

HUNAN SHUIWEN SHUIZIYUAN

湖南 水文水资源

2021 年第 2 期
(总第 56 期)

2021 年 12 月出版

编委会

主 任 郭世民
副主任 李广源
主 编 任美庆
副主编 雷 军
编 辑 王冬云

主办单位:湖南省水文水资源勘测中心
省水利学会水文专委会

编 辑:《湖南水文水资源》编辑部

地 址:湖南省长沙市开福区秀峰路 1 号

邮 编:410005

编印单位:湖南省水文水资源勘测中心

印 数:600 份

印刷单位:湘水文轻印刷厂

印刷日期:2021 年 12 月

电 话:(0731)85483915

电子邮箱:2223418191@qq.com

目 录

水资源与水生态

洞庭湖水文情势与治理刍议

..... 叶泽纲(2)

湖南涟水流域鱼类多样性研究

..... 高 耶 侯婷娟 朱 熠 任美庆(8)

暴雨洪水分析

沅水下游“2020.7”暴雨洪水分析

..... 张婉柔 吴震中(16)

长沙市圭塘河“2020.6.9”洪水总结与思考

..... 陈 芳(19)

水文测验与分析

湘潭站水文特性的改变及对水安全的影响

..... 马忠红 匡燕鹂 彭楚杰(22)

湖南紫鹊界梯田自流灌溉系统降雨条件研究

..... 危润初 周升健(25)

洧水流域淹没区分洪水文效益评估

..... 宋荷花 陈春明 陈 芳 杨付博(33)

湖南汨罗江流域典型水文断面查勘研究

..... 刘 海 唐 哲(36)

澧水石门站年降水量特征及变化趋势分析

..... 匡永清(40)

珠江流域汾市站径流变化趋势分析

..... 李美丽(44)

捞刀河流域降水、径流时空变化规律分析

..... 吴 丹(47)

浅析 LS1206B 型转子式流速仪的故障排除和养护办法

..... 黄瑶婷(52)

激光粒度分析仪在安江水文站泥沙颗粒级配分析中的使用探讨

..... 张 森(54)

黄桥站激光粒度分布仪与烘干法含沙量比测分析

..... 刘禹良 彭治国 唐卫民(62)

洞庭湖水文情势与治理刍议

叶泽纲 (湖南省水文水资源勘测中心 长沙 410005)

【摘要】 洞庭湖区河湖网密布,纵横交错,各水量之间交换关系复杂。本文简述了湖南省洞庭湖区的有关水文特征,分析了其水文、水资源、防洪的主要特点,对洞庭湖治理提出了个人建议,对洞庭湖区的水文特性特点认识,如何开展水文观测布局、防洪治理、水资源管理等具有一定的参考价值。

【关键词】 洞庭湖 水文水资源 水文情势 治理

1 洞庭湖概况

1.1 洞庭湖水系与湖泊

洞庭湖位于湖南北部,长江中游荆江南岸,是我国第二大淡水湖泊,中国五大淡水湖之一。它接纳四水和长江四口来水,入湖水量经湖泊蓄蓄后,由洞庭湖出口城陵矶注入长江。

洞庭湖的天然水面(外湖),主要由七里湖、目平湖(合称西洞庭湖)、南洞庭湖、东洞庭湖四部分组成。长江入湖的松滋、太平、藕池三口(调弦口于1958年冬堵塞)洪道和湘、资、沅、澧四水以及环湖区间的新墙河、汨罗江、捞刀河、浏阳河等水流从四面八方汇入洞庭湖,仅有城陵矶(七里山)一个出口流注长江,形成了入湖河流众多、河湖串联、水网纵横的洞庭湖冲积平原。洞庭湖水系概化图见图1。

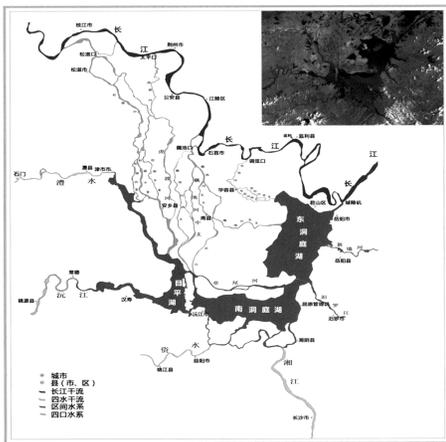


图1 洞庭湖水系概化图

洞庭湖环湖区其它河流主要有:属西洞庭湖水系的涇水、枉水、沧水,属南洞庭湖水系的汨罗江、泉交河,属东洞庭湖水系的新墙河,属四口水系的澧水等环湖的中小河流,流域面积共有13582km²,较大者依次为汨罗江(5543km²,其中湖南境内5268km²)、新墙河(2370km²)、澧水(2218km²,其中湖南境内534km²)和涇水(1188km²)。

1.2 湖区面积

湖区范围泛指湘、资、沅、澧四水尾间及长江四口入湖洪道范围的广大平原、湖泊水网区(纯湖区),总面积18780km²,跨湘、鄂两省,在湖南境内有16620km²,占全省面积7.8%,在我省共辖常德、岳阳、益阳、长沙、湘潭、株洲6地市、33个县(市、区)和8个国营农场,共有耕地1000多万亩,人口1008万人,受堤防保护面积10220km²,纯外湖面积2691km²。根据湖南省水资源评价分区及有关资料统计计算,我省境内洞庭湖纯湖区按水面、水田、不透水面、陆面划分,情况如表1。

表1 洞庭湖纯湖区域湖南境内面积组成情况表

| 项目 | 面积(km ²) | 占总面积(%) | 备注 |
|------|----------------------|---------|--|
| 水面 | 4453 | 26.8 | 包括:天然外湖2691km ² 、堤坑内湖798km ² 、洪道964km ² |
| 水田 | 3662 | 22.0 | |
| 不透水面 | 538 | 3.2 | 包括:道路、屋场、堤基、其它等 |
| 陆面 | 7967 | 47.9 | 包括:旱土、自留地 |
| 合计 | 16620 | 100.0 | |

湖区分区面积特别说明:本文湖区一般指纯湖区,湖南的面积为 16620km²,若指环湖区,则包括周边三条小河,湖南的面积有 25061km²,见图 2、表 2。

表 2 洞庭湖环湖三级区面积分配表

| 四级区名称 | 面积(km ²) |
|----------|----------------------|
| 汨罗江 | 5494.95 |
| 新墙河 | 2358.73 |
| 荆南四河区 | 588 |
| 西洞庭湖水系区 | 3484.25 |
| 南洞庭湖水系区 | 2775.7 |
| 湖区 | 10359.7 |
| 洞庭湖环湖区合计 | 25061 |
| 三个纯湖区合计 | 16620 |

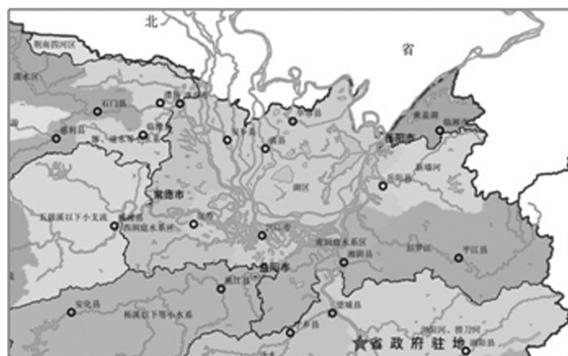


图 2 洞庭湖湖区面积图

1.3 洞庭湖容积

洞庭湖历经了漫长的演变过程。在 20 世纪

初期以前,洞庭湖是全国第一大淡水湖泊,其后面积逐步缩小而位列鄱阳湖之后(洞庭湖区堤垸区内约有 190 余个面积较小的内湖,一般只对内渍排涝起调节作用,不计入洞庭湖面积),入湖总水量和洪水期最大容积仍居第一。各时期洞庭湖湖泊面积、容积变化情况见表 3。

表 3 洞庭湖湖泊面积容积变化表

| 年份 | 1825 | 1896 | 1949 | 1954 | 1958 | 1978 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| 湖泊面积(km ²) | 6000 | 5400 | 4350 | 3915 | 3141 | 2691 |
| 湖泊容积(亿 m ³) | | | 293 | | 228 | |

备注:容积按城陵矶水位 33.5m(吴淞基面)以下容量计算

2 洞庭湖水文要素

2.1 降水量

洞庭湖区内的三个地市多年平均分区面雨量计算结果见表 4,洞庭湖区不同系列特征值见表 5,全省多年平均降水量为 1450mm。洞庭湖区年平均降水量为 1387.2mm,在我省属低值区。

表 4 洞庭湖区三级区套地级行政区多年平均雨量成果表

| 三级区名称 | 套地级区名称 | 面积(km ²) | 降水量(mm) |
|--------|--------|----------------------|---------|
| | 长沙市 | 210.1 | 1431 |
| | 岳阳市 | 13145.08 | 1427.6 |
| 洞庭湖环湖区 | 常德市 | 6824.25 | 1356.1 |
| | 益阳市 | 4881.9 | 1319.8 |
| | 合计 | 25061.33 | 1387.2 |
| 全省合计 | | 211829 | 1450 |

表 5 洞庭湖区年降水量特征值

| 三级区名称 | 计算面积(km ²) | 统计年限 | 年数 | 统计参数 | | | 不同频率降水量(mm) | | | |
|--------|------------------------|-------------|----|---------|------|-------|-------------|--------|--------|--------|
| | | | | 平均值(mm) | Cv | Cs/Cv | 20% | 50% | 75% | 95% |
| 洞庭湖环湖区 | 25061 | 1956~2000 年 | 45 | 1387.2 | 0.16 | 2.0 | 1569.7 | 1375.3 | 1231.7 | 1043.4 |
| | | 1956~1979 年 | 24 | 1335.8 | 0.17 | 2.0 | 1522.2 | 1323 | 1176.5 | 985.5 |
| | | 1971~2000 年 | 30 | 1395.5 | 0.17 | 2.0 | 1590.2 | 1382.1 | 1229 | 1029.5 |
| | | 1980~2000 年 | 21 | 1445.8 | 0.15 | 2.0 | 1624.5 | 1435 | 1294.3 | 1108.5 |
| 湖南省 | 211829 | 1956~2000 年 | 45 | 1450.0 | 0.10 | 2.0 | 1570.4 | 1445.1 | 1349.7 | 1220.0 |
| | | 1956~1979 年 | 24 | 1426.2 | 0.12 | 2.0 | 1567.9 | 1419.3 | 1307.3 | 1156.8 |
| | | 1971~2000 年 | 30 | 1452.2 | 0.11 | 2.0 | 1584.6 | 1446.3 | 1341.5 | 1199.8 |
| | | 1980~2000 年 | 21 | 1477.2 | 0.10 | 2.0 | 1599.9 | 1472.3 | 1375.0 | 1242.9 |

2.2 蒸发量

(1) 全省多年平均水面蒸发量为:736.5mm,变化幅度为:600~900mm。洞庭湖平原水网区为800~870mm,属高值区。总的趋势是以雪峰山为界东部大于西部。

(2) 全省多年平均陆地蒸发量653mm,变化幅度为570~760mm,洞庭湖平原陆地蒸发量大于700mm,属高值区。

(3) 干旱指数一般以各地年蒸发能力与年降水量之比作为区别各地气候干湿程度的指标。湖南省干旱指数的变化范围在0.26~0.64间。洞庭湖平原区干旱指数在0.6~0.64之间;属高值区。说明降水量较少,蒸发量大,干旱相对较重。

2.3 径流与径流系数

径流情况主要是降雨径流关系,主要体现在径流系数大小、地区分布及变化情况上。

径流系数指一定集水面积、内径流量与降水量的比值。湖南省多年平均年径流系数为0.55(长江片0.55,珠江片0.60),变化范围在0.35~0.80。地区分布规律与降水、径流基本相应,降水、径流丰沛的地区径流系数大,山区径流系数比丘陵、平原区大。

沿澧县、常德、益阳、岳阳范围内的洞庭湖区,径流系数为0.35~0.45,属低值区,见表6。

表6 洞庭湖区多年平均降雨-径流关系表

| 三级区 | 地级行政区 | 计算面积(km ²) | 年降水量(mm) | 天然年径流量(mm) | 径流系数 |
|-----------|-------|------------------------|----------|------------|------|
| 洞庭湖环湖区 | 长沙市 | 210.1 | 1431.0 | 686.5 | 0.48 |
| | 岳阳市 | 13145.08 | 1427.6 | 678.4 | 0.48 |
| | 常德市 | 6824.25 | 1356.1 | 565.2 | 0.42 |
| | 益阳市 | 4881.9 | 1319.8 | 497.1 | 0.38 |
| | 小计 | 25061.33 | 1387.2 | 612.4 | 0.44 |
| 湖南省(长江流域) | | 206712 | 1447.0 | 790.4 | 0.55 |
| 湖南省(珠江流域) | | 5117 | 1569.1 | 944.6 | 0.60 |

2.4 泥沙

湖南省多年平均输沙模数为133.1t/km²,洞庭湖纯湖区为全省的低值区,多年平均输沙模数为100t/km²以下。

洞庭湖汇集“四水”和长江“三口”(调弦口于1958年堵闭),水流挟带大量泥沙,入湖后,水流减缓,大量泥沙沉积湖内,使洪道湖床日渐淤高,泻洪流量和蓄水容积逐渐减小。洞庭湖的泥沙主要来自长江“三口”,其次是“四水”。而时间上入湖泥沙量主要集中在汛期,约占全年总量的90%。

洞庭湖多年平均入湖总沙量17630万t。其中“三口”入湖沙量14074万t,占总入湖沙量的79.8%，“四水”入湖沙量为3230万t,占总入湖沙量的18.4%;其他水系入湖沙量为326万t,仅占总入湖沙量的1.8%;而城陵矶输出沙量为4101万t,占总入湖输沙量的23.3%,多年平均年沉积在湖内的泥沙为13529万t,占总入湖输沙量的76.7%。在“四水”和“三口”中,以藕池口最大,多年平均输沙量为7391万t,占入湖总沙量的41.9%,最小是资水,多年平均输沙量为196万t,占入湖总沙量的1.1%,见表7:

表7 洞庭湖多年平均输沙量统计表

| 项目 | 多年平均输沙量(万t) | 占“三口”总量比例 | 占“四水”总量比例 | 占入湖总沙量比例 |
|--------|-------------|-----------|-----------|----------|
| 松滋口 | 4751 | 33.8% | | 26.9% |
| 太平口 | 1933 | 13.7% | | 11.0% |
| 藕池口 | 7391 | 52.5% | | 41.9% |
| “三口”合计 | 14074 | 100.0% | | 79.8% |
| 湘江 | 1139 | | 35.3% | 6.5% |
| 资水 | 196 | | 6.1% | 1.1% |
| 沅江 | 1178 | | 36.5% | 6.7% |
| 澧水 | 717 | | 22.2% | 4.1% |
| “四水”合计 | 3230 | | 100% | 18.4% |
| 其它水系 | 326 | | | 1.8% |
| 入湖沙量 | 17630 | | | 100% |
| 出湖沙量 | 4101 | | | 23.3% |
| 湖内沉积 | 13529 | | | 76.7% |

注:其它水系沙量指湖北省入境进入湖区的面积5968km²、江西入境进入湖区面积275km²、以及湖区本身面积25061km²,共计面积31304km²的产沙量。

根据主要入出湖测站含沙量、输沙量1956~1979年的均值与1980~2000年的均值比较,情况见表8。

表 8 湖南省入出湖测站含沙量变化比较表

| 项目 | 河流名称 | 测站名 | 多年平均年 | 多年平均年 |
|----|------|-------|----------|----------|
| | | | 含沙量增加(%) | 输沙量增加(%) |
| 入湖 | 湘江 | 湘潭 | -24.5 | -17.6 |
| | 资水 | 桃江 | -31.5 | -25.6 |
| | 沅江 | 桃源 | -49.8 | -49.3 |
| | 澧水 | 石门 | -11.3 | -7.5 |
| | 长江 | 新江口 | -21.9 | -18.1 |
| | 长江 | 沙道观 | -20.3 | -4.4 |
| | 长江 | 弥陀寺 | -23.1 | -2.0 |
| | 长江 | 藕池(康) | -43.5 | -8.1 |
| | 长江 | 藕池(管) | -29.8 | -13.0 |
| | | 平均 | | -28.4 |
| 出湖 | 洞庭湖 | 城陵矶 | -38.8 | -43.4 |

1980 年以前入湖含沙量平均减少 28.4%，入湖输沙量平均减少 16.2%，而出湖含沙量也呈减少趋势，平均减少 38.8%，出湖输沙量减少 43.4%。

3 洞庭湖水资源量

3.1 洞庭湖水系水资源总量

洞庭湖水系控制面积为 262289km²。湖南省面积占该水系面积的 78.0%，洞庭湖水系径流总量为 2074.6 亿 m³，本省水资源量占该水系总径流量的 78.1%，计算结果见表 9。

洞庭湖入湖沙量显减少趋势，1980 年以后比

表 9 洞庭湖水系天然水资源总量成果表

| 名称 | 湘水 | | | 资水 | | | 沅水 | | | 澧水 | | | 湖区 | | | 总计 | | |
|-----------------------------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|--------|-------|--------|
| | 省内 | 省外 | 小计 | 省内 | 省外 | 小计 | 省内 | 省外 | 小计 | 省内 | 省外 | 小计 | 省内 | 省外 | 小计 | 省内 | 省外 | 小计 |
| 流域面积 (km ²) | 85383 | 9432 | 94815 | 26738 | 1375 | 28113 | 51927 | 37561 | 89488 | 15505 | 3064 | 18569 | 25061 | 6243 | 31304 | 204614 | 57675 | 262289 |
| 多年均值 (亿 m ³) | 696.1 | 95.5 | 791.6 | 232.6 | 18.9 | 251.5 | 398.2 | 276.3 | 674.5 | 133.4 | 36.3 | 169.7 | 160.1 | 27.2 | 187.3 | 1620.4 | 454.2 | 2074.6 |

3.2 洞庭湖区水资源量及入出湖水量

据全省水资源评价资料：洞庭湖区四水多年平均入湖水量为 1742 亿 m³，占总水量的 60.7%；长江三口的多年平均入湖水量为 947.8 亿 m³，占总水量的 33.0%；洞庭湖环湖区间产水量 187.3 亿 m³，占总水量的 6.5%，城陵矶多年平均年出湖量为 2870.0 亿 m³，见表 10。

表 10 湖南省洞庭湖区水量平衡表

| 项目 | 面积(km ²) | 水量(亿 m ³) | 占比(%) |
|-----------|----------------------|-----------------------|-------|
| 四水入湖(过境) | 230985 | 1742 | 60.7 |
| 三口入湖(过境) | | 947.8 | 33.0 |
| 湖区自产(湖南省) | 31304 | 187.3 | 6.5 |
| 洞庭湖区出境 | | 2877 | 100 |

3.3 洞庭湖区地下水资源量

湖南省洞庭湖区间多年平均地下水资源量 37.6 亿 m³，其中地下水资源不重复计算量为 6.6132 亿 m³，见表 11。

表 11 湖南省洞庭湖区多年平均地下水资源量成果表

| 水资源三级区名称 | 计算分区 | | 山丘区 | | 平原区 | | 降水入渗补给量(万 m ³) | 地下水资源量(万 m ³) | 地下地表水资源量间重复计算量(万 m ³) |
|----------|-------|------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--|----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| | 地级行政区 | 计算面积(km ²) | 河川基流量(万 m ³) | 补给总量(万 m ³) | 潜水蒸发量(万 m ³) | | | | |
| 洞庭湖环湖区 | 长沙市 | 210 | 1258 | 3361 | | | 3850 | 4504 | 4504 |
| | 岳阳市 | 10136 | 111495 | 56818 | 17210 | | 149694 | 165520 | 152049 |
| | 常德市 | 5743 | 8203 | 122965 | 37089 | | 94716 | 125700 | 95602 |
| | 益阳市 | 3386 | | 84614 | 28627 | | 58000 | 80622 | 58196 |
| | 小计 | 19475 | 120957 | 267758 | 82926 | | 306261 | 376346 | 310215 |



4 洞庭湖洪水

4.1 洪水概况

洞庭湖汇集四水、四口水量,致使洪水组合复杂。三口、四水洪水特征各异:三口来水峰型肥胖,历时可达数十天,5~10月的来水量占全年的93.4%,最大入湖流量多出现在7~8月;四水属山溪性河流,峰型尖瘦,历时较短,一般只有几天,汛期为4~9月,最大入湖流量出现在6~8月。三口、四水洪水遭遇在7月份和8月份的可能性较大,见表12。

表12 洞庭湖汛期(4~9月)多年平均入湖水量统计表 (单位:亿 m³)

| | 湘潭 | 桃江 | 桃源 | 石门 | 四水 | 三口 | 三口四水 |
|----|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 均值 | 488.3 | 166.0 | 503.5 | 123.6 | 1282.0 | 677.2 | 1959.2 |

洞庭湖出口城陵矶站历年实测最大流量57900m³/s(1931年7月30日),最小流量377m³/s(1975年2月4日),最高水位35.94m(1998年8月20日),最低水位17.03m(1907年1月23日),见表13。

表13 洞庭湖区洪水情况表

| 河流名称 | 流域面积(km ²) | | 干流河长(km) | | 控制站名 | 防汛特征值 | | 多年平均水资源量(亿 m ³) | 年径流量 | | 历史最低水位时间(m) | 历史最高水位时间(m) | 最大洪峰流量时间(m ³ /s) | 最枯流量时间(m ³ /s) | | | | |
|------|------------------------|-------|----------|------|------|---------|---------|-----------------------------|-------|------------------------------|--------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| | 总面积 | 省内面积 | 总长 | 省内河长 | | 警戒水位(m) | 保证水位(m) | | 多年平均 | 最大年径流量(亿 m ³ /年份) | | | | | 最大年径流量(亿 m ³ /年份) | | | |
| 湘江 | 94660 | 85383 | 856 | 670 | 湘潭 | 38 | 39.5 | 791.6 | 704.0 | 1098 /1994 | 320 /1963 | 27.10 1998.11.14 | 41.95 1994.6.18 | 20800 1994.6.18 | 100 1966.10.6 | | | |
| | | | | | 长沙 | 36 | 38.37 | | | | | | | | 25.24 2003.11.2 | 39.18 1998.6.27 | | |
| 资水 | 28142 | 26738 | 653 | 653 | 桃江 | 40 | 42.8 | 251.5 | 239.1 | 375/1994 | 140/1963 | 33.35 1992.12.19 | 44.44 1996.7.17 | 15300 1955.8.27 | 15.5 1964.9.11 | | | |
| | | | | | 益阳 | 36.5 | 38.32 | | | | | | | | 26.84 1992.12.19 | 39.48 1996.7.21 | | |
| 沅水 | 89163 | 51066 | 1033 | 568 | 桃源 | 42.5 | 45.4 | 674.5 | 648.6 | 877/1977 | 465/1985 | 30.71 1998.12.10 | 46.9 1996.7.19 | 29100 1996.7.19 | 184 1998.12.10 | | | |
| | | | | | 常德 | 39 | 40.68 | | | | | | | | 28.53 1998.12.18 | 42.49 1996.7.19 | | |
| 澧水 | 18496 | 15505 | 388 | 388 | 石门 | 58.5 | 61 | 169.7 | 150.3 | 254/1980 | 85/1992 | 48.67 1990.11.28 | 62.66 1996.7.23 | 19900 1998.7.23 | 10 1996.1.1 | | | |
| | | | | | 津市 | 41 | 44.01 | | | | | | | | 29.14 2006.2.6 | 45.02 2003.7.10 | 17200 2003.7.10 | 50.1 2006.2.6 |
| 洞庭湖 | 18780 | 15200 | | | 城陵矶 | 32.5 | 34.55 | | 2869 | 4007/1964 | 1990/1978 | 17.03 1907.1.23 | 35.94 1998.8.20 | 57900 1931.7.30 | 377 1975.10.5 | | | |
| | | | | | 沅江 | 33.5 | 35.28 | | | | | | | | 27.20 1928.2.10 | 37.09 1996.7.20 | | |
| | | | | | 安乡 | 37.5 | 39.38 | | 388 | 555/1964 | 214/1994 | | | | 28.07 1972.2.3 | 40.44 1998.7.24 | 7270 1998.7.24 | 2.8 1972.1.22 |
| | | | | | 南县 | 35 | 36.35 | | 192 | 468/1964 | 2263/2006 | 26.14 1979.4.14 | 37.57 1998.8.20 | 5290 1955.6.27 | 0 | | | |

4.2 洪水遭遇

洞庭湖是一个接纳湘、资、沅、澧四水又吞吐长江的通江性湖泊,洞庭湖流域是一个以洞庭湖

为中心,从四面八方中央汇流的辐射状河网,不同的水系有不同的气候特征和地貌特征。在洞庭湖接纳任何单独一条水的洪水,往往只影响该河

流的尾间地区,不会造成全湖区的洪水灾害。危害较大的是,各水系间洪水的相互遭遇,包括四水相互遭遇及四水与长江洪水的相互遭遇。

从洪水发生的时间看,湘、资水的主汛期为4~6月,沅、澧水为5~7月,长江洪水为6~8月,因此,洞庭湖洪水期为6~8月。6月以前入湖水量以四水为主,这时阴雨连绵,山洪暴发,四水陡涨,形成桃汛,即所谓“南水”,因长江自宜昌以上雨季开始于6~8月,故洞庭湖区最高水位均出现在此期间,洪量较大,洪水历时较长,往往前峰未落,后峰又起,历时可达数月之久,俗称“北水”。如果长江宜昌以上雨季提前,而我省雨季推后,则“南、北水”碰头,同时进入洞庭湖时,由于洞庭湖仅有城陵矶一个出口,则可造成湖区灾害型洪水。

5 洞庭湖水文特点及治理建议

5.1 水文特点

洞庭湖区属于平原水网区,无明显的流域界限。地势低洼,河湖串联,水流纵横交错,又接纳四水、吞吐长江,具有以下水文特点:

(1)洞庭湖区年平均降水量为1387.2mm,在我省属低值区,而多年平均水面蒸发量为736.5mm,在我省又属高值区。因此,洞庭湖区径流系数为0.35~0.45,属我省的低值区。

(2)洞庭湖纯湖区多年平均输沙模数为 $100\text{t}/\text{km}^2$ 以下,为全省的低值区。但洞庭湖的泥沙主要来自长江,因长江来沙原因,洞庭湖纯湖区的输沙量很大,多年平均入湖总沙量就有17630万t。而城陵矶输出沙量为4101万t,只占总入湖输沙量的23.3%,所以洞庭湖区多年平均年沉积在湖内的泥沙就有13529万t,占总入湖输沙量的76.7%。但洞庭湖入湖沙量有减少趋势。

(3)洞庭湖区水量丰富,总水量有2870.0亿 m^3 。虽然环湖区间平均年产水量只有187.3亿 m^3 ,只占总水量(含过境水量)的6.5%,过境水量就占了

93.5%。

(4)洞庭湖是中国有名的鱼米之乡。由于汇集四水、四口水量,致使洞庭湖区洪水组合复杂,各水系间洪水的相互遭遇,包括四水相互遭遇及四水与长江洪水的相互遭遇,洪水对生命与财产的危害极大。

5.2 治理建议

(1)洞庭湖接纳四水、吞吐长江,是我省的粮仓及灾害重点防治区。为了治理好洞庭湖,方法很多,但水文必须先行。

(2)洞庭湖区的主要水文站,大部份属于长江委管,除需加强交流沟通外,本文主要提出湖区小河站和区域代表站不足(没有),水资源计算、区间洪水计算与预报难度较大,应加强站网布局研究及补充站点建设。

(3)洞庭湖区属于平原水网区,无明显的流域界限。虽然陆地面积占湖区总面积的比例较大,但不是一个完整的闭合流域,陆地被密布水网所分割,且又有大堤相间隔。在水文测验和水文计算上都存在着很大的困难,需加强湖区测验、产水、洪水的计算与预报方法研究。

(4)重视水力学方法进行洪水演算研究,引用新技术进行湖区水下地形测量。

6 结语

洞庭湖的水系、水情很复杂,本文只起个抛砖引玉的作用,研究的人很多、可研究的课题也很多,大家有时间可作专门研究,希望寄托在年轻人身上。

例如:江湖关系问题、湖区洪水遭遇问题、三口分流分沙问题、水文站水位~流量关系及通流能力问题、洪水预报与调度问题、洞庭湖区防洪标准体系问题、平原区水文计算问题、水资源水环境问题,上述问题在三峡建成后的变化情况研究等等。



湖南涟水流域鱼类多样性研究

高耶¹ 侯婷娟² 朱熠¹ 任美庆¹

(1. 湖南省水文水资源勘测中心 长沙 410005 2. 郴州水文水资源勘测中心 郴州 423000)

【摘要】 2019年10月对湖南涟水流域主要干支流的鱼类资源进行鱼类种类组成、多样性指数和群落结构相似性分析。结果显示:共采集鱼类47种,隶属5目14科36属,其中鲤科鱼类种类最多,占总种类数的76.6%。Shannon-Wiener多样性指数、Maggalef丰富度指数和Pielou均匀度指数的变化范围分别为0~1.55、0~2.65和0.2~0.96。各样点间鱼类群落相似性总体上处于极不相似水平,流域鱼类群落空间异质性明显。作为水资源开发利用强度高的区域,涟水流域内影响鱼类物种多样性的人类活动主要包括矿产开发、大型水利工程修建导致河系纵向连通性中断以及水体污染。涟水干流上游、水府庙库尾汇水河段和侧水为涟水流域鱼类生物多样性高值区域,应作为敏感区域优先保护。

【关键词】 涟水流域 鱼类群落结构 生物多样性 纵向梯度

理解鱼类群落的时空格局与环境变量间关系是保护鱼类多样性的基础(Naiman和Latterell, 2005; Rice, 2005)。淡水鱼类群落在河网上的空间变化受自然因素和人为活动干扰的共同影响(Allan, 2004; Kennard等, 2006)。自然情况下,鱼类群落的时空格局受多尺度时空变量共同作用(Ostrand和Wilde, 2002; Hoinghaus等, 2007)。土地利用变化、水体污染、筑坝等人类活动也会影响鱼类群落,造成物种组成、丰度和分布(Allan, 2004; Yan等, 2011; Freedman等, 2014)。在淡水生态系统中,鱼类位于食物链顶端,对于人类活动的干扰反应敏感,可基于鱼类指标评价水生生态系统健康状况。我国学者对于自然保护区内鱼类多样性的研究论述颇多,如宁夏沙坡头(黄族豪等, 2006)、秦岭生态保护区(周小愿等, 2011)、莫莫格自然保护区(杨富亿等, 2012)、两河口湿地公园(李峥等, 2020)和流溪河(吴倩等, 2020)。在更大空间尺度上,帅方敏等(2020)对珠江水系广西段鱼类多样性空间格局进行详细调查研究,于晓东等(2005)研究论述了长江流域鱼类物种多样性大尺度格局。不同空间尺度上的研究,为理解鱼

类物种多样性空间格局及其影响机理,保护流域生物多样性提供理论基础。

涟水为湘江中游一级支流,位于东经111°31′-112°53′,北纬27°12′-28°07′区域,流域面积7155km²。流域东西长、南北窄,呈树枝状水系,干流河长224km,主要支流有湄江、孙水、侧水。涟水流域年平均气温17.5-18.5℃,多年平均降水量1418.2mm,属于亚热带季风湿润气候,降水集中于4~9月,汛期径流量占全年径流量的71%~78%。涟水流域开发利用强度大,总人口约378万,密度达533人/km²;耕地面积占流域面积的27.71%,其中水田占17.89%。涟水流域位于衡邵干旱走廊核心区域,水资源短缺,分布各类山坪塘约12万座,小型水库466座,中型水库8座,大型水库水府庙。总体而言,随着流域内经济社会发展,部分干支流河段水体污染较为严重,大型水利工程的修建又阻隔了河段间鱼类的迁徙洄游,对鱼类多样性和群落组成产生不利影响。本研究可以弄清涟水流域内鱼类多样性的空间变化,为保护和修复开发强度高的流域鱼类资源提供理论参考。

1 研究方法

1.1 监测站点

2020年10月对涟水流域主要河流鱼类资源进行了调查,调查河流包括涟水干流及其主要支流侧水、湄水和孙水。共在涟水干支流设置13个监测点(S1—S13),监测各站点鱼类种类组成,同步监测水质,见表1。

表1 涟水采集站点汇总表

| 编号 | 河流 | 站点 | 坐标 | | 地址 |
|-----|------|-------|--------|-------|--------------|
| | | | 东经 | 北纬 | |
| S1 | 涟水干流 | 联盟 | 112.72 | 27.78 | 湘潭市湘潭县联盟村 |
| S2 | 涟水干流 | 湘乡站 | 112.52 | 27.72 | 湘乡城关镇昆仑桥 |
| S3 | 涟水干流 | 九仑 | 112.37 | 27.68 | 湘乡九仑村 |
| S4 | 侧水 | 双峰站 | 112.20 | 27.48 | 湖南省双峰县永丰镇联阳村 |
| S5 | 侧水 | 十竹 | 112.10 | 27.37 | 湖南省双峰县十竹中学 |
| S6 | 涟水干流 | 水府庙坝下 | 112.23 | 27.68 | 水府庙水库管理局 |
| S7 | 涟水干流 | 曾家排 | 112.11 | 27.74 | 娄底市娄星区曾家排 |
| S8 | 涟水干流 | 娄底站 | 111.99 | 27.76 | 娄底市涟钢索桥 |
| S9 | 湄江 | 段江 | 111.81 | 27.81 | 涟源市段江村 |
| S10 | 湄江 | 龙凤 | 111.80 | 27.98 | 涟源市伏口镇龙凤村 |
| S11 | 涟水干流 | 涟源站 | 111.67 | 27.68 | 涟源市涟源水文站 |
| S12 | 涟水干流 | 麻如塘 | 111.62 | 27.71 | 涟源市麻如塘 |
| S13 | 孙水 | 白马水库 | 111.69 | 27.57 | 涟源市白马镇 |

1.2 研究方法 & 数据分析

1.2.1 研究方法

参照《内陆水域渔业自然资源调查手册》进行鱼类资源调查,记录生境、拍照。为保证监测结果的一致性,对13个监测点设计的采集鱼类的方式及强度均相同,采用刺网和地笼相结合的方式,刺网、地笼在各监测点放置的数量及时间相同。统计监测时段内全部渔获物的种类、数量和重量,所采新鲜标本在固定前进行拍照,记录鱼的形态特征,记录完成后选取典型样本浸入10%福乐马林溶液固定,个体较大的标本在胸鳍腋部和背部肌肉中注射适量固定液。标本主要依据《湖南鱼类志》和《湖南鱼类原色图谱》等进行种类鉴定。同时,通过查阅相关文献资料、走访娄底市畜牧水产局、渔民等方式,了解当地鱼类资源的历史背景。基于上述监测数据,比较分析各监测点的鱼类多样性。

此外,按照《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)和《水环境监测规范》(SL219-2013)要求,在监测站点同步开展pH值、电导率、溶解氧、溶解

氧饱和度、五日生化需氧量、高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷等常规水质指标的监测和分析评价。

1.2.2 数据分析

①水环境评价。根据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002),选取相应类别标准,对各站点pH值、电导率、溶解氧、溶解氧饱和度、五日生化需氧量、高锰酸盐指数、氨氮、总氮、总磷等水质指标进行单因子评价。

②采用Shannon-Weiner多样性指数(Shannon和Weaver., 1949)

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

式中:

P_i ——第*i*种鱼生物量占总渔获生物量的比例。

③Margalef丰富度指数(Margalef, 1957)

$$D = (S-1)/\ln N$$

式中:

S ——样品中的种类总数, N 为样品中的生物个体总数。

④Pielou均匀度指数(Pielou, 1966)

$$J' = H' / \ln S$$

式中:

S ——渔获物的种类数。

⑤群落结构相似性Jaccard's种类相似性指数(Jaccard, 1912)

$$I = j / (a + b - j)$$

式中:

a ——一个站点鱼类种类数,

b ——另一站点鱼类种类数,

j ——两监测点共有鱼类种类数。

Jaccard's种类相似性指数值为0~0.25时,表明两监测点间监测点间鱼类种类极不相似;0.25~0.50时,为中等不相似;0.50~0.75时,为中等相似;0.75~1.00时,为极相似。

2 结果与分析

2.1 涟水流域水环境质量

如表2所示,涟水洋潭坝上游干支流地表水质介于II~III类,其中干流涟源站氨氮为0.684 mg/L,略高于II类水质标准值,为III类地表水,其

余各站点常规水质指标均处于 II 类地表水。洋潭类,主要是由于总氮指标超标。坝下游联盟、湘乡站、九仓三个站点水质均为 V

表 2 涟水流域水环境监测结果 (单位:mg/L)

| 站点 | pH 值 | 电导率 | 溶解氧 | 溶解氧饱和度 | 五日生化需氧量 | 高锰酸盐指数 | 氨氮 | 总氮 | 总磷 | 水质分类 |
|-------|------|-----|-----|--------|---------|--------|-------|-------|-------|------|
| 联盟 | 7.9 | 387 | 9.2 | 99.8 | 1 | 2.5 | 0.224 | 2.139 | 0.021 | V |
| 湘乡站 | 7.8 | 365 | 9.2 | 100 | 1.5 | 2.7 | 0.373 | 1.752 | 0.01 | V |
| 九仓 | 8 | 388 | 8.4 | 93 | 1.4 | 2.5 | 0.145 | 2.188 | 0.018 | V |
| 双峰站 | 7.5 | 369 | 9.9 | 99.5 | 1.2 | 2.6 | 0.193 | 0.285 | 0.06 | II |
| 十竹 | 7.7 | 399 | 8.5 | 96.5 | 1.2 | 2.4 | 0.201 | 0.273 | 0.04 | II |
| 水府庙坝下 | 8.0 | 360 | 8.5 | 96.5 | 1.0 | 2.0 | 0.118 | 0.278 | 0.03 | II |
| 曾家排 | 7.6 | 430 | 7.5 | 83.5 | 1.2 | 2.3 | 0.182 | 0.308 | 0.04 | II |
| 娄底站 | 7.4 | 486 | 8.3 | 89.3 | 0.8 | 1.7 | 0.476 | 0.495 | 0.03 | II |
| 段江 | 8.0 | 453 | 8.6 | 93.5 | 1.0 | 2.1 | 0.229 | 0.308 | 0.02 | II |
| 龙凤 | 7.2 | 669 | 7.8 | 94.2 | 1.2 | 2.5 | 0.349 | 0.277 | 0.02 | II |
| 涟源站 | 7.1 | 699 | 9.3 | 98.4 | 1.0 | 2.0 | 0.684 | 0.199 | 0.04 | III |
| 麻如塘 | 7.7 | 255 | 9.8 | 99.5 | 1.2 | 2.4 | 0.220 | 0.251 | 0.04 | II |

2.2 涟水流域鱼类资源现状

监测共采集鱼类 47 种,隶属于 5 目 14 科 36 属,鱼类阶元分布见表 3 和表 4。其中,鲤形目鱼类最多,共 36 种,占比 76.6%;鲈形目鱼类 5 种,占比 10.645;合鳃鱼目、攀鲈目和鰕虎目各 2 种,占比 4.26%。

表 3 涟水流域鱼类分类阶元分布

| 目 | 科 | 属 | 种 |
|------|----|----|----|
| 鲤形目 | 3 | 26 | 36 |
| 合鳃鱼目 | 2 | 2 | 2 |
| 攀鲈目 | 1 | 1 | 2 |
| 鰕虎目 | 2 | 2 | 2 |
| 鲈形目 | 2 | 2 | 5 |
| 总计 | 10 | 33 | 47 |

表 4 湖南涟水流域鱼类名录

| 物种 | | 联盟 | 湘乡站 | 九仓 | 双峰站 | 十竹 | 水府庙坝下 | 曾家排 | 娄底站 | 段江 | 龙凤 | 涟源站 | 麻如塘 | 白马水库 |
|-------|------|-------------------------|-----|----|-----|----|-------|-----|-----|----|----|-----|-----|------|
| 鲤形目鲤科 | | | | | | | | | | | | | | |
| 马口鱼亚科 | 马口鱼属 | 1 马口鱼 | | | | | | | | | | | | |
| | | Opsariichthys bidens | | | | | | | | | | + | + | + |
| | | 2 宽鳍鱮 | | | | | | | | | | | | |
| | | Opsariichthys evolans | | | | + | | | | | | | | |
| | | 3 草鱼 | | | | | | | | | | | | |
| 赤眼鳟亚科 | 草鱼属 | Ctenopharyngodon idella | | | | + | | | | | | | | |
| 鲃亚科 | 鲃 | 4 翘嘴鲃 | | | | | | | | | | | | |
| | | Culter alburnus | | | | | | | | | | | | + |
| | | 5 达氏鲃 | | | | | | | | | | | | |
| | | 6 蒙古鲃 | | | | | | | | | | | | |
| | | Culter mongolicus | | | | | | | | | | | | |
| | | 7 大眼华鲃 | | | | | | | | | | | | |
| | 华鲃属 | Sinibrama macrops | | | | | | | | | | | | |
| | | 8 鲃 | | | | | | | | | | | | |
| | 鲃属 | Megalobrama skolkovi | | | | | | | | | | | | + |
| | | 9 | | | | | | | | | | | | |
| | 鲃属 | Hemiculter leucisculus | + | + | | + | | | | | | | | |
| | | 10 贝氏鲃 | | | | | | | | | | | | |
| | | Hemiculter bleekeri | | | | | | | | | | | | |

续表

| | | 物种 | 联盟 | 湘乡站 | 九仑 | 双峰站 | 十竹 | 水府庙 坝下 | 曾家排 | 娄底站 | 段江 | 龙凤 | 涟源站 | 麻如塘 | 白马 水库 |
|------|------|--|----|-----|----|-----|----|-----------|-----|-----|----|----|-----|-----|----------|
| | 拟鲇属 | 11 南方拟鲇 <i>Pseudohemicultus dispar</i> | + | | | | | | | | | | | | |
| | | 12 海南拟鲇 <i>Pseudohemicultus hainanensis</i> | | | | | + | | | | | | | | |
| 鲴亚科 | 鲴属 | 13 黄尾鲴 <i>Xenocypris davidi</i> | | | | | | | | | | | | | + |
| | 圆吻鲴属 | 14 圆吻鲴 <i>Distoechodon tumirostris</i> | | | + | | | | | | | | | | |
| 鲢亚科 | 鲢属 | 15 鲢 <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> | | | | | | | + | | | | | | |
| | 鳊属 | 16 鳊 <i>Aristichthys nobilis</i> | | | + | | | | | | | | | | + |
| | 鲮属 | 17 花鲮 <i>Hemibarbus maculatus</i> | | | | | | + | + | | | | | | |
| 麦穗鱼属 | | 18 麦穗鱼 <i>Pseudorasbora parva</i> | | | | | | | + | | | | | + | + |
| | 鳊属 | 19 江西鳊 <i>Sarcocheilichthys kiangsiensis</i> Nichols | | + | | | | + | | | | | | | |
| | 银鳊属 | 20 银鳊 <i>Squalidus argentatus</i> | | | | + | + | + | | | | | | | |
| | 棒花鱼属 | 21 棒花鱼 <i>Abbottina rivularis</i> | | | | + | | | + | | | | | + | |
| | 蛇鳊属 | 22 蛇鳊 <i>Saurogobio dabryi</i> Bleeker | | | | | | + | + | | | | | | |
| | | 23 斑点蛇鳊 <i>Saurogobio punctatus</i> | + | | | | | | | | | | | | |
| | 鲮属 | 24 中华鲮 <i>Rhodeus sinensis</i> Gunther | | | | + | + | | | | | | | + | |
| | | 25 高体鲮 <i>Rhodeus ocellatus</i> | | | | | | | + | | | | | | |
| | | 26 越南鲮 <i>Acheilognathus tonkinensis</i> | | | | | | | | + | | | | | |
| | | 27 兴凯鲮 <i>Acheilognathus chankaensis</i> | | | | | | + | + | | | | | | |
| 鲃亚科 | 光唇鱼属 | 28 半刺光唇鱼 <i>Acrossocheilus hemispinus</i> | | | + | | | | | | | | | | |
| | | 29 薄颌光唇鱼 <i>Acrossocheilus kreyenbergi</i> | | | | | | + | | | | | | | |
| 鲤亚科 | 鲤属 | 30 鲤 <i>Cyprinus carpio</i> Linnaeus | + | | | | + | + | | | | | | | |
| | 鲫属 | 31 鲫 <i>Carassius auratus</i> | | | | | + | | + | | | | | + | + |
| | | 32 中华鳊 <i>Cobitis sinensis</i> Sauvage | | | | | | | | | | | | + | |
| 鳊科 | 鳊属 | & Dabry de Thiersant 33 泥鳊 <i>Misgurnus anguillicaudatus</i> | | | | | | | | | | | | + | |
| | 泥鳊属 | 34 大鳞副泥鳊 <i>Paramisgurnus dabryanus</i> | | | | | | + | | | | | | + | |
| | 副泥鳊属 | Dabry de thiersant 35 无斑南鳊 <i>Schistura incerta</i> | | | | | | | | | | | | | |
| | 南鳊属 | 36 黄颡鱼 <i>Pelteobagrus fulvidraco</i> | | | + | | + | | + | | | | | + | |
| 鲮科 | 拟鲮属 | 37 黄鲢 <i>Monopterus albus</i> | | | | | | | | | | | | + | |
| 合鳃鱼目 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 合鳃鱼科 | 黄鲢属 | | | | | | | | | | | | | + | |

续表

| | | 物种 | 联盟 | 湘乡站 | 九仑 | 双峰站 | 十竹 | 水府庙 坝下 | 曾家排 | 娄底站 | 段江 | 龙凤 | 涟源站 | 麻如塘 | 白马 水库 |
|------|-------|---|----|-----|----|-----|----|-----------|-----|-----|----|----|-----|-----|----------|
| 刺鲃科 | 中华刺鲃属 | 38 中华刺鲃 <i>Sinobdella sinensis</i> | | | | | | | | | | | | | + |
| 攀鲈目 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 鳢科 | 鳢属 | 39 乌鳢 <i>Channa argus</i> 40 斑鳢 <i>Channa maculata</i> | | | | | | | | | | | | | + |
| 鰕虎目 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 鰕虎科 | 吻鰕虎属 | 41 子陵吻鰕虎鱼 <i>Rhinogobius giurinus</i> | | | | | + | | | | | | | | |
| 沙塘鳢科 | 沙塘鳢属 | 42 中华沙塘鳢 <i>Odontobutis sinensis</i> | | + | | | | | | | | | | | |
| 鲈形目 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 鳊科 | 鳊属 | 43 鳊 <i>Siniperca chuatsi</i> 44 中国少鳞鳊 <i>Coreoperca whiteheadi</i> Boulenger 45 长身鳊 <i>Siniperca roulei</i> 46 大眼鳊 <i>Siniperca kneri</i> Garman | | | | | | | | | | | | | |
| 棘臀鱼科 | 太阳鱼属 | 47 蓝鳃太阳鱼 <i>Lepomis macrochirus</i> Rafinesque | | | | | | | | | | | | | + |

2.3 鱼类生物多样性

分析不同监测点鱼类的多样性指数(表5)发现,涟水流域涟水涟源站、侧水十竹和双峰站、涟水汇入水府庙区域为涟水流域鱼类生物多样性高值区域,应列为生态敏感区域优先保护。由于孙水河流域采样点偏少,白马水库难以代表其鱼类生物多样性状况,但监测过程中发现白马水库库区有形成稳定种群的中国少鳞鳊,值得进一步监测研究和保护。

受煤矿开采洗矿作业影响,湄江水体浑浊,龙

凤断面仅监测到马口鱼和蓝鳃太阳鱼两种,段江断面处于无鱼状态,水生生态系统受损较为严重。涟水流经娄底城区段厂矿众多,存在老街区生活污水直排等问题,导致涟水娄底城区段鱼类生物多样性偏低。此外,由于水府庙水库和洋潭引水坝影响涟水干流纵向连通性,水府庙坝下、联盟、湘乡站和九仑等断面鱼类生物多样性均较低。水府庙水库大坝见图1,煤矿开采导致湄江河段水体浑浊见图2。

表5 涟水流域鱼类多样性指数统计表

| 多样性指数 | 联盟 | 湘乡站 | 九仑 | 双峰站 | 十竹 | 水府庙坝下 | 曾家排 | 娄底站 | 段江 | 龙凤 | 涟源站 | 麻如塘 | 白马水库 |
|-------------------------|-----|------|-----|------|-----|-------|------|-----|----|-----|------|-----|------|
| Shannon-Wiener 多样性指数 | 0.4 | 0.64 | 0.4 | 1.27 | 1.9 | 1.55 | 1.34 | 0 | 0 | 0.5 | 1.7 | 0 | 1.37 |
| Maggalef 丰富度指数 | 1.2 | 0.91 | 1.4 | 1.36 | 3.3 | 1.26 | 2.65 | 0 | 0 | 0.5 | 2.59 | 0 | 2.95 |
| Piclon 均匀度指数 | 0.2 | 0.92 | 0.6 | 0.58 | 0.7 | 0.96 | 0.47 | | | 0.7 | 0.66 | | 0.62 |

2.4 鱼类群落的空间相似性

如表6所示,涟水流域各样点间鱼类群落相

似性总体上处于极不相似水平,Jaccard's 种类相似性指数值小于0.25。麻如塘和龙凤 Jaccard's 种



类相似性指数值处于中等不相似水平,但两个断面鱼类种类偏少。仅涟水上游涟源站与侧水上游

十竹间,鱼类群落处于中等不相似水平。

表6 涟水流域 Jaccard's 种类相似性指数统计表

| | 联盟 | 湘乡站 | 九仑 | 双峰站 | 十竹 | 水府庙坝下 | 曾家排 | 娄底站 | 段江 | 龙凤 | 涟源站 | 麻如塘 | 白马水库 |
|-------|------|------|------|------|------|-------|------|------|----|------|------|------|------|
| 联盟 | 1 | 0.14 | 0 | 0.08 | 0.11 | 0 | 0.15 | 0 | 0 | 0 | 0.07 | 0 | 0 |
| 湘乡站 | 0.14 | 1 | 0 | 0.09 | 0.06 | 0.14 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0.08 | 0 | 0 |
| 九仑 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.07 | 0 | 0.05 | 0 | 0 | 0 | 0.08 | 0 | 0 |
| 双峰站 | 0.08 | 0.09 | 0 | 1 | 0.15 | 0.08 | 0.08 | 0 | 0 | 0 | 0.16 | 0 | 0.06 |
| 十竹 | 0.11 | 0.06 | 0.07 | 0.15 | 1 | 0.06 | 0.19 | 0.07 | 0 | 0 | 0.32 | 0.07 | 0.10 |
| 水府庙坝下 | 0 | 0.14 | 0 | 0.08 | 0.06 | 1 | 0.10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 曾家排 | 0.15 | 0.05 | 0.05 | 0.08 | 0.19 | 0.10 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.21 | 0 | 0.13 |
| 娄底站 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.07 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 段江 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 龙凤 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.08 | 0.33 | 0 |
| 涟源站 | 0.07 | 0.08 | 0.08 | 0.16 | 0.32 | 0 | 0.21 | 0 | 0 | 0.08 | 1 | 0.08 | 0.11 |
| 麻如塘 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.33 | 0.08 | 1 | 0 |
| 白马水库 | 0 | 0 | 0 | 0.06 | 0.10 | 0 | 0.13 | 0 | 0 | 0 | 0.11 | 0 | 1 |



图1 水府庙水库大坝



图2 煤矿开采导致湄江河段水体浑浊

3 讨论

Schlosser(1987)提出迁移—灭绝过程概念模型解释鱼类在河网纵向梯度变化:源头溪流河段水流情势高度变化、生存环境不稳定,鱼类群落随时间变化;下游河段和干流生境尺寸更大、环境条件更稳定,灭绝事件更少,鱼类多样性更大。因此,在大的空间尺度上,河网空间位置、河流大小

等变量决定了鱼类种类多样性和群落物种组成(Livingstone 和 Bailey, 1982; Grenouillet 等, 2004; Smith 和 Kraft, 2005)。Grenouillet 等(2004)研究了生境变量和空间位置对于物种丰富度的影响,结果表明只有河流宽度和坡度两个局部生境变量显著,在下游4-7级河段物种丰富度存在显著空间自相关性。研究发现鱼类物种丰富度随季节和河流大小而变化,与下游汇流点的距离是其中最重要的环境变量,其次是海拔和下游连接(Osborne 和 Wiley, 1992; He 等, 2017)。

Taylor 和 Warren(2001)研究发现河系中鱼类群落组成具有明显的嵌套结构,水流情势变化高的源头溪流河段鱼类灭绝速率更高,嵌套结构更显著;下游区域鱼类群落迁移速率更高,嵌套结构更弱;灭绝过程是有序过程,而迁移更多是随机过程。上游支流鱼类群落经受周期性干扰,下游河流和深潭生境作为物种避难所对于上游河段鱼类物种恢复和迁移是极为重要的(Lake, 2000; Taylor 和 Warren, 2001)。迁徙过程会增加局部河段多样性,而本地生物过程(如捕食和竞争)和非生物因素(如洪水和干旱)可能减少当地生物多样性,因此迁徙或灭绝事件对于本地群落结构非常重要(Taylor 和 Warren, 2001)。因此,自然条件下鱼类种类多样性和群落组成主要受河系纵向位置等区域景观变量所影响,受生境类型等局部变量影响较少。

由于涟水流域强度较高的人类活动干扰,导致本研究结果并不符合自然条件下鱼类多样性的空间分布规律。其中,人类活动导致自然河网连通性的丧失是淡水生物多样性最主要的威胁(Nilsson等,2005;Reidy等,2012)。大坝修建对于鱼类生境连通性和迁移格局具有长远威胁(Sa-Oliveira等,2015),阻碍了鱼类到产卵场和索饵场的迁徙,造成水深、流速等生境改变和碎片化,生境不连续使得对于产卵地和食物的竞争增加,最终导致本地物种消失和外来物种入侵(Cambray等,1997;Hall等,2011;Reidy等,2012)。此外,通过水力发电涡轮机会造成死亡,尤其是成鱼。由于涟水流域水利工程的梯级开发,尤其是水府庙水库大坝及其下游的洋潭坝造成涟水下游干流与上游纵向连通性的丧失,现存鱼类生物多样性更高的河段鱼类无法迁移和补充到其余河段,导致干流下游生物多样性偏低,流域内各站点间鱼类群落相似性较低。

此外,水体污染和过量捕捞等人类活动也会影响流域内鱼类物种多样性。湄江河段煤矿分布众多,洗煤作业导致大量悬浮物进入水体,与洪水过程引起的悬浮物浓度上升类似,河流生物能够忍受短期悬浮物浓度增加,但长时间的浑浊水体会磨损鱼类体表黏液,堵塞鳃耙和鳃丝,降低生长速率和对疾病的抵抗能力或者直接致死,同时也会影响产卵生境的适宜性和稳定性,从而威胁鱼类生存与繁殖(高耶等,2017)。涟水干流娄底城区段厂矿众多,河流底质多为污染较重的黑色淤泥质,尽管常规水质指标显示正常,但水环境感官较差。

在《长江保护法》颁布实行和“长江十年禁渔”大背景下,流域内各级渔政部门加大了渔业捕捞的打击力度,有助于恢复局部河段渔业资源。鉴于水府庙水库和洋潭引水坝等大型水利工程的长期存在,虽然河段间联通性和连续性对于维持鱼类多样性具有重要性,从实际角度出发,下一步应着重加大涟水干流上游和侧水的护渔力度,加大湄水水环境保护和治理,为鱼类生物多样性恢复创造更好的生境条件。

参 考 文 献

Naiman R J , Latterell J J . Principles for linking fish habitat to fisheries management and conservation [J] . Journal of Fish Biology , 2005 , 67 (Supplement sB) : 166 - 185 .
Rice J C . Understanding fish habitat ecology to achieve

conservation [J] . Journal of Fish Biology , 2005 , 67 (sB) : 1 - 22 .

Allan J D . Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems [J] . Annual Review of Ecology Evolution and Systematics , 2004 , 35 (1) : 257 - 284 .

Kennard M J , Pusey B J , Arthington A H , et al . Development and Application of a Predictive Model of Freshwater Fish Assemblage Composition to Evaluate River Health in Eastern Australia [J] . Hydrobiologia , 2006 , 572 (1) : 33 - 57 .

Ostrand K G , Wilde G R . Seasonal and spatial variation in a prairie stream-fish assemblage [J] . Ecology of Freshwater Fish , 2002 , 11 (3) : 137 - 149 .

Hoeinghaus D J , Winemiller K O , Birnbaum J S . Local and regional determinants of stream fish assemblage structure: inferences based on taxonomic vs. functional groups [J] . Journal of Biogeography , 2007 , 34 (2) : 324 - 338 .

Yan Y Z , Xiang X Y , Chu L , et al . Influences of local habitat and stream spatial position on fish assemblages in a dammed watershed, the Qingyi Stream, China [J] . Ecology of Freshwater Fish , 2011 , 20 (2) : 199 - 208 .

Freedman J A , Lorson B D , Taylor R B , et al . River of the dammed: longitudinal changes in fish assemblages in response to dams [J] . Hydrobiologia , 2014 , 727 (1) : 19 - 33 .

黄族豪,刘迺发,刘荣国,等.宁夏沙坡头自然保护区鱼类多样性[J].四川动物,2006,25(3):499-501.

周小愿,韩亚慧,高宏伟.秦岭生态保护区鱼类多样性研究[J].生态科学,2011,30(6):624-629.

杨富亿,吕宪国,娄彦景,等.莫莫格国家级自然保护区的鱼类多样性[J].湿地科学,2012,10(2):214-222.

李峥,段家慧,赵良杰,等.两河口国家湿地公园河流鱼类群落结构和多样性研究[J].水产学杂志,2020,33(5):45-51.

吴倩,李潮,高天扬,等.流溪河保护区鱼类群落结构及其时空变动[J].水产科学,2020,39(2):234-244.

帅方敏,李新辉,何安尤,等.珠江水系广西江段鱼类多样性空间分布特征[J].水生生物学报,2020,44(4):819-828.

于晓东,罗天宏,周红章.长江流域鱼类物种多样性大尺度格局研究[J].生物多样性,2005,13(6):473-495.

张觉民,何志辉.内陆水域渔业自然资源调查手册[M].农业出版社,1991.

湖南省水产科学研究所.湖南鱼类志[M].湖南人民出版社,1977.

李鸿,廖伏初,杨鑫等.湖南鱼类系统检索及手绘图鉴[M].科学出版社,2020.

廖伏初,李鸿,杨鑫等.湖南鱼类原色图谱[M].科学



出版社, 2020.

Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication [M]. Urbana: the University of Illinois Press, 1949.

Margalef R. Information theory in ecology [J]. Gen Systems Bull, 1957, 31(1):36-71.

Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession [J]. Journal of Theoretical Biology, 1966, 10(2):370-383.

Jaccard P. The distribuion of flora in the alpine zone [J]. New Phytologist, 1912, 11(2): 37-50.

Schlösser I. A conceptual framework for fish communities in small warmwater streams [M]. Community and Evolutionary Ecology of North American Stream Fishes. University of Oklahoma Press, Norman, 1987.

Livingstone D A , Bailey R . On the Size of African Riverine Fish Faunas [J]. American Zoologist, 1982, 22(2): 361-369.

Grenouillet G , Pont D , C Hérisse. Within-basin fish assemblage structure: the relative influence of habitat versus stream spatial position on local species richness [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2004, 61(1): 93 - 102.

Smith T A , Kraft C E . Stream Fish Assemblages in Relation to Landscape Position and Local Habitat Variables [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 2005, 134(2) : 430 - 440.

Osborne L L, Wiley M J . Influence of Tributary Spatial Position on the Structure of Warmwater Fish Communities [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1992, 49(4):671-68

He D , Kang Z , Tao J , et al. Hydrologic connectivity driven natural stream fish assemblages in mountain streams in the Yangtze River basin: implications for stream fish conservation in monsoonal East Asia [J]. Hydrobiologia, 2017, 785(1):1-22.

Taylor C M, Warren Jr M L . Dynamics in species composition of stream fish assemblages: environmental variability and nested subsets [J]. Ecology, 2001, 82(8):2320-2330.

Lake P S . Disturbance patchiness and diversity in streams [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2000, 19(4): 573 - 592.

Nilsson C et al. Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems [J]. Science, 2005, 308(5720): 405 - 408.

Reidy L C , Christer N , James R , et al. Implications of

dam obstruction for global freshwater fish diversity [J]. Bioscience, 2012, 62(6):539-548.

Sá-Oliveira J C, Isaac V J , Ferrari S F . Fish community structure as an indicator of the long-term effects of the damming of an Amazonian river [J]. Environmental Biology of Fishes, 2015, 98(1):273-286.

Cambrey J A , King J M , Bruwer C . Spawning behaviour and early development of the Clanwilliam yellowfish (Barbus capensis; Cyprinidae), linked to experimental dam releases in the Olifants River, South Africa [J]. Regulated Rivers Research & Management, 2015, 13(6):579-602.

Hall C J , Jordaan A , Frisk M G . The historic influence of dams on diadromous fish habitat with a focus on river herring and hydrologic longitudinal connectivity [J]. Landscape Ecology, 2011, 26(1):95-107.

高耶,谢永宏,邹冬生. 采砂对河道生态环境的影响及对策综述 [J]. 泥沙研究, 2017, 42(02):74-80.

Study on fish diversity in Lianshui Basin of Hunan Province

GAO Ye¹, HOU Ting-juan², ZHU Yi¹, REN Mei-qing¹
(1.:Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hunan Province; Changsha 410007, China; 2: Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Chenzhou City, Chenzhou, 423000, China;)

Abstract: Fish were sampled at 13 monitoring sites in Lianshui Basin of Hunan Province in October 2019 by the combination of gill nets and trap cages in order to understand the diversity and structure of fish community in a basin with high intensity of water resources utilization. During this survey, 47 species of fish were collected, belonging to 5 orders, 14 families and 36 genera, including 36 species in Cypriniformes. The ranges of Shannon-Wienner index, Margalef richness index and Pielou evenness index were 0 ~ 1.55, 0 ~ 2.65 and 0.2 ~ 0.96 respectively. On the whole, the similarity of fish communities among points is at a very dissimilar level, and the spatial heterogeneity of fish communities in the basin is obvious. Human activities affecting fish species diversity mainly include mining, large-scale water conservancy project construction resulting in the interruption of longitudinal connectivity of river system and water pollution. The upstream of the main stream, the catchment section at the end of Shuifumiao reservoir and the Che River are areas of high fish biodiversity, which should be protected as sensitive areas.

Key words: Lianshui Basin; fish community structure; community difference; Longitudinal gradient

沅水下游"2020.7"暴雨洪水分析

张婉柔 吴震中 (常德水文水资源勘测中心 常德 415000)

【摘要】 2020年7月6日~8日,受长江梅雨锋南移影响,沅江流域中游普降大雨,局部地区大暴雨,沅江五强溪水库入库流量不断加大。9日1时~17时,五强溪水库持续按 $18000\text{m}^3/\text{s}$ 控制下泄,使得下游常德市沅江桃源站以下发生了全线超警的洪水过程。文章对该次暴雨洪水进行雨水情分析复盘,为日后水情预报工作提供参考。

【关键词】 沅江 暴雨洪水 常德 2020年

1 流域概况

沅江发源于贵州省都匀市斗篷山北中寨,全长 1053km ,流域面积 89833km^2 ,是湖南省第二大河。沅江地跨湖南、广西、贵州、重庆、湖北5省,于常德市德山经济开发区孤峰塔汇入洞庭湖。流域南北长、东西窄,河网发育,湖南省内左岸主要支流有舞水、辰水、武水、酉水,右岸主要支流有渠水、巫水、溇水。

流域干流有三板溪水库、白市水电站、托口水电站、五强溪水库等控制性骨干水利工程,碗米坡水库、凤滩水库为沅江支流酉水上调节水库,见图1。

三板溪水库位于沅江上游干流河段清水江中下游,控制集水面积 11051km^2 ,防洪库容 $26.16\text{亿}\text{m}^3$;白市水电站位于沅江上游干流河段清水江下游,控制集水面积 16530km^2 ,防洪库容 $1.72\text{亿}\text{m}^3$;托口水电站位于沅江上游干流清水江与支流渠水汇合口下游,控制集水面积 24450km^2 ,防洪库容 $2.00\text{亿}\text{m}^3$;五强溪水库位于沅江下游干流河段,控制集水面积 83800km^2 ,防洪库容 $13.6\text{亿}\text{m}^3$ 。碗米坡水库位于沅江一级支流酉水中游,控制集水面积 10415km^2 ,防洪库容 $0.37\text{亿}\text{m}^3$;凤滩水库位于沅江一级支流酉水下游,控制集水面积 17500km^2 ,防洪库容 $6.22\text{亿}\text{m}^3$ 。

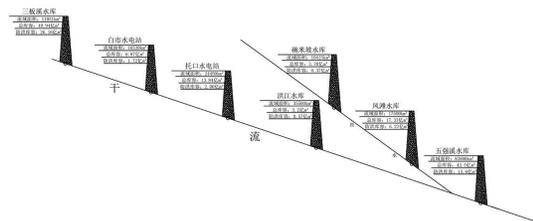


图1 沅江五强溪水库以上梯级水库分布图

2 暴雨分析

2.1 天气背景

2020年7月上旬,湖南省高空处于副热带高压系统的北侧,受长江梅雨锋南移影响。同时,弱冷空气南下遇副高边缘暖湿气流,加上中低层低涡切变线共同影响,使得湖南省沅江流域中游出现暴雨及大暴雨天气。

2.2 降雨过程

7月6日8时~9日8时,沅江流域部分地区有暴雨和大暴雨,暴雨主要集中于湘西吉首市、泸溪县、保靖县、永顺县、花垣县北部、古丈县西部、龙山县南部,怀化市沅陵县南部、辰溪县北部。流域平均降雨量 80.2mm ,其中酉水 103.3mm ,武水 102.6mm ,辰水 55.8mm ,溇水 29.6mm ,舞水 56.9mm ,巫水 22.1mm ,渠水 13.8mm ,五强溪库区 92.5mm ,五强溪至桃源区间 64.8mm 。沅江流域主要支流7月6日~8日降雨量统计表见表1。

表1 沅江流域主要支流7月6日~8日降雨量统计表

| 河流 | 酉水 | 武水 | 辰水 | 溇水 | 舞水 | 巫水 | 渠水 | 库区 | 五桃 |
|-------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| 降雨量 (mm) | 103.3 | 102.6 | 55.8 | 29.6 | 56.9 | 22.1 | 13.8 | 92.5 | 64.8 |

2.3 降雨特点

本次降雨的特点是降雨强度大、范围广、持续时间长。且暴雨中心由北至南转移,6日暴雨中心在酉水上游,7日扩大到酉水、武水及辰水,8日南移至舞水。7月6日8时~9日8时,沅江流域平均降雨量为80.2mm,较典型年“96.7”、“54.7”、“99.6”、“69.7”、“95.7”、“2014.7”流域平均降雨量偏少,见表2。根据五强溪站、桃源站、常德站历年水位流量年极值系列表分析比较,“2010.7”次洪水为“2020.7”洪水的相似场次,而“2010.7”流域平均降雨量76.8mm,小于本次流域平均降雨量。本次暴雨中心主要集中于沅江中游酉水及武水,中心累计三日降雨量在250mm~300mm之间,累计三日最大降雨量为永顺县新村水库站341.5mm。

表2 “2020.7”暴雨与典型年份对照表 单位:mm

| 序号 | 年份 | 流域平均降雨 | 主要降雨区域 | 单站最大降雨 |
|----|--------|--------|------------------------|----------------|
| 1 | 1996.7 | 275.4 | 全流域 | 思蒙:414 |
| 2 | 1954.7 | 245.5 | 吉首、沅陵一带 | 沅陵:524 |
| 3 | 1999.6 | 221 | 酉水、沅陵桃源区间 | 筒车坪:350 |
| 4 | 1969.7 | 168.2 | 酉水、沅陵桃源区间 | 草龙潭:301 |
| 5 | 1995.7 | 148.2 | 溇水、辰水 武水、溇水、辰水、酉水 | 沅溪:406 |
| 6 | 2014.7 | 136 | 水和浦市-五强溪区间 | 江山:536 |
| 7 | 2020.7 | 80.2 | 酉水、武水 | 新村水库: 341.5 |
| 8 | 2010.7 | 76.8 | 酉水、武水、浦市-五强溪区间、沅江五强溪以下 | 黄土湾: 390.5 |

3 洪水分析

3.1 洪水发展过程

7月6日8时~7月8日8时,酉水中上游持续出现较大强度的降雨。碗米坡水库8日1时水库库水位起涨,至8日12时达到最大入库8060m³/s。凤滩水库自6日17时水库库水位起涨,至8日14时达最高库水位202.91m,相应蓄水量12.94亿m³,最大入库流量为8日8时

13200m³/s,最大出库为8日15时11800m³/s。本次过程中,凤滩水库拦蓄洪水2亿m³,削峰1400m³/s,削峰率10.6%。

7月7日8时~9日8时,武水中游有一次较大强度的降雨过程。因此,武水河溪站出现了一次较大涨幅的洪水过程,洪峰水位出现在7月8日13时,洪峰水位155.74m,相应流量3350m³/s。本次洪水过程河溪站涨幅7.6m。

浦市出峰时间相对于支流较晚。7月9日23时,浦市站出现洪峰水位116.36m,相应流量9970m³/s。五强溪水库自7日1时库水位97.68m起涨,至9日4时出现最高库水位102.82m,相应蓄水量22.72亿m³,拦蓄洪水6.07亿m³,最大入库为8日20时26200m³/s,最大出库为9日2时18600m³/s,削峰率29.0%。由于干流出峰时间晚,本次五强溪入库洪水主要是酉水凤滩水库下泄流量及武水河溪站流量加上库区降雨组成。

五强溪水库出库流量按18000m³/s以上下泄时间长达18小时,9日18时减小下泄至14000m³/s。受此影响,五强溪水文站于9日5时出现洪峰水位60.77m,相应流量19500m³/s。桃源水文站于9日20时出现洪峰水位43.50m,相应流量17600m³/s,超警戒水位1.00m。常德站于9日22时出现洪峰水位39.82m,超警戒水位0.82m。周文庙站于10日3时出现洪峰水位37.36m,超警戒水位1.36m。主要站洪峰水位流量实况见表3。

同时,考虑五强溪水库无拦蓄状态下,预计桃源站将出现洪峰水位46.30m,超警戒水位3.80m,超保证水位0.90m;常德站将出现洪峰水位41.90m,超警戒2.90m,超保证水位1.22m。由此可见,五强溪水库拦蓄洪水降低了桃源洪峰水位2.80m、常德洪峰水位2.08m。

表3 “2020.7”洪水主要控制站实况表

| 站名 | 时间 | 水位(m) | 流量(m ³ /s) |
|--------|-----------|--------|-----------------------|
| 浦市(二) | 7.9.23 | 116.36 | 9970 |
| 河溪 | 7.8.13 | 155.74 | 3350 |
| 高砌头(二) | 7.8.14:20 | 117.12 | 11300 |
| 五强溪 | 7.9.5 | 60.77 | 19500 |
| 桃源 | 7.9.20 | 43.50 | 17600 |
| 常德 | 7.9.22 | 39.82 | |
| 周文庙 | 7.10.3 | 37.36 | |

3.2 洪水特点

“2020.7”洪水相较于沅江历次典型洪水而言,洪水影响范围及持续时间都较小。相似典型年“2010.7”洪水主要控制站实况见表4。

表4 “2010.7”洪水主要控制站实况表

| 站名 | 时间 | 水位(m) | 流量(m ³ /s) |
|--------|------------|--------|-----------------------|
| 浦市(二) | 7.13.13 | 111.59 | 3300 |
| 河溪 | 7.12.10:30 | 155.96 | 3580 |
| 高砌头(二) | 7.11.9:20 | 112.92 | 5280 |
| 五强溪 | 7.12.20 | 59.24 | 15000 |
| 桃源 | 7.13.1 | 43.85 | 17500 |
| 常德 | 7.13.5 | 39.80 | 17000 |
| 周文庙 | 7.13.12 | 36.36 | |

从表3、表4中可以发现,“2010.7”、“2020.7”两场洪水五强溪水库出现最大入库的时间点(“2020.7”次洪水为7月8日20时,“2010.7”次洪水为7月11日11时20分),浦市(二)站尚未出峰,高砌头(二)站洪峰已过。不同的是,在“2020.7”次洪水中,河溪站已经出现洪峰水位,而“2010.7”次洪水中尚未出峰。对比最大出库的时间节点,“2020.7”次洪水五强溪水库最大出库出现于7月9日2时,传播到下游五强溪站、桃源站、常德站、周文庙站的时间分别为3小时、15小时、17小时和22小时;“2010.7”次洪水五强溪水库出库时间为12日20时,传播到下游五强溪站、桃源站、常德站、周文庙站的时间分别为0小时、5小时、9小时和16小时。

从洪水传播时间分析,“2020.7”次洪水中,五强溪至桃源洪峰出现时间间隔15小时,考虑为五强溪水库在此期间持续按18000m³/s调度导致洪峰出现时间延长,而9日18时起五强溪水库减小下泄至14000m³/s,使得常德站洪峰提前出现。而“2010.7”次洪水中五强溪至桃源洪峰出现时间间隔5小时,则考虑为五强溪至桃源区间强降雨导致洪峰提前。

两场洪水五强溪水库入库洪水的成分组成如图2所示。

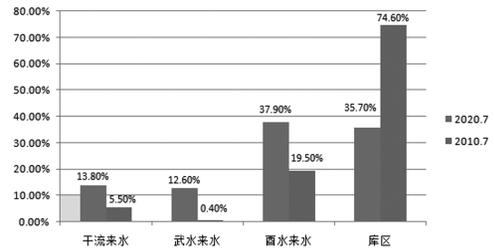


图2 五强溪水库入库洪水成分组成比重图

可以看出,“2020.7”次洪水与“2010.7”次洪水相比较,针对五强溪入库流量,在洪水组成中,“2020.7”次洪水高砌头站所代表的酉水凤滩下泄流量占比较重,库区次之,而“2010.7”次洪水库区流量占比极重。“2010.7”次洪水中,五强溪水库最大入库为21800m³/s,最大出库为14600m³/s,而“2020.7”次洪水中,五强溪水库最大入库为26400m³/s,最大出库18600m³/s,但两场洪水桃源站洪峰流量基本相同,这是由于“2010.7”洪水中沅江五桃区间强降雨造成。同时,参照两场洪水中洞庭湖水位(见表5),可见“2020.7”次洪水洞庭湖底水明显高于“2010.7”次洪水,因此受顶托影响,“2020.7”次洪水中常德站及周文庙站洪峰水位也高于“2010.7”。但由于2016年桃源水电站建成后对桃源站左岸滩地形成了冲刷作用,使得桃源站过水断面面积明显增大,因此导致在流量一致时,“2020.7”次洪水的洪峰水位低于“2010.7”次洪水的洪峰水位0.35m。

表5 “2010.7”洪水与“2020.7”洪水湖区主要控制站实况表

| 站名 | “2020.7”洪水 | | | | “2010.7”洪水 | | | |
|-----|------------|---|-------|-----------------------|------------|----|-------|-----------------------|
| | 月、日 | 时 | 水位(m) | 流量(m ³ /s) | 月、日 | 时 | 水位(m) | 流量(m ³ /s) |
| 南咀 | 7.10 | 8 | 36.39 | 12000 | 7.13 | 20 | 34.89 | 13200 |
| 小河咀 | 7.10 | 8 | 36.14 | 15700 | 7.13 | 22 | 34.70 | 13400 |

本次洪水过程中,见表6~8,沅江总控制站桃源站最大一日洪水总量13.83亿m³,最大三日洪水总量36.04亿m³,较历次典型洪水年相应洪水总量较低。与相似年“2010.7”次洪水比较,本次洪水桃源站最大一日洪水总量基本一样,但最大三日及最大七日均大于“2010.7”,主要原因是由于本次洪水过程中,五强溪水库控制下泄流量偏大、持续时间偏长导致。

(下转第46页)



长沙市圭塘河“2020.6.9”洪水总结与思考

陈芳 (长沙水文水资源勘测中心 长沙 410014)

【摘要】 圭塘河作为长沙市的一条城市内河,其洪涝灾害的影响直接关系到城市的发展与建设,也牵绊着城市内每个人的出行与安全。本文主要分析了“2020.6.9”暴雨洪水发生的全过程,对今后应对类似暴雨洪水过程起借鉴作用,进而减少人民群众的财产损失以及保障人民群众的生命安全。

【关键词】 圭塘河 暴雨 洪水分析

随着国家经济技术的发展,城市防洪以全面形成了以工程措施为主,非工程措施为辅的完整防洪体系。近几年来,受全球气候变化的影响,极端天气频发,大规模的城市建设带来的热岛效应,使得城市暴雨频发,洪涝灾害严重。在这种形式下,水文分析与预报技术作为重要的非工程防洪措施,在提升城市防洪能力以及保障人民群众生活、生产安全方面发挥着非常重要的作用。

1 流域概况

圭塘河发源于雨花区跳马镇鸭巢冲水库,南北贯穿雨花区全境,在雨花区黎托街道花桥汇入浏阳河,河长 28.27km,流域面积 125km²,平均坡降 2.7‰,多年平均径流量为 1.0 亿 m³。从发源地至洞井街道牛头桥为上游,牛头桥至盐船山圭塘坝为中游,圭塘坝至花桥河口为下游。见图 1,图中绿色部分为圭塘河流域。

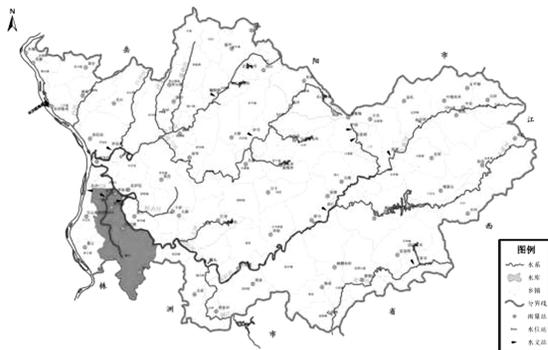


图 1 圭塘河流域图

圭塘河由于城市开发利用,河流水文特征发生了明显变化,河道大部分被人为硬化,部分河段河道较窄,河流的雨水调蓄能力不大。圭塘河补给水源主要来源于雨水、汇水、农田河塘库派水、城市工业和生活污水,使其来水形成了多样性。

圭塘河主要流经雨花区,下游左、右两岸分别为长善垸和合丰垸,

其中长善垸达到 200 年一遇防洪标准,合丰垸达到 100 年一遇防洪标准,这两处堤垸以上均为岸线河段。圭塘河城区段河岸线设计防洪标准为 100 年一遇,目前还有湘府路至时代阳光大道段长约 2km 河道岸线未达标。

2 “2020.6.9”暴雨洪水过程及特点

2.1 暴雨过程

据长沙市气象台发布,此次降雨过程是由于长沙地区一直有很强的热力不稳定和水汽条件,在局地边界层触发抬升条件后,就形成了极端的短时暴雨。此次降雨时段集中在 6 月 9 日晚上,长沙城区(主要集中在天心区和雨花区)普降大雨到大暴雨,流域平均降雨量达 85.1mm。圭塘河流域各代表雨量站雨量统计表见表 1。



表1 圭塘河流域代表站降雨特征值统计表 单位:mm

| 站名 | 6.9 | 降雨特征值 | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|--|
| | 降雨量 | 1小时 | 3小时 | 6小时 | 12小时 | 24小时 | | |
| 嵩山 | 14.0 | 4.5 | 6.5 | 6.5 | 11.0 | 14.0 | 中雨 | |
| 天心区政府 | 101.0 | 53.0 | 90.0 | 93.0 | 98.5 | 101.0 | 大暴雨 | |
| 同升湖 | 113.5 | 33.0 | 66.5 | 70.0 | 112.5 | 113.5 | 大暴雨 | |
| 树木岭 | 112.0 | 52.5 | 105.5 | 106.0 | 109.5 | 112.0 | 大暴雨 | |

2.2 暴雨特点

(1) 暴雨历时短。6月9日圭塘河流域降雨过程,主要集中在晚上21:00~23:00,历时2小时。

(2) 暴雨强度大。根据表1,我们可以清楚看到,除圭塘河上游降雨较少外,其中下游降雨过程都到了暴雨及大暴雨程度,根据暴雨预警信号,此次暴雨过程只有树木岭站达到了暴雨红色预警。

(3) 降雨量大。6月9日,圭塘河流域平均降雨量为85.1mm。流域上各代表雨量站,除上游嵩山站降雨量降水以外,其余站点累计日降雨量都超过100mm。

2.3 洪水特点

6月9日,受强降雨影响(暴雨主要集中在长沙城区南部,涉及天心区和雨花区,以及长沙县地区),浏阳河支流圭塘河圭塘水文站水位从6月9日21时30分开始上涨,于9日23时10分出现洪峰,洪峰水位38.18m,水位在1.5小时内上涨3.48m。由于洪峰持续时间短,未实测到洪峰流量,但通过水力学方法并结合洪水调查资料,求得本次洪峰流量为238m³/s。

$$V = \frac{k}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$R = \frac{A}{X} \quad (2)$$

$$Q = AV \quad (3)$$

式中:

V ——流速;

k ——转换常数,一般为1;

n ——糙率;

R ——水力半径;

S ——比降;

A ——面积;

X ——湿周;

Q ——流量。

这是圭塘站自建站以来第三大洪水过程。此次洪水过程主要有以下两个方面的特点。圭塘河控制站圭塘站水位过程线图见图1。

(1) 洪水起涨快且急

从暴雨开始,到最后洪峰出现仅历时1.5小时。

(2) 洪峰持续时间短

从洪峰水位出现,随着暴雨停止,水位就开始快速下退,至水位退至34.80m,历时16小时。

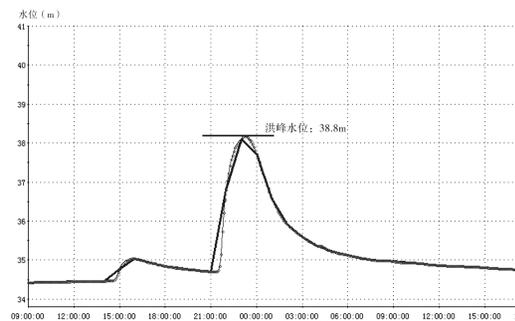


图1 圭塘河圭塘站6月9~10日
水位过程线图 单位:m

3 与“2019.6.21”和“2017.6.30”洪水过程对比分析

3.1 “2019.6.21”洪水过程

2019年6月21日圭塘河圭塘站发生了较大洪水过程,水位从6月21日15时开始快速上涨,并于20时30分出现洪峰水位38.33m,水位涨幅达3.8m,随后水位又开始快速下降,整个过程是陡涨陡落。圭塘河流域各代表雨量站雨量统计表见表2。

表2 圭塘河流域代表站降雨特征值统计表 单位:mm

| 站名 | 6.21 | 降雨特征值 | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
| | 降雨量 | 1小时 | 3小时 | 6小时 | 12小时 | 24小时 | |
| 嵩山 | 263.0 | 74.5 | 166.0 | 252.5 | 262.0 | 263.0 | |
| 天心区政府 | 52.0 | 21.5 | 30.0 | 39.0 | 52.0 | 52.0 | |
| 同升湖 | 104.5 | 24.5 | 66.5 | 97.5 | 104.5 | 104.5 | |
| 树木岭 | 68.5 | 24.0 | 55.0 | 63.0 | 68.5 | 68.5 | |

3.2 “2017.6.30”洪水过程

2017年6月30日圭塘河圭塘站发生了建站以来最大一次洪水过程。通过洪水调查得到圭塘

河圭塘站洪水水位为 38.66m,出现时间为 7 月 1 日 13 时 15 分。本次降雨过程是从 6 月 22 日~7 月 2 日,是长沙市遭遇的最大一次洪水过程,很多河流都出现了超历史水位。而圭塘河流域的降雨过程主要集中在从 6 月 29 日~7 月 2 日,圭塘河流域各代表雨量站雨量统计表见表 3。

表 3 圭塘河流域代表站降雨特征值统计表 单位:mm

| 站名 | 6.29~7.2 降雨量 | 降雨特征值 | | | | |
|-------|-----------------|-------|------|-------|-------|-------|
| | | 1小时 | 3小时 | 6小时 | 12小时 | 24小时 |
| 嵩山 | 304.0 | 37.5 | 65.0 | 93.5 | 117.5 | 152.0 |
| 天心区政府 | 298.0 | 33.5 | 84.0 | 105.0 | 125.0 | 186.5 |
| 同升湖 | 253.5 | 34.0 | 70.5 | 90.5 | 118.0 | 153.0 |
| 树木岭 | 281.0 | 28.5 | 71.0 | 95.5 | 127.5 | 170.5 |

3.3 对比分析

三次暴雨洪水过程,都是经历了快涨快落,2017 年的洪水过程由于受浏阳河洪水顶托影响造成退水历时较长,而 2019 年和 2020 年的洪水过程基本上是和降雨同时进行的,历时很短。三场洪水水位、降雨对比图见图 3、图 4。

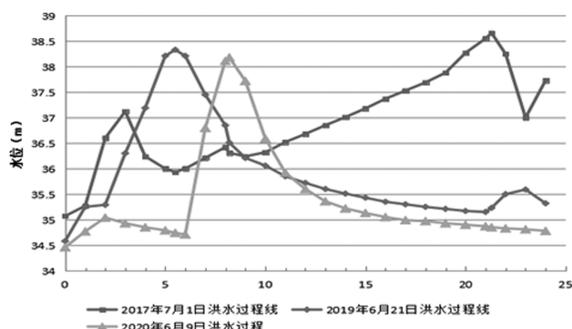


图 3 水位过程线图 单位:m

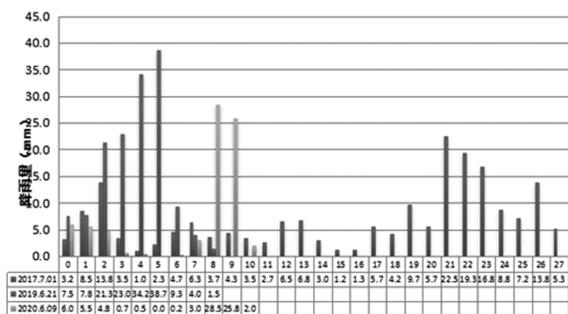


图 4 降雨过程柱状图 单位:mm

通过图 3、图 4,我们可以看出 2019 的洪水过程和 2020 的洪水过程很相似,基本上是随着降雨过程同时进行的,并且是快涨快落。而 2017 年的洪水过程,由于降雨持续时间较长,加之受浏阳河洪水顶托影响,整个洪水过程持续时间较长,特别是退水持续时间长。2017 年暴雨中心是全流域范围内,2019 年暴雨中心主要集中在河流上游,2020 年暴雨中心主要集中在上、下游。流域面平均雨量按照 2017 年、2019 年、2020 年依次递减。3 次洪水过程汇流时间很快短,退水情况除了 2017 年因受浏阳河洪水顶托影响造成退水缓慢,其余 2 次过程都很快结束。

4 结语

通过上述分析,圭塘河 6 月 9 日晚上发生的这场暴雨洪水过程具有降雨强度大、持续时间短、突发性强,洪水涨落急、洪水持续时间短、城市区域性灾害严重等特点。加之,圭塘河由于其快速城市化进程,导致其河道天然的自然结构丧失,取而代之的是平直而硬质的河道,在此情况下,河流本身的雨水调蓄能力就丧失了,这也是导致圭塘河洪水易发频发的原因之一。另外,河道本身较窄,行洪面积小,造成了洪水水位高。

这种暴涨暴落的河流,对于水文测报工作的开展有一定难度。通过对比分析,如果再遭遇同样的雨情时,应加强对突发性暴雨造成的城市内河洪水的分析与研究,提前预判,不断提高洪水预报的时效性和精准性,更好地为防汛减灾服务。

参考文献

- [1]王军. 浅析水文预报技术在城市防洪中的应用[J]. 传播力研究, 2018. 2(14):237.
- [2]叶守泽. 水文水利计算[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [3]长沙市防汛抗旱指挥部办公室. 长沙市防汛抗旱工作指南. 2018.



湘潭站水文特性的改变及对水安全的影响

马忠红¹, 匡燕鹂¹, 彭楚杰²

(1. 湖南省水文水资源勘测中心 长沙 410005 2. 湘潭水文水资源勘测中心 湘潭 411100)

【摘要】 随着人口增加、经济的发展,人类对天然水体的干扰越来越多,天然河道变化越来越大,一些测站的水文特性也随之发生了显著改变。湘潭站近几十年来,河床不断下切,过水面积增加,中高水位水面比降加大,流速增加,同水位下流量加大,对河势的稳定、生产生活取水、航运等水安全产生了不利影响,我们应在水文站网优化、测验方式更新、预报方法调整等方面做出相应的改变,提前预测并尽早减轻河道水文特性的改变对水安全造成的不利影响。

【关键词】 水文特性 河床下切 水面比降 冲刷能力 站网优化

1 前言

湘潭水文站系湘江下游控制站。测站集水面积 81638km²,距洞庭湖口 90km。测验河段较顺直,主槽偏右,无死水、回流及水草生长。河床由淤泥、细沙、卵石等组成。河底坡降较为平缓,当长江、洞庭湖涨水时,易受变动回水顶托影响。例如,2017 年湘潭站受下游及洞庭湖的洪水顶托,39.72m 时流量为 18200 m³/s;到 40.21m 时,流量减小为 15200 m³/s。

2019 年湘江大洪水中,湘潭站洪峰水位 41.42m,居历史实测第二位,低于 1994 年的 41.95m;而洪峰流量达 26400 m³/s,比 1994 年的 20800 m³/s 偏大 5600 m³/s。与往年相比,湘潭站的水文特性发生了很大改变,对水安全造成了不利影响。分析测站水文特性的长期变化规律,不仅有助于深入了解水资源特性,为水资源的合理开发利用提供依据,而且也能为洪水灾害的风险分析提供良好的水文基础。

2 湘江流域概况

湘江发源于湖南省蓝山县紫良瑶族乡,向北流经江华、道县、双牌等地,至永州市萍岛纳湘江西源(原来的湘江干流),至常宁市茆河口纳舂陵

水,至衡阳市纳蒸水和耒水,至衡山县纳洙水,至株洲县渌口镇纳渌水,至湘潭纳涟水,至长沙市区纳浏阳河、捞刀河、浏水,到湘阴县城西镇浩河口村分东、西两支汇入洞庭湖。流域面积 94816km²(其中省内面积 85383 km²、省外面积 9433 km²),全长 948km,平均坡降 0.189‰,是洞庭湖水系中流域面积最大的河流。湘江在永州市(萍岛)以上为上游,水流湍急,河水有时穿切岩层而过,形成峡谷,流域内石灰岩分布很广,岩洞较多,地下水对河水的补给量较大。在永州至衡阳之间为中游,沿岸丘陵起伏,盆地错落其间,有几条较大的支流汇入,水量大增。在衡阳以下进入下游,衡山以下地势平坦,水流平稳,比降减小,河面增宽,沿河沙洲断续可见。

湘江流域属于亚热带季风湿润气候,雨量丰沛,年内分配不均,降水多集中在春夏之间,夏热冬冷,暑热期长,形成了流域内高温多湿的气候特征。流域年平均降水量 1300~1500mm,多集中在 4~6 月,降水量占全年的 40~45%;7~9 月干旱少雨,降水量约占全年的 18%;1~2 月最少,仅占全年的 8%。湘江的降水量南北多、中部少,上游广西全州、兴安一带,是湘江的暴雨区之一,雨量较多;中游衡阳盆地降水较少;下游长沙又比中游略多。降水量年际分配不均,一般变差为 2~3 倍。

湘江流域洪水均由暴雨形成,洪水时空变化



与暴雨情况大概一致,年最大洪水多发生在4~7月,期间洪水主要由气旋锋面暴雨形成,8月及以后洪水多为台风雨产生。一次洪水过程历时约3~5天,多为复式洪峰。

3 水文特性的变化

2019年湘江大洪水中,湘潭站洪峰水位41.42m,比1994年低0.53m;而洪峰流量达26400 m³/s,比1994年偏大26.9%。与往年相比,湘潭站水文特性的改变主要体现在以下几方面。

3.1 过水面积增加

从80年代起,湘潭站的断面河床总体上呈下降趋势。取湘潭站的实测大断面资料,根据河床变化速度每隔4~5年选一个大水年数据点绘成历年大断面图。从图上看,近40年期间,河床平均下切2.0m左右,最多的地方下切将近4.0m。从断面的横向分布看,中间沙洲部分的冲刷比岸边更为明显,中间部分普遍下切3.0m左右,而岸坡部分仅1.0~2.0m。河床逐年下降,同水位下的断面面积也随之扩大。与上世纪80年代相比,测站水位27.00m以上,断面过水面积增大大约1200m²(见图1)。

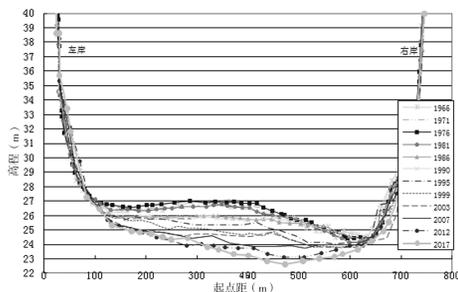


图1 湘潭水文站历年大断面图

随着断面的不断下切,湘潭站水位流量关系也发生了相应的变化,水位流量关系线不断向下延伸,同流量下的水位逐年下降。21世纪以来这种趋势更为明显。枯水位逐年降低,同水位下的流量逐步增大,直到2014年长沙航电枢纽建成,这种情况才有所缓解。而高水部分受断面面积扩大、水面比降增加等影响,同水位下的流量加大。

3.2 流速加大

2019年湘江大洪水中,湘潭站7月10日的最

大断面平均流速达到2.50m/s。而近些年的湘江大洪水中,2010年、2017年的最大断面平均流速均在1.70~1.80 m/s之间。2019年的断面平均流速远远超过其他大水年份。流速的加大,导致了同水位下流量的增加;同时,也使得洪水从上到下传播过程中的洪水附加比降增大,反过来又进一步引起流速的增加。另一方面,流速的增加也使洪水在上下游测站之间的传播速度大为缩短。

3.3 水面比降加大

随着湘江下游及尾间河床的不断下切,湘江沿程的河底坡降也越来越大,水面比降随之增加,上下游测站之间的水位落差加大。2019年与1994年相比较,两年的洪水均来自于株洲站以上流域,1994年株洲站洪峰水位时与下游湘潭站的落差为2.63m,而2019年为3.04m,比1994年偏大0.41m。与2010年相比,两年的洪水均来自于湘潭站以上流域,2010年湘潭站洪峰水位时与下游长沙站的水位落差为2.18m,而2019年为3.07m,比2010年偏大0.89m。水面比降的加大,导致了流速的增加,以及流量的加大。

3.4 同水位下流量增加

随着湘潭站过水面积的加大、流速的增加,同水位下的流量也逐步加大。与1994年相比,水位40.00m时,2019年流量偏大7000 m³/s;41.00m时,流量偏大3500 m³/s。与2017年(水位40.00m时受下游顶托流量严重偏小)相比,水位41.00m时,2019年流量偏大5400 m³/s。见图2。流量的增加,也使得短历时洪量迅猛增加。2019年湘潭站最大1天、最大3天洪量分别为22.45亿 m³、60.23亿 m³,均超过了1994年的17.80亿 m³、51.49亿 m³,为有实测资料以来的最大值。这些在一定程度上也导致了年径流量和年最大流量的增加。杜鹃、徐伟等人通过对湘江流域径流量过去30年的长期变化趋势分析,得出:湘江流域中下游的年径流量和年最大流量呈现明显的增大趋势。

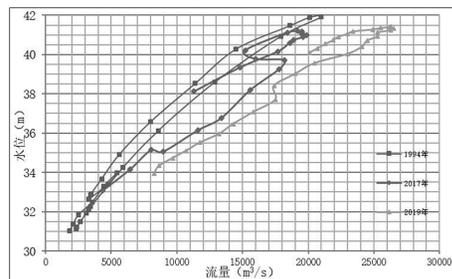


图2 湘潭站典型年的高水水位流量关系图



4 对水安全的影响

湘潭站近几十年来,河床下切,水面比降增大,同流量下的中高水位降低,河段的天然水力特性发生了改变,使得河道原有的传播规律、水位流量关系发生了很大变化,洪水规律越来越不可捉摸,对沿岸的生产、生活、水生态及河势变化也产生了不利影响。

4.1 对水文测验的影响

随着断面的下切,湘潭站水位流量关系也发生了相应的变化,尤其是低水部分(见图3)。从图上可看到,低水部分的水位流量关系线不断向下延伸,同流量下的水位逐年下降。二十一世纪以来这种趋势更加明显,关系线之间的距离加大,这与断面的下切变化相对应。2014年之后,下游长沙航电枢纽开始蓄水,湘潭站河床下切有所缓解,枯季水位也有所抬高,水位流量关系线不再下延。

测站的断面不均匀下切,深泓发生偏移,横断面上流速分布也随之发生改变,加上中高水流量增大,水文测验变得更加复杂和困难,流量测验精度也受到一定影响。

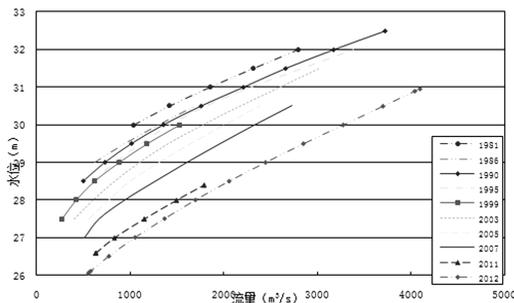


图3 湘潭站历年低水水位流量关系图

4.2 对河势的影响

湘潭河段洪水期水面比降加大,流速增加,水流冲刷能力增强,易造成滩地后退,护岸坍塌,堤防出险,加上河床下切,对河势的稳定带来了不利影响。同时,河床冲刷深度的增加,对河内桥墩、过河隧道等涉水建筑物的埋置深度也造成了影响。

4.3 对取用水的影响

湘潭河段河床下切,水位降低,枯水位维持时间延长,取水保证率减小,曾给周围的取用水带来了不利影响。2014年长沙航电枢纽蓄水之后,湘

潭站枯季水位基本上稳定在30.00m以上,取用水矛盾减轻。但洪水期水面落差加大,水流速度加快,水流对河床底泥的冲刷也增强了,沉积在底泥中的重金属加速混合到水体中,使得水体中铜、铅、锌、镉等重金属含量提高。上下游河段曾多次发生相关的重金属水污染事件。

4.4 对航运的影响

随着河床的逐年下切,尤其是河床中间部分冲刷严重,河床深槽发生了迁移,深泓有从右岸向中间转移的趋势。横断面上流速分布随之发生改变,加上流速增大,航运受到一定的影响。

4.5 对生态的影响

由于下游长沙航电枢纽的运行,湘潭河段枯季水流流速变缓,加上滩地退化,水体涵养和自净作用减弱。河道岸坡的人为硬化对水生生物的生长繁殖也产生了不利条件。工程因素造成的河流水力特性变化对于污染物输移扩散作用产生了直接影响,河流自净能力减弱,在这些因素综合作用下使得水环境质量下降,也直接威胁到水生生物的生存。

5 结语

随着人口的增加、经济的发展,人类对天然水体的干扰越来越多,天然河道的变化越来越大,一些测站的水文特性随之发生了显著改变,对河势稳定、生产生活取用水、航运等都产生了影响。因此,我们不仅要重视对水文历史资料的分析研究,还要根据河道上水利工程的建设和变化,及时了解河道河床的改变,以及它们对洪水特性带来的影响和趋势变化,从而在站网的优化、测验方式的更新、预报方法的调整等方面做出相应的改变,提前预测并尽早减轻河道水文特性的改变对水安全造成的不利影响。

参 考 文 献

- [1] 杜鹃,徐伟等.湘江流域近30年径流量与水位的长期变化规律研究.应用基础与工程科学学报,2010,18(03):369-378.
- [2] 匡燕鹤,马忠红.湘潭河段最小生态流量初探[J].湖南水利水电,2018,(03):49-50,67.
- [3] 彭楚杰.湘潭市水生态系统保护与修复的对策研究[J].湖南水利水电,2018,(03):51-53,74

湖南紫鹊界梯田自流灌溉系统降雨条件研究

危润初¹, 周升健²

(1. 长沙理工大学水利工程学院 长沙 410004 2. 娄底水文水资源勘测中心 娄底 417000)

【摘要】 紫鹊界梯田以其独特的自流灌溉系统而闻名于世,以往对其水循环机理的研究主要集中在土壤、地质等方面,缺乏降雨条件的研究成果。本文从降雨条件的视角出发,基于紫鹊界地区及周边共 11 个气象站的 1986~2015 年降水序列数据,运用集中度、降雨标准指数(SPI)等方法从总降雨量、降雨年内分配、干旱频率等方面开展对比分析,以揭示紫鹊界地区梯田稻作自流灌溉系统所拥有的独特的天然降雨条件。结果表明:紫鹊界地区多年平均降雨量达 1638.7mm,比外围 8 站平均高出 177.4mm,其中夏季(6~8 月)平均降雨为 552.7mm,比外围 8 站平均高出 122.4mm。紫鹊界 3 站旬降雨序列的平均集中度为 0.373,明显高于外围 8 站的平均值 0.354,夏季是紫鹊界地区降雨的主要优势时段,多年平均降雨高峰为 6 月中旬,晚于外围 8 站的 6 月上旬或 5 月下旬。紫鹊界地区 5~8 月份的 3 个月时间尺度的干旱频率有“先小后大”的特征,5 月份和 6 月份的 3 个月时间尺度的干旱频率明显要小于全区平均值,7 月份和 8 月份要大于平均值。6 月上旬到 8 月中旬是紫鹊界梯田灌溉的主要时期,紫鹊界地区降雨年内分配、多年平均干旱频率分布特征等与紫鹊界梯田的水稻生长期形成良好的匹配关系,降雨是紫鹊界梯田自流灌溉系统的重要自然支撑条件。

【关键词】 紫鹊界梯田 自流灌溉系统 降雨条件 集中度 标准降雨指数

1 引言

湖南紫鹊界梯田、云南哈尼梯田和广西龙脊梯田被称为“中国南方三大古梯田系统”,其中紫鹊界梯田又以其独特的自流灌溉系统而闻名,并列入了首批世界灌溉工程遗产名录。作为历史悠久的农耕稻作系统,紫鹊界梯田在无塘无坝、无人工水利设施条件下能够实现旱涝保收^[1-2],其内在运行机制对于构建现代人与自然的新型关系具有重要的借鉴意义。

早在 2005 年,秦仁秋^[3]就从地质、地貌、气象与人类活动等方面对紫鹊界梯田的饱水机制进行了简要阐述,而后相关研究逐渐深入。到目前,相关研究结论主要集中于以下几点:

(1) 紫鹊界特殊的花岗岩地质条件,使其土壤

具有渗透性适中、土壤含水量大、持水性好等特点^[2,4-6],这为梯田系统提供了绝大的“天然条件水库”^[7];

(2) 花岗岩基底为梯田系统提供了天然隔水层,使大气降水入渗至地下后在近地表的土-岩界面渗流,为梯田自灌溉提供了条件^[1-2];

(3) 紫鹊界梯田分布具有明显的坡度规律,并有“顶盖帽”的特征,这自然形成了植被-土壤-地形-梯田的自适应系统^[2,6,8-10];

(4) 千年来人类的深耕细作,整体上形成上下梯田“长藤结瓜”的自灌溉模式,同时又培育出特殊的稻田饱水层^[2]。

在上述研究的基础上,李桂元^[12-13]采用数字滤波法分析了梯田区的水源结构,并建立了古梯田原生态自流灌溉水供需平衡计算模型,精确给出了紫



鹊界梯田原生态自流灌溉保证率,从定性、定量两方面深刻揭示了古梯田原生态自流灌溉机理。

作为一种特殊的人地复合型水文系统,降水在其运行过程中必然要起到重要作用。但是,除部分学者强调了区内降水总量外^[2,8],未见有对紫鹊界梯田自流灌溉系统降水条件的专门研究。本文从降雨量、降雨年内分配、干旱频率、降雨条件与稻作制度匹配等角度出发,利用紫鹊界地区及周边共 11 个气象站的 1986~2015 年降水序列数据对紫鹊界梯田自流灌溉系统背后的降雨条件开展研究,以其补充完善紫鹊界梯田水循环理论体系,为紫鹊界梯田旅游开发、科学保护提供理论依据。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

紫鹊界梯田位于湖南省中部偏西的新化县水车镇(图 1),是分布于海拔 500~1000m 的稻作梯田系统。整个梯田向东北方向呈扇形展开,范围约 93km²^[12],共有梯田 3801.6hm²,其中核心景区共有连片梯田 1334.0hm²^[7]。景区梯田主要分布在坡度在 20°~40°的山腰,自下往上最大级数超过 500。紫鹊界区域气候类型属亚热带大陆性季风湿润气候,四季分明,夏季湿热,冬季寒冷,多年平均降水量在 1600mm 以上,其中 4~8 月份降水最为集中。

紫鹊界梯田基岩岩性主要以二长花岗岩为主,属白马寺复式岩体,于加里东期(志留纪)侵入。受白马寺岩体边界控制,紫鹊界梯田所在的水车地区在地形上呈现为一开口朝南的簸箕形地形,核心景区最高峰海拔为 1585.2m,地貌上属典型的中低山侵蚀地貌。

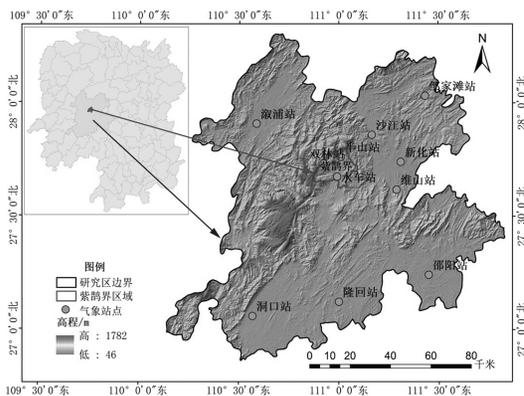


图 1 研究区域及气象站点分布

2.2 数据

本次研究收集了紫鹊界附近区域及周边地区的 11 个气象站的 1986 年~2015 年逐日降水数据,其中包括紫鹊界的双林、半山和水车 3 个气象站。新化、溁浦、邵阳、洞口、隆回等 5 个气象站为国家气象基本站数据,下载自国家气象信息中心,其余站点为地方防汛气象监测站,数据源为湖南省水文水资源勘测中心。

2.3 研究方法

(1) 集中度测定法

集中度测定法是一种用于评价降水或径流年内分配特性的计算方法^[14-15],目前该方法已经得到了广泛应用^[16-18]。集中度(CD)是利用向量分析的原理定义气象或水文序列时间的分配特征。将一个时段(n 天)降水量或径流量的数值看作向量的长度,而对应的时段则当作向量的方向,把第一个时段方向看成 0° ,以后每个时段依次按 $(n/365 \times 360)^\circ$ 等差递增,将第一个时段到最后一个时段的方位角 θ 分别设为 $0^\circ, 1 \times (n/365 \times 360)^\circ, 2 \times (n/365 \times 360)^\circ, \dots, (365/n - 1) \times (n/365 \times 360)^\circ$,把每个时段的降水量或径流量看作是有 x, y 两个方向分量,那么 x, y 两个方向的矢量合成及总向量可表示为^[19]:

$$Q_x(t) = \sum_{i=1}^{365/n} Q(t, i) \cos \theta(t) \quad (1)$$

$$Q_y(t) = \sum_{i=1}^{365/n} Q(t, i) \sin \theta(t) \quad (2)$$

$$Q_{xy}(t) = \sqrt{Q_x(t)^2 + Q_y(t)^2} \quad (3)$$

公式(1)和(2)中:

$Q(t, i)$ ——第 t 年 i 个时段的降水量或径流深,

$Q_x(t, i)$ 和 $Q_y(t, i)$ ——为 $Q(t, i)$ 分解在 x 和 y 两个方向上的分矢量,

$Q(t, i)$ ——矢量和。

则第 t 年降水或径流的集中度(CD)和年内最大降水或径流的分布时段对应的方位角——集中期(CP)为^[19]:

$$CD(t) = Q_{xy}(t) / \sum_{i=1}^{12} Q(t, i) \quad (4)$$

$$CP(t) = \arctan \left(\frac{Q_x(t)}{Q_y(t)} \right) \quad (5)$$

通过公式(4)和(5)可以看出,CD 能够反映研



究时段降水或径流的集中程度,取值在 0.0~1.0 之间,若研究时段内降水分布均匀,则 CD 会趋近于 0,若 CD 值越接近于 1,则表示降水或径流越集中于某一个时段内;CP 表示的是合成向量的方位角,反映了年内最大降水或径流的分布时段。

本次研究为了计算方便,对时段划分进行简化处理,将年总天数按 360 天算,以旬为单位时段(10 天),即将全年分成 36 个旬,每旬对应方位角为 10°,大月下旬大于 10 天的和二月下旬小于 10 天的均按 10 天计。

(2) 标准化降水指数(SPI)

标准化降水指数(SPI)是通过计算给定时间尺度内降水量的累积概率,使之能够在多个时间尺度上进行计算比较^[20]。在进行标准化降水指数(SPI)计算时,首先假设某个时段的降水量分布是一种偏态分布,因此采用 Γ 分布概率来描述降水量的变化。在计算出某时段内降水量的 Γ 分布概率后,再进行正态标准化处理,最终用标准化降水累积频率分布来划分干旱等级^[21],其计算步骤如下:

①假设某时段降水量为随机变量 x ,则其 Γ 分布的概率密度函数如下式:

$$f(x) = \frac{1}{B^\gamma \Gamma(x)} x^{\gamma-1} e^{-x/B}, x > 0 \quad (6)$$

式中:

β, γ ——尺度和形状参数, $\beta > 0, \gamma > 0, \beta$ 和 γ 可用极大似然估计方法求得:

$$\hat{r} = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}}{4A} \quad (7)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{r}} \quad (8)$$

式中:

$$A = \lg \bar{x} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (9)$$

式中:

x_i ——某时段降水量标准化结果资料样本;

\bar{x} ——某时段降水量平均值。

确定概率密度函数中的参数后,对于某时段的降水量 x_0 ,可求得随机变量 x 小于 x_0 事件的概率为:

$$F(x < x_0) = \int_0^{x_0} f(x) dx \quad (10)$$

利用数值积分可以计算用式(6)代入式(10)后的事件概率近似估计值。

②降水量结果为 0 时的事件概率由下式估计:

$$F(x < x_0) = \frac{m}{n} \quad (11)$$

式中:

m ——降水量为 0 的样本数;

n ——总样本数。

③对 r 分布概率进行正态标准化处理,即将式(10)、式(11)求得的概率值代入标准化正态分布函数,即:

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (13)$$

对式(13)进行近似求解可得标准化降水指数 SPI 的值:

$$Z = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (14)$$

式中: $t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}}$, F 为式(10)或式(11)求得的

概率;并当 $F > 0.5$ 时, $S = 1$, 当 $F \leq 0.5$ 时, $S = -1$ 。 $c_0 = 2.515517; c_1 = 0.802853; c_2 = 0.010328; d_1 = 1.432788; d_2 = 0.189269; d_3 = 0.001308$ 。

由上述 SPI 的计算步骤可知,标准化降水指数计算并未考虑不同季节降雨量的自然差别,这就使得计算的 SPI 序列会呈现出明显的雨→枯的年周期变化。这种计算结果虽然能够有效地反映出不同时间尺度条件下的水分变化^[22],但是很难反映雨季真实的丰枯情况。因此本次在计算前对各站 30 年的月降雨序列进行标准化处理,即将所有月降雨样本 x_i 除以该站样本 x_i 所在月份的 30 年降水的平均值,并以此标准的月降雨序列开展标准化降水指数(SPI)计算。

根据 SPI 值干旱等级划分标准^[20],对于旱进行等级划分(表 1),然后根据计算得到的各年不同时间尺度不同时间节点的干旱等级结果对选定的时间尺度开展干旱频率分析(根据水稻需水情况,只统计中旱以上级别),计算公式为:

$$P_i = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (15)$$

式中:

n ——该站某时间节点选定时间尺度发生中旱级别以上干旱的次数,

N ——样本总数(30),

i ——不同的时间节点。

表 1 SPI 干旱等级划分

| 干旱等级 | 特旱 | 重旱 | 中旱 | 轻旱 | 无旱 |
|-------|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|--------------|
| SPI 值 | $SPI \leq -2.0$ | $-2.0 < SPI \leq -1.5$ | $-1.5 < SPI \leq -1.0$ | $-1.0 < SPI \leq -0.5$ | $SPI > -0.5$ |

3 结果与分析

3.1 降水特征及干旱情势对比

3.1.1 年、季平均降水量对比

根据各站 30 年降水监测资料,统计得到多年年平均及各季多年平均降水量,并绘制年均降水量空间分布图(见图 2)和各站季降水量对比图(见图 3)。从图 2 可以看出,紫鹊界区域是整个地区的降水高值中心。本次研究所选取的紫鹊界外围地区 8 个站的多年平均降水量为 1461.3mm,而紫鹊界地区的双林、水车、半山 3 站的多年平均降水量平均值为 1638.7mm,较外围 8 站平均高出 177.4mm,其中双林站年平均降水量更是高达 1757.2mm,比邻近的新化县城站高出 308.4mm,比隆回、邵阳等站更是要高出 400mm 以上。

根据本次研究的现场调查结果,受山地气候决定,紫鹊界梯田水稻种植多为单季稻,水稻生长期一般为 4 月底~10 月中旬,生长周期 120~150 天不等,受海拔的影响,山上播种与收割时间都较山下晚,同时山上水稻生长周期时间更长,具体为,山下 120~130 天,山上一般超过 130 天。根据水稻各生长期需水情况,5~8 月的降水情势对紫鹊界水稻生长影响最大。由各站多年季均降水对比图(图 3)可以看出,研究区降水春夏多,秋冬少;紫鹊界地区 3 站相对其他站点的多年平均降水高值优势主要由夏季降水贡献。外围 8 个气象站多年春季(3~5 月)、秋季(9~11 月)和冬季 12~2 月)平均降水量分别为 480.1、238.9、189.6mm,紫鹊界 3 站分别为 501.7、266.5、195.4mm,紫鹊界 3 站并无明显优势,但是 11 个气象站的多年夏季(6~8 月)平均降水量仅为 552.7mm,而紫鹊界 3 站平均高达 675.1mm,相差 122.4mm。

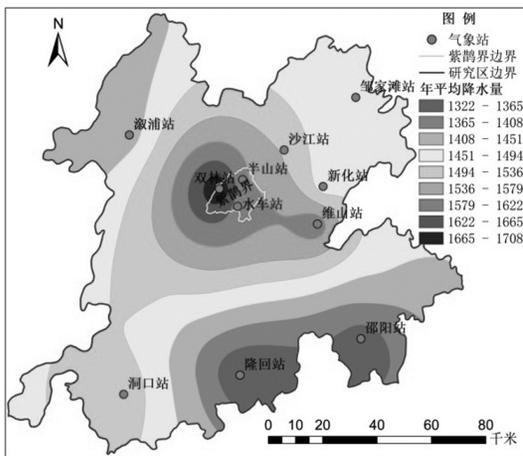


图 2 年平均降水量空间分布图

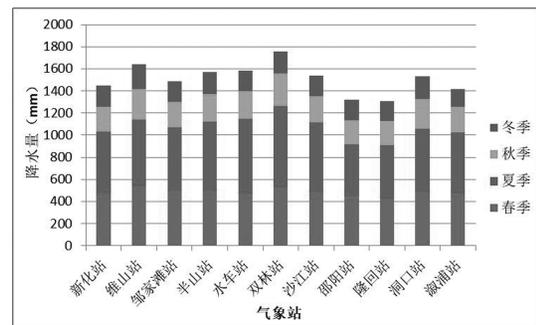


图 3 四季平均降水量分布

3.1.2 集中度与集中期对比

运用集中度测定法对收集的 11 个气象站的 1986~2015 年逐日降水数据进行处理,得到各站点集中度(CD)与集中期(CP)的多年平均值(见表 2),并分别绘制 CD 和 CP 的空间分布图(见图 4)。由表 2 可知,研究区各站点的集中度平均值为 0.359,集中期为 15.39,紫鹊界地区三站点的集中度平均值为 0.373,集中期为 16.02。由此可知,紫鹊界地区 3 站的集中度要大于研究区平均值,即全年降水更为集中,这与前节的研究结论相一致。

表 2 紫鹊界及外围地区多年降水集中度与集中期计算结果

| 站点 | 新化站 | 维山站 | 邹家滩站 | 半山站 | 水车站 | 双林站 | 沙江站 | 隆回站 | 洞口站 | 邵阳站 | 溆浦站 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 集中度 | 0.357 | 0.339 | 0.363 | 0.362 | 0.381 | 0.377 | 0.383 | 0.337 | 0.339 | 0.332 | 0.382 |
| 集中期 | 15.32 | 15.07 | 15.02 | 15.62 | 16.08 | 16.36 | 15.82 | 15.02 | 15.40 | 14.58 | 15.03 |

从空间变化趋势来看,本论文所采用的 11 个气象站所覆盖区域多年平均降水集中度(CD)呈现出明显的自东南向西北逐渐增加趋势(见图 4),紫鹊界地区处于高值区。而在集中期(CP)方面,紫鹊界地区降水多年平均的高峰时段为 6 月中旬,而外围地区多为 6 月上旬,甚至是 5 月下旬。

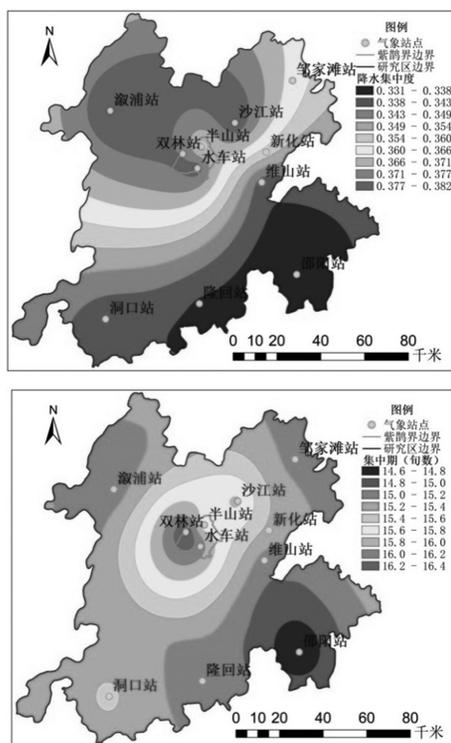


图 4 紫鹊界及周边地区降水集中度与集中期等值线

3.1.3 基于 SPI 方法的 3 个月时间尺度的干旱频率对比

水稻灌溉保证率与农业干旱密切相关,而 2~3 个月时间尺度的 SPI 可以很好地反映农业干旱情况^[20],同时 5~8 月的降水情势对紫鹊界水稻生长影响最大。本研究基于 11 个气象站 30 年的标准化月降雨序列,计算得到各站 1986~2015 年的 5 月~8 月的 3 个月时间尺度的 SPI 值,在此基础上统计得到 5 月~8 月的 3 个月时间尺度的干旱频率,并绘制干旱频率空间分布图(见图 5)。

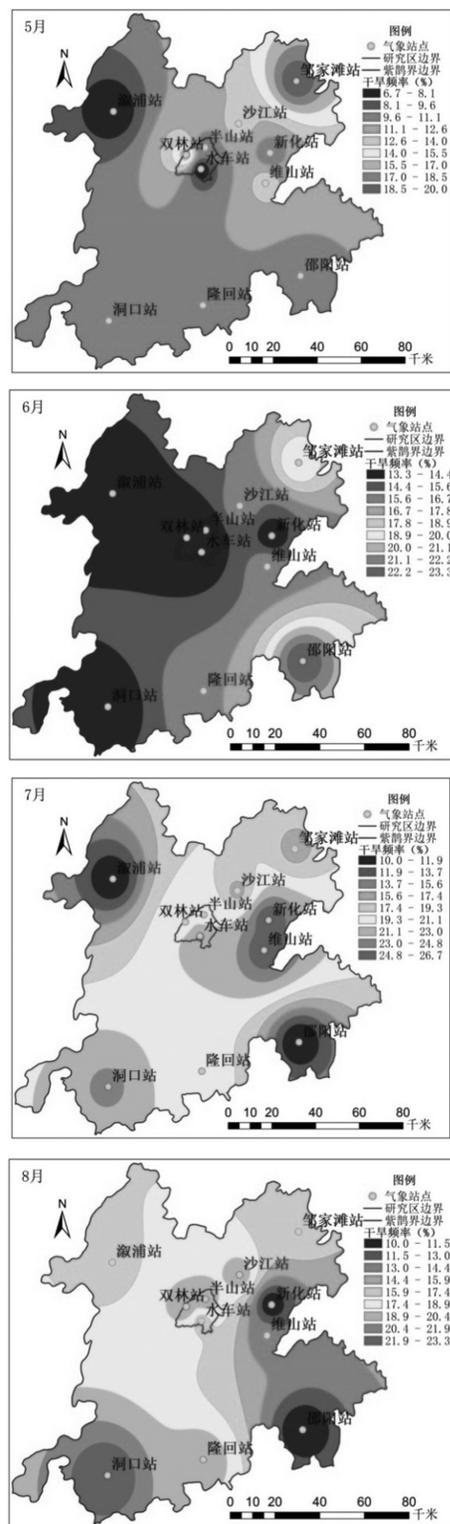


图 5 3 个月尺度干旱频率空间分布图



从图 6 可以看出,紫鹊界及周边地区的干旱频率存在明显的空间变化,同时不同月份干旱频率也有较大差异。5 月份,整个区域干旱频率发生频率总体最低,平均仅为 11.5%,其中紫鹊界地区的 3 站平均仅为 11.1%,低于平均值;6 月份,全区域平均干旱频率升为了 15.76%,其中邵阳站甚至达到了 23.3%,但是紫鹊界地区 3 站表现为全区域最低水平,均为 13.3%;7 月份,全区域平均干旱频率进一步升高至 20.0%,而紫鹊界地区平均为 21.1%,超过了全区域平均值;8 月份,全区域相对 7 月份干旱频率有所下降,平均干旱频率为 17.0%,紫鹊界地区略高于全区域平均水平,约为 18.9%。

从上述分析可知,紫鹊界地区 5~8 月份的 3 个月时间尺度的干旱频率有“先小后大”的特征,5 月份和 6 月份的干旱频率明显要小于全区域平均值,7 月份和 8 月份要高于全区平均值。

3.2 紫鹊界地区降水优势控制因素分析

研究区位于长江中游流域,属亚热带季风气候,夏热冬冷,四季分明,季风发达;湖南省以春季和夏季降水居多,而秋季和冬季降水量较少,季节变化较显著^[23]。按照季风的特点,可划分为夏季风(5~10 月)与冬季风(11 月~翌年 4 月)^[24]。

夏季风期间,水汽主要来自孟加拉湾、南海洋面与西太平洋海区^[24-25],印度季风环流、东亚季风环流、中纬度西风带是影响东亚夏季水汽输送的最主要的三个因素^[26]。在长江中下游地区,通过印度季风环流到达的气块约占 44%,通过东亚季风环流系统到达的气块约占 37.6%,此外,还有 18.4%的气块是通过中纬度西风带最终到达长江中下游地区,其中,印度季风环流的西南水汽输送是长江中下游峰值降水期的主要水汽来源^[26]。郭海宇等人曾统计得出,在夏季风期间,湖南省偏南风占到所有风向中的 59.0%,其中西南风 30.1%、南风 14.7%、东南风 14.2%^[27]。而在冬季风期间,水汽主要来自西风带携带的水汽和局地水汽环流^[28],水汽输送主要依靠西风环流和南下的大陆性气团^[23],风向上也主要以西北风为主。

由图 1 可以看出,紫鹊界至洞口、隆回和邵阳的一带区域,明显呈现为以紫鹊界地区为核心,在西南和东南两个方向开口的“漏斗状”地形,这种

特殊的地形条件为紫鹊界的夏季降雨提供了有利的“聚水”条件。夏季风期间,来自印度洋的西南季风和来自太平洋的东南季风易受“漏斗状”地形的控制,汇于紫鹊界梯田所在区域,给紫鹊界梯田带来丰沛降水。而在冬季风期间,紫鹊界并无明显优势,这也是紫鹊界地区夏季降雨较外围气象站明显偏高的主要原因。

3.3 紫鹊界地区降雨与水稻需水匹配度分析

水稻生长期主要包括返青期、分蘖期、拔节期、抽穗期、乳熟期和黄熟期等 6 个阶段,不同阶段水稻需水量会有差异。紫鹊界地处雪峰山区,梯田也多分布在海拔 500~1000m 的山坡上,其水稻生长周期与湖南一般丘陵或平原地区有较大不同,且目前尚未见有专门的统计结果,本次研究参考相近海拔与纬度的云贵地区的研究成果。2014 年,符娜等对我国西南地区的 48 个地区的水稻生长期及需水量进行了专门统计(见表 3)^[29],其结果表明,滇、贵、川、渝四省市单季稻生长期不同阶段平均天数非常接近,分别约为 9 天、35 天、17 天、13 天、13 天、12 天。引用该研究成果,可以大致得到紫鹊界梯田单季稻生长期不同阶段的时段分布(见图 6)。

表 3 云贵地区单季稻水稻生长期需水量统计

| 地区 | 生育期 | 移栽返青 | 分蘖期 | 拔节期 | 抽穗期 | 乳熟期 | 黄熟期 |
|----|----------|------|-------|------|------|------|------|
| 云南 | 平均时长/天 | 8.9 | 34.5 | 17.1 | 13.1 | 13.0 | 11.8 |
| | 需水量均值/mm | 29.3 | 107.0 | 51.2 | 39.9 | 40.3 | 36.9 |
| 贵州 | 平均时长/天 | 9.0 | 35.4 | 16.9 | 13.1 | 13.1 | 12.2 |
| | 需水量均值/mm | 22.6 | 99.1 | 59.4 | 46.6 | 45.3 | 40.5 |
| 四川 | 平均时长/天 | 9.0 | 35.4 | 16.8 | 13.1 | 13.2 | 11.8 |
| | 需水量均值/mm | 24.3 | 95.7 | 52.1 | 43.1 | 42.2 | 35.5 |
| 重庆 | 平均时长/天 | 8.8 | 34.9 | 16.9 | 13.0 | 13.1 | 12.1 |
| | 需水量均值/mm | 22.1 | 94.3 | 59.1 | 52.1 | 48.6 | 43.4 |

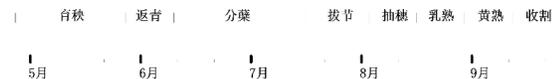


图 6 紫鹊界梯田单季稻生长期不同阶段时段分布

一般来说,在插秧返青后,拔节期和抽穗期对稻田缺水最为敏感^[30],而分蘖期需水量最大。因此,在紫鹊界地区,6 月上旬~8 月中旬是水稻灌溉的主要时期。由前文的研究可知,紫鹊界地区夏

季(6~8月)降雨量比地区平均值要高出89mm,同时其降水多年平均的高峰时段为6月中旬,5月份和6月份的3个月尺度的干旱频率要小于全区域平均值。紫鹊界地区降雨的年内分配特征与紫鹊界梯田的水稻生长期形成良好的匹配关系。5月份,紫鹊界梯田区进入雨季,为育秧、泡田、翻耕提供足够水分;6月中旬进入降雨的高峰期,丰沛降水不仅直接为水稻分蘖提供水分,同时也通过地表入渗至土壤并蓄存在花岗岩基岩面以上的风化带空隙中,并在后期缓慢排泄出地表。

根据李桂元等人在紫鹊界梯田开展的抽水试验和压水试验结果^[13],紫鹊界梯田花岗岩风化层的渗透系数在0.08~0.11m/d间,接近粉土到粉砂的水平,而给水度在0.10~0.15间,接近细砂和中砂水平。紫鹊界风化层这种较低渗透性、较高给水度的特征,使其兼具粘土和砂的优点,即既能保水、又能给水,从而拥有了良好的调蓄能力。从前文的5~8月的3个月时间尺度的SPI计算结果可知,紫鹊界地区7月份、8月份的干旱频率要大于全区域平均值。当7~8月份遭遇干旱时,蓄存在风化带孔隙中的水分就成为紫鹊界梯田的主要灌溉水源。但是也要注意,虽然花岗岩风化层渗透系数不大,但是由于梯田区坡度较大,如果较长时间得不到降雨补充,地下水仍然可能会失去对梯田系统的补给能力。由降雨集中期(CP)的计算结果可知,紫鹊界地区的多年平均降雨高峰期为6月中旬,相较于其他区域要晚10~20天,这实际上提高了梯田区7月和8月的灌溉保障能力。

4 讨论

(1)紫鹊界梯田自流灌溉系统是人类智慧与天然条件的完美结合,降雨对自流灌溉系统的贡献也必然要通过其他条件来实现。花岗岩土壤的独特性质,提供了良好的入渗条件、蓄水条件和给水条件,花岗岩低裂隙基底的隔水作用为地下水自然补给梯田奠定了基础,而人工改造梯田又客观上延缓了地表降雨汇流过程、延长了降雨入渗时间,从而增加了降雨入渗量。因此,对紫鹊界梯田自流灌溉系统的认识,需要秉持系统的观点,将降雨、土壤、岩石、植被、地形、人工梯田以及稻作

制度联系起来做整体思考,才能真正地理解紫鹊界梯田自流灌溉系统内在的水循环机制。

(2)对于山区来说,降雨一般存在“迎风坡”和“背风坡”的差别,而观察紫鹊界的梯田分布就会发现,区内梯田分布有明显集中于南坡的规律。由于区内没有开展南坡和北坡降雨差异对比研究的气象资料条件,因此,紫鹊界梯田分布的南北坡空间差异规律是否与降雨有关,还需要在以后的研究中进一步深化。

5 结论

(1)受独特的南向开口“漏斗状”地形条件的影响,紫鹊界地区拥有比外围地区更为丰沛的降雨。区内3站多年平均降雨量达1638.7mm,比外围8站平均高出177.4mm。同时,受长江流域季风与地形条件的双重影响,紫鹊界的降雨优势主要集中于夏季(6~8月)。夏季紫鹊界地区3站平均降雨高达552.7mm,比外围8站平均高出122.4mm,这也反映为紫鹊界地区降雨的高集中度(CD)值。紫鹊界地区3站旬降雨序列的平均集中度为0.373,明显高于外围8站的平均值0.354,紫鹊界地区3站多年平均降雨高峰为6月中旬,也要晚于外围8站的6月上旬或5月下旬。

(2)紫鹊界及周边地区的干旱频率存在明显的时空分异。紫鹊界地区5~8月份的3个月时间尺度的干旱频率有“先小后大”的特征,5月份和6月份的3个月时间尺度的干旱频率明显要小于全区平均值,7月份和8月份要大于平均值。

(3)紫鹊界地区一般在4月底育秧、5月底移栽,6月上旬到8月中旬是梯田灌溉的主要时期。紫鹊界地区降雨年内分配、多年平均干旱频率分布特征等与紫鹊界梯田的水稻生长期形成良好的匹配关系。

参 考 文 献

- [1]许志方,聂芳容,张硕辅,等. 湖南紫鹊界梯田自流灌溉体系[J]. 中国农村水利水电,2006(04):73-74+77.
- [2]许文盛,尤伟,李亚龙,等. 紫鹊界梯田原生态自流灌溉的环境因素探析[J]. 长江科学院院报,2011,



- 28(10):69-74.
- [3] 秦仁秋. 紫鹊界梯田保水机理解析[J]. 湖南水利水电, 2005(03):47-48.
- [4] 李影, 王延龄. 浅析紫鹊界的水资源[J]. 科技风, 2011(04):115.
- [5] 聂芳容. 独具特色的紫鹊界梯田[J]. 中国水土保持, 2013(03):35-36.
- [6] 童潜明. 我国古代三大梯田的共性以及紫鹊界梯田的特有性[J]. 国土资源导刊, 2006(04):73-74.
- [7] 段兴凤, 宋维峰, 李英俊, 等. 湖南紫鹊界、云南元阳及广西龙脊古梯田研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2011, 23(01):31-35.
- [8] 段兴凤, 宋维峰, 曾珣, 等. 湖南紫鹊界梯田区森林改良土壤作用研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(06):123-126+132.
- [9] 王辉, 杨小宝, 田大作, 等. 紫鹊界梯田区不同土地利用类型土壤入渗特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(05):123-126+139.
- [10] 张长伟, 许文盛, 李亚龙, 等. 湖南省紫鹊界梯田区人工林凋落物持水特性[J]. 水土保持通报, 2013, 33(04):176-179.
- [11] 张冠华, 程冬兵, 张平仓, 等. 紫鹊界梯田区坡面产流产沙特征的模拟试验研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(06):9-12.
- [12] 李桂元, 杜新德, 罗利顺, 等. 基于数字滤波法的紫鹊界梯田区水源结构分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(18):9756-9757+9945.
- [13] 李桂元, 肖红宇, 刘思妍. 紫鹊界古梯田区域地下水储量及其运移转化规律研究[J]. 湖南水利水电, 2014(05):31-34+39.
- [14] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. 地理学报, 1984, 51(2):218-227.
- [15] 汤奇成, 李秀云. 径流年内分配不均匀系数的计算和讨论[J]. 自然资源, 1982, 3:59-65.
- [16] ZhangLJ, QianYF. Annual distribution features of the yearly precipitation in China and their interannual variations[J]. ActaMeteorologicaSinica, 2003. 17(2): 146 - 163.
- [17] 郑红星, 刘昌明. 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 585-590.
- [18] 王纪军, 裴铁璠, 顾万龙, 等. 降水年内分配不均匀性指标[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1364r1368.
- [19] 张录军, 钱永甫. 长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 622-630.
- [20] 危润初, 肖长来, 方樟. 黑龙江建三江地区地下水动态趋势突变点分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(01):202-210.
- [21] Bussay A, Szinell C, Szentimery T. Investigation and Measurements of Droughts in Hungary [C]//Climatological & Agrometeorological Papers. Budapest: Hungarian Meteorological Service, 1999.
- [22] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与Z指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004(04): 523-529.
- [23] 王小芳, 夏卫生, 杨云帆, 等. 湖南省降水量时空分布特点及其动态趋势分析[J]. 湖南农业科学, 2018(01):60-63.
- [24] 吴华武, 章新平, 关华德, 等. 不同水汽来源对湖南长沙地区降水中 δD 、 $\delta^{18}O$ 的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(08):1404-1414.
- [25] 隋明滇, 张瑛, 徐庆, 等. 水汽来源和环境因子对湖南会同大气降水氢氧同位素组成的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(06):1791-1799.
- [26] 褚曲诚. 中国东部汛期降水的水汽来源变化及其气候动力学研究分析[D]. 兰州大学, 2020.
- [27] 郭海宇, 陈华忠, 汤翔宇, 等. 湖南省风的时空分布特征及大风概念模型研究[J]. 中低纬山地气象, 2019, 43(04):55-59.
- [28] 黄一民, 章新平, 唐方雨, 等. 长沙大气降水中稳定同位素变化及过量氙指示水汽来源[J]. 自然资源学报, 2013, 28(11):1945-1954.
- [29] 符娜, 刘小刚, 张岩, 等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律[J]. 生态学杂志, 2014, 33(7):1895-1901.
- [30] 张玉屏, 朱德峰, 林贤青, 等. 不同时期水分胁迫对水稻生长特性和产量形成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2):48-53.

沱水流域淹没区分洪水文效益评估

宋荷花 陈春明 陈芳 杨付博 (长沙水文水资源勘测中心 长沙 410014)

【摘要】 本文根据沱水流域地形地貌和 2017 年特大洪水淹没情况,圈定 9 处淹没区。计算 9 处淹没区分洪流量情况,并演算至宁乡城区段,评估当沱水流域发生 50 年一遇洪水时,淹没区对宁乡城区段的分洪水文效益,供防汛部门应对超标准洪水过程中启用“中滞”防洪措施时参考。

【关键词】 效益 分洪 淹没区 沱水

1 前言

沱水发源于宁乡市西部的沱山(龙田镇白花村),河流全长 133.8km,流域面积 2673.4km²。沱水河干流,起于宁乡市黄材镇黄材水库,止于望城区高塘岭街道新康社区,干流自西向东流,流经宁乡市市区。建国以后发生的 7 次大的洪涝灾害,其中 2 次特大洪水,每次造成很大的经济损失,此类大灾基本上是 10 年一遇,近年出现愈发频繁,严重危害了宁乡市城区经济发展和人民生命财产安全。为有效应对宁乡城区大洪水,在充分发挥上游大中型水库拦洪削峰作用后,积极启用淹没区域分蓄洪水,合理防御洪水,确保重点,兼顾一般,力求避免和减少人员伤亡,尽最大可能减轻灾害损失。本文根据沱水流域地形地貌和 2017 年特大洪水淹没情况圈定 9 处淹没区,计算在沱水流域遭遇 50 年一遇洪水时,9 个淹没区对宁乡城区段的分洪水文效益。

2 淹没区介绍

根据沱水流域地形地貌和 2017 年特大洪水淹没情况,圈定 9 处淹没区。淹没区共占地面积 12903 亩,蓄水量为 1850.67 万 m³,9 个淹没区位置及淹没区详细参数见图 1。通过堤顶高程测量及现场调查成果,将各淹没区堤防高程与设计水位关系进行对比,发现 2 区、5 区、8 区和 9 区在 20

年一遇洪水时已经在淹没区下端进水,1 区、3 区、4 区、7 区在 50 年一遇洪水时淹没区下端进水,6 区在 50 年一遇洪水时不进水。

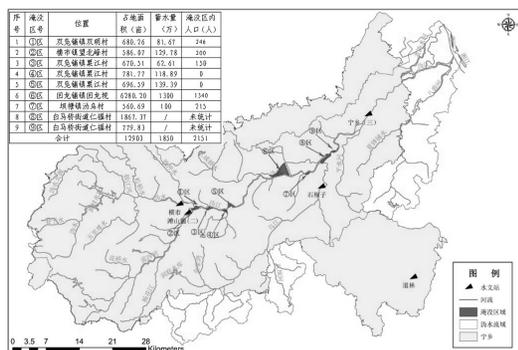


图 1 9 个淹没区位置分布图

3 淹没区分洪口设置及最大分洪流量计算

1 区、3 区、4 区、7 区在遭遇 50 年一遇洪水时为洪泛区,可在淹没区上段加宽进水口加大淹没区进水流量,6 区在遭遇 50 年一遇洪水时不进水,需设置进水口计算最大进水流量。

根据现场调查情况,按照如下原则假定进水口宽度和深度:

若淹没区实际进水时间小于 1 小时,按照 1 小时进水完推算进水口最大流量,然后根据确定的最大流量计算进水口宽度。

若淹没区实际进水时间大于 1 小时,则设定

20m、50m、100m 三个进水口宽度,计算对应的三个进水口最大流量。

根据调查 1 区-5 区、7 区、8 区、9 区进水时间均小于 1 小时,只有 6 区进水时间大于 1 小时。

本文涉及的所有进水口都在河道的堤防上,进水口水流流态都属于宽顶侧堰流,因此在推算进水口宽度时采用以下宽顶堰侧堰公式:

$$Q = m \left(1 - \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}} \sin a \right) b \sqrt{2gH_1^{3/2}}$$

式中:

- m ——一般正堰时的流量系数,
- v_1 ——侧堰首端河渠断面的平均流速(m/s),
- g ——重力加速度(m^3/s),
- h_1 ——侧堰首端河渠断面水深(m),
- α ——水流方向与溃口出流方向的夹角($^\circ$),
- b ——进水口宽度(m),
- H_1 ——堰上水头(m)。

按照以上原则和公式推算进水口宽度的过程见表 1、表 2。

表 1 假定进水口宽度的推算表

| 序号 | 淹没区 | 河流 | 河道洪峰流量(m^3/s) | 估算的进水口最大流量(m^3/s) | 进水口宽度计算值(m) | 进水口口门高程(m) |
|----|-----|----|-------------------|-----------------------|-----------------|----------------|
| 1 | 1 区 | 洧水 | 1333 | 295 | 53 | 85 |
| 2 | 2 区 | 楚江 | 587 | 361 | 58 | 86 |
| 3 | 3 区 | 洧水 | 1401 | 174 | 120 | 81.4 |
| 4 | 4 区 | 洧水 | 1429 | 330 | 85 | 80.7 |
| 5 | 5 区 | 洧水 | 1645 | 387 | 85 | 78 |
| 6 | 7 区 | 洧水 | 2173 | 100 | 35 | 55 |
| 7 | 8 区 | 洧水 | 3010 | 517 | / | / |
| 8 | 9 区 | 洧水 | 3030 | 217 | / | / |

表 2 ⑥区进水口宽度的推算表

| 序号 | 淹没区 | 河流 | 河道洪峰流量(m^3/s) | 计算的进水口最大流量(m) | 进水口宽度计算值(m) | 进水口口门高程(m) |
|----|-----|----|-------------------|-------------------|-----------------|----------------|
| | | | | 168 | 20 | 60 |
| 1 | 6 区 | 洧水 | 3596 | 420 | 50 | 60 |
| | | | | 841 | 100 | 60 |

4 洪水分析方法

洧水流域地处山区湿润气候带,径流的来源是降雨,洪水分析计算主要包括两部分,一是根据区域降雨情况采用新安江三水源产汇流模型计算各控制断面洪峰流量,二是根据上游淹没区分洪情况,采用马斯京根法进行河道演算,分析分洪对下游宁乡城区段洪峰流量及洪峰水位影响。主要计算断面和区间为各淹没区断面、横市站断面、滩山铺站断面、石坝子站至宁乡水文站区间、袁家河大桥断面及袁家河大桥断面至宁乡水文站区间。

5 各淹没区分洪效益计算

5.1 计算步骤

- (1) 构建宁乡流量(各区断面+区间)计算方案。
- (2) 根据 2017 年实测数据进行参数调整,将计算流量过程与实测流量过程进行拟合(主要拟

合水位开始上涨至洪峰出现的过程)作为分洪前宁乡站流量过程,通过查宁乡站水位流量关系线得分洪前洪峰水位。

(3) 根据各区最大分洪流量,通过模型计算分洪后宁乡站流量,通过查宁乡站水位流量关系线得分洪后洪峰水位。

(4) 分洪前宁乡站流量(水位)与各区分洪后宁乡站流量(水位)的差值即为各区分洪流量(水位)效益。

(5) 洧水城区段的防洪标准为 50 年一遇,当遭遇 50 年一遇洪水时,⑧~⑨已淹没,无需进行调度。

5.2 以 6 区为例计算分洪效益

1. 构建 6 区到宁乡站计算方案结构图见图 2:



图 2 6 区到宁乡站计算方案结构图

2. 通过方案计算分洪前宁乡站流量过程见图

3:

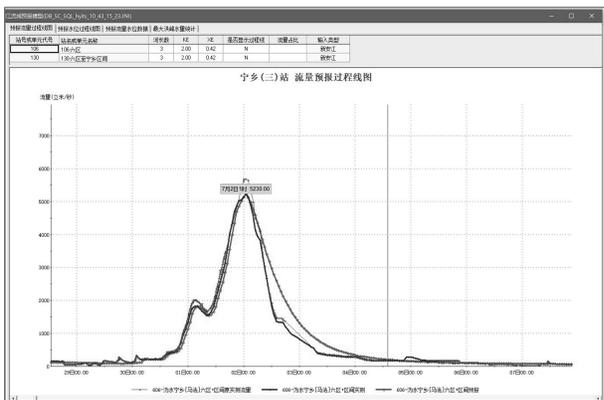


图3 6区分洪前宁乡站洪水流量(50年一遇)过程图

3. 根据6区最大分洪流量,通过模型计算分洪后(按100m开口)宁乡站流量过程见图4:

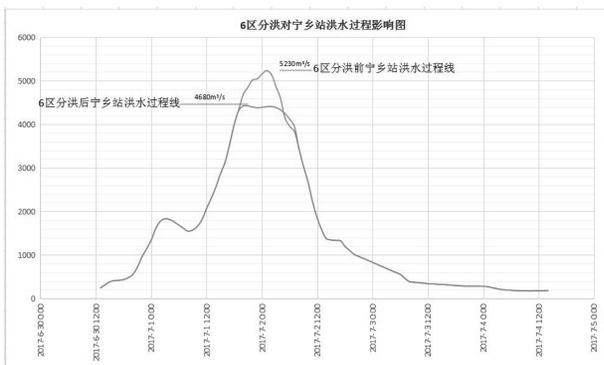


图4 6区(按100m开口)分洪对宁乡站洪水过程影响图

4. 分洪流量(水位)效益见表3:

表3 分洪流量(水位)效益表

| 淹没区 | 淹没区最大分洪流量 | 分洪前宁乡站流量 | 分洪后宁乡站流量 | 对宁乡站流量效益 | 分洪前宁乡站水位 | 分洪后宁乡站水位 | 对宁乡站水位效益 |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|
| | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | 水位 m | 水位 m | 效益 m |
| 6区 | 841 | 5 230 | 4 680 | 550 | 44.17 | 43.82 | 0.35 |

5.3 各区分洪效益

根据分洪效益计算步骤,分别计算各区分洪对宁乡站产生的效益,见表4:

表4 各区分洪对宁乡站流量(水位)效益总表

| 淹没区 | 淹没区最大分洪流量 | 分洪前宁乡站流量 | 分洪后宁乡站流量 | 对宁乡站流量效益 | 分洪前宁乡站水位 | 分洪后宁乡站水位 | 对宁乡站水位效益 |
|-----|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|----------|----------|
| | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | m ³ /s | 水位 m | 水位 m | 效益 m |
| 1区 | 229 | 5 230 | 5 195 | 35 | 44.17 | 44.15 | 0.02 |
| 2区 | 361 | 5 230 | 5 170 | 60 | 44.17 | 44.13 | 0.04 |
| 3区 | 174 | 5 230 | 5 185 | 45 | 44.17 | 44.14 | 0.03 |
| 4区 | 330 | 5 230 | 5 164 | 66 | 44.17 | 44.13 | 0.04 |
| 5区 | 387 | 5 230 | 5 152 | 78 | 44.17 | 44.12 | 0.05 |
| 6区 | 841 | 5 230 | 4 680 | 550 | 44.17 | 43.82 | 0.35 |
| 7区 | 100 | 5 230 | 5 180 | 50 | 44.17 | 44.14 | 0.03 |
| 合计 | 2 422 | / | / | 819 | / | / | 0.56 |

1-7区分洪对宁乡洪水过程影响见图5.

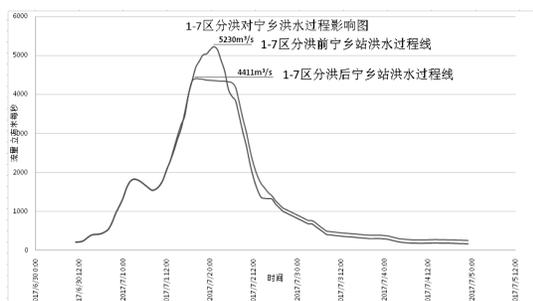


图5 1-7区分洪对宁乡洪水过程影响图

6 总结

本文根据扩大沔水流域9个可淹没区进水口加大淹没区分洪流量,分析了对城区段(宁乡站)的水文效益,供防汛部门应对超标洪水过程中采取弃守部分堤垸蓄滞洪水错峰等“中滞”防洪措施时参考。9个淹没区联合调度时,最大可降低沔水城区段宁乡站水位0.56m,淹没区内共有2 151人需要转移。其中分洪量最大的是6区,可降低宁乡站水位0.35m。由于沔水流域大型水库黄材水库,较大支流楚江和乌江,建议后期根据暴雨洪水组合情况进一步深化调度研究,在已充分发挥上游大中型水库拦洪削峰作用后,仍需启用淹没区域分蓄洪水时,提出淹没区的详细调度方案,寻求最佳启用时机,以充分发挥淹没区分洪效益。

参考文献

[1]李炜,徐孝平 水力学 武汉大学出版社。
[2]包为民,张建云 水文预报 中国水利水电出版社。



湖南汨罗江流域典型

水文断面查勘研究

刘 海 唐 哲 (岳阳水文水资源勘测中心 岳阳 414000)

【摘要】 1973年汨罗江水文查勘资料已无法满足当今水文地质研究的需求,为了全面掌握汨罗江流域40余年自然变迁和人为影响造成的水文特性变化,2017年重新对汨罗江流域进行了水文查勘。文章简要概述了该流域典型水文断面的地貌、河床变化以及水质等情况,研究了汨罗江河道行洪能力、水情特性。此次水文查勘为汨罗江流域的水污染治理、水资源开发、水生态保护奠定了科学基础。

【关键词】 典型水文断面 水文查勘 水生态保护 汨罗江流域

1 流域概况

汨罗江古称汨水,发源于湘赣边境幕阜山脉金凤山南麓,于湖南省汨罗市磊石镇注入东洞庭湖,流域面积5 543.2km²,干流全长253.2km,总落差249.8m,河道平均坡降0.46‰。汨罗江沿程接纳5km以上支流达173条,其中流域面积大于100km²的支流有10条,呈不对称羽状水系。汨罗江主要流经平江县、汨罗市,是南洞庭湖滨湖区最大河流,为平江、汨罗地区提供灌溉和生活用水。为加强汨罗江流域的水污染治理、水资源开发、水生态保护,收集汨罗江河道行洪能力、水情特征等水文资料,国家水文部门于1951年在汨罗江干流设立了加义、平江、伍市3个基本水文站,长期收集并整理水文基础资料。同时,为了弥补水文站网分布稀少导致的水文资料缺失,水利部在1973~1975年组织了大型水文查勘来补足流域内水文资料,探索汨罗江流域河流演变和洪水特征。

2 水文查勘情况

1973年汨罗江水文查勘使用水准仪、经纬仪、平板仪等测量设备,收集的资料精度低、范围不广、项目不全,已不能满足当今水文地质研究的需

求。为了全面掌握汨罗江流域历经40多年自然变迁和人为影响的水文特性变化,2017年7月,岳阳市水文局采用全站仪、GPS、ADCP声学多普勒流速仪、无人机等新仪器新设备,对汨罗江流域开展了高效、精确、全面的水文查勘。采用无人机航拍,收集了汨罗江河流地貌形态;更新完善了汨罗江流域40年来河流演变、洪水特性、水质水量等水文资料;对典型河段的河床高程及周边地形进行了测量,调查了历史洪水及洪涝灾害情况,并计算了洪调年份的洪峰流量。

3 查勘成果分析

通过对38个河段纵横断面形态、桥梁、水利工程建筑及历史洪痕情况进行的查勘分析,1983年、1995年和2000年均发生了几次较大洪水,对平江县、汨罗市部分地区造成了较为严重的洪涝灾害。对比1973年水文查勘资料,表明拦河修闸、河道挖砂等人为活动,对汨罗江流域河流生态系统健康造成了较大破坏,严重影响了河流的行洪能力。

3.1 典型水文断面地貌变化

选取汨罗江干流平江、伍市,支流昌江河打树坪、车田共4个河段进行了分析,典型断面分布见



图1。经水文查勘,汨罗江平江河段顺直长度约300m,无岔流,河槽宽约100m。断面上下游有水草生长。基本水尺断面形状为“U”形,河床为细砂组成,逐年有淤积变化,右岸为新建的防洪大堤,左岸为沙壤土。汨罗江伍市河段河道顺直,河段右岸在水位约38.50m开始漫滩,漫滩宽度在280m左右。右岸有冲淤现象,河床由细沙组成。汨罗江打树坪河段为洪调河段,处于平江县梅仙镇竹岭村上组,右岸为高山,左岸相对平坦,植被良好,为沙壤土,砂卵石河床较为稳定,河流生态具有一定的自我恢复能力。车田河段为典型山溪性河流,河床较狭窄,河道蜿蜒曲折,不同河段河道宽窄变化大,洪水暴涨暴落。汨罗江车田河段处于平江县梅仙镇板口村板口电站下游,河床由砂石构成,结构较稳定。调查河段顺直,左岸冲刷,右岸淤积,植被良好,为沙壤土;上游附近有采砂场,河道采砂破坏了河床的稳定性,产生了大量砂堆;加之河道的冲刷能力增强,河床下切严重,严重制约了河段的行洪能力。通过查阅现有水文资料、历史洪水资料和当地居民走访记录,结合现场洪水断面、河段周边地形测量和无人机拍摄的地貌全景,发现该河段于1983年和1995年发生了两场较大的洪水,由于河道行洪能力不足,造成河岸崩塌、河道堵塞、水位壅高,对当地经济、居民生活产生了不利影响。

打树坪河段地形图见图2。

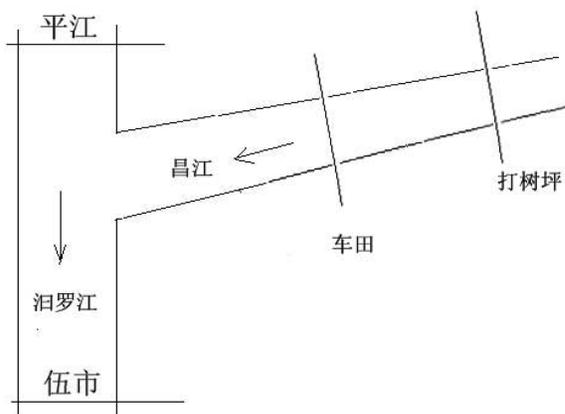


图1 汨罗江典型水文断面示意图

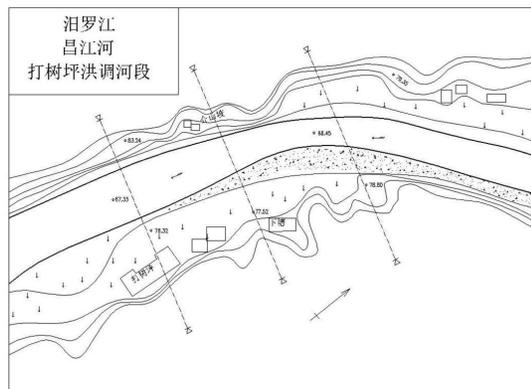


图2 打树坪河段地形图(单位:m)

3.2 典型水文断面河床分析

对比1973年,受水利工程建设和河道采砂影响,汨罗江河道发生了明显变化,河床不断下切,河道断面演变成为V字形或者U字形,见图3。断面冲刷明显,左右岸坡面呈直线或曲线形,谷底与谷坡之间通常无明显界限。河面狭窄,河床遭受破坏,河道沙石裸露,致使水生生物栖息生存环境恶化。河道行洪能力下降,水流不畅破坏了河床的完整性和稳定性,危及防洪安全。

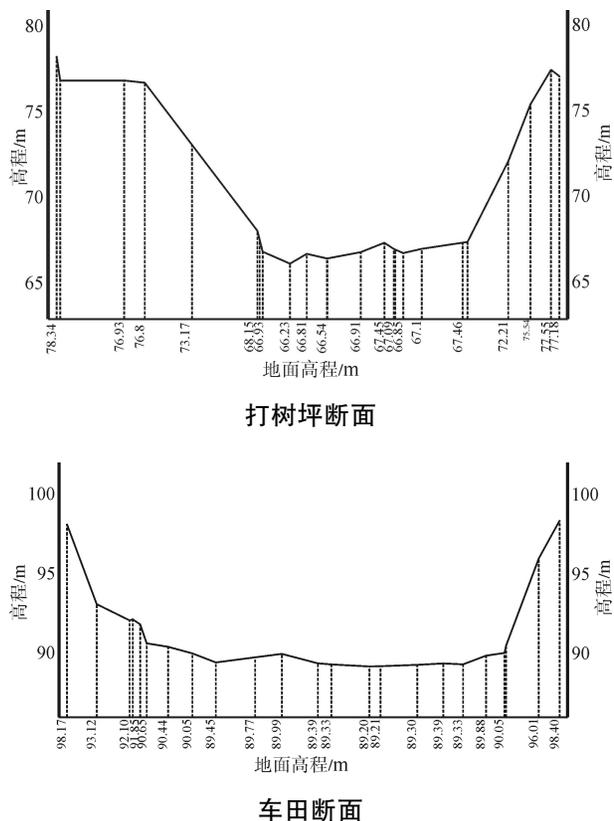


图3 打树坪断面和车田断面示意图

3.3 典型洪水调查分析

2017年8月12日,汨罗江昌江流域发生了特大暴雨,最大3h降雨量的重现期超过100年一遇,降水主要集中在昌江上游。8月12日06:00,因暴雨强度大、产流汇流速度快,冬塔和石浆的洪水在南江桥高南村汇集后向下游迅速涌去。昌江流域上游洪水06:00开始起涨,昌江北源洪峰于10:00经过冬塔钟家,昌江洪峰于10:40经过石浆毛家,11:00经过南江镇高南村,水位涨幅达7.93m;洪峰于13:00经过大洲乡大江村,于16:15经过下游梅仙镇,梅仙水文站水位涨幅达7.40m,洪峰流量1400m³/s,于当日22:30经过汨罗江干流伍市水文站,洪峰流量达1920m³/s。洪水传播示意图见图4。



图4 洪水传播示意图

根据汨罗江流域的实际情况,洪水调查洪峰流量一般采用曼宁公式计算:

$$Q = A \times \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

式中:

Q ——洪峰流量, m³/s;

A ——断面面积, m²;

S ——水面比降;

n ——糙率;

R ——水力半径 m, 由断面面积除以湿周计算得出。

由式(1)可知,影响流量的水力因素主要有断

面面积、水面比降、糙率和水力半径。由于河床采砂严重,河岸未经保护,水力半径变小,糙率变大,行洪能力下降,导致在通过相同流量的情况下过水断面面积变大,水位壅高,对河流沿线的堤岸造成影响。此次暴雨强度大,洪量集中,洪水来势猛,破坏力强,大洲乡以上河段底水偏高,导致洪水经过时洪峰峰值偏高,冬塔钟家大屋集贤大桥和大洲乡大江电站被冲毁,洪水破坏现场见图5。



(a) 冬塔钟家大屋集贤大桥



(b) 大洲乡大江电站

图5 洪水破坏现场

3.4 典型水文断面水质分析

选取了加义、平江、伍市和汨罗水文断面的水质监测数据统计分析,见图6。基于汨罗江监测站点水质监测数据,以总磷为指标因子代表,对近7年间(2013~2019年)沿江两岸农业发达的汨罗江流域水体水质进行研究发现,平江—伍市的汨罗

江河段污染情况在时间和水量期两个维度上均出现了顺河流而下的地域性增长。由图 6 可知,汨罗江河段的总磷浓度 2013~2016 年呈现整体上升趋势,2016~2019 年呈下降趋势。总磷是水质富营养化的重要指标,2013~2016 年总磷的整体上升与河道采砂、河床冲刷造成的河床深层底泥翻动密切关联。2016 年后,国家对长江流域实施“共抓大保护、不搞大开发”,加大对汨罗江整治力度,护岸护滩、河道清理、禁止采砂,总磷的年平均浓度呈现下降态势,水环境逐渐得到改善。

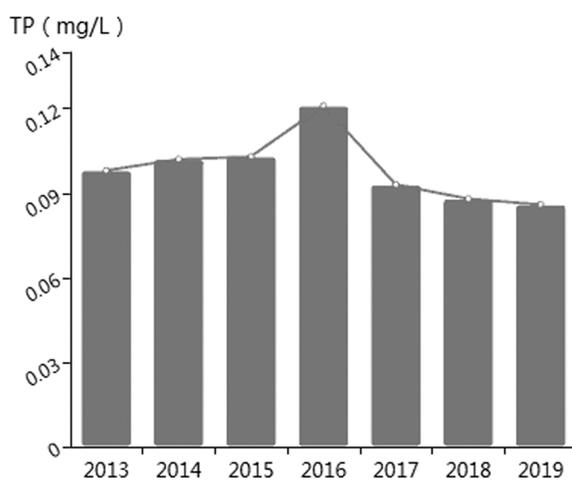


图 6 汨罗江总磷平均浓度年际变化(2013~2019 年)

4 结语

通过对汨罗江流域典型水文断面的水文查勘分析发现,受人类活动影响,汨罗江自 1973 年以来河床不断下切,演变成为“V”形或“U”形河道。在河流自动调整作用下,河槽发生周期性冲淤变化,深槽、浅滩和深泓线不断转换位置,遗留的砂坑、沙洲等人类活动痕迹造成河流行洪能力下降,严重影响了流域水生态环境。近年来,加大了汨罗江的整治保护,通过河道清理,禁止采砂以及局部河段河道整治开展的护岸工程、护滩工程

等一系列工程措施,有效地防止了河岸线坍塌。通过改善滩涂、滩区的生产生活条件,提高了滩区的土地利用价值,改善了两岸堤灌站的引水条件,保障了两岸灌区和人民生活用水需求。

参 考 文 献

- [1] 张荣. 浅析河道整治中的水污染治理[J]. 资源节约与环保,2019(9):27.
- [2] 卢玉萍. 水资源开发利用中的生态环境保护简析[J]. 科技风,2019(20):137,141.
- [3] 吴春峰. 水文资料收集的重要性与水文计算方法[J]. 北京农业,2015(29):108-109.
- [4] 周佳,罗树辊,雷小浪,等. 河道行洪分析方法综述[J]. 湖北水力发电,2007(6):11-13,26.
- [5] 张道长,徐红丽,冯丽,等. 浅谈对调整水文调查工作内容的认识[J]. 治淮,2018(11):12-14.
- [6] 胡皓. 赣江下游水沙特性及河床演变分析[D]. 天津:天津大学,2017.
- [7] 付佳伟,李德龙,许小华,等. 江西省中小河流洪水成因及规律分析[J]. 水资源研究,2019,8(5):456-464.
- [8] 孙其鹏. RTK 与全站仪联合测图的实际应用[D]. 长春:吉林大学,2016.
- [9] 王槐军. ADCP 技术在水文测验中的应用[J]. 能源与节能,2017(8):165-166,179.
- [10] 刘海,唐哲. 无人机在水文中的应用[J]. 中国水利,2019(7):63-64.
- [11] 王文英,李百克,邹文安. 曼宁公式在工程水文设计中的应用[J]. 东北水利水电,2010,28(5):13-15.
- [12] 奚旦立,孙裕生,刘秀英. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [13] 黄敏,肖少怀,贺丹,等. 汨罗江总磷时空分布研究[J]. 科技经济导刊,2019,27(14):128-129.



澧水石门站年降水量特征及变化趋势分析

匡永清 (常德水文水资源勘测中心 石门县水文局 415300)

【摘要】 对石门站 70 年的年降水量,采用多个时段短系列年降水量的资料代表性,采用 Man-Kendall 非参数趋势、P-Ⅲ型频率曲线以及滑动平均曲线三种方法进行探讨分析,总结出石门站年降水量的多年变化情况,为水资源评价和水资源综合利用提供参考。

【关键词】 石门站 年降水量 非参数趋势 重现期 滑动分析

1 前言

澧水流域位于湖南省西北部,介于东经 $109^{\circ}38' \sim 111^{\circ}54'$ 、北纬 $28^{\circ}58' \sim 30^{\circ}09'$ 之间,跨越湘鄂两省,地处长江之南,北以武陵山脉北支薛家垭、雨花寨、北风垭、太清山与湖北省清江、澧水相隔,南以武陵山脉南支及尾翼天门山、剪刀寺、五雷山、太浮山与沅水分野,西起湘鄂崇山,东抵洞庭湖。流域内西北高、东南低;南北窄而东西长,略成葫芦状。

澧水干流在桑植南岔以上分为北、中、南三源。中源为主源,出自龙山县大安乡翻身村。(澧水有北、中、南三源。中源为主源,发源于湖南省龙山县大安乡翻身村。干流全长 407km,流域面积 16959km^2 ,湖南境内 13841.5km^2 。支流较少,流域面积大于 3000km^2 的仅有溇水、渫水两条,5km 以上的支流 326 条。

澧水降水充沛,属典型的亚热带季风湿润气候区。流域多年平均雨量上游 1500~1800mm,中游为 1400mm,下游为 1200~1300mm,全流域平均为 1482mm。

2 石门站基本情况

石门站是澧水干流总控制站,设立于 1980 年 1 月 1 日,是原三江口水文站下迁后更名(因修建三江口水电站),位于石门县楚江镇东方桥路,东

经 $111^{\circ}23'$ 、北纬 $29^{\circ}37'$,集水面积为 15307km^2 ,干流长 320km,距河口 68km,属于国家基本站网中的重要水文站。主要观测项目有水位、水温、流量、降水量、泥沙、泥颗、水质分析,流量和泥沙测验均属一类精度站。该站为澧水流域的江河治理、防汛抗旱、水资源开发利用及水工程的兴建系统地收集水文资料,属国家重要报汛水文站。

3 资料样本分析

3.1 资料选用

该站降雨资料采用 1951 年~2020 年(共 70 年),其中原三江口站 1951 年~1979 年,石门站 1980 年~2020 年,两站相距不远,地貌相似,可以作为一站处理。

3.2 不同长度系列统计分析

该站从 1951~2020 年的 70 年长系列的年降水量资料中,还考虑到迁移站前后 30 年,以及迁站后 40 年,系列资料前后 60 年,按 1951~1980 年、1981~2010 年、1981~2020 年、1951~2010 年、1961~2020 年、1951~2020 年六个统计年限的年降水量系列进行分析,并计算六个不同长度的系列年降水量均值、变差系数 CV、偏态系数 CS,通过长短系列统计参数对比,见表 1,分析各系列的代表性。年降水量均值采用算术平均法计算,不作适线调整;变差系数 CV 采用适线值。适线时,采用 P-Ⅲ型分布,从分析的结果来看,1951 年~1980 年

降水明显偏多,相对 70 年长系列偏多 4.9%,1981 年~2010 年降水明显偏少,相对 70 年长系列偏少 6.4%,其它系列年代表性都比较好,接近长系列均值。

表 1 长短系列统计参数对比表

| 起止年份(年) | 年数 | 均值(mm) | CV | CS/CV | 降水趋势 |
|-----------|----|--------|------|-------|------|
| 1951~1980 | 30 | 1433.3 | 0.25 | 3.0 | 下降 |
| 1981~2010 | 30 | 1278.5 | 0.23 | 4.0 | 下降 |
| 1981~2020 | 40 | 1315.5 | 0.25 | 4.0 | 下降 |
| 1951~2010 | 60 | 1355.9 | 0.23 | 4.0 | 下降 |
| 1961~2020 | 60 | 1343.4 | 0.24 | 4.0 | 下降 |
| 1951~2020 | 70 | 1366.0 | 0.23 | 4.0 | 下降 |

4 年降水量的多年变化

4.1 利用 Man-Kendall 非参数趋势分析

在 Man-Kendall 检验中,原假设 H_0 为时间序列数据 (X_1, X_2, \dots, X_n) , 是 n 个独立的、随机变量同分布的样本;备择假设 H_1 是双边检验。对于所有的 $i, j \leq n$, 且 $i \neq j$, X_i 和 X_j 的分布是不相同的。定义检验统计量 S :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j)$$

其中, $\text{sign}()$ 为符号函数。当 $X_i - X_j$ 小于、等于或大于零时, $\text{sign}(X_i - X_j)$ 分别为 $-1, 0$ 或 1 。 S 为正态分布,其均值为 0 , 方差 $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ 。

$M-K$ 统计量公式 S 大于、等于、小于零时分别为:

$$\begin{cases} z = (s-1) / \sqrt{(n(n-1)(2n+5)/18)} & \left\{ \begin{array}{l} s > 0 \\ s = 0 \\ s < 0 \end{array} \right. \\ z = 0 \\ z = (s+1) / \sqrt{(n(n-1)(2n+5)/18)} \end{cases}$$

在双边趋势检验中,对于给定的置信水平 α , 若 $|Z| = Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设 H_0 是不可接受的,即在置信水平 α 上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。 Z 的绝对值在大于等于 $1.28, 1.64, 2.32$ 时表示分别通过了信度 $90\%, 95\%, 99\%$ 显著性。

经分析,石门站 1951~2020 年的年降水量呈下降趋势,得出 $S = 1033 - 1312 = -279$, 且 $S < 0, n$

$= 70, \text{Var}(S) = n \times (n-1) \times (2n+5) \div 18 = 38908.3$ 。由于 $S < 0$ 并且 $n > 10$, 所以 $Z = (S+1) / \text{sqrt}(n \times (n-1) \times (2n+5) \div 18) = -1.41$, 由于 $Z < -1.41 < 0$, 所以石门站年降水量呈下降趋势,并且通过了 90% 显著性检验。

又对近 60 年分析(1961~2020 年)年降水量呈整体下降趋势。其它时段年降水量均呈下降趋势(见表 1)。还对后 30 年和 20 年分析显示,1991~2020 年、2001~2020 年年降水量呈增加趋势。

4.2 年代际变化

从分析中可以看出该站年降水量年际变化大,见 1951 年~2020 年年水量分布图(见图 1)。多年平均降水量为 1366.0mm , 最大年降水量为 2194.4mm (1954 年), 最小年降水量为 834.9mm (2001 年), 最大是最小年降水量的 2.6 倍(见表 2), 多年平均变差系数 Cv 值为 0.23 。降水量不同年代也有较大变化,20 世纪 50~70 年代(代表年份 1951~1980 年)降水偏多,80 年代后(代表年份 1980~2010 年)降水偏少,出现前丰后枯特点。2011 年后降水明显偏多,有上升趋势。

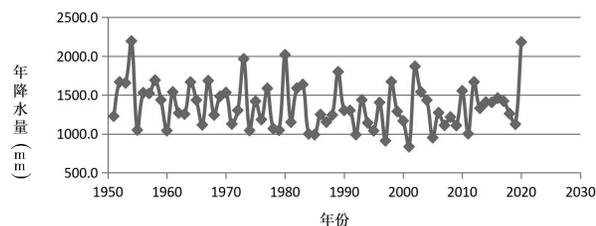


图 1 1951~2020 年年降水量分布图

表 2 年降水量级值统计表

| 实测年数 | 多年平均 降雨量 (mm) | Cv | 最大年 | | 最小年 | | 最大与 最小比值 |
|------|---------------------|------|-------------|------|-------------|------|-------------|
| | | | 降水量 (mm) | 年份 | 降水量 (mm) | 年份 | |
| 70 | 1366.0 | 0.23 | 2194.4 | 1954 | 834.9 | 2001 | 2.6 |

根据 70 年年降水量资料按每 10 年划分分析来看(见表 3),2000 年以前降水为下降趋势,2000 年后降水为上升趋势。降水量拐点为 2001 年,其当年降水量为 834.9mm 。

表3 年降水量分级划分统计表 单位:mm

| | | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1951~ 1960年 | 1961~ 1970年 | 1971~ 1980年 | 1981~ 1990年 | 1991~ 2000年 | 2001~ 2010年 | 2011~ 2020年 |
| 1501.5 | 1422.2 | 1376.1 | 1311.0 | 1235.4 | 1289.1 | 1426.5 |

4.3 年内分配

对该站的70年降水量资料进行统计分析,分析表明该站降水量年内分配很不均匀(见表4)。主要表现为汛期降水量相对集中,枯期相对偏少,1~6月呈阶梯增长趋势,7~12月呈逐月减少的趋势,从年内降水量分布图来看(见图2),春夏5~8月偏多,秋冬11~2月偏少的特点。多年平均降水

量为1366.0mm,多年平均最大月降水量为220.0mm(6月),多年平均最小月降水量为31.6mm(12月)。降水量主要集中在4~9月,占全年降水量的73.0%,其它月占全年降水量的27.0%。连续最大4个月降水量出现在5~8月,占汛期降水量的76.5%,占全年的降水量的55.9%,最大月(6月)降水量占全年降水量的16.1%。连续最小4个月出现在11~2月,占全年降水量的13.6%,最小月(12月)降水量占全年降水量的2.3%。

表4 多年降水量年内分布表

| 月 项 目 | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 年总数 |
|-------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|--------|
| 月平均 | 39.2 | 52.7 | 90.1 | 142.4 | 182.9 | 220.0 | 202.8 | 157.4 | 91.6 | 93.4 | 62.0 | 31.6 | 1366.0 |
| 百分比(%) | 2.9 | 3.9 | 6.6 | 10.4 | 13.4 | 16.1 | 14.8 | 11.5 | 6.7 | 6.8 | 4.5 | 2.3 | 100 |

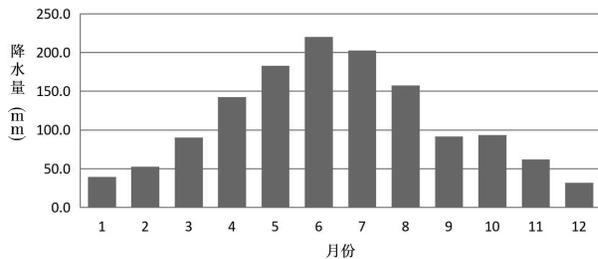


图2 年内降水量分布图

4.4 年降水量重现期分析

对石门站70年降水量数据采用P-III型频率曲线进行分析,变差系数比较小表明数据系列较集中, c_v 值为0.23, $c_s/c_v=4.0$, c_s 大于0表明降水

量大于均值(1366.0mm)比小于均值出现机会少,亦即均值所对应的频率小于50%。在70年资料中,年降水量超过2000mm年份有1954年、1980年、2020年,其中1954年排第一、2020年排第二、1980年排第三。在前60年资料中,年降水量超过2000mm年份有1954年、1980年,其中1954年排第一、1980年排第二。

在前60年数据分析系列中1954年发生了长江流域性大洪水,当年降水量超过了50年一遇并接近100年一遇,在70年资料分析显示,随着系列的增长,重现期不变的情况下,年降水量减少。不同重现期的年降水量见表(5)。

表5 不同重现期的年降水量

| 重现期(年) | 500 | 200 | 100 | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 备注 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| 年降雨量(mm) | 2720.0 | 2530.0 | 2380.0 | 2220.0 | 2000.0 | 1830.0 | 1630.0 | 1320.0 | 1951—2020年 |
| 年降雨量(mm) | 2610.0 | 2430.0 | 2290.0 | 2140.0 | 1940.0 | 1780.0 | 1600.0 | 1310.0 | 1951—2010年 |

4.5 年降水量滑动分析

根据石门站年降雨量5年滑动平均曲线见图3,自2013年起位于多年均值以上后至2019年回

到均值以下,且2020年相对于2019年上升幅度大,2021年存在向下滑动趋势。



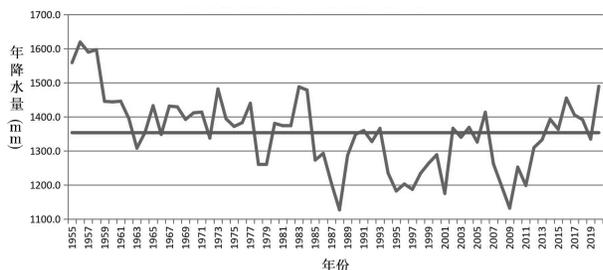


图3 石门站年降雨量5年滑动平均曲线

又根据石门站年降雨量10年滑动平均曲线(图4),自1990年起至2016年均在历年均值以上,2017年开始出现向上滑动态势,且2017年、2018年、2019年三年基本持平,2020年出现大幅上升,预计2021年10年滑动均值会持平或略向上滑动。

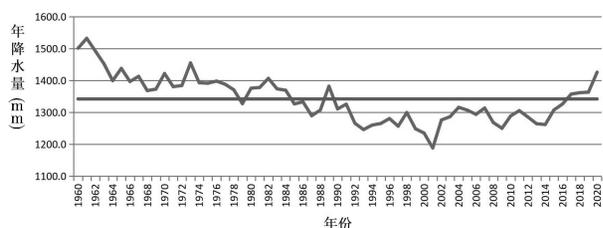


图4 石门站年降雨量10年滑动平均曲线

再根据石门站年降雨量20年滑动平均曲线(图5),自1993年起至2017年均位于历年均值以下,且2017年与多年均值相差并不大,2018年、2019年持续下降而2020年有所回升,预计2021年20年滑动均值会持平或略向上滑动。

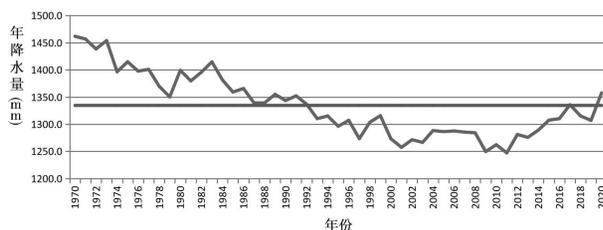


图5 石门站年降雨量20年滑动平均曲线

综上,根据滑动平均曲线分析,2021年石门站年降雨量较上年向下滑动趋势明显。

5 分析结论

经分析,该站明显表现为年内分布不均,年际变化较大,丰枯水年交替变化。在六个长短系列中,利用 Man-Kendall 非参数趋势分析方法,1981年~2010年降水量均呈增加趋势外,其它均为下降趋势,还分析系列后30年(1991~2020年)和20年(2001~2020年),其结果显示年降水量呈增加趋势。通过滑动平均曲线分析来看,2021年年降水量较上年呈下降趋势明显。从重现期分析来看:随着系列的增长,重现期不变的情况下,年降水量减少。在前60年数据分析系列中1954年发生了长江流域性大洪水,当年降水量超过了50年一遇并接近100年一遇,对70年数据分析显示年降水量没有达到50年一遇。

石门站是澧水流域的一个重要水文站,具有一定的代表性,在水资源开发利用规划设计工作中,采用系列的年降水量和年径流量分析成果时,应考虑该系列偏丰或偏枯的程度。

参 考 文 献

- [1]《湖南省水利志》第二分册
- [2]黄振平编著《水文学统计学》河海大学出版社
- [3]王燕 衣学军等胶东半岛烟台市域降水系列代表性分析,《水文》期刊2002年第4期
- [4]马蕴芬 江苏省若干代表站年降水量的多年变化和系列代表性分析,《水文》期刊2003年第3期
- [5]王勤宜 长江源区降水特征及变化趋势分析,《水文》期刊2004年第1期
- [6]邹连文 陈干琴等山东省年降水量系列代表性及多年变化的初步分析,《水文》期刊2005年第6期
- [7]李发东 宋献方等40年来栾城降水变化特征分析,《水文》期刊2006年第1期
- [8]近54年定西市降水趋势及突变分析,《水文》期刊2012年第3期



珠江流域汾市站径流变化趋势分析

李美丽 (郴州水文水资源勘测中心 郴州 423000)

【摘要】 根据珠江流域汾市站 1988~2018 年实测年径流资料系列,利用线性倾向回归分析、累积距平分析法、Spearman 秩次相关检验法和 Mann-Kendall 秩次相关检验法等 4 种方法分析了汾市站近 31 年径流的变化趋势,结果表明,汾市站径流系列在整个研究期间呈现不明显上升趋势,平均线性递增率为 $0.0124\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$ 。

【关键词】 珠江 汾市站 径流变化 趋势分析

河流是大地的动脉,也是人类文明的发源地,它不仅哺育了沿岸的人们,也灌溉了大片土地良田。河川径流是水资源最主要的补给来源,它是支撑经济、社会、生态环境和人类社会可持续发展的基础。21 世纪以来,我国各方面都进入高速发展阶段,对水资源量的需求也日益增长,但是在发展的同时产生了一系列的生态环境破坏活动,给水资源的数量和质量都带来了极大的影响,导致了河川径流表现出明显的变化。自 2007 年,大规模蓝藻在太湖爆发后,江苏省无锡市率先出台河长制,经过三个阶段的长时间演变,通过开展水环境治理、水生态修复、水污染防治等措施,河湖健康状况逐步恢复,又重新具备了可持续为人类社会提供服务的能力。因此研究流域内径流变化趋势和特征有着重要的现实意义,本文的研究是为了分析流域水资源的演变趋势,同时期望能为水资源的分配提供可靠的依据。

1 区域基本概况

郴州市归属长江和珠江两大流域,三大水系,即赣江、湘江和北江。属长江流域面积为 15632km^2 ,属珠江流域面积为 3685km^2 。境内河流发育,成放射状密布。北江水系主要河流是武江,境内面积 3367km^2 。武江,又名武水(武水河),是临武人民的母亲河,也是珠江水系北江干流上源之一,古称泷水、湊水、武溪。发源地在临武县三峰岭,干流流经湖南省临武县、宜章县和广东省的

乐昌、乳源、曲江、韶关市区,于韶关市汇入北江,为珠江水系北江干流。干流长 260km ,主流两岸支流繁多,集水面积 7079km^2 ,集水面积 100km^2 以上支流有 13 条,其中在 1000km^2 以上的只有南花溪支流。武江属山区性河流,河床为岩石、卵石。两岸高山耸立,多峡谷急流,河床弯曲大,坡降大,是兴建大型水坝的理想地段,也是北江水电资源开发条件较好的河段。

汾市站位于武江上游,于 1959 年 1 月 1 日设立,属国家基本二类精度站,珠江流域,北江水系,为珠江流域上游在本省范围的代表站。集水面积 880km^2 ,属山溪性河流测站,洪水暴涨暴落。本文主要是研究汾市站 1988~2018 年间河流水资源量的趋势变化。

2 研究数据及分析方法

2.1 研究数据

使用的研究数据为珠江流域国家基本二类精度站汾市站 1988~2018 年实测年径流资料。

2.2 分析方法

使用的分析方法有线性倾向估计法、累积距平、Spearman 秩次相关检验法和 M-K 秩次相关检验。

3 汾市站径流趋势分析

3.1 线性倾向估计法

汾市站实测年平均流量的趋势变化如图 1 所



示,由已知数据计算得出汾市站多年平均流量为 $24.8\text{m}^3/\text{s}$ 。近30年的实测年平均流量呈现微弱增加趋势,平均线性递增率为 $0.0124\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ 。选择置信水平 $\alpha=0.05$,当 $n=31$,查相关系数检验表的临界值 $r_\alpha=0.355$ 。结果表明, $r < r_\alpha$,所以序列上升趋势不显著,即此流域水资源越来越多。

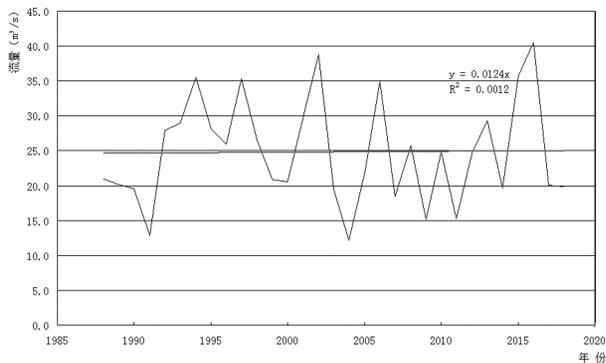


图1 汾市站1988~2018年实测年平均流量变化图

3.2 累积距平

累积距平,顾名思义即要素值与多年平均值差值的累加,当计算值为正数时为正距平。累积距平曲线是在趋势分析中使用比较多的可以由曲线直观判断变化趋势的方法。序列长时间段显著的持续性的变化和演变趋势,是从曲线上下起伏状况来判断的,甚至还可以诊断发生突变的大致时间。当曲线呈上升趋势时,表明距平为正,径流是在增加;当曲线呈下降趋势时,表明距平为负,径流是在减少;当距平累积值不变时,表明距平为零。斜率越大表明丰(枯)期的程度越剧烈,若出现长时期的连续上升,则表明丰水期的持续时间越长,反之亦然。图2为汾市站径流累积距平曲线图。

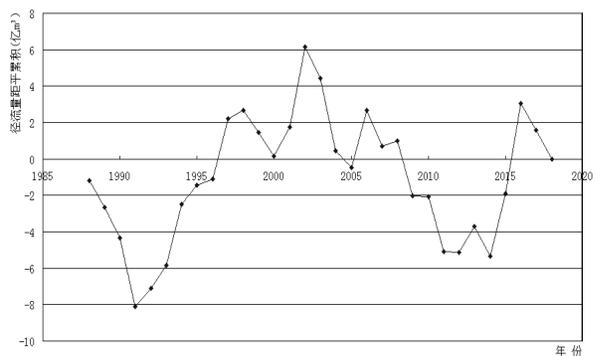


图2 汾市站年径流量累积距平曲线图

如图所示,距平累积值出现十分明显的上下

起伏交替现象,但丰枯交替周期不同。1988~1991年、2003~2014年属于枯水期。1992~2002年属于丰水期。经过计算,最终累积值为 $0.0014\text{亿}\text{m}^3$,占多年平均值(7.8346)的 0.02% ,水资源量在整体上呈现上升趋势。

3.3 Spearman 秩次相关检验法

显著性计算的公式如下:

$$T = r_s \left(\frac{N-4}{1-\gamma_s^2} \right)^{1/2} \quad \gamma_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{N^3 - N}$$

式中:

γ_s ——年径流序列的相关系数;

t ——年径流时间序列的序号,

$d_i = R_i - t, R_i$ ——年径流时间序列的正序(及每年对应的年径流从大到小)序号。

将年径流序列值带入公式进行统计计算,最终得 $\gamma_s = 0.018, T = 0.094$ 。

用这种方法分析汾市站径流量的年际趋势变化,实质上是在分析径流序列与时间的相关性,计算出径流序列与时间序列的秩次。选择置信水平 $\alpha=0.05$,查出 $t_{\alpha/2} = 0.355$ 。计算出汾市站年均径流序列的秩次相关值 $|T| = 0.094 < t_{\alpha/2} = 0.355$,即接受原假设,该序列上升趋势不显著。

3.4 M-K 秩次相关检验法

在水文资料分析研究中, Mann-Kendall 法是一种非参数秩次相关统计检验方法,已经广泛应用于检验水文序列的趋势变化研究。M-K 法假设水文样本序列为平衡的时间序列,服从正态分布,各样本之间是相对独立的。设某一元素 χ_i 大于前面元素 $\chi_{i-1}, \chi_{i-2}, \dots, \chi_2, \chi_1$ 的累积数构成一序列 m_i, m_i 的样本累积数计为:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (k=2,3,\dots,n)$$

而新建序列 $d_k (k=2,3,\dots,n)$ 的均值和方差用下列公式计算:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4}, \quad V(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$$

$$U(d_k) = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{V(d_k)}}$$

对给定的1988~2018年实测年径流资料系列即(6.630, 6.364, 6.174, 4.069, ..., 6.344, 6.269),通过计算,点绘 $k \sim U(d_k)$ 曲线,选定 $\alpha=0.05$,查得 $U_{\alpha/2} = \pm 1.96$ 。 $U(d_k)$ 的值大于0,则表明序列呈上



升趋势,小于0则表明呈下降趋势。

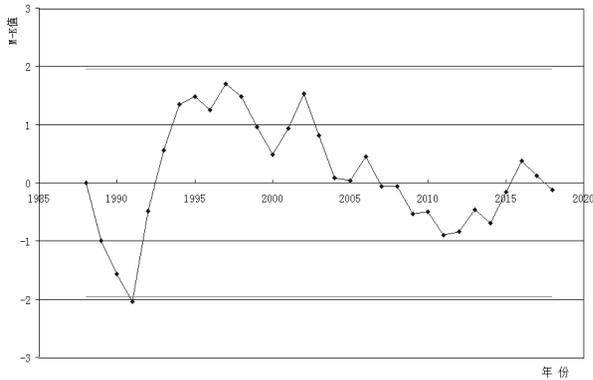


图3 Mann-Kendall 秩次相关检验法

由图3可以看出曲线在0直线处上下波动,有超出 ± 1.96 直线的数据点,说明年径流量发生过明显的趋势变化。但从图中可以看出, $U(d_k)$ 曲线在0直线以上的范围更大一些,表明年径流量基本呈上升趋势。

4 结语

基于珠江流域汾市站1988~2018年实测年径流资料系列,采用的4种统计方法分析结果基本一致,结果表明,汾市站径流系列在整个研究期间呈现不明显上升趋势,平均线性递增率为 $0.0124\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{a})$ 。在M-K法分析的图表中明确显示出了有超过临界线的数值,这说明该系列在整个研究区间范围内存在径流突变的现象。

参 考 文 献

- [1] 陈吉琴,宋萌勃. 嘉陵江流域北碚站径流变化趋势分析[J]. 黄河水利职业技术学院学报,2014(4): 18-20.
- [2] 徐金英,胡明庭. 基于Matlab的水库年径流序列变化周期及趋势性分析[J]. 华电技术,2019(2):22-25.
- [3] 宋萌勃,黄锦鑫. 水文时间序列趋势分析方法初探[J]. 长江工程职业技术学院学报,2007(4):35-37
- [4] 王现领,王学海,贡欣. Kendall秩次相关检验法在降雨趋势分析中的应用[J]. 天津水利,2009(1)

(上接第18页)

表6 桃源站“2020.7”七日
洪水总量统计表 (单位:亿 m^3)

| 日期 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 7.10 | 7.11 | 7.12 | 合计 | 最大一日 | 最大三日 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 洪量 | 5.49 | 4.81 | 7.38 | 13.83 | 12.18 | 10.03 | 5.70 | 59.42 | 13.83 | 36.04 |

表7 桃源站“2010.7”七日
洪水总量统计表 (单位:亿 m^3)

| 日期 | 7.8 | 7.9 | 7.10 | 7.11 | 7.12 | 7.13 | 7.14 | 合计 | 最大一日 | 最大三日 |
|----|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 洪量 | 2.97 | 3.41 | 4.84 | 6.45 | 13.22 | 10.97 | 3.59 | 45.46 | 13.22 | 30.64 |

表8 桃源站“2020.7”洪水总量
与典型年比较表 (单位:亿 m^3)

| 序号 | 典型年 | 最大一日 | 最大三日 | 最大七日 |
|----|--------|-------|-------|--------|
| 1 | 1996.7 | 23.70 | 70.00 | 146.70 |
| 2 | 1999.6 | 22.29 | 61.26 | 116.47 |
| 3 | 1995.7 | 21.30 | 58.50 | 99.80 |

续表

| 序号 | 典型年 | 最大一日 | 最大三日 | 最大七日 |
|----|--------|-------|-------|-------|
| 4 | 1969.7 | 22.70 | 49.30 | 80.70 |
| 5 | 2014.7 | 21.77 | 53.44 | 84.41 |
| 6 | 2020.7 | 13.83 | 36.04 | 59.42 |
| 7 | 2010.7 | 13.22 | 30.64 | 45.46 |

4 结语

本次洪水过程主要由于流域中游西水、武水暴雨,加上库区暴雨形成。凤滩水库、五强溪水库在本次洪水过程中均起到重要的调洪作用,有效降低了下游的洪峰水位,五强溪水库的调度还影响了下游河道洪水的传播时间。因此,在暴雨洪水期间,防汛部门充分利用水库的蓄洪错峰等调度作用,可减轻下游的防洪压力、有力的保障群众的生命财产安全。



捞刀河流域降水、径流

时空变化规律分析

吴丹 (长沙水文水资源勘测中心 浏阳市水文局 410300)

【摘要】 本文使用了线性回归、滑动平均、累积距平、滑动 t 联合检验等方法研究了捞刀河流域降水、径流时空分布和演变规律,结果表明捞刀河流域降水近 60a 呈上升趋势,近 40a 呈下降趋势,径流近 40a 呈下降趋势;流域多年平均降水量总体呈现从东向西逐渐减少的分布格局;流域降水量、径流在 2002 年前后、1990 年前后发生均值突变,突变显著。

【关键词】 捞刀河流域 降雨 径流 累积距平法 滑动 t 检验 IDW 插值

长沙东部经济发达,浏阳市和长沙县的县域经济与县域基本竞争力排在我国前列。捞刀河下游高新技术开发区、工业园区众多,供水需求很大。随着人类活动在该流域愈来愈剧烈,水环境、水生态问题频发,严重制约了捞刀河流域的可持续发展。伴随着全球气候变暖,极端降水事件及其所导致的洪涝、滑坡、泥石流等灾害的频次、强度总体呈增加趋势,对区域经济社会发展、人民生命财产和自然生态系统的安全造成了极大威胁。近年来,浏阳河、捞刀河流域极端天气常有发生,2017 年 7 月的强降水 10 天累积雨量 420.5mm,超历史极值,2017 年湘江下游、浏阳河出现超历史洪水,威胁当地的生命财产安全,对生态环境、粮食生产和经济发展造成了严重影响。

目前,对捞刀河流域的降水、径流演变规律研究不多,径流资料缺乏。因此,研究气候变化环境和人类活动下降水、径流等要素的时空演变规律十分必要,对流域防洪抗旱和水资源合理利用、生态保护等具有重要的现实意义。

本文使用了线性回归、滑动平均、累积距平、滑动 t 联合检验等方法研究了捞刀河流域降水、径流时空分布和演变规律,降水、径流时间序列的趋势、变异分析以及周期变化对捞刀河流域的农业、工业生产布局规划具有重要现实意义,研究结果

将为流域气候分析和未来天气变化提供参考。

1 流域概况

捞刀河在东经 $112^{\circ} 58' \sim 113^{\circ} 41'$, 北纬 $28^{\circ} 14' \sim 25^{\circ} 34'$ 之间,又名北川,是湘江右岸一级支流。发源于石柱峰相坑,向西南流经周洛、关山、花桥至社港。又经狮子滩、龙伏、焦家桥、许家河、澎溪渡至北盛,为中游之始。又经芦诸湾、邹家滩、蒋家河、伍家渡至永安,为下游之始。再至界牌桥,入长沙市境,至长沙开福区入湘江。总的地势北面为汨罗江水系,东面为浏阳河水系。干流全长 141km,流域面积 2543km^2 ,平均坡降 0.9‰,多年平均水量 9.8 亿 m^3 ,水能蕴藏量 0.83 万 kw,占全市的 4%。捞刀河流域地势西北面低、东南面高,区内以连云山-福寿山-甄盖山为地表分水岭,地形以山地丘陵为主。流域以亚热带湿润季风气候为主,气候温暖、降水充沛、雨热同期、四季分明。捞刀河流域降雨具有明显的时间分配特点:年平均最大月降水一般出现在 5、6 月,占全年总降水量的 13% ~ 20%;年平均最小月降水量一般出现在 11 月,仅占全年总降水量的 1.6% ~ 4.0%。捞刀河流域地形、水系及站点情况见图 1 所示。



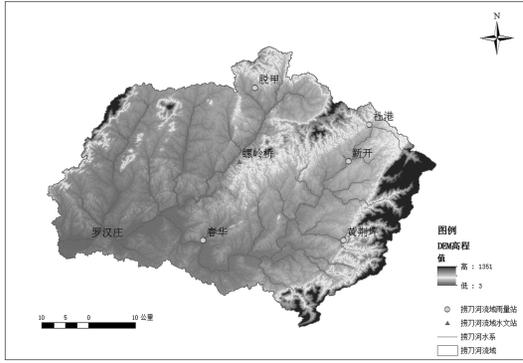


图1 捞刀河流域地形、水系及站点情况

2 资料来源与研究方法

2.1 资料来源

本次研究采用的基础数据为捞刀河流域内7个雨量站1961~2020年实测逐日降水数据,1个水文站1982~2020年的实测逐日径流数据,来源于湖南省长沙水文水资源勘测中心。基础数据来源清单见表1。

表1 基础数据来源清单

| 站名 | 站类 | 资料年份 | 备注 |
|-----|----|-----------|--------------|
| 罗汉庄 | 水文 | 1972~2020 | |
| 社港 | 雨量 | 1963~2020 | |
| 新开 | 雨量 | 1961~2020 | 1983~1998 停测 |
| 黄荆坪 | 雨量 | 1964~2020 | |
| 春华 | 雨量 | 1999~2020 | |
| 螺岭桥 | 水文 | 1961~2020 | 1982~2020 流量 |
| 脱甲 | 雨量 | 1972~2020 | |

基于 ArcGIS10.2 平台利用反距离加权法 IDW 插值成捞刀河流域的面降雨量,并将数据处理为年(1~12月)、汛期(4~9月)和非汛期(10~3月)3个时段。IDW 面雨量插值结果及径流数据见表2。

表2 IDW 面雨量插值结果及径流数据

| 年份 | IDW 面雨量插值结果(mm) | | | 螺岭桥站径流(m ³ /s) | | | |
|------|-----------------|--------|--------|---------------------------|---|----|-----|
| | 雨量站个数 | 年 | 汛期 | 非汛期 | 年 | 汛期 | 非汛期 |
| 1961 | 2 | 1168.6 | 776.2 | 596.7 | | | |
| 1962 | 3 | 1604.5 | 1104.9 | 499.6 | | | |

| | | | | | | | |
|------|---|--------|--------|-------|------|------|------|
| 1963 | 3 | 1016.2 | 601.5 | 367.4 | | | |
| 1964 | 4 | 1219.0 | 826.9 | 392.1 | | | |
| 1965 | 4 | 1557.4 | 1038.4 | 519.0 | | | |
| 1966 | 4 | 1483.2 | 923.5 | 559.7 | | | |
| 1967 | 4 | 1723.1 | 1053.4 | 591.0 | | | |
| 1968 | 4 | 1312.2 | 819.6 | 492.6 | | | |
| 1969 | 4 | 1982.8 | 1496.8 | 486.0 | | | |
| 1970 | 4 | 1655.2 | 1077.4 | 577.8 | | | |
| 1971 | 4 | 1289.7 | 930.7 | 359.1 | | | |
| 1972 | 6 | 1311.8 | 676.1 | 635.7 | | | |
| 1973 | 6 | 1801.6 | 1347.4 | 454.2 | | | |
| 1974 | 6 | 1351.1 | 932.1 | 419.0 | | | |
| 1975 | 6 | 1465.3 | 1052.7 | 412.3 | | | |
| 1976 | 6 | 1384.3 | 947.6 | 436.7 | | | |
| 1977 | 6 | 1585.8 | 1156.6 | 429.3 | | | |
| 1978 | 6 | 1203.1 | 764.2 | 438.9 | | | |
| 1979 | 6 | 1388.5 | 1063.4 | 325.1 | | | |
| 1980 | 6 | 1474.5 | 929.4 | 545.1 | | | |
| 1981 | 5 | 1082.2 | 624.3 | 457.9 | | | |
| 1982 | 6 | 1567.5 | 916.7 | 650.8 | 6.72 | 7.94 | 5.50 |
| 1983 | 5 | 1458.2 | 1067.5 | 390.7 | 7.82 | 11.8 | 3.80 |
| 1984 | 5 | 1491.3 | 1001.3 | 490.0 | 6.12 | 9.09 | 3.16 |
| 1985 | 5 | 1236.3 | 673.7 | 562.7 | 5.53 | 5.78 | 5.28 |
| 1986 | 5 | 1335.2 | 876.2 | 459.1 | 5.49 | 7.99 | 2.98 |
| 1987 | 5 | 1329.6 | 820.8 | 508.9 | 4.56 | 5.85 | 3.26 |
| 1988 | 5 | 1434.5 | 1028.7 | 405.8 | 5.83 | 8.76 | 2.91 |
| 1989 | 5 | 1634.9 | 1069.8 | 565.1 | 7.70 | 10.7 | 4.68 |
| 1990 | 5 | 1527.8 | 860.6 | 667.1 | 6.06 | 7.07 | 5.03 |
| 1991 | 5 | 1429.5 | 751.8 | 677.7 | 7.75 | 9.05 | 6.45 |
| 1992 | 5 | 1624.5 | 1000.6 | 623.9 | 9.11 | 12.6 | 5.66 |
| 1993 | 5 | 1987.6 | 1377.5 | 610.1 | 缺 | 缺 | 缺 |
| 1994 | 5 | 1751.1 | 1232.8 | 518.3 | 9.48 | 13.0 | 5.96 |
| 1995 | 5 | 1914.2 | 1389.7 | 524.5 | 14.9 | 24.3 | 5.46 |
| 1996 | 5 | 1450.9 | 977.8 | 473.1 | 7.53 | 10.7 | 4.34 |
| 1997 | 5 | 1815.0 | 1131.3 | 683.7 | 8.27 | 11.0 | 5.48 |
| 1998 | 5 | 2349.7 | 1682.4 | 667.3 | 16.9 | 23.5 | 10.2 |
| 1999 | 7 | 1881.4 | 1564.0 | 317.4 | 13.0 | 21.0 | 4.93 |
| 2000 | 7 | 1505.0 | 939.5 | 565.5 | 7.96 | 9.08 | 6.85 |
| 2001 | 7 | 1423.8 | 835.4 | 588.3 | 7.39 | 9.02 | 5.78 |
| 2002 | 7 | 1878.6 | 1272.9 | 605.6 | 11.2 | 16.3 | 5.96 |
| 2003 | 7 | 1148.3 | 751.0 | 397.7 | 6.04 | 7.41 | 4.67 |
| 2004 | 7 | 1462.5 | 967.4 | 495.1 | 3.74 | 5.46 | 2.01 |
| 2005 | 7 | 1663.9 | 934.9 | 729.1 | 4.91 | 6.19 | 3.63 |
| 2006 | 7 | 1447.7 | 982.5 | 465.1 | 6.62 | 8.52 | 4.71 |
| 2007 | 7 | 980.9 | 615.0 | 365.9 | 4.48 | 4.77 | 4.18 |
| 2008 | 7 | 1301.6 | 720.2 | 581.4 | 4.65 | 4.66 | 4.64 |
| 2009 | 7 | 1241.8 | 783.6 | 458.1 | 4.62 | 6.99 | 2.23 |
| 2010 | 7 | 1626.5 | 1108.3 | 518.2 | 6.15 | 8.58 | 3.73 |
| 2011 | 7 | 1145.7 | 832.6 | 313.1 | 6.19 | 8.52 | 3.84 |
| 2012 | 7 | 1998.0 | 1234.0 | 764.0 | 8.24 | 10.9 | 5.57 |
| 2013 | 7 | 1265.9 | 834.3 | 431.6 | 5.53 | 7.53 | 3.53 |
| 2014 | 7 | 1614.4 | 1088.9 | 525.5 | 7.14 | 11.0 | 3.27 |
| 2015 | 7 | 1629.3 | 1029.2 | 600.1 | 7.46 | 10.9 | 3.98 |
| 2016 | 7 | 1799.7 | 1311.5 | 488.1 | 7.52 | 11.4 | 3.61 |
| 2017 | 7 | 1687.7 | 1164.4 | 523.4 | 7.33 | 10.5 | 4.13 |
| 2018 | 7 | 1321.0 | 764.0 | 557.0 | 2.98 | 3.29 | 2.67 |
| 2019 | 7 | 1298.1 | 774.1 | 524.0 | 5.98 | 7.60 | 4.34 |
| 2020 | 7 | 1885.7 | 1218.3 | 667.4 | 6.96 | 10.0 | 3.90 |

2.2 研究方法

运用 Excel、matlab 和 ArcGIS 等软件分析处理数据,选用线性回归法、滑动平均法来分析降水时间序列的趋势。利用累积距平法联合滑动 t 检验来确定突变。

3 结果与分析

3.1 时间变化趋势

用线性回归和 5a 滑动平均法分析得到的捞刀河流域年降水、汛期降水和非汛期降水,支流金井河年平均流量、汛期平均流量和非汛期平均流量的时间序列趋势变化如图 2 所示。分析可知,近 60a 来捞刀河流域年降水量、汛期降水量、非汛

期降水量均呈上升趋势,上升率分别为 26.8mm/10a、13.0mm/10a、11.8mm/10a,年降水的时间相关系数为 0.029、0.009、0.039。近 40a 来(1982 年以来)捞刀河流域年降水量、汛期降水量、非汛期降水量均呈下降趋势,支流金井河年平均径流、汛期径流、非汛期径流也呈下降趋势,下降率分别为 $0.38\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/10\text{a}$ 、 $0.48\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/10\text{a}$ 、 $0.28\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/10\text{a}$,年径流的时间相关系数为 0.026、0.016、0.049。总体来看,汛期的降水量对流域年降水量有较大影响,降水、径流相关性较好。孙杰、许杨等^[4]从华中区域降水量的年代际变化中发现,20 世纪 60、70 年代降水偏少,80 年代以后降水增多,90 年代降水最多,与捞刀河流域的规律基本一致。

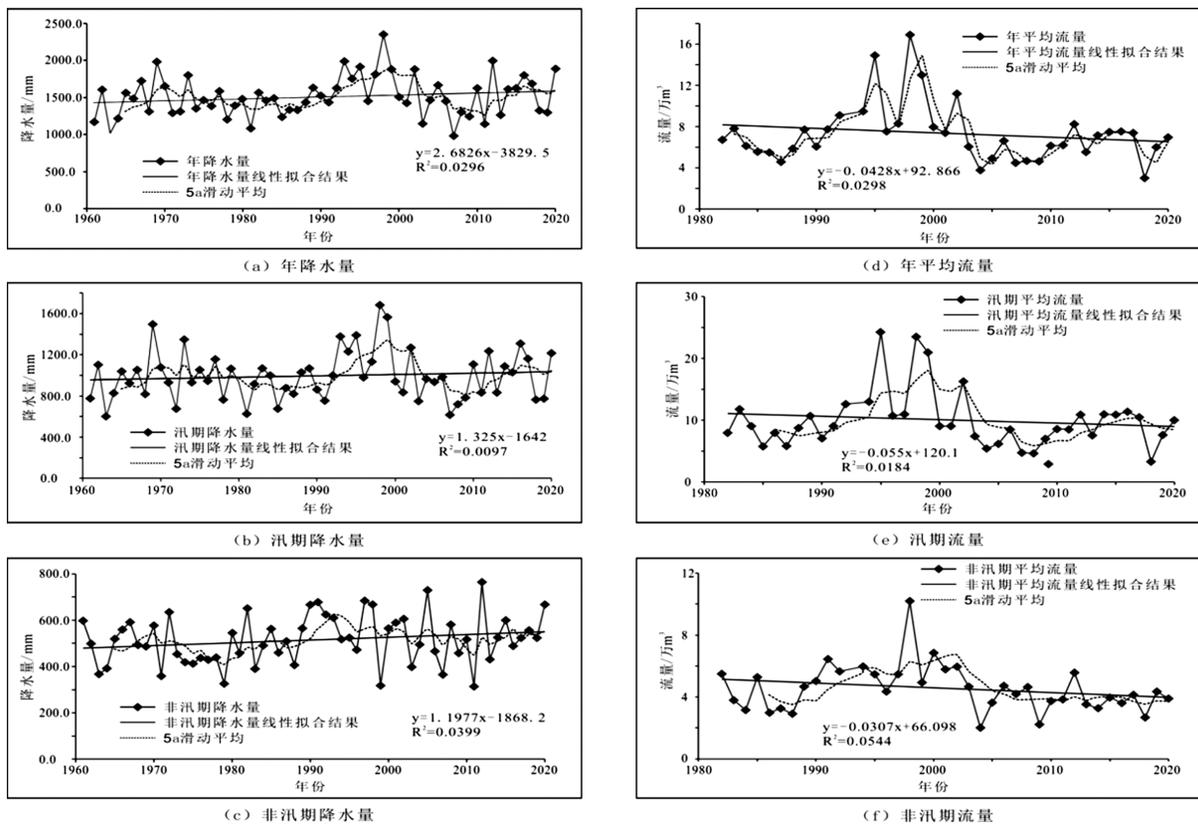


图 2 捞刀河流域降水、径流时间序列变化趋势

3.2 空间分布规律

通过将捞刀河流域内 7 个雨量站及其年降水、汛期降水、非汛期降水的多年平均值通过 ArcGIS 软件运用反距离加权法插值成图 3 可知,多年平均降水空间分布存在不均衡性,总体从东向西

减少、从上游向下游减少,年降水超过 1600mm 的站点主要集中在黄荆坪附近,降雨集中区域位于捞刀河流域上游。浏阳市盛行西风,上游站点处在东南面山地的迎风坡,所以雨量充沛。

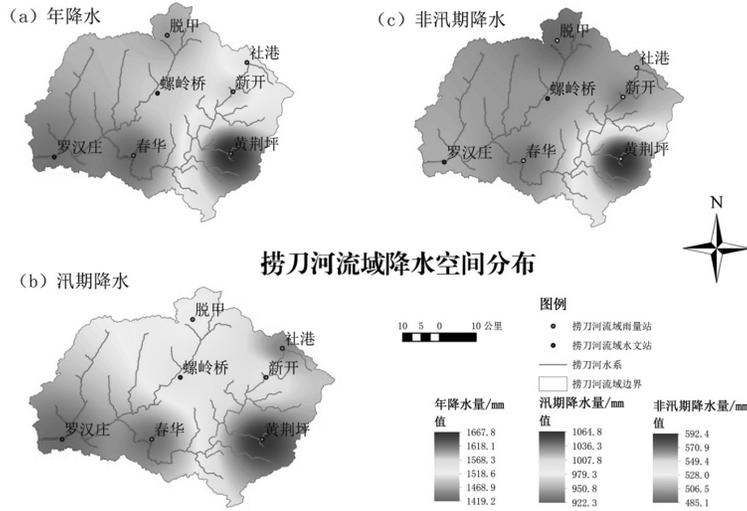


图3 捞刀河流域降水空间分布

3.3 突变分析

初步选取各时期降水、径流累积距平的极值为均值突变点,结合降水资料长度的限制,暂未剔除掉 1961、1962 年原始数据。

从图 4 可以看出,年降水量初步选取累积距平的最大年份 2002 年和最小年份 1988 年为均值突变点。同理,选取 2002 年和 1991 年为汛期降水量的均值突变点(见图 5)。但是,针对非汛期降水,从图 6 可以看出,累积距平最大的年份却为 1961 年,设站初期的非汛期雨量数据可能存在人工观测不全、后期统计不全的因素,所以,综合考虑年降水、汛期降水的一致规律,选取 2005 年和 1988 年为非汛期的均值突变点。

从图 7~9 可以看出,支流金井河年径流量初步选取累积距平的最大年份 2002 年和最小年份 1990 年为均值突变点。同理,选取 2002 年和 1991 年为汛期径流量的均值突变点,选取 2003 年和 1988 年为非汛期径流量的均值突变点。

对累积距平曲线法初步确定的均值突变点,运用滑动 t 检验法作精确识别。由表 3 可知,捞刀河流域降水量、径流在 2002 年前后、1990 年前后发生均值突变。其中非汛期降水在 1988 年、汛期径流在 1991 年突变显著,其余年份突变不显著。

表 3 捞刀河流域降水、径流分时段滑动 t 检验

| 统计项目 | 突变年份 | 统计量 t 值 | 临界 $t_{\alpha/2}$ | 是否显著 |
|------|------|---------|-------------------|------|
| 年降水量 | 2002 | 0.113 | 2.447 | |
| | 1988 | 0.116 | 2.447 | |

| 统计项目 | 突变年份 | 统计量 t 值 | 临界 $t_{\alpha/2}$ | 是否显著 |
|--------|------|---------|-------------------|------|
| 汛期降水量 | 2002 | 0.338 | 2.447 | |
| | 1991 | -2.192 | 2.447 | |
| 非汛期降水量 | 2005 | 0.772 | 2.447 | 显著 |
| | 1988 | -2.852 | 2.447 | |
| 年径流 | 2002 | 0.138 | 2.447 | |
| | 1990 | -1.566 | 2.447 | |
| 汛期径流 | 2002 | 0.450 | 2.447 | 显著 |
| | 1991 | -2.517 | 2.447 | |
| 非汛期径流 | 2003 | 1.205 | 2.447 | |
| | 1988 | 0.052 | 2.447 | |

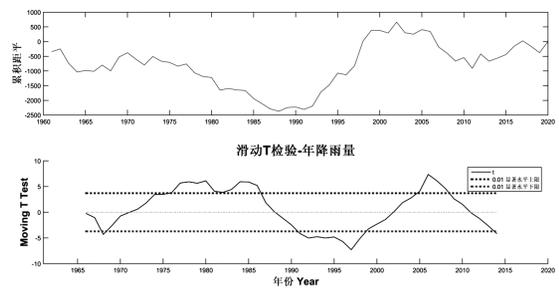


图 4 年降水累积距平及滑动 t 检验

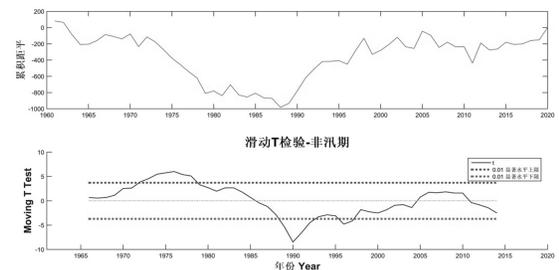


图 5 汛期降水累积距平及滑动 t 检验

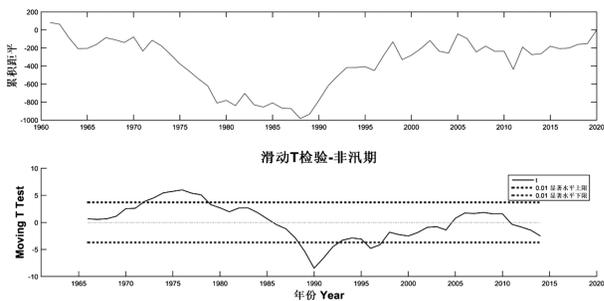


图6 非汛期降水累积距平及滑动t检验

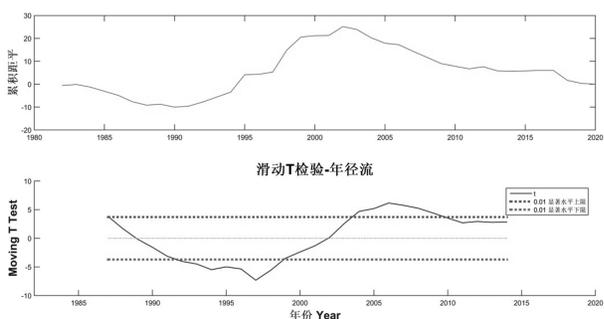


图7 年径流累积距平及滑动t检验

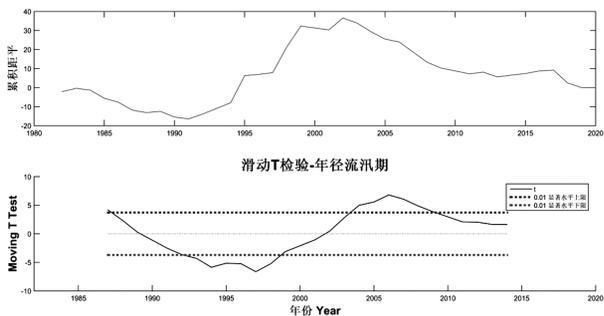


图8 汛期径流累积距平及滑动t检验

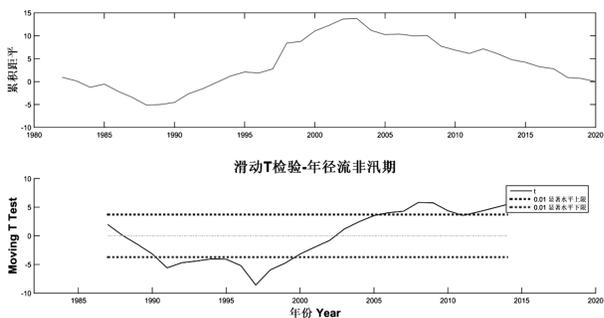


图9 非汛期径流累积距平及滑动t检验

4 结论

本文分析了降水、径流系列的年、汛期和非汛期变化趋势、突变及周期,总结了捞刀河流域降水、径流的时空演变规律,主要结论如下。

(1)通过线性回归和5a滑动平均法分析得到的捞刀河流域近60a降水呈上升趋势,近40a径流呈下降趋势,汛期降水量对整个流域的影响比年降水量的影响更大,降水、径流相关性较好。

(2)捞刀河流域多年平均降水的空间分布存在不均衡性,降水量总体呈现从东向西逐渐减少的分布格局。上游的黄荆坪是多年平均降水量最多的站点,超过1600mm/a,而下游罗汉庄站的多年平均降水量最少。

(3)通过累积距平联合滑动t联合检验发现捞刀河流域降水量、径流在2002年前后、1990年前后发生均值突变。在99%的置信区间下,采用T检验得到结果与线性回归的结果基本一致,且变化趋势在不同时期都不显著。

参 考 文 献

- [1] 于泽兴,胡国华,陈肖,顾庆福. 降水变化和人类活动对浏阳河流域径流的影响[J]. 长江科学院院报,2017,34(11):6-11.
- [2] 于泽兴,胡国华,陈肖,顾庆福. 浏阳河流域降水时空演变规律分析[J]. 人民长江,2017,48(08):28-31+48.
- [3] 杨家祯,杨云川,杨淇洪等. 1951-2015年广西极端降雨时空演变特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(05):84-93.
- [4] 孙杰,许杨,陈正洪,王凯. 华中地区近45年来降水变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2010,19(S1):45-51.
- [5] 长沙市气象局,长沙市水文局. 2017年特大洪涝灾害水文气象评估报告[R]. 2017
- [6] 浏阳市水利局. [R] 浏阳市水旱灾害防御手册, [R]. 2020
- [7] 吴建华,逯跃锋. ArcGIS软件与应用. [M]. 北京:电子工业出版社,2019.
- [8] 魏凤英,现代气候统计诊断与预测技术. [M]. 北京:气象出版社,2007.
- [9] 周牡丹,赖尔林. 株洲市近59a降水变化规律分析[J]. 海河水利,2021(01):57-60.
- [10] 王芳,王天慈,白雁翎,刘扬. 大通河降雨径流关系演变与水资源衰减初步研究[J/OL]. 中国水利水电科学研究院学报



浅析 LS1206B 型转子式流速仪的

故障排除和养护办法

黄瑶婷 (湖南省水文仪器设备检测中心 长沙 410007)

【摘要】 LS1206B 型转子式流速仪是一种精密新型流速仪,广泛适用于江河、湖泊渠道等测量水流速度。此仪器性能优良、造型轻巧、结构紧密、防水防沙性能好,高、低速使用范围广。本文通过分析 LS1206B 型流速仪的一些常见故障及解决方法,提出此类型流速仪的正确养护办法,供同行参考。

【关键词】 LS1206B 转子式流速仪 故障排除 养护办法

1 概述

转子式流速仪是目前水文测验中使用最广泛、历史最悠久的水体流速检测仪器。本文提到的 LS1206B 型转子式流速仪具有造型轻巧,结构紧密、携带方便,转动灵活、防水防沙性能好等特点,在水文测验工作中发挥着极为重要的作用。在实际水文测验工作中,如果能及时排除仪器故障,日常科学保养好流速仪,将使流速仪保持最优良的性能,提高水文测验精度,从而保障水文测验工作的可靠性。本人总结多年的流速仪检定维修实践经验,对 LS1206B 型转子式流速仪的故障排除方法和养护办法总结如下,供各位同行参考。

$v_0 \leq 0.05\text{m/s}$ (优等品)

(4) 讯号频率:每转 2 个讯号

(5) 检定精度:全线均方差 $m \leq \pm 1.5\%$

2.3 仪器工作原理

仪器工作原理与一般转子式流速仪相同,可与各种计数器等配套,其工作过程功能框图见图 1,电缆输出部分之后的虚线可接各种数据处理终端。

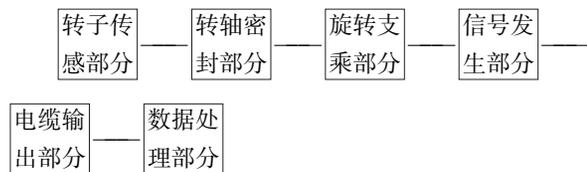


图 1 转子式流速仪工作过程功能框图

2 LS1206B 型转子式流速仪

2.1 用途及使用范围

LS1206B 型转子式流速仪适用于河道、管道、排灌渠道、水利调查和径流试验等。仪器测速范围:0.07~7m/s (普通品)

0.05~7m/s (优等品)

2.2 主要技术指标

(1) 转子回转直径: $\Phi 60\text{mm}$

(2) 转子水力螺距: $b = 120\text{mm}$

(3) 仪器起转速: $v_0 \leq 0.06\text{m/s}$ (普通品)

当水流作用到仪器的感应部件转子时,转子即产生旋转运动,水流越快,转子转动越快,转速与流速之间存在着一定的函数关系,即 $V = f(n)$ 。此关系是通过检定单位的计量检测而确定的。每架仪器检定的结果均附有检定公式,其形式如下:

$$V = bn + a$$

式中:

V ——流速(m/s);

n ——转子回转率,等于转子总转数“ N ”与相应的测速历时“ T ”之比,即 $n = N/T(1/S)$;

b——水力螺距(m)；
a——仪器常数(m/s)。

b 和 a 是表示仪器性能的系数,与转子的水力螺距和支承系统的摩擦阻力等的因素有关。

2.4 仪器结构

LS1206B 型转子式流速仪按工作原理可分为:感应部分,旋转支承部分,传讯机构,尾翼和测杆等五部分。其中,前三部分为主机,内部结构如图 2 所示。

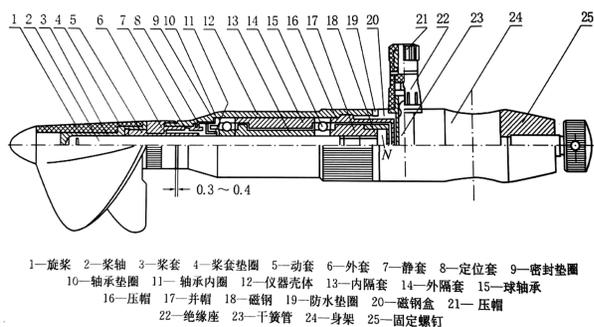


图 2 LS1206B 型转子式流速仪

3 LS1206B 型转子式流速仪常见故障及排除方法

3.1 信号故障

LS1206B 型转子式流速仪常见的信号故障有以下三种,无信号、时有时无、信号常通。

排除故障方法:检查流速仪信号时先检查音响器是否正常,再检查流速仪的传讯部件,用音响器连接流速仪,转动桨叶,正常的信号频率为桨叶旋转一圈 2 个信号,信号声音清脆、均匀为正常。

如无信号,先检查干簧管是否损坏,接着检查磁钢是否有足够大的剩磁,如这两个配件损坏则需进行更换。最后检查干簧管与磁钢是否正确配合,根据仪器壳体与支座配合螺纹为 M18×0.5 的关系,可知螺纹每旋转一圈,壳体旋出 0.5mm。据此,将支座旋出 4 圈,即使干簧管离开距离增大 2mm,这时如信号正常,则说明磁钢剩磁是符合要求的,仪器信号部分工作可靠。

信号时有时无,先查各处接触情况是否良好,接着查干簧管的弹片弹性情况,如弹性不足,需更换干簧管配件。

信号常通时则有可能是干簧管已被磁化,需进行更换。

3.2 转动故障

LS1206B 型转子式流速仪转动故障主要表现为仪器不旋转、转动不灵活、不均匀、灵敏度差。

故障原因:轴承锈蚀或受污染;仪器部件之间的间隙超差或组装不当;流速仪有进沙进水或仪器油不符合标准。

排除故障方法:轴承(D6025)锈蚀或受污染,在不严重的情况下将轴承蘸上汽油在左手掌或平整的木板上来回滚擦,直至钢球恢复原有的光洁度,能转动灵活、缓慢停止,则表示已清洗干净。当更换球轴承,应先用千分表分别测量新、旧两套轴承内、外圈之间的高差,如高差相同,原有的内、外隔套可继续使用;如损坏严重的就需更换新轴承;

流速仪部件间隙超差或组装不当,会出现以下几种情况:a. 压帽未拧紧,使球轴承间间隙过大,应重新旋紧;b. 旋转部件中,桨套与轴座之间的间隙应为 0.3~0.4mm。此间隙过大或过小对仪器的灵敏度将产生直接影响,这时可用补偿垫圈来调整间隙;c. 油杯损坏或缺失,会导致旋轴传动部件与感应部件产生间隙,致使仪器在转动中产生骤停现象,更换新油杯即可解决此问题;d. 外隔套之间的间隙过小,在这种情况下装好轴承拧紧并帽,仪器会出现无法转动卡死现象,应更换合适的隔套或者将隔套在砂纸上打磨直至仪器转动灵活无卡死的现象即可;e. 防水垫圈组装错误,就会导致配件间间隙过大或无间隙,影响仪器的灵敏度,转动不灵活,应按正确的组装顺序进行组装。

当流速仪进沙进水时,应及时拆卸仪器,用 120 号汽油将油污、泥沙等异物清洗干净,并加注 8 号仪表油;不可使用非标准油,否则易使仪器系数产生变化。

4 LS1206B 型转子式流速仪的养护办法

(1) 仪器的保管要设专人负责,在长期保存时,应特别注意每隔一定时间(约 3~6 个月),就要取出仪器检查是否少油,再查看油质的情况,如少油则及时补充 8 号仪表油,防止精密的轴承生锈,导致仪器的转动不灵活。如仪器油变质则需用高纯度汽油(120 号汽油或 200 号汽油)清洗完后再注入 8 号仪表油。

(下转第 61 页)

激光粒度分析仪在安江水文站泥沙颗粒级配分析中的使用探讨

张 森 (怀化水文水资源勘测中心 怀化 418000)

【摘要】 本文通过安江水文站开展的欧美克 TopSizer 激光粒度仪比测分析工作,选取安江站颗粒分析断面有代表性的样品进行基础参数试验,分散试验,重复性、重现性、准确性试验,以及与传统方法的比测试验。通过基础参数试验,确定激光粒度仪各参数在安江站的适应范围;通过分散试验,确定样品的分散方法可以用超声波分散替代传统的反凝剂分散;通过对仪器的重复性、重现性及准确性试验,验证仪器的稳定性和平行性较好,精度较高。

【关键词】 激光粒度仪 泥沙颗粒级配

1 比测背景

欧美克 TopSizer 激光粒度仪是目前国内较为先进的室内粒度测试仪器之一,它测试的粒度范围广,广泛应用于工业冶金、粉末、化工、医药、建筑、水利工程等领域;测试速度快、效率高,对于大批量的测试分析犹能显现其高效性;仪器性能稳定,测试自动化程度高。2014年8月,湖南省水文水资源勘测中心为安江站配置了欧美克 TopSizer 激光粒度分析仪(以下简称激光粒度仪),其仪器附件是 SCF-108 型循环进样器,该仪器的粒径测试范围:0.02~2000 μm ,涵盖了悬移质泥沙颗粒分析的粒径计、吸管法等传统手工分析方法以及粒度范围较窄的其他仪器分析的粒径范围,可以使悬沙的颗粒分析用一种方法分析完成,而无需分段使用结合法分析。2014年10月,长沙八方科学仪器有限公司来安江站安装了激光粒度仪,并进行业务培训。按照湖南省水文勘测中心水质泥颗粒整编会议精神,安江水文站于3月上旬开展了本次比测分析工作,历时两个月,于5月份完成了该专项工作。

2 比测目的

水文事业随着国民经济的发展和科学技术的进步,准确性和时效性越来越强。为了提高工作效率和质量,减轻劳动强度,更好地满足社会需求,省水文勘测中心开展水文测验方式方法技术创新工作,引进激光粒度分析仪,使河流泥沙颗粒分析方法有一个飞跃。开展比测分析工作,通过比测资料的收集与分析,探讨激光粒度仪在不同河段、不同水沙条件下的泥沙颗粒分析的激光粒度仪的适应条件,参数适用范围,以及激光法与传统法颗粒级配成果之间的关系,为激光粒度仪的投产提供依据和基本资料。

3 测站概况

安江水文站位于湖南省洪江市硤州乡红村,东经 110°08',北纬 27°19',集雨面积 40305 km^2 。为沅江流域的江河治理,防汛抗旱,水资源开发利用以及水工程的兴建系统的收集水文资料。安江水文站始建于1951年1月,由湖南省人民政府农林厅水利局设为水位站。1955年后上迁 2300m,1959年1月改为水文站至今。1995年后隶属于湖南省水利厅水文水资源勘测中心。设站以来实测

最高洪水位 170.29m,发生在 1996 年 7 月 17 日。该站河道稍弯曲,河槽呈“U”型,河床主槽为沙卵石组成,两岸为沙壤土,河床稳定。在测验断面下游大约 30km 处建有铜湾电站大坝一座,正常蓄水位 152.50m(黄海高程),2007 年 12 月 8 日开始蓄水。

4 安江站泥沙基本规律

安江水文站为控制沅江中游干流洪江市河段在巫水汇入后水情基本站,每年 4~8 月为主汛期,水沙变化较大。断面河床为沙质河床,汛期冲淤变化较大,上游 2700m 处有安江大桥。该站历年单断沙关系稳定,单断沙系数处于 0.98~1.02 之间,实测最高水位 170.29m(1996.7.17),相应流量 27200m³/s。历年实测最大断面平均含沙量 14.1kg/m³(1996.7.17)。历年最大日平均输沙率 24100kg/s(1995.7.1)。历年最大年平均输沙率 50900kg/s。历年含沙量变幅为 14.1kg/m³。

5 样品来源与处理

5.1 样品来源

本次试验比测样品来源:沙样共计 16 点,系安江站测验河段淤泥配置样品,见表 1:

表 1 安江站比测样品数量

| 沙样类别 | 细沙 | 中沙 | 粗沙 | 合计 |
|-------|----|----|----|----|
| 数量(点) | 1 | 5 | 10 | 16 |

5.2 样品收集处理方法

5.2.1 样品收集(取样)方法

安江站采用横式采样器在断面垂线上按常规方法采取泥沙水样。所取样品沙重在 1g 以上,每个样品一分为二后的沙重能够满足激光法与传统法的最少分析沙重要求。

5.2.2 样品处理方法

(1)将所收集的悬沙样品过 1.00mm 的洗筛,去掉试样中的杂草浮物等非沙物质等杂质。对筛下部份的沙样用两分式分样器进行分样,每点沙样分为 2 等份(分样的体积差小于 10%)。

(2)将所收集的淤泥样品取适量过 1.00mm

的洗筛,去掉试样中的杂草浮物等非沙物质等杂质,用不同粒径级的试验筛过筛进行人工配置样品,样品配置好后一分为二(分样的体积差小于 10%)。

6 常用传统法

怀化水文中心常用的传统分析方法为粒径法,这种方法分析的粒径为沉降粒径,其原理是对于同种样品的颗粒,如果他们的大小不同,则他们在水中沉降的速度也不同,因此,通过测量颗粒在静水中的沉降速度,将其与沉降速度相等且比重相同的球体直径当作泥沙的粒径,并称为沉降粒径。在级配组成上是用粒径与沙重百分数来反映。

安排有经验的分析人员,按《河流泥沙颗粒分析规程》和相关技术规定要求,采用常规的分析方法进行泥沙颗粒级配分析,并进行资料分析、计算和整理。

7 激光粒度仪试验

7.1 基础参数试验

取一定数量的悬沙样品含有粗、中、细不同颗粒级,参照《激光粒度仪技术指南(试行)》和省中心培训学习教材,采用不同参数(泵速、超声强度、遮光度、颗粒吸收率、分散剂折射率等)进行试验,找出这些参数的适用范围,作为不同沙型条件下的技术参数,用于与传统方法转换的比测分析。

首先测试泵速的适用范围。泵的作用是保持进样器里的悬浮颗粒均匀分散,然后将颗粒输送到流动样品池内测量。泵速过小不能使较粗颗粒均匀分散和流动,太大容易产生过多气泡和细化泥沙颗粒,两种情况都会对测量结果产生影响。分别用粗、中、细三种不同颗粒级的样品,分别从 1400~2500 转/分范围按每次 100 的级差进行测试,测得适合粗沙的泵速范围:1700~2200 转/分,中沙的泵速范围:1700~2200 转/分,细沙的泵速范围:1400~1900 转/分,确定泵速综合范围:1700~1900 转/分,一般采用 1800 转/分。测试泵速范围时,其他参数按仪器出厂时的初始数据不变。



遮光度的测定。遮光度是反映测量时每次激光束中有多少样品的指标,其大小与颗粒多少成正比且与颗粒的组成有关。实验结果表明,遮光度如果太高可能发生多重衍散,太低会显示信号不足,并且影响其测量精度。当泵速范围确定后,测定第二个参数遮光度时,泵速设定的数值为1800转/分,其余参数不变,用上面同样的方法,改变遮光度进行颗粒级配的测试。测得粗沙的遮光度范围:8~20,中沙的遮光度范围:8~20,细沙的遮光度范围:5~20,确定综合遮光度范围为8~20。

分散时间2分钟、水的折射率1.33、颗粒吸收率0.1、颗粒折射率2.6均按《激光粒度分布仪长江泥沙颗粒分析操作技术指南》(试行)执行。

超声强度测试。固定泵速1800转/分、遮光度8~20、分散时间2分钟、水的折射率1.33、颗粒吸收率0.1、颗粒折射率2.6,改变不同的超声强度测试样品。测得粗沙的超声强度范围:10~11,中沙的超声强度范围:10~13,细沙的超声强度范围:11~14,综合超声强度为11。

通过以上基础参数的测试,确定各参数适用范围见表2。

表2 基础参数设置参考指标

| 参数名称 | 泵速 (转/分) | 遮光度 | 分散 时间 | 超声波 强度 | 水的折 射率 | 颗粒 吸收率 | 颗粒 折射率 |
|------|-------------|------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 参数设置 | 1800 | 8~20 | 2 | 11 | 1.33 | 0.1 | 2.6 |

7.2 分散试验

较细的泥沙颗粒具有较大的粘性,在水中受电化学的作用,容易形成絮状的团粒,俗称“絮凝”。在传统的分析方法中为了使絮凝的颗粒分散,分析前在样品中要加入反凝剂进行分散处理。激光粒度仪提供了超声波分散功能,由于在样品中加入反凝剂后,反凝剂容易附着在仪器的测试玻璃片上,使用多了影响测试精度,同时如果经常更换测试玻璃片,很不划算。试验人员随机取了若干个样品,用激光粒度仪对样品加入反凝剂和不加反凝剂进行了对比分析,误差较小,可以用超声波分散替代反凝剂处理。但要注意超声波的强度和分散时间,超声波强度大了,有可能分裂易碎的晶体颗粒,同时超声波分散停止后细小的颗粒团聚能力会比分散前更强,可能导致测试结果偏粗,因此用超声波分散后在样品测试过程中不要停止超

声波。

7.3 稳定(重复)性试验

重复性是指同一样品多次测试结果之间的偏差,它是仪器所必须具备的重要质量性能测试指标之一。为了检验激光粒度仪分析成果的稳定性,我们选取粗、中、细沙共3个样品,每个样品重复测定30次,取30次的平均值与单次结果进行比较,并分别计算级配系统误差和标准差,统计结果见表3。

表3 稳定(重复)性测试误差统计

| 沙型 | 名称 | 小于某粒径体积累积百分数(%) | | | | | | | |
|----|-----|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| | | 粒径组(um) | | | | | | | |
| | | 0.020 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 250 | 2000 |
| 粗沙 | 标准差 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.5 | 1.8 | 0.0 |
| 中沙 | 标准差 | 0.0 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.0 |
| 细沙 | 标准差 | 0.0 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |

通过对激光粒度仪的稳定性性能测试,一个样品重复多次分析的重复性较好,仪器的稳定性较高,如图1、图2、图3所示:

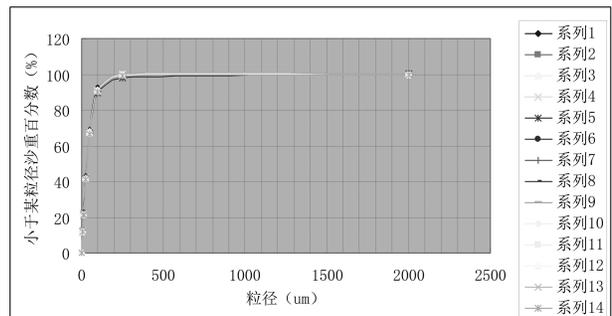


图1 粗沙重复性测试

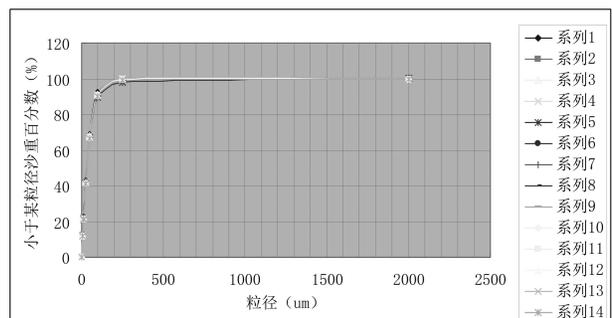


图2 中沙重复性测试

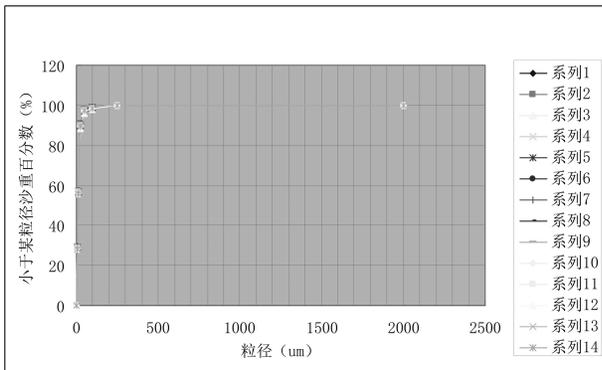


图3 细沙重复性测试

计算公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

式中:

σ ——标准差;

X ——每次测试的结果;

\bar{X} ——多次测量的平均值;

n ——测量次数(一般大于或等于 30)

7.4 平行性(重现性)试验

平行性试验包括准确性试验和重现性试验。准确性试验是指用激光粒度仪与传统分析方法的对比分析试验。重现性试验是将 1 个泥沙样品等分成 30 份,用激光粒度仪对每份沙样逐一测量,并与 30 份沙样的平均值进行对比。

(1) 同一样品分次分析(重现性)

将一个样品等份成 30 份,逐个用激光粒度仪进行分析,误差结果见附表 1。从分析结果看,同一样品等分 30 个样分次测试的平行性误差最大一个为 3.6%,满足规程小于 5%的要求,测试级配分布带状较窄,如图 4 所示:

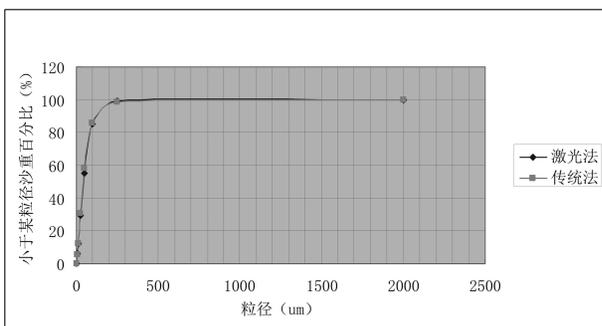


图4 激光法与传统法级配比较图

由此可见激光粒度仪多次测量结果的平行性(重现性)具有较高的精度。

从图 1、图 2、图 3、图 4 可以看出,仪器的重复性和平行性测试效果好,均满足《河流泥沙颗粒分析规程》的规定。仪器本身的粗沙重复性效果不及其他,是因为它不仅与仪器有关,还与取样方法、样品分散、分析介质、环境变化、操作方法等因素有关。相对而言,仪器本身的稳定性比平行性更重要。

(2) 准确性测试(标准样品检验)

准确性也是仪器性能的一个重要指标。由于传统法与激光法是两个不同的测试原理与体系,它们之间无法比较准确程度,因此,我们采用国际上通用的做法,用标准粒子检验激光粒度仪的准确性。我们用生产厂家提供的标准粒子检验激光粒度仪的准确性,测试特征值结果见表 4,从中可见,测试结果与标准粒子的结果非常接近。

表4 准确性测试结果特征值比较

| 特征粒径(um) | D ₁₀ | D ₅₀ | D ₉₀ |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 标准值 | 37.185 | 61.850 | 89.972 |
| 测试平均值 | 37.641 | 60.654 | 92.534 |
| 误差 | 1.226 | -1.934 | 2.848 |

(3) 两种分析方法的比测

我们选取了有代表性的样品,每个样品等分成 2 份,一份做传统法分析,一份做激光粒度仪分析(每个样品分析 3 次取其平均值作为结果)并将两者进行比较,发现传统法和激光法小于某粒径沙重百分比的结果相差比较小,见附表 2。

8 数据整理与分析

8.1 标准样本库的建立

8.1.1 建立标准样本库

对激光法与传统法的比测数据作相关分析,激光法与传统法分析级配累积百分数测试数据作为有效分析数据建立为标准级配样本库。标准级配样本是同一泥沙样品,分别采用激光法与传统法按规程规定分析所得出的一组对应级配数据,即单次激光粒度仪悬沙颗粒级配(粒径~体积百分数),传统法(粒径~小于某粒径沙重百分数)颗粒



级配。对相关系数不强的样本数据暂不录入标准样本数据库。通过对相关系数的筛选,建立了本中心 16 组分析下限 0.020um 标准级配样本库。

8.1.2 数据转换

依据欧美克 TopSizer 激光粒度仪操作规程,对于同种物质,在密度不变的情况下,质量分布和体积分布是相同的。在安江水文站泥沙颗粒性状未发生改变的情况下,其体积分布等同于质量分布,所以小于某粒径沙重百分数可以用小于某粒径体积百分数的数值来表示。

8.2 两种方法平行性比较

激光法与传统法之间的平行性测试所测出的颗粒粒径结果比较接近,略微存在差异,如图 5、图 6 和图 7。

具体结果见附表 3。

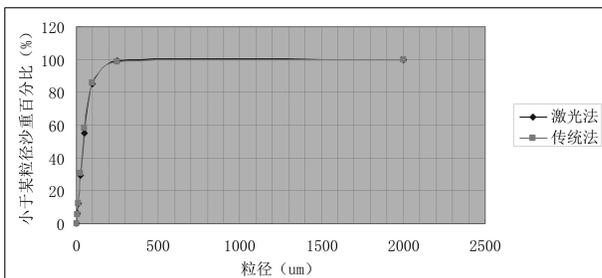


图 5 激光法与传统法级配比较图

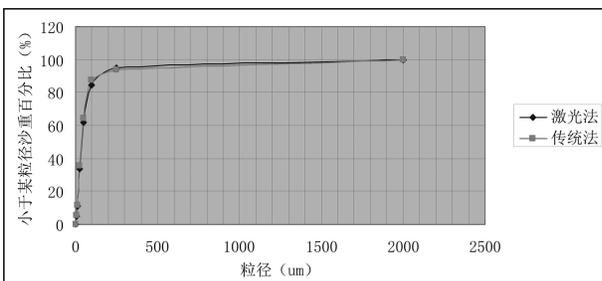


图 6 激光法与传统法级配比较图

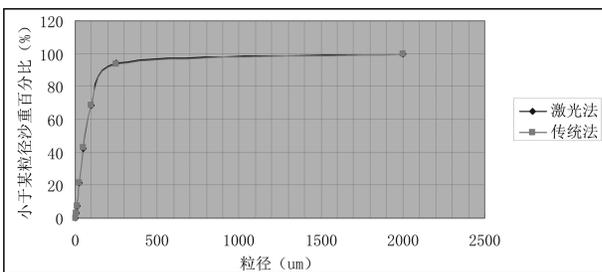


图 7 激光法与传统法级配比较图

激光法与传统法之间产生的差异,主要认识如下:

(1) 两种分析方法的原理不同。传统法是依据沉降原理;激光法是依据光的散射原理,不同分析方法之间存在系统性偏差。

(2) 两种分析方法在测量过程中都不是直接测量颗粒的大小,而是根据颗粒大小不同而划分若干的粒径级,以每个粒径级的颗粒占总量的多少来计算相应的百分数。天然河流的泥沙样品是一个复杂的组合物,颗粒的形状复杂多样,对于同一颗粒使用不同的测试方法,有可能划分在不同的粒径级。

(3) 两种划分方法测试的结果表示方法不同。传统法是以重量表示,即粒径~小于某粒径沙重百分数;激光法则是以体积表示,即粒径~小于某粒径体积百分数。由于河流泥沙样品中每个颗粒的比重不完全相同,因此,即使通过两种方法之间的换算也可能不完全一致。

通过标准样本库,从误差结果看,小于某粒径沙重百分数的系统偏差的绝对值在级配的 90% 以上部分最大一组为 1.8(250um 组),90% 以下部分最大一组为 3.2(100um 组),随机不确定度最大一组为 3.6(50um 组),能够满足《河流泥沙颗粒分析规程》(SL42-2010) 2.1.2 的要求;当采用新的颗粒分析方法或改变主要技术要求时,应用标准方法或标样进行试验,其统计误差结果应到达小于某粒径的沙量百分数在 90% 以上部分小于 2,在 90% 以下部分小于 4;小于某粒径沙量百分数的随机不确定度应小于 10。

8.3 比测分析结论

通过对比测资料的分析与误差统计,小于某粒径沙重百分数的系统偏差的绝对值在级配的 90% 以上部分最大一组为 1.8(250um 组),90% 以下部分最大一组为 3.2(100um 组),随机不确定度最大一组为 3.6(50um 组),能够满足《河流泥沙颗粒分析规程》(SL42-2010) 2.1.2 的要求;当采用新的颗粒分析方法或改变主要技术要求时,应用标准方法或标样进行试验,其统计误差结果应到达小于某粒径的沙量百分数在 90% 以上部分小于 2,在 90% 以下部分小于 4;小于某粒径沙量百分数的随机不确定度应小于 10。见附表 3。

9 结论

(1)通过安江水文站 16 点的样品分析,认为安江站能够代表沅江中游河段的水沙颗粒变化特性,代表性较好。

(2)通过对激光粒度仪的性能测试,一个样品重复多次分析的重复性较好,仪器的稳定性较高;激光法自身的平行性较好。

(3)确定了激光粒度仪分析的基础参数见表 5。

表 5 基础参数设置参考表

| 参数名称 | 泵速 (转/分) | 遮光度 | 分散 时间 | 超声波 强度 | 水的折 射率 | 颗粒 吸收率 | 颗粒 折射率 |
|------|-------------|------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 参数设置 | 1800 | 8~20 | 2 | 11 | 1.33 | 0.1 | 2.6 |

(4)可以用超声波分散替代反凝剂分散。

(5)比测成果各粒径组的系统偏差在 90%以上部分小于 2,其余部分小于 4,随机不确定度小于 10,能够满足《河流泥沙颗粒分析规程》(SL42-2010)的要求。

(6)该仪器可在安江站投产使用。

参 考 文 献

- 《河流泥沙颗粒分析规程》(SL42-2010)
- 《河流悬移质泥沙测验规范》(GB50159-92)
- 《河流推移质泥沙及床沙测验规程》(SL43-92)
- 《激光粒度仪操作规程》
- 《激光粒度分布仪长江泥沙颗粒分析操作技术指南》(CJSW-C·SWCY-06-A)
- 《激光粒度分布仪比测大纲》

附表 1 同一样品分次测试结果误差

| 序号 | 小于某粒径累积体积百分数误差(%) | | | | | | | |
|----|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 粒 径 组(um) | | | | | | | |
| | 0.020 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 250 | 2000 |
| 1 | 0.0 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | 0.9 | 1.0 | 0.7 | -1.6 |
| 2 | 0.0 | 0.2 | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 2.5 | -0.8 | 1.5 |
| 3 | 0.0 | 0.7 | 2.5 | -1.7 | 2.2 | 1.7 | 2.3 | -1.6 |
| 4 | 0.0 | 1.3 | 1.4 | 2.8 | -2.5 | -1.4 | -3.4 | 1.1 |
| 5 | 0.0 | -1.5 | 0.4 | 1.6 | 3.1 | 0.9 | 0.9 | 1.2 |
| 6 | 0.0 | 0.8 | 0.9 | -2.7 | -1.1 | 2.6 | 3.3 | 1.9 |
| 7 | 0.0 | 0.6 | 0.7 | 0.9 | -0.9 | 1.6 | 2.6 | 1.8 |
| 8 | 0.0 | 0.4 | 0.3 | 1.3 | 0.8 | -1.7 | -3.2 | -1.5 |
| 9 | 0.0 | 0.1 | -0.8 | 2.2 | -0.5 | 3.1 | 3.0 | 2.9 |
| 10 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | -2.3 | 0.7 | 2.4 | 1.5 | -1.6 |
| 11 | 0.0 | 0.4 | -1.2 | 0.3 | -1.6 | -0.7 | 0.6 | -2.3 |
| 12 | 0.0 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 1.8 | 0.8 | 2.8 | 0.6 |
| 13 | 0.0 | 0.6 | 2.0 | -1.3 | 2.3 | 2.4 | -2.7 | -2.2 |
| 14 | 0.0 | 0.4 | -1.8 | 2.4 | -1.5 | -1.8 | 3.2 | 1.8 |
| 15 | 0.0 | 0.1 | 0.6 | -2.1 | 2.5 | 2.4 | 2.7 | 1.2 |
| 16 | 0.0 | -2.1 | 0.7 | 0.9 | -1.8 | 3.1 | 1.4 | -0.4 |
| 17 | 0.0 | -1.2 | 0.3 | 1.5 | 2.2 | 1.7 | 0.8 | -2.2 |
| 18 | 0.0 | 0.9 | 0.4 | -2.0 | 2.6 | 2.3 | 0.7 | 1.6 |
| 19 | 0.0 | 0.7 | 1.5 | 0.9 | -1.6 | 1.8 | -0.8 | 0.3 |
| 20 | 0.0 | 2.1 | -1.3 | 0.7 | 0.5 | 0.7 | 3.2 | 1.8 |
| 21 | 0.0 | 1.4 | 2.6 | 1.8 | 0.4 | 2.2 | 0.6 | 2.8 |
| 22 | 0.0 | 2.3 | 0.8 | 3.6 | 0.9 | 1.7 | 0.6 | 1.3 |
| 23 | 0.0 | 0.7 | 1.3 | -3.2 | 1.3 | 2.4 | 0.8 | -1.9 |
| 24 | 0.0 | -2.0 | -1.5 | 2.2 | -2.6 | 0.9 | 1.7 | 0.9 |
| 25 | 0.0 | 1.7 | 0.9 | 1.3 | 3.3 | -1.6 | 2.6 | -2.5 |



| 序号 | 小于某粒径累积体积百分数误差(%) | | | | | | | |
|------------|-------------------|------|-----|------|------|------|------|------|
| | 粒 径 组(um) | | | | | | | |
| | 0.020 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 250 | 2000 |
| 26 | 0.0 | 0.8 | 0.3 | 3.5 | -2.8 | 3.3 | 1.8 | -3.4 |
| 27 | 0.0 | 0.9 | 1.2 | -2.3 | 0.9 | 0.7 | 3.3 | 2.9 |
| 28 | 0.0 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 0.5 | 3.0 | 0.4 | 1.4 |
| 29 | 0.0 | -3.1 | 0.8 | 2.7 | 0.8 | 1.0 | -3.1 | 2.5 |
| 30 | 0.0 | 2.4 | 1.7 | -3.2 | -3.2 | -2.3 | 2.3 | 1.4 |
| 标准差 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | 0.7 | 0.5 | 0.8 | 0.7 | 1.3 |
| 随机不 确定度 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |

附表2 同一样品激光法与传统法测试结果

| 序号 | 分析 方法 | 小于某粒径累积体积百分数误差(%) | | | | | | | |
|----|----------|-------------------|-----|------|------|------|------|------|------|
| | | 粒 径 组(um) | | | | | | | |
| | | 0.020 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 250 | 2000 |
| 1 | 激光法 | 0.0 | 8.5 | 17.9 | 41.7 | 66.6 | 87.6 | 98.4 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 7.8 | 17.0 | 41.5 | 65.0 | 87.0 | 98.3 | 100 |
| 2 | 激光法 | 0.0 | 4.2 | 8.5 | 20.1 | 41.6 | 72.9 | 96.3 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 4.6 | 9.4 | 20.6 | 40.6 | 73.6 | 96.5 | 100 |
| 3 | 激光法 | 0.0 | 3.8 | 7.9 | 20.1 | 43.6 | 78.1 | 100 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 3.0 | 8.3 | 22.1 | 44.6 | 77.5 | 99.8 | 100 |
| 4 | 激光法 | 0.0 | 6.3 | 12.4 | 29.1 | 55.1 | 85.2 | 99.0 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 5.8 | 12.3 | 30.8 | 58.0 | 85.5 | 98.5 | 100 |
| 5 | 激光法 | 0.0 | 6.2 | 12.3 | 29.3 | 54.1 | 82.9 | 97.3 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 7.2 | 14.0 | 30.5 | 53.9 | 80.8 | 97.8 | 100 |
| 6 | 激光法 | 0.0 | 3.0 | 6.1 | 15.4 | 33.5 | 65.3 | 94.3 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 2.7 | 6.5 | 14.2 | 32.7 | 64.1 | 93.2 | 100 |
| 7 | 激光法 | 0.0 | 4.7 | 9.4 | 24.0 | 49.1 | 78.6 | 95.1 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 4.3 | 8.7 | 23.6 | 47.5 | 75.4 | 93.8 | 100 |
| 8 | 激光法 | 0.0 | 2.7 | 5.5 | 14.5 | 32.0 | 62.7 | 93.4 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 2.9 | 5.8 | 15.2 | 33.6 | 64.7 | 91.8 | 100 |
| 9 | 激光法 | 0.0 | 3.8 | 8.0 | 22.2 | 44.4 | 74.4 | 96.7 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 3.3 | 7.5 | 20.8 | 42.1 | 73.5 | 94.9 | 100 |
| 10 | 激光法 | 0.0 | 4.6 | 9.3 | 22.9 | 46.2 | 75.3 | 93.9 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 4.2 | 9.1 | 21.3 | 43.5 | 72.9 | 93.2 | 100 |
| 11 | 激光法 | 0.0 | 3.5 | 7.9 | 18.7 | 35.1 | 63.2 | 96.3 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 3.2 | 6.2 | 16.3 | 33.0 | 64.3 | 94.9 | 100 |
| 12 | 激光法 | 0.0 | 7.1 | 13.9 | 33.5 | 61.6 | 87.5 | 100 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 6.8 | 13.4 | 31.7 | 58.9 | 85.2 | 100 | 100 |
| 13 | 激光法 | 0.0 | 3.3 | 7.3 | 21.5 | 42.1 | 68.3 | 94.0 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 3.2 | 7.5 | 21.4 | 42.9 | 68.8 | 93.7 | 100 |
| 14 | 激光法 | 0.0 | 4.4 | 9.0 | 23.6 | 47.3 | 76.8 | 97.7 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 4.2 | 9.3 | 24.5 | 48.7 | 76.1 | 97.6 | 100 |
| 15 | 激光法 | 0.0 | 5.2 | 11.2 | 33.7 | 62.0 | 84.6 | 95.2 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 5.8 | 11.9 | 35.8 | 64.2 | 87.3 | 93.9 | 100 |
| 16 | 激光法 | 0.0 | 4.5 | 9.0 | 19.5 | 33.8 | 55.8 | 84.2 | 100 |
| | 沉降法 | 0.0 | 4.9 | 9.9 | 21.1 | 34.8 | 57.2 | 86.9 | 100 |

附表3 同一样品激光法与传统法测试结果误差统计

| 序号 | 小于某粒径颗粒体积(沙重)百分数误差(%) | | | | | | | |
|------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 粒 径 组(um) | | | | | | | |
| | 0.020 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 | 250 | 2000 |
| 1 | 0.0 | 0.7 | 0.9 | 0.2 | 1.6 | 0.6 | 0.1 | 0.0 |
| 2 | 0.0 | -0.6 | -0.9 | -0.5 | 1.0 | -0.7 | -0.2 | 0.0 |
| 3 | 0.0 | 0.8 | -0.7 | -2.0 | -1.0 | 0.6 | 0.2 | 0.0 |
| 4 | 0.0 | 0.5 | 0.1 | -1.7 | -2.9 | -0.3 | 0.5 | 0.0 |
| 5 | 0.0 | -1.0 | -1.7 | -1.2 | 0.2 | 2.1 | -0.5 | 0.0 |
| 6 | 0.0 | 0.3 | -0.4 | 1.2 | 0.8 | 1.2 | 1.1 | 0.0 |
| 7 | 0.0 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 1.6 | 3.2 | 1.3 | 0.0 |
| 8 | 0.0 | -0.2 | -0.3 | -0.7 | -1.6 | -2.0 | 1.6 | 0.0 |
| 9 | 0.0 | 0.5 | 0.5 | 1.4 | 2.3 | 0.9 | 1.8 | 0.0 |
| 10 | 0.0 | 0.4 | 0.2 | 1.6 | 2.7 | 2.4 | 0.7 | 0.0 |
| 11 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | 2.4 | 2.1 | -1.1 | 1.5 | 0.0 |
| 12 | 0.0 | 0.3 | 0.5 | 1.8 | 2.7 | 2.3 | 0.0 | 0.0 |
| 13 | 0.0 | 0.1 | -0.2 | 0.1 | -0.8 | -0.5 | 0.3 | 0.0 |
| 14 | 0.0 | 0.2 | 0.3 | -0.9 | -1.4 | 0.7 | 0.1 | 0.0 |
| 15 | 0.0 | -0.6 | -0.7 | -2.1 | -2.2 | -2.7 | 1.3 | 0.0 |
| 16 | 0.0 | -0.4 | -0.9 | -1.6 | -1.0 | -1.4 | -2.7 | 0.0 |
| 标准差 | 0.0 | 0.5 | 0.7 | 1.5 | 1.8 | 1.7 | 1.1 | 0.0 |
| 随机不 确定度 | 0.0 | 1.0 | 1.4 | 3.0 | 3.6 | 3.4 | 2.2 | 0.0 |

(上接第 53 页)

(2) 仪器及全部附件应妥善保存在仪器箱内,存放的房间要保持干燥、通风和无腐蚀气体存在,潮湿天气时应注意及时通风除湿。

(3) 流速仪在进行拆卸清洗和安装时,必须由熟知仪器结构和拆卸方法的专业人员进行操作,切勿随意拆卸流速仪。

(4) 测量前必须检测流速仪性能,调试好仪器后应固紧各种螺丝,以免仪器入水后被冲走。每一次测流工作完成后,都必须要用 120 号或 200 号汽油及时清洗,去除水、泥沙、污物等。先浸泡半小时再进行 3 次清洗,需重点清洗的部件为轴承部件,依次清洗完后要把仪器的零部件依序摆放在干净的搪瓷盘中晾干,再依序安装,安装时桨套内应注入约 1/3 的 8 号仪表油。

(5) 流速仪连续工作时间最好不超过 8 小时,超时仪器应马上进行清洗,除去水、泥沙、污物等。

(6) 流速仪检定公式的稳定期超过 1 年,应送检定单位重新检定。

5 结语

在日常工作中,为管理到位,测验人员需制定合理的仪器维护计划,并做好相关维护记录。LS1206B 型转子式流速仪是目前在水文测验中使用最为广泛的种类之一,了解仪器的结构和特性,做好日常维护工作才能确保仪器正常工作,为获得准确、可靠的水文测验数据提供有效的保障。

参 考 文 献

- [1] GB/T 11826-2002. 转子式流速仪[S].
- [2] 周冬生,宗军,曹子聪等. 通用型旋桨流速仪性能检定方法研究[J]. 水文,2017(06):39-43.
- [3] 姚永熙. 国内外转子式流速仪检定方法分析[J]. 水文,2012(03):1-5.
- [4] 李新强. 流速仪常见故障及维护[J]. 黑龙江水利科技,2011(6):124-125
- [5] 赵广忠,杨庆福,鞠贵权. 声学多普勒剖面测流仪与传统流速仪的比测[J]. 黑龙江水利科技,2006,34(5):81-82



黄桥站激光粒度分布仪与烘干法含沙量比测分析

刘禹良 彭治国 唐卫民 (邵阳水文水资源勘测中心 邵阳 422000)

【摘要】 为了探索 Bettersize2000 激光粒度分布仪与烘干称沙法之间的比例关系,充分发挥高科技测验仪器的优势,确保测验精度和正式应用于泥沙测验,黄桥水文站对比测成果随测算,随分析,随整理,通过多次调整,取得了较为明显的效果。

【关键词】 黄桥站 激光粒度分布仪 含沙量 比测分析

1 前言

为减轻高洪期间泥沙分析工作强度,黄桥水文站于 2015 年 4 月配备了 Bettersize2000 激光粒度分布仪,完成了安装调试工作。为了探索 Bettersize2000 激光粒度分布仪与烘干称沙法之间的比例关系,确保测验精度和今后正式应用于泥沙测验,充分发挥高科技测验仪器的优势,期间对比测成果随测算、随分析、随整理,通过多次调整,取得了较为明显的效果。

2 测站情况简介

黄桥水文站位于湖南省洞口县黄桥镇正山街,东经 $110^{\circ} 51'$,北纬 $27^{\circ} 02'$,测站编码为 61200200。设立于 1954 年 1 月,为赧水中游控制站,属国家基本水文站,集水面积 2660km^2 。隶属邵阳水文水资源勘测中心。本站水位采用黄海基面,黄海基面与冻结基面换算关系为 $Z_{\text{黄海}} = Z_{\text{冻结}} - 2.371\text{m}$ 。建站至今实测历史最高水位发生在 1996 年 7 月 17 日为 271.37m ,相应流量 $3250\text{m}^3/\text{s}$,实测最大流量 $3710\text{m}^3/\text{s}$,相应水位 271.06m ,发生在 1996 年 7 月 18 日。1955 年 1 月开始泥沙测验,历年采用单断沙关系线法进行资料整编,历年单断沙关系线稳定,各年关系线偏离历年综合线

的最大值为 -2.5% ,实测最大含沙量 $1.5\text{kg}/\text{m}^3$,单沙测次每年在 100 次以上。

测验项目有水位、流量、降水量、蒸发量、泥沙、水温等。承担向国家防总、湖南省防指、湖南省水文水资源勘测中心、邵阳水文水资源勘测中心、洞口县应急管理局、洞口县水利局等单位的雨水情报汛任务,向沿河两岸提供水文情报服务。

测验河段顺直,河床稳定。右岸地势高;左岸地势低,2020 年修防洪大堤,河床为卵石夹沙、壤土组成。一般水面宽 110m ,当水位达到 270.50m 时,左岸开始漫滩,水面宽约 400m ,滩地为树木,流量作死水处理。基上 1500m 处有田凫拦河坝一座,发电时开关闸较频繁,对水位流量测验有一定影响,虽受上下游电站开关闸影响,但单断沙关系良好,呈单一线。基下 150m 处有公路桥一座。基下 300m 处有一沙洲,右岸下游 500m 处有一乱石坝。左岸为土质防洪堤,堤顶高程 270.50m ,堤顶宽 3m ;右岸天然岸坡。

本站设有基本水尺断面;基下 18m ,设立流速仪测流断面。比降上断面位于基上 290m ,中高水使用;浮标测流上断面位于基上 90m ,高水位使用;基本水尺断面兼浮标测流中断面,高水位使用;浮标测流下断面位于基下 90m ,高水位使用;比降下断面兼手持电波流速仪测流断面位于基下 70m ,为黄桥水文站辅助断面,高水位使用。

本站洪水来源主要为暴雨洪水,以复峰型呈现,主峰雨停止时间至洪峰出现时间约为 12 小时,洪峰维持时间 1 小时,沙峰维持时间约 1 小时。较大洪水过程一般持续 3~5 天。受断面冲淤影响,历年水位流量关系为临时曲线推流。

3 Bettersize2000 激光粒度仪工作简介

工作原理: Bettersize2000 激光粒度仪是采用米氏散射原理进行粒度分布测量的。当一束平行光的单色光照射到颗粒上时,在傅式透镜的焦平面上将形成颗粒的散射光谱,这种散射光谱不随颗粒运动而改变,通过米氏散射理论分析这些散射光谱就可得出颗粒的粒度分布。光环的直径与产生散射的颗粒粒径相关,粒径越小,散射角越大,圆环直径越大;粒径越大,散射角越小,圆环直径越小。

基本指标性能:

测试范围:0.02-2000 μm

进样方式:内置自动循环分散进样系统

重复性误差:<1%(标样 D50 偏差)

准确性误差:<1%(标样 D50 偏差)

测量原理:米氏散射原理

突出特点:精度高、效率高、测试结果稳定可靠、适用范围广、操作方便等。

4 比测分析

4.1 目的

采用 Bettersize2000 激光粒度分布仪,找出与传统泥沙测验方法的比例关系,尽快使新仪器投产使用,摆脱传统测验方法劳动强度大、历时长、工作任务繁重等缺点,大大提高了工作效益。

4.2 方法

黄桥站激光粒度仪主要用来测量含沙量,烘干法是沙重与水样体积比得出含沙量,粒度仪是通过泥沙在水中的遮光率及粒径大小的换算得出含沙量。在整个泥沙施测过程中,我们在各个水位级合理分布测次,在比测试验中,我们将取来的样品溶液充分搅匀,并将一个样品分成四份,系数分别为 0.4、0.6、0.8、1.0,然后对每一份溶液都进行了分析,同时与人工烘干称出来的沙样进行对比,从中选择接近的几组数值作为最终的实验结果,比对仪器与人工含沙量的偏差情况,通过大量

的试验分析,我们得出相关数据:修正系数 0.55,样品比重 1.65。

4.3 误差分析计算

计算各样本测次粒度仪含沙量相对于烘干法含沙量的相对误差,采用系统误差和随机不确定度来进行误差评价,计算公式如下:

$$\text{系统误差: } p = \frac{1}{n} \sum P_i$$

$$\text{标准差: } S_e = \left[\frac{1}{n-2} \sum \left(\frac{C_i - C}{C} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{随机不确定度: } X'Q = 2S_e$$

式中:

C——烘干法含沙量;

C_i ——粒度仪含沙量。

误差计算见表 1。

表 1 误差计算表

| 编号 | 采样时间 | | | | 烘干法含 | 粒度仪含 | $P_i(\%)$ | P_i^2 |
|----|------|----|----|----|---------------------------|---------------------------|-----------|---------|
| | 月 | 日 | 时 | 分 | 沙量 kg/m^3 | 沙量 kg/m^3 | | |
| 1 | 5 | 18 | 11 | 00 | 0.01 | 0.01 | 12.57 | 158.1 |
| 2 | | | 12 | 30 | 0.11 | 0.107 | -2.44 | 5.9 |
| 3 | | | 13 | 30 | 0.176 | 0.178 | 1.30 | 1.7 |
| 4 | | | 15 | 00 | 0.31 | 0.314 | 1.83 | 3.3 |
| 5 | | | 17 | 20 | 1.03 | 1.00 | -1.87 | 3.5 |
| 6 | | | 18 | 00 | 1.06 | 1.05 | 0.20 | 0.0 |
| 7 | | | 19 | 30 | 1.07 | 1.09 | 2.52 | 6.4 |
| 8 | | | 21 | 00 | 0.672 | 0.633 | -5.22 | 27.2 |
| 9 | | | 23 | 00 | 0.576 | 0.576 | 0.54 | 0.3 |
| 10 | 19 | 02 | 00 | | 0.264 | 0.276 | 5.14 | 26.4 |
| 11 | | 06 | 00 | | 0.241 | 0.253 | 5.62 | 31.6 |
| 12 | | 08 | 00 | | 0.167 | 0.169 | 1.30 | 1.7 |
| 13 | | 18 | 00 | | 0.075 | 0.075 | -1.06 | 1.1 |
| 14 | | 20 | 08 | 00 | 0.076 | 0.076 | 0.07 | 0.0 |
| 15 | | 18 | 00 | | 0.029 | 0.030 | 4.27 | 18.2 |
| 16 | 21 | 08 | 00 | | 0.078 | 0.080 | 2.66 | 7.1 |
| 17 | | 15 | 00 | | 0.059 | 0.055 | -8.26 | 68.2 |
| 18 | 22 | 08 | 00 | | 0.026 | 0.028 | 3.31 | 11.0 |
| 19 | | 14 | 30 | | 0.029 | 0.031 | 4.58 | 21.0 |
| 20 | 23 | 08 | 00 | | 0.030 | 0.030 | -0.95 | 0.9 |
| 21 | | 17 | 00 | | 0.014 | 0.015 | 1.36 | 1.9 |
| 22 | 6 | 03 | 16 | 00 | 0.134 | 0.129 | -3.97 | 15.8 |
| 23 | | 22 | 00 | | 0.212 | 0.210 | -0.84 | 0.7 |
| 24 | 6 | 04 | 03 | 30 | 0.275 | 0.263 | -3.79 | 14.3 |
| 25 | | 08 | 00 | | 0.209 | 0.199 | -4.62 | 21.3 |
| 26 | | 11 | 00 | | 0.148 | 0.149 | 0.82 | 0.7 |
| 27 | | 14 | 00 | | 0.122 | 0.130 | 6.28 | 39.5 |
| 28 | | 17 | 00 | | 0.090 | 0.098 | 9.13 | 83.4 |
| 29 | | 05 | 08 | 00 | 0.038 | 0.039 | 0.69 | 0.5 |
| 30 | | 11 | 00 | | 0.042 | 0.040 | -6.40 | 41.0 |
| 31 | | 17 | 00 | | 0.028 | 0.027 | -6.19 | 38.2 |
| 合计 | | | | | | 18.6 | 650.9 | |



则系统误差为： $P = \frac{1}{n} \sum P_i = \frac{18.6}{31} = 0.6\%$

标准差： $S_e = \left[\frac{1}{n-2} \sum \left(\frac{C_i - C}{C} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{650.9}{29}} = 4.7\%$

随机不确定度： $X'Q = 2S_e = 2 \times 4.7\% = 9.4\%$

参照《水文资料整编规范》SL247-2012 第 3.3.4 条规定的单断沙关系曲线误差指标,本次分析系统误差与随机不确定度都在允许范围内,满足水文资料整编等相关规范的精度指标要求。

分别以激光粒度仪与烘干法含沙量为纵、横坐标建立粒度仪与烘干法含沙量相关图(见图 1),两者的相关系数 $R^2 = 0.999$,相关关系良好。

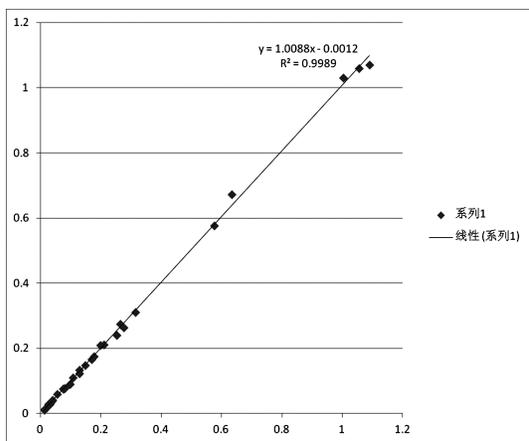


图 1 粒度仪与烘干法含沙量相关图

5 建议与结论

5.1 激光粒度仪的使用环境

激光粒度仪在使用过程中一定要确保环境的干燥,避免潮湿的情况出现。如果出现潮湿环境,就会导致激光粒度仪的傅式透镜产生雾气,对仪器的背景生成会产生一定的影响。所以如果出现潮湿的天气,我们在使用仪器之前一定要使用除湿器对仪器所在房间进行除湿以后再使用。

5.2 激光粒度仪的分沙建议

激光粒度仪在分沙中一定要采取分沙器均匀的分沙,然后按照比例在确保样品含量和清水含

量的配比保持在 1100 的范围内进行含沙量操作。平水时期我们可以选择 1000 : 100 的比例进行操作,但是随着水位的上升以及水变得浑浊,我们就要适时的减少样品含量和增加清水含量的配比,以保证激光粒度仪的测算精度。

5.3 激光粒度仪的常态建议

通过我们前期的比测分析已经初步建立起关系良好的相关系数,但是在今后的使用过程中每年应根据高沙至少抽取 10 次以上的沙样与烘干法进行比较,并计算误差。如果误差过大,应及时调整相关参数,将误差控制在合理范围内。

0.2、0.4、0.6、0.8 系数含沙量成果见表 2。

表 2 0.2、0.4、0.6、0.8 系数的含沙量成果表

| 粒度仪 0.2 系数含沙量 kg/m | 粒度仪 0.4 系数含沙量 kg/m | 粒度仪 0.6 系数含沙量 kg/m | 粒度仪 0.8 系数含沙量 kg/m |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 0.004 | 0.009 | 0.013 | 0.018 |
| 0.039 | 0.078 | 0.117 | 0.156 |
| 0.065 | 0.129 | 0.194 | 0.259 |
| 0.114 | 0.229 | 0.343 | 0.457 |
| 0.365 | 0.730 | 1.09 | 1.46 |
| 0.384 | 0.767 | 1.15 | 1.53 |
| 0.396 | 0.792 | 1.19 | 1.58 |
| 0.230 | 0.460 | 0.690 | 0.921 |
| 0.209 | 0.419 | 0.628 | 0.837 |
| 0.101 | 0.201 | 0.301 | 0.402 |
| 0.092 | 0.184 | 0.277 | 0.369 |
| 0.061 | 0.123 | 0.184 | 0.246 |
| 0.027 | 0.054 | 0.081 | 0.109 |
| 0.028 | 0.056 | 0.083 | 0.111 |
| 0.011 | 0.023 | 0.030 | 0.045 |
| 0.029 | 0.058 | 0.034 | 0.117 |
| 0.020 | 0.040 | 0.088 | 0.080 |
| 0.010 | 0.020 | 0.060 | 0.040 |
| 0.011 | 0.023 | 0.030 | 0.045 |
| 0.011 | 0.022 | 0.033 | 0.044 |
| 0.006 | 0.011 | 0.016 | 0.022 |
| 0.047 | 0.094 | 0.140 | 0.187 |
| 0.076 | 0.152 | 0.229 | 0.305 |
| 0.096 | 0.192 | 0.287 | 0.383 |
| 0.096 | 0.192 | 0.287 | 0.383 |
| 0.072 | 0.146 | 0.217 | 0.289 |
| 0.054 | 0.108 | 0.163 | 0.217 |
| 0.047 | 0.094 | 0.141 | 0.189 |
| 0.036 | 0.072 | 0.107 | 0.143 |
| 0.014 | 0.028 | 0.042 | 0.057 |
| 0.015 | 0.029 | 0.044 | 0.058 |
| 0.010 | 0.020 | 0.030 | 0.039 |