

黄奇波, 邹胜章, 覃小群, 等. 桂林市会仙岩溶湿地水资源特征及有效调控[J]. 中国岩溶, 2023, 42(4): 722-732, 762.
DOI: 10.11932/karst20230408

桂林市会仙岩溶湿地水资源特征及有效调控

黄奇波^{1,2,4}, 邹胜章^{1,2,4}, 覃小群^{1,2}, 陈学军³, 代俊峰³,
焦友军^{1,2,4}, 李腾芳^{1,2,4}, 莫凌云³, 宋 宇³

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部、广西岩溶动力学重点实验室/联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004; 2. 广西平果喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 广西 平果 531406;
3. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 4. 广西岩溶资源环境工程技术研究中心, 广西 桂林 541004)

摘 要: 会仙湿地是“漓江之肾”, 对漓江补水和生态环境改善具有重要作用, 但湿地水资源调蓄功能较弱, 严重制约了湿地功能的发挥。本研究以会仙湿地为示范区, 对湿地核心区狮子岩地下河系统和睦洞湖分散排泄系统流量进行了一个水文年的观测, 并实施水资源调控措施。结果表明: 会仙湿地岩溶含水层对大气降雨具有一定的调蓄作用, 但调蓄功能较弱, 雨季后若连续 2 个月无降雨地下河基本断流; 会仙河通过桂柳古运河补给睦洞湖, 补水效果取决于会仙河大坝的蓄水高度, 当会仙河大坝蓄水高度小于 149.25 m 时, 会仙河无法对湿地进行有效补水, 对该大坝重修可增加对睦洞湖湿地的补水效果。针对狮子岩地下河系统具有管道集中径流、流量大、水量充足的特征, 在地下河采取了上游“蓄”和“引”, 中游“堵”, 下游“拦”的三级调控工程使地下河水位从出口到八仙湖段 1 km 范围内提高 70 cm, 可缩短狮子岩地下河溶洞湿地低水位期 1 个月以上。针对睦洞湖分散排泄系统地下水具有分散排泄的特征, 采取出口“拦”的水资源调控技术, 成功将出口水位抬高 30 cm, 核心区水位抬高 10~20 cm, 使睦洞湖湿地低水位期推迟 2 个月以上。

关键词: 会仙岩溶湿地; 蓄水高度; 地下河系统; 分散排泄系统; 桂林

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 04-0722-11

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引 言

会仙岩溶湿地被誉为“漓江之肾”, 是漓江流域最大的喀斯特地貌原生态湿地, 具有保持水源、净化水质、蓄洪抗旱、维护生物多样性等环境调节功能和生态效益, 自然潜力与经济潜力巨大^[1-3]。然而, 会仙岩溶湿地水资源调蓄能力有限, 面积季节变化大, 涝期过涝, 旱期过早, 水资源调蓄功能较弱^[4-6]。经过前期监测显示, 一个水文年中湿地水面标高处于

147.5~150.2 m 之间^[7-8], 周边地面高程在 149.6~150.0 m 之间, 当水位高于 149.8 m 时, 会造成大片耕地被淹没, 枯水期湿地水位又容易降到 149.0 m 以下, 一个水文年内湿地水面频繁波动导致湿地面积变小或淹没耕地, 严重影响村民的生产生活用水和湿地景观面貌, 水资源问题成为制约湿地开发与保护的关键因素^[9-10]。前人对湿地形成的地质背景^[11]、水文地质条件^[12]、水位动态^[7-8]、地下水均衡^[13]、地下水污染^[14-21]等方面进行了大量深入的研究, 但对地下水

资助项目: 国家重点研发计划项目“漓江流域喀斯特景观资源可持续利用关键技术研发与示范(2019YFC0507500)”; 中国地质调查项目“珠江流域水文地质调查与水资源监测(DD20221758)”

第一作者简介: 黄奇波(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事岩溶水文地质、岩溶环境与全球变化研究。E-mail: qbhuang0108@163.com。

通信作者: 邹胜章(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事水文地质与环境地质研究。E-mail: zshengzhang@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期: 2023-03-02

流量动态及水资源调控技术关注较少,严重制约了湿地水资源调控工程的有效实施。

2022年桂林市启动了桂林新区相思江防洪排涝提升工程,计划投资6.5亿用于会仙岩溶湿地水资源调蓄功能提升和水生态环境改善,并计划开发狮子岩地下河出口溶洞湿地景观资源。本研究对湿地核心区狮子岩地下河系统和睦洞湖分散排泄系统流量进行了一个水文年的观测,系统掌握了湿地地下水流量的动态特征,并分析了其控制因素。在此基础上,针对狮子岩地下河管道集中径流型和睦洞湖分散排泄型系统采取不同的调控技术进行了水资源调控,将湿地水位控制在合理范围内,取得了良好的示范效应。为会仙岩溶湿地水资源调蓄功能提升提供了科技支撑。并为西南岩溶区溶洞管道型湿地和分散排泄型湿地水资源调控提供了典型范例。

1 研究区概况

会仙岩溶湿地位于桂林市临桂区会仙镇,距桂林市区25 km,包括以睦洞河、睦洞湖、分水塘、古桂柳运河以及湿地周边的龙头山、狮子岩,面积约60 km²,位于东经110°09'50"~110°14'30",北纬25°05'20"~25°06'45"。属亚热带季风湿润气候,多年平均气温为18.9℃,多年平均降雨量为1835.8 mm,雨季为3—8月,降雨量占全年的80%,其中,4—8月是暴雨多发期,降雨约占全年的50%,9月至次年2月为旱季,降雨量仅为年降雨量的20%。湿地范围内出露地层有主要为上泥盆统融县组(D_{3r})纯灰岩、石炭系下统岩关阶(C_{1y})白云岩和大塘阶(C_{1d})不纯灰岩,地下水主要赋存于融县组(D_{3r})厚层灰岩中,区内岩层倾角较为平缓,C_{1y}、C_{1d}地层在一定程度上能起到隔水底板作用。研究区位于南岭纬向构造带、湘东—桂东经向构造及广西山字型构造东翼交汇处,为巨大的褶皱—断陷复合型岩溶封闭储水盆地,会仙湿地处于构造盆地中间。

会仙湿地核心区由睦洞湖分散排泄系统和狮子岩地下河系统组成,两个系统通过古桂柳运河相连,古桂柳运河位于湿地中南部,总长14.5 km,狮子岩地下河的水汇入分水塘后,向东经社门岭在蒋家坝注入良丰江,向西经睦洞湖南部在莫家附近注入会仙河(图1)。

狮子岩地下河系统位于湿地东部,流域面积为

19.51 km²,为管道集中径流型系统,地下河呈南北向发育,长5 km,地下河明暗相间(图2)。地下河管道从北到南流经上村、南村、黄插塘,在八仙湖流出地表,之后通过八仙湖西南侧山脚下的溶洞又流入地下,经过一段暗流后流出地表形成神潭,一部分水直接通过神潭水沟从SH1汇入分水塘;另一部分水又进入神潭东侧的溶洞,向南经过一段暗流后流出地表形成狮子潭,流经狮子潭后又通过南侧山脚溶洞潜入地下,最后在狮子岩溶洞SH2流出地表,汇入分水塘(图1、图2)。

睦洞湖分散排泄系统位于湿地西部,睦洞湖湿地通过古桂柳运河与分水塘相连,古桂柳运河西支在莫家村与会仙河相连,从分水塘到莫家村长约7 km。地下水以泉的形式分散状补给睦洞湖,主要通过中部的睦洞河排入相思江(图1)。睦洞河总长约4.38 km,源头为睦洞湖,流经凤凰山北部、九头山南部向西注入相思江,总集水面积约23.14 km²。在古桂柳运河与会仙河汇后的下游200 m处的上高桥村修有一石砌拦河坝MT1,坝高约1 m,抬高了会仙河水位,使会仙河的水流向运河,补给睦洞湖,因此会仙河通过古桂柳运河西支补给睦洞湖,是湿地水资源的重要来源。在古桂柳运河汇入会仙河的上游150 m处修建拦水低坝MT2,水坝顶面高程149.37 m,长约10 m,宽0.2 m,水坝中间留有宽0.6 m、深0.8 m过水堰口,为会仙河补水过水通道,只要会仙河水位高于过水堰口底部高程(149.25 m),就可以实现向睦洞湖湿地补水。

2 研究方法

为了掌握狮子岩地下河系统地下水排泄动态特征,对两个出口SH1和SH2进行一个水文年流量的观测。为了研究会仙河对睦洞湖湿地的补水效果及睦洞河水资源排泄动态特征,对会仙河大坝MT1、莫家水坝MT2及睦洞河上五孔桥MT3的流量进行一个水文年的观测,观测点位置见图1。

采用陕西欣源科技有限公司生产的YSD5本安型流速测量仪测量5个观测点的流量,测量精度为0.01 L·s⁻¹,观测频率为5天一次,降雨量主要采用岩溶地质研究所会仙实验基地的雨量观测数据。

在中国地质调查项目“珠江流域水文地质调查与水资源监测(DD20221758)”和国家重点研发计划

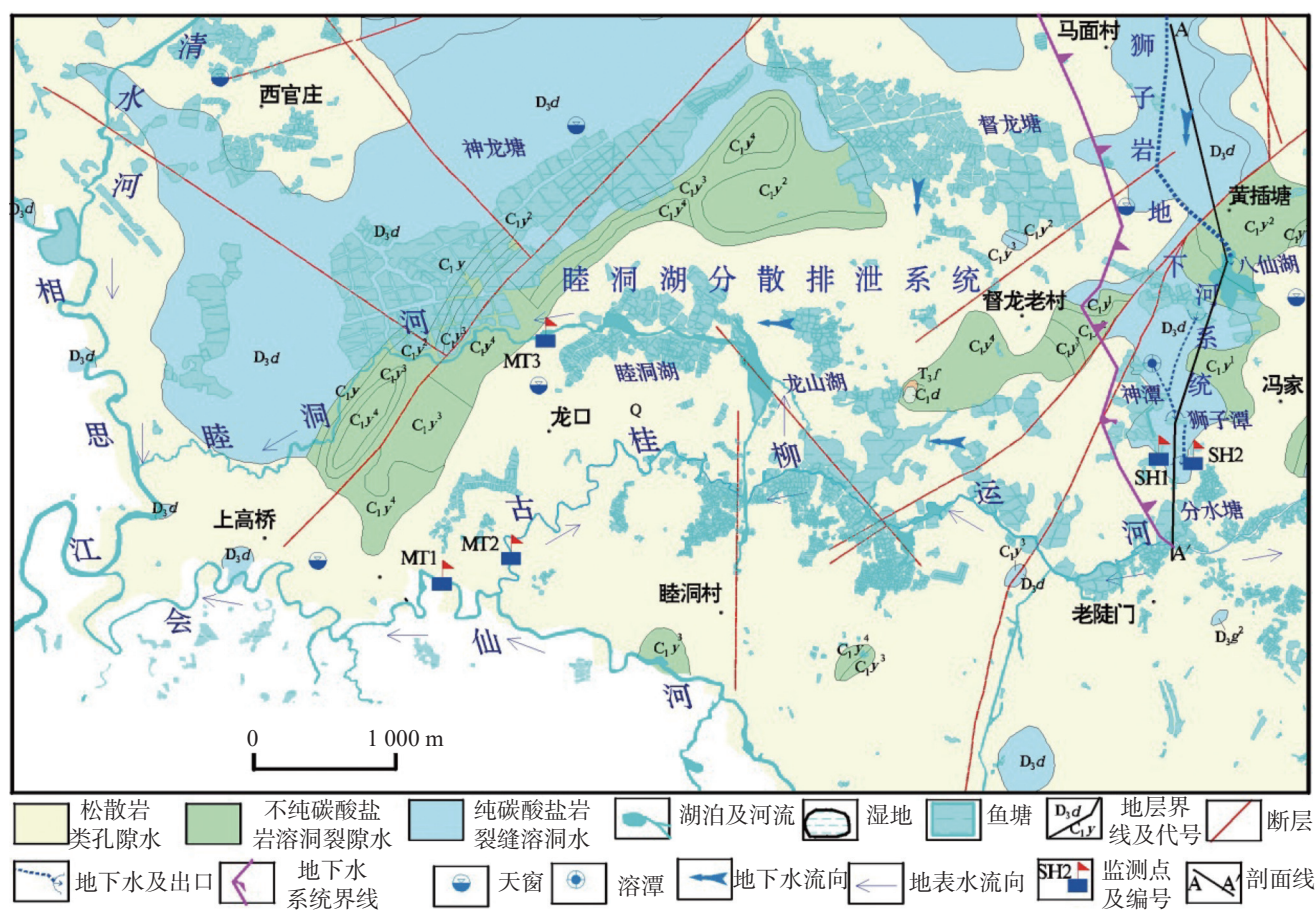


Fig. 1 Hydrogeological map of the core area of the Huixian karst wetland

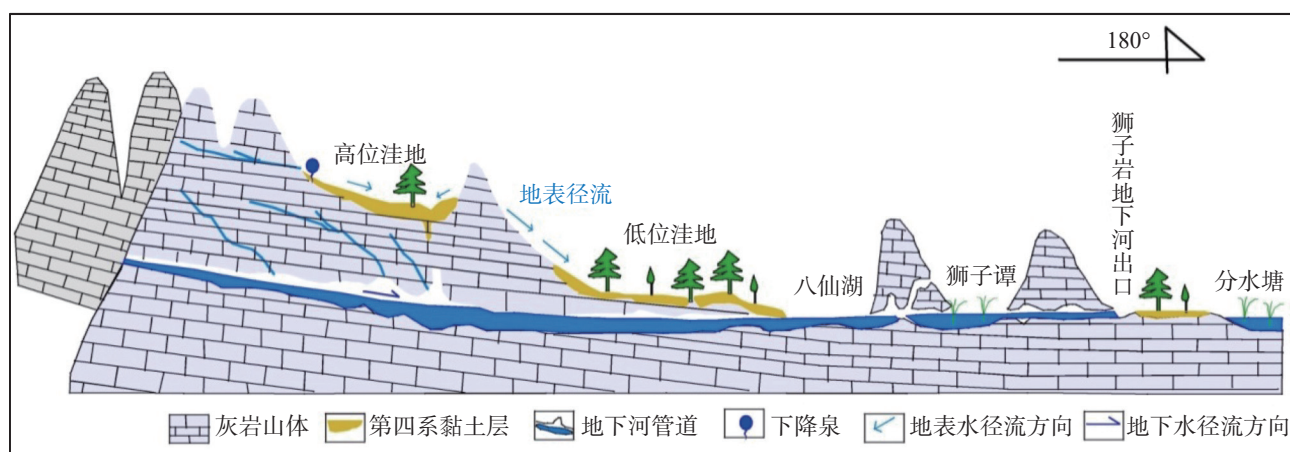


Fig. 2 Profile of the Shiziyan underground river

项目“漓江流域喀斯特景观资源可持续利用关键技术研发与示范(2019YFC0507500)”资助下,对会仙湿地开展 1:5 000 水文地质条件调查、岩溶含水层结构研究,建立了水位动态监测网对地下水位进行了 3 个水文年的监测,选择适当位置实施地下水、地表水综合调蓄示范工程,实现对湿地水资源的有效

调控。

3 地下水动态特征

3.1 狮子岩地下河流量动态特征

从狮子岩地下河排入分水塘的两个出口(SH1

和SH2)的流量动态(图3)来看,狮子岩地下河流量主要受大气降雨控制,随大气降雨量的变化而波动,对大气降雨响应较快,雨后1—2 d 地下河出口流量达到最大,与桂林地区的寨底地下河、毛村地下河的流量动态特征基本一致^[22-25]。2022年流域内降雨主要集中在1—7月,其间地下河出口保持 $20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上流量,6月14日到6月24日,累积降雨量达313 mm,会仙湿地发生了大范围的内涝,6月24日SH1流量由于湿地大范围内涝而无法测量。7月6日之后流域内降雨量很少,地下河流量不断减少,至7月9日SH2断流,SH1也在8月18日也出现断流,显示了狮子岩地下河含水层对大气降雨具有一定的调蓄功能,但调蓄功能较弱。朱丹尼等^[8]研究证实,相较于地表水,会仙湿地地下水位动态曲线的波峰窄而陡、波谷宽且缓,降水脉冲输入较快,而水量释放较慢,岩溶含水层具有一定的储水调蓄功能。2022年11月16—26日流域内积累降雨量达72 mm,但SH1和SH2并没有出现流量,说明72 mm的降雨量全部渗入了地下填补地下水的亏空。

狮子岩地下河流域面积 19.51 km^2 ,根据桂林地区岩溶区枯季径流模数为 $1\sim 3 \text{ L}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 来计算^[26],枯季狮子岩地下河可保持 $20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的流量,但每年枯季狮子岩地下河均会出现不同程度的断流,其原因主要有:1)上游峰丛山区补给区植被稀疏,呈中度石漠化^[1],调蓄作用减弱;2)中游上村、南村、黄插塘一带为水稻种植区,9月—10月为水稻用水高峰期,大量抽取地下水灌溉,使枯季地下水量进一步减少;3)分水塘、神塘、八仙湖淤积严重,可用于调蓄水资源

的湖塘容积减小,地下河调蓄功能不断退化。

对比SH1和SH2动态曲线可以看出狮子岩地下河系统主要通过SH1排泄,SH2的排泄量不到SH2的1/10;另外SH2在2022年1月—6月出现了三次断流,且连续10—15 d 无降雨时,SH2就会出现断流。SH2原为地下河系统的主要排水口,出口溶洞高约10 m,宽约30 m,已探明溶洞管道500余米,现排水量不到总排水量的1/10,造成该现象的原因是地下河出口段岩溶管道淤塞严重,底部增高;同时地下河伏流段的狮子潭中水葫芦常年生长茂盛,且从未被清理,导致潭底淤塞严重,阻碍水的流动,造成地下河水更容易通过神潭水沟从SH1排泄。因此,要使狮子岩出口溶洞地下水长流,开发狮子岩出口溶洞景观及溶洞出口前方小象山景观,必须对狮子岩溶洞管道底部和狮子潭进行清淤,使地下河系统中的大部分水从SH2流出,同时要在SH1排泄口修建控制性水闸以调控从神潭水沟的流出量。

3.2 睦洞湖分散排泄系统流量动态特征

对会仙河流量监测结果表明(图4),流量随降雨量变化而波动,对降雨的响应时间短。1月—2月19日、3月22日—5月15日有陆续有降雨,会仙河流量不断增加,2月19日到3月21日、5月15—6月14日基本没有降雨,会仙河的流量不断减少。6月14日开始降雨量集中,6月23日日降雨量达128.5 mm,会仙湿地发生了大范围的内涝,会仙河流量大涨,6月24日和29日流量无法测量。7月6日之后,流域内基本没有降雨,会仙河流量不断减少,8

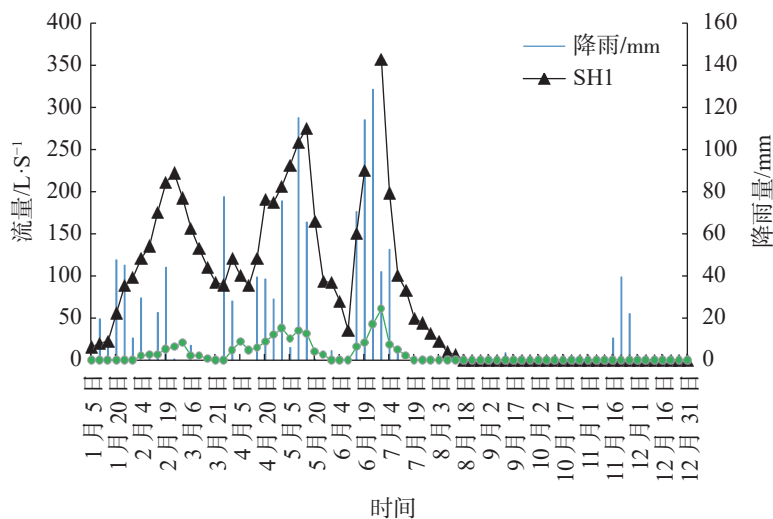


图3 SH1、SH2 流量动态曲线

Fig. 3 Flow dynamic curve of SH1 and SH2

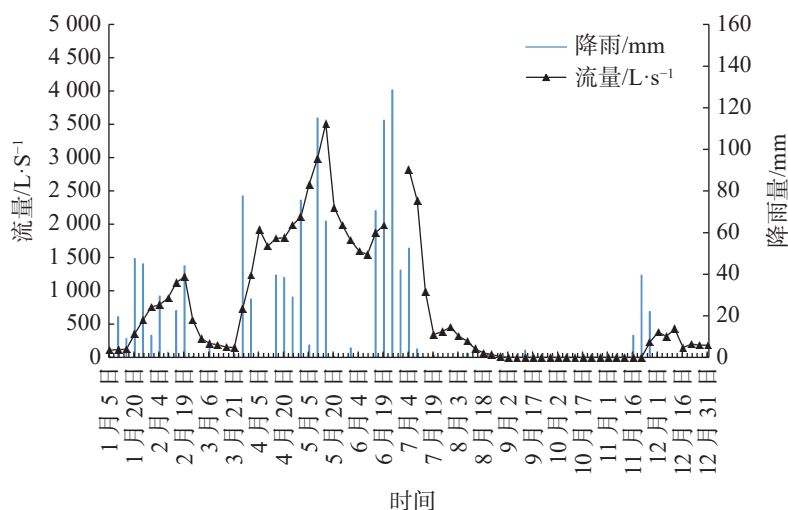


图4 会仙河 MT1 流量动态

Fig. 4 Flow dynamic curve of the Huixian river in MT1

月 28 日断流, 9—10 月为灌溉高峰期, 大量抽取地下水和会仙河水用于灌溉, 到 10 月 15 日会仙河被抽干见底。11 月 16—26 日流域内积累降雨量达 72 mm, 且灌溉用水高峰期已过, 农业抽水灌溉量减少, 会仙河水流量不断增大, 会仙河大坝 MT1 正常蓄水。

古桂柳运河莫家水坝 MT2 的流量监测结果表明(图 5), 流量动态与降雨量有一定的对应关系, 但对应关系并不明显, 这是由于莫家水坝的流量主要来源于会仙河的补给, 其流量取决于会仙河大坝蓄水水位高度, 只要会仙大坝蓄水位高于莫家水坝过水堰口的高度 149.25 m, 会仙河就可以向湿地补水, 莫家水坝的流量就有保障。因此, 莫家水坝流量是大气降雨经过会仙河大坝调蓄后的补水量, 其过水

量大小不仅受降雨量影响, 更多的是受会仙大坝放水和蓄水对水位高度的调控。1 月 1 日—7 月 14 日会仙河受连续降雨控制, 会仙河保持较大流量(图 4), 会仙河大坝蓄水高度保持在 149.25 m 以上, 会仙河通过莫家水坝向湿地补水的流量保持在 $50 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 其中最大补水量为 2 月 24 日, 达 $222.53 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ 。6 月 14 日开始降雨量增多, 到 6 月 23 日日降雨量达 128.5 mm, 会仙湿地发生了大范围的内涝, 会仙河流量猛涨, 水位上升到 149.8 m, 6 月 24 日和 29 日莫家水坝流量无法测量。从 7 月 6 日开始, 流域内长达 4 个月无降雨, 会仙河流量不断减少(图 4), 会仙河大坝蓄水水位也不断下降, 造成莫家过水坝流量不断减少, 到 8 月 23 日减少到 $12.34 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后断流。

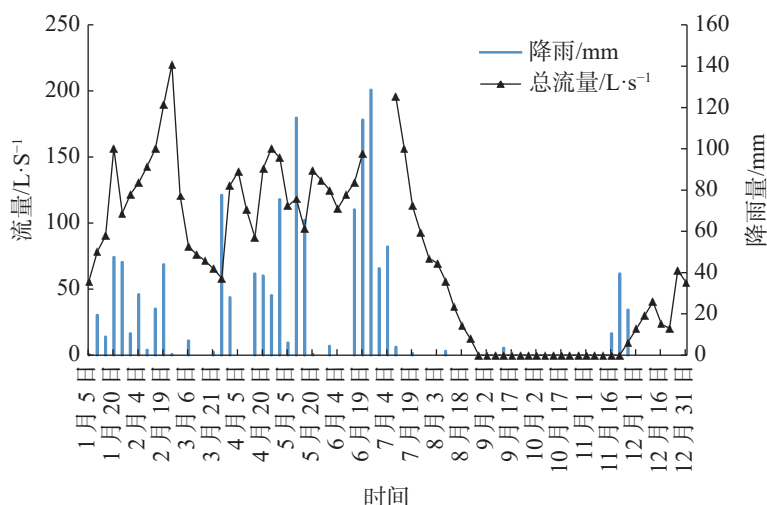


图5 莫家水坝 MT2 流量动态

Fig. 5 Flow dynamic curve of Mojiada dam in MT2

根据前文分析,8月28日会仙河基本断流,到10月中下旬,会仙河水被抽干见底,会仙河水位比莫家大坝水位低2 m。村民为了保存湿地水量,防止睦洞湖湿地水通过运河反向补给会仙河而不断流失,将莫家水坝中间过水堰口堵塞。11月16—26日流域内积累降雨量达72 mm,且过了农业抽水灌溉高峰期,会仙河流量得到恢复,会仙河大坝蓄水高程在149.25 m以上,会仙河恢复向湿地补水,最大补水量在12月16日达 $64.39 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

睦洞河下游五孔桥 MT3 的监测结果表明(图6),1—7月初陆续有降雨,睦洞河均有较大的流量,流量随降雨波动,对降雨的响应时间短,长时间无降雨,流量快速下降,6月19日—6月29日由于降雨量大,流量无法测量。从7月9日开始,流域内长达4个月无降雨,睦洞河流量不断减少,到8月18日之后基本断流。11月16—26日流域内积累降雨量达72 mm,睦洞河流量得到恢复。睦洞河的水主要来源于睦洞湖,对大气降雨响应时间较短,说明睦洞湖对大气降雨调蓄作用不强,这与睦洞湖汇水面积不大,湖泊和河道较严重淤塞有关。

4 水资源调控技术

以上分析表明,会仙岩溶湿地水资源调蓄能力有限,雨季易涝,旱季过早,若连续2个月无降雨,狮子岩地下河基本断流,为了提高湿地水资源调蓄能力,本研究实施了水资源调控工程,使湿地水资源调蓄能力得到提升。

4.1 狮子岩地下河系统

针对狮子岩地下河系统具有管道集中径流、流量大、水量充足的特征,于2020年沿地下河管道采取“蓄”“引”“堵”“拦”三级水资源调控技术对水资源进行调控(图7),逐级提升地下河水位,充分发挥狮子岩地下河对水资源的调控作用。

(1)上游“蓄”和“引”:在地下河上游八仙湖地表明流段实施了蓄水工程和引水工程,八仙湖周边耕地标高149.8~150.0 m,通过修建可调控水位的蓄水坝将八仙湖的水位控制在149.0~149.8 m之间,将枯水期水位提高30 cm。水坝设计为兼具泄洪与控制蓄水水位功能的节制闸,在洪水季节开闸排泄洪水,不加重周边耕地洪涝程度;洪水过后关闸蓄水提高水位,增加地下水在八仙湖中的滞留时间;并通过修建引水渠道和控水闸门将八仙湖的水集中引流到西南侧地下河伏流入口的水塘中,提高地下水补给量;

(2)中游“堵”,在地下河管道中实施堵水工程。在地下河中游天窗中修建宽1 m,长20 m,高1.5 m的拦水大坝,提高了地下河上游水位,枯水期可提高上游水位20 cm,并利用巨大的地下河管道空间存蓄地下水;拦水大坝还可以减慢地下水的径流速度,延长地下水在地下管道中的滞留时间;

(3)下游“拦”,在地下河出口处实施拦水工程。在地下河的两个出口 SH1、SH2 修建可调控水位的拦蓄水坝,经验证明当出口水位抬高50 cm时,对神潭附近的耕地淹没面积较大,得不到村民的支持,当抬高30 cm时,淹没耕地的面积较小,村民抽水灌溉

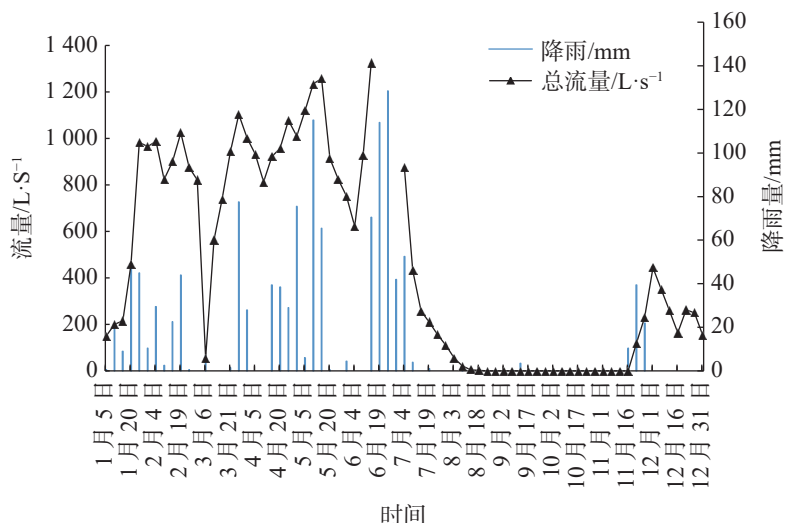


图6 睦洞河五孔桥 MT3 流量动态

Fig. 6 Flow dynamic curve of the Mudong river in MT3

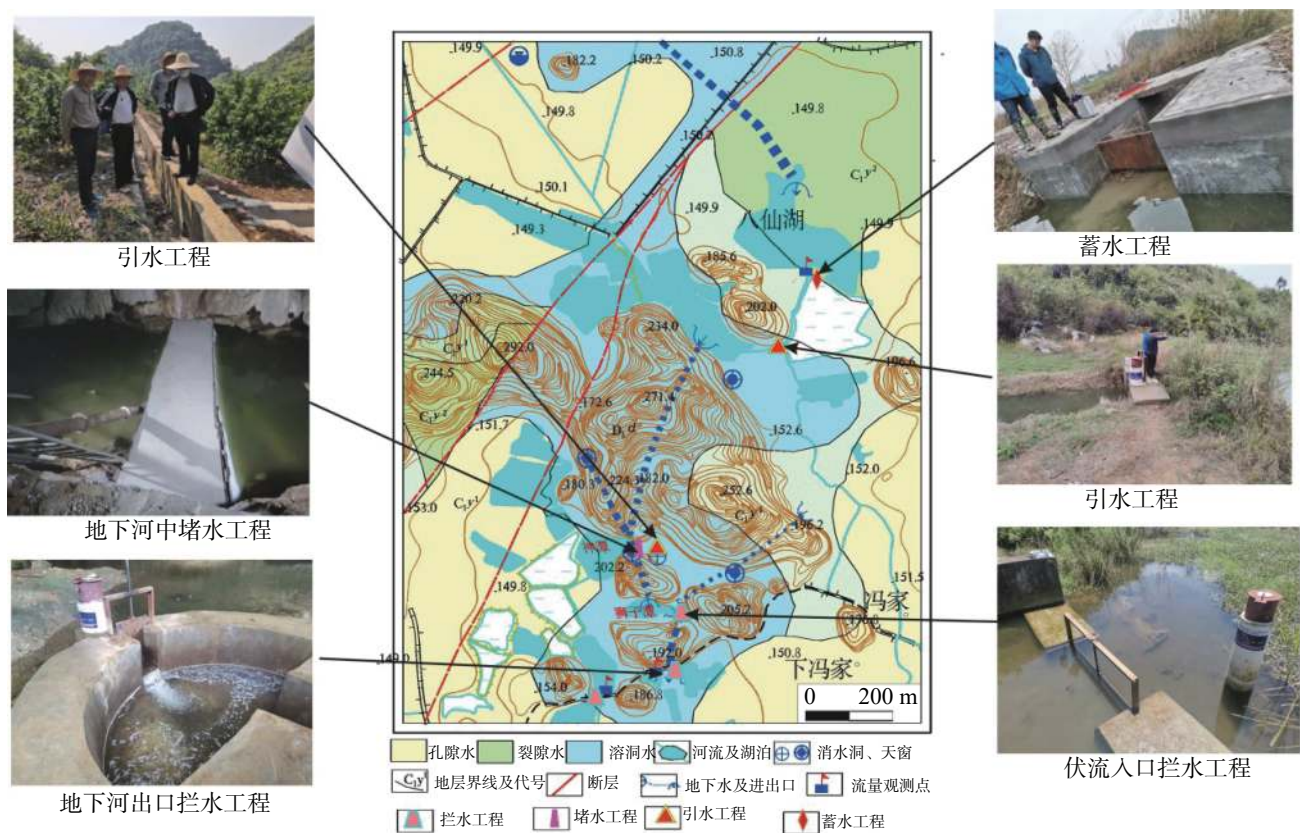


图 7 狮子岩地下河系统三级调蓄工程部署图

Fig. 7 Deployment plan of the three-stage storage and regulation project of the Shiziyan underground river system

更为方便。因此,出口拦蓄水坝设置提高水位 30 cm,在提高出口水位的同时并增加地下水在管道中的滞留时间。

通过三级调控工程使狮子岩地下河水位从出口到八仙湖 1 km 的范围段提高 70 cm,采用可控制水位的调蓄工程保障了集中降雨期不会加重周边耕地洪涝程度。调蓄工程在 2021 年投入运行,效果较好,可将狮子岩地下河出口上游 1 km 范围内明流段狮子潭、神潭、八仙湖的低水位期时间缩短 1 个月以上(照片 1,照片 2)。针对分水塘、神潭、狮子潭、八仙湖长满了芦苇和水草,淤泥充塞,水面被土堤分割,两侧被鱼塘挤占,可调蓄水资源的湖塘容积减小,水资源调蓄能力较弱的问题,提出了清淤扩容、水系连通来进一步提高狮子岩地下河水资源调蓄能力的方案,该方案被临桂区政府采用,2022 年 12 月开始实施对该区域湖塘的清淤工作(照片 3、照片 4),可增加调蓄库容 10 万 m³。

4.2 睦洞湖系统

针对睦洞湖系统分散排泄的特征,于 2021 年采



照片 1 2019 年 10 月 8 日八仙湖水面

Photo 1 Water surface of Baxian lake on Oct 8, 2019



照片 2 2021 年 10 月 14 日八仙湖水面

Photo 2 Water surface of Baxian lake on Oct 14, 2021



照片 3 清淤前的狮子潭
Photo 3 Shizi lake before the silt clearing



照片 4 清淤后的狮子潭
Photo 4 Shizi lake after the silt clearing

取出口“拦”的地表水、地下水资源综合调控技术，并提出了进口“引”的工程措施建议。

(1)出口“拦”，在睦洞河五孔桥上游 200 m 处建立了自动远程调控湿地水位的控制站(照片 5、照片 6)，通过模拟计算出口水位超过 149.2 m 时，核



照片 5 实施调蓄工程前睦洞河水位 (2021 年 7 月 13 日)
Photo 5 Water level of the Mudong river before the implementation of regulation and storage project (July 13, 2021)



照片 6 实施调蓄工程后睦洞河水位 (2022 年 9 月 1 日)
Photo 6 Water level of the Mudong river after the implementation of regulation and storage project (September 1, 2022)

心区水位达 149.8 m 以上，发生大面积洪涝，出口水位为 148.8 m 时，核心区水位可达 149.0 m，该成果另文发表。因此，在丰水期当出口水位超过 149.2 m 时自动开闸放水减轻湿地洪涝灾害，平水期和枯水期水位低于 148.8 m 时自动关闭水闸。通过该调控技术成功将湿地出口水位抬高 30 cm，湿地核心区水位抬高 10~20 cm。调蓄工程 2022 年投入运行，效果较好，使睦洞湖湿地低水位期推迟 2 个月以上。

(2)进口“引”，会仙河拦河坝 MT1 由于年久失修，坝底部漏水，蓄水效果不佳，建议重修该拦河大坝，新建水坝需满足泄洪和蓄水两方面需求，保障水位的可调节性。运河周边及湿地地表高程在 149.8~150.0 m 之间，雨季当会仙河水位超过 149.8 m 后，开闸泄洪，减轻睦洞湖湿地的排洪压力；当会仙河水位低于 149.25 m 时，关闸蓄水，保障会仙河水通过运河向湿地中补水。这样既能在洪水高峰时快速、有效地泄洪，又能确保洪水后期能有效蓄洪，提高地下水水位并满足湿地生态蓄水要求。即便是在 9—10 月农业灌溉期，会仙河流量较小，不能有效增加对湿地补水量的情况下，修建的大坝也能提高湿地周边农田的灌溉用水量，减少湿地周边农田对湿地灌溉用水的需求。值得注意的是，会仙河枯季流量有限，灌溉用水量大，无法补给湿地，如果能在会仙河上游非岩溶区修建或扩建蓄水工程，将有效提高会仙河枯水季节流量。

5 结 论

会仙湿地核心区由狮子岩地下河系统和睦洞湖分散排泄系统组成，地下水对大气降雨具有一定的调蓄作用，但调蓄功能较弱，雨季过后若连续 2 个月无降雨地下河基本断流。狮子岩溶洞 SH2 出水量不到系统的 1/10，大部分地下水通过神潭水沟从 SH1 排泄。因此，要让狮子岩溶洞中地下水长流，使地下河系统中的大部分水从 SH2 流出，需对狮子岩溶洞管道底部和狮子潭进行清淤，同时要在 SH1 排泄口修建控制性水闸以调控从神潭水沟的流出量。

会仙河通过古运河补给睦洞湖，是湿地水资源的重要来源，补水量取决于会仙河大坝的蓄水高度，2022 年 1—8 月会仙河大坝蓄水高度大于 149.25 m，会仙河通过莫家水坝向湿地补水的流量保持在 50 L·s⁻¹ 以上，从 7 月 6 日开始，流域内长达 4 个月无

降雨, 会仙河流量不断减少, 对湿地的补水不断减少, 到 8 月 23 日减少到 $12.34 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, 之后断流。枯季会仙河大坝蓄水高度容易降到 149.25 m 以下, 不能保障对湿地补水。建议对该大坝进行重修, 更好的发挥会仙河大坝对河水位的调蓄作用, 增加对睦洞湖湿地的补水效果。

针对狮子岩地下河系统具有管道集中径流的特征, 采取了在地下河管道上游“蓄”和“引”, 中游“堵”, 下游“拦”的三级调控工程使地下河水位从出口到八仙湖段提高 70 cm, 并采用可控制水位的调蓄工程保障丰水期不会加重周边耕地洪涝程度, 缩短狮子岩地下河出口上游 1 km 范围内明流段狮子潭、神潭、八仙湖低水位期时间 1 个月以上。针对睦洞湖系统具有分散排泄的特征, 采取出口“拦”地表水、地下水资源综合水资源调控技术, 成功将湿地出口水位抬高 30 cm, 湿地核心区水位抬高 10~20 cm, 使睦洞湖湿地低水位期推迟 2 个月以上。

本研究证实可以通过堵、蓄水工程来提高湿地水位, 增加湿地蓄水和保水能力, 使其在枯水期维持一定的水深、水域范围, 推迟枯竭的时间。但受湿地核心区流域范围较小和调蓄空间限制, 要彻底改善会仙湿地的水环境状况、满足枯季旅游及周边农田灌溉用水需求问题, 还需考虑修建外流域调水工程加以解决。解决雨季内涝问题, 还需在流域外增加调蓄工程进行调水, 加大从周边河流引水力度。

参考文献

- [1] 蔡德所, 马祖陆, 蒋忠诚. 会仙岩溶湿地生态系统研究[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
CAI Desuo, MA Zulu, JIANG Zhongcheng. Study on ecosystem of karst wetland in Huixian[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012.
- [2] 栗圆圆. 桂林会仙岩溶湿地水文过程初步研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2008.
LI Yuanyuan. Preliminary study on hydrologic process of karst wetland in Huixian, Guilin[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2008.
- [3] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1491-1503.
XU Guangping, LI Yanqiong, SHEN Yuyi, ZHANG Denan, SUN Yingjie, ZHANG Zhongfeng, ZHOU Longwu, DUAN Chunyan. Soil organic carbon distribution and components in different plant communities along a water table gradient in the Huixian karst wetland in Guilin[J]. Environmental Science, 2019, 40(3): 1491-1503.
- [4] 张莹, 刘畅, 宋昂, 靳振江, 李强. 基于典范对应分析的会仙岩溶湿地土壤理化性质与土壤酶活性关系研究[J]. 中国岩溶, 2016, 35(1): 11-18.
ZHANG Ying, LIU Chang, SONG Ang, JIN Zhenjiang, LI Qiang. Relationship between soil physicochemical properties and soil enzyme activities in Huixian karst wetland system based on Canonical Correspondence Analysis[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(1): 11-18.
- [5] 吴应科, 莫源富, 邹胜章. 桂林会仙岩溶湿地的生态问题及其保护对策[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 85-88.
WU Yingke, MO Yuanfu, ZOU Shengzhang. Ecologic problem and protection method of karst wetland in Huixian, Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2006, 25(1): 85-88.
- [6] 邹胜章, 周长松, 朱丹尼, 林永生, 樊连杰, 谢浩, 王佳, 李军. 科学保护“桂林之肾”: 会仙岩溶湿地[J]. 中国矿业, 2019, 28(Supp.1): 353-357.
ZOU Shengzhang, ZHOU Changsong, ZHU Danni, LIN Yongsheng, FAN Lianjie, XIE Hao, WANG Jia, LI Jun. Scientific protection of Huixian karst wetland in Guilin[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(Supp.1): 353-357.
- [7] 赵一, 邹胜章, 申豪勇, 周长松, 樊连杰, 朱丹尼, 李军. 会仙湿地岩溶地下水系统水位动态特征与均衡分析[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 325-333.
ZHAO Yi, ZOU Shengzhang, SHEN Haoyong, ZHOU Changsong, FAN Lianjie, ZHU Danni, LI Jun. Dynamic characteristics and equilibrium analysis of water level in karst groundwater system of Huixian wetland[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(2): 325-333.
- [8] 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 赵一, 卢海平, 谢浩. 桂林会仙岩溶湿地水位动态特征及水文生态效应[J]. 中国岩溶, 2021, 40(4): 661-670.
ZHU Danni, ZOU Shengzhang, ZHOU Changsong, ZHAO Yi, LU Haiping, XIE Hao. Dynamic characteristics of water level and hydroecological effects in Huixian karst wetland in Guilin[J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(4): 661-670.
- [9] Moran J, Sheehy Skeffington M, Gormally M. The influence of hydrological regime and grazing management on the plant communities of a karst wetland (Skealaghan turlough) in Ireland[J]. Applied Vegetation Science, 2008, 11(1): 13-24.
- [10] Grabas G P, Rokitnicki-Wojcik D. Characterizing daily water-level fluctuation intensity and water quality relationships with plant communities in Lake Ontario coastal wetlands[J]. Journal of Great Lakes Research, 2015, 41(1): 136-144.
- [11] 卢丽, 邹胜章, 赵一, 樊连杰, 林永生, 王喆. 桂林会仙湿地狮子岩地下河系统水循环对降水的响应[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(5): 63-72.
LU Li, ZOU Shengzhang, ZHAO Yi, FAN Lianjie, LIN Yongsheng, WANG Zhe. Response of water cycle to precipitation in Shizhiyan underground river system in Huixian wetland of Guilin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(5): 63-72.

- 63-72.
- [12] 林栋材, 魏宇, 张新兴, 陈涛. 从岩溶水文地质角度分析桂林会仙湿地修复问题[J]. *资源环境与工程*, 2008(Supp.1): 221-222.
- LIN Dongcai, WEI Yu, ZHANG Xinxing, CHEN Tao. The restoration of Huixian wetland in Guilin was analyzed from the perspective of karst hydrogeology[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2008(Supp.1): 221-222.
- [13] 任智丽, 路明, 孙小双. 会仙湿地岩溶地下水数值模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(5): 157-164.
- REN Zhili, LU Ming, SUN Xiaoshuang. Numerical simulation of karst groundwater in Huixian wetland[J]. *South-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(5): 157-164.
- [14] 彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁. 多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例[J]. *环境科学*, 2018, 39(12): 5410-5417.
- PENG Cong, PAN Xiaodong, JIAO Youjun, REN Kun, ZENG Jie. Identification of nitrate pollution sources through various isotopic methods: A case study of the Huixian Wetland[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(12): 5410-5417.
- [15] 靳振江, 程亚平, 李强, 曾鸿鹄, 罗堃, 黄静云, 陆文体, 唐志琴. 会仙喀斯特溶洞湿地、稻田和旱田土壤有机碳含量及其与养分的关系[J]. *湿地科学*, 2014, 12(4): 485-490.
- JIN Zhenjiang, CHENG Yaping, LI Qiang, ZENG Honghu, LUO Kun, HUANG Jingyun, LU Wenti, TANG Zhiqin. Content of soil organic carbon and its relationship with nutrients in karst cave wetlands, paddy fields and dry farmlands in Huixian[J]. *Wetland Science*, 2014, 12(4): 485-490.
- [16] 李军, 邹胜章, 梁永平, 林永生, 周长松, 赵一. 会仙岩溶湿地水体金属元素分布与健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, 41(11): 4948-4956.
- LI Jun, ZOU Shengzhang, LIANG Yongping, LIN Yongsheng, ZHOU Changsong, ZHAO Yi. Metal distributions and human health risk assessments on waters in the Huixian karst wetland, China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 4948-4956.
- [17] 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝芙宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹尼. 会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险[J]. *环境科学*, 2021, 42(1): 184-194.
- LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Shengzhang, LAN Funing, FAN Lianjie, XIE Hao, QIN Yue, ZHU Danni. Metal pollutions and human health risks in groundwater from wet, normal, and dry periods in the Huixian karst wetland, China[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(1): 184-194.
- [18] 章程, 汪进良, 谢运球, 王松. 桂林会仙岩溶湿地水化学昼夜动态变化及其影响因素[J]. *地质评论*, 2013, 59(6): 1235-1241.
- ZHANG Cheng, WANG Jinliang, XIE Yunqiu, WANG Song. Hydrochemical daily variations in a karst lake of Huixian wetland of Guilin and their influencing factors[J]. *Geological Review*, 2013, 59(6): 1235-1241.
- [19] 彭聪, 巴俊杰, 胡芬, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁, 梁嘉鹏. 广西会仙岩溶湿地典型抗生素污染特征及生态风险评估[J]. *环境科学学报*, 2019, 39(7): 2207-2217.
- PENG Cong, BA Junjie, Hu Fen, PAN Xiaodong, JIAO Youjun, REN Kun, ZENG Jie, LIANG Jiapeng. Typical antibiotic pollution characteristics and ecological risk assessment of Huixian karst wetland in Guangxi, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(7): 2207-2217.
- [20] 符鑫, 梁延鹏, 覃礼堂, 曾鸿鹄, 莫凌云, 王敦球, 覃璐玫. 桂林会仙岩溶湿地水体中有机氯农药分布特征及混合物环境风险评估[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(5): 974-983.
- FU Xin, LIANG Yanpeng, QIN Litang, ZENG Honghu, MO lingyun, WANG Dunqiu, QIN Lumei. Distribution of organochlorine pesticides (OCPs) in the water body of Huixian karst wetland of Guilin and environmental risk assessment of OCP mixtures[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5): 974-983.
- [21] LIAO Hongwei, JIANG Zhongcheng, ZHOU Hong, QIN Xiaogun, HUANG Qibo. Isotope-based study on nitrate sources in a karst wetland water, Southwest China[J]. *Water*, 2022, 14: 1533.
- [22] 郭永丽, 吴佩艳, 黄芬, 孙平安, 苗迎, 刘绍华. 环境同位素示踪的毛村地下河流域水流特征[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(4): 577-587.
- GUO Yongli, WU Peiyan, HUANG Fen, SUN Ping'an, MIAO Ying, LIU Shaohua. Water flow characteristics of Maocun underground river basin based on environmental isotopes[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(4): 577-587.
- [23] 唐伟, 裴建国, 殷建军, 林玉石, 蒲俊兵, 汪智军, 朱琴. 桂林毛村岩溶地下河二十多来的水质演化趋势研究[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 331-336.
- TANG Wei, PEI Jianguo, YIN Jianjun, LIN Yushi, PU Junbing, WANG Zhijun, ZHU Qin. Water quality evolution tendency in Maocun karst underground river in Guilin for the past more than 20 years[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 331-336.
- [24] 赵良杰, 夏日元, 杨杨, 邵景力, 曹建文, 樊连杰. 基于CFP的岩溶管道流数值模拟研究: 以桂林寨底地下河子系统为例[J]. *地球学报*, 2018, 39(2): 225-232.
- ZHAO Liangjie, XIA Riyuan, YANG Yang, SHAO Jingli, CAO Jianwen, FAN Lianjie. Research on numerical simulation of karst conduit media based on CFP: A case study of Zhaidi karst underground river subsystem of Guilin[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2018, 39(2): 225-232.
- [25] 易连兴, 夏日元, 王喆, 卢海平, 赵良杰. 岩溶峰丛洼地区降水入渗系数: 以寨底岩溶地下河流域为例[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(4): 512-517.
- YI Lianxing, XIA Riyuan, WANG Zhe, LU Haiping, ZHAO Liangjie. Infiltration coefficient of precipitation in karst peak-cluster depression area: A case study of Zhaidi karst underground river basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(4): 512-517.
- [26] 广西壮族自治区水文工程地质队. 桂林幅1: 200 000区域水文地质普查报告[M]. 广西, 1983.

Study on characteristics and regulation technology of water resources of karst wetland in Huixian, Guilin

HUANG Qibo^{1,2,4}, ZOU Shengzhang^{1,2,4}, QIN Xiaoqun^{1,2}, CHEN Xuejun³, DAI Junfeng³, JIAO Youjun^{1,2,4},
LI Tengfang^{1,2,4}, MO Lingyun³, SONG Yu³

(1. Institute of Karst Geology GAGS/Karst Laboratory of karst Dynamics, MNR & GZAR/ International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi, Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo, Guangxi 531406, China; 3. Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 4. Guangxi Karst Resources and Environment Research Center of Engineering Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Known as "the kidney of the Lijiang river", Huixian karst wetland is the largest original ecological wetland of karst landform in the Lijiang river basin; therefore, it plays an important role in water replenishing and improvement of ecological environment of the Lijiang river. However, the regulation of water resources and storage capacity of Huixian karst wetland is limited because the area of the wetland varies greatly in season, and the regulation and storage function of water resources is weak in both the waterlogging season and the drought season. In a hydrological year, the water surface elevation of wetland fluctuates between 147.5-150.20 m, and the surrounding ground elevation ranges from 149.6-150 m. Thus, when the water level is higher than 149.8 m, a large area of cultivated land will be flooded, while the water level of wetland will easily drop below 149 meters resulting in the water shortage of wetland in the dry season. The frequent fluctuation of wetland water surface in a hydrological year leads to the reduction of wetland area or the inundation of cultivated land, which seriously affects the wetland landscape and villagers' water consumption of farming and living. Water resource problem has become a key factor restricting the development and protection of Huixian karst wetland. Previous studies have been carried out on the geological background, hydrogeological conditions, water level dynamics, groundwater balance, groundwater pollution and other aspects of the formation of Huixian karst wetland. However, less attention is paid to the dynamics of groundwater flow and the technology of regulating water resources, which may seriously influence the implementation of effective regulation of wetland water resources.

In 2022, Guilin City launched the flood control and drainage upgrading project of the Xiangsi river in Guilin New District. The municipal government planned to invest 650 million yuan for the improvement of water resource regulation and storage function of Huixian karst wetland and the improvement of water ecological environment. It also intended to develop the landscape resources of karst cave wetland at the outlet of the Shiziyan underground river. In this study, the discharge of Shiziyan underground river system and Mudong lake dispersed drainage system in the core area of wetland were observed for one hydrological year, and the dynamic characteristics and controlling factors of wetland groundwater flow were systematically analyzed. On this basis, different regulation techniques were adopted to control water resources for the centralized runoff system of the Shiziyan underground river pipeline and the dispersed drainage system of Mudong lake. As a result, the water level of Huixian wetland was controlled within a reasonable range, achieving a good demonstration effect. This study provides scientific and technological support for the improvement of water resource regulation and storage function of Huixian karst wetland. It also provides a typical example for water resource regulation of karst cave pipeline wetland and dispersed drainage wetland in the karst area of Southwest China.

The results show that groundwater plays a certain role but a weak function in regulating and storing atmospheric rainfall. If there is no rainfall for two months after the rainy season, the flow will be basically cut off. The Huixian river supplies water to Mudong lake through the ancient Guiliu canal, and the amount of water replenishment depends on the water storage height of the Huixian river dam. In the rainy season, the water storage height of the Huixian river dam is greater than 149.25 meters, which can guarantee the water replenishment of the wetland, but in the dry season, the water storage height can easily fall below 149.25 meters, which cannot replenish the wetland. Considering that the Shiziyan underground river system has the characteristics of concentrating runoff from pipelines, a three-level control

(下转第 762 页)

An overview of karst geology in Myanmar

WEI Yanlan, LI Wenli, HUANG Chenhui, QIN Fengrui

(*Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR/International*

Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract With a widespread area of karst accounting for about 12% of the national territory, Myanmar, the second largest country in Southeast Asia in terms of karst area, has great potential of karst resources. However, due to outdated infrastructure and other reasons, the research on karst geology in Myanmar started late with a weak foundation. Having been in the developing stage of karst geology research in Myanmar, comprehensive karst geological data is conducive to understanding karst in this country. On the basis of systematic data collection, this study synthesizes remote sensing data with geologic map, hydrogeologic map, and structural map on various scales. It comprehensively analyzes the background conditions of karstification from the geological evolution process, lithologic combination, and climate and environment, and summarizes the karst distribution law and the characteristics of karst landscape in Myanmar.

Extending to the borders of Thailand, Laos and China, karst in Myanmar covers an area of 70,000 km², distributed in the high land and mountainous area of Shan State to the east of the Irrawaddy River and the south of Andaman Sea. Some karst landforms are also developed in Kachin State in the north, Chin State in the west and Sagaing State in the northwest. Mainly developed in the Permian-Lower Triassic limestone and Early Ordovician limestone, karst on the Shan Plateau in the east is the largest karst area in Myanmar, with an area of about 63,000 km². The belt-shaped karst extends 1,500 kilometers from Shan State to Myeik Archipelago in a south-north direction. Intensity of karstification in Myanmar is controlled by many geological factors such as stratigraphic lithology, geological structure and environment. Thick Paleozoic carbonate strata, warm and rainy climate, complex tectonic movements and active biological activities are all conducive to the occurrence of karstification. The thick layers of Permian-Triassic, Triassic, Ordovician, and Silurian periods, pure limestone, and dolomite are the main layers of karst development, especially 5,000-meter-thick Permian-Triassic limestone in Shan State. With the highest biodiversity in the world, active biological activities in Myanmar facilitate karstification. The karst landform in Myanmar is controlled by stratigraphic lithology, with the development of peak forests, peak clusters, and karst cave landscapes. From north to south, karst landforms change from limestone ridges, canyons, cluster-peak depressions to peak forest plains. Hpa-an is a transitional area from high mountain karst to depression karst.

Key words Myanmar, karst geology, karst landscape, cave

(编辑 张玲)

(上接第 732 页)

project—"storing" and "diverting" in the upper reaches, "blocking" in the middle reaches, and "intercepting" in the lower reaches—has been adopted to increase the level of the underground river by 70 cm from the outlet to Baxian lake. This project can shorten the period of keeping a low water level by more than one month. In view of the dispersed drainage characteristics of the Mudong lake system, the technology of regulating water resources by "diverting" at the entrance and "intercepting" at the outlet was adopted. The water level at the exit was raised by 30 cm and the water level in the core area by 10-20 cm, delaying the time of keeping the low water level for more than two months.

Key words Huixian karst wetland, storage height, underground river system, dispersed drainage system, Guilin

(编辑 杨杨 张玲)