

普政功, 黄奇波, 吴华英, 等. 漓江峰丛片区高位岩溶洼地洪涝水文过程及有效治理[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 831-842.

DOI: 10.11932/karst2024y004

# 漓江峰丛片区高位岩溶洼地洪涝水文 过程及有效治理

普政功<sup>1,2,3</sup>, 黄奇波<sup>1,2</sup>, 吴华英<sup>1,2</sup>, 李腾芳<sup>1,2</sup>, 邹昌霖<sup>1,2</sup>, 廖红为<sup>1,2</sup>

(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. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

**摘要:** 漓江峰丛片区高位岩溶洼地洪涝频发, 严重影响该地区农村经济发展和自然景观资源开发与保护。本研究选择在漓江峰丛片区暗崮高位洼地开展洪涝水循环过程研究, 对洼地内主要消水口(A01、A03落水洞)进行扩宽和疏通, 加大过水能力, 使洪涝水害得到有效治理。结果表明: 洼地积水成涝对降雨响应迅速, 降雨结束后, 12~24 h内洼地积水深度就能达到最大, 日降雨量超过50 mm或72 h累计降雨量超过90 mm, 洼地就容易积水成涝。2023年4—7月共造成了8次洪涝灾害, 洪涝总时长达417.5 h(18.6 d)。鱼崮地下河出口排泄量达到大气降雨补给量的77.77%和87.32%, 为暗崮洼地地下水总排泄口, 主要通过中部A01、A02、A03、A04 4个消水洞排水, 4个消水洞不同的消水速度造成了出口流量的4个峰值。A01消水洞水力坡度小, 下部管道受方解石矿渣堵塞, 消水速度较慢, 现仅对A01洞口进行整治, 未能有效解决洼地洪涝问题。A03、A04消水洞位于方解石脉矿的南侧, 未受到方解石尾矿渣的影响, 岩溶管道过水通畅。通过疏通A04消水洞, 并将南侧古蚕洼地的洪流引至A03消水洞, 缩短洪涝时间66.71 h(2.8 d)。因此, 修建好南部排水沟系统, 使南部古蚕洼地的水全部通过A03、A04消水洞快速向鱼崮地下河出口排泄, 是进一步减轻暗崮洼地洪涝受灾程度的重要措施。

**关键词:** 漓江峰丛片区; 岩溶洼地; 岩溶洪涝; 水文过程; 洪涝治理

**创新点:** 通过对漓江峰丛片区暗崮岩溶洼地中的消水洞、出口流量及降雨量的实时动态监测, 掌握了岩溶洼地内涝形成过程和变化规律, 揭示了内涝形成机理, 并采取了有针对性的防治措施, 使内涝灾害得到有效治理。

中图分类号: P333.2 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0831-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## 0 引言

岩溶地区的洪涝是一种与生态环境和人类活动密切相关的地质灾害<sup>[1-2]</sup>, 在我国西南岩溶区最为常

见, 与岩溶石漠化、水土流失等环境地质灾害一样, 至今仍无法有效“根治”, 生活在该类地区的人民深受其害, 农业生产水平低下, 居民生活贫困<sup>[3-5]</sup>。岩溶含水层结构和水动力条件是洪涝发生的主要因素<sup>[6-7]</sup>,

资助项目: 广西科技计划项目“漓江喀斯特自然遗产地植物资源保育与景观功能提升技术及应用”——喀斯特峰丛区水土过程调控与空间优化及适宜产业试验示范课题(AB22080057-2); 中国自然科学基金面上项目(42372294); 中国地质调查项目(DD20221758)

第一作者简介: 普政功(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水文地质与工程地质。E-mail: ZG9578@139.com。

通信作者: 黄奇波(1982—), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 岩溶水文地质、岩溶环境与全球变化。E-mail: qbhuang0108@163.com。

收稿日期: 2023-01-01

由于岩溶地下水对大气降雨响应迅速、暴涨暴落,相同降雨条件下岩溶区的洪涝比非岩溶区更为严重<sup>[7]</sup>。开展岩溶地区洪涝成因及防治研究,对实现区域内社会、经济、生态、环境可持续发展具有重要的现实意义<sup>[8]</sup>。

岩溶洼地封闭性好,雨季周围山地地表及地下径流集中汇流,相比其它岩溶地貌更易形成洪涝灾害区<sup>[7,9]</sup>。国内外学者对岩溶区的洪涝成因开展了大量的研究,也提出了很多有效的治理措施<sup>[10-15]</sup>。蒋忠诚等<sup>[16]</sup>研究表明汛期集中暴雨或多日连续降雨是岩溶洼地发生洪涝灾害的直接外因,大多数岩溶洪涝发生在暴雨期间或连续强降雨时段;苏昌等<sup>[17]</sup>认为洪涝灾害发生与连续高强度降雨有直接关系,一般情况下,地下管道系统的排水能力能够适应当地的降水量和降水强度,但当大暴雨和连续降雨量过大时,因排水不畅而使洼地发生洪涝;裴建国等<sup>[18-19]</sup>指出溶洼系统所处的位置高度、地层岩性、岩溶发育程度及地下水埋藏深度,特别是落水洞、竖井、天窗、漏斗、地下河管道发育的形态和大小是形成洪涝的内在因素。岩溶区地下水土漏失会影响降雨渗流及管道排泄,地下河管道堵塞,引发洼地洪涝灾害<sup>[15,20-21]</sup>,黄琨等<sup>[22]</sup>认为人类的工程活动打破岩溶区原先的水文地质条件,生活垃圾、采石场矿渣等堵塞地下岩溶管道引起洪涝。以上研究从气象条件、地形地貌和人类工程活动方面来研究岩溶洪涝成因,但对洪涝与降雨量的定量关系及形成的水文过程方面的研究不多,这严重影响了洪涝治理成效<sup>[23-24]</sup>。当前急需开展更为精细的观测研究,刻画出洪涝与降雨量的定量关系及水文过程,才能提出有效的治理模式,更好地服务于洪涝治理和生态文明建设。

漓江峰丛片区主要分布于桂林漓江中游从灵川县大圩镇到阳朔县 83 km 范围内,分布面积达 624 km<sup>2</sup>。区内洼地数量有上千处之多,洼地内土壤养分很高,面积较大的洼地地势平坦、村屯聚集、土地资源稀缺。片区内干旱与洪涝的频繁交替不仅严重影响该地区居民的经济发展和乡村振兴,也影响该区景观资源品质的提升,俨然是制约自然景观资源开发与保护的主要瓶颈。前人对该地区的地貌成因、地质构造进行了深入研究<sup>[25-29]</sup>,但有关该地区洪涝形成条件和水文过程并未见相关报道,亟需开展深入研究。基于此,本研究依托广西重点研发项目课题“喀斯特峰丛区水土过程调控与空间优化及适宜产业试

验示范(桂科 AB22080057-2)”和中国地质调查项目“珠江流域水文地质调查与水资源监测(DD20221758)”,选取漓江峰丛连片区暗崮高位洼地开展洪涝水循环过程研究,并实施有针对性治理工程措施,使洪涝水害得到有效治理和洼地中宝贵的土地资源得到开发利用,并改善当地群众的生产生活条件,研究成果还可为西南岩溶峰丛洼地地区的洪涝治理提供科技支撑。

## 1 研究区概况

桂林市位于广西壮族自治区东北部,以锥状峰丛、塔状峰林秀甲天下。属亚热带季风性湿润气候,雨热同期,夏季炎热多雨、冬季阴冷潮湿。全年平均降雨量为 1 925 mm,降雨量随季节变化显著,4—8 月丰水期大的降雨量达全年的 65%,枯水期为 12 月至翌年 3 月,降雨量约占全年的 15%,其中 5—6 月份降雨量最为丰富,9 月以后降雨量逐渐减少,仅有局部性阵雨。

暗崮高位岩溶洼地位于漓江西岸、烈崮背斜东翼,距离江约 3.5 km(图 1),烈崮背斜呈北西~南东向,核部出露中泥盆统民塘组(D<sub>2m</sub>)厚层白云质灰岩,两翼为泥盆系融县组(D<sub>3r</sub>)厚层灰岩,以烈崮核部形成漓江与良丰江地下、地表水分水岭,东翼向东排泄进入漓江,西翼向大埠方向排入良丰江(图 2)。受北东向断层和裂隙影响,东翼岩溶地下河管道呈北东向发育,共发育有 4 条沿北东向展布的地下河(图 1),主管道长 3~6 km,汇水面积 5~10 km<sup>2</sup>,4 条地下河出口均在漓江西岸,出口高出漓江 10~15 m,显示西岸峰丛片区溯源侵蚀速率较漓江下切速率小而使地下河排泄口高出漓江河面。

暗崮高位洼地主要发育于泥盆系融县组(D<sub>3r</sub>)厚层灰岩中,岩溶十分发育。洼地主要沿北东向裂隙和南北向裂隙发育,整体呈“S”形。中部洼地受早期南北向构造的影响,受溶蚀作用时间较长,洼地位置较低,低洼处高程为 280 m,南北两端的洼地则受后期北东南西向构造影响,形成及受侵蚀较晚,侵蚀面较高,高程 290~300 m,南北两端的地表、地下水均向中部低洼地汇集(图 1)。通过洼地中部的南北向排列的 A01、A02、A03、A04 消水洞进入地下河管道,由西往东径流约 800 m,在东部的鱼崮洼地(标高 260 m)西侧 A05 地下河出口流出地表,在鱼崮洼地径约 400 m 明流后,在洼地东侧 A06 落水洞再潜

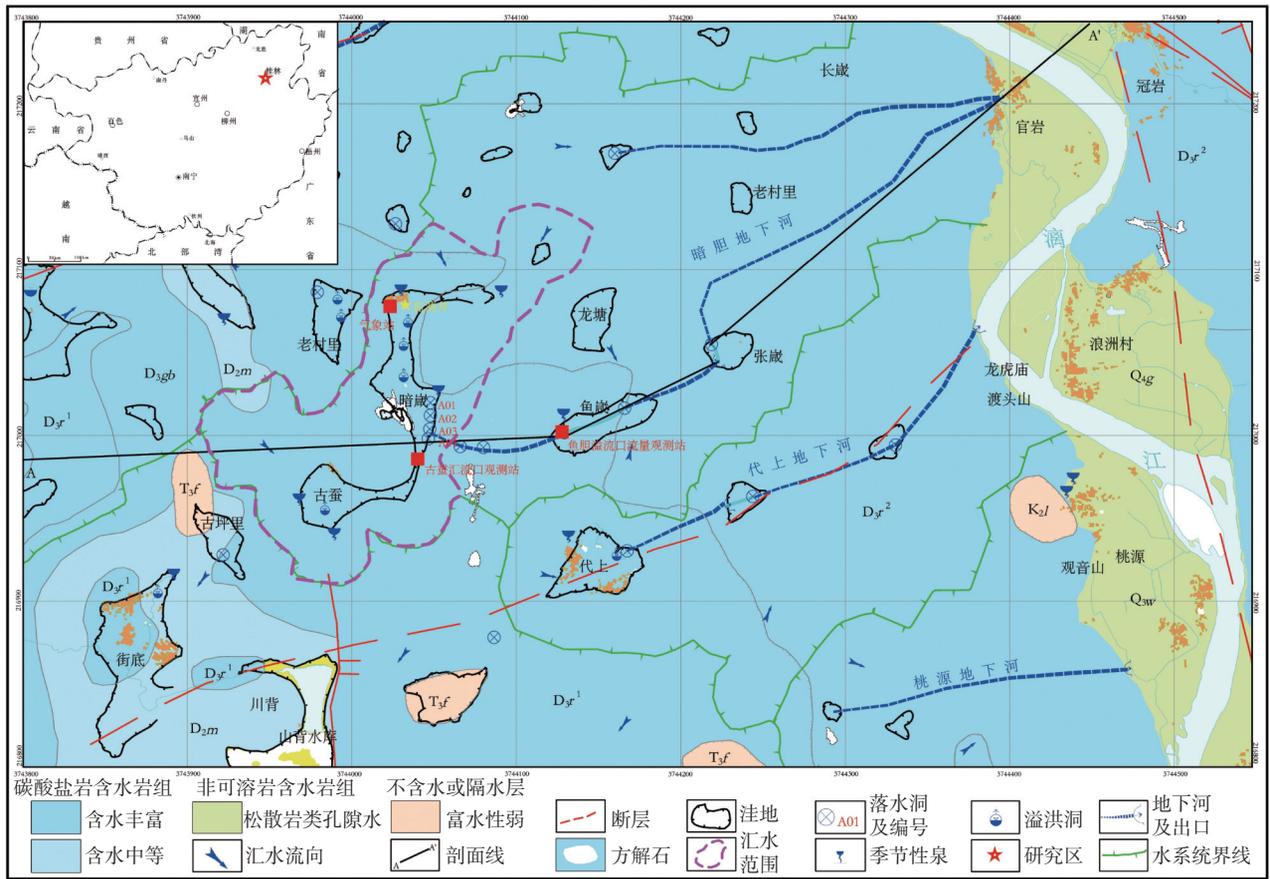


图 1 研究区位置及水文地质图

Fig. 1 Location and hydrogeological map of the study area

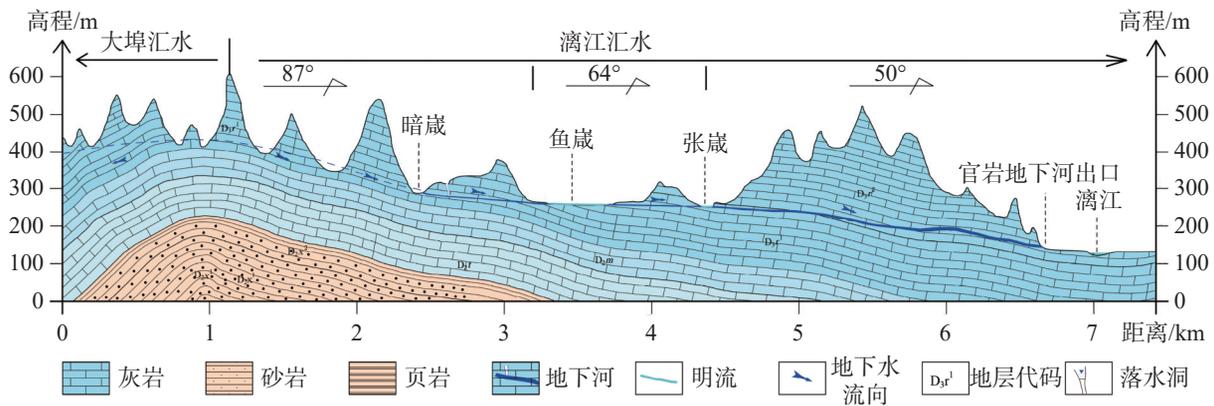


图 2 烈崴背斜北东—南西向剖面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the northeast-southwest section of the Liedang anticline

入地下(图 1),最后在漓江西岸官岩村流出地表,汇入漓江(图 1),漓江标高 130 m,暗崴高位洼地高出漓江 150 m。暗崴高位洼地中部落水洞西侧山体中发育一条宽约 20 m 的方解石矿脉,前期进行了开采,并将矿渣堆放于 A01 消水洞中,造成地下管道被堵,过水能力受限,当发生强降雨时因排水不畅产生洪涝。洼地每年发生严重洪涝 3~4 次,每次淹水 5—10 d,多则达 1 月之久,淹水深度达 3~10 m,洼地中

大片肥沃土地由于连年内涝而荒芜。

暗崴高位洼地地下水系统边界完整,汇水面积 2.3 km<sup>2</sup>,依据地表水汇流特征可分为北侧老塘洼地汇水子单元和南侧古蚕洼地汇水子单元,汇水面积分别为 1.0 km<sup>2</sup> 和 1.3 km<sup>2</sup>(图 1)。北侧老塘洼地汇水单元以 A01 消水洞消水,南侧古蚕洼地汇水单元以 A04 消水洞消水,A04 消水洞比 A01 消水洞高 5 m,且排水不畅,暴雨南侧古蚕洼地洪水易流向 A01 消

水洞,最终在鱼崮洼地地下河出口流出。洼地内土壤覆盖厚度不均,土壤为第四系红黏土,覆盖厚度1~5 m,洼地内以种植农作物(水稻、玉米、大豆等)为主,山坡及顶部土壤零星分布于岩石沟槽中,植被以灌木为主,下垫面条件简单。大气降雨是地下、地表水的唯一来源。汇水过程分为两部分,一是降雨形成地表水,通过洼地中的水沟向落水洞汇集,对大气降雨响应迅速;二是洼地周边峰丛山体接受大气降水补给后经岩石节理、层间裂隙下渗,在洼地周边出露成季节性泉或在谷地中形成溢洪溶潭(图1),汇入洼地中,经水沟汇入落水洞,此部分水因经过表层岩溶裂隙和植被的调蓄对大气降雨具有滞后作用。

## 2 研究方法

### 2.1 水循环转化水文地质在线监测方法

为准确掌握洼地内的洪涝发生条件和水文过程,建立了大气降雨、地表、地下水位、出口流量监测站(图1)。在暗崮村民屋顶安装了在线气象监测站,采用美国 Davis 公司生产的 Vantage 型翻斗式雨量桶自动记录仪,实时监测暗崮洼地的降雨量、蒸发量、气温等系列要素,监测频率为15分钟1次,监测精度为0.1 mm;为观测北侧老塘洼地汇水子单元水土流失状况和洪涝形成过程;在 A01 消水洞口修建了三级沉沙池和三角堰流量观测站,在三角堰口安置了水位自动监测探头;为监测南侧古蚕洼地汇流子单元的水流形成过程,在 A04 消水洞口上游 50 m 的总汇水沟中建立了水位自动监测站,安置了水位自动监测探头。为实时监测洼地地下水流量动态,在鱼崮地下河出口人工开挖形成宽 3 m、深 1.5 m 的标准水平渠道,在水渠中安装水位自动监测探头,实时监测渠道水深,同时对出口水渠流量进行了系列人工测量。水位监测均采用美国 Onset 公司生产的 Onset HOBO 型水位自动监测探头,监测精度为 1 mm,监测频率为 15 分钟 1 次。降雨量、水位监测时间为 2023 年 1 月 1 日—7 月。流量人工监测采用陕西欣源科技有限公司生产的 YSD5 本安型流速仪测量,测试精度为  $0.01 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,监测时间为 2023 年 5 月—7 月,每天 2 次,暴雨天气加密到 2 小时/次。

### 2.2 地下河出口流量拟合方法

将鱼崮地下河出口人工测量的系列流量数据与水位自动监测探头监测到的水深数据进行对比,选

择同一时间人工测量流量与探头监测水深进行统计分析,采用三次多项式拟合和指数函数拟合方程求解地下河出口渠道水深( $H$ )与流量( $Q$ )的对应关系。

三次多项式拟合效果如图 3,拟合方程如下:

$$Q = 3309.6H^3 - 455.94H^2 - 4.5111H + 17.764, \\ R^2 = 0.9242 \quad (1)$$

指数函数拟合效果如图 4,拟合方程如下:

$$Q = 5.5678e^{7.9602H}, \quad R^2 = 0.9148 \quad (2)$$

通过对比可知,三次多项式拟合方程拟合效果更好,平方差( $R^2$ )更接近 1,本次选取三次多项式拟合方程,利用 A05 地下河出口水位探头监测的水深数据来计算鱼崮地下河出口实时流量。

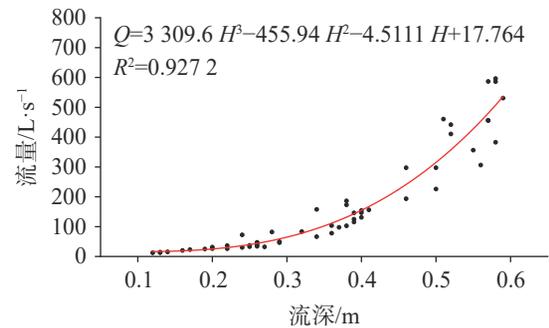


图 3 鱼崮地下河出口水位深度与人工测量流量三次多项式拟合

Fig. 3 Cubic polynomial fitting of water level depths and manually measured flow rates at the outlet of the Yudang underground river

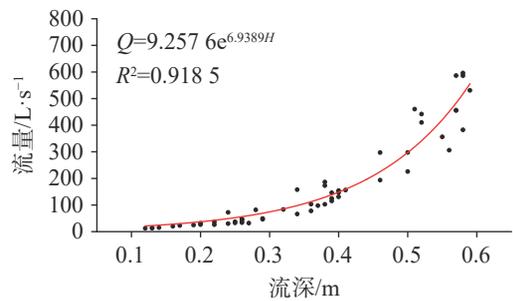


图 4 鱼崮地下河出口水位深度与人工测量流量指数函数拟合

Fig. 4 Exponential function fitting of the water level depths and the manually measured flow at the outlet of the Yudang underground river

## 3 洪涝特征及水文过程

### 3.1 降雨量特征

2023 年 1 月 1 日—7 月 9 日总降雨量为 1 142.2

mm, 其中 4 月—6 月降雨量为 911.6 mm, 占总降雨量的 79.81%, 降雨集中分布于 4 月到 6 月(图 5)。洼地消水洞消水能力有限, 通过观测日降雨量超过 50 mm 或连续 3 天的降雨量超过 90 mm, 洼地就容易积水成涝。日降雨量超过 50 mm 的有 6 次, 分别为 4 月 22 日(53.8 mm)、4 月 29 日(60.6 mm)、5 月 22 日(75 mm)、6 月 9 日(90.6 mm)、6 月 24 日(64.2 mm)、6 月 25 日(59.8 mm); 连续 3 天的降雨量超过 90 mm 的有 5 次, 分别为 3 月 23 日—3 月 25 日(97.2 mm)、4 月 22 日—4 月 23 日(90.8 mm)、5 月 20 日—5 月 22 日(99.4 mm)、6 月 8 日—6 月 9 日

(129.4 mm)、6 月 21 日—6 月 25 日(224 mm)。由此可见, 研究区 4—6 月降雨集中, 日降雨量和场降雨量超过 50 mm 的次数较多, 容易引起洪涝灾害。

### 3.2 洼地洪涝特征

通过监测发现 A01 消水洞三角堰口水深超过 1.4 m, 洼地就开始积水成涝, 作物受淹。根据三角堰水位监测站水深可见, 2023 年 4 月以来共造成了 8 次洪涝灾害(图 6), 洪涝总时间达 417.5 h(18.6 d), 主要对应日降雨量超过 50 mm 和场雨降雨量超过 90 mm 的时间(表 1), 8 次洪涝的被淹的时间为 17.5—

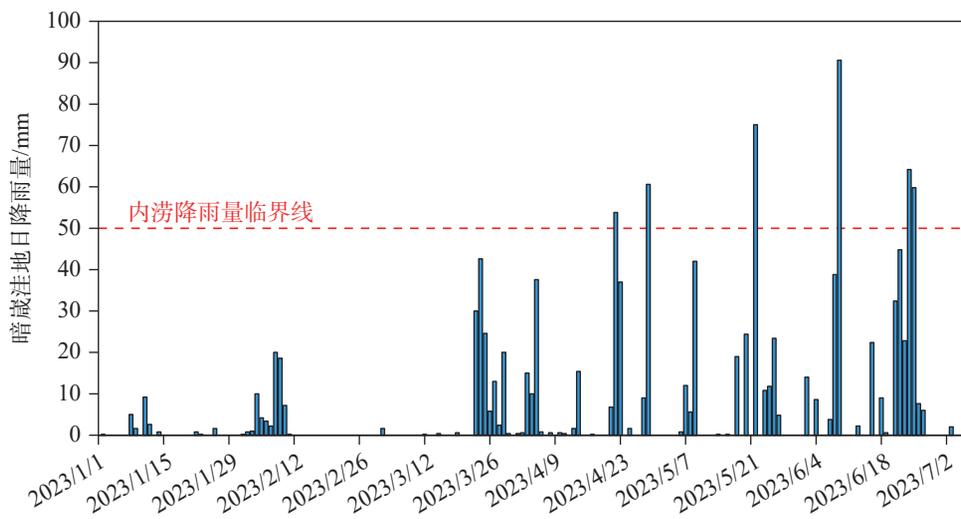


图 5 暗崮洼地 1—7 月日降雨量分布图

Fig. 5 Distribution of daily rainfall from January to July in Andang depression

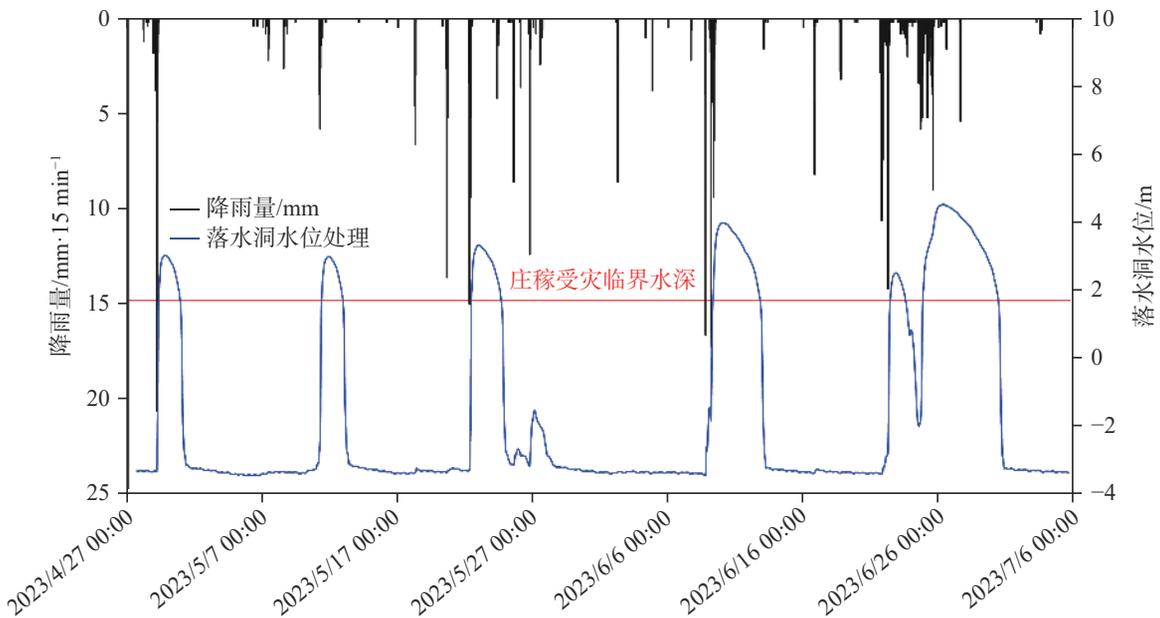


图 6 2023 年 4—7 月 A01 消水洞堰口水深曲线

Fig. 6 Water depth curve of the triangular weir mouth of A01 from April to July, 2023

表 1 2023 年 4 月到 6 月洼地洪涝时间统计  
Table 1 Flooding time in depressions from April to June, 2023

降雨时间	场雨降雨量	淹水时段	淹水时间/h	最大积水	
	mm			深度/m	时刻
4月3日—4月5日	62.6	4月05日08:00—4月06日01:30	17.5	0.457	4月5日14:00
4月22日—4月23日	90.8	4月23日15:00—4月24日15:30	24.5	0.815	4月24日0:15
4月29日	60	4月29日07:00—4月30日20:30	37.5	1.299	4月29日18:30
5月7日—5月9日	59.6	5月11日08:30—5月12日22:00	37.5	1.269	5月11日20:30
5月20日—5月22日	99.4	5月22日10:00—5月24日15:00	53	1.609	5月22日23:30
6月8日—6月9日	129.4	6月09日07:30—6月12日19:00	84	2.265	6月10日0:00
6月21日—6月22日	77.2	6月22日10:00—6月23日13:30	27.5	0.792	6月22日19:30
6月23日—6月25日	146.8	6月24日20:00—6月30日10:00	136	2.808	6月26日7:30

136 h 不等。4 月到 5 月随着降雨量的增多, 洼地表层土壤水分不断饱和, 后期相同的降雨量引起的受灾时间和程度明显强于前期。如 4 月 22 日—4 月 23 日场雨降雨量达 90.8 mm, 洼地淹水时间仅为 24.5 d, 淹水深度仅为 0.815 m; 而后期 4 月 29 日和 5 月 7 日—5 月 9 日两场降雨量均为 60 mm 左右, 但淹水时间达 37.5 h 左右, 淹水深度达 1.3 m 左右, 后期两场降雨所造成的洪涝灾害程度明显大于前者。这是因为前期的大量降雨首先要补给土壤层和表层岩溶带由于长时间未有降雨而造成的巨大亏缺后, 才能形成地表洪流; 5 月以后洼地土壤水基本饱和, 降雨全部形成地表洪流。

洼地积水成涝对降雨响应迅速, 降雨结束后, 12—24 h 内洼地积水深度就能达到最大, 受灾时间和积水深度由降雨强度所决定, 从 4 月到 6 月随着降雨量的增加, 洼地淹水时间和淹水深度均呈增加的趋势(表 1)。4 月降雨量相对较少, 洼地淹水时间为 17.5—37.5 h, 淹水深度 0.457~1.299 m, 5 月洼地淹水时间为 37.5—53 h, 深度 1.269~1.609 m, 特别严重洪涝为 6 月 21 日—6 月 25 日, 5 天降雨量达 224 mm, 积水深度达到了 2.808 m, 淹没到了洼地中的水泥路面, 洪涝时间为 6 月 24 日—6 月 30 日, 达到 136 h (6 d)。

### 3.3 洪涝水文过程

#### 3.3.1 水均衡分析

利用三次多项式拟合方程可计算出鱼崮地下河出口不同时间的流量, 选取完整的场雨来分析暗崮洼地大气降雨补给量与地下河出口排泄量的水平衡关系, 每场完整降雨过后, 鱼崮地下河出口流量恢复

至降雨前的流量就认为该次大气降雨量均排出了系统。因此, 一场完整降雨暗崮洼地系统地下水补给量和排泄量可用以下公式进行计算:

$$Q_{\text{大气}} = S \times M \quad (3)$$

$$Q_{\text{蒸发}} = S \times N \quad (4)$$

$$Q_{\text{补给}} = Q_{\text{大气}} - Q_{\text{蒸发}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{排泄}} = \sum Q_i \times \Delta t \quad (6)$$

式中:  $Q_{\text{大气}}$  为大气降雨补给量, 单位( $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{蒸发}}$  为蒸发量, 单位( $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{补给}}$  为大气降雨对暗崮洼地地下水系统补给量, 单位( $\text{m}^3$ );  $Q_{\text{排泄}}$  为鱼崮地下河出口排泄总量, 单位( $\text{m}^3$ );  $Q_i$  为鱼崮地下河出口  $i$  时刻的排泄量, 单位( $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ );  $S$  为暗崮洼地汇水面积, 单位( $\text{m}^2$ );  $M$  为场雨降雨量, 单位( $\text{mm}$ );  $N$  为蒸发量, 单位( $\text{mm}$ );  $\Delta t$  为水位探头的记录时间间隔(15 min);

选取 2023 年 6 月 7 日 16:15—2023 年 6 月 13 日 1:30 和 2023 年 6 月 21 日 15:30—2023 年 6 月 27 日 15:15 两场降雨对洼地水均衡进行计算。2023 年 6 月 7 日 16:15—2023 年 6 月 13 日 1:30 总降雨量 129.4 mm, 总蒸发量 20.3 mm, 降雨开始前 2023 年 6 月 8 日 18:45 鱼崮地下河出口流量为  $32.875 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ , 降雨发生后出口流量恢复至  $34.808 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$  的时间为 2023 年 6 月 14 日 17:15, 历时 142.5 h, 本场降雨水均衡计算:

$$Q_{\text{大气}} = 2.3 \text{ km}^2 \times 129.4 \text{ mm} = 29.462 \times 10^4 \text{ m}^3,$$

$$Q_{\text{蒸发}} = 2.3 \text{ km}^2 \times 20.3 \text{ mm} = 4.69 \times 10^4 \text{ m}^3,$$

$$Q_{\text{补给}} = Q_{\text{大气}} - Q_{\text{蒸发}} = 24.772 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$Q_{\text{排泄}} = \sum Q_i \times \Delta t = 19.2653 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$$Q_{\text{排泄}}/Q_{\text{补给}} = 77.77\%$$

2023 年 6 月 21 日 15:30—2023 年 6 月 27 日 15:15 时总降雨量 237.6 mm, 总蒸发量 31 mm, 降雨开始前 2023 年 6 月 21 日 18:30 鱼崮地下河出口流量为  $21.034 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , 降雨发生后出口流量恢复至  $22.792 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  的时间为 2023 年 7 月 5 日 15:00 时, 历时 332.5 h, 本场降雨水均衡计算:

$$Q_{\text{大气}} = 2.3 \text{ km}^2 \times 237.6 \text{ mm} = 54.648 \times 10^4 \text{ m}^3,$$

$$Q_{\text{蒸发}} = 2.3 \text{ km}^2 \times 31 \text{ mm} = 7.13 \times 10^4 \text{ m}^3,$$

$$Q_{\text{补给}} = Q_{\text{大气}} - Q_{\text{蒸发}} = 47.554 \times 10^4 \text{ m}^3,$$

$$Q_{\text{排泄}} = \sum Q_i \times \Delta t = 41.5263 \times 10^4 \text{ m}^3,$$

$$Q_{\text{排泄}}/Q_{\text{补给}} = 87.32\%。$$

两场降雨中地下河出口排泄量达到大气降雨补给的 77.77% 和 87.32%, 比例较高, 还有部分降雨

补给量由于岩溶含水层的调蓄作用, 排泄有所滞后。总体上, 暗崮洼地排泄量和补给量较为均衡, 说明鱼崮地下河出口为暗崮洼地地下水总排泄口。

### 3.3.2 洪涝水文过程

暗崮洼地水主要来源于北侧的老塘洼地和南侧的古蚕洼地, 总汇水面积  $2.3 \text{ km}^2$ , 其中南侧古蚕洼地汇水面积为  $1.3 \text{ km}^2$ , 北侧老塘洼地为  $1.0 \text{ km}^2$ , 北侧老塘洼地汇水面积比古蚕洼地小, 且洼地底部比古蚕洼地平坦。因此, 古蚕洼地汇水量大, 且来水速度比北侧老塘洼地快, 古蚕洼地汇水沟中的水位曲线呈对称的尖峰状很好的证明了一点(图 7)。与 A01 消水洞三角堰水深曲线对比来看, 南侧古蚕排水沟流量最大值比 A01 消水洞三角堰口最大值早到 9.5~16.5 d(表 2)。

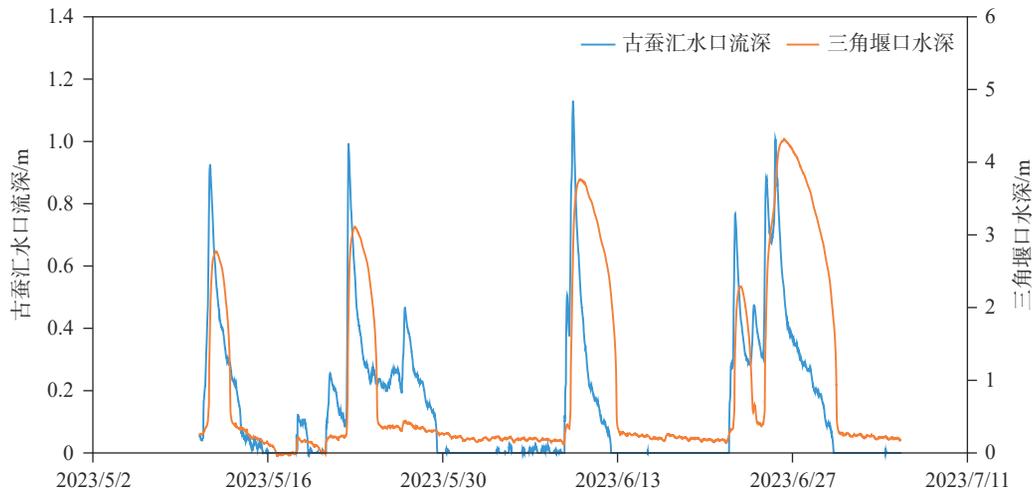


图 7 古蚕洼地汇水沟水深和 A01 三角堰口水深曲线

Fig. 7 Water depth of the catchment ditch in Gucan depression and water depth curve of the triangular weir mouth of A01

表 2 古蚕洼地汇水沟水深和 A01 三角堰口水深最大值对比

Table 2 Comparison of the maximum water depth of the catchment ditch in Gucan depression and water depth curve of the triangular weir mouth of A01

古蚕洼地排水沟		A01 消水洞三角堰口		间隔
时间	深度/m	时间	深度/m	小时/h
5月11日09:00 时	0.924	5月11日20:30 时	1.269	11.5
5月22日11:15 时	0.993	5月22日23:30 时	1.609	12.09
6月09日10:30 时	1.122	6月10日0:00 时	2.265	13.5
6月22日10:00 时	0.768	6月22日19:30 时	0.792	9.5
6月25日15:15 时	1.006	6月26日7:30 时	2.808	16.5

根据水位—流量三次多项式拟合方程, 计算出了鱼崮地下河出口在 4 月 29 日降雨量为 69.6 mm 的流量动态, 并生成了流量曲线(图 8)。降雨从 4 月 29

日 0:30 开始, 雨量达到最大是 4:00 时(20.6 mm), 6:30 时降雨基本停止。鱼崮地下河出口流量从 4 月 29 日 4:00 时开始增大, 流量呈波状上升, 曲线有 4 个

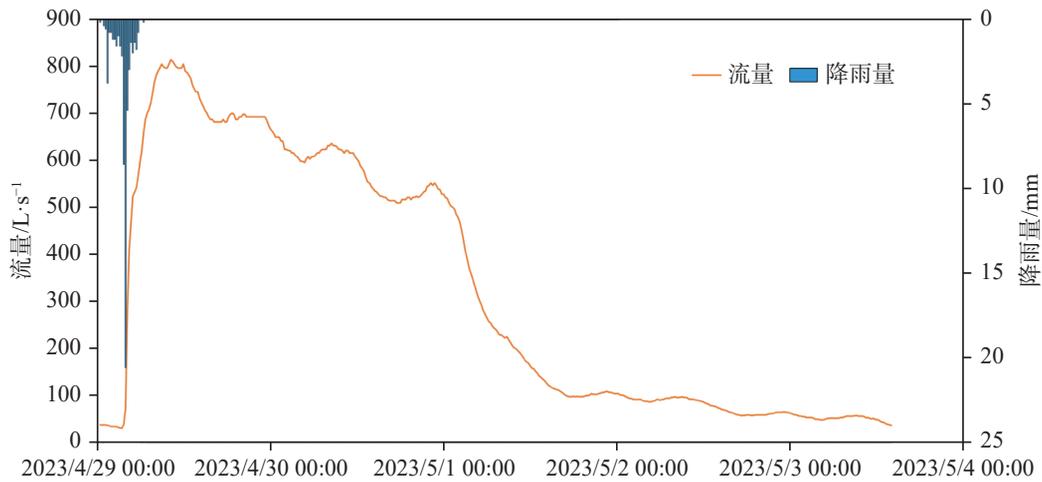


图8 4月29日降雨量69.6 mm时的鱼崮溢流口流量动态

Fig. 8 Flow dynamics of the overflow outlet of the Yudang underground river on Apr. 29 when the rainfall was 69.6 mm

峰,第一个峰值时间为4月29日8:30时,流量为 $1\ 004.51\ \text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ ;第二个峰时间为4月29日14:30时,流量为 $904.58\ \text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ ;第三个峰时间为4月30日0:00,流量为 $822.78\ \text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ ;第四个峰值时间为4月30日13:00时,流量为 $628.96\ \text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ ;说明鱼崮地下河出口的水由4股汇流而成,洼地主要通过A01、A02、A03、A04 4个消水洞排水,4个消水洞不同的消水速度造成了出口流量的4个峰值。A01消水洞口三角堰口水位呈急升缓降的单峰状,水位上升较快,10.5 h达到峰值,之后水位下降缓慢,在消水洞中形成一个溶潭,与出口流量曲线第4个峰相交之后快速下降(图8),说明A01消水洞消水不畅,第四个峰值曲线之后的流量主要受A01消水洞的水量控制。由于A01消水洞是洼地中位置最低处,地表水容易向A01消水洞汇集,而A01消水洞下部消水通道排水

不畅造成洼地容易发生洪涝。

#### 4 洪涝治理

北侧老塘洼地汇水子系统以A01消水洞消水,南侧古蚕洼地汇水子系统以A04消水洞消水。为了加快A01消水洞的消水速度,2023年1月对A01消水洞进行了开挖、清理底部泥沙,向下加深约2 m开挖至基岩,消水洞挖深2 m后,发现底部主要为两条沿岩层面发育的向 $110^\circ$ 方向展布的岩溶裂隙型水平溶洞,地下水沿水平溶洞消水,流向鱼崮地下河出口。裂隙型溶洞底部较平坦,并沉积有大量泥沙,说明水力坡度小,消水速度较慢,泥沙易沉积。通过其4月—6月发生洪涝和鱼崮伏流出口流量的情况来看(图9),A01消水洞整治效果不佳,A01消水洞可

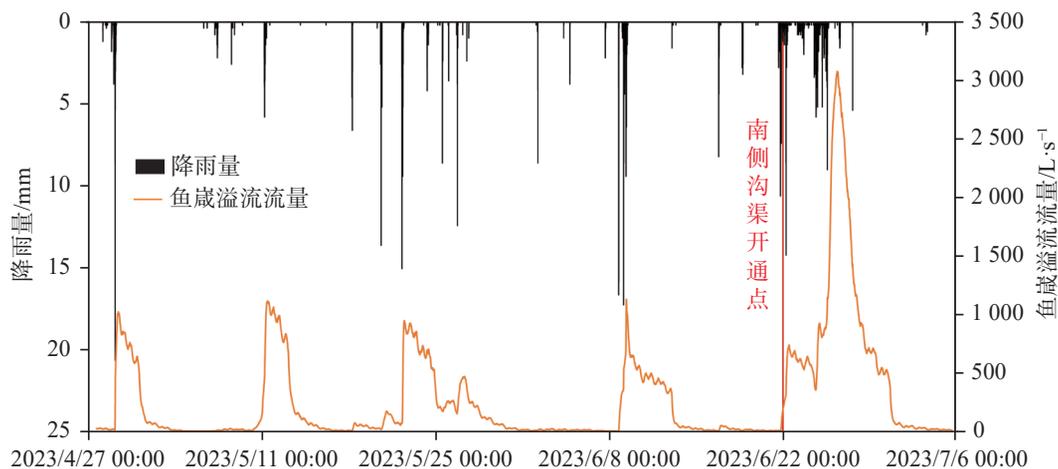


图9 鱼崮地下河出口流量动态特征曲线

Fig. 9 Dynamic flow curve at the outlet of the Yudang underground river

能是由于前期方解石矿开采,将矿渣堆放在洞口,暴雨将矿渣带到下部管道中,而造成堵塞,现仅对洞口进行整治,不能有效解决洼地洪涝问题。

古蚕洼地汇水子系统主要通过 A04 消水洞排水, A04 消水洞洞口比 A01 号消水洞高 5 m,且洞口易堆积大量的枯枝落叶,造成消水不畅,暴雨时南侧古蚕洼地来水量大且迅速时,南侧古蚕洼地排水沟最窄处仅 1 m,水沟最浅处仅 0.5 m,来势迅速的水容易漫过排水沟流向 A01 消水洞,加重洼地的洪涝受灾程度。为增加 A04 消水洞对南侧古蚕洼地来水的消水能力,6月15日清理了 A04 消水洞洞口,并通过新开挖一条宽 1 m、深 0.5 m 的水沟,将古蚕洼地部分洪流引致 A02 消水洞。从 6月21日—6月25日这场强降雨鱼崮地下河出口流量与之前的流量对比来看(图9),6月15日之前四场集中降雨的最大流量分别为  $1\,004.51\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1\,086.96\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $930.62\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $1\,139.53\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,而 6月21日—6月25日这场集中降雨最大流量达到了  $3\,050.97\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ (图9),是前面 4 场降雨最大流量的 3 倍。一方面说明疏通 A04 消水洞,并将南侧古蚕洼地的水引至 A03 加速了洼地消水能力;另一方面也说明 A04 消水洞下部岩溶管道过水能力强于 A01 消水洞下部岩溶通道;前文分析认为 A01 消水洞可能由于原来方解石矿开采,洞口堆放矿渣而造成堵塞;而 A04 消水洞位于方解石脉矿的南侧,

未受到方解石尾矿渣的影响,岩溶管道过水较通畅(图10)。

前 4 场降雨的出口最大流量为  $1\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,出口流量大于  $1\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,可认为是疏通 A04 消水洞后增加的流量,增加消水能力  $2\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ( $3\,000\sim 1\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ),6月21日—6月25日集中降雨流量大于  $1\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  的时间为 6月25日 13:45 时( $1\,017.95\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ )—6月28日 2:45 时( $1\,008.98\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ),用以下公式计算增加的消水量为:

$$Q = (Q - 1\,000) \times T = 24.02 \times 10^4 \text{ m}^3$$

$\Delta Q$  疏通 A04 消水洞后增加的流量,单位( $\text{m}^3$ ); $Q$  为地下河出口大于  $1\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  的实时流量,单位( $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ ); $\Delta T$  为流量大于  $1\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  的时间,单位(min)。

未整治 A04 消水洞之前,地下河出口的最大消水量为  $1\,000\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ,可算得本次缩短洪涝时间为:

$$T = Q / 1\,000(\text{L}\cdot\text{s}^{-1}) = 66.71 \text{ h} = 2.8 \text{ d}$$

即整治 A04 消水洞后,6月21日—6月25日的强降雨,洼地洪涝时间缩短了 66.71 h(2.8 d),消水洞的排水能力增加显著。但新开挖通向 A03 的水沟规模较小(宽 1 m、深 0.5 m),南侧古蚕洼地汇水范围大,来水量大,且速度较快,本次降雨过程仍有很大一部分洪流溢出水沟流向 A01 消水洞,造成这次洪涝时间达 136 h。因此修建好南部排水沟系统,使南

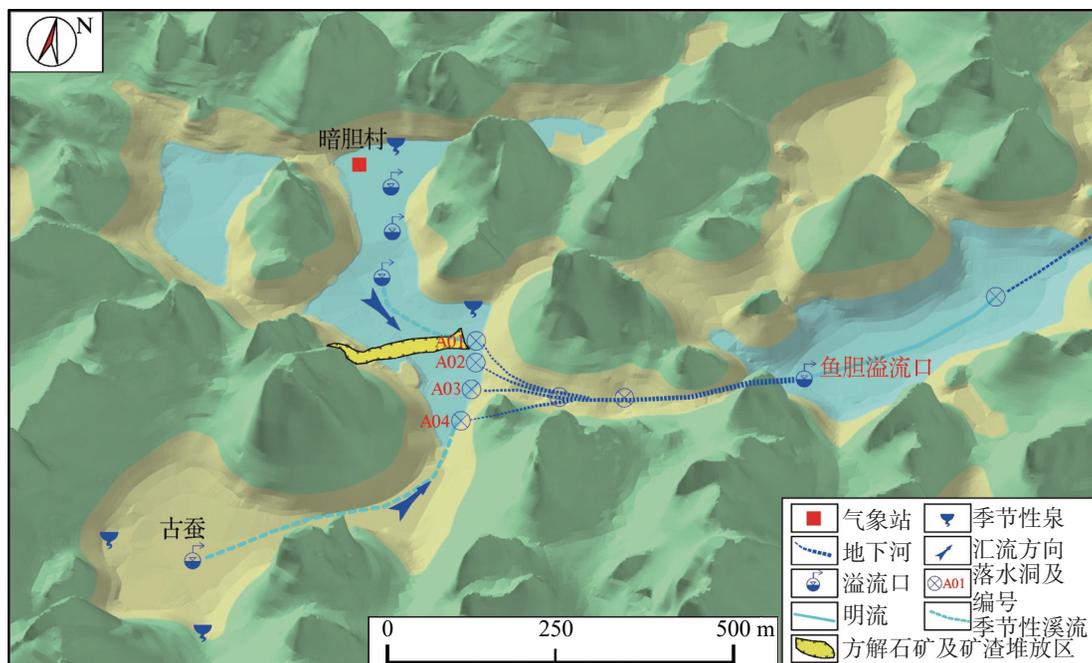


图 10 消水洞及排泄布局三维地貌示意图

Fig. 10 3D geomorphological diagram of the sinkholes and the layout of discharge

部古蚕洼地的水全部通过 A03 消水洞快速向鱼崮地下河出口排泄,是进一步减轻暗崮洼地洪涝受灾程度的重要措施。

## 5 结 论

(1)暗崮洼地地下水系统边界完整,包括北侧老塘洼地汇水子系统 and 南侧古蚕洼地汇水子系统,汇水面积分别为 1.0 km<sup>2</sup> 和 1.3 km<sup>2</sup>。洼地积水成涝对降雨响应迅速,降雨结束后,12—24 h 内洼地积水深度就能达到最大,日降雨量大于 50 mm 或连续 3 天的降雨量大于 90 mm,洼地就容易积水成涝。2023 年 4 月—7 月共造成了 8 次洪涝灾害,洪涝总时间达 417.5 h(18.6 d)。

(2)鱼崮地下河出口排泄量达到大气降雨补给量的 77.77% 和 87.32%,为暗崮洼地地下水总排泄口,主要通过中部 A01、A02、A03、A04 4 个消水洞排水,4 个消水洞不同的消水速度造成了出口流量的 4 个峰值。2023 年 1 月主要对 A01 消水洞进行整治,但从 4 月—6 月消水和发生洪涝的情况来看,A01 消水洞整治效果不佳,考虑原方解石矿开采期间,暴雨将堆放于洞口的矿渣带到下部管道中,而造成堵塞。现仅对 A01 消水洞洞口进行整治,不能有效解决洼地洪涝问题。疏通另外 3 个消水洞,可加快消水速度,有效减轻洪涝灾害。

(3)北侧老塘洼地汇水系统以 A01 消水洞消水,南侧古蚕洼地汇水系统以 A04 消水洞消水,A04 消水洞比 A01 消水洞高 5 m,且洞口有大量的枯枝落叶,造成消水不畅,暴雨时南侧古蚕洼地来水量大且迅速时,南侧古蚕洼地排水沟最窄处仅 1 m,水沟最浅仅 0.5 m,来势迅速的地表洪流容易漫过排水沟流向 A01 消水洞,加重洼地的洪涝受灾程度。A03、A04 消水洞位于方解石脉矿的南侧,未受到方解石尾矿渣的影响,岩溶管道过水通畅。疏通 A03 消水洞,并将南侧古蚕洼地的洪流引至 A03 消水洞,能显著增加消水能力,缩短洼地洪涝时间。因此对南部排水系统进行合理布局,使南部古蚕洼地的水全部通过 A03 消水洞快速向鱼崮地下河出口排泄,是进一步减轻暗崮洼地洪涝受灾程度的有效措施。

## 参考文献

[1] 袁道先. 岩溶地区的地质环境和水文生态问题[J]. 南方国土

资源, 2003(1): 22-25

- [2] 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学, 2002(3): 365-370.  
LI Yangbing, HOU Jianyun, XIE Deti. The recent development of research on karst ecology in Southwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002(3): 365-370.
- [3] 黎廷宇, 王世杰. 贵州省岩溶洼地洪涝灾害加重的原因分析[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 1-4.  
LI Tingyu, WANG Shijie. Analysis of flood aggravation in Guizhou karst depression[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(3): 1-4.
- [4] 苏维词. 西南岩溶山区生态系统基本特征及其调控措施研究: 以贵州省为例[J]. 水土保持通报, 2004, 24(2): 55-59.  
SU Weici. Characteristics and its regulation of karst ecosystem in Southwest China: In the case of Guizhu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2004, 24(2): 55-59.
- [5] 罗贵荣, 李兆林, 梁小平. 广西岩溶石山区洪涝灾害成因与防治对策研究: 以马山岩溶地下河流域为例[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(1): 6-9.  
LUO Guirong, LI Zhaolin, LIANG Xiaoping. Research on the causes and countermeasures of flood disaster in Guangxi karst rock areas: A case study of karst underground river area in Mashan[J]. Safety and Environmental Engineering, 2010, 17(1): 6-9.
- [6] Fleury P, Maréchal J C, Ladouche B. Karst flash-flood forecasting in the city of Nîmes (Southern France)[J]. Engineering Geology, 2013, 164: 26-35.
- [7] 姜光辉, 郭芳. 我国西南岩溶区表层岩溶带的水文动态分析[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(5): 89-93.  
JIANG Guanghui, GUO Fang. Hydrological character of epikarst in Southwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 36(5): 89-93.
- [8] Maréchal J C, Ladouche B, Dörfli N. 地中海喀斯特山洪暴发: 以尼姆喷泉为例[J]. 工程地质, 2008, 99(3-4): 138-146.  
Maréchal J C, Ladouche B, Dörfli N. Karst flash flooding in a Mediterranean karst, the example of Fontaine de Nîmes[J]. Engineering Geology, 2008, 99(3-4): 138-146.
- [9] 郭纯青. 岩溶浸没内涝灾害风险评价[J]. 地球与环境, 2005(Suppl.1): 337-342.  
GUO Chunqing. The evaluation of karst immersion-waterlogging hazards' risk[J]. Earth and Environment, 2005(Suppl.1): 337-342.
- [10] 郭纯青, 胡君春, 潘林艳. 中国西南典型岩溶洼地旱涝灾害演变规律: 以西南块所岩溶区为例[J]. 中国农村水利水电, 2013(11): 160-164.  
GUO Chunqing, HU Junchun, PAN Linyan. Evolvement rules of drought and karst depression in Southwest China: A case study of Kuaisuo karst depression in Yunnan[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(11): 160-164.
- [11] 蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的特征及形成机理[J]. 热带地理, 1998(4): 322-326.

- JIANG Zhongcheng. Features of epikarst zone in South China and formation mechanism[J]. *Tropical Geography*, 1998 (4): 322-326.
- [12] 李庆松, 李兆林, 裴建国, 覃小群, 易连兴, 梁茂珍. 马山东部岩溶洼地谷地内涝特征与治理规划[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(4): 359-365.
- LI Qingsong, LI Zhaolin, PEI Jianguo, QIN Xiaoqun, YI Lianxing, LIANG Maozhen. Characteristics of waterlogging and management planning in karst depressions and valley in the east Mashan[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(4): 359-365.
- [13] 罗锦珠. 桂林漓江洪旱灾害成因分析及综合治理刍议[J]. *人民珠江*, 2006(4): 77-79.
- [14] 肖攀, 万军伟, 曹雪琴, 黄小琴. 湖北宣恩岩底河流域洪涝灾害成因分析及防治对策[J]. *桂林理工大学学报*, 2012, 32(4): 500-504.
- XIAO Pan, WAN Junwei, CAO Xueqin, HUANG Xiaoqin. Formation and flood prevention in Yandi river in Xuanen of Hubei[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2012, 32(4): 500-504.
- [15] 李远强, 李中蔚. 岩溶山区洪涝灾害成因分析及对策[J]. *长江水利教育*, 1995, 12(4): 64-65.
- [16] 蒋忠诚, 罗为群, 邓艳, 曹建华, 覃星铭, 李衍青, 杨奇勇. 岩溶峰丛洼地水土流失及防治研究[J]. *地球学报*, 2014, 35(5): 535-542.
- JIANG Zhongcheng, LUO Weiqun, DENG Yan, CAO Jianhua, QIN Xingming, LI Yanqing, YANG Qiyong. The Leakage of water and soil in the karst peak cluster depression and its prevention and treatment[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2014, 35(5): 535-542.
- [17] 苏昌, 陈海波, 董炳维. 岩溶洪涝灾害成因机制分析及防治建议[J]. *资源环境与工程*, 2008, 22(2): 193-196.
- SU Chang, CHEN Haibo, DONG Bingwei. Genetic mechanism analysis and controlling suggestions on flood disaster in karst area[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2008, 22(2): 193-196.
- [18] 裴建国, 李庆松. 生态环境破坏对岩溶洼地内涝的影响: 以马山古寨乡为例[J]. *中国岩溶*, 2001, 20(4): 297-300.
- PEI Jianguo, LI Qingsong. The effect of ecological environment change on waterlogging of karst depressions: A case study in Guzhai, Mashan county[J]. *Carsologica Sinica*, 2001, 20(4): 297-300.
- [19] 裴建国. 广西溶洼系统结构特征及其对岩溶内涝的影响[J]. *广西科学*, 2002(3): 193-197.
- PEI Jianguo. The structure characteristic of karst depression system and its effect on karst depression waterlogging[J]. *Guangxi Sciences*, 2002(3): 193-197.
- [20] 罗锦珠, 黄联锋. 广西北部地区“85·5”特大暴雨洪水分析[J]. *广西水利水电*, 2001(4): 42-45.
- LUO Jinzhu, HUANG Lianfeng. Analysis of "85·5" extreme storm flood in northern Guangxi[J]. *GX Water Resources & Hydropower Engineering*, 2001(4): 42-45.
- [21] 王恒松, 熊康宁, 刘云. 西南岩溶区地下水水土流失浅析[J]. *科技情报开发与经济*, 2008, 18(32): 144-146.
- WANG Hengsong, XIONG Kangning, LIU Yun. Analysis on the belowground water and soil loss in karst area[J]. *Sci-tech Information Development & Economy*, 2008, 18(32): 144-146.
- [22] 黄琨, 武亚遵, 万军伟, 肖攀. 落马洞暗河发育特征及其洪涝成因分析[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(4): 385-388.
- HUANG Kun, WU Yazun, WAN Junwei, XIAO Pan. Analysis on the development characteristic of the Luoma cave underground river and the origin of the flood[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(4): 385-388.
- [23] 黄秀凤. 下牙谷地岩溶内涝成因分析与治理工程方案设计[J]. *安全与环境工程*, 2017, 24(4): 52-57.
- HUANG Xiufeng. Cause analysis of karst waterlogging and scheme design of the control project in Xiaya karst valley[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2017, 24(4): 52-57.
- [24] Chen Weike, Dong Jing, Yan Chaozhua, Dong Hui, Liu Ping. What causes waterlogging?—Explore the urban waterlogging control scheme through system dynamics simulation[J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2021, 13(15): 8546.
- [25] Ow L F, Chan E. Deferring waterlogging through stormwater control and channelling of runoff[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 65: 127351.
- [26] 罗书文, 杨桃, 邓亚东, 吕勇, 吴克华, 孟庆鑫. 桂林岩溶地貌发育演化过程地文期的解析[J]. *地质通报*, 2023, 42(10): 1652-1665.
- LUO Shuwen, YANG Tao, DENG Yadong, LYU Yong, WU Kehua, MENG Qingxin. Analysis of the physiographic stages of the development and evolution process of karst geomorphology in Guilin, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(10): 1652-1665.
- [27] 罗书文, 吕勇, 吴克华, 邓亚东, 杨桃, 潘明, 傅良同. 桂林峰林平原、峰丛洼地残留中生代地层空间展布形成机制探讨[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(5): 805-814.
- LUO Shuwen, LYU Yong, WU Kehua, DENG Yadong, YANG Tao, PAN Ming, FU Liangtong. Formation mechanism of the spatial distribution of Mesozoic strata in Guilin peak-forest plain and peak-cluster depression[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(5): 805-814.
- [28] 邓自强, 林玉石, 刘功余, 张美良. 岩溶发育过程中的改造与建造作用分析[J]. *中国岩溶*, 1993, 12(1): 23-32.
- DENG Ziqiang, LIN Yushi, LIU Gongyu, ZHANG Meiliang. Analysis on reformation and formation processes in the course of karst development[J]. *Carsologica Sinica*, 1993, 12(1): 23-32.
- [29] 缪钟灵. 漓江发育演化及与相邻流域关系[J]. *中国岩溶*, 1998, 17(4): 385-391.
- MIAO Zhongling. The development and evolution of Lijiang river and its relations to its adjacent basins[J]. *Carsologica Sinica*, 1998, 17(4): 385-391.

## Flood hydrological process and its effective control measures in the high-altitude depressions of peak-cluster areas in Lijiang River

PU Zhenggong<sup>1,2,3</sup>, HUANG Qibo<sup>1,2</sup>, WU Huaying<sup>1,2</sup>, LI Tengfang<sup>1,2</sup>, ZOU Changpei<sup>1,2</sup>, LIAO Hongwei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Pingguo Guangxi,

Karst Ecosystem, National Observation and Research Station, Pingguo 531406, Guangxi, China;

3. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 430074, China )

**Abstract** With a length of 83 km and an area of about 624 km<sup>2</sup>, the high-altitude karst depressions in peak-cluster areas are mainly distributed in the middle reaches of the Lijiang River from Daxu town to Yangshuo county, Guilin. There are thousands of depressions in this area, with sufficient nutrients in soil. Large depressions with flat terrain are concentrated with villages, but land resources are scarce. The frequent alternation of droughts and floods has seriously affected not only the local economic development and rural revitalization but also the improvement of landscape resources, which is the main bottleneck restricting the development and protection of natural landscape resources in these depressions. Previous studies mainly focused on the geomorphological origins and geological structures of depressions, but there is little research on the flood formation conditions and hydrological processes.

In this study, the Andang depression in the peak-cluster area of Lijiang River basin was selected as a study area in the analysis of flood water cycle. About 3.5 km away from the Lijiang river, the study area is located on the west bank of the Lijiang River, with a catchment area of 2.3 km<sup>2</sup>. Rainfall mainly recharges the karst underground river channels through A01, A02, A03 and A04 sinkholes in north-south alignment in the central part of the depression, then discharges to the surface at Guanyan village on the west bank of the Lijiang river, and finally flows into the Lijiang River. The elevation of the Andang depression (150 m) is higher than that of the Lijiang river (130 m). A calcite vein about 20 m wide developed in the middle of the depression was mined in the early years. The slag was piled up in Sinkhole A01, resulting in the blockage of underground channels and limited water discharge capacity. Consequently, floods are likely to occur due to the poor drainage system when it rains heavily. With flooding depths of 3–10 m, floods take place 3 or 4 times every year in the depressions, lasting 5–10 days each time, even one month for the longest. A large area of cultivated land in the depression has been deserted due to years of waterlogging.

This study established real-time monitoring stations for atmospheric rainfall, surface water level, groundwater level, and outlet flow in the depression to analyze the conditions and causes of floods. The main drainage outlets (A01 and A03 sinkholes) in the depressions were widened and dredged to increase their drainage capacity, which was effective for the control of flood and waterlogging. The results showed that the depression were highly subject to flooding after rainfall. The water depth in the depression could reach the maximum within 12–24 h after the rainfall. If the daily rainfall exceeded 50 mm or the cumulative rainfall exceeded 90 mm in 72 h, the depression was prone to flood. A total of 8 floods occurred in the depression area from April to July, 2023, with a flooding time of 417.5 h (18.6 d). The discharge at the outlet of the Yudang underground river reached 77.77% and 87.32% of the rainfall recharge, which was the total groundwater discharge outlet of the Andang depression. The four sinkholes A01, A02, A03 and A04 were discharge outlets for the central section of the underground river. The water discharge rates of these four sinkholes formed four flow peaks at the outlets. Because the hydraulic gradient in Sinkhole A01 was small, and the karst channels of the lower section were blocked by calcite slag, the water discharge speed was slow. Renovating Sinkhole A01 is not an effective way to control flooding in the depressions. Located on the south side of the calcite lode, Sinkhole A03 and Sinkhole A04 were not affected by the blockage of calcite slag; therefore, groundwater discharged smoothly. The dredging of Sinkhole A04 and water diversion from the south of Gucan depression to Sinkhole A03 reduced the flooding time to 66.71 h (2.8 d). Therefore, constructing the south drainage system, diverting water from the south Gucan depression to Sinkhole A03, and discharging water from Sinkhole A04 to the outlet of the Yudang underground river are crucial for further control of flood hazards in the Andang depression.

**Key words** peak-cluster area in the Lijiang River basin, karst depression, karst flood, hydrological process, flood control

(编辑 张玲)