

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20181101.004

姜光辉,郭芳. 广西岩溶水资源与社会服务功能[J]. 广西科学,2018,25(5):456-464.

JIANG G H, GUO F. Karst water resources in Guangxi and their social servicing capacity[J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(5): 456-464.

# 广西岩溶水资源与社会服务功能<sup>\*</sup>

## Karst Water Resources in Guangxi and Their Social Servicing Capacity

姜光辉, 郭 芳

JIANG Guanghui, GUO Fang

(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, 广西桂林 541004)

(Key Laboratory of Karst Dynamics, MAR/GZAR, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi, 541004, China)

**摘要:** 广西岩溶分布广泛且类型多样, 岩溶水资源普遍服务于农业生产、城市与农村供水, 或应对极端气候产生的干旱等。认清水资源的形成、演变趋势和动力机制, 能使其更好地发挥社会服务功能。本文以广西 5 个具有长期研究积累的岩溶场地为例, 采用地下水分层观测技术展示了表层岩溶带的调蓄过程, 提出表层富水带可以成为石漠化治理和缓解干旱的找水方向; 设计洞穴滴水观测装置, 展示了渗流通过包气带的过程, 提出干旱和内涝的地质成因; 建立洞穴交互带的观测方法, 展示地下水与地表水的交互过程, 指出地下水与地表水交互作用成为水源地环境退化的驱动力; 建立地下河的氮流失模型, 显示农业活动引起的氮流失过程, 总结地下河系统中氮的循环机制并提出固氮方案; 建立地下水潜蚀作用的观测方法, 展示潜蚀作用的机制, 提出城市地下空间的保护和利用需要综合考虑水动力侵蚀和化学溶蚀。岩溶地区水资源与水环境问题的认识需要结合岩溶水的补给、下渗、径流、排泄过程的观测, 揭示问题产生的机制, 实现岩溶水资源的可持续利用。

**关键词:** 广西 岩溶 水资源 水源地 地下空间

**中图分类号:** P641.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2018)05-0456-09

**Abstract:** The karsts in Guangxi are widely distributed and diverse, and karst water resources generally serve for agricultural production, urban and rural water supply, or droughts caused by extreme weather. Recognizing the formation, evolutionary trends and dynamic mechanisms of water resources will enable them to better play their social service functions. In this paper, five karst sites with long-term research and accumulation in Guangxi were taken as an example. The groundwater stratification observation technology was used to demonstrate the regulation and storage process of the epikarst zone. It was proposed that the surface water-rich zone could be used to control the rocky desertification and ease the drought. A cave drip observation device was designed to demonstrate the process of seepage through the vadose zone and present

the geological origin of drought and water logging. The observation method of establishing a cave interaction zone was used to show the interaction process between groundwater and surface water, and to point out that the interaction between groundwater and surface water becomes the driving force of environmental degradation of the water source. A nitrogen loss model of the

收稿日期: 2018-07-31

作者简介: 姜光辉(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩溶水文地质研究, E-mail: bmnxz@126.com。

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41472239, 41772269), 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室建设项目(2002371310010)和袁道先广西院士顾问项目资助。

underground river was established to show the nitrogen loss process caused by agricultural activities. The nitrogen circulation mechanism in the underground river system was summarized and a nitrogen fixation scheme was proposed. The observation method of groundwater erosion was established to demonstrate the mechanism of erosion. It was proposed that the protection and utilization of urban underground space required comprehensive consideration of hydrodynamic erosion and chemical dissolution. The understanding of water resources and water environment problems in karst areas needed to be combined with the observation of karst water recharge, infiltration, runoff, and discharge processes to reveal the mechanism of problem generation and to realize the sustainable utilization of karst water resources.

**Key words:** Guangxi, karst, water resources, water sources, underground space

## 0 引言

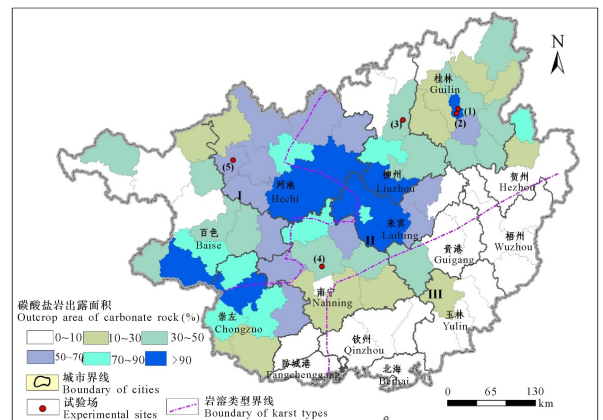
广西岩溶面积达  $9.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占全区总面积的 41%。其中裸露的碳酸盐岩面积达  $7.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 覆盖碳酸盐岩面积  $2.41 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 是世界上最重要的岩溶区之一。岩溶主要分布在红水河、郁江以及桂北柳江、桂江与贺江流域, 桂南诸河也有分布, 广西 109 个县市中, 80 个县岩溶面积超过 30%, 被定义为岩溶县。岩溶地区具有丰富的水资源、景观资源、生物资源, 是广西实现跨越式发展的重要支撑, 但脆弱的岩溶环境也是发展的约束。岩溶地区地下水资源丰富, 广西全区已探知地下河约 604 条, 枯水期总流量为  $191 \text{ m}^3/\text{s}$ 。流量大于  $0.05 \text{ m}^3/\text{s}$  的岩溶泉有 299 个, 枯水期总流量为  $37 \text{ m}^3/\text{s}$ <sup>[1]</sup>。岩溶地下水是重要的饮用、工业或农业用水水源。大新县、武鸣县、河池市等都以岩溶地下水作为城市饮用水源。在岩溶水开发利用的同时也出现了水位下降、泉水断流、水质变差、水生态退化等问题<sup>[2]</sup>。实现岩溶水资源可持续地服务经济社会发展需要完善水文与水资源理论, 弄清水环境问题产生的原因和发展趋势。本研究在概括广西岩溶及岩溶水文地质特点的基础上, 总结岩溶地区水资源开发利用和保护遇到的主要问题, 并以 5 个具有长期研究积累的典型野外科研场地为例, 总结岩溶地区开展的水资源研究进展, 为新时代岩溶水资源的可持续发展和利用提供依据。

## 1 广西岩溶水文地质特征

广西的碳酸盐岩沉积建造是从泥盆系至三叠系沉积的一套以灰岩为主, 间夹白云岩、砂页岩、硅质岩的海相地层, 碳酸盐岩总体上杂质含量少, 有利于岩溶的发育。其中晚古生代碳酸盐岩最典型, 分布也最广。碳酸盐岩古老且坚硬, 经历了多次构造运动岩石断层和裂隙发育, 形成了以宽缓褶皱和断裂为主的构造结构<sup>[1]</sup>。中生代以来, 岩溶的演化以剥蚀为主, 沉积建造仅局部发育, 岩溶经历了长期的演化历史。第

广西科学 2018 年 10 月 第 25 卷第 5 期

四纪以来除了桂西抬升幅度较大外, 广西中部和东部均以凹陷为主, 形成了不少覆盖型岩溶盆地。广西湿热的气候有利于岩溶的发育, 经历剥蚀与溶蚀作用后, 广西岩溶形成了以裸露型岩溶为主, 兼有覆盖型岩溶的发育特色(图 1)。在强烈的溶蚀作用下碳酸盐岩基本上都发育形成含水层, 而其他岩石类型构成相对隔水层。构造与河流切割破坏了岩溶含水层的完整性, 形成了众多分散小型的水文系统或单元, 其中汇水面积超过  $1\,000 \text{ km}^2$  的较少。



I 裸露型石山区; II 覆盖型石山区; III 孤峰平原区; 野外科研场地: (1) 丫吉试验场; (2) 甌皮岩遗址; (3) 官村地下河; (4) 灵水岩溶泉; (5) 凤山鸳鸯泉

I Bare karst mountains; II Covered karst mountains; III Covered karst plain; (1) Yaji experimental site; (2) Zengpiyan cave relics; (3) Guan cun subterranean river; (4) Lingshui karst spring; (5) Yuanyang karst spring in Fengshan mountain

图 1 广西岩溶分布与类型划分及 5 个研究点分布

Fig. 1 Distribution and type of karst and 5 study points distribution in Guangxi

降雨直接入渗是岩溶水主要的补给方式, 在山区或山前, 冲积扇河流渗漏补给非常普遍, 在覆盖型岩溶区, 降雨通过松散沉积层越流补给岩溶含水层。岩溶地下水埋深受地形和侵蚀基准的控制, 平原地区岩溶多分布在地面以下 100 m 范围, 地下水的埋深一般为 30 m 以内, 循环较浅, 渗流路径也不长, 排泄至当地地表水系, 山区峰丛洼地地下水埋深普遍超过

50 m, 大于 100 m 也很常见。广西经历了多次地壳提升, 古老的洞穴被抬高至山腰或山顶部位。落水洞、竖井和岩溶天窗垂直发育深度一般超过 100 m, 代表了地下水垂直循环深度。

河流是岩溶地下水的排泄基准面。岩溶水通常以地下河或岩溶泉的形式集中排泄, 但也可以沿着河床分散排泄。桂西和桂中的峰丛洼地、谷地多以地下河的方式排泄, 岩溶大泉则主要分布在峰林平原或谷地。岩溶地下水的动态变化大, 与降雨和岩溶发育有明显的关系, 地下水的水文动态常具有暴涨暴落的特点, 受水位或流量动态的影响, 水化学的变化也呈现明显的季节或场雨特征。

## 2 水资源和水环境问题

岩溶发育的碳酸盐岩虽然具有良好的富水性, 但是地下水在无序的岩溶裂隙与管道构成的介质中流动, 不容易探测。弄清地下水的来源、径流途径和排泄去向等甚为困难, 岩溶地下水的勘察需要专业的技术和方法。对大部分岩溶含水系统, 除了重点地区、重要水源地、重点流域有详细的水资源调查外, 大部

分含水单元资料缺乏。资料掌握程度与水资源管理利用的需求不相适应, 这是导致多种问题出现的原因。

已有研究发现, 岩溶水资源开发利用遇到的突出问题有水位下降、泉流量减少、水质下降和水生生态退化<sup>[2-3]</sup>。出现的这些问题与岩溶水固有的脆弱性以及水资源的保护意识不到位有关, 还反映出国土资源整体的规划不完整等深层次的问题。广西岩溶面积广, 分布有农业主产区、城市重点开发区和矿产开发区, 环境干扰强度大, 岩溶固有脆弱性与开发利用之间的矛盾突出。具体表现在: (1) 重要岩溶水源地保护区划分方案缺少依据; (2) 农业主产区面源污染问题突出; (3) 重要经济开发区功能规划达不到岩溶环境保护要求, 城市地下空间利用缺少技术规范; (4) 极端气候影响增强, 旱涝问题制约经济社会发展; (5) 岩溶水系统水量水质预测模型还未完全解决。基于前述问题的考量和国民经济建设的需求, 近年来广西岩溶水资源研究的内容主要集中在岩溶水文地质条件、水质、干旱和内涝等方面(表 1)。

表 1 近 3 年广西岩溶水资源研究的主要内容(2015—2017)

Table 1 The major content of karst research in Guangxi in recent three years(2015—2017)

序号 Number	问题 Topics	研究区 Study area	发表时间 Publishing time
1	水文地质条件或成因 Karst hydrogeology	凤山 Fengshan County	2017 <sup>[4]</sup>
		灵水 Lingshui Spring	2017 <sup>[5]</sup>
2	水化学和水质变化 Hydrochemistry and water quality	黎塘姚村地下河 Yaocun subterranean river in Litang	2016 <sup>[6]</sup>
		清水泉地下河 Qingshuiquan subterranean river	2016 <sup>[7]</sup>
		桂林 Guilin	2015 <sup>[8]</sup>
3	内涝 Flooding	红水河 Hongshuihe River	2015 <sup>[9]</sup>
		忻城县古蓬河流域 Gupeng River in Xincheng County	2017 <sup>[10]</sup>
4	干旱和地下水开发 Drought and water exploitation	德保 Debao County	2015 <sup>[11]</sup>
		南丹 Nandan County	2015 <sup>[12]</sup>
5	水土流失 Soil erosion	全区 Guangxi	2015 <sup>[13]</sup>
6	塌陷 Karst collapse	临桂 Lingui, Guilin	2017 <sup>[14]</sup>
		来宾 Laibin	2017 <sup>[15]</sup>
7	探测技术方法 Karst techniques	柳州太阳村 Tangyang, Liuzhou	2017 <sup>[16]</sup>
		隆林 Longlin County	2016 <sup>[17]</sup>
8	矿坑涌水 Mine water burst	广西岩溶区某矿山 A mine somewhere in Guangxi	2017 <sup>[18]</sup>
9	岩溶地基处理 Ground treatment in karst	柳州至南宁高速公路 Highway from Liuzhou to Nanning	2017 <sup>[19]</sup>
10	石漠化 Rocky desertification	全区 Guangxi	2017 <sup>[20]</sup>

### 3 典型试验场岩溶水资源研究

从1961年在广西南宁举办第一届全国岩溶研究会议开始,岩溶水资源研究的主题就是岩溶发育的理论和水资源开发利用相关问题的解决。第一届岩溶会议交流的成果中包括对广西岩溶发育特点的认识,同时注意到了岩溶地区的干旱影响农业生产和水电建设遇到的岩溶渗漏问题<sup>[21]</sup>。此后岩溶发育的研究形成了岩溶动力学理论,岩溶水资源勘查与开发技术

表2 广西典型岩溶试验场

Table 2 Typical karst experimental sites in Guangxi

试验场 Experimental site	水文地质特征 Hydrogeology				含水系统类型 Types of aquifer system	垂直分带 Vertical zoning	水资源问题* Questions about water resources
	出口高度 Outlet elevation (m)	包气带厚度 Thickness of vadose zone (m)	饱和带厚度 Thickness of saturated zone (m)	面积 Drainage area (km <sup>2</sup> )			
丫吉 Yaji	150	100	100	2	峰丛-峰林 Fengcong-Fenglin	表层岩溶带 Epikarst	(5)
甌皮岩 Zengpiyan	155	2	100	1	峰林 Fenglin	饱水带 Saturated zone	(3)
官村 Guancun	200	10~100	100	30	峰丛-坡立谷 Fengcong-polje	饱水带 Saturated zone	(2)
灵水 Lingshui	100	10	200	697	峰林 Fenglin	饱水带 Saturated zone	(1)
鸳鸯泉 Yuanyang Spring	500	200	100	300	峰丛洼地大型含水系统 Fengcong-doline large scale aquifer system	包气带 Vadose zone	(4)

注: \* 水资源问题的分类依据 2.2 水资源和水环境问题

Note: \* The classification of water resources issues refer to texts in 2.2 water resources and water environment issues

#### 3.1 发展岩溶水文地质基本概念

丫吉试验场包含发育在平缓、厚层状连续型灰岩中的多个小型岩溶泉系统。通常,岩溶水文地质研究通过精细化的探测来认识水文调蓄机制。研究方法主要为水文分析,结合示踪试验、水化学和同位素技术的应用,达到认识岩溶水系统垂直分带、径流方式和边界条件的目的。本研究团队建立了反映系统物理结构和岩溶水转化机制的水箱模型<sup>[22]</sup>,利用模型研究了表层岩溶带的调蓄功能,提出岩溶含水系统对径流的调蓄主要依赖表层岩溶带,将表层岩溶带定义为由降水在裸露碳酸盐岩表面形成的岩溶强烈发育带。表层岩溶带具有支撑生态系统和调节水文过程的重要作用。

表层岩溶带是生物圈与岩石圈、大气圈与岩石圈之间的界面。它积极参与地球表生作用,在石漠化、干旱、洪涝治理上起到至关重要的作用。本研究团队在丫吉试验场建立了一套利用洞穴开展表层岩溶带探测的方法,包括采用示踪技术确定坡面表层岩溶带径流的路径<sup>[23-24]</sup>,洞穴滴水的水文分析显示表层岩溶带通过提供降雨入渗通道实现调蓄作用<sup>[25]</sup>,采用水化学与温度测井界定岩溶含水系统径流的垂直分带,

持续开展。至20世纪90年代岩溶水资源的开发利用率达到高峰,岩溶动力学与资源环境效应的研究快速发展。开发强度增大引起的地下水质量下降和水生态退化问题逐渐显现。为明确岩溶发育的基本概念和理论,为社会生产服务,本研究以相关的资源环境问题为导向,筛选了5个具有适宜水文地质特征的地点建立岩溶典型试验场,以期水资源的管理和利用提供解决方案。岩溶试验场的基本情况见表2。

钻孔分层监测技术实现了表层岩溶带的隔离与独立监测,显示了表层岩溶带与饱水带水文过程的差异(图2)。

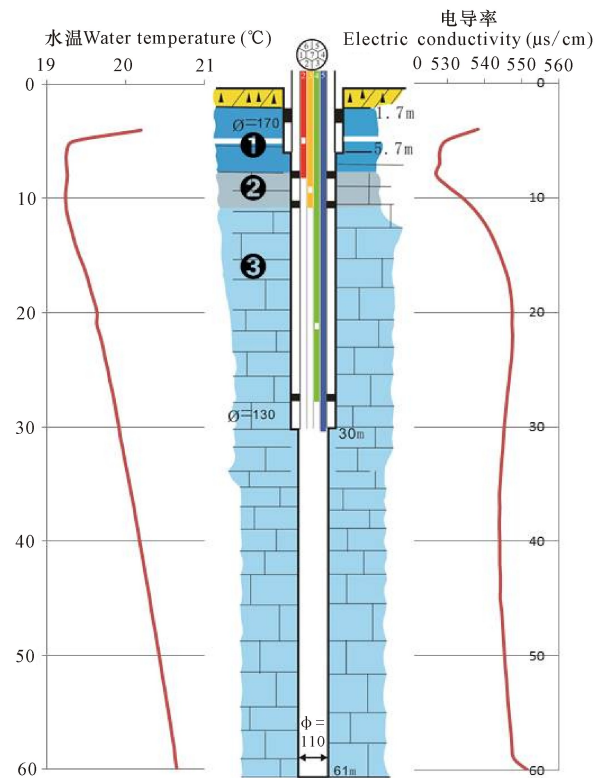
地下水分层观测结果表明,表层岩溶带的底部存在一个岩溶不发育带,形成了局部隔水层,这使得表层岩溶带的水文过程与饱水带相比具有相对的独立性。尽管这个岩溶不发育带并不完整,但却能够使表层岩溶带具备局部富水的条件。富水带埋深在地表以下10 m左右,容易开发利用,可以成为石漠化治理和抗旱的找水方向。

#### 3.2 构建“四水”转化模型,应对气候变化

旱涝交替是西南岩溶地区最突出的问题。气候变化使旱涝的发生更加频繁,而旱涝的形成与岩溶含水系统的径流转化方式有关。降水大量转化形成表层岩溶带径流,表层岩溶带径流汇集形成地下河管道流,地下河排泄能力受到岩溶管道形态限制,局部形成洪水溢流,造成季节性洼地内涝。而表层岩溶带渗透性极强,导致地表存不住水,为干旱的形成提供了条件。

凤山县属于桂西红水河上游岩溶集中分布区,岩溶水以形成大型地下河为特色。地下河系统中沿着





①表层岩溶带,②岩溶不发育带,③饱水带

①Epikarst zone,②Weakly karstic zone ③Saturated zone

图2 丫吉试验场 ZK6 钻孔多层监测系统

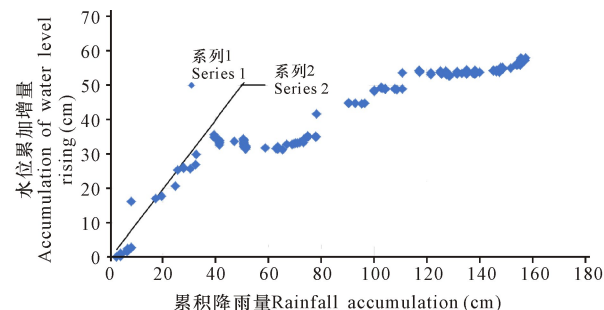
Fig. 2 ZK6 multi-level monitoring system in Yaji karst experimental site

岩溶管道分布的洼地或谷地属于易旱易涝地区。旱涝交替是土地利用与自然因素相互作用的结果,近年来极端气候频发、土地利用变化和植被退化使旱涝加剧。土地利用方式变化改变了入渗条件,总体上有利于坡面流产生,加快径流转化。而植被的退化导致水土保持能力减弱,加剧了土壤侵蚀,同时造成岩溶管道堵塞。

凤山县鸳鸯泉流域是乐业-凤山世界地质公园内的一个地下河系统。雨季地下河暴涨导致凤山县城频繁受到内涝的侵袭。而在鸳鸯泉流域的上游则面临干旱和局部洼地内涝的威胁。本研究团队通过地下河系统“四水”转化的研究揭示旱涝的发展趋势。研究工作在鸳鸯泉流域建立了“四水”转化试验场,并认识到旱涝交替发生的条件和演变趋势。大气降水通过入渗、产流、汇流、排泄等过程在含水系统中的储存和流动可以概括为大气降水、表层岩溶水、包气带水与地下河四个调蓄层次。“四水”的分配及其转化速度决定了旱涝的形成和演化,如表层岩溶带蓄水能力弱,分配的水量少,有利于干旱的形成;在短时间内地下河分配的水量过多,则引起内涝。

降水、表层岩溶水、包气带水和地下河的径流转

化,体现出水资源的分配从地表逐渐向深部转移的特点。包气带处于表层岩溶带与地下河之间,具有承上启下的作用,其调蓄作用有助于缓解干旱和洪涝。为观测分析包气带水的产生条件,研究团队设置包气带观测站,通过洞内滴水汇集而成的水池的水位变化估算补给量。试验表明,降水通过表层岩溶带转化为包气带水的过程季节性变化明显。雨季降水转化为包气带水的效率接近 100%,而枯季出现转化效率接近零的情况(图 3),这充分显示鸳鸯泉流域的“四水”转化在雨季和旱季处于两个极端,成为旱涝交替的内因。



系列 1:水池水位累积增加量与累积降雨量的关系;系列 2:雨季时满足降水全部转化为包气带水的线性关系

Series 1: The accumulation of water level rising in the pool changes with rainfall accumulation; Series 2: The linear relation between accumulation of water level rising and rainfall theoretically

图3 凤山县鸳鸯泉流域鸳鸯洞包气带水形成效率

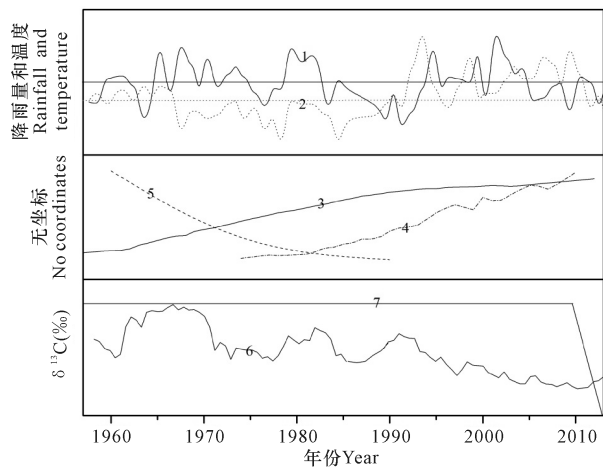
Fig. 3 Formation efficiency of vadose flow in Yuanyang Cave of Yuanyang basin in Fengshan County

### 3.3 提出水源地保护方案,保证水质安全

岩溶水资源的研究目标是保证水资源的可持续利用。对于具备地下水开发利用潜力的地下河和岩溶大泉,水安全尤为重要。位于南宁武鸣区的灵水岩溶泉即是一个通过水资源研究,建立水安全保障措施的典型例子。灵水岩溶泉是覆盖型峰林平原出露的泉水,出口位于城镇中心。9 个泉水集中出露后形成灵水湖,水面面积达  $2.93 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,灵水湖向南流出汇入武鸣河。灵水岩溶泉是武鸣区 12 万人口唯一的供水水源地,流量为  $2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,日径流量平均约为  $2.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。灵水曾经优良的水质是当地人的骄傲。然而,近 30 年来随着城镇化进程的加快,流域内部土地利用发生了显著变化,灵水水资源量和质量大不如前。除了出现流量减少、水质恶化等问题外,原本茂盛的沉水植物近乎消失,引起了当地政府和群众的担忧<sup>[5]</sup>。据本研究团队监测,2018 年 4 月 13 日,灵水观测站断面流量仅为  $1.187 \text{ m}^3/\text{s}$ ,比同期减少了 57%~59%。灵水的流量达到有观测记录以来的最低值。

水资源量的减少和快速增长的供水需求是灵水岩溶泉开发利用遇到的主要矛盾,也是其水环境与水生生态变化的起因。广西地质调查院通过开展 1:50 000 水文地质调查,查明了流域内的水文地质条件、地下水开采情况和污染源等。本研究团队通过与当地政府和自来水公司合作,在灵水进行了持续的观测,通过合作研究利用灵水湖沉积物恢复环境变化的过程。郭芳<sup>[26]</sup>研究地下水和地表水的相互作用对岩溶泉口水环境的影响,提出了“洞穴交互带”的概念。本研究团队未来还将通过水文地质结构概化建立模型,为确定最佳的水资源开采量提供依据。

灵水岩溶泉属于岩溶地下水水源地,其汇水范围约 697 km<sup>2</sup>,该区域农业发达,人口密集。农业生产和农村生活依赖于地下水开发利用,农业面源污染和农村生活污染不可避免地影响地下水。由于涉及的面积极广,水源保护区的制度难以实施。且灵水岩溶泉水源地位于风景区内,长久以来水资源既要满足供水,又要提供给市民休闲和游泳,保护与开发的矛盾没有得到解决。灵水湖出口靠近河流,洪水期河水倒灌进入取水口,随之而来的泥沙和污染物对灵水湖的水生态造成永久性的破坏,成为灵水湖水草死亡的主要原因(图 4)。随着灵水流量的减少,洪水倒灌的规模和持续的时间可能增加。灵水水源地的保护需要进一步的研究来认识水环境演化的机制。



1. 降雨量距平; 2. 温度距平; 3. 武鸣县人口数量; 4. 武鸣县地下水开采量; 5. 武鸣县森林蓄积量; 6. 灵水湖底泥有机碳的<sup>13</sup>C同位素; 7. 灵水湖沉水植物数量

1. Anomaly of rainfall; 2. Anomaly of water temperature; 3. Population in Wuming; 4. Groundwater exploitation in Wuming; 5. Forest growing stock in Wuming; 6. <sup>13</sup>C of organic carbon in sediment of Lingshui Lake; 7. Aquatic plant in Lingshui Lake

图 4 灵水岩溶泉口环境演化趋势

Fig. 4 Conceptual model of environment evolution in Lingshui Spring

### 3.4 认识地下河氮流失过程并提供固氮方案

人类活动对岩溶环境的影响是水资源管理需要考虑的一个重要因素。1994 年中国地质学会岩溶专业委员会主办的第四届全国岩溶学术会议就以“人类活动与岩溶环境”为主题<sup>[27]</sup>。地下水污染是人类活动影响岩溶环境的突出问题。由于土壤覆盖层薄或缺失,地表过滤污染物的能力低,加上落水洞等岩溶形态的存在,地下水与地表水的转换快速且频繁,污染物通过多种路径进入地下,造成水质下降和水生态退化。而且污染物在含水层得不到有效降解,岩溶水也成为向地表水体输送污染物的重要路径。

位于柳州融安县的官村地下河,处于桂中平原边缘。地下河流域面积 30.5 km<sup>2</sup>,流量为 0.040~2 m<sup>3</sup>/s。地下河发育于泥盆系融县组灰岩,漏斗、洼地、谷地、落水洞、天窗、明流极为常见,是沟通地表和地下的直接通道。谷地为耕地和村庄,以水稻、甘蔗、玉米种植为主,饲养山羊和水果成为农民增加收入的行业。

为掌握农业种、养、牧等活动对地下河的干扰,本研究团队从 2004 年起在地下河出口建立了观测站,记录水位、流量和水化学的变化。随着人口和耕地面积的增加,地下河上游、中游和下游硝酸盐含量逐渐升高。每年的春季地下河的硝酸根浓度出现高峰(图 5)。高峰的出现与农作物正处于开播、施肥阶段有关系。同时秋季和冬季很少形成有效降雨,污染物在包气带累积,雨季开始后积累的污染物被冲洗进入地下河,形成硝酸盐浓度峰<sup>[28]</sup>。

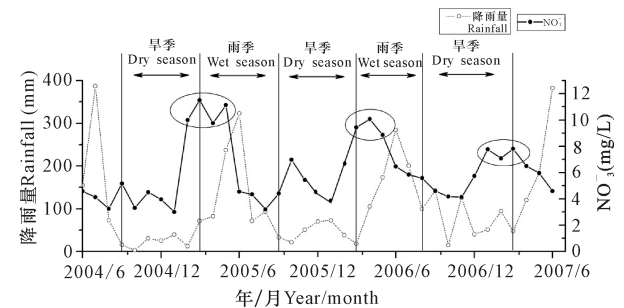


图 5 官村地下河 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度的季节性变化

Fig. 5 Variation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> in Guancun underground river

官村地下河的氮平衡计算显示,通过地下河出口排泄的氮是流域氮输入量的 32%。地下河基流阶段氮的流失量为 16 162.15 kg,占全年流失量的 76%,表明氮素大量进入含水层,而且得不到降解。

地下河系统中近 1/3 的氮通过地下水流失,对水生态富营养化有重要的推动作用。地下河流域以旱地为主,且土壤浅薄,在季风气候影响下,氮元素在枯季形成积累,但同时农田处于闲置状态,不利于氮的

吸收利用。雨季降雨形成径流促进地表层积累的氮进一步向地下河迁移。根据地下河流域氮流失的机制,本研究团队提出岩溶地区除采取科学施肥外,还需要在枯季充分利用积累在土壤中的氮,提高化肥的利用效率,以减少氮流失的方案。

### 3.5 认识城市水环境演变提供地下空间保护的依据

桂林在 20 世纪 80 年代以前地下水开发一度形成降落漏斗,并引起多处塌陷。在工业发展高峰期,桂林市区溶潭、脚洞等作为水源地被充分利用。同时工业三废大量进入溶洞对水环境产生严重的影响。岩溶发育和地下水丰富使桂林地下空间的利用受到限制。基坑排水不得不采取帷幕灌浆以阻断岩溶水的联系。尽管当前桂林市作为一个非工业城市,污染物的排泄总量和用水量不高,但原工业化进程中遗留的污染问题和生活类污染源仍然对地下水环境产生影响。另一方面由于在地基处理中大量采用灌浆,以及为了避免塌陷而放弃使用地下水,导致地下水富余,增加了城市内涝和地下水侵害作用的风险。甑皮岩遗址地下水环境的勘察说明了城市水环境的演变问题。

甑皮岩洞穴遗址位于桂林市西南部一个石峰底部。洞穴底板高程 154.0~154.8 m,考古挖掘活动在底板形成了 6 个探坑,探坑的最大深度为 3 m,底部有强烈溶蚀的石灰岩。地下水的波动范围 149.59~154.93 m,遗址因此位于地下水季节变动带中。地下水的浸泡和扰动造成遗址软化、冲刷掏空、坍塌和污染等一系列问题<sup>[29]</sup>(图 6)。控制地下水水位及其波动速度,防止污染,成为保护文物的关键问题。

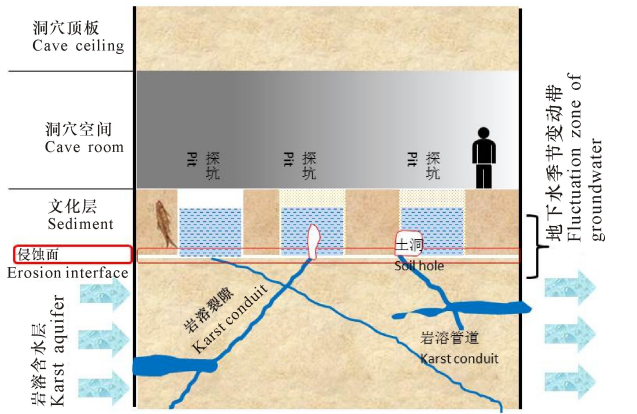


图 6 甑皮岩遗址所处的水文地质和工程地质环境

Fig. 6 Hydrogeological and engineering geological environment of Zengpiyan city

制定遗址的保护方案必须认识遗址周围岩溶发育以及地下水的运动特征,说明岩溶形态与水动力之间的联系。区域尺度的水文地质调查的任务是划分

水文地质单元的范围和确定边界条件。局部尺度的地下水详查是为了了解溶洞的具体位置和与遗址接触的地下水的来源和去向。

本研究团队通过勘察建立了场地岩溶发育及水文地质概念模型,用于解释地下水的侵蚀力形成原因。甑皮岩遗址由石峰脚洞和平原面以下的隐伏溶洞、溶蚀裂隙构成的具有主径流带的地下水系统构成,在峰林平原地区具有代表性。在这个系统中地下水的水平运动缓慢,基本不具有侵蚀力,地下水溶蚀和水位波动产生的潜蚀作用是造成土体破坏的动力。

除了地下水潜蚀外,水质污染的威胁同样需要关注。遗址处于城市环境,周围污染源众多。早在 20 世纪 60 年代,附近氮肥厂的污水直接排泄到遗址下部的溶洞。遗址西北方向的砖厂采用电厂的煤渣作为原料,砖厂关闭后煤渣就地填埋,成为一个固定的污染源,不断淋滤释放出含有硫酸盐的污水。加上生活污水的混入,遗址周围形成一个富硫的地下水环境。地下水的  $SO_4^{2-}$  含量平均值为 56 mg/L,最高值可达 255 mg/L,而遗址下部的地下水  $SO_4^{2-}$  含量仅为 1.33~5.57 mg/L,说明地下水发生了硫酸盐还原。硫酸盐还原加速碳酸盐岩的溶蚀作用,增加了遗址的不稳定。

## 4 结论

广西岩溶分布广且类型多样。岩溶水资源对于农业灌溉、城市和农村供水、应对极端气候起到了重要作用。但是与岩溶水有关的水环境与水生态问题及其发展趋势都呈现新的变化。解决岩溶发育规律和探测方法问题,通过长期监测掌握问题发展的趋势对于岩溶水资源的可持续利用具有重要意义。

岩溶水根据地质条件的不同可以形成地下河系统或者含水构造。不论是哪一种存在形式,岩溶水都是脆弱的。地下河系统地下水的动态强烈,常引起干旱和内涝。含水构造地下水运动缓慢,但是容易形成污染物的累积,并且水资源开采能够引起水环境和水生态的连锁反应,根据岩溶水的特征制定水资源的保护方案十分必要。

岩溶地区水资源的开发从以前注重提高开采量,到现在围绕水资源的安全与可持续利用,以建设生态文明为目标。在水资源开发的同时应注意防范极端气候产生的干旱和洪涝,同时防治农业面源污染和农村生活来源的污染对水质的影响。城市地区与地下空间的利用相关的岩溶环境问题越来越突出,但是这方面的研究还很薄弱,需要予以重视。

参考文献:

- [1] 广西壮族自治区地方志编纂委员会. 广西通志: 岩溶志 [M]. 南宁: 广西人民出版社, 2000.  
Provincial Records Compilatory Committee of Guangxi. General records of Guangxi: Karst records [M]. Nanning: People's Press of Guangxi, 2000.
- [2] GUO F, JIANG G H, POLK J, et al. Resilience of groundwater impacted by land use and climate change in a karst aquifer, South China [J]. *Water Environment Research*, 2015, 87(11): 1990-1998.
- [3] 袁道先. 西南岩溶石山地区重大环境地质问题及对策研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
YUAN D X. Significant environmental geology issues and countermeasures in karst mountain areas in Southwest China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [4] 刘凡, 姜光辉, 吴卫熊, 等. 广西凤山县鸳鸯泉水文地质成因探讨 [J]. *广西科学*, 2017, 24(6): 623-628.  
LIU F, JIANG G H, WU W X, et al. Discussion on hydrogeological genesis of Yuanyang Spring in Fengshan County, Guangxi [J]. *Guangxi Science*, 2017, 24(6): 623-628.
- [5] GUO F, WANG W K, JIANG G H, et al. Distribution and stable isotopic compositions of organic carbon in surface sediments in hyporheic zone of karst springs [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 850.
- [6] 林永生, 裴建国, 杜毓超, 等. 广西姚村地下水化学特征及其时空变化 [J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(12): 6-9, 16.  
LIN Y S, PEI J G, DU Y C, et al. Temporal and spatial distribution of the hydrochemical characteristics of Yao-cun underground river in Guangxi Province [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(12): 6-9, 16.
- [7] 王喆, 卢丽. 南宁市清水泉地下河水中多环芳烃分布特征 [J]. *环境科学与技术*, 2016, 39(4): 132-136.  
WANG Z, LU L. Distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in water from Qingshuiquan underground river in Nanning [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 39(4): 132-136.
- [8] 刘绍华, 郭芳, 姜光辉, 等. 桂林市峰林平原区岩溶水文地球化学特征 [J]. *地球与环境*, 2015, 43(1): 55-65.  
LIU S H, GUO F, JIANG G H, et al. Hydrogeochemical characteristics of peak forest plain in Guilin city, China [J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(1): 55-65.
- [9] 樊连杰, 裴建国, 杜毓超, 等. 广西红水河中下游澄江地区地下水地球化学特征 [J]. *现代地质*, 2015, 29(4): 958-966.  
FAN L J, PEI J G, DU Y C, et al. Geochemical characteristics of groundwater in Chengjiang area of the Hongshui River in Guangxi [J]. *Geoscience*, 2015, 29(4): 958-966.
- [10] 孙国伟. 广西忻城县北更-古蓬岩溶区排涝防洪分析 [J]. *低碳世界*, 2017(7): 79-80.  
SUN G W. Analysis on flood drain and control in Beigeng-Gupeng karst area in Xincheng, Guangxi [J]. *Low Carbon World*, 2017(7): 79-80.
- [11] 曾家俊, 黄华爱, 刘松, 等. 广西德保岩溶内涝灾害成因分析 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2015, 13(6): 118-122.  
ZENG J J, HUANG H A, LIU S, et al. Cause analysis of karst waterlogging disasters in Debao County of Guangxi [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2015, 13(6): 118-122.
- [12] 姚克追, 荣明书, 黄祖勇. 广西南丹县干旱缺水地区水文地质特征及地下水开发利用条件分析 [J]. *工程建设与设计*, 2015(S1): 142-145.  
YAO K Z, RONG M S, HUANG Z Y. Analysis on the hydrogeological characteristics and the conditions of groundwater exploitation and utilization in Nandan County, Guangxi Province [J]. *Construction & Design for Engineering*, 2015(S1): 142-145.
- [13] 张正国, 黄凯, 凌贤宗, 等. 广西岩溶区水土流失现状分析及治理措施探讨 [J]. *广西水利水电*, 2015(2): 76-78.  
ZHANG Z G, HUANG K, LING X Z, et al. Current status of soil erosion in karst regions of Guangxi and harnessing measures [J]. *Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering*, 2015(2): 76-78.
- [14] 于东歌, 高武振. 桂林市临桂新区地下岩溶对塌陷的影响 [J]. *土工基础*, 2017, 31(6): 716-720.  
YU D G, GAO W Z. Karst sinkhole occurrences in Lingui new district of Guilin City [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2017, 31(6): 716-720.
- [15] 戴建玲, 罗伟权, 吴远斌, 等. 广西来宾市良江镇吉利村岩溶塌陷成因机制分析 [J]. *中国岩溶*, 2017, 36(6): 808-818.  
DAI J L, LUO W Q, WU Y B, et al. Mechanism analysis of sinkholes formation at Jilivillage, Laibin City, Guangxi, China [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(6): 808-818.
- [16] 郑智杰, 曾洁, 甘伏平, 等. 高密度电法在柳州太阳村镇岩溶塌陷区调查中的应用研究 [J]. *地质与勘探*, 2017, 53(1): 124-132.  
ZHENG Z J, ZENG J, GAN F P, et al. Application of high density electrical resistivity imaging to karst collapse investigation at the Taiyangcun Town, Liuzhou [J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53(1): 124-132.
- [17] 韦明汛, 陶毅, 李世平. 高密度电阻率法在岩溶探测中的应用——以广西隆林地区为例 [J]. *南方国土资源*, 2018年10月 第25卷第5期



- 2016(7):35-38.
- WEI M X,TAO Y,LI S P. Application of multi-electrode resistivity method on karst detection: A case of Longlin, Guangxi [J]. Nanfang Land Resource, 2016 (7):35-38.
- [18] 丁凯,刘珺,冯莉,等. 广西岩溶区某矿段矿坑涌水量预测[J]. 世界有色金属,2017,6:280-282.
- DING K,LIU J,FENG L,et al. Prediction of mine water inflow in a mining area in Guangxi karst area[J]. World Nonferrous Metals,2017,6:280-282.
- [19] 黄胜文. 柳州(鹿寨)至南宁高速公路改扩建岩溶地基处理方案设计[J]. 西部交通科技,2017,11:29-31.
- HUANG S W. Design of karst foundation treatment scheme for reconstruction and expansion of Liuzhou (Luzhai)-Nanning express way[J]. Western China Communication Science & Technology,2017,11:29-31.
- [20] 邓艳,蒋忠诚,李衍青,等. 广西不同石漠化程度下典型植物水分来源分析[J]. 热带地理,2015,35(3):416-421.
- DENG Y,JIANG Z C,LI Y Q,et al. Water sources of typical plants in different rocky desertification grades in Guangxi[J]. Tropical Geography,2015,35(3):416-421.
- [21] 中国科学院地学部. 全国喀斯特研究会议论文集[M]. 北京:科学出版社,1962.
- Division of Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences. Ministry of geology selected conference papers from national karst research [M]. Beijing: Science Press,1962.
- [22] 袁道先,戴爱德,蔡五田,等. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究:以桂林丫吉村为例[M]. 桂林:广西师范大学,1996.
- YUAN D X,DAI A D,CAI W T,et al. Karst water system of a peak cluster catchment in South China's bare karst region and its mathematic model[M]. Guilin: Guangxi Normal University Publishing House, 1996.
- [23] 姜光辉,陈坤琨,于爽,等. 峰丛洼地的坡地径流成分划分[J]. 水文,2009,29(6):14-19.
- JIANG G H,CHEN K K,YU S,et al. Separating karst slope runoff in peak cluster area[J]. Journal of China Hydrology,2009,29(6):14-19.
- [24] 陈国富,姜光辉,周文亮,等. 岩溶石山区山坡表层径流水文动态特征对比分析—以桂林丫吉试验场为例[J]. 水文,2013,33(5):58-63.
- CHEN G F,JIANG G H,ZHOU W L,et al. Comparative analysis of surface runoff hydrologic dynamic characteristics in karst mountainous areas: Taking Yaji experimental station as study case[J]. Journal of China Hydrology,2013,33(5):58-63.
- [25] GUO X J,JIANG G H,GONG X P,et al. Recharge processes on typical karst slopes implied by isotopic and hydrochemical indexes in Xiaoyan Cave, Guilin, China[J]. Journal of Hydrology,2015,530:612-622.
- [26] 郭芳. 岩溶洞穴交互带的环境功能及形成机制研究[D]. 西安:长安大学,2017.
- GUO F. The characteristic of environment function and formation mechanism of cave hyporheic zone in karst water system[D]. Xi'an:Chang'an University,2017.
- [27] 中国地质学会岩溶地质专业委员会. 人类活动与岩溶环境:第四届全国岩溶学术会议论文集[C]. 北京:北京科学技术出版社,1994.
- Commission on Karst, Geological Society of China. Human activity and karst environment (Proceedings of the fourth national academic conference on karst)[C]. Beijing: Beijing Science and Technology Press,1994.
- [28] GUO F,JIANG G H. Nitrogen budget of a typical subterranean river in peak cluster karst area[J]. Environmental Geology,2009,58(8):1741-1748.
- [29] GUO F,JIANG G H,LO K,et al. Hazard of sinkhole flooding to a cave hominin site and its control countermeasures in a tower karst area, south China[C].<sup>14</sup> th-Sinkhole Conference NCKRI Symposium 5,2015:447-454.

(责任编辑:陆雁)