

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20181101.001

郭芳,姜光辉,刘绍华.武鸣灵水岩溶水的水环境变化及管理保护面临的新问题[J].广西科学,2018,25(5):553-559.

GUO F,JIANG G H,LIU S H. Change of water environment in Lingshui karst spring and new issues faced in water resources management and protection[J]. Guangxi Sciences,2018,25(5):553-559.

## 武鸣灵水岩溶水的水环境变化及管理保护面临的新问题<sup>\*</sup>

# Change of Water Environment in Lingshui Karst Spring and New Issues Faced in Water Resources Management and Protection

郭芳,姜光辉,刘绍华

GUO Fang,JIANG Guanghui,LIU Shaohua

(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,MNR/GZAR,Institute of Karst Geology,Chinese Academy of Geological Sciences,Guilin,Guangxi,541004,China)

**摘要:**【目的】以武鸣灵水岩溶水为例,对调查研究灵水来源及环境地质问题所做的一系列工作进行总结,为其他地区的地下水开发利用和保护提供经验和参考。【方法】综合前期的地面调查、钻探、物探、水化学、水文监测以及示踪试验等多种技术手段,总结灵水岩溶水的形成及水环境退化的原因和趋势。【结果】确定灵水的补给范围;灵水含水层以网状裂隙排泄为主,呈现集中径流带的特征;枯季灵水的水资源量明显减少;水文功能的弱化导致水生生态系统急剧退化。另外,灵水还面临有害微生物快速繁殖、地下水动力减弱引发河流倒灌更加频繁等亟待解决的问题。【结论】灵水研究的一系列工作既展示了成果,也成为岩溶水源地研究的典范。广西其他岩溶地下水的研究还停留在水质水量的调查评价阶段。建议以灵水为参考,从单纯的无机环境向有机生命环境过渡,以应对变化环境下岩溶地下水资源管理和保护所面临的挑战。

**关键词:**岩溶水 水文地质 水生环境 水质 管理

**中图分类号:**P641.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2018)05-0553-07

**Abstract:**【Objective】Taking Wuming Lingshui karst spring as an example, this paper summarized a series of investigation and research works for understanding the source of Lingshui and its environmental geology problems, and provided experience and reference groundwater development and utilization and protection in other areas. 【Methods】Ground survey, borehole drilling, geophysical prospecting, monitoring on hydrochemistry and hydrology, and tracer test were applied to summarize the causes and trends of the formation of water karst springs and water environment degradation. 【Results】The recharge range of Lingshui was determined. Karst aquifer in Lingshui system was dominated by network fissures, showing the characteristics of concentrated runoff belts. Water quantity in dry seasons was significantly reduced in Lingshui Spring. The weakening of hydrological function led to abrupt degradation of aquatic ecosystem.

收稿日期:2018-01-29

作者简介:郭芳(1978—),女,博士,研究员,主要从事岩溶水文地质研究,E-mail:gfkarst@126.com.

\* 国家自然科学基金项目(41472239,41772269)和袁道先广西院士顾问项目资助。

In addition, Lingshui also faced with problems that needed to be solved urgently, such as the rapid propagation of harmful microorganisms and the frequent river backflow caused by the reducing of groundwater dynamics. **【Conclusion】**A series of work in Lingshui's research has not only demonstrated the results, but also served as a model for the research on karst water sources. In comparison, most of karst groundwater in Guangxi still stays in the initial stages of water quality and quantify investigation and evaluation. It is suggested to take Lingshui as a reference and the research should transfer from a pure inorganic environment to an organic life environment to cope with the challenge of karst groundwater management and protection under changing environment.

**Key words:** karst spring, hydrogeology, aquatic environment, water quality, management

## 0 引言

**【研究意义】**广西是中国南方集中连片发育的岩溶地区之一,岩溶面积有  $9.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占广西总陆地面积的 41%<sup>[1]</sup>。岩溶地下水资源丰富,地下水以地下河或岩溶泉的形式排泄。枯水期流量在 100 L/s 的地下河有 435 条,岩溶大泉有 736 个,枯季总流量 191  $\text{m}^3/\text{s}$ ,相当于  $1.650 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[2]</sup>。这些地下河或岩溶泉都形成相对独立的水文系统,地下河出口或泉口是资源开采利用的有利位置。然而,由于埋藏于地下的特点,特殊的地形地质条件导致对岩溶地下水的认识并不如地表水容易,需要专业的团队和技术。**【前人研究进展】**20 世纪七八十年代,在原国家地质部的领导下,广西境内 1:20 万的水文地质调查工作覆盖了区内主要的地下河出口、泉口,掌握了重要的水文资料。1999 年以来,以中国地质科学院岩溶地质研究所为代表的科研机构对广西部分重要岩溶流域开展 1:5 万水文地质调查工作,期间主要是对重要水点的流量大小、水质状况进行调查,大致划分了流域范围。其他流域则少有详细的调查和研究工作。随着国民经济的发展,这些资料已不能满足实际需要。**【本研究切入点】**灵水是广西典型的构造型岩溶大泉,是武鸣盆地流量最大的泉水。自 1964 年兴建水厂以来,是县城 12 万人口的唯一供水水源。灵水发育于典型的覆盖型峰林平原区,地下水径流特征不明显。因此,管理部门和当地群众长期以来对灵水岩溶泉的来源、水文地质条件、汇水范围等并不清楚,管理措施只能参照地表水来开展。随着城镇化进程的加快和气候变化等区域环境的影响,灵水岩溶泉的水资源面临一系列的威胁。**【拟解决的关键问题】**本研究以武鸣灵水岩溶泉为例,论述为认识岩溶水环境的变化所开展的一系列工作及成果,阐释目前水资源管理面临的新问题,并提出建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 水文地质调查

根据地面调查、钻探和物探、现场示踪等试验,结合地层岩性、地质构造和岩溶发育情况,判断水文地质条件。

### 1.2 监测、取样和分析

自 2010 年起,在灵水岩溶泉出口建立水文水化学观测站,采用 GreenSpan CTDP300 或 YSI 6920 自动监测水位、水温、pH 值、电导率和溶解氧指标,利用 HOBO 小型气象站记录降雨量、气温和湿度,监测频率为 30 min。灵水流域内其他重要的岩溶泉则采取每季度或偶测水温、pH 值、电导率和溶解氧的方法,并同时进行了流量测量。对灵水岩溶泉出口以及灵水流域内其它重要泉水进行取样,分析水的阴阳离子和微量元素,时间间隔为季度或者年度;部分年度进行加密取样,取样间隔为每天。此外还进行水样的氢氧同位素、无机碳的同位素取样和测试。2013 年至 2015 年,每季度对灵水泉口沉积物的有机质及其碳同位素进行取样测试,并对浮游植物和浮游动物进行分析鉴定。期间两次取样分析微生物的群落结构。收集武鸣区环保局、水文局和供水公司的水文和水化学分析测试结果。

## 2 结果与分析

### 2.1 灵水岩溶泉的水文地质条件

1:20 万水文地质普查认为,灵水湖为地下河出口,补给面积为  $400 \text{ km}^2$ ,主要由灵水北部的那甲向斜储水构造构成,出口枯季流量为  $4000 \text{ L/s}$ <sup>[3]</sup>。自 2009 年起,岩溶地质研究所在地理信息系统技术划分地表水流域的基础上,利用盆地内大量水点的水化学、氢氧同位素,确定灵水岩溶泉的补给来源和汇水范围,认为灵水汇水面积为  $697 \text{ km}^2$ ,以覆盖型岩溶为主<sup>[4]</sup>,并划分了灵水的主要含水单元。该研究成果

在 2009 年武鸣县政治协商会议做出专题报告,第一次清晰地给当地政府阐释灵水从哪里来的问题。

覆盖型岩溶的特点是土壤覆盖层相对比较厚,地表岩溶形态如落水洞等较少。灵水含水层中,地下水的运动状态、有无主径流带、从上游到下游地下水运动所需要的时间等都不明确,但污染物或溶质的运移均是受制于地下水运动的。为此,2010 年中国地质调查局部署,广西地质调查研究院在武鸣盆地开展 1:5 万水文地质调查工作,对灵水的形成条件有了更深入的研究,认识了灵水流域地形地貌和水动力条件。因灵水流域内大部分地形较为平缓,平原区的谷地多为第四系覆盖,地下水的水力坡度较小,因此含水岩组没有产生强烈的侵蚀或冲刷溶蚀,推测不利于管道状岩溶的发育<sup>[5-6]</sup>。由于碳酸盐岩岩性不纯和相对隔水层的存在,灵水流域内岩溶发育未呈现大的岩溶管道,而是以网状溶洞、裂隙为主。

地面调查结果认为灵水岩溶泉系统由 3 个块段组成:北西面灵马至林圩岩溶块段(面积 216 km<sup>2</sup>)、北东及北面小明山至仙湖水碎屑岩块段(面积 464 km<sup>2</sup>)、中部灵水至府城岩溶块段(面积 684 km<sup>2</sup>)<sup>[5]</sup>。其中,府城—灵水岩溶块段为灵水泉主要的补给区和径流、排泄区,与前期姜光辉等<sup>[5]</sup>的认识一致。因府城—灵水块段对灵水岩溶泉的形成起主导作用,因此后来的研究中均以 697 km<sup>2</sup>的府城—灵水块段作为灵水的流域范围。

灵水泉口实际上是 9 个泉水集中排泄形成的湖泊,具有 2.93 × 10<sup>4</sup> m<sup>2</sup> 的水域面积。泉口的形成除受区域水文地质条件的影响外,与泉口周围的局部环境也有关。地表径流的汇入、地表河流的倒灌等对泉口的水文条件有明显的影响。

## 2.2 灵水含水介质的特征

一般情况下,含水介质包括岩溶管道、裂隙和孔隙、缝隙。不同的含水介质对地下水运动的控制作用不同。管道介质为主的含水层,地下水的运动速度高达 1 000 m/d;而裂隙为主的含水介质,地下水的运动速度仅为 10~100 m/d<sup>[7]</sup>。在地形较为平坦的峰林平原和孤峰丘陵谷地区,洞穴或地下水天然露头少,给含水介质特征的判断带来困难。因此,在灵水主要采取钻探、物探和示踪试验的方法来揭露含水介质的特征。

水文地质调查显示灵水的岩溶管道规模不大,但可能呈带状集中径流的特征。在灵水北部约 3 km 处,发育多处消水洞及消溢洪洞。为此,在这一带布设 5 条剖面线开展物探工作。在物探异常处,布设水文地质钻探揭露岩溶发育情况。结果显示,浅部岩溶

裂隙发育,抽水涌水量较大,地下水较丰富,推测地下水集中径流带在大路屯南西经过。钻孔验证与物探结果基本吻合,钻孔虽没有揭露到溶洞,但也体现出地下水集中径流带地下水相对富集的特征。

在灵水流域内开展 2 次人工示踪试验进一步分析岩溶管道特征。人工示踪试验通过投放对环境无毒无害的化学试剂,在下游可能与投放点相通的水点接收,通过计算接收时间和回收率判断地下水的连通状况,是水文地质常用的试验方法<sup>[8]</sup>。在大路屯落水洞投放示踪剂,在大路钻孔及落水洞附近的大口井、灵水泉口观察和接收示踪剂。结果表明该地区岩溶发育是比较均匀的,多种含水介质之间的连通性较好。根据峰值出现时间计算示踪剂的运移速度只有 17~23 m/d,地下水水动力条件较缓,主管道的可能性不大,存在网络状溶蚀裂隙的可能性更大。

综合分析水文地质调查、物探及钻探、示踪试验结果,认为灵水岩溶泉流域内的岩溶管道结构主要为网络状,没有形成单一的主管道。初步确定灵水北部的集中径流带或岩溶发育带分布,该结论与黄之巍等<sup>[9-10]</sup>的结论基本一致(图 1)。之后,笔者等<sup>[11]</sup>利用在线监测的电导率频率分布中提取峰的个数和形态,判断含水介质的特征和水源组分,其结果也与上述结论吻合。该径流带的划分,不仅为认识灵水流域内的岩溶含水介质提供条件,也为地下水的开发利用和管理保护提供基础。

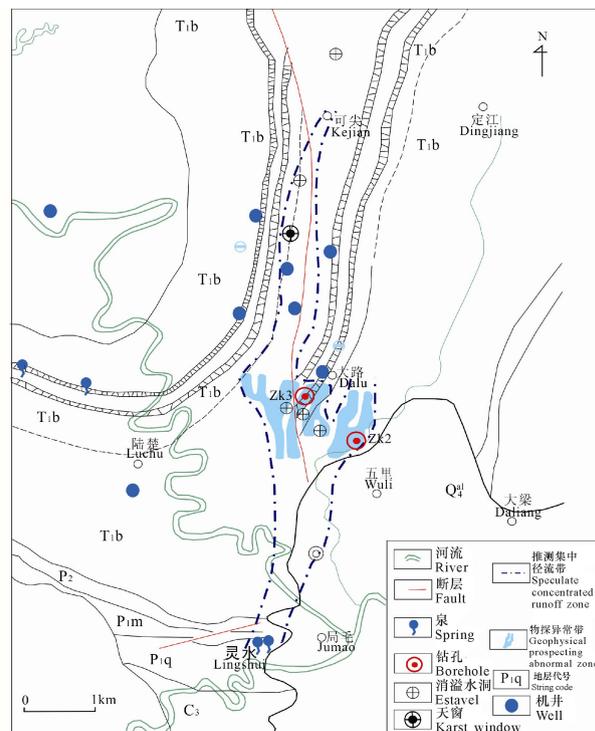


图 1 灵水北面地下水集中径流带分布<sup>[11]</sup>  
Fig. 1 Distribution of groundwater concentrated runoff zone in the north of Lingshui<sup>[11]</sup>

### 2.3 水资源的变化及其影响因素

水资源量是否稳定是水源地和风景区关注的重要问题。20世纪70年代末,灵水出口的枯季流量达4 000 L/s。2010年起连续测量发现,灵水出口的枯季流量为2 100~4 000 L/s。灵水现阶段的流量与80年代对比,枯季流量减少12.5%~50%,其中灵水2号出口的减少量最大,流量从20世纪80年代占总流量的23%下降到现阶段的12%左右。2018年3月,灵水的流量更是下降到历史最低值,仅为1 180 L/s。盆地内其余泉水也大都存在类似的情况,2010年调查的45个泉水中,有37个流量下降,下降率为3%~97%<sup>[12]</sup>。与之形成强烈对比的是,随着城镇化的发展,供水需求却在逐年上升。2010年灵水的年开采量为 $1.461 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,是1978年开采量的12倍。

地下水资源量的减少与流域内地下水的开采、土地利用变化和气候变化密切相关。流域内快速增长的地下水开采、传统的水土保持林转变为桉树林以及近几年干热的气候条件,可能是导致灵水岩溶泉流量衰减的原因。

水资源量减少还是导致水质变化的主要因素,原因是稀释能力的减弱。此外,人类活动的增强、污染负荷的增加,也是水质恶化的原因。灵水2号出口地下水硝酸盐的含量变化趋势显示(图2),20世纪70年代末至今,硝酸盐含量的变化经历3个阶段,从原来的接近零状态上升到现阶段的6.5~10 mg/L。 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 等也呈明显的升高趋势。地下水的水质恶化极大地威胁了饮水安全。鉴于岩溶地下水动态变化强烈、偶测样品不能反映地下水水质变化的特点,2010年起在灵水湖建立观测站,自动记录水位、pH值、水温、电导率、溶解氧以及硝酸盐等对环境变化敏感的物理化学指标,一直延续至今。自动记录的

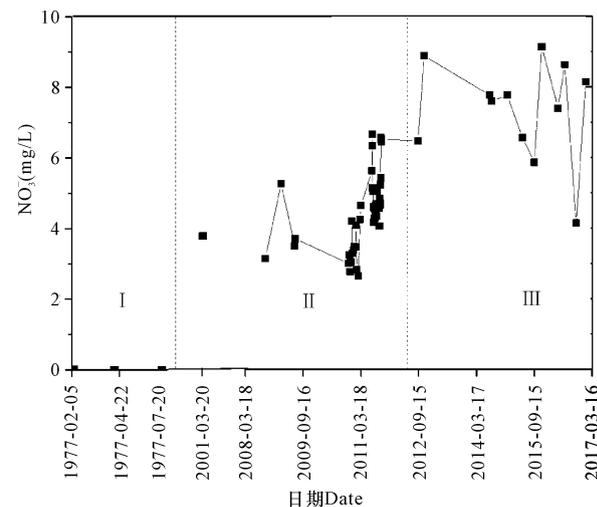


图2 灵水岩溶泉的硝酸盐含量变化

Fig. 2 Variation of nitrate content in Lingshui Spring

水化学时间变化不仅可以反映灵水湖的水环境变化,如水温有 $0.02^\circ\text{C}/\text{yr}$ 的增加趋势<sup>[12]</sup>,也为辅助判断径流来源、过程等提供数据<sup>[11]</sup>。

高分辨率的沉积物微量元素记录能大致反映流域生态环境和人类活动的历史变化。为研究灵水湖环境变化的历史和原因,在灵水出口无扰动的前提下采集长度为1 m的沉积柱,利用 $^{210}\text{Pb}$ 进行沉积物的定年,并测试铁、铝、铜、铅、锌等14种微量元素的浓度。结果显示,尽管大部分微量元素没有剧烈的变化趋势,但在某些阶段都有波动的现象;1957—2013年,Cu和Zn有明显的增加趋势,并且一些时段的浓度超过标准浓度,与历史上的工业和矿山开采活动的发展有很好的对应关系(图3)。

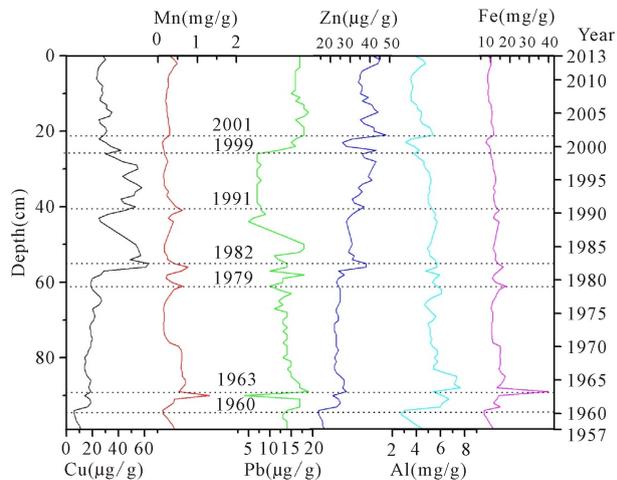


图3 Cu、Mn、Pb、Zn、Al、Fe与沉积物深度和年代的对 应关系

Fig. 3 Relationship between Cu, Mn, Pb, Zn, Al, Fe and sediment depth and ages

### 2.4 水生生态环境的退化

2010年以来持续观测的水化学表明,灵水的水质评价结果大都属于I类地下水,雨季个别时段出现浊度等指标的超标。然而,从2010年夏季开始,灵水湖原本茂盛的沉水植物突然出现大量的死亡现象;至2013年,沉水植物已基本消失。沉水植物消亡不仅导致自然景观发生变化,也引起一系列问题,如浑浊度提高、以沉水植物为食和庇护的鱼等生物的退化、甚至还引起水温升高等问题。

沉水植物和浮游植物都是水生生态系统的重要群落,但它们是竞争关系,而沉水植物的死亡消失可能会引起浮游植物的大量爆发,引起水华等富营养化问题<sup>[13-14]</sup>。因此,选择灵水与灵水流域内其他4个流量大的泉水,对比研究浮游植物和浮游动物的群落结构及其与水环境的关系,发现不同的岩溶泉口环境中,影响浮游生物群落的主要影响因子不同。如春季,亚硝酸盐、溶解氧、温度和pH值是影响灵水浮游

植物物种的主要因子;其余季节,总磷、总氮、钙离子、重碳酸根离子、高锰酸钾指数是影响物种分布的主要环境因子。春季,影响罗波潭地下河出口浮游植物群落的主要环境因子是 pH 值和溶解氧;秋季,则是电导率、总氮、重碳酸氢根离子等;夏季,总磷、铵离子、高锰酸钾指数发挥的作用则更明显。水生环境的退化除与区域含水层的地下水流动有关外,与泉口的水文地质条件、局部小环境的水文过程、人类活动的影响程度有极大的关系,特别是河流倒灌导致的岩溶地下水与地表水的相互作用对泉口水环境造成很大的影响,为此笔者提出“岩溶洞穴交互带”的概念<sup>[15]</sup>,并以武鸣盆地为例,划分洞穴交互带的类型,探讨其环境功能。该问题在水文地质、水环境领域属于前沿科学问题,但尚处于起步探索阶段,是未来需要重点攻关的方向。

另外,笔者所在团队利用沉积物的有机碳及其同位素( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ )、总氮、烧失量、C/N 的含量,结合<sup>210</sup>Pb 测年,恢复灵水湖过去的水生环境,通过有机碳的来源及同位素等了解灵水湖环境的变化。结果显示,1957—2013 年灵水湖环境变化可划分为 6 个阶段,1960—1990 年,降雨量、气温和水位变化是此阶段影响灵水湖的主要因素;1990—2013 年,区域尺度的人类活动是导致局部尺度(泉口)环境变化的主要原因<sup>[16-17]</sup>,说明水生生态环境的退化是个累积的过程。

## 2.5 灵水出现的新问题和面临的新挑战

### 2.5.1 微生物群落结构的变化及对水环境的影响

环境水体中微生物广泛存在,水媒传播引起的疾病是我国急性传染病中发病数量最多、流行面最广的一类疾病。寻找指示微生物、水环境污染微生物溯源是环境水体微生物关注的重要问题<sup>[18-19]</sup>。水文功能弱化、沉水植物消失为主的水生生物功能退化常引发一系列的问题,除承载稀释、降解污染物的水化学功能减弱外,微生物群落结构可能发生变化。

2015 年 8 月的检测显示,灵水 2 号出口的微生物以变形菌门为主,占 99%。2017 年 4 月,灵水 2 号出口以拟杆菌门为最大比例的门类,达 43.44%;其次是变形菌门和疣微菌门,分别为 24.89%和 9.4%。同期,位于灵水岩溶泉的观测站处,酸杆菌门为最大的优势门,达 44.73%;其次是变形菌门和绿弯菌门。两次分析对比显示,两年内灵水的微生物群落发生了明显的变化。岩溶泉口与受地表河流倒灌影响显著的湖尾的微生物群落结构也有差异。但因前期未有微生物相关的研究,受水文地质条件和人类活动影响的岩溶水体中微生物群落结构如何演化及其对水环境的影响尚不清楚。

因微生物对人体健康的潜在威胁,我国生活饮用水标准(GB 5749—2006)规定总大肠菌群不得检出。2010—2016 年的监测显示,尽管大部分时段灵水岩溶泉口都未检出大肠菌群,但偶然检出时却有 9~240 CFU/100 mL,显著高于饮用水的标准。大肠杆菌,特别是粪大肠的超标对生活饮用水是个极大的威胁。大肠菌群等微生物的存在不仅恶化水质,威胁饮水健康,微生物群落结构的变化也会影响水环境,如微生物优势群落的变化可能改变食物链的结构,导致鱼类、浮游生物、沉水植物群落结构发生变化<sup>[20]</sup>。但微生物与水环境的互作机制是个复杂的问题,岩溶水系统中微生物群落结构的变化与水环境的关系尚需进一步研究。

### 2.5.2 地下水水动力减弱导致河流倒灌更加频繁

河流倒灌进入泉口或含水层在南方岩溶地区是个常见现象。灵水湖与武鸣河仅相距 40 m。枯季,灵水泉补给武鸣河;雨季,暴雨期间有可能发生武鸣河倒灌进入灵水泉口的现象。河流倒灌对地下水的水质是个严重威胁,因为地表水的水质往往比地下水差。如对比 2009 年 2 月 19 日和 2015 年 5 月 13 日两次取样,武鸣河的  $\text{PO}_4^{3-}$  浓度是灵水的 50 倍。地表水倒灌进去泉口或含水层,不仅带来暂时的浑浊度提高,也可能会改变地下水的物理化学性质和生物特征<sup>[21]</sup>。每年一至几次的武鸣河倒灌使灵水浊度超标,导致水厂停止供水。倒灌发生时,河流带来大量的有机质和污染物质,所带来的悬浮颗粒物会降低泉口交互带的透明度,进而减少沉水植物的光合作用;有机质在不同的环境条件改变时,发生分解,此过程需消耗大量的氧气,导致水体的溶解氧浓度降低,使得水环境向还原环境过渡;沉积物如果携带有毒污染物质,在 pH 值等条件变化下,可能发生变化,如重金属的活化,进而释放到上覆水体。这些过程不仅影响水体的水质,也会影响水生生态系统的健康生长。

由于灵水的流量减小,水动力变弱,近两年的观测发现,武鸣河倒灌进入灵水的频率增加,且倒灌持续的时间变长。原本暴雨才会产生的倒灌,中雨尺度也可能会发生。倒灌持续的时间由原来的 1~3 d,到现在长的可持续 5~7 d。河流倒灌的频率增加以及持续时间变长,对灵水岩溶泉口的水环境、甚至整个含水层都会产生更为强烈的交互作用。倒灌发生的阈值、倒灌带来的环境后果、特别是含水层水文和水化学的变化,将成为未来灵水水资源管理的重要依据,同时也是南方岩溶地区类似地质条件下急需关注的问题。

### 3 结论

灵水由 9 个岩溶泉集中排泄形成,是县城唯一的饮用水供水水源地。那甲向斜是主要的储水含水层,中部的府城—灵水岩溶块段为灵水泉主要的补给区和径流、排泄区。灵水岩溶泉流域内的岩溶管道结构主要为网络状,管道规模不大,呈现出带状集中径流的特征。

现阶段灵水的地下水流量在枯季下降 25%~50%,硝酸盐为首的污染物经历了 3 个上升的阶段。地下水的水质和水量的变化与灵水领域内土地利用方式的变化、地下水开采量的快速增加、区域气候变化的影响有密切的关系。

沉水植物消亡后,浮游生物群落结构的变化反映了灵水湖水生生态环境的变化。沉积物的有机碳及其同位素的变化也说明 20 世纪 90 年代后人类活动是导致灵水湖泉口环境变化的主要原因。水生环境的变化同时触发水化学功能的弱化,降低污染物的稀释能力、引起水温升高、浑浊度增加等问题。

当自然资源承载力与人类对其的开发利用没有平衡点时,水资源质量恶化的趋势还将继续。当前灵水出现微生物污染、地表河流倒灌愈加剧烈和频繁等尖锐问题,建议加大科研投入,通过创新解决威胁水资源安全的问题。

#### 致谢:

武鸣区政府、区政治协商委员会、武鸣区供水公司等单位在工作开展过程中给予了大量的支持和帮助,在此表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] 李国芬. 广西岩溶水文地质特征及其资源[J]. 中国岩溶, 1996, 15(3): 48-53.  
LI G F. Karst hydrogeologic characteristics and water resources in Guangxi[J]. *Carsologica Sinica*, 1996, 15(3): 48-53.
- [2] 钱小鄂. 广西水资源开发现状及可持续发展对策[J]. 南方国土资源, 2003, 6: 26-28, 30.  
QIAN X E. Exploitation status and sustainable development strategies of water resources in Guangxi[J]. *Nanfang Land Resources*, 2003, 6: 26-28, 30.
- [3] 广西壮族自治区地质局, 广西水文工程地质队普查分队. 中华人民共和国区域水文地质普查报告: 南宁幅(FO49O[7])[R]. 南宁: [s. n.], 1979.  
Guangxi Bureau of Geology, Guangxi Hydrological Engineering and Geology Team, Regional Hydrogeological

Survey Report of China: Nanning (FO49O[7]) [R]. Nanning: [s. n.], 1979.

- [4] 姜光辉, 郭芳. 利用 GIS 水化学和同位素方法判断灵水来源[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 59-63.  
JIANG G H, GUO F. Source identification of Lingshui Spring using GIS-based hydrochemistry and environmental isotopic methods[J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 59-63.
- [5] 广西壮族自治区地质调查研究院. 广西重点岩溶地区水文地质及环境地质调查报告: 武鸣岩溶盆地[R]. 南宁: [s. n.], 2011.  
Institute of Guangxi Geological Survey. Hydrogeology and environmental geological survey of important karst region in Guangxi: Wuming basin [R]. Nanning: [s. n.], 2011.
- [6] 黄秀凤. 广西武鸣灵水泉形成条件研究及保护建议[J]. 南方国土资源, 2015, 10: 28-31.  
HUANG X F. Study on formation condition of Lingshui Spring and its protection suggestion[J]. *Nanfang Land Resources*, 2015, 10: 28-31.
- [7] 姜光辉, 郭芳, 汤庆佳, 等. 人工示踪技术在岩溶地区水文地质勘察中的应用[J]. 南京大学学报: 自然科学, 2016, 52(3): 503-511.  
JIANG G H, GUO F, TANG Q J, et al. Application of tracer test techniques in hydrogeological survey in karst area[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2016, 52(3): 503-511.
- [8] GOLDSCHIEDER N, DREW D. Methods in karst hydrogeology[M]. London: Taylor & Francis Group, 2007: 264.
- [9] 黄之巍. 广西灵水岩溶大泉水文地质条件[J]. 中国地质调查, 2017, 4(5): 74-81.  
HUANG Z W. Hydrogeological conditions of the large karst spring in Lingshui, Guangxi[J]. *Geological Survey of China*, 2017, 4(5): 74-81.
- [10] 黄之巍, 张勤军. 灵水泉出口特征及补径排条件分析[J]. 南方国土资源, 2017, 8: 35-37.  
HUANG Z W, ZHANG Q J. Characteristic of the outlet of Lingshui Spring and its recharge-runoff-discharge condition[J]. *Nanfang Land Resources*, 2017, 8: 35-37.
- [11] 郭芳, 姜光辉, 刘绍华, 等. 利用泉水电导率频率分布辨别岩溶含水系统的水源组分[J]. 水科学进展, 2018, 29(2): 245-251.  
GUO F, JIANG G H, LIU S H, et al. Identifying source water compositions of karst water systems by quantifying the conductance frequency distribution of springs[J]. *Advances in Water Sciences*, 2018, 29(2): 245-251.
- [12] GUO F, JIANG G H, POLK J, et al. Resilience of  
Guangxi Sciences, Vol. 25 No. 5, October 2018

- groundwater impacted by land use and climate change in a karst Aquifer, South China[J]. *Water Environment Research*, 2015, 87(11):1990-1998.
- [13] 王立新, 吴国荣, 王建安, 等. 黑藻 (*Hydrilla verticillata*) 对铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 抑制作用[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(4):337-342.  
WANG L X, WU G R, WANG J A, et al. The Inhibition of *Hydrilla verticillata* on *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4):337-342.
- [14] MOSS B. Engineering and biological approaches to the restoration from eutrophication of shallow lakes in which aquatic plant communities are important components[J]. *Hydrobiologia*, 1990, 200, 201:367-377.
- [15] 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.
- [16] 郭芳, 王文科, 姜光辉, 等. 岩溶泉口沉积物有机碳的来源及环境指示意义[J]. *地球与环境*, 2015, 44(5):485-491.  
GUO F, WANG W K, JIANG G H, et al. Sources of organic carbon from sediment of a karst spring and its environmental significance [J]. *Earth and Environment*, 2015, 44(5):485-491.
- [17] 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.
- [18] 陈胜蓝, 尹红果, 陈梦清, 等. 环境水体中病原微生物与指示微生物的相关性研究[J]. *浙江农业科学*, 2015, 56(4):448-452, 537.  
CHEN S L, YIN H G, CHEN M Q, et al. Relative study on pathogenic and indicator microorganism in water [J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Science*, 2015, 56(4):448-452, 537.
- [19] 敖静, 阮晓红, 万宇. 水环境中粪便污染的微生物溯源技术及研究进展[J]. *环境与健康杂志*, 2012, 29(7):658-662.  
AO J, YUAN X H, WAN Y. Development of microbial source tracking of fecal pollution in water [J]. *Journal of Environment and Health*, 2012, 29(7):658-662.
- [20] SUN R, SUN P F, ZHANG J H, et al. Microorganisms-based methods for harmful algal blooms control: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 248 (part B):12-20.
- [21] JOIGNEAUX E, ALBERICP, PAUWELS H, et al. Impact of climate change on groundwaterpoint discharge: Backflooding of karsticsprings (Loiret, France) [J]. *Hydrological and Earth System Science*, 2011, 15: 2459-2470.

(责任编辑:米慧芝)