

# 广西凤山县鸳鸯泉水文地质成因探讨\*

## Discussion on Hydrogeological Genesis of Yuanyang Spring in Fengshan County, Guangxi

刘凡<sup>1</sup>, 姜光辉<sup>1\*\*</sup>, 吴卫熊<sup>2</sup>, 郭芳<sup>1</sup>, 郭永丽<sup>1</sup>

LIU Fan<sup>1</sup>, JIANG Guanghui<sup>1</sup>, WU Weixiong<sup>2</sup>, GUO Fang<sup>1</sup>, GUO Yongli<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004;

2. 广西壮族自治区水利科学研究院, 广西南宁 530023)

(1. Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR/GZAR, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi, 541004, China; 2. Guangxi Institute of Water Resources Research, Nanning, Guangxi, 530023, China)

**摘要:**【目的】研究凤山县鸳鸯泉水文地质成因,为鸳鸯泉这一地质奇观提出科学的解释。【方法】根据实地调查和现场试验,结合地层岩性、地质构造以及岩溶发育情况,查明鸳鸯泉的岩溶水文地质条件;根据地下水示踪试验,确定鸳鸯泉的源头和主要的岩溶含水介质类型,并通过稳定氢氧同位素和钙锶比(Ca/Sr)分析,研究管道介质岩溶大泉的补径排过程和水循环特征。【结果】鸳鸯泉的源头为年里落水洞补给的外源水,公塘和母塘两个出口的主径流管道基本一致;鸳鸯泉具有以岩溶管道为主的含水介质特征,以及快速流的补给、径流和排泄过程。这种水文地质现象的成因与管道流集中排泄的方式有关。【结论】鸳鸯泉同属于一个管道系统,管道流的两个出口在水循环速度上存在差异,相比公塘,母塘具有较短的径流途径和较快的更新速率。

**关键词:**鸳鸯泉 岩溶地质 示踪试验 钙锶比 稳定氢氧同位素

**中图分类号:**P641.11 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2017)06-0623-06

**Abstract:**【Objective】The research on hydrogeological genesis of Yuanyang Spring in Fengshan County could make this geological wonder a scientific explanation.【Methods】Combined with lithology, geological structure and karst development, the karst hydrogeological conditions of Yuanyang Spring were identified by field investigations and trials. According to the groundwater tracer test, the source of Yuanyang Spring and the main types of karst aqueous media were determined. Stable oxygen and hydrogen isotopes, calcium strontium ratio (Ca/Sr) were used to study the recharge, runoff and discharge processes of karst springs of conduit medium and water cycle characteristics.【Results】The source of Yuanyang Spring was the groundwater from

Nianli Sinkhole. The main runoff pipes of the two outlets of Father Spring and Mother Spring were basically the same. The aquifer medium was dominated by karst conduit. The groundwater recharge, runoff and discharge process were characterized by fast-flow. The genesis of Yuanyang Spring was related to the concentrated discharge of karst conduit flow.【Conclusion】The two sub springs (father spring and mother spring) in Yuanyang Spring belonged to the

收稿日期: 2017-04-12

修回日期: 2017-06-05

作者简介: 刘凡(1988—),男,实习研究员,主要从事水文地质、环境地质研究。

\* 广西水利科技项目“广西岩溶峰丛洼地区水资源综合利用技术研究”(201418, 201517, 201612)和中国地质调查项目(DD20179302, DD20160303)资助。

\*\* 通信作者: 姜光辉(1977—),男,研究员,主要从事水文地质、岩溶学、土壤生态学研究, E-mail: ghjiang@karst. ac. cn.

same karst conduit system. The two outlets of the pipeline flow had differences in the water circulation speed. Compared with father spring, the mother spring had a shorter runoff path and a faster update rate.

**Key words:** Yuanyang Spring, karst geology, tracer test, calcium strontium ratio, stable oxygen and hydrogen isotopes

## 0 引言

**【研究意义】**地下水的排泄方式因为地质条件、地形和地貌、流域结构等因素产生差异。在岩溶区,裂隙和管道介质相组合,地下水排泄方式多种多样<sup>[1-2]</sup>。鸳鸯泉有别于经典水文地质学中泉群的概念,具有相距很近且形态相似的两个泉口<sup>[3-5]</sup>。凤山县鸳鸯泉位于广西河池凤山县凤城镇,地处云贵高原南部边缘,属亚热带季风气候区,多年平均降雨量 1 569.8 mm,蒸发量 1 367.9 mm。该泉自凤凰山脚下流出,泉口处地理坐标为 107°03'59"E, 24°32'45"N,两眼泉水均为常年泉,汇集后流量为 0.2~2.0 m<sup>3</sup>/s。泉口呈两个近圆形的水塘,相距约 40 m,流出约 20 m 后汇合形成九曲河,自东向西汇入观音河<sup>[8]</sup>。鸳鸯泉是凤山县重要的水源,以悠久的历史 and 美丽的传说成为当地著名的旅游景点。鸳鸯泉俗称公母塘,是鸳鸯泉流域的出口。因为九曲河是巴马盘阳河的上游,所以鸳鸯泉也称为长寿河之源。**【前人研究进展】**鸳鸯泉出露于峰丛洼地岩溶流域,岩溶含水介质的结构导致赋存其中的地下水具有十分复杂的运动过程。在地质调查的基础上提出假设,并结合地下水示踪试验,是国内外常用的确定岩溶含水系统连通性的方法<sup>[6-7]</sup>。在水文地质条件复杂、含水介质高度不均一的岩溶流域,稳定同位素技术可较好地对流域内水循环的过程进行识别,可用以进一步研究鸳鸯泉岩溶流域的补径排过程<sup>[8-10]</sup>。此外,在岩溶水的水化学指标中,锶元素常用于指示水岩交互作用的时间,进而推断径流途径的长短<sup>[11-13]</sup>。在岩性相近的地层中,锶的浓度随径流时间和径流途径的增加而增加。根据板寨地下河流域的研究成果,Ca/Sr 和 1/Sr 之间存在正相关关系,水的径流条件越好,Ca/Sr 的值越大<sup>[11]</sup>。若公塘和母塘具有不同的径流途径,理论上可根据 Ca/Sr 的比值来区分公母塘的岩溶水循环的径流条件。**【本研究切入点】**近年来,关于鸳鸯泉源头及成因的研究多为猜测和推断,缺乏结合地质调查资料和实验数据进行科学分析的过程,且仍未有研究能明确指出其可能的源头<sup>[4]</sup>。本研究旨在找出鸳鸯泉的源头,公塘和母塘两个出口的水力联系和两个出口之间的差异及其原因。**【拟解决的关键问题】**根据区内地层岩性、地质

构造以及岩溶发育情况,结合外源水的影响,初步查明鸳鸯泉的岩溶水文地质条件。根据地下水示踪试验,确定鸳鸯泉的源头和主要的岩溶含水介质类型,并通过稳定氢氧同位素和钙锶比(Ca/Sr)分析,进一步研究管道介质岩溶大泉的补径排过程和水循环特征。

## 1 材料与方法

### 1.1 水文地质条件调查

根据实地调查和现场试验,结合地层岩性、地质构造以及岩溶发育情况,查明鸳鸯泉的岩溶水文地质条件。

### 1.2 示踪试验

以荧光素钠(C<sub>20</sub>H<sub>10</sub>Na<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)为示踪剂,投放点位于鸳鸯泉北西侧直线距离约 4 km 的年里村落水洞,分别在鸳鸯泉两个水塘(公塘、母塘)进行接收。于 2015 年 9 月 21 日投放后,每日在接收点取水样 50 mL 于离心管中避光保存,同时取水样于 25 mL 塑料样品瓶中并滴加饱和 HgCl<sub>2</sub> 溶液抑制微生物活性。连续取样监测至 2015 年 11 月 11 日,结束后将样品带回实验室并对荧光素钠浓度和有机碳进行测试。荧光素钠样品送至国土资源部岩溶动力学重点实验室进行分析,测试仪器为野外自动化荧光仪(Flow-through field fluorometer, GGUN-FL30)。同时,在鸳鸯泉下游约 1 km 处设立水位观测站,使用 Diver 自动化水位观测仪,数据记录间隔为 15 min,得到取样期间的水位变化曲线。

根据示踪点和投放点的距离,采用加权平均的方式计算求得地下水的平均流速<sup>[14]</sup>。计算公式如下:

$$\bar{v} = S \div \frac{\sum_{t=1}^n C(t)t}{\sum_{t=1}^n C(t)}$$

式中, $n$  为示踪试验持续的时间(d), $C$  为示踪剂的浓度( $\mu\text{g/L}$ ), $t$  为时间变量(d), $S$  为投放点到接收点的距离(m)。

### 1.3 稳定同位素和钙锶比(Ca/Sr)试验

枯水期表层带的岩溶水减少,来自饱水带管道介质的岩溶水比例相对增高,在枯水期进行取样监测,能够较好的反映来自管道介质的水化学特征,更具指

示意义。因此,于2016年1—3月在鸳鸯泉公塘、母塘和外源水汇入的年里落水洞处进行稳定同位素连续取样两份。其中,一份水样采集于50 mL聚乙烯小瓶中,共计70组,送至国土资源部岩溶动力学重点实验室进行测试,使用仪器为MAT 253气体稳定同位素质谱仪。另一份水化学分析样品用600 mL聚乙烯塑料瓶采集,共计22个,送至中国地质科学院岩溶地质研究所测试中心进行测试,其中的阳离子及微量元素用ICP-MS分析。现场使用便携式水质监测仪(Professional Plus Series YSI)测试样品的温度(T)、pH值、溶解氧(DO)和电导率(SPC)。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区地质和水文地质条件

地层岩性、地质构造、地形地貌以及外源水的侵蚀作用影响控制着岩溶发育的程度。其中,地层岩性是最基本的条件。流域内主要的地层分布以及岩性见图1<sup>[15]</sup>。鸳鸯泉流域主要地层为石炭系上统C<sub>3</sub>和中统C<sub>2</sub>,二叠系下统茅口组P<sub>1m</sub>和栖霞组P<sub>1q</sub>,连续沉积厚度超过1 km,岩性以厚层至块状灰岩白云岩为主,夹杂硅质岩、燧石灰岩,含碳酸盐岩裂隙溶洞水,水量丰富至中等。碳酸盐岩的广泛出露为前提,加上来自碎屑岩地区外源水的影响,为岩溶发育提供了有利条件。

在区域地质构造方面,鸳鸯泉流域受到因挤压抬升形成的以背斜为主的复式褶皱的影响。如图1所示,北西向构造及南北向构造将鸳鸯泉流域包围<sup>[15]</sup>,中间的碳酸盐地层受到的挤压应力集中,进而产生强烈的破碎作用,为降水的入渗、垂直渗流带的形成以及落水洞的发育提供了有利条件。地层被挤压抬升以后,地表水系逐渐演化为一个个独立的集水单元,形成洼地。底部碳酸盐岩中的裂隙受洼地内汇流的影响逐步扩大,形成落水洞,出现垂直渗流带<sup>[16]</sup>。以背斜为主的复式褶皱,为内源水的溶蚀提供足够大的垂直渗流带空间,北东侧为碎屑岩和灰岩的接触带。碎屑岩区有巨大的汇水面积,大量的外源水汇入加速了碳酸盐岩的溶蚀作用,岩溶发育很强烈,因此在碳酸盐岩和碎屑岩接触地带形成了谷地,成为地下水的集中排泄带。

鸳鸯泉流域的地貌形态为构造溶蚀型峰丛洼地和谷地,鸳鸯泉位于谷地边缘。由于相对位置较低,峰丛谷地经常为地下水和地表水汇集排泄的区域。在峰丛洼地地区,地形坡度较大,溶蚀能力较强的大气降水通过洼地中的落水洞垂直入渗,地下水水力坡度大,径流集中,为岩溶管道的发育提供了条件。来自

自北东向碎屑岩区的外源水通过落水洞进入地下,洞口与泉口的连线发育有成串的峰丛洼地和落水洞,暗示了下方岩溶管道的发育。

从岩溶水文地质结构类型分析,鸳鸯泉流域属于均匀状灰岩平缓褶皱型,灰岩含水层大面积出露,补给范围广阔,地表和地下的各种岩溶形态发育均较好<sup>[2]</sup>。其显著特点是地下径流强于地表径流,发育有不同形态和规模的地下河管道以及落水洞,水量丰富,流域边界为地下分水岭。峰丛洼地区大气降水通过垂直渗流带补给,同时受到碎屑岩区外源水的影响,其汇水范围通过落水洞延伸至北东向碎屑岩区。

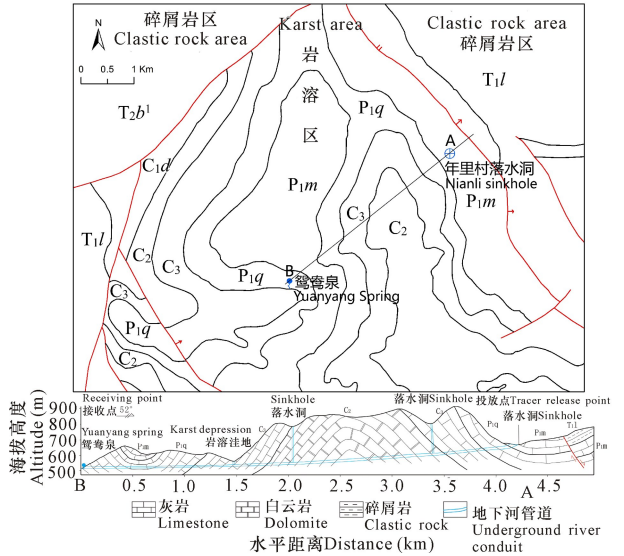


图1 研究区地质及剖面图

Fig. 1 Geological and section map of the study area

### 2.2 岩溶水动态与水化学特征

峰丛洼地岩溶流域地表水系不发育,鸳鸯泉流域的上游为碎屑岩山区,中游和下游则为岩溶石山。大气降水以及来自碎屑岩区的外源水为主要补给来源,降水在岩石裸露的山坡能够快速形成径流,但这些地表径流在运动很短的距离后便沿溶蚀裂隙入渗,转化为地下径流,只有少部分保留在表层岩溶带中。管道状岩溶含水介质的发育,加速了地下水补给和径流的过程。同时,地下河管道介质也成为了降水以及上游地表水排泄的主要途径。因此,鸳鸯泉的流量动态变化受降雨影响较为强烈,且流量随降雨量的增大同步增长。观测站记录的水位曲线和日降雨量如图2所示,几次主要的降水过后均伴随着流量的显著增长。

根据实地勘查,母塘内泉水排泄的方式为倒置的虹吸管式,或者称为U型管道。U型管道的排泄方式容易在泉口形成水潭,表明岩溶发育的深度会在泉口以下,这是岩溶发育适应不同级别的排泄基准面的结果。但是鸳鸯泉未出现过断流的现象,一方面是因

为流域的面积较大,另一方面也说明,尽管在泉口以下仍有岩溶发育,但是潜流的比例不高。该岩溶系统并没有形成比现有排泄口更低的出口。

根据 2015 年 11 月测试的部分水质指标,除  $\text{NH}_4^+$  含量相差较大外,两泉点其他水化学组分的含

表 1 鸳鸯泉水质测试结果

Table 1 Water quality test results of Yuanyang Spring

鸳鸯泉 Yuanyang Spring	测试指标 Analysis indicators								
	T(°C)	pH	DO (mg/L)	SPC ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	$\text{NH}_4^+$ (mg/L)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/L)	$\text{K}^+$ (mg/L)	$\text{Na}^+$ (mg/L)
公塘 Father Spring	21.0	7.21	7.68	361.6	0.009 1	74.034	1.409	0.263	0.543
母塘 Mother Spring	20.9	7.29	7.29	362.4	0.020 8	75.445	1.364	0.309	0.576

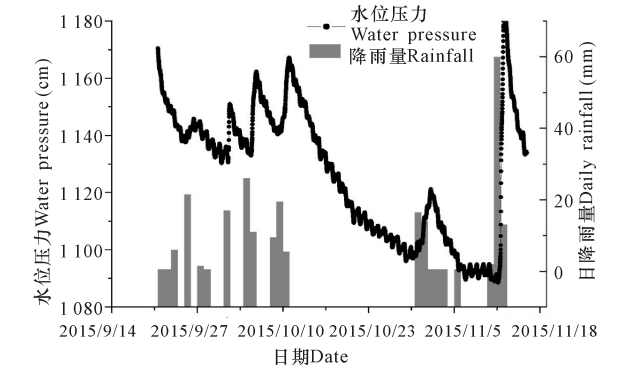


图 2 鸳鸯泉水位曲线和日降雨量

2.3 示踪试验分析

如图 3 所示,示踪试验曲线出现明显的主峰且两个主峰能够较好的重叠,说明两个泉的主径流通道基本一致,均属分布较为集中的强岩溶径流带型介质。同时也证实了,通过年里落水洞汇入的外源水是鸳鸯泉的源头。主峰过后,浓度出现波动,表明两个泉流经管道裂隙有所差别,地下水同源同汇但路径和流速有差异<sup>[17]</sup>。拖尾反弹现象说明来自碎屑岩区的地表水通过落水洞进入岩溶管道介质以后,一部分被管道内部的溶潭所滞留,体现了岩溶含水层的调蓄功能。示踪试验持续了 52 d,经计算,公塘的流速为 207 m/d,母塘的流速为 201 m/d,公塘的流速稍快于母塘。流速的快慢暗示了更新速率和径流途径的差别。

2.4 稳定氢氧同位素分析

如图 4 所示,岩溶水中的稳定氢氧同位素整体呈现先变重后变轻的过程,最重时为 2 月下旬,出现在母塘。该变化整体上受到枯水期降水事件的影响,降水主要发生在 1 月下旬和 3 月中旬。期间由于一段时间连续干旱作用的影响,稳定氢氧同位素的含量偏重。在连续降水期间,同位素含量则明显变轻。稳定

量均十分接近(表 1)。由于母塘已开发成为游泳场所,建有简易的配套设备,不时有人在塘边洗衣、钓鱼;公塘处则无此类活动干扰。因此推测  $\text{NH}_4^+$  的差异由人类活动影响导致。

氢氧同位素均在 2 月下旬出现最重值。其中,母塘的变化趋势相比公塘更为显著,变幅更大,这在一定程度上说明两者补径排途径的差异。同位素的差异可以反映径流来源的差别。母塘的同位素变化较为显著且流量略大于公塘,推测其较多地接收了附近洼地的补给,故表现出相对较快的更新速率,与上文示踪试验得出的结论一致。相比之下,公塘的同位素变化较为迟钝,推测来自附近洼地的补给量较少,主要接受远距离外源水的补给。

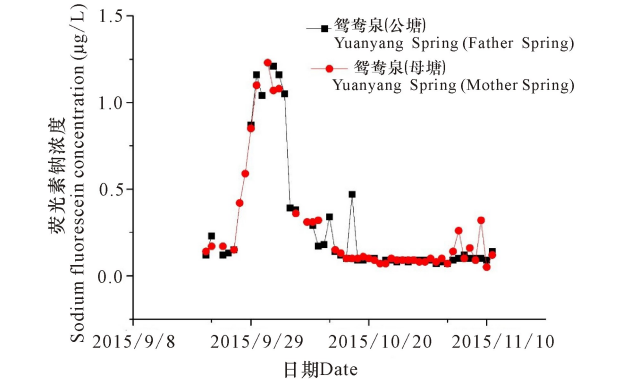


图 3 示踪试验曲线图

2.5 Ca/Sr 分析

在岩溶水循环过程中,Sr 浓度随着径流途径和水岩交互作用的时间而增加,相比之下 Ca 浓度却受制于溶解平衡,因此,不同来源的水的 Ca/Sr 值不同,径流途径和水岩交互作用的时间越长,其值越小,反之越大,依此可指示公塘和母塘径流条件的差异<sup>[11,13,18]</sup>。鸳鸯泉流域岩性以灰岩为主夹杂少量白云岩,Ca/Sr 的值越小,表示水岩交互作用越充分。示踪试验证实,公塘和母塘的岩溶水均以管道介质为主,其在枯水期补给自大气降水和表层岩溶带的比例较低,管道介质岩溶水的水岩交互作用较为充分。由

图5可知,取样期间,公塘的Ca/Sr值明显高于母塘,表示公塘的径流途径和水岩交互作用的时间小于母塘。根据前文结论,两者的流速相近、主管道相同。据此推测,产生该差异的原因主要为补给来源的不同,相比公塘,母塘接受了更多附近洼地的补给,加大了水岩交互作用的程度,进而Ca/Sr值表现出如此差异。

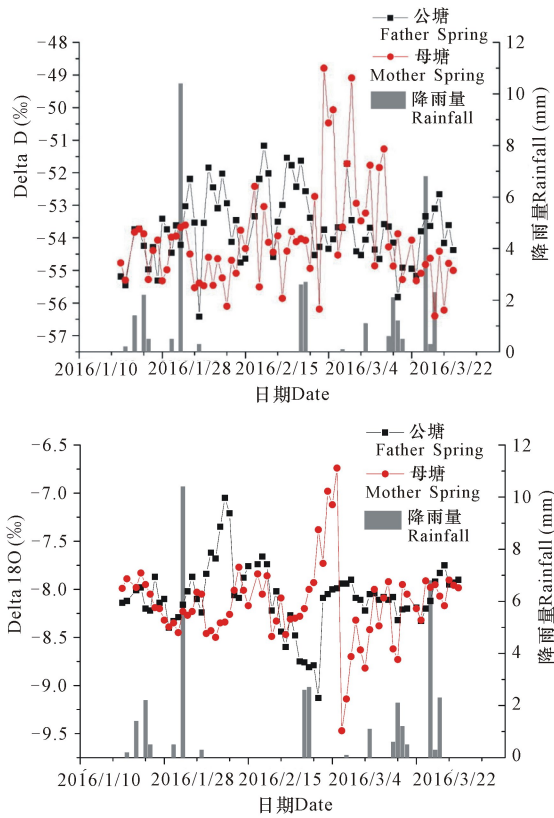


图4 氢氧稳定同位素随时间序列变化曲线

Fig. 4 Time series curve of hydroxyl stable isotopes

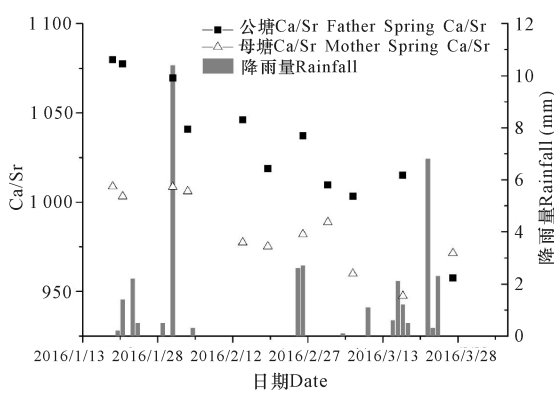


图5 Ca/Sr随时间变化曲线

Fig. 5 Time series curve of Ca/Sr

### 3 结论

地下水示踪试验结果确定了鸳鸯泉的源头为年里落水洞补给的外源水,公塘和母塘两个出口的主径流管道基本一致。一个管道两个出口的岩溶水文地质学 2017年12月 第24卷第6期

质现象得到确认,并且外源水对管道的形成起关键作用。稳定氢氧同位素和钙锶比(Ca/Sr)分析确定,流域具有以岩溶管道为主的含水介质特征,以及快速流的补给、径流和排泄的过程。两个出口在水循环速度上存在差异,母塘拥有与公塘不同的汇水系统。相比公塘,母塘具有较短的径流途径和较快的更新速率,其接收了更多附近洼地的补给。该研究对鸳鸯泉流域的进一步保护和开发有重要的指导意义。

### 致谢:

在本研究野外样品采集和测试分析过程中,得到中国地质科学院岩溶地质研究所,国土资源部岩溶动力学重点实验室的王紫燕、曾莘茹、陈长杰、龚晓萍和郭小娇的协助,在此一并致谢。

### 参考文献:

[1] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社, 1988:112-121.  
 YUAN D X, CAI G H. The science of karst environment [M]. Chongqing: Chongqing Publishing Press, 1988: 112-121.  
 [2] 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究 [M]. 北京:科学出版社,1979:84-92.  
 Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Karst Research Group. China karst research [M]. Beijing: Science Press, 1979: 84-92.  
 [3] 苏童. 揭秘神奇的凤山鸳鸯泉[J]. 发明与创新, 2011 (10): 50-51.  
 SU T. Mysterious Fengshan mandarin duck springs [J]. Invention and Innovation, 2011(10): 50-51.  
 [4] 陶琦. 凤山鸳鸯泉·谜一样的岩溶泉潭[J]. 南方国土资源, 2016(6): 45-48.  
 TAO Q. Fengshan mandarin duck spring: Mystery karst spring pool [J]. Land and Resources of Southern China, 2016(6): 45-48.  
 [5] 王大纯, 张人权, 史毅红. 水文地质学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1980: 141-142.  
 WANG D C, ZHANG R Q, SHI Y H. Hydrogeology basis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 141-142.  
 [6] 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: 自然科学版, 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.  
 [7] PETRI Ć M, KOGOVSĚK J. Identifying the characteristics of groundwater flow in the Classical Karst area

- (Slovenia/Italy) by means of tracer tests[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(22): 1446.
- [8] YUAN J F, XU F, DENG G S, et al. Using stable isotopes and major ions to identify hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in Xide county, Sichuan Province[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2017: 1-12. DOI:10.1007/s13146-017-0333-x.
- [9] 康志强. 喀斯特表层岩溶带原生森林的水文效应研究——以贵州省茂兰国家自然保护区为例[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(6): 47-50.  
KANG Z Q. Hydrological effect of karst primal forest on epi-karst zone: A case study from Maolan National Reserve of Guizhou Province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(6): 47-50.
- [10] 黄华诚, 刘宏. 昆明市黑龙潭岩溶泉氢氧稳定同位素分析[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(5): 445-451.  
HUANG H C, LIU H. The hydrogen and oxygen stable isotope analysis of the karst spring in Heilongtan [J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(5): 445-451.
- [11] 康志强, 熊志斌, 李清艳, 等. 岩溶地下河流域水循环方式的降水效应[J]. *地球与环境*, 2011, 39(1): 26-31.  
KANG Z Q, XIONG Z B, LI Q Y, et al. The precipitation effect on the water cycle mode of karst subterranean stream catchment[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(1): 26-31.
- [12] 黄奇波, 康志强, 覃小群, 等. 习水县岩溶水系统  $\rho(\text{Sr}^{2+})$ 、 $\rho(\text{Sr})/\rho(\text{Ca})$ 、 $\rho(\text{Sr})/\rho(\text{Mg})$  分布特征及其应用[J]. *地质科技情报*, 2011, 30(4): 98-103.  
HUANG Q B, KANG Z Q, QIN X Q, et al. Distribution characteristics of  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Sr}/\text{Mg}$ ,  $\text{Sr}/\text{Ca}$  and its applications in karst water system of Xishui County[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2011, 30(4): 98-103.
- [13] LAND M, INGRI J, ANDERSSON P S, et al. Ba/Sr, Ca/Sr and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ratios in soil water and groundwater: Implications for relative contributions to stream water discharge[J]. *Applied Geochemistry*, 2000, 15(3): 311-325.
- [14] 曾莘茹, 姜光辉, 郭芳, 等. 桂林甑皮岩洞穴遗址地下水示踪及污染源分析[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(3): 245-253.  
ZENG X R, JIANG G H, GUO F, et al. Tracer tests for pollutant sources of the Zengpiyan remainder cave in Guilin, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(3): 245-253.
- [15] 黄秀凤, 石树静, 黄之巍, 等. 广西重点岩溶地区水文地质及环境地质调查报告(凤山县)[R]. 广西地质调查研究院, 2010.  
HUANG X F, SHI S J, HUANG Z W, et al. Investigation report on hydrogeology and environmental geology of key Karst areas in Guangxi (Fengshan County)[R]. Guangxi Institute of Geological Survey, 2010.
- [16] 杨明德, 梁虹. 峰丛洼地形成动力过程与水资源开发利用[J]. *中国岩溶*, 2000, 19(1): 44-51.  
YANG M D, LIANG H. The processes of evolution dynamic of cone karst and the exploitation of the water resource[J]. *Carsologica Sinica*, 2000, 19(1): 44-51.
- [17] 何师意, MICHELE L, 章程, 等. 高精度地下水示踪技术及其应用——以毛村地下河流域为例[J]. *地球学报*, 2009(5): 673-678.  
HE S Y, MICHELE L, ZHANG C, et al. A high precision underground water tracing test technique and its applications: A case study in Maocun karst system, Guilin, Guanxi[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2009(5): 673-678.
- [18] 胡进武, 王增银, 周炼, 等. 岩溶水锶元素水文地球化学特征[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(1): 37-42.  
HU J W, WANG Z Y, ZHOU L, et al. Hydrogeochemical characteristics of the strontium in karst water[J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(1): 37-42.

(责任编辑: 陆 雁)