

曾莘茹,姜光辉,郭芳,等. 桂林甌皮岩洞穴遗址地下水示踪及污染来源分析[J]. 中国岩溶, 2016, 35(3): 245-253.
DOI: 10. 11932/karst20160301

桂林甌皮岩洞穴遗址地下水示踪及污染来源分析

曾莘茹^{1,2}, 姜光辉², 郭芳², 汤庆佳², 刘凡²

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715;

2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 桂林甌皮岩遗址周围地带地下水中污染物的种类及来源复杂。为了查明地下水系统的结构特征, 分析地下水的污染物运移路径和追溯污染源, 采用在线高分辨率示踪技术与人工采样相结合的方法。选取荧光素钠和罗丹明 B 两种示踪剂, 在桂林甌皮岩遗址周围进行了三次示踪试验。根据试验结果分析地下水流程, 计算地下水平均流速。结果表明地下水流速在 1.6~33.91 m/d, 平均值为 12.92 m/d。流场内岩溶以溶蚀裂隙为主, 且裂隙发育呈网络式, 存在西北向东南方向的主径流带, 但大型岩溶管道存在的可能性小。三次示踪试验结果均显示, 投放点所在的污染源区与遗址周围地下水存在水力联系, 因此, 遗址附近的居民小区、学校、原砖厂等污染源对遗址下部的地下水存在潜在污染, 需更大程度地划分遗址的保护范围。特别是甌皮岩景区化粪池密闭情况较差, 严重危害遗址环境, 必须对化粪池进行防渗处理。

关键词: 地下水; 污染源; 示踪试验; 桂林甌皮岩; 遗址保护

中图分类号: P641.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2016)03-0245-09

岩溶地区水文地质条件复杂, 岩溶水具有非均质性、隐蔽性、敏感性等特点^[1-3], 普通水文地质勘察方法一般不适用。示踪试验是岩溶水文地质调查中一种非常有效的方法, 在地下河流域边界确定、土壤中溶质的传输过程研究、测定水流量以及水库渗漏途径识别等方面得到广泛应用^[4-6]。随着科技进步, 示踪剂逐渐多样化, 示踪技术也得到了很大发展^[7-9], 应用在线监测技术来分析含水介质的空间联通特征, 已成为当今国际水文地质研究的重要方向^[5, 10-12]。高精度在线示踪技术多应用于地下河等较大的岩溶管道^[13-15], 而平原地区是通过溶洞以及大量钻孔示踪地下水流程和追溯污染源, 较少应用此项技术。本研究在桂林峰林平原区开展的三次示踪试验, 均采用自动化监测并辅以人工取样的方法来求证甌皮岩遗址附近地下水的连通情况, 以查明可能存在的污染物运移路径, 从而为甌皮岩遗址的保护提供科学依据。

1 研究区概况

甌皮岩遗址位于桂林市区西南方向的独山, 是我国南方的一个重要的新石器时代人类遗址。经考古发掘, 出土了古人类骨架、动植物化石等大量的较为珍贵的实物资料, 在华南乃至东南亚史前考古研究中占有非常重要的地位^[16-18]。

甌皮岩遗址处于峰林平原地区, 地表覆盖层为粘性土或粘土卵石层, 下伏碳酸盐岩含水层(图 1)。含水介质主要为网络状溶蚀裂隙与溶洞。岩溶水除接受大气降水的人渗补给外, 还接受西部峰丛洼地地下水的侧向补给, 地下水富水性好^[19]。遗址位于一座石峰脚洞内。脚洞是指发育于石峰边缘与平原地面交接地带的洞穴。甌皮岩脚洞属于“流入型”脚洞, 是平原地面径流向石峰山体内部流失而形成的洞道, 故只有进水口而无地面出水口^[20]。

基金项目: 国家文物局行业专项“甌皮岩遗址地下水害防治工程水文地质勘察”(200237122002)

第一作者简介: 曾莘茹(1991-), 女, 硕士研究生, 自然地理学专业, 主要研究方向为岩溶学与环境变化。E-mail: 350430367@qq.com。

通讯作者: 姜光辉(1977-), 男, 博士, 研究员, 从事水文地质、岩溶学、土壤生态学领域研究。E-mail: bmnxz@126.com。

收稿日期: 2016-02-13

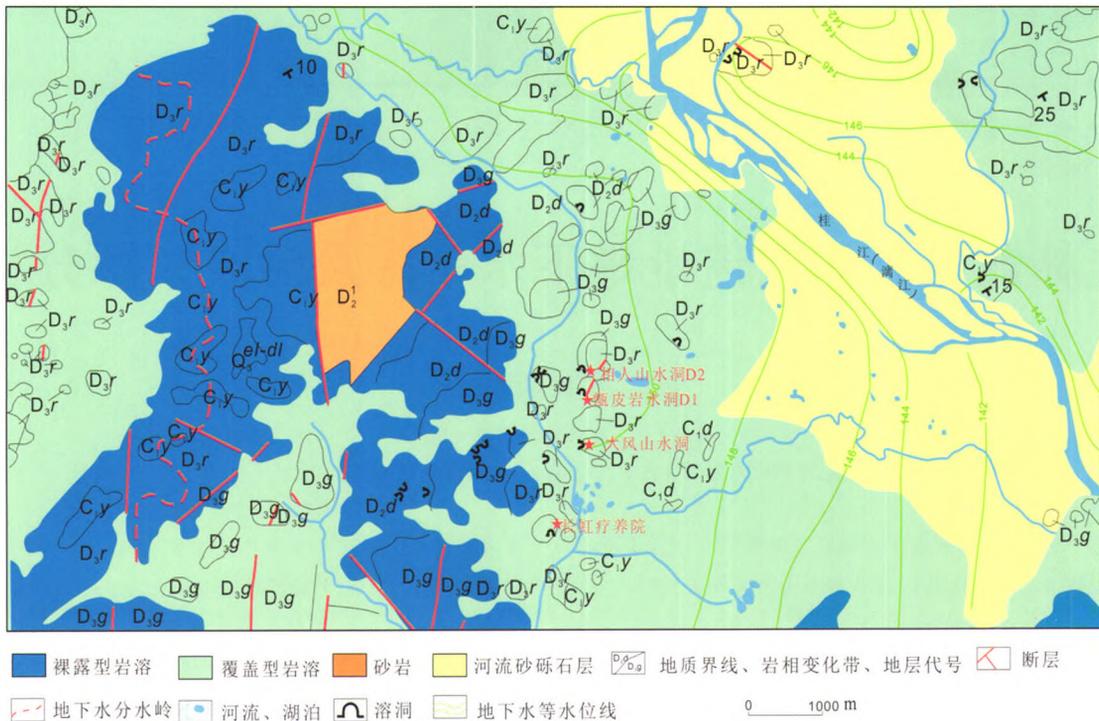


图1 研究区水文地质图(据桂林市环境工程地质图(1:25 000)修改)

Fig.1 Hydrogeological map of study area (modified from the environmental engineering geology map of Guilin City (1 : 25 000))

由于甑皮岩遗址处于城市中心,遗址洞穴内和附近的地下水易遭受污染且污染物种类和来源复杂(图2)。遗址核心区(钻孔 ZK10)及附近部分钻孔中地下水有臭味,核心区地下水处于还原环境,可能含有硫化氢气体,也可能是受其它污染所致,其周围部分钻孔地下水硫酸盐含量较高,但来源不明。可能存在的污染源较多,上世纪 60 年代,遗址西部被迁走的原氮肥厂的废水曾流入遗址洞内;遗址西北部曾为砖厂,从上世纪 50 年代至 90 年代砖厂遗留下的煤渣等污染物被永久填埋进土壤层中。遗址东部仅一路之隔是桂林日用化工厂。此外在甑皮岩遗址附近分布着小学、居民区、待拆迁的原砖厂职工老住宅区等,其排放的生活污水也可能影响地下水水质。在距离甑皮岩遗址核心区西南方向 50 m 处建有景区厕所,其化粪池可能通过裂隙管道进入地下水。

2 示踪试验投放点与接收点的选择

本研究共进行三次示踪试验,旨在查明地下水系统的结构特征,并分析地下水污染源和运移路径。三次试验的路线分别位于甑皮岩的北部、西北部和西部(图2),经初步判断属于甑皮岩溶洞水的上游。

第一次示踪试验选取甑皮岩北部的相人山水洞

(D2)作为示踪剂投放点(图2,图3)。相人山水洞(D2)与甑皮岩水洞(D1)之间相距仅 400 m,两者之间联通的可能性大。在示踪试验开始前对即将作为投放点的相人山水洞内水潭进行水文观测。观测期间,水位最大涨幅 38 cm/d,跌幅一般 20 cm/d,根据这个速度,在没有降雨补给的情况下,水潭内的水在三天内就可以漏完。水潭水位的变化特征表明水潭与含水层之间存在密切的联系,可以作为示踪剂投放点,水潭流动性强,能够保证示踪剂能够很快进入到含水层。甑皮岩水洞(D1)作为第一接收点,位于甑皮岩南部约 800 m 的大风山水洞和 1.5 km 长虹疗养院水洞(图1)作为另外二个接收点。这四个脚洞大致呈南北方向排列,可能是地下河存在的证据。除了这三个接收点之外,还在甑皮岩遗址周围的钻孔进行人工取样监测。

第二次示踪试验投放点选择在钻孔 Y6 与 Y7(图2,图3)。钻孔深度均为 70 m,2016 年 1 月 19 日测量地下水水位埋深分别为 3.64 m 和 2.54 m,揭示的浅部地层主要为碎砖构成的回填土及黄黏土,下部主要为融县组灰岩及桂林组灰岩。在钻孔 Y7 和 Y6 分别同时投入两种不同的示踪剂。甑皮岩水洞(D1)依旧为第一接收点,并进行在线监测,在遗址周围钻孔、水塘(C2)、脚洞(D3)进行人工取样。

第三次试验投放点为甑皮岩遗址的景区厕所马

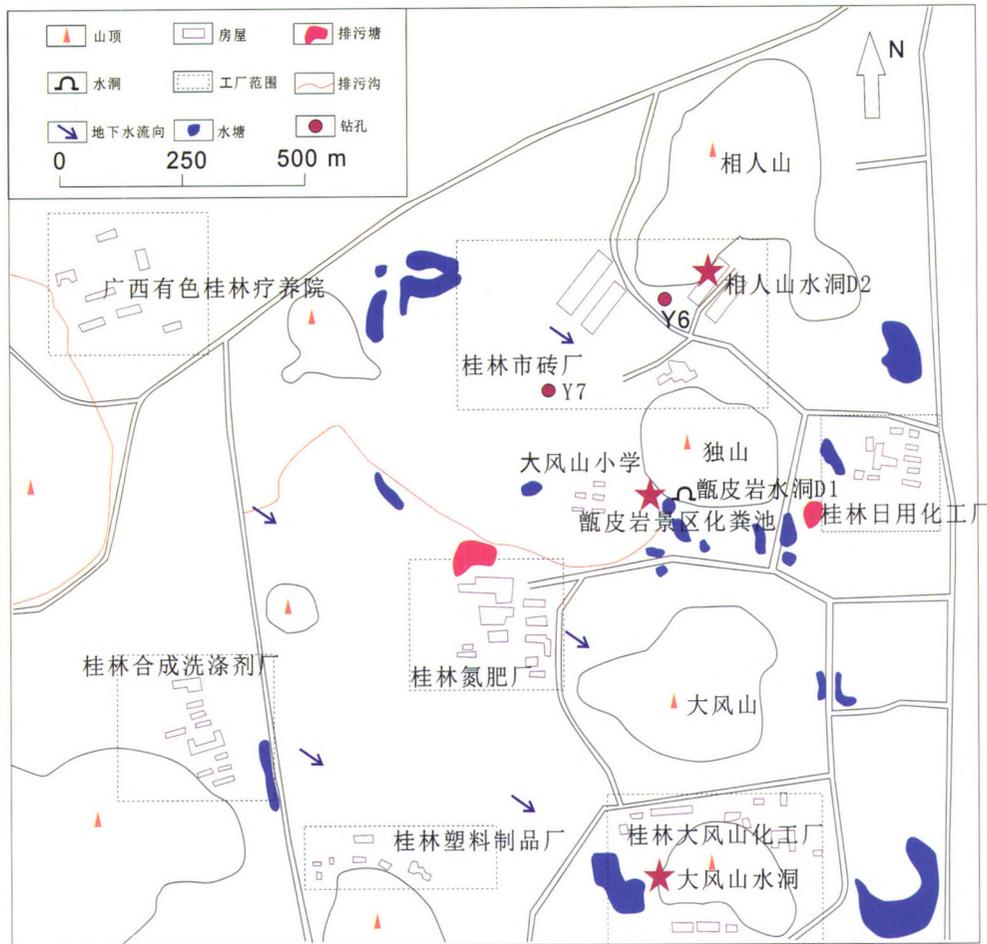


图2 甌皮岩附近现存和过去老旧的潜在污染源

Fig. 2 Sketch map showing existing and old potential pollutant sources around Zengpiyan

桶内,接收点为钻孔 ZK6、ZK7、ZK8、ZK9、ZK10、ZK11、ZK12、ZK20,以及水塘(C2)和水洞(D1)。

第一次和第二次示踪试验的投放点靠近原砖厂,用来验证地下水中 SO_4^{2-} 污染与原砖厂和砖厂职工小区污染源的关系。第三次示踪试验的投放点直接确定在景区厕所,距离甌皮岩遗址核心区仅 50 m,遗址核心区内地下水发臭,景区厕所化粪池是否会产生渗漏并对核心区地下水造成污染可得以验证。

3 示踪试验过程

第一次试验示踪剂的投放时间为 2013 年 5 月 22 日。在此之前已经将示踪仪放置在甌皮岩水洞(D1)和大风山水洞,部分取样点于 21 日取好背景值。在室内称取荧光素钠 4.6 kg,将其充分溶解在相人山脚洞内的水潭。从 2013 年 5 月 26 日起对钻孔 ZK9、ZK11、ZK12、ZK14、ZK19、Y3,甌皮岩水洞(D1)以及洞外水塘(C3)等接收点进行人工取样,于

7 月 29 日结束。

第二次试验示踪剂投放时间为 2014 年 3 月 22 日,示踪剂投放之前已对甌皮岩周围钻孔及水洞(D1)、水塘(C2)等都已经进行连续 7 日的取样作为背景值,示踪仪于 3 月 22 日安放在甌皮岩水洞。将 1.023 kg 荧光素钠投放在 Y7 钻孔。罗丹明 B 在 Y6 钻孔投放,投放量为 0.6431 kg。投放后分别往两个孔注水,确保示踪剂全部溶解。从 2014 年 3 月 26 日至 2014 年 5 月 12 日对钻孔 ZK6、ZK9、ZK11、ZK12、ZK14、Y1、Y2、Y4、Y5、Y8 及水塘(C2),脚洞(D3)等接收点进行人工取样。

第三次试验在室内称取荧光素钠 958 g,示踪剂投放之前已对甌皮岩周围钻孔、水洞(D1)和水塘(C2)等都已经取样一周作为背景值。荧光素钠于 2015 年 7 月 21 日投放在甌皮岩遗址厕所内。为了增加示踪剂的扩散速度,用厕所冲水阀冲水 40 分钟,总注水量约 2.4 m^3 。除甌皮岩水洞外,从 2015 年 7 月 22 日至 2015 年 10 月 14 日对 ZK6、ZK9、ZK11、ZK12、

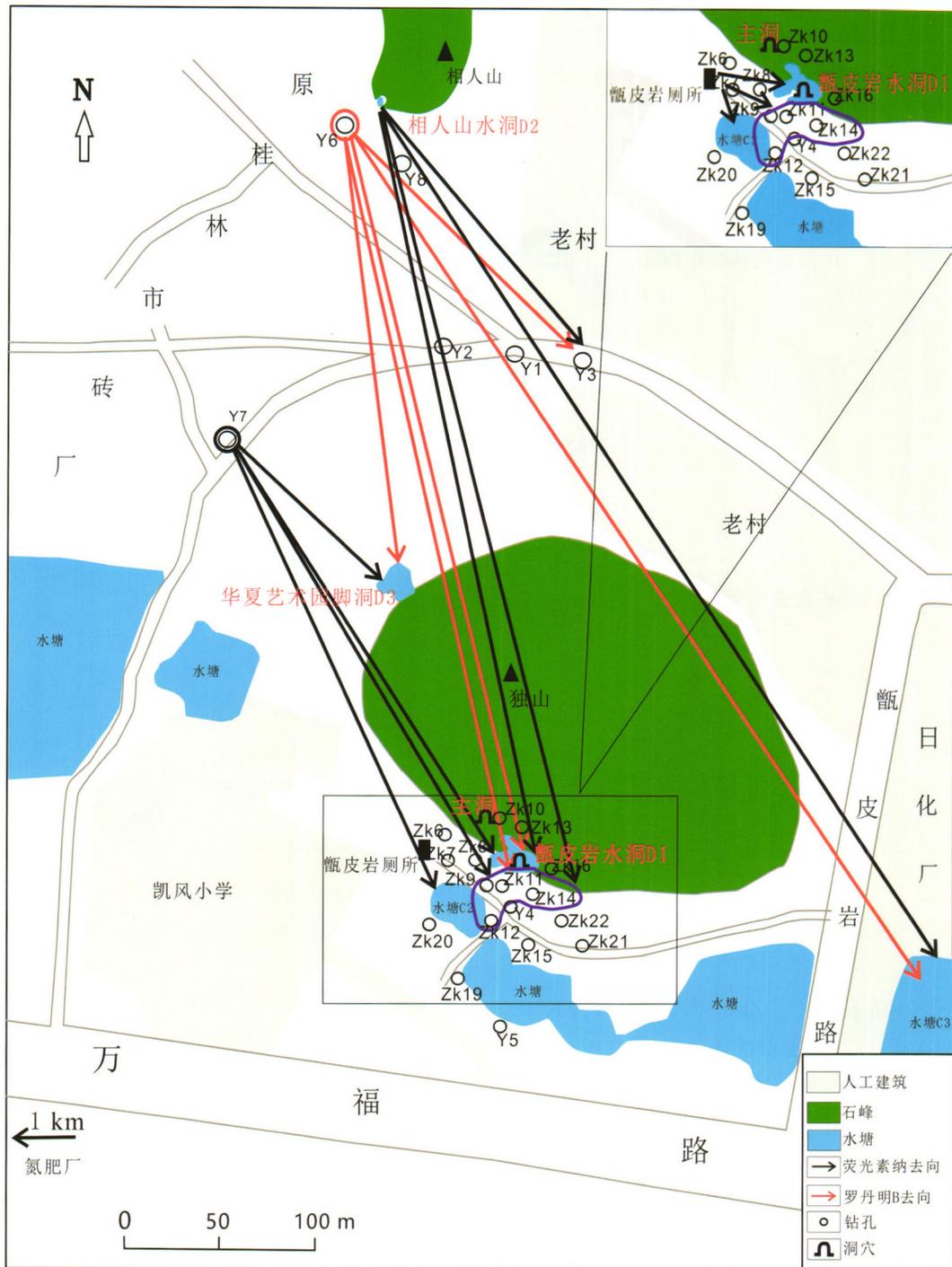


图3 甑皮岩遗址示踪试验的设计和结果

Fig. 3 Design and results of tracer tests around Zengpiyan relics

水塘(C2)、水洞(D1)等接收点进行人工采样。由于8月5日左右水洞(D1)涨水示踪仪被水淹没,故从8月6日起对所有点进行人工采样。

4 示踪试验结果

4.1 示踪剂接收情况

第一次示踪试验共设置接收点15个。甑皮岩水洞(D1)采用仪器自动检测示踪剂浓度和人工采样分析,其余各点采用人工取样分析。ZK6、ZK7、ZK8、ZK13、ZK16、Y1、Y2、长虹疗养院、大风山水洞没有发现示踪剂,表明上述接收点与相人山水洞(D2)之间无水力联系。而在甑皮岩水洞(D1)、ZK9、ZK11、ZK14、Y3、ZK19、洞口水塘(C2)均发现示踪剂,且

ZK9 和 ZK11 的浓度最高。

第二次示踪试验共设置接收点 17 个。结果显示 ZK7、ZK8、ZK13、ZK16、ZK20、ZK21、ZK22、Y5 荧光素钠浓度变化不明显。ZK6、ZK9、ZK11、ZK12、ZK14、Y3、脚洞(D3)、甌皮岩水洞(D1)、水塘(C2)以

及甌皮岩大门外池塘(C3)均发现示踪剂。

第三次示踪试验共设置接收点 11 个。ZK7、ZK8、ZK10 未接收到示踪剂, ZK6、ZK9、ZK11、ZK12、ZK20、Y4、水塘(C2)、水洞(D1)都接收到了示踪剂, 这几个点与甌皮岩化粪池存在水力联系(图 4)。

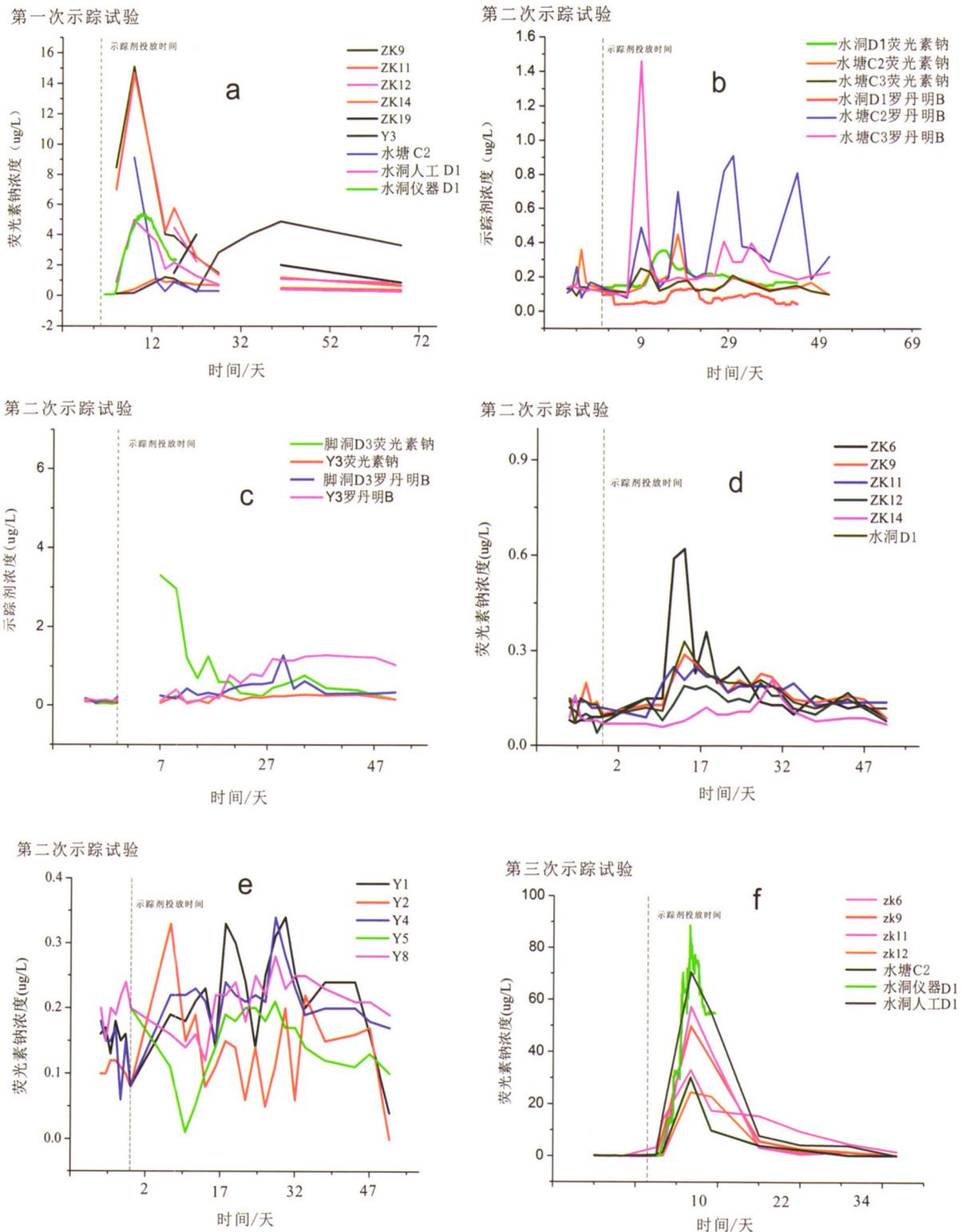


图 4 示踪剂浓度曲线图

Fig. 4 Concentration curve of tracer

4.2 岩溶地下水流速

根据各接收点与投放点的距离与示踪剂接收时

间(表1),采用加权平均方法计算出地下水的平均流速。

表1 甌皮岩遗址地区地下水流速情况

Table 1 Flow velocity conditions of groundwater in Zengpiyan relic area

| 示踪剂 投放点 | 通道类型 | 接收点 | 距离/m | 初现用时 /d | 峰值到达 用时/d | 平均流速/ m/d | 峰值流速/ m/d |
|------------|-------|--------|-------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 相人山 | 主通道 | 水洞(D1) | 395 | 3 | 8 | 28.05 | 50 |
| | | ZK9 | 410 | 3 | 8 | 33.91 | 54.63 |
| | 次通道 | ZK11 | 408 | 3 | 8 | 32.54 | 54.38 |
| | | Y3 | 160 | 9 | 41 | 4.88 | 3.9 |
| 钻孔 Y6 | 主通道 | 水洞(D1) | 397 | 16 | 28 | 14.47 | 27.43 |
| | | 脚洞(D3) | 282 | 12 | 28 | 10.32 | 27.32 |
| | 次通道 | ZK9 | 449.5 | 16 | 30 | 16.7 | 26.91 |
| | | ZK11 | 452 | 16 | 30 | 16.22 | 27.86 |
| | | ZK12 | 469.5 | 18 | 30 | 16.49 | 23.59 |
| | Y3 | 231 | 20 | 38 | 7.09 | 32.58 | |
| 钻孔 Y7 | 主通道 | 水洞(D1) | 267 | 11 | 14 | 10.93 | 19.07 |
| | | 脚洞(D3) | 191 | 7 | 10 | 10.67 | 19.1 |
| | 次通道 | ZK6 | 240 | 7 | 12 | 11.09 | 12.13 |
| | | ZK9 | 282 | 12 | 14 | 14.19 | 25.61 |
| | | ZK11 | 294.5 | 12 | 14 | 14.43 | 25.79 |
| | | ZK12 | 312 | 12 | 18 | 12.3 | 28.27 |
| ZK14 | 306.5 | 16 | 30 | 11.39 | 21.09 | | |
| 厕所 | 主通道 | 水洞(D1) | 40 | 2 | 6 | 4.08 | 7.63 |
| | | ZK6 | 17.5 | 1 | 6 | 1.6 | 3.85 |
| | 次通道 | ZK9 | 29 | 2 | 6 | 3.52 | 5.41 |
| | | ZK11 | 39 | 3 | 6 | 4.72 | 6.57 |
| | | ZK12 | 45 | 3 | 6 | 4.75 | 7.61 |

$$\bar{v} = S \div \frac{\sum_i C(t)t}{\sum_i C(t)}$$

式中*i*为示踪剂初现时间,*n*示踪试验结束时间,*C*为示踪剂的浓度,*t*为时间,*S*为投放点到接收点的距离。

5 分析与讨论

根据各个接受点的荧光素钠浓度,绘制荧光素钠

历时曲线图。示踪剂浓度历时曲线的主要影响因素是岩溶含水层的结构特征^[21-22]。第一次示踪试验的结果显示甌皮岩水洞示踪剂浓度曲线起伏较为和缓,为单峰型,峰值持续时间比较长,浓度相对较高(图4)。在示踪剂浓度下降阶段,下降速度先快后慢,浓度下降的速度变化可能与地下水的运动速度有关。浓度曲线和地下水运移速度反映相人山水洞(D2)至甌皮岩水洞(D1)之间水流速度相比于南方其他岩溶地区较慢,可能是因为水流不畅,或者导水介质空间狭小且形态不规则;造成水流不畅也可能是因

为在投放点和接收点都存在溶洞,溶洞内水体流动性差。

第一次试验的各个钻孔的荧光素钠浓度曲线图结果还显示,水塘(C2)、ZK9、ZK11、ZK12 曲线变化比较一致,说明这几个点的水力联系较通畅。而且 ZK9 和 ZK11 的浓度最高,它们处于地下水径流的主通道上。而钻孔 Y3 反应示踪剂浓度变化比较慢,当其它点的示踪剂浓度进入衰减阶段时,Y3 的示踪剂浓度才达到峰值,可以判断 Y3 处于不同的地下水径流路径上。这种多通道连接的方式表明岩溶介质不是单一管道类型的。

第二次示踪试验的结果显示,水洞荧光素钠浓度在示踪剂投放之后出现一个较强的主峰值,持续时间短,峰值具有尖峰状特征,表明投放点 Y7 与水洞(D1)之间存在一个主径流带,这个峰值之后出现多峰且拖尾现象。已有研究成果认为,若有溶潭位于管道主流上,主要表现为对示踪剂的稀释作用,就不会造成多个峰值,而是平滑曲线^[22-25]。多峰曲线说明岩溶泉流域的过水通道错综复杂,通道的长度、宽度、以及地下水流量均有很大差别,导致各通道的峰值浓度到达接收点时的时间不一^[26]。主峰后存在多个平台状峰值,峰值持续时间较长,出现和消失具有缓慢的渐变特征,地下水流速慢,推测可能岩溶裂隙较发育。在水洞(D1)中罗丹明 B 已经衰减到零的情况下,Y3 钻孔罗丹明 B 的浓度还很高,并且持续了较长一段时间,说明 Y3 和水洞(D1)等接收点不在同一径流路线上,此结果和第一次示踪试验结果一致。

甌皮岩水洞(D1)和钻孔 ZK9、ZK11、ZK12 浓度曲线基本一致,但 ZK14 钻孔示踪剂浓度峰值出现较晚,ZK6 的峰值浓度较高,可以判断水洞(D1)、ZK9、ZK11、ZK12 处于同一地下水径流带上,而 ZK6 和 ZK14 不在同一个径流带上。其他钻孔取样测试结果示踪剂浓度较低且无明显规律。除此之外,甌皮岩公园大门对面池塘(C3)也接收到了示踪剂。

总之,甌皮岩遗址地区岩溶发育以裂隙为主,地下水主要沿具有双重含水介质(裂隙和小管道)的岩溶含水层流动,裂隙发育呈网络式,但存在主径流带,主径流带的方向为西北—东南向(图 5)。

第三次示踪试验的结果显示甌皮岩水洞的荧光素钠浓度起初呈一个阶梯状上升,出现一个平缓的稳

定值,之后浓度陡然上升。已有研究结果表明由于降雨间断性地冲刷会导致示踪剂浓度反复升高或降低^[27]。此次示踪剂投放两天后开始降雨,且降雨量较大,地下水受到雨水补给,造成示踪剂随地下水迅速流动,形成多个峰值,持续时间较短。而且 ZK9、ZK11、ZK12、水塘(C2)、水洞(D1)的荧光素钠历时曲线基本一致,表明它们之间连通性较好,这和第一次、第二次示踪试验的结果相符合。

从接收到的示踪剂浓度变化情况来看,多数接收点接收到了示踪剂并且浓度较高,说明甌皮岩公园厕所化粪池出现渗漏,渗漏的污染物通过裂隙、管道等对周围地下水产生污染,污染程度高,污染面大,足以造成甌皮岩遗址地区地下水水质恶化。而遗址核心区主洞中钻孔 ZK10 未接收到示踪剂,说明存在其它污染源致使主洞散发臭味。

甌皮岩附近潜在的污染源较多,主要污染源有原桂林市砖厂填埋的煤渣,周围居民区产生的生活污水,景区的厕所排放污物以及原化工厂和原氮肥厂产生的工业污染等。示踪试验的结果显示研究区存在从西北到东南方向的主径流带,并且根据研究区污染物分布特征来看(图 5),地下水主径流带流经区域污染源种类呈点状或线状分布。地下水硫酸盐污染浓度较高的采样点与主径流带流经区域高度吻合,而原砖厂煤渣含有较多的硫酸盐,且浓度变化特征呈现出以砖厂遗址为中心由上游到下游降低的趋势,可初步推断遗址周围硫酸盐污染主要来自原砖厂填埋的煤渣污染物,地下水通过主径流带携带硫酸盐污染物质进入遗址核心区及附近区域。研究区部分采样点的 DOC 和 COD 浓度较高,说明地下水受到有机污染,同时经野外观测发现,此类采样点地下水臭味严重并且地下水可见生活类油渍及动植物残体。研究区内的居民区和学校的生活污水以及化粪池渗漏污水等产生的有机污染较多,地下水有机污染很大程度上与周围人类活动有关。示踪试验还显示遗址核心区内钻孔 ZK10 虽然位于主径流带上,但与周围钻孔连通性差,较为封闭,且硫酸盐含量很低,经测试其处于 ORP 为 -147.1 mV 的还原环境,同时存在有机污染,臭味可能来自于硫化氢气体,也有可能来自于周围学校和居民生活污水、化粪池污水等其它污染。

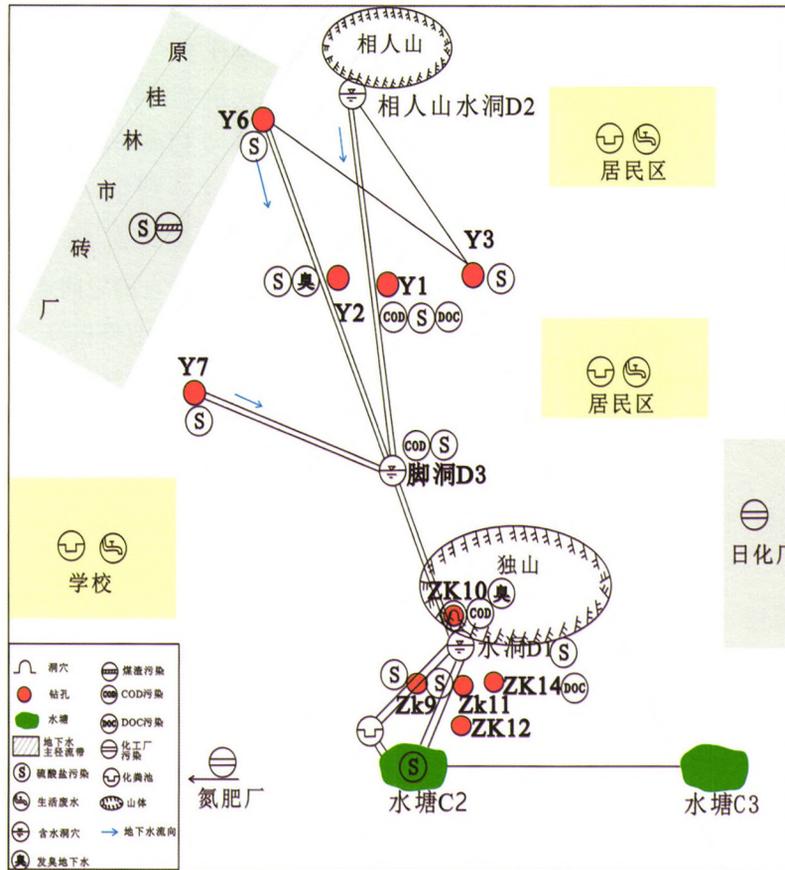


图5 甑皮岩地区污染物溯源结果示意图

Fig. 5 Sketch map showing results of tracing pollutant sources in the Zengpiyan area

6 结论

(1)甑皮岩遗址地区岩溶发育以裂隙为主,地下水流速缓慢,不存在大型岩溶管道,地下水主要沿着具有双重含水介质(裂隙和小管道)的岩溶含水层流动,裂隙发育呈网络式,存在着西北—东南向的主径流带。

(2)甑皮岩遗址附近较小范围内存在较多污染源。原桂林砖厂遗址、原氮肥厂、学校、居民区等大片区域的地下水与甑皮岩遗址附近地下水连通,原砖厂和氮肥厂等的遗留污染物、居民区和学校所产生的生活污水等,很容易通过主径流带扩散到甑皮岩遗址核心区,对遗址的保护非常不利。所以保护遗址不应仅限于遗址核心区,而应该扩大保护范围,应对周围居民区和学校等污染排放物进行合理处理。

(3)甑皮岩景区岩溶地下水系统自净能力较弱,景区厕所化粪池渗漏量较大、密闭情况较差,长此以往会对周围地下水水质产生严重影响,因此必须要对甑皮岩化粪池进行防渗处理。而遗址核心区的溶洞地下水发臭问题与甑皮岩景区厕所无关,说明还存在其

它暂未发现的污染源,可能来源于遗址周围学校和居民的生活污水、化粪池污水等其它污染,尚待进一步查清。

致谢:本研究取样,绘图过程中得到中国地质科学院岩溶地质研究所岩溶动力学重点实验室的何若雪、李丽、郭雅思、赵红亮、张华生、郭永丽、刘绍华的帮助,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Yuan D X. Sensitivity of karst process to environmental change along the PEPH transect[J]. Quaternary International, 1997, 37(2):105-113.
- [2] Vesper D J, Loop C M, White W B. contaminant transport in karst aquifers[J]. Speleogenesis & Evolution of Karst Aquifers,2003,1(2):101-111.
- [3] 袁道先,朱德浩,翁金桃,等. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社, 1994:129-134.
- [4] 袁道先. 对南方岩溶石山地区地下水资源及生态环境地质调查的一些意见[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 103-108.
- [5] 张人权,梁杏,靳孟贵,等. 当代水文地质学发展趋势与对策[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 51-55.
- [6] Craig E D. Introduction to theme issue on tracers in hydrogeolo-

- gy [J]. *Environmental & Engineering Geoscience Journal*, 2005, 11(4): 293.
- [7] 裴建国, 谢运球, 章程. 湘中溶蚀丘陵区示踪试验: 以湖南新化为例[J]. *中国岩溶*, 2000, 19(4): 366-371.
- [8] 刘兴云, 曾昭建. 地下水多元示踪试验在岩溶地区的应用[J]. *岩土工程技术*, 2006, 20(2): 101-105.
- [9] 邓振平, 周小红, 何师意, 等. 西南岩溶石山地区岩溶地下水示踪试验与分析[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(2): 163-169.
- [10] 蒋忠诚, 袁道先. 中国南方表层岩溶带的结构、岩溶动力学特征及其意义[J]. *地球学报*, 1999, 20(3): 302-308.
- [11] Meiman J, Groves C, Herstein S. In-cave dye tracing and drainage basin divides in the Mammoth Cave karst aquifer, Kentucky [R]. U. S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 2001, 01-4011: 179-185.
- [12] Nico G, David D. *Methods in karst hydrogeology* [M]. London: Taylor & Francis Group, 2007.
- [13] 徐尚全, 王鹏, 焦杰松, 等. 高精度在线示踪技术在岩溶地下水调查中的应用[J]. *工程勘察*, 2013, (2): 40-44.
- [14] 鲁程鹏, 束龙仓, 苑利波, 等. 基于示踪试验求解岩溶含水层水文地质参数[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(4): 717-721.
- [15] 何师意, Michele L, 章程, 等. 高精度地下水示踪技术及其应用: 以毛村地下河为例[J]. *地球学报*, 2009, 30(5): 673-678.
- [16] 中国社会科学院考古研究所, 广西壮族自治区文物工作队, 桂林甌皮岩博物馆, 等. 桂林甌皮岩 [M]. 北京: 文物出版社, 2003.
- [17] 广西壮族自治区文物工作队, 桂林市革命委员会文物管理委员会. 广西桂林甌皮岩洞穴遗址的试掘[J]. *考古*, 1976, (3): 175-179.
- [18] 王令红, 彭书琳, 陈远璋. 桂林宝积岩发现的古人类化石和石器[J]. *人类学学报*, 1982, 1(1): 30-35.
- [19] 覃政教, 林玉石, 等. 桂林甌皮岩遗址岩溶地下水水害成因及防治对策[J]. *地球学报*, 2011, 32(1): 107-113.
- [20] 朱德浩, 覃厚仁. 洞穴类型及岩溶洞穴成因研究[J]. *旅游学刊*, 1988, (Z): 41-46.
- [21] Smart C C. Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers[J]. *Ground water*, 1988, 26(4): 445-453.
- [22] 杨立铮, 刘俊业. 试用示踪剂浓度-时间曲线分析岩溶管道的结构特征[J]. *成都地质学院学报*, 1979, 16(4): 211-219.
- [23] 张祯武. 岩溶地下水管流场类型与示踪曲线对应关系及在生产中的应用[J]. *中国岩溶*, 1990, 9(3): 211-219.
- [24] 高志友, 尹观, 蒋良文, 等. 毛坝向斜核部岩溶水绕轴径流的同位素示踪分析[J]. *地球学报*, 2004, 25(2): 64-68.
- [25] 贾秀梅, 刘满杰, 孙继朝, 等. 万家寨水库右岸岩溶渗漏试验研究[J]. *地球学报*, 2005, 26(2): 82-85.
- [26] 梅正星. 我国喀斯特地下水示踪概况[J]. *中国岩溶*, 1988, 7(4): 371-377.
- [27] 王开然, 姜光辉, 郭芳, 等. 桂林东区峰林平原岩溶地下水示踪实验与分析[J]. *现代地质*, 2013, 27(2): 454-459.

Tracer tests for pollutant sources of the Zengpiyan remainder cave in Guilin, China

ZENG Xin-ru^{1,2}, JIANG Guang-hui², GUO Fang², TANG Qing-jia², LIU Fan²

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MLR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The composition and source of groundwater pollutant are complex around Zengpiyan cave, one of the archaeological sites in Guilin City. The purpose of this work is to find out the structure characteristics of groundwater systems and identify migration pathways of the groundwater pollutants and their pollution sources. Combining the artificial sampling and high-resolution online tracer technique and using sodium fluorescein and rhodamine B as the tracers, three tracer tests have been carried out around the study site. Based on these test results, the groundwater seepage field was analyzed and the average velocity of the groundwater was calculated. The results show that the flow velocity is about 1.6-33.91 m/d with an average value of 12.92 m/d. The flow system in the karst area is basically dominated by a dissolution fracture network. There exists a northeast-southwest trending main runoff zone; and it is unlikely to exist large-scale karst channels that control the flow. The three tracer tests all indicate a hydraulic connection between the release points of pollutants and groundwater around the study site. Therefore, the localities such as residential areas, schools and previous brickyard can be identified as the pollutant sources which have a potential to pollute the groundwater in the relic cave. So it is necessary to expand the scope of protection of the relics, especially taking actions to prevent the leakage of the septic containers of the Zengpiyan scenic, which are now poorly closed and seriously harm to the environment of the relic cave.

Key words groundwater, pollutant source, tracer tests Zengpiyan in Guilin, relics protection

(编辑 张玲)