

赵志豪, 王孔伟, 周 准, 等. 张玉坑磷石膏集中库岩溶水文地质调查与示踪[J]. 中国岩溶, 2023, 42(3): 413-424.
DOI: 10.11932/karst2023y017

张玉坑磷石膏集中库岩溶水文地质调查与示踪

赵志豪^{1,2}, 王孔伟^{1,2}, 周 准^{1,2}, 刘士元^{1,2}, 张凯元^{1,2}, 王 岚^{1,2}

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 磷石膏是生产磷酸过程中产生的废弃物, 对其最有效的处理方法就是采取集中堆填处理。张玉坑磷石膏集中库就是一个典型的磷石膏堆填场所, 建造磷石膏集中库对地质环境要求严格, 涉及磷石膏堆填体稳定性问题, 同时还涉及对地下水可能造成的污染。文章在野外地质调查、钻井岩心观察、地球物理剖面解释的基础上, 利用示踪评价技术, 对研究区岩溶发育及岩溶水的径流、排泄特征进行评价, 得出如下结论: ①张玉坑磷石膏集中库所在冲沟与临谷无任何水力联系, 不会发生向临谷的地下水渗漏; ②NE 向岩溶管道的存在控制着张玉坑地区岩溶水的径流和排泄, 排泄通道唯一, 地质点 (D5) 是该区存在的接触式下降泉——岩溶地下水的排泄通道; ③示踪曲线具有拖尾特征的单峰式曲线, 地下岩溶管道类型单一, 相对简单, 同时也说明试验区地下岩溶较为发育, 存在着由地质点 (D2) 到地质点 (D5) 的主流径通道, 且通道畅通; ④磷石膏堆填场地的理想要求就是具有相对独立的地下水文地质单元, 与临谷没有水力联系, 排泄通道单一清楚, 张玉坑磷石膏集中库岩溶水文地质条件基本满足上述要求, 满足建库水文地质条件。

关键词: 张玉坑磷石膏集中库; 水文地质条件; 地下水; 示踪试验

中图分类号: P641.7 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2023) 03-0413-12

开放科学(资源服务)标识码 (OSID):



0 引 言

磷元素在农业、建筑、化肥工业等领域存在着不同程度的应用需求。磷石膏是生产磷酸过程中产生的废弃物, 目前对其最有效的处理方法就是建造磷石膏集中库, 采取集中堆填处理^[1]。张玉坑磷石膏集中库就是一个典型的磷石膏堆填场所, 建造磷石膏集中库对地质环境要求极其严格, 涉及磷石膏堆填体的稳定性问题^[2], 同时还涉及对地下水可能造成的污染, 磷石膏污染的地下水 pH 可以达到 4.5^[3-4], 磷石膏库一旦发生泄漏, 造成地下水污染, 必将对当地居

民的生活造成巨大影响, 形成长久环境污染^[5-6], 因此弄清磷石膏堆填区地下水的运移状态, 防止磷石膏对地下水造成污染具有重要意义。目前, 针对磷石膏堆填库的建造及适应水文地质条件、标准等方面基本上处于缺失状态。

磷石膏堆填场地的理想水文地质条件主要表现为: ①要具有相对独立的地下水文地质单元; ②与临谷没有水力联系; ③排泄通道单一、清楚。在特定的水文地质条件下, 即使磷石膏堆填场地不慎发生地下水渗漏, 也可以精准确定渗漏点的位置, 及时采取处理措施, 将污染危险降低到可控的范围, 特别是在

基金项目: 湖北省创新群体项目 (2020CFA049), 国家自然科学基金重点项目 (U2034203) 联合资助; Hubei Provincial Innovation Group Project (2020CFA049); Supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (U2034203)

第一作者简介: 赵志豪 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为地质灾害防治及成因机理。E-mail: 17628153486@163.com。

通信作者: 王孔伟 (1966—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 研究方向为地质灾害防治与成因机理。E-mail: wongkongwei@126.com。

收稿日期: 2022-06-06

堆填场设计时,将渗漏点位置布置于回水池内,将可能的污染控制在一定范围之内。

本论文以张玉坑磷石膏集中库专项水文地质调为基础,针对该区域的岩溶发育特征及岩溶水文地质条件进行研究,并通过示踪评价技术,确定研究区岩溶水的排泄通道,为张玉坑磷石膏堆填库的建设提供设计依据。

1 区域地质背景

研究区位于仙女山断裂与天阳坪断裂夹持的三角形区域内^[7-9],隶属于黄陵背斜周边构造复合带(图1)。

1.1 区域地形地貌及气候特征

区域地貌类型复杂,自然环境多样。宜都市属武陵山余脉和川东巫山余脉的临界区域,也是湖北省东部平原向鄂西南山地过渡地带,同时又是长江与清江水系的交汇地。地势西南高,东北低,以长江为轴线向西南呈梯级上升,形成以丘陵为主,低山、平原兼有的地貌结构,境内海拔最高为1 081.0 m(与

五峰交界的天埡),最低仅38 m(松滋市交界区)。

张玉坑谷底李坪处海拔高程196 m,张玉坑处海拔高程275 m;其西侧临谷前后茅坪沟延伸方向N50°E,海拔高程310 m,相比张玉坑处海拔高程高出35 m;东侧临谷钟家冲沟与张玉坑沟近平行,谷底海拔高程85 m,张玉坑正东侧的马踏石海拔高程137 m,相比张玉坑处,海拔高程低出138 m(图2)。

宜都市地处中亚热带和北亚热带的交汇地带,气候类型属于北亚热带大陆性季风气候,表现出春早、夏热、秋迟、冬暖,夏季降雨集中,雨热同季,四季分明。

1.2 区域地层岩性

研究区区域地层以长阳—张家河背斜为界,南、北两侧地层遭受剥蚀情况存在较大差异,南侧仅出露上三叠统以下的地层,北侧侏罗系、白垩系均有分布^[10]。

张玉坑附近寒武系大面积出露,寒武系与下伏地层呈平行不整合或整合接触,局部分布第四系冲洪积层:①下寒武统天河板组(C_1t),灰色、青灰色厚

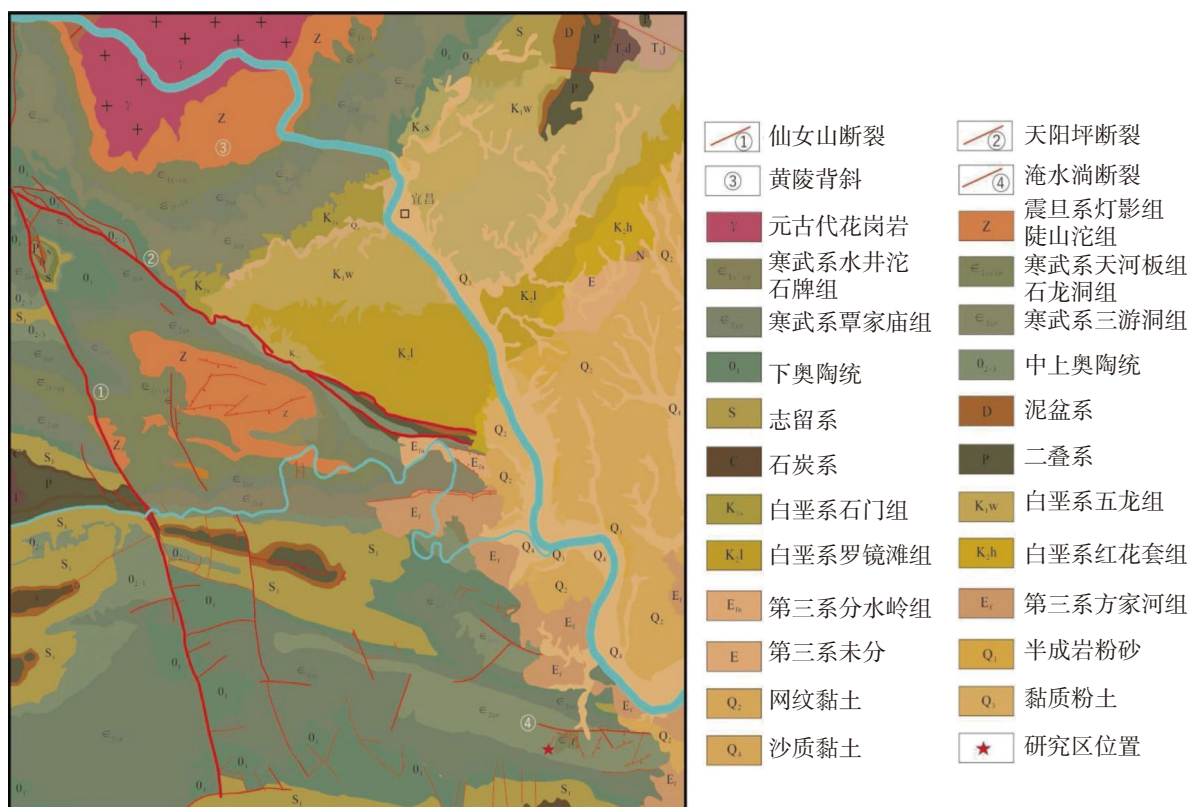


图1 研究区地质图

Fig. 1 Geological map of the study area



图 2 研究区地形地貌卫星片图

Fig. 2 Relief and geomorphic map of the study area

层灰岩, 泥质条带灰岩夹鲕状灰岩; ②下寒武统石龙洞组(C_1sh), 深灰色厚层状灰岩夹白云质灰岩, 底部含有绿色页岩以及薄层泥灰岩; ③中寒武统覃家庙组(C_2qn): 张玉坑场地内出露的主要地层, 地层岩性具有三分的特征, 上部为中厚层状灰岩、白云岩及白云质灰岩夹少量粉砂岩; 中部存在一厚度在 10 m 左右的泥岩段, 下部为泥质条带灰岩夹白云岩及白云质灰岩; ④上寒武统三游洞组(C_3sn), 整体上为一套碳酸盐岩组合。

1.3 局部构造特征——工程地质条件评价

研究区整体构造面貌主要受控于近 EW 向的梁山-肖家隘背斜, 该背斜为一箱状褶皱, 核部地层为中寒武统覃家庙组(C_2qn), 局部出露有下寒武统天河板组(C_1t)和下寒武统石龙洞组(C_1sh), 背斜南北

翼存在三游洞组(C_3sn)。

该背斜核部在研究区处于李坪处, 整体表现为箱型背斜构造, 岩性组合表现中寒武统覃家庙组泥岩段和灰岩段(图 3)。

在张玉坑磷石膏集中库地附近李坪(六里冲村 2 组)西侧山体附近发现泥岩出露, 产状 $260^\circ \angle 10^\circ \sim 15^\circ$, 节理面产状 $166^\circ \angle 83^\circ$ (图 4)。

在李坪东侧山体附近同样发现了泥岩出露, 产状 $320^\circ \angle 37^\circ$ (图 5), 整体上与李坪西侧山体所见泥岩相连, 同时在李坪区域内农作物种植水稻, 不存在漏水现象, 在耕植土中存在大量泥岩碎片, 同样表明李坪地区整体被该套泥岩层覆盖, 该套泥岩上覆地层为覃家庙组上部灰岩段。按照泥岩产状预测在张玉坑磷石膏集中库内部灰岩段的下部同样存在该套泥岩, 对地下水下渗深度起到明显控制作用, 形成张

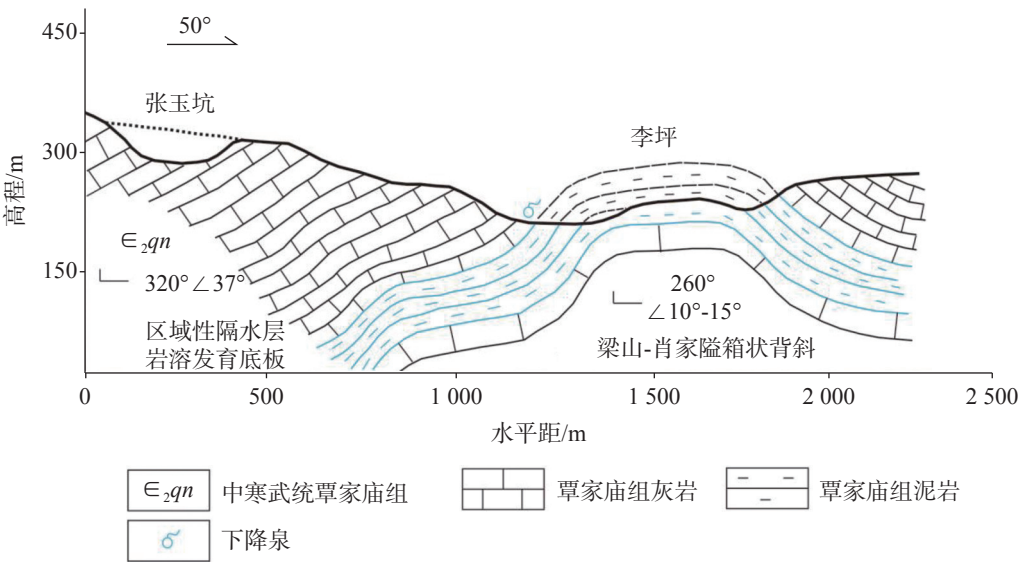


图 3 张玉坑横向地质剖面图(垂直背斜枢纽方向)

Fig. 3 Horizontal geological profile of Zhangyukeng (in the direction of vertical anticline pivot)



图 4 李坪西侧山体泥岩产状

Fig. 4 Occurrence of mudstone on the west side of Liping

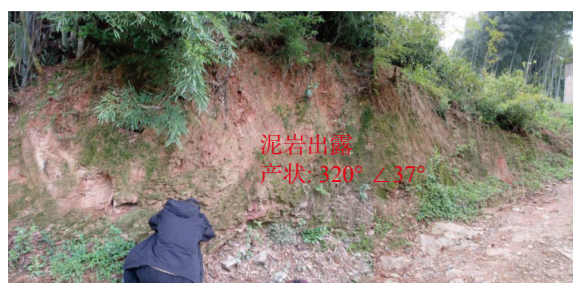


图 5 李坪东侧山体泥岩产状

Fig. 5 Occurrence of mudstone on the east side of Liping

玉坑磷石膏集中库内部第一套区域性隔水岩层,是该地区岩溶发育的底界深度,控制着上部灰岩段岩溶整体发育程度。因此,上部灰岩段岩溶发育的底界为该套泥岩,同时在该套泥岩与上部灰岩接触部位岩性变化形成接触性下降泉,形成岩溶水排泄出口。

张玉坑谷地主要存在三组控制性节理:①节理走向 NE20°~30°,倾向 110°,倾角 60°~80°,与沟的走向基本一致,控制张玉坑长轴方向的主要裂隙带,也是控制岩溶发育的主要裂隙带;②节理走向 NE70°~80°,倾向 330°,倾角 60°~85°与张玉坑短轴方向基本一致;③节理走向 NE126°,倾向 216°,倾角 70°,从整体状态看研究区岩溶发育主要受裂隙控制,受岩层层面控制较弱。

2 张玉坑磷石膏集中库岩溶发育特征

灰岩作为结晶岩系列,与碎屑岩相比不具有孔

隙结构特征,其内部含水特征主要受裂隙结构所控制(含层面),一般来说含水层底界与沟谷区岩体卸荷底界一致,在本研究区为中风化岩(富含裂隙层)底界,地表季节性河道水系与裂隙型地下水径流、排泄通道具有一致性。因此,在研究区岩溶发育除与岩性组合相关外,同时与裂隙发育及岩体卸荷深度密切相关,存在向临谷渗漏的可能性,如果存在这种可能性,与临谷之间水力联系包含两种类型:①注入型:临谷岩溶水通过岩溶通道注入,地下岩溶水的补给区和径流区扩展到临谷,地下水的排泄量增加,无形中增大了磷石膏集中库回水池的设计容量;②输出型:通过岩溶通道,岩溶地下水向临谷渗漏,地下岩溶水的径流区和排泄区扩展到临谷,增大了环境污染的可能性;因此,磷石膏集中库与临谷之间存在水力联系,势必增大磷石膏集中库的建库成本。

岩溶发育主要受岩层层面和裂隙控制,形成岩溶地下水径流和排泄通道,张玉坑磷石膏集中库的西侧前后茅坪沟谷高程较高,海拔高程 310 m,岩层产状倾向前后茅坪沟谷方向,沿岩层层面形成岩溶通道不发育,由于研究区裂隙产状倾角较陡(60°~80°)沿裂隙形成沟通张玉沟与前后茅坪沟的岩溶通道的可能性低,在张玉沟与前后茅坪沟之间发生临谷渗漏的可能性低(图 6)。

在张玉沟与钟家冲沟之间,张玉沟高程明显高于钟家冲沟,岩层倾向张玉沟方向,由于存在泥岩隔水层,岩溶向钟家冲方向停止发育,两沟之间没有水

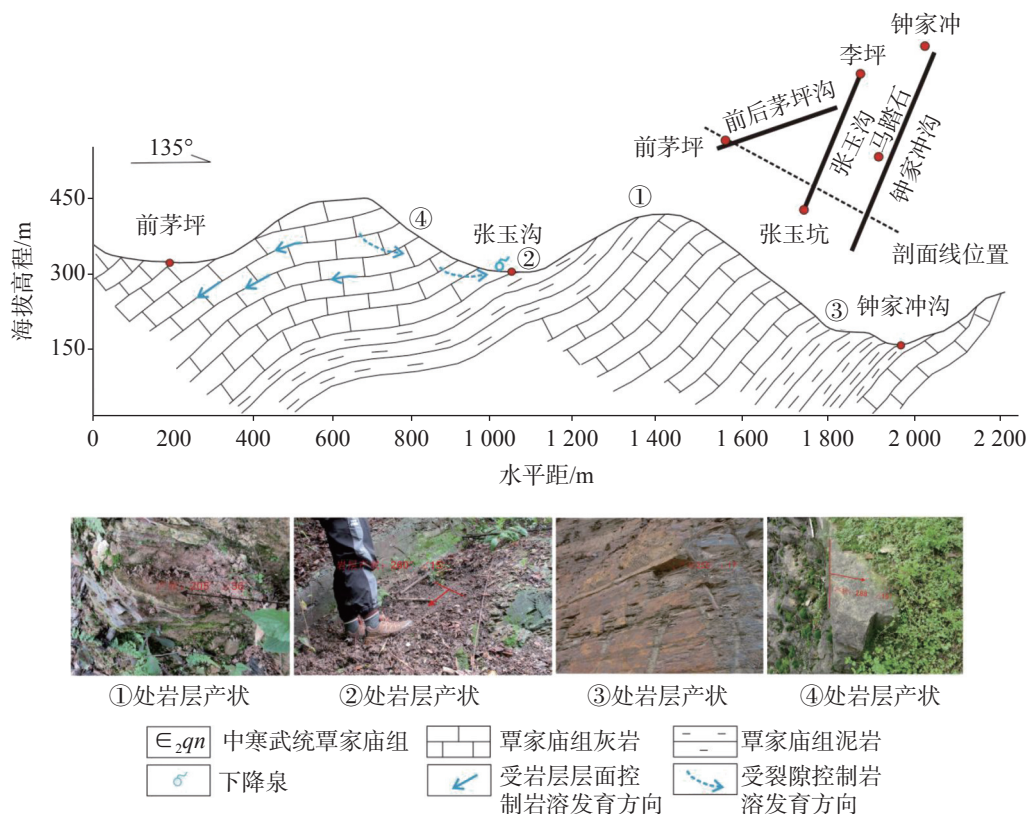


图 6 张玉坑与临谷岩溶发育联系特征图

Fig. 6 Connection between Zhangyukeng and the karst development of the adjacent valley

力联系,也就是说在东西方向上,张玉坑与邻谷没有水力联系,不存在邻谷之间岩溶径流、排泄体系。

张玉坑沿 NE 方向发育多个落水洞等消水构造,在李坪处的南边有一小型水库,该小型水库的上游部位存在一下降泉,此泉为该区域唯一的地下水排泄通道(图 7)。

(1)地质点(D1)为一落水洞,位于张玉坑左侧山体处,落水洞深度尚不清楚,直径 1~2 m,受裂隙控制,裂隙产状为 $162^{\circ} \angle 85^{\circ}$,与区域内部第二组节理产状一致(图 8)。

(2)地质点(D2)为张玉坑最大的消水构造,为一岩溶管道,位于左侧山体处,深度不清,直径 1 m,洞口延伸方向受裂隙控制,裂隙产状 $336^{\circ} \angle 81^{\circ}$,与张玉坑地区第二组节理产状一致(图 9),肉眼可见岩溶通道转弯,转向与张玉沟延伸方向基本一致,为 NE 向。该岩溶通道平时无水流入,一般在降雨 1~2 天之后,地表形成局部径流,此岩溶管道成为张玉坑唯一消水构造。

(3)地质点(D3)为一落水洞,位于张玉坑左侧山体中部,落水洞深约 6 m,直径 2~3 m,受裂隙构造控制,裂隙走向 260° ,与张玉坑地区第二组节理产状一致

(图 10)。

(4)地质点(D4)为一落水洞,位于张玉坑与李坪之间山梁处田间,靠近左侧山体,落水洞深度不清,直径 50 cm,受裂隙控制,裂隙产状 $110^{\circ} \angle 70^{\circ}$,与张玉坑地区第一组节理产状一致(图 11)。

(5)地质点(D5)为一下降泉,分布于李坪向张玉坑方向的山梁底部的小水库处,间歇性出水,一般在下雨后 10~12 h 开始有水流出,水源来源于上部张玉坑方向(图 12)。

(6)通过地球物理(高密度电阻率)剖面,配合钻井勘察,进一步确定了张玉坑沟地下岩溶发育的方向。高密度电阻率法广泛应用于岩溶地质调查领域,高密度电阻率地球物理剖面不仅能反映地下岩溶的形态特征,同时对岩溶深度的预测也具有一定的准确性。但高密度电阻率法与其他地球物理勘察方法一样具有多解性,需要配合地质调查以及钻井资料综合判断解译结果。在综合地质调查研究的基础上,以已知点确定的地球物理异常为出发点,确定未知异常点的解释成果。

GMD1-57 剖面沿南北向布置,位于张玉坑的左侧,存在三处低阻异常:①横向 85~100 m,垂深

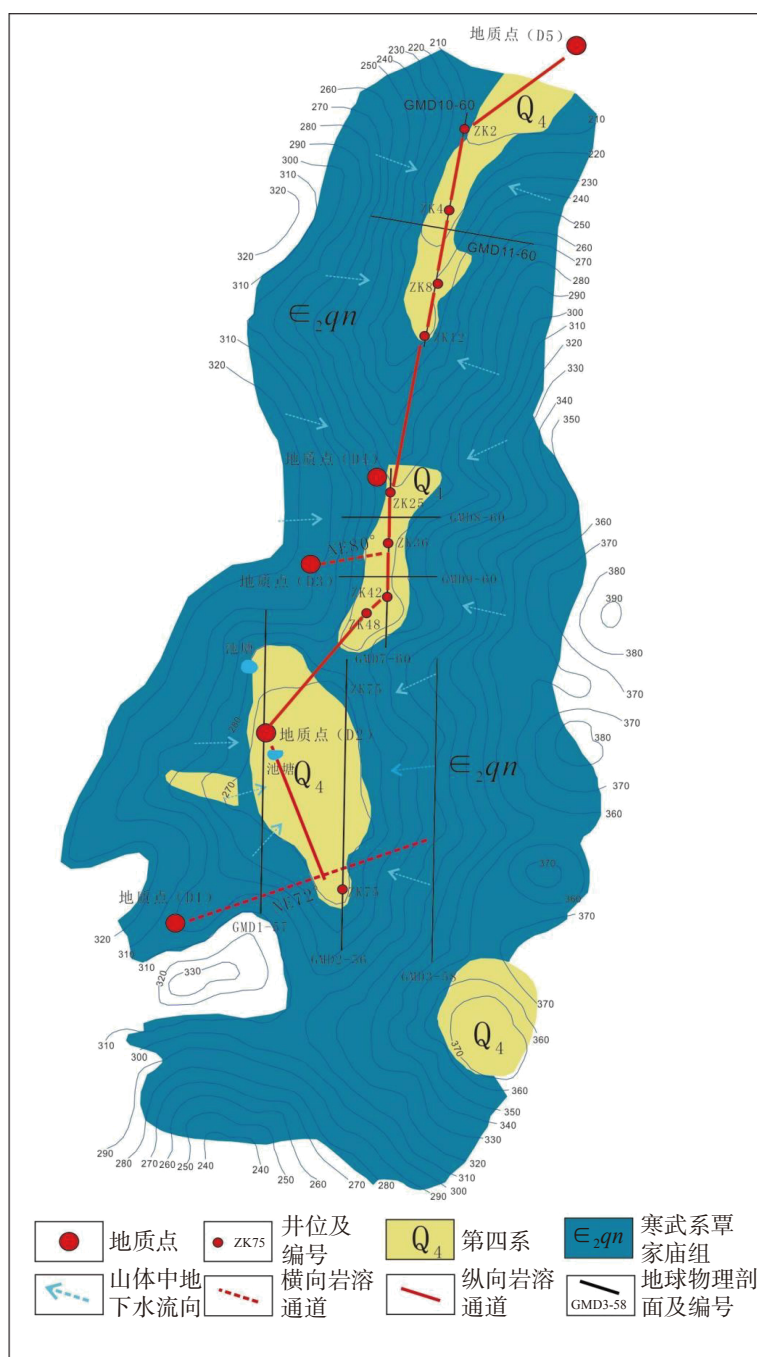


图 7 张玉沟纵向岩溶体系

Fig. 7 Vertical karst system of Zhangyugou

6~20 m 处,与地质点(D1)处的落水洞相对应;②横向 155~165 m,垂深 0~15 m 处,与地质点(D2)处的岩溶管道相对应;③横向 235~245 m,垂深 2~10 m 处,野外水文地质调查与地表水塘相对应。

GMD3~58 剖面沿南北向布置,位于张玉坑的右侧,存在两处低阻异常:①横向 25~45 m,垂深 5~15 m 处,野外地质调查地表没有发现消水构造,对比分析为对应地质点(D1)的横向岩溶体系;②横

向 150~175 m,垂深 5~25 m 处,野外地质调查地表没有发现消水构造,对比分析为对应地质点(D2)的横向岩溶体系。GMD2-56 剖面沿南北向布置,位于张玉坑的中部,上部低阻纵向分布,与 ZK75 号钻井对比分析表明,低电阻底界与 ZK75 号钻井钻遇溶洞底界基本一致(图 13)。

综合钻井和物探资料,结合现今地形,张玉坑的形成成为坍塌的地下溶洞,目前张玉坑的底部仍然保



图 8 地质点(D1)落水洞特征

Fig. 8 Characteristics of sinkholes at the geological point (D1)



图 9 地质点(D2)控制岩溶通道节理构造特征

Fig. 9 Joint structure characteristics of the karst channel controlled by the geological point (D2)



图 10 地质点(D3)控制落水洞节理构造特征

Fig. 10 Joint structure characteristics of the sinkhole controlled by the geological point (D3)



图 11 地质点(D4)控制落水洞节理构造特征

Fig. 11 Joint structure characteristics of the sinkhole controlled by the geological point (D4)



图 12 地质点(D5)张玉坑地区唯一泉水出露点

Fig. 12 Geological point (D5)—the only spring outcrop point in Zhangyukeng area

留了原来地下溶洞体系。

GMD7-60 剖面沿南北向布置,位于张玉坑到李坪之间山梁的中部,上部低阻纵向分布,与 ZK48、ZK42、ZK36、ZK25 井钻遇岩溶溶洞相对应。GMD8-60、GMD9-60 剖面沿东西向布置,位于张玉坑到李坪之间山梁的中部,两个物探剖面特征基本一致,依据钻井剖面 and 野外地质调查资料,认为物探剖面低阻与地下岩溶主排泄通道位置一致(图 14)。

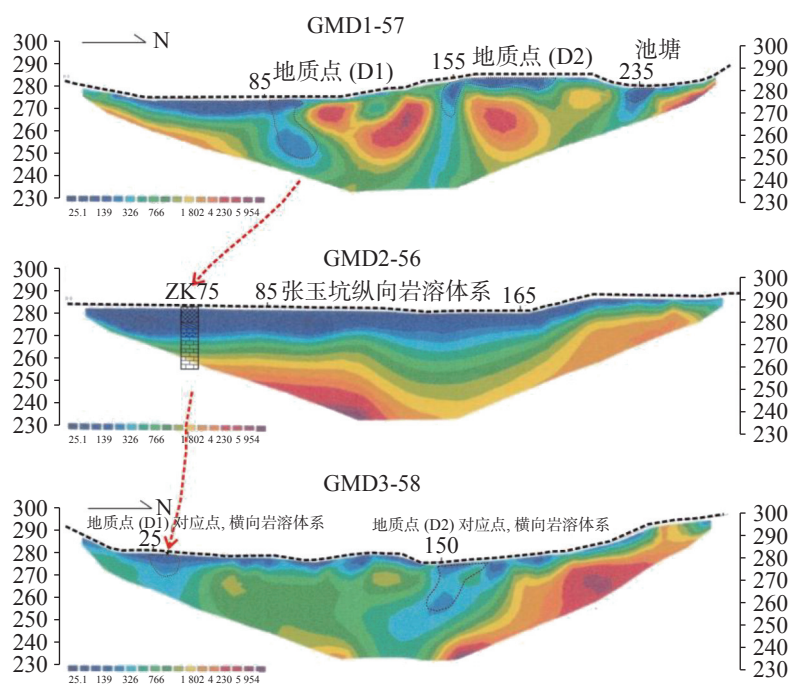


图 13 张玉坑岩溶管道物探解释成果图

Fig. 13 Results of geophysical exploration of the karst pipeline in Zhangyukeng

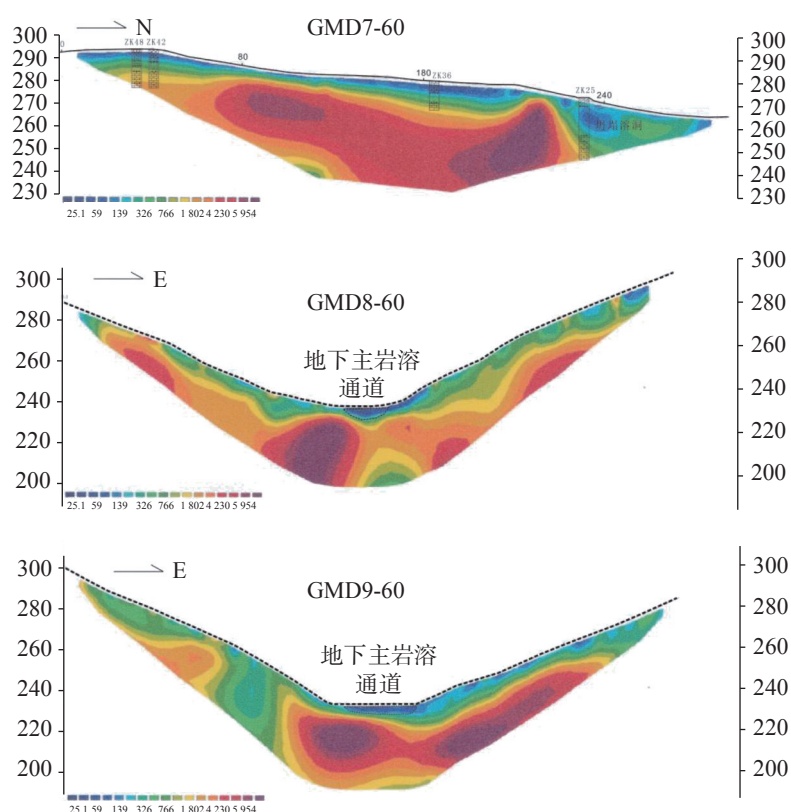


图 14 张玉坑与李坪之间山梁部位岩溶管道物探解释成果图

Fig. 14 Results of geophysical exploration of the karst pipeline in the mountain ridge between Zhangyukeng and Liping

GMD10-60 剖面沿南北向布置, 位于李坪的南端, 上部低阻纵向分布, 与 ZK12、ZK8、ZK4、ZK2 地下溶洞相对应, 为主水道方向; GMD11-60 剖面沿东西

向布置, 位于李坪南端, 两个物探剖面特征基本一致, 依据钻井剖面和野外地质调查资料, 认为物探剖面低阻与地下岩溶主排泄通道位置一致(图 15)。

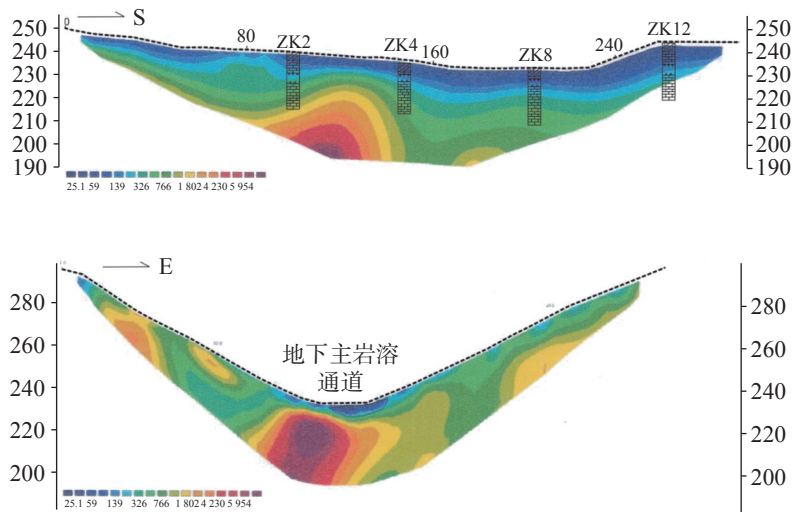


图 15 李坪南部岩溶管道物探解释成果图

Fig. 15 Results of geophysical exploration of the karst pipeline in the south of Liping

综合野外地质调查、钻井岩心、地球物理解释等研究成果,建立了张玉沟岩溶通道发育特征,确立了

张玉坑磷石膏集中库岩溶地下水的径流排泄通道(图 16)。

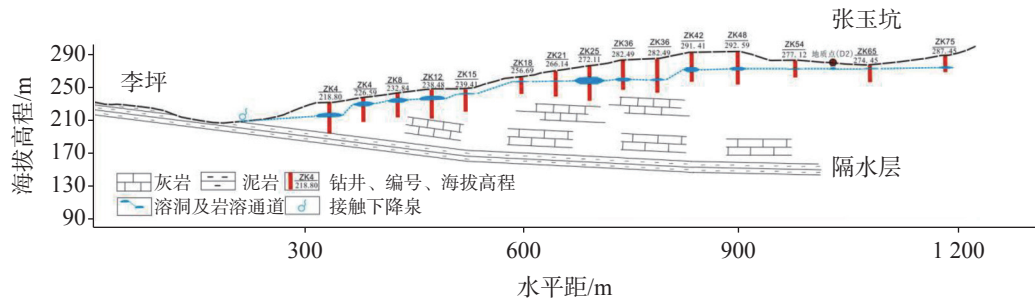


图 16 张玉坑磷石膏集中库岩溶地下水的径流排泄通道

Fig. 16 Discharge channel of the karst groundwater runoff in Zhangyukeng Phosphogypsum Repository

整体上来看张玉坑沟磷石膏集中库所在区域岩溶发育强烈,径流、排泄方向为 NE 向,与临谷不存在水力联系,构成相对独立的岩溶水文地质单元,其地下岩溶水径流-排泄通道整体上由局部溶洞和相互连通的裂隙体系共同构成,其排泄出口位于灰岩与泥岩的接触部位,形成接触式下降泉。

3 张玉坑磷石膏集中库岩溶径流、排泄通道示踪评价

为进一步查明岩溶通道及岩溶水的径流和排泄

路径,采用荧光素钠^[11]作为示踪剂,检测仪器采用瑞士生产的野外荧光光度计 GGUN-FL24。将地质点(D2)作为荧光素钠示踪剂投放点,将地质点(D5)作为示踪剂接收地点,两点海拔高程分别为 283 m 和 210 m,两点相距 983 m,水力梯度为 7.42%。经计算得出此次试验荧光素钠用量为 500 g^[12-13],在投放示踪剂之前,测得两试验点处的示踪剂本底值均为 0 (表 1)。

投放示踪剂后,7 h 后,接收点初次监测到示踪剂;12 h 达到峰值,浓度为 63×10⁻⁹,持续监测 62 h,示踪剂浓度降为 5×10⁻⁹,试验结束;本次示踪试验共历

表 1 岩溶地下水示踪试验情况一览表
Table 1 List of the tracer test of karst groundwater

投放地点	示踪剂类型	投放量/g	试验时间	接收地点
地质点(D2)	荧光素钠	500	2021年4月24日11点开始,历时62 h,持续降雨20 h	地质点(D5)

时 62 h, 获得的示踪剂浓度-时间曲线峰值明显, 表现为具有一定拖尾特征的单峰型穿透曲线(图 17)。

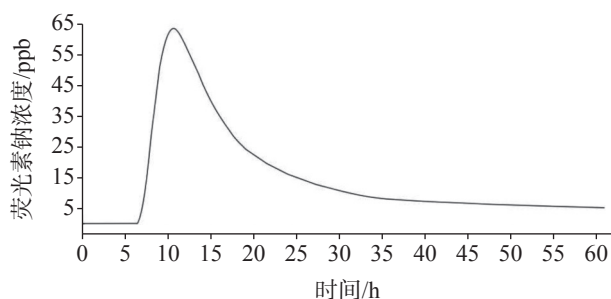


图 17 荧光素钠浓度历时曲线

Fig. 17 Time-lapse curve of sodium fluorescein concentration

示踪穿透曲线的特征可以一定程度反映地下水管道的发育特征, 其主要分为三类曲线类型: 单峰曲线、多峰曲线和双平台曲线。不同的曲线类型, 对应不同的岩溶通道结构特征(图 18)。

由此可见, 张玉坑示踪曲线反映出地下岩溶管道类型单一, 相对简单, 主要表现为岩溶管道中存在溶潭(溶洞中的永久性存水), 溶潭中水量相对集中, 对示踪剂具有一定的稀释作用, 导致浓度曲线呈现一个“拖尾”的特征; 示踪剂初现快, 峰值持续时间短, 这与试验在雨天进行有关, 降雨使试验区含水层富水程度高, 地下水流速快、流量大, 同时也说明试验区地下岩溶较为发育, 存在着由地质点(D2)到地质点(D5)的主流径通道, 且通道畅通。

利用 Qtracer2 软件^[14] 对示踪试验监测数据进行定量分析计算, 以获取示踪剂的流速、回收率和相应岩溶管道的几何形态特征、水力参数等指标。Qtracer2 软件可对岩溶地下水系统的水动力学特性和溶质运移特性进行合理评价, 被广泛应用于分析野外示踪实验数据。

总体来说, 示踪剂投放点与接收点之间的距离越长、相对高差越大, 示踪剂在管道中迁移时间越久, 示踪剂滞留或被吸附、分解的越多, 示踪剂回收率会越低。示踪试验获取的试验参数表明本次试验试验示踪剂回收率达到了 89.8%, 具有很高的示踪剂回收率(表 2), 进一步证明了研究区岩溶较发育, 岩溶主径流通道具有很好的连通性, 且岩溶水排泄通道唯一, 只通过地质点(D5)向外排泄。

一般来说, 不同的时间对应不同的流速值, 包括示踪剂首次检出时间对应最大流速、峰值时间对应优势流速、平均传输时间对应平均流速。此次试验

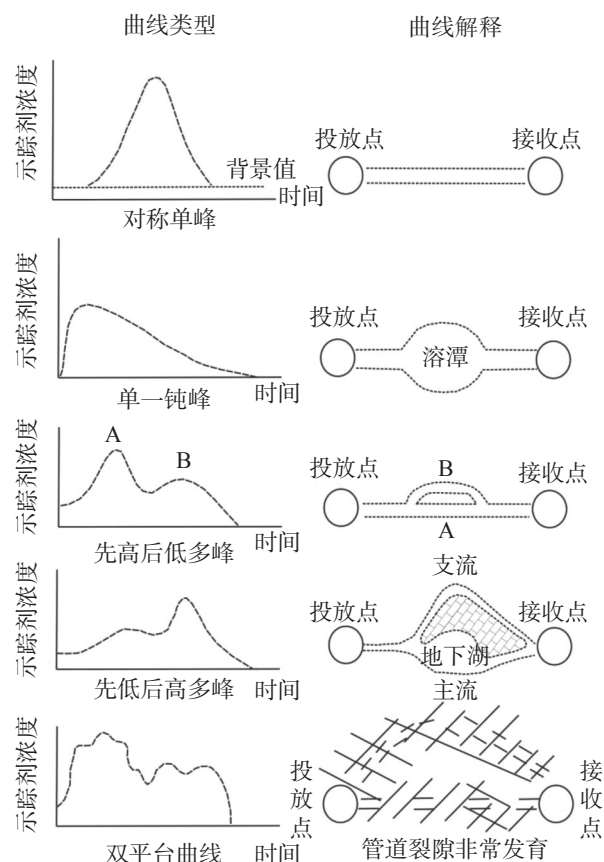


图 18 示踪穿透曲线类型及水文地质意义

Fig. 18 Tracer curve types and hydrogeological interpretation

的最大流速、优势流速和平均流速分别为 $134 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $81 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $16 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 。通过接收点示踪试验结果分析, 从地下水运移特征来说, 地下水流速较大, 最快流速与平均流速之比为 8.3, 其中估算雷诺数为 9 673, 远大于 4 000, 呈现典型的紊流流态(表 3)同样表明试验区域岩溶介质相当发育, 地下水运移路径极为通畅。

4 结 论

(1) 张玉坑磷石膏集中库所在冲沟与临谷无任何水力联系, 不会发生向临谷的地下水渗漏;

(2) 张玉坑岩溶底界为分布于李坪区域的寒武系覃家庙组中部泥岩层, 该套泥岩层的存在, 控制了张玉坑岩溶发育以及岩溶水径流、排泄管道的形成; NE 向岩溶管道的存在控制着张玉坑地区岩溶水的径流和排泄, 排泄通道唯一, 地质点(D5)是该区存在的接触式下降泉, 岩溶地下水的排泄通道;

(3) 示踪曲线为具有拖尾特征的单峰式曲线, 表明地下岩溶管道类型单一, 相对简单, 岩溶管道中存

表 2 示踪试验主要参数一览表
Table 2 Main parameters of the tracer test

投放点	接收点	直线距离/m	水力梯度/%	初现时间/h	峰值时间/h	最大流速/m·h ⁻¹	优势流速/m·h ⁻¹	平均流速/m·h ⁻¹	回收率/%
地质点(D2)	地质点(D5)	983	7.42	7	12	134	81	16	89.8

表 3 示踪试验估算的水文地质参数
Table 3 Hydrogeological parameters estimated by the tracer test

参数	管道储水体积/m ³	管道平均横截面积/m ²	管道平均直径/m	弥散系数/m ² ·s ⁻¹	纵向弥散度/m	摩擦系数(f)	雷诺兹数(N _R)	舍伍德数(N _{sh})	施密特数(N _{sc})
数值	1 713	2.5	0.84	0.506	783.6	0.033	9 673	841.4	1 140

在溶潭，溶潭中水量相对集中，对示踪剂具有一定的稀释作用，导致浓度曲线呈现一个“拖尾”的特征；同时也说明试验区地下岩溶较为发育，存在着由地质点(D2)到地质点(D5)的主流通道，且通道畅通；

(4)从水文地质条件来说磷石膏堆填场地的理想要求就是具有相对独立的地下水文地质单元，与临谷没有水力联系，排泄通道单一清楚，在这种条件下，即使磷石膏堆填场地发生泄漏，也可以精准把握处理措施，将污染降低到危险可控的范围，张玉坑磷石膏集中库岩溶水文地质条件基本满足上述要求，满足建库水文地质条件。

参考文献

[1] 蒋建亚, 张苏花, 付旭东, 孙浩. 磷化工废渣磷石膏的特性及其资源化利用[J]. 山西建筑, 2021, 47(9): 1-4.
JIANG Jianya, ZHANG Suhua, FU Xudong, SUN Hao. Characteristics and resource utilization of phosphogypsum from phosphorus chemical waste[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(9): 1-4.

[2] 段先前, 韦俊发, 丁坚平. 贵州某磷石膏堆场渗漏污染评价[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(2): 218-221.
DUAN Xianqian, WEI Junfa, DING Jianping. Evaluation on seepage pollution of a phosphogypsum yard in Guizhou Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2008, 22(2): 218-221.

[3] 王萍, 刘静, 朱健, 李筑江, 田茂苑, 张旺. 岩溶山区磷石膏堆场重金属迁移对耕地质量的影响及污染风险管控[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 294-299.
WANG Ping, LIU Jing, ZHU Jian, LI Zhujiang, TIAN Maoyuan, ZHANG Wang. Impacts of heavy metal migration on quality of cultivated land and control of pollution risk in phosphogypsum yard in karst mountain area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 294-299.

[4] 钟春里. 岩溶管道系统中污染物扩散及地下水自净能力研究: 贵州某磷石膏堆场为例[J]. 贵州地质, 2011, 28(2): 126-130.

ZHONG Chunli. Study of pollutant dispersion and underground water self-purification capacity in the karst conduit system: One phosphogypsum gradient in Guizhou as the example[J]. Guizhou Geology, 2011, 28(2): 126-130.

[5] 陈舟, 赵贵清, 王志光, 陈豪, 张科正. 岩溶区某磷石膏堆放场渗漏特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 144-150.
CHEN Zhou, ZHAO Guiqing, WANG Zhiguang, CHEN Hao, ZHANG Kezheng. Leakage characteristics of a phosphorus gypsum storage site in karst area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 144-150.

[6] 丁坚平, 毛健全, 姜涛. 贵州岩溶地区废渣堆场渗漏污染研究[J]. 工程勘察, 2004(6): 16-19.
DING Jianping, MAO Jianquan, JIANG Tao. Study on seepage pollution of waste residue disposal sites in karst area of Guizhou[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004(6): 16-19.

[7] 邓铭哲. 黄陵背斜及邻区构造建模[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
DENG Mingzhe. Structural modeling of the Huangling anticline and its peripheral structural belt[D]. Beijing: China University of Geoscience (Beijing), 2018.

[8] 王孔伟, 张帆, 邱殿明. 三峡库区黄陵背斜形成机理及与滑坡群关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(4): 1142-1154.
WANG Kongwei, ZHANG Fan, QIU Dianming. Relation of Huangling anticline and landslide group in the Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(4): 1142-1154.

[9] 徐政语, 李大成, 卢文忠, 林柯, 刘池阳. 渝东构造样式分析与成因解析[J]. 大地构造与成矿学, 2004(1): 15-22.
XU Zhengyu, LI Dacheng, LU Wenzhong, LIN Ge, LIU Chiyang. Pattern analyses and genetic interpretation about the geotectonics of Yudong (East Chongqing)[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004(1): 15-22.

[10] 王军, 褚杨, 林伟, 王清晨. 黄陵背斜的构造几何形态及其成因探讨[J]. 地质科学, 2010, 45(3): 615-625.
WANG Jun, CHU Yang, LIN Wei, WANG Qingchen. Struc-

- tural geometry and the origin of the Huangling anticline[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(3): 615-625.
- [11] 陈余道, 程亚平, 王恒, 蒋亚萍, 黄月群. 岩溶地下河管道流和管道结构及参数的定量示踪: 以桂林寨底地下河为例[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 11-15.
- CHEN Yudao, CHENG Yaping, WANG Heng, JIANG Yaping, HUANG Yuequn. Quantitative tracing study of hydraulic and geometric parameters of a karst underground river: Exemplified by the Zhaidi underground river in Guilin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 11-15.
- [12] 鲁程鹏, 束龙仓, 苑利波, 张蓉蓉, 黄币娟, 王彬彬. 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.
- LU Chengpeng, SHU Longcang, YUAN Libo, ZHANG Rongrong, HUANG Bijuan, WANG Binbin. Determination of hydrogeologic parameters of karst aquifer based on tracer test[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(4): 717-721.
- [13] 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(4): 44-49.
- [14] Field MS. The Qtracer2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifer and other hydrologic systems[R]. US: United States Environmental Protection Agency, 2002.

Karst hydrogeological survey and tracing of Zhangyukeng phosphogypsum repository

ZHAO Zhihao^{1,2}, WANG Kongwei^{1,2}, ZHOU Zhun^{1,2}, LIU Shiyuan^{1,2}, ZHANG Kaiyuan^{1,2}, WANG Lan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract The most effective treatment of phosphogypsum—the waste generated in the production of phosphoric acid—is centralized landfill. Given the stability of phosphogypsum landfill and possible pollution to groundwater, Zhangyukeng phosphogypsum repository, a typical phosphogypsum landfill site, should be established in accordance with strict requirements on the geological environment. In this study, based on the field geological survey, observation of drilling cores and interpretation of geophysical profiles, the tracer evaluation technology was used to evaluate karst development and to analyze characteristics of karst water runoff and discharge in the study area. The following conclusions are drawn as follows. Firstly, the gullies where Zhangyukeng phosphogypsum repository is located have no hydraulic connection with the adjacent valley; therefore, there will be no groundwater leakage to the adjacent valley. Secondly, NE karst pipelines control the runoff and discharge of karst water in Zhangyukeng area. The discharge channel is unique and the geological point (D5) is the contact-type descending spring existing in this area—the discharge channel of karst groundwater. Thirdly, the tracer curve is a unimodal one with trailing characteristics, and the type of underground karst pipeline is single with relatively simple structures, which shows that the underground karst in the experimental area is developed and there is a main path channel with smooth flow between two geological points from D2 to D5. In conclusion, from the perspective of hydrogeological conditions, the building of a phosphogypsum landfill should meet the requirements that there exists a relatively independent underground geological unit without the hydraulic connection with the adjacent valley, and the discharge channel is single and clear. The karst hydrogeological conditions of Zhangyukeng phosphogypsum repository basically satisfy the above requirements and meet the hydrogeological conditions for its construction.

Key words Zhangyukeng phosphogypsum repository, hydrogeological conditions, groundwater, tracer test

(编辑 张玲)