

# 贵州裸露岩溶地下河系统污染通道识别钻探技术

陈涛<sup>1</sup>, 李强<sup>1,2</sup>, 江峰<sup>1,2</sup>, 赵华宣<sup>1\*</sup>, 陈浩<sup>1</sup>, 贾玉川<sup>1</sup>, 王若帆<sup>1</sup>

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局114地质大队, 贵州遵义563000;

2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳550000)

**摘要:** 贵州裸露岩溶区地下河系统发育、岩溶发育强烈、水文地质条件复杂, 地下河系统易受地面污染源渗滤液侵入引发严重污染问题。地下河系统污染通道隐蔽性强、空间狭窄、各向发育不均匀, 精准识别难度大。为揭露识别污染通道, 钻探成孔施工面临软硬互层与软弱不均、强岩溶地层易孔斜、大溶洞钻孔轴线易偏移和套管折断、自然水力坡度小的地下河系统示踪剂迁移缓慢等难题, 污染通道揭露识别难度大、效率低。采用防斜保直、大岩溶套管穿越封隔、孔内激化促示踪剂迁移等技术措施, 保证了勘查孔垂直度, 并为测井、示踪试验及水样采集等工作提供精准的钻孔通道, 实现了污染通道的精准揭露和快速识别。对同类地层精准揭露和高效识别污染通道的钻探施工有参考和借鉴意义。

**关键词:** 地下河系统; 污染通道; 精准识别; 防斜保直; 大溶洞穿越; 孔内激化; 裸露岩溶区

**中图分类号:** P634; X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0124-08

## Drilling techniques for pollution pathway identification in exposed karst subterranean river systems in Guizhou

CHEN Tao<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, JIANG Feng<sup>1,2</sup>, ZHAO Huaxuan<sup>1\*</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, JIA Yuchuan<sup>1</sup>, WANG Ruofan<sup>1</sup>

(1. 114 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Zunyi Guizhou 563000, China;

2. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550000, China)

**Abstract:** The exposed karst region in Guizhou features a complex network of underground river systems characterized by extensive karst development and intricate hydrogeological conditions. These systems are highly susceptible to severe contamination from surface pollutant sources due to percolation of leachates. The pollution pathways within these underground river systems are challenging to precisely identify owing to their concealed nature, narrow spatial extent, and anisotropy. To expose and identify contaminated channels, drilling operations face several difficulties, including alternating soft and hard layers, non-uniform weak zones, significant karstic formations causing borehole deviation, large cavities leading to casing misalignment or breakage, and slow tracer migration due to low natural hydraulic gradients in the underground river systems. Consequently, the identification and exposure of pollution pathways are both difficult and inefficient. To address these challenges, several technical measures were employed, including anti-deviation and vertical maintenance techniques, large karst casing passage and sealing, and in-hole activation to promote tracer migration. These measures ensured the verticality of exploration boreholes, facilitating accurate

收稿日期: 2024-06-13; 修回日期: 2024-06-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.018

基金项目: 贵州省科学技术厅重大科技成果转化项目“地下河走向物理化学探测及数字地图绘制技术集成与应用”(编号: 黔科合成果[2023]重大006); 贵州省地质矿产勘查开发局科研项目“贵州岩溶地下水环境污染勘查与地学治理关键技术研究”(黔地矿科合(2022)重大2号)

第一作者: 陈涛, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 探矿工程专业, 主要从事钻探施工管理及技术研究工作, 贵州省遵义市银河北路桃溪河畔喜来登酒店国际商务中心13~16层, 1352732461@qq.com。

通信作者: 赵华宣, 男, 苗族, 1968年生, 研究员, 探矿工程专业, 主要从事钻探技术及管理, 贵州省遵义市银河北路桃溪河畔喜来登酒店国际商务中心13~16层, 1060440458@qq.com。

引用格式: 陈涛, 李强, 江峰, 等. 贵州裸露岩溶地下河系统污染通道识别钻探技术[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 124-131.

CHEN Tao, LI Qiang, JIANG Feng, et al. Drilling techniques for pollution pathway identification in exposed karst subterranean river systems in Guizhou[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 124-131.

logging, tracer testing, and water sampling. This approach enabled the precise exposure and rapid identification of pollution pathways. The methodologies and technical measures adopted in this study offer significant reference and practical insights for the precise exposure and efficient identification of pollution pathways in similar geological formations.

**Keywords:** underground river systems; pollution pathways; precise identification; anti-deviation and vertical maintenance; large karst cavity passage; in-hole activation; exposed karst region

## 0 引言

岩溶地下水是贵州生产生活的重要水源和生态环境的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>,岩溶区特殊的地理位置及地表地下双层结构特征<sup>[3]</sup>使地下水环境脆弱、岩溶生态敏感性高、恢复能力弱<sup>[4]</sup>,区内老旧污染堆渣场富含污染组分,渗滤液经岩溶管道、裂隙(污染通道)径流进入地下水造成下游地下河与地表水系统双重污染,恶化地下河系统与最终受纳体江河水质<sup>[5]</sup>。岩溶地下河系统具有地下水污染隐蔽性强、扩散迅速、污染源复杂、污染通道识别难等特点<sup>[6]</sup>,钻探成孔既是岩溶区地面调查、地球物探、水文钻探等综合手段精准识别污染源和污染通道的关键环节<sup>[7-8]</sup>、更是获取污染区域地质要素资料的重要手段和采集地下样品的唯一通道<sup>[9]</sup>。采用有效的钻探技术措施查明污染源,精准揭露和识别污染通道,对地下河系统污染调查评价、生态保护以及污染治理有重要意义。

近年来,贵州实施了一系列中央水污染防治资金和市场的地下水污染调查与治理类项目<sup>[10]</sup>。在揭露和识别污染通道的钻探施工中,常遇到软硬互层与软弱不均、局部高大溶洞(高度>10 m)、连续性溶蚀破碎带等复杂岩溶地层,且岩溶裂隙(溶洞)表现出各向非均匀发育的特征,严重影响了钻孔精度,增大了污染通道查找难度,同时因地下河系统自然水力坡度小造成污染通道示踪识别过程缓慢。根据钻遇地层特征及设计要求,通过采用适宜的钻进工艺、防斜组合钻具钻进、矩形齿嵌入焊接或楔型+肋骨焊接长套管穿越封隔大溶洞等施工技术措施克服了复杂岩溶地层,精准地实施了钻孔通道和揭露地下河污染水,通过孔内激化促示踪剂迁移的措施缩短了污染通道识别时间。

## 1 贵州岩溶特征与技术要求

### 1.1 岩溶特征

贵州属西南裸露型岩溶山区,地形地貌起伏较大、区域构造发育。岩溶区地表岩溶洼地、落水洞、

天窗等个体形态密布,岩溶发育强烈,含水性极不均一,地下河系统发育、岩溶水文地质条件复杂,岩溶地下河系统空间结构复杂,地下水污染通道(管道、裂隙、溶洞)隐蔽性强、空间狭窄及各向发育不均匀,精准识别难度大。地下河系统含水岩组多以白云岩、灰岩为主,其次为含泥质、硅质等不纯碳酸盐岩,受岩性、地形地貌、构造节理影响,各区域地下河系统岩溶发育程度及空间变化差异较大。

钻探施工影响精准揭露识别地下河系统污染通道的主要地质因素有岩溶裂隙(溶洞)强发育、溶洞规模大、溶蚀破碎带厚度大、岩层产状陡倾、自然水力坡度小等。岩溶类别及特征见表1。

### 1.2 技术要求

勘查孔应准确揭露目标靶区(地球物理勘探异常区)和精准识别污染通道,查明构造、节理、裂隙发育起止深度和岩层完整、破碎情况等地层要素特征,获取含水层位置、涌水量、水质等水文地质特征,钻探施工工艺和材料对地层无污染且不影响污染水COD、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、TP等关键特征指标的检测。

## 2 钻探施工技术难题

(1)通道精准识别困难。岩溶地下河系统污染通道具有(岩溶裂隙、管道、溶洞)隐蔽性强、空间狭窄、分布不均及各向发育不均的特点,勘查钻孔需穿越上部复杂岩溶地层并准确揭露污染通道或污染影响带的目标靶区(见图1),污染通道精准识别十分困难。

(2)钻孔结构和工艺复杂。施工中为及时准确获取详细的构造节理和岩溶裂隙(溶洞)空间位置、岩溶发育状况、含水层涌水量、污染特征因子及浓度等信息,需分段多次开展水文测井、抽水试验及水样采集等相关工作,单一的钻孔结构和钻进工艺难以满足要求。

(3)钻孔轴线控制难度大。勘查区岩溶裂隙(溶洞)发育,常遇软硬互层与软弱不均、局部高大

表1 岩溶类别与特征

岩溶类别	地层岩性特征
岩溶裂隙(溶洞)发育	(1)地表有较多的落水洞、漏斗、洼地,地下溶洞发育,多岩溶大泉、暗河,岩溶发育深度较大; (2)第四系盖层薄或缺失,下伏岩层裂隙、溶洞发育、岩溶化程度高、多发育岩溶地下河管道和暗河,岩溶裂隙(溶洞)密度、规模、有/无充填等受含水岩层岩性、区域构造节理等关系密切; (3)钻孔岩溶率受区域地质构造及节理影响差异大,污染通道(管道、裂隙、溶洞)隐蔽性强、空间狭窄及各向发育不均匀,地下水位几米至几百米不等; (4)软硬不均、软硬互层、各向发育不均匀、裂隙带岩体较破碎易掉块
局部大溶洞	受区域地质构造和节理裂隙影响,局部发育高度>10 m大溶洞,有或无充填与区域地质条件关系密切
溶蚀破碎带	受岩溶裂隙、构造节理影响,局部区域岩体破碎、胶结较差、软硬不均,孔壁垮塌严重、成孔困难
产状陡倾	受构造节理影响,局部区域层岩产状陡倾、含水岩层软硬不均、软硬互层
自然水力坡度小	受地形地貌和岩溶裂隙影响,局部区域地下河系统内自然水力坡度小、岩溶通道内地下水流速缓慢,示踪剂在勘查孔(投放点)水面上悬浮及通道内迁移缓慢



图1 勘查孔与污染通道示意

溶洞(高度>10 m)、连续性溶蚀破碎带等复杂地层,且岩层陡倾、岩溶发育各向极不均匀,钻孔轴线易偏移,控制难度大,必须采取防斜措施。

(4)折断事故频发。岩溶裂隙(溶洞)窄地层钻孔偏斜易引起钻杆、套管折断,尤其是遇高大溶洞(高度>10 m),钻杆、套管无孔壁的束缚支撑条件,更易发生复杂的折断事故。

(5)施工条件差。部分勘查孔受周边地形地貌及交通条件制约,施工条件差,设备应用受限。

(6)示踪试验效率低。自然水力坡度小的地下河系统,岩溶通道内地下水流速及示踪剂迁移速度缓慢,示踪试验查验识别污染通道耗时长、效率低,不利于污染通道的快速识别。

### 3 勘查孔布置与钻探工艺

#### 3.1 勘查孔布置

污染源处于岩溶地下河系统上游区域,在勘查区地面调查、地球物理勘探等圈定潜在污染源和污染通道(物探异常区)后,在地下河系统上游邻近潜在污染源适当区域的污染通道上部地面布置勘查孔(见图2),勘查孔周边(一定范围)无障碍物,尽可能采用直孔,减少施工难度和节省钻探施工成本。

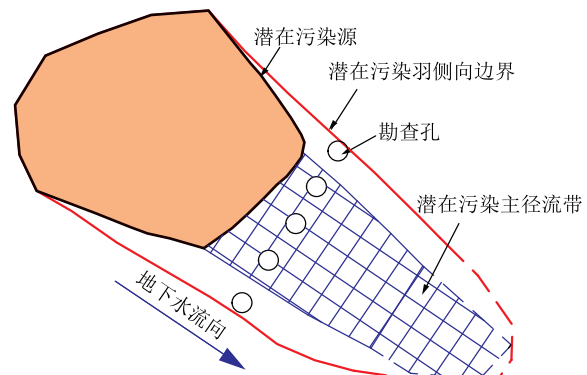


图2 近源区勘查孔布置示意

#### 3.2 钻探工艺

钻探工艺是准确获取区域地质要素和精准识别污染通道的施工关键要素,直接影响施工效率、质量和成本<sup>[11]</sup>。根据设计要求、地层结构特征及交通条件等要素选用金刚石取心钻进和空气潜孔锤钻进。

##### 3.2.1 金刚石提钻取心+清水钻进<sup>[12]</sup>

勘查区地质要素信息不全、不清晰(或溶蚀破碎带与交通条件差),需查明构造节理位置、溶蚀裂

隙发育起止深度和充填情况、岩层完整性、含水层位置和涌水量、水质特征指标等地质要素信息,使用取心率高、原状岩心保持好、钻孔垂直度高的金刚石提钻取心钻进工艺,冲洗液使用清水或无泵钻进,避免污染地层。钻孔结构满足污染水样采集、综合水文测井、孔内数字摄像、水文地质试验等要求。

### 3.2.2 空气潜孔锤钻进

勘查区地层要素资料清楚且需快速准确查明

岩溶通道内含水层位置、涌水量、水质指标等水文特征参数,采用不污染地层、可实时准确反映钻遇各含水层位置、涌水量、水质特征信息以及孔底清洁和钻效较高<sup>[13-15]</sup>的空气潜孔锤钻进工艺。钻孔结构满足污染水样采集、综合水文测井、孔内数字摄像、水文地质试验等要求。

不同勘查孔钻进工艺与钻孔结构见表2。

表2 勘查孔钻进工艺与钻孔结构

钻孔类型	设计要求	钻进工艺	钻孔结构
金刚石小口径钻孔	(1)查明构造、节理、裂隙(溶洞)发育起止深度,岩层完整、破碎情况等地质要素,含水层涌水量、水质特征指标等水文地质要素;(2)终孔作简易抽水、水样采集	(1)金刚石取心钻进(清水);(2)浅表松散层及	(1)开孔 $\Phi 150$ mm,进入完整岩体 $>2.0$ m,下 $\Phi 146$ mm套管水泥固井止水,终孔 $\geq \Phi 110$ mm;(2)见水继续钻进10.0 m或达到地质要求终孔
金刚石大口径钻孔	(1)查明构造、节理、裂隙(溶洞)发育起止深度,岩层完整、破碎情况等地质要素,含水层涌水量、水质特征指标等水文地质要素;(2)地下水富集区,终孔作完整抽水试验、水样采集	充填裂隙、溶洞采用无泵取心钻进)	(1)开孔 $\Phi 225$ mm,进入完整岩体 $>2.0$ m,下 $\Phi 219$ mm套管水泥固井止水,终孔 $\geq \Phi 130$ mm;(2)见水继续钻进10.0 m或达到地质要求
空气潜孔锤钻孔	(1)查明地下水主径流带及构造、节理、裂隙(溶洞)等地质要素;(2)实时精准查明各含水层位置、涌水量、水质特征指标等水文地质要素;(3)终孔作完整抽水试验、水样采集,提高钻进效率	(1)空气潜孔锤;(2)浅表松散层及充填裂隙、溶洞采用无泵取心钻进)	(1)开孔 $\Phi 280/225$ mm,进入完整岩体 $>2.0$ m,下 $\Phi 273/219$ mm套管水泥固井止水,终孔 $\Phi 194$ mm(地质要求);(2)见涌水继续钻进10.0 m或达到地质要求;注:采用“探采”结合的钻孔,孔口管固结止水后先以小径( $\Phi 140$ mm)钻进,快速探查识别污染通道,涌水量大再扩孔抽水

## 4 钻探中采取的关键技术

### 4.1 防斜保直

岩溶区地下河系统含水岩组多以白云岩、灰岩为主,含泥质、硅质等不纯碳酸盐岩,因溶蚀、构造节理作用,岩溶裂隙(溶洞)强烈发育、含水性极不均一、岩溶水文地质条件复杂。为精准识别地下河系统污染通道,钻探施工需穿越上部岩溶裂隙(溶洞)发育、岩层破碎、软硬不均、岩层陡倾的易斜地层<sup>[16-17]</sup>。使用长刚直防斜组合钻具与合理工艺参数组合的防斜保直技术,较好的保证了钻孔垂直度,准确揭露物探异常区,精准识别污染通道。

#### 4.1.1 长刚直组合钻具防斜<sup>[18]</sup>

(1)长刚直粗径钻具:金刚石取心钻进使用长度 $>4.0$  m、厚壁的长刚直粗径钻具,以提高粗径钻具刚度和同心度,增强粗径钻具导向作用,减少钻孔弯曲。

(2)防斜组合钻具:在粗径钻具上部钻杆柱设

扶正装置,增加防斜钻具长度和提高钻具整体刚性,加长了钻具与孔壁环状间隙小的孔段,起到提高钻具同心度、减弱振动作用,提高防斜效果。

金刚石取心钻具为 $\Phi 130$  mm金刚石钻头+ $\Phi 127$  mm长粗径钻具+ $\Phi 50$  mm短钻杆+ $\Phi 127$  mm筒式扶正器;空气潜孔锤钻进钻具为 $\Phi 140$  mm锤头+4 in( $\Phi 101.6$  mm)冲击器+ $\Phi 89$  mm外平钻杆+ $\Phi 138$  mm筒式扶正器。防斜组合钻具长度大于岩溶裂隙(溶洞)窜或大溶洞高度+2.0 m,钻具组合如图3所示。

#### 4.1.2 合理钻进参数防斜

金刚石取心钻遇岩溶裂隙发育、软硬不均地层,及时调整钻进参数,钻压调整至正常压力的1/4~1/3,慢转120~150 r/min防斜钻进。

#### 4.1.3 工艺技术措施

(1)钻机底座平整、稳固,开孔钻具随钻孔不断加深而加长岩心管,尽可能使用动力头钻机以便加

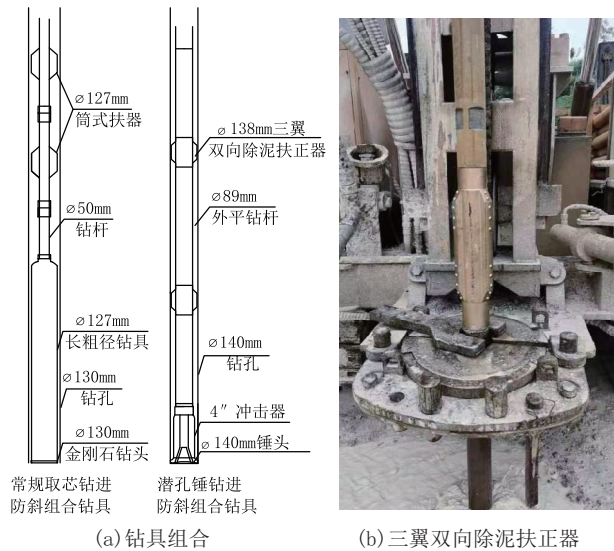


图3 防斜组合钻具

长开孔钻具。

(2) 孔口管进入完整岩层一定深度校正,并固结止水,换径时应带导正装置导正钻进。

(3) 工艺转换:空气潜孔锤钻进遇溶洞,换长刚

直组合钻具防斜取心钻进,钻至进入溶洞底0.5~1.0 m。

#### 4.2 大溶洞穿越

岩溶区地下河系统普遍岩溶裂隙(溶洞)发育强烈,局部发育高度10 m以上大溶洞或岩溶裂隙(溶洞)窜,钻探施工中遇大溶洞或连续性裂隙(溶洞)窜时,孔壁无束缚支撑条件,易引发钻孔轴线偏移、钻杆和套管拆断等事故<sup>[19]</sup>,需采取有效的大溶洞穿越封隔技术,保障施工安全,确保钻孔质量。

遵义某地下河系统污染调查项目近源勘查区6个勘查孔,于孔深28.15~42.74 m段遇10.85~14.3 m的大溶洞及裂隙(溶洞)窜,综合考虑溶洞空间高度、钻进工艺、孔径结构及孔壁完整性等情况,采用单根长套管、楔型焊接+肋骨固强长套管、矩形齿嵌入焊接长套管穿越封隔溶洞<sup>[20]</sup>,见表3。有效的保证了钻孔垂直度,保障了后续钻探施工安全,最终准确揭露了物探异常区,精准的识别了污染通道。

表3 遵义某地下河系统污染调查项目钻遇大溶洞情况及处理措施

钻孔编号	钻进工艺	溶洞(裂隙)窜位置/m	溶洞高度/m	充填状况	处理措施	套管长度/m
CK6	取心钻进	28.5~39.35	10.85	基本无充填	单根长套管封隔	13.50
CK7	取心钻进	28.63~39.83	11.20	基本无充填	单根长套管封隔	13.70
CK12	取心钻进	28.44~42.74	14.30	基本无充填	矩形齿嵌入焊接长套管封隔	18.20
CK10	取心钻进	28.22~41.92	13.70	基本无充填	矩形齿嵌入焊接长套管封隔	18.10
CK13	空气潜孔锤	28.43~42.33	13.90	基本无充填	楔型焊接+肋骨固强	43.83
CK17	空气潜孔锤	28.15~42.25	14.10	基本无充填	长套管封隔(至地表)	43.90

##### 4.2.1 单根长套管穿越封隔

CK6、CK7勘查孔分别钻遇10.85 m、11.2 m无充填大溶洞,具备单根长套管穿越封隔大溶洞的条件。长刚直防斜组合钻具无泵钻进到溶洞底采样起钻,再轻压慢转钻至溶洞底板以下完整岩层 $< 1.0$  m,钻杆送单根长套管至孔底穿越封隔大溶洞,换径顺利钻至终孔并完成抽水取样、测井、孔内数字摄像等后续工作。

##### 4.2.2 楔型焊接+肋骨固强长套管穿越封隔

CK13、CK17勘查孔以 $\varnothing 140$  mm空气潜孔锤钻进,分别钻遇13.9 m、14.1 m无充填大溶洞,需下 $\varnothing 219$  mm技术套管封隔,单根套管不足以穿越封隔大溶洞。采用 $\varnothing 245$  mm潜孔锤扩孔至溶洞顶,并以 $\varnothing 240$  mm防斜组合钻具( $\varnothing 219$  mm钻具+肋骨+ $\varnothing$

89 mm钻杆+ $\varnothing 235$  mm筒式扶正器)圆铣孔至溶洞顶,无泵钻至溶洞底采样起钻,低压、慢转、小泵量钻至溶洞底进入完整岩层 $< 1.0$  m。因场地条件和施工设备限制,而孔壁与套管间隙较大,采用 $\varnothing 219$  mm套管公母接头对接焊+肋骨补强的方式形成“楔型焊接+肋骨固强长套管”(见图4),长套管垂直度好、肋骨连接牢固,成功穿越封隔大溶洞并延伸至地表。换径 $\varnothing 194$  mm顺利钻至终孔并完成后续工作。

##### 4.2.3 矩形齿嵌入焊接长套管穿越封隔

CK10、CK12勘查孔以金刚石取心钻进,分别钻遇13.7 m、14.3 m无充填大溶洞,单根套管不足以穿越封隔大溶洞,且孔壁与套管间隙小。采用长刚直防斜组合钻具无泵钻进到溶洞底采样起钻,轻压



图4 楔型焊接+肋骨固强长套管

慢转钻至溶洞底板进入完整岩层 $<1.0$  m,采用水平焊缝错开的“矩形齿嵌入焊接长套管”穿越封隔大溶洞(见图5),长套管增设了垂直焊缝,连接强度高。换径顺利钻至终孔并完成后续工作。



图5 矩形齿嵌入焊接长套管

### 4.3 钻探施工效果

#### 4.3.1 钻孔垂直度控制较好

通过长刚直组合钻具与防斜工艺参数的组合、以及单根长套管、楔型焊接+肋骨固强、矩形齿嵌入焊接长套管穿越封隔溶洞等技术的应用,完成的勘查孔垂直度好,孔斜率 $0.65^{\circ}\sim 0.73^{\circ}/100$  m,见表4。为准确揭露物探异常区和精准识别污染通道提供了技术保障。

#### 4.3.2 准确揭露和识别污染通道

勘查孔采集的水样送至具有资质的实验室检测,钻孔水质污染程度为IV(重度)和V类(极重

表4 遵义某地下河系统污染调查项目勘查孔施工质量与揭露污染情况

钻孔编号	钻孔施工质量				污染程度
	孔深/ m	取心 率/%	终孔孔 斜/( $^{\circ}$ )	孔斜率/ [( $^{\circ}$ ) $\cdot 100$ m $^{-1}$ ]	
CK6	107.59	89.6	0.7	$0.65^{\circ}$	IV/重度
CK7	109.65	86.7	0.8	$0.72^{\circ}$	V/极重度
CK12	112.45	93.4	0.7	$0.62^{\circ}$	V/极重度
CK10	108.20	91.5	0.8	$0.73^{\circ}$	V/极重度
CK13	100.8	每2.0 m 取岩样	0.7	$0.7^{\circ}$	V/极重度
CK17	108.3	每2.0 m 取岩样	0.8	$0.73^{\circ}$	V/极重度

注:钻孔取心率不包含无充填的岩溶裂隙(溶洞)。

度),较准确的揭露和识别污染了通道,见表4。

### 5 孔内激化

岩溶区地下河系统污染调查广泛使用示踪剂连通试验判断地下水流向、验证地下水管道连通情况以及验证识别地下水污染源和污染通道等<sup>[21-22]</sup>。如果示踪剂投放点与接收点间自然水力坡度小、流速缓慢,需通过外力作用促进示踪剂迁移<sup>[23]</sup>,以缩短示踪试验和识别污染通道的时间。

遵义某地下河系统水环境状况调查项目,地下河系统区域内地形较平缓,自然水力坡度小(0.725%),平、枯水期地下水平均流速40~50 m/d,流速缓慢。在地下河系统上游邻近潜在污染源区施工2排(X排、Y排)勘查孔,通过在勘查孔内投示踪剂开展示踪试验,识别污染通道,验证污染源与污染受体地下河系统的关系。示踪剂在勘查孔静止水面上长期悬浮,迁移缓慢,连通识别时间长,通过采取下游溶坑抽水和勘查孔内压水的孔内激化技术,促进及加快示踪剂迁移,缩短了示踪试验时间,实现了快速识别污染源和污染通道。

#### 5.1 溶坑抽水

提钻取心勘查孔X3(孔深15.20 m、水位标高904.357 m),于孔内投2 kg罗丹明B示踪剂。接收点为下游溶坑(相连约500 m $^3$ 池塘)水位标高902.921 m,示踪流距198 m、水位高差1.436 m、水力坡度0.725%,72 h后孔内仍有示踪剂悬浮,而接收点未收到示踪剂信号。

在下游溶坑内下100WQ80-22型污水潜水泵

抽水,连续抽水10.5 h溶坑出水见示踪剂,见图6。缩短示踪试验时间效果明显。下游溶坑抽水促进和加快了地下水和示踪剂迁移,



图6 溶坑抽水

## 5.2 孔内压水

提钻取心勘查孔Y2(孔深16.20 m、水位标高906.585 m),孔内投3 kg荧光增白剂示踪剂。接收点为下游岩溶泉,泉口标高904.12 m,示踪流距340 m,水位高差2.465 m,水力坡度0.725%。自然水力作用历时7.34 d接收到示踪剂数据。

同勘查轴线的Y4勘查孔(孔深16.2 m、水位标高906.586 m),钻孔施工结束下入水力式膨胀栓塞到岩体完整孔段注水密封,泵入罗丹明B示踪剂液后即泵入清水挤压,促进通道内示踪剂迁移,见图7。勘查孔岩体完整性较差,且钻孔深度小,控制水压力 $\leq 0.3$  MPa,避免较高水压击穿密封段上部的岩溶裂隙,压水0.68 d下游岩溶泉即接收到罗丹明B示踪剂,较自然水力作用减少6.66 d,缩短示踪试验时间效果明显。

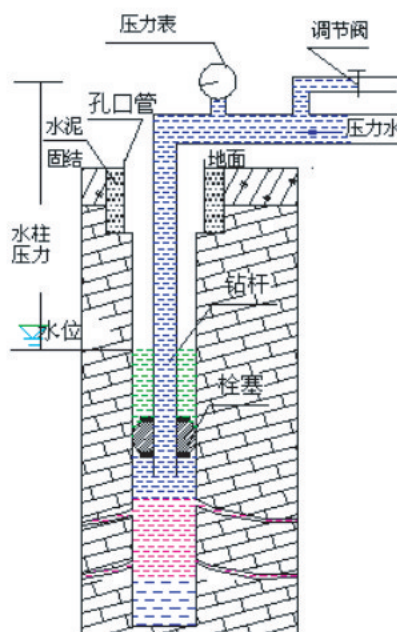


图7 钻孔内压水示意

## 6 结论与建议

(1)应用长刚直组合钻具,匹配合理的钻进工艺参数,解决了强岩溶地层孔斜问题,保证勘查孔垂直度,为污染通道精准揭露和识别提供了通道条件。

(2)单根长套管、楔型焊接+肋骨固强长套管、矩形齿嵌入焊接长套管穿越封隔技术,解决了钻遇大溶洞穿越封隔的难题,有力保障钻孔后续工序施工安全。

(3)在水力坡度小、地下水流动缓慢的地下河系统开展示踪试验,采用下游溶坑抽水和勘查孔内

压水的孔内激化技术促进及加快示踪剂迁移,有效缩短示踪试验时间,有利于快速识别污染源和污染通道。

(4)圈定的污染通道正上方有障碍物或污染通道窄小需高精度垂直钻孔揭露时,建议采用定向钻进技术,可更精准有效的揭露和识别污染通道。

### 参考文献:

- [1] 王明章.论贵州省岩溶石山地区的岩溶地下水开发[J].贵州地质,1999(3):259-265.
- [2] 罗维,杨秀丽,宁黎元,等.贵州省主要碳酸盐岩含水层污染现

- 状与特征[J].地球科学,2019,44(9):2851-2861.
- [3] 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(2):103-108.
- [4] 张军以,王腊春,苏维词,等.岩溶地区人类活动的水文效应研究现状及展望[J].地球科学进展,2014,33(8):1125-1135.
- [5] 李贵仁,邬立.强岩溶地区历史遗留渣堆地下水污染治理技术研究[J].现代矿业,2019,35(3):193-195.
- [6] 宁航,王宗星,柳富田,等.基于系统空间特征识别的岩溶地下水污染成因分析[J].地质科技通报,2022,41(5):367-376.
- [7] 易世友,李强,高峰,等.遵义市坪桥地下河系统污染源及污染通道研究[J].地下水,2023,45(5):43-46.
- [8] 段俭君,李卿.南方煤矿区喀斯特泉污染源识别及污染通道探查方法[J].能源与环保,2019,41(11):62-68.
- [9] 郑继天,王建增,蔡五田,等.钻探技术在地下水污染调查中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):197-199.
- [10] 陈涛,赵华宣,李强,等.贵州裸露型岩溶地下河系统污染防治技术——以遵义坪桥地下河系统污染防治工程为例[J].钻探工程,2024,51(3):60-68.
- [11] 陈浩,赵华宣,贾玉川,等.贵州岩溶疏干区浅层地热能埋管施工技术[J].钻探工程,2021,48(3):170-177.
- [12] 刘祥,兰沁,许飞,等.西藏罗布莎铬铁矿高海拔巨厚覆盖层钻探技术[J].钻探工程,2021,48(6):49-56.
- [13] 高起前,曾四和,气动潜孔锤打基岩井钻进过程中初见水位与含水层的判别与应用[J].四川地质学报,2011,31(11):18-21.
- [14] 赵华宣,李强,陈涛,等.贵州碳酸岩地层地热深井空气潜孔锤钻进技术应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):37-42.
- [15] 陈涛,赵华宣,陈浩,等.毕节试验区矿泉水勘查WLCK1井施工技术[J].钻探工程,2023,50(S1):316-322.
- [16] 蒋兵.九瑞地区复杂地层深斜钻孔弯曲预防与斜测技术探讨[J].西部探矿工程,2020,32(11):35-39,41.
- [17] 程红文,朱恒银,刘兵.南岭科学钻探NLSO-1孔防斜及纠斜技术[J].钻探工程,2022,48(3):109-117.
- [18] 蔡隽,吕敬尊,潘德元,等.湖南安化天明矿区复杂地层钻探难点及对策研究[J].中国锰业,2023,41(3):25-31.
- [19] 陈涛,赵华宣,陈浩,等.瓮安大坪水文地质——矿产勘查深孔施工技术[J].西部探矿工程,2022,34(1):79-83.
- [20] 邓鹏,黄明勇,方青,等.贵州省旦坪铝土矿钻探施工工艺[J].钻探工程,2021,48(3):78-85.
- [21] 徐凤,汪家权,喻佳.连通试验在某项目地下水环评中的应用[J].广州化工,2014,42(6):119-121.
- [22] 吴玉梅,骆振华,罗维,等.连通试验在西南某区岩深地下水污染溯源中的应用[J].城市地质,2023,18(1):69-74.
- [23] 刘建章,刘承磊,叶竞雄,等.地下水环评中水流向的确定方法探讨[J].中国水运,2017,17(2):100-101.

(编辑 王文)