

刘浩, 田茂中, 陈再谦. 水文地质条件对岩溶地下暗河污染的影响[J]. 中国岩溶, 2024, 43(2): 314-325.

DOI: 10.11932/karst2023y040

水文地质条件对岩溶地下暗河污染的影响

刘浩^{1,2}, 田茂中^{1,2}, 陈再谦^{1,2}

(1. 中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院岩土工程有限公司, 贵州 贵阳 550081;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要:通过收集基础资料、岩溶水文地质调查、水体污染指标分析等多种手段,分析了水文地质条件对贵州西南部某岩溶暗河地下水污染的影响。认为:(1)暗河出口所包含的六处泉点、两处溶洞,平面分布位置集中,但其水质污染情况各异,表明其分属于不同的地下岩溶水系统,暗河岩溶地下水系统极为复杂。岩溶暗河出口在空间平面上呈多股、条带状泉眼展布出露,主要受地质相变带附近构造及岩体本身异质性控制。(2)调查区受新构造运动的强烈抬升和河流快速下切的影响,形成了发达的地下岩溶水系统和岩溶洞穴系统,存在多股明流与伏流组成的水文地质单元体,客观上为暗河污染创造了条件。(3)暗河污染物来源为秧家坝岩溶洼地内某养猪场养殖废水,且是集中式、间断性通过落水洞进入地下岩溶管道。建议该岩溶暗河补给区应当控制发展大型养殖业及大中型集镇建设,污废水应当加强回收利用和减少外排,加强区内水源地建设与保护工作。

关键词:水文地质条件;岩溶暗河污染源;示踪试验;岩溶泉保护

创新点:从地形地貌、地质构造及岩性特征等宏观分析了污染源的形基础,结合微生物指标、岩溶水文地质调查、电导率测试、地球物理探测等多种手段进行综合研判。

中图分类号: X523; P641.134 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)02-0314-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

我国西南地区是世界上连片分布最大的岩溶区,面积约 5×10^5 km²。岩溶暗河是岩溶地区最重要的岩溶景观之一,也是我国西南岩溶区人类生产和生活的重要水源。然而,随着工农业的发展和人类活动的加剧,加上岩溶含水层系统自身的开放性和脆弱性,使得岩溶地下水正面临水质污染,水资源枯竭等多方面的威胁^[1-3]。

近年来,岩溶区暗河污染问题受到越来越多学者的关注。高旭波等^[4-6]对我国北方岩溶水系统水质特征、污染现状、污染来源及污染途径进行了总

结,认为我国北方岩溶水水质类型中硫酸盐型水和氯化物型水的分布逐渐增加,特别是以硫酸盐和硝酸盐污染强度和范围最大,显现出了人类活动影响特征,同时依据岩溶系统结构及水力学特征,将岩溶水污染途径总结为三种类型:连续入渗型、越流型、间歇入渗型。廖昱^[7]以颗粒态甾类物质的成分与特征参数指标,分析重庆南山某岩溶地下河系统,显示南山地下河系统的水体受到了粪便物质的污染,且粪便污染物主要来自于人类粪便的直接输入和陈旧型人类粪便的污染。曾莘茹等^[8]采用了高分辨率示踪技术(荧光素钠和罗丹明B两种示踪剂)和人工采样相结合的方法研究了桂林甑皮岩洞穴遗址地下水

基金项目:中国电建贵阳院科学技术发展基金项目“岩溶山区深厚回填场地勘察技术研究”(ZL2018-19)

第一作者简介:刘浩(1987—),男,高级工程师,主要从事地质工程、岩土工程勘察等生产及研究工作。E-mail: 493671873@qq.com。

收稿日期:2023-06-11

污染物运移路径和污染源。段逸凡等^[9]采用粪大肠杆菌(FC)与粪链球菌(FS)比值法,分析重庆南山老龙洞流域水样中的水化学指标和三种重要微生物指标,初步得到该地区微生物污染程度和污染来源。张恒等^[10-15]总结出污染源调查分析方法有基础资料收集、污染物相关性分析、岩溶水文地质调查、地形分析、污染源排查、水污染现状调查、影像分析、地球物理勘探、水质检测、连通试验及污染源论证等。本文以贵州西南部某岩溶暗河地下水系统为研究对象,通过基础资料收集、岩溶水文地质调查及分析、水体污染指标分析等多种手段进行污染源调查,并希望通过此项工作能够为当地政府和居民对木耳洞岩溶暗河的保护和治理提供科学依据。

1 研究区概况

1.1 水污染现状

贵州西南部某岩溶暗河(以下简称木耳洞)发生水体严重污染并导致下游庆坪河水体受到污染。木耳洞庆坪河段属饮用水源地一级保护区,周边集镇人口约3万人,人畜饮水及灌溉均取自该河流,因此该暗河污染对周边人口生活环境影响较大(图1)。



图1 木耳洞出口水体污染照片

Fig. 1 Photo of water pollution at the outlet of Muer cave

现场调查显示^[16],木耳洞暗河出口在500 m范围内集中分布6处暗河出露点(编号为泉水Q1—泉水Q6),枯期流量合计200~280 L·s⁻¹,汛期流量合计5~10 m³·s⁻¹,同时周边发育两个大型溶洞(图2),暗河出露点自上游至下游分别为:

(1)泉水Q1 位于木耳洞庆坪河段源头,出露于河道右岸堡坎下的石缝中。出露高程754 m,调查期水流量10~15 L·s⁻¹,水体呈浑浊状,出水处岩石明显发黑,并混杂有畜禽粪便的臭味。

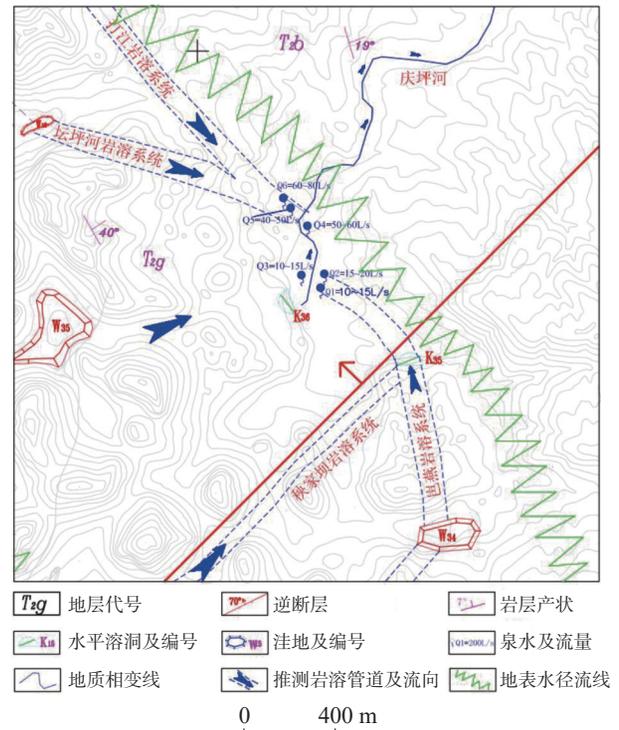


图2 木耳洞岩溶水文地质图

Fig. 2 Karst hydrogeology of Muer cave

(2)泉水Q2 位于木耳洞庆坪河段源头,出露于河道右岸一支沟耕地田埂下的石缝中。出露高程754.3 m,调查期水流量15~20 L·s⁻¹,水体呈浑浊状,出水处岩石明显发黑,并混杂有畜禽粪便的臭味。

(3)泉水Q3 位于木耳洞庆坪河段源头,出露于河道左岸道路堡坎下的石缝中。出露高程754 m,调查期水流量10~15 L·s⁻¹,水体清澈,出水未见污染痕迹。

(4)泉水Q4 位于木耳洞庆坪河段上游,出露于河道左岸石缝中,出口处已砌筑石板进行保护。出露高程750 m,调查期水流量50~60 L·s⁻¹,水体清澈,水质较好,该暗河未见污染痕迹。

(5)泉水Q5 于木耳洞庆坪河段上游一支沟中右岸的田埂处出露,出露高程750.5 m,调查期水流量40~50 L·s⁻¹,水体清澈,水质较好,未见明显污染痕迹。

(6)泉水Q6 出露于木耳洞庆坪河段上游一支沟中,为多股石缝中的泉水汇集形成。出露高程750~751 m,调查期水流量60~80 L·s⁻¹,水体清澈,水质较好。

(7)溶洞K35 位于木耳寨南侧一处岩壁下,出露高程约770 m,该溶洞纵向呈近东西向发育。调查

期因洞内地下水埋深较大,难以查看,经洞内抽水查看水体浑浊并有臭味。

(8)溶洞 K36 位于木耳寨子西侧公路边岩壁下,出露高程约 756 m,该溶洞纵向呈 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 往下发育。调查期因洞内水位埋深约 754 m,未见水体流动,水质清澈,无污染痕迹。

1.2 地形分析

调查区位于云贵高原东南边缘,地处黔西南中山丘原盆谷区向广西低山丘陵区过渡的斜坡地带,区内地势北西高南东低,呈台阶状下降至北盘江河谷。调查区属岩溶槽谷及峰丛洼地地貌单元,地形西高东低,西侧山脊地面高程 1 499~1 590.6 m,槽谷地面高程 750~1 300 m,最低点为木耳洞河,地面高程约 750 m。

1.3 基本地质条件

调查区地处扬子准地台黔北台隆之普安旋扭构造变形区与黔南台陷之望漠西北向构造变形区的接壤地带,以北东向构造变形为主。区内以木耳洞河为界,可分为东西两区。木耳洞河东区为非可溶性的碎屑岩分布区,岩性以三叠系中统边阳组(T_2b)砂岩、泥岩等岩性为代表,西侧为可溶性碳酸盐岩分布区,岩性以三叠系中统关岭组(T_2g)厚层至块状白云岩为代表。

1.4 区域水文地质条件

调查区位于北盘江与南盘江两大水系之间靠北

盘江一侧。区内及周边主要发育的地表水体有:调查区东侧木耳洞暗河水体经庆坪河汇入自北向南流向的大田河,大田河在庶连海子处以伏流形式进入地下,并最终汇入北盘江;北盘江位于调查区以东约 20 km,为自北向南流向;者楼河位于调查区以南约 10 km,为自西向东流向(图 3)。

受新构造的强烈抬升和河流快速下切的影响,水循环交替强烈,形成了较为发育的地下岩溶水系统和岩溶洞穴系统,存在多个明流与伏流组成的水文地质单元体。地下水主要为两种类型:可溶岩地区的岩溶地下水,是流域内地下水的主要部分,其次是碎屑岩分布区的基岩裂隙水。

2 调查分析论证

2.1 基本资料收集

2.1.1 污染物特征及周边环境条件

从水中的附着物看,木耳洞岩洞底部岩石明显发黑,并混杂有畜禽粪便的臭味。木耳洞污染物排放时间相对较长,重污染持续时间约 10 d,之后污染程度逐渐减轻,说明其污染物排放量大。初步调查,木耳洞河上游周边住户分散且居民较少,居民粪便等污水主要采用化粪池进行贮存后用于浇地灌溉处理,也未见大型工矿企业或学校等,周边不存在短期、大量人体粪便等污水集中式排放的条件,因此可排

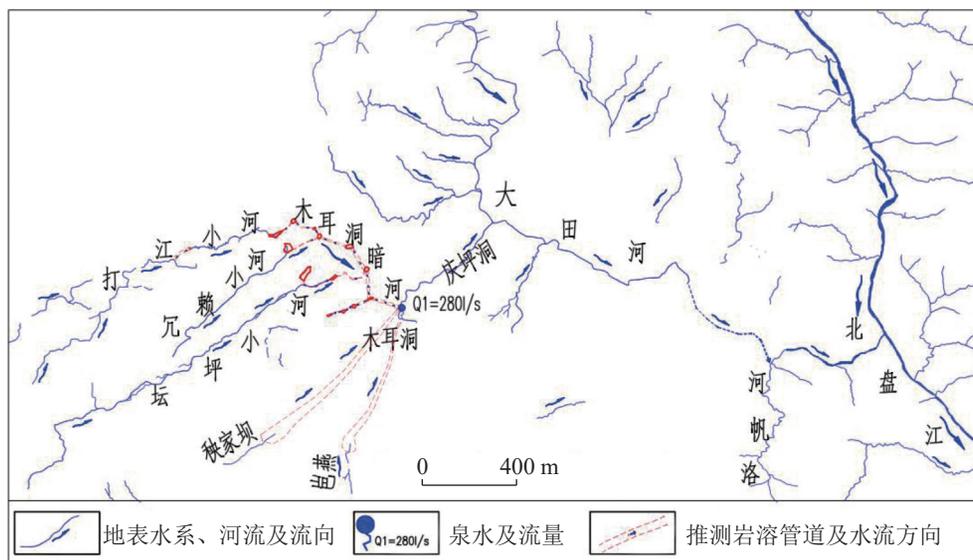


图 3 调查区水系分布图

Fig. 3 Distribution of the river system in the study area

除农村人体粪便等生活污水外排污染地下河的可能。

另据调查,木耳洞暗河周边规模以上的养殖场较多,养殖类型主要为生猪及羊,这些养殖场多使用水泡粪的处理方式,产生大量的畜禽废水。调查区属岩溶发育区,土层较薄,土壤消纳能力差,存在地下水被污的可能。初步推测,木耳洞水体污染源为周边养殖场畜禽粪便处理不当,经区内地下水携带至木耳洞暗河出口所致。但与岩溶暗河水体污染存在关联的养殖场一时难以确定,需进行详细调查。

2.1.2 微生物指标判别

大肠菌群是最为常用的水质粪便污染指示菌,粪大肠菌群为耐热大肠菌群,只在温血生物粪便中存在,在自然环境中一般为休眠状态,是最常用的粪便污染指示菌,粪大肠菌的存在代表水样确定被粪便污染,含量越高污染程度越重^[17-19]。

根据木耳洞—庆坪河水质监测数据,河道内未受污染前大肠杆菌监测范围值为70~100个·L⁻¹,污染后,木耳洞Q1泉点监测值为5500个·L⁻¹,木耳洞Q2泉点监测值为4900个·L⁻¹。根据《地表水环境质量标准》,II类水检出限为20个·L⁻¹,标准限值为2000个·L⁻¹,其含量超出标准限值,并超出未受污染前正常范围值50倍。因此,可以确定粪便污染是木耳洞河的主要来源。

2.2 岩溶水文地质调查

2.2.1 调查范围

根据区内地表及地下水径流特征,区域可划分为4个水文地质单元(图4),即木耳洞—庆坪河地下水单元(I单元),为碳酸盐岩发育区,地表高程750~1530 m,汇水面积约270 km²,地表沿岩溶槽谷主要有打江明流、冗赖明流及坛坪明流,地表径流主要通过岩溶洼地、落水洞进入地下伏流段后在木耳洞(H=750 m)排出;安龙—招堤地下水单元(II单元),为碳酸盐岩发育区,地表高程430~1740 m,汇水面积约200 km²,地表沿岩溶槽谷主要有青龙槽谷明流,地表径流主要通过岩溶洼地、落水洞进入地下伏流段后最终以岩溶泉的形式在单元区南侧(H=430 m)排出;四方洞地下水单元(III单元),为碳酸盐岩发育区,地表高程900~1550 m,汇水面积约260 km²,地

表较大的水体主要为坝子河,地表径流主要通过岩溶洼地、落水洞进入地下伏流段后以岩溶泉的形式在单元区内东侧四方洞暗河(H=900 m)排出;大田河地下水单元(IV单元),为碎屑岩分布区,地表高程600~1300 m,汇水面积约100 km²,区内地表水和地下水最终均汇入大田河(H=600 m)。在四个水文地质单元中,对庆坪河木耳洞地下水污染构成影响的主要为木耳洞—庆坪河地下水单元(I单元)。

木耳洞—庆坪河地下水单元(I单元)以木耳洞为界限,可细分为东西两区。其中东区为碎屑岩分布区,为非可溶性岩区,据其水文地质特征分析,其不能造成本次岩溶暗河污染,因此该区域不在调查范围内。故本次调查范围缩小为木耳洞西侧区域的碳酸盐岩分布区。

2.2.2 岩溶水文地质调查

(1)区域水文特征 调查区属北盘江支流大田河水系,槽谷内发育地表明流,洼地内发育落水洞。调查区西部为可溶岩分布区(图2),自北向南依次发育打江、冗赖、坛坪三条槽谷,打江小河、冗赖小河及坛坪小河自西南向东北向明流,后伏入洼地落水洞后,于东南侧6 km处的木耳洞暗河(H=750 m)流出后流入大田河,并最终汇入北盘江。秧家坝、岂燕等大型岩溶洼地内未见明流出露,但洼地底部均发育落水洞,推测通过深部岩溶管道连通木耳洞(H=750 m)。木耳洞暗河是调查区内地下水最低排泄基准面。北盘江为区域地下水一级排泄基准面。

(2)地表明流 区内除了木耳洞—庆坪河外,在北侧槽谷内还分布着打江小河、冗赖小河及坛坪小河(图3),三条小河自西南向东北径流过程自落水洞伏入地下。

为了解木耳洞暗河与打江(冗赖)槽谷、坛坪槽谷地表水系连通关系,采用在槽谷落水洞入口明流投入指示剂NaCl测试木耳洞暗河各泉点电导率的方法进行水系连通性试验(图5),测试结果如表1,5 h后木耳洞范围的Q4、Q5、Q6泉点电导率最高值较初始值增加35~45倍,而其他泉点电导率变化不大。试验结果表明,打江(冗赖)槽谷、坛坪槽谷地表明流伏入地下后,通过深部岩溶管道后在木耳洞地质相变带附近的Q4、Q5、Q6泉点排出,说明打江(冗赖)槽谷、坛坪槽谷地表水系伏与Q4、Q5、Q6泉点是连通的。同时,泉点Q1、Q2及溶洞K35电导

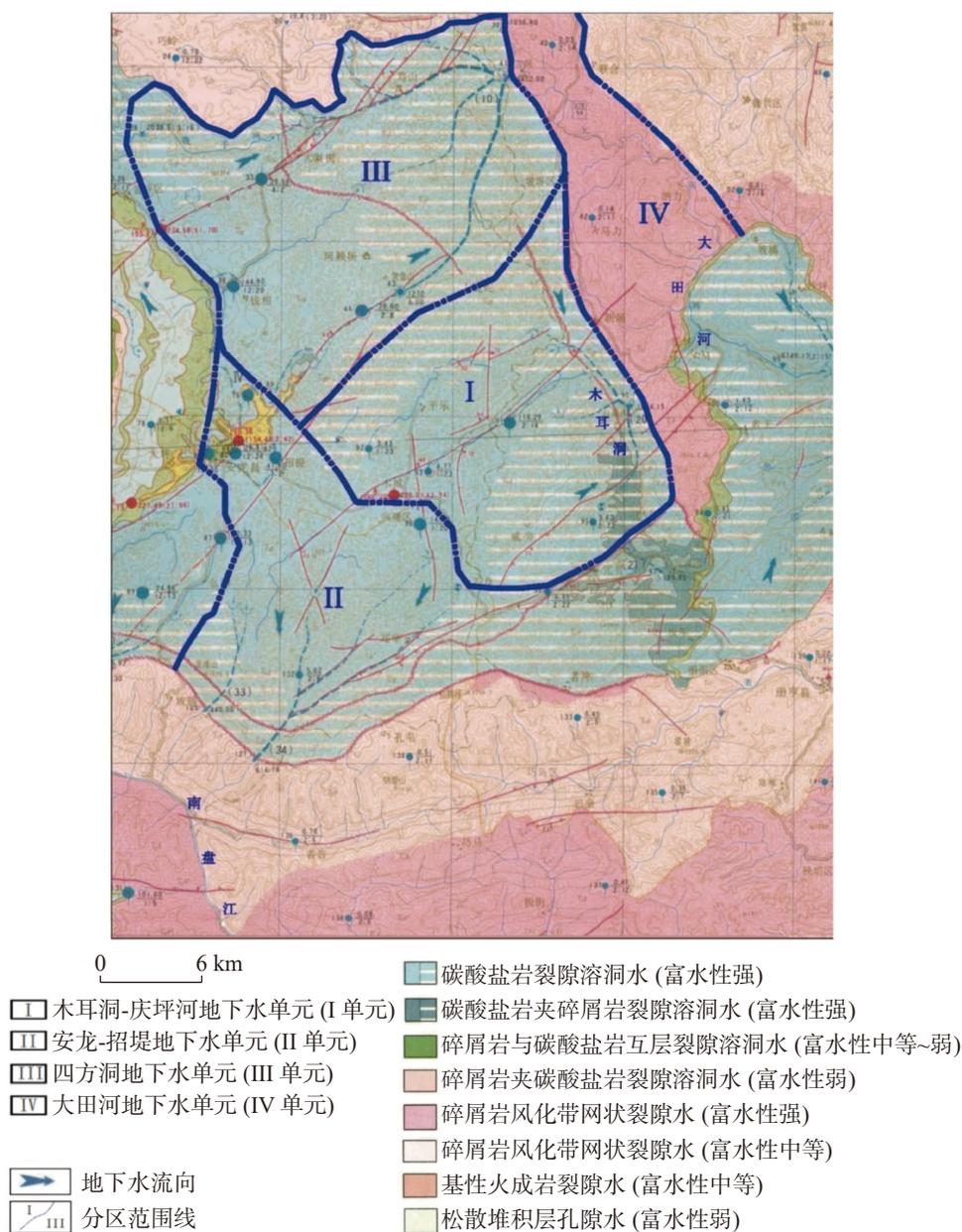


图 4 调查区水文地质单元划分图

Fig. 4 Division of hydrogeological unit in the study area

率 $> 1500 \mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 较正常值明显偏高, 表明水体中离子浓度较高, 三处泉水是受到污染的。

(3) 岩溶及水文地质岩组划分 工程区岩溶与水文地质岩组划分见表 2。根据划分结果, 调查区主要以三叠系关岭组 (T_2g) 厚层块状白云岩等强透水性的富水岩组为主, 局部分布三叠系下统安顺组 (T_1a) 薄层泥质白云岩、黏土岩等中等—强透水岩组。

(4) 地下水类型及水动力特征 区内地下水的根据储水介质特征可分为岩溶管道水、溶隙水、裂隙水、孔隙水等四种形式。木耳洞河西侧主要为强—中等可溶岩地层, 地下水补给源主要为分水岭范围

内的大气降水入渗补给。

受区域地形及北东向构造的影响, 区内发育以北东向为主的构造裂隙、溶隙及岩溶管道系统。在小区域地表分水岭以内, 受地形影响, 地下水自西向东渗流, 在木耳洞河附近受渗流条件改变影响, 地下水以岩溶暗河形式出露地表, 形成木耳洞岩溶暗河。

(5) 岩溶类型及发育特征 调查区岩溶形态主要有岩溶海子、岩溶槽谷、岩溶洼地、落水洞、溶洞、岩溶泉等(表 3, 表 4, 图 6)。其中岩溶洼地 34 处, 分布高程 838~1485 m, 主要为槽状、漏斗状, 发育地层主要为关岭组 (T_2g), 洼地长轴方向以 NE 向为主, 注



图 5 K2 落水洞 NaCl 连通试验

Fig. 5 NaCl connection test of the K2 sinkhole

地面积 15 000~540 000 m², 极少量洼地可见明流分布其中。落水洞 38 处, 洞底高程范围 838~1 485 m,

主要为槽状、叠状, 发育地层主要为关岭组(T_{2g}), 洞内主要呈干涸状。从地层岩性方面分析, 岩溶主要在关岭组(T_{2g})灰岩等强岩溶地层中发育。

2.2.3 污染源地表排查

根据木耳洞暗河补给区各岩溶槽谷及洼地发育的地形特征, 可将排查区分为 4 个子系统(图 7)。选取高锰酸盐指数、化学需氧量、氨氮、总磷和粪大肠菌群等作为代表性的水质污染因子来作评价分析。

2.2.3.1 打江岩溶水系统

(1) 明流段主要由两部分组成 北侧明流长约 6 km, 汇水面积约 7 km², 穿越打江槽谷在南马石岩溶洼地附近进入伏流; 南侧明流长约 6 km, 汇水面积约 11 km², 穿越冗赖槽谷在冗赖海子下游岩溶洼地

表 1 调查区连通试验测试结果表

Table 1 Results of connectivity tests in the study area

| 序号 | 投放及监测点位 | 高程/ m | 监测指标 | | | | | | | |
|----|------------------|----------|-------|-----|-------|------|-------------------------|-------|--------|-------|
| | | | pH | | 温度/°C | | 电导率/μs·cm ⁻¹ | | | |
| | | | 初始均值 | 最高值 | 初始均值 | 最高值 | 初始均值 | 最高值 | 变化率/% | |
| 1 | 坛坪槽谷落水洞 | K2 | 1 067 | 7.9 | 8.0 | 19.4 | 19.5 | 410 | — | — |
| 2 | 投放点 坛坪槽谷-冗赖海子落水洞 | K7 | 1 057 | 8.0 | 8.0 | 19.2 | 19.3 | 485 | — | — |
| 3 | 打江槽谷落水洞 | K19 | 990 | 7.9 | 7.9 | 19.5 | 20.5 | 464 | — | — |
| 4 | | Q1 | 754 | 8.5 | 8.8 | 18.4 | 18.5 | 1 810 | 1 825 | 0.1 |
| 5 | | Q2 | 754.3 | 8.6 | 8.8 | 18.0 | 18.1 | 1 795 | 1 805 | 0.05 |
| 6 | | Q3 | 754 | 7.9 | 8.0 | 18.1 | 18.2 | 650 | 665 | 2.3 |
| 7 | | Q4 | 750 | 7.8 | 7.9 | 18.2 | 18.3 | 424 | 15 500 | 3 556 |
| 8 | 监测点 木耳洞河泉点 | Q5 | 750.5 | 7.5 | 7.6 | 18.1 | 18.3 | 501 | 22 400 | 4 371 |
| 9 | | Q6 | 750 | 7.5 | 7.7 | 18.3 | 18.4 | 458 | 18 600 | 3 961 |
| 10 | | K35 | 770 | 9.0 | 9.1 | 17.5 | 17.6 | 2 050 | 2 080 | 1.5 |
| 11 | | K36 | 754 | 8.4 | 8.9 | 17.8 | 17.9 | 650 | 680 | 4.6 |

表 2 岩溶含水岩组划分表

Table 2 Classification of karst water-bearing rock groups

| 类别 | 岩溶层组 | | 岩溶特征 | 水文地质岩组 | | 平面分布范围 |
|----------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------|------------|-----------------|
| | 地层 | 岩性 | | 地下水类型 | 透水性划分 | |
| 弱岩溶含水岩组 | 三叠系上统把南组(T _{2b}) | 黏土岩、粉砂岩夹薄至中厚层灰岩及泥灰岩 | 埋藏深度较浅、水动力条件弱, 少量溶蚀裂隙发育 | 含风化带网状裂隙水 | 以弱透水层为主 | 木耳洞河以东 |
| 中等岩溶含水岩组 | 三叠系下统安顺组(T _{1a}) | 薄层泥质白云岩、杂色黏土岩, 粉砂岩互层 | 埋藏深度深、水动力条件中等—强, 溶蚀裂隙、溶洞发育、少量管道发育 | 裂隙水+溶隙水+少量岩溶管道水 | 以中等—强透水层为主 | 岷燕洼地 |
| 强岩溶含水岩组 | 三叠系中统关岭组(T _{2g}) | 厚层至块状白云岩、角砾状白云岩夹泥质白云岩 | 埋藏深度深、水动力条件强, 溶蚀裂隙、溶洞、管道、暗河发育 | 裂隙水+溶隙水+岩溶管道水+暗河 | 以强透水层为主 | 打江、坛坪河、秧家坝槽谷/洼地 |

表 3 岩溶洼地统计表
Table 3 Statistics of karst depressions

| 编号 | 高程/m | 地层 | 形状 | 尺寸/m×m | 长轴方向 | 水文特征 |
|-----|-------|-----------------|-----|---------|-------|------|
| W1 | 1 067 | T _{2g} | 槽状 | 645×180 | N67°E | 明流分布 |
| W2 | 1 055 | T _{2g} | 漏斗状 | 215×185 | N61°E | |
| W4 | 975 | T _{2p} | 漏斗状 | 240×140 | N20°E | 明流分布 |
| W5 | 1 063 | T _{2g} | 碟状 | 415×385 | N37°W | |
| W7 | 888 | T _{2l} | 漏斗状 | 230×200 | N68°E | 明流分布 |
| W8 | 1 057 | T _{2g} | 槽状 | 675×200 | N36°E | |
| W9 | 997 | T _{2p} | 槽状 | 350×100 | N62°E | 明流分布 |
| W10 | 880 | T _{2p} | 槽状 | 270×80 | N65°E | |
| W16 | 1 235 | T _{2g} | 碟状 | 340×320 | N32°E | |

表 4 落水洞及溶洞统计表
Table 4 Statistics of sinkholes and karst caves

| 编号 | 高程/m | 地层 | 备注 | 水文特征 |
|-----|-------|-----------------|------|------|
| K6 | 1 063 | T _{2g} | 落水洞 | 明流分布 |
| K14 | 1 244 | T _{2g} | 落水洞 | |
| K15 | 1 235 | T _{2g} | 落水洞 | |
| K24 | 880 | T _{2p} | 落水洞 | |
| K25 | 1 485 | T _{1a} | 落水洞 | |
| K35 | 1 025 | T _{2l} | 地表溶洞 | |
| K36 | 1 050 | T _{2g} | 地表溶洞 | |
| K37 | 1 050 | T _{2g} | 地表溶洞 | |
| K38 | 1 075 | T _{1a} | 地表溶洞 | |



图 6 天窗型溶洞 K36
Fig. 6 Photo of skylight cave K36

进入伏流。现场调查未发现明流段有养殖场, 水流清澈, 作为村民饮用水源。仅在村寨集中处偶见生活污水、农家禽类粪便, 体量极小, 未见明显水源污染现象。

在该区明流段内选取 2 个水样点(表 5), 水样分析结果可满足 III 类水质标准, 表明补给径流区明流段水质情况较好。

(2) 该水系统明流分别在北侧的南马石、朱砂洞

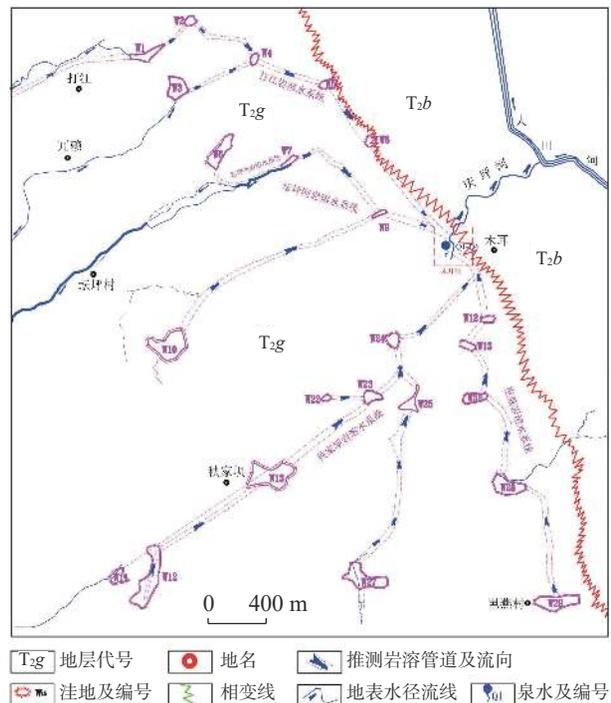


图 7 木耳洞—庆坪河 1/1 万岩溶水文分布图
Fig. 7 Karst hydrologic distribution of Muer cave-Qingping river

一带岩溶洼地(W1=1 067 m, W2=1 055 m)及南侧的冗赖海子岩溶洼地(W5=1 062.5 m)处进入伏流。伏流经田家湾洼地(W4=975 m)、小铜子洼地(W7=888.8 m)等串珠状洼地下部的岩溶管道系统,从木耳洞(H=750 m)一带以岩溶泉形式进行排泄。调查表明,伏流段上部的岩溶洼地、落水洞分布区内未见养殖场,洼地内未见污染物排放现象。

(3)伏流入口与木耳洞出口水质对比分析表明(表 5),伏流段水质能达到Ⅲ类水质要求,区内地表水进入地下后,通过岩溶水生态系统的自净功能后,水质得到一定净化。打江岩溶水系统地下水环境未受到养殖废水污染。

2.2.3.2 坛坪河岩溶水系统

(1)该水系统明流段主要为两部分:北侧明流长约 10 km,汇水面积约 20 km²,穿越坛坪槽谷,在海田岩溶洼地附近进入伏流;南侧明流长约 1.5 km,汇水面积约 3 km²,穿越石棚槽谷在下游马家洞附近的岩溶洼地进入伏流。

调查发现,该水系统的明流段区域内共有 3 个废弃养猪场,调查时未见养殖区污水任意排放,两条

明流水质清澈。区域明流段内有 2 个水样点,采样分析各监测点水质满足Ⅲ类水质标准。表明该补给径流区明流段水质情况均较好。

(2)该水系统明流分别在北侧的海田一带岩溶洼地(W8=1 056.8 m)及南侧的马家洞岩溶洼地(H=1 102.5 m)进入伏流。伏流经破屋洼地(W9=996.9 m)、邱家营洼地(W10=880 m)等串珠状洼地下部的岩溶管道系统,从木耳洞(H=750 m)一带以岩溶泉形式进行排泄。

调查发现,北侧伏流段分布有三处洼地,未见养殖场。南侧伏流段主要分布有石棚洼地、马家洞落水洞、禾麻冲洼地等,未见大型养殖场。未发现大规模养殖场污染物向岩溶管道排放。

(3)伏流入口与木耳洞出口水质对比分析表明,区内伏流段水质能达到Ⅲ类水质要求(表 5),地表水进入岩溶系统后,水质得到一定的净化。坛坪河岩溶水系统地下水环境未受到养殖废水污染。

2.2.3.3 秧家坝岩溶水系统

(1)该水系统明流段至达南一带逐渐渗入地下,在明流和伏流交界处有一家养猪场,养猪规模

表 5 庆坪河木耳洞地下水监测点监测数据统计表

Table 5 Statistics of monitoring data on groundwater at the monitoring point in Muer cave of the Qingping river

| 序号 | 监测项目 | 高锰酸盐 指数/mg·L ⁻¹ | 化学需氧 量/mg·L ⁻¹ | 氨氮 /mg·L ⁻¹ | 总磷 /mg·L ⁻¹ | 亚硝酸盐 /mg·L ⁻¹ | 细菌总数 /CUF·mL ⁻¹ | 粪大肠菌 群/个·L ⁻¹ | 备注 | |
|----|-------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------|--|
| 1 | 检出限 | 0.5 | 4 | 0.25 | 0.01 | | | 20 | | |
| 2 | 标注限值 | 6 | 20 | 1 | 0.2 | 0.013 | 1 000 | 2 000 | | |
| 3 | 庆坪河监 控断面 | 2019.1 | 1.1 | 4 | 0.20 | 0.01 | | 70 | | |
| 4 | | 2019.4 | 0.8 | ND | 0.16 | 0.01 | ND | 110 | | |
| 5 | | 2019.7 | 1.5 | ND | 0.1 | 0.06 | ND | 100 | | |
| 6 | Q1 | 2019.11 | 14.88 | 51 | 4.35 | 0.206 | 0.026 | 1.2×10 ⁶ | 5 500 | |
| 7 | | 2019.12 | 5.29 | 16 | 4.05 | 0.292 | | | 1 500 | |
| 8 | Q2 | 2019.11 | 15.65 | 57 | 6.45 | 1.192 | 0.013 | 1.1×10 ⁵ | 4 900 | 参照《地表水环 境质量标准》 (GB3838-2002) Ⅲ类;粪大肠菌群 参照Ⅱ类标准限 值进行评价 |
| 9 | | 2019.12 | 5.65 | 23 | 6.60 | 0.47 | | | 1 800 | |
| 10 | Q3 | 2019.11 | 1.18 | 5 | ND | ND | ND | 650 | 60 | |
| 11 | Q4 | 2019.11 | 1.17 | 7 | ND | ND | ND | 590 | 50 | |
| 12 | Q5 | 2019.11 | 1.23 | 6 | ND | ND | ND | 420 | 60 | |
| 13 | Q6 | 2019.11 | 0.72 | 1 | ND | 0.012 | ND | 460 | 80 | |
| 14 | 打江岩溶 水系统 | D1 2019.12 | 1.21 | 2 | 0.03 | 0.011 | | | 1 700 | |
| 15 | | D2 2019.12 | 4.11 | 13 | 0.17 | ND | | | 170 | |
| 16 | | D3 2019.12 | 1.4 | 2 | ND | 0.016 | | | 1 100 | |
| 17 | 坛坪河岩溶水系统 | T1 2019.12 | 1.42 | 2 | 0.18 | ND | | | 800 | |
| 18 | | T2 2019.12 | 1.58 | 3 | 0.09 | 0.012 | | | 2 200 | |
| 19 | 秧家坝岩溶水系统 | Y1 2019.12 | 5.71 | 10 | 5.60 | 0.63 | | | 26 000 | |

4 000 头。该区监测点 Y1 采样表明,养猪场外排废水粪大肠菌群为 $26\ 000\ \text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,表明粪大肠菌群严重超标,且化学需氧量、氨氮等多项指标与岩溶泉(Q1、Q2)相关性较强。地表未见大范围明流,但存在多个竖向落水洞。

(2)伏流段上部岩溶洼地、落水洞分布区养殖污染物排放情况:该槽谷地表明流经冗约洼地(W16=1 235 m)、秧家坝洼地(K18=1 021.5 m, K36=1 050 m)等串珠状洼地下部岩溶管道系统连成一体,地下水在联合村 K35(H=780 m)一带与岜燕岩溶水系统汇合后,沿相变带折向西南方向,并在木耳洞河一带以岩溶泉(Q1、Q2)形式出露。

该水系统伏流段上部岩溶强发育,岩溶洼地、落水洞等分布广。其中,养猪场沟渠边分布见 K14、K15 等落水洞,可作为畜禽废水外排通道。根据物探测试剖面图 8,该洼地下方存在一处相对高阻异常,高程在 1 120 m 附近,视电阻率值大于 $6\ 000\ \Omega\cdot\text{m}$,解释为空腔溶洞,表明下部存在岩溶管道。

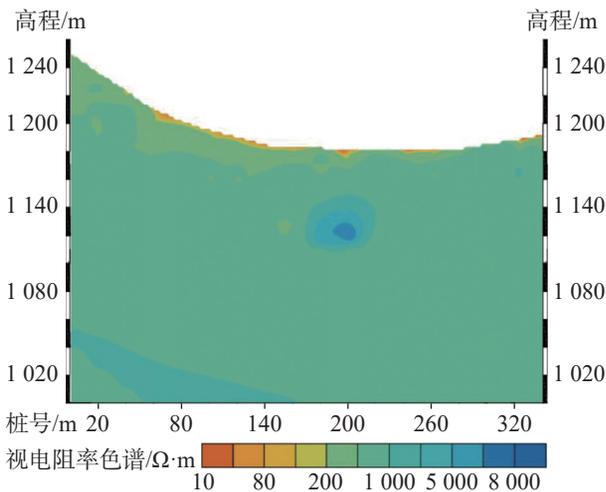


图 8 WT1-WT1'测线色谱图

Fig. 8 Chromatogram of WT1-WT1' line

综上,该水系统的伏流段上部岩溶洼地等存在大规模养殖场的污染源,对于该洼地如此大规模养殖产生的污染源,在处理不及时或暴雨浸漫后,存在向地表至岩溶管道溢流的可能,并污染地下水。

2.2.3.4 岜燕岩溶水系统

(1)明流段周边及水污染情况 该水系统地下岩溶管道强发育。地表水多通过岩溶裂隙、溶洞等伏入地下伏流。调查期为枯期,未见地表明流出露,溪沟多呈干涸状,故不作明流段的水污染评价。

(2)伏流段上部岩溶洼地、落水洞、竖向型溶洞分布区养殖场污染物排放情况 该水系统主要以伏流形式存在,地表水体伏入地下后,经岜燕寨洼地(K26=1 143.1 m)等串珠状洼地下部岩溶管道系统连成一体,地下水在联合村 K35(H=780 m)一带与冗约、秧家坝岩溶水系统汇合后,沿相变带折向西南方向,并在木耳洞河一带以岩溶泉(Q1、Q2)形式出露。经调查,该洼地分布有两家废弃多年的养殖场,不产生动物粪便,因此对地下水污染影响较小。

2.3 污染源论证分析

调查区内北东向构造作用控制了区内岩溶发育的方向及空间位置。受新构造的强烈抬升和河流快速下切的影响,水循环交替强烈,在厚层状碳酸盐岩体内形成了较为发育的地下岩溶水系统和岩溶洞穴系统,存在多个明流与伏流组成的水文地质单元体,客观上为地表污染物渗入地下岩溶水系统创造了便利条件。

木耳洞暗河出口所包含的六处泉点及两处溶洞,平面分布较为集中,但水质污染情况各异,表明其分属于不同的地下岩溶水系统,暗河补给来源丰富,范围广。木耳洞河东区为非可溶岩分布区,西侧为厚层强透水的可溶性碳酸盐岩分布区,结合污染物排放特征为集中式、排放量大,说明其渗入地下后其排泄通道较为畅通,应为通过可溶性岩石内发育的岩溶管道等大断面通道排泄,而不是非可溶性岩体内的基岩裂隙等微小通道排泄,因此污染源应分布在木耳洞河以西的可溶性碳酸盐分布区范围内。

木耳洞河上游周边住户分散且居民较少,居民粪便等污水主要采用化粪池进行贮存后用于浇灌,未见大型工矿企业或学校等,周边不存在短期、大量人体粪便等污水集中式排放的条件,因此可排除农村人体粪便等生活污水外排污染地下河的可能。从污染物现场调查、水质监测及微生物指标分析,污染物应为动物畜禽粪便。

示踪剂连通试验和地表排查排除了污染源位于打江(冗赖)槽谷、坛坪槽谷等范围。秧家坝岩溶洼地等地形高程大,区域为厚层富水性岩体,在地形高差、断层构造控制作用下地下水沿着岩溶洞穴、岩溶管道系统自西向东渗流汇集至木耳洞暗河出口处排泄。物探结果也显示该洼地下部存在深部发育的

岩溶管道系统。同时结合秧家坝岩溶洼地水样及木耳洞泉点水样微生物指标特征,畜禽粪便排放来源指向该大型岩溶洼地内的一家养猪场,经现场调查,该养猪场内存在多处落水洞,可作为猪粪废水外排通道。

综上所述,木耳洞暗河污染物来源应为秧家坝岩溶洼地内某养猪场猪粪废水外排所致,且是集中式、间断性通过落水洞、竖向型溶洞进入地下岩溶管道,并最终于区内地下水最低排泄基准面的木耳洞暗河出口排泄并造成水体污染。

3 结论及建议

(1)木耳洞位于可溶岩与非可溶岩的地质相变带附近,西侧为强透水性的碳酸盐岩,东侧为弱透水性的碎屑岩,受地形及渗流条件的突变影响,区域地下水在最低排泄基准面附近的木耳洞以岩溶暗河形式排泄于地表。

(2)受新构造运动的强烈抬升和河流快速下切的影响,区内形成了发达的地下岩溶水系统和岩溶洞穴系统,存在多个明流与伏流组成的复杂水文地质单元体,客观上为地表污染物渗入地下岩溶水系统导致暗河污染创造了条件。

(3)木耳洞暗河出口含六处泉点,两处溶洞,分布位置集中,但其水质污染情况各异,表明其分属于不同的地下岩溶水系统,也从侧面说明了木耳洞暗河补给来源范围广,区域岩溶地下水系统极为复杂,暗河生态环境脆弱。

(4)结合水文地质条件、水体污染指标分析等多种手段,证明木耳洞暗河污染物来源为秧家坝岩溶洼地内某养猪场养殖废水,且是集中式、间断性通过落水洞等进入地下岩溶管道,并最终于木耳洞暗河口排泄。建议后期应重点加强对该养猪场的监督管理。

(5)在经济欠发达的岩溶地区,岩溶泉水保护与治理具有相应难度。按照控制、回用、减少污染物排放,加强水源地保护,改良环境的思路^[20-21],木耳洞岩溶暗河补给区应当控制发展大型养殖业及大中型集镇建设,养殖业畜禽废水及居民生活污水应当加强回收利用,减少污染物外排。同时建议加强区内水源地建设与保护工作,增加新的稳定可靠的饮用水源。

参考文献

- [1] 袁道先. 论岩溶环境系统[J]. 中国岩溶, 1988, 7(3): 179-186.
YUAN Daoxian. On the karst environmental system[J]. *Carso-logica Sinica*, 1988, 7(3): 179-186.
- [2] 梁永平, 韩行瑞. 中国北方岩溶地下水环境问题与保护[M]. 北京: 地质出版社.
LIANG Yongping, HAN Xingrui. Environmental problems and protection of karst groundwater in Northern China[M]. Beijing: Geological Press.
- [3] 林永生, 裴建国. 广西马山地下河系统地下水质量及污染特征分析[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2015, 33(2): 127-133.
LIN Yongsheng, PEI Jianguo. Groundwater quality and characteristics of karst groundwater pollution in the Mashan subterranean River, Guangxi, China[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2015, 33(2): 127-133.
- [4] 高旭波, 王万洲, 侯保俊, 高列波, 张建友, 张松涛, 李成城, 姜春芳. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 287-298.
GAO Xubo, WANG Wanzhou, HOU Baojun, GAO Liebo, ZHANG Jianyou, ZHANG Songtao, LI Chengcheng, JIANG Chunfang. Analysis of karst groundwater pollution in Northern China[J]. *Carso-logica Sinica*, 2020, 39(3): 287-298.
- [5] 孙斌, 邢立亭, 李常锁. 趵突泉泉域岩溶水典型污染组分变化特征及污染途径[J]. 中国岩溶, 2018, 37(6): 810-818.
SUN Bin, XING Liting, LI Changsuo. Variation of typical pollution components and pollution way of karst water in Baotu Spring region[J]. *Carso-logica Sinica*, 2018, 37(6): 810-818.
- [6] 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.
- [7] 廖昱, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 张远瞩. 甯醇对南山老龙洞地下河粪便污染的指示[J]. 环境科学, 2016, 37(8): 3034-3040.
LIAO Yu, SUN Yuchuan, WANG Zunbo, LIANG Zuobing, ZHANG Yuanzhu. Fecal contamination in Laolongdong underground river as measured by the sterol biomarkers[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8): 3034-3040.
- [8] 曾莘茹, 姜光辉, 郭芳, 汤庆佳, 刘凡. 桂林甯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.
ZENG Xinru, JIANG Guanghui, GUO Fang, TANG Qingjia, LIU Fan. Tracer tests for pollutant sources of the Zengpiyan remainder cave in Guilin, China[J]. *Carso-logica Sinica*, 2016, 35(3): 245-253.
- [9] 段逸凡, 贺秋芳, 刘子琦, 张远瞩, 张弘, 赵瑞一. 岩溶区地下水微生物污染特征及来源: 以重庆南山老龙洞流域为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(4): 504-511.
DUAN Yifan, HE Qiufang, LIU Ziqi, ZHANG Yuanzhu, ZHANG Hong, ZHAO Ruiyi. Characteristics and source of microbial contamination of groundwater in Laolongdong

- basin[J]. *Carsologica Sinica*, 2014, 33(4): 504-511.
- [10] 张恒. 黔西南煤区岩溶地下河污染调查方法探析[J]. *地下水*, 2016, 38(4): 93-95.
ZHANG Heng. Pollution sources survey in karst underground river in coal-producing regions southwest of Guizhou[J]. *Ground Water*, 2016, 38(4): 93-95.
- [11] 徐昕, 孙玉川, Md.Jahangir Alam. 重庆老龙洞地下河流域水体有机氯农药污染及来源初步研究[J]. *中国岩溶*, 2013, 32(2): 189-194.
XU Xin, SUN Yuchuan, Md.Jahangir Alam. Preliminary study on OCPs in water body of the Laolongdong underground river basin in Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2013, 32(2): 189-194.
- [12] 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.
MEI Zhengxing. An outline of the underground water tracing in karst regions of china[J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(4): 371-377.
- [13] 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.
ZHANG Zhenwu. Types of conduit flow field of karstic groundwater versus tracer curves and their practical application[J]. *Carsologica Sinica*, 1990, 9(3): 211-219.
- [14] 李扬, 杨桢, 康凤新, 刘金勇, 孙彦伟, 黄静波. 东阿水文地质单元地下水硝酸盐污染来源的同位素分析[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 19-27.
LI Yang, YANG Zhen, KANG Fengxin, LIU Jinyong, SUN Yanwei, HUANG Jingbo. Isotope analysis on the source of nitrate contamination to groundwater in the Dong'e hydrogeologic unit[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 19-27.
- [15] Smart C C. Artificial tracer techniques for the determination of the structure of conduit aquifers[J]. *Groundwater*, 1988, 26(4): 445-453.
- [16] 曹卫峰. 贵州岩溶大泉和地下河水资源[J]. *贵州地质*, 2021, 16(66): 37-43.
CAO Weifeng. Water resources involving karst large spring and underground river in Guizhou Province[J]. *Guizhou Geology*, 2021, 16(66): 37-43.
- [17] 王开然, 姜光辉, 郭芳, 周文亮, 陈国富, 梁毅. 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.
WANG Kairan, JIANG Guanghui, GUO Fang, ZHOU Wenliang, CHEN Guofu, LIANG Yi. Karst groundwater tracer test and analysis of peak forest plain area in eastern Guilin[J]. *Geoscience*, 2013, 27(2): 454-459.
- [18] 樊连杰, 裴建国, 邹胜章, 杜毓超, 卢丽. 重庆市南川区南部岩溶地下水水文地球化学特征[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(5): 697-703.
FAN Lianjie, PEI Jianguo, ZOU Shengzhang, DU Yuchao, LU Li. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in southern Nanchuan district, Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(5): 697-703.
- [19] 李义连, 王焰新, 刘剑, 罗朝晖. 娘子关泉域岩溶地下水 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 污染分析[J]. *地质科技情报*, 1998, 17(2): 111-114.
LI Yilian, WANG Yanxin, LIU Jian, LUO Chaohui. Pollution analysis of SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} in karst water in Niangziguan spring area[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1998, 17(Suppl.2): 111-114.
- [20] 彭淑惠, 王宇, 黄成, 李芹, 王裕琴. 昆明大板桥岩溶地下水系统污染边界及其防污性能研究[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(4): 362-368.
PENG Shuhui, WANG Yu, HUANG Cheng, LI Qin, WANG Yuqin. A study on the pollution boundary of karst groundwater system and its antifouling performance in Dabanqiao, Kunming[J]. *Carsologica Sinica*, 2015, 34(4): 362-368.
- [21] 时坚, 王晶, 刘德深, 韩行瑞. 山西岩溶泉域水污染现状、趋势与防治对策研究[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(3): 219-224.
SHI Jian, WANG Jing, LIU Deshen, HAN Xingrui. Study on the pollution status, trend and protection measure of Shanxi karst springs[J]. *Carsologica Sinica*, 2004, 23(3): 219-224.

Influence of hydrogeological conditions on the pollution of karst underground rivers

LIU Hao^{1,2}, TIAN Maozhong^{1,2}, CHEN Zaiqian^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Corporation Limited, Sinohydro Guiyang Survey and Design Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China;

2. PowerChina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract With an area of about $5 \times 10^5 \text{ km}^2$, the largest contiguous karst area in the world is distributed in Southwest China. Karst underground rivers are the most important karst landscapes in karst areas, and also important water sources for human production and life in karst areas of Southwest China. However, with the development of industry and agriculture, the intensification of human activities, and the openness and vulnerability of the karst aquifer system, karst groundwater is facing many threats such as water pollution, depletion of water resources and so on. The water body of a karst underground river in southwestern Guizhou Province was seriously polluted, which resulted in the pollution of the water body of Qingping river downstream. Muer cave, one section of the Qingping river, is a first-class protection area of drinking water source. There are about 30,000 people living in the surrounding towns, in which

water for drinking and irrigation is taken from the Muerdong underground river; therefore, the pollution of this river will greatly influence the people's life. This paper studies the influence of hydrogeological conditions of pollution in the karst underground river by means of basic data collection, analysis of karst hydrogeological conditions, microbial indicators and water pollution indexes.

The results show as follows: (1) Muer cave is located near the phase transition zone between karst and non-karst rocks, with highly permeable carbonate rocks in the west and weakly permeable clastic rocks in the east. Groundwater in this area is discharged to the surface in the form of karst underground river in Muer cave near the lowest discharge datum. (2) Because of the strong uplift of neotectonic movement and the rapid cut-off of rivers, the underground karst water system and karst cave system have been developed in this area, and there exist multiple complex hydrogeological units formed by surface flows and underground flows, which may create conditions for the pollution of underground river caused by surface pollutants penetrating into underground karst water system. (3) Six spring points and two karst caves are concentrated at the outlet of the Muerdong underground river, but their water quality is different, which indicates that they belong to different underground karst water systems. This also indicates that the range of recharge source of Muerdong underground river is wide, the regional karst groundwater system is very complex, and the ecological environment of the underground river is vulnerable. (4) The characteristics that pollutants are discharged in a concentrated way and in a large amount indicate that the discharge channel is relatively unblocked after the infiltration of pollutants into the underground. It is likely that pollutants are discharged through channels with large cross-sections such as karst pipelines developed in the soluble rock, instead of small channels like bedrock fractures in non-soluble rocks. Therefore, sources of pollution may be distributed in the area west of the Muludong river. Few households are scattered in the upper reaches of the Muerdong underground river, and the sewage such as residents' excreta is mainly stored in septic tanks and used for irrigation. Besides, given that no large industrial and mining enterprises or schools, etc. have been established, there exist no conditions that sewage such as human excrement is discharged in a concentrated way and in a large amount. Therefore, we can exclude the possible pollution caused by the discharge of human excrement and other sewage into the underground river. According to the field investigation, water quality monitoring and microbial index analysis, the pollutants may be the excrement of livestock. By tracer connectivity test and investigation of the surface, we can exclude the pollution sources from the areas of Dajiang (Ronglai) trough and Tanping trough. The Yangjiaba karst depression is characterized by high elevation and thick water-rich rock mass. Under the control of topographic height difference and fault structure, groundwater flows from west to east along the karst cave and karst pipeline system to the outlet of the Muerdong underground river. The geophysical prospecting results also show that there is a deep karst pipeline system in the lower part of Yangjiaba karst depression. At the same time, combined with microbial indicators of water samples from this depression and from Muerdong spring, the source of discharge of livestock was from a piggery in Yangjiaba karst depression. Several sinkholes located in this piggery become the channels of discharging sewage and pig excrement which are likely the source of pollutants in the Muerdong underground river.

In this study, some suggestions have been put forward. In the economically underdeveloped karst areas, the protection and treatment of karst spring water is relatively difficult under the background of economic and social development. In accordance with the principles of controlling, recycling, and reducing pollutant discharge, strengthening the protection of water sources and improving the environment, the development of large-scale aquaculture and the construction of large and medium-sized towns in the recharge area of the Muludong underground river should be controlled, sewage of livestock and domestic sewage should be recycled to reduce the discharge of pollutants. At the same time, it is suggested to strengthen the local construction and protection of water sources and increase new stable and reliable drinking water sources.

Key words Hydrogeological conditions, source of pollution of karst underground river, tracer test, protection of karst spring