

韩啸,陈鑫,郑克勋,等.示踪试验在岩溶大泉修复中的应用:以丽江黑龙潭为例[J].中国岩溶,2019,38(4):524-531.
DOI:10.11932/karst20190408

示踪试验在岩溶大泉修复中的应用 ——以丽江黑龙潭为例

韩啸^{1,2},陈鑫³,郑克勋^{1,2},刘胜^{1,2}

(1.中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵阳550081;2.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,贵阳550081;3.贵州省水利水电勘测设计研究院,贵阳550000)

摘要:为查明云南丽江黑龙潭泉域九子海洼地补给区地下水与周边泉水的连通关系,提供泉水修复的科学依据,采用人工化学示踪方法,选取碘化钾作为示踪剂,开展了一次大型地下水示踪试验。根据试验数据计算地下水渗流速度,并分析黑龙潭泉域地下水系统结构特征。结果表明:九子海洼地补给区地下水与黑龙潭泉群和古城泉群具有显著的连通关系,与清溪泉群和白浪花泉群不存在连通关系,九子海至黑龙潭和古城的地下水渗流速度分别为 $405.86\sim 1\,077.84\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $349.96\sim 629.09\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。九子海洼地为黑龙潭泉域地下水系统的主要补给区,同时也可作为黑龙潭泉水修复的有效注水点,接受补给后,主要通过深层岩溶管道向南运移至黑龙潭—古城方向,其中黑龙潭泉群为系统的排泄天窗。

关键词:示踪试验;黑龙潭;碘化钾;地下水系统

中图分类号:P641.2 **文献标识码:**A

文章编号:1001-4810(2019)04-0524-08 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

在岩溶发育地区,地下水常具有非均质性、敏感性、隐蔽性等特点^[1],常规水文地质勘察手段一般难以达到较好的效果。地下水示踪试验作为一种常用的岩溶水文地质勘察手段,能够直观有效地反映地下水运动状态^[2]。目前,地下水示踪试验在识别水库渗漏通道、地下水害防治、获取水文地质参数、查探岩溶地下水径流管道、验证隔水边界可靠性、查找地下水补给来源以及污染源等方面得到较为广泛的应用,但多为短距离示踪,示踪距离从数十米到数千米不等^[3-14]。对于数十千米级的长距离示踪,由于环境影响大、人力物力耗费大、示踪剂出峰不稳定等原因^[15-16],技术成熟度相对较低。

云南省丽江市黑龙潭泉群,作为丽江市人民的

主要生活和景观用水,在2012—2017年期间发生了持续性断流,为此丽江市启动了保泉工程项目,着手修复泉域地下水。本次研究以碘化钾作为示踪剂,在云南省丽江市东北部岩溶山区开展了示踪范围约 355 km^2 的大型地下水示踪试验,最大示踪距离为 17.70 km ,以查明九子海大型岩溶洼地补给区地下水与周边泉水的连通情况,验证地下水系统划分的合理性,以期为云南丽江黑龙潭泉水修复提供科学依据,也为岩溶地区地下水较长距离示踪试验提供借鉴。

1 研究区概况

研究区位于云南省丽江市古城区和玉龙县辖区内,范围形如指向西南方向的尖锥(图1),面积约为

第一作者简介:韩啸(1988—),男,工程师,研究方向为水文地质工程地质。E-mail:hanxiao1124@sina.com。

通信作者:郑克勋(1982—),男,高级工程师,研究方向为水文地质工程地质。E-mail:848545331@qq.com。

收稿日期:2019-04-30

574 km², 总体为高原山区地貌, 地势北高南低, 主要出露的地层有: 三叠系北衙组灰岩、白云质灰岩, 三叠系中窝组灰岩、泥灰岩, 三叠系松桂组砂泥岩、页

岩, 下第三系丽江组三、四段和第四系覆盖层。山体间局部分布较多岩溶洼地, 主要有九子海、腊日光、黄土坡、红水塘、吊水井等。

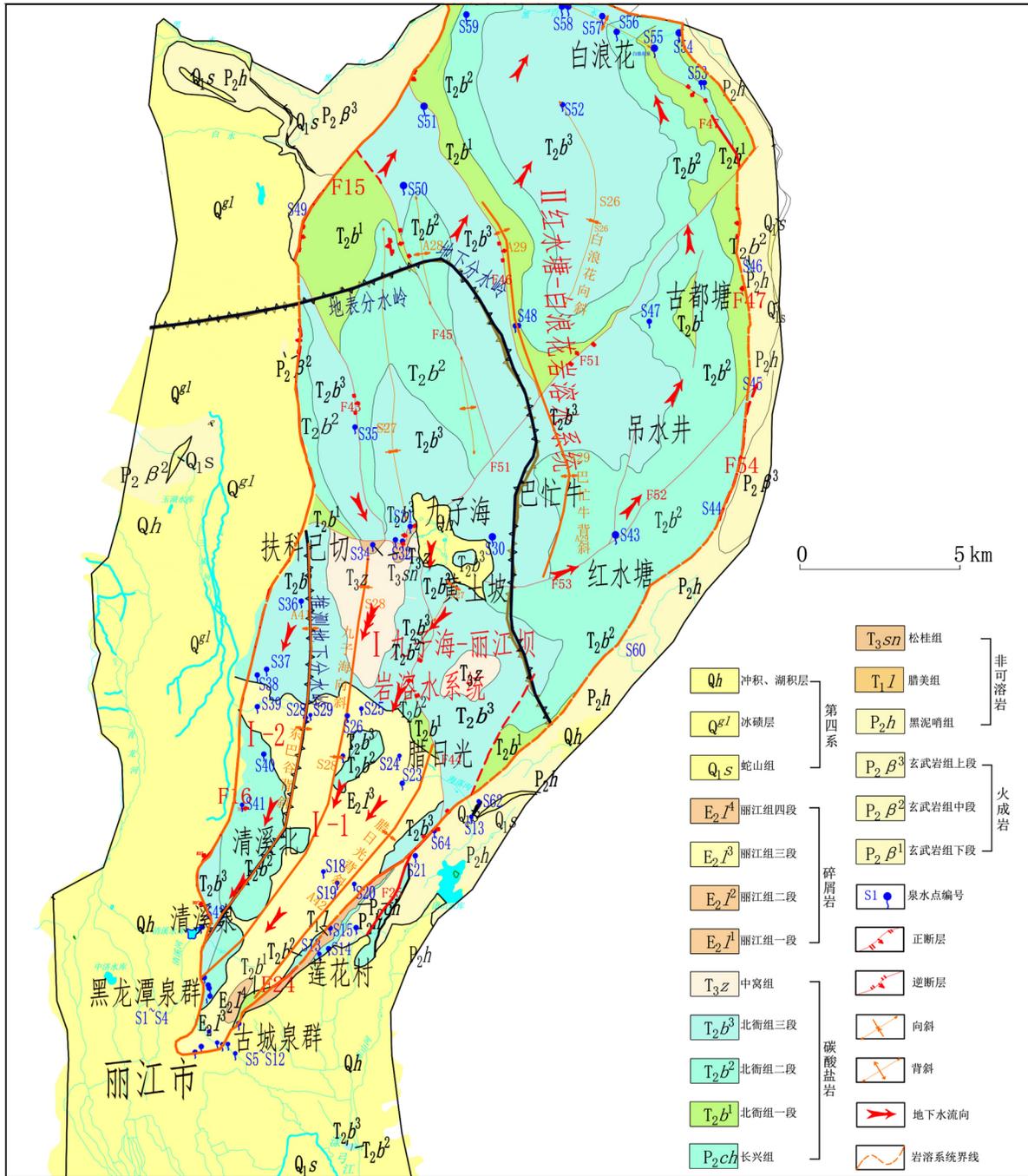


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Geological map of the study area

研究区西侧沿 F₁₆ 断裂形成弱透水边界; 东侧二叠系上统黑泥哨组 (P₂h) 砂泥岩、二叠系上统玄武岩 (P₂β) 以及 F₂₄ 断裂均具备隔水性能; 北侧黑白水河 P₂h 砂泥岩、P₂β 玄武岩为隔水岩组。隔水岩层与阻水

断裂联合形成大的隔水边界, 将地下水控制在锥形碳酸盐岩强含水岩组中 [三叠系中统北衙组中段、上段 (T₂b²⁺³) 白云质灰岩、灰岩以及下第三系始新统丽江组三段 (E₂l³) 白云质钙质角砾岩], 主要在南侧丽

江盆地边缘和北侧黑白水河口排出地表。沿巴忙牛背斜核部一线分布近一致的地下和地表分水岭的隔阻作用,将整个蓄水构造划分为两个独立的地下水系统:分水岭以南的九子海—丽江坝岩溶水系统(I)和分水岭以北的红水塘—白浪花岩溶水系统(II)。红水塘—白浪花岩溶水系统的地下水主要以红水塘、吊水井等洼地作为主要补给区,北侧黑白水河口的白浪花泉为主要排泄点。在九子海—丽江坝岩溶水系统内,东巴谷背斜核部北衙组下段下部(T_2b^{1-1})的砂泥岩与灰岩互层的地层具备隔水性能,即沿东巴谷背斜核部一线存在地下分水岭,将九子海—丽江坝岩溶水系统分为两个次级岩溶水系统:黑龙潭岩溶水系统(I-1)和清溪泉岩溶水系统(I-2)。黑龙潭岩溶水系统的地下水主要以九子海、黄土坡、腊日光等洼地作为主要补给区,黑龙潭泉群和古城泉群作为主要排泄点;清溪泉岩溶水系统的地下水主要以清溪洼地作为主要补给区,以清溪泉作为主要排泄点^[17]。

2 地下水示踪试验

2.1 试验目的

本次示踪试验研究,是在黑龙潭保泉工程专项水文地质调查评价、保泉补水工程水文地质、工程地质勘察等研究工作的成果基础上,以九子海为中心,以南侧黑龙潭泉群、古城泉群、清溪泉,北部白浪花泉群为重点研究对象进行开展。其主要目的在于:(1)明确九子海洼地补水位置与北侧白浪花区域、南侧清溪泉区域、黑龙潭区域、古城区域的连通关系和补排规律,验证地下水系统划分的合理性;(2)分析黑龙潭泉域内北衙组灰岩中岩溶管道的发育情况;(3)明确九子海洼地地下水运移的总体方向和路径;确定引水保泉工程在九子海洼地的有效注水点。

2.2 示踪剂的选择与确定

从已有研究来看,人工地下水示踪剂可大致归为四类^[18-19]:(1)颗粒类,如石松孢子、聚乙烯颗粒等,此类示踪剂适用于地下岩溶管道较为发育的地区,且检测过程较为繁琐;(2)人工放射性同位素类,如 ^3H 、 ^{60}Co 等,此类示踪剂仅适用于示踪距离数十米到数百米的小规模研究,大量投放具有一定危险性;(3)染料类,如酸性大红、荧光素等,此类示踪剂多在水环境质量要求较低、示踪范围较小的地区使用,大

量投放会对环境产生严重损害;(4)盐类,如氯化钠、碘化钾等,此类示踪剂应用最为广泛,可靠性较高,但在使用时应根据实际研究情况进行细致比选,尤其需要考虑背景值问题。本次研究遵循示踪剂性质稳定、易溶于水、无毒无害、检测方便、检测限低、围岩吸附能力弱、背景值低、成本低等原则,选取碘化钾作为示踪剂。碘化钾在示踪试验中具有标记能力强、天然背景值低、检测限低等突出特点,是一种良好的示踪剂^[20]。

结合研究区蓄水构造所含地下水量、示踪距离、地下水补给区至排泄区水力坡度及岩溶发育程度,并参照勘察资料,本次试验采用下式^[21]计算示踪剂的投放量:

$$M = Kw/j \quad (1)$$

式中: M 为示踪剂投放量; K 为岩溶率系数; w 为示踪区段总水量, $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$; j 为检测方法灵敏度, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

经计算分析,碘化钾的投放量定为500 kg。

2.3 投放及接收点选择与分布

根据九子海洼地内各落水洞所处位置和消水流量,在洼地南部选择消水能力最强的K18落水洞作为示踪剂投放点。同时,为尽可能提高试验的成功率,在地下水径流较为通畅的时间段内进行了本次投放,即降雨汛期内。投放前1日,在投放点上游修筑一小型土堰,蓄积地表水;实验当天(2018年8月23日),将所有示踪剂完全溶解在水箱中,快速下放示踪剂溶液至落水洞中,下放完毕后,拆除土堰放水,以驱动示踪剂进入到地下水体中。

根据研究区水文地质边界分布,结合地下水出露情况及试验目的,将示踪试验取样监测点沿黑龙潭泉域四周边界进行布置,按排泄区划分为清溪泉群、黑龙潭泉群、古城泉群、东南边界泉、北部排泄泉群5个监测组,从2018年8月24日08:00开始进行人工取样,间隔时间为6 h,取样持续到2018年10月11日。投放及接收点布置见图2。

2.4 示踪检测技术

本次示踪试验采用离子色谱法测定水样中碘离子含量^[22-23],水样检测工作均在丽江市水文局实验室完成,具体实验操作过程参考规范《HJ778-2015-水质-碘化物的测定-离子色谱法》。检测过程中均使用符合国家标准分析纯化学试剂,实验用水为无碘化物高纯水,电导率值小于 $1.0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。为尽可

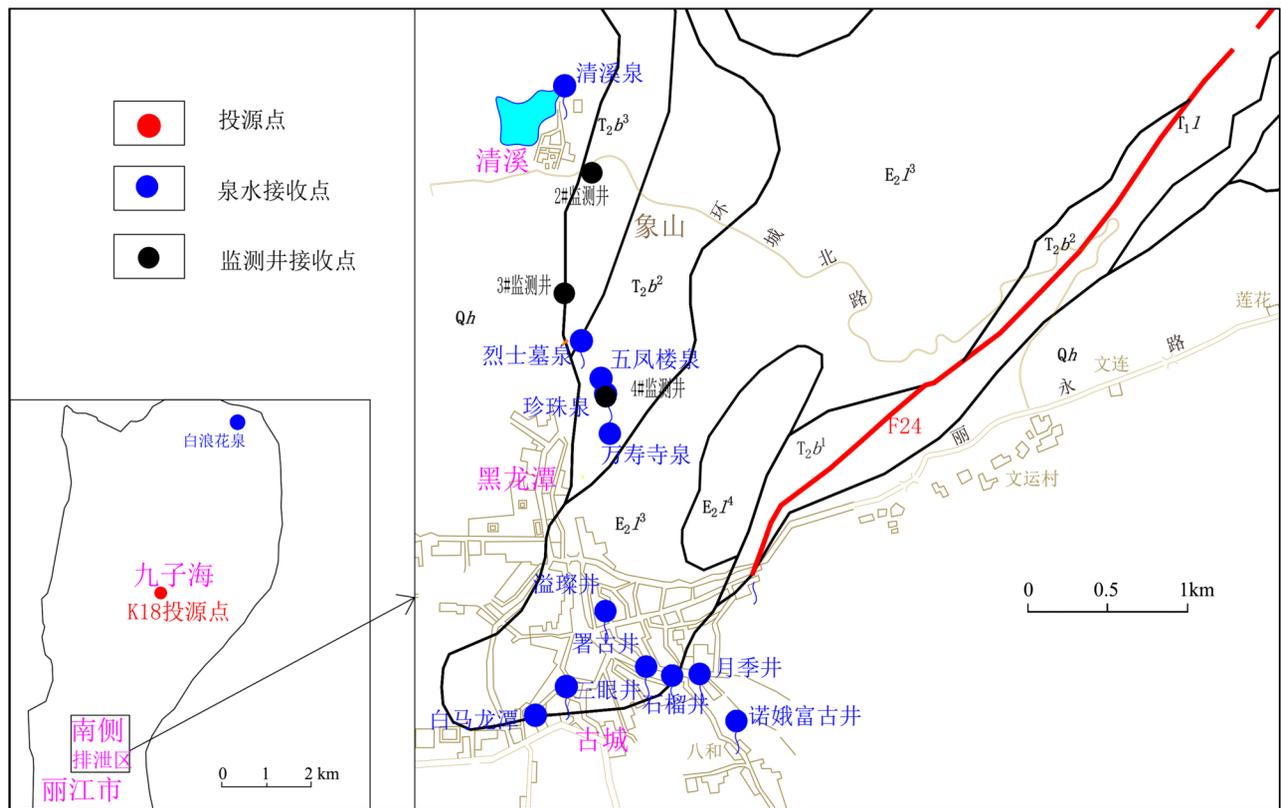


图 2 示踪试验投放及接收布置图

Fig. 2 Layout diagram of tracer test

能保证水样中碘离子不被氧化还原,水样取回后进行遮光低温保存,检测时,对碘离子浓度异常水样进行复核。

该方法检出限为 $0.002 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 即 $2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 当浓度低于 $2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时默认为 0; 测定下限为 $0.0008 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 即 $8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此在规范操作前提下,检测浓度达 $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上的数值准确可信度高,可做定量判断; $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下的浓度值仅做参考,用以定性分析。

3 结果与分析

3.1 示踪剂接收情况

本次示踪试验自 2018 年 8 月 23 日投源后,24 日开始取样,所有监测点的取样持续到 2018 年 10 月 11 日,距离投源近 1 200 h,在黑龙潭区域和古城区域接收到碘化钾示踪剂,在清溪泉群、白浪花泉群和其他监测点中均未收到任何示踪剂。示踪剂接收过程曲线见图 3、图 4、图 5。

根据各接收点与九子海投源点的距离及接收时间,计算出各接收点地下水的流速见表 1。

3.2 连通关系

3.2.1 九子海—黑龙潭区域

由实验数据分析可知,九子海补给区与黑龙潭排泄区之间径流通道畅通,有显著水力联系。从表 1 和图 3 来看,在黑龙潭区域,3#、4#监测井内接收到连续完整碘离子示踪剂单峰曲线,3#监测井在投源 334 h 后出现峰值,峰值浓度为 $26.82 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,4#监测井在投源 609 h 后出现峰值,浓度达 $53.50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,按其最大峰值浓度对应时间所算出的渗流速度分别是 $1\,077.84 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $591.13 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,而泉水接收到的多为不具备连续性的多点值,最大浓度不超过 $18 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从地理位置上来看,烈士墓泉和珍珠泉分别靠近 3#、4#监测,两者渗流速度分别为 $615.38 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $585.37 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,流速和示踪剂浓度与监测井差异较大。对此可认为,3#监测井与烈士墓泉虽位置相近,但不属于同一条地下水径流通道,烈士墓泉水具有更为通畅的径流通道,示踪剂先行到达;而 4#监测井与珍珠泉位置相近,示踪剂接收时间相近,地下水渗流速度相近,但示踪剂曲线形态不一,峰值浓度差异大,认为九子海地下水流经较发育的岩溶管道运移至黑龙潭

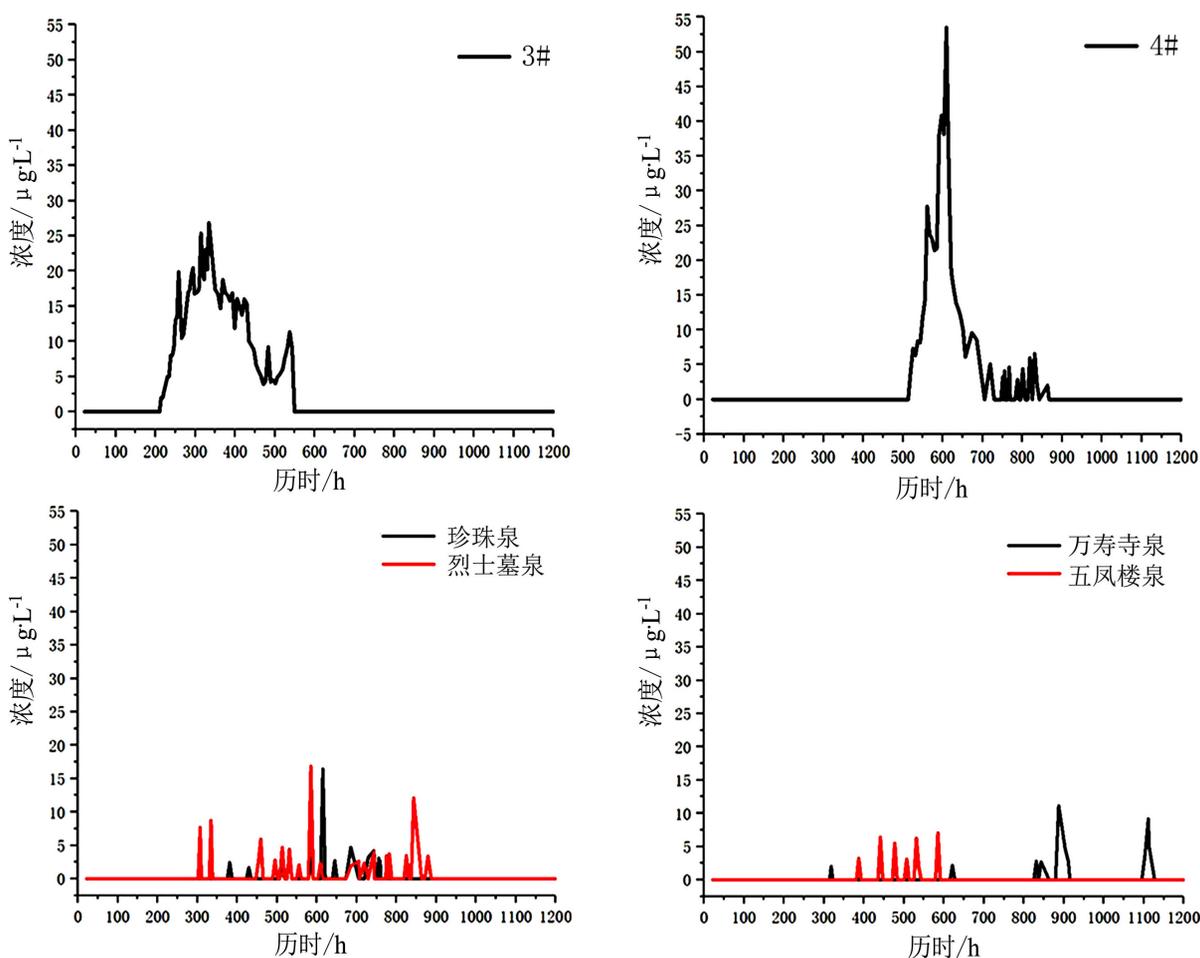


图3 黑龙潭区域示踪剂浓度曲线图

Fig. 3 Tracer concentration in Heilongtan area

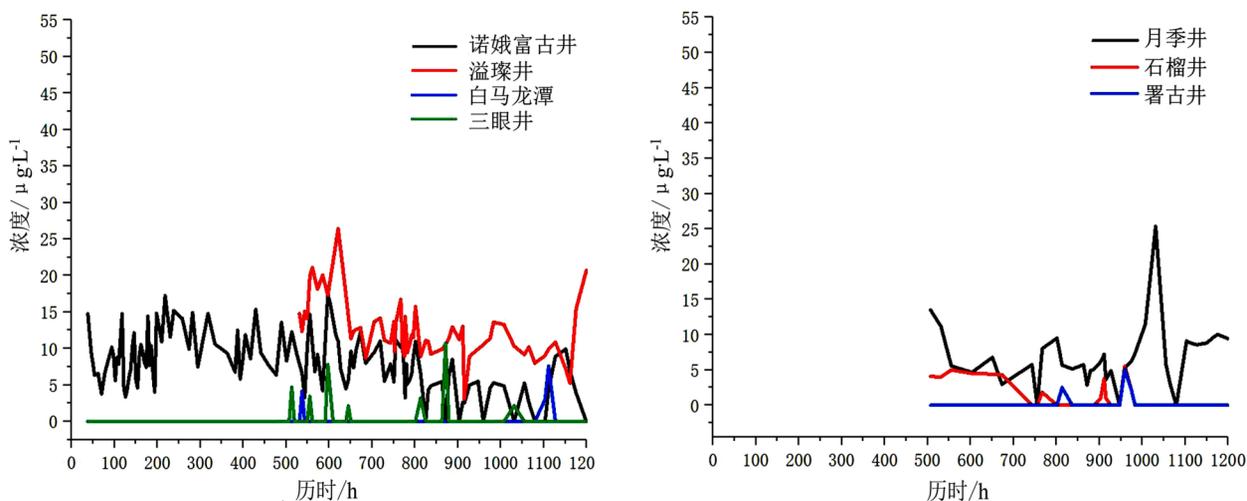


图4 古城区域示踪剂浓度曲线图

Fig. 4 Tracer concentration in Gucheng area

区域,4#监测井位于管道之上,或是4#监测井揭穿底部深岩溶储水空间的顶板而接受到浓度相对较高的示踪剂;而珍珠泉的径流通道为4#监测井地下水岩

溶径流通道的分支通道,深部岩溶地下水向上扩散,再加上泉水受到降雨入渗稀释的影响,从而导致珍珠泉间断性接收到低浓度示踪剂。

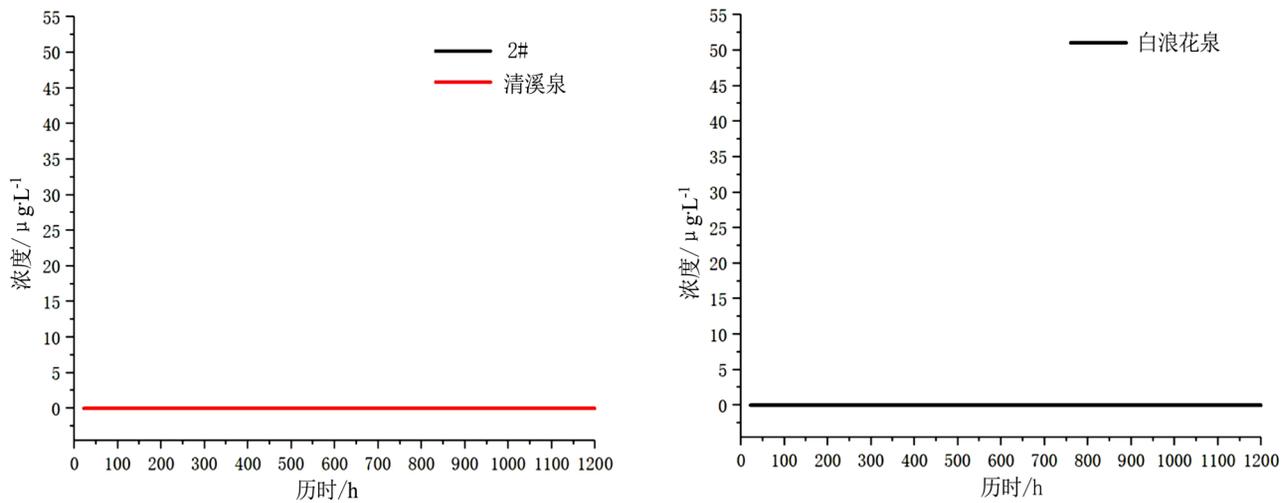


图 5 白浪花泉与清溪泉域示踪剂浓度曲线图

Fig. 5 Tracer concentration in Bailanghua spring and Qingxi spring areas

表 1 示踪剂接收情况统计表

Table 1 Statistics of tracer reception

接收区域	接收位置	高程/m	与九子海投源点的相对高差/m	与九子海的相对距离/km	深流速度/m·d ⁻¹	浓度变化曲线形态特征	初次接收示踪剂时间/h	最大监测峰值时间/h	峰值浓度/μg·L ⁻¹
黑龙潭区域	3#监测井	2 412.75	395.00	15.00	1 077.84	单峰	250	334	26.82
	4#监测井	2 408.63	399.13		591.13	单峰	500	609	53.50
	烈士墓泉	2 408.88	398.88		615.38	多小峰	300	585	16.84
	五凤楼泉	2 407.02	400.74		615.38	多小峰	400	585	7.07
	珍珠泉	2 407.09	400.67		585.37	多小峰	381	615	16.44
	万寿寺	2 407.23	400.53		405.86	多小峰	318	887	11.12
古城区域	诺娥富古井	2 385.43	422.33	16.20	不稳定,难以确定示踪剂接收情况				
	白马龙潭	2 393.30	414.46		349.96	多小峰	537	1 111	7.59
	三眼井	2 395.08	412.68		446.38	多小峰	513	871	10.70
	溢臻井	2 395.38	412.38		626.09	单峰		621	26.41
白浪花区域	石榴井	2 388.64	419.12	17.70	405.42	多小峰	补充监测点,初现时间无法确定	959	5.54
	暑古井	2 390.89	416.86		405.42	多小峰		959	5.10
	月季井	2 387.78	419.98		377.11	单峰		1 031	25.35
白浪花区域	白浪花大泉	2 015.00	792.76	17.70	未接收到示踪剂				
清溪区域	清溪泉	2 432.43	375.33	15.20	未接收到示踪剂				
	2#监测井	2 445.34	362.42		未接收到示踪剂				

由上述分析可知,九子海降雨经洼地落水洞入渗至地下水水体,再经过北衙组深层岩溶管道向南

运移至黑龙潭区域,而监测井更接近深层岩溶管道,从而出现了较为完整的示踪曲线,同时,当黑龙潭区

域深层地下水向丽江盆地第四系含水层补给时,受到阻挡作用,致使地下水产生向上涌动的趋势,从而泉水中出现了较监测井低的示踪剂浓度,再结合3#、4#监测井峰值出现时间的差异现状,可认为九子海—黑龙潭发育有多条径流通道,对地下水的运移能力各不相同。

3.2.2 九子海—古城区域

由实验数据分析可知,古城区内除诺娥富古井中碘离子浓度—时间示踪曲线无明显峰型,难以体现出连通情况以外,其余各泉点均接收到异常明显的碘离子浓度,这表明九子海补给区与古城区泉群之间具有一定的水力联系,但峰值浓度较低,多为不连续的多点值。结合3.2.1节分析可知,九子海补给区地下水通过北衙组深层岩溶管道向南运移至丽江盆地,而古城泉水均出露于北衙组上覆的丽江组砾岩含水层中,因此大多泉水只能接收到较低浓度的示踪剂,个别泉水得到了相对较完整连续的碘离子示踪单峰曲线,如溢璨井和月季井,最大浓度峰值出现时间分别是621 h、1 031 h,与黑龙潭区域示踪剂峰现时间进行对比,可认为黑龙潭泉群与古城泉群在黑龙潭岩溶水系统内为相对上下游关系,黑龙潭泉群可视为九子海—丽江坝岩溶水系统在排泄区途经的天窗,古城泉群的地下水在地下运移的时间更久,因而古城区泉群与黑龙潭泉群接收到示踪剂的时间相比较晚,检测到的示踪剂最值浓度较低,示踪剂线型不明显。

3.2.3 九子海—清溪泉区域

清溪泉群位于黑龙潭北部约1.6 km,距离九子海补给区的直线距离约是15.20 km,泉水位高程为2 432.43 m,据前期调查得知清溪泉流量受九子海降雨量变化影响较小,清溪泉口比黑龙潭泉群高25 m,在黑龙潭泉群持续断流期间,清溪泉也不曾断流;结合地质条件及水位关系分析,在九子海—丽江坝岩溶水系统内,西侧扶科已切—猎鹰谷—清溪北洼地东侧一带位于东巴谷背斜核部,其下部的北衙组下段砂泥岩与灰岩互层为隔水层,推测该隔水层基本阻断了背斜两翼地下水水力联系,形成了一条地下水分水岭。从本次示踪试验结果来看,清溪泉群内的监测点并未接收到碘化钾示踪剂,因此清溪泉区域与九子海补给区地下水不存在连通关系,从而也验证了该地下分水岭存在的真实性。

3.2.4 九子海—白浪花泉

白浪花泉口高程为2 015.00 m,与九子海补给区投源点之间的直线距离约是17.70 km,相对高差为792.76 m,但是并未接收到碘化钾示踪剂,表明九子海补给区与白浪花之间地下水不存在连通关系,即沿巴忙牛背斜核部一线存在的分水岭具有可靠的隔水性能。

4 结 论

(1)九子海补给区与黑龙潭区域和古城区域有显著的水力联系,从九子海到黑龙潭发育有多条地下水径流管道,黑龙潭泉群与古城泉群均属黑龙潭岩溶水系统,互为上下游关系,古城区域砾岩含水层接收北衙组灰岩含水层越流补给,黑龙潭泉群为岩溶水系统的排泄天窗。

(2)九子海补给区与清溪泉区域和白浪花泉区域不连通,不存在水力联系,认为沿九子海北侧巴忙牛背斜以及清溪泉北侧东巴谷背斜形成的地下分水岭具备可靠的隔水性能,即黑龙潭岩溶水系统划分具有合理性。

(3)确定的黑龙潭岩溶水系统边界,证明九子海洼地可作为引水保泉工程的有效注水点,且九子海接收补给后,地下水整体向南运移至黑龙潭和古城一带,黑龙潭岩溶水系统具备补水的水文地质条件基础。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 沈春勇.水利水电工程岩溶勘察与处理[M].北京:中国水利水电出版社,2015:143-146.
- [3] WILLIAMS C F, NELSON S D. Comparison of Rhodamine-WT and Bromide as a Tracer for Elucidating Internal Wet-land Flow Dynamics [J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 1492-1498.
- [4] 易连兴,夏日元,唐建生,等.地下水连通介质结构分析:以寨底地下河系统实验基地示踪试验为例[J].工程勘察,2010,38(11):38-41.
- [5] 黄炯,尹推军.地下水示踪技术在水库渗漏勘察中的应用[J].低碳世界,2017,2(4):99-100.
- [6] 陈相彪.地下水示踪连通试验在水文地质勘察中的应用[J].水利科技与经济,2014,20(7):93-95.
- [7] 郑克勋,刘建刚.多元连通示踪试验研究地下水流场的工程实例[J].贵州水力发电,2009,23(4):63-68.

- [8] 黄保健,张之淦,陈伟海,等.高山峡谷区岩溶水示踪试验:以川西锦屏地区为例[J].中国岩溶,1995,14(4):362-371.
- [9] 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.
- [10] 潘国营,轩吉善,岳保祥,等.基于GSM水位遥测系统的大型放水与示踪联合试验[J].河南理工大学学报(自然科学版),2007,28(2):152-155.
- [11] 张乃兴,李伟,安立贵,等.济南四大泉群水源地连通试验研究[J].山东师大学报(自然科学版),1998,13(4):49-53.
- [12] 时晓,张宇,李红叶,等.诺水河风景区双峰垭隧道地下水示踪试验与分析[J].甘肃水利水电技术,2019,55(2):32-35.
- [13] 杨前,翟加文,张智旺.示踪连通试验在确定岩溶水径流通道中的应用[J].中州煤炭,2013(7):74-76.
- [14] 刘人太,李术才,张庆松,等.示踪试验分析方法在地下工程水害治理中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):814-821.
- [15] 尹尚先,徐斌,徐慧,等.化学示踪连通试验在矿井充水条件探查中的应用[J].煤炭学报,2014,39(1):129-134.
- [16] 马祖陆,周春宏,张之淦,等.四川锦屏落水洞岩溶地下水示踪[J].中国岩溶,2006,25(3):201-210.
- [17] 陈鑫.云南黑龙潭岩溶泉域地下水系统划分及泉水动态特征分析研究[D].南京:河海大学,2019.
- [18] 郑克勋.地下水人工化学连通示踪理论及试验方法研究[D].南京:河海大学,2007.
- [19] 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.
- [20] SHIRRA G R, SARA P A, YANA L, et al. Iodinated Contrast Media Oxidation by Nonthermal Plasma: The Role of Iodine as a Tracer[J].Water Research,2011,45: 5047-5057.
- [21] 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):67-70.
- [22] 张会娟,谢雅兰,王朝亚.测定饮用水中碘化物的含量:离子色谱法和化学法的比较[J].城镇供水,2017,6(6):35-38.
- [23] 王红伟,路凯,刘俊妮,等.离子色谱法测定饮用水中碘化物[J].实用预防医学,2006,13(5):1331-1333.
- [24] 程岩,贾岩.微量物质示踪剂用量设计探讨[J].油气井测试,2010,19(3):64-66.

Application of the tracer test in karst hydrogeological prospecting: An example of Heilongtan, Lijiang, Yunnan

HAN Xiao^{1,2}, CHEN Xin³, ZHENG Kexun^{1,2}, LIU Sheng^{1,2}

(1. Powerchina Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China; 2. Hydrochina Guiyang Engineering Corporation Geotechnical Engineering Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China; 3. Guizhou Survey & Design Research Institute for Water Resources and Hydropower, Guiyang, Guizhou 550000, China)

Abstract The purpose of this work was to investigate the connection between groundwater and the surrounding springs in the recharge area of the Jiuzihai depression, Lijiang, Yunnan Province, and to provide scientific basis for spring water restoration. Using the artificial chemical tracer method a large-scale groundwater tracer test has been conducted with potassium iodide as tracer. Based on the experimental data, the seepage velocity of groundwater was calculated and the characteristics of the groundwater system in Heilongtan springs area were analyzed. The results show that the groundwater in the Jiuzihai depression is significantly connected with Heilongtan and Gucheng springs, while not connected with Qingxi springs and Bailanghua springs. The seepage velocity of groundwater from Jiuzihai to Heilongtan and Gucheng is around $405.86-1,077.84 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ and $349.96-629.09 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. The Jiuzihai depression is the main recharge area of the groundwater system of the Heilongtan springs area, which can also be used as an effective injection site for the restoration of Heilongtan springs. After receiving the recharge, it is mainly transported to area around Heilongtan—Gucheng by deep karst pipelines, of which the Heilongtan springs are the discharge area of the groundwater system.

Key words tracer test, Heilongtan, potassium iodide, groundwater system

(编辑 黄晨晖)