

赵一,李衍青,覃星铭,等.南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析[J].中国岩溶,2017,36(2):226-233.

DOI:10.11932/karst20170210

南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析

赵一,李衍青,覃星铭,洪涛,程瑞瑞,蓝芙宁

(中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,广西桂林 541004)

摘要:运用高精度的示踪试验研究了南洞地下河流域部分岩溶管道的展布状况,并对暗河管道的结构特征进行了分析。试验结果表明:一号暗河有一独立的含水系统,补给区为瓦白白一带,二号暗河主管道总体通往永宁和石洞方向,三号暗河通往城红寨方向,二号暗河和三号暗河在南洞口附近有连通,枯季时二号暗河补给三号暗河。此外,一号暗河和二号暗河分别呈老年期和壮年期地下河形态,较为畅通;三号暗河则发育较晚,出口处有较多的裂隙。最后,结合现有的资料及流域内的水文地质条件,对流域内岩溶管道的大体分布位置进行了推断,绘制了岩溶管道的展布图,以期为南洞地下河流域的岩溶水文地质调查、物探、钻探及地下水开发利用等提供理论依据。

关键词:示踪试验;南洞地下河;岩溶管道;展布;结构特征

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)02-0226-08

0 引言

近20多年来示踪试验取得了长足发展,由最初以连通为目的的水文地质试验方法演变为一种能够探明岩溶水流场类型,介质空间形态特征的可靠的手段^[1-6]。与此同时,示踪剂的选择也日益多样化,示踪剂的监测技术也得到了很大的发展。传统的野外示踪试验大部分采取人工取样和室内测试的方法,其劳动强度较大并且试验结果不够精确,而在线监测技术的发展克服了这些困难,并广泛用于地下水开发利用、水库渗漏以及地下水污染途径判断等领域^[7-12]。

南洞地下河是我国南方流域面积大于1 000 km²和年枯季资源大于1×10⁸ m³的4个超大型地下河系统之一。90年代初期,为解决蒙自盆地的需水问题和蒙自东山的水土漏失问题,研究人员提出了两种开发方案,一种为在蒙自东山家邑村附近寻到主管道开凿斜井开发地下水,另一种在磨石沟地下筑坝建地下水

库。但由于当时技术水平的限制,未能查清流域内地下暗河管道的展布情况,亦未在局部找到地下暗河主管道,两种构想均未能实现^[13]。本次研究运用新的高精度地下水示踪方法,结合流域内的一些重要水文地质信息,对流域内岩溶管道的大体分布位置进行了推断,以期为以后开展南洞地下河流域的岩溶水文地质调查、物探、钻探及地下水开发利用等提供参考。

1 研究区概况

南洞地下河流域位于云南红河州蒙自市、开远市和个旧市,其汇流面积为1 684.2 km²。前人根据单元相对独立的补、径、排特征,将南洞地下河流域岩溶水划分为I、II、III、IV、V五大相对独立的岩溶水系统。其中,由南洞口出流的I区岩溶地下河汇水范围为987.6 km²。I区水文地质条件极为复杂,地质构造主要由南北向、北西向、北东向及近东西向4组构造

基金项目:国家地质大调查项目(12120114062601);岩溶地质研究所基本科研业务费项目(121237128100246);国家自然科学基金面上项目(41471447);国家自然科学基金青年基金项目(41502257);广西自然科学基金项目(2013GXNSFBA019220)

第一作者简介:赵一(1989-),男,助理研究员,硕士研究生,研究方向为水文地质。E-mail:zhaoyi@karst.ac.cn.

通信作者:蓝芙宁,E-mail:lanfuning@karst.ac.cn.

收稿日期:2016-06-20

造组成。第三系、第四系地层主要分布于大庄、草坝、蒙自、鸡街等断陷盆地内,盆地间的丘陵及周边高原岩溶十分发育,分布有众多的消水洞、出水洞、竖井和天坑,地下暗河则由多条地下河经过长期发育演化、归并袭夺形成,其管道纵横交错^[14]。南洞口位于开远盆地南东山麓,标高为1 067 m,年平均径流总量为2.988亿 m^3 ^[15]。南洞口附近可见有两个明显的地下河出口。分别为“通灵洞”和“桃源洞”。经调查,两个洞内部是连通的,内部又有三个较明显的地下河管道口,分别为一号暗河口、二号暗河口和三号暗河口。二号暗河口的水一部分与一号暗河口的水混合后从“通灵洞”下面潜出,另一部分与三号暗河口的水

混合后从“桃源洞”流出。由于流域内水土流失严重,南洞口出水常年为浑浊状态。

2 示踪试验的部署

2.1 示踪试验目的

根据前期的南洞地下河流域水文地质调查,本次试验选择在流域内4个较大的消水洞进行示踪剂的投放,同时在南洞口的3个地下河管道出口处分别布设示踪仪进行接收,具体部署位置见图1。拟通过分析各暗河口处示踪剂浓度与流量的历时曲线特征,来推断南洞地下水岩溶管道的展布和结构特征。

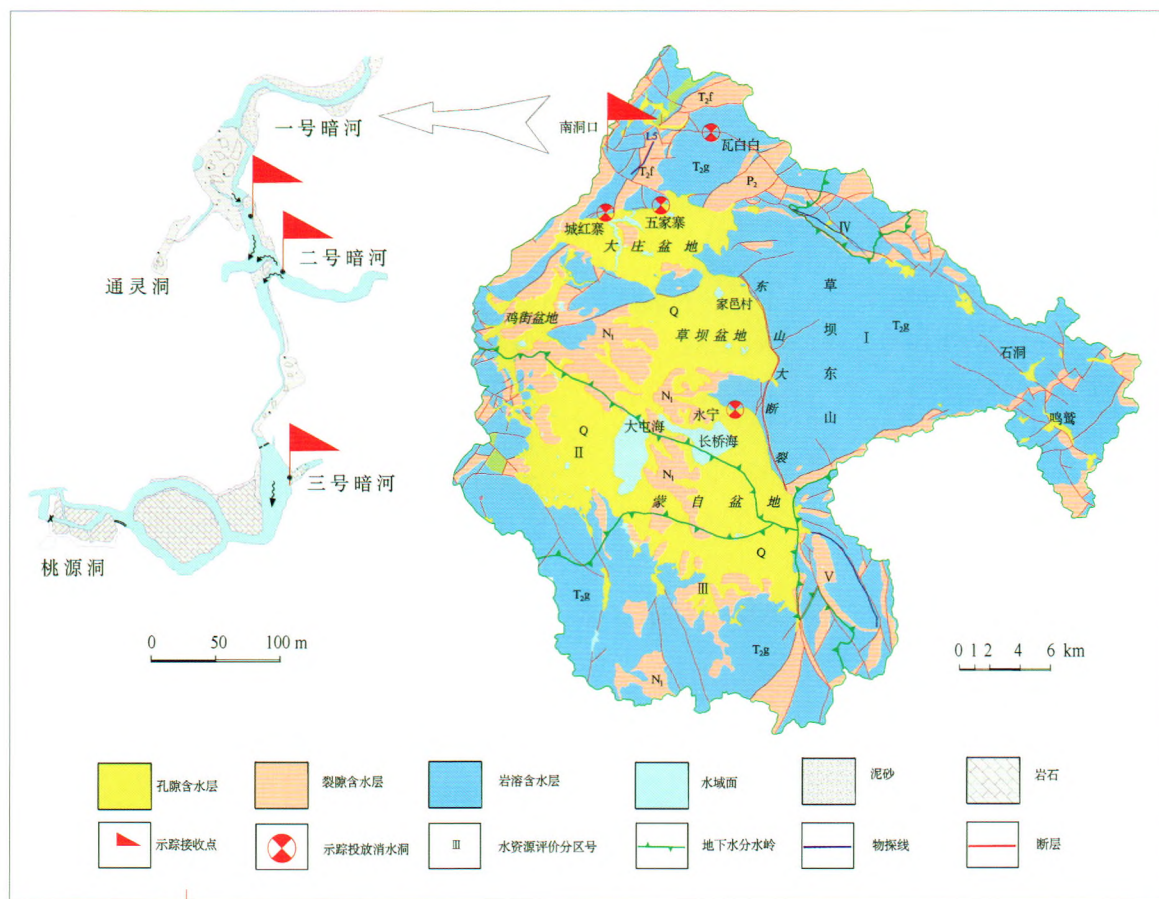


图1 南洞地下河流域水文地质与示踪试验布置简图

Fig. 1 Sketch of hydrogeology map and layout of tracer tests in Nandong underground river

2.2 试验方法

由于流域内水土流失严重,地下河介质吸附作用较强,本次示踪试验选择不易被吸附的荧光素钠作为示踪剂。投放示踪剂的消水洞分别为瓦白白消水洞、永宁消水洞、五家寨消水洞及城红寨消水洞,由于投放点较多,为避免接收信号相互之间的干扰,选择在

枯季的不同时期分别投放,确认接收完信号后再进行新一轮的投放。投放方式均为将示踪剂充分溶解后一次性注入消水洞。具体投放情况见表1。使用的三台示踪仪均为GGUN-FL30在线示踪仪。示踪仪的测量精度为0.2 $\mu\text{g/L}$,设置监测时间间隔为15 min。

表 1 示踪剂在各消水洞的投放情况
Table 1 Tracer releasing in each sinkhole

投放地点	至南洞口距离 L/m	投放时间	示踪剂种类	注入方式	投放量 M/kg
瓦白白消水洞	8 600	2015-01-23 12:30	荧光素钠	一次性注入	30
永宁消水洞	24 300	2015-04-28 10:10	荧光素钠	一次性注入	50
五家寨消水洞	6 800	2015-10-24 10:30	荧光素钠	一次性注入	40
城红寨消水洞	5 700	2015-12-24 11:00	荧光素钠	一次性注入	20

2.3 计算方法

本次示踪试验地下水水流的平均速度、地下水示踪剂的回收量和回收率分别用以下公式进行计算^[12,16]：

$$v = \frac{L}{t_0} \quad (1)$$

$$M_0 = \sum_{i=1}^n \frac{(C_i - C_0) + (C_{i+1} - C_0)}{2} \times \frac{(Q_i + Q_{i+1})}{2} \times \Delta t \quad (2)$$

$$P = \frac{M_0}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中： v 为地下水水流的平均速度(m/h)； L 为示踪距离(m)； t_0 为到示踪曲线达峰值的时间(h)， M_0 为示踪剂的回收量(kg)； M 为示踪剂的投放量(kg)； C_i ， C_{i+1} 分别为监测点在 $i, i+1$ 时刻的示踪剂浓度(kg/m³)； C_0 为示踪剂的背景浓度(kg/m³)； Q_i, Q_{i+1} 分别为监测点在 $i, i+1$ 时刻的水流量(m³/h)， Δt 为取样间隔时间(h)， P 为示踪剂回收率(%)。

3 示踪试验结果

3.1 瓦白白消水洞示踪结果

瓦白白消水洞位于瓦白白村北西前冲河床中，洞口较大，人可进入。由于当地水土流失情况严重，内部被泥土填充，靠周边裂隙消水，消水能力较强。2015 年 1 月 23 日 12 时，在瓦白白消水洞投放示踪剂荧光素钠 30 kg(见图 2)，同时南洞口的三台在线示踪仪开始监测记录。36 d 后分别采取数据，二、三号暗河口仪器显示均未收到示踪剂，只显示背景浓度曲线，一号暗河口布设的仪器显示接收到了示踪剂。其示踪浓度与流量的历时曲线如图 3 所示。可以看出在 14 d 和 17 d 曲线有两个较为明显的尖峰，说明瓦白白消水洞至一号暗河口有两个支管道。18 d 后曲线开始迅速降落，19 d 后曲线降落变缓并开始有小范围的波动，其后延续较长时间。其可能是由于当

地水土流失较为严重，部分示踪剂经过了一些粘土类的孔隙介质，导致到达一号暗河口的时间较慢。另一种可能是径流过程中遇到了较大的溶潭导致速度减慢。一号暗河口示踪剂浓度在约 17 d 后达到峰值。通过公式(1-3)计算得到瓦白白消水洞至一号暗河口地下水平均速度为 21.1 m/h，总回收率为 94.6%。



图 2 瓦白白消水洞示踪剂投放照片

Fig. 2 Tracer releasing in Wabaibai sinkhole

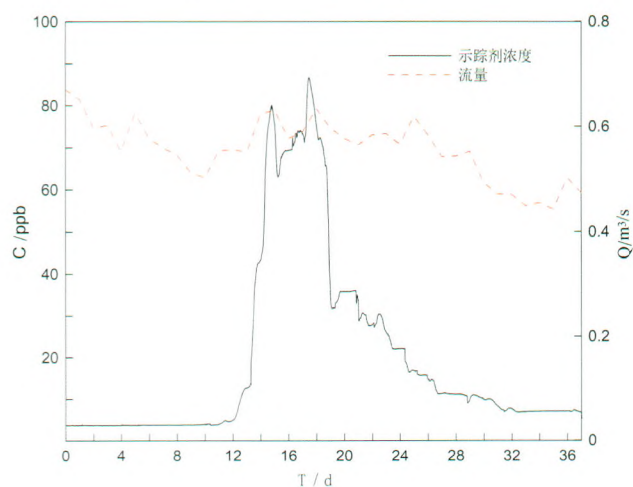


图 3 一号暗河口示踪浓度与流量的历时曲线

(日期:20150123-20150228;投放点:瓦白白消水洞)

Fig. 3 Curve of tracer concentration flow at the exit of No. 1 underground river (Date: 20150123 - 20150228; Release point: Wabaibai sinkhole)

3.2 永宁消水洞示踪结果

永宁消水洞位于蒙自盆地东北角,是蒙自盆地最主要的消水点,人可钻进十多米。据记载,该洞曾两天消落长桥海 310 万 m^3 的水量^[3]。2015 年 4 月 28 日 10 时,在永宁消水洞投放示踪剂荧光素钠 50 kg (图 4),同时南洞口的三台在线荧光仪开始监测记录。60 d 后分别采取数据,一号暗河口仪器显示未收到,只有背景浓度曲线,二、三号暗河口布置的仪器均显示接收到了示踪剂,其示踪浓度历时曲线如图 5、6 所示。二号暗河与三号暗河示踪浓度历时曲线均显示有 3 个明显的波峰,峰型较为一致,但位置高度



图 4 永宁消水洞示踪剂投放照片

Fig. 4 Photo of releasing in Yongning sinkhole

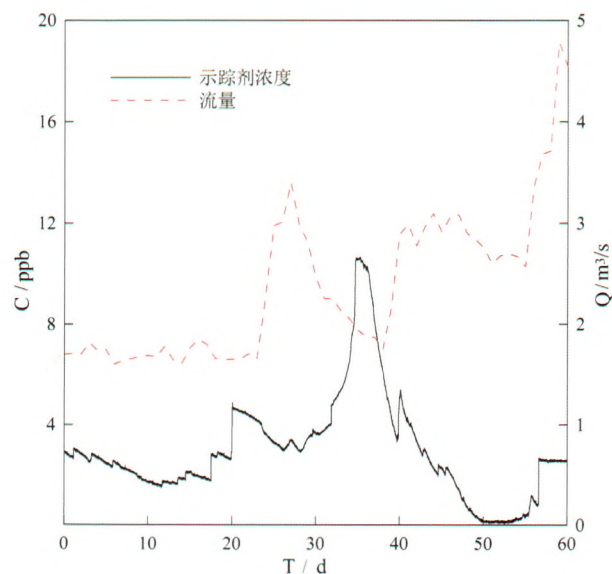


图 5 二号暗河口示踪浓度与流量的历时曲线

(日期:20150428—20150626;投放点:永宁消水洞)

Fig. 5 Curve of tracer concentration and flow at the exit of No. 2 underground river (Date: 20150428—20150626; Release point: Yongning sinkhole)

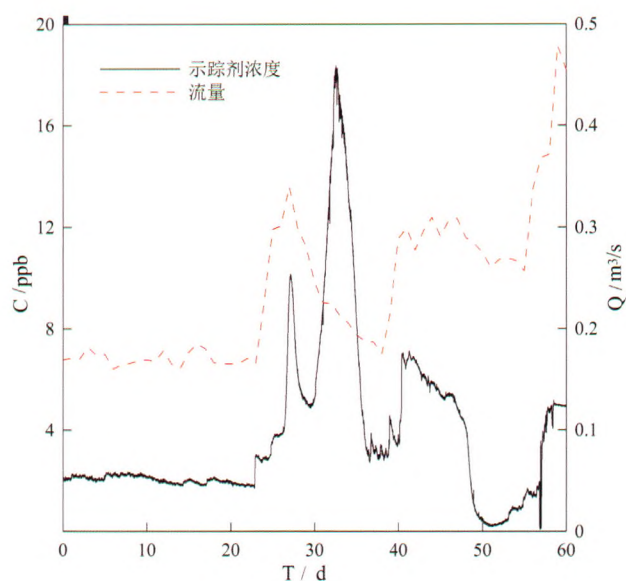


图 6 三号暗河口示踪浓度与流量的历时曲线

(日期:20150428—20150626;投放点:永宁消水洞)

Fig. 6 Curve of tracer concentration and flow at the exit of No. 3 underground river (Date: 20150428—20150626; Release point: Yongning sinkhole)

有明显不同,说明永宁消水洞至二、三号暗河口是有管道连通的,并且至少有三个管道,水从永宁消水洞进入地下暗河,然后经各管道汇合后分别从二、三号暗河口流出。二号暗河口示踪剂浓度在约 36 d 后达到峰值,三号暗河口示踪剂浓度在约 32 d 后达到峰值。通过公式(1—3)计算得到永宁消水洞至二号暗河口地下水平均速度为 28.1 m/h,回收率为 25.2%;至三号暗河口地下水平均速度为 31.6 m/h,回收率为 4.2%;总回收率为 29.4%。

3.3 五家寨消水洞示踪结果

五家寨消水洞位于大庄盆地的北缘偏东,沿北西走向裂隙发育,盆地的水沿北西 300° 方向消泄于洞口陡坎之下。2015 年 10 月 24 日 10 时,在五家寨消水洞投放示踪剂荧光素钠 40 kg (图 7),同时南洞口的三台在线荧光仪开始监测记录,10 d 后分别采取数据。一号暗河口仪器显示未收到信号,只有背景浓度曲线;二、三号暗河口布置的仪器均显示接收到了示踪剂,其示踪浓度历时曲线如图 8、9 所示。二号暗河口的示踪浓度历时曲线呈现先低后高型,表明五家寨消水洞至二号暗河口有主管道,并有一小的分支,主流通道上有一大型溶潭,形成钝峰,支流水量小浓度背景值高,主支流汇合形成高峰^[17]。三号暗河口

的示踪历时曲线为较陡的单峰,并有锯齿状的波动,说明五家寨消水洞至三号暗河口有管道,但管道尚未完全通畅,为脉管状的细小岩溶裂隙组成。二号暗河口示踪剂浓度在约 4.8 d 后达到峰值,三号暗河口示踪剂浓度在约 3 d 后达到峰值。计算得到二号管道平均流速为 58.6 m/h,回收率为 52.9%;三号管道平均流速为 94.4 m/h,回收率为 4.2%;总回收率为 57.1%。



图 7 五家寨消水洞示踪剂投放照片

Fig. 7 Tracer releasing in Wujiashai sinkhole

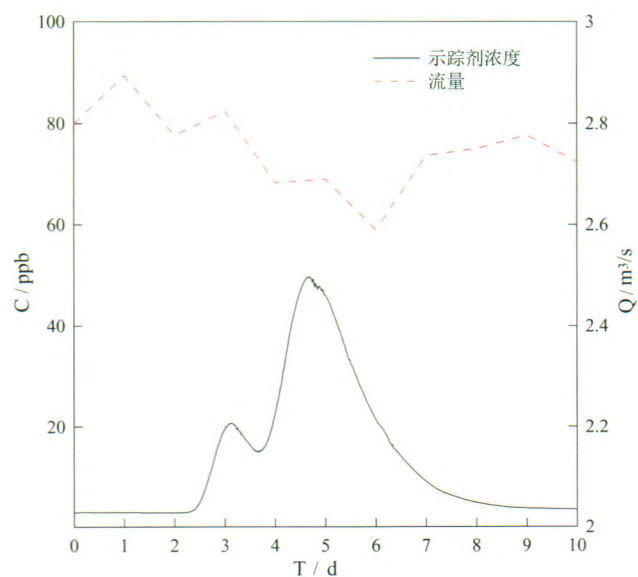


图 8 二号暗河口示踪浓度与流量的历时曲线

(日期:20151024—20151103;投放点:五家寨消水洞)

Fig. 8 Curve of tracer concentration and flow at the exit of No. 2 underground river (Date:20151024—20151103;Release point:Wujiashai sinkhole)

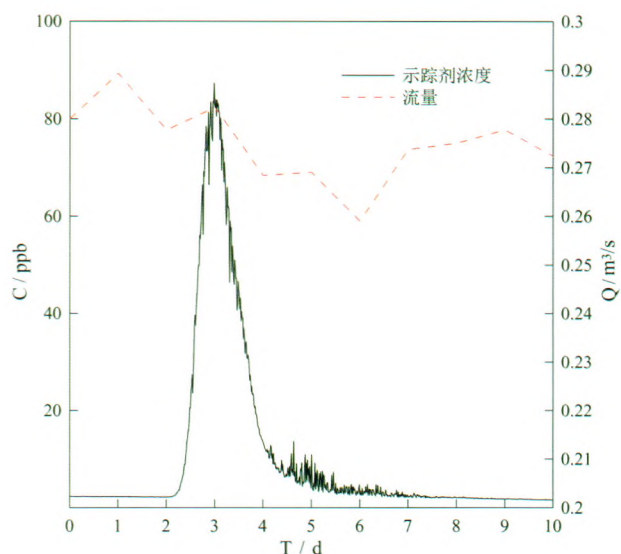


图 9 三号暗河口示踪浓度与流量的历时曲线

(日期:20151024—20151103;投放点:五家寨消水洞)

Fig. 9 Curve of the tracer concentration and flow at the exit of No. 3 underground river (Date:20151024—20151103;Release point:Wujiashai sinkhole)

3.4 城红寨消水洞示踪结果

城红寨消水洞位于大庄盆地北缘偏西,附近一带消水点较多,消水较为分散,消水能力较强。据访,四十年以前大庄盆地水主要从五家寨消水洞消入,后来修建水渠,大庄盆地主要从城红寨一带消水洞消入。2015 年 12 月 24 日 11 时,在城红寨消水洞投放示踪剂荧光素钠 20 kg(图 10),同时南洞口的三台在线荧光仪开始监测记录,20 d 后分别采取数据。一号、二号暗河口仪器显示未收到,只有背景浓度曲线;三号暗河口布设的仪器显示接收到了示踪剂,其示踪浓度历时曲线如图 11 所示。同之前三号暗河口接收到



图 10 城红寨消水洞示踪剂投放照片

Fig. 10 Tracer releasing in Chenghongzhai sinkhole

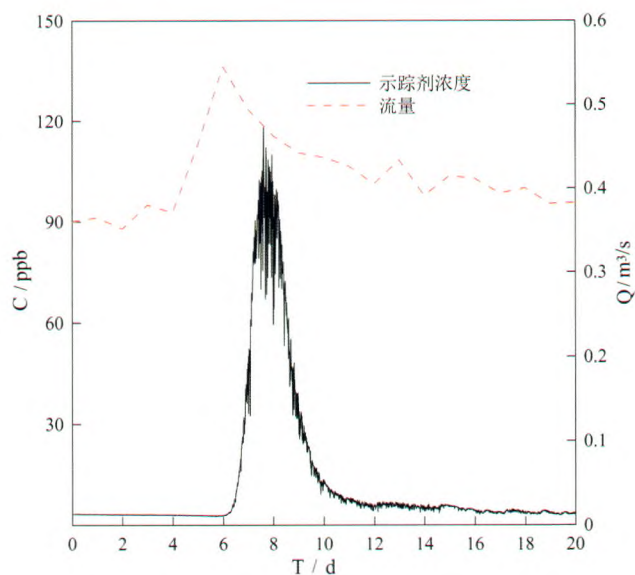


图 11 三号暗河口示踪浓度与流量的历时曲线

(日期:20151224—20160113;投放点:城红寨消水洞)

Fig. 11 Curve of tracer concentration and flow at the exit of No. 3 underground river (Date: 20151224—20160113; Release point: Chenghongzhai sinkhole)

的示踪浓度历时曲线相似,有轻微的拖尾现象,并出现密集的锯齿状峰,表明城红寨消水洞至三号暗河口有管道,但尚未完全通畅。三号暗河口示踪剂浓度在 7.5 d 后达到峰值,计算得到平均流速为 31.7 m/h,总回收率为 27.1%。

4 讨论

(1)瓦白白消水洞投放的示踪剂几乎全部从一号暗河流出,结合探洞结果以及研究区的水文地质情况,推断暗河管道总体位置是从瓦白白消水洞沿东西方向的断裂带延伸,而后从清塘子附近的谷地边缘通往南洞口。永宁洞的示踪结果与五家寨的示踪结果相似,在二、三号暗河管道口均接收到了信号,且二号暗河口接收到的浓度均是三号暗河口接收浓度的三分之二左右,由此可判断,永宁消水洞与五家寨消水洞之间有管道连通。结合流域内的地质构造特征,推测地下暗河是沿蒙自东山边缘的大断裂展布。五家寨至南洞口一段暗河展布情况则根据物探和钻孔信息来推测,物探结果显示南洞口附近的碎屑岩地层厚度不超过 200 m,其低于南洞地下河的发育深度,不能作为阻水边界的存在,地下河管道有从碎屑岩地层

下方穿过的可能。城红寨消水洞投放的示踪剂仅在三号暗河口接收到信号,说明三号暗河总体通向城红寨方向。此外,在南洞口附近的一钻孔揭露了一较大地下管道,搅动钻杆约一天后南洞口二、三号暗河水均变浑浊,由此推测五家寨方向的暗河管道在经该钻孔位置后分为两支,而三号暗河管道位置相对二号暗河管道较低,枯季时二号暗河一部分地下水单向补给三号暗河。另外,流域内的大、小黑水洞为地下暗河的溢洪口,其中,大黑水洞已被证明与石洞消水洞连通^[3],由于它们位置均靠近蒙自东山大断裂,推测连通二号地下暗河;老燕子处亦有一大型的天坑,其是地下河经过的重要标志,推测其与城红寨消水洞连通。根据上述讨论,本次实验推测南洞地下河流域内岩溶管道展布如图 12 所示,二号地下暗河的主管道水文地质剖面示意图如图 13 所示。

(2)从本次示踪试验的回收率结果分析,瓦白白消水洞示踪剂回收率达到了 94.6%,近乎实现了完全回收;永宁消水洞投放示踪剂的总回收率仅为 29.4%,一方面是由于三号管道在南洞口还存在其它裂隙出口,且出流量较大,另一方面可能是由于其投放位置距离南洞口相对较远,示踪剂运移时间较长,而示踪仪接收时间较短,本次的示踪结果曲线可能显示不完全,造成计算得到的回收量较低;从城红寨消水洞及五家寨消水洞投放的示踪剂回收率偏低,分析亦是由于三号管道存在其它裂隙出口所造成。

(3)从一、二号暗河管道口接收得到的示踪曲线较为平滑,而从三号暗河管道口接收得到的示踪曲线都有许多锯齿状的杂峰,反映出一、二号暗河发育较早,管道较为畅通。三号暗河较为年轻,洞口处多为脉管状裂隙。探洞结果也验证了这一推论。一、二号暗河内洞穴堆积和阶地发育,分别呈老年期和壮年期地下河形态。三号暗河往里数米人则不能进入,地下水从脉管状裂隙中涌出,暗河口周边亦有其他裂隙出水。

5 结论

南洞地下河系统开发潜力巨大,但展布情况与结构特征较为复杂,本次示踪试验成功运用了新的高精度地下水示踪方法,结合流域内的一些重要水文地质信息,推测了南洞地下河流域岩溶管道的展布,并对各暗河的管道结构特征进行了分析,得到以下结论:

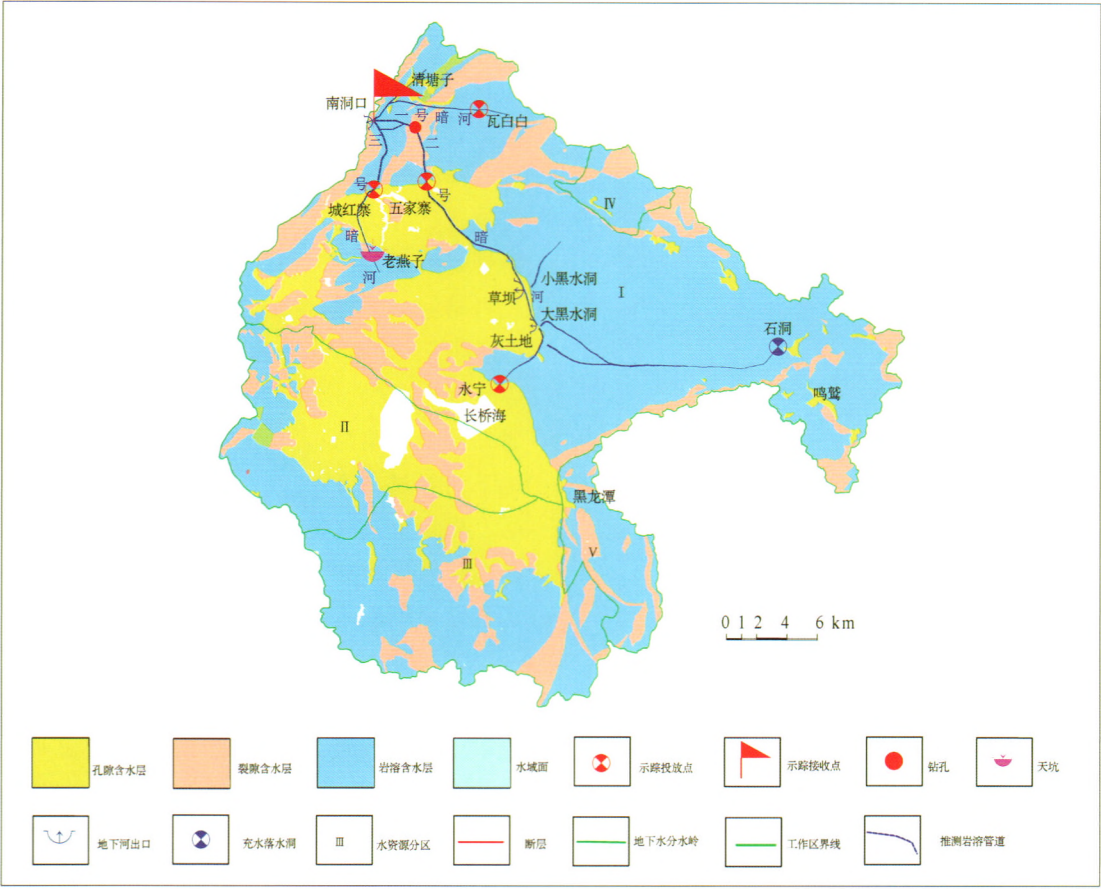


图 12 南洞地下河流域推测岩溶管道的展布

Fig. 12 Distribution of speculative karst conduits in Nandong underground river

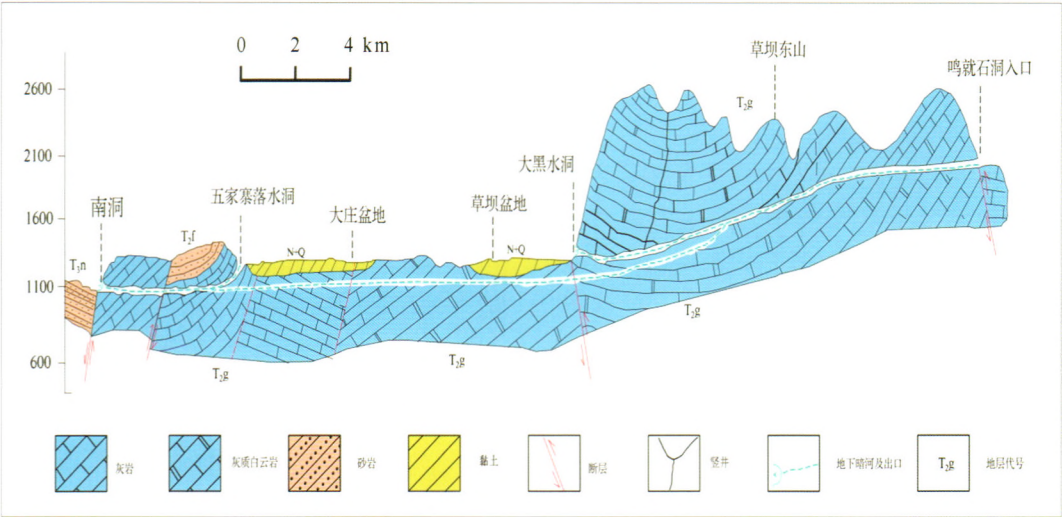


图 13 二号暗河主管道水文地质剖面示意图

Fig. 13 Hydrogeolog the main conduits of No. 2 underground river

(1)一号地下暗河为一独立的含水系统,补给区为瓦白白一带;二号暗河经五家寨,然后沿蒙自东山

大断裂通往永宁和石洞方向;三号暗河总体通往城红寨方向。

(2)二号暗河和三号暗河在南洞口附近有连通,三号暗河管道位置相对二号暗河管道较低,枯季时二号暗河一部分地下水补给三号暗河。

(3)一、二号暗河发育较早,管道较为畅通,分别呈老年期和壮年期地下河形态,三号暗河则相对发育较晚,出口处为脉管状裂隙。

参考文献

- [1] 张祯武,杨胜强. 岩溶水示踪探测技术的新进展[J]. 工程勘察, 1999(5):40-43.
- [2] 虎维岳,郑刚,闫兰英. 应用化学示踪技术探查深部岩溶发育特征研究[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2):205-211.
- [3] 喻希乐. 利用连通试验查找导水通道的应用研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2013, 21(4):18-21.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 陈长生,王家祥,张海平,等. 示踪试验在复杂岩溶区工程中的应用[J]. 水电与新能源, 2015(1):22-25.
- [7] 易连兴,卢海平,赵良杰,等. 鱼泉地下河示踪试验及回收强度法管道结构分析[J]. 工程勘察, 2015(2):46-50.
- [8] 陈雪彬,周军,蓝家程,等. 基于在线示踪技术的岩溶地下河流场反演与水文地质参数估算[J]. 中国岩溶, 2013, 32(2):148-152.
- [9] 邓振平,周小红,邹胜章,等. 在线监测仪在岩溶地下水示踪实验中的应用[J]. 水资源保护, 2009, 25(3):75-78.
- [10] 何师意, Michele L. 章程,等. 高精度地下水示踪技术及其应用[J]. 地球学报, 2009, 30(5):673-677.
- [11] 潘国林,洪天求. 地下水示踪试验在岩溶塌陷成因判别中应用分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(1):125-129.
- [12] 朱学愚,徐绍辉,司进峰. 示踪试验在淄博裂隙岩溶水污染治理中的应用[J]. 中国岩溶, 1997, 16(2):132-137.
- [13] 中国地质科学院岩溶地质研究所. 云南南洞地下河系统的形成演化及水资源开发利用研究[R]. 1991.
- [14] 康彦仁,梁彬. 云南南洞地下河系统的水文地质特征[J]. 水文地质工程地质, 1996(4):28-30.
- [15] 张贵,周翠琼,康晓波. 云南开远南洞地下河水水质演变特征[J]. 中国岩溶, 2008, 27(4):366-370.
- [16] 聂艳华,段文刚,树锦. 示踪法定量分析水流连通问题[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(2):16-19.
- [17] 孙恭顺,梅正星. 实用地下水连通试验方法[M]. 贵阳:贵州人民出版社, 1988:154-203.

Tracer tests on distribution and structural characteristics of karst channels in Nandong underground river drainage

ZHAO Yi, LI Yanning, QIN Xingming, HONG Tao, CHENG Ruirui, LAN Funing

(Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Rehabilitation, MLR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract The high precision tracer tests were carried out to delineate the distribution of part karst channels in the Nandong underground river drainage and to analyze their structural characteristics. The results show that the No. 1 underground stream has an independent water system, with its recharge area around Wabaibai. The chief channels of No. 2 underground stream are overall towards to Yongning and Shidong. The channels of No. 3 underground stream lead to Chenghongzai. The channels of No. 2 and No. 3 underground streams meet each other nearby Nandong outlets where the No. 2 stream supplies No. 3 stream during dry seasons. In addition, No. 1 and No. 2 underground streams present morphology of old and adult ages, respectively, and their courses are relatively fluent. Whereas, the No. 3 underground stream developed later and has some cracks nearby its outlet. Finally, this paper infers and maps the general distribution of karst channels based on the existing data and the hydrogeological conditions in the drainage, providing a theoretical basis for the future karst hydrogeology surveys, geophysical prospecting, drilling and groundwater exploitation and utilization in this region.

Key words tracer test, Nandong underground river, karst channels, distribution, structural characteristics

(编辑 吴华英)