

# 桂林硝盐洞洞穴滴水示踪及气候环境意义研究

殷建军,郭小娇,姜光辉,郭芳,唐伟,汤庆佳,刘绍华

(国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室,国际岩溶研究中心,中国地质科学院岩溶地质研究所 广西 桂林 541004)

**摘要:** 洞穴滴水对大气降水的滞留时间的研究是准确解译洞穴沉积物气候环境代用指标的重要内容。由于研究尺度和技术手段的差异,目前对滞留时间的研究重视程度仍不够。基于此引入水文地质领域成熟的示踪方法,对桂林丫吉硝盐洞滴水对大气降水响应时间进行了连续高分辨率的研究。利用野外自动化荧光仪和荧光示踪剂,实现了滴水的自动化示踪研究,节省了人力物力且提高了分辨率。通过两次示踪试验,确定了桂林丫吉硝盐洞滴水雨季对大气降水的响应时间小于48h,一些强降雨事件,滞留时间甚至小于4h。发现滴水的温度变化可以作为高分辨率监测时大气降水形成径流的示踪剂。对于桂林丫吉硝盐洞XY5常年性滴水点,雨季日降雨强度大于16.3mm就可以形成径流,并被监测到。XY5滴水点主要存在两个水源补给,常年的基流补给和大气降水的快速补给。这些认识对洞穴滴水监测和洞穴沉积物古气候环境重建有着很好的借鉴意义。

**关键词:** 滞留时间;示踪试验;洞穴滴水;硝盐洞;桂林

中图分类号:P641

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2017)04-0018-06

洞穴滴水监测一直是研究岩溶含水层和洞穴沉积物气候环境信号表达的关键手段。通过对洞穴滴水的监测,可以准确反映岩溶含水系统径流路径、径流过程,以及对大气降水的调蓄、存储过程,是通过工程措施解决岩溶区饮用水问题的基础。同时洞穴滴水监测是研究洞穴沉积物气候环境代用指标气候环境意义的重要中间过程。洞穴滴水监测是大气-土壤-岩溶含水层-现代沉积物这系列过程的关键环节,是解译的关键。同时在高分辨率气候环境重建过程中,如年际、年内分辨率的研究尺度,涉及到一个重要的问题,那就是洞穴沉积物对洞穴外界气候环境变化的响应时间。即沉积的沉积物响应的是何时的气候环境信息。而这一过程就需要对洞穴滴水进行示踪调查。目前对洞穴滴水的示踪研究实例不多,主要是基于不同的时间尺度和时间分辨率来开展的。现主要的研究方法有:放射性同位素定年法( $^3\text{H}/^3\text{H}-^3\text{He}$ 法)<sup>[1-3]</sup>、 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 法<sup>[4]</sup>、工业盐法(如NaCl、KBr等)<sup>[5-6]</sup>和滴水中荧光物质监测<sup>[7-8]</sup>等。但以上方法分辨率多为月、甚至年,且受到取样频率和方法的限制,并没有大规模开展。本研究将水文地质成熟的示踪方法应用到洞穴滴水监测中,实现了简单、高

分辨率的目的,将滴水滞留时间精确到小时,大大提高了数据的准确性,建议在洞穴滴水监测、特别是滴水滞留时间、滴水补给范围确认、滴水径流路径研究中进行推广,为准确研究洞穴沉积物气候环境代用指标的意义服务。

## 1 研究区概况

硝盐洞( $25^{\circ}14'53''\text{N}$ ,  $110^{\circ}22'33''\text{E}$ )位于桂林丫吉试验场。丫吉试验场位于桂林市东南郊约8km的丫吉村,处于峰丛洼地与峰林平原交界区,是岩溶水文地质、地质生态、岩溶作用与碳循环研究的重要场所。桂林气候类型属于亚热带季风气候,多年平均气温为 $19.0^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量为1883mm(1951~2011年),降水主要集中在每年3~8月份,降水量占全年降水的77%。硝盐洞位于丫吉试验场10号洼地东面峰体中,洞口海拔197.55m,为一近东西方向发育的厅堂式洞穴(图1)。洞穴长100m,宽1~50m,高5~30m。洞穴围岩为上泥盆统融县组灰岩( $\text{D}_3\text{r}$ ),顶板厚度10~60m,上覆土壤层从裸露到1.4m,植被主要为灌丛和藤本植物。XY5滴水点为洞穴内一常年性滴水点,滴水点顺

收稿日期:2016-04-25

基金项目:中国地质科学院基本科研业务费项目(YWF201414);岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2014025,201319);国家自然科学基金项目(41172231,41472239,41502176);中国地质调查局地调项目(12120113006700,DD20160305)

作者简介:殷建军(1985-),男,湖南醴陵人,博士,副研究员,主要从事全球变化与岩溶环境研究。E-mail: david1985\_2005@163.com

洞壁形成壁流石、后形成大面积钟乳石,后滴水悬空滴落。XY5 流量收集采用一大型彩条布,将该处滴水全部收集于一处,并用桶接取,进行示踪剂监测、水文观测和物理化学指标监测。XY5 枯季最小流量约为 20ml/min,洪峰流量能达到 15L/min,变化幅度较大。

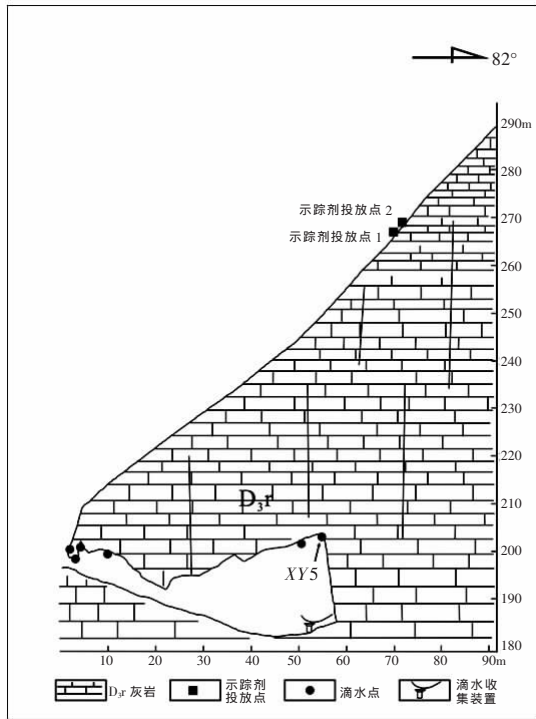


图1 硝盐洞示踪及洞穴剖面图

Fig.1 The tracer test sites and geological profile map of the Xiaoyan cave, Yaji, Guilin

## 2 研究方法

示踪仪器为野外自动化荧光仪。可用于检测荧光素钠(Uranin)、Sulphorhodamin B、天乃宝等示踪剂,并同时测量水温(精度为 0.1℃)。对荧光素钠的检测限为  $2 \times 10^{-11} \text{g/ml}$ ,测量的最小时间间隔为 5s。本次使用的示踪剂为荧光素钠,示踪设置时间间隔为 15min。为了研究硝盐洞常年性滴水点 XY5 对大气降水的响应时间及补给范围,示踪试验进行过 2 次示踪剂的投放,每次均投放 200g,时间选择在降雨前,雨季和旱季分别投放一次。第一次投放时间为 2012 年 5 月 29 日,第二次示踪投放时间为 2014 年 1 月 13 日。示踪剂投放地点选择山坡陡崖下的地表冲沟中,并确认在暴雨时有地面径流通过,为地表径流分布坡面的最顶部,两次示踪剂投放点直线距离约 10m,土壤厚度 10~30cm,为棕色石灰土。第一次投放方法为土壤掩埋和地表抛洒。第

二次投放方法为挖一深 30cm 坑,坑底见到基岩,投放示踪剂,并注水 6L,使示踪剂粉末全部溶于水并完全下渗。气象数据来源于位于安装在丫吉试验场的 HOBO 小型气象站,降水量测量精度为 0.2mm,气温测量精度为 0.1℃。期间由于仪器故障,有部分数据缺失,缺失数据利用桂林市气象站日均降水量数据插补。

## 3 结果

第一次示踪试验,示踪剂投放以后,在 6 月 5~8 日出现不同几次降雨,示踪剂可能在雨水的携带下在土壤层和表层岩溶带大面积分布。由于取样频率和测试手段的限制,此次示踪试验主要证明了示踪剂投放点与洞内滴水点和坡面观测点的连通性,浓度变化及浓度、温度与降雨的关系并未深入研究<sup>[9]</sup>。

在第二次示踪剂投放前,检测到荧光素钠的浓度为  $8 \times 10^{-10} \text{g/ml}$ (由于自然界并不存在荧光素钠,桂林丫吉试验场以前示踪试验前检测到当地本底值低于仪器检测限  $2 \times 10^{-11} \text{g/ml}$ ),水温为 11.6℃。第二次示踪剂投放后,如图 2 所示,水温一直同步快速响应气温的变化,而示踪剂浓度表现为缓慢的衰减。在有效降水的情况下,气温快速降低,水温急剧上升,伴随着示踪剂浓度的快速变化。而随着降雨的结束,水温变化又与气温保持同步变化,示踪剂浓度再次恢复到缓慢衰减变化。示踪剂浓度和水温变化特征基本可以划分为三个阶段。

### 3.1 阶段 水温剧烈变化,示踪剂浓度几乎不变

由于 2013 年冬季降水稀少,在示踪剂投放前两天和当天出现过零星降雨,最大降雨量为 7.2mm(1 月 13 日)。但在 2014 年 2 月 7 日之前并未形成有效降雨,示踪剂投放后检测到示踪剂浓度在缓慢降低。1 月 13 日示踪剂浓度为  $8 \times 10^{-10} \text{g/ml}$ 。其中 1 月 13~15 日,示踪剂浓度出现  $2 \times 10^{-10} \text{g/ml}$  的波动,可能是投示踪剂前,由于从实验室取得和携带示踪剂过程中,示踪剂在身上有沾染,而期间进入硝盐洞取样、分析过程中,对仪器有一定的干扰。到 1 月 27 日,示踪剂浓度降低为  $7.6 \times 10^{-10} \text{g/ml}$ ,而水温在 1 月 14 日处于波动上升期,到 1 月 27 日水温达到 13.05℃(图 2)。到 2 月 5 日,示踪剂浓度已经衰减到  $7 \times 10^{-10} \text{g/ml}$ ,而水温则处于下降期,2 月 5 日水温为 13.80℃。2 月 16~18 日降水量为 20mm,示踪剂浓度并未出现明显变化,浓度值由  $6.8 \times 10^{-10} \text{g/ml}$  衰减到  $6.6 \times 10^{-10} \text{g/ml}$ 。而水温却由 2 月 4 日的最高 14.44℃,迅速降低到 2 月 12 日的最低 9.52℃,降幅达到 4.92℃。而后水温快速攀升,到 2 月

25日,水温已经上升至 $12.66^{\circ}\text{C}$ (图2)。由于没有形成能产生径流的有效降雨,示踪剂浓度表现为缓慢衰减的过程<sup>[8]</sup>,示踪剂的缓慢衰减变化主要是示踪剂不断被消耗,而基流持续补给,引起示踪剂逐步被稀释的过程。而水温主要响应气温的变化。

### 3.2 阶段II水温升高,示踪剂浓度快速升高

2月16~18日,丫吉出现降雨,16~18日降雨量分别为4.8mm,3.0mm和12.2mm。但是并未引起示踪剂浓度的变化。从2月21日起,连续6d的降雨,特别是2月22日和2月23日降水量分别达到17.8mm和19mm。在连续有效降雨的作用下,2月26日6:27示踪剂浓度出现投放以来的第一个峰值,峰值浓度达到 $1.98\times 10^{-8}\text{g/ml}$ ,这个峰值也是整个监测期间出现的浓度最大的一个峰值。同时水温也表现出上升期突然出现一个小峰值,峰值温度达到 $13.3^{\circ}\text{C}$ ,变幅达到 $0.6^{\circ}\text{C}$ (图2)。而后降雨引起的示踪剂浓度变化表现出与第一次相似的特征:即示踪剂浓度出现峰值,水温也同时出现峰值。如果以每次有效降雨结束时间起算,根据示踪剂出现结果,可以计算出滴水对降雨的滞留时间分别为44h(第一次),而后几次降水过程的滞留时间均小于24h。

### 3.3 阶段III水温升高,示踪剂浓度快速降低

由于4月11日~5月5日数据中断,阶段II何时、如何转变成阶段III,目前还不清楚。但是从图2可以看到,水温和示踪剂浓度变化呈现出另一种特征:水温升高,示踪剂浓度降低。5月5日之前,应该发生过一次变化过程,但是由于数据中断,只捕捉到临近结束的一小段。5月10~11日发生了一次明显的示踪剂变化过

程。可以看到,示踪剂浓度快速降低,达到低谷(示踪剂浓度降为 $2.7\times 10^{-10}\text{g/ml}$ ),水温却出现快速上升,由 $15.86^{\circ}\text{C}$ 升至 $17.21^{\circ}\text{C}$ ,变幅达到 $1.35^{\circ}\text{C}$ 。同时计算的滴水对降雨的滞留时间同样小于24h(小于4h)。而后发生的几次降雨事件均表现为同一特征。但是示踪剂的变化也有例外,5月20~22日出现的示踪剂浓度峰值是何原因,目前仍有待研究。阶段III表明第二次投放示踪剂全部经含水层包气带以滴水或其他径流形式排出。示踪剂浓度显示的仍是第一次投放的示踪剂。到2015年1月23日,示踪剂浓度已经衰减到 $2.5\times 10^{-10}\text{g/ml}$ 。

## 4 讨论

### 4.1 滞留时间

大气降水降落到地面,经过土壤层、岩溶含水层,最后以滴水形式进入洞穴,其运移过程中由于土壤层的阻隔、含水层介质的影响导致其运移过程中时间延长、甚至停滞。而大气降水在包气带运移直至以滴水形式排出的时间即洞穴滴水对大气降水的滞留时间。

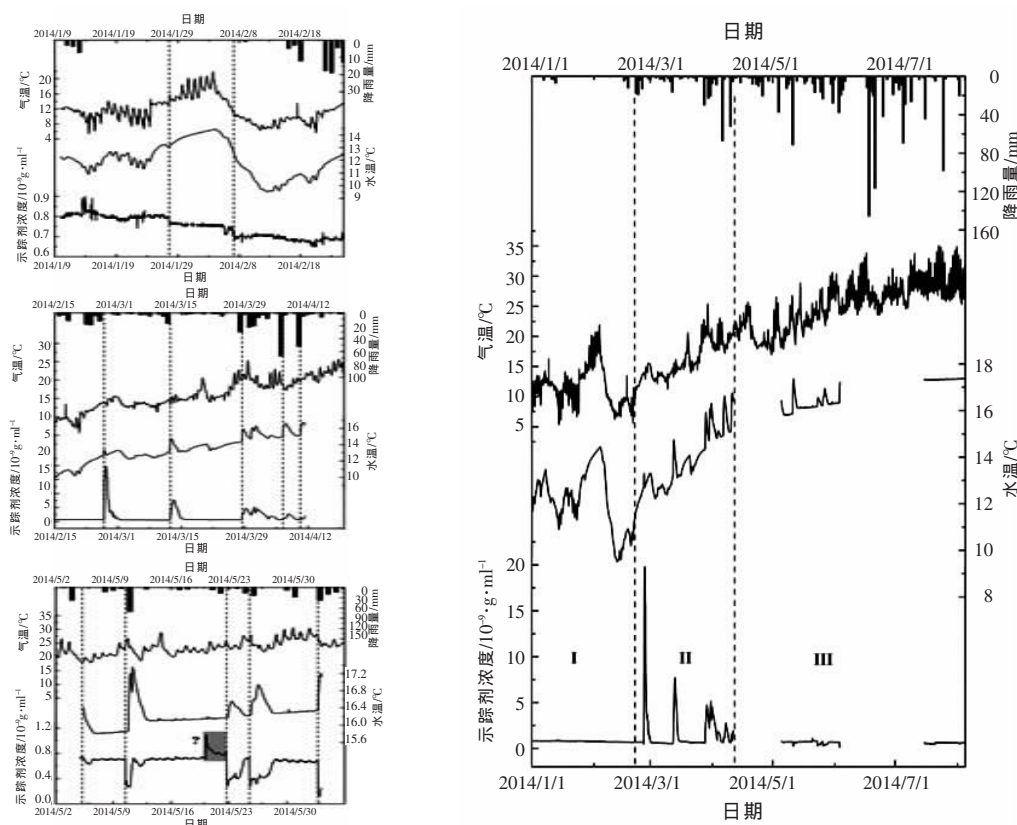


图2 丫吉试验场降雨量和气温变化以及硝盐洞XY5监测的示踪剂浓度和水温变化 (I—阶段I, II—阶段II, III—阶段III, 不连续部分为数据缺失)

Fig.2 Variation of precipitation, air temperature, tracer concentration and water temperature at the site of XY5 (I—stage I, II—stage II, III—stage III, hiatus parts mean the data missing)



而滞留时间除了受到土壤层和含水层介质的影响,还受到降雨强度和土壤相对湿度的控制。如2013年冬季降水相对较少,且温度相对较高,蒸发强烈,土壤相对干燥。在示踪剂注入后,并没有迅速渗入到含水层中。而在降水相对较多的4~6月份,由于降雨较多,土壤湿度相对较大,滴水能够快速响应大气降水的变化。第二次示踪试验的示踪剂运移过程可以划分为以下三个阶段。

#### 4.1.1 土壤扩散阶段

1月13日示踪剂投入到挖好的坑中,注水6L,充分溶解并让示踪剂充分渗入土壤层中。但是在没有有效降雨的情况下,示踪剂主要表现在土壤层中的扩散过程,也可能在非直接补给XY5滴水点的含水层中扩散的过程。从示踪剂浓度的变化可以看出,新注入的示踪剂并没有立即进入到XY5滴水点的补给水流中。XY5滴水点中示踪剂的浓度为缓慢的衰减过程,主要是受到第一次投放示踪剂的影响。且补给水源为占总径流量11.2%的基流<sup>[10]</sup>,即所谓的“老水”。而这股持续供给的“老水”储存、循环、交换、混合时间多长,无法得知。因此在无降水或者无法形成径流的降水条件下,滴水的滞留时间更长。而我们接取的滴水,则代表的是一个过去的、混合的信息。

#### 4.1.2 包气带运移阶段

随着降水的增加,特别是持续降水的出现,土壤湿度逐渐增大。特别是2月21日开始的持续降水过程,土壤层逐渐过饱和,示踪剂在土壤渗透水的携带下,进入岩溶含水层,汇合基流经过含水介质,以滴水的形式排出含水层。而图2也显示,只有在持续的降雨下或者单次降雨强度达到一定阈值,才有大气降水穿过土壤层-包气带,最终以滴水的形式排出。而由于每次降雨的雨水温度相对较高,或者通过土壤层时吸收土壤温度后,水温相对较高<sup>[11]</sup>,每次大气降水直接补给的过程均表现为水温峰值的出现,这是快速的上升,同时也是快速的降低过程,不同于基流补给的水温特征(图2)。而这种直接补给的大气降水不仅引起水温的升高,同时也引起流量的快速增加,以及水化学指标的快速变化<sup>[12]</sup>。这种快速补给的大气降水可以占到总流量的90%以上<sup>[12]</sup>。因此对于能形成直接径流的降雨事件,虽然存在基流的影响,但是却可以通过滴水准确记录。因此对于某些极端事件(如强降雨事件)的发生,石笋记录是完全可以准确记录的。

#### 4.1.3 稀释阶段

随着示踪剂逐渐被携带出土壤层和含水层,1月13日投放的示踪剂逐渐减少。由于数据缺失,我们无法获知何时开始,本次投放的示踪剂就已经基本被排出,但是5月10日这次过程基本可以看出,含水层处于稀释第一次投放示踪剂的阶段。第一次投放的示踪剂一直处于衰减趋势,随着新的降水的加入,示踪剂迅速稀释,表现为示踪剂浓度的低谷(图2)。而降水结束,且雨水进入含水层以滴水形式排出后,示踪剂马上恢复到新雨水进入含水层之前的浓度值(图2)。这个过程实质上与示踪剂在包气带运移的过程一致。

#### 4.2 水温对大气降水响应的指示

在无大气降水或者降雨无法进入含水层的情况下,滴水水温表现出与大气温度同步变化的特征(图2),但是变幅相对气温较小,可能更多的是与洞温长期平衡的结果。而在持续降雨条件下,水温表现出与示踪剂浓度同时上升趋势(图2)。而后期则表现为水温上升,示踪剂浓度降低(图2)。但相同的特征是在有大气降水快速进入含水层时,水温都表现为快速上升和降低的趋势。因此在对洞穴滴水的监测过程中,对于快速响应大气降水的洞穴滴水,水温可能是一个重要的指标。可以通过连续高分辨率的水温监测,准确捕捉到每场降雨的信息,这可能比按月取样、甚至季度取样更能合理的解译洞穴滴水的气候环境信息。

#### 4.3 降雨强度对示踪剂的指示作用

多大的降雨强度能够引起洞穴滴水的水文响应,一直是我们关心和关注的。通过此次示踪过程,可以看到降雨强度对于示踪剂下渗和在含水层中的运移,直到以滴水形式排出的重要作用。通过统计,对于硝盐洞XY5滴水点,可以看到在土壤相对湿润的情况下,日降水量达到16.3mm及以上,示踪剂才能进入含水层以滴水形式排出。而由于土壤相对干燥的情况下,并没有产生大的降雨,因此在土壤相对干燥的情况下,多大的日降雨强度才能引起洞穴滴水响应,目前仍缺乏数据支持。

#### 4.4 多源、混合水源对石笋古气候研究的意义

此次示踪过程可以看到,在没有降雨的情况下,一直存在持续稳定的补给源。第一次投放的示踪剂进入了这个持续稳定的补给源中,因此示踪剂呈现缓慢衰减的趋势。而每次降雨进入含水层后,存在一个混合过程。最明显的就是阶段III(图2)。由于第二次投放的示踪剂基本运移出土壤层和含水层包气带之后,

新的降雨进入就表现出对第一次投放的示踪剂的稀释过程。因此我们可以推断出,XY5滴水点主要存在两个补给源、而两个补给源至少存在部分介质重合,最后汇合从XY5以滴水形式排出。因此在洞穴监测中就必须意识到:采集的一次滴水可能并不是一次降水形成的,而是混合的结果;我们采集的一次滴水可能除了最近的大气降水还有多次、多路径来源的水的一个混合的结果。因此在用滴水结果解释石笋古气候意义的时候,特别是年际、甚至季节尺度指标的变化时,需要谨慎<sup>[8,13]</sup>。而这又涉及到最常见的两种洞穴滴水类型:

(1)常年滴水点。硝盐洞XY5滴水点即为常年滴水点,由于存在基流的持续补给,滴水常年不断,而雨季由于能得到降雨的快速补给,则表现出明显的旱季和枯季两种特征。雨季在降雨的补给下,若单场降雨能形成径流,那么这场降雨在滴水的总流量的比例将达到90%以上,那么这次降雨期间滴水主要反映的是单场降雨的信息。而降雨过后又表现出多源、多时期混合的滴水特征。而由于雨季混合的比例更大,则当年雨季降雨在雨季基流中的比例更大。而在旱季,由于能形成径流的降雨相对减少,在无法形成有效径流的情况下,滴水主要反映基流特征,即多源、多时期混合的滴水特征。因此滴水表现出雨季滴水量大,旱季滴水量小<sup>[14-15]</sup>;雨季 $\delta^{18}\text{O}$ 相对更加偏轻,旱季 $\delta^{18}\text{O}$ 相对更加偏重的特征<sup>[16-17]</sup>(如凉风洞和七星洞<sup>[18]</sup>)。而若滴水的滞留时间长,滴水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值则表现为更加均一化,季节性变化特征将不明显。接受这种滴水补给的石笋则更加适合做长尺度的气候变化研究<sup>[19-20]</sup>。

(2)季节性滴水点。季节性滴水点主要受降雨的季节性分配不均,且含水层对滴水点无法产生持续补给所致。因此季节性滴水点主要表现在雨季滴水、旱季断滴。沉积物沉积同样表现为雨季沉积、旱季停止的特征。因此季节性滴水点主要为降雨的直接快速补给,而同位素特征也表现为更多的受到雨季同位素信号的影响<sup>[21]</sup>。因此这种快速响应的滴水点更加适合记录雨季发生的气候事件,如ENSO信号<sup>[22]</sup>及El Niño事件导致的干旱<sup>[23]</sup>。

## 5 结论

选择桂林市丫吉硝盐洞常年性滴水点XY5作为研究对象,利用野外自动化荧光仪和荧光示踪剂,实现了对XY5的高分辨率示踪。通过对示踪结果进行分

析,得到以下主要认识:

(1)常年性滴水点XY5雨季对大气降水的滞留时间小于48h,对高降雨强度的降雨事件的响应时间甚至小于4h,能够快速响应引起径流的降雨事件。但是由于缺少旱季数据,旱季滴水对大气降雨的响应时间有待进一步研究。

(2)对于XY5这种快速滴水点而言,高分辨率水温监测能够捕捉到能形成径流的大气降雨信号。因此水温变化可以作为滴水对大气降水响应时间的示踪剂。

(3)对于XY5而言,雨季日大气降雨强度大于16.3mm时,能够产生径流,可以通过滴水点监测捕捉到当场降雨的信号。

(4)通过对XY5的示踪研究,发现XY5的补给源主要有两种类型:常年性的基流补给和能产生径流的快速降雨补给。而基流是旱季XY5的主要补给源,而对于单场能产生径流的降雨而言,大气降雨可以占到总径流量的90%以上。

(5)通过对XY5的示踪研究,认识到洞穴滴水监测和洞穴沉积物古气候环境重建过程中,对于气候环境代用指标的解译方面需要谨慎。特别是对于年际、年内、季节甚至月尺度气候环境解译时只有清楚滴水类型、滴水补给类型、滴水对降雨响应方式才能给出更加准确和合理的解释。

致谢:感谢中国地质科学院岩溶地质研究所袁道先院士和宋爱玲女士对本人工作的支持。感谢中国地质科学院岩溶地质研究所覃嘉铭、林玉石研究员对本人工作的指导。

## 参考文献:

- [1] 李红春,顾德隆,赵树森,等.北京石花洞地区水系氢氧同位素及氚含量研究——石花洞研究系列之一[J].地震地质,1996,18(4):325-328.(LI Hongchun, GU Delong, ZHAO Shusen, et al. Isotope studies of Shihua cave-I:  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and tritium activity of Shihua cave, Beijing[J]. Seismology and Geology, 1996,18(4):325-328.(in Chinese))
- [2] YAMADA M, OHSAWA S, MATSUOKA H, et al. Derivation of travel time of limestone cave drip water using tritium/helium 3 dating method[J]. Geophysical Research Letters, 2008,35,L08405,doi:10.1029/2008GL033237.
- [3] KLUGE T, RIECHELMANN D F C, WIESER M, et al. Dating cave drip water by tritium[J]. Journal of Hydrology, 2010,394(3-4):396-406.

- [4] 覃嘉铭,袁道先,林玉石,等. 桂林 44ka BP 石笋同位素记录及其环境解译[J]. 地球学报, 2000,21(4):407–416.(QIN Jiaming, YUAN Daoxian, LIN Yushi, et al. Isotopic records of stalagmites from Guilin since 44 ka B.P. and their environmental interpretation [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2000,21(4):407–416.(in Chinese))
- [5] 周运超,王世杰,谢兴能,等. 贵州 4 个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义[J]. 科学通报, 2004,49(21):2220–2227.(ZHOU Yunchao, WANG Shijie, XIE Xingneng, et al. Significance and dynamics of drip water responding to rainfall in four caves of Guizhou, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2005,50(2):154–161. (in Chinese))
- [6] 朱健,班凤梅,蔡炳贵,等. 北京石花洞降水至滴水下渗时间示踪观测[J]. 第四纪研究, 2008,28(3):509–510.(ZHU Jian, BAN Fengmei, CAI Binggui, et al. Tracer monitor of infiltration time from rainfall to drip water in Shihua cave, Beijing [J]. Quaternary Sciences, 2008,28(3):509–510.(in Chinese))
- [7] 贾苒,胡超涌,邱海鸥,等. 天然荧光物质作为岩溶地下水的示踪剂研究——以湖北清江和尚洞为例[J]. 中国岩溶, 2007,26(3):262–265. (JIA Ran, HU Chaoyong, QIU Haiou, et al. Natural fluorescent substance as tracer for karst groundwater: a case study on Heshangdong of Qingjiang, Hubei[J]. Carsologica Sinica, 2007,26(3): 262–265. (in Chinese))
- [8] BAKER A, GENTY D, FAIRCHILD I J. Hydrological characterization of stalagmite dripwaters at Grotte de Villars, Dordogne, by the analysis of inorganic species and luminescent organic matter [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2000,4(3): 439–449.
- [9] 陈国富,姜光辉,周文亮,等. 岩溶石山区山坡表层径流水文动态特征对比分析——以桂林丫吉试验场为例[J]. 水文, 2013,33(5):58–63. (CHEN Guofu, JIANG Guanghui, ZHOU Wenliang, et al. Comparative analysis of surface runoff hydrologic dynamic characteristics in karst mountainous areas: taking Yaji experimental station as study case[J]. Journal of China Hydrology, 2013,33(5):58–63. (in Chinese))
- [10] 周文亮. 岩溶山区包气带洞穴滴水水文水化学过程与水量研究——以硝盐洞研究为例 [D]. 重庆: 西南大学硕士论文, 2013. (ZHOU Wenliang. Study on the Hydrological and Hydrochemical Processes and Water Resources of Cave Drip Water in Karst Mountain Area Vadose Zone: A Case Study on Xiaoyan Cave[D]. Chongqing: Southwest University, 2013. (in Chinese))
- [11] YOSHIOKA M, TAKAKURA S, ISHIZAWA T, et al. Temporal changes of soil temperature with soil water content in an embankment slope during controlled artificial rainfall experiments [J]. Journal of Applied Geophysics, 2015,114:134–145.
- [12] 郭小娇,姜光辉,汤庆佳,等. 典型岩溶石山包气带洞穴水流的水文过程浅析[J]. 中国岩溶, 2014,33(2):176–183.(GUO Xiaojiao, JIANG Guanghui, TANG Qingjia, et al. Analysis of hydrological process of drip water in the aeration zone of a typical karst stone hill[J]. Carsologica Sinica, 2014,33(2):176–183. (in Chinese))
- [13] MCDONALD J, DRYSDALE R, HILL D, et al. The hydrochemical response of cave drip water to sub-annual and inter-annual climate variability, Wombeyan caves, SE Australia[J]. Chemical Geology, 2007,244(3–4):605–623.
- [14] 张美良,朱晓燕,林玉石,等. 桂林盘龙洞滴水的物理化学指标变化研究及其意义[J]. 地球与环境, 2009,37(1):1–10. (ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, LIN Yushi, et al. Study on the variation of physical-chemical properties of dripping water in the Panlong cave in Guilin and its significance[J]. Earth and Environment, 2009,37(1):1–10. (in Chinese))
- [15] 张美良,朱晓燕,李涛,等. 桂林现代洞穴碳酸盐——石笋的沉积速率及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011,31(1):125–133. (ZHANG Meiliang, ZHU Xiaoyan, LI Tao, et al. Study on sedimentation rate of modern cave stalagmite carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) deposits and its Environmental significance: a cave from Panlong cave, Guilin, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011,31(1):125–133. (in Chinese))
- [16] TREBLE P C, CHAPPELL J, GAGAN M K, et al. In situ measurement of seasonal  $\delta^{18}\text{O}$  variations and analysis of isotopic trends in a modern speleothem from southwest Australia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005,233(1–2):17–32.
- [17] MATTEY D, LOWRY D, DUFFET J, et al. A 53 year seasonally resolved oxygen and carbon isotope record from a modern Gibraltar speleothem: reconstructed drip water and relationship to local precipitation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008,269(1–2):80–95.
- [18] LUO Weijun, WANG Shijie, XIE Xingneng. A comparative study on the stable isotope from precipitation to speleothem in four caves of Guizhou, China[J]. Chemie der Erde, 2013,73(2):205–215.
- [19] BALDINI J U L, MCDERMOTT F, FAIRCHILD I J. Spatial variability in cave drip water hydrochemistry: implications for stalagmite paleoclimate records[J]. Chemical Geology, 2006,235(3–4):390–404.
- [20] LACHNIET M S. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values[J]. Quaternary Science Reviews, 2009,28(5–6):412–432.
- [21] AYALON A, BAR-MATTHEW M, SASS E. Rainfall-recharge relationships within a karstic terrain in the eastern Mediterranean semi-arid region, Israel:  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  characteristics [J]. Journal of Hydrology, 1998,207(1–2):18–31.
- [22] MOERMAN J W, COBB K M, PARTIN J W, et al. Transformation of ENSO-related rainwater to dripwater  $\delta^{18}\text{O}$  variability by vadose water mixing[J]. Geophysical Research Letters, 2014,41:7907–7915.
- [23] MCDONALD J, DRYSDALE R. The 2002–2003 El Niño recorded in Australian cave drip waters: implications for reconstructing rainfall histories using stalagmites [J]. Geophysical Research Letters, 2004,31,L22202,doi:10.1029/2004GL020859.

- Hohai University (Natural Science), 2009,37(1):32–35. (in Chinese))
- [6] 张羽. 城市水源地突发性水污染事件风险评价体系及方法的实证研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2006. (ZHANG Yu. Empirical Study on Risk Assessment System and Method of Urban Water Source Sudden Water Pollution Event [D]. Shanghai: East China Normal University, 2006. (in Chinese))
- [7] 金光炎. 论水文频率计算中的适线法 [J]. 水文, 1990,(2):1–6. (JIN Guanyan. Discussing on curve-fitting method in hydrological frequency calculation [J]. Hydrology, 1990,(2):1–6. (in Chinese))
- [8] 黄振平, 萨迪伊, 王春霞, 等. 关于适线法中经验频率计算公式的对比研究 [J]. 水利水电科技进展, 2002,22(5):5–7. (HUANG Zhenping, SA Diyi, WANG Chunxia, et al. Study on formulas for calculation of empirical frequency in curve-fitting method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002,22(5):5–7. (in Chinese))
- [9] 河海大学. 南京市高淳区水资源综合规划 [R]. 2008. (Hohai University. Comprehensive planning of water resources in Gaochun district of Nanjing [R]. 2008. (in Chinese))
- [10] 江苏省水文水资源勘测局南京分局. 固城湖区螃蟹养殖污染负荷分析及水环境承载力研究 [R]. 江苏省水利厅, 2012. (Nanjing Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Jiangsu Province. Study on pollution load and water environment carrying capacity of crab culture in Gucheng lake area [R]. Water Resources of Jiangsu Province, 2012. (in Chinese))

## Effect of Wuhu–Shanghai Canal Renovation on Water Quantity in Gucheng Lake

GONG Laicun<sup>1</sup>, ZHOU Yi<sup>2</sup>, YU Feilong<sup>1</sup>, LI Xianghua<sup>1</sup>, CHEN Wenquan<sup>1</sup>, LIU Miao<sup>2</sup>

(1. *Nanjing Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Nanjing 210008, China;*  
2. *Jiangsu Hydrology and Water Resource Survey Bureau, Nanjing 210008, China*)

**Abstract:** Wuhu–Shanghai Canal is an important inter-provincial trunk channel, and it was planned to renovate and meet Grade III standard navigable waterway. The Gucheng Lake is an important source of drinking water, and the Wuhu–Shanghai canal navigation will reduce the quantity of the Gucheng Lake substantially. In this study, the variation of water quantity in the Gucheng Lake after the renovation were calculated by modeling. The results show that opening-gate 10 times per day will result in the water losses of  $1.71 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ , and the loss is  $2.87 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$  for 20 times per day. The normal water level of the Gucheng Lake is 9.5m, corresponding to storage capacity of  $1.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ . The Gucheng Lake will loss normal water quantity by 133.6% and 224% if the renovation is completed and open to navigation. In addition, if the gate open 20 times per day, the Gucheng Lake will have to supplement water quantity to meet the water demand. If the preparation reach 90% of that in normal year, the Gucheng Lake need  $0.64 \times 10^8 \text{ m}^3$  supplement water per year, which is almost half of the storage capacity of the Gucheng Lake.

**Key words:** Wuhu–Shanghai Canal; Gucheng Lake; water quantity

(上接第 23 页)

## Tracer Test of Drip Water in Xiaoyan Cave, Guilin and Its Climatic and Environmental Significance

YIN Jianjun, GUO Xiaojiao, JIANG Guanghui, GUO Fang, TANG Wei, TANG Qingjia, LIU Shaohua

(*Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources and Guangxi, International Research Center on Karst under the Auspices of UNESCO, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Science, Guilin 541004, China*)

**Abstract:** The study on the residence time of cave drip water responding to the rainfall is important for accurate interpreting the meaning of the climate and environmental index in cave speleothems. For the difference of research scales and techniques, it is not paid enough attention to in the past. So this paper introduced to the tracer test technique often used in hydrogeology for cave residence time research, and made the Xiaoyan Cave in Yaji Experimental Site, Guilin, for an example. It improved the resolution in cave drip water monitoring, by using GGUN–FL30 in-situ flow-through fluorometer and tracer uranin. Based on twice tracer tests, we determined the residence time of perennial drip site XY5 in Xiaoyan Cave is less than 48 hour in rainy season, and even less than 4 hour in some rainstorm events. Meanwhile, the drip water temperature can be used as a tracer for rainfall which can produce groundwater runoff in high resolution monitoring. The runoff can be monitored when the daily rainfall is up to 16.3mm. At least two recharge sources can be identified, one is perennial base flow and the other is fast groundwater runoff produced by rainfall.

**Key words:** residence time; tracer test; cave drip water; Xiaoyan Cave; Guilin