

贵州4个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义

周运超 王世杰* 谢兴能 罗维均 黎廷宇

(中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002. *联系人, E-mail: sjwang@ms.gyig.ac.cn)

摘要 在雨季, 采用 NaCl 示踪的方法, 对贵州珠江水系的 4 个岩溶洞穴(荔波凉风洞、都匀七星洞、安顺将军洞和镇宁犀牛洞)滴水点水的来源、滴水对大气降雨的响应尺度、水动力学过程等进行研究, 揭示出由于岩溶洞穴环境、水运移路径的联通性、水动力学过程等的不一致, 4 个洞穴的不同滴水点滴水对大气降雨响应的尺度为 0~40 天。根据水在洞穴顶板的运移特性、水的运行方式、水头类型等水文学特性的差异, 将这 4 个洞穴的滴水点划分成 5 种水动力学类型。由于不同洞穴不同滴水点水-土、水-岩作用的时间尺度、作用方式、水运移路径等的差异, 影响到岩溶次生沉积物的物质来源及量度标准, 加之不同洞穴各滴水点水动力条件的极大差异, 岩溶次生沉积物过去环境变化指标的解译应该有洞穴滴水水动力条件的结果作为支撑。根据目前对这 4 个洞穴众多滴水点滴水电导率的监测, 电导率与大气降雨量的一致变化, 意味着洞穴滴水形成的岩溶次生沉积物的元素含量具有记录岩溶环境过去变化的意义, 但应以多个点的研究结果来保证解译的正确性。

关键词 岩溶洞穴 滴水 示踪 环境指示 水动力特征

岩溶过去环境记录在短尺度、高分辨率全球变化研究中已成为不可或缺的重要研究内容。准确了解洞穴次生沉积记录信息以及这些信息在洞穴顶板的传递时间、运移方式等对于岩溶次生沉积记录指标的解译具有极其重要的意义。洪都拉斯伯利兹洞穴一石笋稳定碳同位素年、季及以下时间尺度的高分辨率过去记录指示了厄尔尼诺和南方涛动现象, 但是这一重要发现却是基于一个假设, 即形成该石笋的水在洞穴顶板(土壤和岩石层中)运移时间估计是 3~10 个月^[1]。水与洞穴顶板基质之间作用时间的长短或含 CO₂ 水在含水层的脱气作用将导致岩溶洞穴次生沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值记录 2‰ 的变化, 这一变化可能大于洞穴环境植被变化产生的结果^[2]。水在洞穴顶板中的运移过程与基质的作用时间长短, 还决定了岩溶次生沉积物记录中的 Mg, Mg/Ca, Sr/Ca, Sr 等指标所指示的岩溶过去环境变化, 如大气降雨量的变化等^[3-5]。到目前为止, 国内外岩溶水文学研究中广泛采用示踪剂进行岩溶系统中表层岩溶泉补给边界、岩溶地下水来源、补给状况、圈定地下水边界以及水的运动及转移时间等的研究^[6-12]。国际上有一些研究是针对洞穴滴水的示踪, 如斯洛文尼亚 Postojnska Jama 洞的荧光剂示踪研究污染物的运移^[13], 美国印第安纳 Marengo 洞的荧光剂示踪研究表层水和滴水有机物的季节变化^[14] 以及以色列 Soreq 洞穴 ³H 示踪研究滴水的传输时间^[15] 等。这些均显示出洞穴滴水对大气降雨的响应,

时间短的仅 45 min, 长的可达 30 年左右, 但较少关注大气降雨在岩溶洞穴顶板不同基质内运移的水动力学过程。本文以贵州珠江水系 4 个洞穴的滴水为研究对象, 探寻在岩溶洞穴过去环境次生沉积记录高分辨率、短时间尺度研究中滴水的来源、水在洞穴顶板运移时间、运移方式等, 以利于进一步准确了解洞穴顶板内源于大气降雨的水的运移过程对岩溶次生沉积指标的影响, 及对岩溶次生沉积记录高分辨率、短时间尺度环境信息的解译。

1 研究方法

1.1 研究点概况

中国北方岩溶区古环境记录研究已经取得了显著的成果, 而南方岩溶区的古环境记录研究也愈来愈受到关注^[16,17]。为此, 我们在贵州珠江流域岩溶区域选择 4 个洞穴, 荔波凉风洞、都匀七星洞、安顺将军洞和镇宁的犀牛洞进行定位研究。4 个洞穴的基本情况见表 1。

1.2 研究方法

() 示踪剂的选择。采用示踪研究的方法, 在每个洞选择一个滴水点进行示踪(凉风洞为 1#, 七星洞为 2#, 将军洞为 1#, 犀牛洞为 1#)。考虑到环境保护、廉价、易购、易测、土壤岩石对示踪剂的影响以及对后续研究的影响等诸多方面后, 选择食盐作为洞穴滴水点的示踪剂。为了能够在滴点收集到足够

表 1 4 个洞穴的基本情况一览

+地点	地理位置	岩层类型	植被类型	顶板厚度 /m	年均温度 /	年均降雨量 /mm	滴点 个数
荔波凉风洞	108°02'29"E, 25°16'21"N	石炭系生物灰岩	原生性森林	100	15.3	1752	5
都匀七星洞	107°16'E, 26°04'N	石炭系石灰岩和白云质灰岩	灌丛草被	50~90	15.9	1445	9
安顺将军洞	106°03'54"E, 26°17'03"N	三叠系白云岩	灌草丛	50~60	14~16	1360	4
镇宁犀牛洞	105°46'35"E, 26°03'27"N	三叠系白云岩	刺丛草坡	20~60	14.4~19.7	1200	3

测定的示踪剂, 食盐用量为 100 kg.

() 示踪剂的施放方法. 对洞内滴点准确定位后, 仔细考查洞顶地貌、岩石产状、节理发育及分布特点等, 分析出大气降水在洞穴顶板的可能路径, 将 100 kg 食盐粗略分成 20 份, 为了能够达到示踪效果, 在 40 ~ 60 m² 的范围内, 以点状埋设的方式, 选择 20 个有土壤覆盖的点, 在每个点将表层土壤挖开, 施入 1 份示踪剂后, 覆土. 这样做的目的是: (1) 降低地表径流对示踪剂的冲刷作用; (2) 直接研究通过大气降雨-土壤渗透-岩石运移过程. 示踪剂的施放时间为 2003 年 6 月 8~16 日.

() 测定方法. 对示踪点滴水进行采样, 隔天采集一个分析样, 持续到检测出一个完整的示踪过程为止. 并每月一次对另外非示踪点进行采样测定. 样品采集好后, 在实验室内进行阴阳离子的测定工作, Cl⁻采用 HP1100 型高效液相色谱仪测定, Na⁺采用 PE5100PC 型原子吸收光谱仪测定. 所有的分析均是在中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室完成. 同时, 在洞穴环境下, 每月一次现场测定滴水点滴率、pH 和电导率. 监测时间自 2003 年 4 月到 2003 年 10 月.

() 大气降雨测定方法. 在进行示踪滴水点样品采集的同时, 采用简易的大气降雨测定器皿和测定方法测定大气降雨量. 将已知直径的塑料圆桶洗净后, 置于屋顶(无树枝遮拦)承接大气降雨, 并记录起止降雨时间, 降雨结束时, 测量桶内水量毫升数, 换算成毫米雨量.

2 结果

2.1 洞穴滴水示踪结果

自 2003 年 6 月 8~16 日起, 分别对 4 个洞穴进行示踪研究工作, 示踪结果及降雨量结果见图 1 和表 2, 表明在短时间内就已经显示出了示踪剂的踪影.

根据凉风洞的示踪结果(图 1(a), (b))显示出, 在施用示踪剂后的第 2 天就有一次高达 71.64 mm 的降雨, 紧接着的示踪点样品中检测出高含量的示踪剂,

即凉风洞滴水对大气降雨的响应速度较快, 但其峰值出现的时间在 7 月 16 日(Na, Cl). 示踪剂峰值前后的变化动态与之前的大气降雨最高量前后动态间的对应关系明显, 因此, 凉风洞洞穴滴水 1# 点对大气降雨的响应时间为 0~36 天. 图 1(a), (b) 中还显示出在针对凉风洞 1# 滴水点进行的示踪研究过程中, 在另外 4 个滴水点同样检测出了高过平均值的示踪剂含量, 意味着凉风洞 5 个滴水点的物质来源间有着一定程度的联系. 但从图 1(a), (b) 中可以看出, 各滴水点示踪剂的多少存在较大差异, 这一方面说明了源自同一区域的物质由于运移路径的不同导致运移量的差异, 另一方面也表示出各滴水点对大气降雨响应的的时间尺度可能由于水运移路径的差异而有区别.

七星洞 2# 滴水点进行的示踪研究结果(图 1(c), (d)). 施用示踪剂后的第 1 次降雨发生在 2003 年 6 月 19 日(即施用示踪剂后第 8 天), 因此, 降雨之前的示踪剂离子的变化可以作为该滴水点的背景值. 示踪剂峰值出现时间 Na 和 Cl 均为 8 月 5 日, 而这一区域的最大降雨量出现在 8 月 15 日, 8 月 5 日的示踪剂峰值实际指示了这一日期之前, 即 6 月 26 日的 32.10 mm 降雨量的作用结果. 滴水点示踪剂含量上的起伏指示了滴水对不同时间段大气降雨的响应. 表明七星洞 2# 滴水点滴水对大气降雨的响应时间尺度为 27~40 天. 即大气降雨在洞穴顶板运移与基质间的作用时间为 27~40 天. 七星洞监测的滴水点为 9 个, 另外 8 个滴水点的检测结果从图 1(c), (d) 中显示较高的示踪剂含量, 而不同的滴水点示踪剂含量升降先后不一, 这一结果同样指示了七星洞 9 个滴水点洞穴顶板物质来源的联通性特点.

将军洞 1# 滴水点的示踪结果见图 1(e), (f). 施入示踪剂后的第 10 天发生第 1 次降雨, 降雨量达到 34.71 mm, 2 天后的滴水样品中示踪剂含量明显上升, 滴水示踪剂含量的变化形成一条较完美的曲线, 且含量极高. 示踪剂的峰值出现在大气降雨后的第 9 天, Na 和 Cl 出现时间也较一致, 仅表现在小范围内的差异. 即将军洞 1# 滴水点对大气降雨的响应时间为 0~9

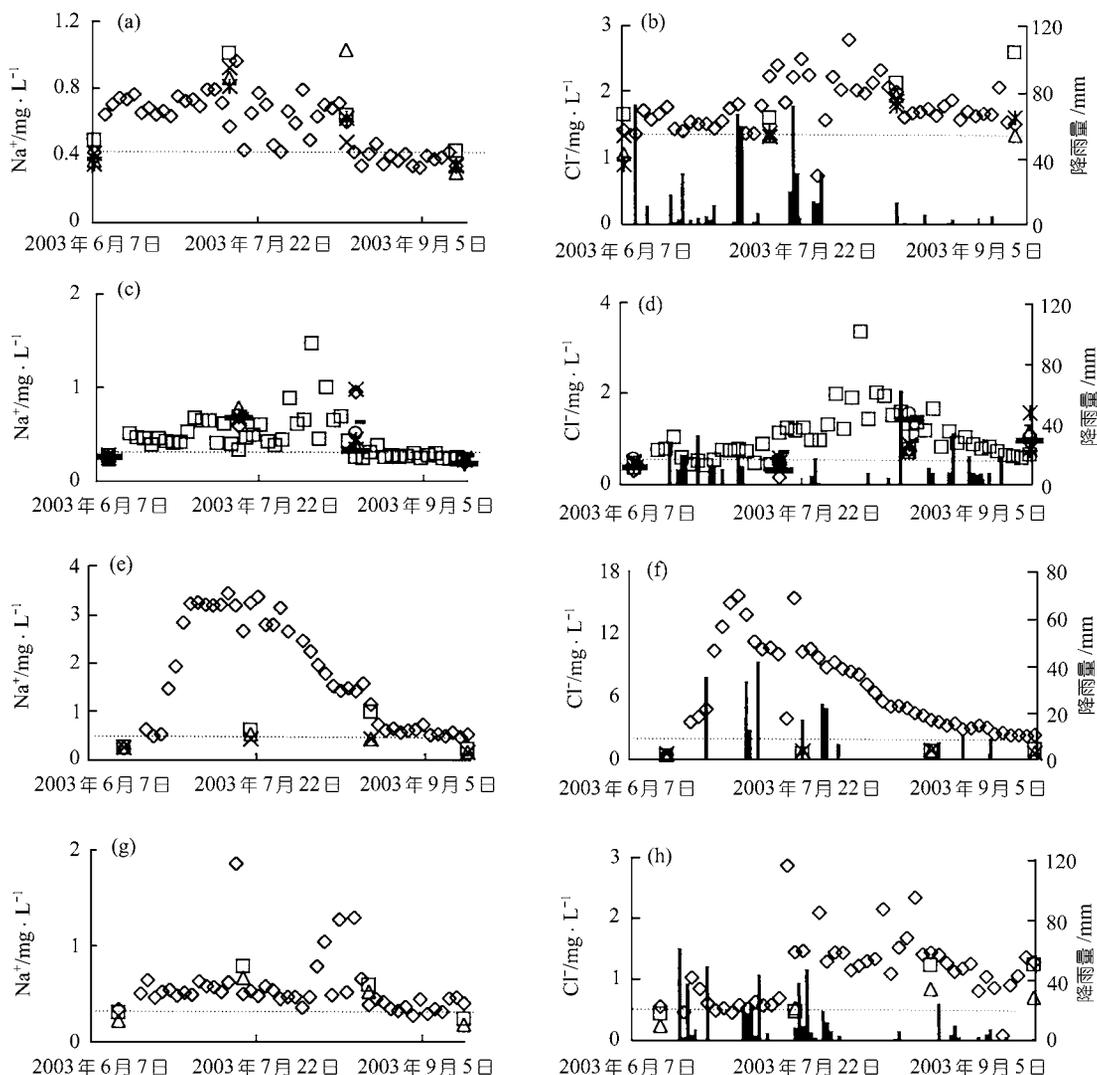


图1 4洞穴示踪结果

: 1#滴水点, : 2#滴水点, : 3#滴水点, x: 4#滴水点, *: 5#滴水点, : 6#滴水点, +: 7#滴水点, -: 8#滴水点, —: 9#滴水点

表2 4个洞穴滴水示踪结果

示踪滴水点	示踪剂施用时间	施用示踪剂后的首次降雨		示踪剂升高日期	最高降雨		示踪剂峰值时间
		时间	降雨量/mm		时间	降雨量/mm	
LFD-1	6月8日	6月10日	71.64	6月12日	6月10日	71.64	7月16日
QXD-2	6月11日	6月19日	25.68	7月16日	8月15日	61.66	8月5日
JJD-1	6月17日	6月26日	34.71	6月28日	7月9日	41.32	7月4日
XND-1	6月15日	6月19日	59.90	7月16日	6月19日	59.90	7月16日

天, 该点滴水对大气降雨的响应极快. 另外的3个滴水点没有显示出示踪剂含量的升降, 表明这3个滴水点与1#滴水点间的联通性较差, 即1#滴水点的物质来源与另3个点间不一致.

犀牛洞1#滴水点的示踪结果见图1(g), (h). 施入示踪剂后第5天(6月19日)开始第1次降雨, 降雨量达到59.90 mm. 但这之后相当长的一段时间内滴水

并未出现明显的示踪剂含量的上升, 1#点滴水最初响应时间为7月16日, 这一时间也是滴水示踪剂峰值的出现时间, 表明犀牛洞1#点滴水对大气降雨的响应时间为28天以上. 另外2个滴水点的示踪剂检测结果也显示出一定的上升, 同样也表现出不同的响应程度, 表明3个滴水点间的物质来源具有一定的同源性.

2.2 洞穴滴水的滴率

洞穴滴水滴率的测定结果见图 2。凉风洞 7 月份日均降雨量最高，而 8、9 月份降雨量少，洞穴滴水点滴率也在改变。但不同的滴水点对大气降雨的响应不一致，1#、5#滴水点滴率变化较大，而其他点则相对变化较小。因此，根据滴率的大小及其滴率变幅大小，可以将滴水点分成两类，即 LFD-1#、5#为一类，特点是滴率快，而变幅也大；其余 3 个点归为另一类，特点为滴率小，变幅也小。

七星洞最高大气降雨量(每月日平均)发生在 6 月份，而洞中各滴水点滴率的变化与降雨量不一致，反映出各滴水的运移过程即水动力学过程的差异以及

水来源的不同。洞穴内滴水滴率的差异较大。根据滴率的大小以及滴率变率的大小，将七星洞滴水分成三类，即 QXD-1#、9#为一组，滴率最低，变幅最小，基本保持恒定；QXD-2#、3#、7#、8#，滴率中等变幅也中等且较平稳；QXD-4#、5#、6#，滴率大，变幅大且升降频繁。

将军洞的最大降雨量发生在 7 月份，但 4 个滴水点滴率的变化与降雨变化均不一致，根据变化的幅度，将洞内 4 个滴点分成两种类型，JJD-1#，滴率最高，变幅最大，动态图显示出剧烈的升降过程；JJD-2#、3#、4#，滴率低，变幅小，基本保持很平稳的状态。

犀牛洞大气降雨量以 7 月份最高，6 月次之，8 月

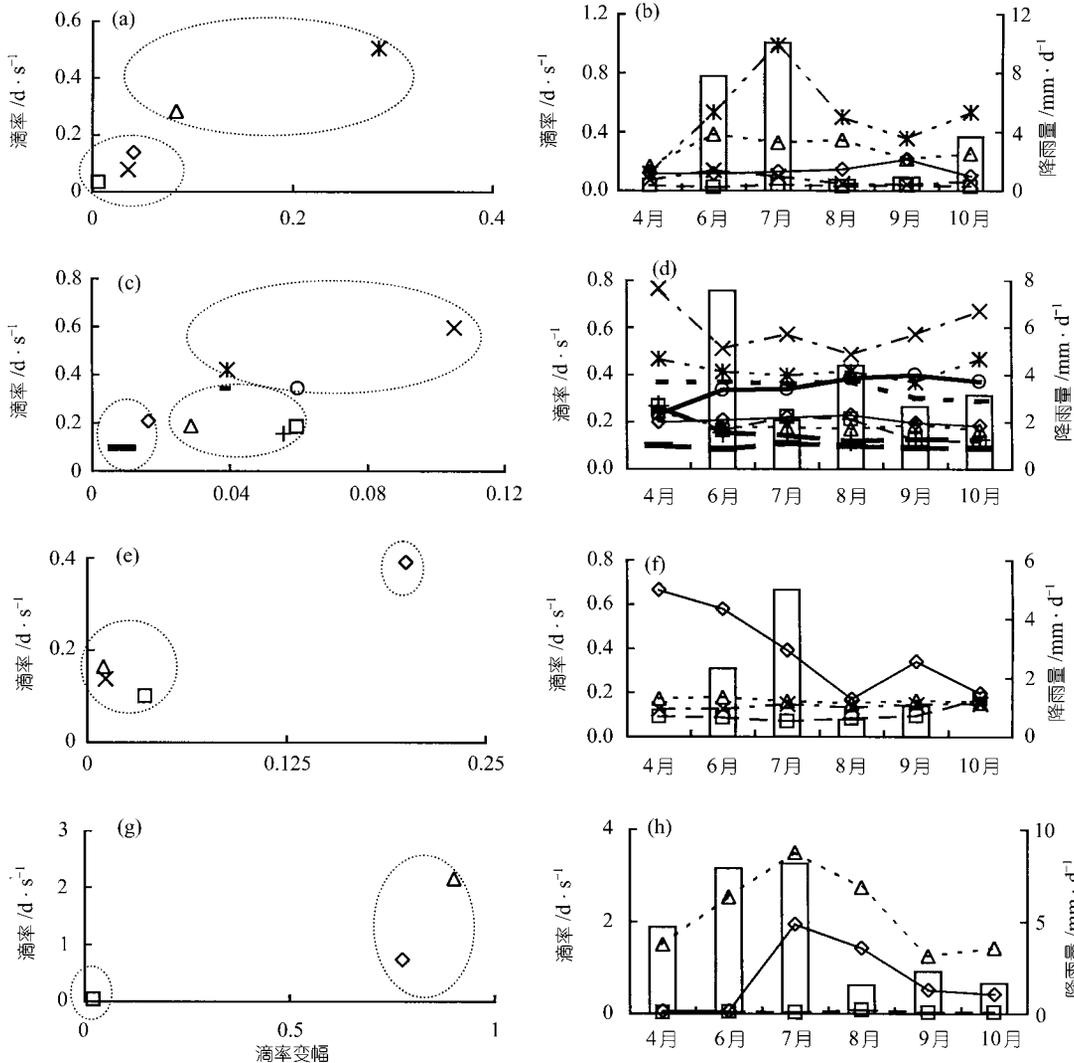


图 2 滴水点滴率结果

: 1#滴水点, : 2#滴水点, : 3#滴水点, ×: 4#滴水点, *: 5#滴水点, : 6#滴水点, +: 7#滴水点, -: 8#滴水点, -: 9#滴水点, : 每月日平均降雨量

最低. 洞穴滴水滴率变化与大气降雨基本保持一致. 3个滴水点的滴率变化明显是两种类型, 即 XND-1#, 3#为一组, 滴率快, 变化大, 与大气降雨的变化较为一致; XND-2#, 滴率小, 变幅也小, 与大气降雨不一致. 纵观4个洞穴各个滴水点滴率的变化特点, 表明除 XND-1#, 3#点滴率最快外, 其余各洞点滴率都很慢.

2.3 洞穴滴水的 pH

根据野外的测定, 滴水 pH 动态见图 3. 从图 3 中可以看出, 凉风洞洞穴滴水的 pH 值变化除 4 月份时有两滴水点与另三点不一致外, 其余时间段所有滴水点的 pH 动态曲线几乎重合. 而其他洞穴各点滴水

的 pH 值动态过程也非常一致, 同时, 各洞穴滴水 pH 值的升降时间有差异, 凉风洞 8 月份低, 七星洞 8 月份低, 将军洞 7 月份低, 犀牛洞则 7, 8 月份均低. pH 值的动态曲线还显示出在干旱季节具有较高的 pH 值, 湿润季节具较低的 pH 值, 表明洞穴滴水 pH 值受到大气降雨的影响而变化.

2.4 洞穴滴水的电导率

每个洞穴所有滴水点电导率的动态曲线均表现出一致的现象, 但不同洞穴滴水电导率的升降有差异, 且基本上均表现出干旱季节电导率较低, 湿润季节较高的特点. 凉风洞 8 月份时电导率形成一低谷, 七星洞的低谷出现在 9 月份, 将军洞也在 8 月份出现

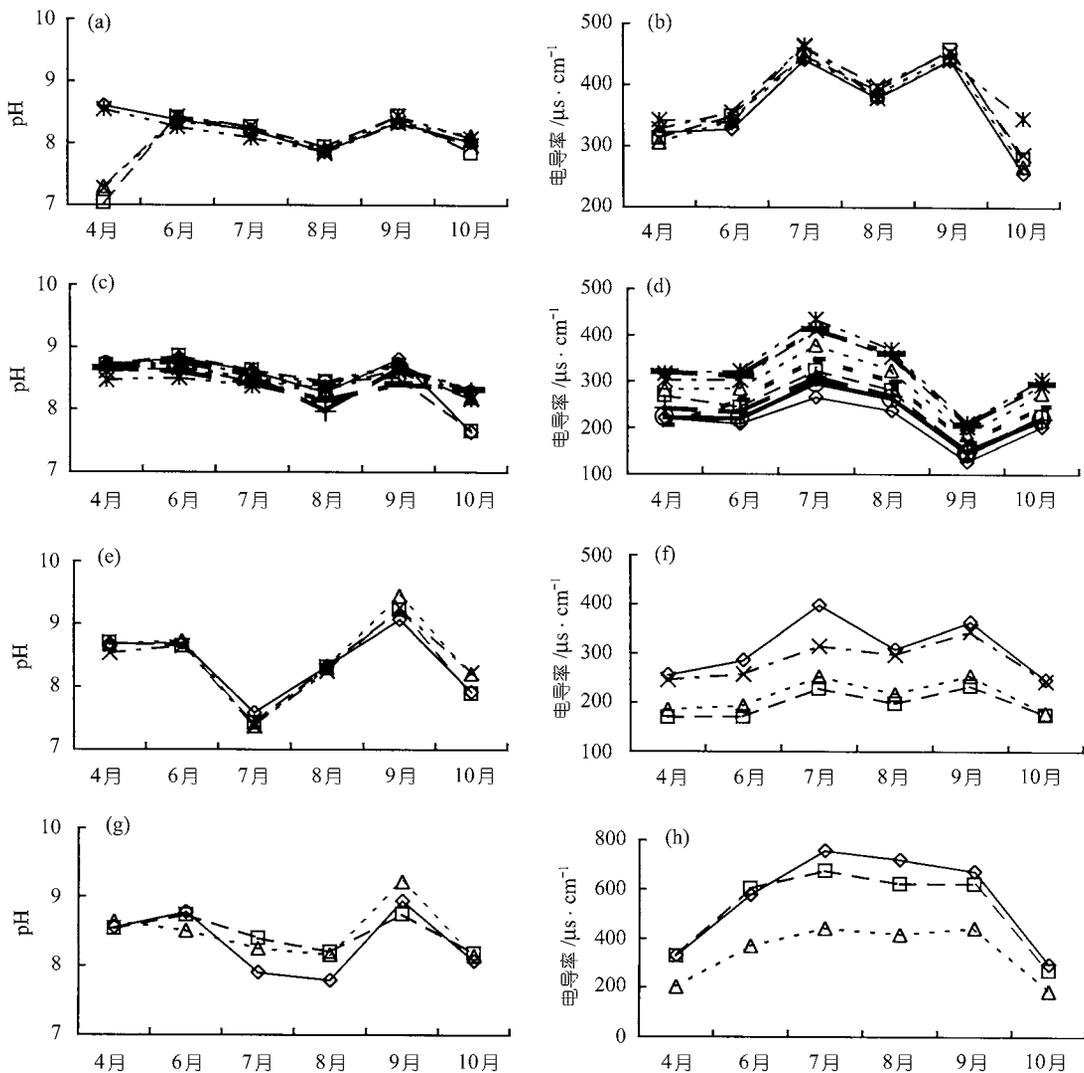


图 3 滴水点 pH 和电导率动态图

: 1#滴水点, : 2#滴水点, : 3#滴水点, ×: 4#滴水点, *: 5#滴水点, : 6#滴水点, +: 7#滴水点, -: 8#滴水点, —: 9#滴水点

低谷, 犀牛洞在湿润季节则未出现低谷, 表现出一定的特殊性.

3 讨论

3.1 岩溶洞穴滴水对大气降雨的响应

4 个洞穴都分布在贵州南部珠江水系, 降雨多集中在 6~8 月份, 且占全年降雨量的 50% 以上, 雨热同季, 年均降雨量达 1000 mm 以上, 干湿季节相较明显; 但因地域变化而略有差异. 通过 NaCl 示踪, 4 个洞穴的滴水均源自于洞外环境, 即洞穴滴水直接响应大气降水(图 1). 同时, 4 个洞穴滴水点对于大气降雨的响应时间尺度均较快, 在 0~40 天左右, 而以将军洞和凉风洞最快, 犀牛洞和七星洞次之. 按洞穴滴水响应大气降雨时间尺度快慢排列, 大致顺序为: 将军洞(0~9 天)、凉风洞(0~36 天)、犀牛洞(28 天)、七星洞(27~40 天). 影响洞穴滴水对大气降雨响应时间尺度的因素有植被覆盖的差异、洞穴顶板厚度、顶板基质特性(如土壤紧实度、结构、土壤、岩石通透特性等)以及大气降雨强度等. 就洞穴顶板而言, 凉风洞最厚, 犀牛洞最薄, 因此, 这 4 个洞穴中洞穴顶板厚度不是主要的水运移控制因素. 凉风洞植被最好, 可以增加大气降雨的入渗量及速率, 加之土壤疏松, 土下岩石节理发育, 容易形成优先流. 因此, 在降雨发生的最初一段时间, 优先流明显而且速度极快. 尽管示踪的 1#滴水点在降雨后即显示了示踪剂的踪影, 受优先流影响最快的还应属于凉风洞 2#, 3#和 4#滴水点. 这一作用结果可以从两个方面得到证据, 图 1(a)在 7 月 14 日的测定中 1#点最低. 同时, 图 3(a)在 4 月份时的测定结果显示 2#, 3#和 4#滴水的 pH 值较 1#和 5#低, 原因在于采样测定前(7 月 11 日, 4 月 11 日)均有一次降雨(6.3 mm, 16.7 mm), 优先流的快速移动影响到这 3 个滴水点的 Na 含量和 pH 值. 从这个意义上

讲, 前期的优先流和后期的基质流共同影响到岩溶洞穴滴水对大气降雨的响应. 将军洞植被差, 但土壤疏松, 透水性能强, 土下岩石节理发育, 也容易形成优先流, 导致滴水快速响应大气降雨. 犀牛洞和七星洞植被为灌草丛, 但土壤粘重, 紧实, 通透性极差, 优先流不明显, 主要以基质流输送水份. 因此, 滴水响应大气降雨的时间较长. 另外, 从洞穴滴水中示踪剂的含量上可以看出, 将军洞 1#滴水点特别高, 它指示了 1#滴水点物质来源的主要点就在施用示踪剂的点上. 而其他三个洞穴的示踪结果仅说明示踪剂的埋设点上有物质运移到滴水点, 但并不是起决定作用的点, 表明洞穴滴水点物质来源范围更大、水的运移路径更多.

3.2 岩溶洞穴滴水的水动力特性

示踪结果表明 4 个洞穴的滴水对大气降雨的响应时间尺度在 0~40 天左右, 均快速响应大气降雨. 但大气降雨进入岩溶顶板后的运移特性、水的运行方式、水头类型等水文学特性对于进一步研究滴水的其他地质作用过程具有举足轻重的作用. 根据对岩溶洞穴滴水的分类、滴水 pH 值变化、滴水电导率动态、滴水物质来源的示踪以及洞穴滴水对大气降雨的响应等的研究, 这 4 个洞穴的滴水可以划分成如下 5 种类型(表 3):

类的主要特点为受到岩溶水的优先流的影响(图 1(a), (b)), 同时也受到基质流的影响(图 3(a), (b)), 有固定的水头, 水头直接与大孔隙、裂隙等联通, 其 pH 值和电导率直接响应大气降雨的变化, 而滴水速率保持恒定. 滴点有 LED-1#, 2#, 4#; JJD-2#, 3#, 4#.

类的主要特点为直接受到包气带水流(优先流和基质流)的影响而发生变化, 变化快, 且具有直接的联通性. 滴点有 LFD-3#, 5#及 JJD-1#.

表 3 4 个岩溶洞穴的滴水点水动力类型分类

水动力类型	主要水流类型	水流路径连通性	水头压力类型	对降雨响应快慢	主要滴水点	备注
	优先流、基质流	连通性好	固定	快	LFD-1#, 2#, 4#, JJD-2#, 3#, 4#	
	优先流、基质流	连通性好	变化	快	LFD-3#, 5#, 1#	LFD-3#的水头容量较小
	基质流、渗滤流	连通性较差	固定	慢	QXD-1#, 9#, 2#	QXD-9#可能以渗滤流为主
	基质流、渗滤流	连通性较差	变化	慢	QXD-2#, 3#, 7#, 8#	
	基质流、渗滤流	连通性较好	变化	慢	QXD-4#, 5#, 6#, XND-1#, #	

类的主要特点为很少受到优先流的影响,而是得到基质流、渗滤流等形式的补充。有固定的水头压力,来水量的大小对其几乎没有影响,但 QXD-9#点可能以渗滤流形式的水来源为主,这是因为该点滴水的电导率比 QXD-1#滴水点的电导率高很多。滴水点 pH 值和电导率也随着大气降雨变化,因此,它受到包气带水的直接影响。XND-2#也属此类。

类的主要特点为受到基质流与渗滤流的共同影响,由于水的流速较慢,对于这些滴水点水头的补给具有较大的滞后性,可能其对大气降雨响应的的时间尺度更长一些。

类的主要特点为受到基质流强烈影响而变化较大,同时,滴水的水头可以随着补给量的增大而水头压力加大,变化较快。主要滴点有 QXD-4#, 5#, 6#; XND-1#, 3#。

3.3 岩溶次生沉积物过去环境记录指征

尽管洞穴滴水点的水动力特性不一,但每个洞穴滴水点的 pH 值和电导率结果(图 3)的一致性显示出大气降雨对滴水性质影响的决定性。当然,植被类型、响应时间尺度、洞穴顶板内水的运动形式(优先流、基质流)、物质来源范围等差异,对滴水 pH 值和电导率会有一些微小的影响。然而,值得注意的是电导率的规律变化、电导率的大小指示了滴水中所含离子量的多少,电导率随着大气降雨的规律性变化意味着岩溶次生沉积物中元素含量等对大气环境变化的指示意义。但是,大气降雨的水动力学特征、水-土及水-岩反应时间、反应过程等对于岩溶次生沉积记录起到了极其重要的决定作用。这 4 个洞穴滴水的水动力学特征、岩溶滴水对大气降雨响应时间尺度等的研究表明(表 1),同一洞穴滴水点间、不同洞穴滴水点间存在着对大气降雨响应时间尺度的差异、水动力过程的差异、水-土及水-岩作用时间及方式的差异以及物质来源的差异等。这样势必造成岩溶次生沉积记录的多样性。现阶段众多岩溶过去环境变化记录研究仅以一根石笋(或其他次生沉积记录载体)的记录指标指示岩溶环境过去变化的结果具有极大的不确定性。因此,只有在清楚洞穴滴水水动力学特性、水-土、水-岩作用过程以及形成岩溶次生沉积物的滴水对大气降雨响应的的时间尺度等的前提下,以多点结果的指标研究岩溶过去环境变化,才能获得过去环境的真实记录。

4 结论

岩溶洞穴顶板环境的差异,不仅导致洞穴滴水

对大气降雨响应时间尺度的差异(将军洞滴水的响应时间最快,为 0~9 天,凉风洞位于其次为 0~36 天,犀牛洞为 28 天,七星洞为 27~40 天),而且还影响到大气降雨在洞穴顶板的运移方式。尽管凉风洞的顶板最厚,但由于其通透性强,加上森林植被对大气降雨的作用,快速的优先流是洞穴滴水的主要来源。而洞穴顶板最薄的犀牛洞,由于植被很差,加上顶板通透性也差,洞穴滴水以基质流为主要运移方式,将军洞具有与凉风洞相似的水运移方式,七星洞则与犀牛洞相似,但各滴水点间水的运移方式又存在极大的差异。这些差异的存在,影响到水在洞穴顶板的运行、水-土、水-岩作用的时间尺度、作用方式,进一步影响到滴水中的物质组成。洞穴滴水是形成岩溶次生沉积物的主要动力和物质来源,由于不同洞穴各滴水点水动力条件的差异极大,因此,岩溶次生沉积物过去环境变化指标的解译应该有洞穴滴水水动力特征的结果作为支撑。根据目前对这 4 个洞穴众多滴水点滴水电导率的测定结果,电导率与大气降雨的一致变化,意味着洞穴滴水形成的岩溶次生沉积物的元素含量具有记录岩溶环境过去变化的意义,但应以多个点的研究结果来保证解译的正确性。

致谢 本工作受中国科学院地球化学研究所知识创新工程前沿领域项目和国家自然科学基金西部重大项目(批准号:90202003)资助。

参 考 文 献

- 1 Frappier A, Sahagian D, González L A, et al. El Niño events recorded by stalagmite carbon isotopes. *Science*, 2002, 298: 18
- 2 Baker A, Ito E, Smart P. L., et al. Elevated and variable values of ^{13}C in speleothems in a British cave system. *Chemical Geology*, 1997, 136: 263~270[DOI]
- 3 Roberts M S, Smart P L, Baker A. Annual trace element variations in a Holocene speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 154: 237~246[DOI]
- 4 Treble P, Shelley J M G, Chappell J. Comparison of high resolution sub-annual records of trace elements in a modern (1911~1992) speleothem with instrumental climate data from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 216: 141~153[DOI]
- 5 Fairchild I J, Borsato A, Tooth A F, et al. Controls on trace element Sr-Mg compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records. *Chemical Geology*, 2000, 166: 255~269[DOI]
- 6 Zhou Wanfang, Beck B F, Pettit A J, et al. A groundwater tracing investigation as an aid of locating groundwater monitoring stations on the Mitchell Plain of southern Indiana. *Environmental Geology*, 2002, 41: 842~851[DOI]
- 7 James B F. Source-identification investigations of petroleum contaminated groundwater in the Missouri Ozarks. *Engineering Ge-*

- ology, 1999, 52: 3~13[DOI]
- 8 George L D, Ponta G M. Dye study tracks historical pathway of VOC-bearing industrial wastewater from failed pond at metals coating facility. *Engineering Geology*, 2002, 65: 159~167[DOI]
- 9 Yuan Daoxian, Drogue C, Dai Aide, et al. Hydrology of the karst aquifer at the experimental site of Guilin in southern China. *Journal of Hydrology*, 1990, 115, (1-4): 285~296[DOI]
- 10 Dennis P C, Brian S M. Karst groundwater basin delineation, Fort Knox, Kentucky. *Engineering Geology*, 2002, 65: 125~131[DOI]
- 11 Plagnes V, Bakalowicz M. The protection of karst water resources: the example of the Larzac karst plateau (south of France). *Environmental Geology*, 2001, 40 (3): 349~358[DOI]
- 12 Elhatip H. The use of hydrochemical techniques to estimate the discharge of Ovacik submarine springs on the Mediterranean coast of Turkey. *Environmental Geology*, 2003, 43: 714~719
- 13 Kogovšek J, Šebela S. Water tracing through the vadose zone above Postojnska Jama, Slovenia. *Environmental Geology*, 2004, 45: 992~1001[DOI]
- 14 Beynen P V, Ford D, Schwarcz H. Seasonal variability in organic substances in surface and cave waters at Marengo Cave, Indiana. *Hydrological Process*, 2000, 14: 1177~1197[DOI]
- 15 Kaufman A, Bar-Matthews M, Ayalon A, et al. The vadose flow above Soreq Cave, Israel: a tritium study of the cave waters. *Journal of Hydrology*, 2003, 273: 155~163[DOI]
- 16 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China. *Science*, 2001, 294(14): 2345~2348[DOI]
- 17 Yuan Daoxian, Cheng Hai, Edwards R, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon. *Science*, 2004, 304(23): 575~578[DOI]

(2004-06-28 收稿, 2004-10-08 收修改稿)