

石漠化地区降雨条件下洞穴滴水时空变化特征

——以贵州石将军洞为例^①

李 渊, 刘子琦, 吕小溪

贵州师范大学 喀斯特研究院/国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心, 贵阳 550001

摘要: 降雨条件下, 对贵州中度石漠化地区石将军洞的 3 个滴水点与洞穴环境进行了短时间尺度监测, 探讨其时空变化特征及石漠化效应, 结果表明: 洞内温度与 CO_2 体积分数变化趋势受洞外环境变化控制, 且滞后性较小. 1# 监测点上覆土壤较厚, 基岩中白云岩的质量分数较高, 溶液渗流时间较长, 降雨响应慢, 连通性较差; 2# 监测点上覆土壤较薄, 基岩中石灰岩的质量分数较高, 降雨响应快, 连通性好; 3# 监测点上覆土壤层薄, 基岩中石灰岩的质量分数较高且岩层厚度大, 降雨响应慢, 连通性较好.

关 键 词: 石漠化; 洞穴滴水; 短时间尺度; 降雨响应

中图分类号: P641.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)08-0128-06

近年来, 石漠化作为“喀斯特环境问题”受到国内外广泛关注, 同时石漠化也是制约我国西南地区可持续发展的首要问题^[1-3]. 随着石漠化综合治理的逐步推进^[4-6], 对石漠化环境机理的研究也在进一步加深, 环境监测是石漠化治理方案中必不可少的重要参数. 目前, 对石漠化地区地表生态环境的研究已有不少, 但是对地下环境的研究相对较少. 以往对洞穴滴水监测频率的研究大多以月际时间尺度反映季节变化对洞穴滴水的影响, 其偶然性较大, 研究条件不够充分. 国内关于洞穴滴水短时间尺度高分辨率的水文地球化学响应研究甚少, 石漠化地区洞穴特殊的地质条件(地表土壤层薄、水土流失严重、降水在土岩中滞留运移时间短等)为研究短时间尺度降雨响应提供了可能. 对短时间尺度洞穴滴水对降雨的响应研究——岩溶水动力响应时间^[7]以及物理化学指标变化规律的研究, 可以清晰反映降雨条件下滴水的时空变化响应机理与运移过程, 探寻岩溶作用的水化学动力变化机理, 准确解释石漠化环境演变信息.

1 研究区概况

石将军洞位于贵州省中西部安顺市西秀区七眼桥镇本寨燕子窝组, 地处 $106^{\circ}03'54''\text{E}$, $26^{\circ}17'03''\text{N}$, 洞口海拔 1 360 m. 该地区为亚热带季风性气候区, 降雨集中在 5 月至 10 月, 年均降雨量 1 360 mm, 平均气温 15°C . 洞穴发育于三叠系中上统中厚层灰质白云岩, 地貌类型属于峰丛—盆地, 喀斯特溶蚀作用方向主要以盆底部水平侵蚀为主. 洞顶上覆发育灌草丛植被, 地表岩石裸露约 50%, 土被覆盖率约 30%, 土壤侵蚀严重, 土层较为浅薄, 属中度石漠化等级. 因洞口较小, 洞内空气与外界大气流动交换甚少, 常年湿度在 85% 以上, 洞穴长度约 500 m, 以水平通道为主, 水土流失较为严重, 通道分布较多潮

^① 收稿日期: 2015-06-30

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题(2016YFC0502607); 贵州省科技计划重大专项(黔科合重大专项字[2014]6007 号); 贵州师范大学研究生创新基金(研创 201518).

作者简介: 李 渊(1990-), 男, 河南汝州人, 硕士研究生, 主要从事喀斯特地貌与石漠化环境监测评价研究.

通信作者: 刘子琦, 副教授.

湿土壤。顶板垂直裂隙发育极多，洞底部的石笋、石钟乳、石幔、石旗等沉积物发育较好。洞内有若干池水点、一条地下暗河，雨季地下暗河流量增多、流速较快。

2 研究方法

本次降雨监测在 2015 年 5 月 8 日至 10 日进行，选取 3 个响应变化较明显的季节性滴水点(图 1，表 1)，每隔 6 h 监测一次并取样品。使用芬兰 Vaisala 公司生产的 WM5200 型 Weather Meter 小型气象站监测降雨量数据，现场监测空气温度、CO₂ 体积分数以及滴水的水温、滴量、pH 值、电导率、Ca²⁺、HCO₃⁻ 等指标。使用量筒测量每次采集滴水的滴量，精度为 1 mL；使用美国 HACH 公司生产的 HQ40d 多参数水质分析仪监测滴水 pH 值、水温、电导率，其测量精度分别为 0.01、0.1 ℃和 1 μS/cm；使用德国 Merck 公司生产的碱度计和硬度计分别测量滴水的 HCO₃⁻ 和 Ca²⁺ 质量浓度，其精度分别为 0.1 mmol/L 和 2 mg/L。所获数据用 SPSS19 软件进行相关性、标准差等分析。

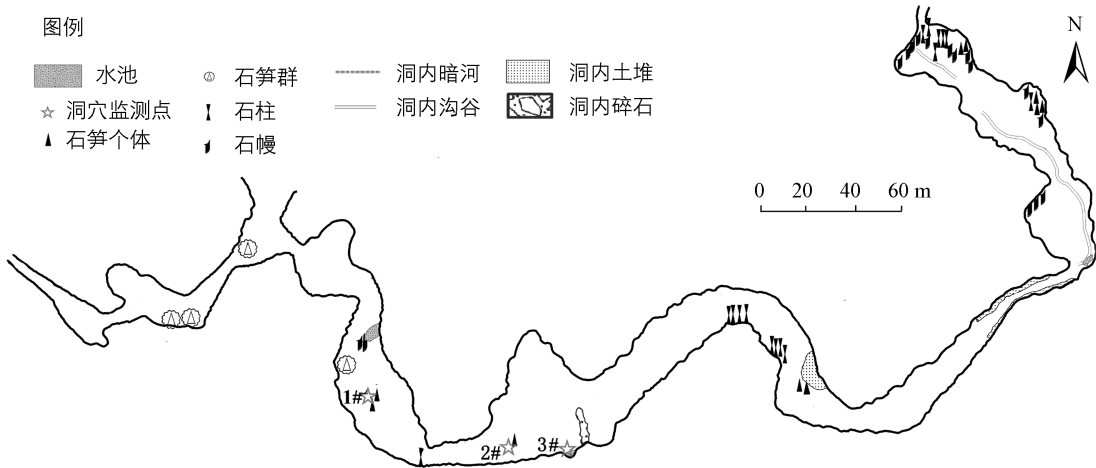


图 1 滴水监测点分布示意图

表 1 滴水监测点情况

监测点	滴水点高度/m	顶板状况
SJJ-1 #	7.1	少量沉积物
SJJ-2 #	21.1	上有沉积物
SJJ-3 #	23.1	裂隙滑落水

3 结果与讨论

3.1 CO₂ 体积分数与温度的时空变化特征

由图 2 可知，石将军洞内温度的日变化特征为下午(18:00)偏高，夜晚(24:00)温度较低，外界环境对洞内温度起一定的调节作用，洞内温度变化相比洞外滞后几个小时；洞内 CO₂ 体积分数变化规律与温度变化特征类似。由于石漠化地区土壤稀薄，洞内与洞外的气体交换较多，受白天光合作用的影响，洞内环境随洞外 CO₂ 体积分数滞后变化而产生传递效应，但降雨后 CO₂ 体积分数出现先上升后下降的特征，原因是降雨时洞内气压大于洞外，导致洞内气温升高，加之土壤微生物活动剧烈，致使洞内 CO₂ 体积分数滞后增加^[8-9]；另外，地下河与滴水点的脱气作用也会增加 CO₂ 体积分数^[10]。从温度的变化趋势来看，各滴水点温度标准差值变化幅度从大到小依次为 1#(1.07)、2#(0.73)、3#(0.61)，说明随着洞穴深度的增加，滴水点气温变化幅度逐渐变小；从 CO₂ 体积分数的变化幅度趋势来看，其标准差值从大到小依次为 3#(34.36)、1#(28.48)、2#(28.40)，3#较 1#和 2#的差异大，可能是因为 3#滴水点靠近池水点而受到 CO₂ 脱气作用的影响，尤其在降雨后更明显。综上所述，处于中度石漠化条件下的石将军洞洞内环境变化特征为：总体温度变化趋势随洞外气温变化相对较快，滞后性较小，变化幅度

较大; CO_2 体积分数变化特征也与之相似, 随气候条件变化而相对响应较快。

3.2 滴水降雨响应与物理化学指标的时空变化特征

3.2.1 降雨响应

由于各个滴水监测点上覆地质条件不同, 滴量对降雨响应的差异明显. 洞穴滴水在降雨响应下有 3 种响应类型: 快速响应型、滞后响应型、稳定型 3 种类型^[11]. 据小型气象站监测显示, 监测期间研究区共有 2 次降雨: 2015 年 5 月 8 日 04:27 开始降雨, 持续到 05:36, 降雨量为 28.5 mm; 之后 5 月 9 日 17:32 有一场降雨, 持续到 18:56, 降雨量为 5 mm. 在监测过程中 2# 滴量标准差所表现的幅度变化最大, 1# 变化幅度最小, 滴量均值从大到小依次为 1# (672 mL)、2# (492 mL)、3# (270 mL). 由图 3 可知, 1# 对降雨的响应

时间最慢且变化幅度最小, 推测 1# 上覆的降水赋存时间长, 汇水面积较大, 土壤或基岩较厚, 因而滴量对降雨响应不明显, 属于滞后响应型; 2# 对降雨的响应较为敏感, 第一场降雨滴量即出现明显峰值, 5 月 9 日第二场降雨滴量响应也有明显的突增, 之后的监测中保持平稳趋势, 因此推测 2# 对降雨的响应时间应该在 1~2 h 之内, 属于快速响应滴水点; 3# 滴量的变化趋势紊乱, 基本趋势是大约每 12 h 周期性变化一次, 推测滴水点上覆岩溶水的运移路径较为复杂, 可能受到混合补给水的影响, 具体原因还需要进一步研究。

3.2.2 pH 值响应特征

雨季湿热条件下, 降水将土壤中产生的大量 CO_2 带入基岩溶解, 使滴水 pH 值降低; 旱季降水量少时, 土壤生物活动较弱, 导致 CO_2 体积分数减少, 岩溶作用较弱, 滴水滞留洞顶时间增长, pH 值增高. 之前对石将军洞的研究发现^[12-13], 由于石漠化洞穴上覆土壤稀薄, 滴水在土壤层滞留时间短, 可溶解的 CO_2 体积分数少且在基岩中滞留时间相对较长, pH 值雨季高; 旱季降水少, 土壤层相对雨季赋存时间较长而可溶解的 CO_2 体积分数多, 滴水中 pH 值低。

由图 3 可知, 1# 降雨响应较慢, 第一场降雨后其 pH 值呈缓慢上升趋势; 2# 在 2 次降雨响应中都出现 pH 值上升的趋势, 第一场降雨后大约 18 h 出现峰值, 第二场降雨后 12 h 出现峰值; 3# 在 2 场降雨中均显示出 pH 值升高的特征, 第一场降雨后 24 h 左右出现峰值, 第二场降雨后约 12 h 出现峰值, 这种响应时间差异与 2# 相似. 因此推测 pH 值大小, 由降雨量大小控制. 由图 3 可知, 3 个滴水点 pH 值的标准差与均值相似, 说明 3 个滴水点上覆土壤条件差异不大, 由于岩层滞留时间的不同导致响应时间快慢有差异. 2# 与 3# 的整体趋势相近, 表明 2# 与 3# 的 pH 值在降雨响应速率上表现出相似的特性. 综上所述, 降雨时期主要受雨水的稀释作用与水—岩—气相互作用过程的影响, 石将军洞滴水 pH 值短时间尺度响应总体上呈升高特征. 降雨时, 由于土壤稀薄, 短时间内岩溶水的滞留时间并不长, CO_2 体积分数的吸收量较小, 岩溶水没有达到饱和状态, 降水在基岩中运移时间相对较长, 加之稀释作用的影响, 溶蚀作用消耗更多的 H^+ , 因此降雨响应呈 pH 值升高的趋势^[14]. 简言之, 石漠化地区洞穴的特殊地质条件, 形成短时间尺度下洞穴滴水 pH 值随降雨响应而升高的现象。

3.2.3 电导率与 Ca^{2+} 质量浓度响应特征

滴水中的离子来源于降水携带的洞顶土壤元素中的离子以及降水对基岩溶解作用后携带的离子, 因而主要受土岩溶解速率与岩溶元素迁移机制影响. 雨季 CO_2 体积分数多, 导致岩溶能力增强, 从而溶解迁移

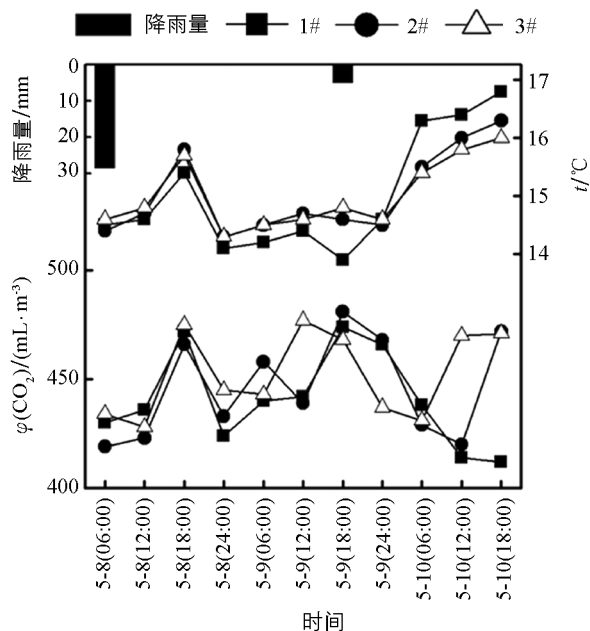


图 2 CO_2 体积分数与温度变化

更多离子. 有研究表明^[15], 滴水电导率季节变化规律为旱季低、雨季高. 在石灰岩地区的洞穴滴水中, 电导率与 Ca^{2+} 质量浓度的比值有较好的相关性, Ca^{2+} 质量浓度在溶液中占主要比例. 有研究发现^[16-18], 地表 CO_2 体积分数与季节性的降水量变化是控制滴水中 Ca^{2+} 质量浓度的主要因素. 冬季降水量少, 岩溶作用较弱, 滴水滞留洞顶时间增长, CO_2 脱气作用使 Ca^{2+} 的质量浓度达到饱和, 生成 CaCO_3 (先期沉积作用), 导致滴水中 Ca^{2+} 的质量浓度降低; 夏季降水量大时, 气温与土壤湿度高, 地表生物活动促使土壤中 CO_2 体积分数增加. 降雨初期, “活塞效应”导致 Ca^{2+} 的质量浓度快速升高, 随着降水的增加, 洞顶滞留岩溶水从“活塞效应”逐渐转变为“稀释效应”, 导致 Ca^{2+} 的质量浓度逐渐降低.

图 3 可知, 1# 主要受第一次降雨影响, 电导率表现出持续升高的趋势, 对降雨响应滞后, Ca^{2+} 的质量浓度在降雨响应上表现出平稳的滞后性升高; 2# 降雨响应速度快、连通性好, 不存在“活塞效应”, 在第一场降雨时便出现一次电导率响应的峰值, 第二场降雨后短时间内响应出现峰值, 同时 Ca^{2+} 质量浓度的降雨响应与之表现出相似的变化规律;

3# 电导率的降雨响应变化峰值较为突出迅速, 均在短时间内有所回应, 但 Ca^{2+} 质量浓度的响应时间有所滞后: 第一次峰值出现在第一场降雨后 12 h, 而第二次响应幅度不大. 从图 3 可知, 电导率均值从大到小依次为 1# ($362 \mu\text{S}/\text{cm}$)、2# ($278 \mu\text{S}/\text{cm}$)、3# ($241 \mu\text{S}/\text{cm}$), 其原因是电导率大小受滴水溶解速率与渗透时间的影响. 1# 响应时间最慢, 上覆土壤渗透速率较慢, 从而溶解更多的离子; 3# 是裂隙混合水, 可能是稀释作用导致电导率较低. 滴水点电导率的标准差值从大到小依次为 3# (4.74)、1# (3.89)、2# (1.35), 由此说明 3# 上覆岩溶地质条件的复杂性影响该点的电导率变化幅度; 2# 的连通性最好, 响应速度最快, 因此溶液的渗透时间相对较短, 其溶解能力较弱, 电导率变化幅度最小; 1# 因为降雨响应的滞后性导致电导率持续缓慢升高, 变化幅度具有持续规律性.

Ca^{2+} 质量浓度的标准差值从大到小依次为 3# (7.93)、2# (4.83)、1# (3.53). 由表 2 可知 1# 电导率与 Ca^{2+} 质量浓度的相关性不明显, 表明 1# 溶液中 Ca^{2+} 的质量浓度所占溶液比例小, 推测 1# 上覆基岩的白云岩质量分数较高, 从而控制滴水中 Ca^{2+} 的质量浓度; 2# 电导率、 Ca^{2+} 质量浓度与滴量相互之间呈显著相关, 表明 2# 降雨响应较快, 与上覆土岩连通性强, 其离子变化特征直接受降水影响, 证明 2# 上覆基岩中石灰岩的质量分数较高; 3# 的滴量与 Ca^{2+} 质量浓度显著相关, 说明 3# 的 Ca^{2+} 的质量浓度在一定程度上受降雨的控制, 电导率响应较快可能是因为快速溶解了顶板介质中的离子, 由于滴水点上覆为裂隙地质条件, 裂隙水在运移过程中受水—岩作用的影响^[19], 溶液在基岩裂隙中携带 CO_2 运移时间充分, 因而 Ca^{2+} 质量浓度滞后升高. 综上可知, 1# 因上覆地表土壤较厚, 土壤中溶液滞留时间长而降雨响应较慢, 并且上覆基岩中白云岩的质量分数较高; 2# 降雨响应迅速并且连通性较好, 滴水点上覆顶板较薄, 基岩中石灰岩的质量分数较高; 3# 电导率响应快, Ca^{2+} 的质量浓度响应滞后, 是因为上覆土壤层薄而基岩较厚, 基岩中石灰岩的质量分数较高.

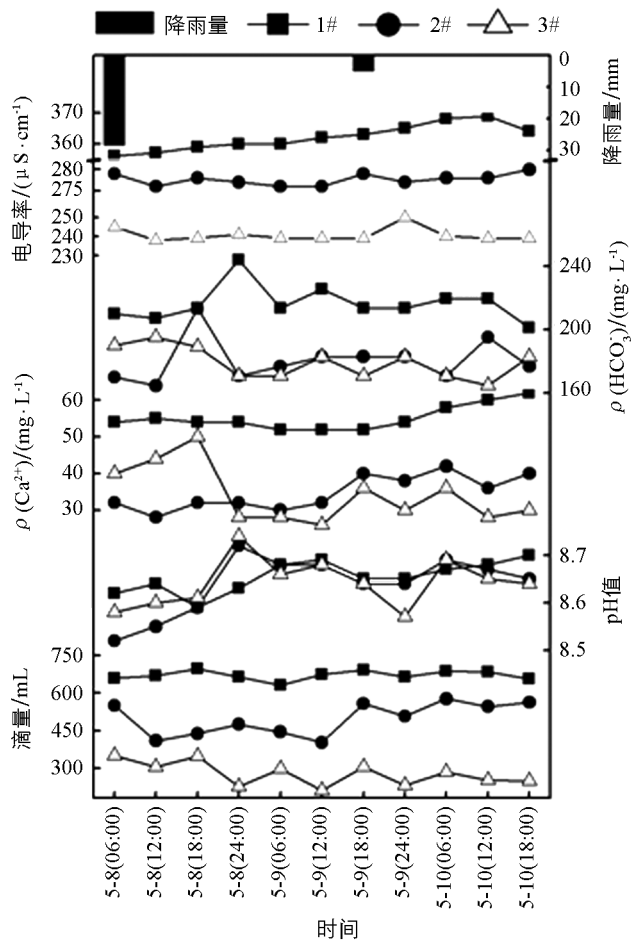


图 3 滴水点理化指标变化

表 2 滴水点理化指标相关性

滴水点		滴量	pH 值	电导率	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻
1 #	滴量	1				
	pH 值	−0.458	1			
	电导率	0.273	0.464	1		
	Ca ²⁺	0.103	0.296	0.566	1	
	HCO ₃ ⁻	0.078	−0.065	−0.003	−0.312	1
2 #	滴量	1				
	pH 值	0.330	1			
	电导率	0.798 * *	0.025	1		
	Ca ²⁺	0.922 * *	0.299	0.764 *	1	
	HCO ₃ ⁻	−0.053	−0.201	0.250	0.000	1
3 #	滴量	1				
	pH 值	−0.356	1			
	电导率	−0.381	−0.431	1		
	Ca ²⁺	0.842 * *	−0.451	−0.216	1	
	HCO ₃ ⁻	0.227	−0.586	0.081	0.578	1

注: * * 在 0.01 水平(双侧)上有统计学意义; * 在 0.05 水平(双侧)上有统计学意义.

3.3 水动力响应特性

根据水流类型特征(优先流、基质流、渗透流),将滴水分为 5 种水动力类型^[7]:Ⅰ类水流类型为优先流、基质流,连通性好,水头压力固定,降雨响应快;Ⅱ类水流类型为优先流、基质流,连通性好,水头压力变化大,降雨响应快;Ⅲ类水流类型为基质流、渗透流连通性较差,水头压力固定,降雨响应慢;Ⅳ类水流类型为基质流、渗透流,连通性较差,水头压力变化大,降雨响应慢;Ⅴ类水流类型为基质流、渗透流,连通性较好,水头压力变化大,降雨响应慢.对比分析本次监测的石将军洞 3 个滴水点水动力响应特征发现:1#滴量多,变化幅度小,响应速度慢,连通性一般;2#滴量中等,变化幅度大,响应速度快,连通性好;3#滴量小,变化幅度较大,响应速度较慢,连通性较好.可见,石将军洞 1#属于Ⅲ类水动力类型,2#属于Ⅱ类水动力类型,3#属于Ⅴ类水动力类型.

4 结 论

- 1) 由于石漠化地区二元地质结构的特殊性,其洞内环境特征差异具有统计学意义.石将军洞内总体温度受洞外环境变化控制,且因土壤稀薄导致洞内温度滞后性较小,其 CO₂ 体积分数变化特征与之相似.
- 2) 本研究的滴水监测点均表现出连通性较好、响应时间较快的特点,基本不受“活塞作用”的影响.不同滴水点上覆水、土、岩作用的时间、运移路径有差异,主要受到降雨量、稀释作用与岩石溶解等水化学动力作用控制.pH 值、电导率、Ca²⁺ 质量浓度、滴量均在降雨响应中表现出随降雨量增加而升高的现象.基于滴水点上覆地质条件的差异性,各个滴水点对降雨响应表现出较大的差异性:1#上覆土壤较厚,基岩岩性中白云岩质量分数较高,溶液渗流时间较长,推断水流类型为基质流、渗透流,连通性较差,水头压力固定,降雨响应慢;2#上覆土壤较薄,基岩中石灰岩的质量分数较高,推断水流类型为优先流、基质流,连通性好,水头压力变化大,降雨响应快;3#上覆土壤层薄,基岩中石灰岩的质量分数较高且岩层厚度大,推断水流类型为基质流、渗透流,连通性较好,水头压力变化较大,降雨响应慢.

参考文献:

[1] 袁道先.我国岩溶资源环境领域的创新问题[J].中国岩溶,2015,34(2):98—100.

[2] 熊平生,袁道先,谢世友.我国南方岩溶山区石漠化基本问题研究进展[J].中国岩溶,2010,29(4):355—362.

[3] 熊康宁,池永宽.中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J].生态经济,2015,31(1):23—30.

[4] 袁道先.岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验[J].草业科学,2008,25(9):19—25.

- [5] 熊康宁, 李 晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题 [J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878—888.
- [6] 李瑞玲, 王世杰, 熊康宁, 等. 喀斯特石漠化评价指标体系探讨——以贵州省为例 [J]. 热带地理, 2004, 24(2): 145—149.
- [7] 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.
- [8] 徐尚全. 重庆雪玉洞空气 CO₂ 浓度变化及水—气碳转换研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [9] 周运超, 王世杰. 贵州将军洞上覆土层对滴水水化学特征的影响 [J]. 环境科学, 2006, 27(10): 1986—1991.
- [10] 王晓晓. 雪玉洞洞穴系统碳的变化特征及洞内 CO₂ 来源研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [11] 班凤梅. 洞穴滴水地球化学变化特征及其与土壤过程的联系——以北京石花洞为例 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [12] 段逸凡, 刘子琦, 贺秋芳, 等. 石漠化地区洞穴滴水地球化学特征——以贵州省石将军洞为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(4): 95—101.
- [13] 张乾柱, 熊康宁, 刘子琦, 等. 洞穴滴水水文化学特征及石漠化效应——以贵州石将军洞为例 [J]. 热带地理, 2013, 33(3): 256—263.
- [14] 刘再华. 岩溶水文地球化学研究中 pH 值野外测定的必要性 [J]. 中国岩溶, 1990, 9(4): 310—317.
- [15] 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.
- [16] 姜光辉, 郭 芳, 曹建华, 等. 峰丛洼地表层岩溶动力系统季节变化规律 [J]. 地球科学, 2003, 28(3): 341—345.
- [17] 何师意, 潘根兴, 曹建华, 等. 表层岩溶生态系统碳循环特征研究 [J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 383—390.
- [18] 唐 灿, 周平根. 北京典型溶洞穴土壤中的 CO₂ 及其对岩溶作用的驱动 [J]. 中国岩溶, 1999, 18(3): 213—217.
- [19] 王昕亚, 李廷勇, 胡 蓉, 等. 重庆芙蓉洞洞穴滴水地球化学初探 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(2): 122—126.

Temporal and Spatial Variation Response of Cave Drip Water under Rainfall Condition in Rocky Desertification Area ——A Case Study of Shijiangjun Cave, Guizhou

LI Yuan, LIU Zi-qi, LV Xiao-xi

*School of Karst Science, Guizhou Normal University / State Engineering Technology Institute
for Karst Desertification Control, Guiyang 550001, China*

Abstract: A short-term scale monitoring of three drip points in Shijiangjun cave and its cave environment was conducted under rainfall condition in moderate rocky desertification area of Guizhou, in order to explore its temporal-spatial variation characteristics and rocky desertification effect. The result shows that: the change trends of cave temperature and CO₂ concentration, which have small hysteresis, are controlled by the environment outside cave. 1# has thicker overlying soil and high quality fraction of dolomite in bedrock, long solution seepage time, slow rainfall response and poor connectivity; 2# has thinner overlying soil and high quality fraction of limestone in bedrock, fast rainfall response and well connectivity; 3# has thin overlying soil and high quality fraction of limestone in bedrock with large thickness, slow rainfall response and well connectivity.

Key words: rocky desertification; cave drip water; short-term scale; rainfall response

