

不同等级石漠化地区洞穴滴水的物理化学特征对比研究

吕小溪^{1,2} 刘子琦^{2,3*}

(贵州师范大学中国南方喀斯特研究院¹;

国家喀斯特石漠化防治工程技术研究中心², 贵阳 550001; 西南大学地理科学学院³, 重庆 400715)

摘要 对贵州不同等级石漠化地区6个洞穴7月份的滴水物理指标(滴水滴率、电导率)和化学指标(pH值、 Ca^{2+})进行了监测,并探讨了各指标的变化规律及环境意义,得出以下结论:①受地表植被影响,潜在石漠化地区洞穴滴水滴率较强度石漠化地区小,随着洞穴长度的加深,不同等级石漠化地区滴水滴率均趋于稳定;②各滴水点pH值并未表现出降雨的稀释效应,潜在石漠化地区不同洞穴的滴水pH值情况表现不一致,强度石漠化地区pH值普遍偏高;③潜在石漠化地区较强度石漠化地区滴水电导率偏大,不同等级石漠化地区洞穴滴水的电导率值正比于滴水 Ca^{2+} 含量。

关键词 石漠化 喀斯特洞穴 滴水 物理化学特征

中图法分类号 P512.22;

文献标志码 A

目前有关洞穴系统指示地表环境的研究,主要集中在洞穴沉积物及洞穴滴水,洞穴滴水是洞穴沉积物的直接物质来源,分析滴水的水文地球化学特征,对于研究洞穴沉积物形成机理有着重要的意义^[1-9]。通过滴水特征可以了解现代地表气候及环境信息,同时可以论证特定滴水条件下形成的早期沉积物指标体系的地表环境替代作用的科学性。为了利用洞穴沉积物进行高分辨率气候-环境信息解译,国内外学者在早期就对洞穴滴水中的同位素及元素展开了相关研究^[10-13]。滴水中物质组成有赖于降雨、大气以及上覆基岩与土壤,即溶解有大气中 CO_2 的降雨到达地面后,对基岩和土壤进行溶蚀、淋滤和搬运,经过喀斯特裂隙进入洞穴系统成为滴水,此过程中,源于大气降水的滴水携带了丰富的气候信息,敏感地响应气候与地表生态环境的变化^[14-18]。位于典型热带-亚热带季风气候区的中国西南喀斯特地区环境脆弱、土地贫瘠,其开发利用加速了环境的改变,石漠化问题日趋严重,如何有效全面地对石漠化生态环境

及其治理效果进行监测评价,是将来制定长期大范围治理石漠化战略所必须要回答的。中国西南喀斯特地区发育有特殊的上下二元地质结构,而石漠化过程中的水土流失也包括地表及地下两部分流失,因此利用洞穴滴水进行地下监测,从而配合地表生态监测,为石漠化治理提供全面的监测数据是十分必要的。

为此,在国家“十二五”科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”及西南大学基本科研业务费专项资金的支持下,通过对中国西南喀斯特地区贵州省潜在、轻度、中度和强度等不同等级石漠化地区6个洞穴的滴水水文指标(滴率、pH值、电导率与 Ca^{2+} 等)进行初步监测,选取监测获得的2014年7月份的数据,对比分析了不同强度石漠化条件下洞穴滴水的物理化学特征,以探究不同等级石漠化地区洞穴滴水物理化学指标对石漠化环境响应的变化规律,为石漠化古环境重建提供洞穴环境记录,为正在进行的石漠化环境监测评价提供科学依据。

1 研究区概况

鉴于贵州省在地貌单元上呈现出高原山地区、高原盆地区与高原峡谷区的喀斯特石漠化格局,本研究共选择6个洞穴,分别是位于贵州西北部高原山地区毕节撒拉溪镇石漠化综合治理示范区的朝营洞和韩家冲洞、中部高原盆地区安顺屯堡景观世界自然-文化双遗产提名地的本寨洞和石将军洞以及西南部高原峡谷区关岭-贞丰花江石漠化综合治理

2014年12月29日收到 国家“十二五”科技支撑计划重大课题
(2011BAC09B01)、西南大学基本科研业务费专项资金项目
(XDJK2013C091)资助

第一作者简介:吕小溪(1988—),男,河北邢台人,硕士。研究方向:喀斯特洞穴与石漠化监测评价。E-mail: karstlv@sina.cn。

*通信作者简介:刘子琦(1979—),女,山西五台人,副教授,硕士生导师。研究方向:喀斯特地貌与洞穴、喀斯特环境与世界自然遗产。E-mail: michelle-lily@163.com。

示范区的大消洞和荣发洞(表1),分属于毕节、屯堡和花江3个研究区。在综合植被、坡度、土壤厚度、基岩裸露率等众多因素的基础上,熊康宁等^[19]将喀斯特石漠化划分为无明显、潜在、轻度、中度、强度与极强度等6个等级。朝营洞地表植被以灌丛、荒草为主;本寨洞地表有农作物生长,植被条件较好,属于潜在石漠化等级;韩家冲洞与大消洞上覆环境坡度较陡,岩石裸露明显,植被以低结构灌丛、荒草为主,经过退耕还林及石漠化治理工程,已恢复至中度石漠化等级;石将军洞与荣发洞植被条件都较差,地形坡度陡峻,岩石裸露率高,表现出强度石漠化特征。总体上来说,这3个研究区洞穴上覆环境的石漠化等级为朝营洞<本寨洞<韩家冲洞<大消洞<石将军洞<荣发洞。

表1 6个洞穴位置及环境特征概况
Table 1 Cave's location and their environmental characteristics

洞穴名称	所属研究区	所属地形区	石漠化等级	土地利用
朝营洞	毕节研究区	高原山地	潜在石漠化	灌丛、草地
韩家冲洞			中度石漠化	灌丛、草地
本寨洞	屯堡研究区	高原盆地	潜在石漠化	灌草丛、旱地
石将军洞			强度石漠化	低结构灌丛
大消洞	花江研究区	高原峡谷	中度石漠化	低结构灌丛
荣发洞			强度石漠化	低结构灌丛

2 样品采集与分析方法

根据洞穴长度及洞穴滴水稳定性,按常年滴水、均匀分布的原则,在朝营洞(CY)、韩家冲洞(HJC)、本寨洞(BZ)、石将军洞(SJJ)、大消洞(DX)及荣发洞(RF)等6个洞穴中分别选择3、3、9、8、4、3个洞穴滴水点(表2),在2014年7月底对每个洞穴的滴水滴率、温度、pH、电导率、Ca²⁺等指标进行现场监测,其中,用秒表对滴水的滴速进行测定,使用美国Hach公司生产的HQ40d型野外多参数水质分析仪现场监测滴水的pH值及电导率,测量精度分别为0.01pH和1 μS/cm,利用钙试剂盒(精度为2 mg/L)测滴水的Ca²⁺浓度。

表2 洞穴滴水点详情描述
Table 2 Description of cave drops

研究区	洞穴	监测点	类型	滴水点高度/m	顶板沉积物状况
毕节研究区	朝营洞 (朝向:105°)	CY-W1	滴水	1.1	上有沉积物
		CY-W2	滴水	3.2	上有沉积物
		CY-W3	滴水	0.7	上有沉积物
	韩家冲洞 (朝向:185°)	HJC-W1	滴水	1.3	上有沉积物
		HJC-W2	滴水	4.5	上有沉积物
		HJC-W3	滴水	6.8	上无沉积物

续表2

研究区	洞穴	监测点	类型	滴水点高度/m	顶板沉积物状况
屯堡研究区	石将军洞 (朝向:225°)	SJJ-W1	滴水	7.1	少量沉积物
		SJJ-W2	滴水	0.36	上有沉积物
		SJJ-W3	滴水	21.1	上有沉积物
		SJJ-W4	滴水	23.1	上有沉积物
		SJJ-W5	滴水	1.6	上有沉积物
		SJJ-W6	滴水	2.5	上有沉积物
		SJJ-W7	滴水	1.2	上有沉积物
		SJJ-W8	滴水	1.9	上有沉积物
	本寨洞 (朝向:130°)	BZ-W1	滴水	9.2	上有沉积物
		BZ-W2	滴水	3.7	上有沉积物
		BZ-W3	滴水	2.5	上有沉积物
		BZ-W4	滴水	2.7	上有沉积物
		BZ-W5	滴水	5.1	上有沉积物
		BZ-W6	滴水	4.4	上有沉积物
		BZ-W7	滴水	2.6	上有沉积物
		BZ-W8	滴水	5.5	上有沉积物
		BZ-W9	滴水	8.3	上有沉积物
	大消洞 (朝向:18°)	DX-W1	滴水	39.4	上无沉积物
		DX-W2	滴水	16.5	上无沉积物
		DX-W3	滴水	16.8	上无沉积物
		DX-W4	滴水	13.5	上无沉积物
花江研究区	荣发洞 (朝向:110°)	RF-W1	滴水	26.6	上无沉积物
		RF-W2	滴水	28.5	上无沉积物
		RF-W3	滴水	27.7	上无沉积物

3 结果与分析

3.1 滴率特征

通过滴水对大气降雨的响应时间可以大致判断滴水中物质的来源,一般滴水点响应较快,其物质来源主要是土壤,土壤物理、土壤化学等过程均会对滴水的物质组成产生影响^[20]。滴水滴率较小的滴水点元素含量较高,表明水运移过程中水-土、水-岩作用差异能影响滴水化学组成^[21]。通过对不同研究区内6个洞穴多个滴水点滴率的空间变化特征对比显示(图1),7月份不同研究区洞穴滴水的滴率均有所差异,不同滴水点的滴率变化体现了其对地表生态环境的响应水文过程。对比发现,同属潜在石漠化地区的朝营洞与本寨洞滴水点的滴率较小,原因是7月份是农作物及灌草的生长旺季,两个洞穴上覆植被均很丰富。韩家冲洞1#与2#滴水点的滴率较大,是由于其洞口洞穴顶板较薄,且植被覆盖率低,雨水赋存在基岩中的时间较短所致。大消洞1#、2#、4#等3个滴水点由于受到采样前期的强降雨影响,滴速迅猛,尤其是1#与4#滴水点,而3#滴水点的滴率却很小,很可能与洞穴顶板的裂隙有关。强度石漠化条件下的石将军洞与荣发洞前两个滴水点滴率相似,可能受到洞顶植被及土被因素的影响,而石将军洞3#至8#的滴率趋于一致,且与本寨洞3~

9#(除7#外)滴水点的滴率相似,则是由于这些滴水点均位于洞穴通道的深部,随着洞穴的不断深入,洞穴顶板逐渐增厚,与此带来洞穴滴水点迁移路径和滞留时间的延长,滴率也趋于稳定,形成了上述现象^[22]。本寨洞7#滴水点的距地高度仅2.6 m,由于顶板厚度大的因素影响,在7月份未收集到水。

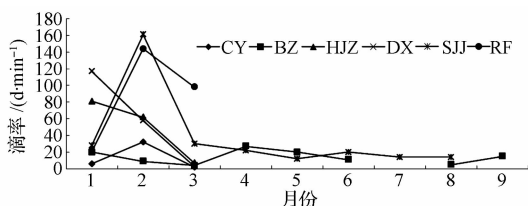


图1 各洞穴7月份滴水点滴率对比

Fig. 1 Comparison on drip rate of cave drips in Jul

由图1可知,洞穴滴水点对地表环境的响应过程受到来自大气降水、植被覆盖度、土壤层厚度、基岩厚度及基岩裂隙发育程度等因素的影响,表现出水分运移方式(裂隙水、渗透水)及运移时间的不同,最终形成不同滴水点滴率的空间变化差异性特征。大气降雨在下渗过程中,上覆植被、土壤与基岩是水分的主要赋存媒介,而石漠化地区由于植被覆盖率低、土被稀少,导致水分主要存在于下部基岩中,在不考虑基岩发育程度的前提下,基岩越厚,水分在基岩中存留的时间越长,所形成的滴水越稳定、持续^[23]。总体上来看,潜在石漠化地区的洞穴滴水由于受制于植被土壤因素,其滴率较小;而强度石漠化条件下滴水点的滴率则可能受地表降雨和基岩厚度的影响,而不完全与地表生态环境相关。

3.2 pH 值特征

大气降水在渗入地表环境后,大都经过土壤层和下部基岩的运移过程,在该过程中水分由于吸收土壤中不同形式的 CO_2 而导致pH值降低,对基岩的溶蚀作用消耗 H^+ ,引起pH升高^[24],之后又有研究者通过探讨降雨对pH的稀释作用得出干旱与湿润时期的洞穴滴水其pH值恰好相反,其中在干旱时期pH值较高,而湿润期pH值则偏低,原因在于湿润期降雨量大稀释作用明显,从而表现出较低的pH值,冬季则相反^[25]。张乾柱等通过分析贵州石将军洞滴水pH值空间和时间变化规律初步探索了其石漠化效应,研究发现由于石漠化地区土壤中可利用的 CO_2 少,滴水pH值则呈现出雨季值较高而旱季值却低的反常特征^[23]。

6个洞穴各个滴水点在7月份的pH值对比显示(图2),除荣发洞外,其他各单独洞穴中滴水点的pH值趋于一致,洞口与洞内滴水的pH值变化不大,反映了各个洞穴滴水pH值受制于地区季风变

化及同一洞穴系统的规律;然而各洞穴之间的滴水pH值差异却很明显,各洞穴滴水pH均值大小比较如下(图3):本寨洞>荣发洞>石将军洞>韩家冲洞>大消洞>朝营洞。其中,本寨洞滴水pH值最为偏高,其pH值趋势更多受喀斯特水对洞穴上覆 CO_2 吸收及碳酸盐岩的溶解过程的影响;石将军洞、大消洞、韩家冲洞滴水点间的pH值差别不大,随洞穴通道的深入,石将军洞滴水pH值有逐步增大趋势,可能与洞穴不同位置的 CO_2 分压差异有关,石将军洞与荣发洞滴水pH均值次于本寨洞,这主要受地表强度石漠化的条件影响。而荣发洞滴水点之间的pH值差异较大,可能与3#滴水点的土壤漏失现象有关,监测过程中往往发现有结晶碳酸钙与松散土壤淀积在取样装置中。朝营洞滴水点pH均值最小,植被覆盖度最高,以灌丛荒草为主,7月份正是植被繁茂的时期,植物根系呼吸作用旺盛,土壤中赋存 CO_2 较多,且由于根系的保水固土作用使得土壤中的 CO_2 不易被雨水所带走,因此水分携带较多的 CO_2 进入洞穴系统,使滴水的pH值急剧降低。值得注意的是,洞穴各滴水点pH值并未表现出降雨的稀释效应,更多地受制于喀斯特水对洞穴上覆 CO_2 吸收及碳酸盐岩的溶解过程影响。

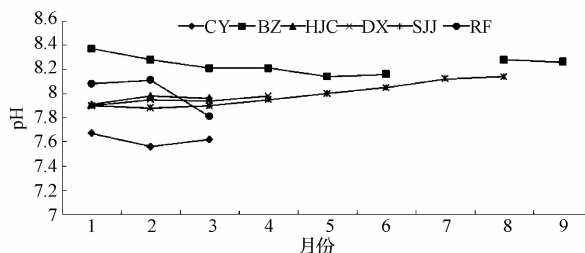


图2 各洞穴7月份滴水pH值对比

Fig. 2 Comparison on pH value of cave drips in July

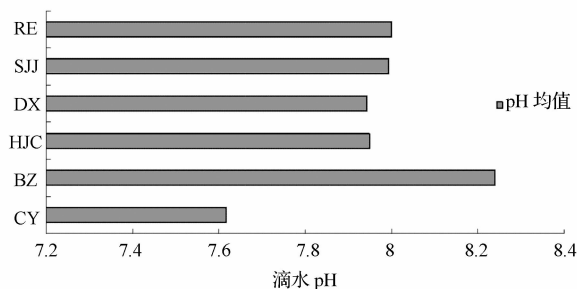


图3 各洞穴7月份滴水pH均值对比

Fig. 3 Comparison on the average pH of cave drips in July

3.3 电导率及 Ca^{2+} 特征

喀斯特水在下渗过程中引起上覆土壤及母岩的淋溶,而造成洞穴滴水具有上覆土壤及母岩的元

素特征,并保存了土壤与母岩的某些物理特性。滴水的电导率受到上覆土壤及母岩中元素含量的影响,反映了滴水中所含阴阳离子的导电能力。周运超在对滴水电导率测定后发现电导率与大气降雨变化保持一致,体现出洞穴次生沉积物的元素含量可以记录岩溶环境过去的变化^[25]。六个洞穴中滴水电导率特征显示(表3,图4),各洞穴不同滴水点之间在7月份的电导率差异明显,均有不同程度的波动。除本寨洞外,各洞穴前3个滴水点电导率波动趋势一致,电导率最高值出现在本寨洞(617 $\mu\text{S}/\text{cm}$),最低值出现在韩家冲洞(221 $\mu\text{S}/\text{cm}$),电导率均值的最高值依然是本寨洞(357 $\mu\text{S}/\text{cm}$),而其最低值则出现在石将军洞(233 $\mu\text{S}/\text{cm}$),反映了潜在石漠化与中-强度石漠化环境影响下的洞穴滴水电导率的显著区别。所选滴水点较多的本寨洞与石将军洞,在电导率方面并未表现出从洞口到洞内规律性的变化,说明因滴水点所在位置而引起的温度差异及同时期的 pH 对滴水电导率没有明显影响,同时因滴水点所在位置决定的滴水点的运移路径可能对电导率起控制作用。

表3 各洞穴7月份滴水电导率及 Ca^{2+} 含量
Table 3 EC and Ca^{2+} content of cave drips in July

洞穴名称	电导率最高值/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	电导率最低值/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	电导率均值/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	Ca^{2+} 最高值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ca^{2+} 最低值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Ca^{2+} 均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
韩家冲洞	453	221	347.33	96	48	72
朝营洞	445	374	404	114	94	102
本寨洞	617	357	499.75	102	44	84.67
石将军洞	381	233	278.13	62	32	50
大消洞	406	337	371.25	62	32	52
荣发洞	489	367	437.67	78	40	61.33

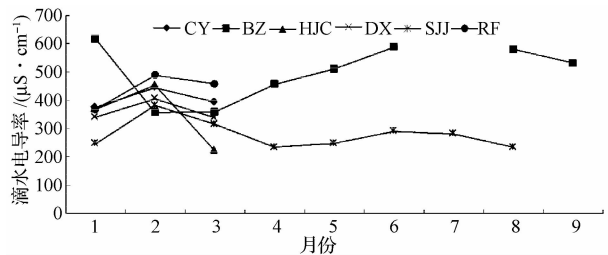


图4 各洞穴7月份滴水电导率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution for EC of cave drips in July

由于滴水电导率值反映的是滴水中所含阴、阳离子的导电能力大小,因此其与滴水中所含离子浓度有直接关系,在野外试剂盒现场滴定测试 Ca^{2+} 浓度时,发现其与电导率有着较大的相关性,因此做出电导率与 Ca^{2+} 浓度的关系图(图5),发现7月份滴水电导率均值与同时期的 Ca^{2+} 浓度有较强的对应关系,从而证实了这种相关性的存在;同时说明滴水

Ca^{2+} 浓度在所含离子中具有主导作用, Ca^{2+} 浓度同样并未表现出从洞口到洞内规律性的空间变化。洞穴沉积物的元素主要来源于岩溶水下渗过程中引起的上覆土壤及基岩的淋溶过程,不同成分元素的特征取决于土壤及基岩中的元素特征,同时受元素迁移过程的控制^[26],滴水 Ca^{2+} 主要通过溶解上覆碳酸岩层,溶解生成的 Ca^{2+} 含量取决于降雨携带的土壤 CO_2 ,土壤生物来源 CO_2 含量的季节性变化也会影响滴水 Ca^{2+} 含量^[27-29]。值得注意的是,在所研究的6个洞穴中,处于潜在石漠化地区的朝营洞较其他洞穴滴水电导率与 Ca^{2+} 浓度均值差异较大,在整体趋势中呈现反相关现象,具体原因尚待进一步研究。

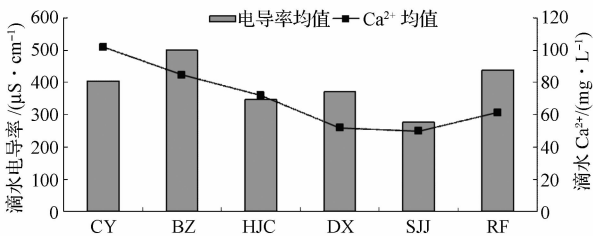


图5 各洞穴7月份滴水电导率与 Ca^{2+} 含量相关关系

Fig. 5 Correlation on EC and Ca^{2+} content of cave drips in July

3.4 滴水的物质来源与形成过程

喀斯特洞穴滴水的物质来源以元素组成的形式记录在洞穴次生沉积物中,有些洞穴的滴水物质直接来源于大气降雨^[30],然而有些并不以降雨为基础,更多的反映出滴水在土壤及围岩中的溶解和溶蚀作用^[21,31]。滴水的水文地球化学过程包括稀释作用、水源改变、岩石溶解和方解石沉淀等多种水文过程^[10,32,33],其对滴水中元素含量起至关重要的作用。探讨滴水对地表环境的响应特征,目前大多数采用示踪剂进行,可行性较大的示踪剂有 NaCl 、 SO_4 等^[21,34],通过示踪剂可以实现滴水对大气降水的响应时间及地表环境的监测。通过雨水、土壤水和滴水中物质或元素含量的对比,可以找出水体在不同媒介运移过程中的规律,由此可以推断出滴水中所含物质的来源^[20,21,25]。石漠化地区由于水土流失严重,陡峭的坡体与强降雨的冲刷造成土壤层浅薄,致使土壤水的获取较其他地区更加困难,也正因此,强度石漠化地区洞穴滴水滴速相对较快,而洞穴上覆土壤中所含 CO_2 相对偏少,喀斯特水对基岩的溶蚀能力较弱,导致滴水中 pH 值呈现弱碱性,强度较中度石漠化区滴水 pH 值偏大,同时由于溶蚀作用而参与滴水形成的离子偏少,因而导致电导率的

均值也表现偏小,这与前期的研究成果是大体一致的^[22,23]。

5 结论

(1) 洞穴滴水滴率变化特征表明,潜在石漠化地区由于上覆植被条件良好,滴水点的滴率较小,而强度石漠化条件下的滴水滴率则受制于稀缺的地表植被土壤使滴水滴率偏大,强降雨天气尤其影响植被覆盖率小的强度石漠化洞穴中的滴水滴率。随着洞穴长度的加深,洞穴顶板逐渐增厚,滴水滴率逐渐趋于稳定。

(2) 各洞穴中不同滴水点间的 pH 值变化不大,各滴水点 pH 值并未表现出降雨的稀释效应,各洞穴间的滴水 pH 值差异明显。潜在石漠化地区不同洞穴的滴水 pH 值情况受洞穴上覆 CO₂ 吸收及碳酸盐岩的溶解过程影响表现不一致,强度石漠化地区,洞穴滴水受植被条件影响导致 pH 值偏高。

(3) 潜在石漠化与中-强度石漠化环境影响下的洞穴滴水电导率差异显著,潜在石漠化地区较强度石漠化地区滴水电导率偏大。滴水电导率值反映了其中所含阴阳离子的导电能力,其值正比于滴水中 Ca²⁺ 含量。

参 考 文 献

- Urey H C. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Jour Chem Soc*, 1947; (297): 562—581
- Hendy C H, Wilson A T. Palaeoclimatic data from speleothems. *Nature*, 1968; (219): 48—51
- Schwarcz H P, Harmon R S. Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1976; (40): 657—665
- Thompson P, Schwarcz H P, Ford D C. Stable isotope geochemistry, geothermometry, and geochronology of speleothems from West. *Geological Society of America Bulletin*, 1976; 87(12): 1730—1738
- Shen C C, Edwards R L, Cheng H, *et al.* Uranium and thorium isotopic and concentration measurements by magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chem Geol*, 2002; (185): 165—178
- 李红春. 利用洞穴石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 重建 3 000a 以来北京地区古气候和古环境——石花洞研究系列之三. *地震地质*, 1997; 19(01): 77—86
Li H C. Isotope studies of Shihua Cave-III: reconstruction of paleoclimate and paleoenvironment of Beijing during the last 3 000 years from $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ records in stalagmite. *Journal of Earthquake Geology*, 1997; 19 (01): 77—86
- 李 彬, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林地区降水、洞穴滴水及现代洞穴碳酸盐氧碳同位素研究及其环境意义. *中国科学: D 辑*, 2000; 30(1): 81—87
Li B, Yuan D X, Lin Y S, *et al.* Research on precipitation, cave drips and modern carbonate oxygen and carbon isotopes and their environmental significance. *Chinese Science: D*, 2000; 30 (1): 81—87
- 覃嘉铭, 袁道先, 林玉石, 等. 桂林 44 ka BP. 石笋同位素记录及其环境解释. *地球学报*, 2000; 21(4): 407—416
Qin J M, Yuan D X, Lin Y S, *et al.* Isotope record of stalagmite in 44 ka BP. in Guilin and its environmental experiment. *Journal of Earth*, 2000; 21 (4): 407—416
- 张会领, 覃嘉铭, 张美良, 等. 洞穴化学沉积物的古环境记录研究进展. *中国岩溶*, 2004; 23(2): 144—153
Zhang H L, Qin J M, Zhang M L, *et al.* Research progress on ancient environment record of cave chemical sediment. *China Karst*, 2004; 23 (2): 144—153
- 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(3—4): 255—269
- Baker A, Barnes W L, Smart P L. Variations in the discharge and organic matter content of stalagmite drip waters in lower cave, Bristol. *Hydrological Processes*, 1997; 11 (11): 1541—1555
- Genty D, Deflandre G. Drip flow variations under a stalactite of the Pèrre Nol cave (Belgium). Evidence of seasonal variations and air pressure constraints. *Journal of Hydrology*, 1999; 211 (1—4): 208—232
- Zhang Pingzhong, Chen Yimeng, Johnson K P, *et al.* Environmental significance of isotope in drip water and present stalagmites from Wanxiang Cave, Wudu, Gansu. *Chinese Science Bulletin*, 2004; 49 (15): 1529—1531
- Geode A, Vogel J C. Trace element variations and dating of a Late Pleistocene Tasmanian speleothems. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1991; 88 (12): 121—131
- Morse J W, Bender M L. Partition coefficients in calcite: examination of factors influencing the validity of experimental results and their application to natural systems. *Chemical Geology*, 1990; (82): 265—277
- Gascoyne M. Trace element partition coefficients in the calcite water system and their paleoclimatic significance in cave studies. *Journal of Hydrology*, 1983; 61 (1—3): 213—222
- Roberts M S, Smart P L, Baker A. Annual trace element variations in a Holocene speleothem. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998; 154(1—4): 237—246
- Huang Y M, Fairchild I J. Partitioning of Sr²⁺ and Mg²⁺ into calcite under karst-analogue experimental conditions. *Geochim Cosmochimica Acta*, 2001; 65 (1): 47—62
- 熊康宁, 黎 平, 周忠发, 等. 喀斯特石漠化的遥感——GIS 典型研究. 北京: 地质出版社, 2002
Xiong K N, Li P, Zhou Z F, *et al.* Typical research on remote sensing and GIS of karst rocky desertification research. Beijing: Geological Publishing House, 2002
- 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. *环境科学*, 2006; 10: 1986—1991
Zhou Y C, Wang S J. Effects of soil cover on drips hydrochemical characteristics in Jiangjun Cave, Guizhou. *Journal of Environmental Science*, 2006; 10: 1986—1991
- 周运超, 王世杰. 洞穴滴水的水文地球化学过程. 贵阳: 犀牛洞的研究. *地球与环境*, 2005; (02): 23—30

- Zhou Y C, Wang S J. Hydrogeochemical process of cave drips study on Xiniu Cave, Zhenning, Guizhou. *Journal of Earth and Environment*, 2005; (02): 23—30
- 22 张乾柱. 喀斯特地区洞穴滴水地球化学特征及其对石漠化环境响应的初步研究——以贵州四个洞穴为例. 贵阳: 贵州师范大学, 2013
- Zhang Q Z. Geochemical characteristics and preliminary research on rocky desertification implication of cave drip in karst area——with a special reference to four caves in Guizhou. Guiyang: Guizhou Normal University, 2013
- 23 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. *热带地理*, 2013; 03: 256—263
- Zhang Q Z, Xiong K N, Liu Z Q, *et al.* Hydrogeochemical characteristics of cave drips and their rocky desertification effect——taking Shi Jiangjun Cave as an example. *Journal of Tropical Geography*, 2013; 3: 256—263
- 24 刘再华. 岩溶水文地球化学研究中 pH 值野外测定的必要性. *中国岩溶*, 1990; 9(4): 310—316
- Liu Z H. The necessity of pH value in the research field measurement in karst hydrogeochemistry. *China Karst*, 1990; 9 (4): 310—316
- 25 周运超, 王世杰, 谢兴能, 等. 贵州四个洞穴滴水对大气降雨响应的动力学及其意义. *科学通报*, 2004; (21): 2220—2227
- Zhou Y C, Wang S J, Xie X N, *et al.* Dynamics of four cave drips in Guizhou to atmospheric rainfall response and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 2004; (21): 2220—2227
- 26 刘子琦, 张乾柱, 熊康宁. 洞穴环境替代指标研究现状及其石漠化记录研究问题探究. *水土保持研究*, 2013; (04): 293—300
- Liu Z Q, Zhang Q Z, Xiong K N. The progress of environmental proxy indexes in cave system and the research for its application to rocky desertification. *Journal of Soil and Water Conservation Research*, 2013; (04): 293—300
- 27 刘东生, 谭明, 秦小光, 等. 洞穴碳酸钙微层理在中国的首次发现及其对全球变化研究的意义. *第四纪研究*, 1997; (1): 41—51
- Liu D S, Tan M, Qin X G, *et al.* Discovery of micro bedding on cave calcium carbonate in China and its significance on global change research. *Journal of Quaternary Research*, 1997; (1): 41—51
- 28 唐灿, 周平根. 北京典型溶洞区土壤中的 CO₂ 及其对岩溶作用的驱动. *中国岩溶*, 1999; 18(3): 213—217
- Tang C, Zhou P G. CO₂ of soil and its driving effect on karst in Beijing typical karst cave area. *China Karst*, 1999; 18 (3): 213—217
- 29 潘根兴, 曹建华, 何师意, 等. 岩溶土壤系统对土壤空气 CO₂ 的吸收及其对陆地碳循环的意义: 以桂林丫吉村岩溶试验场的野外观测和模拟实验为例. *地质前缘*, 2000; 7(4): 580—587
- Pan G X, Cao J H, He S Y, *et al.* Absorb of karst soil system to the soil air CO₂ and its significance on terrestrial carbon cycle: taking the field observation and simulation experiment of Karst Proving Ground in Yaji village, Guilin as an example. *Geological Front*, 2000; 7 (4): 580—587
- 30 王新中, 班凤梅, 潘根兴. 洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素——以北京石花洞为例. *第四纪研究*, 2005; 3(2): 259—263
- Wang X Z, Ban F M, Pan G X. Changes in space and time of cave drips on geochemical characteristics and their control factors-taking Shihua Cave of Beijing as an example. *Journal of Quaternary Research*, 2005; 3 (2): 259—263
- 31 王明达, 胡超涌, 周炼, 等. 土壤和围岩地球化学组成及气候对洞穴滴水水化学的影响——以湖北清江和尚洞为例. *地质科技情报*, 2010; 5(3): 97—103
- Wang M D, Hu C Y, Zhou L, *et al.* Influence of geochemical composition of soil and rock and climate to hydrochemistry of cave drips——taking Heshang Cave of Hubei Qingjiang as an example. *Journal of Geology and Technological intelligence*, 2010; 5 (3): 97—103
- 32 Tooth A F, Fairchild I J. Soil and karst aquifer hydrological controls on the geochemical evolution of speleothem-forming drip waters, Crag Cave, Southwest Ireland. *Journal of Hydrology*, 2003; 273: 51—68
- 33 Liu Z H, Groves C, Yuan Daoxian, *et al.* Hydrochemical variations during flood pulses in the southwest China peak cluster karst: Impacts of CaCO₃—H₂O—CO₂ interactions. *Hydrological Processes*, 2004; 18(13): 2423—2437
- 34 杨涛, 王世杰, 罗维均, 等. 现代环境监测研究中的一种新示踪指示剂(SO₄). *地球与环境*, 2012; 1(1): 1—8
- Yang T, Wang S J, Luo W J, *et al.* A new kind of tracer (SO₄) in the study of modern environmental monitoring. *Journal of Earth and Environment*, 2012; 1 (1): 1—8

Physical and Chemical Characteristics of Cave Drips in Different Rocky Desertification Area

LÜ Xiao-xi^{1,2}, LIU Zi-qi^{2,3*}

(Institute of South China Karst, Guizhou Normal University¹;

State Engineering Technology Institute for Karst Desertification Control², Guiyang 550001, P. R. China;

School of Geographical Sciences, Southwest University³, Chongqing 400715, P. R. China)

[**Abstract**] Physical indexes (drip rate, EC) and chemical indicators (pH, Ca^{2+}) of Karst cave drips were analyzed from different grades of rocky desertification area in Guizhou in July, and the change law of each index and their environmental significance were probed. The conclusions are as followed: ① Affected by the ground-surface vegetation, the drip rate of potential rocky desertification area is smaller than that of severe rocky desertification area, drip rates from different grades rocky desertification areas tend to be stable when go deep into cave passage. ② pH of each drop did not show the dilution effect of rainfall, drip pH value in each cave performed differently in potential rocky desertification area, and pH value in severe rocky desertification area is generally high. ③ The EC value of drips in potential rocky desertification area is larger than that of severe rocky desertification area, and the EC in different grades rocky desertification area is directly proportional to Ca^{2+} content.

[**Key words**] rocky desertification karst cave drips physical and chemical characteristics

(上接第 5 页)

Molecular Dynamics Simulation of Metal Fe Treated by Laser Beam

WEN Peng, TAO Gang, ZHOU Pei-jie

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, P. R. China)

[**Abstract**] Based on the embedded-atom method, molecular dynamics simulations have been performed on solidification processes of liquid metal Fe by using crystal-liquid configuration method at two different cooling rates. In this way, it simulates the process that metal Fe is treated by laser beam. By the analyses of average atomic energy, pair correlation function, common neighbor analysis and atomic configuration, it is studied that the evolution process of system and the structure characteristic of final state. It is found that the transfer velocities of crystal-liquid interface are $1.74 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{K})$ and $0.89 \text{ m}/(\text{s} \cdot \text{K})$ at cooling rates of 2 K/ps and 5 K/ps . In the final state, owing to the disordered atoms, some atoms' energy are higher than the original state at the interface. And there are some high-energy nanoparticles in the original liquid part. It provides the microstructure foundation to study the mechanical property of metal Fe treated by laser beam.

[**Key words**] molecular dynamics simulation EAM potential function crystal-liquid configuration method solidification process