

贵州石漠化地区地下漏失水土理化性质特征

李 渊，刘子琦，吕小溪，曹 洋，董晓超

(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：以贵州石漠化地区的 3 个洞穴为研究对象,通过对其地表土与地下漏失水土进行监测与采样分析,研究了不同地质环境条件中地表土壤与洞穴漏失水土的理化性质特征。结果表明,地表石漠化程度越高,岩溶裂隙管道的联通性越强,地下漏失水的滴率变幅越大,漏失土中的粘粒含量越低;在相同岩性条件下,石漠化程度越高,地表土壤 pH 值与元素含量越高;石将军洞漏失水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度平均值分别为 31.48,17.65,0.026 mg/L,韩家冲洞分别为 58.39,2.49,0.074 mg/L,荣发洞分别为 38.29,25.33,0.037 mg/L;受岩性差异影响,韩家冲洞漏失水中的 Mg^{2+} 浓度相对较低, Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度相对较高;受气候条件差异影响,荣发洞洞漏失水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度均高于石将军洞;洞穴漏失水对漏失土长期的化学侵蚀作用导致漏失土 pH 值与元素含量高于地表土。

关键词：石漠化;洞穴;漏失水土;理化性质

中图分类号：S157.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2016)06-0111-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.06.020

Physicochemical Properties of Underground Leakage Water and Soil in Rocky Desertification Area of Guizhou, China

LI Yuan, LIU Ziqi, LÜ Xiaoxi, CAO Yang, DONG Xiaochao

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

Abstract: In this study, surface soil and underground leakage water and soil were monitored and sampled for analysis over 3 caves in rocky desertification area in Guizhou, to research the physicochemical properties of surface soil and cave leakage water and soil under different geological environments. Results indicated that severe surface rocky desertification led to strong connectivity in fissure conduits of karst and large variation in drip rate of underground leakage water and soil, together with low clay content in leakage soil; pH and element contents became higher with more severe rocky desertification under the same lithology condition; mean values of Ca^{2+} , Mg^{2+} , and Sr^{2+} in leakage water were 31.48 mg/L, 17.65 mg/L, and 0.026 mg/L in Shijiangjun Cave, 58.39 mg/L, 2.49 mg/L, and 0.074 mg/L in Hanjiachong Cave, and 38.29 mg/L, 25.33 mg/L, and 0.037 mg/L in Rongfa Cave, respectively; the concentration of Mg^{2+} was low and those of Ca^{2+} and Sr^{2+} were high in Hanjiachong Cave for the influence of lithology difference, while the concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} and Sr^{2+} in leakage water of Rongfa Cave were higher than those of Shijiangjun Cave, which was influenced by weather condition; pH and element contents in leakage soil were higher than those in surface soil, which was the result of long-term chemical erosion of cave leakage water to leakage soil.

Keywords: rocky desertification; cave; leakage water and soil; physicochemical property

中国西南喀斯特地区人地矛盾突出,其衍生的石漠化问题,严重制约着地区经济的可持续发展^[1]。“十三五”期间,国家明确提出该区的生态环境需要进一步的改善与治理^[2]。制定石漠化治理方案,需要环境监测评价为其提供准确的科学依据与数据支撑,水土流失监测

评价作为其中一项重要的考核指标,旨在了解石漠化演化机理以及提供水土保持治理措施,其重要性不言而喻。由于喀斯特地区独特的二元地质结构,造成该区水土流失具有地表流失与地下漏失的双重特点。

水土漏失是地表、地下双层空间结构发育的喀斯

收稿日期:2016-05-21

资助项目:国家“十三五”重点研发计划项目(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项目(研创 201518)

第一作者:李渊(1990—),男,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。E-mail:liyuan7pro@163.com

通信作者:刘子琦(1979—),女,博士,副教授,主要从事喀斯特地貌演化、石漠化治理与监测评价研究。E-mail:124294329@qq.com

特地区一种特殊的水土流失方式,由于地表营力作用影响,土壤崩解和离散形成的颗粒物质经过土间空隙,在水流机械侵蚀及化学溶蚀作用驱动下,通过岩溶裂隙等岩溶通道向下渗漏至地下空间^[3-4]。地下水土漏失研究是水土流失监测评价中重要的参考指标,近年来,国内学者通过室内模拟试验^[5-7]以及¹³⁷Cs示踪法^[8-9]揭示地下水土漏失机制,已取得一定认识。但模拟试验与自然监测相比存在一定的客观局限性,此外,不同地表条件(石漠化程度)下土壤侵蚀差异较为显著^[10],因此需考虑地表环境特征差异对地下水土漏失机制的影响。

基于以上认识,本文对贵州不同地质环境条件下 3 个洞穴的上覆地表土壤与地下漏失水土进行了监测与采样,分析了地表土壤与地下漏失水土的理化特征,探讨了石漠化演化过程对水土漏失特征的影响机制,以期为喀斯特地区水土保持及石漠化治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选择贵州安顺地区、毕节地区、花江地区作为研究区,分属长江—珠江流域分水岭、长江流域和珠江流域;每个地区选取 1 个地下洞穴(图 1),由于上覆地表石漠化都较为严重,岩石裸露,长期受到风化作用与溶蚀作用的影响,导致洞穴顶板裂隙发育,地下洞穴水土漏失现象较为明显。

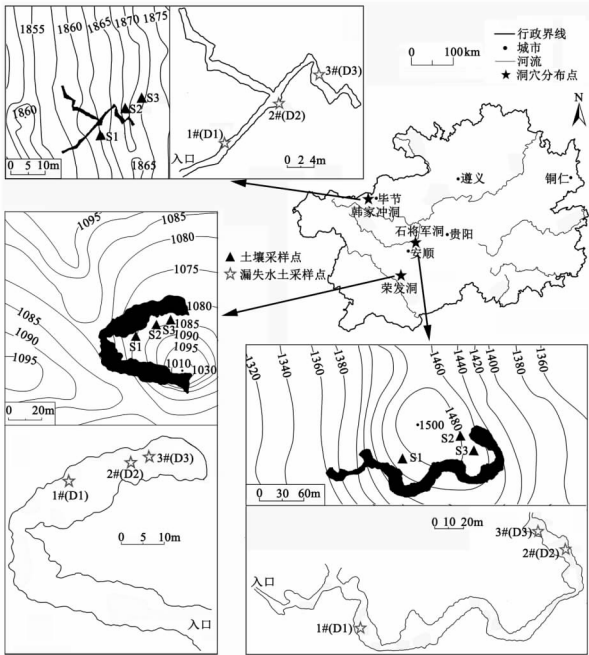


图 1 研究区洞穴分布

石将军洞位于安顺市西秀区七眼桥镇本寨燕子窝组,该区处于亚热带季风性气候区;喀斯特溶蚀方向主要以水平侵蚀为主,形成较多的水平方向洞道,造成水土流失较为严重,分布较多潮湿土壤。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;洞顶上覆植被主要以灌木、荒草为主,坡体陡峻,岩石裸露约达到 50%,土壤层稀薄,现属于中度石漠化等级;多数土壤以水土流失、裂隙渗漏方式进入洞穴内部,在洞穴通道底部堆积成较厚的沉积土层。

韩家冲洞位于毕节市七星关区拉溪镇朝营村韩家冲组,该区属典型的亚热带季风湿润气候;洞穴上覆植被主要是稀疏灌丛,仅有小片林草地零星分布于山腰靠下位置,岩石裸露约 60%,由于坡度大、植被覆盖率低、土壤抗蚀性低等原因,造成水土流失较为严重,现属强度石漠化等级;洞内通道狭窄且向下倾斜,沉积物发育较少,洞穴通道地表分布着漏失土形成的沉积土。

荣发洞位于花江镇北盘江峡谷的斜坡地带,该区属中亚热带气候,洞口位于封闭洼地一侧,是该洼地的消水通道;地表植被与土壤退化、基岩裸露率达 85%以上,洞穴顶部水土漏失严重,现属强度石漠化等级;洞内通道宽阔且向下倾斜,堆积了大量渗漏与冲刷土壤,洞内发育沉积物较少,水土漏失较为严重。

3 个洞穴的地表石漠化程度依次为荣发洞>韩家冲洞>石将军洞,在岩性、地貌和气候条件等方面具有一定的分异性(表 1)。

表 1 洞穴基本信息

项目	石将军洞	韩家冲洞	荣发洞
研究区	安顺	毕节	花江
地貌类型	高原盆地	高原山地	高原峡谷
洞口海拔/m	1433	1818	1079
经度	106°04'E	105°04'E	105°38'E
纬度	26°17'N	27°14'N	25°38'N
岩性	灰质白云岩	石灰岩	灰质白云岩
岩层年代	三叠系中统	二叠系下统	三叠系中统
地表植被类型	灌木、荒草	灌丛	灌丛
土壤均厚度/cm	24±16	20±8	11±7
土壤孔隙度	中	大	大
地表石漠化程度	中度	中度	强度
年均气温/℃	15	11.5	18.4
年降雨量/mm	1360	984	1052
洞内年均气温/℃	14.7±1.0	14.2±1.7	14.8±0.6
洞内年均湿度/%	98±1	94±3	96±2

1.2 样品采集

在研究区放置 Vaisala 公司生产的 WM 5200 型 Weather Meter 小型气象监测气温与降雨量数据。分别对 3 个洞穴上覆地表土壤(石漠化地表土壤层较薄,无法系统收集土壤水)、洞内漏失水与漏失水下方对应的表层漏失土壤进行采样。每个洞穴选取 3 个漏失水点(1#~3#)(图 1),自 2014 年 8 月至 2015 年 7 月按月连续监测并取样,并于 2016 年 5 月 23 日至 5 月 26 日在降雨期间每隔 4 h 对石将军洞漏失水点进行监测;现场监测漏失水的滴率,每次用秒表测量 10 min,使用美国 HACH 公司生产的 HQ40d 水质分析仪测试水样的 pH 值,精度为 0.01;使用事先润洗 3 次的 50 ml 聚乙烯瓶采集漏失水样品,并加入

1 : 1 HNO₃, 密封后带回实验室低温保存。于 2015 年 7 月, 在各研究区洞穴上覆选取 3 个土壤采集点 (S1~S3)(图 1), 自表层垂直向下分别按 5 cm 一层采集 1 个土壤样品; 采集洞内每个漏水水点下方对应的漏失表层土样品(D1~D3)(图 1)。

1.3 样品测试分析

土壤样品 pH 采用 2.5 : 1 的水土比, 用电位计法测定; 采用吸管法测定土壤颗粒组成。其余土壤样品自然风干后, 研磨过 100 目筛; 称取 0.5 g 样品放入聚四氟乙烯坩埚中, 滴入氯化氢 10 ml, 置于电热板上加热; 蒸发到 5 ml 时滴入硝酸 15 ml, 加热至粘稠状; 再滴入氢氟酸 10 ml 继续加热消解; 然后滴入高氯酸 5 ml, 加热至呈白色或淡黄色的粘稠物; 冷却后纯水稀释定容于 50 ml 的容量瓶中。所有样品预处理完备后, 使

用美国 Perkin—Elmer 公司产 Optima—2100DV 电感耦合等离子发射光谱仪 ICP—OES 分析样品中 Ca、Mg、Sr 元素含量, 检测精度 0.001 mg/L, 测量相对标准偏差 < 2%。

2 结果与分析

2.1 地表土壤与地下漏失水土物理特征

通过野外观测发现, 3 个洞穴的漏失土较为湿滑、细腻, 淤积较深, 并呈现出向周围蠕滑扩散的分布特点。由表 2 可知, 3 个洞穴的漏失土均以粘粒(粒径 < 0.001 mm)为主, 整体比地表土壤的粒径更小。推断其原因为地表土壤经坡面流水侵蚀, 以粘粒为主的土壤通过岩溶裂隙管道在水动力作用下漏失至地下空间形成沉积土, 造成地表土壤沙化, 洞穴漏失土粘化的现象。

表 2 地表土与洞穴漏失土粒径对比

洞穴	样品类型	各级粒径土壤颗粒含量/%				
		1~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.001 mm	<0.001 mm
石将军洞	地表土	21.22±3.31	21.49±2.78	9.79±1.57	27.54±3.16	19.86±3.44
	漏失土	4.92±0.63	6.43±1.51	10.47±3.24	16.47±2.41	60.17±6.13
韩家冲洞	地表土	21.33±1.85	19.57±2.01	21.42±2.84	17.32±1.47	20.44±3.04
	漏失土	12.03±2.07	14.88±2.16	6.94±0.96	10.36±1.39	54.92±4.49
荣发洞	地表土	17.52±2.55	15.38±2.42	21.14±1.96	28.20±3.11	17.42±2.77
	漏失土	8.19±1.09	15.11±2.61	19.37±2.85	12.65±1.75	48.22±4.38

图 2 反映了洞穴漏失水的季节性滴率变化, 代表漏失水的漏失速率变化; 3 个洞穴漏失水的滴率变化均表现出随季节性降雨量的增加而增大, 对降雨的响应较为明显; 从滴率变幅特征看出(图 3), 荣发洞的滴率变幅最显著, 雨季滴率极大, 且在旱季会出现断流, 这种漏失水属于降雨入渗水在岩溶裂隙中的优先流现象^[11]。此外, 据降雨期间石将军洞漏失水的滴率监测结果显示(图 4), 3 个漏失点的滴率均呈现出随降雨量增高而滞后增大, 1#、2#、3# 的率峰值分别出现在 36, 36, 52 h; 根据学者对贵州 4 个洞穴的监测中发现, 无石漠化地区地下洞穴漏失水对降雨响应的时长达 27~40 d 之久^[12], 说明由于石漠化地区特殊的二元地质结构, 造成漏失水在洞穴顶板的运移时间相对较短, 漏失速率相对较快。

通过比较 3 个洞穴漏失土粘粒含量与漏失水滴率特征, 石将军洞漏失土粘粒含量相对较高, 漏失水滴率变幅相对较小; 而荣发洞漏失土粘粒含量相对较低, 漏失水滴率变幅相对较大。说明水土漏失程度与地表石漠化的发育程度具有明显的关联, 地表石漠化程度高, 岩溶裂隙发育较好, 导致其裂隙管道的连通性较强, 地下水土漏失程度较高; 而地表石漠化程度低, 岩溶裂隙管道的连通性较差, 管道的“过滤性”强, 导致地下水土漏失程度较低, 漏失土的粘粒含量较高。

2.2 地表土壤与地下漏失水土化学特征

2.2.1 地表土壤与漏失水土 pH 特征 图 5 为 3 个洞穴上覆地表土壤剖面 pH 值的变化特征, 呈现出随土壤深度增加而升高的规律; 对比 3 个洞穴上覆地表土壤 pH 均值大小依次为荣发洞(7.42) > 石将军洞(7.19) > 韩家冲洞(5.92)。受母岩岩性影响, 灰质白云岩地区土壤 pH 高于石灰岩地区。一般情况下, 石漠化程度越高, 土壤 pH 越高^[13-14], 是因为石漠化严重地区的地表土壤层薄, 植被覆盖率低, 地表风化程度高, 土壤微生物活动较弱, 土壤中的 CO₂ 效应较差且易脱气, 因而土壤酸化程度低; 此外, 岩石裸露率较高, 土壤的化学性质受到母岩风化成分的影响, 碳酸盐岩普遍偏碱性, 石漠化程度高的地表土壤相对更多受到母岩风化的影响^[15]。

石将军洞地表土、漏失水、漏失土的 pH 值分别为 7.17, 8.34, 7.79, 韩家冲洞分别为 5.94, 8.12, 7.53, 荣发洞分别为 7.45, 8.24, 7.58。从图 6 可以看出, 地表土、漏失水、漏失土三者 pH 的大小关系为漏失水 > 漏失土 > 地表土。推测原因为土壤水渗透地表土层后, 进入基岩裂隙中与基岩发生岩溶作用时会消耗更多的 H⁺, 因而漏失水的 pH 值会升高^[16]; 由于漏失土来源于洞穴上覆地表土壤, 说明漏失土 pH 高于地表土的原因是长期受到漏失水的化学侵蚀作用造成的。

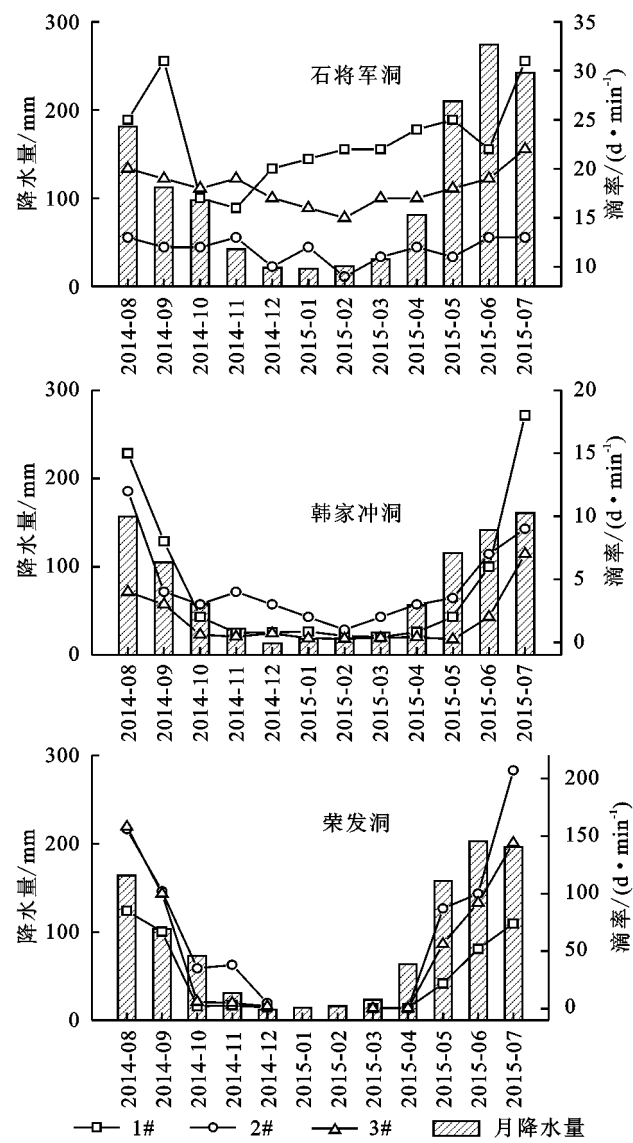


图 2 洞穴漏失水滴率变化

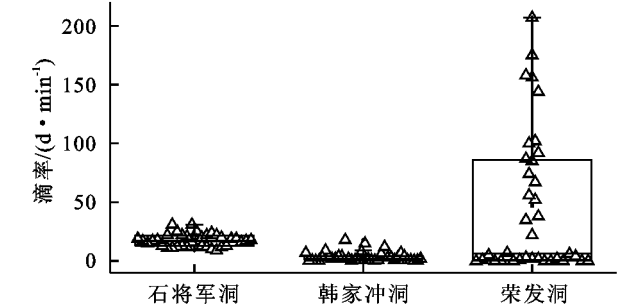


图 3 洞穴漏失水滴率 box-plot 分布

2.2.2 地表土与地下漏失水土元素特征 从表 3 可以看出,石将军洞上覆土壤 Ca、Mg、Sr 含量平均值分别为 8 443,10 309,68.67 $\mu\text{g/g}$,韩家冲洞分别为 9 283,2 017,53.65 $\mu\text{g/g}$,荣发洞分别为 10 186,11 322,73.00 $\mu\text{g/g}$ 。受母岩岩性影响,韩家冲洞上覆土壤中 Mg 含量较低,石灰岩中 Mg 含量相对灰质白云岩中较少,因而风化成土后土壤中含量亦较低。从数据可以看出,在相同岩性条件下地表石漠化程度越高,土壤的元素含量越多,是因为地表石漠化越严重,土壤的发育与

分布越接近母岩,其地球化学元素会受到母岩风化成分的影响越多^[13]。

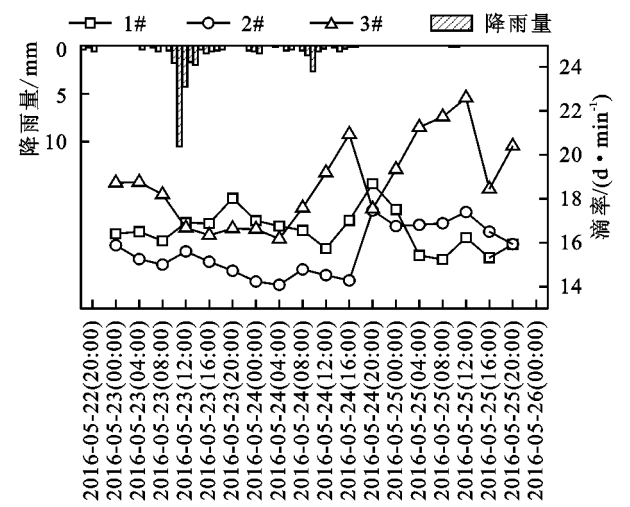


图 4 降雨期间石将军洞漏失水滴率变化

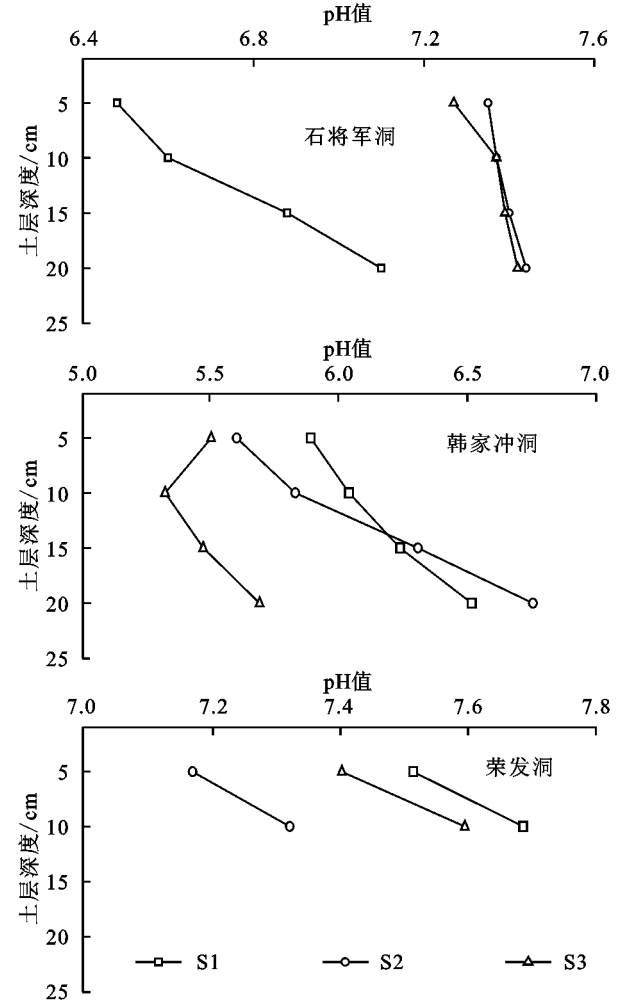


图 5 地表土壤剖面 pH 值变化

石将军洞漏失水 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度平均值分别为 31.48,17.65,0.026 mg/L,韩家冲洞分别为 58.39,2.49,0.074 mg/L,荣发洞分别为 38.29,25.33,0.037 mg/L(表 4)。3 个洞穴地表石漠化程度较严重,因而漏失水中的元素主要受到岩溶作用的贡献较多,而受到土壤的贡献相对较少^[17]。从漏失水滴率变化特征得

知(图 2),石将军洞顶板滞留水的时间最长,其次是韩家冲洞、荣发洞;通常情况下,漏失水中元素浓度越高,说明渗透水在顶板的滞留时间与岩溶作用时间越长,因而溶解的离子浓度越高,而这 3 个洞穴的漏失水的离子浓度并没有表现出此规律,说明渗透水在顶板的滞留时间对漏失水中的离子浓度的影响并不大,推测可能是受到气候与岩性条件的影响所致。

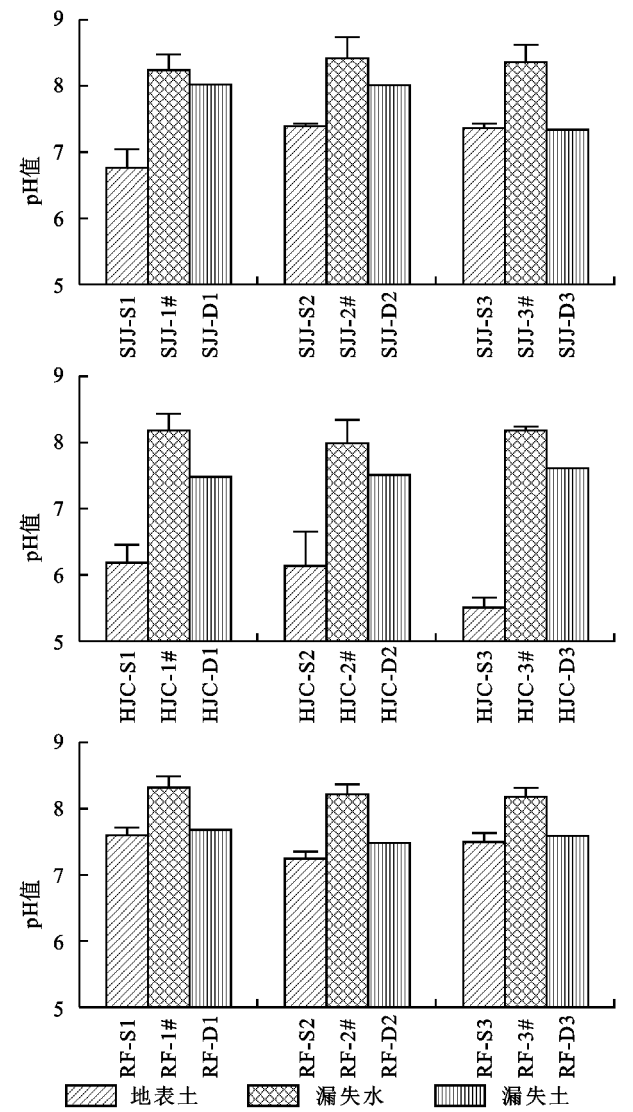


图 6 地表土壤、地下漏失水土的 pH 特征

通过比较,漏失水 Ca^{2+} 浓度表现为韩家冲洞>荣发洞>石将军洞, Mg^{2+} 浓度表现为荣发洞>石将军洞>韩家冲洞, Sr^{2+} 浓度表现为韩家冲洞>荣发洞>石将军洞。据学者研究发现,在相同岩性不同气候环境下,碳酸盐的溶蚀速率表现为干冷>干热>湿热^[18];在相同气候不同岩性条件下,石灰岩与白云岩的溶蚀速率具有明显差异,白云岩中的 Mg 元素溶解量最高^[19],而石灰岩中 Ca、Sr 元素的溶解速率大于白云岩^[20-22];Sr 在岩石风化中易与 Ca 发生类质同象作用,因而在岩溶过程中同 Ca 元素一起受到淋溶作用被迁移^[23]。韩家冲洞漏失水中 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度相对

较高,一方面可能因为韩家冲洞所在地区相对气温低、降雨量少的气候条件影响,另一方面受石灰岩岩性影响;而 Mg^{2+} 浓度相对较低则是因为岩性差异的影响,石灰岩中的 Mg 含量相对灰质白云岩中较少。而在相同岩性条件下,荣发洞漏失水的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度均高于石将军洞,原因可能受到气候条件差异的影响所导致,荣发洞所在地区相对气温高、降雨量少,而石将军洞所在地区相对气温高、降雨量多。

表 3 地表土和漏失土元素含量 $\mu\text{g/g}$

洞穴	样品类型	样品编号	Ca	Mg	Sr
石将军洞	地表土	SJJ-S1	7328	9713	66.33
		SJJ-S2	7934	10699	70.67
		SJJ-S3	10066	10514	69.00
		平均值	8443	10309	68.67
	漏失土	SJJ-D1	14405	13000	65.23
		SJJ-D2	10208	8237	81.31
		SJJ-D3	12213	11578	74.52
		平均值	12275	10938	73.69
韩家冲洞	地表土	HJC-S1	11810	2436	60.10
		HJC-S2	8200	1635	50.07
		HJC-S3	7838	1980	50.78
		平均值	9283	2017	53.65
	漏失土	HJC-D1	10600	1623	90.50
		HJC-D2	19955	2843	137.35
		HJC-D3	9613	2295	107.50
		平均值	13389	2253	111.78
荣发洞	地表土	RF-S1	10233	12278	78.50
		RF-S2	10108	11060	68.25
		RF-S3	10218	10627	72.25
		平均值	10186	11322	73.00
	漏失土	RF-D1	11343	9287	66.56
		RF-D2	12478	9948	67.13
		RF-D3	15155	10224	70.59
		平均值	12992	9822	68.09

表 4 漏失水元素含量 mg/L

洞穴	漏失水点	Ca	Mg	Sr
石将军洞	SJJ-1#	41.06	20.59	0.023
	SJJ-2#	22.69	15.90	0.031
	SJJ-3#	30.70	16.45	0.023
	平均值	31.48	17.65	0.026
韩家冲洞	HJC-1#	57.39	1.69	0.072
	HJC-2#	67.08	3.24	0.077
	HJC-3#	50.69	2.49	0.074
	平均值	58.39	2.47	0.074
荣发洞	RF-1#	26.25	24.99	0.036
	RF-2#	37.13	25.05	0.037
	RF-3#	51.48	25.94	0.037
	平均值	38.29	25.33	0.037

石将军洞漏失土 Ca、Mg、Sr 含量平均值分别为 12 275,10 938,73.69 $\mu\text{g/g}$,韩家冲洞分别为 13 389,2 253,111.78 $\mu\text{g/g}$,荣发洞分别为 12 992,9 822,68.09 $\mu\text{g/g}$ (表 3)。对比地表土与漏失土中的元素含量可知,每个洞穴的漏失土的元素含量均高于地表土壤。根据 3 个洞穴漏失土与漏失水之间 Ca、Mg、Sr 元素

的相关性可以看出(表 5),漏失土与漏失水之间的各元素表现出明显的正相关关系,说明漏失土的地球化学元素特性是在沉积过程中长期受到漏失水的化学侵蚀作用所导致。

表 5 洞穴漏失土与漏失水各元素相关性

洞穴	Ca(漏失土 与漏失水)	Mg(漏失土 与漏失水)	Sr(漏失土 与漏失水)
石将军洞	0.999	0.799	0.818
韩家冲洞	0.945	0.999	0.999
荣发洞	0.989	0.765	0.609

3 讨论

3.1 水土漏失机制

喀斯特石漠化地区的水土漏失形成机制主要受到地质构造、人类活动、降水驱动等因素的影响^[24]。贵州地区在新构造运动时期受到强烈的间歇性地壳上升运动,造成被抬升的侵蚀基准面不断接受地下水的垂直侵蚀作用,加之碳酸盐岩在风化溶蚀过程中存在明显的差异性风化^[25],导致褶皱与断裂交织,基岩节理与裂隙不断扩大加深,地下水在此部位优先入渗溶蚀,逐渐形成喀斯特地区独特的二元地质结构。随着人类活动的出现,土地开垦与植被破坏使土壤表层植被根系遭到破坏,土壤失去了植物根系的网固作用^[26],导致表层岩溶带土壤结构遭到崩解和破坏,水分入渗能力增强,渗透水填充基岩裂隙风化侵蚀形成的孔隙与管道,加剧基岩裂隙管道的化学侵蚀。同时,降水在入渗过程中会优先选择裂隙与节理等部位进行渗流,长期的溶蚀与冲刷作用导致其基岩裂隙不断蔓延扩大,造成地表土壤与基岩的空间异质性较高。渗透水将基岩裂隙中的土壤粘粒优先携带至地下空间,导致地表土壤的不断漏失,形成地表土壤空隙增大并出现粗颗粒化、地下漏失土粘化的趋势。

3.2 石漠化演化对水土漏失的影响

石漠化演化过程中不同阶段的水土漏失特征具有一定差异^[27]。演化初期,植被与土壤发育较好,降水对地表土壤的冲刷侵蚀程度较弱;碳酸盐岩的风化程度较低,且受到土壤渗透水溶蚀形成的裂隙较小,此时水土漏失发生在岩石裂隙中。但因碳酸盐岩具有风化成土速率慢,土壤侵蚀速率快的特点^[28],地表土壤与植被遭到地质外营力与人为因素的破坏后,降水对土壤的侵蚀强度增加,造成地表径流侵蚀与岩溶裂隙溶蚀的强度增加,水土流失逐渐严重致使地表土壤层变薄、基岩裸露率增加,碳酸盐岩受到风化侵蚀的强度增加,岩溶裂隙管道易受到渗透水的溶蚀而不断扩展加深,逐步形成水土漏失。随着地表水土的逐渐流失,石漠化与水土漏失进一步严重,此时降水一方面会直接进入基岩裂隙进行溶蚀,另一方面会以土

壤渗透水的形式进入基岩裂隙中进行溶蚀,后者的溶蚀强度更大,降水作用加剧了地表溶沟与地下岩溶裂隙管道的发育,同时促进了地下水土漏失。水土漏失初期,裂隙管道口径较小,漏失水将地表土壤的粘粒冲刷带入裂隙管道渗漏至地下空间,而较多的土壤粗颗粒仍滞留于地表或岩溶裂隙入口处,导致地表土壤沙化;由于溶蚀管道的空间异质性较大,造成漏失的土壤主要以粘粒为主,降水的漏失速率相对稳定(石将军洞);随着渗透水对岩溶裂隙管道的持续溶蚀,岩溶管道逐渐扩大,联通性加强,导致水土漏失速率增大,降水的漏失速率较快(韩家冲洞);最终,在长期的地表水土流失与地下水土漏失的双重作用下,地表石漠化极度严重且无土可流,呈现出水漏失较多,土漏失较少的极端情况,水漏失速率与降雨强度趋于一致(荣发洞)。

4 结论

(1)石漠化地区地表土壤的地球化学特征主要受到土壤侵蚀与母岩风化成土作用的影响,在相同岩性条件下,石漠化程度越高,土壤 pH 越高,土壤 Ca、Mg、Sr 元素含量越高;受母岩岩性的影响,石灰岩地区的土壤 Mg 含量比灰质白云岩地区低。

(2)岩性与气候条件差异导致地下漏失水中的元素含量具有明显差异。石灰岩岩性的韩家冲洞漏失水 Ca^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度相对较高, Mg^{2+} 浓度相对较低;因气候条件差异导致荣发洞洞漏失水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 浓度均高于石将军洞。

(3)受石漠化效应的影响,地表石漠化程度越高,岩溶裂隙管道的发育程度与联通性越强,其地下漏失水的滴率变幅越大,漏失土中的粘粒含量越低。

(4)洞穴漏失土因在沉积过程中长期受到漏失水的化学侵蚀作用的影响,表现出漏失土 pH 大于地表土壤,元素含量高于地表土壤,且漏失土与漏失水之间各元素均表现出明显的正相关关系。

(5)水土漏失程度随着石漠化过程的恶化而加深,漏失水将地表土壤中的粘粒通过岩溶裂隙管道携带至地下,长期作用造成地表土壤的不断漏失与沙化,岩溶裂隙管道联通性较强,最终导致地表无土可漏,土漏失较少、水漏失量较多的极端现象。

参考文献:

[1] 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.

[2] 李裕瑞,曹智,郑小玉,等. 我国实施精准扶贫的区域模式与可持续途径[J]. 中国科学院院刊,2016,31(3):279-288.

[3] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等. 岩溶峰丛洼地水土漏失及防治研究[J]. 地球学报,2014,35(5):535-542.

[4] 唐益群,张晓晖,周洁,等. 喀斯特石漠化地区土壤地下

- 漏失的机理研究:以贵州普定县陈旗小流域为例[J]. 中国岩溶, 2010, 29(2): 121-127.
- [5] 蔡雄飞, 王济, 雷丽, 等. 不同雨强对我国西南喀斯特山区土壤侵蚀影响的模拟研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 5-8.
- [6] 杨智, 戴全厚, 黄启鸿, 等. 典型喀斯特坡面产流过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 78-81.
- [7] 严友进, 戴全厚, 伏文兵, 等. 喀斯特坡地土壤地下侵蚀模拟试验研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 7-13.
- [8] 李豪, 张信宝, 文安邦, 等. 喀斯特峰丛洼地泥沙堆积的 ^{137}Cs 示踪研究:以丫吉试验场为例[J]. 地球与环境, 2016, 44(1): 57-63.
- [9] 魏兴萍, 袁道先, 谢世友. 运用 ^{137}Cs 与土壤营养元素探讨重庆岩溶槽谷区山坡土壤的流失和漏失[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 16-23.
- [10] 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.
- [11] 曹建生, 刘昌明, 张万军, 等. 典型小流域裂隙岩体渗流补给特性试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(11): 1335-1340.
- [12] 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.
- [13] 景宜然, 邓湘雯, 邓东华, 等. 湘西南不同石漠化程度土壤理化性质及相关性分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 189-195.
- [14] 尹辉, 李晖, 蒋忠诚. 果化示范区土壤pH值的空间自相关及其主导因子[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 183-188.
- [15] 汪智军, 梁轩, 袁道先. 岩溶流域不同土壤剖面溶解性碳氮分布和淋失特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 83-87.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 冯志刚, 马强, 李石朋, 等. 模拟不同气候条件下碳酸盐岩风化作用的淋溶实验研究[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 361-376.
- [19] 龙偲, 陈中吉, 周运超, 等. 静水和滴水条件下碳酸盐岩溶解与主要元素释放规律初步研究[J]. 中国岩溶, 2015, 34(5): 452-459.
- [20] 刘再华. 外源水对灰岩和白云岩的侵蚀速率野外试验研究:以桂林尧山为例[J]. 中国岩溶, 2000, 19(1): 1-4.
- [21] 胡进武, 王增银, 周炼, 等. 岩溶水锶元素水文地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2004, 23(1): 37-42.
- [22] 唐伟, 曹建华, 杨会, 等. 外源水对碳酸盐侵蚀速率研究:以桂林毛村地下河为例[J]. 地球与环境, 2014, 42(2): 207-212.
- [23] 任小凤, 杨琰, 彭涛, 等. 豫西鸡冠洞洞穴水及现代沉积物Mg, Sr和Ba记录及其意义[J]. 中国岩溶, 2014, 33(1): 57-63.
- [24] 郭红艳, 周金星. 石漠化地区水土地下漏失治理[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 71-76.
- [25] 孙承兴, 王世杰, 周德全, 等. 碳酸盐岩差异性风化成土特征及其对石漠化形成的影响[J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 308-314.
- [26] 张信宝, 王世杰, 贺秀斌, 等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-206.
- [27] 陆冠尧, 李森, 魏兴琥, 等. 粤北石漠化地区土壤退化过程研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(2): 20-25.
- [28] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- (上接第110页)
- [13] 李振新, 郑华, 欧阳志云, 等. 岷江冷杉针叶林下穿透雨空间分布特征[J]. 生态学报, 2004, 24(5): 1015-1021.
- [14] Jackson N A. Measured and modeled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 2000, 100(4): 323-336.
- [15] 李道宁, 王兵, 蔡体久, 等. 江西省大岗山主要森林类型降雨再分配特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2193-2200.
- [16] Shan L S, Li Y, Zhao R F, et al. Effects of deficit irrigation on daily and seasonal variations of trunk sap flow and its growth in *Calligonum arborescens* [J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(2): 233-243.
- [17] van Dijk A I J M, Bruijnzeel L A. Modeling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system[J]. Journal of Hydrology, 2001, 247(3/4): 239-262.
- [18] Liang W L, Hung F X, Chan M C, et al. Spatial structure of surface soil water content in a natural forested headwater catchment with a subtropical monsoon climate[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516(8): 210-221.
- [19] 孙忠林, 王传宽, 王兴昌, 等. 两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3978-3986.
- [20] 刘世荣, 温远光. 中国森林生态系统水文生态功能规律[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 121-156.
- [21] 马雪华. 森林水文学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1993: 30-40.