

# 喀斯特石漠化小流域土壤渗滤水 化学特征及影响因素研究

陈生华<sup>1,2,3</sup>, 王世杰<sup>1,2</sup>, 杨涛<sup>1,2,3</sup>, 肖德安<sup>1,3,4</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院普定喀斯特生态与石漠化试验研究站, 贵州 普定 562100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 贵州省环境监测中心站, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 对贵州省清镇王家寨喀斯特小流域 9 个样地的土壤渗滤水进行了系统监测。结果表明, 随着石漠化退化程度的加剧, 黑色石灰土地区土壤渗滤水中的  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , 方解石饱和度 ( $\text{SI}_c$ ) 和黄壤地区土壤渗滤水中的  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度均呈升高趋势。初步认为, 植被和土壤的双重退化是控制石漠化发育过程中渗滤水化学组成的主要原因, 当植被系统的退化先于土壤系统时, 水—土反应强度的影响更大, 渗滤水化学组成表现为  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量随石漠化的发育而减少; 当土壤系统的退化先于植被系统时, 水—土反应时间的影响更大, 渗滤水的化学组成则表现为  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量随石漠化的发育而增加。

**关键词:** 喀斯特石漠化; 土壤渗滤水; 喀斯特小流域; 水化学特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0026-06

中图分类号: P642.25

## Chemical Characteristics of Soil Percolating Water and Influencing Factors in Karst Stony Desertification Area

CHEN Sheng-hua<sup>1,2,3</sup>, WANG Shi-jie<sup>1,2</sup>, YANG Tao<sup>1,2,3</sup>, XIAO De-an<sup>1,3,4</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China; 2. Puding Experimental Research Station of Karst Ecology and Desertification, Puding, Guizhou 550002, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Guizhou Environmental Monitoring Center, Guiyang, Guizhou 550002, China)

**Abstract:** A systematically monitoring has been carried of soil percolating water in karst stony desertification area. The result showed that higher the degree of stony desertification is, the higher the concentrations of  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and the value of calcite saturation index ( $\text{SI}_c$ ) in the percolating water from rendzina area are. The concentrations of  $\text{Mg}^{2+}$  in water samples from yellow soil area showed the same trend. It maybe result from related soil and vegetation degradation. When vegetation degradation starts earlier than soil, the concentrations of  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  will decrease with the development of stony desertification due to the stronger reactions between water and soil. On the contrary, when soil degradation starts earlier than vegetation, the concentrations of  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  will increase with the development of stony desertification due to more time requirement for reactions between water and soil.

**Keywords:** stony desertification in karst area; soil percolating water; karst catchment; hydrochemical characteristics

喀斯特石漠化的本质是一个生产力连续退化的过程, 其发育程度常用土壤系统和植被系统的关联退化来表征<sup>[1]</sup>。虽然人类不合理的社会经济活动通常

是石漠化发生的主要诱因, 但是脆弱敏感的喀斯特环境才是石漠化发生的前提条件, 特别是其所具有的地上—地下双层水文结构更加剧了土壤系统的退化趋

收稿日期: 2009-11-08

修回日期: 2011-03-27

资助项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目“岩溶山地土壤与植被关联退化过程及其调控对策研究”(KZCX2-YW-306); 国家重点基础研究(973) 发展计划项目(2006CB403200)

作者简介: 陈生华(1979—), 男(土家族), 湖南省张家界市人, 博士研究生, 主要从事喀斯特石漠化研究。E-mail: chenshenghua2009@gmail.com。

通信作者: 王世杰(1966—), 男(汉族), 浙江省台州市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为岩溶环境与地球化学研究。E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn。

势<sup>[2-3]</sup>。与非喀斯特地区不同,喀斯特小流域内的降雨通常很难产生地表径流,这主要是由于大部分降雨会通过土壤渗滤进入表层岩溶带,即使部分降雨形成地表径流也会通过落水洞、岩溶漏斗等岩溶管道系统快速下渗转变为地下径流<sup>[4]</sup>。因此,在喀斯特生态水文过程中土壤渗滤水扮演着重要的角色,是土壤侵蚀和营养物质传输迁移的载体。

为此,选择清镇市退耕还林(草)示范区——王家寨喀斯特小流域作为研究区,在杜学莲、余海等人<sup>[5-7]</sup>在流域内开展植被、土壤等环境因子的研究基础上,对不同石漠化等级下的土壤渗滤水进行了长期监测,以期能通过土壤渗滤水化学组成的对比研究,为进一步了解石漠化退化过程中喀斯特环境因子的演化过程和机理提供帮助。

## 1 研究区概况

研究区为贵州省清镇市红枫湖镇王家寨小流域,地理坐标为东经  $106^{\circ}02'05''$ — $106^{\circ}02'18''$ ,北纬  $26^{\circ}31'45''$ — $26^{\circ}30'27''$ 。据清镇市红枫湖气象站 1995—2004 年的资料统计,该区年均气温  $14.4^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $1205.6\text{ mm}$ ,为典型的亚热带湿润季风气候。研究区位于贵州高原二级台面,地势中间低四周高,海拔变化范围  $1275\sim 1460\text{ m}$ ,峰丛与洼地的面积比  $1.65:1$ ,为典型的喀斯特浅碟状峰丛洼地<sup>[5]</sup>。区内出露地层为中三叠统关岭组白云岩、灰岩、泥质白云岩、泥质灰岩夹少量页岩、溶塌角砾岩和石膏,主要受南北向斜控制,同时亦受北东向发育的次级断层影响。流域内一般在 5—11 月发育有季节性地表径流。地下水以岩溶裂隙水和岩溶管道水为主,在流域东侧出口处以泉的形式排泄,最终向东汇流注入红枫湖。土壤类型主要有黑色石灰土与黄壤两类<sup>[6]</sup>。流域洼地以耕地为主,峰丛以灌木林和草地为主<sup>[7]</sup>。流域总面积约  $2.21\text{ km}^2$ ,有轻、中、重不同等级的石漠化发育(图 1)。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

2005 年 10 月,对小流域内石漠化的分布情况作了详细调查。根据基岩裸露率和植被盖度两项指标划分出了强、中、轻共 3 个石漠化等级。强度石漠化:基岩裸露率  $>70\%$ ,植被盖度  $<30\%$ ;中度石漠化:基岩裸露率  $50\%\sim 70\%$ ,植被盖度  $30\%\sim 50\%$ ;轻度石漠化:基岩裸露率  $30\%\sim 50\%$ ,植被盖度  $50\%\sim 70\%$ 。此外,将基岩裸露率  $<30\%$ 和植被盖度  $>70\%$

的地区,确定为无石漠化地区。在此基础上,选取了 9 个有代表性的样地开展土壤渗滤水监测(图 1)。

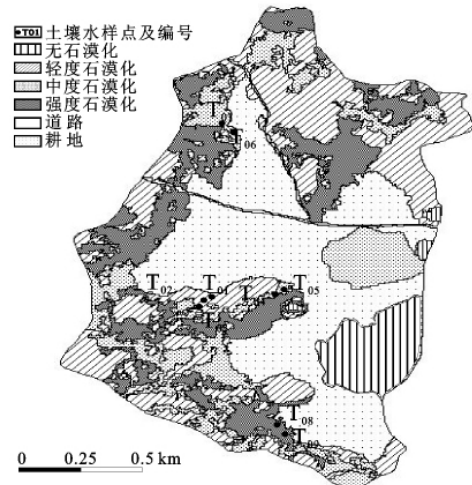


图 1 研究区石漠化等级及样地分布

### 2.2 土壤样品采集及分析

根据土被分布情况分别确定土壤样品的采集方法:(1)土被连续的样地。按一般土壤采样规则采集表层混合样;(2)土被不连续的样地。采用权重取样法,即首先划分样地中的小生境类型,然后根据面积权重确定组成样地土壤代表样的各类小生境土壤样品量,各类小生境土样则分别由以面积权重确定的同类小生境样品量混合构成,小生境土样则由多点混合样组成,在样地小生境类型数量较多的情况下,只考虑面积之和超过样地总面积  $95\%$  以上的几类小生境<sup>[8]</sup>。由于流域内土层较为浅薄,考虑到表层土壤与植被生长关系的密切性及样地间的可比性,确定所有样地的采样深度均为  $0\sim 15\text{ cm}$ ,不足  $15\text{ cm}$  的直接以土壤厚度为采样深度。

新鲜土样自然风干后,用四分法取出一定量的测试样做预处理。首先从测试样中挑出石砾及可见凋落物和根系,然后用玛瑙碾钵碾细过筛,碾磨过程中植物碎片用塑料棒摩擦静电法去除。称取过  $1\text{ mm}$  筛的自然风干土  $10\text{ g}$ ,加超纯水  $25\text{ ml}$ ,搅拌均匀,静置  $30\text{ min}$  后用 pH 计测定土壤 pH 值,精度  $0.01$ 。将土壤样品过  $0.073\text{ mm}$  筛,用元素分析仪(PE2400-II)测定土壤有机质含量,精度  $0.01\%$ 。将土壤样品过  $0.25\text{ mm}$  筛后用氯化铵—乙酸铵溶液交换,吸取浸出液  $5\text{ ml}$  于  $50\text{ ml}$  容量瓶中,加入镧盐  $0.5\text{ ml}$ ,定容,用 AAS 法测定土壤交换态 Ca 和 Mg。

### 2.3 土壤渗滤水取样方法

用于采集土壤渗滤水的工具是自制的简易集水器,有  $40\text{ cm}\times 20\text{ cm}$  和  $20\text{ cm}\times 10\text{ cm}$  两种规格,整体构造如图 2 所示。确定取样点时,一定要在植被土

壤调查的基础上,选择土壤层较厚、剖面完整,汇流条件好的地点埋放集水器,否则,很难采集到足够的渗滤水用于分析测试。埋放集水器时,先在下坡方向垂直挖出一个剖面,然后在上坡方向的侧壁掏挖一个与集水器大小和形状相近的小洞,将集水器放入洞中,出水口向下,并有一定的向下倾斜角度,以保证能最大限度地收集渗滤水。将导水管紧贴剖面侧壁引出地表,并用原土将剖面填埋。最后,为防止受干扰土层积水淹没集水器,造成无效取样,还应在剖面下方挖一条平行的引水沟排水。

由于渗滤水的收集难度较大,集水器很难保证一次安置成功。因此,在正式开始监测前,建议预留一个丰水期来检测安置效果,以确保整个监测周期的连贯性。

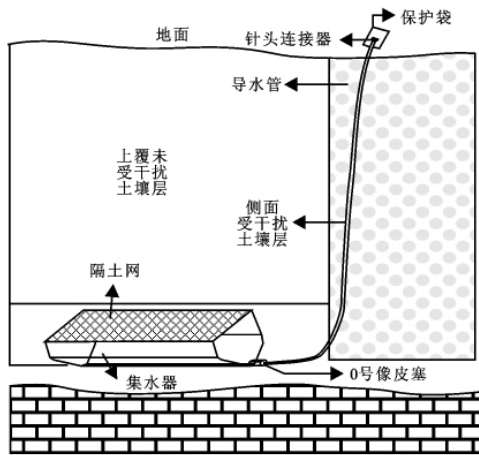


图 2 土壤渗滤水采集示意

## 2.4 各参数测定方法

2006年3月至2007年8月,每月中旬采样一次,共获得渗滤水样品50个(主要集中在2006和2007年5—8月)。现场采样时,首先用50 ml医用注射器抽取部分渗滤水转移到玻璃瓶中,用法国制Radiometer便携式多参数仪(pIONneer 65)测定pH值、电导率(EC)和水温,精度分别为0.01,0.1和0.01,并用HCl滴定法测定 $\text{HCO}_3^-$ 含量。剩余渗滤水样现场过滤( $\theta=50$  mm Millipore滤头,0.45  $\mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜)后密封于100 ml高致密聚乙烯瓶,放入暗箱保存。用于测定阳离子的水样需立即加入超纯 $\text{HNO}_3$ ,酸化至pH值 $<2$ 。水样带回实验室后,用AAS(原子吸收光谱PE-601)测定阳离子 $\text{K}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ ;用离子色谱(ICS-90)测定阴离子 $\text{F}^-$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{NO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ 。

## 3 分析与讨论

### 3.1 土壤渗滤水的化学特征

土壤渗滤水的pH值变化范围为6.59~8.70,

中值7.36,较室内土壤滤液的pH值(5.86~7.89)偏碱性。电导率变化范围为44.0~539.0  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,均值306.3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,下限值远低于西南喀斯特地区已报道的表层岩溶泉的电导率<sup>[9-10]</sup>。阳离子以 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 为主,阴离子以 $\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 为主,整体上具有 $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ 和 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^-$ 的离子浓度(mg/L)顺序。Piper图的投点分类结果显示(图略),所有样品的水化学类型均为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 型。

经WATSPEC2程序的矿物饱和指数计算<sup>[11]</sup>,土壤渗滤水的 $\text{CO}_2$ 分压范围为11~2 990 Pa,方解石饱和指数( $\text{SI}_c$ )的区间值为-2.02~1.04。以 $\text{SI}_c < -0.3$ 作为不饱和判断条件<sup>[12]</sup>,有39%的土壤渗滤水样品保留了对碳酸岩的侵蚀力。

### 3.2 土壤类型对水化学的影响

岩溶生境中,植被类型、土壤状况及小气候条件等环境因子的空间异质性极强<sup>[8,10]</sup>,这在土壤渗滤水的化学组成上也有明显反映。虽然所有水样的水化学类型均为 $\text{HCO}_3-\text{Ca}$ 型,但从表1的统计及各主要离子含量的单因素分析结果来看,黄壤和黑色石灰土地区的土壤渗滤水化学组成在EC, $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{SI}_c$ 和 $P_{\text{CO}_2}$ 上具有显著性差异( $F > F_{0.05}$ , $p < 0.05$ )。

阳离子中,黄壤地区土壤渗滤水中的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 含量远低于黑色石灰土地区的土壤渗滤水,且黄壤地区的土壤渗滤水具有“高Ca低Mg”的特征,大部分样品中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量占总阳离子浓度的69%~98%,而 $\text{Mg}^{2+}$ 仅有1.29%~33%;黑色石灰土地区则表现为Ca和Mg相似的特征,大部分样品中 $\text{Ca}^{2+}$ 含量占总阳离子浓度的52%~65%, $\text{Mg}^{2+}$ 含量占34%~47%之间。

阴离子中,黄壤地区土壤渗滤水中的 $\text{HCO}_3^-$ 含量为33.94~78.99 mg/L,远低于黑色石灰土地区的含量115.32~338.55 mg/L。 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量整体上也具有相似的特征。

根据土壤渗滤水与当地降雨中各主要离子浓度的比值来判断(表1),不同土壤类型间土壤渗滤水化学组成之所以存在差异,与各离子的来源密不可分:(1)以大气降雨输入为主的离子,如 $\text{K}^+$ , $\text{Na}^+$ , $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{Cl}^-$ ,土壤渗滤水中的含量相对降雨增加较少,除 $\text{Na}^+$ 离子由于受极值样品的影响比值相对偏高外,其余离子的平均浓度比值都小于3,在不同土壤类型的渗滤水中,该类离子的含量无明显差异。已有的研究表明碳酸岩地区的人类活动也是该类离子的一个主

要来源,但在本研究中,所选取的样地均位于王家寨小流域的分水岭地带,远离居民聚集区,人类活动强度小,因此,这一来源几乎可以忽略。(2) 以水—土反应输入为主的离子,如  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$ , 土壤渗滤水中的含量相对降雨增加了几十倍。虽然由于未测定降雨样品的  $\text{HCO}_3^-$  离子浓度,无法给出具体的比值

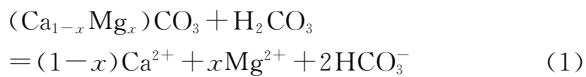
范围,但贵阳地区已有的雨水化学研究表明  $\text{HCO}_3^-$  离子亦属此类 [13]。岩溶生境中土壤的空间异质性的对渗滤水的化学组成产生了显著影响。 $\text{SO}_4^{2-}$  离子比较特殊,从降雨到土壤渗滤水,离子含量变化并不大,但在不同土壤类型的渗滤水中具有显著性差异,其原因有待进一步研究。

表 1 不同土壤类型下的土壤渗滤水化学组成及与降雨比值统计

项目	黑色石灰土地区		黄壤地区		与降雨的比值			
	范围	均值	范围	均值	黑色石灰土地区(35)		黄壤地区(15)	
					范围	均值	范围	均值
pH 值	6.82~8.59	7.36	6.59~8.70	7.39				
EC	44.0~539.0	372.3 <sup>a</sup>	67.1~253.9	151.5				
$\text{NO}_3^-$	—~4.11	0.76	—~6.16	1.41	—~4.47	0.83	—~6.70	1.53
$\text{Cl}^-$	0.02~3.66	0.67	0.12~2.75	0.70	0.07~14.24	2.59	0.46~10.69	2.72
$\text{SO}_4^{2-}$	15.28~117.87	49.39 <sup>a</sup>	3.13~47.64	25.48	1.69~13.07	5.48	0.35~5.28	2.83
$\text{HCO}_3^-$	115.32~338.55	216.75 <sup>a</sup>	33.94~78.99	57.32				
$\text{K}^+$	—~0.45	0.09 <sup>a</sup>	0.07~1.54	0.28	0.05~2.15	0.43	0.31~7.32	1.35
$\text{Na}^+$	0.09~3.24	0.44	0.07~1.61	0.37	1.71~62.86	8.51	1.38~31.27	7.25
$\text{Mg}^{2+}$	15.86~31.25	23.49 <sup>a</sup>	0.26~5.92	2.20	195.66~385.59	289.75	3.20~73.01	27.11
$\text{Ca}^{2+}$	29.23~89.60	56.77 <sup>a</sup>	12.25~42.18	25.87	23.21~71.13	45.07	9.73~33.43	20.54
$\text{SI}_c$	-0.66~1.04	-0.02 <sup>a</sup>	-2.02~0.50	-0.79				
$P_{\text{CO}_2}$	45~2 990	1 026 <sup>a</sup>	11~924	348				

注:(1) 括号内 35,15 为样品数量,下同;(2) 字母 a 表示组间差异达到 0.05 水平显著,下同;(3) 降雨样品于 2007 年 7 月采集;(4) 离子浓度单位为 mg/L,EC 单位为  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , $P_{\text{CO}_2}$  单位为 Pa。下同。

为进一步了解土壤类型对土壤渗滤水化学组成的控制,  $[\text{Ca}^{2+}]^* = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{SO}_4^{2-}]$  被单独求出。根据碳酸岩侵蚀方程:



由化学反应计量可知,  $[\text{Ca}^{2+}]^* / [\text{HCO}_3^-] = 1$  和  $[\text{Ca}^{2+}]^* / [\text{HCO}_3^-] = 1/2$  分别代表了方解石和白云石的侵蚀,二者之间的区域则反映了过渡岩性的侵蚀作用 [14]。由图 3 中可以看出,黑色石灰土地区的土壤渗滤水样品沿白云石侵蚀线分布,说明此类土壤中所含的碳酸盐矿物可能以白云石为主。

由于样品量太少,图 3 所反映的黄壤渗滤水中的离子关系趋势难下定论,但从  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  离子占总阳离子浓度的比值来看 ( $\text{Ca}^{2+}$  占总阳离子浓度的 69%~98%, $\text{Mg}^{2+}$  仅有 1.29%~33%),可以推断黄壤中所含的碳酸盐矿物可能更多的为方解石类型。这也与土壤交换态 Ca 和 Mg 的分析结果相一致,黑色石灰土中 CaO 和 MgO 含量较高,变化范围分别为 10.7%~12.4% 和 29.4%~35.0%;黄壤中 CaO 和 MgO 含量偏低,变化范围分别为:0.9%~1.6%,1.7%~11.7%。

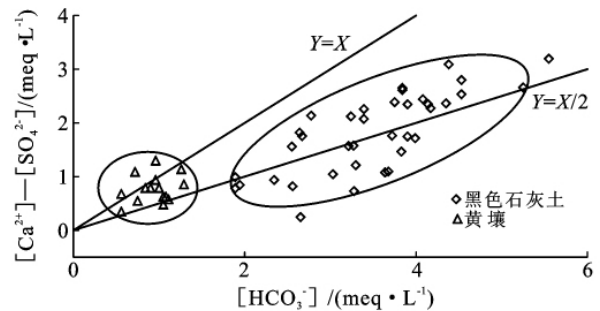


图 3 不同土类土壤渗滤水  $[\text{Ca}^{2+}] - [\text{SO}_4^{2-}]$  与  $[\text{HCO}_3^-]$  关系

此外,不同土壤类型渗滤水的  $\text{CO}_2$  分压和  $\text{SI}_c$  的特征也有差异:黑色石灰土渗滤水为高  $\text{CO}_2$  分压高  $\text{SI}_c$ ,黄壤渗滤水为低  $\text{CO}_2$  分压低  $\text{SI}_c$ 。这可能是受到土壤有机质含量的影响,黑色石灰土的有机质含量为 23.2%~28.2%,远高于黄壤的 5.7%~9.9%。在土壤微生物作用下,富含有机质的黑色石灰土地区的土壤渗滤水一般具有较高  $\text{CO}_2$  分压,但同时由于土壤中碳酸盐矿物含量较高为水—土反应供应了更多的物质,水中的碳酸被大量消耗,降低了土壤渗滤水的侵蚀性,最终导致黑色石灰土地区土壤渗滤水的  $\text{SI}_c$  值相对黄壤地区偏高。

### 3.3 石漠化等级对水化学的影响

以上的分析表明,土壤类型对土壤渗滤水化学组成的控制是极其显著的。因此,在研究石漠化等级对土壤渗滤水化学组成的影响时,首先需要区分出不同的土壤类型。

表 2 是在土壤类型的基础上,将土壤渗滤水样品按石漠化等级分组后获得的统计结果。单因素分析显示,黑色石灰土地区的轻度石漠化和中度石漠化样

地间存在  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SI}_c$  的显著性差异 ( $F > F_{0.05}$ ,  $p < 0.05$ ); 黄壤地区的中度石漠化和强度石漠化间则仅有  $\text{Mg}^{2+}$  浓度的显著性差异 ( $F > F_{0.05}$ ,  $p < 0.05$ )。从平均值和分布范围的统计结果来看,这类指标的显著性差异表现为:在黑色石灰土地区,随石漠化退化程度的加剧,土壤渗滤水的  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SI}_c$  有升高的趋势;在黄壤地区,随石漠化退化程度的加剧,土壤渗滤水的  $\text{Mg}^{2+}$  离子浓度有升高的趋势。

表 2 不同石漠化等级土壤渗滤水的化学组成统计

项目	黑色石灰土地区				黄壤地区			
	轻度石漠化(27)		中度石漠化(8)		中度石漠化(9)		强度石漠化(6)	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
pH 值	6.82~8.50	7.36	7.14~8.59	7.38	6.59~7.60	7.37	7.00~8.70	7.39
EC	221.3~539.0	367.7	44.0~493.3	387.5	67.1~253.9	140.5	77.9~224.5	168.0
$\text{NO}_3^-$	0~4.11	0.79	0.06~3.66	0.69	0~6.16	1.71	0.02~3.60	0.96
$\text{Cl}^-$	0.02~3.66	0.73	0.09~0.90	0.46	0.12~2.75	0.63	0.14~2.51	0.81
$\text{SO}_4^{2-}$	15.28~89.04	46.73	16.13~117.87	58.34	3.34~47.64	22.38	3.13~44.67	30.14
$\text{HCO}_3^-$	115.32~276.33	206.72 <sup>a</sup>	161.75~338.55	250.63	33.94~78.99	54.55	45.76~67.71	61.47
$\text{K}^+$	0~0.25	0.08	0~0.45	0.11	0.07~1.54	0.34	0.11~0.36	0.21
$\text{Na}^+$	0.09~3.24	0.47	0.09~0.75	0.32	0.07~1.61	0.44	0.08~0.43	0.28
$\text{Mg}^{2+}$	15.86~31.25	22.91	20.23~29.71	25.42	0.26~4.83	1.23 <sup>a</sup>	1.93~5.92	3.64
$\text{Ca}^{2+}$	29.23~75.46	53.84 <sup>a</sup>	38.90~89.60	66.68	15.00~42.18	26.79	12.25~32.81	24.49
$\text{SI}_c$	-0.66~0.86	-0.10 <sup>a</sup>	-0.16~1.04	0.24	-2.02~-0.31	-1.04	-1.54~0.50	-0.48
$P_{\text{CO}_2}$	50~2 990	1 052	45~1 886	940	84~924	407	11~570	278

在以往喀斯特地区表层岩溶带有关水的研究中,学者们更多地关注植被群落的变化对水化学组成的影响。如刘方等人<sup>[15]</sup>在茂兰的研究表明,随着喀斯特森林从阔叶林—灌木林—灌草方向的演替,表层岩溶泉水中  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的比例明显减少。本研究的结果并不符合这一变化趋势,这可能是由于石漠化发育过程不仅仅只有植被系统的逆向演替,更重要的是还包含有土壤系统的退化。

如果将两种土壤类型下不同石漠化等级间具有显著差异的离子种类结合起来考虑,可以发现这些离子均受到  $\text{CaCO}_3-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$  反应控制。由此,可推测不同石漠化等级下的土壤渗滤水化学组成形成差异的过程为:在石漠化等级低的地区,植物根呼吸和土壤微生物作用强烈,土壤渗滤水具有较高的  $\text{CO}_2$  分压,同时由于土壤松散,土壤渗滤水下渗速率较快,水—土作用时间短,使得土壤渗滤水的侵蚀能力被保留, $\text{SI}_c$  值较低,以水—土反应输入为主的  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  离子的浓度也相对较低;而在石漠化等级高的地区,虽然植被退化降低了土壤  $\text{CO}_2$  分压,但同时由于土壤退化,土壤结构遭到破坏,渗滤水的下渗速率减缓,水—土作用时间变长,渗滤水的侵蚀

能力被大量消耗,结果表现出  $\text{SI}_c$  升高,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{HCO}_3^-$  离子浓度增加的特征。因此,石漠化退化过程对于土壤渗滤水化学组成的控制可归结为两个方面,一是植被系统的逆向演替会降低土壤  $\text{CO}_2$  分压,导致渗滤水侵蚀能力减弱,水—土反应强度变小;二是土壤系统的退化会破坏土壤结构,减缓了渗滤水的下渗速率,水—土反应时间延长。前一个现象已有大量的研究结果证明<sup>[16-18]</sup>,后一个现象还有待进一步研究。

## 4 结论

(1) 研究区土壤渗滤水样品的水化学类型均为  $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型,但受土壤类型和石漠化等级的影响,同样地间土壤渗滤水的化学指标存在显著性差异。

(2) 土壤类型对土壤渗滤水化学组成的控制影响极为显著。土壤中物质组成的差异导致黑色石灰土地区的土壤渗滤水较黄壤地区的土壤渗滤水具有更高的 EC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SI}_c$  和  $P_{\text{CO}_2}$ , 同时  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{Mg}^{2+}$  之间的离子浓度差异也更小。

(3) 石漠化的发育包含了植被系统和土壤系统的双重退化。当植被系统的退化先于土壤系统时,

水—土反应强度的影响更大,渗滤水的化学组成表现为  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量随石漠化的发育而减少;当土壤系统的退化先于植被系统时,水—土反应时间的影响更大,渗滤水的化学组成则表现为  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量随石漠化的发育而增加。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [2] 何宇彬. 关于“喀斯特水系统”研究[J]. 中国岩溶, 1997, 16(1): 68-74.
- [3] 袁道先. 全球岩溶生态对比:科学目标和执行计划[J]. 地理科学进展, 2001, 16(4):461-466.
- [4] 冉景丞, 何师意, 曹建华, 等. 亚热带喀斯特森林的水土保持效益研究:以贵州茂兰国家级自然保护区为例[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5):92-95.
- [5] 周梦维. 喀斯特石漠化景观的空间因子分析及生态优化途径初探:以贵州清镇王家寨小流域为例[D]. 贵州 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2007.
- [6] 余海. 喀斯特丘原区石漠化过程中土壤退化的表征与分析:以清镇王家寨小流域为例[D]. 贵州 贵阳:中国科学院地球化学研究所, 2007.
- [7] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区土壤渗漏水分的时空变异分析:以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地球与环境, 2008, 36(3): 93-201.
- [8] 王世杰, 卢红梅, 周运超, 等. 茂兰喀斯特原始森林土壤有机碳的空间变异性与代表性土样采集方法[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 475-483.
- [9] 何寻阳, 李强. 表层岩溶带岩溶水的水化学动态变化及其环境效应:以马山弄拉电堂为例[J]. 广西师范大学学报:自然科学版, 2005, 23(2):103-106.
- [10] 刘再华, Chris Groves, 袁道先, 等. 水—岩—气相互作用引起的水化学动态变化研究:以桂林岩溶试验场为例[J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(4):13-18.
- [11] Wigley T M L, Watspe C. A computer program for determining the equilibrium of aqueous solutions [J]. British Geomorphological Research Group Technical Bulletin, 1977, 20: 1-46.
- [12] Pentecost A. Carbonate chemistry of surface waters in a temperate karst region: The southern Yorkshire Dales, UK[J]. Journal of Hydrology, 1992, 139(11): 211-232.
- [13] 韩贵琳, 刘丛强. 贵阳地区雨水化学与 Sr 同位素地球化学[J]. 环境化学, 2005, 24(2): 213-218.
- [14] Wang Y X, Guo Q H, Su C L, et al. Strontium isotope characterization and major ion geochemistry of karst water flow, Shentou, northern China [J]. Journal of Hydrology, 2006, 328(3/4): 592-603.
- [15] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林群落退化对浅层岩溶地下水化学的影响[J]. 林业科学, 2007, 43(2): 21-25.
- [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: 中国地质大学学报, 2003, 28(3):341-345.
- [17] 吴威, 况明生, 魏秉铎, 等. 亚热带岩溶山区植被演替和夏季土壤  $\text{CO}_2$  浓度动态关系[J]. 西南师范大学学报:自然科学版, 2004, 29(2):289-293.
- [18] 李林立, 高波, 蒋勇军, 等. 重庆金佛山岩溶区表层岩溶生态系统  $\text{CO}_2$  浓度分析[J]. 热带地理, 2004, 24(4):326-331.