

喀斯特石漠化过程中植被演替及其对 径流水化学的影响*

刘方^{1,2} 王世杰¹ 罗海波² 刘元生² 何腾兵² 龙健³

(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 贵州大学环境与资源研究所, 贵阳 550025)

(3 贵州师范大学地理科学系, 贵阳 550004)

摘要 通过对贵州中部喀斯特地区进行植被调查以及土壤和径流样品的分析, 探讨石漠化过程中植被演替及其对径流水化学组成的影响。结果表明: 喀斯特石漠化后, 土壤出现粘质化, 有机质含量急剧下降, 土壤毛管孔隙度下降, 干旱季节表层和次表层土壤的含水量明显减少, 改变了生态系统的水分运动规律。喀斯特地表径流中离子浓度的大小排序为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{PO}_4^{3-}$, 地表径流水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主; 随着石漠化程度的增加, 地表径流中 PO_4^{3-} 输出量明显增加, 其次是 Ca^{2+} 、 NO_3^- , 这部分养分的流失造成土壤养分水平下降, 同时影响接纳水体的环境质量。地下径流离子组成与地表径流总体相似, 但 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量高于地表径流, 而 K^+ 、 NH_4^+ 的含量低于地表径流; 石漠化发生后, 地下径流中 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 浓度明显减少, 岩溶作用减弱, 而 NH_4^+ 、 NO_3^- 浓度明显增加, 对地下水水质产生一定的影响。

关键词 喀斯特; 石漠化; 土壤-植物系统; 径流; 水化学

中图分类号 S156.1; S157.1

文献标识码 A

喀斯特地区多为峰林、峰丛、峡谷地貌, 地表崎岖破碎, 坡度陡峭, 溶蚀、水蚀作用显著, 加上碳酸盐岩成土速率较慢, 形成的土壤浅薄, 并且不连续, 土壤蓄水能力弱, 植物生长缓慢, 生态链易受干扰而中断, 生态系统对外界干扰显得脆弱和敏感, 系统的抗逆能力、稳定性和自我恢复能力较低^[1,2]。喀斯特山区多为湿润的亚热带季风气候, 南方喀斯特森林是一种特殊森林生态系统, 其顶级群落为常绿阔叶混交林, 生态系统的组成和结构复杂, 生态系统的物种多样性和结构多样性较高^[1]。在人为干扰下南方喀斯特森林普遍出现退化, 其群落演变的主要过程为常绿阔叶混交林阶段(乔林)、灌木灌丛阶段、灌草群落阶段、草本群落阶段^[1], 生物多样性减少, 水土流失逐步加剧, 同时引起土壤和表层岩溶带水环境恶化, 而退化的土壤又抑制植物的生长, 造成植被覆盖率明显下降, 进一步演化成石漠化^[1,2]。土壤环境与植被演替之间存在互动响应, 其变化对喀斯特生态环境变迁与演化有着重要的影响, 一方

面植被演替影响到土壤养分循环以及土壤水分运动, 从而影响植物可利用养分和水分的变化; 另一方面, 当地表径流和土壤侵蚀发生时, 土壤有机质、氮、磷等由陆地向水体迁移, 成为水体中营养物质的补给源, 但过剩的氮磷会导致水体富营养化^[3-5], 从而影响接纳水体的质量。

目前对喀斯特石漠化过程中生态环境变化的研究主要在岩溶生态环境、植物群落演变、土壤质量变化等方面^[6-9], 对喀斯特森林生态系统的水文特征以及岩溶水、河流的水化学特征方面也进行了一些研究^[10-14], 但有关石漠化过程中径流水化学变化方面还缺乏系统的研究。喀斯特生态系统土壤和表层岩溶带是岩石、大气、水、生物四大圈层的敏感交汇地带, 又是生态系统赖以存在的基础; 土壤异质性不仅改变了土壤养分和水分的空间分布, 同时造成植物分布格局与生长过程的变化。降水的再分配及径流水运动显著地改变了生态系统内水文循环和土壤物质的再分配过程, 从而影响水环境的变迁。本

* 国家自然科学基金项目(90202003, 40361004)和中国科学院地球化学研究所知识创新工程前沿领域项目(IC-04-01)资助

作者简介: 刘方(1964~), 男, 贵州省天柱县人, 博士, 教授。主要从事土壤生态学的研究。E-mail: Lfang123@tom.com, 通信地址: 贵阳市贵州大学花溪南区环境与资源研究所; 邮编: 550025; 联系电话: 13984073549

收稿日期: 2004-11-26; 收到修改稿日期: 2005-04-19

研究从喀斯特生态系统的角度,将生态系统的植物-土壤或岩石-水体作为一个整体,系统地研究了喀斯特石漠化过程中土壤-植物系统的演变对径流水化学组成的影响,为喀斯特地区水资源保护、生态环境恢复以及土水资源的可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区属典型的亚热带湿润气候,年均温为 $17\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温在 $5800\sim 6130\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降雨量为 1200 mm 左右;海拔变化范围在 $800\sim 1470\text{ m}$,成土母质主要是白云质灰岩、泥质灰岩风化物,其次是白云岩风化物,土壤类型主要是黑色石灰土、黄色石灰土,研究区内森林覆盖率不足 5% ,大部分地区植被稀疏,小部分地区次生植被较茂盛,植被覆盖率变动大,基岩裸露率(没有植被覆盖情况下岩石出露的面积占土地面积的百分率)为 $50\%\sim 80\%$,土地开垦率(长期种植农作物的耕地面积占土地面积的百分率)为 $10\%\sim 50\%$;从整体来看,属中强度喀斯特石漠化区。本研究采用样地调查的方法,在地形地貌、坡度以及岩性(白云质灰岩和石灰岩)相对一致下,选择有代表性的阔叶林(乔木)地、灌木林地、灌丛草地设置样地($n=12$)进行植被和土壤调查。

1.2 土壤样品采集和测定方法

在4月至5月进行植被和土壤调查时,在每个样方内选取 $5\sim 8$ 个样点,采集样地坡面表层土壤($0\sim 15\text{ cm}$)混合样品并测定土壤容重,同时选择有代表性的地段挖土壤剖面,以每 10 cm 分层测定土壤水的含量(烘干重量法,每层重复测3次)。土壤样品风干后,研磨通过 1 mm 筛孔,供实验与测试分析。测定项目有土壤孔隙度、pH值、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙和镁以及粘粒含量,其中有效磷采用Olsen法、速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法、交换性钙和镁采用醋酸铵浸提-EDTA滴定法测定,其他采用常规方法测定^[15]。

1.3 地表径流水样采集

在调查的阔叶林(乔木)地、灌木林地、灌丛草地上,选择坡度一致的地段,采用无界径流小区法设置径流收集槽^[16],在同一时间的自然降雨条件下(降雨量为 $20\sim 30\text{ mmh}^{-1}$)进行地表径流样品的收集,同时选择位置较低的地段,在雨后 1 d 内收集从岩石裂隙中渗出的水样(这部分出露的地下渗透水一

般在 $1\sim 2\text{ d}$ 内断流),作为地下径流水样。室内量取 500 ml 径流液通过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,对过滤的水样进行水化学参数的测定,测定项目有pH值、电导率以及10种离子浓度(HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-}),其中 NH_4^+ 采用靛酚蓝比色法、 NO_3^- 采用紫外分光光度法、 PO_4^{3-} 采用异丁醇萃取-钼蓝比色法、 HCO_3^- 采用电位滴定法、 SO_4^{2-} 采用EDTA间接滴定法、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用EDTA滴定法、 K^+ 和 Na^+ 采用火焰光度法、 Cl^- 采用硝酸银滴定法测定^[15]。

2 结果与分析

2.1 喀斯特石漠化过程中植被演替规律

通过对贵州中部喀斯特样地的调查,不同石漠化强度下植被群落特征发生明显的变化,轻度石漠化区域优势的树种主要有香椿(*Toona sinensis*)、乌柏(*Sapium rotundifolium*)、香叶树(*Lindera communis*)、密花树(*Rapanea nerifolia*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、朴树(*Celtis sinensis*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)等;中度石漠化区域优势植物主要有花椒(*Zanthoxylum bungeanum maxim.*)、火棘(*Pyracantha floruneana*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、小果蔷薇(*Rosa cymosa*)、月月青(*Itea ilicifolia*)、悬钩子(*Rubus sp.*)等;强度石漠化区域优势植物主要有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、狗芽根(*Cynodon dactylon*)、莎草(*Cyperus sp.*)等。随着石漠化强度的增加,乔木群落逐步演变为灌木群落、灌草群落和草本群落,群落高度和生物量出现明显下降,群落垂直结构由复杂向简单过程演变,群落结构变为简单和不稳定,群落的功能出现明显退化,特别是强度石漠化的地区,只有零星的草被植物,其数量、盖度均不足以形成一个层次。此外,喀斯特石漠化地区大部分土层较厚的土壤被开垦为耕地,种植玉米、烤烟、油菜等作物,在人为强烈的干扰下植被覆盖率急剧下降,生态系统结构单一,导致土地系统退化,加剧了石漠化的发展。

从表1看出由于植物群落的演变,土壤的理化性质也发生变化。在不同的植被退化演替阶段,喀斯特土壤粘粒含量、容重、毛管孔隙度出现差异,小于 0.01 mm 和小于 0.001 mm 粘粒含量、土壤容重的大小顺序是灌丛草地 $>$ 灌木林地 $>$ 阔叶林地,而毛

管孔隙度的变化则相反;土壤有机质、碱解氮和有效磷含量大小顺序是阔叶林地 > 灌木林地 > 灌丛草地,阔叶林地、灌木林地土壤速效钾含量高于灌丛草地。多重比较结果表明:灌丛草地与阔叶林地之间有机质、碱解氮、粘粒含量、土壤容重都出现显著性

的差异,灌木林地与阔叶林地之间仅粘粒含量出现显著性的差异。可见,喀斯特石漠化发生后,土壤质地出现粘化,土壤毛管孔隙度下降,导致水分入渗、再分配过程以及植物对水分的利用发生变化,从而改变土壤-植物系统中水分的运动规律。

表 1 喀斯特石漠化区不同的植被演替阶段土壤主要理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soils under various vegetations in Karst rocky desertification area ($n=4$)

生态模式 Ecological pattern	pH 值 pH value	有机质 Organic matter (g kg^{-1})	碱解氮 Avail-able N (mg kg^{-1})	有效磷 Avail-able P (mg kg^{-1})	速效钾 Avail-able K (mg kg^{-1})	交换性钙 Avail-able Ca (mg kg^{-1})	交换性镁 Avail-able Mg (mg kg^{-1})	容重 Bulk density (g cm^{-3})	毛管孔隙度 Capillary Porosity (v/v, \%)	<0.01 mm 粘粒 (%)	<0.001 mm 粘粒 (%)
阔叶林地 Broad-leaved forest land	7.49 ± 0.21 a	128.9 ± 49.7 a	410 ± 102 a	8.2 ± 3.7 a	131.7 ± 29.4 a	623 ± 95 a	157 ± 55 a	1.13 ± 0.10 a	50.6 ± 1.5 a	48.9 ± 4.7 a	26.2 ± 2.8 a
灌木林地 Brush forest land	7.26 ± 0.34 a	91.2 ± 20.1 a	308 ± 61 a	6.6 ± 0.7 a	133.2 ± 41.8 a	502 ± 59 a	102 ± 20 a	1.17 ± 0.03 a	43.8 ± 6.1 ab	67.1 ± 3.1 b	40.0 ± 6.8 b
灌丛草地 Brush-grass land	7.23 ± 0.53 a	45.9 ± 19.0 b	175 ± 44 b	5.0 ± 2.0 a	90.2 ± 24.3 a	503 ± 71 a	137 ± 34 a	1.31 ± 0.02 b	39.4 ± 5.8 b	70.9 ± 2.5 b	45.2 ± 6.0 b

注:表中数字为平均值 ± 标准差,字母为多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同的处理之间达到 p 为 0.05 的显著性水平 Mean ± SD, and different letters in the same column mean significance at $p < 0.05$ level based on multiple comparisons by SSR

2.2 喀斯特石漠化过程中土壤水分的空间变异

土壤水分是喀斯特植物生长发育的最主要限制因子,森林生态系统中的水分循环对系统的稳定性、连续性和生物生产力产生极大影响,土壤-植物系统的演变不仅影响土壤的养分含量,同时影响土壤的持水能力。从表 2 中看出,在连续 12 d 未降雨的条件下,阔叶林地 0~20 cm 土层内土壤含水量明显高于灌木林地和灌丛草地,而灌木林地又明显高于灌丛草地;阔叶林地 20~30 cm 土层内土壤含水量明显高于灌木林地和灌丛草地。对阔叶林来说,不仅植被层次结构复杂、覆盖度高,而且有较厚的枯落

物层,能明显减少土面的蒸发强度,使表层土壤含水量维持在较高水平,植物可利用的水分数量多,特别是干旱的时期,不仅维持表层土壤具有较高的含水量,而且强化了下层土壤液态水的运移与再分配,提高了下层土壤水分的含量,有利于减轻持续干旱对植物生长的威胁。而石漠化强度高的灌丛草地,灌木植物零星分布,植被覆盖度较低,几乎没有枯落物层,土面的蒸发强度高,0~10 cm、10~20 cm 土层内土壤含水量平均比阔叶林低 64.9% 和 48.4%,并且相对波动较大,20~30 cm 土层含水量也低 26.1%,植物可利用的水分数量少,很难满足植物对水分的

表 2 干旱季节不同生态模式下土壤剖面水分含量(g kg^{-1})的变化

Table 2 Moisture contents in the soils different in vegetation during dry seasons ($n=4$)

生态模式 Ecological pattern	0~10 cm			10~20 cm			20~30 cm		
	范围 Range	平均值 Mean	变异系数 C. V.	范围 Range	平均值 Mean	变异系数 C. V.	范围 Range	平均值 Mean	变异系数 C. V.
阔叶林地 Broad-leaved forest land	75~148	118.0 a	21.23	215~302	261.9 a	10.94	352~405	382.8 a	5.03
灌木林地 Brush forest land	58~121	74.9 b	24.93	193~260	220.8 b	10.43	267~355	310.2 b	8.12
灌丛草地 Brush-grass land	29~61	41.8 c	25.81	91~188	135.1 c	22.80	215~338	282.7 b	13.56

注:表中字母为多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同的处理之间达到 p 为 0.05 的显著性水平 Different letters in the same column mean significance at $p < 0.05$ level based on multiple comparisons by SSR

需求,植物生长受到严重的影响。可见,随着喀斯特石漠化强度的增加,生境逐步从湿润、空气湿度大的中性生境向干旱、空气湿度小的严酷生境发展,土面的蒸发强度逐渐加大,土壤干旱频繁出现,土壤表层和次表层的含水量减少,造成植物水分胁迫生长,植物群落向旱生群落方向演变,这种变化改变了土壤-植物系统中水环境的空间结构,导致土壤水分保持能力和入渗、再分配过程的变化,同时改变了喀斯特森林生态系统的水文特征。

2.3 喀斯特石漠化过程中土壤-植物系统变化对地表径流水化学组成的影响

降雨-径流水化学组成的变化,可反映生态系统内水化学状况和物质循环特征,径流是降雨通过生态系统空间层次再分配后的输出,其化学成分变化一方面受降水化学组成的直接影响,另一方面与径流水动力发生过程密切相关。森林生态系统在空

间上有乔木、灌木、草本植物或苔藓植物等组合,可以避免雨滴的直接打击以及拦蓄和滞留地表径流对土壤的冲击,径流水的运动促进了生态系统的水分和营养物质的迁移。随着植被覆盖度下降以及群落结构简化,枯落物层厚度明显减少,增加了降雨对土壤的直接作用,雨滴和径流对地表的冲击、分散、悬浮和运移能力增强,加速了土壤的侵蚀速率,造成土壤颗粒和可溶性物质的大量迁移,从而明显地增加土壤侵蚀量和土壤养分的流失量。从表 3 看出,在天然降雨量(20~30 mm h⁻¹)相同的条件下,喀斯特地表径流的泥沙含量和电导率大小顺序为灌丛草地>灌木林地>阔叶林地,特别是灌丛草地地表径流的泥沙含量和电导率出现显著的增加,表明喀斯特严重石漠化后,由于土壤-植物系统的明显变化,改变了土水界面的交换时间和空间以及营养物质的迁移通量,从而影响到地表径流的水化学组成。

表 3 不同土壤-植物系统下地表径流水化学组成的变化

Table 3 Chemical compositions of surface runoffs from soils different in vegetation (n = 4)

生态模式 Ecological pattern	水化学参数 Water quality parameter											泥砂量 Clay and sandy content (g L ⁻¹)	
	pH	HCO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ (mg kg ⁻¹)	Cl ⁻ (mg kg ⁻¹)	NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹)	PO ₄ ³⁻ (mg kg ⁻¹)	Ca ²⁺ (mg kg ⁻¹)	Mg ²⁺ (mg kg ⁻¹)	K ⁺ (mg kg ⁻¹)	NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹)	Na ⁺ (mg kg ⁻¹)		EC (μS cm ⁻¹)
阔叶林地 Broad-leaved forest land	7.32 ± 0.39a	47.3 ± 30.8 a	47.6 ± 27.4 a	3.14 ± 1.34 a	2.82 ± 1.34 a	0.0029 ± 0.0004 a	13.7 ± 7.6 a	5.8 ± 2.8 a	3.0 ± 0.8a	0.354 ± 0.153 a	0.79 ± 0.60 a	87 ± 48 a	0.216 ± 0.107 a
灌木林地 Brush forest land	7.55 ± 0.20 ab	58.5 ± 13.7 a	55.3 ± 9.4 a	3.34 ± 0.69 a	3.10 ± 1.13 ab	0.0148 ± 0.0085 b	15.7 ± 8.1 b	6.9 ± 3.1 a	2.5 ± 2.7 a	0.572 ± 0.427 a	1.31 ± 0.75 ab	119 ± 19 ab	0.548 ± 0.327 b
灌丛草地 Brush-grass land	7.75 ± 0.09 b	77.3 ± 18.9 a	63.3 ± 4.0 a	4.52 ± 0.84 a	5.10 ± 1.29 b	0.0345 ± 0.0049 c	27.7 ± 8.3 b	5.6 ± 3.1 a	5.3 ± 2.5 a	0.515 ± 0.236 a	2.20 ± 0.61 b	175 ± 69 b	0.924 ± 0.070 c

注:表中数字为平均值±标准差,字母表示多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同的处理之间达到p为0.05的显著性水平 Mean ± SD, and different letters in the same column mean significance at p < 0.05 level based on multiple comparisons by SSR

分析结果表明(表 3),喀斯特地表径流中离子浓度的大小排序为 HCO₃⁻ > SO₄²⁻ > Ca²⁺ > Mg²⁺ > K⁺、NO₃⁻、Cl⁻ > Na⁺ > NH₄⁺ > PO₄³⁻,地表径流的阳离子主要为 Ca²⁺、Mg²⁺,其浓度的变化范围分别为 6.1~36.0 mg L⁻¹、2.5~10.0 mg L⁻¹,Ca²⁺、Mg²⁺平均含量分别占离子总量(10种离子之和)的 6.64%、2.28%;阴离子主要为 HCO₃⁻、SO₄²⁻,其浓度变化范围分别为 16.5~96.2 mg L⁻¹、20.2~67.3 mg L⁻¹,HCO₃⁻、SO₄²⁻平均含量分别占离子总量的 21.81%、20.18%。说明喀斯特地表径流水化学类型以 HCO₃-Ca 型为主,局部出现 HCO₃-Ca·Mg 型和

HCO₃·SO₄-Ca型,与该地区的河流水化学特征相似^[11]。多重比较结果表明(表 3),阔叶林地、灌木林地和灌丛草地地表径流中 PO₄³⁻的浓度均出现显著的差异,阔叶林地地表径流中 Ca²⁺浓度与灌木林地、灌丛草地出现显著的差异,阔叶林地地表径流中 NO₃⁻、Na⁺浓度与灌丛草地存在显著性的差异。可见,随着喀斯特石漠化程度的增加,地表径流中 PO₄³⁻-P 的输出量明显的增加,其次是 Ca²⁺、NO₃⁻-N,这部分养分的流失一方面造成土壤养分水平的下降,影响植物的正常生长。另一方面,地表径流中 Ca²⁺的流失,造成径流水 pH 值的上升,同时增加水

的矿化度,而 PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N 进入受纳水体后,能被水体藻类吸收利用,氮磷长期的富积促进藻类的大量繁殖,可以造成水体富营养化,从而影响水环境质量。从表 1 也看出,喀斯特严重石漠化后土壤有效态的氮、磷和钙含量出现下降,特别是有效氮出现明显下降,说明地表径流氮磷的输出和迁移,是土壤养分退化的主要原因之一,同时土壤氮磷向水体的迁移可以成为藻类养分的主要来源。因此,喀斯特石漠化程度增加的同时,其对生态环境的影响也大大的提高。

2.4 喀斯特石漠化过程中土壤-植物系统变化对地下径流水化学组成的影响

喀斯特地质环境变化大,碳酸盐岩差异性溶蚀在地表形成大量岩石裂隙和洼地,在生态系统中林冠层、枯落物层、土层拦截的雨水,通过下渗运动进入岩石裂隙,形成地下径流,部分径流从位置较低的岩石裂隙中渗出;还有部分地下径流入渗到表层岩溶带,形成具有一定流量和流速的表层岩溶水(这部分出露的岩溶水一般为常年性或季节性泉水)。喀斯特森林生态系统中,发达的植物根系不仅吸收土层中的水分,还可以伸入岩石裂隙中,吸收利用部分表层地下径流水或岩溶水,这种岩溶双层空间结构

保持了喀斯特生物多样性。喀斯特地下径流水补给的主要来源有降雨的直接入渗、地表径流水的渗漏、土壤水的补给,良好的植被对降雨有明显的调节作用,地下径流量较大及持续的时间较长,但植被受到严重破坏后,地表径流量明显增加以及流速加快,进入土壤-植物系统的水量减少,下渗进入岩石裂隙的水量相应减少,地下径流量小且不稳定,持续的时间缩短,植物可以利用的水分不足,植物生长受到严重的影响,从而影响到径流的水化学成分。由表 4 看出,调查区内地下径流水的电导率变化范围为 $176 \sim 336 \mu\text{S cm}^{-1}$,其可溶性盐总量明显高于地表径流,说明地下径流的溶蚀作用增强。从水化学组成看,水化学类型仍以 HCO_3^- -Ca 型为主,主要为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 离子,地下径流离子组成与地表径流总体相似,但一些离子的浓度与地表径流存在明显的差异,地下径流中 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量高于地表径流,其浓度的变化范围分别为 $89.2 \sim 186.2 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $18.5 \sim 39.5 \text{ mg L}^{-1}$ 和 $6.6 \sim 15.3 \text{ mg L}^{-1}$;其平均含量分别比地表径流高 114.9%、50.6% 和 84.7%;而 K^+ 、 NH_4^+ 的含量低于地表径流,其浓度变化范围分别为 $0.1 \sim 3.7 \text{ mg L}^{-1}$ 和 $0.020 \sim 0.134 \text{ mg L}^{-1}$,其平均含量分别比地表径流低 55.6%、85.8%。

表 4 不同土壤-植物系统下地下径流水化学组成的变化

Table 4 Chemical compositions of groundwaters under different soil-vegetation systems ($n = 4$)

生态模式 Ecological pattern	水化学参数 Water quality parameter											
	pH	HCO_3^- (mg kg^{-1})	SO_4^{2-} (mg kg^{-1})	Cl^- (mg kg^{-1})	NO_3^- (mg kg^{-1})	PO_4^{3-} (mg kg^{-1})	Ca^{2+} (mg kg^{-1})	Mg^{2+} (mg kg^{-1})	K^+ (mg kg^{-1})	NH_4^+ (mg kg^{-1})	Na^+ (mg kg^{-1})	EC (μS cm^{-1})
阔叶林地 Broad-leaved forest land	$7.87 \pm$	$154.5 \pm$	$39.3 \pm$	$3.69 \pm$	$1.62 \pm$	$0.007 \pm$	$27.5 \pm$	$14.5 \pm$	$1.5 \pm$	$0.041 \pm$	$1.45 \pm$	$302 \pm$
	0.24 a	31.7 a	23.6 a	0.32 a	0.89 a	0.003 a	9.0 a	0.8 a	1.4 a	0.015a	1.01 a	34 a
灌木林地 Brush forest land	$7.72 \pm$	$139.7 \pm$	$36.2 \pm$	$3.53 \pm$	$2.68 \pm$	$0.017 \pm$	$29.0 \pm$	$10.6 \pm$	$1.4 \pm$	$0.062 \pm$	$1.14 \pm$	$240 \pm$
	0.16 a	19.9 a	14.9 a	0.45 a	1.50 b	0.011 a	8.2 a	3.1 b	1.0 a	0.042 ab	0.87 a	27 b
灌丛草地 Brush-grass land	$7.85 \pm$	$99.4 \pm$	$55.3 \pm$	$3.98 \pm$	$4.95 \pm$	$0.010 \pm$	$29.5 \pm$	$8.7 \pm$	$1.9 \pm$	$0.101 \pm$	$1.50 \pm$	$202 \pm$
	0.16 a	10.2 a	22.6 a	0.62 a	1.10 b	0.005 a	10.0 a	2.1 b	1.8 a	0.033 b	1.27 a	26 b

注:表中数字为平均值 \pm 标准差,字母表示多重比较(SSR)结果,同一列中字母不同的处理之间达到 p 为 0.05 的显著性水平 Mean \pm SD, and different letters in the same column mean significance at $p < 0.05$ level based on multiple comparisons by SSR

不同土壤-植物系统中地下径流可溶性盐的总量发生变化,阔叶林地明显高于灌木林地、灌丛草地,表明喀斯特石漠化发生后,地下径流的溶蚀作用减弱。多重比较结果表明(表 3),阔叶林地地下径流中 NO_3^- 、 Mg^{2+} 浓度与灌木林地、灌丛草地出现显著的差异,阔叶林、灌木林地下径流中 HCO_3^- 浓度

与灌丛草地出现显著的差异,阔叶林地地下径流中 NH_4^+ 浓度与灌丛草地出现显著性的差异。由此可见,阔叶林地地下径流中 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 浓度明显高于灌丛草地,说明岩溶作用在阔叶林条件下明显比灌丛条件下强,阔叶林具有较高的生物活动,在土壤中能产生浓度较高的 CO_2 ,生态系统中植被的调节作

用强,水动力交替活跃,有利于溶解的碳酸盐组分的迁移,同时岩溶作用的时间较长,导致表层岩溶带溶蚀作用增强,提高气相、液相界面 CO_2 气体分压,促进了岩溶作用的发生。在灌草条件下,植被的调节作用弱,生物活动也较弱,土壤产生的 CO_2 浓度较低,而岩溶作用又易受外部环境变化的影响,溶蚀作用相对弱化,岩溶作用明显减弱。此外,在石漠化程度较高的灌丛草地,其地下径流中 NH_4^+ 、 NO_3^- 浓度分别达 $0.068 \sim 0.134 \text{ mg L}^{-1}$ 、 $3.85 \sim 6.05 \text{ mg L}^{-1}$, NH_4^+ 、 NO_3^- 浓度明显高于阔叶林地,由于灌丛草地的旱生环境条件变化强烈,加快了土壤含氮有机质的分解速率,而退化的土壤吸附能力出现下降,在土壤水的淋溶过程中一方面使土壤有效氮含量减少,另一方面,增加了地下径流中水溶性氮的浓度,这部分氮进入地下水后,对地下水的质产生一定的影响。由于岩溶裂隙沟通了地表水与孔隙水含水层以及岩溶水含水层的联系,污染的地表水及孔隙水通过岩溶裂隙直接注入岩溶含水层,使得喀斯特地区地下水更容易受到污染,并难以治理,加剧了喀斯特水质的退化。

3 结 论

随着喀斯特石漠化程度的提高,植被群落高度和生物量出现明显下降,群落结构简化,土壤出现粘质化,有机质含量急剧下降,土壤毛管孔隙度下降,导致水分入渗、再分配过程发生变化,土壤表层和次表层的含水量减少,造成植物水分胁迫生长,植物群落向旱生群落方向演变,从而改变土壤-植物系统中水分的运动规律以及喀斯特森林生态系统的水文特征。

喀斯特地表径流中离子浓度的大小排序为 $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{PO}_4^{3-}$, 主要离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} , 地表径流水化学类型以 HCO_3^- -Ca 型为主。随着喀斯特石漠化程度的增加,地表径流中 PO_4^{3-} 的输出量明显的增加,其次为 Ca^{2+} 、 NO_3^- , 这部分养分的流失一方面造成土壤养分水平的下降,影响植物的正常生长。另一方面,地表径流中 Ca^{2+} 的流失,造成径流水 pH 值的上升,同时增加了水的矿化度,而 PO_4^{3-} 、 NO_3^- 的迁移,则影响接纳水体的环境质量。地下径流离子组成与地表径流总体相似,但 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的含量高于地表径流,而 K^+ 、 NH_4^+ 的含

量低于地表径流;喀斯特石漠化发生后,地下径流中 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 浓度明显减少,岩溶作用减弱,另一方面,地下径流中 NH_4^+ 、 NO_3^- 浓度明显增加,可以降低地下水的质。因此,喀斯特石漠化程度增加的同时,其对生态环境影响的作用也大大提高。

喀斯特地区不连续的土层可以与地表岩溶带相结合形成多层生态空间,石沟、石缝、石槽对水分具有汇集的作用,在气候条件相似条件下,石缝、石沟、石槽中土壤含水量明显高于坡面的土壤,小生境对土壤水分的空间再分配具有重要的影响。由于土壤水分受空间变异的影响,生态系统中植被演替过程也出现空间差异,这种变化增加了土壤水分运动和植物吸收利用水分过程的复杂性。而水化学成分是多种因素综合作用的结果,其主要取决于岩溶系统的水动力条件、土壤植被层发育状况、水势条件和地质构造以及水流速度等,今后应从降水-径流水-岩溶水的水化学变化来进行系统评价,才能更全面地了解喀斯特石漠化后水文循环与岩溶作用的变化对土壤发育和生态环境的影响。

参 考 文 献

- [1] 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社, 2003. Zhu S Q. Ecological Research on Karst Forest (Ⅲ) (In Chinese). Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 2003
- [2] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101 ~ 105. Wang S J. Concept deduction and its connotation of karst rocky desertification (In Chinese). China Karst, 2002, 21(2): 101 ~ 105
- [3] Sims J T. Phosphorous soil testing: Innovations for water quality protection. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1998, 29(11/14): 1471 ~ 1489
- [4] Zhang G L, Yang J L, Zhao Y G. Nutrient discharges from a typical watershed in the hilly areas of subtropical China. Pedosphere, 2003, 13(1): 23 ~ 30
- [5] Yang J L, Zhang G L. Quantitative relationship between land use and phosphorus discharge in subtropical hilly regions of China. Pedosphere, 2003, 13(1): 67 ~ 74
- [6] 李阳兵, 谢德体, 魏朝富. 岩溶生态系统土壤及表生植被某些特性变异与石漠化的相关性. 土壤学报, 2004, 41(2): 196 ~ 202. Li Y B, Xie D T, Wei C F. Correlation between rock desertification and variations of soil and surface vegetation in karst ecosystem (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(2): 196 ~ 202
- [7] 杨胜天, 朱启疆. 论喀斯特环境中土壤退化的研究. 中国岩溶, 1999, 18(2): 169 ~ 175. Yang S T, Zhu Q J. The research on soil degradation in karst environment (In Chinese). China Karst, 1999, 18(2): 169 ~ 175
- [8] 龙键, 黄昌勇. 喀斯特山区土地利用方式对土壤质量演变的

- 影响. 水土保持学报, 2002, 16(1): 76 ~ 79. Long J, Huang C Y. Effect of land use pattern on the change of soil quality in karst mountains (In Chinese). Journal of Soil and water Conservation, 2002, 16(1): 76 ~ 79
- [9] 喻理飞. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态变化. 林业科学, 2002, 38(1): 252 ~ 255. Yu L F. Dynamics of a degraded karst forest in the process of natural restoration (In Chinese). Forest Science, 2002, 38(1): 252 ~ 255
- [10] 梁小平, 朱志伟, 梁彬. 湖南洛塔表层岩溶带水文地球化学特征初步分析. 中国岩溶, 2003, 22(2): 103 ~ 109. Liang X P, Zhu Z W, Liang B. Preliminary analysis on hydrogeochemical characteristics of the epikarst zone in Luota, Hunan (In Chinese). China Karst, 2003, 22(2): 103 ~ 109
- [11] 李林立, 况明生, 蒋勇军. 金佛山岩溶生态系统初步探讨—岩溶泉水化学特征分析. 四川师范大学学报, 2003, 26(2): 201 ~ 204. Li L L, Kuang M S, Jiang Y J. Study on the karst ecosystem of mountain Jinfo (In Chinese). Journal of Sichuan Normal University, 2003, 26(2): 201 ~ 204
- [12] 钱家忠, 汪家权, 吴剑锋. 洛塔徐州张集水源裂隙岩溶水化学特征及影响因素. 环境科学研究, 2003, 16(2): 23 ~ 26. Qian J Z, Wang J Q, Wu J F. The distributing characteristics of chemical components of fracture—karst groundwater and their causes in Zhangji well field in Xuzhou city (In Chinese). Research of Environment Science, 2003, 16(2): 23 ~ 26
- [13] 章程, 曹建华. 不同植被条件下表层岩溶泉动态变化特征对比研究—以广西马山弄拉兰电堂泉和东旺泉为例. 中国岩溶, 2003, 22(1): 1 ~ 5. Zhang C, Cao J H. Seasonal and diurnal variation of physico-chemistry of typical epikarst springs under different vegetation (In Chinese). China Karst, 2003, 22(1): 1 ~ 5
- [14] Han G L, Liu C Q. Hydrogeochemistry of Wujiang river water in Guizhou Province, China. Chinese Journal of Geochemistry, 2001, 22(3): 240 ~ 248
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. The analytical methods for soil and agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [16] Robert J L. Measurement methods for soil erosion. Progress in Physical Geography, 1989, 20 (2): 5 ~ 9

VEGETATION SUCCESSION WITH KARST ROCKY DESERTIFICATION AND ITS IMPACT ON WATER CHEMISTRY OF RUNOFF

Liu Fang^{1,2} Wang Shijie¹ Luo Haibo² Liu Yuansheng² He Tengbin² Long Jian³

(1 National laboratory of Environmental Geochemistry, Geochemistry Institute of Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

(2 Environment and Resource Institute of Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(3 Geography Department of Guizhou Normal University, Guiyang 550004, China)

Abstract Karst rocky desertification is a land degradation process, involving serious soil erosion, extensive exposure of basement rocks, drastic decrease in soil productivity, and appearance of a desert-like landscape. As it is a serious problem in Guizhou Province, studies were carried out on succession of the vegetations on lands under karst rocky desertification and its impact on chemical composition of runoffs from the lands in this region through vegetation surveys and analysis of soil and runoff samples. The results show that with development of karst rocky desertification, the soil was losing organic matter rapidly, becoming clayey in texture, decreasing in soil capillary porosity and in water-holding capacity in the surface or subsurface soil layers significantly during dry seasons, thus altering the law of water movement in karst ecological system. The analysis of chemical composition of surface runoffs show that in terms of concentration, anions and cations in the surface runoffs were in the order of $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, NO_3^- , $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{PO}_4^{3-}$. With karst rocky desertification going on, the output of PO_4^{3-} in the surface runoff increased significantly, and that of Ca^{2+} and NO_3^- followed, thus leading to decrease in soil fertility and affecting environmental quality of the recipient waterbodies. The variation of chemical composition of ground runoff was similar to that of the surface runoff, but the concentrations of HCO_3^- , Ca^{2+} , and Mg^{2+} were higher than that in the surface runoff, respectively, while the concentrations of NH_4^+ and K^+ lower than that in the surface runoff. The concentrations of HCO_3^- and Mg^{2+} were reduced obviously with karst rocky desertification proceeding on, thus weakening karstification, while the concentrations of NH_4^+ and NO_3^- were increased significantly, thus affecting the quality of ground-water, to some extent.

Key words Karst; Rocky desertification; Plant-soil system; Runoff; Water chemistry