

## 喀斯特森林群落退化对浅层岩溶地下水化学的影响

刘 方<sup>1,2</sup> 王世杰<sup>1</sup> 罗海波<sup>2</sup> 刘元生<sup>2</sup> 何腾兵<sup>2</sup> 龙 健<sup>3</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. 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:** 对贵州中部喀斯特地区植被调查及径流和岩溶水样分析,探讨喀斯特森林群落退化过程中浅层岩溶地下水化学组成的变化。结果表明:喀斯特森林生态系统降雨中离子浓度大小的排序为  $\text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+、\text{Ca}^{2+}、\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+、\text{Mg}^{2+}、\text{Cl}^- > \text{NO}_3^-、\text{NH}_4^+ > \text{PO}_4^{3-}$ ,而径流中离子浓度的大小排序为  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}、\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}、\text{Cl}^- > \text{K}^+、\text{Na}^+、\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{PO}_4^{3-}$ ;岩溶地下水离子组成与径流总体相似,但岩溶地下水中  $\text{HCO}_3^-、\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的含量及电导率明显增加高于地表径流。随着喀斯特森林群落从阔叶林群落向灌木林群落、灌草群落方向演替,其岩溶地下水中  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{Ca}^{2+}$  比例明显减少,而  $\text{SO}_4^{2-}$  比例明显增加。岩溶地下水的  $\text{HCO}_3^-、\text{Ca}^{2+}$  含量与森林覆盖率之间存在显著的正相关,而  $\text{K}^+、\text{NH}_4^+$  含量与森林覆盖率之间则存在显著的负相关。 $\text{HCO}_3^-$  含量是影响岩溶地下水电导率的最重要因子,其次是  $\text{Ca}^{2+}$ ,再次是  $\text{K}^+、\text{Mg}^{2+}$ ;岩溶地下水电导率可以作为评价喀斯特森林群落退化对生态环境影响的数量指标。

**关键词:** 喀斯特; 森林群落; 群落退化; 岩溶地下水; 水化学

中图分类号: S156.1; S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-7488(2007)02-0021-05

**Effects of Forest Community Degradation on Water Chemical of Karst Shallow Groundwater**Liu Fang<sup>1,2</sup> Wang Shijie<sup>1</sup> Luo Haibo<sup>2</sup> Liu Yuansheng<sup>2</sup> He Tengbing<sup>2</sup> Long Jian<sup>3</sup>

(1. National Laboratory of Environmental Geochemistry, Geochemistry Institute of Chinese Academy of Sciences Guiyang 550002;

2. Environment and Resource Institute of Guizhou University Guiyang 550025; 3. Geography Department of Guizhou Normal University Guiyang 550004)

**Abstract:** The effects of forest community degradation on chemical composition of Karst shallow groundwater were studied in Guizhou Province by investigating vegetations and analyzing the samples of runoff and Karst groundwater. The results showed that the order of concentrations of anion and cation in rainfall is  $\text{SO}_4^{2-} > \text{K}^+、\text{Ca}^{2+}、\text{HCO}_3^- > \text{Na}^+、\text{Mg}^{2+}、\text{Cl}^- > \text{NO}_3^-、\text{NH}_4^+ > \text{PO}_4^{3-}$ , while the order of concentrations of anion and cation in runoff is  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}、\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}、\text{Cl}^- > \text{K}^+、\text{Na}^+、\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{PO}_4^{3-}$ , and that the chemical composition of Karst shallow groundwater is similar with that of the runoff, but the concentrations of  $\text{HCO}_3^-、\text{Ca}^{2+}、\text{Mg}^{2+}$  and electric conductivity are higher than that of surface runoff. The results also showed that with increasing the grades of Karst forest community degradation, the percents of  $\text{HCO}_3^-、\text{Ca}^{2+}$  reduced significantly and the percent of  $\text{SO}_4^{2-}$  enhanced obviously, and that the contents of  $\text{HCO}_3^-、\text{Ca}^{2+}、\text{K}^+、\text{NH}_4^+$  in Karst shallow groundwater correlated significantly with the rate of forest coverage, which the content of  $\text{HCO}_3^-$  is dominant factor to impact on electric conductivity of Karst groundwater,  $\text{Ca}^{2+}、\text{K}^+$  and  $\text{Mg}^{2+}$  coming next, so that electric conductivity could be used as primary indices to evaluate Karst forest community degradation impacting on ecological environment.

**Key words:** Karst; forest community; community degradation; Karst groundwater; water chemistry

喀斯特地区植被大多具有喜钙、旱生和石生性特点,南方喀斯特森林是一种特殊的森林生态系统,其顶级群落为常绿落叶阔叶混交林,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。但是,在人为干扰和不合理开发利用下喀斯特森林普遍退化,其群落演替的主要过程为常绿落叶阔叶混交林阶段(乔林)、灌木灌丛阶段、灌草群落阶段、草本群落阶段(朱守谦, 2003; 喻理飞, 2002a; 2002b); 植被的组成从高大乔木向典型的小灌木退化,并随着环境干旱程度的加剧向旱生化演替,形成稀疏植被覆盖的荒漠景观。

喀斯特生态系统中土壤和表层岩溶带是岩石、大气、水、生物等四大圈层的敏感交汇地带,又是生态系统赖以存在的基础;由于溶隙及岩溶管道发育,碳酸盐岩含水介质体常为地表、地下双重结构,从而形成一个地

表、地下水体组合的双重水文结构。植物分布格局的异质性不仅改变了土壤养分和水分的空间分布,同时造成喀斯特溶蚀过程的变化(章程等, 2003; 李林立等, 2003)。生态环境的退化引起岩溶地下水系统自我调蓄能力降低,使岩溶地下水资源的时空分布变得极不均匀,总资源量减少和水质恶化(邹胜章等, 2004)。喀斯特水资源是支撑区域社会经济发展最为重要的一个基本方面,研究生态系统变化对岩溶水资源质量的影响,有助于岩溶水循环机制的深入研究。目前对岩溶水的水文特征、化学特征以及水质演变等方面进行了一些研究(贾亚男等, 2004; 邹胜章等, 2004; 李林立等, 2003; 梁小平等, 2003; 钱家忠等, 2003; Lang *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2001),但有关植被变化对岩溶水化学影响方面还缺乏系统的研究。近期研究表明,森林退化已成为影响地下水质量的重要原因(Hindar *et al.*, 2003),制定区域的环境管理政策,保护地下水资源,成为喀斯特地区环境保护的主要目标之一(Andreo *et al.*, 2006)。本文从喀斯特生态系统的角度,把生态系统的植物、岩石和水体作为一个整体,系统地研究喀斯特森林退化过程中植物群落的演变对浅层岩溶地下水化学组成的影响,为揭示喀斯特水资源的演化规律、控制机理及水资源评价与保护提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市关岭县板贵乡,地理位置为东经  $105^{\circ}14'$ — $107^{\circ}32'$ ,北纬  $25^{\circ}20'$ — $27^{\circ}19'$ 。海拔 800 ~ 1 470 m,具典型的亚热带湿润季风气候,年均气温  $18.4^{\circ}\text{C}$ ,  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温 5 000 ~ 6 000  $^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量 1 130 ~ 1 259 mm,多集中在夏秋两季。该区地质构造较为复杂,成土母岩以形成于石炭纪、二迭纪的白云岩和石灰岩为主,伴有少量二迭纪和三迭纪形成的白云质灰岩、泥质白云岩和燧石石灰岩。岩石裸露率较高,土体不连续,土层浅薄,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变幅大,大部分地区植被稀疏,森林覆盖率不足 10%,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)50% ~ 90%;小部分地区次生植被较茂盛,森林覆盖率 70% ~ 90%,基岩裸露率 10% ~ 20%;从整体来看,属中度喀斯特森林退化区。

## 2 研究方法

采用样地调查的方法,根据群落外貌、结构、组成等特性,进行草本群落、灌木林群落及乔木林群落的初步划分;在地形地貌、坡度以及岩性(白云质灰岩和石灰岩)相对一致的条件下,选择有代表性的阔叶林(乔木)地、灌木林地、灌丛草地各设置 6 个样地进行植被调查。另外,对每块样地的森林覆盖率、基岩裸露率等景观指标进行调查及分级(按 10% 为一个等级,共分 10 级),每块样地的森林覆盖率和基岩裸露率见表 2。

在调查的阔叶林(乔木)地、灌木林地、灌草地样地上,选择坡度一致的地段,采用无界径流小区法在每个样地上设置 3 个径流收集槽(Robert, 1989),在自然降雨条件下(降雨量  $20 \sim 30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )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 ~ 2 d 内断流),作为地下径流水样。在相应的地段采集从岩层裂隙中常年渗出的泉水(这部分出露的地下渗透水受降雨季节性的明显影响)作为浅层岩溶地下水水样。室内量取 500 mL 水溶液通过  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜,对过滤的水样进行水化学参数测定,测定项目有 pH 值、电导率(EC)以及 10 种离子浓度( $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ ),其中  $\text{NH}_4^+$  采用靛酚蓝比色法、 $\text{NO}_3^-$  采用紫外分光光度法、 $\text{PO}_4^{3-}$  采用异丁醇萃取-钼蓝比色法、 $\text{HCO}_3^-$  采用电位滴定法、 $\text{SO}_4^{2-}$  采用 EDTA 间接滴定法、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  采用 EDTA 滴定法、 $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  采用火焰光度法、 $\text{Cl}^-$  采用硝酸银滴定法测定(鲁如坤, 2000)。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同空间层次的水化学特征

该地区喀斯特森林群落优势种主要有香椿(*Toona sinensis*)、乌桕(*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。喀斯特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,雨水在林冠层、枯落物层、土壤层等的拦截及再分配作用下,通过下渗运动进入岩溶裂隙或岩溶管道,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。喀

斯特森林生态系统中,发达的植物根系不仅可以吸收土层中的水分,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,这种岩溶的双重水文结构保持了喀斯特生物的多样性。岩溶水主要由大气降水补给,降水有效入渗补给量的大小直接影响喀斯特地区地下水资源总量。

表 1 水化学特征  
Tab.1 Water chemistry character

植被 Vegetation	水体 Waters	pH 值 pH value	离子浓度 Ion concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )									
			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
阔叶林 Broadleaved forest	降雨 Rainfall	7.69	13.0	1.8	14.4	4.1	0.247	67.2	10.6	3.64	0.37	0.002 6
	地表径流 Surface runoff	7.52	62.0	3.8	0.2	0.5	0.055	14.4	141.5	8.23	3.43	0.006 3
	地下径流 Ground runoff	7.37	56.0	14.0	0.2	0.3	0.066	27.4	155.2	10.40	3.15	0.005 6
	岩溶地下水 Karst ground water	7.23	84.1	15.2	0.2	0.7	0.041	16.3	194.0	9.34	3.47	0.007 4
灌草 Brush-grass	降雨 Rainfall	7.79	25.3	5.1	14.7	1.3	0.381	89.9	23.8	3.08	2.13	0.001 4
	地表径流 Surface runoff	7.98	36.3	4.6	1.3	0.5	0.131	46.0	84.7	5.47	0.74	0.013 3
	地下径流 Ground runoff	7.77	23.2	19.8	0.1	0.8	0.067	72.6	106.8	4.39	1.64	0.004 1
	岩溶地下水 Karst ground water	7.73	46.0	15.6	1.2	1.0	0.721	55.2	104.9	10.86	3.61	0.008 0

喀斯特空间是处于连续演化过程中的喀斯特系统,它直接控制着地表水和地下水的交替和水的动态变化,对喀斯特地球化学特征也存在影响。由表 1 看出,降雨中离子浓度大小的排序为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>,而径流中离子浓度的大小排序为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup> > K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>,说明降雨通过林冠层、枯落物层后其化学特性发生改变,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度明显增加,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度明显下降。岩溶地下水与径流的离子组成总体相似,但岩溶地下水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 的含量和电导率明显高于地表径流,说明水分在喀斯特空间运动过程中随着水-岩界面交换时间的增加,其对碳酸盐岩石的溶蚀能力增强。可见,在喀斯特森林生态系统中,存在较强的生化作用及微生物作用,土壤释放 CO<sub>2</sub> 量大,一方面增加了径流水 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量,另一方面,降低了径流水的 pH 值,提高了对碳酸盐岩的化学溶解能力,导致岩溶地下水电导率及 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量升高。但是,喀斯特森林生态系统发生退化后,这种变化趋势出现减弱,不同植物群落岩溶地下水的化学组成出现差异。

### 3.2 喀斯特森林不同退化阶段浅层岩溶地下水化学组成的变化

喀斯特森林群落退化后,灌木群落优势种主要有花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*)、火棘 (*Pyracantha floruniana*)、构树 (*Broussonetia papyrifera*)、小果蔷薇 (*Rosa cymosa*)、月月青 (*Itea ilicifolia*)、悬钩子 (*Rubus* sp.) 等,草本群落优势种主要有五节芒 (*Miscanthus floridulus*)、扭黄茅 (*Heteropogon contortus*)、狗芽根 (*Cynodon dactylon*)、莎草 (*Cyperus* sp.) 等。从表 2 看出,喀斯特岩溶地下水的阳离子主要是 Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>,其浓度分别为 31.1~117.2 和 4.56~58.8 mg·L<sup>-1</sup>,阴离子主要是 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,其浓度分别为 104.9~301.6 和 21.6~142.6 mg·L<sup>-1</sup>,说明调查区内喀斯特岩溶地下水化学类型以 HCO<sub>3</sub>-Ca 型为主,局部出现 HCO<sub>3</sub>-Ca·Mg 型和 HCO<sub>3</sub>·SO<sub>4</sub>-Ca 型,与该地区的河流水化学特征相似 (Han et al., 2001)。但是,不同植物群落下岩溶地下水的化学组成发生改变,阔叶林地、灌木林地和灌丛草地的岩溶地下水中 Ca<sup>2+</sup> 含量占离子总量(10 种离子之和)的平均百分数( $n=6$ )分别是 21.73%、17.34% 和 16.77%,而 Mg<sup>2+</sup> 含量则分别是 5.18%、7.82% 和 7.95%;阔叶林地、灌木林地和灌丛草地的岩溶地下水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量占离子总量的平均百分数分别为 52.31%、54.60% 和 44.18%,而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量占离子总量则分别是 16.69%、14.40% 和 25.11%。说明随着喀斯特森林从阔叶林向灌木林、灌草方向的演替,其岩溶地下水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 比例明显减少,而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比例明显增加,其水化学类型也发生了变化。可见,随着森林群落退化度增加,群落高度和生物量明显下降,群落垂直结构由复杂变简单,这种变化改变了森林生态系统中水环境的空间结构,地表径流强度加大,使大气降水在时空分布上变得极不均匀,减少了岩溶地下水的有效补给量;降低了森林植被和土壤对地下水的涵养性和对岩溶水的调蓄能力,使地表水与地下水分配结构引起较大变化,也直接影响岩溶地下水的化学组成。

相关分析结果表明(表 3),喀斯特岩溶地下水的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup> 含量与森林覆盖率之间均存在显著的正相关,而 K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量与森林覆盖率之间存在显著的负相关。岩溶地下水的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量与基岩裸露率之间也存在显著的相关性,它们的相关关系与森林覆盖率正好相反。随着森林覆盖率下降、基岩裸

表 2 浅层岩溶地下水的化学组成变化  
Tab.2 Changes of Karst shallow groundwater chemical components

植被 Vegetation	pH	离子浓度 Ion concentration/(mg·L <sup>-1</sup> )										电导率 Electric conductivity/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	森林覆盖率 Vegetation coverage rate/%	基岩裸露率 Rocky coverage rate/%
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>			
阔叶林 Broadleaved forest	7.19	261.1	96.0	7.97	1.96	0.016 5	117.2	18.5	0.13	0.038	0.7	620	90	10
	7.27	151.9	64.3	7.64	3.33	0.008 5	92.2	4.56	0.25	0.094	1.4	454	80	10
	7.47	250.7	48.0	10.8	3.75	0.004 3	104.6	23.6	0.12	0.061	0.8	627	90	10
	7.66	270.2	88.8	11.1	14.2	0.013 6	88.0	44.4	0.40	0.088	3.0	590	80	20
	7.11	301.6	76.8	8.97	12.4	0.004 6	108.0	24.1	0.65	0.088	2.2	588	80	20
	7.90	178.1	76.8	8.41	10.9	0.008 0	77.4	24.4	0.14	0.038	0.2	433	70	30
灌木林 Brush forest	7.39	250.4	56.6	7.47	7.88	0.009 9	55.6	45.0	0.95	0.050	2.1	545	70	20
	7.98	188.2	33.6	10.2	11.4	0.008 2	62.0	26.4	0.05	0.154	1.2	402	60	50
	7.89	172.6	21.6	6.87	14.9	0.005 7	84.0	10.8	0.15	0.242	4.2	461	50	40
	7.81	146.7	36.0	8.86	4.48	0.006 3	54.0	18.0	0.45	0.088	2.7	338	60	50
	8.19	165.3	103.2	8.97	13.8	0.007 1	58.0	33.6	0.12	0.055	0.2	384	60	40
	7.66	162.3	35.3	3.01	1.45	0.011 7	31.1	21.6	2.50	0.116	1.4	260	50	60
灌草 Brush-grass	7.57	143.9	44.2	7.75	4.06	0.005 9	52.0	7.44	8.00	0.229	3.7	331	30	60
	7.78	196.1	142.6	10.1	8.60	0.016 8	60.0	27.8	0.10	0.055	0.2	463	40	50
	7.85	154.3	116.8	7.75	12.9	0.007 1	52.0	58.8	0.70	0.087	1.0	435	30	70
	7.64	214.8	78.0	8.41	15.8	0.007 7	76.1	28.1	0.44	0.091	1.9	488	30	80
	7.73	104.9	55.2	10.9	3.61	0.008 0	46.0	15.6	1.20	0.721	1.0	296	20	90
	8.16	111.0	88.8	6.87	4.70	0.004 2	65.0	28.8	10.4	0.121	3.4	260	10	90

表 3 岩溶地下水离子含量与森林覆盖率、基岩裸露率的相关系数<sup>①</sup>

Tab.3 Correlation coefficients of ion concentration with vegetation coverage rate or rocky coverage rate

景观指标 Landscape index	离子 Ion									
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>
森林覆盖率 Vegetation coverage rate	0.719**	-0.102	0.192	-0.035	0.227	0.670**	-0.054	-0.606**	-0.484*	-0.249
基岩裸露率 Rocky coverage rate	-0.697**	0.031	-0.159	0.023	-0.236	-0.683**	0.072	0.545*	0.512*	0.167

① \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

露率增加,加剧了水生态环境退化的强度和速度,特别是喀斯特森林严重退化后,改变了水土或水岩界面的交换时间和空间以及物质的迁移通量,不仅减弱岩溶作用,影响成土过程,还加剧了 K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 等养分流失。可见,喀斯特森林植被可以保持浅薄的土壤层,保证植物必须的养分和水分来源,减少水土流失,还可以提高土壤溶液的溶蚀能力,促进成土作用。因此,通过保护天然林、退耕还林还草等措施恢复植被,可以促进喀斯特森林生态系统的恢复,也是提高该地区水资源潜力的有效途径。

#### 4 小结

喀斯特森林生态系统降雨中离子浓度大小的排序为 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Na<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>,径流中离子浓度的大小排序为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup> > K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>,降雨通过林冠层、枯落物层后其化学特性发生改变,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度明显增加,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度明显下降。岩溶地下水离子组成与径流总体相似,但岩溶地下水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的含量和电导率明显高于地表径流,随着森林群落的退化,这种变化趋势出现减弱。

喀斯特森林群落从阔叶林群落向灌木林群落、灌草群落方向演替,其岩溶地下水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 比例明显减少,而 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 比例明显增加。喀斯特岩溶地下水的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup> 含量与森林覆盖率之间均存在显著的正相关,而 K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量与森林覆盖率之间存在显著的负相关;岩溶地下水的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 含量与岩石裸露率之间也存在显著的相关性。随着森林覆盖率下降、基岩裸露率增加,加剧了水生态环境退化的强

度和速度。

随着喀斯特森林群落退化与溶蚀作用的减弱,岩溶地下水中可溶性盐的总量逐渐下降。 $\text{HCO}_3^-$  含量是影响岩溶水电导率的最重要因子,其次是  $\text{Ca}^{2+}$ , 再次是  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 。随着  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量提高,岩溶水电导率不断增加。在同一条件下,随着  $\text{K}^+$  含量增加,岩溶水电导率下降。岩溶水电导率可以反映森林植被变化对水环境的影响,可以采用岩溶地下水电导率作为数量指标来评价森林群落退化对生态环境的影响。

### 参 考 文 献

- 贾亚男,刁承泰,袁道先. 2004. 土地利用对埋藏型岩溶区岩溶水质的影响——以涪陵丛林岩溶槽谷区为例. 自然资源学报, 19(4):455-461
- 李林立,况明生,蒋勇军. 2003. 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, 26(2):201-204
- 梁小平,朱志伟,梁 彬. 2003. 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, 22(2):103-109
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析法. 北京:中国农业科技出版社
- 钱家忠,汪家权,吴剑锋. 2003. 洛塔徐州张集水源地裂隙岩溶水化学特征及影响因素. 环境科学研究, 16(2):23-26
- 喻理飞. 2002a. 退化喀斯特森林自然恢复过程中群落动态变化. 林业科学, 38(1):252-255
- 喻理飞. 2002b. 人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究. 应用生态学报, 13(5):529-532
- 章 程,曹建华. 2003. 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, 22(1):1-5
- 朱守谦. 2003. 喀斯特森林生态研究(Ⅲ). 贵阳:贵州科技出版社
- 邹胜章,梁 彬,朱志伟,等. 2004. 生态系统变化对岩溶水资源的影响——以湘西为例. 长江流域资源与环境, 13(6):599-603
- Andreo B T, Goldscheider N C, Vadillo I K. 2006. Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). Science of The Total Environment, 357(1):54-73
- Guo H M, Wang Y X. 2005. Geochemical characteristics of shallow groundwater in Datong basin, northwestern China. Journal of Geochemical Exploration, 87(3):109-120
- Han G L, Liu C Q. 2001. Hydrogeochemistry of Wujiang river water in Guizhou Province, China. Chinese Journal of Geochemistry, 22(3):240-248
- Hindar A, Richard F W, Nilsen P. 2003. Effects on stream water chemistry and forest vitality after whole-catchment application of dolomite to a forest ecosystem in southern Norway. Forest Ecology and Management, 180(1-3):509-525
- Lang Y C, Liu C Q, Zhao Z Q, et al. 2006. Geochemistry of surface and ground water in Guiyang, China: Water/rock interaction and pollution in a karst hydrological system. Applied Geochemistry, 21(6):887-903
- Robert J L. 1989. Measurement methods for soil erosion. Progress in Physical Geography, 20(2):5-9
- Wang Y, Ma T, Luo Z. 2001. Geostatistical and geochemical analysis of surface water leakage into groundwater on a regional scale: a case study in the Liulin karst system, northwestern China. Journal of Hydrology, 246(2):223-234

(责任编辑 于静娴)