

喀斯特地区浅层地下水对植被退化的 水文地球化学响应

——以贵州荔波拉桥小流域为例

肖德安^{1,2}, 罗维均^{1,3}, 王世杰^{1,3*}, 陈生华⁴

(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. 贵州省环境监测中心站, 贵阳 550081;
3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 4. 贵州省贵阳市国土资源局, 贵阳 550001)

摘要:喀斯特地区植被退化的水文地球化学响应是喀斯特研究的重要内容之一, 具有重要的科学和现实意义。选择贵州荔波拉桥小流域中四个不同植被类型的样地作为对象, 按月采集浅层地下水(土壤水和表层泉水), 对其进行水文地球化学各参数的分析。结果表明, 土壤水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、EC 和 pH 值, 表层泉水中 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 等对植被退化响应敏感; 而土壤水中 NO_3^- 和 SO_4^{2-} , 表层泉水中 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 HCO_3^- 和 EC, 以及土壤水和表层泉水中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值则可能还受到其他过程的影响, 需谨慎使用。由此可见, 对于土壤层, 阳离子和与土壤 CO_2 气体浓度有关的 HCO_3^- 可能有较好的响应, 而对于表层泉水, HCO_3^- 以外的阴离子可能更敏感。

关键词:地球化学响应; 土壤水; 表层泉水; 喀斯特; 植被退化

中图分类号:P592 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9250(2012)03-0297-08

当前, 喀斯特石漠化已成为我国生态环境研究的热点之一, 尤其是在石漠化集中连片分布的贵州, 其已成为影响当地工农业生产和人们正常生活最主要的因素。于是, 石漠化治理即成为了政府和百姓十分关注的问题, 而石漠化治理是个系统工程, 不仅需要扎实的实践经验, 理论支持也不可缺少。自然地, 石漠化研究也就成为了科学家们关注的热点之一。

经过近 20 年的研究, 在石漠化的发生、发展和演化等理论和实践方面均已取得了一些重要的认识^[1-9], 但是, 由于喀斯特的特殊性(如高异质性^[10-12]), 对于石漠化地区生态环境退化的各种地球化学响应的认识还存在诸多争议, 而这对于石漠化地区生态环境的恢复具有重要指导意义。土壤水和表层泉水, 由于其贯穿整个生态系统, 是地球化学过程的良好参与者, 因此, 其中的一些水文地球化学参数可能对环境比较敏感, 如 SO_4^{2-} ^[13], 电导率^[14] 和

溶解有机碳(DOC)^[15]等。

基于此, 在贵州荔波喀斯特地区选取拉桥小流域内的四种不同植被类型(分别为乔木林 QM、乔灌混合林 QG、灌木林 GM 和灌丛草坡 GC)的样地, 以土壤水和表层泉水为研究对象。通过对不同植被条件下土壤水和表层泉水中各种水文地球化学参数的分析, 分别探讨他们对植被退化的响应关系, 为喀斯特地区生态环境的恢复提供科学依据。

1 研究区域概况

研究区位于贵州省荔波县茂兰国家自然保护区拉桥村(图 1), 地处贵州高原向桂东丘陵过渡的斜坡地段, 基岩类型主要为下石炭系的纯质石灰岩和白云岩; 地貌类型主要是峰丛洼地和峰丛漏斗, 局部地区亦有峰丛槽谷、峰林洼地和峰林盆地; 土壤以黑色石灰土为主, 土层浅薄且不连续, 剖面构型多为

收稿日期: 2012-02-09; 改回日期: 2012-03-26

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2011]2089); 贵州省优秀科技教育人才省长专项资金(201115); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(kzcx2-yw-306); 国家自然科学基金(41003054)。

第一作者简介: 肖德安(1981—), 男, 理学博士, 从事环境地球化学研究。E-mail: xiaodean@hotmail.com.

* 通讯作者: E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn.

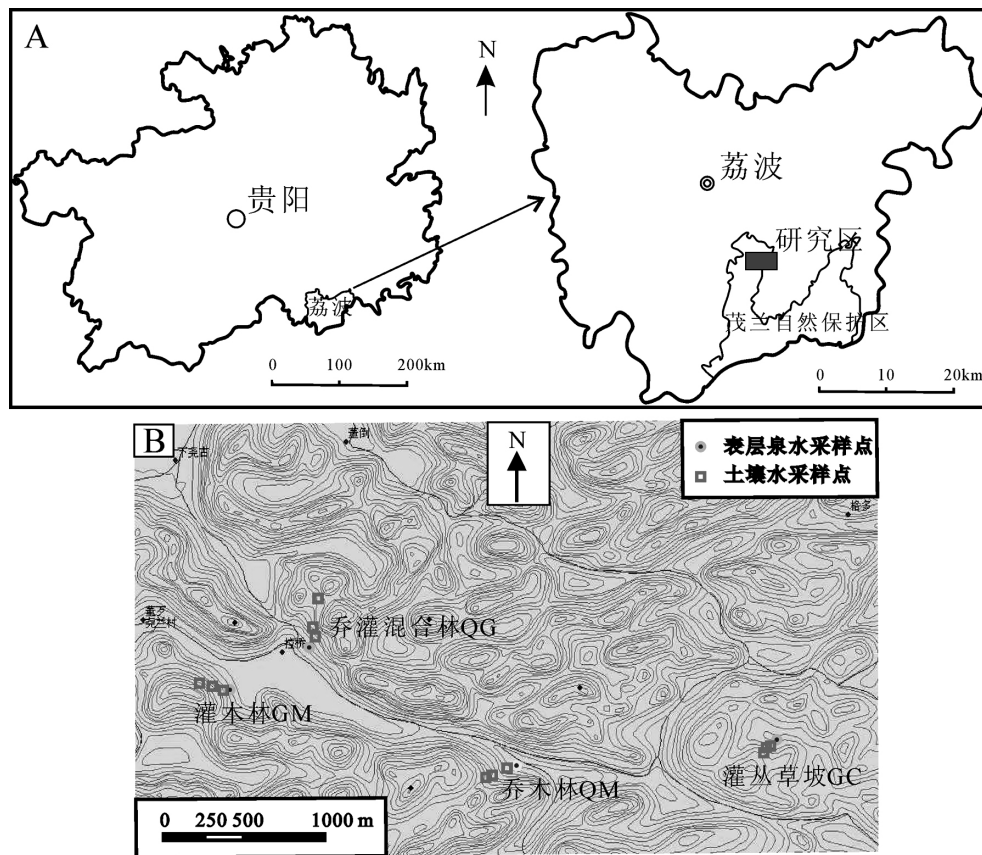


图1 研究区地理位置(A)和采样点位置(B)

Fig. 1 Location of the study area (A) and sampling sites (B)

AF-D型、A-D型^[10]。平均海拔约为759 m,属中亚热带季风性湿润气候。多年平均气温18.6℃,极端最高气温39.4℃,极端最低气温-6.7℃,多年平均降水量1280 mm。茂兰保护区是目前世界上同纬度地区残存下来的仅有的、原生性强、相对稳定的岩溶森林生态系统。但是,在保护区的边缘地带由于受人为因素和自然因素的共同作用,上覆植被已出现不同程度的退化。

根据植被退化的程度,在拉桥小流域选取4个不同植被退化阶段(乔木林、乔灌混合林、灌木林、草坡)的样地作为研究对象(图1),对不同植被条件下土壤水和表层岩溶泉水的水文地球化学参数和碳同位素组成进行对比研究。植被特征如表1所示。

2 研究方法

2.1 样品的采集

为了使所采集的样品能反映每种植被类型的真实情况,按统计学规律在每种植被类型样地中分别布设3个能代表该植被类型特征的土壤水取样点(图1)。由于研究区降水的季节性分布(主要分布

表1 样地的植被特征(据肖德安等2010^[15]改编)

Table 1 The characteristics of vegetation at four sampling sites

指标	植被类型			
	乔木林 QM	乔灌混 合林 QG	灌木林 GM	灌丛草 坡 GC
群落高度(m)	10.0~20.0	5.0~12.0	2.5~3.0	1.0~2.0
多样性指数	5.42	4.22	3.21	2.99
生态优势度	0.06	0.15	0.27	0.46
物种丰富度	56.3	28.2	26.1	11.67
均匀度	0.94	0.91	0.73	0.27
植被覆盖度(%)	90	85	90	80
地上生物量(t/hm ²)	135.4	41.1	17.9	7.3
年凋落量(kg/hm ²)	3845	2986	2362	530
优势种	圆果化香 等 ^a	云贵鹅耳 枥等 ^b	南天竹 等 ^c	黄茅 等 ^d

注:^a短萼海桐、小果润楠、青檀、光叶海桐、裂果卫茅、丝栗栲、十大功劳、天竺果等;

^b青冈栎、丝栗栲、马尾松、皱叶海桐、香叶树;

^c化香、香叶树、虎刺、柔毛绣球花、荔波鹅耳枥、长叶榉木、齿叶黄皮、多脉青冈、小果蔷薇;

^d毛叶荩草、毛轴蕨、铁芒萁、五节芒。

在 4~9 月)特征,致使采集到的水样主要集中在 3~9 月(2007 年)。

土壤水样品采用零张力式收集法采集。选择地势相对平缓、土壤深度大于 50 cm 且土壤剖面保存完好又不易受人为等因素影响的坡面,垂直坡面流向挖一个土壤剖面,然后再侧向挖一个洞,埋设体积约为 2 L 的半圆柱聚乙烯集水器,集水器口均距地表约为 40~45 cm。在埋设集水器的过程中,必须保证土壤水流经的土壤结构不被破坏和干扰。用 PTFE 管连接集水器底部,用注射器抽取集水器内土壤水。

表层泉水样品直接在泉的出露口采集,采样时尽可能采集与外界接触时间较短的刚流出的泉水以保证所采样品的真实性和代表性。

2.2 稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)的测定

水样用 Atekwana 等人的方法制备并纯化 CO_2 ^[16]。首先,在洁净的 20 mL 玻璃瓶中注入 1 mL 浓磷酸,并放入一颗用于搅拌的小磁棒,用一次性橡皮塞密封,高真空系统上抽至真空后($<3\text{ Pa}$),取下备用;然后,现场取 5 mL 水样注入备用玻璃瓶中以产生 CO_2 气体带回;最后,将样品瓶连接到高真空系统上,并用 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 水浴加热和恒温磁力搅拌器搅拌,使水中溶解无机碳完全转化为 CO_2 气体,根据气体凝点的差异,采用酒精液氮和液氮逐级分离并去除反应过程中生成的杂质气体,纯化 CO_2 气体并完全转移至玻璃管中,密封。纯化后的 CO_2 样品采用美国 FinniganMAT 公司生产的 MAT-252 型气体同位素质谱仪测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值。测定值以‰为单位,以 PDB 标准表示,测定误差为 0.15‰。

2.3 水文地球化学参数的测定

用法国产 Radiometer 便携式多参数测定仪现场测定水的 pH 值、电导率(EC)和水温,其分析精度分别为 ± 0.02 、 $\pm 1\%$ 、和 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

以溴甲酚绿-甲基红混合溶液作为指示剂,用约 0.01 mol/L 的稀盐酸滴定 HCO_3^- 含量,误差 $< 5\%$ 。

全部水样的阴离子浓度(F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-})均采用美国戴安公司(DIONEX)生产的 ICS-90 型离子色谱仪测量,其最低检测限值为 0.01 mg/L。

所有样品的阳离子浓度(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})采用美国 PE 公司生产的原子吸收分光光谱仪(PE5100PC)测量,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子在测定前需稀释,同时加 LaCl_3 溶液屏蔽其它离子避免干

扰测定。该设备特征值(mo)在 Pg 级,灵敏度($10^{-9} \sim 10^{-12}$)。

采用中华人民共和国国家标准(GB 7479-87)规定的纳氏试剂比色法(北京普析通用仪器有限公司生产的 T6 紫外/可见分光光度计)测定 NH_4^+ 含量,其最低检出浓度为 0.05 mg/L,测定上限为 2 mg/L。

所有分析工作均在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完成。

3 结 果

3.1 水文地球化学

3.1.1 雨水

根据 2008 年在当地采集的 28 个大气降水样品的主要元素分析发现,阳离子主要有 Ca^{2+} 和 NH_4^+ 等,而阴离子主要是 SO_4^{2-} 和 Cl^- 等,其中,除了 SO_4^{2-} 离子含量较高(平均为 $4.1 \pm 2.3 \times 10^{-6}$)外,其他离子含量绝大多数都小于 1×10^{-6} 。雨水中各离子含量随季节的变化不明显。

3.1.2 土壤水

研究的 4 个样地中,土壤水中阳离子主要以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为主,阴离子则主要有 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,质量浓度分别占全部离子质量浓度的 95% 左右。

高异质性是喀斯特样地的主要特征之一^[10],因此,本研究在每个样地设置了三个土壤水采集点,他们之间也显示出了明显的差异,主要体现在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、pH 值和 EC 等参数上。其中乔木林样地的上述参数 $\text{QM-1} > \text{QM-2} > \text{QM-3}$;乔灌混合林样地 QG-1 显著高于其他两个点,后两个点中 $\text{QG-2} < \text{QG-3}$;灌木林样地 GM-1 较其他两个点的上述参数明显偏低,后两个点中 GM-2 略高于 GM-3 ;灌丛草坡样地 $\text{GC-1} < \text{GC-2} < \text{GC-3}$ 。

尽管如此,不同样地间还是存在较为显著的关系,各个样地三个采样点数据的统计结果(表 2)表明,随着植被的退化, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 浓度以及 EC 和 pH 值的平均值均具有降低的趋势,以及 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度的平均值除了乔灌混合林外也逐渐降低。

土壤水中各水文地球化学参数的季节变化较为复杂,除水温外,不同点表现出不完全一致的特征。总体上, QM-1 、 QG-1 、 GM-2 和 GC-3 具有大致相似的特征,即多数主要参数(如 Ca^{2+} 和 HCO_3^-)均显示出雨季高于旱季的特征,而这四个样地的其他点则

表 2 土壤水主要水文地球化学参数统计结果 (n≈40) (离子浓度单位均为 mg·L⁻¹)
Table 2 The statistical hydro-geochemical results of the soil waters (n≈40) (mg·L⁻¹)

样地	统计名	温度/°C	pH 值	EC/μS·cm ⁻¹	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
QM	平均值	20.3	7.10	207	38.9	12.4	0.39	134	14.0	0.96	6.44
	标准差	3.5	0.32	84	13.5	5.4	0.22	58	11.6	0.92	10.62
QG	平均值	22.0	6.72	122	19.2	4.3	0.31	62	6.8	0.83	1.05
	标准差	3.0	0.58	103	12.6	4.6	0.25	53	3.5	0.59	2.61
GM	平均值	21.2	6.55	92	18.6	2.7	0.54	46	10.2	1.26	2.28
	标准差	3.7	0.45	45	8.6	1.8	0.30	21	8.4	1.04	6.45
GC	平均值	22.4	6.54	69	16.6	0.7	0.43	40	6.6	0.84	0.63
	标准差	3.9	0.55	42	10.9	0.4	0.26	31	3.4	0.70	1.25

注: K⁺、Na⁺ 和 F⁻ 等离子由于含量很低且没有规律性变化而未进行统计。

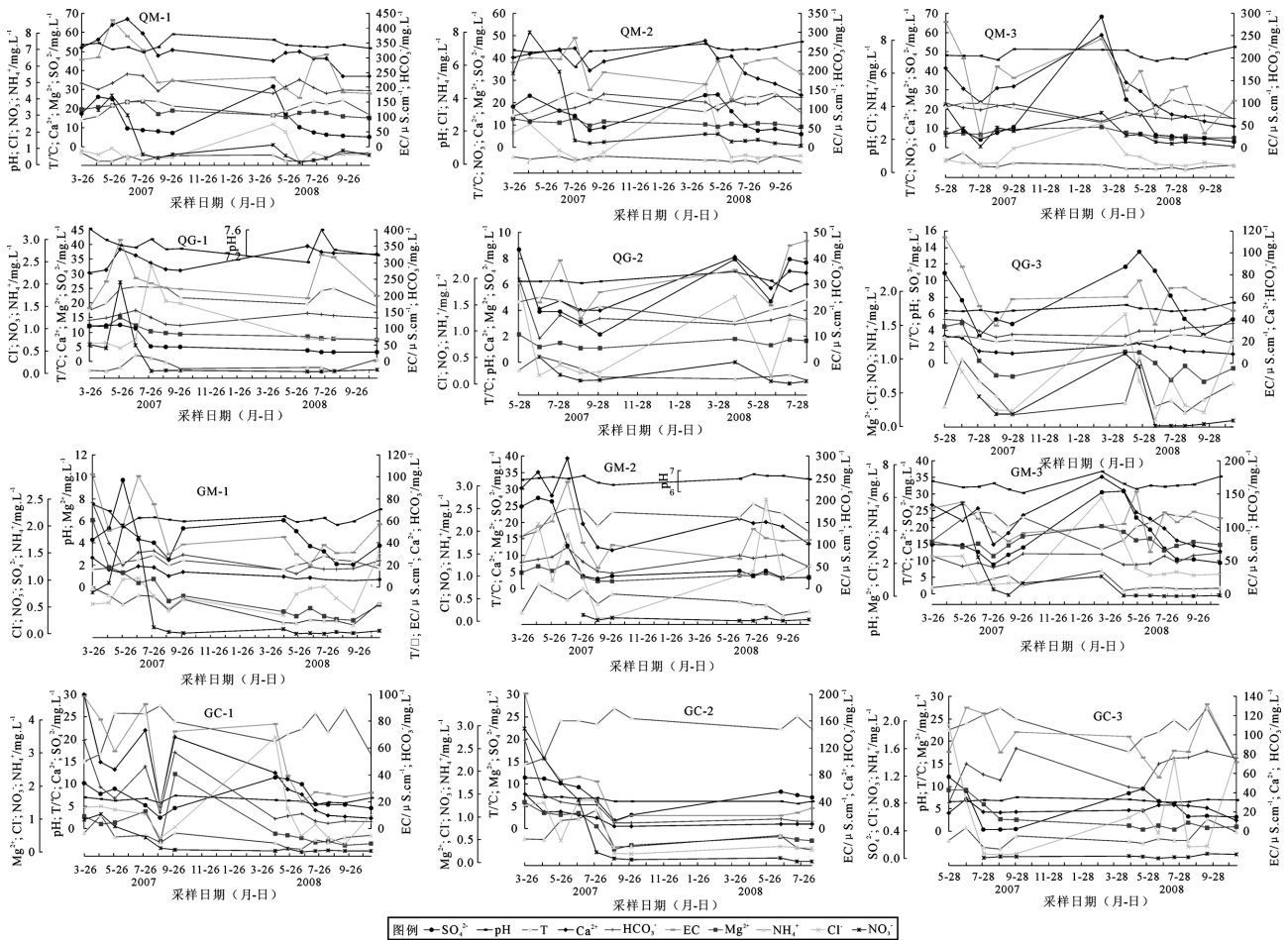


图 2 土壤水水文地球化学参数的季节变化

Fig. 2 The seasonal variations of hydro-geochemical parameters in soil waters

显示出相反的趋势,即雨季低于旱季。pH 值(除 GM-2 外)和 SO₄²⁻ 等在多数点中均显示出雨季低于旱季的特征(图 2)。

3.1.3 表层泉水

与土壤水类似,4 个样地内泉水中阳离子主要以 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 为主,阴离子则主要也是 SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻,质量浓度分别占全部离子质量浓度达到

99% 以上。

不同样地的表层泉水水文地球化学参数之间存在不同程度的差异,其中, SO₄²⁻、Cl⁻ 和 NO₃⁻ 等离子浓度随着植被退化均呈现出一致的变化趋势(均随植被的退化而降低),而泉水温度、EC、HCO₃⁻、Mg²⁺ 和 NH₄⁺ 等均在 QG 样地出现“异常值”(均相对偏高)(表 3)。

表 3 表层泉水主要水文地球化学参数统计结果 (n=17) (离子浓度单位均为 mg·L⁻¹)

Table 3 The statistical hydro-geochemical results of the epikarst springs (n=17) (mg·L⁻¹)

样地	统计名	温度/°C	pH 值	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
QM	平均值	17.4	7.66	292	76.4	13.0	0.22	221	20.7	1.14	2.19
	标准差	1.7	0.30	61	10.1	1.7	0.14	17	4.5	0.54	1.73
QG	平均值	17.6	7.80	330	74.6	19.4	0.29	248	17.1	0.95	0.98
	标准差	1.0	0.31	78	12.7	4.9	0.19	23	4.1	0.43	0.79
GM	平均值	17.4	7.50	292	82.9	12.0	0.20	239	16.2	0.77	0.37
	标准差	2.7	0.41	72	9.8	2.6	0.14	19	3.9	0.52	0.36
GC	平均值	17.3	7.64	227	76.4	2.1	0.15	190	10.9	0.63	0.09
	标准差	3.1	0.43	64	6.9	0.3	0.10	18	2.6	0.43	0.08

注:K⁺、Na⁺和 F⁻ 等离子由于含量很低且没有规律性变化而未进行统计。

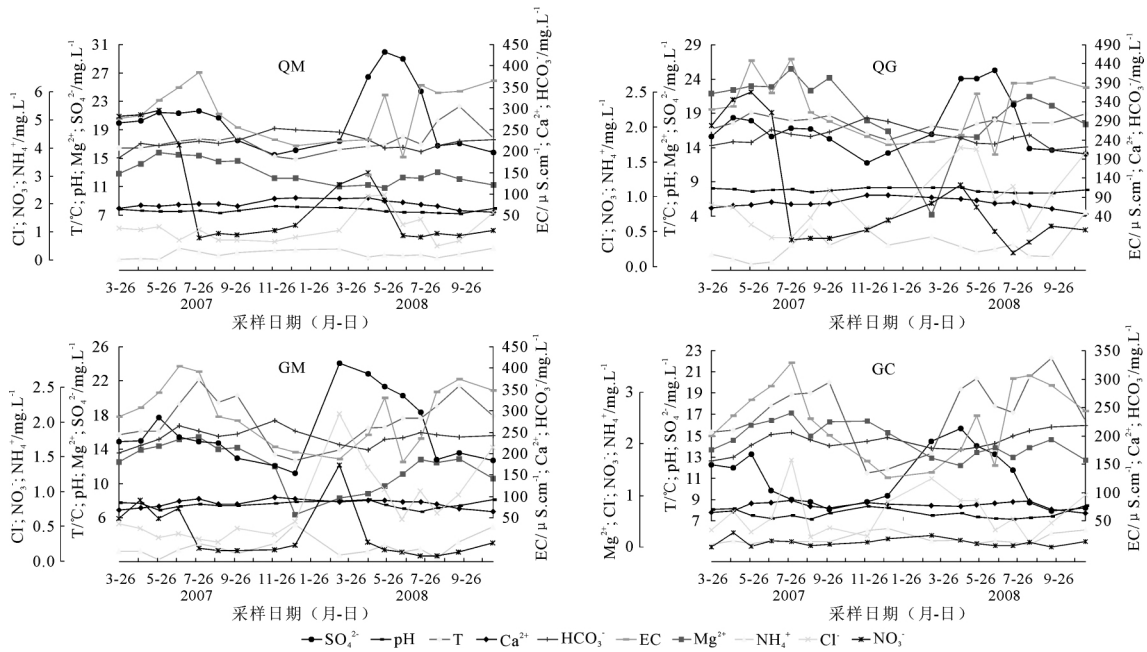


图 3 表层泉水水文地球化学参数的季节变化

Fig. 3 The seasonal variations of hydro-geochemical parameters in epikarst springs

而表层泉水的温度、EC 和 Mg²⁺, 以及 pH 值、Cl⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 具有显著的季节变化, 其中, 前者雨季偏高而旱季偏低, 后者则相反, 即雨季偏低而旱季偏高。SO₄²⁻ 有在春夏交际最高而在秋冬交际时最低, Ca²⁺ 有一定季节变化, 但不很明显, 且各个样地不完全一致, 其他参数没有明显的季节变化特征 (图 3)。

3.2 溶解无机碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$)

3.2.1 土壤水

在 4 个研究样地中, 除了次生乔灌混合林 1 号点外, 土壤水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值总体上呈现出灌丛草坡明显高于其他样地土壤水, 其中次生乔灌混合林土壤水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值轻微偏重于原生乔木林, 而原生乔木林土壤水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值又轻微重于灌木林。尽管仅

有不到一年的碳同位素数据, 但是依然可看出, 所有样地中土壤水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值均呈现出较为明显的季节变化, 即雨季较早季偏轻 (图 4)。

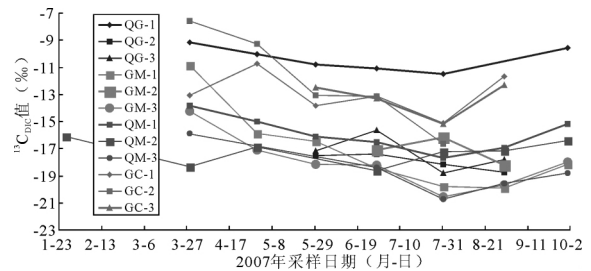


图 4 土壤水无机碳同位素组成的季节变化

Fig. 4 The seasonal variations of inorganic carbon isotopic compositions of the soil waters

3.2.2 表层泉水

表层泉水的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值尽管总体上呈现出土壤水相似的特征,即所有样地均呈现出雨季较旱季偏轻,以及灌丛草坡的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值明显偏重于其他样地,这三个样地之间也呈现出次生乔灌混合林重于原生乔木林,原生乔木林重于灌木林,但他们之间的关系要显著得多(图5)。

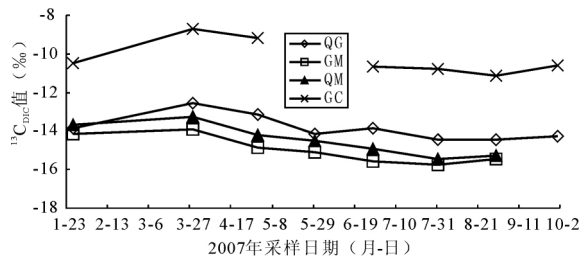


图5 表层泉水无机碳同位素组成的季节变化

Fig. 5 The seasonal variations of inorganic carbon isotopic compositions of the epikarst springs

4 讨论

从上面的研究结果可见,随着植被的退化,土壤水和表层泉水中许多水文地球化学参数均有所响应,但是部分参数不是非常明显,且土壤水和表层泉水中表现不完全一致。这说明,不同的水文地球化学参数可能有不同的物质来源或经历了不同的过程。

事实上,随着植被的退化,生态系统中各主要参数均显示出不同程度的恶化趋势(表1)。理论上,在同一地区(气候和地质背景等基本一致),随着植被的退化(群落高度、生物量、覆盖度等的降低),植物归还土壤的物质减少,同时地表微环境(小生境)恶化^[17],微生物活动减弱,从而导致土壤中 CO_2 气体浓度降低,致使土壤水中的二氧化碳分压降低以及土壤水中生物成因的碳($\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值较低)含量减少,即土壤水侵蚀能力减弱和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值偏正,因此,只能溶解较少基岩,从而导致 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子偏低,最终使得土壤水、甚至表层泉水的各项地球化学参数均发生相应变化。即随着植被的退化, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值应该偏正,受 CO_2 溶解量影响的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等离子浓度将会降低,进而使得 EC 和 pH 值等有关参数值偏小。而在雨热同季的该研究区,由于旱季水热条件较雨季差,因此类似于植被退化,也即上述主要参数在旱季应该较雨季偏低(未考虑雨水的稀释作用)。

尽管4个样地的土壤水水化学参数的平均值(表2)与上述理论分析的有关参数变化趋势完全吻

合,然而,灌木林样地的土壤水和表层泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值“异常”偏负(图4和图5),以及表层泉水的主要水化学参数也与上述理论推测结果不完全一致(表3)。而表1显示,灌木样地尽管生物量不高,但是其植被覆盖度却很高,且群落高度不大,而这些都有利于地表微环境(小生境)的改善^[18],以至于增强土壤微生物的活性^[19],另一方面,该样地植被年凋落物量也较大(表1),导致了土壤有机碳含量较高^[20],可能正是灌木林样地的土壤水和表层泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值“异常”偏负的主要原因;而不同样地的表层泉水可能经历了不同的运移过程,因此,除了 SO_4^{2-} 等与植被状况相关性较强^[13]的参数对植被退化比较敏感外,对其他参数的应用需要谨慎。

土壤水和表层泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值的季节变化完全与上述理论推导吻合,而土壤水中除了 GM-2 外,其他点的 pH 值雨季均低于旱季;所有土壤水中只有 QM-1、QG-1、GM-2 和 GC-3 的 HCO_3^- 浓度雨季高于旱季,表层泉水的所有点 pH 值雨季均低于旱季。所有水样中 pH 值和大多数土壤水的 HCO_3^- 浓度雨季偏低而旱季偏高,可能是受雨水(大多为酸性降雨)的稀释作用所致,还有待进一步研究;而上述4个点土壤水样中 HCO_3^- 浓度雨季较旱季高,这与其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值均偏正于同一样地的其他点(图4)相吻合,说明其可能与碳同位素偏重(+2.9‰^[21])的基岩溶解($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$)有关,也就是说,这些点的土壤水在到达土壤水收集器之前很可能经历过水-岩反应。

5 结论

通过对四个不同植被类型的样地中土壤水和表层泉水多种水文地球化学参数的对比研究发现,土壤水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、EC 和 pH 值等参数对植被退化响应敏感; NO_3^- 和 SO_4^{2-} ,以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值则可能还受到其他过程的影响,还有待进一步的研究工作进行确证或修正;其他水化学参数则对喀斯特地区植被退化不太敏感。表层泉水中 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 等参数对植被退化响应敏感; Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 HCO_3^- 和 EC,以及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 值则可能还受到其他过程的影响,同样还需进一步研究;其他水化学参数对喀斯特地区植被退化不敏感。由此可见,对于土壤层,阳离子和与土壤 CO_2 气浓度有关的 HCO_3^- 对喀斯特地区植被退化比较敏感,而对于表层泉水, HCO_3^- 以外的阴离子更敏感。

参 考 文 献

- [1] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 657-666.
- [2] 王世杰, 李阳兵. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 573-582.
- [3] 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.
- [4] Yuan D X. Rock Desertification in the Subtropical Karst of South China [J]. Z. Geomorph. N. F., 1997, 108: 81-90.
- [5] Ding H, Lang Y C, Liu C Q. The impact of land use and land cover changes on solute dynamics in seepage water of soil from karst hillslopes of Southwest China [J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(Supplement 1): S183-S186.
- [6] Li S L, Liu C Q, Li J, *et al.* Geochemistry of dissolved inorganic carbon and carbonate weathering in a small typical karstic catchment of Southwest China: Isotopic and chemical constraints [J]. Chemical Geology, 2010, 277(3-4): p. 301-309.
- [7] Martin J B, White W B. Frontiers of Karst Research, Special Publication 13 [M]. Leesburg: Karst Waters Institute, Inc., 2007:118.
- [8] Ford D C, Williams P. Karst Hydrogeology and Geomorphology [M]. New York: John Wiley and Sons, 2007: 576.
- [9] Peterson E W, Davis R K, Brahana J V, *et al.* Movement of nitrate through regolith covered karst terrane, northwest Arkansas [J]. Journal of Hydrology, 2002, 256(1-2): 35-47.
- [10] 刘方, 王世杰, 罗海波, 等. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1055-1062.
- [11] 王世杰, 卢红梅, 周云超, 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.
- [12] 周运超, 王世杰, 卢红梅. 喀斯特石漠化过程中土壤的空间分布[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 1-7.
- [13] 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(SO_4) [J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 1-8.
- [14] 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.
- [15] 肖德安, 王世杰, 容丽, 等. 喀斯特地区土壤水中溶解有机碳浓度对植被退化的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(7): 797-801.
- [16] Atekwana E A, Krishnamurthy R V. Seasonal variations of dissolved inorganic carbon and $\delta^{13}\text{C}$ of surface waters: application of a modified gas evolution technique [J]. Journal of Hydrology, 1998, 205(3-4): 265-278.
- [17] 杜雪莲, 王世杰, 葛永罡, 等. 喀斯特石漠化过程的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化及其环境分析[J]. 自然科学进展, 2008, 18(4): 413-423.
- [18] 俞国松, 王世杰, 容丽. 茂兰喀斯特森林演替阶段不同小生境的小气候特征[J]. 地球与环境, 2011, 39(4): 469-477.
- [19] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 等. 茂兰保护区小生境土壤微生物活性研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(3): 285-291.
- [20] 刘玉杰, 王世杰, 刘秀明, 等. 茂兰喀斯特植被演替中土壤微生物量碳氮研究[J]. 地球与环境, 2011, 39(2): 188-195.
- [21] Luo W J, Wang S J. Transmission of $\delta^{13}\text{C}$ signals and its paleoclimatic implications in Liangfeng Cave System of Guizhou Province, SW China [J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 59(3): 655-661.

Hydro-geochemical Response of Shallow Groundwater on Vegetation Degradation in Karst Area: A Case Study in Laqiao Catchment of Libo in Guizhou, China

XIAO De-an^{1,2}, LUO wei-jun^{1,3}, WANG Shi-jie^{1,3}, CHEN sheng-hua⁴

- (1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China;
2. Environmental Monitoring Center of Guizhou Province, Guiyang 550081, China; 3. Puding Karst Ecosystem
Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, Guizhou, China; 4. Land and Resources
Bureau of Guiyang City, Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: It is very important that geochemical response of vegetation degradation is studied in karst area, which has an important scientific and practical significance. Four sample plots with different types of vegetation were selected as a study object in Laqiao catchment of Libo in Guizhou, China. Shallow groundwaters (soil water and epikarst spring) were sampled monthly at the four plots, respectively, and their main hydrogeochemical parameters were measured. Results show that Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , EC and pH value in the soil waters, and Cl^- , NO_3^- and SO_4^{2-} in the epikarst springs are sensitive to vegetation degradation. However, we should be cautious when using those parameters that maybe are affected by more complex processes, such as NO_3^- and SO_4^{2-} in the soil waters, Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- and EC etc. in the epikarst springs, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ value in the soil waters and epikarst springs. Thus, the cations and HCO_3^- that is affected mainly by soil CO_2 gas concentration in the soil layer may have a good potential to respond vegetation variation, and the anions except for HCO_3^- maybe are more sensitive in the epikarst springs.

Key words: Geochemical response; Soil water; Epikarst spring; Karst region; Vegetation degradation