

广西弄拉岩溶植被的表层水文地球化学效应

邓新辉^{1,2}, 蒋忠诚¹, 覃小群¹, 沈利娜¹

(1. 中国地质科学院桂林岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. 湖南工业大学, 湖南 株洲 412007)

摘要: 岩溶区植被是岩溶生态系统的重要组成部分, 具有旱生性、喜钙性、岩生性和对环境变化敏感的特点。为了更好的恢复植被, 加速岩溶生态系统的重建, 在广西弄拉岩溶动力系统监测站, 通过收集并分析大气降雨、土壤水和表层岩溶泉水的物理化学特征, 对典型表层岩溶泉——兰电堂泉集水区内的水源林的表层水文地球化学效应进行了研究。结果表明: 植被能降低大气降雨的 pH 值, 增加大气降雨中化学物质 (HCO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和游离 CO_2) 的总含量, 尤其是游离 CO_2 的增加能增强岩溶动力系统系统中的溶蚀动力, 有利于岩溶作用; 植被能改变土壤的理化性质, 减少土壤水的含量, 增加土壤的自然含水量, 影响土壤水的化学性质; 植被不仅通过淋溶等方式增强岩溶动力因子 (H_2O 和 CO_2) 来影响表层岩溶泉水的物理化学性质, 还通过自身的生理作用 (蒸腾和呼吸) 来影响表层岩溶泉水的物理化学性质。因此岩溶区植被不但具有与非岩溶区植被同样的功能, 还具有其特有的生态效应。今后岩溶植被的恢复和重建应该从提高当地居民生活质量、可持续发展和岩溶景观等角度来考虑。

关键词: 岩溶植被; 表层水文地球化学效应; 广西弄拉

中图分类号: Q143

文献标识码: A

岩溶生态环境作为一种特殊的物质、能量、结构和功能体系构成的多相多层次复杂界面体系, 具有一定的脆弱性, 表现为生态敏感度高、环境容量低、抗干扰能力弱、空间转移能力强等一系列脆弱性特征^[1]。植被是岩溶生态系统中重要且敏感的自然环境因素, 与非岩溶地区相比, 具有旱生性、喜钙性和岩生性, 并能反映岩溶生态系统的特点。同时, 岩溶植被还具有以下功能^[2-6]: 是岩溶作用的动力因素或产生动力条件的介质之一, 它在改变环境过程中具有重要作用, 湿热地区植被的生物岩溶作用能丰富表层岩溶带的形态, 甚至还能够改造表层岩溶带的结构和发育深度; 由于植被的存在, 森林环境比非森林环境具有更大的溶蚀潜力; 植被的存在和发展能促进岩溶区土壤的形成, 植被的演替能改变土壤的理化性质, 促进成土作用; 在表层岩溶生态系统的生物作用中, 植被能直接或间接增加参与岩溶作用的碳。

在非岩溶区, 国内外有关森林生态系统中大气降雨、穿透雨和树干径流、土壤水物理化学特征的研究很多^[7-13]。在西南岩溶区, 仅对原生性岩溶森林和水土保持的关系^[14]、大气降雨直接滴落到岩面水化学特征的变化^[15]作过研究, 对岩溶生态系统中大气降雨经过森林植被和土壤及表层岩溶带后雨水化学成分和物理化学性质的变化却鲜有报道。但这方面的研究不仅对于深化岩溶地区的生态水文过程研究具有理论意义, 而且对于深入认识生态环境对表层岩溶水的调蓄功能, 促进石漠化严重的西南岩溶区水源林恢复具有重要的现实意义。

本研究以广西马山弄拉兰电堂泉集水区的次生乔木林为例, 按照岩溶峰丛山区水的浅循环: 大气降雨→穿透雨和树干径流雨→土壤水→表层岩溶泉水的过程中各个层次水的物理化学特征, 分析岩溶峰丛山区植被的表层水文地球化学效应, 为岩溶区水资源的建设、生态恢复与重建提供理论基础和科学依据。

收稿日期 (Received date): 2007-11-12; 改回日期 (Accepted): 2008-02-14.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (40572151) 和广西自然科学基金项目 (桂科基 0575113) [Supported by the Nature Science Foundation of Nation (No. 40572151), the Nature Science Foundation of Guangxi (No. 0575113)]

作者简介 (Biography): 邓新辉 (1974-), 女, 硕士研究生, 主要从事环境生态学和植物学研究。 [Deng Xinhui, born in 1974, female, master studying in environmental ecology and botany.] E-mail: xhdeng2007@126.com

1 研究区概况

弄拉位于广西马山县东南部,是古零镇的一个自然屯,地理坐标为 $108^{\circ}19'E$, $23^{\circ}39'N$,属亚热带季风气候,多年平均气温 $19.84^{\circ}C$,平均降雨量 1700 mm ,4~10月降雨量占年降雨量的 82% ,年均相对湿度 83% ,地貌景观为峰丛洼地,地质背景为泥盆系东岗岭组中段(D_2d_2),岩性以含泥硅质的白云岩为主,弄拉天然林已于1958~1963年全部砍光,1964年开始对兰电堂表层岩溶泉水源地山峰封山育林,现已形成以常绿阔叶林为主的茂密次生林,植被覆盖率 95% ,发育于该区域的典型表层岩溶泉——兰电堂泉是一个常流泉。1984年开始对上弄拉封山育林,现已形成以灌草层为主,间有稀疏乔木的次生林,植被覆盖率 80% ,发育于该区域的表层岩溶泉——上弄拉泉是一个季节性泉。东旺距弄拉不到 2 km ,是古零镇的另一个自然屯,地理坐标为 $108^{\circ}19'E$, $23^{\circ}39'N$,岩性同样为白云岩^[16],1984年开始封山育林,植被覆盖类型为以灌丛为主的灌草层群落,植被覆盖率 65% ,其内发育的表层岩溶泉——东旺泉是一个季节性泉。

2 研究方法简介

2.1 雨水水样的收集

2006-05至2006-07,研究工作在弄拉兰电堂表层岩溶泉泉水域开展。实验样带为次生乔木林,共收集11场大气降雨、穿透雨、树干径流雨。具体收集方法为:在距兰电堂泉 100 m 的农户家四层楼屋顶用聚乙烯塑料盆收集大气降雨,于集水区林内随机布设聚乙烯塑料桶收集穿透雨,选择几棵树用剖开的聚乙烯塑料管蛇形缠绕于树干基部,再用塑料管引入小塑料桶内收集树干径流雨,同时于每场雨后在兰电堂泉采集相应的表层岩溶泉水样。采用常规采样方法,每种水样用 350 mL 娃哈哈纯净水瓶收集两瓶,采好的样品均临时保存在农户家的冰箱里,再送到中国地质科学院桂林岩溶所水质分析室进行分析。

2.2 土壤水的收集

2006-04-18于弄拉洼地底部、鸡蛋堡垭口、兰电堂山腰和东旺山腰的缓坡地段(表1)土下 20 cm 处,埋下根据岩溶区土壤特征而设计的收集土壤

水的装置——Lysimeter装置由吸水槽和集水瓶两大部分组成,用有机玻璃制成吸水槽,长 30 cm ,宽 10 cm ,高 8 cm ,槽内放满玻璃纤维,并使之充分与其上方的土壤剖面接触,用一橡胶管将吸水槽内的水引入 1000 mL 棕色大口瓶中,棕色大口瓶的盖子上钻有两个小孔,一孔插有橡胶管伸出地面用于抽取土壤水,另一孔插有橡胶管伸出地面与外界空气相通,使瓶内气压与外界气压相等。每月定期用注射器抽取瓶内的土壤水,并将抽取的土壤水注入 350 mL 娃哈哈纯净水瓶中。

2.3 土壤样品的采集

2006-07-05于弄拉洼地底部、鸡蛋堡垭口、兰电堂山腰和东旺山腰埋收集土壤水装置的附近位置采集土样。具体采集方法如下:去掉表土层,分别采集土层 $-5\sim-10\text{ cm}$ 和 $-10\sim-20\text{ cm}$ 的土壤装入事先称好重量的铝盒中,每种土样5个重复,当场用电子天平称重,记下湿土重量。

2.4 样品的分析

每种水样取1瓶送到国土资源部桂林岩溶地质研究所水质分析实验室,测定水中溶解的主要离子(HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-})。另一瓶用于水中溶解的有机碳(DOC)的测定,采用岛津公司产的TOC-VCPN仪,先测定水中的总碳(TC)和无机碳(DIC),再采用DOC(单位: 10^{-6}) = $TC - DIC$ 的方法计算水中DOC的含量。在采集水样的同时,用德国WTW公司生产的MultilineP3多参数仪,现场测定水样的pH值。利用CTDP300多参数自动记录传感仪对兰电堂表层岩溶泉的水位、水温、pH值、电导率和降雨量进行自动监测。2001-06-09泉水中 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 含量的测定是人工用德国生产的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 试剂盒当场采样测定。土壤样品送回实验室,置于 $105^{\circ}C$ 的电热恒温干燥箱中 8 h 电子天平称重,并记录第一次干土重,然后放回电热恒温干燥箱中 2 h 后,再次称重,前后两次的重量差不超过 3 mg 利用土壤自然含水量($\%$) = $\text{水重} / \text{湿土重} \times 100\%$ 的方法,计算不同土层的自然含水量。用Excel软件处理分析测定后的原始数据。

3 结果与分析

3.1 植被对雨水的水文地球化学效应

由于大气降雨各项指标受地带内局部因子的影响较大,变化无规律,故本文采用各项指标的平均值

来进行研究。 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是与岩溶作用紧密相关的离子,能体现岩溶作用的强度及表层岩溶泉水的物理化学特征; Cl^- 、 Na^+ 和 K^+ 所形成的盐都是能溶解于水的,并且它们在植物体内是大量和易于移动的元素,能很好的体现大气降雨与植被间的淋溶和吸附作用; SO_4^{2-} 可以作为当地降雨质量的一个指标,故选取以上这些离子作为水样分析的对象。从表2可以看出,三种阴离子中, Cl^- 经过植被层后含量减少了,可见植被对大气降雨中的 Cl^- 有吸附作用,20 cm深处土壤水中的 Cl^- 含量高于大气降雨,是由于雨水对植被枯枝落叶和浅层土壤的淋滤

作用而产生的,而在经过更深层的土壤和表层岩溶带后, Cl^- 含量又回到了与大气降雨相等的水平,说明深层土壤对 Cl^- 有吸附作用。弄拉的大气降雨中不含 SO_4^{2-} ,20 cm深处土壤水中 SO_4^{2-} 含量较高,表层岩溶泉水中 SO_4^{2-} 含量又下降了,因此深层土壤对 SO_4^{2-} 有吸附作用。 HCO_3^- 无论是经过植被层、土壤层还是表层岩溶带都有所增加,经过植被层和土壤层的增加是由于植被和土壤的呼吸及枯枝落叶的分解释放出 CO_2 而引起的,经过表层岩溶带后的进一步增加是由于表层带的岩溶作用而引起的。

表 1 不同植被影响土壤水分含量效应对比
Table 1 Responses' comparison of soil water content under different vegetation

项 目 Item	弄拉山腰 H illside of Nongla	弄拉洼地底部 Bottom of Nongla depression	弄拉垭口 Saddle of Nongla	东旺山腰 H illside of Dongwang
土壤水总量 (ml) Total of soil water	64	2642	796	3987
土壤自然含水量 (%) - 5~ - 10 cm Natural water content of soil - 10~ - 20 cm	29. 57	27. 53	29. 3	27. 27
	29. 4	28. 97	28. 7	25. 77

注:土壤水总量为 2006- 05~ 08 所收集到的土壤水量 n= 4 土壤样品 n= 5

表 2 各类水样中的离子变化
Table2 Ions change of waters

项 目 (Item s)	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
大气降雨 (Rain fall)							
均值 (Average)	6. 80	0. 00	10. 16	0. 15	0. 52	3. 36	0. 61
标准差 (Standard variance)	2. 99	0. 00	4. 44	0. 19	0. 72	2. 14	0. 54
穿透雨 (Throughfall)							
均值 (Average)	6. 48	0. 00	8. 76	0. 75	0. 19	2. 81	0. 70
标准差 (Standard variance)	2. 97	0. 00	3. 93	0. 90	0. 30	1. 25	0. 61
穿透雨净淋溶 (Net leaching of throughfall)	- 0. 32	/	- 1. 40	0. 60	- 0. 33	0. 55	0. 09
穿透雨淋溶系数 (Leaching coefficient of throughfall)	0. 95	/	0. 86	4. 95	0. 36	0. 84	1. 15
树干径流 (Stem flow)							
均值 (Average)	5. 53	0. 00	15. 43	2. 66	0. 08	3. 84	1. 19
标准差 (Standard variance)	1. 82	0. 00	6. 38	1. 48	0. 14	1. 17	0. 58
树干径流净淋溶 (Net leaching of stem flow)	- 1. 27	/	5. 27	2. 51	- 0. 44	0. 48	0. 58
树干径流淋溶系数 (Leaching coefficient of stem flow)	0. 81	/	1. 52	17. 53	0. 16	1. 14	1. 96

续表 2

项 目 (Items)		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
土壤水 (Soil water)	均值 (Average)	9. 94	13. 30	139. 52	0. 87	13. 09	29. 18	8. 64
	标准差 (Standard variance)	7. 44	0. 49	4. 17	0. 96	15. 99	0. 12	5. 25
	土壤水净淋滤 (Net leaching of soil water)	3. 14	13. 30	129. 36	0. 72	12. 57	25. 82	8. 03
	土壤水淋滤系数 (Leaching coefficient of soil water)	1. 46	/	13. 73	5. 80	25. 17	8. 68	14. 16
	均值 (Average)	6. 80	8. 59	371. 48	0. 00	0. 64	75. 89	30. 99
	标准差 (Standard variance)	1. 26	4. 01	26. 90	0. 02	0. 09	6. 97	4. 76
表层岩溶泉水 (Spring water)	泉水迁移量 (Net moving of spring water)	0. 00	8. 59	361. 32	- 0. 15	0. 12	72. 53	30. 38
	泉水迁移系数 (Moving coefficient of spring water)	1. 00	/	36. 58	0. 00	1. 24	22. 57	51. 19

注: 由于土壤水受降雨等因素的限制,其均值 n= 4 其余各类水样 n= 11。净淋溶为各水样与大气降雨离子浓度的差值,淋溶系数为各水样中的离子浓度除以大气降雨的离子浓度,均值和标准差单位为 mg/L。

4种阳离子中, K⁺ 和 Na⁺ 是两种易溶于水且易移动的离子, 植被层对它们的影响程度不一样, 对 K⁺ 来说, 植被表现为淋溶作用, 而对 Na⁺ 来说, 植被表现为吸附作用, 土壤层对 K⁺ 始终表现为吸附作用, 而浅层土壤对 Na⁺ 具有淋溶作用, 深层土壤对 Na⁺ 有吸附作用, 表层岩溶泉水中未检测到 K⁺, 原因可能是雨水对泉水的稀释作用而导致泉水中 K⁺ 浓度太低的缘故。Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 在经过植被、土壤和表层岩溶带后含量均增加, 虽然 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 相对 K⁺ 和 Na⁺ 来说是两种不易溶解且不易移动的离子, 但是雨水还是能将它们从植被层淋溶洗脱进入土壤, 经过富钙偏碱的石灰土层时进一步增加了雨水中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的含量, 表层岩溶泉水中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的剧增是由于表层岩溶带强烈的岩溶作用引起的。

经过植被层后, HCO₃⁻、K⁺、Na⁺、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的含量都增加, Cl⁻ 和 Na⁺ 的含量减少; 经过 20 cm 深土壤层后的土壤水中各种离子的含量相对各类雨水都增加了, 与表层岩溶泉水相比, Cl⁻、SO₄²⁻、K⁺、Na⁺ 的含量较高, HCO₃⁻、Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 由于表层岩溶带的岩溶作用而泉水中的含量高, 说明土壤层能汇集各类雨水中及枯枝落叶分解产生的各种营养元素, 供给岩溶生态系统中植被的生长发育。

大气降雨经过植被层后, pH 值下降了 (图 1), 显示植被酸化大气降雨的功能, 土壤水和表层岩溶

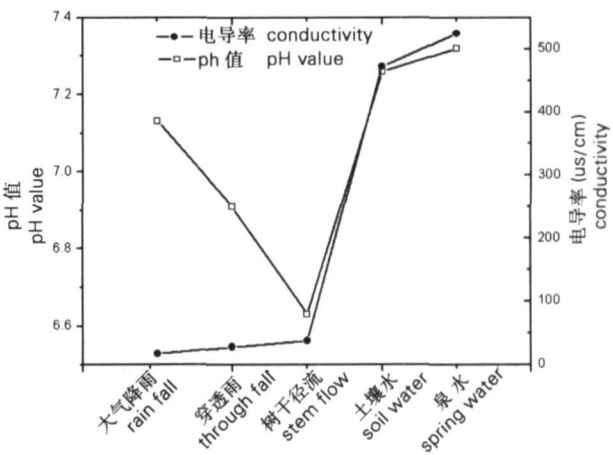


图 1 各类水样 pH 值与电导率
Fig 1 pH value and ductivity of sampled water

泉水的 pH 值明显高于各类雨水, 并且偏碱性, 这与石灰土富钙偏碱的地质背景和表层岩溶带的岩溶作用分不开的。电导率随着雨水经过植被、土壤和表层岩溶带的顺序而呈增加趋势, 雨水对植被的淋溶和土壤的淋滤, 使各类雨水和土壤水的电导率升高, 再由于表层岩溶带的岩溶作用, 表层岩溶泉水的电导率进一步增加。从各类水样中所含的游离 CO₂ 来看 (图 2), 大气降雨在经过植被和土壤层后, 雨水中溶解的游离 CO₂ 含量增加了, 原因是雨水经过植被和土壤层时, 植被和土壤的呼吸以及植被枯枝落叶层的分解释放出 CO₂ 溶解所致, 雨水和土壤水中

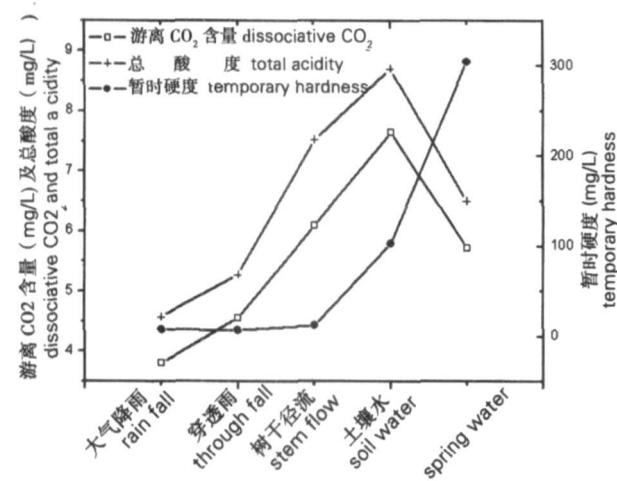


图 2 各类水样游离 CO₂ 含量、总酸度及暂时硬度
(总酸度和暂时硬度的单位以 CaCO₃ 计算)

Fig. 2 Dissociative CO₂, total acidity and temporary hardness
of different water

游离 CO₂ 含量的增加有利于表层岩溶带岩溶作用的正向进行,也正因为表层岩溶带的岩溶作用,表层岩溶泉水中游离 CO₂ 的含量下降了。从图 2 还可看出,各类水样中总酸度的变化与游离 CO₂ 的含量呈正相关,说明各类水样酸度的变化主要是由游离 CO₂ 溶解于水导致水中 H⁺ 含量增加引起的,暂时硬度的变化稍有区别,穿透雨中 HCO₃⁻ 含量的降低(见表 2)导致其暂时硬度较大气降雨要低,树干径流、土壤水和表层岩溶泉水的暂时硬度呈增加的趋势。

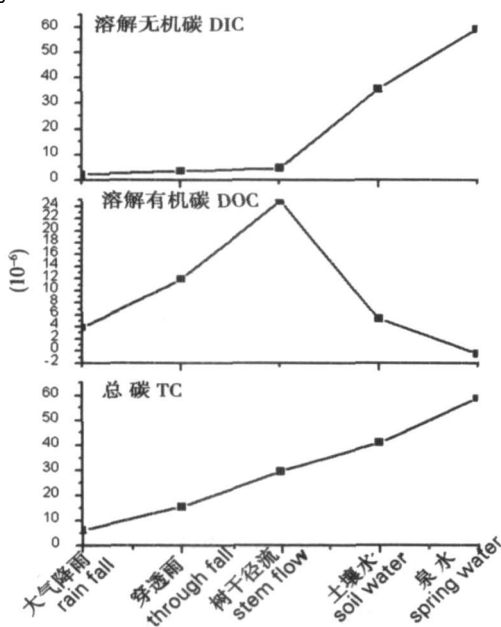


图 3 各类水样碳含量比较

Fig. 3 Comparison of carbon contents in water

从图 3 还可以看出,由于各类水样中游离 CO₂ (无机碳)含量的增加,导致水样中总碳的含量增加了,有机碳的变化与无机碳的变化不一致,穿透雨和树干径流中 DOC 的含量都高于大气降雨,此研究结果与郭剑芬^[17]等人的一致,根据 Ciglasch 等人的研究^[18],穿透雨中 DOC 浓度的增加是由于大气降雨对雨水中沉降于树冠层的可溶性有机物质及树冠层来源于动物或微生物的有机物质的淋溶而引起的,树干径流中 DOC 含量的进一步增加是雨水对树干的进一步淋溶所引起的^[17],土壤水和泉水中有机碳的含量较各类雨水下降了,是因为土壤层对各类有机物质的吸附。

3.2 植被对土壤水的水文地球化学效应

大气降雨在经过不同的植被层后被不同的植被重新分配,影响到其到达地面及土壤的水分含量^[19-21]。从表 3 可以看出,在相同的降雨量、坡向等外界条件下,东旺的土壤水总量比弄拉任何一个地貌部位的都高,而土壤自然含水量却较低。究其原因,一是土壤本身的物理化学性质影响的,据龙健等人的研究^[22],在石漠化过程中,伴随着土壤的粗粒化,必然引起土体的分散和结构的破坏,造成土壤物理性质的变化,土壤的容重随着石漠化程度的增加而增大,孔隙度和持水量降低;二是不同的植被类型影响的^[19, 23, 24],弄拉的植被是以常绿阔叶林为主的次生乔木林,其下还有灌木林和草本层,土壤持水能力较强,东旺的植被是以灌木为主的灌草层,土壤持水能力较弱。本研究的结果与北京九龙山的结果不一致^[25],可能是由于九龙山乔木林的是单一乔木树种的缘故。

不同的植被-土壤对大气降雨的水化学总效应基本相同^[26],弄拉和东旺两地对大气降雨的总效应与此研究结果一致,即总的化学物质质量增加了。相对大气降雨来说,两个不同的植被-土壤系统对大气降雨的水化学影响不一样,弄拉土壤水中 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 HCO₃⁻ 的含量比东旺土壤水低,Cl⁻、SO₄²⁻、K⁺、Na⁺、DOC 和游离 CO₂ 的含量比东旺要高,原因在于土壤水化学是大气沉降、蒸腾、生物对营养成分的吸收、有机质的降解、离子交换和矿质风化等许多因素相互作用的结果^[27],弄拉植被覆盖率高,树种复杂,土壤层厚,土壤风化程度高,形成土壤水之前的大气降雨要经过植被、枯枝落叶和纯土壤层,而东旺由于植被覆盖率较低,树种复杂程度较弄拉低,岩石裸露率高,土壤层薄,土壤风化程度低,形

成土壤水之前的大气降雨经过了植被、枯枝落叶、裸露岩石和风化程度低的土壤, 并且东旺埋放土壤水装置深处已经到达母岩层, 故大气降雨的物理化学特征除了受植被、枯枝落叶和土壤的影响外, 还受到

了岩石的影响, 因此东旺土壤水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 TC 和 DIC 的含量高于弄拉, 随着离子含量的不同, 土壤水的暂时硬度也高于弄拉。

表 3 不同植被对土壤水化学效应对比
Table 3 Comparison of soil water chemical effects under different vegetation

项目 (Items)	pH 值 (pH value)	游离 CO_2 (Dissociative CO_2)								暂时硬度 (Temporary hardness)				
		Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	TC	DOC	DIC			
大气降雨 (Rainfall)	均值 (Average)	7.13	6.80	0.09	10.16	0.15	0.52	0.61	1.73	3.81	6.04	3.92	2.11	7.81
	标准差 (Standard variance)	0.51	2.99	0.29	4.44	0.19	0.72	2.14	0.54	1.35	9.07	8.29	1.36	3.72
东旺土壤水 (Soilwater of Dongwang)	均值 (Average)	7.13	5.26	10.31	290.31	0.75	2.69	65.5	21.28	5.95	50.74	2.48	48.3	238.09
	标准差 (Standard variance)	0.19	4.13	4.72	41.40	0.80	1.09	7.39	4.07	1.20	19.55	3.81	15.74	1.25
弄拉土壤水 (Soilwater of Nongla)	均值 (Average)	7.26	9.94	13.3	139.52	0.87	13.1	29.18	8.64	7.65	40.94	5.34	35.61	102.69
	标准差 (Standard variance)	0.05	7.44	0.49	4.17	0.96	15.99	0.12	5.25	3.61	17.53	15.49	10.53	13.17

注: 土壤水样品 $n=4$, 大气降雨 $n=4$ 均值单位为 mg/L 。

3.3 植被对表层岩溶泉水的水文地球化学效应

表层岩溶带位于大气圈、水圈、岩石圈、生物圈 4 个圈层的交汇处, 对环境变化较为敏感。表层岩溶带上覆盖的植被能增强表层岩溶带的调蓄功能^[28], 同时影响表层岩溶泉水的地球化学行为^[29]。兰电堂、上弄拉和东旺三个不同泉水域的植被覆盖率顺序依次为: 兰电堂 > 上弄拉 > 东旺, 从图 4 和图 5 可以看出, 发育于三个不同植被覆盖率下的表层岩溶泉水 2001-06-09 的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的含量顺序是: 兰电堂 > 上弄拉 > 东旺, 此研究结果与梁小平等人的研究结果一致: 植被的覆盖程度与表层岩溶泉水化学含量呈正相关^[16]。原因在于植被环境下岩溶作用时间长且强度大^[30]。对兰电堂和东旺两个表层岩溶泉的 TC 、 DOC 和 DIC 的含量进行了测定, 其结果如图 6 所示, 兰电堂泉水的 TC 和 DIC 含量均高于东旺泉水, 进一步证实了植被覆盖较好条件下岩溶作用强。

不仅植被的覆盖率影响表层岩溶泉水的化学特性, 植被的生理作用同样也影响表层岩溶泉水的地球化学行为^[31-33]。根据图 7 所示, 2006-04-01、02 和 04-3 d 泉水 pH 值的变化, 在昼夜交替变

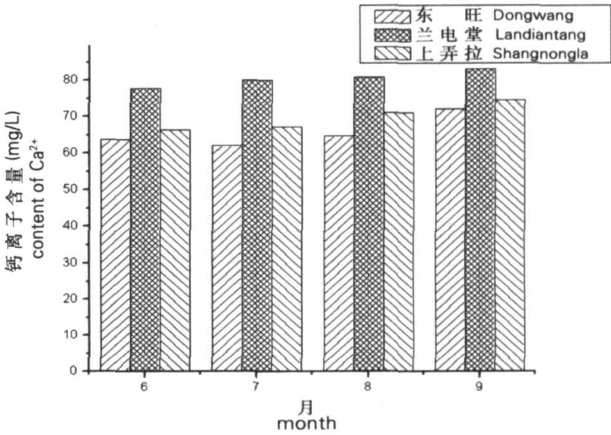


图 4 不同植被覆盖下表层岩溶泉水 Ca^{2+} 含量对比
(据 2001 年数据)

Fig 4 Comparison of Ca^{2+} in epikarst spring under different vegetations

化的过程中, pH 值的高峰期一般出现在 T 6 00~10 00 低峰期出现在 T 16 00~18 00。根据刘再华的研究^[34], 泉水中 CO_2 主要受大气 CO_2 和土壤 CO_2 两者的影响, 而在兰电堂、东旺和上弄拉三个泉水域大气 CO_2 主要受植物光合作用和呼吸作用的影响,

4 结论与展望

岩溶区植被的表层水文地球化学效应表现为: 第一, 改变大气降雨的化学特征, 增加大气降雨中化学物质的总含量, 尤其是游离 CO_2 含量的增加, 实际上增加了岩溶动力系统中的动力因子, 有利于岩溶作用的正向进行; 第二, 改变土壤的理化性质, 增加土壤的持水能力, 影响土壤水的化学性质; 第三, 延长岩溶作用时间, 增强岩溶动力因子, 影响表层岩溶泉水的化学性质。因此, 岩溶区植被除了具有与非岩溶区植被一样的功能之外, 还具有增强岩溶动力, 促进岩溶作用和岩石风化, 土壤形成以及增强表层岩溶带的调蓄功能等特有功能。

今后岩溶植被的恢复, 在提高植被覆盖率, 促进成土作用, 减缓岩溶干旱, 提高当地居民的经济收入等基础的同时, 还应考虑如下几点: 从提高岩溶区居民的生活质量出发, 提高居民饮水质量, 降低水的硬度; 从可持续发展的目标出发, 恢复后的植被应该具有长久保持水土的能力, 即蒸腾作用小, 散失水分的能力较弱, 水分利用效率高; 从景观生态学的角度出发, 将植被的恢复与当地的岩溶景观相结合, 营造出岩溶区特有的岩溶-植被景观, 为西南岩溶区成为世界岩溶的典范奠定基础。

参考文献 (References)

- [1] Zeng Xiao-Yan, Xu Shun-Guo, Mu Rui-Fang. Research of karst ecological fragility [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2006, 17(1): 5~8 [曾晓燕, 许顺国, 牟瑞芳. 岩溶生态脆弱性研究 [J]. 地质灾害与环境保护, 2006, 17(1): 5~8]
- [2] Li En-Xiang, Jiang Zhong-Cheng, Cao Jian-Hua, et al. The comparison of properties of Karst soil and Karst erosion ratio under different successional stages of Karst vegetation in NongLa GuangXi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(6): 1131~1139 [李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 等. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究 [J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1131~1139]
- [3] He Shi-Yi, Pan Gen-Xing, Cao Jian-Hua, et al. Research on characters of carbon cycle in epikarst ecological system [J]. *Quaternary Science*, 2000, 20(4): 383~389 [何师意, 潘根兴, 曹建华. 表层岩溶生态系统碳循环研究 [J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 383~389]
- [4] Cao Jian-Hua, Yuan Dao-Xian, Pan Gen-Xing, et al. Preliminary study on biological action in Karst dynamic system [J]. *Earth Science Frontiers*, 2001, 8(1): 203~209 [曹建华, 袁道先, 潘根兴, 等. 岩溶动力系统生物作用研究初探 [J]. 地学前缘, 2001, 8(1): 203~209]
- [5] Jiang Zhong-Cheng. Dynamics features of the epikarst zone and their significance in environment and resources [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999, 20(3): 302~308 [蒋忠诚. 表层岩溶带的岩溶动力学特征及其环境与资源意义 [J]. 地球学报, 1999, 20(3): 302~308]
- [6] Jiang Zhong-Cheng. Features of epikarst zone in South China and formation mechanism [J]. *Tropical Geography*, 1998, 18(4): 322~325 [蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带动力学特征及其机理 [J]. 热带地理, 1998, 18(4): 322~325]
- [7] Tian Da-Lun, Xiang Wen-Hua, Yang Wan-Hua. Nutrient characteristics of hydrological process in young second-rotation Chinese Fir Plantations [J]. *Acta Ecology Sinica*, 2002, 22(6): 859~865 [田大伦, 向文华, 杨晚华. 中国第二代杉木林水文过程中的营养特征 [J]. 生态学报, 2002, 22(6): 859~865]
- [8] Chen Shu-Jun, Tian Da-Lun, Kang Wen-Xing, et al. Chemical properties of the precipitation in the artificial forest of *Cinnamomum camphora* (L.) Presl [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2004, 24(4): 6~10 [陈书军, 田大伦, 康文星, 等. 人工樟树林的降雨化学特征研究 [J]. 中南林业学院学报, 2004, 24(4): 6~10]
- [9] Zhou Guo-Yi, Luo Yan, Ou Yang Xue-Jun, et al. Analysis on the concentration of some sediment elements in their transport process through monsoon evergreen broad-leaved forest ecosystem in Dinghushan, Guangdong Province, China [J]. *Acta Ecology Sinica*, 2003, 23(7): 1408~1413 [周国逸, 罗艳, 欧阳学军, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林几种沉积元素的迁移研究 [J]. 生态学报, 2003, 23(7): 1408~1413]
- [10] Pan Hao-Bao, Ma Zhuang, Liang Yi-Chi. Chemical properties of open and intercepted precipitation in Chinese Fir Plantation in Nanping, China [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1996, 16(2): 101~104 [樊后保, 马壮, 梁一池. 福建南平杉木人工林截留降水化学性质的变化 [J]. 福建林学院学报, 1996, 16(2): 101~104]
- [11] Chen Yong-Rui. Research of rainfall effects on leaching of nutrient elements in the artificial splash pine forest at Qianyanzhou experimental station [J]. *Resources Science*, 2000, 22(1): 65~68 [陈永瑞. 千烟洲试区湿地松人工林中降雨对矿质元素淋溶的影响 [J]. 资源科学, 2000, 22(1): 65~68]
- [12] Roberto G., Carlos O., Victor G. Precipitation chemistry in deciduous and evergreen *Nothofagus* forests of southern Chile under a low-deposition climate [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2001, 2: 65~72
- [13] Neldi D., Noemi C. Nutrient fluxes in incident rainfall through fall and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234: 218~226
- [14] Ran Jing-Chen, He Shi-Yi, Cao Jian-Hua, et al. Study on hydrological benefit of Karst forest in Maolan [J]. *Journal of Water and Soil Conservation*, 2002, 16(5): 92~95 [冉景丞, 何师意, 曹建华. 亚热带喀斯特森林水土保持效益研究——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]
- [15] Jiang Zhong-Cheng. Typical study on Karst processes and element migration in ecological environment in Fengcong Stone Mountain

- [D]. Beijing: CAGS, 1997: 20~21 [蒋忠诚. 峰丛石山的岩溶作用及生态环境元素迁移典型研究 [D]. 北京: 中国地质科学院, 1997: 20~21]
- [16] Zhang Cheng, Cao Jian-Hua. Seasonal and diurnal variation of physico-chemistry of typical epikarst springs under different vegetation [J]. *Carsologica Sinica*, 2003, 22(1): 1~5 [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 [J]. 中国岩溶, 2003, 22(1): 1~5]
- [17] Guo Jian-Fen, Yang Yu-Sheng, Chen Guang-Shui, et al. Dissolved organic carbon and nitrogen in precipitation through fall and stem flow from Schima superba and Cunninghamia lanceolata plantations in subtropical China [J]. *Journal of Forestry Research*, 2005, 16(1): 19~22
- [18] Ciglasch H., Lilienfein J., Kaiser K., et al. Dissolved organic matter under native Cenado and Pinus caribaea plantation in the Brazilian savanna [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 67: 157~182
- [19] Zhou Ze-Fu, Li Chang-Zhe. Study on soil moisture characteristics of different forest vegetations in Jialongshan, Beijing [J]. *Forest Research*, 1994, 7(1): 48~53 [周泽福, 李昌哲. 北京九龙山不同植被条件下土壤水分研究 [J]. 林业科学研究, 1994, 7(1): 48~53]
- [20] Yin Guang-Cai, Zhou Guo-Yi, Tang Xu-Li, et al. Soil water storage of three forest types in different succession stage in Dinghushan [J]. *Journal of Jishou University (Nature Science Edition)*, 2003, 24(3): 62~68 [尹光彩, 周国逸, 唐旭利, 等. 鼎湖山不同演替阶段的森林土壤水分动态 [J]. 吉首大学学报, 2003, 24(3): 62~68]
- [21] G. Josi, G. B. M. Heuvelink, A. Papritz. Analysing the space-time distribution of soil water storage of a forest ecosystem using spatiotemporal kriging [J]. *Geoderma*, 2005, 128: 258~273
- [22] Long Jian, Li Juan, Wang Jing-Ren, et al. Effects on soil quality properties in process of Karst Rocky Desertification [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 77~81 [龙健, 李娟, 汪境仁, 等. 喀斯特石漠化过程对土壤特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 77~81]
- [23] Liu Fang, Wang Shi-Jie. Vegetation succession with Karst rocky desertification and its impact on water chemistry of runoff [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 26~32 [刘方, 王世杰. 石漠化过程中的植被演替及其对地表径流水化学的影响 [J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 26~32]
- [24] Zhang Qing-Fei, You Wen-Hui, Song Yong-Chang, et al. Influence of plant community succession on soil physical properties in Tianlong Forest Park, Zhejiang Province [J]. *Journal of Plant Resources and Environment*, 1997, 6(2): 36~40 [张庆费, 由文辉, 宋永昌, 等. 浙江天童森林公园植物群落演替对土壤物理性质的影响 [J]. 植物资源与环境, 1997, 6(2): 36~40]
- [25] Zhou Ze-Fu, Li Chang-Zhe. Studies on soil water under different vegetations of Jialongshan in Beijing [J]. *Forestry Science Research*, 1994, 7(1): 48~53 [周泽福, 李昌哲. 北京九龙山不同植被条件下土壤水分研究 [J]. 林业科学研究, 1994, 7(1): 48~53]
- [26] Liu Hong-Yan, Huang Jian-Guo, Guo Yan-Na. Impacts of different vegetation types and soil properties on runoff chemical characteristics [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 655~660 [刘鸿雁, 黄建国, 郭艳娜. 不同的植被类型和土壤特征对地表径流水化学的影响 [J]. 环境科学, 2006, 27(4): 655~660]
- [27] Adams F. Soil solution [A]. In: E. W. Carson. The Plant Root and Its Environment [C]. University Press of Virginia, Charlottesville, VA 1974.
- [28] Geology Investigation in China. Researches on Karst Underground Water and Rock Lization [M]. Nanning: Guangxi Science Technology Press, 2003: 180~183 [中国地质调查局. 中国岩溶地下水与石漠化研究 [M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2003: 180~183]
- [29] Jiang Zhong-Cheng. Element migration of Karst Dynamic System [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(5): 438~443 [蒋忠诚. 岩溶动力系统的元素迁移 [J]. 地理学报, 1999, 54(5): 438~443]
- [30] Liang Xiao-Ping, Zhu Zhi-Wen, Liang Bin, et al. Preliminary analysis on hydrogeochemical characteristics of the epikarst zone in Luotahutan [J]. *Carsologia Sinica*, 2003, 22(2): 103~108 [梁小平, 朱志伟, 梁彬, 等. 湖南洛塔表层岩溶带水文地球化学特征初步分析 [J]. 中国岩溶, 2003, 22(2): 103~108]
- [31] Zhang Cheng, Yuan Dao-Xian, Cao Jian-Hua, et al. An analysis of short-term scale variation of the typical epikarst spring [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2004, 25(4): 467~471 [章程, 袁道先, 曹建华, 等. 典型表层岩溶泉短时间尺度动态变化规律研究 [J]. 地球学报, 2004, 25(4): 467~471]
- [32] Yao Chang-Hong, Jiang Zhong-Cheng, Yuan Dao-Xian, et al. Vegetation karst effects on the karst area of Southwest China. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(2): 160~164 [姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先, 等. 西南岩溶植被的喀斯特效应 [J]. 地球学报, 2001, 22(2): 160~164]
- [33] Li Lin-Li, Kuang Ming-Sheng, Zhang Yuan-Zhu, et al. Study on diurnal change of physico-chemistry of karst spring of epikarst ecosystem [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(2): 222~225 [李林立, 况明生, 张远瞩, 等. 典型表层岩溶泉短时间尺度动态变化规律研究 [J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 222~225]
- [34] Lin Zai-Hua. Study on the Karst hydrogeochemistry of the Guilin Karst Hydrogeological experiment site [J]. *Carsologia Sinica*, 1992, 11(3): 209~217 [刘再华. 桂林岩溶试验场的岩溶水地球化学研究 [J]. 中国岩溶, 1992, 11(3): 209~217]
- [35] Jiang Zhong-Cheng. Carbon cycle and ecological response in epikarst system in South China [J]. *Tropical Geography*, 2000, 20(4): 316~321 [蒋忠诚. 中国南方表层岩溶带的碳循环及其生态响应 [J]. 热带地理, 2000, 20(4): 316~321]

Epi-hydrogeochemical Effects of Karst Vegetation in Nongla Guangxi

DENG X inhu^{1, 2}, JIANG Zhongcheng¹, Q IN X iaoqun¹, SHEN L ina¹

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. Hunan Industry University, Zhuzhou 412000 Hunan, China)

Abstract Vegetation is one of the important components of karst ecosystem. It is xerophile, petrophile, calciphile and sensitive to environmental change. The goal of this study is to restore karst vegetation better and to accelerate rebuilding karst ecosystem. In the karst dynamic system monitoring site of Guangxi Nongla by collecting and analyzing water samples chemical characters, for example, the chemical characters of rainfall, soil water and epikarst spring. The paper studied the epi-hydrogeochemical effects of karst vegetation in Guangxi Nongla. The conclusions are as follows: Vegetation can acidify rainfall and increase chemical substances (HCO_3^- , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and dissociative CO_2), especially the increasing of dissociative CO_2 can increase karst dynamics in karst dynamic system; Vegetation can strengthen soil's capability of preserving water, decrease soil water, increase soil's natural water content, influence chemical characters of soil water; Vegetation can increase karst dynamic factors not only by leaching but also through its photosynthesis and transpiration, which influences physicochemical characters of epikarst spring. So karst vegetation has its distinctive ecological functions from non-karst vegetation. It is strongly recommended that restoration and rebuilding of karst vegetation should be undertaken in consideration of improving people's living level, sustainable developing and karst landscape.

Key words karst vegetation; epi-hydrogeochemical; Nongla Guangxi

封面图片说明: 红原草地

图片为位于红原县城北面的四川省草原科学研究院红原高寒草地试验区 ($31^\circ 51' \sim 33^\circ 19' \text{N}$, $101^\circ 51' \sim 103^\circ 23' \text{E}$), 地形以白河一级阶地与高原面浅丘状山地构成主要地貌景观, 主要植被类型为高寒草甸和以高山绣线菊 (*Spiraea alpine*) 为建群种的高寒灌丛草甸。整个红原地区地处“世界屋脊”青藏高原东部边缘, 位于四川省西北部、阿坝藏族羌族自治州中部, 南距成都 450 km, 北距兰州 640 km。境域分属长江、黄河两大水系。高原面由浅丘山地和丘间低地构成其主要地貌类型, 平均海拔在 3 600 m 以上, 年平均气温 1.1°C , 极端最低气温零下 36.2°C , 年降雨量为 791.95 mm。图为夏季的景象。

(张 伟)