

典型岩溶区不同土地利用方式下雨季、旱季岩溶作用研究

王冬银^{1,2}, 谢世友^{1,4*}, 章程^{1,3}

1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 国家土地督察成都局, 四川 成都 610091;
3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;
4. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715

摘要: 2006年4月—2007年4月, 通过野外溶蚀标准试片法, 测试得出重庆金佛山岩溶区山腰碧潭泉和山顶水房泉两泉域5种典型土地利用方式下的6个测试点雨季和旱季溶蚀量。测试结果表明: 雨季溶蚀量明显高于旱季, 位于生态保护良好的山顶原始生态区测试点溶蚀率高于保护区、非保护区交界地带且受人类活动影响较大的山腰测试点; 同一时段内不同土地利用方式下的测试点溶蚀速率也存在较大差异; 6个测试点的年均溶蚀量由大到小依次为: 水房泉竹林地>水房泉林地>水房泉草地>碧潭泉林地>碧潭泉灌草丛>碧潭泉耕地。从测试点的土壤基本理化性质分析得出, 在研究区域内局地气候(降雨量、温度)影响的基础上, 除了土壤CO₂浓度, 土壤有机质也是控制两泉域岩溶速率的主要因素之一。

关键词: 岩溶; 土地利用; 溶蚀量; 重庆金佛山

中图分类号: X14

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906(2009)06-2366-07

岩溶地区是一种以可溶性岩为主、富钙的岩石体构成的特殊环境。岩溶环境系统由可溶岩及其风化残余的土壤、岩溶形态、岩溶地区的地表和地下水空气层、岩溶水、岩溶生物群落五个基本系统组成^[1], 其中土壤在岩溶作用与岩溶生态系统中扮演着极其重要的角色^[2-7], 土壤有机质和土壤微生物对碳酸盐岩溶蚀具有明显的促进作用^[8-9]。前人研究岩溶作用主要从宏观角度进行对比, 如不同地质背景、气候与水文条件下岩溶作用强度及其差异^[10-11]; 或总结特定岩溶区内CO₂浓度的时空变化规律及其对岩溶作用的驱动^[12-15]; 或从碳循环角度研究岩溶作用对大气CO₂汇的贡献^[16-19]; 从不同土地利用方式产生土壤理化性质差异角度分析岩溶作用的研究很少。岩溶环境被视为与沙漠边缘一样的脆弱生态环境^[20], 岩溶过程和岩溶作用可以用岩溶溶蚀速率来定量表示, 本文从亚高山不同土地利用方式下产生土壤理化性质差异的角度结合土壤CO₂的驱动作用, 探索测试点雨、旱季溶蚀速率差异, 此文研究对基于岩溶动力系统对环境变化的敏感性^[21-22]及岩溶区土壤及内部生态系统的脆弱性^[23]认识基础上的西南岩溶区石漠化治理研究和生态恢复工作有较为重要的意义。

1 研究区概况与试验方法

1.1 研究区概况

金佛山自然保护区(N 28°50'~29°20', E 107°~107°20')位于四川盆地南缘川黔交界地带、重庆市

东南边缘的南川区南部(图1), 为大娄山脉东段的一部分, 最高峰风吹岭海拔2251 m, 保护区面积441 km², 亚热带湿润季风气候, 相对高差达1300~1500 m^[24]。碧潭泉位于金佛山西坡海拔约800 m处, 泉域附近年平均气温为16.6 °C, 年平均降雨量1286.5 mm, 大气降水为泉域的主要补给源, 雨季主要集中在每年的5~10月份; 泉域内植被发育, 主要为常绿阔叶乔木林及次灌丛。水房泉位于金佛山山顶海拔约2010 m处, 泉域附近年平均气温为8.2 °C, 年平均降水量1434.5 mm, 降水在12月至次年的3月以降雪的形式出现, 大气降水(雪)为泉域的主要补给源; 泉域内植被发育, 主要为成片的竹林及稀疏的灌丛和乔木。根据土壤剖面的理化性质试验结果, 两泉区测试点岩溶土壤平均有机碳含量高达49.9916 g·kg⁻¹, 测试点中有机碳最高相对含量达18.0%且绝大多数土壤测试剖面超过3%、平均相对

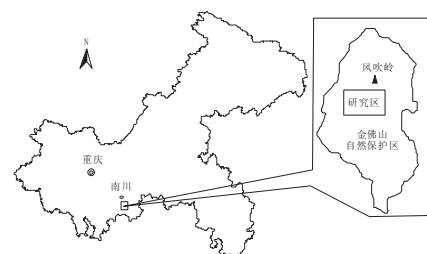


图1 研究区地理位置图

Fig.1 Location map of the study area

基金项目: 中国科技部攻关项目(2006BAC01A16)

作者简介: 王冬银(1981年生), 女, 博士研究生, 主要从事岩溶环境和土地利用等方面的研究。E-mail: dongdongwang520@sina.com.cn

*通讯作者

收稿日期: 2009-09-14

含量超过5.0%。据潘根兴^[25]对桂林实验场¹³C特征研究表明：土壤有机碳为土壤CO₂的主要来源，土壤CO₂又为岩溶泉HCO₃⁻不容忽视的重要来源，金佛山两泉域土壤剖面有高碳的特性，其岩溶作用的碳源充足。

1.2 试验方法

本文试验中采用由袁道先院士在20世纪80年代末引进国内的标准溶蚀试片法，该试验方法在IGCP299项目(1990—1994)中得到广泛引用，主要目的是对比不同地质、气候和水文条件下岩溶作用的强度及其差异。实验中统一采用广西桂林七星岩产的上泥盆统融县组灰岩做成标准溶蚀试片(试片为圆形，直径4 cm，厚0.3 cm)获得初始重量后，放置在野外试点坑内，试点坑的建立采用国际上通用的方法，即挖掘0.5 m深的试点，每个试点不同深度(土面0~5 cm、土下20 cm、土下50 cm)分别水平埋放两组试片(图2)，经过一定时间后，从野外取回样片称重，通过以下公式计算可以计算得出其测试时间内试片单位面积溶蚀量或绝对溶蚀量(袁道先，1998)。计算公式如下：

$$ER = (W_1 - W_2) \times 10^7 / T/S \quad (1)$$

式中：ER 为单位面积溶蚀量(mg·m⁻²·d⁻¹)；W₁ 为试片初重(g)；W₂ 为试片取回后烘干重量(g)；(W₁-W₂)为埋放时间内试片绝对溶蚀量(mg)；T为埋放天数(d)；S为试片表面积(约28.91 cm²)。

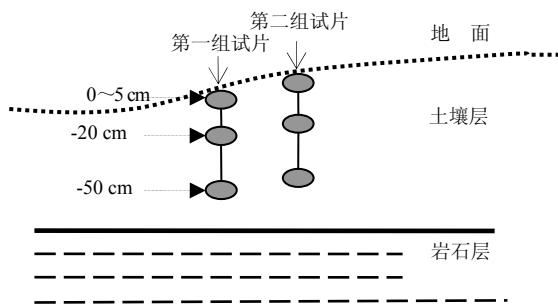


图2 试片放置示意图
Fig.2 Tablets buried profile

本研究中测试点选取金佛山山顶的水房泉域3种典型土地利用方式(林地、竹林地、灌草地各一处)和山腰碧潭泉域3种典型土地利用方式(林地、灌草丛、耕地各一处)共5种土地利用方式6个测试点的土壤剖面(土面0~5 cm、土下20 cm、土下50 cm)，埋放标准溶蚀试片共72片，试验时间选择当地雨季(2006年4月15~2006年9月25日)和旱季(2006年11月15日~2007年4月5日)，测试时间过后，将试片取回实验室小心洗净、风干，经过两次102℃和8 h红外线烘箱烘干后，用万分之一的电子秤称重取平均值，通过公式(1)计算

获得6个测试点雨、旱季的单位面积溶蚀量、绝对溶蚀量及年均单位面积溶蚀量。

2 试验结果

2.1 两泉区雨、旱季石灰岩溶蚀速度观测结果

表1为金佛山岩溶山区两泉区雨、旱季土壤剖面3个测试层位的土下溶蚀观测成果，可以看出：(1)与我国各地观测数据相比(袁道先，1988)，水房泉域和碧潭泉域土下溶蚀速度较快，水房泉域土下20 cm的雨季平均百日溶蚀量达71.3 mg·(100 d)⁻¹，0~5 cm左右的旱季平均百日溶蚀量也达到了49.0 mg·(100 d)⁻¹的高值，与测试期间丰富的降水相对应。(2)金佛山两泉区雨、旱季观测期间溶蚀量相比，水房泉域土壤剖面雨季平均溶蚀量64.6 mg·(100 d)⁻¹远远大于碧潭泉域土壤剖面雨季平均溶蚀量11.1 mg·(100 d)⁻¹，水房泉域土壤剖面旱季平均溶蚀量42.1 mg·(100 d)⁻¹也远远大于碧潭泉域7.9 mg·(100 d)⁻¹。(3)土壤剖面各层的雨、旱季溶蚀速度也有一定差异，水房泉域土壤剖面雨季平均百日溶蚀量从大到小为：土下20 cm>土下50 cm>地面，旱季为：土面>土下50 cm>地下20 cm；碧潭泉雨、旱季平均百日溶蚀量具有相同的土壤剖面变化规律，即随土壤深度而下降：地面>土下20 cm>土下50 cm。

表1 金佛山两泉区雨、旱季的石灰岩溶蚀速度观测成果
Table 2 Results of limestone tablets denudation observation near two springs of Jinfo Mt.

金佛山 观测站	平均百日溶蚀量/[mg·(100 d) ⁻¹]						观测期间 降雨量/mm	
	地面 0~5 cm		土下 20 cm		土下 50 cm		雨季	旱季
	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季
水房泉域	56.5	49	71.3	38.1	66.1	39.2	863	765
碧潭泉域	17.5	9.4	8.6	8.4	7.3	6	690	630

从表1中比较两泉区雨、旱季溶蚀速度可以看出：(1)金佛山水房泉和碧潭泉雨、旱季的溶蚀速率存在一定的差异性，整体上两个泉区的雨季溶蚀速率快于旱季溶蚀速率。水房泉测试点雨、旱季溶蚀速率的差异[7.5~33.19 mg·(100 d)⁻¹]大于碧潭泉测试点雨、旱季溶蚀速率差异[0.2~8.1 mg·(100 d)⁻¹]。(2)从两个测试区土壤剖面的3个测试层位来看，水房泉雨、旱季溶蚀速率差异最大的发生在土下20 cm[相差达33.19 mg·(100 d)⁻¹]，这也是所有测试点中溶蚀速率差异最大的一个测试层位；碧潭泉雨、旱季溶蚀速率差异最大的发生在地面0~5 cm左右[相差为8.1 mg·(100 d)⁻¹]；两泉区雨、旱季溶蚀速率差异最小的发生在碧潭泉土下20 cm左右，相差仅0.2 mg·(100 d)⁻¹。

2.2 土壤剖面基本理化性质试验结果

2.2.1 土壤剖面有机质含量与pH值

金佛山两泉域测试点土壤剖面有机质(OM)含量都随土层自上向下呈现递减的趋势，表现出“上

肥下瘦”的特点, pH的相对含量有随深度而增加的规律(图3), 两者呈现出很强的负相关对应关系。碧潭泉域3个测试点平均土壤有机质含量为4.1%, 低于水房泉3个测试点的平均土壤剖面有机质含量(13.1%), 且6个测试点的各土壤剖面A、B层含量相差较大; 从土地利用类型来看, 林地有机质含量大于其他土地利用类型, 最高值出现在水房泉林地土壤剖面A层(31.0%), 最低值出现在碧潭泉耕地土壤剖面B层(1.9%), 仅为最高含量的1/15。6个测试点土壤有机质含量由高到低依次为: 水房泉林地>水房泉竹林地>水房泉草地>碧潭泉林地>碧潭泉灌草丛>碧潭泉草地。土壤pH值的含量与有机质含量呈负相关对应, 两泉区测试点的值也存在较大差异, 碧潭泉域3个测试点平均土壤pH值7.5, 较高于水房泉域3个测试点平均土壤pH值5.3; 土壤pH值最低值出现在水房泉竹林地土壤剖面A层(pH值为4.46), 最高值出现在碧潭泉灌草丛土壤剖面A层(pH值为8.14), 由高到低依次排列为: 碧潭泉灌草丛>碧潭泉林地>碧潭泉草地>水房泉林地>水房泉草地>水房泉竹林地; 整体上山顶水房泉域土壤呈酸性特征(pH值范围为4.46~6.91), 山腰碧潭泉域土壤呈中性偏碱的特征(pH值范围为7.15~8.14)。

2.2.2 土壤剖面含水量和 CO₂ 含量

试验期间, 通过采用 SM-2(Soil Moisture)水分体积测试仪器野外测试, 碧潭泉域测试点土壤剖面水分体积比平均含量为 5.32%, 仅为水房泉测试点 16.57% 的 1/3; 通过取回土壤样品室内水分重量百分比分析, 碧潭泉域测试点土壤剖面平均水分重量百分比为 24.24%, 为水房泉域各测试点 45.50% 的 1/2 左右。测试点含水量差异较大, 且土地利用以林地的土壤水分含量最高、耕地最低。碧潭泉域测试点土壤水分含量排列为: 林地>灌草丛>耕地; 水房泉域测试点排列为: 林地>竹林地>草地。不同植被覆盖条件的土壤具有不同的保水能力, 一般而言, 植被覆盖较高的地区, 因其根系及枯枝落叶层的作用, 土壤的保水、保肥能力更强^[26]。

在试验期间的春夏秋冬四季, 使用日本生产的

GASTEC-CO₂ 测试仪及含 C₂H₄ 试剂的配套测试管测定土壤中 CO₂ 的体积分数, 6 个测试点土壤剖面平均值排列为: 水房泉林地 (7300×10⁻⁶) > 水房泉竹林地 (4616×10⁻⁶) > 水房泉草地 (3866×10⁻⁶) > 碧潭泉林地 (3916×10⁻⁶) > 碧潭泉灌草丛 (2483×10⁻⁶) > 碧潭泉耕地 (1800×10⁻⁶), 全年测试最高值出现在 7 月的水房林地土下 30 cm (14000×10⁻⁶)。测试时通过对该地的土壤剖面观察, 发现竹林地土下 30~50 cm 竹林根系非常发达, 土壤层较其他测试点厚。森林土壤具有很高的土壤有机质, 微生物分解土壤有机质使土壤剖面产生更多的 CO₂, 同时林区内发育更多、更深的植物根系, 在植物生产旺盛期, 根系呼吸释放的 CO₂ 量可以占到土壤呼吸释放总量的 50% 以上^[27]。水房泉 3 个测试点中土壤 CO₂ 的体积分数高于碧潭泉测试点, 且植被丰富的林地高于植被稀疏的草地, 碧潭泉耕地表层土壤 CO₂ 的体积分数含量最低 (1250×10⁻⁶)。6 个测试点土壤 CO₂ 的体积分数从不同土壤深度的含量来看, 土下 20~30 cm 左右为测试剖面土壤 CO₂ 的体积分数最大值 (5250×10⁻⁶)。

3 讨论

3.1 水房泉林地雨季与旱季溶蚀速率

从图 4 可以得出: (1)旱季有 1 块标准试片溶蚀速度快于雨季, 且平均旱季土面溶蚀速率(239.25 mg·m⁻²·d⁻¹) 高出雨季 (239.25 mg·m⁻²·d⁻¹) 28.64 mg·m⁻²·d⁻¹, 与冬季山上气温低、水气丰富且不易蒸发, 地面土样水分重量比高达 44%, 而雨季降水丰富、蒸发大, 地面土样水分重量比 (值为 34%) 较低于旱季有关。(2)土下 20 cm 测试层位, 雨季平均溶蚀速率(248.86 mg·m⁻²·d⁻¹) 略高于旱季 (210.45 mg·m⁻²·d⁻¹) 38.41 mg·m⁻²·d⁻¹, 且同一层位的两块标准石灰岩试片之间溶蚀量相差不大。(3)土下 50 cm 测试层位, 雨季平均溶蚀速率(142.27 mg·m⁻²·d⁻¹) 远高于旱季 (67.02 mg·m⁻²·d⁻¹), 达 75.25 mg·m⁻²·d⁻¹, 且同一层位的标准石灰岩试片之间溶蚀相差较大, 可能与埋放时坡度差异有关。(4)该测试点旱季和雨季溶蚀速率大体随土壤深度而降低, 与土壤水分、土壤

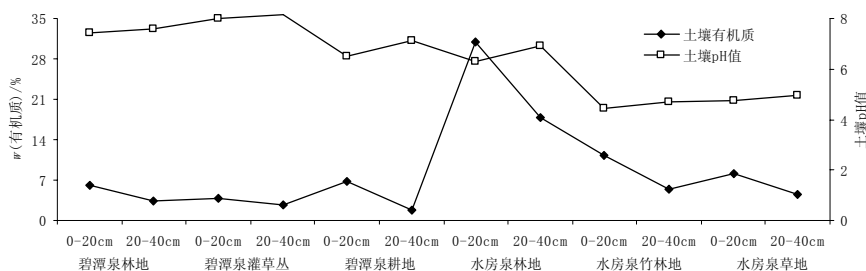


图3 金佛山两泉区不同土地利用方式与土壤深度的土壤有机质和 pH 值变化曲线

Fig.3 Soil organism and pH in land-use types with soil depth in the two springs of Jinfo Mt

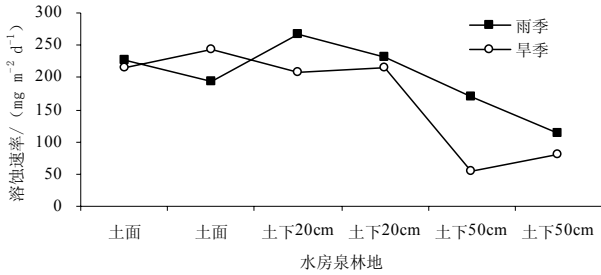


图4 金佛山水房泉林地雨季与旱季溶蚀速率比较

Fig.4 The comparison of limestone tablets denudation between the rainy season and dry season in forest of Shuifang spring

有机质含量的降低呈正相关关系。

3.2 水房泉竹林地雨季与旱季溶蚀速率

从图5可以得出：(1)土面测试层位，有2块试片旱、雨季溶蚀速度接近，但平均雨季土面溶蚀速率(270.21 mg·m⁻²·d⁻¹)却远高出旱季(133.17 mg·m⁻²·d⁻¹) 137.04 mg·m⁻²·d⁻¹，与夏季气温高、竹林地植物根系呼吸作用强烈而加剧岩溶作用有关。(2)土下20cm测试层位，雨季平均溶蚀速率(312.38 mg·m⁻²·d⁻¹)高于旱季(111.26 mg·m⁻²·d⁻¹)，达201.11 mg·m⁻²·d⁻¹。(3)土下50cm测试层位，雨季平均溶蚀速率(318.18 mg·m⁻²·d⁻¹)高于旱季(125.34 mg·m⁻²·d⁻¹)，达186.59 mg·m⁻²·d⁻¹。(4)该测试点旱、雨季溶蚀速率相差值为6个测试点中最大，且3个测试层位的雨季溶蚀速率均快于旱季溶蚀速率，差值为137.03 mg·m⁻²·d⁻¹~186.59 mg·m⁻²·d⁻¹之间，旱季3个土壤剖面层位的溶蚀速率相差较小(21.91 mg·m⁻²·d⁻¹)。在野外工作时发现该测试点土壤剖面中的植被细小根系十分发达，雨季测试期正好是水热配套的夏季，气温较高，根系呼吸作用使竹林地土壤剖面的CO₂浓度大大升高从而促进了岩溶作用；在旱季测试期间，情况正好相反。

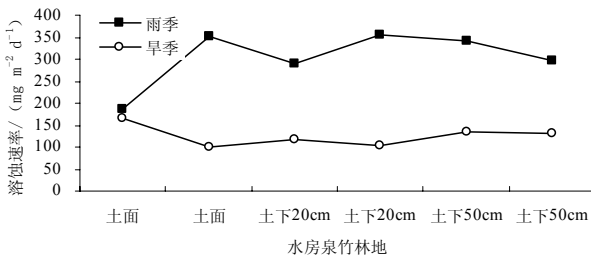


图5 金佛山水房泉竹林地雨季与旱季溶蚀速率比较

Fig.5 The comparison of limestone tablets denudation between the rainy season and dry season in bamboo forest land of Shuifang spring

3.3 水房泉草地雨季与旱季溶蚀速率

从图6可以得出：(1)土面测试层位，旱季有2块试片溶蚀速度快于雨季，平均旱季土面溶蚀速率(135.91 mg·m⁻²·d⁻¹)高出雨季(108.86 mg·m⁻²·d⁻¹) 27.05 mg·m⁻²·d⁻¹，旱季测试期间山上气温低、水气丰富且不易蒸发，土壤水分含量充足。(2)土下20cm

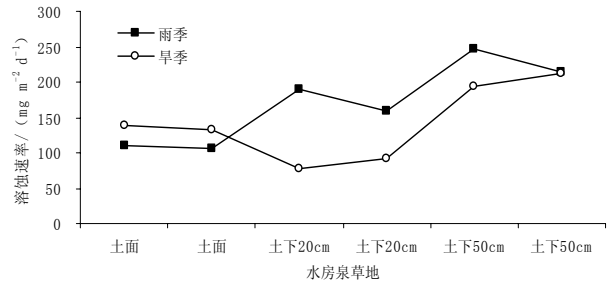


图6 金佛山水房泉草地雨季与旱季溶蚀速率比较

Fig.6 The comparison of limestone tablets denudation between the rainy season and dry season in meadow of Shuifang spring

测试层位，雨季平均溶蚀速率(174.49 mg·m⁻²·d⁻¹)高于旱季(85.47 mg·m⁻²·d⁻¹)，达89.02 mg·m⁻²·d⁻¹。(3)土下50cm测试层位，雨季平均溶蚀速率(230.65 mg·m⁻²·d⁻¹)略微高于旱季(207.83 mg·m⁻²·d⁻¹)，值为22.82 mg·m⁻²·d⁻¹。(4)该测试点雨季溶蚀速率大体随土壤深度而升高，旱季从土下20cm最低、到土下50cm溶蚀速率有所上升。除了土面一个测试层位外，该测试点雨季溶蚀速率高于旱季，与土壤水分雨季和旱季含量差异呈正相关关系。

3.4 碧潭泉林地雨季与旱季溶蚀速率

从图7可以得出：(1)土面测试层位，雨、旱季试片溶蚀速度差异明显，平均雨季土面溶蚀速率(79.19 mg·m⁻²·d⁻¹)高出旱季(33.58 mg·m⁻²·d⁻¹)，值为45.61 mg·m⁻²·d⁻¹，也是3个测试层位中唯一一个雨季溶蚀速率快于旱季的。与雨季测试期间内水热同期的气候特征有关，雨季气温高、水分充足，雨水淋溶作用促进了岩溶作用的进行。(2)土下20cm测试层位，旱季平均溶蚀速率(56.21 mg·m⁻²·d⁻¹)高于雨季(30.44 mg·m⁻²·d⁻¹)，差值为25.77 mg·m⁻²·d⁻¹。(3)土下50cm测试土壤层位，旱季平均溶蚀速率(37.76 mg·m⁻²·d⁻¹)高于雨季(29.93 mg·m⁻²·d⁻¹)，差值为7.84 mg·m⁻²·d⁻¹。(4)该测试点除了土面一个测试层位外，土下20cm和土下50cm雨季溶蚀速率均低于旱季，与土壤水分旱季测试期间气温低，蒸发小，根系呼吸作用的进行及春季生物作用开始繁荣息息相关。

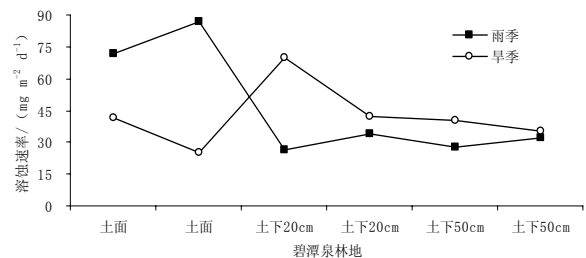


图7 金佛山碧潭泉林地雨季与旱季溶蚀速率比较

Fig.7 The comparison of limestone tablets denudation between the rainy season and dry season in forest of Bitan spring

3.5 碧潭泉灌草从雨季与旱季溶蚀速率

从图8可以得出:(1)土面测试层位,雨、旱季试片溶蚀速度差异十分明显,且平均雨季土面溶蚀速率($42.67 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)高出旱季($21.76 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),差为 $20.91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。(2)土下 20 cm 土壤测试层位中,雨季平均溶蚀速率($29.64 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)略高于旱季($21.04 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),差值为 $8.60 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。(3)土下 50 cm 测试土壤层位中,雨季平均溶蚀速率($21.11 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)略高于旱季($19.02 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)为 $2.08 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。(4)该测试点雨季溶蚀速率从地面到土下 20 cm 和土下 50 cm 均较高于旱季。

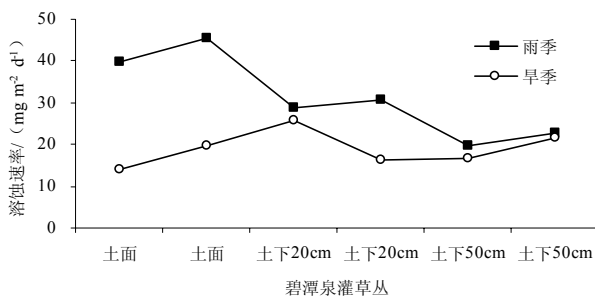


图8 金佛山碧潭泉灌草从雨季与旱季溶蚀速率比较

Fig.8 The comparison of limestone tablets denudation between the rainy season and dry season in shrub of Bitan spring

3.6 碧潭泉耕地雨季与旱季溶蚀速率

从图9可以得出:(1)土面测试层位,雨、旱季试片溶蚀差异明显,旱季平均土面溶蚀速率($40.73 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)远高出雨季($16.64 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) $24.09 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,也是3个测试层位中唯一一个旱季溶蚀速率快于雨季且差值较大的。与雨季测试期间,测试点经历夏季炎热高温,加上海拔低、气温高、蒸发强烈、地面人为翻动频繁,CO₂大量逸出;而旱季测试期为冬季低温和春雨季节,测试点地表气温低、蒸发少、水分充足有关。(2)土下 20 cm 测试层位中,雨季平均溶蚀速率($10.91 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)略高于旱季($9.66 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) $1.26 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。(3)土下 50 cm 测试土壤层位中,雨季平均溶蚀速率($8.13 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

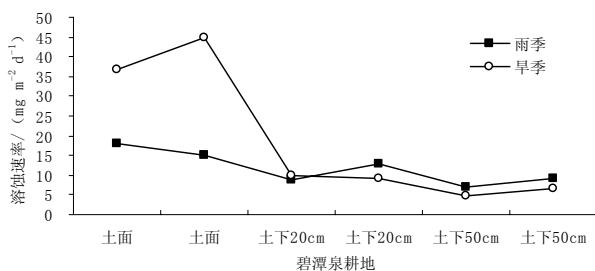


图9 金佛山碧潭泉耕地雨季与旱季溶蚀速率比较

Fig.9 The comparison of limestone tablets denudation between the rainy season and dry season in tilled land of Bitan spring

较高于旱季($3.31 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$),值为 $4.81 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。(4)该测试点土下 20 cm 和土下 50 cm 雨季溶蚀速率均略高于旱季且差别十分细微,与雨季和旱季测试期间土下土壤水分($w = 1\% \sim 5\%$)及 CO₂ 体积分数差异甚小($200 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$)有关。

4 结论

(1)研究区面积较小,但为亚热带季风气候高山的不同海拔下典型岩溶山区域系统中比较齐全土地利用类型,因此本文的研究有一定的典型性和代表性。

(2)金佛山岩溶山区水房泉和碧潭泉6个测试点的土下岩溶过程以溶蚀作用为主,受亚热带降水丰富、热量充足且雨热同期的气候影响,测试时间内金佛山碧潭泉域和水房泉域的溶蚀速率高于其它同纬度测试区的标准溶蚀试片的观测速率,且雨季的溶蚀速率快于旱季;从小区域上来看,受局地小气候的影响,水房泉域测试点的雨、旱季试片岩溶溶蚀速度都快于碧潭泉域测试点对应雨、旱季的溶蚀量。

(3)研究区不同的土地利用方式影响了小区域的土壤理化性质,尤其是土壤有机质含量高低差异,从而导致对金佛山6个岩溶区测试点的土下岩溶过程的强度的巨大差异性。土壤剖面平均年溶蚀速率由大到小依次排列为:水房泉竹林地>水房泉林地>水房泉草地>碧潭泉林地>碧潭泉灌草从>碧潭泉耕地。

(4)不同的土地利用方式下土壤含水量、土壤有机质、土壤CO₂和土壤pH都有较大的差异,从年均溶蚀速率与这些影响因素的关系来看:土壤水分与研究区岩溶作用呈现出极高的正相关关系,土壤水分含量高的测试点土下的岩溶作用也较活跃。土壤有机质含量是岩溶溶蚀速率的控制因子之一,两者呈现出较好正相关关系。土壤的CO₂浓度与研究区岩溶作用呈现出较高的正相关关系,即土壤CO₂浓度高的测试点其土下溶蚀作用也较活跃。金佛山岩溶山区6个测试点的土下溶蚀速率与土壤pH值呈现出较明显的对应关系,土壤pH越低,其土下溶蚀速率就越高,两者呈现出负相关特征。

参考文献:

- [1] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988:23-24. YUAN Daoxian, CAI Guihong. The Science of Karst Environment[M]. Chongqing: Chongqing Science and Technology Publishing House, 1988:23-24.
- [2] 曹建华,袁道先,潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展,2003,18(1):37-44. CAO Jianhua, YUAN Daoxian, PAN Genxing. Some soil features in karst ecosystem[J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(1):37-44.

- [3] 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速率对比研究[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1131-1139.
LI Enxiang, JIANG Zhongcheng, CAO Jianhua, et al. The comparison of properties of karst erosion ratio under different successional stage of karst vegetation in Nongla[J]. Guangxi Acta Ecologic Sinica, 2004, 24(6): 1131-1139.
- [4] 潘根兴, 曹建华. 表层带岩溶作用: 以土壤为媒介的地球表层生态系统过程: 以桂林峰丛洼地岩溶系统为例[J]. 中国岩溶, 1999, 18(4): 287-296.
PAN Genxing, CAO Jianhua. Karstification in epikarst zone: The earth surface ecosystem processes taking soil as medium: case of the Yiji karst experiment site[J]. Guilin. Carsologica Sinica, 1999, 18(4): 287-296.
- [5] 蒋忠诚. 广西弄拉白云岩环境元素的岩溶地球化学迁移[J]. 中国岩溶, 1997, 16(4): 304-312.
JIANG Zhongcheng. Karst geochemical migration of elements of dolomite environment in Nongla[J]. Guangxi Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 304-312.
- [6] 蒋忠诚. 论南方岩溶山区生态环境的元素有效态[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 123-128.
JIANG Zhongcheng. Liable content of elements in ecological environments in karst mountains in south China[J]. Carsologica Sinica, 2000, 19(2): 123-128.
- [7] 王世杰, 季宏军, 欧阳自远, 等. 碳酸盐岩风化成土的初步研究[J]. 中国科学: D辑, 1999, 29(5): 441-449.
WANG Shijie, JI Hongjun, OUYANG Ziyuan, et al. The preliminary research of carbonate rock weathering into soil[J]. Science in China: Series D, 1999, 2(5): 441-449.
- [8] LI W, YU L J, YUAN D X, et al. Bacteria biomass and carbonic anhydrates activity in some karst areas of Southwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2004, 24: 145-152.
- [9] 陶于祥, 潘根兴, 孙玉华, 等. 土壤有机碳地球化学及其与岩溶作用的关系: 以桂林丫吉村岩溶试验场为例[J]. 火山地质与矿产, 1998, 19(1): 40-46.
TAO Yuxiang, PAN Genxing, SUN Yuhua, et al. Soil geochemistry of organic carbon and its relationship with karst processes: a case study of Guilin Yaji karst experimental site[J]. Volcanic Geology and Mineral Resources, 1998, 19(1): 40-46.
- [10] PULINA MARIAN. Denudacja chemiczna Na Obszarach karsu Weglanowego, Polska Academic Nauk, Instytut Geographic[J]. Prace Geograficzne NR105, 1974: 159.
- [11] IVAN GAMS. Comparative research of limestone solution by means of standard tablets (Second Preliminary Report of the Commission of Karst Denudation, ISU)[J]. Proceedings of 8th International Congress of Speleology, 1981, 1: 273-275.
- [12] 刘再华, 何师意, 袁道先. 土壤中的CO₂及其对岩溶作用的驱动[J]. 水文地质工程地质, 1998, (4): 42-45.
LIU Zaihua, HE Shiyi, YUAN Daoxian. The CO₂ regime of soil profile and its drive to dissolution[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1998, (4): 42-45.
- [13] 章典, 师长兴. 青藏高原的大气CO₂含量、岩溶溶蚀速率及现代岩溶微地貌[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 565-570.
ZHANG Dian, SHI Changxing. CO₂ partial pressure, karst dissolution rate and karst micro-landforms on the Qingha-Tibet Platea[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(4): 565-570.
- [14] 何师意, 徐胜友, 张美良. 岩溶土壤中CO₂浓度、水化学观测及其与岩溶作用关系[J]. 中国岩溶, 1997, 16(4): 319-323.
HE Shiyi, XU Shengyou, ZHANG Meiliang. Observation on soil CO₂ concentration, hydrochemistry, and their relationship with Karst processes[J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 319-323.
- [15] XU SHENGYOU, HE SHIYI. The CO₂ regime in soil profile and its drive to dissolution in carbonate rock area[J]. Carsologica Sinica, 1996, 15(1-2): 50-57.
- [16] SUCHET P A, PROBEST J L. Modeling of atmospheric CO₂ consumption by chemical weathering of rocks. Application to the Geronne Congo and Amazon Basiona[J]. Chemical Geology, 1993, 107(3-4): 205-210.
- [17] YUAN DAOXIAN. The carbon cycle in karst Z[J]. Geomorph. N. F, Suppl.-BD, 1997, 108: 91-102.
- [18] ATKINSON T C. Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones[J]. Journal of Hydrology, 1977, 35: 111-123.
- [19] STRIEGL R G, ARMSTRONG D E. Carbon dioxide retention and carbon exchange on unsaturated Quaternary sediments[J]. Geochem Cosmochem Acta, 1990, 54: 2277-2283.
- [20] 何师意, 冉景丞, 袁道先, 等. 不同岩溶环境系统的水文和生态效应研究[J]. 地球学报, 2001, 22(3): 265-270.
HE Shiyi, RAN Jingcheng, YUAN Daoxian, et al. A comparative study on hydrological and ecological effects in different karst ecosystems[J]. Acta Geological Sinica, 2001, 22(3): 265-270.
- [21] ZHANG CHENG, YUAN DAOXIAN, CAO JIANHUA, et al. Analysis on the environmental sensitivities of typical dynamic epikast system at the Nongla monitoring site[J]. Guangxi China Environmental Geology, 2005, 47(5): 615-619.
- [22] 袁道先. 碳循环与全球岩溶[M]. 第四纪研究, 1993, (1): 1-6.
YUAN Daoxian. Carbon Cycle and Global Karst[M]. Quaternary Sciences, 1993, (1): 1-6.
- [23] 曹建华, 袁道先, 章程, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.
CAO Jianhua, YUAN Daoxian, Zhang Cheng et al. Karst ecosystem constrained by geological condition in Southwest China[J]. Earth and Environment, 2004, 32(1): 1-8.
- [24] 章程, 蒋忠诚, 何师意, 等. 垂直气候带岩溶动力系统特征研究[J]. 地球学报, 2006, 27(5): 510-514.
ZHANG Cheng, JIANG Zhongcheng, HE Shiyi, et al. The karst dynamic system of vertical zoned climate region[J]. Acta Geological Sinica, 2006, 27(5): 510-514.
- [25] 潘根兴, 孙玉华, 腾永忠, 等. 润亚热带峰丛洼地岩溶土壤系统中碳分布及其转移[J]. 生态学报, 2000, 11(1): 69-72.
PAN Genxing, SUN Yuhua, TENG Yongzhong, et al. Soil carbon distribution in subtopic karst depression system and its transfer[J]. Journal of Applied Ecology, 2000, 11(1): 69-72.
- [26] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应[J]. 地球学报, 2001, 22(2): 159-164.
YAO Changhong, JIANG Zhongcheng, YUAN Daoxian. Vegetation karst effects on the karst area of Southwest China[J]. Acta Geological Sinica, 2001, 22(2): 159-164.
- [27] DANIEL L, KELTING J A B, GERRY S E. Estimating root respiration, microbial respiration in the rhizosphere, and root-free soil respiration in forest soils[J]. Soil Biochemistry, 1998, 30(7): 961-968.

Impact of land-use patterns upon karst processes in typical karst regions of Jinfo Mountain

WANG Dongyin^{1,2}, XIE Shiyu^{1,4*}, Zhangcheng^{1,3}

1. School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chengdu Bureau of State Land Supervision, Chengdu 610091, China;

3. School of Geographic Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

4. Key Laboratory of the Three Gorge's Eco-Environment (Ministry of Education), Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: It has been recognized that intensity of karst processes could be largely affected by soil's physical and chemistry properties. Then, less attention was paid to the impact of land-use types on karst processes in mountain area. Field dissolution test of standard limestone tablets, carried out in the karst regions of Bitan spring which located on 800 m elevation and Shuifang spring which located on 2 100 m elevation in Jinfo mountain of Chongqing during rainy season and dry season of 2006 ~ 2007, where five types of land-use and six test sites were encountered. Almost all the typical land-use types occurred in the small study area, so the present study is also typical and representative. The results showed that the corrosion ratio was some difference between the rainy season and dry season, and at different elevations is quite different that corrosional ratio in Shuifang spring is more quicker than that of in Bitan spring during the test time, revealed that limestone dissolution was related to corrosion speed of the soil, and the soil's corrosion speed was different with land-use types in study area. Six test points average content of organic matter in soil profile arranged in descending order: forest of Shuifang spring > bamboo forest land of Shuifang spring > meadow of Shuifang spring > forest of Bitan spring > shrub of Bitan spring > tilled land of Bitan spring.

Key words: karst; land-use; limestone tablets denudation; Jinfo Mt. in Chongqing