

文章编号:1001-4810(2011)04-0443-06

亚高山表层岩溶泉域土壤溶蚀速率 季节变化及碳汇量估算 ——以重庆金佛山水房泉流域为例

罗健¹, 蒋勇军^{1,2,3}, 胡毅军¹, 李林立^{1,2,3}, 刘文¹

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 西南大学岩溶环境与石漠化治理研究所, 重庆 400715;

3. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

摘要:利用标准溶蚀试片法测定了重庆金佛山水房泉流域林地、草地和灌丛三种土地利用类型不同深度年溶蚀速率。结果表明,不同土地利用类型、不同季节、不同土壤深度的溶蚀速率具有很大的差异。通过对各土地利用类型下不同季节不同深度土壤有机质、土壤 CO₂ 浓度和土壤 pH 分析发现:土壤有机质和 pH 相互耦合共同对溶蚀速率产生影响,有机质含量越高,则 pH 值越低,溶蚀速率就越大;三种土地利用方式下土壤 CO₂ 浓度与溶蚀速率具有一定的相关性,夏秋季土壤 CO₂ 浓度较冬春季高,相对应地,其地下溶蚀速率也比冬春季大。最后利用试片溶蚀数据对泉域内年碳汇量进行了估算,结果约为:25.595 t/a。

关键词:表层岩溶泉域; 土地利用; 溶蚀速率; 碳汇估算

中图分类号: P641.25

文献标识码: A

岩溶生态系统是地球表层系统的重要组成部分^[1-2],表层岩溶作用过程中的碳汇是自然界碳循环的一个重要组成部分,也是“遗漏汇”中的一个重要方面,它对调节大气 CO₂ 起着不可忽视的作用^[3]。其中,土壤圈层是岩溶动力条件最为活跃的部位^[3],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^[1-4],而不同土地利用方式也将导致土壤理化性质发生变化,进而影响到岩溶作用的方向和强度^[5-9]。近年来的研究表明,土壤对大气 CO₂ 的汇效应主要是以对土壤 CO₂ 吸收和土壤有机碳积累的两种途径实现^[10]。本文以金佛山水房泉流域为例,分析讨论了不同土地利用类型土壤有机质、pH、CO₂ 浓度对地下溶蚀率作用的影响,并对流域内碳汇量做了初步的估算。

1 研究区概况

金佛山自然保护区(28°50′~29°20′N, 107°~107°20′E)位于四川盆地南缘渝黔交接地带,重庆市东南边缘的南川市境内南部,属于大娄山东段的一部分,总面积 1 300 km²,最高峰风吹岭海拔 2 251 m。地质构造上,金佛山属于一个宽缓的向斜,以二叠系为核部,志留系、奥陶系和寒武系为两翼,呈东北—西南走向。水房泉流域位于向斜轴部,由二叠系栖霞组石灰岩组成,呈条带状分布,地形地貌上表现为海拔 2 000 m 左右的较大面积的缓坡与平台,发育大型的地表、地下岩溶形态(图 1)。金佛山属亚热带湿润季风性气候区,云雾多、日照少,降雨量季节分配不均。流域内多年平均气温为 8.2℃,降雨量 1 434.5 mm。

基金项目:国家自然科学基金(41172331 和 41040026)、中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK201113003)、国土资源部地质调查项目(1212011087119)、国土资源部公益性行业科研专项(201111022)、国土资源部岩溶动力学重点实验室开放课题(KDL2011-01)、西南大学博士基金(SWU109050)、西南大学自然地理博士点开放基金(250-411111)

第一作者简介:罗健(1985—),男,硕士研究生,主要从事表层岩溶碳循环研究。E-mail:karstluo@163.com。

通讯作者:李林立, E-mail: lilinli@swu.edu.cn。

收稿日期:2011-11-24

水房泉流域附近植被主要为亚热带常绿落叶阔叶林、稀疏的灌丛和草甸,属于高原面上的温带岩溶生态系统。土壤有机质含量高,容重大,整体淋溶强,厚度

30~120 cm 左右,且交换性钙、镁含量相对较高,主要以黄棕壤和草甸土为主。

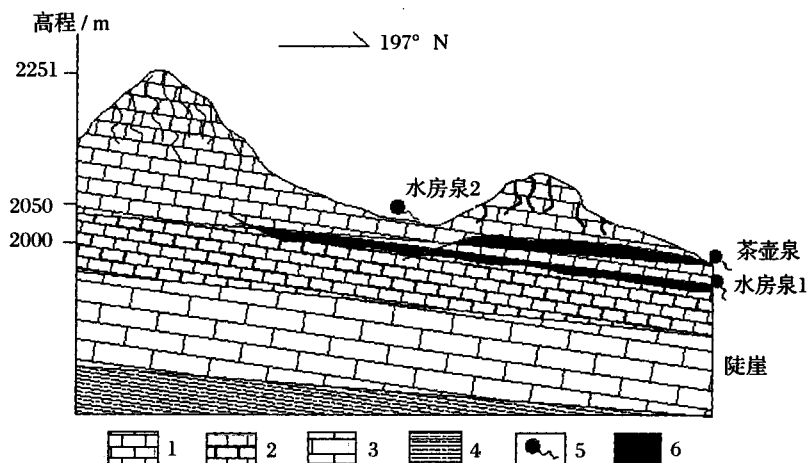


图1 水房泉流域地质剖面示意图(据吴月霞修改)

Fig. 1 Sketch geologic profile of the Shuifang Spring Watershed

1. 茅口组上段质纯致密灰岩(P_1m^2); 2. 茅口组下段泥灰岩夹碳质页岩(P_1m^1); 3. 栖霞组灰岩(P_1q); 4. 志留系砂页岩(S); 5. 泉; 6. 洞穴

2 研究方法

溶蚀速率的测定采用标准溶蚀试片法,试片埋放时间为2010年3月至2011年4月,每个剖面的每一层面埋放一块,所用试片采自桂林七星岩附近的上泥盆统质地较纯的融县组石灰岩(D_3r),直径4 cm,厚3 mm,表面积为28.9 cm²。称得初重后,将其埋置在林地、草地、灌丛3种土地利用类型不同层位(土下10 cm、20 cm、40 cm、50 cm)。试片在一个水文年内分春夏秋冬四个季节进行埋放。试片取出清洗并烘干后称量其重量。据埋放前后溶蚀量计算流域内单位面积溶蚀量,计算公式如下:

$$ER = (W1 - W2) \times 10^7 / T / S$$

式中:ER为日单位面积溶蚀量(mg/(m²·d));W1为试片初重(g);W2为试片称后重量(g);T为埋放时间(d);S为试片表面积(cm²)。

土壤样品的采集时间为2011年3月13日,分林地、草地、灌丛3种土地利用类型不同层位(土下10 cm、20 cm、40 cm、50 cm)采集。土壤有机质测定采用丘林法,其计算公式如下:

有机质含量% =

$$\frac{(V1 - V2)_{\text{FeSO}_4} \times N_{\text{FeSO}_4} \times \frac{1}{6} \times \frac{3}{2} \times 0.012 \times 1.1}{W} \times 1.724 \times 100$$

式中:V1为滴定10 mL 0.069 mol/L $K_2Cr_2O_7$ 所用0.197 5 mol/L $FeSO_4$ 量,即空白量;V2为有机质氧

化后,滴定所用0.197 5 mol/L $FeSO_4$ 的量; N_{FeSO_4} 为 $FeSO_4$ 溶液的摩尔浓度;1/6为 $K_2Cr_2O_7$ 与 $FeSO_4$ 的反应分子比;3/2为 $K_2Cr_2O_7$ 与C反应的摩尔比;W为风干土重;0.012为1 mmol C的重量;1.724为1 g碳相当于有机质的克数;1.1为校正常数(因该方法测得有机质含量一般仅为实际含量的90%,所以需要校正)。

土壤pH值测定采用室内电位测定法。

流域碳汇的估算采用石灰岩溶蚀试片法^[3]。

土壤CO₂浓度的收集方法是在不同土地利用的不同深度埋放“L”型CO₂收集管,直径8 mm^[8],并使用国产MOT400-CO₂测试仪测定管中CO₂浓度,为了保证数据的准确性,在使用仪器测量时,重复3次测量,取其平均值。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用下的土下溶蚀速率

流域内,林地和灌丛位于山体的缓坡地带,草地地形平缓,草地和灌丛位于流域上游,林地处于下游,且植被覆盖好。研究区不同土地利用类型条件下的不同层位其试片季度溶蚀量变化明显,最大溶蚀量为277.586 mg/(m²·d),发生在夏季土下10 cm处的林地,最小溶蚀量为85.226 mg/(m²·d),发生在冬季土下50 cm处的林地(如图2),最大溶蚀率约为最小溶蚀率的3倍多,这说明不同土地利用类型、不同季节、不同土下深度的溶蚀速率差异很大,可能是

因为夏季降雨量和土壤 CO₂ 浓度高于冬季,故夏季土下溶蚀速率较冬季高;冬季土下 50 cm 处林地土壤有机质最低,pH 值最大,溶蚀率最小,而夏季林地土下 10 cm 处 CO₂ 浓度最大,土壤有机质较高,且接受大气降水较多,因而溶蚀速率最大。

土下岩溶作用在时间和空间上具有很大的差异性。如图 2,同一深度上土下溶蚀速率比较,除了冬

季草地外,土下 20 cm 处各季节均以林地的溶蚀率最大,分析原因可能是在土下 20 cm 处,植物根系较密集,降水和温度在该层与微生物活动配合较好,则土下溶蚀率较大;季度上,三种土地利用类型的溶蚀速率均为:夏季>秋季>春季>冬季,分析原因可能是夏季降水量和土下 CO₂ 浓度较高,加速了土下溶蚀速率的进行。

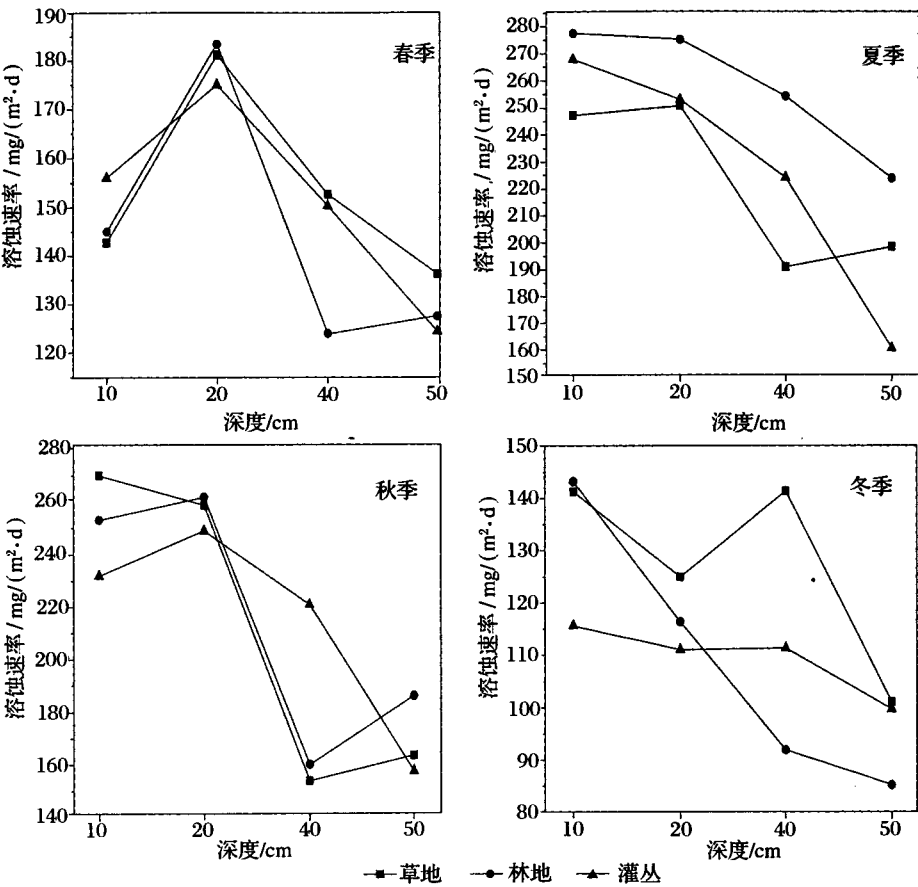


图 2 不同土地利用类型下不同季节土下溶蚀速率

Fig. 2 Soil dissolution rate of carbonate under different land use types and in different seasons

3.2 土壤有机质与 pH 对土下溶蚀速率的影响

土壤有机质可能是土壤系统中最重要功能物质^[10],其分解形成的土壤有机酸会对土壤 pH 造成影响,两者均影响着土下溶蚀作用的进行。实验结果表明土壤有机质含量随土下深度的增加均呈下降趋势,有机质含量最高是灌丛土下 10 cm 处的 15.11 g/kg,最低为林地 50 cm 处的 2.64 g/kg (如图 3)。三种土地利用类型土下平均土壤有机质含量和 pH 值大小均为:灌丛>草地>林地,原因可能是灌丛密集且表层枯枝落叶层较厚,有机质较多,加上山顶气温低,降雨丰富,湿度大,有利于腐殖质分解,产生大量有机酸;草地植物根系多集中在 10 cm 至 30 cm 之间,表层腐殖质较灌丛少;而林地较稀疏,树下基本无灌木矮草,凋零物较少。另外,土下 10 cm 处有机质

含量远高于其它各层,约为其它各层的 2 倍,分析认为可能是土下 10 cm 处植物根系密度较大,生物活性较好,且该层常年有枯枝落叶累积,造成腐殖质在近地表富集。

三种土地利用类型下土壤 pH 值均小于 6.5,土壤性质均为酸性土;同种土地利用方式不同深度土壤 pH 值的变化幅度不是很大。土壤 pH 值随着土下深度的增加而变大,即越接近表层,土壤酸性越大,分析原因可能有两点:一是由于土壤有机碳含量多,可以产生较多的 CO₂ 和有机酸^[11],这些可造酸类物质的存在,提供了更多的土壤交换性氢离子^[12],降低了土壤 pH 值;二是表层土壤对沉降的大气酸(如 SO₂ 等)和可造酸类污染物的吸收量较下层大。

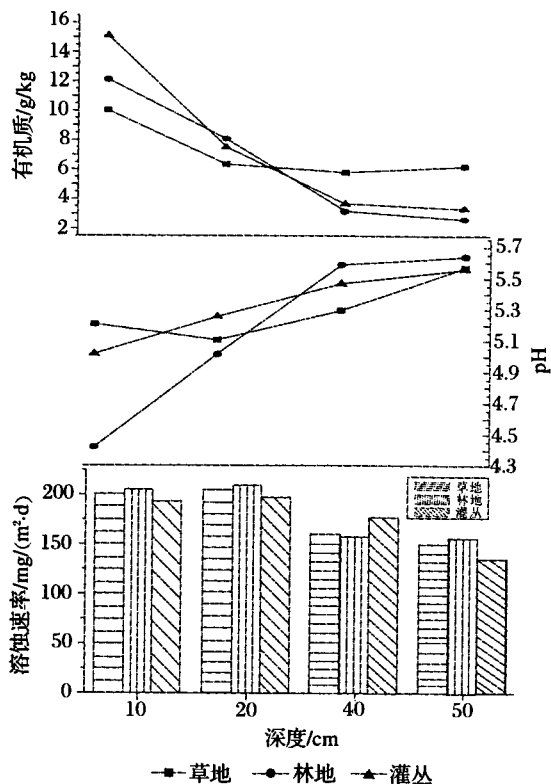


图3 不同土地利用条件下不同深度土壤有机质、pH与土下溶蚀速率
Fig. 3 Soil organism, pH and soil dissolution rate of carbonate under different land use types and at different depth

总体上,土壤有机质和溶蚀率随着土下深度的增加而减小,但土壤有机质含量最高的层位,溶蚀速率并不一定是最高,如土下10 cm处的土壤有机质含量通常最高,但春季林地、草地和灌丛,秋季林地和灌丛,以及夏季草地却是土下20 cm处的溶蚀速率最大,分析原因可能一是土下10 cm处土层受人为扰动大,土壤疏松,降水易下渗,影响土下湿度及土下微生物活性,造成有机质分解速度缓慢,抑制了土下溶蚀作用的进行,而在土下20 cm处植物根系发达,微生物活性较好,有机质分解产生了更多CO₂,有利于溶蚀的进行;二是土下10 cm土壤中CO₂易向大气中扩散,这对溶蚀作用会产生一定影响。

总体上来看,土壤有机质和pH相互耦合共同对溶蚀速率产生影响,有机质含量越高,则pH值越低,溶蚀速率就越大,有机质含量越低,则pH值越高,溶蚀速率就越小,这主要是因为有机质含量高,分解产生的有机酸多,促进碳酸盐岩不断溶解,相反,随着土壤深度的增加,土壤pH值增高,溶蚀速率减弱。

3.3 土壤CO₂浓度与土下溶蚀速率的关系

土壤CO₂是个非常关键的因子,在岩溶动力系统中起着重要驱动作用^[3]。表1反映的是三种土地利用下土壤不同季节、不同深度剖面CO₂浓度的变

化情况,土壤中CO₂的释放量对环境响应十分敏感,其中包括土地利用、时空、降雨、土壤温度和土壤湿度变化等。从图4中看出,夏秋季CO₂浓度的变化均高于冬春季;林地CO₂浓度总体大于草地和灌丛(表1,图4),分析原因可能是林地树木根系较灌丛和草地

表1 草地、林地、灌丛土下不同季节、不同深度下土壤CO₂浓度值(ppm)

Tab. 1 The soil CO₂ concentration at different depth and in different seasons in grass land, forest land and shrub land

土地利用类型	土下深度/cm	春	夏	秋	冬
草地	10	5 160	6 460	6 680	5 156
	20	5 182	6 875	6 788	5 100
	40	4 880	6 345	6 320	4 880
	50	5 075	6 400	6 458	4 962
林地	10	6 126	7 000	6 887	6 210
	20	6 240	7 250	7 180	6 450
	40	6 100	6 875	6 750	5 956
	50	5 850	6 253	6 120	6 215
灌丛	10	5 220	6 750	6 650	5 300
	20	5 650	7 100	6 920	5 350
	40	4 985	6 350	6 200	4 980
	50	5 012	6 675	6 570	5 350

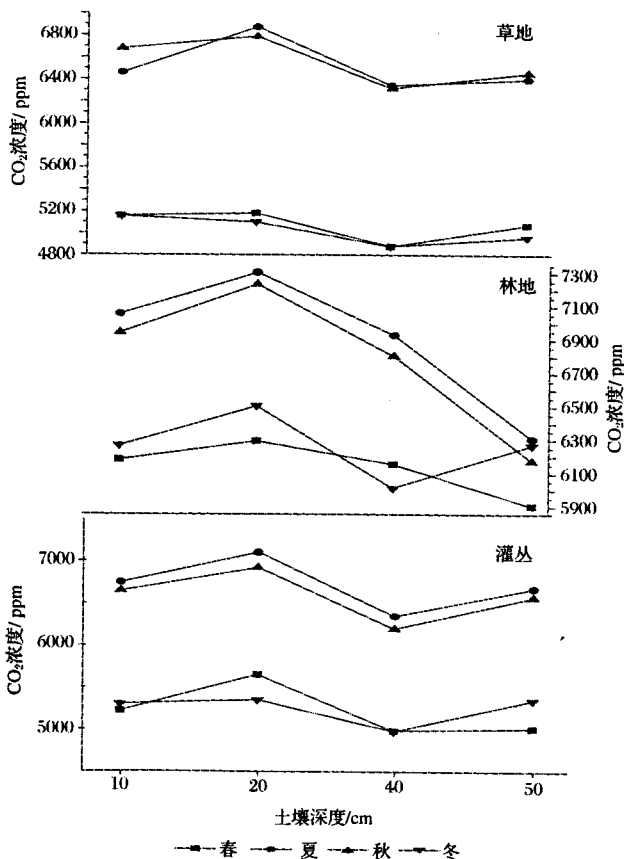


图4 不同土地利用下不同深度土壤CO₂浓度变化
Fig. 4 The soil CO₂ concentration under different land use types and at different depth

的发达,根系呼吸及根部微生物活动比较强烈而利于土壤 CO₂ 浓度的升高。与溶蚀速率空间变化特征类似,不同深度、不同土地利用类型中土下 20 cm 处的 CO₂ 浓度也以林地的为最大,这可能是由于此处的植被根系密度较大,其呼吸作用和土壤微生物较强烈所引起。

三种土地利用方式下各深度下土壤 CO₂ 浓度与溶蚀速率具有一定的相关性,草地 $R^2=0.6866$,林地 $R^2=0.6672$,灌丛 $R^2=0.6904$ (如图 5)。夏秋季土壤 CO₂ 浓度较高,相对应同一深度土下溶蚀率也较大;春冬季土壤 CO₂ 浓度较低,相对应同一深度土下溶蚀率也较小(图 2,表 1)。

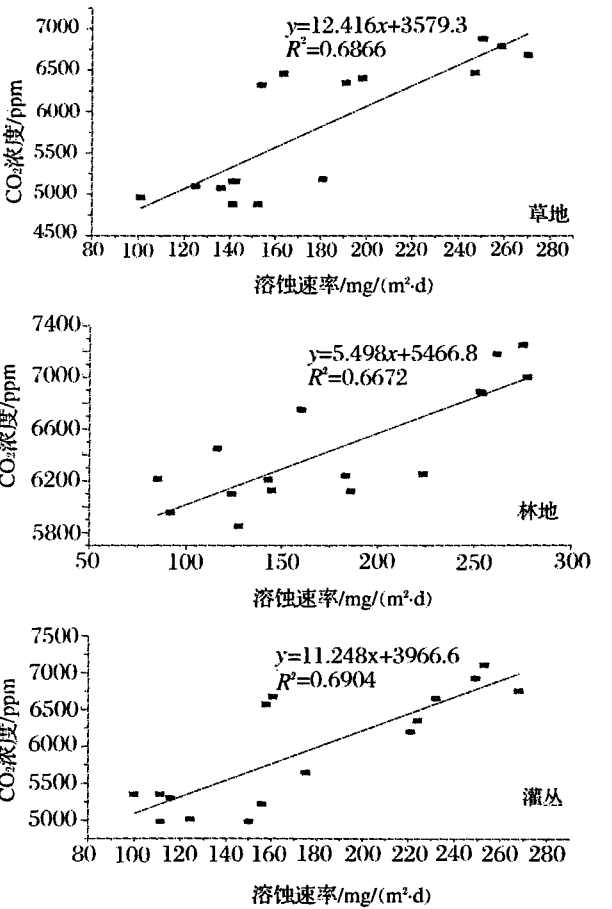


图 5 草地、林地、灌丛土下土壤 CO₂ 浓度与溶蚀速率的相关性
Fig. 5 The correlation between soil CO₂ concentration and soil dissolution rate of carbonate in grassland, forestland and shrub land

3.4 流域内年碳汇量的估算

研究区内表层岩溶动力系统 CO₂ 汇主要根据石灰岩的溶解方程^[3]估算。由于：
$$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$$

由此得到大气 CO₂ 汇的计算公式：

$$F = E \times S \times R \times M_{\text{CO}_2} / M_{\text{CaCO}_3}$$

式中： F 为 CO₂ 的汇，单位 10¹⁰ g/a； E 为岩石试片的溶蚀速度，单位 mg/(cm² · a)； S 为岩溶区面积，单位 km²； R 为岩石试片的碳酸盐岩纯度，为 99.03 %^[13]； M_{CO_2} 为 CO₂ 的分子量，为 44； M_{CaCO_3} 为 CaCO₃ 的分子量，为 100。

计算中，岩石试片的溶蚀速度主要采用草地、林地、灌丛土下 50 cm 深度的平均值(因为 50 cm 处于或接近于土岩交界面)，其大小为 5.34 mg/(cm² · a)，水房泉泉域面积为 1.1 km²。由此计算出泉域内的 CO₂ 年汇约为 25.595 t/a，这与利用水化学—径流量方法计算水房泉出口年 CO₂ 的汇有一定的偏差^[14]，其原因可能是水房泉流域为不闭合流域，水化学—径流量法可能漏算了部分碳。

4 结 论

(1) 不同土地利用类型、不同季节、不同土下深度溶蚀速率具有很大的差异。同一深度上土下溶蚀速率比较，除了冬季草地外，土下 20 cm 处各季节均以林地的溶蚀率最大；不同土地利用类型的季度溶蚀速率均为：夏季>秋季>春季>冬季。

(2) 土壤有机质和 pH 二者相互耦合共同对溶蚀速率产生影响，随着土壤深度的增加，有机质含量降低，pH 值变大，溶蚀速率减小；土壤有机质和溶蚀率总体上随着土下深度的增加而减小，但土壤有机质含量最高的层面，溶蚀速率并不一定是最高，可能原因是土下 10 cm 处土壤疏松，降水易下渗，土壤湿度较小，土下微生物活性较低，造成有机质分解速度缓慢，抑制了土下溶蚀作用的进行，而在土下 20 cm 处植物根系发达，微生物活性较好，有机质分解产生的 CO₂ 较多，有利于溶蚀作用的进行。

(3) 土壤 CO₂ 释放量对环境响应十分敏感，其中包括土地利用变化、土壤深度的变化、季节的变化等；不同土地利用方式下不同深度土壤 CO₂ 浓度与溶蚀速率具有一定的相关性；夏秋季土壤 CO₂ 浓度较冬春季高，相对应地夏秋季土下溶蚀率也较冬春季的大。

(4) 标准溶蚀试片法计算初步表明，流域内 CO₂ 的年汇约为 25.07 t/a。

岩溶区溶蚀过程是一个综合复杂的过程，影响土下岩溶的因子很多，仅考虑土壤 CO₂、有机质、pH 等因素还远远不够，应从生物碳汇作用、土壤 CO₂ 与大

气 CO₂ 对降雨的响应、土壤岩溶与表层岩溶水的相关关系等多角度出发去研究,从而更准确地把握岩溶作用的发生方向。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李阳兵,王世杰,王济,等.岩溶生态系统的土壤特性及其今后研究方向[J].中国岩溶,2006,25(4):285-289.
- [3] 袁道先,刘再华,蒋忠诚,等.碳循环与岩溶地质环境[M].北京:科学出版社,2003:36-73.
- [4] 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.
- [5] 章程,袁道先.IGCP448:岩溶生态系统全球对比研究进展[J].中国岩溶,2005,24(1):83-88.
- [6] 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.
- [7] 潘根兴,孙玉华,滕永忠,等.湿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.
- [8] 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):319-324.
- [9] 章程,谢运球,吕勇,等.不同土地利用方式对岩溶作用的影响——以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例[J].地理学报,2006,61(11):1181-1188.
- [10] 潘根兴.地球表层系统土壤学[M].北京:地质出版社,2000:76-81.
- [11] 朱鹤健,何宜庚.土壤地理学[M].北京:高等教育出版社,1992:70-82.
- [12] 杨平恒,章程,孙玉川,等.土壤环境因子对土下岩溶溶蚀速率的影响——以重庆金佛山国家自然保护区为例[J].中国地质,2007,34(5):922-924.
- [13] 袁道先,刘再华,林玉石,等.中国岩溶动力系统[M].北京:地质出版社,2002:121.
- [14] 胡毅军,蒋勇军,李林立.表层岩溶泉域短时间尺度作用碳汇效应初步研究——以重庆金佛山水房泉域为例[J].中国岩溶,2011,30(2):176-180.

Seasonal changes of soil dissolution rate and estimations on carbon sequestration in the subalpine epikarst spring zone: A case study in the Shuifang Spring in Jinfoshan, Chongqing

LUO Jian¹, JIANG Yong-jun^{1,2,3}, HU Yi-jun¹, LI Lin-li^{1,2,3}, LIU Wen¹

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

2. Institute of Karst Environment and Rocky Desertification Control, Southwest University, Chongqing 400715, China;

3. Key Laboratory of Eco-Environments in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China)

Abstract: Annual soil dissolution rates of carbonate under forestland, grassland and shrub land at different depth in the Shuifang Spring in Jinfoshan, Chongqing are tested by means of the standard limestone tablets. The results show that the karst erosion rates are quite different under different land-use types, in different seasons and at different depth of soil. Through analysis on soil organic matter, soil CO₂ concentration and soil pH during different seasons and at different depth in forestland, grassland and shrub land, it is discovered firstly that the soil organic matter and pH coupled with each other to affect the dissolution rate of carbonate, and the higher the organism and the less the pH value, the higher the dissolution rate. And secondly, the soil CO₂ concentration is of certain relations with the dissolution rate of carbonate, and the soil CO₂ concentration in summer and autumn is higher than in winter and spring, so, the soil erosion rate in summer and autumn is higher than in winter and spring. Finally, an estimation on the carbon sequestration in the spring area is done by means of standard limestone tablets, the result is about 25.595 t/a.

Key words: epikarst spring area; land use; dissolution rate of carbonate; carbon sequestration estimation