

# 典型岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳储量及其矿化速率的影响

严毅萍<sup>1,2</sup>, 曹建华<sup>1</sup>, 尹辉<sup>1</sup>, 杨慧<sup>1,3</sup>, 喻崎雯<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所 国土资源部 广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;  
2. 广西师范大学, 广西 桂林 541004; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 选取桂林市毛村典型岩溶区林地、灌丛、旱地和果园 4 种土地利用方式下的土壤, 对土壤有机碳库、矿化速率、土壤有机碳累积矿化量进行研究。研究表明, 不同土地利用方式的土壤有机碳含量不同, 地表以下 0—20 cm 土壤有机碳含量大小依次为: 森林>灌丛>旱地>果园; 20—40 cm 土壤有机碳含量大小依次为: 森林>旱地>灌丛>果园; 40—60 cm 土壤有机碳含量大小依次为: 旱地>灌丛>果园。土壤培养试验的结果显示土壤有机碳矿化速率和累积矿化量大小依次为: 森林>灌丛>旱地>果园。

**关键词:** 土壤有机碳; 矿化速率; 土地利用类型; 岩溶区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)05-0013-05

中图分类号: S153.6

## Influences of Land Use on Storage and Decomposition Rate of Soil Organic Carbon in Karst Area

YAN Yi-ping<sup>1,2</sup>, CAO Jian-hua<sup>1</sup>, YIN Hui<sup>1</sup>, YANG Hui<sup>1,3</sup>, YU Qi-wen<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Karst Geology, CAGS, Karst Dynamics Laboratory, MLR, and GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China*; 2. *College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China*; 3. *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Soil samples from four land use types including forest, shrub, cultivated land and orchard were collected to investigate the soil organic carbon(SOC) storage, decomposition rates and the accumulation rate of degraded SOC in the karst area of Maocun village, Guilin City. The results show that the contents of SOC varied under different land use. The SOC contents of different land use in descending orders are forest, shrub, cultivated land, and orchard for 0—20 cm soil layer, forest, cultivated land, shrub, and orchard for 20—40 cm soil layer, and cultivated land, shrub, and orchard for 40—60 cm soil layer, respectively. The results of the comparative incubation experiment show that the SOC decomposition and accumulation rates in descending order were forest, shrub, cultivated land, and orchard.

**Keywords:** soil organic carbon; decomposition rate; land use; karst area

土壤有机碳库是地球生态系统中最大的碳库, 全球大约有 1500 Pg C(1 Pg=10<sup>15</sup> g) 以有机质形式存在于土壤中, 是大气碳库的 2 倍, 陆地生物量碳库的 2.3 倍<sup>[1]</sup>。土壤有机碳的积累与释放决定着土壤有机碳的储量。每年土壤通过矿化和微生物分解有机碳释放出来的 CO<sub>2</sub> 约为 68~75 Pg<sup>[2]</sup>, 远远超出化石燃料燃烧释放到大气中的 CO<sub>2</sub> (6 Pg)。可见, 土壤有机碳库的微小变化将显著影响到大气 CO<sub>2</sub> 的变

化<sup>[3]</sup>。相关研究表明, 不同土地利用方式对于土壤有机碳分解速率的影响较大<sup>[4-5]</sup>。由于土壤矿化与有机碳分解过程密切相关<sup>[6-7]</sup>, 可以根据有机碳矿化释放 CO<sub>2</sub>-C 的数量与强度评估土地利用变化对土壤有机碳分解的影响<sup>[8]</sup>。因此, 评估土地利用变化对土壤有机碳矿化的影响, 通过改变土地利用和土地管理方式来减少矿化率, 控制陆地生态系统中碳的含量和转变, 是认识陆地生态系统碳循环规律, 缓解全球温室

收稿日期: 2011-04-19

修回日期: 2011-05-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“岩溶动力系统中土壤钙的迁移及生态环境效应”(40872213); 中国地质调查局工作项目“中国岩溶碳汇过程与效应”(水[2011]矿评 01-15-02); 广西自然科学基金(青年基金)项目“忍冬属植物的地质生态特性与石漠化治理的基础研究”(2010GXNSFB013004); 中国地质科学院基本科研业务费项目(2009-sys-17)

作者简介: 严毅萍(1986—), 女(汉族), 福建省建阳市人, 在读硕士, 主要从事岩溶生态系统及土壤有机碳稳定性研究。E-mail: yanyiping134@163.com。

效应以及实现增汇减排的重要科学手段。我国西南岩溶面积为  $3.44 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 约占国土面积的  $1/3$ <sup>[9]</sup>, 石漠化严重<sup>[9]</sup>。由于人为干扰, 植被破坏, 土壤有机质分解加剧, 有机质含量明显降低<sup>[10]</sup>。据此, 本文通过选取桂林毛村典型岩溶区不同的土地利用类型, 对不同土地利用方式下土壤有机碳矿化累积量、矿化速率进行了研究, 为进一步研究和评价岩溶地区不同土地利用方式对土壤有机碳的影响以及探明土壤固碳机制提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西桂林毛村典型的峰丛洼地和峰丛谷地( $110^{\circ}19'E$ ,  $25^{\circ}25'N$ ), 该地属中亚热带湿润季风气候, 气候温和, 雨量充沛, 夏季常出现高温、湿热、暴雨频繁, 秋季雨量迅速减少, 常有旱秋。年平均气温  $18.6^{\circ}\text{C}$ , 年均降雨量  $1980 \text{ mm}$ 。据桂林气象站多年观测资料统计, 雨季一般为每年的 3—8 月份, 最大降雨量连续出现在 4—7 月, 占全年降雨量的 50% 以上。

### 1.2 样品采集与处理

在研究区分别取由灰岩发育的 pH 值为中性偏碱性的棕色石灰土的 4 种有代表性的土地利用类型——林地、灌丛、旱耕地、果园作为研究对象。林地主要为青冈栎和栲树为主的常绿阔叶林, 灌丛主要为檫木、木荷、蕨类植物, 洼地处的旱地种植了多年的玉米; 果园也处在洼地(种植十多年的柚子园)。

采样选用典型样地取样法, 开挖  $60 \text{ cm}$  深土坑, 沿土壤剖面取  $0-20$ ,  $20-40$  和  $40-60 \text{ cm}$  的 3 层土样。由于林地土层较薄, 仅采集到  $0-20$  和  $20-40 \text{ cm}$  土层的土样。各层采用土样五点取样法取得的土混合后, 立即放入自封袋中带回实验室, 去除碎石、残根等杂物, 自然风干后研磨, 过  $2 \text{ mm}$  的筛后, 用四分法取一部分进行再次研磨, 过  $100$  目的筛待用。

### 1.3 分析方法

1.3.1 总碳与惰性碳的测定 土壤总有机碳含量用重铬酸钾容量法(外加热法)测定。土壤惰性碳用酸水解法测定, 具体步骤为: 取过  $100$  目筛风干土  $1 \text{ g}$  于消煮管中, 加入  $20 \text{ ml}$  浓度为  $6 \text{ mol/L}$  的  $\text{HCl}$ , 在  $115^{\circ}\text{C}$  下消煮  $16 \text{ h}$ 。冷却后用蒸馏水洗至中性并烘干, 然后用重铬酸钾容量法(外加热法)测定所得有机碳含量即为惰性碳含量。

1.3.2 pH 值的测定 pH 值用 pH 计测定, 水土比为  $2.5:1$ 。

1.3.3 土壤全磷、全钾的测定 土壤全磷、全钾分别用酸溶钼锑抗比色法和火焰光度法进行测定<sup>[11]</sup>。

1.3.4 土壤培养和有机碳矿化释放的  $\text{CO}_2-\text{C}$  的测定 取过  $2 \text{ mm}$  筛的风干土  $100 \text{ g}$ , 将含水量调整为其田间持水量的  $70\%$ , 装在密封培养瓶后放入恒温培养箱内(重复 3 次), 将温度控制在  $25^{\circ}\text{C}$  的黑暗条件下进行培养。用  $20 \text{ ml}$   $0.5 \text{ mol/L}$   $\text{NaOH}$  溶液吸收释放的  $\text{CO}_2$ 。培养  $2, 4, 7, 11, 18, 25, 32, 39 \text{ d}$  后, 用针筒吸出碱液加入  $\text{BaCl}_2$  ( $1 \text{ mol/L}$ )  $20 \text{ ml}$ , 再用  $0.5 \text{ mol/L}$   $\text{HCl}$  滴定法测定释放的  $\text{CO}_2$ , 最后把  $\text{CO}_2$  累积释放量换算为碳矿化释放的有机碳含量或矿化速率<sup>[12]</sup>。

### 1.4 数据分析

取部分指标重复测定 3 次的平均值作为试验地土壤基本理化性质(表 1)。采用 SPSS 13.0 进行不同土地利用方式下不同土层土壤有机碳含量和惰性有机碳含量的单因素方差分析, 不同土地利用方式土壤有机碳释放速率运用 origin 8.0 进行作图, 土壤有机碳累计矿化量的拟合方程借助 DPS 7.05 统计软件中的一元非线性模块完成。

表 1 土壤基本理化性质

土地利用类型	深度/ cm	含水量/ %	pH 值	土壤钾/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	土壤磷/ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
旱地	0—20	28	7.12	5.20	639.02
	20—40	61	7.19	4.90	623.36
	40—60	28	7.05	5.10	2565.47
灌丛	0—20	19	6.90	4.20	568.54
	20—40	21	6.58	4.20	458.90
	40—60	21	6.42	3.90	153.49
果园	0—20	17	6.12	5.90	2408.85
	20—40	20	5.89	6.20	975.76
	40—60	24	6.37	7.90	1132.38
森林	0—20	21	7.23	4.30	4233.50
	20—40	22	7.41	4.60	1578.75

## 2 研究结果

### 2.1 不同土地利用类型不同土层的土壤有机碳储量

用重铬酸钾容量法和酸水解法分别测得土壤有机碳总量和惰性有机碳含量(见表 2—3), 由表 2 可见, 4 种土地利用方式土壤有机碳含量均随土层加深而递减, 其中灌丛和林地土壤中递减的幅度比旱地和果园中大。各土壤剖面上相邻土层土壤有机碳含量递减幅度不同, 其中灌丛  $0-20$  与  $20-40 \text{ cm}$  土层差异最大, 林地  $0-20$  与  $20-40 \text{ cm}$  土层次之。相同深度范围的土层中,  $0-20 \text{ cm}$  森林土壤有机碳含量为  $38.17 \text{ g/kg}$ , 分别比灌丛、旱地、果园多  $47.89\%$ ,  $91.33\%$ ,  $196.35\%$ ;  $20-40 \text{ cm}$  森林土壤有机碳含量为  $33.53 \text{ g/kg}$ , 分别比旱地、灌丛、果园多  $116.29\%$ ,  $128.41\%$ ,

216.02%; 40—60 cm 旱地土壤有机碳含量大小为 14.15 g/kg, 比灌丛和果园分别高 17.33%, 74.32%。林地的土壤碳储量最高, 灌丛的土壤碳储量次之, 均显著高于其它所有土地利用类型, 这在一定程度上表明, 人类改变土地利用方式极大地破坏了土壤碳储量, 使土壤固持有机碳的能力大大降低。在 0—20 cm 土层中, 各土地利用方式下土壤有机碳含量差异显著 ( $p < 0.05$ ); 20—40 cm 土层中, 旱地和灌丛的差异不显著 ( $p > 0.05$ ); 在 40—60 cm 土层中, 各土地利用方式下土壤有机碳含量差异均不显著。说明, 人类干扰方式主要影响 0—20 cm 深度范围土层, 而对 40—60 cm 土层的影响不大。

表 2 不同土地利用方式不同土层土壤有机碳含量 g/kg

土层深度/cm	旱地	灌丛	果园	林地
0—20	19.95 Aa	25.81 Ab	12.88 Ac	38.17 Ad
20—40	16.47 Ba	14.68 Ba	10.61 Ab	33.53 Bc
40—60	14.15 Ba	12.06 Ca	8.06 Ba	—

注: 相同小写字母表示不同土地利用方式在同一土层土壤有机碳含量差异不显著, 相同大写字母表示同一土地利用方式不同土层土壤活性有机碳含量差异不显著 ( $p = 0.05$ )。下同。

惰性有机碳不易分解, 是土壤有机碳中最稳定的部分<sup>[8]</sup>。从表 3 可见, 几种土地利用方式下惰性有机碳含量的变化趋势和土壤有机碳总量的趋势基本类似。区别在于林地 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤

惰性有机碳含量差异不显著, 而旱地和灌丛在 20—40 cm 惰性有机碳含量差异显著。40—60 cm 土层土壤中, 各种土地利用方式下土壤惰性有机碳含量差异均显著, 表明土地利用方式对 40—60 cm 土层土壤中惰性有机碳含量有较大影响。

表 3 不同土地利用方式各土层土壤惰性有机碳含量 g/kg

土层深度/cm	旱地	灌丛	果园	林地
0—20	17.42 Aa	20.94 Aa	10.72 Ab	25.13 Ac
20—40	14.07 Ba	10.22 Bb	9.72 Ab	23.45 Ac
40—60	13.40 Ba	7.71 Cb	4.86 Bc	—

### 2.2 土壤有机碳矿化速率

不同土地利用方式下土壤有机碳分解速率与培养时间的动态趋势如图 1—4 所示, 旱地和灌丛 0—20 cm 土层土壤有机碳分解速率明显大于 20—40, 40—60 cm 土层, 而果园和森林的相邻土层有机碳矿化速率差别不大。随着培养时间的增加, 土壤有机碳矿化速率都降低, 培养前半个月速率下降最快, 下降了 80%~90%, 后期下降速率逐渐趋于缓和, 且 CO<sub>2</sub>-C 释放速率不到培养第 2 d 的 20%。从图可以看出, 0—20, 20—40 cm 土层, 有机碳矿化速率均是林地 > 灌丛 > 旱地 > 果园, 并且在 20—40 cm 土层林地土壤有机碳矿化速率明显大于另 3 种土地利用类型, 说明有机碳的分解速率与总有机碳储量大小呈正相关。

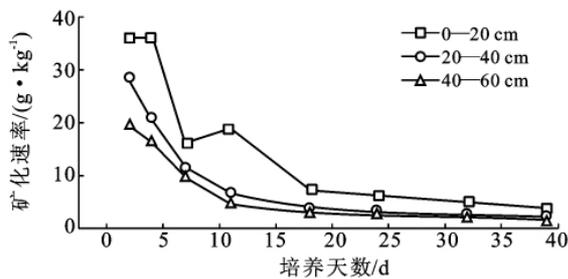


图 1 旱地土壤有机碳矿化速率

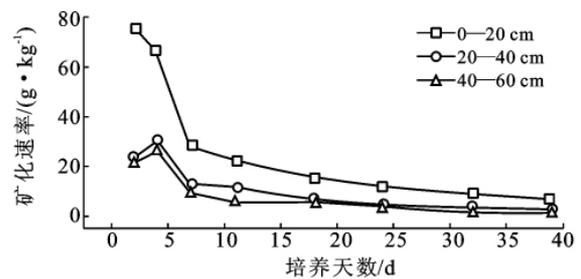


图 2 灌丛土壤有机碳矿化速率

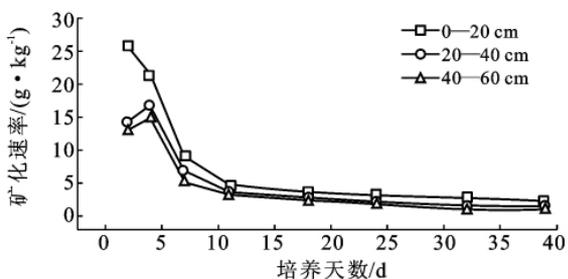


图 3 果园土壤有机碳矿化速率

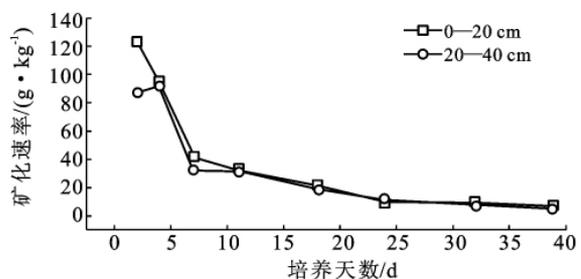


图 4 森林土壤有机碳矿化速率

### 2.3 土壤有机碳累积矿化量

土壤有机碳累积矿化量指土壤培养 39 d 内有机碳

矿化释放碳的数量(以每 1 kg 干土释放的 CO<sub>2</sub>-C 的 mg 数计), 它是土壤矿化速率的表征之一。不同土地利

用方式下土壤碳矿化释放有机碳的量不同。不同土层不同土地利用方式下土壤有机碳累积释强度都随时间变化趋势逐渐减缓。0—20 cm 林地土层有机碳累积释放量为 3 234 mg/kg, 分别比灌丛、旱地、果园高 30.35%, 126.96%, 292.0%; 20—40 cm 森林土层有机碳累积释放量为 2 760 mg/kg, 分别比灌丛、旱地、果园高 154.85%, 255.90%, 373.41%; 40—60 cm 灌丛土层有机碳累积释放量为 786.5 mg/kg, 分别比旱地、果园高 32.41%, 62.5%。

各类土地利用方式下不同土层土壤累积释有

机碳总量的顺序均为 0—20 cm 土层 > 20—40 cm 土层 > 40—60 cm 土层, 这种趋势与有机碳储量大小规律一致。

#### 2.4 土壤有机碳累计分解量曲线拟合

各种土地利用条件下各土层土壤有机碳分解呈相同趋势, 包括前期快速分解和后期稳定速率分解 2 个阶段。利用 origin 8.0 拟合各处理 CO<sub>2</sub> 累积释放量(mg/kg)和培养天数的二次函数关系(表 4), 相关系数 0.94 以上, 说明二次方程能很好地描述本研究的土壤有机碳分解状况。

表 4 培养期间土壤有机碳累计分解量曲线拟合方程

土地利用类型	深度/cm	累积释放 CO <sub>2</sub> 拟合曲线	R <sup>2</sup>	培养期间累计释放 CO <sub>2</sub> 总量/(mg·kg <sup>-1</sup> )
旱地	0—20	$Y=31.0244+77.0521x-1.0938x^2$	0.9703	1424.5
旱地	20—40	$Y=55.2698+41.4591x-0.612670x^2$	0.9445	775.5
旱地	40—60	$Y=41.6196+31.0695x-0.449238x^2$	0.9439	594.0
灌丛	0—20	$Y=117.8675+126.6322x-1.7442x^2$	0.9650	2481.0
灌丛	20—40	$Y=28.2515+58.6783x-0.836433x^2$	0.9691	1083.0
灌丛	40—60	$Y=36.2770+44.4190x-0.663308x^2$	0.9587	786.5
果园	0—20	$Y=74.5856+40.0719x-0.554069x^2$	0.9379	825.0
果园	20—40	$Y=43.9534+30.5271x-0.4453350x^2$	0.9388	583.0
果园	40—60	$Y=37.1032+26.8233x-0.407596x^2$	0.9381	484.0
森林	0—20	$Y=198.7459+186.8838x-2.8897x^2$	0.9513	3234.0
森林	20—40	$Y=92.8133+161.2744x-2.4506x^2$	0.9664	2760.0

### 3 结论

(1) 土壤有机碳矿化速率是土壤有机碳分解速率的重要表征指标, 岩溶区林地、灌丛被改变为其它土地利用方式后, 土壤有机碳的矿化速率显著下降。在控制温度、湿度的实验室培养条件下, 土壤有机碳培养 39 d 后, 矿化累积释放的有机碳含量和分解速率大小依次为: 林地 > 灌丛 > 旱地 > 果园。这种变化趋势与其它相关研究结果基本一致。吴建国等<sup>[12]</sup>研究表明, 农田和草地土壤矿化释放的 CO<sub>2</sub>-C 含量分别比天然林低 65% 和 23%; 人工林比农田和草地分别平均高 155% 和 17%。戴慧等<sup>[13]</sup>对浙江天童地区的栲树群落进行研究表明, 常绿阔叶林土壤的固碳能力高于其它土地利用类型土壤, 常绿阔叶林被改为其它土地利用方式后, 土壤有机碳含量和矿化速率显著下降。可能原因为林地改为农田或草地后, 土壤团聚体被破坏, 残留物被移走, 土壤碳输入减少, 导致有机碳含量下降, 生产力降低。反之, 枯枝落叶的输入增加和对土壤扰动的减少引起有机碳含量增加<sup>[12]</sup>。耕作对土壤有机碳的损失有着很大的影响, 旱地有机碳储量减少主要是因为翻耕将深层土壤暴露于外界环

境而引起碳流失, 果园有机碳储量减少是由于长时间闲置导致腐殖质输入大量减少<sup>[8]</sup>。而免耕土壤有机碳提高主要是因为团聚体的保护而变得稳定<sup>[14]</sup>。只要合理耕作, 增加旱地土壤作物覆盖时间, 桔梗还地, 充分发挥旱地和果园的固碳潜能, 就能提高旱地和果园土壤有机碳的储量。

(2) 影响土壤矿化的因素是复杂的, 在生物物理因素与固碳机理方面, 土地利用变化后土壤有机碳储量增加是因为作物碳的输入和土壤的固定和稳定作用<sup>[14]</sup>。生物物理因素包括土地利用方式和植被类型的改变引起凋落物质总量和性质的改变, 参与土壤有机碳矿化过程的土壤动物和微生物种类组成的改变以及土壤物理和化学性质的改变等<sup>[15]</sup>。在土壤的固定和稳定作用方面, 吴建国研究表明土地利用对土壤矿化的机制与土壤有机质的稳定性有很大的关系<sup>[12]</sup>。还有一些研究表明土地利用变化对土壤有机碳矿化速率与土壤颗粒粒径相关。如 Motavalli 等<sup>[16]</sup>发现热带森林土壤矿化速率与土壤有机碳、溶解性微生物生物量碳和轻组有机碳的含量密切相关; Rovira 等<sup>[17]</sup>发现土壤碳的矿化速率随土壤有机质颗粒的变小而减弱。土地利用变化对土壤碳矿化的影

响比较复杂,岩溶区土壤固碳的影响机制还处于探索的阶段。在未来的研究中,应深入了解岩溶区土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响机制,发挥岩溶区土壤固定有机碳的潜能,从而控制着陆地生态系统中碳的含量和转变。

(3) 在不同土层,有机碳矿化速率受土地利用方式的影响程度不同。本研究显示,土壤碳矿化速率随土层加深而递减,其中灌丛与旱地递减幅度较大。各土地利用方式中,0—20 cm 层土壤有机碳矿化速率差异最大。林地土壤有机碳在 20—40 cm 层矿化速率及累积释放量与其它 3 种土地利用类型差异最明显,说明林地土在 20—40 cm 层腐殖质含量仍较高,而改为其它土地利用类型后,这一层土壤腐殖质补给不足。然而在 40—60 cm 层处各土地利用类型中有机碳含量、惰性有机碳含量及有机碳释放累积量差异都不显著 ( $p < 0.05$ ),说明土地利用方式的改变对 40—60 cm 土层的影响不大。有机碳矿化速率和有机碳含量呈正相关,岩溶区土地利用变化对土壤碳矿化速率的影响程度也随有机碳含量及土层深度的不同而有所不同。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995(1): 77-91.
- [2] Batjes N H. The total C and N in soils of the world[J]. *European J. Soil Society*, 1996, 47:51-63.
- [3] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44:81-99.
- [4] 史学军,陈锦盈,潘剑君,等. 几种不同类型土壤有机碳库容大小及周转研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 123-127.
- [5] 王红,范志平,邓东周,等. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(9):1469-1475.
- [6] 周焱,徐宪根,阮宏华,等. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 1901-1907.
- [7] 刘德燕,宋长春,王丽,等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3525-3530.
- [8] 陈锦盈,孙波,李忠佩,等. 不同土地利用类型土壤有机碳各库大小及分解动态[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1):91-95(179).
- [9] Yuan D X. Contribution of IGCP379 "Karst Processes and Carbon Cycle" to global change[J]. *Episodes*, 1998, 21(3):198.
- [10] 李孝良,陈效民,周练川,等. 西南喀斯特石漠化过程中土壤有机质组分及其影响因素[M]. *山地学报*, 2010, 28(1): 56-62.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,1999.
- [12] 吴建国,张小全,徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较[M]. *植物生态学报*, 2004, 28(4):530-538.
- [13] 戴慧,王希华,阎恩荣,等. 浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响[M]. *生态学杂志*, 2007, 26(7): 1021-1026.
- [14] 潘根兴,李恋卿,郑聚锋,等. 土壤碳循环研究及中国稻田土壤碳固碳研究的进展与问题[M]. *土壤学报*, 2008, 45(5):901-914.
- [15] Alvarez R, Alvarez C R. Soil organic matter pools and their associations with carbon mineralization kinetics [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64:184-189.
- [16] Motavalli P P, Palm C A, Parton W J, et al. Comparison of laboratory and modeling simulation methods for estimating carbon pools in tropical forest soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1994, 26: 935-944.
- [17] Rovira P, Vallejo R. Mineralization of carbon and nitrogen from plant debris as affected by debris size and depth of burial [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 327-339.