

## 上海典型植物群落土壤有机碳矿化特征

郝瑞军<sup>1</sup>, 方海兰<sup>1</sup>, 沈烈英<sup>1</sup>, 车玉萍<sup>2</sup>

(1. 上海市园林科学研究所, 上海 200232; 2. 中国科学院南京土壤研究所 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 选择上海市 5 种典型植物群落采样并布置室内恒温培养试验, 观测了土壤有机碳矿化量大小及动态变化过程, 并比较了不同植物群落土壤有机碳矿化特征差异。结果表明, 不同群落间土壤有机碳、微生物量碳质量分数差异显著, 但均高于草坪; 而同一群落内土壤有机碳、微生物量碳则随土层深度的增加而逐渐下降; 培养期间, 土壤有机碳矿化量高低顺序为桂花 *Osmanthus fragrans* > 草坪 (黑麦草 *Lolium perenne*) > 樟树 *Cinnamomum camphora* > 池杉 *Taxodium ascendens* > 竹林 (孝顺竹 *Bambusa multiplex*), 不同植物群落间差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ); 同一群落土壤有机碳矿化量随土层的加深而递减, 但不同群落间递减幅度存在差异, 其中降幅最大为池杉, 降幅最小分别为桂花 (20 ~ 40 cm) 和竹林 (40 ~ 60 cm); 培养期间, 各植物群落土壤有机碳矿化动态变化过程趋势相同, 均表现为培养前期快速下降, 培养后期保持相对稳定的趋势, 与培养时间之间符合对数关系, 而有机碳累计矿化量与培养时间则符合显著的线性关系, 各群落高低顺序为桂花 > 草坪 > 樟树 > 池杉 > 竹林。研究结果初步表明, 相对于草坪, 深根系植物能有效提高土壤有机碳和微生物量碳, 提高土壤有机碳库质量分数。图 3 表 4 参 20

**关键词:** 土壤学; 植物群落; 有机碳矿化; 微生物量碳; 矿化率

中图分类号: S153.6; S714.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-5692(2010)05-0664-07

## Soil organic carbon mineralization with urban plant communities in Shanghai

HAO Rui-jun<sup>1</sup>, FANG Hai-lan<sup>1</sup>, SHEN Lie-ying<sup>1</sup>, CHE Yu-ping<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Landscape and Gardening, Shanghai 200232, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China)

**Abstract:** Soil samples for five typical urban plant communities: *Osmanthus fragrans*, *Lolium perenne*, *Cinnamomum camphora*, *Taxodium ascendens*, and *Bambusa multiplex*, were collected in Shanghai Gongqing Forest Park. Laboratory incubation tests were then used to analyze soil microbial biomass carbon (MBC) and to examine soil organic carbon (SOC) mineralization with its dynamic patterns. Analyses included fitting to a logarithmic equation and a correlation analysis. Results showed that SOC and MBC had significant differences among the different plant communities, but both decreased with increasing soil depth. Daily SOC mineralization was significantly different ( $P < 0.05$ ) with *O. fragrans* > *L. perenne* > *C. camphora* > *T. ascendens* > *B. multiplex*. For a given plant community, SOC mineralization decreased as soil depth increased with the extent of decrease different for each plant community. SOC mineralization patterns for all plant communities were alike: decreasing rapidly as incubation began and then being relatively constant fitting a logarithmic equation. Cumulative SOC mineralization was *O. fragrans* > *L. perenne* > *C. camphora* > *T. ascendens* > *B. multiplex* and was linearly correlated with the incubation time. Thus compare to lawn (*L. perenne*), deep-rooted plants could increase SOC and MBC, thus increasing the soil carbon pool. [Ch, 3

---

收稿日期: 2009-12-28; 修回日期: 2010-04-01

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2007)第 10-1 号]

作者简介: 郝瑞军, 工程师, 硕士, 从事城市土壤生态与植物营养研究。E-mail: ruijunhao@gmail.com

fig. 4 tab. 20 ref.]

**Key words:** soil science; plant community; soil organic carbon mineralization; microbial biomass carbon; rate of soil organic carbon mineralization

有机碳矿化是土壤碳循环的重要环节, 直接关系到土壤中养分元素的释放与供应、温室气体的形成以及土壤质量的保持等<sup>[1]</sup>, 对其规律的研究已成为土壤、生态、环境等领域的热点<sup>[2-3]</sup>。随着全球气候变暖, 土壤有机碳矿化分解的速率可能会加快, 进而导致土壤的碳汇功能减弱。目前, 相关研究主要集中于自然森林土壤或农田土壤, 而对于高速城市化进程影响下土壤有机碳矿化规律的研究较少<sup>[4-5]</sup>; 城市土壤虽然面积较小, 但受人为活动影响强烈(如土壤压实与污染), 在维持园林植物生长, 改善城市生态环境等方面有重要作用。研究表明, 植物群落是影响土壤有机碳矿化的关键因素<sup>[6]</sup>, 根系分泌物以及凋落物是土壤有机碳的主要来源<sup>[7]</sup>; 不同植物群落可能会导致土壤“碳源”与“碳汇”功能的转变。因此, 研究城市典型植物群落土壤有机碳矿化的变化规律, 必将对优化植物景观配置和城市生态环境建设具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概括及样品采集

选择上海市共青国家森林公园作为研究地点。该公园位于上海市杨浦区, 原为黄浦江滩地。1956年, 上海市人民政府疏浚河道, 取泥围垦, 辟为苗圃; 1958年, 在圃内建立了青春实验果园, 取名为共青苗圃; 1982年初, 作为扩大公共绿地面积的重点实事工程, 将苗圃改建为共青国家森林公园。该公园总占地131.00 hm<sup>2</sup>, 其中开放公共绿地为125.00 hm<sup>2</sup>, 是上海居民主要的休闲娱乐场所。

在共青国家森林公园内选择建成年限相近, 管理方式、开放程度相对一致的池杉 *Taxodium ascendens*, 樟树 *Cinnamomum camphora*, 桂花 *Osmanthus fragrans* 和竹林(孝顺竹 *Bambusa multiplex*)等4种群落进行土壤样品采集, 各群落内均以所选植物为优势种(各群落特征见表1), 同时选择相邻的草坪(黑麦草 *Lolium perenne*)土壤作为对照。

在不同群落内划定200 m<sup>2</sup>(14.5 m × 14.5 m)

的标准样方, 以梅花型布置5个点, 清除土壤表层枯枝落叶层, 分别按0~20, 20~40, 40~60 cm分层取样, 各土壤样品分成2份, 一份在新鲜状态下过2 mm筛, 放入4℃冰箱中, 供土壤微生物量碳和有机碳矿化测定; 另一份在室内自然风干后磨细, 供土壤基本理化性质测定(表2)。

### 1.2 土壤有机碳矿化培养实验

采用碱液吸收法测定培养过程中土壤有机碳矿化量<sup>[8]</sup>。具体方法为: 称取相当于风干土壤50 g的新鲜土样于750 mL培养瓶中, 平铺在瓶底部, 根据土壤含水量及最大持水量计算出最大持水量为60%时的需水量, 将它们均匀加入铺于瓶底的土壤中。然后将盛有5 mL 0.3 mol·L<sup>-1</sup>氢氧化钠溶液的特制容量瓶小心地置于培养瓶内, 将培养瓶加盖密封, 在(28 ± 1)℃的恒温培养箱中培养, 重复3次·处理<sup>-1</sup>。在培养开始后的第1, 2, 4, 7, 11, 18, 25, 32, 39天取出容量瓶, 将其中的溶液完全洗入三角瓶中, 然后加入1.0 mol·L<sup>-1</sup>氯化钡溶液2 mL及2滴酚酞指示剂, 用标准酸(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)滴定至红色消失, 根据二氧化碳的释放量计算培养期内土壤有机碳的矿化量。

### 1.3 分析方法

土壤微生物量碳采用氯仿熏蒸提取法<sup>[9]</sup>。称取过2 mm筛的30 g新鲜土样于培养皿中, 置于已放置50 mL无乙醇氯仿的真空干燥器内, 反复抽气至氯仿沸腾2 min, 在(28 ± 1)℃恒温培养箱中培养24 h后打开干燥器, 取出氯仿, 覆盖好干燥器盖, 用真空泵抽空, 以驱除土壤中残余氯仿。称取熏蒸

表 1 不同群落主要植物特征

Table 1 Characteristics of the tested plant communities in Shanghai

植物群落	平均高度/m	胸径/cm	郁闭度/%	主要物种
池杉	21.24	30.42	82	池杉, 麦冬
樟树	14.32	29.42	86	樟树, 八角金盘, 麦冬
桂花	6.67	10.80	93	金桂, 麦冬
竹林	7.00		91	孝顺竹, 杂草

表2 供试土壤基本理化性质

Table 2 Chemical and physical properties of the tested soils

植物群落	土壤深度/cm	pH值(H <sub>2</sub> O)	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	速效氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	微生物量碳/(mg·kg <sup>-1</sup> )
池杉	0~20	7.99	16.55 a	1.35 a	97.75	19.00	175.64a
	20~40	8.08	10.20 b	0.82 b	41.12	14.13	56.13b
	40~60	8.09	5.03 c	0.45 c	25.44	11.63	63.60 b
樟树	0~20	8.14	14.97 a	1.13 a	67.95	27.13	123.06 a
	20~40	8.19	11.24 b	0.90 b	39.90	33.88	92.35 b
	40~60	8.17	12.16 b	1.02 a	44.26	23.00	112.15c
桂花	0~20	8.17	17.82 a	1.59 a	89.91	22.25	359.47 a
	20~40	8.19	12.08 b	1.07 b	73.53	12.38	174.16 b
	40~60	8.19	6.97 c	0.70c	46.00	6.13	66.63 c
竹林	0~20	8.04	13.48 a	1.25 a	74.40	14.13	264.15 a
	20~40	7.97	8.27 b	0.70 b	35.89	13.31	80.21 b
	40~60	7.90	7.27 b	0.61 b	26.48	16.00	94.24 b
草坪	0~20	8.33	11.10 a	1.01 a	60.64	5.25	206.15 a
	20~40	8.32	6.66 b	0.64 b	24.39	2.38	33.11 b
	40~60	8.39	4.88 b	0.56 b	20.21	3.25	24.76 c

说明：同一群落不同土层深度不同字母表示在0.05水平差异显著。

后的土样20 g，加入0.5 mol·L<sup>-1</sup>硫酸钾溶液50 mL，震荡提取30 min，未熏蒸土样进行同样提取操作。提取液中的有机碳质量分数用费恩法测定，根据熏蒸和未熏蒸处理土样提取液中有机碳质量分数之差，乘以转换系数2.64，求得土壤样品中微生物量碳质量分数。其他常规指标分析依照《土壤农业化学分析方法》进行<sup>[8]</sup>。

#### 1.4 数据统计分析

采用Microsoft Excel 2003制图，相关指标的差异显著性检验及回归分析采用SPSS 13.0软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同群落土壤有机碳、微生物量碳质量分数

从表2可以看出，不同植物群落土壤有机碳、微生物量碳质量分数显著不同。0~20 cm土壤中有机碳质量分数以桂花最高，草坪最低，后者仅为前者的62.29%，桂花和池杉群落土壤有机碳显著高于其他群落( $P<0.05$ )；20~40 cm土壤中有机碳质量分数高低顺序为桂花>樟树>池杉>竹林>草坪，其中桂花、樟树、池杉群落显著高于草坪；40~60 cm土壤中有机碳质量分数高低顺序为樟树>竹林>桂花>池杉>草坪，樟树显著高于其他群落( $P<0.05$ )；而在整个剖面中有机碳质量分数高低顺序为樟树>桂花>池杉>竹林>草坪。总体来看，不论在整个剖面还是各层次中，有机碳质量分数均以草坪最低。

微生物量碳质量分数表征土壤活性强度。结果表明(表2)，0~20 cm土壤中微生物量碳高低顺序为桂花>竹林>草坪>池杉>樟树，桂花显著高于其他群落( $P<0.05$ )，樟树仅为桂花群落土壤的34.23%；而草坪土壤微生物量碳也高于池杉和樟树，这可能与其根系主要集中在表层，微生物活性较强有关；20~40 cm与40~60 cm土壤中微生物量碳均以草坪土壤最低，高低顺序分别为桂花>樟树>竹林>池杉>草坪、樟树>竹林>桂花>与池杉>草坪。总体来看，整个土壤剖面中微生物量碳高低顺序为桂花>竹林>樟树>池杉>草坪，说明长期栽植乔灌木后有助于增加土壤微生物量碳，特

别是下层土壤中的质量分数, 提高土壤活性。

结果还表明, 同一群落土壤有机碳、微生物量碳质量分数随土层的加深呈逐渐降低的趋势(表 2), 特别是表层( $0 \sim 20$  cm)显著高于下层( $P < 0.05$ ), 这种差异可能主要是因为表层土壤受枯枝落叶层的累积与分解及人为施肥, 而下层土壤受此影响较小有关。

## 2.2 不同群落土壤有机碳矿化量及动态过程

土壤有机碳矿化量用单位质量干土释放的二氧化碳量  $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  来表征, 其大小受微生物及活性底物的影响<sup>[10]</sup>。结果表明(图 1), 不同群落土壤有机碳矿化量差异显著, 培养第 1 天后有机碳矿化量以桂花最高, 达  $47.07 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 并显著高于其他群落( $P < 0.05$ ), 而其余 4 种群落差异不显著, 变化范围为  $31.19 \sim 35.34 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 整个培养过程中有机碳矿化量仍以桂花最高(表 3), 大小为  $14.21 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 最小为竹林, 大小为  $9.55 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。总体来看, 整个培养期间有机碳矿化量大小顺序为桂花>草坪>樟树>池杉>竹林。

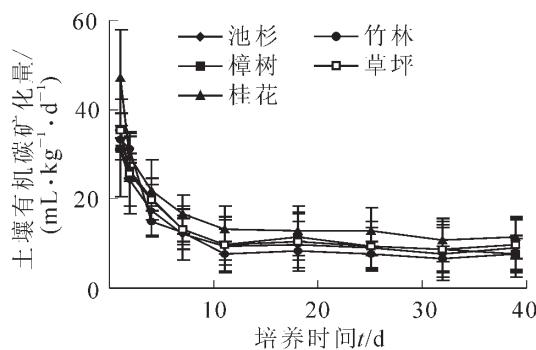


图 1 培养期间不同群落土壤有机碳矿化量变化

Figure 1 Changes in SOC mineralization under different plant communities during incubation

表 3 不同群落土壤有机碳矿化量随土层深度的变化

Table 3 Changes in SOC mineralization with soil depth under different plant communities

土层深度/cm	有机碳矿化量/( $\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )				
	池杉	樟树	桂花	竹林	草坪
0 ~ 20	$17.06 \pm 0.52$ a	$16.38 \pm 0.43$ a	$19.44 \pm 0.14$ a	$12.72 \pm 0.03$ a	$18.13 \pm 0.59$ a
20 ~ 40	$8.25 \pm 0.06$ b	$8.94 \pm 0.08$ b	$14.20 \pm 0.37$ b	$7.89 \pm 0.51$ b	$8.43 \pm 0.12$ b
40 ~ 60	$6.39 \pm 0.82$ b	$8.41 \pm 0.21$ b	$9.00 \pm 0.15$ c	$8.05 \pm 1.12$ b	$7.67 \pm 0.21$ b
平均	10.57	11.24	14.21	9.55	11.41

不同深度处土壤有机碳矿化量也差异明显(表 3), 均表现为随土层加深而递减, 其中降幅最大为池杉群落, 相对于  $0 \sim 20$  cm 的表层,  $20 \sim 40$  cm 和  $40 \sim 60$  cm 处分别下降了 51.64% 和 62.54%; 而有机碳矿化量降幅最小为桂花( $20 \sim 40$  cm)和竹林( $40 \sim 60$  cm), 相对于  $0 \sim 20$  cm 的表层分别下降了 26.95% 和 36.71%。统计表明, 有机碳矿化量均表现为表层( $0 \sim 20$  cm)显著高于下层( $P < 0.05$ ), 这种变化趋势与土壤有机碳和微生物量碳质量分数的变化趋势相似。

整个培养过程中, 不同群落土壤有机碳矿化量有明显差异, 但有机碳矿化动态过程却表现出相对一致的规律(图 1)。培养初期各群落土壤有机碳矿化量均较高, 但随着培养时间的延续, 有机碳日均矿化量不断降低, 至培养第 11 天, 降为开始时的 23.14%(竹林)~31.07%(樟树), 而在培养后期均保持相对稳定趋势, 相互之间的差异也保持相对稳定(图 1)。回归分析也表明, 在培养期间各群落土壤有机碳矿化的动态过程均符合对数关系(表 4)。李忠佩等<sup>[1]</sup>的研究也表明, 土壤有机碳矿化量随时间的变化符合对数函数, 相关性都达到了显著或极显著水平。

## 2.3 不同群落土壤有机碳累计矿化量和矿化率

有机碳累计矿化量是指在一定的培养条件下, 一段时间内土壤有机碳矿化释放的二氧化碳数量, 是有机碳矿化特征的指标<sup>[10]</sup>。从图 2 可见, 培养结束后, 有机碳累计矿化量最高为桂花, 达  $541.53 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 最小为竹林, 为  $364.11 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 前者是后者的 1.49 倍。不同群落土壤有机碳累计矿化量变化顺序为桂花>草坪>樟树>池杉>竹林, 其中, 草坪、樟树和池杉之间差异不显著, 桂花显著高于

表4 不同群落土壤有机碳矿化量、累计矿化量随培养时间变化的拟合方程

Table 4 Simulating equations for daily and cumulative mineralization of SOC under different plant communities

植物群落	相关方程(相关系数)	
	日均矿化量	累计矿化量
池杉	$y = -6.13\ln(x) + 27.86 (R^2 = 0.8948)$	$y = 9.33x + 47.28 (R^2 = 0.9891)$
樟树	$y = -6.43\ln(x) + 29.42 (R^2 = 0.9258)$	$y = 10.10x + 50.67 (R^2 = 0.9862)$
桂花	$y = -8.62\ln(x) + 38.36 (R^2 = 0.8445)$	$y = 12.59x + 64.28 (R^2 = 0.9912)$
竹林	$y = -7.58\ln(x) + 30.98 (R^2 = 0.8531)$	$y = 8.16x + 56.52 (R^2 = 0.9809)$
草坪	$y = -6.87\ln(x) + 30.77 (R^2 = 0.8857)$	$y = 10.01x + 52.92 (R^2 = 0.9888)$

说明: 式中  $y$  为有机碳日均或累计矿化量,  $x$  为培养时间。

其他群落 ( $P < 0.05$ ), 而竹林则显著低于其他群落。不同群落土壤有机碳累计矿化量在培养期间差异说明不同林分土壤矿化释放二氧化碳能力不同。回归分析表明, 供试土壤有机碳累计矿化量与培养时间的动态过程均符合线性关系(表4), 说明不同植物群落影响土壤有机碳矿化总量, 但矿化量的动态过程未因植物群落的不同而呈现差异。

不同群落土壤有机碳矿化的难易程度可用矿化率来表示<sup>[11]</sup>。从图3可见, 0~20 cm 土壤中, 土壤有机碳矿化率变化表现为草坪>樟树>桂花>池杉>竹林, 草坪土壤有机碳矿化率分别比樟树、桂花、池杉和竹林高 49.14%, 49.61%, 58.35% 和 72.97%。20~40 cm 与 40~60 cm 土层有机碳矿化率高低分别为草坪>桂花>竹林>池杉>樟树、草坪>桂花>池杉>竹林>樟树。

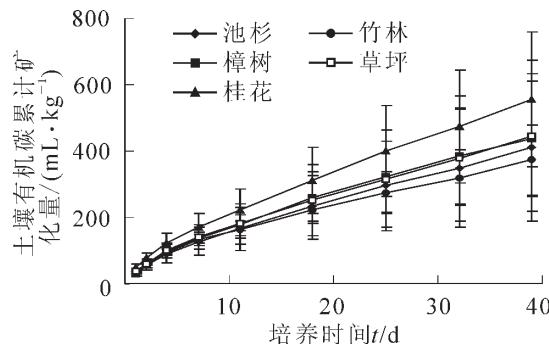


图2 培养期间不同植物群落土壤有机碳累计矿化量

Figure 2 Cumulative mineralization of SOC under different plant communities during incubation

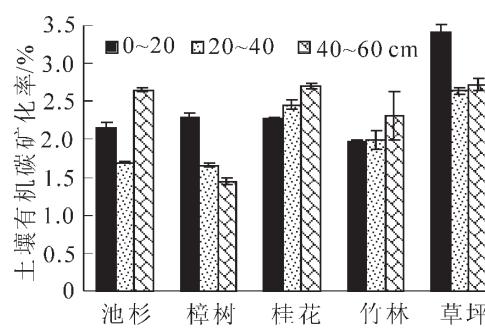


图3 不同植物群落土壤有机碳矿化率

Figure 3 Rate of SOC mineralization under different plant communities

同一群落不同土层有机碳矿化率也不同(图3)。樟树土壤有机碳矿化率随土层的加深而不断降低; 池杉和草坪土壤有机碳矿化率随土层加深表现为先降低后升高的趋势; 而桂花和竹林有机碳矿化率随土层的加深而不断升高。

### 3 讨论与结论

以往的大量研究都表明, 植物群落差异是导致土壤理化性质和生物学性质不同的主要原因。不同群落因凋落物以及根系分泌物不同使输入到土壤中的有机碳的质量和数量也随之改变, 导致土壤有机碳存在差异, 而土壤有机碳质量分数又反映了地表植物群落的空间分布和时间上的演替<sup>[12]</sup>。森林转变成耕地和草地后 5 a 内土壤有机碳分别损失了 40% 和 25%<sup>[13]</sup>, 而农用地恢复植被后可以使土壤有机碳和养分含量提高到自然林地的水平<sup>[14]</sup>。本研究选择建成近 30 a 的城市不同植物群落来比较不同群落对土壤性质的影响。结果表明, 不同植物群落土壤有机碳总量以及剖面分布均有显著差异, 可能与不同群落根系生物量大小及分布深度有关<sup>[15]</sup>, 但相对于草坪土壤, 深根系植物群落土壤有机碳以及微生物量碳质量分数均有明显的提高, 与以往研究结果一致。

土壤有机碳的矿化是土壤碳循环过程中关键步骤, 有机碳矿化速率高低及其过程动态是反映土壤质量变化的重要指标; 土壤微生物是土壤有机碳矿化的主要驱动者<sup>[16]</sup>, 通常情况下土壤微生物数量和活性越高则有机碳矿化速率也越高。本研究结果表明, 不同植物群落下土壤微生物量碳质量分数顺序为桂花>竹林>樟树>池杉>草坪, 而有机碳日均矿化量大小顺序为桂花>草坪>樟树>池杉>竹林, 两者并没有表现出完全一致的规律, 这可能与不同群落土壤微生物可直接利用的活性底物量及其在土壤有机碳中所占比例不同有关。姜培坤等<sup>[7]</sup>认为不同林分土壤活性碳质量分数, 易氧化态碳以常绿阔叶林最高, 水溶性碳质量分数常绿阔叶林和马尾松林均明显高于杉木林土壤; 张剑等<sup>[17]</sup>也认为与常绿阔叶林相比, 城市植物群落土壤活性有机碳质量分数显著降低, 且不同群落间也有明显差异。此外, 同一植物群落不同深度处土壤有机碳矿化量差异则表明土壤中可供微生物利用的有机碳的相对量及微生物对其利用情况不同<sup>[18]</sup>; 结果还表明, 城市不同植物群落有机碳矿化的动态过程却表现出一致的规律, 培养前期有机碳矿化量相对较高, 但随着培养时间延续迅速下降, 并在培养后期保持相对稳定趋势, 与培养时间均符合对数关系, 这与农田土壤有机碳矿化的研究结果基本一致<sup>[1]</sup>。

土壤有机碳的矿化率从某种程度上反映土壤有机碳释放的难易程度, 矿化率高则说明有机碳容易分解, 累积能力相对较差。从结果看, 供试 5 种植物群落土壤有机碳矿化率高低顺序为草坪>桂花>池杉>竹林>樟树, 因此, 相对来说, 樟树群落有利于土壤有机碳累积, 而草坪则最低, 这与整个土壤剖面中有机碳质量分数最高为樟树, 最低为草坪的顺序也基本吻合。卢立华等<sup>[19]</sup>研究表明, 同等立地条件下, 乔灌木根系生物量和地上部分凋落物均显著高于草坪; 周光胜等<sup>[20]</sup>研究也认为, 深根系植物的根系分泌物是土壤中有机质的主要来源。因此, 从提高土壤肥力, 增加土壤碳汇功能来看, 樟树作为园林绿化树种可优先考虑, 而草坪功效则最低。

#### 参考文献:

- [1] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, **41** (4): 544 – 552.  
LI Zhongpei, ZHANG Taolin, CHEN Biyun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon [J]. *Acta Pedol Sin*, 2004, **41** (4): 544 – 552.
- [2] KHALIL M I, HOSSAIN M B, SCHMIDHALTER U. Carbon and nitrogen mineralization in different upland soils of the subtropics treated with organic materials [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37**: 1507 – 1518.
- [3] ATSUNOBU K, SHINYA F, TAKASHI K. Factors controlling mineralization of soil organic matter in the Eurasian steppe [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40**: 947 – 955.
- [4] 徐桂林, 方晰, 田大伦, 等. 杉木林地不同更新方式土壤有机碳垂直分布及储量[J]. 浙江林学院学报, 2009, **26** (3): 333 – 340.  
XU Guilin, FANG Xi, TIAN Dalun, et al. Soil organic carbon: distribution and storage with five regeneration patterns in *Cunninghamia lanceolata* forests [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2009, **26** (3): 333 – 340.
- [5] 张履勤, 章明奎. 林地与农地转换过程中红壤有机碳、氮和磷库的演变[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (1): 75 – 79.  
ZHANG Lüqin, ZHANG Mingkui. Changes of organic C, N and P pools in red soil in transformation between agricultural land and forestry land [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (1): 75 – 79.
- [6] 陈亮中, 肖文发, 唐万鹏, 等. 三峡库区几种退耕还林模式下土壤有机碳研究[J]. 林业科学, 2007, **43** (4): 111 – 114.  
CHEN Liangzhong, XIAO Wenfa, TANG Wanpeng, et al. Study on soil organic carbon under several reforestation patterns in the three gorges reservoir area [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (4): 111 – 114.
- [7] 姜培坤. 不同林分下土壤活性有机碳库研究[J]. 林业科学, 2005, **41** (1): 10 – 13.  
JIANG Peikun. Soil active carbon pool under different types of vegetation [J]. *Sci Silv Sin*, 2005, **41** (1): 10 – 13.
- [8] 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.
- [9] VANCE E D, BROOKS P C. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biol Biochem*, 1987, **19**: 703 – 707.

- [10] 戴慧, 王希华, 阎恩荣. 浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2007, **26** (7): 1021 – 1026.  
DAI Hui, WANG Xihua, YAN Enrong. Effects of land use type on soil organic carbon mineralization in Tiantong, Zhejiang Province [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26** (7): 1021 – 1026.
- [11] 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[J]. 植物生态学报, 2004, **28** (4): 530 – 538.  
WU JianGuo, ZHANG Xiaoquan, XU Deying. The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan mountain forest zone [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, **28** (4): 530 – 538.
- [12] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后枯落物对土壤的影响[J]. 林业科学, 2007, **43** (7): 112 – 119.  
GONG Wei, HU Tingxing, WANG Jingyan, et al. Impacts of litter on soil in the natural evergreen broadleaved forests after artificial regeneration in southern Sichuan [J]. *Sci Silv Sin*, 2007, **43** (7): 112 – 119.
- [13] DETWILER R P. Land use change and the global carbon cycle: the role of tropical soils [J]. *Biogeochemistry*, 1986, **2** (1): 67 – 93.
- [14] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. 中国农业科学, 2007, **40** (8): 1712 – 1721.  
LI Zhongpei, WU Xiaocheng, CHEN Biyun. Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns [J]. *Sci Agric Sin*, 2007, **40** (8): 1712 – 1721.
- [15] 王俊波, 季志平, 白立强, 等. 刺槐人工林土壤有机碳与根系生物量的关系[J]. 西北林学院学报, 2007, **22** (4): 54 – 56.  
WANG Junbo, JI Zhiping, BAI Liqiang, et al. The relation between soil organic carbon and root biomass in plantation [J]. *J Northwest For Univ*, 2007, **22** (4): 54 – 56.
- [16] CAYUELA M L, SINICCO T, MONDINI C. Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil [J]. *Appl Soil Ecol*, 2009, **41**: 118 – 127.
- [17] 张剑, 汪思龙, 王清奎, 等. 不同森林植被下土壤活性有机碳含量及其季节变化[J]. 中国生态农业学报, 2009, **17** (1): 41 – 47.  
ZHANG Jian, WANG Silong, WANG Qingkui, et al. Content and seasonal change in soil labile organic carbon under different forest covers [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2009, **17** (1): 41 – 47.
- [18] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响 [J]. 生态学杂志, 2007, **26** (12): 1918 – 1923.  
WANG Qingkui, WANG Silong, YU Xiaojun, et al. Soil carbon mineralization potential and its effect on soil active organic carbon in evergreen broadleaved forest and Chinese fir plantation [J]. *Chin J Ecol*, 2007, **26** (12): 1918 – 1923.
- [19] 卢立华, 贾宏炎, 何日明, 等. 南亚热带6种人工林凋落物的初步研究[J]. 林业科学研究, 2008, **21** (3): 346 – 352.  
LU Lihua, JIA Hongyan, HE Rimeng, et al. A preliminary study on litter falls of six kinds of plantations in the tropical south Asia [J]. *For Res*, 2008, **21** (3): 346 – 352.
- [20] 周广胜, 王玉辉, 许振柱, 等. 中国东北样带碳循环研究进展[J]. 自然科学进展, 2003, **13** (9): 917 – 922.  
ZHOU Guangsheng, WANG Yuhui, XU Zhenzhu, et al. Research progress of carbon cycle in Northeast China Transect [J]. *Prog Nat Sci*, 2003, **13** (9): 917 – 922.