

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.04.016

周伟, 孙向阳, 李素艳 等. 有机覆盖对城市森林土壤有机碳矿化及其氧化稳定性特征的影响. 土壤, 2022, 54(4): 779–786.

# 有机覆盖对城市森林土壤有机碳矿化及其氧化稳定性特征的影响<sup>①</sup>

周伟, 孙向阳\*, 李素艳, 董文萱, 杜田甜, 郑焱, 范志辉

(北京林业大学林学院森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为探究有机覆盖对城市森林土壤有机碳矿化及其氧化稳定性特征的影响, 采集北京市鹫峰国家森林公园土壤, 进行室内培养, 研究不覆盖(CK)、木片覆盖( $M_w$ )、堆肥覆盖( $M_c$ )、上层木片覆盖+下层堆肥覆盖( $M_{w+c}$ ) 4种条件下土壤有机碳矿化特征及氧化稳定组分变化。结果表明, 不同有机覆盖方式均显著影响了土壤有机碳(SOC)矿化( $P<0.05$ ),  $M_c$ 、 $M_{w+c}$ 、 $M_w$ 处理的有机碳累积矿化量分别是CK的1.77倍、2.93倍和3.98倍,  $M_w$ 处理累积矿化量分配比和 $C_p/SOC$ 值(土壤有机碳矿化潜能占土壤有机碳含量的比重)显著高于 $M_c$ 和 $M_{w+c}$ 处理( $P<0.05$ ), 说明 $M_c$ 和 $M_{w+c}$ 处理的固碳潜力好于 $M_w$ 处理。不同有机覆盖方式显著提升了土壤有机碳及其氧化稳定组分含量( $P<0.05$ ),  $M_{w+c}$ 处理的增幅最明显, 土壤有机碳含量比CK提高了29.14%; 高活性有机碳组分和低活性有机碳组分含量较CK分别提高了20%和37.14%。有机覆盖提高了土壤有机碳稳定指数, 降低了活性指数, 表明有机覆盖增强了土壤有机碳稳定性。有机碳累积矿化量与高活性有机碳组分呈极显著正相关( $P<0.01$ ), 与土壤有机碳和低活性有机碳组分呈显著正相关( $P<0.05$ )。综合土壤有机碳矿化特征及其氧化稳定组分的变化来看, 上层木片+下层堆肥的覆盖模式, 既能提高土壤的固碳潜力, 又能协调有机碳矿化与稳定性特征。

**关键词:** 有机覆盖; 城市森林; 有机碳矿化; 氧化稳定组分

**中图分类号:** S156 **文献标志码:** A

## Effects of Organic Mulching on Soil Organic Carbon Mineralization and Oxidation Stability in Urban Forest

ZHOU Wei, SUN Xiangyang\*, LI Suyan, DONG Wenxuan, DU Tiantian, ZHENG Yi, FAN Zhihui

(Key Laboratory of Forest Cultivation and Protection of Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of organic mulching on soil organic carbon (SOC) mineralization and oxidation stability in urban forest, soil samples were collected from Jiufeng National Forest Park for incubation experiment. Four treatments were applied: 1) no organic mulch (CK); 2) wood chips alone ( $M_w$ ); 3) wood composts alone ( $M_c$ ); 4) the upper layer wood chips + the lower layer wood composts ( $M_{w+c}$ ). The results showed that organic mulching significantly affected SOC mineralization in the soil ( $P<0.05$ ), and the cumulative mineralization of SOC under  $M_c$ ,  $M_{w+c}$  and  $M_w$  treatments was 1.77, 2.93 and 3.98 times that of CK. Ratios of cumulative mineralization amount to SOC contents and  $C_p/SOC$  under  $M_w$  treatment was significantly higher than those of  $M_c$  and  $M_{w+c}$  treatments ( $P<0.05$ ), which showed that  $M_c$  and  $M_{w+c}$  treatments had higher carbon sequestration capacity than  $M_w$  treatment. Organic mulching significantly increased SOC contents and oxidation stability fractions ( $P<0.05$ ). Compared with CK, SOC content of  $M_{w+c}$  was increased by 29.14%, and the contents of very active organic carbon (VAC) and partially organic carbon (PAC) were increased by 20% and 37.14%, respectively. Organic mulching increased SOC stability index and decreased activity index, indicating that organic mulching enhanced SOC stability. The cumulative mineralization of organic carbon was very significantly positively correlated with VAC ( $P<0.01$ ), and significantly positively correlated with SOC and PAC ( $P<0.05$ ). As a whole,  $M_{w+c}$  treatment is beneficial for soil organic carbon sequestration, and it also can balance the organic

①基金项目: 北京市自然科学基金项目(6202021)资助。

\* 通讯作者(sunxybjfusoil@163.com)

作者简介: 周伟(1990—), 男, 山东淄博人, 博士研究生, 主要研究方向为城市土壤质量提升及园林绿化废弃物资源化利用。E-mail: bsstzw@163.com

carbon mineralization and sequestration.

**Key words:** Organic mulching; Urban forest; Organic carbon mineralization; Oxidation stability fractions

城市森林是保护城市环境的重要生态屏障,受城市小气候、人为活动、环境污染等因素影响,土壤退化严重,制约了城市生态服务功能的提升<sup>[1-5]</sup>。随着城市绿地面积不断增大,园林绿化废弃物的数量也逐年增多,其资源化处置利用是实现保护环境、节约资源的重要途径。有机覆盖是指园林绿化废弃物就地物理粉碎或堆腐化处理后,覆盖于城市森林与绿地土壤表面,用于提升景观环境、提高土壤质量、改善城市生态服务功能的生态改良措施<sup>[6-8]</sup>。

有机覆盖除了可以改善景观环境、增加土壤有机质含量、促进土壤微生物活动外,还会影响有机碳矿化等其他土壤过程,进而影响土壤碳的固定和 CO<sub>2</sub> 的排放,从而对土壤碳循环、气候变化等产生深刻的影响<sup>[9]</sup>。城市森林土壤在全球碳循环中发挥重要作用,土壤碳库的微小变化即会对全球有机碳库的收支平衡产生重要影响<sup>[4, 10-11]</sup>,不同生态恢复措施下,土壤固碳效应及其稳定机制是当前恢复生态学研究的热点<sup>[12]</sup>。土壤有机碳矿化是在微生物参与下分解和利用土壤中的活性有机组分并释放出 CO<sub>2</sub> 的过程,直接影响土壤中养分元素释放与供应、温室气体排放等过程,对土壤碳循环起着重要作用<sup>[12-14]</sup>。有机碳矿化特征还不足以全面反映土壤碳库稳定性<sup>[12]</sup>,氧化稳定性是土壤有机碳的重要性质,关系到有机碳在土壤中的循环能力,对有机碳的存留和养分释放等方面存在影响<sup>[15-17]</sup>。将有机碳矿化特征与有机碳氧化稳定组分结合起来更有利于揭示有机覆盖下土壤有机碳矿化特征及其稳定固存机制。

目前,北京市已在城市森林和绿地景观中大面积推广木片覆盖、堆肥覆盖、上层木片+下层堆肥等不同有机覆盖模式<sup>[6]</sup>,这可能对土壤有机碳矿化和气候变化产生深远影响,然而不同有机覆盖模式对城市森林土壤的有机碳矿化效应尚不明晰,弄清有机覆盖对有机碳矿化及其氧化稳定组分的影响,对提高土壤碳汇能力和缓解气候变暖具有重要意义<sup>[18]</sup>。基于此,本研究通过室内培养试验,探讨了增强土壤固碳潜力、减少有机碳矿化分解的有机覆盖模式,为提升城市森林土壤固碳能力提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤与覆盖物

供试土壤取自北京市鹫峰国家森林公园(40°4'N,

116°6'E),采集表层土壤(0~10 cm),样品充分混匀,将样品中的砾石、细根、枯落物等移除,风干备用。土壤基本理化性质:pH 7.03、有机碳 21.24 g/kg、全氮 1.72 g/kg、碱解氮 112.62 mg/kg、有效磷 5.66 mg/kg、速效钾 197.75 mg/kg。

有机覆盖物取自北京市香山植物园园林绿化废弃物消纳中心,分别为粉碎后的木片(粒径 1~2 cm)和园林绿化废弃物堆肥(粒径约 0.2 cm),木片有机碳含量 484.98 g/kg、全氮含量 7.77 g/kg、C/N 62.42,堆肥有机碳含量 356.68 g/kg、全氮含量 18.88 g/kg、C/N 18.89。

### 1.2 培养试验

培养试验共设置 4 个处理:①对照(CK),不覆盖有机物;②5 g 木片覆盖于培养土壤表面(M<sub>w</sub>);③5 g 堆肥覆盖于培养土壤表面(M<sub>f</sub>);④上层 2.5 g 木片+下层 2.5 g 堆肥覆盖于培养土壤表面(M<sub>w+f</sub>)。目前有机覆盖物的常见覆盖厚度为 5 cm(用量为 10 000 kg/hm<sup>2</sup>)<sup>[6]</sup>,据此换算出室内培养条件下不同覆盖处理的有机覆盖物添加量为 5 g。每个处理 3 个重复,共 24 个培养瓶(矿化培养和土壤培养试验各用 12 个培养瓶)。

**1.2.1 矿化培养试验** 土壤有机碳矿化测定采用碱液吸收法<sup>[19-21]</sup>。称取过 0.25 mm 鲜土 200.00 g,置于 750 ml 培养瓶中,调节土壤水分至田间持水量的 30%,并在土样表面分别覆盖有机覆盖物,25 °C 的恒温培养箱中,预培养 7 d。预培养结束之后调节土壤水分至田间持水量的 60%,将盛有 20 ml NaOH (0.5 mol/L) 溶液的烧杯置于培养瓶内,放置在 25 °C 黑暗条件下密封培养,分别在第 1、3、5、7、14、28、42、56、70、98、126、154、182 天取出烧杯,同时添加新一批 NaOH 溶液继续培养(第 182 天不再添加)。

在取出的 NaOH 内加入 20 ml BaCl<sub>2</sub> 溶液 (1 mol/L),摇匀后滴加 2 滴酚酞指示剂,用 HCl (0.5 mol/L) 滴定,中和未耗尽的 NaOH,通过 HCl 消耗量来计算 CO<sub>2</sub> 的含量,进而计算培养期内土壤有机碳的矿化量。用称重法校正土壤水分含量,定期调整土壤水分保持在田间持水量的 60%。

**1.2.2 土壤培养试验** 称取过 0.25 mm 土样 200.00 g,置于 750 ml 培养瓶中 25 °C 黑暗条件下密封培养(除不添加 NaOH 外,处理设计与矿化培养试验相同)。在培养的第 182 天进行破坏性取样,测定土壤有机碳及其氧化稳定组分。

### 1.3 有机碳及其氧化稳定组分测定

重铬酸钾氧化-稀释热法测定土壤总有机碳<sup>[22]</sup>。有机碳氧化稳定组分测定采用改进的 Walkley-Black 方法<sup>[23]</sup>，土样中加入 10 ml 的重铬酸钾(1 mol/L)后，分别加入酸水比为 1 : 2(相当于 6 mol/L)、1 : 1(相当于 9 mol/L)、2 : 1(相当于 12 mol/L)的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 20 ml，然后用 0.5 mol/L FeSO<sub>4</sub> 标定，所测得的有机碳分别记为 6、9、12 mol/L 的有机碳。从而获得 4 个氧化稳定性有机碳组分：6 mol/L 的有机碳为高氧化活性有机碳组分(VAC)；9 mol/L 的有机碳减去 6 mol/L 有机碳为中氧化活性有机碳组分(AC)；12 mol/L 的有机碳减去 9 mol/L 有机碳为低氧化活性有机碳组分(PAC)；总有机碳减去 12 mol/L 的有机碳为稳定有机碳组分(IAC)。

### 1.4 数据处理与分析

有机碳累积矿化量与有机碳矿化速率计算公式如下<sup>[19-21]</sup>：

$$\text{有机碳累积矿化量 (mg/kg, 以 CO}_2\text{ 计)} = N_{\text{HCl}} \times (V_0 - V) \times 22 \times 10 \times 12 / 44 \quad (1)$$

式中：N<sub>HCl</sub> 为 HCl 浓度(mol/L)；V<sub>0</sub> 为空白消耗 HCl 的体积(ml)；V 为样品消耗 HCl 的体积(ml)。

$$\text{有机碳矿化速率(mg/(kg} \cdot \text{d), 以 CO}_2\text{ 计)} = \text{培养时间内有机碳矿化量} / \text{培养天数} \quad (2)$$

采用一级动力学方程对土壤有机碳矿化过程进行模拟，其表达式如下<sup>[24]</sup>：

$$y = Cp \times (1 - e^{-kx}) \quad (3)$$

式中：Cp 表示土壤有机碳潜在矿化量(mg/kg)；k 表示矿化速率常数(d<sup>-1</sup>)；x 表示培养天数(d)；y 表示培养时间内土壤累积有机碳矿化量(mg/kg)。

土壤有机碳活性指数及稳定指数计算公式如下<sup>[15-16]</sup>：

$$\text{活性指数} = \frac{\text{WAC}}{\text{SOC}} \times 3 + \frac{\text{AC}}{\text{SOC}} \times 2 + \frac{\text{PAC}}{\text{SOC}} \times 1 \quad (4)$$

$$\text{稳定指数} = \frac{\text{IAC} + \text{PAC}}{\text{VAC} + \text{AC}} \quad (5)$$

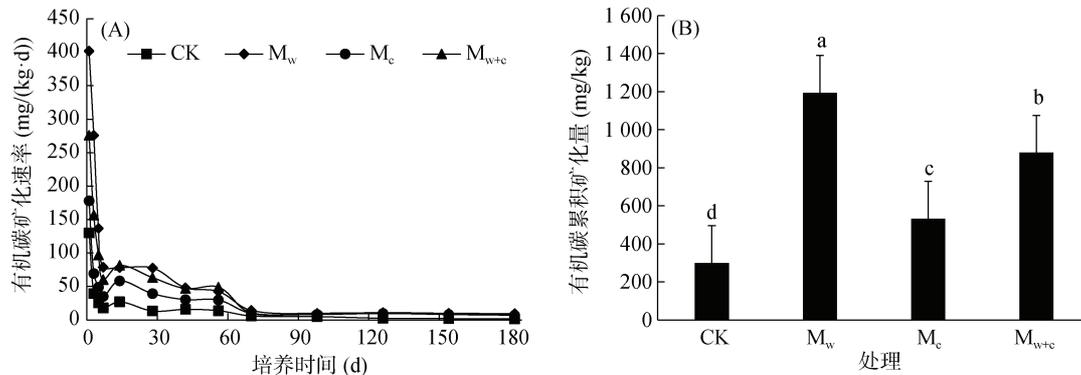
采用 Excel 2019 进行数据整理及绘制图表, SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析、Duncan 多重比较分析、Person 相关分析, 并使用 Origin 2019b 进行一级动力学方程拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 有机覆盖对土壤有机碳矿化的影响

由图 1A 可知, 有机覆盖显著影响了土壤有机碳矿化速率, 覆盖处理有机碳矿化速率均显著高于 CK(P<0.05), 各处理均呈现随培养时间的延长而下降, 最终逐渐趋于平缓的趋势。培养初期(1~7 d), 矿化速率下降最快, 第 1 天矿化速率最大, 为 130~402 mg/(kg·d); 培养中期(7~70 d), 第 7~14 天, 矿化速率略有升高, 第 14~70 天逐渐小幅度下降; 末期(70~182 d)矿化速率趋于平稳, 第 182 天的矿化速率为第 1 天的 1.25%~3.91%。有机覆盖处理有机碳累积矿化量显著高于 CK(P<0.05, 图 1B), 其中 M<sub>w</sub> 处理的有机碳累积矿化量最高, 是 CK 的 3.98 倍, M<sub>c</sub> 和 M<sub>w+c</sub> 处理分别是 CK 的 1.77 倍和 2.93 倍。

采用一级动力学方程对有机碳矿化进行拟合, 得到有机碳潜在矿化量(Cp)和矿化常数(k)值, 结果如表 1 所示, 拟合决定系数 R<sup>2</sup> 为 0.77~0.94, 均达到了极显著水平(P<0.01), 拟合效果较好。Cp 和 k 值用以表征土壤有机碳矿化作用, Cp 值越大、k 值越小表明土壤有机碳矿化作用越强, 反之则越弱。Cp/SOC 值(土壤有机碳矿化潜能占土壤有机碳含量的比重) 是土壤固碳能力的体现, 该值越高表示土壤有机碳矿化能力越强, 有机碳固存能力越弱<sup>[24]</sup>。



(图中小写字母不同表示处理间差异显著(P<0.05), 下同)

图 1 不同处理下土壤有机碳矿化速率和累积矿化量

Fig. 1 Mineralization rates and cumulative mineralization of SOC under different treatments

表 1 土壤有机碳矿化的一级动力学参数及  $C_p/SOC$  值  
Table 1 Parameters of first-order kinetic and  $C_p/SOC$  values for SOC mineralization

处理	$C_p$ (mg/kg)	$k$ ( $d^{-1}$ )	$R^2$	$C_p/SOC$ (%)
CK	254.47 ± 9.45 d	0.39 ± 0.006 a	0.77**	1.15 ± 0.04 d
$M_w$	1 059.81 ± 74.06 a	0.33 ± 0.003 ab	0.94**	3.84 ± 0.34 a
$M_c$	433.86 ± 15.77 c	0.26 ± 0.005 b	0.84**	1.56 ± 0.11 c
$M_{w+c}$	746.61 ± 4.06 b	0.28 ± 0.003 b	0.90**	2.60 ± 0.03 b

注：表中同列数据小写字母不同表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )；\*\* 表示拟合达到  $P < 0.01$  显著水平。

由表 1 可知，有机覆盖处理的  $C_p$  值均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )，是 CK 的 1.70 倍 ~ 4.16 倍。不同覆盖方式间的  $C_p$  值差异显著 ( $P < 0.05$ )， $M_w$  处理的  $C_p$  值最大，为 1 059.81 mg/kg， $M_{w+c}$  处理的  $C_p$  值为 746.61 mg/kg， $M_c$  处理的  $C_p$  值最小，为 433.86 mg/kg。 $k$  值变化范围为 0.26 ~ 0.39  $d^{-1}$ ，CK 最大，其次是  $M_w$  处理， $M_c$  和  $M_{w+c}$  处理最小。 $C_p/SOC$  值的变化趋势与  $C_p$  值类似，变化范围为 1.15% ~ 3.84%，覆盖土壤的  $C_p$  值均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )，不同覆盖方式间的  $C_p/SOC$  值差异显著 ( $P < 0.05$ )，表现为  $M_w > M_{w+c} > M_c$ 。

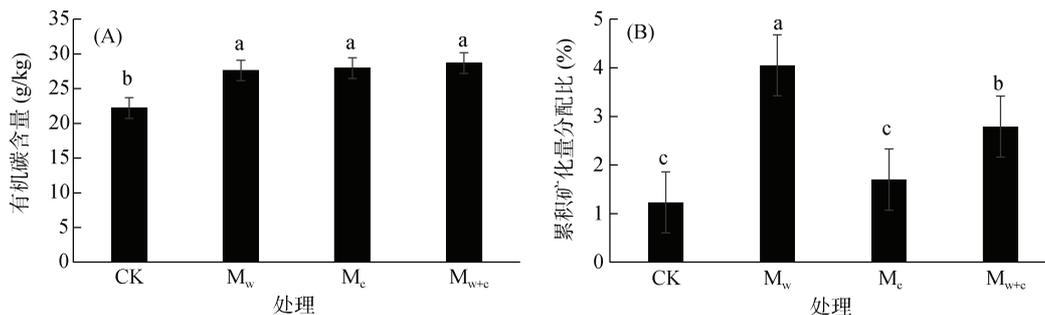


图 2 不同处理下有机碳含量及累积矿化量分配比

Fig. 2 SOC contents and distribution ratios of cumulative mineralization amount to SOC content under different treatments

表 2 不同处理下有机碳氧化稳定组分含量  
Table 2 Contents of SOC oxidation stability fractions under different treatments

处理	VAC (g/kg)	AC (g/kg)	PAC (g/kg)	IAC (g/kg)
CK	9.45 ± 0.21 Ac	2.77 ± 0.07 Da	3.74 ± 0.16 Cc	6.24 ± 0.11 Bc
$M_w$	10.98 ± 0.19 Aab	2.87 ± 0.34 Da	4.53 ± 0.08 Cb	9.24 ± 0.28 Bb
$M_c$	10.62 ± 0.07 Ab	2.90 ± 0.18 Da	4.44 ± 0.20 Cb	9.99 ± 0.12 Ba
$M_{w+c}$	11.34 ± 0.40 Aa	2.95 ± 0.12 Da	5.14 ± 0.07 Ca	9.25 ± 0.07 Bb

注：表中小写字母不同表示同一氧化稳定组分不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，大写字母不同表示同一处理不同氧化稳定组分间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

氧化稳定组分占总有机碳比例如图 3 所示，VAC 组分占比最高，为 38.03% ~ 42.58%，AC 组分占比为 10.28% ~ 12.48%，这两个组分均表现为 CK 占比最高，说明有机覆盖降低了土壤有机碳活性组分的比例。同时，有机覆盖后增加了稳定组分的比例，具体表现为：PAC 组分占比为 15.90% ~ 17.92%， $M_{w+c}$  处

不同处理土壤有机碳含量变化如图 2A 所示，覆盖处理的 SOC 含量显著高于 CK ( $P < 0.05$ )，而不同覆盖模式的 SOC 含量差异不显著， $M_{w+c}$  处理的 SOC 最高，比 CK 提高了 29.14%， $M_w$  和  $M_c$  的 SOC 分别比 CK 提高了 24.37% 和 25.90%。土壤有机碳累积矿化量分配比是指在一定时间内土壤有机碳累积矿化量占土壤有机碳含量的比例，能在一定程度上反映土壤有机碳的固碳能力<sup>[25]</sup>。 $M_w$  处理有机碳累积矿化量分配比显著高于其他处理 ( $P < 0.05$ )， $M_{w+c}$  处理土壤显著高于  $M_c$  和 CK 处理，而  $M_c$  处理与 CK 无显著差异 (图 2B)。这说明不同有机覆盖模式下， $M_w$  处理的土壤固碳能力最差， $M_c$  的土壤固碳能力最好。

## 2.2 有机覆盖对有机碳氧化稳定组分的影响

各处理土壤有机碳氧化稳定组分含量差异显著 (表 2)，均表现为 VAC > IAC > PAC > AC。与 CK 相比，覆盖土壤均显著提高了 VAC、PAC 和 IAC 的含量 ( $P < 0.05$ )。 $M_{w+c}$  处理的 VAC 和 PAC 含量增幅最明显，较 CK 分别提高了 20% 和 37.14%； $M_c$  处理的 IAC 含量增幅最明显，较 CK 提高了 60.10%。AC 含量不同处理间差异不显著。

理占比最高，CK 处理与其他处理差异不显著；IAC 组分占比为 28.11% ~ 35.77%， $M_c$ 、 $M_{w+c}$ 、 $M_w$  处理均显著高于 CK ( $P < 0.05$ )。

有机碳活性指数的变化范围为 1.51 ~ 1.70 (图 4A)，覆盖土壤的活性指数显著低于 CK ( $P < 0.05$ )，而不同覆盖处理间差异不显著，具体表现为 CK >  $M_{w+c}$  >

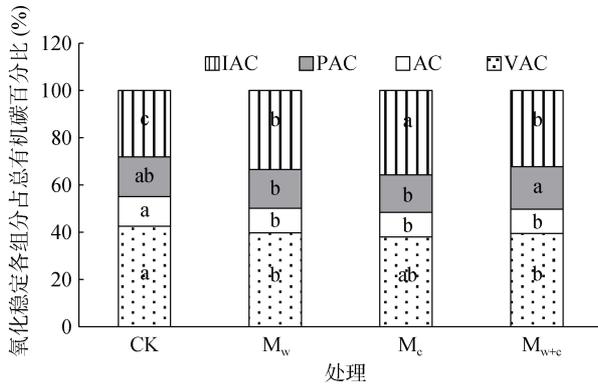


图 3 不同处理下有机碳氧化稳定组分占总有机碳的百分比

Fig. 3 Percentages of SOC fractions to total organic carbon under different treatments

M<sub>w</sub>>M<sub>c</sub>。稳定指数的变化范围为 0.82 ~ 1.07(图 4B),

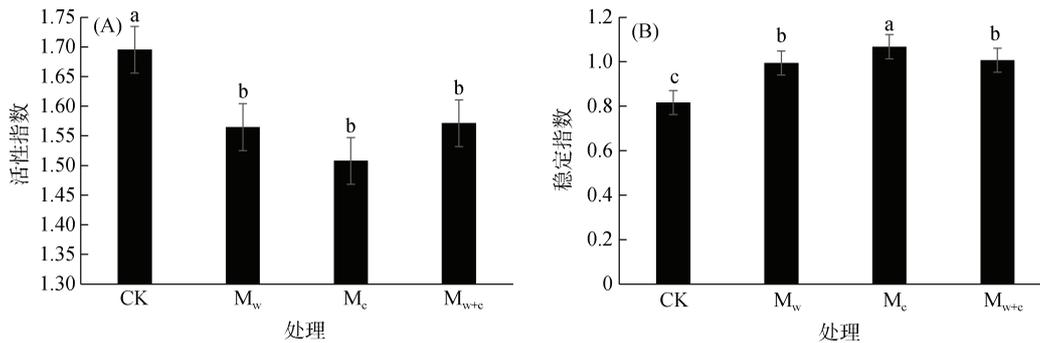


图 4 不同处理下土壤有机碳活性指数和稳定指数

Fig. 4 Activity and stability indexes of SOC under different treatments

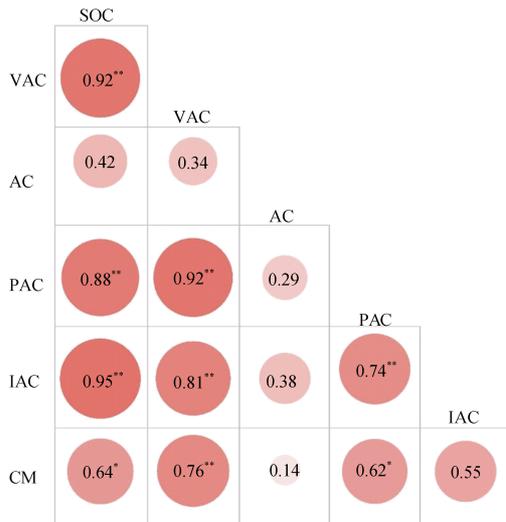


图 5 有机碳累积矿化量与土壤有机碳及氧化稳定组分的相关性

Fig. 5 Correlation of SOC cumulative amount with SOC and its oxidation stability fractions

覆盖土壤的稳定指数显著高于 CK(P<0.05); 不同覆盖处理间, M<sub>c</sub>和 M<sub>w+c</sub>处理的稳定指数显著高于 M<sub>w</sub>处理, 具体表现为 M<sub>c</sub>>M<sub>w+c</sub>>M<sub>w</sub>>CK。与 CK 相比, 覆盖处理的活性指数下降了 7.65% ~ 11.18%, 稳定指数则上升了 20.73% ~ 30.49%。

### 2.3 土壤有机碳累积矿化量与土壤有机碳及其氧化稳定组分的关系

土壤有机碳累积矿化量与土壤有机碳及其氧化稳定组分 Pearson 相关性分析如图 5 所示。结果表明: 土壤累积矿化量与 VAC 达到极显著正相关(P<0.01), 相关系数为 0.76; 与 SOC 和 PAC 达到显著正相关(P<0.05), 相关系数分别为 0.64 和 0.62。这说明 VAC 组分是影响土壤有机碳累积矿化量的最主要组分。除 AC 组分外, 其他组分间相关性均达到显著或极显著正相关。

## 3 讨论

### 3.1 有机覆盖对土壤有机碳矿化的影响

有机碳矿化是在土壤微生物作用下, 完成自身代谢并释放 CO<sub>2</sub>的过程, 是碳循环的重要组成部分。有机碳矿化速率随培养时间的延长而逐渐下降, 最终趋于平缓的趋势, 这与许多研究结果类似<sup>[26-27]</sup>。覆盖初期, 由于新鲜有机覆盖物的投入, 增加了土壤易分解养分, 使得土壤微生物活性增强, 有机碳矿化速率快, 后期随着易分解活性有机碳组分的矿化完成, 可供微生物矿化的碳源减少, 微生物活性逐渐受到营养源的限制而减弱, 矿化速率随之逐渐下降并趋于稳定<sup>[24-25]</sup>。有机覆盖可以改变土壤微生物群落结构, 进而对土壤有机碳矿化过程产生显著影响, 不覆盖土壤由于没有新鲜碳源的加入, 土壤微生物活性较弱, 所以有机碳矿化量最低<sup>[28]</sup>。与不覆盖相比, 不同有机覆盖方式均显著增加了有机碳累积矿化量和潜在矿化量。木片单独覆盖的有机碳累积矿化量和潜在矿化量最大, 而堆肥单独覆盖最

小,这可能与木片含氮量低,而堆肥含氮量高有关,低氮素水平供应会增加土壤有机碳矿化速率,高氮素供应更有利于土壤有机碳固存<sup>[28-29]</sup>。木片覆盖的土壤有机碳累积矿化量分配比和  $C_p/SOC$  值最高,不利于土壤固碳。堆肥覆盖最有利于固碳,但是堆肥具有质轻、色黑、粒径小等特点,单独覆盖于城市土壤中,既不美观,也易被风刮走而造成环境污染<sup>[6]</sup>。上层木片+下层堆肥处理的固碳能力介于木片覆盖和堆肥覆盖之间,今后可采取适当地降低上层木片覆盖量,增加下层堆肥覆盖量的方式增加土壤固碳潜力。

### 3.2 有机覆盖对土壤有机碳氧化稳定组分的影响

土壤有机碳氧化稳定组分反映了土壤有机碳的组成和状态,对于土壤有机碳的储存和变化具有重要的意义<sup>[15-16,30]</sup>。有机覆盖物为土壤微生物提供了大量碳源,这些物质矿化分解显著提高了有机碳氧化稳定组分含量<sup>[15]</sup>。与 CK 相比,有机覆盖降低了土壤有机碳活性指数及其活性组分(VAC 和 AC)的占比,增加了土壤有机碳稳定指数及其稳定组分(IAC 和 PAC)的占比,这是由于有机覆盖物含有大量的木质素和纤维素,这些成分难以彻底分解,能够长期保存于土壤中,使得土壤有机碳在有机覆盖后提高稳定性<sup>[15]</sup>。不同有机覆盖方式对土壤有机碳氧化稳定组分的影响是不同的,木片+堆肥覆盖显著提高了有机碳活性组分含量,木片+堆肥和单独堆肥处理均显著提高了有机碳稳定性组分含量。木片具有高碳量、低氮量的特点,C/N 过高会加速土壤矿化<sup>[31]</sup>,导致木片的累积矿化量大,固碳能力差,单独覆盖对氧化稳定组分的提升效果不如木片+堆肥和单独堆肥覆盖,Ouyang 等<sup>[27]</sup>研究指出,施用木片生物质炭后土壤有机碳含量增加,但是其活性有机碳含量依然较低,本研究结果与此类似。木片+堆肥覆盖的土壤有机碳含量最高,并显著提高了 VAC 组分含量,这可能是由于木片和堆肥结合调节 C/N,使其有机质更易分解转化。VAC 组分属于高活性有机碳,也是占比最大的组分,能够在短期内矿化分解<sup>[15]</sup>,为微生物生长提供充足的碳源,这有利于降低土壤原有有机碳的矿化分解,促进原有有机碳的积累<sup>[32]</sup>。综合土壤矿化特征及氧化稳定性组分的变化来看,上层木片+下层堆肥的覆盖模式,既能提高土壤的固碳潜力,又能协调有机碳矿化与稳定性特征。

### 3.3 土壤有机碳矿化与其氧化稳定组分含量的关系

土壤有机碳活性组分的矿化是土壤呼吸和  $CO_2$

排放的主要贡献者<sup>[33]</sup>,外源有机物添加增加了土壤活性有机碳,为微生物提供了丰富的碳源,促进了有机物的分解,土壤活性有机碳含量与有机碳矿化密切相关<sup>[34]</sup>。本研究中,VAC 组分与有机碳累积矿化量均达到极显著正相关,说明高活性有机碳组分是影响土壤有机碳矿化的最主要因子。有机碳矿化与土壤可溶性有机碳、微生物生物量碳等活性有机碳密切相关已被广泛研究<sup>[25-26,34]</sup>,而可溶性有机碳、微生物生物量碳等活性有机碳组分测定费时费力,VAC 组分测定简单,灵敏度高,与有机碳累积矿化量关系更密切,对土壤碳的变化更为敏感,今后可将其作为重要诊断指标,用于指示环境条件变化对土壤质量的影响<sup>[9,15,35]</sup>,合理调控影响 VAC 组分含量的因子有利于提高城市森林土壤质量。有机碳累积矿化量与 SOC 显著正相关已被广泛证实<sup>[25-36]</sup>,这与本研究结果一致。累积矿化量还与 PAC 含量呈显著正相关,这说明 PAC 作为相对稳定组分,其含量变化也会对土壤有机碳矿化产生重要影响。此外,有机覆盖条件下,覆盖物性质、覆盖量、土壤类型等均会对土壤有机碳矿化产生影响,因此,有机覆盖对土壤有机碳矿化影响的机制还需进一步明确,今后应重点考虑土壤微生物群落结构对土壤有机碳矿化的影响<sup>[33,37]</sup>。

### 3.4 展望

目前,木片覆盖等有机覆盖方式在国外已经成为比较流行的城市土壤健康管理方法,我国许多城市也已逐步推广使用有机覆盖物改良土壤<sup>[6-8]</sup>。随着城市树木老龄化趋势加剧,会产生更多的木质残余物,这将有利于有机覆盖物的资源化利用与产业发展。虽然有机覆盖在我国的应用前景广阔,但是相关应用技术体系和标准还不完善,许多地区并没有因地制宜地科学选取有机覆盖物改良土壤,这可能适得其反,过量覆盖还会产生土壤通气不良、透水性差等问题<sup>[7]</sup>。仅从有机碳矿化及其氧化稳定特征的角度分析有机覆盖对城市森林土壤的影响还略显单薄,未来应开展长期定位监测研究,从土壤肥力、碳组分、微生物、有机覆盖物分解特征等多方面入手,深入系统研究有机覆盖对土壤生态系统的作用机制<sup>[6-7,38]</sup>,形成完善的应用技术体系和标准,因地制宜地制定最优覆盖方案,从而促进城市土壤生态系统可持续发展。

## 4 结论

1)有机覆盖促进了土壤有机碳矿化,提高了有机碳氧化稳定组分的含量,增加了土壤有机碳稳定指

数, 降低了土壤有机碳活性指数。

2) 土壤有机碳累积矿化量与 VAC 极显著正相关, 与 SOC 和 PAC 显著正相关。

3) 与木片单独覆盖相比, 木片+堆肥覆盖和堆肥单独覆盖的土壤固碳能力更好, 木片+堆肥覆盖显著增加了 VAC 和 PAC 组分含量, 有利于促进有机碳累积。城市森林土壤有机覆盖首选木片+堆肥覆盖方式。

#### 参考文献:

- [1] 周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价[J]. 生态学报, 2017, 37(4): 1211-1220.
- [2] 周伟, 王文杰, 何兴元, 等. 哈尔滨城市绿地土壤肥力及其空间特征[J]. 林业科学, 2018, 54(9): 9-17.
- [3] Wang W J, Wang Q, Zhou W, et al. Glomalin changes in urban-rural gradients and their possible associations with forest characteristics and soil properties in Harbin City, Northeastern China[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 224: 225-234.
- [4] 武慧君, 姚有如, 苗雨青, 等. 芜湖市城市森林土壤理化性质及碳库研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(5): 1015-1023.
- [5] Chen Y J, Day S D, Wick A F, et al. Influence of urban land development and subsequent soil rehabilitation on soil aggregates, carbon, and hydraulic conductivity[J]. Science of the Total Environment, 2014, 494/495: 329-336.
- [6] Zhou W, Sun X Y, Li S Y, et al. Effects of organic mulching on soil aggregate stability and aggregate binding agents in an urban forest in Beijing, China[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(3): 1083-1094.
- [7] 孙晓丹, 叶钰倩, 王刚, 等. 有机物覆盖的土壤环境效应作用机制研究现状与展望[J]. 林业科学, 2020, 56(6): 103-112.
- [8] Sun X D, Wang G, Ma Q X, et al. Organic mulching promotes soil organic carbon accumulation to deep soil layer in an urban plantation forest[J]. Forest Ecosystems, 2021, 8: 2.
- [9] 杨苏, 刘耀斌, 王静, 等. 不同有机物料投入下黄河故道土壤有机碳累积特征的研究[J]. 土壤, 2021, 53(2): 361-367.
- [10] Wan S Z, Chen F S, Hu X F, et al. Urbanization aggravates imbalances in the active C, N and P pools of terrestrial ecosystems[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00831.
- [11] Kan Z R, Virk A L, He C, et al. Characteristics of carbon mineralization and accumulation under long-term conservation tillage[J]. CATENA, 2020, 193: 104636.
- [12] 蒋小董, 郑嗣蕊, 杨咪咪, 等. 毛乌素沙地固沙林发育过程中土壤有机碳库稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2567-2574.
- [13] 卢晓蓉, 尹艳, 冯亮仙, 等. 杉木凋落物及其生物质炭对土壤原有有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 943-953.
- [14] Rong G H, Zhang X J, Wu H Y, et al. Changes in soil organic carbon and nitrogen mineralization and their temperature sensitivity in response to afforestation across China's Loess Plateau[J]. CATENA, 2021, 202: 105226.
- [15] 邓明位, 张思佳, 朱波, 等. 猪厩肥和秸秆还田对紫色土有机碳组分及稳定性的影响[J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(2): 205-211.
- [16] 程虎, 许文年, 向瀚宇, 等. 不同修复年限植被混凝土基材有机碳氧化稳定性特征[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 232-238.
- [17] 贾国梅, 何立, 刘潇, 等. 三峡库区消落带土壤有机碳氧化稳定性特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(5): 14-19.
- [18] 史登林, 王小利, 段建军, 等. 氮肥减量配施生物炭对黄壤稻田土壤有机碳活性组分和矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4117-4124.
- [19] 毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 等. 不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2842-2851.
- [20] 朱凌宇, 潘剑君, 张威, 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 668-675.
- [21] 窦艳星. 黄土丘陵区不同小流域土壤有机碳库含量、稳定性特征及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2020: 17.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] Kan Z R, Liu Q Y, Virk A L, et al. Effects of experiment duration on carbon mineralization and accumulation under no-till[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: 104939.
- [24] 李隽永, 窦晓琳, 胡印红, 等. 城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化的差异[J]. 生态学报, 2018, 38(1): 112-121.
- [25] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(4): 2219-2225.
- [26] 梅孔灿, 陈岳民, 范跃新, 等. 凋落叶和磷添加对马尾松林土壤碳激发效应的影响[J/OL]. 土壤学报, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210826.1100.002.html>.
- [27] Ouyang L, Yu L Q, Zhang R D. Effects of amendment of different biochars on soil carbon mineralisation and sequestration[J]. Soil Research, 2014, 52(1): 46.
- [28] 冷雪梅, 钱九盛, 张旭辉, 等. 添加外源有机物对长期不同施肥处理水稻土有机碳矿化的影响[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(1): 103-112.
- [29] 徐学池, 苏以荣, 王桂红, 等. 秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(6): 2912-2919.
- [30] Sun C L, Xue S, Chai Z Z, et al. Effects of land-use types on the vertical distribution of fractions of oxidizable organic carbon on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(2): 221-231.
- [31] 刘颖川, 杨凯, 叶哲隆, 等. 青海东部地区地膜覆盖条件下土壤有机碳矿化对温度变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 143-148.

- [32] 马欣, 魏亮, 唐美玲, 等. 长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5680–5686.
- [33] 孔培君, 郑洁, 栾璐, 等. 不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(12): 6047–6057.
- [34] 张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 等. 微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4558–4565.
- [35] Kan Z R, Virk A L, Wu G, et al. Priming effect intensity of soil organic carbon mineralization under no-till and residue retention[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147: 103445.
- [36] 陈晓芬, 吴萌, 江春玉, 等. 不同培养温度下长期施肥红壤水稻土有机碳矿化特征研究[J]. 土壤, 2019, 51(5): 864–870.
- [37] Song Y Y, Liu C, Song C C, et al. Linking soil organic carbon mineralization with soil microbial and substrate properties under warming in permafrost peatlands of Northeastern China[J]. CATENA, 2021, 203: 105348.
- [38] Sun X D, Ye Y Q, Liao J H, et al. Organic mulching alters the composition, but not the diversity, of rhizosphere bacterial and fungal communities[J]. Applied Soil Ecology, 2021, 168: 104167.