

# 毛竹林地表覆盖年限对土壤有机碳的影响

赵睿宇<sup>1</sup> 李正才<sup>1\*</sup> 王 斌<sup>1</sup> 葛晓改<sup>1</sup> 戴云喜<sup>2</sup> 赵志霞<sup>1</sup> 张雨洁<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 311400; <sup>2</sup>台州市黄岩区林业技术推广总站, 浙江黄岩 318020

**摘 要** 为了解毛竹(*Phyllostachys edulis*)林不同年限地表覆盖对土壤总有机碳及土壤活性有机碳含量的影响, 以浙江省台州市黄岩区山地毛竹林为研究对象, 对覆盖1年、覆盖2年和自然生长(对照)的毛竹林地0–50 cm内各土层土壤活性有机碳含量进行了比较研究。结果表明: 1)地表覆盖1年和2年的毛竹林样地土壤总有机碳、轻组有机质和易氧化碳含量均高于对照样地, 相比于对照样地, 覆盖1年的毛竹林样地土壤总有机碳、土壤轻组有机质、土壤易氧化碳含量分别增加11.2%–74.2%、31.7%–196.9%、5.0%–79.6%, 覆盖2年的毛竹林样地土壤总有机碳、土壤轻组有机质和土壤易氧化碳含量分别增加22.2%–90.8%、36.7%–238.5%、21.9%–97.5%。不同处理样地的土壤水溶性有机碳含量差异不明显。2)对照样地土壤水溶性有机碳占总有机碳的比率高于覆盖处理的毛竹林地, 而易氧化碳占总有机碳的比率在0–30 cm土层表现为覆盖1年>覆盖2年>对照样地。3)覆盖1年、覆盖2年和自然生长3种处理下, 土壤水溶性有机碳、易氧化碳、轻组有机质和总有机碳含量呈现较高的相关性, 且对照样地土壤水溶性有机碳与总有机碳的相关系数大于覆盖1年和覆盖2年的毛竹林地, 覆盖2年的毛竹林样地易氧化碳与轻组有机质的相关系数最大。4)三种处理方式下, 土壤总有机碳、水溶性有机碳、易氧化碳、轻组有机质与土壤养分(全氮、水解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁)的相关性达到显著或极显著水平。短期内毛竹地表覆盖有利于提高土壤总有机碳、土壤活性有机碳和土壤养分元素含量, 对改善毛竹林土壤质量, 维持竹林可持续经营具有一定的促进作用。

**关键词** 毛竹; 地表稻草覆盖; 土壤有机碳; 土壤活性有机碳; 土壤养分

**引用格式:** 赵睿宇, 李正才, 王斌, 葛晓改, 戴云喜, 赵志霞, 张雨洁 (2017). 毛竹林地表覆盖年限对土壤有机碳的影响. 植物生态学报, 41, 418–429. doi: 10.17521/cjpe.2016.0340

## Duration of mulching caused variable pools of labile organic carbon in a *Phyllostachys edulis* plantation

ZHAO Rui-Yu<sup>1</sup>, LI Zheng-Cai<sup>1\*</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, GE Xiao-Gai<sup>1</sup>, DAI Yun-Xi<sup>2</sup>, ZHAO Zhi-Xia<sup>1</sup>, and ZHANG Yu-Jie<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, China; and <sup>2</sup>Taizhou Huangyan District Forestry Technology Popularization Station, Huangyan, Zhejiang 318020, China

### Abstract

**Aims** Soil total organic carbon and labile organic carbon are important indicators in evaluating soil quality. Mulching is widely applied to promote the emergence of bamboo shoot in winter time through stand management. Yet the consequences of mulching on soil quality in *Phyllostachys edulis* have not been well studied. We aim at the quantitative effect of mulching duration on soil quality in *P. edulis* stands.

**Methods** Several *P. edulis* stands located in Huangyan District of Taizhou, Zhejiang Province of China, had been applied with mulching for 1–2 years and were used in this study to assess the mulching effects. We also selected stands without mulching treatment as the reference sites (or control, CK) for comparisons.

**Important findings** Total soil organic carbon (TOC), light fraction organic matter (LFOM), and easily-oxidized carbon (EOC) contents at stands with 1-year and 2-year mulching treatments were significantly increased compared with those at the CK sites. The 1-year mulching increased TOC, LFOM and EOC by 11.2%–74.2%, 31.7%–196.9% and 5.0%–79.6%, respectively, than those of CK sites, while by 22.2%–90.8%, 36.7%–238.5%, and 21.9%–97.5% with 2-year treatment. However, the contents of water-soluble organic carbon (WSOC) changed insignificantly. Among the indicators, we found that WSOC:TOC in CK was higher than that with the mulching treatments, while EOC:TOC with 1-year treatment was higher than that with 2-year treatment, and EOC:TOC with 2-year treatment was higher than that of CK. Additionally, WSOC, EOC, and LFOM at all three treatments showed high correlations with TOC, with a higher correlation coefficient of WSOC with TOC of 0–

收稿日期Received: 2016-11-03 接受日期Accepted: 2017-03-01

\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: lizccaf@126.com)

30 cm soil layers in CK than those with mulching treatments. The correlation coefficient of EOC and LFOM with TOC was the highest at the 2-year mulching sites. More importantly, TOC, WSOC, EOC, and LFOM were significantly ( $p < 0.05$ ), or extremely significantly ( $p < 0.01$ ), correlated with soil nutrient content, including total N, hydrolysis N, available P, available K, exchangeable Ca, and exchangeable Mg in all treatments. In sum, it appeared that mulching in short term can increase the contents of TOC, soil labile organic carbons and soil nutrients in bamboo soils, yielding an improved soil quality and thus can be promoted as a plausible practice for the sustainable management of *P. edulis* stands.

**Key words** *Phyllostachys edulis*; soil mulching with straw; soil organic carbon; soil labile organic carbon; soil nutrients

**Citation:** Zhao RY, Li ZC, Wang B, Ge XG, Dai YX, Zhao ZX, Zhang YJ (2017). Duration of mulching caused variable pools of labile organic carbon in a *Phyllostachys edulis* plantation. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 418–429. doi: 10.17521/cjpe.2016.0340

毛竹(*Phyllostachys edulis*)隶属于禾本科竹亚科刚竹属,是竹类资源中分布最广和经济价值最高的竹种资源(谢孝福, 1994; 江泽慧, 2002)。竹产业是我国南方区域经济发展的重要支柱产业,也是竹农家庭经济收入的主要来源(陈双林, 2011)。传统的毛竹经营模式中,虽然人工施肥在一定程度上补充了因竹笋和竹材输出造成的土壤养分损失,但长期大量的化学肥料输入,不仅会导致竹林土壤板结、加重水土流失和改变土壤理化性质,而且会影响毛竹的生长节律,产生竹林产量降低等经济效益问题(王波等, 2012)。单纯的竹林施有机肥,虽然可改良土壤,但是对提升竹林经济效益的效果不明显,而且费工、费时,在生产上难以推广。近年来,由于利用毛竹林冬季地表稻草秸秆覆盖发酵腐烂增加土壤温度的方法能够促使竹林春笋冬出,快速提升竹林的经济效益,并且有利于稻草的资源化利用和竹林的固碳减排,因此推广面积越来越大。研究表明,秸秆绝大部分是有机成分,其中水溶性成分纤维素和半纤维素易被微生物分解,而木质素及蛋白质复合体较难分解,它们残留于土壤中,形成了土壤有机质(Sainju *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2014)。秸秆本身含有一定的氮(N)、磷(P)、钾(K),覆盖的秸秆腐烂后能够快速增加土壤N、P和速效K的含量,丰富土壤营养库,是土壤养分的主要补给源(Kahlon *et al.*, 2013),秸秆覆盖为提高土壤肥力奠定了物质基础(Zhang *et al.*, 2012; Ouyang *et al.*, 2013)。

人们多关注地表覆盖对毛竹林经济效益的影响,却忽视了地表覆盖对山地毛竹林土壤理化性质的影响,土壤活性有机碳如何感知并响应竹林地表覆盖变化的研究更为缺乏。土壤活性碳占土壤全碳含量的比例较小,但它作为表征土壤全碳质量变化的一种敏感指标,可以在土壤全碳变化之前反映土

壤质量的微小变化,反映人为管理措施和环境所引起的土壤变化(Blair *et al.*, 1995; Whitbread *et al.*, 1998)。另外,土壤活性碳能够直接参与土壤生物化学的转化过程,是土壤养分循环的驱动力,对土壤养分活化也起着重要的作用(Coleman *et al.*, 1983; Wander *et al.*, 1994)。秸秆覆盖多用于北方干旱、半干旱的农田地区,南方地区温湿度条件优于北方干旱、半干旱地区,并且毛竹林下复杂多变的生态环境也影响着覆盖物的分解过程。因此,南方毛竹林冬季地表秸秆覆盖后,覆盖物的分解对毛竹林地土壤有机碳和质量影响程度和影响机理等问题,明显区别于干旱、半干旱地区以水土保持为主要目的农业用地秸秆覆盖(Han *et al.*, 2013; Moradi *et al.*, 2015)。开展我国南方地区毛竹林冬季覆盖试验研究,探讨毛竹林地表覆盖对土壤有机碳和土壤质量影响的研究具有重要的意义。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于浙江省台州市黄岩区平田乡(120.28°–121.93° E, 28.02°–29.33° N)。该地区属中亚热带季风区,四季分明。受海洋水体调节和西北高山对寒流的阻滞,境内夏季少酷热,冬季无严寒,热量丰富,雨水充沛,气候温和湿润。年平均温度17 °C,年日照时数1 800–2 037 h,年降水量1 632 mm。研究区为典型的低山、丘陵地貌,土壤类型为发育于石英、长石砂岩上的微酸性红壤,地带性植被为亚热带常绿、落叶阔叶混交林。

### 1.2 样地布置与土样采集

试验地在用稻草覆盖前,毛竹林为笋竹两用林分,经营管理粗放,每两年清除1次林下灌木和杂草,不垦覆也不施肥,土层深度大于80 cm。2013年11月,

在毛竹林内设置面积为10 m × 10 m的样地10块, 其中5块样地开展连续覆盖试验(2013年11月和2014年11月两次覆盖, 由于毛竹林被稻草覆盖后显著影响新竹数量, 一般生产上连续覆盖2次后, 便不再进行覆盖), 另5块自然生长的样地作为对照。2014年11月, 于上述毗邻样地旁再设立5块样地开展覆盖试验。覆盖物为稻草, 稻草覆盖量为15 t·hm<sup>-2</sup>。稻草覆盖操作过程如下: 覆盖前将林地浇湿(所有处理和对照浇水量一致, 下同), 将稻草均匀地覆盖在林地表面, 然后在稻草上均匀覆盖一层猪粪(促进稻草腐烂, 猪粪覆盖量为30 t·hm<sup>-2</sup>), 再将剩余的稻草覆盖在猪粪上, 浇透水, 覆盖以后不再人为浇水(发酵腐烂, 释放热量); 然后在浇水后的稻草上面覆盖厚度为10 cm的砻糠(10 t·hm<sup>-2</sup>, 对发酵层起到保温作用); 来年5月份, 在毛竹林出笋结束后, 将砻糠移出竹林外堆放, 并将林地翻耕一次, 翻耕深度为20 cm。上述所有样地比邻, 且处于同一气候背景下, 以保证地形、土壤等条件大体一致, 具有可比性。

2015年9月, 在上述设立的每个样地内, 调查毛竹的数量和胸径, 样地概况见表1。同时, 采用“S”形布设方法, 于每个样地内布设5个点, 除去枯枝落叶层后, 用5 cm内径的土钻分0–10、10–20、20–30、30–40、40–50 cm 5个层次采集土壤样品, 每一层次的样品充分混匀并去掉土壤中可见植物根系、残体和碎石后分为两部分带回实验室, 一部分鲜样用于测定水溶性有机碳(WSOC), 另一部分自然风干后, 过2.00和0.15 mm筛用于轻组有机质(LFOM)、土壤养分和易氧化碳(EOC)的测定。

表1 样地基本概况

Table 1 Site characteristics of the experimental plots

处理 Treatment	平均胸径 Mean DBH (cm)	立林密度 Stand density (plant·hm <sup>-2</sup> )	坡向 Aspect	坡度 Slope grade (°)	林下植被 Understory vegetation
对照 Control	9.09	2 700	东南向 Southeast direction	20	少灌草 Few shrubs and herbs
覆盖1年翻耕 1-year mulching	8.68	1 500	东南向 Southeast direction	20	无灌木 No shrub
覆盖2年翻耕 2-year mulching	7.67	1 200	东南向 Southeast direction	20	无灌木 No shrub

DBH, diameter at breast height

表2 不同覆盖年限土壤总有机碳含量差异(平均值±标准偏差)

Table 2 Changes in soil total organic carbon contents under different mulching durations (mean ± SD)(g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)				
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50
对照 Control	29.60 ± 4.07 <sup>b</sup>	26.70 ± 3.08 <sup>b</sup>	22.40 ± 1.28 <sup>a</sup>	19.20 ± 5.09 <sup>a</sup>	16.07 ± 4.15 <sup>a</sup>
覆盖1年翻耕 1-year mulching	38.43 ± 2.98 <sup>a</sup>	46.50 ± 1.99 <sup>a</sup>	24.90 ± 4.07 <sup>a</sup>	21.73 ± 3.37 <sup>a</sup>	19.07 ± 4.49 <sup>a</sup>
覆盖2年翻耕 2-year mulching	39.33 ± 2.15 <sup>a</sup>	50.93 ± 2.56 <sup>a</sup>	27.73 ± 1.91 <sup>a</sup>	23.47 ± 1.21 <sup>a</sup>	20.67 ± 1.88 <sup>a</sup>

同列中不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Values within the same column with different lowercase letters meant significant difference at 0.05 level.

### 1.3 土壤分析

土壤总有机碳(TOC)分析采用重铬酸钾外加热法(国家林业局, 1999), 土壤水溶性有机碳的测定参照Liang等(1997)方法, 易氧化碳的测定是采用333 mmol·L<sup>-1</sup>高锰酸钾氧化法(沈宏等, 2000), 土壤轻组有机质的测定是采用1.7 g·mL<sup>-1</sup>碘化钠重液分离法(Janzen *et al.*, 1992), 土壤养分测定采用常规方法(鲁如坤, 2000): 土壤全氮测定采用凯氏定氮法; 土壤水解氮的测定采用碱解扩散法; 土壤速效钾测定采用乙酸浸提, 原子吸收光谱法; 土壤有效磷的测定是采用碳酸氢钠法; 土壤交换性钙和交换性镁测定采用原子吸收分光光度法。

### 1.4 数据统计分析

应用Excel 2007和SPSS 19.0软件分析处理文中数据并制图。采用单因素方差分析的方法比较不同覆盖年限毛竹林土壤活性有机碳的差异显著性, 用双变量Pearson相关系数方法比较土壤活性有机碳各组分与土壤总有机碳、活性有机碳与土壤养分的相关性(双尾检验)。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同年限地表覆盖对毛竹林地土壤总有机碳含量的影响

从表2可以看出, 与对照样地相比, 覆盖1年和覆盖2年翻耕处理的土壤总有机碳含量明显增加, 各个土层土壤总有机碳含量均高于对照样地。覆盖1年样地翻耕处理的0–10、10–20、20–30、30–40和40–50 cm土层土壤总有机碳含量较对照样地分别

增加了29.8%、74.2%、11.2%、13.2%和18.7%，覆盖2年样地翻耕处理的0–10、10–20、20–30、30–40和40–50 cm土层土壤总有机碳含量较对照样地分别增加了32.9%、90.8%、23.8%、22.2%和28.6%。覆盖2年翻耕处理的土壤总有机碳各土层的含量都比覆盖1年翻耕处理下的土壤总有机碳含量高。

2.2 不同年限地表覆盖对毛竹林地土壤活性有机碳含量的影响

从表3中可以看出，除0–10 cm土层外，覆盖2年翻耕和覆盖1年翻耕的土壤水溶性有机碳含量在各层均高于对照样地，但差异不显著，变化幅度较对照样地分别介于1.8%–52.1%和0.3%–58.7%之间，且覆盖样地10–20 cm的土层土壤水溶性有机碳变化幅度较0–10 cm土层的大，大于20 cm的土层各处理下土壤水溶性有机碳含量的变化不明显。覆盖1年翻耕和覆盖2年翻耕相比，各土层土壤水溶性有机碳差异不显著。

通过对不同年限的翻耕土壤进行比较，发现覆盖1年翻耕和覆盖2年翻耕的土壤轻组有机质在各层的含量都比对照样地的土壤轻组有机质含量高。从

表4可以看出，覆盖1年翻耕和覆盖2年翻耕的土壤0–50 cm土层土壤轻组有机质含量较对照样地分别增加了31.7%–196.9%和36.7%–238.5%。覆盖1年和覆盖2年的土壤轻组有机质差异不显著。覆盖翻耕处理下的毛竹林地轻组有机质的含量在0–40 cm均高于对照样地，且除20–30 cm外，差异显著。

从表5可以看出，覆盖2年翻耕处理和覆盖1年翻耕处理比对照样地的易氧化碳含量分别增加了5.0%–79.6%和21.9%–97.5%，2种不同处理下的覆盖翻耕的土壤在0–20 cm土层易氧化碳含量均高于对照样地，且差异显著。20 cm以下土层的土壤易氧化碳含量相较于对照样地而言也有一定程度的增加。

2.3 土壤活性有机碳占土壤总有机碳的比率

表6显示，覆盖1年翻耕处理和覆盖2年翻耕处理毛竹林土壤水溶性有机碳占土壤总有机碳的比率在0.05%–0.10%之间，且3种处理土壤水溶性有机碳占土壤总有机碳的比率都呈现随土层的加深而升高的趋势，除10–20 cm土层外，对照样地的土壤水溶性有机碳占土壤总有机碳的比率均高于翻耕后的土壤。不同处理下土壤易氧化碳占土壤总有机

表3 不同覆盖年限的土壤水溶性有机碳含量差异(平均值±标准偏差)

Table 3 Changes in soil water-soluble organic carbon contents under different mulching durations (mean ± SD) (mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)				
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50
对照 Control	21.51 ± 2.53	18.46 ± 1.76	18.33 ± 1.40	17.50 ± 2.50	15.13 ± 2.24
覆盖1年翻耕 1-year mulching	20.47 ± 1.46	29.30 ± 9.21	18.38 ± 0.88	17.99 ± 0.30	16.12 ± 1.42
覆盖2年翻耕 2-year mulching	23.84 ± 2.35	28.08 ± 5.37	20.98 ± 4.03	17.81 ± 2.37	16.86 ± 2.57

表4 不同覆盖年限的土壤轻组有机质含量(g·kg<sup>-1</sup>)差异(平均值±标准偏差)

Table 4 Changes in soil light fraction organic matter contents under different mulching durations (mean ± SD) (g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)				
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50
对照 Control	0.155 ± 0.025 <sup>b</sup>	0.130 ± 0.023 <sup>b</sup>	0.091 ± 0.009 <sup>a</sup>	0.074 ± 0.031 <sup>b</sup>	0.060 ± 0.014 <sup>a</sup>
覆盖1年翻耕 1-year mulching	0.300 ± 0.092 <sup>a</sup>	0.386 ± 0.020 <sup>a</sup>	0.123 ± 0.022 <sup>a</sup>	0.116 ± 0.016 <sup>a</sup>	0.079 ± 0.021 <sup>a</sup>
覆盖2年翻耕 2-year mulching	0.292 ± 0.070 <sup>a</sup>	0.440 ± 0.027 <sup>a</sup>	0.135 ± 0.026 <sup>a</sup>	0.118 ± 0.009 <sup>a</sup>	0.082 ± 0.007 <sup>a</sup>

同列中不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Values within the same column with different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level.

表5 不同覆盖年限的土壤易氧化碳含量(g·kg<sup>-1</sup>)差异(平均值±标准偏差)

Table 5 Changes in soil easily-oxidized carbon contents under different mulching durations (mean ± SD) (g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)				
	0–10	10–20	20–30	30–40	40–50
对照 Control	6.67 ± 1.01 <sup>b</sup>	5.92 ± 0.49 <sup>b</sup>	5.08 ± 0.76 <sup>a</sup>	3.65 ± 1.17 <sup>a</sup>	3.02 ± 1.04 <sup>a</sup>
覆盖1年翻耕 1-year mulching	8.96 ± 0.93 <sup>a</sup>	10.63 ± 0.27 <sup>a</sup>	5.67 ± 1.39 <sup>a</sup>	3.84 ± 1.04 <sup>a</sup>	3.17 ± 1.13 <sup>a</sup>
覆盖2年翻耕 2-year mulching	9.08 ± 0.48 <sup>a</sup>	11.69 ± 0.58 <sup>a</sup>	6.19 ± 1.32 <sup>a</sup>	4.46 ± 0.34 <sup>a</sup>	3.83 ± 0.34 <sup>a</sup>

同列中不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。

Values within the same column with different lowercase letters mean significant difference at 0.05 level.

表6 不同覆盖年限0–50 cm土层土壤活性有机碳占总有机碳的比率  
Table 6 Ratios of 0–50 cm soil labile organic carbons to total organic carbon under different mulching durations

土层 Soil layer (cm)	WSOC/TOC (%)			EOC/TOC (%)		
	对照 Control	覆盖1年翻耕 1-year mulching	覆盖2年翻耕 2-year mulching	对照 Control	覆盖1年翻耕 1-year mulching	覆盖2年翻耕 2-year mulching
0–10	0.073	0.053	0.061	22.65	23.31	23.08
10–20	0.069	0.063	0.055	22.18	22.87	22.95
20–30	0.082	0.074	0.076	21.76	22.79	22.33
30–40	0.091	0.083	0.076	19.03	17.68	19.02
40–50	0.094	0.085	0.082	18.78	16.64	18.53

EOC, 易氧化碳; TOC, 总有机碳; WSOC, 水溶性有机碳。  
EOC, easily-oxidized carbon; TOC, total organic carbon; WSOC, water-soluble organic carbon.

碳的比率为16.6%–23.3%，表现为随着土层深度增加，比率呈下降趋势，且覆盖1年翻耕的0–30 cm土层比率均大于覆盖2年翻土的各土层，也大于对照样地。

2.4 土壤总有机碳与土壤活性有机碳的相关性分析

由图1可以看出，3种处理0–50 cm土层土壤各活性有机碳与土壤总有机碳之间的相关性均达到极显

著水平( $p < 0.01$ )。对照样地中的水溶性有机碳与总有机碳含量的相关系数均大于翻耕后的土壤，而易氧化碳和轻组有机质含量与总有机碳含量的相关系数则是覆盖2年翻耕处理大于对照样地和覆盖1年翻耕处理，覆盖2年翻耕的土壤3种活性有机碳与总有机碳含量的相关系数均大于覆盖1年翻耕的土壤。

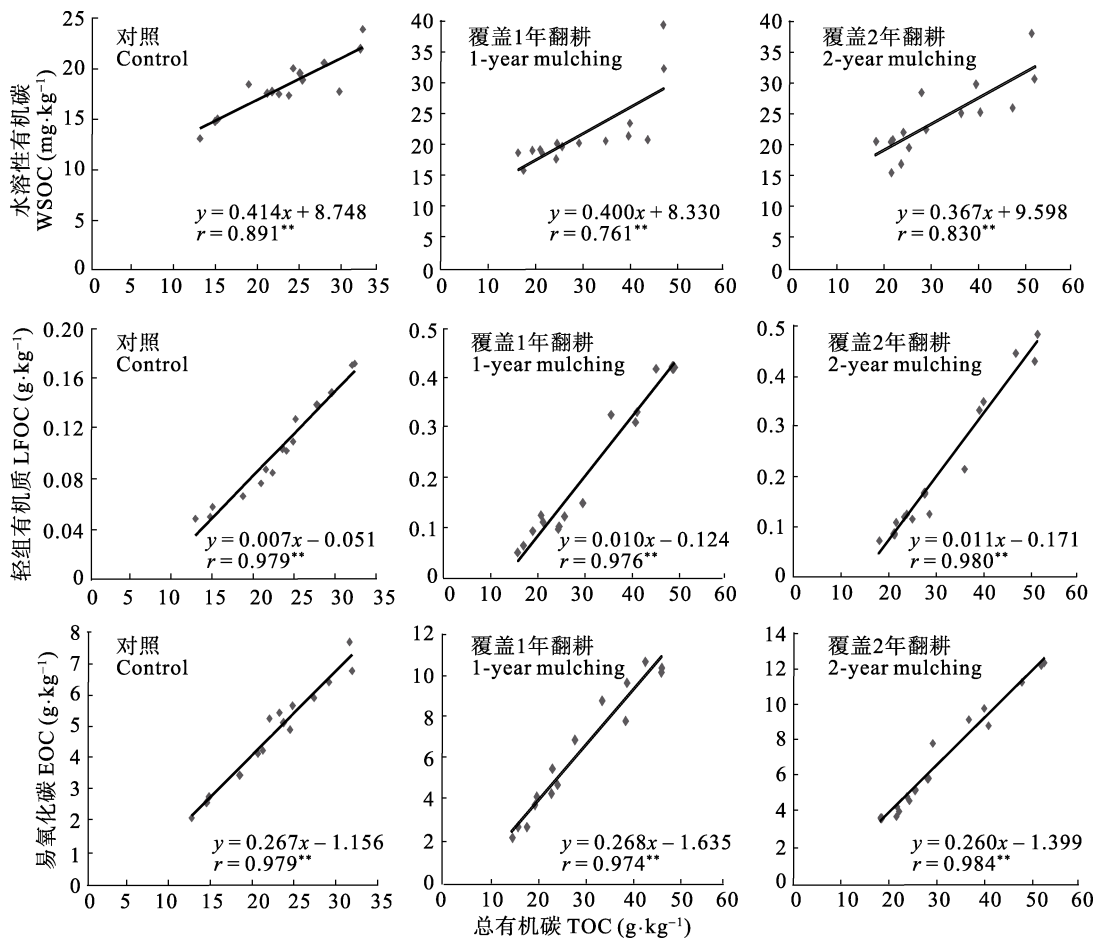


图1 不同覆盖年限下土壤活性有机碳与总有机碳的相关关系。\*\*,  $p < 0.01$ 。  
Fig. 1 Relationships between soil labile organic carbons and total organic carbon under different mulching durations. \*\*,  $p < 0.01$ .  
EOC, easily-oxidized carbon; LFOC, light fraction organic matter; TOC, total organic carbon; WSOC, water-soluble organic carbon.

## 2.5 土壤有机碳与土壤养分的关系

对土壤有机碳与土壤养分进行相关性分析, 从结果可以看出, 土壤总有机碳和轻组有机质、易氧化碳, 与土壤养分之间的相关性达到极显著水平( $p < 0.01$ ), 土壤水溶性有机碳与土壤养分之间的相关性达到显著水平( $p < 0.05$ ), 表明土壤养分的供应很大程度上是取决于土壤有机碳的含量, 也可反映出土壤易氧化碳是土壤养分的潜在来源(表7)。在各种处理下土壤有机碳与土壤养分元素的相关关系中, 速效钾和有效磷是相关性较低的两种养分。土壤总有机碳、土壤各种活性有机碳与全氮和水解性氮的相关程度高, 由此可见, 土壤活性有机碳的多少和土壤氮素的含量有密切关系。

## 3 结论和讨论

地表秸秆覆盖具有改善和保护土壤结构、调节小气候、提高水分利用率等优点(巩杰等, 2003; Wang *et al.*, 2009)。土壤有机质短期波动主要发生在活性较高且易分解的部分(Zhao *et al.*, 2008), 因此, 本文以浙江省台州市黄岩区毛竹林为研究对象, 通过比较不同年限地表覆盖下毛竹林地土壤有机碳的变化, 分析不同覆盖年限对土壤活性有机碳的影响, 并深入探讨了毛竹林地土壤活性有机碳的变化趋势。

土壤有机碳水平是衡量土壤质量的重要指标, 土壤有机碳含量变化受土地利用方式和管理措施的影响显著(朱咏莉等, 2004), 且土壤有机碳含量主要取决于凋落物的分解速率以及植被的归还量(刘荣杰等, 2012; 吴亚丛等, 2013), 本研究表明覆盖翻耕下的毛竹林土壤总有机碳含量高于对照样地, 且0–10 cm与10–20 cm土层差异显著, 这主要是由于覆盖增加了与覆盖物接触的浅层土壤的总有机碳含量, 覆盖物中的有机碳转移到土壤中, 并且翻耕也加速了有机质的分解, 使覆盖翻耕的土壤总有机碳输入量高于对照样地。地表覆盖还能改善土壤的养分情况, 提高土壤肥力, 进而增加根系分泌物、有机残体等作物归还量(Halvorson *et al.*, 2002; 李江涛等, 2011), 从而导致地表覆盖后的土壤总有机碳含量高于对照样地。Huang等(2008)的研究表明秸秆覆盖耕作能够显著提高土壤总有机碳含量, 并且土壤总有机碳含量随着土层深度的增加而递减。本研究中2年覆盖翻耕土壤总有机碳含量高于1年覆盖翻耕土壤总有机碳含量, 说明短期内持续的秸秆覆盖翻耕可连续增加土壤总有机碳的含量, 这与刘文娜等(2006)和郭子武等(2013)的研究结果一致, 短期林地覆盖可以显著增加土壤有机碳库和主要养分元素含量。高飞等(2011)研究表明秸秆覆盖后土壤水热

表7 土壤有机碳与土壤养分的关系

Table 7 Correlation between soil organic carbons and soil nutrients

处理 Treatment	土壤养分 Soil nutrient	土壤总有机碳 TOC	土壤水溶性有机碳 WSOC	土壤易氧化碳 EOC	土壤轻组有机质 LFOM
对照 Control	全氮 Total N	0.987**	0.881**	0.956**	0.989**
	水解性氮 Hydrolysis N	0.984**	0.892**	0.964**	0.976**
	有效磷 Available P	0.774**	0.673**	0.816**	0.738**
	速效钾 Available K	0.793**	0.772**	0.808**	0.838**
	交换性钙 Exchangeable Ca	0.765**	0.579*	0.810**	0.804**
	交换性镁 Exchangeable Mg	0.763**	0.671**	0.712**	0.775**
覆盖1年翻耕 1-year mulching	全氮 Total N	0.895**	0.712**	0.885**	0.901**
	水解性氮 Hydrolysis N	0.882**	0.570*	0.904**	0.876**
	有效磷 Available P	0.843**	0.544*	0.878**	0.869**
	速效钾 Available K	0.801**	0.545*	0.747**	0.770**
	交换性钙 Exchangeable Ca	0.780**	0.631*	0.842**	0.827**
	交换性镁 Exchangeable Mg	0.868**	0.570*	0.857**	0.885**
覆盖2年翻耕 2-year mulching	全氮 Total N	0.960**	0.899**	0.935**	0.939**
	水解性氮 Hydrolysis N	0.920**	0.902**	0.882**	0.908**
	有效磷 Available P	0.749**	0.685**	0.745**	0.751**
	速效钾 Available K	0.861**	0.804**	0.864**	0.841**
	交换性钙 Exchangeable Ca	0.806**	0.875**	0.805**	0.796**
	交换性镁 Exchangeable Mg	0.887**	0.847**	0.889**	0.862**

\*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ . EOC, easily-oxidized carbon; LFOM, light fraction organic matter; TOC, total organic carbon; WSOC, water-soluble organic carbon.

及植物的利用状况不同会导致土壤总有机碳含量的变化,且秸秆覆盖有利于土壤总有机碳含量的增加,土壤总有机碳增加量因覆盖量的不同而不同(黄耀等, 2002)。李玲等(2009)的研究也表明稻草易地还土对耕地土壤总有机碳含量的增加效果明显。

土壤水溶性有机碳是指溶于水的那部分有机碳,虽然它们只占土壤总有机碳的较小部分,但对土壤生物化学性质有着深刻的影响,能直接参与生物化学转化过程,并且保持土壤肥力等(Oliva *et al.*, 1999; Louise *et al.*, 2000; Kalbitz *et al.*, 2005),是可以影响土壤微生物,并且被土壤微生物直接利用的有机碳源(Boyer & Groffman, 1996; Agarwal *et al.*, 2010)。土壤水溶性有机碳含量受多种因素的制约,其中主要取决于土壤总有机碳的含量(Burford & Bremner, 1975; 李岩等, 2014),也和土层黏粒含量有较高的相关性(Kuiters & Mulder, 1993)。本研究中,覆盖翻耕毛竹林地浅层土壤,即10–20 cm土层,土壤水溶性有机碳含量高于对照,说明短期内翻耕疏松了土壤,增加了土壤与覆盖层的接触面积,增加了这部分土壤的水溶性有机碳的含量,姜培坤等(2002)的研究结果也表明竹林实施冬季地表覆盖后土壤水溶性有机碳含量有增加趋势。而表层土壤(0–10 cm)水溶性有机碳则差异不明显,可能原因是尽管翻耕毛竹林地地表覆盖增加了土壤有机碳源,在微生物的作用下释放出了更多的土壤水溶性有机碳(李森等, 2013),但是,由于翻耕毛竹林地林分结构单一,且翻耕扰动了土壤结构的稳定,土层黏粒的含量降低,土壤水溶性有机碳含量也随之下降,所以导致表层土壤水溶性有机碳与对照样地差异不明显。有研究显示,土壤水溶性有机碳的主要来源是微生物分解的有机质以及近期植物的枯枝落叶,但是翻耕会导致微生物所能利用的根系分泌物及其他养分在土层间分布不均匀,所以会间接影响活性碳组分在不同土层的碳含量(乐丽鑫, 2010),这也是本实验中,3种处理各土层(除10–20 cm)土壤水溶性有机碳含量差异不明显的可能原因。

土壤易氧化碳是土壤中易被氧化且活性较高的有机碳(Shrestha *et al.*, 2006),为土壤微生物活动提供重要能源,同时也是土壤养分的潜在来源,是稳定性相对较差的活性有机碳(程彩芳等, 2015)。研究表明,土壤易氧化态碳对耕作方式的反应比其他活性有机碳更为敏感、更为迅速,且易氧化碳与土

壤碳库管理指数的相关性达到极显著水平。作为土壤活性有机碳的指标,土壤易氧化碳可以更好地反映土壤有机碳短期的变化状况(王清奎等, 2005; 吴建国和徐德应, 2005)。本研究中,覆盖翻耕毛竹林地土壤易氧化碳含量均高于对照样地,且2年覆盖翻耕比1年覆盖翻耕的土壤易氧化碳含量高,这是由于土壤易氧化碳含量在很大程度上取决于土壤总有机碳含量(Anderson & Domsch, 1989)。覆盖2年翻耕土壤中的总有机碳的含量比覆盖1年翻耕的土壤中总有机碳含量高;而且地表覆盖对土壤易氧化碳含量的增加有重要作用,因为土地利用方式能显著改变植物对表层土壤有机质的输入(Thorburn *et al.*, 2012),进而影响到表层土壤易氧化碳的含量(Dupont *et al.*, 2010)。这也和Stockfisch等(1999)、陈尚洪等(2008)的研究结果一致。田慎重等(2010)在研究不同耕作措施和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响中得出,覆盖和翻耕对土壤活性有机碳组分含量均表现为显著影响,与本文研究条件类似,翻耕使整个耕作层的土壤和覆盖物翻换,增加了覆盖物和土壤的接触面积(杨敏芳等, 2013),并且翻耕将有机碳带入土壤并使其累积(宋明伟等, 2008),补充了土壤中易氧化碳的消耗,因此,与覆盖物有接触的土层土壤易氧化碳含量都比对照样地高。从表5可以看出,3种处理样地土壤易氧化碳的含量随土层深度的增加而降低,20 cm以下的土层土壤易氧化碳差异不明显,这主要是因为植物对土壤易氧化碳的输入多集中在土壤表面(王国兵等, 2013),对深层次的土壤影响较微弱。

土壤轻组有机质主要来源于地上凋落物和地下根系(Boone, 1994),土壤轻组有机质的含量与土壤有机碳储存及其短期动态有关(Post & Kwon, 2000)。本文研究的覆盖翻耕毛竹土壤中,除个别土层外,0–40 cm各土层土壤轻组有机质含量均显著高于对照样地,并随土层深度的加深,增加量逐渐减少,这是由于翻耕将覆盖物带入下层,覆盖物分解后,残茬可能进入了土壤活性碳库,不仅丰富了土壤轻组有机质的来源(程彩芳等, 2015),而且还使得翻耕后与覆盖物接触的各土层微生物结构体的积累增多,这为土壤中的微生物提供了分解物条件,从而增加了土壤中轻组有机质的含量。Six等(2002)研究发现,表层以下土壤轻组有机质受凋落物影响减弱,细根分泌物、代谢残体、微生物是轻组有机质



的主要来源, 深层土壤没有进行翻耕, 对地表覆盖物分解后输入进土层的轻组有机质含量影响不显著, 3种处理下的样地深层土壤轻组有机质的来源区别不大, 因此深层土层轻组有机质含量差异不显著。不同年限覆盖翻耕毛竹林地深层土壤轻组有机质差异也不显著, 可能也是由于上述原因造成的。

不同处理对土壤总有机碳和土壤活性有机碳含量的影响程度不同, 所以土壤中各活性碳组分占总有机碳的比率不同。一般认为土壤中活性有机碳占总有机碳的百分比可以用来反映土壤有机碳的质量, 活性有机碳所占的百分比越大, 表示有机碳越易被微生物分解, 质量也就越高(周国模和姜培坤, 2004)。土壤水溶性有机碳占土壤总有机碳的比率反映了土壤有机碳的流失水平, 与其矿化量具有较强的相关性(李忠佩等, 2004)。本研究中, 土壤水溶性有机碳占土壤总有机碳的比率较小, 一方面可能是因为翻耕毛竹林地林分结构单一, 加上南方多雨冲刷, 使土壤水溶性有机碳随地表径流流失(马少杰等, 2011); 另一方面, 可能是因为本研究土样采集于夏季, 有机质分解强烈, 微生物活动旺盛, 土壤水溶性有机质处于不断产生和消耗的动态平衡中(刘荣杰等, 2012)。对照样地土壤水溶性有机碳与土壤总有机碳的比率比覆盖翻耕处理的毛竹林地高, 可能是因为翻耕扰动了土壤中的土壤黏粒的吸附作用, 使土壤黏粒含量减少, 导致对照样地土壤水溶性有机碳与土壤总有机碳的比率最高。土壤易氧化碳是指示土壤有机质早期变化的指标, 土壤易氧化碳占土壤总有机碳的比率反映了土壤有机碳的稳定性(朱志建等, 2006)。本研究中, 覆盖翻耕毛竹林地土壤易氧化碳占土壤总有机碳比率在0–30 cm土层高于对照样地; 在30 cm以下土层中比率低于对照样地, 说明覆盖翻耕使土壤碳素活度变强, 碳库稳定性变差。土壤易氧化碳占土壤有机碳的比率随着土层深度的增加呈现下降趋势, 这与Wang等(2010)和Mandal等(2011)的研究结果基本一致。从易氧化碳和轻组有机质与总有机碳的相关性中我们可得出, 覆盖2年翻耕土壤有机碳累积比覆盖1年翻耕土壤有机碳累积的多, 并且稳定的多, 因此导致它们与总有机碳含量的相关系数相对较高。研究数据表明, 秸秆覆盖翻耕样地土壤活性碳含量比对照样地高, 这与李琳等(2006)的研究结果一致。这些结论也进一步说明土壤活性有机碳依赖于土壤总有机碳。

本研究中, 3种处理下土壤各活性有机碳、总有机碳, 土壤养分之间的相关性均达到极显著或显著水平。土壤总有机碳与土壤水溶性有机碳、土壤易氧化碳及土壤轻组有机质两两之间相关性均达极显著水平( $p < 0.01$ ), 说明在不同覆盖年限处理下的毛竹林地土壤中, 各种形态活性碳尽管有数量, 比例上的差异, 但它们之间的相关性均呈现出相同的规律, 也表明不同类型的土壤活性有机碳虽然含量不同, 不同处理方式对土壤活性有机碳含量的影响存在一定的差别, 但它们均是表征土壤碳平衡和土壤生物学肥力的理想指标(周国模等, 2006), 这与徐秋芳等(2003)在研究集约经营的毛竹林时得到的结论一致。土壤养分的供给在很大程度上取决于有机碳的含量, 其中, 土壤水溶性有机碳与土壤养分的相关性最低, 与前面学者研究的规律一致, 这和土壤水溶性有机碳受多种因素共同作用有关; 其中各处理下的土壤总有机碳、土壤易氧化碳和土壤轻组有机质与全氮和水解性氮都有极显著的相关性, 但是土壤水溶性有机碳与氮素关系不显著, 说明土壤水溶性有机碳的含量一般不受氮素的限制(Tirol-Padre & Ladha, 2004; 张俊华等, 2010)。在各种处理下土壤有机碳与土壤养分元素的相关关系中, 速效钾和有效磷是相对相关性较低的两种养分, 这可能是与有效磷和速效钾含量在土壤中变化较为复杂有关(徐秋芳, 2003), 3种处理样地土壤有机碳与其他土壤养分的相关性没有明显的特殊规律。

毛竹林地覆盖翻耕不仅影响了土壤有机碳、土壤养分等元素含量, 而且还改变了土壤总有机碳和各活性有机碳的垂直分布特征, 各组分含量在0–20 cm土层内是随土层加深而增加, 20–50 cm土层内是随土层深度增加而降低, 翻耕处理对与秸秆有接触的土层(0–20 cm)有机碳含量影响最大, 这与多种因素有关。短时间内翻耕毛竹林土壤, 覆盖年限越长, 土壤总有机碳和活性有机碳含量越高, 但长期条件下的结果如何, 有待进一步研究证明。

**基金项目** 浙江省科技厅重大项目(2015C32012)和浙江省科技厅团队特派员项目(2012T2T120和浙科发农[2013]215-95)。

## 参考文献

Agarwal S, Aggarwal SG, Okuzawa K, Kawamura K (2010).

doi: 10.17521/cjpe.2016.0340



- Size distributions of dicarboxylic acids, ketoacids,  $\alpha$ -dicarbonyls, sugars, WSOC, OC, EC and inorganic ions in atmospheric particles over Northern Japan: Implication for long-range transport of Siberian biomass burning and East Asian polluted aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 5839–5858.
- Anderson TH, Domsch KH (1989). Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 21, 471–479.
- Blair GJ, Lefroy RDB, Lisle L (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index of agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46, 1459–1466.
- Boone RD (1994). Light-fraction soil organic matter: Origin and contribution to net nitrogen mineralization. *Soil Biology & Biochemistry*, 26, 1459–1468.
- Boyer JN, Groffman PM (1996). Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles. *Soil Biology & Biochemistry*, 28, 783–790.
- Burford JR, Bremner JM (1975). Relationships between the denitrification capacities of soils and total water-soluble and readily decomposable soil organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, 7, 389–394.
- Chen SH, Zhu ZL, Liu DH, Shu L, Wang CQ (2008). Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool management index. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 14, 806–809. (in Chinese with English abstract) [陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 舒丽, 王昌全 (2008). 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究. 植物营养与肥料学报, 14, 806–809.]
- Chen SL (2011). Thoughts on related problems of mulched technique with organic materials. *Journal of Zhejiang A&F University*, 28, 799–804. (in Chinese with English abstract) [陈双林 (2011). 毛竹林地覆盖竹笋早出技术应用的问题思考. 浙江农林大学学报, 28, 799–804.]
- Cheng CF, Li ZC, Zhou JG, Wu YC, Zhao ZX, Sun JJ (2015). Change of soil labile organic carbon pools after conversion from degraded shrub forest to broadleaved plantations in North subtropical area of China. *Forest Research*, 28, 101–108. (in Chinese with English abstract) [程彩芳, 李正才, 周君刚, 吴亚丛, 赵志霞, 孙娇娇 (2015). 北亚热带地区退化灌木林改造为人工阔叶林后土壤活性碳库的变化. 林业科学研究, 28, 101–108.]
- Coleman DC, Reid CPP, Cole CV (1983). Biological strategies of nutrient cycling in soil systems. *Advances in Ecological Research*, 13, 1–55.
- Dupont ST, Culman SW, Ferris H, Buckley DH, Glover JD (2010). No-tillage conversion of harvested perennial grassland to annual cropland reduces root biomass, decreases active carbon stocks, and impacts soil biota. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 137, 25–32.
- Gao F, Jia ZK, Zhang P, Wang W, Lu WT, Yang BP, Li YP (2011). Effect of straw mulching on soil active organic carbon and soil C pool management index in the arid areas of Southern Ningxia. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 29, 107–117. (in Chinese with English abstract) [高飞, 贾志宽, 张鹏, 王维, 路文涛, 杨宝平, 李永平 (2011). 秸秆覆盖对宁南旱作农田活性有机质及碳库管理指数的影响. 干旱地区农业研究, 29, 107–117.]
- Gong J, Huang GB, Chen LD, Fu BJ (2003). Comprehensive ecological effect of straw mulch on spring wheat field in dryland area. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 21, 69–73. (in Chinese with English abstract) [巩杰, 黄高宝, 陈利顶, 傅伯杰 (2003). 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究. 干旱地区农业研究, 21, 69–73.]
- Guo ZW, Yu WX, Chen SL, Li YC, Yang QP (2013). Influence of mulching management on soil microbe and its relationship with soil nutrient in *Phyllostachys praecox* stand. *Acta Ecologica Sinica*, 33, 5623–5630. (in Chinese with English abstract) [郭子武, 俞文仙, 陈双林, 李迎春, 杨清平 (2013). 林地覆盖对雷竹林土壤微生物特征及其与土壤养分制约性关系的影响. 生态学报, 33, 5623–5630.]
- Halvorson AD, Wienhold BJ, Black AL (2002). Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal*, 66, 906–912.
- Han J, Jia ZK, Han QF, Zhang J (2013). Application of mulching materials of rainfall harvesting system for improving soil water and corn growth in northwest of China. *Journal of Integrative Agriculture*, 12, 1712–1721.
- Huang Y, Liu SL, Shen QR, Zong LG (2002). Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 709–714. (in Chinese with English abstract) [黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 宗良纲 (2002). 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响. 应用生态学报, 13, 709–714.]
- Huang ZQ, Xu ZH, Chen CR (2008). Effect of mulching on labile soil organic matter pools, microbial community functional diversity and nitrogen transformations in two hardwood plantations subtropical Australia. *Applied Soil Ecology*, 40, 229–239.
- Janzen HH, Campbell CA, Brandt SA, Lafond GP, Townley-Smith L (1992). Light-fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 1799–1806.
- Jiang PK, Zhou GM, Xu QF (2002). Effect of intensive cultivation on the carbon pool of soil in *Phyllostachys praecox* stands. *Scientia Silvae Sinicae*, 38(6), 6–11. (in Chinese with English abstract) [姜培坤, 周国模, 徐秋芳 (2002). 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响. 林业科学, 38(6), 6–11.]
- Jiang ZH (2002). *World Bamboo Rattan*. Liaoning Science and Technology Publishing House, Shenyang. (in Chinese) [江泽慧 (2002). 世界竹藤. 辽宁科学技术出版社, 沈阳.]
- Kahlon MS, Lai R, Ann-Varughese M (2013). Twenty two

- years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 126, 151–158.
- Kalbitz K, Schwesig D, Rethemeyer J, Matzner E (2005). Stabilization of dissolved organic matter by sorption to the mineral soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 1319–1331.
- Kuiters AT, Mulder W (1993). Water-soluble organic matter in forest soils. *Plant and Soil*, 152, 225–235.
- Li JT, Zhong XL, Zhao QG (2011). Enhancement of soil quality in a rice-wheat rotation after long-term application of poultry litter and livestock manure. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 2837–2845. (in Chinese with English abstract) [李江涛, 钟晓兰, 赵其国 (2011). 畜禽粪便施用对稻麦轮作土壤质量的影响. *生态学报*, 31, 2837–2845.]
- Li L, Zhu HH, Su YR, Xiao HA, Huang DY, Wu JS (2009). Effects of rice straw incorporation in situ and *ex situ* on soil organic C and active organic C in agricultural soils in red soil hilly region. *Scientia Agricultura Sinica*, 42, 926–933. (in Chinese with English abstract) [李玲, 朱捍华, 苏以荣, 肖和艾, 黄道友, 吴金水 (2009). 稻草还田和易地还土对红壤丘陵农田土壤有机碳及其活性组分的影响. *中国农业科学*, 42, 926–933.]
- Li L, Li SJ, Zhang HL, Chen F (2006). Study on soil C pool management index of conservation tillage. *Journal of Soil and Water Conservation*, 20, 106–109. (in Chinese with English abstract) [李琳, 李素娟, 张海林, 陈阜 (2006). 保护性耕作下土壤碳库管理指数的研究. *水土保持学报*, 20, 106–109.]
- Li S, Zhang SR, Luo HH, Zhou L, Wang GY, Shen YC (2013). Concentration characteristics and dynamic changes of water soluble organic carbon in soil under different fertilization treatments. *Journal of Agro-Environment Science*, 32, 314–319. (in Chinese with English abstract) [李森, 张世熔, 罗红华, 周玲, 王贵胤, 沈义畅 (2013). 不同施肥处理土壤水溶性有机碳含量特征及动态变化. *农业环境科学学报*, 32, 314–319.]
- Li Y, Fang X, Xiang WH, Sun WJ, Zhang SJ, Li SL (2014). Contents of soil dissolved organic carbon and its relation. *Chinese Journal of Soil Science*, 45, 1483–1490. (in Chinese with English abstract) [李岩, 方晰, 项文化, 孙伟军, 张仕吉, 李胜蓝 (2014). 湘中丘陵区4种森林土壤水溶性有机碳含量及其与土壤养分的关系. *土壤通报*, 45, 1483–1490.]
- Li ZP, Zhang TL, Chen BY (2004). Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica*, 41, 544–552. (in Chinese with English abstract) [李忠佩, 张桃林, 陈碧云 (2004). 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. *土壤学报*, 41, 544–552.]
- Liang BC, Mackenzie AF, Schnitzer M, Monreal M, Voroney PR, Beyaert RP (1997). Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, 26, 88–94.
- Liu MY, Chang QR, Qi YB, Liu J, Chen T (2014). Aggregation and soil organic carbon fractions under different land uses on the tableland of the Loess Plateau of China. *Catena*, 115, 19–28.
- Liu RJ, Wu YC, Zhang Y, Li ZC, Ma SJ, Wang B, Geri LT (2012). Comparison of soil labile organic carbon in Chinese fir plantations and natural secondary forests in north subtropical areas of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 431–437. (in Chinese with English abstract) [刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 李正才, 马少杰, 王斌, 格日乐图 (2012). 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较. *植物生态学报*, 36, 431–437.]
- Liu WN, Wu WL, Wang XB, Wang MX, Mao WF (2006). Effects of soil type and land use pattern on microbial biomass carbon. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 12, 406–411. (in Chinese with English abstract) [刘文娜, 吴文良, 王秀斌, 王明新, 毛文峰 (2006). 不同土壤类型和农业用地方式对土壤微生物量碳的影响. *植物营养与肥料学报*, 12, 406–411.]
- Louise MD, Gwyn SG, John H, Phil JH, Richard D (2000). Management influences on soil microbial communities and their function in botanically diverse haymeadows of northern England and Wales. *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 253–256.
- Lu RK (2000). *Analytical Methods for Soil Agrochemistry*. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing. (in Chinese) [鲁如坤 (2000). 土壤农业化学分析方法. 中国农业科学技术出版社, 北京.]
- Ma SJ, Li ZC, Wang G, Liu RJ, Fu MY, Zhou BZ (2011). Effects of intensive and extensive management on soil active organic carbon in bamboo forests of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 551–557. (in Chinese with English abstract) [马少杰, 李正才, 王刚, 刘荣杰, 傅懋毅, 周本智 (2011). 集约和粗放经营下毛竹林土壤活性有机碳的变化. *植物生态学报*, 35, 551–557.]
- Mandal UK, Yadav SK, Sharma KL, Ramesh V, Venkanna K (2011). Estimating permanganate-oxidizable active carbon as quick indicator for assessing soil quality under different land-use system of rainfed Alfisols. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 81, 927–931.
- Moradi A, Sung CTB, Goh KJ, Hanif AHM, Ishak CF (2015). Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation. *Soil and Tillage Research*, 145, 62–71.
- Oliva P, Viers J, Dupré B, Fotuné JP, Martin F, Braun JJ, Nahon D, Robain H (1999). The effect of organic matter on chemical weathering: Study of a small tropical watershed: Nsimi-Zoétélé site, Cameroon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 4013–4035.
- Ouyang W, Qi SS, Hao FH, Wang XL, Shan YS, Chen SY

- (2013). Impact of crop patterns and cultivation on carbon sequestration and global warming potential in an agricultural freeze zone. *Ecological Modelling*, 252, 228–237.
- Post WM, Kwon KC (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 6, 317–327.
- Sainju UM, Schomberg HH, Singh BP, Whitehead WF, Tillman PG, Lachnicht-weywes SL (2007). Cover crop effect on soil carbon fractions under conservation tillage cotton. *Soil and Tillage Research*, 96, 205–218.
- Shen H, Cao ZH, Xu ZH (2000). Effects of fertilization on different carbon fractions and carbon pool management index in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 37, 166–173. (in Chinese with English abstract) [沈宏, 曹志洪, 徐志红 (2000). 施肥对土壤不同碳形态及碳库管理指数的影响. 土壤学报, 37, 166–173.]
- Shrestha RK, Ladha JK, Gami SK (2006). Total and organic soil carbon in cropping systems of Nepal. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 75, 257–269.
- Six J, Conant RT, Paul EA, Paustian K (2002). Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241, 155–176.
- Song MW, Li AZ, Cai LQ, Zhang RZ (2008). Effects of different tillage methods on soil organic carbon pool. *Journal of Agro-Environment Science*, 27, 622–626. (in Chinese with English abstract) [宋明伟, 李爱宗, 蔡立群, 张仁陟 (2008). 耕作方式对土壤有机碳库的影响. 农业环境科学学报, 27, 622–626.]
- State Forestry Administration (1999). *Forestry Industry Standard of the People's Republic of China LY/T 1210 1275-1999. Forest Soil Analysis Method*. Standards Press of China, Beijing. (in Chinese) [国家林业局 (1999). 中华人民共和国林业行业标准LY/T 1210 1275-1999 森林土壤分析方法. 中国标准出版社, 北京.]
- Stockfisch N, Forstreuter T, Ehlers W (1999). Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany. *Soil and Tillage Research*, 52, 91–101.
- Thorburn PJ, Meier EA, Collins K, Robertson FA (2012). Changes in soil carbon sequestration, fractionation and soil fertility in response to sugarcane residue retention are site-specific. *Soil and Tillage Research*, 120, 99–111.
- Tian SZ, Ning TY, Wang Y, Li HJ, Zhong WL, Li ZJ (2010). Effect of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 373–378. (in Chinese with English abstract) [田慎重, 宁堂原, 王瑜, 李洪杰, 仲惟磊, 李增嘉 (2010). 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响. 应用生态学报, 21, 373–378.]
- Tirol-Padre A, Ladha JK (2004). Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 68, 969–978.
- Wander MM, Traina SJ, Stinner BR, Peter SE (1994). The effects of organic and conventional management on biologically-active soil organic matter fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1130–1139.
- Wang B, Wang KH, Li Q, Zhu ZJ, Ding XZ, Yang J (2012). A preliminary study of the effect of mulching on growth of *Phyllostachys edulis*. *World Bamboo Rattan*, 10, 20–22. (in Chinese with English abstract) [王波, 汪奎宏, 李琴, 朱志建, 丁笑章, 杨键 (2012). 地面覆盖对毛竹生长影响的初步研究. 世界竹藤通讯, 10, 20–22.]
- Wang GB, Zhao XL, Wang MH, Ruan HH, Xu CB, Xu YM (2013). Effects of land use change on soil readily oxidizable carbon in a coastal area of northern Jiangsu Province, East China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 921–926. (in Chinese with English abstract) [王国兵, 赵小龙, 王明慧, 阮宏华, 徐长柏, 徐亚明 (2013). 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响. 应用生态学报, 24, 921–926.]
- Wang QK, Wang SL, Feng ZW, Huang Y (2005). Active soil organic matter and its relationship with soil quality. *Acta Ecologica Sinica*, 25, 513–519. (in Chinese with English abstract) [王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇 (2005). 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报, 25, 513–519.]
- Wang Y, Ruan HH, Huang LL, Feng YQ, Qi Y, Zhou JZ, Shen YL (2010). Soil labile organic carbon with different land uses in reclaimed land area from Taihu Lake. *Soil Science*, 175, 624–630.
- Wang YJ, Xie ZK, Malhi SS, Vera CL, Zhang YB, Wang JN (2009). Effects of rainfall harvesting and mulching technologies on water use efficiency and crop yield in the semi-arid loess plateau China. *Agricultural Water Management*, 96, 374–382.
- Whitbread AM, Lefroy RDB, Blair GJ (1998). A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales. *Australian Journal of Soil Research*, 36, 669–681.
- Wu JG, Xu DY (2005). Dissolved organic carbon concentrations in soil under different land uses in the Liupan mountain forest zone. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 945–953. (in Chinese with English abstract) [吴建国, 徐德应 (2005). 六盘山林区几种土地利用方式对土壤中可溶性有机碳浓度影响的初步研究. 植物生态学报, 29, 945–953.]
- Wu YC, Li ZC, Cheng CF, Liu RJ, Wang B, Geri LT (2013). Effects of understory removal on soil labile organic carbon pool in a cinnamomum camphora plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 3341–3346. (in Chinese with English abstract) [吴亚丛, 李正才, 程彩芳, 刘荣杰, 王斌, 格日乐图 (2013). 除去林下植被对樟树人工林土壤活性有机碳库的影响. 应用生态学报, 24, 3341–

- 3346.]
- Xie XF (1994). *Bamboo Production and Processing*. Jindun Publishing House, Beijing. (in Chinese) [谢孝福 (1994). 竹子生产与加工. 金盾出版社, 北京.]
- Xu QF (2003). *Study on Labile Organic Carbon Pool in Forest Soils*. PhD dissertation, Zhejiang University, Hangzhou. [徐秋芳 (2003). 森林土壤活性有机碳库的研究. 博士学位论文, 浙江大学, 杭州.]
- Xu QF, Xu JM, Jiang PK (2003). Study on organic carbon pool of soil under intensive management bamboo forest. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17, 15–21. (in Chinese with English abstract) [徐秋芳, 徐建明, 姜培坤 (2003). 集约经营毛竹林土壤活性有机碳库研究. 水土保持学报, 17, 15–21.]
- Yang MF, Zhu LQ, Han XZ, Gu KJ, Hu NJ, Bian XM (2013). Short-term effects of different tillage modes combined with straw-returning on the soil labile organic carbon components in a farmland with rice-wheat double cropping. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 1387–1393. (in Chinese with English abstract) [杨敏芳, 朱利群, 韩新忠, 顾克军, 胡乃娟, 卞新民 (2013). 不同土壤耕作措施与秸秆还田对稻麦两熟制农田土壤活性有机碳组分的短期影响. 应用生态学报, 24, 1387–1393.]
- Yue LX (2010). *Effects of Tillage Practices on Soil Organic Carbon Pool in Paddy Soil*. PhD dissertation, Huazhong Agricultural University, Wuhan. [乐丽鑫 (2010). 耕作方式对稻田土壤有机碳库的影响, 博士学位论文, 华中农业大学, 武汉.]
- Zhang JH, Ding WX, Meng L (2010). Spatial variability of soil labile organic carbon in the tropical rubber plantations of Hainan Province, China. *Ecology and Environmental Sciences*, 19, 2563–2567. (in Chinese with English abstract) [张俊华, 丁维新, 孟磊 (2010). 海南热带橡胶园土壤易氧化有机碳空间变异特征研究. 生态环境学报, 19, 2563–2567.]
- Zhang LM, Yu DS, Shi XZ, Xu SX, Wang SH, Xing SH, Zhao YC (2012). Simulation soil organic carbon change in China's Tai-Lake paddy soils. *Soil and Tillage Research*, 121, 1–9.
- Zhao MX, Zhou JB, Kalbitz K (2008). Carbon mineralization and properties of water-extractable organic carbon in soils of the south Loess Plateau in China. *European Journal of Soil Biology*, 44, 158–165.
- Zhou GM, Jiang PK (2004). Changes in active organic carbon of erosion red soil by vegetation recovery. *Journal of Soil and Water Conservation*, 18, 68–83. (in Chinese with English abstract) [周国模, 姜培坤 (2004). 不同植被恢复对侵蚀红壤活性碳库的影响. 水土保持学报, 18, 68–83.]
- Zhou GM, Xu JM, Wu JS, Jiang PK (2006). Changes in soil active organic carbon with history of intensive management of *Phyllostachy pubescens* forest. *Scientia Silvae Sinicae*, 42(6), 124–128. (in Chinese with English abstract) [周国模, 徐建明, 吴家森, 姜培坤 (2006). 毛竹林集约经营过程中土壤活性有机碳库的演变. 林业科学, 42(6), 124–128.]
- Zhu YL, Han JG, Wu JS (2004). Effect of agricultural practices on soil organic carbon dynamics. *Chinese Journal of Soil Science*, 35, 648–651. (in Chinese with English abstract) [朱咏莉, 韩建刚, 吴金水 (2004). 农业管理措施对土壤有机碳动态变化的影响. 土壤通报, 35, 648–651.]
- Zhu ZJ, Jiang PK, Xu QF (2006). Study on the active organic carbon in soil under different types of vegetation. *Forest Research*, 42, 523–526. (in Chinese with English abstract) [朱志建, 姜培坤, 徐秋芳 (2006). 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较. 林业科学研究, 42, 523–526.]

责任编委: 陈 槐 责任编辑: 王 葳



扫码向作者提问