

# 茶园与相邻林地土壤有机碳及基础呼吸的垂直分布特征

范利超, 韩文炎\*, 李鑫, 李治鑫

(中国农业科学院茶叶研究所, 杭州 310008)

**摘要:**对茶园及相邻林地土壤基础呼吸的垂直分布特征进行了研究,并试图寻求其与土壤有机碳(SOC)、水溶性有机碳(WSOC)、微生物生物量碳(MBC)的关系。结果表明茶园和林地土壤有机碳、土壤呼吸积累量、水溶性有机碳和微生物生物量碳均随着土壤深度的增加而减少,且茶园均值大于林地。在0~100 cm土壤层次内,茶园土壤质量敏感性指标(WSOC/SOC)平均值、代谢熵( $qCO_2$ )平均值均大于林地,微生物熵( $qMBC$ )平均值小于林地。茶园和林地土壤基础呼吸速率与SOC、WSOC及MBC呈显著正相关,向后筛选回归模型表明对茶园土壤基础呼吸的影响作用依次为SOC>MBC>WSOC,对林地土壤基础呼吸的影响作用则为WSOC>SOC>MBC。茶园土壤代谢作用强于林地,但茶园有机碳库的稳定性比林地差,不利于土壤有机碳库的积累,为促进茶叶生产的持续健康发展,茶园土壤需要更加科学合理的施肥和耕作措施。

**关键词:**茶园;有机碳;水溶性有机碳;微生物生物量碳;土壤基础呼吸;垂直分布

中图分类号:S154.3 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)06-1149-09 doi:10.11654/jaes.2015.06.019

## Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Soil Basal Respiration in Tea Soil and Adjacent Woodland Soil

FAN Li-chao, HAN Wen-yan\*, LI Xin, LI Zhi-xin

(Tea Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** In this study, the vertical distributions of soil organic carbon (SOC), water soluble organic carbon (WSOC), microbial biomass carbon (MBC) and soil basal respiration (SBR) in tea soils and their adjacent woodland soils were determined to explore the relationship between soil basal respiration rate and SOC, WSOC and MBC. Results showed that SOC, WSOC, MBC and soil cumulative respiration flux were all greater in tea garden than in woodland, and decreased with increasing soil depth in both types of soils. Biological activity indicators (WSOC/SOC and  $qCO_2$ ) in the tea garden soils were also greater than those in the woodland soils. However,  $qMBC$  in the tea garden was less than that in the woodland. Soil respiration rate was significantly and positively correlated with SOC, WSOC and MBC. Multiple linear regression by “Backward Elimination” method showed that soil respiration rate was affected by SOC>MBC>WSOC in the tea garden soils, but by WSOC>SOC>MBC in the woodland soils. Soil metabolism was greater in the tea garden than in the woodland soils. The stability of soil carbon pools in the tea garden was less than that in the woodland, implying less accumulation of soil organic carbon in tea garden than in woodland. More attention to scientific and reasonable fertilization and tillage management is necessary to maintain soil sustainability of tea gardens.

**Keywords:** tea; soil organic carbon; WSOC; MBC; soil basal respiration; vertical distribution

在全球变暖背景下,不同生态系统的土壤有机碳库储量及其稳定性成为土壤碳循环研究的热点<sup>[1]</sup>。土壤碳库是最大的陆地碳库,其储量是大气碳库的3倍以上<sup>[2-3]</sup>。植被类型和土地利用方式会改变土壤有机碳

的输入和输出量,改变土壤有机碳的稳定性,使得土壤碳库储量发生变化<sup>[4]</sup>。土壤呼吸是土壤碳输出的重要方式,土壤呼吸速率相对微小的变化都会显著改变大气中 $CO_2$ 浓度和土壤碳的累积速率<sup>[5]</sup>。土壤呼吸主要由自养呼吸(根呼吸)和异养呼吸(微生物呼吸)两部分组成,异养呼吸部分的土壤呼吸常被称为土壤基础呼吸(Soil basal respiration, SBR)<sup>[6]</sup>。土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、土壤水溶性有机碳(Water soluble organic carbon, WSOC)和微生物生物量碳

收稿日期:2015-02-05

基金项目:国家自然科学基金(41171218);中国农业科学院科技创新团队(CAAS-ASTIP-2014-TRICAAS);浙江省茶产业重点创新团队项目(2011R50024)

作者简介:范利超(1988—),男,山东菏泽人,硕士研究生,从事土壤呼吸研究。E-mail:flxxy@126.com

\*通信作者:韩文炎 E-mail:hanwy@tricaas.com

(Microbial biomass carbon, MBC)是土壤基础呼吸的重要影响因素<sup>[7-8]</sup>。WSOC只占土壤有机碳很少的一部分,但由于可以被微生物直接利用,对土壤有机和无机物质的转化、迁移和降解有重要影响<sup>[9]</sup>。MBC是土壤有机质中有生理活性的部分,可以在土壤有机碳库变化之前反映土壤的生物活性变化<sup>[10-11]</sup>。Wang等<sup>[12]</sup>对我国6种类型森林土壤呼吸组分的研究表明,土壤基础呼吸速率与土壤有机碳含量呈正相关。吴君君等<sup>[13]</sup>研究认为,米楮人工林土壤异养呼吸高于杉木林是由于米楮人工林土壤表层有机碳含量高于杉木人工林。Agnelli等<sup>[14]</sup>对意大利亚平宁山脉森林土壤剖面微生物群落及土壤呼吸的研究表明,随着土壤深度的增加,土壤呼吸速率及微生物生物量碳降低。土壤呼吸与水溶性有机碳的相关性随土地利用类型不同而表现为显著正相关<sup>[15]</sup>或不相关<sup>[16]</sup>。水溶性有机碳与有机碳比值(WSOC/SOC)、微生物碳熵(qMBC)和代谢商(qCO<sub>2</sub>)常被用作土壤质量的敏感性指标<sup>[11]</sup>,可以早期预测土壤有机碳的长期变化趋势<sup>[17]</sup>。

我国是世界上最大的茶叶生产国,茶园面积占世界茶园总面积的62%。茶树属于多年生木本植物,主要位于热带和亚热带区域,具有类似于森林的固碳能力及潜力。尽管每年有修剪枝叶回园,并大量施肥,平均施氮量高达553.4 kg·hm<sup>-2</sup>,但茶园土壤有机质含量不高,平均仅为1.87%<sup>[18-20]</sup>。是什么原因导致茶园土壤有机质积累量较少?本研究以茶园相邻林地作为参考,测定了土壤基础呼吸、SOC、WSOC及MBC等指标的垂直分布特征,并探讨了土壤基础呼吸与SOC、WSOC及MBC的关系,以期在全球变暖背景下为深入了解茶园碳循环过程以及绿色低碳管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本试验土样采集于杭州中国农业科学院茶叶研究所(120°09'E, 30°14'N)的试验区高产茶园及相邻林地,属亚热带季风气候区,全年气候温和湿润。年平均气温为17.0℃,月平均气温1月份最低,为1.7℃,7月份最高,为33.0℃;年平均降雨量为1533 mm,降雨主要集中在3月到7月,也是茶树生长的主要季节。高产茶园是由林地改植而成,茶树品种为龙井43种,树龄为40年左右,西湖龙井茶叶产量为280 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;茶园土壤N:P:K的平均比例为3:1:1(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O),磷、钾肥和有机肥作为基肥在每年9或10月份

施一次,化肥(主要为尿素)施用量为900 kg N·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>,有机肥(厩肥或饼肥)施用量为2250 kg·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>;每年秋季进行一次轻修剪,间隔3~4年重修剪一次,修剪枝叶保留在茶园里。相邻林地不施肥,主要为荷木(*Schima crenata korthals*)、樟树(*Cinnamomum camphora*)和苦槠树(*Castanopsis sclerophylla*)的混合林。供试土壤的成土母质为安山斑岩,土壤为红壤。供试茶园及相邻林地的详细情况参见文献[21]和[22]。

### 1.2 样品采集及处理

于2014年6月中旬,采用土钻按“S”型采集茶园和林地土壤,每层为7~8点混合样,如此采样重复三次,获得3个混合土壤样。取样深度为0~100 cm,分6层(0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm)取样。采集的土样迅速带回实验室,碾磨过2 mm筛后迅速装入密封袋储存于4℃冰箱,用于室内培养和WSOC、MBC等测定。土壤MBC测定前在温度25℃、相对湿度85%的恒温恒湿的培养箱中预培养7 d。部分样品自然风干研磨后过0.154 mm筛用于测定土壤有机碳及全氮。同时,挖取3个土壤剖面,测定土壤容重。茶园和林地土壤pH值和容重见表1。

### 1.3 土壤基础呼吸测定实验方法

将茶园和林地新鲜过筛土样的含水量调节为田间持水量的60%。取土样10 g(以干重计)于100 mL三角瓶中,并在三角瓶中加入少量水,以维持瓶内微生物正常活动的湿度,然后用橡皮塞将三角瓶密封,每种样地每层土样共有12个三角瓶,放入25℃恒温培养箱中培养。另有3个无土样三角瓶测定空气中CO<sub>2</sub>浓度。在培养期间,分别在第1、3、7、14 d随机取出不同样地不同土层样品的3个三角瓶用15 mL负压储血真空管抽取气体样,用于测定土壤基础呼吸。取样后的三角瓶清除。真空管内CO<sub>2</sub>浓度用气相色谱仪测定(GC-14A,日本岛津),检测器为<sup>63</sup>Ni电子捕获器(ECD),色谱填充柱为80/100目Porapak Q<sup>[23]</sup>。

### 1.4 分析方法

土壤容重采用环刀法测定;土壤pH值使用玻璃电极法(DRION 3 STAR pH计,Thermo公司,美国)测定(土液比1:1);土壤含水量用烘干法(105℃±2℃,24 h)测定;土壤田间持水量采用容量法测定<sup>[23]</sup>。SOC及全氮采用Elementar VarioMax CN自动分析仪(Elementar公司,德国)测定;土壤MBC采用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>提取法测定<sup>[20]</sup>。土壤WSOC测定方法:称取10.0 g新鲜土壤,放入50 mL超纯水中振荡30 min,过滤,过滤液离心15 min(1000 r·min<sup>-1</sup>)。将浮在表层的物质通过抽

表 1 茶园和林地不同土壤层次的 pH 值、容重和 C/N 值的垂直分布特征  
Table 1 Vertical distribution of pH, bulk density and C/N value in tea garden and woodland soils

| 土层深度<br>Soil depth/cm | pH 值 pH value |             | 土壤容重 Soil bulk density/g·cm <sup>-3</sup> |             | C/N           |             |
|-----------------------|---------------|-------------|-------------------------------------------|-------------|---------------|-------------|
|                       | 茶园 Tea garden | 林地 Woodland | 茶园 Tea garden                             | 林地 Woodland | 茶园 Tea garden | 林地 Woodland |
| 0~10                  | 3.40          | 3.42        | 1.09                                      | 1.12        | 8.18          | 11.09       |
| 10~20                 | 3.28          | 3.47        | 1.21                                      | 1.13        | 8.67          | 10.15       |
| 20~40                 | 3.37          | 3.53        | 1.12                                      | 1.11        | 8.14          | 10.69       |
| 40~60                 | 3.34          | 3.61        | 1.03                                      | 1.07        | 8.69          | 10.47       |
| 60~80                 | 3.50          | 3.79        | 1.20                                      | 1.21        | 6.55          | 11.38       |
| 80~100                | 3.56          | 3.98        | 1.29                                      | 1.14        | 8.51          | 9.98        |
| 0~100                 | 3.41          | 3.63        | 1.16                                      | 1.13        | 8.12          | 10.60       |

吸装置过 0.45 μm 的滤膜,最后滤液采用 TOC 分析仪(Multi N/C 2100, Analytik Jena 公司,德国)测定<sup>[24]</sup>。

### 1.5 数据处理及统计方法

土壤质量敏感性指标 WSOC/SOC 为土壤 WSOC 与 SOC 的比值(%)。

微生物熵  $qMBC(\%) = MBC/SOC$

呼吸熵  $qCO_2(\%) = (CO_2 - C)/MBC^{[25]}$

式中:  $CO_2 - C$  为培养周期内土壤呼吸释放的碳量,  $mg\ C \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ 。

有机碳密度  $SOC D_i = C_i \times B_i \times H_i \times (1 - q)/100$

式中:  $SOC D_i$  为第  $i$  层 SOC 密度,  $kg \cdot m^{-2}$ ;  $C_i$  为第  $i$  层 SOC 的平均含量,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $B_i$  为第  $i$  层土壤容重,  $g \cdot cm^{-3}$ ;  $H_i$  为第  $i$  层土壤厚度,  $cm$ ;  $q$  为直径大于 2 mm 砾石的含量, %。

0~100 cm 土层有机碳密度为各土层有机碳密度之和<sup>[26]</sup>。SOC 储量分配比例(%)为每层 SOC 含量与 0~100 cm 土层总有机碳含量的比值。

采用最小显著差数法(LSD)对 SOC、WSOC、MBC 等进行显著性检验,不同样地相同土层间比较用两个独立样本  $t$  检验(Independent-Samples T Test)。土壤基础呼吸速率均值为培养期间土壤呼吸碳积累量与培养天数的比值,土壤基础呼吸速率均值与 SOC、WSOC 及 MBC 的相关性采用简单线性相关,与 SOC、WSOC 及 MBC 的复合相关性采用向后筛选策略(Backward)回归分析,土壤基础呼吸速率均值为因变量, SOC、WSOC 和 MBC 为自变量。所有数据处理和统计分析采用 IBM SPSS 19.0 软件,采用 SigmaPlot 12.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 SOC、WSOC 及 WSOC/SOC 的垂直分布特征

由图 1 可知,在茶园和林地中, SOC、SOC 密度、SOC 储量分配比例和土壤 WSOC 均随着土壤深度的

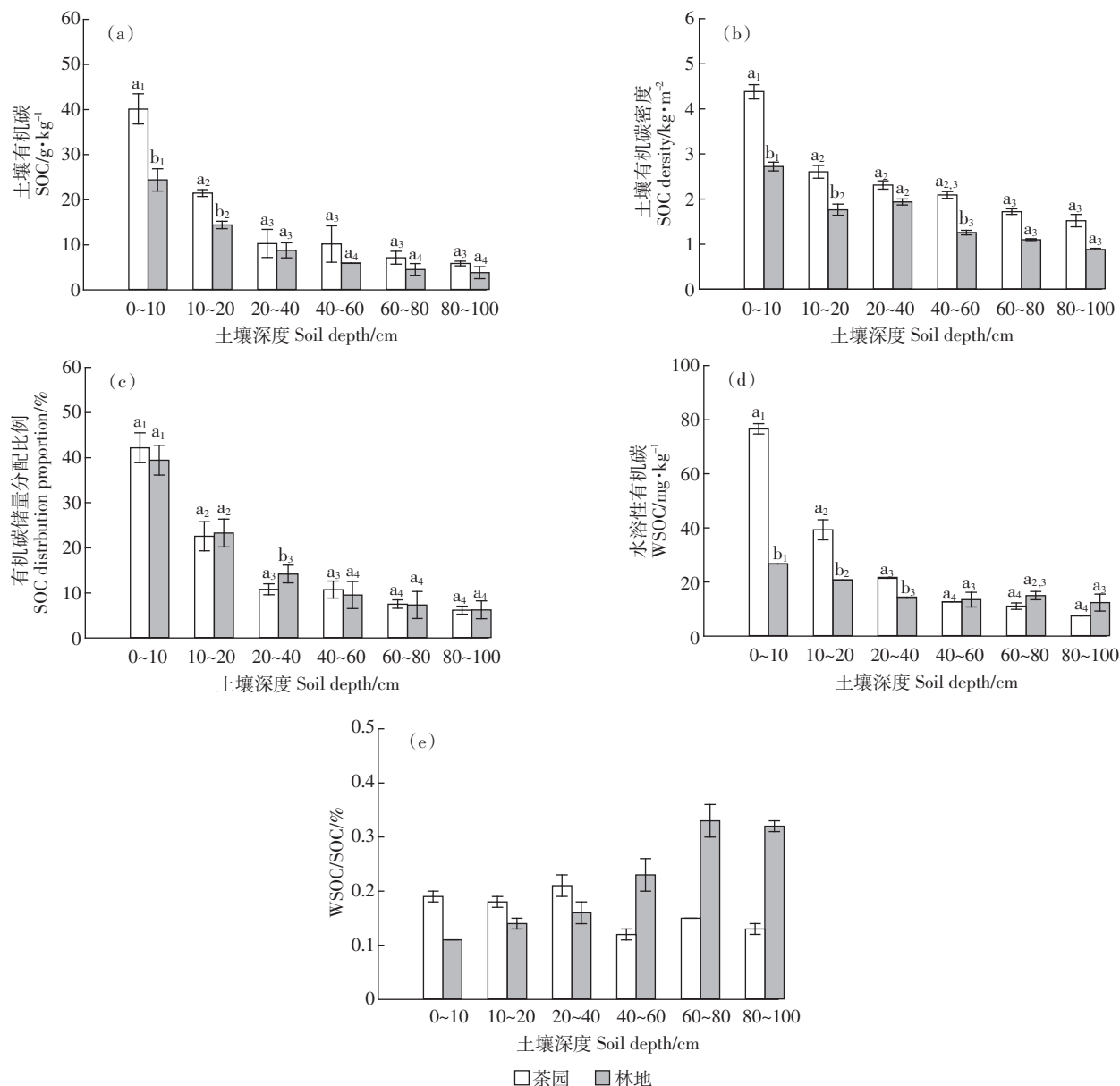
增加而减少,且减少幅度先快后慢。在 0~100 cm 土层中,茶园 SOC 均值和 SOC 密度分别为 15.85、14.63  $kg \cdot m^{-2}$ ,为林地的 1.53 倍和 1.54 倍。茶园和林地 SOC 储量仅在 20~40 cm 土层表现了显著性差异,二者在其余土层未呈现显著差异。茶园和林地 SOC 储量在 0~10 cm 土层分配比例均为最高,分别占 42.18% 和 39.44%。可见虽然 0~100 cm 剖面内茶园和林地 SOC 含量和 SOC 密度大小有很大差异,但其在土壤表层分配比例较高的特点相一致。茶园土壤 WSOC 在 0~10、10~20、20~40 cm 三个土层均显著大于林地,特别是茶园 0~10 cm 土层 WSOC 是林地的 1.95 倍。茶园 WSOC/SOC 的值在 0~40 cm 土层较大,其余土层含量较低,而林地则相反。0~100 cm 土壤剖面内茶园和林地 WSOC/SOC 的变化范围为 0.12%~0.21% 和 0.11%~0.33%,均值分别为 0.18% 和 0.17%。

### 2.2 土壤 MBC 及 qMBC 的垂直分布特征

由图 2 可知,茶园和林地 MBC 分布随着土层深度的增加而减少,减少幅度逐渐变小,最后趋于平稳。茶园土壤 MBC 在 0~10、20~80 cm 土层显著大于林地,而在 10~20、80~100 cm 土层与林地未呈现显著差异。茶园和林地 qMBC 没有表现出明显的变化规律。0~100 cm 土壤剖面内茶园和林地 qMBC 的变化范围为 0.64%~1.10% 和 0.53%~0.98%,均值分别为 0.74% 和 0.79%。

### 2.3 土壤基础呼吸及 $qCO_2$ 的垂直分布特征

由图 3 可知,茶园和林地土壤基础呼吸速率随着土壤深度的增加而减少。茶园 0~10 cm 土层土壤呼吸速率随着培养时间延长在第 7 d 达到最大值,随后下降,其余土层土壤基础呼吸随着培养时间的延长而下降(图 3a)。林地 0~80 cm 五个土层土壤基础呼吸速率先升高后下降在第 3 d 达到最大值,80~100 cm 土层土壤呼吸速率一直处于下降趋势(图 3b)。土壤呼吸碳释放积累量总体上随着土壤深度的增加而减少(图



不同字母表示不同样地相同土层的显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 不同数字表示每块样地不同土层之间的显著性差异 ( $P < 0.05$ )。下同  
 Different letters mean significant difference between tea garden and woodland at 0.05, different numbers mean significant difference between different soil layers at 0.05. The same was below

图1 不同样地 SOC、SOC 密度和 SOC 储量分配比例、WSOC 及 WSOC/SOC 的垂直分布特征

Figure 1 Vertical distribution characteristics of SOC, SOC density, SOC storage proportion, WSOC and WSOC/SOC values in different soil depths

3d、3e)。茶园土壤呼吸碳释放积累量在 0~10、10~20、40~60 cm 三个土壤层次显著大于林地, 其余土层差异不显著。在培养周期(14 d)内, 茶园土壤呼吸碳释放积累总量是林地的 1.84 倍。茶园  $qCO_2$  的最大值出现在 0~10 cm 土层, 而林地出现在 40~60 cm 土层。0~100 cm 土壤剖面内茶园和林地  $qCO_2$  的变化范围分别为 2.56%~6.94%和 2.88%~6.51%, 均值为 4.76%和

3.74%。

## 2.4 土壤基础呼吸与 SOC、WSOC 及 MBC 的相关性

由图 4 可知, 茶园和林地土壤基础呼吸速率均与 SOC、WSOC 及 MBC 均到达了极显著的正相关 ( $P < 0.01$ )。向后筛选策略共经过三步完成回归方程的建立, 最终模型为第 3 个模型(表 2)。第 2 个模型显示茶园土壤基础呼吸的相关因素为 SOC 和 MBC, 林



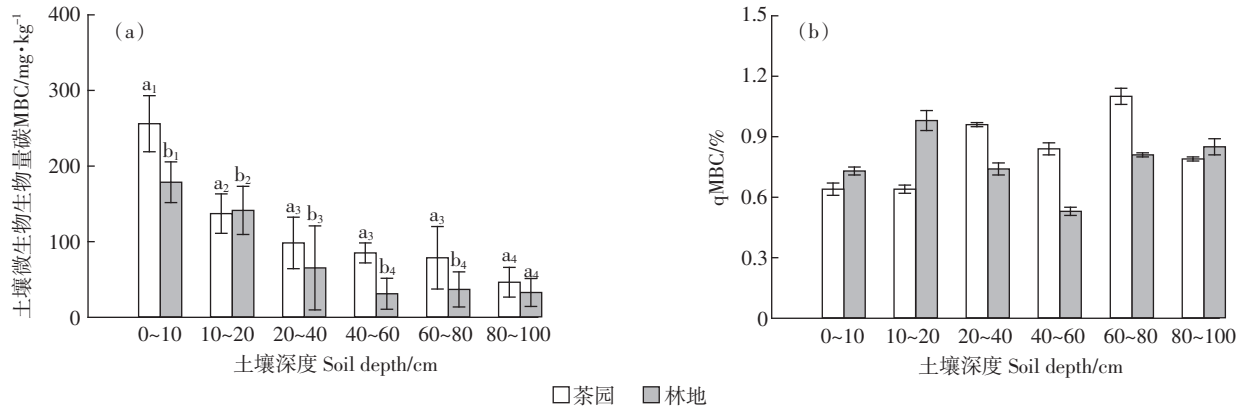
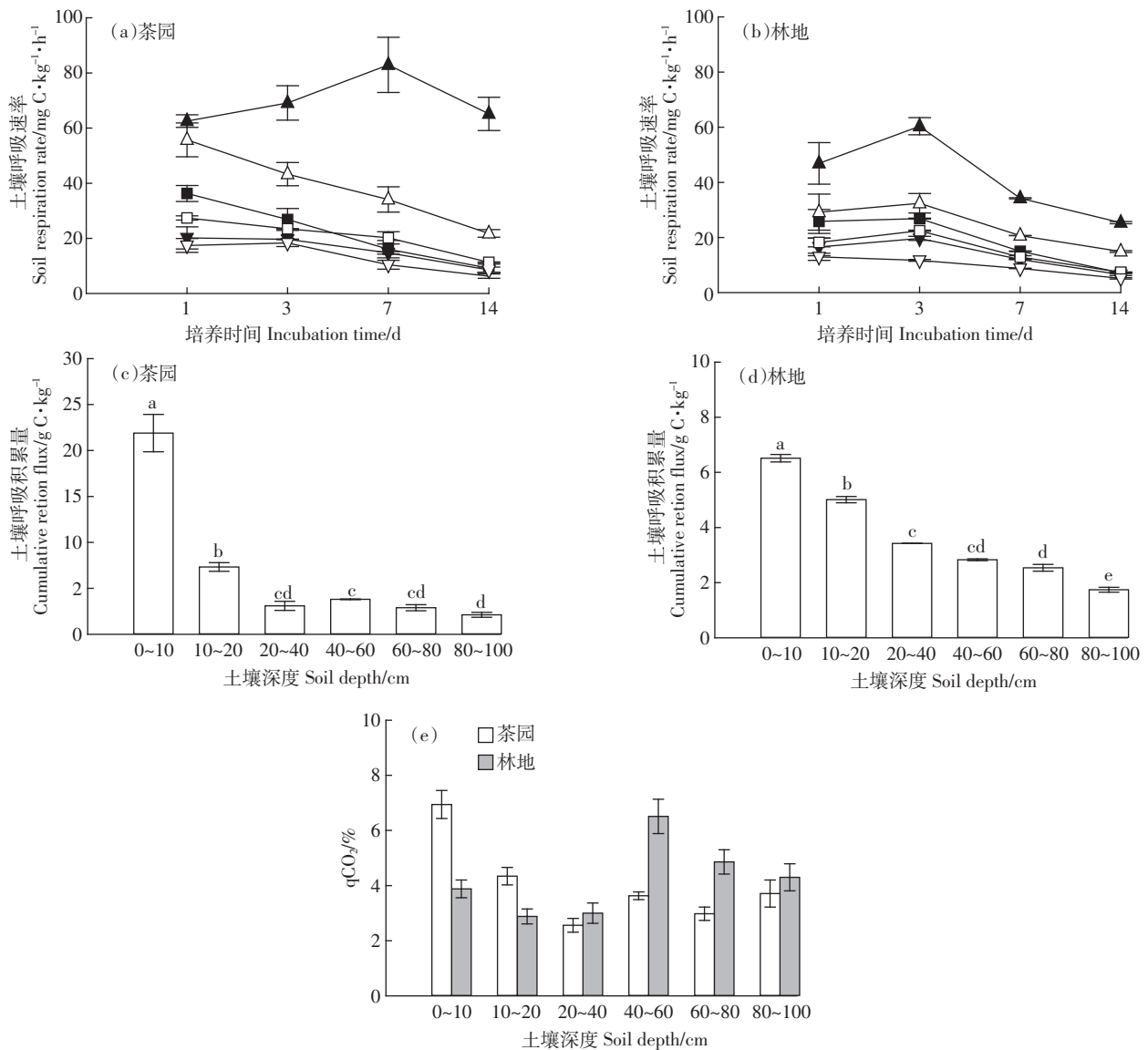


图 2 土壤 MBC 及 qMBC 的垂直分布特征

Figure 2 Vertical distribution of MBC and qMBC in different soil depths



▲ 0~10 cm △ 10~20 cm ■ 20~40 cm □ 40~60 cm ▼ 60~80 cm ▽ 80~100 cm

图 3 茶园和林地不同土壤层次土壤基础呼吸、呼吸积累量及 qCO<sub>2</sub> 的垂直分布特征Figure 3 Soil basal respiration, respiration accumulation and qCO<sub>2</sub> in different soil depths

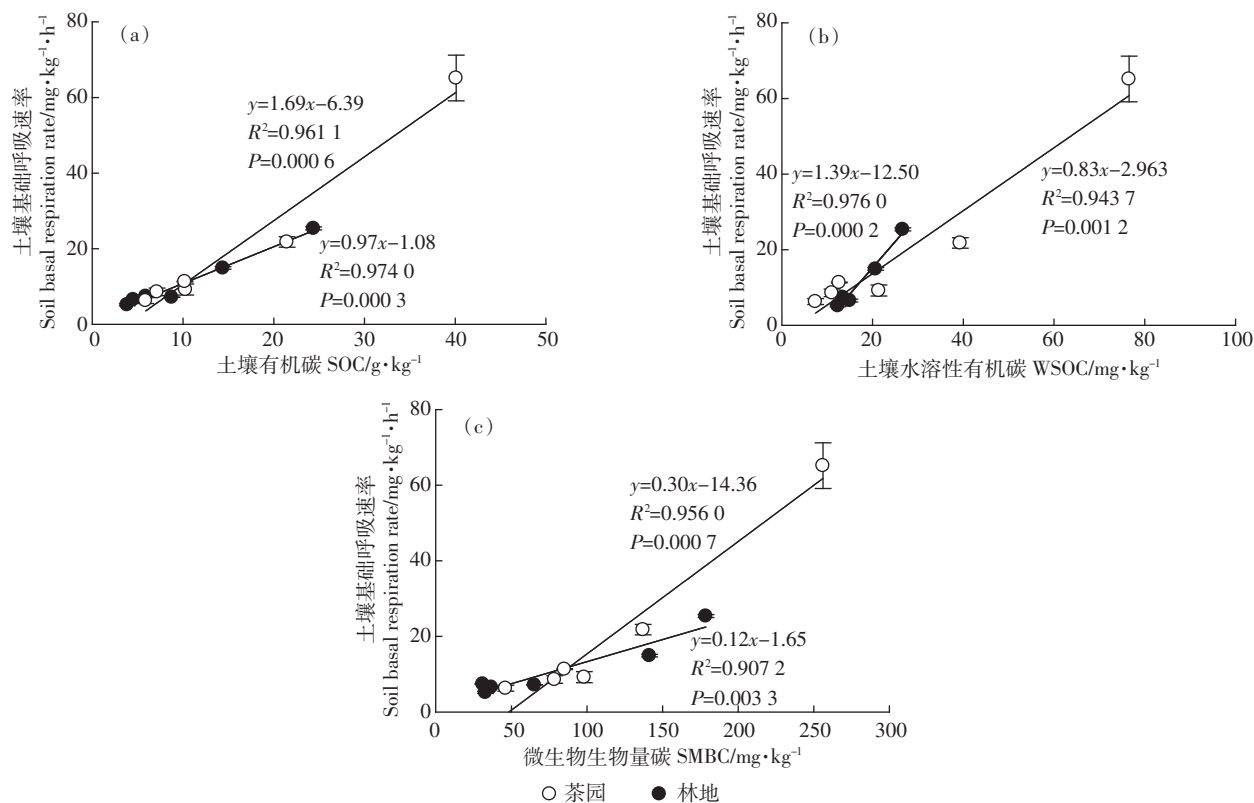


图 4 土壤基础呼吸与 SOC、WSOC 及 MBC 的简单线性相关性

Figure 4 Simple linear correlations of soil basal respiration with SOC、WSOC and MBC

表 2 土壤基础呼吸与 SOC、WSOC 及 MBC 的回归方程系数

Table 2 Regression coefficients for soil basal respiration and SOC、WSOC、MBC

| 茶园 Teagarden |                                          |                |       |       | 林地 Woodland |                                         |                |      |       |
|--------------|------------------------------------------|----------------|-------|-------|-------------|-----------------------------------------|----------------|------|-------|
| 模拟方程 Model   | 方程系数 Coefficient                         | 标准误差 Std.Error | P     |       | 模拟方程 Model  | 方程系数 Coefficient                        | 标准误差 Std.Error | P    |       |
| 1            | Constant                                 | -13.94         | 11.41 | 0.346 | 1           | Constant                                | -8.08          | 3.45 | 0.144 |
|              | SOC                                      | 1.92           | 2.13  | 0.464 |             | SOC                                     | 0.66           | 0.25 | 0.122 |
|              | WSOC                                     | -0.64          | 1.16  | 0.638 |             | WSOC                                    | 0.92           | 0.34 | 0.114 |
|              | MBC                                      | 0.19           | 0.28  | 0.578 |             | MBC                                     | -0.04          | 0.03 | 0.295 |
|              | SBR=1.92(SOC)-0.64(WSOC)+0.19(MBC)-13.94 |                |       |       |             | SBR=0.66(SOC)+0.92(WSOC)-0.04(MBC)-8.08 |                |      |       |
| 2            | Constant                                 | -9.62          | 7.23  | 0.275 | 2           | Constant                                | -6.18          | 3.65 | 0.189 |
|              | SOC                                      | 1.05           | 1.25  | 0.464 |             | SOC                                     | 0.48           | 0.25 | 0.154 |
|              | MBC                                      | 0.12           | 0.22  | 0.637 |             | WSOC                                    | 0.73           | 0.36 | 0.135 |
|              | SBR=1.05(SOC)+0.12(MBC)-9.62             |                |       |       |             | SBR=0.48(SOC)+0.73(WSOC)-6.18           |                |      |       |
| 3            | Constant                                 | -6.39          | 3.38  | 0.132 | 3           | Constant                                | -12.50         | 1.94 | 0.003 |
|              | SOC                                      | 1.69           | 0.17  | 0.001 |             | WSOC                                    | 1.39           | 0.11 | 0.000 |
|              | SBR=1.69(SOC)-6.39                       |                |       |       |             | SBR=1.39(SOC)-12.50                     |                |      |       |

注:SBR 土壤基础呼吸,SOC 土壤有机碳,WSOC 土壤水溶性碳,MBC 微生物生物量碳,Constant 方程常数项。

Note:SBR, soil basal respiration; SOC, soil organic carbon; WSOC, water soluble organic carbon; MBC, microbial biomass carbon; Constant, constant term of equation.

地为 SOC 和 WSOC;第 3 个模型显示茶园土壤基础呼吸的相关因素为 SOC,而林地为 WSOC。这说明对茶园土壤基础呼吸的影响作用 SOC>MBC>WSOC,对林地土壤基础呼吸的影响作用 WSOC>

SOC>MBC。

3 讨论

SOC、WSOC 及 MBC 是影响土壤基础呼吸的重

要因素<sup>[6]</sup>。黄宗胜等<sup>[27]</sup>的研究表明喀斯特森林土壤基础呼吸、WSOC 和 MBC 均随着土壤深度增加而减少。本研究结果与其相似,茶园和林地土壤基础呼吸随着土壤深度的增加而减少,与 SOC、WSOC 及 MBC 的垂直分布特征有关<sup>[26,28]</sup>。茶园和林地土壤基础呼吸与 SOC 含量均有极显著的相关性。相似的研究如范利超等<sup>[29]</sup>通过室内培养实验表明茶园土壤基础呼吸速率随着外源有机质的增加而显著增加( $R^2=0.99, P<0.01$ ); Ma 等<sup>[30]</sup>对不同林龄落叶松土壤呼吸组分的研究表明,10 年松林 SOC 的周转速率大于 20 年和 45 年松林,但是 10 年松林土壤基础呼吸速率低于 20 年和 45 年松林,其原因归结为 10 年土壤有机碳含量低于 20 年和 45 年松林。这说明 SOC 含量是土壤基础呼吸的重要因素<sup>[31]</sup>。Wang 等<sup>[32]</sup>对森林与草原演替区 5 种植被类型研究表明土壤呼吸速率与 SOC 具有显著的相关性( $R^2=0.73, P=0.04$ );周焱等<sup>[25]</sup>的研究也表明土壤基础呼吸速率与 SOC 含量呈显著相关( $P<0.01$ )。可见, SOC 对土壤呼吸特别是土壤基础呼吸有重要的贡献,而且其含量对土壤基础呼吸的作用呈显著正相关。

目前土壤基础呼吸与土壤 WSOC 的相关性研究较多,但是结论并不一致。如 Lee 等<sup>[33]</sup>对美国南部山核桃和棉花农田的研究表明土壤呼吸与 MBC 有显著的正相关性( $R^2=0.52, P<0.05$ );与其研究结果相同,本研究结果也得出茶园和林地土壤基础呼吸与土壤 WSOC、MBC 含量均有显著的相关性(图 4b, 图 4c)。但是, Liu 等<sup>[15]</sup>研究表明常规耕作的毛竹林土壤 WSOC 与土壤呼吸呈显著正相关( $R^2=0.64, P<0.01$ ),而耕作频繁的毛竹林土壤呼吸与土壤 WSOC 的相关性不显著( $R^2=0.29, P>0.05$ ); Zhang 等<sup>[16]</sup>研究结果为耕作措施下的雷竹林和水稻田土壤呼吸速率与 WSOC 的相关性也不显著(雷竹林:  $R^2=0.22, P>0.05$ ; 水稻田  $R^2=0.23, P>0.05$ )。虽然徐秋芳等<sup>[34]</sup>研究表明 WSOC 与土壤总有机质碳处于动态平衡中,且本研究结果显示 SOC 与 WSOC 具有极显著的相关性(茶园:  $R^2=0.99, P<0.01$ ; 林地:  $R^2=0.97, P<0.01$ )。但不可忽视的是,人类干扰如施肥、翻耕等田间耕作措施以及土地利用方式的改变弱化了土壤 WSOC 与土壤基础呼吸的相关性,影响了土壤 WSOC 对土壤呼吸的作用。

在本研究中, 茶园土壤上层的 WSOC/SOC 的值大于土壤下层。这是由于茶园施用的有机肥多为腐熟粪肥和菜饼,其稳定性较差<sup>[35]</sup>,并且茶园土壤耕作增强了土壤的透气性,为微生物生长提供了疏松潮湿的

有氧环境<sup>[36]</sup>,促进了土壤呼吸。林地则相反,林地土壤下层的 WSOC/SOC 值较大。这可能与根系分泌物是林地土壤 WSOC 的重要来源有关,林地丰富的根系给下层土壤提供了较为丰富的 WSOC,而林地表层枯落物降解缓慢<sup>[37]</sup>,人为干扰较少,土壤呼吸速率较低。本研究中回归模型表明,茶园有机碳对土壤呼吸的决定作用大于 WSOC 和 MBC,而林地土壤 WSOC 对土壤呼吸的决定作用大于 SOC 和 MBC。Reichstein 等<sup>[38]</sup>和 Dalias 等<sup>[39]</sup>认为土壤微生物通过消耗土壤有机质来维持自身生理活性,但 SOC 中活性有机碳和惰性有机碳含量的变化影响土壤微生物的代谢过程。土壤 WSOC 可以被土壤微生物直接利用,是微生物生长的能量及物质源,同时又是微生物新陈代谢的产物,受微生物活性的影响<sup>[40]</sup>。在本研究中, MBC 与 WSOC 具有显著的相关性(茶园:  $R^2=0.981, P<0.01$ ; 林地:  $R^2=0.932, P<0.01$ ),但 MBC 对茶园土壤基础呼吸的作用大于 WSOC,而 MBC 对林地土壤基础呼吸的控制作用小于 WSOC。这是由于茶园 0~100 cm 土层的 qMBC 均值小于林地,即茶园有机碳库储量比林地丰富,但其稳定性小于林地,茶园土壤 WSOC 含量丰富,能为茶园土壤微生物提供充足的底物,而林地 SOC 较稳定,微生物需要分解有机碳来供给自身充足的底物<sup>[41]</sup>。qCO<sub>2</sub> 是土壤基础呼吸与 MBC 的比值,用来表示土壤碳库的代谢效率,意味着微生物呼吸消耗的碳与建造微生物细胞的碳的分配比例大小<sup>[10]</sup>。茶园 0~100 cm 土层的 qCO<sub>2</sub> 均值大于林地,说明茶园土壤呼吸速率高,但是微生物呼吸消耗的碳占建造微生物细胞的碳的比例相对较大,茶园土壤有较高的代谢效率,而使茶园土壤的活性有机碳含量逐渐减少,不利于维持土壤的质量和持续利用的潜力,也不利于土壤碳库储量积累。与此相反,林地土壤呼吸速率较低,微生物呼吸熵较小,利于土壤碳库的积累。所以,在茶园管理过程中需要更加合理的施肥和土壤管理措施来提高土壤肥力水平,实现茶园的可持续发展。

## 4 结论

茶园与林地 SOC、WSOC、MBC 及土壤基础呼吸碳积累量的垂直分布特征相同,在 0~100 cm 土层内含量均表现为茶园土壤大于林地土壤。茶园和林地土壤基础呼吸速率与 SOC、WSOC、MBC 呈现显著正相关, SOC 是茶园土壤基础呼吸的控制因素, WSOC 是林地土壤基础呼吸的控制因素。与林地土壤相比,茶

园土壤虽每年有大量有机物质输入,但茶园土壤代谢作用较强,有机碳库的稳定性较差,不利于有机碳库积累。茶园土壤需要更加科学合理的施肥和耕作措施,以促进茶叶生产的持续健康发展。

#### 参考文献:

- [1] Mahecha M D, Reichstein M, Carvalhais N, et al. Global convergence in the temperature sensitivity of respiration at ecosystem level[J]. *Science*, 2010, 329(5993):838-840.
- [2] Carvalhais N, Forkel M, Khomik M, et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2014, 514(7521):213-217.
- [3] Putz S, Groeneveld J, Henle K, et al. Long-term carbon loss in fragmented Neotropical forests[J]. *Nature Communications*, 2014, 5:5037.
- [4] Conti G, Pérez-Harguindeguy N, Quétier F, et al. Large changes in carbon storage under different land-use regimes in subtropical seasonally dry forests of southern South America[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, 197:68-76.
- [5] Arneeth A, Harrison S P, Zaehle S, et al. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(8):525-532.
- [6] Shi W Y, Zhang J G, Yan M J, et al. Seasonal and diurnal dynamics of soil respiration fluxes in two typical forests on the semiarid Loess Plateau of China: Temperature sensitivities of autotrophs and heterotrophs and analyses of integrated driving factors[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 52:99-107.
- [7] Cable J M, Ogle K, Tyler A P, et al. Woody plant encroachment impacts on soil carbon and microbial processes: Results from a hierarchical Bayesian analysis of soil incubation data[J]. *Plant and Soil*, 2009, 320(1-2):153-167.
- [8] Nie X J, Zhang J H, Su Z G. Dynamics of soil organic carbon and microbial biomass carbon in relation to water erosion and tillage erosion[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(5):e64059.
- [9] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. *生态环境*, 2003(1):71-75.  
NI Jin-zhi, XU Jian-min, XIE Zheng-miao. Advance in soil water-soluble organic carbon research[J]. *Ecology and Environment*, 2003(1):71-75.
- [10] Harris J A. Measurements of the soil microbial community for estimating the success of restoration[J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(4):801-808.
- [11] 任天志, Stefano G. 持续农业中的土壤生物指标研究[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(1):68-75.  
REN Tian-zhi, Stefano G. Soil bioindicators in sustainable agriculture[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(1):68-75.
- [12] Wang C K, Yang J Y. Rhizospheric and heterotrophic components of soil respiration in six Chinese temperate forests[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1):123-131.
- [13] 吴君君, 杨智杰, 刘小飞, 等. 米槠和杉木人工林土壤呼吸及其组分分析[J]. *植物生态学报*, 2014(1):51-57.
- WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, LIU Xiao-fei, et al. Analysis of soil respiration and components in *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014(1):51-57.
- [14] Agnelli A, Ascher J, Corti G, et al. Distribution of microbial communities in a forest soil profile investigated by microbial biomass, soil respiration and DGGE of total and extracellular DNA[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(5):859-868.
- [15] Liu J, Jiang P, Wang H, et al. Seasonal soil CO<sub>2</sub> efflux dynamics after land use change from a natural forest to Moso bamboo plantations in subtropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(6):1131-1137.
- [16] Zhang T, Li Y, Chang S X, et al. Responses of seasonal and diurnal soil CO<sub>2</sub> effluxes to land-use change from paddy fields to Lei bamboo (*Phyllostachys praecox*) stands[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 77:856-864.
- [17] Eaton W D. Microbial and nutrient activity in soils from three different subtropical forest habitats in Belize, Central America before and during the transition from dry to wet season[J]. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(3):219-227.
- [18] 韩文炎, 阮建云, 林智, 等. 茶园土壤主要营养障碍因子及系列茶树专用肥的研制[J]. *茶叶科学*, 2002(1):70-74.  
HAN Wen-yan, RUAN Jian-yun, LIN Zhi, et al. The major nutritional limiting factors in tea soils and development of tea specialty fertilizer series[J]. *Journal of Tea Science*, 2002(1):70-74.
- [19] 韩文炎, 李强. 茶园施肥现状与无公害茶园施肥技术[J]. *中国茶叶*, 2002, 6(24):29-31.  
HAN Wen-yan, LI Qiang. Tea garden application present situation and pollution-free tea garden fertilizer technology[J]. *China Tea*, 2002, 6(24):29-31.
- [20] Han W, Kemmitt S J, Brookes P C. Soil microbial biomass and activity in Chinese tea gardens of varying stand age and productivity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39(7):1468-1478.
- [21] Han W, Xu J, Yi X, et al. Net and gross nitrification in tea soils of varying productivity and their adjacent forest and vegetable soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(2):173-182.
- [22] 林衣东, 韩文炎. 不同土壤 N<sub>2</sub>O 排放的研究[J]. *茶叶科学*, 2009(6):456-464.  
LIN Yi-dong, HAN Wen-yan. N<sub>2</sub>O emission from soils with different stands[J]. *Journal of Tea Science*, 2009(6):456-464.
- [23] 杨明臻, 林衣东, 韩文炎. 施氮对茶园土壤基础呼吸的影响[J]. *土壤通报*, 2012(6):1355-1360.  
YANG Ming-zhen, LIN Yi-dong, HAN Wen-yan. Effect of nitrogen fertilizer on basic respiration in tea garden soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012(6):1355-1360.
- [24] 张小琴. 施肥对茶园土壤可溶性有机碳和酶活性特征的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2012:69.  
ZHANG Xiao-qin. Study on the change of the soil soluble organic carbon and the enzyme activity in different fertilized tea plantations[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2012:69.
- [25] 周焱, 徐宪根, 王丰, 等. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物



- 量、微生物呼吸及其熵值( $q_{MB}$ ,  $q_{CO_2}$ )[J]. 生态学杂志, 2009(2): 265–269.
- ZHOU Yan, XU Xian-gen, WANG Feng, et al. Soil microbial biomass respiration and metabolic quotient along an altitudinal gradient in Wuyi mountain of south eastern China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009(2): 265–269.
- [26] 吴旭东, 张晓娟, 谢应忠, 等. 不同种植年限紫花苜蓿人工草地土壤有机碳及土壤酶活性垂直分布特征[J]. 草业学报, 2013(1): 245–251.
- WU Xu-dong, ZHANG Xiao-juan, XIE Ying-zhong, et al. Vertical distribution characters of soil organic carbon and soil enzyme activity in alfalfa field with different growing years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013(1): 245–251.
- [27] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林自然恢复中土壤微生物生物量碳与水溶性有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2012(10): 2715–2720.
- HUANG Zong-sheng, FU Yu-hong, YU Li-fei. Characteristics of soil microbial biomass carbon and soil water soluble carbon in the process of natural restoration of Karst forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012(10): 2715–2720.
- [28] 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 Zhong-pei, WU Xiao-chen, CHEN Bi-yun. Change in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1712–1721.
- [29] 范利超, 杨明臻, 韩文炎. 温湿度和外源有机质对茶园土壤基础呼吸作用的影响[J]. 土壤通报, 2014(6): 1383–1389.
- FAN Li-chao, YANG Ming-zhen, HAN Wen-yan. Effects of temperature, soil moisture contents, and organic matter addition on basic respiration in Tea Garden Soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014(6): 1383–1389.
- [30] Ma Y C, Piao S L, Sun Z Z, et al. Stand ages regulate the response of soil respiration to temperature in a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184: 179–187.
- [31] Adachi M, Bekku Y S, Rashidah W, et al. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems[J]. *Applied soil Ecology*, 2006, 34: 258–265.
- [32] Wang W, Zeng W J, Chen W L, et al. Correction: Soil respiration and organic carbon dynamics with grassland conversions to woodlands in temperate China[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(9): e71986.
- [33] Lee K H, Jose S. Soil respiration and microbial biomass in a pecan-cotton alley cropping system in Southern USA [J]. *Agroforestry Systems*, 2003, 58(1): 45–54.
- [34] 徐秋芳, 姜培坤. 不同森林植被下土壤水溶性有机碳研究[J]. 水土保持学报, 2004, 37(6): 84–87.
- XU Qiu-fang, JIANG Pei-kun. Study on active organic carbon of soils under different types of vegetable[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 37(6): 84–87.
- [35] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(17): 3565–3574.
- LIANG Yao, HAN Xiao-zeng, SONG Chun, et al. Impacts of returning organic materials on soil labile organic carbon fractions redistribution of mollisol in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(17): 3565–3574.
- [36] 王莹, 阮宏华, 黄亮亮, 等. 围湖造田不同土地利用方式土壤水溶性有机碳的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2010(5): 109–114.
- WANG Ying, RUAN Hong-hua, HUANG Liang-liang, et al. Soil water soluble organic carbon in reclaimedland from lake under different land uses[J]. *Journal of Nanjing Forestry (Natural Science Edition)*, 2010(5): 109–114.
- [37] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 277–280.
- [38] Reichstein M, Bednorz F, Broll G, et al. Temperature dependence of carbon mineralization: Conclusions from a long term incubation sub-alpine soil samples[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 947–958.
- [39] Dalias P, Anderson J M, Bottner P, et al. Temperature responses of carbon mineralization in conifer forest soils from different regional climates incubated under standard laboratory conditions[J]. *Global Change Biology*, 2001, 6: 181–192.
- [40] Gregorich E G, Liang B C, Drury C F, et al. Elucidation of the source and turnover of water soluble and microbial biomass carbon in agricultural soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(5): 581–587.
- [41] Tang Y, Wang L, Jia J, et al. Response of soil microbial community in Jiuduansha wetland to different successional stages and its implications for soil microbial respiration and carbon turnover[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2011, 43(3): 638–646.