

集约经营措施对毛竹林生长季土壤呼吸的影响

叶耿平¹, 刘娟^{1,2}, 姜培坤^{1,2}, 周国模^{1,2}, 吴家森²

(1. 浙江农林大学 环境科技学院, 浙江 临安 311300; 2. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300)

摘要: 以粗放经营毛竹 *Phyllostachys pubescens* 林和常绿阔叶林作为对照, 利用静态箱-气相色谱法研究集约经营对毛竹林土壤呼吸速率的影响。结果显示: 整个生长季(4-10月), 集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林之间土壤平均呼吸速率存在差异显著($P<0.05$), 3种林分土壤平均呼吸速率分别为 1.01, 0.79 和 0.72 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。3种林分土壤呼吸速率动态变化规律基本一致, 4-5月土壤呼吸速率相对较小, 6月开始迅速升高, 7月达到最大值, 6-9月维持在较高值, 10月开始大幅度下降。土壤呼吸与地下 5 cm 土壤温度呈显著的指数相关($P<0.05$), 3种林分地下 5 cm 深处土壤温度分别可以解释土壤呼吸变化的 63%, 63%和 59%。根据集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林土壤呼吸与地下 5 cm 土壤温度拟合的指数方程, 计算出生长季土壤呼吸的温度系数 Q_{10} 值分别为 2.46, 4.81 和 2.05。图 2 表 1 参 40

关键词: 森林土壤学; 土壤呼吸; 土壤温度; 毛竹林; 集约经营; 粗放经营; 常绿阔叶林

中图分类号: S714 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2011)01-0018-08

Soil respiration during the growing season with intensive management of *Phyllostachys pubescens*

YE Geng-ping¹, LIU Juan^{1,2}, JIANG Pei-kun^{1,2}, ZHOU Guo-mo^{1,2}, WU Jiao-sen²

(1. School of Environmental Sciences and Technology, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To examine the effects of intensive management practices on soil respiration, the soil respiration rate for three stand types: 1) intensively managed (IM) *Phyllostachys pubescens*, 2) traditional practices (TP) with *P. pubescens*, and 3) an evergreen broadleaved (EB) forest, was measured during the growing season with a closed chamber and gas chromatography. Results showed that the average soil respiration rate in the three stand types had significant differences ($P<0.05$) with IM 1.01, TP 0.79, and EB 0.72 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Soil respiration of the three stand types showed a similar pattern; namely, being low in April and May, rising rapidly in June, reaching a maximum in July, remaining high from June to September, and dropping dramatically in October. Significant exponential relationships ($P<0.05$) between the soil respiration rate and soil temperature were found at the 5 cm depth. Also, soil respiration was IM = 63%, TP = 63%, and EB = 59% with temperature coefficient (Q_{10}) values of IM 2.46, TP 4.81, and EB 2.05. [Ch, 2 fig. 1 tab.40 ref.]

Key words: forest soil science; soil respiration; soil temperature; *Phyllostachys pubescens* forest; intensive management; traditional practice; evergreen broadleaf forest

收稿日期: 2010-03-01; 修回日期: 2010-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30771715); 浙江省科技厅优先主题社会发展重点项目(2007C13041); 浙江省“151”人才基金和浙江农林大学 B 类创新团队基金资助项目

作者简介: 叶耿平, 硕士, 从事森林土壤学研究。E-mail: babepau@126.com。通信作者: 周国模, 教授, 博士, 从事森林资源管理和森林碳汇等研究。E-mail: zhougm@zafu.edu.cn

土壤呼吸是全球碳循环的重要组成部分，也是陆生植物固定的二氧化碳返回到大气的主要途径^[1]，大气中近 10% 的碳由土壤产生^[2]。因此，土壤呼吸一直是全球碳循环研究的重点。研究表明，土壤呼吸不仅受到土壤温度、土壤水分、土壤养分和土壤有机质等非生物因素的影响，还受植被类型、土壤微生物和土壤动物等生物因子和土地利用方式以及人类活动的综合影响^[3-4]。同一气候区域土壤呼吸主要因植被状况的不同而存在差异^[5]。植被类型的差异一定程度上反映了土壤温度、水分等环境要素在时空上的分异。其中温度是影响土壤呼吸的主要因素之一^[6-7]；而土壤含水量对呼吸的影响较为复杂，目前对水分条件对土壤呼吸的影响及其相互关系的研究缺乏一致性^[8]。森林是陆地生态系统的主体，是地球生物圈的重要组成部分。森林地上部分植被碳库储存了全球 80% 的地上碳储量，森林土壤碳库储存了全球土壤碳储量的 40% 左右^[9]。毛竹 *Phyllostachys pubescens* 是中国南方重要的森林资源。中国毛竹林面积为 337 万 hm^2 ，毛竹林蓄积量达 8 766 万 t (58.44 亿株)^[11]。毛竹具有很强的自然扩张能力，如浙江天目山国家级自然保护区毛竹林自然增长 $4.47 \text{ hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ ^[12]。另外还有大量的人工造林。近年来，随着效益林业的实施，有近 40% 的毛竹林实行了集约化栽培^[13]，森林类型和毛竹林经营模式改变会对土壤碳的输出过程产生影响，但目前有关毛竹林土壤呼吸，特别是集约经营毛竹林土壤呼吸特征的研究鲜见报道。本研究以常绿阔叶林为对照，通过比较立地条件相近的集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林生长季土壤呼吸的差异，探讨集约经营措施对毛竹林生长季土壤呼吸的影响。

1 试验与方法

1.1 试验地概况

试验地位于浙江省临安市青山镇， $29^{\circ}56'N$ ， $118^{\circ}51'E$ 。该区属亚热带季风气候区，年平均气温为 16.0°C ，极端最高气温 41.7°C ，极端最低气温 -13.3°C ，年有效积温 $5\ 774.0^{\circ}\text{C}$ ，年降水量 $1\ 350.0 \sim 1\ 500.0 \text{ mm}$ ，年日照时数 $1\ 774.0 \text{ h}$ ，无霜期 235 d。采样地属丘陵区，海拔高度为 $100 \sim 300 \text{ m}$ ，土壤为发育于花岗岩的红壤土类。集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林等 3 种林地土壤基本理化性质见表 1。

表 1 3 类林地土壤(0 ~ 20 cm)基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil(0 - 20 cm)

林地类型	pH 值	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	黏粒 ($<0.01 \text{ mm}$)/%
集约经营毛竹林	4.41	19.00	18.00	7.90	161.00	2.13	43.00
粗放经营毛竹林	4.45	22.20	16.20	4.51	192.50	1.53	39.00
常绿阔叶林	4.77	21.70	13.80	10.83	122.50	1.32	37.00

集约经营毛竹林。年年进行松土垦复，7 月施肥 1 次。施肥品种和施肥量为：尿素 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，过磷酸钙 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，氯化钾 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料地表撒施，撒施后深翻 1 次，翻耕深度为 $30 \sim 35 \text{ cm}$ 。毛竹平均胸径为 10.10 cm ，密度 $3\ 100 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

粗放经营毛竹林。不进行劈山、除草、施肥、垦复等人工措施，林下植被保存较好，毛竹平均胸径为 9.60 cm ，密度为 $2\ 300 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

常绿阔叶林。乔木层以苦槠 *Castanopsis sclerophylla*，石栎 *Lithocarpus glaber* 等为主，平均胸径为 20.40 cm ，树高 10.00 m ，郁闭度 0.60。灌木平均高为 1.50 m ，盖度 80%，以微毛柃 *Eurya hebeclados*，马银花 *Rhododendron ovatum* 等为主。

1.2 试验设计

在 3 类林地中随机选择试验样地，在样地 4 个角选择 4 个点，布置静态箱的箱座。在 2008 年 4 - 10 月，连续 7 个月隔 20 d 左右上午 8:00 - 10:00 采集测定二氧化碳 (CO_2)，并采集土壤样品。同时记录大气、地表温度，地下 5 cm，地下 10 cm 和地下 20 cm 土壤温度和大气压。

1.3 测定方法

二氧化碳排放通量采用静态箱/气相色谱法测定。采样箱为组合式，即由底座、顶箱组成，均用聚

氯乙烯(PVC)板做成^[14]。底座上方有水封凹槽(槽宽为5 cm,深5 cm),顶箱封顶,内装气扇、采样管。采集气体时,将采集箱插入底座凹槽中,用蒸馏水密封,分别于关箱后0,10,20和30 min,用注射器抽样60 mL,密封带回实验室用气相色谱仪分析其浓度,采用离子火焰化检测器(FID)分析^[15]。

土壤含水量用烘干法测定,土壤温度用曲管温度计测定,空气温度湿度用T & D Recorder温湿度自动记录仪测定,气压用气压表测定,土壤有效磷用Brayetall法测定,速效钾用火焰光度计法测定,碱解氮用碱解扩散法,全氮用凯氏定氮法测定。

1.4 土壤呼吸通量计算方法

土壤呼吸通量:

$$F = \frac{M}{V_0} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} H \frac{d_c}{d_i}$$

其中: F 为二氧化碳通量($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), M 为二氧化碳摩尔质量($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$); P_0 和 T_0 为理想气体标准状态下的空气压力和绝对气温(分别为1013.25 hPa和273.15 K); V_0 为二氧化碳在标准状态下的摩尔体积,即 $22.40 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$; H 为气室高度(m); P 和 T 为测定时桶内的实际气压(hPa)和气温($^{\circ}\text{C}$); d_c 和 d_i 为箱内二氧化碳浓度随时间变化的回归曲线斜率^[16]。

1.5 数据分析

所有的统计分析都在SPSS 13.0软件中进行,用配对 t 检验分析3种林地平均土壤呼吸速率之间的差异,用指数回归检验土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度的相关性。用Microsoft Excel软件作图。土壤呼吸与温度之间关系采用如下指数模型^[17]: $y = ae^{bt}$,其中, y 为土壤呼吸速率, T 为土壤温度, a 是温度为 0°C 时的土壤呼吸, b 为温度反应系数。土壤呼吸的温度敏感性指数 Q_{10} 值通过下式确定: $Q_{10} = e^{10b}$,其中, b 为温度反应系数^[18]。

2 结果与分析

2.1 3种林型土壤呼吸速率、土壤温度和土壤湿度季节动态变化

集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林生长季土壤呼吸动态变化如图1所示。4月初集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林的土壤呼吸速率均是整个生长季最小值,分别为 0.19 , 0.22 和 $0.23 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,然后随着气温的升高而升高,并随着温度的变化出现一定的波动。集约经营毛竹林和粗放经营毛竹林的土壤呼吸速率则从6月开始迅速升高,3种林地的土壤呼吸速率均在7月达到最大值,分别为 1.62 , 1.47 和 $1.01 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。6-9月期间,3种林地类型土壤呼吸速率维持在较高的值,10月上旬3种林地的土壤呼吸速率开始随着温度的下降而大幅度下降。

把整个生长季根据温度分为4-5月和6-10月2个阶段。4-5月期间,温度为 $10.0 \sim 20.0^{\circ}\text{C}$,土壤呼吸速率相对较低,并集约经营和粗放经营毛竹林土壤呼吸速率比常绿阔叶林的土壤呼吸速率低;6-10月,温度为 $20.0 \sim 30.0^{\circ}\text{C}$,土壤呼吸速率高,集约经营和粗放经营毛竹林土壤呼吸速率比常绿阔叶林的高。4-5月,3种林地土壤平均呼吸速率之间差异均不显著;6-10月,3种林地类型平均土壤呼吸速率差异极显著($P < 0.01$)。在整个生长季,3种林地土壤的平均呼吸速率分别为 1.01 , 0.79 和 $0.72 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

整个生长季,集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林地下5 cm深处平均土壤温度分别为 21.8 , 21.5 和 22.4°C ,最大值均出现在7月底,最小值均出现在4月初。4-5月,3种林地类型5 cm深处的土壤温度均为 $10.0 \sim 20.0^{\circ}\text{C}$,6-10月为 $20.0 \sim 30.0^{\circ}\text{C}$ (图1)。

集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林土壤含水量变化趋势与土壤呼吸速率之间没有明显一致性,生长季3种林型土壤呼吸速率与含水量之间不存在显著相关性。在整个生长季,集约经营毛竹林土壤含水量都高于粗放经营毛竹林和常绿阔叶林,3种林型土壤平均含水量分别为 33.24% , 32.14% 和 31.06% (图1)。

2.2 3种林型土壤呼吸速率与水热因子的关系

对集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林生长季土壤呼吸速率与地下5 cm土壤温度进行相关分析(图2)。结果表明:3种林地土壤呼吸速率与5 cm土壤温度极显著相关($P < 0.01$)。根据3种

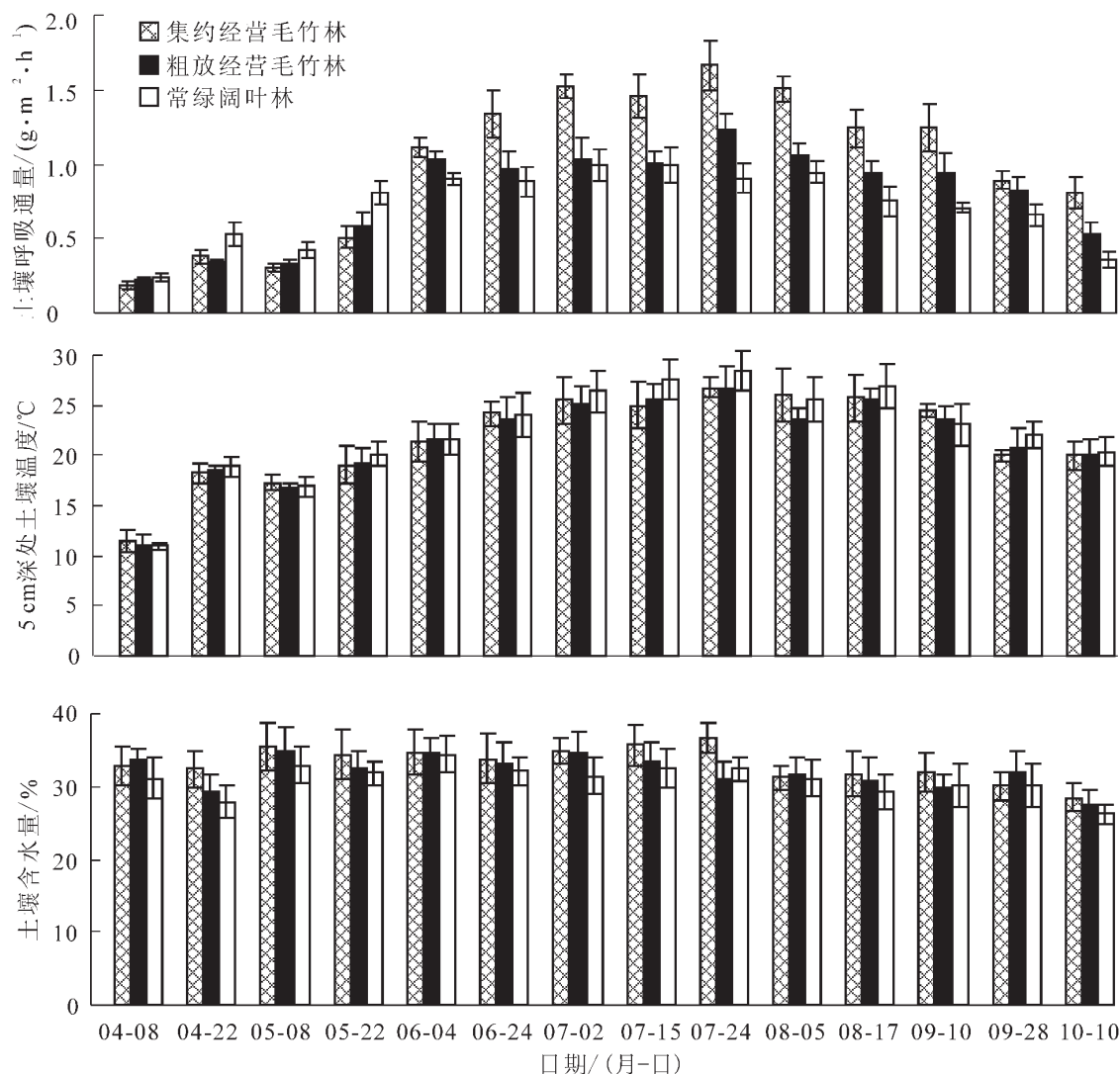


图 1 集约经营、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林土壤呼吸速率、地下 5 cm 土壤温度和土壤湿度动态变化图

Figure 1 Seasonal dynamics of soil respiration rate, temperature in 5 cm depth and moisture in intensive practice *Phyllostachys pubescens*, traditional practice *Phyllostachys pubescens* and evergreen broad-leaved forest

林型土壤呼吸与温度的指数方程，分别计算出集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林和常绿阔叶林土壤呼吸的温度敏感性指数(Q_{10} 值)，分别为 2.46, 4.81 和 2.05，这表明生长季温度每升高 10.0 °C，3 种林型土壤呼吸速率分别增加 2.46, 4.81 和 2.05 倍。

3 结论与讨论

3.1 毛竹林和常绿阔叶林土壤呼吸的比较

土壤呼吸主要由根系的自养呼吸、土壤微生物及土壤动物的异养呼吸，以及少量的无机碳酸盐的化学分解作用组成。土壤呼吸受水热条件影响的程度，主要是由于不同森林类型的生物量积累、根系生物量及其呼吸量、凋落物质量和数量及土壤微生物数量和活性不同引起的。相同立地条件下(气候状况和土壤本底相同)，森林植被对土壤呼吸有重要的影响，它可通过影响根呼吸速率、微生物呼吸、土壤状况及小气候条件等而影响土壤呼吸^[2]。植物根呼吸占土壤呼吸的 10% ~ 90%(主要集中在 40% ~ 60%)^[19]，通常细根(≤ 2 mm)呼吸速率、呼吸活性比粗根高，而且周转时间短^[20]。

本研究中，集约经营毛竹林和常绿阔叶林土壤之间呼吸速率差异极显著($P < 0.01$)，粗放经营毛竹林和常绿阔叶林之间差异显著($P < 0.05$)，这与张连举等^[20]的研究结果一致。生长季集约经营毛竹林的平均土壤呼吸速率比常绿阔叶林高 40.5%，与黄承才等^[21]的研究结果一致，这可能是由于毛竹独特的生长特征所致。毛竹具有发达的地下根鞭系统，细根非常密集，并且主要在 0 ~ 30 cm 的浅土层横向延伸，

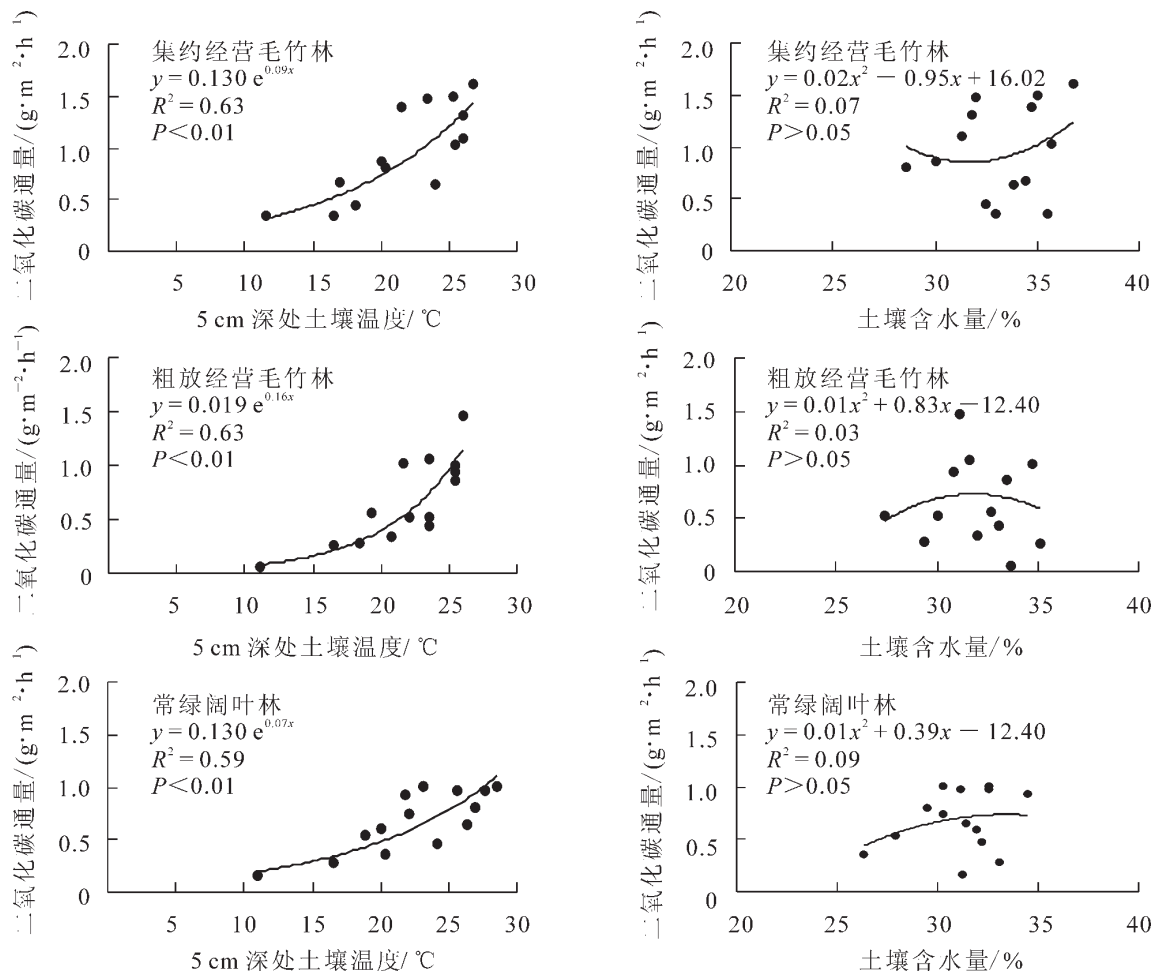


图2 土壤呼吸速率与5 cm深处土壤温度及土壤含水量的关系

Figure 2 Relationship between soil respiration and temperature in 5 cm soil depth and moisture

6-10月,日平均温度20.0℃以上,毛竹生长最旺盛,其根鞭系统一方面为地上部分的生理活动吸收水分和矿质营养,另一方面大量储藏光合产物用于来年新竹的生长,呼吸非常活跃,所以,在这段期间毛竹根呼吸对所测定的土壤呼吸有极其重要的贡献。Risk^[22]在加拿大东南岸的新斯科舍省安蒂戈尼什地区研究发现,在植物生长季,根呼吸和微生物呼吸对土壤总呼吸的贡献的比值为1.75~2.33:1,Vogel^[23]等的研究也表明根呼吸对土壤总呼吸的贡献比微生物呼吸大。因此,虽然常绿阔叶林的微生物量和凋落物都比毛竹林要多,但在此期间,毛竹林的根呼吸量与常绿阔叶林的差值,足以超过常绿阔叶林由于微生物量和凋落物优势而增加的那部分土壤呼吸的值。在4-5月,温度为10.0~20.0℃,毛竹林的根呼吸没有6-10月旺盛,而亚热带常绿阔叶林与毛竹林相比具有更多的微生物和凋落物,且微生物物种多样性高,对凋落物和根系分泌物的分解速率快,此期间土壤微生物呼吸和凋落物分解产生的二氧化碳等对土壤总呼吸的贡献率增大,根呼吸的贡献率相应减小,易志刚等^[24]在鼎湖山的研究表明,在植物根呼吸较弱时,不同林型间土壤呼吸的差异可能是来源于土壤微生物量的差异,土壤微生物量高的土壤具有较高的土壤呼吸速率,这也很可能是此期间常绿阔叶林土壤呼吸高于毛竹林的原因。

3.2 集约经营措施对毛竹林土壤呼吸的影响

施用化肥、翻耕和除草等集约经营措施促进了毛竹林的土壤呼吸。整个生长季,集约经营毛竹的土壤呼吸速率高于粗放经营毛竹林。姜培坤等^[25]浙江临安的试验发现,集约经营促进了毛竹土壤有机质矿化,加剧了土壤呼吸。Gallardo等^[26],Schlesinger等^[27]在不同的试验区研究表明,施氮肥会增加土壤呼吸,LaScala等^[28],Zhang等^[29]在不同地区的研究表明翻耕能明显地增强土壤呼吸,翻耕地土壤呼吸的平均值大约是未耕作地的2倍以上。生长季集约经营毛竹林的平均土壤呼吸速率高于粗放经营毛竹林还跟根呼吸的差异有关。集约经营毛竹林的立竹密度高3100株·hm⁻²,是粗放经营毛竹林的近1.40倍,其

单位面积土壤的细根数量也超过了粗放经营毛竹林, 故集约经营毛竹林的根呼吸总量大于粗放经营毛竹林的根呼吸总量, 但粗放经营毛竹林的凋落物比集约经营的多, 因此, 在 6 - 10 月, 根呼吸很旺盛的时期, 集约经营毛竹林的土壤呼吸速率显著高于粗放经营毛竹, 而在根呼吸相对较弱的时期, 两者的差异不显著。

3.3 土壤温、湿度对土壤呼吸速率的影响

国内外相关研究表明, 土壤呼吸速率的变化受温度与水分共同调控^[30]。土壤水热条件交互作用共同影响着森林生态系统的土壤呼吸过程, 同时考虑土壤温度和湿度的效应, 可以解释土壤呼吸变化的 67.50% ~ 90.60%^[31]。在本研究中, 土壤温度是影响土壤呼吸的主要因子, 这主要是温度通过影响微生物呼吸^[32]、根生长^[33]和植物的发育阶段^[34]对土壤呼吸产生直接或间接影响。本研究分别测定了大气、地表温度, 地下 5 cm, 地下 10 cm 和地下 20 cm 土壤温度 (图 2)。结果表明, 生长季地下 5 cm 深处的土壤温度与土壤呼吸的相关性最好, 呈显著指数关系, 这可能是因为在土壤表层的植物根系和微生物活动最旺盛, 对土壤呼吸速率的贡献较大, 这与 Liu 等^[35]的研究结果是基本一致的。3 种林地土壤呼吸速率与 5 cm 处土壤温度在 4 - 5 月期间比在 6 - 10 月期间的拟合效果较好, 是由于 4 - 5 月的温度比 6 - 10 月的低, 土壤呼吸对温度更为敏感^[36]。整个生长季, 集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林、常绿阔叶林地下 5 cm 土壤温度对土壤呼吸速率变化的解释能力分别为 63%, 63% 和 59%。

温度系数 Q_{10} 值通常用来表征土壤呼吸速率对温度变化响应的敏感程度。温度敏系数 Q_{10} 值多为 1.80 ~ 4.10^[37]。本研究结果表明, 在生长季, 集约经营毛竹林、粗放经营毛竹林的 Q_{10} 值分别为 2.46 和 4.81, 即温度增加 10.0 °C, 集约经营毛竹林和粗放经营毛竹林土壤呼吸分别增加 2.46 倍和 4.81 倍。

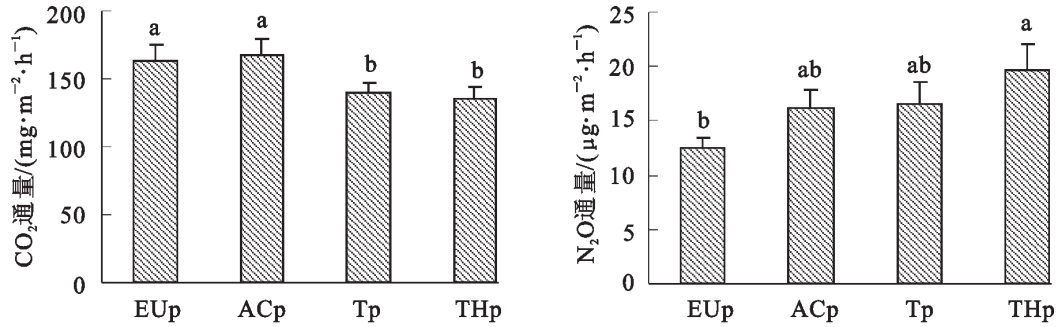
土壤呼吸与含水量的关系通常用一元二次方程、双曲线方程和指数方程来描述。但是水分条件对土壤呼吸的影响及其相互关系的研究缺乏一致性^[8]。在本研究中, 3 种林型的土壤含水量为 29% ~ 37%, 与土壤呼吸的相关性均不显著。土壤含水量对土壤呼吸的影响较为复杂, 往往同时取决于温度的相互协调情况。很多研究者证实, 在土壤水分含量充足、不成为限制因子的情况下土壤呼吸与土壤温度呈正相关, 而在水分含量成为限制因子的干旱、半干旱地区, 水分含量与土壤温度共同起作用^[38-40]。本试验研究地区为湿润亚热带季风气候区, 雨水充沛, 土壤含水量高, 在这里水分不是土壤呼吸的限制因子, 此结果与国内外的部分研究结果相似^[4,21,41]。

以上研究结果和讨论表明, 施肥、翻耕等集约经营措施促进了生长季毛竹林土壤呼吸, 增加了土壤二氧化碳的排放。

参考文献:

- [1] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 7 - 20.
- [2] RISK D, KELLMAN L, BELTRAM I H. Are soil respiration processes geographically invariant?[C]//[s. n.]. Banff: Candian Geophysical Union Meeting, 2002 : 18 - 21.
- [3] RUSTAD L E, HUNTINGTON T G, BOONE R D. Controls on soil respiration: implications for climate change [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 1 - 6.
- [4] MONCRIEF F. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature [J]. *Soil Biol Biochem*, 2001, **33**: 155 - 165.
- [5] RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls [J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**: 71 - 90.
- [6] FANG C, MONCRIEF J B, GHOLZ H L, *et al.* Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation [J]. *Plant and Soil*, 1998, **205**: 135 - 146.
- [7] RAYMENT M B, JARVIS P G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**: 35 - 45.
- [8] 张慧东, 周梅, 赵鹏武, 等. 寒温带兴安岭落叶松土壤呼吸特征[J]. 林业科学, 2008, **44** (9): 142 - 145.
ZHANG Huidong, ZHOU Mei, ZHAO Pengwu, *et al.* Soil respiration of *Larix gmelini* forest in cool temperate zone [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44** (9): 142 - 145.
- [9] MARLAND E, MARLAND G. The treatment of long lived, carbon containing products in inventories of carbon diox-

- ide emissions to the atmosphere [J]. *Environ Sci Policy*, 2003, **268**: 1 – 14.
- [10] 陈勇. 中国竹产品市场现状及发展趋势[J]. 世界竹藤通讯, 2003, **1** (4): 10 – 15.
CHEN Yong. Status on bamboo products market and development trend in China [J]. *World Bamboo Rat*, 2003, **1** (4): 10 – 15.
- [11] 吴家森, 姜培坤, 王祖良. 天目山国家级自然保护区毛竹扩张对林地土壤肥力的影响[J]. 江西农业大学学报, 2008, **30** (4): 689 – 692.
WU Jiasen, JIANG Peikun, WANG Zuliang. The effect of *Phyllostachys pubescens* expansion on soil fertility in National Nature Reserve of Mount Tianmu [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2008, **30** (4): 689 – 692.
- [12] 熊文愈. 世界竹子的分布生产和研究[J]. 竹类研究, 1983, **2** (2): 6 – 16.
XIONG Wenyu. The distribution of the world's bamboo production and research [J]. *Bamboo Res*, 1983, **2** (2): 6 – 16.
- [13] 杜丽君, 金涛, 阮雷雷, 等. 鄂南4种典型土地利用类型方式红壤CO₂排放及其影响因素[J]. 环境科学, 2007, **28** (7): 1607 – 1613.
DU Lijun, JIN Tao, RUAN Leilei, *et al.* CO₂ effluxes from red soil under four land use types in mid-subtropical, China [J]. *Environ Sci*, 2007, **28** (7): 1607 – 1613.
- [14] WANG Yuesi, WANG Yinghong. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem [J]. *Adv Atmos Sci*, 2003, **20** (5): 842 – 844.
- [15] LIU Qing, EDWARDS N, POST W N, *et al.* Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperature deciduous forest [J]. *Glob Change Biol*, 2006, **12**: 2136 – 2145.
- [16] LUO Yiqi, WAN Shiqiang, HUI Dafeng, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie [J]. *Nature*, 2001, **413**: 622 – 625.
- [17] XU Ming. Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variation in a young ponderosa pine plantation in northern California [J]. *Glob Change Biol*, 2001, **7**: 667 – 677.
- [18] ATKIN O K, EDWARDS E J, LOVEYS B R. Response of root respiration to change in temperature and its relevance to global warming [J]. *New Phytol*, 2000, **147**: 141 – 154.
- [19] DESROCHERS A, LANDHÄUSSER S M, LIEFFERS V J. Coarse and fine root respiration in aspen (*Populus tremuloides*) [J]. *Tree Physiol*, 2002, **22**: 725 – 732.
- [20] 张连举, 王兵, 刘苑秋, 等. 大岗山4种林型夏秋季土壤呼吸研究[J]. 江西农业大学学报, 2007, **29** (1): 73 – 76.
ZHANG Lianju, WANG Bing, LIU Yuanqiu, *et al.* A study of soil respiration under four forest types in Dagangshan in Summer and Autumn [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2007, **29** (1): 73 – 76.
- [21] 黄承才, 葛滢, 常杰, 等. 中亚热带东部3种主要木本群落土壤呼吸的研究[J]. 生态学报, 1999, **19** (3): 324 – 328.
HUANG Chengcai, GE Ying, CHANG Jie, *et al.* Study on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid-subtropical zone, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 1999, **19** (3): 324 – 328.
- [22] RISK D. Exploring the environmental sensitivity of natural soil carbon dioxide emissions, Do roots and soil microbes respond to different climatic cues [J]. *Nature*, 2006, **189**: 874 – 877.
- [23] VOGEL J G, VALENTINE D W, RUESS R W. Soil and root respiration in mature Alaskan black spruce forests that vary in soil organic matter decomposition rates [J]. *Can J For Res*, 2005, **35**: 161 – 174.
- [24] 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山3种主要植被类型土壤碳释放研究[J]. 生态学报, 2003, **23** (8): 1673 – 1678.
YI Zhigang, YI Weimin, ZHOU Guoyi, *et al.* Soil carbon effluxes of three major vegetation types in Dinghushan Biosphere Reserve [J]. *Acta Ecol Sin*, 2003, **23** (8): 1673 – 1678.
- [25] 姜培坤, 徐秋芳, 杨芳. 雷竹土壤水溶性有机碳及其与重金属的关系[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20** (1): 8 – 11.
JIANG Peikun, XU Qiufang, YANG Fang. Relationship between water soluble organic carbon and heavy metal elements in the soil under *Phyllostachys praecox* stands [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20** (1): 8 – 11.
- [26] GALLARDO A, SCHLESINGER W H. Factors limiting microbial biomass in the mineral soil and forest floor of a



EUp尾叶桉纯林, ACp厚荚相思纯林, Tp10个树种混交林, THp30个树种混交林

图2 4种人工林二氧化碳和氧化亚氮通量比较(误差线为标准误, $n = 102$)

Figure 2 Comparisons of mean soil CO₂ and N₂O fluxes in the four plantations (vertical bars are standard error for means, $n = 102$)

著($P < 0.05$), 且 CO₂ 通量与土壤微生物碳呈正相关性($r = 0.560$, $n = 6$)。这说明, 在4种林型中, 由于尾叶桉和厚荚相思为速生树种, 与Tp和THp混交林相比, 林下土壤温度较低, 但土壤湿度较大(表2)。土壤温度和土壤湿度作为影响土壤温室气体排放的重要因子, 可能在EUp和ACp林下土壤创造一个有利于土壤微生物的小环境^[26-27], 土壤微生物碳显著增高, 微生物活性较强, 因而土壤CO₂通量增高。表3表明, N₂O排放通量与土壤温度表现为极显著正相关, 但与土壤湿度呈显著负相关。这可能是由于在土壤湿度较高的情况下, N₂O易溶于水, 导致N₂O排放通量下降的缘故^[28]。总之, 土壤温度和土壤湿度是影响土壤温室气体排放的启动因子和关键因子, 土壤温度和土壤湿度的组合作用能直接影响土壤中微生物的活性, 进而影响土壤温室气体的排放^[26]。

表3 土壤二氧化碳和氧化亚氮排放通量与环境因子的相互关系

Table 3 Correlation of soil CO₂ and N₂O fluxes and environmental factors

因子	CO ₂ 通量	N ₂ O 通量	土壤温度	土壤湿度	土壤 pH 值	有机碳	硝态氮	铵态氮	微生物碳
CO ₂ 通量	1.000								
N ₂ O 通量	0.449	1.000							
土壤温度	0.651**	0.607**	1.000						
土壤湿度	0.584*	-0.513*	-0.437	1.000					
土壤 pH 值	-0.238	-0.077	0.401	0.397	1.000				
有机碳	0.477	0.281	-0.560*	0.296	-0.177	1.000			
硝态氮	0.126	0.582*	-0.084	-0.448	-0.560*	-0.016	1.000		
铵态氮	0.482	0.393	-0.520	0.405	-0.043	-0.138	0.395	1.000	
微生物碳	0.560*	0.370	-0.503	0.517*	-0.374	0.066	0.167	0.369	1.000

说明: **为0.01显著水平; *为0.05显著水平。

硝化作用和反硝化作用等生物过程是土壤N₂O产生的主要原因, 而氮源是影响土壤中这些生物过程的最主要因素。从表2可以看出, 由于速生树种对土壤NO₃-N和NH₄-N的大量吸收利用, 土壤NO₃-N和NH₄-N在EUp(5.55 mg·kg⁻¹, 4.35 mg·kg⁻¹)和ACp(8.12 mg·kg⁻¹, 5.32 mg·kg⁻¹)都显著低于Tp(8.45 mg·kg⁻¹, 6.07 mg·kg⁻¹)和THp(10.03 mg·kg⁻¹, 6.87 mg·kg⁻¹)(表2)。图2结果显示, EUp和ACp纯林N₂O排放通量低于Tp和THp混交林, 且EUp林N₂O排放通量最低。这说明, 在EUp和ACp速生林, 尽管土壤微生物碳较高, 但由于土壤NO₃-N和NH₄-N含量降低, N₂O氮源不足, 导致EUp林N₂O通量最低。表3可以看出, N₂O通量与土壤NO₃-N呈明显的正相关($r = 0.582$, $n = 6$), 说明土壤NO₃-N是影响N₂O通量的主要因素, 这与Davidson^[13]和Fisk等^[12]的研究的结果类似。但土壤N₂O通量与NH₄-N相关性不大(表3), 说明土壤NH₄-N不是影响N₂O通量的主要因子, 这与Simojoki等^[16]的研究结果一致。

表3还表明, 土壤CO₂通量与土壤有机碳的相关并不显著, 且在表2中, EUp和ACp速生林土壤