

西天目山毛竹林土壤呼吸特征及其影响因子

李雅红¹, 江洪^{1,2,*}, 原焕英², 刘源月³, 周国模², 余树全²

(1. 三峡库区生态环境教育部重点实验室 西南大学生命科学学院, 重庆 400715;

2. 浙江林学院国际空间生态与生态系统生态研究中心, 杭州 311300; 3. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要:毛竹(*Phyllostachys edulis*)是中国南方重要的森林资源,在区域碳平衡中扮演重要的作用。研究毛竹林土壤呼吸特征及影响因子有助于了解其土壤CO₂释放过程的关键驱动因子,为进一步揭示毛竹林土壤碳循环特点提供科学依据。以浙江省西天目山自然保护区毛竹林为研究对象,利用LI-Cor8100开路式土壤碳通量测量系统测定(2007年5、8、11月,2008年1、3月)土壤呼吸速率及环境因子,同时取0—20 cm土层土样测定土壤酶活性,结果表明:(1)毛竹林土壤呼吸具有典型的日动态和季节变化模式,日动态变化较为平缓,土壤呼吸的季节变化较为显著($P < 0.05$),最大值($5.99 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)出现在2007年8月,最小值($1.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)出现在2008年1月。(2)回归方程表明,土壤呼吸与土壤5 cm温度呈极显著的指数相关关系($P < 0.001$),与土壤体积含水量相关性较弱($P > 0.05$),与近地面大气温度和CO₂浓度分别呈极显著的指数相关关系($P < 0.001$)和显著的线性相关关系($P < 0.05$)。(3)相关分析表明,土壤脲酶、蔗糖酶、纤维素酶活性与土壤呼吸均呈正相关,其中纤维素酶活性达到显著水平。综合分析表明毛竹林土壤温度是调控土壤呼吸季节变化的主要驱动因子,近地面大气环境及土壤酶活性的变化也对其产生不容忽视的影响。

关键词:毛竹; 土壤呼吸; 环境因子; 脲酶; 蔗糖酶; 纤维素酶

Soil respiration and its regulating factors in the *Phyllostachys edulis* forest of west Tianmu Mountain, China

LI Yahong¹, JIANG Hong^{1,2,*}, YUAN Huanying², LIU Yuanyue³, ZHOU Guomo², YU Shuquan²

1 Key Laboratory of Eco-environments of Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, School of Life Sciences, South West University, Chongqing 400715, China

2 International Research Center of Spatial-Ecology and Ecosystem Ecology, Zhejiang Forestry University, Hangzhou 311300, China

3 International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The *phyllostachys edulis* are the most important composition of forest resources in the south of China. In order to quantify soil respiration dynamics and its regulating factors, we conducted a set of relevant experiments in *phyllostachys edulis* forest in west Tianmu Mountain, Zhejiang province. Soil respiration rate and relevant factors were measured by Li-Cor8100 from May 2007 to March 2008, then we investigated soil enzyme activities above 20cm surface. Results were displayed as follows: (1) Soil respiration of *phyllostachys edulis* forest emerged typical diurnal and seasonal dynamic patterns. The diurnal variation was gentle, the mean soil respiration showed significant difference among seasons ($P < 0.05$); the maximum ($5.99 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) appeared in August 2007, the minimum ($1.08 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) appeared in January 2008. (2) Regression equation analysis showed that the relationship between soil respiration and soil temperature of 5cm depth can be described as an exponential equation, and it was very significant ($P < 0.001$). The relationship between soil respiration and soil volumetric water content can be described as linear equation, but it was not significant ($P > 0.05$). The relationship between soil respiration and near-surface atmospheric temperature were described as an

基金项目:科技部 973 项目(2005CB422207 & 2005CB422208); 国家自然科学基金项目(40671132); 科技部数据共享平台建设项目(2005DKA32306 和 2006DKA32308); 科技部国际合作项目(20073819); 科技部重大科技基础项目(2007FY110300); 浙江省科技厅重大项目(2006C12060 和 2008C13G2100010)资助

收稿日期:2009-06-25; 修订日期:2009-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Hongjiang.china@gmail.com

exponential equation, it was a close relation ($P < 0.001$). The relationship between soil respiration and CO_2 concentration were described as a liner equation, it was a significant correlation ($P < 0.05$). (3) Correlation analysis showed that urease, sucrase and cellulase activities and soil respiration were positively correlated, but only the activity of cellulase achieved a significant level. All of these results suggest that soil temperature is a dominant factor to impact soil respiration, yet the effect of near-surface atmospheric conditions and soil enzymes could not be ignored.

Key Words: *Phyllostachys edulis*; soil respiration; environmental factors; urease; sucrase; cellulase

土壤呼吸是土壤碳库的主要输出途径和大气 CO_2 重要的源,全球每年土壤呼吸释放的 CO_2 量高达 50—75 GtC^[1], 为化石燃料燃烧释放量的 10 倍以上^[2], 因此即使是土壤呼吸的微小变化,也将会对全球碳平衡及温室效应产生重大影响。森林是陆地生态系统的主体,其土壤碳占全球土壤碳的 73%^[3], 森林土壤呼吸亦是陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分,因此研究森林土壤呼吸对探讨全球 CO_2 变化及其影响具有重要的意义。在土壤呼吸与气候变化、碳交易及环境政策紧密相关的背景下,国内外,掀起了研究土壤呼吸的热潮。目前对森林土壤呼吸的研究主要集中在对不同地带、不同森林类型的碳排放量以及影响土壤呼吸的环境因子方面^[4-17], 为阐明森林土壤呼吸特点及在全球碳循环中的地位与作用做出了重要贡献。

毛竹在我国分布最广、面积最大,达 400 万 hm^2 , 以其生长快、周期短等特有的结构与功能特性使其有别于其它类型的森林生态系统,在维护生态平衡方面发挥了重要作用^[18-19]。当今全球森林面积急剧下降,而竹林面积却以每年 3% 左右的速度在递增,这意味着竹林将是一个不断增大的碳汇,但对毛竹林地土壤呼吸的研究尚少^[20-22], 且集中在对毛竹林土壤呼吸与土壤温度和水分的关系的研究。本试验选取浙江西天目山天然毛竹林为研究对象,在不同月份,测定了土壤呼吸速率、土壤温度、土壤体积含水量、近地面大气温度、湿度、 CO_2 浓度及大气压强的日动态变化以及土壤(0—20 cm)的酶活性。研究了我国亚热带毛竹林土壤呼吸的日动态变化规律,探讨影响土壤呼吸季节变化的主要驱动因子,为准确评估毛竹林生态系统碳收支提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究区域位于浙江省西天目山自然保护区内,天目山于 1956 年被国家林业部划为森林禁伐区,作为自然保护区加以保护。该地区处于中国东部亚热带季风区($30^\circ 18' - 30^\circ 25' \text{N}$, $119^\circ 23' - 119^\circ 29' \text{E}$)。山麓年平均气温为 $14.8 - 15.6^\circ \text{C}$, 最冷月平均温度为 3.4°C , 极端最低气温为 -13.1°C , 最热月平均气温为 28.1°C , 极端最高气温达 38.2°C , 无霜期为 235 d, 年降水量为 1390—1870 mm, 形成浙江西北部的多雨中心。冬季寒冷干燥,夏季炎热潮湿。

试验地设于海拔 431 m, 较为平坦的毛竹林内,土壤为黄红壤,土壤容重在 $1.23 - 1.56 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 之间,土层厚度约 100 cm。毛竹的平均胸径是 8.08 cm, 平均树高是 17.67 m, 乔木层是毛竹,郁闭度 0.9; 林下灌木稀少,偶有山胡椒 (*Lindera glauca*), 鸡爪槭 (*Acer palmatum*), 南天竹 (*Nandina domestica*) 等, 草本层有络石 (*Trachelospermum jasminoides*), 爬山虎 (*Parthenocissus tricuspidata*), 小野芝麻 (*Galeobdolon chinense*), 栗褐苔草 (*Carex brunnea*) 等; 枯枝落叶层厚度平均约为 2.5 cm。土壤理化性质见表 1。

1.2 土壤呼吸测定

在毛竹林地内设有 1 个 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的样地,在样地内随机选取 6 个 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的小样方,每个小样方内随机嵌入 1 个 PVC 环,深度约 3—5 cm。利用 LI-Cor8100 开路式土壤碳通量测量系统 (Li-cor Inc., Lincoln, NE, USA), 于 2007 年 5、7、11 月和 2008 年 1、3 月,每周选择 1 d, 时间从 08:00—16:00, 1 次/2h 测量土壤呼吸速率。土壤呼吸测定尽量选择晴天或雨后 2 d 测定,尽量不破坏原来土壤物理结构,并分别剪除掉地表以上的植物活体部分。土壤温度和湿度由 LI-Cor8100 携带的探针进行同步测定,探针插入 5 cm 处,分别测得土壤 5

cm 处土壤和土壤体积含水量。每次呼吸室关闭会记录初始的大气压、相对湿度、大气温度及 CO₂ 浓度,可以认为是周围近地面大气的气压、相对湿度、温度及 CO₂ 浓度。

表 1 毛竹林主要土壤理化性质(0—20cm)

Table 1 Major soil properties in *Phyllostachys edulis* forest(mg·g⁻¹)

pH	全氮 Total N	碱解氮 Alkali-hydrolyzable N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	Ca	Na	Mg	Al	Fe	Zn
5.50	0.82	0.21	0.03	0.07	4.47	2.39	3.93	17.89	16.93	0.28

1.3 土壤酶活性测定

每天测量土壤呼吸的同时,在样地内(5m×20m),按 S 型选取 6 点,每点采集 0—20 cm 土壤,混合为 1 包土样,重复选 S 型 3 次(共选取 18 个点,共 3 包土样),样品带回实验室,挑出土样中的石子、根系等杂质,经风干、过筛后,尽快测量。脲酶测定:苯酚钠-次氯酸钠比色法,脲酶活性以 24h 后 1g 土壤中 NH₃-N 的毫克数表示;蔗糖酶测定:3,5-二硝基水杨酸比色法,蔗糖酶活性以 24h 后 1g 土壤葡萄糖的毫克数表示;纤维素酶测定:3,5-二硝基水杨酸比色法,纤维素酶活性以 72h 后 10g 土壤生成葡萄糖毫克数表示^[23]。

1.4 数据分析

统计分析基于 SPSS13.0 进行,采用指数和线性回归的方法分析土壤呼吸与环境因子的关系,One-Way ANOVA 方差分析不同月份间土壤呼吸与酶活性的差异,并用 LSD 法进行多重比较,Pearson 相关分析不同月份间土壤呼吸与土壤酶活性的相关程度。在数据分析前,对所有数据进行正态性与方差齐性检验。由 Sigmpot10.0 绘图。

2 结果

2.1 毛竹林土壤呼吸特征及与环境因子关系

2.1.1 土壤呼吸日动态及季节变化

毛竹林地土壤呼吸日变化表现出较为平缓的单峰曲线,不同月份土壤呼吸日动态变化特征不同(图 1)。土壤呼吸的峰值主要出现在 12:00 或 14:00,这与土壤温度的日变化基本一致。不同月份的土壤呼吸的日变幅差异较大,2007 年 8 月份土壤呼吸的日变幅最大(3.34—7.87 μmol·m⁻²·s⁻¹),2008 年 1 月份变幅最小(0.84—1.35 μmol·m⁻²·s⁻¹)。毛竹林土壤呼吸表现出明显的季节变异,月平均土壤呼吸变幅在 1.08—5.99 μmol·m⁻²·s⁻¹之间,不同月份的土壤呼吸均值间具有显著差异(图 2),在最热的 8 月份,土壤呼吸速率最高,随着土壤温度的下降,土壤呼吸也逐渐减小,在 1 月份达到最小值。

2.1.2 土壤呼吸与环境因子的关系

土壤 5cm 温度,土壤体积含水量,大气温度、湿度、CO₂ 浓度、大气压强都是导致土壤呼吸变化的重要环境因子。由于它们的日变幅较小,导致土壤呼吸日变化微弱,但环境因子在不同月份间差异较大,为揭示环境因子对土壤呼吸季节变化的影响,将各月份各时间点的土壤呼吸的均值与相应的各环境因子的均值用不同的回归方程反映它们之间的关系(图 3)。其中,土壤呼吸与土壤 5cm 温度和空气温度的指数相关均达到极显著水平($P < 0.001$),其中土壤 5cm 温度可以解释毛竹林土壤呼吸变化的 94.09%,说明土壤温度是毛竹土壤呼吸变化的决定性因子。土壤温度和大气温度变化规律表现较好的一致性,二者为正相关关系($R^2 = 0.82$)。土壤呼吸随大气湿度和土壤体积含水量的增加而增加,但线性回归的相关性均不显著。土壤呼吸与近地面 CO₂ 浓度呈显著正相关($P < 0.05$),与大气压强负相关,但相关性较弱。

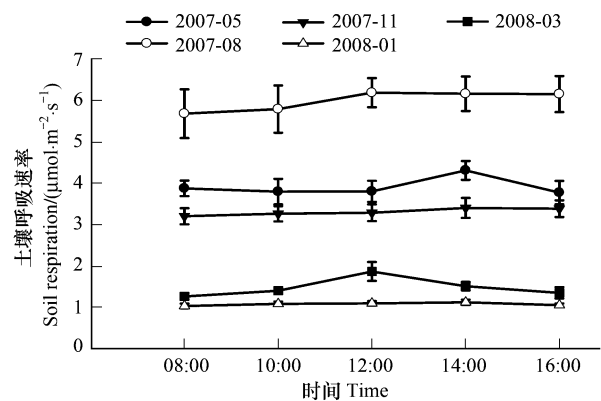


图 1 毛竹林土壤呼吸日变化(平均值±标准误)

Fig. 1 The diurnal variation of soil respiration in *phyllostachys edulis* forest(mean ± SE)

2.2 不同月份间土壤酶活性及与土壤呼吸的关系

土壤酶能够促进土壤有机质和某些矿质化合物间的转化,在营养元素的生物学循环中起着重要的作用。土壤脲酶是一种水解性酶,可以分解有机质生成氨和 CO_2 ,蔗糖酶广泛存在于各种土壤中,直接参与土壤有机质的代谢过程,纤维素酶分解纤维素形成腐殖质和释放碳素养分,这 3 种酶在土壤碳素代谢中起着极其重要的作用。结果表明,土壤脲酶活性的最大值是最小值的 5.01 倍,土壤蔗糖酶活性的最大值是最小值的 12.58 倍,土壤纤维素酶活性的最大值是最小值的 3.56 倍(图 4)。说明土壤蔗糖酶活性的季节变化最大,土壤纤维素酶的最小,土壤脲酶居中。土壤酶活性与土壤呼吸的季节变化基本一致,生长旺盛的季节较高,非生长季节相对较低。将土壤酶活性的月平均值与相应的土壤呼吸进行简单相关分析表明,土壤酶活性与土壤呼吸均呈正相关(表 2),但仅土壤纤维素酶活性与土壤呼吸的相关系数为 0.91,达到显著水平。

3 讨论

3.1 毛竹林土壤呼吸日动态特征及季节变异性

许多研究表明,土壤呼吸具有明显的日动态变化规律,但日变化动态却不尽相同。云南石林林地的土壤呼吸日变化呈双峰,高峰出现在 18:00 和 04:00^[24];六盘山天然次生林的土壤呼吸日变化呈单峰型,最大值出现 13:00—15:00^[25];长白山长白松林地内土壤呼吸速率日变化呈单峰型,峰值出现在 12:00—14:00^[26];塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸的日动态变化呈单峰型,但不同月份最大值出现的时间不同,8 月份最大值出现在 16:00,9 月份出现在 12:00^[27];本研究表明,毛竹林土壤呼吸具有较为明显的日变化规律,基本上表现为单峰曲线,峰值出现在 12:00 或 14:00,与土壤温度的日变化相似,但土壤呼吸的日变幅较小,可能由于毛竹林郁闭度较高,在较短的时间内(1d),林内小气候受外界环境因子的影响较少。

本研究表明,毛竹林地不同月份之间土壤呼吸存在显著差异($P < 0.05$),2007 年 8 月份土壤呼吸显著高于 2007 年 5 月、11 月、2008 年 3 月和 1 月,土壤呼吸具有明显的季节变异。肖复明^[21]对湖南会同林区毛竹林土壤呼吸的季节变化的发现,毛竹林地土壤呼吸的季节变化曲线呈单峰型,8 月份达到土壤呼吸的最大值,这与本研究的结果是一致的。5 月份为新竹生长旺季,每日可长 80—100 mm,毛竹需从土壤中汲取大量的营养物质,供新竹生长需要,因此毛竹的根系呼吸会增强,产生大量的 ATP,为营养元素从根际运输到植物地上部分提供动力。8 月份是本研究中土壤温度最高的月份,此期间雨水丰富,使得土壤呼吸达到全年最大值。此后土壤温度开始下降,可能导致土壤呼吸减缓。1 月份是土壤温度最低的月份,也是土壤呼吸最小的月份。3 月初土温上升到 10℃ 以上,毛竹由芽生长发育成竹笋再长成新竹,此时是毛竹生长季的初期,根际呼吸开始加强,此时的土壤呼吸明显高于 1 月份的土壤呼吸速率。

3.2 环境因子对毛竹林土壤呼吸的影响

土壤呼吸是指未经扰动的土壤中产生 CO_2 的所有代谢过程,主要包括根系呼吸(自养呼吸的一部分)以及土壤微生物和土壤动物的异养呼吸^[28],这些过程均受到环境因子的强烈影响。大多数研究表明,土壤温度与湿度是驱动土壤呼吸变化的主要环境因子^[6-10],二者的交互作用可以解释森林土壤呼吸变化的 67.5%—

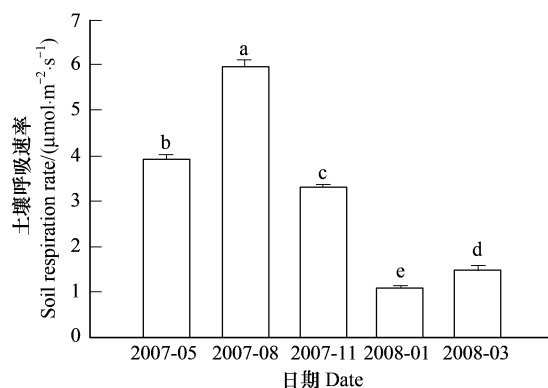


图 2 毛竹林土壤呼吸季节变化

Fig. 2 The seasonal variation of soil respiration in *phyllostachys edulis* forest

注:柱体上不同字母表示存在显著差异($P = 0.05$)

表 2 土壤呼吸与土壤酶活性的相关关系

Table 2 The correlation of soil respiration and soil enzyme activities

	脲酶活性 Urease activity	蔗糖酶活性 Scurase activity	纤维素酶活性 Cellulose activity
相关系数 Pearson correlation	0.71	0.79	0.91 *

* $P < 0.05$

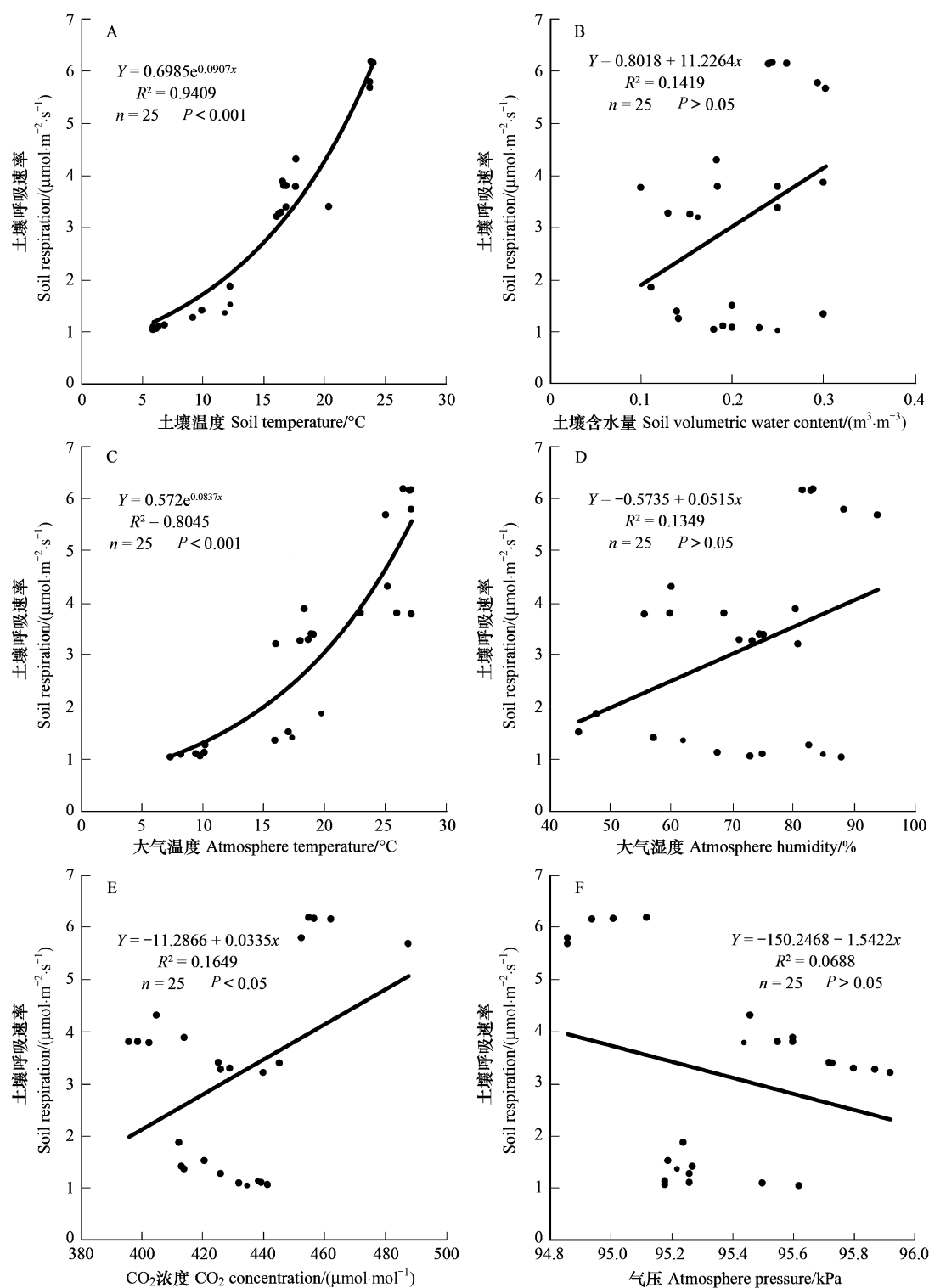


图3 土壤呼吸与环境因子的关系

Fig. 3 The relationships between soil respiration and environmental factors

A, B, C, D, E, F 分别代表土壤 5cm 温度,土壤体积含水量,大气温度,大气湿度,大气 CO_2 浓度和大气压强与土壤呼吸的关系

90.6%^[29]。本研究,土壤温度是主要环境因子。土壤呼吸与土壤温度呈极显著的指数关系,土壤温度可以解释土壤呼吸变化的 94.09%。土壤体积含水量与土壤呼吸不存在显著关系,土壤体积含水量仅可以解释土

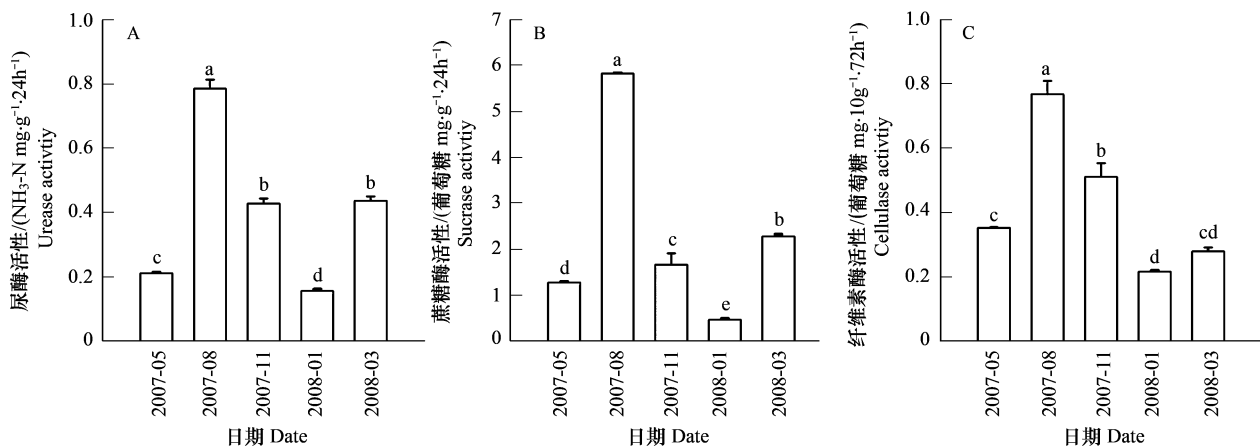


图4 不同月份间土壤酶活性比较

Fig. 4 Comparison with soil enzymes activities among different months

A, B, C 分别代表不同月份间土壤脲酶、蔗糖酶及纤维素酶活性; 柱上的不同字母表示存在显著差异 ($P = 0.05$)

壤呼吸变化的 14.19%。这与黄承才等^[20], 张连举等^[22]在不同区域的毛竹林中, 土壤呼吸与土壤温度呈正相关, 而与土壤含水量不存在相关性的研究结果是一致的。土壤呼吸不仅受到土壤环境的影响, 还与近地面大气环境因密切相关, 本研究发现, 近地面气温、 CO_2 浓度均与土壤呼吸呈显著正相关 ($P < 0.05$)。有研究发现, 大气 CO_2 浓度升高的施肥效应和抗蒸腾效应促进了植物根与叶对碳的同化作用, 增强了根系呼吸, 从而增大了土壤总呼吸^[30-32], 本研究也支持这些观点。总之除土壤温度与湿度外, 土壤呼吸还受近地面大气环境的影响, 因此应加强对其精确、持续的观测, 为揭示不同环境因子对土壤呼吸产生的不同影响及为建立更加精确的土壤碳释放模型提供科学依据。

3.3 土壤酶活性对毛竹林土壤呼吸的影响

土壤呼吸不仅受外界环境条件的影响, 同时受土壤酶活性变化的影响。Lee 等^[33] 和 Borken 等^[34] 认为, 20 cm 以上土层包含了 90% 以上或更大比例的根系和土壤微生物生物量, 此深度的土壤对土壤碳释放的贡献远远大于深层土壤。土壤脲酶、蔗糖酶、纤维素酶是土壤碳素循环的主要酶类, 参与土壤有机物质分解释放 CO_2 的反应。本研究对 0—20cm 土层土壤酶活性的研究发现, 土壤呼吸随土壤酶活性的增加而增加。但本实验中土壤酶活性的测量是基于不同月份的土壤样品, 土壤酶的测定采用生物化学常规方法, 用在相同条件下测定土壤酶所消耗基质的多少来表征土壤酶的活性^[23], 并没有对其含量进行定量测定。这仅能在一定程度上, 揭示了土壤酶对土壤呼吸的影响, 如深入研究土壤酶对土壤呼吸变化的机理, 还需要对与碳循环相关酶类的深入研究。

总之, 土壤呼吸的变化是多因子复杂交互作用的结果, 既包括环境因子, 也包括土壤本身的一些理化性质, 而环境因子是通过调控土壤总呼吸的所有酶促反应的微环境而影响土壤呼吸的, 因此, 在揭示环境因子对土壤呼吸的过程中, 应更多的关注引起土壤呼吸本质变化的土壤理化及生化性质等, 对深入研究土壤碳释放机理提供理论依据。基于前人研究环境因子对土壤呼吸影响已经较为深入的前提下, 本试验通过为期 1 年的研究发现, 土壤温度是影响毛竹林土壤呼吸的主要环境因子, 土壤酶活性对土壤呼吸的影响也较大, 不容忽视。但因试验周期较短, 涉及的影响因子还不够全面, 应进行深入的、连续的观测, 进而为竹类土壤碳释放的研究提供科学参考。

References:

- [1] Falk M, Paw U K T, Wharton S, Schroeder M. Is soil respiration a major contributor to the carbon budget within a Pacific Northwest old-growth forest?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135: 269-283.

- [2] Schlesinger W H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8: 51-81.
- [3] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pool and world life zones. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [4] Risk D, Kellman L, Beltrami H. Carbon dioxide in soil profiles: production and temperature dependence. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29 (6): 11-14.
- [5] Vanhala P. Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34 (9): 1375-1379.
- [6] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. Contribution of root respiration to soil surface CO₂ flux in a boreal black spruce. *Tree Physiology*, 2004, 24 (12): 1387-1395.
- [7] Conant R T, Dalla-Betta P, Klopatek C C, Klopatek J A. Controls on soil respiration in semiarid soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 945-951.
- [8] Yang J Y, Wang C K. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forests in northeastern China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (2): 286-294.
- [9] Zhou H X, Zhang Y D, Song H L, Wu S Y. Soil respiration in temperate secondary forest and *Larix gmelinii* plantation in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (12): 2668-2674.
- [10] Wang M, Ji L Z, Li Q R, Liu Y Q. Effects of temperature and moisture on soil respiration in different forest types in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (8): 1234-1238.
- [11] Chang J G, Liu S R, Shi Z M, Chen B Y, Zhu X L. Soil respiration and its components partitioning in the typical forest ecosystems at the transitional area from the northern subtropics to warm temperate. China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5): 1791-1802.
- [12] Yang Y S, Chen G S, Wang X G, Xie J S, Gao R, Li Z, Jin Z. Response of soil CO₂ efflux to forest conversion in subtropical zone of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (7): 1684-1690.
- [13] Fang Q L, Sha L Q. Soil respiration in a tropical seasonal rain forest and rubber plantation in Xishuangbanna, Yunnan, SW China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (1): 97-103.
- [14] Rodeghiero M, Cescatti A. Main determinants of forests soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps. *Global Change Biology*, 2005, 11 (7): 1024-1041.
- [15] Martin J G, Bolstad P V. Annual soil respiration in broadleaf forests of northern Wisconsin: influence of moisture and site biological, chemical, and physical characteristics. *Biogeochemistry*, 2005, 73: 149-182.
- [16] Saiz G, Green C, Butterbach-Bahl K, Kiese R, Avitabile V. Seasonal and spatial variability of soil respiration in four *Sitka spruce* stands. *Plant and Soil*, 2006, 287 (1/2): 161-176.
- [17] Liu Q, Edwards N T, Post W M, Gu L, Ledford J, Lenhart S. Temperature-independent diel variation in soil respiration observed from a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 2006, 12 (11): 2136-2145.
- [18] Wang Y, Wang B, Zhao G D, Guo H, Ding F J, Ma X Q. Study on carbon balance in *Phyllostachys edulis* plantation ecosystem. *China Forest Science and Technology*, 2008, 22 (4): 9-11.
- [19] Wu J S, Hu M Y, Cai T F, Yu G J. The relationship between soil environment and the growth of *Phyllostachys pubescens*. *Journal of Bamboo Research*, 2006, 25 (2): 3-6.
- [20] Huang C C, Ge Y, Chang J, Lu R, Xu Q S. Studies on the soil respiration of three woody plant communities in the east mid subtropical zone, China. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19 (3): 324-328.
- [21] Xiao F M, Fan S H, Wang S L, Xiong C Y, Shen Z Q. Soil carbon cycle of *Phyllostachys edulis* plantation in huitong region, Hunan Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45 (6): 11-15.
- [22] Zhang L J, Wang B, Liu Y Q, Chen B, Ao J Y. Study on the hydrology dynamics of needle-broad mixed plantation and evergreen broad-leaved in Dagangshan. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2007, 29 (1): 72-84.
- [23] Guan S Y. Soil enzymes and the research method. Beijing: Agriculture Press, 1986: 275-297.
- [24] Cao J H, Song L H, Jiang G H, Xie Y Q, You S Y. Diurnal dynamics of soil respiration and carbon stable isotope in Lunan Stone forest, Yunnan Province. *Carsologica Sinica*, 2005, 24 (1): 23-27.
- [25] Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The temporal variations of soil respiration under different land use in Liupan Mountain forest zone. *Environmental Science*, 2003, 24 (6): 23-32.
- [26] Liu Y, Han S J, Hu Y L, Dai G H. Effects of soil temperature and humidity on soil respiration rate under *Pinus sylvestris* forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16 (9): 1581-1585.
- [27] Huang X, Li W H, Chen Y N, Ma J X. Soil respiration of desert riparian forests in the lower reaches of Tarim River as affected by air temperature at 10cm above the ground surface and soil water. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5): 1951-1959.
- [28] Fang J Y, Wang W. Soil respiration as a key belowground process: Issues and perspectives. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31 (3): 345-347.

- [29] Wang G J, Tian D L, Zhu F, Yan W D, Li S Z. Comparison of soil respiration and its controlling factors in sweetgum and Camphortree plantations in Hunan, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (9): 4107-4114.
- [30] King J S, Hanson P J, Bernhardt E, DeAngeli P, Norby R J, Pregizer K S. A multiyear synthesis of soil respiration responses to elevated atmospheric CO₂ from four forest FACE experiments. *Global Change Biology*, 2004, 10(6): 1027-1042.
- [31] Lin G H, Rygielwicz P T, Ehleringer J R, Johnson M G, Tingey D T. Time-dependent responses of CO₂ efflux components to elevated atmospheric [CO₂] and temperature in experimental forest mesocosms. *Plant and Soil*, 2001, 229: 259-270.
- [32] Norby R J, Hanson P J, O'Neill E G, Tschaplinski T J, Weltzin J F, Hansen R A, Cheng W X, Wullschlegel S D, Qunderson C A, Edwards N T, Johnson D W. Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implication for carbon storage. *Ecological Applications*, 2002, 12(5): 1261-1266.
- [33] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, Koizumi H. Seasonal changes in the contribution of root respiration to total soil respiration in a cool-temperature deciduous forest. *Plant and Soil*, 2003, 255: 311-318.
- [34] Borken W, Xu Y J, Davidson E A, Beese F. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8 (12): 1205-1216.

参考文献:

- [8] 杨金艳, 王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO₂ 通量的影响. *植物生态学报*, 2006, 30 (2): 286-294.
- [9] 周海霞, 张彦东, 孙海龙, 吴世义. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2668-2674.
- [10] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 刘延秋. 土壤温度和水分对长白山不同森林类型土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2003, 14 (8): 1234-1238.
- [11] 常建国, 刘世荣, 史作民, 陈宝玉, 朱学凌. 北亚热带-南温带过渡区典型森林生态系统土壤呼吸及其组分分离. *生态学报*, 2007, 27 (5): 1791-1802.
- [12] 杨玉盛, 陈光水, 王小国, 谢锦升, 高人, 李震, 金钊. 中国亚热带森林转换对土壤呼吸动态及通量的影响. *生态学报*, 2005, 25 (7): 1684-1690.
- [13] 房秋兰, 沙丽清. 西双版纳热带季节雨林与橡胶林土壤呼吸. *植物生态学报*, 2006, 30 (1): 97-103.
- [18] 王燕, 王兵, 赵广东, 郭浩, 丁访军, 马向前. 我国毛竹林生态系统碳平衡研究进展. *林业科技开发*, 2008, 22 (4): 9-11.
- [19] 吴家森, 胡睦荫, 蔡庭付, 余国军. 毛竹生长与土壤环境. *竹子研究汇刊*, 2006, 25(2): 3-6.
- [20] 黄承才, 葛滢, 常杰, 卢蓉, 徐青山. 中亚热带东部三种主要木本群落土壤呼吸的研究. *生态学报*, 1999, 19 (3): 324-328.
- [21] 肖复明, 范少辉, 汪思龙, 熊彩云, 申正其. 湖南会同毛竹林土壤碳循环特征. *林业科学*, 2009, 45 (6): 11-15.
- [22] 张连举, 王兵, 刘苑秋, 陈滨, 敖剑云. 大岗山四种林型夏秋季土壤呼吸研究. *江西农业大学学报*, 2007, 29 (1): 72-84.
- [23] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986: 275-297.
- [24] 曹建华, 宋林华, 姜光辉, 谢运球, 游省易. 路南石林地区土壤呼吸及稳定同位素日动态特征. *中国岩溶*, 2005, 24 (1): 23-27.
- [25] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式土壤呼吸时间格局. *环境科学*, 2003, 24 (6): 23-32.
- [26] 刘颖, 韩士杰, 胡艳玲, 戴冠华. 土壤温度和湿度对长白松林土壤呼吸速率的影响. *应用生态学报*, 2005, 16 (9): 1581-1585.
- [27] 黄湘, 李卫红, 陈亚宁, 马建新. 塔里木河下游荒漠河岸林群落土壤呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27 (5): 1951-1959.
- [28] 方精云, 王妮. 作为地下过程的土壤呼吸: 我们了解多少?. *植物生态学报*, 2007, 31 (3): 345-347.
- [29] 王光军, 田大伦, 朱凡, 闫文德, 李树战. 枫香和樟树人工林土壤呼吸及其影响因子的比较. *生态学报*, 2008, 28 (9): 4107-4114.