

雷州半岛尾巨桉人工林土壤呼吸动态变化及其对气象因子的响应

竹万宽, 王志超, 许宇星, 杜阿朋*

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东湛江桉树人工林生态系统定位研究站, 广东 湛江 524022)

摘要: 为探讨桉树(*Eucalyptus* spp.)人工林土壤呼吸及其对气象因子的响应, 采用 LI-8100A 土壤碳通量自动测量系统, 对雷州半岛北部尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)人工林的土壤呼吸速率进行监测。结果表明, 尾巨桉人工林土壤呼吸速率具有明显的时间变化特征, 表现为单峰曲线型变化趋势, 2016 年 5 月和翌年 2 月分别达到最高值 $[(3.17 \pm 0.12) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}]$ 和最低值 $[(1.18 \pm 0.16) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}]$, 年均值为 $(2.34 \pm 0.70) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。根据相关系数, 土壤呼吸速率的影响因子以土壤温度 > 气温 > 气压 > 光合有效辐射 > 饱和水汽压差 > 土壤湿度。主成分分析表明, 温度、光合有效辐射等引起的热能量变异和土壤湿度等引起的水分变异是土壤呼吸速率的主要影响因子。回归分析表明, 气象因子综合模型能解释土壤呼吸速率 94.0% 的变异情况, 模型可靠性较高。尾巨桉林土壤表面全年 CO_2 通量为 $893.31 \text{ g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 。气象因子的综合作用能更全面地解释土壤呼吸的时间变异情况。

关键词: 尾巨桉人工林; 土壤呼吸速率; 土壤温度; 气象因子

doi: 10.11926/jtsb.3833

Soil Respiration of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation and Its Response to Meteorological Factors in Leizhou Peninsula

ZHU Wan-kuan, WANG Zhi-chao, XU Yu-xing, DU A-peng*

(China Eucalypt Research Centre, Guangdong Zhanjiang Eucalyptus plantation Ecosystem Research Station, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: In order to understand the dynamic change of soil respiration rate and its response to meteorological factors, soil respiration rate of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation in Leizhou Peninsula was measured by using LI-8100A Soil carbon flux automatic measurement system. The results indicated that soil respiration rate of *E. urophylla* × *E. grandis* plantation changed distinctly from March 2016 to February 2017, showing single peak curve with the maximum at May, 2016 and minimum at February, 2017, respectively. The mean soil respiration rate was $(2.34 \pm 0.70) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. According to the correlation coefficient, the influencing factors on soil respiration rate was ordered as soil temperature > air temperature > atmospheric pressure > photosynthetic active radiation > vapor pressure deficit > soil moisture. Furthermore, the principal component analysis showed that the variation of heat energy caused by temperature and photosynthetic active radiation and that of moisture caused by soil moisture were the main effect factors on soil respiration rate. The meteorological factors model was reliable due to 94.0% variation of soil respiration rate can be explained by regression analysis. The cumulative

收稿日期: 2017-10-11

接受日期: 2017-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0600505, 2016YFD0600504); 广东省林业科技创新专项资金项目(2014KJCX021-04, 2017KJCX020); 2016 年省级生态公益林激励性补助资金项目(2016-03); 林业科技创新平台运行补助项目(2017-LYPT-DW-137)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Plan (Grant No. 2016YFD0600505, 2016YFD0600504), the Project for Forestry Science and Technology Innovation in Guangdong Province (Grant No. 2014KJCX021-04, 2017KJCX020), the Project for Provincial Public Welfare Forest Incentive Subsidy (Grant No. 2016-03), and the Project for Forestry Science and Technology Innovation Platform Operation Subsidy (Grant No. 2017-LYPT-DW-137).

作者简介: 竹万宽(1989-), 男, 研究实习生, 主要从事桉树人工林生态定位监测研究。E-mail: zwk_2015@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: dapzj@163.com

annual CO₂ flux of soil surface in *E. urophylla* × *E. grandis* plantation was estimated as 893.31 g C m⁻²a⁻¹. The temporal variation of soil respiration could be fully explained by coupling effect of meteorological factors.

Key words: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation; Soil respiration rate; Soil temperature; Meteorological factor

土壤呼吸作为土壤碳的主要输出途径,对区域和全球尺度上碳收支的调配起到至关重要的作用^[1];作为陆地生态系统碳交换过程中一个重要的组成部分^[2],其微小的变化都可能影响全球碳平衡^[3]。人工林被认为是缓解大气中CO₂浓度继续上升的一个解决办法,开展碳汇造林是促进碳汇林业发展的主要途径之一,也是建设现代林业的重要组成部分^[4]。桉树作为中国华南地区发展人工林的主要造林树种之一,截至2015年其面积已突破4.50 × 10⁶ hm²^[5],具有巨大的碳储量和碳汇效益^[6]。

目前,对森林生态系统的土壤呼吸作用已有大量研究^[7-8],桉树人工林土壤呼吸作用特征也逐渐受到国内学者的关注。其中,黄雪蔓等^[9]对广西凭祥第二代桉树人工纯林及混交林土壤呼吸进行了组分分离研究;吴蒙等^[10]对桂林尧山地区桉树人工林的土壤呼吸日动态特征及其与土壤温、湿度的关系进行了研究;张磊^[11]对云南省中部地区桉树人工林土壤微生物呼吸进行了研究。然而,这些研究集中在南亚热带季风气候区,对雷州半岛等热带季风气候区桉树人工林土壤呼吸作用研究尚未见报道。土壤呼吸具有很强的时空异质性^[12],易受到多种影响因素的干扰^[13-18],森林小气候现象所产生的林内气象因子对林地土壤呼吸作用具有一定的影响。当前对土壤呼吸速率与影响因子的关系拟合回归仅围绕土壤温、湿度进行,涉及到气压、气温、空气相对湿度、风速、光合有效辐射、饱和水汽压差和大气水势等的研究较少。本研究选取桉树属最具有代表性的树种之一的尾巨桉 *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* 人工林为研究对象,探讨桉树人工林土壤呼吸速率动态变化特征及其与气象因子的相互关系,为准确评估桉树人工林生态系统碳收支状况提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

本研究地位于雷州半岛北部南方国家级林木种苗示范基地内(109°22'~111°38' E, 21°20'~21°30' N)。该地区属于海洋性季风气候,土壤为玄武岩风化发育的砖红壤,土壤肥力中等,平均海拔150.4 m;

年均温23.1℃,最热月(7月)平均气温28.8℃,最冷月(1月)平均气温15.6℃;年均降雨量1567 mm,5-7月为雨季,多午后雷阵雨和台风带来的暴雨,年相对湿度80.4%,年日照时数为1937 h。研究样地造林树种为尾巨桉无性系32-29,造林密度1666 ind. hm⁻²,保留密度为690 ind. hm⁻²,造林时间为2008年7月,林地地势平坦。8年生尾巨桉人工林平均树高(23.15 ± 0.76) m,平均胸径(18.43 ± 0.24) m。林下灌草层主要有鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)、龙船花(*Ixora chinensis*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、马樱丹(*Lantana camara*)、白背叶(*Mallotus apelta*)、三桠苦(*Melicope pteleifolia*)、潺槁木姜子(*Litsea glutinosa*)、银柴(*Aporosa dioica*)、薇甘菊(*Mikania micrantha*)、马唐草(*Digitaria sanguinalis*)、白花鬼针草(*Bidens pilosa*)和木通(*Clematis armandii*)。样地土壤基本情况见表1。

表1 样地土壤基本情况

Table 1 Basic situation of sample plots soil

土层深度 Depth of soil (cm)	土壤容重 Soil bulk density (g cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity /%	有机质含量 Organic matter content (g kg ⁻¹)
0~10	0.92 ± 0.04	58.96 ± 1.47	57.05 ± 6.50
10~20	1.02 ± 0.04	55.53 ± 0.30	31.67 ± 3.03
20~40	1.07 ± 0.03	55.56 ± 0.78	23.65 ± 2.29
40~60	1.03 ± 0.08	56.62 ± 1.78	17.62 ± 3.40

1.2 研究方法

土壤呼吸速率测定时间为2016年3月至2017年2月。2016年1月于尾巨桉林地中随机设置6个2 m × 2 m的小样方。在每个小样方的对角线交叉位置设置1个内径为20 cm,高12 cm的土壤环作为固定样点,将土壤环底端朝下垂直于地表插入土壤中,保留环顶部距离土壤表面3 cm。安装时尽量一次到位,避免反复操作造成土壤扰动;同时保证后续监测过程中土壤环位置恒定。2016年3月开始,用美国LI-8100A Automated Soil CO₂ Flux System连接20 cm呼吸气室,于每个月中下旬选择无降雨天气进行测定。开始测定前检查土壤环安放是否正常,并剪除环内可见植物。每个林分每月测定1次,每次测定从上午8:00至下午18:00,测定间隔为1 h,

每次测定重复 3 次, 以每个月各样点、各时段的数据计算算术平均值, 作为月平均土壤呼吸值。利用仪器自身配置的土壤温度和水分传感器探针同步测定采集 0~10 cm 土壤温度和土壤湿度。

2016 年 7 月, 在每个小样方附近挖取土壤剖面, 划分土壤深度 0~10、10~20、20~40 和 40~60 cm 共 4 层进行取样。环刀法(100 cm³)测定土壤容重及总孔隙度。同时每层另取约 300 g 土壤样品去除根系、石头等杂物后按质量比混合均匀, 装袋标记后带回实验室, 采用重铬酸钾氧化-容量法测定土壤有机质含量。

气象因子测定采用林内气象站同步观测, 包括气压、气温、空气相对湿度、风速、光合有效辐射、饱和水汽压差及大气水势。

饱和水汽压差(VPD)^[19]首先计算实际水汽压

$$e_s = 0.6108e^{\left(\frac{17.27T}{T+273.3}\right)}, \text{ 带入公式 } VPD=(1-RAH)\cdot e_s,$$

大气水势^[20]按 $P_a=4.6248 \times 10^5 \times T_K \times \ln(RH)$ 计算, 式中, VPD 为饱和水汽压差; e_s 为即时温度下空气的饱和水汽压; RAH 为空气相对湿度; T 为大气温度; T_K 为绝对温度;

尾巨桉林分全年土壤表面 CO₂ 累积通量(g C m⁻²a⁻¹)的估算方法: 通过实测的土壤呼吸速率和气象因子关系模型与林内气象站连续动态监测的气象因子数据建立方程, 估算土壤呼吸速率($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)连续数据以 1 h 为步长累加获得(土壤呼吸速率均值 $\times 12 \times 10^{-6} \times 3600$)。

1.3 数据处理

采用 SPSS 19.0 的 Perason 相关性分析研究不同气象因子与土壤呼吸速率的相关程度, 主成分回归分析拟合土壤呼吸速率和气象因子的关系, 所有图表均采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 9.1 处理。

2 结果和分析

2.1 气象因子月动态变化特征

土壤温度月变化基本呈单峰曲线的变化趋势, 在 2016 年 5 月出现最高值(31.79℃), 在 12 月出现最低值(18.86℃); 土壤温度年变异系数为 17.35%, 属中等变异性, 说明研究区土壤温度在日间波动较小, 而随季节变化波动较大。土壤湿度月变化特征不明显, 在 2016 年 4 月出现最高值(22.17%), 在翌

年 2 月出现最低值(6.91%); 土壤湿度年变异系数为 33.92%, 属中等变异性。气压月变化曲线近似开口向上的抛物线, 在 8 月出现最低值(97.60 kPa), 在翌年 1 月出现最高值(98.41 kPa), 气压随时间波动较小。气温月变化呈现与土壤温度类似的单峰曲线, 在 2016 年 7 月出现最高值(30.44℃), 在 12 月出现最低值(15.06℃), 说明气温会影响土壤温度的变化。光合有效辐射呈现出与土壤温度、气温较为相似的变化趋势, 说明光合有效辐射作为热量来源, 会影响气温和土壤温度; 光合有效辐射在 2016 年 11 月出现最低值($79.90 \mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$), 在 6 月出现最高值($520.73 \mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$)。饱和水汽压差和大气水势均表现出双峰曲线的变化趋势, 年变异程度均属中等变异性。

2.2 土壤呼吸对气象因子的响应

选取每个季节首月土壤呼吸测定值比较分析土壤呼吸的昼间变化特征, 从图 2: A 可见, 尾巨桉人工林昼间土壤呼吸速率为 $1.14 \sim 3.28 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 基本表现为单峰型曲线, 3、6 和 9 月最高值出现在 15:00, 12 月最高值出现在 17:00; 6 和 12 月最低值出现在 8:00, 3 月最低值出现在 17:00, 9 月最低值出现在 18:00, 说明土壤呼吸昼间变化受天气条件影响明显。尾巨桉人工林土壤呼吸速率月变化特征明显, 呈单峰曲线(图 2: B)。土壤呼吸速率由观测初期开始逐渐上升, 在 2016 年 5 月出现最高值 [$(3.17 \pm 0.12) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$], 之后逐渐下降, 在翌年 2 月出现最低值 [$(1.18 \pm 0.16) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$], 年均值为 $(2.34 \pm 0.70) \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。观测期内, 土壤呼吸速率的变异系数为 1.96%~13.82%, 其中 2016 年 7 月土壤呼吸速率变化最小, 翌年 2 月的变化最大, 说明土壤呼吸作用的变异情况与相应季节的天气条件关系密切。

相关性分析表明, 土壤呼吸速率与土壤温度、土壤湿度及气温均存在极显著正相关关系($P < 0.01$), 相关系数为土壤温度 > 气温 > 土壤湿度; 土壤呼吸速率与气压存在极显著负相关关系($P < 0.01$); 土壤呼吸速率与光合有效辐射及饱和水汽压差存在显著相关关系($P < 0.05$); 土壤呼吸速率与空气相对湿度、风速及大气水势无显著相关性(表 2)。回归分析表明, 土壤呼吸速率与土壤温度、气温、光合有效辐射和饱和水汽压差符合正相关线性关系, 拟合精度分别为 0.892、0.690、0.409 和 0.389, 即土壤呼

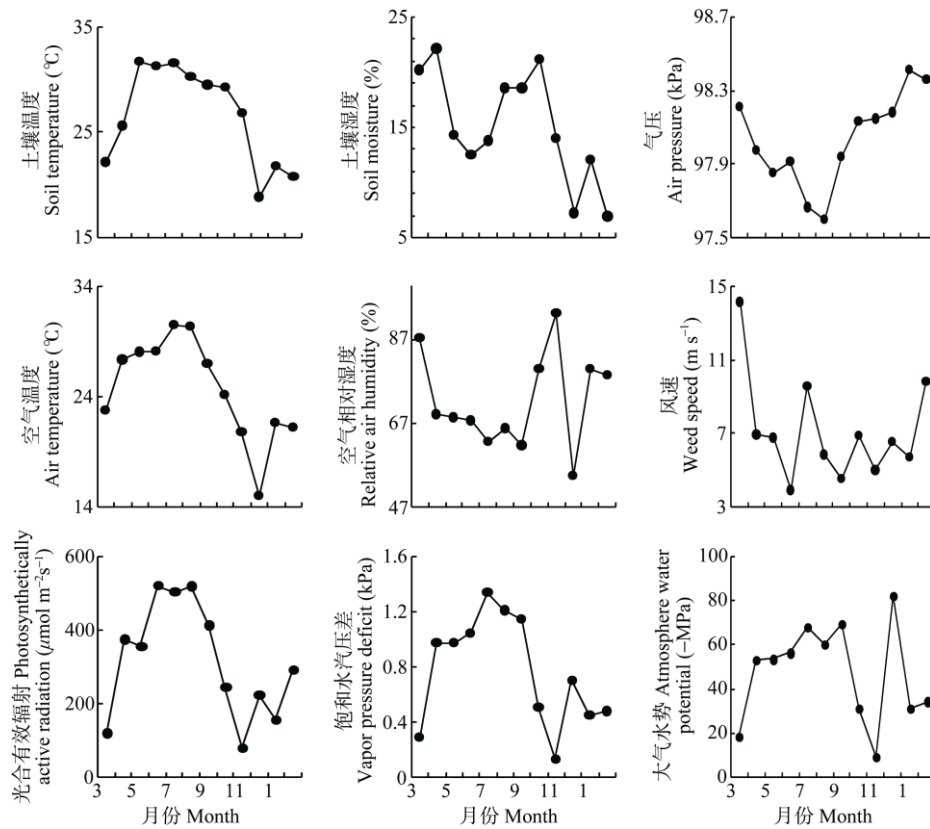


图 1 气象因子的月动态变化

Fig. 1 Monthly dynamic changes of meteorological factors

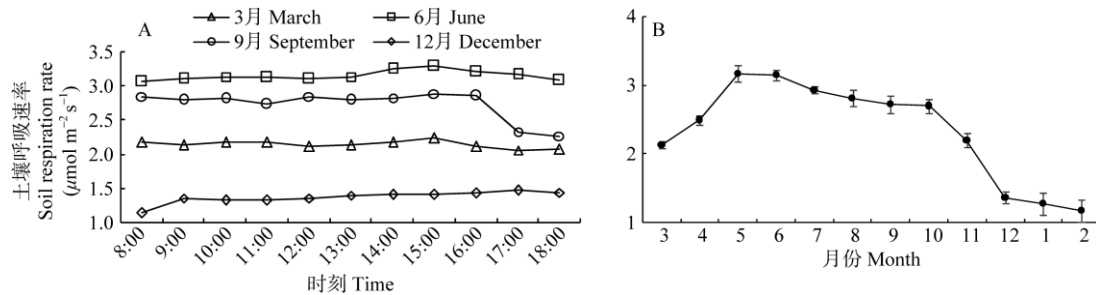


图 2 土壤呼吸速率时间变化

Fig. 2 Dynamics of soil respiration rate

吸作用随其升高而增强；土壤呼吸速率与气压符合负相关线性关系，拟合精度为 0.678，即土壤呼吸随其升高而减弱；土壤呼吸速率与土壤湿度符合二次项关系，拟合精度为 0.551，即当土壤湿度大于 17.2%时土壤湿度对土壤呼吸产生抑制作用，当土壤湿度小于 17.2%时土壤湿度促进土壤呼吸作用。

2.3 气象因子的主成分回归分析及土壤表面 CO₂ 累积通量估算

KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)检验通过后,对和土

壤呼吸速率相关性在显著水平以上($P < 0.05$)的气象因子进行主成分分析,得出影响尾巨桉林土壤呼吸速率的 2 个主成分。第 1 个主成分主要由土壤温度(T)、气压(AP)、气温(AT)、光合有效辐射(PAR)和饱和水汽压差(VPD)决定,荷载分别为 0.864 (T)、-0.935 (AP)、0.940 (AT)、0.898 (PAR)和 0.891 (VPD),主要解释了热量和大气对土壤呼吸的影响。第 2 个主成分主要由土壤湿度(W)决定,荷载为 0.867,主要解释了水分对土壤呼吸的影响。2 个主成分的方差累积贡献率大于 85%,能比较全面地反映所有信息。

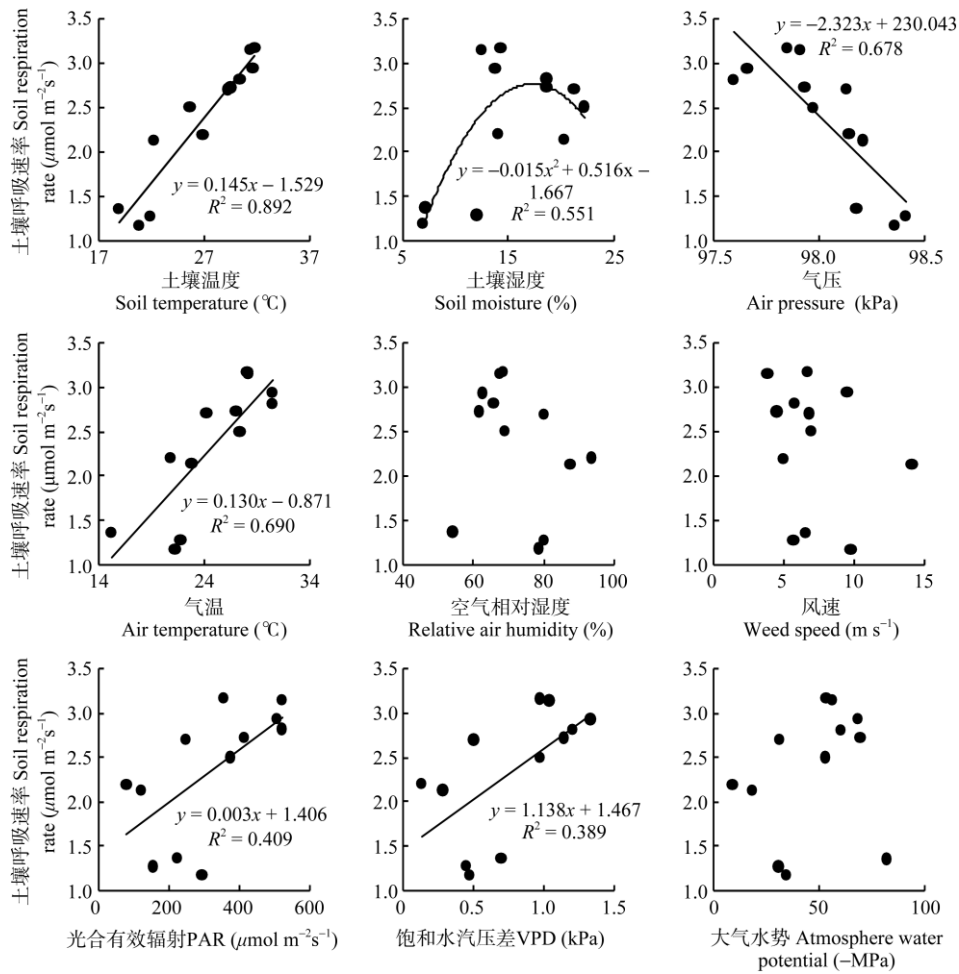


图 3 土壤呼吸速率与气象因子的关系

Fig. 3 Relationship between soil respiration rate and climate factors

表 2 土壤呼吸与气象因子的相关性分析

Table 2 Correlation analysis and regression model between soil respiration rate and meteorological factors

	相关系数 Correlation coefficient
土壤温度 Soil temperature	0.945**
土壤湿度 Soil moisture	0.554**
气压 Air pressure	-0.824**
气温 Air temperature	0.831**
空气相对湿度 Relative air humidity	-0.239
风速 Weed speed	-0.241
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	0.638*
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	0.620*
大气水势 Atmosphere water potential	0.250

表 3 气象因子的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of meteorological factors

主成分 Principal component	因素分量 Component	特征值 Eigen value	贡献率 Variance /%	累积贡献率 Cumulative /%
1	T、AP、AT、PAR、VPD	4.282	71.362	71.362
2	W	1.066	17.766	89.128

根据主成分分析结果，将各气象因子进行标准化后，确定 2 个主成分表达式分别为：

$$F_1 = 0.418T + 0.203W - 0.452AP + 0.454AT + 0.434PAR + 0.430VPD \quad (1)$$

$$F_2 = 0.176T + 0.839W - 0.053AP + 0.166AT - 0.351PAR - 0.333VPD \quad (2)$$

以土壤呼吸速率为因变量，6 个气象因子为自变量进行多元逐步回归，得到回归方程：

$$R_s = 53.872 + 0.125T + 0.036W - 0.557AP + 0.036AT + 0.001PAR - 0.09VPD \quad (R^2 = 0.940, P < 0.01) \quad (3)$$

用独立于建模数据的 60 组气象因子数据采用

模型公式(3)对土壤呼吸速率进行预测, 预测值与实测值之间存在极显著正相关性(图4), 相关系数为0.903, 方程拟合精度为81.6%, 说明模型具有较高可靠性。

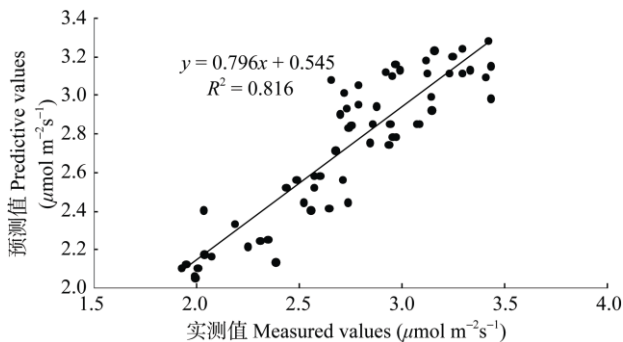


图4 土壤呼吸速率实测值与预测值关系

Fig. 4 Relation between measured values and predictive values of soil respiration rate

用以土壤温度、土壤湿度、气压、气温、光合有效辐射和饱和水汽压差为自变量建立起来的土壤呼吸速率统计模型来估测观测期内土壤表面 CO_2 通量, 尾巨桉人工林土壤表面全年 CO_2 累积通量为 $893.31 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 较高于热带雨林($831 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[21]和季风常绿阔叶林($604 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[22]全年 CO_2 排放通量。

3 讨论和结论

3.1 土壤呼吸速率变化特征

本研究中, 尾巨桉人工林土壤呼吸的昼间变化基本呈单峰型曲线。有研究表明土壤呼吸的日进程主要取决于土壤温度在一天中的变化, 同时土壤呼吸也与光合作用有关, 光合作用为植物根系呼吸提供底物供应, 从而调节土壤呼吸日变化过程。尾巨桉人工林土壤呼吸的月变化趋势明显, 呈单峰曲线型, 与黄雪蔓^[9]、吴华静等^[23]报道桉树人工林土壤呼吸呈双峰曲线变化趋势的结论不同, 可能是由于不同研究区域土壤温、湿度的季节变化特征不同导致土壤呼吸速率对温、湿度变化响应出现差异。本研究结果表明, 尾巨桉人工林土壤呼吸速率最高值出现在2016年5月, 最低值出现在翌年2月, 即最高值出现在夏季, 最低值出现在冬季, 即以土壤温度为主导因子的变化可能引起了土壤呼吸速率的时间异质性, 与前人^[9,24]研究结果相符。土壤呼

吸速率的年均值为 $(2.34 \pm 0.70) \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 高于吴蒙等^[10]报道的广西桂林20年生桉树林土壤呼吸速率年均值($2.19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 低于陈进等^[25]报道的广东广州8年生尾叶桉林土壤呼吸速率年均值($3.35 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。相比于20年生桉树, 8年生尾巨桉人工林处于速生增长期, 根系呼吸作用较强, 从而具有较高的土壤呼吸速率; 相比于同林龄尾叶桉林, 可能是由于林分密度及土壤性质的差异引起土壤呼吸的空间变异。不同空间位置、林分类型、林龄和气象条件的差异会引起土壤物理性质(土壤含水量、热量条件、孔隙度、质地和化学性质)、生物条件(细根生物量、土壤动物、真菌和细菌)、营养的可利用性(掉落物沉积和氮矿化)以及其他因素(干扰历史和风化)的较大差异, 从而导致土壤呼吸具有很高的空间变异性。

3.2 气象因子与土壤呼吸速率的关系

本研究中, 土壤呼吸速率与土壤温度、气温存在极显著正相关关系, 均符合极显著线性模型, 即土壤呼吸速率随温度的升高而增强。相比之下, 土壤温度与土壤呼吸速率相关性最大, 相关系数为0.945, 可以单独解释土壤呼吸月变化的89.22%。温度几乎可以影响呼吸过程的各个方面^[26], 在无其他胁迫因子时, 土壤温度的升高会促进植物根系的呼吸作用^[27]、土壤微生物活动及土壤有机质的分解, 进而增强土壤呼吸^[28]。

土壤呼吸速率与土壤湿度存在极显著正相关关系, 且符合极显著的二次项模型, 而有研究表明土壤呼吸速率与0~10 cm土层平均含水量无显著相关性^[29-31], 可能是土壤呼吸组分中90%以上是根系呼吸及微生物呼吸贡献^[32-33], 研究区地处雷州半岛, 年均温度较高, 植被全年生长旺盛, 根系呼吸及微生物活动较强, 土壤湿度产生干扰作用较为明显。

土壤呼吸速率与气压存在极显著负相关关系, 冯朝阳等^[34]和齐清等^[35]的研究表明, 高的气压会对土壤呼吸产生一定的抑制作用, 使土壤中 CO_2 的排放受阻。气体在土壤中的运动方式主要包括扩散和质量流量两种, 质量流量是由区域间的气压差造成的, 扩散则是空气中 CO_2 分子的分压驱动的, 气压的变化会对土壤中的 CO_2 运动速度和方式造成一定影响, 具体影响机制有待进一步研究。风速对土壤呼吸的影响主要表现在促进土壤表面的水分散失及热量流失, 而本研究中土壤呼吸速率与风速无显

著相关性。

土壤呼吸速率与饱和水汽压差存在显著正相关关系,符合线性模型关系,即土壤呼吸随饱和水汽压差的增大而加强。饱和水汽压差和大气水势都是通过改变土壤水分状况而对土壤呼吸产生影响。

土壤呼吸速率与光合有效辐射存在显著正相关关系,且符合线性模型。井艳丽^[36]的研究表明光合有效辐射可以解释遮阴引起的土壤呼吸变异程度的 95%~99%,范连连等^[37]同样证明土壤呼吸与光合有效辐射之间的关系表现为正相关。光合有效辐射主要作用于植物的有机物质合成,从光能转化为化合物中储存的化学能,为植物各项生命活动提供动力保证。光合有效辐射的大小对地面接收的太阳辐射量产生影响,进而左右土壤温度,直接影响土壤呼吸。再者,光合有效辐射对植物光合作用、蒸腾强度及气孔开闭的影响间接改变土壤呼吸。

3.3 气象因子的综合作用对土壤呼吸的影响

土壤呼吸过程受到众多因素的综合影响。主成分分析表明,以土壤温度、气压、气温、光合有效辐射和饱和水汽压差为主要因子的第 1 主成分的贡献率为 71.362%,以土壤湿度为主要因子的第 2 主成分贡献率为 17.766%,累积贡献率为 89.128%,足以解释气象因子交互对土壤呼吸时间变异的影响机理。回归分析以这 6 个气象因子为自变量,土壤呼吸速率为因变量进行拟合,所得方程可以解释土壤呼吸速率 94.0%的时间变异情况,较单一因子模型高,说明气象因子综合模型对土壤呼吸速率变异的解释能更强。目前,绝大多数研究均围绕土壤呼吸速率与土壤温、湿度进行模型拟合。其中,余世钦等^[38]的研究表明华南地区 5 种人工幼林土壤温度在湿季能解释土壤呼吸 90.2%的变异,汪金松等^[39]的研究表明太岳山油松林土壤温、湿度双变量模型对土壤呼吸速率的解释能力为 0.70~0.78,可见气象因子的综合作用在复合模型的拟合上相比单因子和双因子模型具有更高的拟合优度,在进行土壤呼吸通量估算时气象因子的综合影响不可忽视。

参考文献

[1] ZHOU L Y, ZHOU X H, SHAO J J, et al. Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: A meta-analysis [J]. *Glob Change Biol*, 2016, 22(9): 3157–3169. doi: 10.1111/gcb.13253.

[2] HAN C X, LIU T X, DUAN L M, et al. Dynamic changes in soil

respiration of two vegetation types and their influencing factors in Horqin Sandy Land [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, 37(6): 1994–2004. doi: 10.5846/stxb201510031998.

韩春雪, 刘廷玺, 段利民, 等. 科尔沁沙地两种植被类型土壤呼吸动态变化及其影响因子 [J]. *生态学报*, 2017, 37(6): 1994–2004. doi: 10.5846/stxb201510031998.

[3] PENG F, XU M H, YOU Q G, et al. Different responses of soil respiration and its components to experimental warming with contrasting soil water content [J]. *Arct Antarct Alp Res*, 2015, 47(2): 359–368. doi: 10.1657/AAAR0014-018.

[4] WEI X H, ZHENG J, LIU G H, et al. The concept and application of carbon sequestration potentials in plantation forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 35(12): 3881–3885. doi: 10.5846/stxb201309252358.

魏晓华, 郑吉, 刘国华, 等. 人工林碳汇潜力新概念及应用 [J]. *生态学报*, 2015, 35(12): 3881–3885. doi: 10.5846/stxb201309252358.

[5] XIE Y J. A discussion on the contribution and sustainable management strategy of eucalypt development in China [J]. *Eucal Sci Technol*, 2016, 33(4): 26–31. doi: 10.13987/j.cnki.askj.2016.04.007.

谢耀坚. 论中国桉树发展的贡献和可持续经营策略 [J]. *桉树科技*, 2016, 33(4): 26–31. doi: 10.13987/j.cnki.askj.2016.04.007.

[6] HOU X H, NIU Z, HUANG N, et al. Carbon storage and value of carbon sinks of *Eucalyptus* in Guangdong Province [J]. *J NE For Univ*, 2012, 40(8): 13–17. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2012.08.004.

侯学会, 牛铮, 黄妮, 等. 广东省桉树碳储量和碳汇价值估算 [J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(8): 13–17. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2012.08.004.

[7] HOU L, LEI R D, WANG D X, et al. A review of soil respiration in forest ecosystem [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, 37(3): 589–594. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2006.03.041.

侯琳, 雷瑞德, 王得祥, 等. 森林生态系统土壤呼吸研究进展 [J]. *土壤通报*, 2006, 37(3): 589–594. doi: 10.3321/j.issn:0564-3945.2006.03.041.

[8] WEI S J, LUO B Z, SUN L, et al. Spatial and temporal heterogeneity and effect factors of soil respiration in forest ecosystems: A review [J]. *Ecol Environ*, 2013, 22(4): 689–704. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.04.024.

魏书精, 罗碧珍, 孙龙, 等. 森林生态系统土壤呼吸时空异质性及影响因子研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 689–704. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.04.024.

[9] HUANG X M, LIU S R, YOU Y M. Study on the soil respiration and its components of the second rotation *Eucalyptus* plantations in subtropical China [J]. *For Res*, 2014, 27(5): 575–582. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2014.05.001.

黄雪蔓, 刘世荣, 尤业明. 第二代桉树人工纯林和混交林土壤呼吸

- 及其组分研究 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(5): 575–582. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2014.05.001.
- [10] WU M, MA J M, LIANG S C, et al. Diurnal variation of soil respiration in 20-year-old *Eucalyptus* sp. forest in Yaoshan Mountain of Guilin, China [J]. J Ecol Rural Environ, 2014, 30(5): 620–626. doi: 1673-4831(2014)05-0620-07.
- 吴蒙, 马姜明, 梁士楚, 等. 桂林尧山地区20年生桉树林土壤呼吸昼夜变化特征 [J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5): 620–626. doi: 1673-4831(2014)05-0620-07.
- [11] ZHANG L. The soil microbial respiration and leaf litter's decomposition under four *Eucalyptus* plantation stands [D]. Kunming: Yunnan University, 2007: 34–39.
- 张磊. 巨尾桉等桉树林下土壤呼吸及其凋落物分解研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2007: 34–39.
- [12] ARCHMILLER A A, SAMUELSON L J, LI Y R. Spatial variability of soil respiration in a 64-year-old longleaf pine forest [J]. Plant Soil, 2016, 403(1/2): 419–435. doi: 10.1007/s11104-016-2817-1.
- [13] MANDE H K, ABDULLAH A M, ARIS A Z, et al. Factors responsible for spatial and temporal variation of soil CO₂ efflux in a 50 year recovering tropical forest, Peninsular Malaysia [J]. Environ Earth Sci, 2015, 73(9): 5559–5569. doi: 10.1007/s12665-014-3810-8.
- [14] FANG C, MONCRIEFF J B, GHOLZ H L, et al. Soil CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation [J]. Plant Soil, 1998, 205(2): 135–146. doi: 10.1023/A:1004304309827.
- [15] GAUMONT-GUAY D, BLACK T A, GRIFFIS T J, et al. Influence of temperature and drought on seasonal and interannual variations of soil, bole and ecosystem respiration in a boreal aspen stand [J]. Agric For Meteorol, 2006, 140(1/2/3/4): 203–219. doi: 10.1016/j.agrformet.2006.08.002.
- [16] HARTLEY I P, HEINEMEYER A, EVANS S P, et al. The effect of soil warming on bulk soil vs. rhizosphere respiration [J]. Glob Change Biol, 2007, 13(12): 2654–2667. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01454.x.
- [17] FERRÉ C, CASTRIGNANÒ A, COMOLLI R. Assessment of multi-scale soil-plant interactions in a poplar plantation using geostatistical data fusion techniques: Relationships to soil respiration [J]. Plant Soil, 2015, 390(1/2): 95–109. doi: 10.1007/s11104-014-2368-2.
- [18] SAIZ G, GREEN C, BUTTERBACH-BAHL K, et al. Seasonal and spatial variability of soil respiration in four Sitka spruce stands [J]. Plant Soil, 2006, 287(1/2): 161–176. doi: 10.1007/s11104-006-9052-0.
- [19] WAGN Y B, WANG Y H, XIONG W, et al. Variation in the sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and its impact factors in different slope positions in a semi-arid region of Liupan Mountains [J]. Sci Silv Sin, 2017, 53(6): 10–20. doi: 10.11707/j.1001-7488.20170602.
- 王艳兵, 王彦辉, 熊伟, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松树干液流速率及主要影响因子的坡位差异 [J]. 林业科学, 2017, 53(6): 10–20. doi: 10.11707/j.1001-7488.20170602.
- [20] YANG X J, DU J H, ZHANG C J, et al. Diurnal variations of water potential and its influencing factors in typical plant communities on coppice dunes of Pingtan Island [J]. Acta Ecol Sin, 2016, 36(9): 2614–2619. doi: 10.5846/stxb201411172277.
- 杨显基, 杜建会, 张楚杰, 等. 平潭岛典型海岸草从沙堆植物群落水势日变化特征及其影响因素 [J]. 生态学报, 2016, 36(9): 2614–2619. doi: 10.5846/stxb201411172277.
- [21] SHA L Q, ZHENG Z, TANG J W, et al. Soil respiration in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China [J]. Sci China Ser D Earth Sci, 2005, 48(S1): 189–197. Doi: 10.1360/05zd0019.
- [22] MO J M, ZHANG W, ZHU W X, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China [J]. Glob Change Biol, 2008, 14(2): 403–412. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01503.x.
- [23] WU H J, LIANG S C, TIAN F, et al. Study on soil respiration of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation under different management [J]. J SW For Univ, 2016, 36(5): 58–64. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2016.05.010.
- 吴华静, 梁士楚, 田丰, 等. 不同经营措施对尾巨桉人工林土壤呼吸的影响 [J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(5): 58–64. doi: 10.11929/j.issn.2095-1914.2016.05.010.
- [24] XIANG Y B, HU T X, ZHANG J, et al. Study on soil respiration in *Eucalyptus grandis* plantations with different densities in rainy area of western China [J]. J Nat Resour, 2011, 26(1): 79–88. doi: 10.11849/zrzyxb.2011.01.008.
- 向元彬, 胡庭兴, 张健, 等. 华西南屏区不同密度巨桉人工林土壤呼吸特征 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 79–88. doi: 10.11849/zrzyxb.2011.01.008.
- [25] CHEN J, XIAO Y H, CHEN B F, et al. The study of soil CO₂ flux of four forest types in Pearl River Delta [J]. Ecol Environ, 2011, 20(5): 860–864. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2011.05.013.
- 陈进, 肖以华, 陈步峰, 等. 珠江三角洲四种森林类型土壤 CO₂ 通量特征研究 [J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 860–864. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2011.05.013.
- [26] LUO Y Q, ZHOU X H, JIANG L F, QU L Y, ZHOU Y M, et al. Translated. Soil Respiration and the Environment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 72–77.
- 骆亦其, 周旭辉. 姜丽芬, 曲来叶, 周玉梅, 等. 译. 土壤呼吸与环境 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 72–77.
- [27] REY A, PEGORARO E, TEDESCHI V, et al. Annual variation in soil

- respiration and its components in a coppice oak forest in central Italy [J]. *Glob Change Biol*, 2002, 8(9): 851–866. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00521.x.
- [28] SHI G S, LIU Y H, KANG F F. Zaw of variation of soil respiration rates in warm temperate forests with forest types [J]. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2009, 31(3): 408–415, 436. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2009.03.006.
- 史广松, 刘艳红, 康峰峰. 暖温带森林土壤呼吸随林分类型及其微生境因子的变异规律 [J]. *江西农业大学学报*, 2009, 31(3): 408–415, 436. doi: 10.3969/j.issn.1000-2286.2009.03.006.
- [29] MA H P, GUO Q Q, LI J R, et al. Soil respiration and its affecting factors relative to type of forest in the Sygera Mountains of Southeast Tibetan Plateau [J]. *Acta Pedol Sin*, 2016, 53(1): 253–260. doi: 10.11766/trxb201504280131.
- 马和平, 郭其强, 李江荣, 等. 色季拉山 4 种林型土壤呼吸及其影响因子 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 253–260. doi: 10.11766/trxb201504280131.
- [30] DONG B. Effects of soil moisture on soil respiration in *Populus tremula* plantations in Southeast Shandong [J]. *J NW Agric For Univ (Nat Sci)*, 2012, 40(11): 131–138. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2012.11.031.
- 董彬. 土壤湿度对鲁东南杨树人工林地土壤呼吸的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(11): 131–138. doi: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2012.11.031.
- [31] JIANG Y, WANG B, WANG Y R, et al. Soil respiration in subtropical forests and model simulation of its relationships with soil temperature and moisture content [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(7): 1641–1648. doi: 10.13287/j.1001-9332.2010.0265.
- 姜艳, 王兵, 汪玉如, 等. 亚热带林分土壤呼吸及其与土壤温湿度关系的模型模拟 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(7): 1641–1648. doi: 10.13287/j.1001-9332.2010.0265.
- [32] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate [J]. *Tellus B Chem Phys Meteor*, 1992, 44(2): 81–99. doi: 10.3402/tellusb.v44i2.15428.
- [33] LIU S H, FANG J Y, KIYOTA M. Soil respiration of mountainous temperate forests in Beijing, China [J]. *Acta Phytocool Sin*, 1998, 22(2): 24–31.
- 刘绍辉, 方精云, 清田信. 北京山地温带森林的土壤呼吸 [J]. *植物生态学报*, 1998, 22(2): 24–31.
- [34] FENG C Y, LÜ S H, GAO J X, et al. Soil respiration characteristics of different vegetation types in the mountain areas of North China [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, 30(2): 20–26. doi: 10.3321/j.issn:1000-1522.2008.02.004.
- 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 20–26. doi: 10.3321/j.issn:1000-1522.2008.02.004.
- [35] QI Q, LI C R, XU J W, et al. Effects of environment factors on soil respiration rate in coastal protective forests [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2005, 3(4): 65–69. doi: 10.3969/j.issn.1672-3007.2005.04.012.
- 齐清, 李传荣, 许景伟, 等. 环境因子对海防林土壤呼吸速率的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(4): 65–69. doi: 10.3969/j.issn.1672-3007.2005.04.012.
- [36] JING Y L. Experimental study on regulating and controlling soil respiration by photosynthesis of *Fraxinus mandshurica* seedlings [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015: 21–47.
- 井艳丽. 水曲柳幼树光合作用调控土壤呼吸的实验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015: 21–47.
- [37] FAN L L, XIE J P, MA J, et al. Variation characteristics of herb layer carbon flux and soil respiration in southern edge of Junggar Basin, northwest China [J]. *Chin J Ecol*, 2013, 32(10): 2567–2573. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0280.
- 范连连, 谢继萍, 马健, 等. 准噶尔盆地南缘草本层碳通量及土壤呼吸的变化特征 [J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2567–2573. doi: 10.13292/j.1000-4890.2013.0280.
- [38] YU S Q, WANG X L, LIN Y B, et al. Soil respiration and its seasonal variation among five young plantations in south China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2015, 23(2): 176–182. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.02.009.
- 余世钦, 王晓丽, 林永标, 等. 华南地区 5 种人工幼林的土壤呼吸及其季节性变化 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2015, 23(2): 176–182. doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2015.02.009.
- [39] WANG J S, FAN J, ZHAO X H, et al. Soil respiration components and its controlling factors in a *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue Mountain, China [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, 49(2): 1–7. doi: 10.11707/j.1001-7488.20130201.
- 汪金松, 范娟, 赵秀海, 等. 太岳山油松人工林土壤呼吸组分及其影响因子 [J]. *林业科学*, 2013, 49(2): 1–7. doi: 10.11707/j.1001-7488.20130201.