

气象条件对长白山阔叶红松林 CO₂ 通量的影响*

关德新^{①**} 吴家兵^① 于贵瑞^② 赵晓松^① 韩士杰^① 金昌杰^①

(^①中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ^②中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 利用涡动相关技术观测资料和同步的气象要素监测资料, 探讨了温度、光合有效辐射和空气饱和差对长白山阔叶红松林生态系统 CO₂ 通量的影响, 结果表明, 白天 CO₂ 通量主要受光合有效辐射的制约, 二者符合 Michaelis-Menten 方程, 同时空气饱和差也有一定的影响, 空气越干燥, 光合吸收能力下降越明显, 这种敏感性在 6 月较显著. 该生态系统的暗呼吸强度主要受土壤温度的影响, 二者符合指数关系, 另外, 土壤温度对暗呼吸的影响还与季节有关, 在相同土壤温度下, 4~7 月的呼吸强度比 8~11 月的高. 日净碳交换与日平均气温符合指数关系. 通过 CO₂ 通量和温度, 光合有效辐射的年度变化规律发现, 森林生态系统碳交换的季节变化是温度和光照综合作用的结果, 其中 6 月份碳汇强度最大, 7, 8 月次之, 全年的净碳吸收量为 $-184 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$.

关键词 CO₂ 通量 气温 光合有效辐射 空气饱和差 阔叶红松林

大气 CO₂ 浓度的增加被认为是全球变暖的重要原因之一, 森林是陆地上面积最大的生态系统, 它通过光合作用吸收大量的大气 CO₂ 并可长期地储存于生态系统中, 所以森林生态系统 CO₂ 通量的研究成为全球变化研究的焦点之一^[1-3]. 由于森林树木高大, 以往的观测和实验方法很难完成生态系统尺度的 CO₂ 通量研究, 所以国内大量的研究都以森林生态系统的某个组分为对象, 如森林土壤^[4-8], 植物体或叶片^[9,10], 树干^[11]等, 或采用间接计算的方法^[12], 也有少量的研究用大气边界层动力学等方法进行生态系统尺度的 CO₂ 通量计算^[13], 但一般观测的持续时间

较短. 最近发展起来的涡动相关技术使得生态系统尺度的长期 CO₂ 通量的监测变为可能, 世界各地相继建立了森林 CO₂ 通量监测站, 逐渐形成了欧洲通量网 (CARBOEUROFLUX), 美洲通量网 (AMERIFLUX), 亚洲通量网 (ASIAFLUX) 等区域性观测网络, 都以涡动相关技术作为主要的观测方法, 2001 年统计的 140 个通量监测站中森林站就占了 80 个^[14], 涡动相关技术成为多个生物圈研究计划的基本手段. 我国的通量网 (CHINAFLUX) 于 2002 年建成, 其中包括 5 个森林监测站^[15].

无人干扰的天然林生态系统中, 林分结构和

2004-07-14 收稿, 2004-10-14 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)、国家重点基础研究发展规划项目(编号: 2002CB412501)、国家自然科学基金项目(批准号: 30370293)和中国科学院沈阳应用生态研究所领域前沿项目资助

** E-mail: guandexin@hotmail.com

空气饱和差 VPD 取值不同分别划分为 3 个区间, 根据方程(4)对数据进行拟合, 6~8 月拟合的指数方程系数 a_2, a_3 如图 2(a), (b)所示(其中 a_1 取表 1 中的值), 可以发现, 系数 a_2 和 a_3 对 VPD 的变化比较敏感, VPD 越大, a_2 和 a_3 越小, 即干燥的空气削弱了森林对大气 CO_2 的吸收速率, 空气越干燥, 吸收速率下降越大. 这可能是干燥的空气影响植物叶片的光合生理而导致的结果. 从 a_2 和 a_3 随 VPD 的变化规律可以发现, NEE 对 VPD 的敏感程度 6 月较强, 7, 8 月相对较弱.

Anthoni 等^[34]曾发现 NEE 随 VPD 的上升而下降的现象, 他们认为应在方程(4)右边加上 VPD 的线性订正项来描述其影响, 但我们认为 VPD 直接影响了叶片的光合作用, 改变了生态系统的生理生态特征, 所以应直接反映在方程的特征参数中, 使方程(4)的意义更加明确.

2.4 日平均气温对 CO_2 净交换量的影响

2003 年的逐日平均气温(26m 高度) T_d 与逐日净碳交换量(NEE_d)的关系如图 3 所示, 在 T_d 低于 $0^\circ C$ 时, 生态系统有微小的 CO_2 排放, NEE_d 平均在 $0.56 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. T_d 在 $0 \sim 10^\circ C$ 之间时, 随着 T_d 上升 NEE_d 负值增大, 但增加速度很小, T_d 高于 $10^\circ C$ 时, 随着 T_d 上升 NEE_d 负值迅速增大, NEE_d 与 T_d 的这种关系可以用指数方程表示为

$$NEE_d = 0.580 - 0.014 \exp(0.310 T_d), \quad (8)$$

样本数 $n = 321$, 相关系数 $R^2 = 0.851$, 可见方程较好

地反映了二者的关系.

从图 3 还可以发现, T_d 高于 $5^\circ C$ 时, NEE_d 观测值离散程度明显增加, 这是因为除了温度的影响外, NEE_d 还与生态系统的物候, 光合有效辐射(PAR), 空气湿度等因素有关.

2.5 与气温和 PAR 相关联的 CO_2 通量的季节变化

CO_2 通量月总量的年度变化如图 4 所示, 图中还绘出了月平均气温, PAR 月平均日总量的年度变化, 它们的季节动态有如下特点: 1~3 月, 气温在 $0^\circ C$ 以下, 森林植物处于休眠期, 土壤也处于冻结状态, 生态系统的生命活动极其微弱, 只有微弱的正的碳通量(释放 CO_2); 4 月的平均气温上升到 $6.8^\circ C$, 植物开始萌动和生长, 呼吸强度增强的同时也具有一定的光合吸收能力, CO_2 通量月总量接近于 0; 5~8 月是生态系统生长旺盛期, 随着温度上升和 PAR 的增大, 光合吸收能力超出呼吸释放量, 表现为明显的碳汇, 其中 6 月的净碳吸收最大($-114.4 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$), 这是因为该月的温度适宜, 光照充足, 7, 8 月次之($-82.5, -65.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$), 是因为阴雨日增多, 光照减低, 以及叶片老化等原因所致; 9 月温度下降, 叶片老化明显, 光合吸收能力下降, 有的树种开始落叶, CO_2 通量月总量接近于 0, 10 月以后进入寒冷的冬季, 温度较低, 生态系统的特点与 1~3 月相似, 有微弱的 CO_2 释放. 2003 年该生态系统净碳吸收量为 $-184 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$, 这与加拿大安大略省南部不足百年林龄落叶混交林 1996 年的观测结果($190 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$)^[35]相近.

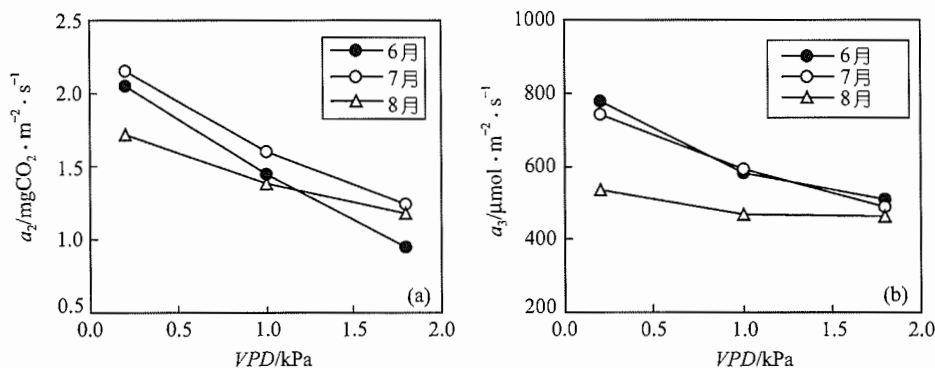
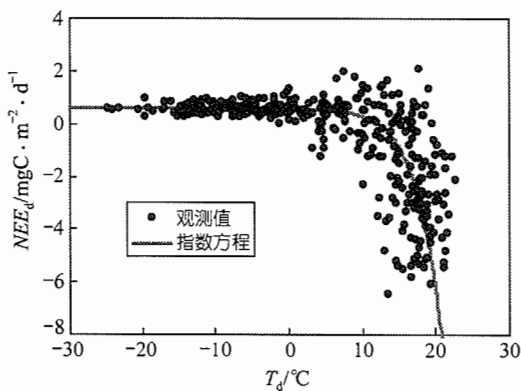
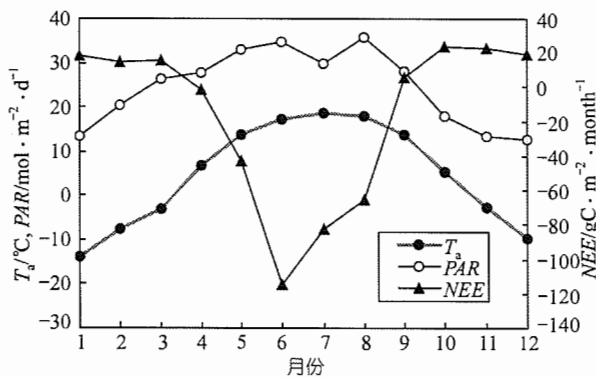


图 2 方程(4)系数 a_2 和 a_3 随 VPD 的变化(2003 年 6~8 月资料)

图3 日碳净交换量 NEE_d 与日平均气温 T_d 的关系图4 净碳交换月总量与气温 T_a 和 PAR 的协同季节变化

3 结论

温度, 光合有效辐射是影响森林生态系统 CO₂ 通量的主要环境因素, 在 2003 年的气候条件下, 长白山天然阔叶红松林生态系统的暗呼吸强度主要受土壤温度的影响, 二者符合指数关系, 但在相同土壤温度下, 4~7 月的呼吸强度比 8~11 月的高, 主要是由于物候和地温与气温的时滞造成的; 白天 CO₂ 通量主要受光合有效辐射的制约, 二者符合 Michaelis-Menten 方程, 同时空气饱和差也有一定的影响, 空气越干燥, 生态系统对 CO₂ 吸收能力下降就越多, 这种影响在 6 月较为明显。

CO₂ 通量的年动态是温度控制下的物候变化以及光照等环境条件综合作用的结果, 2003 年的观测结果表明, 长白山天然阔叶红松林生态系统 1~3 月和 10~12 月保持微弱的 CO₂ 释放, 4 月和 9 月碳收支近似平衡, 5~8 月为净碳吸收, 其中 6 月生态系统的净碳吸

收最大, 日平均气温与日净碳交换量的关系符合指数关系。

参 考 文 献

- 1 方精云, 朴世龙, 赵淑清. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇. 植物生态学报, 2001, 26: 594~602
- 2 于贵瑞, 牛 栋, 王秋凤. 《联合国气候变化框架公约》谈判中的焦点问题. 资源科学, 2001, 23(6): 10~16
- 3 吴家兵, 张玉书, 关德新. 森林生态系统 CO₂ 通量研究方法与进展. 东北林业大学学报, 2003, 31(6): 49~51
- 4 蒋高明, 黄银晓. 北京山区辽东栎林土壤释放 CO₂ 的模拟实验研究. 生态学报, 1997, 17(5): 476~482
- 5 刘绍辉, 方精云. 北京山地温带森林的土壤呼吸. 植物生态学报, 1998, 22(2): 119~126
- 6 骆士寿, 陈步峰, 李意德. 海南岛尖峰岭热带山地雨林土壤和凋落物呼吸研究. 生态学报, 2001, 21(12): 2013~2016
- 7 易志刚, 蚁伟民, 周国逸, 等. 鼎湖山三种主要植被类型土壤碳释放研究. 生态学报, 2003, 23(8): 1673~1678
- 8 刘建军, 王德祥, 雷瑞德, 等. 秦岭天然油松, 锐齿栎林地土壤呼吸与 CO₂ 释放. 林业科学, 2003, 39(2): 8~13
- 9 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林群落呼吸量初步测定. 林业科学研究, 1997, 10(4): 348~355
- 10 曾小平, 彭少麟, 赵 平. 广东南亚热带马占相思林呼吸量的测定. 植物生态学报, 2000, 24(4): 420~424
- 11 Wang W J, Yang F J, Zu Y G. Stem respiration of a larch plantation in northeast China. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(12): 1387~1397
- 12 方精云. 森林群落呼吸量的研究方法及其应用的探讨. 植物学报, 1999, 41(1): 88~94
- 13 陈步峰. 海南尖峰岭热带山地雨林近冠层 CO₂ 及其通量特征研究. 生态学报, 2001, 21(12): 2166~2172
- 14 Baldocchi D, Falge E, Gu L H, et al. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bull Am Meteorol Soc, 2001, 82(11): 2415~2434
- 15 Project Leader Chinese Ecosystem Network Synthesis Research Center, Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Observational Research Network. <http://www.chinaflux.org/>
- 16 Barford C C, Wofsy S C, Goulden M L, et al. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO₂ in a mid-latitude forest. Science, 2001, 294: 1688~1691
- 17 Schulze E D, Valentini R, Sanz M J. The long way from Kyoto to Marrakesh: implications of the Kyoto Protocol negotiations for global ecology. Global Change Biol, 2002, 8(6): 505~518
- 18 Baldocchi D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rate of ecosystem: past, present and future. Global Change Biol, 2003, 9: 479~492
- 19 Zhou G S, Wang Y H, Xu Z Z. Progress on NECT researches. Advances in Natural Sciences, 2003, 13(9): 917~922
- 20 Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measure-

- ments for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85~100
- 21 Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorol*, 2001, 99(1): 127~150
- 22 Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, et al. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 1994, 75 (1): 143~150
- 23 Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 1996, 2: 183~197
- 24 Pilegaard K, Hummelshøj P, Jensen N O, et al. Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agric For Meteorol*, 2001, 107: 29~41
- 25 Knohl A, Schulze A, Kolle O, et al. Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany. *Agric For Meteorol*, 2003, 95: 115~168
- 26 Guan D, Wu J, Zhao X, et al. Annual flux over old temperate mixed forest in North-eastern China. *Agric For Meteorol*, 2005 (in Press)
- 27 Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. *Science*, 1996, 271: 1576~1578
- 28 Black T A, den Hartog G, Neumann H H, et al. Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biol*, 1996, 2: 219~229
- 29 Jarvis P G, Massheder J M, Hale S E, et al. Seasonal variation of carbon dioxide, water vapor, and energy exchanges of a boreal black spruce forest. *J Geophys Res*, 1997, 102: 28953~28966
- 30 Lindroth A A, Grelle A, Moren A S. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. *Global Change Biol*, 1998, 4: 443~450
- 31 Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981~1991. *Nature*, 1997, 386: 698~702
- 32 Myneni R, Nemani R, Running S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 1380~1393
- 33 Randerson J T, Thompson M V, Conway T J, et al. The contribution of terrestrial sources and sinks to trends in the seasonal cycle of atmospheric carbon dioxide. *Global Biogeochem Cycles*, 1997, 11: 535~560
- 34 Anthoni P M, Law B E, Unsworth M H. Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. *Agric For Meteorol*, 1999, 95: 115~168
- 35 Lee X, Fuentes J D, Staebler R M, et al. Long-term observation of the atmospheric exchange of CO₂ with a temperate deciduous forest in southern Ontario. *Canada J Geophys Res*, 1999, 104: 15975~15984