

长白山阔叶红松林 CO₂ 通量与温度的关系赵晓松^{1,2}, 关德新^{1,*}, 吴家兵¹, 张 弥^{1,2}, 金昌杰¹, 韩士杰¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100093)

摘要:应用涡度相关法观测的通量数据和环境因子数据,在生态系统水平上分析了长白山阔叶红松林生长季温度与 CO₂ 通量之间的关系。结果表明:(1)在相同的光合有效辐射水平下,净生态系统 CO₂ 交换量(*NEE*)随温度 *Ta* 的变化趋势为,在 *Ta* < 20℃ 范围内,*NEE* 随温度的增加而增加,在 *Ta* = 20℃ 附近有极大值,随温度的继续增加 *NEE* 呈下降的趋势,同时 *NEE* 还具有明显的季节变化,表现为 7 月 > 6 月 > 8 月 > 9 月 > 5 月 > 4 月 > 10 月。(2)应用 Michaelis-Menten 方程计算得出最大光合速率 *P_{max}* 和生态系统呼吸 *Re*,分析其与温度的关系发现,*P_{max}* 随温度的变化呈 S 型曲线,*Re* 则随着温度的升高而呈指数上升的趋势,曲线为: $Re = 0.0607 \exp(0.0666 Ta)$, $R^2 = 0.96$ 。夜间生态系统呼吸的 *Q₁₀* 为 3.15。(3)通过对 *NEE* 与环境因子的偏相关分析表明,温度对 *NEE* 的偏相关系数在生长季呈现先减小后增大的趋势,说明在生长季初期和末期升高温度比生长季中期对 *NEE* 的影响要大。

关键词:涡度相关法; CO₂ 通量; 温度; 偏相关分析; 生态系统水平

文章编号:1000-0933(2006)04-1088-08 **中图分类号:**Q948 **文献标识码:**A

The relationship between CO₂ flux and temperature of the mixed forest of broad-leaved and Korean-Pine in Changbai Mountain

ZHAO Xiao-Song^{1,2}, GUAN De-Xin^{1,*}, WU Jia-Bing¹, ZHANG Mi^{1,2}, JIN Chang-Jie¹, HAN Shi-Jie¹ (Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016; Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10093, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1088 ~ 1095.

Abstract: Forested ecosystems cover a large expanse of the terrestrial area in the world, which represent a large global sink of CO₂, and strongly influence the dynamics of the global carbon cycle. In light of the current increase in atmospheric CO₂ and warming climate, it is crucial to understand the mechanisms that control some ecological progresses in the forest ecosystems. Studies of forest CO₂ uptake have increased rapidly, especially after tower flux networks were established. However, the perspectives on net CO₂ exchange at ecosystem-level are relatively new to plant ecophysiology.

In this study, based on eddy covariance system on tower, we continuously measured CO₂ flux in the mixed forest of broad-leaved and Korean-pine in Changbai Mountain in 2003. The relationship between CO₂ flux and temperature at ecosystem-level during the growing season was analyzed. The results were as follows:

(1) When air temperature was below 20℃ in the definite range of photosynthetic activity radiation (*PAR*), the higher air temperature, the higher net ecosystem CO₂ exchange (*NEE*). In contrast, when it was over 20℃, the higher air temperature, the lower *NEE*. This effect was significantly different amongst seasons. It was mainly controlled by plant physiology and leaf area

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30370293);中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-01-01A1)

收稿日期:2005-01-27; **修订日期:**2005-10-04

作者简介:赵晓松(1980-),女,蒙古族,内蒙古人,硕士,主要从事森林生态系统碳交换研究。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guan_dexin@126.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China(No. 30370293); The Key Project of CAS Knowledge Innovation Program(No. KZCX1-SW-01-01A1)

Received date: 2005-01-27; **Accepted date:** 2005-10-04

Biography: ZHAO Xiao-Song, Master, mainly engaged in carbon exchanged in forest ecosystem.

index.

(2) *NEE* includes photosynthesis and respiration of ecosystem. Maximum photosynthetic rate $P_{\max}$ and ecosystem respiration R_e were calculated by Michaelis-Menten equation. The relationship between $P_{\max}$ and air temperature exhibited S shaped curve, while R_e was exponential to air temperature.

(3) The effects of canopy *PAR*, air temperature and vapor pressure deficit (*VPD*) on *NEE* were estimated respectively by partial correlation analysis and of difference amongst seasons. Partial correlation coefficients of temperature on *NEE* were higher in early and late growing period than that in the middle of growing seasons. It suggested that temperature in early and late growing seasons had more significant effects on *NEE* than that in the middle of growing seasons. Thus, we could identify the dynamic role that temperature played in controlling ecosystem fluxes during early and late seasons.

Key words: eddy covariance; CO₂ flux; temperature; partial analysis; ecosystem-level

工业革命以来,由于人类活动的影响,大气中 CO₂ 等温室气体的浓度持续上升,全球气候将因此而发生巨大的变化。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change 2001)最近的预测结果表明,在未来 100a 内,全球表面温度将上升 1.4~5.8℃。森林生态系统作为陆地生态系统的主体,覆盖了全球陆地表面的 40%,在陆地生态系统碳循环中发挥着重要的作用^[1~4]。模型预测认为,气候变暖,森林的 CO₂ 汇水平将会发生变化^[5,6]。因此,温度对森林生态系统影响的机理性研究至关重要^[7~11]。近年来,随着通量观测塔的建立和用涡度相关法进行长期的连续观测的发展,森林 CO₂ 交换的研究不断增加^[12~19]。

在叶片和枝条尺度上有关温度对 CO₂ 交换影响的研究有很多报导^[20~22],但在生态系统水平上对净 CO₂ 交换的研究还很少^[23],特别是我国在这方面的研究尚处于起步阶段^[24]。长白山阔叶红松林是我国典型的温带植被类型,位于东北样带的东端,属对气候变化反应较敏感的地区^[25],中国通量网于 2002 年 8 月在此安装了先进的涡度相关通量观测系统,并进行了涡度通量数据的订正、环境因子对 CO₂ 通量影响等方面的研究^[26~29],但温度的影响研究还不够深入,本文将以此生态系统为研究对象,根据观测塔上环境因子和通量测量数据,在生态系统水平上分析生长季温度与 CO₂ 交换的关系,试图揭示温度的作用机制,为森林碳收支的研究提供基础。

1 材料与方法

1.1 实验地概况

本研究在中国科学院长白山森林生态系统定位站一号标准地阔叶红松林内进行(42°24'N, 128°6'E,海拔 738m)。年平均气温为 3.6℃,年平均降雨量 695mm。土壤为山地暗棕色森林土。观测场附近下垫面地势平坦,林型为成熟原始林,主乔木为红松(*Pinus koraiensis*)、椴树(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木(*Acer mima*)。林分为复层结构,下木覆盖度 40%,平均株高 26m,立木株数约 560 株/hm²。

1.2 观测方法

观测林地建有高 62m 的微气象观测塔,开路涡度相关系统的探头安装在 40m 高度上,由三维超声风温仪(CAST3, Campbell Inc., USA)和开路 CO₂/H₂O 分析仪(Li-7500, LiCor Inc., USA)组成,原始采样频率为 10Hz,数据传输给数据采集器(CR10X, Campbell Inc., USA)进行存储,同时进行 30min 的通量计算并存储。常规气象观测系统,包括 7 层风速(A100R, Vector Instruments, Denbighshire, UK)、7 层大气温度和湿度(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland),高度分别为 2.5m, 8m, 22m, 26m, 32m, 50m, 60m, 光合有效辐射设于 32m (LI-190Sb, LiCor Inc., USA),地温(105T, Campbell Inc., USA)设置深度为 0 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 100cm,通过数据采集器(CR23X and CR10X, Campbell Inc., USA)采集并按 30min 计算平均值进行存储。本文选取 2003 年 4 月 1 日到 10 月 31 日之间生长季的数据进行分析。

1.3 计算方法

根据涡度相关理论, CO_2 通量的表达式为:

$$F_c = \rho \overline{w' \xi'_c} \quad (1)$$

式中, ρ 为干空气密度, w 为垂直风速, ξ_c 为 CO_2 相对于干空气的混合比, $-$ 和 $'$ 分别表示时间平均和脉动值。根据三维超声风温仪和开路 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪观测的时间系列资料, 以 30min 为平均长度, 采用涡度相关方法实时计算 40m 高度的 CO_2 通量 F_c , 然而, 开路 CO_2 分析仪测得的是 CO_2 的浓度 ρ_c 而不是混合比。因此, 需要对原始的 CO_2 通量进行的密度脉动订正^[30]。

为了检验探头姿态, 采用三维旋转(3Drotation)和平面旋转(planar-fit rotation)方法进行了坐标订正^[28], 通量结果偏差很小, 年总量变化在 0.5% ~ 3.2%, 可以忽略不计。计算中还要考虑涡度相关系统探头高度以下 CO_2 浓度变化导致的 CO_2 储存, 因此净生态系统 CO_2 交换量(NEE)为:

$$NEE = F_c + F_s \quad (2)$$

式中, F_c 为测量的 CO_2 通量, F_s 为 CO_2 储存项。探头高度以下的大气 CO_2 储存项 F_s 利用 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪测定的 CO_2 浓度进行计算^[17,31-33]。

为了准确地反映生态过程, 对于天气异常及仪器本身的原因造成的不合理数据, 本文通过给定阈值予以剔除, 根据 NEE 数据的范围, 本研究给定阈值生长季为 $[-2, 2] \text{mgCO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。而对于夜间弱湍流条件下造成的通量低估现象, 本文通过剔除夜间摩擦速度 $u_* < 0.2 \text{ms}^{-1}$ 的通量数据来解决。临界摩擦速度 0.2ms^{-1} 是根据夏季(6~8月份)夜间的 CO_2 通量(NEE)与摩擦速度的经验关系确定的(如图1), 图中曲线为数据的四次回归方程, 根据曲线可以看出, $u_* > 0.2 \text{ms}^{-1}$ 时 NEE 基本稳定, 由此确定临界 u_* 为 0.2ms^{-1} 。这与其他地区森林的研究结果很相似^[14,34-36]。

在下文分析中, 白天净生态系统 CO_2 交换量(NEE)与光合有效辐射(PAR)的关系用 Michaelis-Menten 方程拟合^[17,37]:

$$NEE = Re - \frac{P_{\max} \cdot PAR}{K_m + PAR} \quad (3)$$

式中, $P_{\max}$ 为最大光合速率, Re 为生态系统呼吸, K_m 为 Michaelis-Menten 方程常数。本文中 NEE 为负表示生态系统吸收 CO_2 , NEE 为正表示释放 CO_2 。夜间 NEE 与土壤温度的关系用指数方程拟合^[17,37]:

$$NEE_n = b_1 \exp(b_2 T_s) \quad (4)$$

式中, NEE_n 为夜间净生态系统 CO_2 交换量, 即生态系统呼吸, T_s 为 5cm 土壤温度, b_1 、 b_2 为常数。 Q_{10} 值通过下式确定:

$$Q_{10} = \exp(10 \cdot b_2) \quad (5)$$

2 结果

2.1 气象条件

通过观测塔测得的气象因子(包括温度, 光合有效辐射, 饱和水汽压差 VPD 和降水)的变化情况如图 2 所示。生长季日平均 26m 气温和 5cm 土壤温度的变化如图 2a, 均呈现单峰型, 土壤温度的变化略滞后于气温的变化。生长季日平均气温和土壤温度的变化范围分别为 $-2.7 \sim 24.0^\circ\text{C}$ 和 $-0.1 \sim 18.4^\circ\text{C}$, 而半小时的气温和土壤温度的变化范围分别在 $-8.9 \sim 30.7^\circ\text{C}$ 和 $-0.2 \sim 18.9^\circ\text{C}$ 。日平均的最高气温和土壤温度分别出现在 6 月

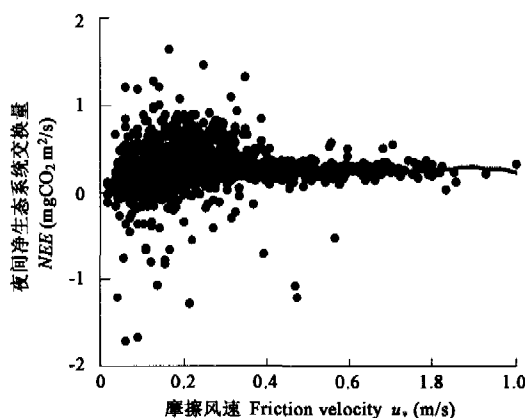


图1 生长季夜间摩擦风速与净生态系统 CO_2 交换量的关系

Fig.1 Relationship between friction velocity and NEE in the night during growing season

和 8 月份。日平均的光合有效辐射的范围在 $31 \sim 647 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间(图 2b),大致呈双峰型趋势,在 6、7、8 月份出现较多的相对低值,这是由于雨季阴雨天增多的缘故。VPD 变化在 $0.01 \sim 1.36 \text{kPa}$ 范围内(图 2c),生长季初期较大,进入雨季,在 7 月达到最低值,然后又开始增加。生长季降雨主要集中在 6、7、8 月份(图 2d),其中 7 月降雨最多为 179.7mm ,占整个雨季降雨的 38.5% 。

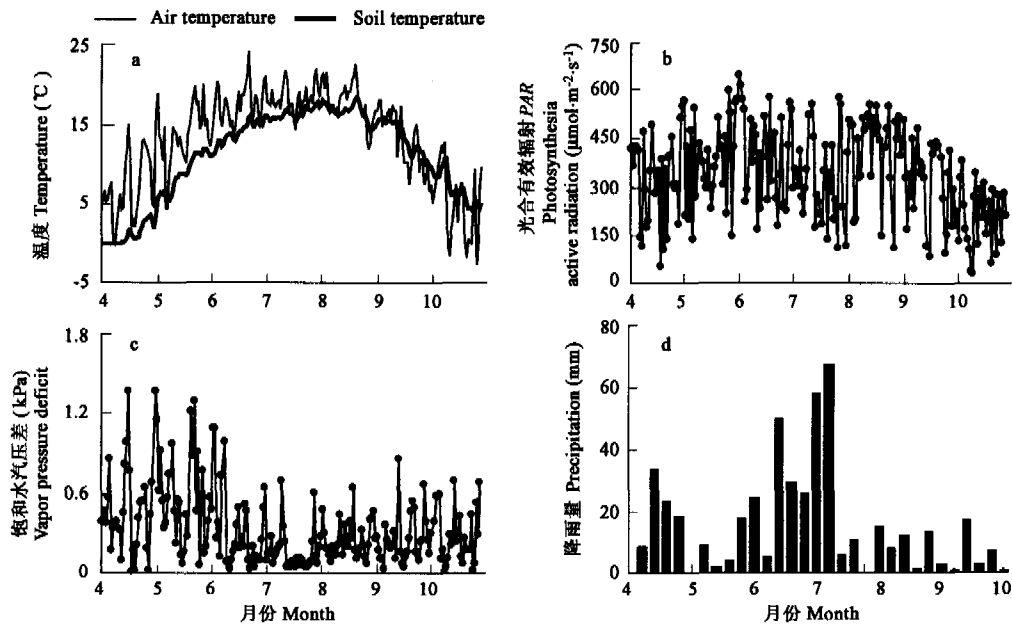


图 2 气象因子变化

Fig.2 Dynamics of meteorological factors

a 为 26m 气温 T_a 和 5cm 土壤温度 T_s Air temperature in 26m height and soil temperature in 5cm depth; b 为光合有效辐射 Photosynthesis activity radiation; c 为饱和水汽压差 Vapor pressure deficit; d 为降水 Precipitation

2.2 不同光合有效辐射(PAR)水平下白天 NEE 随温度的变化

生长季的白天森林群落以光合作用为主,主要受光合有效辐射(PAR)和温度的影响。为了分析温度对 NEE 的影响,把 PAR 划分为 4 个水平,分别是 $0 \sim 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $500 \sim 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, $1000 \sim 1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $> 1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,分别分析白天 NEE 随气温的变化(如图 3 所示)。当 PAR 在 $0 \sim 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围时(图 3a),NEE 随温度没有明显的变化,围绕 0 值上下波动,只是当温度升高时波动较大,这是由于此时光强较弱,光合作用能力低,光合和呼吸作用水平相当,NEE > 0 表示呼吸作用大于光合作用,即生态系统释放 CO₂,反之则为吸收 CO₂。PAR 在 $500 \sim 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围时(图 3b),当气温 $T_a < 10^\circ\text{C}$ 时,NEE 的绝对值随温度的升高而缓慢增加;而气温 $10^\circ\text{C} < T_a < 20^\circ\text{C}$ 时,NEE 的绝对值随温度的升高而呈指数上升;气温 $T_a > 20^\circ\text{C}$,NEE 随温度又略有下降。PAR 在 $1000 \sim 1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围时(图 3c),NEE 随温度的变化趋势与 PAR 在 $500 \sim 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围时相一致,但由于 PAR 增大,引起光合速率的增强,所以 NEE 的值较之增大。当 PAR $> 1500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时(图 3d),多为晴天正午,数据主要集中在高温区,由于水分等条件限制,光合能力减弱,NEE 比图 3c 中小,但仍然存在气温 $T_a > 20^\circ\text{C}$ 时 NEE 下降的趋势。

NEE 随气温的变化也具有明显的季节变化,以 PAR 在 $500 \sim 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围为例说明其变化趋势,图 4 为该 PAR 水平下月平均 NEE 和气温的季节变化,气温随季节呈单峰曲线,同时气温和 NEE 具有明显的负相关关系。从图 4 可以看出,从 4 月到 7 月,生态系统的 CO₂ 吸收量逐渐增加,最大值出现在 7 月,8 月到 10 月又逐渐减小,且 6 月大于 8 月,大小排序为 7 月 $>$ 6 月 $>$ 8 月 $>$ 9 月 $>$ 5 月 $>$ 4 月 10 月。这主要是 NEE 受植物生理活性和叶面积指数影响的结果。

2.3 温度对 P_{max} 和 R_e 的影响

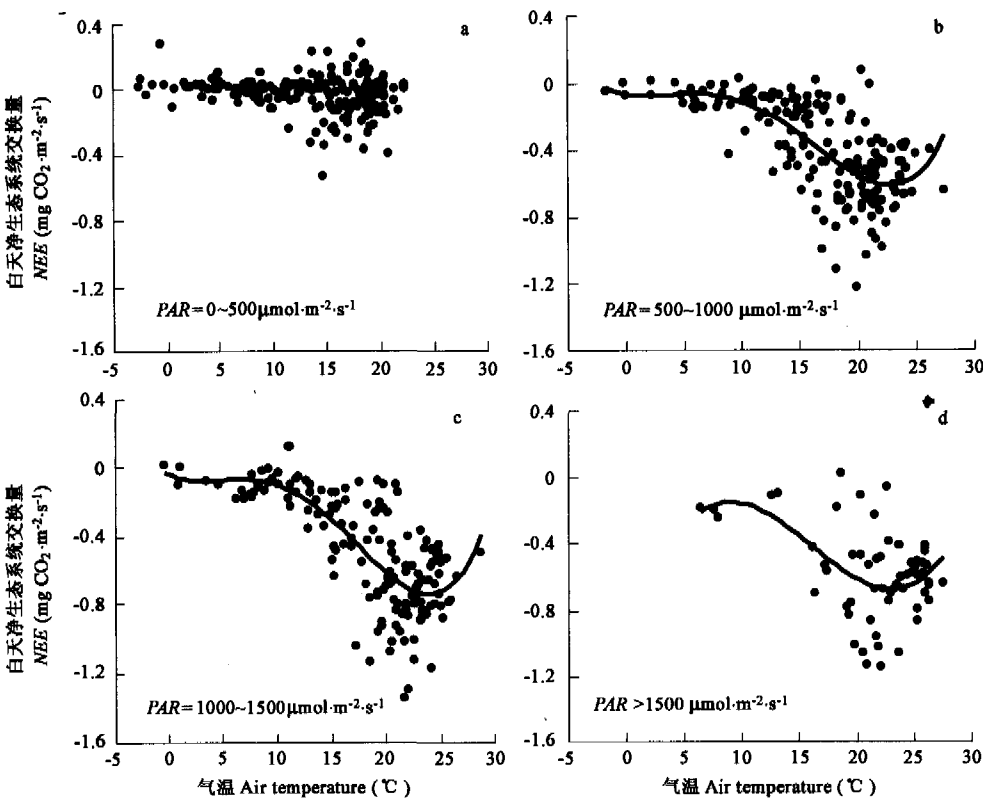


图3 不同光合有效辐射条件下 NEE 随温度的变化

Fig.3 Variation of NEE with air temperature under different ranges of photosynthesis active radiation

NEE 为净生态系统 CO₂ 交换量,它是光合作用和呼吸作用之差。为了更好地说明图 3 中的现象,把气温划分为 7 个梯度范围,分别是 < 0℃, 0 ~ 5℃, 5 ~ 10℃, 10 ~ 15℃, 15 ~ 20℃, 20 ~ 25℃, 25 ~ 30℃。根据方程 (3)应用最小二乘法,求算 7 个温度区间的 $P_{\max}$ 和 R_e 。 $P_{\max}$ 和 R_e 分别代表生态系统的光合和呼吸作用。结果如图 5 所示, $P_{\max}$ 随温度的变化曲线呈 S 型,总的趋势是随温度的升高而增加,在 10℃ 以下, $P_{\max}$ 随温度增加很慢,而在 10 ~ 20℃ 范围内, $P_{\max}$ 随温度迅速上升,大于 20℃ 时, $P_{\max}$ 变化平稳,几乎不再随温度升高而增加。

R_e 则随温度的升高而呈指数上升的趋势,拟合曲线为: $R_e = 0.0607 \exp(0.0666 T_a)$, $R^2 = 0.96$ 。结合两条曲线,可以解释图 3 中的现象,当温度 $T_a < 20^\circ\text{C}$ 时,光合和呼吸速率同时增加,但光合速率大于呼吸,所以 NEE 呈增加的趋势;而当温度 $T_a > 20^\circ\text{C}$ 时,光合不再增加而呼吸仍呈指数上升,此时 NEE 开始下降。同时可以推断,在低温区升温,生态系统吸收 CO₂ 能力增强,而在高温区升温则生态系统 CO₂ 能力有下降的趋势。

夜间 NEE 与 5cm 土壤温度有很好的相关关系,为了与白天的 R_e 与温度的关系进行比较研究,把夜间 NEE 按 < 0, 0 ~ 5, 5 ~ 10, 10 ~ 15, 15 ~ 20℃ 的 5cm 土壤温度区间求平均。得到夜间 NEE 随温度的关系(如图 6)为: $NEE_n = 0.0571 \exp(0.1147 T_s)$, $R^2 = 0.98$ 。呼吸强度大于白天计算值。

生长季,夜间 NEE 即生态系统呼吸的 Q_{10} 为 3.15。生态系统呼吸包括土壤呼吸和植物体呼吸,因此生态系统呼吸应该为二者的加权平均。根据王森^[38]得到阔叶红松林的土壤呼吸 Q_{10} 为 3.64,不同径阶红松树干呼

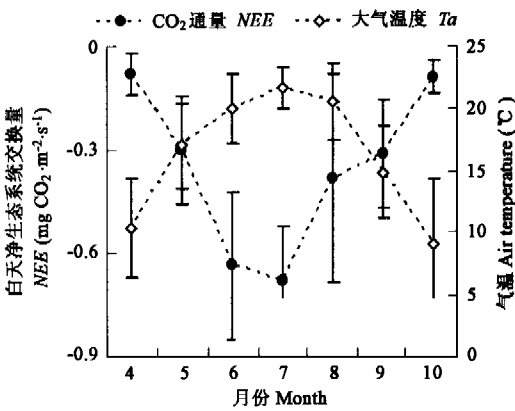


图4 PAR 在 500 ~ 1000 μmol · m⁻² · s⁻¹ 范围内 NEE 和气温的季节变化
Fig.4 Seasonal variation of NEE and air temperature in the range of 500 ~ 1000 μmol · m⁻² · s⁻¹ of photosynthetic activity radiation

呼吸强度大于白天计算值。

吸 Q_{10} 值在 2.56 ~ 3.32 之间。本研究的 Q_{10} 在二者之间, 比较合理。但却远大于 Huxman^[23] 亚高山针叶林生态系统呼吸的 Q_{10} (1.53 ~ 1.87)。

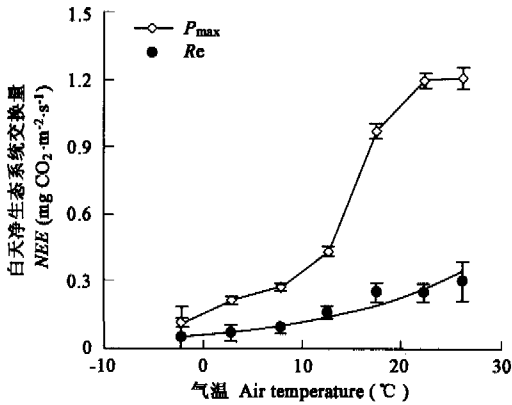


图 5 白天 $P_{\max}$ 和生态系统呼吸 Re 随温度的变化

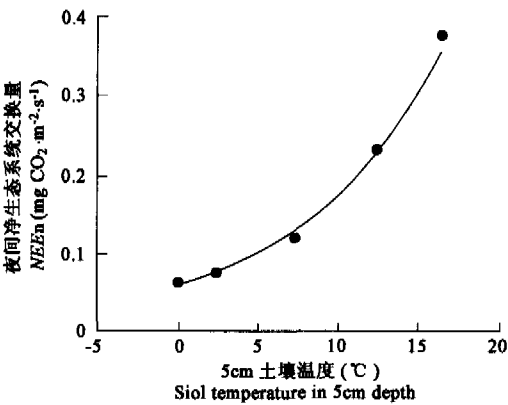


图 6 夜间生态系统呼吸和土壤温度的关系

Fig.5 Variation of $P_{\max}$ and ecosystem respiration Re with air temperature Fig.6 Relationship between night ecosystem respiration and soil temperature

2.4 NEE 与环境因子的偏相关分析

净生态系统 CO₂ 交换量是受温度、光合有效辐射和水汽饱和压差 (VPD) 等多种因子的影响。为了综合评价环境因子对 NEE 的影响, 对主要因子与 NEE 做偏相关分析。结果表明 (图 7), 环境因子对 NEE 的影响随着季节变化而变化。如果固定 PAR 和 VPD 的影响, 分析温度与 NEE 的关系, 其偏相关系数有从生长季初期到中期呈逐渐降低的趋势, 到生长季末期又逐渐升高, 其中 7 月的值最小。如果固定温度和 VPD 的影响, PAR 与 NEE 偏相关系数则呈从生长季初期到中期逐渐升高, 8 月达到最大, 然后下降的趋势。如果固定温度和 PAR 的影响, VPD 与 NEE 的关系波动性较大, 主要受生长季降雨的影响, 在 7、8 月份降雨多时偏相关系数较小。在整个生长季, 温度与 NEE 的偏相关系数都比 PAR 与 NEE 的要小, 这是由于生长季光合作用强度大于呼吸强度, 生态系统表现为净 CO₂ 吸收。而温度对 NEE 的偏相关系数在生长季表现为两端高中间低的趋势, 说明在生长季初期和末期温度升高对 NEE 的影响要比生长季中期升温对 NEE 的影响大。

3 结论

在生长季白天, 森林生态系统 CO₂ 交换主要受光合有效辐射 (PAR) 和温度的影响。分析相同 PAR 水平温度对 NEE 的影响, 如 PAR 在 500 ~ 1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, 当气温 $T_a < 10^\circ\text{C}$ 时, NEE 的绝对值随温度的升高而缓慢增加; 气温 $10^\circ\text{C} < T_a < 20^\circ\text{C}$ 时, NEE 的绝对值随温度的升高而呈指数上升; 而气温 $T_a > 20^\circ\text{C}$ 时, NEE 随温度又略有下降。在同一 PAR 水平下, NEE 随温度的季节变化表现为 7 月 > 6 月 > 8 月 > 9 月 > 5 月 > 4 月 > 10 月, 这主要是 NEE 受植物的生理活性和叶面积指数影响的缘故。

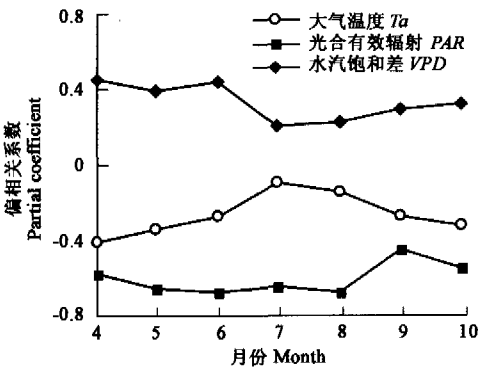


图 7 NEE 与环境因子的偏相关系数

Fig.7 Partial correlation coefficients of NEE with environmental factors

$P_{\max}$ 随温度的变化曲线呈 S 型, 总的趋势是随温度的升高而增加。 Re 则随温度的升高而呈指数上升的趋势, 拟合曲线为: $Re = 0.0607 \exp(0.0666T_a)$, $R^2 = 0.96$ 。夜间 NEE 与 5cm 土壤温度的关系为: $NEEn = 0.0571 \exp(0.1147 T_s)$, $R^2 = 0.98$ 。呼吸强度大于白天计算值, 其原因还需进一步探索。生长季夜间生态系统呼吸的 Q_{10} 为 3.15。

通过对主要环境因子与 NEE 的偏相关分析发现, 环境因子对 NEE 的影响随着季节变化而变化。当固定

PAR 和 *VPD* 对 *NEE* 的影响,生长季温度与 *NEE* 的偏相关系数呈现两端高中间低的趋势,说明在生长季初期和末期温度升高对 *NEE* 的影响要比生长季中期升温对 *NEE* 的影响大。

References:

- [1] Houghton J T. The role of forests in affecting the greenhouse gas composition of the atmosphere. In: Wyman R L ed. Global climate change and life on earth. Chapman & Hall, New York, USA, 1991. 43 ~ 56.
- [2] Pacala S W, Hurtt G C, Baker D, *et al.* Consistent land- and atmosphere based US carbon sink estimates. *Science*, 2001, 292:2316 ~ 2320.
- [3] Schimel D S, House J I, Hibbard K A, *et al.* Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414:169 ~ 172.
- [4] Wisniewski J, Lugo A E. Natural sinks of CO₂. Kluwer Academic, Dordrecht Wofsy SC, Daube, 1992.
- [5] Schimel D S, Brawell B H, Holland E A, *et al.* Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochem Cycles*, 1994, 8:279 ~ 293.
- [6] Grace S, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, 404:819 ~ 820.
- [7] Canadell J G, Mooney H A, Baldocchi DD, *et al.* Carbon metabolism of the terrestrial biosphere: a multi-technique approach for improved understanding. *Ecosystems*, 2000, 3: 115 ~ 130.
- [8] Field C B. Diverse controls on carbon storage under elevated CO₂: toward a synthesis. In: Luo Y, Mooney HA (eds) Carbon dioxide and environmental stress. Academic Press, New York, 1999. 373 ~ 392.
- [9] Keeling C D, Whorf T P. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: Trends: a compendium of data on global change carbon dioxide. Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn, 1998.
- [10] Law B E, Godstein A H, Anthoni P M, *et al.* Carbon dioxide and water vapor exchange by young and old ponderosa pine ecosystems during a dry summer. *Tree Physiol.*, 2001, 21:299 ~ 308.
- [11] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, *et al.* Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, 1996, 271:1402 ~ 1406.
- [12] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, *et al.* Estimates of the annual net carbon and water exchanges of European forests: the EUROFLUX methodology. *Adv Ecol Res.*, 2000, 30:113 ~ 174.
- [13] Baldocchi D D, Vogel C A, Hall B. Seasonal variation of carbon dioxide exchange rates above and below a boreal jack pine forest. *Agric For Meteorol.*, 1997, 83:147 ~ 170.
- [14] Black T A, DenHartog 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.
- [15] Goldstein A H, Hultman N E, Fracheboud J M, *et al.* Effects of climate variability on the carbon dioxide, water and sensible heat fluxes above a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada (CA). *Agric For Meteorol.*, 2000, 101:113 ~ 129.
- [16] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, *et al.* Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biol.*, 1996, 2:169 ~ 182.
- [17] Greco S, Baldocchi D D. Seasonal variations of CO₂ and water vapor exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biol.*, 1996, 2:183 ~ 197.
- [18] Monson R K, Turnipseed A A, Sparks J P, *et al.* Carbon sequestration in a high elevation subalpine forest. *Global Change Biol.*, 2002, 8:459 ~ 478.
- [19] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, *et al.* Net exchange of CO₂ in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260:1314 ~ 1317.
- [20] Smith W K, Knapp A K. Ecophysiology of high elevation forests. In: Osmond CB, Pitelka LF, Hidy GM eds. Plant biology of the basin and range. Springer, Berlin Heidelberg New York, 1990. 87 ~ 142.
- [21] Teskey R O, Sheriff D W, Hollinger D Y, *et al.* External and internal factors regulating photosynthesis. In: Smith WK, Hinkley TM eds Resource physiology of conifers. Academic Press, San Diego, Calif., 1995. 105 ~ 140.
- [22] Day T A, Heckathorn S A, DeLucia E H. Limitations of photosynthesis in *Pinus taeda* L. (loblolly pine) at low temperatures. *Plant Physiol.*, 1991, 96: 1246 ~ 1254.
- [23] Huxman T E, Turnipseed A A, Sparks J P, *et al.* Temperature as a control over ecosystem CO₂ fluxes in a high-elevation, subalpine forest. *Oecologia*, 2003, 134:537 ~ 546.
- [24] Wu J B, Zhang Y S, Guan D X. Method and progress of research on CO₂ flux of forest ecosystem. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(6): 49 ~ 51.

- [25] Zhou G S, Wang Y H, Xu Z Z, *et al.* Advanced in C cycle of Northeast China Transect (NECT). *Progress in Natural Science*, 2003, 13(9): 917 ~ 922.
- [26] Wu J B, Guan D X, Zhao X S, *et al.* Impacts of time series correction on CO₂ flux above forest. *Chin J Appl Ecol*, 2004, 15(10): 1833 ~ 1836.
- [27] Guan D X, Wu J B, Yu G R, *et al.* Influences of meteorological factors on CO₂ flux above the mixed forest of broad-leaved and Korean-pine in Changbai Mountain. *Science in China-D*, 2004, supp(2): 103 ~ 108.
- [28] Wu J B, Guan D X, Sun X M, *et al.* Eddy flux corrections for CO₂ exchange in broad-leaved Koreanpine forest of Changbai Mountains. 2004, *Science in China-D*, 2004, supp(2): 95 ~ 102.
- [29] Wen X F, Yu G R, Sun X M. Uncertainties in long-term studies of net ecosystem CO₂ exchange with the atmosphere based on eddy covariance technique. *Advances in Earth Science*, 2004, 19(4): 658 ~ 663.
- [30] Web E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 1980, 106: 85 ~ 100.
- [31] 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, 5(1): 143 ~ 150.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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: 28,953 ~ 28,966.
- [36] 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.
- [37] Song X, Liu Y F, Xu X F, *et al.* Comparison study on carbon dioxide, water and heat fluxes of the forest ecosystem in red earth hilly zone over winter and spring. *Resource Science*, 2004, 26(3): 97 ~ 104.
- [38] Wang M, Ji L Z, Li Q R, *et al.* Stem respiration of *Pinus koraiensis* in Changbai Mountains. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(1): 7 ~ 13.

参考文献:

- [24] 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.
- [25] 周广胜, 王玉辉, 许振柱, 等. 东北样带碳循环研究进展. *自然科学进展*, 2003, 13(9): 917 ~ 922.
- [26] 吴家兵, 关德新, 赵晓松, 等. 时间系列修订对森林 CO₂ 通量的影响. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1833 ~ 1836.
- [27] 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 气象条件对长白山阔叶红松林 CO₂ 通量的影响. *中国科学 D(增刊)*, 2004, 103 ~ 108.
- [28] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林 CO₂ 交换的涡度通量修订. *中国科学 D(增刊)*, 2004, 95 ~ 102.
- [29] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的不确定性. *地球科学进展*, 2004, 19(4): 658 ~ 663.
- [37] 宋霞, 刘允芬, 徐小锋, 等. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析. *资源科学*, 2004, 26(3): 97 ~ 104.
- [38] 王森, 姬兰柱, 李秋荣, 等. 长白山地区红松树干呼吸的研究. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 7 ~ 13.