

华北低丘山地人工林生态系统净碳交换 与气象因子的关系

同小娟^{1,2}, 张劲松^{2,*}, 孟 平², 尹昌君², 高 峻², 黄 辉², 国 琳²

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 中国林业科学研究院林业研究所 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 植树造林使我国森林碳储量显著增加, 人工林潜在的碳汇功能不容忽视。基于涡度相关技术, 对华北低丘山地 30 年生栓皮栎-刺槐-侧柏人工混交林生态系统进行了连续 2a 的碳通量观测, 以探讨净碳交换 (NEE) 与气象因子的关系。结果表明: 在主要生长季 (4~9 月份), 夜间日平均 NEE (生态系统呼吸) 随气温升高呈指数增长 ($P < 0.01$)。2006 年和 2007 年生态系统呼吸的温度敏感系数 (Q_{10}) 分别为 1.92 和 1.86。气温在 10℃ 以下时, NEE 日总量较小。气温超过 10℃ 后, 人工林以净吸收大气 CO_2 为主, 且日吸收量随温度升高迅速增加。白天净碳吸收量随光合有效辐射 (PAR) 增加而增大 ($P < 0.01$), 可由直角双曲线方程描述; 不过, 当饱和差 (VPD) 小于 1.0 kPa 时, 二者呈线性相关 ($P < 0.01$)。2006 年和 2007 年主要生长季 (4~9 月份) 的平均表观初始光能利用率 (α) 分别为 0.032 和 0.019, 平均最大光合速率 (P_{max}) 分别为 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 α 和 P_{max} 都存在季节变化。在月尺度, P_{max} 与 VPD 和 PAR 呈明显的负相关关系 (分别为 $P < 0.01$ 和 $P < 0.05$), 但与气温相关性不显著; α 与对应的 PAR 、气温和 VPD 均无明显相关关系。

关键词: 人工林; 净生态系统碳交换; 涡度相关; 光合有效辐射; 气温; 饱和差

文章编号: 1000-0933 (2009) 12-6638-08 中图分类号: S718.51 文献标识码: A

Relationship between net ecosystem carbon exchange and meteorological factors in a plantation in the hilly area of the North China

TONG Xiao-Juan^{1,2}, ZHANG Jin-Song^{2,*}, MENG Ping², YIN Chang-Jun², GAO Jun², HUANG Hui², GUO Lin²

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Research Institute of Forestry, CAF; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12): 6638 ~ 6645.

Abstract: In China, the potential carbon sink of plantation could not be neglected because forest carbon storage increased significantly by afforestation in recent decades. In this study, CO_2 flux was measured continuously using the eddy covariance technique over a 30-year aged mixed plantation in the hilly zone of the North China from 2006 to 2007. The major tree species are *Quercus variabilis*, *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis*. The relationships between net ecosystem carbon exchange (NEE) and main meteorological factors were investigated. The results showed that daily mean nighttime NEE increased exponentially with an increase of air temperature ($P < 0.01$). The temperature sensitivity (Q_{10}) of ecosystem respiration was 1.92 in 2006 and 1.86 in 2007. On daily scale, NEE varied within a small range of $\pm 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ when air temperature was lower than 10℃. Daily net carbon uptake by plantation increased obviously with air temperature when air temperature was more than 10℃. In the main growing season (April-September), daytime net carbon uptake was positively related with photosynthetically active radiation (PAR). The relationship between NEE and PAR could be expressed by the rectangular hyperbolic function. However, there was a linear relationship between NEE and PAR when vapor pressure deficit (VPD) was less than 1.0 kPa. In the main growing season, the apparent initial light use efficiency

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题资助项目 (2006BAD03A11); 国家科技部科研院所社会公益研究专项资助项目 (2003DIB4J142); 黄河小浪底森林生态系统定位研究站基金资助项目

收稿日期: 2009-07-23; 修订日期: 2009-10-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangjs@caf.ac.cn

(α) averaged 0.032 in 2006 and 0.019 in 2007. The maximal assimilation rate ($P_{\max}$) averaged $0.96 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in 2006 and $1.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ in 2007. Seasonal variation of $P_{\max}$ and α was obvious. On monthly scale, $P_{\max}$ had negative correlations with VPD ($P < 0.01$) and PAR ($P < 0.05$) but was not related with air temperature. No significant correlation could be found between α and PAR , VPD and air temperature.

Key Words: plantation; net ecosystem carbon exchange; eddy covariance; photosynthetically active radiation; air temperature; vapor pressure deficit

森林是陆地生态系统最大的植物碳库,也是重要的大气碳汇之一。在我国,长期植树造林使森林覆盖率有了较大提高,人工林面积已达森林总面积的 30%,其潜在的碳汇功能不容忽视。我国森林碳储量的增加主要是人工造林的结果^[1]。与天然林相比,人工林具有生长迅速、生长量大的特点。这决定了人工林有别于天然林的碳交换特征及影响机制。开展人工林碳交换及其环境响应研究对我国陆地生态系统碳循环和全球变化研究具有重要意义。

为精确估算陆地生态系统的碳收支状况,有必要对生态系统的碳通量进行长期监测。涡度相关技术为获得长期的碳通量数据提供了有效工具。基于涡度相关技术,人们研究了包括人工林在内的各类森林生态系统净碳交换量(NEE)的季节、年际变化及其与气象因子的关系^[2~8]。在未来气候变暖背景下,森林生态系统的碳汇水平将发生变化^[9]。研究气象条件对森林生态系统 NEE 的影响,有助于加深对碳的源汇过程的了解,并为进一步开展森林碳循环过程的模拟和气候变化情景下的预测研究奠定基础。目前森林生态系统 NEE 与气象因子关系的研究主要集中于温带、中亚热带和热带气候区^[3~6,10~12],对暖温带森林尤其是暖温带山地人工林 NEE 与气象因子的关系等方面研究则很少。本研究利用涡度相关法对位于暖温带亚湿润区的华北低丘山地人工林生态系统碳通量进行了连续两年的观测,探讨了光合有效辐射(PAR)、气温和饱和差(VPD)对 NEE 的影响,旨在为今后开展区域尺度人工林碳交换的模拟和预测研究提供理论依据和数据支持。

1 实验区概况和方法

1.1 实验区概况

本实验在国家林业局黄河小浪底森林生态系统定位研究站($35^{\circ}01'N$, $112^{\circ}28'E$, 410 m elev)进行。该站位于河南省济源市,地处黄河中游,紧连太行山。所在地区属暖温带亚湿润季风气候,4~9 月份盛行风向为东北风。年平均气温 $12.4 \sim 14.3^{\circ}\text{C}$,全年日照时数为 2367.7 h,年平均降水量 641.7 mm,且季节分配不均,6~9 月份降水量占全年的 68.3%。主要树种为栓皮栎(*Quercus variabilis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等,林龄分别为 32、30 a 和 28 a,平均株高分别为 10.5、8.2 m 和 9.3 m。土壤主要为棕壤和石灰岩风化母质淋溶性褐土。

通量观测塔位于站区中心偏西方向的栓皮栎、侧柏、刺槐团状混交样地内。塔周围 1.8 km^2 范围平均坡度约 14° ,林木覆盖率为 96.0% 左右,栓皮栎、侧柏、刺槐所占比例分别约为 80%、8% 和 12%。

1.2 CO_2 通量和微气象观测

涡度相关系统安装在观测塔的东北方向,高度为 30.0 m,主要由 CSAT3 三维超声风速仪(Campbell Sci. Inc., USA)和 LI-7500 红外 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-Cor Inc., USA)等组成,测定三维风速、温度、湿度和 CO_2 浓度。原始数据采样频率为 10 Hz,由 CR5000 数据采集器(Campbell Sci. Inc., USA)记录和保存。

微气象梯度观测系统包括 7 层 AR-100 风速计(vector instruments, UK)和 7 层 HMP-45C 型温湿度传感器(Vaisala, Finland)(安装高度分别为 8、9、11、14、18、26、30 m)。此外,在 27 m 高度处,安装了 CNR-1 型净辐射表和 CM11 型总辐射表(kipp and zonen)、Li-190SB 型光量子表(Li-Cor Inc., USA)、气压计和雨量计(Model 52203, RM Young, Inc)等。上述仪器均与 CR23x 型数据采集器(Campbell Sci., USA)相连,每 30 min 输出一组平均值。

1.3 数据处理

涡度相关法是通过直接测量温度、湿度、风速和气体浓度的脉动来确定动量、热量、水汽和微量气体的通量。根据雷诺原理, CO_2 的垂直通量(F_c)可由下式表示:

$$\overline{F_c} = \overline{w'c'} \quad (1)$$

式中, w' 为垂直风速, c' 为 CO_2 的摩尔浓度。

净生态系统碳交换(NEE)可由下式得出:

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

式中, F_c 为 CO_2 湍流通量, F_s 为涡度相关仪器观测高度以下大气 CO_2 储存通量。 NEE 值为负时表示人工林净吸收大气 CO_2 , 反之表示净排放 CO_2 。

对涡度相关测定的 10 Hz 原始数据进行平均, 得到三维风速、温度、湿度、 CO_2 浓度和气压的半小时平均值和协方差。以上数据经 3 次坐标轴旋转^[13] 和 WPL 校正^[14] 后得到 30 min 平均水、热和 CO_2 通量。夜间大气层结较为稳定、湍流较弱时, 涡度相关仪器所测夜间 CO_2 通量偏低。根据摩擦风速(U^*)与 CO_2 通量的关系确定一个临界 U^* , 摩擦风速小于临界 U^* 的通量数据将被剔除掉^[15]。本研究 U^* 取 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当仪器出现故障、人为影响以及雨天或清晨有露水时, 所得的异常值应当删除。对以上经过初步筛选的数据计算出月平均值和方差, 与平均值相差超过 3 倍方差的数值也要剔除掉。利用下列方法插补被去除的数据和缺失的数据: 小于 2 h 的缺失数据用线性内插法插补; 大于 2 h 的缺失数据采用平均日变化法(mean diurnal variation, MDV)进行插补^[15]。

2 结果与讨论

2.1 PAR 对碳交换量的影响

光合作用受光量子通量密度驱动。研究表明: 生长季(4~9 月份)人工林白天的 NEE 随太阳辐射的增加而增加($P < 0.01$) (图 1)。 NEE 与 PAR 的关系可由直角双曲线方程^[3,16] 表示:

$$NEE = -\frac{\alpha P_{\max} PAR}{\alpha PAR + P_{\max}} + R_d \quad (3)$$

式中, α 为表观初始光能利用率, 即弱光条件下光响应曲线的斜率; $P_{\max}$ 为光饱和时的最大光合速率; R_d 表示生态系统暗呼吸速率。

表观初始光能利用率(α)反映了植物对弱光的利用效率。研究发现, 人工林的 α 值并非一固定值, 而是呈现一定的季节变化(表 1)。不同年份 α 值的季节变化规律不尽相同: 如 2006 和 2007 年的最大 α 值分别出现在 5 月和 6 月份, 最小 α 值分别出现在 6 月和 9 月份。2006 年 6 月 α 值最小主要是由于该月较大的 VPD 使气孔导度变小, 植物冠层的光合作用降低; 加之辐射较强, 致使光能利用效率下降。本实验中, 2006 年和 2007 年主要生长季(4~9 月份)的平均 α 值分别为 0.032 和 0.019。2006 年主要生长季的 α 值较高可能与该段时期辐射和 VPD 较低有关(表 1)。不过在月尺度上, α 值与对应的 PAR 、气温和 VPD 均无明显相关关系。本实验测得的 α 值在 Pilegaard 等^[3] 在丹麦山毛榉林生长季所得的 α 值范围内, 但小于刘允芬等^[11]、Wang 等^[16]、Ruimy 等^[17] 和 Goulden 等^[18] 的研究结果, 这与不同树种光合特性及环境条件差异有关^[3,16]。

本实验中, 人工林的 $P_{\max}$ 也存在季节变化(表 1)。2006 和 2007 年 $P_{\max}$ 最大值都出现在 8 月份, 最低值分别出现在 6 月和 5 月, 这主要是由于 2006 年 6 月、2007 年 5 月较大的 VPD 和较强的辐射抑制了植物的光合作用(表 1)。在主要生长季, 各月的 $P_{\max}$ 与气温的相关性不显著。但与 VPD 和 PAR 成反比, 相关性分别达到 0.01 和 0.05 显著水平。 VPD 升高使气孔关闭^[3], 导致 $P_{\max}$ 下降。而辐射增加往往伴随着 VPD 升高。本实验中, 2006 年和 2007 年主要生长季平均 $P_{\max}$ 分别为 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 与刘允芬等^[11] 和 Wang 等^[16] 的研究结果接近。和 2007 年相比, 2006 年主要生长季的 $P_{\max}$ 值较小, 但 α 值较大, 植物光能利用效率较高(表 1), 人工林的净碳吸收比较大(2006 和 2007 年 4~9 月 NEE 总量分别为 -508.3 、 $-409.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

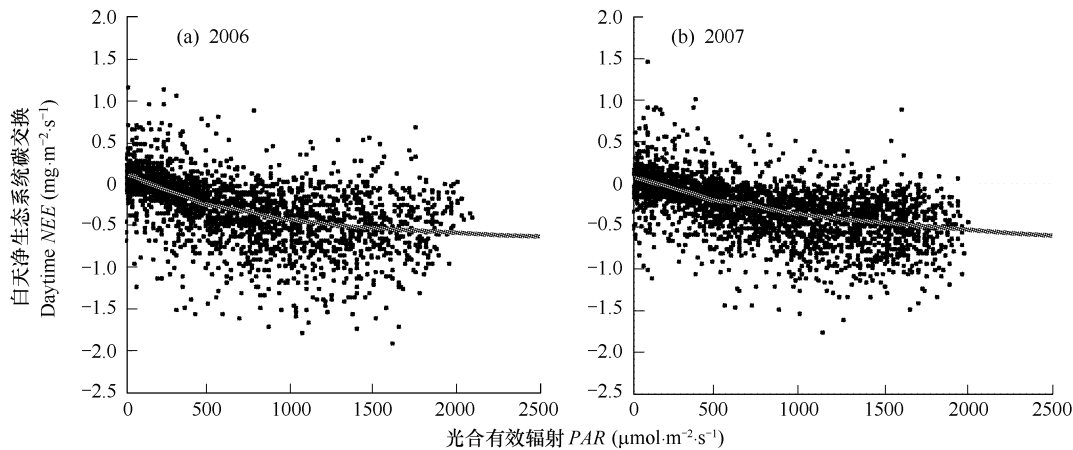


图1 人工林白天净生态系统碳交换量(NEE)与光合有效辐射(PAR)的关系

Fig. 1 Relationship between daytime NEE and PAR in a plantation

表1 人工林的光响应参数及气象因子

Table 1 Parameters of the light response curve and meteorological factors in a plantation ecosystem

月份 Month	P_{max} ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		α ($\mu\text{mol}\cdot\mu\text{mol}^{-1}$)		R_d ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		r^2		PAR ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)		T_a ($^{\circ}\text{C}$)		VPD (kPa)	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007	2006	2007
4	0.94	1.09	0.022	0.014	0.08	0.08	0.28 **	0.32 **	6.6	7.7	17.0	16.4	1.10	1.16
5	1.70	0.90	0.032	0.020	0.14	0.08	0.47 **	0.38 **	7.5	8.2	20.7	23.4	1.01	2.02
6	0.80	0.99	0.016	0.024	0.10	0.13	0.23 **	0.28 **	9.1	7.1	26.6	23.8	1.82	1.59
7	2.04	1.44	0.028	0.023	0.08	0.08	0.48 **	0.38 **	5.5	6.4	25.1	25.1	0.53	0.82
8	2.16	1.73	0.029	0.023	0.11	0.12	0.45 **	0.46 **	5.1	6.5	24.3	25.0	0.58	0.90
9	1.27	1.49	0.024	0.009	0.11	0.00	0.42 **	0.35 **	4.7	5.9	20.2	21.0	0.94	1.09
4~9	0.96	1.10	0.032	0.019	0.12	0.08	0.31 **	0.35 **	6.4	7.0	22.3	22.5	1.00	1.26

“ ** ”表示达到 0.01 显著水平 Significance

2.2 温度对净碳交换量的影响

生态系统呼吸受环境和生物因子控制。温度是控制生态系统呼吸的主要环境因子^[20,21]。许多研究^[3,5,7,16]表明:生态系统呼吸随温度的升高呈指数增长。本实验也发现了类似的规律:人工林日平均夜间 NEE(即生态系统呼吸)随冠层气温增加呈指数增长(图 2)。受土壤湿度等其它环境因子影响,图 2 的数据点较为分散,夜间 NEE 的变化仅有 36%(2006 年)和 25%(2007 年)可由冠层气温来解释。尽管如此,两年的日平均夜间 NEE 与冠层气温的相关性还是都达到了 0.01 显著水平。2006 和 2007 年人工林生态系统呼吸的温度敏感系数(Q_{10})分别为 1.92 和 1.86。2007 年生长季空气较 2006 年干燥(表 1),干旱胁迫下生态系统呼吸的 Q_{10} 通常较低^[22]。本研究得到的 Q_{10} 值与其它温带地区的研究结果接近^[23]或偏低^[4,16,24]。本研究区地处暖温带,冬季温度相对较高,温度升高会使生态系统呼吸敏感系数减小^[25,26]。

温度除了影响自养和异养呼吸,还通过影响冠层光合作用来影响生态系统的 CO_2 交换。研究表明:当温度在 10°C 以下时,人工林 NEE 日总量较小,在 $-5 \sim 5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间变动。温度超过 10°C 以后,人工林以净吸收大气 CO_2 为主,且吸收量随温度的升高迅速增加(图 3)。在冬季,尽管日平均气温时常在 5°C (温带植物光合作用界限温度)以下,但我们还是在人工林生态系统观测到不少日平均 NEE 为负的现象。这表明本地人工林在冬季仍具有一定的光合能力。Dolman 等^[27]、Miyazawa 和 Kikuzawa^[28]也发现森林在非生长季吸收大气 CO_2 的现象。此外,密度脉动效应也可能是冬季碳通量出现负值的重要原因^[29]。在生长季温度高于 10°C 时,人工林生态系统日平均净 CO_2 交换量为正的现象还时有发生(图 3)。通常辐射低时光合作用较弱;若此时温

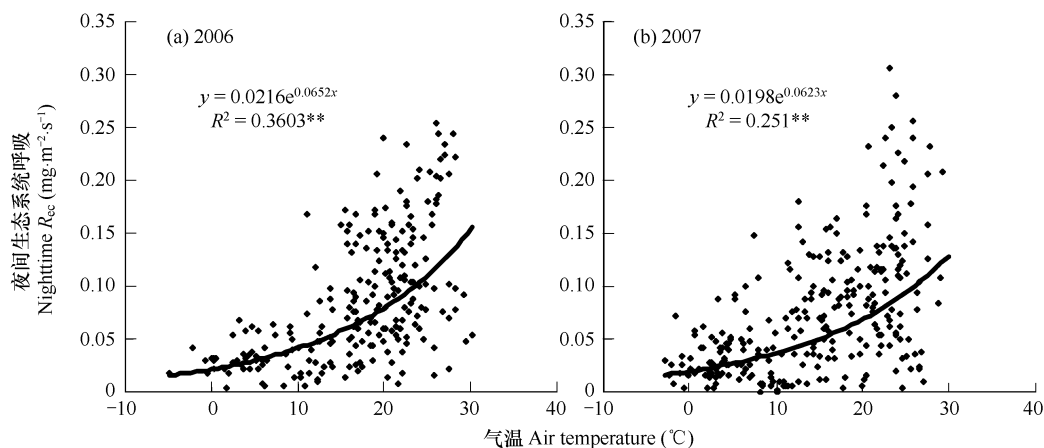


图2 人工林夜间生态系统呼吸(R_{ec})与气温的关系 (**表示 $P < 0.01$)

Fig. 2 Relationship between nighttime ecosystem respiration and air temperature in a plantation ecosystem

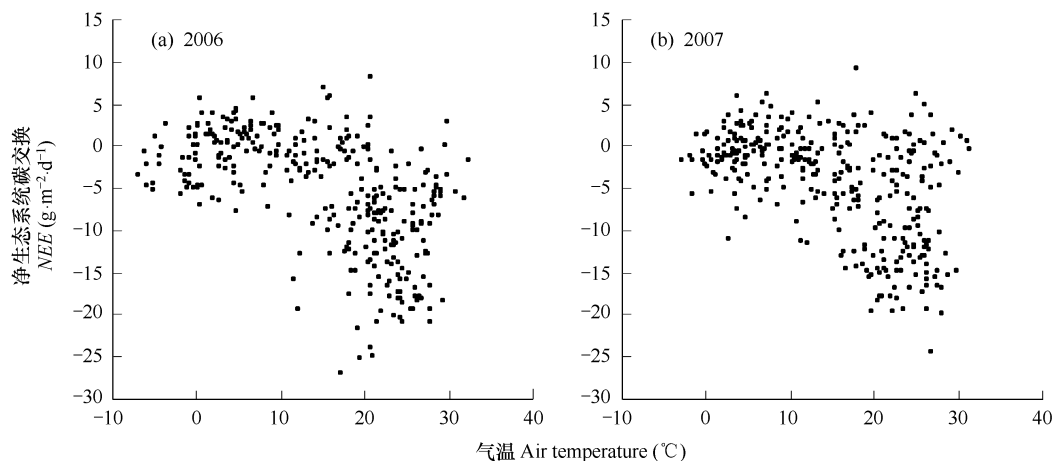


图3 人工林生态系统 NEE 日总量与日平均气温的关系

Fig. 3 Relationship between daily NEE and daily average air temperature in a plantation

度较高,生态系统呼吸较大,很可能导致人工林生态系统净排放 CO_2 。赵晓松等^[19]对温带阔叶红松林的研究也得出了类似的结果。

2.3 VPD 对碳交换量的影响

VPD 是影响生态系统净碳交换的重要因子之一^[16,30,31]。本研究对 4~9 月份不同 VPD 条件下人工林 NEE 对光的响应过程进行了分析。结果表明(图 4 和表 2):当 $VPD \leq 1.0$ kPa 时, NEE 与 PAR 之间具有很好的线性关系, NEE 最大值可达 $-1.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 $VPD \leq 1.0$ kPa 时对应的 PAR 比较小,散射辐射在太阳辐射中所占比例较高。与直接辐射相比,散射辐射更容易穿过叶片到达植物冠层下部,增加了冠层下部遮阴叶片的同化速率^[32]。另外,太阳辐射低时,植物叶片光合作用不容易达到光饱和。Ruimy 等^[17]、徐玲等^[33]也发现光强较低时 NEE 与 PAR 具有线性关系。当 VPD 在 1.0~2.5 kPa 之间时, NEE 随 PAR 的增加而增加,两者之间具有显著的直角双曲线关系($P < 0.01$)。当 $VPD > 2.5$ kPa 时,随 PAR 的增加,尽管 NEE 也呈增加趋势,但增加幅度明显变小,最大值不超过 $-1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,其主要原因是 VPD 较大时,植物叶水势增加,导致气孔的关闭,从而降低了光合作用速率^[34]。

3 结论

(1)白天 NEE 与光合有效辐射(PAR)之间符合直角双曲线关系($P < 0.01$)。2006 年和 2007 年主要生长

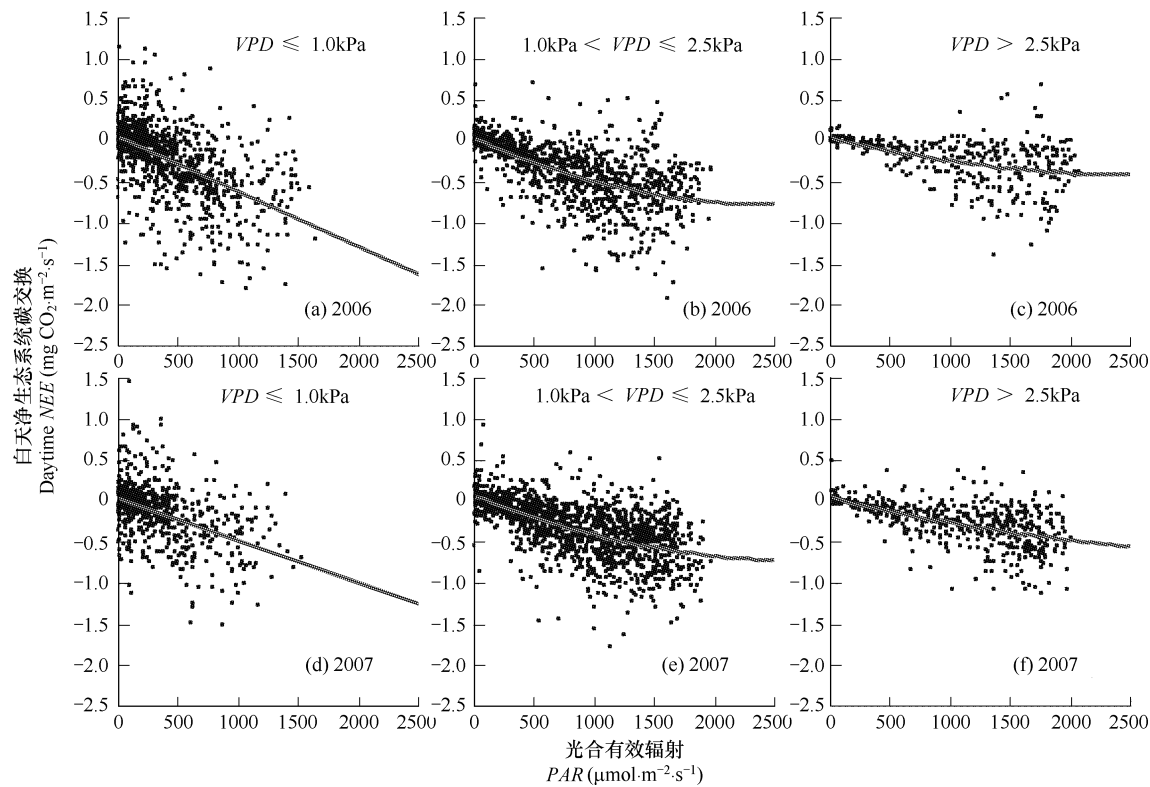


图4 不同 VPD 条件下白天人工林净生态系统碳交换 (NEE) 与光合有效辐射 (PAR) 的关系

Fig. 4 Relationship between daytime NEE and PAR under different VPD in a plantation ecosystem

表 2 不同 VPD 条件下人工林 NEE 与 PAR 之间的关系

Table 2 Relationship between NEE and PAR under different VPD condition

年份 Year	VPD (kPa)	光响应方程 Light response function	r^2
2006	≤ 1.0	$NEE = -0.0007PAR + 0.0532$	0.32 **
	1.0 ~ 2.5	$NEE = -0.0321PAR / (0.0256PAR + 1.2564) + 0.0939$	0.38 **
	> 2.5	$NEE = -0.0096PAR / (0.0129PAR + 0.7414) + 0.0738$	0.22 **
2007	≤ 1.0	$NEE = -0.0005PAR + 0.0391$	0.23 **
	1.0 ~ 2.5	$NEE = -0.0257PAR / (0.0187PAR + 1.3706) + 0.1010$	0.39 **
	> 2.5	$NEE = -0.0137PAR / (0.0092PAR + 1.4878) + 0.0551$	0.32 **

“ ** ”表示达到 0.01 显著水平 Significance

季(4~9月份)的平均 α 值分别为0.032和0.019;平均 P_{max} 分别为 $0.96\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.10\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 α 值和 P_{max} 都存在季节变化。主要生长季月平均 P_{max} 与对应的气温关系不显著,与VPD和PAR则具有明显的负相关关系($P<0.01$ 和 $P<0.05$)。月平均 α 值与对应的PAR、气温和VPD均无明显相关关系。

(2)夜间生态系统呼吸随温度的升高呈指数增长($P<0.01$)。2006和2007年人工林生态系统呼吸的温度敏感系数(Q_{10})分别为1.92和1.86。温度在10℃以下时,人工林NEE日总量较小;温度超过10℃后,人工林以净吸收CO₂为主,且吸收量随温度的升高迅速增加。

(3)VPD ≤ 1.0 kPa时,净碳吸收量随PAR增大线性增加($P<0.01$);VPD > 1.0 kPa后,净碳吸收量随PAR的增加而增加,二者呈显著的直角双曲线关系($P<0.01$);VPD > 2.5 kPa后,净碳吸收量随PAR增加的增幅变小。

本文系统研究了人工林生态系统CO₂交换与主要气象因子间的关系。但要全面、深入地了解人工林碳交换的影响机制,尚需结合土壤水分、叶面积等其它指标做进一步的分析。

References:

- [1] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320 — 2322.
- [2] Arain M A, Restrepo-Coupe N. Net ecosystem production in a temperate pine plantation in southeastern Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128: 223 — 241.
- [3] Pilegaard K, Hummelshøj P, Jensen N O, Chen Z. Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 29 — 41.
- [4] Saigusa N, Yamamoto S, Murayama S, Kondo H, Nishimura N. Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 203 — 215.
- [5] Zha T S, Kellomäki S, Wang K Y, Rouvinen I. Carbon sequestration and ecosystem respiration for 4 years in a Scots pine forest. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1492 — 1503.
- [6] Saigusa N, Yamamoto S, Murayama S, Kondo H. Inter-annual variability of carbon budget components in an AsiaFlux forest site estimated by long-term flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134: 4 — 16.
- [7] McCaughey J H, Pejam M R, Arain M A, Cameron D A. Carbon dioxide and energy fluxes from a boreal mixedwood forest ecosystem in Ontario, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 79 — 96.
- [8] Kosugi Y, Takanashi S, Ohkubo S, Matsuo N, Tani M, Mitani T, Tsutsumi D, Nik A R. CO₂ exchange of a tropical rainforest at Pasoh in Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 439 — 452.
- [9] Grace S, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, 404: 819 — 820.
- [10] Guan D X, Wu J B, Yu G R, Zhao X S, Han S J, Jin C J. Meteorological control on CO₂ flux above broad-leaved Korean pine mixed forest in Changbai Mountains. *Science in China, Series D*, 2004, 34(Supp. II): 103 — 108.
- [11] Liu Y F, Song X, Sun X M, Wen X F, Chen Y R. Seasonal variation of CO₂ flux and its environmental factors in evergreen coniferous plantation. *Science in China, Series D*, 2004, 34(Supp. II): 109 — 117.
- [12] Sun X M, Wen X F, Yu G R, Liu Y F, Liu Q J. Seasonal drought effects on carbon sequestration of a mid-subtropical planted forest of southeastern China. *Science in China, Series D*, 2006, 36(Supp. I): 103 — 110.
- [13] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99: 127 — 150.
- [14] Webb E K, Pearman G, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106: 85 — 100.
- [15] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N-O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 43 — 69.
- [16] Wang H, Saigusa N, Yamamoto S, Kondo H, Hirano T, Toriyama A, Fujinuma Y. Net ecosystem CO₂ exchange over a larch forest in Hokkaido, Japan. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 7021 — 7032.
- [17] Ruimy A, Jarvis P G, Baldocchi D D, Saugier B. CO₂ fluxes over plant canopies and solar radiation: A review. *Advances in Ecological Research*, 1995, 26: 1 — 68.
- [18] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 169 — 182.
- [19] Zhao X S, Guan D X, Wu J B, Zhang M, Jin C J, Han S J. The relationship between CO₂ flux and temperature of the mixed forest of broad-leaved and Korean-Pine in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1088 — 1095.
- [20] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8: 315 — 323.
- [21] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81 — 89.
- [22] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, Wang Y H, Song X, Li J, Sun X M, Yang F T, Chen Y R, Liu Q J. Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China, Series D*, 2006, 36(Supp. I): 91 — 102.
- [23] Arain A M, Restrepo-Coupe N. Net ecosystem production in a temperate pine plantation in southeastern Canada. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128: 223 — 241.
- [24] Wu J B, Guan D X, Wang M, Pei T F, Han S J, Jin C J. Year-round soil and ecosystem respiration in a temperate broad-leaved Korean Pine

- forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223:35–44.
- [25] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q_{10} determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevadan forest. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2001, 13(3):687–696.
- [26] Drewitt G B, Black T A, Nesic Z, Humphreys E R, Jork E M, Swanson R, Ethier G J, Griffis T, Morgenstern K. Measuring forest floor CO_2 fluxes in a Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 110:299–317.
- [27] Dolman A J, Moors E J, Elbers J A. The carbon uptake of a mid latitude pine forest growing on sandy soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111:157–170.
- [28] Miyazawa Y, Kikuzawa K. Winter photosynthesis by saplings of evergreen broad-leaved trees in a deciduous temperate forest. *New Phytologist*, 2005, 165 (3):857–866.
- [29] Wu J B, Guan D X, Shi T T, Han S J, Yu G R, Sun X M. Non-growing seasons CO_2 flux of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(9):1–6.
- [30] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, Hunt J E, McSeveny T M, Weir P L. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 1994, 75:134–150.
- [31] Hollinger D Y, Kelliher F M, Schulze E D, Bauer G, Arneth A, Byers J N, Hunt J E, McSeveny T M, Kobak K I, Milukova I, Sogatchev A, Tatarinov F, Varlargin A, Ziegler W, Vygodskaya N N. Forest-atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90:291–306.
- [32] Gu L, Baldocchi D D, Wofsy S C, Munger J W, Michalsky J J, Urbanski S P, Boden T A. Response of a deciduous forest to the Mount Pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. *Science*, 2003, 299:2035–2038.
- [33] Xu L L, Zhang X Z, Shi P L, Yu G R. Response of canopy quantum yield of alpine meadow to temperature under low atmospheric pressure on Tibetan Plateau. *Science in China, Series D*, 2006, 36(Supp. I):204–209.
- [34] Anthoni P M, Law B E, Unsworth M H. Carbon and water vapor exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 95:151–168.

参考文献:

- [10] 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 赵晓松, 韩士杰, 金昌杰. 气象条件对长白山阔叶红松林 CO_2 通量的影响. *中国科学, D 辑(地球科学)*, 2004, 34(增刊 II):103–108.
- [11] 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 温学发, 陈永瑞. 千烟洲人工针叶林 CO_2 通量季节变化及其环境因子的影响. *中国科学, D 辑(地球科学)*, 2004, 34(增刊 II):109–117.
- [12] 孙晓敏, 温学发, 于贵瑞, 刘允芬, 刘琪璟. 中亚热带季节性干旱对千烟洲人工林生态系统碳吸收的影响. *中国科学, D 辑(地球科学)*, 2006, 36(增刊 I):103–110.
- [19] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 张弥, 金昌杰, 韩士杰. 长白山阔叶红松林 CO_2 通量与温度的关系. *生态学报*, 2006, 26(4):1088–1095.
- [22] 刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 王迎红, 宋霞, 李菊, 孙晓敏, 杨风亭, 陈永瑞, 刘琪璟. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO_2 通量的季节变异特征. *中国科学 D 辑(地球科学)*, 2006, 36(增刊 I):91–102.
- [29] 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 韩士杰, 于贵瑞, 孙晓敏. 非生长季长白山红松针阔叶混交林 CO_2 通量特征. *林业科学*, 2006, 42(9):1–6.
- [33] 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 于贵瑞. 青藏高原低气压条件下高寒草甸群落光量子效率对温度的响应. *中国科学, D 辑(地球科学)*, 2006, 36(增刊 I):204–209.