

中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的 碳通量特征及其影响因子比较

王 宇^{1,2}, 周广胜^{3, 1, *}, 贾丙瑞¹, 李 帅⁴, 王淑华⁵

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 4. 黑龙江省气象科学研究所, 哈尔滨 150030; 5. 黑龙江省伊春市五营气象局, 伊春 153033)

摘要:北半球中高纬度的森林生态系统在全球碳循环过程中扮演着非常重要的角色。基于中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林 2007 年和 2008 年 2a 生长季的涡度相关通量资料及气象观测资料, 比较分析了两类生态系统的碳通量特征及其环境控制因子。结果表明: 研究期间, 阔叶红松林与兴安落叶松林都表现为碳吸收, 强度分别为 199 g C m^{-2} (阔叶红松林 2a 生长季平均值) 与 49 g C m^{-2} (兴安落叶松林 2008 年生长季); 阔叶红松林碳吸收强度在生长季的大部分时段都大于兴安落叶松林。半小时尺度上, 两类生态系统的呼吸作用均与 10 cm 土壤温度呈显著的指数相关, 兴安落叶松林生态系统呼吸的温度敏感性 ($Q_{10} = 3.44$) 显著大于阔叶红松林 ($Q_{10} = 1.90$); 日尺度上, 阔叶红松林与兴安落叶松林碳释放/吸收的转变临界温度为 10°C 左右。研究期间, 兴安落叶松林生态系统的水分利用效率高于阔叶红松林生态系统。

关键词: 涡度相关; 碳循环; 北方林; 温带针阔叶混交林; 气候变化

Comparisons of carbon flux and its controls between broad-leaved Korean pine forest and Dahurian larch forest in northeast China

WANG Yu^{1, 2}, ZHOU Guangsheng^{3, 1, *}, JIA Bingrui¹, LI Shuai⁴, WANG Shuhua⁵

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

4 Heilongjiang Institute of Meteorological Sciences, Harbin 150030, China

5 Wuying Meteorological Bureau, Yichun 153033, China

Abstract: Forest ecosystem in northern middle and high latitudes play an important role in global carbon cycle. Based on eddy covariance flux data and meteorological observations in the growing seasons of 2007 and 2008, the characteristics of CO_2 flux and its controls were compared between broad-leaved Korean pine forest and Dahurian larch forest in northeast China. The results showed that both forest ecosystems acted as net sinks of CO_2 during the study period, with a magnitude of 199 g C m^{-2} (the average of 2007 and 2008 for broad-leaved Korean pine forest) and 49 g C m^{-2} (the value of 2008 for Dahurian larch forest) respectively. The broad-leaved Korean pine forest ecosystem sequestered more carbon than the Dahurian larch forest ecosystem in most days of the growing season. Respirations of these two ecosystems showed exponential correlations well with the 10 cm soil temperatures on half-hour scale, and the temperature sensitivity index (Q_{10}) of respiration in the Dahurian larch forest ecosystem (3.44) was much larger than in the broad-leaved Korean pine forest ecosystem (1.90). The critical transition temperature from carbon release to carbon uptake on daily scale was around 10°C for these two ecosystems. Water-use efficiency was higher in the Dahurian larch forest ecosystem than in the broad-leaved Korean pine forest ecosystem.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40625015, 40705008); 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-432); 公益性行业 (气象) 科研专项经费资助项目 (GYHY200706021); 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2010CB833501)

收稿日期: 2009-07-27; **修订日期:** 2009-12-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn

Key Words: eddy covariance; carbon cycle; boreal forest; temperate mixed forest; climate change

越来越多的研究证实,以 CO_2 为主的温室气体过度排放是导致气候变化的重要原因^[1]。正因为如此,全球碳循环受到前所未有的关注^[2-4]。北半球中高纬度的森林生态系统由于面积庞大及低温导致土壤碳长期封存,在碳循环研究中具有十分重要的意义^[5-10]。同时,植被与气候变化研究表明,北半球中高纬度地区是全球气候变化最为剧烈的地区之一,且该地区多数生态系统对气候变化较为敏感。而长期的气候变化必然导致植被的结构和分布格局发生变化,进而改变区域甚至全球的碳收支^[11-16]。

阔叶红松林与兴安落叶松林分别是中国东北地区温带针阔叶混交林与北方针叶林的地带性顶级群落。研究表明,在未来气候变化情景下,中国东部各森林群落的最适分布区及其分布南北界都将会不同程度的北移,其中兴安落叶松林在未来 100a 内可能从中国境内消失,并被阔叶红松林或其他温带森林(如以蒙古栎为主要优势种的落叶阔叶林)替代^[17-24]。

涡度相关技术是目前唯一可以直接观测生态系统水平上不同时间尺度(半小时到年际尺度)的碳、水汽以及能量通量的方法,在全球碳循环研究中发挥着十分重要的作用^[25]。目前,国内外许多学者已经基于涡度相关技术对北半球中高纬度森林生态系统碳通量开展了大量的研究^[26-33];国内基于中国科学院长白山森林生态系统定位站(阔叶红松林)以及东北林业大学帽儿山实验林场老山实验站(人工兴安落叶松林)的涡度相关通量观测,也陆续开展了中国东北地区典型森林生态系统碳通量的基础研究^[34-42]。但这些研究大多停留在分析单个站点的碳通量动态及环境控制机制上,对于不同森林生态系统之间碳通量的比较研究还相对缺乏,从而制约着对中国中高纬度森林生态系统碳通量特征及其控制机制的深入理解。

为此,本研究选取中国东北地区两类典型森林生态系统:阔叶红松林与兴安落叶松林,利用涡度相关技术进行比较研究,主要目标如下:(1) 阐明阔叶红松林与兴安落叶松林碳通量的日、季动态差异;(2) 揭示两类生态系统碳通量环境控制机制的异同。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点

研究地点选在大兴安岭的中国科学院植物研究所中国北方林森林生态系统定位研究站(以下简称 BF)与小兴安岭的黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(以下简称 TM)。表 1 给出了 2 个站点的基本信息。

1.2 研究方法

1.2.1 通量及相关观测

2 个站点通量观测的主要仪器相同,均采用开路式涡度相关观测系统(OPEC),即主要由红外气体分析仪(LI-7500, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)、三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)和数据采集器(CR5000, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA)构成。中国科学院植物研究所中国北方林森林生态系统定位研究站的涡度相关系统观测始于 2006 年 7 月,只观测生长季通量交换,数据采集频率为 10 Hz;黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站的涡度相关系统观测始于 2006 年 9 月,全年连续观测,数据采集频率为 20 Hz。为比较起见,本研究以中国科学院植物研究所的中国北方林森林生态系统定位研究站数据采集时段为参考,选取 2007 年和 2008 年生长季(6 月初—10 月底)的通量数据进行比较分析。

2 个站点都安装有气象梯度观测系统,进行连续气象要素采集,采集时段与通量数据相同。中国北方林森林生态系统定位研究站的气象梯度观测系统包括:1 个光合有效辐射(PAR)仪(LI-190SB, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)安装于 32 m、1 个净辐射(R_n)仪(CNR1, Kipp & Zonen, Corp., Delft, Holland)安装于 32 m、1 个风向传感器(034B, Campbell Scientific Inc., MS, USA)安装于 30 m、4 层(1.5、15、25、30 m)风速(014A, Campbell Scientific Inc., MS, USA)和空气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala Inc., Helsinki, Finland)、6 层(0.5、10、15、20、30 cm)土壤温度(107L, Campbell Scientific Inc., Edmonton, Alberta, Canada)、2 个土壤热通量板(HFP01, Hukseflux Inc., Netherlands)埋植于地下 8 cm、1 个土壤水分时域反射仪(CS616, Campbell

Scientific Inc., USA)埋植于地下 8 cm,还配备有雨量筒(52203, RM Young Inc., Traverse City, MI, USA)安装于塔顶 38 m 处。黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站的气象梯度观测系统各项观测分别为:6 层(1.5、20、30、40、50、60 m)空气温湿度、9 层土壤温度(0、5、10、15、20、40、80、160、320 cm)、5 层风向(10、30、40、50、60 m)、7 层风速(1.5、10、20、30、40、50、60 m),林下地表配置有雨量筒观测降雨量。但黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站没有辐射相关观测。

表 1 站点信息对比

Table 1 Comparisons of site characteristics

站点 Site	中国科学院植物研究所中国北方森林生态系统定位研究站 Chinese Boreal Forest Ecosystem Research Station, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences	黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站 Broad-leaved Korean Pine Forest Experimental Station, Heilongjiang Meteorological Bureau
地点 Location	黑龙江省呼中国家级自然保护区	黑龙江省伊春市五营区
纬度 Latitude/(°)	51.78	48.10
经度 Longitude/(°)	123.02	129.23
海拔 Altitude/m	773	420
生态系统类型 Ecosystem pattern	兴安落叶松林	阔叶红松林
年均温 Mean annual temperature/°C	-2.4	0.2
年降水量 Mean annual precipitation/mm	470	637
林龄 Stand age/a	70	220
最大叶面积指数 Maximum Leaf area index	3.6	5.8
平均树高 Mean height/m	15	26
塔高 Tower height/m	38	70
涡相关高度 Eddy covariance height/m	36	50
主要物种 Main species	以兴安落叶松(<i>Larix gmelinii</i>)为单优势种,白桦(<i>Betula platyphylla</i>)为主要伴生树种,林下以杜香(<i>Ledum palustre</i>)、越桔(<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)等为主。	以红松(<i>Pinus koraiensis</i>)为主要优势种,伴生树种主要有蒙古栎(<i>Quercus mongolica</i>)、椴树(<i>Tilia</i>)、桦树(<i>Betula</i>)等

中国科学院植物研究所的中国北方森林生态系统定位研究站的气温和降水资料取自 1954—2005 年平均值,黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站的气温和降水资料取自 1958—2007 年平均值

1.2.2 通量数据处理方法

涡度相关方法通过测定在一定高度上垂直风速与大气中二氧化碳和水汽脉动量,计算两者的协方差,得到植被与大气间的二氧化碳和水汽通量。碳通量(NEE)可计算如下:

$$NEE = Fc = \overline{w'\rho'_c}$$

式中, w' 是垂直风速与平均值的瞬时偏差,即脉动量。 ρ'_c 是 CO_2 密度的瞬时脉动值与平均值的偏差。 Fc 为正值代表生态系统释放 CO_2 ,负值代表生态系统从大气中吸收 CO_2 。在涡度相关系统进行观测时,红外气体分析仪观测的 CO_2 气体浓度为质量密度(单位体积气体所含 CO_2 的质量)。为消除大气水热条件变化对 CO_2 质量密度的影响以及地形不均匀或传感器不垂直等可能造成的误差,在此对观测资料进行了 WPL 校正(密度效应校正)和二次坐标旋转。同时,考虑到大气热力分层稳定或湍流的混合作用较弱时储存在植被冠层和观测高度以下的 CO_2 (储存项),净生态系统碳交换(NEE)可计算如下:

$$NEE = Fc + Fs = \overline{w'\rho'_c} + \frac{\Delta C \times h}{\Delta T}$$

式中, Fc 为测量得到的 CO_2 通量; Fs 为储存项,参考 Hollinger 等^[43]推荐的方法计算: ΔC 为相邻 2 个时刻测得的 CO_2 浓度差, ΔT 为 2 次测定的时间间隔(由于研究采用 30 min 平均,因此时间间隔为 $30 \times 60s = 1800s$), h 为涡度相关观测高度(m)。

1.2.3 通量数据筛选及插补

为剔除天气异常、仪器响应问题以及涡度相关技术本身的一些假设条件不能完全满足等原因造成的数据异常,参考欧洲通量网(CarboEurope)^[44]以及中国通量网(ChinaFLUX)^[45]的常规方法,本研究对以下条件下的通量数据进行剔除:(1)同期有降水的数据;(2)原始数据(10 Hz)中野点过多的时刻;(3)通量时间序列中明显异常的数据(差分法);(4)夜间摩擦风速(u^*)低于临界值时的资料。 u^* 临界值(u_c^*)的选取参考朱治林等提出的方法^[45],结合本研究资料计算最终得出:兴安落叶松林摩擦风速临界值取 0.10 m s^{-1} ,阔叶红松林摩擦风速临界值取 0.21 m s^{-1} 。

为了得到完整时间序列的通量资料,需要对缺失数据进行合理的插补。本研究主要采用查表法^[46]进行插补,表格编制窗口为2个月。对长期缺失气象数据而无法编制表格的部分,采用日平均变化法进行补充插补。

1.2.4 生态系统呼吸作用模拟

生态系统呼吸作用拟合选用 Lloyd-Taylor 方程^[47],所用资料包括湍流混合充分条件下($u^* > u_c^*$)的夜间 NEE(数值上等同于生态系统呼吸 R_e)与浅层土壤温度:

$$R_{\text{eco}}(T) = R_{\text{eco,ref}} \times e^{E_0 \times \left(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)}$$

式中, $R_{\text{eco,ref}}$ 为参考温度下的生态系统呼吸; E_0 为活化能参数,决定呼吸的温度敏感性; T_{ref} 为参考温度,取 10°C ; T_0 取 -46.02°C ; T 一般为气温或浅层土壤温度。根据本研究的资料分析可知,两个生态系统夜间呼吸与 10 cm 土壤温度的相关性最好,故在此利用 10 cm 土壤温度进行拟合。

1.2.5 统计分析与作图

所有统计分析均在 SPSS15.0 (SPSS Inc., Chicago, USA) 环境下进行,作图采用 sigmaplot10.0 (Systat Software Inc., San Jose, USA)。

同时,在分析半小时尺度的 NEE 与环境因子关系时,由于参与统计样本量太大且相对离散,通常按照一定的间隔对其进行集合平均,以更清晰地反映两者间的关系。

2 结果分析

2.1 环境因子比较

黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站与中国北方林森林生态系统定位研究站的气温(T_a)季节动态基本一致(图1),总体呈单峰型曲线,但在整个生长季都显著大于中国北方林森林生态系统定位研究站。研究期间,黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站与中国北方林森林生态系统定位研究站的日平均气温最大值都出现在7月份,分别为 25.1°C 和 22.1°C 。两个站点的饱和水汽压差(VPD)波动较大,但总体上都随温度降低逐渐减小。

2.2 净生态系统碳交换的日、季动态

2.2.1 净生态系统碳交换的日动态

在研究期间,阔叶红松林与兴安落叶松林的净生态系统碳交换(NEE)日动态呈“U”型曲线,夜间表现为碳释放,通常在 06:00 左右 NEE 开始逐渐减小,并逐渐转变为碳吸收,随后两类生态系统均在 09:00 前后达到碳吸收最大值并持续此峰值至 13:00 左右,最后碳吸收强度逐渐减小,至 19:00 左右又转变为碳释放(图2)。NEE 在正午并没有随温度达到一个确定的峰值,而是在正午前后维持相对稳定的吸收高峰,这可能是由于两个生态系统光饱和点都较低^[39, 41, 48],当光强达到一定程度时,光合作用即达到饱和,之后其碳吸收不再显著增大;同时,正午光合作用往往由于饱和水汽压差较大导致气孔关闭,碳吸收强度也不再持续增加。

阔叶红松林与兴安落叶松林 NEE 日动态的季节变化有明显差异:6、7、8 月份两类生态系统都保持较强的碳吸收,其中6月份阔叶红松林碳吸收强度大于兴安落叶松林,7、8 月份两类生态系统碳吸收强度无显著差异;从9月份开始,两类生态系统碳吸收强度都明显减弱,兴安落叶松林逐渐接近碳中性,而阔叶红松林在此阶段仍维持一定强度的碳吸收;至10月份,两类生态系统总体都表现为碳源,只在正午前后几个小时有微

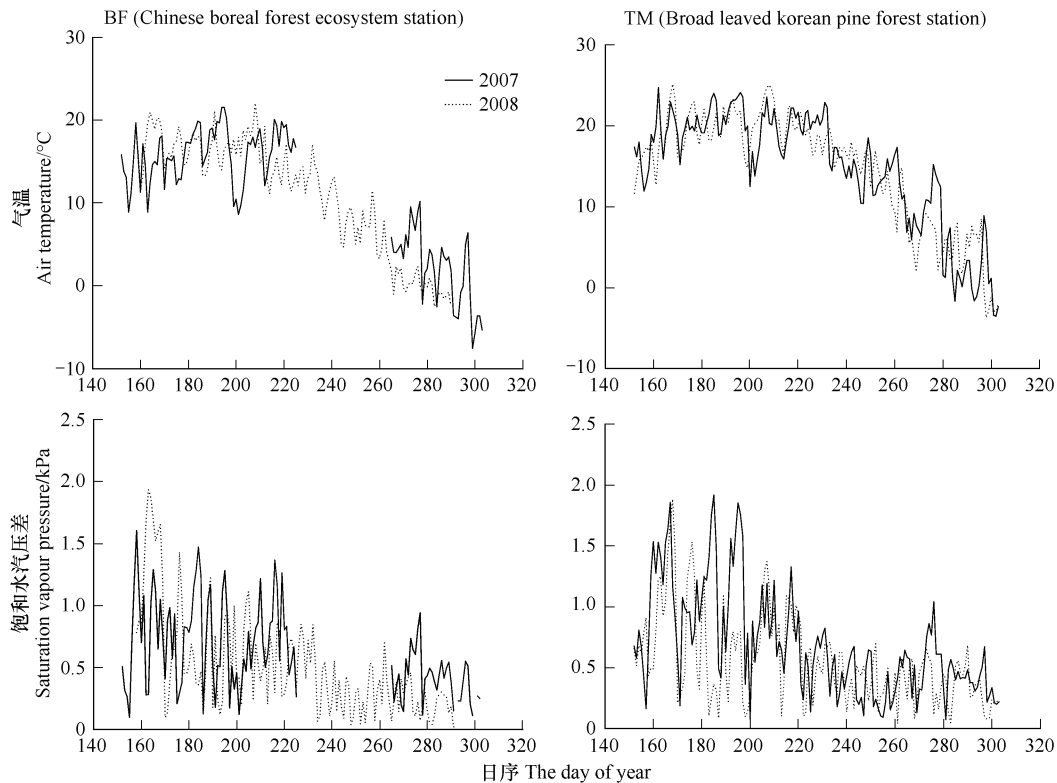


图1 黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(TM)与中国北方森林生态系统定位研究站(BF)的气象因子季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of meteorological factors at TM (broad-leaved Korean pine forest) and BF (Dahurian larch forest)

弱的碳吸收。

研究期间,阔叶红松林生态系统碳吸收达到最大值与最小值的时间(7月底至8月中)都比兴安落叶松林生态系统(6月底至7月初)晚1个月左右。阔叶红松林净生态系统碳交换的变化幅度($-1.67—1.62 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)显著大于兴安落叶松林生态系统($-0.98—1.00 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)。

2.2.2 净生态系统碳交换的季节动态

阔叶红松林与兴安落叶松林生态系统在2007年和2008年生长季的多数时间都表现为碳吸收。阔叶红松林最大碳吸收日值($-22.29 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$)显著大于兴安落叶松林($-15.77 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$),但两者最大碳排放日值并无显著差异(阔叶红松林 $12.35 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$,兴安落叶松林 $11.61 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$)。兴安落叶松林生态系统碳吸收的季节动态与气温的单一季节变化一致,先增大(NEE 减小)而后减弱,总体呈现“U”型曲线;而阔叶红松林生态系统在生长季有两个碳吸收高峰:在初期(6月初)碳吸收随温度升高而增大,随后在6月底至7月初有所减小,在7月底至8月初碳吸收再次增大并达到第2次高峰,最终随着温度降低、生长季结束呈微弱的碳排放状态(图3)。与阔叶红松林生长季饱和水汽压差(VPD)(图1)相对应发现,阔叶红松林碳吸收减弱阶段与 VPD 增大时期相吻合,故其碳吸收在6月至7月份的减小很可能是由于干旱导致空气中饱和水汽压差增大引起的。

在研究时间段内,阔叶红松林与兴安落叶松林生态系统总体上都表现为碳吸收,但阔叶红松林由于水、热条件优于兴安落叶松林(表1),且碳吸收维持时间较长,其碳吸收强度显著大于兴安落叶松林,具体为:阔叶红松林生态系统2007年共吸收 247 g C m^{-2} (6月1日—10月21日),2008年共吸收 151 g C m^{-2} (6月7日—10月18日);兴安落叶松林生态系统2008年共吸收 49 g C m^{-2} (6月7日—10月18日)。由于2007年兴安落叶松林8月13日—9月22日通量数据缺失,因此未做统计。

图4给出了日尺度阔叶红松林与对应兴安落叶松林 NEE 的差值,即 $\Delta NEE = NEE_{TM} - NEE_{BF}$,负值表示

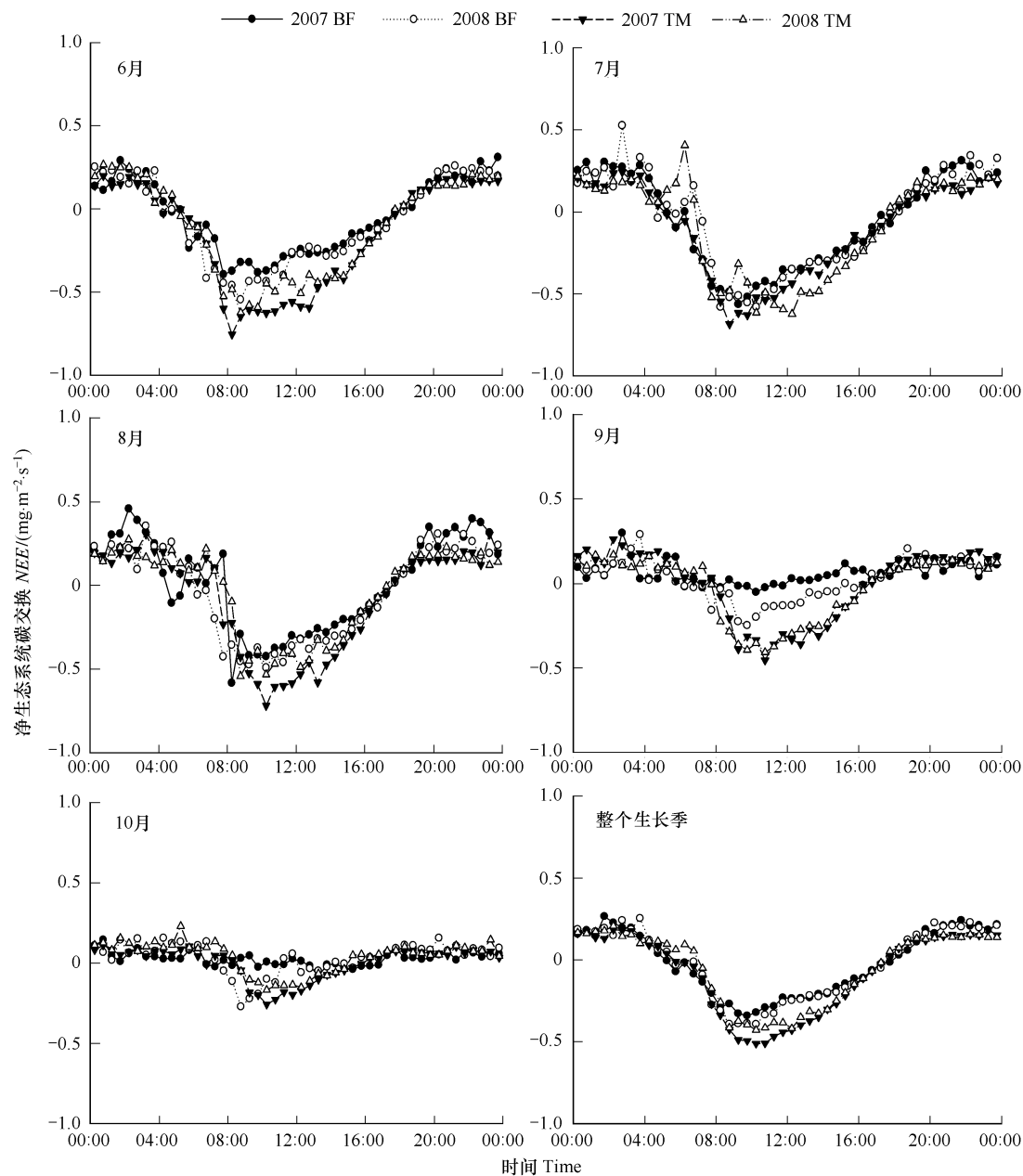


图2 黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(TM)与中国北方森林生态系统定位研究站(BF)的各月及整个生长季 NEE 日动态

Fig. 2 Diurnal dynamics of Net CO_2 Ecosystem Exchange (averages of every month and entire growing season) at TM (broad-leaved Korean pine forest) and BF (Dahurian larch forest)

该日阔叶红松林生态系统碳吸收大于兴安落叶松林生态系统。2007年和2008年生长季多数 ΔNEE 为负值,表明在生长季的多数时段阔叶红松林碳吸收显著大于兴安落叶松林。阔叶红松林生态系统碳吸收在生长季的部分时间小于兴安落叶松林(图中椭圆区域范围),此时期与阔叶红松林 NEE 吸收减弱阶段相一致(图3,图4)。

2.3 影响因子分析

2.3.1 温度

(1) 夜间生态系统呼吸作用(R_e)与温度(T_s)

在研究期间,两类生态系统半小时尺度的呼吸作用与10 cm土壤温度呈显著的指数相关(图5),但均表现出较大的变异性。

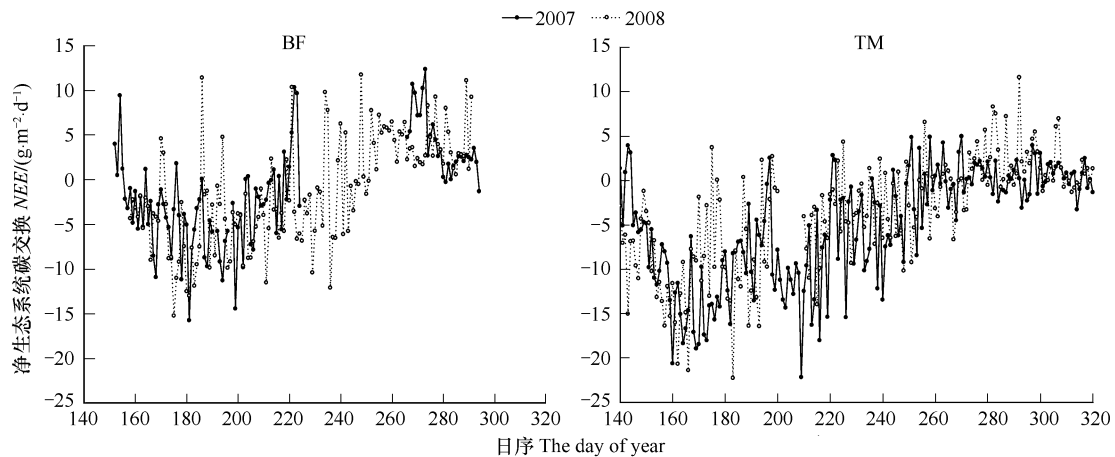


图3 黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(TM)与中国北方森林生态系统定位研究站(BF)的日尺度 NEE 季节动态

Fig. 3 Seasonal dynamics of daily NEE at BF (Dahurian larch forest) and TM (broad-leaved Korean pine forest)

兴安落叶松林生态系统呼吸作用的温度敏感性指数 Q_{10} 是阔叶红松林生态系统的近两倍,其参考呼吸速率(参考温度定义为 10°C)略大于阔叶红松林生态系统(表2)。两类生态系统在研究时段内 2a 之间的差异并不显著。

(2) 日间净生态系统碳交换(NEE)与温度(T_a)

图6(BFa、TMa)给出了半小时尺度上阔叶红松林与兴安落叶松林日间 NEE 以 1°C 气温为间隔进行集合平均后的比较。在半小时尺度上,阔叶红松林与兴安落叶松林日间 NEE 随气温变化规律基本一致:生长季初期随气温上升(在气温小于 10°C 时) NEE 逐渐减小,当气温大于 10°C 时 NEE 开始迅速降低(即碳吸收强度急剧增大),而后在 $20\text{--}26^{\circ}\text{C}$ 之间达到吸收峰值,且在此温度范围内维持较强碳吸收;至 $26\text{--}28^{\circ}\text{C}$ 时, NEE 开始随气温上升而增大,碳吸收逐渐减弱。如果仅考虑温度因子,在半小时尺度上阔叶红松林与兴安落叶松林的 NEE 在气温为 $6\text{--}9^{\circ}\text{C}$ 时逐渐由正值转变为负值,阔叶红松林生态系统转变的气温临界点较兴安落叶松林略低。

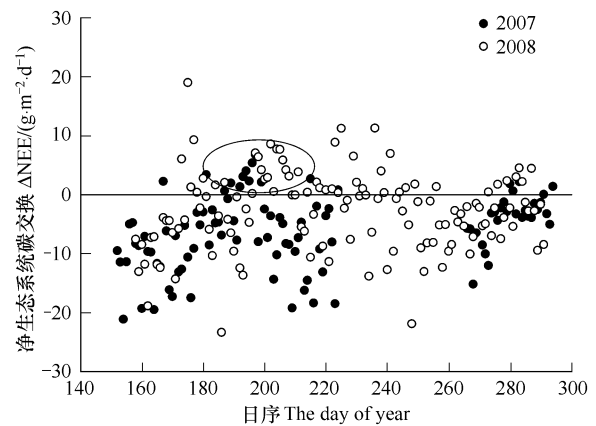


图4 日尺度两类生态系统 NEE 差值季节动态 ($\Delta NEE = NEE_{TM} - NEE_{BF}$)

Fig. 4 Seasonal dynamic of daily NEE difference between TM (broad-leaved Korean pine forest) and BF (Dahurian larch forest)

表2 阔叶红松林与兴安落叶松林的生态系统呼吸作用比较

Table 2 Comparison of the ecosystem respiration from the Dahurian larch forest and the broad-leaved Korean pine forest

站点 Site	年份 Year	样本量 Samples	决定系数 Determination coefficient	显著性 Significance	参考呼吸 Reference respiration $/(\text{mg m}^{-2} \text{s}^{-1})$	温度敏感性指数 Temperature sensitivity index
阔叶红松林	2007	2052	0.16	<0.01	0.0355	1.98
Broad-leaved Korean pine forest	2008	1794	0.09	<0.01	0.0417	1.82
兴安落叶松林	2007	482	0.24	<0.01	0.0408	3.65
Dahurian larch forest	2008	889	0.19	<0.01	0.0512	3.22

在日尺度上,阔叶红松林与兴安落叶松林的 NEE 先随温度变化有一个不太明显的上升过程,这时两生态系统都表现为碳排放。这可能是由于在非生长季向生长季过渡时期,由于温度回升较快,土壤开始解冻,土壤

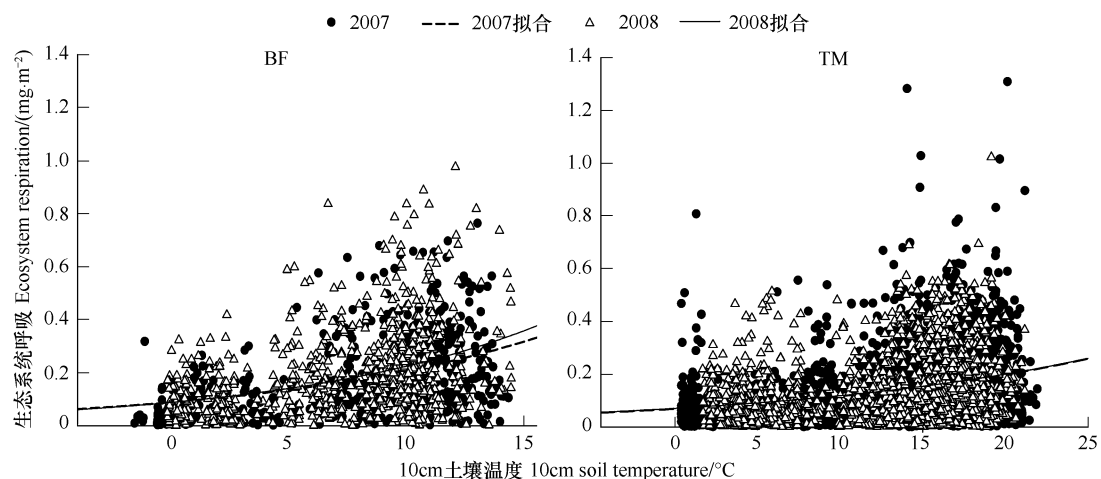


图5 黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(TM)与中国北方林森林生态系统定位研究站(BF)的半小时尺度生态系统呼吸作用对10 cm 土壤温度的响应

Fig. 5 Responses of ecosystem respiration on half-hour time scale to 10cm soil temperature at BF (Dahurian larch forest) and TM (broad-leaved Korean pine forest)

微生物开始活跃,生态系统呼吸急剧增加,而此时植物刚刚开始展叶,受到叶面积的限制,光合作用较弱,故碳排放总体上有增强趋势。随着温度继续升高,植物生长越来越旺盛,叶面积逐渐增大,碳吸收强度也随之增大。在观测时期内碳吸收强度并未随温度的升高达到饱和。统计分析表明,在日尺度上,阔叶红松林与兴安落叶松林的 NEE 在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右由正值逐渐转变为负值,即由碳释放转变为碳吸收(图6 BFb、TMb)。

2.3.2 净生态系统碳交换(NEE)与饱和水汽压差(VPD)

图7(BF、TM)给出了半小时尺度上阔叶红松林与兴安落叶松林的 NEE 以 0.5 kPa 饱和水汽压差(VPD)为间隔进行集合平均后的比较。研究期间,阔叶红松林与兴安落叶松林的 NEE 随 VPD 变化规律基本一致:先随 VPD 增大而减小,在 VPD 为 $1\text{—}2\text{ kPa}$ 时 NEE 达到最小值(即碳吸收强度最大),而后 NEE 随 VPD 增大而增大。2008年当 VPD 处于 $3\text{—}4\text{ kPa}$ 范围时, NEE 的变异较大,两者之间的关系不明显。在日尺度上,阔叶红松林与兴安落叶松林 NEE 首先随 VPD 增大迅速减小,而后随 VPD 增大有所增大,但是变化幅度较小。

2.4 净生态系统碳交换(NEE)与潜热通量(LE)

在半小时尺度上, NEE 随潜热通量 LE (也即蒸散)的增大而减小,即蒸散越大,碳吸收强度越大;但当 LE 大于 200 W m^{-2} 时, NEE 的减小趋势明显变弱,维持稳定的碳吸收峰值(图8 BFa、TMa)。在日尺度上, NEE 随 LE 的增大直线下降。日蒸散量(LE)每增加 1 mm ,阔叶红松林与兴安落叶松林日 NEE 分别减小 $3.98\text{ g CO}_2\text{ m}^{-2}$ 与 $4.18\text{ g CO}_2\text{ m}^{-2}$,说明兴安落叶松林生态系统的水分利用效率略高于阔叶红松林生态系统(图8 BFb、TMb)。

3 结论与讨论

3.1 碳通量比较

2007年和2008年生长季,阔叶红松林与兴安落叶松林生态系统都表现为碳汇,但阔叶红松林生态系统碳吸收强度(研究期间为 199 g C m^{-2})显著大于兴安落叶松林生态系统(研究期间为 49 g C m^{-2})。阔叶红松林与兴安落叶松林 NEE 之间的显著差异主要由以下原因造成:

(1) 阔叶红松林生态系统生长季的叶面积指数大于兴安落叶松林。由于阔叶红松林属于成熟的温带针阔叶混交林,其森林结构复杂,乔灌木各层都有较高的物种多样性^[49],而兴安落叶松林树种单一,灌木层与草本层都较少^[50],因此两类生态系统结构本身即决定了其 NEE 之间的显著差异;

(2) 尽管阔叶红松林在生长季常受到干旱的影响,但总体而言黑龙江气象局伊春阔叶红松林试验站的水、热条件都要优于中国北方林森林生态系统定位研究站(表1)。

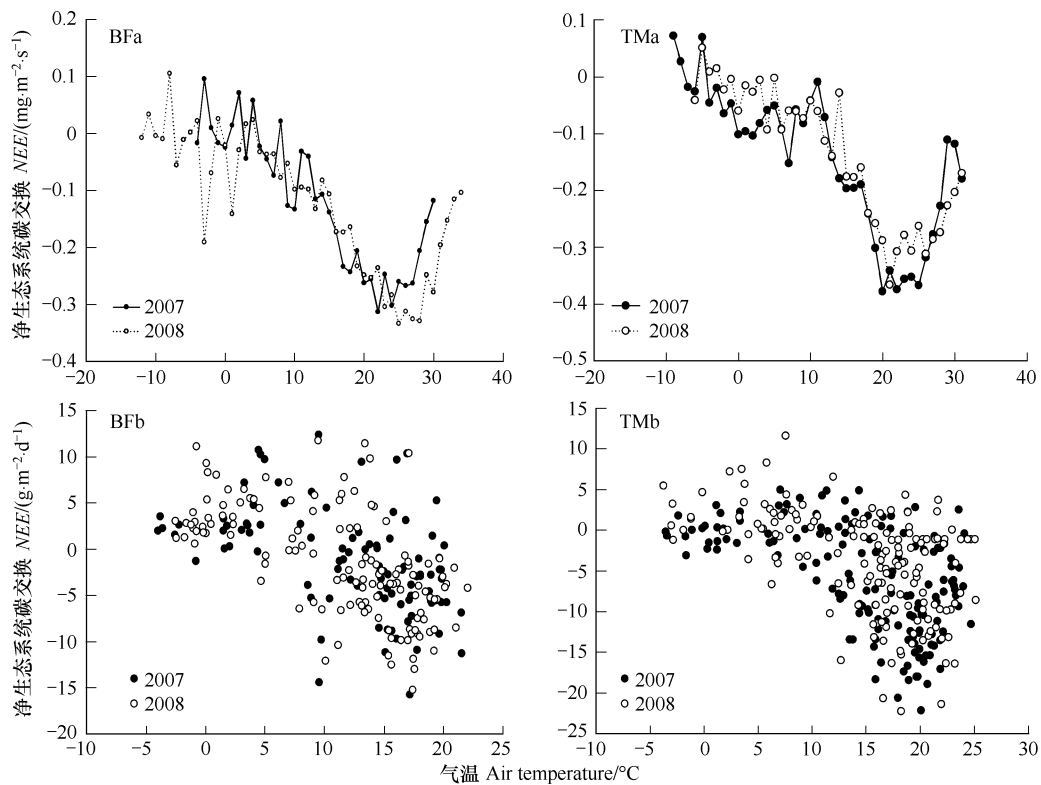


图6 黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(TM)与中国北方森林生态系统定位研究站(BF)半小时(日间)与日尺度 NEE 对气温响应
Fig. 6 Responses of daytime NEE on half-hour time scale and daily NEE to air temperature at BF (Dahurian larch forest) and TM (broad-leaved Korean pine forest)

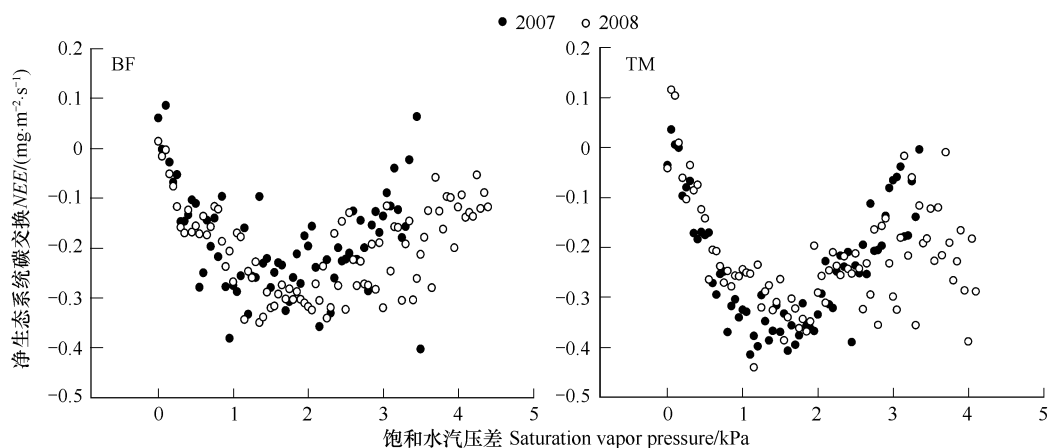


图7 黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(TM)与中国北方森林生态系统定位研究站(BF)的半小时尺度白天 NEE 对 VPD 的响应
Fig. 7 Response of Daytime NEE on half-hour time scale to VPD at BF (Dahurian larch forest) and TM (broad-leaved Korean pine forest)

(3) 由于两生态系统气候条件的差异,阔叶红松林生态系统碳吸收持续的时间(NEE 为负值的总日数)比兴安落叶松林长,这从两类生态系统各月 NEE 的日动态也可以看出。而生长季长会导致碳吸收总量大^[25]。

由于缺乏观测数据,本研究并未对比两生态系统冬季净碳交换的特征。已有研究表明,阔叶红松林在冬季仍有一定强度的光合作用^[35],在正午可能有短暂的碳吸收,但兴安落叶松林光合作用几乎完全停止,故两生态系统净碳交换量在冬季必定存在较大差异,且对年碳收支有着不可忽略的影响。因此,在今后的工作中

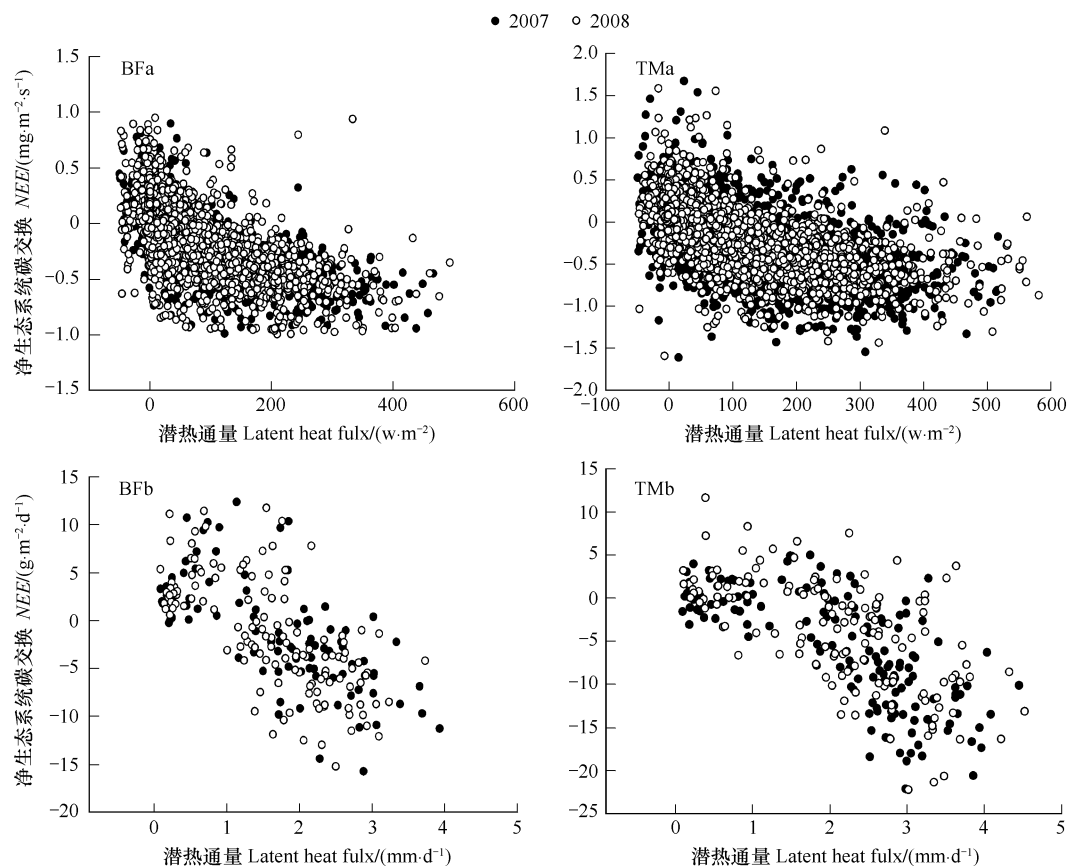


图8 黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站(TM)与中国北方林森林生态系统定位研究站(BF)的半小时尺度日间 NEE 及日尺度 NEE 与 LE 的关系

Fig. 8 Relationship between daytime NEE at half-hour time scale, daily NEE and LE at BF (Dahurian larch forest) and TM (broad-leaved Korean pine forest)

很有必要对两生态系统的年碳收支进行对比,从而更全面的了解两生态系统碳通量的差异。

3.2 生态系统呼吸作用的温度敏感性

兴安落叶松林生态系统呼吸作用的温度敏感性指数(2a 生长季 Q_{10} 平均 3.44)显著大于阔叶红松林生态系统(2a 生长季 Q_{10} 平均 1.9)。关于北半球中高纬度森林生态系统呼吸作用的温度敏感性问题比较复杂,因为该地区有永久性或季节性冻土分布,呼吸对温度的响应并不仅仅体现为温度对酶活性的影响;研究表明,该地区土壤温度(包括深层土壤温度)的升高,会导致活跃层(通常为 0—50 cm)土壤解冻,进而导致可利用呼吸底物的增加,从而提高生态系统呼吸^[8]。但另一方面,土壤解冻会导致土壤含水量的升高,如果这部分土壤水不能及时的从土壤中渗漏或蒸发,又会导致土壤中氧气不足,土壤碳不能及时的得到分解释放。本研究在选取温度指标时,对不同层次的气温以及土壤温度进行了统计对比分析,结果表明,两类生态系统的呼吸作用与 10 cm 土壤温度的相关性最好,这也说明,与其他地区相比,北半球中高纬度森林生态系统的土壤及生态系统呼吸可能受较深层土壤温度的控制。

3.3 碳释放/吸收临界温度

阔叶红松林与兴安落叶林 NEE 的季节动态都呈典型的“U”型曲线。在非生长季,由于光合作用几乎完全停止,生态系统表现为净碳释放,随着温度的升高,植被开始逐渐恢复生长,生态系统也逐渐由碳释放转变为碳吸收。因此,确定生态系统由碳源向碳汇转变的临界温度(通常以日均温为指标)非常重要,在碳通量研究中,据此划分生长季与非生长季比传统的划分方法更有参考意义。研究期间,阔叶红松林与兴安落叶松林日尺度碳源/汇临界温度均在 10 °C 左右,高于以往多数研究中所使用的 5 °C^[26, 30]。这表明,不同生态系统的

碳源/汇临界温度可能存在显著差异,简单的使用某一确定温度作为碳源/汇的转变临界温度并以此来划分生长季的方法是不合理的,会造成一定的误差。

3.4 本研究的不足

由于中国北方森林生态系统定位研究站的通量塔(兴安落叶松林)位于黑龙江呼中国家级自然保护区核心实验区内,冬季保护区内道路积雪厚度在数十厘米,数据获取非常艰难,直至现在该站仍没有获取全年的涡度相关通量数据,故只能对两类生态系统生长季通量动态进行对比分析。期望今后能通过仪器的发展以及站内基础设施的完善,获取全年的通量数据进而对该地区年碳收支进行更为准确的估算。

同时,光合有效辐射是净生态系统碳交换的主要影响因子之一,特别是在半小时尺度上。但是由于黑龙江省气象局伊春阔叶红松林试验站没有安装辐射相关测量仪器,本研究未能对光合有效辐射及其对碳通量的影响进行对比分析。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2007: 5-6.
- [2] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric carbon dioxide budget. *Science*, 1990, 247: 1431-1438.
- [3] IGBP Terrestrial Carbon Working Group. The terrestrial carbon cycle: implications for the Kyoto Protocol. *Science*, 1998, 280: 1393-1394.
- [4] Tao B, Ge Q S, Li K R, Shao X M. Progress in the studies on carbon cycle in terrestrial ecosystem. *Geographical Research*, 2001, 20(5): 564-575.
- [5] Dixon R K, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263: 185-190.
- [6] Ciais P, Tans P P, Trolier M, White J W C, Francey R J. A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂. *Science*, 1995, 269: 1098-1102.
- [7] Fan S, Gloor M, Mahlman J, Pacala S, Sarmiento J, Takahashi T, Tans P. A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 1998, 282: 442-446.
- [8] Goulden M L, Wofsy S C, Harden J W, Trumbore S E, Crill P M, Gower S T, Fries T, Daube B C, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger J W. Sensitivity of boreal forest carbon balance to soil thaw. *Science*, 1998, 279: 214-217.
- [9] Fang J Y, Piao S L, Zhao S Q. The carbon sink: the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 594-602.
- [10] Goodale C L, Apps M J, Birdsey R A, Birdsey R A, Field C B, Heath L S, Houghton R A, Jenkins J C, Kohlmaier G H, Kurz W, Liu S R, Nabuurs G J, Nilsson S, Shvidenko A Z. Forest carbon sinks in the northern hemisphere. *Ecological Applications*, 2002, 12(3): 891-899.
- [11] Betts R A, Cox P M, Lee S E, Woodward F I. Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature*, 1997, 387: 796-799.
- [12] Qi Y. The effect of climate change on vegetation at high latitudes of the northern hemisphere: a functional analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(4): 474-477.
- [13] Bachelet D, Neilson R P, Lenihan J M, Drapek R J. Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the United States. *Ecosystems*, 2001, 4(3): 164-185.
- [14] Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, Prentice I C, Betts R A, Brovkin V, Cox P M, Fisher V, Foley J, Friend A D, Kucharik C, Lomas M R, Ramankutty N, Sitch S, Smith B, White A, Molling C Y. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 2001, 7(4): 357-373.
- [15] Walther G R, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee T J C, Fromentin J M, Guldberg O H, Bairlein F. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416: 389-395.
- [16] Pearson R G, Dawson T P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?. *Global Ecology & Biogeography*, 2003, 12: 361-371.
- [17] Wu Z F, Deng H P. Responses of broad-leaved *Pinus koraiensis* forests to global climate change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(S): 81-91.
- [18] Guo Q S, Yan H, Xu D Y, Wang B. Effects of climate changes on geographical distribution of *Pinus Koraiensis* in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(5): 484-488.
- [19] Pan Y D, Melillo J M, Kicklighter D W, Xiao X M, Meguire A D. Modeling structural and functional responses of terrestrial ecosystems in China to changes in climate and atmospheric CO₂. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(2): 175-189.
- [20] Weng E S, Zhou G S. Modeling distribution changes of vegetation in China under future climate change. *Environmental Modeling and Assessment*, 2006, 11(1): 45-58.

- [21] Li F, Zhou G S, Cao M C. Responses of *Larix gmelinii* geographical distribution to future climate change: A simulation study. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(12): 2255-2260.
- [22] Cheng X X, Yan X D. Effects of global climate change on forest succession in Daxing'anling of Northeast China. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1277-1284.
- [23] Liu D, Na J H, Du C Y, Zhang J X. Changes in eco-geographical distributions of major forestry species in Heilongjiang Province during 1961—2003. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(2): 100-105.
- [24] Leng W F, He H S, Liu H J. Response of larch species to climate changes. Journal of Plant Ecology, 2008, 1(3): 203-205.
- [25] Baldocchi D, Falge E, Gu L H, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X H, Malhi Y, Meyers T, William M, Oechel W, Paw U K T, Pilegaard K, Schmid H P, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Fluxnet: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415-2434.
- [26] 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, Vygorskaya N N. Forest-atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 90(4): 291-306.
- [27] Lindroth A, Grelle A, Moren A S. Long-term measurements of boreal forest carbon balance reveal large temperature sensitivity. Global Change Biology, 1998, 4(4): 443-450.
- [28] Hollinger D Y, Goltz S M, Davidson E A, Lee J T, Tu K, Valentine H T. Seasonal patterns and environmental control of carbon dioxide and water vapour exchange in an ecotonal boreal forest. Global Change Biology, 1999, 5(8): 891-902.
- [29] Barr A G, Griffis T J, Black T A, Lee X, Staebler R M, Fuentes J D, Chen Z, Morgenstern K. Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(5): 813-822.
- [30] Li S G, Asanuma J, Kotani A, Eugster W, Davaa G, Oyunbaatar D, Sugita M. Year-round measurements of net ecosystem CO₂ flux over a montane larch forest in Mongolia. Journal of Geophysical Research, 2005, 110(D9): D09303.
- [31] McCaughey J H, Pejam M R, Arain M A, Cameron D A. Carbon dioxide and energy fluxes from a boreal mixed wood forest ecosystem in Ontario, Canada. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140(1/4): 79-96.
- [32] Bergeron O, Margolis H A, Black T A, Coursolle C, Dunn A L, Barr A G, Wofsy S C. Comparison of carbon dioxide fluxes over three boreal black spruce forests in Canada. Global Change Biology, 2007, 13(1): 89-107.
- [33] Nakai Y, Matsuura Y, Kajimoto T, Abaimov A P, Yamamoto S, Zyryanova O A. Eddy covariance CO₂ flux above a Gmelini larch forest on continuous permafrost in Central Siberia during a growing season. Theoretical and Applied Climatology, 2008, 93(3/4): 133-147.
- [34] 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(S2): 103-108.
- [35] Zhang J H, Yu G R, Han S J, Guan D X, Sun X M. Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux and its controlling mechanisms above a broad-leaved Korean pine mixed forest. Science in China, Series D, 2006, 36(S1): 60-69.
- [36] Guan D X, Wu J B, Jin C J, Han S J, Zhang M, Shi T T. Diurnal and seasonal variation of CO₂ flux above the Korean Pine and broad-leaved mixed forest in Changbai Mountain. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(10): 123-128.
- [37] Wang W J, Zu Y G, Cui S, Hirano T, Watanabe Y, Koike T. Carbon dioxide exchange of larch (*Larix gmelinii*) cones during development. Tree Physiology, 2006, 26(10): 1363-1368.
- [38] Cui S. Study on the CO₂ flux of a larch plantation in NE China by the micrometeorological method. Harbin: Northeast Forestry University, 2007. 1-6.
- [39] Wang W J, Zu Y G, Wang H M, Yang F J, Nobuko S, Takayoshi K, Susumu Y. Preliminary study of CO₂ flux of a larch forest by eddy covariance and eco-physiological methods. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 118-128.
- [40] Wu J B, Guan D X, Sun X M, Shi T T, Han S J, Jin C J. CO₂ turbulent exchange in a broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(5): 951-956.
- [41] Wang H M, Saigusa N, Zu Y G, Wang W J, Susumu Y, Hiroaki K. Carbon fluxes and their response to environmental variables in Dahurian larch forest ecosystem in northeast China. Journal of Forestry Research, 2008, 19(1): 1-10.
- [42] Tang F D, Han S J, Zhang J H. Carbon dynamics of broad-leaved Korean pine forest ecosystem in Changbai Mountains and its responses to climate change. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(6): 1285-1292.
- [43] 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(1): 134-150.
- [44] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. Biogeosciences, 2006, 3(4): 571-583.
- [45] Zhu Z L, Sun X M, Wen X F, Zhou Y L, Tian J, Yuan G F. Study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data in

ChinaFLUX. Science in China, Series D, 2006, 36(S1): 34-44.

- [46] 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, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sum of net ecosystem exchange. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [47] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. Functional Ecology, 1994(8): 315-323.
- [48] Wu J B, Guan D X, Sun X M, Zhang M, Shi T T, Han S J, Jin C J. Photosynthetic characteristics of dominant tree species and canopy in the broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountains. Science in China, Series D, 2006, 36(S1): 83-90.
- [49] Cao W, Li Y, Wang S L, Yu X H, Zhu C X, Liu T Y. Community type and species diversity of broad-leaved Korean pine mixed forest in Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2406-2411.
- [50] Song G L, Yang G T. Comparison of species diversity between *Larix gmelini* pure forest and *Larix gmelini*-*Betula platyphylla* mixed forest in Daxing'an Mountains. Journal of Forestry Research, 2001, 12(2): 136-138.

参考文献:

- [4] 陶波, 葛全胜, 李克让, 邵雪梅. 陆地生态系统碳循环研究进展. 地理研究, 2001, 20(5): 564-575.
- [9] 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, 25(5): 594-602.
- [12] 齐晔. 北半球高纬度地区气候变化对植被的影响途径和机制. 生态学报, 1999, 19(4): 474-477.
- [17] 吴正方, 邓慧平. 东北阔叶红松林全球气候变化响应研究. 地理学报, 1996, 51(增刊 I): 81-91.
- [18] 郭泉水, 阎洪, 徐德应, 王兵. 气候变化对我国红松林地理分布影响的研究. 生态学报, 1998, 18(5): 484-488.
- [19] 潘愉德, Melillo J M, Kicklighter D W, 肖向明, Mcguire A D. 大气 CO₂ 升高及气候变化对中国陆地生态系统结构与功能的制约和影响. 植物生态学报, 2001, 25(2): 175-189.
- [21] 李峰, 周广胜, 曹铭昌. 兴安落叶松地理分布对气候变化响应的模拟. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2255-2260.
- [22] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国大兴安岭森林演替动态的影响. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1277-1284.
- [23] 刘丹, 那继海, 杜春英, 张剑侠. 1961—2003 年黑龙江省主要树种的生态地理分布变化. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 100-105.
- [34] 关德新, 吴家兵, 于贵瑞. 气象条件对长白山阔叶红松林 CO₂ 通量的影响. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, 34(增刊 II): 103-108.
- [35] 张军辉, 于贵瑞, 韩士杰, 关德新, 孙晓敏. 长白山阔叶红松林 CO₂ 通量季节和年际变化特征及控制机制. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2006, 36(增刊 I): 60-69.
- [36] 关德新, 吴家兵, 金昌杰, 韩士杰, 张弥, 施婷婷. 长白山红松阔叶混交林 CO₂ 通量的日变化与季节变化. 林业科学, 2006, 42(10): 123-128.
- [38] 崔崧. 基于微气象学方法的落叶松人工林 CO₂ 通量研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007: 1-6.
- [39] 王文杰, 祖元刚, 王辉民, 杨逢建, 三枝信子, 小池孝良, 山本晋. 基于涡度协方差法和生理生态法对落叶松林 CO₂ 通量的初步研究. 植物生态学报, 2007, 31(1): 118-128.
- [40] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 施婷婷, 韩士杰, 金昌杰. 长白山阔叶红松林二氧化碳湍流交换特征. 应用生态学报, 2007, 18(5): 951-956.
- [42] 唐凤德, 韩士杰, 张军辉. 长白山阔叶红松林生态系统碳动态及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1285-1292.
- [45] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 周艳莲, 田静, 袁国富. 中国通量网(ChinaFLUX)夜间 CO₂ 涡度相关通量数据处理方法研究. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2006, 36(增刊 I): 34-44.
- [48] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 张弥, 施婷婷, 韩士杰, 金昌杰. 长白山阔叶红松林主要树种及群落冠层光合特征. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2006, 36(增刊 I): 83-90.
- [49] 曹伟, 李岩, 王树良, 于兴华, 朱彩霞, 刘童燕. 东北阔叶红松林群落类型划分及物种多样性. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2406-2411.