

湖南岳阳地区杨树人工林生态系统净碳 交换季节动态研究*

魏 远¹, 张旭东^{1**}, 江泽平¹, 周金星¹,
汤玉喜², 吴立勋², 黄玲玲¹, 高升华¹

(1. 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; 2. 湖南省林业科学院, 湖南 长沙 410004)

摘要:利用涡度相关法对长江流域杨树人工林 CO₂ 通量季节变化进行了研究。结果表明:CO₂ 通量的日变化特征与杨树所处生长阶段以及光合有效辐射(PAR)有关,夜间生态系统净碳交换(NEE)与5 cm 土壤温度呈指数相关,全年的生态系统净碳交换(NEE)数值波动在-2 ~ 2 mg · m⁻² · s⁻¹之间。生长季 NEE 的变化特点为:早上7点开始生态系统整体表现为吸收 CO₂,到午时(11:00—13:00)NEE 的值较为稳定,日落(18:30—19:00)开始生态系统呼吸作用占主导,而晚上 NEE 的值变化不大。CO₂ 的最大吸收出现在早上10点左右。NEE 同时表现为较为明显的季节变化,在生长季节(4—9月)NEE 多为负值,生态系统整体表现为对 CO₂ 的吸收,而在非生长季表现为一定强度的碳释放,值得注意的是在2006年的6月碳固定能力弱于生长季的其他月份,原因是长期降雨导致土壤呼吸加剧和水淹的生理胁迫导致杨树呼吸作用加剧。2006年全年 NEE 为-579 g · m⁻²,说明该生态系统具有明显的碳汇功能。

关键词:CO₂ 通量;涡度相关法;动态变化;生态系统净碳交换;杨树人工林

中图分类号:S792.11

文献标识码:A

Study on the Seasonal Dynamic of Net Ecosystem Exchange over a Poplar Plantation of Yueyang City in Hu'nan Province

WEI Yuan¹, ZHANG Xu-dong¹, JIANG Ze-ping¹, ZHOU Jin-xing¹, TANG Yu-xi²,
WU Li-xun², HUANG Ling-ling¹, GAO Sheng-hua¹

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. Hu'nan Academy of Forestry, Changsha 410004, Hu'nan, China)

Abstract:The dynamics in different time-scale of Net Ecosystem Exchange(NEE) in poplar forest of the Yangtze River were studied by using an eddy covariance method. The following results were obtained: Daily CO₂ flux was closely related to growing stages and photosynthetic active radiation (PAR), and night CO₂ flux showed an exponential regression relationship with 5 cm depth soil temperature. The CO₂ flux between forest and atmosphere ranged from -2 mg · m⁻² · s⁻¹ to 2 mg · m⁻² · s⁻¹. As for the daily change of NEE in the growing season, it begin to absorb carbon dioxide and increase after 7:00 AM, and keep stable from 11:00AM to 1:00 PM resulting from PAR then decrease and after 6:30PM change to discharge carbon dioxide to the atmosphere, lastly change gradually at night. The maximum uptake occurred at about 10 o'clock of local time in clear day. The NEE also had obviously

收稿日期:2008-04-15 修回日期:2010-05-16

基金项目:国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A15);

作者简介:魏 远(1983—),男,安徽合肥人,在读博士生,主要从事生态系统生态学与修复生态学相关研究。

* 致谢美国托莱多大学陈吉泉教授,美国北卡罗来纳州立大学 Asko 副教授对本文数据处理给予的帮助!

** 通讯作者:张旭东, zhxd@caf.ac.cn

seasonal variation that was mainly controlled by temperature. Remarkable uptake occurred in blooming growing season and weak respiration occurred in dormant season. Assimilation and respiration were nearly balanced during the transition of growing and dormant seasons. Poplar forests are one of carbon sinks. The annual carbon uptake of the ecosystem was $-579 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ in 2006. It is in 2006 when the serious water logging happened that plantation still absorbed carbon dioxide from the atmosphere in the whole year, which shows that the poplar forest plays an important role in improving the carbon sink of terrestrial ecosystem.

Key word: CO_2 flux; eddy-covariance; dynamic variation; net ecosystem exchange; poplar forest

目前全球的人工林面积为 1.87 亿 hm^2 , 约占全球森林面积的 5%; 第 5 次全国森林资源清查资料显示, 我国林地面积 15 894.1 万 hm^2 , 森林覆盖率达到 16.55%, 约占全国土地面积的 23.7%, 约占全球森林的 2.6%。中国是人工林保存面积和年新增面积第一大国, 现存人工林面积 4 666.69 万 hm^2 , 占全国有林地面积的 30.38%。当前, 我国正以极高的造林速度发展, 2040 年森林覆盖率将达到 27.38%^[1]。这样一个庞大的人工林森林生态系统对大气 CO_2 浓度增加究竟将有什么样的作用? 是碳的源还是汇? 这是我国和世界许多国家政府和学者十分关注的问题。因此, 弄清我国人工林生态系统碳循环的真实情况, 了解它在全球气候变化中的作用与地位, 不仅对研究本地区的碳循环至关重要, 而且对研究全球陆地生态系统碳循环也是必不可少的; 同时也是回答我国森林生态系统碳源汇功能的主要依据, 关系到我国林业政策与战略的制定。尽管近年来许多学者已开始对我国人工林碳汇功能进行研究^[2], 但由于我国森林碳循环方面的基础研究还不充分, 缺乏充足的实测数据, 加上我国森林类型复杂多样, 导致我国森林的碳通量估计中有较多的不确定性^[3]。

根据第七次全国森林资源清查报告显示, 中国杨树人工林面积已达 757.23 万 hm^2 , 成为世界上杨树人工林面积最大的国家。此外, 目前世界上还有杨树天然林的优势种林分面积约 2 000 万 hm^2 , 我国 253.03 万 hm^2 , 所以开展针对杨树人工林碳循环的研究, 对杨树林生态系统合理经营管理, 充分发挥其综合生态效应有重要价值。我国对于杨树人工林生态系统碳循环的系统研究开展得较少, 但有关过程研究, 如群落生产力、凋落物量、土壤有机碳动态等已经积累了一定的资料。国内学者对杨树人工林生态系统的碳循环研究多关注于杨树光合作用、生物量动态、凋落物分解、土壤微生物活动及土壤有机碳动态等方面^[4-10]。近年来对杨树生态系统土壤呼

吸也进行了不少研究^[11], 2003 年中国科学院、中国林业科学研究院及与美国多所大学以及美国多家科研机构联合组织了 USCCC (US-China Carbon Consortium), 简称中美碳联盟, 2005 年开始在不同的气候带生态系统类型条件下, 采用统一标准的涡度相关系统, 对各种杨树人工林碳通量进行监测。森林是与全球碳循环密切相关的五大类陆地生态系统之一, 目前国内利用涡度相关方法对杨树林碳通量的长期连续观测研究还比较少。研究杨树人工林 CO_2 通量及水热通量不同时间尺度的变化特征及其影响因素, 对于进一步定量研究区域碳循环和吸收及其对气候变化的影响有重要意义。

涡度相关法、涡度相关技术是一种非破坏性的微气象通量测定技术, 近年来相关技术的进步使长期的涡度相关系统的长期观测成为可能^[12-13]。目前, 涡度相关技术已经广泛应用于陆地生态系统 CO_2 吸收与排放的测定中^[14-16]。涡度相关技术在生态系统尺度水平上研究碳收支的时间分布格局和变率具有其他观测方法无可比拟的优势, 可以直接测定植被/大气间 CO_2 通量密度, 空间尺度上测定范围可以达到 100 m 到几公里, 时间尺度上测定范围可以从小时、天、季节到数年^[17], 而短期的、独立分散的、探索性的研究, 无法确定环境变量与气候变化是如何影响陆地生态系统吸收或释放 CO_2 。近年来, 我国在 CO_2 和水热通量的长期观测方面取得了较大进展, 中国科学院、中国林业科学研究院、中国气象局等部门相继建立了一系列碳通量观测站, 成立了相应的研究小组, 在典型陆地生态系统进行了大量卓有成效的观测和研究^[18-34]。

1 研究材料与方法

1.1 研究区概况

观测样地设在湖南岳阳市君山区内 ($29^{\circ}31'40''\text{N}$, $112^{\circ}51'34''\text{E}$), 本区位于中亚热带向北亚热带过渡气候区, 具有典型的亚热带湿润季风气候特征, 春季多

雨,秋季多旱;年平均降水量 1 200.7 ~ 1 414.6 mm, 年均相对湿度 80%;年平均气温 16.5 ~ 17.0 °C, 极端低温 -13.7 °C, 极端高温 39.3 °C; 无霜期 264 ~ 277 d, 年日照 1 644.3 ~ 1 813.8 h。2006 年气象因子变化见图 1, 生长季叶面积指数为 2.5。

观测站的平均海拔为 31 m。土壤为江湖滩地特有的潮土类型, 土层深度达 2 m 以上, 矿质养分丰富, 有机质含量较高。湖滩地每年汛期平均淹水时间为 20 ~ 50 d, 最长可达 130 d, 其淹水退水受制于长江水位。观测场地面平整, 所观测林地沿长江河道近 10 km, 宽平均约 1 000 m, 构成大范围均一的下垫面, 满足了试验要求盛行风向的风浪区长度。

观测站所在的杨树林生态系统属于黑杨派系列的欧美杨, 无性系包括: 2KEN8 号杨 (*P. deltoides* '2KEN8')、55/56 杨 (*P. deltoides* '55/56')、NL-

80121 杨 (*P. X'nanlin80121'*) 等。现有林分是 2000 年营造, 密度为 495 株 · hm⁻², 株行距为 4 m × 5 m, 平均树高约 16 m, 平均胸径 17.3 cm。林下由于季节性的水淹, 只有草本植物, 而且有很强的季节性生长和分布, 林下草本总盖度为 70% ~ 80%, 主要种类有: 狗牙根 (*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)、水芹 (*Oenanthe javanica* (Bl.) DC.)、扬子毛茛 (*Ranunculus sieboldii* Miq.)、益母草 (*Leonurus artemisia* (Laur.) S. Y. Hu)、羊蹄 (*Rumex japonicus* Houtt.)、苔草 (*Carex sp.* Gaudin)、鸡矢藤 (*Paederia scandens* (Lour.) Merr.)、泥胡菜 (*Hemistepta lyrata* (Bunge) Bunge)、大蓟 (*Cirsium japonicum* Fisch. ex DC.)、一年蓬 (*Erigeron annuus* (L.) Pers.)、土牛膝 (*Achyranthes aspera* L.) 等。

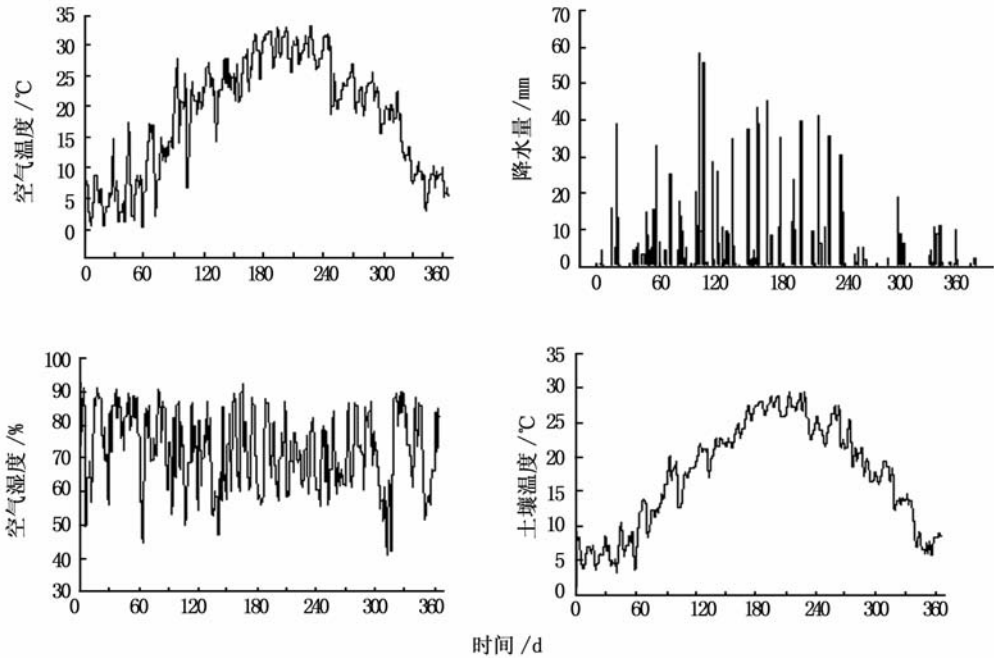


图 1 2006 年气温、降水、湿度和土壤温度随季节的变化

1.2 观测系统

观测系统 (EC 系统) 安装在高 35 m 的铁塔上, 并于 2005 年顺利运转, 每 15 d 读取数据 1 次。电力供应采用 220 V 交流电, 并且使用蓄电池作为连续非间断电源。观测系统主要有涡度相关观测系统和微气象观测系统两部分组成。

1.2.1 涡度相关系统 开路式涡度相关系统主要由开路快速响应红外 CO₂-H₂O 分析仪 (Li-7500, Lincoln Nebraska, USA)、超声风速仪 (CSAT-3, Campbell, Utah, USA) 和数据采集器 (CR5000,

Campbell, Utah, USA) 组成。观测仪器安装在 25 m 高度, 测量植被与大气间的通量交换。采用超声风速仪测量三维风速和气温, 开路红外分析仪测量二氧化碳和水汽浓度变化, 采样频率为 10 Hz, 实时观测的数据记录在数据采集器, 同时在线计算 30 min 的通量及其它各种必要的协方差并把结果存储在 PC 卡内。按照微气象学符号协定, 生态系统净碳交换 (NEE)、潜热通量 (Le) 和热量通量 (Hs) 向下通量用负号表示。为了对通量系统的工作状态进行长期监测, 开路式涡度相关系统将空气温度和湿度传感

器(HMP45C, Vaisala Inc, Finland)安装在防辐射罩内作为系统的标准配置。为尽量减小通量塔身对来流方向空气运动的扭曲,将红外 CO₂-H₂O 分析仪和三维超声风速仪安装在一定长度为 50 cm 的支臂上,指向正北风向。

1.2.2 微气象观测系统 塔上安装了微气象观测系统,包括 4 层大气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Finland),安装高度为 18、14、11、4 m。冠层上净辐射(CNR-1, Kipp&Zonen, The Netherlands)和光合有效辐射传感器设于 23 m (Li-190Sb, LiCor Inc., USA)。观测塔 23 m 高度处安装有雨量测量装置(TE525, R. M. Young, USA),同时安装了 4 层(20、14、8、2 m)CO₂ 浓度梯度观测系统,通过采样管送入到分析仪(Li-840, LiCor., USA)进行分析。土壤中安装了 3 层土壤湿度传感器(257-L, Campbell, USA),深度分别为 5、10、20 cm。3 个土壤热通量板(HFP01, Hukseflux, The Netherlands),设置在地下 2 cm 处;地下部分观测的数据原始采样频率为 0.5 Hz,通过数据采集器(CR23X, Campbell, USA)采集并按 30 min 计算平均值进行存储。光合有效辐射、净辐射、土壤热通量与 *NEE*、*LE*、*Hs* 相反,正号表示向下通量。

1.3 涡度相关数据的计算与处理

根据三维超声风速仪和开路 CO₂/H₂O 分析仪,以 30 min 为平均长度,采用涡度相关方法实时计算冠层以上 CO₂ 通量 *F_c*,计算公式为:

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

式(1)中:*w'*和*c'*分别表示垂直风速和 CO₂ 浓度瞬时值与平均值的偏差,上横线表示协方差。由于水热通量的存在引起大气微量成分(如 CO₂、水汽)密度的变化,因此,涡度相关仪测量的 CO₂ 通量结果和潜热通量结果需要进行密度脉动修订。本研究采用了常用的 WPL 校正法对数据做了校正^[35]。

通常在使用涡度相关系统进行通量测定时,应使超声风速仪测定的垂直方向上平均风速等于或接近于零,但由于安装倾斜或试验场地地势不平坦将直接影响平均垂直通量的计算结果^[36-37]。Dyer^[37]曾报道超声风速仪倾斜 1°切向动量应力的误差可达 14%,这种误差通常用坐标变换方法进行修订,将基于仪器坐标系的三维风速分量转换为目标坐标系下的风速分量,使垂直风正交于平均气流方向。目前,应用较多的是流线坐标变换和平面拟合坐标变换^[38-40]。本文采用了流线坐标变换中的三维坐

标旋转和平面拟合坐标变换。

探头高度以下的大气 CO₂ 储存项 *F_s* 利用 4 层 CO₂ 浓度梯度观测系统进行计算^[41-43],则生态系统净交换为:*NEE* = *F_c* + *F_s*

假设水平湍流通量的漏流为零,同时没有水平平流现象,则 *NEE* 定义为:

$$NEE = \int_0^{z_r} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz + (\overline{w'c'})_r + \bar{w}r(\bar{c}_r - \langle \bar{c} \rangle) \quad (2)$$

式(2)中:下角标 *r* 表示在观测高度 *z_r* 的量 $\langle \bar{c} \rangle$,表示地表和观测高度的平均浓度。式(2)的右边项表明了 *NEE* 由 4 部分组成:观测高度以下的储存项(第 1 项)、湍流通量项(第 2 项)、由平流扩散/幅合或非零垂直速度产生的物质流量(第 3 项),最后 1 项被认为是夜间由于垂直方向的大气热量不均匀引起大气下沉而造成的通量问题^[43-44]。由于试验条件所限,本文 *NEE* 计算中仅取前 2 项。

为了控制数据质量,从时间系列中剔除方差大于 3 的数据,并根据超声风速仪观测的摩擦速度剔除弱湍流条件(摩擦速度小于 0.2 m·s⁻¹)的数据,临界摩擦速度 0.2 m·s⁻¹根据夏季(6—8 月)夜间 CO₂ 通量与摩擦速度的经验关系确定,这与其他森林生态系统研究结果相似^[45-46]。

通过初步数据筛选,年有效数据占 88.7%,由于降雨,开路 CO₂/H₂O 分析仪探测光路受阻或停电和仪器维护等原因造成的数据缺失,用以下方法插补:小于 4 h 的短时间数据缺失,用邻近值线性内插方法插补,大于 4 h,按 7 d 分段的阶段数据规律进行插补,按照白天和夜间采用不同的方法。

白天 *NEE*(*PAR* ≥ 1 W·m⁻²)与光合有效辐射(*PAR*)的关系用式(3)拟合^[47]。

$$NEE_{day} = \frac{\alpha \times PAR \times P_{max}}{\alpha \times PAR + P_{max}} + R_d \quad (3)$$

*NEE_{day}*是 *PAR* ≥ 1 W·m⁻²时的净生态系统交换量,α 为生态系统光合作用的表观光量子效率,*P_{max}*为生态系统最大光合速率,*R_d*为白天生态系统暗呼吸速率。

夜间 *NEE*(*PAR* < 1 W·m⁻²)与表层土壤温度的关系用指数方程拟合^[48]:

$$NEE_n = a \exp^{(bT_s)} \quad (4)$$

式(4)中:*NEE_n*为夜间生态系统净碳交换,即生态系统呼吸,*T_s*为 5 cm 土壤温度,*a*、*b*是拟合参数。

2 结果与分析

2.1 生态系统净碳交换(*NEE*)的日变化

2.1.1 *NEE* 日变化 图2表明:在杨树生长季(4—9月),*NEE* 存在明显的日变化,呈明显的单峰曲线特征,吸收峰多集中在每天的8:00—16:00。非生长季*NEE* 日变化波动很小。在各个月的*NEE* 变化图可以观察到,在8:00和18:00点左右,*NEE* 符号发生转变时刻通

量有突变现象,这主要是由于大气稳定度变化引起的。中午12:00以前净碳交换量逐渐增大,中午12点左右达到最大值,12点以后净碳交换量逐渐减小。4—6月杨树林净碳交换量波动范围分别为0.23 ~ -0.61、0.21 ~ -0.69、0.29 ~ -1.43 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;7—9月杨树林净碳交换量波动范围分别为0.22 ~ -0.95、0.53 ~ -1.27、0.56 ~ -0.76 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

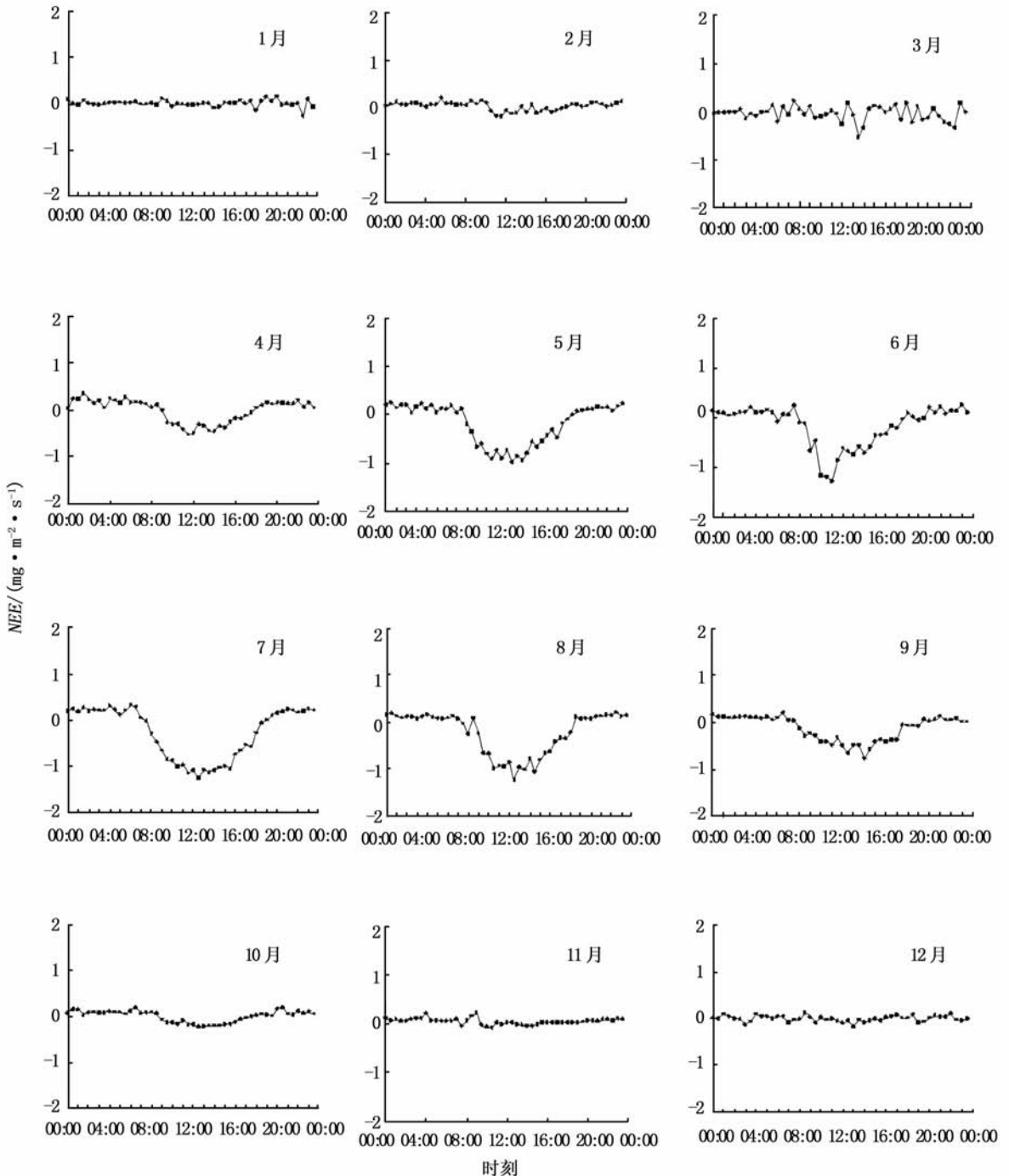


图2 2006年不同月份杨树人工林生态系统*NEE*的日变化

2.1.2 生长季白天 *NEE* 的光响应曲线及其参数 在植物生长比较旺盛的季节,白天一般以光合同化作用占优势;因此,影响植被与大气之间白天碳通量的环境因子是控制植物光合有效辐射 (*PAR*) 为主。本观测的 *NEE* 与光合有效辐射的模型模拟参数见表 1。由图 3 可得:5—8 月份生长旺季 *NEE* 与 *PAR* 的相关系数分别为:0.76、0.81、0.82、0.73,在生长季,滩地杨树树林生态系统的 *NEE* 与 *PAR* 显著相关。光合作用随着 *PAR* 的增大而逐渐增强,*NEE* 负值也随之增大,森林生态系统对 CO_2 的吸收量呈增大的趋势,系统的碳汇作用也增大;而当光合有效辐射达到一定的范围后,净碳交换量的分布出现分散现象。*NEE* 值达到一定水平时,有效辐射继续增加,但系统的碳汇量不再增大,系统基本上对光合有效辐射的响应达到饱和状

态。 CO_2 的吸收不随 *PAR* 值的增加而一直增加,晴天的最大通量出现在上午 8:00—10:00,而不在 *PAR* 最大的午时,这主要是受空气饱和气压差 (*VPD*) 所制约,晴天中午高 *VPD* 迫使叶片光合作用下降。

表 1 Michaelis-Menten 模型模拟参数

时间(年-月)	α	$P_{\max}/$ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$R_d/$ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
2006-04	0.001 6	2.37	0.156
2006-05	0.002 3	2.62	0.185
2006-06	0.001 3	3.02	0.221
2006-07	0.002 6	3.04	0.260
2006-08	0.001 7	2.91	0.118
2006-09	0.001 1	1.49	0.117
2006-10	0.000 9	0.48	0.059

注: P_{\max} 为生态系统最大光合速率; R_d 为白天生态系统暗呼吸速率。

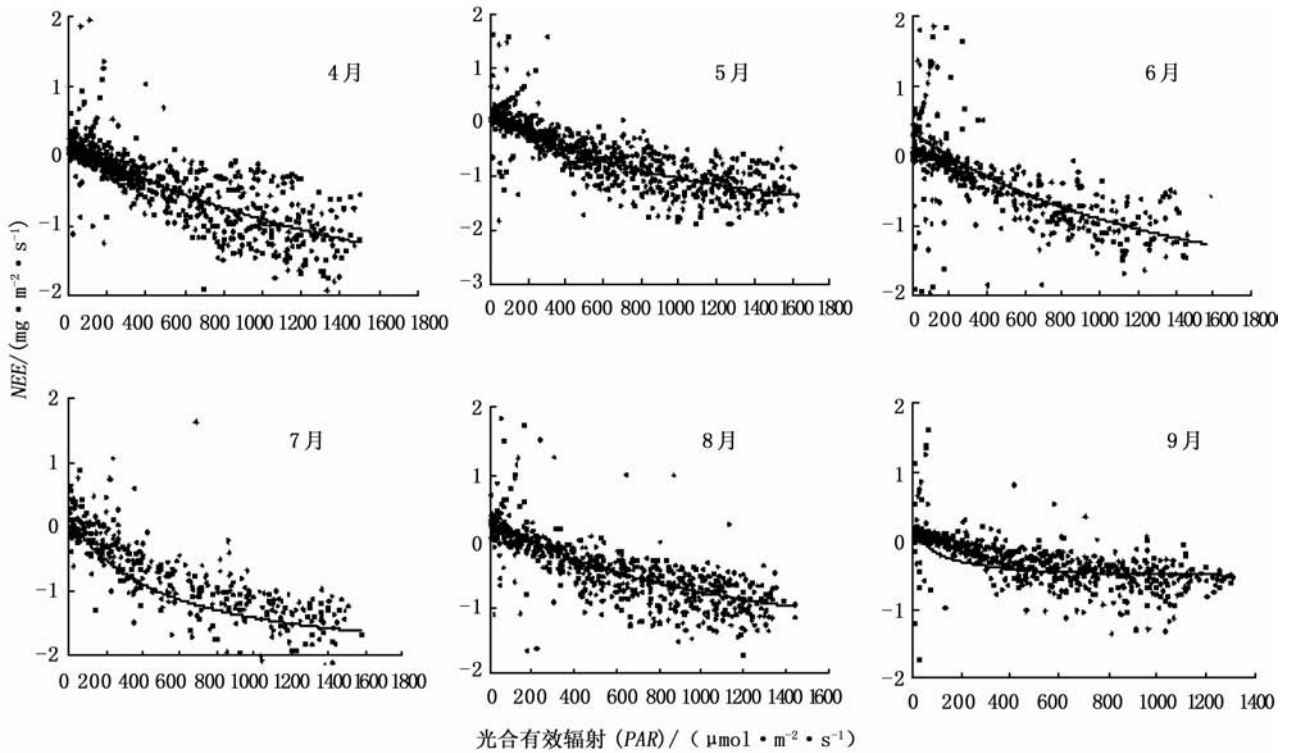


图 3 生长季白天生态系统净碳交换 (*NEE*) 的光响应曲线

2.2 生态系统的呼吸

日出后随光照增加生态系统由 CO_2 释放转化为吸收,在午时左右达到最大;在日落前由吸收转化为释放,夜间保持释放,土壤呼吸占很大比重,研究表明其值与表层 (5 cm) 土壤温度有一定关系 (如图 4),二者关系用指数方程拟合。

2.3 生态系统净碳交换的季节变化

图 5 所示:结合图 1 的气象资料,每年的 1—3

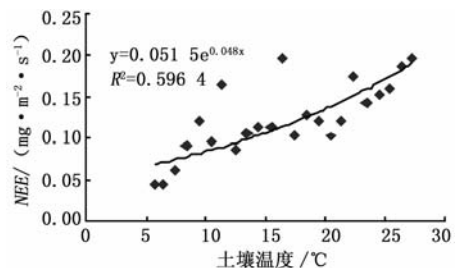


图 4 夜间生态系统净碳交换 (*NEE*) 与 5 cm 土壤温度的关系

月温度很低,杨树尚未展叶,无法进行光合作用,所以杨树人工林生态系统又有微弱的呼吸。随着温度的升高,杨树开始展叶,杨树和林下地被植物白天开始强烈的光合作用,吸收和固定 CO_2 , 4—9 月是杨树的生长季,月收支都是负值;但 2006 年 6 月人工林生态系统出现了较强的呼吸。考虑到这一时期该片林地处于雨季,降水伴随的是阴天导致的太阳辐射下降,由于光合生产力主要受太阳辐射驱动,所以这一时期辐射量也强烈的影响碳输入及光合作用在冠层内部的分布。10 月开始叶片逐渐老化,光合吸收迅速下降,10 月以后 NEE 保持正值。

2006 年该生态系统净碳吸收量为 $-579 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 这高于加拿大安大略省南部落叶混交林的观测结果 ($190 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[48], 也高于丹麦的榉木 (*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino) 林 2 年的观测结果 ($232, 144 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[42], 也高于长白山红松林针阔混交林的观测结果 ($184 \sim 242 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[23, 29], 这说明本研究的杨树林生态系统固碳能力较强。

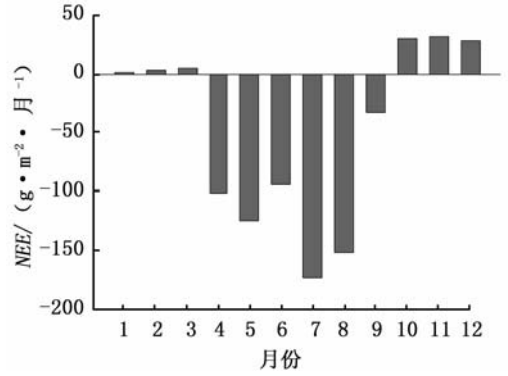


图5 不同月份生态系统净碳交换(NEE)总量的季节变化

2.4 不同森林的生态系统净碳交换

从表 2 可知:众多森林生态系统通量观测研究站点中,人工林站点较少,且杨树人工林在相同纬度具有极高的固碳能力,说明发展杨树碳汇造林有很大的前景。对比欧美高纬度地区的针叶林的 NEE 年收支数据可知,我国的人工林具有更高的吸收 CO_2 能力,这对我国应对全球气候变化谈判具有很好的辅助作用

表 2 全球不同森林生态系统年净碳交换比较

站名	植被类型	地理位置	$NEE/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	数据来源文献
Cuieriras	热带雨林	02°35' S	-590.0	[49]
Manaus	热带常绿阔叶林	02°36' S	-601.7	[50]
Ducke	热带雨林	02°57' S	-220.0	[51]
Rond	热带常绿阔叶林	10°04' S	-102.0	[51]
Jaru	热带雨林	10°04' S	-100.0	[52]
La selva	热带雨林	10°26' N	-792.0	[53]
西双版纳	热带季雨林	21°57' N	320.0	[54]
鼎湖山	亚热带常绿阔叶林	23°10' N	-435.9	[55]
千烟洲	亚热带常绿针叶林	26°44' N	-387.0	[19]
湖南岳阳	杨树人工林	29°31' N	-579.0	本论文
长白山	温带针阔混交林	42°24' N	-242.0	[55]
Harvard forest	针阔混交林	42°32' N	-120.0 ~ -303.1	[50]
Tomakomai	针阔混交林	42°44' N	-293.0	[50]
Camp borden	针阔混交林	44°19' N	-60.0 ~ 240.0	[50]
Le bray, bordeaux	常绿针叶林	44°43' N	-372.5 ~ 575.0	[50]
Howland forest	针阔混交林	45°20' N	-210.0 ~ 321.9	[50]
Wind river crane	常绿针叶林	45°49' N	-476.2	[50]
Reno	常绿针叶林	46°35' N	-450.0	[50]
Bayreuth	常绿针叶林	50°09' N	-76.3	[50]

3 结论与讨论

生态系统净碳交换 (NEE) 是生态系统初级生产力 (GEP) 和生态系统呼吸 (Re) 的总和。光合作用的日格局主要受光能驱动,强度受叶面积、水分因素和环境温度的影响。呼吸作用主要受环境温度和水分因素的影响。因此,光合有效辐射、空气温度、

土壤温度、空气湿度和土壤水分的季节变化共同控制 NEE 日格局及强度的变化。杨树林 NEE 的月平均日变化都具有明显的季节动态,生长季(4—9 月)量级较大,非生长季(10—3 月)较低,不同月份 NEE 的日变化格局也存在明显差异。 NEE 在寒冷季节(10—4 月)多为正值,表现为弱的碳源;而在生长季多为负值,表现为碳汇。研究期间全年月平均 NEE

最小值为 $0.3512 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大值为 $-1.285 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 生长季(4—9月)月平均 *NEE* 的日动态格局变化较大, 当土壤水分不是光合作用的限制因子时, 光合作用与日光合有效辐射变化趋势相同, 并在正午时分达到峰值, 同时良好的温度和水分条件以及活跃的植物根系活动同时促进系统呼吸, 系统呼吸也随光照导致的温度升高而升高, 所以 *NEE* 形成单峰曲线。

杨树人工林生态系统 *NEE* 季节变化的动态特征, 是系统内各个组分共同作用的结果, 是森林碳收支机理分析的重要内容, 限制因素不同, 特别是不同气候类型的森林生态系统, 其 *NEE* 的变化差异较大。

最新的 IPCC 的报告指出: 林业的造林与再造林活动对全球固碳贡献比率最大, 比草原、农业等土地利用类型的固碳能力都强。从造林再造林来说, 策略是加大循环, 森林树木固定 CO_2 的最佳时机是中幼龄阶段, 我国在森林吸收 CO_2 方面的研究相对薄弱。杨树生长比针叶树快得多, 造纸材树种 5~10 年, 用材树种 10~20 年就可以采伐更新, 始终保持一个高速的碳吸收。人工林不像天然林有成熟衰退的过程, 人工林可以在最旺盛的阶段保持生态效益和固碳效益。

尽管我国科学家已对杨树人工林生态系统碳循环过程进行了一些观测和研究, 但这些观测和研究都比较零散且采用的方法各不相同, 在数据的共享和利用上带来很大困难, 因而还无法提出增加中国人工林生态系统碳固定、减少碳排放的对策及相应技术。中国是世界最大的人工林造林国, 对人工林的生态效应研究特别是碳循环的相关机制的研究是当今生态学和林学的研究热点问题, 杨树作为速生丰产林, 对生态环境应当是有积极的综合效应。传统林业对其生态价值不能全面的做出分析, 对杨树林生态系统碳循环的研究应当结合现在国际流行的公认的生态系统通量观测技术, 通过涡度观测塔获取的气象、碳通量等观测数据, 结合地面植物光合生理生态学的调查数据, 围绕 CO_2 交换核心过程的追踪, 精确定量评估冠层作为温室效应气体 CO_2 的吸收库的作用, 这将有助于进一步了解我国杨树人工林对温室气体减排中的贡献, 并对全球碳循环机制研究有重要参考意义。

基于涡度相关技术的通量观测虽然能观测一定空间尺度上的植被与大气间的碳、水和能量交换, 但

是每个通量观测站所能观测的空间范围仍然十分有限, 而在所有陆地表面建立通量观测塔也不现实。因此, 在未来的研究中, 需要将地面通量观测、区域遥感观测和碳循环模型结合起来, 强化通量观测站在定位动态观测与卫星遥感监测一体的立体化、跨区域、跨尺度综合性野外观测体系, 运用数据-模型融合和尺度扩展的方法, 更准确地量化中国区域人工林生态系统的碳收支状况, 并深入探讨我国人工林生态系统碳收支、植被格局以及森林机构和功能对未来全球变化的响应与适应性机制。

参考文献:

- [1] 李克让, 陈育峰, 刘世荣, 等. 减缓及适应全球气候变化的中国林业对策[J]. 地理学报, 1996, 5(supp.): 109-119
- [2] 方 晰, 田大伦, 项文化, 等. 第二代杉木中幼林生态系统碳动态与平衡[J]. 中南林学院学报, 2002, 22(1): 1-6
- [3] 桑卫国, 马克平, 陈灵芝. 暖温带落叶阔叶林碳循环的初步估算[J]. 植物生态学报, 2006, 26(5): 543-548
- [4] 梁万军, 胡海清, 刘富军, 等. 中国杨树生物量和碳储量研究进展[J]. 林业研究: 英文版, 2006, 17(1): 75-79
- [5] 苏东凯, 周永斌, 唐庆华, 等. 不同杨树品种光合生理生态特性的研究[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(2): 39-41
- [6] 付士磊, 周永斌, 何兴元, 等. 干旱胁迫对杨树光合生理指标的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2016-2019
- [7] 张鼎华, 翟明普, 林 平, 等. 杨树刺槐混交林枯落物分解速率的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 24-26
- [8] 胡延杰, 翟明普, 武巍文, 等. 杨树刺槐混交林及纯林根际微生物数量及其生化强度的季节性动态研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 219-222
- [9] 樊 奔, 包树敏, 蒋永丰, 等. 连栽杨树林对土壤微生物的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(5): 81-83
- [10] 石培礼, 于贵瑞. 拉萨河下游河谷不同土地利用方式下土壤有机碳储量格局[J]. 资源科学, 2003, 25(5): 96-102
- [11] 朱强根, 张焕朝, 单奇华, 等. 苏北不同杨树人工林经营模式下土壤呼吸日变化观测与测定方法比较[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(30): 9518-9521
- [12] Falge E, Tenhunen J, Baldocchi D, et al. Phase and amplitude of ecosystem carbon release and uptake potentials as derived from FLUXNET measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 13(1-4): 75-95
- [13] Gilmanov T G, Soussana J E, Aires L, et al. Partitioning European grassland net ecosystem CO_2 exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2007, 121(1-2): 93-120
- [14] Fu Y L, Yu G R, Wang Y F, et al. Effect of water stress on ecosystem photosynthesis and respiration of a *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia[J]. Science in China Series D-Earth Sciences, 2006(49): 196-206

- [15] Grace J S, Jose J, Meir P, *et al.* Productivity and carbon fluxes of tropical savannas [J]. *Journal of Biogeography*, 2006 (33): 387 - 400
- [16] Law B E, Falge E, Gu L, *et al.* Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4): 97 - 120
- [17] Baldocchi D D, Finnigan J, Wilson K, *et al.* On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain [J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2000(96): 257 - 291
- [18] 孙晓敏, 温学发, 于贵瑞, 等. 中亚热带季节性干旱对干烟洲人工林生态系统碳吸收的影响 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 103 - 110
- [19] 刘允芬, 温学发, 王迎红, 等. 干烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量的季节变异特征 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2006, 36(增刊 I): 91 - 102
- [20] 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林 CO₂ 交换的涡动通量修订 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 95 - 102
- [21] 王秋风, 牛 栋, 于贵瑞, 等. 长白山森林生态系统 CO₂ 和水热通量的模拟研究 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 131 - 140
- [22] 周存宇, 周国逸, 张德强, 等. 鼎湖山森林地表 CO₂ 通量及其影响因子的研究 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 175 - 182
- [23] 张军辉, 韩士杰, 孙晓敏, 等. 冬季强风条件下森林冠层/大气界面开路涡动相关 CO₂ 净交换通量的 UU 修正 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 77 - 83
- [24] 朱治林, 孙晓敏, 袁国富, 等. 非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 37 - 45
- [25] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 57 - 66
- [26] 任传友, 于贵瑞, 王秋风, 等. 冠层尺度的生态系统光合 - 蒸腾耦合模型研究 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 141 - 151
- [27] 宋 霞, 于贵瑞, 刘允芬, 等. 开路与闭路涡度相关系统通量观测比较研究 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 67 - 76
- [28] 曹明奎, 于贵瑞, 刘纪远, 等. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 1 - 14
- [29] 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 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 103 - 108
- [30] 孙晓敏, 朱治林, 许金萍, 等. 涡度相关测定中平均周期参数的确定及其影响分析 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 30 - 36
- [31] 沙丽清, 郑 征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 167 - 174
- [32] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏, 等. 亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 15 - 29
- [33] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 46 - 56
- [34] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 84 - 94
- [35] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980(106): 85 - 100
- [36] Kaimal J C. Some errors in the measurement of Reynolds stress [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1969(8): 460 - 462
- [37] Dyer A J. Flow distortion by supporting structures [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1981(20): 243 - 251
- [38] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127 - 150
- [39] Massman W J, Lee X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002(113): 121 - 144
- [40] Finnigan J J. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques Part II: Coordinate systems [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004(113): 1 - 41
- [41] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, *et al.* Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere [J]. *Ecology*, 1994, 75(1): 143 - 150
- [42] Pilegaard K, Hummelshj P, Jensen N O, *et al.* Two years of continuous CO₂ eddy-flux measurements over a Danish beech forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001(107): 29 - 41
- [43] Knohl A, Schulze A, Kolle O, *et al.* Large carbon uptake by an unmanaged 250-year-old deciduous forest in Central Germany [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003(95): 115 - 168
- [44] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001(108): 183 - 197
- [45] 赵晓松, 关德新, 吴家兵, 等. 长白山阔叶林红松林 CO₂ 通量与温度的关系 [J]. *生态学报*, 2006, 26(4): 16 - 23
- [46] Guan Dexin, Wu Jiabing, Zhao Xiaosong, *et al.* CO₂ fluxes over an old, temperate mixed forest in Northeastern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3-4): 130 - 149
- [47] Moren A S, Lindroth A. CO₂ exchange at the floor of a boreal forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000(101): 1 - 14
- [48] 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]. *Journal of Geophysical Research*, 1999(104): 15975 - 15984
- [49] Mahli Y, Nobre A D, Grace J, *et al.* Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998(103): 31593 - 31612
- [50] www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/nec.cfm

- [51] Fan S M, Wolfsy S C, Bakwin P S, *et al.* Atmosphere-biosphere exchange of CO₂ and O₃ in the central Amazon forest [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990 (25) :16851 - 16864
- [52] Grace J, Lloyd J, McIntyre J, *et al.* Fluxes of carbon dioxide and water vapor over an undisturbed tropical rainforest in south-west amazonia [J]. *Global Change Biology*, 1995 (1) :1 - 12
- [53] Loescher H W, Oberbauer S F, Gholz H L, *et al.* Environmental controls on net ecosystem-level carbon exchange and productivity in a central American tropical wet forest [J]. *Global Change Biology*, 2003 (9) :396 - 412
- [54] 张雷明,于贵瑞,孙晓敏,等. 中国东部森林样带典型生态系统碳收支的季节变化[J]. *中国科学 D 辑*, 2006, 36 (增刊 I) :45 - 59
- [55] 张雷明. 中国东部南北森林样带典型生态系统碳收支及其生理生态学机制 [D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2006

欢迎订阅 2011 年《南京林业大学学报(自然科学版)》

CN 32-1161/S 国内外公开发行 ISSN 1000-2006

《南京林业大学学报(自然科学版)》创刊于 1958 年,是江苏省教育厅主管、国内外公开发行的全国性以林学与林业工程为主的学术期刊。本刊拥有以南京林业大学、中国林业科学研究院、国内一些综合性重点大学、农林院校、工科院校以及国外有关科研机构 and 大学等单位的研究人员为主体的作者队伍。

本刊是中文核心期刊、中国自然科学核心期刊、科技部“中国科技论文统计源期刊”和中国科学院“中国科学引文数据库统计源期刊”,曾连续多次荣获中国高校科技期刊优秀期刊等多项全国性优秀期刊奖。连续收录《南京林业大学学报》的著名检索期刊和数据库有:美国《化学文摘》(CA)、美国剑桥科学文摘、日本科学技术文献速报(JST)、英国“国际农业与生物科学研究中心”数据库(CABI)、英国《动物学记录》(ZR)、哥白尼文摘(CI)、中国科技论文引文数据库(CSTPCD)、中国科学引文数据库、《中国学术期刊文摘》、《中国生物学文摘》、中国林业科技文献数据库等。

《南京林业大学学报(自然科学版)》为双月刊,大 16 开本,150 页左右,单月月底出版。从 2010 年起每期定价 20 元。

全国各地邮政局(所)均可订阅,邮发代号:28-16;国外发行:中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱),发行代号:Q552。

也可通过全国非邮发中心联合征订服务部办理订阅手续:天津市大寺泉集北里别墅 17 号,邮编:300385 如有需要近年过刊的读者请直接与本刊编辑部联系:210037 南京市龙蟠路南京林业大学学报编辑部。

地 址:210037 南京市龙蟠路 159 号《南京林业大学学报》编辑部

发行电话:025-85427076

发行电子信箱:xuebao_3@njfu.edu.cn