

文章编号: 1001-1498(2009)02-0237-06

安庆杨树林生态系统碳通量及其影响因子研究

彭镇华¹, 王妍^{2*}, 任海青², 孙启祥¹, 周金星¹

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要:以安徽安庆长江外滩地杨树林生态系统为研究对象,运用涡度相关技术进行长期 CO₂ 通量监测,得到 2005 年 4 月到 2006 年 3 月间生态系统碳通量的日动态变化过程:从 7:30 左右生态系统开始吸收 CO₂,午间 13:30 左右达到全天碳吸收最高峰,然后开始降低,到 17:30 左右生态系统逐渐转入碳排放;同时分析了生态系统碳通量与光合有效辐射 (PAR)、温度、土壤热通量等环境因子的响应变化关系:PAR > 1 μmol · m⁻² · s⁻¹ 时,在不同温度范围内,PAR 与碳通量的响应关系不同;平均夜间碳通量与月平均气温呈线性相关;平均夜间碳通量与 5 cm 处土壤日平均温度呈指数相关;月平均碳通量与 2 cm 深处土壤热通量也呈指数相关。

关键词:碳通量;杨树林;环境因子;响应关系

中图分类号: S722.3 文献标识码: A

Research on the Variation of Carbon Flux and the Relationship of Environmental Factors and Carbon Flux of Populus Forest Ecosystem in the Reaches of Yangtze River in Anqing

PENG Zhen-hua¹, WANG Yan², REN Hai-qing², SUN Qi-xiang¹, ZHOU Jin-xing¹

(1 Research Institute of Forestry, CAF, Beijing 100091, China; 2 Research Institute of Wood Industry, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: The research chose the *Populus* forest ecosystem in the reaches of Yangtze River in Anqing, Anhui province as research object, and monitored the CO₂, H₂O, temperature, moisture, PAR, and so on by eddy-covariance. The data of regulated change and process of diurnal carbon flux of forest ecosystem were obtained. In daytime, the ecosystem began to absorb CO₂ at about 7:30 am, and reached to the Max at about 13:30, then went down slowly, and at about 17:30, the ecosystem began to release CO₂. The value of carbon sink or source varied owing to different season and forest ecosystem. The paper also analyzed the relationships of carbon flux of forest ecosystem and environmental factors. The results are as follows: (1) When the PAR > 1 μmol · m⁻² · s⁻¹, the relationship of carbon flux and PAR was different in different range of temperature. (2) Average air temperature and carbon flux at night had linear relationship, namely when the air temperature arose, the carbon flux at night augmented. The night-time CO₂ flux and soil temperature in 5 cm depth had exponential correlation. (3) The monthly average carbon flux of night-time and soil heat flux in 2 cm depth had the relationship of exponential correlation.

Key words: carbon flux; *Populus* forest; environmental factors; responsive relationship

温室气体浓度升高导致全球气温明显上升,带来一系列环境变化,引起了各国政府和科学界的高度重视^[1-2]。《京都议定书》的签署与生效要求发达国家承担温室气体减排义务,一些发达国家在量化

收稿日期: 2007-11-06 修回日期: 2008-10-18

基金项目: 国家林业局 948 项目 (2006-4-16); 推广项目: 长江流域低山丘陵治理材料高附加值利用技术示范 [2007]-91

作者简介: 彭镇华 (1931—), 主要研究方向: 森林生态. E-mail: wykelly@126.com

* 通讯作者: 博士, 主要研究方向: 森林生态.

不同类型生态系统的 CO_2 源/汇值的同时提出了“抵消排放”和“换取排放”,即在国外扩大森林面积来实现本国减排的目标^[3]。森林生态系统是地球上重要的碳库,其碳动态变化成为研究的焦点^[4],但是由于受研究方法的限制,森林生态系统与外界的 CO_2 交换量及其变化规律一直是研究的难点。涡度相关(Eddy-covariance简称 EC)随着红外感应系统的改进,实现了对森林生态系统碳通量的长期定位监测^[5-6]。欧美以及日本最早采用了涡度相关技术对森林生态系统进行定位监测,我国在这方面的研究起步较晚,特别是人工林的研究相对较少,碳通量资料还十分零散。我国人工林面积达世界首位,杨树是我国人工速生丰产林的主要造林树种之一,其生态系统的碳通量研究具有重要意义。

1 试验点自然概况

碳通量监测站设在安徽安庆大观区海口镇长江北岸滩地杨树林地^[7],是受长江和皖河水系冲积形成的小平原(116°59'27"E, 30°28'08"N),属北亚热带季风气候区,平均气温 16.7℃, 10℃ 积温约 5300℃·h,太阳总辐射量约 $1.07 \times 10^5 \text{ k} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;降水量约 1500 mm,主要集中在 4—8 月;土壤为冲积潮土类,滩地高程 14.0~16.5 m,1989 年造林整地,采用的是大苗(苗高 > 4 m,地径 > 3 cm)栽植, F69 (*Populus deltoids* Bartr. cv. 'Lux'), F72 (*Populus deltoids* Bartr. cv. 'Lux')混植,造林密度为 318 株·hm⁻²,平均树高约 22 m,株行距为 3 m × 10 m,面积共计 220 hm²。在造林前,林下植被以芦(*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、荻(*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth. Et Hook. f.)为主,在造林前期,每年退水后杨树与小麦、油菜间种,造林中后期不再间种,林下逐渐有柳(*Salix babylonica* L.)、构树(*Broussonetia papyifera* (Linn.) L'Hert. ex Vent.)等小灌木出现,草本主要有益母草(*Leonurus artemisia* (Lour.) S. Y. Hu)、水芹(*Oenanthe javanica* (Bl.) DC.)、泥胡菜(*Hemistepta lyrata* (Bunge) Bunge)、苔草(*Carex liparocarpos* Gaudin)、杠板归(*Polygonum perfoliatum* L.)等。

2 研究方法

本研究运用开路式涡度相关设备(Open Eddy-covariance)与常规气象观测仪器进行长期定位观测,具体安装情况如下:三维超声风速仪(CAST-3,

Campbell, USA)以及红外 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 气体分析仪(Li-7500, LiCor Inc, USA)的安装高度为 29 m;辐射传感器(CNR-1, Kipp & Zonen, Holland)、光量子传感器(LF190SB, LiCor Inc USA)、有效辐射(LF200X, LiCor Inc USA)的安装高度也为 29 m;空气温度、湿度(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)分别装在离地 6、15、23、29 m 处;数据采集器(CR5000, Campbell, USA)安装高度为 28 m;土壤温度传感器(107-L, Campbell, USA)的埋入深度为 5、10、20 cm;用 2 个土壤含水量传感器(CS616-L, Campbell, USA)监测 15 cm 深处的土壤含水量;3 个土壤热通量板(HFP01, Hukseflux, The Netherlands)距地表 2 cm。

Li-7500 可以直接监测出 CO_2 通量值, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 通量和风速风向等监测频率为 10 Hz,仪器根据程序自动进行平均值相加,计算半小时的通量平均值,同时 WPL 校正消除水汽对 CO_2 密度的影响。对半小时平均碳通量输出值做 2 次坐标旋转^[8],第 1 次旋转以 z 为轴,使 x 轴平行于平均风速的方向, v 平均为零,变换后 3 个方向的风速分别是 u_1, v_1, w_1 , 即:

$$\begin{aligned} &= \arctan(v_m/u_m) \\ u_1 &= u_m \cos \alpha + v_m \sin \alpha \quad v_1 = -u_m \sin \alpha + v_m \cos \alpha \\ w_1 &= w_m \end{aligned}$$

第 2 次旋转以 y 为轴,使平均侧风速度和平均垂直风速度为零,变换后风速分别为 u_2, v_2, w_2 , 即:

$$\begin{aligned} \delta &= \arctan(w_1/u_1) \\ u_2 &= u_1 \cos \delta + w_1 \sin \delta \quad v_2 = v_1 \\ w_3 &= -u_1 \sin \delta + w_1 \cos \delta \end{aligned}$$

2005 年 4 月到 2006 年 3 月,记录数据的覆盖率为 87.1%,这是由于仪器故障、停电等原因造成数据缺失。剔除受降雨等气象因子影响造成的突变数据,夜间风速较小易形成平流或泄流现象,以夜间风速 $u_s > 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的通量值为有效数据^[9]。目前常用能量平衡来评价站点数据的质量,该站点能量闭合度 EBR 为 0.81,据 Baldocchi 等^[10-11]相关研究结果,可以认为通量数据是可靠的。对于缺失的数据,半小时缺失值采用查表法,选择邻近相似气象条件(温度、湿度)的值来替代;如果缺失值太多,采用的是平均值插补法,用邻近天的平均值补齐;对于日通量值,白天一般采用前后 14 d 左右的数据平均值补足,夜间一般用 7 d 左右平均值求得,避免由于时间太长而增大估算误差。

3 结果与分析

图 1 是试验点温度和降水情况,7 月日平均气

温最高为 29.70℃, 12 月气温降到最低, 日平均气温最低为 0.69℃。试验点 2005 年 4 月到 2006 年 2 月的降水量近 2 000 mm, 但分配不均匀, 7 月降水量约 200 mm, 9 月降水量为零。

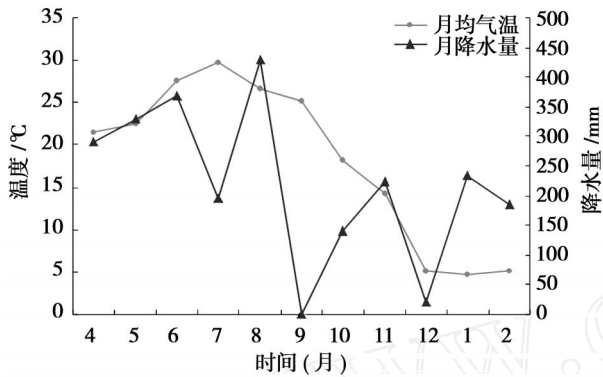


图 1 杨树林生态系统年气温与降水量

3.1 杨树林生态系统碳通量的变化

杨树林生态系统碳通量日变化与其本身的生理变化规律相一致, 开路式涡度相关设备监测得到的数据负值表示系统吸收 CO₂, 即碳汇; 正值表示系统放出 CO₂, 即碳源。生态系统碳通量指的是一个瞬时差值, 即生态系统吸收 CO₂ 与放出 CO₂ 的一个矢量值。图 2 为不同季节晴天日 30 min 碳通量平均值的日变化规律, 从早晨 7:30 左右杨树林生态系统

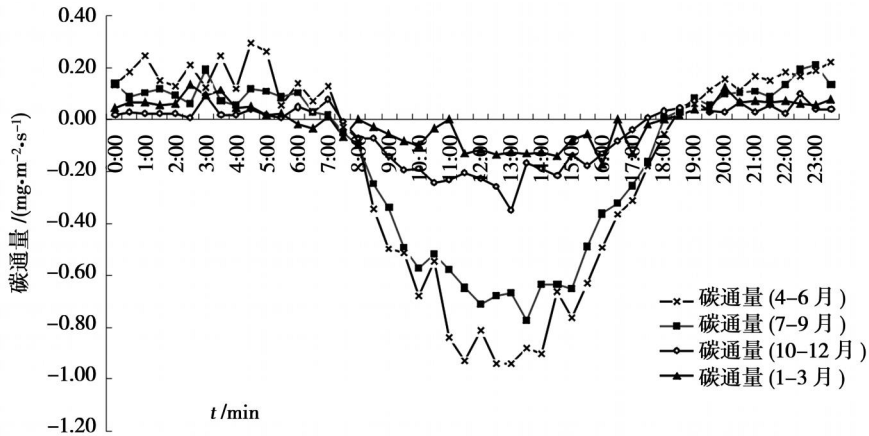


图 2 杨树生态系统不同季节碳通量日变化

注: 4-6 月: 4 月 16-18 日, 5 月 10-12 日, 6 月 17-19 日; 7-9 月: 7 月 16-18 日, 8 月 8、10、11 日, 9 月 9、10、18、19 日; 10-12 月: 10 月 6-8 日, 11 月 13-15 日, 12 月 7、8、22、26 日; 1-3 月: 1 月 7、8、10 日, 2 月 13、17、19 日, 3 月 13、14、20 日

3.2 杨树林生态系统碳通量与环境因子的相关性分析

杨树林生态系统碳通量的变化规律由其自身的生物特性所决定, 同时也受环境因子的影响^[12-14]。

3.2.1 杨树林生态系统碳通量 (FC) 与光合有效辐

射的关系 光合有效辐射 (PAR) 的强弱直接影响植物叶片光合作用的大小, 从图 3 可知: 当 PAR > 1 μmol·m⁻²·s⁻¹ 时, 不同温度范围内, 二者相关关系不同, 气温在 -5~10℃ 时, 随着 PAR 的增大, FC 接近 X 轴呈线性变化; 温度在 10~25℃ 时, 当 PAR 碳开始吸收 CO₂, 即此时 CO₂ 吸收量大于释放量。直到午后 13:30 左右达到最大值, 然后随光合作用降低, 生态系统碳吸收值逐渐降低, 到傍晚 17:30 左右生态系统转化为碳排放。生长季 (4—9 月) 和非生长季 (10 月到次年 3 月) 生态系统碳通量的日变化在源、汇的转化时间上略有差别, 而且碳排放与吸收量差异较大。4—6 月是杨树的纵向生长期, 生态系统碳吸收量达到全年最高值, 碳通量的最大瞬时值达到 -0.901 mg·m⁻²·s⁻¹, 这时生态系统夜间呼吸量也较大, 夜间碳通量平均值达到 0.155 mg·m⁻²·s⁻¹。7—9 月由于生态系统呼吸量加大, 且杨树生长速度减慢导致生态系统吸收 CO₂ 的能力下降, 碳通量最大值为 -0.773 mg·m⁻²·s⁻¹, 夜间平均碳通量值为 0.097 mg·m⁻²·s⁻¹。10—12 月杨树进入了非生长期, 但林下仍生长一些小灌木以及草本植物, 生态系统的碳吸收量较小, CO₂ 的日平均吸收量为 -0.168 mg·m⁻²·s⁻¹, 而 CO₂ 的释放量也较 4—9 月小, 均值为 0.036 mg·m⁻²·s⁻¹, 由于 10—12 月气温没达到全年的最低值, 生态系统与外界的碳交换量较 1—3 月大。1—3 月杨树林生态系统的碳吸收量和碳排放量都达到全年的最低值, 分别为 -0.075、0.060 mg·m⁻²·s⁻¹。

射的关系 光合有效辐射 (PAR) 的强弱直接影响植物叶片光合作用的大小, 从图 3 可知: 当 PAR > 1 μmol·m⁻²·s⁻¹ 时, 不同温度范围内, 二者相关关系不同, 气温在 -5~10℃ 时, 随着 PAR 的增大, FC 接近 X 轴呈线性变化; 温度在 10~25℃ 时, 当 PAR

增大时,生态系统明显表现出碳吸收, F_c 与 PAR 呈直线相关;特别是在 $20 \sim 25$ 时,生态系统的碳吸收随 PAR 增大而较快增大,相关性更强;温度在 $25 \sim 30$ 的范围内,生态系统的碳吸收随着 PAR 增大而增加,但增加到一定程度时趋于平缓,二者呈 Michalis-Menten模型变化规律;当温度达到 30 以上时, F_c 与 PAR 的变化关系 Michalis-Menten模型拟合的更好^[15-16]。

3.2.2 杨树林生态系统碳通量与温度的关系

3.2.2.1 碳通量与气温的关系

树木的光合作用随着气温的升高而增加,同时林木、草本及林地土壤的呼吸作用也随着气温的升高而增强,所以森林生态系统碳通量的变化与气温的关系在不同生态系统以及同一生态系统的不同时期都不一样。由图 4 可见:瞬时 F_c 月平均值与夜间平均气温呈直线相关,温度升高,生态系统呼吸加强^[17]。

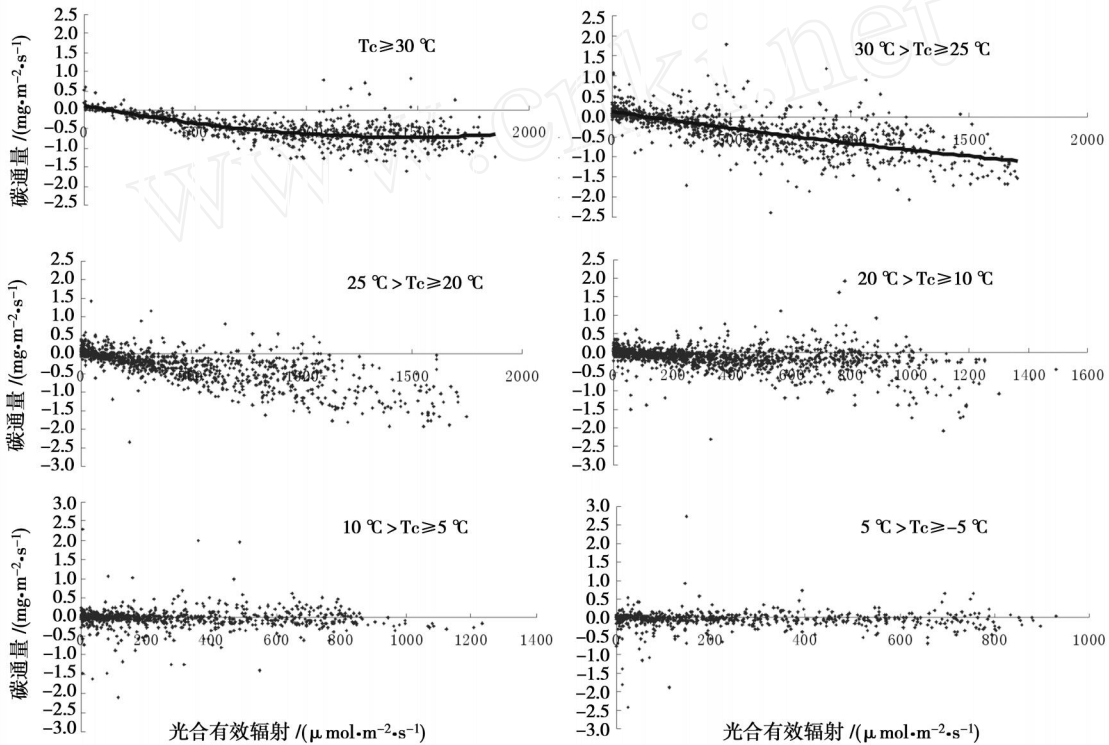


图 3 杨树林生态系统碳通量与光合有效辐射的相关性

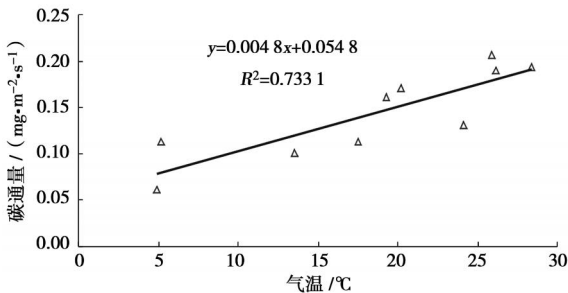
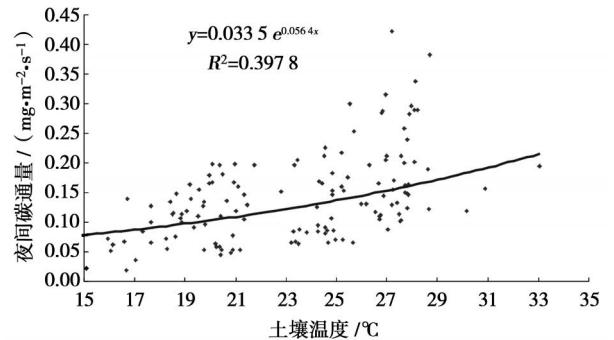


图 4 杨树林生态系统月平均夜间碳通量 (y)与 (x)气温的关系

3.2.2.2 碳通量与土壤温度的关系

由图 5 可知,生态系统内的土壤温度与系统夜间碳通量同样呈指数相关,即随着林内温度升高生态系统的呼吸强度增加。因为当土壤温度升高的时候,不仅杨树等植被的呼吸作用会加强,林地土壤温度升高也会使土

壤中的根际呼吸、微生物活动量增加,从而加大生态系统的呼吸量,这与国内外研究的结果基本一致^[18]。



y指夜间生态系统瞬时碳通量; x指土壤 5 cm深处夜间平均温度
图 5 杨树林生态系统夜间碳通量与 5 cm深处土壤温度的关系

3.2.3 杨树林生态系统碳通量与土壤热通量的相关性分析 土壤热通量是指土壤与外界大气的热交换量,是生态系统内部能量交换的重要环节,热通量的大小主要决定于土壤温度与土壤热容量。

从图 6 中可以看出:夜间碳通量的月平均值与土壤热通量呈指数相关。夜间土壤与外界大气的热交换量越大,生态系统的碳排放量越大^[19-20]。

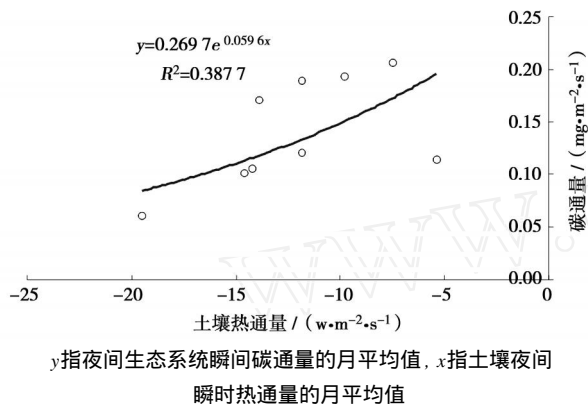


图 6 杨树林生态系统夜间碳通量与土壤 2 cm 处热通量的关系

4 讨论

杨树林生态系统碳通量的规律变化反应了生态系统内植被的生物物候节律^[21-23]。白天植被的光合作用使生态系统吸收大量 CO_2 ,为碳汇作用;夜间植被的光合作用停止,生态系统呼吸释放 CO_2 ,即碳源作用。杨树林生态系统的碳汇作用不仅来自于杨树对 CO_2 的吸收,同时也包括了林下灌木和草本植物的碳吸收;而且,杨树落叶进入非生长季节,林下仍有灌木、草本植物生长,所以在冬季白天生态系统仍有少量的碳吸收光合有效辐射,但因冬季多无风,涡度相关仪器监测误差加大。生态系统碳排放基本来自植被和土壤的呼吸作用,一般生长季,由于适宜的土壤含水量以及较高的气温和土壤温度,植被和土壤的呼吸强度高,而在非生长季杨树进入休眠期,生态系统呼吸量明显下降,碳排放降低^[24-25]。

光合有效辐射 $PAR > 1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,温度对光合有效辐射和系统碳通量的关系影响较大,根据植物的生理特点,低温下叶片气孔开张数量较少,气孔导度降低,植物光合作用较弱,因此在低温下光合有效辐射增强而生态系统 CO_2 吸收较小。本文关于 PAR 与系统碳通量相关关系研究结果与其他人研究结果略有不同,刘允芬等^[26-27]研究了千烟洲人工针叶林全年碳通量与 PAR 的相关性,其结果为白天生态系统碳通量对 PAR 的响应关系符合

MichalisMenten 的双曲线模型,本文在未能得到二者较好拟合效果的情况下,分不同温度范围研究其相关性,发现气温在 25 以下时,碳通量与 PAR 呈线性相关,在大于 25 时,碳通量与 PAR 符合双曲线模型。这可能由于本研究的试验点是杨树人工林生态系统,与混交林和针叶林不同,杨树林下生长的常绿植物少,低温下,杨树落叶,生态系统内进行光合作用的植物较少,生态系统的碳吸收量在低温下也较小。

夜间生态系统的碳通量主要是指土壤和植被的呼吸,据相关研究证明,生态系统释放的 CO_2 相当一部分来自土壤呼吸,气温、土壤温度是影响土壤呼吸的重要环境因子,本研究也得到了生态系统夜间碳通量与土壤温度和土壤热通量较好的相关性,这与黄湘等^[28]研究结果一致;但杨树林作为一个复杂的生态系统,其生态过程会同时受到多种内在和外在环境因子的影响,在 8 月份,杨树林生态系统夜间 CO_2 通量的平均值达到最大,为 $0.206 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,依据碳通量与气温的关系 8 月的平均气温也应最高,然而全年 7 月的平均气温最高,可见碳通量的变化受多种因子的影响。

参考文献:

- [1] 方精云. 全球生态学: 气候变化和生态响应 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [2] Harrington J. Climate change and Canadian forest [M]. Proceeding of the second north American conference on preparing for climate change. Washing: Washing D C Climate Institute, 1989: 297 - 302
- [3] IPCC. Climate Change 2001-Synthesis Report: Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [4] 周涛, 史培军, 孙睿, 等. 气候变化对净生态系统生产力的影响 [J]. 地理学报, 2004, 59 (3): 357 - 365
- [5] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积 [M]. 北京: 气象出版社, 2003
- [6] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 40 - 234
- [7] 彭镇华, 江泽慧. 中国新林种杨树林研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 10 - 125
- [8] 吴家兵, 关德新, 张弥, 等. 长白山阔叶红松林碳收支特征 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29 (1): 1 - 6
- [9] Flage E, Dennis B, Richard O, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107: 43 - 69
- [10] Baldocchi D, Falge E, Lianhong Gu, et al. Fluxnet a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. Bulletin of the

- American Meteorological Society, 2001, 82(11): 2415 - 2434
- [11] Baldocchi D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future [J]. *Global Change Biology*, 2003 (9): 479 - 492
- [12] Jiquan Chen. Relations of climate and radial increment of western hemlock in an old-growth Douglas-fir forest in southern Washington [J]. *Northwest Science*, 2000, 74(1): 57 - 68
- [13] Dabberdt W F, Lenschow D H. Atmosphere-surface Exchange Measurements[J]. *Science New Series*, 1993, 260(260): 1472 - 1481
- [14] Graeme J J. Strategies to estimate national forest carbon stocks from inventory data: the 1990 New Zealand baseline [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7: 389 - 403
- [15] 刘允芬, 宋 霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林 CO₂ 通量季节变化及其环境因子的影响 [J]. *中国科学 D 辑. 地球科学*, 2004, 34 (增刊): 1 - 9
- [16] Hungate B A. Evapotranspiration and soil water content in a scrub-oak woodland under carbon dioxide enrichment [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8: 289 - 298
- [17] Scorr D B. Ecosystem control over temperature and energy flux in northern peatlands [J]. *Ecological Application*, 1999, 9 (4): 1345 - 1358
- [18] McCaughey J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario—a case study [J]. *Boundary Meteorol*, 1985, 31: 89 - 101
- [19] Wilson K B, Hanson P J, Baldocchi D D. Factors controlling evaporation and energy balance partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 102: 83 - 103
- [20] 宋 霞, 刘允芬, 徐小锋. 箱法和涡度相关法测碳通量的比较研究 [J]. *江西科学*, 2003, 21 (3): 206 - 210
- [21] Keeling C D, Chin J F S, Whorf T P. Increased activity of northern vegetation in inferred from atmospheric CO₂ measurements [J]. *Nature*, 1996, 382: 146 - 149
- [22] Bolin B. Change of land biota and their importance for carbon cycle [J]. *Science*, 1977, 196: 613 - 616
- [23] 彭镇华. 长江中下游滩地杨树栽培与利用 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2002
- [24] Valentine R. Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests [M]. New York: Springer, 2003
- [25] 郭家选, 梅旭荣, 卢志光, 等. 测定农田蒸散的涡度相关技术 [J]. *中国农业科学*, 2004, 37 (8): 172 - 176
- [26] McCaughey J H. Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario—a case study [J]. *Boundary Meteorol*, 1985, 31: 89 - 101
- [27] Wilson K B, Hanson P J, Baldocchi D D. Factors controlling evaporation and energy balance partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle [J]. *Agric For Meteorol*, 2000, 102: 83 - 103
- [28] 黄 湘, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河中下流柽柳群落土壤碳通量及其影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2006, 27 (10): 1405 - 1410