

长江安庆段河流湿地生态系统呼吸及其影响因子

韩 帅, 黄玲玲, 王昭艳, 魏 远, 张旭东*

(中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

摘要: 研究湿地生态系统呼吸 (R_{eco}) 对评价湿地生态系统碳汇功能具有重要的意义。采用涡度相关法对位于长江中游河流湿地的杨树人工林生态系统进行了长期的定位观测, 根据 2005-07-23 ~ 2007-12-15 的数据对 R_{eco} 进行估算, 并分析 R_{eco} 对主要环境因子的响应特征。结果表明: (1) R_{eco} 具有明显的季节变化, 每年的最大值出现在 8 月份, 最小值出现在 1 月份, R_{eco} 受空气温度、土壤温度和土壤含水量共同影响, 总体上看空气温度是驱动 R_{eco} 的主要因子; (2) 在几种模拟生态系统呼吸的模型中, Van't Hoff 方程、Arrhenius 方程、Lloyd-Talor 方程在统计意义上具有同等的能力, 由空气温度和土壤含水量共同驱动的连乘模型对 R_{eco} 的拟合效果最好; (3) 使用连乘模型估算的 2006 年生态系统呼吸总量为 $1074.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2007 年为 $1127.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与亚热带和温带的森林站点的测定值相接近。

关键词: 长江; 河流湿地; 生态系统呼吸; 涡度相关

文章编号: 1000-0933 (2009) 07-3621-08 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Ecosystem respiration and its controlling factors in the riparian wetland of Yangtze River

HAN Shuai, HUANG Ling-Ling, WANG Zhao-Yan, WEI Yuan, ZHANG Xu-Dong*

Research Institute of Forestry of CAF, Beijing 100091, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3621 ~ 3628.

Abstract: Research of ecosystem respiration (R_{eco}) in wetland ecosystem is critical for estimating wetland ecosystem carbon balance. Continuous eddy covariance measurements were made in a poplar plantation located in the riparian wetland of middle reaches of Yangtze River. R_{eco} was estimated and analyzed for its regulatory factors based on data from 2005-07-23 through 2007-12-15. We found that: (1) R_{eco} had an obvious seasonal fluctuation with peak R_{eco} in August and minimum in January. The seasonal change was affected by canopy air temperature, soil temperature, and soil water content, with canopy air temperature as the most important factor; (2) exponential equations (e. g., Van't Hoff, Arrhenius and Lyold-Talor) were effective in modeling R_{eco} with canopy air temperature and soil water content; (3) R_{eco} in 2006 and 2007 were 1074.7 and $1127.0 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively, based on the multiplicative model. These estimates were closed to forest sites in subtropical and temperate zones.

Key Words: Yangtze River; riparian wetland; ecosystem respiration; eddy covariance

湿地是陆地生态系统最重要的碳库之一, 全球湿地面积仅占陆地面积的 1%, 碳储量却占陆地生态系统碳储存总量的 15%^[1]。湿地生态系统是水域生态系统向陆地生态系统过渡的特殊的生态系统, 经常受到干扰, 生态系统脆弱, 气候的微小变化会导致湿地生态系统碳循环过程的变化, 打破原有碳平衡, 甚至使湿地碳的源汇关系发生逆转^[2]。目前, 关于湿地源/汇的问题还没有一致性结论, Bridges^[3]认为全球大部分湿地

基金项目: 国家“十一五”科技支撑资助项目(2006BAD03A15); 中美碳联盟资助项目(USCCC)

收稿日期: 2008-04-15; 修订日期: 2008-12-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhxd@forestry.ac.cn.

生态系统是碳汇。Lafluer^[4]利用涡度相关法对加拿大的 Mer Bleue 湿地的研究发现也为碳汇。汪宏宇^[5]等在盘锦湿地进行长期的通量观测表明芦苇湿地具有较强的碳汇作用。Heinsch 等^[6]研究发现在 Texas 的湿地生态系统是碳源。张法伟等^[7]利用涡度相关法对青藏高原高寒湿地的研究认为其为明显的碳源。生态系统的固碳量是生态系统生产力和生态系统呼吸(R_{eco})收支平衡的结果^[8],研究湿地生态系统呼吸对评价湿地生态系统碳汇功能具有重要的意义。

长江流域气候对全球天气系统变化反映敏感,1998 年长江洪水、2006 年重庆大旱、2008 年初长江流域特大风雪冰冻等极端气候事件是其敏感性的体现^①。长江流域又是我国乃至全球最重要的湿地生态系统之一,流域范围内(尤其是长江中下游地区)分布有大面积不同类型的湿地。根据 1995~2003 年全国湿地资源调查结果,长江中下游地区(包括湖北、湖南、江西、江苏、安徽和上海 6 省(市))湿地总面积达 $580 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (不包括人工湿地中的稻田),约占全国湿地面积的 15%^②。安徽安庆沿江河流湿地是长江中下游地区湿地中比较典型的湿地类型,在维持湿地生态系统的相对稳定性和湿地群落的多样性等方面发挥着重要的作用,是长江中下游区域重要的生态功能区^[9]。本文根据位于长江中游河流湿地杨树人工林生态系统的安庆通量站基于涡度相关法测定的通量数据,分析 R_{eco} 的环境控制机制和季节变化特征,为进一步可靠评估净湿地生态系统 CO_2 净交换(NEE)奠定方法基础,也为全球气候变化背景下湿地生态系统碳平衡模型的建立与验证提供数据支撑。

1 研究地区概况

实验地位于安徽安庆市大观区长江北岸滩地,是受长江和皖河两水系冲积形成的冲积小平原,117°2'E, 30°30'N,属北亚热带气候区。根据 1989~2004 年安庆地区气象资料,年平均气温 17.3℃,年平均降水量 1458mm,主要集中在 4~9 月份,土壤为沙心沙泥土,pH6.5~7.0。造林前植被以芦苇(*Phragmites communis*)、荻(*Miscanthus sacchariflorus*)为主,1989 年造林,造林密度 333 株· hm^{-2} ,造林树种为杨树 I-69(*Populus × euramericana* cv. I-69)、I-72(*P. × deltoides* cv. I-72)。林下由于季节性的水淹,主要为草本植物,而且有很强的季节性生长和分布,林下草本总盖度为 80%~100%,主要有益母草(*Leonurus atremisia*)、水芹(*Oenanthe javanica*)、泥胡菜(*Hemistepta lyrata*)、苔草(*Carex* sp.)、杠板归(*Polygonum perfoliatum*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)、南艾蒿(*Artemisia verlotorum*)、扬子毛茛(*Ranunculus sieboldii*)、繁缕(*Stellaria media*)、水苏(*Stachys japonica*)等,造林后期出现小灌木,主要有柳(*Salix* sp.)、构树(*Broussonetia papyrifera*)等。2005 年 4 月进行了固定样地调查,平均树高为 24.9m,平均胸径 30.5cm,标准木的生物量为 402.65kg。

2 研究方法

2.1 数据采集与处理

2004 年底在实验点建立通量观测塔。塔高 32m,塔上设置了开路涡度相关测量系统(Open Path Eddy Covariance, OPEC)和常规气象观测系统,同步观测林地冠层的 CO_2 通量、水热通量和气象条件。其中 OPEC 是由一个三维超声风速仪(CSAT3, Campbell, USA)和一个快速响应的红外气体分析仪(LI-7500, LiCor Inc., USA)构成,安装高度 28m。观测塔高度 28 m 处还安装有雨量测量装置(TE525, R. M. Young, USA)和光合有效辐射传感器(LI-190Sb, LiCor Inc., USA),此外还安装了 4 层大气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland),安装高度分别为 28、23、15、6 m。同时安装了 4 层(25、18、6、1m) CO_2 密度梯度观测系统,通过采样管送入到分析仪(Li-840, LiCor Inc., USA)进行分析。以上数据原始采样频率为 10 Hz,通过数据采集器(CR5000, Campbell, USA)采集并按 30min 计算平均值进行存储。

土壤中安装了 3 层土壤温度传感器(107-L, Campbell, USA),深度分别为 5、10、20 cm;2 层土壤含水量传

① 生态大讲堂 2008:气候变化与生态系统适应性——聚焦长江流域。

② 国家林业局 2003 年《全国湿地资源调查简报》。

感器(CS616-L, Campbell, USA), 深度分别为 10、20 cm; 2 层土壤水势传感器(257-L, Campbell, USA), 深度分别为 10、20 cm; 3 层土壤热通量板(HFP01, Hukseflux, The Netherlands), 分别设置在地下 5、10、20 cm。地下部分观测的数据原始采样频率为 10 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。最终建立通量数据库。

虚温订正^[10]和空气密度脉动订正^[11]是在线进行修订的。对离线数据采用二次坐标旋转^[12]进行地形、仪器倾斜影响订正; 剔除与降水和凝结有关的异常数据; 因为夜间(光合有效辐射 $PAR < 1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)不可能有光合作用, 所以剔除夜间 CO_2 通量为负值的数据^[13]; 此外还剔除了夜间摩擦风速(u^*)小于 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的数据, 因为在这种条件下储存和平流效应可能会造成 CO_2 通量的系统性低估^[13]。

本文选取 2005 年 7 月 23 日~2007 年 12 月 15 日的数据进行分析。

2.2 生态系统呼吸的估算

生态系统呼吸(R_{eco})通常有两种方法进行估算^[14], 一种是利用夜间通量观测数据建立的生态系统呼吸函数关系外延到白天以获得全天的生态系统呼吸数据^[15], 在研究中被广泛使用的呼吸模型主要有以温度驱动的经验模型^[16~18](Van't Hoff 方程(公式 1)、Arrhenius 方程(公式 2)和 Lloyd-Taylor 方程(公式 3))和以温度 and 水分共同驱动的连乘模型^[19](公式 4):

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{eco,ref}} e^{B \cdot (T_m - T_{\text{ref}})} \quad (1)$$

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{eco,ref}} e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_m} \right)} \quad (2)$$

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{eco,ref}} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T_m - T_0} \right)} \quad (3)$$

$$R_{\text{eco}} = R_{\text{eco,ref}} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T_m - T_0} \right)} e^{c \cdot S_w + d \cdot S_w^2} \quad (4)$$

公式(1)~(4)中, $R_{\text{eco,ref}}$ 是参考温度(T_{ref})和适宜的水分条件下的生态系统呼吸; B 为实验常数($B = \ln(Q_{10})/10$), 因此在分析中不单独考虑 Q_{10} 函数; E_a 为活化能($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), 也是实验常数; R 为气体常数($8.134 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$); E_0 在实际应用中取 309K; T_0 为温度实验常数(K); c 和 d 为土壤水分实验常数。 T_m 为实测温度(K), S_w 为实测的土壤表层含水量($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)。在连乘模型中(公式 4)中对温度的响应函数为 Lloyd-Taylor 方程, 对水分因子响应函数为二次指数方程。

另一种方法是先利用白天($PAR > 1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)观测数据由基于 Michaelis-Menten 动力学原理的直角双曲线经验模型(公式 5)^[20,21]拟和得到 R_{eco} , 然后在建立 R_{eco} 与温度的函数关系估算全天的生态系统呼吸:

$$NEE = \frac{\alpha \cdot PAR \cdot A_{\text{MAX}}}{\alpha \cdot PAR + A_{\text{max}}} + R_{\text{eco}} \quad (5)$$

公式(5)中, α 为表观初始光能利用效率($PAR = 0$ 时的曲线斜率); A_{max} 为光饱和时($PAR \rightarrow \infty$)生态系统同化 CO_2 能力(最大光合速率)。将白天数据按旬或按月分组^[15,18], 根据白天湍流条件良好($u^* > 0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)通量资料拟合参数 $\alpha, A_{\text{max}}, R_{\text{eco}}$ 。

涡度相关法在白天测定的数据是比较可靠的, 但是使用白天通量数据进行 R_{eco} 估算时比使用夜间观测数据多了一个反演 R_{eco} 的环节, 增加了估算误差, 而且使用白天通量数据估算的 R_{eco} 时间分辨率较低。使用夜间的通量数据可以避开太阳辐射和植物光合作用对 R_{eco} 的影响, 虽然夜间通量数据有较大的不确定性, 但是通过对夜间通量数据的进行评价和控制, 可以提高夜间通量数据的可靠性^[13]。本文使用夜间通量数据对 R_{eco} 进行估算。

3 结果与分析

3.1 生态系统呼吸对温度因子的响应特征

为了降低随机误差, 本文使用夜间通量数据和环境因子的日平均值进行拟合^[16], 不同呼吸模型拟合的温度因子与 R_{eco} 的关系见表 1。3 种模型的 R^2 差异非常小, 从统计学角度, 3 种方程具有同等的拟合能力。从温度敏感性指标 Q_{10} 看, Van't Hoff 方程的 Q_{10} 不随温度变化而变化, 显得比较简单; 而 Arrhenius 方程和 Lloyd-

Talor 方程的 Q_{10} 随温度升高而减小,能够反映生态系统呼吸对温度响应的一般规律,因而显示出比前面 Van't Hoff 方程更先进;进一步从量值上看, Lloyd-Talor 方程拟合的 Q_{10} 变动幅度(夏季 1.53,冬季 1.7)比 Arrhenius 方程(夏季 1.49,冬季 1.54)大,而且 Lloyd-Talor 方程拟合的 Q_{10} 与同气候带上其他森林生态系统比较接近^[16,18]。表明 Lloyd-Talor 方程比 Arrhenius 方程更适合于描述长江河流湿地杨树人工林 R_{eco} 对温度的响应特征。

从表 1 可以看出安庆通量站 R_{eco} 与空气温度的相关性大于与土壤温度的相关性,综合各方程的评价结果,利用空气温度作为驱动因子可以解释生态系统呼吸变异的 29%,如果选用土壤表层温度则只能解释生态系统呼吸变异的 24%。此外,安庆通量站 R_{eco} 与温度的相关系数(R^2 最大为 0.2934)要小于于贵瑞^[16]等在千烟洲(R^2 最大为 0.712)和长白山(R^2 最大为 0.857)的研究,表明在安庆通量站 R_{eco} 与温度的关系还受到其他环境因子的制约。安庆通量站的人工杨树林沿长江呈带状分布,林分的宽度与林分的长度比例悬殊,林分的宽度不能完全满足涡度相关观测的要求,不同的风向对 R_{eco} 的影响还需要进一步的研究。

表 1 不同生态系统呼吸模型拟合结果
Table 1 Nonlinear regression result of different ecosystem respiration models

模型 Models	温度因子 Temperature factor	$R_{eco,ref}$ (283.16K)	$B/E_a/T_0$	Q_{10}			R^2
				10℃	20℃	30℃	
Van't Hoff 方程	T_{ave}	0.08992	0.03910	1.48	1.48	1.48	0.2934
Van't Hoff equation	T_{s5}	0.08875	0.04108	1.51	1.51	1.51	0.2391
Arrhenius 方程	T_{ave}	0.08980	27018	1.54	1.51	1.49	0.2934
Arrhenius equation	T_{s5}	0.08859	28277	1.57	1.52	1.48	0.2385
Lloyd-Talor 方程	T_{ave}	0.09005	201.7	1.70	1.60	1.53	0.2921
Lloyd-Talor equation	T_{s5}	0.08855	203.6	1.75	1.54	1.41	0.2368

采用 2005-07-23 ~ 2007-12-15 夜间通量数据 ($PAR < 1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 和温度的日平均值进行拟合, $n = 620$; T_{ave} 代表地上各层 (6、15、23、28m) 平均空气温度, T_{s5} 代表 5cm 深度的土壤温度,下同 Daily mean of nighttime ($PAR < 1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) NEE and temperature data from 2005-07-23 to 2007-12-15 was used, $n = 620$; T_{ave} canopy average air temperature of 6m, 15m, 23m and 28m, T_{s5} 5cm soil temperature, the same below

3.2 生态系统呼吸对水分因子的响应特征

以空气温度 (T_{ave}) 和土壤 10cm 含水量 (S_{w10}) 作为驱动变量,拟合连乘模型得到公式 (6),以土壤温度 (T_{s5}) 和土壤 10cm 含水量 (S_{w10}) 作为驱动变量,拟合连乘模型得到公式 (7):

$$R_{eco} = 0.0224e^{309 \left(\frac{1}{283.16 - 202.89} \frac{1}{T_{ave} - 202.89} \right)} e^{20.82S_{w10} - 26.25S_{s10}} \quad R^2 = 0.3117, n = 614 \quad (6)$$

$$R_{eco} = 0.0221e^{309 \left(\frac{1}{283.16 - 205.37} \frac{1}{T_{s5} - 205.37} \right)} e^{20.73S_{w10} - 26.13S_{s10}} \quad R^2 = 0.2577, n = 614 \quad (7)$$

公式 (6) 和 (7) 的解释方差 R^2 大于仅以温度作为驱动变量拟合的所有方程 (表 2), 表明引进 S_{w10} 有助于提高对 R_{eco} 的拟合效果。各种呼吸模型之中,以空气温度和土壤含水量作为驱动变量的连乘模型拟合效果最好。公式 (6) 中 S_{w10} 的 1 次项系数为正号,而 2 次项系数为负号,表明在 S_w 较低时 ($S_{w10} < 0.3966 m^3 \cdot m^{-3}$) S_w 增大可以促进 R_{eco} , 当 S_w 较大时 ($S_{w10} > 0.3966 m^3 \cdot m^{-3}$) 对 R_{eco} 产生抑制作用^[18]。

水分条件对生态系统呼吸的影响仅次于温度^[16]。安庆通量站的土壤水分变化幅度比较小,表层土壤含水量是土壤各层变动幅度最大的层次,但是在实验点表层土壤含水量的变动幅度也不大 (图 1 和表 2), S_{w10} 变化范围在 $0.29 \sim 0.4 m^3 \cdot m^{-3}$ 之间的时间占全部观测时间 79%。虽然使用以 T_{ave} 和 S_{w10} 作为驱动变量的连乘模型对 R_{eco} 拟合的效果 ($R^2 = 0.31$) 优于只以 T_{ave} 作为驱动变量的 Lloyd-Talor 方程的拟合效果 ($R^2 = 0.29$),但是提高的幅度也非常有限,表明在长江河流湿地生态系统中,由于土壤水分的变化幅度非常小,使得土壤水分对 R_{eco} 的影响也比较小。

3.3 生态系统呼吸的季节变化

长江河流湿地杨树人工林生态系统的 R_{eco} 和环境因子的季节变化见图 1。 R_{eco} 具有明显的季节变化:每年

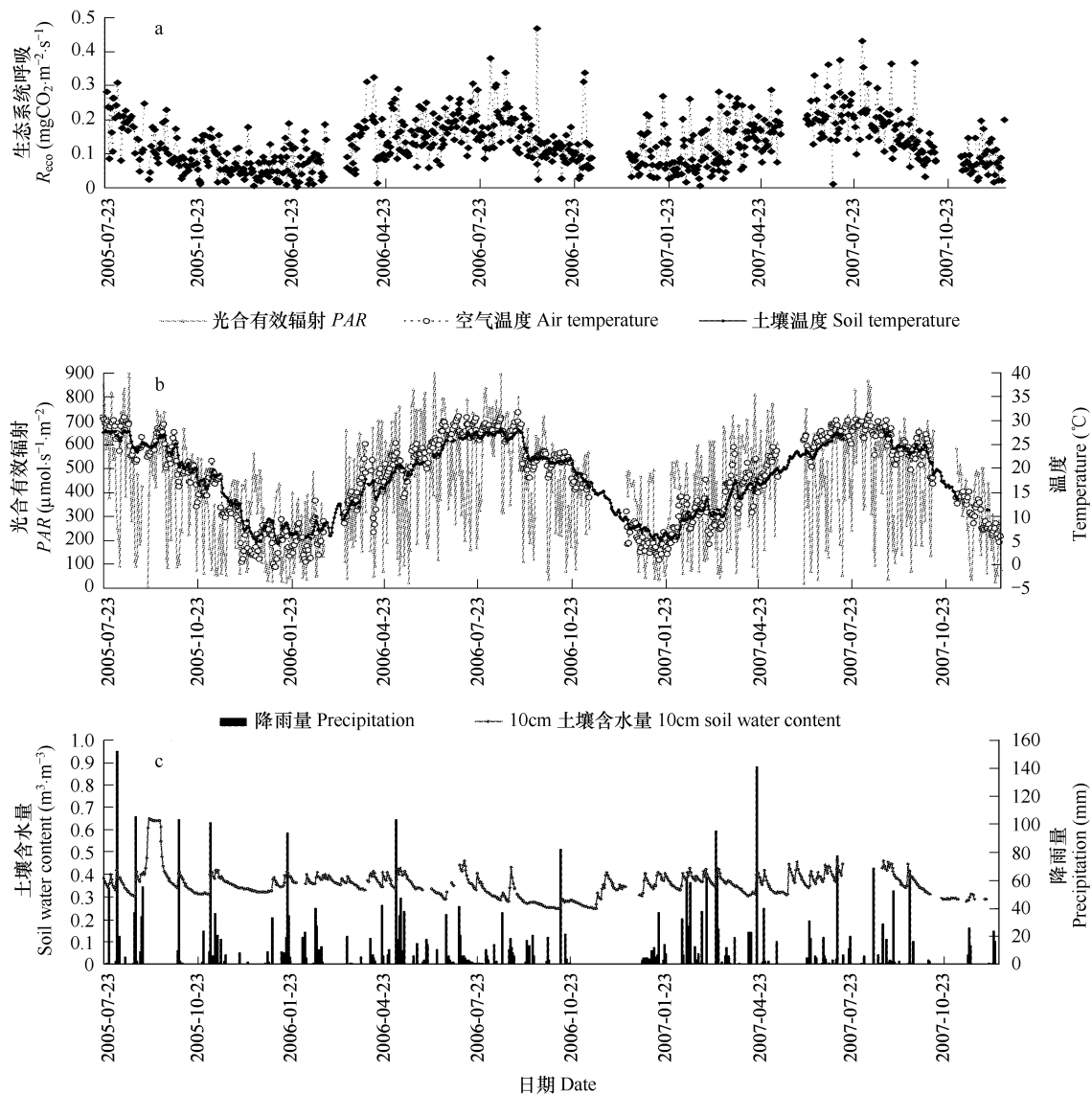


图1 生态系统呼吸和环境因子的季节变化图

Fig. 1 The seasonal variations of ecosystem respiration and environmental factors

(a) 生态系统呼吸; (b) 光合有效辐射、空气温度、土壤温度; (c) 土壤含水量和降雨量 (a) R_{eco} ; (b) PAR , air temperature, soil temperature; (c) soil water content and precipitation

的1月~8月份,生态系统呼吸速率为上升趋势;每年的8月~翌年1月份,生态系统呼吸呈降低趋势。生态系统呼吸的季节变化呈单峰曲线,每年的最大值出现在8月份,最小值出现在1月份(图1a)。

空气温度、土壤温度和光合有效辐射(PAR)有明显的季节性变化, PAR 达到最大值的时间早于空气温度和土壤温度, PAR 于6月达到最大,而土壤温度和空气温度的最大值出现在8月初;降雨量的季节性变化不明显,夏季略高;土壤含水量变化非常小,没有明显的季节变化。 R_{eco} 的季节变化趋势与空气温度和土壤温度基本一致,温度是影响 R_{eco} 的季节变化的首要环境因子。大量研究表明温度是影响 R_{eco} 的首要环境因子^[16,18],但是以生态系统中何处的温度作为环境指标,并没有明确的结论。在本文的研究中, R_{eco} 与冠层空气温度的相关性大于与土壤温度的相关性,以冠层空气温度作为 R_{eco} 的环境指标比较好。

3.4 年生态系统呼吸总量的估算

使用连乘模型估算的安庆通量站2006年的生态系统呼吸总量为 $1074.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,2007年为 1127.0

$\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 2), 与同属亚热带气候的千烟州通量站^[16]和鼎湖山通量站^[18]的相比, 差异很小, 处于相同的量级内。

2007 年的生态系统呼吸总量略高于 2006 年, 温度和土壤水分的协调作用是造成年际变化的主要原因, 2007 年的平均温度和土壤含水量比 2006 年要高 (表 2)。连乘模型 (在连乘模型中对温度的响应函数为 Lloyd-Taylor 方程, 对水分因子响应函数为二次指数方程) 估算的年生态系统呼吸总量与 Lloyd-Taylor 方程的差值 2006 年为 $-4.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 而 2007 年为 $19.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明 2006 年土壤水分较低限制了生态系统呼吸排放。

表 2 安庆通量站年生态系统呼吸的估算

Table 2 Annual ecosystem respiration of 2006–2007 in Anqing site derived by different methods

	2006	2007
T_{ave} 年平均值 average annual canopy air temperature ($^{\circ}\text{C}$)	17.15 (−0.55 ~ 36.9)	17.91 (2.97 ~ 36.0)
S_{w10} 年平均值 average annual 10 cm soil water content ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0.337 (0.247 ~ 0.462)	0.364 (0.283 ~ 0.464)
Van't Hoff 方程 Van't Hoff equation ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	1083.6	1108.3
Arrhenius 方程 Arrhenius equation ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	1082.3	1108.0
Lloyd-Taylor 方程 Lloyd-Taylor equation ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	1079.6	1107.3
连乘模型 multiplicative model ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	1074.7	1127.0

4 讨论

4.1 生态系统呼吸对环境因子的响应

在安庆通量站生态系统呼吸对环境因子响应的研究中, 有两点和其他人的研究略有不同: (1) 大量研究表明土壤呼吸是 R_{eco} 的主要来源 (尤其是成熟林)^[16,18,22], R_{eco} 与土壤温度的相关性大于与空气温度的相关性, 但是在安庆通量站 R_{eco} 与空气温度的相关性大于与土壤温度的相关性; (2) 在湿地生态系统中, 通常不会由于土壤水分过低而影响生态系统呼吸作用, 反而会由于土壤水分过高, 导致土壤孔隙度减小, 限制土壤异氧呼吸作用所需氧气的进入以及呼吸产物 CO_2 的排放^[23], 但是在安庆通量站 2006 年土壤水分较低限制了生态系统呼吸排放。

安庆通量站所在的杨树人工林 1998 年以前经常受到季节性的水淹^[24], 林下主要是草本; 1998 年大洪水以后, 长江水位每年在洪水期水位并不高, 特别是长江三峡大坝建成后, 长江水位处于高洪水位的时间缩短, 冬季河滩提前裸露并陆地化时间增长。安庆通量站所在的杨树人工林已经连续 10a 没有出现季节性的水淹, 由于林下光照条件比较好 (造林株行距为 $3\text{m} \times 10\text{m}$), 不仅草本生长旺盛, 而且出现了构树幼苗组成的灌木层, 因此植物地上部分的呼吸占生态系统呼吸的比重比较大, 使得空气温度与 R_{eco} 的相关性要大于土壤温度与 R_{eco} 的相关性。此外, 由于长江水位处于高洪水位的时间缩短, 长江水位对安庆通量站林地土壤水分影响降低, 安庆站点的生态系统呼吸已经由受土壤水分过高抑制转为受土壤水分较低抑制, 长时间未受到季节性的水淹, 对安庆通量站所在的河流湿地有较大的影响。

4.2 与其他生态系统的比较

目前, 全球仅有很少量的湿地通量观测点, 还没有关于湿地森林生态系统年呼吸量的报道, 所以将测定结果与中国陆地生态系统通量观测网络 (ChinaFLUX) 的森林站点相比较。于贵瑞等^[16]的研究表明千烟州亚热带人工针叶林的年生态系统呼吸总量为 $1197 \sim 1209 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 长白山温带阔叶红松混交林为 $1268 \sim 1303 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。王春林等^[18]的研究表明鼎湖山亚热带针阔叶混交林年生态系统呼吸总量基于白天资料估算结果为 $1100 \sim 1135.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 基于夜间资料估算结果为 $921 \sim 975 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。使用连乘模型估算的安庆通量站 2006 年的生态系统呼吸总量为 $1074.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2007 年为 $1127.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 不仅与同属亚热带气候的森林站点接近, 而且与温带的森林站点差异也不大。

Janssens 等^[22]对欧洲通量网 (EuroFLUX) 森林站点的研究表明, 16 个森林站点的年生态系统呼吸总量的

平均值为 $(1100 \pm 260) \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 年生态系统呼吸总量与年平均温度不相关, 而与年总初级生产力 (GPP) 显著相关。岳阳通量站 2006 年的 GPP 为 $1688.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2007 年为 $1615.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而长白山通量站、千烟州通量站和鼎湖山通量站^[14] 的 GPP 分别为 1525.1 、 $1641.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1455.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与 EuroFLUX 的研究结果相似, R_{eco} 与 GPP 有较高的相关性。

5 结论

(1) 长江河流湿地杨树人工林 R_{eco} 具有明显的季节变化, 每年的最大值出现在 8 月份, 最小值出现在 1 月份, R_{eco} 受空气温度、土壤温度和土壤含水量共同影响, 总体上看空气温度是驱动 R_{eco} 的主要因子。

(2) 在几种模拟生态系统呼吸的模型中, Van't Hoff 方程、Arrhenius 方程、Lloyd-Talor 方程和简单的指数方程, 统计意义上具有同等的能力, 由空气温度和土壤含水量共同驱动的连乘模型对 R_{eco} 的拟合效果最好。

(3) 使用连乘模型估算的安庆通量站 2006 年的生态系统呼吸总量为 $1074.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 2007 年为 $1127.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与亚热带和温带的森林站点的测定值相接近。

References:

- [1] IGBP. The terrestrial carbon working group. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. Science, 1998, 280:1392—1394.
- [2] YANG J S, LIU J S, SUN L N. Effects of temperature and soil moisture on wetland soil organic carbon mineralization. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(1):38—42.
- [3] Bridges E M. Word soils. Cambridge University Press Cambridge, New York, Melbourne, 1978.
- [4] Lafleur P. Annual net ecosystem exchange of CO_2 at a boreal bog, Symposium 43, Carbon balance of peatlands sponsor, International peat society, 1999.
- [5] Wang H Y, ZHOU G S. Long-term flux characteristics of Phragmites ecosystem in Panjin wetland. Journal of Meteorology and Environment, 2006, 22(4):18—24.
- [6] Heinsch F A, Heilman J L, McInnes K J, et al. Carbon dioxide exchange in a high marsh on the Texas Gulf Coast: effects of fresh water availability. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 125:159—172.
- [7] ZHANG F W, LIU A H, LI Y N, et al. CO_2 flux in alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):0453—0462.
- [8] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113:53—74.
- [9] CUI L J, ZHANG M Y. Impact study on the biodiversity of Yangtze beaches wetland in Anqing with human interference. Forest Research, 2005, 18(4):441—445.
- [10] Schotanus P H, Nieuwstadt F T M, Bruin H A R. Temperature measurements with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes. Boundary-Layer Meteorology, 1983, 26:81—93.
- [11] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106:85—100.
- [12] Wilezak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99(1):127—150.
- [13] ZHU Z L, SUN X M, ZHOU Y L, et al. Correcting method of eddy covariance fluxes over non-flat surfaces and its application in ChinaFLUX. Science in China Series D:Earth Sciences, 2006, 36(Supp I):34—44.
- [14] Zhang L M, YU G R, SUN X M, et al. Seasonal variation of typical ecosystem carbon balance on IGBP China eastern forest transect. Science in China Series D:Earth Sciences, 2006, 36(Supp I):45—59.
- [15] Liu Y F, Yu G R, Wen X F, et al. Seasonal dynamics of CO_2 fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. Science in China Series D:Earth Sciences, 2006, 36(Supp I):91—102.
- [16] Yu G R, Wen X F, Li Q K, et al. Seasonal patterns and environmental control of ecosystem respiration in subtropical and temperate forests in China. 2004, Science in China series D:Earth Sciences, 2004, 34(Supp II):84—94.
- [17] Wen X F, Yu G R, Sun X M et al. Soil moisture effect on the temperature dependence of ecosystem respiration in a subtropical Pinus plantation of southeastern China. Agriculture and Forest Meteorology, 2006, 137:166—175.
- [18] WANG C L, ZHOU G Y, Tang X L, et al. Ecosystem respiration and its controlling factors in a coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7):2659—2668.

- [19] Fang C, Moncrieff J B. A model for soil CO₂ production and transport 1: model development. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1999, 95:225–236.
- [20] Michael L G, Bruce C D, Fan S M, *et al.* Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102:28987–28996.
- [21] Falge E, Baldocchi D D, Olson R J, *et al.* Gapfilling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2001, 107:43–69.
- [22] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, *et al.* Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3):269–278.
- [23] Xie Y B, Jia Q Y, Zhou L, *et al.* Soil respiration and its controlling factors at *Phragmites communis* wetland in Panjin. *Journal of Meteorology and Environment*, 2006, 22(4):53–58.
- [24] WU Z M, Sun Q X, DUAN W X. Relationship between flooded situation and poplar growth on beach land of Yangtze River in Anhui. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1):25–29.

参考文献:

- [2] 杨继松,刘景双,孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(1):38–42.
- [5] 汪宏宇,周广胜. 盘锦湿地芦苇生态系统长期通量观测研究. *气象与环境学报*, 2006, 22(4):18–24.
- [7] 张法伟,刘安花,李英年,等. 青藏高原高寒湿地生态系统 CO₂ 通量. *生态学报*, 2008, 28(2):0453–0462.
- [9] 崔丽娟,张曼胤. 人类干扰对安庆沿江湿地植物多样性的影响. *林业科学研究*, 2005, 18(4):441–445.
- [13] 朱治林,孙晓敏,温学发,等. 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)*, 2006, 36(增刊 I):34–44.
- [14] 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. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(增刊 I):45–59.
- [15] 刘允芬,于贵瑞,温学发,等. 千烟洲中亚热带人工林生态系统 CO₂ 通量的季节变异特征. *中国科学(D 辑)*, 2006, 36(增刊 I):91–102.
- [16] 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. *中国科学(D 辑)*, 34(增刊 II):2004. 84–94.
- [18] 王春林,周国逸,唐旭利,等. 鼎湖山针阔叶混交林生态系统呼吸及其影响因子. *生态学报*, 2007, 27(7):2659–2668.
- [23] 谢艳兵,贾庆宇,周莉,等. 盘锦湿地芦苇群落土壤呼吸作用动态及其影响因子分析. *气象与环境学报*, 2006, 22(4):53–58.
- [24] 吴泽民,孙启祥,段文秀. 安徽长江滩地杨树人工林个体生长与水淹状况的关系. *应用生态学报*, 2000, 11(1):25–29.