

盘锦湿地芦苇生态系统长期通量观测研究

汪宏宇 周广胜

(中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016)

摘要:针对2004年5月26日—2005年10月15日盘锦湿地芦苇生态系统碳通量、感热通量和潜热通量资料进行分析。结果表明:芦苇湿地具有较强的碳汇作用;2005年芦苇湿地固定二氧化碳为 13.32 t/hm^2 ,日平均感热通量和潜热通量分别为 2464 kJ/m^2 和 3880 kJ/m^2 。2004年和2005年6—9月的日累积值波文比平均值均为0.15。芦苇湿地碳通量、感热通量和潜热通量的日动态呈单峰单谷型变化,极值出现在中午前后,夜间线形平直。芦苇生长季白天通量绝对值远较夜间大,白天碳吸收,夜间碳排放。 CO_2 浓度年平均日变化曲线亦为单谷单峰型,夜间浓度较高且逐渐升高,直到日出前达到峰值;日出后急剧下降,傍晚又开始逐渐增加。芦苇湿地感热通量昼正夜负,潜热通量与林地不同,全天为正。各通量季节变化明显,冬季 CO_2 通量日变化不明显,趋近于零;感热通量总体向上输送,春季数值较大,生长季数值较小;潜热通量冬季最小,接近0,春季开始显著增加,生长季达到最大。

关键词:湿地;芦苇;涡动相关;碳通量;感热通量;潜热通量;波文比

全球碳循环是相关科研人员普遍关注的一个热点问题,尤其是北半球中高纬度陆地生态系统在全球碳循环中的角色及其源汇强度引起了广泛的关注^[1-7]。其中,关于森林生态系统的观测研究较多,而对北半球中高纬度湿地生态系统的研究较少。湿地与陆地、海洋并称为全球三大生态系统,在全球碳循环中具有重要地位。湿地是目前已知的陆地生态系统中仅次于森林的重要碳库之一,特别是高纬湿地,其储存了全球近1/3的土壤碳^[8]。20世纪90年代末期,欧美实施的陆地碳汇监测的大型研究观测网络EUROFLUX和AMERIFLUX进行了长期的碳通量观测和研究。中国湿地居于世界第4位。因此,湿地碳循环及其碳收支的准确评估直接影响到我国及全球碳收支的准确评估。

本文试图利用2004年5月26日—2005年10月15日盘锦湿地芦苇生态系统碳通量、感热通量和潜热通量的连续观测资料,分析芦苇湿地通量动态,增进对湿地生态系统通量,特别是碳通量过程的理解,为准确地模拟湿地通量提供参考与依据。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点

研究地点位于中国气象局沈阳大气环境研究所盘锦湿地生态系统野外观测站($41^{\circ}08'N$, $121^{\circ}54'E$),海拔高度为0.0~3.8 m。该站位于我国东北辽河三角洲地区,地处辽东湾,位居世界第2、亚洲第1大芦苇分布区,成片苇田达8万 hm^2 。该区气候属于暖温带季风气候,

四季分明,雨热同季,温度适宜,光照充裕。年平均气温为 8.6°C ,无霜期为170 d,年平均降水量为627 mm,年日照时间为2700 h或以上。主导风向夏季为南风、冬季为北风。地貌类型以冲积平原和潮滩为主。

1.2 研究方法

该站配备梯度观测系统和涡动相关观测系统。涡动相关观测系统安装在3 m高度,主要由三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Inc, USA)、开路式 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-7500, Li-corr Inc, USA)和数据采集器(CR5000, CSI, USA)组成,采样频率为10 Hz。原始输出数据包括水平风速(U_x , U_y),垂向风速(U_z),二氧化碳绝对密度(CO_2),水蒸汽绝对密度(H_2O),超声虚温(T_s),大气压力(pressure)。小气候梯度观测系统由1台CR23X数据采集器、1个AM16/32扩展板和2个HMP45C温度/相对湿度传感器、1个014A风速传感器、1个034B风速/风向传感器、1个CNR1净辐射仪、1个CS616土壤水反射计、2个HFP01热通量板等组成;观测高度为2.5 m和4.0 m,观测量包括2层高度的风速、温度和湿度资料,5 cm土壤热通量(G),及净辐射(R_n)、光合有效辐射(PAR)和太阳总辐射,不同深度的土壤体积含水量(10, 20, 30 cm和50 cm);采样频率为30 min。

在大气边界层内大气与地表之间的物质与能量交换主要是通过湍流输送实现的(除辐射外),涡动相关法的基本原理是利用湍流理论,通过测量风速、温度、水汽含量、 CO_2 浓度的脉动值,进而求得各通

收稿日期:2006-06-08;修订日期:2006-07-25。

基金项目:中国气象局科技项目“我国中高纬地区典型下垫面陆一气通量观测系统建设”、“东北地区干旱化和生态系统相互作用的观测与模拟”等共同资助。

作者简介:汪宏宇,男,1970年生,副研究员,主要从事大气物理和应用气象领域的研究工作。

通信作者:周广胜, E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn。

量值。该方法要求大气运动状态相对平稳,地形与植被水平均一,通量垂直变化较小。公式:

$$\text{感热通量 } H_s = \rho C_p \overline{W'T'} \quad (1)$$

$$\text{潜热通量 } LE = \overline{Lw'\rho_v'} \quad (2)$$

$$\text{CO}_2 \text{ 通量 } F_c = \overline{W'C'} \quad (3)$$

式(1)–式(3)中, ρ 为空气密度, C_p 为定压比热, L 为蒸发潜热, w' 为垂直风速脉动值, T' 为温度脉动值, ρ_v' 为水汽密度脉动值, C' 为 CO_2 浓度脉动值。

本研究采用2004年5月26日–2005年10月15日盘锦芦苇湿地观测场涡动相关系统的30 min碳通量、感热通量和潜热通量长期观测资料,并经过噪声去除、3次坐标旋转、WPL校正以及趋势去倾等

数据校正处理。

2 结果分析

受观测资料的限制,以往关于通量特征的分析研究通常基于短时段、甚至几天的观测数据,难以反映长期的平均状态和长期变化趋势。为增进对陆一气通量交换动态的理解,本研究基于近2 a的湿地芦苇涡动相关观测资料,分析研究了芦苇湿地 CO_2 浓度、 CO_2 通量、感热通量、潜热通量以及 Bowen 等的日、季、年动态特征。

2.1 芦苇湿地的 CO_2 浓度动态

图1给出了芦苇湿地 CO_2 浓度的日动态。从年

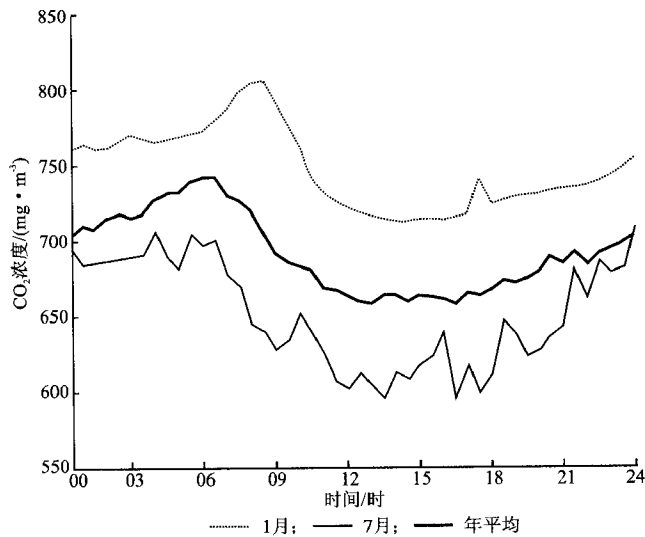


图1 芦苇湿地的 CO_2 浓度日动态

平均日变化曲线可以看出,芦苇湿地 CO_2 浓度具有明显的日变化,呈单谷单峰型;夜间浓度较高且逐渐升高,至日出前达到峰值;日出后急剧下降,傍晚又开始逐渐增加。7月 CO_2 浓度的日动态变异较1月

大,说明生长季下垫面植被的光合与呼吸作用对地表 CO_2 浓度影响较大,而冬季冻土表面的 CO_2 浓度日变化曲线比较光滑。

从芦苇湿地 CO_2 浓度的年动态(图2)可以看出,

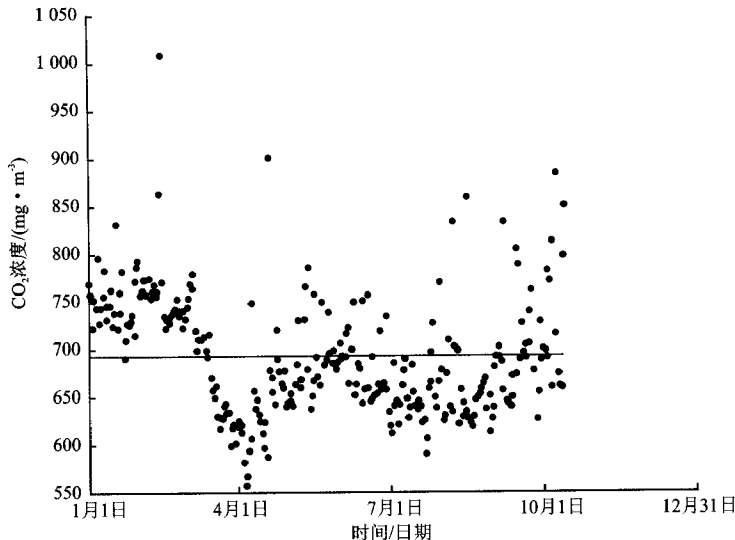


图2 芦苇湿地 CO_2 浓度年动态

冬季 CO_2 浓度较高,而生长季 CO_2 浓度较低。2005 年 CO_2 浓度年平均值为 692.18 mg/m^3 ,生长季(6~9月) CO_2 浓度平均值为 672.61 mg/m^3 ;而 2004 年生长季 CO_2 浓度平均值仅为 662.69 mg/m^3 ,2005 年与 2004 年的生长季 CO_2 浓度相比,增加了 1.5%。

2.2 芦苇湿地 CO_2 通量动态

图 3 给出了芦苇湿地 CO_2 通量的日动态。从年平均日动态变化可以看出, CO_2 通量日动态呈明显的单谷单峰型。07:00~18:00,由于植物吸收 CO_2 进行光合作用,使得 CO_2 通量为负值,呈抛物线型,最低值约为 $-0.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现在 12:00 左右;傍晚一夜间由于植物呼吸作用与土壤呼吸作用, CO_2 通量为正值,线型较平直,最高值约为 $0.1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。总的来说,芦苇湿地 CO_2 通量基本上是夜间以 13 h 为正,白天 11 h 为负。这是由于白天芦苇光合

作用强于芦苇自养呼吸作用和土壤异养呼吸作用之和,表现为碳吸收;夜间芦苇光合作用停止,主要为芦苇自养呼吸作用和土壤异养呼吸作用,表现为碳排放。从 1 月的日动态曲线可以看出,冬季 CO_2 通量的日动态变化不明显,趋近于零;夏季碳吸收强烈,变化显著。

盘锦湿地芦苇生态系统 CO_2 通量日变化曲线与森林、草原生态系统相似,与生长有水生植物的水面也相似,但与表现出纯碳源性质的洁净水面不同^[9]。宋霞等^[10]指出,千烟洲森林生态系统的冬季 CO_2 通量值为 $-1.5 \text{ mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \sim 0.5 \text{ mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,春季为 $-2.0 \text{ mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \sim 1.0 \text{ mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$,比盘锦湿地芦苇生态系统 CO_2 通量的日变化振幅要大,表明芦苇湿地生态系统的光合与呼吸强度要小于森林生态系统。

图 4 给出了芦苇湿地 CO_2 通量日累积值的年动

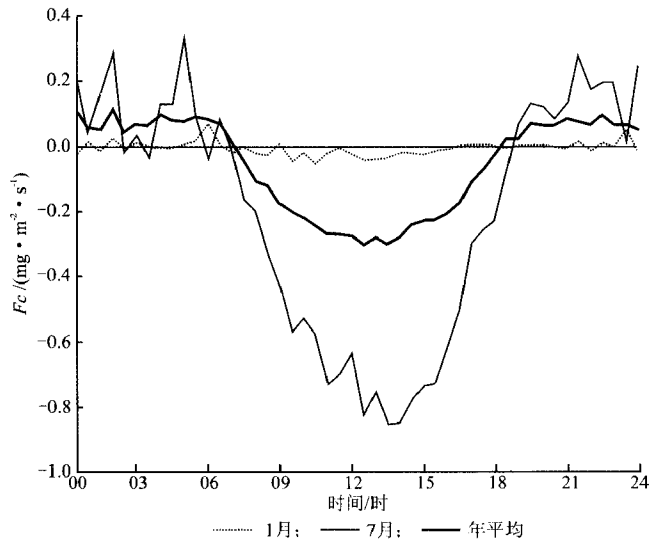


图 3 芦苇湿地 CO_2 通量日动态

态。 CO_2 通量日累积值年动态与日动态相似,冬季 CO_2 通量几乎为零,而生长季有较强的向下通量。2005 年 CO_2 通量总和为 -1332 g/m^2 ,日平均值为 -4.642 g/m^2 ,表明盘锦芦苇湿地具有较强的碳汇作用,以此推算湿地芦苇固碳为 $13.32 \text{ t CO}_2/\text{hm}^2$ 。2005 年湿地芦苇生长季(6~9月) CO_2 通量总和仅为 -1275 g/m^2 ,日平均值为 -10.447 g/m^2 ,而 2004 年同期生长季(6~9月) CO_2 通量总和达 -1409 g/m^2 ,日平均值为 -11.548 g/m^2 ,同比下降 9.5%。这表明,2005 年盘锦湿地芦苇生态系统 6~9 月固碳量小于 2004 年,同期芦苇长势较 2004 年差。因此,为更准确地理解与评估芦苇湿地生态系统碳收支,还需进一步加强对芦苇生态系统生产力、芦苇自养呼吸作用和土壤异养呼吸作用等碳循环的综合观测研究。

2.3 芦苇湿地感热通量动态

图 5 给出了芦苇湿地感热通量的日动态。从年平

均日动态曲线可以看出,芦苇湿地感热通量变化呈单峰单谷型。07:30~17:30,感热通量从地面向上输送,在 12:30 左右达到最大值;夜间感热通量为负值,变化较为平缓,最小值约为 -20 W/m^2 。总体而言,芦苇湿地感热通量白天 10 h 为正,夜间 14 h 为负。这表明,白天芦苇湿地受太阳辐射加热,温度高于大气,感热通量从地面向上输送;夜间芦苇湿地地表辐射冷却,温度低于大气,形成近地层逆温,感热通量从上向下输送。感热通量峰值在 1 月远大于 7 月。

图 6 给出了芦苇湿地感热通量日累积值年动态。芦苇湿地感热通量日累积值季节变化明显,春季数值较大,生长季数值较小。但日与日之间变动幅度较大,个别日数出现感热向下输送。2005 年感热通量日平均值为 2464 kJ/m^2 ,生长季(6~9月)感热通量日平均值为 984 kJ/m^2 ,2004 年同期生长季感热通量日平均值仅为 964 kJ/m^2 。2005 年与 2004

年的生长季感热通量相比, 同比增加了 2.1%。

2.4 芦苇湿地潜热通量动态

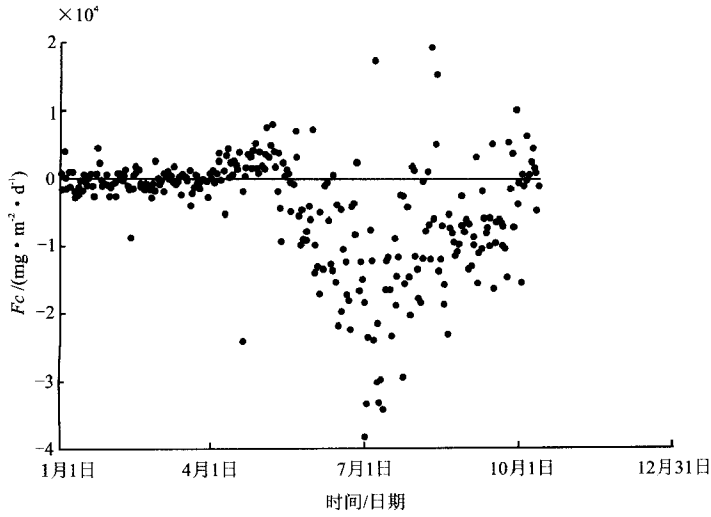


图 4 芦苇湿地 CO₂ 通量日累积值年动态

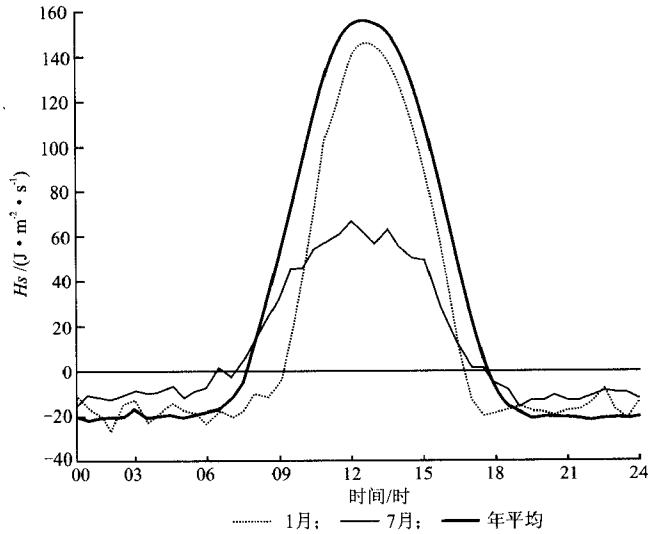


图 5 芦苇湿地感热通量日动态

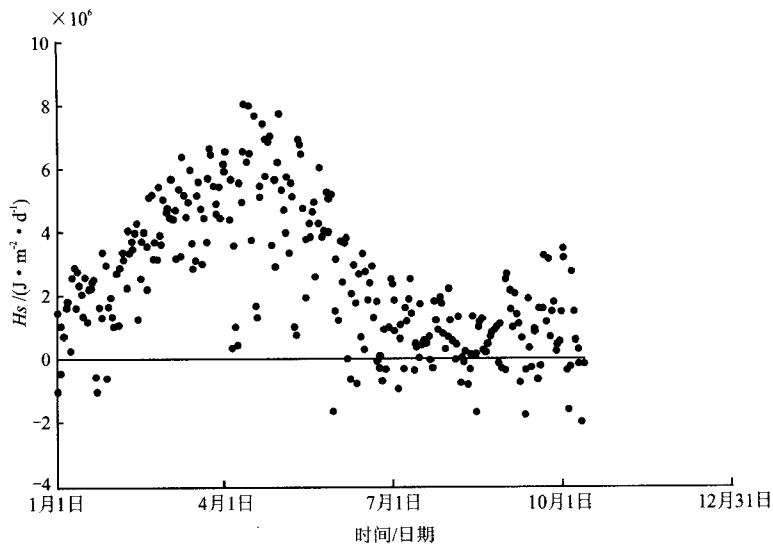


图 6 芦苇湿地感热通量日累积值年动态

图 7 给出了芦苇湿地潜热通量日动态。从年平均日动态曲线可以看出, 观测期间芦苇湿地的潜热

通量都为正值,呈单峰单谷型变化。自 6:00 开始, 潜热通量逐渐加大,至 13:00 达到最大值,尔后逐渐

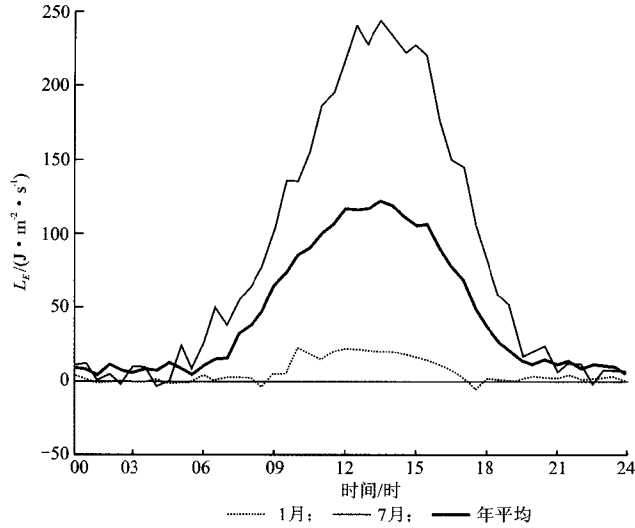


图 7 芦苇湿地潜热通量日动态

下降,19:00 降至最小值。这表明,在观测期间芦苇湿地无论在白天还是夜间,水汽总体而言都是从地表向上输送。芦苇湿地的潜热通量在白天远大于夜间,这是由于芦苇湿地地表的蒸发和生长季植被的蒸腾作用在白天远大于夜间。

长白山阔叶红松林^[11]和红壤丘陵区人工林^[10]

的观测亦表明,潜热通量白天为正,夜间为负。但盘锦芦苇湿地的水汽全天向上输送,潜热通量全天为正,反映出湿地水循环较强的特性。

芦苇湿地潜热通量日累积值季节动态变化明显(图 8)。冬季芦苇湿地潜热通量最小值接近于零,春季开始显著增加,在生长季达到最大。这表明,芦苇

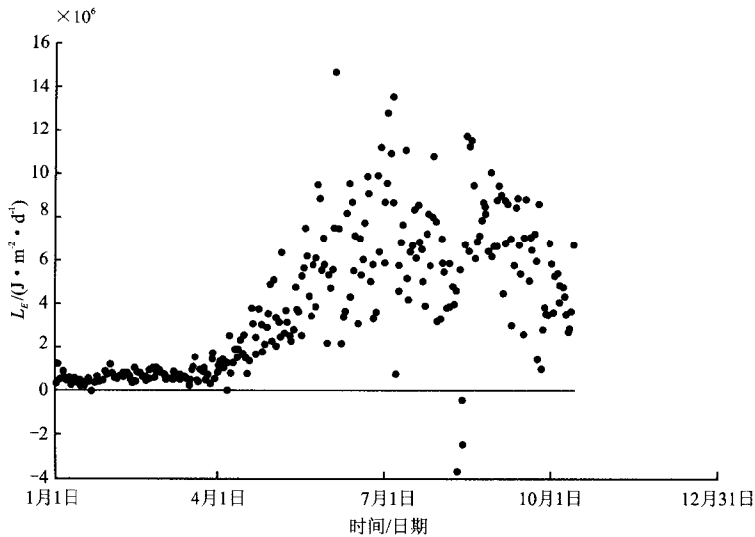


图 8 芦苇湿地潜热通量日累积值年动态

湿地冬季水汽向上输送但量值很小,而生长季湿地水分供应充足,植被蒸腾和地表蒸发十分旺盛,到了秋季以后又再次下降。2005 年潜热通量日平均值为 3 880 kJ/m²,生长季潜热通量日平均值为 6 474 kJ/m²,而 2004 年生长季潜热通量日平均值则达 6 951 kJ/m²。2005 年与 2004 年的生长季潜热通量相比,下降了 6.9%。

2.5 芦苇湿地波文比动态

图 9 给出了芦苇湿地波文比日动态。08:00~18:00,芦苇湿地波文比为正值,线型较平直,最大值约

为 1.0;其他时段为负值,呈无规则锯齿状分布,最小值接近 -5.0。芦苇湿地冬季潜热通量数值较小,导致 1 月波文比日变化剧烈且不稳定;而夏季水汽通量数值大且较稳定,7 月白天波文比稳定且较小。波文比日变化较突出,说明白天感热通量与潜热通量方向一致,比值较稳定;夜间感热通量与潜热通量方向相反,因为两者数值都较小,容易受到扰动影响,所以呈现出不规则的锯齿状波动。在盘锦芦苇湿地,白天潜热通量占主导地位,夜间感热通量占主导地位。

杨兴国等^[12]在陇中黄土高原夏季春小麦下垫面的

研究表明,白天波文比接近于 1.0。盘锦芦苇湿地在 7 月白天波文比小于 0.2,表明芦苇湿地下垫面水分充足,

潜热通量大于春小麦下垫面。

由芦苇湿地日累积值波文比年动态可以看出

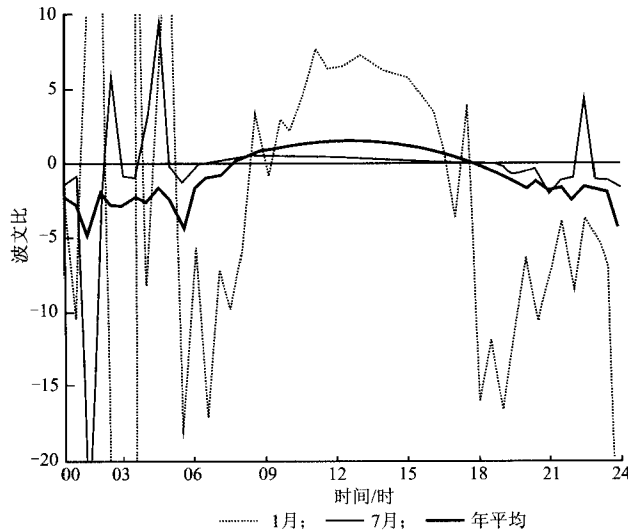


图 9 芦苇湿地波文比日动态

(图 10),日累积值波文比季节变化明显。冬春季数值较大且变动剧烈;生长季数值接近零,且较稳定。

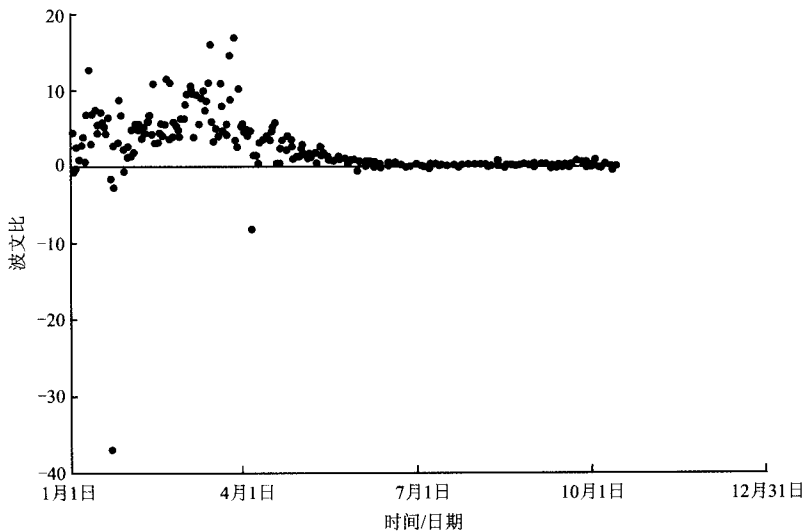


图 10 芦苇湿地日累积值波文比年动态

这是由于在冬春季,芦苇湿地的净辐射主要靠感热消耗,而生长季主要靠潜热消耗。2005 年芦苇湿地日累积值波文比平均值为 2.07,生长季日累积值波文比平均值为 0.15,2004 年日累积值波文比平均值 0.15,2 a 基本一致。

芦苇湿地固碳达 13.32 t CO₂/hm²;CO₂ 通量平均日动态呈单谷单峰型,白天为碳吸收,最大固碳出现在 12:00,夜间为碳排放;芦苇湿地 CO₂ 通量日变化振幅小于森林。

3 结论

通过对 2004 年 5 月 26 日—2005 年 10 月 15 日盘锦芦苇湿地的通量分析,得出如下结论。

(3)盘锦芦苇湿地感热通量平均日动态曲线呈单峰单谷型,昼正夜负,白天峰特征明显,12:00 达极大值;2005 年感热通量日平均值为 2 464 kJ/m²。

(1)盘锦芦苇湿地 CO₂ 浓度日动态呈单谷单峰型,夜间浓度较高且逐渐升高,直到日出前达到峰值;日出后急剧下降,傍晚又开始逐渐增加;2005 年 CO₂ 浓度年平均值为 692.18 mg/m³。

(4)盘锦芦苇湿地潜热通量季节变化明显,冬季接近于 0,春季开始显著增加,生长季达到最大;2005 年潜热通量日平均值为 3 880 kJ/m²。

(2)盘锦芦苇湿地具有较强的碳汇作用,2005 年

(5)盘锦芦苇湿地日累积值波文比季节变化明显,冬春季数值较大且变动剧烈,生长季接近于零且较稳定。2004 年和 2005 年生长季的日累积值波文比平均值均为 0.15,小于黄土高原夏季春小麦下垫

面。

(致谢:感谢在实验过程中提供帮助的辽宁盘锦鼎翔集团副总经理关恩凯,盘锦监狱第五大队副大队长范锦军,盘锦市气象局原局长赵芳文和刘景涛、张野、姜大鹏、张昆等科技人员)

参考文献

- [1] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget[J]. Science, 1990, 247: 1431 - 1438.
- [2] Keeling R F, Piper S C, Heimann M. Global and hemispheric CO₂ sinks deduced from changes in atmospheric CO₂ concentration[J]. Nature, 1996, 381: 218 - 221.
- [3] Holland E A, Brown S, Potter C S, et al. North American carbon sink[J]. Science, 1999, 283: 1815.
- [4] Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology[J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 112 - 175.
- [5] 周广胜, 张新时, 高素华, 等. 中国植被对全球变化反应的研究[J]. 植物学报, 1997, 39(9): 879 - 888.
- [6] 刘国华, 方精云. CO₂ 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇[J]. 植物生态学报, 2001, 25: 594 - 602.
- [7] 周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 等. 陆地生态系统类型转变与碳循环[J]. 植物生态学报, 2002, 26(2): 250 - 254.
- [8] Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming[J]. Ecological Application, 1991(1): 182 - 195.
- [9] 张发兵, 胡维平, 杨龙元. 太湖春季水-气界面碳通量日变化观测研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 186 - 190.
- [10] 宋霞, 刘允芬, 徐小锋, 等. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析[J]. 资源科学, 2004, 26(3): 98 - 104.
- [11] 关德新, 吴家兵, 王安志, 等. 长白山阔叶红松林生长季热量平衡变化特征[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1828 - 1832.
- [12] 杨兴国, 张强, 王润元, 等. 陇中黄土高原夏季地表能量平衡观测研究[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 828 - 834.

Long-term flux characteristics of *Phragmites* ecosystem in Panjin wetland

WANG Hongyu ZHOU Guangsheng

(Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016)

Abstract: The dynamics of carbon flux, sensible heat flux and latent heat flux of *Phragmites* ecosystem were analyzed based on long term field observation data in Panjin wetland from May 26, 2004 to Oct. 15, 2005. The results indicated that reed wetland was a strong carbon sink. The reed wetland absorbed carbon about 13.32 t CO₂/hm² in 2005, and the values of diurnal mean sensible heat flux and latent heat flux were 2464 kJ/m² and 3880 kJ/m² in 2005, respectively. The mean Bowen ratio of daily cumulation from June to September in both 2004 and 2005 was about 0.15. The diurnal patterns of carbon flux, sensible heat flux and latent heat flux in reed wetland were single kurtosis and single vale, and the maximum value appeared at noon. The absolute flux values of *Phragmites* in growth season during daytime were higher than those during nighttime, and carbon was absorbed in daytime and emitted in nighttime. The annual average diurnal pattern of carbon dioxide concentration was also single kurtosis and single vale. The concentration became strong in nighttime and would reach maximum value near sunrise, then dropped down rapidly, and increased again on dusk. In reed wetland, the value of annual average sensible heat flux was positive in daytime and negative in nighttime, but the value of annual average latent heat flux was positive in all day different with that of forest ecosystems. The seasonal changes were obvious. In winter, the diurnal values of CO₂ flux had few changes, and the values were close to zero. The sensible heat flux was upwards as a whole, and the values in spring were higher than those in growth season. The value of latent heat flux was minimum and near zero in winter, then increased obviously in spring, and reached maximum in growth season.

Key words: Wetland; *Phragmites*; Eddy covariance; Carbon flux; Sensible heat flux; Latent heat flux; Bowen ratio