

盘锦湿地芦苇群落蒸发散模拟研究

于文颖¹ 周广胜^{2,3} 周莉³

(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110161; 2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016;
3. 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

摘要:根据2005年盘锦芦苇湿地监测站的小气候梯度监测数据和涡动通量观测数据,结合芦苇生理生态特性观测资料,采用波文比-能量平衡法、Penman-Monteith模型对盘锦湿地芦苇群落蒸发散进行模拟,并与涡动相关系统的实测资料进行比较。结果表明:Penman-Monteith模型更适合芦苇群落蒸发散的模拟,可为芦苇湿地蒸发散的计算提供依据。

关键词:湿地;芦苇群落;蒸发散;潜热通量;模拟

湿地蒸发散是湿地水分损失的主要途径,是湿地生态水文过程综合作用的结果。正因为湿地蒸发散在湿地生态水文过程中的重要作用,湿地蒸发散被列为第5届国际湿地会议(1996)的核心内容之一^[1]。湿地蒸发散包括湿地水面-土壤-植被表面的蒸发过程和湿地植被的蒸腾过程以及植被表面的截留蒸发过程三部分。目前,关于湿地生态水文过程的研究不够深入,特别是湿地植被生态过程对蒸发散影响的定量模拟还较薄弱,制约着湿地水文循环的准确评估。

蒸发散可通过实测或模型方法估算。蒸发散的实测法包括水文学法、风调室法、气孔计法、快速称重法、涡动相关法、热脉冲法、同位素示踪法和能量平衡法等。用于蒸发散估算的模型包括波文比-能量平衡法、梯度法、空气动力学法、SPAC法、经验公式法和遥感法等^[2]。涡动相关法是目前国际上公认的精确测量蒸发散方法。但是该方法设计复杂,仪器造价高。在蒸发散模型研究中,遥感法具有很好的空间适应性和空间覆盖性,可直接估算大面积蒸发散,越来越受到科学界的关注。但该方法存在着取样不连续等缺点,同时对蒸发散遥感估算的机理与过程仍有待于进一步完善。目前,波文比-能量平衡法与Penman-Monteith模型常被用于蒸发散估算^[3]。

本研究试图以盘锦湿地芦苇群落为例,基于涡动相关系统的观测资料,比较分析当前蒸发散估算的常用方法,波文比-能量平衡法和Penman-Monteith模型对湿地蒸发散的估算准确性,以为湿地蒸发散的准确评估提供方法,服务于湿地生态系统的科学管理。

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°08'N, 121°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,属于暖温带季风气候:四季分明,雨热同季,气温适宜,光照充裕。年平均气温为8.6℃,无霜期为170 d,年平均降水量为627 mm,年日照时间为2 700 h以上。地貌类型以冲积平原和潮滩为主。盘锦湿地是世界上保存比较完好的滨海湿地,成片苇田达8万hm²,是世界第二大芦苇分布区^[4]。该站配备有小气候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CO₂/H₂O分析仪(Li-7500, Li-cor 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(CO₂)、水蒸气绝对密度(H₂O)、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、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 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。

本研究所用资料包括2005年盘锦芦苇湿地观测站的小气候梯度数据,涡动相关系统的感热通量和潜热通量资料,以及芦苇群落叶面积、群落冠层内分层小气候以及芦苇生理生态观测资料等。小气候梯度数据、涡动相关系统观测数据均为30 min的平均值。涡动相关系统通量观测数据已经经过原始观测数据的噪声去除、3次坐标旋转、WPL校正以及趋势去倾修正。

收稿日期:2006-06-08;修订日期:2006-07-05。

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-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:于文颖,女,1978年生,博士研究生,主要从事农业水土工程方面的研究。

通信作者:周广胜, E-mail: gshou@ibcas.ac.cn。

1.2 蒸发散计算方法

1.2.1 波文比-能量平衡法

根据能量平衡原理,地表热量平衡方程可表示为:

$$R_n = H + \lambda E + G + S + \rho H \quad (1)$$

式(1)中 R_n 为地表面净辐射通量, G 为土壤热通量, H 为近地面层地气间的湍流感热交换通量, λE 为地面及作物因蒸发或凝结所产生的潜热输送通量, S 为植被热贮存, ρH 为植物光合作用及各种其他生物反应所引起的热量转换。其中, ρH 一般比 H 和 λE 的数量级要小很多,通常可予以忽略。 S 在能量平衡方程中所占比例很小,故略去不计。因此,式(1)可简化为:

$$R_n = H + G + \lambda E \quad (2)$$

式(2)中, R_n 为实测值。

土壤热通量 G 可写为:

$$G = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (3)$$

式(3)中, λ 为土壤的导热率($J \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$), ΔT 和 ΔZ 分别为2层间的温度差($^\circ C$)和深度差(m)。

假定在土壤中没有水平方向的热交换和附近没有冻结和溶解现象发生,同时导热率 λ 不随时间和深度而变化,则由5 cm土壤热通量均值可求取 λ :

$$\lambda = -G_5 \frac{\Delta Z}{\Delta T} \quad (4)$$

式(4)中,5 cm土壤热通量 G_5 由土壤热通量板测定。

0 cm处土壤热通量可根据式(5)计算^[5]:

$$G_0 = G_5 + \frac{\partial S_{0-5}}{\partial t} \Delta Z \quad (5)$$

式(5)中, G_0 为地表面土壤热通量($W \cdot m^{-2}$), G_5 为地表下5 cm处的土壤热通量($W \cdot m^{-2}$), $\Delta Z = 5$ cm, S_{0-5} 为0~5 cm土层贮热量(J),即: $S_{0-5} = -\lambda A t \frac{\Delta T}{\Delta Z}$, 式中 A 为土壤截面积(m^2),取 $A = 1 m^2$, t 为2次观测时间的间隔(s)。

将所求的 λ 值和 S_{0-5} 代入式(5),求出土壤表面热通量。

由已知的净辐射 R_n 和土壤热通量 G , 求出感热通量 H 和潜热通量 λE 。为了从式(2)中确定 H 和 λE , 采用波文比-能量平衡法进行计算。

Bowen 于1926年提出通过地表能量平衡方程和显热及潜热通量的垂直输送方程计算显热和潜热通量的波文比-能量平衡法,计算潜热通量的公式为:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (6)$$

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (7)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{(1 + \beta)} \quad (8)$$

式(6)~式(8)中, R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; β 为波文比; ΔT 和 Δe 分别为2个高度的温度和水汽压差; γ 为干湿表常数, $\gamma = \frac{C_p P}{\epsilon \lambda}$; λ 为蒸发潜热(2.5

$\times 10^6 J/kg$); P 为气压(kPa); C_p 为定压比常数 $1.013 \times 10^{-3} [MJ/(kg \cdot ^\circ C)]$; ϵ 为水汽与干空气摩尔质量比, $\epsilon = 0.622$ 。

根据 R_n 和 G , 即可由式(7)和式(8)求得相应的 λE 和 H ^[6-7]。

1.2.2 Penman-Monteith 模型

Penman-Monteith 模型在蒸散研究中的应用最广泛。用该模型估算的关键问题是对空气动力学阻力和冠层阻力等参数的确定。Monteith 在 Penman 等人的工作基础上于1965年提出了 Penman-Monteith 模型^[7]:

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_n - G) + C_p P(e_s - e_a)/r_c}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (9)$$

式(9)中 Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率($Pa/^\circ C$); e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压、实际水汽压(Pa); ρ 为大气密度($kg \cdot m^{-3}$); r_a 为空气动力学阻抗(s/cm); r_c 为作物冠层阻抗(s/cm); γ 为干湿表常数($Pa/^\circ C$); R_n 为净辐射; G 为土壤热通量; C_p 为定压比常数($J/(kg \cdot ^\circ C)$)。式(10)中各参数的计算公式:

1.2.2.1 饱和水汽压曲线的斜率 $\Delta(kPa \cdot ^\circ C^{-1})$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp\left(\frac{17.27T}{T + 237.3}\right) \right]}{(T + 273.3)^2} \quad (10)$$

1.2.2.2 饱和水汽压 $e_s(T)$ (kPa)

$$e_s(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right] \quad (11)$$

1.2.2.3 实时空气密度 $\rho(kg \cdot m^{-3})$:

$$\rho = \frac{P}{R_d(T + 273.15)(1 + 0.378 \frac{e_a}{P})} \quad (12)$$

式(12)中, R_d 为干空气的比气体常数($R_d = 0.287 J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$), e_a 为实际水汽压^[9]。

1.2.2.4 空气动力学阻抗 r_a :

$$r_a = [\ln(z - d)/z_0]^2 / [k^2 \times U(z)] \quad (13)$$

式中, z 为参考高度(测风处的高度); d 为零平面位移高度; z_0 为下垫面的粗糙高度; k 为卡门常数(0.4); $U(z)$ 为 z 高度处的风速。

为了避免 $U(z)$ 为0, r_a 为无穷大的情况, Thom 和 Oliver(1977)^[9] 给出了如下经验公式:

$$r_a = 4.72 [\ln(z - d)/z_0]^2 / [1 + 0.54U(z)] \quad (14)$$

对于一般作物, d 和 z_0 可近似采用经验公式估算:

$$d = 0.667h \quad (15)$$

$$z_0 = 0.123h \quad (16)$$

式(16)和式(17)中, h 为作物高度。

1.2.2.5 冠层阻抗 r_c (s/m)

Ball 等^[10] 提出了气孔导度模型, 被称为 BWB 模型:

$$g_s = m \frac{A_n \cdot h_s}{C_s} + b \quad (17)$$

式(17)中 g_s 为气孔导度(cm/s); A_n 为由光、温因子所决定的光合作用速率($\mu mol/m^2 \cdot s$); C_s 为环境中 CO_2 的相对浓度($\mu mol/m^2 \cdot s$); h_s 为相对湿度; m 和

b 为回归方程的斜率和截距,其中 $m = 3.9716, b = 0.0475$ 。其中叶片气孔阻力为气孔导度的倒数,即:

$$r_{ci} = \frac{1}{g_s} \quad (18)$$

由气孔阻力 r_{ci} 和叶面积指数计算冠层阻力 r_c , 则

$$r_c = \left(\sum \frac{1}{r_{ci}} \cdot LAI_i \right)^{-1} \quad (19)$$

将以上求得的各参数值代入 Penman - Monteith 模型,即可求得 $\lambda E^{[10-15]}$ 。

2 结果分析

2.1 芦苇群落蒸发散动态

图1给出了基于涡动相关系统的芦苇群落不同

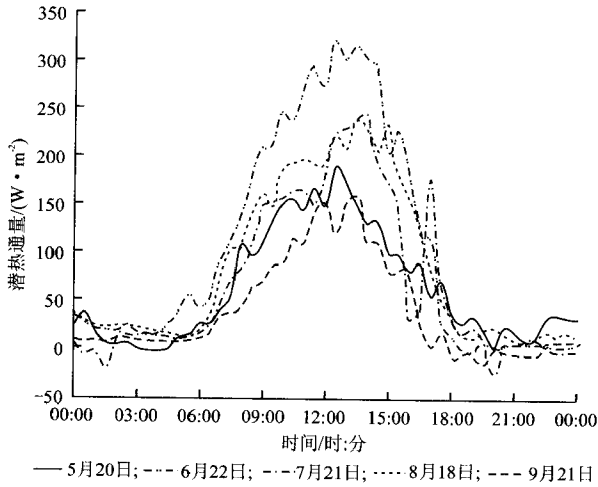


图1 盘锦湿地芦苇群落蒸发散日变化

季节的潜热通量(30 min 平均值)日动态。可以看出,晚间蒸发散较小,12~14 时蒸发散最大。芦苇群落蒸发散的日变化为单峰曲线,总的趋势为清晨蒸发散较低;随着气温的升高,12~14 时蒸发散速率不断升高,出现峰值;而后,随着气温下降,蒸发散速率也不断下降,夜间蒸发散下降到最低。不同月份的蒸发散日动态呈现相同的变化趋势,即早晚低、中午高的单峰曲线型。图2给出了不同月份逐日蒸发散速率均值的变化趋势。可以看出,5月和9月的湿地

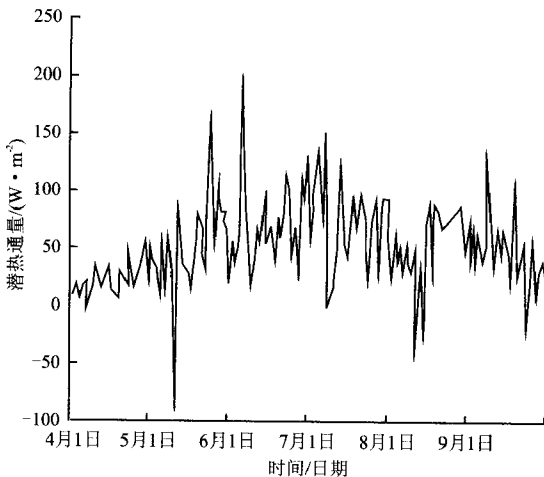


图2 盘锦湿地芦苇群落蒸发散季节变化

芦苇群落蒸发散速率较低,这是由于6~8 月间芦苇生长旺盛,蒸发散速率较高而导致。

2.2 芦苇群落蒸发散模拟比较

图3给出了基于能量平衡法和 Penman - Monteith

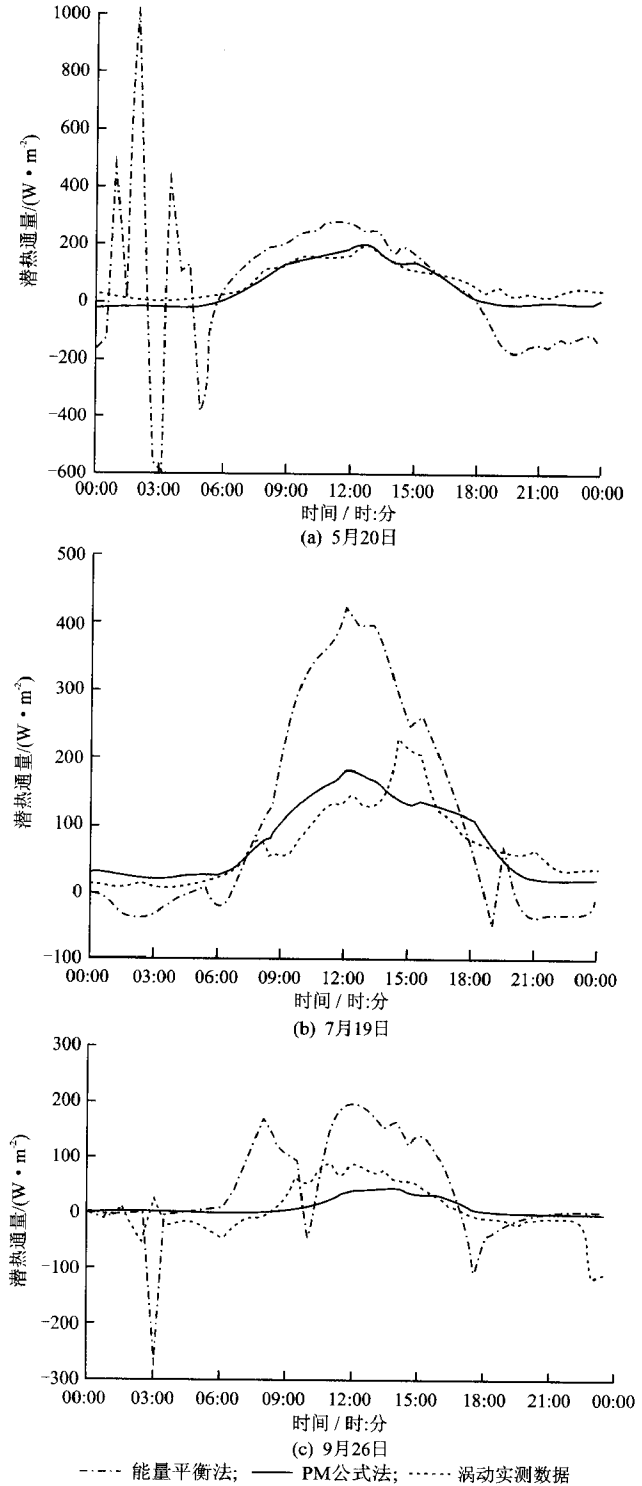


图3 Penman - Monteith 模型与能量平衡法的蒸发散模拟值与涡动相关系统观测值的比较

模型计算的芦苇群落蒸发散,并与涡动相关系统的通量观测数据进行了比较。可以看出,2 种方法计算的潜热通量与涡动相关系统的蒸发散存在较大差

异。其中, Pemman - Monteith 模型模拟值与涡动相关系统观测较为接近。图 4 给出了 2005 年 5 月 20 日、7 月 19 日和 9 月 26 日基于能量平衡法和 Pemman - Monteith 模型模拟的潜热通量与涡动相关系统通量数据的回归分析结果。可以看出, Pemman - Monteith 模型对湿地芦苇群落蒸发的模拟效果在

整个生长季均较好, 但能量平衡法对湿地芦苇群落的模拟值除生长季盛期(7 月)模拟较好外, 其他季节的模拟值均较差。总之, Pemman - Monteith 模型模拟值较能量平衡法的模拟值更接近于涡动相关系统的观测值。

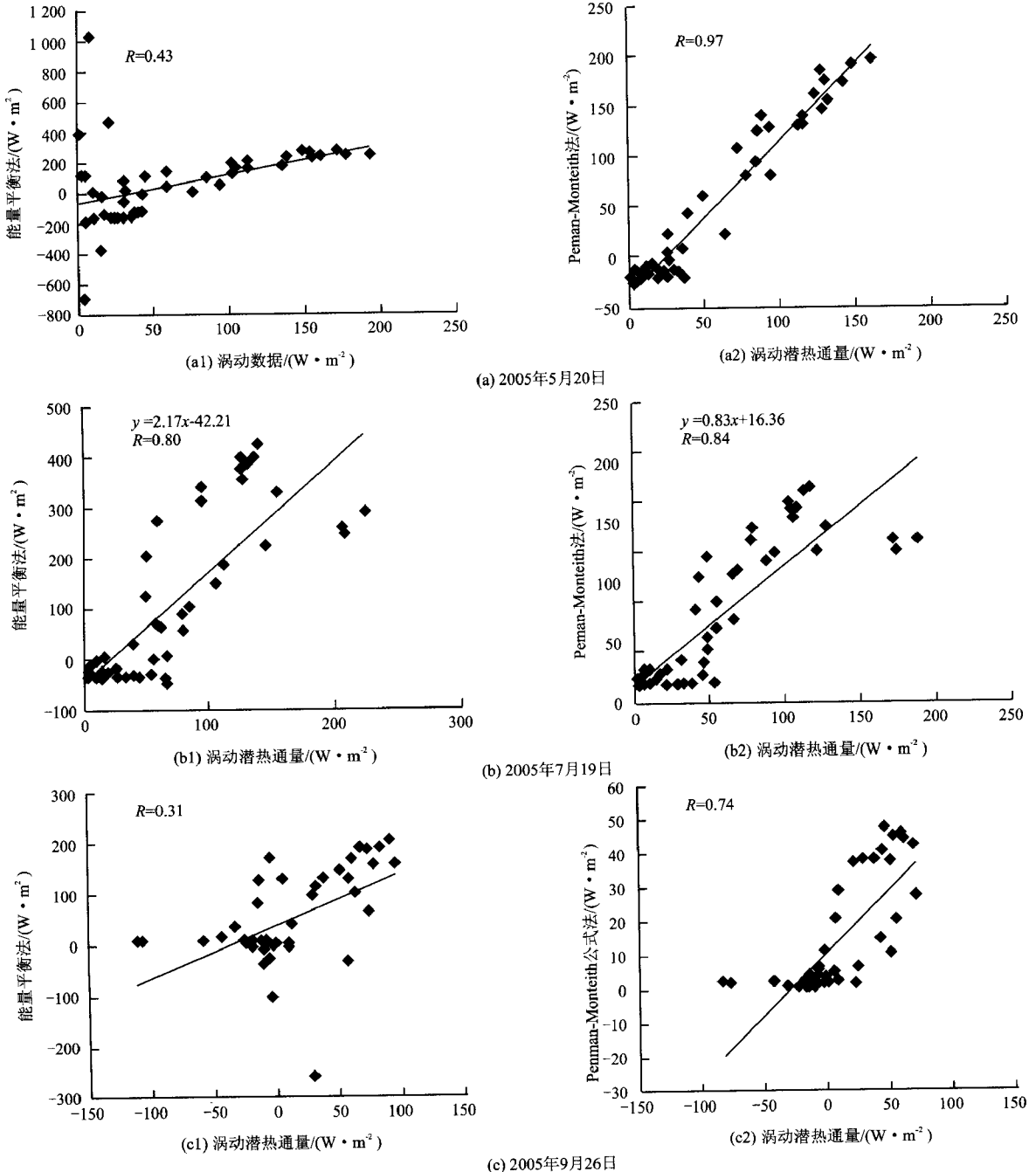


图 4 Pemman - Monteith 模型和能量平衡法的蒸发散模拟值与涡动相关系统观测值的相关性

2.3 芦苇群落蒸发的动态模拟

基于 Pemman - Monteith 模型和能量平衡法对盘锦湿地芦苇群落蒸发的模拟值与涡动相关系统观测值的比较表明, Pemman - Monteith 模型较能量平衡法更适于模拟盘锦湿地芦苇群落蒸发。为了解 Pemman - Monteith 模型对盘锦湿地芦苇群落蒸

发动态模拟的准确性, 采用 Pemman - Monteith 模型对 2005 年芦苇生长季蒸发动态进行模拟, 见图 5。图 6 给出了 Pemman - Monteith 模型模拟盘锦湿地芦苇群落整个生长季 30 min 蒸发动态与涡动相关系统观测值的相关性分析, 相关系数为 0.46。

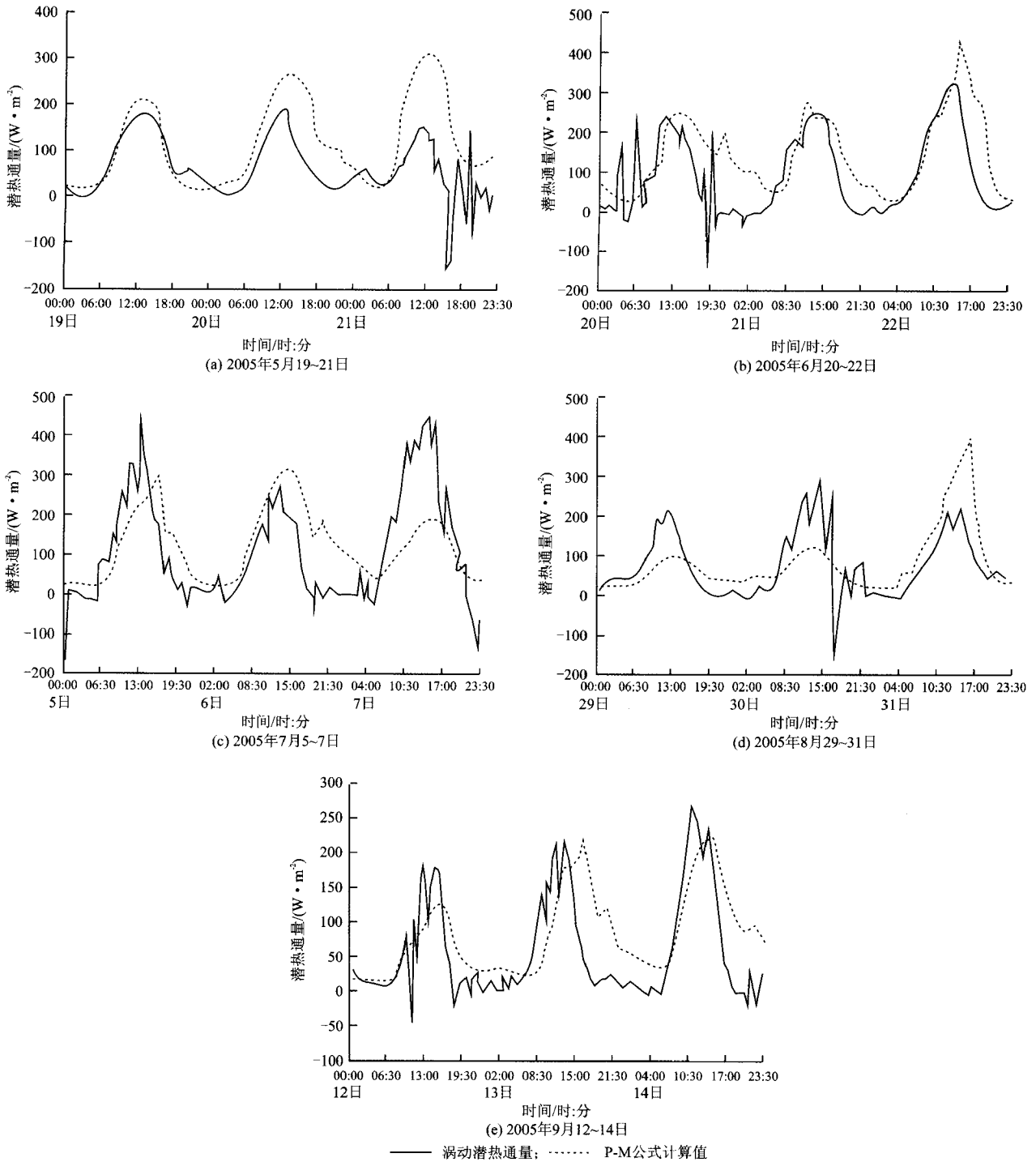


图 5 基于 Penman - Monteith 模型对盘锦湿地芦苇生长季蒸发的动态模拟

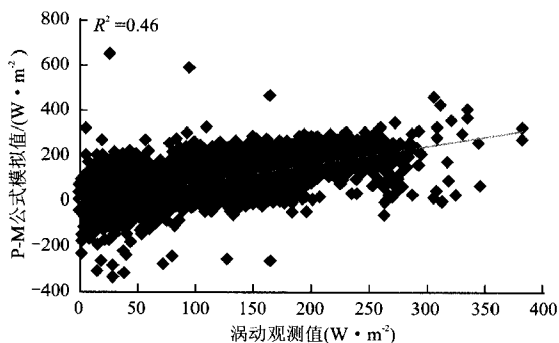


图 6 盘锦湿地芦苇生长季蒸发的模拟值与涡动相关系统观测值的相关性分析

3 结论

基于盘锦湿地芦苇群落生长季涡动相关系统的连续观测资料,分析了芦苇群落蒸发动态,得出盘锦湿地芦苇群落蒸发散呈单峰曲线变化:夜间至清晨,蒸发散较低;随着气温的升高,辐射逐渐增强,12~14 时蒸发散达到最大;此后,由于辐射的不断减弱,气温逐渐开始下降,芦苇蒸发散也开始不断降低。比较波文比—能量平衡法和 Penman - Monteith 模型对盘锦湿地芦苇群落蒸发散模拟值的准确性表

明, Penman - Monteith 模型更适合芦苇群落蒸发散的模拟, 而波文比 - 能量平衡法不适于模拟芦苇群落蒸发散动态。这可能是因为湿地水分较大, 特别是在夜间或出现降雨时, β 值接近 -1, 此时温度梯度与水分子气压梯度方向相反, 波文比法误差增大, 使得潜热通量的模拟值增大很多, 结果没有意义^[17]。

(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] 王仁卿, 刘纯慧. 从第五届国际湿地会议看湿地保护与研究趋势[J]. 生态学杂志, 1997, 16(5): 72 - 76.
- [2] 司建华, 冯起, 张小由, 等. 植物蒸散耗水量测定方法研究进展[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 450 - 459.
- [3] 梁丽乔, 闫敏华, 邓伟. 湿地蒸散测算方法进展[J]. 湿地科学, 2005, 3(1): 74 - 80.
- [4] 杨允菲, 李建东. 松嫩平原不同生境芦苇种群分株的生物量分配与生长分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(1): 30 - 34.
- [5] 张晓煜, 王连喜, 刘静, 等. 宁南退耕还草区近地面的湍流通量特征研究[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 988 - 993.
- [6] 刘树华, 陈家宜, 张霁琛. 干燥防护林田与湿润农田热量平衡观测研究[M]//防护林体系生态效益及边界层物理特征研究. 兰州: 高原出版社, 1992: 217 - 223.
- [7] 刘树华, 张霁琛. 防护林近地面层动量、感热和潜热通量特征[M]//防护林体系生态效益及边界层物理特征研究. 兰州: 高原出版社, 1992: 59 - 67.
- [8] Monteith J L. Evaporation and environment. In: G E Fagg ed. The State and Movement of Water in Living Organism [C]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1965: 205 - 234.
- [9] Thom A S, Oliver H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1977, 103: 345 - 357.
- [10] Toby N C. Modeling stomata resistance: an overview of the 1989 workshop at the Pennsylvania State University [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 54: 103 - 106.
- [11] 莫兴国, 林忠辉, 刘苏峡. 基于 Penman - Monteith 公式的双源模型的改进[J]. 水利学报, 2000(5): 6 - 11.
- [12] 魏天兴, 朱金兆, 张学培. 林分蒸散耗水量测定方法述评[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(3): 85 - 91.
- [13] 王安志, 裴铁璠. 森林蒸散测算方法研究进展与展望[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 933 - 937.
- [14] 李孝广, 毕华兴, 刘胜, 等. Penman - Monteith 蒸散模型及其在森林下垫面中参数的确定[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 257 - 261.
- [15] 刘建栋, 傅抱璞, 于强. 包容环境因子的 Penman - Monteith 公式进行蒸散计算的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1998, 34(3): 359 - 364.
- [16] 刘绍民, 孙中平, 李小文, 等. 蒸散量测定与估算方法对比研究[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 161 - 167.
- [17] 吴家兵, 关德新, 张弥. 涡动相关法与波文比 - 能量平衡法测算森林蒸散的比较研究——以长白山阔叶红松林为例[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1245 - 1249.

Simulating evapotranspiration of *Phragmites communis* in Panjin Wetland

YU Wenyong¹ ZHOU Guangsheng^{2,3} ZHOU Li³

(1. College of Water Conservancy, Shenyang Agriculture University, Shenyang 110161;

2. Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016; 3. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

Abstract: Based on the microclimate gradient observation, eddy covariance observation and ecophysiological observation in Panjin wetland ecosystem research station in 2005, the evapotranspiration of *Phragmites communis* was simulated by Bowen ratio energy balance method and Penman-Monteith model. The simulated values were validated by the observed data from eddy covariance system. The results showed that Penman-Monteith model was the better one to simulate the evapotranspiration of *Phragmites communis*. This research would provide the evaluation method for the evapotranspiration of *Phragmites communis*.

Key words: Wetland; *Phragmites communis*; Evapotranspiration; Latent heat flux; Simulation