

三江平原典型沼泽湿地蒸散量研究

贾志军^{1,2} 宋长春^{1,2} 王跃思² 黄耀² 石立庆²

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130021

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 利用涡度相关技术对三江平原典型沼泽湿地蒸散量及其影响因子进行研究, 结果表明沼泽湿地蒸散量时间变化特征明显。日出后蒸散量逐渐增加, 12:00~13:00 (北京时间) 达到最大值, 6~10月各月平均值分别为 285.5、257.4、243.0、167.1 和 65.9 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 各月总蒸散量分别为 120.9、101.6、93.1、59.3 和 25.9 mm。与同期降雨量相比, 6~9月沼泽湿地水量发生亏缺, 亏缺量分别为 72.7、3.2、58.8 和 44.4 mm。沼泽湿地蒸散量受环境因子影响强烈。蒸散量与净辐射呈显著线性正相关。蒸散量也随饱和水汽压差的增加而增加, 但植物发育成熟后, 当饱和水汽压差大于某一阈值 (11 hPa) 时, 饱和水汽压差的增加反而抑制了水分蒸散。另外, 白天风速增加在一定程度上能够促进水分蒸散。

关键词 沼泽湿地 蒸散量 净辐射 饱和水汽压差 风速

文章编号 1006-9585 (2007) 04-0496-07 **中图分类号** P426.2 **文献标识码** A

Studies on Evapotranspiration over Mire in the Sanjiang Plain

JIA Zhi-Jun¹, SONG Chang-Chun^{1,2}, WANG Yue-Si²,
HUANG Yao², and SHI Li-Qing²

1 *Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012*

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Evapotranspiration and its influential factors were studied by eddy covariance technique over mire in the Sanjiang Plain in 2004. The results show that temporal variation of evapotranspiration is very clear. The evapotranspiration gradually increased after the sunrise and reached the maximum at noon from June to October, which were 285.5, 257.4, 243.0, 167.1, and 65.9 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively. The total evapotranspiration of every month from June to October were 120.9, 101.6, 93.1, 59.3, and 25.9 mm, respectively. Compared with the corresponding precipitation, the deficits of water for mire ecosystem occurred from June to September, which were about 72.7, 3.2, 58.8, and 44.4 mm, respectively. The results also suggest that evapotranspiration is significantly influenced by environmental factors. Evapotranspiration in the daytime, for example, is strongly linearly dependent on net radiation and increased with the increasing vapour pressure deficit. However, after mire plant matured, the evapotranspiration was depressed by the increasing vapour pressure deficit when it surpassed certain value (11 hPa). In addition, wind speed could promote the evapotranspiration at some degree in the daytime.

Key words mire, evapotranspiration, net radiation, vapour pressure deficit, wind speed

1 引言

蒸散是生态系统水分平衡的重要组成部分,影响植物光合作用,与生态系统生产力密切相关,在湿地生态系统中还可作为评价其功能的重要指标^[1]。湿地是陆地生态系统中一个重要碳汇^[2],水文条件是其性质的决定性因子^[3]。水分输入与输出的动态平衡为湿地创造了有别于陆地和水体生态系统的独特物理化学条件,其中蒸散作为湿地一大气间水热交换的主要方式,对湿地水位、盐度及其微气象环境影响很大,在一定程度上控制着湿地生态系统的机能。因此研究湿地蒸散及其驱动机制,对于认识与理解湿地生态系统的结构、功能和特点具有重要意义。

当前蒸散量研究主要集中于森林、农田等生态系统中,而着眼于沼泽生态系统的研究较少。三江平原沼泽湿地是我国湿地类型的典型代表,国内部分学者利用蒸发器和有关经验方程对其蒸散特点进行了初步研究^[4,5],但受测量仪器精度及研究方法的限制,沼泽湿地蒸散过程仍待进一步深入探讨。目前涡度相关技术日趋成熟并被广泛应用于测定生物圈与大气圈间痕量气体通量,成为现阶段国际上水热通量测定的标准方法^[6]。本文利用安装在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站内的涡度相关设备测定沼泽湿地蒸散量,分析三江平原典型沼泽湿地蒸散量的时间变化特征及其控制因素和作用机理。

2 研究方法

2.1 研究区概况

观测试验布置在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站沼泽湿地综合试验场(47°35'N, 133°31'E)内。试验场为一人工闭合集雨区,海拔55.4~57.9 m之间,地势由南向北倾斜,坡降1:5000左右。属温带湿润大陆性季风气候,夏季温暖湿润,冬季严寒漫长,冰冻期达5个多月。年均气温1.9℃,1月平均气温-21℃,7月平均气温22℃,极端最高和最低气温分别为37.0和-38℃,无霜期约125天,年均降水量约600 mm,主要集中于7和8月,降水和高温同期。试验场分布有

多种类型的淡水草本沼泽和沼泽化草甸,涡度相关观测系统架设在毛果苔草沼泽湿地中。该类沼泽是三江平原沼泽类型中面积最大的,约占三江平原沼泽湿地总面积的57%^[7]。毛果苔草沼泽地表常年积水,水深10~30 cm,水化学类型为HCO₃—Ca、Mg型,pH值6.0~7.5,沼泽表层为20~30 cm厚的草根层,其下发育了腐殖质沼泽土。植被群落主要为毛果苔草—乌拉苔草(*Carex lasiocarpa*-*Carex meyeriana*)群丛。植株高度0.3~0.8 m,覆盖度50%~80%。试验区沼泽湿地土壤与植被类型发育典型,没有受到人类活动干扰,在三江平原具有典型代表性。

2.2 研究方法

2.2.1 数据获取

2004年6月12日~10月19日利用涡度相关观测系统对试验场毛果苔草沼泽湿地蒸散量(潜热通量)进行连续观测。涡度相关观测系统主要由开路红外气体分析仪(LI-7500, Li-Cor Inc, USA)和三维超声风速仪(CSAT3, CAMP-BELL, USA)组成,分别用来测量大气中CO₂和H₂O浓度以及三维风速,用温湿度计(HMP45C, CAMPBELL, USA)监测空气温度和相对湿度。开路系统采样频率为10 Hz。传感器将信号传递给CR5000数据采集器(CSI)进行信号转换和相关处理,最后将所有采集的实时数据和在线计算的30 min平均通量数据保存到PCMC卡上。在测量蒸散量的同时,利用实验场内安装的沼泽小气候自动气象站(Model MONITORMAOS-I, 中国机械工业部长春气象仪器研究所)对太阳总辐射、净辐射、干湿球温度(0.5、1、2和3 m)、土壤温度(0、5、10、20和40 cm)和风速等环境要素进行实时监测。采用CI-203型叶面积仪(CID, Inc, USA)测定毛果苔草—乌拉苔草群丛的叶面积指数,以此反映沼生植物发育的季节性变化。

2.2.2 数据处理

涡度相关法测定蒸散量不仅精确度高而且稳定性好,但在实际观测中由于各种原因不可避免地会缺测和出现不合理数据^[8],因此数据处理时首先对蒸散量(潜热通量)日变化进行绘图分析,剔除显著异常数据;再从各月采集的30 min数据中计算出样本平均值 m 和标准差 σ ,根据 3σ 原则把落在 $(m-3\sigma, m+3\sigma)$ 之外的数据进一步剔

除。由于降雨时感应头受潮对测量结果影响很大，所以把降雨期内的数据也剔除掉。被剔除的数据按缺测数据处理，各月缺测数据量见表 1。统计结果表明，不合理数据夜间出现频率较高，主要是夜间大气层结稳定、湍流强度弱所致。7 月数据缺测率较高则是由于该月降雨频繁所致，但白天的有效潜热通量数据仍能反映生态系统水分蒸散的基本状况。对缺测和被剔除的数据依据有关方法进行插值和替代：1) 小于 3 h 的缺测数据利用线性内插法插补；2) 大于 3 h 的缺测值用相邻几天同时刻数据的平均值进行插补。涡度相关法测量蒸散量同样面临着夜间通量低估这个问题，但由于低温、高湿、植物蒸腾作用减弱及露水凝结等因素的影响，夜间生态系统水分蒸散到大气圈中的量远小于白天的蒸散量，完全可以忽略不计，因此本试验着重分析研究白天（光合有效辐射 $PAR>5\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）蒸散量的变化规律。

3 结果与讨论

3.1 沼泽湿地蒸散量白天平均日变化

蒸散是一个发生在土壤—植被—大气系统中复杂、连续的物理和生理过程，与植被类型、生长状况、土壤含水量及气象条件密切相关。数据分析表明，6~10 月沼泽湿地蒸散日变化明显，各月日变化过程基本相同（如图 1）。日出后 4:00~6:00（北京时间，下同）蒸散量增加缓慢，主要是由温度的滞后效应所致。之后随着太阳辐射强度增强，温度明显升高，叶片气孔张开，空气相对湿度减小，植物蒸腾和水分蒸发作用迅速增强，蒸散量于 12:00~13:00 达到最大值，6~10 月的最大值分别为 285.5、257.4、243.0、167.1 和 65.9 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。午后温度逐渐下降，空气相对湿度增加，蒸散量也逐渐减小，至日落后趋于稳定。蒸散量日变化模式是植物蒸腾和水分蒸发对

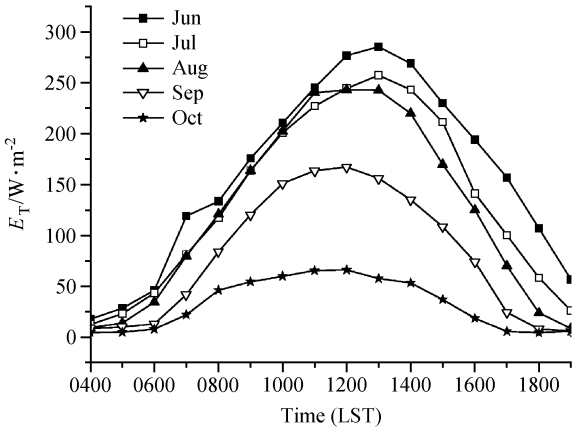


图 1 沼泽湿地蒸散量 (E_T) 白天平均日变化
Fig. 1 Monthly averaged variation of daytime evapotranspiration (E_T) over mire from Jun to Oct

净辐射、空气温度、湿度等环境因子周期性变化综合响应的体现。

虽然涡度相关法也往往低估夜间蒸散量，但统计数据表明白天始末时刻（4:00 和 19:00）的蒸散量分别只有白天各时刻平均蒸散量的 1/10 和 1/7，夜间随着气温降低这个比例还会进一步下降。夜间蒸散量小是因为植物气孔关闭，蒸腾显著降低，同时低温、高湿也使得土壤和水面蒸发明显下降。另外试验站所处地理位置（47°35'N，133°31'E）光照时间较长，6~8 月日照时数分别为 15.9、15.7 和 14.4 h。夜间蒸发量小且时间短，因此夜间蒸散量在日总蒸散量中所占比例较小，与采用沼泽蒸发器观测结果完全一致^[4]，因而可采用白天时段内的蒸散量来估算沼泽湿地总蒸散量。

3.2 沼泽湿地蒸散量季节变化

沼泽湿地蒸散量季节变化规律如表 2 和图 2 所示，6~10 月蒸散量呈逐月下降趋势，其中 9 和 10 月表现尤为明显（6 和 10 月观测天数均为 19 天）。分析结果表明，6~10 月日平均蒸散量大小受净辐射控制显著，故 6 和 10 月内未测量的蒸散量可据二者间的线性关系来确定（图 3 和 4）。蒸散量的这种变化特征不仅与气象因素有关，而且还与植物发育状况密切相关（图 5）。毛茛苔草和乌拉苔草每年 4 月中旬开始返青，6 和 7 月为植物生长旺季，植株发育快 [表现为叶面积指数 (Leaf area index, LAI) 迅速增加 (图 5)]，新陈代谢旺盛，需水量最多，同时也是一年内气温的

表 1 2004 年 6~10 月各月缺测数据量
Table 1 Missing data from Jun to Oct 2004

月份	总数据量	缺测数据量	数据缺测率/%
6	912	73	8.0
7	1488	828	55.6
8	1488	452	30.4
9	1440	444	30.8
10	912	261	28.6

最高时期，因此，6 和 7 月植物蒸腾和水面、土壤蒸发都较强烈。但与 6 月相比，7 月阴雨天较多，水分蒸散受到一定限制，蒸散量略有减少。试验测得 6 和 7 月总蒸散量分别为 120.9 和 101.6 mm。8 月植物发育进入成熟期，LAI 达到最大（图 5），但植物生物量不再增加，新陈代谢活动有所减弱，耗水量减少，使得植物需水量下降，同时气温开始缓慢下降，因此蒸散量有所减少，为 93.1 mm。9 月以后植物生长活力衰退，至 10 月变黄枯萎，植物需水量明显减少，气温逐渐下降，因而蒸腾和蒸发作用都显著降低，9 和 10 月蒸散量仅为 59.3 和 25.9 mm。6~10 月总蒸散量为 400.8 mm，比利用 Penman-Monteith 蒸散发模型计算得出的三江平原典型沼泽湿地蒸散量（424.7 mm）低^[5]，但明显高于日本 Fuhrengawa 沼泽泥炭藓丘 6~10 月 383.1 mm 的总蒸散量^[9]。事实上日本 Fuhrengawa 沼泽湿地的年均温度（5.1℃）明显高于三江平原沼泽湿地的年均温度（1.9℃），且降雨也较充沛，但生长期内的蒸散量却小于三江平原沼泽湿地的蒸散量，这主要与沼泽植被类型及微地貌特点不同有关。

降雨对沼泽蒸散影响明显，如图 2 所示：降雨及降雨前后蒸散量都明显下降，这是因为这段时间太阳辐射强度减弱、气温降低及空气湿度增大导致蒸腾和蒸发作用降低。试验区为闭合集雨区，土壤透水性很差，蒸散和降雨是沼泽湿地水量平衡最主要的决定性因子。通过比较各月降雨量和蒸散量（表 2），发现生长季 6~9 月蒸散量均大于降雨量，各月水分都存在不同程度的亏缺，6~9 月水分亏缺量分别为 72.7、3.2、58.8 和 44.4 mm。这种生长季内沼泽湿地群落蒸散量超过降水量而产生水分亏缺现象，与试验区沼泽湿地表面水位不断下降的季节变化相一致。

表 2 2004 年 6~10 月各月蒸散量和降雨量
Table 2 Evapotranspiration and the corresponding precipitation from Jun to Oct 2004

月份	蒸散量	降雨量
6	120.9	48.2
7	101.6	98.4
8	93.1	24.3
9	59.3	14.9
10	25.9	39.6

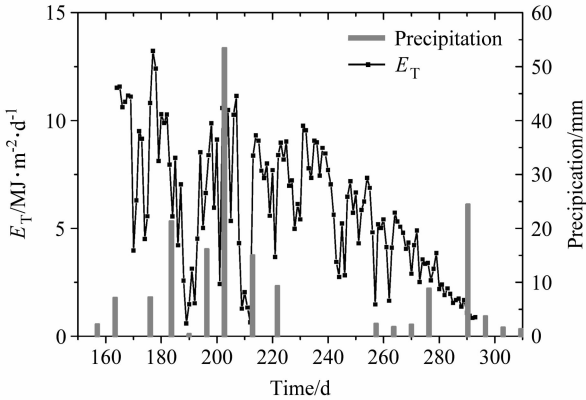


图 2 沼泽湿地蒸散量季节变化以及降雨量
Fig. 2 Seasonal daytime variation of E_T and the precipitation over mire

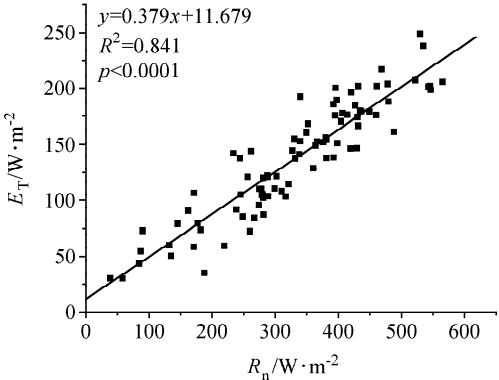


图 3 沼泽湿地 6~9 月白天日平均净辐射 (R_n) 与相应蒸散量的关系
Fig. 3 The relationship between daytime average net radiation (R_n) and the corresponding E_T from Jun to Sep over mire

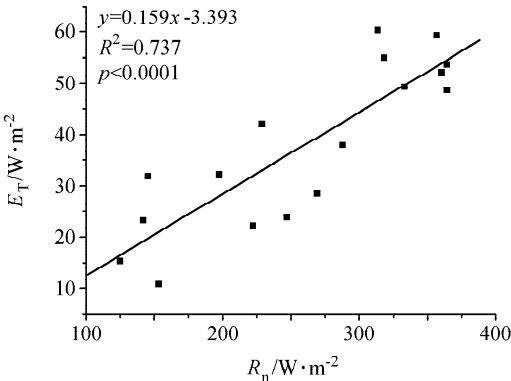


图 4 沼泽湿地 10 月白天日平均净辐射与相应蒸散量的关系
Fig. 4 The relationship between daytime average R_n and the corresponding E_T in Oct over mire

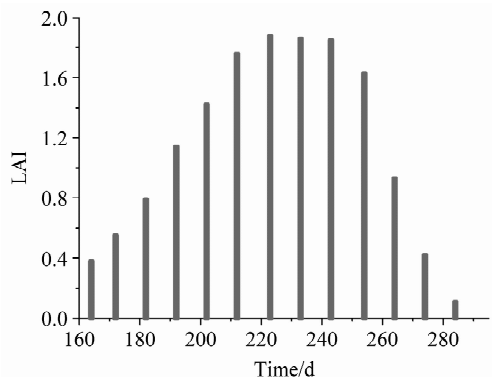


图5 沼泽湿地叶面积指数 (LAI) 的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of leaf area index (LAI) over mire

3.3 环境因子对沼泽湿地蒸散量的影响

蒸散过程通常受到能量供给条件、水汽输送条件与蒸发介质的供水能力等因素影响^[10]。能量供给主要源于太阳净辐射,水汽输送取决于饱和水汽压差和风速大小,蒸发介质的供水能力则由下垫面性质决定。沼泽湿地地表常年积水,植被覆盖度 60%~80%,蒸腾作用强,下垫面供水能力强,因此沼泽湿地蒸散量主要取决于能量供给条件和水汽输送条件,即净辐射、饱和水汽压差及风速。

3.3.1 净辐射

生态系统水分不论以蒸发还是蒸腾作用方式逸散到大气中,都需要吸收大量能量(本试验汽化常数取为 $2\,440\text{ KJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),一般情况下净辐射是白天水分蒸散的主要能量来源,因此白天蒸散量与净辐射(Net radiation, 缩写为 R_n)密切相关^[11]。研究仅将完善的日记录保留并分析净辐射对沼泽湿地蒸散量的影响。结果表明沼生植物生长期 6~9 月和枯萎期 10 月内,沼泽湿地 R_n 和蒸散量线性相关都较好(图 3 和 4),该结果与 Burba 等^[12]在草原湿地生态系统(Prairie wetland ecosystem)中的研究结果一致。沼生植物生长期内,净辐射增加导致气温和水温升高,水分蒸发速率增加。在强烈太阳辐射下(太阳辐射和净辐射高度正相关)叶片温度可高出气温 $2\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,增大叶片水汽扩散梯度,有利于植物水分蒸腾;此外太阳辐射能够促使气孔开放,气孔导度增加,内部阻力减小,蒸腾作用加强^[13]。这是净辐射对生长期内蒸散量影响明显的根本原因。10 月植物

几乎完全枯萎,蒸散绝大部分来源于土壤蒸发,但由于地表草根层中仍含有大量沼泽水,净辐射仍是土壤蒸发的决定性因素,因此蒸散量与净辐射仍有较好的相关性 ($R^2=0.737$, $p<0.0001$)。

虽然沼泽湿地常年积水,6~10 月净辐射和蒸散量相关性都较好,但通过比较图 3 和 4 可发现,枯萎期(10 月)净辐射对蒸散量的影响程度明显较生长期(6~9 月)的小,蒸散量相对于净辐射的变化率由 0.379 下降到 0.159,说明在 6~9 月植物生长旺盛期内植被蒸腾在水分蒸散中占有重要地位。为了进一步阐明这个问题,依据生长季内拟合的方程 $y = 0.379x + 11.679$ (图 3)来预测 10 月蒸散量,并与 10 月实测值进行比较。结果表明在净辐射相同的条件下,植物枯萎期实测蒸散量比其预测值平均低 66.2%,说明植物枯萎导致蒸腾作用减弱是造成 10 月蒸散量下降的主要原因。这从另一个角度也反映了植物生长期蒸散量主要受植物蒸腾作用控制。沼生植物越密集,覆盖率越高,植被水分蒸腾的作用就越大,沼泽湿地蒸散量就越大,这一结果与陈刚起等^[4]的研究结果完全一致。

3.3.2 饱和水汽压差

饱和水汽压差(Vapour Pressure Deficit, 缩写为 VPD)反应了空气能够容纳水蒸汽能力的大小,是影响蒸散量重要的环境因子之一。研究仅选取白天合理的通量数据进行分析,结果如图 6 所示,2004 年 6~9 月沼泽湿地蒸散量与 VPD 正相关性明显。其原因是:1) 叶片蒸腾作用与气孔下腔和外界空气的水汽压差呈正比,进而与空气饱和水汽压差成正比^[14];2) 水分蒸发也受饱和水汽压差影响,空气饱和水汽压愈大,蒸发作用愈强。因此 VPD 增加导致蒸发和蒸腾作用加强,从而使蒸散量明显增加。

虽然蒸散量与 VPD 呈正相关关系,但图 6 显示的 VPD 对蒸散量的影响特征也表明,蒸散量对 VPD 的响应程度随植物发育而存在明显差异。6 和 7 月植物发育处于旺盛期,需水量大,蒸腾作用强烈,对环境因子耐受范围大,蒸散量随 VPD 的增加而增加(图 6a 和 6b)。8 月植物发育进入成熟期,植物体各种生理活动主要用于维持其基本新陈代谢。当 VPD 很大时,蒸腾强烈,植物叶片水势降低,引起气孔部分关闭,降低蒸腾失水,

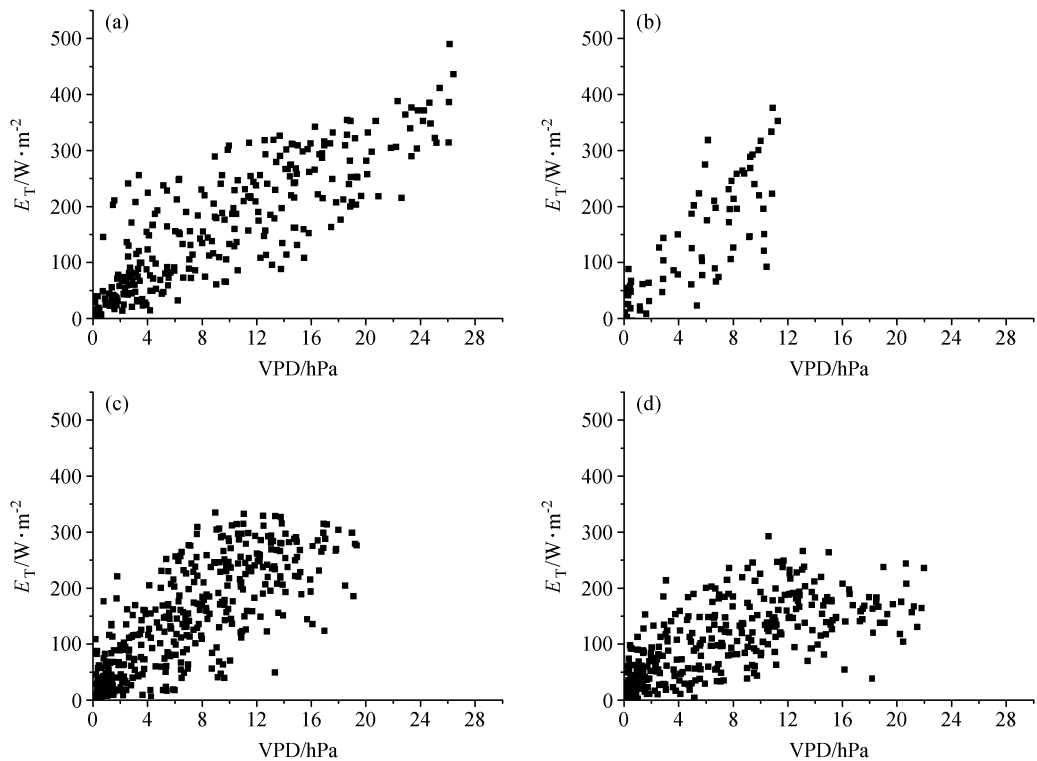


图 6 沼泽湿地白天饱和水汽压差 (VPD) 对蒸散量的影响: (a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月; (d) 9 月
Fig. 6 The influence of daytime vapour pressure deficit (VPD) on evapotranspiration over mire: (a) Jun; (b) Jul; (c) Aug; (d) Sep

从而避免了植物体内水分失衡。因此如图 6c 所示, 沼泽湿地中当 VPD 在某一范围 (0~11 hPa) 内变动时, 蒸散量随 VPD 的增加而增加, 而当 VPD 超出阈值 (11 hPa) 时, VPD 的增加反而抑制了植物蒸腾, 导致蒸散降低。关于这一问题 Takagi 等^[15]的研究也得出了相同的结论。进入 9 月植物开始枯萎, 生理活性减弱, 气孔闭合对水分蒸腾的限制作用明显增强: 当 VPD 大于阈值 (11 hPa) 时, 蒸散量随 VPD 的增加而降低, 表现出负相关关系 (图 6d)。

3.3.3 风速

目前关于风速对蒸散量影响的研究很少, 通常认为风速能够促进水汽交换, 加强对流扩散, 增加水分蒸发, 且风速越大水分蒸发越快; 同时风速增大也导致叶片水蒸汽压梯度增大, 从而促进植物水分蒸腾^[16]。夜间受植物气孔闭合及环境因子的影响 (低温、高湿及稳定的大气层结等), 蒸散量小且较稳定, 因此研究着重探讨白天风速大小对蒸散量的影响。结果 (如图 7) 表明, 白天风速对蒸散量具有一定的影响, 在一定程度上能

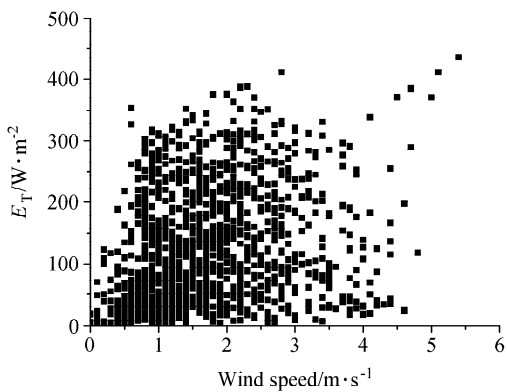


图 7 沼泽湿地 6~10 月白天风速对蒸散量的影响
Fig. 7 The influence of daytime wind speed on evapotranspiration from Jun to Oct over mire

够促进水分蒸散。其原因是白天空气对流能够将沼泽湿地蒸散的水汽输送到高空, 同时补充一些相对湿度较低的空气, 导致扩散层变薄或消失, 外部扩散阻力减小, 蒸发和蒸腾作用加强。但与净辐射、温度和饱和水汽压差等因子相比, 风速对蒸散的影响显然处于次要地位, 通过比较图 3~7 中蒸散量对影响因子的响应程度可以说明这一

点。风速对蒸散量的影响很复杂,受周围环境气象条件、植被密度、高度和微地貌特征等因子综合影响,有待进一步研究。

4 结论

(1) 三江平原典型沼泽湿地蒸散量有明显的日变化:日出后蒸散量逐渐增加,12:00~13:00 达到最大值,6~10 月分别为 285.5、257.4、243.0、167.1 和 65.9 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。午后蒸散量逐渐减小,至日落后趋于稳定。蒸散量的季节变化也很明显:6~10 月各月总蒸散量分别为 120.9、101.6、93.1、59.3 和 25.9 mm。但与降雨量相比,生长季 6~9 月存在不同程度的水分亏缺,水分亏缺量分别为 72.7、3.2、58.8 和 44.4 mm。

(2) 沼泽湿地蒸散量主要受净辐射、饱和水汽压差和风速等环境因素影响。植物发育无论处于生长阶段还是枯萎阶段,蒸散量与净辐射之间线性相关显著。蒸散量也会随着饱和水汽压差的增加而增加,但植物发育成熟后,当饱和水汽压差大于某一阈值(11 hPa)时,饱和水汽压差的增加反而抑制了水分蒸散。风速对蒸散量的影响比较复杂,白天风速增加在一定程度上能够促进水分蒸散,但远不及净辐射和饱和蒸汽压差显著。

参考文献 (References)

- [1] Salvador S C, David G A, Raquel S A, et al. Evapotranspiration in semi-arid wetlands: Relationships between inundation and the macrophyte-cover: Open-water ratio. *Advances in Water Resources*, 2004, **27** (6): 643~655
- [2] 林万涛. 生态系统在全球变化中的调节作用. 气候与环境研究, 2005, **10** (2): 275~280
Lin Wantao. Adjustment action of ecosystem in global change. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (2): 275~280
- [3] Winter T C. A physiographic and climatic framework for hydrological studies of wetlands. In: *Aquatic Ecosystems in Semi-Arid Regions: Implications for Resource Management*, Roberts R D, Bothwell M L, Ed. NHRI Symposium series. Environment Canada, 1992. 127~148
- [4] 陈刚起, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原沼泽蒸发研究. 见: 陈刚起主编, 三江平原沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1996. 5~11
Chen Gangqi, Lü Xianguo, Yang Qing, et al. A study on mire evapotranspiration in the Sanjiang Plain. In: *A Study on Mire in the Sanjiang Plain* (in Chinese), Chen Gangqi, Ed. Beijing: Science Press, 1996. 5~11
- [5] 邓伟, 栾兆擎, 胡金明, 等. 三江平原典型沼泽湿地生态系统水分通量研究. 湿地科学, 2005, **3** (1): 32~36
Deng Wei, Luan Zhaoqing, Hu Jinming, et al. Study on water flux in the typical wetlands of the Sanjiang Plain. *Wetland Science* (in Chinese), 2005, **3** (1): 32~36
- [6] Baldocchi D, Valentini R, Running S, et al. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 1996, **2**: 159~168
- [7] 赵魁义. 中国沼泽志. 北京: 科学出版社, 1999. 55~56
Zhao Kuiyi. *Chinese Mire Records* (in Chinese). Beijing: China Science Press, 1999. 55~56
- [8] Foken T h, Wichura B. Tools for quality assessment of surface based flux measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, **78** (1): 83~105
- [9] Tomotsugu Yazakia, Shinichi Uranoa, Kazuo Yabeb. Water balance and water movement in unsaturated zones of Sphagnum hummocks in Fuhrengawa Mire, Hokkaido, Japan. *J. Hydrol.*, 2006, **319** (1~4): 312~327
- [10] 李林, 张国胜, 汪青春, 等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究. 地球科学进展, 2000, **15** (3): 256~259
Li Lin, Zhang Guosheng, Wang Qingchun, et al. Study on evapotranspiration and its impact factors over Yellow River upper stream area. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2000, **15** (3): 256~259
- [11] Mahrt D V. Relationship of area-averaged carbon dioxide and water vapour fluxes to atmospheric variables. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, **112** (3): 195~202
- [12] Burba G G, Verma S B, Kim J. A comparative study of surface energy fluxes of three communities (Pragmites australis, Scirpus acutus, and open water) in a prairie wetland ecosystem. *Wetlands*, 1999, **19** (2): 451~457
- [13] 王沙生, 高荣孚, 吴贵明. 植物生理学. 北京: 中国林业出版社, 1990. 202~203
Wang Shasheng, Gao Rongfu, Wu Guanming. *Plant Physiology* (in Chinese). Beijing: Chinese Forestry Press, 1990. 202~203
- [14] Peter M A, Beverly E L, Michael H U. Carbon and water vapour exchange of an open-canopied ponderosa pine ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, **95** (3): 151~168
- [15] Takagi K, Tsuboya T, Takahashi H. Diurnal hysteresis of stomatal and bulk surface conductance in relation to vapour pressure deficit in a cool-temperate wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, **91**: 177~191
- [16] Stuart Chapin III, Pamela A, Harold A M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. New York: Springer-Verlag Inc, 2002. 75~76