

三江平原沼泽湿地垦殖对蒸散量的影响

贾志军^{1,2}, 张稳^{1*}, 黄耀¹, 赵晓松¹, 宋长春³

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

摘要: 三江平原沼泽湿地大面积垦殖已对区域生态环境产生了明显影响. 2005 ~ 2007 年每年 5 ~ 10 月利用涡度相关系统对三江平原典型沼泽湿地、水稻和大豆田进行了观测, 目的是阐明沼泽湿地垦殖为农田对地表水分蒸散的影响. 结果表明, 沼泽湿地垦殖前后潜热通量日变化均表现为单峰变化特征, 但其最大值当湿地垦殖为水稻田后增加了 14% ~ 130%, 当垦殖为大豆地后在 2006 年增加了 3% ~ 77%, 而在 2005 年和 2007 年发生干旱时降低了 25% ~ 40%. 植被叶面积指数差异是造成不同系统潜热通量日变化差异的主要原因. 沼泽湿地垦殖为农田没有改变潜热通量的季节变化趋势, 但是当垦殖为水稻田后潜热通量明显增加, 5 ~ 10 月水稻田日平均潜热通量较沼泽湿地增加了 38% ~ 53%, 这主要是由于净辐射和叶面积指数增加所致. 相比之下沼泽湿地垦殖为大豆地后潜热通量的变化与降水密切相关, 土壤水分亏缺时降水量是控制大豆地水分蒸散的主要因子, 这导致干旱的 2005 年和 2007 年大豆地日平均潜热通量较沼泽湿地减小了 11% ~ 17%, 而在降水充沛的 2006 年大豆地蒸散量较沼泽湿地蒸散量增加了 22%. 生长季(6 ~ 9 月)内水稻田总蒸散量较沼泽湿地增加了 24% ~ 51%, 大豆地总蒸散量在 2005 年和 2007 年较沼泽湿地减少了 19% ~ 23%, 而在 2006 年增加了 19%. 总之, 三江平原沼泽湿地开垦种植水稻或大豆蒸散量发生明显变化. 稻田潜热通量高于湿地, 大豆田潜热通量在降水充沛的年份高于湿地, 但在干旱年份则低于湿地. 这与净辐射、叶面积指数和降水量等蒸散量主控因子的改变密切相关.

关键词: 沼泽湿地; 垦殖; 蒸散量; 净辐射; 叶面积指数; 降水量

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)04-0833-10

Effects of Marshland Reclamation on Evapotranspiration in the Sanjiang Plain

JIA Zhi-jun^{1,2}, ZHANG Wen¹, HUANG Yao¹, ZHAO Xiao-song¹, SONG Chang-chun³

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China)

Abstract: Extensive reclamation of marshland into cropland has had tremendous effects on the ecological environment in the Sanjiang Plain. Observations over marshland, rice paddy and soybean field were made with eddy covariance measuring systems from May to October in 2005, 2006 and 2007. The objective of this study was to identify the effects of the conversion of marshland to cropland on evapotranspiration in the Sanjiang Plain. The results showed that the diurnal variation curves of latent heat flux were single peaked in marshland, rice paddy and soybean field. The daily maximum latent heat flux increased by 14% -130% in rice paddy in the three measuring years, however, in soybean field, it increased by 3% -77% in 2006 but decreased by 25% -40% in 2005 and 2007 by comparison with that in marshland. This difference was due to the change of leaf area index when marshland was reclaimed into cropland. Seasonal change of latent heat flux was identical for the three land use types. Daily averaged latent heat flux of rice paddy, from May to October, showed 38% -53% increase compared with that of marshland, which resulted from the increase in net radiation and leaf area index. When marshland was reclaimed into soybean field, the variation of daily averaged latent heat flux depended primarily on precipitation. Precipitation was the main factor that controlled evapotranspiration over soybean field which was usually in condition of soil water deficit. Drought caused 11% -17% decrease of daily averaged latent heat flux over soybean field in 2005 and 2007, while sufficient precipitation caused 22% increase in 2006, comparing to marshland. Similarly, during the growing season from June to September, total evapotranspiration of rice paddy increased by 24% -51% compared with that of marshland, and the total evapotranspiration of soybean field decreased by 19% -23% in 2005 and 2007 and increased by 19% in 2006. It is concluded that the evapotranspiration changes significantly when the marshland was reclaimed into rice paddy or soybean field in the Sanjiang Plain. Compared to marshland, the evapotranspiration is higher in rice paddy and soybean field with sufficient precipitation, while lower in soybean field under drought. These changes are found to be highly related to the variations of net radiation, leaf area index and precipitation.

Key words: marshland; reclamation; evapotranspiration; net radiation; leaf area index; precipitation; risk

收稿日期: 2009-06-22; 修订日期: 2009-09-03

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40431001); 国家自然科学基金项目(40675075)

作者简介: 贾志军(1974 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为陆地生态系统物质和能量交换, E-mail: jiazhijunneigae@126.com

* 通讯联系人, E-mail: zhw@mail.iap.ac.cn

近 100 年来,以全球变暖为主要特征的全球气候与环境发生了重大变化,对人类生存和社会经济的可持续发展构成了严重威胁,成为当前全球密切关注的热点问题.土地利用变化作为全球变化的重要组成部分,已引起国际组织和世界各国的普遍关注,具有全球影响的两大国际组织“国际地圈与生物圈计划”(IGBP)和“全球环境变化人文计划”(HDP)共同制订了“土地利用/土地覆被变化科学研究计划”,将其列为全球环境变化的核心项目,其中土地利用变化对地气系统水分和能量交换的影响已成为近年来的研究热点^[1~3],但目前研究集中于森林^[4~7]和草地^[8,9]垦殖为农田,而关于湿地垦殖的相关研究鲜见报道.在湿地生态系统中,蒸散不仅是系统能量最主要的消耗方式^[10,11],而且对湿地水温、水位和盐度影响显著,是湿地生态系统功能的指示器^[12].三江平原是我国最大的沼泽湿地分布区,建国后历经多次大规模农业垦殖,区内耕地面积由 1950 年的 78.6~88.7 万 hm^2 增加至 2000 年的 269.6~516.4 万 hm^2 ^[13~15],新增耕地绝大部分由湿地垦殖而成.沼泽湿地大面积垦殖导致下垫面性质发生变化,势必会影响该区地气系统物质交换和能量平衡.国内就三江平原沼泽湿地垦殖对温室气体排放^[16,17]、土壤理化性质^[18,19]和土壤有机碳储量^[20,21]等方面的影响进行了诸多研究,但是对地气间能量通量影响的研究并不多见^[22],特别是针对湿地垦殖后蒸散量在不同时间尺度(日、季节和年际)上的变化特征缺乏深入研究.本研究试图通过对三江平原沼泽湿地、水稻和大豆田潜热通量(蒸散量)测定结果的分析,阐明湿地垦殖对生态系统蒸散量的影

响规律及其关键驱动因子,以期为进一步系统评价湿地垦殖对三江平原水分平衡的影响奠定基础.

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

实验布置在中国科学院三江平原沼泽湿地生态试验站(47°35'N,133°31'E)的沼泽湿地、旱地试验场和附近水稻田内.该区属于温带湿润大陆性季风气候,夏季温暖湿润,冬季严寒漫长,冻结期达 5 个多月.年均气温 1.9℃,降水量 600 mm 左右,60% 以上集中于 6~8 月.研究区内农田是由沼泽湿地和沼泽化草甸垦殖而成,主要种植水稻和大豆.沼泽湿地观测点选择在三江平原沼泽类型中面积最大的毛果苔草沼泽湿地,面积约 8 hm^2 .毛果苔草沼泽湿地常年积水(水深 10~30 cm),植被为毛果苔草-乌拉苔草群丛(*Carex lasiocarpa*-*Carex meyeriana*).旱地试验场内的大豆田面积约 10 hm^2 ,15 a 垦殖年限,为三江平原典型雨养农田,5 月中下旬播种时化肥被一次性施入,主要包括尿素、磷酸二铵和钾肥(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 40、90 和 15 kg/hm^2).水稻田观测点面积达几千 hm^2 ,垦殖年限约 10 a,从 5 月下旬移栽到 9 月初地表持续淹水,水深 4~8 cm.水稻田施肥 2 次,主要包括尿素、磷酸盐和钾肥,一次在插秧之前作为基肥施入(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 23、50 和 45 kg/hm^2),一次在水稻分蘖时作为追肥施入(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 23、0 和 15 kg/hm^2).沼泽湿地观测点正西方约 1.5 km 处为水稻田观测点,正北方向约 0.5 km 处为大豆地观测点,3 个观测点的土壤理化性状见表 1.

表 1 三江平原沼泽湿地、水稻和大豆田土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of marshland, rice paddy and soybean field in the Sanjiang Plain

土地利用类型	容重 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	孔隙度 /%	田间持水量 /%	pH	有机质 含量/%	全量养分/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$			速效养分/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
						N	P	K	N	P	K
沼泽湿地	0.10	74.4	110	5.84	19.95	20.41	1.04	4.03	922.48	24.94	165.72
水稻田	1.06	59.0	45	6.36	4.67	2.78	0.75	11.00	217.46	25.22	114.28
大豆田	1.11	61.8	37	5.79	3.77	2.84	0.83	12.18	156.79	30.14	109.52

1.2 观测方法

2005~2007 年,5~10 月利用涡度相关系统对毛果苔草沼泽湿地、水稻和大豆田的潜热通量(蒸散量)进行了连续观测.涡度相关观测系统主要由开路式红外气体分析仪(LI-7500, Li-Cor Inc, USA)和三维超声风速仪(CSAT3, Campbell, USA)组成,分别用于观测 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 密度脉动和风速.开路系统采样频率为 10 Hz,实时数据和在线计算的 30 min

平均通量均存储于 PCMC 卡内.同时小气候观测系统对净辐射(CNR-1, Kipp&Zonen, The Netherlands)、空气温湿度(HMP45C, Campbell Science)和降水量(RainGauge 52203, MI, USA)等环境因子进行了同步观测.另外每 10 d 使用 CI-203 型叶面积仪(CID, Inc., USA)测定毛果苔草群丛、水稻和大豆的叶面积指数,以此反映植被发育的季节变化.

1.3 数据处理

涡度相关法测定蒸散量精确性高且稳定性好 ,但在实际观测中由于各种原因(传感器故障、降雨、维护传感器和断电等)不可避免地会出现数据异常和缺失. 本试验观测期间数据缺失率如表 2 所示 ,明显低于国际通量网 35% 的平均值^[23]. 缺失数据依据下述方法进行插值 :① < 2 h 的数据空缺用线性外推法插补 ;② ≥ 2 h 的数据空缺用查表法(Look-up table)插补 ,查表法是生态系统能量通量插补首选的标准方法^[24]. 将缺失数据插值后首先计算出每小时的平均值 ,将各月每天各时刻潜热通量进行月平均 ,得到潜热通量月平均日变化趋势. 然后计算观测期每天潜热通量平均值 ,得到潜热通量的季节变化趋势. 对于潜热通量的年际变化 ,由于三江平原非生长季气温较低 ,主要考虑生长季(6 ~ 9 月)潜热通量总和的年际变化.

表 2 2005 ~ 2007 年观测期内数据缺失率

Table 2 Missing data percentage during observation periods from 2005 to 2007

年份	数据缺失率/%		
	沼泽湿地	水稻田	大豆田
2005	27.4	17.2	16.7
2006	19.1	15.2	31.9
2007	17.8	16.3	21.4

2 结果与讨论

2.1 沼泽湿地垦殖对潜热通量日变化的影响

如图 1 所示 ,沼泽湿地、水稻和大豆田在植被不同发育阶段潜热通量日变化形态相同 ,均表现为单峰变化特征 ,与太阳辐射日变化基本同步. 日出后潜热通量随着太阳辐射的增强逐渐增加 ,12 :00 左右达到最大值 ,但不同生态系统潜热通量日最大值存在明显差异 ;14 :00 之后随着气温降低和太阳辐射减弱 ,潜热通量显著下降 ,19 :00 趋于稳定 ,至次日 04 :00 达到最低值 ,此时沼泽湿地、水稻和大豆田潜热通量分别为(4.67 ± 6.53)、(12.79 ± 10.73)和(3.78 ± 4.22)W · m⁻². 在夜间湿度较高和风速较低的情况下潜热通量有时会表现为负值^[25]. 总体而言 ,湿地垦殖为稻田后 5 ~ 10 月日最大潜热通量增加了 14% ~ 130% ;湿地垦殖为旱田大豆地后 ,在降水充沛的 2006 年大豆地日最大潜热通量较同期湿地增加了 3% ~ 77% ,但是在 2005 年和 2007 年生长季内发生干旱时 ,大豆地日最大潜热通量较同期湿地降低 25% ~ 40% .

观测结果显示三江平原沼泽湿地生长季潜热通量日变化最大值与 South 等^[26]在美国大沼泽湿地和 Spijkma 等^[27]在荷兰泥炭地中的观测结果相似 ,但是明显低于 Burba 等^[11]和 Šmíd^[28]对芦苇沼泽观测的日内最大潜热通量 ,它们分别达到了 300 ~ 380 W · m⁻²和 400 ~ 500 W · m⁻² ,比三江平原湿地高出 70% ~ 130% ,这可能与芦苇湿地生物量较高有关. 水稻田生长季潜热通量日变化最大值与日本国际水稻试验结果相似^[29] ,但小于安徽省水稻田潜热通量的观测结果(390 ~ 560 W · m⁻²)^[30] ,主要原因是三江平原稻田净辐射和气温明显低于安徽省观测点水稻田的净辐射和气温 ,大约分别低 17% 和 20% . 大豆地生长季潜热通量日变化最大值也明显小于其他地区同类研究结果^[31~33] ,这与不同地区地表水分供给情况和太阳辐射密切相关.

诸多研究表明潜热通量受边界层气象条件、植被因子和下垫面水分供给能力三方面因素控制^[34~38] ,其日变化模式是植物蒸腾和地表水分蒸发对太阳辐射、气温、湿度和风速等环境因子周期性变化综合响应的体现. 由于生态系统水分蒸散消耗的能量主要来源于净辐射 ,因此净辐射是潜热通量的主要驱动因子^[35,36]. 有研究表明三江平原正常年份的降水量基本能满足作物生育期内蒸散耗水需求^[39] ,因此本研究以降水量接近正常年份降水量的 2006 年为例 ,分析植被不同发育阶段各时刻潜热通量与净辐射的关系. 结果表明 ,日尺度上沼泽湿地、水稻和大豆田潜热通量与净辐射均呈极显著正相关($R^2 > 0.81$, $p < 0.0001$,见图 2) ,但植被生长旺盛期内(以 7 月为例) ,在净辐射相同的条件下水稻田潜热通量最大 ,沼泽湿地潜热通量最小 ,主要原因是湿地开垦为农田改变了地表辐射平衡 ,而且也是由于水稻和大豆叶面积指数(leaf area index ,LAI)大于湿地 LAI 所致[图 2(b)] ,进一步分析表明植被生长旺盛期间(6 ~ 8 月)月平均潜热通量与相应的月平均 LAI 线性正相关(图 3) ,说明植被因子对水分蒸散的影响也非常显著. 植被生长旺盛期内蒸腾量在总蒸发量占有很大比例^[11,37] ,因此系统间 LAI 的差异必然会造成潜热通量的差异. 5、9 和 10 月土壤水分蒸发是蒸散量的主要来源 ,湿地垦殖为农田后土壤温度明显升高^[16,18] ,因此不管植被 LAI 相对大小如何 ,在相同的净辐射条件下水稻田和大豆地潜热通量均大于沼泽湿地潜热通量[图 2(a)、2(c) 和 2(d)] .

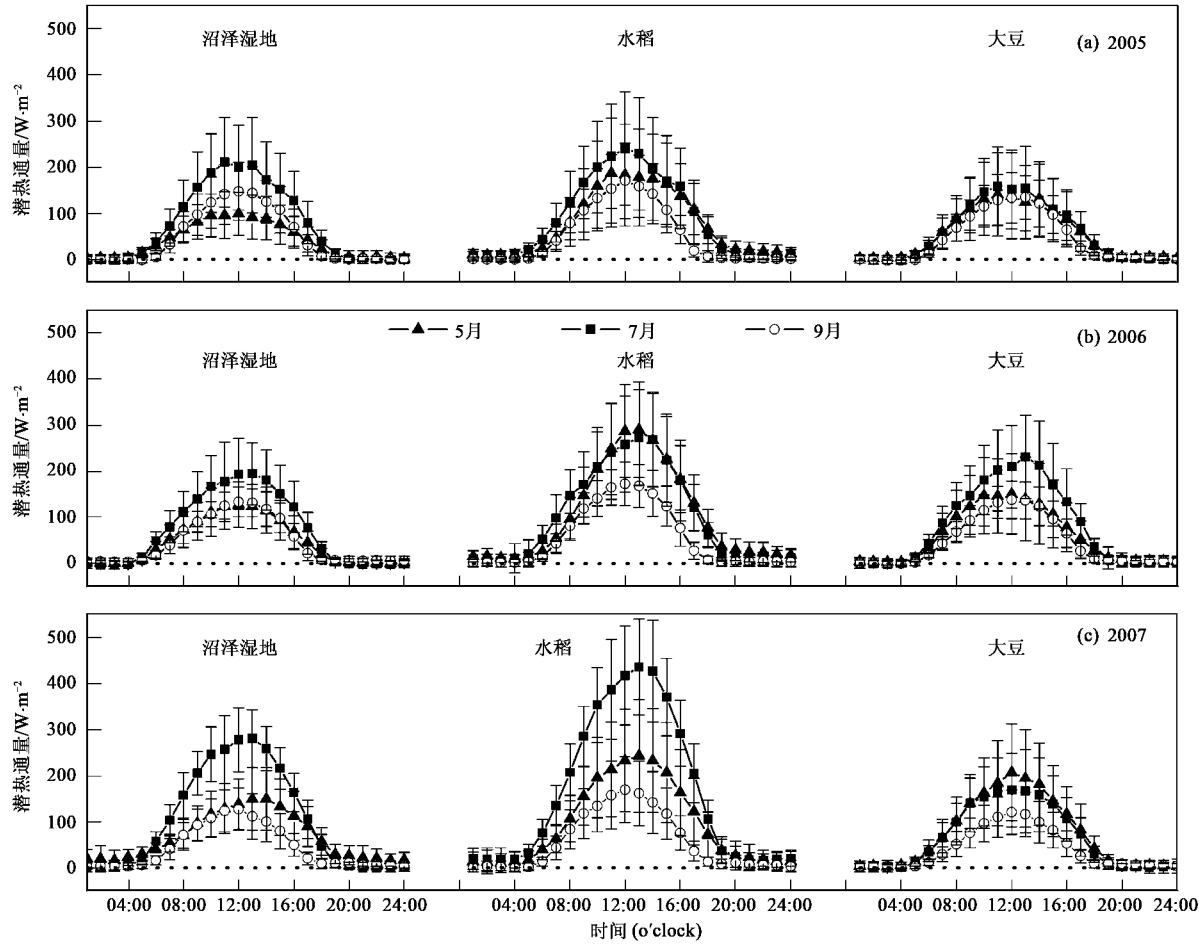


图 1 2005 ~ 2007 年沼泽湿地、水稻田和大豆地潜热通量月平均日变化

Fig. 1 Diurnal variations of monthly averaged latent heat flux over marshland , rice paddy and soybean field from 2005 to 2007

2.2 沼泽湿地垦殖对潜热通量季节变化的影响

沼泽湿地垦殖前后生态系统潜热通量具有相似的季节变化趋势[图 4(a)]. 从 5 月起随着净辐射增强和气温回升, 潜热通量呈增加趋势, 一般于 6 月下旬 ~ 7 月上旬达到最大值, 但 2007 年 6 月上旬 ~ 7 月中旬干旱导致大豆地水分蒸散受到显著抑制, 大豆地潜热通量于 7 月下旬达到最大值. 沼泽湿地、水稻和大豆田日平均潜热通量最大值如表 3 所示. 之后随着净辐射减小和植被成熟枯萎潜热通量呈逐渐下降趋势. 观测期间内潜热通量的突然降低都是由于阴雨天气引起净辐射显著减少所致[图 4(b)、4(d)]. 潜热通量的季节变化特征是植物蒸腾和地表水分蒸发对净辐射、气温、湿度和风速等环境因子季节性变化以及植被物候规律、地表水分供给条件综合响应的体现.

沼泽湿地垦殖为农田对潜热通量影响非常明显, 如图 4(a)和表 3 所示. 5 ~ 10 月水稻田日平均潜热通

量较沼泽湿地增加了 38% ~ 53%, 水稻田与沼泽湿地潜热通量之间的差距在 6、7 月尤为明显, 从 8 月植被发育进入成熟期后呈现逐渐减小的趋势. 相比之下沼泽湿地垦殖为大豆田后潜热通量的变化与降水量密切相关. 降水多少不仅直接控制了大豆旱田土壤含水量, 而且对大豆发育的影响也非常显著. 2005 年和 2007 年的干旱使得大豆田潜热通量较沼泽湿地潜热通量减小 11% ~ 17%, 而在降水充沛的 2006 年大豆地潜热较湿地潜热通量增加 22%.

表 3 2005 ~ 2007 年 5 ~ 10 月潜热通量 ¹⁾ /W · m ⁻²			
Table 3 Daily averaged latent heart flux and its maximum during observation period from 2005 to 2007/W · m ⁻²			
土地利用类型	2005 年	2006 年	2007 年
沼泽湿地	57. 21/136. 66	50. 24/98. 19	69. 08/148. 32
水稻田	78. 65/200. 34	76. 65/159. 27	104. 12/212. 52
大豆田	50. 85/139. 60	61. 12/152. 61	57. 72/138. 13

1) 表中数据为日平均值/最大值

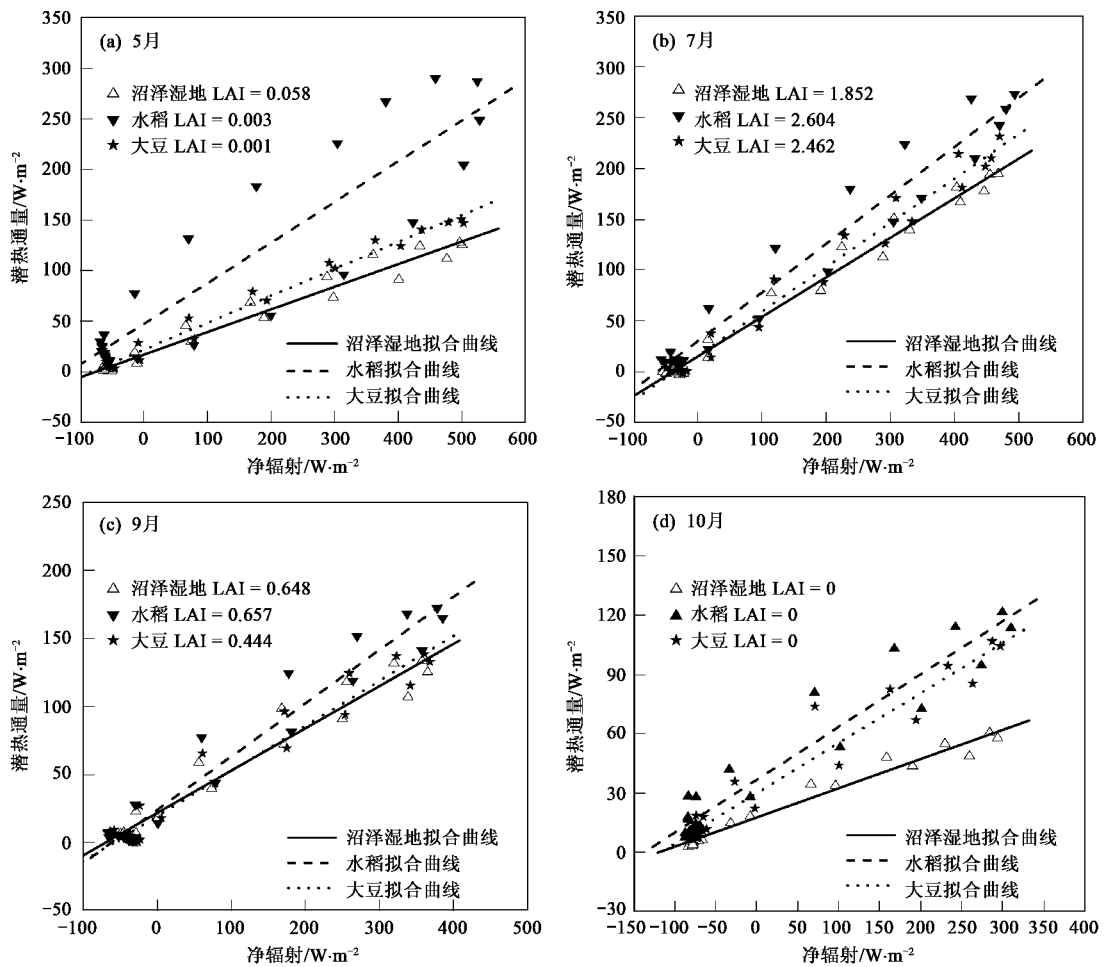


图 2 2006 年沼泽湿地、水稻田和大豆地潜热通量与净辐射关系

Fig.2 Relationship between latent heat flux and net radiation over marshland ,rice paddy and soybean field in May , July , September and October in 2006

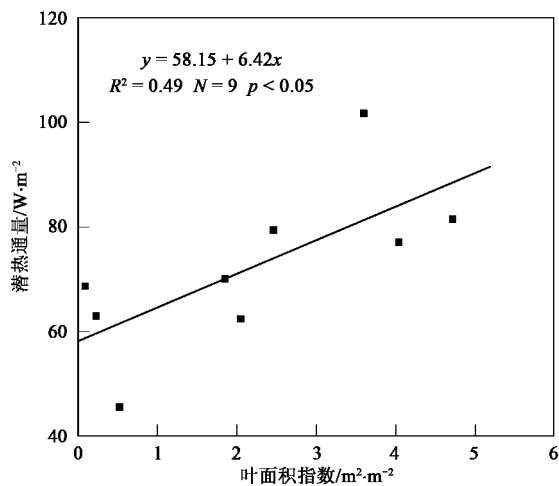


图 3 2006 年 6 ~ 8 月份沼泽湿地、水稻和大豆田月平均潜热通量与月平均叶面积指数关系

Fig.3 Relationship between monthly averaged latent heat flux and leaf area index from June to August in 2006 over marshland , rice paddy and soybean field

不同类型下垫面潜热通量的差异与下垫面性质和气象条件密切相关,气象条件主要受区域气候特征控制,本试验 3 个观测点距离很近,因此太阳总辐射、风速、气温和相对湿度等气象因子差异极小,可忽略不计,但下垫面植被冠层特征和地表水分条件差异显著,导致地表辐射平衡明显不同,分析表明沼泽湿地垦殖为水稻田后净辐射明显增加,而垦殖为旱田大豆地净辐射呈减少趋势[图 4(b)],这一结论与 Liu^[40]研究结果一致.因此湿地垦殖前后净辐射、叶面积指数和地表水分供给条件的变化是造成潜热通量季节变化差异的主要原因.

如图 5(a)和 5(b)所示,沼泽湿地和水稻田潜热通量均与净辐射呈显著正相关,线性回归分析表明净辐射能够解释沼泽湿地和水稻田潜热通量季节变化的 69% ~ 84%(表 4),说明净辐射是沼泽湿地和水稻田潜热通量季节变化的主控因子.表 4 也表明沼泽湿地垦殖为水稻田后地表获得的净辐射不仅

增加了,而且对潜热通量的影响作用也明显增加了,2005~2007年水稻田线性回归方程斜率较沼泽湿地分别增加了30.4%、70.0%和60.0%,说明水稻田潜热通量对净辐射变化的响应程度明显大于沼泽

湿地.在生长季内这主要是由于水稻田 LAI 明显大于湿地植被 LAI[图 4(c)],而在非生长季内(5月和10月)则是由于稻田地表温度高于沼泽湿地地表温度.

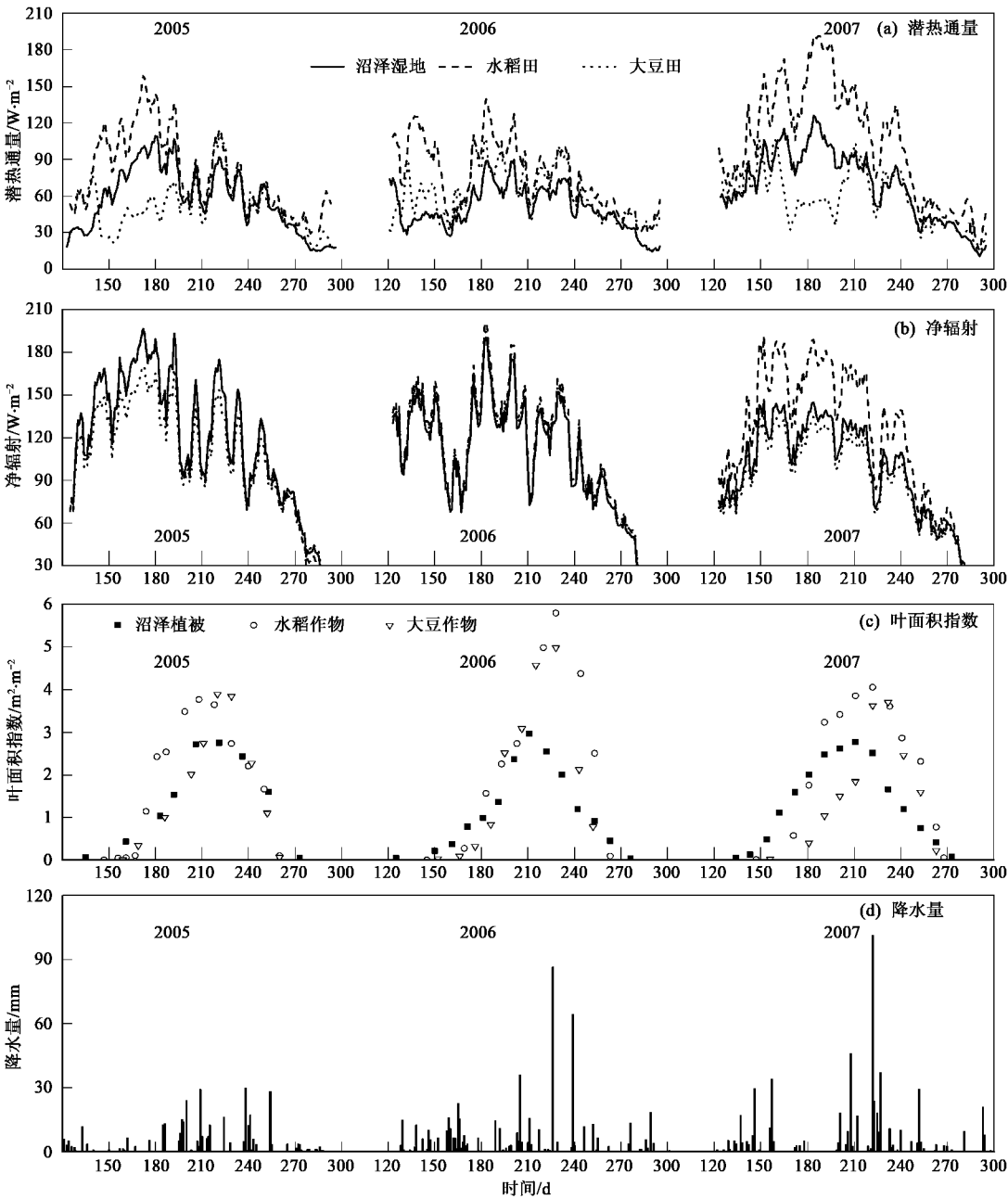


图 4 2005~2007 年沼泽湿地、水稻田和大豆地潜热通量、净辐射、叶面积指数和降水量季节变化
Fig.4 Seasonal distribution of daily mean latent heat flux , net radiation , leaf area index and precipitation over marshland , rice paddy and soybean field from 2005 to 2007

大豆田潜热通量与净辐射也呈显著正相关,但净辐射能够解释大豆田潜热通量季节变化的比例明显小于同期沼泽湿地和水稻田净辐射所能解释的比例[图 5(c)和表 4],2005~2007 年平均值仅为

49%,说明大豆田潜热通量除受净辐射控制外,还明显受到其他因子影响.诸多研究表明旱田水分蒸散受土壤水分状况影响显著,随着土壤水分亏缺程度的增强蒸散量呈减少趋势^[34,38,41,42].三江平原大豆

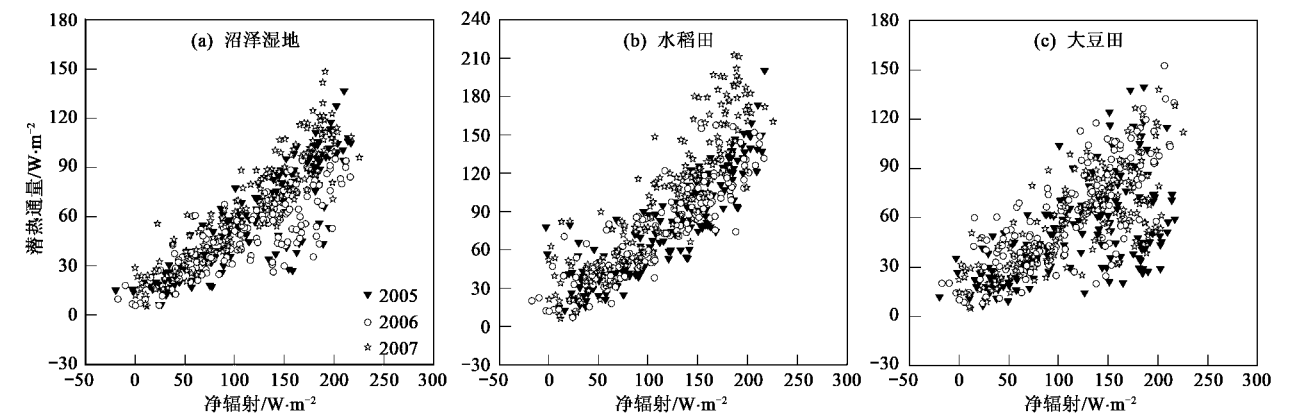


图5 2005~2007年5~10月沼泽湿地、水稻田和大豆地潜热通量与净辐射关系

Fig.5 Relationship between latent heat flux and net radiation over marshland ,rice paddy and soybean field from June to October in 2005 ,2006 and 2007

表4 2005~2007年沼泽湿地、水稻田和大豆地净辐射(R_n)与潜热通量(LE)线性回归方程参数¹⁾

Table 4 Parameters of linear regression function between latent heat flux (LE) and net radiation (R_n) over marshland ,rice paddy and soybean field from 2005 to 2007

参数值	沼泽湿地			水稻田			大豆田		
	2005	2006	2007	2005	2006	2007	2005	2006	2007
截距 a	5.33	13.14	10.38	8.58	14.47	9.97	20.21	15.12	17.38
斜率 b	0.46	0.33	0.50	0.60	0.56	0.80	0.26	0.42	0.34
决定系数 R^2	0.79**	0.69**	0.84**	0.78**	0.77**	0.80**	0.33**	0.61**	0.53**
样本量 N	170	173	172	167	173	173	168	173	171

1)线性回归方程为 $LE = a + b \times R_n$; ** 表示线性回归的显著性水平 $p < 0.001$

田主要靠降水自然补给,因此降水对大豆田水分蒸散影响非常显著.如图6(a)所示,当降水量较小时($<120\text{ mm}$),大豆田月蒸散量与月降水量显著线性正相关,这与 Sincik 等^[38]和张淑杰等^[43]的研究结论一致.当月降水量较大时 $[>120\text{ mm}$,图6(a)虚框内的4个月],降水量变化对大豆田蒸散量影响甚微.不同水分条件下净辐射对大豆地潜热通量影

响程度也明显不同,图6(b)表明当月降水量较小时,净辐射仅能解释潜热通量季节变化的42%,而当降水量较大时这个比例达到64%[图6(c)].这表明土壤水分亏缺时,降水量是控制大豆地水分蒸散的主要因子,而当降水量较大时,净辐射成为大豆地潜热通量的主控因子.2005年和2007年的干旱对大豆作物发育以及水分蒸散产生显著影响,导致

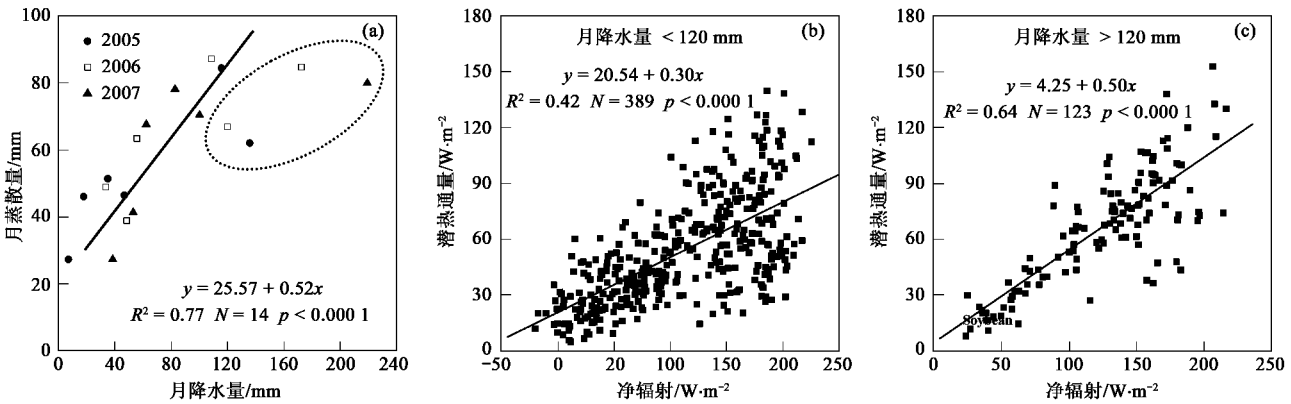


图6 大豆地潜热通量与降水量、净辐射关系

Fig.6 Relationship between latent heat flux and precipitation ,net radiation over soybean field

大豆地蒸散量小于沼泽湿地蒸散量.而在 2006 年生长季降水充沛,大豆作物发育较好,其 LAI 明显大于湿地植被 LAI [图 4(c)],因而大豆地蒸散量较沼泽湿地蒸散量明显增加.

2.3 沼泽湿地垦殖对蒸散量年际变化的影响

沼泽湿地垦殖为农田后生长季(6~9月)蒸散量的年际变化显著,如图 7 所示.生长季内水稻田蒸散量较沼泽湿地蒸散量增加了 24%~51%,大豆地生长季蒸散量在 2005 年和 2007 年较沼泽湿地的减少了 19%~23%,而在 2006 年增加了 19%.湿地垦殖前后季节尺度上蒸散量主要受净辐射、植被 LAI 和降水量控制,因此年际尺度上蒸散量的变化也必然与这些因子密切相关.如图 8 所示,生长季蒸散量年际变化与相应期间内的平均净辐射和平均植被 LAI 均呈线性正相关关系,表明净辐射和植被 LAI 仍是湿地垦殖前后蒸散量年际变化的主要驱动因子.年际尺度上降水量对大豆田蒸散量的影响比较复杂,它不仅与降水总量有关,更与降水分布状况密切相关.2006 和 2007 年生长季降水总量基本相同(图 7),但是 2007 年季节性干旱导致大豆地生长季

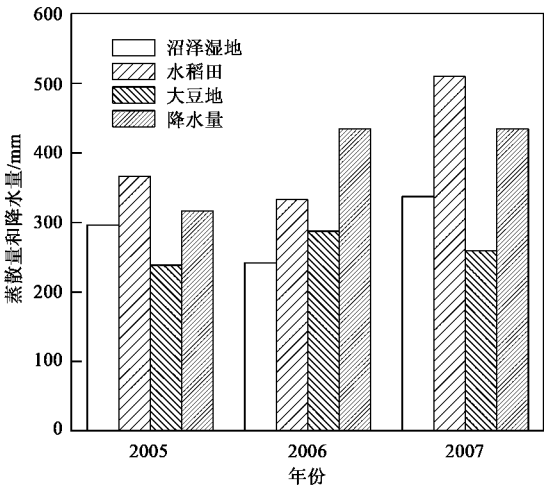


图 7 沼泽湿地、水稻和大豆田生长季蒸散量和降水量年际变化

Fig.7 Annual variation in evapotranspiration and precipitation during the growing season over marshland ,rice paddy and soybean field

蒸散量小于沼泽湿地,而在 2006 年降水分布均匀使得大豆地蒸散量大于沼泽湿地蒸散量.本研究只进行了 3 a 观测,时间较短,蒸散量年际变化的主控因子还有待于继续观测后作进一步深入分析.

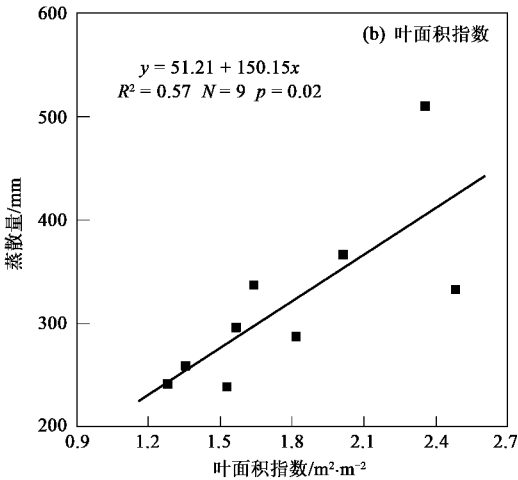
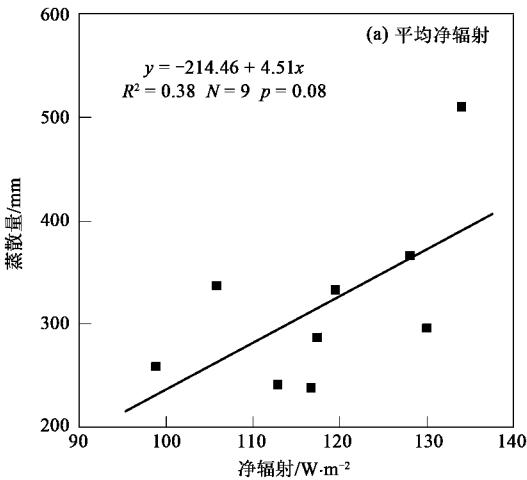


图 8 生长季蒸散量与平均净辐射和平均叶面积指数的关系

Fig.8 Relationship between evapotranspiration and averaged net radiation , leaf area index during the growing season

3 结论

(1)三江平原沼泽湿地开垦种植水稻或大豆并不影响其潜热通量日变化及季节变化模态,但数值上具有明显差异.总体而言,稻田潜热通量高于湿地;大豆田潜热通量在降水充沛的年份高于湿地,但在降水量偏少或发生季节性干旱的年份则低于湿地.

(2)湿地垦殖对潜热通量的影响主要由下垫面状况所决定.湿地开垦种植水稻使得净辐射和叶面积指数明显增加,因而稻田潜热通量高于湿地,生长季降水多少不影响稻田潜热通量的年际变化;湿地开垦种植大豆使得净辐射呈减少趋势,但生长季降水对大豆田叶面积指数影响显著,表现为大豆田叶面积指数在降水充沛的年份高于沼泽湿地,在降水偏少或发生季节性干旱的年份则低于沼泽湿地,因

而生长季降水对大豆田潜热通量的影响也表现出相似的变化规律. 决定大豆田潜热通量变化的关键因子为降水量、叶面积指数和净辐射.

参考文献:

- [1] DeFries R ,Eshleman K N. Land-use change and hydrologic processes : a major focus for the future [J]. *Hydrological Processes* 2004 ,**18**(11) :2183-2186.
- [2] Twine T E ,Kucharik C J ,Foley J A. Effects of land cover change on the energy and water balance of the Mississippi River Basin [J]. *Journal of Hydrometeorology* 2004 ,**5**(4) :640-655.
- [3] Ibrom A ,Oltchev A ,June T *et al.* Effects of land-use change on matter and energy exchange between ecosystems in the rain forest margin and the atmosphere [A]. In : Tscharnkte T ,Leuschner C ,Zeller M ,*et al* (eds). *The Stability of Tropical Rainforest Margins* [C]. Germany : Springer Berlin Heidelberg , 2007. 461-490.
- [4] Mwavu E N ,Witkowski E T F. Land-use and cover changes (1988-2002) around Budongo Forest Reserve ,NW UGANDA : Implications for forest and woodland sustainability [J]. *Land Degradation & Development* 2008 ,**19**(6) :606-622.
- [5] Khresat S ,Al-Bakri J ,Al-Tahhan R. Impacts of land use/cover change on soil properties in the Mediterranean region of Northwestern Jordan [J]. *Land Degradation & Development* , 2008 ,**19**(4) :397-407.
- [6] Pongratz J ,Bounoua L ,DeFries R S ,*et al.* The impact of land cover change on surface energy and water balance in Mato Grosso , Brazil [J]. *Earth Interactions* 2006 ,**10**(19) :1-17.
- [7] Giambelluca T W ,Nullet M A ,Ziegler A D ,*et al.* Latent and sensible energy flux over deforested land surfaces in the eastern Amazon and northern Thailand [J]. *Singapore Journal of Tropical Geography* 2000 ,**21**(2) :107-130.
- [8] Sakai R ,Fitzjarrald D R ,Moraes O L L ,*et al.* Land-use change effects on local energy , water and carbon balances in an Amazonian agricultural field [J]. *Global Change Biology* 2004 , **10**(5) :895-907.
- [9] Wang Z M , Song K S , Zhang B , *et al.* Shrinkage and fragmentation of grasslands in the West Songnen Plain , China [J]. *Agriculture , Ecosystems & Environment* 2009 ,**129**(1-3) : 315-324.
- [10] Příbůň K , Ondok J P. Heat balance components and evapotranspiration from a sedge-grass marsh [J]. *Folia Geobotanica & Phytotaxonomica* ,1985 ,**20**(1) :41-56.
- [11] Burba G G , Verma S B , Kim J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* ,1999 ,**94**(1) :31-51.
- [12] Sánchez-Carrillo S , Angeler D G , Sánchez-Andrés R , *et al.* Evapotranspiration in semi-arid wetlands : relation-ships between inundation and the macrophyte-cover : open-water ratio [J]. *Advances in Water Resources* 2004 ,**27**(6) :643-655.
- [13] 苏艳华 ,张稳. 三江平原近 50 年耕地面积动态变化序列重建 [J]. *地理与地理信息科学* 2008 ,**24**(6) :72-75.
- [14] 国家林业局. 中国湿地保护行动计划 [M]. 北京 : 中国林业出版社 ,2000. 39-40.
- [15] Zhou Z Q , Liu T. The current status , threats and protection way of Sanjiang Plain wetland , Northeast China [J]. *Journal of Forestry Research* 2005 ,**16**(2) :148-152.
- [16] 宋长春 ,王毅勇 ,闫百兴 ,等. 沼泽湿地开垦后土壤水热条件变化与碳、氮动态 [J]. *环境科学* 2004 ,**25**(3) :150-154.
- [17] 郝庆菊 ,王跃思 ,宋长春. 垦殖对沼泽湿地 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 [J]. *生态学报* 2007 ,**27**(8) :3417-3426.
- [18] 宋长春 ,王毅勇 ,闫百兴 ,等. 沼泽湿地垦殖前后土壤温度变化及其对土壤热状况的影响 [J]. *应用生态学报* ,2005 ,**16**(1) :88-92.
- [19] 张金波 ,宋长春 ,杨文燕. 三江平原不同土地利用方式对土壤理化性质的影响 [J]. *土壤通报* 2004 ,**35**(3) :371-373.
- [20] Zhang J B , Song C C , Yang W Y. Land use effects on the distribution of labile organic carbon fractions through soil profiles [J]. *Soil Science Society of America* 2006 ,**70**(2) :660-667.
- [21] 黄靖宇 ,宋长春 ,宋艳宇 ,等. 湿地垦殖对土壤微生物量及土壤溶解有机碳、氮的影响 [J]. *环境科学* ,2008 ,**29**(5) : 1379-1387.
- [22] Zhao X S , Huang Y , Jia Z J , *et al.* Effects of the conversion of marshland to cropland on water and energy exchanges in northeastern China [J]. *Journal of Hydrology* 2008 ,**355**(1-4) : 181-191.
- [23] Falge E , Baldocchi D , Olson R , *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2001 ,**107**(1) :43-69.
- [24] Falge E , Baldocchi D , Olson R , *et al.* Gap filling strategies for long term energy flux data sets [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* 2001 ,**107**(1) :71-77.
- [25] Liu W T. Moisture and latent heat flux variabilities in the tropical Pacific derived from satellite data [J]. *Journal of Geophysical Research* ,1988 ,**93**(C6) :6749-6760.
- [26] South C , Wolfe C P , Grimmond C S B. Wetland evaporation and energy partitioning : Indiana Dunes National Lakeshore [J]. *Journal of Hydrology* ,1996 ,**184**(3-4) :189-208.
- [27] Spieksma J F M , Moors E J , Dolman A J , *et al.* Modeling evaporation from a drained and rewetted peatland [J]. *Journal of Hydrology* ,1997 ,**199**(3-4) :252-271.
- [28] Šmíd P. Evaporation from a reedswamp [J]. *Journal of Ecology* , 1975 ,**63** :299-309.
- [29] Harazono Y , Kim J , Miyata A , *et al.* Measurement of energy budget components during the International Rice Experiment (IREX) in Japan [J]. *Hydrological Processes* ,1998 ,**12**(13) : 2081-2092.
- [30] Gao Z Q , Bian L G , Zhou X J. Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China [J]. *Journal of Geophysical Research* 2003 ,**108**(D13) :ACL 6-1-6-13.
- [31] 李胜功 ,赵哈林 ,何宗颖 ,等. 灌溉与无灌溉大豆田的热量平衡 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)* ,1997 ,**33**(1) :98-104.
- [32] Anderson D E , Verma S B , Rosenberg N J. Eddy correlation measurements of CO₂ , latent heat and sensible heat fluxes over a crop surface [J]. *Boundary-Layer Meteorology* ,1984 ,**29**(3) :

- 263-272.
- [33] Viswanadham Y ,André R G B. Energy Balance of Soybeans Grown in Brazil [J]. Archives for Meteorology , Geophysics and Bioclimatology ,1983 **33**(1-2) :141-157.
- [34] Bailey W G ,Davies J A. Evaporation from soybean [J]. Boundary-Layer Meteorology ,1981 **20**(4) :417-428.
- [35] Kurbatova J ,Arenth A ,Vygodskaya N N ,*et al.* Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and a central Siberian bog I : Interseasonal and interannual variability of energy and latent heat fluxes during the snowfree period [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology 2002 **54**(5) :497-513.
- [36] Mahrt L ,Vickers D. Relationship of area-averaged carbon dioxide and water vapor fluxes to atmospheric variables [J]. Agricultural and Forest Meteorology 2002 **112**(3-4) :195-202.
- [37] Goulden M L ,Litvak M L ,Miller S D. Factors that control Typha marsh evapotranspiration [J]. Aquatic Botany 2007 **86**(2) 97-106.
- [38] Sincik M ,Candogan B N ,Demirtas C ,*et al.* Deficit Irrigation of Soya Bean [*Glycine max* (L.) Merr.] in a Sub-humid Climate [J]. Journal of Agronomy and Crop Science 2008 **194**(3) 200-205.
- [39] 王毅勇 ,杨青 ,刘振乾. 三江平原典型低湿地雨养农田水分特征 [J]. 中国生态农业学报 2001 **9**(1) :43-45.
- [40] Liu X T. Radiation balance and microclimatic features of marsh in the Sanjiang Plain [J]. Chinese Geographical Science ,1991 **1**(4) 347-358.
- [41] Karam F ,Breidy J ,Stephan C ,*et al.* Evapotranspiration , yield and water use efficiency of drip irrigated corn in the Bekaa Valley of Lebanon [J]. Agricultural Water Management 2003 **63**(2) :125-137.
- [42] Karam F ,Masaad R ,Sfeir T ,*et al.* Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions [J]. Agricultural Water Management 2005 **75**(3) 226-244.
- [43] 张淑杰 ,班显秀 ,纪瑞鹏 ,等. 农田蒸散量模型构建及蒸散状况分析 [J]. 中国农学通报 2006 **22**(10) :454-458.