

三江平原稻田能量通量研究*

贾志军^{1,2} 张 稳^{1**} 黄 耀¹

(1. 中国科学院大气物理研究所 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室 北京 100083;

2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 基于三江平原稻田 2005~2007 年 5~10 月涡度相关通量观测数据,分析了该区稻田能量通量的日变化、季节变化和能量分配特征以及能量平衡状况。结果表明:三江平原稻田净辐射和潜热通量日变化均表现为明显的单峰特征,感热通量日变化在水稻发育进入成熟期后才较明显,而土壤热通量在水稻整个发育期内日变化特征都不明显。稻田净辐射季节变化特征显著,6月下旬至7月上旬达到最大值 $18\sim 20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。潜热通量季节变化与净辐射同步,最大值为 $13\sim 19 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。相比之下感热通量较小,观测期间变化于 $-3.90\sim 3.94 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,且没有明显的季节变化。5~10月土壤热通量呈下降趋势,变化于 $-2.67\sim 3.62 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。三江平原地区稻田能量分配特征明显,潜热通量占净辐射的比例(LE/R_n)5~10月平均值为 0.67,表明净辐射大部分以潜热通量形式所消耗,但生长旺季 LE/R_n 略大于生长季初期和末期。感热通量占净辐射的比例(H_s/R_n)的季节变化特征与 LE/R_n 比值相反,观测期间平均值为 0.10。这导致波文比在水稻生长旺季较小而在初期和末期较大。5~10月土壤热通量占净辐射的比例(G/R_n)呈逐渐下降趋势,其月平均值由 5 月的 0.14 下降到 10 月的 -0.08。线性回归法和能量平衡比率均表明三江平原稻田能量明显不闭合,2005、2006 年 5~10 月能量不闭合度分别为 22%和 16%,而 2007 年能量“过闭合”,能量平衡比率平均值为 1.07。

关键词 稻田 涡度相关技术 能量通量 能量分配 能量平衡

中图分类号: S162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2010)04-0820-07

Analysis of energy flux in rice paddy in the Sanjiang Plain

JIA Zhi-Jun^{1,2}, ZHANG Wen¹, HUANG Yao¹

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Using eddy covariance data for May to October 2005, 2006 and 2007 collected from rice paddies in the Sanjiang Plain, diurnal and seasonal variations in energy flux, partitioning and balance closure were analyzed. The results show that diurnal variations in net radiation and latent heat flux are uni-peak model. However, a relatively distinct diurnal variation in sensible heat flux is observed only at the maturity stage of rice. There is no obvious diurnal variation in soil heat flux in the entire growing season. Seasonal variations in net radiation are significant, generally reaching the maximum of $18\sim 20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ during late June to early July. Seasonal variations in latent heat flux are similar to those in net radiation, with a maximum range of $13\sim 19 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. In contrast, sensible heat flux is smaller and less variable on seasonal scale ($-3.90\sim 3.94 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) than latent heat flux. Soil heat flux is not only small, but has a declining trend for May to October, and with a range of $-2.67\sim 3.62 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$. There is a significant energy partition in the rice paddies of the Sanjiang Plain, with mean LE/R_n ratio of 0.67 (for May to October). This suggests that most of the energy is latent heat flux, but with a larger LE/R_n ratio at blooming stage than at other growth stages. The seasonal pattern of H_s/R_n ratio is inversely related to LE/R_n ratio, with an average H_s/R_n ratio of 0.10. This implies that the Bowen ratio is smaller for blooming stage and larger for the early and late stages of growth. G/R_n ratio is small, showing a declining trend of 0.14~ -0.08 from May to October. The energy balance closure, evaluated by methods of Ordinary Linear Squares regression and Energy Balance Ratio, is generally small in the study area. Averaged energy imbalance ratio in the paddy fields for May to October is

* 国家自然科学基金重点项目(40431001)和国家自然科学基金项目(40675075)资助

** 通讯作者: 张稳(1968~), 男, 副研究员, 主要从事生态系统碳氮循环与全球变化研究。E-mail: zhw@mail.iap.ac.cn
贾志军(1974~), 男, 博士研究生, 主要从事陆地生态系统物质和能量交换研究。E-mail: jiazhijunneigae@126.com

收稿日期: 2009-09-07 接受日期: 2009-12-17

respectively 22% and 16% for 2005 and 2006. However, energy balance ratio surprisingly hits 1.07 in 2007, showing that the sum of latent and sensible heat fluxes is larger than the available energy.

Key words Rice paddy, Eddy covariance, Energy flux, Energy partition, Energy balance

(Received Sept. 7, 2009; accepted Dec. 17, 2009)

地表能量通量直接影响地面温度、水分传输和植被发育以及生态系统生产力^[1],也是区域气候模式的重要输入参数^[2-3],受到生态学、水文学和气象学界的广泛关注。农田生态系统在全球生态环境、能量平衡和区域气候研究中具有重要地位,对农田地表能量通量的长期观测研究一直是国际上关注的热点问题^[4]。稻田区别于其他农田生态系统之处在于水稻生育期内地表大部分时间处于淹水状态,这势必会影响地表能量收支以及局域气候特征^[5-6],国内外对此进行了一些研究^[7-10]。三江平原地处中高纬度地区,近几年水稻种植面积不断扩大,目前已达 $107 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占该区耕地总面积的 20.4%^[11],但关于该区稻田地表能量通量的研究尚不多见^[12]。本研究试图通过对 2005~2007 年 5~10 月稻田涡度相关系统观测资料的分析,初步阐明观测区稻田地表能量通量的变化动态、分配特点和能量平衡闭合特征,为进一步评价水稻种植对三江平原地表能量平衡和区域气候的影响奠定基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

观测系统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)附近稻田内。试验区气候属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°C , 7 月平均气温 22.0°C ; 年均降水量 600 mm 左右,其中 70% 左右集中在水稻生长季; 10 年积温 $2\,400 \sim 2\,500^\circ\text{C}$; 无霜期 130~150 d; 年日照总数 $2\,300 \sim 2\,600 \text{ h}$,其中水稻生长季日照时数在 $1\,000 \sim 1\,200 \text{ h}$; 年总辐射量 $4\,100 \sim 4\,700 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$, 10 时期的光合有效辐射 $900 \sim 1\,100 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。温度、降水和光照条件的分布与水稻生长同步,基本能满足水稻发育的要求。稻田从幼苗移栽前至 9 月初地表持续淹水(水深 4~8 cm)。每年施肥 2 次,主要包括尿素、磷酸盐和钾肥,一次在插秧前作为基肥施入(N、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 $23 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),一次在水稻分蘖时作为追肥施入(N 和 K_2O 施用量分别为 $23 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $15 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。该区水稻生长期近 5 个月,一般 5 月中下旬移栽,9 月中旬成熟,10 月初收割。

1.2 观测方法

2005~2007 年 5~10 月利用涡度相关系统对水稻田潜热通量(LE)和感热通量(H_s)进行连续观测。涡度相关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,分别用于测定 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 密度和三维风速。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。观测仪器安装在铁三角架上,距地表 2 m 高,仪器探头朝向盛行风向。距涡度相关观测系统 10 m 远处设置了小气候观测系统,观测要素包括净辐射(CNR-1, Kipp&Zonen, Netherlands)、光合有效辐射(Li-190SB, Li-Cor, USA)、不同深度(5 cm 和 10 cm)的土壤热通量(HFP01SC, Hukseflux Inc)等。

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、维护感应器和断电等)不可避免地会出现数据异常和缺测^[13]。2005~2007 年观测期间数据缺测率分别为 17.2%、15.2% 和 16.3%,远低于国际通量网(FLUXNET)35%的平均值^[14]。缺失数据依据下述方法进行插值: 1) $<2 \text{ h}$ 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^[15]。本试验查表法以月为时间步长,选取光合有效辐射和饱和水汽压差为驱动因子对潜热通量划分插值。将缺失数据插补后,选择水稻不同生长阶段内的典型晴天,分析能量通量的日变化特征;并累计求和得到每天能量通量总和,分析其季节变化趋势、能量分配和闭合特征。

2 结果与分析

2.1 稻田能量通量日变化

以 2006 年为例,分析稻田地表能量平衡各主要分量(净辐射、潜热通量、感热通量和土壤热通量)日变化特征。5 月 12 日、7 月 12 日、9 月 12 日和 10 月 12 日分别代表水稻移栽前、生长旺盛期、成熟期和收割后(裸地)各阶段典型晴天。图 1 表明,稻田净辐射在水稻不同发育阶段均表现为明显的单峰变化趋势。净辐射与太阳辐射同步变化,通常于中午 11:00~12:00 达到最大值,5 月 12 日、7 月 12 日、

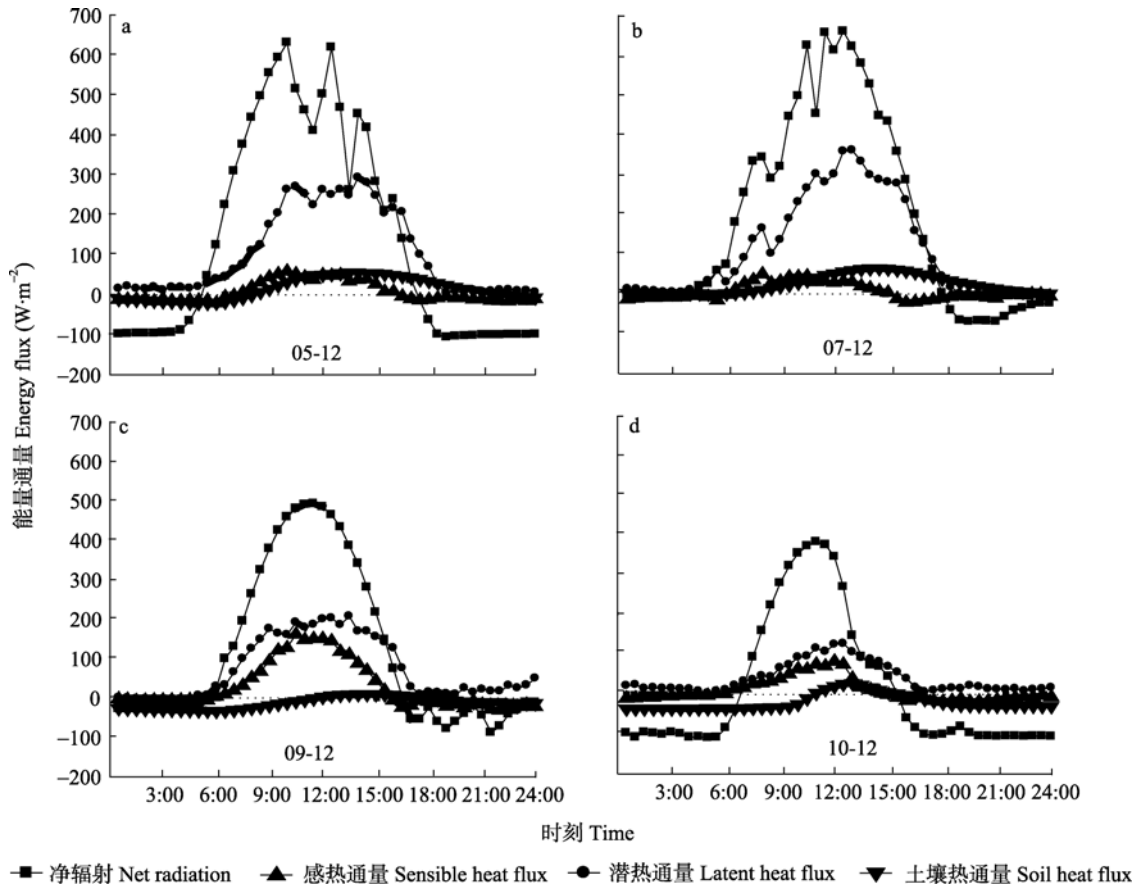


图 1 水稻不同发育阶段晴天稻田能量通量日变化

Fig. 1 Diurnal variation of energy flux in rice paddy on a clear day in different development phases of rice

9月12日和10月12日最大值分别为 $612 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $641 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $488 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $378 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。潜热通量日变化模式与净辐射相同,但其最大值明显小于同期净辐射最大值,4个阶段潜热通量最大值分别为 $271 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $360 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $194 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $117 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。相比之下,感热通量日变化特征在水稻移栽前和生长旺盛期不明显,而在水稻进入成熟期后较明显。这主要是由于9月水稻发育逐渐成熟和稻田排水晒田导致潜热通量减少而感热通量相对增加所致。水稻整个发育期内土壤热通量日变化特征都很不明显,变化于 $-37 \sim 63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,且最大值出现时间明显滞后于净辐射(一般在14:00左右)。三江平原稻田净辐射、潜热、感热和土壤热通量的日变化特征及其量级与其他区域稻田的观测结果相近^[7-8,10],也与旱田生态系统的观测结果相似^[16-17],但具体大小受气候、地理条件和地表水分供给条件影响而存在一定差异。

2.2 稻田能量通量季节变化

三江平原稻田净辐射、潜热、感热和土壤热通量随作物发育的季节变化特征如图2所示。该区秧苗一般于5月下旬移栽,稻田插秧之前由于土壤返浆而过湿或者泡田而被水覆盖,地表获得的净辐射整体表现为随着太阳辐射的增强而增加。稻田插秧

后水稻发育进入分蘖期,一般延续至7月上旬。分蘖期水稻生长迅速,地表获得的净辐射较大,6月下旬~7月上旬达到最大值,观测期间净辐射日总量最大值为 $18 \sim 20 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。水稻长穗期延续至7月底,该时期地表获得的净辐射略低于分蘖期净辐射($13.35 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),达到 $12.16 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。进入8月水稻发育进入灌浆期,并于9月中旬成熟。水稻灌浆成熟期内的净辐射随太阳辐射减弱和植被枯黄呈逐渐下降趋势。此外由于净辐射大小主要取决于太阳辐射强弱^[18],因此观测期间阴雨天气太阳辐射骤然降低导致地表获得的净辐射显著下降。5~10月稻田净辐射年际差异较小,2005~2007年净辐射日总量平均值分别为 $9.93 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $9.53 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $10.16 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其中2005年和2007年净辐射日总量平均值明显大于2006年,主要原因是2006年没有发生季节性干旱,阴雨天气较多导致地表太阳辐射总量较少所致。潜热通量的季节变化与净辐射基本同步,这是由于净辐射是潜热通量的主要驱动因子^[19-20],因此当净辐射达到最大值时潜热通量也同步达到了最大值,水稻分蘖期稻田潜热通量最大,达 $10.24 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,观测期间潜热通量日总量最大值为 $13 \sim 19 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,

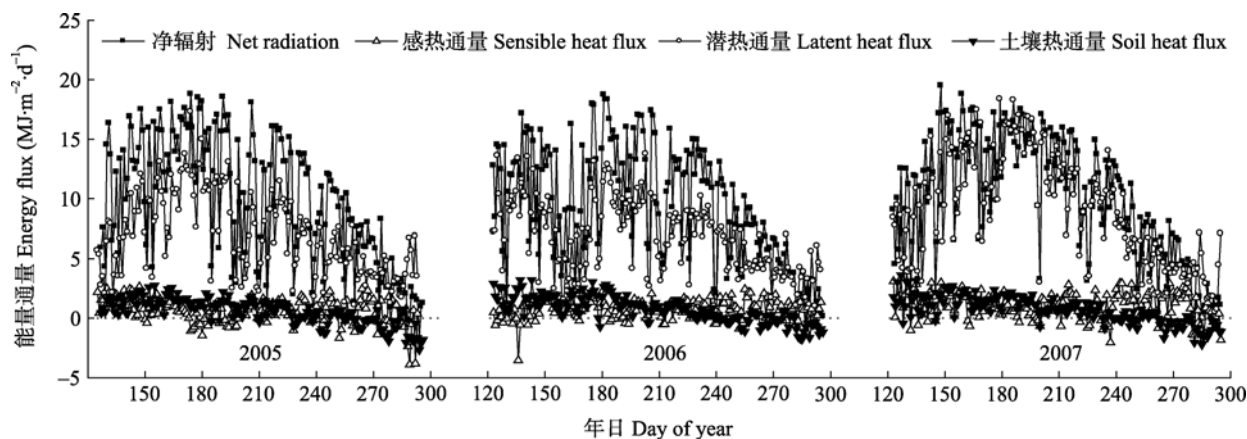


图2 2005~2007年稻田能量通量观测期季节变化

Fig. 2 Seasonal variation of energy flux in rice paddy from 2005 to 2007 during the observation period

2005~2007年平均值分别为 $6.80 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $6.62 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $9.00 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。相比之下水稻发育期间感热通量较小且没有明显的季节变化, 观测期间日总量变化于 $-3.90 \sim 3.94 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。土壤热通量变化于 $-2.67 \sim 3.62 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 但季节变化较明显, 水稻移栽至成熟收割(5~10月)呈下降趋势, 期间8月下旬通量逐渐由正值转变为负值, 表明稻田土壤从吸收能量转化为向地表释放能量。稻田土壤热通量的季节变化特征与其他生态系统相似^[21]。

2.3 稻田能量分配特征

稻田能量分配(LE/R_n 为潜热通量与净辐射之比, H_s/R_n 为感热通量与净辐射之比, G/R_n 为土壤热通量与净辐射之比)的季节变化特征如图3和表1所示。整体而言, 2005~2007年5~10月 LE/R_n 平均值为0.67, 水稻不同发育阶段差异较小, 表明地表获得的净辐射大部分以潜热形式所消耗, 但水稻移栽前和生长旺季(6~8月) LE/R_n 比值略大于水稻发育初期和末期。 H_s/R_n 比值季节变化特征与 LE/R_n 相反, 在水稻生长旺季较小, 而在生长初期和末期较大, 观测期间平均值为0.10。潜热和感热通量的这种季

节分配特征导致波文比 β ($\beta = H_s/LE$) 在水稻生长旺季较小, 而在生长初期和末期较大(图4)。 G/R_n 比值5~10月呈下降趋势, 由5月平均值0.14逐渐下降到10月-0.08。地表能量分配受植被发育状况、气象条件、土壤水分等多种因子共同影响^[22-23]。水稻发育期间地表处于积水或过湿状态, 水分供给充足, 土壤含水量变化对能量分配影响甚微, 因此水稻生长发育和气象因子成为控制能量分配的主要因子。有研究表明, LE/R_n 比值和植被冠层导度均与叶面积指数呈线性正相关^[22], 而且当饱和水汽压差较大时, 太阳辐射增强有利于净辐射更多地分配给潜热通量^[24], 因此水稻生长旺盛期间叶面积指数和冠层导度较大以及较强的太阳辐射和较大的饱和水汽压差都使 LE/R_n 比值较大, H_s/R_n 比值较小。三江平原稻田能量分配特征与日本国际水稻试验(IRES)^[7]和中国台湾地区稻田^[10]的观测结果相同, 但其波文比明显小于国际通量网中对玉米/大豆轮作农田的观测结果(其平均值为0.31)^[25], 这主要是由于水稻生育期内稻田地表水分供给充足使净辐射更多地分配给潜热通量。

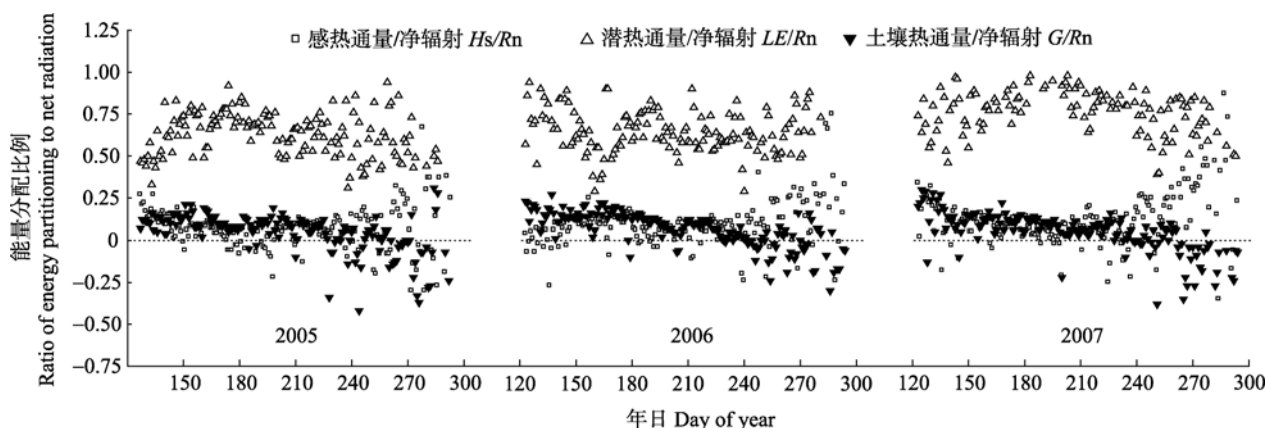
图3 2005~2007年稻田能量分配(H_s/R_n 、 LE/R_n 、 G/R_n)季节变化Fig. 3 Seasonal variations of the ratio of energy partitioning [sensible heat flux (H_s), latent heat flux (LE), and soil heat flux (G)] to net radiation (R_n) in rice paddy from 2005 to 2007

表 1 2005~2007 年水稻生长各阶段能量分配平均值(标准差)
Tab. 1 Daily mean (standard deviation) of energy partitioning to net radiation and Bowen ratio during each development phase of rice from 2005 to 2007

能量分配 Energy partitioning	移栽前(5 月) Before transplanting (May)	生长旺季(6~8 月) Peak of growing season (from June to August)	成熟期(9 月) Mature period (September)	收割后(10 月) After harvesting (October)
感热通量/净辐射(H_s/R_n) Ratio of sensible heat flux to net radiation	0.09(±0.11)	0.06(±0.08)	0.13(±0.15)	0.23(±0.29)
潜热通量/净辐射(LE/R_n) Ratio of latent heat flux to net radiation	0.68(±0.15)	0.69(±0.14)	0.63(±0.14)	0.63(±0.14)
土壤热通量/净辐射(G/R_n) Ratio of soil heat flux to net radiation	0.14(±0.07)	0.08(±0.07)	-0.04(±0.11)	-0.08(±0.15)
波文比 (H_s/LE) Ratio of sensible heat flux to latent heat flux	0.15(±0.18)	0.10(±0.10)	0.22(±0.24)	0.14(±0.30)

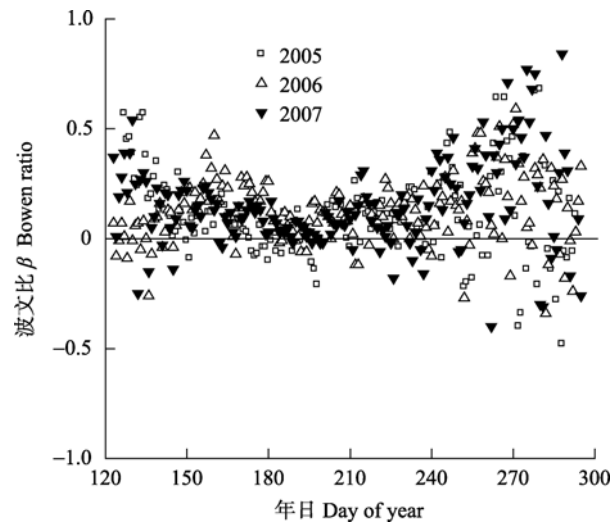


图 4 2005~2007 年稻田波文比 β 季节变化
Fig. 4 Seasonal variation in Bowen ratio in rice paddy from 2005 to 2007

2.4 能量平衡闭合分析

地表能量平衡基于能量守恒定律,理论上地表潜热和感热通量之和应该与有效能量(即其他所有能量源汇之和)相等^[26],能量平衡方程一般可表示为:

$$V = R_n - G - S - W - F = LE + H_s \tag{1}$$

式中, V 为有效能量或可利用能量,定义为 $R_n - G - S - W - F$, R_n 为冠层净辐射, G 为土壤热通量, S 为土壤热储存量, W 为稻田地表水体热储存量, F 为植被光合作用消耗的能量, LE 和 H_s 分别为涡度相关系统测定的潜热和感热通量,其中 S 、 W 和 F 值很小,在计算中忽略不计。本文采用两种方法来评价稻田能量平衡闭合度。第 1 种方法是对半小时湍流热通量($LE+H_s$)与有效能量(V)进行 OLS(Ordinary least squares)线性回归,利用方程的斜率和截距进行评价。线性回归方程表示为:

$$LE + H_s = aV + b \tag{2}$$

式中, a 、 b 分别为直线回归的斜率和截距,能量平衡闭合状况下应该分别为 1 和 0。第 2 种方法是利用能量平衡比率 EBR (Energy balance ratio, 特定时间段内湍流热通量之和与有效能量之比)进行评价,

表达式为:

$$EBR = \frac{\sum (LE + H_s)}{\sum V} \tag{3}$$

对 2005~2007 年 5~10 月观测数据的分析结果如表 2 所示。OLS 线性回归方程斜率范围 0.44~0.80, 平均值 0.62; 截距范围为 6.43~62.67, 平均值为 30.13; 决定系数范围为 0.63~0.95, 平均值为 0.81。能量平衡比率 2005~2007 年平均值分别为 0.78、0.84 和 1.07, 明显偏离地表能量闭合时的数值 1。这两种方法均表明用涡度相关法观测稻田能量时存在明显的能量不闭合现象。此外稻田能量平衡比率具有明显的季节变化特征,一般在水稻移栽前和移栽初期(5 月)较大,之后随着水稻生长发育呈下降趋势,在灌浆期

表 2 能量平衡闭合线性回归参数和能量平衡比率
Tab. 2 Linear regression coefficients of energy balance closure and energy balance ratio

观测日期 (年-月) Observation period (year-month)	线性回归参数 Linear regression parameters			能量平衡 比率 EBR Energy balance ratio
	斜率 a Slop	截距 b Inter- cept	决定系数 R^2 Coefficient of determi- nation	
2005-05	0.44	41.81	0.71	0.80
2005-06	0.51	50.39	0.80	0.84
2005-07	0.59	21.56	0.93	0.77
2005-08	0.65	9.44	0.94	0.73
2005-09	0.59	6.43	0.93	0.66
2005-10	0.56	18.43	0.86	0.99
2006-05	0.53	45.78	0.74	0.92
2006-06	0.45	37.70	0.66	0.83
2006-07	0.59	27.86	0.90	0.80
2006-08	0.66	9.71	0.95	0.74
2006-09	0.63	13.88	0.94	0.81
2006-10	0.48	28.09	0.79	1.28
2007-05	0.60	51.76	0.63	1.12
2007-06	0.65	62.67	0.79	1.08
2007-07	0.79	49.86	0.89	1.11
2007-08	0.80	23.09	0.92	0.99
2007-09	0.72	15.86	0.89	0.93
2007-10	0.53	25.01	0.78	1.23

间(8月)达到最小,水稻收割后(10月)EBR明显增加。这与李正泉等^[27]对中国通量观测网站农田能量平衡比率的季节变化特征和郭建侠等^[28]对玉米能量平衡闭合状况的观测结果相同。EBR季节变化特征可能是由于随着植被生长发育,曾被忽略的地面到仪器探头之间植被冠层和大气的热储存量以及其他能量消耗(如光合作用产生的生物化学能量等)明显增加所致。

地表能量不闭合是涡度相关通量观测中普遍存在的问题^[7-8,26,29-30],本研究中2005年和2006年稻田能量平衡比率与国际通量网20%的平均能量不闭合度相当^[26],也与中国亚热带稻田85%^[31]和台湾地区稻田82%的能量平衡比率^[10]非常相近。学者们对于地表能量平衡不闭合的原因给出了各种解释:Tsai等^[10]在考虑稻田光合作用消耗的能量和局地水平对流热通量后,能量平衡比率高达95%,但也有研究表明能量平衡不闭合的原因可能主要是尺度问题而非测量误差或能量存储问题^[32]。目前关于这一现象学者们尚未给出充分的解释,但如果观测系统测定的有效能量 V 准确,则可以认为涡度相关系统测定的湍流通量(包括潜热、感热和 CO_2 通量)偏低,问题是这种假设是否成立,以及产生这种偏差的具体原因还有待进一步深入分析研究。地表能量平衡除不闭合外也存在能量“过闭合”现象^[26,28],即湍流热通量($LE+H_s$)大于有效能量 V 。分析表明2007年5~10月平均能量平衡比率 $EBR>1$,5月和10月表现尤为明显(表2)。Wilson等^[26]对国际通量网观测数据分析表明,一些站点EBR最高值达到1.69,中国通量观测网络能量平衡闭合状况的评估结果也表明农田生态系统部分日能量平衡比率大于1^[27]。能量平衡“过闭合”可能是由于各能量分量与净辐射的时间不同步所致,当将有效能量位相提前后,能量闭合程度明显提高^[28]。本试验2005年和2006年稻田能量不闭合,而2007年能量过闭合,这可能与年际间地表水分变化有关。2006年降水较多,2005年尽管发生季节性干旱,但持续时间短,因此整体而言稻田地表积水较深,水体热储存量大,故在计算EBR时忽略该项会导致EBR偏小。相反2007年季节性干旱持续时间较长,导致稻田地表水位显著下降,水体热储量较小,从而使EBR相对偏大出现明显的能量“过闭合”。

3 结论

三江平原稻田净辐射和潜热通量日变化特征显著,表现为单峰变化趋势。感热通量日变化只有在水稻成熟后才较明显,而土壤热通量在水稻整个发

育期内都没有表现出明显的日变化特征。潜热通量的季节变化与净辐射基本同步,具有明显的季节变化趋势,一般5月起逐渐增加,并于6月下旬~7月上旬达到最大值,之后逐渐减少。相比而言感热通量和土壤热通量均较小,感热通量没有明显的季节变化,但土壤热通量5~10月份呈下降趋势,8月下旬土壤热通量逐渐由正值转变为负值。

三江平原5~10月稻田 LE/R_n 比值均较大,表明净辐射大部分以潜热通量形式消耗,但生长旺季 LE/R_n 比值略大于生长季初期和末期,而 H_s/R_n 比值的季节变化特征恰与 LE/R_n 比值相反,这导致波文比 β 在水稻生长旺季较小,而在生长初期和末期较大。 G/R_n 比值从5~10月呈逐渐下降趋势。水稻生长发育和气象因子(太阳辐射、饱和水汽压差)是稻田地表能量分配特征的主控因子。OLS回归方程和能量平衡比率均表明三江平原稻田能量明显不闭合,且在2007年出现能量“过闭合”现象。

致谢 中国科学院东北地理与农业生态研究所宋长春研究员、三江平原沼泽湿地生态试验站成员及中国科学院大气物理研究所石立庆高级工程师和赵晓松博士在仪器维护和数据采集等方面给予支持,谨表谢意!

参考文献

- [1] Dennison M S, Berry J F. Wetlands: Guide to science, law, and technology[M]. New Jersey: Cambridge University Press, 1993: 24-27
- [2] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Rosenzweig C, et al. Evapotranspiration models with canopy resistance for use in climate models: A review[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 54(2/4): 373-388
- [3] Unland H E, Houser P R, Shuttleworth W J, et al. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran desert site[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 82(1/4): 119-153
- [4] 高志球, 卞林根, 陆龙骅, 等. 水稻不同生长期稻田能量收支、 CO_2 通量模拟研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(2): 129-140
- [5] Wu R S, Sue W R, Chien C B, et al. A simulation model for investigating the effects of rice paddy fields on the runoff system[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2001, 33(6/7): 649-658
- [6] Simmonds I, Daohua B, Hope P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over China in summer[J]. Journal of Climate, 1999, 12(5): 1353-1367
- [7] 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(13/14): 2081-2092
- [8] 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
- [9] Yoshimoto M, Oue H, Kobayashi K. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment[J]. *Agriculture and Forest Meteorology*, 2005, 133(1/4): 226–246
- [10] Tsai J L, Tsuang B J, Lu P S, et al. Surface energy components and land characteristics of a rice paddy[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(11): 1879–1900
- [11] 刘兴土, 马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 59–82
- [12] 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
- [13] Foken T H, Wichura B. Tools for quality assessment of surface based flux measurement[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1): 83–105
- [14] Falge E, Baldocchi D, Olson R J, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43–69
- [15] Falge E, Baldocchi D, Olson R J, et al. Gap filling strategies for long term energy flux data sets[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71–77
- [16] 王毅勇, 杨青, 张光, 等. 三江平原大豆田蒸散特征及能量平衡研究[J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 82–85
- [17] 许秀娟, 张嵩午. 冷型小麦灌浆期农田热量分配状况初探[J]. *中国生态农业学报*, 2002, 10(4): 40–43
- [18] Alados I, Foyo-Moreno I, Oimo F J, et al. Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 116(3/4): 221–227
- [19] Kurbatova J, Arenth A, Vygodskaya 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 snow free period[J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2002, 54(5): 497–513
- [20] 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
- [21] Verhoef A, Allen S J, Lloyd C R. Seasonal variation of surface energy balance over two Sahelian surfaces[J]. *International Journal of Climatology*, 1999, 19(11): 1267–1277
- [22] Li S G, Eugster W, Asanuma J, et al. Energy partitioning and its biophysical controls above a grazing steppe in central Mongolia[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(1/2): 89–106
- [23] Hammerle A, Haslwanter A, Tappeiner U, et al. Leaf area controls on energy partitioning of a temperate mountain grassland[J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(2): 421–431
- [24] Oue H. Influences of meteorological and vegetation factors on the partitioning of the energy of a rice paddy field[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19(8): 1567–1583
- [25] Wilson K B, Baldocchi D, Aubinet M, et al. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(12): 30.1–30.11
- [26] Wilson K B, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 223–243
- [27] 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX) 能量平衡闭合状况的评价[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 46–56
- [28] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 玉米生育期地表能量平衡的多时间尺度特征分析及不平衡原因的探索[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38(9): 1103–1111
- [29] Mahrt L. Flux sampling errors for aircraft and towers[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(2): 416–429
- [30] Foken T, Wimmer F, Mauder M, et al. Some aspects of the energy balance closure problem[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, 6: 4395–4402
- [31] 朱咏莉, 吴金水, 胡晶亮, 等. 亚热带稻田能量平衡闭合状况分析[J]. *中国农学通报*, 2007, 28(3): 536–539
- [32] Foken T. The energy balance closure problem: An overview[J]. *Ecological Applications*, 2008, 18(6): 1351–1367