doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.013

# 南方节水灌溉稻田能量通量特征及其规律分析\*

刘笑吟<sup>1,2</sup> 杨士红<sup>1,2</sup> 李霁雯<sup>2</sup> 徐俊增<sup>1,2</sup> 刘 明<sup>1,2</sup>

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,南京 210098; 2.河海大学水利水电学院,南京 210098)

摘要:利用涡度相关系统在江苏省昆山市试验研究基地 2013 年水稻生育期所测的净辐射量、土壤热通量、潜热通量和显热通量等观测资料,分析了能量各通量在典型晴天、阴天的日变化规律和稻季能量通量的日变化、月变化及分配特征,讨论了能量各组分占净辐射量的比例和不同时间尺度上稻田的能量闭合情况。结果表明:能量平衡各分量在亚热带南部季风区节水灌溉稻田典型晴天以及水稻生育期间月均日变化均呈明显的倒"U"型单峰趋势,典型阴天能量平衡各分量日均值和峰值均小于晴天,但也呈单峰型变化趋势。稻季潜热通量占净辐射量的 86.2%, 土壤热通量占净辐射量的 1.3%,不同时间尺度上净辐射量均主要以潜热形式加湿大气,感热通量占净辐射量的 86.2%, 土壤热通量占净辐射量的 1.3%,不同时间尺度上净辐射量均主要以潜热形式加湿大气,感热通量占净辐射量的 0.8%,与潜热通量差异显著,且占净辐射量的比例呈此消彼长的关系。在能量通量的测量过程中,与净辐射量相比,感热、潜热通量滞后于净辐射量约0.5h,土壤热通量滞后 1.5~2.5h。热传输速度不同步,从而影响了能量的短期闭合率。但与其他生态系统相比,该节水灌溉稻田生态系统能量闭合度较高,说明该试验区涡度数据可靠,通量特征及规律具有较好的代表性,有利于通量研究的进一步开展。

关键词: 节水灌溉稻田 能量通量 涡度相关法 能量平衡 中图分类号: S271 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)05-0083-10

# Characteristics and Law Analysis of Energy Flux in Southern Water-saving Irrigation Paddy Field

Liu Xiaoyin<sup>1,2</sup> Yang Shihong<sup>1,2</sup> Li Jiwen<sup>2</sup> Xu Junzeng<sup>1,2</sup> Liu Ming<sup>1,2</sup>

State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China
 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the observation data, including net radiation flux, latent heat flux, sensible heat flux, soil heat flux, etc., which were surveyed at the stage of rice growth in 2013 at Kunshan Irrigation and Drainage Experiment Station with eddy covariance method, this article analyzes the features and distribution characteristics of energy balance components in the typical sunny day and cloudy day, as well as the diurnal and monthly variations of energy fluxes in rice season. The ratios of energy balance components to the net radiation and the energy closure degree of paddy field in different temporal scales were also discussed. The results illustrated that the monthly averaged diurnal variations of energy balance components, which were observed in typical sunny day in southern subtropical monsoon region at the stage of rice growth, obviously presented as the singlet trend of inverted "U" shape. The daily mean value and peak value of energy balance components in typical sunny day were smaller than that in cloudy day, but it also presented as the trend of singlet variation. The difference between latent heat flux and sensible heat flux appeared apparently. The ratios of the above two to the net radiation were anti-connected and the values were 86.2% and 0.8%, respectively. The ratio of the soil heat flux to the net

收稿日期: 2014-08-28 修回日期: 2014-10-20

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(51209066)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B17114)、中国博士后科学基金资助项目 (2013T60495)和江苏高校优秀科技创新团队基金资助项目

作者简介: 刘笑吟,博士生,主要从事节水灌溉农田水热通量研究, E-mail: liu\_xyin@ sina. com

通讯作者:杨士红,副教授,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究,E-mail: ysh7731@hhu.edu.cn

radiation was 1.3%. As a result, the latent heat flux was the main component of net radiation in different temporal scales. Due to out-sync of energy transformation, turbulent fluxes lagged behind the net radiation about 0.5 h, and the hysteresis of surface soil heat flux was about  $1.5 \sim 2.5$  h. Energy balance components in different time spots were corresponding incompletely as to the impact to the short-term energy closure rate. But compared with other ecosystems, there was a better energy balance closure in water-saving irrigation paddy field, which suggested the flux data measured by eddy covariance method was capable to act as an effective judgment for evaluating the availability of energy flux features.

Key words: Water-saving irrigation paddy field Energy flux Eddy covariance method Energy balance

# 引言

涡度相关技术经过长期的理论发展与技术实 践,在陆地生态系统和大气之间水热通量测定研究 中已得到了广泛应用,在涡度相关观测数据的质量 与可信度得到保证后,分析能量各通量的特征与变 化规律,理解环境因子和下垫面结构动态对能量通 量的影响,已成为通量界共同关心的重要问题。但 是,目前相关研究多集中于草地、湿地和森林下垫 面,农田领域的研究则以旱作物为主,针对稻田的研 究不多,对其能量闭合状况进行深入分析并提出修 正方法的则更少。汪瑛<sup>[1]</sup>对稻田各能量通量特征 进行了分析,并用 SiB2 模式对稻田不同生长期的湍 流通量进行了模拟研究。之后朱咏莉等<sup>[2]</sup>、贾志军 等<sup>[3]</sup>分别用不同统计方法对涡度相关法所测的稻 田通量数据进行了分析,发现稻田生态系统存在 10%~20%的能量不闭合度,但均未提出修正方法。 国外学者在20世纪末开始对水稻田能量通量特征 进行分析,提出了稻田能量的不闭合率达20%左 右<sup>[4]</sup>。近来, Masseroni 等<sup>[5]</sup>提出了多种影响稻田能 量平衡的因素,进一步考虑了田面水层热储量并对 地表土壤热通量进行了修正,结果表明修正后稻田 能量不平衡率小于10%。

我国是世界上最大的水稻生产国,尤其在我国 南方地区,稻田不仅是农田生态系统的主要组成,也 是陆地生态系统的重要部分。同时,稻田生态系统 下垫面群落单一,植被冠层矮小、简单且匀质性高, 是进行涡度相关通量观测试验和开展理论研究的理 想类型<sup>[6]</sup>。所以,本研究用涡度相关法观测节水灌 溉稻田生态系统能量通量各分量在整个水稻生育期 的连续变化,分析系统能量平衡各组分在不同天气 条件下、不同时间尺度上的变化过程和规律,并试图 从物理机制和数据修正方面分析导致地表能量不平 衡的原因,旨在加深对节水灌溉稻田下垫面的近地 层大气湍流运动规律及能量交换特征的认识,探寻 亚热带南部季风区稻田地表蒸发规律和农田节水灌 溉机制,同时也为评价稻田生态系统对温室气体的 收支与排放能力提供依据,为今后利用能量不闭合 情境下观测通量发展陆面过程数值模式奠定基础。

#### 1 基本观测条件

#### 1.1 试区概况

试验区位于河海大学国家重点实验室昆山试验 研究基地(31°15′15″ N,120°57′43″ E),地处太湖流 域水网区低洼平原,属亚热带南部季风气候区。年 平均气温 15.5℃,年总降水量 1 097.1 mm,年总蒸 发量1365.9mm,年平均气压1016.3kPa,年日照时 数2085.9h,年平均相对湿度83%,土壤为潴育型 黄泥土,耕层土壤为重壤土。试验区常年盛行东南 风,涡度相关系统布置于试验区西北角,风浪区较为 均匀平坦,长度 200 m 左右。观测场所监测下垫面 为控制灌溉的稻田<sup>[7]</sup>,控制灌溉处理在返青期田面 保留5~25 mm薄水层,以后的各个生育期灌溉后稻 田不建立水层,以根层土壤含水率占饱和含水率 60%~80%的组合为灌水控制指标,0~10 cm、 10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 各层土壤饱和含 水率分别为 51.8%、42.6%、33.9%、35.8%;各生 育期具体土壤水分调控指标见表1,稻田控制灌溉 具体灌水日期和灌水量见表2。表1中θ指饱和含 水率,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 、 $\theta_4$ 指各阶段土壤饱和含水率, 为根 层观测深度内土壤饱和含水率平均值;p 指占土壤 饱和含水率的百分比;水稻返青期田间水层深度的 上限和下限分别为25 mm 和5 mm,控制灌溉处理中 只有当现场观测的土壤水分达到下限土壤含水率 时,才能灌水至上限,保证灌水后田面无水层。

#### 1.2 观测仪器与观测内容

在具有代表性的昆山稻区下垫面下风向安装涡 度相关系统自动观测仪器(OpenPath Eddy Covariance, OPEC),该系统主要由CAST3A型三维 超声风速仪、EC150型开路CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O分析仪、 CR3000型数据采集器、HMP155A型空气温湿度探 头、CNR4型四分量净辐射量表和HFP01SC型热通

表1 控	制灌溉水稻各生育期根层土壤水分控制指标
------	---------------------

Tab. 1 Control standards for soil moisture of root zone at each growth stage of rice under control irrigation

指标			分蘖期		拔节孕穗期		+++ +== TT -++ +HI	可曲扣	- 共 由 田	
		前期	中期	后期	前期	后期	一	孔烈朔	<b></b>	
灌水上限	p/%	100	100	100	100	100	100	100		
	$\theta$	$ heta_1$	$\theta_1$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_2$	$\theta_3$	$ heta_4$	个灌溉	
灌水下限	p/%	70	65	60	70	75	80	70	不灌溉	
	$\theta$	0. $7\theta_1^*$	0. $65\theta_1$	0. $6\theta_1$	0. 7 $\theta_2$	0.75 $\theta_2$	0. $8\theta_3$	0. 7 $\theta_4$		
根层观测深度/cm		0 ~ 20	0~20	0~20	0 ~ 30	0~30	0 ~ 40	0 ~ 40		

#### 表 2 控制灌溉稻田的灌水日期和灌水量

Tab. 2 Irrigation date and amount of rice under control irrigation

灌水日期	返青期			分蘖期			拔节孕穗期				乳熟期	
	06 - 24	06 - 30	07 - 03	07 - 11	07 - 17	07 - 20	08 - 04	08 - 12	08 - 13	08 - 21	09 - 24	09 - 30
灌水量/mm	123.0	58.1	28.3	34.3	52.3	36.8	54.3	48.5	22.0	36.3	105.2	54.4

量板等组成。观测内容包括太阳总辐射量、反射辐射量、土壤热通量、土壤温度、气压和超声仪观测的 感热通量与潜热通量等。土壤热通量板埋设深度为 距地表8 cm,辐射观测高度1.5 m,空气温湿探头观 测高度2 m,三维超声风速仪和 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪安装 高度2.5 m。所有原始数据昼夜连续自动采集,采样 频率为10 Hz,通过数据采集器在线计算并储存 30 min的统计数据。

## 2 数据处理方法

#### 2.1 数据预处理

涡度相关数据用 EdiRe<sup>[8]</sup>软件处理后,实现了 二次坐标旋转修正、超声虚温订正和空气密度脉动 订正等,且由于地势平坦,忽略地形的影响。本研究 选用稻季(2013 年 6 月 26 日—10 月 25 日)连续观 测的 30 min 通量数据进行分析,剔除降雨时段及降 雨前后 1 h 的通量数据<sup>[9]</sup>和夜间湍流不充分混合引 起的潜热通量低估数据。研究表明,摩擦风速 $u^*$ 能 够作为度量湍流混合强度的指标,因此选择大于一 定阈值 $u^*$ 的通量数据用以处理和分析,可以减少通 量数据的不确定性<sup>[10-11]</sup>。本研究选择 $u^* = 0.1$  m/s 作为摩擦风速临界值<sup>[12]</sup>(通常取 0.1~0.3 m/s),剔 除 $u^* < 0.1$  m/s 的通量数据。

涡度相关数据插补延长方法主要有<sup>[13]</sup>:平均日 变化法、根据特定气象条件查表法和非线性回归法。 本文对于短时间内(小于3h)的缺失数据直接采用 线性内插法;对于较长时间(大于3h)的缺失数据 用平均日变化法(MDV)、以10d(依不同作物不同 生育期取7~14d)为窗口的相邻数据变化规律进行 插补<sup>[6,13]</sup>。

#### 2.2 能量平衡方程

在运用涡度相关技术测定农田物质和能量通量

系统中,能量平衡基本公式可表示为[14]

$$LE + H_s = R_n - G_s - S - Q \tag{1}$$

*R<sub>n</sub>*——净辐射量,为太阳总辐射量与地面反 射的差额,W/m<sup>2</sup>

- G,——土壤热通量,W/m<sup>2</sup>
- S----植被冠层热储量,W/m<sup>2</sup>

Q----附加能源项的总和,W/m<sup>2</sup>

通常将式(1)的左端项称为标准湍流热通量, 右端项称为可利用能量或有效能量。在能量平衡计 算中,Q较小而常被忽略<sup>[15-16]</sup>,且对于水稻等冠层 高度小于8m的低矮作物,S也常被忽略<sup>[17]</sup>。由此, 稻田能量平衡方程可简化为<sup>[18]</sup>

$$LE + H_s = R_n - G_s \tag{2}$$

#### 3 结果与分析

#### 3.1 能量通量各组分的典型日变化及分配特征

理论上地球表面能量收入与支出应当维持平 衡,但实际上不同的生态系统由于自然气候环境、下 垫面性质以及研究的天气背景不同,地表热量交换 也存在差异。为分析亚热带南部季风气候条件下水 稻生育期地表各主要能量分量(净辐射量、感热通 量、潜热通量和土壤热通量)的日变化特征,选择生 育期中典型晴天与阴天的个例进行分析,探讨各通 量的日变化特征。

3.1.1 典型晴天能量各通量的变化及分配特征

选择 2013 年 7 月连续晴天中的一天(2013 年 7 月 18 日)为典型晴天的观测资料(图 1a)。可见,亚热带 南部季风气候区节水灌溉稻田能量平衡各分量呈显著 的日变化,典型晴天能量平衡各分量均呈明显的倒"U" 型单峰变化趋势,变化规律也基本保持一致。





Fig. 1 Diurnal variation of energy balance components in typical sunny day and cloudy day of rice growth

(a) 典型晴天
(b) 典型阴天

典型晴天净辐射量夜间为负值且变化小,日出后变为正值,即转变为地表能量的收入项,之后随着太阳辐射的增强而增大,日峰值约为 786 W/m<sup>2</sup>,出现时间在 12:30 左右,然后逐渐减少,日落后又变为负值。全天约 1/2 的时间表现为净辐射能量的损失,平均净辐射通量为 207 W/m<sup>2</sup>。

潜热通量日变化幅度明显大于感热通量,两者 日峰值分别为456 W/m<sup>2</sup>和81 W/m<sup>2</sup>,可知该试验区 水分条件较好,土壤含水率较高,农田蒸散作用较 强,水稻生长期净辐射量能主要用于地面向上的水 汽输送。湍流通量日变化趋势与净辐射量相似,但 因间歇性湍流传输所致<sup>[19]</sup>,其日变化曲线均不如净 辐射量平滑,潜热通量尤为明显。与净辐射量相比, 潜热、感热通量峰值都有一定的滞后性,滞后时长约 0.5~1.5 h。潜热通量全天均为正值,说明无论昼 夜稻田下垫面均存在蒸散发现象,感热通量白天为 正夜间为负,与净辐射量进程相似,主要用于大气增 温。

土壤热通量在典型晴天的峰值大小与变化趋势 均与感热通量相似,峰值79.6 W/m<sup>2</sup>,但峰现时间有 明显的滞后性,较净辐射量滞后1.5~2.0 h。土壤 热通量夜间为负值,白天在日出后一段时间由负变 为正值,日落后变为负,说明土壤热通量与温度、净 辐射量等有关。从全天24 h 来看土壤向外输送热 量的时间略多于吸收热量的时间,但日均值 2.85 W/m<sup>2</sup>为正,整体上表现为吸收热量。

3.1.2 典型阴天能量各通量的变化及分配特征

9月5日—9月8日为持续阴天,典型阴天观测 资料选择2013年9月7日(图1b)。与水稻种植期 间大多数阴天日变化规律相似,典型阴天条件下日 照时数为零,能量平衡各分量也都呈单峰型变化趋 势,但日均值和峰值均小于晴天条件下,且净辐射量 和湍流通量变化曲线均不如晴天条件下平滑。阴天 能到达地表的太阳辐射大大减少,因而地面净辐射 量减少,地面温度降低,地面热传导和水汽蒸发也变 缓,随之感热和潜热通量降低,向下传到土壤的热通 量也相应减小。

典型阴天净辐射量平均值为 57 W/m<sup>2</sup>,最大值 为 352 W/m<sup>2</sup>,夜间为负值且变化小,日出后变为正 值,变幅不到晴天时的 1/2,峰现时间约为 11:00,然 后逐渐减少,日落后又变为负值。潜热通量日变化 幅度大于感热通量,两者日变化趋势均与净辐射量 相似,但没有明显的滞后性。阴天潜热通量同样全 为正值,感热通量只有在正午时段出现短时间的正 值,说明随着净辐射量的减弱,稻田系统开始从大气 吸收热量,而大气则表现为降温。土壤热通量在阴 天并没有随着净辐射量的波动而波动,其值变化幅 度小而平缓,但较净辐射量存在明显的滞后性。土 壤热通量仅在午后一段时间内为正值,与典型晴天 不同,日均值为负,且小于感热通量,说明全天 24 h 中多于 2/3 的时间土壤降温,并向大气释放热量。

## 3.2 稻季能量通量的月均日变化及分配特征

图 2 是将水稻生育期间各月份(7—10 月份)从 00:00~24:00 每日 48 个时次的 30 min 平均值再平 均得到湍流通量和有效能量各分量的月均日变化 图。

 $R_n \ H_s \ LE 和 G_s 都是倒"U"型单峰曲线(图 2)。$  $R_n \ G_s 和 H_s 均在白天为正夜间为负,且从夏季到秋季 3 个通量值为正的时间逐渐缩短,但无论白天还是夜间 LE 值均为正。7—10 月份 <math>R_n$  均值分别为 181、143、95、63 W/m<sup>2</sup>,峰值分别为 694、607、457、 378 W/m<sup>2</sup>,  $R_n$  从大到小依次为:7 月份、8 月份、9 月份、10 月份。LE 与其变化规律一致,7—10 月份月均值分别为 143、130、83、60 W/m<sup>2</sup>,相应稻田蒸散强度平均为 5.04、4.58、2.93、2.12 mm/d,其变化趋势与高志球等<sup>[20]</sup> 对南方稻田蒸散量的观测结果一致。随着水稻的生长, $H_s$ 变化于 - 25 ~ 49 W/m<sup>2</sup>,没有明显的月变化特征。G\_s 月均值逐渐减小,分别为 11、 3、-2、-7 W/m<sup>2</sup>,即随着水稻生长, $R_n$ 减弱,叶面积指数增加,地表直接接受的太阳辐射量减少,土壤由

.m\_2

量通量/(W·

22





吸收热量转变为热源对大气起加热作用。各月份  $R_n$ 与 $H_s$ 均在正午11:00~12:00时达到最大值,同 步性较好,但 LE 和  $G_s$ 的日最大值相对于 $R_n$ 有不同 程度的滞后,LE 滞后约 0.5 h, $G_s$ 滞后 1.5~2.5 h。

#### 3.3 稻季能量各组分占净辐射量的比例

表3给出了稻季能量分量占净辐射量的比例, 节水灌溉水稻生长期间潜热通量、土壤热通量和感 热通量占净辐射量的比例依次减小,分别为 86.2%、1.3%和0.8%,能量残余项约占净辐射量 的11.7%。整个水稻生育期,LE均大于H<sub>3</sub>,且差异 十分显著,表明节水灌溉稻田生态系统的净辐射量 消耗以潜热输送加湿大气为主,这主要由于亚热带 南部季风区降水丰富,气候湿润,稻田土壤含水率 高,蒸散作用较强。这与黄土高原半干旱地区以及 敦煌干旱地区地气间以感热交换为主的规律相 反<sup>[21-22]</sup>,与一般稻田规律相同,但LE与H<sub>3</sub>的差异 较一般稻田更为显著。

#### 表 3 稻季能量各组分占净辐射量的比例

## Tab. 3 Ratios of each of energy balance component to energy radiation during rice season

参数	7月份	8月份	9月份	10月份	平均
降水量/mm	63.2	31.6	154.9	210.9	115.2
叶面积指数	2.9	8.3	7.3	5.8	6.0
$LE$ 占 $R_n$ 百分比/%	78.8	91.3	87.2	95.2	86.2
$H_s$ 占 $R_n$ 百分比/%	3.9	-4.2	2.2	1.0	0.8
$G_s$ 占 $R_n$ 百分比/%	6.0	2.2	-2.2	- 8.9	1.3
D 占 R <sub>n</sub> 百分比/%	11.4	10.7	12.8	12.8	11.7
$(H_s + LE)$ 占 $R_n$ 百分比/%	82.6	87.0	89.4	96.2	88.8

随着水稻生长,湍流通量之和 H<sub>s</sub> + LE 占净辐

射量 R, 的百分比从 82.6% 逐渐增加到 96.2%, 但  $G_{R_{a}}$ 值呈下降趋势,由7月份平均值6%逐渐下降 到10月份的-8.9%。说明虽然是节水灌溉稻田, 但水稻生长期间地表仍处于过湿状态,水分供给充 足,土壤含水率变化对能量分配影响很小,所以水稻 自身生长情况和气象条件成为控制能量分配的主要 因子。观测发现,10月份 LE/R。值最大,8月份次 之,7月份最小。可能因为10月份降雨量最大,土 壤水分充足,棵间蒸发量大;8月份叶面积指数最 大,作物蒸腾强度大;7月份属水稻生长初期,叶面 积指数较小,作物腾发量小。潜热通量与降雨量和 叶面积指数呈正相关<sup>[23-25]</sup>,是田间蒸腾蒸发量的直 接反映。但目前试验研究还不能区分棵间蒸发和作 物蒸腾,今后如何分别测算将是研究南方节水灌溉 稻田需水规律和水分利用效率的关键。H\_/R\_的稻 季变化特征与 LE/R,相反,潜热通量与感热通量占 净辐射量的比例呈现出此消彼长的关系,这与贾志 军等观测结果一致<sup>[3]</sup>。另外,除 $H_s$ 、LE和 $G_s$ 外的能 量残余项(D)占净辐射量的比例在9、10月份相同, 大于7、8月份,可能由于随着水稻生长,被忽略的冠 层热储量和大气热储量以及其他能量消耗(如水稻 光合作用产生的生物化学能等)明显增加所致。

# 4 讨论

#### 4.1 忽略的热储量对稻田能量平衡的影响

本文分析能量通量特征和规律时忽略了冠层热 储量、土壤热通量板到地表间的土壤热储存以及地 表水层热储量。

稻田冠层热储量(S)是从土壤表面到冠层顶端

高度 h。范围内,空气和植物中所储存的热量, 月日[26-27]

$$S = S_a + S_{\lambda} + S_{p}$$
(3)  
式中  $S_a$ ——冠层内感热通量  
 $S_{\lambda}$ ——冠层内潜热通量

一冠层内作物叶、枝干等的热储量  $S_n$ -

式(3)中考虑了地表土壤热通量到冠层顶部的 所有热传输,但由于水稻冠层高度小于1m,其温、 湿度随高度变化很小,且观测资料有限,所以计算 S\_S,时,高度变化简化为2层,即土壤表面和冠层 表面。本研究由于缺乏树叶和树枝干等生物温度观 测数据,因此在计算冠层热储量时,冠层内叶热储量 和枝干热储量 S。没有考虑。经计算水稻生育期 S 在-10~10 W/m<sup>2</sup>范围内变动,占地气能量交换的 极少部分(约2%),通常小于测定主要成分时的实 际误差<sup>[28]</sup>,且 Wilson 等<sup>[17]</sup>也曾指出,当冠层高度超 过8m时,冠层热储量对能量平衡闭合度有较大的 影响,即当冠层高度低于8m时影响较小,所以本研 究中冠层热储量忽略不计。

涡度相关系统 HFP01SC 土壤热通量板埋在地 下 8 cm 深处,因此,在能量平衡方程中,地表土壤热 通量不仅指土壤热通量板测定的热通量,还应包括 土壤热通量板到地表的土壤热储存,即<sup>[22,29-31]</sup>

$$G_0 = q + G_t + G_w \tag{4}$$

 $G_0$ ——校正到地表的土壤热通量, W/m<sup>2</sup> 式中

> q-----土壤热通量板到地表的土壤热储量,  $W/m^2$ G.,--水体热储存,W/m<sup>2</sup> 140 120 ·.m<sup>-2</sup>) 100 ́Ч Ш 80 量通量/(W· 60 . 通量/(W· 40 20 ìA 칠고 22 -40'15:00 18:00 21:00 24:00 12:00时刻 (a) 140 120 100 (m<sup>-2</sup>) 能量通量/(W·m<sup>-2</sup>) 80 60 能量通量/(W· 40 20 -20 40 60 00:00 03:00 06:00 09:00 12:00 15:00 18:00 21:00 24:00 时刻 (c)

> > (a)7月份 (b)8月份 (c)9月份 (d)10月份

$$q = \Delta T C_s d/t \tag{5}$$

**式**中  $\Delta T$ ——土壤热储量输出间隔时间内的温度 变化量,℃

*C*,——实际(潮湿)土壤热容量,J/(g·℃)

d----通量板埋深, cm

t----通量输出间隔时间,s

本试验间隔时间为 30 min。其中, C, 不便直接 测量,可计算得到[33],公式为

$$C_s = \rho_b C_d + \theta_v \rho_w C_w \tag{6}$$

 $\rho_b$ ——土壤容重,g/cm<sup>3</sup> 式中

- *C*<sub>4</sub> 干土土壤热容量,取0.84 J/(g·℃)<sup>[34]</sup>
- θ,——按体积计算的土壤含水率,由 CS616 土壤水分传感器测得

 $\rho_{w}$ ——水的密度,g/cm<sup>3</sup>

*C<sub>w</sub>*——水的热容量,取4.19 J/(g·℃)

图 3 为 7—10 月份 G 和 G 的月份平均日变化, 可以看出地表土壤热通量不仅相位超前于8 cm 埋 深热通量约0.5~1.5h,而且变化幅度也明显较 8 cm 埋深大。7—10 月份, G. 变化范围在 - 18.8 ~ 52.6 W/m<sup>2</sup>之间,  $G_0$ 在 - 39.6 ~ 118.8 W/m<sup>2</sup>之间。  $G_0$ 与 $G_2$ 差,说明0~8 cm 深的土壤热储量对地表 能量平衡闭合率有一定的影响,在分析地表能量平 衡特征时,须准确获取地表的土壤热通量才能较好 地解决其同步性问题。本文主要是分析各能量通量 的变化规律与特征,对闭合度问题没有进行深入的 分析,所以对能量闭合程度的修正以及修正方法的 选择将是下一步研究的重点。



#### 4.2 不同指标对稻田能量平衡闭合度的评价

可靠的通量数据资料能准确分析通量变化规 律,反映蒸散发与土壤水分状况的相互制约关系,也 是研究地表能量分配、农田水分时空分布、近地表蒸 发以及潜、感热交换等规律的基础。目前,原始数据 分析、稳态测试、大气湍流统计特性、谱分析与能量 闭合评价等方法都被用于评价通量观测的数据质 量<sup>[35]</sup>。其中能量平衡闭合程度作为地面与大气之 间能量交换的一个重要约束条件,能够直接影响地 面温、湿度,改变土壤-植被-大气之间的水分输送与 交换<sup>[36]</sup>,已成为被国内外学者广泛接受的评价数据 质量与可靠性的参考指标<sup>[37]</sup>。

能量平衡比率(EBR)是评价能量闭合程度的 常用方法之一<sup>[38]</sup>,以 EBR 计算所得该试区 2013 年 稻季能量闭合率为0.882。图4体现了稻季以 30 min 为步长的 EBR 日内变化情况,结果显示,白 天的能量闭合程度明显好于夜间,下午的闭合情 况又稍好于上午,EBR 最大值出现在16:00 左右。 产生这种现象,是因为白天上午随着太阳辐射量 的增加,空气温度和土壤温度经历了一个持续加 热的过程,午后温差没有上午剧烈,相对较稳定, 因此能量平衡处于一个稳定的较高状态。16:00 过后的一段时间内,能量还出现了"过闭合"现象, 本文推测可能由于水稻长势茂盛,蒸发蒸腾作用 强烈,垂直输送剧烈,使涡度相关法测量的湍流通 量瞬时值差异较大,较难得到一个稳定值,目所测 各能量分量与净辐射量的时间不同步[3,39],后续研 究将检验这一推测。此外,在日出和日落时段能 量闭合状况波动较大,因为在该稻田下垫面的涡 度相关系统观测中, $H_{\odot}$ LE 代表近地层通量, $R_{s}$ 为 冠层上方观测量, $G_s$ 为地表下8 cm深度观测量, $G_0$ 为 G.加上 0~8 cm 土壤热储存但未考虑相位转换 滞后的土壤热通量,观测中能量各分量不在一个 平衡面上,就会导致观测量在时间和空间上的不 同步,再加上日出日落时温差大,大气湍流不稳定 且存在平流,测量瞬时值易变且准确性较低,更加 剧了此时的能量不平衡度。夜间 EBR 值又恢复平 稳但为负,超出了正常范围0~1,说明能量平衡比 率已不再适用于衡量夜间能量闭合度,但由其稳



定的分布趋势推测可能是涡度相关仪观测夜间通量时出现了系统性的偏差,或者忽略了试验稻田存在的某一稳定的附加能源,又或是忽略的冠层热储量、0~8 cm 土壤热储量及热通量板上的热储量等引起 *G*。等的损失,造成湍流能量和可利用能量收支不一致。

能量平衡残差(D)的正负大小不仅可以体现能 量平衡过程中不闭合与过闭合的变化特征,还反映 了不同时间上的能量不平衡程度。由图5分析发 现,水稻生长期内,日出时和午后15:00-16:00,地 表能量闭合程度最高,能量不闭合与过闭合呈规律 性的日内交替变化。郭建侠等<sup>[39]</sup>、岳平等<sup>[15]</sup>分别 在研究玉米生育期和草原生长期能量平衡特征时发 现了类似规律,但与其结果相比,水稻生育期 D 值 变化幅度最大(-129~260 W/m<sup>2</sup>),表明水稻生长 期的能量闭合情况较玉米、草原生长期差。由图5 还可看出,各能量分量的相位变化都与 R<sub>a</sub>不一致, 无论是起波时间、峰现时间还是回落时间,H、LE都 滞后于  $R_{1}$ 约 0.5 h,  $G_{2}$ 又滞后于  $H_{1}$ 和 LE 约 1 ~ 2 h, 原因在于能量转化和传输都存在着时间消耗,同步 计算的能量分量并不是对同一时段净辐射量的响 应。已有文献<sup>[40-41]</sup>中也有类似的研究结果,由此推 测,能量分量时间尺度不匹配,可能是导致所测能量 不平衡的重要原因之一。但对于整体 EBR 和 D 值, 因当天有效能量和湍流能量数据总和都没有发生变 化,因此总体 EBR 和 D 值均保持不变,即能量转化 滞后修正后只能提高能量的短期闭合率。

本文对以上通量特征和规律的分析与判断依赖 于涡度数据的质量,涡度数据质量的好坏又体现在 能量平衡闭合度的高低。然而,不同评价指标对亚 热带南部季风区节水灌溉稻田能量平衡闭合度的评 价结果不尽相同。用能量平衡比率评价不闭合程度 仅12%,低于 FLUXNET 和 ChinaFLUX 站点的平均 能量不闭合度 20% 和 27%,这在一定程度上说明用 涡度相关法观测节水灌溉稻田生态系统能量通量较 其他生态系统以及普通稻田生态系统能量通量较 其他生态系统以及普通稻田生态系统能量通量较 其他生态系统以及普通稻田生态系统和更高的可靠 性。但用能量平衡残差分析该试验区能量闭合状况 时发现,虽然全天 *D/R*<sup>a</sup>较小,但白天不闭合程度和 夜晚过闭合程度均较高。所以,今后应如何选择适 当的评价指标,在确保涡度数据质量的前提下,准确 分析、解释能量各通量特征和变化规律都有待进一 步探索。

# 5 结论

(1)亚热带南部季风区节水灌溉稻田典型晴天 以及水稻生育期间各月份能量平衡各分量日均值均



Fig. 5 Monthly averaged diurnal variations of *D* and energy balance components from July to October (a) 7 月份 (b) 8 月份 (c) 9 月份 (d) 10 月份

呈明显的倒"U"型单峰变化趋势,典型阴天呈倒 "V"型变化趋势。典型阴天能量平衡各分量日均值 和峰值均小于典型晴天,净辐射量和湍流通量变化 曲线均不如晴天条件下平滑。R<sub>n</sub>、LE和G<sub>s</sub>月均值 由大到小均依次为7月份、8月份、9月份、10月份, H<sub>s</sub>没有明显月变化特征。

(2)不同时间尺度上亚热带南部季风区稻田净 辐射量都主要以潜热形式加湿大气。稻季潜热通量 占净辐射量的86.2%,与降雨量和叶面积指数呈正 相关。感热通量仅占净辐射量的0.8%,与潜热通 量差异显著,且潜热通量与感热通量占净辐射量的 比例呈此消彼长的关系。土壤热通量占净辐射量的 1.3%,7—10月份逐渐减小,水稻生长期间土壤含 水率变化对湍流能量分配影响很小,水稻自身生长 情况和气象条件是控制湍流能量分配的主要因子。

(3)不同时间尺度上净辐射通量、感热通量、 潜热通量和土壤热通量的起波时间、峰现时间和 回落时间均不同。与净辐射量相比,感热、潜热通 量滞后约 0.5 h,土壤热通量滞后 1.5~2.5 h。各 通量热传输速度不同步,是影响能量平衡闭合度 的重要原因。

参考 文 献

汪瑛. 稻田和旱地湍流通量的观测试验与模拟[D]. 北京:中国气象科学研究院,2003.
 Wang Ying. The observation and simulation of turbulence fluxes over rice paddy and dry farming land [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences,2003. (in Chinese)

- 2 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,2007,23(8):536-539. Zhu Yongli, Wu Jinshui, Hu Jingliang, et al. Energy balance closure at rice paddy fields in subtropical region [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2007,23(8):536-539. (in Chinese)
- 3 贾志军,张稳,黄耀. 三江平原稻田能量通量研究[J]. 中国生态农业学报,2010,18(4):820-826. Jia Zhijun, Zhang Wen, Huang Yao. Analysis of energy flux in rice paddy in the Sanjiang plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(4):820-826. (in Chinese)
- 4 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.
- 5 Daniele Masseroni, Arianna Facchi, Marco Romani, et al. Surface energy flux measurements in a flooded and an aerobic rice field using a single eddy-covariance system [J]. Paddy and Water Environ, 2014: 1 - 20.
- 6 王尚明,胡继超,吴高学,等. 亚热带稻田生态系统 CO<sub>2</sub>通量特征分析[J]. 环境科学学报,2011,31(1):217-224. Wang Shangming, Hu Jichao, Wu Gaoxue, et al. Characteristic analysis of CO<sub>2</sub> fluxes from a rice paddy ecosystem in a subtropical region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(1):217-224. (in Chinese)
- 7 彭世彰,徐俊增,丁加丽,等.节水灌溉条件下水稻叶气温差变化规律与水分亏缺诊断试验研究[J].水利学报,2006, 37(12):1503-1508.

- 8 王介民. 涡动相关通量观测指导手册(Ver. 20120212) [Z/OL]. http://westdc.westgis.ac.cn/water/surveystd, 2012.
- 9 陈琛. 淮河流域农田生态系统能量平衡与闭合研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2012. Chen Shen. Observational study of surface energy balance and energy closure in the farmland ecosystems in Huaihe River Basin [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- 10 Anthoni P M, Freibauer A, Kolle O, et al. Winter wheat carbon exchange in Thuringia, Germany [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(1): 55-67.
- 11 Peter M Anthoni, Annette Freibauer, Olaf Kolle, et al. Turbulent flux measurements above and below the overstory of a boreal aspen forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 121(1):55-67.
- 12 朱咏莉. 亚热带稻田生态系统 CO<sub>2</sub>通量研究[D]. 杨凌:中国科学院研究生院, 2005. Zhu Yongli. Carbondioxide exchange between paddy ecosystem and the atmosphere in the subtropical region[D]. Yangling: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
- 13 Falge E, Baldocchi D, Olson R. Gap filling strategies for long term energy flux data sets [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4):71-77.
- 14 Aston A R. Heat storage in a young eucalypt forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1985, 35(1): 281-297.
- 15 岳平, 张强, 牛生杰, 等. 半干旱草原下垫面能量平衡特征及土壤热通量对能量闭合率的影响[J]. 气象学报, 2012, 70(1): 136-143.
- Yue Ping, Zhang Qiang, Niu Shengjie, et al. Characters of surface energy balance over a semi-arid grassland and effects of soil heat flux on energy balance closure [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2012,70(1):136-143. (in Chinese)
- 16 Arya P S. Introduction to micrometeorology[M]. Access Online via Elsevier, 2001.
- 17 Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1): 223-243.
- 18 Kato T, Tang Y, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 124(1): 121-134.
- 19 Zhang J H, Ding Z H, Han S J, et al. Turbulence regime near the forest floor of a mixed broad leaved/Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. Journal of Forestry Research, 2002, 13(2): 119-122.
- 20 高志球, 卞林根, 陆龙骅, 等. 水稻不同生长期稻田能量收支 CO2通量模拟研究[J]. 应用气象学报, 2004, 15(2): 129-140.
- 21 Qiang Z, Xiaoyan C. The influence of synoptic conditions on the averaged surface heat and radiation budget energy over desert or Gobi[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences: Chinese Edition, 2003, 27(2): 245-254.
- 22 岳平,张强,杨金虎,等. 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6866-6876. Yue Ping, Zhang Qiang, Yang Jinhu, et al. Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(22): 6866-6876. (in Chinese)
- 23 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.
- 24 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.
- 25 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.
- 26 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社, 1994:37-39.
- 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,2004, 34(Supp.2):46-56.
- 28 秦钟. 华北平原农田水热、CO2通量的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005. Qin Zhong. Studies of water, heat and CO2 fluxes over a crop field in the North China Plain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- 29 Heusinkveld B G, Jacobs A F G, Holtslag A A M, et al. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 122(1): 21-37.
- 30 莫兴国,李宏轩,刘苏峡,等.用土壤温度估算表层土壤导温率与热通量的研究[J].中国生态农业学报,2002,10(1): 62-64.

Mo Xingguo, Li Hongxuan, Liu Suxia, et al. Estimation of the soil thermal conductivity and heat flux in near surface layer from soil temperature [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2002,10(1):62-64. (in Chinese)

31 窦兆一. 涡度相关法观测数据的质量评价和质量控制[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2009.

Dou Zhaoyi. QC and QE of dates come from eddy-correlation method [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)

- 32 Heitman J L, Horton R, Sauer T J, et al. Latent heat in soil heat flux measurements [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(7): 1147-1153.
- 33 Jury W A, Gardner W R, Gardner W H. Soil physics [M]. US: John Wiley and Sons, Inc., 1991.
- 34 Hanks R J, Ashcroft G L. Applied soil physics: soil water and temperature applications[M]. Germany: Springer, 1980.

- 35 温学发,于贵瑞,孙晓敏,等.复杂地形条件下森林植被湍流通量测定分析[J].中国科学:D辑,2004,34(增刊2):57-66. Wen Xuefa, Yu Guirui, Sun Xiaomin, et al. Analysis on measure of forest turbulent flow under complex terrain condition[J]. Science in China: Series D, 2004, 34(Supp.2):57-66. (in Chinese)
- 36 谢五三,田红,童应祥,等. 基于淮河流域农田生态系统观测资料的通量研究[J]. 气象科技,2009,37(5):601-606. Xie Wusan, Tian Hong, Tong Yingxiang, et al. Flux of cropland ecosystem in Huaihe River Basin[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(5):601-606. (in Chinese)
- 37 Verma S B, Baldocchi D D, Anderson D E, et al. Eddy fluxes of CO<sub>2</sub>, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1986, 36(1-2): 71-91.
- 38 刘渡,李俊,同小娟,等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田能量闭合状况分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 493 499.

Liu Du, Li Jun, Tong Xiaojuan, et al. Analysis of the energy balance closure in a winter wheat /summer maize double cropping system in the north China plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 493-499. (in Chinese)

39 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, 2008, 38(9): 1103-1111.

Guo Jianxia, Bian Lin'gen, Dai Yongjiu. The characteristics and analysis of surface energy balance closure in different temporal scales at the stage of corn growth [J]. Science in China; Series D, 2008, 38(9); 1103 – 1111. (in Chinese)

- 40 Berliner P R, Zangvil A, Ben-Dor E. Soil water evaporation during the dry season in an arid zone [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, 109(D16103):1-10.
- 41 Oncley S P, Foken T, Vogt R, et al. The energy balance experiment EBEX 2000. Part I: overview and energy balance [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 123(1): 1-28.

#### (上接第67页)

- 7 徐立章,李耀明,马朝兴,等. 横轴流双滚筒脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(11):55 58.
   Xu Lizhang, Li Yaoming, Ma Chaoxing, et al. Design and experiment of threshing and separating unit with double axial cylinder
   [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(11): 55 58. (in Chinese)
- 8 李耀明,徐立章,邓玲黎,等. 复脱分离装置的理论分析及试验[J]. 农业机械学报,2005,36(11):55-58. Li Yaoming, Xu Lizhang, Deng Lingli, et al. Theoretical analysis and experimental study on rethreshing and separation unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11):55-58. (in Chinese)
- 9 衣淑娟,陶桂香,毛欣.两种轴流脱粒分离装置脱出物分布规律对比试验研究[J].农业工程学报,2008,24(6):154-156. Yi Shujuan, Tao Guixiang, Mao Xin. Comparative experiment on the distribution regularities of threshed mixtures for two types of axial flow threshing and separating installation[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6):154-156. (in Chinese)
- 10 Miu P I, Kutzbach H D. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007,58(2): 93 - 99.
- 11 Miu P I, Kutzbach H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units. Part II. application to tangential feeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 105-109.
- 12 唐忠. 切纵流结构谷物脱粒分离理论与试验研究[D]. 镇江:江苏大学, 2013. Tang Zhong. Theoretical and experimental study of cereals threshing and separation tangential-longitudinal axial device [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)
- 13 Anil J, Guruswamy T, Desai S R, et al. Effect of cylinder speed and feed rate on the performance of thresher [J]. Journal of Agricultural Sciences, 1998(4): 1120-1123.
- 14 吴崇友,丁为民,张敏,等. 油菜分段收获脱粒清选试验 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 72 76.
   Wu Chongyou, Ding Weimin, Zhang Min, et al. Experiment on threshing and cleaning in two-stage harvesting for rapeseed[J].
   Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 72 76. (in Chinese)
- 15 王万中.试验的设计与分析[M].北京:高等教育出版社, 2004.
- 16 杜金萍. 模糊正交法在 GCr15 钢切削用量优化中的应用[J]. 轴承, 2007(3): 26-28.