

# 长江中下游地区稻田不同时间尺度 土壤热通量特征分析

陈东旭<sup>1</sup>, 黄萧霖<sup>1</sup>, 陈留根<sup>2</sup>, 张岳芳<sup>2</sup>, 郭智<sup>2</sup>, 郝璐<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;

2.江苏省农业科学院 农业资源与环境研究所, 南京 210014)

**摘要:**为了更好地掌握地表能量收支状况,基于江苏省农业科学院溧水试验基地稻田 2018 年 3 月—2019 年 2 月的土壤热通量( $G$ )、土壤温度( $T$ )、土壤含水量(VWC)以及净辐射(RN)观测数据进行不同时间尺度下  $G$  特征分析以及  $G$  与各因子间的相关性分析,探究了  $G$  在不同时间尺度和不同天气条件下的变化特征及其影响因素。结果表明:稻田  $G$  在半小时尺度上日变化呈“S”型。不同天气条件下,5 cm 与 10 cm 深度  $G$  日变化程度和日总量均为晴天>阴天>雨天。不同水稻种植季节 5 cm 与 10 cm 深度  $G$  日总量均为稻季前>稻季>稻季后。该研究区全年  $G$  总量为负值。在半小时、日以及月尺度上,RN 与  $G$  达到极显著相关;VWC 在半小时和日尺度上与  $G$  达到显著相关,但不同季节 VWC 对  $G$  的影响并不一致,在水稻生长季,VWC 与  $G$  呈正相关,在生长季之前及之后呈负相关;类似地, $T$  在日尺度和半小时尺度上与  $G$  达到极显著相关,且 5 cm 处  $T$  与  $G$  的关系最为密切。稻田生态系统中, $G$  存在明显日变化与季节变化,并且不同时间尺度  $G$  受不同因子的影响也不同。

**关键词:**长江中下游稻田;土壤热通量;净辐射;土壤温度;土壤含水量

中图分类号:S161.2<sup>+</sup>1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0151-08

## Analysis of Soil Heat Flux Characteristics at Different Time Scales in Paddy Fields in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River

CHEN Dongxu<sup>1</sup>, HUANG Xiaolin<sup>1</sup>, CHEN Liugen<sup>2</sup>, ZHANG Yuefang<sup>2</sup>, GUO Zhi<sup>2</sup>, HAO Lu<sup>1</sup>

(1.Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of

Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Institute of Agricultural

Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:**For the purpose of grasping the surface energy budget better, soil heat flux, soil temperature, soil water content and net radiation observation data from March 2018 to February 2019 in the paddy field of the Lishui Experimental Station were used to analyze the characteristics of soil heat flux on different time scales and the correlations between soil heat flux and various factors, and explore the characteristics and influencing factors on the soil heat flux in the paddy field on different time scales and under different weather conditions. The results showed that the diurnal variation of soil heat flux in the paddy field was ‘S’ type on the half-hour time scale; under different weather conditions, the diurnal variation and daily total amounts of soil heat flux at 5 cm and 10 cm depth followed the order of sunny days>cloudy days>rainy days; the daily total amounts of soil heat flux at 5 cm and 10 cm depth in different rice planting seasons followed the order of pre-growth season>growing season>post-harvest season; the total amount of soil heat flux in the study area was negative for the whole year; on half hour, day and month scale, net radiation was significantly correlated with soil heat flux; soil water content was significantly correlated with soil heat flux on half hour and daily scale, but the effect of soil water content on soil heat flux was not consistent at different times, during the rice growing season, soil water content was positively correlated with soil heat flux and negatively correlated

收稿日期:2020-07-13

修回日期:2020-09-18

资助项目:国家自然科学基金(41877151,41977409,42061144004)

第一作者:陈东旭(1995—),男,江苏如东县人,博士生,研究方向为应用气象。E-mail:1193463103@qq.com

通信作者:郝璐(1970—),女,内蒙古呼和浩特人,博士,主要从事应用气象研究。E-mail:haolu@nuist.edu.cn

before and after the growing season; soil temperature was significantly correlated with soil heat flux on the daily and half-hour scales, and the 5 cm soil temperature was most closely related to soil heat flux. In conclusion, in the paddy field ecosystem, soil heat flux has obvious diurnal and seasonal changes, and soil heat flux is affected by different factors on different time scales.

**Keywords:** paddy fields in the middle and lower reaches of the Yangtze River; soil heat flux; net radiation; soil temperature; soil water content

土壤热通量作为表征地表和深层土壤能量传输状况的特征量,是地表热量平衡的重要组成部分<sup>[1]</sup>。目前对于地表能量平衡的研究发现,所有的生态系统均存在能量无法闭合的现象,并且不同的生态系统由于地面条件相异,能量闭合程度也不同<sup>[2]</sup>。Masseroni 等<sup>[3]</sup>通过对土壤热通量进行修正,将水稻田的能量不平衡率减小到 10% 以下,说明土壤热通量显著影响着地表能量的闭合程度<sup>[4-5]</sup>。因此,深入研究土壤热通量的变化特征及其影响因素,不仅能更好地掌握地表能量的收支状况,同时也可为基于地表能量平衡开发的模型提供验证参数<sup>[6]</sup>。

不同生态系统由于下垫面条件不同,地表能量的收支状况也不一样,因此此前的研究基本依据不同生态系统进行土壤热通量的特征分析,主要集中在森林<sup>[7-8]</sup>、湿地<sup>[9-10]</sup>、沙漠<sup>[11-12]</sup>、草原<sup>[13]</sup>、农田<sup>[14-15]</sup>等生态系统。张利平等<sup>[7]</sup>研究分析了会同杉木人工林不同土层深度的土壤热通量特征,发现表层(10 cm, 20 cm)土壤热通量日变化呈“S”型,深层(45 cm)土壤热通量日变化没有明显规律;吕国红等<sup>[9]</sup>通过对盘锦芦苇湿地土壤热通量按季节进行分析得出,该地区不同深度的土壤热通量日均值呈春季>夏季>秋季>冬季;郝雅婕等<sup>[16]</sup>分析了元江干热河谷稀树灌丛土壤热通量与气象因子的关系,得出土壤热通量与总辐射和日照时数呈正相关,和土壤含水量呈负相关,且太阳总辐射成为该地区土壤热通量的主要影响因子。国内对于水稻田土壤热通量的研究并不少见,但大多是针对水稻田的能量闭合程度进行研究和模拟。刘笑吟等<sup>[17]</sup>发现南方节水灌溉稻田生态系统能量闭合程度较高,通量特征及规律具有较好的代表性,各能量分量在典型晴天和水稻季月均日变化均呈明显的倒“U”型单峰趋势,典型阴天各能量分量的月均日变化和晴天相似,但日均值和峰值均小于晴天。尽管研究涉及到水稻田土壤热通量的日变化特征,但仅仅是作为能量平衡分量加以介绍,仍缺乏对其系统深入的研究分析。

我国作为世界上最大的水稻生产国,稻田既是农田生态系统的主要组成部分<sup>[18]</sup>,同时也是陆地生态系统的重要部分。因此,深入研究长江中下游地区稻

田的土壤热通量变化特征及其影响因子,对掌握地表热量收支状况,为通量修正提供科学依据,提高能量闭合程度具有重要意义。

## 1 研究区概况

研究区位于江苏省农业科学院溧水试验基地,地处江苏省南京市溧水区白马镇(东经 119.2°,北纬 31.6°,海拔 39 m),占地面积 0.8 km<sup>2</sup>,基地试验用地大多为水稻田,灌溉水源源于白马湖水库<sup>[19]</sup>。基地位于长江中下游平原秦淮河流域,属东南沿海季风区,气候类型为亚热带季风气候,雨热同期,四季分明,降水丰沛,年降水量 1 048 mm,年均温 15.4℃,地貌多为丘陵,土壤为白浆土。研究区种植的水稻品种为“南粳 9108”,2018 年水稻的插秧时间为 6 月 13 日,6 月 23 日进入分蘖期,7 月 11 日进入拔节期,8 月 8 日进入抽穗期,8 月 11 日进入灌浆期,9 月 28 日进入成熟期,并于 10 月 12 日收获。2018 年其他时间及 2019 年 1 月、2 月该研究区均种植甘蓝,称甘蓝期。

## 2 数据与方法

本研究利用 CS616 土壤水分传感器测得的 45, 35, 15, 5 cm 深度处土壤含水量(VWC)半小时数据, HFP01 土壤热通量传感器测得的 5, 10 cm 深度土壤热通量( $G$ )半小时数据, TCAV 土壤温度传感器测得的 5, 10 cm 深度土壤温度( $T$ )半小时数据, CNR4 测得的半小时净辐射数据进行处理分析。因为试验期间仪器断电的原因,2018 年 3 月 1 日、2018 年 3 月 2 日、2018 年 6 月 12 日、2019 年 2 月 20 日这 4 天的数据缺失,因此剔除之后进行数据处理与分析。包括求取土壤热通量不同水稻种植季节的半小时均值并以此探究土壤热通量的日变化规律,以及分析不同时段(全年、稻季前、稻季、稻季后)、不同时间尺度(半小时、日、月)下土壤热通量与净辐射、土壤含水量、土壤温度之间的相互关系。求取半小时尺度下各因子相关性时样本量为 48×361,总计 17 328 个。在求取日尺度下各因子相关性之前,首先计算各因子的日总量,利用各因子日总量求出日尺度下各因子相关性,样本量为 361 个。接着在日总量的基础上计算各因

子每个月的月总量,进而求出月尺度下各因子相关性,样本量为 12 个。

研究时间内按不同季节划分为稻季(2018 年 6 月 13 日—2018 年 10 月 12 日)下垫面种植水稻、稻季前(2018 年 3 月 1 日—2018 年 6 月 12 日)下垫面种植甘蓝菜、稻季后(2018 年 10 年 13 日—2019 年 2 月 28 日)下垫面为裸地。选取 2018 年 7 月 13 日为典型晴天,2018 年 7 月 22 日为典型阴天,2018 年 8 月 27 日为典型雨天,对这 3 天的土壤热通量进行分析。并且依据降水数据,筛选出研究时段的全部雨天,取其半小时均值研究不同天气条件下土壤热通量的日变化特征。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同季节稻田土壤热通量日变化

在不同季节,同一深度的土壤热通量( $G$ )日半小时平均值大不相同(表 1),5 cm 和 10 cm 土壤热通量在稻季前和稻季为正,在稻季后为负,呈“稻季前>稻季>稻季后”。这主要因为稻季前处于春夏季节,热量条件较好,且下垫面种植甘蓝菜,植株矮小对辐射的影响较小,土壤能较好地接受地表传输的能量,故稻季前土壤热通量最大。尽管稻季也处于夏秋季节,热量条件较稻季前相差不大,但是稻季水稻生长过程中对太阳辐射的吸收和反射能力较强,尤其水稻生长旺季,植株茂密很大程度上减小辐射到达地面的热量,由此稻季土壤热通量受到较大影响明显小于稻季前土壤热通量。稻季后则处于秋冬季节,热量条件较差,主要由土壤向地表传输能量,所以土壤热通量为负值。从全年来看,能量主要由土壤向地表传输,土壤表现为“热源”。

表 1 不同季节稻田土壤热通量半小时均值

土层深度/cm	W/m <sup>2</sup>			
	稻季前	稻季	稻季后	全年
5	5.011	1.499	-6.904	-0.64
10	5.516	2.298	-7.879	-0.58

不同季节,不同深度(5 cm,10 cm)的土壤热通量日变化基本趋于一致,均呈“S”型分布,而净辐射(RN)的日变化基本呈倒“U”型分布(图 1)。白天,土壤热通量为正,说明大气向土壤传输能量,并且随着净辐射的增加,土壤热通量也随之增加,并在到达峰值后逐渐下降。白天净辐射与不同深度土壤热通量变化特征基本一致,二者呈极显著正相关(表 2—4)。但是,净辐射和两个深度(5 cm,10 cm)的土壤热通量到达峰值的时间并不相同,土壤热通量明显滞后于净辐射,10 cm 土壤热通量滞后于 5 cm 土壤热通量。并且因为水稻种植季节不同,土壤热通量滞后于净辐射的时间也不尽相同,稻

季前和稻季后 5 cm 土壤热通量滞后于净辐射时间为 2 h,稻季滞后时间为 1 h。而 5 cm 和 10 cm 土壤热通量二者的滞后时间差异不大,不同季节均小于 1 h(图 1)。这也证实了净辐射对土壤热通量的影响具有滞后性<sup>[20]</sup>,并且不同季节,地表与土壤下层之间的能量传输受到较大影响,但不同土层深度之间能量传输的差异并不大。在夜间,净辐射变为负值,大气温度降低,土壤通量也因此变为负值,能量传输方向与白天相反,由土壤下层向地表传输。

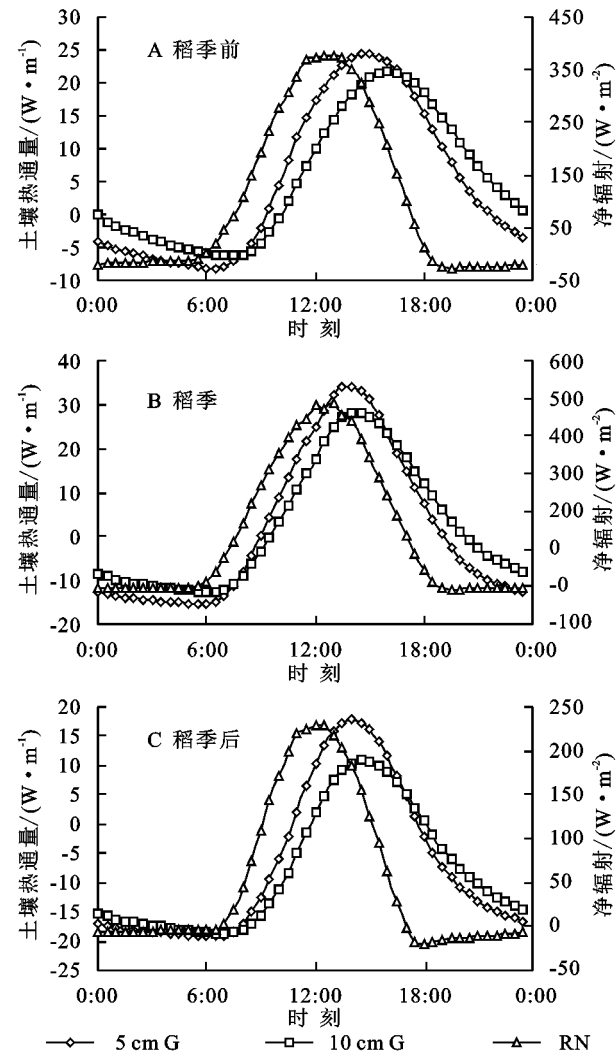


图 1 不同季节不同深度稻田(5 cm,10 cm)

土壤热通量与净辐射日变化

观察不同深度土壤热通量日变化发现(图 1),白天 5 cm 土壤热通量均大于 10 cm 土壤热通量,说明在白天气温较高,太阳辐射强,浅层土壤更容易接受大气输送的能量<sup>[21]</sup>,而能量在向深层土壤传输时逐渐递减。在傍晚和夜间,能量传输方向相反,5 cm 土壤热通量开始小于 10 cm 土壤热通量。稻季前和稻季后,5 cm 土壤热通量均在 17:00 开始小于 10 cm 土壤热通量,而在稻季这一时间被提前到 16:00。这主要因为稻季土壤含水量高于稻季前和稻季后,土壤

水分的储热作用加强,使得 10 cm 土壤热通量提前大于 5 cm 土壤热通量。

表 2 不同季节稻田半小时尺度上土壤热通量与各因子相关性

不同季节	因子	RN	T			VWC		
			5 cm	10 cm	45 cm	35 cm	15 cm	5 cm
稻季前	G <sub>5</sub>	0.546**	0.400**	0.319**	−0.122**	−0.031*	−0.103**	−0.074**
	G <sub>10</sub>	0.345**	0.485**	0.409**	−0.139**	−0.027*	−0.116**	−0.076**
稻季	G <sub>5</sub>	0.736**	0.505**	0.377**	0.202**	0.206**	0.236**	0.229**
	G <sub>10</sub>	0.615**	0.592**	0.469**	0.241**	0.248**	0.283**	0.273**
稻季后	G <sub>5</sub>	0.577**	0.296**	0.166**	−0.131**	−0.075**	−0.087**	−0.031*
	G <sub>10</sub>	0.426**	0.362**	0.234**	−0.141**	−0.043**	−0.097**	−0.01

注: \* 表示  $p$  在 0.05 上显著相关; \*\* 表示  $p$  在 0.01 上极显著相关。RN 为净辐射;  $T$  为土壤温度; VWC 为土壤含水量;  $G_5, G_{10}$  分别为 5 cm, 10 cm 深度的土壤热通量, 下表同。

表 3 不同季节稻田日尺度上土壤热通量与各因子相关性

不同季节	因子	RN	T			VWC		
			5 cm	10 cm	45 cm	35 cm	15 cm	5 cm
稻季前	G <sub>5</sub>	0.318**	0.360**	0.313**	−0.087	0.056	0.028	−0.126
	G <sub>10</sub>	0.257*	0.383**	0.334**	−0.061	0.087	0.044	−0.104
稻季	G <sub>5</sub>	0.458**	0.742**	0.705**	0.491**	0.522**	0.539**	0.506**
	G <sub>10</sub>	0.463**	0.752**	0.716**	0.499**	0.530**	0.550**	0.516**
稻季后	G <sub>5</sub>	0.200*	0.245**	0.194*	−0.313**	−0.193*	−0.340**	−0.269**
	G <sub>10</sub>	0.188*	0.293**	0.243**	−0.291**	−0.176*	−0.333**	−0.190*

表 4 月尺度上土壤热通量与各因子的相关性

因子	RN	T			VWC		
		5 cm	10 cm	45 cm	35 cm	15 cm	5 cm
G <sub>5</sub>	0.709**	0.568	0.554	0.246	0.239	0.226	0.34
G <sub>10</sub>	0.740**	0.609*	0.596*	0.276	0.273	0.243	0.365

3.2 不同天气条件下的土壤热通量日变化

晴天和阴天条件下,土壤热通量日变化(图 2A—B)基本一致,符合上文所说的“S”型分布,但雨天时土壤热通量变化较不规则(图 2C),这与王胜等<sup>[12]</sup>在戈壁地区研究结果类似。但从雨天土壤热通量半小时均值的日变化来看(图 2D),雨天的土壤热通量变化又较规则,符合上文所说的“S”型分布,这与吕国红等<sup>[9]</sup>在盘锦湿地的研究结果一致。王胜等<sup>[12]</sup>在戈壁地区的研究是选取典型日进行研究,而吕国红等<sup>[9]</sup>在盘锦湿地的研究则是利用 7 月份晴天、阴天、雨天土壤热通量的 1 小时均值进行分析。由此可见,在选取典型日进行分析时,土壤热通量容易受短时间天气的影响而不规则变化,但利用更多的数据资料进行均值分析时这种天气影响就会被弱化,由此使得土壤热通量在雨天条件下仍然符合“S”型日变化规律。

典型日分析结果表明,不同天气条件下土壤热通量的变化程度有明显差异(图 2)。对于 5 cm 处的土壤热通量,晴天条件下,土壤热通量于凌晨 5 : 30 时到达最低值 − 15.64 W/m<sup>2</sup>,并于 14 : 00 到达峰值 82.5 W/m<sup>2</sup>。阴天条件下,土壤热通量于 6 : 00 到达最低值

− 4.745 W/m<sup>2</sup>,并于 13 : 00 到达峰值 34.32 W/m<sup>2</sup>。雨天条件下,土壤热通量于夜间 2 : 00 到达最低值 − 14.57 W/m<sup>2</sup>,并于 14 : 30 到达峰值 12.71 W/m<sup>2</sup>。比较 3 种天气条件下土壤热通量的最大最小值可以看出,晴天的土壤热通量变化程度最大,而雨天的变化程度最小,这主要因为降水导致土壤含水量增多,改变了土壤热容量<sup>[22]</sup>,由此导致阴雨天的土壤热通量变化程度明显小于晴天土壤热通量的变化程度。

3 种天气条件下的土壤热通量日总量在数值上也有明显差异。晴天条件下,5 cm 和 10 cm 土壤热通量日总量分别为 532.7,631.4 W/m<sup>2</sup>;阴天条件下,5 cm 和 10 cm 土壤热通量日总量为 445.5,435.2 W/m<sup>2</sup>;雨天时,5 cm 和 10 cm 土壤热通量日总量为 − 242.7, − 199.3 W/m<sup>2</sup>,即“晴天 > 阴天 > 雨天”,这说明晴天的太阳净辐射更高,热量条件更好,阴雨条件下云量较多,太阳辐射容易被遮蔽和散射,因此到达地表的净辐射较少,由此导致不同天气条件下土壤热通量差距较大。

2.3 土壤热通量年内变化

土壤热通量的年内变化表明,5 cm 和 10 cm 的土壤热通量年内变化无明显差异。5 cm 和 10 cm 处



土壤热通量年内变化均表现为 3—8 月土壤热通量基本为正,9 月—翌年 2 月土壤热通量基本为负,这与该研究区全年的热量分布基本符合,3—8 月温度逐渐升高,能量由大气向土壤传输,9 月开始气温逐渐下降,至翌年 2 月能量均由土壤向大气传输(图 3)。但实际上,该研究区 9 月气温虽有所下降,但温度条件仍然较好,单单从气温的角度分析,9 月份的土壤热通量应仍以正值为主。张文斌等<sup>[11]</sup>在塔克拉玛干沙漠的研究表明 8 月、9 月气温较高,土壤热通量为

正值。本文中 9 月份的土壤热通量以负值为主,可能与 9 月为水稻灌浆期,水稻生长旺盛,植株茂密,减少了辐射到达土壤表面的热量,并且水稻生长也要吸收大量的热量,加之气温下降等三方面的原因导致 9 月土壤热通量基本为负值。从总量上看,本研究区 5 cm 和 10 cm 土壤热通量的年总量均为负值(表 1),且 10 cm 土壤热通量略微大于 5 cm 土壤热通量。说明从全年的角度出发,该研究区地表能量传输方向主要是由土壤向地表传输。

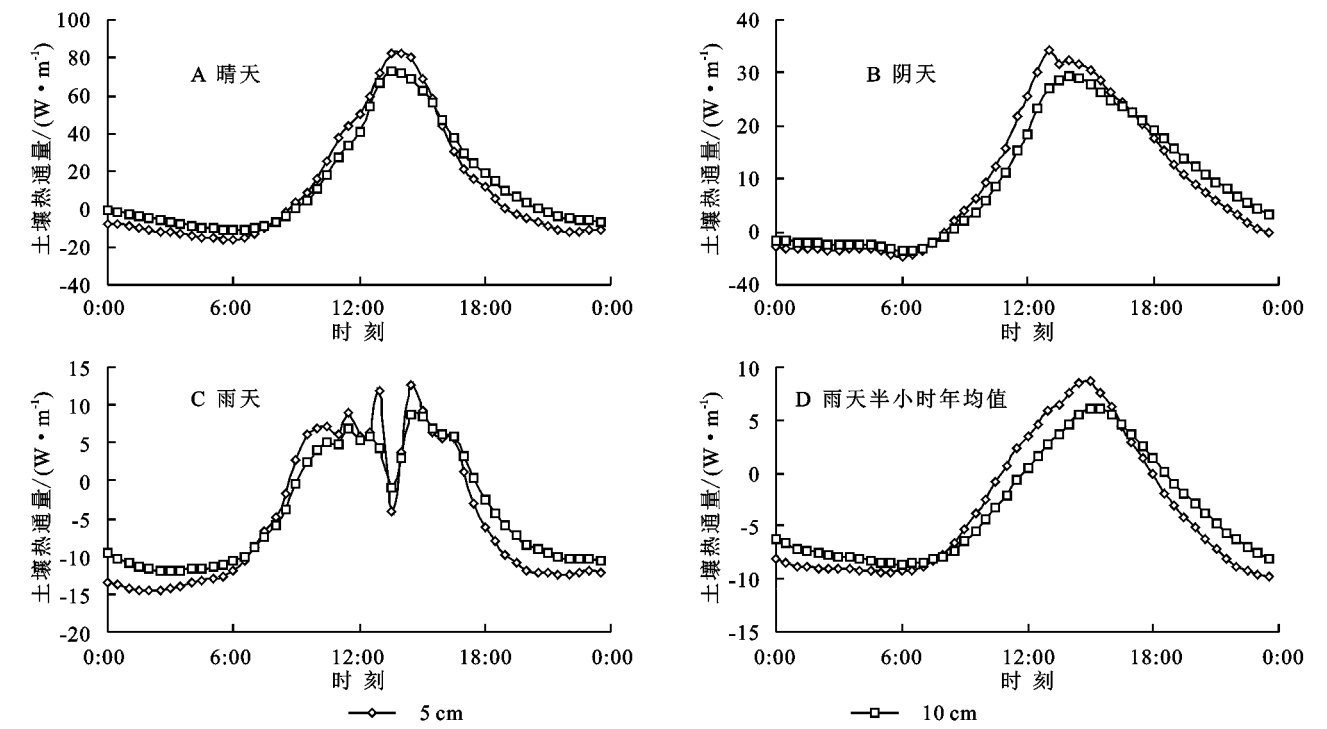


图 2 不同天气条件晴天、阴天、雨天与全年雨天半小时均值的土壤热通量日变化

### 3.4 不同时间尺度下土壤热通量和土壤含水量 (VWC) 的相关性分析

半小时尺度上,稻季前和稻季后,不同深度(5, 10 cm)土壤热通量与不同深度(5, 10, 35, 45 cm)土壤含水量均满足极显著负相关(除稻季后 5 cm 土壤含水量与 10 cm 土壤热通量未达到显著相关水平),最小相关系数(绝对值)为 0.027,最大相关系数达到 0.141;而在稻季,各个深度土壤含水量与土壤热通量均满足极显著正相关,最小相关系数为 0.202,最大相关系数达到 0.283(表 2)。

日尺度上,稻季前,各个深度土壤含水量与土壤热通量未达到显著相关水平;稻季,各个深度土壤含水量与土壤热通量均呈极显著正相关,最小相关系数为 0.491,最大相关系数达到 0.55;与此相反,稻季后,各个深度土壤含水量与土壤热通量均呈显著或极显著负相关,最小相关系数(绝对值)为 0.176,最大相关系数达到 0.34(表 3)。

月尺度上,不同深度土壤含水量与土壤热通量均未达到显著相关水平,即月尺度下土壤含水量对土壤热通量的影响并不显著(表 4)。

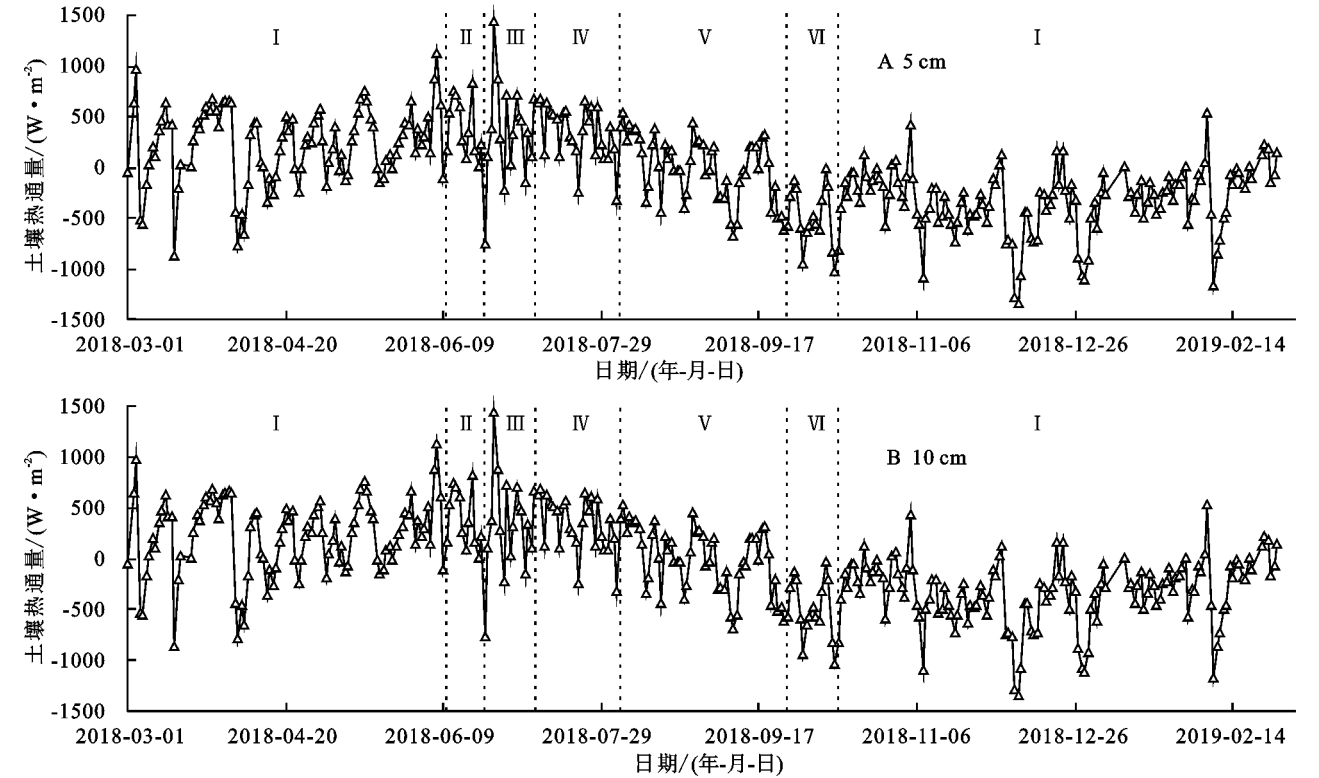
由上述相关性分析可知,无论是日尺度和半小时尺度,在水稻生长季(稻季),土壤含水量与土壤热通量均呈正相关,而在稻季前和稻季后二者呈负相关,这主要是因为稻季稻田存在灌溉水层,水层具有储热功能,使得土壤可以在气温下降时额外获得来自水层的热量,由此土壤热通量会有所上升,所以在稻季,土壤热通量与土壤含水量呈正相关。而在稻季前以及稻季后田间并不存在灌溉水层,土壤水分的储热作用则减弱了土壤与大气的热交换,所以土壤含水量与土壤热通量呈负相关。

### 3.5 不同时间尺度下土壤热通量和土壤温度 (T) 的相关性分析

在全年时段内,半小时尺度和日尺度上土壤热通量和土壤温度均满足极显著相关,但是在月尺度上,

相关性明显下降,5 cm 土壤热通量与土壤温度无相关性,10 cm 土壤热通量与土壤温度达到显著相关。可见,土壤热通量在半小时和日尺度上影响土壤温度,而在月尺度上土壤温度主要受净辐射的影响。在半小时尺度和日尺度上,无论是稻季前、稻季,还是稻季后,10 cm 土壤热通量与不同深度土壤温度(5 cm

和10 cm)的相关系数要大于5 cm的相关系数。而5 cm 土壤温度与不同深度土壤热通量(5 cm 和10 cm)的相关系数也要大于10 cm的相关系数。这说明土壤温度受到10 cm 土壤热通量的影响更大,且5 cm 的土壤温度与土壤热通量的关系最为密切,这与孙成等<sup>[23]</sup>在安吉毛竹种植区的研究结果一致(表2—3)。



注: I 为甘蓝期; II 为插秧至分蘖期; III 为分蘖期; IV 为拔节期; V 为抽穗、灌浆期; VI 为成熟期。

图3 5 cm,10 cm 处土壤热通量年内变化

一天内土壤温度和土壤热通量的变化特征基本一致(图4),这也说明在半小时尺度上土壤热通量显著影响土壤温度,并且从两者到达峰值的时刻上发现土壤温度总是滞后于土壤热通量。

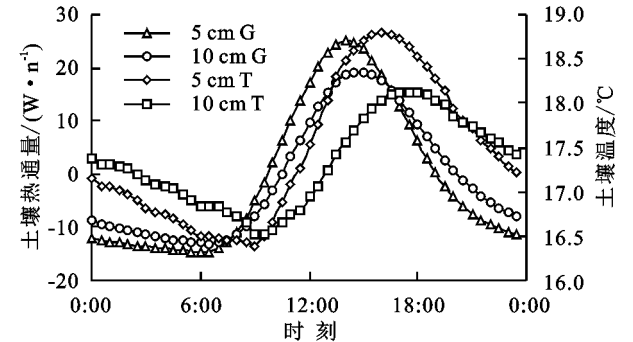


图4 半小时尺度上土壤热通量(G)与土壤温度(T)日变化

## 4 讨论

本研究通过分析长江中下游稻田土壤热通量在不同时间尺度下变化特征,我们发现土壤热通量的日变化符合“S”型分布,这与前人的研究一致。从年尺

度上看,本研究区全年的土壤热通量为负值,土壤表现为“热源”,这与在鼎湖山<sup>[24]</sup>和安吉<sup>[22]</sup>毛竹种植区的研究结果一致,但与大兴安岭原始林区<sup>[8]</sup>的研究结果相反,这主要是因为大兴安岭原始林区的环境为极端低温。

通过选取典型日和计算全年雨天土壤热通量半小时均值两种方法进行不同天气条件下土壤热通量的研究,并与前人的研究结果对比发现,晴天土壤热通量的日变化符合“S”型分布,但是在雨天条件下结果不一致,雨天条件下土壤热通量短时间内容易受到不良天气条件的影响而呈不规则变化,但当将全年雨天土壤热通量进行半小时平均后分析发现这种天气影响被大幅弱化,土壤热通量再次符合“S”型分布。所以,研究方法的选择对不同天气条件下土壤热通量的变化特征有显著影响。

对于土壤含水量对土壤热通量影响的研究,此前并不多见,前人的研究结果基本都是土壤含水量与土

壤热通量呈负相关。本研究考虑到稻季灌溉对土壤含水量的影响,分3个时段进行不同时间尺度土壤含水量与土壤热通量的相关性分析。结果表明,月尺度上土壤含水量与土壤热通量不相关,但在日尺度和半小时尺度上,由于稻季灌溉水层的储热功能,使得土壤热通量在傍晚气温下降时仍能接受来自灌溉水层的热量,因此稻季土壤含水量与土壤热通量呈正相关,但在稻季前后两个时段土壤含水量与土壤热通量呈负相关,原因在于土壤水分的储热作用减弱了土壤与大气的热交换。但是考虑到长江中下游稻田和水的特殊关系加之土壤含水量对土壤热通量的影响较为复杂,未来需进一步开展土壤含水量影响稻田土壤热通量的内在机理系统深入地研究。

较之土壤含水量,前人对土壤温度与土壤热通量的关系研究相对较多,结果与本文也基本一致,即土壤温度受土壤热通量影响显著,且日变化存在滞后现象。日尺度和半小时尺度上土壤温度与土壤热通量的相关性优于月尺度上土壤温度与土壤热通量的相关性,并且浅层土壤受土壤热通量的影响最为显著。

对于土壤热通量的分析,国内主要依据不同生态系统和不同下垫面条件进行区分研究,尽管发现不同的生态系统土壤热通量都有各自特殊的变化特征,并且不同时间尺度下各个因子对土壤热通量的影响程度也不尽相同,但对于不同生态系统不同下垫面条件如何影响土壤热通量变化的原因并没有具体的解释,所以后续的研究工作将着重关注不同生态系统间土壤热通量的变化规律,以探寻不同下垫面条件对土壤热通量影响的内在机理。

## 5 结论

(1) 长江中下游稻田土壤热通量的日变化成“S”型,白天土壤热通量基本为正,表示能量由地表向土壤传输,且白天浅层土壤更易接收到更多热量,因此土壤热通量也大于较深层土壤热通量,夜间则与之相反。同时,由于净辐射对土壤热通量的影响具有滞后性,所以一天中净辐射首先达到峰值,其次是5 cm土壤热通量,最后10 cm土壤热通量到达峰值,并且5 cm土壤热通量滞后于净辐射的时间在不同水稻种植季节存在差异,稻季前和稻季后滞后时间为2 h,稻季滞后时间为1 h。在不同季节,稻季前和稻季土壤热通量为正,稻季后为负,呈“稻季前>稻季>稻季后”。该研究站点5 cm和10 cm土壤热通量年总量均为负值,说明该研究区总体上由土壤向地表传输能量。尽管不同深度处土

壤热通量日变化规律一致,但在数值上有明显不同,白天5 cm土壤热通量大于10 cm处,而在傍晚和夜间,5 cm土壤热通量小于10 cm处。稻季前和稻季后,5 cm土壤热通量在17:00小于10 cm处,而在稻季,这一时间提前至16:00。并且,5 cm土壤热通量日变化程度大于10 cm处日变化程度。

(2) 在不同天气条件下,土壤热通量总量呈晴天>阴天>雨天,同时选取典型日进行不同天气条件下土壤热通量日变化分析得出,晴天和阴天土壤热通量日变化符合“S”型,而雨天土壤热通量日变化较不规则,但基于全年雨天半小时均值进行的研究则发现雨天的土壤热通量变化也符合“S”型。这一结果与前人的研究有同有异,这主要是数据处理方法不同带来的差异。

(3) 土壤含水量在半小时和日尺度上与土壤热通量达到显著相关,但在不同季节土壤含水量对土壤热通量的影响并非一致,稻季土壤含水量与土壤热通量呈正相关,而在其他时间则呈负相关。

(4) 土壤热通量在半小时和日尺度上显著影响土壤温度,但在月尺度上土壤温度主要还是受到净辐射的影响,与土壤热通量的关系并不十分密切。在半小时和日尺度上,10 cm土壤热通量对土壤温度的影响更大,并且5 cm土壤温度与土壤热通量的关系更为密切。

(5) 半小时和月尺度上,土壤热通量均主要受净辐射影响。日尺度上,稻季前,土壤热通量主要受净辐射影响,而在稻季和稻季后,土壤含水量对土壤热通量的影响显著提升甚至超过净辐射对土壤热通量的影响。

### 参考文献:

- [1] 张宏,胡波,刘广仁,等.中国土壤热通量的时空分布特征研究[J].气候与环境研究,2012,17(5):515-522.
- [2] 李亮,张宏,胡波,等.不同土壤类型的热通量变化特征[J].高原气象,2012,31(2):322-328.
- [3] Masseroni D, Facchi A, Romani M, et al. Surface energy flux measurements in a flooded and an aerobic rice field using a single eddy-covariance system[J]. Paddy and Water Environment, 2015,13(4):405-424.
- [4] Wilson K, Goldstein A, Falge E, et al. Energy balance closure at FLUXNET sites[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,113(1/4):223-243.
- [5] 左金清,王介民,黄建平,等.半干旱草地地表土壤热通量的计算及其对能量平衡的影响[J].高原气象,2010,29(4):840-848.
- [6] 韦志刚,文军,吕世华,等.黄土高原陆—气相互作用预试验及其晴天地表能量特征分析[J].高原气象,2005,36(4):545-555.

- [7] 张利平,赵仲辉.会同杉木人工林土壤热通量特征[J].中南林业科技大学学报,2010,30(5):12-17.
- [8] 王美莲,崔学明,韩鹏,等.大兴安岭原始林区土壤热通量变化特征的初探[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(4):139-142.
- [9] 吕国红,王笑影,贾庆宇,等.盘锦芦苇湿地土壤热通量变化特征研究[J].气象与环境学报,2018,34(6):158-162.
- [10] 李科,王毅勇,王瑗.三江平原季节性积水沼泽湿地能量平衡要素研究[J].湿地科学,2008,6(2):264-270.
- [11] 张文斌,买买提艾力·买买提依明,何清,等.塔克拉玛干沙漠土壤热通量变化特征分析[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2016.
- [12] 王胜,李耀辉,张良,等.张掖戈壁地区土壤热通量特征分析[J].干旱气象,2010,28(2):148-151.
- [13] 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.
- [14] 王春风,刘文兆,朱元骏,等.长武塬区农田生态系统土壤热状况变化特征[J].中国农学通报,2011,27(18):130-134.
- [15] 戴平,李涵茂,方丽,等.湘南旱地土壤热通量变化特征分析[J].湖北农业科学,2017,56(20):3870-3873.
- [16] 郝雅婕,邓巧玲,王艳霞,等.元江干热河谷稀树灌丛土壤热通量特征[J].西北林学院学报,2019,34(5):23-28.
- [17] 刘笑吟,杨士红,李霁雯,等.南方节水灌溉稻田能量通量特征及其规律分析[J].农业机械学报,2015,46(5):83-92.
- [18] 秦孟晟,郝璐,郑管舟,等.秦淮河流域土地利用/覆被变化对蒸散量变化的贡献[J].中国农业气象,2019,40(5):269-283.
- [19] 白昕昕,黄萧霖,秦孟晟,等.亚热带地区水稻田地表反照率变化特征[J].中国生态农业学报,2017,25(11):1707-1717.
- [20] 陈凤.作物蒸发蒸腾的测量及作物系数变化规律的研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2004.
- [21] 周亚,高晓清,李振明,等.青藏高原深层土壤热通量的变化特征分析[J].高原气象,2017,36(2):307-316.
- [22] 马柱国,魏和林,符淙斌.中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系[J].气象学报,2000,58(3):278-287.
- [23] 孙成,江洪,陈健,等.亚热带毛竹林土壤热通量变异特征[J].土壤学报,2013,50(5):966-973.
- [24] 尹光彩,王旭,周国逸,等.鼎湖山针阔混交林土壤热状况研究[J].华南农业大学学报,2006,27(3):16-20.

(上接第150页)

- [25] 秦建蓉.宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落及物种多样性研究[D].银川:宁夏大学,2016.
- [26] 井乐,李建平,张翼,等.黄土高原不同土地利用方式下土壤干层差异[J].草业科学,2018,35(8):1829-1835.
- [27] 马全林,鱼泳,陈芳,等.干旱区沙漠化逆转过程土壤水分的空间异质性特征[J].干旱区地理,2010,33(5):716-724.
- [28] 王艳莉,刘立超,高艳红,等.人工固沙植被区土壤水分动态及空间分布[J].中国沙漠,2015,35(4):942-950.
- [29] 李新荣,马风云,龙立群,等.沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J].中国沙漠,2001,21(3):217-222.
- [30] 潘颜霞,王新平,苏延桂,等.不同植被类型沙地表层土壤水分变化特征[J].水土保持学报,2007,21(5):106-109.
- [31] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, et al. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2004,57(1):1-16.
- [32] 赵文智.科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响[J].土壤学报,2002,39(1):107-113.
- [33] 刘娜娜,陈惠娟,孔德杰.宁夏盐池不同草地类型的土壤水分平衡研究[J].水土保持研究,2016,23(1):23-28.
- [34] Schenk H J, Jackson R B. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems[J]. Journal of Ecology, 2002,90(3):480-494.
- [35] Jackson R B, Schenk H J, Jobbagy E G, et al. Below-ground consequences of vegetation change and their treatment in models [J]. Ecological Applications, 2000,10(2):470-483.
- [36] 王军锋,张丽华,赵锐锋,等.荒漠草原区不同生活型植物生长对降水变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(3):778-786.
- [37] Zhang R, Zhao X Y, Zuo X A, et al. Effect of manipulated precipitation during the growing season on soil respiration in the desert-grasslands in Inner Mongolia, China-ScienceDirect[J]. Catens, 2019,176:73-80.
- [38] Sanaei A, Ali A, Chahouki M A Z. The positive relationships between plant coverage, species richness, and aboveground biomass are ubiquitous across plant growth forms in semi-steppe rangelands[J]. Journal of Environmental Management, 2018,205:308-318.