

# 覆膜滴灌紫薯农田水热传输规律及其对环境因子的响应

张友良<sup>1</sup> 李 躲<sup>1</sup> 冯绍元<sup>1</sup> 王凤新<sup>2</sup> 胡英杰<sup>1</sup> 汪兆辉<sup>1</sup>

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

**摘要:** 农田水热传输过程的量化对于农业用水管理和作物灌溉制度的制定具有重要意义。本文利用 Bowen 比通量观测系统实测数据和气象站资料, 对覆膜滴灌紫薯农田的水热通量变化规律及其对环境因子的响应进行了研究。结果表明: 潜热通量是全生育期覆膜滴灌农田能量支出的主要部分, 显热通量和土壤热通量支出占比较小, 全生育期潜热通量、显热通量、土壤热通量支出占比分别为 69.12%、25.14%、6.57%。不同天气条件下, 显热通量的大小和变化范围均小于潜热通量。潜热通量对降雨和灌溉的响应最为显著, 且降雨影响程度大于灌溉。净辐射、气温对潜热通量的影响较大, 表层土温和风速变化的影响则较低, 各环境因子主要通过直接和间接作用共同对潜热通量产生影响。该研究成果可以深化对覆膜滴灌紫薯农田水热传输规律的认识, 为作物高效用水提供理论依据。

**关键词:** 紫薯农田; 通量观测系统; 水热通量; 环境因子

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)02-0330-11

OSID:



## Water and Heat Transfer and Its Response to Environmental Factors in Drip Irrigated Purple Potato Field with Film Mulching

ZHANG Youliang<sup>1</sup> LI Duo<sup>1</sup> FENG Shaoyuan<sup>1</sup> WANG Fengxin<sup>2</sup> HU Yingjie<sup>1</sup> WANG Zhaohui<sup>1</sup>

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Drip irrigation with film mulching has been widely used in crop cultivation. Film mulching can change surface optical properties, including reflectance, absorption, and emissivity, which will affect the energy distribution in the farmland. It is necessary to study the water and heat transport and its influence factors in drip irrigated field with film mulching. The quantification of water and heat transfer process of the farmland is of great significance for agricultural water management and irrigation schedule formulation. Based on the measured data with Bowen ratio system and meteorological station, the water and heat flux variation and its response to environmental factors were studied in drip irrigated purple potato field with film mulching. The results indicated that latent heat flux was the main part of energy expenditure in drip irrigated purple potato field with film mulching during the whole growth period. Sensible heat flux and soil heat flux accounted for a relatively small proportion. During the whole growth period, the proportion of latent heat flux, sensible heat flux and soil heat flux was 69.12%, 25.14% and 6.57%, respectively. Under different weather conditions, the magnitude and range of sensible heat flux were smaller than that of latent heat flux. Latent heat flux had the most significant response to rainfall and irrigation. The influence of rainfall on latent heat flux was greater than that of irrigation. Net radiation and air temperature had great impact on latent heat flux, while the effects of surface soil temperature and wind speed had low impact. Various environmental factors affected the latent heat flux directly or indirectly. The research results can deepen the understanding of water and heat transfer in drip irrigated purple potato farmland under film mulching, and provide theoretical basis for efficient water use of crops.

**Key words:** purple potato farmland; flux observation system; water and heat flux; environmental factor

收稿日期: 2022-03-26 修回日期: 2022-06-12

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(51809225)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180929)、中国博士后科学基金特别项目(2020T130559)和中国博士后科学基金面上项目(2019M651977)

**作者简介:** 张友良(1987—),男,副教授,博士,主要从事农业水土环境与生态调控研究, E-mail: youliangzhang@yzu.edu.cn

**通信作者:** 冯绍元(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉与水资源及水环境研究, E-mail: syfeng@yzu.edu.cn

## 0 引言

覆膜滴灌已在棉花、玉米、马铃薯等作物种植中得到了广泛应用<sup>[1]</sup>,它可以减少土壤水分蒸发<sup>[2]</sup>,提高土壤温度<sup>[3]</sup>,还能抑制杂草生长<sup>[4]</sup>,减少深层渗漏,提高水肥利用效率<sup>[5]</sup>,对农田中的害虫也起到一定的防治作用<sup>[6]</sup>,从而促进作物生长发育<sup>[7-8]</sup>,并提高作物产量<sup>[9-12]</sup>。农田是受人类活动影响,对地表特征改变反应最为显著的区域<sup>[13-14]</sup>,随着畦灌、沟灌等传统灌溉农田被覆膜滴灌农田所取代,地表反射率、地表吸收率、地表发射率和地表粗糙度等各项农田地表物理特性发生改变,会影响到农田的能量分配与水量循环以及区域气候<sup>[14-15]</sup>。为了量化这种影响,有必要对农田的水热通量变化规律及影响因素展开研究。

农田水热通量变化规律及其影响因素的研究是深入了解农业生产过程中能量分配、水量循环的基础,对于作物与环境变化间动态模型的构建也具有重要作用<sup>[16-17]</sup>,近些年已成为国内外研究的热点。TIAN 等<sup>[18]</sup>通过熵度相关系统对新疆覆膜滴灌棉田水热通量进行观测,发现大规模的灌溉引起的高显热平流会使实际蒸散增大 20%~30%;李国栋等<sup>[19]</sup>采用熵度相关系统和相关性分析方法对黄淮海平原典型冬小麦各生育期的水热通量变化特征进行了分析,并解释了冬小麦农田环境因子与水热通量各分量之间的相关关系。QIN 等<sup>[20]</sup>通过对不同灌溉方式下覆膜制种玉米的研究发现,覆膜滴灌可以给作物提供更好的土壤水热环境,缩短玉米生育期时长,并且覆膜滴灌主要通过促进植株蒸腾减少土壤蒸发来实现节水。冯禹等<sup>[21]</sup>通过研究覆膜对旱作玉米水热通量影响发现,降水的分布能够显著影响生育期内旱作玉米田的能量平衡。YANG 等<sup>[22]</sup>利用波文比系统监测西北地区滴灌小麦的水热通量,发现滴灌可以明显降低小麦耗水量,主要是因为滴灌可以显著降低其叶面积指数,进而减少作物的植株蒸腾。

紫薯是一种药食两用的特有甘薯品种,除了含有普通甘薯的营养成分外,硒元素和花青素的含量也较高<sup>[23-24]</sup>。紫薯的高营养价值使其成为了重要的健康保障食品。山东省是我国重要的农业基地,也是紫薯的主产地之一,但由于水资源时空分布不均与人口、耕地分布不匹配,使得山东地区水资源短缺,出现季节性缺水,农业用水日益紧张<sup>[25]</sup>,覆膜滴灌技术的应用可以提高紫薯产量和水分利用效率。但关于覆膜滴灌紫薯农田的水热通量资料短缺,为了制定科学合理的灌溉制度,需要对当地覆膜

紫薯农田的水热通量规律及其影响因素进行深入研究。

目前对于覆膜滴灌农田的水热通量已有一定研究,但相关研究主要集中在干旱、半干旱地区农田及其作物。而区域气候状况、植被覆盖条件等因素会影响水热通量的传输过程<sup>[26]</sup>,使得各地区农田水热通量规律存在较大差异。本文利用波文比通量观测系统实测数据和气象站资料,对山东地区覆膜滴灌紫薯农田的水热传输规律及其对环境因子的响应进行研究,并进一步探讨降雨和灌溉环境条件下对水热通量的影响,确定覆膜滴灌水热通量的主要影响因素及其水热传输规律,增进对覆膜滴灌紫薯农田在不同环境下水热传输规律的认识,为该地区覆膜滴灌紫薯农田的节水灌溉和作物高效用水提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于 2021 年 5—10 月在山东省日照市岚山区中国农业大学特色马铃薯优质高产试验示范基地(北纬 35°25',东经 118°59',海拔 131 m)进行。该地属于暖温带湿润季风气候,多年平均气温为 13.2℃,相对湿度为 72%,日照时数为 2 533 h,降水量为 897 mm,无霜期为 213 d。2021 年 5—10 月试验区总降雨量为 835 mm,主要集中在 6—8 月,占全年降雨量的 60%~70%,生育期降雨量如图 1 所示。试验区土壤质地为砂壤土,0~90 cm 深度平均土壤干容重为 1.46 g/cm<sup>3</sup>,田间持水率为 26.02% (体积含水率)。

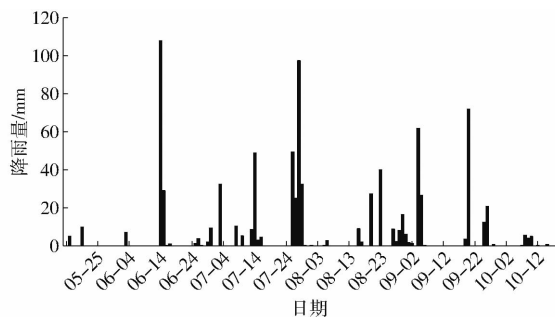


图 1 全生育期降雨量分布

Fig. 1 Rainfall distribution in whole growth period

紫薯农田东西长 84 m,南北长 110 m,占地 0.93 hm<sup>2</sup>,覆黑膜。紫薯品种为济黑 2 号,采用机械起垄种植,一垄单行,垄宽 0.8 m,垄高 0.3 m,株距 0.25 m 左右,采用膜下滴灌作为补充灌溉。滴灌系统采用支管+辅管布置,设有闸阀、压力表和水表,同时在滴头正下方安装负压计,用来控制和调节灌溉。在播种前,试验地施入 385 kg/hm<sup>2</sup>复合肥(含

N 15% ;含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 15% ;含 K<sub>2</sub>O 15% ),8月7日追加 241 kg/hm<sup>2</sup> 硫酸钾肥料(含 K<sub>2</sub>O 52%)。于 2021 年 5月16日起垄种植,10月16日收获。试验地的除草病虫害防治等均与当地农艺措施相同,灌水时间则依据负压计实时监测的土壤基质势确定,当试验区 8个负压计示数平均值达到 -25 kPa 时开始灌水<sup>[25,27]</sup>,灌水量计算公式为

$$m = \frac{h(\theta_a - \theta_b)P}{\eta} \quad (1)$$

式中  $m$ ——灌水量,mm

$h$ ——计划湿润层深度,取 0.4 m

$\theta_a$ ——灌水后土壤平均含水率,即田间持水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$\theta_b$ ——灌水前土壤平均含水率,即 -25 kPa 时土壤含水率(田间持水率的 70%),cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$P$ ——滴灌湿润比,取 65%

$\eta$ ——滴灌系统灌溉水利用系数,取 0.97

## 1.2 试验监测仪器

试验监测仪器采用波文比通量观测系统(BR1000X型),由于试验区主要以东南风为主,故本系统安装在紫薯农田中心略偏西北处,留有一定风浪区长度。系统主要由 1 个数据采集器(CR1000X型,Campbell Scientific Inc.,美国)、1 个净辐射传感器(NR Lite2型,Kipp & Zonen,新西兰)、2 个高精度温湿度传感器(085型,Met One Instruments Inc.,美国)、2 个强制通风防辐射罩(076B-4型,Met One Instruments Inc.,美国)、1 个风速风向传感器(034B-L15型,Met One Instruments Inc.,美国)、2 个热通量板(HFP01-L10型,Hukseflux,新西兰)、1 个土壤水分传感器(CS616-L33型,Campbell Scientific Inc.,美国)、1 个土壤温度传感器(TCAV型,Campbell Scientific Inc.,美国)等组成,可以观测不同时间尺度的气象资料。其中,净辐射传感器和风速风向传感器的安装高度为距地表 2 m,温、湿度传感器安装高度为距地表 1.4 m 和 2 m,土壤热通量板埋于地表以下 8 cm 处,土壤温度传感器埋于地表以下 2 cm 和 6 cm 处,土壤水分传感器埋于地表以下 8 cm 处,将所有传感器连接到数据采集器,数据采集间隔为 10 s,计算并存储每 10 min 的数据。

## 1.3 理论依据与计算方法

波文比能量平衡法是 1926 年英国物理学家 BOWEN 所提出的以能量平衡原理和近地面梯度扩散理论为基础计算水热通量的方法<sup>[28-30]</sup>。根据波文比能量平衡法,只需要测出相应的净辐射、土壤热

通量以及不同高度空气温、湿度差,便可求得相应的潜热通量和显热通量<sup>[30-34]</sup>,计算式为

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (4)$$

式中  $\lambda ET$ ——潜热通量,W/m<sup>2</sup>

$R_n$ ——净辐射,W/m<sup>2</sup>

$G$ ——土壤热通量,W/m<sup>2</sup>

$\beta$ ——波文比

$H$ ——显热通量,W/m<sup>2</sup>

$\gamma$ ——干湿表常数,kPa/K

$\Delta T$ ——两个高度温度差,K

$\Delta e$ ——两个高度水汽压差,kPa

利用土壤热通量板测得的 8 cm 土层深度的土壤热通量,可以计算出地表土壤热通量。计算公式为

$$G = G_s + \frac{\Delta T_s}{t} d(\rho_b C_s + \rho_w \theta C_w) \quad (5)$$

式中  $G_s$ ——8 cm 深度土壤热通量,W/m<sup>2</sup>

$t$ ——计算时间间隔,s

$\Delta T_s$ ——计算时间间隔内 0~8 cm 土层的温度变化量(此处与 2~6 cm 土层的温度变化量近似),K

$d$ ——土壤热通量板以上土层厚度,m

$\rho_b$ ——土壤干容重,kg/m<sup>3</sup>

$\rho_w$ ——水密度,kg/m<sup>3</sup>

$C_s$ ——土壤比热容,J/(kg·K)

$\theta$ ——0~8 cm 土层的土壤含水率,cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>

$C_w$ ——水比热容,J/(kg·K)

## 1.4 途径分析

途径分析最早由数量遗传学家 SEWALL 于 1921 年提出,是研究多变量与因变量之间相关关系的科学方法<sup>[35]</sup>。途径分析可将各个自变量与因变量之间的相关关系分解为各自变量对因变量的直接作用和通过其他自变量对因变量产生的间接作用,通过途径分析结果可以直观地了解变量间的相互影响关系,从而建立优化且简便的回归方程<sup>[34-35]</sup>。目前关于途径分析的研究已有不少,学者们通过不同的案例和应用方向进行了多方面的探讨<sup>[36-40]</sup>,但关于覆膜农田水热传输及其影响因素方面的研究较少,本文途径分析采用覆膜滴灌紫薯农田全生育期 10 min 潜热通量为因变量,对应的各环境因子为自变量,进一步分析各环境因子间的相互作用,为覆膜

农田水热通量对环境因子的响应研究提供依据。

## 1.5 数据处理

波文比通量观测系统监测数据按 PEREZ 等<sup>[41]</sup>的方法进行筛选,同时根据 BILLESBACH 等<sup>[42]</sup>、LIU 等<sup>[43]</sup>的研究,剔除潜热通量、显热通量不在  $-50 \sim 700 \text{ W/m}^2$  范围内的数据,筛选和剔除掉的数据通过其邻近数据插值补全。数据利用 Excel 整理计算,使用 Origin 2018 绘图,采用 SPSS 25.0 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 各生育期水热通量日变化规律

为得到覆膜滴灌紫薯农田不同生育期水热平衡

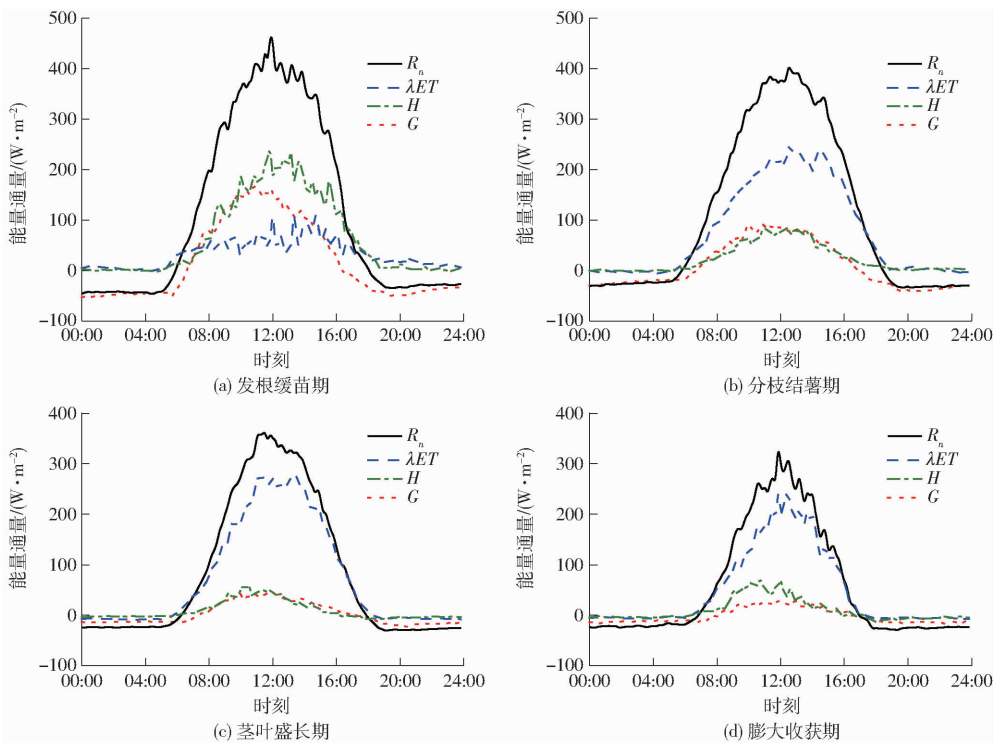


图2 覆膜滴灌紫薯不同生育期水热通量日变化曲线

Fig. 2 Diurnal variations of water and heat flux of purple potato under drip irrigation with film mulching at different growing stages

峰值分别为  $468.88$ 、 $407.48$ 、 $364.72$ 、 $344.08 \text{ W/m}^2$ ,在整个生育期呈逐渐下降的趋势。净辐射日均峰值在紫薯的分枝结薯期、茎叶盛长期出现略微下降,是因为生育期降雨量主要集中在这两个生育阶段。而气温骤然下降,太阳辐射急剧减小,则是导致紫薯膨大收获期净辐射日均峰值下降的最主要原因。夜间净辐射在  $-47.45 \sim 0 \text{ W/m}^2$  之间波动,这是因为夜间少有能量输入,而地表向大气散热使得净辐射出现负值。

潜热通量、显热通量是最主要的能量支出,二者变化规律基本是随着净辐射的增加而增加,在  $12:30$  左右达到峰值后又逐渐减小为  $0 \text{ W/m}^2$ ,从

各分量的日变化特点和规律,分别取覆膜滴灌紫薯 2021 年各生育阶段每天对应时段的净辐射  $R_n$ 、潜热通量  $\lambda ET$ 、显热通量  $H$  和土壤热通量  $G$  的平均值<sup>[26,33]</sup>。如图 2 所示,能量平衡各分量在整个生育阶段的日均变化曲线均呈现出明显的单峰特征,昼夜正负值交替分布,分别在  $06:00$  与  $18:00$  左右完成正值与负值的转变。但由于不同生育期日照时长不同,并随着气象条件等因素的进一步影响,会使得各生育时期正负值转变的具体时间有所不同。

净辐射是能量输入的来源,每日  $06:00$  左右净辐射由负值上升,在正午太阳直射时分达到峰值后开始降低, $18:00$  左右下降为负值。发根缓苗期、分枝结薯期、茎叶盛长期、膨大收获期紫薯日均净辐射

$18:00$  一直到次日  $06:00$  左右都稳定在  $0 \text{ W/m}^2$  附近。不同生育期潜热通量日均峰值分别为  $136.23$ 、 $252.12$ 、 $278.66$ 、 $266.37 \text{ W/m}^2$ ,在整个生育期呈现先增高再减小的趋势,这主要与紫薯的叶面积指数和太阳辐射变化有关。其夜间变化范围较小,一般在  $-20 \sim 0 \text{ W/m}^2$  之间,在生育中后期出现夜间潜热小于  $0 \text{ W/m}^2$  的主要原因是夜间近地面大气温度低于露点,当空气中的水汽含量较高时会在紫薯叶面凝结。不同生育期显热通量日均峰值分别为  $260.70$ 、 $86.26$ 、 $65.45$ 、 $80 \text{ W/m}^2$ ,随生育期推进呈现出先逐渐减小、再逐渐增加的趋势。夜间显热通量处于  $-20 \sim 0 \text{ W/m}^2$  之间,由于温度差,地表与近地

面大气进行热量交换则是显热通量夜间出现负值的主要原因。

土壤热通量是净辐射的另一个重要能量支出,其变化趋势与净辐射基本相同,每日 07:00 左右开始由负值上升,抵达峰值后在 18:00 左右下降为负值。不同生育期土壤热通量日均峰值分别为 169.46、92.94、44.67、30.43  $W/m^2$ ,在整个生育期呈现明显下降趋势,这主要与作物冠层生长特性和气象因素相关。夜间土壤热通量处于  $-53.07 \sim 0 W/m^2$  之间,夜间表层土壤向大气散热是导致土壤热通量小于  $0 W/m^2$  的主要原因。土壤热通量日均峰值在生育期前期较大且高于潜热通量,主要是因为生育前期太阳辐射可以直达地表,而覆膜使得土壤在吸收太阳短波辐射的同时又降低了土壤对大气长波辐射的透射率,因而地表热量可以得到进一步提升<sup>[44]</sup>。而后由于作物生长,紫薯冠层截获了绝大部分太阳短波辐射,再加上气候条件的进一步改变,因此在生育后期地表热通量日均峰值远低于潜热通量。此外随着生育期推进,紫薯冠层覆盖度逐渐变大,夜间地表与近地面大气温度差逐渐减小,土壤向大气释放的热量随之减小,会使得夜间土壤热通量逐渐增大。

水热通量各分量受地理位置和区域气候的影响,随时间变化而变化。如表 1 所示,在覆膜滴灌紫

薯的全生育期内,潜热通量、显热通量、土壤热通量在全生育期能量支出占比分别为 69.12%、25.14%、6.57%。潜热通量占能量支出的绝大部分,其  $\lambda ET/R_n$  高达 69.12%。但在紫薯的发根缓苗期,显热通量却超过潜热通量占能量支出的主要部分,之所以会出现这种情况,一方面是因为该生育期降雨量少,同时覆膜滴灌可以大幅度减小灌溉湿润面积,减小了水分的蒸发。另一方面则是因为此阶段紫薯冠层对地表的遮荫程度较低,太阳辐射直接作用于地表,使得地气间温度梯度大,促进了显热交换的进行<sup>[45]</sup>。而后随着紫薯农田覆盖度的提高及气象条件的改变,潜热通量逐渐成为能量支出的最主要部分。膨大收获期显热通量的能量比率高于茎叶盛长期,主要是因为紫薯覆盖度在达到峰值后会有一定的下降。土壤热通量占能量支出比例随着生育期的推进而逐渐减小。在发根缓苗期,土壤热通量日变化曲线明显高于潜热通量日变化曲线,但其能量支出占比却小于潜热通量,这主要是在该阶段,夜间地表散热使得土壤热通量出现较多负值,降低了土壤热通量的能量比率。而在膨大收获期,土壤热通量能量比率甚至出现负值,这主要是因为该时期气温骤降,太阳辐射较低,热量会从温度较高的覆膜土壤向大气散失,张宝忠<sup>[46]</sup>、TEIXEIRA 等<sup>[47]</sup>也有类似的发现。

表 1 覆膜滴灌紫薯各生育期水热通量

Tab.1 Variation of water and heat flux of purple potato under film drip irrigation with film mulching at each growing stage

生育期	能量通量/ $(W \cdot m^{-2})$				能量比率/%		
	$R_n$	$\lambda ET$	$H$	$G$	$\lambda ET/R_n$	$H/R_n$	$G/R_n$
发根缓苗期(5月16日—6月10日)	112.41	33.11	65.71	18.01	29.45	58.46	16.02
分枝结薯期(6月11日—7月25日)	109.80	77.56	23.06	9.18	70.64	21.00	8.36
茎叶盛长期(7月26日—9月10日)	85.43	74.55	8.72	2.16	87.26	10.21	2.53
膨大收获期(9月11日—10月16日)	56.76	49.09	9.59	-1.88	86.48	16.70	-3.31
全生育期(5月16日—10月16日)	90.40	62.48	22.73	5.94	69.12	25.14	6.57

## 2.2 不同天气条件下水热通量日变化规律

为进一步了解覆膜滴灌紫薯农田水热通量在不同天气条件下的动态变化特征,对覆膜滴灌紫薯每个生育期阶段分别选择不同天气条件下(晴天、阴天、雨天)各一天的水热通量取均值。晴天选取 5月24日、6月18日、8月14日、9月30日,阴天选取 6月1日、7月7日、8月27日、9月24日,雨天选取 6月3日、7月3日、8月20日、9月20日。图 3 为典型天气条件下覆膜紫薯水热通量各分量的日变化。

不同天气条件下到达地表的太阳辐射差异较大,下垫面能量输入明显不同,能量平衡各分量在不同天气下由大到小分别为晴天、阴天、雨天。从图 3

可以看出,晴天、阴天天气条件下的各水热通量变化趋势大致相同,由于受雨滴和气温的影响,雨天条件下各水热通量变化较为复杂,均呈现多峰特征,其中潜热通量和净辐射日变化规律一致性最好。晴天与阴天各水热通量均在 06:00 与 18:00 左右完成正负值转变,而在雨天条件下,各水热通量 10:00 左右才由负值升为正值,转变时间明显滞后。

不同天气条件下,夜间潜热通量都在  $0 W/m^2$  附近浮动,说明夜间水分的蒸发很小,这有可能是夜间紫薯的蒸发蒸腾作用与水分的凝结作用达到了某种平衡。日均潜热通量和显热通量在晴天、阴天、雨天分别为 79.34、33.96  $W/m^2$ , 42.93、24.82  $W/m^2$ , 20.67、7.24  $W/m^2$ 。显热通量在不

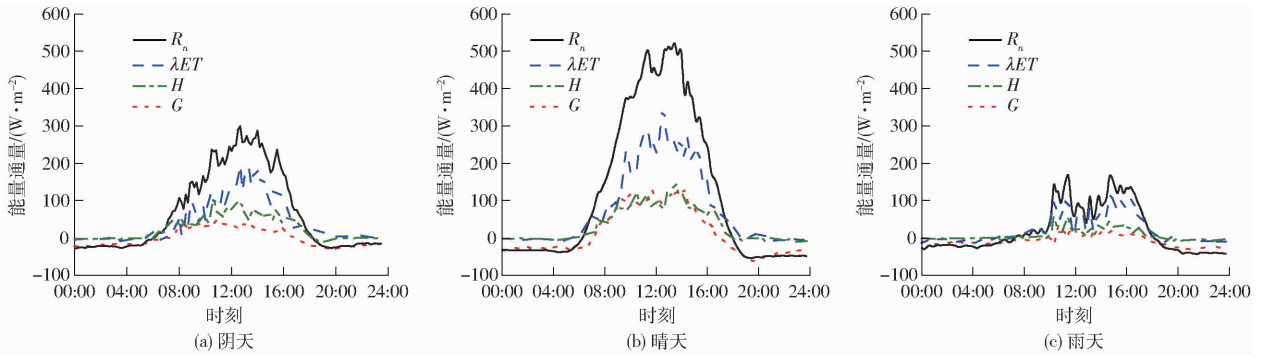


图3 覆膜滴灌紫薯不同天气条件下水热通量日变化曲线

Fig.3 Diurnal variation of water and heat flux under different weather conditions of purple potato under drip irrigation with film mulching

同天气条件下均小于潜热通量,进一步说明了覆膜滴灌紫薯农田潜热通量是能量支出的主要部分。同时显热通量在不同天气条件下变化幅度也小于潜热通量,这可能是因为紫薯冠层较高的覆盖度以及覆膜对土壤的保温效应,使得不同天气条件下地表土壤不会产生过大的温度差异,导致土壤和大气间热交换量较低。

日均土壤热通量在晴天、阴天、雨天分别为 14.42、0.05、-6.91 W/m<sup>2</sup>。在阴天条件下,土壤热通量均值基本为 0 W/m<sup>2</sup>,是因为白天土壤吸收的热量与夜间散失的热量基本相同。而在雨天条件下,土壤热通量均值为负值,主要是因为雨天紫薯农田的能量收入较低,为了弥补能量支出,土壤会向大气释放能量。夜间的土壤热通量在不同天气条件下由大到小依次为晴天、阴天、雨天,这主要是因为晴天的昼夜温差相对较大,且在覆膜作用下,土壤温度高,使得晴天夜间土壤热量散失更为明显。

### 2.3 降雨和灌溉后水热通量变化规律

农田各能量通量的变化在很大程度上取决于地表的湿润程度<sup>[48]</sup>,降雨和灌溉会使得农田出现不同程度地表湿润,对农田的能量分配产生较大影响,对降雨和灌溉后水热通量的变化规律进行深入分析可以进一步了解不同环境条件下的农田水热传输规律。

### 2.3.1 降雨后水热通量日变化规律

图4(图中日期所在刻度均对应于12:00数据,下同)为降雨前后紫薯农田不同生育阶段水热平衡各分量日变化规律,表2为对应的气象资料。

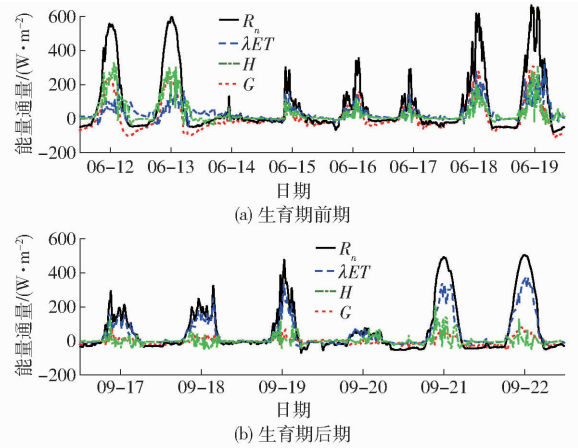


图4 降雨前后覆膜滴灌紫薯水热通量日变化曲线

Fig.4 Diurnal variation of water and heat flux of purple potato under drip irrigation with film mulching before and after rainfall

生育期前期,紫薯农田潜热通量峰值由降雨前6月13日的315.3 W/m<sup>2</sup>增大到降雨后6月18日的381.44 W/m<sup>2</sup>,日均潜热通量由43.09 W/m<sup>2</sup>增大到83.29 W/m<sup>2</sup>,增幅为93.3%。显热通量峰值由335.95 W/m<sup>2</sup>降低到311.61 W/m<sup>2</sup>,降幅为7.24%。

表2 生育前后期典型降雨资料统计

Tab.2 Statistics of typical rainfall data before and after growth

	日期	6月14日	6月15日	6月16日	6月17日	6月18日	6月19日
生育期前期	天气状态	大暴雨	大雨	小雨	小雨	多云	多云
	降雨量/mm	108	29	0.2	1	0	0
	降雨时间	07:00—24:00	00:00—09:00	13:00—14:00	18:00—20:00		
	日期	9月17日	9月18日	9月19日	9月20日	9月21日	9月22日
生育期后期	天气状态	阴天	阴天	小雨	暴雨	晴天	晴天
	降雨量/mm	0	0	3.6	72	0	0
	降雨时间			09:00—10:00	10:30—19:00		
				17:50—18:50			



日均土壤热通量由  $23.98 \text{ W/m}^2$  增大到  $31.16 \text{ W/m}^2$ , 增幅为 29.9%。在生育期前期, 紫薯冠层截获的太阳辐射较少, 大部分太阳辐射直接作用于地表, 而降雨后表层土壤含水率显著升高, 使得土壤水分蒸发明显变大, 蒸发蒸腾量也随之增加, 所以潜热通量会明显上升。而雨后紫薯农田的能量输入大部分用于潜热通量支出, 这是显热通量减小的主要原因。

生育期后期, 紫薯农田潜热通量峰值由降雨前 9 月 18 日的  $260.99 \text{ W/m}^2$  增大到降雨后 9 月 21 日的  $389.93 \text{ W/m}^2$ , 日均潜热通量由  $46.55 \text{ W/m}^2$  增大到  $70.28 \text{ W/m}^2$ , 显热通量峰值由  $123.5 \text{ W/m}^2$  增大到  $211.6 \text{ W/m}^2$ , 日均显热通量由  $-2.95 \text{ W/m}^2$  增大到  $12.31 \text{ W/m}^2$ , 土壤热通量峰值由  $47.77 \text{ W/m}^2$  增大到  $59.08 \text{ W/m}^2$ , 日均土壤热通量由  $0.09 \text{ W/m}^2$  增大到  $0.64 \text{ W/m}^2$ , 降雨后各能量支出分量都有所提高。相较于生育期前期, 生育期后期降雨后的日均显热通量和土壤热通量变化幅度较小, 这主要是因为在此生育阶段紫薯冠层可以将地表完全覆盖, 截获绝大部分的太阳辐射, 使得雨后地表温度变化较小。与此同时, 生育期后期紫薯冠层和地膜共同作用, 减少了雨后紫薯农田土壤蒸发, 但在此阶段, 植株蒸腾为紫薯农田的主要蒸发蒸腾, 所以生育期后期降雨后紫薯潜热通量与生育期前期相比变化幅度不大。

### 2.3.2 灌溉后水热通量日变化规律

覆膜滴灌紫薯农田的灌溉主要集中在生育期前期, 图 5 为 6 月 8—9 日灌水前后紫薯水热平衡各分量的日变化规律, 灌水量为  $20 \text{ mm}$ 。紫薯农田日均潜热通量均值由灌水前的  $49.71 \text{ W/m}^2$  增加到灌水后  $55.49 \text{ W/m}^2$ , 日均显热通量均值从  $81.80 \text{ W/m}^2$  降低到  $65.27 \text{ W/m}^2$ , 日均土壤热通量由  $17.53 \text{ W/m}^2$  降低到  $7.53 \text{ W/m}^2$ 。灌水前后潜热通量、显热通量变化与生育期前期降雨变化趋势相似, 但变化幅度相对较小。这主要是因为紫薯农田采用覆膜滴灌的灌溉方式, 灌溉水直接作用于作物根系, 与降雨相比, 不仅湿润面积小, 灌水量也低, 所以潜热通量、显热通量变化幅度不大。从图 5 可以看出, 刚开始灌水时, 土壤热通量会骤然减小, 这是因为灌溉水为地下水, 水温低于土壤温度, 而后由于土壤热量传输, 土壤热通量变化趋势则会逐渐平缓。与降雨不同, 由于灌水湿润面积小, 土壤温度上升快, 夜间土壤散热是灌水后土壤热通量减小的主要原因。

### 2.4 潜热通量与各环境因子通径分析

潜热通量是覆膜滴灌紫薯农田能量支出最主要分量, 与近地面大气和下垫面水分、能量的传输联系密切, 在多种时间尺度上受作物、土壤和气象等多项

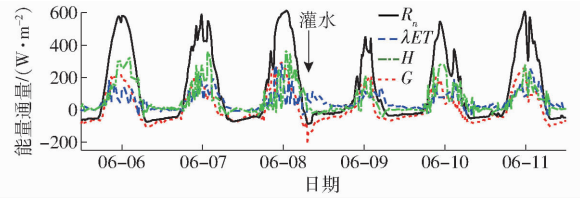


图 5 灌溉前后覆膜滴灌紫薯水热通量日变化曲线

Fig. 5 Diurnal variation of water and heat flux of purple potato under drip irrigation with film mulching before and after irrigation

环境因子的综合影响<sup>[49]</sup>, 是研究水热通量对环境因子响应的基础。本文根据已有的实测数据, 对覆膜紫薯农田全生育期每 10 min 潜热通量与各环境因子关系进行通径分析, 主要考虑的环境因子包括净辐射  $R_n$ 、气温  $T_a$ 、相对湿度 (RH)、饱和水汽压差 (VPD)、风速  $u$ 、表层土温  $T_s$  和土壤热通量  $G$  等, 结果如图 6 和表 3 所示。

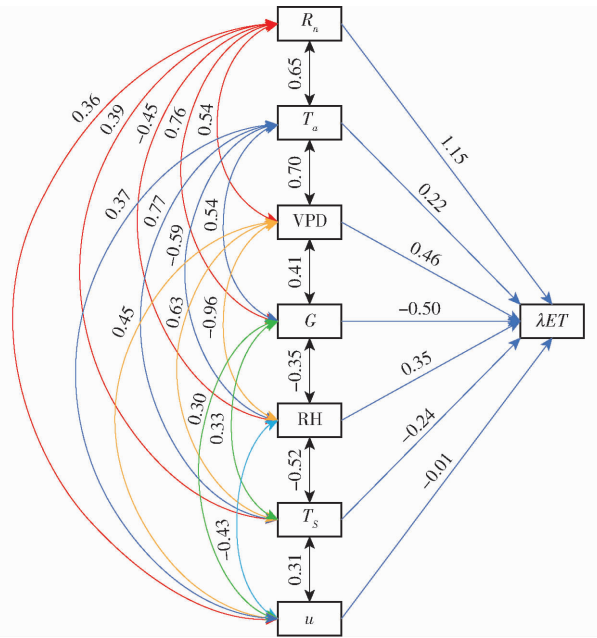


图 6 10 min 潜热通量与各环境因子通径分析结果

Fig. 6 Path analysis results of 10 min latent heat flux and environmental factors

各环境因子对 10 min 潜热通量相关系数绝对值由大到小依次为  $R_n$ 、 $T_a$ 、VPD、 $G$ 、RH、 $T_s$ 、 $u$ , 说明净辐射是对紫薯农田 10 min 潜热通量产生影响最重要的环境因子, 其次为气温和饱和水汽压差, 表层土温和风速的影响相对较小。其中表层土温与 10 min 潜热通量相关系数明显小于气温, 这可能是因为生育中后期紫薯冠层遮阴度较高, 土壤温度上升较慢, 又由于覆膜的保温作用, 土壤温度下降也会较慢, 与空气温度和净辐射的变化不同步所致。

净辐射、饱和水汽压差的直接通径系数大于间接通径系数之和, 说明它们主要通过直接作用对 10 min 潜热通量产生影响, 而其他因子对 10 min 潜

热通量的影响则主要体现为间接作用。各环境因子对 10 min 潜热通量直接途径系数绝对值由大到小依次为  $R_n$ 、 $G$ 、 $VPD$ 、 $RH$ 、 $T_s$ 、 $T_a$ 、 $u$ ，间接途径系数之和绝对值由大到小依次为  $G$ 、 $RH$ 、 $T_s$ 、 $T_a$ 、 $u$ 、 $VPD$ 、 $R_n$ ，说明净辐射和土壤热通量分别对 10 min 潜热通量的直接作用和间接作用最大。从图 6 中可以看出，土壤热通量对 10 min 潜热通量的间接作用主要通过气温和净辐射之间的互相作用来产生影响。净辐射主要通过气温、土壤热通量和

相对湿度等环境因子相互作用对 10 min 潜热通量产生间接作用，其他各因子则主要通过净辐射相互作用来对 10 min 潜热通量产生间接影响，进一步说明了净辐射对 10 min 潜热通量影响程度最大。综合直接途径系数和间接途径系数之和的排序来看，各环境因子并不是直接作用越大间接作用就会越小或间接作用越大直接作用越小，也不是单独只有直接或者间接作用，而是通过二者的共同作用对 10 min 潜热通量产生影响。

表 3 10 min 潜热通量与各环境因子途径分析

Tab. 3 Path analysis results of 10 min latent heat flux and environmental factors

环境因子	相关系数	直接途径系数	间接途径系数之和	各因子间接途径系数						
				$R_n$	$T_a$	$VPD$	$G$	$RH$	$T_s$	$u$
$R_n$	0.87	1.15	-0.174		0.14	0.25	-0.34	-0.13	-0.09	-0.004
$T_a$	0.58	0.22	0.396	0.74		0.32	-0.27	-0.21	-0.18	-0.004
$VPD$	0.51	0.46	0.245	0.77	0.15		-0.19	-0.31	-0.17	-0.005
$G$	0.44	-0.50	1.136	0.87	0.12	0.19		-0.12	0.08	-0.004
$RH$	-0.42	0.35	-0.785	-0.52	-0.13	-0.44	0.17		0.13	0.005
$T_s$	0.29	-0.24	0.557	0.45	0.17	0.29	-0.17	-0.18		-0.003
$u$	0.28	-0.01	0.330	0.42	0.08	0.20	-0.15	-0.15	-0.07	

### 3 讨论

本文利用波文比通量观测系统实测数据，分析了山东湿润区覆膜滴灌紫薯全生育期水热通量分配规律及日变化特征，并研究了降雨和灌溉对水热通量的影响，最后结合试验区气象资料与土壤数据，进一步探讨了不同环境因子对紫薯农田 10 min 潜热通量的影响。

从覆膜滴灌紫薯全生育期水热通量能量比率来看，在生育期前期，潜热通量占净辐射份额较小，随着生育期推进，在茎叶盛长期潜热通量占净辐射份额达到最大，生育后期略微减小，这主要与紫薯的叶面积指数变化有关，郑思宇等<sup>[50]</sup>和 QIU 等<sup>[51]</sup>也有类似结论。同时在全生育期，覆膜紫薯农田的潜热通量是净辐射的主要能量支出。郑思宇等<sup>[50]</sup>对温室葡萄水热通量特征展开研究，发现显热通量占能量支出份额最大，即使后期潜热通量占比增大，也仍小于显热通量，OLIVER 等<sup>[52]</sup>也有相似发现。这与本研究结果有所差异，差异的形成主要与覆膜滴灌、作物类型等因素相关。ZHANG 等<sup>[53]</sup>研究干旱区覆膜葡萄发现，在葡萄生育期内，显热通量占净辐射主要支出；冯禹等<sup>[21]</sup>利用涡度相关系统对旱区覆膜玉米水热通量展开研究，发现在玉米的生育期内潜热通量是净辐射最主要的能量支出，而休闲期净辐射以消耗显热通量为主；TIAN 等<sup>[54]</sup>分析了西北干旱地区膜下滴灌棉田的水热通量变化，发现潜热

通量支出占净辐射的主要部分。这说明了在覆膜条件下，作物类型不同，冠层结构对地面的覆盖度不同会对农田的能量分配产生较大的影响。

从降雨前后水热通量的变化来看，降雨对潜热和显热都有较大影响，尤其在生育期前期，潜热通量对降雨的反应更为敏感。张宝忠<sup>[45]</sup>、邹旭东等<sup>[55]</sup>研究也发现，降雨后潜热通量和感热通量会出现不同程度的增幅，这与本研究结论一致。这种现象的形成主要是因为，生育期前期地面裸露度较高，雨后土壤湿度增大，土壤蒸发潜热占潜热总量比重较大，而后随着作物的生长，植株蒸腾逐渐成为蒸发蒸腾的主体，降雨对潜热通量影响也逐渐减低。而灌溉对水热通量的影响与降雨相似，但由于湿润面积和灌水量远小于降雨，因此影响程度低于降雨。

从 10 min 潜热通量与各环境因子的相关系数来看，净辐射对覆膜滴灌紫薯 10 min 潜热通量影响程度最大，其次为气温和饱和水汽压差，土壤热通量影响相对较小。余昭君等<sup>[56]</sup>通过对葡萄园潜热通量对环境因子的敏感性分析则发现，潜热通量对净辐射和土壤热通量的变化较为敏感，且二者差距很小，这与本研究略有差异。这主要是因为，净辐射是下垫面植被蒸发蒸腾主要的能量输入，与蒸散量相关，对潜热通量的影响最大，而相对于其他稀疏植被，紫薯农田覆盖度较高，作物冠层会截获大部分的太阳辐射，留给土壤的能量较少，因此紫薯农田土壤热通量变化对潜热通量的影响相对较小。从途径分



析结果来看,净辐射、饱和水汽压差对 10 min 潜热通量的影响主要为直接作用,其余主要通过各因子间相互作用产生间接影响。张雪松等<sup>[57]</sup>通过通径分析也发现,净辐射和饱和水汽压差对冬小麦农田小时尺度潜热通量影响主要为直接作用。QIU 等<sup>[58]</sup>、邱让建等<sup>[17]</sup>则发现净辐射对小尺度轮作稻麦田潜热通量的影响主要为直接作用,而其他因子均通过影响净辐射对潜热通量产生间接影响,这与本文结果略有差异。风速对 10 min 潜热通量的影响较为复杂,基本没有直接作用,主要通过净辐射和相对湿度等因素相互作用产生间接影响,这可能是由于风可以吹开地表上方的水汽,使得太阳辐射可以更容易到达作物冠层,进而影响蒸发蒸腾。刘健<sup>[59]</sup>的研究也表明风速主要通过影响作物蒸腾量来影响潜热通量。因此风速与潜热通量有一定相关性,但关于不同风速、风向对潜热通量的具体影响还

有待进一步研究。

## 4 结论

(1)各水热通量全生育期变化曲线都呈现明显昼高夜低单峰型特征,潜热通量、显热通量、土壤热通量在全生育期能量支出占比分别为 69.12%、25.14%、6.57%。

(2)降雨后紫薯农田潜热通量与显热通量都会有一定的增幅,且降雨对生育期前期的影响大于生育期后期。灌溉对水热通量造成影响的机理与降雨相似,但影响程度小于降雨。

(3)对 10 min 潜热通量影响较大的环境因子为净辐射、气温、饱和水汽压差,其次为土壤热通量和相对湿度,表层土温和风速的影响较小。各环境因子通过直接和间接作用共同对 10 min 潜热通量产生影响。

## 参 考 文 献

- [1] 张友良,王凤新,聂唯,等.滴灌条件下覆膜热效益及其对马铃薯生长的影响[J].农业机械学报,2020,51(12):252-261. ZHANG Youliang, WANG Fengxin, NIE Wei, et al. Effects of film mulching on thermal conditions and potato growth under drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 252-261. (in Chinese)
- [2] ZHANG Y, WANG F, SHOCK C C, et al. Influence of different plastic film mulches and wetted soil percentages on potato grown under drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2017, 180: 160-171.
- [3] SUBRAHMANYAN K, VEERAMANI P, HARISUDAN C. Heat accumulation and soil properties as affected by transparent plastic mulch in Blackgram (*Vigna mungo*) doubled cropped with Groundnut (*Arachis hypogaea*) in sequence under rainfed conditions in Tamil Nadu, India[J]. Field Crops Research, 2018, 219: 43-54.
- [4] GHOSH P, DAYAL D, BANDYOPADHYAY K, et al. Evaluation of straw and polythene mulch for enhancing productivity of irrigated summer groundnut[J]. Field Crops Research, 2006, 99(2-3): 76-86.
- [5] 孙云云,刘方明,高玉山,等.覆膜滴灌技术研究进展[J].农业工程,2020,10(3):68-71. SUN Yunyun, LIU Fangming, GAO Yushan, et al. Research progress of drip irrigation under film[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(3): 68-71. (in Chinese)
- [6] 李颖,王耀生,杨宁,等.滴灌施药对覆膜玉米茎腐病防效及产量影响[J].植物保护,2021,47(1):282-286. LI Ying, WANG Yaosheng, YANG Ning, et al. Effect on stalk rot control and yield of mulching film maize by drip irrigation system with fungicides[J]. Plant Protection, 2021, 47(1): 282-286. (in Chinese)
- [7] MIN L, REN C, JUN W, et al. Improvements of emergence and tuber yield of potato in a seasonal spring arid region using plastic film mulching only on the ridge[J]. Field Crops Research, 2018, 223: 57-65.
- [8] FAN Y, DING R, KANG S, et al. Plastic mulch decreases available energy and evapotranspiration and improves yield and water use efficiency in an irrigated maize cropland[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 122-131.
- [9] 毕继业,王秀芬,朱道林.地膜覆盖对农作物产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(11):172-175. BI Jiye, WANG Xiufen, ZHU Daolin. Effect of plastic-film mulch on crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 172-175. (in Chinese)
- [10] LIU H, WANG X, ZHANG X, et al. Evaluation on the responses of maize (*Zea mays* L.) growth, yield and water use efficiency to drip irrigation water under mulch condition in the Hetao Irrigation District of China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 144-157.
- [11] 江燕,史春余,王振振,等.地膜覆盖对耕层土壤温度水分和甘薯产量的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(6):627-634. JIANG Yan, SHI Chunyu, WANG Zhenzhen, et al. Effects of plastic film mulching on arable layer soil temperature, moisture and yield of sweet potato[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(6): 627-634. (in Chinese)
- [12] QIN S, ZHANG J, DAI H, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 87-94.
- [13] SAUER T, HATFIELD J, PRUEGER J, et al. Surface energy balance of a corn residue-covered field[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 89(3-4): 155-168.
- [14] 秦淑静.不同灌溉方式下覆膜制种玉米农田水热通量传输机制与模拟[D].北京:中国农业大学,2020. QIN Shujing. Mechanisms and modeling of water and energy fluxes transfer processes above mulched seeding maize fields under different irrigation methods[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [15] HUBER D B, MECHEM D B, BRUNSELL N A. The effects of great plains irrigation on the surface energy balance, regional circulation, and precipitation[J]. Climate, 2014, 2(2): 103-128.
- [16] HOSSEN M S, MANO M, MIYATA A, et al. Surface energy partitioning and evapotranspiration over a double-cropping paddy

- field in Bangladesh[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(9): 1311–1320.
- [17] 邱让建,杨再强,景元书,等. 轮作稻麦田水热通量及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 82–88.  
QIU Rangjian, YANG Zaiqiang, JING Yuanshu, et al. Analysis of water and heat flux over rice-wheat rotation field and influencing factors[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(17): 82–88. (in Chinese)
- [18] TIAN F, YANG P, HU H, et al. Energy balance and canopy conductance for a cotton field under film mulched drip irrigation in an arid region of northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 110–121.
- [19] 李国栋,史桂芬,吴东星. 黄淮海平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡研究——以封丘地区为例[J]. *气象与环境学报*, 2017, 33(1): 93–100.  
LI Guodong, SHI Guifen, WU Dongxing, et al. Research on energy balance of the typical winter wheat farmland ecosystem in the Huanghuaihai plain: a case study in Fengqiu region[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2017, 33(1): 93–100. (in Chinese)
- [20] QIN S, LI S, KANG S, et al. Transpiration of female and male parents of seed maize in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 397–409.
- [21] 冯禹,郝卫平,高丽丽,等. 地膜覆盖对旱作玉米田水热通量传输的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 300–313.  
FENG Yu, HAO Weiping, GAO Lili, et al. Effects of plastic mulch on water and heat flux transfer in rainfed maize fields[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 300–313. (in Chinese)
- [22] YANG D, LI S, KANG S, et al. Effect of drip irrigation on wheat evapotranspiration, soil evaporation and transpiration in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 232: 106001.
- [23] 陈纯. 紫薯提取物对果蝇和线虫抗氧化作用的研究[D]. 天津:天津科技大学, 2016.  
CHEN Chun. Studies on the antioxidant effect of purple sweet potato extract on *drosophila melanogaster* and *caenorhabditis elegans*[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [24] 唐婷,韦璐,赵琤. 紫薯果胶类多糖的成分分析及稳定性研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(3): 20–24.  
TANG Ting, WEI Lu, ZHAO Cheng. Analysis of components and stability of pectic polysaccharides from purple sweet potato [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(3): 20–24. (in Chinese)
- [25] 张友良,汪兆辉,冯绍元,等. 覆膜滴灌条件下滴灌湿润比和施氮量对甘薯生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 261–270.  
ZHANG Youliang, WANG Zhaohui, FENG Shaoyuan, et al. Effects of soil wetted percentages and nitrogen fertilizations on sweet potato growth under drip irrigation with film mulching [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7): 261–270. (in Chinese)
- [26] 余昭君,胡笑涛,冉辉,等. 基于波文比-能量平衡法的半湿润地区葡萄园蒸发蒸腾量估算[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 175–183.  
YU Zhaojun, HU Xiaotao, RAN Hui, et al. Estimation of grape evapotranspiration in semi-humid region based on Bowen ratio energy balance method[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 175–183. (in Chinese)
- [27] 胡英杰,张友良,冯绍元,等. 不同颜色地膜和滴灌土壤湿润比对土壤水热及甘薯生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(10): 33–42.  
HU Yingjie, ZHANG Youliang, FENG Shaoyuan, et al. The colour of mulching plastic film and drip irrigation amount combine to affect water and thermal condition in soil and sweet potato growth[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(10): 33–42. (in Chinese)
- [28] 康燕霞. 波文比和蒸渗仪测量作物蒸发蒸腾量的试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2006.  
KANG Yanxia. Study on the measuring method of lysimeter and Bowen-ratio energy balance system of crop evapotranspiration by experiment[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- [29] BOWEN I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface[J]. *Physical Review*, 1926, 27(6): 779.
- [30] 强小嫚,蔡焕杰,王健. 波文比仪与蒸渗仪测定作物蒸发蒸腾量对比[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 12–17.  
QIANG Xiaoman, CAI Huanjie, WANG Jian. Comparative study of crop evapotranspiration measured by Bowen ratio and lysimeter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(2): 12–17. (in Chinese)
- [31] IRMAK S, SKAGGS K E, CHATTERJEE S. A review of the Bowen ratio surface energy balance method for quantifying evapotranspiration and other energy fluxes[J]. *Transactions of the ASABE*, 2014, 57(6): 1657–1674.
- [32] UNLU M, KANBER R, KAPUR B. Comparison of soybean evapotranspirations measured by weighing lysimeter and Bowen ratio-energy balance methods[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, 9(30): 4700–4713.
- [33] 白云岗,张江辉,董新光. 极端干旱区成龄葡萄园蒸散研究[J]. *中国农村水利水电*, 2012(7): 1–4.  
BAI Yungang, ZHANG Jianghui, DONG Xinguang. Research on evapotranspiration of grown-up grapes in extremely areas [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(7): 1–4. (in Chinese)
- [34] 向皎,李程,张清涛,等. 绿洲荒漠过渡带风况对波文比和蒸散发的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 705–720.  
XIANG Jiao, LI Cheng, ZHANG Qingtao, et al. Effects of wind conditions on the Bowen ratio and evapotranspiration in an oasis-desert ecotone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 705–720. (in Chinese)
- [35] 艾宁,魏天兴,朱清科,等. 基于通径分析的陕北黄土坡面径流产沙影响因素[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(6): 77–84.  
AI Ning, WEI Tianxing, ZHU Qingke, et al. Factors affecting slope runoff and sediment yield in northern Shanxi Province based on path analysis[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(6): 77–84. (in Chinese)
- [36] 冯峰,王孟植,陈东煜,等. 气象因子对引黄灌区作物需水量影响的通径分析[J]. *人民黄河*, 2022, 44(3): 149–154, 159.  
FENG Feng, WANG Mengzhen, CHEN Dongyu, et al. Path analysis of influence of meteorological factors on crop water requirement in Yellow River irrigation area[J]. *Yellow River*, 2022, 44(3): 149–154, 159. (in Chinese)
- [37] 魏清顺,孙西欢,刘在伦. 导流器几何参数对潜水泵性能影响的通径分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(3): 202–207.

- WEI Qingshun, SUN Xihuan, LIU Zailun. Path analysis of effects of diffuser geometric parameters on performance of submersible pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(3): 202–207. (in Chinese)
- [38] 许俊东, 张心如, 关钧元, 等. 华北平原冬小麦农田蒸散动态变化及其影响因子的通径分析[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 209–214.
- XU Jundong, ZHANG Xinru, GUAN Junyuan, et al. Dynamic change of evapotranspiration of winter wheat farmland in North China plain and passage analysis of influencing factors[J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 53(2): 209–214. (in Chinese)
- [39] 韩俊伟, 陈荣江, 李新宁, 等. 新疆早中熟棉新品种数量性状的相关性及通径分析[J]. *安徽农业科学*, 2022, 50(6): 40–45, 49.
- HAN Junwei, CHEN Rongjiang, LI Xinning, et al. Correlation and path analysis of quantitative traits of early-middle maturing cotton new varieties in Xinjiang[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(6): 40–45, 49 (in Chinese)
- [40] SHAO Wenyang, WANG Qingzheng, GUAN Qingyu, et al. Distribution of soil available nutrients and their response to environmental factors based on path analysis model in arid and semi-arid area of Northwest China[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154254.
- [41] PEREZ P, CASTELLVI F, IBANEZ M, et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 97(3): 141–150.
- [42] BILLESBACH D P, ARKEBAUER T J. First long-term, direct measurements of evapotranspiration and surface water balance in the Nebraska SandHills[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 104–110.
- [43] LIU S, XU Z, ZHU Z, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24–38.
- [44] MALIK M, TRAN V V. A simplified mathematical model for predicting the nocturnal output of a solar still[J]. *Solar Energy*, 1973, 14(4): 371–385.
- [45] 姚欢欢, 景元书, 韩丽娟. 基于 Priestley–Taylor 模型的低丘红壤区水热通量变化及影响因素[J]. *中国农村水利水电*, 2020(9): 1–7.
- YAO Huanhuan, JING Yuanshu, HAN Lijuan. Research on the change of water and heat flux and influencing factors in low hilly red soil region based on Priestley–Taylor model[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(9): 1–7. (in Chinese)
- [46] 张宝忠. 干旱荒漠绿洲葡萄园水热传输机制与蒸发蒸腾估算方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2009.
- ZHANG Baozhong. Water and heat transfer mechanisms and evapotranspiration model of vineyards in the oasis of Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [47] TEIXEIRA A D C, BASTIAANSEN W, BASSOI L. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 94(1–3): 31–42.
- [48] TESTI L, VILLALOBOS F, ORGAZ F. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 121(1–2): 1–18.
- [49] 王修信, 汤谷云, 罗涟玲, 等. 喀斯特城市地表水热通量的时空变化研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3579–3589.
- WANG Xiuxin, TANG Guyun, LUO Lianling, et al. Spatio-temporal variation of land surface water and heat fluxes over Karst city[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3579–3589. (in Chinese)
- [50] 郑思宇, 王铁良, 魏新光, 等. 东北日光温室葡萄园水热通量特征及其对气象因子的响应[J]. *干旱地区农研究*, 2020, 38(4): 200–206.
- ZHENG Siyu, WANG Tieliang, WEI Xinguang, et al. Characteristics of water-heat flux in vineyard and its response to meteorological factors in solar greenhouse in the Northeastern China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 200–206. (in Chinese)
- [51] QIU R, KANG S, LI F, et al. Energy partitioning and evapotranspiration of hot pepper grown in greenhouse with furrow and drip irrigation methods[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(4): 790–797.
- [52] OLIVER H, SENE K. Energy and water balances of developing vines[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 61(3–4): 167–185.
- [53] ZHANG B Z, KANG S Z, ZHANG L, et al. Estimation of seasonal crop water consumption in a vineyard using Bowen ratio-energy balance method[J]. *Hydrological Processes: an International Journal*, 2007, 21(26): 3635–3641.
- [54] TIAN F, YANG P, HU H, et al. Energy balance and canopy conductance for a cotton field under film mulched drip irrigation in an arid region of Northwestern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 110–121.
- [55] 邹旭东, 蔡福, 李荣平, 等. 玉米农田水热通量及能量变化研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(8): 1642–1653.
- ZOU Xudong, CAI Fu, LI Rongping, et al. Study on water and heat flux and energy change of maize field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(8): 1642–1653. (in Chinese)
- [56] 余昭君, 胡笑涛, 冉辉, 等. 半湿润地区葡萄园水热通量特征及其对环境因子的响应[J]. *节水灌溉*, 2020(2): 96–101, 108.
- YU Zhaojun, HU Xiaotao, RAN Hui, et al. Characteristics of water heat flux in vineyard in semi-humid area and its response to environmental factors[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(2): 96–101, 108. (in Chinese)
- [57] 张雪松, 闫艺兰, 胡正华. 不同时间尺度农田蒸散影响因子的通径分析[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(4): 201–210.
- ZHANG Xuesong, YAN Yilan, HU Zhenghua. Using path analysis to identify impacting factors of evapotranspiration at different time scales in farmland[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(4): 201–210. (in Chinese)
- [58] QIU R, LIU C, CUI N, et al. Evapotranspiration estimation using a modified Priestley–Taylor model in a rice-wheat rotation system[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 224: 105755.
- [59] 刘健. 常用园林植物蒸腾耗水特性及生态效应研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2007.
- LIU Jian. Study on characteristic of transpiration and ecological function of familiar landscape plants[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2007. (in Chinese)