

冬小麦冠层温度对大气温度的时滞效应与影响因素研究

张智韬^{1,2} 张秋雨^{1,2} 杨宁^{1,2} 罗林育^{1,2} 黄嘉亮¹ 姚一飞^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:冠气温差能够间接监测作物水分变化规律,而冠层温度与大气温度的时滞效应会影响监测效果,为探明两者之间的时滞效应变化规律及影响因素,本研究以拔节期至乳熟期的冬小麦为研究对象,利用红外温度传感器连续监测灌溉上限分别为田间持水率的95%(T1)、80%(T2)、65%(T3)和50%(T4)4个不同灌溉处理的冠层温度,并同步获取短波净辐射(Short-wave net radiation, R_s)、大气温度(Atmospheric temperature, T_a)、相对湿度(Relative humidity, R_h)等气象数据。利用错位相关法计算冠层温度与大气温度的时滞时间(Time lag, T_L),分析其不同生育期和不同灌溉条件下变化规律,并采用相关性分析法探究气象因子(R_s 、 T_a 、 R_h)变化率和日均值与时滞时间的相关性,最后通过通径分析探讨气象因子(R_s 、 T_a 、 R_h)、土壤含水率(Soil moisture content, SMC)以及叶面积指数(Leaf area index, LAI)对时滞时间的共同影响。结果表明:不同生育期和不同灌溉条件下冬小麦冠层温度变化均提前于大气温度;在不同灌溉处理下,T1、T2和T3处理的时滞时间高于T4处理,且在不同生育期下,时滞时间呈现先减少再增加的趋势。短波净辐射变化率(Change rate of short-wave net radiation, R_{SCR})、大气温度变化率(Change rate of atmospheric temperature, T_{ACR})和相对湿度变化率(Change rate of relative humidity, R_{HCR})与时滞时间的相关性均高于对应日均值与时滞时间的相关性;同时, R_{SCR} 与时滞时间的相关程度最高(相关系数 R 为0.718~0.806), T_{ACR} 次之(R 为0.582~0.661), R_{HCR} 最低(R 为-0.534~-0.570)。利用通径分析发现,时滞时间主要受 R_{SCR} 、SMC以及LAI共同影响,但在不同灌溉条件下影响时滞时间的主要因素存在差异,其中T1、T2和T3处理主要受 R_{SCR} 和LAI影响,而T4主要受 R_{SCR} 和SMC影响。研究可为利用冠气温差信息监测作物水分变化进一步提供理论依据。

关键词:冬小麦;冠层温度;时滞效应;土壤含水率;叶面积指数;通径分析

中图分类号:S512.1;S161

文献标识码:A

文章编号:1000-1298(2023)11-0359-10

OSID:



Time Lag Effect between Winter Wheat Canopy Temperature and Atmospheric Temperature and Its Influencing Factors

ZHANG Zhitao^{1,2} ZHANG Qiuyu^{1,2} YANG Ning^{1,2} LUO Linyu^{1,2} HUANG Jialiang¹ YAO Yifei^{1,2}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shannxi 712100, China)

Abstract: Canopy-air temperature difference can indirectly monitor the variation of crop moisture, and the time lag effect between canopy temperature and atmospheric temperature will affect the monitoring effect. In order to explore the characteristics and influencing factors of the time lag effect between canopy temperature and atmospheric temperature, winter wheat from jointing stage to ripening stage was used as the research object. The infrared temperature sensor was used to continuously monitor the canopy temperature of four different irrigation treatments with irrigation upper limits of 95% (T1), 80% (T2), 65% (T3) and 50% (T4) of field water capacity, and simultaneously obtained meteorological data such as short-wave net radiation (R_s), atmospheric temperature (T_a) and relative humidity (R_h). The time lag between canopy temperature and atmospheric temperature was calculated by dislocation correlation method, and its variation characteristics under different growth stages and different irrigation conditions

收稿日期: 2023-04-27 修回日期: 2023-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979232, 52279047, 52179045)

作者简介: 张智韬(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事遥感技术在节水灌溉及水资源中的应用研究,E-mail: zhitaozhang@126.com

were analyzed. The correlation analysis method was used to explore the correlation between the change rate and daily mean value of meteorological factors (R_s , T_A , R_H) and time lag. Finally, the common influence of meteorological factors (R_s , T_A , R_H), soil moisture content (SMC) and leaf area index (LAI) on time lag was discussed by path analysis. The results showed that the change of winter wheat canopy temperature was ahead of the atmospheric temperature under different growth stages and different irrigation conditions; under different irrigation treatments, the lag time of T1, T2 and T3 treatments was higher than that of T4 treatment, and the lag time was decreased firstly and then increased at different growth stages. The correlation between the change rate of shortwave net radiation (R_{SCR}), the change rate of atmospheric temperature (T_{ACR}) and the change rate of relative humidity (R_{HCR}) and the time lag was higher than that between the corresponding daily mean and the time lag. At the same time, the correlation between R_{SCR} and lag time was the highest ($R = 0.718 \sim 0.806$), followed by T_{ACR} ($R = 0.582 \sim 0.661$) and R_{HCR} ($R = -0.534 \sim -0.570$). Path analysis showed that the lag time was mainly affected by R_{SCR} , SMC and LAI, but the main factors affecting the lag time were different under different irrigation conditions. T1, T2 and T3 treatments were mainly affected by R_{SCR} and LAI, while T4 was mainly affected by R_{SCR} and SMC. The research result can provide a theoretical basis for monitoring crop water changes by using canopy temperature difference information.

Key words: winter wheat; canopy temperature; time lag effect; soil moisture content; leaf area index; path analysis

0 引言

冠层温度(Canopy temperature, T_c)是指作物冠层茎、叶表面温度的平均值,是土壤、作物和大气之间水热交换的结果,是反映作物水分状况的重要指标之一^[1-3]。为了进一步了解冠层温度的变化规律,许多研究者分析了冠层温度与环境因子之间的关系,以期定量阐明环境条件变化对冠层温度的影响,为农业墒情监测提供一定理论依据^[4-6]。同时随着热红外技术的发展,利用冠层温度及大气温度信息监测植物含水率或者土壤含水率变化得到广泛研究^[7-11]。然而冠层温度与大气温度变化存在一定的滞后效应,使得利用冠气温差信息监测农田水分状况的精度降低,应用受限^[12-14]。

了解和量化冠层温度与大气温度之间时滞效应变化规律和影响因素对于作物含水率及土壤含水率监测具有重要意义^[15-17]。李志军等^[15]探究了气象因素以及作物生长状态对玉米地表温度的影响规律并提出了综合调整温度监测不同时刻的土壤含水率,发现监测精度大幅提升。张智韬等^[16]发现利用考虑冠层温度与大气温度之间时滞效应后的冠气温差能够一定程度上提升土壤含水率的监测精度。研究发现冠层温度与环境因子之间并不是同步变化的,即作物冠层温度对于环境因子的变化需要一定时间的响应^[16-17]。有学者提出植被冠层吸收太阳短波辐射后,又以长波辐射的形式释放能量,使周围大气温度升高,导致冠层温度变化与大气温度变化存在一定的时间滞后^[18-19]。狄艳等^[20]探究冠层温度变化规律时发现小麦冠层温度日变化峰值滞后于

太阳辐射 60 min 左右;张智韬等^[16]研究了夏玉米冠层温度与气象因子之间的时滞效应,分析发现冠层温度到达峰值时间滞后于太阳净辐射 70 ~ 100 min,但超前于大气温度、相对湿度 30 ~ 60 min,且不同灌溉条件下时滞时间存在差异,说明作物冠层温度变化的时滞效应受多种因素共同影响。

目前大多数研究仅定量分析了某些单一因子变化对时滞效应的影响。例如,ZHANG 等^[21]探究了在不同生态系统中气象因子均值及其变化率、土壤含水率分别对时滞时间的影响,结果表明时滞时间主要受气象因子变化率的影响,而土壤含水率影响并不明显;HUANG 等^[17]分析了不同天气条件下气象因子日均值和土壤含水率对时滞效应的影响,发现在不同天气条件下影响时滞时间的主要因素存在差异且土壤含水率在水分亏缺状态下对时滞时间存在显著影响。但这些研究仅简单分析了某一因子单独对时滞时间的作用,并未考虑到各因子之间存在相互影响,且关于作物生理指标对于时滞效应的影响研究较少,因此对影响时滞效应变化的因素仍需进一步深入研究^[22-23]。

鉴于此,本文通过连续获取冬小麦从拔节期至乳熟期的冠层温度数据和气象数据,分析不同灌溉条件、不同生育期冬小麦冠层温度日变化规律;采用错位相关法量化并分析冠层温度与大气温度之间的时滞效应及其变化规律;通过相关性分析和通径分析定量讨论气象因子、土壤含水率以及叶面积指数分别对不同灌溉条件下时滞时间的影响以及各因子之间的相互作用,以期利用冠气温差信息监测作物含水率或土壤含水率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于陕西省杨凌区西北农林科技大学旱区节水研究院内的试验田展开,该地属于大陆性暖温带季风气候,具有春暖多风、夏热多雨等气候特征。年平均温度为 12.9℃,多年平均降雨量为 610.2 mm,平均蒸发量为 1 505.3 mm。该试验区域内土壤为中壤土,平均田间持水率为 22.0%,凋萎系数为 6.7% (均为质量含水率)。

在冬小麦生育期内利用滴灌系统进行区域灌溉与控水处理,设置 4 种不同的灌溉梯度,其灌溉上限分别控制在田间持水率的 95% (T1)、80% (T2)、65% (T3)、50% (T4),试验小区面积为 4 m×4 m,均配备水表和滴灌管,确保定量均匀灌溉,使整个小区小麦长势相当,同时相邻小区设置保护行,避免水分相互渗漏的影响。为严格保证每个灌溉处理不被破坏,整个试验区域搭建可移动式遮雨棚,避免自然降水的影响。冬小麦品种选用小堰 22,种植行间距为 25 cm,于 2021 年 10 月 17 日进行播种,2022 年 6 月 5 日收获。

1.2 试验数据采集

1.2.1 冠层温度及气象因子

为获取连续冬小麦冠层温度变化数据,分别在 4 个不同灌溉处理的小区正上方距离地表 2.5 m 处安装精密红外温度传感器 (Apogee SI-411 型),该传感器视场范围半角为 22°,响应时间为 0.1 s,监测精度可达 ±0.2℃。同时试验区域内安装小型气象站监测气象因子变化,其中包括短波净辐射 (R_s)、大气温度 (T_A)、空气相对湿度 (R_H)、风速 (Wind speed, W_s) 等,数据采集时间间隔均为 2 min。在试验地周边设有杨凌国家一般气象站,可获得长时间降雨量 (Precipitation, P) 等气象资料。监测传感器详细信息如表 1 所示。

表 1 气象站监测传感器信息

气象因子	传感器类型
短波净辐射 (R_s , W/m ²)	Apogee SN500
大气温度 (T_A , ℃)	HC2AS3
相对湿度 (R_H , %)	
风速 (W_s , m/s)	Lambrecht 14574
冠层温度 (T_c , ℃)	Apogee SI-411
降雨量 (P , mm)	

1.2.2 土壤含水率

试验期间利用 TDR-310H 型传感器连续监测深度 10、20、40 cm 的土壤含水率变化,该传感器响

应时间为 0.7 s,监测精度为 ±2%。同时采用土钻取土干燥法测定每个试验小区深度 10、20、40 cm 的土壤含水率,并将其作为实测土壤含水率对传感器监测的土壤含水率进行校准。不同深度的土壤含水率均值作为深度 0~40 cm 的土壤含水率。

1.2.3 叶面积指数

采用三点取样法,在每个试验小区选取 3 株具有代表性的小麦,进行茎叶分离后通过数字图像处理技术的摄影方法提取单株叶面积^[24-25],然后利用 3 株小麦叶面积均值乘以单位面积单茎数得到叶面积指数。试验期间每隔 3~7 d 测量一次叶面积指数。

1.3 数据处理

考虑到冬小麦生长前期植被覆盖度不高,土壤温度对冬小麦冠层温度监测会造成一定的影响,为减小该误差,本研究的数据时段选择从冬小麦拔节期至乳熟期。

1.3.1 错位相关法

采用错位相关法量化冬小麦冠层温度与大气温度之间的时滞效应^[26-27]。首先按照观测时间顺序将冠层温度时间序列 x_i 与大气温度时间序列 y_i 一一对应;其次将冠层温度数据以步长 2 min 进行移动并计算两者的相关系数,当相关系数达到最大时,此时移动的时间即为两者的时滞时间。其中相关系数计算公式为

$$R_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_i)(y_{i+k} - \bar{y}_{i+k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} (y_{i+k} - \bar{y}_{i+k})^2}} \quad (1)$$

式中 R_k ——当移动数为 k 时的相关系数

n ——样本量 x_i ——冠层温度

y_{i+k} ——大气温度

$\bar{x}_i$ ——冠层温度序列均值

$\bar{y}_{i+k}$ ——大气温度序列均值

其中 $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$, 当 $k>0$ 时表示冠层温度变化提前于大气温度,反之则表示冠层温度变化滞后于大气温度。

最大相关系数 R_m 为

$$R_m = \max(R_k) \quad (2)$$

当相关系数达到最大时,时滞时间计算公式为

$$T_L = 2m \quad (3)$$

式中 T_L ——时滞时间, min

m ——当相关系数最大时冠层温度序列的
动数

1.3.2 气象因子变化率

气象因子变化率 (Change rate of meteorological

factors, M_{CR}) 计算公式为^[28]

$$M_{CR} = \frac{M_p - M_0}{t_p - t_0}$$

(4)

式中 M_p ——冠层温度到达峰值时刻的气象因子值,可表示 R_{Sp} 、 T_{Ap} 、 R_{Hp}
 M_0 ——冠层温度开始升高时刻的气象因子值,可表示 R_{S0} 、 T_{A0} 、 R_{H0}
 t_p ——冠层温度到达峰值的时刻
 t_0 ——冠层温度开始升高的时刻
气象因子变化率如图 1 所示。

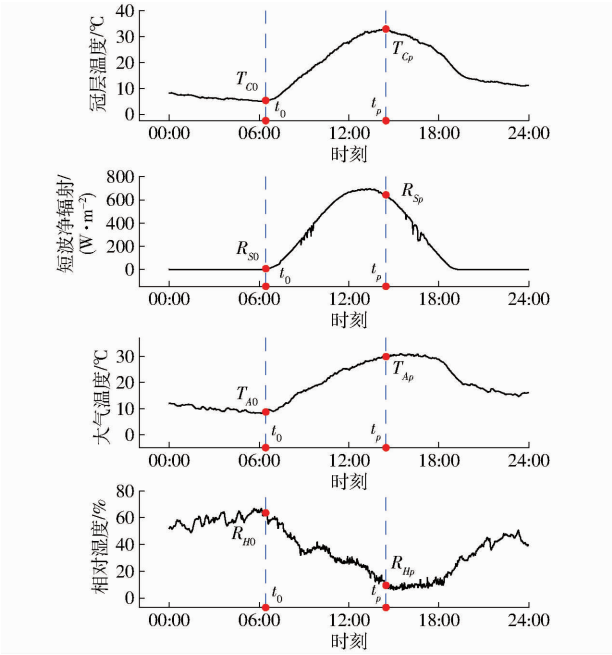


图 1 气象因子变化率

Fig. 1 Change rates of meteorological factors

1.3.3 相关性分析

相关性分析是用于研究 2 个变量或多个变量之间相关关系的方法。本研究中使用该方法分析气象因子(短波净辐射、大气温度和相对湿度)的均值及其变化率、土壤含水率以及叶面积指数分别对冠层温度与大气温度之间时滞效应的影响。

1.3.4 通径分析

通径分析是多元回归分析的扩展,它能分析多个自变量与多个因变量之间的因果关系,也能将自变量与因变量的相关关系剖分成自变量对因

变量的直接影响(即直接途径系数)以及该自变量通过其他自变量对因变量的间接影响(即间接途径系数)^[29],在本研究中,利用通径分析量化气象因子、土壤含水率以及作物生长因子对时滞效应的直接与间接影响,并剔除所有对时滞效应影响不显著($p > 0.05$)的因子,最终模型仅使用与 T_L 显著相关的变量来确定其对 T_L 的直接和间接影响。

1.3.5 评价指标

通过相关系数 R 评价气象因子、土壤含水率和作物生长因子变化与冠层温度和大气温度之间时滞时间的相关性,判断 2 个变量的显著水平 p , $p > 0.05$ 则表示两者无显著性差异, $p < 0.05$ 表示两者在 5% 水平上显著(记作 *), $p < 0.01$ 表示两者在 1% 水平上显著(记作 **), $p < 0.001$ 表示两者在 0.1% 水平上显著(记作 ***)^[30]。

2 结果与分析

2.1 冬小麦冠层温度日变化规律

在冬小麦不同生育期内,选取 3 d(3 月 8 日、4 月 6 日及 5 月 6 日)晴朗天气条件下 4 种灌溉处理的冬小麦冠层温度数据,分析生育期变化及不同灌溉条件对冠层温度日变化的影响,如图 2 所示。由图 2 可知,作物冠层温度日变化曲线在不同生育期、不同灌溉处理条件下形状相似,均呈现单峰变化。在一天中,冠层温度 07:00 之前呈现下降趋势, 07:00 之后开始逐渐升高,并在 13:30—14:30 达到峰值,随后逐渐减小。

在不同条件下冠层温度峰值及到达峰值的时间存在差异。就冠层温度峰值而言,随着生育期的变化,冠层温度呈升高趋势,主要原因是不同季节太阳短波净辐射存在差异,短波净辐射越高,冠层温度随之升高;在不同灌溉处理条件下,T4 灌溉处理的冠层温度峰值最高,T3 灌溉处理次之,T1 和 T2 灌溉处理峰值基本一致且最低。从冠层温度到达峰值的时间来看,在不同生育期下其并无明显的规律;而在不同灌溉处理条件下,T4 灌溉处理到达峰值的时间晚于其余 3 个处理。经分析发现,冬小麦在拔节期

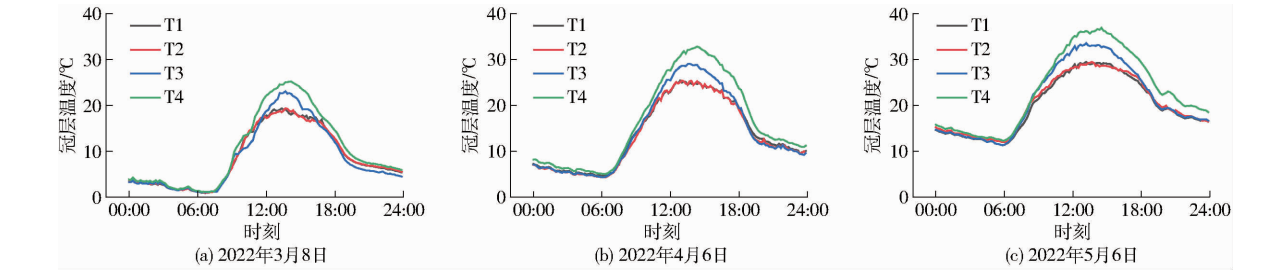


图 2 不同生育期下不同灌溉处理的冠层温度日变化曲线

Fig. 2 Diurnal variations of canopy temperature under different irrigation treatments at different growth stages

后适宜生长的土壤含水率为田间持水率的 70% 左右^[31],因此 T1 和 T2 灌溉处理的冬小麦未受到土壤水分胁迫的影响,叶片可正常进行蒸腾作用,冠层温度相差不大且相对较低,而 T3 灌溉处理遭受轻度的水分胁迫,叶片气孔出现部分关闭,所以冠层温度高于 T1 和 T2 处理。T4 处理一直处于水分亏缺状态,叶片蒸腾丧失的水分未得到及时补充,为保证作物正常生命活动,叶片气孔会出现大部分或完全关闭,冠层温度持续升高,因此该处理的冠层温度最高且到达峰值的时间最晚。

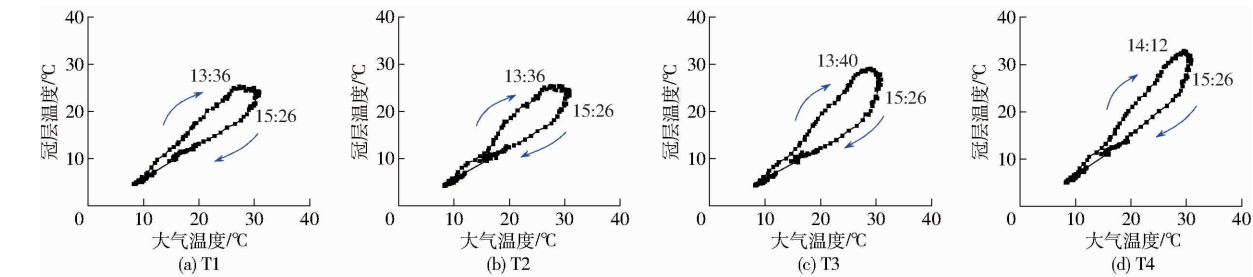


图 3 作物冠层温度变化对大气温度时滞响应曲线

Fig. 3 Time-delay response curves of crop canopy temperature to atmospheric temperature

采用错位相关法量化作物冠层温度与大气温度之间的时滞效应,并计算 T_L (图 4、5)。结果显示,在不同灌溉条件下,冠层温度变化对大气温度的响应时间存在差异。其中 T1、T2 和 T3 灌溉处理的 T_L 相差不大,平均为 44 min 左右(提前 44 min);而 T4 处理的 T_L 均值为 32 min,低于其余 3 个处理。在冬小麦主要生育期内,冠层温度变化对大气温度响应的 T_L 存在波动性变化,从拔节期至乳熟期时滞时间呈先减少后增加的趋势。当发生降雨时,短波净辐射减少,大气温度降低,空气相对湿度升高,导致时滞时间出现明显缩短。这表明作物冠层温度与大气温度之间的时滞时间可能受到气象因子变化、土壤含水率以及作物自身生长状况等多种因素的影响,且不同因素的影响程度存在差异。

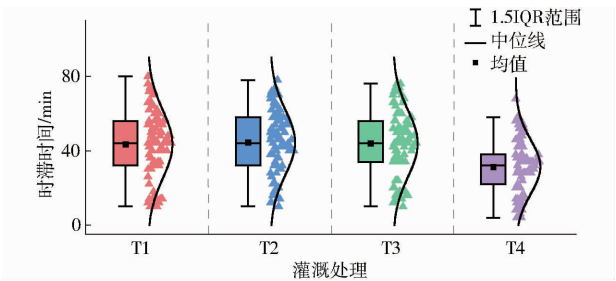


图 4 不同灌溉条件下时滞时间

Fig. 4 Lag time under different irrigation conditions

2.3 气象因子、土壤含水率和叶面积指数与时滞时间的相关性分析

2.3.1 气象因子和土壤含水率对时滞效应的影响

为量化气象因子和土壤含水率对冠层温度时滞

2.2 冬小麦冠层温度对大气温度的时滞响应变化特征

不同灌溉条件下冬小麦冠层温度变化对大气温度变化的时滞响应曲线如图 3(以 4 月 6 日为例)所示,可以发现该曲线呈明显的“迟滞回环”现象,且该回环呈顺时针变化,说明在同一大气温度条件下,上午的冠层温度高于下午,表明在一天内上午与下午冠层温度对大气温度的敏感性存在较大差异,且发现在不同灌溉条件下冠层温度到达峰值的时间均提前于大气温度。

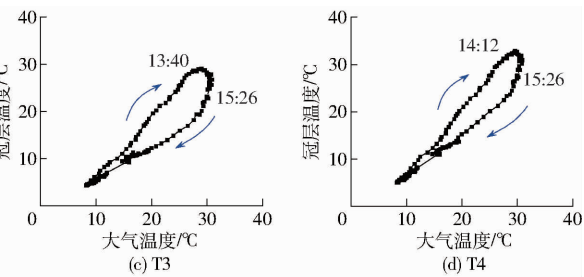


图 3 作物冠层温度变化对大气温度时滞响应曲线

Fig. 3 Time-delay response curves of crop canopy temperature to atmospheric temperature

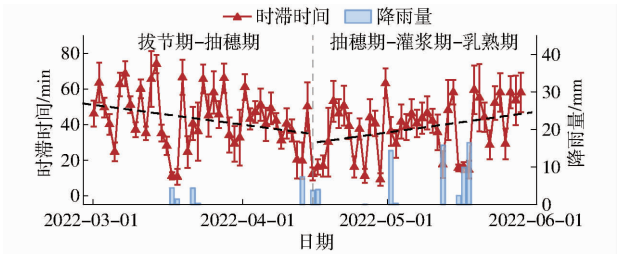


图 5 不同生育期下时滞时间

Fig. 5 Lag time in different growth stages

效应的影响程度,将气象因子和土壤含水率与 T_L 进行相关性分析,结果如表 2 所示。可以看出,在不同灌溉处理下, T_L 与短波净辐射变化率(R_{SCR})、大气温度变化率(T_{ACR})和相对湿度变化率(R_{HCR})存在较高相关性,相关系数绝对值大都高于 0.550 ($p < 0.001$),且相关系数绝对值 $R_{SCR} > T_{ACR} > R_{HCR}$;而 T_L 与 R_s 、 T_a 和 R_h 的日均值相关性不高,其相关系数绝对值大部分低于 0.300。研究发现不同灌溉处理下的土壤含水率与 T_L 的相关性存在差异,在 T1、T2 和 T3 灌溉处理下,两者之间不存在显著相关性,其相关系数均低于 0.105;而在 T4 灌溉处理中,两者之间的相关系数为 0.450,呈现极显著相关关系。这说明 T_L 与土壤含水率的关系可能是分段式的或者是非线性的,只有当土壤含水率低于特定的阈值或者作物处于严重的水分胁迫时,土壤水分才是影响时滞效应变化的重要因素^[32]。

2.3.2 叶面积指数对时滞效应的影响

叶面积指数与时滞时间的相关性分析结果如图 6 所示。由图 6 可知,在不同灌溉处理条件下,叶

表 2 气象因子均值及变化率和土壤含水率与时滞时间的相关系数

灌溉处理	样本量	气象因子						土壤含水率
		日均值			变化率			(SMC)
		R_s	T_A	R_H	R_{SCR}	T_{ACR}	R_{HCR}	日均值
全部处理	240	0.182 **	-0.105	-0.257 ***	0.726 ***	0.582 ***	-0.534 ***	0.228 ***
T1	60	0.119	-0.208	-0.252 *	0.742 ***	0.635 ***	-0.570 ***	0.011
T2	60	0.175	-0.180	-0.232	0.718 ***	0.604 ***	-0.564 ***	0.101
T3	60	0.220	-0.030	-0.214	0.806 ***	0.646 ***	-0.567 ***	0.025
T4	60	0.282 *	-0.085	-0.423 ***	0.757 ***	0.661 ***	-0.550 ***	0.450 ***

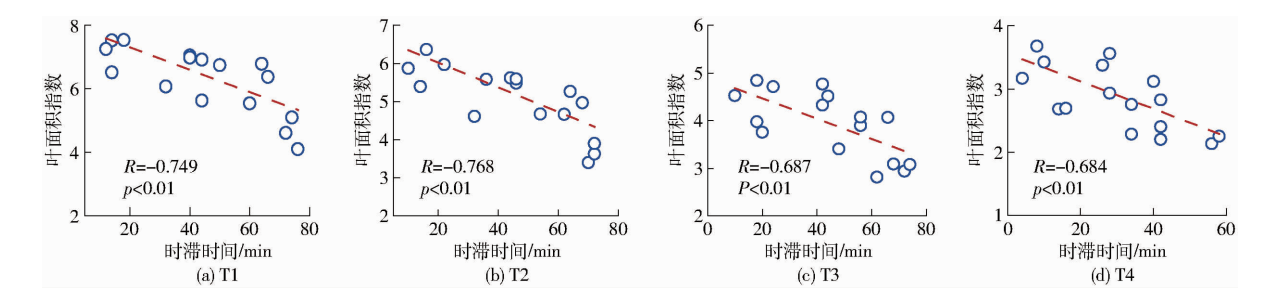


图 6 作物叶面积指数与时滞时间相关性分析
Fig.6 Correlation analysis between crop leaf area index and lag time

面积指数与时滞时间存在显著的负相关关系 ($p < 0.01$),即随着叶面积指数的增加,时滞时间逐渐缩短。这说明时滞时间不仅受到环境因子变化的影响,同时叶面积指数也对冠层温度变化存在一定程度的影响。

2.4 环境因子和叶面积指数与时滞时间的回归和通径分析

为了明确环境因子变化和叶面积指数对时滞

效应的具体作用,了解各因子之间的相互作用,进行通径分析。只有当自变量对因变量的影响达到显著水平 ($p < 0.05$) 时才能进行通径分析^[33],因此本研究以气象因子变化率 (R_{SCR} 、 T_{ACR} 、 R_{HCR})、土壤含水率 (SMC)、叶面积指数 (LAI) 作为自变量, T_L 作为因变量进行逐步回归分析 (表 3),筛选出对时滞时间显著影响的因子,从而进行通径分析 (表 4)。

表 3 不同灌溉条件下逐步回归分析
Tab.3 Stepwise regression analysis under different irrigation conditions

灌溉处理	回归方程	R^2	p	样本量
全部处理	$T_L = -10.160 + 0.415R_{SCR} + 1.628SMC - 3.150LAI$	0.540	<0.001	64
T1	$T_L = 100.103 + 0.412R_{SCR} - 13.326LAI$	0.798	<0.001	16
T2	$T_L = 96.683 + 0.366R_{SCR} - 15.406LAI$	0.826	<0.001	16
T3	$T_L = 74.731 + 0.421R_{SCR} - 15.431LAI$	0.801	<0.001	16
T4	$T_L = -60.741 + 0.330R_{SCR} - 3.657SMC$	0.836	<0.001	16

由表 3 可知,对于所有灌溉处理的冬小麦, R_{SCR} 、SMC 以及 LAI 是影响冠层温度与大气温度之间时滞效应的主要因素,T1、T2 和 T3 灌溉处理下, R_{SCR} 和 LAI 是影响 T_L 的主要因素,而 T4 灌溉处理下 R_{SCR} 和 SMC 是影响时滞时间的主要因素。

由表 4 可知,对于所有灌溉处理, R_{SCR} 、SMC 和 LAI 均呈现显著的直接影响 ($p < 0.05$),其中 R_{SCR} 、SMC 表现出正向影响,而 LAI 表现出负向影响。对于 T1、T2、T3 和 T4 灌溉处理, R_{SCR} 对时滞效应均呈现显著正向直接影响 ($p < 0.001$),直接通径系数均高于 0.550。在 T1、T2 和 T3 灌溉处理下, LAI 呈现

显著负向直接影响 ($p < 0.01$),直接通径系数绝对值均高于 0.500, SMC 表现出负直接影响,但其直接影响并不显著,主要通过影响 R_{SCR} 和 LAI 从而间接影响时滞效应。对于 T4 灌溉处理, LAI 虽然也呈现负直接影响,但直接影响并不显著,主要通过影响 R_{SCR} 和 SMC 从而间接影响时滞效应,而 SMC 却呈现出显著的正向直接影响 ($p < 0.001$),直接通径系数为 0.476。综上,气象因子变化率、土壤含水率以及叶面积指数之间存在相互影响,相关性分析只能片面评价各因子与时滞效应的关系,利用通径分析能够更加清晰地研究各因子对时滞效应的影响,以避

表 4 环境因子和叶面积指数与时滞时间的通径分析
Tab. 4 Path analysis of environmental factors, leaf area index and lag time

灌溉处理	自变量	简单相关系数	直接通径系数	间接通径系数			合计
				R_{SCR}	SMC	LAI	
全部处理	R_{SCR}	0.693 ***	0.587 ***		0.076	0.030	0.106
	SMC	0.364 **	0.332 **	0.134		-0.102	0.032
	LAI	-0.152	-0.225 *	-0.079	0.152		0.073
T1	R_{SCR}	0.685 **	0.585 ***		-0.057	0.157	0.100
	SMC	0.166	-0.161	0.208		0.119	0.327
	LAI	-0.749 ***	-0.633 ***	-0.146	0.030		-0.116
T2	R_{SCR}	0.717 ***	0.583 ***		-0.067	0.201	0.134
	SMC	0.296	-0.183	0.212		0.267	0.479
	LAI	-0.768 ***	-0.667 ***	-0.175	0.074		-0.101
T3	R_{SCR}	0.778 ***	0.671 ***		-0.056	0.163	0.107
	SMC	0.212	-0.164	0.223		0.153	0.376
	LAI	-0.687 **	-0.528 **	-0.206	0.047		-0.159
T4	R_{SCR}	0.700 **	0.553 ***		0.076	0.071	0.147
	SMC	0.710 ***	0.476 ***	0.088		0.147	0.235
	LAI	-0.684 **	-0.252	-0.155	-0.277		-0.432

免出现分析误差。

3 讨论

冠层温度与大气温度之间的时滞效应被认为是由许多复杂且相互关联的植物生理活动共同作用产生的现象,比如植物内部气孔关闭的控制与土壤水分的吸收与运移之间的相互作用,因此冠层温度的时滞效应受到环境因子(气象因子、土壤含水率以及季节变化等)和植物自身的生理生长因子(植物种类、叶面积指数以及气孔导度等)影响^[21,28,34-35]。本研究表明在日尺度上不同灌溉处理的作物冠层温度变化对大气温度变化响应均存在时滞效应,时滞响应曲线均呈顺时针变化,冠层温度变化提前于大气温度,这与前人的研究结果一致^[17,36-37],然而不同灌溉条件下以及不同生育期 T_L 存在差异。

许多研究提出时滞效应受到多种气象因子(R_s 、 T_A 、 R_H 、饱和水汽压差(VPD)等)变化的影响^[38-39]。一些研究者定量分析了气象因子对 T_L 的影响,例如 HONG 等^[40] 研究发现 T_L 与 R_s 、VPD 的日均值存在显著的正相关关系;HUANG 等^[17] 分析了不同天气条件下时滞时间与 R_s 、 T_A 、 R_H 均值相关性,提出在不同天气条件下影响时滞时间的气象因子存在差异。然而本文发现 T_c 与 T_A 之间的时滞时间与气象因子日均值之间的关系并不显著,而是与气象因子变化率呈现极显著的关系($p < 0.001$)。从本质上分析,这可能是由于植物与环境之间的水分供需不平衡造成的。植物叶片水分容量限制叶片供水量的上限,气象因子(R_s 、 T_A 、 R_H)变化率控制叶片需水量,当叶片需水量超过供水量时,植物气孔会出现

部分关闭或完全关闭从而避免水分散失^[21,28],且气象因子变化率能够很好地反映气象因子日变化过程,而气象因子日均值仅表示一天中气象因子的平均水平,不能体现其日分布情况,因此日均值不能很好地解释时滞时间的变化。本研究分析气象因子对时滞效应影响时,发现 R_s 变化率对时滞效应的影响程度高于 T_A 、 R_H ,这可能是因为 T_A 、 R_H 的变化由 R_s 驱动,植物的蒸腾作用也会随着 R_s 的增加而升高,因此 R_s 变化率能更好地解释时滞时间的变化。

研究表明土壤含水率也是影响时滞效应的重要因素之一^[32,35,41]。WULLSCHLEGER 等^[41] 发现在潮湿土壤中时滞时间比在干燥土壤中更明显;TUZET 等^[32] 则认为在干旱条件下时滞时间随土壤含水率的降低而增大;而 ZHANG 等^[37] 量化了土壤含水率对时滞时间的影响,认为只有当土壤含水率低于 $0.175\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,土壤含水率才是影响时滞时间的关键因素。本研究结果显示,T1、T2 和 T3 灌溉处理下,冠层温度与大气温度之间的时滞时间差异不大,且土壤含水率对其影响并不显著($p > 0.05$),而在 T4 灌溉处理下,时滞时间有所缩短,且时滞时间与土壤含水率之间的相关性为极显著($p < 0.001$)。这可能是由于当作物在严重缺水状态下利用蒸腾作用调节叶片温度这一作用无法实现,即植物为了减少水分流失,保证作物存活,叶片气孔开放程度逐渐变小,从而导致叶片的蒸腾速率以及散热能力降低,冠层温度持续上升,到达峰值的时间变晚,因此与大气温度之间的时滞时间出现缩短。

众多研究者在研究影响树木液流与环境因子之

间时滞效应的影响因素时,发现树木自身结构特征也会影响时滞时间的变化。梅婷婷等^[42]研究树木胸径对液流变化时滞效应的影响时,发现随着胸径的增大,时滞时间逐渐变小;ZHANG 等^[28]分析了月尺度上树木叶面积指数对 T_L 的影响,结果表明 LAI 对 T_L 变化存在显著影响。在本文中,分析了作物叶面积指数对时滞效应的影响,发现两者之间存在显著负相关,即随着叶面积指数的增加,冠层温度与大气温度之间的 T_L 逐渐缩短。造成该现象的原因可能是随着叶面积的逐渐增加,植物生理活动愈加旺盛,对环境的适应能力逐渐增强,因此冠层温度的日变化曲线逐渐靠近大气温度日变化曲线, T_L 逐渐缩短。

作物冠层温度变化对大气温度响应的时滞效应不仅受到气象因子变化、土壤水分状态以及作物自身生理指标对其产生的直接影响,同时还会受到各因子之间的间接作用影响,因此本文利用通径分析法明确各因子对 T_L 的影响及其之间的相互作用。结果表明在不同灌溉条件下影响时滞效应的因素存在差异,对于所有灌溉处理,短波净辐射变化率、土壤含水率以及叶面积指数对 T_L 均存在显著直接影响;在 T1、T2 和 T3 灌溉处理下,短波净辐射变化率和叶面积指数主要通过直接影响时滞时间变化,而

土壤含水率则是通过影响短波净辐射变化率和叶面积指数间接影响时滞时间;而在 T4 灌溉处理下则是主要受短波净辐射变化率和土壤含水率直接影响,叶面积指数主要通过影响短波净辐射变化率和土壤含水率间接影响时滞效应。虽然本研究量化了气象因子、土壤含水率和叶面积指数对时滞效应的影响,但并未从气孔导度、叶片水势等其他作物生理指标对冠层温度时滞效应变化的影响进行深入探讨,后续研究会针对作物生理指标进行深入分析讨论。

4 结 论

- (1)冬小麦冠层温度变化对大气温度存在时滞效应,其中冠层温度变化提前于大气温度,在不同生育期及不同灌溉条件下,冠层温度变化与大气温度变化响应曲线呈顺时针迟滞回环。
- (2)在不同灌溉条件下,冠层温度变化对大气温度的响应时间存在差异,且在冬小麦不同生育期内,冠层温度变化对大气温度响应的时滞时间存在波动性变化。
- (3)冠层温度与大气温度之间的时滞时间变化受气象条件变化、土壤含水率以及叶面积指数共同影响,但不同灌溉条件下影响因素存在差异。

参 考 文 献

[1] 董振国. 作物层温度与土壤水分的关系[J]. 科学通报, 1986(8): 608 – 610.

[2] 蔡焕杰,康绍忠. 棉花冠层温度的变化规律及其用于缺水诊断研究[J]. 灌溉排水, 1997(1): 2 – 6.

[3] JACKSON R D, IDSO S B, REGINATO R J, et al. Canopy temperature as a crop water stress indicator[J]. Water Resources Research, 1981, 17(4): 1133 – 1138.

[4] 邓聪,吴志祥,谭正洪,等. 海南岛西部橡胶人工林冠层温度变化及其与微气象要素的关系[J]. 热带作物学报, 2020, 41(7): 1490 – 1497.

DENG Cong, WU Zhixiang, TAN Zhenghong, et al. Variations of canopy temperature in a rubber plantation in western Hainan island and their relations with micrometeorological factors[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(7): 1490 – 1497. (in Chinese)

[5] 史长丽,郭家选,梅旭荣,等. 夏玉米农田表面温度影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(1): 48 – 56.

SHI Changli, GUO Jiaxuan, MEI Xurong, et al. Analysis of the factors influencing surface temperature in summer maize field [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(1): 48 – 56. (in Chinese)

[6] 邓强辉,潘晓华,石庆华. 作物冠层温度的研究进展[J]. 生态学杂志, 2009, 28(6): 1162 – 1165.

DENG Qianghui, PAN Xiaohua, SHI Qinghua. Research advances on crop canopy temperature [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(6): 1162 – 1165. (in Chinese)

[7] BIAN J, ZHANG Z, CHEN J, et al. Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 267.

[8] 刘奇,张智韬,刘畅,等. 基于无人机遥感的夏玉米水分胁迫指数改进方法[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 68 – 77.

LIU Qi, ZHANG Zhitao, LIU Chang, et al. Improved method of crop water stress index based on UAV remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 68 – 77. (in Chinese)

[9] HAN M, ZHANG H, DEJONGE K C, et al. Comparison of three crop water stress index models with sap flow measurements in maize[J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 366 – 375.

[10] 张智韬,许崇豪,谭承轩,等. 覆盖度对无人机热红外遥感反演玉米土壤含水率的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 213 – 225.

ZHANG Zhitao, XU Chonghao, TAN Chengxuan, et al. Influence of coverage on soil moisture content of field corn inversed from thermal infrared remote sensing of UAV [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 213 – 225. (in Chinese)

[11] 张智韬,许崇豪,谭丞轩,等. 基于无人机热红外遥感的玉米地土壤含水率诊断方法[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 180 – 190.
ZHANG Zhitao, XU Chonghao, TAN Chengxuan, et al. Diagnosing method of soil moisture content in corn field based on thermal infrared remote sensing of UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 180 – 190. (in Chinese)

[12] 韩文霆,张立元,牛亚晓,等. 无人机遥感技术在精量灌溉中应用的研究进展[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 1 – 14.
HAN Wenting, ZHANG Liyuan, NIU Yaxiao, et al. Review on UAV remote sensing application in precision irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 1 – 14. (in Chinese)

[13] BIJU S, FUENTES S, GUPTA D. The use of infrared thermal imaging as a non-destructive screening tool for identifying drought-tolerant lentil genotypes[J]. Plant Physiol Biochem, 2018, 127: 11 – 24.

[14] 陈仲新,任建强,唐华俊,等. 农业遥感研究应用进展与展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 748 – 767.
CHEN Zhongxin, REN Jianqiang, TANG Huajun, et al. Progress and perspectives on agricultural remote sensing research and applications in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 748 – 767. (in Chinese)

[15] 李志军,于广多,刘奇,等. 环境因子与玉米生长对地表温度监测土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(20): 77 – 85.
LI Zhijun, YU Guangduo, LIU Qi, et al. Effects of environmental factors and maize growth on surface temperature to monitor soil water contents[J]. Transactions of the CASE, 2022, 38(20): 77 – 85. (in Chinese)

[16] 张智韬,吴天奎,于广多,等. 夏玉米冠层温度变化的时滞效应及其对土壤水分监测的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 117 – 124.
ZHANG Zhitao, WU Tiankui, YU Guangduo, et al. Time delay effect of summer maize canopy temperature change and its influence on soil moisture content monitoring[J]. Transactions of the CASE, 2022, 38(1): 117 – 124. (in Chinese)

[17] HUANG J L, WANG S, GUO Y H, et al. Hysteresis between winter wheat canopy temperature and atmospheric temperature and its driving factors[J]. Plant and Soil, 2022: 1 – 17.

[18] LU C G, XIA S J, CHEN J, et al. Plant temperature and its simulation model of thermo-sensitive genic male sterile rice[J]. Rice Science, 2008, 15(3): 223 – 231.

[19] RICOTTA C, AVENA G C, TEGGI S. Relation between vegetation canopy surface temperature and the sun-surface geometry in a mountainous region of central Italy[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(14): 3091 – 3096.

[20] 狄艳,高懋芳,李强,等. 不同灌溉梯度下冬小麦冠层温度与土壤水分关系研究[J]. 中国农业信息, 2021, 33(2): 13 – 23.
DI Yan, GAO Maofang, LI Qiang, et al. Study on the relationship between winter wheat canopy temperature and soil moisture under different irrigation gradients[J]. China Agricultural Informatics, 2021, 33(2): 13 – 23. (in Chinese)

[21] ZHANG R F, XU X L, LIU M X, et al. Comparing ET – VPD hysteresis in three agroforestry ecosystems in a subtropical humid karst area[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 454 – 464.

[22] BO X D, DU T S, DING R S, et al. Time lag characteristics of sap flow in seed-maize and their implications for modeling transpiration in an arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(4): 515 – 529.

[23] JIANG S Z, ZHAO L, LIANG C, et al. Leaf- and ecosystem-scale water use efficiency and their controlling factors of a kiwifruit orchard in the humid region of Southwest China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 260: 107329.

[24] 范军亮,王涵,廖振棋,等. 基于纹理-颜色特征与植被指数融合的冬小麦 LAI 估测[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 347 – 359.
FAN Junliang, WANG Han, LIAO Zhenqi, et al. Winter wheat leaf area index estimation based on texture – color features and vegetation indices[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 347 – 359 (in Chinese)

[25] FANG H L, BARET F, PLUMMER S, et al. An overview of global leaf area index (LAI): methods, products, validation, and applications[J]. Reviews of Geophysics, 2019, 57(3): 739 – 799.

[26] 刘家霖,满秀玲,胡悦. 兴安落叶松天然林不同分化等级林木树干液流对综合环境因子的响应[J]. 林业科学研究, 2016, 29(5): 726 – 734.
LIU Jialin, MAN Xiuling, HU Yue. Response of tree sap flow of *Larix gmelinii* with various differentiation classes to multiple environmental factors[J]. Forest Research, 2016, 29(5): 726 – 734. (in Chinese)

[27] PHILLIPS N, NAGCHAUDHURI A, OREN R, et al. Time constant for water transport in loblolly pine trees estimated from time series of evaporative demand and stem sapflow[J]. Trees, 1997, 11(7): 412 – 419.

[28] ZHANG R F, XU X L, LIU M X, et al. Hysteresis in sap flow and its controlling mechanisms for a deciduous broad-leaved tree species in a humid karst region[J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(11): 1744 – 1755.

[29] 郭相平,高爽,吴梦洋,等. 中国农作物水足迹时空分布与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 295 – 302.
GUO Xiangping, GAO Shuang, WU Mengyang, et al. Analysis of temporal-spatial distribution and influencing factors of water footprint in crop production system of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 295 – 302. (in Chinese)

[30] 于广多. 基于无人机遥感的夏玉米田间土壤含水率监测指数研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022.
YU Guangduo. Monitoring index study of soil water content in summer maize fields based on UAV remote sensing data[D].

Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[31] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 2版. 北京:中国农业出版社, 2013.

[32] TUZET A, PERRIER A, LEUNING R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration[J]. Plant, Cell and Environment, 2003, 26(7): 1097 – 1116.

[33] TONG B, GUO J P, XU H, et al. Effects of soil moisture, net radiation, and atmospheric vapor pressure deficit on surface evaporation fraction at a semi-arid grass site[J]. Science of the Total Environment, 2022, 849: 157890.

[34] 孙晨娜,张晶,鲁志云,等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林冠层温度变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2023,29(1): 197 – 203. SUN Chenna, ZHANG Jing, LU Zhiyun, et al. Characteristics of canopy temperature in a subtropical evergreen broadleaf forest in Ailao Mountain[J]. Chinese Journal Applied and Environmental Biology, 2023, 29(1): 197 – 203. (in Chinese)

[35] 吴天奎. 作物冠层温度变化及其对环境因子的滞后效应分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022. WU Tiankui. Analysis of crop canopy temperature variation and its hysteresis effect to environmental factors[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)

[36] 王城城,叶文伟,赵从举,等. 热带桉树树干液流的时滞效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 25 – 32. WANG Chengcheng, YE Wenwei, ZHAO Congju, et al. Sap flow in the stem of *Eucalyptus* and changes in meteorological factors are not consistent[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 25 – 32. (in Chinese)

[37] ZHANG Q, MANZONI S, KATUL G, et al. The hysteretic evapotranspiration-vapor pressure deficit relation[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119(2): 125 – 140.

[38] 王瑛,刘美君,杜盛. 树干液流时滞特征及影响因素研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(2): 507 – 514. WANG Ying, LIU Meijun, DU Sheng. Research progress in the characteristics and driving factors of time lags in stem sap flow [J]. Chinese Journal Applied and Environmental Biology, 2023, 29(2): 507 – 514. (in Chinese)

[39] XU S Q, YU Z B. Environmental control on transpiration: a case study of a desert ecosystem in Northwest China[J]. Water, 2020, 12(4): 1211.

[40] HONG L, GUO J B, LIU Z B, et al. Time-lag effect between sap flow and environmental factors of *larix principis-rupprechtii* Mayr[J]. Forests, 2019, 10(11): 971.

[41] WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TSCHAPLINSKI T J. Whole-plant water flux in understory red maple exposed to altered precipitation regimes[J]. Tree Physiol, 1998, 18(2): 71 – 79.

[42] 梅婷婷,赵平,倪广艳,等. 树木胸径大小对树干液流变化格局的偏度和时滞效应[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7018 – 7026. MEI Tingting, ZHAO Ping, NI Guangyan, et al. Effect of stem diameter at breast height on skewness of sap flow pattern and time lag[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7018 – 7026. (in Chinese)

(上接第 318 页)

[25] 李慧敏,申丽霞,王瑞军,等. 微润灌施下压力水头对湿润锋及土壤水氮运移的影响[J]. 节水灌溉, 2022(9): 81 – 86, 92. LI Huimin, SHEN Lixia, WANG Ruijun, et al. Effects of pressure head on moisture front and soil water and nitrogen transport under Moistube irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2022(9): 81 – 86, 92. (in Chinese)

[26] SUN H Y, LIU C M, ZHANG X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1 – 2): 211 – 218.

[27] 徐嘉惠,齐伟,刘俊,等. 农田干缩裂隙对微润灌土壤水氮运移及分布的影响[J]. 节水灌溉, 2022(7): 15 – 21. XU Jiahui, QI Wei, LIU Jun, et al. Effects of farmland desiccation crack on water and nitrogen transport and distribution under moistube irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2022(7): 15 – 21. (in Chinese)

[28] LI Y K, WANG L C, XUE X Z, et al. Comparison of drip fertigation and negative pressure fertigation on soil water dynamics and water use efficiency of greenhouse tomato grown in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184: 1 – 8.

[29] CAI Y H, YAO C P, WU P T, et al. Effectiveness of a subsurface irrigation system with ceramic emitters under low-pressure conditions[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106390.

[30] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, SEJNA M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 587 – 600.

[31] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN M T, SEJNA M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(7): 25.

[32] KANDELOUS M M, SIMUNEK J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS – 2D[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(7): 1070 – 1076.