

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.027

# 大田玉米水分胁迫指数经验模型建立方法

张立元<sup>1,2</sup> 牛亚晓<sup>1,2</sup> 韩文霆<sup>1,3</sup> 刘治开<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100; 2. 农业部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100;  
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 作物水分胁迫指数(Crop water stress index, CWSI)经验模型的建立与气候和种植条件密切相关。以内蒙古自治区鄂尔多斯市达拉特旗大田玉米为对象,研究了CWSI的最优经验模型。玉米在营养生长阶段(Vegetative stage, V期)、生殖期(Reproductive stage, R期)和成熟期(Maturation stage, M期)分别进行不同灌溉水平的处理,采用红外测温传感器采集玉米冠层温度。分别结合田间和实验地旁标准气象站空气温湿度数据建立了CWSI经验模型的无水分胁迫基线。基于2种无水分胁迫基线,分别利用饱和水汽压梯度获取的无蒸腾作用基线和5℃无蒸腾作用基线建立了4种CWSI经验模型,得出反映大田玉米水分胁迫状况的关系曲线,并进行对比。结果表明,基于实验地旁标准气象站空气温湿度数据建立的CWSI经验模型具有很大的波动性,并不能很好反映玉米的水分胁迫状况,其值常常超出正常范围(0~1)。而基于田间空气温湿度数据建立的CWSI经验模型则可以很好地监测内蒙古自治区大田玉米水分胁迫状况,M期3种不同水分处理(100%、52%和28%)具有较好的CWSI数值梯度,分别为0.03、0.14和0.32。相比于基于饱和水汽压梯度获取的无蒸腾作用基线,以5℃作为无蒸腾作用基线时得到的CWSI数值较小,可以较好地反映水分胁迫状况,对应上述M期3种不同水分处理CWSI值分别为0.02、0.10和0.22,具有较为合理的梯度。经过初步检验和分析,认为基于田间空气温湿度数据建立的CWSI经验模型较为合理,可以有效监测大田玉米水分胁迫状况。

**关键词:** 大田玉米; 水分胁迫; CWSI; 经验模型; 红外测温

中图分类号: S27 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)05-0233-07

## Establishing Method of Crop Water Stress Index Empirical Model of Field Maize

ZHANG Liyuan<sup>1,2</sup> NIU Yaxiao<sup>1,2</sup> HAN Wenting<sup>1,3</sup> LIU Zhikai<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China  
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The establishment of crop water stress index (CWSI) empirical model was closely related to climate and planting condition. Field maize CWSI empirical model was established in Dalat Banner, Ordos City, Inner Mongolia, trying to get the best empirical model. Different irrigation strategies were applied in the vegetative stage (V), reproductive stage (R) and maturation stage (M), respectively. Maize canopy temperature was obtained by infrared thermometry. Air temperature and humidity were acquired in the field and the adjacent standard weather station, respectively. Firstly, two CWSI lower lines were built, combined with maize canopy temperature, and based on field and weather station air temperature and humidity. And then based on the above CWSI lower lines, four CWSI empirical models were established with 5℃ as the CWSI upper line or using the saturated vapor pressure gradient (VPG) to get the CWSI upper line, respectively. Results showed that CWSI empirical model based on weather station air temperature and humidity was very volatile, its value always beyond the normal range of 0~1,

收稿日期: 2017-11-01 修回日期: 2017-12-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0403203)、自治区科技支疆项目(2016E02105)、西北农林科技大学学科重点建设项目(2017-C03)和陕西省水利科技项目(2017SLKJ-7)

作者简介: 张立元(1992—),男,博士生,主要从事无人机遥感与精准灌溉技术研究, E-mail: liyuanzhang@nwafu.edu.cn

通信作者: 韩文霆(1972—),男,研究员,博士生导师,主要从事无人机遥感与精准灌溉技术研究, E-mail: hanwt2000@126.com

which can not reflect the water stress status of maize. However, CWSI empirical model based on filed air temperature and humidity monitored the water stress status well. CWSI value of three different treatments of 100%, 52% and 28% in M stage were 0.03, 0.14 and 0.32, respectively, having good numerical gradient. The CWSI values, using 5°C as the upper line, were smaller, compared with the CWSI values using the upper line based on VPG, which could reflect the water stress status well. The CWSI values in M stage were 0.02, 0.10 and 0.22, respectively, with a reasonable numerical gradient. After preliminary analysis, it was considered that the CWSI empirical model based on filed air temperature and humidity was reasonable and could effectively monitor the water stress status of filed maize in Dalat Banner, Ordos City, Inner Mongolia.

**Key words:** filed maize; water stress; crop water stress index; empirical model; infrared thermometry

## 0 引言

农业作为干旱、半干旱地区的用水主体,其用水效率关乎有限水资源的可持续利用<sup>[1]</sup>。调亏灌溉作为提高农业用水效率的有效手段,可以在不减产或少量减产的情况下节约大量农业用水,从而提高农业用水效率<sup>[2-6]</sup>。然而,为了实现作物产量与灌溉用水之间的微妙平衡,需要充分了解作物对水分胁迫的响应以及有效的作物水分胁迫状况监测方法<sup>[7-9]</sup>。在众多作物水分胁迫监测方法中,传统的基于土壤与作物的监测方法费时、费力、成本较高<sup>[10-12]</sup>。众所周知,作物蒸腾作用具有降温效应,不同水分胁迫状态下作物实际蒸腾速率不同,相比于无水分胁迫的作物,其具有较高的冠层温度<sup>[13-14]</sup>。基于上述现象以及红外测温技术的发展,以冠层温度为基础建立的作物水分胁迫监测指数得到了广泛的应用<sup>[15-19]</sup>。

目前,应用最为广泛的为作物水分胁迫指数(Crop water stress index, CWSI)模型,建立方法主要为1981年IDSO等<sup>[20]</sup>提出的经验法和JACKSON等<sup>[21]</sup>提出的理论法。相比于理论法,经验法更为简易,只需监测冠层温度( $T_c$ )、空气温度( $T_a$ )以及相对湿度(Relative humidity, RH),得到了更为广泛的应用。国内外许多研究人员成功地将CWSI经验模型应用到作物水分胁迫状况监测,如孙道宗等<sup>[22]</sup>通过观测冬季和春季塑料大棚中不同灌溉条件下茶树的冠层温度、空气温湿度建立了CWSI经验模型,得出了反映茶树水分状况的关系曲线。高洪燕等<sup>[23]</sup>基于经验法得到了番茄CWSI模型,结合近红外、可见光波段信息实现了多信息融合的番茄冠层水分诊断。崔晓等<sup>[24]</sup>基于经验法探讨并建立了适合于中国华北地区夏玉米水分状况监测的CWSI模型。TAGHVAEIAN等<sup>[16]</sup>基于经验法建立了针对美国科罗拉多州北部的向日葵CWSI模型,并分析了CWSI与叶面积指数、叶水势等的相关性。IRMAK等<sup>[25]</sup>基于经验法建立的CWSI模型可以有效地监测及量

化地中海半干旱条件下玉米的水分胁迫状况。

在建立CWSI经验模型时,研究者采用不同方式建立了无水分胁迫基线( $T_c-T_a$ 下限)、无蒸腾作用基线( $T_c-T_a$ 上限)。如文献[26-28]采用干湿参考面的方式获取冠层温度与空气温度之差( $T_c-T_a$ )的上、下基线。然而为了保证应用效果,需要在实际应用中谨慎选择干湿参考面的位置<sup>[8]</sup>,也可以基于冠层-空气温度差( $T_c-T_a$ )与饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)、饱和水汽压梯度(Vapor pressure gradient, VPG)的线性关系分别建立下基线、上基线。相比于建立干湿参考面,通过采集空气温湿度得到VPD和VPG的方式在实施上更为容易。根据空气温湿度数据采集方式可以将其分为2种:①通过与实验田相邻的标准气象站采集空气温湿度数据,如TAGHVAEIAN等<sup>[16,19]</sup>。②通过田间布设传感器的方式采集空气温湿度数据,如TAGHVAEIAN等<sup>[17]</sup>、孙道宗等<sup>[22]</sup>以及崔晓等<sup>[24]</sup>。还有研究者如TAGHVAEIAN等<sup>[16]</sup>、JACKSON等<sup>[21]</sup>和张振华等<sup>[29]</sup>直接将5°C作为冠层-空气温度差( $T_c-T_a$ )上基线。

上述基于冠层温度和空气温湿度建立的CWSI经验模型在实际应用中都取得了一定的成果。但是CWSI经验模型与气候和种植条件密切相关<sup>[17]</sup>,为了得到内蒙古自治区鄂尔多斯市大田玉米的最优CWSI经验模型,以大田玉米为研究对象,在营养生长阶段(Vegetative stage, V期)、生殖期(Reproductive stage, R期)和成熟期(Maturation stage, M期)分别进行不同灌溉水平处理,通过对比分析上述CWSI经验模型对灌溉/降雨事件的响应情况以及对不同灌溉处理水平的识别能力,寻求建立CWSI经验模型的最优方式。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区域位于内蒙古鄂尔多斯市达拉特旗昭君镇(40°26′0.29″N, 109°36′25.99″E, 海拔1 010 m)。

玉米( 钧凯 918) 播种时间为 2017 年 5 月 20 日, 出苗时间为 6 月 1 日, 抽穗时间为 7 月 20 日, 收获时间为 9 月 7 日( 青储), 生长周期 110 d。玉米种植行距 58 cm、株距 25 cm、行向由东到西, 实验地面积 1. 13 hm<sup>2</sup>, 采用中心轴式喷灌机进行灌溉。为了排除其他因素的干扰, 根据种植经验进行施肥、施加除草剂。

实验地被划分为 5 个扇形区域( 图 1), 并以田间持水率的不同百分比在 V 期、R 期和 M 期( 2017

年 7 月 4 日—8 月 29 日) 进行不同梯度的水分处理, 田间持水率的 50% 为充分灌溉, 各个生长阶段的实际灌溉量与降雨量如表 1 所示。通过在喷灌机上安装流量计( MIK-2000H 型) 采集实际灌溉量, 通过与实验地相邻的标准气象站采集实际降雨量。通过在 5 个处理区布设土壤水分传感器( TDR 315L 型) 采集土壤含水率数据, 每个处理区布设一个土壤水分采集点, 每个点布设 6 个深度, 分别为 30、60、90、120、150、180 cm。

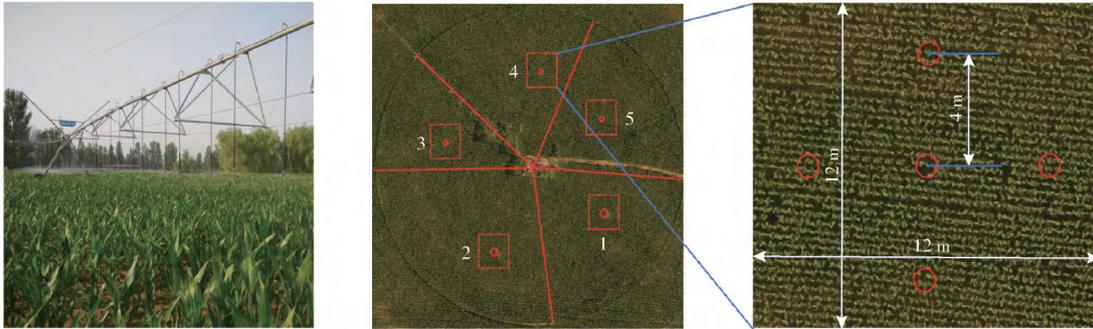


图 1 实验地分区情况

Fig. 1 Experimental partition

表 1 各个处理的实际灌溉/降雨量

Tab. 1 Experimental treatments and total applied water depths mm

水分处理区	V 期			R 期			M 期			总量
	7 月 4—28 日	7 月 29 日—8 月 20 日	8 月 21 日—9 月 7 日	7 月 4—28 日	7 月 29 日—8 月 20 日	8 月 21 日—9 月 7 日	7 月 4—28 日	7 月 29 日—8 月 20 日	8 月 21 日—9 月 7 日	
T1	188( 100%)	132( 100%)	82( 100%)	158( 84%)	128( 97%)	43( 52%)	158( 84%)	125( 95%)	43( 52%)	402
T2	158( 84%)	128( 97%)	43( 52%)	158( 84%)	125( 95%)	43( 52%)	158( 84%)	91( 69%)	23( 28%)	329
T3	158( 84%)	125( 95%)	43( 52%)	158( 84%)	91( 69%)	23( 28%)	158( 84%)	124( 94%)	82( 100%)	326
T4	158( 84%)	91( 69%)	23( 28%)	158( 84%)	124( 94%)	82( 100%)	158( 84%)	124( 94%)	82( 100%)	272
T5	158( 84%)	124( 94%)	82( 100%)	158( 84%)	124( 94%)	82( 100%)	158( 84%)	124( 94%)	82( 100%)	365

1. 2 田间数据采集

2017 年 8 月 6—29 日( 包含玉米 R 期和 M 期) 在田间同步采集玉米冠层温度数据和空气温湿度数据。通过手持红外测温仪雷泰( RAYTEK) ST60 + 型采集冠层温度, 光谱响应范围 8 ~ 14 μm, 测温范围 -32 ~ 600℃, 测量精度 ±1% 或 ±1℃ 中较大者, 辐射率设置为 0. 97。在晴朗天气、当地时间 12: 00—13: 00( 北京时间 12: 44—13: 44), 以图 2 方式采集冠层温度。为了避免土壤的影响, 面向南以与水平线 15° 夹角扫射冠层( 扫射范围为 120°) 得到冠层平均温度( 玉米种植行向为从东向西)。为了使采集的冠层温度更具有代表性, 在每个水分处理区选择土壤水分传感器节点及其前后左右各 4 m 处作为数据采集点( 图 1), 以 3 次测量的平均值作为每个点的冠层温度, 以 5 个采集点的平均值作为该处理的玉米冠层温度。在采集冠层温度数据的同时, 在上

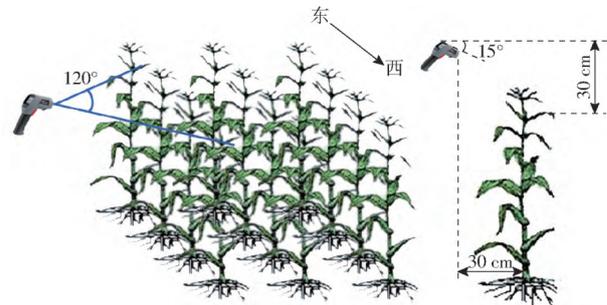


图 2 冠层温度采集方式

Fig. 2 Canopy temperature collection pattern

述 5 个采样点以 Klimalogg Pro 型手持温湿度计放置高度约为玉米高度 80% 的方式采集田间空气温湿度数据。

通过与实验地相邻的标准气象站采集气象数据, 主要包括降雨量、空气温湿度、太阳净辐射、风速( 距参考草面 2 m)。除降雨量外, 数据采集时间间隔为 30 min。研究期间( 2017 年 8 月 6—29 日) R 期和 M 期的主要气象参数如表 2 所示。

1. 3 CWSI 经验模型建立方法

CWSI 经验模型计算公式为

$$V_{CWSI} = \frac{T_c - T_a - T_L}{T_U - T_L} \tag{1}$$

式中  $V_{CWSI}$ ——作物水分胁迫指数

$T_a$ ——空气温度, ℃

$T_c$ ——冠层温度, ℃

$T_L$ ——冠层-空气温度之差下限, ℃

$T_U$ ——冠层-空气温度之差上限, ℃

表2 主要平均气象参数

Tab.2 Main mean meteorological parameters

主要平均气象参数	R期	M期
	(8月6—20日)	(8月21—29日)
平均日平均空气温度/℃	22.11	17.21
平均日最大空气温度/℃	31.31	25.46
平均日最小空气温度/℃	13.61	9.24
平均日最小相对湿度/%	29.78	33.23
平均日平均净辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	10.98	3.00
平均日平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.47	0.28

CWSI 为 0 表示没有水分胁迫现象,为 1 表示水分胁迫现状最为严重。研究表明,在当地时间 10:00—14:00 之间,  $T_L$  和  $T_U$  分别为

$$T_L = mP_{VPD} + b \quad (2)$$

$$T_U = mP_{VPG} + b \quad (3)$$

其中  $P_{VPD} = 0.6108 \frac{100 - P_{RH}}{100} \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3}\right)$  (4)

式中  $m$ ——斜率  $b$ ——截距

$P_{VPD}$ ——饱和水汽压差, kPa

$P_{VPG}$ ——饱和水汽压梯度, kPa(即当空气温度增加  $b$  时饱和水汽压差的变化)

$P_{RH}$ ——空气相对湿度, %

由于 CWSI 经验模型易受云层等的影响,为了保证数据的有效性,需要根据天气情况对得到的 CWSI 数据进行剔除。在本研究中,以冠层温度数据采集时间段(北京时间 12:44—13:44)的太阳净辐射与无云晴天(R期为2017年8月9日和2017年8月15日,M期为2017年8月24日)太阳净辐射的比值判断天气状况是否良好。两者之比大于 0.7 时,认为天气状况良好,在研究期间的 23 d 中,共有 17 d 满足上述条件。

## 2 结果与分析

### 2.1 基于田间空气温湿度度的 $T_c-T_a$ 下限

为了建立大田玉米 CWSI 经验模型的  $T_c-T_a$  下限,选择有效灌溉/降雨事件发生后的无云晴天,在充分灌溉区(区域1)连续(北京时间 10:44—14:44,数据采集时间间隔为 15 min)采集冠层温度、空气温湿度数据。一般认为在有效灌溉/降雨之后,土壤中水分充足,冠层与空气温度之差即为  $T_L$ 。为了减小数据的波动性,使获取的拟合曲线能更好地代表不同饱和水汽压差下的  $T_c-T_a$  下限,根据 IDSO 等<sup>[20]</sup>的方法,在绘制  $T_L$ -VPD 散点图之前将数据进行了三步移动平均。图 3 为 R 期(7月29日—8月20日),M 期(8月21日—9月7日)基于田间空气温湿度度的  $T_L$ -VPD 散点图,通过线性拟合得到的  $T_c-T_a$

下限分别为

$$R \text{ 期 } T_L = -2.64P_{VPD} + 0.42 \quad (R^2 = 0.891) \quad (5)$$

$$M \text{ 期 } T_L = -3.35P_{VPD} + 2.96 \quad (R^2 = 0.979) \quad (6)$$

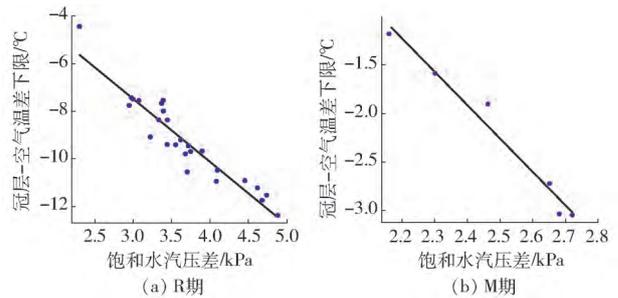


图3 基于田间气象数据的下底线

Fig.3 Lower limit based on field parameters

由图3可以看出,  $T_L$  与 VPD 的线性拟合结果较好,与 TAGHVAEIAN 等<sup>[19]</sup> ( $n = 6, R^2 = 0.98$ ) 和 IDSO 等<sup>[20]</sup> ( $n = 28, R^2 = 0.92$ ) 接近,但在 R 期和 M 期具有一定的差异。造成上述现象原因可能有:①如图4所示,进入 M 期之后空气温度显著下降,平均每日最高温度由 R 期的 31.31℃ 降低为 M 期的 25.46℃,下降幅度 5.85℃。②玉米在 M 期开始逐渐衰老,其生理特征如光合、蒸腾作用会发生明显的变化<sup>[24]</sup>。

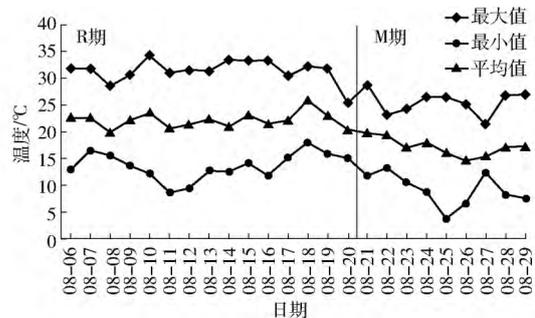


图4 研究期间空气温度变化

Fig.4 Air temperature changes during study period

为了更加直观地反映 M 期气候条件和玉米生理特性变化对 CWSI 经验模型的影响,分别基于 R 期和 M 期的冠层-空气温度之差上、下限得到了 M 期区域 1(100%)、区域 2(52%)、区域 3(52%)、区域 4(28%) 和区域 5(100%) 等 5 个处理的 CWSI 数据,并绘制了如图 5 所示的变化曲线,其中 T1\_R 和 T1\_M 分别表示区域 1 基于 R 期和 M 期基线数据得到的 CWSI。由图 5 可知,沿用 R 期基线数据会造成 M 期 CWSI 数值偏大,5 个处理的平均涨幅分别为 0.08、0.06、0.03、0.11 和 0.07。并且还会造成 CWSI 经验模型对水分胁迫的识别能力下降,如在 2017 年 8 月 29 日区域 1(100%) 的 CWSI 高达 0.33 与区域 4(28%) 的 0.37 较为接近,远高于区域 2(52%)、区域 3(52%) 的 0.19、0.28。综上所述,沿用 R 期的基线数据不仅会造成 CWSI 数据的

偏大,还会降低 CWSI 经验模型对不同水分胁迫水平的识别能力,因此在建立玉米 CWSI 经验模型时,需要针对不同的生长期建立对应的  $T_c-T_a$  上下限,

即本研究中大田玉米 R 期和 M 期基于田间气象数据  $T_c-T_a$  上下限的斜率分别为  $-2.64$  和  $-3.35$ ,截距分别为  $0.42$  和  $2.96$ 。

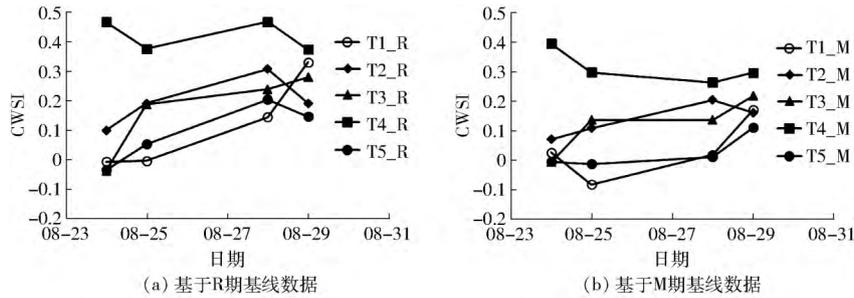


图 5 M 期不同基线 CWSI 数据的变化曲线

Fig. 5 CWSI curves of different baselines during maturation stage

### 2.2 基于实验地相邻标准气象站空气温湿度下的 $T_c-T_a$ 下限

选择有效灌溉/降雨事件发生后的无云晴天(R 期为 2017 年 8 月 9 日和 2017 年 8 月 15 日,M 期为 2017 年 8 月 24 日)利用实验地旁标准气象站采集的空气温湿度(北京时间 10:44—14:44,数据采集时间间隔为 30 min)结合田间采集的冠层温度绘制了  $T_L-VPD$  散点图。为了减小数据的波动性,使得获取的拟合曲线能更好地代表不同 VPD 下的  $T_c-T_a$  下限,同样根据 IDSO 等<sup>[20]</sup>的方法,在绘制  $T_L-VPD$  散点图之前也将数据进行三步移动平均。图 6 为 R 期(7 月 29 日—8 月 20 日)、M 期(8 月 21 日—9 月 7 日)基于气象站空气温湿度的  $T_L-VPD$  散点图,通过线性拟合得到的  $T_c-T_a$  下限分别为

$$R \text{ 期 } T_L = -4.02P_{VPD} + 7.34 \quad (R^2 = 0.996) \quad (7)$$

$$M \text{ 期 } T_L = -3.47P_{VPD} + 6.42 \quad (R^2 = 0.973) \quad (8)$$

即本研究中大田玉米 R 期和 M 期基于气象站空气温湿度的  $T_c-T_a$  上下限的斜率分别为  $-4.02$  和  $-3.47$ ,截距分别为  $7.34$  和  $6.42$ 。

### 2.3 大田玉米 CWSI 经验模型

根据上述建立的  $T_c-T_a$  下限,分别以式(3)、 $5^\circ\text{C}$  作为  $T_c-T_a$  上限建立基于田间空气温湿度的经验模

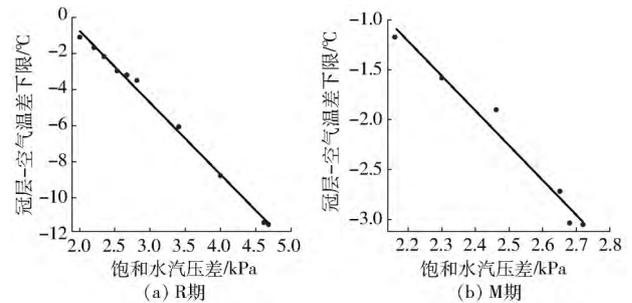


图 6 基于气象站气象数据的下基线

Fig. 6 Lower limit based on meteorological parameters

型  $CWSI_f, CWSI_{f5}$ , 其中  $CWSI_{f5}$  表示上基线固定为  $5^\circ\text{C}$ ; 基于实验地相邻标准气象站空气温湿度的经验模型  $CWSI_m, CWSI_{m5}$ , 其中  $CWSI_{m5}$  表示上基线固定为  $5^\circ\text{C}$ 。如图 7(P/I 表示实际施水量)所示,区域 1 和区域 4 上述 4 种 CWSI 经验模型在有效灌溉/降雨之后都会降低,第 3 天左右达到最低,随后开始慢慢增加,较好地响应了灌溉/降雨事件。但是经验模型  $CWSI_m$  和  $CWSI_{m5}$  具有很大的波动性,常常超出正常范围(0~1)。甚至在 M 期,除了区域 4(23%) 外所有处理的平均 CWSI 均小于零,最小值  $-0.56$ ,远远超出正常范围,因此并不能很好地反映玉米的水分胁迫状况。而经验模型  $CWSI_f, CWSI_{f5}$  相对来说更为稳定,异常值较少,

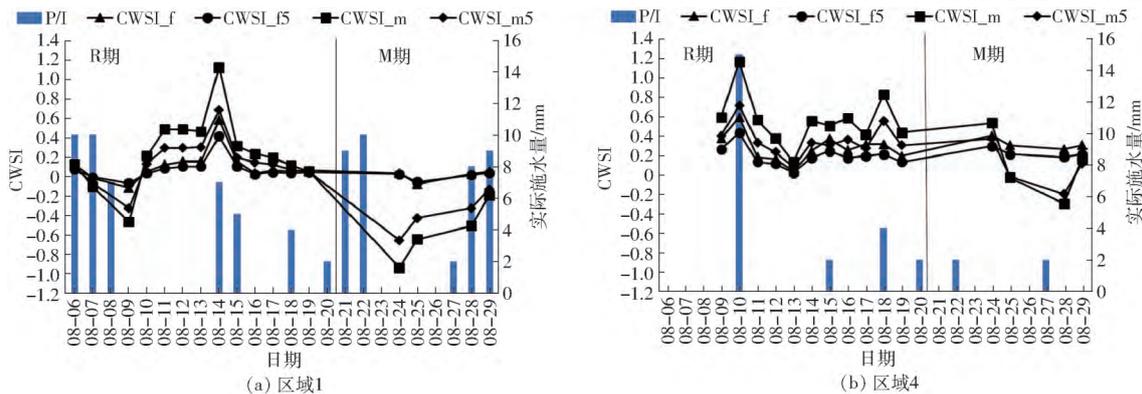


图 7 CWSI 变化曲线

Fig. 7 CWSI changing curves

较好地响应了灌溉/降雨事件。

如图8所示5个水分处理区的经验模型CWSI<sub>f</sub>和CWSI<sub>f5</sub>都可以很好地识别大田玉米水分胁迫。由表3可知,M期区域1(100%)、区域2(52%)和区域4(28%)这3种水分胁迫处理的平均CWSI<sub>f</sub>值分别为0.03、0.14、0.32,平均CWSI<sub>f5</sub>值分别为0.02、0.10、0.22,具有明显的CWSI数值梯度。R期区域1(100%)和区域4(69%),平均CWSI<sub>f</sub>值分别为0.11和0.27,平均CWSI<sub>f5</sub>值分别为0.07和0.19,具有明显的CWSI数值梯度。而在同一灌溉处理微小的灌溉量差异的反映上,CWSI经验模型不够精确,但可以很好地反映不同灌溉处理之间的差异。如R期充分灌溉处理区域1(100%)、区域

2(97%)、区域3(94%)和区域5(95%)的CWSI数值差异较小,最大差异分别为0.07和0.05,但远小于与同一时期不同处理之间的最小差异0.15和0.10。

虽然经验模型CWSI<sub>f</sub>和CWSI<sub>f5</sub>都可以很好地识别水分胁迫,但是相比于以式(3)作为 $T_c-T_a$ 上限的CWSI<sub>f</sub>经验模型,以5℃作为 $T_c-T_a$ 上限的CWSI<sub>f5</sub>经验模型得到的CWSI数值较小。造成上述现象的原因为相比于5℃作为无蒸腾作用基线,研究期间基于式(3)得到的无蒸腾作用基线最大值1.36℃远小于5℃。如式(1)所示, $T_c-T_a$ 下限和实际冠层-空气温度之差不变时, $T_c-T_a$ 上限的升高仅会造成分母变大,进而造成CWSI数值减小。

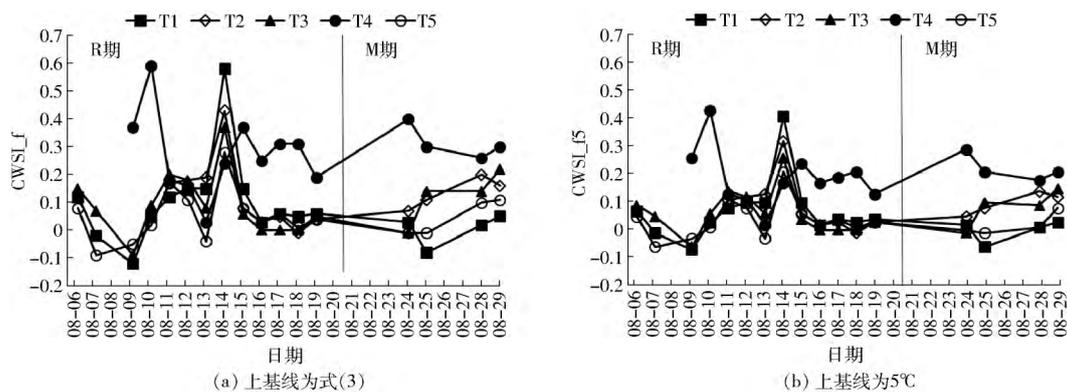


图8 5个处理区的CWSI变化曲线

Fig. 8 CWSI changing curves of five treatments

表3 R期和M期平均CWSI值

Tab.3 Average CWSI of reproductive and maturation stage

水分处理区	R期(8月6—20日)				M期(8月21—29日)			
	CWSI <sub>f</sub>	CWSI <sub>f5</sub>	CWSI <sub>m</sub>	CWSI <sub>m5</sub>	CWSI <sub>f</sub>	CWSI <sub>f5</sub>	CWSI <sub>m</sub>	CWSI <sub>m5</sub>
T1	0.11	0.07	0.24	0.15	0.03	0.02	-0.53	-0.36
T2	0.12	0.09	0.33	0.21	0.14	0.10	-0.42	-0.29
T3	0.09	0.06	0.20	0.13	0.12	0.08	-0.42	-0.28
T4	0.27	0.19	0.55	0.35	0.32	0.22	0.09	0.07
T5	0.05	0.04	0.18	0.11	0.03	0.02	-0.56	-0.38

综上所述,基于实验地相邻标准气象站空气温湿度建立的CWSI经验模型具有较大的波动性,并不能有效地监测内蒙古自治区气候和种植条件下的大田玉米水分胁迫状况。基于田间空气温湿度建立的CWSI经验模型则可以很好地监测该区域大田玉米水分胁迫状况。因此,为了更好地监测内蒙古自治区气候和种植条件下的大田玉米水分胁迫状况,在建立CWSI经验模型时应基于田间空气温湿度数据获取冠层空气温度差下限,即将空气温湿度传感器布设在田间。

### 3 结论

(1) 基于实验地相邻标准气象站和田间空气温

湿度数据建立的CWSI经验模型都可以很好地响应有效灌溉/降雨事件,但是基于实验地相邻标准气象站空气温湿度建立的CWSI经验模型具有很大的波动性,并不能有效地监测大田玉米的水分胁迫状况。

(2) 基于田间空气温湿度建立的CWSI经验模型则可以很好地监测内蒙古自治区大田玉米水分胁迫状况,相比基于饱和水汽压梯度VPG获取上基线,以5℃作为上基线时得到的CWSI数值较小。

(3) 为了更好地监测内蒙古自治区气候和种植条件下的玉米水分胁迫状况,在建立CWSI经验模型时应基于田间空气温湿度数据获取冠层空气温度差下限。

## 参 考 文 献

- 1 刘清, 吴振天. 我国农业水资源可持续利用面临的问题与对策[J]. 南方农机, 2017(4): 1-3.
- 2 孟兆江, 段爱旺, 王景雷, 等. 调亏灌溉对冬小麦不同生育阶段水分蒸散的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 198-202.  
MEMG Zhaojiang, DUAN Aiwang, WANG Jinglei, et al. Effect of regulated deficit irrigation on evapotranspiration at different growth stages in winter wheat [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(1): 198-202. (in Chinese)
- 3 CUI N, DU T, KANG S, et al. Regulated deficit irrigation improved fruit quality and water use efficiency of pear-jujube trees [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 489-497.
- 4 LOPEZ G, ARBONES A, CAMPO J D, et al. Response of peach trees to regulated deficit irrigation during stage II of fruit development and summer pruning [J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2008, 6(3): 479-491.
- 5 庞秀明, 康绍忠, 王密侠. 作物调亏灌溉理论与技术研究动态及其展望[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(6): 141-146.  
PANG Xiuming, KANG Shaozhong, WANG Mixia. Theory and technology research development and prospect of regulated deficit irrigation on crops [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2005, 33(6): 141-146. (in Chinese)
- 6 ROMERO-TRIGUEROS C, NORTES P A, ALARCÓN J J, et al. Effects of saline reclaimed waters and deficit irrigation on Citrus physiology assessed by UAV remote sensing [J]. Agricultural Water Management, 2017, 183: 60-69.
- 7 GEERTS S, RAES D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(9): 1275-1284.
- 8 HAN M, ZHANG H, DEJONGE K C, et al. Estimating maize water stress by standard deviation of canopy temperature in thermal imagery [J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 400-409.
- 9 周春艳, 华灯鑫, 乐静, 等. 结合图像的叶绿素荧光动力学植物水分胁迫探测方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 148-154. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20170119&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170119&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.019.  
ZHOU Chunyan, HUA Dengxin, LE Jing, et al. Detecting method for plant water stress with chlorophyll fluorescence kinetics based on imaging [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 148-154. (in Chinese)
- 10 BEN-GAL A, AGAM N, ALCHANATIS V, et al. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation of soil water status, tree water status, and thermal imagery [J]. Irrigation Science, 2009, 27(5): 367-376.
- 11 CAMPBELL G S, CAMPBELL M D. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice [J]. Advances in Irrigation, 1982(1): 25-42.
- 12 赵燕东, 高超, 张新, 等. 植物水分胁迫实时在线检测方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 290-300. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20160740&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160740&flag=1). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.040.  
ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Review of real-time detecting methods of water stress for plants [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 290-300. (in Chinese)
- 13 GATES D M. Transpiration and leaf temperature [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1968, 19: 211-238.
- 14 CLUM H H. The effect of transpiration and environmental factors on leaf temperatures II: light intensity and the relation of transpiration to the thermal death point [J]. American Journal of Botany, 1926, 13(4): 217-230.
- 15 DEJONGE K C, TAGHVAEIAN S, TROUT T J, et al. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize [J]. Agricultural Water Management, 2015, 156: 51-62.
- 16 TAGHVAEIAN S, COMAS L, DEJONGE K C, et al. Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower [J]. Agricultural Water Management, 2014, 144(2): 69-80.
- 17 TAGHVAEIAN S, CHÁVEZ J L, BAUSCH W C, et al. Minimizing instrumentation requirement for estimating crop water stress index and transpiration of maize [J]. Irrigation Science, 2014, 32(1): 53-65.
- 18 ZIA S, ROMANO G, SPREER W, et al. Infrared thermal imaging as a rapid tool for identifying water-stress tolerant maize genotypes of different phenology [J]. Journal of Agronomy & Crop Science, 2013, 199(2): 75-84.
- 19 TAGHVAEIAN S, CHÁVEZ J L, HANSEN N C. Infrared thermometry to estimate crop water stress index and water use of irrigated maize in Northeastern Colorado [J]. Remote Sensing, 2012, 4(11): 3619-3637.
- 20 IDSO S B, JACKSON R D, JR P J P, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability [J]. Agricultural Meteorology, 1981, 24(1): 45-55.
- 21 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.
- 22 孙道宗, 王卫星, 唐劲驰, 等. 茶树水分胁迫建模及试验[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(1): 65-70.  
SUN Daozong, WANG Weixing, TANG Jinchi, et al. Modeling and testing of tea tree water stress [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(1): 65-70. (in Chinese)
- 23 高洪燕, 毛罕平, 张晓东, 等. 基于多信息融合的番茄冠层水分诊断[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 140-144.  
GAO Hongyan, MAO Hanping, ZHANG Xiaodong, et al. Water moisture diagnosis of tomato canopy based on multi-information fusion [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 140-144. (in Chinese)
- 24 崔晓, 许利霞, 袁国富, 等. 基于冠层温度的夏玉米水分胁迫指数模型的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 22-24.
- 25 IRMAK S, HAMAN D Z, BASTUG R. Determination of crop water stress index for irrigation timing and yield estimation of corn [J]. Agronomy Journal, 2000, 92(6): 1221-1227.
- 26 COHEN Y, ALCHANATIS V, MERON M, et al. Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis [J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(417): 1843-1852.
- 27 WANG L, QIU G Y, ZHANG X, et al. Application of a new method to evaluate crop water stress index [J]. Irrigation Science, 2005, 24(1): 49-54.
- 28 杨卫平, 王学知, 比尔·莫兰, 等. 利用红外成像技术的自动树冠温度估计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 169-175.  
YANG Weiping, WANG Xuezhi, MORAN B, et al. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 169-175. (in Chinese)
- 29 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 红外遥感估算春小麦农田土壤含水率的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 84-87.