

倪 锋, 谢鹏飞, 褚荣浩, 等. 利用日光诱导叶绿素荧光估算高温干旱复合胁迫下夏玉米生理生态参数[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(3): 587-596.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.03.002

## 利用日光诱导叶绿素荧光估算高温干旱复合胁迫下夏玉米生理生态参数

倪 锋<sup>1</sup>, 谢鹏飞<sup>1</sup>, 褚荣浩<sup>2</sup>, 李 萌<sup>1</sup>, 沙修竹<sup>3</sup>, 彭金龙<sup>1</sup>, 申双和<sup>4</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽省公共气象服务中心/安徽省气象局, 安徽 合肥 230031; 3. 河南省人工影响天气中心, 河南 郑州 450003; 4. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 高温和干旱会对农业生产活动及陆地生态系统产生严重威胁, 并最终对经济和社会发展产生不利影响。本研究以夏玉米为研究对象, 开展高温干旱复合胁迫田间试验, 首先对比分析各胁迫处理下夏玉米形态和生理生态响应特征, 之后引入日光诱导叶绿素荧光(SIF), 探究各胁迫处理下夏玉米冠层 SIF 值日变化和不同生育阶段变化特征, 最终揭示 SIF 值与生理生态参数之间的关联性。结果表明, 高温、干旱以及高温干旱复合胁迫均会抑制夏玉米株高和叶面积, 造成产量下降。在生理生态参数方面, 各胁迫处理下夏玉米叶片含水量(LWC)和叶绿素含量的变化规律基本一致, 随各胁迫程度的加重总体均呈现逐渐下降趋势。夏玉米冠层 SIF 值在日尺度上呈现“单峰”型变化特征, 在不同生育阶段呈现逐渐下降趋势。基于 2/3 的冠层 SIF 值与对应 LWC、叶绿素含量之间构建的线性模型的  $R^2$  值分别为 0.837 和 0.509 ( $P < 0.05$ ); 且基于上述线性模型和 1/3 的冠层 SIF 值估算的 LWC 和叶绿素含量估算值与实测值之间拟合的  $R^2$  值分别为 0.827 和 0.726 ( $P < 0.05$ ), 验证了利用 SIF 值估算高温干旱复合胁迫下夏玉米生理生态参数(LWC 和叶绿素含量)的可靠性。

**关键词:** 夏玉米; 高温干旱复合胁迫; 生理生态参数; 日光诱导叶绿素荧光(SIF)

**中图分类号:** S166; S514 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)03-0587-10

## Estimation of physiological and ecological parameters of summer maize under combined stress of heat and drought using solar-induced chlorophyll fluorescence

NI Feng<sup>1</sup>, XIE Peng-fei<sup>1</sup>, CHU Rong-hao<sup>2</sup>, LI Meng<sup>1</sup>, SHA Xiu-zhu<sup>3</sup>, PENG Jin-long<sup>1</sup>, SHEN Shuang-he<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Anhui Public Meteorological Service Center/Anhui Meteorological Bureau, Hefei 230031, China; 3. Weather Modification Center of Henan Province, Zhengzhou 450003, China; 4. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

收稿日期: 2021-08-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41905100); 安徽省自然科学基金项目(2108085QD157、1908085QD171); 国家重点研发计划项目(2018YFD0300905); 安徽农业大学青年基金重点项目(2018zd07); 安徽农业大学引进与稳定人才资助项目(yj2018-57)

**作者简介:** 倪 锋(1997-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事农业气象研究。(E-mail) 2934608403@qq.com

**通讯作者:** 李 萌, (E-mail) mengli@ahau.edu.cn; 褚荣浩, (E-mail) ronghao\_chu@163.com

**Abstract:** Heat and drought will pose a serious threat to agricultural activities and terrestrial ecosystems, and have a negative impact on economic and social development ultimately. In this study, summer maize was taken as the research object to carry out field experiments under combined stress of heat and drought. Firstly, the morphological and ecophysiological response characteristics of summer maize under various stresses were compared and

analyzed. Then solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) was introduced to investigate the diurnal variation of SIF values and the variation characteristics at different growth stages of summer maize under different stress treatments. Finally, the correlation between SIF values and physiological and ecological parameters was revealed. The results showed that heat, drought and combined stress of heat and drought inhibited plant height, leaf area and yield of summer maize. In terms of physiological and ecological parameters, the changes of leaf water content (*LWC*) and chlorophyll content of summer maize under different stress treatments were basically consistent, presenting a gradually downward trend on the whole. On daily scale, the canopy SIF values of summer maize showed a "single peak" variation, and gradually decreased at different growth stages. In the correlation analysis, the  $R^2$  values fitting between 2/3 canopy SIF values and *LWC* and chlorophyll content were 0.837 and 0.509, respectively ( $P < 0.05$ ). The  $R^2$  values fitting between the measured value and the estimated value of the remaining 1/3 *LWC* and chlorophyll content were 0.827 and 0.726, respectively ( $P < 0.05$ ), which further verified the reliability of estimating physiological and ecological parameters (*LWC* and chlorophyll content) of summer maize under combined stress of heat and drought based on SIF value.

**Key words:** summer maize; combined stress of heat and drought; physiological and ecological parameters; solar-induced chlorophyll fluorescence(SIF)

近年来,全球气候变暖加剧,干旱已成为备受关注的气候问题<sup>[1-2]</sup>。准确及时地监测大规模干旱事件,对研究植被变化及其对气候变化的响应、保证粮食安全具有重要意义<sup>[3]</sup>。此外,温度胁迫是限制作物产量的最重要非生物胁迫因子之一。在全球气候变化的背景下,极端高、低温事件发生的频率和强度均有所上升。而玉米作为全球最重要的粮食作物之一,其在生长发育过程中对环境胁迫较为敏感,其中高温与干旱胁迫均是玉米生长过程中常见的环境胁迫因子,二者均会对玉米产量和品质造成不同程度的影响。

在有关高温干旱胁迫研究中,方子松等<sup>[4]</sup>研究发现,在干旱胁迫下,薏苡的株高和茎粗会受到不同程度的抑制。庄克章等<sup>[5]</sup>发现玉米的株高在干旱胁迫下会呈现明显的下降趋势,且胁迫越严重下降幅度越大。崔丽娜等<sup>[6]</sup>研究发现,在高温胁迫下,夏玉米的生育期会明显缩短,其产量也会下降。在生理生态参数研究中,邵宇航等<sup>[7]</sup>和费立伟<sup>[8]</sup>发现小麦叶片叶绿素含量在高温胁迫下会有所降低。郝召君等<sup>[9]</sup>研究指出,受高温胁迫时,芍药的叶绿素含量会明显下降。

传统植被指数[如归一化差异植被指数(*NDVI*)和增强植被指数(*EVI*)]已被广泛用来监测植被的生理状态和水分胁迫对植被的影响。其虽然能够表征植被的生理状态,但只能反映植被色素含量的变化,与植物的实际光合作用无直接关联。因此,传统植被指数对植被水分缺失情况反映较慢,不能即时反映植被对水分胁迫的动态响应过程。叶绿素荧光

是叶绿素分子在吸收光能后,在极短的时间内重新释放的红光和近红外波段的光子<sup>[10]</sup>。由于获取手段的差异性,叶绿素荧光主要包括主动和被动诱导的叶绿素荧光<sup>[11]</sup>。其中,被动诱导叶绿素荧光是以太阳光为激发光源,在自然条件下获取的叶绿素荧光,即日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)。由于叶绿素荧光发射量与光合作用效率直接相关,可以提供关于光化学反应和热耗散量子效率的有价值的信息<sup>[12]</sup>。因此,SIF可以作为植被瞬时光合作用活性的理想探针,在植物环境胁迫监测研究中应用<sup>[13]</sup>。

Dobrowski 等<sup>[14]</sup>研究发现,在红边光谱区域计算的简单反射率指数可以追踪水分胁迫引起的 SIF 变化,从而提供与植物生理过程直接相关的作物水分胁迫的快速评估。Alexander 等<sup>[15]</sup>研究指出,在叶片和冠层尺度上,SIF 信号强度的下降与水分胁迫有关。Daumard 等<sup>[16]</sup>通过对 SIF 的连续地面观测进一步指出,SIF 可以较早地检测到高粱田发生的可逆水分胁迫,且从航空图像 SIF 信号中可以检测高粱在水分胁迫条件下发生的生理变化。Liu 等<sup>[17]</sup>和 Lee 等<sup>[18]</sup>研究发现,SIF 和传统植被指数在干旱胁迫下会同时降低,但在不同干旱胁迫程度下二者的递减趋势不一致。Wang 等<sup>[19]</sup>研究指出,卫星 SIF 在准确、及时监测干旱和高温热浪方面具有很大的发展潜力。Song 等<sup>[20]</sup>利用卫星 SIF 检测印度恒河平原冬小麦对热胁迫的早期响应。

目前大多数研究仅考虑作物受单一高温或干旱胁迫,然而在现实情况下,高温和干旱往往会相伴而

生,因此有必要探究高温干旱复合胁迫下夏玉米形态和生理生态参数响应特征,并揭示 SIF 与生理生态参数之间的关联性。本研究拟通过设计夏玉米不同等级高温干旱复合胁迫田间试验,在观测数据的基础上,探究高温干旱复合胁迫下夏玉米形态(株高、叶面积和产量)、生理生态指标[叶片含水量(*LWC*)、叶绿素含量]和冠层 SIF 响应特征,对比分析不同胁迫处理下夏玉米形态指标和生理生态指标之间的差异,之后对比分析不同胁迫处理下冠层 SIF 响应差异,并将冠层 SIF 与各生理生态指标进行回归分析,建立回归模型并验证,揭示夏玉米冠层 SIF 在高温干旱复合胁迫监测应用上的可能性和适宜性,以期利用冠层 SIF 估算高温干旱复合胁迫下夏玉米的生理生态参数提供理论依据。

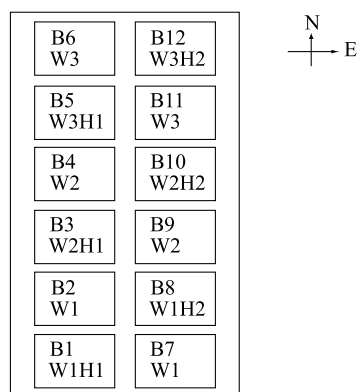
## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验地位于安徽农业大学农萃园农业气象试验基地(31°51'N, 117°15'E),本试验中玉米播种方式为穴播,于2020年6月30日完成播种,小区种植7行×6列,每穴内放2~3粒玉米种子。之后根据出苗情况进行间苗和补苗,施肥、除草等田间管理视玉米生长情况进行。玉米形态观测和数据采集于2020年7~10月夏玉米生长季进行。本试验采用室外大田种植方式,共设置12个小区,每个小区长2.0 m,宽1.8 m。为避免受到自然降水的影响,在试验田干旱处理小区上方搭建移动式遮雨棚;为避免受到区间和边缘效应的影响,小区与小区间以及小区与遮雨棚边缘之间的间隔距离均为0.5 m。如图1所示,每个对照组都有一个小区为重复处理,最终选取9个小区进行观测。

胁迫处理在玉米拔节后7 d左右进行,在此之前各小区充分供水,即将土壤水分灌溉至田间最大持水量(*FC*)的80%~90%水平,以保证夏玉米前期的正常生长,在拔节后7 d左右按照*FC*的百分比进行灌溉处理(表1)。本试验共设置三个等级的灌溉处理,分别为重度干旱(W1, 50%~60% *FC*)、轻度干旱(W2, 65%~75% *FC*)和充分供水对照组(W3, 80%~90% *FC*)。温度处理共设置两个等级,分别为H1和H2,增温处理主要采用塑料薄膜覆盖的方式,在有增温处理的小区四周架设镀锌钢管架,随着夏玉米的生长不断调整钢管架上覆膜的位置和高

度。其中,H1处理的覆膜方式为24 h四周半覆盖,H2处理为24 h四周全覆盖。本研究分别将W1、W1H1和W1H2,W2、W2H1和W2H2,W3、W3H1和W3H2,W1、W2和W3设为第一组、第二组、第三组和第四组,其中第一组为高温和重度干旱复合胁迫处理,第二组为高温和轻度干旱复合胁迫处理,第三组为不同温度的高温胁迫处理,第四组为不同水分的干旱胁迫处理。



W1:重度干旱,土壤含水量为田间最大持水量的50%~60%;  
W2:轻度干旱,土壤含水量为田间最大持水量的65%~75%;  
W3:充分供水对照,土壤含水量为田间最大持水量的80%~90%;  
H1:高温处理,小区四周塑料薄膜半覆盖;H2:高温处理,小区四周塑料薄膜全覆盖;B1~B12为小区编号。

图1 高温干旱胁迫试验田间布局示意图

Fig.1 Field layout of heat and drought stress test

### 1.2 数据采集与处理

1.2.1 夏玉米形态指标与生理生态参数 生育期:参照《农业气象观测规范(上卷)》进行观测。株高:每个小区选取10株有代表性的玉米植株,分别测量其高度。叶面积:在每个处理中选取有代表性的玉米植株,分别采集3片穗上叶、3片穗位叶和3片穗下叶,置于保鲜袋中密封,及时取回室内,测量玉米叶片的长和宽(最宽处),并计算单叶的叶面积。

$$\text{叶面积} = \text{长} \times \text{宽} \times 0.7 \quad (1)$$

叶片含水量(*LWC*):在测完叶片长、宽后,先称取叶片鲜质量,然后烘干。前1 h的烘干温度设置在105℃左右,对叶片进行杀青,之后烘干温度设定在80℃左右,待叶片质量不变时称取干质量。

$$LWC = \frac{FW - DW}{FW} \quad (2)$$

其中  $FW$  为叶片鲜质量(单位:g);  $DW$  为叶片干质量(单位:g);  $LWC$  为叶片含水量。

表 1 不同干旱胁迫处理夏玉米各生育期灌溉方案

Table 1 Irrigation schemes of summer maize at different growth stages under different drought stress

处理	苗期(%)	拔节期(%)	抽雄期(%)	开花期(%)	抽丝期(%)	灌浆期(%)	成熟期(%)
W1	80~90	50~60	50~60	50~60	50~60	50~60	50~60
W2	80~90	65~75	65~75	65~75	65~75	65~75	65~75
W3	80~90	80~90	80~90	80~90	80~90	80~90	80~90

W1、W2、W3 见图 1 注。

产量及其构成因素:主要包括玉米果穗长、果穗粗、秃尖比、株籽粒质量、百粒质量和理论产量<sup>[21]</sup>

叶绿素含量:使用 SPAD 叶绿素仪进行测定,每个小区选取 3 株,选取每株玉米穗上叶、穗位叶、穗下叶,每个叶片均匀选取 5 个不同部位,分别测定叶绿素值,去掉异常数据后记录其平均值。

1.2.2 冠层 SIF 数据 利用美国 Ocean Optics 公司生产的超高分辨率光谱仪(型号为 QE-Pro)进行观测:按照初始积分时间采集一条太阳入射光谱,然后记录一条暗电流,随后采集一条冠层反射光光谱,最后重新采集一条太阳入射光谱,至此一个观测循环结束,时间为 8:00–16:00,每两次观测间隔 1 h。通过获得的光谱数据计算得到辐射亮度值和反射率。

由于太阳辐射会在近红外与红外波段形成三个明显的吸收波段(656.3 nm、687.0 nm 与 760.0 nm),这与 SIF 发射的波段互相重叠,因此可选取这三个波段对 SIF 进行研究。Moya 等<sup>[22]</sup>和刘良云等<sup>[23]</sup>研究认为 687.0 nm 与 760.0 nm 波段处的夫琅和费暗线较其他波段更为明显,而 760.0 nm 波段处的夫琅和费暗线在宽度与深度上均比 687.0 nm 波段处大一些<sup>[22-23]</sup>。因此,选取 760.0 nm 波段来研究 SIF 更为合适,本文也选取该波段对夏玉米冠层 SIF 进行研究。

目前 SIF 的获取方法较多,常见的有 FLD 算法、3FLD 算法、cFLD 算法和 SFM 算法等。Damm 等<sup>[24]</sup>和 Meroni 等<sup>[25]</sup>将 FLD 算法和 SFM 算法进行对比,发现在任何噪声干扰情况下,SFM 算法的精度要高于 FLD 算法。以上几种算法都需要相应的假设作为前提条件,并不能完全符合植被所处的真实环境状况,因此在估算荧光值过程中均会产生一定的误差<sup>[26-27]</sup>,在使用过程中要根据具体需求来选择最优算法。本研究最终选取 SFM 算法作为 SIF

的提取方法。

1.2.3 数据处理 采用 Microsoft Excel 2007 对原始数据进行预处理,利用 SPSS 22.0 对各类数据进行分析及回归拟合等,采用 Origin 2016 完成文中各插图的绘制。

## 2 结果分析

### 2.1 夏玉米形态、产量及其构成因素变化特征

2.1.1 株高变化特征 本研究选取夏玉米开花期 T1(8 月 18 日)、灌浆期 T2(9 月 9 日)和成熟期 T3(9 月 24 日)的观测数据,比较不同生育阶段夏玉米株高的变化情况。从表 2 可以看出,随着生育期的推进,所有处理小区夏玉米株高均呈先升后降的变化趋势。其中,T1 至 T2 阶段株高不断上升的主要原因是由于夏玉米处于营养生长阶段,该时期夏玉米株高会一直上升。此阶段 W3、W3H1、W3H2 3 个处理夏玉米株高的生长速度要明显快于重度和轻度干旱处理。T2 至 T3 阶段夏玉米株高呈现下降趋势,主要是由于该时期是夏玉米果实生长阶段,茎、叶等其他器官基本停止生长并开始逐渐衰老。

T1 阶段各处理夏玉米株高之间无明显差异,而 T2 和 T3 阶段差异明显,T3 阶段呈现出  $W1 > W1H1 > W1H2$ 、 $W2 > W2H1 > W2H2$ 、 $W3 > W3H1 > W3H2$ 、 $W3 > W2 > W1$  的变化趋势,该现象表明干旱与高温胁迫均会抑制夏玉米株高的生长,重度干旱胁迫影响要大于轻度干旱胁迫,且干旱胁迫影响大于高温胁迫、高温干旱复合胁迫影响大于单一胁迫。但是,T2 阶段株高表现为  $W2H2 > W2H1 > W2$  和  $W1 > W2$ ,且  $W2$ 、 $W2H1$  和  $W2H2$  的标准差较大,分别为  $\pm 21.0$  cm、 $\pm 23.1$  cm 和  $\pm 28.2$  cm,这可能是由于人工取样造成的差异。



表 2 高温干旱复合胁迫下夏玉米不同生育阶段株高

Table 2 Plant height of summer maize at different growth stages under combined stress of heat and drought

处理	T1 (cm)	T2 (cm)	T3 (cm)
W1	167.7±11.7	209.6±10.5	201.8±15.2
W1H1	166.6±12.2	206.8±15.6	200.9±18.8
W1H2	173.9±8.2	203.4±22.0	195.7±18.0
W2	174.1±12.4	208.1±21.0	216.6±14.2
W2H1	174.5±19.5	210.5±23.1	208.7±24.2
W2H2	191.4±20.0	221.9±28.2	206.9±18.1
W3	171.4±12.7	237.6±13.6	231.2±8.4
W3H1	171.4±13.0	234.9±19.1	224.1±20.0
W3H2	187.3±12.7	227.8±20.2	221.8±19.8

W1、W2、W3、H1、H2 见图 1 注。T1、T2 和 T3 分别为夏玉米开花期、灌浆期和成熟期。

表 3 高温干旱复合胁迫下夏玉米不同生育阶段单叶叶面积

Table 3 Single leaf area of summer maize at different growth stages under combined stress of heat and drought

处理	T1			T2			T3		
	穗上叶 (cm <sup>2</sup> )	穗位叶 (cm <sup>2</sup> )	穗下叶 (cm <sup>2</sup> )	穗上叶 (cm <sup>2</sup> )	穗位叶 (cm <sup>2</sup> )	穗下叶 (cm <sup>2</sup> )	穗上叶 (cm <sup>2</sup> )	穗位叶 (cm <sup>2</sup> )	穗下叶 (cm <sup>2</sup> )
W1	351.0	444.5	308.5	375.8	451.9	337.5	344.1	488.2	352.1
W1H1	321.3	405.3	291.6	338.0	441.2	349.5	227.9	471.1	342.9
W1H2	279.5	397.7	258.8	322.5	432.4	279.1	203.1	463.5	301.7
W2	439.2	501.1	325.3	468.1	525.7	367.9	344.0	557.7	389.6
W2H1	422.5	441.4	295.7	443.1	490.6	329.1	324.7	525.4	368.8
W2H2	409.5	399.4	284.9	428.5	430.1	299.5	316.6	463.3	302.8
W3	484.1	582.1	369.7	513.7	627.9	444.3	359.6	638.1	475.2
W3H1	434.7	526.9	341.8	440.6	523.0	359.2	371.9	627.2	375.5
W3H2	328.5	497.6	289.1	377.8	499.6	346.2	368.4	547.5	382.2

W1、W2、W3、H1、H2 见图 1 注;T1、T2 和 T3 见表 2 注。

2.1.3 产量及其构成因素变化特征 如表 4 所示,在不同胁迫处理下,夏玉米产量及其构成因素均呈现出不同程度的下降趋势,除秃尖比之外,其他参数基本呈现 W1>W1H1>W1H2、W2>W2H1>W2H2、W3>W3H1>W3H2、W3>W2>W1 的变化趋势,秃尖比呈现出 W1H2>W1H1>W1、W2H2>W2H1>W2、W1>W2>W3、W3H2>W3H1>W3 的变化趋势。该现象表明干旱与高温胁迫均会造成果穗变细、变短,秃尖比增大,株籽粒质量下降,最终导致夏玉米减产。其中,W1、W1H1 和 W1H2 3 个处理的理论产量较对照(W3)分别下降了 81.9%、82.5%和 84.2%。

## 2.2 夏玉米不同生育阶段生理生态参数变化特征

2.2.1 LWC 变化特征 LWC 表示叶片的相对含水量,是指征叶片水分含量的一个最为直接的生理指

2.1.2 叶面积变化特征 如表 3 所示,所有处理夏玉米穗上叶的叶面积从 T1 至 T3 阶段均呈现出先增后减的变化趋势,穗位叶和穗下叶的叶面积均呈现逐渐增加的变化趋势。T2 至 T3 阶段夏玉米穗上叶叶面积出现下降趋势,穗位叶和穗下叶呈现上升趋势,其原因可能是由于穗上叶衰老的速度要快于穗位叶和穗下叶。在大部分胁迫处理下,夏玉米穗上叶、穗位叶、穗下叶 3 叶的叶面积在 T1 和 T2 阶段表现为穗位叶>穗上叶>穗下叶,在 T3 阶段则表现为穗位叶>穗下叶>穗上叶。此外,各处理叶面积之间也存在明显差异,大致表现为 W1>W1H1>W1H2、W2>W2H1>W2H2、W3>W3H1>W3H2、W3>W2>W1 的变化趋势。

标<sup>[28]</sup>。叶片是植物进行光合作用积累有机物的地方,其含水量变化将对叶片光合能力产生重要影响<sup>[29]</sup>。如图 2 所示,各处理的夏玉米 LWC 在 T1 至 T3 阶段均呈现出逐渐下降趋势。其中,T1 至 T2 阶段的下降速率较快,T2 至 T3 阶段的下降速率较缓慢。各处理 LWC 在 T1 阶段的差异较为明显,具体表现为 W1>W1H1>W1H2、W2>W2H1>W2H2、W3>W3H1>W3H2 和 W3>W2>W1。在 T1 和 T2 阶段,6 个干旱胁迫处理的 LWC 均明显低于 3 个非干旱胁迫处理;在 T3 阶段,各处理间 LWC 差异变小。

2.2.2 叶绿素含量变化特征 叶绿素作为植物进行光合作用的主要色素,其在光能的吸收及转化过程中起着重要作用<sup>[28]</sup>。叶绿素含量的多少可以反映叶片的光合效率、作物生长速度、产量的高低以及

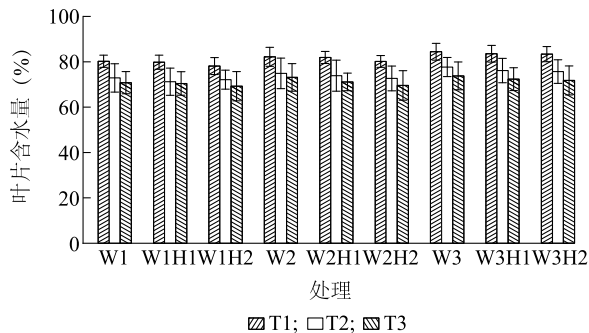
受胁迫状态<sup>[28]</sup>。SPAD 值与叶片叶绿素含量的相关性极显著,并且在测量过程中既不会破坏植物叶片又方便快捷<sup>[30]</sup>,因此叶绿素含量可以用 SPAD 值进行表示。如图 3 所示,各处理夏玉米叶片的叶绿素含量随生育期的推进均呈现逐渐下降的变化趋势。

表 4 高温干旱复合胁迫下夏玉米产量及其构成因素

Table 4 Yield and its components of summer maize under combined stress of heat and drought

处理	果穗长 (cm)	果穗粗 (cm)	秃尖比 (cm)	株籽粒质量 (g)	百粒质量 (g)	理论产量 (g/m <sup>2</sup> )
W1	16.5	3.9	0.17	36.6	28.5	106.1
W1H1	14.4	3.6	0.18	35.5	28.3	103.0
W1H2	14.3	3.5	0.21	34.3	27.9	92.6
W2	18.2	4.3	0.13	47.2	31.9	221.8
W2H1	17.7	4.1	0.14	43.9	29.2	197.6
W2H2	16.8	3.9	0.15	38.2	28.8	187.2
W3	21.6	4.5	0.09	78.3	31.6	587.3
W3H1	20.5	4.4	0.10	76.5	29.9	535.5
W3H2	18.9	4.2	0.12	73.8	30.1	516.6

W1、W2、W3、H1、H2 见图 1 注;T1、T2 和 T3 见表 2 注。



W1、W2、W3、H1、H2 见图 1 注;T1、T2 和 T3 见表 2 注。

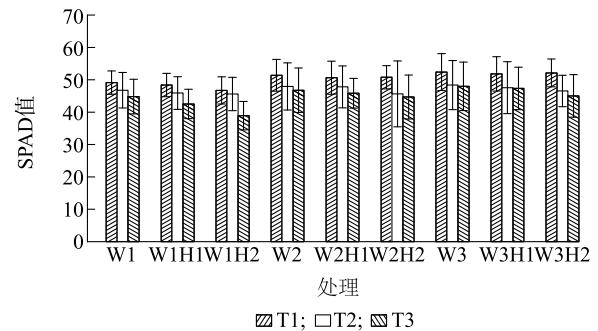
图 2 高温干旱复合胁迫下夏玉米不同生育阶段叶片含水量 (LWC) 动态变化特征

Fig. 2 Dynamic changes of leaf water content at different growth stages of summer maize under combined stress of heat and drought

### 2.3 夏玉米冠层 SIF 值变化特征

2.3.1 日变化特征 本研究以 8 月 28 日(抽丝期)观测数据为例,比较不同胁迫处理冠层 SIF 日变化情况。如图 4 所示,所有处理的夏玉米冠层 SIF 值日变化曲线均呈现“单峰”型变化特征:8:00–12:00 SIF 值逐渐升高,并在 12:00 左右达到峰值。这主要是由于此时间段内太阳光逐渐增强,夏玉米吸收的太阳辐射逐渐增加;12:00–16:00 夏玉米冠层 SIF 值逐渐下降,这主要是由于该时间段内太阳光逐渐减弱,夏玉米吸收的太阳辐射逐渐减少,最终导致冠层 SIF 值

相同生育阶段,各处理之间差异明显,具体表现为 W1>W1H1>W1H2、W2>W2H1>W2H2、W3>W3H1>W3H2 和 W3>W2>W1,表明干旱胁迫与高温胁迫抑制夏玉米生长。



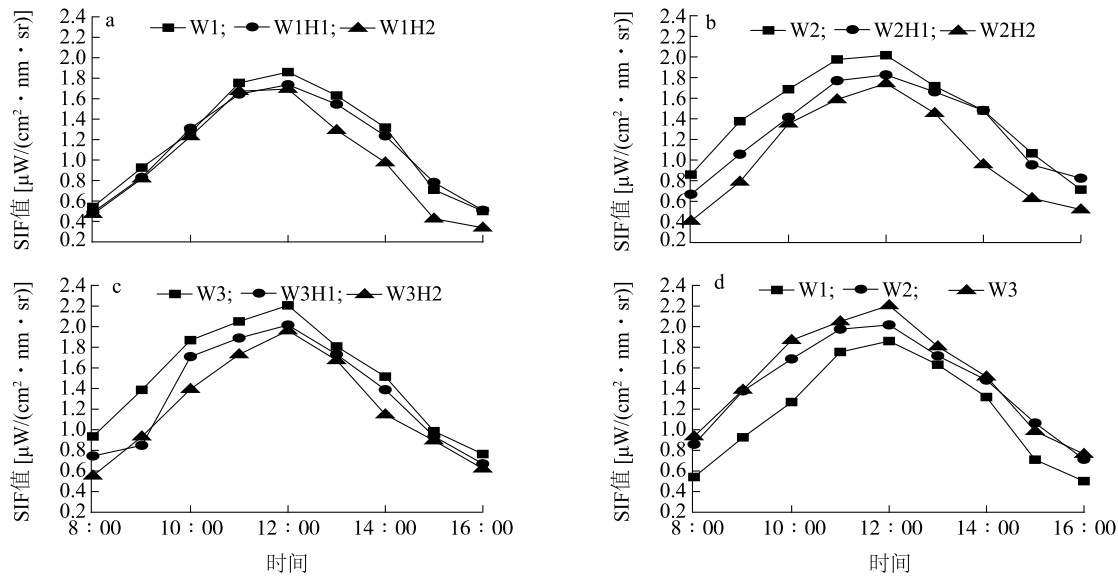
W1、W2、W3、H1、H2 见图 1 注;T1、T2 和 T3 见表 2 注。

图 3 高温干旱复合胁迫下夏玉米不同生育阶段叶绿素含量动态变化特征

Fig. 3 Dynamic changes of chlorophyll content at different growth stages of summer maize under combined stress of heat and drought

降低,并在 16:00 左右达到极小值。在全天大部分时间内,各处理间的 SIF 值呈现出 W1>W1H1>W1H2、W2>W2H1>W2H2、W3>W3H1>W3H2、W3>W2>W1 的变化趋势。

2.3.2 不同生育阶段变化特征 冠层 SIF 值均为各生育阶段中午 12:00 的数值。如图 5 所示,随着生育期的推进,夏玉米冠层 SIF 值呈现出 T1>T2>T3 的变化趋势,这可能是由于随着夏玉米的生长,叶绿素含量逐渐下降、冠层结构发生改变等原因造成。各处理间差异明显,总体上表现为重度干旱胁迫的影

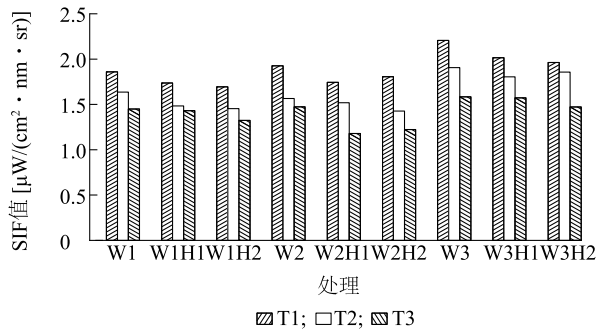


W1、W2、W3、H1、H2 见图 1 注;T1、T2 和 T3 见表 2 注。

图 4 高温干旱复合胁迫下夏玉米冠层日光诱导叶绿素荧光 (SIF) 日变化特征

Fig.4 Diurnal variation characteristics of canopy solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) of summer maize under combined stress of heat and drought

响程度要大于轻度干旱胁迫,高温干旱复合胁迫影响比单一胁迫影响严重。



W1、W2、W3、H1、H2 见图 1 注;T1、T2 和 T3 见表 2 注。

图 5 高温干旱复合胁迫下夏玉米不同生育阶段冠层日光诱导叶绿素荧光 (SIF) 变化特征

Fig.5 Variation characteristics of canopy SIF at different growth stages of summer maize under combined stress of heat and drought

## 2.4 夏玉米冠层 SIF 值与 $LWC$ 和叶绿素含量之间的相关性分析

2.4.1 模型建立  $LWC$  是反应植物水分亏缺状况的有效指标<sup>[28]</sup>,其数值在高温、干旱胁迫下呈现下降趋势。因此,研究冠层 SIF 值与  $LWC$  之间的相关性能够验证在高温干旱复合胁迫下利用 SIF 值估算夏玉米生理生态参数的可行性。本研究将 T1 至 T3

阶段观测得到的 2/3 夏玉米冠层 SIF 值与  $LWC$  进行线性拟合。如图 6 所示,夏玉米  $LWC$  随冠层 SIF 值的增加而增加,冠层 SIF 值与  $LWC$  之间线性拟合的  $R^2$  值为 0.837 (该值为调整后的值,消除了自变量之间的影响,  $P < 0.05$ ),散点分布总体上比较集中,表明冠层 SIF 值与  $LWC$  之间的拟合度较好且二者之间的敏感性较高。此外,在冠层 SIF 值较高时,  $LWC$  持续升高,分布相对比较分散;而当冠层 SIF 值较低时,  $LWC$  分布比较集中,其中冠层 SIF 值集中在  $1.4 \sim 1.6 \mu W / (cm^2 \cdot nm \cdot sr)$  时,  $LWC$  浮动较小。上述结果表明,当冠层 SIF 值达到一定数值时,可以较好地反映植被生理状态变化。

叶绿素含量的多少可以反映出叶片的光合效率、作物生长速度、产量的高低以及受胁迫状态<sup>[28]</sup>。因此,研究夏玉米冠层 SIF 值与叶绿素含量之间的相关性,可以为探究 SIF 值与作物光合作用之间的关联机制提供理论依据。如图 7 所示,夏玉米叶绿素含量随冠层 SIF 值的增加而增加,且二者之间线性拟合的  $R^2$  值为 0.509 (该值为调整后的值,消除了自变量之间的影响,  $P < 0.05$ )。此外,二者之间的散点分布总体上比较集中,说明冠层 SIF 值对叶绿素含量的敏感性较高。在冠层 SIF 值较高时,叶绿素含量持续升高,分布相对比较集中;而在冠层 SIF 值较低时,叶绿素含量分布比较分散,其中 SIF 值在

1.0~1.5  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$  时,叶绿素含量波动较大。上述结果表明,当冠层 SIF 值不是很低时,可以反映植物生理状态变化。

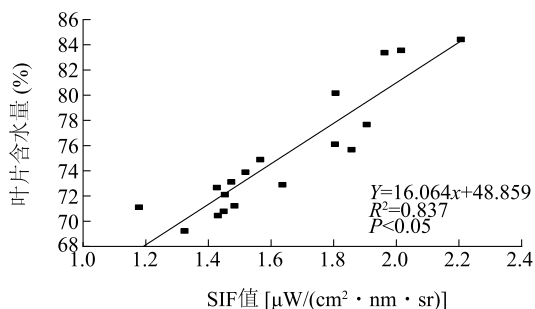


图6 夏玉米不同生育阶段冠层 SIF 值与 LWC 之间的线性拟合

Fig.6 Linear fitting between canopy SIF values and leaf water content at different growth stages of summer maize

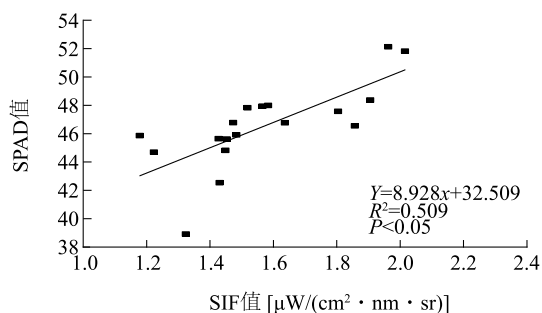


图7 夏玉米不同生育阶段冠层 SIF 值与叶绿素含量之间的线性拟合

Fig.7 Linear fitting between canopy SIF values and chlorophyll content at different growth stages of summer maize

**2.4.2 模型验证** 为了验证上述线性拟合模型的精度,本研究利用剩余 1/3 的 LWC 和 SPAD 实测值和通过线性模型得到的对应拟合值,建立线性回归模型进行相关分析。如图 8 所示,LWC 和 SPAD 实测值与拟合值之间的决定系数分别为 0.827 和 0.726,表明 SIF 值与 LWC 和叶绿素含量之间建立的线性模型模拟效果较好,即利用 SIF 值估算高温干旱复合胁迫下的 LWC 和叶绿素含量均具有一定的可靠性。

### 3 结论与讨论

本研究基于 2020 年 7~9 月间夏玉米高温干旱复合胁迫田间试验,对高温干旱复合胁迫下夏玉米生理生态响应进行深入分析,同时基于 SIF 反演算

法探究了高温干旱复合胁迫下夏玉米冠层 SIF 的响应特征,最终揭示利用冠层 SIF 值估算高温干旱复合胁迫下生理生态参数的可行性,主要结论如下:  
(1)从不同生育阶段看,各处理株高均呈先升后降变化趋势。开花期株高差异较小,灌浆期和成熟期差异较大。所有处理穗上叶叶面积先增后减,穗位叶和穗下叶叶面积呈逐渐增加趋势。在产量形成方面,随干旱胁迫和高温胁迫程度的加重,除秃尖比外,其他参数总体呈现逐渐减少的变化趋势。干旱与高温胁迫均会抑制夏玉米株高、叶面积和产量,其中重度干旱胁迫影响大于轻度干旱胁迫,干旱胁迫影响大于高温胁迫,高温干旱复合胁迫较单一胁迫影响严重。  
(2)不同生育阶段夏玉米 LWC 和叶绿素含量的变化规律基本一致,总体呈现逐渐下降的变化趋势,其中 LWC 在 T1 至 T2 阶段下降速度较快,在 T2 至 T3 阶段下降速度较缓慢。干旱与高温胁迫均会对 LWC 和叶绿素含量产生一定影响,其中重度干旱影响大于轻度干旱,高温干旱复合胁迫影响重于单一胁迫,且随着胁迫加剧,影响越严重。  
(3)在日尺度上,夏玉米冠层 SIF 值日变化曲线呈现“单峰”型变化特征;从不同生育阶段看,冠层 SIF 值呈现 T1>T2>T3 的变化趋势。干旱与高温胁迫均会抑制夏玉米冠层 SIF 值,其中重度干旱胁迫影响大于轻度干旱胁迫,高温干旱复合胁迫影响要重于单一胁迫。冠层 SIF 值可以及时准确地监测到高温干旱胁迫信息,胁迫越重,冠层 SIF 值响应越剧烈。  
(4)夏玉米 LWC 和叶绿素含量随 SIF 值的增加而增加, SIF 值与 LWC 和叶绿素含量之间建立的线性模型模拟效果较好,因此利用 SIF 值估算高温干旱复合胁迫下的 LWC 和叶绿素含量均具有一定的可靠性。

本研究发现干旱与高温胁迫均会抑制夏玉米株高、叶面积和产量,其中重度干旱胁迫影响大于轻度干旱胁迫,干旱胁迫影响大于高温胁迫,高温干旱复合胁迫较单一胁迫影响严重。这一结果与刘红芳等<sup>[31]</sup>的研究结论基本一致,其研究发现玉米的株高、叶面积、茎粗等形态指标会受到干旱胁迫的影响。不同的是,本研究中按照梯度设计高温干旱复合胁迫,试验结果更加显著。宋晋辉等<sup>[32]</sup>基于设计的干旱梯度试验研究发现,干旱胁迫会阻碍玉米株高和叶面积增长,致使产量与干物质下降且干旱胁迫越严重,影响越大。

干旱与高温胁迫均会对夏玉米 LWC 和叶绿素



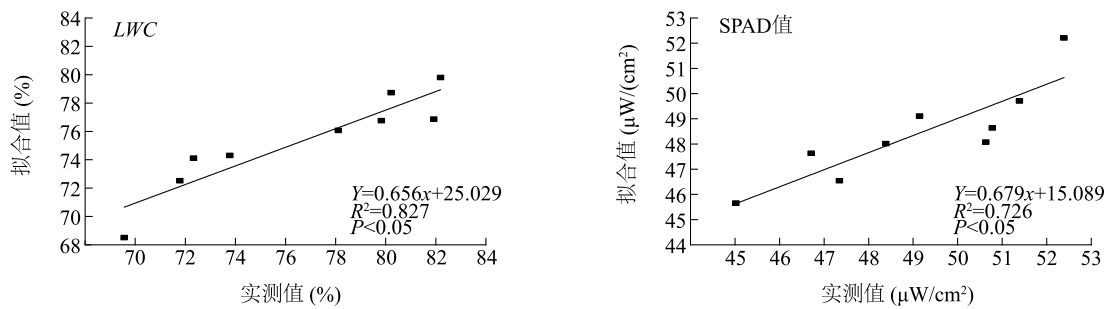


图8 LWC、叶绿素含量拟合值与实测值之间的线性拟合图

Fig.8 Linear fitting graph of simulated and measured values of leaf water content and chlorophyll content

含量产生影响,且随着胁迫的加剧,影响越严重。这一结果与宋贺等<sup>[33]</sup>的研究结果相似,其研究发现干旱会影响植物叶绿素的生物合成,持续的干旱降低了叶片的叶绿素含量,其中在持续轻度干旱中,叶绿素含量有一个上升的趋势,而持续的重度干旱较轻度干旱影响更大,叶绿素含量呈持续下降趋势。SIF本身由叶绿素发射,其值对于叶绿素含量的变化更为敏感。印玉明等<sup>[34]</sup>研究结果表明 SIF 值在监测水稻冠层和单叶叶绿素含量时效果较好,且基于 SIF 值的辐射传输模型也可以用来反演水稻冠层和单叶的叶绿素含量。此外,前人研究发现,SIF 信号强度的下降与水分胁迫有关,其可以较早地检测到作物的可逆水分胁迫,且从航空图像 SIF 信号中可以检测到作物在水分胁迫条件下的生理变化<sup>[15-16]</sup>。综上,SIF 值在一定程度上能够较好地估算作物 LWC 和叶绿素含量。

Sun 等<sup>[35]</sup>研究发现 SIF 值对干旱的发生较为敏感,可以用于及时监测农业生态系统上发生的干旱。Chen 等<sup>[36]</sup>研究发现,由于降水突然下降,加上异常高温,蒸发蒸腾作用使土壤水分迅速枯竭,导致干旱的迅速出现。此外,SIF 值对植被结构和生理生化参数的变化十分敏感,具有极佳的动态干旱监测潜力。本试验中冠层 SIF 值可以及时准确地监测到高温干旱胁迫信息,且胁迫越重,冠层 SIF 响应越剧烈。

在今后的研究中,还需从以下角度进一步探究高温干旱复合胁迫下夏玉米生理生态:(1)完善并继续开展夏玉米高温干旱复合胁迫田间试验,强化试验的可重复性,增强试验结果的可信度;(2)引入 SIF 自动观测系统。在人工测量 SIF 时,时间间隔长且误差较大,因此在条件允许的情况下,可引入 SIF 自动观测系统,进而实现夏玉米冠层 SIF 值的实时

连续观测,以便更好地提高时间精度、减少测量误差。(3)本文没有开展叶片尺度的 SIF 值观测,在今后的研究中,可同步开展叶片和冠层尺度 SIF 值观测研究,为尺度效应相关研究提供理论支撑。

#### 参考文献:

- [1] 郭艳春. 干旱灾害风险评估及管理对策探析[J]. 地下水, 2019, 44(4): 148-149.
- [2] 纪瑞鹏,于文颖,冯 锐,等. 作物对干旱胁迫的响应过程与早期识别技术研究进展[J]. 灾害学, 2019, 34(2): 153-160.
- [3] 胡鹏飞. 基于多源遥感数据的农业旱情监测方法比较研究[D]. 兰州:西北师范大学, 2019.
- [4] 方子松,龙 华,金隆英,等. 干旱胁迫对云南薏苡新品种形态和生理指标的影响[J]. 农业科学与技术(英文版), 2019, 20(1): 22-29.
- [5] 庄克章,吴荣华,张春艳,等. 苗期干旱及复水对玉米生长和生理特性的影响[J]. 山东农业科学, 2020, 52(350): 61-66.
- [6] 崔丽娜,董树亭. 不同氮肥处理下高温胁迫对夏玉米产量及叶片超微构造的影响[J]. 玉米科学, 2020, 28(137): 96-101.
- [7] 邵宇航,石祖梁,张 珊,等. 高温胁迫下镁对小麦旗叶光合特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(7): 802-808.
- [8] 费立伟. 晚播对冬小麦灌浆后期高温胁迫下光合能力和产量的影响[D]. 泰安:山东农业大学, 2020.
- [9] 郝召君,周春华,刘 定,等. 高温胁迫对芍药光合作用、叶绿素荧光特性及超微结构的影响[J]. 分子植物育种, 2017, 15(6): 2359-2367.
- [10] 关琳琳. 基于叶绿素荧光的植被总初级生产力估算[D]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- [11] 刘雷震,武建军,周洪奎,等. 叶绿素荧光及其在水分胁迫监测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(9): 2780-2787.
- [12] 程占慧,刘良云. 基于叶绿素荧光发射光谱的光能利用率探测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 74-80.
- [13] 詹春晖,章钊颖,张永光. 日光诱导叶绿素荧光辐射传输模型研究进展[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 945-957.
- [14] DOBROWSKI S Z, PUSHNIK J C, ZARCO-TEJADA P J, et al. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced

- changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97: 403-414.
- [15] ALEXANDER A, MALENOVSKY Z, OLEJNICKOVA J, et al. Meta-analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168: 420-436.
- [16] DAUMARD F, CHAMPAGNE S, FOURNIER A, et al. A field platform for continuous measurement of canopy fluorescence [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48: 3358-3368.
- [17] LIU L, YANG X, ZHOU H, et al. Evaluating the utility of solar-induced chlorophyll fluorescence for drought monitoring by comparison with NDVI derived from wheat canopy [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1208-1217.
- [18] LEE J E, FRANKENBERG C, VANDERTOL C, et al. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence [J]. *Proceedings of the Royal Society B (Biological Sciences)*, 2013, 280: 20130171.
- [19] WANG X, QIU B, LI W, et al. Impacts of drought and heatwave on the terrestrial ecosystem in China as revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 693: 133627.
- [20] SONG L, LUIS G, GUAN K, et al. Satellite sun-induced chlorophyll fluorescence detects early response of winter wheat to heat stress in the Indian Indo-Gangetic Plains [J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4023-4037.
- [21] 王江山. 生态与农业气象 [M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [22] MOYA I, CAMENEN L, EVAÏN S, et al. A new instrument for passive remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 186-197.
- [23] 刘良云, 张永江, 王纪华, 等. 利用夫琅和费暗线探测自然光条件下的植被光合作用荧光研究 [J]. *遥感学报*, 2006, 10(1): 130-137.
- [24] DAMM A, ERLER A, HILLEN W, et al. Modeling the impact of spectral sensor configurations on the FLD retrieval accuracy of sun-induced chlorophyll fluorescence [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115: 1882-1892.
- [25] MERONI M, Busetto L, COLOMBO R, et al. Performance of spectral fitting methods for vegetation fluorescence quantification [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114: 363-374.
- [26] 问静怡. 基于日光诱导荧光的水稻铜胁迫遥感监测机理研究 [D]. 杭州: 杭州师范大学, 2019.
- [27] 王冉, 刘志刚, 杨沛琦. 植物日光诱导叶绿素荧光的遥感原理及研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1221-1228.
- [28] 李萌. 夏玉米理化参数对连续水分胁迫的响应特征及遥感监测 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [29] 陈秀青, 杨琦, 韩景晔, 等. 基于叶冠尺度高光谱的冬小麦叶片含水量估算 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(3): 233-239.
- [30] 王秋玲. 夏玉米生理生态与生长特性对干旱过程的响应研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2015.
- [31] 刘红芳, 邸仕忠, 姚启伦. 热带和温带玉米对干旱的形态生理应答 [J]. *安徽大学学报 (自然科学版)*, 2020, 44(3): 92-99.
- [32] 宋晋辉, 瓮巧云, 吕爱枝, 等. 拔节期干旱胁迫对青贮玉米生育与品质的影响 [J]. *中国农业科技导报*, 2020, 22(154): 167-173.
- [33] 宋贺, 蒋延玲, 许振柱, 等. 玉米光合生理参数对全生育期干旱与拔节后干旱过程的响应 [J]. *生态学报*, 2019, 39(7): 2405-2415.
- [34] 印玉明, 王永清, 马春晨, 等. 利用日光诱导叶绿素荧光监测水稻叶片叶绿素含量 [J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 169-180.
- [35] SUN Y, FU R, DICKINSON R, et al. Drought onset mechanisms revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from two contrasting extreme events [J]. *Journal of Geophysical Research (Biogeosciences)*, 2016, 120: 2427-2440.
- [36] CHEN X, MO X, ZHANG Y, et al. Drought detection and assessment with solar-induced chlorophyll fluorescence in summer maize growth period over North China Plain [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 347-356.

(责任编辑: 蒋永忠)