

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.09.006

石涛,杨太明,黄勇,等.无人机多光谱遥感监测水稻高温胁迫的关键技术[J].中国农业气象,2020,41(9):597-604

## 无人机多光谱遥感监测水稻高温胁迫的关键技术\*

石涛<sup>1</sup>, 杨太明<sup>2</sup>, 黄勇<sup>3</sup>, 李翔<sup>4</sup>, 刘琪<sup>1</sup>, 杨元建<sup>5\*\*</sup>

(1. 芜湖市气象局, 芜湖 241000; 2. 安徽省农业气象中心, 合肥 230000; 3. 安徽省气象科学研究所, 合肥 230000;  
4. 太原龙翔森业有限公司, 太原 030001; 5. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

**摘要:** 选取长江中下游的芜湖地区超级水稻生产基地为试验区域, 以 2019 年 7 月 20 日-8 月 9 日连续高温日为试验时段, 设计基于消费级无人机与便携式多光谱传感器的水稻长势遥感监测系统, 并创建数据后处理分析与应用方法, 对处于生育敏感期稻株的光谱特征进行研究, 建立水稻高温胁迫的反演识别模型。结果表明: 稻株植被指数与叶面积指数呈显著的指数关系, 相关系数达到 0.918, 由此建立稻树叶面积指数反演模型, 并进一步确定稻株出现高温胁迫的叶面积指数判别条件。利用叶面积指数反演模型和判别条件对实验区域内的水稻进行高温胁迫下的光谱特征提取与分析, 结果显示, 实验区域内 15.3% 的水稻受到了持续高温胁迫的影响, 与农业部门田间调查事实相符, 即实验区域内水稻灌浆率为 82.2%。相对于传统人工田间调查和卫星遥感调查的作物长势监测方法, 便携式无人机多光谱遥感监测技术具有空间分辨率高、可实时大范围监测、简单易行以及应用成本低等特点, 利于普及与推广, 在农作物自然灾害监测方面具有应用前景。

**关键词:** 无人机; 便携式多光谱传感器; 水稻; 高温胁迫; 遥感监测; 叶面积指数

## Key Technologies of Monitoring High Temperature Stress to Rice by Portable UAV Multi Spectral Remote Sensing

SHI Tao<sup>1</sup>, YANG Tai-ming<sup>2</sup>, HUANG Yong<sup>3</sup>, Li Xiang<sup>4</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, YANG Yuan-jian<sup>5</sup>

(1. Wuhu Meteorological Administration, Wuhu 241000, China; 2. Anhui Agrometeorological Center, Hefei 230000; 3. Anhui Institute of Meteorological and Sciences, Hefei 230000; 4. Taiyuan Longxiang Forest Business Co., Ltd, Taiyuan 030001; 5. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

**Abstract:** Rice is an important cereal crop in the world and the most important food resource in China. Under the background of global warming, the degree and frequency of extreme high temperature heat waves are also increasing. From July to August every year, continuous high temperature weather with daily maximum temperature exceeding 35.0°C often occurs in the middle and lower reaches of the Yangtze River affected by subtropical high. At this time, rice is in a sensitive period of growth and development, and continuous high temperature will seriously influence the physiological development of rice. Consequently, scientific and reasonable monitoring of the occurrence and development process of high temperature stress to rice is of great scientific significance and practical value for impact assessment of rice yield variation and agricultural production decisions in the context of global warming. At present, crop growth monitoring methods mainly rely on field investigation and satellite remote sensing. However, the traditional field investigation methods are time-consuming and labor-intensive, and the accuracy is also influenced by the subjective consciousness of investigators. In addition, satellite remote sensing also has some shortcomings, such as low spatial resolution, long transit period, cloud pollution and so on. So, the application

\* 收稿日期: 2020-04-27

\*\* 通讯作者杨元建, E-mail: yyj1985@nuist.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506502); 安徽省气象科技发展基金(2017022)

第一作者联系方式: 石涛, E-mail: stahau1987@163.com

technology research of real-time monitoring of crop growth using multi-spectral sensors carried by portable drones is an important supplement and improvement to the existing monitoring and investigation methods for high temperature stress to rice. In this paper, a remote sensing monitoring system for rice growth and data post-processing analysis and application methods were designed based on consumer-grade drones and portable multi-spectral sensors, and then Wuhu super rice production base in the middle and lower reaches of the Yangtze river was selected as the experimental area, and the continuous high temperature days from July 20 to August 9, 2019 was taken as the experimental period. Experimental results showed that there was a significant exponential relationship between the rice vegetation index and the leaf area index, with the correlation coefficient of 0.918, and then the inversion model of rice leaf area index was established. Finally, the discrimination conditions of leaf area index of rice under high temperature stress were further determined. The inversion model and discrimination conditions of leaf area index were used to extract and to analyze the spectral characteristics of rice under high temperature stress in the experimental area. During this continuous high temperature period, 15.3% of rice in the experimental area was damaged by the continuous high temperature stress, which is coincided with the reality from the field investigation conducted by agricultural department (i.e., the grain filling rate of rice was 82.2% in the experimental area). Compared with the traditional field survey and satellite remote sensing monitoring methods, the portable UAV multispectral remote sensing monitoring technology developed in this paper has advantages of high spatial resolution, real-time and large-scale monitoring and application of low cost, which is conducive to the popularization and promotion. It has a certain application prospect in the remote sensing monitoring of crop natural disasters.

**Key words:** UAV; Portable multispectral sensor; Rice; High temperature stress; Remote sensing monitoring; LAI

水稻是全球重要的谷类作物,也是中国最重要的粮食资源,2014年中国的种植面积为3030.99万 $\text{hm}^2$ ,总产量达到2.065亿 $\text{t}^{[1-2]}$ 。长江中下游是中国最大的水稻生产区,水稻种植面积和总产量在全国占比均超过50%<sup>[3]</sup>。随着全球变暖趋势的不断增加,中国的气候特征也呈现出显著变化,年平均气温升高了 $0.4\sim 0.5\text{ }^\circ\text{C}^{[4-5]}$ 。在全球变暖的背景条件下,发生极端高温热浪的程度和频率也在持续增加,每年7-8月,受到副热带高压的影响,长江中下游地区常出现日最高气温超过 $35.0\text{ }^\circ\text{C}$ 的连续高温天气,而此时水稻正处于生长发育的敏感时期(分蘖-抽穗-灌浆),连续高温会使水稻的生理发育受到严重影响,导致水稻花器发育不良、花粉受精受阻,造成空秕率上升而最终出现减产或绝收<sup>[6-8]</sup>。因此,在气候变暖背景下,科学合理地监测水稻高温胁迫发生和发展情况对揭示水稻产量变化特征有着重要的科学意义和社会经济价值<sup>[7-8]</sup>。

目前,作物长势监测方法主要依赖于田间调查<sup>[9-10]</sup>和卫星遥感<sup>[11]</sup>两种方法。高敏等<sup>[9]</sup>在思茅市各主要咖啡场选取出现黑果病危害试验点,把试验点上每行的中间植株作为调查范围,按照植株的发病症状,通过目视判别将黑果病划分为6个等级。

孔令寅等<sup>[11]</sup>通过分析冬小麦主产区的MODIS-EVI时间序列遥感资料,使用最大变化斜率法、窗口转折点法和简单转折点法识别关键发育期和抽穗期数据,对2006-2010年冬小麦的长势进行了遥感监测。这些研究对作物长势的监测识别以及产量预测具有重要的参考价值。

但是上述监测方法在实际应用中存在一些问题。传统的田间调查方法耗时耗力、时效性差,而且准确度也受调查者主观意识的影响<sup>[9-10]</sup>。而卫星遥感也存在影像空间分辨率低、过境周期长、云污染等不足,在关键生育期对指定区域的作物进行遥感监测,卫星影像往往难以满足需求<sup>[11]</sup>。随着轻型无人机技术的发展,不少学者利用无人机来实时监测地面作物长势<sup>[12-13]</sup>。江杰等<sup>[12]</sup>选择小麦关键生育期作为研究时段,利用搭载数码相机的消费级无人机获取试验区数码影像,通过随机森林算法定量分析了作物长势状况与影像颜色指数的关系。李明等<sup>[13]</sup>利用无人机飞行获取地面影像,通过累计像元的方法测算得到了水稻田块的面积。但是目前用于作物监测的无人机搭载的相机一般为可见光相机,数码相机采集的影像数据波段较少,不能全面反映农田作物完整的光谱信息。近年来,利用研究开发的便

便携式多光谱传感器来收集作物光谱信息已经有了不少应用<sup>[14-17]</sup>。倪军等<sup>[14]</sup>研发了一种利用便携式多光谱传感器对作物生长进行监测的诊断设备,实现了实时、快速、无损地监测作物植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)等指标。王婷婷等<sup>[15]</sup>构建了多光谱作物生长的智能监测设备,实现了多光谱传感器对稻麦冠层光谱特征的实时、在线、快速获取。可见,研究利用无人机搭载多光谱传感器实时监测作物长势的应用方法,对补充完善现有的水稻高温胁迫监测调查手段有着重要的意义。

本研究选取位于长江中下游的芜湖市南陵县龙潭村袁隆平超级稻基地为研究观测区,使用消费级无人机搭载便携式多光谱传感器构建无人机多光谱遥感系统,在连续高温时段对处于生育敏感期的水稻光谱信息进行采集,并通过实地测量和相关文献确定稻株出现高温胁迫的叶面积指数判别条件,最后在ArcGIS地理信息系统中建立水稻高温胁迫的反演识别模型,实现了基于无人机多光谱遥感技术的水稻高温胁迫监测。构建的无人机多光谱遥感系统具有空间分辨率高、实时快速监测以及成本低,利于推广应用的特点,在作物病虫害遥感监测方面有一定的应用前景。

## 1 资料与方法

### 1.1 实验区概况

在长江中下游水稻主产区内,选取芜湖市南陵县龙潭村袁隆平超级稻基地内的一块高标准农田为实验观测区,实验区面积为0.33hm<sup>2</sup>。该地属于亚热带湿润季风气候,年平均气温在15.0~16.0℃,日照时数约为2000.0h,年降水量大于1200.0mm,年无霜期达219d以上。基地水稻产量9750kg·hm<sup>-2</sup>,被农业部选定为袁隆平院士的第三期超级杂交水稻高产攻关基地,基地地理位置为118°26'24"E,31°2'24"N。

### 1.2 光谱数据

采用搭载便携式多光谱传感器的无人机采集研究区域内水稻的光谱数据。便携式多光谱传感器是基于ARM9-Linux平台的小型图像采集设备,由蓝光、红光和近红外三通道(表1)反射率传感器以及数据自动采集模块组成,基于Zigbee协议自动组网,支持GPRS远程数据传输与反向控制,可以实时查看数据质量并计算多种植被指数,从而实现对地面作物生长状况的快速监测。

表1 便携式多光谱传感器波段信息

Table 1 Band information of portable multispectral sensor

波段 Band	波长 Wavelength (nm)
蓝 Blue	450-610
绿 Green	-
红 Red	630-690
近红外 Near infrared	770-950

### 1.3 归一化植被指数反演

目前常用的光谱植被指数有比值植被指数(Ratio vegetation index, RVI)、差值植被指数(Difference vegetation index, DVI)等,其中应用最广泛的是归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)<sup>[18-19]</sup>。利用稻株在红光波段处的吸收和近红外波段处的反射特性,在ENVI软件中经过波段运算可以得到NDVI,以反映稻株的长势状况、健康程度、营养信息等。其计算式为

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

式中, $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{RED}$ 分别代表近红外波段、红光波段的反射率。

### 1.4 叶面积指数测定

LAI-2200型植物冠层分析仪是基于朗伯-比尔定律研制的光学检测仪器<sup>[20]</sup>,该仪器运行原理是利用鱼镜头测量植被冠层上、下5个方向的透射光线的强度,并利用植被冠层的辐射转移模型来计算叶面积指数、聚集度指数、空隙比等植被冠层的结构参数。鱼镜头的垂直视野范围为148.0°,水平视野范围为360.0°,波谱响应范围在320~490nm。

实验时段内(7月20日-8月9日),在实验区选取均匀分布的100个长势不同的植株作为测定样本,使用LAI-2200植被冠层测定仪测定LAI,测定时间选择14:00。测定时鱼镜头处于植株茎基部的同一水平面上,具体方法参见文献[21]和LAI-2200操作手册。此外,同时配备手持GPS测量地面样本的经纬度信息。

### 1.5 实验时段选择

根据南陵县国家气象观测站数据,2019年自自梅以来(7月20日-8月9日),实验基地区域的日最高气温超过35.0℃的天数达到20d,日极端最高气温超过了39.0℃,总体呈现高温日数多且集中、高温范围广、强度大的特点(图1),持续晴热高温少雨的天气使部分水稻出现了一定程度的高温热害。

此外，7 下旬-8 月上旬水稻正处于分蘖-孕穗-抽穗期，稻株的植被光谱特征显著<sup>[22-23]</sup>，在多光谱影像中易于分辨。因此，选择 7 月 20 日-8 月 9 日作为无人机多光谱遥感监测一季稻高温胁迫的实验时段。

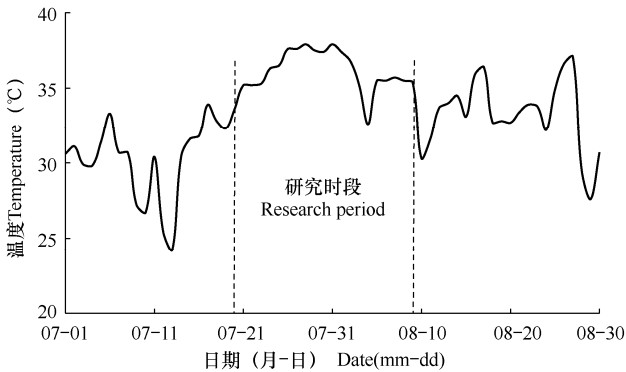


图 1 2019 年 7-8 月实验区日最高气温变化过程

Fig. 1 Variation course of daily maximum temperature in the experimental area from July to August, 2019

## 2 结果与分析

### 2.1 多光谱遥感系统与无人机的硬件兼容

便携式多光谱传感器(图 2a)外形尺寸为 6.0cm×3.5cm×2.0cm，重量为 0.15kg，为了适应该传感器的

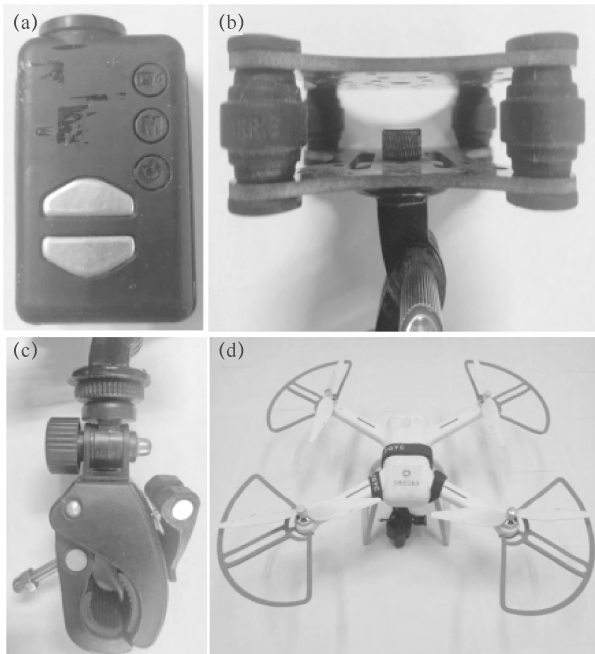


图 2 便携式多光谱传感器 (a)、云台 (b)、连接器 (c) 组装成无人机多光谱遥感系统 (d)

Fig. 2 Portable multispectral sensor(a), cloud platform(b) and connector(c) were assembled to the UAV multispectral remote sensing system(d)

重量、体积等方面的兼容要求，同时兼顾续航时间、价格等因素，选择轻便型的四翼无人机与之组装，该无人机的外形尺寸为 38.0cm×31.0cm×19.0cm，重量为 2.0kg，续航时间为 0.5h，并具有操作方便、影像清晰、安全稳定、易于改装的特点。

由于该传感器并不是专为无人机设计，因此需要解决传感器与无人机硬件装配兼容的问题。云台是无人机用于安装、固定相机和传感器等任务载荷的支撑设备。为了保证遥感影像的高质量，根据无人机和传感器的外形尺寸、重量等参数特点设计定制了云台(图 2b)，该云台的上下叶板由两片轻薄的复合材料构成，中间装配了用于吸收气流扰动的缓震材料，可以保障无人机在空中作业时结构的稳定。此外，还通过粘黏绑带、机械式连接器(图 2c)完成无人机、云台以及传感器的硬件装配(图 2d)。

### 2.2 无人机多光谱遥感系统的信息处理

#### 2.2.1 参数配置及影像的几何校正

Mobius Actioncam 是一款功能强大的固件调参软件，可以按照实际使用环境和需求对传感器的各类性能参数进行设置。利用 Mobius Actioncam 对无人机遥感系统的传感器进行参数配置，传感器的开机时间设为 14:00，拍摄间隔设为 1s，镜头类型设为普通，光源闪频设为 60Hz，储存格式设为 TIF。在实验时段内，每日 14:00 对实验区进行无人机多光谱遥感监测，共获得 21 张水稻实验区遥感影像，像元的空间分辨率为 0.03m×0.03m，单幅影像共计 3668945 个像元。

由于无人机属于低空遥感，且传感器监测的遥感影像无地理信息，因此几何校正十分重要。选取实验区高标准农田的四个对角为地面控制点，利用手持 GPS 测量记录经纬度信息，在 ArcGIS 中，利用已有地面控制点的准确地理坐标，对原始遥感影像进行纠正，使其具有准确的地理坐标和投影信息，以便完成遥感光谱信息与地面实测数据的空间匹配。

#### 2.2.2 归一化植被指数的提取

根据式(1)，将无人机多光谱遥感系统采集到的光谱信息在遥感图像处理平台(ENVI)中进行波段运算，反演得到实验区内水稻归一化植被指数(NDVI)的空间分布，并统计整幅遥感影像内 NDVI 的平均值及其逐日变化过程，结果见图 3。由图可见，

虽然受到部分稻株高温胁迫的影响，但是实验区内水稻 NDVI 的平均值表现为逐渐增加的变化过程。7 月下旬水稻处于分蘖-孕穗期，植株相对较小，光谱特征主要表现为稻田水体，NDVI 相对较小，仅 0.35~0.40；进入 8 月以后，水稻进入抽穗期，随着植株体增大 NDVI 快速上升，至 8 月 7 日达到 0.55。可见，无人机多光谱遥感系统采集的光谱信息可以表征实验区水稻整体长势的真实状态。

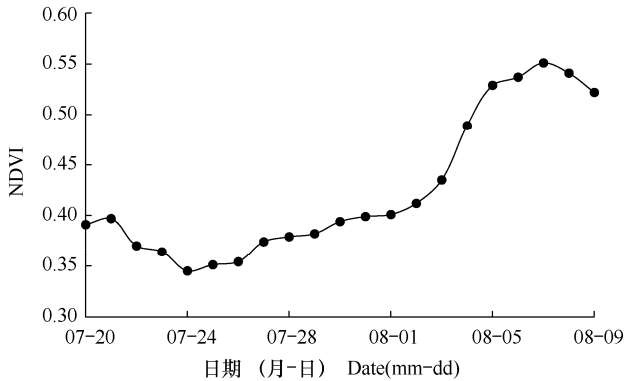


图 3 基于无人机多光谱遥感系统的研究时段内水稻归一化植被指数 (NDVI) 时间序列

Fig. 3 Variation course of the NDVI(normalized difference vegetation index) time series of rice during study period based on multi-spectral monitoring of UAV

### 2.3 水稻高温胁迫的遥感识别

#### 2.3.1 叶面积指数反演模型

地表作物的光谱特征与叶面积指数 (LAI) 有着密切的关系<sup>[24-26]</sup>。康婷婷等<sup>[24]</sup>利用 HJ-CCD 影像与地面同步获取的 LAI 实测数据结合，生成研究区水稻 30.0m 的 HJ/LAI，并以 HJ/LAI 作为标准，通过尺度转换以及空间匹配，验证得到植被指数与研究区水稻 LAI 之间的决定系数为 0.72，精度

达 70.89%。通过 LAI-2200 型植物冠层分析仪及手持 GPS 仪采集带有经纬度信息的地面稻株 LAI，而无人机多光谱遥感系统采集的遥感影像也通过几何校正获取了地理坐标和投影信息，在 ArcGIS 中可以完成 NDVI 反演数据与 LAI 地面实测数据的空间匹配，最后利用数理统计的方法建立实验区内 NDVI-LAI 的回归模型。表 2 为实验区 LAI 和 NDVI 样本，样本 LAI 变化范围在 0.41~6.87，代表同一时间内实验区内长势不同的稻株。从样本标准差可以看出取样均匀合理，能够代表研究区域内作物的真实生长情况。

表 2 实验区叶面积指数 (LAI) 和 NDVI 样本特征值  
Table 2 Characteristics of the samples of LAI(leaf area index) and NDVI in the experimental area

指数	样本数	最大值	最小值	平均值	标准差
Index	No. of sample	Maximum	Minimum	Average	Standard deviation
LAI	100	6.87	0.41	4.15	0.22
NDVI	100	0.69	0.09	0.37	0.14

根据选取的 NDVI 和 LAI 样本，建立两者的拟合方程。对比分析表明，线性函数拟合方程 (图 4a) 的相关系数 (R) 为 0.837，决定系数 (R<sup>2</sup>) 为 0.701，而指数函数拟合方程 (图 4b) 的相关系数 (R) 为 0.918，决定系数 (R<sup>2</sup>) 为 0.843，说明在关键生育期 NDVI 对 LAI 的最佳拟合方程为指数形式<sup>[24]</sup>。LAI 反演模型的数学表达式为

$$LAI = 0.79e^{3.42NDVI} \quad (2)$$

式中，LAI 与 NDVI 呈显著的正相关关系，说明实验区内水稻的 LAI 与水稻长势状况关联较大，水稻长势越好，则 LAI 越大，这与以往有关 LAI 与 NDVI 关系的研究结果相一致<sup>[24-26]</sup>。

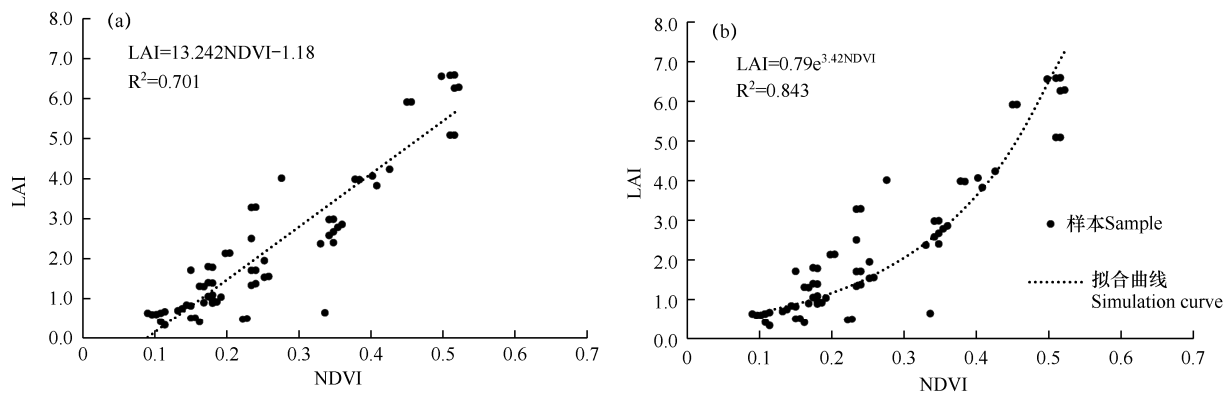


图 4 实验区域内 LAI 与 NDVI 的线性 (a) 和指数 (b) 相关性统计分析

Fig. 4 The linear(a) and exponential(b) function analysis between LAI and NDVI in experimental area

### 2.3.2 水稻高温胁迫的遥感识别

当植被遇到外界环境的胁迫时，如氮素胁迫、高温胁迫以及水分胁迫等会影响作物的生化生理机能，导致作物叶面保护膜的结构与功能受损并加速叶片的衰老，从而使叶片叶绿素含量随之减少。根据前人的研究<sup>[25]</sup>，随着外界气温的不断增加，处于生育关键期的稻株 LAI 将表现出下降的趋势，且不同胁迫温度的差异均达到显著水平，由此可知外界高温胁迫会影响处于生育关键期的水稻的生长发育状况，导致 LAI 降低。因此，选取出现高温胁迫的水稻，利用叶面积测量仪对其 LAI 进行实地测量，将其平均值作为识别水稻高温胁迫的判别条件，表达式为

$$LAI \leq k \tag{3}$$

式中，k 为常数，根据文献[24-26]，取 k=1.8。

以 k=1.8 作为水稻高温胁迫识别条件，在遥感处理软件中进行波段运算，提取 8 月 9 日实验区内水稻高温胁迫分布情况，结果见图 5。根据图 5 统计实验时段内稻株出现高温胁迫的面积为 504.9m<sup>2</sup>，占实验区面积的 15.3%，而农业部门在水稻成熟期经过实地测量得到该基地的灌浆率为 82.2%，受害率 17.8%，由此可见，无人机多光谱遥感监测水稻高温胁迫技术能够满足业务应用。

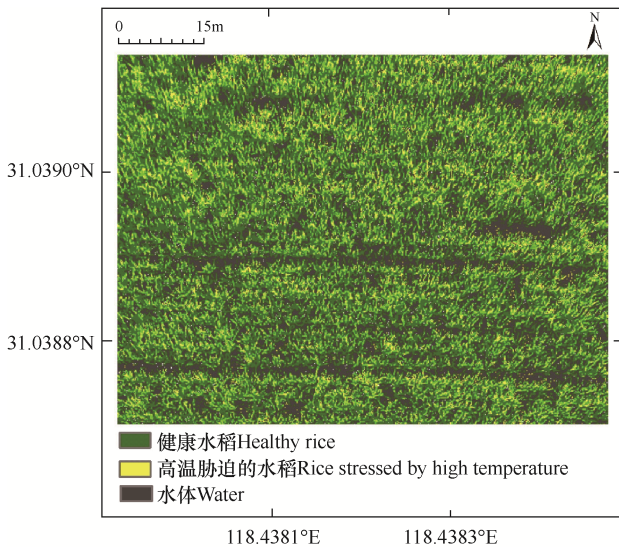


图 5 水稻高温胁迫的无人机多光谱监测结果

Fig. 5 Multi-spectral monitoring result of rice after high temperature stress by UAV

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

(1) 利用无人机多光谱遥感技术对实验区内水

稻高温胁迫进行监测并进行统计分析，得到实验时段内稻株出现高温胁迫的面积为 504.9m<sup>2</sup>，占实验区面积的 15.3%，农业部门在水稻成熟期经过实地测量得到该基地的灌浆率为 82.2%，说明本研究提出的无人机多光谱遥感监测水稻高温胁迫技术的监测结果精度较高，且本技术在孕穗生育期内可以实现对高温胁迫的实时遥感监测，并以此作为生育期损失估算、政策性保险定损、成熟期产量预测的重要依据。

(2) 为了保证遥感影像的高质量 and 稳定性，根据无人机和传感器的外形尺寸、重量等参数特点设计定制了云台、粘黏绑带以及机械式连接器，完成无人机、云台以及传感器的硬件兼容问题。通过设置地面控制点的方法，在遥感处理软件中对原始遥感影像进行几何校正，完成遥感光谱信息与地面实测数据的空间匹配。此外，无人机多光谱遥感系统由消费级无人机和便携式光谱传感器组合而成，购置成本较低，组装方便。

综上，相对于传统人工田间调查和卫星遥感调查的作物长势监测方法，本研究构建的无人机多光谱遥感监测技术具有空间分辨率高、实时快速监测以及成本低、利于推广应用的特点。

### 3.2 讨论

(1) 虽然本技术通过装配云台在一定程度上保证了遥感影像的高质量，但云台与传感器的衔接在稳定性上可能还有所欠缺，未来将通过工业设计、专项定制便携式传感器和云台一体化设备等方式，提升本技术在实际推广应用中的稳定性。

(2) 研究只分析了 2019 年 7 月 20 日-8 月 9 日连续高温时段实验区内水稻受高温胁迫的影响，水稻苗期及成熟灌浆期的 NDVI/LAI 序列的时空变化并未监测研究，在未来的业务应用中将进一步监测研究水稻全生育期的光谱信息时空变化特征。

(3) 长江中下游地区的水稻种植区域分布广泛，品种繁多，本研究对象品种为超级稻-Y 两优 900，而不同品种的水稻在出现高温胁迫时其光谱特征会有一定程度差异，后期将在其它品种水稻以及油菜、小麦等大宗作物上应用，进一步扩大无人机多光谱遥感监测系统的应用覆盖面，为科学防灾减灾和粮食生产安全提供强有力的科技支撑。



## 参考文献 References

- [1] 国家粮食局. 中国粮食年鉴[M]. 北京: 经济管理出版社, 2015:239-240.  
State Administration of Grain.China grain yearbook[M]. Beijing:Economic Management Press,2015:239-240.(in Chinese)
- [2] 张洪程,王夫玉. 中国水稻群体研究进展[J]. 中国水稻科学, 2001,15(1):51-56.  
Zhang H C,Wang F Y.Recent progress on research of rice population in China[J].Chinese Journal of Rice Science,2001, 15(1):51-56.(in Chinese)
- [3] 杨秉臻,金涛,陆建飞. 长江中下游地区近20年水稻生产与优势的变化[J]. 江苏农业科学,2018,46(19):62-67.  
Yang Z Z,Jin T,Lu J F.Changes of rice production and advantage in the middle and lower reaches of the Yangtze River in the past 20 years[J].Jiangsu Agricultural Sciences, 2018,46(19):62-67.(in Chinese)
- [4] 黄荣辉,杜振彩. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势[J]. 自然杂志,2010,32(4):187-195.  
Huang R H,Du Z C.Evolution characteristics and trend of droughts and floods in China under the background of global warming[J].Chinese Journal of Nature,2010,32(4):187-195. (in Chinese)
- [5] 黄守坤,夏甜甜. 气候变暖的第一影响因素及我国的应对[J]. 生态经济,2012(3):153-158.  
Huang S K,Xia T T.The first factor of global climate warming and how China face it[J].Ecological Economy,2012(3): 153-158.(in Chinese)
- [6] 任义方,赵艳霞,张旭晖. 江苏水稻高温热害气象指数保险风险综合区划[J]. 中国农业气象,2019,40(6):391-401.  
Ren Y F,Zhao Y X,Zhang X H.Comprehensive risk regionalization of meteorological index insurance for high temperature heat damage of rice in Jiangsu province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2019,40(6):391-401.
- [7] 谢志清,杜银,高莘,等. 江淮流域水稻高温热害灾损变化及应对策略[J]. 气象,2013,6(1):101-112.  
Xie Z Q,Du Y,Gao P,et al.Impact of high-temperature on single cropping rice over Yangtze-Huaihe River valley and response measures[J].Meteorological Monthly,2013,6(1):101- 112.(in Chinese)
- [8] 李友信. 长江中下游地区水稻高温热害分布规律研究[J]. 华中农业大学学报,2015,11(2):37-42.  
Li Y X.Study on the temporal and spatial distribution of the high thermal damage to rice in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2015,11(2):37-42.(in Chinese)
- [9] 高敏,张茂松,王美新. 思茅咖啡黑果病与气象条件的关系及趋势预报[J]. 中国农业气象,2006,27(4):339-342.  
Gao M,Zhang M S,Wang M X.Relationship of coffee black fruit to meteorological conditions and forecast of its occurrence trend in Simao region[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2006,27(4):339-342.(in Chinese)
- [10] 刘静,张宗山,马力文,等. 宁夏枸杞蚜虫发生规律及其气象等级预报[J]. 中国农业气象,2015,36(3):356-363.  
Liu J,Zhang Z S,Ma L W,et al.Occurrence of *Aphis* sp.on *Lycium barbarum* L.and its meteorological grades forecast in Ningxia[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2015, 36(3):356-363.(in Chinese)
- [11] 孔令寅,延昊,鲍艳松,等. 基于关键发育期的冬小麦长势遥感监测方法[J]. 中国农业气象,2012,33(3):424-430.  
Kong L Y,Yan H,Bao Y S,et al.Remote sensor monitoring method for winter wheat growth based on key development periods[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2012,33(3): 424-430.(in Chinese)
- [12] 江杰,张泽宇,曹强,等. 基于消费级无人机搭载数码相机监测小麦长势状况研究[J]. 南京农业大学学报,2019,42(4): 622-631.  
Jiang J,Zhang Z Y,Cao Q,et al.Use of a digital camera mounted on a consumer-grade unmanned aerial vehicle to monitor the growth status of wheat[J].Journal of Nanjing Agricultural University,2019,42(4):622-631.(in Chinese)
- [13] 李明,黄愉淇,李绪孟,等. 基于无人机遥感影像的水稻种植信息提取[J]. 农业工程学报,2018,34(4):108-114.  
Li M,Huang Y Q,Li X M,et al.Extraction of rice planting information based on remote sensing image from UAV [J].Transactions of the CSAE,2018,34(4):108-114.(in Chinese)
- [14] 倪军,姚霞,田永超,等. 便携式作物生长监测诊断仪的设计与试验[J]. 农业机械学报,2013,44(6):150-156.  
Ni J,Yao X,Tian Y C,et al.Design and experiments of portable apparatus for plant growth monitoring and diagnosis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(6):150-156.(in Chinese)
- [15] 王婷婷. 多光谱作物生长智能传感器的研制[D]. 南京: 南京农业大学,2012:21-23.  
Wang T T.Development of multispectral crop growth

- intelligent sensor[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2012:21-23.(in Chinese)
- [16] 杨建宁,张井超,朱艳,等.便携式作物生长监测诊断仪性能试验[J].农业机械学报,2013,44(4):208-212.  
Yang J N,Zhang J C,Zhu Y,et al.Experiments on performance of portable plant growth monitoring diagnostic instrument[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(4):208-212.(in Chinese)
- [17] 李博,晏磊,张立福,等.传感器光谱指标对植被光谱模拟精度的影响[J].光谱学与光谱分析,2010,30(7):1843-1847.  
Li B,Yan L,Zhang L F,et al.Evaluation of sensor spectral parameters for the simulation accuracy of the vegetation spectrum[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(7): 1843-1847.(in Chinese)
- [18] 赵宗泽,张永军.基于植被指数限制分水岭算法的机载激光点云建筑物提取[J].光学学报,2016,36(10):1022-1028.  
Zhao Z Z,Zhang Y J.Building extraction from airborne laser point cloud using NDVI constrained watershed algorithm[J]. Acta Optica Sinica,2016,36(10):1022-1028.(in Chinese)
- [19] 陈景玲,王静,王谦,等.植物冠层分析仪测定荆条孤立冠层叶面积指数和透光率的分析[J].中国农业气象,2014,35(4): 373-379.  
Chen J L,Wang J,Wang Q,et al.LAI and light transmittance measurement of isolated vitex shrub using LAI-2200 PCA[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2014,35(4): 373-379.(in Chinese)
- [20] Gower S T,Norman J M.Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations[J].Ecology,1991,72: 1896-1900.
- [21] Defries R,Townshend J.NDVI-derived land cover classifications at a global scale[J].International Journal of Remote Sensing,2007,17(15):3567-3586.
- [22] 张佳华,姚凤梅,李秉柏,等.星-地光学遥感信息监测水稻高温热害研究进展[J].中国科学,2011,41(10):1396-1406.  
Zhang J H,Yao F M,Li B B,et al.Progress in monitoring high-temperature damage to rice through satellite and ground-based optical remote sensing[J].Scientia Sinica,2011, 41(10):1396-1406.(in Chinese)
- [23] 李根,景元书,王琳,等.基于 MODIS 时序植被指数和线性光谱混合模型的水稻面积提取[J].大气科学学报,2014,37 (1):119-126.  
Li G,Jing Y S,Wang L,et al.Extraction of paddy planting areas based on MODIS vegetation index time series and linear spectral mixture model[J].Journal of Atmospheric Science,2014,37(1):119-126.(in Chinese)
- [24] 康婷婷,居为民,李秉柏,等.水稻叶面积指数遥感反演方法对比分析[J].江苏农业科学,2015,43(5):366-371.  
Kang T T,Ju W M,Li B B,et al.Comparative analysis of remote sensing inversion methods of rice leaf area index[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2015,43(5):366-371. (in Chinese)
- [25] 谢晓金,李映雪,李秉柏,等.高温胁迫下水稻生理生化特性及高光谱估测研究[J].中国水稻科学,2010,24(2):196-202.  
Xie X J,Li Y X,Li B B.Estimation of rice yield under high temperature stress by hyper-spectral remote sensing[J]. Chinese Journal of Rice Science,2010,24(2):196-202.(in Chinese)
- [26] 刘飞,王莉,何勇.应用多光谱图像技术获取黄瓜叶片含氮量及叶面积指数[J].光学学报,2009,29(6):1616-1620.  
Liu F,Wang L,He Y.Application of multi-spectral imaging technique for acquisition of cucumber growing information [J].Acta Optica Sinica,2009,29(6):1616-1620.(in Chinese)