

郭铭淇, 包云轩, 黄璐, 等. 无人机多光谱影像在稻纵卷叶螟危害监测中的应用[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(7): 1530-1542.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.07.010

无人机多光谱影像在稻纵卷叶螟危害监测中的应用

郭铭淇^{1,2,3}, 包云轩^{1,2,3}, 黄璐^{1,2,3}, 陈晨^{1,2,3}, 杨荣明⁴, 朱凤⁴

(1.南京信息工程大学气象灾害预报和评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 2.江苏省农业气象重点实验室/南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044; 3.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210044; 4.江苏省植物保护站, 江苏 南京 210013)

摘要: 为探讨利用无人机多光谱影像监测稻纵卷叶螟危害的可行性, 本研究于 2021 年 6–10 月开展了无人机对稻纵卷叶螟危害和田间水稻生育状况的同步观测试验, 分析了 15 种植被指数与卷叶率(虫害指标)之间的相关关系; 分别采用普通最小二乘法、多项式拟合、多元逐步回归法和偏最小二乘法建立了水稻分蘖期、拔节期和孕穗期的卷叶率反演模型; 在此基础上, 筛选出最优模型并分析卷叶率与水稻生理生态参数之间的关联。结果表明, (1) 3 个生育期的大部分植被指数与卷叶率存在极显著的相关性, 每个生育期卷叶率与均一化植被指数(NDVI)的相关性都是最高的。(2) 分蘖期的卷叶率反演模型效果最好, 孕穗期的模型较好, 拔节期的模型效果稍差。(3) 在分蘖期, 稻纵卷叶螟对水稻的危害反映在叶绿素浓度的下降和叶色的变化; 在拔节期, 虫害会引起水稻的补偿反应, 导致叶绿素含量和叶面积增加; 在孕穗期虫害对水稻生长的危害主要表现为叶绿素含量下降。本研究结果可为无人机遥感技术在区域范围内精确识别稻纵卷叶螟危害提供重要的参考。

关键词: 稻纵卷叶螟; 无人机遥感; 植被指数; 多光谱影像; 反演模型

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)07-1530-13

Application of multispectral image taken by unmanned aerial vehicle in monitoring *Cnaphalocrocis medinalis* Güenée damage on rice growth

GUO Ming-qi^{1,2,3}, BAO Yun-xuan^{1,2,3}, HUANG Lu^{1,2,3}, CHEN Chen^{1,2,3}, YANG Rong-ming⁴, ZHU Feng⁴

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology/School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 3. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 4. Plant Protection Station in Jiangsu Province, Nanjing 210013, China)

Abstract: To explore the feasibility of using multispectral images taken by unmanned aerial vehicles (UAV) to monitor the damage of rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis* Güenée), a set of synchronous observation experiments on the damage of *C. medinalis* and rice growth status in paddy fields were conducted by using UAV, during the period from June to October in 2021. Correlations between 15 spectral vegetation indexes and leaf-roll rate (insect damage index) of *C. medina-*

收稿日期: 2022-10-31

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41975144); 江苏省重点研发项目(BE2019387)

作者简介: 郭铭淇(1997-), 女, 广东佛山人, 硕士, 主要研究领域为农业气象灾害监测与预警。(E-mail) guomqi@sina.com

通讯作者: 包云轩, (E-mail) baoyx@nuist.edu.cn; baoyunxuan@163.com

lis were analyzed. Inversion models for the leaf-roll rates during the tillering stage, jointing stage and booting stage of rice were established by using the ordinary least square method, polynomial fitting, multiple stepwise linear regression method and partial least square method respectively. The optimal model was selected, and the relationships between leaf-roll rate and rice physiological and eco-

logical parameters were analyzed. The results showed that, firstly, during the three growth stages, most of the vegetation indexes showed extremely significant correlations with the leaf-roll rate, and during each growth stage the correlation between leaf-roll rate and normalized difference vegetation index (*NDVI*) was the highest. Secondly, during the tillering stage, effect of the leaf-roll rate inversion model was the best, followed by models for the booting stage, but the model for the jointing stage was slightly worse. Thirdly, during the tillering stage, the damage of *C. medinalis* to rice reflected in decreasing of chlorophyll concentration and changing of leaf color. During the jointing stage, damage of *C. medinalis* might cause compensatory response in rice, resulting in increasing of chlorophyll content and leaf area. During the booting stage, the damage of *C. medinalis* to rice growth mainly presented as the decreasing of chlorophyll content. The research results can provide important reference for using UAV remote sensing technology to identify the damage of *C. medinalis* accurately in regional range.

Key words: *Cnaphalocrocis medinalis* Guénée; remote sensing of unmanned aerial vehicle (UAV); vegetation index; multispectral image; inversion model

水稻是全球超过半数人口的主要粮食^[1],但水稻的各个生育阶段都容易受到一种或多种病虫害的侵害。其中,稻纵卷叶螟是危害水稻的迁飞性害虫之一,其幼虫取食叶肉组织形成白色条斑,同时结茧时导致叶片卷曲,影响水稻正常生长^[2-3]。

近年来,稻纵卷叶螟危害呈现程度变重、频率增加的趋势,有研究表明,全球变暖会导致稻纵卷叶螟危害加重^[4],同时稻纵卷叶螟对化学药剂的抗性增强也减弱了对其防治效果^[5]。有研究者发现田间寄主植物多样性为稻纵卷叶螟的成虫栖息和产卵提供了更多场所^[6-7],同时,水稻耕作栽培制度的多样性也加大了稻纵卷叶螟监测和防治的难度^[8]。根据全国农业技术推广服务中心的预测,2023年稻纵卷叶螟在华南东部、江南、长江下游稻区偏重发生^[9]。

水稻病虫害人工调查方法费时费力,存在依赖调查者的专业知识和经验、主观性强、历史数据难以追溯的缺点。数字图像处理和识别方法的不断改进使得研究人员更容易识别出受病菌感染的作物及病害品种^[10]。目前红绿蓝颜色系统(RGB)、多光谱、高光谱、热成像和荧光成像等多种技术也已被用于识别各种作物的病害^[11]。针对单一病害,Lin等^[12]发现叶鞘病变和叶片病变的光谱曲线形状相似,但吸收谷、反射峰和反射陡坡的变化程度不同;另一个研究团队研究发现,包络线消除法提取的吸收谷参数与随机森林模型相结合在预测稻瘟病病害发生程度上具有实用性^[13]。针对水稻多种病害,Santosh等^[14]提出了一种基于叶片图像中病变大小、形状和颜色的水稻植物病害识别与鉴定的有效方法;有研究团队提出用一种新的密集连接型卷积神经网络模

型进行水稻叶部病害识别,结合感兴趣区域提取算法的分类模型,提高了识别的准确率^[15]。

传统的监测稻纵卷叶螟方法主要指试验者采用驱虫棒在田间对虫量进行测量,以及利用化学试剂^[16]或诱虫灯^[17]夜间捕获蛾虫进行测量。随着遥感技术的进步,研究人员通过把受稻纵卷叶螟侵害的叶片转移到实验室内进行与光谱相关的分析,如利用主成分分析方法结合神经网络对单叶片的稻纵卷叶螟危害进行识别^[18],或采用波段扩展过程(The band expansion process, BEP)方法进行有效波段选择^[19]。Huang等^[20]研究获得了表征叶片受害程度和卷叶大小的光谱指标,如741 nm的反射率(R_{741})、近红外反射率-红光反射率($R_{nir}-R_{red}$)、黄边(550~590 nm)的面积和黄边内一阶微分光谱中的最小值。后来,研究人员利用便携式光谱仪测定不同受害等级的水稻冠层光谱反射率,结果发现红边参数可较好地反映水稻受稻纵卷叶螟危害的程度^[21],这与室内的结果^[20]产生差异。野外的试验中还加入水稻其他生理指标的数据进行病虫害分析^[22],如叶绿素含量,它是一个非常有效表征植物生长状况的指标^[23],常被研究者作为重要参数进行研究。有研究者发现,孕穗期光谱指数与作物参数的相关性最高^[24],说明此生育期利用光谱指数对水稻的健康状况进行监测是有效的。

随着无人机技术的发展,基于无人机遥感对作物病虫害进行监测的研究可以通过图像识别、目视检查和粗略的损害评估等方法实现^[25]。植被受到病虫害胁迫后会导致叶片色素及冠层结构的改变^[26],特别是叶绿素含量会发生改变,因此,对叶绿素含量敏感的光谱特征可用于病虫害遥感诊断^[27]。在病害和虫

害发生后,利用遥感数据识别植物反射光谱的变化,并通过模型对受害程度进行估算^[28]。有学者利用无人机多光谱影像对棉花叶枯病进行不同观测高度(100 m、300 m 和 500 m)的监测,发现可以检测到 2 个比例的感染水平^[29]。研究人员提取与小麦条锈病发生显著相关的 22 种光谱指数进行研究,发现红边-差值指数(*Red edge-DVI*)、均一化植被指数(*NDVI*)和红边-均一化植被指数(*Red edge-NDVI*)可以同时描述群体小麦条锈病发病阶段和病害严重程度^[30]。还有研究结果证明基于多光谱影像计算的 *NDVI* 十分适合监测水稻纹枯病的病害严重程度,而比值植被指数(*RVI*)的监测效果次之^[31]。

国内有学者于 2020 年开始探索无人机技术在稻纵卷叶螟危害监测中的应用,他们利用无人机平台获取了水稻冠层的高光谱数据,发现 410 nm、470 nm、490 nm、570 nm、625 nm、665 nm 和 720 nm 附近的光谱波段是叶片检测稻纵卷叶螟侵害的敏感区域^[32]。其后,另一个研究团队利用低空多光谱数据对水稻生长后期的稻纵卷叶螟受害情况进行了诊断^[28],但无法确定无人机多光谱数据能否应用于水稻早期生长阶段对虫害的识别。

鉴于稻纵卷叶螟危害对中国南方稻区的严重影响,本研究于 2021 年在江苏省南京市开展了稻纵卷叶螟的无人机观测试验,希望能实现以下 3 个目标:(1)评估无人机多光谱数据在稻纵卷叶螟遥感监测方面的可行性;(2)筛选出各生育期定量评估稻纵卷叶螟危害程度效果较好的植被指数,并分析其与水稻生理生态参数之间存在的关联;(3)比较不同建模方法在各生育期的计算效果,并利用各生育期最优模型获取试验区的虫害等级空间分布状况。本研究旨在为监测稻纵卷叶螟的无人机遥感精确识别提供参考,帮助植保工作者科学地开展稻纵卷叶螟的防治工作。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验大田位于中国江苏省南京市浦口区的高标准水稻种植示范区内(图 1),地理经纬度为:118°29'E~118°30'E,31°52'N~31°53'N。该地区位于长江北岸,属于亚热带湿润性季风气候,年均降水量达 1 200 mm 以上,无霜期长,年平均日照时长 2 150 h。夏季为水稻主要生长季,最高气温超过 35

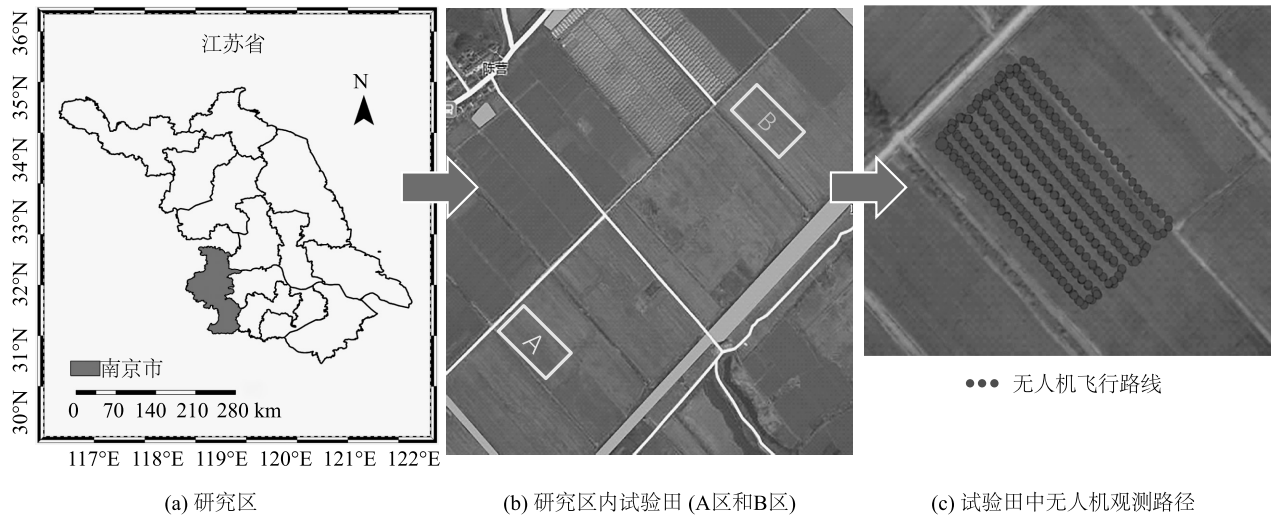
℃。2 处试验田内水稻品种均为南粳 46,播种时间为 2021 年 6 月 1 日,6 月 30 日移栽,栽插密度为 1 m² 33 穴,全生育期内采用常规大田种植管理,防治试验田进行稻纵卷叶螟的农药防治,非防治试验田不进行稻纵卷叶螟的防治。2021 年 7 月中旬开始,大田水稻在自然状态下开始陆续受到稻纵卷叶螟的侵害。虫害发生后,非防治试验田内划分出 9 个区域,每个区域内依照虫害等级选取样点,地面数据采集围绕样点附近植株进行。防治田在区域内随机选取 6 个样点进行数据采集。

1.2 无人机平台和多光谱传感器

无人机多光谱影像采集利用中国深圳大疆公司的 M600 Pro 多旋翼无人机作为飞行平台(最高飞行高度 120 m,最大续航时间 30 min),搭载多光谱相机 Red Edge-MX,该相机有 5 个波段[Blue (475±10) nm、Green (560±10) nm、Red (668±5) nm、NIR (840±20) nm、Red-edge (717±5) nm],1 次采集 5 个波段的影像,最小拍摄时间间隔 1 s;相机镜头焦距为 5.4 mm。

1.3 数据获取和处理

1.3.1 地面样点数据采集 根据南京市浦口区植保站提供的前期虫情数据、当前虫情数据和未来虫情预测,结合南京市气象局对研究区天气的预报,选择天气状况晴好的 2021 年 7 月 19 日、2021 年 8 月 18 日、2021 年 8 月 31 日无人机多光谱遥感观测数据进行分析,其中 2021 年 7 月 19 日为第五代稻纵卷叶螟危害初期,水稻处于分蘖期,当时温暖潮湿的环境、充足的食物为稻纵卷叶螟的发生、繁殖提供了有利条件^[33-34];2021 年 8 月 18 日水稻进入拔节后期,此时处于第五代稻纵卷叶螟危害末期;2021 年 8 月 31 日为第六代稻纵卷叶螟危害中期,此时水稻进入孕穗期,是影响水稻产量和品质的关键生育期之一。由于非防治试验田内未对稻纵卷叶螟进行防治,各区域的虫害程度存在一定的差异,单个区域内每个虫害等级随机选取样点进行虫害程度调查。其中虫害程度(卷叶率=受害叶片数/总叶片数×100%)的分级标准见表 1。防治田是作为非防治田的对照,进行虫害防治后,其中的水稻默认为健康或轻度(I 级)虫害,在田中随机选取 6 个样点进行数据采集。表 2 为非防治田水稻卷叶率调查情况,各生育期的 45 个样点中均包含未受虫害水稻的数据(健康水稻卷叶率统一记为 0.01%)。



A 区:未防治田;B 区:防治田。

图1 试验区地理位置信息

Fig.1 Geographical location of the experimental area

表1 稻纵卷叶螟侵害程度级别分类

Table 1 Classification of infestation degree of rice leaf folder

等级	程度	卷叶率(%)	
		分蘖期	拔节期-孕穗期
I	轻度	<20.0	<5.0
II	中等	20.0~35.0	5.0~20.0
III	较重	35.1~50.0	20.1~35.0
IV	严重	50.1~70.0	35.1~50.0
V	极严重	>70.0	>50.0

表2 非防治试验田水稻卷叶率调查情况

Table 2 Investigation on leaf-roll rate of rice in non-control experimental field

生育期	最大卷叶率(%)	平均卷叶率(%)	方差
分蘖期	24.138	9.637	7.662
拔节期	8.011	3.028	3.886
孕穗期	13.953	3.883	12.141

1.3.2 多光谱影像采集 试验前,首先对试验区及其周边环境进行调查研究,确定在无人机飞行过程中不会受到高压线、树木、信号塔等障碍物的干扰,而且起飞降落时所选区域应尽量平坦无杂物。无人机飞行作业时要求天气晴朗无云或少云,风速小于 5.5 m/s,选取的 3 次无人机观测时间均在当日 10:00-14:00,相对飞行高度 40 m,采集正射影像,

地面分辨率为 2.78 cm,旁向重叠率为 70%,航向重叠率为 80%。

1.3.3 多光谱影像处理 无人机航拍后采集的多光谱影像,经过筛选,剔除无人机起飞、降落以及其他无效数据,保留试验区有效数据,利用瑞士 Pix4D 公司集成开发的 Pix4D mapper 软件进行拼接,先后进行点云和纹理处理、辐射校正等,最终输出拼接好的单波段正射图像。预处理结束后得到完整试验区图像,通过 ENVI 5.3 软件进行波段运算,得到初步的植被指数。根据每个样本点的全球定位系统 (GPS)位置信息,在 ENVI 软件中构建这些样点的感兴趣区域 (Region of interest, ROI),并利用 ROI 提取相应的植被指数值。利用 SPSS 软件对 15 种植被指数(表 3)与卷叶率进行相关性分析和逐步回归建模,利用 Python 软件编程构建偏最小二乘法模型,最后在 Origin 2022 中绘制验证结果图。

1.4 研究方法

1.4.1 植被指数筛选 水稻遭受稻纵卷叶螟的侵害后,稻纵卷叶螟的 1 龄幼虫取食叶肉组织,取食后仅留下表皮,造成叶片出现条状淡黄色或白色斑纹,2 龄幼虫开始吐丝将叶片卷成“小苞”并在叶苞内啃食叶肉,严重影响叶片的叶绿素含量^[3],同时叶片外形的改变也会影响叶片对太阳辐射的吸收,进而影响植株的光合作用。因此,本研究参考了前人的一些研究成果初步选择了 15 种植被指数^[35-39],进行稻纵卷叶螟危害的监测。

表 3 植被指数及计算公式

Table 3 Vegetation indexes and their calculation formulas

植被指数	缩写	公式
均一化植被指数	NDVI	$(NIR-R)/(NIR+R)$
差值植被指数	DVI	$NIR-R$
修正的三角植被指数	MTVI	$1.5 \times [1.2 \times (RE-G) - 2.5 \times (R-G)]$
无蓝波段增强型植被指数	EVI2	$2.5 \times (NIR-R)/(NIR+2.4R+1)$
绿色均一化差值植被指数	GNDVI	$(NIR-G)/(NIR+G)$
再均一化差值植被指数	RDVI	$(NIR-R)/\sqrt{(NIR+R)}$
均一化差值红边指数	NDRE	$(NIR-RE)/(NIR+RE)$
最佳土壤调整植被指数	OSAVI	$1.16 \times (NIR-RE)/(NIR+RE+0.16)$
红绿均一化指数	GRVI	$(G-R)/(G+R)$
修正叶绿素吸收比指数	MCARI	$[(NIR-RE)-0.2 \times (NIR-G)] \times (NIR/RE)$
转换叶绿素吸收反射率指数	TCARI	$3 \times (RE-R) - 0.2 \times [(RE/B)/(RE/R)]$
红边叶绿素指数	CI-RE	$(NIR/RE)-1$
绿色叶绿素指数	CI-G	$(NIR/G)-1$
中分辨率成像光谱仪的陆地叶绿素指数	MTCI	$(NIR-RE)/(RE-R)$
增强型植被指数	EVI	$2.5 \times (NIR-R)/(NIR+6 \times R-7.5 \times B+1)$

B 是蓝色波段反射率; G 是绿色波段反射率; R 是红色波段反射率; NIR 是近红外波段反射率; RE 是红边反射率。

1.4.2 模型的构建方法 选择相关系数较高的多个植被指数作为自变量,以田间调查的卷叶率作为因变量,分别采用普通最小二乘法(Ordinary least squares matching, OLS)、多项式拟合(Polynomial fitting, PF)、多元逐步回归法(Stepwise multiple linear regression, SMLR)以及偏最小二乘法(Partial least squares regression, PLSR)构建卷叶率反演模型,其中 OLS 和 PF 为单因素模型, SMLR 和 PLSR 为多因素模型。从每个生育期的 45 个卷叶率数据样本中随机抽选 35 个作为建模样本,建立植被指数与卷叶率之间的线性或非线性回归模型,剩下的 10 个样本作为验证集,对模型进行验证。非防治试验田中 9 个区域的卷叶率数据均参与了建模或验证。以防治田的数据作为模型适用性检验的数据集。

1.4.3 模型的检验 利用验证数据集代入最优反演模型得到估算值,通过构建估算值与实测值的线性或非线性拟合,对拟合模型的验证采用 4 个指标进行精度评价:决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)和相对分析误差(RPD),其中 R^2 又称为拟合优度,指回归曲线对观测值的拟合程度,其值越大说明曲线拟合真实值的时间变化序列越逼近; $MAPE$ 值越接近 0 说明该模型越接近完美^[40],该指标把每个样点的误差进行了归一化,降低了特殊点带来的绝对误差的影响; RPD 的划分标准参照已有

的研究结论^[41-43]。各指标的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

$$MAPE = \frac{100\%}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \quad (2)$$

$$SD = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2} \quad (3)$$

$$RPD = \frac{SD}{RMSE} \quad (4)$$

式中, m 为验证集样本数量, y_i 为估算值, \hat{y}_i 为实测值, $\bar{\hat{y}}$ 为实测值的平均值, SD 为标准偏差。

2 结果与分析

2.1 水稻卷叶率与植被指数之间的关系

稻纵卷叶螟对水稻的影响主要表现在减少了水稻叶片的叶绿素含量^[44],以及叶片卷曲导致光合能力下降。为了获取能有效监测稻纵卷叶螟危害的植被指数,对未防治田中 15 种植被指数与卷叶率进行了相关性检验(表 4)。在分蘖期、拔节期和孕穗期,3 个生育期中 $NDVI$ 与卷叶率存在最大的相关系数(以绝对值计),证明 $NDVI$ 在监测稻纵卷叶螟方面有着巨大潜力。在分蘖期和孕穗期都存在特有的、与卷叶率有极显著相关关系的植被指数。大部分植被指数与卷叶率的相关系数绝对值存在先减后增的情况,根

据前人的研究结论^[45],推测这是由水稻生长愈加旺盛和稻纵卷叶螟世代更迭两方面原因所造成的,导致在拔节期植被指数对稻纵卷叶螟危害的敏感度下降。

表 4 植被指数与卷叶率的相关性

Table 4 Correlation between vegetation index and leaf-roll rate

植被指数	分蘖期	拔节期	孕穗期
<i>NDVI</i>	-0.949 **	-0.872 **	-0.956 **
<i>MTVI</i>	0.358 *	-0.228	0.480 **
<i>GNDVI</i>	-0.835 **	-0.678 **	-0.851 **
<i>GRVI</i>	-0.870 **	-0.860 **	-0.761 **
<i>TCARI</i>	-0.277	-0.194	0.524 **
<i>CI-G</i>	-0.820 **	-0.706 **	-0.851 **
<i>DVI</i>	-0.810 **	-0.558 **	-0.541 **
<i>EVI2</i>	-0.849 **	-0.583 **	-0.622 **
<i>RDVI</i>	-0.863 **	-0.606 **	-0.648 **
<i>EVI</i>	-0.838 **	-0.592 **	-0.616 **
<i>NDRE</i>	-0.629 **	-0.578 **	-0.912 **
<i>OSAVI</i>	-0.737 **	-0.608 **	-0.922 **
<i>MCARI</i>	-0.764 **	-0.617 **	-0.925 **
<i>CI-RE</i>	-0.629 **	-0.589 **	-0.912 **
<i>MTCI</i>	-0.470 **	-0.472 **	-0.875 **

表中涉及的植被指数含义见表 3。* 表示植被指数与卷叶率显著相关 ($P<0.05$); ** 表示植被指数与卷叶率极显著相关 ($P<0.01$)。

2.2 水稻 3 个生育期的稻纵卷叶螟危害反演模型分析

2.2.1 3 个生育期的卷叶率反演模型的构建与验证

分蘖期是水稻移栽后经历的第一个重要时期,在南京

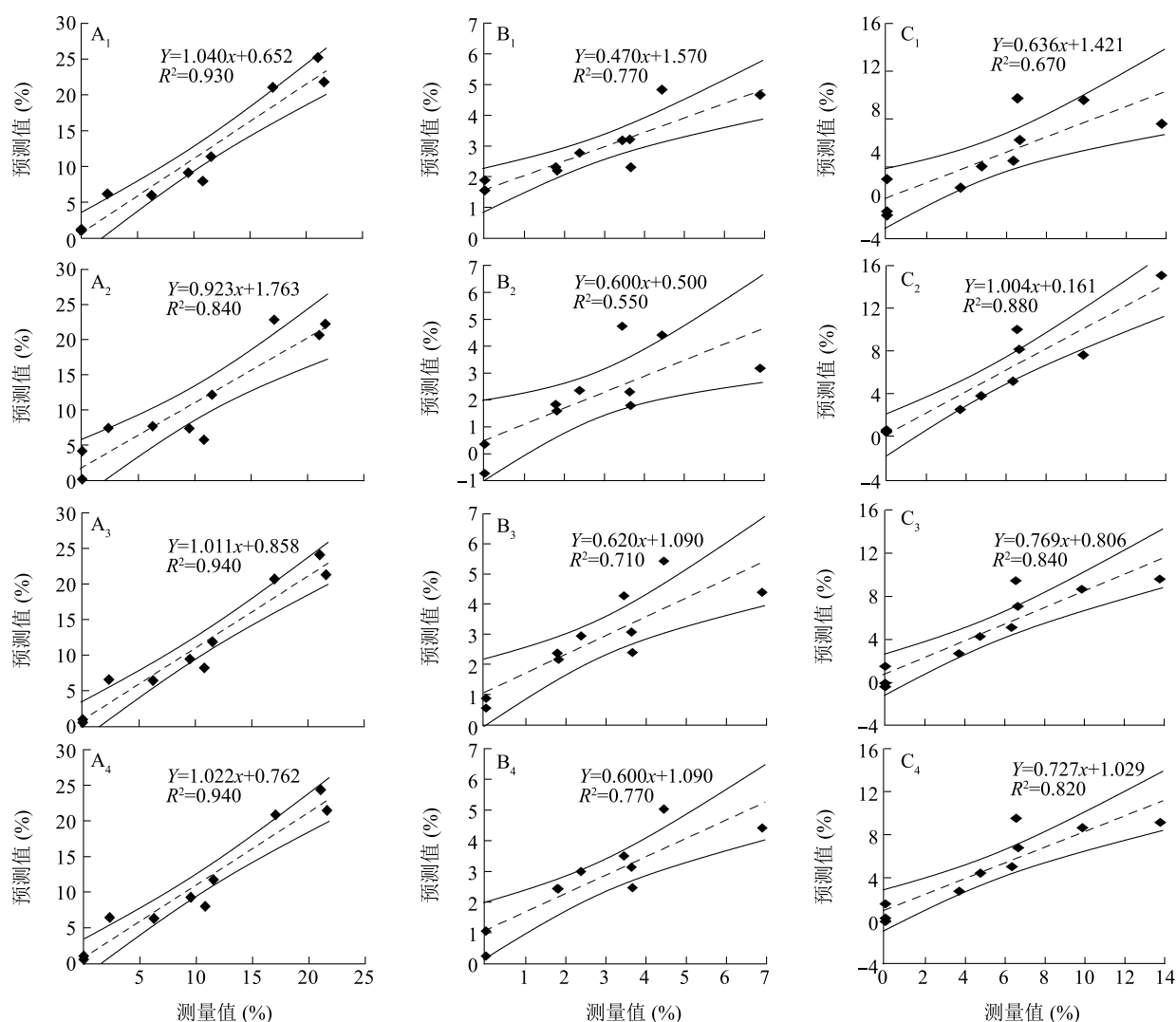
地区该时期常与稻纵卷叶螟第 5 代虫卵孵化期重合。在未防治田的分蘖期,多因素线性模型(SMLR,PLSR)的拟合度优于单因素线性模型(PF),SMLR 模型和 PLSR 模型建模集的决定系数(R^2)均在 0.90 以上,并且验证集的各项指标均优于 OLS 模型和 PF 模型(表 5)。对比 SMLR 模型和 PLSR 模型,两者的验证结果非常接近,两者的 *RMSE* 和 *MAPE* 分别相差 0.07 个百分点和 1.43 个百分点(表 5)。拔节期是水稻快速生长期,稻纵卷叶螟已经从幼虫蜕变成蛾。拔节期基于 4 种方法构建的模型的拟合效果都比分蘖期差(图 2),而 SMLR 模型和 PLSR 模型需要更多的自变量才能有效估算卷叶率。拔节期验证集的结果同样呈现出多因素模型优于单因素模型,效果较好的是 SMLR 模型和 PLSR 模型,其中 PLSR 模型建模集的 R^2 比 SMLR 稍差,但验证集的 R^2 和 *MAPE* 均较好(表 5)。水稻孕穗期是影响水稻产量的一个重要阶段^[46],此时期恰逢稻纵卷叶螟第六代的幼虫期。孕穗期的 PF 模型、SMLR 模型和 PLSR 模型在建模集表现出色($R^2\geq 0.85$)。但在验证集出现了些微差异,自变量数量越多的模型估算值与实际值的偏差更大,PF 模型是孕穗期估算卷叶率的最佳模型,它的 R^2 为 0.88,*RMSE* 为 1.59%,*MAPE* 为 13.95%,*RPD* 为 2.70(表 5)。综上,在 3 个生育期内,未防治田中多因素模型的估算结果总体上比单因素模型更理想,并且在分蘖期和孕穗期对卷叶螟进行观测估算的效果比拔节期好。

表 5 分蘖期、拔节期和孕穗期基于植被指数的卷叶率反演模型评估

Table 5 Estimation results of leaf-roll rate inversion models constructed based on vegetation index measured at tillering stage, jointing stage and booting stage

生育期	模型	自变量	建模集 R^2	验证集			
				R^2	<i>RMSE</i> (%)	<i>MAPE</i> (%)	<i>RPD</i>
分蘖期	OLS	<i>NDVI</i>	0.90	0.93	2.42	22.08	3.15
	PF	<i>GRVI</i>	0.76	0.84	3.31	41.96	2.31
	SMLR	<i>GRVI</i> 、 <i>GNDVI</i>	0.90	0.94	2.20	14.38	3.47
	PLSR	<i>NDVI</i> 、 <i>GNDVI</i> 、 <i>GRVI</i>	0.90	0.94	2.27	15.81	3.36
拔节期	OLS	<i>GRVI</i>	0.79	0.77	1.17	34.25	1.69
	PF	<i>NDVI</i>	0.86	0.55	1.47	10.99	1.35
	SMLR	<i>NDVI</i> 、 <i>GNDVI</i> 、 <i>NDRE</i> 、 <i>CI-RE</i>	0.90	0.71	1.08	14.10	1.83
	PLSR	<i>NDVI</i> 、 <i>GNDVI</i> 、 <i>OSAVI</i> 、 <i>CI-G</i> 、 <i>CI-RE</i>	0.89	0.77	1.02	12.92	1.93
孕穗期	OLS	<i>OSAVI</i>	0.79	0.67	2.52	33.07	1.70
	PF	<i>NDVI</i>	0.85	0.88	1.59	13.95	2.70
	SMLR	<i>NDVI</i> 、 <i>OSAVI</i>	0.85	0.84	1.81	19.69	2.37
	PLSR	<i>NDVI</i> 、 <i>CI-RE</i> 、 <i>OSAVI</i>	0.86	0.82	1.93	18.80	2.22

R^2 : 决定系数; *RMSE*: 均方根误差; *MAPE*: 平均绝对百分比误差; *RPD*: 相对分析误差。表中自变量见表 3。



A₁:分蘖期 OLS 模型;A₂:分蘖期 PF 模型;A₃:分蘖期 SMLR 模型;A₄:分蘖期 PLSR 模型;B₁:拔节期 OLS 模型;B₂:拔节期 PF 模型;B₃:拔节期 SMLR 模型;B₄:拔节期 PLSR 模型;C₁:孕穗期 OLS 模型;C₂:孕穗期 PF 模型;C₃:孕穗期 SMLR 模型;C₄:孕穗期 PLSR 模型。

图 2 分蘖期、拔节期和孕穗期基于不同建模方法的卷叶率反演模型的验证结果

Fig.2 Validation results of leaf-roll rate inversion models obtained for tillering stage, jointing stage and booting stage of rice based on different modeling methods

2.2.2 3 个生育期的稻纵卷叶螟卷叶率反演模型的适用性检验 为了检验所获得的卷叶率反演模型的适用性,利用同一时段收集的防治田无人机数据和卷叶率观测数据进行验证。验证结果(图 3)表明,分蘖期和孕穗期的最优卷叶率估算模型在防治田的估算效果较好,拔节期较差。分蘖期的卷叶率估算值与真实值之间拟合效果出色,并没有出现个别的点误差较大的情况。拔节期的卷叶率估算值全部为负值,推测是由于健康的水稻叶面积指数(LAI)达到了 NDVI 和绿光-均一化植被指数(GNDVI)的饱和范围,而无法对轻微的虫害进行良好的估算。孕穗

期的卷叶率模型在防治田的估算结果非常接近真实值,拟合效果达到预期目标(图 3)。

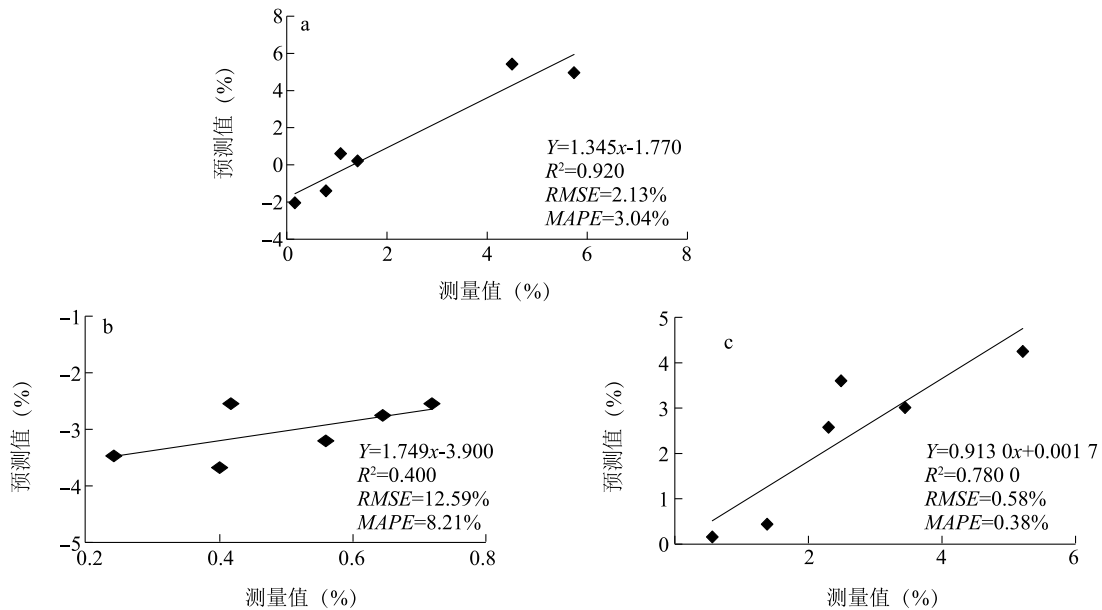
2.3 水稻不同生育期的最优卷叶率反演模型分析

通过对分蘖期、拔节期和孕穗期获得的卷叶率虫害程度反演模型进行比较和验证分析,得到了 3 个时期的最优卷叶率反演模型,分别为:

$$Y_{\text{分蘖期}} = -169.6 \times \text{GNDVI} - 86.3 \times \text{GRVI} + 167.8 \quad (5)$$

$$Y_{\text{拔节期}} = -1.313 \times \text{CI} - G - 1.915 \times \text{CI} - \text{RE} + 270.610 \times \text{GNDVI} - 248.323 \times \text{NDVI} + 18.420 \times \text{OSAVI} + 15.479 \quad (6)$$

$$Y_{\text{孕穗期}} = 12457 \times \text{NDVI}^2 - 23824 \times \text{NDVI} + 11391 \quad (7)$$



a:分蘖期;b:拔节期;c:孕穗期。 R^2 :决定系数; $RMSE$:均方根误差; $MAPE$:平均绝对百分比误差。

图3 3个生育期的卷叶率估算模型的适用性检验

Fig.3 Results of applicability test of the leaf-roll rate estimation models for three growth stages

其中, Y 为卷叶率,各植被指数含义如表3所示。

由公式(5)可知,在分蘖期,能最有效地反映稻纵卷叶螟为害情况的植被指数组合是 $GRVI$ 和 $GNDVI$,两者在进行卷叶率的估算中的贡献程度是接近的(表6)。根据前人的研究结果, $GRVI$ 对冠层可见光波段(尤其是绿色波段)的变化很敏感,常作为叶片颜色从绿色到黄色或红色变化的检验指标^[47-48]。另一方面, $GNDVI$ 比 $NDVI$ 能更精确地评估叶绿素的浓度^[49],同时,绿色波段对 LAI 的敏感性低于红色波段,但敏感范围更广, $GNDVI$ 在估计叶面积指数方面也出色^[50],能更好地监测植物的健康状态。水稻在分蘖期时,叶绿素含量处于较低值, $GNDVI$ 能更好地反演由稻纵卷叶螟为害引起的叶绿素浓度下降的情况,另外, $GRVI$ 对稻纵卷叶螟幼虫导致的水稻叶片上的淡黄色条斑非常敏感,因此,这2个植被指数的组合能更好地反演该时期的虫害程度。

随着水稻的生长,水稻生育期从分蘖期进展到拔节期,相应的水稻叶面积指数、叶绿素含量较前一阶段有大幅度增加(图4)。在拔节期,最优估算卷叶率的植被指数组合为: $NDVI$ 、 $GNDVI$ 、 $OSAVI$ 、 $CI-RE$ 和 $CI-G$ 。 $NDVI$ 对绿色植被表现敏感,可以用于进行植被和土壤的区分^[51],并通过植被覆盖密度确定光合生物量,常被用于度量地表植被数量和活

力^[52]。 $OSAVI$ 具有描述植被覆盖和土壤背景变化,并削弱土壤背景效应影响的优势^[53],在估计 LAI 方面具有统计学意义^[54]。 $GNDVI$ 在评估 LAI 和叶绿素含量方面的出色表现在前面已经有了说明, $CI-RE$ 和 $CI-G$ 与所有植物叶片中的总叶绿素含量均密切相关^[55]。结合公式(6)和表6分析, $NDVI$ 对卷叶率估算的影响是最大的,其次是 $GNDVI$ 和 $OSAVI$,最小的是 $CI-RE$ 和 $CI-G$ 。另外,在拔节期 $NDVI$ 的标准化系数与其他4种植被指数($GNDVI$ 、 $OSAVI$ 、 $CI-RE$ 和 $CI-G$)的相反,说明 $NDVI$ 的变化与卷叶率是相反的,其他4种植被指数与卷叶率的变化方向一致(表6)。因此,当其他4种植被指数($GNDVI$ 、 $OSAVI$ 、 $CI-RE$ 和 $CI-G$)增加时,卷叶率有明显的增加趋势。综上所述,在拔节期稻纵卷叶螟为害的加重会促进水稻叶面积和叶绿素含量的增加,根据相关文献所述,这可能是植物为了抵抗害虫的侵害而采用补偿手段以弥补虫害造成的损失^[56]。

水稻进入孕穗期后,反演虫害程度最有效的植被指数是 $NDVI$ 。此阶段水稻叶片的叶绿素含量开始衰减(图4),说明叶绿素含量的变化不仅受到虫害的影响,还随着水稻走向成熟而发生衰减, $NDVI$ 较好地描述了这种复合的结果。根据前人的研究结果,当 $LAI \geq 2.0$ 时, $NDVI$ 容易出现数值饱和现象^[57],这可能是该模型只能解释卷叶率85%的原因。由公式

(7)可知, $NDVI$ 与卷叶率之间呈开口向上的抛物线关系,当 $NDVI$ 值超过拐点后,卷叶率会增大,这与拔节

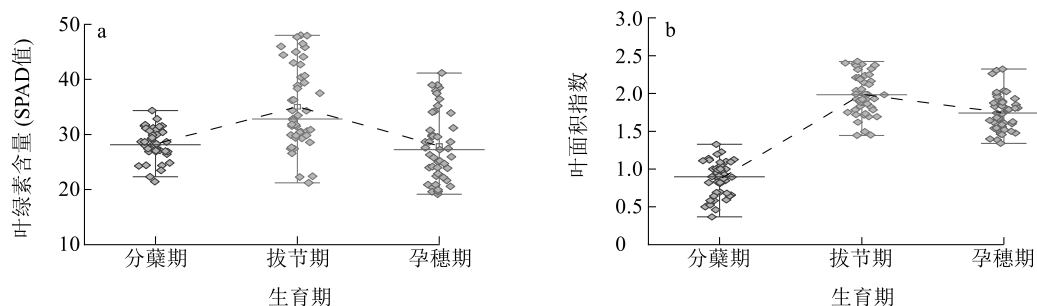
期得到的水稻存在补偿作用的推论一致。

表 6 分蘖期、拔节期和孕穗期的最优模型自变量的标准化回归系数

Table 6 Standardized coefficients of optimal model independent variables for tillering, jointing and booting stages

生育期	$NDVI$	$GRVI$	$GNDVI$	$OSAVI$	$CI-RE$	$CI-G$	$(NDVI)^2$
分蘖期	/	-0.54	-0.52	/	/	/	/
拔节期	-1.48	/	1.18	1.28	0.81	0.64	/
孕穗期	-59.26	/	/	/	/	/	58.37

$NDVI$ 、 $GRVI$ 、 $GNDVI$ 、 $OSAVI$ 、 $CI-RE$ 、 $CI-G$ 见表 3。



a 为叶绿素含量; b 为叶面积指数。

图 4 未防治田全部样点在不同生长阶段的叶绿素含量(a)与叶面积指数(b)

Fig.4 Chlorophyll content (a) and leaf area indexes (b) at different growth stages of all sample points in non-control fields

2.4 不同生育期虫害等级的空间分布

基于模型估算结果和样点实测的卷叶率,采用样条法进行了空间插值。图 5 中不同颜色代表不同的稻纵卷叶螟危害等级,由图 5 可知,非防治田的稻纵卷叶螟危害程度是随着生育期的推进而逐渐加重的。非防治田 3 个生育期的模型结果插值与样点数据插值结果均较为接近。其中,分蘖期的空间分布呈现中部区域受虫害威胁较轻,东部和东北部边缘则较严重(虫害等级Ⅲ~Ⅳ级);拔节期的虫害分布呈现北部、东部和东南部边缘受害严重;孕穗期的虫害在中部呈现多点暴发,在西部和北部边缘虫害程度加重。因此,利用基于无人机多光谱数据的植被指数对稻纵卷叶螟危害程度进行反演估算的结果,较好地描述了在非防治田中水稻受稻纵卷叶螟侵害的空间分布情况,可为水稻虫害防治和精细化管理决策提供支持。

3 讨论

3.1 稻纵卷叶螟虫害指标的表现

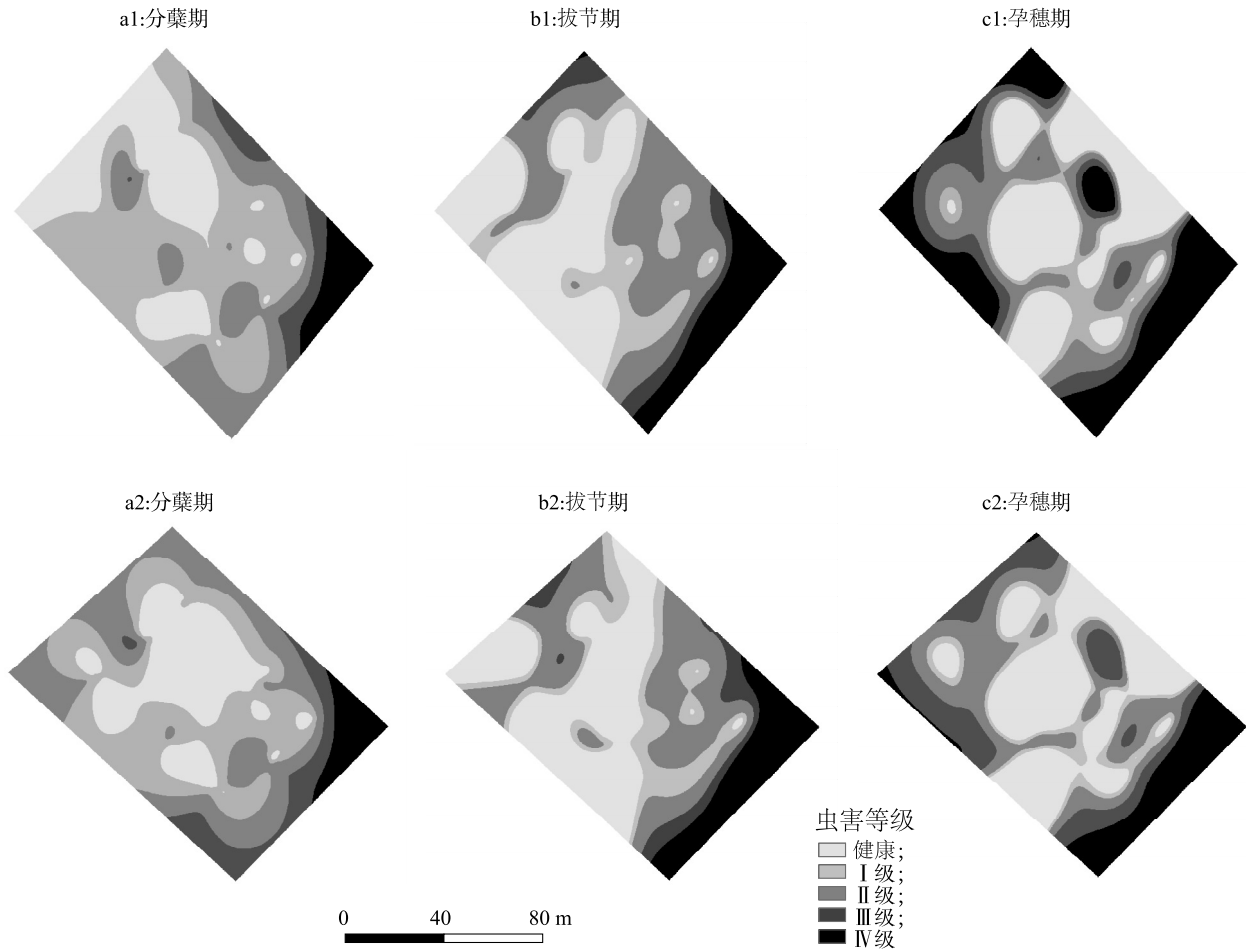
基于前期学者们对植被指数能实现定量估计作物病虫害的研究结论和这类方法已被广泛应用于小麦、棉花、水稻等作物的病虫害研究^[58-61]并具简便性、可解释性的前提,在研究不同生育期水稻受稻纵

卷叶螟侵害时,需要考虑用单一植被指数能否有效地估算虫害程度。因此,本研究选取了基于无人机多光谱数据源的 15 种植被指数。此前很少有关于植被指数对不同生育期的稻纵卷叶螟危害情况的敏感性差异方面的研究,并探讨其背后的生物学意义。在研究作物病害方面,许多研究者都发现了作物病害都有其发生的特殊时期,如小麦白粉病和水稻的纹枯病的最佳监测时期是开花期^[61-62],水稻叶瘟病对产量造成危害的关键期为孕穗期^[63]。研究结果表明,分蘖期和孕穗期的水稻更适合稻纵卷叶螟取食和产卵^[64],说明稻纵卷叶螟在水稻生育过程中是有偏好的,这会导致不同生育期虫害程度出现差异。因此,生长阶段在植被指数估计稻纵卷叶螟危害程度的敏感性和有效性中起着重要作用,需要根据生长阶段筛选最佳植被指数^[65]。

拔节期水稻冠层的覆盖度已经达到较高水平,根据以往的研究结果,此时根据大部分的植被指数已经难以准确地估计生物量^[66]。本研究发现, $OSAVI$ 在拔节期和孕穗期对卷叶率的估计具有重要影响,这证明了它消除土壤背景效应的能力^[53]。但是,拔节期利用植被指数对卷叶率进行估算的精度一般,推测是由于稻纵卷叶螟危害后会影响叶片的

反射光谱,如:与叶面积指数有非常紧密相关性的近红外波段^[67]。另一方面,稻纵卷叶螟与水稻之间存在一定的反馈机制,即植物会对食草性昆虫作出2方面的响应,包括补偿性生长和诱导抗性^[68]。水稻

在拔节期可能存在超补偿生长,指适度的昆虫采食可以促进植物生长,使得植物的累积生物量超过正常生长植物^[69]。同时,在分蘖期虫害导致顶端优势被打破,对植物的补偿性生长具有重要作用^[70]。



a1、b1 和 c1 为模型计算结果;a2、b2 和 c2 为样点插值结果;虫害等级规则见表 1。

图 5 不同生育期研究区水稻卷叶率反演分布图和样点数据插值图

Fig.5 Inversion distributions and sampling observation distributions of the rice leaf-roll rate in the study area at different growth stages

3.2 无人机多光谱成像的性能

研究表明,无人机平台相较于地面遥感和卫星遥感有其独特的优势。在过去的研究中,受限于试验仪器和人力等条件,对稻纵卷叶螟的研究主要集中在单叶尺度的光谱研究^[70]以及小面积的冠层光谱研究^[71]。单叶尺度的高光谱图像虽然能提供非常详细的光谱信息^[19],但是缺乏对水稻整体的了解;盆栽试验和小区域试验所采集的冠层高光谱信息弥补了单叶尺度研究的缺陷,但由于其极高的光谱分辨率,导致不同试验环境和方案都会产生新的结果^[72-73]。

无人机平台的飞行高度低于机载和卫星平台,具有更高的空间分辨率,同时由于它的灵活性和简便性,提高了观测的时间分辨率^[33]。因此,本研究结果在对稻纵卷叶螟为害程度的估计上确实优于基于卫星数据的研究结果^[74]。多光谱数据相比于 RGB 三波段的影像数据具有更高的反演精度^[75]。然而,高光谱成像遥感分辨率更高,数据量更大,相邻波段有很强的相关性,同时包含了光谱域与空间域信息^[76-78],这是多光谱影像无法达到的精度^[79]。但是,无人机多光谱影像可看作是筛选、提取特征波段后的高光谱数据,理论上具有与高光谱影像等效

的定量反演能力,具有低成本、操作流程简单等优点^[80]。本研究结果对基于无人机多光谱的农作物长势参数获取及其精准反演具有重要的理论意义和应用价值。

此外,本研究利用多光谱影像变量估算稻纵卷叶螟危害情况,仅限于 1 年的数据,监测结果容易受到气候变化、监测时间、昆虫迁飞等因素影响,为提高模型的精度和适用性,未来需要对虫害进行不间断的监测,总结各个时间段的监测结果,再作全面和综合的评判。

4 结 论

本研究针对水稻不同生育期构建的卷叶率反演模型显示,植被指数与卷叶率的相关性越强,构建的模型稳定性和精度也越高;在分蘖期和孕穗期对稻纵卷叶螟为害情况进行检测效果较好,拔节期效果稍差。另外,分蘖期的 *GNDVI* 和 *GRVI* 能有效表达由稻纵卷叶螟引起的叶绿素浓度下降,从而推测叶片出现淡黄色条状斑纹。水稻在拔节期可能存在补偿效应,导致模型估算效果不理想。孕穗期,水稻冠层由衰老和虫害综合引起的叶绿素含量的变化能被 *NDVI* 有效地反映。因此,要在水稻分蘖期和孕穗期对稻纵卷叶螟危害进行更好的监测,应及早、科学地进行虫害防控。

参考文献:

- [1] KUMAR S P, AKSHAY N, PREETI A, et al. Prospects of understanding the molecular biology of disease resistance in Rice[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(4): 1141.
- [2] MATTESON P C. Insect pest management in tropical Asian irrigated rice[J]. Annual Review of Entomology, 2000, 45(1): 549-574.
- [3] PADMAVATHI C, KATTI G, PADMAKUMARI A P, et al. The effect of leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) injury on the plant physiology and yield loss in rice[J]. Journal of Applied Entomology, 2013, 137(4): 249-256.
- [4] WAN N F, JI X Y, CAO L M, et al. The occurrence of rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenée in the large-scale agricultural production on Chongming Eco-island in China[J]. Ecological Engineering, 2015, 77: 37-39.
- [5] ZHANG S K, REN X B, WANG Y C, et al. Resistance in *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Pyralidae) to new chemistry insecticides[J]. Journal of Economic Entomology, 2014, 107(2): 815-820.
- [6] 刘 欢,侯茂林. 稻纵卷叶螟发生为害与寄主植物间关系的研究进展[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(6): 1178-1185.
- [7] CHINTALAPATI P, GURURAJ K, VALLABUNI S, et al. Physiological age status of female adults and off-season survival of rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* in India[J]. Rice Science, 2015, 22(5): 237-244.
- [8] 张海维,姜硕琛,孔 盼,等. 不同稻作模式下品种混作对稻纵卷叶螟发生和水稻生长的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(9): 2783-2792.
- [9] 刘 杰,曾 娟,杨清坡,等. 2023 年农作物重大病虫害发生趋势预报[J]. 中国植保导刊, 2023, 43(1): 32-35.
- [10] BASHIR K, REHMAN M, BARI M. Detection and classification of rice diseases: an automated approach using textural features[J]. Mehran University Research Journal of Engineering and Technology, 2019, 38(1): 239-250.
- [11] ANNE-KATRIN M. Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping[J]. Plant Disease, 2016, 100(2): 241-251.
- [12] LIN F F, GUO S, TAN C W, et al. Identification of rice sheath blight through spectral responses using hyperspectral images[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(21): 6243.
- [13] HAN Y, LIU H J, ZHANG X L, et al. Prediction model of rice panicles blast disease degree based on canopy hyperspectral reflectance[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(4): 1220-1226.
- [14] SANTOSH K U, AVADHESH K. A novel approach for rice plant diseases classification with deep convolutional neural network[J]. International Journal of Information Technology, 2022, 14: 185-199.
- [15] LIU W F, YU L, LUO J X. A hybrid attention-enhanced DenseNet neural network model based on improved U-Net for rice leaf disease identification[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 922809.
- [16] LIU L S, PENG Y L, ZENG L G, et al. Application of sex attractants in the control of rice stem borer and rice leaf roller[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2013(20): 25-27.
- [17] QI H H, ZHANG Y H, WANG J, et al. Rhythm of rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) to the searchlight trap[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(22): 4436-4444.
- [18] 李 波,刘占宇,黄敬峰,等. 基于 PCA 和 PNN 的水稻病虫害高光谱识别[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 143-147.
- [19] LIANG G C, OUYANG Y C, DAI S M. Detection and classification of rice infestation with rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) using hyperspectral imaging techniques[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22): 4587.
- [20] HUANG J R, SUN Q H, LIU X D. Spectral characteristics of rice leaves damaged by rice leaf roller[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(13): 2679-2687.
- [21] 孙启花,刘向东. 稻纵卷叶螟危害孕穗期水稻的光谱诊断[J]. 中国农业科学, 2012, 45(24): 5040-5048.

- [22] FENG W, WANG X Y, SONG X, et al. Hyperspectral estimation of canopy chlorophyll density in winter wheat under stress of powdery mildew[J]. Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(13): 114-123.
- [23] KIARA B, ALISTAIR C, MBULISI S, et al. Predicting the chlorophyll content of maize over phenotyping as a proxy for crop health in smallholder farming systems[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 518.
- [24] KAUR R, SINGH M, KINGRA P K. Hyperspectral remote sensing for monitoring growth of rice (*Oryza sativa*) crop[J]. Indian Journal of Agronomy, 2016, 61(2): 191-196.
- [25] PARTHASARATHY V, SANTHOSH R, KUMAR M R, et al. Unmanned aerial vehicles (UAV) in precision agriculture: applications and challenges[J]. Energies, 2021, 15(1): 217.
- [26] ZHANG J C, PU R L, HUANG W J, et al. Using in-situ hyperspectral data for detecting and discriminating yellow rust disease from nutrient stresses[J]. Field Crops Research, 2012, 134(3): 165-174.
- [27] CHEW W C, HASHIM M, LAU A M S, et al. Early detection of plant disease using close range sensing system for input into digital earth environment[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2014, 18(1): 12143.
- [28] GOGOI N K, DEKA B, BORA L C. Remote sensing and its use in detection and monitoring plant diseases: a review[J]. Agricultural Reviews, 2018, 39(4): 307-313.
- [29] THOMAS F, HAI P, ALESSANDRO G, et al. Active and passive electro-optical sensors for health assessment in food crops[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 21(1): 171.
- [30] 苏宝峰,刘昱麟,黄彦川,等. 群体小麦条锈病发病动态无人机遥感监测方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 127-135.
- [31] 赵晓阳,张 建,张东彦,等. 低空遥感平台下可见光与多光谱传感器在水稻纹枯病病害评估中的效果对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(4): 1192-1198.
- [32] LIU T, SHI T Z, ZHANG H, et al. Detection of rice damage by leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) using unmanned aerial vehicle based hyperspectral data[J]. Sustainability, 2020, 12(22): 9343.
- [33] 包云轩,曹 云,谢晓金,等. 中国稻纵卷叶螟发生特点及北迁的大气背景[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3519-3533.
- [34] 董红刚,耿 跃,左 希,等. 扬州邗江地区稻纵卷叶螟发生动态及影响因素分析[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(4): 850-857.
- [35] DASH J, CURRAN P J. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI) [J]. Advances in Space Research, 2006, 39(1): 100-104.
- [36] FITZGERALD G J, RODRIGUEZ D, CHRISTENSEN L K, et al. Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rain-fed and irrigated wheat environments [J]. Precision Agriculture, 2006, 7(4): 233-248.
- [37] 关 丽,刘湘南. 两种用于作物冠层叶绿素含量提取的改进光谱指数[J]. 地球科学进展, 2009, 24(5): 548-554.
- [38] LUCAS P O, PAULA M R A, DANILO R P, et al. Predicting canopy nitrogen content in citrus-trees using random forest algorithm associated to spectral vegetation indices from UAV-imagery [J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 2925.
- [39] CANH N, VASIT S, MATTHEW M, et al. Early detection of plant viral disease using hyperspectral imaging and deep learning [J]. Sensors, 2021, 21(3): 742.
- [40] DE MYTTENAERE A, BORIS G, LE GRAND B, et al. Mean absolute percentage error for regression models[J]. Neurocomputing, 2016, 192(5): 38-48.
- [41] 李文涛,杨江波,张 绩,等. 基于不同传感器的纽荷兰脐橙叶片叶绿素含量检测技术评价[J]. 中国农业科学, 2018, 51(6): 1057-1066.
- [42] YAO Z F, LEI Y, HE D J. Early visual detection of wheat stripe rust using visible/near-infrared hyperspectral imaging[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(4): 952.
- [43] REI S, YUDAI S, RYOHEI K, et al. Hyperspectral wavelength selection for estimating chlorophyll content of muskmelon leaves [J]. European Journal of Remote Sensing, 2021, 54(1): 512-523.
- [44] 周 晓,包云轩,王 琳,等. 稻纵卷叶螟为害水稻的冠层光谱特征及叶绿素含量估算[J]. 中国农业气象, 2020, 41(3): 173-186.
- [45] KUMARÂ P, SINGHÂ R, PANDEYÂ S K. Population dynamics of rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis* Guen., in relation to stage of the crop, weather factors and predatory spiders[J]. Journal of Entomological Research, 1996, 20(3): 205-210.
- [46] KAWAMURA K, IKEURA H, PHONGCHANMAIXAY S, et al. Canopy hyperspectral sensing of paddy fields at the booting stage and PLS regression can assess grain yield[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1249.
- [47] MOTOHKA T, NASHAHARA K N, OGUMA H, et al. Applicability of green-red vegetation index for remote sensing of vegetation phenology[J]. Remote Sensing, 2010, 2(10): 2369-2387.
- [48] ALBETIS J, JACQUIN A, GOULARD M, et al. On the potentiality of UAV multispectral imagery to detect flavescence dorée and grapevine trunk diseases[J]. Remote Sensing, 2018, 11(1): 23.
- [49] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, MERZLYAK M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289-298.
- [50] DONG T F, MENG J H, SHANG J L, et al. Modified vegetation indices for estimating crop fraction of absorbed photosynthetically active radiation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(12): 3097-3113.
- [51] VYGODSKAYA N N, GORSHKOVA I I, FADEYEVA Y V. Theoretical estimates of sensitivity in some vegetation indices to variation in the canopy condition [J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(12): 1857-1872.

- [52] PETTORELLI N, VIK J O, MYSTERUD A, et al. Using the satellite-derived *NDVI* to assess ecological responses to environmental change[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2005, 20(9): 503-510.
- [53] RONDEAUX G, STEVEN M, BARET F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 55(2): 95-107.
- [54] KIMURA R, OKADA S, MIURA H, et al. Relationships among the leaf area index, moisture availability, and spectral reflectance in an upland rice field [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(2): 83-100.
- [55] GITELSON A A, GRITZ Y, MERZLYAK M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3): 271-282.
- [56] 陈彦,朱奇,刘树真. 植物对虫害的超越补偿作用[J]. *生物学通报*, 2000(5): 19-21.
- [57] HASHIMOTO N, SAITO Y, MAKI M, et al. Simulation of reflectance and vegetation indices for unmanned aerial vehicle (UAV) monitoring of paddy fields[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(18): 2119.
- [58] SINGH N Y, KUMAR G S, CHANDRAMANI S, et al. A study on light trap catches of rice leaf folder, (*Cnaphalocrocis medinalis*) Guenée in relation to meteorological parameters[J]. *Trends in Biosciences*, 2016, 8(9): 2251-2255.
- [59] XAVIER T W F, SOUTO R N V, STATELLA T, et al. Identification of ramularia leaf blight cotton disease infection levels by multi-spectral, multiscale UAV imagery[J]. *Drones*, 2019, 3(2): 33.
- [60] MA H Q, HUANG W J, DONG Y Y, et al. Using UAV-based hyperspectral imagery to detect winter wheat fusarium head blight [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 3024.
- [61] SINGH R, SINGH L S, PRASAD D, et al. Relationship of susceptibility and growth stages of plant for development of epidemic of sheath blight in rice [J]. *Journal of Applied and Natural Science*, 2010, 2(2): 230-233.
- [62] FENG Z H, SONG L, ZHANG S H, et al. Wheat powdery mildew monitoring based on information fusion of multi-spectral and thermal infrared images acquired with an unmanned aerial vehicle[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 890-906.
- [63] ZHANG G S, XU T Y, TIAN Y W, et al. Assessment of rice leaf blast severity using hyperspectral imaging during late vegetative growth[J]. *Australasian Plant Pathology: Journal of the Australasian Plant Pathology Society*, 2020, 49(5): 571-578.
- [64] LIU H, HAN Y Q, ZHONG Y Q, et al. Preference and performance of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medinalis*, in relation to rice developmental stage[J]. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 2021, 169(8): 701-710.
- [65] ZHU W X, SUN Z G, YANG T, et al. Estimating leaf chlorophyll content of crops via optimal unmanned aerial vehicle hyperspectral data at multi-scales[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 178: 105786.
- [66] QIAO K, ZHU W Q, XIE Z Y. Application conditions and impact factors for various vegetation indices in constructing the *LAI* seasonal trajectory over different vegetation types[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112(C): 106153.
- [67] VIÑA A, GITELSON A A, NGUY-ROBERTSON A L, et al. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3468-3478.
- [68] STIEHA C R, ABBOTT K C, POVEDA K. The effects of plant compensatory regrowth and induced resistance on herbivore population dynamics. [J]. *The American Naturalist*, 2016, 187(2): 167-181.
- [69] 赵威,王征宏. 植物的补偿性生长[J]. *生物学通报*, 2008(3): 12-13.
- [70] 黄建荣,孙启花,刘向东. 稻纵卷叶螟危害后水稻叶片的光谱特征[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2679-2687.
- [71] 孙红,李民赞,周志艳,等. 基于光谱技术的水稻纵卷叶螟受害区域检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4): 1080-1083.
- [72] HUANG J R, LIAO H J, ZHU Y B, et al. Hyperspectral detection of rice damaged by rice leaf folder (*Cnaphalocrocis medinalis*) [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 82: 100-107.
- [73] SINGH B, SINGH M, SURI K, et al. Use of hyper-spectral data for detection of rice leaf folder infestation[J]. *Journal of Research*, 2013, 50(3/4): 147-150.
- [74] 高文婷,陈心怡,包云轩,等. 奇异交叉谱分析方法在中国南方稻纵卷叶螟发生预测中的应用[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(9): 583-596.
- [75] 宋勇,陈兵,王琼,等. 无人机遥感监测作物病虫害研究进展[J]. *棉花学报*, 2021, 33(3): 291-306.
- [76] 郭松,常庆瑞,郑智康,等. 基于无人机高光谱影像的玉米叶绿素含量估测[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(4): 976-984.
- [77] 彭晓伟,张爱军,杨晓楠. 基于 WOS 的高光谱技术在农业方面应用的计量分析[J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(1): 239-249.
- [78] 金宇豪,石楠,文双雅,等. 菜油兼用型油菜籽粒油酸含量的高光谱模型构建[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(6): 1674-1682.
- [79] 刘忠,万炜,黄晋宇,等. 基于无人机遥感的农作物长势关键参数反演研究进展[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 60-71.
- [80] 刘涛,张寰,王志业,等. 利用无人机多光谱估算小麦叶面积指数和叶绿素含量[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 65-72.

(责任编辑:陈海霞)