

曹梦娇, 白石, 唐攀攀, 等. 基于无人机多光谱遥感的水稻二化螟冬前虫量测算[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(2): 305-312.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.02.011

基于无人机多光谱遥感的水稻二化螟冬前虫量测算

曹梦娇¹, 白石², 唐攀攀², 徐红星³, 王晔青¹, 周国鑫⁴

(1. 嘉兴市土肥植保与农村能源站, 浙江 嘉兴 314100; 2. 南湖实验室大数据技术研究中心, 浙江 嘉兴 314100; 3. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 浙江 杭州 310000; 4. 浙江农林大学现代农学院, 浙江 杭州 311300)

摘要: 为实现稻田二化螟冬前虫量的精确测算, 本研究在二化螟差异化防控的基础上, 利用无人机获取水稻灌浆期和蜡熟期的双时相多光谱数据, 并结合虫量稳定期的冬前虫量田间调查, 基于线性回归、支持向量机回归、随机森林回归、岭回归、Lasso 回归和贝叶斯回归等方法构建稻田二化螟冬前虫量的遥感估算模型。结果表明, 灌浆期 450 nm(b1)、660 nm(b3) 波段的光谱反射率和蜡熟期的归一化植被指数(NDVI)与稻田二化螟冬前虫量存在极显著的线性相关; 不同回归方法下, 采用双时相数据建立的稻田二化螟冬前虫量遥感估算模型的估算值与观测值的相关性整体上优于单时相数据, 其中, 基于双时相遥感数据和随机森林回归模型建立的估算方法最佳, 测试集和训练集的估算虫量和观测虫量相关系数分别达 0.85 和 0.94, 且此方法下稻田二化螟冬前虫量的估算结果更符合田间实际情况。本研究基于无人机技术建立的稻田二化螟冬前虫量估算方法, 可为稻田二化螟的精确防控提供依据。

关键词: 二化螟; 冬前虫量; 多光谱; 随机森林; 双时相

中图分类号: S431.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)02-0305-08

Estimation of the pre-winter population of *Chilo suppressalis* in rice field based on unmanned aerial vehicle multi-spectral remote sensing

CAO Mengjiao¹, BAI Shi², TANG Panpan², XU Hongxing³, WANG Yeqing¹, ZHOU Guoxin⁴

(1. Jiaxing Soil Fertilizer, Plant Protection and Rural Energy Station, Jiaxing 314100, China; 2. Big Data Technology Research Center, Nanhu Laboratory, Jiaxing 314100, China; 3. Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310000, China; 4. College of Advanced Agricultural Sciences, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, China)

Abstract: In order to accurately estimate the pre-winter population of *Chilo suppressalis* in paddy fields, based on differentiated prevention and control of *C. suppressalis*, this study used unmanned aerial vehicle (UAV) to obtain double-phase multi-spectral data of rice at filling stage and wax ripening stage. And combined with the field survey of pre-winter population in the stable period of insect population, based on linear regression, support vector machine regression, random forest regression, ridge regression, Lasso regression and Bayesian regression, the remote sensing estimation model of pre-winter population of *C. suppressalis* in paddy fields was constructed. The results showed that the spectral reflectance of 450 nm (b1) and 660 nm (b3) bands at the filling stage and the normalized difference vegetation index (NDVI) at the ripening stage were in extremely

significantly linear correlation with the pre-winter population of *C. suppressalis* in paddy fields. Under different regression methods, the correlations between the estimated value and the observed value of the remote sensing estimation model of the pre-winter population of *C. suppressalis* in rice fields established by using double-phase data were better than those of the single-phase data. Among them, the estimation method based on double-phase remote sensing

收稿日期: 2024-06-19

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2022C02034); 浙江省粮油产业技术项目; 浙江省农业重大技术协同推广计划项目(2023ZDXT01-5)

作者简介: 曹梦娇(1990-), 女, 浙江嘉兴人, 硕士, 农艺师, 研究方向为农作物病虫害监测预警。(E-mail) 1240562399@qq.com

通讯作者: 徐红星, (E-mail) hzxuhongxing@163.com

data and random forest regression model was the best. The correlation coefficients between the estimated and observed population of *C. suppressalis* in the test set and the training set were 0.85 and 0.94, respectively, and the estimation results of the pre-winter population of *C. suppressalis* in rice fields under this method were more in line with the actual situation in the fields. Based on UAV technology, this study established an estimation method for the pre-winter population of *C. suppressalis* in paddy fields, which provided a basis for accurate prevention and control of *C. suppressalis* in paddy fields.

Key words: *Chilo suppressalis*; pre-winter population of insects; multispectral; random forest; double phases

二化螟(*Chilo suppressalis* Walker)是鳞翅目草螟科禾草螟属昆虫。在中国长江流域水稻生长过程中,二化螟每年发生2~3代。二化螟蚁螟孵出后先危害水稻叶鞘,造成枯鞘;幼虫发育至2龄后开始钻蛀水稻茎秆内部,形成枯心、白穗和虫伤株^[1]。目前生产中常利用性引诱剂进行水稻二化螟雄虫蛾峰时间监测及防治适期推算,而田间虫量信息的获取需要依靠传统的人工调查手段。由于二化螟的钻蛀特性,使其虫量调查费时费力,效率较低。随着耕作制度、农艺措施等因素的变化,地区之间乃至田块之间二化螟发生量差异较大。冬前虫量即最后一代二化螟数量,是水稻二化螟测报调查中较为重要的一环,一方面对当年的药剂防效评价和保险理赔评估至关重要,另一方面对次年二化螟防控具有较强的指导性。面对水稻生产规模化、基层植保人员短缺、田块间虫量差异等现状,单纯采用人工调查的方式进行二化螟冬前虫量估算已经不适应当前的生产水平,因此利用现代化的信息技术手段,开展二化螟冬前虫量估算对提高水稻生产水平和虫害精准防控有重要意义。

近年来,无人机光谱成像技术在农作物长势监测^[2-4]、病虫害监测^[5-7]、产量监测^[8-10]和耕地利用精细分类^[11-12]等领域有越来越多的应用^[13]。在农作物病害遥感监测方面,赵晋陵等^[14]利用无人机得到的多光谱遥感数据,构建了槟榔黄化病监测模型,其中反向传播神经网络(BPNN)模型的识别总体精度达到91.7%,Kappa系数为0.875。Chivasa等^[11]建立了基于无人机多光谱遥感的玉米品种条纹病毒抗性鉴定模型,并将模型用于玉米辅助育种。Mandal等^[15]研究发现红色波段指标(RBI)和归一化建筑指数(NDBI)可较好地用于水稻稻瘟病的鉴定。在农作物虫害遥感监测方面,郭铭淇等^[16]基于无人机多光谱影像发现不同生育期的植被指数与卷叶率都极显著相关,可用于水稻稻纵卷叶螟危害的监测。杨丽丽等^[17]基于冠层高光谱、近地多光谱、环境数据与地面调查相结合的多源数据,建立了棉田蚜虫

危害大范围监测方法。Liu等^[18]研究发现水稻乳熟期750~1000 nm波段的光谱反射率及成熟期400~531 nm和567~705 nm波段的光谱反射率与褐飞虱密度密切相关。

针对采用光谱技术进行区域水稻二化螟监测还鲜有研究的现状,本研究在二化螟差异化防控的基础上,基于无人机多光谱遥感技术,通过采集灌浆期和蜡熟期的多光谱数据结合稻田二化螟发生量调查,建立二化螟冬前虫量的遥感估算模型,旨在为当年二化螟防控措施评估和次年二化螟防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试验区域

供试水稻品种为甬优1540。供试药剂包括25%乙基多杀菌素水分散粒剂[科迪华(中国)投资有限公司产品]、25%啮硫磷乳油(印度联合磷化物有限公司产品)、助剂鹰踏(意大利宁柏迪集团产品)、助剂傲釜(意大利宁柏迪集团产品)、助剂火牛[艾普锐农(上海)化学科技有限公司产品]。

试验地位于浙江省嘉兴市桐乡市乌镇镇陈庄村(30.685 2°N, 120.865 9°E)。试验地的种植制度为稻麦轮作,5月至11月为单季稻生长期,12月至次年5月为小麦生长期,当地二化螟可发生3代,其中第3代为不完全世代。

1.2 试验方法与处理

5月8日秧盘育秧,6月6日采用久保田2ZGO-6D1(SPV-6CMD)插秧机[久保田农业机械(苏州)有限公司产品]插秧,种植密度每1 hm²1.8×10⁵穴,借助综合防治技术和精细化管理,确保试验田水稻生长期除二化螟为害外无明显其他生物胁迫和非生物胁迫。

研究中通过施用不同配方或剂量的农药,得到不同二化螟冬前虫量的田块。首先根据水稻植株的现场查剥,确定试验地块第3代二化螟防治适期为9月3日。防治时,设置不同药剂、助剂及剂量的处

理 14 个。处理 1~处理 13 的小区面积约为 500 m², 处理 14 的小区面积约为 2 200 m²。采用担架式喷

雾机进行施药,各处理用水量统一为 900 kg/hm²。各处理所用药剂、助剂及剂量见表 1。

表 1 供试药剂、助剂及用量

Table 1 Test agent, assistant and dosage

处理编号	防治药剂及用量		助剂类型及用量	
	供试药剂	用量	供试助剂	用量(mL/hm ²)
1	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	180 g/hm ²	-	-
2	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	180 g/hm ²	鹰踏	225
3	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	180 g/hm ²	傲釜	450
4	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	180 g/hm ²	火牛	270
5	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	144 g/hm ²	-	-
6	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	144 g/hm ²	鹰踏	225
7	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	144 g/hm ²	傲釜	450
8	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	144 g/hm ²	火牛	270
9	未施药	-	-	-
10	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	90 g/hm ²	-	-
11	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	90 g/hm ²	鹰踏	225
12	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	90 g/hm ²	傲釜	450
13	25%乙基多杀菌素水分散粒剂	90 g/hm ²	火牛	270
14	25%啮硫磷乳油	1 500 mL/hm ²	-	-

1.3 数据采集与数据处理

1.3.1 多光谱影像采集与影像处理 于水稻灌浆期和蜡熟期,选择天气晴朗或少云、风力 3 级及以下的日期(2023 年 10 月 11 日和 2023 年 10 月 23 日),使用飞马无人机 D2000(深圳飞马机器人股份有限公司产品)采集稻田多光谱遥感影像。数据采集时间为 12:00-14:00,每期共采集 2 次影像,选取图像质量较高的影像作为试验数据。采集的影像包括 b1(450 nm)、b2(555 nm)、b3(660 nm)、b4(720 nm)、b5(750 nm)、b6(840 nm)等 6 个波段的反射率数据。无人机飞行高度为 40 m,影像的分辨率为 0.04 m。每期影像通过 1 次飞行后拼接而成。每次影像采集前,在试验区域内用油漆标记 11 个控制点,使用华测 X6 惯导版 RTK(上海华测导航科技股份有限公司产品)记录控制点位置,并以此信息校正遥感影像,以确保其与地面采集的二化螟冬前虫量数据在空间上的精准对齐。

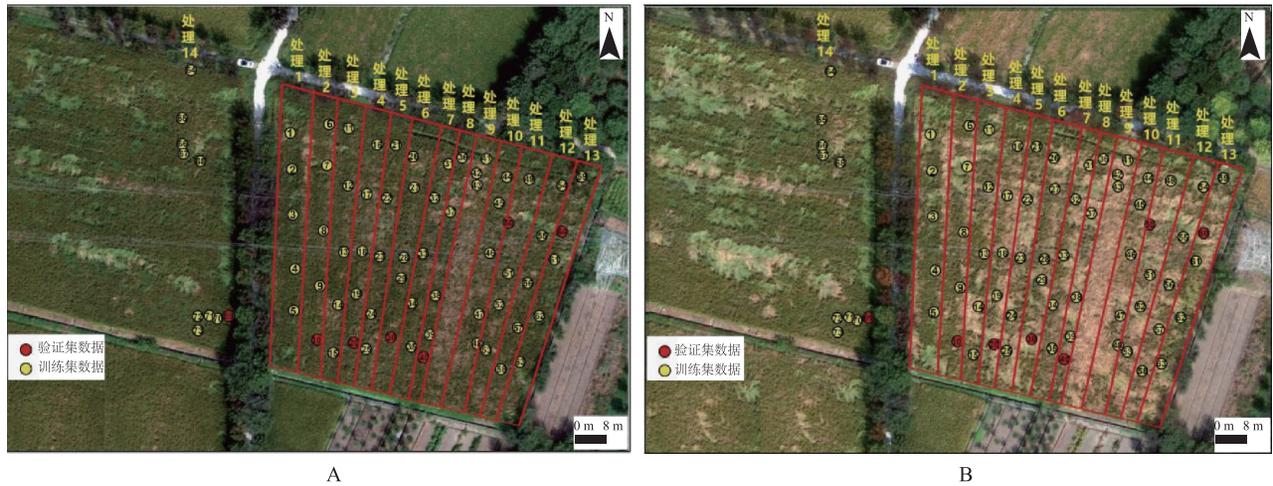
获取遥感数据后,利用 YuSenseRef 软件进行辐射定标,再利用 Pix4D 软件对定标后的影像进行拼接,最后利用 ArcGIS 软件实现实时差分定位(RTK)

数据和遥感数据、地面采样数据的位置配准。

1.3.2 确定二化螟虫量调查时间与调查方式 2023 年 4-10 月,采用性信息素诱捕雄蛾的方式,利用 SPT-R-02S 智慧性诱测报系统(宁波纽康生物技术有限公司产品)进行稻田螟蛾发生量监测。监测频率每天 1 次,判断发生代次,于第 3 代二化螟老熟幼虫期开展田间虫量调查。

考虑到各处理冬前虫量的差异,在虫量较低的小区增加调查样本量,而虫量较高的小区适当减少样本量。处理 1~处理 8、处理 10~处理 13 每个小区选取 5 个样本点,处理 9 选取 3 个样本点,处理 14 选取 10 个样本点,共计 73 个样本点进行稻田冬前虫量调查。调查时,每样本点随机选取 3 行、每行 2 穴,共 6 丛水稻植株,齐土收割并剥查虫量,计算单位面积虫量。取样时,使用华测 X6 惯导版 RTK 精确记录采样点位置。取样点位置及分布如图 1 所示。各样本点冬前虫量的计算采用下式:

$$\text{冬前虫量}(\times 10^4 \text{头}, 1 \text{hm}^2) = \text{调查虫量} / \text{被调查丛数} \times \text{种植密度} \quad (1)$$



A:灌浆期;B:蜡熟期。浅色圈为训练集样本,深色圈为验证集样本。

图 1 灌浆期和蜡熟期遥感影像及取样点分布

Fig.1 Remote sensing images and sampling point distribution at filling stage and wax ripening stage

1.4 数据集划分和稻田二化螟冬前虫量估算方法的建立

从 73 个二化螟冬前虫量样本中随机选取 66 个样本作为训练集,用于模型的建立和训练。剩余的 7 个样本作为测试集,用于模型的检验。

本研究采用机器学习方法^[19-22]和多时相遥感数据^[23]进行二化螟冬前虫量的估算。由于均一化植被指数(*NDVI*)在作物长势、病虫害识别中发挥着重要作用^[24-25],因此本研究亦将 *NDVI* 作为回归模型的输入特征之一,其计算公式为:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (2)$$

式中,*NDVI* 为归一化植被指数,*NIR* 和 *RED* 分别为近红外波段和红光波段的光谱反射率。本研究中,分别用 b6 波段和 b3 波段的反射率代替。

研究中首先分析灌浆期和蜡熟期获取的多光谱数据与二化螟冬前虫量的相关性,接着利用 6 个波段的单时相数据和双时相数据,分别基于线性回归(Linear regression)、随机森林(Random forest, RF)回归、支持向量回归(Support vector regression, SVR)、岭回归(Ridge regression)、贝叶斯回归(Bayesian regression)和 Lasso 回归(Least absolute shrinkage and selection operator regression)算法构建稻田二化螟冬前虫量估算模型。通过对测试集和训练集得到的相关系数的比较,筛选适宜的稻田二化螟冬前虫量估算方法。最后利用双时相数据和 6 种算法得到的估算模型进行区域稻田二化螟冬前虫量反演,并结合稻田冬前虫量的实际空间分布进一步

验证筛选的估算方法的合理性。

本研究所使用模型及数据处理基于 Python 语言和 Scikit-learn 开源库实现。

1.5 数据分析

利用 Excel 2003 对样本数据进行统计,用 SPSS 21.0 软件对不同处理下的虫量进行单因素方差分析(ANOVA),用 Duncan's 多重比较法分析处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 试验稻田螟蛾发生期监测结果

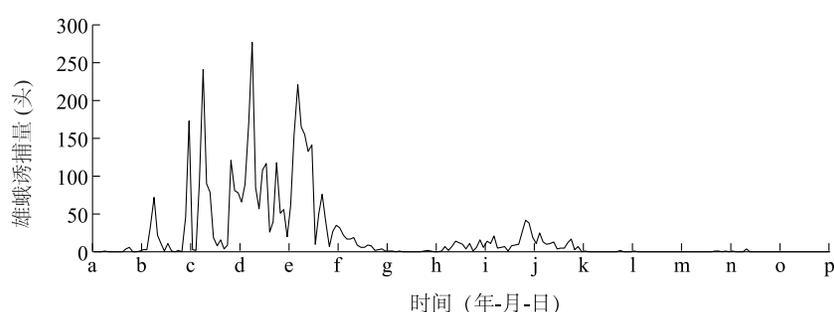
2023 年试验稻田二化螟雄蛾发生趋势如图 2 所示。从监测数据推断,4 月上旬至 6 月下旬为越冬代螟蛾发生期,7 月上旬至 8 月中旬为第 1 代螟蛾发生期,9 月上旬至 9 月下旬的第 2 代螟蛾产下第 3 代的卵。在嘉兴地区第 2 代二化螟成虫诱捕量低于第 1 代,第 2 代螟蛾发生期没有显著蛾峰。但根据二化螟发育历期来判断,9 月是第 2 代螟蛾发生期。10 月下旬,第 3 代二化螟幼虫发育成老熟幼虫进入越冬状态,因此,本次虫量调查时间为 10 月 28 日,符合冬前虫量调查要求。

2.2 二化螟冬前虫量特征

各处理二化螟冬前虫量如表 2 所示。从表中可以看出,不同药剂、不同剂量处理下,二化螟冬前虫量变化明显。总体上看,随着 25% 乙基多杀菌素水分散粒剂施用量的增加,稻田二化螟冬前虫量呈减少趋势。施用 180 g/hm² 25% 乙基多杀菌素水分散

粒剂的处理1~处理3平均虫量每1 hm²低于2.00×10⁶头,显著低于处理8~处理10及处理12,处理4的虫量高于处理1~处理3,可能是由于处理4的虫量受到处理5二化螟迁飞产卵和转株为害影响,同样的情况在处理8和处理10中亦有发生(受未施药的处理9影响);施用144 g/hm² 25%乙基多杀菌素水分散粒剂的处理5~7的虫量显著低于处理9,处理10,高于处理14;施用90 g/hm² 25%乙基多杀菌素水分散粒剂的处理11~处理13的虫量显著低于未放药的处理9。相同的25%乙基多杀菌素水分散

粒剂剂量下添加不同的助剂对二化螟冬前虫量整体上无显著影响。施用25%啮硫磷乳油(有机磷农药)的处理14能有效降低二化螟冬前虫量,因此在生产中25%啮硫磷乳油常作为二化螟防治的应急药剂。未施药处理9虫量每1 hm²高达9.80×10⁶头,水稻植株枯死、倒伏明显。此外,由于小区设置较为狭长,且灌浆期和蜡熟期杂交稻植株较高,会影响施药者的视野,导致施药不均匀和同一处理内的样本点虫量差异较大。总体来说,各处理的虫量与施药处理水平和类型是一致的。



a: 2023-04-01; b: 2023-04-15; c: 2023-04-29; d: 2023-05-13; e: 2023-05-27; f: 2023-06-10; g: 2023-06-24; h: 2023-07-08; i: 2023-07-22; j: 2023-08-05; k: 2023-08-19; l: 2023-09-02; m: 2023-09-16; n: 2023-09-30; o: 2023-10-14; p: 2023-10-28。图中诱捕量为单个诱捕器中的虫量。

图2 2023年当地二化螟雄蛾发生趋势

Fig.2 The trend of male *Chilo suppressalis* in 2023

表2 不同处理二化螟冬前虫量

Table 2 Pre-winter populations of *Chilo suppressalis* under different treatments

处理编号	虫量(×10 ⁴ 头, 1 hm ²)
1	183.60±47.88de
2	169.20±30.68de
3	185.25±11.83de
4	271.80±25.85cd
5	324.00±44.28cd
6	249.60±22.52ede
7	262.80±38.50ede
8	450.60±126.85bc
9	980.00±275.32a
10	680.00±222.66b
11	339.00±34.05cd
12	493.80±114.01bc
13	300.00±80.77cd
14	10.20±4.84e

数据后的不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 光谱数据与二化螟发生量之间的相关性

2.3.1 不同波段反射率与虫量之间的相关性 不同时期不同波段反射率和NDVI与冬前虫量的线性回归相关系数如表3所示。灌浆期可见光区b1、b2和b3波段的光谱反射率与冬前虫量的相关系数在0.33~0.45,且相关性均极显著;而b4、b5和b6波段的光谱反射率与冬前虫量的相关系数在0.18~0.30,低于b1~b3波段。蜡熟期b4、b5和b6波段的光谱反射率与冬前虫量的相关性更低,均未超过0.10;而可见光区b1、b3波段光谱反射率与冬前虫量具有较好的相关性,相关系数分别为0.29和0.31,均达极显著相关水平。无论是灌浆期还是蜡熟期的NDVI与冬前虫量均极显著相关,相关系数分别为0.39和0.41。可见,与二化螟冬前虫量的相关性上,灌浆期的反射率优于蜡熟期,可见光区光谱反射率特别是b1和b3波段与冬前虫量相关性更佳,这可能是由于水稻表面这2种光波对二化螟取食反应更敏感。在蜡熟期,NDVI与水稻冬前虫量也表现出较好的相关性,这可能是NDVI可较好地区

分蜡熟期水稻自然变黄和二代螟取食变枯黄之间的差异。

表 3 不同波段光谱反射率与二代螟冬前虫量的相关性

Table 3 Correlation coefficient between spectral reflectivities under different wave bands and number of pre-winter *Chilo suppressalis*

波段	相关系数	
	灌浆期	蜡熟期
b1	0.44 **	0.29 **
b2	0.33 **	0.16
b3	0.45 **	0.31 **
b4	0.18	0.07
b5	0.25 *	0.07
b6	0.30 **	0.10
NDVI	0.39 **	0.41 **

b1~b6 为无人机的 6 个波段;NDVI:归一化植被指数;* 和 ** 分别表示光谱反射率与冬前虫量显著相关 ($P < 0.05$) 和极显著相关 ($P < 0.01$)。

2.3.2 基于多方法得到的估算虫量与观测虫量之间的相关性 利用单时相和双时相数据,采用不同回归方式,测试集和训练集得到的估算虫量与观测虫量(冬前虫量)的相关性如表 4 所示。从表中可以看出,使用单时相数据时,线性回归、岭回归和贝叶斯回归在训练集和测试集上的相关性差异较小,表明这 3 个模型泛化能力较好,相关系数介于 0.47~0.62,说明这 3 个模型在一定程度上可以估算

冬前虫量,但是准确度还不够高。Lasso 回归模型在测试集和训练集的相关系数差异较大,且灌浆期和蜡熟期测试集估算虫量与观测虫量的相关系数均低于 0.40,表明在该数据集上 Lasso 回归模型的泛化能力较差,估算虫量与观测虫量的相关性较弱,因此,Lasso 回归模型不宜作为预测模型。利用支持向量机回归模型进行冬前虫量估算时,灌浆期数据集同样出现测试集与训练集上估算虫量与观测虫量相关系数差异大、测试集上相关系数低 (< 0.40) 的现象,所以该模型同样不宜用于根据灌浆期光谱数据进行冬前虫量的估算;而利用蜡熟期数据集后,测试集和训练集上估算虫量与观测虫量的相关系数趋于一致,且相关系数接近 0.50,说明支持向量机回归模型可用于基于蜡熟期光谱数据的冬前虫量估算,但准确度不高。随机森林回归模型在灌浆期和蜡熟期测试集与训练集上估算虫量与观测虫量的相关系数虽有所提升,但两者之间差异较大,模型泛化性不理想,因此其不宜作为冬前虫量的估算模型。

利用灌浆期和蜡熟期 2 个时相(双时相)光谱数据后,6 种模型在测试集和训练集上估算虫量与观测虫量的相关系数均有较大幅度的提高,相关系数均在 0.60 以上。其中,随机森林回归模型表现最佳,测试集和训练集上估算虫量与观测虫量的相关系数分别达 0.85 和 0.94,模型具有较高的拟合能力。

表 4 不同时相和不同算法在测试集和训练集上估算虫量和观测虫量的相关性比较

Table 4 Comparison of correlation between estimated insect population and observed insect population in different time phases and different algorithms on test set and training set

方法	单时相灌浆期相关系数		单时相蜡熟期相关系数		双时相相关系数	
	测试集	训练集	测试集	训练集	测试集	训练集
线性回归	0.60	0.62	0.50	0.54	0.62	0.71
岭回归	0.54	0.58	0.47	0.53	0.67	0.69
Lasso 回归	0.34	0.57	0.37	0.50	0.62	0.73
贝叶斯回归	0.51	0.55	0.48	0.51	0.65	0.84
支持向量机回归	0.36	0.70	0.49	0.54	0.79	0.68
随机森林回归	0.61	0.94	0.46	0.88	0.85	0.94

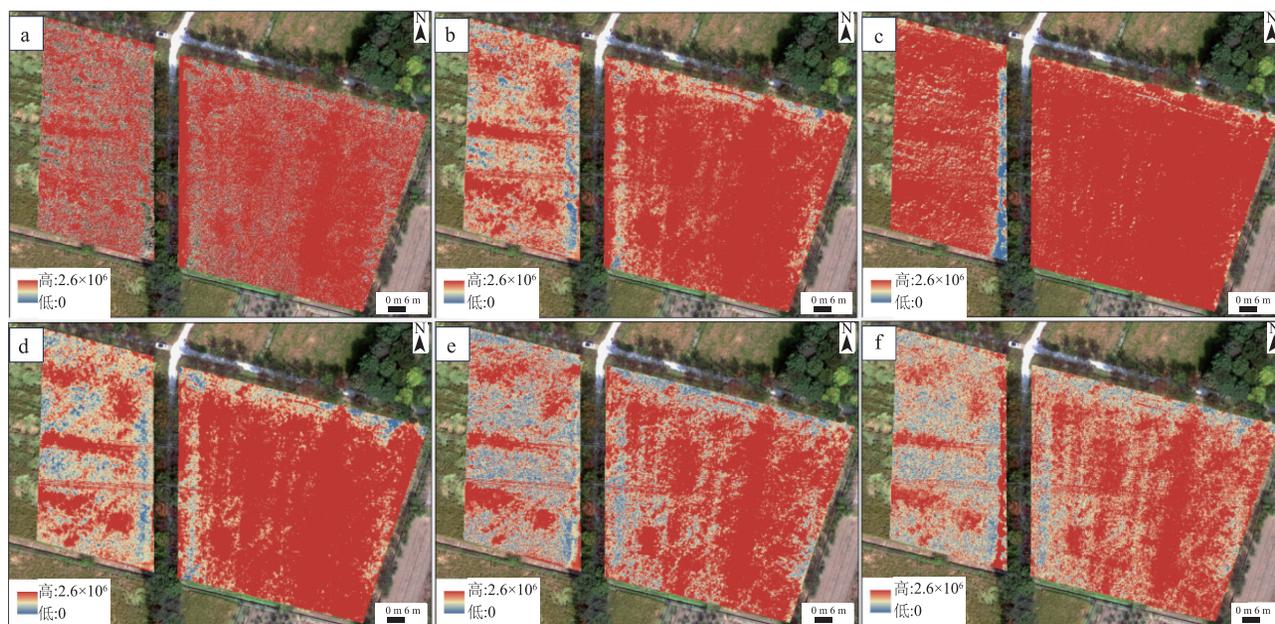
2.4 不同模型二代螟冬前虫量反演结果比较

利用双时相光谱数据和不同模型,反演得到的稻田二代螟冬前虫量分布如图 3 所示。从图中可以看出,利用线性回归方法和 Lasso 回归方法反演得到的稻田二代螟冬前虫量在整个试验区都是高聚集表达。

结合各处理冬前虫量特征(表 2)与 2 期影像数据,取样点 64~73 号(处理 14)因使用有机磷农药,冬前虫量明显低于其他样本点,且未呈现大片枯死倒伏情况。处理 14 与处理 1~处理 13 应该有较大差异,但这 2 个模型的反演结果均无法体现实际的冬前虫量

差异(图 3a、图 3c)。利用岭回归方法和贝叶斯回归方法反演得到的冬前虫量(图 3b 和图 3d)在高虫量情况下其空间差异性表达不足。根据表 2,除编号 41~43 样本点所在的处理 9 区域(未施药)外,处理 1~处理 3、处理 5~处理 7、处理 11~处理 13 的药剂用量呈下降趋势,虫量呈上升趋势,模型中的虫量分布理应符合低聚集表达达到高聚集表达的趋势,但是这 2 个模型并不能很好体现该趋势,因此不符合实际情况。利用支持向量机回归方法(图 3e)和随机森林

回归方法(图 3f)得到的冬前虫量与实际情况较为相符,支持向量机在双时相下表现较好,但存在过拟合现象,即训练集相关系数小于测试集相关系数(表 3)。随机森林回归在双时相数据下表现最佳,测试集和训练集的相关系数分别为 0.85 和 0.94,且预测结果符合虫害分布状态。但随机森林模型的预测结果仍然受到干扰,在道路和行道树上容易产生高虫害的预测结果。这是因为在训练数据中不存在该类地物,因此模型无法正确判断该类地物与虫害的关系。



a:线性回归;b:岭回归;c:Lasso 回归;d:贝叶斯回归;e:支持向量机回归;f:随机森林回归。数据单位:头,1 hm²。

图 3 不同模型二化螟冬前虫量反演结果比较

Fig.3 Comparison of inversion results of pre-winter population of *Chilo suppressalis* by different models

3 讨论

二化螟冬前虫量是二化螟监测预警中重要的参数,不但是次年二化螟防控依据,亦是当年二化螟防治效果与保险理赔评判的基础。由于二化螟的钻蛀特性,二化螟虫量的田间调查大多依赖人工方式进行,这不仅需要调查人员具备相应的专业知识,且调查效率低下,难以用于实际大范围的二化螟虫量调查。因此,利用现代化的信息技术手段开展二化螟虫量的区域调查是稻田虫害精准防控的需求。

随着无人机光谱成像技术的发展,基于无人机的农作物病虫害监测与防控方面取得了较多研究成果,但稻田二化螟的监测还鲜有研究。本研究通过差异化防控,采用无人机搭载多光谱相机,获取水稻

关键生育期的多光谱数据,分析稻田二化螟冬前虫量与不同时期、不同波段光谱反射率的相关性,并基于机器学习方法,建立基于光谱数据的稻田二化螟冬前虫量估算模型。结果表明,二化螟冬前虫量分别与灌浆期 b1、b3 波段的光谱反射率、蜡熟期 *NDVI* 呈极显著线性相关,但相关系数较低,说明简单的线性模型较难描述实际生产中复杂的水稻二化螟为害。采用双时相数据并结合随机森林回归模型建立的估算方法更加符合实际和可靠。当然,该模型在反演道路和行道树等植被时,仍然受到干扰,原因在于训练数据集缺乏相应的样本。因此,获取更多的地物与虫量样本可增强模型的泛化性和反演能力。

除二化螟外,褐飞虱、杂草稻等亦会影响水稻生长,其为害症状与二化螟存在一定的相似性。如何

结合少量的人为鉴定,提高本研究建立的模型的适用性尚需进一步研究。此外,结合高光谱或近红外影像数据,筛选和优化的二化螟监测模型亦是未来的研究方向之一。

参考文献:

- [1] 洪晓月. 农业昆虫学[M]. 3版. 北京:中国农业出版社,2017:77-80.
- [2] 付虹雨,王 薇,卢建宁,等. 基于无人机多光谱遥感和机器学习的苧麻理化性状估测[J]. 农业机械学报,2023,54(5):194-200,347.
- [3] 向友珍,安嘉琪,赵 笑,等. 基于无人机多光谱遥感的大豆生长参数和产量估算[J]. 农业机械学报,2023,54(8):230-239.
- [4] 姜友谊,刘博伟,张成健,等. 利用无人机多光谱影像的多品种玉米成熟度监测[J]. 农业工程学报,2023,39(20):84-91.
- [5] 苏宝峰,刘砥柱,陈启帆,等. 基于时间序列植被指数的小麦条锈病抗性等级鉴定方法[J]. 农业工程学报,2024,40(4):155-165.
- [6] DHAU I, ADAM E, MUTANGA O, et al. Detecting the severity of maize streak virus infestations in maize crop using *in situ* hyperspectral data[J]. Transactions of the Royal Society of South Africa, 2018, 73(1):8-15.
- [7] 杨 宁,张天纬,张钊源,等. 水稻病害孢子多光谱衍射识别与病源定位方法研究[J]. 农业机械学报,2023,54(4):250-258.
- [8] 严海军,卓 越,李茂娜,等. 基于机器学习和无人机多光谱遥感的首蓆产量预测[J]. 农业工程学报,2022,38(11):64-71.
- [9] 向友珍,安嘉琪,赵 笑,等. 基于无人机多光谱遥感的大豆生长参数和产量估算[J]. 农业机械学报,2023,54(8):230-239.
- [10] 胡田田,赵 璐,崔晓路,等. 无人机多光谱数据可靠性分析与冬小麦产量估算研究[J]. 农业机械学报,2023,54(12):217-225.
- [11] CHIVASA W, MUTANGA O, BURGUEÑO J. UAV-based high-throughput phenotyping to increase prediction and selection accuracy in maize varieties under artificial MSV inoculation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 184:106128.
- [12] FENNELL J, VEYS C, DINGLE J, et al. A method for real-time classification of insect vectors of mosaic and brown streak disease in cassava plants for future implementation within a low-cost, handheld, in-field multispectral imaging sensor[J]. Plant Methods, 2018, 14:82.
- [13] 彭要奇,肖颖欣,郑永军,等. 无人机光谱成像技术在大田中的应用研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(5):1356-1361.
- [14] 赵晋陵,金 玉,叶回春,等. 基于无人机多光谱影像的槟榔黄化病遥感监测[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8):54-61.
- [15] MANDAL N, ADAK S, DAS D K, et al. Spectral characterization and severity assessment of rice blast disease using univariate and multivariate models[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14:1067189.
- [16] 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.
- [17] 杨丽丽,张大卫,罗 君,等. 基于SVM和AdaBoost的棉叶螨危害等级识别[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2):14-20.
- [18] LIU X D, SUN Q H. Early assessment of the yield loss in rice due to the brown planthopper using a hyperspectral remote sensing method[J]. International Journal of Pest Management, 2016, 62(3):205-213.
- [19] KASINATHAN T, SINGARAJU D, UYYALA S R. Insect classification and detection in field crops using modern machine learning techniques[J]. Information Processing in Agriculture, 2021, 8(3):446-457.
- [20] TUDA M, LUNA-MALDONADO A I. Image-based insect species and gender classification by trained supervised machine learning algorithms[J]. Ecological Informatics, 2020, 60:101135.
- [21] MARKOVIC D, VUJICIC D, TANASKOVIC S, et al. Prediction of pest insect appearance using sensors and machine learning[J]. Sensors, 2021, 21(14):4846.
- [22] 王 震,李映雪,吴 芳,等. 冠层光谱红边参数结合随机森林机器学习估算冬小麦叶绿素含量[J]. 农业工程学报, 2024, 40(4):166-176.
- [23] 汪 航,师 茁,王 岩,等. 基于MODIS时间序列数据的春尺蠖虫害遥感监测方法研究——以新疆巴楚胡杨为例[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4):686-695.
- [24] OLSSON P O, LINDSTRÖM J, EKLUNDH L. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 181:42-53.
- [25] GREENE A D, REAY-JONES F P F, KIRK K R, et al. Spatial associations of key lepidopteran pests with defoliation, NDVI, and plant height in soybean[J]. Environmental Entomology, 2021, 50(6):1378-1392.

(责任编辑:石春林)