

DOI: 10.5846/stxb202108072162

包云轩, 黄璐, 郭铭淇, 朱凤, 杨荣明. 控制大田和自然大田稻纵卷叶螟危害水稻生理生态参数估算模型. 生态学报, 2023, 43(13): 5466-5479.

Bao Y X, Huang L, Guo M Q, Zhu F, Yang R M. Estimation models of physiological and ecological parameters of rice damaged by *Cnaphalocrocis medinalis* under controlled field experiments and natural field experiments. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5466-5479.

# 控制大田和自然大田稻纵卷叶螟危害水稻生理生态参数估算模型

包云轩<sup>1,2,3,\*</sup>, 黄璐<sup>1,2,3</sup>, 郭铭淇<sup>1,2,3</sup>, 朱凤<sup>4</sup>, 杨荣明<sup>4</sup>

1 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/南京信息工程大学, 南京 210044

2 江苏省农业气象重点实验室/南京信息工程大学, 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, 南京 210044

4 江苏省植物保护站, 南京 210013

**摘要:** 为了准确监测和客观评估稻纵卷叶螟对水稻生长发育和产量形成的危害, 利用 ASD Field Spec3 地物波谱仪和 SPAD-502 叶绿素仪分别采集控制大田试验(2015 年和 2019 年)和自然大田试验(2020 年)在各生育期(拔节期、孕穗期、灌浆期、成熟期)水稻的冠层高光谱数据和 SPAD 值, 调查采集样点的虫量和水稻卷叶率, 对比分析两种试验中稻纵卷叶螟的虫害发生特征、水稻冠层光谱特征和水稻生理生态参数特征, 建立基于高光谱参数的水稻受稻纵卷叶螟危害的生理生态参数估算模型。结果表明, (1) 两种试验的水稻 SPAD 值和冠层的红边至近红外波段的反射率均随着稻纵卷叶螟虫害程度的加重而降低, 而可见光波段的反射率则相反; (2) 自然大田试验的 SPAD 值和红光至近红外波段的冠层反射率在水稻生长发育前期要显著低于控制大田试验, 而到了后期则反而要略高于控制大田试验; (3) 综合分析筛选出自然大田试验和控制大田试验中的多个虫害特征参数和植被指数分别构建出了 SPAD 的单因子和多因子估算模型, 各模型均达到了较好的估算效果, 在单因子模型中 EVI 的二项式函数模拟效果最好, 而多因子线性回归估测模型的模拟效果优于所有的单因子模型; (4) 通过 2021 年对这些模型的应用检验发现, 这些模型中基于虫量、卷叶率、OSAVI、EVI 和 DVI 的单因子估算模型的 SPAD 估算值与实测值拟合度很高, 其  $R^2$  均超过了 0.8, 达到了比较理想的估算效果, 这为稻纵卷叶螟危害下的水稻 SPAD 值估测提供了一种精度较高且可行的估算方法。

**关键词:** 稻纵卷叶螟; 冠层高光谱特征; 生理生态参数; 植被指数; 估算模型

## Estimation models of physiological and ecological parameters of rice damaged by *Cnaphalocrocis medinalis* under controlled field experiments and natural field experiments

BAO Yunxuan<sup>1,2,3,\*</sup>, HUANG Lu<sup>1,2,3</sup>, GUO Mingqi<sup>1,2,3</sup>, ZHU Feng<sup>4</sup>, YANG Rongming<sup>4</sup>

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, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEG), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

4 Jiangsu Province Plant Protection Station, Nanjing 210013, China

**Abstract:** In order to accurately monitor and objectively evaluate the damage of the rice leaf roller, *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee (*C. medinalis*), to rice growth, breeding and yield formation, in this paper, the canopy hyperspectral

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41975144); 江苏省重点研发计划(现代农业)(BE2019387)

**收稿日期:** 2021-08-07; **网络出版日期:** 2023-03-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baoyx@nuist.edu.cn

data and soil and plant analyzer development (SPAD) values of rice in the controlled field experiments (in 2015 and 2019) and the natural field experiments (in 2020) were measured by the instruments of ASD Field Spec3 and SPAD-502 at different growth stages (jointing stage, booting stage, filling stage and maturing stage). The pest number and the percentage of rolled leaves in rice resulted from *C. medinalis* was measured by the manual investigations. The hyperspectral characteristics of rice canopy, physiological and ecological parameters of rice and the characteristics of *C. medinalis*' occurrence parameters in the two experiments were analyzed. Models for estimating physiological and ecological parameters of rice after being damaged by *C. medinalis* based on the hyperspectral parameters were established. The results showed that: (1) in the two experiments, the reflectance of the red edge to near-infrared band of rice SPAD value and canopy decreased with the aggravation of the degree of *C. medinalis* infestation, while the reflectivity of the visible light band was the opposite. (2) The SPAD value of the natural field test and the canopy reflectance in the red light to near-infrared wavelength range were significantly lower than those of the control field test in the early stage of rice growth and development, and slightly higher than that of the control field test in the later stage. (3) After comprehensively analyzing the experimental data, the multiple pest characteristic parameters and vegetation indices in the natural field experiments and the controlled field experiments were selected. A set of single factor estimation models and multi-factor estimation models of SPAD were constructed, respectively. Each model achieved the good estimation effect, among which the binomial function simulation effect of Enhanced Vegetation Index (EVI) was the best in the single factor model. However, the simulation effect of the multi-factor linear regression estimation model was better than that of all single-factor models. (4) Through application test of these models in 2021, it was found that the estimated SPAD values of the single factor estimation models based on the pest number, percentage of rolled leaf, Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI), EVI and Difference Vegetation Index (DVI) in these models were highly consistent with the measured value, and their  $R_e^2$  were more than 0.8. It indicated that these five models achieved relatively ideal estimation effect. This study provided a high-precision and feasible estimation method for the SPAD value estimation of rice under the infestation of *C. medinalis*.

**Key Words:** *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee; canopy hyperspectral characteristics; physiological and ecological parameters; vegetation index; estimation model

稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis* Guenee(*C. medinalis*))是分布于我国各稻区的主要害虫之一,尤其在华南稻区、江岭稻区和江淮稻区危害尤甚。主要以水稻为食,其在幼虫时期吐丝纵卷水稻叶片并结苞,在苞内啃食叶肉,留下白斑,导致叶片无法正常进行光合作用,叶绿素增长速度减缓甚至总的含量下降,从而降低了水稻干物质的累积速率,严重影响了稻株的生长发育,最终使得水稻严重减产<sup>[1-7]</sup>。

高光谱遥感影像能够获取作物的空间、辐射和光谱维信息<sup>[8]</sup>,其分辨率很高,从而能准确反映出作物的光谱特性和差异,进而可以更精确的获取作物的叶绿素含量、含水量、叶面积指数、冠层结构等理化信息参数<sup>[9]</sup>,是一种高效准确的监测手段,相比起传统的人工调查,高光谱遥感监测的成本更低、机动性更高,能够更加准确和及时地反应虫害发生状况,让决策者能够及时在病虫害发生早期做出反应,利用遥感对病虫害进行监测在当下已经成为研究农作物病虫害的一种重要趋势。张桂芬等<sup>[10]</sup>在研究穗期稻纵卷叶螟危害损失时发现虫量与卷叶率呈现出显著的正相关关系。高文婷<sup>[11]</sup>的研究表明:在整个生育期内,虫量增加时,水稻 SPAD 值(SPAD 值代表叶片叶绿素含量的相对值,也代表了植株的绿色程度。)和 LAI 值(叶面积指数, Leaf area index, LAI, 其值代表单位土地面积上植物叶片总面积占土地面积的倍数)均随之逐渐降低。黄建荣等<sup>[12]</sup>的研究显示:水稻在近红外波段的吸收随着稻纵卷叶螟危害程度的增加而增加,其反射率下降。孙启花等<sup>[13]</sup>的研究指出:卷叶率级别升高时,其近红外波段的冠层光谱反射率下降,738—1000 nm 波段的反射率能够较好的反映出水稻受稻纵卷叶螟危害的程度。孙嘉怿等<sup>[14]</sup>研究发现,不论是虫量还是卷叶率上升,稻株光谱反射率均随之在绿光区和近红外区呈现出下降的趋势。孙红等<sup>[15]</sup>使用高光谱辐射仪获取到水稻田间稻纵

卷叶螟虫害区的反射光谱和一阶微分光谱特征,发现在近红外区域受害水稻的光谱反射率出现不同程度的尖峰波动。Yang<sup>[16]</sup>采用绿度植被指数(GNDVI)和土壤调节植被指数(SAVI)对水稻病害进行监测,2种指数与病情程度之间的决定系数均达到0.8以上。

以往的稻纵卷叶螟虫害高光谱特征研究都是在室内盆钵或温室控制小区内进行试验的,对于露天网罩小区试验和纯自然大田试验的稻纵卷叶螟虫害的水稻冠层高光谱特征研究甚少,室内盆钵和温室小区控制试验下所建立的监测模型较难拟合或反映自然农田里稻纵卷叶螟虫害的实际发生情况,而单一的纯自然大田试验受到较多外界因素的干扰,难以精确反映纯稻纵卷叶螟虫害对水稻生长和产量形成的影响。所以本研究分别通过害虫采集投放控制大田试验和纯自然大田实验两种情形对稻纵卷叶螟虫害产生的水稻冠层高光谱特征、水稻生理生态参数以及虫害发生状况进行正向和反向的对比分析,建立诊断稻纵卷叶螟虫害发生程度及其产生的光谱特征参数的数学模型,拟合自然农田的稻纵卷叶螟为害后水稻的长势及其为害特征,为稻纵卷叶螟的危害监测、发生趋势预警、防控决策和水稻产量损失评估提供重要的参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

控制小区试验分别于2015年的6月至10月在南京市江宁区南京农业大学试验基地(31.48°N, 118.48°E)和2019年的6月至10月在南京市浦口区南京信息工程大学农业气象试验站(32.20°N, 118.71°E)的生态实验田内进行,自然大田试验则于2020年6月至10月在南京市浦口区桥林镇(31.48°N, 118.30°E)的农田内进行。三个试验区均位于长江下游沿江稻区,是稻纵卷叶螟迁入和危害的重发区和常发区。该地区水稻生育期为6月至10月,其间日平均气温较适宜,非常有利于稻纵卷叶螟的迁入、取食和繁殖;且分蘖期至成熟期与稻纵卷叶螟的代次递进相一致,为稻纵卷叶螟迁入种群提供了丰富的食料条件。

### 1.2 试验设计

2015年控制大田试验的水稻品种为南粳46。试验设3次重复,每个重复为6块1.5m×1.5m的方形田块。小区内均匀种植100株水稻。水稻移栽后立即喷洒农药去病、去虫,并罩上含有支架的网罩以防止其它害虫侵入。根据GB/T15793 稻纵卷叶螟测报技术规范<sup>[17]</sup>,在水稻分蘖期依次将15、45、80、115和150头稻纵卷叶螟幼虫放置入相应小区内,最后一块田块不接虫作为对照。其它田间管理一致。从水稻分蘖期开始时,每隔7—10d进行一次调查和测量。

2019年控制大田试验的试验设计与2015年相似,只有接入的虫量存在差异:2019年分别将50、100、200、300和400头幼虫接入相应的小区(小区面积为2.0m×2.0m)内,其他设置与2015年相同。

2020年自然大田试验水稻品种仍为南粳46,试验分为防治田和非防治田。非防治试验田面积为17.5m×25m的16个小区,每个小区随机、均匀的选取5个采样点,根据叶片被害部分占整个叶片的比例及危害症状划分为0级(健康叶片)、1级、2级、3级、4级(一开始试验设计时考虑了5级,但实际上没有发生),统计每株水稻各等级叶片的个数,计算该样点的叶片平均受害等级,以此作为该样点稻纵卷叶螟的发生状况。防治试验田则随机、均匀的选取6个采样点(每个点7m×7m),分散覆盖整个研究区,其它田间管理同非防治田。从水稻分蘖期开始时,每隔7—10d进行一次调查和测量。

### 1.3 测量方法

#### 1.3.1 水稻冠层高光谱的获取

利用美国ASDFieldSpec3地物波谱仪(Analytical Spectral Devices Inc, USA)采集水稻整个生育期的冠层光谱数据。该仪器测量波长范围为350—2500nm,光谱分辨率为3—10nm,探头视角为25°。观测间隔时间为7—10d,选择晴朗无云的天气在太阳高度角相对较高的时段即10:00—14:00进行。观测时将波谱仪传感器探头置于在每个样点的几何中心的水稻冠层上方0.6m垂直向下测量,每个样点每次测量存储5条曲线,重复测量三次,将平均的结果作为该样点的冠层光谱反射率。每5min进行一次白板校正,以防太阳高度角变化对

反射率的测量造成误差。

### 1.3.2 SPAD 测量

利用 SPAD-502 叶绿素仪 (Konica Minolta Inc., Marunouchi, Chiyoda, Tokyo), 在每个样点内随机选取三株水稻, 其中为 1 片未被稻纵卷叶螟啃食的叶片以及 2 片被啃食过的叶片, 手持 SPAD 仪, 将水稻剑叶叶片正面夹入仪器使其完全覆盖接收窗, 测定部位应尽量保持一致并避开叶脉。每片叶片测 3 次, 部位分别为距叶尖 2/3、1/2 和 1/3 处, 三次的平均值为所测叶片的 SPAD 值。

### 1.3.3 卷叶率计算

调查光谱仪视野范围内的受害叶片和健康叶片数量。卷叶率计算方法: 每个小区取其中 5—10 丛 (株) 调查总叶片数和卷叶数, 计算卷叶率, 卷叶率 = 卷叶数 / 总叶数, 同时测量株高和分蘖数。

### 1.3.4 研究区虫量数据的获取

2020 年研究区虫情资料来自邻近试验点的植保站的虫情数据 (浦口区植保站于 2020 年在本项目试验区的防治田、非防治田分别进行了逐日稻纵卷叶螟灯诱观测和大田赶蛾计数), 本文将附近植保站统计的虫量数据对应各样点的受害等级进行了转换, 以对应 2015、2019 年的大田控制试验的接虫等级。

## 1.4 数据处理

利用 ViewSpecPro 软件对采集到的冠层光谱数据进行预处理, 得到原始光谱反射率。

利用 SPSS 24.0 软件, 分别对水稻 SPAD、卷叶率和虫量进行方差分析, 采用 Pearson 相关分析法分别比较水稻 SPAD、卷叶率和虫量与水稻冠层光谱反射率之间的相关性, 并建立植被指数与 SPAD、卷叶率和虫量的线性模型和逐步回归模型, 利用  $R^2$  对模型的拟合效果进行比较。

将能够灵敏反映出作物叶片健康状况的近红外波段和可见光波段进行不同形式的组合, 建立出的植被指数能够表征作物的叶绿素含量、植被覆盖度、含水性以及被害程度等生长状态<sup>[18-19]</sup>, 基于上述研究内容并结合前人研究经验, 本研究选取了归一化植被指数 NDVI、增强型植被指数 EVI、差值植被指数 DVI 等 10 个植被指数, 具体见表 1。

表 1 植被指数和计算公式

Table 1 Vegetation indices and calculation formulas

| 植被指数<br>Vegetation indices | 计算公式<br>Calculation formulas                                   | 来源<br>Source | 植被指数<br>Vegetation indices | 计算公式<br>Calculation formulas                                                               | 来源<br>Source |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| NDVI                       | $(R_{875} - R_{680}) / (R_{875} + R_{680})$                    | [20]         | RVI                        | $R_{875} / R_{680}$                                                                        | [25]         |
| GNDVI                      | $(R_{875} - R_{550}) / (R_{875} + R_{550})$                    | [21]         | EVI                        | $2.5 \times (R_{875} - R_{680}) / (R_{875} + 6.0 \times R_{680} - 7.5 \times R_{475} + 1)$ | [26]         |
| PRI                        | $(R_{531} - R_{570}) / (R_{531} + R_{570})$                    | [22]         | TVI                        | $\sqrt{(NDVI + 0.5)}$                                                                      | [27]         |
| OSAVI                      | $1.16 \times (R_{875} - R_{680}) / (R_{875} + R_{680} + 0.16)$ | [23]         | DVI                        | $R_{875} - R_{680}$                                                                        | [28]         |
| NDVI <sub>705</sub>        | $(R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705})$                    | [24]         | RDVI                       | $\sqrt{(NDVI \times DVI)}$                                                                 | [29]         |

NDVI: 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index; GNDVI: 绿色归一化植被指数 Green Normalized Difference Vegetation Index; PRI: 光化学植被指数 Photochemical Reflectance Index; OSAVI: 优化型土壤调节植被指数 Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index; NDVI<sub>705</sub>: 红边归一化植被指数 Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index; RVI: 比值植被指数 Ratio Vegetation Index; EVI: 增强型植被指数 Enhanced Vegetation Index; TVI: 变化植被指数 Transformed Vegetation Index; DVI: 差值植被指数 Difference Vegetation Index; RDVI: 再归一化植被指数 Return-normalized Difference Vegetation Index;  $R_{\lambda}$  表示波长  $\lambda$  的反射率

## 2 结果与分析

### 2.1 不同年份相同稻纵卷叶螟虫量水平下的水稻卷叶率变化特征

由于控制大田试验和自然大田试验各受害等级的虫量设置并不一致, 2015 年和 2019 年已经分别做了 0—5 级虫量水平的控制大田试验, 而 2020 年自然大田试验的虫害发生程度相对较低, 农田内未出现 5 级大



发生的虫害发生程度,为了客观而定量地评估不同条件下稻纵卷叶螟对水稻生长发育和产量形成的危害,本文着重从同一虫量和同一卷叶率水平的角度来对比分析不同条件下的水稻生理生态特征参数和水稻冠层高光谱特征的差异,并选取了最具有代表性的虫量水平和卷叶率水平来对两种实验中各生理生态特征参数和冠层高光谱反射率进行比较。

在水稻生长发育期内,同一稻纵卷叶螟虫量水平下的三年卷叶率均呈现出相似的变化趋势。在整个生育期内,各年份的卷叶率均随着水稻生育期的推进而增大,并在成熟期达到最大值。由图 1 可见,拔节期的水稻受害不严重,此时三年的卷叶率均为水稻生育期的最低值,而随着水稻的生长发育和虫害发生的加重,除孕穗期外,各年份的卷叶率基本都随着生育期的推进而逐渐增加,并在成熟期达到最大值,其增幅分别为 94.11%—283.73%。

在同一虫量水平( $46\pm3$ )下这三年的水稻卷叶率在整个生育期内表现为 2020 年的卷叶率均为最大值,尤其是在水稻生长旺盛的时期,2020 年的卷叶率均明显高于另外两年,其差异达到显著性水平( $P<0.05$ )。2015 年和 2019 年在水稻生殖生长阶段的卷叶率差距不大,仅在成熟期的差异显著。

## 2.2 不同年份相同稻纵卷叶螟虫量水平下的水稻特征

### 参数对比

### 2.2.1 不同年份不同虫量水平下叶绿素相对含量 (SPAD) 的对比

由图 2 可见,整个水稻生育期内各年份在不同虫量水平下的 SPAD 值的变化趋势比较一致,SPAD 与虫量呈现出负相关关系,受稻纵卷叶螟为害的水稻的 SPAD 值均低于健康水稻。

不同水稻生育期内三年各虫量水平下的水稻叶片 SPAD 值的变化趋势基本相似,在水稻生长前期,各年份的 SPAD 值均处于一个较低的水平,随着水稻的生长发育,三年的水稻 SPAD 值逐渐升高且均在灌浆期达到最大值,之后在灌浆期至成熟期,三年水稻的 SPAD 值出现了较大幅度的降低,其降幅分别为 9.40%—20.53%、8.96%—10.97% 和 8.96%—19.31%,并在成熟期达到最小值。

不同虫量水平下不同年份之间的水稻 SPAD 值在各生育期间亦存在差异。在拔节期和孕穗期,2020 年的水稻 SPAD 值均为同虫量水平的最小值,且在孕穗期与前两年存在显著性差异,灌浆期时 2020 年与前两年的差距逐渐缩小,而到了成熟期,2020 年的 SPAD 值反而略高于另外两年。除部分水平外,2019 年的水稻叶绿素相对含量高于 2015 年,在多数水平中达到显著性差异。

### 2.2.2 不同年份不同虫量水平下水稻冠层光谱反射率的对比

由图 3 可见,三年在近红外光区域的水稻光谱反射率与稻纵卷叶螟虫量呈现出负相关的趋势,特别是在水稻生长初期,各年份健康水稻可见光和近红外波段的光谱曲线均明显高于受虫害的水稻,而到了成熟期,健康水稻和受害水稻的光谱曲线比较接近,反射率差异不明显。

从图中可以看出,在不同的生育阶段,三年相同虫量水平下的水稻冠层光谱反射率的变化趋势相似。拔节期时的水稻长势较缓,三年近红外区域的光谱反射率处于一个较低的水平,随着水稻的生长逐渐旺盛,三年的反射率在拔节期之后也随之一路升高,在灌浆期达到最大值,而在灌浆期之后水稻开始逐渐走向黄熟,叶片叶绿素含量逐渐减少,成熟期的冠层反射率明显下降。

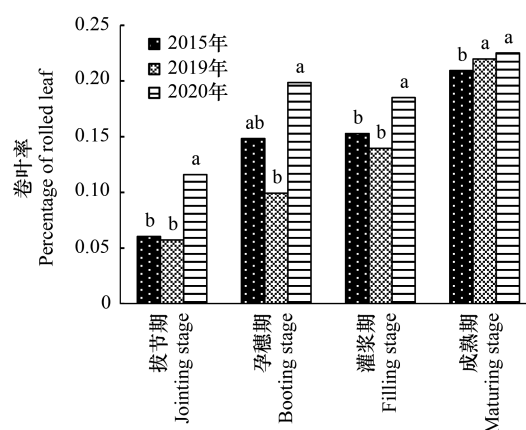


图 1 2015、2019 和 2020 年相同虫量水平 ( $46\pm3$ ) 水稻不同生育期的卷叶率

Fig.1 Percentage of rolled leaf at different growth stages of rice in 2015, 2019 and 2020 under the same population size of *C. medialis* ( $46\pm3$ )

小写字母表示 0.05 水平的差异显著性

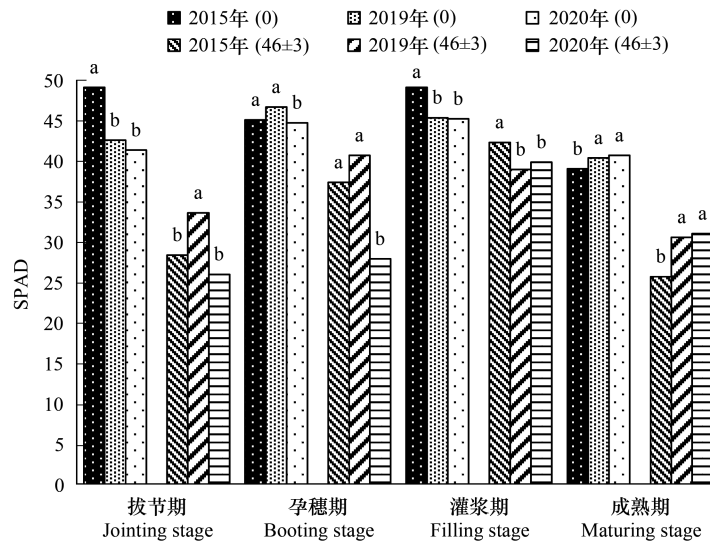


图 2 2015、2019 和 2020 年不同虫量水平 (单位:100 株) 下水稻各生育期的 SPAD 值

Fig.2 SPAD values at different growth stages of rice under different population size of rice leaf roller (unit: 100 plants) in 2015, 2019 and 2020

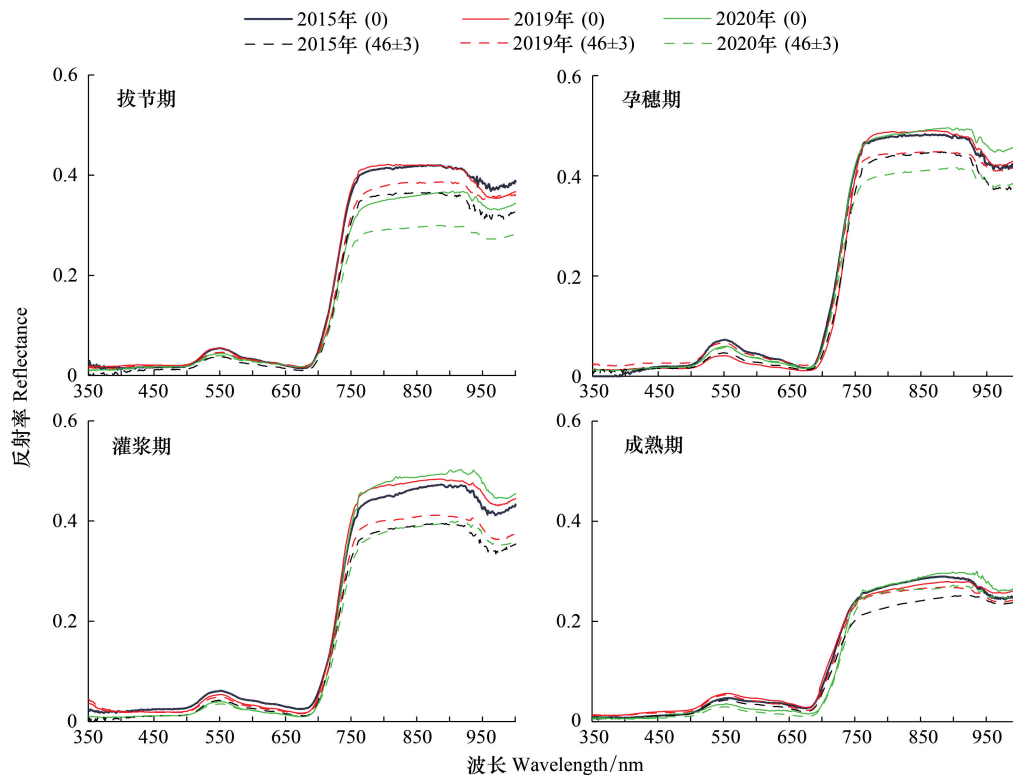


图 3 2015、2019 和 2020 年不同虫量水平 (单位:100 株) 下水稻各生育期的冠层反射率

Fig.3 Spectral reflectance of rice canopy at different growth stages of rice under different population size of *C. medialis* (unit: 100 plants) in 2015, 2019 and 2020

不同年份水稻在各虫量水平下的近红外波段冠层反射率在不同生育期有着不同的变化趋势。在拔节期, 2020 年各虫量水平的冠层反射率均低于 2015 年和 2019 年, 差异达到了显著水平, 而 2015 年与 2019 年健康

水稻的反射率曲线相近,2019 年受害水稻的反射率略高于 2015 年。从孕穗期到成熟期,2020 年各虫量水平近红外光区域的吸收减小,其反射率逐渐高于另外两个年份,2015 年与 2019 年的冠层光谱反射率相差不大,两者曲线十分接近,仅在灌浆期 2019 年略高于 2015 年。成熟期各年份冠层反射率变化趋势与孕穗期和灌浆期基本相似,但各水平下三年的光谱反射率之间的差距减小。

### 2.3 不同年份相同卷叶率水平下的水稻特征参数对比

#### 2.3.1 不同年份不同卷叶率水平下叶绿素相对含量(SPAD)的对比

由图 4 可见,不同卷叶率水平下,这三年的水稻 SPAD 值在整个生育期内的变化趋势相似,各年份的 SPAD 值在整个生育期均与卷叶率呈负相关,均随着卷叶率的升高而降低。

不同生育期内三年在各卷叶率水平下的水稻 SPAD 值的变化趋势大体一致,除 2020 年外,总体上均从拔节期到孕穗期不断升高并在孕穗期达到顶点,到了灌浆期出现小幅度的下降,在成熟期,水稻叶片逐渐变黄及枯萎,各年份的 SPAD 值均出现较明显的下降,这与 2.2.1 节的结论相似。

从图 4 中对比不同年份之间的水稻 SPAD 值后发现,在水稻生长前期,多数卷叶率水平中 SPAD 的最大值都出现在 2019 年,而从灌浆期往后,2020 年各水平的 SPAD 值均为三年的最高。整个生育期内各卷叶率水平下 SPAD 的最小值多数都出现在 2015 年,且大多均显著低于另外两年,其相对于另外两年的减幅分别为 1.38%—15.95% 和 0.81%—28.64%。

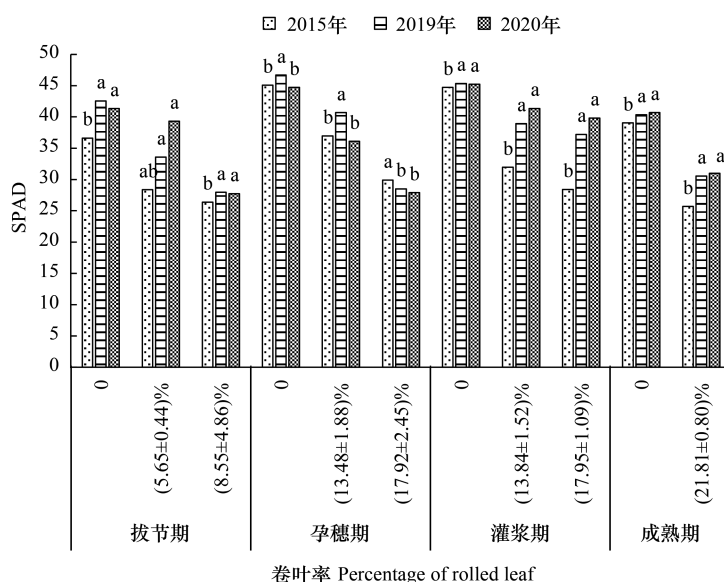


图 4 2015、2019 和 2020 年不同卷叶率水平下水稻各生育期的 SPAD 值

Fig.4 SPAD values at different growth stages of rice under different levels of percentage of rolled leaf in 2015, 2019 and 2020

SPAD: 叶绿素含量相对值 Soil and plant analyzer development

#### 2.3.2 不同年份不同卷叶率水平下水稻冠层光谱反射率的对比

由图 5 可见,三年近红外波段的水稻冠层反射率随着水稻卷叶率的升高而降低,两者呈现出负的相关关系,在水稻生殖生长阶段尤为明显,卷叶率水平高的水稻冠层反射率显著低于卷叶率水平低的水稻以及健康水稻,而成熟期各水平间的反射率差异相对不明显,曲线更加紧密。

从图中还可以发现,随着水稻生育期进程的推进,三年水稻在各卷叶率水平下的近红外波段冠层反射率均表现出相似的变化规律。从拔节期一直到灌浆期,其冠层反射率随着水稻的生长发育不断升高,在灌浆期达到了最大值,而在灌浆期之后水稻叶片叶绿素含量逐渐减少,到了成熟期,水稻叶片逐渐变黄,水稻的反射率出现了大幅度的下降。

不同年份在水稻不同生育期内的近红外波段反射率的变化规律也不相同。拔节期时,2020 年各卷叶率

水平下的冠层反射率均显著低于另外两年,受害水稻各水平中 2019 年的反射率均高于 2015 年。从孕穗期到灌浆期,2020 年大多数水平下的反射率基本为三个年份的最大值,2019 年各水平的反射率均高于 2015 年,但两者的差异并不明显。成熟期三年的反射率从大到小排序为 2020 年>2019 年>2015 年,但三年的反射率曲线都十分接近,其差异相对较小。

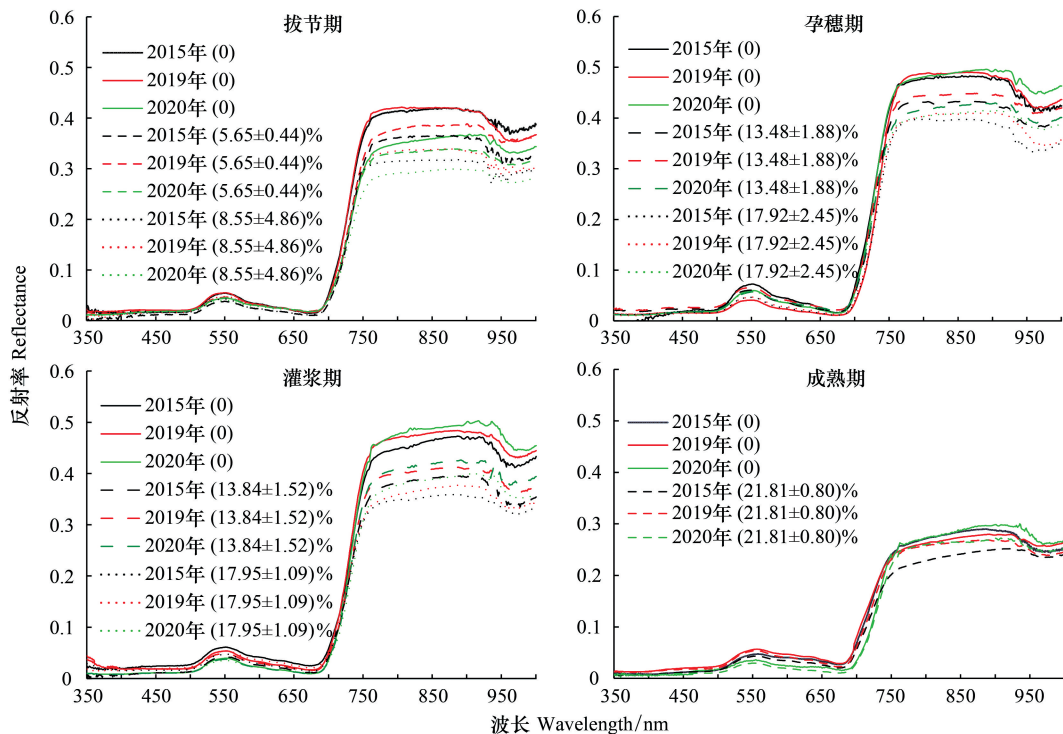


图 5 2015、2019 和 2020 年不同卷叶率水平下水稻各生育期的冠层光谱

Fig.5 Spectral reflectance of rice canopy at different growth stages of rice under different levels of percentage of rolled leaf in 2015, 2019 and 2020

## 2.4 稻纵卷叶螟虫量和水稻卷叶率与冠层高光谱反射率、水稻 SPAD 值和植被指数的相关性

### 2.4.1 各生育期内稻纵卷叶螟虫量和水稻卷叶率与冠层高光谱反射率的相关性

将 2015、2019 和 2020 年稻纵卷叶螟虫量和水稻卷叶率分别与水稻冠层光谱反射率进行相关性分析得到图 6。

从图中可知,在红边波段和近红外波段附近(710—1000nm),三年的虫量均与冠层反射率呈负的相关关系,尤其是在近红外波段处的相关性较强,2019 年和 2020 年在 740—1000nm 均达到了极显著相关性( $P < 0.01$ ),而 2015 年仅在 897—989nm 之间达到显著水平。在可见光波段,除了 2019 年外,另外两年均与冠层光谱反射率保持较弱的正相关关系。

三年的卷叶率均与冠层反射率在红边波段和近红外波段附近(710—1000nm)呈现出负的相关关系,且在 740nm 至 1000nm 均达到了极显著相关性,在可见光波段,2019 年卷叶率在黄-橙光以及红光的部分波段均与反射率呈正相关,2020 年从绿光至红光的部分波段为正相关,两个年份的相关性都较弱,而 2020 年在整个可见光波段均与反射率呈正相关关系,并在 655—691nm 处呈显著相关。

由以上可以看出,不论是虫量还是卷叶率,三年在近红外波段与冠层反射率的相关性表现比较一致,均呈负的相关关系,各年份卷叶率与冠层光谱反射率在近红外波段的相关性均高于虫量,而可见光波段的冠层反射率由于土壤背景的影响,使得不同年份的虫量和卷叶率之间的相关性表现出较大的差异。由此可以归纳出:控制大田和自然大田在单位水稻种植面积上的稻纵卷叶螟虫量和水稻卷叶率越高,其近红外波段的冠层



光谱反射率则越低,相对于可见光波段,近红外波段的冠层反射率对水稻受害程度的变化更加敏感,所以利用近红外波段构建的植被指数更能反映出水稻的受害情况。

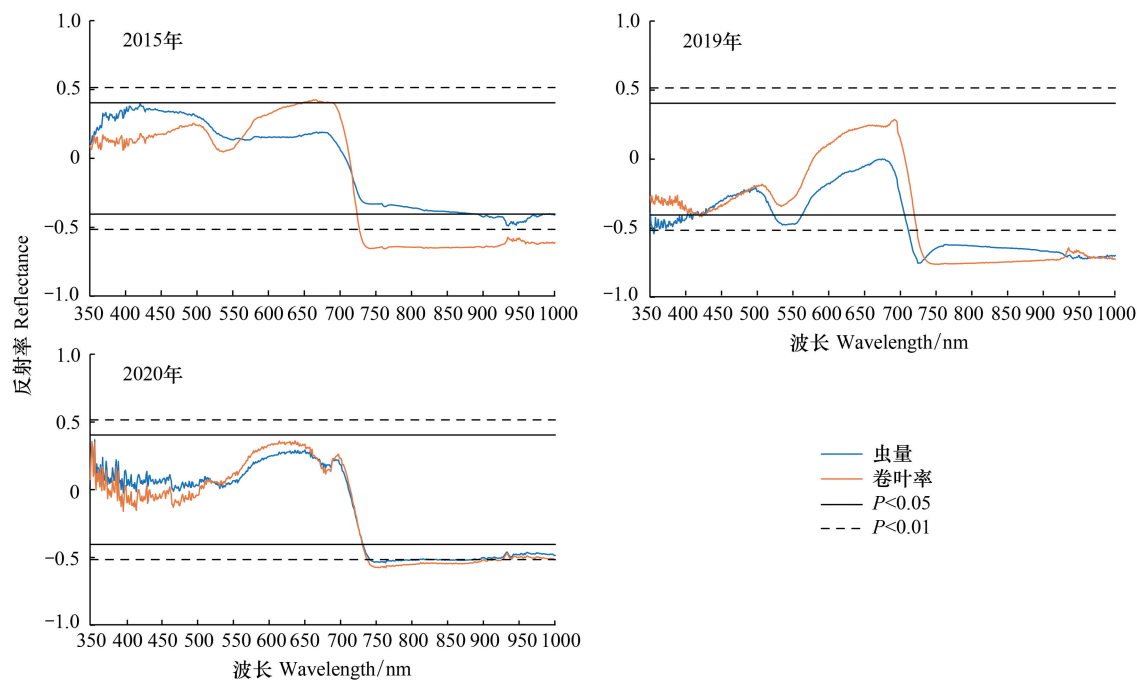


图 6 2015、2019 和 2020 年水稻冠层高光谱反射率与稻纵卷叶螟虫量、水稻卷叶率的相关性

Fig.6 Correlations between the spectral reflectance of rice canopy and population size of *C. medinalis*, the spectral reflectance of rice canopy and percentage of rolled leaf, in 2015, 2019 and 2020

2.4.2 各生育期内稻纵卷叶螟虫量和水稻卷叶率与水稻 SPAD 的相关性

表 2 为三年水稻的稻纵卷叶螟虫量和水稻卷叶率分别与 SPAD 的相关性分析。由表中可以看出,SPAD 值与三年的虫量和卷叶率的相关性都比较强,所有虫量水平和卷叶率与 SPAD 的相关性都达到了显著水平或以上,其中呈现出极显著水平的植被指数超过了总数的 1/2。2020 年虫量与 SPAD 值的相关性高于 2015 年和 2019 年,其相关系数超过 0.6;相反,2015 年和 2019 年卷叶率与 SPAD 的相关性高于 2020 年,其中 2019 年的相关系数为这三个年份中最高的,达 0.7。由此可以得出结论:控制大田和自然大田单位水稻种植面积上的稻纵卷叶螟虫量越多、卷叶率越高,相应的其水稻 SPAD 值越低,稻纵卷叶螟对水稻生长发育和产量形成的危害则越大。

表 2 2015、2019 和 2020 年稻纵卷叶螟虫量和水稻卷叶率与 SPAD 值的相关关系

Table 2 Correlation between the population size of *C. medinalis*, percentage of rolled leaf and SPAD value in 2015, 2019 and 2020

| 虫害发生特征参数<br>Characteristic parameters of pest occurrence | 年份 Year   |           |           |
|----------------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                                          | 2015      | 2019      | 2020      |
| 虫量 Pest number                                           | -0.489 *  | -0.480 *  | -0.663 ** |
| 卷叶率 Percentage of rolled leaf                            | -0.602 ** | -0.700 ** | -0.573 ** |

\* 和 \* \* 分别表示  $P < 0.05$  和  $P < 0.01$  显著性水平;SPAD: 叶绿素含量相对值 Soil and plant analyzer development

2.4.3 各生育期内水稻虫害发生参数和植被指数与 SPAD 值的相关性

选取与虫量和卷叶率相关性较高的波段计算各植被指数,将其分别与 2015、2019 和 2020 年的水稻 SPAD 值进行相关性分析,得到结果如表 3。

从三年总体情况来看,各植被指数与水稻 SPAD 值基本均呈正的相关关系,随着 SPAD 值的升高,各植被指数均出现不同程度的上升。绝大多数植被指数与 SPAD 值的相关性均达到了显著水平,呈极显著性相关的

植被指数也超过了总数的一半,主要集中在 GNDVI、OSAVI、NDVI<sub>705</sub>、RVI、EVI 和 DVI。

从各个年份来看,2019 年的 SPAD 值与植被指数的相关性均高于另外两个年份,几乎所有植被指数的相关性均达到显著水平,呈现出极显著水平的植被指数超过了总数的 2/3,与 OSAVI、RVI、EVI 和 DVI 的相关系数均超过了 0.7,相较于 2019 年,2015 年和 2020 年的 SPAD 值与各植被指数的相关性相对较弱,约 1/2 的植被指数达到了极显著水平,其中与 OSAVI、EVI 和 DVI 的相关性最佳,相关系数均为 0.6 以上。

综上所述,各植被指数与水稻 SPAD 值为正相关关系,SPAD 值越低,植被指数也越低,水稻的生长发育和产量的受害情况也就越严重。OSAVI、EVI 和 DVI 与水稻 SPAD 的相关性最强,三种植被指数均达到了极显著相关水平,且其相关系数的绝对值均在 0.6 以上。因此本文选取 OSAVI、EVI 和 DVI 三种植被指数来进行后续的建模。

表 3 2015、2019 和 2020 年稻纵卷叶螟虫量与植被指数的相关系数

Table 3 Correlation between the population size of *C. medinalis* and vegetation indices of rice in 2015, 2019 and 2020

| 植被指数<br>Vegetation index | 年份 Year  |          |          | 植被指数<br>Vegetation index | 年份 Year  |          |          |
|--------------------------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|----------|
|                          | 2015     | 2019     | 2020     |                          | 2015     | 2019     | 2020     |
| NDVI                     | 0.049    | 0.412 *  | -0.233   | RVI                      | 0.522 ** | 0.708 ** | 0.625 ** |
| GNDVI                    | 0.662 ** | 0.603 ** | 0.574 ** | EVI                      | 0.729 ** | 0.761 ** | 0.619 ** |
| PRI                      | 0.322    | 0.586 ** | 0.288    | TVI                      | 0.052    | 0.416 *  | -0.235   |
| OSAVI                    | 0.712 ** | 0.763 ** | 0.649 ** | DVI                      | 0.792 ** | 0.770 ** | 0.627 ** |
| NDVI <sub>705</sub>      | 0.575 ** | 0.603 ** | 0.515 ** | RDVI                     | 0.372    | 0.641 ** | 0.320    |

## 2.5 基于虫害发生特征参数和植被指数的水稻 SPAD 估算模型及其精度检验

### 2.5.1 基于虫害发生特征参数和植被指数的水稻 SPAD 估算模型

将能够直接反映水稻生长发育状况的 SPAD 值作为因变量,能够直接反映虫害影响的虫量、卷叶率和间接反映水稻生长发育状况的植被指数作为自变量,分别建立单因子的曲线拟合模型和多元逐步回归模型(表 4 和表 5)。由于虫量和卷叶率包含 0 值,无法计算虫量和卷叶率模型项的对数模型。

由表 4 可以看出,植被指数模型对于水稻 SPAD 值的模拟效果均较好,所有模型的复相关系数  $R^2$  均高于 0.5, EVI 的二项式函数的模拟效果最佳,其复相关系数  $R^2$  为 0.575,是所有函数模型中最高的;卷叶率的模拟效果相对较好,四种函数模型的  $R^2$  均超过了 0.4;虫量的估算模型效果最差,仅三次多项式的决定系数  $R^2$  高于 0.4。由此可见, EVI 的指数函数模型对 SPAD 的预测效果为所有单因子模型中最佳的。

将表 5 与表 4 对比后可以看出, SPAD 的多元线性回归模型的拟合效果要优于单因子曲线模型,其决定系数  $R^2$  达到了 0.667,高于所有的单因子模型,且其均根方误差 RMSE 也略低于单因子模型,由此可见, SPAD 的多元线性回归模型的预测效果要优于单因子模型。

### 2.5.2 模型精度验证

选取 2021 年的试验数据(试验设计与 2020 年完全相同)对基于各单因子和多因子所构建的最佳估测模型进行真实性检验,并将 SPAD 的预测值与实测值进行拟合,采用  $R_e^2$  和 RMSE 来评价各估测模型的反演能力,得到图 7 和 8。

从图中可以发现,单因子中由植被指数构建的估测模型的预测效果都比较好,其  $R_e^2$  均超过了 0.8,而多因子构建的多元线性回归模型的  $R_e^2$  高达 0.936,高于所有的单因子模型,达到了比较理想的估算效果,为稻纵卷叶螟危害的水稻 SPAD 值估测提供了一种精度较高且可行的方法。

## 3 结论与讨论

### 3.1 讨论

不论是水稻叶片的叶绿素含量还是冠层光谱反射率均受到稻纵卷叶螟虫害的影响,主要特征体现是稻纵

卷叶螟虫害程度越严重, SPAD 值和冠层的红边至近红外波段的反射率均越低, 而可见光波段的反射率则越高, 这在以往的多项研究中得到验证<sup>[10-13, 30]</sup>。在本研究中, 3 个试验年份的水稻冠层同一生育阶段的可见光波段反射率在不同虫害程度水平之间的相关性均表现出较大的差异, 这可能是因为水稻冠层光谱在采集时, 因不同试验条件(包括有无网罩、灌水深浅、土壤背景差异、周边覆被、天空辐射强弱、以云层覆盖为主的天气条件等)、不同虫害水平对值造成了不同的影响。

表 4 基于虫害特征参数和植被指数的 SPAD 单因子估算模型及其精度检验

Table 4 Single factor estimation model of SPAD and its accuracy test, based on insect characteristic parameters and vegetation indices

| 自变量 $x$<br>Independent variable $x$ | 函数类型<br>Type of function | 估算模型<br>Estimation model                         | $R^2$ | RMSE  |
|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------|-------|-------|
| 虫量<br>Pest number                   | 线性                       | $y = -0.036x + 37.665$                           | 0.270 | 6.692 |
|                                     | 二次多项式                    | $y = 39.932 - 0.108x + 0.0002x^2$                | 0.389 | 6.169 |
|                                     | 三次多项式                    | $y = 41.008 - 0.182x + 0.0008x^2 - 1.117e-6x^3$  | 0.424 | 6.035 |
|                                     | 指数                       | $y = 37.107e^{-0.001x}$                          | 0.281 | 0.270 |
| 卷叶率<br>Percentage of rolled leaf    | 线性                       | $y = -42.528x + 40.309$                          | 0.425 | 5.940 |
|                                     | 二次多项式                    | $y = 41.146 - 56.972x + 35.068x^2$               | 0.434 | 5.937 |
|                                     | 三次多项式                    | $y = 41.819 - 85.253x + 208.728x^2 - 242.858x^3$ | 0.442 | 5.942 |
|                                     | 指数                       | $y = 14.728e^{1.382x}$                           | 0.535 | 0.165 |
| OSAVI                               | 线性                       | $y = 70.433x + 11.078$                           | 0.521 | 5.419 |
|                                     | 二次多项式                    | $y = 10.454 + 74.446x - 6.058x^2$                | 0.563 | 5.179 |
|                                     | 三次多项式                    | $y = 11.712 + 67.342x + 9.051x^3$                | 0.563 | 5.218 |
|                                     | 指数                       | $y = 16.324e^{2.169x}$                           | 0.563 | 5.218 |
|                                     | 对数                       | $y = 47.695 + 24.360\log(x)$                     | 0.556 | 0.162 |
| EVI                                 | 线性                       | $y = 112.484x + 20.575$                          | 0.532 | 5.384 |
|                                     | 二次多项式                    | $y = 21.393 + 95.747x + 76.698x^2$               | 0.535 | 6.294 |
|                                     | 三次多项式                    | $y = 11.712 + 67.342x + 9.051x^3$                | 0.572 | 6.959 |
|                                     | 指数                       | $y = 21.431e^{3.627x}$                           | 0.535 | 0.165 |
|                                     | 对数                       | $y = 59.626 + 22.166\log(x)$                     | 0.521 | 5.419 |
| DVI                                 | 线性                       | $y = 2521.506x - 206.707$                        | 0.563 | 5.168 |
|                                     | 二次多项式                    | $y = 409.789 - 1340.322x + 5937.856x^2$          | 0.563 | 5.209 |
|                                     | 三次多项式                    | $y = -658.496 + 14489.545x - 256596.962x^3$      | 0.563 | 5.209 |
|                                     | 指数                       | $y = 157.148e^{4.112x}$                          | 0.556 | 0.151 |
|                                     | 对数                       | $y = 1608.435 + 465.539\log(x)$                  | 0.560 | 5.182 |

表 5 基于虫害特征参数和植被指数的 SPAD 多元线性回归估算模型及其精度检验

Table 5 Multiple linear regression estimation model of SPAD and its accuracy test, based on insect characteristic parameters and vegetation indices

| 因变量 $y$<br>Dependent variable $y$ | 回归方程<br>Regression equation          | $R^2$ | RMSE    |
|-----------------------------------|--------------------------------------|-------|---------|
| SPAD                              | $y = 19.609 + 52.842DVI - 19.511PRL$ | 0.667 | 4.58681 |

PRL: 卷叶率 Percentage of rolled leaf

水稻植株的红边至近红外波段范围的冠层反射率可反映出水稻本身的生长发育状况, 水稻的长势越旺盛、植被覆盖度越高, 其红边-近红外波段的反射率则相应的越高<sup>[31]</sup>。本研究的结果表明, 自然大田试验的 SPAD 值和红光至近红外波段的冠层反射率在水稻生长发育前期要显著低于控制大田试验, 而到了后期反而要略高于控制大田试验, 这是因为 2020 年水稻生长前期有连阴雨天气, 雨期绵长, 导致水稻缺少光照, 再加之频繁的降雨降低了水稻生长环境的温度, 抑制了水稻前期的光合作用和生长发育, 而到了后期, 前期充沛的雨量有利于水稻后期的生殖生长, 所以在水稻拔节期 2020 年自然大田试验的冠层光谱反射率显著低于 2015 和

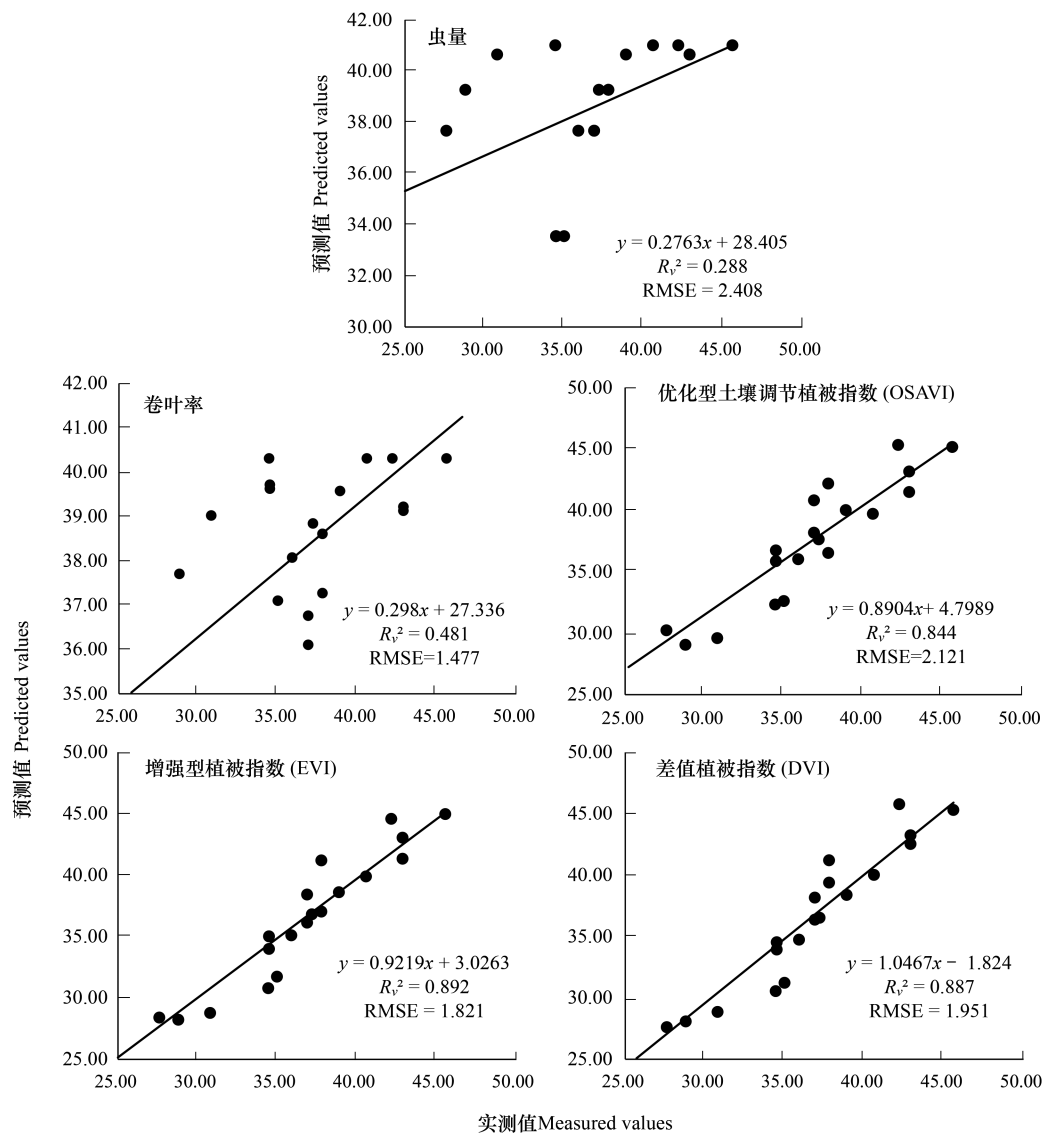


图7 基于多个虫害特征参数和植被指数的单因子估测模型的2021年水稻SPAD实测值与估测值的拟合散点图

Fig.7 Fitted scatter plot of actual and estimated values of SPAD in 2021 based on the single factor estimated models from the multiple pest characteristic parameters and vegetation indices

2019年的控制大田试验,而从孕穗期往后2020年的冠层光谱则远高于控制大田试验。

国内外有许多学者基于植被指数来构建模型对其它作物的叶绿素含量进行估测和反演,如张玮等<sup>[32]</sup>利用植被指数构建干旱胁迫下的雷竹叶片的叶绿素估算模型,袁小康等<sup>[33]</sup>利用三边参数构建植被指数模型对不同灌溉量下玉米叶绿素进行估测等。根据前人的经验,本研究选取了对SPAD变化比较敏感的光谱波段来构建植被指数,结果显示由红边和近红外光区域的光谱波段构建的OSAVI、EVI和DVI三种植被指数与SPAD的相关系数较高;将其与虫害发生参数构建出水稻SPAD的单因子估测模型,在这些估测模型中以EVI的二项式函数的模拟效果最佳,其决定系数为所有模型中的最高值,这可能是因为EVI在提高了对高生物量区域的敏感性的同时也减少了来自大气和土壤的噪声影响,能够更稳定地反应出所测植被的生长情况<sup>[34—35]</sup>;国内外鲜少有研究对受稻纵卷叶螟危害的水稻SPAD建立多因子的线性回归模型,但在其他作物方面,冯子恒等<sup>[36]</sup>针对小麦白粉病进行高光谱监测研究,他发现利用多种数据源对白粉病建立的模型精度明显高于单一数据源,所以本研究将虫害发生参数和植被指数多种数据源相结合构建出水稻SPAD的多因子线性回归估



测模型,其模拟效果相对于单因子都有所提升,这是因为多因子估测模型中的数据源更多,能够从多个方面对植被的长势进行监测和分析,从而更加全面、准确地反映出水稻的受害情况,而单因子只能从某个方面对水稻进行分析,角度比较单一。

以往不少学者针对稻纵卷叶螟为害的水稻各生理生态参数建立过估算模型<sup>[11,30,37]</sup>,但多基于盆钵试验或控制试验,因试验条件(人为控制了水稻生长环境,包括预设了土壤背景、施肥量、灌水量、杀虫措施、光温条件、剔除了其他病虫害和气象灾害影响等)与大田实际生产有着较大的区别,因而导致其反演结果与实际农田中的真实情况存在较大的差异。本研究将控制大田试验(除定期投放虫、网罩隔离其他病虫害影响外,其他条件与实际生产完全一致)与自然大田试验(与实际生产完全一致)相结合,通过无限逼近实际,筛选出两类试验中与水稻生理生态参数相关性高的虫害特征参数

和植被指数,构建出 SPAD 的单因子估算模型并进行了精度评估和实践预测验证,结果表明其中基于虫害特征参数和植被指数相结合构建的多因子估算模型的预测效果比较理想,说明基于大田控制试验与自然大田试验相结合构建出的这些 SPAD 估算模型能较好地反映现实虫害发生背景下水稻生长发育与产量形成的实际,从而为稻纵卷叶螟危害下的水稻 SPAD 值估测提供了一种精度较高且实践可行的估算方法。

由于各种客观或人为因素的影响,本研究中仅对地面冠层光谱的反射率数据进行了采集和分析,单一尺度的遥感观测使得所观测的数据及其反映的稻区稻纵卷叶螟虫害对水稻生长发育和产量形成的影响具有一定的局限性,在今后的研究中我们将会考虑结合无人机遥感和卫星遥感对稻纵卷叶螟为害的水稻生长发育和产量形成进行综合立体观测,在不同的尺度和多尺度融合上对水稻的稻纵卷叶螟虫害进行更深入的研究,进一步提高受稻纵卷叶螟危害的水稻 SPAD 值估算模型的精准度,为科学防控病虫害和保障粮食生产安全提供有效的科技支撑。

### 3.2 结论

本研究通过稻纵卷叶螟采集投放控制的大田试验和纯自然的大田实验,调查了控制小区和采集样点的在不同生育期的虫量和水稻卷叶率变化情况,观测了水稻各生育期的冠层高光谱数据和 SPAD 值,对比分析了两种试验中稻纵卷叶螟的虫害发生特征、水稻冠层高光谱特征和水稻生理生态参数特征,构建并验证了基于稻纵卷叶螟虫害发生特征量及其产生的光谱特征指数的水稻 SPAD 和产量估算模型。研究得到如下结论:

(1) 两种试验的水稻 SPAD 值和冠层的红边至近红外波段的反射率随着稻纵卷叶螟虫害程度的加重而降低,而可见光波段的反射率则相反。

(2) 自然大田试验的 SPAD 值和红光至近红外波段的冠层反射率在水稻生长发育前期要显著低于控制大田试验,而到了后期反而要略高于控制大田试验。

(3) 利用两类试验中相关性较高的植被指数与虫害发生参数分别构建出虫害发生背景下的水稻 SPAD 单因子和多因子估测模型单因子模型中基于 EVI 的二项式函数模拟效果最好,而多因子线性回归估测模型的模拟效果优于所有的单因子模型。

(4) 通过 2021 年对这些模型的应用检验发现:这些模型中基于虫量、卷叶率、OSAVI、EVI 和 DVI 的单因子估算模型的 SPAD 估算值与实测值拟合度很高,其  $R^2$  均超过了 0.8,达到了比较理想的估算效果,这为稻纵卷叶螟危害下的水稻 SPAD 值估测提供了一种精度较高且可行的估算方法。

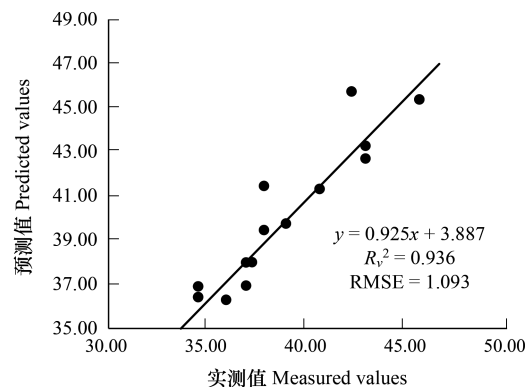


图 8 基于多个虫害特征参数和植被指数的多元线性回归估算模型的 2021 年水稻 SPAD 实测值与估测值的拟合散点图

Fig.8 Fitted scatter plot of actual and estimated values of SPAD in 2021 based on the multiple linear regression estimation model from the multiple pest characteristic parameters and vegetation indices

## 参考文献(References):

- [1] 张素艳,李轲轲,张冬明,田明武. 北方农作物主要病虫害诊断与防控. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2015.
- [2] 包云轩,王明飞,陈桢,陆明红,刘万才. 东亚夏季风进退对我国南方水稻主产区稻纵卷叶螟发生的影响. 生态学报, 2019, 39(24): 9351-9364.
- [3] 韩永强,弓少龙,文礼章,侯茂林. 水稻施用硅肥对稻纵卷叶螟幼虫取食和成虫产卵选择性的影响. 生态学报, 2017, 37(5): 1623-1629.
- [4] 王根,宋元周. 稻纵卷叶螟的发生与防治. 现代农业科技, 2019, (16): 112-112, 114-114.
- [5] 吕国强. 粮棉油作物病虫原色图谱. 郑州: 河南科学技术出版社, 2015.
- [6] 倪合兵. 稻纵卷叶螟的发生规律与绿色防控技术. 安徽农学通报, 2019, 25(23): 79-80.
- [7] 包云轩,曹云,谢晓金,陆明红,李轩,王纯枝,刘万才. 中国稻纵卷叶螟发生特点及北迁的大气背景. 生态学报, 2015, 35(11): 3519-3533.
- [8] 张兵. 高光谱图像处理与信息提取前沿[J]. 遥感学报, 2016, 20(05): 1062-1090.
- [9] 张润杰,古德祥. 以温度为基础的稻纵卷叶螟发育模拟模型. 中山大学学报(自然科学)论丛, 1989, 8(1): 15-23.
- [10] 张桂芬,刘芹轩. 河南省水稻穗期稻纵卷叶螟的危害损失与防治指标的研究. 植物保护学报, 1985, 12(1): 1-7.
- [11] 高文婷. 稻纵卷叶螟对水稻生理生态参数和产量影响的田间试验研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [12] 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. 中国农业科学, 2010, 43(13): 2679-2687.
- [13] 孙启花,刘向东. 稻纵卷叶螟危害孕穗期水稻的光谱诊断. 中国农业科学, 2012, 45(24): 5040-5048.
- [14] 孙嘉铎. 水稻叶片高光谱对虫害的敏感性及其稻飞虱的为害监测[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [15] 孙红,李民赞,周志艳,刘刚,罗锡文. 基于光谱技术的水稻稻纵卷叶螟受害区域检测. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1080-1083.
- [16] Yang C M, Cheng C H, Chen R K. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leafhopper. Crop Science, 2007, 47(1): 329-335.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 15793—2011 稻纵卷叶螟测报技术规范. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [18] 周训. 地下水科学专论. 北京: 地质出版社, 2010: 12-12.
- [19] 汪金花,张永彬,宋利杰. 遥感技术与应用. 北京: 测绘出版社, 2015.
- [20] Josep Peñuelas, Ramón Isla, Iolanda Filella, José Luis Araus. Visible and near-infrared reflectance assessment of salinity effects on barley. Crop Science, 1997, 37(1): 198-202.
- [21] 郑雯. 基于多源多时相遥感数据水稻长势参数提取与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [22] Gamon J A, Peñuelas J, Field C B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. Remote Sensing of Environment, 1992, 41(1): 35-44.
- [23] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(2): 95-107.
- [24] Gitelson A, Merzlyak M N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. Journal of Plant Physiology, 1994, 143(3): 286-292.
- [25] 戴昌达,姜小光,唐伶俐. 遥感图像应用处理与分析. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [26] Huo Q L, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 457-465.
- [27] Gitelson A A, Kaufman Y J, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289-298.
- [28] Richardson A J, Everitt J H. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity. Geocarto International, 1992, 7(1): 63-69.
- [29] Roujean J L, Breon F M. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3): 375-384.
- [30] 周晓,包云轩,王琳,杜正朕,唐倩,陈桢. 稻纵卷叶螟为害水稻的冠层光谱特征及叶绿素含量估算. 中国农业气象, 2020, 41(3): 173-186.
- [31] 王颖,娄运生,石一凡,郑泽华,左慧婷. 夜间增温对稻田甲烷排放的影响及其高光谱估算. 生态学报, 2018, 38(14): 5099-5108.
- [32] 张玮,王鑫梅,潘庆梅,谢锦忠,张劲松,孟平. 干旱胁迫下雷竹叶片叶绿素的高光谱响应特征及含量估算. 生态学报, 2018, 38(18): 6677-6684.
- [33] 袁小康,周广胜,王秋玲,何奇瑾. 不同灌溉量夏玉米叶绿素含量的高光谱特征及其反演. 生态学报, 2021, 41(2): 543-552.
- [34] 王正兴,刘闯, Huete A. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [35] 李美丽,尹礼昌,张园,苏旭坤,刘国华,王晓峰,奥勇,伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [36] 冯子恒,宋莉,张少华,井宇航,段剑钊,贺利,尹飞,冯伟. 基于无人机多光谱和热红外影像信息融合的小麦白粉病监测. 中国农业科学, 2022, 55(5): 890-906.
- [37] 田明璐,班松涛,袁涛,王彦宇,马超,李琳一. 基于无人机平台的稻纵卷叶螟为害程度遥感监测. 上海农业学报, 2020, 36(6): 132-137.