

# 褐飞虱危害在水稻植株光谱反射率上的表现

孙启花 刘向东\*

(南京农业大学 植物保护学院 昆虫学系/农业部作物病虫害监测与防控重点开放实验室, 江苏 南京 210095; \* 通讯联系人, E-mail: liuxd@njau.edu.cn)

## Spectral Characteristics of the Damaged Rice Plant by Brown Planthopper, *Nilaparvata lugens*

SUN Qi-hua, LIU Xiang-dong\*

(Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Monitoring and Management of Crop Diseases and Pest Insects, Ministry of Agriculture, Nanjing 210095, China; \* Corresponding author, E-mail: liuxd@njau.edu.cn)

SUN Qihua, LIU Xiangdong. Spectral characteristics of the damaged rice plant by brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Chin J Rice Sci*, 2010, 24(2): 203-209.

**Abstract:** The reflectance of rice plant damaged by the brown planthopper(BPH, *Nilaparvata lugens*) was measured using an ASD hand-held spectroradiometer. The results showed that the spectral reflectances at the range of wavelengths of visible light and near infrared regions decreased significantly with the increase of the number and instar of BPHs. The damage degrees of rice plants caused by the BPH nymphae with different numbers or at different instars, and by the oviposition behaviour of adult were expressed well by the spectral reflectance in the near-infrared wavelengths. The reflectance was negatively correlated with the number of BPHs, and the correlation coefficients were significant at the range of wavelengths of 520–570 nm and 700–1000 nm. The red edge slope ( $D\lambda_{red}$ ) and red edge area ( $S_{red}$ ) of the reflectance also significantly correlated with the number of nymphae. The linear models for forecasting the occurrence number of BPHs were built using following relative indexes to the undamaged plants: the spectral reflectance at the wavelengths of 550 nm ( $R_{550}$ ) and 760 nm ( $R_{760}$ ), and the red edge indexes ( $D\lambda_{red}$  and  $S_{red}$ ). The accuracy of the models were 53%–79% for the 19 times tests. The factor of  $R_{760}$  was efficient for forecasting the number of BPHs.

**Key words:** brown planthopper; damage degree; hyperspectral remote sensing; spectral reflectance; red edge index; forecast model

孙启花, 刘向东. 褐飞虱危害在水稻植株光谱反射率上的表现. 中国水稻科学, 2010, 24(2): 203-209.

**摘 要:** 利用手持式光谱仪测定了褐飞虱为害后稻株的光谱反射率。在可见光和近红外区, 随褐飞虱虫量和虫龄的增加稻株光谱反射率呈下降趋势, 近红外光区的光谱反射率可很好地表征褐飞虱不同龄期、不同虫量及成虫产卵对稻株的危害程度。各波长处的光谱反射率与褐飞虱虫量间存在明显的负相关, 并且在 520~570 nm 和 700~1000 nm 波长范围内的相关性达到了极显著水平。褐飞虱为害后稻株光谱的红边斜率和红边面积也分别与虫量存在极显著相关。利用虫害后稻株在可见光波长 550 nm 处的反射率( $R_{550}$ )和近红外光区波长 760 nm 处的反射率( $R_{760}$ )、红边参数值与未受害稻株相应值的比值建立了褐飞虱虫量的预测模型, 发现在 19 次预测中, 各模型的预测正确率为 53%~79%, 且  $R_{760}$  因子对褐飞虱虫量有相对较好的预测效果。

**关键词:** 褐飞虱; 危害程度; 高光谱遥感; 光谱反射率; 红边参数; 预测模型

**中图分类号:** S127; S431.9; S435.112+.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-7216(2010)02-0203-07

高光谱遥感为高光谱分辨率遥感(hyperspectral remote sensing)的简称, 它指利用大量很窄的电磁波段(通常波段宽度 $<10$  nm)从感兴趣的物体上获取其表面的反射与辐射等特性指标, 并且这些指标数据能形成一条完整而连续的光谱曲线。该光谱曲线的变化可较好地表征植株内部在营养生理上的细微变化<sup>[1]</sup>。植物受病虫害危害后, 会表现出叶片褪色、变黄等营养不良或叶绿素组织受到破坏的症状。因此, 通过对作物冠层或叶片进行光谱测定, 可间接地分析出作物的受害程度, 从而达到监测病

虫害的目的<sup>[2]</sup>。

国内外利用遥感监测农作物病虫害的研究已有一些报道。Walter 等<sup>[3]</sup>在室内研究了俄罗斯麦蚜和麦二叉蚜为害后小麦叶片的反射光谱特征, 确定了对上述两种虫害最敏感的叶片反射光谱波段。

**收稿日期:** 2009-06-16; **修改稿收到日期:** 2009-09-08。

**基金项目:** 江苏省高新技术研究计划(农业)资助项目(BG2007341)。

**第一作者简介:** 孙启花(1984—), 女, 硕士研究生, E-mail: 2007102088@njau.edu.cn。

Malthus 等<sup>[4]</sup>用地物光谱仪研究了大豆和蚕豆被葡萄菌孢子感染后的反射光谱,发现其一阶反射率变高,可用来监测病害的感染情况。乔红波等<sup>[5]</sup>通过测定不同蚜量为害后烟草冠层光谱反射率的变化发现,烟蚜为害造成烟草光谱反射率下降,且近红外波段反射率下降更为明显。张永强等<sup>[6]</sup>对亚洲玉米螟为害后冠层光谱研究发现,各生育期的食叶级别与对应生育期内的冠层光谱反射率值呈显著负相关,且在 750~900 nm 波长内相关系数较高,可作为虫害监测的敏感波段。陈鹏程等<sup>[7]</sup>对土耳其斯坦叶螨危害程度不同的棉叶进行光谱测试,发现在可见光绿峰两侧波段的光谱反射率随螨害加重逐渐增大,在近红外区 748~863 nm 波段的光谱反射率随螨害加重逐渐减小。石晶晶等<sup>[8]</sup>利用高光谱遥感技术对稻纵卷叶螟为害后水稻进行了识别。Yang 等<sup>[9]</sup>对不同虫量褐飞虱为害后水稻的冠层光谱进行测量,结果表明褐飞虱为害水稻冠层光谱反射率与虫量在 426 nm 波长处达到显著相关。这些研究结果表明,作物遭受病虫害后,在冠层反射光谱上均有明显的表现,光谱监测可以反映作物的受害程度。

不过,目前利用遥感技术来监测病虫害还多处于研究与试验阶段,并且多是在田间对受害作物进行冠层光谱的测定,然后对测定的光谱值与田间实测的病虫害危害程度值进行相关性分析,找出病虫害在光谱特性上的表现。这种研究方法很符合生产实际,有较高的实用性,但是,它受外界环境条件的影响较大,并且大田条件下多种病虫害混合发生,难以找出单种病虫害为害后作物光谱特征的变化规律。另外,由于早期病虫害常具有较高的隐蔽性和不显症性,大田监测往往易错过病虫害的萌发期,而只有能在作物受害未显症前监测出病虫害的发生水平,才可能做到病虫害灾变的早期预测与预警。由此,本研究在室内条件下人为设置不同虫量和虫龄(态)的褐飞虱处理,对其为害后的稻株进行光谱反射率的测定,揭示褐飞虱为害初期在稻株光谱反射率上的表征特点,并构建了虫量预测模型,以期利用高光谱遥感技术监测褐飞虱危害提供理论和方法上的指导。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试水稻及虫源

供试水稻品种为杂交稻汕优 63,在室内光照培养箱内(26℃, 14 h 光照/10 h 黑暗)用水稻培养液

进行无土栽培。当稻株生长到 2 叶 1 心时作为标准苗用于褐飞虱的接种试验。供试褐飞虱于 2008 年 5 月采于广西南宁,在室内用稻苗饲养多代,取龄期一致的个体作为测试虫源。

### 1.2 褐飞虱对稻株的危害

#### 1.2.1 不同虫龄褐飞虱对水稻的危害

将同一批次种植、长势一致的标准稻苗 3 株放于直径为 3 cm、高为 20 cm 的大试管中,加入少量培养液,然后用吸虫器分别吸取 1 龄、2 龄、3 龄、4 龄和 5 龄若虫各 5 头,分别接于备好稻株的大试管中,试管用纱布封口。试虫接完后,定期检查虫口存活量,如有死亡,则用相同龄期及数量的虫体进行补充。以不接虫的稻株为对照,每虫龄 5 次重复。为害 3 d 后的稻株用于光谱反射率和株高的测量。

#### 1.2.2 不同虫量褐飞虱对水稻的危害

采用与 1.2.1 相同的方法,依次在栽有 3 株标准苗的大试管中分别接入 0、3、6、9、12 和 15 头褐飞虱 3 龄若虫,每虫量 5 次重复。为害 3 d 后进行稻株光谱反射率及株高测量。

#### 1.2.3 成虫产卵对水稻的危害

将褐飞虱雄虫、未交配雌虫以及交配 48 h 后(羽化后即配对)的雌虫各 2 头,分别接到标准稻苗上,虫源均为羽化后 48 h 的成虫,5 次重复。为害 10 d 后进行光谱测量,并在解剖镜下检测稻株内的卵量。

### 1.3 稻株光谱反射率测定

采用美国 ASD 公司的便携式光谱仪及其用于室内测定的特制光源,在暗室内对各处理稻株进行光谱反射率的测定。该光谱仪可测定光谱的波段范围为 350~1050 nm,光谱分辨率为 3 nm,采样间隔为 1.41 nm,视场角为 25°。在暗室内,将被测稻株置于黑布上,用三角架将光谱仪固定,使其探头垂直向下正对待测稻株叶片。光谱仪距叶片表面距离 10 cm(视场直径约为 4.4 cm)。光源距稻株叶片表面距离为 20 cm,方位角 45°。光谱仪开机预热 20 min 后连接计算机,光谱测定前先将光谱仪探头对准标准白板进行反射率的优化,每隔 20 min 重新优化 1 次。光谱采样时每个处理连续采集 10 次,以平均值作为该处理的光谱测定值。

### 1.4 数据分析与建模方法

光谱数据由光谱仪传入计算机后,采用光谱仪自带的光谱反射曲线分析软件(View Spec Pro Version 5.0)获得各波段稻株的反射率及其一阶导数。利用一阶微分求取红边并计算红边参数,红边

参数按以下标准确定：1) 红边位置  $\lambda_{red}$ ，红光范围(680~760 nm)内一阶导数光谱最大值所对应的波长；2) 红边斜率(又称红边幅值)  $D\lambda_{red}$ ，红光范围(680~760 nm)内一阶导数光谱的最大值；3) 红边峰值面积(简称红边面积)  $S_{red}$ ，680~760 nm 的一阶导数光谱所包围的面积。

由于在 325~400 nm 和 1000~1050 nm 波长范围内的光谱数据信噪比较低，所以该波段在分析中被剔除。选取 400 nm 的蓝光区、560 nm 的绿光区、680 nm 的红光区以及 760 nm 的近红外光区等光谱曲线中的重要拐点处的光谱反射率，采用 Duncan 氏新复极差比较法，对不同处理间稻株反射率进行差异显著性比较。各波段处稻株的反射率与虫量间的相关性分析采用 Pearson 相关分析法。

采用线性回归分析方法建立褐飞虱虫量的预测模型。由于本研究是分批次在不同时间测定不同虫量为害后稻株的光谱反射率的，为了消除不同批次的稻株与测量误差对光谱反射率的影响，建模时以不同虫量褐飞虱为害后稻株的反射率或红边参数与未受褐飞虱为害稻株的反射率或红边参数的比值为预测因子。利用第一批测定 3、6、9、12 和 15 头飞虱(各 5 次重复)为害后的相对光谱特征值进行建模，以后不同时间测定的 5 批次共 19 个光谱特征值用于模型预测准确率的检验。检验分两种类型，其一是采用卡方检验法对每批次各虫口密度的预测值与实际值进行差异性比较，如果差异不显著，则该批次预测正确，否则预测不正确。所有正确的批次数占总预测批次( $n=5$ )的比率即为模型的预测正确率。其二是将每批次的每个相对光谱值代入模型，得到预测虫量及其变化区间，如果实际虫量在预测值的变化区间范围内，则该次预测准确，所有预测正确的次数占总预测次数( $n=19$ )的比率，则为模型预

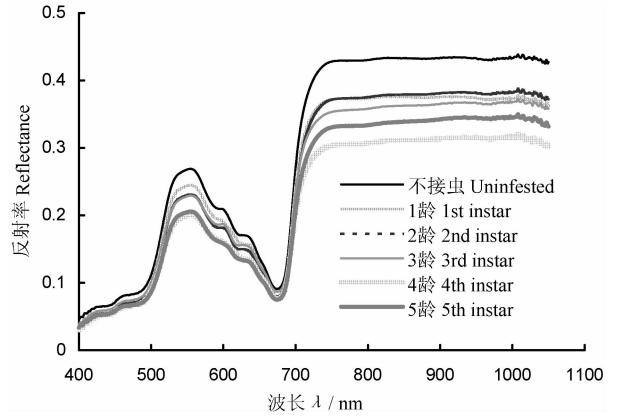


图 1 不同虫龄褐飞虱为害后稻株的光谱反射率  
Fig. 1. Reflectance of rice seedlings infested by different instar nymphae of brown planthopper.

测的正确率。统计分析建模均用 SAS 9.0 软件进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同龄期若虫为害后稻株的光谱反射率

经测定，水稻植株在 1~5 龄褐飞虱若虫为害 3 d 后，株高在各龄期间无显著差异(表 1)，而稻株光谱反射率存在明显的差异，表现为在 500~650 nm 的可见光区和 760~1000 nm 近红外波段光谱反射率随虫龄的增加而下降，且在可见光波段光谱反射率下降幅度不如近红外波段明显。不过，在近红外光区 4 龄若虫为害后的光谱反射率要明显低于 5 龄若虫(图 1)。这可能与本研究选取的 5 龄褐飞虱若虫在为害 3 d 后有部分羽化为成虫有关，羽化过程中褐飞虱的取食较少，因而对稻株的影响小，光谱反射率相应就高。

不同虫龄褐飞虱为害后，稻株在特定波长处的反射率差异的显著性如表 1 所示。560 nm 的绿光

表 1 不同虫龄褐飞虱为害 3 d 后稻苗的株高及植株光谱反射率(平均数±标准差,  $n=5$ )

Table 1. Plant height and reflectance of rice seedling infested by different instar nymphae of brown planthopper for three days (Mean±SD,  $n=5$ ).

虫龄 Instar	株高 Plant height /cm	植株光谱反射率 Reflectance of rice seedling			
		400 nm	560 nm	680 nm	760 nm
不接虫 Uninfested	13.67±0.24 a	0.045±0.003 a	0.267±0.020 a	0.095±0.009 a	0.429±0.011 a
1	13.53±0.61 a	0.036±0.008 b	0.245±0.020 ab	0.086±0.010 ab	0.368±0.007 b
2	13.26±0.15 a	0.035±0.004 b	0.230±0.007 b	0.083±0.004 ab	0.373±0.011 b
3	13.46±0.56 a	0.038±0.003 ab	0.228±0.011 bc	0.090±0.011 ab	0.355±0.018 b
4	12.89±0.71 a	0.029±0.053 b	0.200±0.022 d	0.078±0.010 b	0.305±0.021 d
5	13.13±0.69 a	0.034±0.006 b	0.204±0.010 cd	0.078±0.007 b	0.332±0.017 c

同一列数据后跟相同字母者表示经 Duncan 氏新复极差法测验差异不显著。下表同。

Within a column, data followed by the common letters indicate no significant difference by the Duncan's new multiple range test. The same as in the tables below.

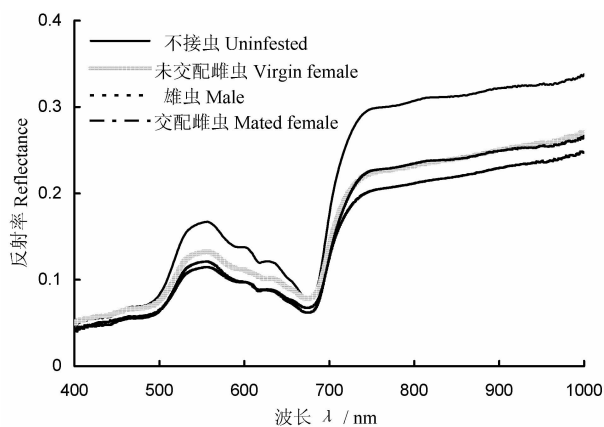


图2 褐飞虱成虫为害后稻株的光谱反射率

Fig. 2. Reflectance of rice seedlings infested by adult of brown planthopper.

区和 760 nm 的近红外光区的反射率在不同虫量为害后稻株上存在显著差异,表现为 560 nm 处无虫为害的对照稻株的反射率显著高于 2~5 龄若虫为害的稻株,1~3 龄若虫为害后的稻株反射率显著高于 4~5 龄若虫为害的稻株,而 4 龄和 5 龄若虫为害的稻株反射率间无显著差异;在 760 nm 处,对照稻株的反射率显著高于 1~5 龄若虫为害的稻株,1~3 龄若虫为害的稻株反射率显著高于 4~5 龄若虫为害的稻株,且 4 龄若虫为害后的稻株反射率显著低于 5 龄若虫为害的稻株。以上结果说明,受 5 头 1 龄若虫为害 3 d 后的稻苗与未受害的稻苗,以及 1~3 龄若虫为害后的稻苗与 4~5 龄若虫为害后的稻苗可通过光谱反射率进行区分。

## 2.2 成虫产卵为害对稻株光谱反射率的影响

从图 2 可知,不接虫处理稻株的反射率在可见光区和近红外光区均明显高于 2 头褐飞虱成虫为害 10 d 后的稻株。在近红外区(>760 nm),被已交配雌虫为害的稻株光谱反射率比接雄虫或未交配雌虫处理都要低,但接未交配雌虫和雄虫处理间没有显

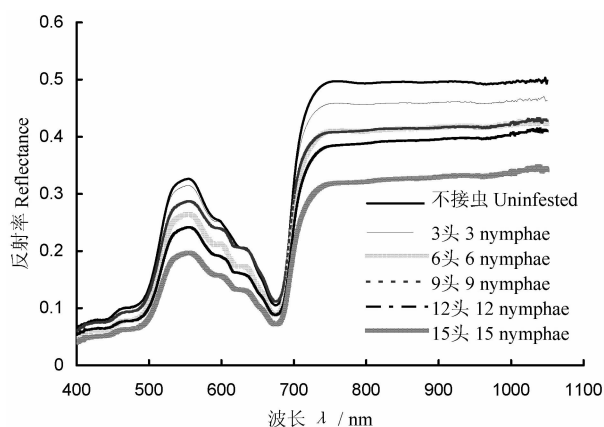


图3 褐飞虱不同虫量 3 龄若虫为害后稻株的光谱反射率

Fig. 3. Reflectance of rice seedlings infested by different number of the 3rd instar nymphae of brown planthopper.

著差异。对雌虫的产卵量进行检测发现,未交配雌虫的产卵量显著少于交配后雌虫,10 d 内平均产卵量未交配雌虫仅为 26 粒/头,而交配过的达 153 粒/头。由此可知,稻株在 760~1000 nm 波段的近红外光区的反射率可敏感地检测出褐飞虱产卵对稻株所造成的细微伤害。

## 2.3 不同若虫量褐飞虱为害后稻株的光谱特征

### 2.3.1 不同虫量为害后稻株的光谱反射率

经测定,不同虫量的 3 龄褐飞虱若虫对稻株为害 3 d 后,稻株的株高除虫量为 15 头的处理与未接虫对照之间有显著差异外,其余虫量间均没有显著差异(表 2)。对稻株光谱反射率测定发现,在可见光区和近红外光区反射率随虫量的增加呈下降趋势,尤其是在可见光绿光区和近红外光区下最明显,近红外光区的陡坡效应受到明显的削弱。同时 720~760 nm 光谱反射率随虫量增加而减小(图 3,表 2)。

对几个特征波长处反射率进行不同虫量处理间的差异显著性分析(表 2),结果表明,在 400 nm 的

表 2 不同虫量褐飞虱为害后水稻株高及植株光谱反射率(平均数±标准差, n=5)

Table 2. Plant height and reflectance of rice seedlings infested by different number of the 3rd instar nymphae of brown planthopper(Mean±SD, n=5).

虫量 Number of nymphae	株高 Plant height /cm	植株光谱反射率 Reflectance of rice seedling			
		400 nm	560 nm	680 nm	760 nm
不接虫 Uninfested	14.06±0.65 a	0.063±0.003 ab	0.323±0.018 a	0.109±0.003 a	0.497±0.029 a
3	13.45±0.62 ab	0.064±0.009 a	0.312±0.023 a	0.108±0.009 a	0.459±0.023 b
6	13.49±0.28 ab	0.050±0.009 c	0.292±0.020 b	0.092±0.017 b	0.411±0.023 c
9	13.45±0.46 ab	0.060±0.009 abc	0.286±0.012 c	0.116±0.012 a	0.409±0.019 c
12	13.33±0.47 ab	0.054±0.005 bc	0.240±0.007 d	0.092±0.003 b	0.385±0.018 c
15	13.10±0.73 b	0.040±0.002 d	0.196±0.014 e	0.074±0.003 c	0.319±0.020 d

蓝光区和 680 nm 的红光区,低虫量的反射率高,高虫量的反射率低,并且在不同虫量间反射率波动较大,难以区分虫量为 6、9、12 头若虫处理间的差异。560 nm 的绿光区的反射率对不同虫量为害相当敏感,稻株的反射率随虫量的增加显著降低。760 nm 的近红外光区 3 头若虫为害后稻株的反射率显著低于无虫对照而高于其他处理,稻株近红外光波区的反射率可明显地区分不接虫处理与接虫量为 3 头若虫处理的稻株。

### 2.3.2 不同虫量褐飞虱为害后稻株光谱的红边参数变化

对不同虫量褐飞虱为害后稻株光谱的红边参数进行分析,发现红边参数中红边斜率和红边面积与虫量的相关性要好于红边位置(表 3)。虫量与红边斜率、红边面积的相关性达到极显著水平,红边也没有发生“红移现象”。以上结果表明,可用红边斜率、红边面积来表征不同虫量褐飞虱对稻株的危害。

### 2.4 基于光谱特征的褐飞虱虫量监测模型的组建与检验

对稻株在不同波长处的光谱反射率与褐飞虱不同虫量进行相关性分析,得到相关系数曲线图(图 4)。由相关系数图可看出在全波段内(400~1000 nm),虫量与光谱反射率间呈负相关,并且在可见光区 445~635 nm 和近红外光区 695~1000 nm 范围内相关性达到显著水平,其中在 520~570 nm 和 700~1000 nm 内的相关性达到了极显著水平。可见光区 550 nm 处相关系数最大,为 0.936,达到了极显著水平;近红外光区 760 nm 处相关系数最大,为 0.971。这说明该波段处的光谱反射率与虫量间有较好的相关性,可以利用该波段处的反射率作为褐飞虱虫量监测的指标。

前面已确定在 550 nm 和 760 nm 波段处的光

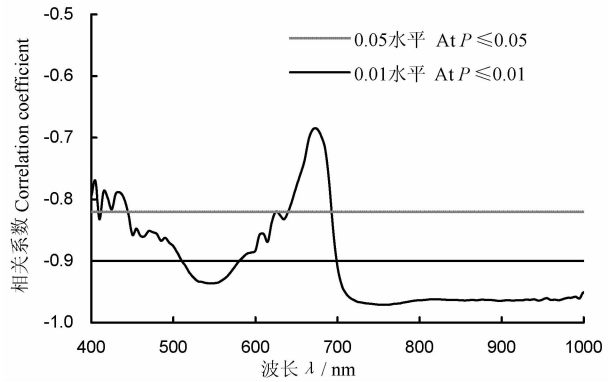


图 4 褐飞虱不同虫量与稻株光谱反射率间的相关系数  
Fig. 4. Coefficients of correlation between the reflectance of rice seedlings and number of brown planthoppers.

谱反射率  $R_{550}$  和  $R_{760}$ ,以及红边斜率和红边面积均与褐飞虱的为害程度显著相关。因此,可以用这些光谱指标建立虫量预测模型,所建模型如表 4 所示。结果表明,稻株的  $R_{550}$ 、 $R_{760}$ 、 $D\lambda_{red}$  和  $S_{red}$  四个指标能较好地反演出褐飞虱虫量多小。如果以每批次为一组进行预测值与实际虫量的卡方检验,其正确率在 80% 以上,并且  $R_{760}$  和  $S_{red}$  单因子,以及  $R_{550} + R_{760}$ 、 $D\lambda_{red} + S_{red}$  的组合模型预测准确率达 100%。分别对 19 次虫口数量进行预测,其准确率为 53%~79%,并且以模型  $Y = 44.053 - 43.940R_{760} \pm 1.730$  的预测准确率最高,达到了 78.95%。

### 3 讨论

褐飞虱为害水稻时具有一定的隐蔽性,这无疑增加了监测的难度和工作量。在室内对稻株光谱进行监测,能够排除田间冠层条件下外界环境因子的干扰,从而发现褐飞虱的危害在稻株光谱特征上的真实表现,为大田条件下水稻褐飞虱的遥感监测打下基础。本研究在暗室条件下,对褐飞虱为害后水

表 3 不同虫量褐飞虱为害后稻株光谱的红边参数(平均数±标准差,  $n=5$ )及其与虫量的相关系数

Table 3. Red edge indices of the reflectance of rice seedlings infested by different number of nymphae of brown planthopper (Mean±SD,  $n=5$ ) and their correlation with number of nymphae.

虫量 Number of nymphae	红边位置 $\lambda_{red}$	红边幅值 $D\lambda_{red}$	红边面积 $S_{red}$
0	695±0.545 a	0.015±0.001 a	0.388±0.020 a
3	694±0.548 a	0.014±0.001 a	0.351±0.016 b
6	695±0.894 a	0.012±0.001 b	0.319±0.020 c
9	694±1.581 a	0.012±0.001 bc	0.293±0.024 c
12	695±1.095 a	0.011±0.004 c	0.294±0.018 c
15	695±0.707 a	0.009±0.001 d	0.244±0.019 d
相关系数 Correlation coefficient ( $r$ )	0.355	0.983**	0.976**

\*\* 达极显著水平。

\*\* Significant at  $P < 0.01$  level.

表4 褐飞虱虫量的预测模型及预测准确率

Table 4. Models and their accuracy for forecasting number of brown planthoppers.

预测模型 Model	模型检验 $R^2$	预测准确率 Accuracy of forecasting/%	
		以批次为样本的卡方检验	以每个光谱值为样本的检验
		$\chi^2$ test by group( $n=5$ )	Test by each value( $n=19$ )
$Y=34.005-31.316R_{550} \pm 2.260$	0.830*	80	63.16
$Y=44.053-43.940R_{760} \pm 1.730$	0.900**	100	78.95
$Y=46.053+8.067R_{550}-54.520R_{760} \pm 2.094$	0.903*	100	73.68
$Y=36.783-36.052D\lambda_{red} \pm 1.279$	0.945**	80	52.63
$Y=44.018-45.240S_{red} \pm 1.500$	0.925**	100	73.68
$Y=34.500+13.365D\lambda_{red}-46.513S_{red} \pm 1.550$	0.947*	100	52.63

\*, \*\* 分别达显著和极显著水平。

\*, \*\* Significant at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively.

稻植株的光谱反射率研究发现,随着龄期及虫量的增加,稻株光谱反射率呈下降趋势,并且确定了 520~570 nm 和 700~1000 nm 为反映褐飞虱危害的敏感波段。另外,对羽化 48 h 的褐飞虱雄虫、未交配雌虫以及交配雌虫为害后稻株进行光谱测量发现,760~1000 nm 波段下稻株的反射率在交配后产大量卵的雌虫与未交配产少量卵的雌虫和雄虫处理间存在显著差异。这可能是因为雌虫产卵时会刺伤水稻茎叶组织,导致水分散失,破坏水稻叶片组织,从而引起近红外光区反射率的降低。本研究结果与其他研究人员在蚜虫、红蜘蛛及飞虱等为害后的作物冠层光谱反射率变化方面有一致性。乔洪波等<sup>[10]</sup>通过对田间不同程度麦蚜危害的小麦冠层光谱反射率与蚜量进行相关分析发现,百株蚜量与 750~900 nm 波段处冠层反射率有很高的相关性,表现为光谱反射率随虫量的增加呈不同程度下降。受白背飞虱不同程度危害的水稻冠层光谱反射率,在近红外波段随虫害程度的加重而下降<sup>[11]</sup>。另外,在室内条件下稻株近红外光波段的反射率可明显地区分无虫为害和 3 头若虫为害 3 d 的稻株,即在褐飞虱为害初期、水稻受害较轻时即可通过光谱反射率的变化检测出危害程度。光谱对虫害的强敏感性,可能与作物受害后,叶片组织中叶绿素、含水量或叶片破坏程度发生明显变化有关,因为这些变化均会在光谱反射率上有明显的表现<sup>[12-14]</sup>,如小麦刚开始受到麦蚜为害时,叶绿素含量就明显降低<sup>[11]</sup>。由此表明,稻株光谱反射率特性确实可敏感地反映出褐飞虱对水稻的细微危害。

安虎等<sup>[15]</sup>测定了小麦条锈病各级别单片病叶发病区的光谱反射率,选择反射率与危害严重程度相关性最强的波段(670~690 nm),建立了危害程度模型( $Y=0.577+0.795R_{685}-0.603R_{690}$ )。江道

辉等<sup>[16]</sup>建立了受条锈病影响的小麦叶绿素含量(Y)与各波段光谱反射率间的预测模型( $Y=46.192-186.304R_{470}+19.116R_{550}-318.574R_{635}+447.491R_{680}-23.991R_{800}$ ),并且模型有较好的精确度。在害虫危害的光谱特性反演模型方面,邱白晶等<sup>[11]</sup>对田间水稻冠层反射光谱与白背飞虱百株虫量进行相关分析,确定了近红外波段 779 nm 和 1685 nm 及可见光波段 558 nm 处的反射率可较好地反映白背飞虱的虫害程度,并确定利用 779 nm 处的光谱反射率来反演白背飞虱的危害为最优。张永强等<sup>[6]</sup>发现亚洲玉米螟为害后玉米单株单粒干质量(Y)与敏感波段 810 nm 处的反射率( $R_{810}$ )间存在较为稳定的线性关系( $Y=9.11+347.42R_{810}$  ( $r=0.78^{**}$ )),用它来预测玉米螟危害的精度较高。本研究选用多种光谱指标,建立了预测褐飞虱虫量的模型,发现 550 nm 和 760 nm 处的光谱反射率,以及红边斜率、红边面积均可较好地反映褐飞虱的虫害程度,所得模型对未参与建模的 5 批次系列虫量的预测准确率均在 80% 以上,而对随机的 19 个虫量预测准确度为 53%~79%,有一定的利用价值。

当然,该项研究仅是在室内进行的标准情况下的褐飞虱为害试验,揭示的是虫害与稻株光谱反射率间的理论关系,结果是完全可靠的。但是,田间稻株及光谱测定时所受的影响因子较多,因此,该项结果在田间的应用还需要结合田间的实际情况,对已得到的预测模型进行校正与调整,或者在已确定的敏感波段与规律基础上,重新组建基于光谱反射率的褐飞虱虫量模型,从而为田间褐飞虱数量的自动化监测服务。

#### 参考文献:

[1] 浦瑞良, 宫 鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版

- 社, 2006.
- [2] 谢佰承, 陆魁东, 帅细强, 等. 遥感技术在水稻病虫害监测中的应用. 安徽农学通报, 2006, 12(13): 81-82.
- [3] Riedel W E, Blackmer T M. Leaf reflectance spectra of cereal aphid-damaged wheat. *Crop Sci*, 1999, 39: 1835-1840.
- [4] Malthus T J, Maderia A C. High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by *botrytis fabae*. *Remote Sens Environ*, 1993, 45: 107-116.
- [5] 乔红波, 蒋金炜, 程登发, 等. 烟蚜为害特征的高光谱比较. 昆虫知识, 2007, 44(1): 57-61.
- [6] 张永强, 文丽萍, 石洁, 等. 亚洲玉米螟为害后玉米冠层光谱变化和产量损失研究. 植物保护, 2007, 33(5): 54-57.
- [7] 陈鹏程, 张建华, 李眉眉, 等. 土耳其斯坦叶螨为害棉叶的生理变化及光谱特征分析. 昆虫知识, 2007, 44(1): 61-65.
- [8] 石晶晶, 刘占宇, 张莉丽, 等. 基于支持向量机(SVM)的稻纵卷叶螟危害水稻高光谱遥感识别. 中国水稻科学, 2009, 23(3): 331-334.
- [9] Yang C M, Cheng C H, Chen R K. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leafhopper. *Crop Sci*, 2007, 47: 329-335.
- [10] 乔洪波, 程登发, 孙京瑞, 等. 麦蚜对小麦冠层光谱特性的影响研究. 植物保护, 2005, 31(2): 21-25.
- [11] 邱白晶, 陈国平, 程麒文. 水稻白背飞虱虫害的冠层光谱特征与虫量反演. 农业机械学报, 2008, 39(9): 92-95.
- [12] 何国金, 胡德永, 金小华, 等. 北京麦蚜虫害的光谱测量与分析. 遥感技术与应用, 2002, 17(3): 120-123.
- [13] Inoue Y, Morinaga S, Shibayama M. Nondestructive estimation of water status of intact crop leaves based on spectral reflectance measurements. *Jpn J Crop Sci*, 1993, 62: 462-469.
- [14] 吴达科, 马承伟, 杜尚丰. 斑潜蝇虫害叶片受害程度对其近红外反射光谱的影响. 农业工程学报, 2007, 23(2): 157-158.
- [15] 安虎, 王海光, 刘荣英, 等. 小麦条锈病单片病叶特征光谱的初步研究. 中国植保导刊, 2005, 25(11): 8-10.
- [16] 江道辉, 李章成, 周清波, 等. 条锈病影响下冬小麦叶绿素含量的高光谱估计. 农业信息科学, 2007, 23(1): 376-380.