

白背飞虱危害水稻虫量的叶片光谱监测*

孙嘉怿** 刘向东***

(南京农业大学植物保护学院昆虫学系, 南京 210095)

摘要 【目的】利用水稻叶片光谱反射率建立白背飞虱 *Sogatella furcifera* 虫量的监测模型, 为稻飞虱的光谱监测提供方法支持。【方法】在水稻分蘖期和孕穗期分别人工接种不同数量的白背飞虱 3 龄若虫, 使水稻受到不同程度的危害; 在暗室利用 ASD 手持式光谱辐射仪测定白背飞虱为害 1-4 周后水稻倒 4 单叶和全部叶片的光谱反射率; 采用相关性分析方法确定叶片光谱反射率和植被指数与白背飞虱虫量的关系; 运用逐步回归建模方法组建基于植被指数的白背飞虱虫量监测模型。【结果】稻株倒 4 单叶和全部叶片的光谱反射率不能很好表征水稻分蘖期受 20 头/株以内白背飞虱为害 1-2 周和孕穗期受 30 头/株以内白背飞虱为害 1 周的虫量大小, 但为害 3-4 周时叶片反射光谱均有稳定波段区域与虫量显著相关。分蘖期倒 4 单叶和全叶在 440 和 680 nm 处反射率可区分 16 头/株白背飞虱为害 3 周时的虫量, 680 和 760 nm 处反射率可区分 12 头/株白背飞虱为害 4 周时的虫量; 孕穗期全叶 680 和 760 nm 处反射率可区分 30 头/株白背飞虱为害 3 周时的虫量, 倒 4 单叶在 760 nm 处反射率可区分 12 头/株白背飞虱为害 4 周时的虫量。在白背飞虱为害分蘖期和孕穗期稻株 3 和 4 周时, 倒 4 单叶在 400-1 000 nm 范围内的差值 (DVI)、比值 (RVI) 和归一化 ($NDVI$) 植被指数与虫量相关程度高的光谱波段区域较为稳定, 并且 DVI 与虫量的相关性强于 RVI 和 $NDVI$ 。分别建立了基于倒 4 单叶 DVI 的分蘖期和孕穗期稻株为害 3 和 4 周时的白背飞虱虫量的逐步回归模型, 模型均方根误差在两水稻生育期分别约为 4 和 5-8 头/株。【结论】稻叶光谱反射率对白背飞虱为害虫量的表征能力受水稻生育期和为害时长的影响。稻株受白背飞虱为害 2 周后, 倒 4 单叶和全叶的光谱反射率在稳定波段区域内均与白背飞虱虫量存在显著相关性, 叶片光谱的差值植被指数与白背飞虱虫量相关稳定, 可用于建立虫量监测模型。

关键词 白背飞虱; 种群数量; 光谱反射率; 植被指数; 回归模型

Monitoring *Sogatella furcifera* population size based on the spectral reflectance of rice leaves

SUN Jia-Yi** LIU Xiang-Dong***

(Department of Entomology, College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract [Aim] Models for monitoring the population size of the white-backed planthopper (WBPH), *Sogatella furcifera*, were established using the spectral reflectance of rice leaves to provide methodological support for the spectral monitoring of rice planthoppers. [Methods] The degree of WBPH damage to rice plants was manually controlled by transplanting different numbers of third instar nymphs onto the tillering and booting stages of rice plants. Reflectance measurements were taken from the fourth leaf from top (4LFT) and all leaves of the rice plant 1-4 weeks following WBPH infestation using an ASD FieldSpec handheld spectroradiometer in a dark room. Correlation analysis was used to determine the relationships between leaf spectral reflectance, spectral vegetation index, and the number of WBPHs on the rice plant. Regression models for monitoring the WBPH population size were established using the stepwise regression modeling method based on the spectral vegetation index. [Results] Spectral reflectance from the 4LFT and all leaves of a rice plant was unable to characterize a population size of up to 20 WBPHs per plant after 1-2 weeks of damage during the tillering stage, or 30 individuals per plant after 1 week of damage

*资助项目 Supported projects: 江苏省现代农业-重点及面上项目 (BE2022387); 国家重点研发计划 (2021YFD1401102)

**第一作者 First author, E-mail: 119934287@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuxd@njau.edu.cn

收稿日期 Received: 2022-10-20; 接受日期 Accepted: 2023-04-10

during the booting stage. However, after 3-4 weeks of damage, the leaf spectral reflectance had stable bands and was significantly correlated with WBPH population size. At 440 and 680 nm, the reflectance of single and whole leaves at the tillering stage was sufficient to distinguish a population size of 16 WBPHs per plant damaged over 3 weeks, and at 680 and 760 nm, the reflectance was sufficient to distinguish 12 WBPHs per plant after 4 weeks of damage. The reflectance of all leaves at 680 and 760 nm during the booting stage was sufficient to detect 30 WBPHs per plant after 3 weeks of damage, while the reflectance of the 4LFT at 760 nm could detect 12 WBPHs per plant after 4 weeks of damage. In rice plants damaged by WBPH during the tillering and booting stages for 3 and 4 weeks, there was a significant correlation between the spectral bands and the difference vegetation index (DVI), ratio vegetation index (RVI), and normalized vegetation index (NDVI) of the 4LFT single leaf in the spectral range of 400-1 000 nm. Additionally, the WBPH population size remained relatively stable, showing a stronger correlation with DVI than with RVI and NDVI. Stepwise regression models were established to monitor WBPH population size during the tillering and booting stages of rice plants damaged for 3 and 4 weeks, based on the DVI of the 4LFT. The root mean square error of these models was approximately 4 and between 5-8 WBPHs/plant for the tillering and booting stages, respectively. [Conclusion] The ability of rice leaf spectral reflectance to determine WBPH population size is affected by the growth stage of rice and the duration of WBPH damage. After two weeks of WBPH damage, there was a significant correlation between the spectral reflectance of both the 4LFT single leaf and all leaves and WBPH population size in the stable band regions. The DVI of leaf spectra shows a stable correlation with WBPH population size, which can be used to establish a pest monitoring model.

Key words *Sogatella furcifera*; population size; spectral reflectance; vegetation index; regression model

作物受病虫危害后, 叶片内叶绿素、水分和叶肉细胞结构等会发生变化, 从而引起叶片反射和辐射的电磁波能量改变, 表现为在某些特定波长位置的反射光谱变化, 因此可根据作物光谱特征反演作物受病虫危害的程度。作物叶片冠层的反射光谱具有表征作物受病虫危害程度的能力(蒋金豹等, 2010; 孙启花和刘向东, 2010, 2012; Huang *et al.*, 2015; 田明璐等, 2022; 郑欣飞等, 2022)。受麦蚜危害后, 小麦冠层光谱的红边斜率随着危害程度加重而逐步下降, 红边斜率有表征麦蚜危害水平的潜力(乔红波等, 2005)。Coops等(2006)研究发现, 利用山松在红光区(630-690 nm)与绿光区(520-600 nm)反射率的比值可识别出受甲虫为害的树冠。水稻受白背飞虱 *Sogatella furcifera* 危害后, 可利用单叶在 514-602、697-1 339、1 501-1 749 及 2 101-2 299 nm 的光谱反射率反演白背飞虱的危害水平, 同时水稻冠层可见光区 558 nm 及近红外区 779 和 1 685 nm 可作为白背飞虱危害监测的敏感光谱波段, 并且利用基于敏感波段的比值植被指数 RVI (Ratio vegetation index) 建立的虫量预测模型最优(邱白晶等, 2008; 吴昊等, 2009)。虽然现今已有一些有关作物受虫害后光谱特征方

面的研究, 并且建立了反演虫量或危害程度的模型, 但是光谱监测虫害在田间的应用尚未实现。究其原因可能是作物光谱不仅受病虫危害的影响, 而且随作物的生育期和其他环境条件的变化而变化, 因此对作物特定时段或条件下病虫危害后的光谱进行分析, 建立的反演病虫危害的光谱模型还难以应用于作物各生育期病虫害的监测。鉴于此, 有必要对害虫在作物不同发育阶段、危害不同时间后的光谱特征进行系统研究, 建立适用于不同情景条件的害虫光谱监测模型, 这样才有可能应用于田间的病虫监测。

白背飞虱是我国水稻上的重要害虫, 其成虫、若虫群集于稻丛基部刺吸稻株韧皮部汁液, 造成稻叶褪绿变黄、水稻生长缓慢、瘪粒增加; 为害严重时, 可造成稻株枯死。由于白背飞虱位于稻株基部危害, 隐蔽性强, 田间调查工作量大, 监测难度相对较高(姜玉英等, 2021)。前人已发现水稻冠层和叶片光谱反射率与白背飞虱的危害相关(邱白晶等, 2008; 吴昊等, 2009), 但是已有的研究尚未涉及水稻不同生育期受害后的光谱特征和监测模型。白背飞虱常在水稻分蘖期开始危害, 因此, 本研究在室内条件下, 在分蘖期和孕穗期稻株上分别接种不同虫量的白

背飞虱, 危害不同天数后对稻株倒 4 单叶和全部叶片进行光谱反射率测定, 从而在可控的稳定条件下阐明白背飞虱危害后水稻的叶片光谱特性, 构建监测白背飞虱虫量的光谱指数和模型, 为下一步组建稻田白背飞虱的光谱监测系统提供敏感波段、光谱指数和建模方法。

1 材料与方法

1.1 供试水稻和飞虱

供试水稻品种为武运梗 7 号, 每株种植于一个 500 mL 装满有机栽培基质 (江苏兴农基质科技有限公司) 的一次性塑料杯中, 在玻璃温室 (温度 25-30 °C、相对湿度 70% 左右, 自然光照) 中种植。及时剪除分蘖, 即生长期仅保留主茎, 以保证所测飞虱完全在单一水稻茎秆上取食, 接虫后如有新分蘖长出也同样剪除, 叶片光谱反射率的变化由供试飞虱取食为害所引起。

供试白背飞虱采于南京农业大学试验田 (南京浦口), 采回后在室内光照培养箱中 (27 °C, 12 L : 12 L) 用武运梗 7 号稻苗饲养多代备用。

1.2 白背飞虱接虫处理

在水稻分蘖期 (移栽后 40 d) 和孕穗期 (移栽后 60 d) 分别进行白背飞虱不同虫量的接种。在分蘖期每株水稻上依次接入 0、4、8、12、16 和 20 头白背飞虱 3 龄若虫。同样在孕穗期依次接入 0、6、12、18、24 和 30 头白背飞虱 3 龄若虫。接虫后, 稻株用高 1 m、直径 14 cm 的透明玻璃纸笼罩罩严, 以防飞虱逃逸和其他害虫进入, 笼罩上部用纱布封口, 以透气、透光。每接虫数量处理 5 次重复。接虫后, 分别在为害 1、2、3 和 4 周时进行稻株叶片的光谱测量。

1.3 稻株叶片光谱反射率测定方法

采用美国 ASD 公司的野外便携式光谱仪及其室内测定的特制光源 50 W 卤素灯, 在暗室内对各处理稻株叶片进行光谱反射率测定。该光谱仪可测定光谱的波段范围为 350-1 050 nm, 光谱分辨率为 3 nm, 采样间隔为 1.41 nm, 视场角为 25°。试验前, 将光谱仪和光源分别通过特定装

置固定在暗室内, 使光谱仪垂直距离叶片表面 15 cm, 光源距稻株叶片表面距离为 40 cm, 方位角为 45°。整个测定过程中光谱仪和光源的位置保持固定, 即光谱取样区域范围固定。试验时, 将被测稻株叶片平铺置于黑布上, 其最宽处向上正对光谱仪探头。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校正, 每测完 3-5 株重新校正一次。光谱测定在暗室内进行。测定时, 将被测稻株各叶片剪下, 剪口处用湿润黑布包裹, 降低叶片失水, 先测定倒 4 叶光谱反射率, 然后按照叶位从中间向两边平铺摆放于黑布上, 测定全部叶片光谱反射率。每稻株叶片进行连续 5 次采集, 以其平均值作为该稻株叶片的光谱值。

1.4 数据分析

光谱数据由光谱仪传入计算机后, 采用光谱仪自带的光谱分析软件 (View Spec Pro Version 5.0) 获得各波段稻株叶片的光谱反射率, 由于背景黑布无反射能力, 因此所测固定区域的光谱反射率均来自叶片。采用 Duncan 氏新复极差比较法, 对不同虫量危害后稻株叶片光谱反射率进行差异显著性比较, 确定光谱反射率可区分的最小虫量。根据各虫量危害后稻叶的反射率是否存在显著差异来判断叶片光谱区分白背飞虱虫量的能力, 与不接虫的稻叶差异显著则定为可以区分, 不显著则不能区分。采用 Pearson 相关分析法对各波段处稻叶的反射率以及 400-1 000 nm 范围内两两波段反射率所组成的 3 类植被指数与危害稻株白背飞虱虫量间的相关性进行判定, 其中 3 类植被指数为: 差值植被指数 $DVI_{1-2} = R_1 - R_2$ 、比值植被指数 $RVI_{1/2} = R_1/R_2$ 、归一化植被指数 $NDVI_{1-2} = (R_1 - R_2)/(R_1 + R_2)$, 其中 R_1 和 R_2 为 2 波段处的反射率, 以相关系数大小做各波段植被指数的热图, 确定与虫量相关稳定的波段组合区域。选取同一为害时间下 3 类植被指数与白背飞虱虫量均呈显著相关水平的波段组合, 组建三类植被指数。以植被指数为预报因子, 采用逐步回归方法建立白背飞虱虫量监测模型, 以模型预测虫量和实际虫量间相关显著性及均方根误差大小判断模型监测效果。全部数据统计分析均

在 SPSS 25.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 分蘖期和孕穗期稻株受白背飞虱危害后的光谱特征

在分蘖期水稻上按 0-20 头/株不等密度接入 3 龄白背飞虱若虫, 为害 1 和 2 周后稻株倒 4 单叶和所有叶片的光谱反射率与白背飞虱虫量的相关性在 400-1 000 nm 区域内均不显著(图 1: A), 502-653 nm 处与虫量呈显著负相关(图 1: B), 而在近红外 703-1 000 nm 处的反射率与虫量显著正相关(图 1: C, D), 这与飞虱危害会造成 580-680 nm 波段处反射率上升而近红外波段反射率下降的常理不符, 由此表明分蘖期稻叶的光谱反射率不宜用于白背飞虱为害 1-2 周时虫量的监测。但是当白背飞虱为害 3 和 4 周时, 倒 4 单叶和整株全叶的反射率在 400-520 nm 和 574-702 nm 区域内均存在与虫量呈显著正相关的波段, 而在 716-1 000 nm 范围内均存在与虫量呈显著负相关的波段(图 1: E-G), 由此表明, 分蘖期稻株单叶和全部叶片的光谱反射率可用于表征白背飞虱为害 3-4 周时的虫量(图 1: E-H)。

分蘖期稻株受不同虫量的白背飞虱为害后, 在稻叶光谱反射率与虫量显著相关的 3 个波段区域各选取 1 代表性波段 440、680 和 760 nm, 比较 3 波段处反射率在各为害虫量间的差异, 以判断该波段光谱可区分的最低为害虫量(表 1), 结果表明, 分蘖期水稻倒 4 单叶和整株全叶在 440 和 680 nm 处的光谱反射率可区分为害 3 周的最低虫量为 16 头/株, 而 760 nm 的反射率可区分为害 3 周的最低虫量为 20 头/株(表 1); 440 nm 处反射率可区分为害 4 周的最低虫量为 20 头/株, 680 和 760 nm 处反射率可区分为害 4 周的最低虫量为 12 头/株。稻株单叶和全叶光谱区分虫量的能力基本一致(表 1)。

孕穗期稻株受不同虫量白背飞虱为害 1 周时, 倒 4 单叶和全叶光谱反射率均与虫量在全波段内均呈正相关关系(图 2: A, B), 这与常理

不符, 因此叶片光谱不能反映此时白背飞虱的为害虫量。为害 2 周时, 稻株倒 4 单叶的反射率在 455-509 nm 波段处与虫量显著正相关, 在近红外 698-1 000 nm 区域与虫量显著负相关(图 2: C); 稻株全叶片在 400-513 nm 和 595-700 nm 的反射率与虫量正相关(图 2: D)。危害 3 周时, 稻株倒 4 单叶的反射率在 424-511 nm 和 576-700 nm 与虫量显著正相关, 在近红外区域 723-1 000 nm 与虫量显著负相关(图 2: E); 稻株全叶片 619-694 nm 的反射率与虫量显著正相关, 其他波段与虫量相关不显著(图 2: F)。危害 4 周时, 倒 4 单叶反射率在 663-681 nm 处与虫量正相关, 在 511-577 nm 和 701-1 000 nm 与虫量负相关(图 2: G); 整株全叶 411-500 nm 和 638-694 nm 处反射率与虫量正相关, 528-561 nm 和 708-1 000 nm 处的反射率与虫量负相关(图 2: H)。这些结果表明, 孕穗期稻株叶片光谱可反映白背飞虱为害 2-4 周时的虫量大小, 倒 4 单叶的近红外波段 700-1 000 nm 反射率在为害 2-4 周中均与虫量呈显著负相关, 但整株叶片的仅在为害 4 周时才显著相关, 孕穗期倒 4 单叶光谱表征白背飞虱虫量比全叶敏感(图 2)。

孕穗期水稻受白背飞虱不同虫量为害后, 倒 4 单叶和整株全叶在 440 nm 处的反射率(R_{440})均不能区分 0-30 头/株白背飞虱为害 3 和 4 周的虫量。白背飞虱在孕穗期为害 3 周时, 倒 4 单叶在 680 nm 处的反射率(R_{680})可以区分的最低虫量为 30 头/株, 但不能区分为害 3 周的虫量; 全叶 R_{680} 可区分最低 30 头/株白背飞虱为害 3 和 4 周的虫量。孕穗期倒 4 叶 760 nm 处反射率(R_{760})可区分最低 12 头/株白背飞虱为害 4 周的虫量, 但不能区分为害 3 周的虫量; 整株全叶的 R_{760} 能区分最低 30 头/株白背飞虱为害 3 周和 24 头/株为害 4 周的虫量(表 2)。

分蘖期和孕穗期水稻受白背飞虱危害后的叶片光谱对虫量的反应大致相同, 但敏感程度存在差异, 分蘖期水稻受害后 1 和 2 周时叶片光谱反射率均不能表征虫量大小, 但可以表征孕穗期水稻受害 2 周时的虫量(图 1, 图 2); 在 440 nm 处的光谱反射率可区分分蘖期 12-20 头/株白背

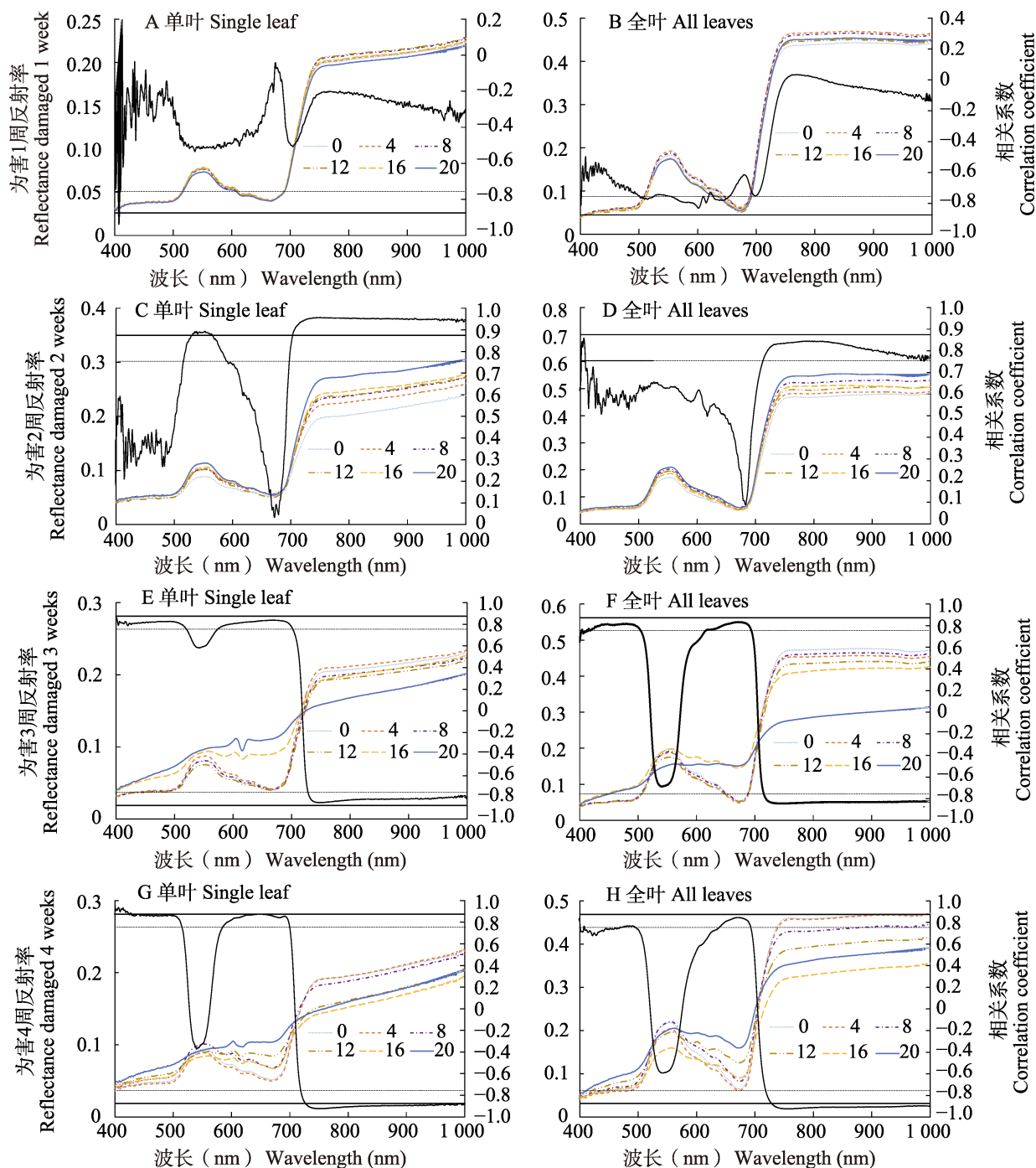


图 1 分蘖期水稻受 0-20 头白背飞虱危害 1-4 周后倒 4 单叶 (A、C、E、G) 和整株全叶 (B、D、F、H) 的光谱反射率及其与虫量的相关性

Fig. 1 Reflectance of the fourth leaf from top (A, C, E, G) and all leaves (B, D, F, H) of the tillering stage of rice plant damaged by 0-20 *Sogatella furcifera* for 1-4 weeks and the correlation between the number of *Sogatella furcifera* and reflectance

粗黑实曲线表示反射率与虫量间的相关系数, 水平虚、实线代表相关显著 ($P < 0.05$, t 检验) 和极显著的相关系数水平 ($P < 0.01$, t 检验)。图 2 同。

The bold curve means the correlation coefficient between the number of *S. furcifera* and reflectance. Dash and solid horizontal lines mean the significant levels of the correlation coefficient at 0.05 and 0.01 by t -test, respectively. The same for Fig. 2.

表 1 白背飞虱 0-20 头为害分蘖期稻株 3 和 4 周后倒 4 单叶和整株叶片的光谱反射率
Table 1 Spectral reflectance from the fourth leaf from top and all leaves of the tillering stage of rice damaged by 0-20 *Sogatella furcifera* for 3 and 4 weeks

为害时长 Duration of damage	虫量 Number	倒 4 单叶反射率 Reflectance from the fourth leaf from top				整株稻叶反射率 Reflectance from all leaves			
		R_{440}	R_{680}	R_{760}	R_{440}	R_{680}	R_{760}	R_{440}	R_{760}
3 周 3 weeks	0	0.037 6±0.001 5 b	0.045 2±0.002 0 b	0.204 7±0.008 2 a	0.048 9±0.002 5 b	0.057 5±0.007 0 b	0.472 0±0.033 0 a		
	4	0.037 9±0.001 51 b	0.046 0±0.002 0 b	0.209 4±0.008 2 a	0.048 5±0.002 6 b	0.052 0±0.004 6 b	0.453 1±0.043 5 a		
	8	0.036 5±0.001 4 7 b	0.044 1±0.002 6 b	0.198 1±0.011 1 a	0.049 3±0.003 2 b	0.055 6±0.007 2 b	0.458 8±0.048 2 a		
	12	0.036 6±0.000 6 9 b	0.043 7±0.001 3 b	0.192 7±0.006 8 a	0.048 5±0.002 4 b	0.055 3±0.004 8 b	0.432 8±0.026 2 a		
	16	0.051 6±0.020 9 a	0.094 5±0.074 1 a	0.194 1±0.029 2 a	0.071 3±0.029 8 a	0.150 1±0.128 2 a	0.408 1±0.069 8 a		
4 周 4 weeks	20	0.054 3±0.008 8 a	0.115 6±0.039 0 a	0.160 5±0.018 7 b	0.068 4±0.021 6 ab	0.154 6±0.082 4 a	0.277 2±0.108 6 b		
	0	0.045 9±0.001 0 bc	0.055 9±0.002 3 c	0.191 9±0.016 2 a	0.058 6±0.004 7 bc	0.069 9±0.009 0 c	0.460 1±0.029 9 a		
	4	0.044 6±0.002 0 c	0.053 2±0.004 8 c	0.191 6±0.018 2 a	0.055 5±0.045 6 b	0.065 7±0.012 2 c	0.457 3±0.040 8 a		
	8	0.049 6±0.006 8 bc	0.071 1±0.029 6 bc	0.183 6±0.026 1 a	0.062 5±0.003 7 bc	0.086 6±0.012 6 bc	0.429 0±0.052 3 ab		
	12	0.053 2±0.005 8 ab	0.087 3±0.022 7 ab	0.154 1±0.024 6 b	0.070 1±0.0128 3 b	0.129 3±0.058 1 ab	0.387 5±0.042 9 bc		
	16	0.050 2±0.003 7 bc	0.069 3±0.011 8 bc	0.144 8±0.015 2 b	0.058 5±0.007 4 bc	0.093 3±0.031 0 bc	0.322 2±0.046 0 d		
	20	0.059 8±0.009 8 a	0.107 0±0.033 6 a	0.150 0±0.025 6 b	0.081 7±0.011 9 a	0.164 0±0.041 0 a	0.353 4±0.045 0 cd		

表中数据为平均数±标准差，同列数据后标有不同字母表示为害虫量间差异显著 ($P<0.05$)。粗体表示光谱反射率的最低区分虫量。下表同。

Data are mean±SD, and followed by the different letters mean significant difference between different numbers of *S. furcifera* ($P<0.05$). Bold indicates the lowest number of *S. furcifera* which the reflection can distinguish. The same below.

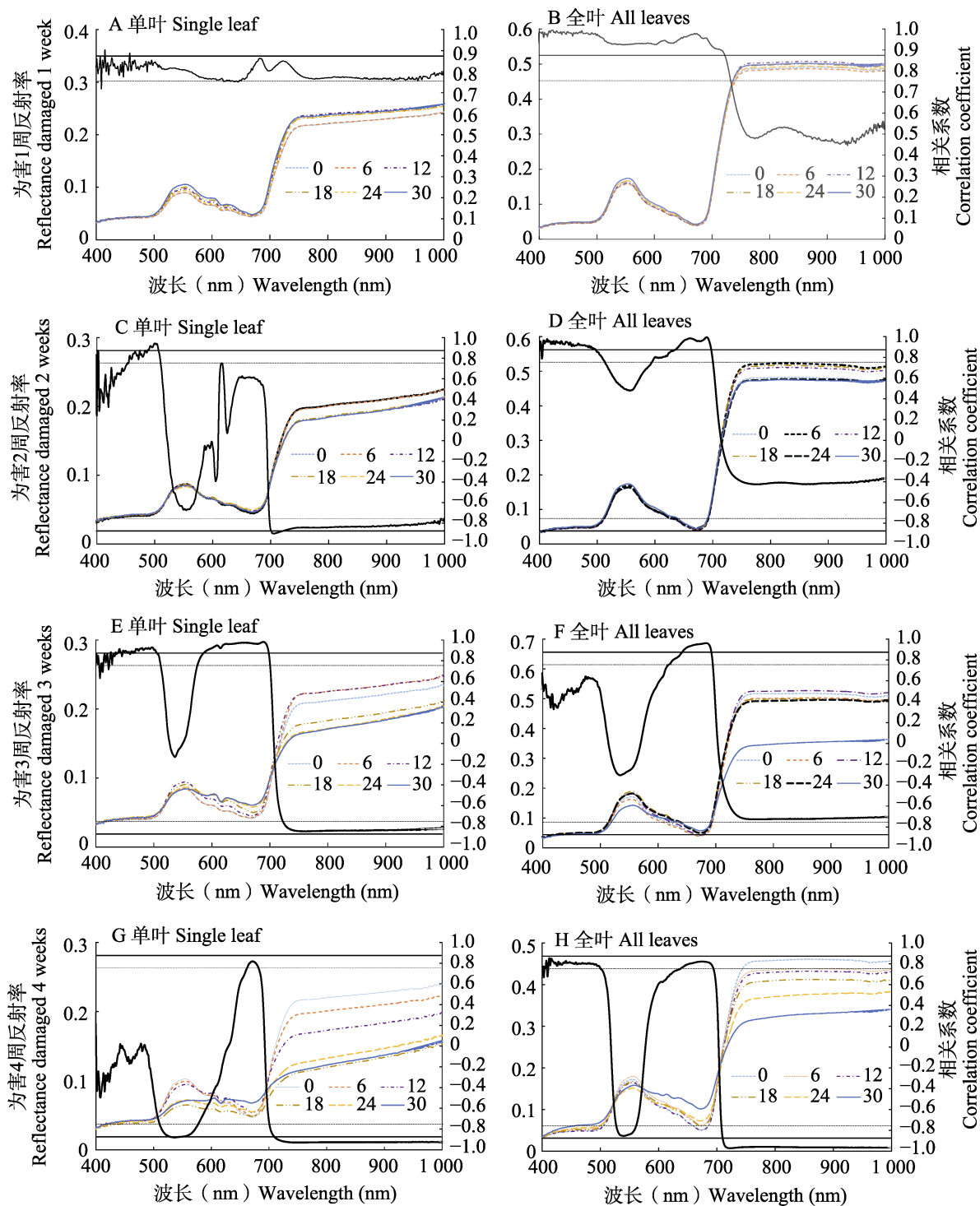


图 2 孕穗期水稻受 0-30 头白背飞虱危害 1-4 周后倒 4 单叶 (A、C、E、G) 和整株全叶 (B、D、F、H) 的光谱反射率及其与虫量的相关性

Fig. 2 Reflectance of the fourth leaf from top (A, C, E, G) and all leaves (B, D, F, H) of the booting stage of rice plant damaged by 0-30 *Sogatella furcifera* for 1-4 weeks and the correlation between the number of *Sogatella furcifera* and reflectance

飞虱为害 3 或 4 周的虫量,但不能区分孕穗期为害的虫量。监测水稻不同生育期白背飞虱的危害

需选用不同的光谱指标(表 1, 表 2)。分蘖期稻株的倒 4 单叶和全叶光谱与白背飞虱虫量的

表 2 白背飞虱 0-30 头为害孕穗期稻株 3 和 4 周后倒 4 单叶和整株叶片的光谱反射率
Table 2 Spectral reflectance from the fourth leaf from top and all leaves of the booting stage of rice damaged by 0-30 *Sogatella furcifera* for 3 and 4 weeks

为害时长 Duration of damage	虫量 Number	倒 4 单叶反射率 Reflectance from the fourth leaf from top			整株叶片反射率 Reflectance from all leaves		
		R_{440}	R_{680}	R_{760}	R_{440}	R_{680}	R_{760}
3 周 3 weeks	0	0.038 3±0.001 6 a	0.045 6±0.001 6 a	0.208 7±0.028 2 ab	0.043 1±0.001 9 a	0.042 6±0.003 0 b	0.515 7±0.020 2 a
	6	0.038 8±0.000 7 a	0.046 7±0.000 8 a	0.222 7±0.010 3 a	0.044 1±0.001 3 a	0.043 2±0.001 0 b	0.499 7±0.010 3 a
	12	0.039 9±0.000 9 a	0.049 0±0.001 7 a	0.222 3±0.030 2 a	0.045 4±0.001 0 a	0.046 2±0.001 7 ab	0.524 4±0.018 3 a
	18	0.040 1±0.001 3 a	0.052 4±0.007 7 a	0.178 6±0.035 0 b	0.047 3±0.002 0 a	0.052 9±0.008 3 ab	0.496 9±0.039 1 a
	24	0.041 2±0.002 7 a	0.060 6±0.013 4 a	0.166 9±0.042 3 b	0.047 6±0.003 4 a	0.052 2±0.008 1 ab	0.490 6±0.033 2 a
	30	0.040 5±0.004 2 a	0.063 3±0.032 5 a	0.165 3±0.030 5 b	0.043 9±0.006 7 a	0.059 3±0.023 9 a	0.341 9±0.043 5 b
4 周 4 weeks	0	0.039 5±0.001 1 a	0.050 7±0.004 9 b	0.217 1±0.025 0 a	0.046 1±0.005 2 a	0.053 6±0.018 8 b	0.455 1±0.045 0 a
	6	0.040 0±0.002 0 a	0.051 8±0.006 1 b	0.197 1±0.008 2 ab	0.049 5±0.009 8 a	0.066 3±0.029 1 ab	0.432 4±0.040 2 a
	12	0.039 6±0.000 8 a	0.056 4±0.005 6 b	0.168 1±0.036 0 b	0.046 4±0.002 7 a	0.053 4±0.014 6 b	0.425 7±0.033 5 a
	18	0.036 8±0.001 5 a	0.050 6±0.004 6 b	0.113 2±0.023 4 c	0.048 2±0.003 9 a	0.063 1±0.015 6 ab	0.405 2±0.051 3 ab
	24	0.038 6±0.003 7 a	0.057 5±0.008 8 b	0.126 4±0.039 1 c	0.051 8±0.017 6 a	0.076 5±0.054 1 ab	0.365 4±0.026 4 bc
	30	0.040 6±0.002 3 a	0.070 5±0.019 5 a	0.115 9±0.023 2 c	0.057 0±0.011 3 a	0.105 1±0.038 4 a	0.314 9±0.054 7 c

相关性基本一致,但孕穗期稻株的倒 4 单叶在近红外的特征光谱与白背飞虱虫量的相关性显著强于整株全叶的光谱(图 1,图 2),因此,可选用倒 4 单叶的光谱来监测白背飞虱。

2.2 白背飞虱危害在全波段光谱植被指数上的表现

分蘖期水稻受白背飞虱为害 3 周时,稻株倒 4 单叶光谱反射率组成的植被指数在 700-1 000 nm 波段与 400-700 nm 波段组成的 *DVI* 指数与虫量的相关性高,明显高于同区域的 *RVI* 和 *NDVI*;比值植被指数 *RVI* 和归一化植被指数 *NDVI* 与虫量仅在较少波段如 750 和 800 nm 为中心区域的相关性高(图 3: A);为害 4 周时 *DVI* 指数与虫量的相关程度总体也高于 *RVI* 和 *NDVI*,并且 550-680 与 500-600 nm 两区域光谱组合、700-1 000 与 400-800 nm 波段组合的三类植被指数和与虫量的相关程度高,且明显高于为害 3 周时的(图 3: B)。

白背飞虱为害孕穗期水稻 3 周时,倒 4 单叶光谱在 700-1 000 nm 波段与 400-1 000 nm 两区域组成的植被指数与虫量间相关性较高(图 4: A),并且在为害 4 周时,绝大部分波段组成的三类植被指数与虫量的相关性均显著提高,特别是 700-1 000 nm 与 400-1 000 nm、550-700 nm 与 500-650 nm 组成的植被指数,且 *DVI* 指数与虫量的相关性总体高于 *RVI* 和 *NDVI*(图 4: B)。

分蘖期和孕穗期水稻受白背飞虱为害 3 和 4 周后,与白背飞虱虫量关系密切的叶片三类光谱植被指数大体相同,并且为害周数越多,植被指数与虫量的相关性越高(图 3,图 4)。

2.3 基于光谱植被指数的白背飞虱虫量监测模型

与 *RVI* 和 *NDVI* 相比,差值植被指数 *DVI* 对白背飞虱虫量的变化更为敏感,结合图 3 和图 4 中与白背飞虱虫量相关性高的 *DVI* 对应的特征波段区域,研究选择了由 12 个特征波段组成的

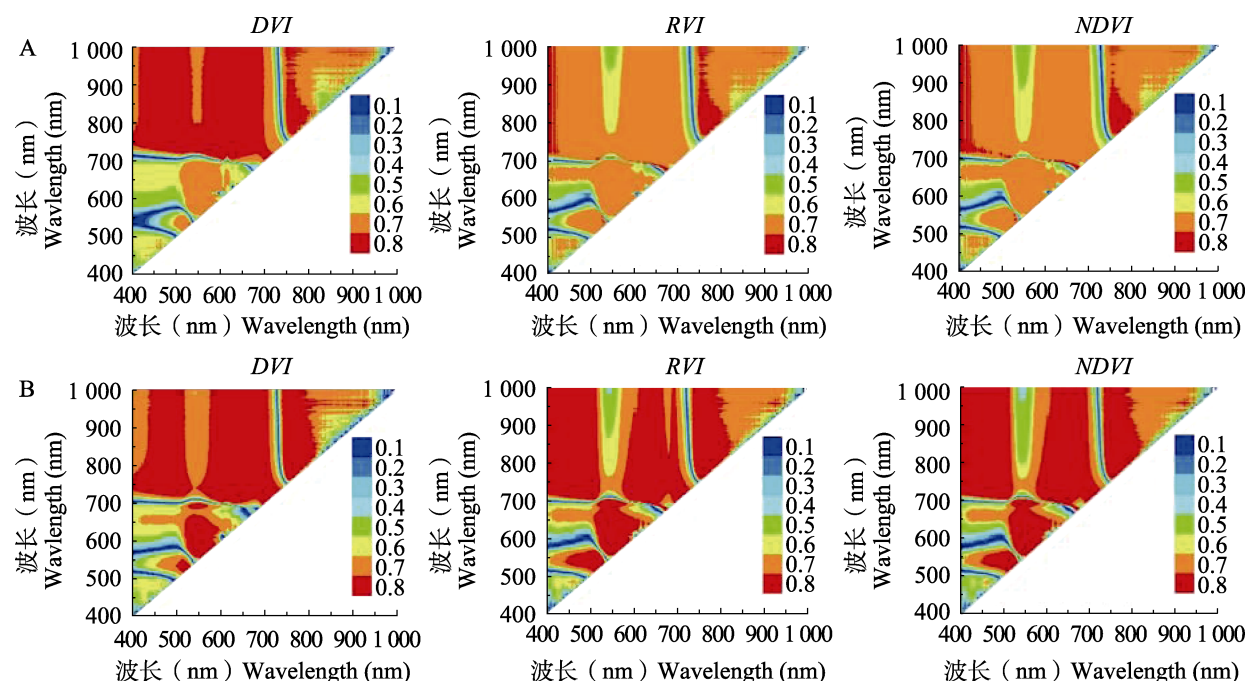


图 3 分蘖期稻株危害 3 周 (A) 和 4 周 (B) 倒 4 单叶的光谱植被指数 *DVI*、*RVI*、*NDVI* 与白背飞虱虫量的相关系数

Fig. 3 The correlation coefficient between spectral index *DVI*, *RVI*, *NDVI* of the fourth leaf from top and the number of *Sogatella furcifera* damaged for 3 (A) and 4 (B) weeks at the tillering stage of rice

颜色标尺表示相关系数大小,由蓝到红表示相关程度升高。图 4 同。The color scales indicate the correlation coefficient. Changes in color from blue to red show the increase of correlation degree. The same for Fig. 4.

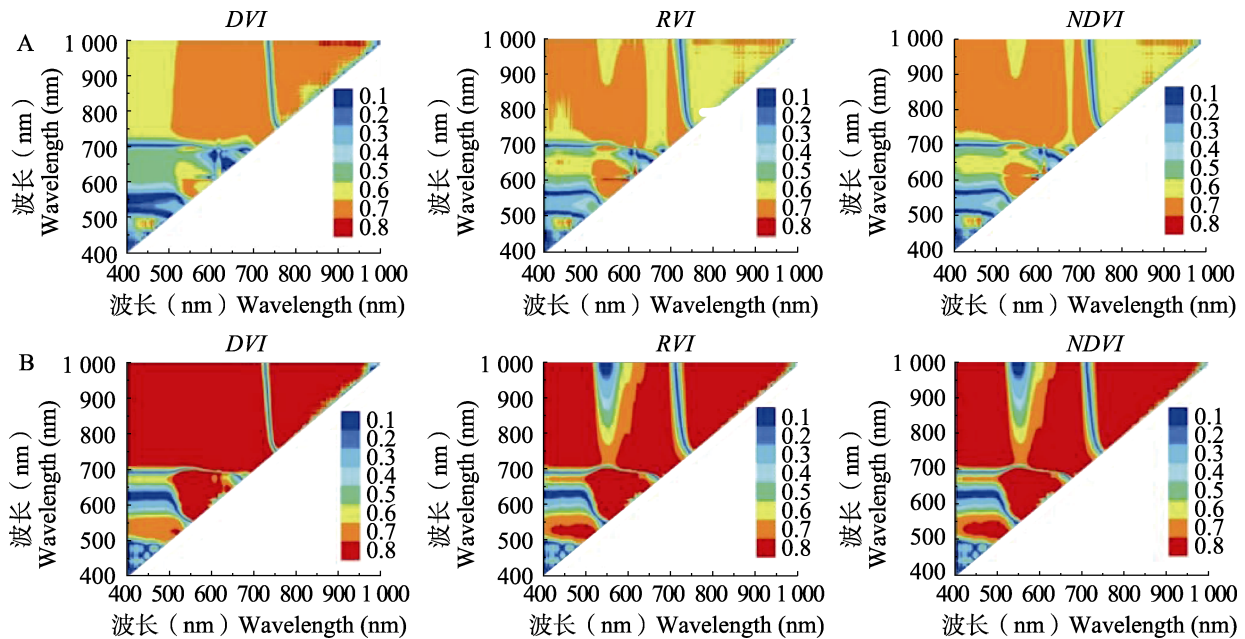


图4 孕穗期稻株受白背飞虱危害3周(A)和4周(B)倒4单叶光谱植被指数

DVI、RVI、NDVI与虫量的相关系数

Fig. 4 The correlation coefficient between spectral indices DVI, RVI, NDVI of the fourth leaf from top and the number of *Sogatella furcifera* damaged for 3 (A) and 4 (B) weeks at the booting stage of rice

9个单叶差值植被指数: $DVI_{540-510}$ 、 $DVI_{550-510}$ 、 $DVI_{640-550}$ 、 $DVI_{680-550}$ 、 $DVI_{740-450}$ 、 $DVI_{740-670}$ 、 $DVI_{800-760}$ 、 $DVI_{850-470}$ 、 $DVI_{850-640}$, 采用逐步回归建模方法对为害3周和4周时的白背飞虱虫量分别进行建模。分蘖期水稻受害3周时基于倒4单叶 $DVI_{850-470}$ 植被指数的线性回归模型监测白背飞虱虫量的均方根误差为4.5头/株(图5:A), 而受害4周时基于 $DVI_{800-760}$ 植被指数的回归模型监测白背飞虱虫量的均方根误差为4.3头/株(图5:B)。孕穗期水稻受害3周和4周时用基于 $DVI_{850-640}$ 植被指数的回归模型监测白背飞虱虫量的均方根误差分别为7.9和5.5头/株(图5:C, D)。

3 讨论

本研究通过室内人工接虫, 并在暗室内测定了不同虫量白背飞虱为害不同生育期水稻不同天数后倒4单叶和整株叶片的光谱反射率, 由于研究是在控制条件下进行, 其发现的稻株叶片反射率与白背飞虱为害虫量间的关系较为可靠, 可供田间光谱监测飞虱方法的建立提供参考。邱白晶等(2008)田间监测结果表明, 水稻冠层近红

外波段699-1 000 nm的反射率随白背飞虱虫量的升高而降低, 可较好地地区分白背飞虱的不同危害等级, 并且褐飞虱 *Nilaparvata lugens* 对水稻的危害在光谱上也有类似现象(Yang *et al.*, 2007; 孙启花和刘向东, 2010; 薛来震等, 2015)。本研究发现, 白背飞虱3龄若虫为害分蘖期水稻1-2周或者为害孕穗期水稻1周时, 稻叶在近红外区的反射率随虫量增加而升高, 这与前人的研究结果不完全一致(Yang *et al.*, 2007; 邱白晶等, 2008; 孙启花和刘向东, 2010; 薛来震等, 2015)。出现这种现象可能是由于飞虱的短期取食对分蘖期和孕穗期水稻具有一定的刺激生长和补偿作用所致, 少量飞虱取食后促进了水稻的生长, 从而表现出近红外反射率的升高。在褐飞虱危害分蘖期水稻的研究中也有类似表现(Tan *et al.*, 2019)。由此表明, 利用稻叶光谱反射率监测短期危害的低虫量飞虱时, 如20-30头/株3龄若虫危害1-2周的情形, 不能简单参考大虫量或危害期长的光谱监测模型。因此, 飞虱迁入水稻的时间或危害水稻的时长是其虫量光谱监测时需考虑的重要因素。现今已有考虑危害时长的基于水稻生理指标的褐飞虱监测模型(Chen and

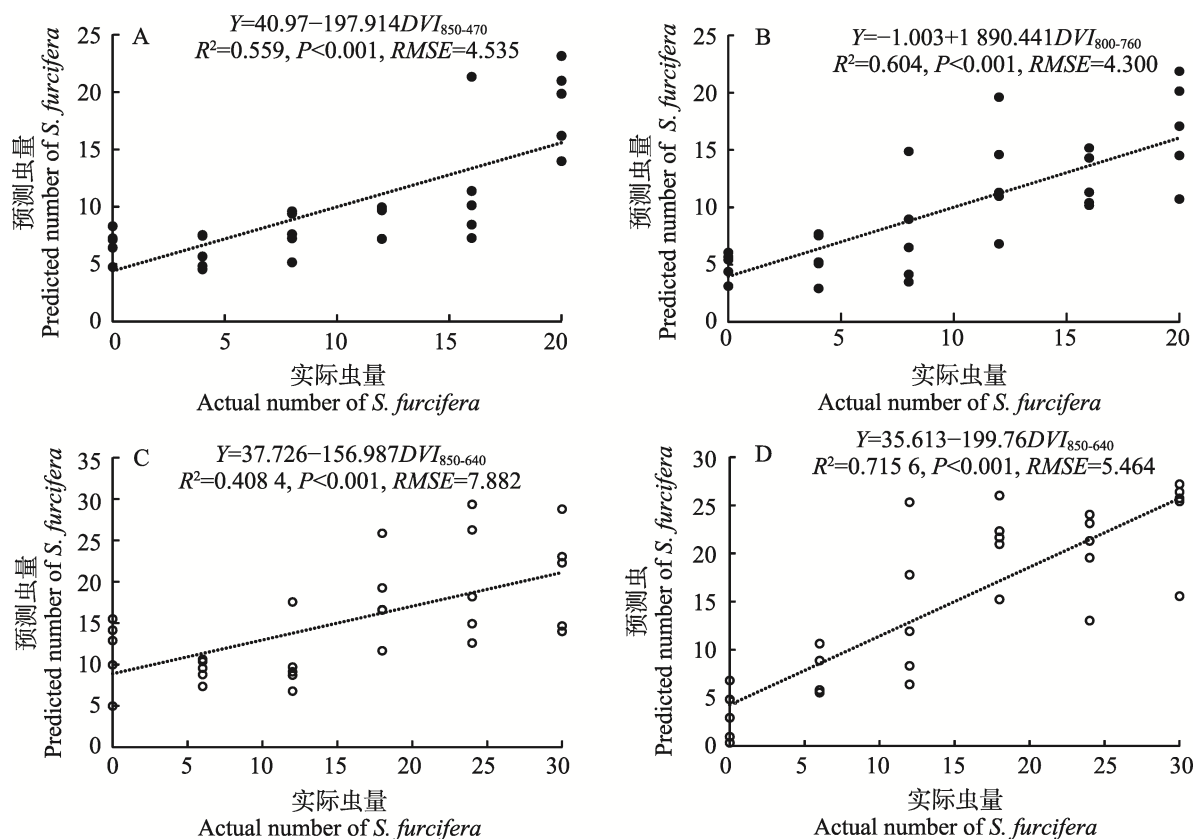


图5 利用倒4单叶光谱差值植被指数DVI监测分蘖期(A, B)和孕穗期(C, D)水稻受白背飞虱为害3周(A, C)和4周(B, D)时虫量的模型及效果($n=30$)

Fig. 5 Models and their efficiencies based on DVI from the fourth leaf from top to monitor the number of *Sogatella furcifera* damaged for 3 (A, C) and 4 (B, D) weeks at the tillering (A, B) and booting (C, D) stages of rice ($n=30$)

Liu, 2023), 但是还没有建立相关基于水稻光谱的模型。

比较水稻倒4单叶和全部叶片的光谱反射率与白背飞虱为害虫量的相关性, 或者两波段组成的DVI、RVI、NDVI植被指数与虫量间的相关性结果表明, 水稻受白背飞虱危害后倒4单叶光谱特征基本与整株叶片的一致。Luedeling等(2009)对桃树受叶螨为害后的光谱测定也发现, 叶片水平比冠层水平监测更能准确反映叶螨的为害情况。由此表明, 可根据室内准确测定出的叶片光谱, 发现光谱与虫量或危害程度间的关系, 则可为下一步开发田间光谱监测白背飞虱虫量的方法提供参考。

光谱植被指数考虑了作物在至少2个波段的反射率, 因此其表征作物所受虫害的能力比单波段反射率有明显提高。Mirik等(2012)研究表明, 光谱指数与小麦受麦双尾蚜 *Diuraphis*

noxia 为害程度有较高的相关性, 可利用光谱指数对麦双尾蚜进行监测。Yang等(2005)研究表明, 基于800 nm和694 nm的比值植被指数RVI对麦二叉蚜 *Schizaphis graminum* 为害最为敏感。归一化植被指数NDVI和Green NDVI与麦二叉蚜密度存在显著的负相关关系(Elliott et al., 2009)。本研究结果表明, DVI、RVI和NDVI三类光谱植被指数与白背飞虱虫量的相关性强且稳定, 这为田间白背飞虱的光谱监测模型组建提供了指标。白背飞虱在分蘖期水稻上为害3和4周时的虫量大小可分别利用差值植被指数 $DVI_{850-470}$ 和 $DVI_{800-760}$ 进行监测, 而在孕穗期水稻上为害3-4周时的虫量均可利用 $DVI_{850-640}$ 进行监测, 且对30头/株以内发生虫量的监测误差为4-8头/株, 虽然监测误差还有待降低, 但也为白背飞虱的光谱监测提供了方法, 有其继续研发和应用的潜力。本研究利用相同的9个差值植被

指数对白背飞虱危害分蘖期和孕穗期水稻 3 和 4 周时的虫量分别进行逐步回归建模, 最终发现 2 个水稻生育期和两个为害时长下虫量的监测模型均不相同, 这进一步说明分别建立不同生育期水稻上飞虱虫量的光谱监测模型尤其重要。本研究是在室内可控条件并且白背飞虱为害虫量和时间完全清楚的前提下进行的, 研究结果反映了水稻光谱与白背飞虱危害的真实关系, 这可为下一步建立田间水稻分蘖期和孕穗期光谱监测白背飞虱虫量模型提供敏感波段、光谱指数和建模方法等支持。

参考文献 (References)

- Chen M, Liu XD, 2023. Estimating insect pest density using the physiological index of crop leaf. *Frontiers in Plant Science*, 14: 1152698.
- Coops NC, Johnson M, Wulder MA, White JC, 2006. Assessment of QuickBird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation. *Remote Sensing of Environment*, 103(1): 67–80.
- Elliott N, Mirik M, Yang ZM, Jones D, Phoofolo M, Catana V, Giles K, Michels GJ Jr, 2009. Airborne remote sensing to detect greenbug stress to wheat. *Southwestern Entomologist*, 34(3): 205–211.
- Huang JR, Sun JY, Liao HJ, Liu XD, 2015. Detection of brown planthopper infestation based on SPAD and spectral data from rice under different rates of nitrogen fertilizer. *Precision Agriculture*, 16(2): 148–163.
- Jiang JB, Huang WJ, Chen YH, 2010. Using canopy hyperspectral ratio index to retrieve relative water content of wheat under yellow rust stress. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 30(7): 1939–1943. [蒋金豹, 黄文江, 陈云浩, 2010. 用冠层光谱比值指数反演条锈病胁迫下的小麦含水量. 光谱学与光谱分析, 30(7): 1939–1943.]
- Jiang YY, Liu J, Zeng J, Huang C, Zhang T, 2021. Occurrence of, and damage caused by, major migratory pests and techniques for monitoring and forecasting these in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 58(3): 542–551. [姜玉英, 刘杰, 曾娟, 黄冲, 张涛, 2021. 我国农作物重大迁飞性害虫发生为害及监测预报技术. 应用昆虫学报, 58(3): 542–551.]
- Luedeling E, Hale A, Zhang MH, Bentley WJ, Dharmasri LC, 2009. Remote sensing of spider mite damage in California peach orchards. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 11(4): 244–255.
- Mirik M, Ansley RJ, Michels GJ, Elliott NC, 2012. Spectral vegetation indices selected for quantifying Russian wheat aphid (*Diuraphis noxia*) feeding damage in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agriculture*, 13(4): 501–516.
- Qiao HB, Cheng DF, Sun JR, Tian Z, Chen L, Lin FR, 2005. Effects of wheat aphid on spectrum reflectance of the wheat canopy. *Plant Protection*, 31(2): 21–26. [乔红波, 程登发, 孙京瑞, 田喆, 陈林, 林芙蓉, 2005. 麦蚜对小麦冠层光谱特性的影响研究. 植物保护, 31(2): 21–26.]
- Qiu BJ, Chen GP, Cheng QW, 2008. Canopy spectral reflectance feature of rice infected with *Sogatella furcifera* and insect number inversion. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 39(9): 92, 95–99. [邱白晶, 陈国平, 程麒文, 2008. 水稻白背飞虱虫害的冠层光谱特性与虫量反演. 农业机械学报, 39(9): 92, 95–99.]
- Sun QH, Liu XD, 2010. Spectral characteristics of the damaged rice plant by brown planthopper, *Nilaparvata lugens*. *Chinese Journal of Rice Science*, 24(2): 203–209. [孙启花, 刘向东, 2010. 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, 24(2): 203–209.]
- Sun QH, Liu XD, 2012. Diagnosis of the damage of *Cnaphalocrocis medinalis* at the booting stage of rice using spectral reflectance. *Scientia Agricultura Sinica*, 45(24): 5040–5048. [孙启花, 刘向东, 2012. 稻纵卷叶螟危害孕穗期水稻的光谱诊断. 中国农业科学, 45(24): 5040–5048.]
- Tan Y, Sun JY, Zhang B, Chen M, Liu Y, Liu XD, 2019. Sensitivity of a ratio vegetation index derived from hyperspectral remote sensing to the brown planthopper stress on rice plants. *Sensors (Basel)*, 19(2): 375.
- Tian ML, Ban ST, Yuan T, Ma C, Kong J, Zhou Y, Wang YY, Li LY, 2022. Information extraction of rice leaf roller based on hyperspectral imaging technology. *Acta Agriculturae Shanghai*, 38(1): 90–94. [田明璐, 班松涛, 袁涛, 马超, 孔吉, 周远, 王彦宇, 李琳一, 2022. 基于高光谱成像技术的水稻叶片稻纵卷叶螟虫害信息提取. 上海农业学报, 38(1): 90–94.]
- Wu H, Qiu BJ, Chen GP, Liu JC, 2009. Hyperspectral feature analyse of rice single leaf infected with *Sogatella furcifera*. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 31(4): 117–119. [吴昊, 邱白晶, 陈国平, 刘继承, 2009. 水稻白背飞虱虫害的单叶高光谱特征分析. 农机化研究, 31(4): 117–119.]
- Xue LZ, Xu L, Tan Y, Liu XD, 2015. Spectral characteristics of different rice cultivars damaged by the brown planthopper *Nilaparvata lugens*. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 38(5): 796–803. [薛来震, 徐磊, 谭晔, 刘向东, 2015. 不同品种水稻受褐飞虱危害后的光谱特征. 南京农业大学学报, 38(5): 796–803.]
- Yang CM, Cheng CH, Chen RK, 2007. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leaf folder. *Crop Science*, 47(1): 329–335.
- Yang Z, Rao MN, Elliott NC, Kindler SD, Popham TW, 2005. Using ground-based multispectral radiometry to detect stress in wheat caused by greenbug (Homoptera: Aphididae) infestation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 47(2): 121–135.
- Zheng XF, Tang Q, Bao YX, Yang SJ, Yang RM, Zhu F, 2022. Damage estimation of *Cnaphalocrocis medinalis* by combining ground hyperspectral observation with GF-2 satellite remote sensing monitoring data. *China Plant Protection*, 42(7): 34–43. [郑欣飞, 唐倩, 包云轩, 杨诗俊, 杨荣明, 朱凤, 2022. 融合地面高光谱和高分二号卫星遥感监测数据的稻纵卷叶螟危害估算. 中国植保导刊, 42(7): 34–43.]