

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2020.03.006

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

稻纵卷叶螟为害水稻的冠层光谱特征及叶绿素含量估算*

周晓^{1,2}, 包云轩^{1,2**}, 王琳^{1,2}, 杜正朕^{1,2}, 唐倩^{1,2}, 陈粲^{1,2,3}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报和评估协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 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)

摘要: 2017–2018 年以南京农业大学农业气象与昆虫生态实验室培养的二龄稻纵卷叶螟幼虫为试验材料, 在南京信息工程大学农业气象试验站水稻大田内, 设置网罩控制下不同投虫量处理, 以无虫量为对照, 利用便携式波谱仪和 SPAD-502 叶绿素仪测定水稻全生育期冠层光谱反射率以及倒一叶叶绿素相对含量 (Soil and Plant Analyzer Development, SPAD), 分析不同初始虫量条件下、不同生育期水稻冠层的原始光谱、三边参数和 SPAD 值的变化规律。在此基础上, 利用观测光谱中与 SPAD 值相关性较强的波段, 计算基于光谱数据的植被指数和三边参数, 并以这两类指数为自变量, 建立水稻叶绿素相对含量的回归估算模型。结果表明: (1) 稻纵卷叶螟为害下的水稻冠层光谱反射率与对照差异显著 ($P < 0.05$), 其中可见光波段的反射率在分蘖–孕穗期低于对照, 在扬花–成熟期高于对照; (2) 在近红外波段, 表现为虫害处理的反射率低于对照, 且随着投虫量的增加反射率呈下降趋势, 其中以 300 头·百株⁻¹ (4 级) 处理近红外波段的反射率最低; (3) 随着投虫量的增加, 红边位置发生明显“蓝移”。(4) SPAD 值随投虫量的增加逐渐降低, 4 级处理最低; (5) 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、红边归一化植被指数 (Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index, NDVI₇₀₅) 以及红边位置与 SPAD 值的相关性较好; (6) 利用观测光谱数据构建了 SPAD 单因子估算模型和多元逐步回归模型, 其中以 NDVI 指数模型的估算效果最优, R^2 达到 0.72, 且高于其它估算模型, 说明利用水稻冠层光谱参数, 建立全生育期稻纵卷叶螟为害下水稻叶片叶绿素相对含量估算模型的方法是可行的, 且具有快速、无损的特点, 利于实现持续、动态和长期定位观测。

关键词: 稻纵卷叶螟; 水稻冠层光谱; 植被指数; 叶绿素相对含量估算模型

Hyperspectral Features of Rice Canopy and SPAD Values Estimation under the Stress of Rice Leaf Folder

ZHOU Xiao^{1,2}, BAO Yun-xuan^{1,2}, WANG Lin^{1,2}, DU Zheng-zhen^{1,2}, TANG Qian^{1,2}, CHEN Can^{1,2,3}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044; 3. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: The second instar larvae of *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee (Rice Leaf Folder, RLF) cultured in the Laboratory of Agrometeorology and Insect Ecology of Nanjing Agricultural University were used as the experimental objects in 2017–2018. In the rice field of the agricultural meteorological experimental station of Nanjing University of Information Science & Technology, six levels treatments, including 50, 100, 200, 300, 400 RLFs·100plants⁻¹ and Control Treatment (CK) were set, in order to test the relationship between spectral characteristics and SPAD values

* 收稿日期: 2019-09-21

** 通讯作者包云轩, E-mail: baoyunxuan@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601221; 41975144); 江苏省重点研发计划(现代农业)(BE2019387); 中国博士后科学基金(2016M1884)

第一作者联系方式: 周晓, E-mail: 18751903716@163.com

under such different initial pest population condition. During the experiments, the spectral reflectance of rice canopy and the SPAD values of the flag leaves were measured by ASD Field Spec3 (Analytical Spectral Devices Inc) and SPAD-502 (Soil and Plant Analyzer Development), respectively. The variation patterns of original spectrum, trilateral parameters and SPAD values in different growth stages were analyzed. Consequently, the vegetation indices and trilateral parameters based on the observed spectral data were calculated using the reflectance values in the bands with strong correlations with SPAD. And the regression estimation models of the SPAD values of rice were established. The results showed that: (1) the spectral reflectance values of rice canopy damaged by RLFs were significantly different from those of the control ($P < 0.05$). In the visible bands, the reflectance values of the former were lower than those of the latter during tillering-booting stages, and was higher than the latter during the flowering-maturity stages. (2) In the near-infrared band, the reflectance values of the injured treatments were lower than those of the control. And they decreased with the increase of the pest's population, among which the reflectance of 300 RLFs \cdot 100plants⁻¹ (Level 4) was the lowest. (3) With the increase of the pest's population, the red-edge position values appeared the 'blue-shift' trend. (4) The SPAD values decreased gradually with the increase of the pest's population, and the Level 4 treatment had the lowest values. (5) The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index (NDVI₇₀₅) and the position of red-edge had a close correlation with SPAD values. (6) The single factor estimation model and multiple stepwise regression model of SPAD were constructed using the hyperspectral features of rice. The exponential model with NDVI had the best estimation effect, with the highest coefficient of determination (0.72) among all the estimation models. The results indicate that it is feasible to use the spectral parameters of rice canopy to establish a model for estimating the SPAD values of rice leaves under the stress of rice leaf folder in the whole growth stages. This method is fast and nondestructive, and is convenient for continuous, dynamic and long-term located observation.

Key words: *Cnaphalocrocis medinalis* Guenee; Canopy spectrum; Vegetation indices; Estimation models of SPAD

水稻是重要的粮食作物, 虫害一直是影响其产量的重要因素。稻纵卷叶螟 (*Cnaphalocrocis medinalis*) 是水稻生产过程中危害较严重的一种虫害, 广泛分布在中国淮河以南稻区, 其中华南稻区、江岭稻区以及江淮稻区为害最为严重^[1]。稻纵卷叶螟幼虫通过虫丝将水稻叶片卷起, 躲藏在卷叶中啃食叶肉, 极大地破坏了叶片上表皮和叶肉组织^[2], 导致光合作用不能正常进行, 从而影响水稻干物质的积累^[3], 最终使得水稻严重减产。据统计, 2005–2015 年中国稻纵卷叶螟年均发生面积为 1969 万 hm^2 , 损失产量 702.7 万 t ^[4]。而叶绿素可以有效反映作物的受害情况, 通过叶绿素含量的高低能够有效反映水稻的生长状况^[5]。但是传统的叶绿素含量测定大多为乙醇、丙酮浸提法^[6]等方法, 需要进行破坏性采样, 无法快速反映水稻的生长状况。

高光谱遥感信息具有波段多、波谱连续等特点, 能够快速、无损地获取作物的光谱反射率曲线, 因此, 成为作物病虫害监测的重要研究手段。2008 年刘占宇^[7]和 2010 年黄建荣等^[8]研究表明, 无论水稻分蘖盛期或抽穗期, 在稻纵卷叶螟暴发后水稻叶片和冠层光谱在

近红外波段的反射率均会下降, 在红光波段的吸收减少, 反射率上升; 2013 年孙嘉悱^[9]的研究发现, 随着卷叶率的增加, 孕穗期水稻叶片绿光区和近红外光区的光谱反射率显著下降, 而蓝光区和红光区的反射率则显著升高。在对病虫害引起作物长势变化的敏感波段研究方面, 朱宇波^[10]通过研究发现, 红光波段和近红外波段是水稻分蘖期稻纵卷叶螟为害的敏感波段, 在孕穗期为近红外波段, 扬花期为蓝紫光和红光波段。袁琳^[11]的研究表明, 受蚜虫为害的小麦叶片在近红外波段的光谱反射率下降, 感染条锈病的叶片反射率上升。研究发现, 通过光谱反射率与作物生理指标的相关性分析, 可以推测出作物对病虫害的敏感波段^[12]。通过这些敏感波段可以建立光谱指数, 从而为病虫害的监测提供依据。2015 年沈文颖等^[13]通过研究发现, 650–680nm 光谱反射率与灌浆期小麦白粉病病情的相关性最强, 基于光谱敏感波段的 MCARI 和 $\text{VARI}_{\text{green}}$ 是估算白粉病受害程度的重要指标。孙红等^[14]针对抽穗期的稻纵卷叶螟受害区域进行监测, 发现利用近红外波段的反射率(762, 774)构建归一化植被指数 NDVI 可以有效识别受害区域, 准确率达到 70%。

但是，以往基于高光谱信息的研究主要集中于某个特定生育期内，对于整个水稻生育期内连续监测稻纵卷叶螟为害下水稻冠层光谱特征的研究较少。所构建的针对特定生育期下的单一估算模型普适性不强，难以适用于全生育期。因此，为了弥补这一缺陷，探明稻纵卷叶螟不同虫量为害下全生育期水稻冠层光谱特征及其演变规律，建立多生育期或全生育期水稻叶绿素相对含量的估算模型，本研究在水稻大田生长背景下，通过设置全生育期不同虫量稻纵卷叶螟为害水平下的水稻生长控制试验，对全生育期内水稻冠层光谱反射率和叶绿素相对含量进行观测，分析两者的相关性，利用相关性较强的光谱波段建立叶绿素相对含量估算模型，以期实现快速、无损地监测全生育期内受不同虫量稻纵卷叶螟为害后水稻的长势及其为害特征，为稻纵卷叶螟为害趋势预警、防控决策和水稻产量损失评估提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2017年6月–2018年10月在南京信息工程大学农业气象站（32°12'N，118°43'E）的生态实验田内进行，该区属于江淮稻区，稻纵卷叶螟是主要虫害之一。水稻生育期为6–10月，与稻纵卷叶螟迁入生长期相吻合，为其生长发育提供了充足的食物来源。水稻生育期内日平均气温在22~28℃，相对湿度较高，对稻纵卷叶螟的生长发育十分有利。

1.2 试验设计

试验水稻品种为南粳5055。每个小区为边长2m的正方形田块，均匀种植100丛水稻。每个小区使用单独的带拉链的透明网罩和支架进行保护，防止稻纵卷叶螟飞出。为确保试验的准确性，从种植水稻开始至试验结束，每个小区全程使用透明网罩进行保护。按照GB/T15793-2011稻纵卷叶螟测报技术规范的准则，设置5个投虫量等级，即50头·百株⁻¹（1级）、100头·百株⁻¹（2级）、200头·百株⁻¹（3级）、300头·百株⁻¹（4级）、400头·百株⁻¹（5级），以达到不同程度的虫害发生水平，从而分析不同初始虫量对水稻生长的影响。对照小区无虫量，采用相同的透明网罩和支架进行保护，以消除网罩和其它虫害造成的影响。故试验共6个处理，每处理重复3次。稻纵卷叶螟的幼虫由南京农业大学农业气象与昆虫生态实验室培养获得。在水稻分蘖初期，将二龄幼

虫投入试验水稻田内。采用人工投虫的方式，将不同数量的稻纵卷叶螟幼虫均匀放置在相应小区水稻叶片上，确保幼虫抓稳水稻叶片。各处理均进行正常水肥管理，但不喷洒任何农药，仅进行必要的人工除草。

1.3 指标测定方法

1.3.1 水稻冠层光谱的测定

利用美国ASD FieldSpec 3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10:30–14:00进行。观测时将网罩拉链打开，波谱仪传感器探头伸入水稻冠层上方0.6m处，正面对着阳光并保持探头垂直向下。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。每个试验小区定点测量3丛水稻冠层光谱，每点记录5次，取其均值作为该试验小区水稻冠层光谱的测量结果。其中波长大于1000nm的光谱数据由于受到大气水分吸收的影响而产生较大波动，故未参与数据分析。

1.3.2 水稻叶片SPAD的测定

利用SPAD-502（Soil Plant Analysis Development）叶绿素仪（日本产）进行水稻叶片SPAD值的测定。SPAD的观测值已经广泛应用于植物叶片叶绿素浓度的测量。根据Ling等^[15]的研究，SPAD值与叶绿素有着很强的正相关，可以直接表现叶绿素的含量，且经过转换后的SPAD值与溶剂萃取叶绿素的光度测量值平均相差仅6%。因此，SPAD值可以反映水稻叶片叶绿素的变化情况。由于本试验采集的光谱数据为水稻冠层数据，而冠层光谱数据主要来源于水稻植株上层的叶片。因此，在进行SPAD数据采集时选取水稻的倒一叶进行测定。为了确保光谱数据和SPAD数据之间的关联，SPAD值的测量时间和测定植株均与冠层光谱的测定同步。每个小区选取3丛水稻，每丛水稻选取2片未被稻纵卷叶螟啃食的叶片以及一片被啃食过的叶片（均选取倒一叶），每片叶片测定上、中、下3个部位，取其均值作为该小区水稻冠层的SPAD值。

1.4 数据处理

利用ViewSpec Pro软件（ASD公司）对光谱数据进行预处理，输出原始光谱反射率以及导数光谱数据。利用Matlab R2016a软件（美国），运用基于

最小二乘法原理的 Savitzky-Golay (SG) 滤波对反射率数据进行适当平滑去噪。SG 滤波在有效去除高光谱数据噪音的同时, 能保留数据中细微的有效信息, 是处理高光谱数据最常用的滤波方法。

利用 SPSS 20.0 (IBM 公司) 软件对 SPAD 值进行方差分析和光谱数据的相关分析, 对比不同虫量等级下, 光谱参数和 SPAD 的差异显著性 ($P < 0.05$)。将植被指数和三边参数作为自变量, SPAD 作为因变量, 建立 SPAD 的回归估算模型。采用决定系数 R^2 比较模型效果。

基于光谱曲线, 计算植被指数以及三边参数。

具体包括归一化植被指数 (NDVI)、绿色归一化植被指数 (GNDVI)、结构不敏感色素指数 (SIPI)、光化学植被指数 (PRI)、最优土壤调节植被指数 (OSAVI)、红边归一化植被指数 (NDVI₇₀₅)、改进红边归一化植被指数 (mNDVI₇₀₅)、红边叶绿素指数 (CI_{rededge})、绿色叶绿素指数 (CI_{green})、归一化差分红边 (NDRE)、美国陆地叶绿素指数 (MTCL)、红边幅值 $D\lambda_{red}$ 、红边位置 λ_{red} 、红边面积 S_{red} 、蓝边幅值 $D\lambda_{blue}$ 、蓝边位置 λ_{blue} 、蓝边面积 S_{blue} 、黄边幅值 $D\lambda_{yellow}$ 、黄边位置 λ_{yellow} 、黄边面积 S_{yellow} 。其计算公式及文献来源如表 1 所示。

表 1 基于光谱曲线构建的植被指数和三边参数

Table 1 Vegetation indices and trilateral parameters based on the spectra data

参数 Parameter	计算公式 Formula	文献来源 Source of reference
归一化植被指数 NDVI	$(R_{790}-R_{630})/(R_{790}+R_{630})$	[16]
绿色归一化植被指数 GNDVI	$(R_{790}-R_{550})/(R_{790}+R_{550})$	[17]
结构不敏感色素指数 SIPI	$(R_{800}-R_{445})/(R_{800}-R_{680})$	[18]
光化学植被指数 PRI	$(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$	[19]
最优土壤调节植被指数 OSAVI	$1.16 \times (R_{800}-R_{670})/(R_{800}+R_{670}+0.16)$	[20]
红边归一化植被指数 NDVI ₇₀₅	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705})$	[21]
改进红边归一化植被指数 mNDVI ₇₀₅	$(R_{750}-R_{705})/(R_{750}+R_{705}-2R_{445})$	[22]
红边叶绿素指数 CI _{rededge}	$(R_{790}/R_{720})-1$	[23]
绿色叶绿素指数 CI _{green}	$(R_{790}/R_{550})-1$	[23]
归一化差分红边 NDRE	$(R_{790}-R_{720})/(R_{790}+R_{720})$	[24]
美国陆地叶绿素指数 MTCL	$(R_{750}-R_{710})/(R_{710}-R_{680})$	[25]
红边幅值 $D\lambda_{red}$	红边区域内 (R ₆₈₀ -R ₇₆₀) 导数光谱的最大值 Maximum value of 1 st derivative spectrum within red-edge (R ₆₈₀ -R ₇₆₀)	[26]
红边位置 λ_{red}	红边区域内导数光谱的最大值所在的波长 The wavelength corresponding to the maximum value of 1 st derivative spectrum within red-edge	[26]
红边面积 S_{red}	红边区域内导数光谱的积分 Integral of 1 st derivative spectrum within red-edge	[26]
蓝边幅值 $D\lambda_{blue}$	蓝边区域内 (R ₄₉₀ -R ₅₃₀) 导数光谱的最大值 Maximum value of 1 st derivative spectrum within blue-edge (R ₄₉₀ -R ₅₃₀)	[27]
蓝边位置 λ_{blue}	蓝边区域内导数光谱的最大值所在的波长 The wavelength corresponding to the maximum value of 1 st derivative spectrum within blue-edge	[27]
蓝边面积 S_{blue}	蓝边区域内导数光谱的积分 Integral of 1 st derivative spectrum within blue-edge	[27]
黄边幅值 $D\lambda_{yellow}$	黄边区域内 (R ₅₆₀ -R ₆₄₀) 导数光谱的最大值 Maximum value of 1 st derivative spectrum within yellow-edge (R ₅₆₀ -R ₆₄₀)	[27]
黄边位置 λ_{yellow}	黄边区域内导数光谱最大值所在的波长 The wavelength corresponding to the maximum value of 1 st derivative spectrum within yellow-edge	[27]
黄边面积 S_{yellow}	黄边区域内导数光谱的积分 Integral of 1 st derivative spectrum within yellow-edge	[27]

注: 计算公式中 R 表示反射率, 下角的数字表示波长。

Note: NDVI is Normalized Difference Vegetation Index. GNDVI is Green Normalized Difference Vegetation Index. SIPI is Structure Insensitive Pigment Index. PRI is Photochemical Reflectance Index. OSAVI is Optimized Soil Adjusted Vegetation Index. NDVI₇₀₅ is Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index. M NDVI₇₀₅ is Modified Red-Edge Normalized Difference Vegetation Index. CI_{rededge} is Red-Edge Chlorophyll Index. CI_{green} is green Chlorophyll Index. NDRE is Normalized Difference Red-Edge. MTCL is MERIS Terrestrial Chlorophyll Index. $D\lambda_{red}$ is Red-Edge amplitude. λ_{red} is red-edge position. S_{red} is red-edge area. $D\lambda_{blue}$ is blue-edge amplitude. λ_{blue} is blue-edge position. S_{blue} is blue-edge area. $D\lambda_{yellow}$ is yellow-edge amplitude. λ_{yellow} is yellow-edge position. S_{yellow} is yellow-edge area. In the calculation formula, R represents the reflectance value, and the subscript with number represents the wavelength.

2 结果与分析

2.1 稻纵卷叶螟为害下水稻冠层高光谱特征

2.1.1 不同生育阶段水稻冠层反射率

由图 1 可见,在水稻生育各阶段,对照处理中冠层反射率数值在可见光波段内(400–760nm)均较小,在近红外波段(760–1000nm)相对较大;受到稻纵卷叶螟为害的处理,水稻冠层反射率数值也表现出同样的特点,但虫害处理与对照的反射率数值

有明显差异,仅分蘖期少量波段(731–899nm)和拔节期小部分波段(814–820nm、897–1000nm)反射率的差异未达显著水平,其余波段均达到了显著差异($P<0.05$),说明水稻冠层光谱能够体现出不同虫量为害的影响。具体来说,这种影响主要表现为,在近红外波段,受到为害的水稻反射率均低于对照,且随投放虫量的增加反射率依次减小,在投虫量第二大处理(4级)中达到最低;在可见光波段,各虫害

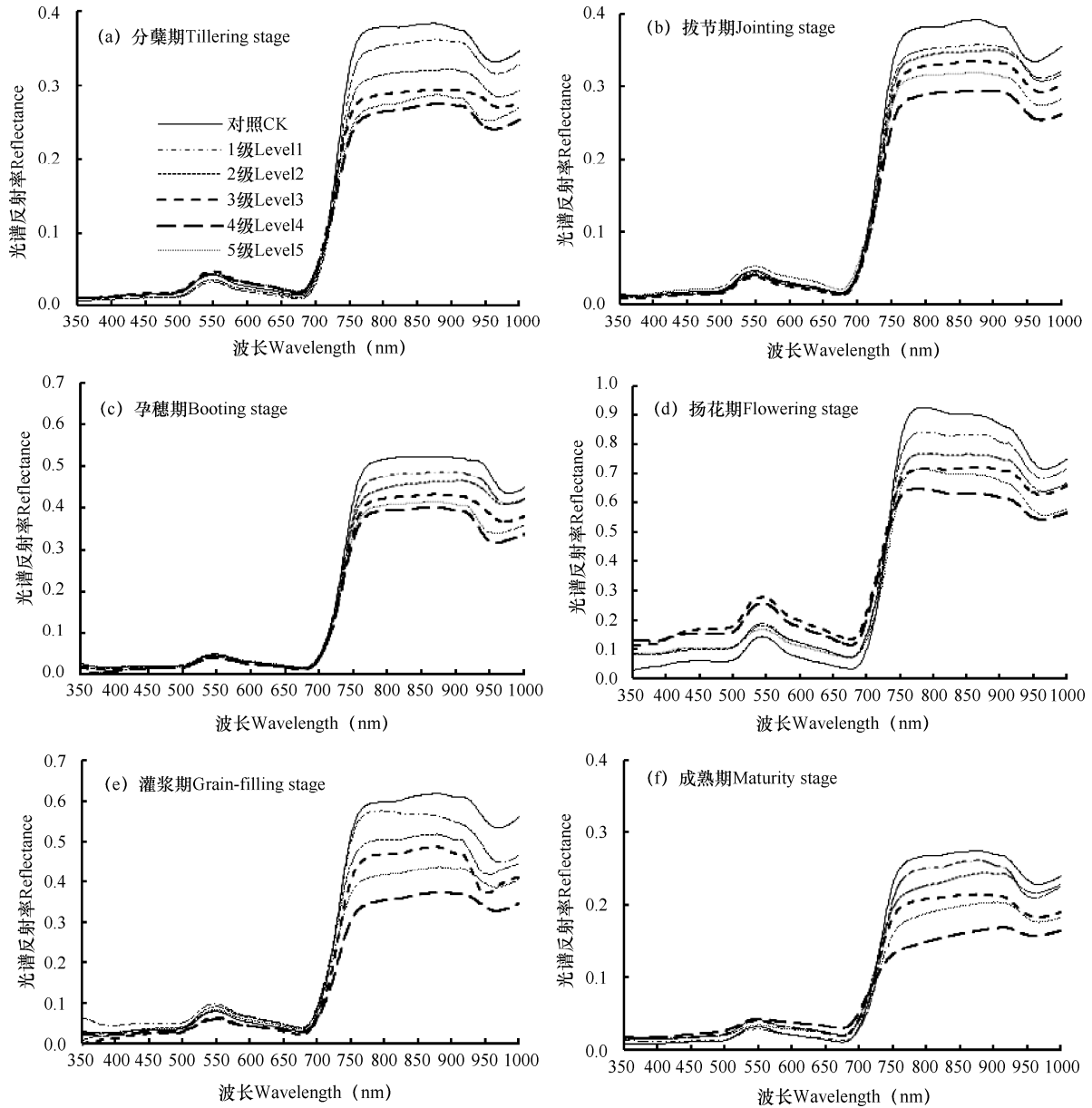


图 1 不同投虫量处理中水稻主要生育期冠层原始光谱曲线

Fig.1 Original spectrum curves of rice canopy in the main growth periods under different insect load treatments

注: 试验设置 5 个投虫量等级, 1、2、3、4、5 级分别为 50、100、200、300、400 头·百株⁻¹, 对照(CK)为不投虫。下同。
Note: In the experiment, five levels of insect population were set. Level 1, 2, 3, 4 and 5 corresponded to 50, 100, 200, 300 and 400 RLFs·100plants⁻¹, respectively, and CK represented the control treatment without pests. The same as below.

处理的反射率并未呈现依次下降或依次升高的变化规律,仅表现为在分蘖期-孕穗期虫害处理的反射率低于对照,在扬花期-成熟期虫害处理的反射率高于对照。可见,受稻纵卷叶螟为害后水稻冠层反射率在不同波段会受到不同程度的影响。

在整个观测期内,不同处理冠层反射率也会受到生育期的影响。图 1 显示,对照处理的水稻冠层光谱在可见光和近红外波段的反射率变化均表现为:从分蘖期至扬花期逐渐增大并在扬花期达到最大值,从扬花期至成熟期逐渐减小并在成熟期达到最小值;不同投虫量处理中冠层反射率数值大小虽不同,但变化趋势与对照相似。均表现为:在分蘖期-扬花期,近红外波段(760-1000nm)的反射率随生育进程逐渐增大,扬花期-成熟期随生育进程逐渐减小。在可见光波段内(400-760nm),投虫量小的处理中包括 1 级、2 级处理,水稻冠层反射率均呈现从分蘖期至扬花期逐渐增大,从扬花期至成熟期逐渐减小的规律;而投虫量较大的处理包括 3 级、4 级处理,其冠层反射率则表现为从分蘖期至扬花期逐渐增大并在扬花期达到最大值,但在拔节期出现小幅下降的情况,扬花期后开始再次减小,成熟期减至与分蘖期相近;投虫量最大的 5 级从分蘖期至扬花期逐渐增大并在扬花期达到最大值,但在孕穗期出现下降的情况,扬花期至成熟期逐渐减小,成熟期时减至低于分蘖期。可见,生育进程也影响着水稻冠层的反射率数值及其曲线形状。

2.1.2 不同生育阶段水稻冠层光谱参数

由表 2 可见,在水稻各生育阶段,对照处理的红边位置在 733-735nm,蓝边位置在 519-520nm,黄边位置在 567-570nm;受到稻纵卷叶螟为害的不同处理中,随着投虫量的增加,红边位置呈现不同程度地往短波方向移动的趋势,即存在“蓝移”现象;蓝边位置在分蘖期-孕穗期呈现往长波方向移动的趋势,即存在“红移”现象,在扬花期-成熟期存在“蓝移”现象;黄边位置在孕穗期、扬花期存在“蓝移”现象,分蘖期、拔节期、灌浆期和成熟期存在“红移”现象。可见,受到稻纵卷叶螟为害后三边位置会产生“蓝移”的现象,并且红边位置的“蓝移”情况最显著,蓝边和黄边位置则存在部分生育期“红移”的现象。

对照处理的红边面积在 0.23~0.86,蓝边面积在 0.01~0.07,黄边面积在 0.01~0.07;除分蘖期,其

余生育阶段虫害处理的红边面积随着投虫量的增加逐渐减小;蓝边面积和黄边面积未表现出显著的变化趋势。可见,红边面积能够反映受害程度,蓝边和黄边面积对受害程度的反映不显著。

在整个观测期内,不同处理的“三边”位置也会受到生育期的影响。对照处理的红边位置在分蘖期-孕穗期呈现往长波方向移动的趋势,即“红移”现象,扬花期-成熟期呈现往短波方向移动的趋势,即“蓝移”现象;蓝边位置和黄边位置的变化情况不显著,蓝边位置往长波方向移动最多的时期均为孕穗期,黄边位置则多为灌浆期和成熟期。不同投虫量处理虽变化趋势与对照处理相似,但不同处理间移动的幅度略有差异。在分蘖期-孕穗期,红边位置表现为 4 级处理的“红移”幅度最大;蓝边位置“红移”幅度在 1nm 左右,黄边位置为 1~2nm。在成熟期,4 级处理的红边位置“蓝移”幅度最大,蓝边位置在扬花期 2 级、3 级的“蓝移”幅度最大;黄边位置表现为扬花期 5 级处理“蓝移”幅度最大。可见,红边位置能够清晰反映水稻的生长阶段,蓝边位置和黄边位置的效果不及红边位置。

对照处理的红边面积在拔节期-灌浆期均大于分蘖期,且拔节期-扬花期逐渐增大并在扬花期达到最大值,成熟期小于分蘖期;蓝边面积和黄边面积呈现与红边面积相同的变化趋势。虫害处理与对照的变化趋势相似,具体表现为:在扬花期 1 级处理的面积以及增幅最大,在成熟期 4 级处理的面积最小;在扬花期蓝边和黄边面积 3 级处理的面积及增幅最大,成熟期时 1 级处理的蓝边面积最小,4 级和 5 级处理的黄边面积最小。可见,随着生育阶段的推进,三边面积先增大后减小。

2.2 稻纵卷叶螟为害下水稻叶片叶绿素相对含量估算

2.2.1 不同虫量处理水稻 SPAD 变化特征

由图 2 可见,对照处理的叶绿素相对含量(SPAD)从分蘖期至扬花期逐渐升高,扬花期达到最高值,从扬花期后逐渐降低,成熟期降至最低值;各虫害处理 SPAD 的变化趋势与对照相似,但不同投虫量处理间存在差异,具体表现为:投虫量较少的 1 级、2 级处理与对照处理呈现相似的变化趋势,但在拔节期出现小幅降低的情况;投虫量较多的 3 级、4 级处理从拔节期至孕穗期均呈现降低的趋势,孕穗期后开始升高,扬花期时升至最大值,扬花期后再次降低,成熟期降至最低值;投虫量最多的 5 级处

表 2 各处理水稻冠层光谱曲线的三边参数

Table 2 Trilateral parameters of rice canopy spectra curves under different treatments

参数 Parameter	生育期 Growth period	处理水平 Treatment level					
		对照 CK	1 级 Level 1	2 级 Level 2	3 级 Level 3	4 级 Level 4	5 级 Level 5
λ_{red} (nm)	分蘖期 Tillering	733.11±1.54a	732.05±1.89b	732.08±1.24b	731.93±1.35b	730.82±2.05c	731.73±1.64b
	拔节期 Jointing	734.62±1.15a	733.88±1.45a	733.60±1.70ab	734.15±1.65a	732.65±1.47bc	731.79±5.24c
	孕穗期 Booting	735.48±1.91b	736.61±1.83a	735.28±1.71b	734.84±1.49b	735.33±1.90b	735.60±2.30b
	扬花期 Flowering	734.13±0.45a	734.06±2.51a	732.44±1.78b	730.69±1.89c	729.92±2.86c	732.24±1.64b
	灌浆期 Grain filling	733.91±1.16a	733.55±1.25a	731.72±1.15b	732.00±1.94b	730.68±2.67c	731.28±1.84bc
	成熟期 Maturity	733.04±0.87a	732.71±1.61a	729.04±1.49b	729.84±1.70b	722.28±9.83c	729.31±2.04b
S_{red}	分蘖期 Tillering	0.23±0.07c	0.26±0.04ab	0.28±0.03a	0.26±0.06ab	0.26±0.06ab	0.25±0.05bc
	拔节期 Jointing	0.27±0.02a	0.26±0.07bc	0.25±0.05bc	0.25±0.04bc	0.25±0.04c	0.26±0.04bc
	孕穗期 Booting	0.62±0.08a	0.36±0.04c	0.32±0.04d	0.32±0.04d	0.39±0.04b	0.61±0.04a
	扬花期 Flowering	0.86±0.07a	0.75±0.06b	0.63±0.11e	0.74±0.07bc	0.67±0.12de	0.69±0.15cd
	灌浆期 Grain filling	0.39±0.06b	0.60±0.05a	0.61±0.05a	0.29±0.06c	0.30±0.10c	0.33±0.14c
	成熟期 Maturity	0.23±0.04ab	0.18±0.20c	0.17±0.03cd	0.24±0.04b	0.15±0.05d	0.16±0.02de
λ_{blue} (nm)	分蘖期 Tillering	519.08±1.04d	519.93±0.71ab	520.17±0.51a	520.02±0.81ab	519.55±0.65c	519.67±1.02bc
	拔节期 Jointing	519.62±0.60a	519.73±0.68a	519.80±0.58a	519.71±0.78a	519.42±0.84a	518.93±1.55b
	孕穗期 Booting	520.82±1.55b	520.81±1.70b	521.77±1.18a	521.71±1.12a	521.46±1.09a	520.33±1.75b
	扬花期 Flowering	519.75±0.43a	518.84±0.57b	518.79±0.41b	518.73±0.44b	518.88±0.32b	518.72±0.45b
	灌浆期 Grain filling	520.20±1.03b	520.69±1.28a	519.55±1.23c	519.91±0.70bc	519.64±0.85c	519.66±1.04c
	成熟期 Maturity	520.04±0.73a	520.11±0.98a	519.55±0.89bc	519.93±1.05ab	519.13±1.32c	519.75±1.09ab
S_{blue}	分蘖期 Tillering	0.02±0.00abc	0.02±0.00cd	0.02±0.00bcd	0.01±0.00d	0.02±0.00a	0.02±0.00ab
	拔节期 Jointing	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.02±0.00a
	孕穗期 Booting	0.03±0.00a	0.02±0.00c	0.01±0.00d	0.02±0.00cd	0.02±0.00b	0.03±0.00a
	扬花期 Flowering	0.07±0.00c	0.07±0.00c	0.06±0.01c	0.10±0.02a	0.08±0.01b	0.08±0.02b
	灌浆期 Grain filling	0.03±0.00c	0.04±0.01b	0.05±0.01a	0.02±0.00c	0.02±0.00c	0.03±0.01c
	成熟期 Maturity	0.01±0.00b	0.01±0.00d	0.01±0.00b	0.02±0.00a	0.01±0.00c	0.01±0.00cd
λ_{yellow} (nm)	分蘖期 Tillering	569.80±0.84bc	569.81±0.70bc	569.48±0.50c	570.02±0.72ab	570.04±0.95ab	570.21±0.88a
	拔节期 Jointing	568.55±0.69c	569.51±0.72ab	569.40±0.53b	569.42±0.83ab	569.75±1.03a	568.72±0.63c
	孕穗期 Booting	570.77±0.87a	569.86±1.67b	569.00±1.27c	568.97±1.30c	568.51±1.12c	570.77±1.04a
	扬花期 Flowering	567.97±0.14b	568.25±1.10b	569.17±0.75a	567.04±0.36c	567.15±1.19c	566.90±0.52c
	灌浆期 Grain filling	569.57±1.43b	570.72±0.52a	570.92±0.41a	571.45±0.81a	571.20±0.75a	570.91±4.79a
	成熟期 Maturity	569.68±0.90c	570.82±1.23a	571.02±1.01a	570.28±1.18b	571.06±1.28a	571.11±1.11a
S_{yellow}	分蘖期 Tillering	0.01±0.00a	0.01±0.00ab	0.01±0.00ab	0.01±0.00b	0.01±0.00a	0.01±0.00ab
	拔节期 Jointing	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.01±0.00b	0.01±0.00a
	孕穗期 Booting	0.03±0.00a	0.02±0.00c	0.01±0.00d	0.01±0.00cd	0.02±0.00b	0.03±0.00a
	扬花期 Flowering	0.07±0.00cd	0.08±0.02c	0.07±0.01d	0.11±0.02a	0.10±0.01b	0.09±0.02b
	灌浆期 Grain filling	0.02±0.00cd	0.05±0.01b	0.05±0.00a	0.02±0.00e	0.02±0.00de	0.02±0.01c
	成熟期 Maturity	0.01±0.00a	0.01±0.00c	0.01±0.00b	0.01±0.00a	0.01±0.00cd	0.01±0.00d

注：小写字母表示 0.05 水平的差异显著性。

Note: Lowercase letters indicate the significant difference at 0.05 level.

理 SPAD 同样在拔节期小幅降低,但孕穗期升至最高值,此后逐渐降低,至成熟期最低。可见,投虫量的不同将导致水稻 SPAD 值在整个观测期内呈现不

同的变化趋势。

从图 2 还可发现,不同投虫量等级间水稻 SPAD 值的差异达到了显著水平 ($P<0.05$),且随着生育阶

段的推进, 不同处理间的差异增大, 其中灌浆期和成熟期的差异最大。对照处理的叶绿素相对含量 (SPAD) 在 39.30~51.20, 与对照相比, 受害的水稻 SPAD 大多低于对照, 仅分蘖期和孕穗期时 1 级处理

的 SPAD 值略高于对照。随着投虫量的增多, SPAD 值逐渐下降, 其中 4 级处理的降幅最大, 且降幅随着生育阶段推进逐渐增大, 在灌浆期时降幅最大。可见, 随着投虫量的增加水稻 SPAD 值逐渐降低。

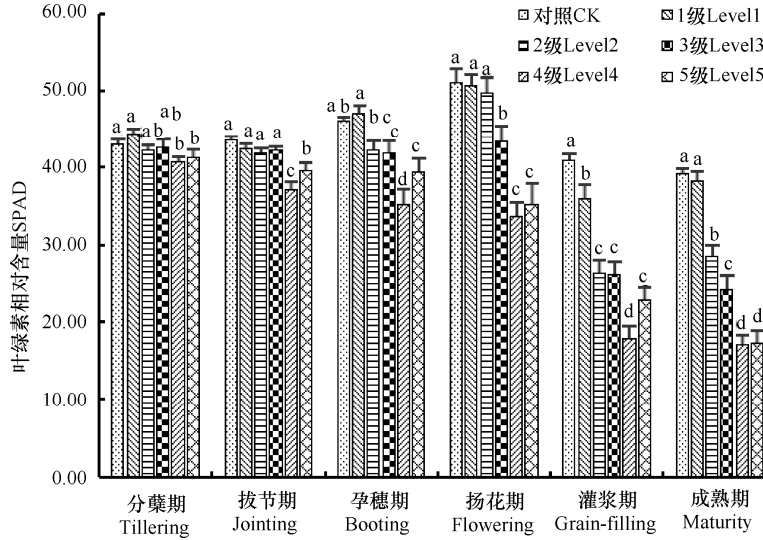


图 2 不同生育期各处理水稻叶片叶绿素相对含量 (SPAD) 比较

Fig.2 Comparison of SPAD values of rice leaves at each growth stage among different treatments

注: 短线表示标准误。小写字母表示 0.05 水平的差异显著性。

Note: The short line indicates standard error of mean (SEM). Different lowercase letters indicate the significant difference at 0.05 level.

2.2.2 叶片 SPAD 值与光谱数据和植被指数相关性分析
将水稻整个生育期的 SPAD 值与原始光谱、导数光谱分别进行相关性分析 (图 3)。由图 3 可见, 在可见光的紫-橙光波段 (400-623nm), SPAD 与原始光谱反射率呈弱的正相关, 部分红光波段 (624-680nm) 为弱的负相关, 部分红光波段

(712-760nm) 以及近红外波段 (761-1000nm) 为显著正相关 (P<0.05)。SPAD 值与导数光谱在部分绿波段 (501-536nm)、部分红波段 (690-758nm) 以及部分近红外波段 (761-793nm) 呈显著正相关, 在黄-红波段 (554-659nm) 二者呈显著负相关。

利用上述相关性达到显著水平的光谱波段计算

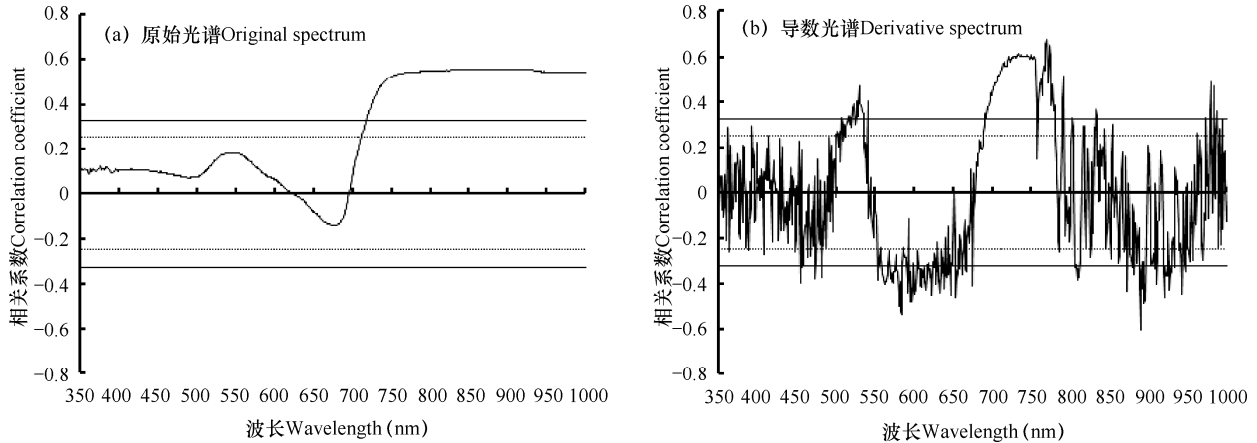


图 3 水稻冠层光谱反射率与 SPAD 的相关性

Fig. 3 Correlation between spectral reflectance of rice canopy and SPAD values

注: 水平虚线和实线分别表示 P<0.05 和 P<0.01 显著性水平。

Note: Horizontal dashed lines and solid lines indicate P<0.05 and P<0.01, respectively.

植被指数和三边参数,并分别与 SPAD 值进行相关性分析(表 3)。其中 SIPI 和黄边位置与 SPAD 值呈显著负相关,其余参数均呈显著正相关。大部分指数与 SPAD 值都具有很强的相关性,达到了极显著水平($P<0.01$),尤以 NDVI、NDVI₇₀₅、红边位置与 SPAD 值的相关性较好,相关系数的绝对值均达到了 0.80 以上。GNDVI、OSAVI、mNDVI₇₀₅、NDRE 与 SPAD 的相关系数也达到 0.70 以上。因此,可利用这些相

关性较强的植被指数与三边参数建立模型,对稻纵卷叶螟为害下水稻 SPAD 值进行估算。

2.2.3 水稻叶片 SPAD 估算模型

分别将整个生育期的植被指数作为自变量,包括 NDVI、OSAVI、NDVI₇₀₅、mNDVI₇₀₅、NDRE、红边位置,将整个生育期的 SPAD 值作为因变量,建立水稻全生育期 SPAD 值的单因子估算模型(表 4)。分别选择常用的指数函数、线性函数、多项式函数以

表 3 植被指数、三边参数与 SPAD 值的相关关系(n=60)

Table 3 Correlation between vegetation indices, trilateral parameters and SPAD values(n=60)

植被指数 Vegetation index	相关系数 Correlation coefficient	三边参数 Trilateral parameter	相关系数 Correlation coefficient
归一化植被指数 NDVI	0.82**	红边幅值 $D\lambda_{red}$	0.51**
绿色归一化植被指数 GNDVI	0.73**	红边位置 λ_{red}	0.80**
结构不敏感色素指数 SIPI	-0.48**	红边面积 S_{red}	0.50**
光化学植被指数 PRI	0.62**	蓝边幅值 $D\lambda_{blue}$	0.32*
最优土壤调节植被指数 OSAVI	0.76**	蓝边位置 λ_{blue}	0.52**
红边归一化植被指数 NDVI ₇₀₅	0.80**	蓝边面积 S_{blue}	0.31*
改进红边归一化植被指 mNDVI ₇₀₅	0.79**	黄边幅值 $D\lambda_{yellow}$	0.36**
红边叶绿素指数 $CI_{rededge}$	0.69**	黄边位置 λ_{yellow}	-0.59**
绿色叶绿素指数 CI_{green}	0.61**	黄边面积 S_{yellow}	0.40**
归一化差分红边 NDRE	0.76**		
美国陆地叶绿素指数 MTCL	0.69**		

注: *和**分别表示相关系数通过 0.05 和 0.01 水平显著性检验。 Note: * is $P<0.05$, and ** is $P<0.01$.

表 4 基于水稻冠层光谱参数的 SPAD 值估算模型

Table 4 Estimation models of SPAD values based on rice canopy spectral parameters

	估算模型 Estimation model	R ²
指数模型 Exponential model	$Y=12.60e^{1.47NDVI}$	0.72
	$Y=20.29e^{1.03OSAVI}$	0.61
	$Y=18.89e^{1.32NDVI_{705}}$	0.67
	$Y=11.73e^{1.74mNDVI_{705}}$	0.66
	$Y=20.04e^{1.67NDRE}$	0.60
	$Y=3.78 \times 10^{-5} e^{0.02\lambda_{red}}$	0.69
线型模型 Linear model	$Y=47.00NDVI+3.91$	0.68
	$Y=18.94OSAVI+33.17$	0.59
	$Y=16.73NDVI_{705}+42.31$	0.64
	$Y=55.82mNDVI_{705}+1.42$	0.63
	$Y=54.14NDRE+18.47$	0.58
	$Y=0.61\lambda_{red}-403.36$	0.65
对数模型 Logarithmic model	$Y=30.23\ln(NDVI)+48.63$	0.70
	$Y=16.06\ln(OSAVI)+48.33$	0.63
	$Y=17.45\ln(NDVI_{705})+51.44$	0.68
	$Y=32.92\ln(mNDVI_{705})+52.77$	0.64
	$Y=16.96\ln(NDRE)+56.64$	0.63
	$Y=438.07\ln(\lambda_{red})-2846.53$	0.65

(续表)

	估算模型 Estimation model	R ²
二次多项式模型 Quadratic polynomial model	$Y = -77.37NDVI^2 + 149.54NDVI - 27.69$	0.71
	$Y = -59.19OSAVI^2 + 96.40OSAVI + 4.75$	0.66
	$Y = -88.77NDVI_{705}^2 + 122.41NDVI_{705} + 1.60$	0.70
	$Y = -90.82mNDVI_{705}^2 + 165.69mNDVI_{705} - 29.97$	0.64
	$Y = -181.17NDRE^2 + 176.88NDRE - 0.70$	0.66
三次多项式模型 Cubic polynomial model	$Y = -39.85NDVI^3 + 101.41NDVI - 18.18$	0.71
	$Y = -53.54OSAVI^3 + 30.05OSAVI^2 + 51.30OSAVI + 11.23$	0.66
	$Y = -282.87NDVI_{705}^3 + 302.09NDVI_{705}^2 - 42.40NDVI_{705} + 21.64$	0.71
	$Y = -52.67mNDVI_{705}^3 + 115.25mNDVI_{705} - 20.98$	0.65
	$Y = -697.98NDRE^3 + 540.48NDRE^2 - 51.11NDRE - 21.64$	0.68
	$Y = -3.49 \times 10^{-6} \lambda_{red}^3 + 6.00 \lambda_{red} - 2986.58$	0.65
多元逐步回归模型 Multiple stepwise regression model	$Y = 91.26NDVI - 56.53NDRE - 7.66$	0.71

及对数函数进行拟合，并比较估算模型的决定系数 R²。由表 4 可见，水稻全生育期 SPAD 值估算模型的 R² 基本在 0.60 以上，表明用光谱参数进行 SPAD 值的估算方法是可行的。NDVI 指数和多项式模型以及 NDVI₇₀₅ 的多项式模型的拟合效果较好，R² 达到了 0.70 以上。其中 NDVI 的指数模型最高，R² 为 0.72。在多元逐步回归模型中，NDVI 和 NDRE 进入模型，R² 同样达到了 0.70 以上。可见，NDVI 和带红边反射率的模型均可用于估算 SPAD，且具有较理想的效果。

3 结论与讨论

3.1 讨论

本研究对全生育期水稻光谱进行研究，而以往的相关研究多仅针对单个生育期进行。孙红等^[14]对抽穗期稻纵卷叶螟为害下的光谱特征的研究表明，在可见光波段，受害程度低的反射率低于对照，受害程度高的反射率则高于对照。这与本研究得出结果相似。而黄建荣等^[8]认为不同为害程度下分蘖期水稻单叶反射率不仅在近红外波段的反射率随为害程度的加深逐渐下降，绿光波段反射率也随为害程度加深而逐渐下降，红光波段反射率则随为害程度加深逐渐增大。与之产生差异的主要原因可能有两点：其一，本研究为冠层光谱，文献中为单叶光谱，二者尺度有明显的差异；其二，冠层光谱采集时天气条件多变，土壤背景会有一定影响。但无论是冠层光谱或是单叶光谱，均能通过光谱的变化情况反映作物的长势变化。

本研究发现，稻纵卷叶螟为害对水稻冠层光谱反射率的影响，主要表现为随着投虫量的增多，近红外波段的光谱反射率逐渐下降。这主要是因为

受到稻纵卷叶螟为害后，水稻叶片会被幼虫啃食因而出现“白斑”，降低了水稻叶面积指数和叶片叶绿素含量。进一步表明光谱与叶绿素含量具有紧密相关性^[28-29]，通过光谱信息能够反映出作物叶绿素的变化情况。其中 4 级处理（300 头·百株⁻¹）的近红外波段反射率在所有处理中最低。这可能是因为本试验采用虫网将水稻与外界隔离，投放的稻纵卷叶螟幼虫将在网内进行生长和繁殖。在水稻分蘖初期，当幼虫虫量达到一定程度时（如 400 头·百株⁻¹），水稻生长速度小于幼虫取食速度，部分幼虫由于无法获得足够的食物而死亡，因此在水稻生长后期，该等级下的虫量反而偏低，水稻长势优于 4 级，从而也造成该等级在近红外波段的反射率有所上升。

本研究还发现，受到稻纵卷叶螟为害后，红边位置、蓝边位置和黄边位置均发生“蓝移”，可以反映出作物受害情况。不仅受稻纵卷叶螟为害，在其它胁迫类型下光谱的三边参数也会产生类似的变化规律。沙依然·外力等^[30]的研究表明，受到干旱为害后水稻红边位置存在“蓝移”现象。朱怀卫等^[31]研究表明，随着 UV-B 的增强，水稻光谱红边位置发生“蓝移”。而当作物长势较好或生长旺盛时则会发生“红移”现象^[32]。本研究还发现，三边参数中红边参数反映稻纵卷叶螟的为害效果优于蓝边和黄边参数。这是因为 SPAD 与导数光谱的红边位置显著相关，红边位置相比其它三边参数更能反映作物受害的变化情况^[33-34]。

本研究对全生育期水稻叶绿素相对含量（SPAD）进行观测，发现随着投虫量的增加 SPAD 值逐渐降低。但投虫量最高的 5 级处理的 SPAD 值并未

依次低于4级处理,反而4级处理为最低值,其原因与光谱类似。在稻纵卷叶螟为害初期,SPAD值下降幅度较小。刚放入稻纵卷叶螟时若受到轻微的虫害,如1级处理,反而使得SPAD值略高于对照处理。这与李梅等^[35]对马铃薯晚疫病的研究结果相似。这可能是因为稻纵卷叶螟幼虫投放时间尚短,幼虫对水稻的为害处于水稻自我补偿能力范围以内,轻微的虫害不仅能被水稻抵御,还能略微促进水稻的生长。有研究表明,孕穗期水稻受到轻微干旱胁迫,复水后SPAD值上升幅度大于对照处理^[36]。本研究还发现,随着时间的推移,SPAD值的下降幅度增加,其中在灌浆期降幅最大。前人也有相似的研究结果。胡华冉等^[37]的研究表明,受到 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为害的大麻幼苗SPAD值均低于对照,并且随着浓度的提高SPAD值逐渐减小。李凯伟等^[38]的研究表明,随着寡照为害时间加长,葡萄叶片的SPAD值逐渐降低。

本研究发现,在整个光谱波段范围内(350-1000nm),绿波段(501-536nm)、黄-红波段(554-659nm)、红波段(690-758nm)以及近红外波段(761-1000nm)与SPAD的相关性较好,说明它们能够有效反映SPAD值的变化情况,或许可以作为稻纵卷叶螟为害下的敏感波段。在所有的植被指数中,NDVI、 NDVI_{705} 、红边位置与SPAD值的相关性较好,估算模型的精度也较高,其中NDVI的指数模型效果最理想。这可能是因为稻纵卷叶螟为害水稻后,会造成叶绿素含量的变化,同时幼虫啃食时将叶片卷起,叶面积会减小,啃食严重时叶片几乎仅剩表皮和叶脉,因此,也会影响叶面积指数。而NDVI也同时能够反映冠层叶面积的变化情况,因此对稻纵卷叶螟的为害更为敏感。黄建荣的研究结果也表明,孕穗期时基于稻纵卷叶螟为害的水稻受害程度估算模型也以NDVI模型准确率最高^[39]。

本研究基于与叶绿素相对含量(SPAD)相关性较强的光谱波段构建估算模型,模型精度较高,表明利用高光谱数据建立稻纵卷叶螟为害下水稻叶绿素相对含量估算模型的方法可行。模型通过水稻冠层光谱数据估算叶绿素相对含量,可以反映稻纵卷叶螟为害下水稻的生长情况,与传统破坏性采样后用丙酮等试剂提取叶绿素含量的方法^[6]相比更为快速、瞬时、无损,并且该模型可用于水稻全生育期的估算,与一般单生育期估算模型^[40-41]相比更具普适性。此外,模型还建立了宏观的冠层尺度与微观

的叶片尺度之间的联系,并取得了较好的结果。前人研究也表明,冠层光谱也可用于叶片尺度的参数估算。孙小香等^[42]利用水稻冠层光谱预测叶片SPAD,精度达0.80; Singh等^[43]利用冠层反射率评价甜高粱生长、叶片氮含量和叶绿素含量,结果表明由595nm与1676nm、595nm与508nm的反射率组成的简单比值模型预测叶片N浓度和叶绿素含量的精度最大。由此说明冠层光谱虽然包含了一些背景和其它叶片的信息,但依然能够反映出叶绿素的变化情况。与实验室环境相比,基于冠层的光谱反射率信息虽然更为复杂,但更接近野外田间的实际情况,更利于推广至田间的观测。为了完善田间的估算模型,后续将开展成像光谱的试验研究,以去除不同部位叶片和背景的信息,进一步提高基于稻纵卷叶螟为害下水稻SPAD估算模型的准确性。

3.2 结论

(1) 随着投虫量的增加,水稻冠层光谱反射率在近红外波段逐渐下降,4级处理(300头·百株⁻¹)的反射率最低。在分蘖期-孕穗期,虫害处理可见光波段的反射率低于对照,扬花期-成熟期则高于对照。

(2) 随着投虫量的增加,红边位置发生了明显的“蓝移”。

(3) 叶绿素相对含量(SPAD)随投虫量的增加逐渐降低,4级处理最低。

(4) 利用相关性较好的植被指数与三边参数构建模型,可用于SPAD的估算,其中NDVI的指数模型估算效果最优。

参考文献 References

- [1] 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.
Bao Y X, Cao Y, Xie X J, et al. Migration pattern of rice leaf folder and impact of atmospheric conditions on a heavy migration event in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11):3519-3533. (in Chinese)
- [2] Guo T W, Liao C T, Chuang W P. Defensive responses of rice cultivars resistant to *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Crambidae)[J]. Arthropod-Plant Interactions, 2019, 13(4):611-620.
- [3] 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.
Gao W T. Effect of *Cnaphalocrocis Medinalis* on rice

- physiological and ecological parameters and yield under condition of field experiments[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science and Technology,2017.(in Chinese)
- [4] 陆明红,刘万才,胡高,等.中越水稻迁飞性害虫稻飞虱、稻纵卷叶螟发生关系分析[J].植物保护,2018,44(3):31-36.
Lu M H,Liu W C,Hu G,et al.Analysis of the relationships of rice planthopper and rice leaf folder occurrence between China and Vietnam[J].Plant Protection,2018,44(3):31-36.(in Chinese)
- [5] 徐澜,高志强,安伟,等.冬麦春播条件下旗叶光合特性、叶绿素荧光参数变化及其与产量的关系[J].应用生态学报,2016,27(1):133-142.
Xu L,Gao Z Q,An W,et al.Flag leaf photosynthetic characteristics,change in chlorophyll fluorescence parameters, and their relationships with yield of winter wheat sowed in spring[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(1): 133-142.(in Chinese)
- [6] 朱雨晴,薛晓萍.遮阴及复光对花果期番茄叶片光合特性的影响[J].中国农业气象,2019,40(2):126-134.
Zhu Y Q,Xue X P.Effects of shading and light restoration on photosynthetic characteristics of tomato leaves during flowering and fruit period[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2019,40(2):126-134.(in Chinese)
- [7] 刘占宇.水稻主要病虫害胁迫遥感监测研究[D].杭州:浙江大学,2008.
Liu Z Y.Monitoring the rice diseases and insect stress with remote sensing[D].Hangzhou:Zhejiang University,2008.(in Chinese)
- [8] 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.
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.(in Chinese)
- [9] 孙嘉怿.水稻叶片高光谱对虫害的敏感性及稻飞虱的为害监测[D].南京:南京农业大学,2013.
Sun J Y.Sensitivity of hyperspectral reflectance to monitor rice pests and the monitor methods for rice planthoppers[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2013.(in Chinese)
- [10] 朱宇波.稻纵卷叶螟危害水稻的高光谱监测方法研究[D].南京:南京农业大学,2012.
Zhu Y B.Hyperspectral monitoring the damage of rice by rice leaf folder *Cnaphalocrocismedinalis* Guénee[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2012.(in Chinese)
- [11] 袁琳.小麦病虫害多尺度遥感识别和区分方法研究[D].杭州:浙江大学,2015.
Yuan L.Identification and discrimination of wheat diseases and insect with multi-source and multi-scale remote sensing data[D].Hangzhou:Zhejiang University,2015.(in Chinese)
- [12] Huang J,Liao H,Zhu Y,et al.Hyperspectral detection of rice damaged by rice leaf folder(*Cnaphalocrocismedinalis*)[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2012,82:100-107.
- [13] 沈文颖,冯伟,李晓,等.基于叶片高光谱特征的小麦白粉病严重度估算模式[J].麦类作物学报,2015,35(1):129-137.
Shen W Y,Feng W,Li X,et al.Estimation model of wheat powdery mildew severity based on leaves hyperspectral characteristics[J].Journal of Triticeae Crops,2015,35(1): 129-137.(in Chinese)
- [14] 孙红,李民赞,周志艳,等.基于光谱技术的水稻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.
Sun H,Li M Z,Zhou Z Y,etal.Monitoring of *Cnaphalocrocismedinalis* Guénee based on canopy reflectance[J].Spectroscopy and Spectral Analysis,2010, 30(4):1080-1083.(in Chinese)
- [15] Ling Q,Huang W,Jarvis P.Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in *Arabidopsis thaliana*[J].Photosynthesis Research,2011,107(2):209-214.
- [16] Rouse J W.Monitoring the vernal advancement and retrogradation(Green wave effect) of natural vegetation[R]. NASA/GSFCT,MD,USA,1973.
- [17] 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.
Zheng W.Extraction and application of rice growth parameters based on multi-source and multi-temporal remote sensing[D].Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2017.(in Chinese)
- [18] Penuelas J,Baret F,Filella I.Semiempirical indexes to assess carotenoids chlorophyll-a ratio from leaf spectral reflectance[J].Photosynthetica,1995,31(2):221-230.
- [19] Gamon J A,Penuelas J,Field C B.A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency[J].Remote Sensing of Environment,1992,41(1): 35-44.
- [20] Geneviève R,Steven M,Frédéric B.Optimization of soil-

- adjusted vegetation indices[J].Remote Sensing of Environment,1996,55(2):95-107.
- [21] 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[J]. Journal of Plant Physiology, 1994, 143(3): 286-292
- [22] Sims D A, Gamon J A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 337-354.
- [23] Gitelson A A, Viña A, Ciganda V, et al. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(8): L08403.
- [24] Fitzgerald G, Rodriguez D, O'Leary G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index: the canopy chlorophyll content index (CCCI)[J]. Field Crops Research, 2010, 116(3): 1-324.
- [25] Dash J, Curran P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23): 5403-5413.
- [26] Bonham-Carter G F. Numerical procedures and computer program for fitting an inverted gaussian model to vegetation reflectance data[J]. Computers & Geosciences, 1988, 14(3): 339-356.
- [27] Gong P, Pu R, Heald R C. Analysis of in situ hyperspectral data for nutrient estimation of giant sequoia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(9): 1827-1850.
- [28] 徐道青, 刘小玲, 王维, 等. 淹水胁迫下棉花叶片高光谱特征及叶绿素含量估算模型[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3289-3296.
- Xu D Q, Liu X L, Wang W, et al. Hyper-spectral characteristics and estimation model of chlorophyll content in cotton under waterlogging stress[J]. Chinese Journal Applied Ecology, 2017, 28(10): 3289-3296. (in Chinese)
- [29] 申晓慧. 不同施肥种类对大豆叶片光谱及叶绿素含量的相关性分析[J]. 黑龙江农业科学, 2014(1): 34-36.
- Shen X H. Correlation analysis of chlorophyll content and spectral characteristics of soybean leaves under different fertilizer treatments[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2014(1): 34-36. (in Chinese)
- [30] 沙依然·外力, 葛道阔, 曹宏鑫, 等. 拔节抽穗期不同时长干旱胁迫对水稻冠层光谱特征的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(5): 586-592.
- Sayran W L, Ge D K, Cao H X, et al. Spectral response characteristics of rice canopy under drought stress at jointing stage and heading stage[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(5): 586-592. (in Chinese)
- [31] 朱怀卫, 娄运生, 石一凡, 等. UV-B 增强下施硅对水稻冠层反射光谱特征的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(3): 172-180.
- Zhu H W, Lou Y S, Shi Y F, et al. Effects of silicon supply on reflectance spectroscopy characteristics of rice canopy under elevated UV-B radiation[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(3): 172-180. (in Chinese)
- [32] 余蛟洋, 常庆瑞, 班松涛, 等. 猕猴桃叶片 SPAD 值高光谱估算模型构建[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 168-174.
- Yu J Y, Chang Q R, Ban S T, et al. Hyperspectral models for estimating SPAD values of kiwifruit leaves[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 168-174. (in Chinese)
- [33] 丁希斌, 刘飞, 张初, 等. 基于高光谱成像技术的油菜叶片 SPAD 值检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(2): 486-491.
- Ding X B, Liu F, Zhang C, et al. Prediction of SPAD value in oilseed rape leaves using hyperspectral imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(2): 486-491. (in Chinese)
- [34] 杨荣超, 田海清, 李斐, 等. 基于甜菜冠层高光谱红边参数的 SPAD 值诊断[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(11): 153-156.
- Yang R C, Tian H Q, Li F, et al. Diagnosis of SPAD value based on red edge parameter of beet canopy hyperspectral[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(11): 153-156. (in Chinese)
- [35] 李梅, 徐明珠, 何勇, 等. 马铃薯晚疫病叶片 SPAD 值的高光谱研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(12): 136-142.
- Li M, Xu M Z, He Y, et al. SPAD measurement of potato leaves infected late blight based on hyper-spectral[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(12): 136-142. (in Chinese)
- [36] 郭慧, 马均, 李树杏, 等. 孕穗期水分胁迫对水稻部分生理特性与产量补偿效应的研究[J]. 南方农业学报, 2013, 44(9): 1448-1454.
- Guo H, Ma J, Li S X, et al. Effects of water stress on partial physiological characteristics and yield compensation in rice at booting stage[J]. Journal of Southern Agriculture, 2013,

- 44(9):1448-1454.(in Chinese)
- [37] 胡华冉,刘浩,邓纲,等.不同盐碱胁迫对大麻种子萌发和幼苗生长的影响[J].植物资源与环境学报,2015,24(4):61-68.
Hu H R,Liu H,Deng G,etal.Effects of different salt-alkaline stresses on seed germination and seedling growth of Cannabis[J].Journal of Plant Resources and Environment, 2015,24(4):61-68.(in Chinese)
- [38] 李凯伟,杨再强,肖芳,等.寡照胁迫对设施葡萄叶片光合特性的影响及评价[J].中国农业气象,2017,38(12):801-811.
Li K W,Yang Z Q,Xiao F,et al.Effects and evaluation of low irradiation stress on photosynthetic characteristics of grapevine leaves in greenhouse[J].Chinese Journal of Agrometeorology,2017,38(12):801-811.(in Chinese)
- [39] 黄建荣.稻纵卷叶螟和褐飞虱为害水稻的光谱监测[D].南京:南京农业大学,2013.
Huang J R.Detection of *Cnaphalocrocismedinalis* Güenée and *Nilaparvatalugens*(Stål) damage in rice using spectral data[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2013.(in Chinese)
- [40] 孙勃岩,常庆瑞,刘梦云.冬小麦冠层叶绿素质量分数高光谱遥感反演研究[J].西北农业学报,2017,26(4):552-559.
Sun B Y,Chang Q R,Liu M Y.Inversion chlorophyll mass fraction in winter wheat canopy by hyperspectral reflectance[J].Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2017,26(4):552-559.(in Chinese)
- [41] 董哲,杨武德,张美俊,等.基于高光谱遥感的玉米叶片 SPAD 值估算模型研究[J].作物杂志,2019,(3):126-131.
Dong Z,Yang W D,Zhang M J,et al.Estimation models of maize leaf SPAD value based on hyperspectral remote sensing[J].Crop Journal,2019,(3):126-131.(in Chinese)
- [42] 孙小香,王芳东,郭熙,等.基于水稻冠层高光谱的叶片 SPAD 值估算模型研究[J].江西农业大学学报,2018,40(3):444-453.
Sun X X,Wang F D,Guo X,et al.The estimation models of rice leaf SPAD value based on canopy spectrum[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2018,40(3):444-453. (in Chinese)
- [43] Singh S K,Houx J H,Maw M J W,etal.Assessment of growth, leaf N concentration and chlorophyll content of sweet sorghum using canopy reflectance[J].Field Crops Research, 2017,209:47-57.