结合冠层光谱和叶片生理观测的 小麦条锈病监测模型研究

艾效夷1,2, 宋伟东1, 张竞成2*, 王保通3, 杨贵军2, 黄文江4

(1. 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院,阜新 123000; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097; 3. 旱区作物逆境生物学国家重点实验室,西北农林科技大学,杨凌 712100;

4. 中国科学院遥感与数字地球研究所,数字地球重点实验室,北京 100094)

摘要 通过开展小麦条锈病接种试验,在多个关键生育期获取被动式的冠层光谱和主动式的叶片生理观测并开展病情调查。在此基础上,结合优选的光谱特征和生理特征采用偏最小二乘回归方法(PLSR)构建病情严重度反演模型,得到不同生育期精度表现最优的特征组合。结果显示,基于光谱观测的优选光谱特征和基于叶片生理观测的Flav(类黄酮相对含量)、Chl(叶绿素含量)的不同组合在小麦挑旗期、灌浆早期和灌浆期分别具有较佳表现,模型精度达到 $r^2=0.90$,RMSE=0.026。相比单纯采用光谱特征,综合冠层光谱和叶片生理观测能够使模型精度提高21%,表明两种数据的结合有利于提高病情严重度估测精度。上述研究可为小麦病害监测仪器的开发提供新的模式和思路。

关键词 光谱特征; 叶片生理; 小麦条锈病; PLSR; Dualex 4

中图分类号: S 431 文献标识码: A **DOI**: 10.3969/j. issn. 0529 - 1542. 2016. 02. 007

Combined canopy spectral and leaf physiological observations in model development for wheat stripe rust detection

Ai Xiaoyi^{1,2}, Song Weidong¹, Zhang Jingcheng², Wang Baotong³, Yang Guijun², Huang Wenjiang⁴

(1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 3. State Key Laboratory of Crop Stress Biology in Arid Areas, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 4. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract This study attempted to combine measurements from both passive and active sensors to form a retrieving model of wheat stripe rust severity. In a disease inoculation experiment, besides the survey of disease severity, measurements of both the passive canopy spectra and active foliar fluorescence were carried out at two key growing stages. Prior to model development, a feature selection protocol is implemented to identify optimal features serving as model input variables. Based on different combinations of the selected features, the retrieving models of disease severity were developed and compared using the partial least squares regression (PLSR) method, to determine the best feature combinations at different growing stages. The results based on the optimal spectral features and leaf physiological observations on Flav (flavonoids), Chl (chlorophyll) of different combinations at wheat flag, early filling and grain filling stages had a better performance, with a precision of $r^2 = 0.90$, and RMSE = 0.026. Compared to spectral characteristics alone, comprehensive canopy spectra and leaf physiological observations improved model accuracy by 21%, showing that the combination of the two kinds of data could improve the disease severity estimation precision. The study can provide a new pattern and idea for the development of wheat disease monitoring instrument.

Key words spectral feature; leaf fluorescence; wheat stripe rust; partial least squares regression (PLSR); Dualex 4

攵稿日期: 2015 - 01 -23 **修订日期:** 2015 - 02 - 16

国家自然科学基金(41301476);北京市自然科学基金(4132029);陕西省科技统筹项目(2012KTCL02-10)

· 通信作者 E-mail:zhangjc_rs@163.com

小麦条锈病是一种发病率高的大区域流行性病 害,给我国的小麦生产造成了极大损失[1]。每年国 家投入大量农药用于防治该病。在田间对该病进行 有效的监测,实时掌握病害发生的范围、程度,有助 于判断病害的发展趋势,采取科学合理的防治措施, 降低防治成本,减轻环境负荷。近年来,除传统病害 田间调查外,一些无损快速诊断技术被应用干作物 病害和其他胁迫的监测和诊断上[2]。这方面研究目 前主要集中在基于光谱原理的探测方式上,包括被 动式冠层光谱和主动式速测仪器等观测方式。在冠 层光谱分析方面,目前,国内外学者对作物病虫害进 行了大量研究,取得了一定的进展,研究内容大致分 为以下两个方面:第一方面研究了病虫害胁迫光谱 响应波段的位置,如竞霞等[3]利用 ASD 光谱仪测量 棉叶光谱反射率,结果表明红光波段 680~700 nm 是棉花单叶黄萎病病情严重度识别的最佳波段; Liu 等[4] 通过 ASD 获取水稻稻穗的光谱信息,分析发现 450~850 nm 波段的反射率变化与水稻颖枯病具有 相关性;第二方面研究基于各类植被指数进行病虫 害监测,如 Steddom 等[5]利用归一化植被指数 (NDVI)、花青素反射指数(ARI)对甜菜病害进行 了监测;Yang 等[6]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,决 定系数均达到 0.8 以上。另外值得注意的是,近年 来基于光谱、荧光原理的主动式仪器被广泛应用于 对作物生理活性及胁迫状态的诊断上。由于该类仪 器以主动方式在相对密闭的环境中对作物进行观 测,能够在很大程度上避免一些环境干扰,测量参数 往往具有较高的精度和稳定性。Tremblay 等[7-9]在 玉米和小麦的研究中发现相对叶绿素含量(SPAD 值)与相对多酚含量(Dualex 值)的比值在氮营养状 况诊断方面比单一指标更加敏感和稳定。Cerovic 等[10]对玉米和小麦进行研究,结果表明 Dualex 估 测叶片叶绿素浓度与实测值高度线性相关;余伟烽 等[11]在对水稻的研究中也发现了类似的结果,Dualex 估测的叶绿素值与水稻叶片叶绿素浓度成极显 著线性相关(P<0.001)。

作物冠层光谱由于具有丰富的谱段信息,能够较灵敏地响应作物整体生长及环境状况。但引起冠层光谱变化的因素很多,关系较为复杂,因此冠层光谱与植物生理活性和生化状态的关系有时并不稳定。而基于光谱、荧光原理的主动式仪器由于能够

获得较为稳定的植物生理活性和生化状态参量,与冠层光谱信息形成很好的互补关系。为此,本研究提出尝试将上述两种观测方式结合进行小麦条锈病监测。根据国内外文献调研,罕有该方面的研究或报道。本文以控制试验方式设置小麦条锈病发生现场及正常对照区域,基于经典的 ASD Field Spec 光谱仪和 Dualex 4 叶片测量仪在重要生育期中对作物进行观测,在特征优选的基础上构建小麦条锈病病情严重度反演模型,检验综合两种观测方式的模型是否有助于提高病情监测精度,并对应用可行性和可能存在的问题进行讨论。

1 材料与方法

1.1 试验方案

试验地位于北京市昌平区小汤山国家精准农业示范研究基地。土壤有机质含量约为14 g/kg,碱解氮为63.3 mg/kg,速效钾为123.4 mg/kg。试验田块长100 m,宽50 m。本试验选用易感条锈病的'京9843'。2014年4月5日采用喷雾法进行接种。接种菌源为甘肃省农业科学院植物保护研究所提供的条锈病夏孢子混合生理小种,设置0.03、0.09、0.12 mg/mL3个不同的浓度梯度处理,以制造不同的发病梯度,每个处理设置2个重复。接种在17:00开始,用小型喷雾器将制备好的孢子悬浮液喷在植株叶片上,接种后盖上塑料薄膜,过夜,次日清晨9:30左右揭去塑料薄膜,完成接种。显症后分别在小麦挑旗期、灌浆早期和灌浆期进行冠层光谱和生理生化参数的测试。

1.2 数据获取及测试

1.2.1 冠层光谱测量

值进行转换。

本研究冠层光谱获取采用美国 ASD 公司生产的 ASD Field SpecPro FR(350-2500) 便携式光谱仪(图 1)。波长范围 $350\sim2~500$ nm,波长精度 ±1 nm,采样时间 10 次/s,光谱采样间隔在 $350\sim1~050$ nm范围内为 1.377 nm;在 $1~000\sim2~500$ nm 范围内为 2~nm;光谱分辨率在 $350\sim1~000$ nm 范围内为 3~nm;在 $1~000\sim2~500$ nm 范围内为 10~nm。观测时将探头垂直向下,高度始终保持离地面 1.3~m,探头为 25° 视场角,地面视场范围直径为 50~cm。每小区测量 20~次,每次测量前后均用标准的参考板进行校正,之后通过反射率值和 DN 灰度

$$R_{\rm H k k k k k} = \frac{DN_{\rm H k k}}{DN_{\rm ssk}} \times R_{\rm ssk k k k k k}$$
 (1)

计算出目标物的反射率值,将 20 次的反射率值 平均,作为该小区小麦冠层光谱反射率值。所有测 试均在晴朗无云天气条件下完成,并于地方时间 10:00-14:00 进行。



图 1 ASD Field SpecPro FR (350 - 2500) 便携式光谱仪(左), Dualex 4 叶片测量仪(右) Fig. 1 ASD Field SpecPro spectrometer(left), Dualex 4(right)

1.2.2 植物生理生化参数速测

采用法国 Force-A 公司开发的 Dualex 4(Dx4) 叶片测量仪获取小麦的类黄酮相对含量(Flav)、叶绿素相对含量(Chl)及氮平衡指数(NBI)(图 1)。 Dx4 是新型的荧光传感器,通过双重激发的叶绿素荧光来获取叶片表皮的紫外光(375 nm)吸收率,进而评估叶片的类黄酮含量[12]; Dx4 估测叶片叶绿素含量所采用的波段为 850 nm 和 710 nm,计算公式为:

$$Chl = k(\frac{T_{850}}{T_{710}} - 1) + c \tag{2}$$

其中 Chl 为 Dx4 估测的叶绿素浓度, T_{850} 和 T_{710} 为 850 nm 和 710 nm 的叶片透射率,k 为比例系数,c 为校正系数^[11]。当植物受到病害胁迫时,叶绿素被破坏,类黄酮作为植物抗毒素含量增加^[13],引起 NBI 值的改变,即可对植物的病害状况进行实时监测。每个小区选取 30 片叶子进行测定,取其均值作为该小区的氮平衡指数、叶绿素相对含量和类黄酮相对含量。

1.2.3 病情指数(DI)调查

主要采取 5 点调查法,即在条锈病开始出现病症后,在处理小区内调查反应型和严重度,每块小区选取对称的 5 点,每点约 1 m²,随机选取 30 株小麦,分别调查其发病情况。病情严重度参照国家标准"小麦条锈病测报技术规范"(GB/T 15795)[14]进行量化。单叶严重度分为 9 个梯度,即:0%、1%、

10%、20%、30%、45%、60%、80%和100%的叶片 病斑覆盖。分别记录各严重度的小麦叶片数,计算 病情指数。公式为:

$$DI(\%) = \frac{\sum (x \times f)}{n \times \sum f} \times 100 \tag{3}$$

其中,DI 为病情指数,x 各梯度的级值,n 为最高梯度级值 9,f 为各梯度的叶片数。

1.3 数据分析及处理

1.3.1 植被指数计算

基于两种仪器获得的观测结果需要通过一些特 征形式进行表示,作为病害监测模型输入变量。其 中,冠层光谱数据则通过计算不同形式植被指数,用 以表征作物某方面特征或状态。本研究系统归纳和 整理了常用于作物病虫害监测的 11 个高光谱(Hyp) 植被指数和9个多光谱(MS)植被指数(表1)。这些 特征包括如 SAVI 等适用于减弱土壤背景影响的指 数;短波红外水胁迫指数(SIWSI)、疾病水胁迫指数 (DSWI)、水分胁迫指数(MSI)、水分指数(WI)等 植被水分含量监测的指数;以及 NDVI、ARI、三角 植被指数(TVI)、比值植被指数(SR)、光化学植被 指数(PRI)、氮反射率指数(NRI)、归一化叶绿素比 值指数(NPCI)等在以往病害监测研究中被报道对 小麦病害敏感的指数[15-16]。其中,多光谱植被指数 参考 Landsat-8 TM 通道范围和响应,基于高光谱数 据根据相关通道的通道响应函数进行积分得到宽波 段反射率。再进一步基于这些转换后的宽波段反射 率计算多光谱指数。本研究基于实测数据检验这些 植被指数响应情况,对特征进行选择。

1.3.2 植被指数优选

为提高模型效率和避免信息冗余,在 1. 3. 1 部分所述植被指数基础上,优选对病害敏感的植被指数作为模型输入变量。为此,本研究采用以下两个标准进行变量选择:首先,将植被指数逐一与 DI 进行相关性分析,相关性越高表明对病情严重度越敏感,保留相关性达到极显著水平(P<0.001)的植被指数进行后续分析。在此基础上,对植被指数进行逐对的相关分析,若 R^2 >0. 9,则淘汰与 DI 相关性相对较低的植被指数,直至剩余的指数间 R^2 均低于0. 9。上述流程对高光谱和多光谱指数独立进行分析,将满足条件的特征分别用于构建病情严重度反演模型。

表 1 用于小麦条锈病病情监测的植被指数名称与形式1)

Table 1 The names and forms of vegetation indexes for wheat stripe rust disease monitoring

分类 Category	植被指数 Vegetation index	计算公式 Description	文献 Literature
宽波段植被指数	NLI	$(R_{NIR^2} - R_R)/(R_{NIR^2} + R_R)$	[17]
Broad band	RDVI	$(R_{NIR}-R_{R})/(R_{NIR}+R_{R})^{0.5}$	[18]
spectral feature	NDVI	$(R_{NIR}-R_R)/(R_{NIR}+R_R)$	[19]
	GNDVI	$(R_{NIR}-R_G)/(R_{NIR}+R_G)$	[20]
	SAVI	$((R_{NIR}-R_R)*1.5)/(R_{NIR}+R_R+0.5)$	[27]
	SR	$R_{ m NIR}/R_{ m R}$	[21]
	MSI	$(R_{\rm NIR}/R_{\rm R}-1)/((R_{\rm NIR}/R_{\rm R})+1)^{0.5}$	[22]
	SIWSI	$(R_{NIR}-R_{SWIR})/(R_{NIR}+R_{SWIR})$	[23]
	TVI	$0.5*(130*(R_{NIR}-R_{G})-200*(R_{R}-R_{G}))$	[24 - 25]
窄波段植被指数	PSRI	$(R_{680} - R_{500})/R_{750}$	[26]
Hyperspectral	GI	$ m R_{554}/R_{677}$	[27]
vegetation index	SIPI	$(R_{800} - R_{445})/(R_{800} - R_{680})$	[28]
	MSI	$ m R_{1600}/R_{819}$	[29 - 30]
	NPCI	$(R_{680} - R_{430})/(R_{680} + R_{430})$	[31]
	ARI	$(R_{550})^{-1} - (R_{700})^{-1}$	[32]
	DSWI	$(R_{802}+R_{547})/(R_{1657}+R_{682})$	[33]
	NBNDVI	$(R_{850} - R_{680})/(R_{850} + R_{680})$	[34]
	NRI	$(R_{570}-R_{670})/(R_{570}+R_{670})$	[35]
	WI	$ m R_{900}/R_{970}$	[36]
	PRI	$(R_{531}-R_{570})/(R_{531}+R_{570})$	[37]

¹⁾ R_{NIR}表示近红外波段反射率; R_R表示可见光一红波段反射率。 R_{NIR}: Reflectance of near-infrared band; R_R: Reflectance of red band.

1.3.3 小麦条锈病病情严重度反演模型

本研究基于冠层光谱和植物生理生化两方面特 征进行小麦条锈病病情严重度反演建模分析。其中, 植物牛理牛化速测参数方面直接采用 Dx4 仪器测量 的 Chl、NBI、Flav; 冠层光谱特征(SF)采用 1.3.2 部 分优选特征。为比较不同特征组合对模型效果的影 响,分别对下列8种变量组合形式逐一进行测试:(1) SF; (2)SF; 和 Chl; (3)SF; 和 Flav; (4)SF; 和 NBI; (5) SF_s 和 Chl, Flav; (6) SF_s 和 Chl, NBI; (7) SF_s 和 Flav、NBI;(8)SF。和 Chl、Flav、NBI。在反演方法上, 采用能够有效消减变量间相关性影响的偏最小二乘回 归分析(partial least square regression, PLSR)进行建模 和验证。在时相上,分别对小麦挑旗期和灌浆早期 (S1)、灌浆期(S2)以及整个生育期进行独立的建模和 验证分析,以得到不同时相下最优的特征组合及模 型。由于小麦生育早期,病害发生程度较轻,植株生 理生化组分变化不明显,因此本次将挑旗期和灌浆早 期合并作为一个时期进行研究。在验证方面,采用留 一的交叉验证方法进行评估,采用预测值与实测值的决 定系数(R2)以及标准误差(RMSE)作为精度评价指标。

2 结果与分析

2.1 光谱及与生理参数对病情的响应分析

由小麦条锈病病情指数与各生理生化参数之间

在不同生育期及整个生育期的相关分析结果来看,小麦生理参数 Chl、Flav、NBI 在 S1 时期与 DI 之间相关性不显著(P>0.05),其中 Flav 和 NBI 相关系数分别为 0.246 和 - 0.317, Chl 与 DI 几乎无相关性。而在 S2 和整个生育期,各参数特征与 DI 均达到极显著相关,Chl、Flav 和 NBI 分别在 S2 和整个生育期与 DI 的相关系数达到最高值为 0.663、0.601 和 0.714;以上结果可能的原因是,小麦被条锈病侵染初期,生理生化参数受病害影响较小,与 DI 相关性不高,但随着生育期的推进和病情严重度的加重,叶绿素大量被破坏,类黄酮含量增加,导致 NBI 减小,因而在发病率逐渐升高的小麦生育后期 Chl、Flav、NBI 可作为 DI 的估测因子。

基于 1. 2. 4 计算得到的 11 个高光谱植被指数和 9 个多光谱植被指数与 DI 进行相关性分析。小麦整个生育期多光谱植被指数与高光谱植被指数与 DI 间相关性均达到 P < 0.001 的显著性水平(图2)。其中,多光谱植被指数 MSI 与 DI 的相关系数最高,R 达到 0. 632。本次研究基于 1. 4. 1 部分内容分别筛选出 MSI、ARI、NRI、PRI、WI 5 个高光谱植被指数和 NDVI、GNDVI、SAVI、SIWSI、TVI 5 个多光谱植被指数共 10 个光谱特征用于构建病情反演模型。

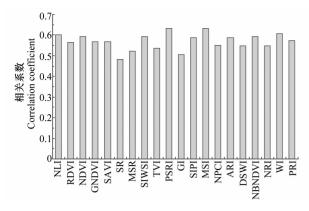
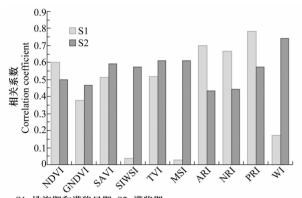


图 2 小麦整个生育期光谱特征与 DI 相关性分析结果 Fig. 2 The correlation analysis of wheat whole growth period spectrum characteristics and DI

图 3 展示了所选植被指数在小麦不同生育期与 DI 的相关系数,除 GNDVI、SIWSI、MSI、WI 这 4 个植被指数在 S1 时期与 DI 相关系数较小外,其余植被指数在小麦不同生育期与 DI 的相关性均达到显著相关,且 S2 时期的光谱特征对病害表现出较强的光谱响应。



S1: 挑旗期和灌浆早期; S2: 灌浆期

S1: Flag leaf stage and grain-filling early stage; S2: Grain-filling stage

图 3 小麦不同生育期光谱特征与 DI 相关性分析结果 Fig. 3 The correlation analysis of wheat spectrum characteristics and DI at different stages

在这些光谱特征中,多光谱植被指数 NDVI、 SAVI、TVI 和高光谱植被指数 PRI、ARI、NRI 在 S1 和 S2 时期与 DI 都表现出较高的相关性。其中, NDVI 和 TVI 因小麦叶绿色在可见光和近红外波 段对电磁波的吸收辐射特性以及 SAVI 因可以有效 减弱土壤背景对冠层光谱的影响对 DI 都表现出持 续的光谱响应:ARI和NRI能够有效反映出病害胁 迫下植物冠层的花青素和叶绿素浓度的变化;PRI 能够直接反映出植物体光合效率的改变,而这种改 变往往会先于色素含量的变化,因而对于小麦条锈 病的早期监测具有一定的优势[38]。而多光谱植被 指数 SIWSI、MSI 和高光谱植被指数 WI 3 个水分 监测指数在 S1 时期与 DI 相关性较低,而在 S2 时 期相关性高达 0.574、0.609 和 0.740,这种规律性 和病害侵染小麦植株的生理过程有关。在较早的生 育期中,条锈病菌大量繁殖,但病菌造成的破坏仍不 明显,没有在叶片上大幅度显症,植株生化组分尚未 产生显著变化[38]。随着病菌对植株侵染的加强,植 株的部分器官开始出现明显的症状,从而引起一系 列光谱特征的响应[39]。其中, Huang 等[15]和 Devadas等[16] 曾报道 PRI 和ARI 在冠层尺度对病害敏 感,与本研究中结果一致。

2.2 不同参数组合估算病情严重度模型比较

本研究根据小麦挑旗期和灌浆早期、灌浆期及整个生育期分别构建病情反演模型,将高光谱和多光谱植被指数分别和生理参数等多个敏感因子与DI建立回归模型。整体来看,S1时期的模型精度达到P=0.001极显著水平的变量组合最少;S2和整个生育期下基于8个变量组合构建的模型精度均达到极显著水平。由表 2.3.4 可知,大多数模型的估测精度的决定系数 R^2 在 $0.3\sim0.9$ 范围内,均方根误差 RMSE 在 $0.02\sim0.2$ 范围内。

表 2 挑旗期和灌浆早期小麦条锈病病情严重度反演模型精度!)

Table 2 The precision of the inversion model of wheat stripe rust disease severity at flag leaf stage and grain-filling early stage

		Production of the production o		8
变量组合 Combination of variables	$R^2(SF_{Hyp})$	$RMSE(SF_{Hyp})$	$R^2(SF_{MS})$	$RMSE(SF_{MS})$
SFs	0.891	0.027	0.520	0.057
SFs+Flav	0. 905	0.025	0. 549	0.055
SFs+NBI	0.891	0.027	0.507	0.058
SFs+Flav+NBI	0.902	0.026	0.537	0.056

1) SFs 表示光谱特征; Hyp 表示高光谱; MS 表示多光谱; 优选组合以下画虚线标示。下同。

SFs: Spectrum features; Hyp: Hyperspectral; MS: Multispectral; The dotted line indicates the optimum combination. The same below.

从不同时期来看,小麦 S1 时期,高光谱植被指数与 Flav 为变量的模型决定系数最高达到 0.905;

多光谱植被指数与 Flav 的模型精度 R^2 值为0.549。 结果显示(表 2),加入了 Flav 估测因子的模型(图 4),因考虑到类黄酮含量在作物受到病害胁迫后显著增加以抑制病虫害增长的影响,在估测小麦条锈

病病情方面的表现都要优于光谱特征。故选择 SF。与 Flav 构建的模型为小麦 S1 时期的最优模型。

表 3 灌浆期小麦条锈病病情严重度反演模型精度

Table 3 The precision of the inversion model of wheat stripe rust disease severity at grain filling stage

变量组合 Combination of variables	$R^2(SF_{Hyp})$	$RMSE(SF_{Hyp})$	$R^2(SF_{MS})$	$RMSE(SF_{MS})$
SFs	0.730	0.144	0.335	0. 225
SFs+NBI	0.737	0.142	0.630	0.168
SFs+Chl	0.739	0.141	0.424	0.210
SFs + Flav	0.761	0.135	0.522	0.191
SFs + NBI + Flav	0.752	0.138	0.704	0.150
SFs+NBI+Chl	0.739	0.141	0.472	0.201
SFs+Chl+Flav	0.770	0.133	0.714	0. 148
SFs+NBI+Chl+Flav	0.734	0.143	0.713	0.148

表 4 整个生育期小麦条锈病病情严重度反演模型精度

Table 4 The precision of the inversion model of wheat stripe rust disease severity on the whole growth period

Tuble 1. The precision of the inversion model of wheat stripe rust disease severity on the whole growth period						
变量组合 Combination of variables	$R^2(SF_{Hyp})$	$RMSE(SF_{Hyp})$	$R^2(SF_{M\!S})$	$RMSE(SF_{MS})$		
SFs	0.387	0.192	0.338	0.200		
SFs+NBI	0.585	0.158	0.565	0.162		
SFs+Chl	0.590	0.157	0.574	0.160		
SFs+Flav	0.416	0.188	0.524	0.169		
SFs + NBI + Flav	0.594	0.156	0.576	0.160		
SFs+NBI+Chl	0.531	0.168	0.502	0.173		
SFs+Chl+Flav	0.623	0. 151	0.620	0. 151		
SFs+NBI+Chl+Flav	0.541	0.166	0.610	0.153		

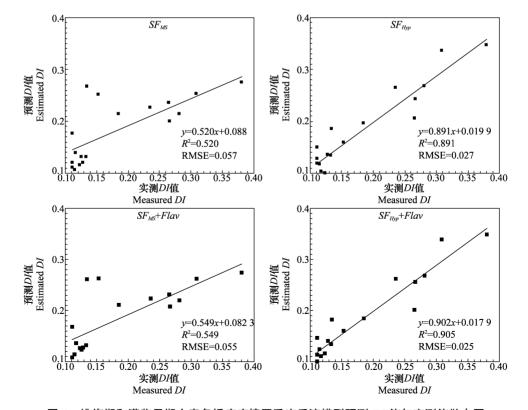


图 4 挑旗期和灌浆早期小麦条锈病病情严重度反演模型预测 DI 值与实测值散点图

Fig. 4 Scatter plots between measured DI and estimated DI at flag leaf stage and grain-filling early stage

小麦 S2 时期(表 3), SF_s 与 Chl、Flav 构建的估算模型,其决定系数为 $R^2(SF_{Hyp})=0.770$, $R^2(SF_{MS})=0.714$,标准误差 RMSE (SF_{Hyp}) = 0.133, RMSE (SF_{MS})=0.148。Chl、Flav 的加入使得原有模型的拟

合精度进一步提高(图 5),这表明,由 Dualex 4 直接获取的 *Chl* 相对含量,因其操作稳定,测量科学,在一定程度上提高了数据的可靠性和精确性。故选择 *SF*_s与 *Chl*、*Flav* 构建的模型为小麦 S2 时期的最优模型。

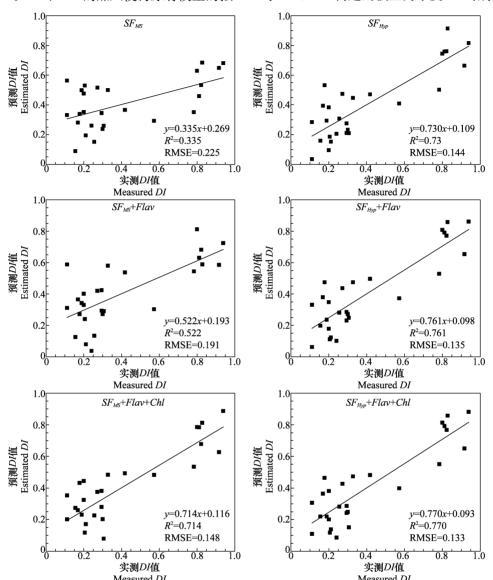


图 5 灌浆期小麦条锈病病情严重度反演模型预测 DI 值与实测值散点图 g. 5. Seatter Plate between measured DI and estimated DI at grain filling at a

Fig. 5 Scatter plots between measured DI and estimated DI at grain filling stage

小麦整个生育期(表 4),只采用高光谱和多光谱 植被指数构建的模型 R^2 (SF_{Hyp}) = 0. 387, RMSE (SF_{Hyp}) = 0. 192, R^2 (SF_{MS}) = 0. 338, RMSE(SF_{MS}) = 0. 200, 精度较差,但 Flav 和 Chl 估测因子的加入,使得模型精度大幅度提高达到 R^2 (SF_{Hyp}) = 0. 623, RMSE(SF_{Hyp}) = 0. 151, R^2 (SF_{MS}) = 0. 620, RMSE (SF_{MS}) = 0. 151。 故选择 SF_s 与 Chl、Flav 构建的模型为小麦整个生育期的最优模型(图 6)。 这与 S2 时 期的研究结果相一致。

3 结论

本文利用 ASD FieldSpec 光谱仪和 Dualex 4 叶片测量仪两种观测方式对小麦条锈病的病情进行监测,建立相关模型进行对比分析得到以下结论:(1)综合 ASD Field Spec 光谱仪和 Dualex 4 叶片测量仪两种观测方式的小麦条锈病病情严重度监测是可行的。与光谱特征的反演模型相比,生理生化参数与光谱特征

的结合提高了小麦条锈反演模型的精度;(2)用于估算小麦条锈病在S1、S2、整个生育期病情严重度的最佳模型,分别是以SF。和Flav、SF。和Flav、Chl,SF。和Flav、Chl 为变量组合所构建的模型;(3)对于所筛

选的最优模型,高光谱特征与生理参数组合反演结果 优于同时期的多光谱特征与生理参数的组合,这说明 在提取植被指数方面,高光谱数据体现出光谱分辨率 高、连续性强和信息量丰富等优势。

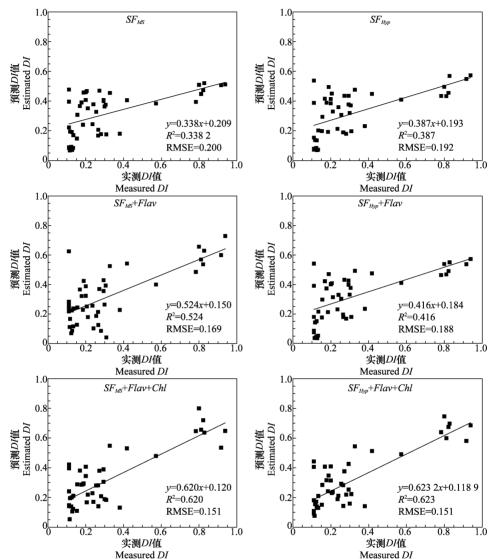


图 6 整个生育期小麦条锈病病情严重度反演模型预测 DI 值与实测值散点图

Fig. 6 Scatter plots between measured DI and estimated DI during the whole growth period

小麦生理生化参数与光谱特征的有效结合,提高了模型的反演精度,表明被动式冠层光谱和主动式速测仪器两种观测方式的结合对于小麦条锈病的监测是具有一定潜力的。然而,如何改进现有的仪器,使得能够同时获取冠层光谱反射率和生理生化参数,并保证测量精度,可能是后期仪器开发需要解决的问题。

参考文献

[1] Saari E E, Prescott J M. World distribution in relation to economic losses [M] // Roelfs A P, Bushnell W R. The cereal

rusts vol. 2; Diseases, distribution, epidemiology and control. Orlando: Academic Press, 1985; 259 – 298.

- [2] Sankaran S, Mishra A, Ehsani R, et al. A review of advanced techniques for detecting plant diseases [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(1):1-13.
- [3] 竞霞,黄文江,王纪华,等.棉花单叶黄萎病病情严重度高光谱反演模型研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(12);3348-3352.
- [4] Liu Zhanyu, Wu Hongfeng, Huang Jingfeng. Application of neural networks to discriminate fungal infection levels in rice panicles using hyperspectral reflectance and principal components analysis [J]. Computers and Electronics in Agriculture,

- 2010,72(2): 99 106.
- [5] Steddom K, Heidel G, Jones D. Remote detection of rhizomania in sugar beets [J]. Phytopathology, 2003, 93(6):720 726.
- [6] Yang Chwenming, Cheng Chinghuan, Chen Rongkuen. Changes in spectral characteristics of rice canopy infested with brown planthopper and leaffolder [J]. Crop Science, 2007, 47 (1): 329 335.
- [7] Tremblay N, Wang Zhijie, Bélec C. Evaluation of the dualex for the assessment of corn nitrogen status [J]. Journal of Plant Nutrition, 2007,30(9):1355 1369.
- [8] Tremblay N, Wang Zhijie, Bélec C. Performance of Dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content [J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 33(1): 57-70.
- [9] Tremblay N, Wang Zhijie, Cerovic Z G. Sensing crop nitrogen status with fluorescent indicators. A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32(2): 451-464.
- [10] Cerovic Z G, Masdoumier G, Ben Ghozlen N, et al. A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids [J]. Physiologia Plantarum, 2012, 146(3): 251 260.
- [11] 余伟烽,胡珊珊,申建宁,等.应用叶片荧光传感器 Dualex 4 估 测寒地水稻叶片叶绿素浓度的研究初报[J]. 北方水稻,2014,44(3):17-19.
- [12] Goulas Y, Cerovic Z G, Cartelat A, et al. Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence [J]. Applied Optics, 2004, 43(23): 4488 4496.
- [13] 周青. 类黄酮及其植物生理学作用[J]. 生物学通报,1986(12): 1-2.
- [14] 黄文江. 作物病害遥感监测机理与应用[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2009.
- [15] Huang Wenjiang, Lamb D W, Niu Zheng, et al. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging [J]. Precision Agriculture, 2007, 8: 187 197.
- [16] Devadas R, Lamb DW, Simpfendorfer S, et al. Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves [J]. Precision Agriculture, 2009, 10(6): 459-470.
- [17] Goel N S, Qi W. Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 10 (4): 309 - 347.
- [18] Roujean J, Breon F. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 51(3); 375 384.
- [19] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [M]// Proceed-

- ings. Third ERTS Symposium, vol. 1, 1973: 48 62.
- [20] Gitelson A A, Kaufman Y, Merzlyak M N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MO-DIS [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 289 298.
- [21] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment [J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2/3): 161-173.
- [22] Chen J M. Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1996, 22(3): 229 242.
- [23] Fensholt R, Sandholt I. Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near-and shortwave infrared data in a semiarid environment [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(1): 111-121.
- [24] Broge N H, Leblanc E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 76(1): 156 - 172.
- [25] Haboudane D, Miller J R, Pattery E, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: modeling and validation in the context of precision agriculture [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(1): 337 352.
- [26] Merzlyak M N, Gitelson A A, Chivkunova O B, et al. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening [J]. Physiologia Plantarum, 1999, 106 (1): 135-141.
- [27] Zarco Tejada, P J, Berjón A, et al. Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 99(1): 271 287.
- [28] Penuelas J, Baret F, Filella I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance [J]. Photosynthetica, 1995, 31(1): 221-230.
- [29] Hunt E R, Rock B N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances [J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(1): 43 54.
- [30] Ceccato P, Gobron N, Flasse S, et al. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(1):188-197.
- [31] Penuelas J, Gamon J, Fredeen A L, et al. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(1): 135-146.
- [32] Gitelson A A, Merzlyak M N, Chivkunova O B. Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves [J]. Photochemistry and Photobiology, 2001, 74 (1): 38-45.

622 和氧化抑制剂 TBHQ 对假蘜杀虫活性物质的 光分解具有良好抑制效果,经光稳定剂处理之后,在 太阳光下照射 216 h 后的分解抑制率达 50%以上, 且抑制效果的强弱,与光稳定使用浓度呈正相关性。 这一研究结果对假蒟用于生产中控制有害生物发生 具有重要意义。但是由于本试验所使用的假蒟杀虫 活性物质为石油醚萃取的混合物质,且只采用了活 体生物测定法进行评价,具体光照是对假蒟杀虫活 性物质的哪个成分产生影响,发生何种反应,还需通 过进一步对有效成分含量变化及降解物的分析等研 究来获得更多信息。从开发利用的角度来看,假蒟 提取物的杀虫活性物质抗光解剂的筛选和相关机理 值得深入研究。

参考文献

- [1] 广东省植物研究所. 海南植物志[M]. 第 1 卷. 北京:科学出版 社,1974;332.
- [2] 覃伟权,张茂新,凌冰,等. 3 种热带杂草挥发油干扰小菜蛾行为的研究[J]. 华南农业大学学报,2004,25 (4):39-42.
- [3] Qin Weiquan, Huang Shanchun, Li Chaoxu. Biological activity of the essential oil from the leaves of *Piper sarmentosum* Roxb. (Piperaceae) and its chemical constituents on *Brontispa longissima* (Gestro) (Coleoptera: Hispidae) [J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2010, 108(2):663 668.
- [4] Chieng T C, Assim Z B, Fasihuddin B A. Toxicity and antitermite activities of the essential oils from *Piper sarmentosum* [J]. Malaysian Journal of Analytical Sciences, 2008, 12(1): 234 239.
- [5] 毕仁军,韩冬银,李敏,等. 2%假蒟微乳剂对几种病、虫的毒力测定[J]. 热带农业工程,2009,33(2): 7-10.
- [6] 张方平,王帮,毕仁军,等. 假蒟提取物对皮氏叶螨的生物活性 测定[J]. 热带作物学报,2009,30(6): 851-855.

- [7] 孙晓东,吕朝军,钟宝珠,等. 几种植物挥发油对螺旋粉虱的生物活性[J]. 热带作物学报,2010(8): 1385-1387.
- [8] 韩冬银. 假蒟杀虫活性成分的分离鉴定及活性研究[D]. 儋州: 华南热带农业大学,2006.
- [9] 谢圣华,梁延坡,林珠凤,等. 9 种药剂对斜纹夜蛾的室内毒力与田间应用效果[J]. 植物保护, 2010, 36(4):175-177.
- [10] 吴传万,杜小凤,王伟中,等. 苦参碱和苦豆子总碱光分解及光分解抑制的研究[J]. 农药学学报,2005,7(4):343-348.
- [11] 刘红芳,符悦冠. 假蒟提取物对斜纹夜蛾的触杀活性及其有效成分的初步分离[J]. 河南农业科学,2014(8):77-81.
- [12] 刘刚. 假蒟根石油醚提取物对斜纹夜蛾的触杀活性最高[J]. 农药市场信息,2014(26),44.
- [13] 张帅,曾鑫年,熊忠华. 表鱼藤酮光稳定性的研究[J]. 农药, 2007,46(4):241-242.
- [14] 王秋芬,宋湛谦,阎新华. 生物农药印楝素的光稳定性研究[J]. 江苏农业科学,2004(4):52-54.
- [15] Sapna J, Prem D. Effect of surfactants on persistence of aza-dirachtin-A (neem based pesticide) [J]. Journal of Environmental Science and Health (Part B), 2002, 37(1):75-80.
- [16] 刘红芳,邸仕忠,彭江. 假蒟根石油醚提取物稳定性实验[J]. 南方农业,2014,8(6):38-40.
- [17] 徐文静,杜茜,赵洪银,等. 大蒜提取液抑菌活性及其稳定性分析[J]. 中国生物防治,2008,24(S1):76-80.
- [18] 田梦,陈凯歌,曾鑫年,等. 光照对除虫菊素触杀毒力的影响 [J]. 环境昆虫学报,2011,33(2): 180-184.
- [19] 吴传万,杜小凤,王伟中,等. 阿维菌素光分解及其光稳定剂的 筛选[J]. 农药,2006,45(12):828-830.
- [20] 雷玲,胡林,徐汉虹,等. 两类光保护剂对鱼藤酮的光保护效果 [J]. 湖北农业科学,2004(2):53-55.
- [21] Sundaram K M S, Curry J. Effect of some UV light absorbers on the photostabilization of azadirachtin, a neem-based biopesticide [J]. Chemosphere, 1996, 32(4): 649 659.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 46 页)

- [33] Galvao L S, Formaggio A R, Tisot D A. Discrimination of sugarcane varieties in southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(1), 523 534.
- [34] Thenkabail P S, Smith R B, De Pauw E. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 71(1): 158-182.
- [35] Filella I, Serrano L, Serra J, et al. Evaluating wheat nitrogen status with canopy reflectance indices and discriminant analysis [J]. Crop Science, 1995, 35(1); 1400 1405.
- [36] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, et al. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970)

- [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(1): 2869 2875.
- [37] 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.
- [38] Bushnell W R. Structural and physiological alterations in susceptible host tissue [M]//Roelfs A P, Bushnell W R. The cereal rusts vol. 1:Origins, specificity, structure, and physiology. Orlando; Academic Press, 1984;477 507.
- [39] 张竞成. 多源遥感数据小麦病害信息提取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

(责任编辑: 田 喆