

日光诱导叶绿素荧光与反射率光谱数据 监测小麦条锈病严重度的对比分析

赵叶^{1,3}, 竞霞^{1*}, 黄文江², 董莹莹², 李存军³

1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054
2. 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
3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089

摘要 小麦条锈病是影响我国小麦产量的主要病害之一, 在小麦受到条锈病菌感染初期探测到病害信息, 对小麦条锈病的防控以及产量和品质的提高具有更为重要的意义。反射率光谱主要反映植被生化组分的浓度信息, 而日光诱导叶绿素荧光则对植物光合生理变化响应灵敏。为了更好地实现小麦条锈病病情严重度的遥感探测, 尤其是条锈病的早期探测, 对日光诱导叶绿素荧光和反射率光谱数据监测小麦条锈病病情严重度的敏感性进行了对比分析。首先利用地物光谱仪测定了不同病情严重度的小麦冠层光谱数据, 基于夫琅和费暗线原理利用 3FLD(three-band Fraunhofer Line Discrimination)方法提取了小麦条锈病不同病情严重度下的日光诱导叶绿素荧光数据, 然后分别利用反射率光谱数据和日光诱导叶绿素荧光数据构建小麦条锈病不同发病状态下的遥感探测模型, 并通过保留样本交叉检验方式对预测模型精度进行了评价。结果表明: (1)当小麦条锈病病情指数低于 20% 时, 日光诱导叶绿素荧光对小麦条锈病病害信息的响应比反射率光谱数据更为敏感, 以日光诱导叶绿素荧光为自变量构建的小麦条锈病病情严重度预测模型达到了极显著性水平, 能够在植被叶绿素含量或叶面积指数发生变化之前探测到植物的胁迫状态, 实现作物病害的早期诊断, 而反射率光谱数据则难以探测到条锈病病害信息; (2)在小麦条锈病病情严重度处于中度发病(20% < DI ≤ 45%)状态时, 虽然日光诱导叶绿素荧光和反射率光谱数据均能实现小麦条锈病病情严重度的遥感探测, 但利用日光诱导叶绿素荧光数据构建的预测模型优于反射率光谱数据; (3)当小麦条锈病病情严重度达到重度水平(DI > 45%)时, 利用反射率光谱数据和日光诱导叶绿素荧光数据构建的小麦条锈病病情严重度预测模型均达到了极显著性水平, 两种数据均能够较好地实现小麦条锈病病情严重度的遥感探测。该研究结果对提高小麦条锈病的遥感探测精度具有重要的意义, 为利用 TanSat 等卫星的荧光数据进行小麦条锈病的早期探测提供了参考依据。

关键词 小麦条锈病; 3FLD; 日光诱导叶绿素荧光; 植被指数; 微分光谱; 病情严重度

中图分类号: S512.1 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2739-07

引言

小麦条锈病是一种气流传播的小麦病害, 具有发生区域广、流行速率快、危害损失大的特点。小麦受条锈病菌感染后一般可减产 20%~30%, 最严重时几乎颗粒无收, 给我国家粮食生产造成巨大损失^[1]。近年来利用反射率光谱数据探测小麦条锈病已成为研究热点, 为基于遥感的作物病害监测

奠定了重要基础^[2-3]。然而反射率光谱主要反映植物生化组分的浓度信息, 不能直接揭示植被光合生理状态^[4], 与反射率光谱相比, 叶绿素荧光光谱所包含的物理涵义更为清晰^[5], 且病害发生后叶绿素荧光光谱比反射率光谱能够更早、更敏感地反映病害引起的生理变化^[6-7], 通过荧光光谱可以了解植被的生理状况、生长发育及受胁迫状态^[7-8]。

目前基于叶绿素荧光探测的作物病害遥感监测主要是利用调制式叶绿素荧光仪、荧光分光光度计等荧光测量仪器, 通过测量单色光激发照明条件下荧光波长的发射荧光, 研究

收稿日期: 2018-12-06, 修订日期: 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601467)资助

作者简介: 赵叶, 1995年生, 西安科技大学测绘科学与技术学院硕士研究生 e-mail: zhaoy1721@163.com

* 通讯联系人 e-mail: jingxia1001@163.com

玉米灰斑病^[9-14]等作物病害与病情严重度之间的关系模型。考虑到叶片不同部位的组织结构和叶绿素含量存在差异性会导致叶片不同部位的光合作用具有横向异质性,也有不少专家利用叶绿素荧光成像系统对小麦根腐病^[15-17]等病害进行了监测。这些基于叶绿素荧光的主动探测,对于揭示叶片光合状态、解释病害胁迫机理很有意义,但该方式测定的叶绿素激发荧光与自然条件光合作用荧光的物理意义差别较大,而且由于使用条件的限制(激光激发或叶片接触式测量等),难以推广到大范围的遥感应应用。日光诱导的叶绿素荧光信号属于被动荧光探测,适合在自然环境下对植被大面积无损观测,是一种非常有潜力的遥感手段,尤其是在欧洲航天局 Fluorescence Explorer (FLEX)等项目的支持下,日光诱导荧光遥感研究受到日益关注。因此基于日光诱导叶绿素荧光的植物病害监测对将来利用荧光遥感技术大面积、快速监测作物受病害胁迫状况具有重要科学意义^[18]。然而利用日光诱导叶绿素荧光方法在监测植物病害方面的研究比较少^[6],且主要集中于日光诱导叶绿素荧光对作物病害的响应情况,没有定量分析和比较反射率光谱与日光诱导叶绿素荧光数据对小麦条锈病病情严重度的探测精度。

为此,基于夫琅和费暗线原理利用 3 FLD 方法提取了小麦条锈病不同病情严重度下的日光诱导叶绿素荧光数据,并结合反射率光谱数据分析了小麦条锈病轻度、中度和重度发病状态下日光诱导叶绿素荧光、反射率光谱指数以及微分光谱指数的敏感性,构建了小麦条锈病不同病情严重度下遥感估测模型,以期为提高小麦条锈病遥感探测精度尤其是实现小麦条锈病的早期探测提供参考依据。

1 实验部分

1.1 试验设计

试验区位于河北省廊坊市中国农业科学院试验站(39°30′40″N, 116°36′20″E),小麦品种为对条锈病比较敏感的“铭贤 169 号”。试验区小麦平均种植密度为 113 棵·m⁻²。2018 年 4 月 9 日采用浓度为 9 mg·(100 mL)⁻¹的孢子溶液利用喷雾法对小麦进行条锈病接种。试验区域小麦分为健康组(编号为 A、D)和染病组(编号为 B、C),每个试验组的面积为 220 m²。每个组分为 8 个样方(A1—A8, B1—B8, C1—C8, D1—D8),即健康组和染病组各有 16 个样方。

1.2 冠层光谱测定及病情指数调查

1.2.1 冠层光谱测量

本试验分别于 2018 年 5 月 14 日、5 月 18 日和 5 月 24 日 3 个时期测定小麦条锈病不同病情严重度下的冠层光谱数据,测量所使用的仪器为 QE Pro 和 ASD Field Spec Pro NIR 地物光谱仪,测量时间为北京时间 11:00—13:30,测量高度距离地面 1.3 m,每个区域重复测定 10 次,光谱观测采用辐射亮度模式,每次测量前后均用标准的 BaSO₄ 参考板进行校正。

1.2.2 病情指数调查

冠层病情指数调查采用 5 点取样法,在每个样方内选取对称的 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/T15795)进行量化。单叶严重度分为 9 个梯度,即: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,按式(1)计算不同梯度测试群体的病情指数^[4]。

$$DI = \frac{\sum(x \times f)}{n \times \sum f} \quad (1)$$

式中:DI 为病情指数;x 为各梯度级值;n 为最高梯度等级值;f 为各梯度的叶片数。

1.3 日光诱导叶绿素荧光的 3FLD 算法

目前常用的日光诱导叶绿素荧光定量测量方法是基于夫琅和费暗线的标准 FLD(Fraunhofer Line Discrimination)方法。该方法是通过比较夫琅和费吸收线内外两个波段植被冠层上行辐亮度和下行辐照度光谱差异计算夫琅和费吸收线处的叶绿素荧光强度 F^[6]

$$F = \frac{L_{in} \times I_{out} - L_{out} \times I_{in}}{I_{out} - I_{in}} \quad (2)$$

式中:I_{in}为夫琅和费吸收线内的太阳辐照度光谱强度;I_{out}为夫琅和费线相邻谱区的太阳辐照度光谱强度;L_{in}为夫琅和费线内植被冠层反射的辐亮度光谱强度;L_{out}为夫琅和费线相邻谱区植被冠层反射的辐亮度光谱强度。

标准 FLD 算法假设吸收线内外反射率和透过率相等,影响荧光估算精度,因此 Maier 等提出了一种改进的 3FLD 荧光估测算法^[19],该方法假定反射率在很窄的波段范围内线性变化,利用 1 个夫琅和费线内的波段和 2 个位于夫琅和费线两侧的波段(λ_{left}和 λ_{right})计算自然光照条件下的叶绿素荧光。

$$\bar{F}_{in} = \frac{[L_{in} \times (\omega_{left} \times I_{left} + \omega_{right} \times I_{right}) - I_{in} \times (\omega_{left} \times L_{left} + \omega_{right} \times L_{right})]}{[(\omega_{left} \times I_{left} + \omega_{right} \times I_{right}) - I_{in}]} \quad (3)$$

其中

$$\omega_{left} = \frac{\lambda_{right} - \lambda_{in}}{\lambda_{right} - \lambda_{left}} \omega_{right} = \frac{\lambda_{in} - \lambda_{left}}{\lambda_{right} - \lambda_{left}} \quad (4)$$

式中:λ_{in}, λ_{left}, λ_{right}为吸收线内、左、右波段的波长;ω_{left}, ω_{right}为吸收线左右两参考波段所占的权重;I_{left}, I_{right}为吸收线左右的太阳辐照度光谱强度;L_{left}, L_{right}为吸收线左右的植被冠层反射辐亮度光谱强度。

1.4 光谱指数计算

根据已有的小麦条锈病遥感探测的研究成果^[2-4],选用了 DR, SDR, NDVI, RVI 4 个光谱指数作为本实验的反射率因子,各指数的含义及计算公式如表 1 所示。

为了计算 DR 和 SDR,首先利用式(5)对小麦条锈病不同病情严重度下的冠层光谱数据进行一阶微分处理:

$$\rho'(\lambda_i) = \frac{[\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})]}{2\Delta\lambda} \quad (5)$$

式中:λ_i为各波段的波长;ρ'(λ_i)为相应的一阶微分光谱;Δλ为波长 λ_{i+1}到 λ_{i-1}的间隔。

1.5 模型建立与精度检验

为了对比分析日光诱导叶绿素荧光和反射率光谱数据监测小麦条锈病病情严重度的精度,确定小麦条锈病不同发病状态下遥感监测的适宜模型,尤其是小麦条锈病早期遥感探

表 1 植被指数和微分光谱指数

Table 1 Vegetation indexes and differential spectral indexes

类型	名称	定义	计算公式
一阶微分指数	DR	红边(680~760 nm)范围内一阶微分最大值	$DR = \max[\rho'(\lambda_i)]$
	SDR	红边(680~760 nm)范围内一阶微分总和	$SDR = \sum[\rho'(\lambda_i)]$
植被指数	NDVI	归一化差分植被指数	$NDVI = \frac{R_{nir} - R_r}{R_{nir} + R_r}$
	RVI	比值植被指数	$RVI = \frac{R_{nir}}{R_r}$

注：式中， R_{nir} 为近红外波段光谱反射率， R_r 为红光波段光谱反射率。
 Note: in the formula, R_{nir} is spectral reflectance of near-infrared band, R_r is spectral reflectance of red band.

测模型，按病情指数将小麦条锈病病情严重度分为轻度发病 ($0\% < DI \leq 20\%$)、中度发病 ($20\% < DI \leq 45\%$) 和重度发病 ($DI > 45\%$) 3 个等级^[2]，并将 3 个等级的原始数据按照 7 : 3 的比例随机分成训练数据和验证数据两部分，以进行小麦条锈病不同发病状态下遥感探测模型的构建及精度评价。

1.5.1 小麦条锈病轻度发病状态下遥感估测模型与精度检验

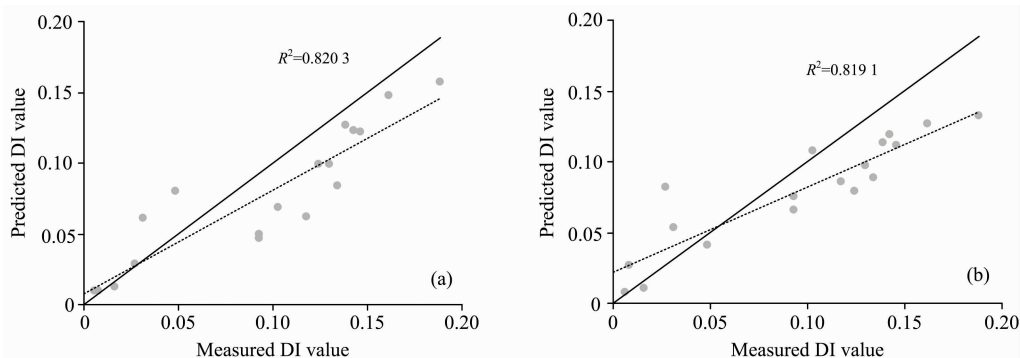


图 1 轻度发病预测模型验证 ($n=18$)

(a): O_2 -A 波段; (b): O_2 -B 波段

Fig. 1 Validation of a mild onset estimation model ($n=18$)

(a): O_2 -A band; (b): O_2 -B band

由表 2 可以出，当小麦条锈病发病较轻 ($0\% < DI \leq 20\%$) 时，以 DR 和 SDR 为自变量构建的小麦条锈病病情严重度估测模型的相关系数未达到显著性水平，以 NDVI 和 RVI 为自变量构建的小麦条锈病病情严重度估测模型的相关系数达到显著性水平，而以日光诱导叶绿素荧光 (O_2 -A 和 O_2 -B 波段) 为自变量构建的小麦条锈病病情严重度估测模型精度均高于以反射率光谱特征参量为自变量构建的病害估测模型，模型的相关系数达到了极显著性水平。这是因为反射率光谱指数与植被光合作用过程之间没有直接联系，而是主要与叶绿素含量、生物量、冠层结构和覆盖度等植被参数相关，所以反射率光谱主要反映生化组分的浓度信息，不能直接揭示植被光合生理状态^[20]，利用反射率光谱数据对作物病害的早期探测具有一定的难度。与反射率不同，自然条件下的叶绿素荧光是植被光合作用的副产品，叶绿素分子吸收

分别以日光诱导叶绿素荧光强度以及反射率光谱特征参数为自变量，轻度发病状态 ($0\% < DI \leq 20\%$) 下的小麦条锈病病情指数为因变量，利用其中 40 个点作为训练样本构建小麦条锈病轻度发病状态下的遥感估测模型 (表 2)，18 个点作为验证样本对达到极显著相关的小麦条锈病病情严重度预测模型精度进行检验 (图 1)。

表 2 轻度发病条件下光谱指数与病情的相关关系 ($n=40$)

Table 2 Correlation between indexes and the condition for mild condition ($n=40$)

植被指数	拟合方程	R	RMSE
NDVI	$y = -0.419x + 0.462$	0.307 *	0.053
RVI	$y = -0.004x + 0.172$	0.371 *	0.050
DR	$y = -0.001x + 0.005$	0.01	
SDR	$y = -0.144x + 0.424$	0.077	
SIF(O_2 -A)	$y = -2.369x + 0.215$	0.607 **	0.013
SIF(O_2 -B)	$y = -13.10x + 0.179$	0.489 **	0.032

注：* 表示显著相关，** 表示极显著相关，下同
 Note: * denotes significant correlation, ** denotes extremely significant correlation and the same below

光子后由激发态回到基态的能量释放途径主要包括 3 种：(1)重新释放一个光子 (荧光或磷光)；(2)以热能的形式耗散；(3)传递到相邻色素分子，最终到达光反应中心用于光化学反应，三者之间相互竞争。因此叶绿素荧光与光合作用过程直接相关，当植物在受到病害等胁迫时，叶绿素荧光的变化要比叶绿素含量的变化更早发生，能够在植被叶绿素含量或叶面积指数发生变化之前探测到植物的胁迫状态，能够更好地揭示植物光合作用的状态，实现作物病害的早期诊断^[9, 20]。

为了进一步对比分析小麦条锈病轻度发病状态下日光诱导叶绿素荧光和反射率光谱数据构建模型的预测精度，采用保留样本交叉检验方式，对达到极显著水平的小麦条锈病病情严重度预测模型进行检验，结果如图 1 所示，图中横坐标是小麦条锈病实测病情严重度，纵坐标是不同数据源预测的

小麦条锈病病情严重度,其中实线表示 1:1 关系线,虚线表示 DI 的实测值与预测值拟合的回归线(下同)。由图 1 可以看出,在小麦条锈病的发病早期($0\% < DI \leq 20\%$),利用日光诱导叶绿素荧光数据估测的小麦条锈病病情严重度与实测病情严重度间的决定系数达到极显著相关水平。因此和反射率光谱数据相比,日光诱导叶绿素荧光数据更适宜于小麦条锈病病情严重度的早期探测。

1.5.2 小麦条锈病中度发病状态下遥感估测模型与精度检验

分别以日光诱导叶绿素荧光数据以及反射率光谱特征参数为自变量,以中度发病状态($20\% < DI \leq 45\%$)下小麦条锈病病情严重度为因变量,利用其中 33 个点作为训练样本构建小麦条锈病中度发病状态下的遥感估测模型(表 3),15 个点作为验证样本对达到极显著相关的小麦条锈病病情严重度

预测模型精度进行检验(图 2)。

表 3 中度发病条件下光谱指数与病情的相关关系($n=33$)

Table 3 Correlation between indexes and the condition for moderate disease ($n=33$)

植被指数	拟合方程	R	RMSE
NDVI	$y = -0.401x + 0.644$	0.442**	0.058
RVI	$y = -0.006x + 0.398$	0.454**	0.056
DR	$y = -10.91x + 0.357$	0.333*	0.055
SDR	$y = -0.252x + 0.396$	0.375*	0.056
SIF(O ₂ -A)	$y = -2.891x + 0.427$	0.685**	0.038
SIF(O ₂ -B)	$y = -21.78x + 0.434$	0.668**	0.043

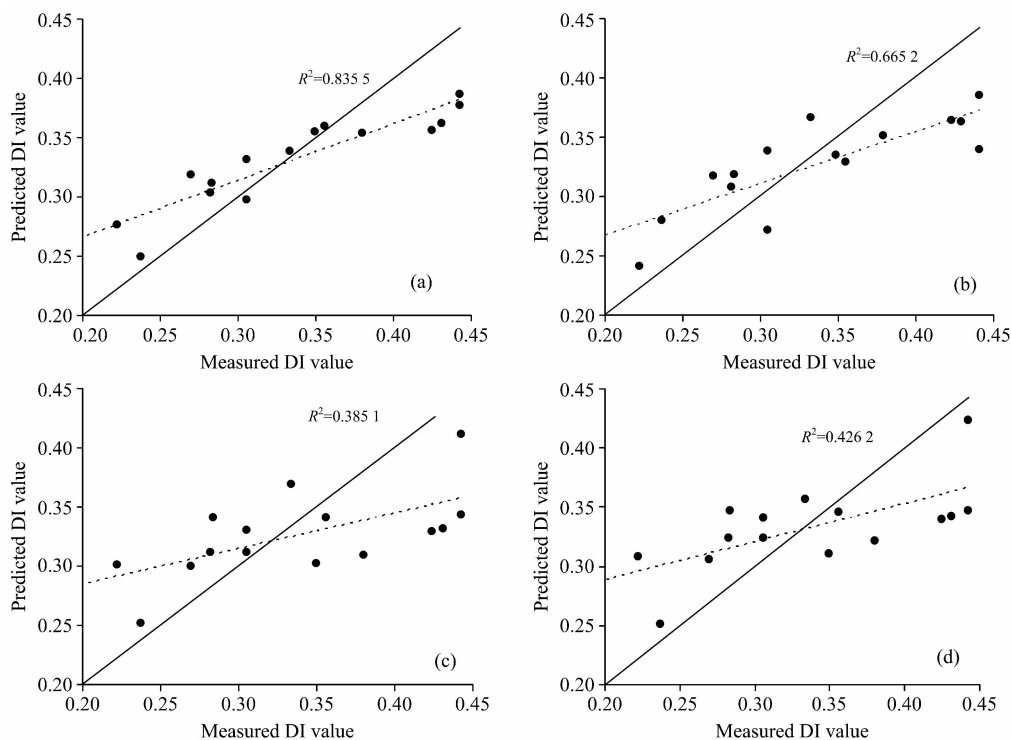


图 2 中度发病估算模型验证($n=15$)

(a): O₂-A 波段; (b): O₂-B 波段; (c): NDVI; (d): RVI

Fig. 2 Validation of a moderate incidence estimation model($n=15$)

(a): O₂-A; (b): O₂-B; (c): NDVI; (d): RVI

由表 3 可以看出,当小麦条锈病发病严重度达到中等发病水平($20\% < DI \leq 45\%$)时,以日光诱导叶绿素荧光数据以及反射率光谱特征参量(NDVI, RVI)为自变量构建的小麦条锈病病情严重度预测模型均达到了极显著水平。这是因为植被的反射率主要受叶子内部结构、生物量、蛋白质、纤维素等影响,在发病中期受到小麦条锈病菌感染的叶片内部结构遭到破坏,叶绿素含量减少,植物生化组分浓度信息以及光合生理状态均发生较明显的变化,植被指数与荧光均能探测到小麦内部此时的变化情况。

图 2 为达到极显著相关的小麦条锈病病情严重度遥感探

测模型精度验证结果,由图 2 可知,在中度发病状态下,利用日光诱导叶绿素荧光数据预测的小麦条锈病病情严重度与实测病情严重度之间的决定系数达到了极显著水平,而利用反射率光谱数据预测的小麦条锈病病情严重度与实测病情严重度之间的决定系数只有 RVI 达到了极显著水平。综合表 3 和图 2 可知,当小麦条锈病病情严重度达到中度发病状态时,以日光诱导叶绿素荧光和反射率光谱特征参量为自变量构建的模型均可以实现小麦条锈病病情严重度的遥感探测,但以日光诱导叶绿素荧光构建的模型预测精度优于反射率光谱数据。因此和反射率光谱数据相比,日光诱导叶绿素荧光

数据更适合于小麦条锈病中等发病水平的遥感探测。

1.5.3 小麦条锈病重度发病状态下遥感估测模型与精度检验

分别以日光诱导叶绿素荧光数据以及反射率光谱特征参数为自变量,以重度发病状态(DI>45%)下小麦条锈病病情严重度为因变量,利用其中 60 个点作为训练样本构建小麦条锈病重度发病状态下的遥感估测模型(表 4),27 个点作为验证样本对达到极显著相关的小麦条锈病病情严重度预测模型精度进行检验(图 3)。

在重度发病(DI>45%)的条件下(表 4),受小麦条锈病菌菌侵染的叶片基本枯黄,叶片内部结构已遭到严重破坏,尤其是病情严重度超过 45%时,植被的反射率受叶子内部结

表 4 重度发病条件下光谱指数与病情的相关关系(n=60)

Table 4 Correlation between indexes and the condition for severe morbidity (n=60)

植被指数	拟合方程	R	RMSE
NDVI	$y = -0.973x + 1.456$	0.757**	0.114
RVI	$y = -0.038x + 1.042$	0.831**	0.116
DR	$y = -64.55x + 0.876$	0.605**	0.122
SDR	$y = -1.212x + 1.008$	0.741**	0.112
SIF(O ₂ -A)	$y = -5.658x + 0.900$	0.590**	0.115
SIF(O ₂ -B)	$y = -32.58x + 0.909$	0.458**	0.114

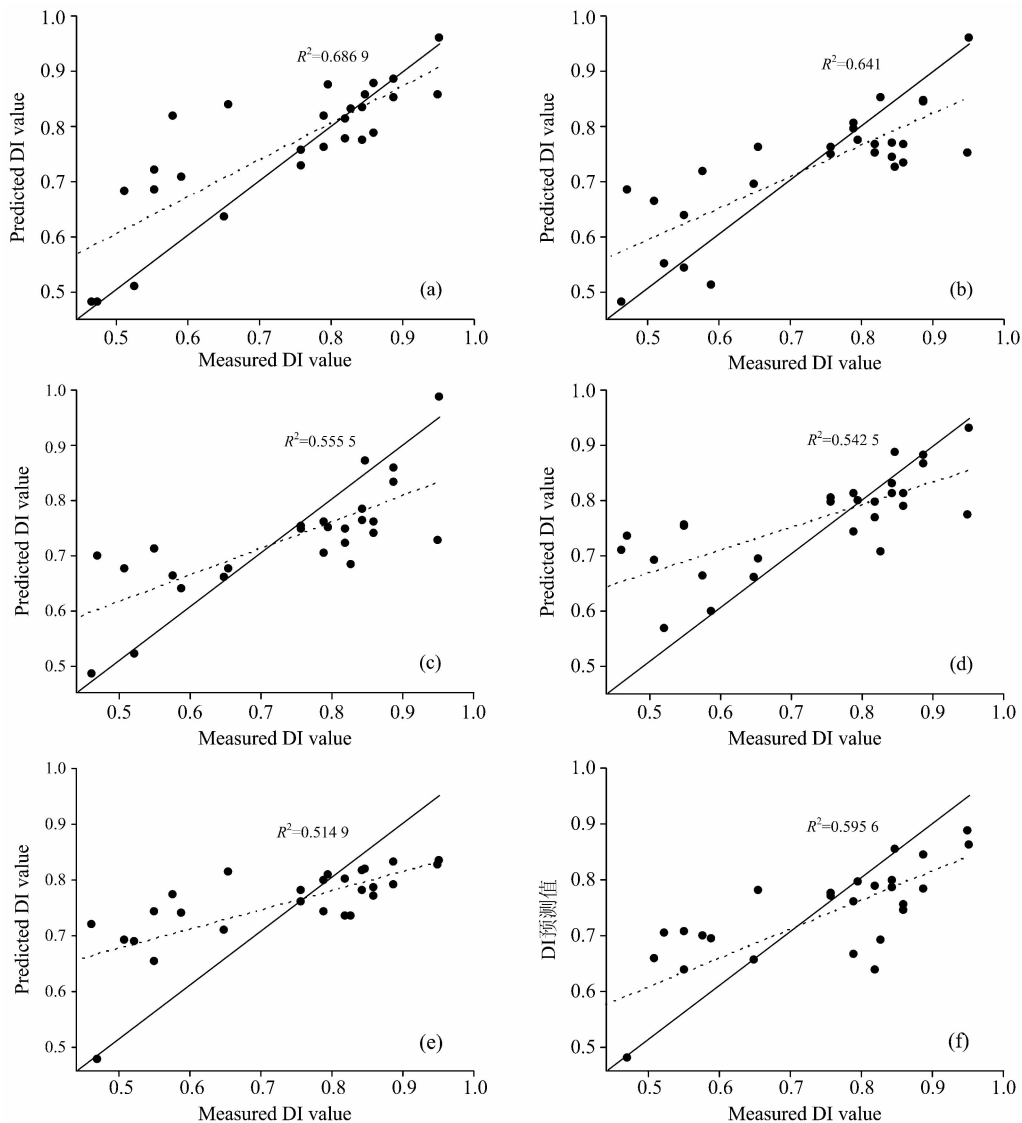


图 3 重度发病估算模型验证(n=27)

(a): O₂-A 波段; (b): O₂-B 波段; (c): NDVI; (d): RVI; (e): DR; (f): SDR

Fig. 3 Validation of severe disease estimation model (n=27)

(a): O₂-A; (b): O₂-B; (c): NDVI; (d): RVI; (e): DR; (f): SDR

构、生物量、蛋白质、纤维素等影响,光谱反射率大幅下降,基于反射率数据的各个特征参量均表现出了与病情指数的极显著相关性^[4-8]。综合表 4 和图 3 可知,利用日光诱导叶绿素荧光和反射率光谱数据构建的小麦条锈病病情严重度预测模型均能实现条锈病病情严重度的预测,预测病情严重度和实测病情严重度均达到了极显著性相关。

2 结 论

为了提高小麦条锈病病情严重度的遥感探测精度,尤其是实现小麦条锈病的早期探测,在前人研究的基础上分析了不同病情严重度下的日光诱导叶绿素荧光、植被指数和微分光谱指数对小麦条锈病病情严重度的敏感性,构建了小麦条锈病不同发病状态下遥感探测的适宜模型。

(1)当小麦条锈病发病严重度低于中等发病水平($DI \leq 45\%$)时,日光诱导叶绿素荧光对小麦条锈病病害信息的响应比反射率光谱数据更为敏感,能够在植被叶绿素含量或叶面积指数发生变化之前探测到植物的胁迫状态,实现小麦条锈病的早期探测。其中当小麦条锈病发病较轻($0\% < DI \leq 20\%$)时,以日光诱导叶绿素荧光为自变量构建的小麦条锈

病病情严重度预测模型达到了极显著性水平,而反射率光谱数据则难以探测到小麦条锈病害信息。虽然在小麦条锈病病情严重度处于中度发病($20\% < DI \leq 45\%$)状态时,日光诱导叶绿素荧光和反射率光谱数据均能实现小麦条锈病病情严重度的遥感探测,但利用日光诱导叶绿素荧光构建的模型预测精度优于反射率光谱数据,更适合于小麦条锈病中等发病水平的遥感探测。

(2)当小麦条锈病病情严重度达到重度水平时,利用反射率光谱数据和日光诱导叶绿素荧光数据构建的小麦条锈病病情严重度预测模型均达到了极显著水平,均可以较好的实现小麦条锈病病情严重度的遥感探测。

(3)在构建不同病情严重度下的小麦条锈病病情严重度预测模型时,仅分析了 O_2 -A 和 O_2 -B 两个波段的日光诱导叶绿素荧光数据以及 4 个反射率光谱数据,当增加监测因子时该结论是否成立还需进一步的探讨。

(4)冠层光谱的测定是在北京时间 11:00—12:30 的正午前后,采用垂直向下测定模式,因此在计算叶绿素荧光和反射率光谱指数时没有考虑方向性的影响,但是对于卫星遥感,由于观测角度、太阳天顶角可能会存在较大差异,方向性对数据的影响则不能忽略。

References

- [1] LI Guo-yang, CHEN Jing-mei(李国阳, 陈景梅). Application Technology of High Yield and High Quality Wheat Production(小麦高产优质生产应用技术). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press(北京: 中国农业科学技术出版社), 2015. 11.
- [2] Shi Y, Huang W J, Luo J H, et al. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 171.
- [3] WANG Shuang, MA Zhan-hong, SUN Zhen-yu, et al(王 爽, 马占鸿, 孙振宇, 等). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2011, 27(21): 253.
- [4] DONG Jin-hui, YANG Xiao-dong, YANG Gui-jun, et al(董锦绘, 杨小冬, 杨贵军, 等). Journal of Wheat Crops(麦类作物学报), 2016, 36(12): 1674.
- [5] LIU Liang-yun(刘良云). Principle and Application of Quantitative Remote Sensing for Vegetation(植被定量遥感原理与应用). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2014.
- [6] Raji S N, Subhash N, Ravi V, et al. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36(11): 2880.
- [7] Liu L, Zhao J, Guan L. European Journal of Remote Sensing, 2013, 46(1): 459.
- [8] LI Cui-ling, JIANG Kai, FENG Qing-chun, et al(李翠玲, 姜 凯, 冯青春, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(1): 151.
- [9] He W Z, Lin Y, Leng Y F, et al. Journal of Phytopathology, 2018, 166(3): 167.
- [10] Pieczywek P M, Cybulska J, Szymańska-Chargot M, et al. Food Control, 2018, 85: 327.
- [11] Hu H, Li S, Zhang G Z, et al. Journal of Phytopathology, 2018, 166(7-8): 547.
- [12] YANG Zhi-xiao, DING Yan-fang, ZHANG Xiao-quan, et al(杨志晓, 丁燕芳, 张小全, 等). Journal of Ecology(生态学报), 2015, 35(12): 4146.
- [13] Armando Sterling, Luz Marina Melgarejo. Physiological and Molecular Plant Pathology, 2018, 103: 143.
- [14] Sun Y M, Wang M, Li Y R, et al. Annals of Botany, 2017, 120(3): 427.
- [15] Chiu Yi-Chieh, Hsu Wei-Chih, Chang Yung-Chiung, et al. Environment and Food, 2015, 8(5): 95.
- [16] da Silva André Costa, de Oliveira Silva Franklin Magnum, Milagre Jocimar Caiafa, et al. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 123: 170.
- [17] Bauriegel E, Brabandt H, Gärber U, et al. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 105: 74.
- [18] WANG Ran, LIU Zhi-gang, YANG Pei-qi(王 冉, 刘志刚, 杨沛琦). Advances in Earth Science(地球科学进展), 2012, 27(11): 1221.
- [19] Maier S W, Günther K P, Stellmes M. American Society of Agronomy, 2003. 209.
- [20] Hunt E Raymond, Doraiswamy Paul C, McMurtrey James E, et al. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2013, 21: 103.

Comparison of Sun-Induced Chlorophyll Fluorescence and Reflectance Data on Estimating Severity of Wheat Stripe Rust

ZHAO Ye^{1,3}, JING Xia^{1*}, HUANG Wen-jiang², DONG Ying-ying², LI Cun-jun³

1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

2. Key Laboratory of Digital Earth, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

3. National Agricultural Informatization Engineering Technology Research Center, Beijing 100089, China

Abstract Stripe rust of wheat is one of the hazardous diseases which affects the wheat yield in China. It is more significant to early detect wheat stripe rust infection information for the prevention of wheat stripe rust and the improvement of yield and quality. Considering that reflectance spectra are sensitive to variations in the concentration of plant biochemical components, and the sun-induced chlorophyll fluorescence is sensitive to variations in plant photosynthetic physiology. In order to preferably detect the severity of wheat stripe rust disease by remote sensing, especially the earlier detection of wheat stripe rust disease, this study made a comparative analysis of the sensitivity of sun-induced chlorophyll fluorescence and reflectance spectrum data to monitor the severity of wheat stripe rust disease. First used the ASD Field Spec Pro NIR spectrometer to determine the wheat canopy spectral data of different illness severity, on the basis of the principle of fraunhofer line to extracted sun-induced chlorophyll fluorescence data by the method of 3FLD under different illness severity, then respectively induced by reflectance spectra data and sun-induced chlorophyll fluorescence data to construct at different conditions of wheat stripe rust of remote sensing detection model, and through the retained sample cross terms of inspection on the forecast model accuracy is evaluated. The result shows that: (1) when the severity of wheat stripe rust disease was less than 20%, the sun-induced chlorophyll fluorescence response of wheat stripe rust disease information was more sensitive than reflectance spectra data, and the sun-induced chlorophyll fluorescence as the independent variable to build the forecasting model of wheat stripe rust disease severity reached the extremely significant level. It can earlier diagnose the crop diseases by detecting the stress state of plants before the change of chlorophyll content or leaf area index, while it is hard to use the reflectivity spectrum data to detect wheat stripe rust damage information. (2) when the severity of wheat stripe rust disease is in the state of moderate incidence ($20\% < DI \leq 45\%$), both sun-induced chlorophyll fluorescence and reflectance spectral data can detect the severity of wheat stripe rust disease, but the prediction model constructed by using sun-induced chlorophyll fluorescence data is superior to the reflectance spectral data model. (3) When the severity of wheat stripe rust reached the severe level ($DI > 45\%$), the prediction model of severity of wheat stripe rust disease constructed by using reflectance spectral data and sun-induced chlorophyll fluorescence data has reached the extremely significant level, both of which can preferably detect the severity of wheat stripe rust by remote sensing. The results of this study have great significance for improving the remote sensing detection accuracy of wheat stripe rust, and it provides reference basis for the earlier detection of stripe rust in wheat by using TanSat or other satellite fluorescence data.

Keywords Wheat stripe rust; Three-band fraunhofer line discrimination; Sun-induced chlorophyll fluorescence; Vegetation index; Differential spectrum; Severity

(Received Dec. 6, 2018; accepted Apr. 18, 2019)

* Corresponding author