

# 基于 SIF - PLS 模型的冬小麦条锈病早期光谱探测

竞霞<sup>1</sup> 吕小艳<sup>1,2</sup> 张超<sup>2</sup> 白宗璠<sup>1</sup>

(1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100083)

**摘要:**为实现冬小麦条锈病早期探测、提高冬小麦产量和品质,研究了日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)对冬小麦条锈病早期探测的可行性。基于3波段夫琅和费暗线(3-band Fraunhofer line discrimination, 3FLD)和反射率荧光指数2种方法提取了冠层SIF数据,计算了对小麦条锈病敏感的光谱指数(Spectral index, SI),通过相关性分析优选了遥感探测小麦条锈病早期的特征参量,利用偏最小二乘(Partial least squares, PLS)算法构建冬小麦条锈病早期光谱探测模型。研究表明: $O_2 - A$ 波段的荧光强度(SIF - A)以及反射率荧光指数 $\rho_{440}/\rho_{690}$ 、 $\rho_{675}\rho_{690}/\rho_{683}^2$ 、 $\rho_{690}/\rho_{655}$ 、 $\rho_{690}/\rho_{600}$ 、 $D_{\lambda p}/D_{744}$ 、 $D_{705}/D_{722}$ 均与小麦条锈病早期病情指数(Disease index, DI)达到了极显著相关,相关系数分别为-0.793、-0.523、-0.539、-0.497、0.541、0.446、0.490,可作为冬小麦条锈病早期光谱探测的荧光特征参量;基于3组SIF数据构建的PLS-SIF检验模型的决定系数分别为0.801、0.772、0.807,均方根误差分别为3.3%、3.1%、3.2%,较反射率光谱指数构建的SI-PLS模型决定系数至少提高了27%,均方根误差至少减少了24%。因此,冠层SIF数据更适于冬小麦条锈病的早期探测。本研究结果对及时进行冬小麦条锈病防控具有重要应用价值,可为利用卫星荧光遥感数据对小麦条锈病早期大面积、无损探测提供参考依据。

**关键词:**冬小麦;条锈病;早期探测;日光诱导叶绿素荧光;偏最小二乘算法;光谱指数

中图分类号: S512.1; S435.121

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)06-0191-07

OSID:



## Early Detection of Winter Wheat Stripe Rust Based on SIF - PLS Model

JING Xia<sup>1</sup> LÜ Xiaoyan<sup>1,2</sup> ZHANG Chao<sup>2</sup> BAI Zongfan<sup>1</sup>

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

2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Stripe rust is one of the main diseases that affects the production of winter wheat in China. The disease information was detected early in the winter wheat infection, and it is of great significance to prevent and control the disease and improve the yield and quality of winter wheat. The reflectance spectrum can reflect the change of concentration information of vegetation biochemical components, but it is greatly affected by the background noise, while the canopy solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF) is less affected by the background noise and has certain photosynthetic physiological diagnosis capabilities. In order to study the feasibility of early detection of winter wheat stripe rust by SIF, the canopy SIF data was extracted based on two methods: 3-band Fraunhofer line discrimination (3FLD) and reflectance fluorescence index. In order to explore the advantages of SIF in the early detection of wheat stripe rust, some SI sensitive to wheat stripe rust were obtained for comparison. The sensitivity of SIF and SI to wheat stripe rust early disease index (DI) was analyzed through correlation, and then the sensitive SIF and SI were used to construct the early wheat stripe rust spectrum detection model based on the partial least squares (PLS). The results showed that the fluorescence index SIF - A,  $\rho_{440}/\rho_{690}$ ,  $\rho_{675}\rho_{690}/\rho_{683}^2$ ,  $\rho_{690}/\rho_{655}$ ,  $\rho_{690}/\rho_{600}$ ,  $D_{\lambda p}/D_{744}$ ,  $D_{705}/D_{722}$  extracted based on the radiance and reflectance method all had very significant correlation to the severity of wheat stripe rust, the correlation coefficients were -0.793, -0.523, -0.539, -0.497, 0.541, 0.446 and 0.490, respectively, which can be used as the chlorophyll fluorescence characteristic parameters for detection of winter wheat stripe rust. Based on

收稿日期: 2020-01-01 修回日期: 2020-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601467)

作者简介: 竞霞(1978—),女,副教授,博士,主要从事农业定量遥感研究, E-mail: jingxiaust@163.com

通信作者: 张超(1972—),男,教授,博士,主要从事遥感在土地和农业领域的应用研究, E-mail: 05022@cau.edu.cn

the three sets of data, the determination coefficients of the PLS-SIF test model were 0.801, 0.772 and 0.807, respectively, and the root mean square errors were 3.3%, 3.1% and 3.2%, which were 27% at least higher than that of the SI-PLS model determination coefficients. The error was reduced by at least 24%. Therefore, canopy SIF data was more suitable for early detection of the severity of winter wheat stripe rust. The research results had important application value for timely prevention and control of winter wheat stripe rust, and provided a reference for the use of satellite fluorescence data for large-area, non-destructive detection of wheat stripe rust in the early stage.

**Key words:** winter wheat; stripe rust; early detection; solar-induced chlorophyll fluorescence; partial least squares; spectral index

## 0 引言

条锈病(*Puccinia striiformis*)对冬小麦生产具有毁灭性危害,已成为影响我国冬小麦产量的重要病害之一<sup>[1]</sup>。传统人工田间调查的小麦条锈病识别与监测方法费时、费力,难以大面积同时展开<sup>[2]</sup>。植物发病后,病原菌与寄主相互作用引起植物细胞内部的色素、水分含量和细胞间隙的变化,导致受病害胁迫的植物反射率与叶绿素荧光光谱特性发生改变。而且,当病情严重到一定程度时,植物叶片上常会形成不同形式的病斑、坏死或枯死区域,使受害植物的颜色、纹理等外部形态特征发生改变。目前,对作物病害的遥感监测主要集中于计算机视觉技术和光谱探测技术。计算机视觉技术在作物病害监测中具有无损、快速等优点,被成功应用于小麦条锈病的识别与诊断,利用病害图像的几何形状、颜色、纹理、方向一致性特征均能实现条锈病的识别<sup>[3-5]</sup>。但这种方法对已经显症且外在形态特征明显的作物病害识别效果较好,对于受病菌侵染初期的作物病害诊断效率低下,难以实现作物病害的早期探测。

随着光谱技术的广泛应用,利用光谱技术对冬小麦条锈病进行识别与监测,尤其是实现冬小麦条锈病潜育期或早期诊断,可为冬小麦条锈病的早期防治提供必要的信息支持,有效减小冬小麦产量损失。目前,利用光谱技术对小麦条锈病的遥感探测主要集中于反射率数据<sup>[6-9]</sup>,反射率数据主要反映作物叶片生化组分的浓度信息,难以直接揭示植被光合生理状态<sup>[10-11]</sup>。叶绿素荧光作为植物光合状态的指示剂,与植物活力密切相关,能够更早、更敏感地反映病害引起的生理变化<sup>[12]</sup>。利用叶绿素荧光监测作物病害方面的研究主要利用主动式荧光<sup>[13-15]</sup>和被动荧光<sup>[16]</sup>,主动式荧光难以大面积反映冠层及以上尺度真实的荧光状态<sup>[17]</sup>,而属于被动荧光的SIF能够在自然环境下实现植被冠层SIF的大面积无损观测<sup>[18]</sup>,因此SIF是利用遥感技术进行作物病害早期探测的有效手段之一。已有研究者利用冠层SIF数据对小麦条锈病的发病情况进行监

测,但是这些研究是针对发病后小麦条锈病不同的病情严重度进行的<sup>[19-21]</sup>,对冬小麦条锈病发病早期<sup>[22]</sup>(DI为0~20%)的监测报道较少。赵叶等<sup>[23]</sup>通过分析SIF数据和反射率光谱数据对小麦条锈病病情严重度的敏感性得出,小麦条锈病发病较轻时,以SIF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信息,该研究仅分析了O<sub>2</sub>-A和O<sub>2</sub>-B两个波段SIF数据,且建模方法简单。

本文基于3FLD和反射率荧光指数2种方法提取冠层SIF数据,优选对小麦条锈病早期敏感的特征参量,利用PLS算法建立小麦条锈病的早期探测模型,以便在冬小麦出现严重病症前及时探测到病情的发展状况,为冬小麦条锈病的早期防治提供必要的信息支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计与数据获取

#### 1.1.1 试验设计

试验于2018年在河北省廊坊市中国农业科学院试验站(39°30'40"N,116°36'20"E)开展,小麦品种为对条锈病高感的“铭贤169号”。试验区小麦平均种植密度为113株/m<sup>2</sup>,分为A、B、C、D共4组,每个试验组的面积为220m<sup>2</sup>,每个组分为8个样方(A1~A8、B1~B8、C1~C8、D1~D8)。2018年4月9日采用质量浓度为90mg/L的孢子溶液,利用喷雾法对B、C组冬小麦进行条锈病接种,即健康组(A1~A8、D1~D8)和染病组(B1~B8、C1~C8)各16个样方。

#### 1.1.2 冠层光谱测量

2018年5月14日、5月18日和5月24日采用ASD Field Spec Pro型地物光谱仪测量冬小麦冠层光谱数据,测量时天气晴朗、无云无风,探头垂直向下,距离地面1.3m,每个样方重复测定10次,取平均值作为该样方的光谱值,每次测量前后均用标准BaSO<sub>4</sub>参考板进行标定,并计算冠层反射率 $\rho$ ,计算式为<sup>[21]</sup>

$$\rho = \frac{L_{\text{target}}}{L_{\text{board}}} \rho_{\text{board}} \quad (1)$$

式中  $L_{\text{target}}$ ——目标辐亮度,  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$

$L_{\text{board}}$ ——参考板辐亮度,  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$

$\rho_{\text{board}}$ ——参考板反射率

### 1.1.3 病情指数调查

采用 5 点取样法调查试验区冬小麦条锈病病情严重度, 即在每个样方内选取对称的 5 点, 每点约  $1 \text{ m}^2$ , 随机选取 30 株冬小麦。单叶病情严重度分为 9 个梯度, 即: 0、1%、10%、20%、30%、45%、60%、80% 和 100%。记录每个样方各梯度下的冬小麦叶片数, 计算病情指数<sup>[17]</sup>, 计算式为

$$D_1 = \frac{\sum xf}{m \sum f} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $D_1$ ——病情指数, %

$x$ ——单叶各梯度级

$m$ ——单叶最高梯度级

$f$ ——各梯度的叶片数

## 1.2 研究方法

基于 ASD 光谱仪测定的冬小麦冠层反射辐亮度光谱以及太阳入射辐照度光谱数据, 利用优选的对小麦条锈病早期探测敏感的反射率荧光指数以及 3FLD 算法估测的单波段 SIF-A 强度作为自变量, 采用 PLS 算法构建小麦条锈病早期探测模型, 并将其与反射率光谱指数构建的模型进行对比分析, 以确定小麦条锈病早期探测的适宜模型。

### 1.2.1 基于 3FLD 的 SIF 估测算法

冬小麦侵染条锈病菌后, 光合作用活性减弱, 吸收光合有效辐射 (Absorbed photosynthetic active radiation, APAR<sub>chl</sub>) 降低<sup>[24]</sup>, 而  $\text{O}_2 - \text{A}$  波段 (中心波长为 760 nm) 的冠层 SIF 主要受 APAR<sub>chl</sub> 影响<sup>[25]</sup>, 且  $\text{O}_2 - \text{A}$  波段吸收形成的夫琅和费暗线特征明显<sup>[26]</sup>。因此, 利用 3FLD 算法提取  $\text{O}_2 - \text{A}$  波段的 SIF-A。3FLD 估测算法是利用夫琅和费暗线内的一个波段表观辐亮度和夫琅和费吸收线左右各一个波段表观辐亮度的加权平均值, 计算自然光照条件下太阳光激发的荧光对夫琅和费“井”的填充程度获取叶绿素荧光的强度<sup>[21]</sup>  $S_{\text{in}}$ , 计算公式为<sup>[27]</sup>

$$S_{\text{in}} = \frac{L_{\text{in}} (I_{\text{left}} \omega_{\text{left}} + I_{\text{right}} \omega_{\text{right}}) - I_{\text{in}} (L_{\text{left}} \omega_{\text{left}} + L_{\text{right}} \omega_{\text{right}})}{\omega_{\text{left}} I_{\text{left}} + \omega_{\text{right}} I_{\text{right}} - I_{\text{in}}} \quad (3)$$

其中  $\omega_{\text{left}} = \frac{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{in}}}{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}}$   $\omega_{\text{right}} = \frac{\lambda_{\text{in}} - \lambda_{\text{left}}}{\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}}$

式中  $I_{\text{in}}$ ——夫琅和费吸收线内的太阳辐照度光谱强度,  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$

$L_{\text{in}}$ ——夫琅和费吸收线内的植被冠层反射的辐亮度光谱强度,  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$

$\lambda_{\text{right}}, \lambda_{\text{in}}, \lambda_{\text{left}}$ ——吸收线右、内、左波段波长

$\omega_{\text{left}}, \omega_{\text{right}}$ ——吸收线左、右 2 个参考波段所占的权重

$I_{\text{left}}, I_{\text{right}}$ ——吸收线左、右的太阳辐照度光谱强度,  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm})$

$L_{\text{left}}, L_{\text{right}}$ ——吸收线左、右的植被冠层反射辐亮度光谱强度,  $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$

为了减弱冠层光谱数据测量时太阳光照强度等外界因素影响, 本文利用 3FLD 算法估测的冠层 SIF 绝对强度 ( $S_{\text{in}}$ ) 除以参考板获取的夫琅和费吸收线内的太阳入射辐照度, 得到该吸收线处的冠层日光诱导叶绿素荧光相对强度  $S_{\text{in}}^*$ , 计算公式为<sup>[28-29]</sup>

$$S_{\text{in}}^* = S_{\text{in}} / I_{\text{in}} \quad (4)$$

### 1.2.2 基于反射率光谱的 SIF 间接提取方法

为了进一步探究荧光对冬小麦条锈病早期探测的潜力, 引入能够检测荧光信息的冠层反射率比值指数、反射率一阶导数比值指数<sup>[30]</sup>。在冬小麦遭受条锈病胁迫时, 红边区域反射率光谱发生显著变化, 一阶导数光谱存在明显的双峰现象, 而在红边光谱区域中计算的反射率指数、利用双峰特征获取的一阶反射率比值指数, 可以跟踪病害诱导的荧光变化, 快速评估与冬小麦直接相关的生理过程<sup>[29-30]</sup>。

本文利用文献 [31] 构建的  $\rho_{740}/\rho_{720}$ 、 $\rho_{440}/\rho_{690}$ 、 $\rho_{675}\rho_{690}/\rho_{683}^2$ 、 $\rho_{750}/\rho_{800}$ 、 $\rho_{685}/\rho_{655}$ 、 $\rho_{690}/\rho_{655}$ , 文献 [32] 构建的  $\rho_{690}/\rho_{600}$ 、 $\rho_{740}/\rho_{800}$  反射率荧光指数, 以及文献 [33] 构建的一阶导数荧光指数  $D_{\lambda_p}/D_{744}$ 、 $D_{705}/D_{722}$ 、 $D_{730}/D_{706}$ 、 $D_{\lambda_p}/D_{703}$ 、 $D_{\lambda_p}/D_{720}$ 、 $D_{\lambda_p}/D_{\lambda_p+12}$  ( $\rho$ 、 $D$ 、 $\lambda_p$  分别为反射率光谱、一阶导数光谱、峰值波长) 估测 SIF 的反射率荧光指数。

### 1.2.3 冠层光谱指数 SI 计算

冠层 SI 能够表征冬小麦的相关特征及状态, 依据冬小麦条锈病的生理特征和已有研究成果, 本文选用文献 [34-39] 中的光谱指数作为冬小麦条锈病早期探测的冠层 SI 数据, 其中包括可减弱土壤背景对冠层光谱影响的 NDVI、RVI 和 DVI, 反映在病害胁迫下植物色素变化的 PPR、MTCI 和 PSSRc, 以及反映植被水分含量变化的 WI 和 MSI, 此外还有反映植被损伤程度的 DSSI2、病害胁迫下植被衰减程度的 PSRI 和直接反映植被光合速率变化的 PRI。

## 1.3 模型构建及精度检验

在进行小麦条锈病病情严重度模型构建和精度评价时, 为了使评价结果更客观, 将样本数据 (样本

数  $n=37$ ) 重复进行 3 次分组 (记为 a、b、c), 每组数据按照 3:1 的比例随机分成训练集 ( $n=28$ ) 和验证集 ( $n=9$ ), 以敏感 SIF 数据和 SI 数据 (达到 0.01 水平相关) 为自变量, DI 为因变量, 基于 PLS 算法建立冬小麦条锈病早期探测的 SIF-PLS 模型和 SI-PLS 模型, 并通过决定系数 (Determination coefficient,  $R^2$ ) 和均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 2 个指标对冬小麦条锈病早期探测模型进行精度评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 冠层 SIF 与 DI 的相关性分析

对冠层 SIF 数据与冬小麦条锈病发病早期的 DI 进行相关分析 (表 1), 由表 1 可以看出, SIF-A、 $\rho_{440}/\rho_{690}$ 、 $\rho_{675}\rho_{690}/\rho_{683}^2$ 、 $\rho_{685}/\rho_{655}$ 、 $\rho_{690}/\rho_{655}$ 、 $\rho_{690}/\rho_{600}$ 、 $\rho_{740}/\rho_{800}$ 、 $D_{\lambda p}/D_{744}$ 、 $D_{705}/D_{722}$ 、 $D_{730}/D_{706}$ 、 $D_{\lambda p}/D_{703}$  均与 DI 达到了显著相关水平, 其中 SIF-A、 $\rho_{440}/\rho_{690}$ 、 $\rho_{675}\rho_{690}/\rho_{683}^2$ 、 $\rho_{690}/\rho_{655}$ 、 $\rho_{690}/\rho_{600}$ 、 $D_{\lambda p}/D_{744}$ 、 $D_{705}/D_{722}$  均与 DI 达到了极显著相关水平, 可作为探测小麦条锈病早期的特征参量。利用 3FLD 方法提取的 SIF-A 强度与 DI 的相关性最高 ( $R=-0.793$ ), 表示  $O_2-A$  吸收线处的荧光对早期病害信息更敏感。

表 1 SIF 与 DI 的相关系数 ( $n=37$ )

Tab.1 Correlation coefficients of SIF and DI ( $n=37$ )

荧光指数	相关系数 $R$
SIF-A	-0.793 **
$\rho_{740}/\rho_{720}$	-0.227
$\rho_{440}/\rho_{690}$	-0.523 **
$\rho_{675}\rho_{690}/\rho_{683}^2$	-0.539 **
$\rho_{750}/\rho_{800}$	0.168
$\rho_{685}/\rho_{655}$	0.328 *
$\rho_{690}/\rho_{655}$	-0.497 **
$\rho_{690}/\rho_{600}$	0.541 **
$\rho_{740}/\rho_{800}$	0.331 *
$D_{\lambda p}/D_{744}$	0.446 **
$D_{705}/D_{722}$	0.490 **
$D_{730}/D_{706}$	-0.391 *
$D_{\lambda p}/D_{703}$	-0.378 *
$D_{\lambda p}/D_{720}$	-0.228
$D_{\lambda p}/D_{\lambda p+12}$	-0.283

注: \*\* 表示 0.01 水平极显著相关; \* 表示 0.05 水平显著相关, 下同。

### 2.2 冠层 SI 与 DI 的相关性分析

将所选择的光谱指数与冬小麦条锈病发病早期的 DI 进行相关分析 (表 2), 由表 2 可知, NDVI、

MSI、PRI、RVI、DVI、PSRI、WI 与 DI 的相关系数分别为 -0.574、0.456、-0.613、-0.571、-0.635、0.615、-0.469, 达到了极显著相关, 可作为早期探测模型的输入参量。PSRI、PRI 与 DI 相关系数的绝对值接近, 但 PSRI 与 DI 正相关, 而 PRI 则与 DI 负相关, 表明随着 DI 的增大, 冬小麦的衰减程度增大, 光合速率减弱。

表 2 SI 与 DI 的相关系数 ( $n=37$ )

Tab.2 Correlation coefficients of SI and DI ( $n=37$ )

光谱指数	相关系数 $R$
归一化植被指数 (NDVI)	-0.574 **
水分胁迫指数 (MSI)	0.456 **
光化学反射指数 (PRI)	-0.613 **
植被色素比率 (PPR)	0.349 *
比值植被指数 (RVI)	-0.571 **
损伤敏感光谱指数 2 (DSSI2)	0.184
差值植被指数 (DVI)	-0.635 **
MERIS 陆地叶绿素指数 (MTCI)	0.364 *
特征色素简单植被比值指数 $c$ (PSSRc)	0.333 *
植被衰减指数 (PSRI)	0.615 **
水分指数 (WI)	-0.469 **

### 2.3 冬小麦条锈病早期探测模型构建及精度评价

在小麦条锈病敏感因子优选的基础上分别以 SIF 和 SI 为特征参量构建小麦条锈病早期探测模型 SIF-PLS (图 1) 和 SI-PLS (图 2)。由图 1 和图 2 可以看出, 3 组冠层 SIF 数据构建的冬小麦条锈病早期探测 SIF-PLS 模型训练集的  $R^2$  分别为 0.679、0.690、0.711, 而 SI-PLS 模型的  $R^2$  分别为 0.509、0.449、0.448; SIF-PLS 的 RMSE 分别 3.4%、3.4%、3.4%, 而 SI-PLS 的 RMSE 分别 4.2%、4.6%、4.7%, SIF-PLS 模型预测 DI 和实测 DI 间的决定系数比 SI-PLS 至少提高了 33%。

采用保留样本交叉检验方式, 利用建模剩余的 9 个数据作为验证样本, 分别对 SIF-PLS 和 SI-PLS 模型的预测精度进行检验, 结果如表 3 所示。由表 3 可以看出, SIF-PLS 验证集的平均  $R^2$  为 0.793, 而 SI-PLS 验证集平均  $R^2$  为 0.576, SIF-PLS 验证集的平均 RMSE 为 3.2%, 而 SI-PLS 验证集的平均 RMSE 为 4.7%。因此, SIF-PLS 模型精度较同组 SI-PLS 模型均有一定的提高, 3 组数据中 SIF-PLS 模型比 SI-PLS 模型的  $R^2$  最少提高了 27%, 平均提高了 38%; RMSE 最少可减少 24%, 平均减少了 32%。因此, SIF-PLS 模型对小麦条锈病的早期探测能力优于 SI-PLS 模型。

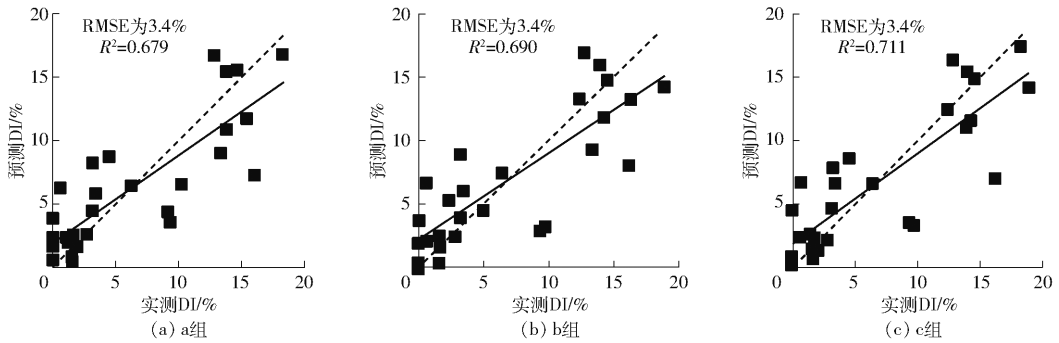


图1 SIF - PLS 模型精度

Fig. 1 SIF - PLS model accuracy

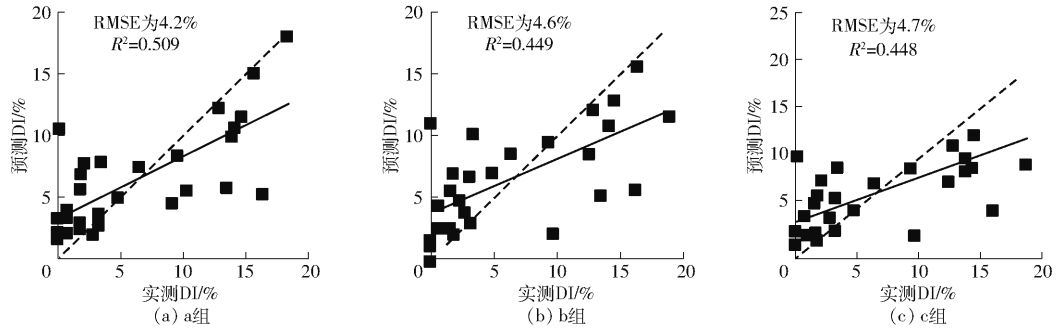


图2 SI - PLS 模型精度

Fig. 2 SI - PLS model accuracy

表3 验证精度

Tab. 3 Validation accuracy

数据组	荧光指数		光谱指数		变化量/%	
	$R^2$	RMSE/ %	$R^2$	RMSE/ %	$R^2$	RMSE
a	0.801	3.3	0.531	5.3	51	-38
b	0.772	3.1	0.607	4.6	27	-33
c	0.807	3.2	0.590	4.2	37	-24
平均值	0.793	3.2	0.576	4.7	38	-32

### 3 结论

(1)为探讨 SIF 对冬小麦条锈病早期探测的潜力,利用野外测定的冠层光谱和病情指数数据,对 SIF、SI 与冬小麦条锈病 DI 进行了相关性分析。结果表明,利用 3FLD 提取的  $O_2 - A$  波段(中心波长为 760nm)处的 SIF - A 强度与 DI 的相关性最高,相关系数  $R = -0.793$ ,说明 SIF - A 对冬小麦条锈病早期信息更为敏感。

(2)利用对 DI 敏感的 SIF 数据(SIF - A、 $\rho_{440}/\rho_{690}$ 、 $\rho_{675}/\rho_{690}$ 、 $\rho_{683}^2/\rho_{690}$ 、 $\rho_{690}/\rho_{655}$ 、 $\rho_{690}/\rho_{600}$ 、 $D_{\lambda_p}/D_{744}$ 、 $D_{705}/D_{722}$ )和 SI(NDVI、MSI、PRI、RVI、DVI、PSRI、WI),分别构建了冬小麦条锈病早期探测的 SIF - PLS 和 SI - PLS 模型。利用实测数据对模型进行了精度验证。结果表明,3 个样本组中 SIF - PLS 模型精度均比同组 SI - PLS 高,SIF - PLS 模型验证集  $R^2$  比 SI - PLS 至少提高了 27%,平均提高了 38%,RMSE 至少减少了 24%,平均减少了 32%。因此,SIF - PLS 模型优于 SI - PLS 模型,更适用于冬小麦条锈病的早期探测。

(3)利用 3FLD 和反射率荧光指数方法提取的 SIF 对小麦条锈病进行早期探测是可行的,且探测效果显著优于光谱指数方法。但该方法仅在小区控制试验条件下实现了冬小麦条锈病的早期探测,如何在田块尺度上探测到显症之前的小麦条锈病是下一步研究的重点。

### 参考文献

[1] 马占鸿. 中国小麦条锈病研究与防控[J]. 植物保护学报, 2018, 45(1): 1 - 6.  
MA Zhanhong. Researches and control of wheat stripe rust in China[J]. Journal of Plant Protection, 2018, 45(1): 1 - 6. (in Chinese)

[2] 黄林生, 江静, 黄文江, 等. Sentinel-2 影像和 BP 神经网络结合的小麦条锈病监测方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 178 - 185.  
HUANG Linsheng, JIANG Jing, HUANG Wenjiang, et al. Wheat yellow rust monitoring based on Sentinel-2 image and BPNN model[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(17): 178 - 185. (in Chinese)

[3] 王美丽, 牛晓静, 张宏鸣, 等. 小麦叶部常见病害特征提取及识别技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(7): 154 - 157.  
WANG Meili, NIU Xiaojing, ZHANG Hongming, et al. Research on feature extraction and recognition of common diseases of

- wheat leaf[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(7): 154–157. (in Chinese)
- [4] 李冠林, 马占鸿, 王海光. 基于支持向量机的小麦条锈病和叶锈病图像识别[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 72–79.  
LI Guanlin, MA Zhanhong, WANG Haiguang. Image recognition of wheat stripe rust and wheat leaf rust based on support vector machine[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2): 72–79. (in Chinese)
- [5] 郭青, 王骊雯, 董方敏, 等. 基于方向一致性特征的小麦条锈病与白粉病识别方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(1): 26–34.  
GUO Qing, WANG Liwen, DONG Fangmin, et al. Identification of wheat stripe rust and powdery mildew using orientation coherence feature[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(1): 26–34. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150105&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150105&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.005. (in Chinese)
- [6] 董锦绘, 杨小冬, 杨贵军, 等. 基于近地高光谱信息的小麦条锈病病情指数反演[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(12): 1674–1680.  
DONG Jinhui, YANG Xiaodong, YANG Guijun, et al. Inversion of wheat stripe rust disease index based on near ground hyperspectral data[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(12): 1674–1680. (in Chinese)
- [7] 鲁军景, 黄文江, 张竞成, 等. 基于小波特征的小麦白粉病与条锈病的定量识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1854–1858.  
LU Junjing, HUANG Wenjiang, ZHANG Jingcheng, et al. Quantitative identification of yellow rust and powdery mildew in winter wheat based on wavelet feature[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1854–1858. (in Chinese)
- [8] 雷雨, 韩德俊, 曾庆东, 等. 基于高光谱成像技术的小麦条锈病病害程度分级方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 226–232.  
LEI Yu, HAN Dejun, ZENG Qingdong, et al. Grading method of disease severity of wheat stripe rust based on hyperspectral imaging technology[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 226–232. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180526&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180526&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.026. (in Chinese)
- [9] YUE S, HUANG W, GONZÁLEZ-MORENO P, et al. Wavelet-based rust spectral feature set (WRSFs): a novel spectral feature set based on continuous wavelet transformation for tracking progressive host-pathogen interaction of yellow rust on wheat[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(4): 525–544.
- [10] MCMURTREY J E, MIDDLETON E M, CORP L A, et al. Optical reflectance and fluorescence for detecting nitrogen needs in *Zea mays* L [C]//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). IEEE, 2003, 7: 4602–4604.
- [11] DAVOUD A, MOBASHERI M, HUETE A. Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*) [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(6): 4723–4740.
- [12] RAJI S N, SUBHASH N, RAVI V, et al. Detection of mosaic virus disease in cassava plants by sunlight-induced fluorescence imaging: a pilot study for proximal sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(11): 2880–2897.
- [13] 陈兵, 王克如, 李少昆, 等. 病害胁迫对棉叶光谱反射率和叶绿素荧光特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 86–93.  
CHEN Bing, WANG Keru, LI Shaokun, et al. The effects of disease stress on spectra reflectance and chlorophyll fluorescence characteristics of cotton leaves [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 86–93. (in Chinese)
- [14] 周丽娜, 于海业, 张蕾, 等. 基于叶绿素荧光光谱分析的稻瘟病害预测模型[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(4): 1003–1006.  
ZHOU Lina, YU Haiye, ZHANG Lei, et al. Rice blast prediction model based on analysis of chlorophyll fluorescence spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(4): 1003–1006. (in Chinese)
- [15] 隋媛媛, 王庆钰, 于海业. 基于叶绿素荧光光谱指数的温室黄瓜病害预测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(6): 1779–1782.  
SUI Yuanyuan, WANG Qingyu, YU Haiye. Prediction of greenhouse cucumber disease based on chlorophyll fluorescence spectrum index[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(6): 1779–1782. (in Chinese)
- [16] 张永江. 植物叶绿素荧光被动遥感探测及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
ZHANG Yongjiang. Studies on passive of plant chlorophyll fluorescence and application of stress detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [17] 张永江, 刘良云, 侯名语, 等. 植物叶绿素荧光遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2009, 13(5): 963–978.  
ZHANG Yongjiang, LIU Liangyun, HOU Mingyu, et al. Progress in remote sensing of vegetation chlorophyll fluorescence[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(5): 963–978. (in Chinese)
- [18] 王冉, 刘志刚, 杨沛琦. 植物日光诱导叶绿素荧光的遥感原理及研究进展[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(11): 1221–1228.  
WANG Ran, LIU Zhigang, YANG Peiqi. Principle and progress in remote sensing of vegetation solar-induced chlorophyll fluorescence[J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(11): 1221–1228. (in Chinese)
- [19] 陈思媛, 竞霞, 董莹莹, 等. 基于日光诱导叶绿素荧光与反射率光谱的小麦条锈病探测研究[J]. *遥感技术与应用*, 2019, 34(3): 511–520.  
CHEN Siyuan, JING Xia, DONG Yingying, et al. Detection of wheat stripe rust using solar-induced chlorophyll fluorescence and reflectance spectral indices[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, 34(3): 511–520. (in Chinese)
- [20] 竞霞, 白宗璠, 高媛, 等. 利用随机森林法协同 SIF 和反射率光谱监测小麦条锈病[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 154–161.  
JING Xia, BAI Zongfan, GAO Yuan, et al. Wheat stripe rust monitoring by random forest algorithm combined with SIF and reflectance spectrum[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(13): 154–161. (in Chinese)

- [21] 竞霞,白宗璠,张腾,等. 3FLD和反射率荧光指数估测小麦条锈病病情严重度的对比分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 136-142.  
JING Xia, BAI Zongfan, ZHANG Teng, et al. Comparative analysis of 3FLD and reflectivity fluorescence index to estimate the severity of wheat stripe rust disease[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(11): 136-142. (in Chinese)
- [22] SHI Y, HUANG W J, LUO J H, et al. Detection and discrimination of pests and diseases in winter wheat based on spectral indices and kernel discriminant analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 171-180.
- [23] 赵叶, 竞霞, 黄文江, 等. 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[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2739-2745.  
ZHAO Ye, JING Xia, HUANG Wenjiang, et al. Comparison of solar-induced chlorophyll fluorescence and reflectance data on estimating severity of wheat stripe rust [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(9): 2739-2745. (in Chinese)
- [24] PORCAR-CASTELL A, TYYSTJÄRVI E, ATHERTON J, et al. Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: mechanisms and challenges[J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(15): 4065-4095.
- [25] DU S, LIU L, LIU X, et al. Response of canopy solar-induced chlorophyll fluorescence to the absorbed photosynthetically active radiation absorbed by chlorophyll[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9): 911-929.
- [26] 刘良云, 张永江, 王纪华, 等. 利用夫琅和费暗线探测自然光条件下的植被光合作用荧光研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(1): 130-137.  
LIU Liangyun, ZHANG Yongjiang, WANG Jihua, et al. Detecting photosynthesis fluorescence under natural sunlight based on fraunhofer line[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(1): 130-137. (in Chinese)
- [27] LIU X, LIU L. Improving chlorophyll fluorescence retrieval using reflectance reconstruction based on principal components analysis[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(8): 1645-1649.
- [28] LIU L, CHENG Z. Detection of vegetation light-use efficiency based on solar-induced chlorophyll fluorescence separated from canopy radiance spectrum[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(3): 306-312.
- [29] CORDON G, LAGORIO M G, PARUELO J M. Chlorophyll fluorescence, photochemical reflective index and normalized difference vegetative index during plant senescence[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 199: 100-110.
- [30] 刘良云. 植被定量遥感原理与应用[M]. 北京:科学出版社, 2014.
- [31] ZARCO-TEJADA P J, MILLER J R, MOHAMMED G H, et al. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. leaf-level measurements and model simulation[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(3): 582-595.
- [32] DOBROWSKI S Z, PUSHNIK J C, ZARCO-TEJADA P J, et al. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(3): 403-414.
- [33] ZARCO-TEJADA P J, PUSHNIK J C, DOBROWSKI S, et al. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(2): 283-294.
- [34] 唐翠翠, 黄文江, 罗菊花, 等. 基于相关向量机的冬小麦蚜虫遥感预测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 201-207.  
TANG Cuicui, HUANG Wenjiang, LUO Juhua, et al. Forecasting wheat aphid with remote sensing based on relevance vector machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 201-207. (in Chinese)
- [35] 王静, 景元书, 黄文江, 等. 冬小麦条锈病严重度不同估算方法对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(6): 1649-1653.  
WANG Jing, JING Yuanshu, HUANG Wenjiang, et al. Comparative research on estimating the severity of yellow rust in winter wheat[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(6): 1649-1653. (in Chinese)
- [36] 刘冰峰, 李军, 贺佳, 等. 基于高光谱植被指数的夏玉米地上干物质质量估算模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 254-262.  
LIU Bingfeng, LI Jun, HE Jia, et al. Estimation models of above-ground dry matter accumulation of summer maize based on hyperspectral remote sensing vegetation indexes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 254-262. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160336&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160336&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.036. (in Chinese)
- [37] 张松, 冯美臣, 杨武德, 等. 基于高光谱植被指数的冬小麦产量监测[J]. 山西农业科学, 2018, 46(4): 572-575.  
ZHANG Song, FENG Meichen, YANG Wude, et al. Monitoring of winter wheat yield based on hyperspectral vegetation index [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2018, 46(4): 572-575. (in Chinese)
- [38] 黄文江, 张亮成, 师越, 等. 作物病虫害遥感监测与预测研究进展[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, 10(1): 30-43.  
HUANG Wenjiang, ZHANG Jingcheng, SHI Yue, et al. Progress in monitoring and forecasting of crop pests and diseases by remote sensing[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 10(1): 30-43. (in Chinese)
- [39] 田静国, 王树东, 张立福, 等. 应用高光谱植被指数反演冬小麦叶绿素含量的光谱指标敏感性研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(15): 1-8.  
TIAN Jingguo, WANG Shudong, ZHANG Lifu, et al. Spectral index sensitivity study of winter wheat chlorophyll inversion using hyperspectral remote sensing vegetation index[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(15): 1-8. (in Chinese)