

## 基于红光波段冠层 SIF 降尺度的小麦条锈病遥感监测

竞霞 赵佳琪 叶启星 张震华 张源芳

(西安科技大学测绘科学与技术学院, 西安 710054)

**摘要:** 为减弱冠层几何结构等因素对传感器探测到的冠层日光诱导叶绿素荧光 (Solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF) 的影响, 探讨了条锈病胁迫下红光波段荧光 (Red SIF, RSIF) 的响应特性, 并以 RSIF 为自变量构建了小麦条锈病遥感监测的线性回归 (Simple linear regression, SLR) 及非线性回归 (Non-linear regression, NLR) 模型。结果表明: 叶片尺度 RSIF 在小麦条锈病遥感监测中具有较大优势, 其与小麦条锈病病情严重度 (Severity level, SL) 间相关系数较远红光波段 SIF (Far-red SIF, FRSIF) 提高 13.2%, 以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的 SLR 及 NLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  之间  $R^2$  较 FRSIF 分别增加 9.8%、38.9%, RMSE 分别降低 23.1%、36.4%。此外, 降尺度处理能够提高 RSIF 监测小麦条锈病的精度, 叶片尺度 RSIF 与  $D_{SL}$  之间  $R^2$  较冠层尺度增加 126.3%, 以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的 SLR 和 NLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  间  $R^2$  较冠层尺度分别提高 114.3% 和 233.3%, RMSE 分别降低 16.7%、15.4%。本文提出方法可提高小麦条锈病遥感监测精度, 同时对其它胁迫的遥感监测具有一定的参考价值。

**关键词:** 小麦条锈病; 遥感监测; 日光诱导叶绿素荧光; 红光波段; 降尺度; 模型精度

中图分类号: S512.1<sup>+</sup>1; S127

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0252-08

OSID:



## Remote Sensing Monitoring of Wheat Stripe Rust Based on Canopy Downscaling Using Red SIF

JING Xia ZHAO Jiaqi YE Qixing ZHANG Zhenhua ZHANG Yuanfang

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

**Abstract:** In order to reduce the influence of canopy geometry and other factors on the sensor detected solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF), the response characteristics of red SIF (RSIF) fluorescence under stripe rust stress were discussed. Simple linear regression (SLR) and non-linear regression (NLR) models for remote sensing monitoring of wheat stripe rust were constructed with RSIF as the independent variable. The results showed that the leaf scale RSIF had a significant advantage in the remote sensing monitoring of wheat stripe rust, with a 13.2% higher correlation with the severity level (SL) of wheat stripe rust compared with far-red SIF (FRSIF). Compared with FRSIF, the  $R^2$  between predicted  $D_{SL}$  and measured  $D_{SL}$  was increased by 9.8% and 38.9%, and the RMSE was decreased by 23.1% and 36.4%, respectively, using the linear regression model and non-linear regression model constructed with the blade scale RSIF as the independent variable. In addition, downscaling can improve the accuracy of RSIF monitoring of wheat stripe rust. The  $R^2$  between leaf scale RSIF and  $D_{SL}$  was increased by 126.3% compared with the canopy scale. The  $R^2$  between  $D_{SL}$  and measured  $D_{SL}$  predicted by SLR and NLR models using leaf scale RSIF as independent variable was increased by 114.3% and 233.3%, respectively, compared with the canopy scale, and RMSE was decreased by 16.7% and 15.4%, respectively. The research results were of great significance for improving the remote sensing monitoring accuracy of wheat stripe rust, and also had certain reference value for remote sensing monitoring of other stresses.

**Key words:** wheat stripe rust; remote sensing monitoring; solar-induced chlorophyll fluorescence; red band; downscaling; model accuracy

收稿日期: 2023-11-11 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171394)和西藏自治区自然科学基金项目(XZ202101ZR0085G)

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

0 引言

小麦是我国主要的粮食作物之一,其生产安全直接关系着国家安全<sup>[1]</sup>,小麦条锈病因其爆发性和流行性的特点<sup>[2]</sup>,严重影响我国粮食的产量和质量,因此准确监测小麦条锈病发病信息,对小麦条锈病的精准防治具有重要意义。日光诱导叶绿素荧光 (Solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF) 能够快速、无损地探测植物光合生理状况及其胁迫变化,已成为植被遥感领域研究热点<sup>[3]</sup>。SIF 光谱在波长范围 650 ~ 850 nm 内有红光和远红光 2 个峰值,红光波段荧光 (Red SIF, RSIF) 主要来源于 PSII 的天线叶绿素分子,远红光波段荧光 (Far-red SIF, FRSIF) 来源于 PSII 和 PSI 的天线叶绿素分子<sup>[4]</sup>。虽然 PSI 和 PSII 都能发射荧光,但室温条件下绝大部分荧光来自于 PSII 天线系统,PSI 天线系统只贡献很小的一部分<sup>[5]</sup>。而 RSIF 由 PSII 产生,能够较 FRSIF 更好地揭示与植物生理生化相关信息,比 FRSIF 对 GPP 更敏感<sup>[6-8]</sup>,能够更好地表征植被光合生理状态<sup>[9]</sup>。然而,由于 RSIF 受叶片内叶绿素吸收的影响较大<sup>[10]</sup>,且其夫琅禾费吸收线的宽度与深度均小于 FRSIF<sup>[11]</sup>,反演精度不如 FRSIF 稳健,所以目前利用 RSIF 开展的相关研究较少<sup>[12]</sup>。

由于传感器观测的冠层 SIF 的方向性特性,叶片内部的重吸收作用导致荧光在叶片尺度不同方向差异较大,且不同的二向间隙率对冠层下层叶片所能吸收的光子造成影响,对 SIF 逃逸概率产生阻碍效应<sup>[13]</sup>。因此,传感器探测到的冠层方向性 SIF 难以准确反映出植物的光合生理状态<sup>[13]</sup>,仅通过冠层 SIF 数据难以实现更高精度的探测。已有研究结果表明,由于 RSIF 在冠层辐射传输过程中的重吸收作用,红-远荧光在冠层尺度上的比值低于叶片尺度<sup>[14]</sup>。BASTIAN 等<sup>[15]</sup>利用荧光校正植被指数 (Fluorescence correction vegetation index, FCVI) 估测从叶片尺度到冠层尺度的逃逸率,结果表明该方法对于补偿冠层结构以及环境受限时光合作用过程产生的影响具有很好的消除作用。LIU 等<sup>[16]</sup>使用随机森林法将冠层 SIF 降尺度到光系统尺度后发现,降尺度后的 RSIF 与吸收光合有效辐射 (Absorbed photosynthetic active radiation, APAR) 之间相关性较冠层尺度显著增强, SIF - 总初级生产力 (Gross primary productivity, GPP) 之间的相关性也有明显的改善<sup>[12]</sup>,且改善效果优于 FRSIF,表明降尺度后 RSIF 较 FRSIF 能更有效地提供植物光合作用生理生化信息。为了研究 RSIF 监测小麦条锈病的性能,本文在对冠层 SIF 降尺度的基础上分析条锈病胁迫

下叶片和冠层尺度 RSIF 的响应特性,并分别以 RSIF 和 FRSIF 为自变量利用简单线性回归、非线性回归算法构建不同尺度小麦条锈病的遥感监测模型,进一步评价叶片和冠层尺度下 RSIF 在小麦条锈病遥感监测中的潜力,以期为提高病害的遥感监测精度提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省宝鸡市岐山县 (34°26'52"N, 107°37'42"E),属暖温带半湿润气候,四季冷暖干湿分明,雨水充足,平均全年日照时数 2 066.6 h,年平均气温 11.9℃,气候适宜。小麦种植时间集中于 2020 年 9 月下旬至 10 月上旬,次年 5 月下旬至 6 月上旬小麦成熟。测量样方均设置为 40 cm × 40 cm 的矩形,测定冠层光谱并调查小麦条锈病严重度。研究区概况如图 1 所示。

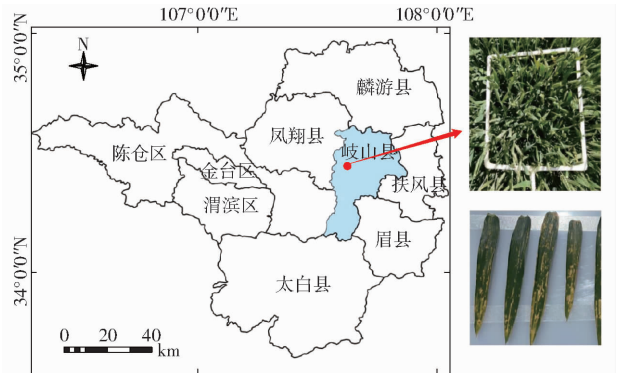


图 1 2020 年岐山县研究区概况

Fig. 1 Overview of research area in Qishan County in 2020

1.2 数据获取与处理

1.2.1 冠层光谱获取

利用 QE - pro 型光谱仪 (Ocean Optics, Inc., 美国)测量研究区冠层光谱,该仪器光谱范围为 640 ~ 800 nm,光谱分辨率 0.30 nm,采样间隔 0.15 nm,探头距小麦冠层 0.9 m,探头视场角 15°。观测时间在 2021 年 4 月下旬至 5 月中旬 (表 1),冠层光谱测量均在晴朗无云的天气下完成,且使用标准 BaSO<sub>4</sub> 参考板对冠层辐亮度数据进行校正。

表 1 实验日期与观测记录

Tab. 1 Experimental date and observation records

| 研究区                       | 观测日期     | 观测时间段       | 测量仪器              |
|---------------------------|----------|-------------|-------------------|
| 陕西省宝鸡市<br>岐山县大田自<br>然发病区域 | 4 月 28 日 | 11:00—14:00 | QE - pro 型<br>光谱仪 |
|                           | 4 月 29 日 | 11:00—14:00 |                   |
|                           | 4 月 30 日 | 11:00—14:00 |                   |
|                           | 5 月 5 日  | 11:00—14:00 |                   |
|                           | 5 月 6 日  | 11:00—14:00 |                   |
|                           | 5 月 12 日 | 11:00—14:00 |                   |
|                           | 5 月 13 日 | 11:00—14:00 |                   |
|                           |          |             |                   |

根据 QE-pro 型光谱仪所测得的光谱数据,计算小麦冠层反射率

$$\rho = \frac{L_{\text{target}}\rho_{\text{board}}}{L_{\text{board}}}$$

(1)

式中  $\rho$ ——目标地物的冠层反射率  
 $L_{\text{target}}$ ——目标地物辐亮度  
 $L_{\text{board}}$ ——参考板辐亮度  
 $\rho_{\text{board}}$ ——参考板反射率

1.2.2 冠层病情严重度调查

采用五点取样法调查小麦条锈病病情严重度,以样方对角线中点为中心样本点,取对角线上与中心样本点距离相等的 4 点作为样本点,以保证样本抽取的随机性和均匀性。所有样本均按照国家标准 GB/T 15795《小麦条锈病测报技术规范》<sup>[17]</sup>对病情严重度水平进行划分,将小麦叶片受害程度(病叶上的病斑面积相对于总叶面积的百分比)分为 1%、5%、10%、20%、40%、60%、80% 和 100% 共 8 个梯度级,计算小麦冠层病情严重度(Severity level, SL)<sup>[18]</sup>

$$D_{\text{SL}} = \sum i l_i / L \times 100\%$$

(2)

式中  $D_{\text{SL}}$ ——小麦冠层病情严重度  
 $i$ ——梯度  
 $l_i$ ——第  $i$  个梯度相对应的病叶数量  
 $L$ ——调查的总叶片数量

1.2.3 日光诱导叶绿素荧光估测

标准 FLD 荧光估测算法通过比较有无荧光贡献的光谱吸收波段深度提取单波段 SIF 强度,该算法关于吸收线处的叶绿素荧光和植被反射率不变的假设影响了 SIF 提取的精度<sup>[13]</sup>。3FLD(Three bands fraunhofer line discrimination)算法利用吸收线左右各一个波段的加权平均值作为单一的参考波段,弥补了标准 FLD 算法的缺陷<sup>[13]</sup>,具有更好的鲁棒性<sup>[19]</sup>,基于此本研究采用 3FLD 方法计算 SIF 值。即

$$SIF_{\text{cpy}} = \frac{(I_{\text{left}} W_{\text{left}} + I_{\text{right}} W_{\text{right}}) L_{\text{in}} - I_{\text{in}} (L_{\text{left}} W_{\text{left}} + L_{\text{right}} W_{\text{right}})}{I_{\text{left}} W_{\text{left}} + I_{\text{right}} W_{\text{right}} - I_{\text{in}}}$$

(3)

$$\begin{cases} I_{\text{out}} = W_{\text{left}} I_{\text{left}} + W_{\text{right}} I_{\text{right}} \\ L_{\text{out}} = W_{\text{left}} L_{\text{left}} + W_{\text{right}} L_{\text{right}} \end{cases}$$

(4)

$$\begin{cases} W_{\text{left}} = (\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{in}}) / (\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}) \\ W_{\text{right}} = (\lambda_{\text{in}} - \lambda_{\text{left}}) / (\lambda_{\text{right}} - \lambda_{\text{left}}) \end{cases}$$

(5)

式中  $I_{\text{left}}、I_{\text{right}}、I_{\text{in}}、I_{\text{out}}$ ——吸收线左、右、内侧和外侧的入射太阳辐照度

$L_{\text{left}}、L_{\text{right}}、L_{\text{in}}、L_{\text{out}}$ ——吸收线左、右、内侧和外侧植被冠层上行辐亮度

$W_{\text{left}}、W_{\text{right}}$ ——吸收线左、右参考波段的权重

$\lambda_{\text{left}}、\lambda_{\text{right}}、\lambda_{\text{in}}$ ——吸收线左、右和内侧波段波长

$SIF_{\text{cpy}}$ ——冠层尺度 SIF

1.2.4 冠层 SIF 降尺度

叶绿素荧光激发过程中,SIF 光子在冠层内多次散射或重吸收在一定程度上限制了从冠层方向性 SIF 中探测植物光合生理的能力。基于此,本研究将传感器探测到的冠层方向性 SIF 降尺度到叶片尺度,探究小麦条锈病胁迫下叶片和冠层尺度 RSIF 的响应特性。

植被光合有效辐射吸收比(Fraction of absorbed photosynthetically active radiation, FAPAR)是表征植被光合作用能力和生长状态的重要参量<sup>[20]</sup>,冠层中的光合组分及非光合组分均会吸收太阳辐射,而真正驱动光合作用的是绿色叶片吸收的 FAPAR( $FAPAR_{\text{green}}$ ),若直接利用冠层 FAPAR 进行光合估算会出现高估问题<sup>[21-22]</sup>。文献[23-27]研究表明, $FAPAR_{\text{green}}$ 与宽动态范围植被指数(Wide dynamic range vegetation index, WDRVI)具有良好的线性相关性,WDRVI 能够更可靠地表征作物的生理和物候特征。因此,本研究利用 WDRVI 进行  $FAPAR_{\text{green}}$  估测,描述植被指数与绿色叶片 FAPAR 之间的关系为

$$FAPAR_{\text{green}} = 0.85 WDRVI + 0.16$$

(6)

其中

$$WDRVI = \frac{\alpha R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}}}{\alpha R_{\text{NIR}} + R_{\text{Red}}}$$

(7)

式中  $R_{\text{NIR}}$ ——近红外波段反射率  
 $R_{\text{Red}}$ ——红光波段反射率  
 $\alpha$ ——加权系数,取 0.5<sup>[23]</sup>

根据 LIU<sup>[12,16]</sup>等的研究结果,对于 RSIF 和 FRSIF,从叶片尺度到冠层尺度的 SIF 逃逸率  $\varepsilon_{\text{CL}}$  分别可以近似为

$$\varepsilon_{\text{CL}}(\text{Red}, \Omega) \sim \frac{\text{BRF}(\text{Red}, \Omega) \text{NDVI}^2}{FAPAR_{\text{green}}}$$

(8)

$$\varepsilon_{\text{CL}}(\text{NIR}, \Omega) \sim \frac{\text{BRF}(\text{NIR}, \Omega) \text{NDVI}}{FAPAR_{\text{green}}}$$

(9)

式中  $\text{BRF}(\lambda, \Omega)$ ——传感器探测到的冠层方向反射率

冠层方向反射率由冠层叶片和土壤背景两者贡献,假设传感器在整个瞬时视场角内的响应均相等,且土壤背景对冠层方向反射率的贡献利用 NDVI 进行补偿,则传感器探测到的反射率可近似为冠层方向

反射率<sup>[12]</sup>。

利用式(8)、(9)计算得到从叶片尺度到冠层尺度的 SIF 逃逸率,则叶片尺度的 SIF 计算式为

$$SIF_{leaf} = \frac{SIF_{epi}}{\varepsilon_{CL}}$$

(10)

式中  $SIF_{leaf}$ ——叶片尺度 SIF

2 结果与分析

2.1 条锈病胁迫下 RSIF 的响应特性

为减弱冠层几何结构以及叶绿素重吸收等因素

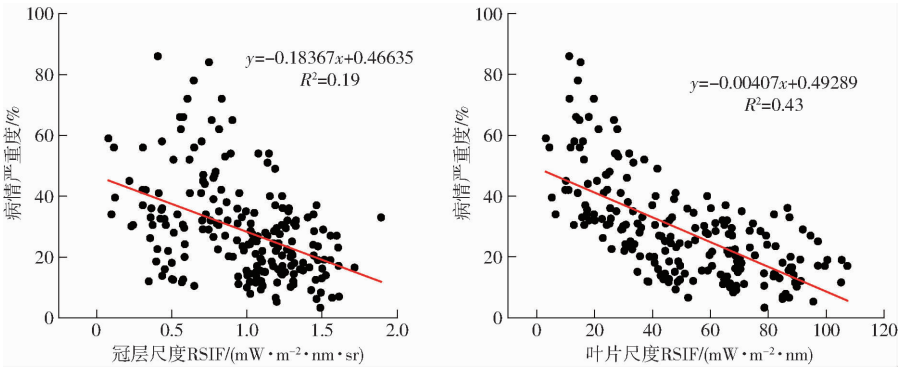


图 2 RSIF 与小麦条锈病病情严重度相关性

Fig. 2 Correlation between RSIF and severity of wheat stripe rust

为更好地评价 RSIF 对小麦条锈病的监测性能,进一步对比分析了条锈病胁迫下 RSIF 和 FRSIF 的响应特性。综合图 2 和图 3 可以看出,冠层尺度 FRSIF 与  $D_{sl}$  之间的相关性优于 RSIF,这是因为受条锈病菌侵染的小麦在进行光合作用时,PSII 对生物和非生物胁迫的敏感性致使光化学电子传递能力受到损害<sup>[29]</sup>,SIF 探测植物光合生理的能力减弱<sup>[11]</sup>,且 RSIF 受重吸收作用影响大。而经过降尺度处理后,叶片尺度 RSIF 与  $D_{sl}$  之间的相关系数较 FRSIF 提高 13.2%,这是由于影响 RSIF 与 FRSIF 荧光光子逃逸率的主导因素不同,在利用 NDVI 分别对 RSIF 与 FRSIF 的冠层方向反射率进行补偿时,对于冠层结构及叶绿素重吸收影响的削弱作用也不同。一方面,利用 NDVI<sup>2</sup>对 RSIF 的冠层方向反射率

进行补偿能够更好地减弱叶片内部散射以及重吸收作用<sup>[29-31]</sup>;另一方面,由 PSII 产生的 RSIF 可以直接表征作物的光合生理信息,在表征植被生理变化上具有更大的潜力<sup>[9]</sup>。此外,叶片尺度 RSIF、FRSIF 与  $D_{sl}$  之间的  $R^2$  较冠层尺度分别增加 126.3% 和 26.7%。这说明无论是 RSIF 还是 FRSIF,对其进行降尺度处理均能够在一定程度上减弱冠层几何结构及叶绿素重吸收对传感器探测到的冠层 SIF 的影响,改善 SIF 与  $D_{sl}$  之间相关性,尤其是叶片尺度的 RSIF 能更好地反映 SIF 与  $D_{sl}$  的响应关系,提高小麦条锈病遥感监测精度。

2.2 模型构建及精度评价

本研究以不同尺度(冠层尺度、叶片尺度)RSIF 为自变量,以小麦条锈病病情严重度为因变量,基于

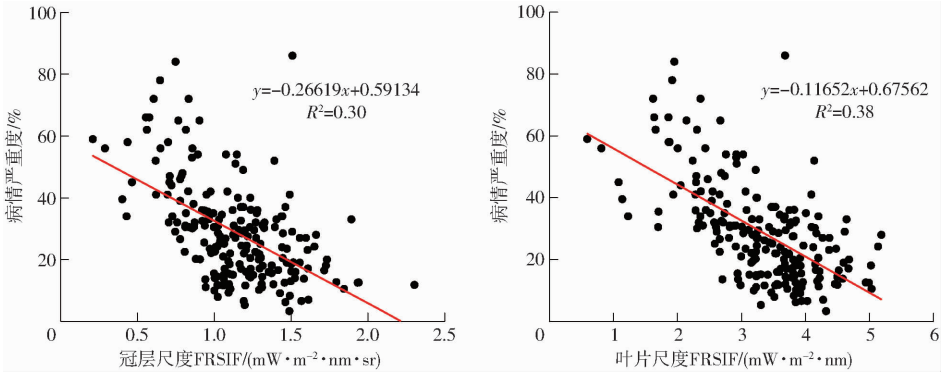


图 3 FRSIF 与小麦条锈病病情严重度相关性

Fig. 3 Correlation between FRSIF and severity of wheat stripe rust

简单线性回归 (Simple linear regression, SLR) 以及非线性回归算法 (Non-linear regression, NLR) 分别构建了小麦条锈病遥感监测模型。选用预测病情严重程度与实测病情严重程度之间的  $R^2$  及 RMSE 评价模型精度。

2.2.1 基于 RSIF 的小麦条锈病遥感监测模型

为保证评价结果的客观性和可靠性,将 211 个样本数据按照比例 3:2 随机分配,以 127 个样本数据作为训练集构建模型,以剩余的 84 个样本数据作

为验证集进行模型精度评价。分别以叶片和冠层尺度下 RSIF 为自变量构建小麦条锈病 SLR 及 NLR 模型(表 2)。由表 2 可以看出,以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的线性回归模型与非线性回归模型的预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  之间  $R^2$  分别为 0.43、0.48,较冠层尺度分别增加了 152.9%、269.2%,RMSE 降低了 18.8%、18.8%。结果表明降尺度处理对于叶片尺度 RSIF 小麦条锈病的监测效果更优。

表 2 RSIF 小麦条锈病病情严重程度模型预测  
Tab.2 Prediction of wheat stripe rust severity model in RSIF

| 模型    | 评价标准 | 模型                                           | $R^2$ | RMSE/% |
|-------|------|----------------------------------------------|-------|--------|
| 线性回归  | 冠层尺度 | $y = -0.1978x + 0.4888$                      | 0.17  | 16     |
|       | 叶片尺度 | $y = -0.0043x + 0.5164$                      | 0.43  | 13     |
| 非线性回归 | 冠层尺度 | $y = -0.0696x^2 - 0.0373x + 0.3978$          | 0.13  | 16     |
|       | 叶片尺度 | $y = 9 \times 10^{-5}x^2 - 0.0136x + 0.6971$ | 0.48  | 13     |

利用建模剩余的 84 个样本点的叶片和冠层尺度 RSIF 数据评价小麦条锈病遥感监测模型精度(图 4)。由图 4 可以看出,以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的 SLR 及 NLR 模型精度均优于冠层尺度,其预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  之间  $R^2$  较冠层尺度分别提高 114.3% 和 233.3%,RMSE 分别降低 16.7% 和 15.4%。这与模型训练结果一致,进一步验证了以叶片尺度 RSIF 构建预测模型的可靠性和鲁棒性。此外,以叶片尺度 FRSIF 为自变量构建的 SLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  间  $R^2$  较冠层尺度提高 5.1%

(图 5), RMSE 不变;NLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  间的  $R^2$  较冠层尺度提高 2.9%,RMSE 不变。因此,无论是 RSIF 或 FRSIF,降尺度处理都能够更有效地提高小麦条锈病的遥感监测精度。

为评价小麦条锈病遥感监测的 RSIF 模型性能,与不同尺度下 FRSIF 为自变量构建的 SLR 以及 NLR 模型进行对比分析(图 5)。综合图 4 和图 5 可以看出,以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的小麦条锈病预测模型精度均优于 FRSIF,其构建的 SLR、NLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  间  $R^2$  较 FRSIF 分别增加

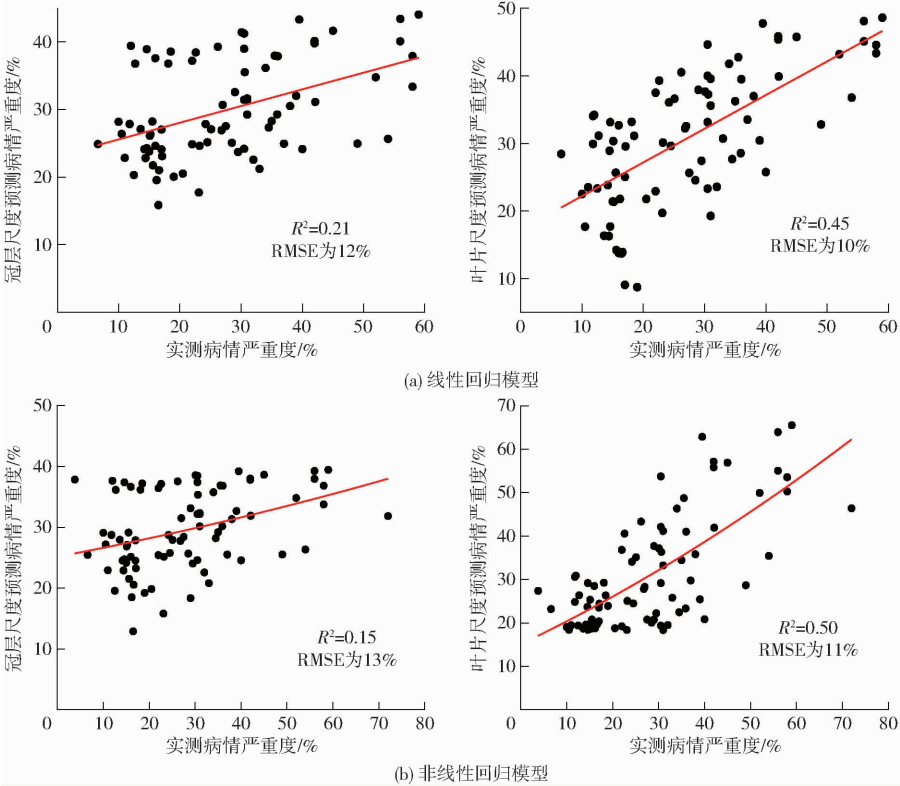


图 4 RSIF 小麦条锈病病情严重程度模型精度验证

Fig.4 Accuracy verification of RSIF wheat stripe rust severity model

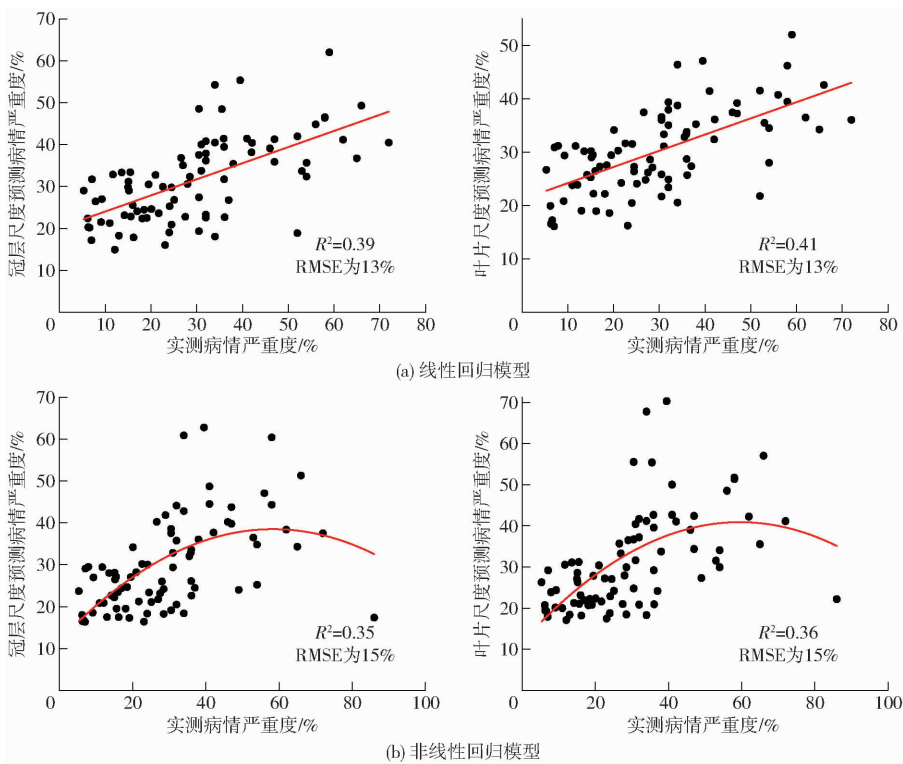


图 5 FRSIF 小麦条锈病病情严重度模型精度验证

Fig. 5 Accuracy verification of FRSIF wheat stripe rust severity model

9.8% 和 38.9% ,RMSE 分别降低 23.1% 和 36.4% 。因此,以叶片尺度 RSIF 为自变量,基于 NLR 算法构建的小麦条锈病遥感监测模型为最优模型。

2.2.2 模型预测精度残差分析

为更好地探究不同病情严重度下小麦条锈病的预测精度,文献[32]依据病情严重度将小麦条锈病发病状况分为轻度发病( $0\% < D_{SL} \leq 20\%$ )、中度发病( $20\% < D_{SL} \leq 45\%$ )和重度发病( $D_{SL} > 45\%$ )3个等级。利用实测  $D_{SL}$  与 RSIF 模型预测的  $D_{SL}$  进行残差计算,比较模型预测残差变化趋势,定量分析小麦条锈病不同病情严重度下模型预测结果(图 6~8)。其中,样本点随机生成的条带越窄,表明模型精度越高,条带越宽,表明模型精度越低。每个样本点残差  $\delta_i$  计算式为

$$\delta_i = D_{SL_i} - \hat{D}_{SL_i} \tag{11}$$

式中  $D_{SL_i}$ ——实测小麦病情严重度  
 $\hat{D}_{SL_i}$ ——以 SIF 为自变量构建的模型预测的病情严重度

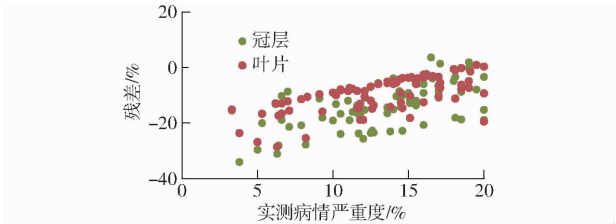


图 6 轻度发病状况下的残差

Fig.6 Residual in mild disease

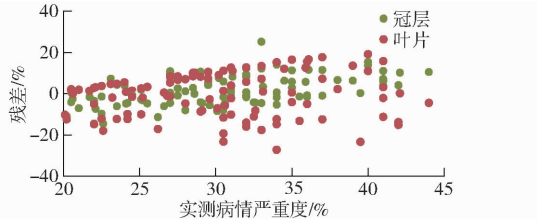


图 7 中度发病状况下的残差

Fig. 7 Residual in moderate disease

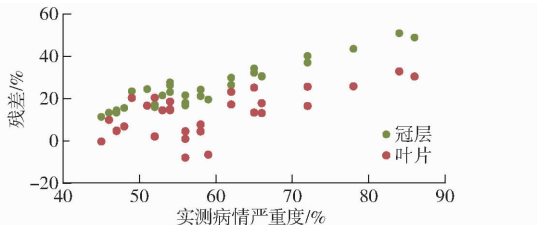


图 8 重度发病状况下的残差

Fig. 8 Residual in severe disease

由图 6 可以看出,轻度发病状况下,模型对  $D_{SL}$  的预测值较实测值偏大,表明该预测模型对轻度发病小麦的预测能力有所高估。此外,叶片尺度残差分布较冠层尺度更均匀,以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的模型预测精度优于冠层尺度。当 RSIF 从冠层尺度降至叶片尺度时,主要反映作物对病害胁迫的生理响应,受冠层结构变化的影响较小,因此对病情严重度的敏感性高于冠层尺度。中度发病状况下,预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  间的残差在一定范围内浮动(图 7),以冠层尺度 RSIF 为自变量预测的  $D_{SL}$  与叶片尺度基本一

致。这是因为冠层 SIF 的变化主要受叶片光合生理以及冠层几何结构的驱动<sup>[33]</sup>,此时 SIF 一方面受能量耗散途径中生理调控的影响,另一方面也受植物色素组成、叶面积、叶倾角等生化和物理参数的影响<sup>[29]</sup>,叶片生理和冠层结构参数均随条锈病病情严重度的变化而变化,且二者对 SIF 冠层的变化具有叠加效应<sup>[33]</sup>。重度发病状况下,模型预测  $D_{SL}$  较实测  $D_{SL}$  偏小(图 8),残差基本为正。这是因为在重度发病情况下,叶片内部结构受到的破坏较严重,影响 SIF 的多次散射及重吸收作用<sup>[33]</sup>,导致重度发病状况下小麦条锈病模型预测  $D_{SL}$  偏低。

3 结论

(1) 叶片尺度 RSIF 与  $D_{SL}$  间  $R^2$  较 FRSIF 增加

13.2%,呈现极显著负相关关系,且以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的 SLR 和 NLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  之间  $R^2$  较 FRSIF 分别增加 9.8%、38.9%,RMSE 分别降低 23.1%、36.4%。

(2) 叶片尺度 RSIF、FRSIF 与  $D_{SL}$  间  $R^2$  较冠层尺度分别增加 126.3% 和 26.7%,且以叶片尺度 RSIF、FRSIF 为自变量构建的 SLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  间  $R^2$  较冠层尺度分别增加 114.3%、5.1%,RMSE 分别降低 16.7%、0,NLR 模型预测  $D_{SL}$  与实测  $D_{SL}$  间  $R^2$  较冠层尺度分别增加 233.3%、12.9%,RMSE 分别降低 15.4%、0。综上,以叶片尺度 RSIF 为自变量构建的 NLR 模型能够更精准地实现病害监测。

参 考 文 献

[1] 韩西红. 小麦条锈病发生规律及综合防治策略[J]. 农家参谋,2022(23):84-86.

[2] 竞霞,张腾,白宗璠,等. 融合 GA 与 SVR 算法的小麦条锈病特征优选与模型构建[J]. 农业机械学报,2020,51(11):253-263. JING Xia, ZHANG Teng, BAI Zongfan, et al. Feature selection and model construction of wheat stripe rust based on GA and SVR algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):253-263. (in Chinese)

[3] 章钊颖,王松寒,邱博,等. 日光诱导叶绿素荧光遥感反演及碳循环应用进展[J]. 遥感学报,2019,23(1):37-52. ZHANG Zhaoying, WANG Songhan, QIU Bo, et al. Retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence and advancements in carbon cycle application[J]. Journal of Remote Sensing, 2019,23(1):37-52. (in Chinese)

[4] 王纪华,赵春江,黄文江,等. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2008.

[5] BUTLER W L. Energy distribution in the photochemical apparatus of photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978,29(1):345-378.

[6] JOINER J, YOSHIDA Y, GUANTER L, et al. New methods for retrieval of chlorophyll red fluorescence from hyper-spectral satellite instruments: simulations and application to gome-2 and sciamachy[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9:3939-3967.

[7] DUAN Weina, LIU Xinjie, CHEN Jidai, et al. Investigating the performance of red and far-red sif for monitoring GPP of alpine meadow ecosystems[J]. Remote Sensing, 2022,14,2740.

[8] MAGNEY T S, BOWLING D R, LOGAN B A, et al. Mechanistic evidence for tracking the seasonality of photosynthesis with solar-induced fluorescence[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019,116:11640-11645.

[9] 吴霖升,张永光,章钊颖,等. 日光诱导叶绿素荧光遥感及其在陆地生态系统监测中的应用[J]. 植物生态学报,2022, 46(10):1167-1199. WU Linsheng, ZHANG Yongguang, ZHANG Zhaoying, et al. Remote sensing of solar-induced chlorophyll fluorescence and its applications in terrestrial ecosystem monitoring[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022,46(10):1167-1199. (in Chinese)

[10] VAN S, ALONSO L, VERRELST J, et al. Bidirectional sun-induced chlorophyll fluorescence emission is influenced by leaf structure and light scattering properties—a bottom-up approach[J]. Remote Sensing of Environment, 2015,158:169-179.

[11] 黄长平. 太阳光诱导下的植被叶绿素荧光遥感反演方法研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013. HUANG Changping. Retrieval of solar-induced vegetation chlorophyll fluorescence from remotely-sensed data[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)

[12] LIU Xinjie, LIU Liangyun, HU Jiaochan, et al. Improving the potential of red SIF for estimating GPP by downscaling from the canopy level to the photosystem level[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020,281:107846.

[13] 王绍强,刘良云,张永光,等. 陆地生态系统高光谱观测方法与应用[M]. 北京:科学出版社,2020.

[14] FOURNIER A, DAUMARD F, CHAMPAGNE S, et al. Effect of canopy structure on sun-induced chlorophyll fluorescence[J/OL]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012,68. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.01.003>.

[15] BASTIAN S, PILAR M C, SERGIO C, et al. Downscaling of far-red solar-induced chlorophyll fluorescence of different crops from canopy to leaf level using a diurnal data set acquired by the airborne imaging spectrometer HyPlant[J]. Remote Sensing of Environment, 2021,264:112609.

[16] LIU X, GUANTER L, LIU L, et al. Downscaling of solar-induced chlorophyll fluorescence from canopy level to photosystem level using a random forest model[J/OL]. Remote Sensing of Environment, 2019,231. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.035>.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 小麦条锈病测报技术规范:GB/T 15795—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[18] JING Xia, DU Kaiqi, DUAN Weina, et al. Quantifying the effects of stripe rust disease on wheat canopy spectrum based on

- eliminating non-physiological stresses[J]. *The Crop Journal*, 2022,10(5):1284–1291.
- [19] 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.
- [20] 田定方,范闻捷,任华忠. 植被光合有效辐射吸收比率遥感研究进展[J]. *遥感学报*,2020,24(11):1307–1324.  
TIAN Dingfang,FAN Wenjie, REN Huazhong. Progress of fraction of absorbed photosynthetically active radiation retrieval from remote sensing data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020,24(11):1307–1324. (in Chinese)
- [21] CHEN Siyuan, LIU Liangyun, ZHANG Xiao, et al. Retrieval of the fraction of radiation absorbed by photosynthetic components (FAPARgreen) for forest using a triple-source leaf-wood-soil layer approach[J]. *Remote Sensing*, 2019,11(21):rs11212471.
- [22] 梁守真,隋学艳,侯学会,等. 落叶阔叶林冠层光合有效辐射分量的遥感模拟与分析[J]. *生态学报*,2017,37(10):3415–3424.  
LIANG Shouzheng,SUI Xueyan,HOU Xuehui, et al. Simulation and analysis on green fraction of absorbed photosynthetically active radiation of deciduous broadleaved forests canopy through remote sensing model[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2017,37(10):3415–3424. (in Chinese)
- [23] GITELSON A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2004,161(2):165–173.
- [24] VIÑA A, GITELSON A. New developments in the remote estimation of the fraction of absorbed photosynthetically active radiation in crops[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005,32(17):L17403.
- [25] CAO Y, LI G L, LUO Y K, et al. Monitoring of sugar beet growth indicators using wide-dynamic-range vegetation index (WDRVI) derived from UAV multispectral images[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 171: 105331.
- [26] GITELSON A A. Remote estimation of fraction of radiation absorbed by photosynthetically active vegetation: generic algorithm for maize and soybean[J]. *Remote Sensing Letters*, 2019, 10(3): 283–291.
- [27] GUZINSKI R. Comparison of vegetation indices to determine their accuracy in predicting spring phenology of Swedish ecosystems[C]//Lunds Universitets Naturgeografiska Institution-Seminarieuppsatser, 2010.
- [28] 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 sun-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)
- [29] 竞霞,邹琴,白宗璠,等. 基于反射光谱和叶绿素荧光数据的作物病害遥感监测研究进展[J]. *作物学报*,2021,47(11):2067–2079.  
JING Xia, ZOU Qin, BAI Zongfan, et al. Research progress of crop diseases monitoring based on reflectance and chlorophyll fluorescence data[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2021,47(11):2067–2079. (in Chinese)
- [30] BADGLEY G, FIELD C B, BERRY J A. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis[J]. *Science Advances*, 2017,3:e1602244.
- [31] ZENG Y, BADGLEY G, DECHANT B, et al. A practical approach for estimating the escape ratio of near-infrared solar-induced chlorophyll fluorescence[J/OL]. *Remote Sensing of Environment*, 2019,232. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.028>.
- [32] SHI Yue, HUANG Wenjiang, LUO Juhua, 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.
- [33] JING Xia, LI Bingyu, YE Qixing, et al. Integrate the canopy SIF and its derived structural and physiological components for wheat stripe rust stressmonitoring[J]. *Remote Sensing*, 2022,14(14): 14143427.

(上接第 240 页)

- [29] SONG W, WU K, ZHAO H, et al. Arrangement of high-standard basic farmland construction based on village-region cultivated land quality uniformity[J]. *Chinese Geographical Science*, 2019,29(2):325–340.
- [30] DI FALCO S, PENOV I, ALEKSIEV A, et al. Agrobiodiversity, farm profits and land fragmentation: evidence from Bulgaria[J]. *Land Use Policy*, 2010,27(3):763–771.
- [31] 罗丹,徐艳,王跃朋,等. 基于地块面积的土地整理耕作效率测算方法研究[J]. *中国土地科学*, 2013,27(6):73–78.  
LUO Dan, XU Yan, WANG Yuepeng, et al. Study on the method of measuring the scale efficiency of land consolidation in terms of plot size[J]. *China Land Science*, 2013,27(6):73–78. (in Chinese)
- [32] 孔德刚,赵永超,刘立意,等. 大功率农机作业效率与机组合理运用模式的研究[J]. *农业工程学报*,2008,24(8):143–146.  
KONG Degang, ZHAO Yongchao, LIU Liyi, et al. Investigation of work efficiency of high-power agricultural machinery and reasonable application pattern of tractor-implement units[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(8): 143–146. (in Chinese)
- [33] 毛亮,李满春,刘永学,等. 一种基于面积紧凑度的二维空间形状指数及其应用[J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(5):11–14.  
MAO Liang, LI Manchun, LIU Yongxue, et al. A 2-dimensional shape index based on area compactness and its applications[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2005,21(5):11–14. (in Chinese)