

## 小麦条锈病胁迫下光合速率与光谱指数关系研究

张晓艳, 侯学会, 王 猛, 王丽丽\*, 刘 锋\*

山东省农业科学院农业信息与经济研究所, 山东 济南 250100

**摘 要** 为应用遥感技术进行小麦条锈病的实时监测以及大范围作物病害识别,明确条锈病胁迫下小麦光谱反射率和净光合速率与病情指数的关系,利用光谱植被指数预测小麦光合速率的变化,在2018年—2019年度冬小麦生长季节,以易感条锈病的济麦15号小麦品种为对照,以生产上播种面积较大的济麦22和鲁原502为供试品种,基于大田小区条锈病接种试验,从抽穗期到乳熟期,每隔7~10 d进行小麦旗叶光合速率、光谱反射率测定及病情指数调查。研究发现,随感病程度加重,小麦旗叶光合速率呈显著下降趋势,扬花期济麦22光合速率高于鲁原502。灌浆期可见光波段,病斑部位的光谱反射率始终高于正常部位,这是由于病斑部位叶片单位面积上叶绿素含量较低,对光吸收的少;而在反射平台区域,病斑部位的光谱反射率较正常叶低得多。利用与病害胁迫、生长状况以及产量相关较大的光化学反射指数(photochemical reflectance index, PRI)、植被衰减指数(plant senescence reflectance index, PSRI)和比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)来反映病情指数变化,结果显示,病斑部位的光化学反射指数和植被衰减指数大于正常部位,且植被衰减指数变化率较大,而比值植被指数变化率小于正常部位。小麦不同生育期,光合速率与光谱反射率的相关性不同,模拟光合速率的植被指数也不同。灌浆期,鲁原502的光合速率与光谱反射率始终呈正相关关系;在可见光范围内,对照光合速率与光谱反射率呈正相关,济麦22呈负相关;在反射率平台位置,对照光合速率与光谱反射率呈负相关,济麦22呈正相关。在小麦灌浆期,可以利用植被衰减指数进行病害程度识别及光合速率估测。该研究为利用遥感手段大面积监测小麦长势及病害发生情况提供了理论依据,也为探讨利用光谱指标无损监测的方法预测小麦条锈病发生及危害程度奠定了基础。

**关键词** 小麦; 条锈病; 光合速率; 成像高光谱; 估测模型

**中图分类号:** S512.1+1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0940-07

### 引 言

条锈病是小麦生产中危害较重的病害之一,由条形柄锈菌侵染小麦引起。其菌丝丝状,生长在小麦叶片、茎秆细胞间隙中,通过吸器从小麦细胞中吸取养料,当有效积温达到150~160 °C,病斑上产生鲜黄色孢子堆,呈缝纫机针脚样成行排列;该菌主要以夏孢子在小麦上完成周年侵染循环,转主寄主为小檗,是一种典型的气流传播、大区域流行病害,一旦条件适宜传播速度极快,俗称小麦黄疸,一般流行年份可使小麦减产10%~30%,严重时甚至绝收<sup>[1-2]</sup>。感病植株的形态和生理变化可导致相应的光谱和光合改变,因此可利

用作物光谱信息识别健康作物和不同类型的作物病害,这为应用遥感技术进行小麦锈病的实时监测以及大范围作物病害识别提供了可能。已有研究说明不同作物病虫害光谱识别的敏感波段主要位于可见光和近红外波段,其最佳敏感波段因作物和病害种类不同而存在差异<sup>[3-5]</sup>。630~687, 740~890和976~1350 nm为遥感监测条锈病敏感波段<sup>[5]</sup>;利用高光谱红边和黄边位置距离可以识别小麦条锈病,以REP-YEP为变量的模型预测DI的精度最好<sup>[5]</sup>。杨小冰等<sup>[6]</sup>发现小麦条锈病抑制染病叶片的净光合速率( $P_n$ ),条锈病病情越重,叶片光合速率渐近线越低。冯伟等<sup>[7]</sup>研究表明,小麦白粉病在可见光350~710 nm范围光谱反射率随病情加重呈上升趋势,580~710 nm为遥感监测白粉病的敏感波段。吕玮等<sup>[8]</sup>

收稿日期: 2021-02-19, 修订日期: 2021-03-25

基金项目: 山东省农业科学院农业科技创新工程项目: 农业气象(CXGC2021A26), 农业农村部农业信息服务技术重点实验室开放基金项目(CAAS-AII NYXXJSFW2019-005), 国家农业科技发展战略智库联盟2021年度重点项目(黄河流域农业科技发展战略问题研究等)资助

作者简介: 张晓艳,女,1974年生,山东省农业科学院农业信息与经济研究所研究员 e-mail: 239491965@qq.com

\* 通讯作者 e-mail: 147924249@qq.com; lf.00@163.com

将小麦旗叶的原始光谱进行一阶导数变换后与  $P_n$  进行相关性分析, 确定敏感谱区集中在 750~925 nm,  $P_n$  的最佳高光谱分析模型为小麦叶片 750~925 nm 反射率一阶导数变换后的 QPSR 模型。

已有研究多集中在小麦条锈病和白粉病的识别及光谱定量监测方面, 鲜有学者利用高光谱对病害胁迫下的小麦叶片光合速率进行遥感估测研究。本工作开展了条锈病胁迫下小麦叶片光合速率的变化及高光谱估测研究, 构建小麦光合速率的光谱反演模型, 以期用简便、无损的遥感技术估测病害胁迫下的小麦光合速率, 为大面积遥感监测小麦病害、光合能力估测及估产提供理论依据和技术支持。

## 1 实验部分

试验于 2018 年 10 月至 2019 年 6 月在山东省济南市济阳试验基地进行(东经 116°58'26", 北纬 36°59'4")。供试材料为易感条锈病的济麦 15 号(CK)和生产上种植面积较大的品种济麦 22(JM22)和鲁原 502(LY502)。2018 年 10 月 15 日播

种, 播种量为 150 kg·hm<sup>-2</sup>。设置感病区和非感病区(对照区)两个大区, 大区内按品种设置小区, 每品种 3 个重复(即 3 个小区), 每小区面积为 48 m<sup>2</sup>(6 m×8 m), 设计图见图 1。前茬为玉米, 土壤为砂壤, 试验纯氮用量 280 kg·hm<sup>-2</sup>, 磷、钾用量及其他栽培管理措施同当地常规。光谱和光合测定时间分别为 2019 年 4 月 28 日(抽穗期)、5 月 10 日(扬花期)、5 月 18 日(灌浆期)、5 月 27 日(乳熟期)。

### 1.1 条锈病菌接种期及接种方法

在 2019 年 3 月 13 日小麦拔节初期、晴朗无风的傍晚进行接种。采用夏孢子悬浮液喷雾法接种试验材料。接种前 3 日内进行灌水以增加田间土壤湿度, 接种当天夜间最低气温应不低于 13℃。具体操作: 将所选条锈菌夏孢子粉用数滴 0.05% 的 Tween-20 水溶液调成糊状, 按 2 g 孢子: 1 000 mL 水的比例稀释成夏孢子悬浮液混匀后直接喷雾, 匀速(≥1 m·s<sup>-1</sup>)行进, 且不重喷, 不漏喷。将悬浮液均匀喷洒在接种段的小麦叶片上之后, 迅速覆盖塑料薄膜, 四周用土压严, 翌日 8:00—10:00 揭去薄膜。

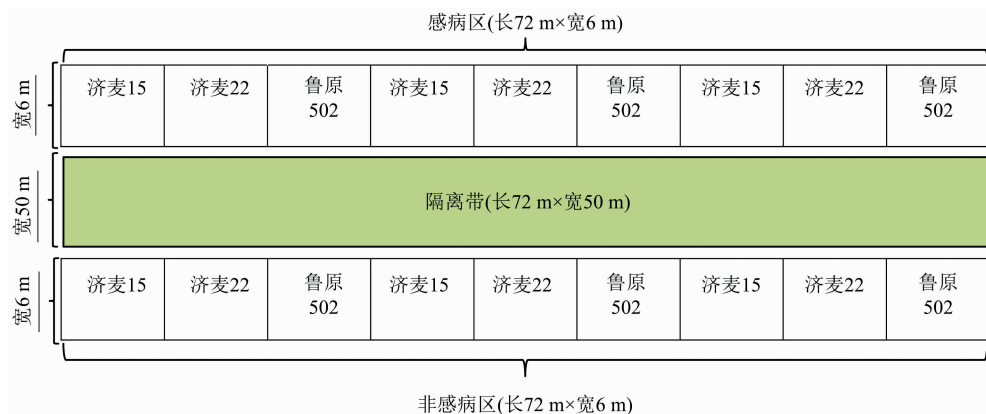


图 1 实验区设计图

Fig. 1 Design of test area

### 1.2 方法

#### 1.2.1 小麦高光谱图像数据测定

采用美国 Surface Optics Corporation 公司生产的 SOC710VP 可见—近红外高光谱成像式地物光谱仪进行测定, 光谱范围为 350~1 050 nm, 光谱分辨率为 4.687 5 nm。光谱测定在大田自然光条件下进行, 光谱仪的视场角为 25°, 探头距待测叶片 0.50 m。实验时, 首先将待测叶片从植株上取下, 然后平整放置于反射率近似为 0 的黑色试验布平台上, 垂直向下正对待测叶片中部进行。为了消除外界干扰以保证精度, 每组选择 10 个叶片, 每小区选取 2 组共计 20 个叶片进行测定, 然后从每组光谱图像上选取研究区域 10 处, 即每个品种各有 60 组数据的平均值作为该品种感病区域和正常区域的光谱反射率(3 个品种共计 180 组数据), 测量过程中同步进行标准白板校正。

#### 1.2.2 小麦旗叶光合速率测定

使用美国产 CI-340 手持式光合仪, 叶室面积 6.5 cm<sup>2</sup>,

于晴天上午 9:00—11:00(北京时间), 分别选取感病区和非感病区的感病和正常小麦旗叶测量其净光合速率, 测量时叶片充满叶室, 每个处理测量 3 次, 每次记录 3 个数据, 取平均值作为该处理的光合速率( $P_n$ )结果。

#### 1.2.3 病叶率、严重度及病情指数(disease index, DI)调查

病叶率按发病叶片数占调查叶片总数的百分率计算。严重度按病叶上病斑面积占总面积的百分率计算。严重度用分级法表示, 设 0, 1%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% 和 100% 九级, 对处于等级之间的病情取其接近值; 虽已发病但严重度低于 1% 的, 按 1% 计。全面考虑发病率与严重度两者的综合指标, 当严重度用分级代表值表示时, 病情指数公式如式(1)<sup>[9]</sup>

$$DI = \frac{\sum_{i=0}^n (X_i \times S_i)}{\sum_{i=0}^n (X_i \times S_{\max})} \times 100 \quad (1)$$

式(1)中, DI 为病情指数;  $i$  为病级数(0~ $n$ );  $X_i$  为  $i$  级叶片数;  $S_i$  为  $i$  级严重度的代表值, 单位为百分率(%);  $S_{\max}$  为严

重度最高级值, 单位为百分率(%)。

1.3 数据分析与利用

光谱数据采用 ENVI 4.7 处理, 然后利用 Matlab 进行植被指数计算(表 1), 相关统计分析用 Microsoft Excel 进行。

表 1 高光谱参数

Table 1 List of hyperspectral parameters

光谱参数	名称	公式	参考文献
RVI	比值植被指数	$R_{890} / R_{670}$	[10]
PRI	光化学反射指数	$(R_{570} - R_{531}) / (R_{570} + R_{531})$	[11]
PSRI	植被衰减指数	$(R_{680} - R_{500}) / R_{750}$	[12]

2 结果与讨论

2.1 小麦正常和感病旗叶光合速率比较

植物净光合速率是体现植物生长状况的重要生理指标。从图 2 看出, 扬花期济麦 22 光合速率高于鲁原 502, 两品种光合速率均是正常叶大于感病叶。主要是因为病斑使得叶片进行光合作用的实际面积减少, 而且感病后孢子堆造成表皮破裂, 使得残余健部水分代谢失调, CO<sub>2</sub> 移动阻力增大, 从而影响了残余健部的光合作用。

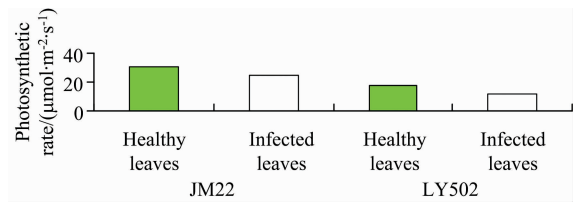


图 2 扬花期净光合速率比较

Fig. 2 Comparison of netphotosynthetic rates of wheat during flowering period

2.2 小麦正常和病斑部位光谱反射率变化特征

成像高光谱的测定不受植被覆盖度、冠层几何结构以及大气的影响, 更容易了解病菌危害的光谱特征真实状况。在可见光范围内单叶光谱反射率主要受叶绿素含量的影响, 而在近红外和远红外范围内, 单叶光谱反射率主要受叶绿素、叶片单位面积含水量、干物质含量和叶片内部结构的影响。图 3 显示, 小麦灌浆期病斑部位与正常部位光谱曲线有着明显差异。在可见光范围内, 病斑部位的光谱反射率高于正常部位, 是因为病斑部位单位面积叶片上叶绿素含量较低, 对光吸收的少、反射的多, 所以反射率就高。在反射平台区域与可见光区域正好相反, 病斑部位的小麦光谱反射率较正常叶片低, 是因为 760~1 300 nm 波段是植物细胞结构变化特

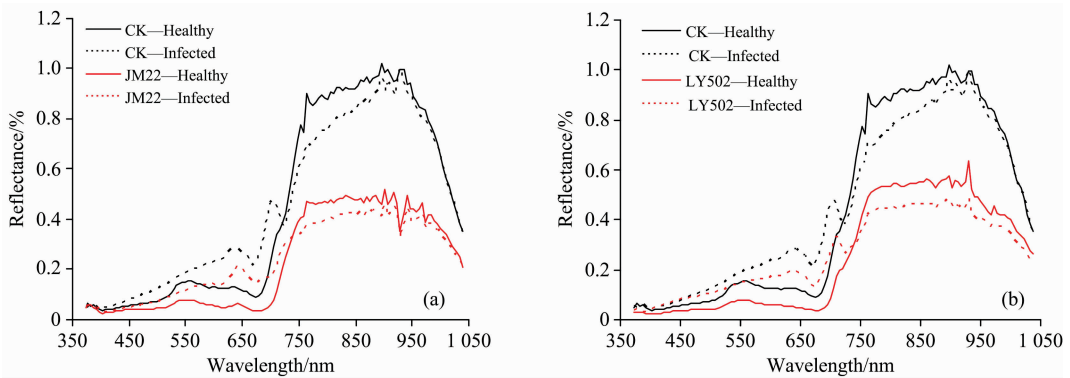


图 3 灌浆期鲁原 502 和济麦 22 与对照病斑和正常部位光谱反射率比较

Fig. 3 Comparison of spectral reflectances between healthy and diseased parts in Luyuan 502, Jimai 22 and control

表 2 不同生育时期小麦旗叶正常与病斑部位光谱植被指数比较

Table 2 Comparison of spectral vegetation indexes between healthy and diseased parts of wheat flag leaves

生育时期	植被指数	CK			LY502			JM22		
		正常	病斑	变化率/%	正常	病斑	变化率/%	正常	病斑	变化率/%
抽穗期	光化学反射指数 (PRI)	0.067	0.075	11.985	0.063	0.079	25.654	0.064	0.073	14.488
	植被衰减指数 (PSRI)	-0.007	0.195	-2 932.241	-0.014	0.093	-767.632	-0.003	0.120	-3 696.717
	比值植被指数 (RVI)	5.220	2.625	-49.703	4.588	1.624	-64.599	4.217	1.961	-53.484
开花期	光化学反射指数 (PRI)	0.033	0.088	165.959	0.068	0.104	52.062	0.017	0.116	577.593
	植被衰减指数 (PSRI)	0.004	0.217	6 008.530	0.000	0.068	16 763.491	-0.029	0.099	-445.024
	比值植被指数 (RVI)	4.015	1.297	-67.697	4.793	2.640	-44.911	8.937	2.825	-68.393
灌浆期	光化学反射指数 (PRI)	0.077	0.131	69.581	0.046	0.096	107.798	0.035	0.147	316.813
	植被衰减指数 (PSRI)	0.031	0.210	579.788	-0.010	0.114	-1 260.853	-0.028	0.224	-890.043
	比值植被指数 (RVI)	3.313	1.329	-59.880	5.041	1.369	-72.846	6.987	2.047	-70.706
乳熟期	光化学反射指数 (PRI)	0.035	0.144	316.924	0.037	0.142	281.707	0.038	0.138	263.449
	植被衰减指数 (PSRI)	0.004	0.232	5 336.592	-0.034	0.214	-724.544	-0.057	0.358	-728.083
	比值植被指数 (RVI)	4.953	1.865	-62.347	3.653	1.408	-61.452	3.495	1.613	-53.844

征反映区，反射率的高低受叶片结构影响，构成叶片的细胞层数越多反射率越高，而感病后细胞结构被破坏，细胞数量变少，使得光谱特征降低。

### 2.3 小麦正常与病斑部位光谱植被指数比较

当作物生长受到胁迫时，相应的氮、色素、酶等会发生变化，通过光谱植被指数可判断作物受胁迫情况、生长状况以及产量情况<sup>[13]</sup>。PRI 在直接估计实际光能利用率方面具有极大的潜力，与净光合作用有关；PSRI 的增加，预示冠层胁迫性增加，可用于植被胁迫情况监测、作物生产和产量分析；RVI 是绿色植物的一个灵敏的指示参数，它与叶面积指数(LAI)、叶干生物量、叶峦素含量相关性高<sup>[14]</sup>。本研究利用光化学反射指数(PRI)、植被衰减指数(PSRI)和比值植被指数(RVI)监测病斑和正常部位变化情况。从表 2 可以看出，病斑部位的光化学反射指数和植被衰减指数大于正常部位，

且植被衰减指数变化率较大；病斑部位比值植被指数小于正常部位，生育期内变化率在 -70% ~ -25% 之间。研究表明，可通过光谱植被指数变化来识别是否感染病害及病害的严重程度。

### 2.4 小麦光合速率与光谱反射率的相关性

从图 4 看出，小麦不同品种、不同生育期，光合速率与光谱反射率的相关性不同。灌浆期，鲁原 502 的光合速率与光谱反射率始终呈正相关关系；对照的光合速率与光谱反射率在可见光范围内呈正相关，在反射率平台位置呈负相关；而济麦 22 与对照相反，在可见光范围呈负相关，在反射率平台位置呈正相关。乳熟期，济麦 22 和鲁原 502 的光合速率与反射率均呈负相关关系，而对照品种的光合速率与光谱反射率呈正相关。

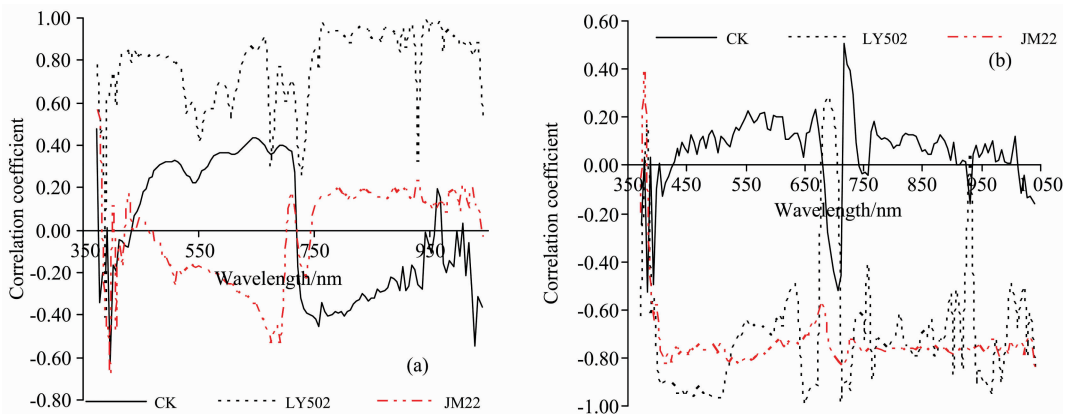


图 4 小麦灌浆期 (a) 和乳熟期 (b) 光合与光谱反射率相关关系

Fig. 4 Correlations between photosynthesis and spectral reflectance of wheat during grain filling period (a) and milk-ripe period (b)

### 2.5 小麦生育期内光合速率随病情指数的变化

净光合速率是衡量光合作用能力的一个重要指标，净光合速率越高，表明植物叶片的结构和功能状况越好<sup>[14-15]</sup>。当植株染病后，光合生理过程受到一定影响。从图 5 看出，对照、济麦 22 和鲁原 502 光合速率变化趋势基本一致，随感病程度加重，光合速率呈显著下降趋势，说明植株染病后，对光合作用影响较大。

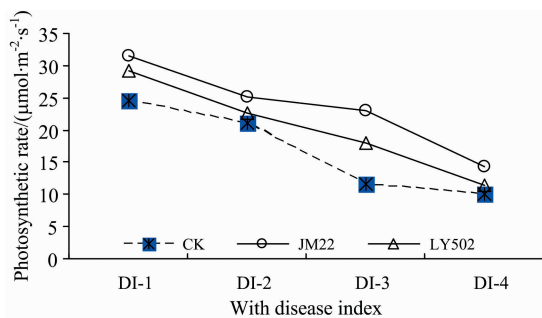


图 5 光合速率随病情指数的变化情况

Fig. 5 Variation of photosynthetic rate with disease index

### 2.6 光合速率与光谱植被指数的关系

本研究发现，与病害胁迫相关的植被指数中，仅有光化

学反射指数、植被衰减指数和比值植被指数与小麦条锈病相关性较大，因此，选用此三种植被指数来模拟小麦抽穗期-乳熟期的光合速率，结果见表 3。分析结果显示，抽穗期，CK 和 JM22 均以比值植被指数的模拟效果最好，均达到极显著水平；LY502 则以 PSRI 模拟效果较好，但未达显著水平。扬花期，PRI 对 CK 的模拟效果最好，达极显著水平；三个指数对 JM22 和 LY502 的模拟效果均较好，达到显著或极显著水平，其中 JM22 以 RVI 最好，LY502 以 PSRI 最好。灌浆期，植被衰减指数模拟效果达到显著或极显著水平， $R^2$  在 0.745~0.992 之间。乳熟期，济麦 22 和鲁原 502 光化学反射指数拟合效果达到显著水平，而对照不显著。综上所述，利用植被指数反演不同生长阶段小麦光合速率的模型不同。在小麦灌浆期，可以利用植被衰减指数进行病害程度识别及光合速率估测。

光合作用是高等植物所特有的一种生理功能，它可以将太阳能转换成化学能，为植物生长提供能量和物质基础。光合作用的强弱与表征植被长势的生理生化参数尤其是叶片叶绿素含量密切相关，它直接影响着植被对光能的吸收和转换。净光合速率是衡量光合作用能力的一个重要指标，也是衡量植被生产力、体现植物整体长势的重要指标，净光合速率越高，表明植物叶片的结构和功能状况越好，其合成光合

产物的能力越强。张秋英等<sup>[16]</sup>研究了冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率在不同生育期的变化规律,指出两者随季节变化趋势一致,且呈显著相关。姚志凤等<sup>[17]</sup>通过对小麦白粉病、条锈病以及健康叶片的显微结构分析,发现病菌入侵叶片,破坏细胞结构,导致叶绿素含量减少,光合作用效能降低,进而使得小麦在可见光波段光吸收程度减弱,反射率增大。这使得利用高光谱监测作物光合生理指标从而监测作物

长势和估测产量成为了可能。目前对植物净光合速率的研究主要以地面样地调查为主,耗时费力,无法快速便捷地反映大区域、长时间跨度的净光合速率情况。而遥感技术尤其是近些年发展起来的高光谱遥感,具有方便快捷和可以大面积跨区域监测的优点,刚好弥补传统方法的缺陷。如果能够利用遥感手段对小麦进行大面积的光合生理指标监测,可为小麦长势监测和估产提供技术支撑。

表 3 植被指数反演不同品种不同时期小麦光合速率模型 ( $n=180$ )

Table 3 Photosynthetic rate inversion models by vegetation indexes for different varieties of wheat in different periods ( $n=180$ )

生育时期	品种	植被指数	模型	$R^2$
抽穗期	CK	光化学反射指数(PRI)	$y=5\ 846.0x^2-711.60x+37.43$	0.914**
		植被衰减指数(PSRI)	$y=-76\ 960x^3-16\ 153x^2-7.90x+17.91$	0.446
		比值植被指数(RVI)	$y=4.128x^3-68.02x^2+369.9x-647.2$	0.982**
	JM22	光化学反射指数(PRI)	$y=51\ 426x^2-6\ 343x+220.3$	0.614
		植被衰减指数(PSRI)	$y=19\ 716x^3+5\ 157x^2-110.8x+26.76$	0.385
		比值植被指数(RVI)	$y=-16.25x^3+208.3x^2-868.5x+1\ 197$	0.889**
	LY502	光化学反射指数(PRI)	$y=-1\ 037x^2+136x+13.62$	0.018
		植被衰减指数(PSRI)	$y=-6\ 182x^2-103.7x+18.13$	0.542
		比值植被指数(RVI)	$y=-0.48x^2+4.282x+8.709$	0.516
扬花期	CK	光化学反射指数(PRI)	$y=3\times 10^7x^3-3\times 10^6x^2+92\ 373.0x-959.1$	0.911**
		植被衰减指数(PSRI)	$y=16\ 040x^2-115.8x+16.71$	0.685
		比值植被指数(RVI)	$y=3.549x^2-29.19x+77.32$	0.154
	JM22	光化学反射指数(PRI)	$y=87.55x+16.16$	0.942**
		植被衰减指数(PSRI)	$y=119.2x+21.11$	0.822*
		比值植被指数(RVI)	$y=0.679x^2-11.41x+64.48$	0.975**
	LY502	光化学反射指数(PRI)	$y=879.1x^2-79.49x+16.39$	0.992**
		植被衰减指数(PSRI)	$y=30\ 811x^3-3\ 565x^2-143.6x+17.07$	0.999**
		比值植被指数(RVI)	$y=1.368x^2-14.310x+52.1$	0.812*
灌浆期	CK	光化学反射指数(PRI)	$y=-1\ 624x^2+315.7x-0.927$	0.850*
		植被衰减指数(PSRI)	$y=-378.4x^2+72.52x+11.48$	0.992**
		比值植被指数(RVI)	$y=-0.283x+12.96$	0.674
	JM22	光化学反射指数(PRI)	$y=-67\ 648x^3+6\ 588x^2-182.5x+25.49$	0.892**
		植被衰减指数(PSRI)	$y=-4\ 028x^2-232.6x+21.28$	0.799**
		比值植被指数(RVI)	$y=6.802x^3-145x^2+1\ 029x-2\ 409$	0.453
	LY502	光化学反射指数(PRI)	$y=-1\times 10^7x^3+2\times 10^6x^2-81\ 017x+1\ 208$	0.543
		植被衰减指数(PSRI)	$y=56\ 186x^3-4\ 964x^2-403.9x+25.38$	0.745*
		比值植被指数(RVI)	$y=3.914x^2-38.36x+113.9$	0.684
乳熟期	CK	光化学反射指数(PRI)	$y=-6\ 537x^2+483.1x+0.058$	0.683
		植被衰减指数(PSRI)	$y=90\ 000x^3-9\ 628x^2-159.7x+8.29$	0.558
		比值植被指数(RVI)	$y=-35.37x^3+514.4x^2-2\ 481x+3\ 976$	0.369
	JM22	光化学反射指数(PRI)	$y=-182.1x+15.57$	0.855*
		植被衰减指数(PSRI)	$y=18\ 482x^2+2\ 041x+64.33$	0.703*
		比值植被指数(RVI)	$y=57.67x^2-404.4x+716.3$	0.881*
	LY502	光化学反射指数(PRI)	$y=72\ 512x^2-5\ 243x+100.2$	0.784*
		植被衰减指数(PSRI)	$y=8\ 251x^2+508.3x+13.47$	0.733*
		比值植被指数(RVI)	$y=-6.779x^2+49.46x-81.37$	0.545

小麦条锈病是一种常年发生病害,主要侵害小麦植株地上部叶片和叶鞘,一旦感染,会严重破坏叶片结构,降低叶

片净光合速率,影响光合产物合成,进而导致小麦减产。2020年山东地区发生了较严重的条锈病危害,因农业管理部

门积极采取措施,产量才有了保障。前人已建立了多种植被指数,为植被生理参数的定量化测定提供了简便、快速、有效、无损的数据采集和处理方法。张晓艳等<sup>[14]</sup>对白粉病胁迫下小麦光合速率的高光谱估测研究表明,生育期内利用比值植被指数对光合速率进行反演效果较好。目前有关病虫害危害后植被理化参数遥感监测的研究报道较少,特别是在条锈病胁迫下小麦光合生理指标的光谱估测鲜见报道。本研究通过比较条锈病胁迫下不同生育时期小麦健叶和病叶的光谱反射率和净光合速率,分析了小麦病情指数与净光合速率的关系,构建了不同时期净光合速率与光谱植被指数的关系模型,明确了条锈病胁迫下小麦光合生理指标的变化,探讨了利用高光谱数据来模拟植株光合速率的可能性及方法,为利用遥感手段大面积监测小麦长势生理指标或病害提供数据依据。

### 3 结 论

通过监测小麦感染条锈病前后的光合速率、光谱反射率

及植被指数与病情指数变化发现,小麦光合速率随感病程度加重呈显著下降趋势。济麦 22 和鲁原 502 扬花期感病后,旗叶净光合速率降低。小麦灌浆期旗叶病斑部位光谱反射率在可见光波段范围比正常叶片高,在反射平台区域,比正常叶片低。利用与作物胁迫、生长状况以及产量相关的光化学反射指数、植被衰减指数和比值植被指数来反映作物病情指数变化,结果显示病斑部位的光化学反射指数和植被衰减指数大于正常部位,且植被衰减指数变化率较大;比值植被指数小于正常部位。小麦灌浆期,植被衰减指数反演光合速率的模拟效果达到显著或极显著水平,其中,CK 模拟模型为  $y = -378.4x^2 + 72.52x + 11.48$  ( $R^2 = 0.992$ )、济麦 22 模拟模型为  $y = -4.028x^2 - 232.6x + 21.28$  ( $R^2 = 0.799$ )、鲁原 502 模型为  $y = 56.186x^3 - 4.964x^2 - 403.9x + 25.38$  ( $R^2 = 0.745$ )。因此,可以利用小麦灌浆期的植被衰减指数来进行病害程度识别及光合速率估测。本研究为利用光谱指标无损监测的方法预测小麦条锈病发生及危害程度提供了重要的数据支撑。

### References

- [ 1 ] WEN Cai-hong, LI Mei(温彩虹, 李 酶). Shaanxi Journal of Agricultural Sciences(陕西农业科技), 2020, 66 (11): 56.
- [ 2 ] DONG Jin-hui, YANG Xiao-dong, YANG Gui-jun, et al(董锦绘, 杨小冬, 杨贵军, 等). Journal of Triticeae Crops(麦类作物学报), 2016, 36(1): 1674.
- [ 3 ] ZHANG Jing-cheng, YUAN Lin, WANG Ji-hua, et al(张竞成, 袁 琳, 王纪华, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2012, 28(20): 1.
- [ 4 ] Zhang M H, Qin Z H, Liu X, et al. Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf., 2003, 4: 295.
- [ 5 ] HUANG Mu-yi, WANG Ji-hua, HUANG Wen-jiang, et al(黄木易, 王纪华, 黄文江, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2003, 19(6): 154.
- [ 6 ] YANG Xiao-bing, ZENG Shi-mai(杨小冰, 曾士迈). Science in China (B)(中国科学(B辑)), 1988, 11: 1175.
- [ 7 ] FENG Wei, WANG Xiao-yu, SONG Xiao, et al(冯 伟, 王晓宇, 宋 晓, 等). Acta Agronomica Sinica(作物学报), 2013, 39 (8): 1469.
- [ 8 ] LÜ Wei, LI Yu-huan, MAO Wei-bing, et al(吕 玮, 李玉环, 毛伟兵, 等). Journal of Agricultural Resources and Environment(农业资源与环境学报), 2017, 34(6): 582.
- [ 9 ] Ministry of Agriculture of the People's Republic of China(中华人民共和国农业部). NY/T 2953—2016 Technical Regulations for Resistance Evaluation of Wheat for Trials to Stripe Rust Caused by Puccinia Striiformis West(NY/T 2953—2016 小麦区域试验品种抗条锈病鉴定技术规程). 2017.
- [10] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring the Vernal Advancements and Retrogradation of Natural Vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report. MD, USA' Greenbelt. 1974. 1.
- [11] Das D K, Pradhan S, Sehgal V K, et al. Journal of Agrometeorology, 2013, 15(1): 36.
- [12] DENG Shu-bin, CHEN Qiu-jin(邓书斌, 陈秋锦). China Remote Sensing Applications Association 2010 Annual Conference and Regional Remote Sensing Development and Industry High-Level BBS Anthology(中国遥感应用协会 2010 年年会暨区域遥感发展与产业高层次论坛文集), 2010. 9.
- [13] LI He-sheng(李合生). Modern Plant Physiology(现代植物生理学). Beijing: Higher Education Press(北京: 高等教育出版社), 2002. 129.
- [14] ZHANG Xiao-yan, NIU Lu-yan, SUN Jia-bo, et al(张晓艳, 牛鲁燕, 孙家波, 等). International Journal of Agriculture and Biology, 2018, (20): 1853.
- [15] HE Yong, PENG Ji-yu, LIU Fei, et al(何 勇, 彭继宇, 刘 飞, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2015, 31(3): 174.
- [16] ZHANG Qiu-ying, LI Fa-dong, LIU Meng-yu(张秋英, 李发东, 刘孟雨). Chinese Journal of Eco-Agriculture(中国生态农业学报), 2005, 13(3): 95.
- [17] YAO Zhi-feng, LEI Yu(姚志凤, 雷 雨). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2019, 39(3): 967.

# Study on Relationship Between Photosynthetic Rate and Hyperspectral Indexes of Wheat Under Stripe Rust Stress

ZHANG Xiao-yan, HOU Xue-hui, WANG Meng, WANG Li-li\*, LIU Feng\*

Institute of Agricultural Information and Economics, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China

**Abstract** For real-time monitor of wheat stripe rust and large-scale recognition of crop diseases using remote sensing technology, the relations of wheat spectral reflectivity and net photosynthetic rate with disease index were studied under stripe rust stress, and the variation of photosynthetic rate was estimated with spectral vegetation indexes. The stripe rust inoculation test was conducted in field plots during the 2018—2019 wheat growth period. The varieties of Jimai 22 and Luyuan 502 with larger sowing areas were used as test materials, and Jimai 15, sensitive to stripe rust, was used as control. The photosynthetic rate and spectral reflectivity of wheat flag leaves were determined, and the disease index was investigated every 7~10 days from heading stage to milk-ripe stage. It was found that the photosynthetic rate decreased significantly with the increase of disease degree. During the flowering stage, the photosynthetic rate of Jimai 22 was higher than that of Luyuan 502. During the grain filling stage, the reflectivity in the visible spectrum range was higher at the diseased part because of lower chlorophyll content leading to lower absorption but the higher reflex of light. However, in the range of reflection platforms, the spectral reflectivity of the diseased part was much lower than that of the healthy part. The indexes related to disease stress, crop growth and yields, such as photochemical reflectance index (PRI), plant senescence reflectance index (PSRI) and ratio vegetation index (RVI) were used to reflect the variation of the disease index. Compared with the healthy part, the PRI and PSRI of the diseased part were high, and the change ratio of PSRI was higher; the RVI of diseased part was lower. At different growth stages of wheat, there were different correlations between photosynthetic rate and spectral reflectivity, and the vegetation index was also different. At the grain filling stage, the correlation between photosynthetic rate and spectral reflectivity of Luyuan 502 was positive in all spectrum ranges, and that of Jimai 15 was also positive in visible spectrum range, while that of Jimai 22 was negative. However, in the range of reflectance platform, that of Jimai 15 and Jimai 22 was opposite. The PSRI could be used to recognize disease degree and estimate the photosynthetic rate in the grain filling period of wheat. These results could provide theoretical bases for monitoring wheat growth status and disease occurrence at a large scale using remote sensing method and layed foundations for estimating wheat stripe rust occurrence and degrees using lossless monitoring spectral indicators.

**Keywords** Wheat; Stripe rust; Photosynthetic rate; Imaging hyperspectral; Estimating model

(Received Feb. 19, 2021; accepted Mar. 25, 2021)

\* Corresponding authors