

冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演

黄木易^{1,2}, 黄文江¹, 刘良云¹, 黄义德², 王纪华¹, 赵春江¹, 万安民³

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089; 2 安徽农业大学

农学系, 合肥 230036; 3 中国农科院植物保护研究所, 北京 100094)

摘 要: 对冬小麦条锈病胁迫不同严重度(0、1%、10%、20%、30%、45%、60% 和 80%) 的单叶进行光谱测定, 其光谱特征明显, 随严重度增加, 单叶光谱反射率在可见光 550~ 740 nm 处增加, 差异显著; 而近红外平台 750~ 1340 nm 反射率也呈上升趋势, 差异不显著; 中红外 1350~ 1600 nm 反射率上升, 差异显著。反射率与严重度相关系数在 376~ 1600 nm 范围内基本成正相关, 达到极显著相关的敏感波段区域为 446~ 725 nm 与 1380~ 1600 nm。入选了 493、666 nm 和 1430 nm 与严重度的相关系数最高的单个波段, 利用相关性最好的 666 nm 和相关性最弱的 758 nm 波段组合设计了光谱角度指数 SA I (Spectral Angle Index), 与严重度建立的模型相关系数较高。并利用连续统去除法对 540~ 740 nm 特征反射峰进行归一化定量分析, 吸收深度 (Depth) 与吸收面积 (Area) 与严重度呈极显著相关, 设计的吸收面积指数 AA I (Absorption Area Index) 与严重度相关系数最好, 可较好地反演单叶严重度。结果表明, 条锈病单叶光谱特性明显, 利用其光谱反射率可以很好的估算单叶严重度, 建立的模型具有很高的反演精度。结果对深入研究冬小麦条锈病害遥感监测机理提供了理论依据。

关键词: 积分球; 冬小麦条锈病; 单叶光谱特性; 光谱角度指数; 吸收面积指数; 严重度反演

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0176-05

0 引 言

小麦条锈病是我国乃至世界上发生最广、为害最大的重要病害之一^[1]。遥感属于一种无损测试技术, 它能够适时、快速、大面积地监测病害的发生与发展状况。对于冬小麦条锈病害的监测从外界条件来看, 环境因子, 如土壤覆盖度、冠层的几何结构及大气等对光谱的吸收影响很大, 所以植物的冠层反射率特征随时空的变化很大^[2], 不同条件下建立的模型不能用于建模以外的时空条件, 从而在一定程度上影响了利用遥感监测冬小麦条锈病的准确性。所以要解决航空、航天条件下的条锈病的遥感诊断, 首先要理解条锈病的光谱特征, 找出其光谱特征参量, 从而达到建模、反演预测, 而叶片是植物的主要组成部分, 其对冠层整体的光谱贡献所占比例很大, 所以有必要在避免冠层条件下的复杂因子所引起的干扰条件下, 从单叶光谱入手, 定性与定量的研究条锈病单叶光谱特征, 这对于理解条锈病的光谱特征和进一步研究条锈病遥感监测机理起着一定的作用。利用单叶光谱对作物胁迫状况诊断研究上, 我国学者田庆久等利用单叶片的光谱反射率在 1 450 nm 附近处水的特征吸收峰深度和面积与叶片水分含量呈极显著相关关系来诊断叶片的水分状况^[3], 结果非常理想。田国良等研究了土壤中镉、铜伤害对水稻光谱特性影响^[4], 郭世忠等研究了二氧化硫和金属镉、铜等物质对植物光谱特性的影响^[5], 李德成等研究了模拟酸雨对水稻叶片反射光谱特性的影响^[6], 外国学者 M althus 和 M adeira 考察了

大豆斑点葡萄孢感染后的光谱反射率变化情况, 受感染的程度与可见光的反射率的相关性一阶导数比原始反射率要高^[7], F. J. Ponzone 用 Spectron SE-590 光谱仪和 L icon 积分球研究了作物缺氮、磷和钾时的光谱特征^[8]。但利用积分球进行条锈病单叶片的光谱研究, 未见系统报道, 本文对条锈病单叶光谱特性及其严重度反演研究作如下报道。

1 材料与方法

1.1 试验材料的获取

本试验采用中国农业科学研究院植保所提供的 28 号、31 号、32 号和水 4 混合小种进行人工接种。冬小麦条锈菌接种显症后 20 天, 冬小麦灌浆期, 取不同感病程度的冬小麦植株活体, 测量时, 取冬小麦旗叶 0%、1%、10%、20%、30%、45%、60% 和 80% 的不同严重度的单叶片作为测定研究样本, 对于反演预测所需的检验样本也采用同样的方法进行田间取样。

1.2 单叶光谱测定

采用美国 L I-Cor 1800-12 外置积分球, 与 ASD Field Spec Pro FR 2500(350~ 2500 nm) 型光谱仪耦合进行冬小麦条锈病单叶片的反射率测定。积分球的优点在于它是密闭环境下的测定, 操作稳定, 测量科学, 在一定程度上减少了误差, 提高了研究的可靠性和精确性, 并且积分球适合于作物单叶片的研究。光谱仪采样间隔在 350~ 1000 nm 范围内为 1.4 nm; 在 1000~ 2500 nm 范围内为 2 nm。光谱分辨率在 700 nm 为 3 nm, 1400 nm 与 2100 nm 为 10 nm。每张单叶片按 SPAD 叶绿素测量步骤, 分叶尖、中部和叶基部 3 个部位, 各部位测 3 次, 共测量 9 次, 每次测量前后均用积分球的内置标准参考白板进行校正。

1.3 数据的处理

对所测条锈病单叶光谱通过反射率值和 DN 灰度

收稿日期: 2003-07-28

基金项目: 国家“973”项目 (G2000077907) 与北京市科委项目 (H010710010123) 共同资助

作者简介: 黄木易(1978-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 遥感的农业应用。北京 2449 信箱 26 分箱 国家农业信息化工程技术研究中心, 100089

值转换公式: $R_{目} = \frac{DN_{目}}{DN_{参}} \times R_{参}$, 计算出目标物的反射率值, 将 9 次的反射率值平均得到该严重度下的冬小麦条锈病的单叶片光谱反射率值。式中: $R_{目}$ 为条锈病单叶光谱反射率, $DN_{目}$ 为条锈病单叶光谱 DN 灰度值, $DN_{参}$ 为积分球内白板的反射灰度值, $R_{参}$ 为积分球内白板的反射率值。

对敏感波段建立的模型, 其预测结果通过均方根误差 RMSE 进行评价, 其计算公式: $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SL - \hat{SL})^2}$, 式中 SL 与 \hat{SL} 分别表示冬小麦条锈病单叶严重度 (severity level) 的真实值与通过预测模型估算的单叶严重度预测值, n 是单叶严重度的样本数。

2 结果与分析

2.1 不同条锈病严重度的单叶光谱特征

由图 1 的不同冬小麦条锈病严重度的单叶光谱特征可以看出, 条锈病单叶片光谱的反射率在整体上都随叶片严重度的增加而增加, 严重度为 0% 的单叶片光谱反射率最低, 80% 最高。以 0% 严重的单叶光谱反射率为基准, 把其它严重度单叶光谱反射率与其作相对比值, 得相对反射率, 即: $R^* = \frac{R_D - R_0}{R_0 + R_D}$, 式中 R^* 是相对反射率, R_0 是 0% 严重度单叶片的光谱反射率, R_D 是严重度为 D 时的单叶片光谱反射率。相对反射率如图 2 所示。可看出可见光 550~740 nm 反射率随条锈病严重度增加的趋势非常明显, 图 3 严重度与光谱反射率相关系数也可以看出。这符合试验中所选的不同严重度实际情况。

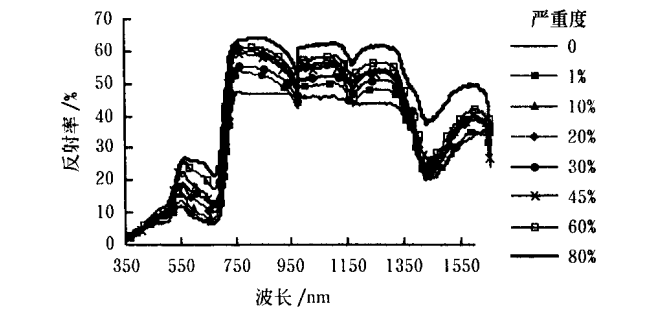


图 1 不同严重度单叶光谱特征
Fig 1 Spectrum characteristic of single leaf with different severity level

单叶光谱与前期的冠层水平光谱研究^[9]表明, 在可见光处两者的反射率变化相当一致, 而近红外平台反射趋势不同。对这种单叶光谱变化的机理解释是: 条锈病菌孢子侵染叶片后, 破坏叶表皮和叶肉细胞, 造成叶片水分含量和叶绿素含量减少, 且随着条锈鲜黄色孢子堆突破表皮而使叶片增厚, 也改变了叶片结构, 由于冠层水平和单叶水平下, 叶绿素与水分所影响的波段区域一致, 所以条锈病胁迫时可见光 550 nm 附近黄绿光反射

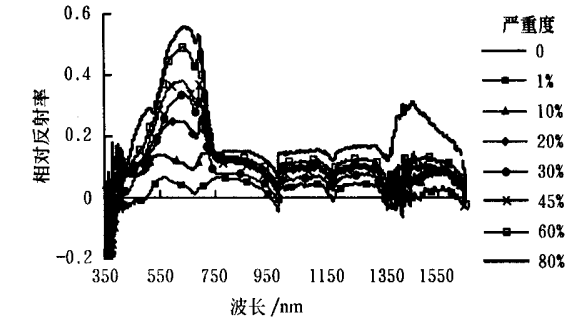


图 2 不同严重度单叶相对反射率光谱
Fig 2 Relative reflectance of single leaf with different severity

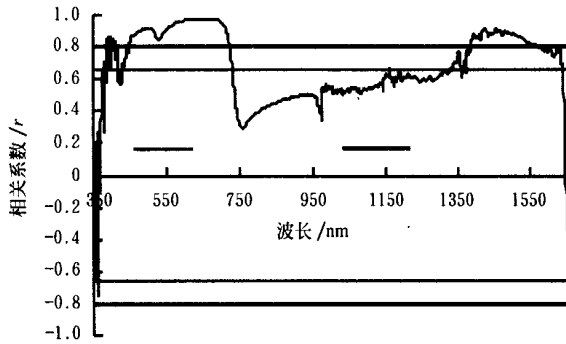


图 3 单叶严重度与光谱反射率相关性
Fig 3 Correlation coefficients between severity level of single leaf and spectral data

率与 1 450 nm 水分敏感波段区的反射率随严重度均呈上升的趋势对二者来说是一致的。但在近红外 750~1350 nm 波段, 植物冠层反射特性受叶面积指数、水分和土壤背景影响较大, 所以在条锈病胁迫增加时, 其冠层叶面积指数变小, 植株含水量下降, 所以近红外平台反射率下降, 但单叶片条件下, 不受群体与土壤的影响, 其光谱特征主要受叶绿素 a 和 b、叶片单位面积含水量、干物质含量和叶片内部结构四个主要因子影响^[10], 所以在此波段两种条件的反射特性不一致。

条锈病胁迫下, 一方面叶肉细胞破坏, 水分含量下降使得叶片变薄, 理论上叶片层数减少, 从而近红外光谱反射率下降^[11]。另一方面, 病菌孢子堆突破表皮, 形成条状黄斑, 又增加了叶片厚度, 理论上增加叶片层数, 反射率上升^[11]。由于随严重度增加, 孢子堆对叶片厚度增加的影响大于叶肉细胞破坏, 失水使叶片厚度变薄的影响, 所以整体上近红外反射率上升, 但不显著, 如图 1、图 3 所示。

对于病虫害胁迫, 作物的病理、生理及形态变化复杂, 但仍有规律可循, 本研究下一步将结合条锈病胁迫下的生理生化参数及光谱信息探讨条锈病害的遥感监测机理。

2.2 反演单叶严重度的敏感波段选择

积分球光源在 1 600 nm 后稳定性较差, 所以将冬小麦条锈病单叶严重度与单叶光谱 350~1600 nm 波

段在 Excel 2000 中进行相关分析。其相关系数如图 3 所示, 350~ 1600 nm 波段范围内严重度与反射率值基本成正相关关系, 其中 446~ 725 nm 和 1380~ 1600 nm 与严重度相关系数达显著水平, 为敏感波段区域, 其中可见光 550~ 740 nm 的相关性最强。在敏感波段区域内, 选择与严重度相关性最好的 493、666、1430 nm 及与严重度最不相关的 758 nm 进行波段组合, 如表 1 所示。根据图 4 中与单叶严重度相关性最好的 666 nm 反射率与 758 nm 随严重度变化的趋势, 可以构建设计一个光谱角度指数: 即把各严重度在 666 nm 的反射率乘以正常叶片在 758 nm 与 666 nm 反射率的比值数 7.289 所得的直线 $7.289 \times R_{666nm}$, 此直线与 R_{758nm} 直线构成的夹角 θ 为一常数, 如图 4, 可表示为: $\text{tg}\theta = \frac{7.289 \times R_{666nm} - R_{758nm}}{89\% - 0\%}$, 计算得 $\text{tg}\theta = 95.581$, 所以 SL

$= 1/\text{tg}\theta * X$, 式中 X 为光谱角度指数 $7.289 * R_{666nm} - R_{758nm}$, 模拟方程决定系数为 0.926, 见表 1 所示。

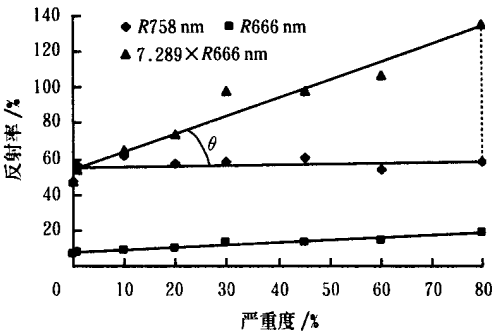


图 4 用二波段的光谱角度指数构建
Fig 4 Design of spectral angle index using wavelength bands 666 nm and 758 nm

表 1 单叶严重度诊断模型

Table 1 Various diagnosing models for stripe rust severity level				
入选波段 (nm) 及组合	自变量 X	模拟方程	RM SE/%	决定系数 R^2
493 nm	R_{493nm}	$SL = 0.228X - 1.662$	17.75	0.848
666 nm	R_{666nm}	$SL = 0.069X - 0.491$	11.35	0.953
1430 nm	R_{1430nm}	$SL = 0.073X - 1.446$	16.28	0.839
666 nm, 758 nm	R_{666nm}/R_{758nm}	$SL = 4.164X - 0.543$	14.04	0.964
	SAI	$SL = 1/\text{tg}\theta * X$	10.69	0.926
	$Depth$	$SL = -3.494X + 2.827$	13.79	0.968
540 ~ 740 nm	$Area$	$SL = -0.014X + 1.532$	13.19	0.951
	AAI	$SL = 2.459X - 0.019$	11.41	0.972

2.3 特征反射峰的归一化定量分析

利用连续统去除法^[11]对各严重度的单叶片 540~ 740 nm 的原始反射率光谱进行归一化处理: 即把包络线外壳(外壳系数, 如图 5a 中虚线所示)依次连接起来, 定义为 100%, 用实际光谱波段值除以连续统上相应波

段值(100%), 求得比值反射率, 深度(Depth, 如图 5b 中箭头所示)是特征峰的极小值点相对 100% 线的距离, 面积(Area, 如图 b 中阴影区所示)是指特征吸收峰深度一半处吸收峰宽度与深度的乘积^[3]。

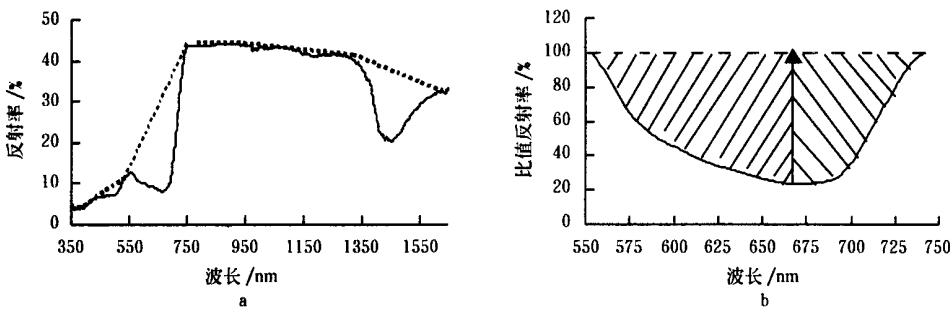


图 5 单叶光谱特征吸收峰归一化定量分析
Fig 5 Map of normalized quantitative analysis of the spectrum feature absorption peak of single leaf

通过定量化归一分析, 计算的 $Depth$ 与 $Area$ 值与单叶严重度呈极显著负相关, 如表 1 所示, 我们对 $Area$ 面积进行变换, 设计 $Area$ 吸收面积指数 (AAI): $Absorption\ Area\ Index = \frac{A_{rea0} - A_{reaD}}{A_{rea0} + A_{reaD}}$, 式中 A_{rea0} 表示严重度为 0% 的正常叶片的 $Area$ 值, A_{reaD} 表示严重度为 D 的 $Area$ 值, 由于 A_{reaD} 随单叶严重度增加而

减小, 故 $Area$ 指数分子、分母两极分化, 其值将被放大, 增强了预测的敏感性。将其与严重度作回归, 决定系数最高为 0.972, 如表 1 所示。
2.4 反演模型 RMSE 检验
利用入选的单波段反射率、比值 R_{666nm}/R_{758nm} 、666 nm 与 758 nm 组合的光谱角度指数 SAI 及 $Depth$ 、 $Area$ 、吸收面积指数 AAI 分别与单叶严重度进行模型

建立, 其模拟方程 $RMSE$ 值与决定系数如表 1 所示。由表 1 可以看出, SAI 及 $DepthArea$ 与 AAI 与单叶严重度所建立的模型总体上优于单波段模型, $RMSE$ 均在 15% 左右, 说明可以较好的预测单叶片的条锈病严重

度。由图 6(左上至右下分别为 R_{666nm} 、 R_{666nm}/R_{758nm} 、 SAI 、 $Area$ 、 $Depth$ 和 AAI 模型) 的不同模型的预测 SL 值与实测 SL 值拟合效果可看出, AAI 模型预测拟合系数平方最高为 0.905。

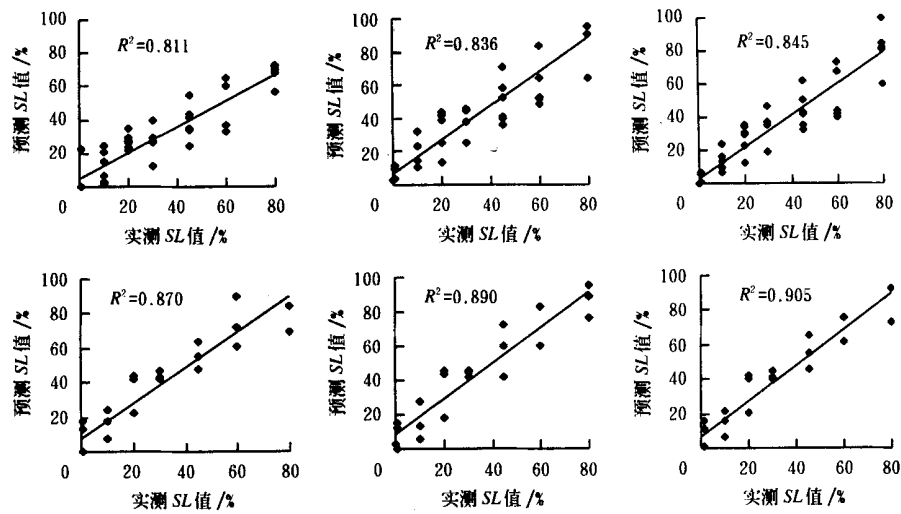


图 6 不同模型的预测 SL 值与实测 SL 值拟合

Fig 6 Comparison of the estimated SL and real SL using different model

3 结论与讨论

本试验研究表明:

1) 条锈病菌孢子侵染叶片后, 叶绿素含量减少, 水分含量下降, 且随着条锈孢子堆增厚, 面积变大, 叶片结构改变, 在光谱上表现为可见光反射率增加, 差异极显著; 中红外反射率增加差异不显著; 短波红外反射率增加差异极显著, 446~ 725 nm 和 1380~ 1600 nm 为敏感波段区域。

2) 对单叶光谱 540~ 740 nm 特征吸收峰进行归一化定量分析表明, 条锈病严重度特征吸收峰深度与面积模型能较好地预测单叶严重度, 所设计的光谱角度指数模型 (SAI) 及吸收面积指数模型 (AAI) 也能较好预测单叶 SL , AAI 模型预测单叶 SL 与实测 SL 拟合系数达 90% 以上。

3) 本文是在冬小麦关键生育期——灌浆期来研究冬小麦单叶严重度反演的, 所以具有一定的实用性, 但是生育期及品种对冬小麦叶片含水量、叶绿素及叶片组织结构影响较大, 所以本文的模拟模型外延性要进一步研究。

本文结果对进一步研究利用遥感监测冬小麦条锈病害提供了一定的理论依据, 对条锈病监测的遥感机理以及反演的机理模型建立, 是本课题下一步研究的重点。

[参 考 文 献]

[1] 李光博, 曾士迈, 李振歧. 小麦病虫草鼠害综合治理[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1989, 185- 186

[2] Grossman Y L, Ustin S L, Jacquemoud S, et al. Critique of stepwise multiple linear regression for the extraction of leaf reflectance data[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56: 182- 193

[3] 田庆久, 宫 鹏, 赵春江, 等. 用光谱反射率诊断小麦水分状况的可行性分析[J]. 科学通报, 2000, 45(24): 2645- 2650

[4] 田国良, 包佩丽, 李建军, 等. 土壤中镉、铜伤害对水稻光谱特性的影响[J]. 环境遥感, 1990, 5(2): 140- 149

[5] 郭世忠, 田国良, 汪水花. 二氧化硫和重金属镉、铜等物质对植物光谱特性的影响[J]. 环境科学, 1984, 5(6): 13- 18

[6] 李德成, 徐彬彬, 石晓日, 等. 模拟酸雨对水稻叶片反射光谱特性影响的初步研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(4): 241- 247

[7] Ponzonni F J. Spectral features associated with nitrogen, phosphorus and potassium deficiencies in Eucalyptus Salina seeding leaves[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(11): 2249- 2264

[8] Malthus T J, Maderia A C. High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by botrytis fabae[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 45: 107- 116

[9] 黄木易, 王纪华, 黄文江, 等. 冬小麦条锈病的光谱特征及遥感监测[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 152- 156

[10] Pietro Ceccato, Stephane Flasse, Stefano Tarantola, et al. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77: 22- 33

[11] Gausman H W, Allen W A, Myers V L, et al. Reflectance and internal structure of cotton leaves (Gossyp-

ium hirsutum L.) [J]. Agronomy Journal, 1969, 61: 374
- 376
[12] Clark R N, Roush T L. Reflectance spectroscopy:

Quantitative analysis techniques for remote sensing applications [J]. Journal of Geographical Research, 1984, 89
(B 7): 6329- 6340

Spectral reflectance feature of winter wheat single leaf infected with stripe rust and severity level inversion

Huang Mui^{1,2}, Huang Wenjiang¹, Liu Liangyun¹, Huang Yide²,

Wang Jihua¹, Zhao Chunjiang¹, Wan Anmin³

(1 National Engineering Research Center for Information Technology In Agriculture, Beijing 100089, China; 2 Agronomy Department, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China; 3 Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract Leaf spectrum of winter wheat infected with stripe rust was measured using integrating sphere method. Spectral characteristic of single leaf with different severity levels (SL) has a significant difference at yellow light region. Spectral reflectance increases with the increasing of the SL significantly at visible light region and middle-infrared 1350~1600 nm, of which the result is similar to the early research results under canopy condition, but is different at near infrared light region. The mechanism of spectral reflectance changing was demonstrated in this paper. The wavelength bands between 446 nm and 725 nm as well as 1380 nm and 1600 nm were selected out as sensitive bands region to the SL. The individual bands of 493 nm, 666 nm and 1430 nm with the highest correlation coefficient were modeled with SL. The Spectral Angle Index (SAI) was designed to do regression with the single leaf SL using individual band 666 nm with the highest correlation coefficient as well as 758 nm with the lowest correlation coefficient. The feature absorption peak of initial spectral reflectance was normalized quantitatively by the continuum removal method. It indicated that the Depth and the Area of the feature absorption peak were closely related to the single leaf SL. Meanwhile, the Absorption Area Index (AAI) model, which can invert the leaf SL accurately, has been designed in the paper. The results indicate that the reflectance spectral feature is significant and the leaf SL of winter wheat infected with stripe rust can be inversed by the leaf spectral data. The results also provide a good basis for further studying monitoring mechanism of winter wheat stripe rust by remote sensing data.

Key words: integrating sphere; winter wheat stripe rust; spectral reflectance feature of single leaf; SAI; AAI; severity level inversion