

## 基于高光谱遥感技术的不同小麦品种 条锈病病情指数的反演

郭洁滨, 黄冲, 王海光, 孙振宇, 马占鸿\*

中国农业大学植物病理学系, 农业部植物病理学重点开放实验室, 北京 100094

**摘要** 应用混合品种控制小麦条锈病在国内外日益受到重视, 通过采集田间不同品种混合小麦条锈病各级病情梯度的高光谱遥感数据, 将光谱数据与条锈病病情数据进行相关性分析, 利用4个光谱参数构建其与病情指数的回归模型。结果表明, 不同小麦品种组合在不同的病情指数情况下, 其冠层光谱信息都表现了一致的变化规律; 冠层反射率在可见光区与病情指数为正相关, 而在近红外区则达到了显著的负相关; 利用690与850 nm处的反射率、SDr、NDVI以及RVI与病情指数构建的回归模型拟合效果较好。研究表明利用高光谱反演条锈病病情指数是可行的, 并且小麦不同品种对反演效果影响不大。

**关键词** 高光谱; 小麦条锈病; 病情指数; 反演模型

**中图分类号:** O657.3, S127

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)12-3353-05

### 引言

由条形柄锈菌(*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*)引起的小麦条锈病是我国小麦生产上为害范围最广、引起损失最大的病害之一, 在我国曾多次流行成灾, 并造成了重大损失<sup>[1]</sup>。该病害是一种气传的大区流行病害, 一旦发生, 在合适的气候条件下, 能够在短时间内大面积的流行成灾。因此, 做好早期监测预警工作, 对于防止该病大面积发生流行具有重要的意义。

长期以来, 我国对小麦条锈病的监测工作主要依靠人力进行田间调查, 不仅耗时耗力, 效率低下, 而且准确性低, 无法大面积实时监测, 因此, 发展一种快速、方便、准确且可以大面积监测的方法对于做好条锈病的防治工作有着重大意义。高光谱遥感技术为这一需求的实现提供了可能。

以3S技术为核心的病虫害监测手段越来越受到植保工作者的重视。针对小麦条锈病的遥感监测, 国内外都已进行了不少相关研究。Moshou等<sup>[2]</sup>研究了冬小麦条锈病发展初期健康植株与发病植株反射光谱的差异, 并开发了基于神经网络系统的病害监测程序, 认为光谱方法有望成为早期病害识别花费少又有效的方法。黄木易等<sup>[3]</sup>研究了小麦条锈病遥

感监测机理。安虎等<sup>[4]</sup>采用美国LI-Cor1800-12外置积分球与ASD Field Spec Pro FR 2500(350~2500 nm)型光谱仪联合对冬小麦条锈病胁迫下不同严重度的单叶进行光谱测定, 研究结果表明, 随着病害严重度的增加, 反射率随之增强, 并选择相关性最高的波段(670~690 nm)建立了小麦条锈病严重度和光谱反射率之间的回归模型。蒋金豹等<sup>[5]</sup>将小麦条锈病冠层光谱数据进行一阶微分处理, 结合小麦病情指数分析表明病情指数与一阶微分在432~582, 637~701和715~765 nm波长范围内相关性达到极显著水平。李京等<sup>[6]</sup>对小麦条锈病冠层一阶微分光谱进行的分析表明, 随病情指数增大, 一阶微分光谱在绿边(500~560 nm)内逐渐增大, 在红边(680~760 nm)内逐渐降低。蔡成静等<sup>[7]</sup>通过GPS定位, 借助热气球获得了近地和对应的30~40 m高空光谱数据, 并建立了高空和近地之间基于高光谱植被指数变量的回归模型。刘良云等<sup>[8]</sup>利用中国科学院上海技术物理所研制的面阵推扫型成像光谱仪PHI(Pushbroom hyperspectral imager)装载于运5飞机上在1000 m高空获得拔节期、灌浆始期、乳熟期3个生育期的小麦条锈病多时相的PHI航空高光谱图像数据。王海光等采集单片小麦条锈病病叶的高光谱数据, 利用支持向量积算法对不同严重度的病叶进行了判别分析, 总体正确识别率达到了97%。

收稿日期: 2008-12-02, 修订日期: 2009-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(30671341), 国家科技支撑计划重大项目(2006BAD10A01, 2006BAD08A01)和国家重点基础研究发展规划("973")课题(2006CB100203)资助

作者简介: 郭洁滨, 1984年生, 中国农业大学植物病理学系在读硕士研究生 e-mail: guojiebin1@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: mazh@cau.edu.cn

近年来,应用混合品种控制小麦条锈病在国内外日益得到广泛应用,美国小麦混合品种的种植面积已达到约 30%<sup>[9]</sup>,我国学者也开展了相关的研究<sup>[10-12]</sup>,并将其作为小麦条锈病综合治理的重要措施之一,但利用高光谱遥感进行品种混种模式下的病情监测尚未发现研究报道。本文拟利用高光谱技术研究不同小麦品种以及品种间混种发生条锈病后冠层反射光谱的变化规律以及探讨利用冠层反射光谱对小麦条锈病病情指数进行反演的办法。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料与仪器

选取甘肃省甘谷县 4 个主要生产品种,分别为免疫品种 9362-10(A)、中感品种兰天 13(B)、高感品种石 917(C)、高

抗品种 9220-42(D),根据不同品种对锈病的抗性情况设置如下试验处理:品种 A, B, C, D 单种,以及品种 A 与 B, A 与 C, B 与 D, C 与 D 等比例混种(表 1),每个处理设置 3 个重复,小区面积 25 m<sup>2</sup>。各个小区中心种植小麦条锈病万能感病品种铭贤 169 并接种小麦条锈病菌作为发病中心,2008 年 5 月 1 日开始调查发现,除了抗性较高两个品种(A, D)的试验小区外,各小区均发病良好并形成病情梯度。

使用美国 Analytical Spectral Devices(ASD)的 FieldSpec Pro FR 野外光谱仪(波长范围 325~1 075 nm)采集小麦冠层的高光谱反射率数据,视场角为 25°。由于植被光合作用吸收的光合有效辐射主要在 400~700 nm,而近红外波段对植被健康状况具有非常敏感的反应,而本研究所用光谱仪的波长范围为 325~1 075 nm,可以满足试验要求。

Table 1 Plots in the study

编号	试验处理	抗性	编号	试验处理
A	9362-10 单种	免疫	A : B = 1 : 1	9362-10、兰天 13 等比例混种
B	兰天 13 单种	中感	A : C = 1 : 1	9362-10、石 917 等比例混种
C	石 917 单种	高感	B : D = 1 : 1	兰天 13、9220-42 等比例混种
D	9220-42 单种	高抗	C : D = 1 : 1	石 917、9220-42 等比例混种

采用 ViewSpec Pro 4.02 版、SPSS16.0 以及 Excel2003 软件进行试验数据处理和分析。

### 1.2 试验时间、地点

病情调查和光谱测定于 2008 年 5 月下旬进行,当时小麦处于灌浆期。试验田位于甘肃省甘谷县,地理坐标为 N34° 45.714', E105°17.676'。

### 1.3 田间取样方法

光谱数据的采集时间选为天空晴朗无云的午后 12:00~14:00 之间,保证取样时太阳高度角在 45°以上。取样时,利用自制支架将光谱仪的探头固定在距离小麦冠层 1.3 m 高度,并使探头垂直向下,这样,就在小麦冠层形成直径约为 0.5 m 的视场范围。每次取样时用白板进行校正以尽量减少光谱数据测量误差。每个样点同时取样 10 次,计算平均值作为该样点结果。

病情数据的调查在光谱数据取样完成时同步进行,每个样点随机调查 20 株小麦,每株调查上面两片叶,调查病情严

重度和普遍率。

### 1.4 数据处理

小麦条锈病的病情指数(DI)利用下式计算

$$DI = \text{平均严重度} \times \text{普遍率}$$

获得光谱反射率数据后,除了对反射率进行处理分析外,还采用光谱归一化微分分析技术,进行一阶微分(差分)计算反射率一阶导数,其近似计算方法如下

$$\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})$$

式中, $i$  为各波段波长, $\rho'(\lambda_i)$  为波长  $i$  处的一阶导数, $\rho(\lambda_{i+1})$ ,  $\rho(\lambda_{i-1})$  分别为波长  $i+1$ ,  $i-1$  的光谱反射率。各项研究<sup>[5, 6, 13, 14]</sup>证明,对光谱反射率进行一阶微分处理能够有效地消除背景因素的影响。

对光谱进行一阶微分处理后,根据前人的研究<sup>[5]</sup>计算如表 2 所示的微分指数,并分别分析其与小麦条锈病病情指数之间的关系。

Table 2 Summary of the first derivatives indices

微分指数	定义
SDb	蓝边波长(430~500 nm)内一阶微分波段值的总和
SDg	绿边波长(501~560 nm)内一阶微分波段值的总和
SDr	红边波长(680~760 nm)内一阶微分波段值的总和
SDr/SDb	红边内一阶微分的总和(SDr)与蓝边内一阶微分的总和(SDb)的比值
SDr/SDg	红边内一阶微分的总和(SDr)与绿边内一阶微分的总和(Sdg)的比值
(SDr-SDb)/(SDr+SDb)	红边内一阶微分的总和(SDr)与蓝边内一阶微分的总和(SDb)的归一化值
(SDr-SDg)/(SDr+SDg)	红边内一阶微分的总和(SDr)与绿边内一阶微分的总和(Sdg)的归一化值

## 2 结果与分析

### 2.1 小麦各个品种组合病情指数与光谱反射率的相关性分析

将各个处理获得的小麦冠层反射率与其病情指数进行相关分析,得到如图 1 所示结果。结果表明:小麦条锈病病情指数与冠层反射率在 550~700 nm 波长范围内主要为正相关,但是相关性并不显著,而在 730 nm 左右,相关系数都达到了极显著的水平,并且为负相关。这就说明在可见光波段,由于患病小麦叶片叶绿素被破坏,致使色素吸收降低,也就导致反射率的升高,而近红外波段的光谱信息主要反映

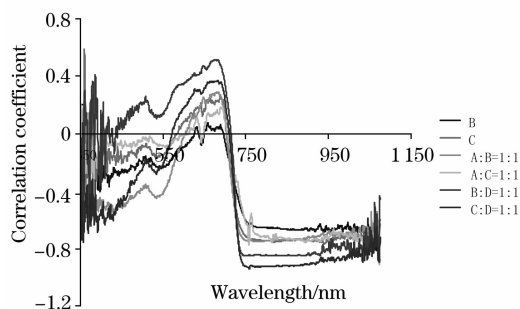


Fig. 1 Correlation between DI and reflectance with different wheat varieties

了作物叶片内部结构以及水分含量等,而条锈病菌会破坏叶片内部结构,导致反射率的下降。

通过对图 1 中不同品种组合的情况下冠层反射率与病情指数之间的相关性的变化的比较,表明其变化规律是一致的。

### 2.2 病情指数与光谱一阶微分及微分指数的相关性分析

对光谱反射率进行一阶微分后,将其与病情指数进行相关分析(图 2),分析结果表明在 700~760 nm 之间,相关性能稳定的达到显著水平,且为负相关,而在其他波段范围内,相关系数的波动性较大。

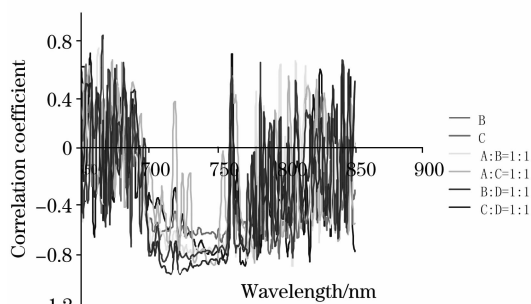


Fig. 2 Correlation between DI and 1st derivative with different wheat varieties

另外,对一阶微分指数与病情指数之间也进行了相关分析,结果如表 3 所示。

Table 3 Correlation coefficient between DI and hyperspectral derivative index with different wheat varieties

品种组合*	SDb	SDg	SDr	SDr/SDb	SDr/SDg	(SDr-SDb)/(SDr+SDb)	(SDr-SDg)/(SDr+SDg)
B	0.082 9	-0.207 2	-0.680 8	-0.528 7	-0.652 8	-0.527 6	-0.640 1
C	0.133 0	-0.166 0	-0.753 9	-0.451 8	-0.617 8	-0.474 0	-0.631 3
A : B=1 : 1	0.377 3	-0.277 4	-0.756 9	-0.689 5	-0.664 6	-0.670 4	-0.664 8
A : C=1 : 1	0.084 1	-0.130 7	-0.758 3	-0.322 7	-0.577 6	-0.455 9	-0.575 5
B : D=1 : 1	0.404 5	0.147 8	-0.839 2	-0.612 3	-0.622 9	-0.676 0	-0.646 5
C : D=1 : 1	0.430 8	0.015 6	-0.933 7	-0.679 7	-0.681 8	-0.720 8	-0.716 1

\* : 品种组合见表 1。

由结果可知,各个品种组合的红边一阶微分和与病情指数的相关性都达到了显著的负相关,可以认为利用一阶微分值进行条锈病的反演时,红边部分(680~760 nm)为条锈病监测的敏感波段,而蓝边和绿边的一阶微分和小麦病情指数的相关性并不显著,这就直接导致了红边与蓝边以及绿边的组合变量与小麦病情指数的相关性的下降。

### 2.3 构建光谱反射率及一阶微分指数与病情指数的关系

由前面的对小麦冠层光谱反射率与病情指数的相关分析可知,对于红光部分来说,各个品种组合都是在 690 nm 附近达到最大相关性,而对于近红外部分,在 850 nm 附近相关性达到极显著。另外,对不同波段之间进行自相关分析,表明 690 nm 处和 850 nm 处的相关性极低。因此,利用 690 和 850 nm 处反射率作为自变量来反演小麦条锈病病情。而一阶微分指数中,SDr 与 DI 的相关性最大,因此可以将两者

进行拟合,结果见表 4。

### 2.4 构建 NDVI, RVI 与 DI 的关系

归一化植被指数(NDVI)、比值植被指数(RVI)是目前应用最广的两种植被指数<sup>[15-17]</sup>。NDVI 和 RVI 主要是将近红外波段反射率与红光波段的反射率结合起来反映植被的生长状态,其计算公式分别如下

$$NDVI = (R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R)$$

$$RVI = R_{NIR} / R_R$$

式中,  $R_{NIR}$  为近红外波段反射率,  $R_R$  为红波段反射率。

根据前面的分析,690 和 850 nm 处的反射率能较好地反演小麦条锈病的病情指数,因此可以利用这两个波长处的反射率来构建 NDVI 与 RVI。将求得的 NDVI 与 RVI 分别与 DI 建立回归方程,如表 5 所示。

**Table 4 Fit equation between DI and reflectance of 690 nm and 850 nm and SDr with different wheat varieties**

品种组合	$R_{690}, S_{850}$		SDr	
	拟合方程	$R^2$	拟合方程	$R^2$
B	$y=752.477 R_{690}-167.356 R_{850}+66.966$	0.611	$y=-229.03SDr+106.11$	0.911 4
C	$y=696.934 R_{690}-233.908 R_{850}+108.023$	0.596	$y=-275.87SDr+127.43$	0.738 8
A : B=1 : 1	$y=148.657 R_{690}-60.547 R_{850}+26.385$	0.588	$y=-79.056SDr+33.574$	0.735 2
A : C=1 : 1	$y=530.009 R_{690}-131.489 R_{850}+55.063$	0.773	$y=-149.09SDr+76.168$	0.668 9
B : D=1 : 1	$y=-42.341 R_{690}-234.475 R_{850}+111.813$	0.719	$y=-236.63SDr+80.265$	0.704 3
C : D=1 : 1	$y=46.637 R_{690}-85.05 R_{850}+46.745$	0.855	$y=-92.751SDr+41.246$	0.871 9

\* :  $R_{690}$  和  $R_{850}$  分别为 690 和 850 nm 波长下的反射率, 品种组合见表 1

**Table 5 Fit equation between DI and NDVI, RVI with different wheat varieties**

品种组合	NDVI		RVI	
	拟合方程	$R^2$	拟合方程	$R^2$
B	$y=-273.71x^*+251.1$	0.534 2	$y=-6.697x+93.292$	0.618 4
C	$y=-454.68x+403.7$	0.773 3	$y=-6.937 1x+101.96$	0.751 2
A : B=1 : 1	$y=-113.99x+96.975$	0.710 8	$y=-2.908 7x+32.279$	0.732 8
A : C=1 : 1	$y=-253.68x+216.35$	0.619 6	$y=-4.620 8x+55.496$	0.586 9
B : D=1 : 1	$y=-118.24x+96.078$	0.751 4	$y=-3.415 1x+32.161$	0.643 5
C : D=1 : 1	$y=-97.558x+85.853$	0.749	$y=-2.209 2x+29.582$	0.708 3

\* :  $x$  分别为 NDVI 和 RVI 值, 品种组合见表 1.

### 3 结论与讨论

通过对不同小麦品种组合冠层光谱的分析, 发现各个品种组合在不同的病情指数情况下, 光谱信息表现出了一致的变化规律。这就表明不同品种在利用高光谱信息反演病情指数的过程中影响不大; 各个处理的冠层反射率都是在 730 nm 之后和病情指数达到了显著的负相关, 而在可见光范围内主要为正相关, 即随着病情指数的增加, 可见光范围的冠层反射率逐渐增加, 近红外波段的冠层反射率则逐渐降低; 将光谱反射率进行微分处理后, 与病情指数的相关性只有在 700~760 nm 范围内达到稳定的负相关, 其他波段则波动很

大; 分别构建光谱反射率、光谱一阶微分指数以及植被指数与小麦病情指数之间的回归方程, 拟合结果较好, 说明利用高光谱反演小麦条锈病病情指数是完全可行的。

小麦的混种对于条锈病的防治有着重要意义, 随着混种模式在小麦生产上的广泛应用, 同时也对该种植模式下小麦条锈病的遥感监测工作提出了要求。本研究结果对发展小麦单种以及混种情况下小麦条锈病的遥感监测技术有重要意义。遥感反演病虫害的最终目标是能够准确利用卫星遥感数据, 结合 GIS 技术, 使我们能够实时、直观地对条锈病的发生情况进行估测, 这就需要卫星遥感光谱分辨率以及空间、时间分辨率的不断提高。

### 参 考 文 献

- [1] LI Guang-bo, ZENG Shi-mai, LI Zhen-qi(李光博, 曾士迈, 李振歧). Comprehensive Management of Disease, Pest, Weeds and Rats on Wheat(小麦病虫草鼠害综合治理). Beijing: China Agricultura Sciencetech Press(北京: 中国农业科技出版社), 1989.
- [2] Moshou D, Brav C, West J, et al. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 44: 173.
- [3] HUANG Mu-yi, WANG Ji-hua, HUANG Yi-de, et al(黄木易, 王纪华, 黄义德, 等). Journal of Anhui Agricultural University(安徽农业大学学报), 2004, 31(1): 119.
- [4] AN Hu, WANG Hai-guang, LIU Rong-ying, et al(安 虎, 王海光, 刘荣英, 等). China Plant Protection(中国植保导刊), 2005, 25(11): 8.
- [5] JIANG Jin-bao, CHEN Yun-hao, HUANG Wen-jiang, et al(蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 等). Optical Technique(光学技术), 2007, 33(4): 620.
- [6] LI Jing, CHEN Yun-hao, JIANG Jin-bao, et al(李 京, 陈云浩, 蒋金豹, 等). Science & Technology Review(科技导报), 2007, 25(6): 23.
- [7] CAI Cheng-jing, MA Zhan-hong, WANG Hai-guang, et al(蔡成静, 马占鸿, 王海光, 等). Acta Phytopathologica Sinica(植物病理学报), 2007, 37(1): 77.
- [8] LIU Liang-yun, HUANG Mu-yi, HUANG Wen-jiang, et al(刘良云, 黄木易, 黄文江, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(3): 275.

- [ 9 ] Chen X M. Canadian Journal of Plant Pathology, 2005, 27(3): 314.
- [10] CAO Ke-qiang, LI Xiao-li, ZENG Shi-mai(曹克强, 李晓莉, 曾士迈). Journal of Agricultural University of Hebei(河北农业大学学报), 1995, 18(2): 30.
- [11] GUO Shi-bao, KANG Zhen-sheng, ZHANG Long-zhi, et al(郭世保, 康振声, 张龙芝, 等). Journal of Northwest A & F University(西北农林科技大学学报), 2007, 35(11): 125.
- [12] CHEN Qi-cun, ZHU You-yong, LI Zhen-qi, et al(陈企村, 朱有勇, 李振崎, 等). Journal of Northwest A & F University(西北农林科技大学学报), 2008, 36(5): 119.
- [13] JIANG Jin-bao, CHEN Yun-hao, HUANG Wen-jiang, et al(蒋金豹, 陈云浩, 黄文江, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报), 2008, 24(1): 35.
- [14] YANG Ke-ming, GUO Da-zhi(杨可明, 郭达志). Geography and Geo-Information Science(地理与地理信息科学), 2006, 22(4): 31.
- [15] Adam K Tillinga, Garry J O'Learyb, Jelle G Ferwerdaa, et al. Field Crops Research, 2007, 104: 77.
- [16] LI Wei-guo, WANG Ji-hua, ZHAO Chun-jiang, et al(李卫国, 王纪华, 赵春江, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2008, 12(3): 506.
- [17] MA Li, XU Xin-gang, LIU Liang-yun, et al(马 丽, 徐新刚, 刘良云, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2008, 23(5): 520.

## Disease Index Inversion of Wheat Stripe Rust on Different Wheat Varieties with Hyperspectral Remote Sensing

GUO Jie-bin, HUANG Chong, WANG Hai-guang, SUN Zhen-yu, MA Zhan-hong\*

State Key Lab of Plant Pathology, Ministry of Agriculture, Department of Plant Pathology, China Agricultural University, Beijing 100094, China

**Abstract** It is becoming more and more important to use mixed wheat varieties to control wheat stripe rust. Different wheat varieties were planted in field and stripe rust was caused by artificial inoculation. Disease index (DI) was assessed and the canopy reflection data of wheat canopy were obtained by ASD FieldSpec HandHeld FR(325-1 075 nm) made by ASD Company. The correlation analysis between DI and spectral data (reflectance and the first derivative) was conducted, and the estimation models between DI and reflection data (reflectance at 690 and 850 nm, SDr, NDVI and RVI) were built using linear regression method. The results showed that different combinations of wheat varieties had the similar variation at different disease index. DI has positive correlation with reflectance of wheat canopy in visible region, and has significant negative correlation in the near infrared region. DI has stable negative correlation with the first derivative in the region of 700-760 nm and with big fluctuation in other regions. The correlation was compared between DI and hyperspectral derivative index, and SDr has the best correlation with DI. DI estimation models were built based on the canopy reflectance at 690 and 850 nm, SDr, NDVI and RVI. The determinant coefficient of the models is between 0.588 and 0.855, 0.669 and 0.911, 0.534 and 0.773, and 0.587 and 0.751, respectively, and all the models were fit well. The results indicated that DI of wheat stripe rust could be inverted using hyperspectral remote sensing technique and that the inversion effect was hardly influenced by the different combinations of wheat varieties.

**Keywords** Hyperspectrum; Wheat stripe rust; Disease index; Inversion model

(Received Dec. 2, 2008; accepted Mar. 6, 2009)

\* Corresponding author