

文章编号: 1007-4619 (2004)03-0275-07

# 利用多时相的高光谱航空图像监测冬小麦条锈病

刘良云<sup>1</sup>, 黄木易<sup>1</sup>, 黄文江<sup>1</sup>, 王纪华<sup>1</sup>, 赵春江<sup>1</sup>, 郑兰芬<sup>2</sup>, 童庆禧<sup>2</sup>

(1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100089;

2. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘要:** 冬小麦发生锈病, 叶绿素被大量破坏, 水分蒸腾量大大增加, 叶片细胞大小、形态、叶片结构发生了改变, 从而改变了叶片和冠层的光学特性, 使得遥感探测与评价成为可能。利用多时相的高光谱航空飞行图像数据, 了解、分析和发现条锈病病害对作物光谱的影响及其光谱特征; 设计了病害光谱指数, 成功地监测了冬小麦条锈病病害程度与范围。对比3个生育期的条锈病与正常生长冬小麦的PHI图像光谱及光谱特征, 发现: 560—670nm黄边、红谷波段, 条锈病病害冬小麦的冠层反射率高于正常生长的冬小麦光谱反射率; 近红外波段, 条锈病病害的冠层反射率低于正常生长的冬小麦光谱反射率; 条锈病冬小麦冠层光谱红谷吸收深度和绿峰的反射峰高度都会减小。

**关键词:** 高光谱; 推扫成像光谱仪; 病情指数; 病害光谱指数

**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## 1 引言

锈病为小麦的主要病害, 属于低温、高湿、强光型真菌性病害, 是中国乃至世界在小麦上发生最广、为害最大的一类病害。小麦发生锈病, 体内养分被吸收, 叶绿素被大量破坏, 光合速率下降, 同时大量孢子堆突破表皮、麦秆表皮, 使水分蒸腾量大大增加, 病株蒸腾量较健株甚至可增加2—3倍, 生长发育受到严重影响, 株高、穗长、小穗数、穗粒数和千粒重都比正常植株显著下降, 品质也变差<sup>[1]</sup>。受害冬小麦的损失, 除与品种有关外, 主要决定于锈病发生的早晚, 如锈病发生特早, 对麦根、麦叶的正常生长影响极大, 条锈能减产73%—85%, 叶锈为49%—67%, 秆锈为74%—84%, 可见为害之大。

传统的病虫害监测主要是田间取样、调查, 综合其它信息, 然后做出决策, 进行预测预报, 但是大面积病害的发生, 该方法不但耗时、费力, 而且不具适时性, 从而在一定程度上影响了预报的精确度。利用遥感技术来大面积监测病虫害, 它具有快速、简便、大面积、无破坏、客观以及能够制成各种专题报告等优点, 是农作物病虫害监测的发展方向<sup>[2-7]</sup>。

## 2 田间试验设计和测试

**田间试验设计** 试验是在北京市小汤山精准农业示范基地进行的, 实验地被分成4块, 其中西南端102m×47m的区域安排为锈病诱发区, 播种品种为较易感病的“98-100”。为确保病害诱发成功, 播种时采用了30kg/hm<sup>2</sup>的较大播量, 并在机播的条幅间预留了专用接种行。旁边东南地块没有进行任何试验处理, 可以作为对照的正常生长的冬小麦。

**病害诱发接种情况** 2002-04-01下午5:00采取喷雾法接条锈病菌, 接种量为6g, 为混合小种, 喷后随即盖上润湿的塑料膜, 铲好土压好膜边保湿, 第二天在天亮前将膜揭去, 并进行人工浇水、灌溉工作, 以创造满足病害发生、发展的生态条件。经过田间调查, 接种十分成功, 20天后, 诱发接种区域的冬小麦开始出现条锈病症状。

**病情指数调查与光谱测定** 条锈病诱发成功后, 在天气晴朗、无风或风速很小时, 进行病情调查和光谱取样, 时间范围为上午10:00—12:00, 每隔一周左右调查一次。每平方米随机选取20株小麦, 分别调查其发病情况, 并在调查取样前利用ASD Field-

收稿日期: 2003-02-15; 修订日期: 2003-06-24

基金项目: 北京精准农业示范工程项目资助(A00300100584)和国家863项目(2003AA209040)资助。

作者简介: 刘良云(1975—), 男, 博士, 副研究员, 2000年于中国科学院西安光学精密机械研究所获博士学位。主要研究方向为光学遥感, 发表论文20余篇。

spec FR2500 光谱仪测定对象的光谱,该光谱仪的光谱范围为 350—2500nm;采样间隔 1.4nm (350—1000nm 区间)和 2nm (在 1000—2500nm 区间);光谱分辨率 3nm @ 700 nm、10nm @ 1400nm & 2100nm,视场角 25°。每次目标光谱测定离地面 130cm 左右,在视场范围内重复 20 次取平均,目标光谱测定后进行参考板校正。

病情严重程度分为 9 个梯度,即 0,1%,10%,20%,30%,45%,60%,80%和 100%,分别记录各病情程度的小麦叶片数,然后利用公式(1)计算病情指数。

$$DI = \frac{\sum(x \times f)}{n \times \sum f} \times 100\% \quad (1)$$

其中  $DI$  为病情指数, $x$  为各梯度的级值, $n$  为最高梯度值为 9, $f$  为各梯度的叶片数。

### 3 PHI 高光谱图像数据获取及处理

PHI(Pushbroom hyperspectral imager)由中国科学院上海技术物理所研制,它是面阵推扫型成像光谱仪<sup>[8]</sup>。其主要光学参数如表 1。

表 1 PHI 仪器主要参数

Table 1 The optical parameters of PHI

| 光学参数           | 数据采集参数                     |
|----------------|----------------------------|
| 总视场:21°        | 输入数据速率:14MBit/s            |
| 瞬时视场:1mrad     | 帧存容量:128KBit (120 波段)      |
| 光谱范围:400—850nm | PC 插槽:ISA 总线               |
| 光谱分辨率: < 5nm   | 内存地址:(Hex)D000:0-D000:FFFF |
| 光谱采样:80        | 端口:(Hex)300                |
| 像元数:380 像元/行   | 中断:IRQ5                    |
| 最大扫描率:60s/s    |                            |
| 数据量化:12bit     |                            |
| 电源:27 V DC     |                            |

在 2002 年利用 PHI 仪器开展了 3 次飞行数据获取试验,每次飞行选在天气晴朗、无风或风速很小时进行的,时间范围为上午 10:00—14:00。飞行日期分别是 2002-04-18,对应为冬小麦的拔节期,此时条锈病已经接种成功,部分区域有轻微症状;5 月 17 日,对应为冬小麦的灌浆始期,此时局部区域已经严重感染上了条锈病;5 月 31 日,对应为冬小麦的乳熟期,此时条锈病接种区域全面感染上条锈病。

每次飞行都采用了“运 5”飞机,航高为 1000m,对应地面幅宽为 380m 左右。共有 7 个航带,覆盖整个小汤山基地,我们从中挑选一个过顶航带的 PHI 图像数据来监测条锈病。

为了对航空飞行数据进行同步辐射校正,在每次 PHI 高光谱航空飞行实验中,都在地面安排了同步辐射定标的黑、白布作为定标体,黑、白布的尺寸为 7m × 7m 左右。当飞机过顶时,准同步地测量黑、白布的光谱反射率,地面光谱仪采用的是 ASD Field-spec FR2500 光谱仪。因此,可以采用经验线性法对 PHI 高光谱飞行图像数据进行辐射校正和反射较换,也就是在图像上找到黑、白布定标体,并挑选中间 3 × 3 个像素的均值作为黑白布在图像上的  $DN$  值,通过线性插值方法,计算图像上所有点的光谱反射率,

$$R_{ij}^b = \frac{DN_{ij}^b - DN_{Black}^b}{DN_{White}^b - DN_{Black}^b} \times (R_{White}^b - R_{Black}^b) + R_{Black}^b \quad (2)$$

式中  $R_{ij}^b$  和  $DN_{ij}^b$  为 PHI 图像像元  $(i, j)$  第  $b$  个波段的光谱反射率和  $DN$  值,  $DN_{White}^b$  和  $DN_{Black}^b$  为第  $b$  个波段白布、黑布的  $DN$  值,  $R_{White}^b$  和  $R_{Black}^b$  为第  $b$  个波段白布、黑布的地面同步测定的光谱反射率。

对图像进行反射率转换后,对照基地 0.25m 高分辨率、带有地理坐标的底图,对 3 次 PHI 图像进行几何精校正,重采样后的图像分辨率为 1m。经过几何校正的 PHI 高光谱图像数据的任一空间像素不仅有该点的反射率光谱曲线,还有该点的空间地理坐标位置。

### 4 条锈病病害冬小麦的图像光谱特征

为了研究病害对冬小麦冠层光谱的影响,并通过光谱特征实现病害的监视、评价和预报,挑选正常生长冬小麦作为参照样本,该正常生长冬小麦的北京 54 大地坐标位置为(452450.98m, 4450215.24m),它与条锈病接种区域相邻,地块平整,肥水处理与病害区一致,该参照点所处地块与条锈病接种区域隔有保护行。在条锈病接种区域挑选感染条锈病的冬小麦样本,其 54 大地坐标位置为(452416.98m, 4450200.24m)。所以通过对比该正常生长的冠层光谱与感染条锈病冬小麦的冠层光谱的差异,可以了解条锈病对冬小麦冠层光谱的影响。

4 月 18 日为冬小麦的拔节期,此时接种才 18 天,接种区域刚发生条锈病,图 1 为此时正常生长的冬小麦与感染条锈病的冬小麦的冠层光谱曲线对照及红外外显示的 PHI 图像。此时,虽然可以在田间局部区域观察到轻微的条锈病发生,但在图像和光谱曲线上,条锈病的影响都不明显。

灌浆期是冬小麦一生中生长发育最重要的时期,

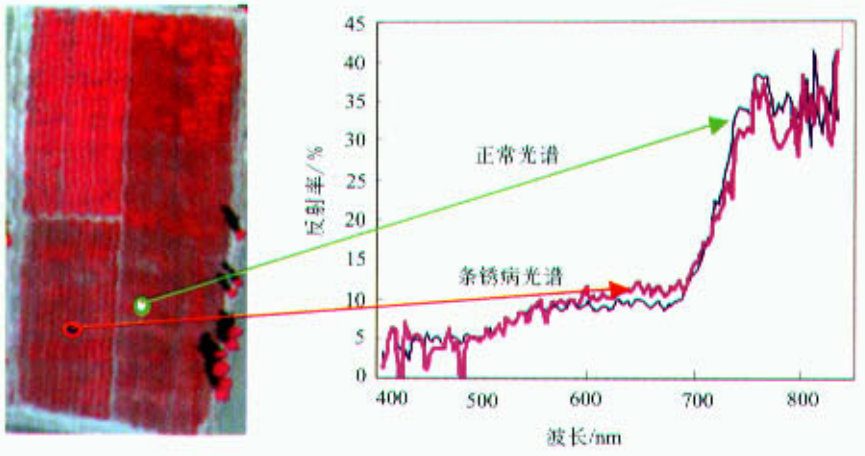


图1 条锈病刚发生时光谱曲线与正常光谱曲线对比(2002-04-18,拔节期)

Fig.1 Image spectra of the normal and diseased wheat polts at Apr.18,2002

如果这个时期遭到外界的胁迫与灾害,对其产量的影响将会很大,所以这也是遥感监测病害的重点时期。

图2为5月17日,冬小麦灌浆期的彩红外显示的 PHI 图像及病害点和正常对照点的光谱曲线。此时,病害点条锈病比较严重,病害点与正常生长的对照点的光谱差异十分明显。我们可以直接从彩红外显示 PHI 图像上发现病害发作较严重区域。从对照点与发病处理点的 PHI 图像光谱的比较图上可以发现,正常生长的对照点的光谱在红光波段 670nm 处有一个明显吸收谷;在 560—700nm 黄边、红谷波段,对照点光谱反射率比发病点低,说明条锈病破坏了叶片叶绿素细胞,降低了叶绿素在该波段的吸收本领;在 730—830nm 范围内,对照点光谱反射率远比

发病点高,说明病害严重破坏了叶片正常的组织结构,造成近红外平台的光谱反射率的下降。

5月31日冬小麦已进入乳熟期,图3为此时条锈病发作点的光谱曲线与正常生长冬小麦对照点的光谱曲线,及彩红外显示的 PHI 图像。由于条锈病破坏了冬小麦色素及叶片组织结构,冬小麦正常生长的营养积累时间被缩短,条锈病区域的冬小麦过早地进入成熟阶段,此时作为对照点的正常生长冬小麦 PHI 图像光谱具备明显的植被特征,而研究病害点的 PHI 图像光谱表现为土壤及干草地光谱特征。所以,病害点的光谱反射率在可见光波段要高于正常生长的冬小麦光谱,而近红外平台的光谱反射率要低。

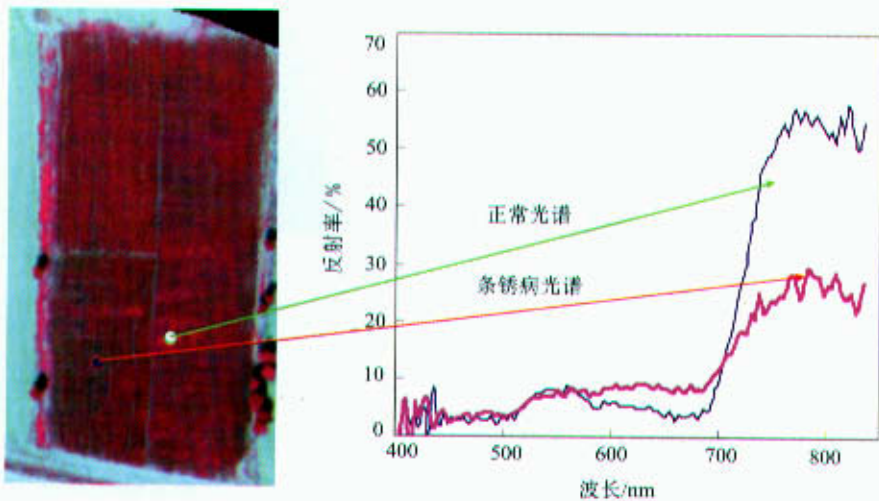


图2 条锈病严重时光谱曲线与正常光谱曲线对比(2002-05-17,灌浆期)

Fig.2 Image spectra of the normal and diseased wheat polts at May. 17,2002

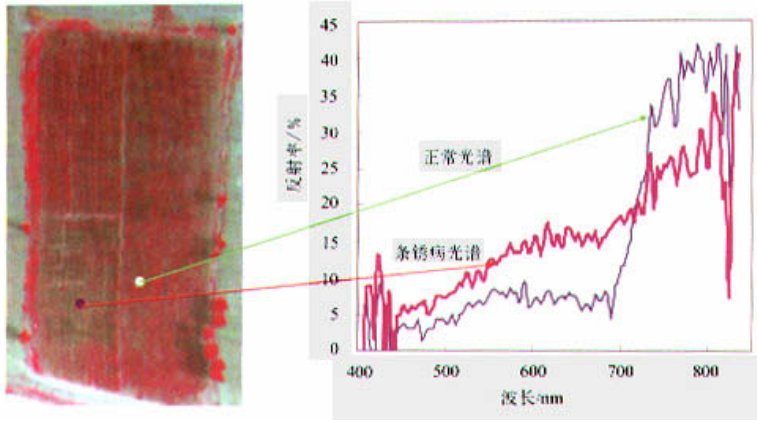


图 3 乳熟期时,条锈病点的光谱曲线与正常光谱曲线对比(2002-05-31)

Fig.3 Image spectra of the normal and diseased wheat polts at May. 31,2002

若将 3 次 PHI 飞行图像数据合成显示,如图 4,为利用 3 次 PHI 图像的归一化植被指数  $NDVI$  合成的假彩色图,分别利用 5 月 31 日 PHI 图像的  $NDVI$  作为红色分量、5 月 17 日  $NDVI$  作为绿色分量、4 月

18 日  $NDVI$  作为蓝色分量。考虑到 2002 年小汤山病害试验区的特点,即 4 月 18 日条锈病刚发作,而 5 月 17 日和 5 月 31 日条锈病较严重,所以图中蓝色区域为条锈病严重发作区域。

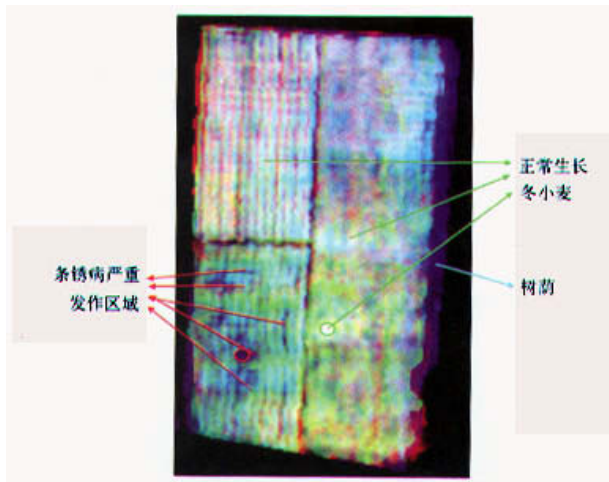


图 4 利用 3 次 PHI 图像的  $NDVI$  组合显示的假彩色图

Fig.4 The CIR displayed image of 3 times PHI data

为了更加定量的比较条锈病对图像光谱的影响,计算了正常生长的对照点和病害点的 PHI 图像光谱特征,包括植被指数、红谷和绿峰的吸收或反射峰的深度/高度。

红谷的吸收深度和面积如图 5(a)所示,定义为:

$$Depth = \frac{AB}{AO} = 1 - \frac{R_C}{\left( R_S + \frac{R_E - R_S}{\lambda_E - \lambda_S} \times (\lambda_C - \lambda_S) \right)} \quad (3)$$

式中,  $R_C, R_S, R_E$ , 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的光谱反射率,  $\lambda_C, \lambda_S, \lambda_E$ , 分别为吸收特征中心点、起点和结束点处的波长, 分别为 560nm, 670nm 和 760nm。

绿峰波段的反射峰高度如图 5(b) 所示,定义为:

$$Height = \frac{AB}{AO} = 1 - \frac{\left( R_S + \frac{R_E - R_S}{\lambda_E - \lambda_S} \times (\lambda_C - \lambda_S) \right)}{R_C} \quad (4)$$

式中符号定义如图 5(b), 与式(3)基本一致, 反射峰

特征中心点、起点和结束点处的波长分别为 500nm、560nm 和 670nm。

表 2 为 3 次飞行的 PHI 数据中的病害点与对照点的图像光谱特征。

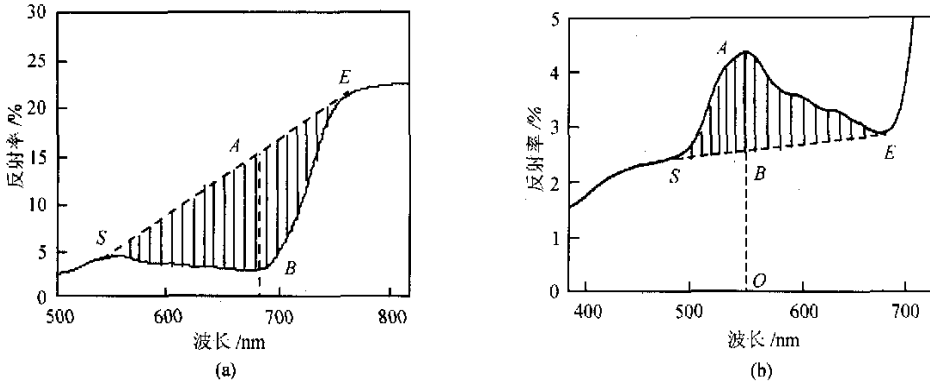


图 5 红谷和绿峰波段的吸收/反射峰的深度/高度及面积

Fig.5 Absorption depth of chlorophyll well and reflectance peak height at green band

表 2 对照点与病害点的 3 次飞行 PHI 图像特征光谱参数(2002 年)

Table 2 The spectral features of PHI images in the 3 different flights

| 光谱        | 拔节期(4月18日) |       | 灌浆期(5月17日) |       | 乳熟期(5月31日) |       |
|-----------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
|           | 对照点        | 病害点   | 对照点        | 病害点   | 对照点        | 病害点   |
| $R_{451}$ | 5.32       | 3.67  | 2.99       | 3.04  | 3.02       | 5.20  |
| $R_{551}$ | 8.78       | 9.13  | 7.90       | 8.05  | 8.03       | 12.62 |
| $R_{682}$ | 9.71       | 11.34 | 3.31       | 8.58  | 8.22       | 15.53 |
| $R_{783}$ | 33.63      | 29.68 | 55.30      | 29.52 | 37.96      | 24.25 |
| NDVI      | 0.772      | 0.760 | 0.949      | 0.751 | 0.871      | 0.623 |
| Depth672  | 0.600      | 0.574 | 0.909      | 0.536 | 0.764      | 0.324 |
| Height560 | 0.167      | 0.138 | 0.495      | 0.202 | 0.271      | 0.101 |

对比表 2 的条锈病对 3 个生育期的 PHI 图像光谱特征的影响, 可以发现如下规律:

- (1) 黄边、红谷波段(560—670nm)处, 条锈病病害冠层反射率都高于正常生长冬小麦冠层光谱反射率;
- (2) 在近红外波段, 条锈病破坏了叶片的组织结构和水分含量, 条锈病病害的冠层反射率小于正常生长冬小麦冠层光谱反射率;
- (3) 条锈病冬小麦冠层光谱红谷吸收深度会增大;
- (4) 条锈病冬小麦冠层光谱绿峰的反射峰高度会减小。

### 5 利用高光谱遥感监测条锈病的变化

条锈病会影响冬小麦冠层光谱, 并主要表现为: 黄边、红谷波段的冠层反射率都高于正常生长冬小麦冠层光谱反射率; 在近红外波段冠层反射率小于

正常生长冬小麦冠层光谱反射率。所以, 根据这一特性, 可以利用 2002 年 3 次 PHI 图像数据, 监测病害试验区的冬小麦条锈病的程度和范围。

可以利用上述病害冬小麦的光谱差异特征, 定义相对的病害光谱指数如下:

$$\text{病害光谱指数} = \frac{Red_{Disease} - Red_{Normal}}{Red_{Normal}} \times \frac{NIR_{Normal} - NIR_{Disease}}{NIR_{Normal}} \quad (5)$$

式中  $Red_{Disease}$  和  $Red_{Normal}$  为正常生长的健康冬小麦和病害冬小麦在红波段的平均光谱反射率,  $NIR_{Disease}$  和  $NIR_{Normal}$  为健康冬小麦和病害冬小麦在近红外波段的平均光谱反射率。

为了更好地掌握病害程度和病害范围, 利用地面病情指数调查数据, 与病害光谱指数进行统计相关分析, 建立病情指数的遥感反演模型, 统计分析结

果如图 5。可以发现公式(5)定义的病害光谱指数与病情指数显著正相关。由于利用地面同步测量光谱,采用经验线性法对图像光谱进行了辐射校正和反射性转换,所以可以直接将地面光谱的模型应用到图像光谱中去。

因此,根据公式(4)所定义的病害光谱指数和图 6 的病情指数的统计模型,利用 PHI 航空高光谱图像,监测拔节期、灌浆期、乳熟期的冬小麦病情和范围如图 7。

左下角地块为条锈病接种区域,从图 7 可以发现,4月18日拔节期,条锈病接种区域只是少数几个小区域有轻微病害表现;5月17日灌浆期,条锈病接种区域有几块隔离、面积较大的病害严重感染

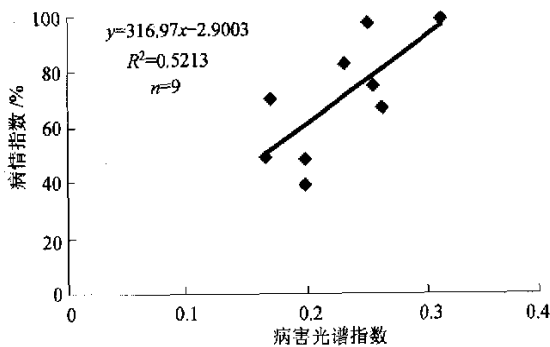


图 6 病害光谱指数与病情指数散点图

Fig.6 The statistical scatter-plot of disease spectral index and disease index

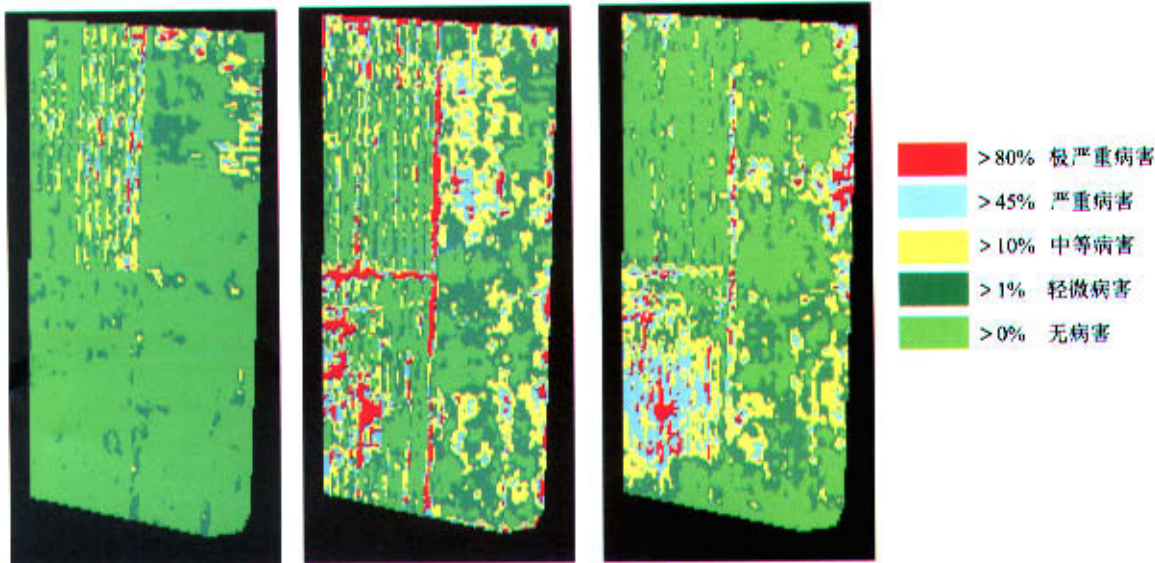


图 7 3次 PHI 图像光谱监测的病情指数(左为拔节期、中为灌浆期、右为乳熟期)

Fig.7 The disease index images derived from 3 PHI data

区域;5月31日乳熟期,整个病害区都严重或极严重地感染了条锈病。这与实际情况是吻合的。

## 6 结论与讨论

冬小麦发生锈病,叶绿素被大量破坏,水分蒸腾量大大增加,叶片细胞大小、形态、叶片结构发生了改变,从而改变了叶片和冠层的光学特性,使得遥感探测与评价成为可能。本文利用3次时相的 PHI 航空图像光谱,分析了3个生育期条锈病病害冬小麦的光谱特征,并根据其特点,设计了病害光谱指数,成功地监测实验区冬小麦的条锈病的病害程度(病情指数)与范围。但要实现条锈病的诊断性探测,特别是需要区分虫害、恶劣水肥环境等其它因素,还需

要进一步的工作,如改善传感器的信噪比,进行地面综合试验,完善地面观测数据等,另一方面,考虑作物生长的时相信息、气象条件,将时间谱与光谱信息相结合,才能更好地实现病虫害的诊断性探测、评估。

## 参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Li Y R, Shang H S, Response of Wheat Plants Infected with Stripe Rust to Water Stress [J], *Acta Phytophysiological Sinica*, 2000, 26(5):417—421. [李玥仁,商鸿生.小麦条锈病罹病植株对水分胁迫的响应[J].植物生理学报,2000,26(5):417—421.]

[ 2 ] Wu J Y, Ni J. Spectral Characteristics of the Pine Leaves Damaged by Pine Moth and a Model to Detect the Damage Early [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 10(4):250—251. [吴继友,倪健.松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式[J].环境遥感,

- 1995, 10(4):250—251.]
- [ 3 ] Yang J G, Jin X H, Guo Y W *et al.*. Study on Applying Remote Sensing Technology on the Monitoring of Wheat Aphid Infest[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2001, 17(6):4—8. [杨建国, 金晓华, 郭永旺等. 遥感技术麦蚜监测应用研究[J]. 中国农学通报, 2001, 17(6):4—8.]
- [ 4 ] Yu G M. The Basic Principles and methods of Remote Sensing Application to the Identification of Waterlog Damage[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 10(1): 9—14. [喻光明. 渍害遥感识别的基本原理与方法[J]. 环境遥感, 1995, 10(1): 9—14.]
- [ 5 ] Price K P, Jakubauskas M E. Spectral Retrogression and Insect Damage in Lodgepole Pine Successional Forests[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(8): 627—1632.
- [ 6 ] Silleos N, Perakis K, Petsanis G. Assessment of Crop Damage Using Space Remote Sensing and GIS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(3):417—427.
- [ 7 ] Wu S W, Wang R C, Chen X B *et al.* Effects of Rice Leaf Blast on Spectral Reflectance of Rice[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agriculture Science)*, 2002, 20(1):73—76. [吴曙雯, 王人潮, 陈晓斌等. 稻叶瘟对水稻光谱特性的影响研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2002, 20(1):73—76.]
- [ 8 ] Shao H, Wang J Y, Xue Y Q. Key Technology of Pushbroom hyperspectral imager(PHI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(4): 251—255. [邵晖, 王建宇, 薛永祺. 推扫式超光谱成像仪(PHI)关键技术[J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 251—255.]

## Monitoring Stripe Rust Disease of Winter Wheat Using Multi-temporal Hyperspectral Airborne Data

LIU Liang-yun<sup>1</sup>, HUANG Mu-yi<sup>1</sup>, HUANG Wen-jiang<sup>1</sup>, WANG Ji-hua<sup>1</sup>, ZHAO Chun-jiang<sup>1</sup>, ZHENG Lan-fen<sup>2</sup>, TONG Qing-xi<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100089, China;

2. Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** When stripe rust disease occurs, chlorophyll cells are destroyed and the plant water content is drastically transpired. The optical properties of plant leaves also vary with crop's biochemical status, which makes it possible to monitor crop's stripe rust by remotely sensed data. The multi-temporal hyperspectral airborne image data were acquired from winter booting stage to milking stage, and the Stripe Rust disease of winter wheat was analyzed using the hyperspectral airborne data. Compared with normal wheat, the image spectral reflectance of disease wheat is higher in 560—670nm bands, lower in near infrared bands; the absorption depth of chlorophyll well in red band and the height of chlorophyll peak in green band are relatively reduced. Therefore, a novel spectral index for stripe rust disease was successfully designed for estimation of the stripe rust disease index, and the degree and area of stripe rust disease were successfully remotely sensed from the multi-temporal hyperspectral data based on the disease spectral index.

**Key words:** hyperspectral; pushbroom imaging spectrometer (PHI); disease index; disease spectral index