

密级:

论文编号:

中国农业科学院

学位论文

基于遥感的农作物病虫害监测方法研究
—以襄樊地区冬小麦条锈病为例

**Based on Remote Sensing of the Crop Diseases and Pest
Monitoring Method Study
—A Case Study of Wheat Yellow Rust of Xiang fan**

硕 士 研 究 生: 江道辉

指 导 教 师: 周清波 研究员

申 请 学 位 类 别: 工学硕士

专 业: 环境工程

研 究 方 向: 农业遥感应用

培 养 单 位: 农业资源与农业区划研究所
研究生院

提交日期 2007 年 6 月

Secrecy:

No.

Chinese Academy of Agricultural Sciences

Master Dissertation

**Based on Remote Sensing of the Crop Diseases and Pest
Monitoring Method Study
—A Case Study of Wheat Yellow Rust of Xiang fan**

Ms.Candidate: Jiang Daohui

Advisor: Zhou Qingbo Prof.

Major: Environmental Engineering

Specialty: Remote Sensing Application

Chinese Academy of Agricultural Sciences

June, 2007

摘要

提高农作物病虫害的监测水平，对维护我国粮食安全，保护生态环境有着重要意义。遥感作为一种大面积、快速、无破坏、无污染的监测技术，能实现经济、社会、生态效益的统一。本文以襄樊地区冬小麦条锈病的监测为例，研究了遥感方法在病虫害监测中的应用。

本研究的主要内容有：

1、高光谱的监测。通过对病害叶片和健康叶片的叶绿素含量进行分析，发现病害叶片与健康叶片的叶绿素含量存在很大差异，因此选择病害叶片中对叶绿素敏感的470nm、550nm、635nm、680nm、800nm等波段的反射率，结合实测的叶绿素含量，建立了条锈病为害后，叶片叶绿素含量的估算模型。该模型能较好评价冬小麦受条锈病影响的程度。冠层水平上的研究，是通过对病害冠层和健康冠层的原始光谱和一阶微分光谱进行定量分析，确定可以选择Db、Dy、Dr、Dinr、Rg、Ro、SDr/SDb和SDinr/SDb作为高光谱特征参数，进行条锈病的诊断。

2、生境因子的监测。以襄樊地区1980到1999年的气象资料和病害发生率为研究对象。通过对月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量与条锈病发生率的相关分析，结果表明：影响襄樊地区冬小麦条锈病发生的主要生境因子是6、7、1、2月的平均最高气温。降水量对该地区条锈病发生程度的影响不大，并对原因进行了简要分析。在此基础上，建立了一个条锈病发生率的预测模型。可以作为条锈病监测的辅助方法。

3、遥感植被指数的监测。通过各种植被指数的比较，选定用NDVI来进行监测。选取襄樊地区2004年4月8日的一景TM影像，对影像进行预处理以后，运用监督分类法进行分类，将该地区小麦分为不同类型，再分别提取其NDVI，确定不同小麦的健康状况。并对每一类小麦的面积进行了统计。结果表明：NDVI能大致将健康区与病害区区分开，从发生面积上与实测值大体吻合。

关键词： 遥感，条锈病，高光谱，生境因子，植被指数

Abstract

It has important significance to improve monitoring the diseases and pest level and to maintain food security and ecological environment protection in China. As a large, fast, no damage, no pollution monitoring technology, remote sensing monitoring can realize the unity of the economy, society and environment. In this paper, we take Xiangfan district in Hubei province as a case, the method of the application of satellite remote sensing technology in pest monitoring was studied.

1. Hyperspectral monitoring

There is a distinct difference on the chlorophyll content between the disease and health leaves after analyzing. Therefore the following bands, 470nm, 550nm, 635nm, 680nm, 800nm, sensitive to chlorophyll are used to monitoring the disease leaves. Combined with the measured chlorophyll content, the model for estimating chlorophyll content is constructed. The model can be used evaluating the extent of the wheat rust.

The research of the canopy scale is based on the quantitative analysis on the first-order differential spectrum characteristics of the disease and health canopy. The following parameters, Db , Dy , Dr , $Dinr$, Rg , Ro , SDr/SDb and $SDinr/SDb$, are selected as hyperspectral characteristic parameters to diagnose the wheat yellow rust disease.

2. Habitat factor monitoring

Through the correlation analysis between the average temperature, average maximum temperature, average minimum temperature and the rate of the winter-wheat yellow rust, the results indicate that:

The main habitat factor influence the winter-wheat yellow rust occurrence is the month average maximum temperature in January, February, June and July, while the influence of the precipitation is less. Also causes a brief analysis. A forecasting model of the winter-wheat yellow rust occurrence is established according to the historical material, which can as the assistance method to monitoring the winter-wheat yellow rust.

3. Remote sensing monitoring on the vegetation index

The vegetation index $NDVI$ was adopted for monitoring by comparison on various vegetation indexes. The TM image was selected on April 8th 2004 in Xiangfan Hubei province. First, winter-wheat is divided into three types using supervised classification method. Then the $NDVI$ value is calculated. Finally the winter-wheat health status can be determined. The results showed that $NDVI$ can be used to identified the health and disease region. It is in accord with the occurrence area.

Key word: remote sensing, yellow rust, hyperspectral, habitat factor, vegetation index

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 国内外的研究进展	2
1.2.1 农作物病害的监测	2
1.2.2 农作物虫害的监测	4
1.3 目前存在的问题	5
1.3.1 遥感信息处理技术难以满足应用需要	5
1.3.2 生境因子的反演精度不高	6
1.3.3 病虫害发生等级与遥感影像之间的关系尚不明确	6
1.4 发展趋势	6
1.5 论文总体设计	7
1.5.1 研究内容	7
1.5.2 技术路线	7
1.5.3 论文结构	7
第二章 研究区概况和数据源	9
2.1 研究区概况	9
2.1.1 研究区自然环境因素	9
2.1.2 研究区冬小麦条锈病的发生情况	10
2.2 数据源	10
第三章 高光谱监测冬小麦条锈病的研究	11
3.1 研究背景	11
3.1.1 高光谱的基本概念	11
3.1.2 高光谱遥感在植被研究中的应用	11
3.1.3 高光谱遥感监测在本研究中的应用	12
3.2 材料和方法	13
3.2.1 光谱测量	13
3.2.2 叶绿素含量的测定	14
3.2.3 数据获取与分析方法	14
3.3 病害叶片的研究	15
3.3.1 叶绿素含量差异性分析	15
3.3.2 病害影响下叶片的光谱特征分析	15
3.3.3 病害叶片的叶绿素含量与单波段反射光谱的关系	16
3.3.4 光谱测量病害叶片叶绿素含量与多波段反射光谱回归分析	18
3.3.5 模型的检验	18
3.4 病害冠层的研究	18

3.4.1 病害影响下冠层的光谱特征	18
3.4.2 冠层光谱特征的定量分析	20
3.5 本章小结	23
第四章 冬小麦条锈病生境因子监测的研究	24
4.1 研究背景	24
4.1.1 生境的概念	24
4.1.2 农作物病虫害生境监测的进展	24
4.1.3 生境监测在本研究中的应用	25
4.2 研究数据和方法	25
4.2.1 研究数据	25
4.2.2 研究方法	26
4.3 研究结论	27
4.3.1 气温、降水量与病害发生率的相关性	27
4.3.2 回归模型的建立	28
4.3.3 回归模型的验证	29
4.4 本章小结	29
第五章 遥感植被指数监测冬小麦条锈病的研究	31
5.1 常用植被指数	31
5.1.1 基于波段线性组合的植被指数	31
5.1.2 消除影响因子的植被指数	31
5.2 遥感影像的选取	33
5.3 遥感影像的预处理	34
5.3.1 辐射定标	34
5.3.2 TM遥感影像的大气校正	34
5.3.3 TM遥感影像的几何校正	35
5.3.4 TM遥感影像的剪切	36
5.4 遥感影像的分类	36
5.4.1 训练样本的选择	37
5.4.2 分类结果	38
5.5 遥感植被指数的计算	39
5.6 本章小结	40
第六章 结论和讨论	41
6.1 研究结论	41
6.2 本研究的创新点	41
6.3 讨论	42
参考文献	43
致谢	48
作者简历	49

图表目录

图 1-1 研究总体技术路线	8
图 2-1 襄樊市政区图	9
图 3-1 成像光谱学的基本概念	12
图 3-2 ASD FIELDSPEC野外便携式高光谱仪	13
图 3-3 美能达SPAD-502 叶绿素测量仪	14
图 3-4 病害叶片与健康叶片的反射率曲线	16
图 3-5 一阶微分后的病害叶片与健康叶片的光谱曲线	16
图 3-6 527NM处线性回归分析	17
图 3-7 527NM处非线性回归分析	17
图 3-8 病害冠层与健康冠层的反射率曲线	19
图 3-9 一阶微分后病害冠层与健康冠层的光谱曲线	20
图 4-1 襄樊地区 1980—2004 年冬小麦条锈病发生图	26
图 4-2 气温因子与条锈病发生率的相关性	27
图 4-3 降水量与条锈病发生的相关性	28
图 4-4 回归方程 (4-1) 预测的病害率与实测病害率的关系图	28
图 4-5 回归方程 (4-2) 预测的病害率与实测病害率的关系图	29
图 5-1 训练区及样本: GPS样方及训练区; 下: 左为水体训练区, 右为小麦GPS样方 . . .	37
图 5-2 各地物在不同波段的平均光谱曲线	38
图 5-3 分类后的TM影像	39
表 3-1 病害叶片与健康叶片叶绿素含量的比较	15
表 3-2 蓝光区不同波长反射率与病害叶片叶绿素含量的回归方程	16
表 3-3 红边区不同波长反射率与病害叶片叶绿素含量的回归方程	17
表 3-4 冠层光谱特征定量分析所使用的变量	20
表 3-5 健康冠层与病害冠层的高光谱特征参数比较	22
表 4-1 冬小麦条锈病历年见病期与发生程度	26
表 5-1 TM各波段对应的波长范围及空间分辨率	34
表 5-2 研究区TM (2004.4.08) 影像几何精校正控制点	36
表 5-3 可分离报告	38

第一章 绪论

1.1 研究意义

据联合国粮农组织（FAO）估计，在对病虫害不防治的情况下，粮食会减产约30%。如果我们能准确对农作物的病虫害作出预报，然后指导农民有针对性的采取措施，这样就能把损失降到最低。但目前的情况是农民获得此类信息的途径较少，有的农药广告片面夸大了某种病虫害的发生，不仅增加了农民生产成本，还会因滥施农药导致环境污染。长期以来，我国对重大病虫害的灾变趋势、成灾规律与机理等方面的基础性和公益性研究较薄弱，缺乏对农作物病虫害的实时监测，也就谈不上准确预报，这是造成农作物生物灾害防不胜防被动局面的主要原因之一。农作物病虫生物灾害一旦发生，将造成我国粮食生产重大减产和经济损失。要实现21世纪的中国农业可持续发展战略目标，防御和减轻农作物病虫灾害及其它自然灾害是必不可少的重要环节，这一环节如不达标，农业稳定、持续发展将成为空中楼阁。遥感技术的迅速发展为我们解决农作物病虫害的实时监测与准确预报提供了一个有力的手段。

20世纪60年代以来，遥感技术取得了迅猛的发展，已广泛应用于国民经济的各个领域。按照《遥感大辞典》的定义，遥感是指从远距离、高空乃至外层空间的平台上利用可见光、红外、微波等，通过摄影或扫描，信息感应、传输和处理，从而识别地面物质的性质和运动状态的现代化技术系统。从这个定义可以看出，信息处于核心位置，遥感过程的本质就是获取信息---分析信息---应用信息的过程。农作物病虫害作为反映农作物生长状况的重要信息，通过遥感技术来获取，并应用于农业生产的实践成为遥感技术发展的一个新领域。

遥感技术监测农作物病虫害的优势

（1）能够进行大面积的同步观测。

灾害的发生，有一个阈值，只有达到一定程度，才能称为灾害。在自然生态系统中，生物与生物之间相互作用、生物与环境之间相互适应，使物种保持平衡密度。在半人工的农田生态系统中，由于围绕增产的目的使系统环境极大改变，加上害虫的生态适应，致使某些种群迅速上升，其平衡密度处于很高的水平，往往超过了害虫防治的经济水平。换言之，只有当害虫危害所引起的经济损失超过其防治时所要花费的费用，害虫才真正是害虫，才需要进行预报和防治。通常的定点观测的方法，在应用中就存在这一个问题。从样点来看，发生了病虫害，于是采取了防治措施，但结果可能并未成灾，造成了经济上的浪费。利用遥感技术进行大面积的同步观测，就为正确判断灾害程度，发生范围提供了保证，也为如何防治提出了科学的决策依据。

（2）数据的获取是经常的、便捷的、系统的，而且成本是低廉的。

当代遥感技术已能全面覆盖大气窗口的所有部分，包括可见光、近红外和短波红外区域。遥感已具有高的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率。遥感探测，尤其是空间遥感探测，可以在短时间内对同一地区进行重复观测，因此获取数据是经常的，便捷的。遥感的费用投入与所获取的效益，与传统监测方法相比，不但节约了时间，而且更节省了人力、物力、财力。有些遥感数据，还是免费接收的。

（3）一些重要的参数可以从遥感数据中方便获取。

如 $NDVI$ 和绿色植物生物量等可以直接从遥感数据中获取。病虫害发生的一些生境参数,如地表温度、土壤水分等可以通过遥感数据进行反演。

(4) 遥感数据的空间特性为监测农作物病虫害提供了一个有利条件。

传统的监测方法都是点源监测,在空间上可以认为是随机的,因此很难反映出病虫害在空间上的变化情况,也就难以进行预报。而遥感数据在空间上是连续的,结合 GIS 很容易进行灾害迁移方向,发生范围的预测。获得信息是空间连续的,这对一些生态上不稳定的区域更为重要,有时,生态上的突变和害虫的暴发最初发生在点、片区域,连续的信息对监测点、片发生非常重要。例如, Schell 等(1995)对在美国怀俄明州发生的草地蝗进行了研究,他们系统的收集了该州 48 年来内的草地蝗的发生资料,并利用 GIS 技术将每年的蝗虫分布图与行政区界限图相叠置,历史上蝗灾发生的具体位置借助 GPS 予以确定,在此基础上,编制了该州“蝗虫成灾频率图”。

从以上的优势我们可以看出,利用遥感技术监测农作物的病虫害有比较大的发展空间,十分有必要加强这方面的研究。

1.2 国内外的研究进展

1.2.1 农作物病害的监测

由于不同的植物具有不同的反射光谱特征,并且同一种植物在不同生长发育阶段和不同生长条件下的反射光谱特征也不尽相同,因此,可以利用多光谱遥感数据来监测植被生长(彭少麟,等 1999),这是利用遥感技术监测农作物病虫害的理论基础。一般作物的反射能力越强,图像上接收的辐射能量就越多,颜色就发白,发灰;反之,作物的反射能力越弱,图像上接收的辐射能量就越少,颜色就发暗,发黑。(萧术,等 1984)现有的研究大多基于光谱参数法,即从遥感数据中提取出植物生物物理方面的信息,以探测农作物的生长情况以及是否受病虫害的危害.具体算法主要是通过一元或多元回归分析方法建立高光谱数据或由此衍生的植被指数与作物农学参数之间的关系。(1)植被指数与作物农学参数。光合作用—干物质积累—叶面积增长—生物量增加,这四个有联系的因子的信息,大多不能为遥感传感器所直接获取。但是,它们的生理机制却能通过植物发射光谱中不同波段发射率的组合而间接地从遥感数据的分析中得到证实,这就为通过遥感监测作物的生长状况提供了一个良好的基础。典型的绿色植物发射光谱曲线上,蓝光区和红光区各有一个叶绿素吸收带(吸收中心在 450nm 及 650nm),近红外区则有一个强反射峰,植被对可见光和近红外辐射的吸收—反射作用的两种截然不同的表现是由色素及细胞内部机构差异造成的.因此,这两个波段的组合建立综合“植被指数”,常被有效地用于作物长势监测.植被指数在一定程度上反映着植被的演化信息.植被指数的一个重要特点是可以转换成叶冠生物物理学参数。植被指数是无量纲量,是利用叶冠的光学参数提取出的独特的光谱信号(特别是在红色和近红外光谱区的信号),适用于开展对植被活动的辐射度量。其主要优势是简单,除了辐射观测之外,不需要其他的辅助资料,也没有假定条件。问题的关键就是如何有效地综合各观测通道的信息,在增强植被信号的同时使非植被信号最小化。归一化植被指数($NDVI$)是最常用的一种植被指数,即

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1-1)$$

式中:NIR ,RED 分别指植被在近红外波段和红色波段的光谱反射率

G.Suryanarayana Reddy 等人研究发现玉米、花生和大豆的 $NDVI$ 与叶绿素含量呈现正相关。

这样就可以从遥感卫星获取光谱反射率, 估量作物受胁迫引起的色素变化。Prasad. S Thenkabail 等人研究不同生长时期的作物(棉花、土豆、大豆、玉米、向日葵)的光谱特征和生物物理量(WBM,LAI,PH 等), 运用回归分析方法建立它们之间的关系, 在 350-- 1 050 nm 光谱范围的 490 个通道中, 计算 4 个不同类型的 *NDVI* 指数(宽波段 TM 的 *NDVI* 指数、490 个窄波段内所有可能的两波段组合的 *NDVI*,490 个窄波段内的多元线性回归、经调整土壤影响的窄波段 *NDVI*)。根据研究结果, 推荐了用于农作物研究的 12 个特别的高光谱窄波段, 以及它们的中心波长和波段宽度, 比如, 第 5 个波段(中心波长 668 nm, 波段宽 4 nm)、第 6 个波段(中心波长 682 nm, 波段宽 4 nm)、第 7 个波段(中心波长 696 nm, 波段宽 4 nm)分别是叶绿素 3 个吸收峰值的光谱部分。(2) 红边参数与农作物农学参数。红边(red edge)现象是由于植被叶绿素在红光波段强烈的吸收与植物细胞在近红外波段强烈的反射造成的。植被红边(600-800 nm)曲线含有植被的许多信息, 其光谱特征有很强的表现能力。因此可以从红边光谱曲线提取特征参量。Patel N.K. 等人用倒置高斯模型曲线的一半拟合植被红边曲线是一个好方法。该模型曲线的数学表达式为

$$R(\lambda) = R_{sg} - (R_{sg} - R_{og}) \exp[-(\lambda - \lambda_{og})^2 / 2\sigma^2] \quad (1-2)$$

其中, R_{og} 等于红光区最低反射率, R_{sg} 对应红外肩反射率, λ_{og} 是红光区最低反射率 R_{og} 对应的波长, σ 为模型曲线拐点波长与 R_{og} 之差, $\lambda_p = \lambda_{og} + \sigma$ 代表模型曲线拐点波长。其形状由 R_{sg} , R_{og} , λ_{og} 和 σ 4 个特征参量确定。

红边位置是指光谱反射率增长率最大处所对应的波长, 由曲线拐点波长确定。红边位置和红边曲线的特征是植物参数在可见光区和近红外光区的好的指示器。Patel N. K. 等人对不同生长时期的小麦研究发现, 红边位置是一个对植物生长变化敏感的红边参数, 它与叶片的叶绿素含量有关。用倒置高斯模型拟合小麦植被红边曲线, 确定拐点波长, 得到了小麦在不同生长时期的拐点处波长也不相同。不同生长阶段的小麦地, 小麦光谱的拐点波长明显地从 713 nm 移到 723 nm。运用回归分析方法建立拐点波长与植被的农学参数 LAI 和叶绿素含量之间的线性关系, 结果表明它们之间的相关性较高。同时研究发现拐点波长的位置在随着农学参数 LAI 值的增大而向较长波长处移动。

黄木易通过高光谱对冬小麦的条锈病进行监测, 从理论上证明, 在冬小麦条锈病发生最佳防治时期(病叶率<5%)内, 高光谱遥感可以对条锈病进行相应诊断。首次提出了冠层水平病情指数的反演条锈病害胁迫指数SRSI模型(yellow ruststress index), 利用该模型可以对病情指数进行反演监测, 正确率在 75%以上。吴曙雯等通过对 4 个感染不同等级稻叶瘟的水稻冠层反射光谱进行测试, 受害轻时近红外区反射率变化幅度大, 受害重时绿光区和红光区反射率变化幅度大。G.L.Rinehart 等利用可见/近红外分光镜对匍匐翦股颖的褐斑病和一年生牧草的硬币圆状斑病进行了研究, 发现不同病情的冠层光谱反射率一阶导数在 700nm、1400nm 和 1930nm 处有着明显的特征。

现在基于MODIS数据农作物病害监测也有了一定进展。MODIS中分辨率成像光谱仪是美国国家航空航天局(NASA)成功发射的极地轨道环境遥感卫星Terra上载有的一种对地观测仪器。从数据资源开发和经济平衡角度考虑, MODIS数据更应该被重视。因为NASA对MODIS数据实行全世界免费接收的政策, 这样的数据接收和使用政策对于目前我国大多数遥感用户来说是不可多得的、廉价并且实用的数据资源, 并且MODIS是当前世界上新一代“图谱合一”的光学遥感仪器。利用MODIS数据监测农作物病害, 目前主要从以下两方面着手: (1) 改进植被指数的获取精度。

MODIS仪器是对以往仪器进行改进的结果,对经过一系列处理的NDVI产品将极大减少噪声,提高对植被的敏感度。(2)利用MODIS的多通道信息,反演多种农学参数。目前比较成熟的反演模型有LAI、FPAR和TS等。叶面积指数(LAI)定义了植物冠层的一个重要结构特性,植物吸收的光合有效辐射比(FPAR)量度了冠层吸收的400到700纳米光谱范围的特定的光合有效波长中可利用的辐射部分。对农作物病害的遥感监测,困难在于识别病害的种类。一种作物发生病害时,往往是几种病害同时发生,因此如何从遥感影像和高光谱上进行识别,是一个棘手的问题。而各种病害所带来的损失及防治方法是有差异的。笔者认为这应该是今后研究努力的方向。

1.2.2 农作物虫害的监测

从目前的研究进展来看,对蝗虫的遥感监测取得了很大进步。遥感技术一般是通过3种途径来监测害虫的:(1)害虫本身;(2)害虫的寄主植物及其所造成危害;(3)有利于害虫种群发展的环境。在监测森林虫害中有了一定进展。1978年美国用人造卫星的有关资料数据,测定了枞色卷蛾(危害白云杉和香脂冷杉)吃光树叶的林区并绘制成图。同年缅因州大学根据卫星遥感信息,做出该州必须喷雾防治枞色卷蛾的区地图。对于危害森林、果树及水稻等作物的舞毒蛾,1978年美国于宾夕法尼亚州进行连续的航空摄影,监测森林被害情况。1980年利用卫星多光谱信息,测定舞毒蛾的发生区域和被害程度。而对农作物虫害的监测,从现在的研究进展来看,对蝗虫的监测研究取得了比较好的效果。

下面就以蝗虫为例来介绍一下。蝗虫的个体不大,不可能从遥感影象上直接予以识别,因此从1970年代开始的早期监测,就是采用这一思路,即通过对蝗虫生境的监测来间接监测蝗虫。生态学上的所谓生境(habitat)是指生物的个体、种群或群落所在的具地段或完成生物过程的空间,生境内包括生物所必须的生存条件以及其他生态因素。例如Pedgley、Hielkema分别对澳大利亚昆士兰州西南部及澳大利亚东南部地区的研究表明,使用Landsat/MSS图像可对蝗虫赖以生存的绿色植被及其动态作出有效的监测。研究表明,虽然在1100万Landsat/MSS图像上可识别出主要的蝗虫生境类型,但效果并不非常理想。80年代后期,遥感植被指数与蝗虫的关系被进一步认识。例如Hielkema等(1986)于80年代后期,开始进行遥感植被指数与蝗虫关系的研究。选用7个时相的NOAA/AVHRR图象,研究了1980至1981年间Sahara沙漠蝗爆发的生境条件。算出归一化植被指数NDVI,与蝗虫调查数据、降雨量结合,进一步计算了沙漠蝗的“潜在繁殖因子”(PBAF)。结果表明,PBAF与实地所记录的沙漠蝗的密度之间存在着较为显著的正相关关系。这说明,“潜在繁殖因子”是监测沙漠蝗的一种重要指数,它可用于指导沙漠蝗的实地防治。进入二十世纪九十年代以后,遥感技术用于蝗虫的监测有了很大进展,这一阶段的重要特点就是将遥感与GIS结合去进行蝗虫的监测。例如Voss等(1994)选用1988和1991年的六景LANDSAT/TM图象对北非苏丹红海沿岸一带的沙漠蝗进行了研究。在室内对TM图象进行预判,并对与蝗虫有关的自然特征进行分析,初步确定沙漠蝗有代表性的生境类型。然后,进行野外实地调查,并借助GPS定位,同时详细收集历史资料。在此基础上利用最大似然分类法完成了TM图象的沙漠蝗生境类型监督分类。此外,还利用GIS技术,对沙漠蝗生境的有关参数进行数据建库、分析与制图,并将其与遥感生境分类图象进行复合,从而获得研究区的“沙漠蝗潜在繁殖区分布图”。倪绍祥等对青海湖环湖地区也开展了类似的研究。通过对Landsat TM图象的数字处理,并借助地理信息系统技术,

在连续数年实地调查和收集资料的基础上，对该地区草地蝗虫的生境类型进行了划分，并对这些生境类型的草地蝗虫潜在发生和成灾的可能性进行了评估。

对蝗虫的监测固然重要，但准确的对其发生和迁移进行预报却有更重要的实用价值。在用于沙漠蝗预测的GIS系统方面，迄今较为成熟的一个系统是联合国粮农组织(FAO)的Magor等所研制的沙漠蝗预警管理系统(SWARMS)。通过该系统，研究人员可以方便的对所预报的事件进行询问，对气象状况、地面状况等与蝗虫分布之间的关系进行计算，分析两者之间的时间偏离程度，从而有利于做出蝗虫发生的预测。此外，澳大利亚近年来已建立了基于“3S”技术的决策支持系统(DSS)，该系统以Arcview为平台，并有专门的蝗虫监测模型，目前已在该国蝗虫的监测中获得应用。

目前来看，对农作物其他虫害的遥感监测还没有大的进展。主要有以下几个方面的原因：(1)相对而言，蝗虫所造成的农作物损失比较大，而且分布范围广，与水灾、旱灾一起构成人类的三大自然灾害。(2)蝗虫的发生与生境的关系较为密切，为间接监测提供了良好的基础。因此，今后努力的方向就是在进一步做好蝗虫监测的同时，加强对其他害虫的监测研究。

1.3 目前存在的问题

1.3.1 遥感信息处理技术难以满足应用需要

遥感技术在信息获取方面的发展，主要表现在不断研制出新型的传感器。当前正在发展的新一代传感器有两方面的发展趋势。一是增加更多谱段的遥感数据。例如成像光谱仪，它能在较窄的连续光谱波段内同时获取图像，因此十分有利于在对地观测中提高识别地物反射特征的能力。另一个趋势是发展合成孔径雷达(synthetic aperture radar,简称 SAR)。SAR 的重要特点是具有全天候、全时段、高分辨率等性能，且具有一定的地表穿透能力，它对地质探矿及土壤水分、海洋大气和海水监测都有很好的应用价值。所以，随技术的发展，我们对遥感信息的来源是不用担心的。但问题是，通过遥感传感器获得的地表影像和其他观测数据，需要进一步处理方可应用于各类地表研究。虽然现在已经发展了遥感数字图像处理与信息提取技术，但由于地球表面结构的极其复杂性，而研究者对信息提取的要求越来越高，希望能通过图像处理，来得到许多“不可见”的底层信息，如地表温度，土壤水分等，单纯利用这些技术和方法还是很难达到预期效果。

就目前对农作物病害的研究而言，大都是进行控制性试验，诱导作物发生病害后，进行实地或者室内的各种测量，然后对测量数据进行分析，得出相应的结论。但在实际的生产中，作物发生病虫害时，往往不是一种，而是几种同时发生，这样要在遥感影像上进行区分，进一步的进行分类就会有很大的困难。另一方面，也存在“异物同谱”和“同物异谱”的难题。黄木易等通过试验表明，很难把不同的真菌病害通过高光谱监测区分开来。就目前而言，还没有研究能从遥感影像上区分作物不同的病害。对于虫害而言，由于害虫的个体往往较小，在遥感影像上难于识别，所以目前都采取间接监测的方法，与实际的发生状况有一定差异。只有在提高分辨率的基础上，通过识别技术研究，提高图象识别的智能化水平，才有可能进行大面积的病虫害监测及预警。

1.3.2 生境因子的反演精度不高

因为对虫害的监测是间接监测，因此通过遥感影像反演生境因子的精度对监测结果有着十分重要的影响。从目前的研究进展看，已经建立了一些地面温度、土壤水分等生境因子的反演模型，但反演精度都有待进一步提高。最好能够通过研究，建立起一套标准的反演体系，达到计算机能够自动识别处理的水平，划分出不同的生境模型，为虫害的预警提供良好的支持。提高反演精度，并不意味着就能进行监测了。由于是间接监测，所以就要处理好遥感影像特征、害虫生境因子与害虫发生繁殖之间的关系。但一般来说，这种关系比较复杂，而且因地而异，并不存在一个固定模式。例如，据研究，北非地区沙漠蝗的发生密度与降雨量的多少呈正相关关系；但加拿大艾伯塔省的草地蝗虫则恰恰相反，在降雨量超过平均值的地区草地蝗虫的密度趋于降低，这种情况与我们研究的我国环青海湖地区的情况相类似。

1.3.3 病虫害发生等级与遥感影像之间的关系尚不明确

从目前的研究进展看，还没有建立起作物病虫害发生等级与相应遥感影像之间的关系。但这作为监测来说很重要。病虫害是一个相对的概念，只有当病虫害危害的经济损失超过了防治所花费的费用，才能认为发生了病虫害，因此有必要针对不同的病虫害，建立一个合理的经济阈值，将其在遥感影像的特征提取出来，建立起病虫害的预警机制，从而达到监测的目的。再就是可以通过历史数据，结合病虫害所造成的经济损失建立起各种病虫害的灾害等级，再与同期的遥感影像结合起来，针对不同的等级，在遥感影像上建立起相应的识别特征，为灾害评估打好基础。

1.4 发展趋势

虽然遥感技术有着前述的若干优点，但仅依靠遥感技术难以很好的完成对农作物病虫害的监测。因为监测的目的是为了预警，这就需要在遥感的基础上结合地理信息系统和全球定位系统，对病虫害发生的地点，范围以及可能的发展趋势进行预测。全球定位系统可以准确的确定病虫害发生的地点。空间定位是否准确，直接影响到病虫害发生面积的确定以及病虫害造成损害的计算和制定相应的防治计划。地理信息系统（GIS）是指采集、存储、分析和显示地理信息的计算机系统，是处理和分析大量地理数据的一种通用技术。它包含若干软件工具，用于输入、编辑、显示空间型与非空间型的地理数据，采用数据库管理系统（DBMS）有效的存储和管理大量的地理信息，并有许多模型工具支持空间分析与决策。GIS 软件中具有叠加分析、网络分析、邻域分析和缓冲区分析等空间分析功能，而遥感信息都是与空间位置有关的。对于这些空间信息，必需进行空间分析。实际上，在遥感监测农作物病虫害的过程中，空间的概念已经渗透在数据获取、数据提取以及成果输出各个环节。由此可见，传统的病虫害监测方法已经很难解决这一类问题，而处理与空间有关的信息正是遥感、地理信息系统、全球定位系统所构成的“3S”技术的特长。

总之，利用遥感监测农作物病虫害是一个较新的领域，需要更好的进行研究，提高遥感监测的精度，使之能尽早大面积应用于农业生产，建立起可持续的农业生产体系。

1.5 论文总体设计

1.5.1 研究内容

冬小麦条锈病是影响我国小麦产量的一种重要病害，襄樊地区是我国冬小麦条锈病由北向南传播的一个重要拐点，因此，做好襄樊地区冬小麦条锈病的监测工作就有着特殊的意义。本论文拟以此作为研究对象，以求为遥感技术监测农作物病虫害提供一些依据。具体说来，准备开展以下的工作：（1）实地选取样地，分别测量条锈病影响下冬小麦冠层和叶片的高光谱反射曲线，并同时测量健康叶片和冠层，进行比较。（2）测量部分重要的作物生理参数，主要包括叶绿素含量、叶面积指数、温度和土壤水分含量等。（3）研究条锈病影响下冬小麦冠层和叶片的高光谱曲线与作物生理参数之间的关系，确立冬小麦条锈病的诊断波段，并建立其生理参数的反演模型。（4）生境因子的研究。将1980年到2004年襄樊地区冬小麦条锈病的发生程度与同期气象资料进行研究，找出二者之间的关系，从而建立通过生境因子变化监测冬小麦条锈病的方法。（5）遥感影像的监测。通过在遥感影像上提取遥感植被指数，确定出能比较准确反映冬小麦条锈病发生的植被指数，为大面积监测提供参考。

1.5.2 技术路线

见第8页图1-1。首先选择病害区和对照区，分别进行光谱测量，确定冬小麦条锈病的光谱特征。其次，对研究区的气象资料进行分析，确定影响该区域冬小麦条锈病发生程度的生境因子，根据历史资料建立一个预测模型。然后，选择遥感影像，计算植被指数，检验监测效果。

1.5.3 论文结构

全文共分六章。第一章为绪论，介绍本文的研究背景，国内外在相关领域的研究进展，本研究的研究内容和技术路线等。第二章是研究区域的简单介绍。第三章主要探讨高光谱监测冬小麦条锈病的方法，从叶片的光谱特征出发，建立了通过叶片反射率反演叶绿素含量的一个模型，并对冠层的光谱特征进行了定量分析。第四章，对条锈病发生的生境因子进行研究，利用襄樊地区1980年到2004年之间的气象数据，分析其和冬小麦条锈病之间的关系，建立一个通过气温、降水量等生境因子模拟条锈病发生程度的模型。第五章是遥感植被指数监测条锈病的研究。选择一幅适当的影像，先进行分类，再根据分类结果计算不同小麦区的植被指数，与地面资料结合分析。第六章是本研究的结论和讨论。

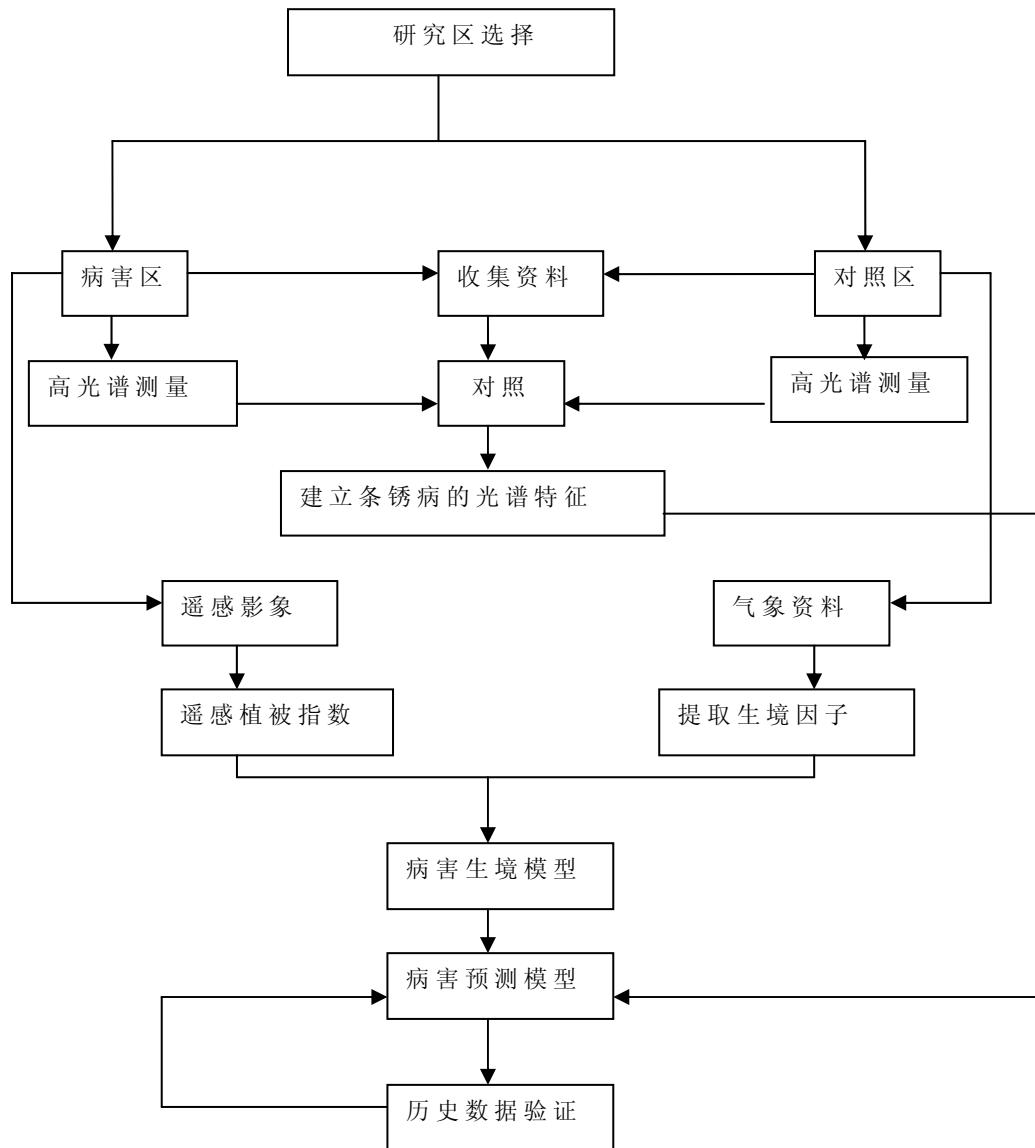


图 1-1 研究总体技术路线
Fig1-1 General flowchart of the whole research

第二章 研究区概况和数据源

2.1 研究区概况



图 2-1 襄樊市政区图
Fig2-1 Map of Xiangfan city

2.1.1 研究区自然环境因素

本研究以襄樊地区作为实验区域。襄樊市位于汉水中游，东经 $110^{\circ}45' - 113^{\circ}43'$ ，北纬 $31^{\circ}14' - 32^{\circ}43'$ ，属南北过渡地带，常年种植小麦在 20 hm^2 。地势自西北向东南倾斜，处于我国地势第二阶梯向第三阶梯过渡地带，全境分为三大地形区。西部山区由武当山脉东端和荆山山脉北段组成，面积 8000 多 km^2 ，海拔 400m 以上，最高点在保康官山，海拔 2000m，既是襄樊全境最高点，又是汉江与长江的分水岭。东部为低山丘陵，面积 1000 余 km^2 ，约占全市的 20%，海拔多在 90 到 250m 之间。西部山区和东部低山丘陵之间的中部广阔地带属岗地平原，面积 4000 km^2 ，约占全市面积的 40%，岗地海拔多在 85 到 140m 之间，沿河冲积平原海拔在 90m 以下，最低点在宜城八角庙。属北亚热带季风气候，冬冷夏热，冬干夏雨，雨热同期，四季分明。全市平均气温除高山外，一般均在 $15 - 16^{\circ}\text{C}$ 之间，1 月 $2 - 3^{\circ}\text{C}$ ，2 月 $15 - 16^{\circ}\text{C}$ ，7 月 $27 - 28^{\circ}\text{C}$ ，10 月 $16 - 17^{\circ}\text{C}$ ，无霜期在 228—249 天之间。全市热量资源不仅丰富，而且具有明显的南北过渡特征，可以说兼备了南北的气候特点。全市年降水量 $820 - 1100 \text{ mm}$ ，大部分集中在夏季。太阳辐射较为丰富，年平均总日照时数为 1800—2100 小时。又由于境内大部分地区处于温度最高、降水最集中、光照最强的季节，正是农作物的旺盛生长季节，故全本

气候资源上的优势，极有利于农业生产潜力的发挥。

2.1.2 研究区冬小麦条锈病的发生情况

虽然气候资源的优势有利于农业优势的发挥。但同时，良好的气候资源对农作物病虫害来说，也提供了比较好的生存条件，所以本地区的农作物病虫害较为严重。对于冬小麦来说，条锈病是影响本地区小麦产量的最重要的一种病害，据调查 2002 年和 2004 年，本地区条锈病的发生程度都达到了 5 级，发生面积超过了种植面积的 80% 以上，严重影响了当年的小麦产量，有的田块防治不力，甚至颗粒无收，损失相当惨重。在农业部组织有关专家制定的《小麦条锈病中长期治理指导意见》中把全国小麦主产区按条锈病的发生规律，划分为越夏区、冬繁区和流行区，明确指出湖北西北部（主要是襄樊），既是条锈病菌越夏区，又是条锈病菌冬繁区，是黄淮海平原流行区的重要菌源基地，所以该区是降低条锈病大面积流行的关键治理区域。由于其地理位置恰好处于南北过渡地带，因而表现为条锈病由南向北传播的一个明显的拐点。做好襄樊地区冬小麦条锈病的监测防治对控制条锈病菌向我国小麦主产区黄淮海平原扩散，控制全国冬小麦条锈病的爆发有着重要意义。

2.2 数据源

本研究的数据来源于以下三个方面：

(1) 实地测量。选择襄樊地区发生条锈病比较多的地方：襄城区的卧龙镇、谷城县的冷集镇和宜城市的郑集镇，进行实地测量，获取高光谱等相关数据。

(2) 收集资料。由襄樊植保站提供了冬小麦条锈病的调查资料，包括条锈病的历年见病日期，小麦种植面积，条锈病发生面积等。气象数据来源于中国国家气象局，主要是研究区气象站点的旬温度、旬降水等数据。

(3) 遥感影像。遥感影像来源于中国科学院地面卫星接收站。选取的是 TM 影像。TM 的数据以景为单位，各景的数据根据卫星轨道号和由中心纬度所确定的行号进行确定。本研究选用的是 2004 年 4 月 8 日 124/38 的一景影像。

第三章 高光谱监测冬小麦条锈病的研究

3.1 研究背景

3.1.1 高光谱的基本概念

高光谱分辨率遥感 (Hyperspectral Remote Sensing) 是指利用很多很窄的电磁波波段从感兴趣的物体获取有关数据。其基础是测谱学 (Spectroscopy)，20 世纪 80 年代开始建立成像光谱学 (Imaging Spectroscopy)。它是在电磁波谱的紫外、可见光、近红外和中红外区域，获取许多非常窄且光谱连续的图像数据的技术。在此基础上就发展了成像光谱仪 (Imaging Spectrometer)，其特点是光谱分辨率高 (<10nm)，波段连续性强，在 400 到 2500nm 之间有几百个波段，能产生一条完整而连续的光谱曲线。图 3-1 展示了成像光谱学的基本概念。这是常规的遥感仪器所无法完成的，常规遥感又称宽波段遥感，波段宽一般为 100nm 左右，且波段在波谱上不连续，并不能完全覆盖整个可见光到红外光的光谱范围。例如一个 TM 波段内只记录一个数据点，而用航空可见光/红外光成像光谱仪 (AVIRIS) 记录着一波段范围的光谱信息需用 10 个以上的数据点，信息量大大增加。有研究表明，许多地表物质 (不是全部) 的吸收特征在吸收峰深度 (band depth) 一半处的宽度为 20 到 40nm (Hunt, 1980)。因此，陆地卫星传感器，像 MSS 和 TM 就无法探测这些具有诊断性光谱吸收特征的物质，因为他们的波段宽度远宽于诊断性光谱宽度。利用高光谱数据则能探测，高光谱数据由足够的光谱分辨率区分出那些具有诊断性光谱特征的地表物质。更为重要的是，高光谱遥感器既能对目标物体成像，又能测量目标物的波谱特性，使得它不仅可以提高对农作物的识别能力，土地覆盖变化的监测能力，还可以用来监测农作物的长势，病虫害情况，反演一些重要的农作物的理化参数，例如可以建立光谱反射率 ρ ， ρ 的变化形式 $1/\rho$ ， $\lg\rho$ 和 ρ 的导数等与叶面积指数 LAI，归一化植被指数 NDVI 及其衍生指数之间的关系，以达到监测作物长势的目的。

3.1.2 高光谱遥感在植被研究中的应用

高光谱遥感数据能大大地改善对植被的识别与分类精度。但据充分利用植被的光谱信息而言，人们可以筛选出植物类型间差异极为明显的波段，利用少数几个窄波段作为植物类型识别与分类的特征波段。同时，光谱分辨率的提高使对作物的生理生态参数进行估算成为可能，如利用高光谱数据估算植被的叶绿素含量、叶面积指数 LAI 等。建立各种从高光谱遥感数据中提取各种生物物理参数、生物化学参数的分析技术从不同的角度可以分为四类。第一类着眼于光谱绝对值 (或其变换形式)，如波段反射率和它们的微分值与不同的生物物理、化学参数的多变量统计回归分析技术，称为统计模型法，是一种比较直接的方法；第二类考察光谱波长位置的变化量与生物物理、化学参数的关系 (比较间接的方法)；第三类是通过一些光学模型来反演一些生物物理、化学参数；第四类是研究各种参数在空间上的变异及其成图技术，涉及一些分类技术和方法。实际上是采用上面的模型方法 (统计，光学模型) 预测生物参数并成图，以分析参数在空间上的分布。(蒲瑞良，宫鹏，2000)

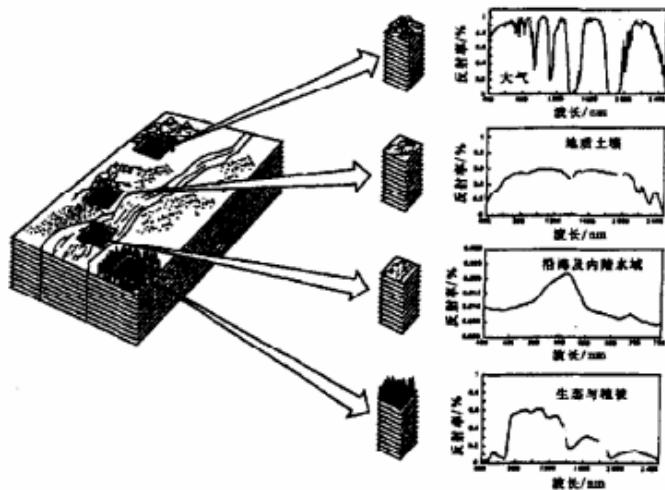


图 3-1 成像光谱学的基本概念
Fig3-1Basic concepts of Imaging Spectroscopy

随着遥感技术的发展,载有丰富波谱信息的高光谱技术被广泛应用,人们就开始探索建立高光谱数据与植物生理参数之间的定量关系。例如,Barry 建立了植被叶子的辐射传输模型(LEAFMOD),给定叶子的厚度和一些光学特性比如叶子吸收和散射系数即可估算叶子的反射和透射系数。反过来,由实测的叶子反射和透射光谱特性即可计算叶子的吸收和散射系数。宋开山等采用回归分析的方式建立了玉米和大豆 LAI 高光谱遥感估算模型,赵祥等做了基于高光谱数据的小麦叶绿素含量反演,都取得了比较理想的结果。

3.1.3 高光谱遥感监测在本研究中的应用

小麦条锈病是危害冬小麦的一种重要病害,具有流行频率高、暴发性强、发生范围广和危害损失大等特点。据统计,1950, 1964, 1990和2002年我国小麦条锈病四次大流行,引起小麦产量的直接损失分别为60亿、30亿、26亿和14亿kg,可见其危害之大。目前,对小麦条锈病高光谱遥感监测研究有了一定的进展,例如,黄木易等人通过研究从理论上证明,在条锈病防治的最佳时期(病叶率<5%),高光谱遥感可以对其进行相应诊断。但这离实际应用还有一段距离。通过对条锈病影响下冬小麦高光谱特征的研究,提取一些重要的生理参数,建立反演的模型,在小麦生长环境分析和长势监测中,将发生重要的作用,对以后进行病害等级评价和损失的评估也具有意义。从目前的研究来看,通常使用高光谱分辨率遥感数据估计植被生理参数主要用两类方法:一是通过多元回归方法建立高光谱数据或由此衍生的植被指数与植被生理参数之间的关系;二是通过红边效应进行分析。所谓红边效应,是指由于植物体内叶绿素吸收作用的影响,植被反射光谱在红到近红外区(660~770nm)出现一个陡峭的爬山脊,称为红边,通过红边的变化能很好的研究植物的健康状况。例如,当植物缺水枯萎时,红边位置将向长波方向偏移(红移),当植物受到病害的影响,叶绿素被大量破坏,红边位置将向短波方向偏移(蓝移)。本研究拟采用回归分析方法,建立条锈病影响下,小麦叶绿素含量的估计模型。叶绿素是吸收光能的物质,对植被的光合作用有着直接的影响。叶绿素含量通常是氮素胁迫、光合作用能力和植被发育阶段的指示器。因而,叶绿素含量是小麦长势监测中十分重要的评估内容。研究表明叶绿素含量和叶片光谱特性之间存在强相关性,在两者之间建立精度较高的估算模型有比较好的基础。但目前针对受病害影响下小麦叶绿

素含量反演的报道,国内外的文献还比较少见,而这对小麦的长势监测有着重要意义。对于冠层光谱,本研究将对其进行定量分析,找出对条锈病敏感的高光谱特征参数。

3.2 材料和方法

3.2.1 光谱测量



图 3-2 ASD FieldSpec 野外便携式高光谱仪

Fig3-2 ASD FieldSpec Held

高光谱的测量选用美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices, ASD 公司) 生产的 ASD FieldSpec 野外便携式高光谱仪, 该仪器可在 350~1050nm 波长范围内进行连续测量, 采样间隔为 1.4nm, 光谱分辨率 3nm, 视场角 25°, 共有 512 个波段。所有的观测均选择在晴朗无风天气, 每次测定时间为北京时 11:00~14:00。测量人员应着深色服装, 以减少测量人员自然反射光对观测目标的影响。在测量过程中, 观测员应面向太阳, 站立在目标区的后方, 记录员等其他人员应站立在观测员的身后, 避免在目标区两侧走动。在高光谱仪的输出光谱设置项中, 每条光谱的平均采样数都不小于 10, 测定暗电流的平均采样次数都不小于 20。每组观测都以对白板开始, 以对白板结束。传感器光纤探头垂直于叶片表面, 距离与对白板时一致, 视场角投影面积完全落在叶面上。在每个样区里选定有代表性的六片叶片, 每张单叶片按 SPAD-502 叶绿素测量步骤, 分叶尖、中部和叶基部三个部位, 各部位测三次, 共测量九次, 每次测量前后都对白板, 最后取其平均作为该叶片的光谱曲线。

3.2.2 叶绿素含量的测定



图 3-3 美能达 SPAD-502 叶绿素测量仪
Fig3-3 Minolta Chlorophyll SPAD-502

叶绿素含量的测定选用美能达 SPAD-502 叶绿素测量仪，它是一种外形小巧，对植物无破坏性的叶绿素含量测定仪。美能达 SPAD-502 叶绿素测量仪的测量方法：由叶片从上而下，分叶尖、中部和叶基部三个部位左右两侧各测量三次，最后取其均值作为该叶片的叶绿素含量。

3.2.3 数据获取与分析方法

2006 年 4 月下旬在已经发病的典型区域进行实地测量，建立起冬小麦条锈病与其高光谱反射波谱的对应关系，并进行验证。在襄城区的卧龙镇、谷城县的冷集镇、宜城的郑集镇选择了三个病害小区，每个小区随机选择了六个典型发病点进行了光谱和叶绿素的测量。同时相应选择健康小区作为对照。最后在卧龙镇再选一个病害小区，测量六个点，作为验证使用。在每个点，既测量叶片的反射波谱，也测量冠层的反射波谱。叶绿素含量以及叶片冠层的光谱曲线都是取测量的平均值，以求结果的相对准确。

本研究以 ASD viewspecpro 软件处理光谱数据，以 Excel2003 和 SPSS11.5 处理各类数据之间的关系。

3.3 病害叶片的研究

3.3.1 叶绿素含量差异性分析

对受病害影响的冬小麦叶片与健康叶片叶绿素含量进行方差及差异显著性检验,发现病害组叶片叶绿素含量比健康组要低的多(表3-1)。

表 3-1 病害叶片与健康叶片叶绿素含量的比较
Table 3-1 Chlorophyll content of disease leaf compares with health leaf

类别	均值	最小值	最大值	标准差
病害叶片	24.825	17.7	31.7	4.2388
健康叶片	41.717	36.2	47.1	2.8967

从叶绿素含量的测量结果可以看出,健康叶片和受病害影响叶片的叶绿素差异很大,所以在基于高光谱数据的叶绿素含量反演上也应该建立针对条锈病影响的模型。

3.3.2 病害影响下叶片的光谱特征分析

健康绿色植物的波谱特征主要取决于它的叶子。在可见光波段内,植物的光谱特性主要受叶的各种色素的支配,其中叶绿素起着最重要的作用。叶绿素有两个明显的吸收峰,一个位于以450nm为中心的蓝光区(400~500nm),另一个位于以670nm为中心的红光区(600~700nm),由于叶绿素强烈吸收辐射能而呈吸收谷,在这两个吸收谷之间,吸收相对减少,形成绿色反射峰。因而光谱曲线总是呈现明显的“峰”和“谷”,这是健康作物的光谱特性。由于叶片受病害的影响,叶绿素被大量破坏,因而在光谱特征上与健康作物有很大不同。就红边而言,会出现“蓝移”。受条锈病影响后冠层的光谱特征表现为可见光谱(400~700nm)反射率上升,近红外谱段(700~1300nm)反射率下降,但单个病害叶片的光谱特征与此有一定的差异。有研究表明,单叶光谱与冠层水平光谱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。把所有病害叶片的高光谱曲线取平均,与健康叶片光谱进行比较,通过对比找出条锈病影响后,叶片光谱特征的变化特征,由此得到对条锈病敏感波段,为建立叶绿素的估算方程做基础。由图3-4可以看出,从可见光到近红外波段,病害叶片的反射率都比健康叶片要高。特别是在550nm附近,病害叶片的反射率比正常叶片要高的多,这是因为,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,在光谱上就表现为可见光反射率增加,差异极显著,440nm~725nm为敏感波段区域。另外,对健康叶片和病害叶片的光谱曲线取一阶微分,也可以很明显的看出红边的“蓝移”现象。图3-5是一阶微分后病害叶片与健康叶片的反射率曲线。健康叶片的红边位置在731nm,病害叶片的红边位置在728nm,红边“蓝移”了3nm,由此也可以看出病害叶片与水肥胁迫导致的叶片发黄在反射光谱上存在很大差异。一般而言,农作物因缺乏营养和水分而生长不良时,海绵组织受到破坏,叶子的色素比例也发生变化,使得可见光区的两个吸收谷部明显,整个反射光谱曲线被拉平。就红边位置来说,就是向长波方向偏移,出现“红移”。这也说明,利用高光谱对农作物进行长势监测,是可以把病害胁迫和水肥胁迫区分开的。由光谱曲线的差异,可以寻找和病害叶片相关性好的波段,以此来进行回归分析,从而建立病害叶片的叶绿素含量的反演模型。在文中,主要采用单波段、多波段的光谱反射率与叶片叶绿素含量做单变量或多变量的统计回归分析。最后,通过验证,得出较好的叶绿素含量估算模型。

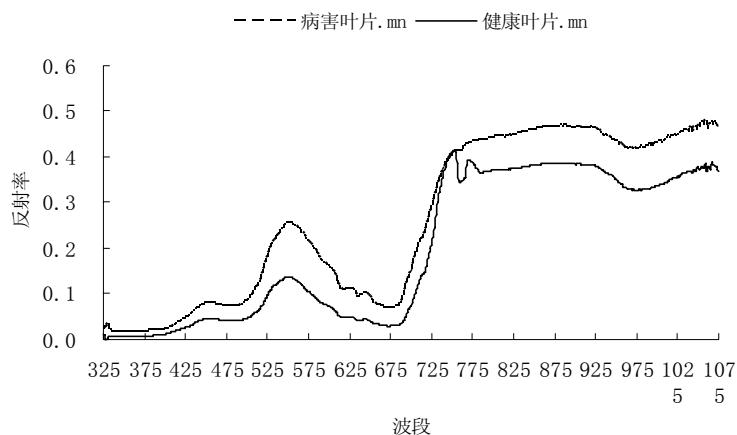


图 3-4 病害叶片与健康叶片的反射率曲线
Fig 3-4 Reflectivity curve of disease leaf and health leaf

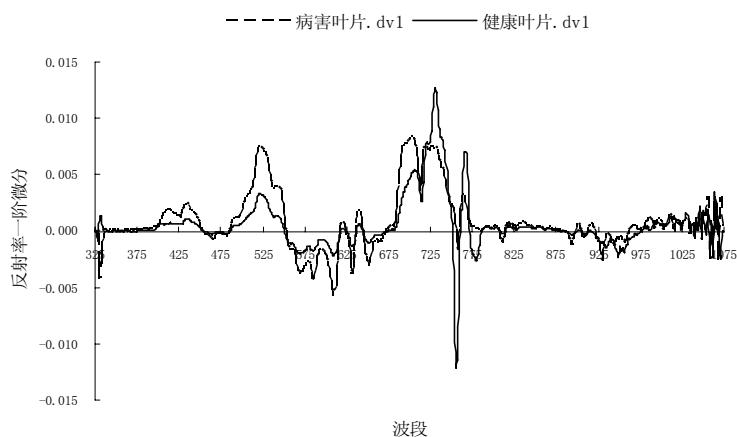


图 3-5 一阶微分后的病害叶片与健康叶片的光谱曲线
Fig3-5 Spectrum curve of health leaf and disease leaf after 1st derivative

3.3.3 病害叶片的叶绿素含量与单波段反射光谱的关系

在分析单波段光谱反射率与病害叶片叶绿素含量的相关关系时,基本是从蓝、绿红边的顺序依次分析各波段反射率对病害叶片叶绿素含量的预测能力。由表 3-2 可以看出,在蓝光波段区,随着波长的变化,病害叶片反射率与叶绿素含量的相关性有所不同,但其确定性系数都在 0.4 左右。通过对比确定性系数 R^2 发现,线性回归方程与非线性回归方程的回归效果区别不大。这也说明蓝光区单波段反射率预测病害叶片叶绿素含量的能力很有限。

表 3-2 蓝光区不同波长反射率与病害叶片叶绿素含量的回归方程

Table3-2 Regression equation reflectivity and chlorophyll content of disease leaf at different wavelength in blue

波长(nm)	非线性回归方程	确定性系数 R^2	线性回归方程	确定性系数 R^2
400nm	$y=10.163x^{-0.2655}$	0.3401	$y=-219.15x+33.092$	0.3703
430nm	$y=12.125x^{-0.2895}$	0.4012	$y=-89.011x+32.999$	0.4137
450nm	$y=13.784x^{-0.2821}$	0.4038	$y=-56.705x+32.558$	0.4077
470nm	$y=13.808x^{-0.2717}$	0.407	$y=-57.069x+32.111$	0.4029
500nm	$y=14.17x^{-0.2682}$	0.4391	$y=-51.554x+31.924$	0.428

通过对绿峰光谱区光谱反射率与病害叶片叶绿素含量的相关性分析,发现从515nm到540nm,相关系数都在0.7以上,其中以527nm最高,达到了-0.71866。图3-6是以527nm处光谱反射率与病害叶片的叶绿素含量做的线性回归分析图解。图3-7是以527nm处光谱反射率与病害叶片叶绿素含量做的非线性回归分析图解。由确定性系数R²可以看出,比蓝光波段的预测能力要好一些,但仍旧偏低。

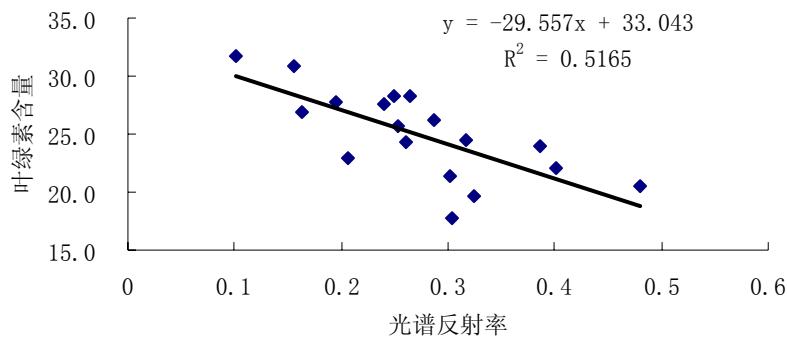


图 3-6 527nm 处线性回归分析

Fig3-6 Linear regression in 527nm

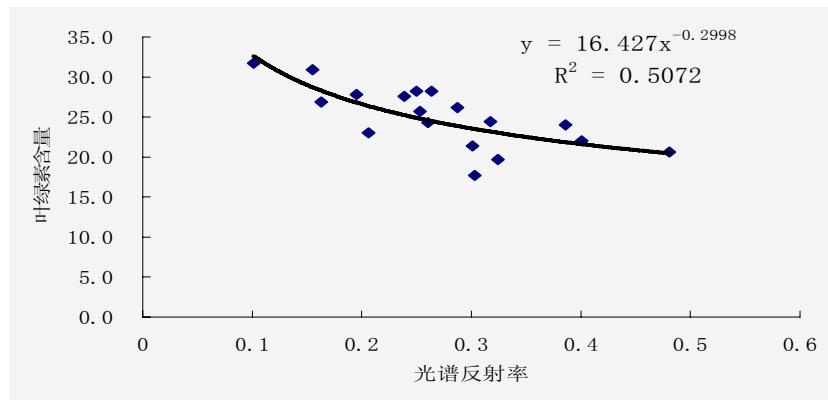


图 3-7 527nm 处非线性回归分析

Fig3-7 Nonlinear regression in 527nm

红边(700~744nm),是植被高光谱遥感研究的重点区域,一些植被遥感模型的建立也是根据此光谱区的反射特征来进行的。前面已经述及,由于受病害的影响,叶绿素被破坏,所以出现“红边”蓝移的现象。表3-3是对红边区不同波长反射率与病害叶片叶绿素含量进行回归分析得到的结果。

表 3-3 红边区不同波长反射率与病害叶片叶绿素含量的回归方程

Table3-3 Regression equation of reflectivity and chlorophyll content of disease leaf at different wavelength in red

波长(nm)	非线性回归方程	确定性系数R ²	线性回归方程	确定性系数R ²
700nm	$y=17.257x^{-0.2262}$	0.3782	$y=-28.003x+31.188$	0.3845
710nm	$y=17.088x^{-0.3012}$	0.3992	$y=-26.57x+33.183$	0.4158
720nm	$y=15.937x^{-0.4015}$	0.4094	$y=-34.264x+36.797$	0.4577
730nm	$y=14.861x^{-0.5805}$	0.4406	$y=-37.666x+40.909$	0.4828
740nm	$y=15.029x^{-0.7142}$	0.4122	$y=-36.16x+43.19$	0.4384

从表 3-3 的分析结果可以看出来, 无论是进行线性回归分析, 还是进行非线性回归分析, 确定性系数 R^2 都不超过 0.5。比较回归效果, 可以看到与表 3-2 中的结果一样, 线性回归的效果相对好些。

通过以上对单波段光谱反射率与病害叶片叶绿素含量的回归分析, 可以得出结论, 利用单波段光谱反射率反演病害叶片的叶绿素含量的精度较差。那么就应该考虑进行多波段反射光谱的回归分析。

3.3.4 光谱测量病害叶片叶绿素含量与多波段反射光谱回归分析

Blackburn 提出了特定色素简单比值指数(PSSR)和特定色素归一化差值指数, 用到的波段有 470nm, 635nm, 680nm, 800nm, 分别估计叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素。另外, 在反射率中, 病害叶片与健康叶片差值最大处在 550nm。也将其引入方程, 进行回归分析。这样就可以利用更多波段的信息, 在不同的波段信息中取长补短, 尽可能提高模型的精度。具体说来, 就是以叶绿素含量为因变量, 取前面所确定的最优波段 470nm、550nm、635nm、680nm、800nm 的反射率为自变量进行逐步回归分析。采用 SPSS 统计分析软件进行分析。得到的结果如下:

$$Y=46.192-186.304R_{470}+19.116R_{550}-318.574R_{635}+447.491R_{680}-23.991R_{800} \quad (2-1)$$

其中 $R^2=0.81$, 回归效果还比较理想。

3.3.5 模型的检验

模型精度主要是通过估算值与实测值的相关系数(r)和估算值的误差均方根 RMSEP(Root Mean Square Error Predict)来验证。RMSEP 计算公式为:

$$RMSEP=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{n}} \quad (2-2)$$

式中: Y_i, y_i 分别为估算值和实测值。

估算的结果表明: 方程 (2-1) 的叶绿素估算值与实测值相关系数为 0.867, RMSEP 为 2.98。这个结果说明模型的精度较好。可以用来估计条锈病影响下冬小麦的叶绿素含量, 来达到监测的目的。

3.4 病害冠层的研究

3.4.1 病害影响下冠层的光谱特征

单叶的光谱行为对植被冠层光谱特性是重要的, 但并不能完全解释植被冠层的光谱反射。植被冠层是由许多叶片组成的, 这些叶片的大小, 形状等是变化的, 会对植被冠层的光谱特性带来影响, 所以在分析了病害叶片的光谱特性以后, 有必要再分析一下病害冠层的光谱特性, 比较它与健康冠层之间的差异, 为进行病害监测提供依据。对正常生长的冬小麦和受条锈病影响下的冬小麦分别进行冠层反射光谱的测量。测量方法与测量叶片不太一样。针对冠层的光谱测量, 应将探头高度保持在 1.3m 左右, 以确保光谱数据的连续可比性和准确反映相同尺度下作物冠层信息

的动态变化，在田间作物覆盖度小于90%时，应加测目标区土壤光谱，以正确估计土壤对冠层的光谱贡献。通过病害影响下冬小麦的冠层光谱特征与健康冬小麦冠层光谱特征之间的差异，找到诊断冬小麦条锈病的高光谱特征参数。

从图3-8可以看出，与健康冠层相比，条锈病影响下病害冠层的反射率曲线表现为：从可见光到近红外区，病害冠层的光谱反射率低于健康冠层，过了近红外区之后，则表现为病害冠层的光谱反射率高于健康冠层，这与其他研究者的研究结果也是一致的。这应该是条锈病发生后，冬小麦叶绿素含量减少、水分减少、氮素含量的减少与叶片褪绿发黄等外观及生理变化在光谱特征上的综合响应。

大多数土壤的光谱反射率几乎都可以用一个线性函数表示，所以从理论上讲，利用导数光谱，可以很好的消除土壤背景的影响，还能部分消除大气效应的影响。因此，导数光谱已被广泛应用于削弱大气散射和吸收对目标物光谱特征的影响，以及作物水分和病害胁迫下光谱特征研究等。

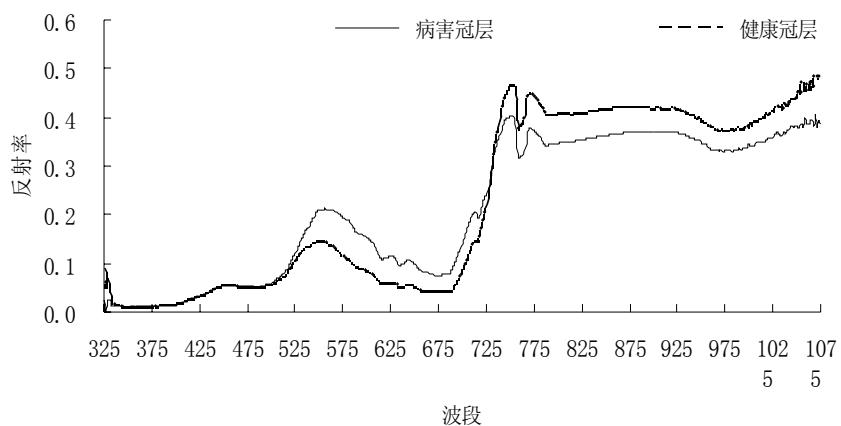


图 3-8 病害冠层与健康冠层的反射率曲线

Fig3-8 Spectrum curve of health canopy and disease canopy

图3-9是病害冠层和健康冠层的一阶导数光谱。根据前人的研究，当绿色植物生长旺盛时，叶绿素含量高，红边会向长波方向移动，称为“红移”，当植物由于病虫害或者物候变化“失绿”时，红边会向短波方向移动，称为“蓝移”。但图3-9上却并没有表现出明显的“蓝移”，这一点有些令人疑惑。笔者估计可能是如下两个原因造成的：(1)由于人为或天气的影响，高光谱的测量不是十分准确；(2)病害的程度或许还没有达到“蓝移”的程度。由于客观条件的限制，笔者也不可能进行连续的观测，但根据黄木易等的研究，病情指数逐渐变大时，冠层光谱的红边发生“蓝移”，当病情指数较低时，则“蓝移”不明显。从这个角度来说，我们的测量结果还是可以接受的，冠层光谱的红边没有发生“蓝移”，应该是病情指数还不够高。对于冠层的研究应该比单叶片更有意义，因为在遥感影像上所反映的作物信息，是冠层水平上的综合反映。因而，对冠层的高光谱特征不仅要进行定性的分析，还应该进行定量分析，找到能够从遥感影像上提取出来的特征参数，这对我们利用遥感技术进行大面积的病虫害监测具有很重要的意义。从冬小麦条锈病的监测来说，我们准备选择一些高光谱特征参数，进行定量比较，从中找出能够反映条锈病发生状况的特征参数，为以后大面积监测提供参考依据。

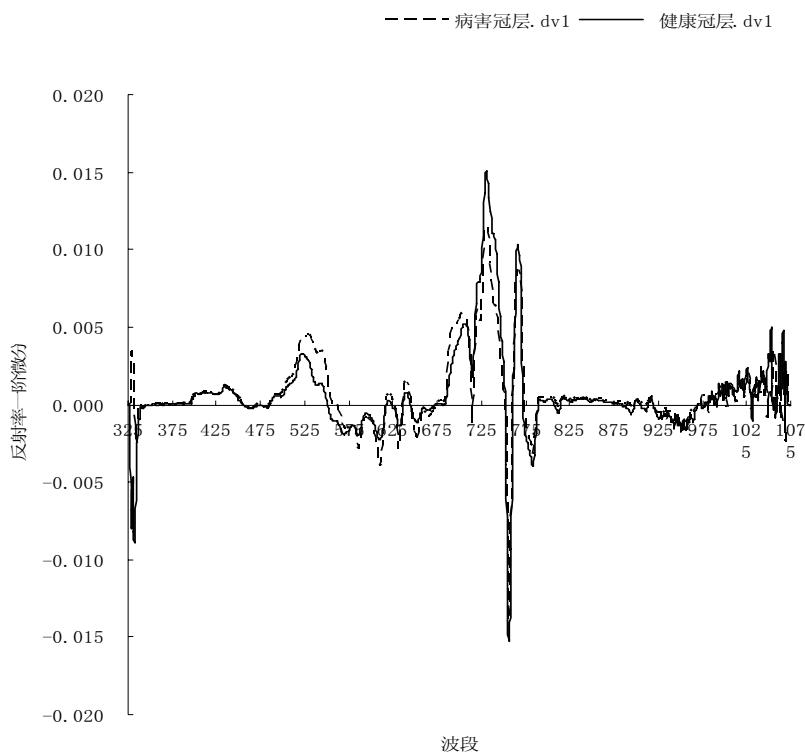


图 3-9 一阶微分后病害冠层与健康冠层的光谱曲线

Fig3-9 Spectrum curve of health leaf and disease leaf after 1st derivative

3.4.2 冠层光谱特征的定量分析

从原始光谱以及导数光谱出发, 可以提取基于高光谱的位置变量、面积变量、植被指数等, 通过高光谱特征参数, 对病害冠层和健康冠层的光谱差异进行定量分析, 以找到最能反映病害光谱特征的参数。在建立高光谱特征参数时, 通常选择植被的“峰—谷”特征点, 采用导数光谱技术提取这些特征点的信息。导数光谱能够部分消除土壤背景、太阳高度、大气、地形等因素的影响, 能主要反应植物中叶绿素吸收光产生的反射曲线的变化, 能明显地表示各重要波段光谱特征的差异。常见的高光谱数据特征参数(蒲瑞良, 宫鹏, 2000)如表 3-4 所示。包括从原始光谱和一阶微分光谱提取的基于光谱位置变量、基于光谱面积变量和植被指数变量。本研究拟使用这些变量。

通过对这些变量的定量分析, 比较出能够比较好的反映出病害叶片与健康叶片差异的高光谱特征参数。具体说来, 就是看病害叶片与健康叶片相比, 发生变化的差异率, 差异率大, 就反映出这个特征参数对病害的变化比较敏感。不过, 这里应该指出的是, 因为我们的高光谱曲线是在襄樊地区实地测量的, 所以从这个数据推出的结果, 也就是我们最后所确定的高光谱特征参数是否适用于其它地区, 有待进一步验证。

表 3-4 冠层光谱特征定量分析所使用的变量

Table 3-4 The variables of the quantitative analysis of canopy spectral characteristics

基于光谱位置变量		
变量	定义	描述
Db	蓝边内最大的一阶微分值	蓝边覆盖 430~470nm, Db 是蓝边内一阶微分波段中最大波段值
λ_b	Db 对应的波长	λ_b 是 Db 对应的波长位置 (nm)
Dy	黄边内对应的一阶微分值	黄边覆盖 550~590 nm, Dy 是黄边内一阶微分波段中最大波段值
λ_y	Dy 对应的波长	λ_y 是 Dy 对应的波长位置 (nm)
Dr	红边内最大的一阶微分值	红边覆盖 620~760nm, Dr 是红边内一阶微分波段中最大波段值
λ_r	Dr 对应的波长	λ_r 是 nm
Dinr	近红外平台最大的一阶微分值	近红外平台覆盖 780~1300 nm, Dinr 是近红外平台一阶微分光谱中的最大值
λ_{inr}	Dinr 对应的波长	λ_{inr} 是 Dinr 对应的波长位置 (nm)
Rg	绿峰反射率	Rg 是波长 500~560nm 范围内最大的波段反射率
λ_g	Rg 对应的波长	λ_g 是 Rg 对应的波长位置 (nm)
Ro	红谷反射率	Ro 是波长 640~680nm 范围内最小的波段反射率
λ_o	Ro 对应的波长	λ_o 是 Ro 对应的波长位置 (nm)

基于光谱面积变量		
变量	定义	描述
SDb	蓝边内一阶微分值的总和	蓝边波长范围内一阶微分波段值的总和
SDy	黄边内一阶微分值的总和	黄边波长范围内一阶微分波段值的总和
SDr	红边内一阶微分值的总和	红边波长范围内一阶微分波段值的总和
SDinr	近红外平台一阶微分值的总和	近红外平台波长范围内一阶微分波段值的总和

基于高光谱植被指数的变量	
变量	定义及描述
SDr/ SDb	红边内一阶微分的总和与蓝边内一阶微分的总和的比值
SDinr/ SDb	近红外平台内一阶微分的总和与蓝边内一阶微分的总和的比值
SDinr/ SDr	近红外平台内一阶微分的总和与红边内一阶微分的总和的比值
$(SDr - SDb) / (SDr + SDb)$	红边内一阶微分的总和与蓝边内一阶微分的总和的归一化值
$(SDinr - SDb) / (SDinr + SDb)$	近红外平台内一阶微分的总和与蓝边内一阶微分的总和的归一化值

本研究从健康冬小麦和病害冬小麦冠层的原始光谱和一阶微分光谱分别提取上述 21 种高光谱特征参数，并对提取的结果进行分析。结果如表 3-5。

表 3-5 健康冠层与病害冠层的高光谱特征参数比较

Table 3-5 Comparison of the hyperspectral characteristics parameters for disease and health canopy

变量	健康冠层 (V1)	病害冠层(V2)	V1-V2	变化率 (%)
Db	0.0032873	0.0044783	0.001191	36.23
λ_b	523 nm	528 nm	5 nm	0.96
Dy	0.0002901	0.0016787	0.0013886	478.66
λ_y	550 nm	550 nm	0	0
Dr	0.0150674	0.0114878	0.0035796	23.76
λ_r	731 nm	731 nm	0	0
Dinr	0.0049150	0.0035313	0.0013837	28.15
λ_{inr}	1053 nm	1056 nm	3 nm	0.3
Rg	0.1448984	0.2116528	0.0667544	46.07
λ_g	551 nm	556 nm	5 nm	0.91
Ro	0.0390587	0.0753396	0.0362809	92.89
λ_o	672 nm	674 nm	2 nm	0.3
SDb	0.0245813	0.021649	0.0029323	11.93
SDy	0.0557358	0.0526657	0.0030701	5.51
SDr	0.5350884	0.4669246	0.0681638	12.74
SDinr	0.2215728	0.172265	0.0493078	22.25
SDr/ SDb	21.76811	21.56795	0.20016	0.92
SDinr/ SDb	9.01388	7.95718	1.0567	11.72
SDinr/ SDr	0.41409	0.36894	0.04515	10.9
(SDr-SDb) / (SDr+SDb)	0.91216	0.91138	0.00078	0.09
(SDinr-SDb) / (SDinr+SDb)	0.80028	0.77672	0.02356	2.94

从表 3-5 对高光谱特征参数的分析结果, 可以看出, 较之正常健康生长的冬小麦, 受条锈病影响的冬小麦冠层光谱发生了如下变化:

- (1) 蓝边位置向长波方向偏移了 5 nm, 产生了“红移”;
 - (2) 黄边位置没有发生变化, 但幅值变大, 变化率高达 478.66%, 说明在黄边位置, 冠层的反射率发生很大变化, 可以作为反映条锈病的一个特征参数。
 - (3) 红边没有出现“蓝移”, 近红外平台向长波方向移动了 3 nm, 同时幅值都变小, 变化率都在 20%以上。
 - (4) 绿峰的反射峰高度由 0.14 上升到 0.21, 并且位置向长波方向偏移了 5 nm, 红谷的吸收深度由 0.04 上升到 0.08, 位置向长波方向偏移了 2 nm。
 - (5) 在基于面积的变量中, 总的来说, 都是面积减少, 但以近红外平台减少最为明显。这说明: 近红外波段的总体反射率降低。
 - (6) 在基于植被指数的变量中, SDr/ SDb 和 SDinr/ SDb 的变化率较大, 都在 10%以上, 说明这两个变量对条锈病影响的叶片较为敏感。
- 产生上述变化的原因, 主要是由于病害胁迫后, 冬小麦叶绿素含量明显低于正常值, 因而蓝光波段和红光波段对叶绿素的吸收降低。近红外波段的变化是由于叶片组织结构被病害破坏, 含水量减少等带来的结果。
- 通过上面的定量分析, 可以得出结论, 在对冬小麦条锈病进行高光谱监测时, 可以选择 Db、Dy、Dr、Dinr、Rg、Ro、SDr/ SDb 和 SDinr/ SDb 作为高光谱特征参数, 进行条锈病的诊断, 叶绿素含量的反演等。

3.5 本章小结

本章主要是研究了高光谱监测冬小麦条锈病的途径。通过对健康叶片与病害叶片的叶绿素含量、光谱曲线的比较，建立了一个叶绿素含量的估算模型。经过验证，具有比较好的精度。通过对健康冠层和病害冠层反射光谱的定量分析，找出了可以作为条锈病诊断的高光谱特征参数，可以作为监测的依据。对叶片和冠层的高光谱监测结果表明，通过监测可以判定出叶片受病害影响的程度，通过提取高光谱特征参数，找到了诊断条锈病的高光谱特征参数，这就为在成像高光谱上监测冬小麦条锈病打下了基础。

第四章 冬小麦条锈病生境因子监测的研究

4.1 研究背景

4.1.1 生境的概念

关于生境(habitat)的概念，不同的学者有着不同的看法。

美国人 Grinnell 于 1917 年最先提出了生境的概念，认为生境是指生物的居住场所，即生物个体、种群或群落能在其中完成生命过程的空间。

E.P.Odum 将生境比喻为生物的“住址”，可以是一种生物，多种生物，也可以是生物群落。可以简单理解为生物生活的地方。

《现代地理学辞典》是这样解释生境的。生境，又称栖息地。具有一定环境特征的生物生活或居住地。如变形虫(Amoebaproteus)的生境为清水池塘或水流缓慢藻类较多的浅水处。生境也可为整个群落占据的地方，如芦苇沼泽群落的生境是在世界各地潮湿的沼泽中。生境是由生物和非生物因子综合形成的。

倪绍祥等认为，生态学上的生境是指生物的个体、种群或群落所在的具体地段或完成生命过程的空间。生境内包括生物所必需的生存条件和其他生态因素。一个生物种群生活的地方及其周围环境，无论是生物的，还是非生物的，都是该生物种群的生境。

由上述对生境概念的解释，我们可以看到，生境一词，不同于环境，它是一个重要的生态学概念，是生物生活的空间和其中全部生态因子的总和。对于生物来说，生境是提供最直接的生活条件的场所。相对于环境来说，对生物有着更直接的实际意义。生境一词，也不同于生态位，但两者的概念容易混淆，常有人把生态位作为生境的同义词使用。E.P.Odum 认为，生境如理解为生物的“住址”，生态位就是生物的“职业”。R.H.惠特克指出，生境是指物种能够生存的环境范围，侧重于生物分布；生态位则指物种在种群中的作用，侧重于生物功能。

具体的生境因子包括光照、温度、水分、空气、无机盐类等非生物因子和食物、天敌等生物因子。生境一词，多用于类称，概括地指某一类群的生物经常生活的区域类型，并不注重区域的具体位置，但也可以用于特称，具体指某一个体、种群或群落的生活场所，强调现实生态环境。一般描述植物的生境常着眼于环境的非生物因子(如气候、土壤条件等)，描述动物的生境则多侧重于植被类型。

4.1.2 农作物病虫害生境监测的进展

前已述及，监测农作物的病虫害可以从两个方面着手，一是直接进行监测，二是进行间接监测。那么，生境监测的方法就是一种间接监测的方法。通过研究生境因子与农作物病虫害发生的关系，可以对病害虫害的发生和成灾进行预测。从地区上来说，有的地方连续数年会出现某种病虫害大规模爆发，即使连年进行治理也没有太好的效果。而有的地方却很少发生，即使发生了，经过一次治理可能就能解决问题。这时，就该考虑生境因子与病虫害的关系了，以掌握病虫害的时空变化规律和发生机理。

从目前的研究进展看，在研究导致蝗虫发生和成灾的生境因子做了大量研究。他们采用不同

方法和从不同角度进行了研究。如研究蝗虫的发生与气温、降水等气候因素的关系，地区植被类型和特征与蝗虫空间分布的关系，放牧等人类活动对蝗虫发生的影响。倪绍祥等在前人研究的基础上，详尽分析了气候因子、地形因子、土壤因子、植被因子和人类活动与草地蝗虫的发生关系，并对环青海湖地区草地蝗虫生境进行了遥感分类与评价，建立了预测模型和遥感与 GIS 支持下的测报方法，取得了比较理想的研究效果。这就说明，通过生境因子的变化监测农作物病虫害时比较有潜力的。

4.1.3 生境监测在本研究中的应用

在本研究中，我们是借鉴生境因子这样一个提法，条锈病是低温、高湿、强光型真菌性病害，目前在谈及生境因子时，主要是针对动植物，对真菌明确提出这一点的很少。但也有学者进行了研究，发现条锈病的发生传播与气候之间存在一定的相关性。笔者认为，真菌的生存和传播也有自己的适宜条件，所以研究这个适宜条件，也就是生境因子，对预测冬小麦条锈病的发生是有一定意义的。从目前遥感技术的发展来看，反演地表温度和土壤含水量有了比较长足的进步，所以本研究想主要探讨气温、降水量与条锈病发生程度之间的关系，建立起气温、降水量与条锈病发生程度之间的关系，为预测条锈病的发生奠定基础。

4.2 研究数据和方法

4.2.1 研究数据

根据前面关于生境因子的概念，应该包括光照、温度、水分、空气、土壤、地形等诸多因素，就本研究来讲，甚至作物品种对条锈病的发生也有很大的影响。但考虑到条锈病菌低温、高湿的特点，主要研究气温、降水量与条锈病发生程度之间的关系。襄樊植保站的综合分析也表明，从 1980—2004 年 25 年之间系统监测资料可以得出结论，第二年发生程度与秋冬菌源有着密切的关系。一般在条锈病大流行年份，冬前秋苗条锈病见病较早。从 1980 年至 2004 年 25 年间，3 级以上程度发生的有 11 年，其中 8 年为 12 月 15 日之前见病；5 级发生的有 5 年，均为 12 月 24 日前见病。而秋冬菌源基数则与气温、降水量有很密切的关系。因此，通过对气温、降水量的分析，是可以起到预测条锈病发生程度的目标的。研究材料拟采用襄樊植保站 1980—2004 年之间的条锈病调查资料和 1979—2004 年之间襄樊地区的气象资料。图 4-1 是襄樊地区 1980—2004 年冬小麦条锈病的发生面积与种植面积的对比（单位为 $h\text{km}^2$ ），表 4-1 是冬小麦历年见病期与发生程度的统计数据。从图 4-1 和表 4-1 中，我们可以看到，最近五年中，襄樊地区冬小麦条锈病出现了爆发的趋势，在 2002 年和 2004 年的发生面积超过了 80%，今年根据农业部公布的情况，发生程度也比较高，这说明近年来，条锈病菌发生了一些变化，这应该和全球气候变化以及环境的变化，还有条锈病病菌自身的生态适应等都有一定的联系。由此，我们认为，加强对生境因子的研究，有利于掌握条锈病的变化规律，有利于提早做好防治的准备，有利于确保粮食产量。但在本研究中，由于种种条件的限制，我们仅研究了气象因子中气温、降水量与条锈病发生率之间的关系。在实际中，影响条锈病的生境因子是比较的，例如风向、地形等，所以要想建立精度较高的预测模型，就应该考虑如何把这些因子考虑进去。

表 4-1 冬小麦条锈病历年见病期与发生程度

Table 4-1 The occurrence degree and the period of the winter-wheat yellow rust occurrence

年份	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988
见病(月/日)	2/24	12/24	3/28	12/11	12/12	11/30	11/30	1/10	12/21
发生程度	2	2	1	3	5	4	2	1	1
年份	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
见病(月/日)	1/10	11/13	12/14	12/10	12/10	1/10	3/2	3/16	12/10
发生程度	1	5*	3	1	3	1	1	1	5
年份	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004		
见病(月/日)	11/18	12/15	12/16	2/8	12/24	3/25	12/3		
发生程度	1	1	1	4	5*	4	5*		

备注: (1) 表中月/日中的 11 月和 12 月代表上一年的秋冬季节的月份。(2) 表中 5* 表示发生面积超过种植面积 80% 的特大发生年份。

单位: hm^2

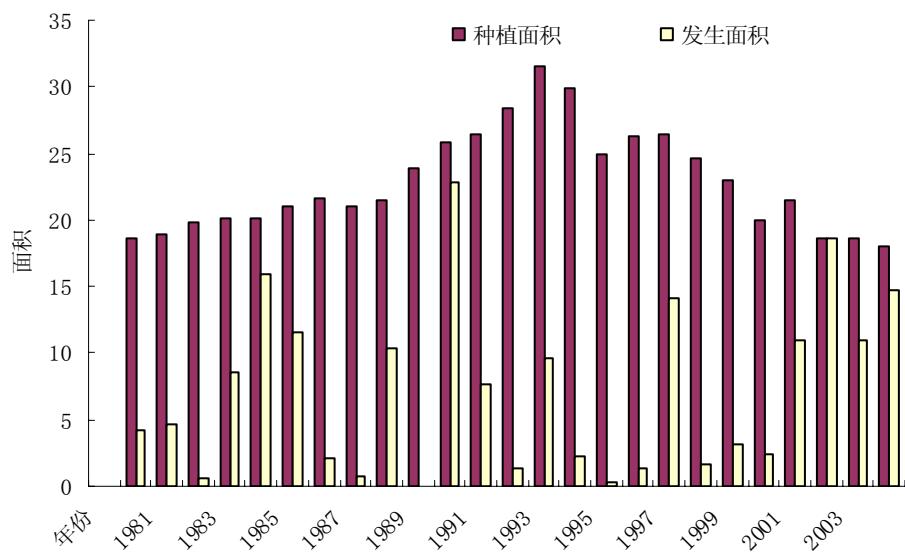


图 4-1 襄樊地区 1980—2004 年冬小麦条锈病发生图
Figure 4-1 Map of winter-wheat yellow rust Occurrence in 1980—2004 in Xiangfan

4.2.2 研究方法

襄樊地区条锈病流行分为六个时期: 秋苗感染期、冬季潜伏繁育期、早春扩展蔓延期、春季爆发流行期、春末夏初衰退期和病菌高山越夏期。根据这个流行特点, 研究某年发病程度与气象指标的关系时, 就选取上一年的 5 月到这一年的 4 月的气象数据进行分析。经过襄樊植保站多年观测, 认为条锈病的发生程度主要和气温及降水量有着密切关系。所以, 本研究拟先分析气温与降水量因子与条锈病发生率(发生面积占种植面积的百分比)之间的相关性, 选取相关性高的因子作为自变量, 以条锈病发生率为因变量, 建立它们之间的回归关系, 作为预测条锈病发生的一种方法。具体说来, 就是以 1979 年到 1999 年的气温、降水量中相关性高的因子作为自变量, 条锈病发生面积作为因变量建立起回归方程, 再利用 2000 年到 2004 年的数据对方程进行检验。确

定预测条锈病发生率的模型。

4.3 研究结论

4.3.1 气温、降水量与病害发生率的相关性

在气温因子中，分别选取月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温与条锈病发生率进行相关分析。结果如下(图 4-2)。

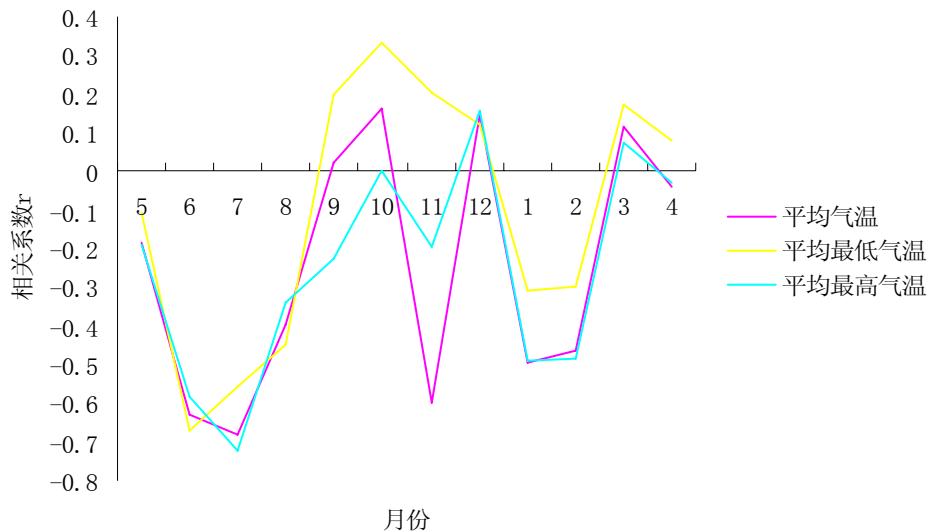


图 4-2 气温因子与条锈病发生率的相关性

Figure 4-2 The correlation between air temperature factor and occurrence of the yellow rust

从图 4-2 中可以看出，月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温与条锈病发生率的相关系数就总的变化趋势而言，是基本一致的。但也有不同。月平均最高气温在 6、7、1、2 月是显著相关，特别是 7 月，相关系数 r 达到-0.721；月平均气温与月平均最高气温相同，也在 6、7、1、2 月显著相关，也是 7 月最相关，相关系数 r 为-0.679；月平均最低气温则是在 6、7、8 月显著相关，6 月的相关性最好，达到-0.669。月平均最低气温为什么在 12、1、2 月这几个冬季的月份表现出与条锈病发生率的高相关性，应该是因为襄樊地处亚热带，冬季的最低气温在 2-3℃，在这种低温条件下，条锈病菌是可以正常越冬的。而在黄淮海平原，因为冬季温度太低，条锈病菌就无法越冬。这个结果表明，在襄樊地区，条锈病病菌对温度比较敏感，特别是对高温很敏感。所以考虑气温因子中，以平均最高气温因子作为变量，把 6、7、1、2 月的月平均最高气温引入方程。

在降水因子中，就选取月降水量与条锈病发生率进行相关分析，分析的结果如图 4-3。这个结果有点让人困惑。各月降水量与条锈病的发生基本没有相关性。根据条锈病高湿的这个特点，降水量应该会对它的发生发展产生影响，但根据降水量资料分析的结果，却没有太大相关性。笔者认为，应该有两个方面的原因，一是襄樊地区常年的降水就能满足条锈病菌对湿度的需要，二是襄樊地区地处汉水流域，湖泊也比较多，常年湿度都相对比较大。也就是说，即使是在降水偏少的情况下，也不会对条锈病菌的发展带来影响。

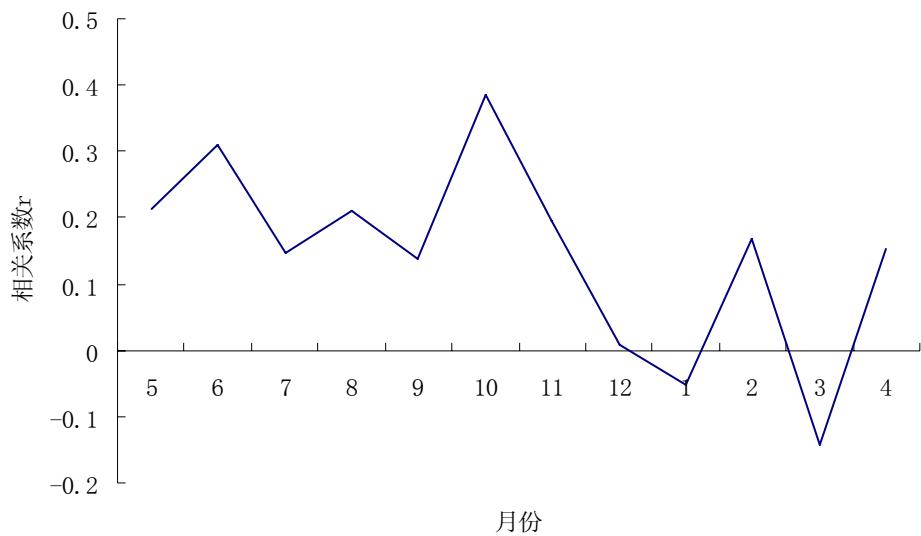


图 4-3 降水量与条锈病发生的相关性

Figure 4-3 The correlation between the precipitation and occurrence of the tripe rust

4.3.2 回归模型的建立

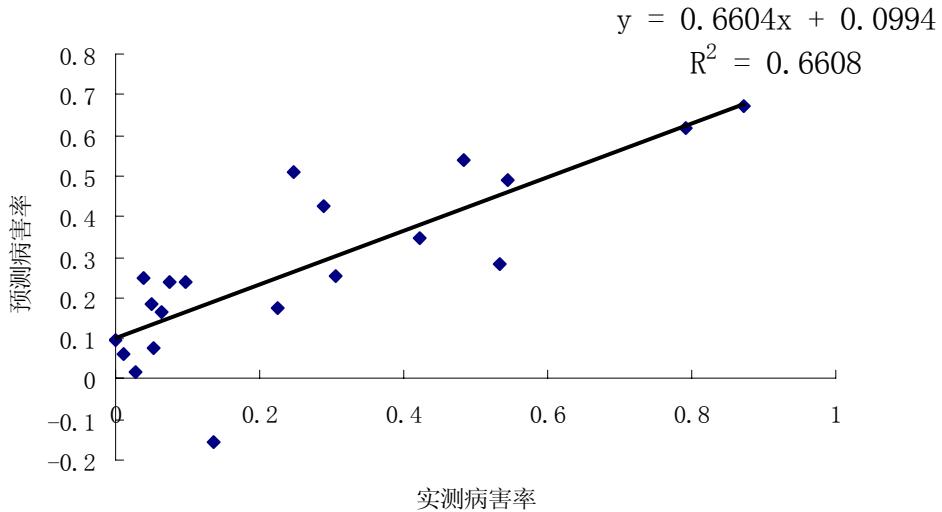


图 4-4 回归方程 (4-1) 预测的病害率与实测病害率的关系图

Figure 4-4 Map of the relationship between the rate of the forecast and measured through Regression Equation 4-1

从前面的相关分析中，我们已经看到 6、7、1、2 月份的平均最高气温与条锈病的发生率呈现出极显著的相关关系，所以把它们作为自变量引入方程，进行回归分析，建立一个回归方程。虽然我们分析的各月降水量与条锈病发生率的相关关系不大，但根据襄樊植保站的调查，认为在冬前的降水量与条锈病的发生有一定的联系，所以考虑选择一个相关系数稍大的月份 10 月的降水量引入方程，再结合 6、7、1、2 月的平均最高气温，再建立一个方程。根据上面的思路，运用 SPSS 统计软件进行回归分析，得到结果如下：

$$y = 4.692 - 0.48T_6 - 0.08T_7 - 0.025T_1 - 0.028T_2 \quad (4-1)$$

其中, y 为条锈病发生率, T 为平均最高气温, $R^2=0.661$ 。

$$y = 4.285 - 0.037T_6 - 0.081T_7 - 0.032T_1 - 0.019T_2 + 0.001R \quad (4-2)$$

其中, y 为条锈病发生率, T 为平均最高气温, R 为10月份降水量, $R^2=0.681$ 。

方程(4-2)的 R^2 值比(4-1)稍高一点,那是否就说明这个方程的预测效果就好了。也不一定,这需要通过2000-2004年的相关数据进行验证。

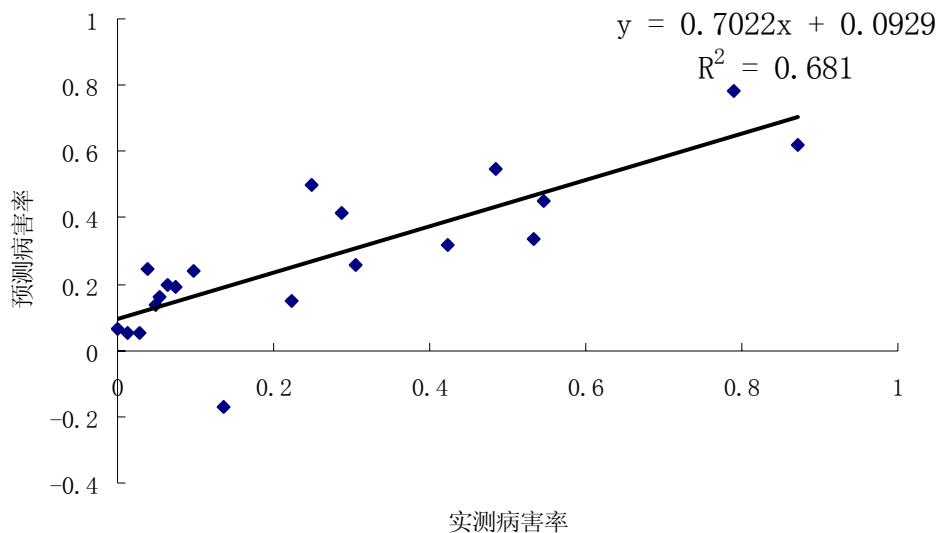


图 4-5 回归方程(4-2)预测的病害率与实测病害率的关系图

Figure 4-5 Map of the relationship between the rate of the forecast and measured through Regression Equation 4-2

4.3.3 回归模型的验证

与前面的模型验证方法一样,模型精度同样依据预测值与实际值的相关系数(r)和估算值的误差均方根RMSEP(Root Mean Square Error Predict)来验证。具体计算公式见(2-2)。估算的结果表明:方程(4-1)中,条锈病发生率的估算值与实际值的相关系数为0.68,估算值的误差均方根RMSEP为0.23。方程(4-2)中,条锈病发生率的估算值与实际值的相关系数为0.7,估算值的误差均方根RMSEP为0.17。相比较而言,方程(4-2)的估算效果较好。说明在襄樊地区,冬小麦条锈病最为敏感的生境因子是最高气温,但还有其他因子影响,所以估算的误差都比较高,但作为辅助手段来说,应该能满足应用的要求。

4.4 本章小结

本章主要是研究了影响条锈病的生境因子,选取了气温和降水量作为研究对象。通过相关分析,确定了影响条锈病发生率的主要因子是6、7、1、2月平均最高气温,并且据此建立了条锈病发生率的方程,通过检验,方程的预测效果较好,能起到辅助监测的作用,由于气象站点分布的关系,所以并不是每个地方都能知道最高气温。下一步要做的工作就是地面温度的反演。就目

前来看，比较成熟的反演算法主要有分裂窗算法，也称劈窗算法（Split Window Algorithm）、单窗算法（Mono-window Algorithm）和温度/比辐射率分离算法。反演出其表温度后，就应考虑如何能把地表温度与最高气温建立一个联系，有了这个联系以后，就可以把我们建立的方程改写为由遥感反演出的地表温度表示的方程，从而实现利用遥感技术间接监测冬小麦条锈病的目的。当然，这里需要强调的是，我们建立的方程是以襄樊地区为基础的，能否推广或者如何推广到其他地区还需要做进一步的研究。

对农作物病害病菌生境因子的研究，就目前而言，开展的并不是很多，但通过我们的研究，可以肯定的是，生境因子对病菌的发生发展有着重要的影响。在对襄樊地区冬小麦条锈病的生境因子分析中，可以得出结论，月平均最高气温对条锈病的发生程度有着最重要的影响。但应该指出的是，还有其他一些生境因子，由于条件所限，我们并没有涉及。至少还应该考虑这样几个方面：（1）春季的风向问题。条锈病是典型的远程气流传播的大区流行病害，以研究区域为例，就有陕甘西北越夏区随风传入。（2）品种问题。根据品种抗性资料记载，处于中等发生程度以上的年份均存在较大面积的感病品种，品种的抗性与条锈病的流行关系极为密切。在生境因子分析中，作为寄主的小麦也应该考虑。但近年来，即使是抗病品种，在适宜的条件下，也会大面积染病。说明病菌发生了新的变化。（3）土壤地形等因素。作为气传性病害，发病的地点应该是随机的，但在襄樊地区，每年最早发病的田块相对不变，均为谷城锅底湖，宜城郑集等地。其原因是什么，还有待于进一步探讨。

第五章 遥感植被指数监测冬小麦条锈病的研究

5.1 常用植被指数

植被覆盖度较低时,植被冠层光谱受土壤质地、颜色、含水量、有机质及农事活动方式的影响。其影响主要体现在两个方面:光谱影响及亮度影响。光谱影响可用信噪比做检测,用RED代表红光光谱段,IR代表红外光谱段,则IR/RED的信噪比最高。土壤亮度的影响主要表现在:暗色土壤背景使IR/RED偏大,而亮色土壤背景使其偏小。为了更准确的分析作物冠层及其背景的反射光谱特征,人们就引入植被指数的概念。植被指数是遥感领域中用来表征地表植被覆盖状况、作物生长状况的一个简单有效的度量参数。(郭铌,2003)其建立的基础是基于植被在红色和近红外波段反差较大的光谱特征,进行一定的变换,在植被信息增强的同时,非植被信息最小化。按发展阶段,大致可分为基于波段简单线性组合的植被指数,消除大气、土壤和综合影响因子的植被指数。(罗亚,2005)

5.1.1 基于波段线性组合的植被指数

最早的比值植被指数 *RVI* 由 Jordan(1969)提出,其优点在于比用单波段信息监测植被更为稳定,因为 *RVI* 强化了植被在近红外和红外波段反射率的差异。但当植被覆盖度较低 (<50%), *RVI* 的分辨能力很弱,当植被盖度越大时,由于反射的红光辐射很少, *RVI* 将无限增长。因此, *RVI* 对土壤背景的变化较为敏感,植被覆盖度高时,对植被的敏感度下降。

$$RVI = \rho_{nir}/\rho_{red} \quad (5-1)$$

Richardson 和 Wiegand(1977) 提出差值植被指数 *DVI*

$$DVI = \rho_{nir} - \rho_{red} \quad (5-2)$$

差值植被指数就是近红外波段和红光波段反射率之差, *DVI* 在 LAI (叶面积指数) 较低时,效果较好,但当 LAI 增加, *DVI* 对土壤背景敏感。

Kauth 等 (1976) 基于经验的方法,针对 Landsat MSS 的特定遥感影像,在忽略大气、土壤、植被相互间作用的前提下,发展了土壤亮度指数 (*SBI*)、绿度植被指数 (*GVI*)、黄度植被指数 (*YVI*)。

总之,这一类的植被指数大多是基于波段的简单线性组合或原始波段的比值,由经验方法发展而来,没有考虑大气、土壤等因子的综合影响,所以在应用上具有很大的局限性。

5.1.2 消除影响因子的植被指数

针对基于波段线性组合的植被指数的局限性,后来又发展了很多消除影响因子的植被指数,大致可分为消除大气影响、消除土壤影响和综合影响因子三类。

(1) 消除土壤影响

为了消除土壤背景的影响,很多人在这方面进行了努力。Kauth and Thomas (1976) 基于土壤线理论,发展了垂直植被指数 (*PVI*),相对于线性组合的植被指数, *PVI* 表现为受土壤亮度的影响较小。

$$\rho_{ir} = a\rho_r + b \quad (5-3)$$

式中: a 为土壤线的斜率, b 为土壤线的截距。

$$PVI = (\rho_{ir} - a\rho_r - b) / \sqrt{a^2 + 1} \quad (5-4)$$

为减少土壤冠层和植被冠层背景的双重干扰, Huete (1988) 提出了土壤调节植被指数 (SAVI)。

$$SAVI = \frac{\rho_{ir} - \rho_r}{\rho_{ir} + \rho_r + L} (1+L) \quad (5-5)$$

该指数看上去似乎由 $NDVI$ 和 PVI 组成, 其创造性在于, 引入了土壤亮度指数 L , 建立了一个可适当描述土壤-植被系统的简单模型。 L 的取值取决于植被的密度, Huete 建议 L 的最佳值为 0.5, 也可以在 0~1 之间变化。实验证明, $SAVI$ 降低了土壤背景的影响, 但可能丢失部分背景信息, 导致植被指数偏低。

为减少 $SAVI$ 中裸土的影响, Qi(QiJa, 1994) 提出了修正的土壤调节植被指数 ($MSAVI$)。它与 $SAVI$ 的最大区别在于 L 值可以随植被密度进行自动调节, 较好地消除了土壤背景对植被指数的影响。

$$MSAVI = (2\rho_{ir} + 1 - \sqrt{(2\rho_{ir} + 1) - 8(\rho_{ir} - \rho_r)}) / 2 \quad (5-6)$$

$MSAVI$ 能增强植被信号, 最大限度消除土壤背景的影响, 并能宏观真实地反映该地区自然植被地带的界线。

基于土壤线理论, Baret 等 (1989) 对 $SAVI$ 进行转换, 发展了转换型土壤调整植被指数 ($TSavi$)。由于考虑了裸土土壤线, $TSavi$ 比 $NDVI$ 对低植被覆盖有更好的指示作用。后来, Baret 和 Guyot (1991) 又对 $TSavi$ 进行了改进, 通过附加一个“ X ”值, 将土壤背景亮度的影响减小到最小值, 发展 $ATSAVI$ 。

$$TSavi = (a(\rho_{ir} - a\rho_r - b)) / (\rho_r + a\rho_{ir} - ab) \quad (5-7)$$

$$ATSAVI = \frac{(a(\rho_{ir} - a\rho_r - b))}{(\rho_r + a\rho_{ir} - ab + x(1 + a^2))} \quad (5-8)$$

$TSavi$ 和 $ATSAVI$ 是对 $SAVI$ 的改进, 着眼于土壤线实际的 a 和 b , 而不是假设为 1 和 0。

(2) 消除大气影响

Kaufman 和 Tanre (1992) 根据大气对红光通道的影响比近红外大得多的特点, 在定义 $NDVI$ 时通过蓝光和红光通道的辐射差别修正红光通道的辐射值, 以有效减少植被指数对大气的依赖。类似于热红外波段的劈窗技术 (the split window technique), 发展了抗大气植被指数 ($ARVI$)。

$$ARVI = \frac{\rho_{ir}^* - \rho_{rblue}^*}{\rho_{ir}^* + \rho_{rblue}^*} \quad (5-9)$$

$$\rho_{rblue}^* = \rho_r^* - \gamma(\rho_{blue}^* - \rho_r^*) \quad (5-10)$$

式中, ρ^* 是预先经过了分子散射和臭氧订正的反射率, γ 为大气调节参数。研究表明, $ARVI$ 对大气的敏感性比 $NDVI$ 约减少 4 倍。由于 γ 是决定 $ARVI$ 对大气调节程度的关键参数, 并取决于气溶胶的类型。Kaufman 推荐的 γ 为常数 1 仅能消除某些尺寸气溶胶的影响, 有很大的局限性。另外, $ARVI$ 进行预处理时需要输入的大气实况参数往往难以得到, 给应用带来很大困难。

张仁华等 (1996) 在 $ARVI$ 的基础上, 运用大气下向光谱的同步观测值以及大气辐射传输方程, 得到纠正 $NDVI$ 的关键参数 γ , 使 γ 值可从 0.65~1.21 之间变化, 同时也不必采用辐射传输模

型进行预处理, 得到新的抗大气影响植被指数 (*IAVI*)。根据实际观测研究表明, 大气对 *IAVI* 影响误差为 0.4%~3.7%, 比 *NDVI* 的 14%~31% 有明显减少。

(3) 消除综合影响

归一化差值植被指数 *NDVI* 由 Rouse 等 (1973) 在对 *RVI* 非线性归一化处理后得到的植被指数。*NDVI* 增强了对植被的响应能力, 是目前应用最广的植被指数。但许多研究也表明, *NDVI* 受到定标和仪器特性、云和云影、大气、双向反射率、土壤及叶冠背景、高生物量区饱和等因素影响, 其应用受到限制 (郭铌, 2003)。

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_r) / (\rho_{nir} + \rho_r) \quad (5-11)$$

唐世浩等 (2003) 提出了一种三波段梯度差植被指数 (*TGDVI*)。*TGDVI* 具有一定的消除背景和薄云影响的能力, 同时该植被指数还解决了 *NDVI* 饱和点低的问题。但 *TGDVI* 在计算植被覆盖度时没有考虑植被、土壤面积比随波长变化的情况, 与实际存在差异。此外, *TGDVI* 用到三个波段的信息, 而且没有经过比值处理, 波段噪声的影响会较大。

$$TGDVI = \frac{R_{ir} - R_r}{\lambda_{ir} - \lambda_r} - \frac{R_r - R_g}{\lambda_r - \lambda_g} \quad (5-12)$$

总之, 此类植被指数大都基于物理知识, 将大气、植被覆盖和土壤背景的影响结合在一起考虑, 并通过数学和物理及逻辑经验以及通过模拟将原植被指数不断改进而发展的。

本文研究的冬小麦在四月份已经基本覆盖土壤背景, 相比较而言, 拟采用成熟的 *NDVI* 指数进行病害区与健康区的差异研究。

5.2 遥感影像的选取

在遥感影像的选取不仅要考虑时间分辨率、空间分辨率和经济上的可行性, 还要考虑影像的可获取性及质量。大范围监测条锈病选择时间和空间分辨率都高的影像, 在经济上是不可行的。本研究最终选取 TM 影像来做分析。是因为 TM 影像的空间分辨率适中, 比较容易获取, 从经济上考虑, 成本也不是太高。如果考虑 MODIS 影像的话, 从经济上来说比较廉价。但分辨率太低, 很难满足病虫害的监测需要。笔者曾经对 2002 年 4 月的襄樊地区的 MODIS 影像进行了分析, 但从植被指数的计算结果来看, 几乎没有差异, 所以用于病害分析的话, MODIS 影像还是不能满足应用的需要。但如果考虑分辨率较高的 SPOT 等影像, 从经济上来说, 成本太高, 不过应该能得到更好的效果。要想从影像上能分析出比较好的结果, 要求条锈病发生的面积足够大, 从时间上来说, 最好在 4 月上旬, 这样还有足够的时间在监测到病情后及时采取措施, 降低灾害的损失。襄樊地区 2004 年冬小麦条锈病出现了爆发, 发生面积超过 80% 以上, 在 4 月初的时候, 发生面积就已经超过了种植面积的 1/3。所以如果选取此时的影像, 有可能能从遥感影像上进行健康区与病害区的差别。综上, 决定选取 2004 年 4 月 8 日的一景 TM 影像来做分析, 看能否区分病害区。

Landsat 5 是美国发射的地球资源卫星之一, 1984 年 3 月 1 日进入预定轨道。其上携带的传感器除了具有类似于 Landsat1、2、3 号上 4 个波段的多光谱扫描仪 (MSS) 之外, 还带有一套改进的多光谱扫描仪, 称为专题制图仪 (TM)。TM 传感器是一个高级多波段扫描型的地球资源敏感传感器, 与原先的 MSS 传感器相比, 它具有更高的空间分辨率, 更好的频谱选择性, 更好的几何保真度。TM 的探测分成 7 个波段。具体技术指标见表 5-1。

表 5-1 TM 各波段对应的波长范围及空间分辨率
Table 5-1 The wavelength range and spatial resolution of each band TM images

波段序号	1	2	3	4	5	6	7
波长范围 (μm)	0.45~0.52	0.52~0.60	0.63~0.69	0.76~0.90	1.55~1.75	10.4~12.5	2.08~2.35
空间分辨率 (m)	30	30	30	30	30	120	30

5.3 遥感影像的预处理

5.3.1 辐射定标

原始图像进行辐射定标，目的是把图像上的 DN 转为辐亮度或者是大气上层表观反射率。以第三波段为例，把 DN 值转化为反射率。具体步骤如下：

(1) 计算辐射亮度

$$L_{\lambda} = Gain \times DN + Bias \quad (5-13)$$

式中，DN：图像的像元灰度值，无量纲，取值范围 0~255； L ：辐射亮度， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ；Gain：增益， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ；增益 $= (L_{\max} - L_{\min}) / 255$ ， L_{\max} 和 L_{\min} 分别是最大和最小光谱辐射值，单位与增益相同。Bias：偏置， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ；偏置 $= L_{\min}$ 。对于第三波段： $L_{\max}=264$ ， $L_{\min}=-1.17$ 。

(2) 计算反射率

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos(\theta)} \quad (5-14)$$

式中， ρ ：大气上层表观反射率，无量纲； d ：日地距离参数（与日期有关），无量纲； $ESUN$ ：太阳光谱辐射量， $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ，与日期及波段有关； θ ：太阳天顶角度数。对于第三波段： $\theta=42.43$ ， $d=0.9909$ ， $\pi=3.1415$ ， $ESUN=1554$ 。

根据上述公式在 ENVI 中进行波段运算，得出辐射校正值影像。其他波段，根据头文件提供的相应参数，用同样的方法进行辐射定标。

5.3.2 TM 遥感影像的大气校正

遥感影像的亮度值是进入传感器的辐射强度。该值主要取决于到达地表的辐射强度和地面的光谱反射率。因此，当到达地面的太阳辐射相同时，影像上像元亮度值的差异直接反映了地物目标光谱辐射率的差异。但这只是一种理想的状况。实际上，由于大气层的存在，大气层中所含大气分子、尘埃及水汽等的作用，使得传感器所接受到的光谱辐射会发生畸变，它引起遥感图像的模糊和对比度的降低，以及传感器所获得的图像数据不能真实地反映地物的反射或发射光谱特征。因此，消除大气的影响是非常重要的，消除大气影响的过程称为大气校正。

进行大气校正常用的方法主要有两种，一是求解辐射传递方程，进行近似求解；另一种方法是利用地面测量数据。设置一个已知辐射特性的标志物，把地面实况数据与传感器的输出数据进行比较，来消除大气影响。在本研究中，第二种方法不现实。尝试用 6S 模型进行大气校正。6S 模型时目前发展的比较好的大气辐射校正模型，是在 Tanre 等人提出的 5S (the simulation of the

Satellite Signal in the Solar Spectrum) 基础上改进而来。它考虑了地表非朗伯体情况, 采用经验近似的方法解决了地表 BRDF 与大气相互耦合的问题, 这一方法的目的是不追求物理方程的严格性, 数学解的严格性, 仅以经验的方法获得较简单的解析式, 但同时获得能满足实用要求的精度。通过了使用较为精确的近似方程以及称之为“successive order of scattering”(SOS)的连续散射算法求解辐射传输方程, 这种方法把大气分为 26 层, 采用 24 个高斯离散角, 而 6S 方法本身将层数减少为 13 层, 离散角减少为 12 个, 这样计算量可以减少 $3/4$, 而引起的误差仍在允许范围之内。6S 方法提高了瑞利散射和气溶胶散射的计算精度。但在具体应用过程中, 相关参数不好设定, 因此, 笔者用此模型进行大气校正, 调整了几次参数, 效果都不理想。最后只好采用了一种比较简单的暗像元法进行了大气校正。校正结果能够满足应用的需要。

5.3.3 TM 遥感影像的几何校正

在传感器运行过程中, 除传感器的姿态有可能变化外, 还存在诸如地球自转等外部因素的影响, 导致在传感器接收地物反射光谱及成像过程中会发生几何变化, 从而使所获得的遥感影像出现几何畸变。这种几何畸变分为两种类型: (1) 系统畸变。这类图像变形是由传感器的结构性能引起的, 对每幅图像的影响恒定不变; (2) 非系统畸变。这类图像变形是由传感器的偶然变化和某些外部因素引起的, 没有一定的规律, 也就难以预测。所谓几何校正, 就是要改正这些畸变。尽管原始数据由接收部门依据遥感平台、地球、传感器的各参数进行了粗校正, 但其精度较低, 一般不能满足研究工作的需要, 因此, 需要对原始数据进行几何精校正。本研究采用影像到影像的方法。以同一景不同年份的, 经过 1: 10 万地形图精校正的影像为基础进行校正。

几何精校正控制点选取遵循了以下原则: (1) 控制点的数目由未知系数的多少决定; (2) 在图像的边缘处或地面特征变化大的地方要尽量多布控制点; (3) 选取图上易分辨且较精确的特征点如道路交叉点或河流上的桥梁等作为控制点; (4) 控制点在图上尽可能均匀分布。

几何校正方法采用一次多项式, 影像重采样采用双线性内插法。表 5-2 是几何精校正的控制点及校正后误差, 平均误差为 0.30 个像元, 符合低于 0.5 个像元的要求。

表 5-2 研究区 TM (2004.4.08) 影像几何精校正控制点
Table 5-2 Control point of TM image adjustment of geometric correction in study area on April 8th 2004

Base (x,y)		Warp (x,y)		Predict (x,y)		Error (x,y)		RMS Error
5218.00	1668.00	3777.75	697.00	3777.49	698.18	-0.26	1.18	1.21
2010.00	1444.75	732.00	957.09	732.34	956.86	0.34	-0.23	0.41
3287.25	679.75	1820.00	53.00	1820.24	52.03	0.24	-0.97	1.00
7566.27	1497.07	5958.27	195.27	5957.78	194.86	-0.49	-0.41	0.64
7444.00	3135.00	6080.93	1751.87	6082.19	1750.88	1.26	-0.99	1.61
7239.00	3617.00	5960.00	2232.00	5960.06	2233.44	0.06	1.44	1.44
4828.25	2447.00	3525.25	1486.75	3525.13	1486.61	-0.12	-0.14	0.18
2039.00	2332.00	889.00	1785.00	888.86	1785.79	-0.14	0.79	0.80
2199.00	3476.00	1207.00	2836.50	1205.84	2836.69	-1.16	0.19	1.17
4318.00	3149.00	3148.25	2219.75	3148.33	2220.32	0.08	0.57	0.57
6554.00	3923.00	5361.75	2621.25	5361.37	2620.79	-0.38	-0.46	0.60
7034.67	5019.17	5973.00	3580.00	5972.92	3580.03	-0.08	0.03	0.09
4413.67	4485.83	3434.00	3462.00	3433.19	3461.72	-0.81	-0.28	0.86
3287.83	4303.83	2348.00	3455.00	2349.18	3455.13	1.18	0.13	1.19
1507.00	4206.33	662.00	3624.00	662.31	3623.50	0.31	-0.50	0.59
1309.00	5290.00	634.00	4670.00	634.21	4670.00	0.21	-0.00	0.21
2517.83	5576.67	1812.00	4763.00	1811.47	4762.77	-0.53	-0.23	0.58
3955.00	6086.00	3235.00	5031.00	3235.75	5031.32	0.75	0.32	0.81
5738.00	6436.00	4962.00	5100.00	4961.74	5099.79	-0.26	-0.21	0.34
6135.50	5696.33	5227.38	4347.38	5227.17	4347.17	-0.21	-0.21	0.30

5.3.4 TM 遥感影像的剪切

几何精校正后，剪切保留了以襄樊地区为研究中心的影像。

5.4 遥感影像的分类

遥感影像分类的最终目的是识别出感兴趣的地物，并判断它们的差异，获取不同地物的定量统计资料。目前常用的遥感分类方法主要有两种：监督分类法与非监督分类法。监督分类需要提供训练区，作为分类前的先验知识，在此先验知识上建立判别准则，进行分类。总体而言，监督分类精度要高，但训练区的确定比较重要，若实地获取训练区，一般通过 GPS 进行样方绘制。

由于本研究有一定量的小麦样方调查数据，分类时采用监督分类中的最大似然比分类法 (maximum likelihood classification)。最大斯似然比分类法是经常使用的分类方法之一，它是通过

求出每个像素对于各类别的归属概率，把该像素分到归属概率最大的类别中的方法。它以条件概率密度函数为判别函数，以 Bayes 准则为判别方法，可以同时定量考虑两个以上的波段和类别，对不同类别的方差变化比较敏感，因此是一种广泛应用的分类器。

5.4.1 训练样本的选择

训练样本（感兴趣区 ROI）的选择基于两个方面，一是实地 GPS 冬小麦地样方采样，二是根据遥感影像显著地物特征选取的兴趣区。下面主图中较大的黄色斑块是研究区中 11 个 GPS 样方中的三个。由于该区在四月份农作物主要是小麦，裸地很少，有间杂的蔬菜和油菜地，但不易区别开来，所以根据地物特征选取的兴趣区主要是湖泊、河流、城镇、山体植被、公路、小麦。根据色调（可能主要是水体中泥沙或其它杂物浓度不同），把湖泊、河流分成了两类，小麦也分为了三大类。

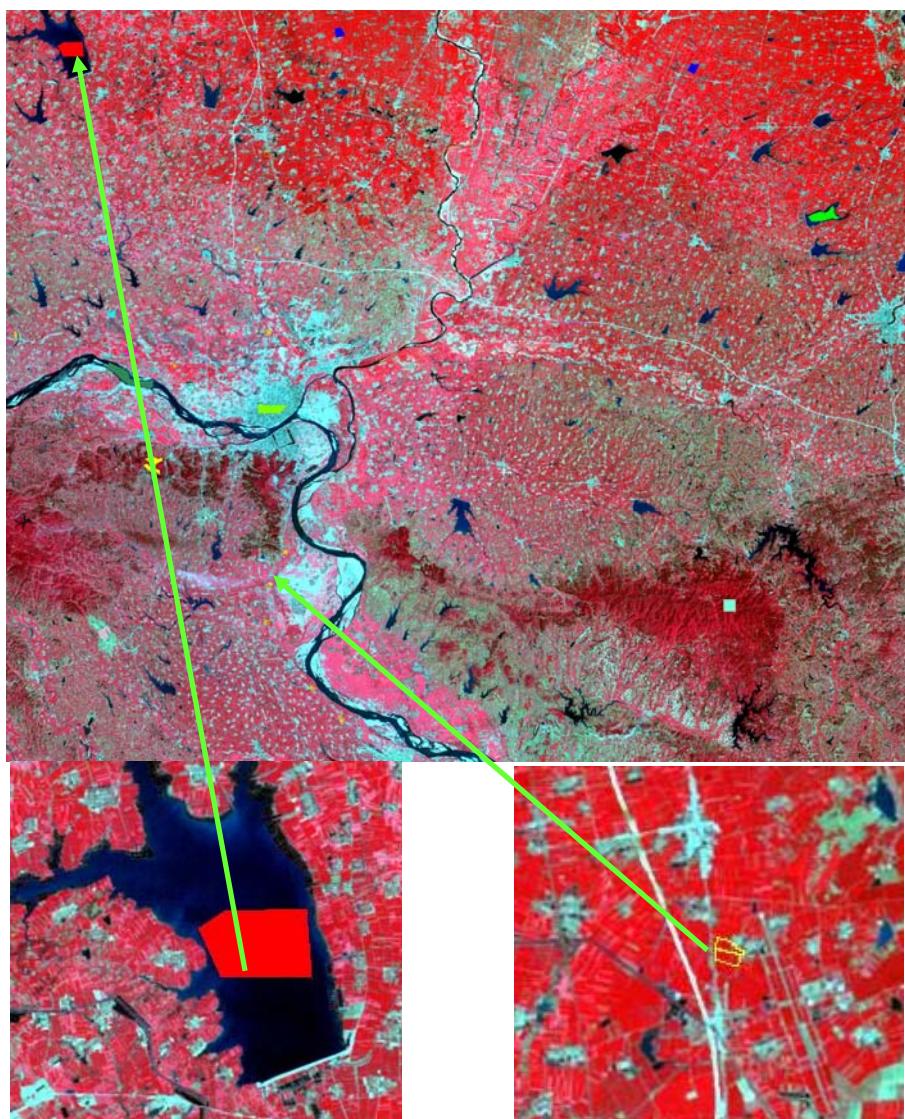


图 5-1 训练区及样本：GPS 样方及训练区；下：左为水体训练区，右为小麦 GPS 样方

Figure 5-1 Training site and samples underside left water training site right wheat GPS samples

5.4.2 分类结果

在 ENVI 中, 如两类感兴趣区的 Jeffries-Matusita 值大于 1.9, 表明感兴趣区是两类不同的地物, 如小于 1.0, 则要考虑两者是否合并为一类地物, 介于 1.0 与 1.9 之间的, 说明两类地物有混合光谱存在, 需要仔细权衡。表 5-3 是感兴趣区 Jeffries-Matusita 值从小到大前面部分的部分可分离报告 (大于 1.9 部分省略)。

表 5-3 可分离报告
Table 5-3 Separated report

类别		Jeffries-Matusita 值
路 1 [紫色]	河 2 [珊瑚色]	0.72787348
城镇 1 [淡紫]	城镇 4 [蓝色]	1.43850460
城镇 1 [淡紫]	路 2 [浅红]	1.54086694
路 1 [紫色]	城镇 1 [淡紫]	1.58955391
路 1 [紫色]	城镇 4 [蓝色]	1.66724078
冬小麦 2 [青色]	路 2 [浅红]	1.69617695
河 2 [珊瑚色]	城镇 1 [紫色]	1.75490441
河 1 [海绿]	城镇 3 [黄绿色]	1.76435811
河 2 [珊瑚色]	城镇 4 [蓝色]	1.76648752
冬小麦 2 [青色]	冬小麦 1 [洋红色]	1.84578959
城镇 4 [蓝色]	路 2 [浅红 1]	1.85194697
冬小麦 3 [蓝]	冬小麦 1 [洋红]	1.88021455
湖 1 [红]	河 1 [海绿]	1.88369799
湖 1 [红]	湖 2 [绿]	1.89678409

从报告可以看出, 从遥感影像地物特征明显可以辨别为河流和公路的两种地物, 在遥感分类中识别不出来, 会归为一类, 城镇与公路因为色调较一致, 基本都是人工建筑物, 所以也较混淆。三类小麦, 相互也有所混淆, 不过 Jeffries-Matusita 值也快接近 1.9 了。总体上看, 所选的用作监督分类的兴趣区具有代表性。各个地物在不同波段的平均光谱曲线也说明分类结果比较理想。

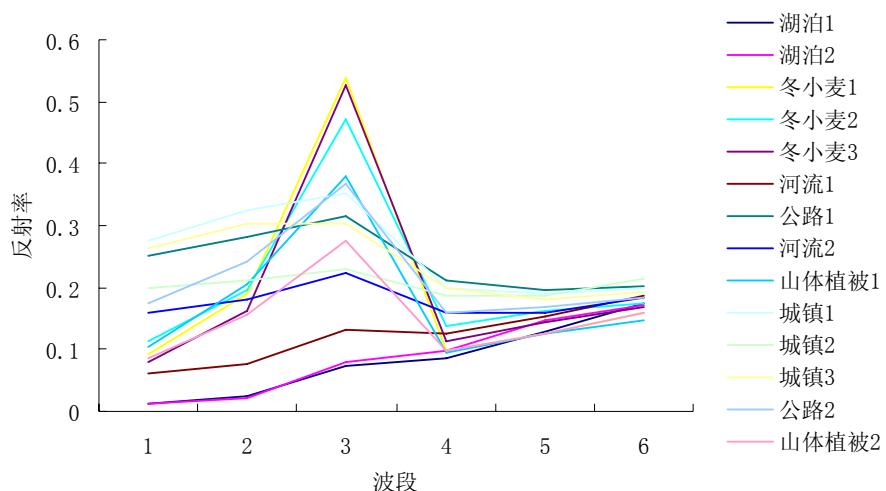


图 5-2 各地物在不同波段的平均光谱曲线
Figure 5-2 Different Band average Spectral curves of all kinds of objects

下面图 5-3 是监督分类及分类后通过过筛、聚合处理后的影像。其中蓝色是小麦 1, 粉红色是

小麦 2, 青色是小麦 3, 砖红色及淡绿色是河流, 鲜绿色是湖泊。浅青色和黄色是山体植被区, 其它红色部分是道路及城镇区。

分类结果表明, 该区小麦面积约占 34%, 水体约 4%, 山体约 9%。但结果表明道路 2 占了 36.3%, 显然不可能, 它应归于城镇一类。总体上, 对于植被而言, 面积较符合当地的生产统计资料。

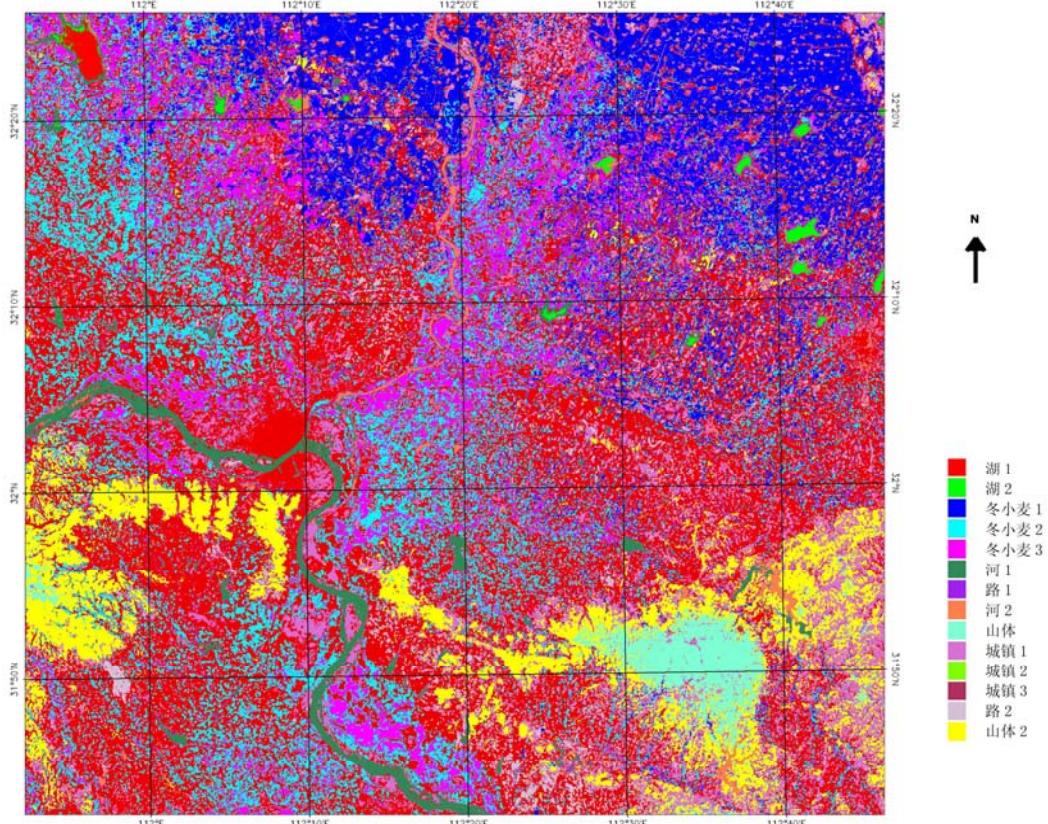


图 5-3 分类后的 TM 影像

Figure 5-3 Classified TM Image

5.5 遥感植被指数的计算

根据前面对冬小麦条锈病冠层反射光谱的研究, 冠层光谱的响应敏感区域在包括 Landsat/TM 中的 TM2(520~600nm), TM3(630~690nm) 和 TM4 (760~900nm)3 个波段。所以在植被指数的选择上选择归一化差值植被指数 $NDVI$ 比较合适。下面就通过计算 $NDVI$ 来看不同小麦区的差别。

通过分类图, 可以认为该区小麦大致有三大类。为此, 下面通过在分类图像上再选取训练区, 把训练区叠加在计算的植被指数图像上, 计算各类小麦区的 $NDVI$ 统计值。

通过统计训练区的地物 $NDVI$ 值, 报告如下: wheat1 [Red] 的平均 $NDVI$ 值为 0.69, wheat3 [Cyan] 的平均 $NDVI$ 值为 0.55, wheat2 [Magenta] 的平均 $NDVI$ 值为 0.65。

从 $NDVI$ 值可以看出, 三个小麦区存在差异, 植被指数较低的 wheat3 [Cyan] 在面积统计上约占小麦总面积的 41.93%。而根据地面调查的结果, 在 2004 年 4 月 8 日, 条锈病发生面积约占研究区小麦总面积的 1/3。但考虑到本研究区没有将襄樊地区的山区计算在内, 研究范围内是小麦条锈病发病比较严重的区域, 所以考虑到这一点, 应该说, 通过 TM 遥感影像 $NDVI$ 的计算, 在病害较严重的时候, 能够把发生病害的区域监测出来。但是, 具体的病害区域的资料很难收集, 所

以也无法确定我们所确定的区域能否和实际发生病害的区域对应。另一方面，导致 $NDVI$ 值发生差异的因素也比较多，和冬小麦的品种，生长期都有关系，是不是由条锈病引起的必须要有相应的地面资料支持，我们在此也只是做了一个尝试。

5.6 本章小结

在这一章中，我们通过一幅 TM 遥感影像，对它进行监督分类，确定不同的小麦区，然后计算植被指数，基本能确定出病害发生的区域。但存在的问题是，我们是在知道发生了条锈病的情况下进行的工作。通过计算植被指数，顶多也就能知道是发生了病害，但至于是什么病害，病害的程度要从影像上获取结论从目前来看，还是有很大的困难。主要是基于如下两个原因：(1) “同物异谱”和“异物同谱”现象。通过光谱差异，很难把各种病害区分开来；(2) 传感器对病害的最小分辨能力。因为病害在外观表现之前，内部结构已经发生了变化，但此时通过遥感监测到就目前的技术而言不太可能。

第六章 结论和讨论

6.1 研究结论

提高农作物病虫害的监测水平，对维护我国粮食安全，保护我国的生态环境有着极其重要的意义。传统的监测方法既费时费力，而且监测的效率也不高。遥感技术作为一种大面积、快速、无破坏、无污染的监测技术，能节省人力、物力，提高监测效率，保护环境，从真正意义上实现经济、社会、生态效益相统一。本研究以襄樊地区冬小麦条锈病的监测为例，从三个不同侧面研究了遥感技术的监测方法，得出如下结论

(1) 通过高光谱监测，能很好的监测冬小麦受条锈病影响的程度。条锈病为害后，冬小麦叶片的叶绿素含量和光谱反射率都发生了很大的变化，因此，选择对叶绿素比较敏感的 470nm、550nm、635nm、680nm、800nm，结合实测的叶绿素含量，建立一个回归方程，能比较好的反演叶绿素含量，从而评价冬小麦的受条锈病影响的程度。

(2) 通过对冠层高光谱的定量分析，确定可以选择 Db 、 Dy 、 Dr 、 $Dinr$ 、 Rg 、 Ro 、 SDr/SDb 和 $SDinr/SDb$ 作为高光谱特征参数，进行条锈病的诊断。在成像高光谱上，提取这些特征参数，能达到大面积监测的目的。

(3) 通过生境因子的分析，得出结论：影响襄樊地区冬小麦条锈病发生的主要因素是 6、7、1、2 月的平均最高气温，并且根据已有资料，建立了一个精度较高的预测模型。能在已知最高平均气温的前提下，对当年条锈病发生率作出统计预测。

(4) 选取襄樊地区 2004 年 4 月 8 日的遥感影像，运用监督分类法进行了分类，把该地区的小麦分为三种类型，分别计算植被指数，根据植被指数初步判定小麦的健康水平，结果不是很精确，但与实际情况大体一致。

(5) 通过三个不同侧面的研究，可以看出高光谱监测的潜力最大。虽然从 TM 影像上能大体区分病害区和健康区，但那是基于发病面积很大和不需要知道是什么病害。生境因子的监测只能做为一种辅助手段，对于一切生物，影响其的生境因子都很复杂，虽然有主导因子，但并不能排除其他因子的作用。高光谱的优势在于：能从光谱特征上把不同的病害区分开来，在病害的早期，就能探测到病害的发生。但目前的问题在于要获取高分辨率的成像高光谱成本较高，这也是制约高光谱监测的瓶颈之一。因为作为病虫害的监测，监测成本不能太高，否则就失去了监测的价值。

6.2 本研究的创新点

1、所有的地面实测均没有进行控制性试验，取得的结果更能符合大田实际状况，具有一定的实际价值。

2、将叶绿素含量作为评价小麦受条锈病影响程度的指标，建立了通过叶片的光谱反射率来估算叶绿素含量的模型，并且模型具有一定精度。

3、提出了对条锈病的间接监测方法，即通过生境因子来进行监测，根据襄樊地区的实际情况，建立了一个预测模型，可作为辅助之用。

4、尝试在 TM 影像上用 $NDVI$ 进行冬小麦条锈病的大面积监测。

6.3 讨论

- 1、在已知条锈病的情况下建立的估算模型，但反过来说，是不是能用这个模型的结果来判断就一定是条锈病，这一点并不能保证，需要做更多的工作。外推到其它地区，结果会怎样，也有待研究。
- 2、在生境因子监测中，如何把其他的因子引入到预测模型中，提高模型的监测精度是一个值得考虑的问题。
- 3、缺乏条锈病大发生时详尽的 GPS 地面调查数据支持，TM 影像的分析结果难以准确验证。

参考文献

1. 安虎, 王海光, 刘荣英, 等. 小麦条锈病单片病叶的特征光谱的初步研究. 中国植保导刊, 2005, 25 (11): 8~11.
2. 蔡成静, 王海光, 安虎, 等. 小麦条锈病高光谱遥感监测技术研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33 (增刊): 31~36.
3. 陈刚, 王海光, 张录达, 等. 小麦条锈病区域流行相关性研究初报. 中国农学通报, 2006, 22 (7): 415~420.
4. 陈述彭主编. 遥感大辞典. 北京: 科学出版社, 1990.
5. 戴昌达. 植物病虫害的遥感探测, 自然灾害学报, 1992, 1 (2): 16~19.
6. 戈峰 主编. 现代生态学. 北京: 科学出版社, 2002, 445~455.
7. 郭铌. 植被指数及其研究进展. 干旱气象, 2003, 21 (4): 71~75.
8. 郭志华, 肖文发, 张真, 等. RS 在森林病虫害监测研究中的应用. 自然灾害学报, 2003, 12 (4): 74~81.
9. 黄木易, 王纪华, 黄义德, 等. 冬小麦条锈病单叶光谱特性及严重度反演. 农业工程学报, 2004, 20 (1): 176~180.
10. 黄木易, 王纪华, 黄义德, 等. 高光谱遥感监测冬小麦条锈病的研究进展, 安徽农业大学学报, 2004, 31 (1): 119~122.
11. 黄木易. 冬小麦条锈病的高光谱遥感监测[硕士学位论文]. 合肥: 安徽农业大学, 2004.
12. 蒋建军, 倪绍祥, 韦玉春. 遥感 GIS 辅助下的环青海湖地区草地蝗虫生境分类研究. 遥感学报, 2002, 6 (5): 387~392.
13. 寇有观, 萧术. 农业遥感. 北京: 农业出版社, 1998, 222~233.
14. 黎镇湘, 张晓丽, 张锁成, 等. RS 与 GIS 集成技术在森林病虫害监测中的应用. 河北林果研究, 2004, 19 (4): 378~380.
15. 刘良云, 黄木易, 黄文江, 等. 利用多时相的高光谱航空遥感图像监测冬小麦条锈病. 遥感学报, 2004, 8 (3): 276~282.
16. 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社, 2001, 232~240.
17. 罗亚, 徐建华, 岳文泽. 基于遥感影像的植被指数研究方法述评. 生态科学, 2005, 24 (1): 75~79.
18. 马占鸿, 石守定, 王海光, 等. 我国小麦条锈病既越冬又越夏地区的气候区划. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33 (增刊): 11~13.
19. 梅安新, 彭望碌, 秦其明, 等. 遥感导论. 北京: 高等教育出版社, 2001. 240~247.
20. 彭少麟, 郭志华, 王伯荪. RS 和 GIS 在植被生态学中的应用及其前景. 生态学杂志, 1999, 18 (5): 52~64.
21. 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000, 81~97.
22. 王历译. 日本卡农公司图像研究室. 遥感—遥感技术的发展及其应用研究. 北京: 科学出版社, 1983, 36—44.

23. 申广荣, 王人潮.植被光谱遥感数据的研究现状及其展望.浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, 27 (6): 682~690.
24. 宋开山, 张柏, 李方, 等.高光谱反射率与大豆叶面积及地上鲜生物量的相关分析.农业工程学报, 2005, 21 (1): 36~40.
25. 宋开山, 张柏, 王宗明, 等.玉米和大豆 LAI 高光谱遥感估算模型研究.中国农学通报, 2005, 21 (1): 318~322.
26. 孙家炳主编.遥感原理与应用.武汉: 武汉大学出版社, 2003.98~168.
27. 唐华俊, 周清波主编.资源遥感与数字农业.北京: 中国农业科学技术出版社, 2005, 240~246.
28. 唐世浩, 朱启疆, 王锦地.三波段梯度差植被指数的理论基础及其应用.中国科学(D辑), 2003, 33 (11): 1094~1102.
29. 唐延林, 王人潮, 王秀珍.对水稻微分光谱和植被指数的探讨.上海交通大学学报(农业科学版), 2003, 21 (3): 199~204.
30. 唐延林, 王秀珍, 王福民, 等.农作物 LAI 和生物量的高光谱法测定.西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, 32 (11): 100~104.
31. 田国良, 包佩丽, 李建军, 等.土壤中镉、铜伤害地水稻光谱特性的影响.环境遥感, 1990, 5 (2): 140~149.
32. 王秀珍, 王人潮, 黄敬峰.微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究.农业工程学报, 2002, 18 (1): 9~13.
33. 王正军, 张爱兵, 程家安, 等.基于 GIS 的种群动态的时空分析与模拟研究的方法进展.生态学报, 2002, 22 (1): 104~110.
34. 王正军, 张爱兵, 李典谟.遥感技术在昆虫生态学中的应用途径与进展.昆虫知识, 2003, 40 (2): 97~100.
35. 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.上海交通大学学报(农业科学版), 20(1):73~76.
36. 武红敢, 陈改英.基于 3“S”和网络技术的森林病虫害监测与管理系统.世界林业研究, 2004, 17 (4): 32~36.
37. 武红敢, 乔彦友, 黄建文, 等.利用陆地卫星 TM 数据评估森林病虫害.遥感技术与应用, 1994, 9 (4): 46~51.
38. 萧术, 寇有观.主要农作物和农业资源的波谱特性研究及其遥感信息解译.遥感技术与应用资料汇编.北京: 科学技术文献出版社, 1984, 175~185.
39. 徐希孺编著.遥感物理.北京: 北京大学出版社, 2005, 25~121.
40. 杨存建, 陈德清, 魏一鸣.遥感和 GIS 在森林病虫害监测管理中的应用模式.灾害学, 1999, 14 (1): 6~10.
41. 杨吉龙, 李家存, 杨德明.高光谱分辨率遥感在植被监测中的应用综述.世界地质, 2001, 20 (3): 307~312.
42. 杨可明, 郭达志.植被高光谱特征分析及其病害信息提取研究.地理与地理信息科学, 2006, 22 (4): 31~34.
43. 张仁华, 饶农新, 廖国男.植被指数的抗大气影响探讨.植物学报, 1996, 38 (1): 53~62.

44. 赵祥, 刘素红, 王培娟, 等.基于高光谱数据的小麦叶绿素含量反演.地理与地理信息科学, 2004, 20 (3): 36~39.
45. 周立阳, 高增祥.害虫预测预报的生态学基础和应用技术研究进展.生态学报, 2001, 21 (6): 1013~1019.
46. 朱述龙, 张占睦.遥感图像获取与分析.北京: 科学出版社, 2000, 105~134.
47. 赵英时, 等.遥感分析原理与方法.北京: 科学出版社, 2003, 36~103.
48. Baret F, Guyot G, Major D J. TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. Proceeding of the 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'89. Vancouver, Canada, 1989, 3: 1355~1358.
49. Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment. *Remote Sens Environ*, 1991, 35: 161~173.
50. Blackburn G A. Spectral indices for estimation photosynthetic pigment concentrations, a test using senescent tree leaves. *Inter J Remote Sensing*, 1998, 19 (4): 657~675.
51. Catherine M. Champagne, Karl Staenz, Abdou Bannari, et al. Validation of a hyperspectral curve-fitting model for the estimation of plant water content of agricultural canopies. *Remote Sens Environ*, 2003, 87: 148~160.
52. Clevers J G P W. The use of imaging spectrometry for agricultural applications. *ISPRS J of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, 54: 299~304.
53. Cloutis E A. Airborne multi-spectral monitoring of agricultural crop status, effect of time of year, crop type and crop condition parameter. *Int J Remote Sensing*, 1996, 17(13): 2579~2601.
54. Danso F M. Red edge response to leaf area index. *Int J Remote Sensing*, 1995, 16(1): 183~188.
55. Dimitrios Moshou, Cédric Bravo, Jonathan West, et al. Automatic detection of yellow rust in wheat using reflectance measurements and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 44: 173~188.
56. G.L.Rinehart, J.H.Baird, R.N.Calhoun, et al. Remote sensing of brown patch and dollar spot on creeping bentgrass and annual bluegrass turf using visible and Near-Infrared spectroscopy. *Australian Turfgrass Management*. Volume 4.2 (April-May 2002)
57. G.Suryanarayana, Reddy. Influence of plant pigments on spectral reflectance of maize, groundnut and soybean grown in semi-arid environments. *Int J Remote Sensing*, 2001, 22(17): 3373~3380.
58. Gregory A, Carter. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *Int J Remote Sensing*, 1994, 15(3): 697~703.
59. Hielkema J U. Assessment of ecological conditions associated with the 1980/81 Desert locust plague upsurge in West Africa using environmental satellite data. *Int J Remote Sensing*, 1986, 7 (11): 1069~1072.
60. Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens Environ*, 1988, 25: 295~309.
61. J.C.Price. Estimate leaf area index from satellite data. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 1993, 31 (3): 727~734.
62. Jordan C F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 1969,

- 50: 663~666.
63. Kaufman Y J , Tanré D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1992, 30 (2): 261~270.
64. Liu H Q, Huete A R. A feedback based modification of the *NDVI* to minimize canopy background and atmosphere noise. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 1995, 33:457~465.
65. Liu Wei-dong, F.Baret, Zhang Bing, et al. Using hyperspectral data to estimate soil surface moisture under experimental conditions. Journal of Remote Sensing, 2004, 8 (5): 434~442.
66. Madeira AC, Mendonca A, Ferreira ME, et al. Relationship between spectroradiometrie and chloropuyl measurements in green beans Communication. Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(5-6): 631~643.
67. Malthus T.J, Maderia A.C. High resolution spectroradiometry, spectral reflectance of field bean leaves infected by *botrytis fabae*. Remote Sens Environ, 1993, 45: 107~116.
68. Miller J R. Quantitative characterization of the vegetation red edge reflectance 1. An Inverted-Gaussian reflectance model. Int J Remote Sensing, 1990, 11(10): 1755~1773.
69. Minghua Zhang, Zhihao Qin, Xue Liu, et al. Detection of stress in tomatoes induced by late blight disease in California, USA, using hyperspectral remote sensing. Inter J of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2003, 4:295~310.
70. Minolta Co. , Ltd. Chlorophyll SPAD — 502 Instruction Manual, Radiometric Instruments Operations, 1989. 17—21.
71. N.H.Broge, J.V.Mortensen. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. Remote Sens Environ, 2002, 81: 45~57.
72. Patel N K. Study of crop growth parameters using airborne imaging spectrometer data. Inter J Remote Sensing, 2001, 22(12):2401~2411.
73. Pearson R. Real-time airborne agricultural monitoring. Remote Sens Environ, 1994, 49:304~310.
74. Penuelas J, Filella I, Serano L, et al. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. Inter J Remote Sensing, 1993, 14 (10): 1887~1905.
75. Prasads Thenkbabail. Hyperspectral vegetation indeces and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sens Environ, 2000, 71:158~182.
76. Qi J, Kerr Y H. Leaf area index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region. Remote Sens Environ, 2000, 73:18~30.
77. Qi J. Modified soil adjusted vegetation index. Remote Sens Environ, 1994, 48:119~126.
78. Railyan V Y. Red edge structure of canopy reflectance spectra of triticale. Remote Sens Environ, 1993, 46: 173—182.
79. Rouse J W, Haas R H, Deering D W, et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC. Remote Sensing Center, Texas A&M Univ, College Station, 1974.
80. Shibayama, M., Munakata, K.A. Spectroradiometer for field use, IV. Radiometric prediction of grain yields for ripening rice plants. Japan Journal of Crop Science, 1986, 55 (1): 53~59.

81. Tomas Ayala-Silva,Caula A.Beyl.Changes in spectral reflectance of wheat leaves in response to specific macronutrient deficiency.*Advances in Space Research*,2005,35:305~317.
82. Tucker C J, Hielkema J U, Roffey J.The potential of satellite remote sensing of ecological conditions for survey and forecasting desert locust activity.*Int J Remote Sensing*, 1985, 6 (1): 127~138.
83. Voss F, Dresier U.Mapping of desert locust habitats using remote sensing techniques, In: Krall S et al eds.*New Strategies in Locust Control*.Berlin: Birkhauser Verlag, 1997, 37~46.
84. Weissten J L,Gutzler D S,Coonrod J E A,et al.Long-term vegetation monitoring with *NDVI* in a diverse semi-arid setting,central New Mexico,USA.*J of Arid Environments*,2004,58(2):249~272.
85. Welles J M, Norman J M.Instrument for indirect measurement of canopy architecture.*Agron J*,1991,83(5):818~825.
86. Yang H, Zhang J, Van Der Meer F, et al.Imaging spectrometry data correlated to hydrocarbon.*Int J Remote Sensing*, 2000, 21 (1): 197~202.
87. Z.Yang,M.N.Rao,N.C.Elliott,et al.Using ground-based multispectral radiometry to detect stress in wheat caused by greenbug infestation.*Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 47:121~135.

致 谢

本论文得到科技部科研院所社会公益项目“种植结构调整期农作物病虫灾害监测预警及减灾对策”(2004DIB4J155)资助，在此表示感谢。

本论文是在我的导师周清波研究员的悉心指导下完成的，从论文的选题，研究方案设计，实施以及数据分析，到论文的完成，每一步都凝结了周老师的心血，在此深表谢意。三年的相处中，周老师不仅给予我学业的指导，还教会了我许多做人的道理，让我受益匪浅。他严谨的治学态度，求实的工作作风，是我终身学习的榜样。

感谢中国农科院植保所的曹雅忠研究员，对我论文的关心和指导。

感谢遥感室这个温暖的集体，让我们度过了三年幸福的时光。

感谢陈仲新、刘佳、王利民、杨桂霞等老师三年来在学习生活等各方面的关心和帮助，感谢李丹丹、张莉、郭永理、许国萍等，谢谢你们平时的支持和帮助。

特别要感谢我的两位学兄，李森博士和李章成博士，李章成博士协助我完成了地面调查工作，并对论文的完成提供了很多帮助。李森博士在完成自己论文的同时，帮助我对论文进行了修改。谢谢二位。

还有我们六楼的各位同学，感谢大家平时的关心和支持。

还要感谢襄樊植保站的黄朝炎、赵强等同志，帮助我们进行了地面调查工作，并提供了诸多支持。更为重要的是，给我的论文提供了许多调查资料。

我要深深感谢我的家人，他们一直对我的关怀和照顾，特别是我的岳父母，担起了照顾孩子的重任，让我有精力完成学业。

最后，要十分感谢我的妻子张彦女士，长期以来给我学业、精神方面的全面支持。

江道辉

2007年6月

作 者 简 历

江道辉，男，1974年2月生。湖北武汉人。

1992年9月至1996年7月，在湖北大学地理学系地理教育专业学习，获理学士

1996年7月至2004年8月，在北京市丰台区看丹中学担任教师

2004年9月至今，中国农业科学院研究生院学习

参加项目：

- 1、科技部科研院所社会公益项目：“种植结构调整期农作物病虫灾害监测预警及减灾对策”
- 2、农业部项目：作物估产的地面调查工作
- 3、新疆兵团新疆棉花冻害遥感监测研究
- 4、863计划“以遥感信息为基础的区域作物水分信息监测技术”。