

密级

论文编号

# 中国农业科学院

# 学位论文

玉米受玉米弯孢菌叶斑病和亚洲玉米螟为害  
后的冠层光谱特征和产量损失研究

**The Study of the Corn Canopy Hyperspectral Character and  
Yield Loss after Damaged by Asian Corn Borer and Maize  
Curvalaria Leaf Spot**

硕士研究生：张永强

指导教师：文丽萍 副研究员

申请学位类别：农学硕士

专业：农业昆虫与害虫防治

研究方向：病虫害综合治理

培养单位：中国农业科学院研究生院  
植物保护研究所

提交日期 2007 年 6 月

Secrecy:

No.

# **Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation**

**The Study of the Corn Canopy Hyperspectral Character and  
Yield Loss after Damaged by Asian Corn Borer and Maize  
Curvalaria Leaf Spot**

**Ms. Candidate: Zhang Yongqiang**

**Advisor: Associate Prof. Wen Liping**

**Major: Agriculture Insect and Pest Management**

**Specialty: Plant Diseases and Insect Pests**

**Comprehensive Treatment**

Chinese Academy of Agricultural Sciences  
Institute of Plant Protection

June 2007

## 独 创 性 声 明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中国农业科学院或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名： 时间： 年 月 日

## 关于论文使用授权的声明

本人完全了解中国农业科学院有关保留、使用学位论文的规定，即：中国农业科学院有权保留递交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同意中国农业科学院可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

研究生签名： 时间： 年 月 日

导师签名： 时间： 年 月 日

**中国农业科学院**  
**专业学位论文答辩委员会名单表**

论文题目		玉米受玉米弯孢菌叶斑病和亚洲玉米螟为害后的冠层光谱特征和产量损失研究			
论文作者		张永强	指导教师	文丽萍	
学位名称		农业硕士	专业领域	农业昆虫与害虫防治	
姓名		职称	单 位	专 业	签 名
答辩主席	沈佐锐	教授	中国农业大学	植物保护	
答辩委员	张芝利	研究员	北京市农林科学院	昆虫学	
	吴孔明	研究员	中国农业科学院植物保护研究所	植物保护	
	王振营	研究员	中国农业科学院植物保护研究所	植物保护	
	何康来	研究员	中国农业科学院植物保护研究所	植物保护	
会议记录(秘书)		白树雄			
论文答辩时间地点		2007年6月19日 中国农业科学院植保所			

# 摘要

本文采用高感玉米弯孢菌叶斑病 *Curvularia lunata* (Wakk) Boed 的“沈试 3005”和高感亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* (Guenée) 的“郑单 958”两品种，在田间自然条件下，分别人工接种弯孢菌叶斑病病菌和亚洲玉米螟 2 龄幼虫以造成不同程度的危害级别，在危害后的不同时期利用便携式高光谱遥感测量仪测定玉米植株冠层光谱反射率，同时调查玉米螟危害造成的食叶级别及玉米弯孢病发生的病情指数，测定叶绿素含量及小区产量。探讨了玉米受玉米弯孢菌叶斑病和亚洲玉米螟为害后的冠层光谱特征和产量损失的关系，通过对试验结果的统计分析，得出以下结果：

1. 侵染为害后，随着玉米弯孢菌叶斑病病情指数的增大，玉米植株冠层光谱反射率值在红光区（630nm~724nm）升高，而在近红外光区（745nm~900nm）减小。对照和发病处理间的光谱反射率值差异达到显著水平，以此建立了病情指数与光谱反射率分析模型。
2. 亚洲玉米螟危害后，其冠层光谱反射率值在波段（400nm~900nm）范围内和食叶级别均呈负相关关系，在近红外区其相关性最高。玉米弯孢菌叶斑病侵染为害后的光谱特征和玉米螟为害后的相比，在近红外区的变化是一致的，与病情指数呈极显著负相关关系。由此得出在近红外区的 745~900nm 波段为监测亚洲玉米螟和玉米弯孢菌叶斑病危害后的敏感波段。
3. 亚洲玉米螟食叶危害与玉米弯孢菌叶斑病侵染后对玉米叶片的叶绿素含量的影响测定结果表明：不同接虫处理与对照间其冠层叶片的叶绿素含量差异性不显著；而玉米弯孢菌叶斑病侵染玉米植株后，接种发病处理间差异性显著，其差异随发病时间的延长更加显著。接菌 26 天后，发病指数为 78% 的处理区叶片叶绿素含量比对照减少了 1.41mg/g。
4. 亚洲玉米螟和玉米弯孢菌叶斑病为害后，近红外区冠层光谱反射率值、全波段光谱反射率值的一阶导数光谱最大值和产量损失率之间存在高度负相关性。可用来估测最终的产量损失。具体结果为：玉米弯孢菌叶斑病为害后其产量损失率（L）与蜡熟期的光谱反射率值的一阶导数（ $P'(max)$ ）相关性系数  $r=-0.84^{**}$ ，估产方程式  $L(\text{病})=53.8-3231.5P'(\text{max})$ ；亚洲玉米螟为害后，乳熟期的 810nm 光谱反射率值和产量损失率的相关系数  $r=-0.75^{**}$ 。估产方程式： $L(\text{虫})=84.93-224.79R_{810}$ 。
5. 依据植被指数公式将高光谱红光波段和近红外波段平均反射率值计算获得四种植被指数，分别与病情指数、食叶级别进行回归及相关性分析。结果显示 4 个植被指数均可以准确地反演病情指数（DI）和食叶级别（LF），其中以再归一化植被指数（RDVI）的拟合效果最佳。DI=  $-167.71\text{RDVI}$ （病）+123.27， $r=-0.83$ 。LF=  $42.145-71.965\text{RDVI}$ （虫）， $r=-0.634$ 。

**关键字：**玉米冠层高光谱，亚洲玉米螟，弯孢菌叶斑病，食叶级别，病情指数，产量损失

## Abstract

In this paper, the corn canopy hyperspectral character and yield loss were studied after infested by Asian corn borer, *Ostrinia furnacali* and maize curvalaria leaf spot, *Curvalaria lunata* at the two maize varieties in 2005 and 2006. One was highly susceptible to Asian Corn Borer, and the other one was highly susceptible to Maize curvalaria leaf spot. The ASD FieldSpec HandHeld was used to collect the canopy spectrum at different damage level and growth stages of maize, and meanwhile, the disease index and leaf feeding rating were surveyed. The yield loss was measured at the harvest. The data were analyzed with statistics and main results were summarized as follows:

1. The reflectance of canopy spectrum after infested with maize curvalaria leaf spot were getting bigger in the red region (630nm~724nm) but were getting smaller in the near infrared region (745~900nm) along with the increase of the disease indexes. The significant differences were shown among the control and 4 disease treatments.
2. When the maize was damaged by the Asian Corn Borer, negative correlation coefficients were shown between leaf feeding rating and the reflectance of spectrum from 400nm to 900nm. The correlation coefficients in the near infrared region were higher than those in other spectrum regions. Comparing the corn canopy hyperspectral character of damaged by the insect pest with the disease, the reflectances of spectrum in the near infrared region have the higher negative correlation with leaf feeding rating and the disease index, respectively, so that the region from 745nm to 900nm can be used as the sensitive band for estimating the occurrence of the Asian corn borer and the maize disease.
3. The changing of the chlorophyll content were different after damaged with the ACB and Maize Curvalaria Leaf Spot. There were no significant differences among the chlorophyll contents of 5 infested levels with ACB, While after damaged by the Maize Curvalaria Leaf Spot, the leafs chlorophyll contents were remarkable decreased and more significant differences among the 5 infested levels were found. 26 days after infesting, the chlorophyll content in the treatment of the highest disease index (78%) was less than 1.41mg/g than that in the control.
4. After damaged by the ACB and Maize Curvalaria Leaf Spot, the maximum of the first derivative value of canopy spectrum and the near infrared spectrum values have significant negative correlation with the yield loss. Both can be used to assess yield loss(L). The equation for Maize Curvalaria Leaf Spot was  $L(\text{dis})=53.8-3231.5P'(\text{max})$ ,  $r=-0.84^{**}$ ; the equation for ACB was  $L(\text{borer})=84.93-224.79 R_{810}$ ,  $r=-0.75^{**}$ ,
5. The 4 vegetation indexes of the reflectance of spectrum from the red spectrum region and the near infrared region were calculated according to the reported equations. All of them have a significant negative correlation with the leaf feeding rating (LF) or the disease index (DI). The vegetation index RDVI was the best one to assess LF or DI. The two equations are: for Maize Curvalaria Leaf Spot,  $DI=123.27-167.71RDVI$ ,  $r=-0.83$ ; for ACB,  $LF=42.145-71.965RDVI$ ,  $r=-0.634$ .

**Key words:** Corn canopy hyperspectral character, Asian Corn Borer, Maize Curvalaria Leaf Spot, leaf feeding rating, disease index, yield loss

# 目录

第一章 引言 .....	1
1.1 遥感及高光谱遥感技术 .....	1
1.2 高光谱遥感监测病虫害的原理 .....	2
1.3 国内外高光谱遥感在监测植物病、虫、肥胁迫中的应用.....	2
1.3.1 作物叶绿素含量、叶绿素密度和高光谱数据之间关系的研究 .....	2
1.3.2 作物缺素状态下高光谱特征分析 .....	3
1.3.3 作物受虫害胁迫后的光谱特征分析 .....	4
1.3.4 作物受病害胁迫后的光谱特征分析 .....	5
1.4 高光谱遥感应用于监测作物病虫肥胁迫中存在的问题.....	6
1.4.1 “同物异谱”和“异物同谱”现象 .....	6
1.4.2 特征波段的选择 .....	6
1.5 本试验的目的和意义 .....	6
1.5.1 实验目的 .....	6
1.5.2 实验意义 .....	6
1.5.3 实验设计 .....	7
第二章 玉米受玉米弯孢菌叶斑病危害后的光谱特征变化及产量损失研究 .....	8
2.1 材料与方法 .....	9
2.1.1 试验材料 .....	9
2.1.2 接菌的时间、菌量和方法 .....	9
2.1.3 光谱测量仪器及全球定位系统仪的测量方法和计算公式 .....	9
2.1.4 测量光谱时玉米所处的生育期和天气情况 .....	10
2.1.5 弯孢菌叶斑病病情指数计算和调查方法 .....	10
2.1.6 叶绿素含量的测定仪器、方法和公式 .....	11
2.1.7 收获时产量及产量损失率的计算方法 .....	11
2.1.8 植被指数的计算方法 .....	11

2.1.9 数据处理.....	12
2.2 结果与分析.....	12
2.2.1 不同时期健康玉米的光谱特征.....	12
2.2.2 接种玉米弯孢菌后不同生育期不同处理玉米的光谱特征和病情指数的关系 .....	15
2.2.3 玉米弯孢菌叶斑病危害后玉米冠层光谱敏感波段的选择 .....	18
2.2.4 接种玉米弯孢菌后各时期植被指数和病情指数的相关性分析 .....	19
2.2.5 玉米弯孢菌病感染后玉米各生育期叶片叶绿素含量的变化与植被指数相关性分析 ....	26
2.2.6 玉米弯孢菌侵染后产量损失率与各时期光谱特征、植被指数的分析 .....	27
2.3 结论与讨论 .....	29
<b>第三章 玉米受亚洲玉米螟为害后的冠层光谱特征变化及产量损失研究 .....</b>	<b>31</b>
3.1 材料与方法 .....	31
3.1.1 试验材料.....	31
3.1.2 试验设计和光谱测量方法 .....	31
3.1.3 叶绿素和植被指数的测定 .....	32
3.1.4 玉米为害的食叶级别测量方法 .....	32
3.1.5 小区产量测定、计算及数据处理 .....	32
3.2 结果与分析 .....	32
3.2.1 不同时期健康玉米的光谱特征 .....	32
3.2.2 接种玉米螟幼虫后不同时期各处理玉米食叶级别光谱特征的关系 .....	33
3.2.3 接种玉米螟幼虫后各时期叶绿素含量和光谱数据及植被指数的相关性分析 .....	36
3.2.4 接种玉米螟幼虫后产量损失率、产量和各时期光谱特征、植被指数的相关性分析 ....	38
3.2.5 玉米螟危害后玉米冠层光谱敏感波段的选择 .....	39
3.3 结论与讨论 .....	40
<b>第四章 总结论 .....</b>	<b>41</b>
4.1 主要研究结论 .....	41
4.1.1 玉米弯孢菌叶斑病和亚洲玉米螟为害后光谱特征的分析 .....	41
4.1.2 亚洲玉米螟为害和玉米弯孢菌叶斑病为害后叶绿素变化的分析 .....	42

4.1.3 亚洲玉米螟为害和玉米弯孢菌叶斑病为害后产量损失和冠层光谱数据的分析 .....	42
4.1.4 亚洲玉米螟为害和玉米弯孢菌叶斑病为害后四种植被指数对食叶级别、病情指数及叶绿素含量的反演 .....	43
4.2 高光谱遥感在病虫害监测中的应用展望 .....	43
参考文献 .....	45
致 谢 .....	49
作 者 简 历 .....	50

## 英文缩略表

英文缩写	英文全称	中文名称
ACB	Asian Corn Borer	亚洲玉米螟
DI	Disease Index	病情指数
LFR	Leaf Feeding Rating	食叶级别
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	归一化植被指数
DVI	Difference Vegetation Index	差值植被指数
NDVI	Ratio of Vegetation Index	比值植被指数
RDVI	Renormalized Difference Vegetation Index	再归一化植被指数
ASD	Analytical Spectral Device	光谱分析仪
GPS	Global Position System	全球定位系统
Chl	Chlorophyll	叶绿素
Chl a	Chlorophyll a	叶绿素 a
Chl b	Chlorophyll b	叶绿素 b
R <sub>NIR</sub>	Reflectance of Near Infrared Region	近红外区光谱反射率
R <sub>RED</sub>	Reflectance of Red Region	红光区光谱反射率
TM	Thematic Mapper	专题制图仪

# 第一章 引言

我国玉米的播种面积和产量占世界第二，玉米也是我国第二大粮食作物，播种面积 2500 万公顷左右，总产达 1.2 亿吨，在国民经济中具有举足轻重的地位。玉米病虫灾害是影响玉米产量的主要生物灾害，在我国能够造成玉米损失的虫害有 52 种，病害近 40 种。其中玉米大、小斑病 (*Helminthosporium turcicum* Pass, *Helminthosporium maydis* Nisik & Miy)、亚洲玉米螟 [*Ostrinia furnacalis* (Guenée)] 是长期以来我国玉米生产上的重要病虫害，大斑病大发生年造成大片玉米过早枯死，减产达 10-30%，小斑病大发生年减产也在 30% 以上，玉米螟常年为害造成 10-20% 的产量损失，大发生时可造成 30-50% 以上。近年来由于我国玉米耕作制度和品种的变化等原因，原来很少发生的玉米弯孢菌叶斑病 (*Curvularia lunata* (Wakk) Boed) 自 1996 年在辽宁省暴发流行成灾以来，发生面积逐年扩大，病情渐趋严重，已成为制约玉米生产的一种重要的病害，对玉米生产构成极大的威胁，引起广大植保和育种工作者的普遍关注。因此，防治病虫害一直是保障玉米稳产高产的主要手段之一。高光谱分辨率遥感，是建立在现代物理学、电子计算机技术、数学方法和地学规律上的一门新兴的前沿科学技术，虽然只有二十多年的历史，但发展迅速，已经在地理学、地质学、生态学、环境科学、大气科学和海洋科学等领域得到广泛的研究和应用。在农业中也有了试验性的应用，本文所研究的内容探讨了高光谱遥感在监测植物病虫害中的应用问题。

## 1.1 遥感及高光谱遥感技术

遥感 “Remote Sensing” 即 “遥远的感知”，是在测量仪器和目标物体不接触的情况下而获取和解译目标物的方法。被测物体是在无损和不侵入的情况下被多次的分析。遥感分析系统一般由遥感平台、传感器、遥感数据接收与处理系统和遥感资料分析解译系统四部分组成。从不同的方面对遥感进行分类，遥感可分为地面遥感，航空航天遥感；主动和被动遥感；可见光、红外遥感，微波遥感，多光谱遥感，高光谱遥感和紫外遥感；地质遥感、农林业遥感和环境遥感等（常庆瑞，1983）。

高光谱遥感是高光谱分辨率遥感 (Hyperspectral Remote Sensing) 的简称。高光谱分辨率遥感或成像光谱遥感技术的发展是过去二十年中人类在对地观测方面所取得的重大技术突破之一，是当前遥感的前沿技术。它是指利用很多很窄的电磁波波段获取许多非常窄且光谱连续的图像数据的技术，融合了成像技术和光谱技术，准确实时地获取研究对象的影像和每个像元的光谱分布。国际遥感界认为光谱分辨率在  $10^{-1}\lambda$  数量级范围内的为多光谱 (Multispectral) 遥感，如美国陆地卫星 TM 和法国 SPOT 卫星等；光谱分辨率在  $10^{-2}\lambda$  的遥感称之为高光谱遥感。又如航空可见光、近红

外成像光谱仪AVIRIS, 即在可见光区到近红外光谱区其光谱通道多达数十甚至超过一百个以上。由于这些高光谱

遥感具有波段多, 分辨率高达纳米(nm)数量级等优点, 更有利于用光谱特征分析来研究地物, 各种光谱匹配的模型, 以及地物的精细分类和识别。对受到各种胁迫后光谱的变化也能更精确的表达(浦瑞良等, 2000)。

## 1.2 高光谱遥感监测病虫害的原理

健康绿色植物的光谱特征主要取决于它的叶子。在可见光谱波段内, 植物的光谱特性主要受叶绿素的影响。由于在以 450nm 为中心的蓝波段以及 670nm 为中心的红波段的叶绿素强烈吸收辐射能而成吸收谷。叶片的反射率和透射率很低, 在两谷之间吸收相对减少, 形成绿色反射峰, 简称“绿峰”, 在视觉上表现为绿色。当植物生长健康, 处于生长期高峰, 叶绿素含量高时, “绿峰”向蓝光方向偏移, 而植物因病虫危害或缺素而“失绿”时, “绿峰”则向红光方向偏移(浦瑞良等, 2000)。在近红外波段绿色植物的光谱作用取决于叶片内部的细胞结构。一般认为健康叶片的海绵状叶肉组织的所有空间都充满水分而膨胀时, 对任何辐射都是一种良好的反射体, 间插在叶肉组织的栅状柔软网胞组织, 吸收可见光中的蓝光和红光而反射绿光。当植物受病害侵害时, 叶片组织的水分代谢受到阻碍, 此后随着病虫害危害的加重, 植物细胞结构遭到破坏, 各种色素的含量也随之减少, 导致叶片对近红外辐射的反射能力减少。在光谱特征上表现为可见光区(400nm 到 700nm) 反射率升高而近红外区(720nm 到 1100nm) 反射率降低。近红外区研究的重点是“红边”。红边的定义是反射光谱的一阶微分的最大值对应的光谱位置(波长), 通常位于 680nm 到 750nm 之间。“红边”位置依据叶绿素含量、生物量和物候变化, 延波长轴方向移动。当叶绿素含量高、生长活力旺盛时, “红边”会向红外方向偏移; 当植物由于感染病虫害或因污染、物候变化而“失绿”时, 则“红边”会向蓝光方向移动。研究发现近红外部分反射率的改变是发生在可见光部分的反射率发生改变之前的。这是因为在这段时间内, 细胞组织中的叶绿素的数量和质量还没有发生改变。由此可见红外波段的光谱特征的变化早于人用肉眼观测到的病虫危害, 这对于病虫害的早期调查和测报具有极其重要的意义(常庆瑞等, 2004; 赵英时, 2003)。

## 1.3 国内外高光谱遥感在监测植物病、虫、肥胁迫中的应用

### 1.3.1 作物叶绿素含量、叶绿素密度和高光谱数据之间关系的研究

作物在不同的生育期, 随着叶片中叶绿素含量的变化, 以及植株叶面积指数的变化, 其在各个生育期的冠层光谱数据值是不同的, 并且不同的作物之间光谱数据也有差异。玉米植株光谱特

征随着发育期的推移，在达到最大叶面积指数之前，冠层反射率在可见光范围内降低，而在近红外区域增高（唐延林等，2003）。水稻、玉米和棉花这三种作物冠层光谱和叶片光谱的最大值的顺序是不同的。冠层光谱最大值由大到小的顺序依次为棉花>玉米>水稻，而叶片为：水稻>棉花>玉米。但无论是哪一种作物的冠层红边参数，即红边位置、红边幅值和红边面积与叶面积指数（LAI）、鲜叶重等农艺性状参数之间都具有极显著的相关性（唐延林等，2004）。

在叶绿素含量、叶绿素密度与光谱反射率值、红边位置等的关系方面，已有许多研究报告。水稻的叶绿素（金震宇等，2003）和棉花、玉米、大豆、甘薯四种叶片的类胡萝卜素（赵德华等，2004）在单位面积的含量与叶片光谱反射率在700nm附近存在稳定的相关关系。而去除了背景噪音的影响，经导数光谱变换的数据比原始的光谱数据在某些波段对叶绿素浓度和密度有更好的反映。如王登伟等（2003）利用高光谱研究技术估测了棉花的主要栽培生理参数，确立的一阶微分光谱值与棉叶叶绿素的在750nm波段处相关性最大。孙莉等（2004）研究也发现棉花4个生育期高光谱数据的一阶微分导数可以清晰的描述棉花光谱的变化情况，且一阶微分变化最明显的区域为“红边”区域。吴长山等（2000）对水稻、玉米的光谱数据和叶绿素进行相关分析后得出原始光谱反射率和光谱一阶导数光谱以及“红边”位置与叶绿素密度存在显著的相关性，而与叶绿素含量相关性较差。这是因为叶绿素密度和光谱数据都反映了叶片的反射和多次散射的信息，所以相关性较高。

除以上所述单波段的数据和农艺性状数据外，还可以通过组合不同波段的数据进行更好的数据分析，如各种植被指数。王登伟等（2003）利用高光谱研究技术估测棉花的主要栽培生理参数后得出叶面积指数与归一化植被指数（NDVI）有很好的对数相关关系。谭昌伟等（2004）综合分析了10种常见的光谱植被指数与夏玉米叶面积指数之间的关系后，发现光谱植被指数的预测性在夏玉米喇叭口到吐丝期最佳，而近红外和绿波波段的比值（ $R_{810}/R_{560}$ ）与叶面积指数呈显著的指数关系，且不受玉米品种类别、生育时期和氮肥水平的影响。

### 1.3.2 作物缺素状态下高光谱特征分析

在不同营养成分和水分胁迫下作物光谱特征的变化方面，国内外研究最多的是缺氮对于作物冠层光谱变化的影响。研究的主要作物包括小麦（代辉等，2005），水稻（Carter等，1993，1996；唐延林等，2004）和玉米（程一松等，2001）等。据报道缺氮状况下作物叶片和正常营养水平下的叶片光谱特性显著不同。缺氮导致了叶绿素含量的降低，而叶绿素含量是导致植物光谱特征差异的主要内在因素。然而无论缺氮与否，叶绿素含量和光谱值在近红外区相关性最大，且在“红边”位置处达到最大值，施氮量越高，近红外区的反射率就越高。而氮素胁迫越严重，红边位置和叶绿素含量的相关性越高（程一松等，2001）。研究还发现水稻在成熟过程中

其叶片光谱的红边位置存在“蓝移”现象（唐延林等，2004）。但低温胁迫下夏玉米苗期不同氮磷钾处理情况下没有“红移”和“蓝移”现象。王磊等（2004）提出紫光波段 400nm 处的光谱反射值可用来诊断植物体内的钾含量。程一松等（2003）将光谱特征参量和叶绿素密度，叶绿素含量等农学参量进行了相关分析后，得出冬小麦孕穗期的反射峰值和绿峰差异最为显著，并提出孕穗期是利用高光谱遥感进行作物长势和养分诊断研究的最佳时期。国外有关研究结果表明在所有营养胁迫条件下叶片的叶绿素含量都会降低，但降低程度不一，缺氮时叶绿素含量最低；同时还可引起见光波段的反射率的增加，其增加程度与植物种类有关（Blackmer 等，1993，1994，1996a）。

### 1.3.3 作物受虫害胁迫后的光谱特征分析

高光谱遥感在虫害监测方面研究最多的昆虫是蚜虫。蚜虫具有刺吸式的口器，会导致寄主叶片变化、变形或者落叶，并能分泌蜜露，可以导致烟霉菌的大量滋生沉积，最终致使寄主植物叶片在近红外波段的反射率值不断下降。在国外，Kieckhefer 等（1980，1988，1995）和 Krause 等（1984，1991）研究了蚜虫危害小麦后的产量损失以及作物叶绿素变化情况。在蚜虫危害的初期小麦自身产生过补偿效应，叶绿素含量升高，但当超过其本身的补偿能力后，叶绿素含量又开始下降，最终的结果是蚜虫增加量与叶绿素含量的下降量成正相关。Riedell 等（1989，1993，1995）研究了干旱情况下蚜虫危害作物后的反应，并在室内进行了蚜虫危害作物后叶绿素的变化研究，叶绿素的变化可以作为害虫危害作物后光谱变化的一个指标。在国内，何国金等（2002）测定小麦生育期内叶绿素含量变化及分析了叶绿素含量与麦蚜数量间的动态关系，将 3 年的地面光谱数据和蚜量进行相关性分析，绘制出相关性曲线，证明利用小麦的反射光谱植被指数 RVI 值可用来监测麦蚜的发生危害情况。乔红波等（2004）发现随着麦蚜危害的加重，小麦冠层的反射率在近红外区下降最显著，且随着危害程度的加重其一阶导数光谱值逐渐下降。

除蚜虫外，吴继友等（1995）对松毛虫危害后的光谱特征进行了研究，对其反射光谱和叶绿素含量进行了测量分析。随受害程度加重，叶绿素含量降低，550nm 处的反射率、近红外反射率与红光最低反射率之差及红边一阶导数光谱最大值均呈下降趋势，630nm 处反射率呈上升趋势，红边光谱蓝移、叶绿素反射峰红移明显。应用逐步判别分析法对比分析证实了某一个特征波段的光谱参量比绿、红、近红外三波段反射率参量有更强的判别分类能力。倪绍祥等（2002）利用 LANDSAT TM 数据，经过最大似然分类，将我国环青海湖地区草地蝗虫的生境类型划分为九类，对环青海湖地区草地生境的蝗虫潜在发生可能性进行了评价。

### 1.3.4 作物受病害胁迫后的光谱特征分析

病害可分为线虫病, 病毒病, 细菌性病害以及真菌性病害等。

受线虫侵害的寄主植物会表现出叶片黄化, 植株矮化、生育迟缓等症状, 从而导致了植株的光谱特性发生在近红外区显著的下降。最成功的应用是 Nutter 等 (1989) 利用 Landsat TM 卫星遥感数据并结合 GIS 对大豆胞囊线虫的危害进行了遥感监测, 并对危害严重程度和大豆产量、蛋白质含量、含油量进行回归分析, 结果表明地理信息系统支持下的遥感提供了一种新的探测和定量大豆胞囊线虫种群密度的方法。

植物细菌性病害, 其多半属于急性的坏死, 出现腐烂, 萎蔫, 溃疡等症状, 会导致寄主植物叶绿素的大量破坏和整个寄主植物的萎蔫枯死, 在光谱上反映为反射红外辐射的能力大大下降。Nilsson 等 (1985) 利用手持式的辐射光谱仪研究了作物的反射光谱和植物病理学状态之间的关系, 包括了油菜茎腐病, 大麦茎黑斑病, 发现病害的严重程度和近红外波段区的反射率之间存在着高度的相关关系, 如 700nm 到 1100nm。病害的严重程度对近红外与红光反射率的比值有很高的依赖度, 而病情指数和绿光与红光反射率的比值有很高的相关性。

真菌性病害是植物病害中种类最多也最重要的一种, 是国内外利用高光谱遥感进行研究最多的一种。研究的作物上的病害包括有冬小麦条锈病 (黄木易等, 2004), 玉米小斑 (Ansmus 等, 1972) 病, 水稻稻瘟病 (吴曙雯等, 2001), 大豆的蚕豆斑点病 (Malthus 等, 1993), 以及蔬菜中的番茄晚疫病 (Zhang 等, 2003) 和甜菜黄萎病 (Demetriades-Shah 等, 1988) 等。研究结果的共同之处是: 健康植株和感病植株的冠层光谱在可见光区的差异不显著, 可见光区只有到了叶片颜色改变才出现差异 (Ansmus 等, 1972)。但在近红外区差异性显著, 即病害等级越高, 近红外区光谱下降的越显著。而且用航空遥感测得的图像分析结果和地面光谱数据所得的结果是一致的 (Zhang 等, 2003)。将原始光谱数据和一阶导数光谱数据与叶绿素含量、病情指数作相关性分析后得出, 一阶导数光谱和病情指数等的相关性要高于原始光谱数据 (Malthus 等, 1993)。在国内对水稻受稻瘟病危害后的研究中, 发现受病害侵染后的水稻近红外区的冠层光谱较健康水稻的冠层光谱出现下降的趋势, 同时绿波段和红波段则是下降和上升的趋势 (吴曙雯等, 2001)。所得结论之中也有不同之处, 例如发现甜菜在 524nm 和 656nm 处的一阶导数光谱值和病情指数相关性最高 (Demetriades-Shah 等, 1998), 而对苜蓿 (J. Guan 等, 2002) 和大豆 (Malthus 等, 1993) 研究后发现, 810nm 处的原始光谱反射率值和 800nm 处的一阶导数光谱值与植株被危害程度最相关。这可能是与所研究的作物种类的或病害的不同而有所区别的。

## 1.4 高光谱遥感应用于监测作物病虫肥胁迫中存在的问题

由于高光谱遥感是在田间做近地光谱观测或是高空的航空航天遥感观测,所以必然会受到天气状况、大气以及太阳高度角等条件的影响。主要会存在以下问题:

### 1.4.1 “同物异谱”和“异物同谱”现象

对于同一种作物来说,引起植株叶绿素变化的不同因素反映在光谱上会有近似相同的特征图谱。而对于不同的作物,由于受不同大气状况,太阳高度角,叶片湿度等各种原因的影响,又会出现相同的光谱特征。这就为利用高光谱遥感来鉴别作物的危害状况增加了难度。

### 1.4.2 特征波段的选择

高光谱遥感的波段分辨率高,所得到的数据量巨大,怎样从大量的光谱数据中找出和作物农学参数相关性最高,可分析性最好的精确波段是首先要考虑的问题。然而对于不同的作物受到同一种病虫害胁迫后,最敏感的鉴别波段是不同的;对于同一种作物,受到不同的病虫害胁迫后最敏感的鉴别波段也是不同的。这就需要做大量工作来建立不同作物受不同病虫害危害后的光谱数据库。

## 1.5 本试验的目的和意义

### 1.5.1 实验目的

利用 ASD Fieldspec Handheld 手持便携式光谱分析仪,研究玉米受亚洲玉米螟和玉米弯孢菌叶斑病危害后的光谱特征变化,分析光谱特征变化和玉米受害程度之间的关系,确定精确监测病虫害的敏感波段和敏感时期,建立预测病情发展及玉米螟为害的拟合方程。通过分析不同时期光谱特征和最终产量的关系,以获得预测产量损失的光谱数据及预测式。

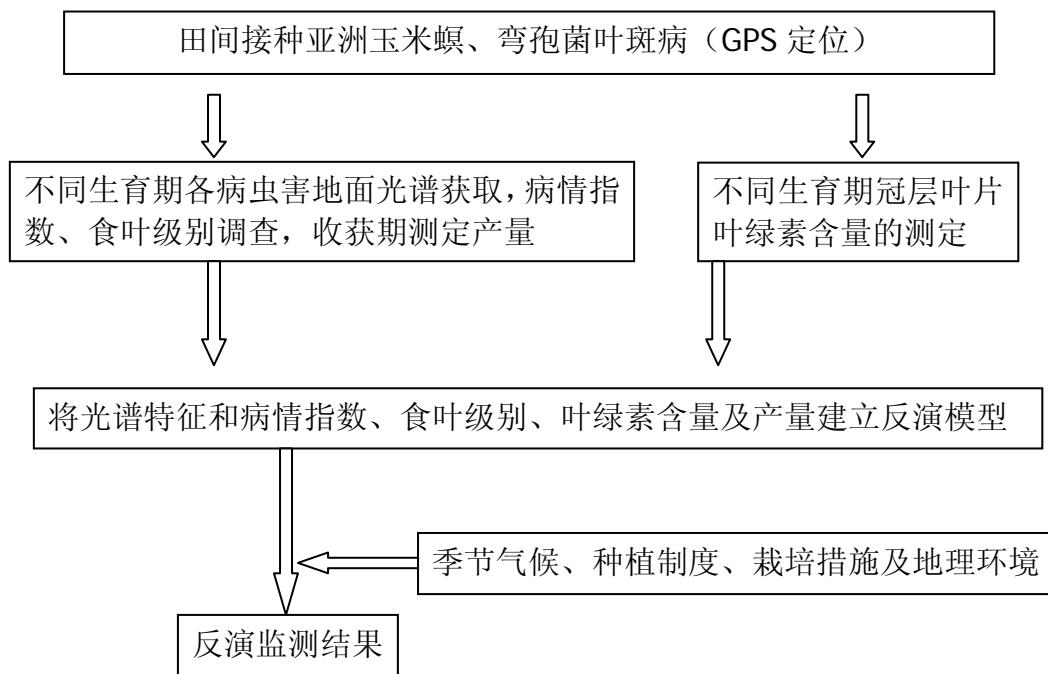
### 1.5.2 实验意义

玉米病虫灾害是影响玉米产量的主要生物灾害,每年造成的损失非常大。造成损失的一个很重要的原因是不能及时准确地对病虫害进行预测预报。传统的预测预报方法主要是依靠田间人为的观察判断,主观性强,误差大,并且费时、费力、不及时。而利用遥感的方法,可以进行大面积的全天候的监测,所得数据客观、及时并且准确。可以更加精确的指导施药防治等农事活动,防止了农药化肥等的滥用,在减少了农业投入的同时,也减轻了农业生态环境的压力。利用 ASD

Fieldspec Handheld 手持便携式光谱分析仪进行地面光谱测定, 分析玉米受病虫害危害后的光谱特征, 为航天航空遥感监测病虫害的发生提供参考依据。

### 1.5.3 实验设计

利用全球定位系统确定试验小区的经纬度, 在感病、感虫的品种上, 人工接种玉米弯孢病菌和亚洲玉米螟低龄幼虫, 造成不同等级的为害状。在出现为害状后, 每隔 10 天左右选择晴朗天气测定光谱数据, 并同时调查亚洲玉米螟为害后的食叶级别和玉米弯孢病为害后的病情指数。采集冠层叶片回室内进行叶绿素含量的测定, 比较病和虫为害后之间叶绿素含量的变化以及同一种病虫试验中不同等级之间的变化。试验流程图如下:



## 第二章 玉米受玉米弯孢菌叶斑病危害后的光谱特征变化及产量损失研究

玉米弯孢菌叶斑病 *Curvularia lunata* (Wakker) Boed 又称黄斑病、拟眼斑病、黑霉病, 过去一直危害很轻。20世纪80年代中后期, 以黄早4为亲本玉米杂交种的扩大种植, 该病日趋严重, 目前已成为河北、河南、山东、山西、辽宁、吉林、北京、天津等玉米主产区的重要叶部病害。1994年北京种植西玉3号, 发生弯孢霉叶斑病, 减产20%~30%; 1996年辽宁绥中县, 1.8万公顷玉米发生弯孢菌叶斑病, 减产粮食800万kg。弯孢菌叶斑病在玉米抽雄后扩展蔓延迅速, 严重植株, 叶片布满病斑, 甚至干枯, 对产量影响很大。玉米弯孢菌叶斑病对温度的要求类似于玉米小斑病, 为喜高温高湿的病害, 高温多雨的天气有利于该病发生。(郑爽等, 2002) 该病又属成株期病害, 品种抗病性随植株生长而减弱, 表现在苗期抗性较强, 13叶期最感病。在华北地区, 发病高峰期在玉米抽雄后, 即8月中下旬至9月上旬。由于该病潜育期短(2~3天), 7~10天即可完成一次侵染循环, 短期内侵染源急剧增加, 如遇高温、高湿, 则在8月下旬导致田间病害流行。由于目前缺少抗病品种, 一旦发生弯孢菌叶斑病后要及时喷药防治。如何能及时、准确、大面积的发现病情, 并在病害的初期就做出预报, 避免病害的流行, 尽可能减少损失, 是植保工作者需要解决的一个问题。

在国外, 航空近红外摄影技术在许多国家已经广泛的用于监测传染性的和非传染性的植物病害。美国对南方玉米小斑病的监测工程展示了用空中近红外摄影技术大规模的监测植物病害的高效性, 为未来遥感用于农业提供了技术支持 (Baucr ME, 1971)。Clark 等 (1981) 利用航空近红外摄影技术来估测大麦斑点病, 锈病和燕麦黄矮病毒病以及小麦白粉病等病害的危害程度。Blazquez 等(1983)利用近红外彩色摄影和光谱反射率研究了番茄和马铃薯的病害, 还对黄瓜病叶片的彩色和彩色红外照片的光密度进行了研究。Blazquez (1993) 对柑桔类树从用彩色红外照相作了相类似的研究。同时, 人们还利用冠层光谱数据中的红波段和近红外波段的光谱反射率平均值, 组合成四种植被指数 (代辉等, 2005) 研究了不同氮水平下冬小麦农学参数与光谱植被指数的相关性。

利用地面光谱仪对植株冠层光谱的监测与航空遥感具有相同的原理。本试验利用地面手持式光谱仪在人工接种玉米弯孢菌侵染危害的基础上, 在玉米不同生育期进行冠层光谱观测, 系统地研究了病害不同发生程度的前、中、后期的光谱特征, 并结合危害程度的调查、叶片叶绿素含量与小区产量损失率测定等, 探讨光谱特征与发病程度及产量损失的关系, 了解利用光谱数据监测玉米弯孢菌叶斑病的敏感时期和敏感波段, 为利用遥感手段预测玉米弯孢菌叶斑病和估计产量损失提供参考依据。

## 2.1 材料与方法

### 2.1.1 试验材料

田间采集玉米弯孢病菌感染叶片，在室内分离纯化得到供试病原物。供试玉米品种为高感玉米弯孢菌叶斑病的沈试 3005，于 2005 年和 2006 年在河北省农林科学院植保所农场夏播。

### 2.1.2 接菌的时间、菌量和方法

不同浓度病原菌孢子液的制备：将弯孢菌孢子接种到高感弯孢菌的玉米粒上进行扩繁，玉米粒放在经过消毒的大搪瓷盘中，上面盖上纱布以防止其他病菌的侵染，置于 30 摄氏度条件下培养。待 4 天后将带病菌玉米粒用水浸泡，然后用力搓洗，将病菌孢子洗出，换水，反复搓洗几遍。最后将洗出的孢子液搅拌均匀，用玻璃棒蘸取一滴滴在玻片上，用显微镜 40 倍镜下观察，统计一个视野内的孢子个数，用无菌水稀释至接菌处理所需浓度。

试验共设 4 个接种浓度处理，一个不接菌对照，重复 3 次，每处理小区面积为  $5 \times 6\text{m}$ ，各处理小区田间随机排列。在自然感病基础上，在玉米的大喇叭口末期用人工喷雾法接种不同浓度的玉米弯孢菌（接种时间和菌量详见表 1）。接种 4 个病菌浓度以造成不同程度的病情指数。对照区不接菌并施药保护。

表 1 两年中接种玉米弯孢菌的生育期和菌量

Table 1 The stage and bacterium quantity of inoculating *Curvularia lunata* in two years

接菌处理	2005 年		2006 年
	大喇叭口末期（8 月 11 日）	大喇叭口末期（8 月 13 日）	大喇叭口末期（8 月 11 日）
	40 倍镜下孢子数	40 倍镜下孢子数	40 倍镜下孢子数
对照	0	—	—
处理 1	4（穗部以下喷雾）	—	3
处理 2	4（全株喷雾）	4（全株喷雾）	6
处理 3	7（全株喷雾）	7（全株喷雾）	12
处理 4	15（全株喷雾）	15（全株喷雾）	25

### 2.1.3 光谱测量仪器及全球定位系统仪的测量方法和计算公式

测量仪器：光谱测定仪器采用美国 ASD (Analytical Spectral Device) 公司生产的野外便携式光谱仪 (ASD FieldSpec HandHeld，以下简称“光谱仪”)。光谱仪的波段值范围是 325~1050nm，光

谱分辨率3nm, 采样间隔(波段宽)为1.41nm, 输出波段512, 测量速度固定扫描时间为0.1s, 视场角25°, 并配有3.5°前场镜头。

测量方法: 从玉米的拔节期开始, 每隔10天左右, 选择晴朗无云风力较小的天气, 对玉米冠层光谱进行测量。在每个小区测量前后, 都要进行硫酸钡白板校正反射率。测量的时间为北京时间11:30-14:00。测量时测量员着深色衣服, 探头距离冠层1.5米垂直向下, 采用25°探头选取长势或者发病情况均匀的玉米植株进行测量。每个小区测量10次, 每次间隔1秒钟。取平均值作为该小区的光谱反射率。

$$\text{计算公式: } R_{\text{目标反射率}} = \frac{DN_{\text{目标}}}{DN_{\text{参考板}}} \bullet R_{\text{参考反射率}}$$

一阶导数光谱的近似计算方法为:  $P'(\lambda_i) = \{P(\lambda_{i+1}) - P(\lambda_{i-1})\} / 2\Delta\lambda$ , 式中,  $\lambda_i$ 为每个波段的波长,  $P'(\lambda_i)$ 为波长  $\lambda_i$  的一阶微分光谱,  $\Delta\lambda$ 是波长  $\lambda_{i-1}$  到  $\lambda_i$  的间隔。

全球定位仪(GPS): Garmin公司生产的GPS Map 760

两年的试验田的经纬度是: 西南角(N: 38°57.386', E: 115°26.664'), 西北角(N: 38°57.436', E: 115°26.671'), 东北角(N: 38°57.434', E: 115°26.687'), 东南角(N: 38°57.384', E: 115°26.675')。

#### 2.1.4 测量光谱时玉米所处的生育期和天气情况

表2 两年中调查光谱数据时玉米所处生育期和当日天气状况

Table 2 The maize stage and weather condition while collect information in 2 years

年份	抽雄期	抽丝期	乳熟期	蜡熟期
2005	晴间少云	晴	晴	晴
2006	晴	晴	晴	晴

#### 2.1.5 弯孢菌叶斑病病情指数计算和调查方法

在田间用改进的“0—9”级法(参照中华人民共和国农业行业标准—玉米对玉米弯孢菌叶斑病抗性鉴定病情分级和抗性评价标准)对玉米植株进行发病情况调查, 每个小区4点取样, 每点调查3株, 调查时间为测量完光谱数据后, 记录每株的发病情况, 然后用下式计算病情指数(Disease Index, 简写为DI):

$$DI = \frac{0 \times n_1 + 1 \times n_2 + \dots + 9 \times n_{10}}{9 \times (n_1 + n_2 + \dots + n_{10})} \times 100$$

$n_1, n_2, \dots, n_{10}$ 分别代表不同级别的发病株数。

表 3 玉米弯孢菌叶斑病病情分级评价标准

Table 3 The estimated standard of DI of Maize Curvularia Leaf Spot

病情分级	描述
1	叶片无病斑或仅在穗位以下部叶片上有少量病斑, 病斑占叶面积少于 5%
3	穗位以下部叶片上有少量病斑, 占叶面积 6%~10%, 穗位上部有零星病斑
5	穗位下部叶片病斑较多, 占叶面积 11%~30%, 穗位上部叶片有较多病斑
7	穗位上部叶片有大量病斑, 病斑相连, 占叶面积 31%~70%, 下部病叶枯死
9	全株叶片基本为病斑覆盖, 叶片枯死

### 2.1.6 叶绿素含量的测定仪器、方法和公式

叶绿素测量仪: Spectrumlab 752S 紫外可见分光光度计

叶绿素的测定方法: 将采集来的鲜叶剪成宽度为 1mm 左右, 长度小于 2cm 的小细条, 用电子天平精确称取 0.2g。放入装有 10ml 无水乙醇的试管中, 密封好, 置于黑暗条件下 24 小时, 使无水乙醇充分萃取叶绿素。次日用分光光度计测量 663nm 和 645nm 波长处的数值。

叶绿素测定公式: 利用 Arnon 法计算叶绿素的含量, 叶绿素 a( $mg/l$ )= $12.7 \times A_{663} - 2.69 \times A_{645}$ ; 叶绿素 b( $mg/l$ )= $22.9 \times A_{645} - 4.68 \times A_{663}$ ; 叶绿素总含量=叶绿素 a+叶绿素 b, 最后换算为  $mg/g$ 。

### 2.1.7 收获时产量及产量损失率的计算方法

每小区有 10 行, 选中间四行收获, 并去除每行的头尾各两株玉米。所收获玉米穗风干、脱粒、称重, 获得每小区的单株干粒重。产量损失率的计算公式为:  $L = (1 - (E/A)) \times 100\%$ 。其中, L 为产量损失率, E 为发病小区产量, A 为对照小区产量。

### 2.1.8 植被指数的计算方法

美国陆地卫星 (Landsat 5) 上携带的专题制图仪—TM (Thematic Mapper), 是一种改进型的多光谱扫描仪, TM 在可见光/红外分辨率为 30 米, 时间分辨率为 16 天 (233 圈), 高度为 705km, 一轨道覆盖宽度为 185km。在 450~1250nm, 共分为 7 个较窄的波段。其中对植被研究有重要意义的有 TM3(630~690nm) 和 TM4(760~900nm)。TM3 位于叶绿素的主要吸收带, 可根据对不同植物叶绿素的吸收来区分植物类型、覆盖度, 判断植物的生长状况、健康状况等。TM4 位于植物的高反射区, 光谱特征受植物细胞结构控制, 对植物的类别、密度、生长力、病虫害等的变化较为敏感。

归一化植被指数 (NDVI), 比值植被指数 (RVI), 差值植被指数 (DVI) 和再归一化植被指数 (RDVI) 的计算公式见表 4。4 种植被指数中 DVI 又称环境植被指数, 对土壤背景的变化极为敏感, 当植被密度大于 80% 时, 灵敏度下降, 适用于植被发育的早中期监测。NDVI 是最佳的植被生长状态指示因子。但对植冠背景的影响较敏感, 作物生长初期 NDVI 将过高估计植被覆盖度, 而在生长后期 NDVI 值偏低。RVI 被广泛用于估算和监测绿色植被生物量, 与叶面积指数、叶干生物量、叶绿素含量相关性高。RDVI 取 DVI 和 NDVI 两者优点, 可用于高低不同植被覆盖度。

表 4 四种植被指数的计算方法\*

Table 4 4 vegetation indexs equations

名称	光谱仪计算公式	陆地卫星计算公式
归一化植被指数 NDVI <sup>1</sup>	$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	$NDVI = (TM4 - TM3) / (TM4 + TM3)$
比值植被指数 RVI <sup>2</sup>	$RVI = R_{NIR} / R_{RED}$	$RVI = TM4 / TM3$
差值植被指数 DVI <sup>3</sup>	$DVI = R_{NIR} - R_{RED}$	$DVI = TM4 - TM3$
再归一化植被指数 RDVI <sup>4</sup>	$RDVI = (NDVI \times DVI)^{1/2}$	$RDVI = (NDVI \times DVI)^{1/2}$

\*注: 计算公式中近红外波段  $R_{NIR}$  和红波段  $R_{RED}$  分别采用所测光谱反射率值的 760~900nm 和 630~690nm 的平均反射率。大致和美国陆地卫星 5 上的专题制图仪的波段 TM4(760~900nm) 和 TM3(630~690nm) 相当。NDVI<sup>1</sup>、RVI<sup>2</sup> 计算公式参照 Rouse 等 (1974), DVI<sup>3</sup> 计算公式参照 Jordan (1969) RDVI<sup>4</sup> 计算公式参照 Reujean (1995)。

### 2.1.9 数据处理

利用光谱仪自带软件 ASD ViewSpec Program 进行光谱数据处理, 不同处理间做方差分析多重比较, 并将光谱数据和农学数据做回归及相关性分析等。用数理统计分析软件 SAS 进行数据分析处理。

## 2.2 结果与分析

### 2.2.1 不同时期健康玉米的光谱特征

从图 1 中可以看出, 玉米未受害植株在各个生育期的原始冠层光谱反射率曲线是有变化的, 近红外区的光谱反射率值随着植株的生长而逐渐增大, 在抽雄期达到最大值, 这时的叶面积指数最大, 之后由于植株转入生殖生长, 叶片逐渐衰老, 近红外区的冠层光谱反射率又逐渐下降。为了去除背景噪音的影响, 更能精确地分析光谱特征, 对获得的原始光谱反射率进行一阶导数转换, 使玉米各生育期光谱反射率值的差异在红边区域 700nm-750nm 处比图 1 明显增大 (见图 2)。

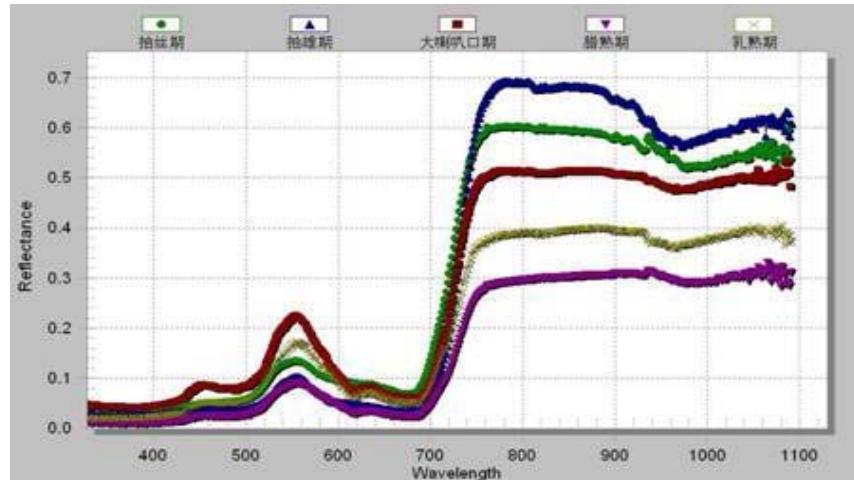


图 1 沈试 3005 未受害植株不同生育期的光谱曲线图

Fig 1 The healthy shensi 3005's spectrum curve in all growth stages

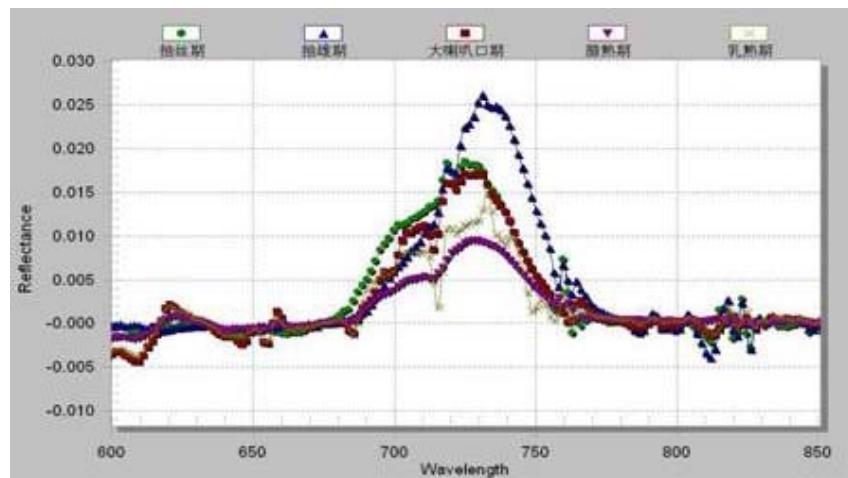


图 2 沈试 3005 未受害植株不同生育期的一阶导数光谱值图

Fig 2 The healthy shensi 3005's the maximum of the first derivative value of canopy spectrum in all stages



图 3 玉米弯孢菌叶斑病处理 4 中期接菌 3 天后照片

Fig 3 The maize level 4 infected by Maize Curvularia Leaf Spot after 3 days



图 4 玉米弯孢菌叶斑病处理 4 中期接菌 13 天后照片

Fig 4 The maize level 4 infected by Maize Curvularia Leaf Spot after 13 days



图 5 玉米弯孢菌叶斑病处理 4 中期接菌 23 天后照片

Fig 5 The maize level 4 infected by Maize Curvularia Leaf Spot after 23 days

表 5、表 6 和表 7 分别为两年接菌后不同生育期内各处理的病情指数、近红外区 810nm 光谱反射率数据和一阶导数最大值数据。在同一个生育期内，病情指数随着初始接菌量的增大而升高，多重比较分析结果表明各处理间差异达到显著水平。随着生育期的推移，各处理的病情指数也不断增大（如图 3—图 5），接种量最大的处理区病情指数由抽雄期的 9.83（2005 年）和 21.0（2006 年）在蜡熟期增长为 92.67（2005 年）和 86.7（2006 年）。

## 2.2.2 接种玉米弯孢菌后不同生育期不同处理玉米的光谱特征和病情指数的关系

表 5 两年不同生育期中的病情指数数据

Tab 5 The DI of different maize stages in two years

接菌处理	抽雄期		抽丝期		乳熟期		蜡熟期	
	2005	2006	2005	2005	2006	2005	2006	
对照	1.17± 0.29 d	0.8± 0.3 d	2.33± 0.58 e	3.67± 0.58 e	5.0± 1.0 e	9.33± 1.53 e	7.7± 1.5 e	
	1.50± 0.50 d	3.0± 1.0 d	12.0± 3.6 d	35.0± 3.0 d	33.0± 3.6 d	44.33± 4.04 d	42.3± 2.5 d	
处理 1	4.33± 0.58 c	8.3± 0.6 c	28.3± 7.6 c	57.0± 3.0 c	48.3± 4.2 c	74.33± 2.52 c	59.3± 5.1 c	
	8.67± 0.29 b	13.0± 2.0 b	44.3± 4.0 b	67.7± 2.5 b	61.3± 5.1 b	84.0± 2.0 b	76.7± 6.1 b	
处理 2	9.83± 0.76 a	21.0± 3.0 a	64.3± 4.0 a	85.7± 3.06 a	78.7± 4.0 a	92.67± 2.52 a	86.7± 3.1 a	

DI 代表病情指数,表中同列不同字母表示 Duncan 氏多重比较差异显著, 显著水平  $p<0.05$ , 下同。

表 6 两年各处理不同生育期 810nm 冠层光谱反射率值

Tab 6 The reflectance of 810nm of different maize stages in two years

接菌处理	抽雄期		抽丝期		乳熟期		蜡熟期	
	2005	2006	2005	2005	2006	2005	2006	
对照	0.685± 0.005 a	0.738± 0.007 a	0.62± 0.02 a	0.37± 0.07 a	0.325± 0.031 ab	0.34± 0.02 a	0.433± 0.071 a	
	0.671± 0.002 b	0.702± 0.002 a	0.58± 0.09 ab	0.34± 0.01 ab	0.365± 0.033 a	0.29± 0.02 b	0.420± 0.007 a	
处理 1	0.655± 0.003 c	0.565± 0.063 b	0.50± 0.07 b	0.31± 0.02 b	0.340± 0.034 ab	0.21± 0.01 c	0.305± 0.059 b	
	0.621± 0.002 d	0.563± 0.028 b	0.38± 0.02 c	0.24± 0.01 c	0.301± 0.037 bc	0.17± 0.02 d	0.311± 0.054 b	
处理 2	0.597± 0.002 e	0.612± 0.026 b	0.33± 0.02 c	0.20± 0.01 c	0.246± 0.026 c	0.11± 0.01 e	0.236± 0.022 b	

表 7 两年各处理不同生育期一阶导数最大值

Tab 7 The maximum of the first derivative value of maize different stages in two years

接菌处理	抽雄期		抽丝期		乳熟期		蜡熟期	
	2005	2006	2005	2005	2006	2005	2006	
对照	2.500± 0.265 a	2.6± 0.1 a	2.07± 0.21 a	1.47± 0.25 a	1.2± 0.1 ab	1.07± 0.06 a	1.5± 0.2 a	
	2.433± 0.115 ab	2.5± 0.2 a	1.90± 0.26 a	1.30± 0.10 ab	1.3± 0.1 a	0.93± 0.12 b	1.4± 0.1 a	
处理 1	2.300± 0 abc	1.9± 0.3 b	1.33± 0.23 b	1.10± 0.17 b	1.2± 0.1 ab	0.57± 0.06 c	0.8± 0.2 b	
	2.233± 0.058 bc	1.9± 0.2 b	0.90± 0 c	0.77± 0.06 c	1.0± 0.1 b	0.33± 0.06 d	0.8± 0.2 b	
处理 2	2.1± 0 c	2.0± 0.2 b	0.83± 0.06 c	0.57± 0.06 c	0.8± 0.2 c	0.17± 0.06 e	0.6± 0.1 b	
处理 3	2.1± 0 c	2.0± 0.2 b	0.83± 0.06 c	0.57± 0.06 c	0.8± 0.2 c	0.17± 0.06 e	0.6± 0.1 b	
处理 4	2.1± 0 c	2.0± 0.2 b	0.83± 0.06 c	0.57± 0.06 c	0.8± 0.2 c	0.17± 0.06 e	0.6± 0.1 b	

近红外光区 810nm 冠层光谱反射率值与病情指数呈负相关性关系。反射率数值随着接菌量的增大而减小，2006 年在接菌初期（接菌后 3 天）对照为 0.738 和处理 4 为 0.612 间差异明显。在发病后期（接菌后 23 天），病情指数随病情而增大，光谱反射率值也呈显著下降趋势。乳熟期对照和处理 4 的 810nm 光谱反射率数据间的差异也不断增大，对照为 0.433，处理 4 为 0.236，两处理间差异近一倍。同时，两年的各处理感病后光谱特征的变化趋势基本一致。

各处理光谱反射率值的一阶导数最大值更准确的反映了不同发病区的光谱特征的差异。在发病初期就达到 1% 水平的显著差异，对照为  $2.6 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$ ，处理 4 为  $2.0 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$ 。而到了发病后期，对照是处理 4 的 2.5 倍，差异更加明显。

以抽丝期为例(图 6、图 7)分析不同处理间玉米的光谱特征和病情指数的关系。光谱数据可以及时地反映病情指数的变化情况。由于近红外区光谱反射率值可以及时、准确地反映植被受各种胁迫后的变化情况，所以采用 810nm 波段处的冠层光谱反射率值来分析。在接菌 13 天后的抽丝期，5 个处理的冠层近红外区光谱反射率值随着初始接菌量的增大而减小。并且和病情指数呈极显著负相关关系。对照的病情指数为 3%，810nm 处的冠层光谱反射率为 0.62，接菌量最大的处理 4 的病情指数发展到 60%，810nm 处的反射率值下降到 0.33。一阶导数光谱最大值同样和病情指数呈极显著负相关。图 8 为抽丝期 810nm 冠层光谱反射率值和病情指数的回归方程。

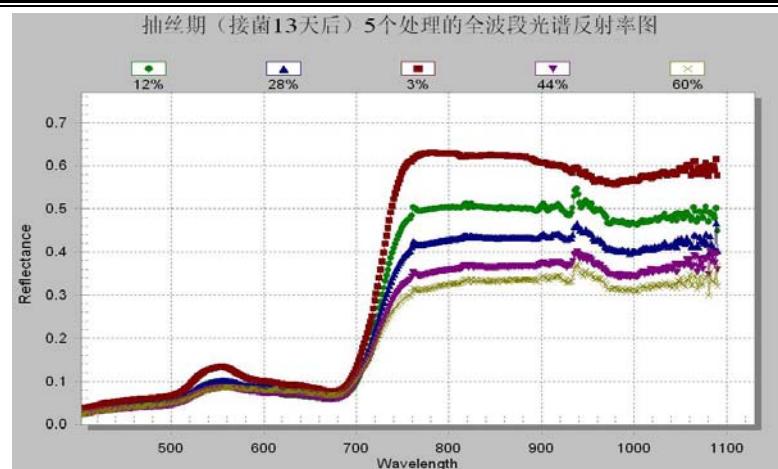


图 6 接种病菌 13 天后抽丝期不同病情指数光谱反射率图

Fig 6 The spectrum value of 5 treatments (different DI) after inoculated the bacterium 13 days

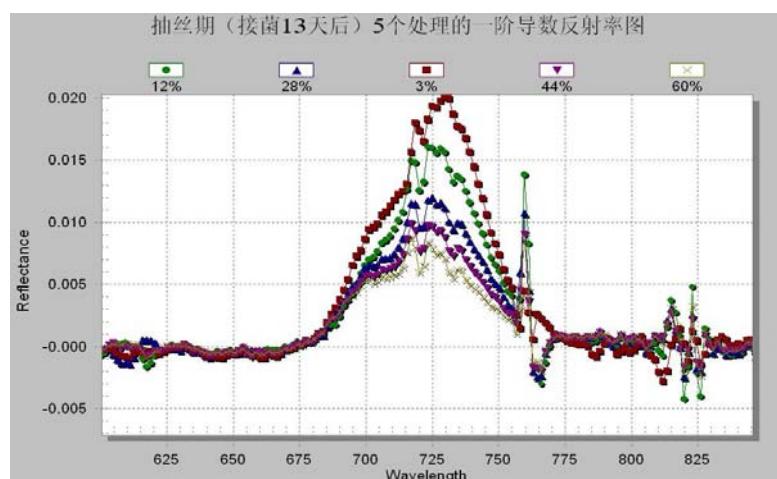


图 7 接种病菌 13 天后抽丝期不同病情指数一阶导数光谱反射率图

Fig 7 The maximum of the first derivative value of 5 treatments (different DI) after inoculated the bacterium 13 days

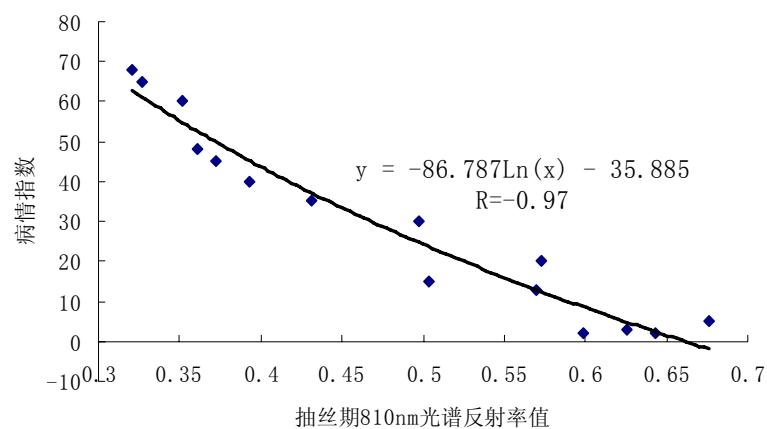


图8 玉米抽丝期弯孢病病情指数和冠层光谱反射率回归方程

Fig 8 The regression equation of DI with the  $R_{810}$  at corn silk stage

如上图所示，在2005年玉米弯孢菌叶斑病侵染的抽丝期，近红外波段的810nm冠层光谱反射率和病情指数有很高的相关性，相关性系数达到-0.97，达到1%的极显著水平。2006年的结果与2005年结论相似。

### 2.2.3 玉米弯孢菌叶斑病危害后玉米冠层光谱敏感波段的选择

将2006年玉米乳熟期5个处理3个重复共15组冠层光谱数据和相应小区的病情指数做相关性分析( $n=15$ )。冠层光谱数据选取400~900nm波长范围内的共317个光谱反射率值，每一个波段值和病情指数分别做相关性分析，得相关性系数，最后将317个相关性系数组合成一条相关性系数曲线，以此条曲线寻找监测病情发展情况的最佳敏感波段范围。以724nm为界限，400nm到724nm之间，冠层光谱反射率和病情指数是正相关的关系，即随着病情指数的增大，这个波段范围内的各个波长的反射率值也表现为增大，只是增大的程度不同。在690nm附近的红光波段，相关性系数达到最大的正相关。接近0.5，达到5%水平的显著相关。表明红光波段的反射率值随着病情指数的增大而数值增大。这和吴曙雯等(2001)所得结论是一致的。而从724nm到900nm的近红外区，冠层光谱反射率值和病情指数呈负相关。相关性系数达到-0.60左右，当n=15的情况下，此波段的冠层光谱反射率值和病情指数基本上达到了0.01水平上的高度负相关。即随着病情指数的不断增大此近红外波段的反射率数值下降。这和前面大多数学者的研究结果是一致的。由于近红外波段的相关性系数最大，又因为近红外波段的监测结果会早于可见光的红光波段，故可将745nm到900nm这个波长范围作为监测预报玉米弯孢菌叶斑病的敏感波段。2005年和2006年的结果是一致的。

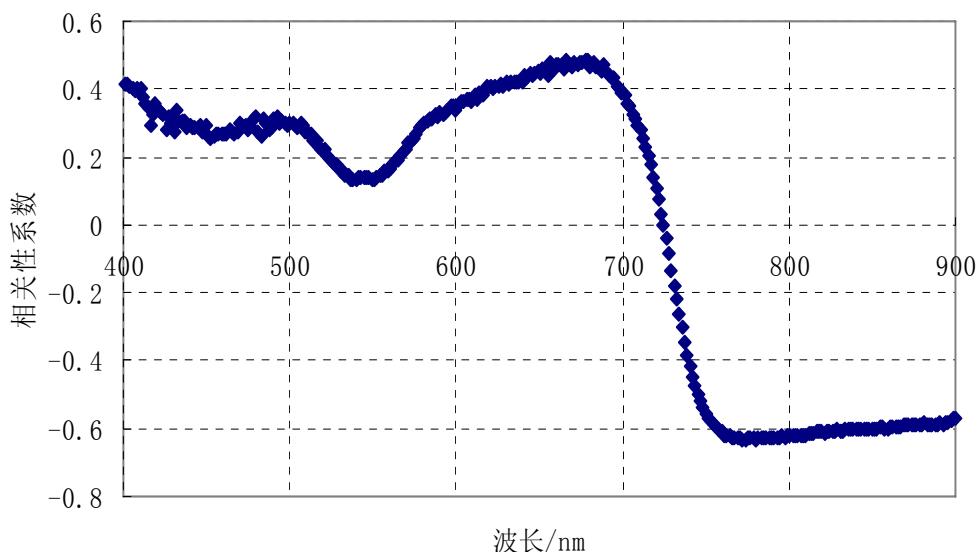


图9 2006年乳熟期400~900nm的冠层光谱反射率值和病情指数的相关系数曲线( $n=15$ )

Fig 9 The correlation coefficients between canopy spectrum value and DI from 400nm to 900nm in milk stage in 2006

### 2.2.4 接种玉米弯孢菌后各时期植被指数和病情指数的相关性分析

根据前人报道的利用光谱反射率值推算植被指数的公式, 将 2005 年和 2006 年玉米弯孢菌叶斑病为害后各生育期的红光波段反射率平均值和近红外波段波段平均值代入公式得四种植被指数数据。通过数据可以看出, 在不同的发病时期, 各种植被指数在不同处理间的差异则不同。在接菌后的初期, 除差值植被指数 DVI 外, 其余指数的各处理与对照间差异均不显著。对照区和处理 1 的差值植被指数 DVI 与其他处理间差异达到了显著水平。在接菌后的中后期, 四种植被指数均可以用来反演病情指数的变化情况。

对于同一个处理来说, 例如处理 2, 植被指数 NDVI、DVI 和 RVI 的数值随着生育期的推移而逐渐变小, 而 RDVI 却表现为增大的趋势。这主要是与植株受弯孢菌叶斑病为害后, 红光区和近红外区的光谱反射率值变化趋势不同所造成的。

表 8 两年不同生育期归一化植被指数数据

Tab 8 The Normalized Difference Vegetation Indexes of maize different stages in two years

接菌处理	抽雄期		抽丝期		乳熟期		蜡熟期	
	2005	2006	2005	2005	2006	2005	2006	
对照	0.903± 0a	0.88± 0.02a	0.81± 0.04a	0.83± 0.09a	0.88± 0.03a	0.83± 0.01a	0.83± 0.03a	
处理 1	0.901± 0b	0.91± 0.02a	0.78± 0.03a	0.79± 0.01a	0.83± 0.05ab	0.81± 0.03a	0.78± 0.02ab	
处理 2	0.893± 0c	0.87± 0.03a	0.62± 0.09ab	0.72± 0.09ab	0.81± 0.04bc	0.72± 0.08ab	0.75± 0.01b	
处理 3	0.882± 0d	0.86± 0.08a	0.68± 0.08b	0.61± 0.07bc	0.79± 0.03bc	0.57± 0.08b	0.73± 0.05b	
处理 4	0.847± 0e	0.88± 0.04a	0.62± 0.06b	0.57± 0.02c	0.75± 0.02c	0.54± 0.17b	0.67± 0.03c	

表 9 两年不同生育期比值植被指数植被指数数据  
Tab 9 The Ratio of Vegetation Indexes of maize different stages in two years

接菌处理	抽雄期		抽丝期		乳熟期		蜡熟期	
	2005	2006	2005	2005	2006	2005	2006	
对照	19.6± 0a	17.38± 4.25a	21.7± 0a	17.2± 15.7a	16.48± 4.74a	11.16± 0.92a	11.18± 2.10a	
处理 1	19.1± 0b	22.96± 3.89a	21.3± 0b	8.96± 0.45a	11.89± 4.32ab	9.58± 1.76a	8.52± 0.89b	
处理 2	17.6± 0c	16.53± 4.14a	19.7± 0c	6.67± 2.23a	10.14± 2.24b	6.47± 1.95b	7.25± 0.46bc	
处理 3	15.9± 0d	16.48± 7.49a	18.1± 0d	4.34± 1.01a	9.06± 1.55b	3.79± 0.86b	6.75± 1.28bc	
处理 4	12.0± 0e	17.41± 6.21a	14.2± 0e	3.74± 0.23a	6.99± 0.73b	3.97± 2.30b	5.28± 0.74c	

表 10 两年不同生育期差值植被指数数据  
Tab 10 The Difference Vegetation Indexes of maize different stages in two years

接菌处理	抽雄期		抽丝期		乳熟期		蜡熟期	
	2005	2006	2005	2005	2006	2005	2006	
对照	0.65± 0a	0.68± 0.01a	0.55± 0.03a	0.29± 0.02a	0.30± 0.03ab	0.29± 0.02a	0.39± 0.06a	
处理 1	0.63± 0b	0.68± 0.03a	0.51± 0.07ab	0.28± 0.04a	0.33± 0.02a	0.28± 0.04a	0.36± 0.01a	
处理 2	0.61± 0c	0.52± 0.06b	0.37± 0.04bc	0.19± 0.04ab	0.30± 0.03ab	0.19± 0.04ab	0.26± 0.05b	
处理 3	0.58± 0e	0.51± 0.02b	0.36± 0.13bc	0.13± 0.02b	0.26± 0.03b	0.13± 0.02b	0.26± 0.05b	
处理 4	0.61± 0d	0.57± 0.04b	0.31± 0.09c	0.13± 0.11b	0.21± 0.03c	0.13± 0.11b	0.19± 0.03b	

表 11 两年不同生育期再归一化植被指数数据  
Tab 11 The Renormalized Difference Vegetation Indexes of maize different stages in two years

接菌处理	抽雄期		抽丝期		乳熟期		蜡熟期	
	2005	2006	2005	2005	2006	2005	2006	
对照	0.76± 0a	0.17± 0.02a	0.67± 0.04a	0.49± 0.02a	0.51± 0.03a	0.49± 0.02a	0.56± 0.04a	
处理 1	0.75± 0b	0.15± 0.02a	0.63± 0.03a	0.47± 0.05a	0.52± 0.01a	0.47± 0.05a	0.54± 0.02a	
处理 2	0.74± 0c	0.14± 0a	0.48± 0.04b	0.37± 0.06ab	0.49± 0.01a	0.37± 0.06ab	0.44± 0.05b	
处理 3	0.72± 0e	0.14± 0.05a	0.49± 0.11b	0.27± 0.04b	0.45± 0.02b	0.27± 0.04b	0.44± 0.05b	
处理 4	0.72± 0d	0.14± 0.03a	0.43± 0.08b	0.26± 0.16b	0.39± 0.03c	0.26± 0.16b	0.35± 0.03c	

### 2.2.4.1 抽雄期病情指数与4种植被指数的拟合分析

表 12 玉米抽雄期病情指数与4种植被指数的拟合分析决定系数  
Tab 12 The R-square of DI with 4 vegetation indexes in tasseling stage of corn

	2005 年				2006 年			
	NDVI	DVI	RDVI	RV	NDVI	DVI	RDVI	
直线	0.63	0.76	0.74	0.83	0.12	0.14	0.44	0.01
对数	0.71	0.76	0.74	0.84	0.14	0.14	0.40	0.02
指数	0.70	0.76	0.83	0.89	0.04	0.06	0.58	0.12

根据抽雄期病情指数数据（表 5）和这个时期四种植被指数数据（表 8 至表 11）分别做直线、对数和指数拟合方程分析，得到各决定系数（表 12）。4 种植被指数的决定系数相比较来看，2005 年再归一化植被指数和病情指数所建立方程决定系数大于其它三种指数，其中又以指数方程的  $R^2$  值最大，为 0.8896，方程为  $DI = 2E+10e^{-30.618RDVI}$ （图 10），而在 2006 年，差值植被指数 DVI 和病情指数的指数拟合方程决定系数最高，为 0.58，方程式为： $DI = 4240.2e^{-11.126DVI}$ （图 11）。

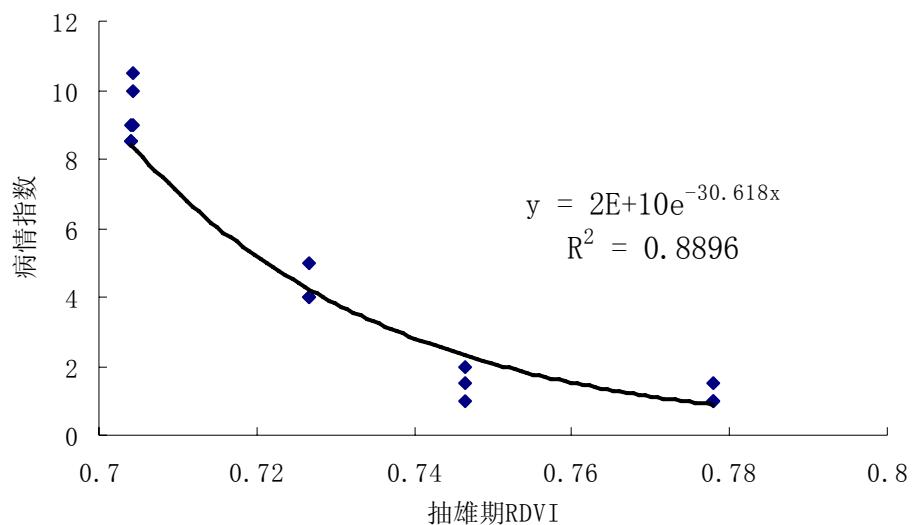


图 10 2005 年玉米抽雄期 RDVI 和病情指数的指数方程  
Fig 10 The exponential equation of RDVI with DI in corn tasseling stage in 2005

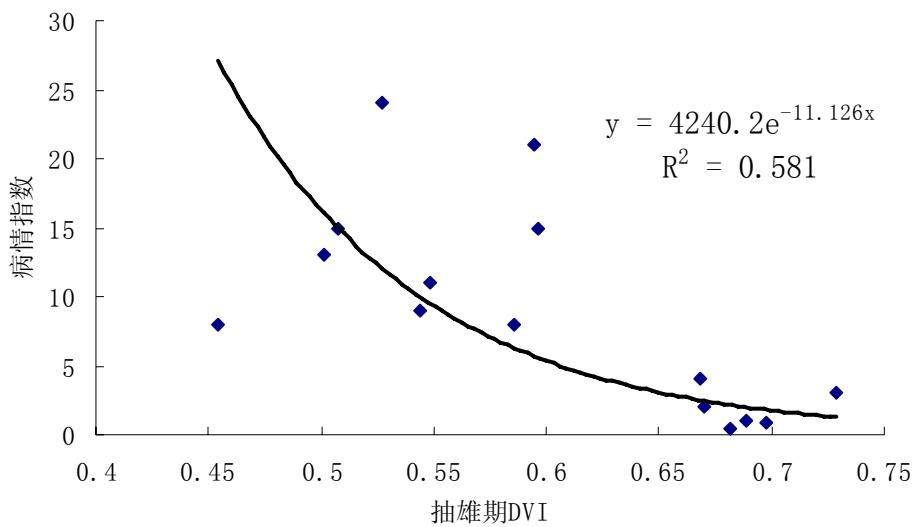


图 11 2006 年抽雄期病情指数和植被指数的指数拟合方程

Fig 11 The exponential equation of DVI with DI in corn tasseling stage in 2006

#### 2.2.4.2 抽丝期病情指数与 4 种植被指数的拟合分析

将抽丝期各处理的病情指数和这个生育期的光谱数据得出的各植被指数进行线性、指数和对数方程的拟合。所得决定系数见表 13 中。在玉米抽丝期弯孢菌叶斑病为害后的光谱数据获得的四种植被指数中，再归一化植被指数 RDVI 和病情指数相关性最好，且指数方程为最佳的拟合方程。在  $n=15$  的情况下，抽丝期病情指数与各个植被指数组建的拟合方程中决定系数最大的方程为  $DI=3177.5e^{-9.695RDVI}$ ,  $R^2=0.66$

表 13 2005 年玉米抽丝期病情指数与 4 种植被指数的拟合分析决定系数

Tab 13 The R-square of DI with 4 vegetation indexes in corn silk stage in 2005

	RFVI	NDVI	DVI	RDVI
直线方程	0.45	0.40	0.61	0.60
对数方程	0.44	0.38	0.60	0.59
指数方程	0.55	0.47	0.65	0.66

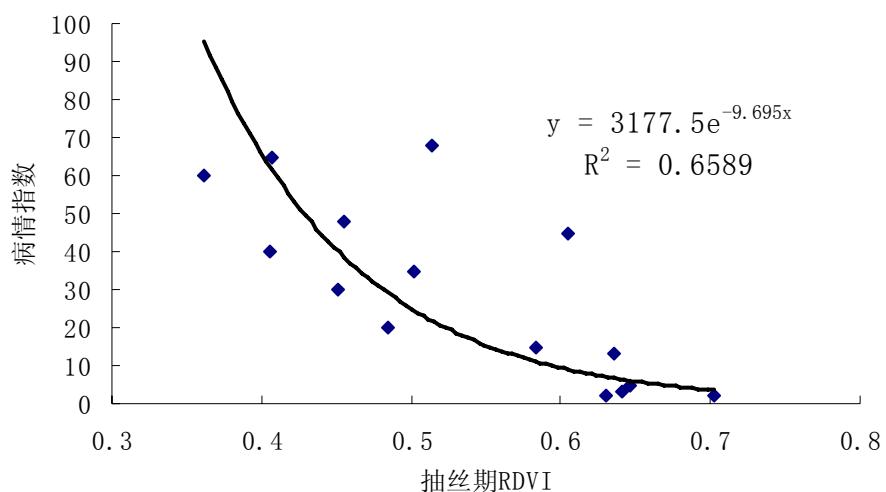


图 12 抽丝期 RDVI 和病情指数的指数方程

Fig 12 The exponential equation of RDVI in silk stage with DI in 2005

#### 2.2.4.3 乳熟期病情指数与 4 种植被指数的拟合分析

将乳熟期各处理的病情指数和这个生育期的光谱数据得出的各植被指数进行线性、指数和对数方程的拟合。所得决定系数见表 11。在乳熟期，差值植被指数DVI和再归一化植被指数RDVI和病情指数值可建立拟合度很高的方程式，其中又以DVI和病情指数建立的对数方程决定系数为最高。在 2005 年乳熟期病情指数与植被指数 DVI 拟合方程的决定系数最大， $DI = -76.123 \ln(DVI) - 61.352$ ,  $R^2 = 0.78$  (图 13)，而在 2006 年，病情指数和 RDVI 的拟合方程决定系数最大， $DI = -425.73RDVI + 250.31$ ,  $R^2 = 0.6872$  (图 14)。

表 14 乳熟期病情指数与 4 种植被指数拟合分析的决定系数

Tab 14 The R-square of DI with 4 vegetation indexes in milk stage

	2005 年				2006 年			
	NDVI	DVI	RDVI	DI	NDVI	DVI	RDVI	DI
直线	0.38	0.70	0.77	0.77	0.57	0.65	0.52	0.69
对数	0.62	0.70	0.77	0.77	0.63	0.65	0.53	0.67
指数	0.45	0.52	0.56	0.56	0.55	0.53	0.23	0.37

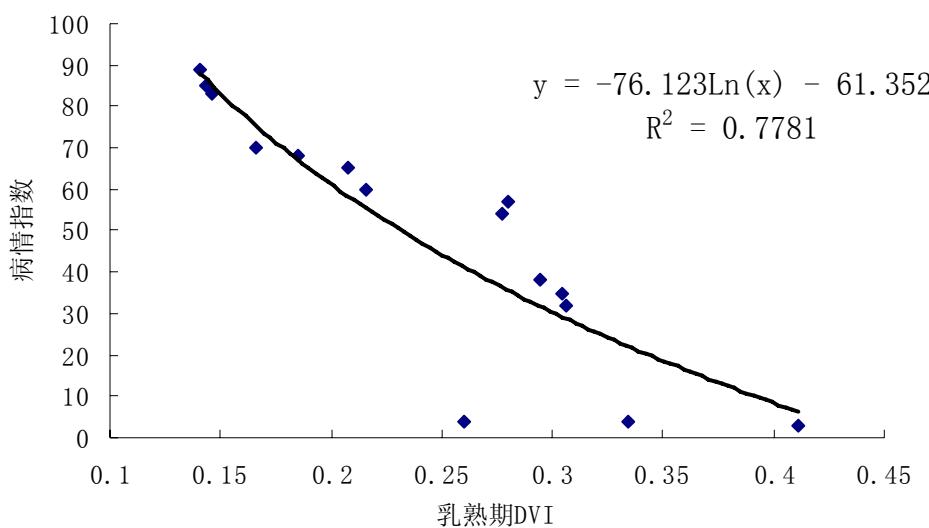


图 13 2005 年玉米乳熟期 DVI 和病情指数的对数方程式

Fig 13 The logarithm equation of DVI with DI in corn silk stage in 2005

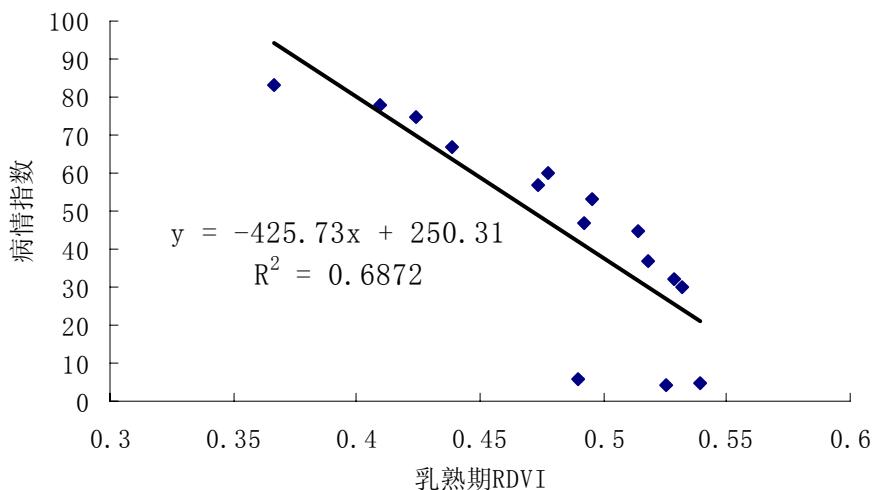


图 14 2006 年玉米乳熟期 RDVI 和病情指数的对数方程式

Fig 14 The line equation of RDVI with DI in corn silk stage in 2006

#### 2.2.4.4 蜡熟期病情指数与 4 种植被指数的拟合分析

将蜡熟期各处理的病情指数为因变量，和这个生育期的光谱数据得出的四种植被指数进行线性、指数和对数方程的拟合。所得方程的决定系数见表 15。

表 15 蜡熟期病情指数与 4 种植被指数拟合方程的决定系数

Tab 15 The R-square of DI with 4 vegetation indexes in corn waxy stage

	2005 年				2006 年			
	NDVI	DVI	RDVI	RV	NDVI	DVI	RDVI	RV
直线	0.82	0.65	0.62	0.64	0.77	0.76	0.74	0.78
对数	0.73	0.59	0.55	0.57	0.78	0.74	0.71	0.75
指数	0.66	0.48	0.47	0.48	0.68	0.59	0.55	0.59

分析结果看出，在玉米弯孢菌叶斑病为害的末期，病情指数和差值植被指数RVI有很好的相关性，2005 年在所建立的三种方程中，线性拟合方程的决定系数高达-0.84。蜡熟期病情指数与各个植被指数组建的拟合方程中决定系数最大的方程为 $DI = -10.103x + 124.01$ ,  $R^2 = 0.8173$ 。2006 年的结果与 2005 年大致相似。

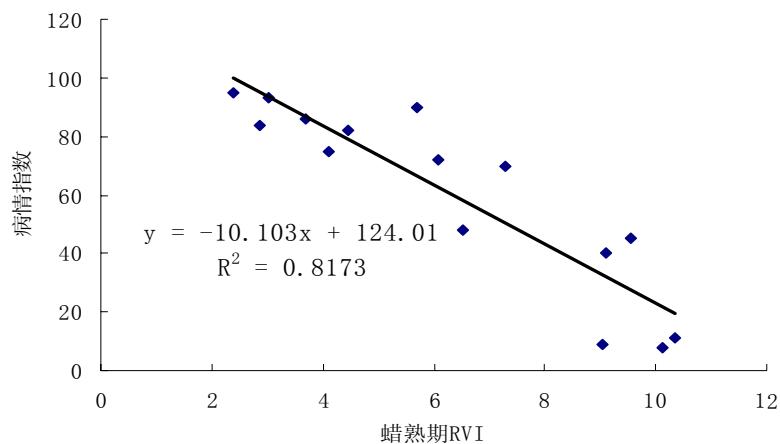


图 15 2005 年蜡熟期 RVI 和病情指数的对数方程式图

Fig 15 The logarithm equation of RVI with DI in corn waxy stage in 2005

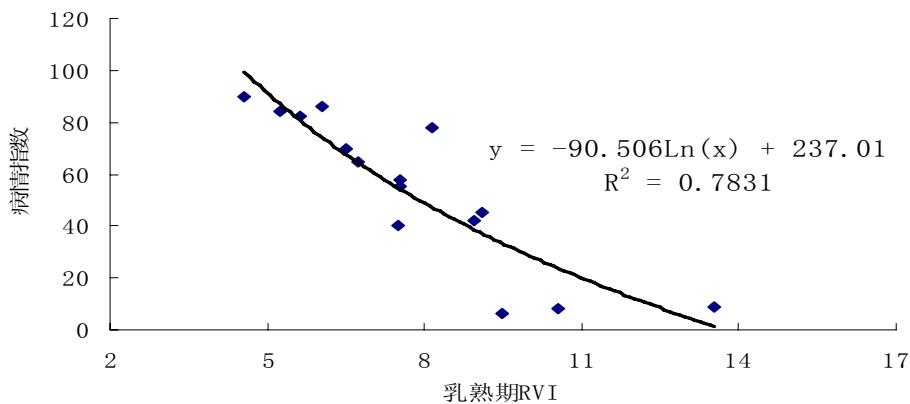


图 16 2006 年蜡熟期 RVI 和病情指数的对数方程式图

Fig 16 The logarithm equation of RVI with DI in corn waxy stage in 2006

在n=15, 99%置信度下, 只要 $R^2>0.2641$  即达到相关性极显著。综上, 在四个生育期中, 各个植被指数和病情指数拟合方程的决定系数都达到极显著水平。相比较来看, 在玉米生长的前期, 病害发病初期病情指数与DVI以及NDVI相关性最高, 而在后期, 由于病情指数的增加, 植株受害严重, 叶片干枯, 植被覆盖率下降, 叶绿素含量急剧下降, 使得病情指数与RVI相关性最高, 四种植被指数能很好的和病情指数相拟合, 均达到极显著水平。因此用地面光谱仪所得到的陆地卫星5号上的TM数据来监测玉米弯孢病发生情况是可行的。

## 2.2.5 玉米弯孢菌病感染后玉米各生育期叶片叶绿素含量的变化与植被指数相关性分析

表 16 2006 年不同生育期玉米冠层叶片叶绿素含量(mg/g)

Tab 16 The chlorophyll content of canopy leafs in corn 3 stages(2006)

接菌 处理	抽雄期 (接菌后 5 天)			乳熟期 (接菌后 26 天)			蜡熟期 (接菌后 33 天)		
	Chl a	Chl b	Chl	Chl a	Chl b	Chl	Chl a	Chl b	Chl
CK	1.53± 0.01aA	1, 14± 0.07aA	2.66± 0.06aA	1.47± 0.03abA	1.77± 0.13aA	3.24± 0.10aA	1.48± 0.02aA	1.57± 0.24aA	3.05± 0.22aA
处理 1	1.51± 0aA	1.03± 0.16abA	2.54± 0.16abA	1.52± 0.01aA	1.12± 0.23bAB	2.64± 0.23 abAB	1.51± 0.01aA	1.14± 0.29bAB	2.65± 0.27aAB
处理 2	1.53± 0aA	0.98± 0.14abA	2.51± 0.14abA	1.52± 0.01aA	1.17± 0.15bAB	2.68± 0.13abAB	1.44± 0.07aA	0.71± 0.24cBC	2.16± 0.31bBC
处理 3	1.60± 0.14aA	0.95± 0.06abA	2.56± 0.13abA	1.47± 0.07abA	0.91± 0.32bcB	2.38± 0.39bcAB	1.43± 0.04aA	0.57± 0.04cC	2.00± 0.08bC
处理 4	1.49± 0.06aA	0.83± 0.21bA	2.32± 0.27bA	1.20± 0.34bA	0.63± 0.32cB	1.83± 0.65cB	1.14± 0.13bB	0.41± 0.05cC	1.54± 0.18cD

由表 16 表明: 在玉米接菌发病初期即抽雄期, 不同处理间叶绿素 b 和总叶绿素含量在 5% 水平上有差异。对照的总叶绿素含量为 2.66mg/g, 而处理 4 的总叶绿素含量为 2.32mg/g, 两处理间差异显著。到了中后期, 随着病情指数的增大, 病害发展的程度加重, 叶绿素含量在接菌量高的处理中下降明显, 使得不同处理间差异极显著。从表中可以看出, 对照由于没有接种病原菌, 其总叶绿素的变化从 2.66mg/g 增加到 3.24mg/g, 后又降低至 3.05mg/g, 为先增大后降低的发展趋势。这表明正常植株从抽雄期到乳熟期叶绿素含量为增加的过程, 后期随着植株的衰老, 叶绿素含量又不断下降。而对于接菌的不同处理, 情况则有所不同, 其叶绿素的总含量在三个生育期均呈下降趋势, 在处理 4 中尤为明显, 从 2.32mg/g 下降到 1.83mg/g, 最终下降到 1.54mg/g。这表明随病情的不断发展, 破坏了叶片的组织结构, 使叶绿素含量显著下降。

表17 4种植被指数反演叶绿素含量 (mg/g) 的决定系数R<sup>2</sup>统计数据表 (N=15)

Tab 17 The R-square of chlorophyll content with 4 vegetation indexs in 3 growth of maize stages

	抽雄期各植被指数				乳熟期各植被指数				蜡熟期植被指数			
	NDVI	RV1	DVI	RDVI	NDVI	RV1	DVI	RDVI	NDVI	RV1	DVI	RDVI
Chla	0.01	0.02	0.04	0.02	0.14	0.12	0.19	0.22	0.44 <sup>**</sup>	0.40 <sup>**</sup>	0.39 <sup>**</sup>	0.42 <sup>**</sup>
Chlb	0.001	0.001	0.08	0.05	0.31 <sup>*</sup>	0.30 <sup>*</sup>	0.31 <sup>*</sup>	0.38 <sup>*</sup>	0.54 <sup>**</sup>	0.61 <sup>**</sup>	0.59 <sup>**</sup>	0.62 <sup>**</sup>
Chl(a+b)	0.03	0.02	0.06	0.02	0.31 <sup>*</sup>	0.29 <sup>*</sup>	0.33 <sup>*</sup>	0.4 <sup>**</sup>	0.60 <sup>**</sup>	0.60 <sup>**</sup>	0.65 <sup>**</sup>	0.67 <sup>**</sup>

表中\*, \*\*分别表示达到 5% 和 1% 显著水平

由表 18 表明: 在玉米弯孢菌叶斑病为害的初期, 各植被指数和叶绿素 a, 叶绿素 b 及总叶绿素含量无显著相关性, 这主要和叶绿素的含量各处理间的差异不显著有关。在病害为害中期, 四种植被指数和叶绿素 b 以及总叶绿素在 5% 水平上相关性显著, 和叶绿素 a 无显著相关性。在病害为害的后期, 四种植被指数和叶绿素 a, 叶绿素 b 以及总叶绿素含量在 1% 水平上极显著相关。比较四种植被指数, 再归一化植被指数 RDVI 可以最好的反演叶绿素的含量, 与 3 叶绿素含量建立的回归方程的决定系数分别达到 0.42, 0.62 和 0.67。在和其他 3 个植被指数的比较中, 除与叶绿素 a 的决定系数小于归一化植被指数 NDVI, 其它两决定系数均为最大值, 所以可用再归一化植被指数 RDVI 来反演弯孢菌叶斑病中后期叶绿素含量的发展变化情况。

## 2.2.6 玉米弯孢菌侵染后产量损失率与各时期光谱特征、植被指数的分析

表 18 两年的产量及产量损失率表

Tab 18 The average seed weight and yield loss in two years

接虫处理	2005年产量数据			2006年产量数据		
	乳熟期病情指数	单株干粒重(g)	损失率(%)	乳熟期病情指数	单株干粒重(g)	损失率(%)
对照	3.67±0.58 e	146.0±6.0a A	—	5.0±1.0 eE	155.33±1.53 aA	—
	35.0±3.0d	126.7±35abAB	13.3±21.8bcAB	33.0±3.6 dD	133.00±10.44 bAB	14.33±7.23 c BC
处理1	57.0±3.0c	93.0±23.5bcAB	34.4±15.2abAB	48.3±4.2 cC	117.33±1.15 bcBC	24.33±1.53 bc AB
	67.7±2.5b	86.0±14.1cB	41.2±8.8aA	61.3±5.1 bB	113.33±15.28 c BC	27.00±9.85 b AB
处理2	85.7±3.06a	75.0±12.1cB	48.7±7.2aA	78.7±4.0 aA	95.33±11.15 d C	38.67±6.81 a A
处理3						
处理4						

表18为2005年和2006年的各处理区的折合单株干粒重及产量损失率,两年间各处理产量损失率随病情指数的增加而增加,病情指数和产量损失率由小到大顺序依次为:2005年,35%和13.3%<57.0和34.4%<67.7%和41.2%<85.7%和48.7%;2006年,33.0%和14.3%<48.3%和24.33%<61.3%和27%<78.7%和38.67%。由数据看出,两年的5个处理的单株干粒重以及损失率在数据上有一定的差距,分析原因可能与初始接菌量的不同有关。

依据产量与光谱反射率、一阶导数光谱和病情指数等的综合因子分别进行回归分析,选择决定系数最大的方程式列入表20中。其中两年中的产量(单株干粒重)以及产量损失率均可以由蜡熟期的一阶导数反射率值来估测,即用成熟期的冠层光谱数据来预测产量,这个结论和唐延林(2004)所得结论是一致的。同时利用传统的病情指数方法来预测产量也得到了很好的结果。在2005年,用光谱数据预测产量的效果好于用病情指数预测的结果,决定系数分别为0.78和0.74;而在2006年,用病情指数预测产量的结果又好于用光谱数据预测的结果,决定系数分别为0.85和0.71。因此不能确定哪种方法更好。同时还可以用植被指数来预测产量,其回归方程式的决定系数也超过了1%水平上的极显著相关。

表19 产量及产量损失率和光谱数据植被指数的回归方程

Tab 19 The regression equation of average seed weight and yield loss with spectrum data and vegetation index

年份	参数	回归方程式	R <sup>2</sup>	Df
2005	蜡熟期一阶导数光谱最大值	$L_1 = 60.241 - 5332.8 X_1$	0.78	14
2006	蜡熟期一阶导数光谱最大值	$L_2 = 53.8 - 3231.5 X_4$	0.71	14
2005	蜡熟期一阶导数光谱最大值	$Z = 56.773 + 7934.8 X_1$	0.76	14
2006	蜡熟期一阶导数光谱最大值	$Y = 71.89 + 4997 X_4$	0.71	14
2005	蜡熟期病情指数	$Z = 158.73 - 0.8804 X_2$	0.72	14
2006	蜡熟期病情指数	$Y = 161.73 - 0.71 X_3$	0.85	14
2006	各生育期病情指数	$L_2 = -4.16 + 0.46 X_3$	0.85	14
2006	各生育期植被指数	$Y = -130.2 + 335.6 X_5$	0.78	14
2005	蜡熟期病情指数	$L_1 = 8.4892 + 0.5951 X_2$	0.74	14
2006	各生育期植被指数	$L_2 = 148.18 - 146.4 X_5 - 57.68 X_6$	0.77	14

$L_1$ 为2005年产量损失率,  $L_2$ 为2006年产量损失率。Z代表2005年单株干粒重。Y代表2006年单株干粒重。 $X_1$ 代表2005年蜡熟期反射率的一阶导数光谱最大值。 $X_2$ 代表2005年蜡熟期的病情指数, $X_3$ 代表2006年蜡熟期病情指数, $X_4$ 代表2006年蜡熟期一阶导数光谱, $X_5$ 代表2006年蜡熟期植被指数归一化指数NDVI, $X_6$ 代表2006年蜡熟期差值植被指数DVI。

## 2.3 结论与讨论

1. 接菌后玉米冠层光谱近红外波段反射率值以及一阶导数光谱最大值和病情指数呈极显著负相关。各处理随着初始接菌量的增加在冠层光谱反射率上表现为红波段反射率值上升而近红外波段反射率值下降。这个结果和吴曙雯（2001）研究水稻受稻瘟病为害后各波段反射率值变化的结论是一致的。
2. 近红外波段（745nm-900nm）为监测弯孢病为害的敏感波段。将乳熟期 400nm 到 900nm 共 317 个波段值和病情指数值作相关性分析得到的相关系数曲线得出，在 724nm 波段之前，冠层光谱反射率值和病情指数呈正相关，而 724nm 到 900nm，冠层光谱反射率值和病情指数呈负相关关系。这主要是因为在 700nm 之前的可见光区，分别在 350-490nm 和 600-700nm 有两个很强的叶绿素吸收带。接菌后叶片发病，导致叶绿素含量显著降低，因此叶片在这两个波段区不能有效地吸收光，而是强烈的反射光，并且叶绿素含量越低，即病情指数越大，此两区的反射率也越高。因此 724nm 波段之前的冠层光谱反射率值和病情指数呈正相关关系。而在 700 之后的近红外波段，随着病情指数不断增大，叶片的结构被破坏的越严重，失去了作为一个良好反射体的条件，所以近红外波段的反射率值下降，并且和病情指数呈极显著负相关关系。由于近红外波段的相关性系数大于其它任何波段，并且近红外波段监测植被变化早于可见光波段（肉眼观测波段），所以选择（745nm-900nm）为监测为害的敏感波段。
3. 可以利用蜡熟期高光谱反射率一阶导数最大值来预测产量。将各个生育期的一阶导数最大值以及冠层 810nm 反射率值等多个因子作为自变量和产量损失率进行双重逐步回归，得出蜡熟期一阶导数最大值和产量及产量损失率之间的相关性最高，可以用来估产。
4. 为了模拟卫星数据，探讨用卫星数据大面积监测预报玉米弯孢菌叶斑病的可行性，本研究将地面光谱仪得到的红光波段和近红外波段反射率值的平均值依据公式得到 4 种植被指数对各生育期的病情指数进行监测。结果显示：在玉米弯孢菌叶斑病为害的前期和中期，病情指数可以由差值植被指数DVI和再归一化植被指数RDVI很好的反演。其组建的拟合方程式决定系数达到 1% 水平的极显著相关。在后期，由于病害为害极为严重，导致叶绿素含量在对照和其他不同处理间差异极显著，所以可以用比值植被指数RVI进行反演。得出的以上结论和前人总结的监测绿色植被前期用RDVI或者DVI，后期用RVI的结论是完全一致的。用植被指数反演病情指数的精确度虽然没有用地面高光谱数据 ( $R_{810}, p'(max)$ ) 监测病情指数的准确度高，但也达到了 1% 的显著水平，完全可以实现卫星的大规模监测预报。在国外，Nutter 等（1989）利用Landsat TM卫星遥感数据并结合GIS对大豆胞囊线虫的危害进行了成功地遥感监测。
5. 高光谱遥感在将来应用前景广阔。由于在病害为害的初期，即接菌后 5 天的抽雄期，植被指

数 DVI 或者 RDVI 就可以很好的反演病情指数，所以利用高光谱遥感数据可以及时地对病害发生情况进行监测。和传统的田间调查的方法来预测病情发生发展有相同的精确度。鉴于高光谱遥感可以大面积、及时、无损、省时、省力等特点，在将来定会得到大面积的推广应用。

## 第三章 玉米受亚洲玉米螟为害后的冠层光谱特征变化及产量损失研究

亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* (Guenée) 属鳞翅目，螟蛾科，又名玉米钻心虫，是长期以来我国玉米生产上的重要害虫，危害性较大，常年为害造成 10-20% 的产量损失，大发生时可造成 30-50% 以上。当玉米心叶期受到玉米螟落卵为害时，低龄幼虫为害玉米心叶，当叶片展开后，叶片上布满有规则的成排小孔。大龄幼虫钻蛀危害玉米茎秆、雄穗柄、雌穗柄及雌穗，使被害植株的叶片、茎秆组织遭受破坏，严重影响光合作用和养分的输送，导致减产。

有关亚洲玉米螟为害与产量损失估计的模型已有许多报道，通过研究收获时可查到的幼虫数量、百株蛀孔数与产量损失的关系，分别得出了相应的产量损失估计模型（顾成玉等，1987；文丽萍等，1992；谢为民等，1993；李文德等，2002）。而现在随着高光谱遥感技术的发展，国内外利用光谱数据来研究植物受病虫害侵染的报道已有不少（吴曙雯等，2001；乔红波等，2005；Guan 等，2002）。但对于亚洲玉米螟这种即取食叶片又钻蛀玉米茎秆为害的光谱特征研究还未见报道。其为害后玉米叶片光谱特征的变化与田间被害状、产量损失等之间的关系还不清楚。本实验系统研究了人工接种玉米螟幼虫造成不同梯度为害后，玉米各生育期的冠层光谱数据和食叶级别、最终产量等之间的关系。为亚洲玉米螟发生危害预测预报和为害产量损失的估计提供参考依据。

### 3.1 材料与方法

#### 3.1.1 试验材料

供试昆虫为中国农业科学院植物保护研究所玉米螟组室内人工饲养的2龄初亚洲玉米螟幼虫。供试玉米品种为高感亚洲玉米螟的郑单958。在河北省农林科学院植保所农场夏播。

#### 3.1.2 试验设计和光谱测量方法

试验共分5个处理，3个重复。15个小区随机排列，每小区面积为5m×6m。处理1为对照，不接虫。其余4个处理在玉米大喇叭口期接虫，每株分别接2龄幼虫1、2、3、4头。

光谱测定仪器及方法详见第二章的2.1.3节。

### 3.1.3 叶绿素和植被指数的测定

叶绿素的测定方法和计算公式见第二章 2.1.6 节。

### 3.1.4 玉米为害的食叶级别测量方法

食叶级别的鉴定参照国际玉米螟协作组 (The International Working Group on *Ostrinia*) 制定的 9 级分级标准。

表20 亚洲玉米螟食叶级别等级划分表

Tab 20 Leaf feeding rating grades of Asian Corn Borer

心叶被害状	食叶级别
虫孔针刺状	个别叶片, 稀少, 分散
	个别叶片, 中等数量
	个别叶片, 大量
虫孔绿豆大小, 个别呈短条孔花叶	个别叶片, 稀少, 分散
	个别叶片, 中等数量
	个别叶片, 大量
虫孔大于绿豆呈排孔, 长条孔花叶或枯心	个别叶片, 稀少, 分散
	个别叶片, 中等数量
	个别叶片, 大量

调查的方法: 在测量完光谱数据后立刻调查, 每小区取四个点, 每个点调查3株, 获得该小区的食叶级别平均值。

### 3.1.5 小区产量测定、计算及数据处理

收获时剖杆调查幼虫数和蛀孔数, 并将各处理小区收获的玉米穗风干、脱粒后称重并计算单株产量和产量损失率。利用光谱仪自带软件 ASD ViewSpec Program 进行数据处理, 所得到数据用数理统计分析软件 SAS 进行分析。

## 3.2 结果与分析

### 3.2.1 不同时期健康玉米的光谱特征

从图 17 中可以看出, 健康的郑单 958 玉米植株在近红外区 (770~1100nm) 的冠层光谱反射率值在所观测的四个生育期中 (抽雄期、抽丝期、乳熟期, 最后到蜡熟期), 呈现逐步下降的趋势。抽雄期玉米叶已经全部展开, 叶面积指数达到最大值, 是植株生长最为茂盛的时期,

反映在冠层光谱上表现为有很高的近红外反射率(810nm波段),达到0.7左右。之后的三个生育期中,随着太阳高度角的减小,入射光强度减小,植株从营养生长转为生殖生长,使得叶片的养分不断向穗部转移等各种因素的影响,使得冠层光谱反射率值不断下降。在抽丝期大约下降到0.5左右。在乳熟期下降到0.35,而到了蜡熟期就已经下降到了0.3左右。

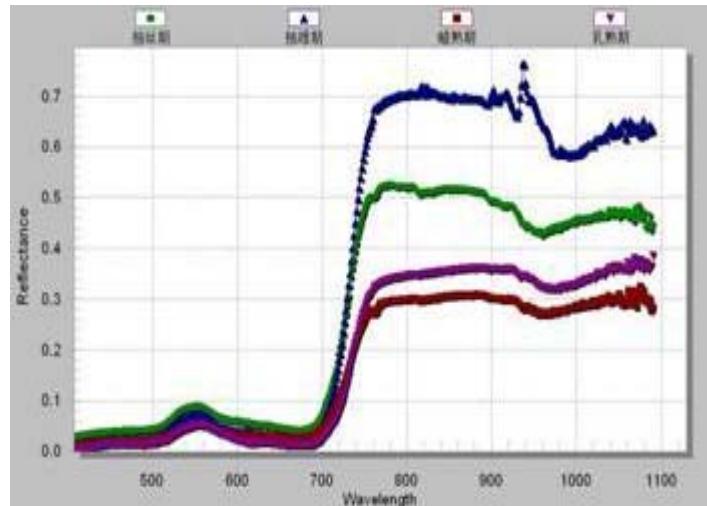


图 17 郑单 958 健康植株各生育期光谱曲线图

Fig 17 The spectrum value of healthy zhengdan 958 at the different stages

### 3.2.2 接种玉米螟幼虫后不同时期各处理玉米食叶级别光谱特征的关系

接种亚洲玉米螟2龄幼虫1、2、3和4头后,各处理所造成的食叶级别见图20-24,接虫数越多,造成的食叶级别就越高。

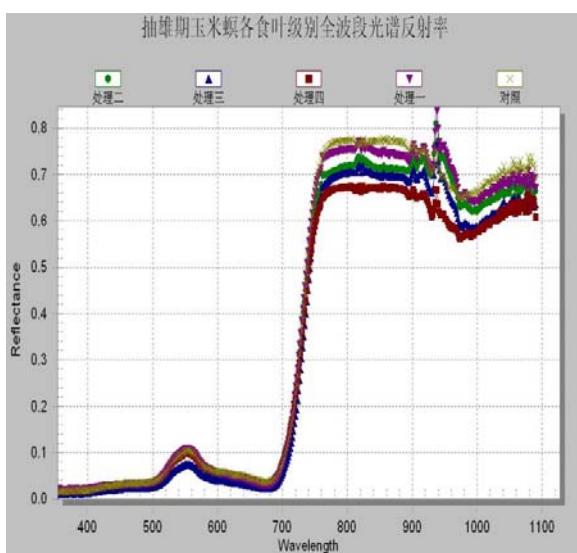


图 18 抽雄期 5 个接种处理冠层光谱反射率曲线图

Fig 18 The spectrum value of 5 infected levels in tasseling stage of maize

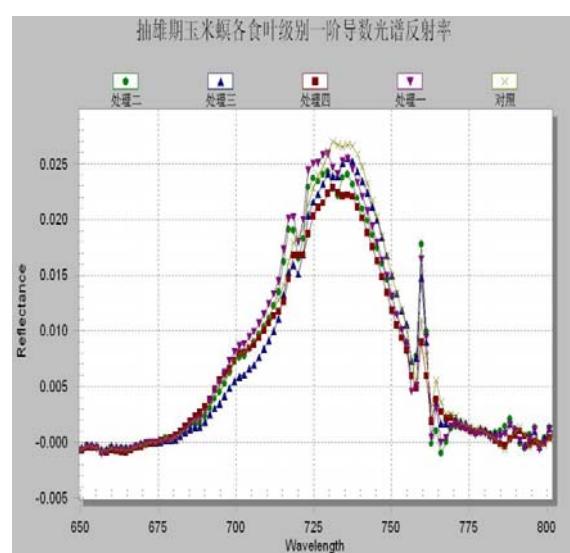


图 19 亚洲玉米螟危害后抽雄期一阶导数光谱光谱反射率值

Fig 19 The maximum of the first derivative value of canopy

spectrum of 5 levels in tasseling stage of maize



图 20 不接种亚洲玉米螟的对照玉米



Fig 20 The maize without the damage of ACB

Fig 21 The LFR after one second instar larva



图 22 接种 2 头亚洲玉米螟的食叶为害状

Fig 22 The LFR after two second instar larva



图 23 接种 3 头亚洲玉米螟的食叶

Fig 23 The LFR after three second instar larva



图 24 接种 4 头亚洲玉米螟的食叶为害状

Fig 24 The LFR after four second instar larva

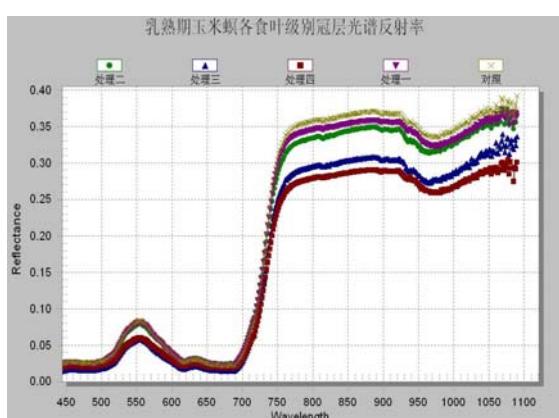


图 25 乳熟期各处理冠层光谱反射率曲线图

Fig 25 The spectrum value of 5 treatments in milk stage of maize

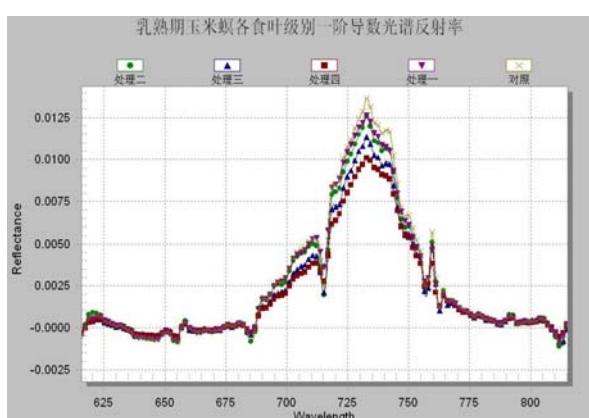


图 26 亚洲玉米螟危害后乳熟期各处理一阶导数光谱

Fig 26 The maximum of the first derivative value of canopy spectrum of 5 treatments in milk stage of maize

由表 21 可以看出, 在接虫后的前期(抽雄期), 5 个处理的 810nm 冠层光谱反射率值经邓肯氏多重比较, 在 5% 水平上差异显著, 处理 4 的 810nm 光谱反射率值比对照减少了 18%。玉米螟为害的中期(乳熟期), 光谱反射率值显著下降, 各处理之间的光谱反射率差异较抽雄期增大, 处理 4 比对照的 810nm 反射率值减少了 25%。由于光谱一阶导数是经过光谱反射率值微分而得到的, 所以变化趋势和 810nm 反射率值是一致的。将抽雄期和乳熟期近红外区 810nm 波段处光谱反射率值及一阶导数光谱最大值数据整理如下表:

表 21 玉米抽雄期和乳熟期不同处理间  $R_{810}$  和一阶导数光谱最大值及食叶级别

Tab 21 The LFR and spectrum  $R_{810}$  and the maximum of the first derivative value of canopy spectrum in maize tasseling and milk stages

接虫量	抽雄期 810nm 光谱	抽雄期一阶导数光	乳熟期 810nm 光谱	乳熟期一阶导数光	食叶级别
	反射率值	谱最大值	反射率值	谱最大值	
对照	0.759±0.011a	0.026±0.000a	0.371±0.012a	0.014±0.001a	0±0e D
每株1头	0.730±0.012ab	0.025±0.001a	0.347±0.030ab	0.014±0.000a	2.6±0.8d C
每株2头	0.686±0.054bc	0.023±0.002ab	0.324±0.022bc	0.013±0.001ab	5.8±0.2c B
每株3头	0.643±0.044c	0.022±0.004ab	0.303±0.007dc	0.012±0.001b	7.5±0.2b A
每株4头	0.621±0.048c	0.021±0.002b	0.280±0.011d	0.010±0.000c	8.3±0.2a A

在接虫后后, 当接虫数达到 2 头以上时, 危害后的近红外区 810nm 冠层光谱反射率在 0.05 水平上与对照差异性显著; 而一阶导数光谱最大值在接虫数为 3 头时与对照到达显著差异, 具体数据见表 21。玉米螟以幼虫取食叶片和蛀茎为害, 和健康的玉米植株相比较, 被为害株的冠层光谱反射率值随着食叶级别的增加而在近红外波段显著下降。图 27 是乳熟期近红外区的 810nm 处冠层光谱反射率值和对应的生育期食叶级别的回归方程式, 图 28 为乳熟期一阶导数最大值和对应生育期的回归方程式。两个方程均达到 1% 的极显著水平。

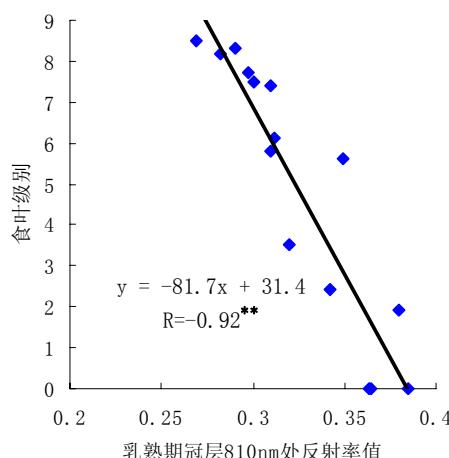


图 27 乳熟期冠层 810nm 反射率和对应生育期食叶级别关系

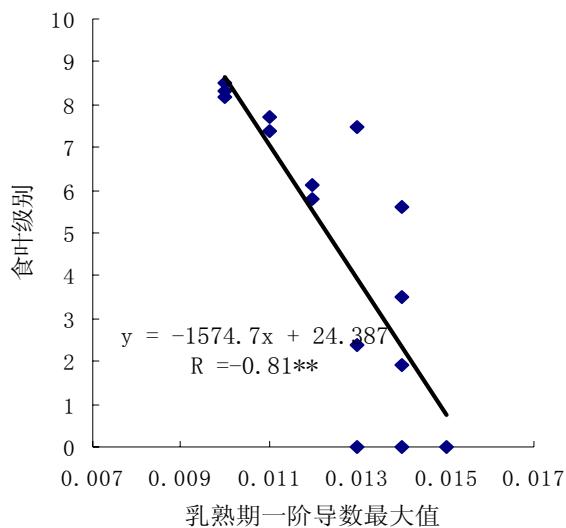
Fig 27 The regression equation of  $R_{810}$  with leaf feeding rating in tasseling stage and milk stage

图 28 乳熟期一阶导数最大值和对应生育期食叶级别关系

Fig 28 The regression equation of  $p'(max)$  with leaf feeding rating in milk stage

### 3.2.3 接种玉米螟幼虫后各时期叶绿素含量和光谱数据及植被指数的相关性分析

表 22 抽雄期和乳熟期不同处理间叶绿素含量的数据表\*

Tab 22 the chlorophyll contents in 5 treatments in maize tasseling and milk stages

接虫处理	抽雄期叶绿素含量(mg/g)			乳熟期叶绿素含量(mg/g)		
	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素(a+b)	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素(a+b)
对照	1.50±0.02aA	1.34±0.22aA	2.84±0.21aA	1.47±0.04aA	1.44±0.52aA	2.91±0.49aA
每株1头	1.52±0.01aA	0.95±0.09bAB	2.47±0.09abAB	1.50±0.03aA	1.33±0.44aA	2.83±0.40aA
每株2头	1.45±0.08aA	0.72±0.17bB	2.17±0.25bB	1.48±0.01aA	1.66±0.06aA	3.14±0.06aA
每株3头	1.50±0.02aA	0.73±0.10bB	2.22±0.12bB	1.47±0.02aA	1.72±0.21aA	3.19±0.19aA
每株4头	1.50±0.03aA	1.02±0.27abAB	2.52±0.30abAB	1.46±0.02aA	1.57±0.23aA	3.03±0.21aA

从表中看出玉米植株被玉米螟为害后，抽雄期叶绿素b以及总叶绿素在5%水平上对照与处理2、处理3差异显著，对照和处理4之间差异不显著，这说明玉米螟危害后并没有导致单位重量叶绿素含量的变化。乳熟期，其叶绿素a、叶绿素b以及总叶绿素的不同接虫处理之间差异不显著。

将表 21 中抽雄期的 810nm 冠层光谱反射率值和一阶导数最大值以及乳熟期 810nm 冠层光谱反射率值、一阶导数最大值和对应的生育期的总叶绿含量作回归分析, 所得方程决定系数很小, 分别为 0.088、0.059 和 0.04、0.078, 光谱数据和玉米螟为害后的叶绿素含量相关性不显著。

表 23 抽雄期和乳熟期 4 种植被指数值\*

Tab 23 The 4 vegetation indexs in tasseling stage and milk stage

接虫处理	决定系数R <sup>2</sup> (抽雄期)				决定系数R <sup>2</sup> (乳熟期)			
	NDVI	RFI	DVI	RDVI	NDVI	RFI	DVI	RDVI
对照	0.91± 0.01aA	21.68± 3.14aA	0.70± 0.03aA	0.80± 0.01aA	0.87± 0.04aA	16.34± 6.80aA	0.34±0aA 0.32±	0.54± 0.02aA
	0.91± 0.01aA	20.06± 0.57abA	0.64± 0.05aA	0.76± 0.03aA	0.86± 0.02aA	12.61± 0.25aA	0.32± 0.03aAB	0.53± 0.02aAB
每株1头	0.88± 0.03aA	16.89± 4.80abA	0.64± 0.08aA	0.75± 0.06aA	0.86± 0.04aA	14.00± 4.04aA	0.31± 0.03aAB	0.52± 0.02abA
	0.90± 0.01aA	19.22± 1.75abA	0.65± 0.10aA	0.76± 0.06aA	0.85± 0.04aA	13.17± 4.15aA	0.33± 0.05aAB	0.53± 0.03aAB
每株2头	0.88± 0.02aA	15.79± 2.54bA	0.59± 0.04aA	0.72± 0.03aA	0.87± 0.02aA	14.42± 2.37aA	0.26± 0.01bB	0.48± 0.01bB

注: NDVI, RFI, DVI, RDVI 分别为利用不同公式计算的植被指数, \* 表中同一列中具有不同大小写字母表示经 Duncan 氏多重比较后在 1% 和 5% 水平上差异显著

由表中可以看出, 每株接种4头幼虫的处理在抽雄期的植被指数RFI在5%水平上与对照呈显著差异, 对照区为21.68, 处理4为15.79。其他3种植被指数各处理间差异不显著。在乳熟期的4种植被指数中, DVI和RDVI在1%水平上差异性显著, 两种指数的对照和处理4的数据分别为0.34和0.26, 0.54和0.48。均达到1%水平的差异显著性。其他两种植被指数NDVI和RFI在各处理之间差异性不显著。将抽雄期和乳熟期的植被指数和叶绿素含量及食叶级别的决定系数R<sup>2</sup>表如下:

表24 4种植被指数反演叶绿素含量及食叶级别的决定系数统计数据表

Tab 24 The R-square of chlorophyll content and leaf feeding rating with 4 vegetation indexs in 2 stages

拟合项目	决定系数R <sup>2</sup> (抽雄期)				决定系数R <sup>2</sup> (乳熟期)			
	NDVI	RFI	DVI	RDVI	NDVI	RFI	DVI	RDVI
叶绿素 a	0.013	0.011	0.015	0.0068	0.009	0.002	0.031	0.058
叶绿素 b	0.013	0.012	0.046	0.0407	0.040	0.022	0.0006	0.002
总叶绿素	0.015	0.014	0.033	0.031	0.041	0.023	0.002	0.0006
食叶级别	0.286*	0.365*	0.33*	0.3574*	0.017	0.032	0.296*	0.4022**

从表中可以看出, 两个时期的植被指数均不能很好的反演叶绿素的含量, 抽雄期的 4 种植被指数可以很好的反演食叶级别, 均达到 5% 显著水平, 乳熟期的再归一化植被指数 RDVI 反演食

叶级别达到1%显著水平。方程为： $LF=42.145-71.965RDVI$ ,  $R=-0.634$

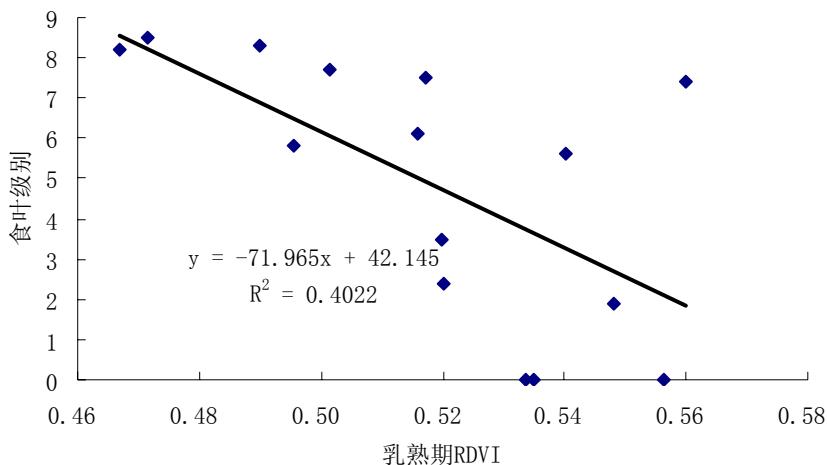


图 29 乳熟期再归一化植被指数和食叶级别拟合分析

Fig 29 The line equation of milk stage RDVI with leaf feeding rating

### 3.2.4 接种玉米螟幼虫后产量损失率、产量和各时期光谱特征、植被指数的相关性分析

由于用一阶导数光谱处理可除去部分线性或接近线性的背景、噪音对目标光谱的影响，本文对原始光谱反射率值作一阶导数光谱处理，所得最大的一阶导数光谱值也可用以反映玉米植株被害情况。一阶导数光谱的近似计算方法见2.1.3节。

表25 玉米螟危害后每株蛀孔数、乳熟期810nm光谱反射率值和一阶导数光谱最大值及单株产量的调查数据

Tab 25 The holes per plant,  $R_{810}$  in milk stage and the maximum first derivative and yield data

接虫处理	食叶级别	平均蛀孔数/每株	平均反射率值	一阶导数光谱最大值/ $\times 10^{-2} \text{nm}^{-1}$	平均每株干粒重/g	平均每株产量损失率/%
对照	0±0e D	0.31±0.07c B	0.37±0.01a A	1.4±0.1a A	138.7±11.9aA	—
每株1头	2.6±0.8d C	0.57±0.15bcB	0.35±0.03abAB	1.3±0.2ab AB	134.0±8.7aAB	3.1±7.3bc B
每株2头	5.8±0.2c B	0.74±0.15bB	0.32±0.02bcABC	1.3±0.1abAB	123.3±13.6abAB	11.2±2.7b AB
每株3头	7.5±0.2b A	0.75±0.12bB	0.30±0.01dc BC	1.1±0.2bc AB	108.7±9.3b B	21.3±8.0a A
每株4头	8.3±0.2a A	1.42±0.30aA	0.28±0.01d C	1.0±0c B	105.3±7.6b B	23.9±5.1a A

由表 25 得：玉米螟为害叶片造成的食叶级别在玉米抽雄散粉后已经达到最大值，此时玉米螟幼虫开始蛀茎为害。在光谱上反映为近红外区的反射率值下降显著，一阶导数光谱最大值下降，并和平均每株蛀孔数呈显著负相关，即为害越重，冠层光谱反射率值或者一阶导数光谱最大值则越小。在有一头虫为害时单株产量损失率为3.1%左右，而增加到每株两头时则产量损失率迅速增加到11.2%，每株3头和4头为害时其产量损失率分别为21.3%和23.9%，两处理之间差异不显

著。对照区没有接种玉米螟幼虫，而在完熟期收获查虫时发现有一定的虫孔，通过排在茎杆外的粪便推测出其中大部分是由桃蛀螟为害造成的，同时也有田间自然为害的玉米螟为害。其它四个处理也有相同程度的桃蛀螟为害，考虑到桃蛀螟蛀杆食穗也会造成产量损失等影响，所以统计时一并记录为蛀孔数。

表26 单株干粒重(Y)、单株产量损失率(L)和P'max、R<sub>810</sub>及平均每株虫孔数的回归方程

Tab 26 the regression equation of yield and yield loss with spectrum and per plant hole number

参数	回归方程式	R	F
一阶导数光谱最大值(P'max)	Y=31.79+7475.57P'max	0.78**	20.67
乳熟期810nm处反射率值(R <sub>810</sub> )	Y=9.11+347.42 R <sub>810</sub>	0.78**	19.89
平均每株虫孔数(X)	Y=143.31-27.32X	-0.65**	9.57
乳熟期810nm处反射率值(R <sub>810</sub> )	L=84.93-224.79 R <sub>810</sub>	-0.75**	17.19
平均每株虫孔数(X)	L=-3.06+18.99X	0.66**	10.29

回归方程式结果(表26)看出：单株干粒重(Y)分别与乳熟期一阶导数光谱最大值(P'max)、乳熟期810nm波段的反射率值(R<sub>810</sub>)和平均每株虫孔数(X)建立回归方程时，其各方程的相关系数达极显著相关(P<0.01)。产量损失率(L)分别与810nm处反射率值(R<sub>810</sub>)、平均每株虫孔数(X)之间建立的回归方程的相关系数也同样达到了极显著水平(P<0.01)。但两组方程中都是以光谱数据为自变量的方程相关系数高于用查虫数据为自变量的方程相关系数。

### 3.2.5 玉米螟危害后玉米冠层光谱敏感波段的选择

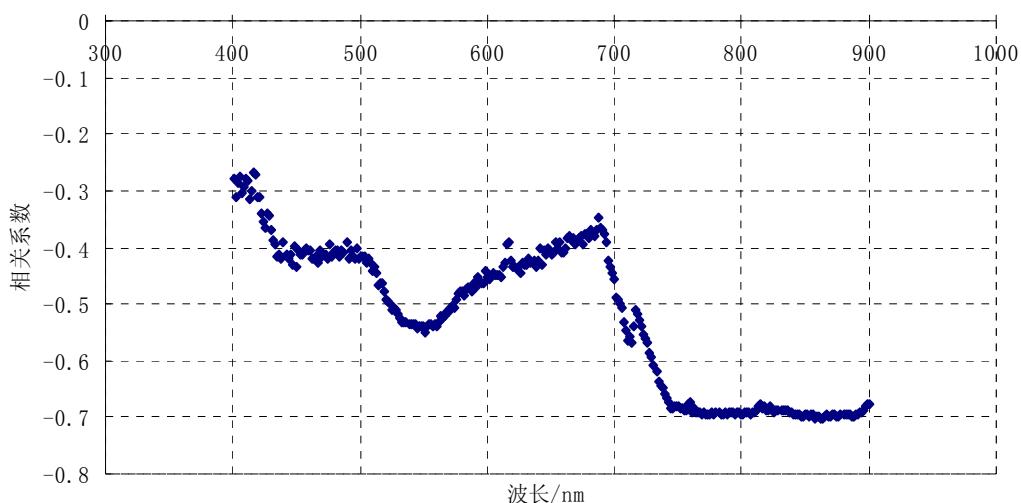


图30 乳熟期400~900nm的冠层光谱反射率值和平均每株虫孔数的相关系数曲线(n=15)

Fig 30 The correlation coefficients between canopy spectrum value and hole number per plant from 400nm to 900nm in milk stage

将乳熟期400~900nm共317个波段的光谱反射率值和各处理区平均每株虫孔数做相关性分析的结果见图30 (n=15)。如图28所示, 在550nm附近的叶绿素强反射区, 相关系数为-0.55左右, 达到显著相关 ( $P<0.05$ )。这一区域位于可见光区的绿光区。之后又逐渐下降, 然后在745nm~900nm的近红外区相关系数又显著升高, 达-0.69左右, 这一波段的反射率值和平均每株虫孔数达到极显著相关( $P<0.01$ )。由此得出近红外区的745nm~900nm冠层光谱反射率值可用来作为受害程度诊断波段。

### 3.3 结论与讨论

1. 近红外区波段 (745~900nm) 和 550nm 附近的叶绿素强反射区 (540~560nm) 可作为监测玉米螟为害的敏感波段。亚洲玉米螟幼虫取食心叶并钻蛀为害, 造成植株水分养分吸收、运输的进程受阻。光合作用所生成的产物也无法转运。在作物的光谱特征上表现为近红外波段的反射率急剧下降, 并随着玉米螟为害的加重而显著下降, 此波段的光谱反射率值和平均每株虫孔数之间极度负相关。同时为害较重的两个处理中, 幼虫蛀茎造成折雄或折茎, 雄穗或者上部茎秆干枯, 使得冠层光谱反射率较对照显著下降, 导致不同处理之间近红外区冠层光谱反射率差异显著。因此在玉米植株的同一个生育期中, 可用近红外区冠层光谱反射率值来推测植株受为害的严重程度。除近红外波段外 (745~900nm), 位于 550nm 附近的叶绿素强反射区 (540~560nm) 也和平均每株虫孔数之间有很高的负相关性。

2. 玉米螟为害后不同等级的食叶为害间的冠层叶片叶绿素含量之间的差异并不显著, 分析原因玉米螟危害主要影响叶片光合面积, 而对单位体积的叶绿素含量的影响并很不显著。故不能用光谱数据来反演玉米螟为害后叶片的叶绿素含量。然而, 利用植被指数可以很好的推测食叶级别, 并可预测后期的危害。将红波段(630nm~690nm波段反射率的平均值)和近红外波段(760nm~900nm波段反射率的平均值)的反射率值进行不同的组合, 得到的四个植被指数。尤其是在玉米螟危害初期的抽雄期, 再归一化植被指数RDVI和食叶级别之间拟合方程的决定系数 $R^2$ 达到0.405, 达到1%的显著水平。可以提前对玉米螟的为害进行预报。

3. 用光谱数据和产量损失率的回归分析法与传统的平均每株虫孔数与产量的回归分析结果相比较得: 两种方法所得回归方程均可以很精确的推测产量, 但用遥感的方法所得方程的相关系数比用每株虫孔数得到方程的相关系数较大, 说明利用光谱仪测产量损失率精确度更高。这和F. W. Nutter等 (2002) 利用遥感和传统两种方法研究苜蓿受叶部病害侵染后的产量损失模型中, 遥感方法比传统的统计病情指数推断产量损失的方法精确度要高的结论是一致的。本实验所得结论为今后大面积应用遥感方法监测病虫害发生、产量估测提供了参考依据。

## 第四章 总结论

### 4.1 主要研究结论

#### 4.1.1 玉米弯孢菌叶斑病和亚洲玉米螟为害后光谱特征的分析

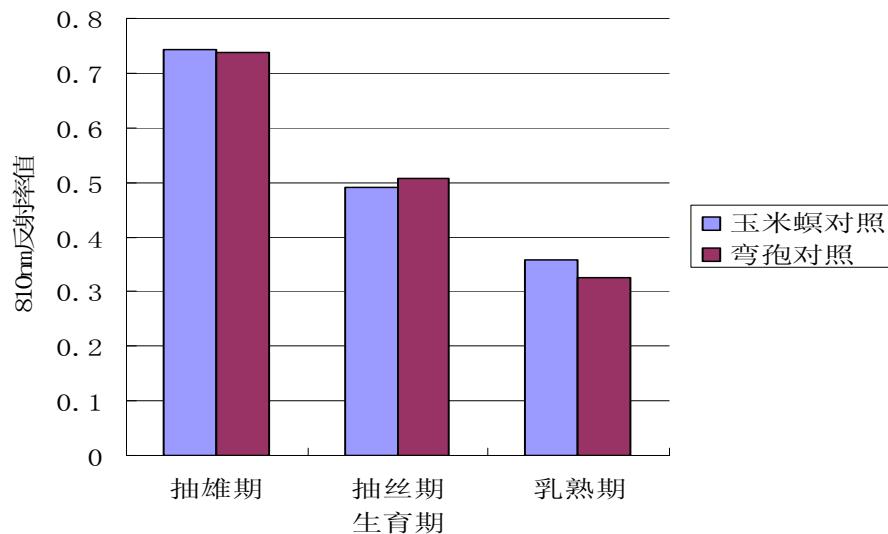


图 31 郑单 958 和沈试 3005 对照株在 3 生育期 810nm 反射率值  
Fig 31 The 810nm reflectance of Zhengdan 958 and Shensi 3005 in three growth stages

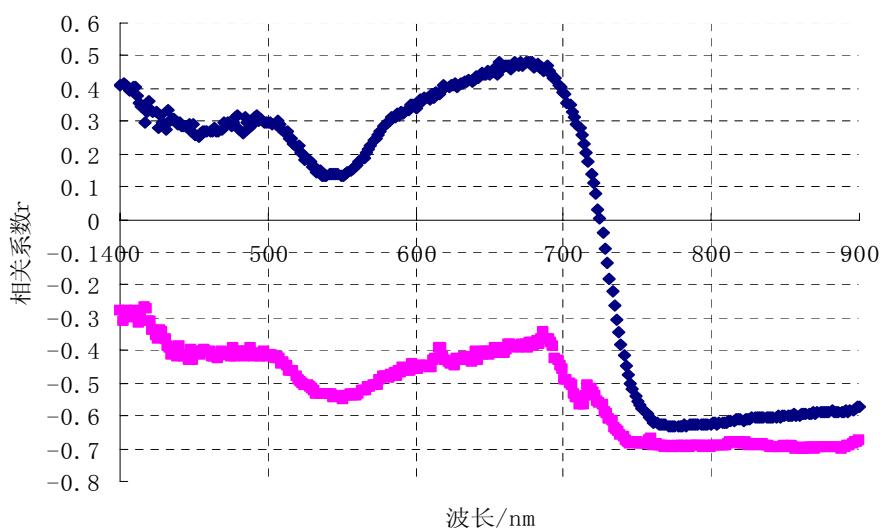


图 32 玉米弯孢菌叶斑病和亚洲玉米螟为害后的冠层光谱与病情指数、每株虫孔数的相关性曲线图  
Fig 32 The correlation coefficients between canopy spectrum value from 400nm to 900nm and DI caused by *Curvularia lunata*,hole number per plant caused by *Ostrinia furnacalis* in maize milk stage

注：玉米弯孢菌叶斑病病情指数与冠层光谱的相关 (2006 年玉米品种沈试 3005(上)和郑单 958(玉米螟为害, 下)乳熟期 400~900nm 的冠层光谱反射率值和病情指数、食叶级别的相关系数曲线( $n=15$ )

由图 31 看出, 郑单 958 和沈试 3005 未受害植株在各生育期的 810nm 光谱反射率值大小基本一致, 表明这两个品种的冠层光谱反射率值在没有受危害的情况下无显著差异。

在 400 到 900nm 波长范围内的 317 个光谱反射率值里, 玉米植株受玉米弯孢菌叶斑病为害和亚洲玉米螟为害后, 其两者在敏感波段的选择上是既有区别又有相似之处(图 32)。

主要的区别在于:

1. 玉米弯孢菌叶斑病为害玉米植株后, 在 400 到 724nm 波段的光谱反射率值和病情指数呈正相关关系, 在 724nm 到 900nm 之间, 冠层光谱反射率值和病情指数呈负相关。而亚洲玉米螟为害玉米植株后, 从 400nm 到 900nm 的各个波段的反射率值和食叶级别呈负相关关系。
2. 在 690nm 波长附近叶绿素的强吸收带, 玉米弯孢菌叶斑病危害后的冠层光谱和病情指数有很高的正相关性, 而玉米螟危害后的冠层光谱数据和食叶级别相关性不显著。

主要相似点:

亚洲玉米螟和玉米弯孢菌叶斑病为害后, 从 745nm 到 900nm 的近红外波段, 其冠层光谱反射率值和食叶级别、病情指数都呈现高度的负相关关系。而且此波段的相关性系数大于其它任何波段的相关性系数。所以, 可确定此波段(745~900nm)为敏感波段来监测病虫害的发生情况。

#### 4.1.2 亚洲玉米螟为害和玉米弯孢菌叶斑病为害后叶绿素变化的分析

亚洲玉米螟为害后, 叶绿素 a, 叶绿素 b 和总叶绿素在各个时期差异性不显著, 这主要因为玉米螟食叶最主要的为害是造成叶面积指数的减少, 使冠层光谱反射率值随着叶面积指数的减少而降低。而玉米弯孢菌叶斑病为害后, 病原菌侵入到叶片细胞内, 破坏了细胞组织结构, 使得叶绿素的单位重量中的含量随着病情指数的增加而不断下降。不同生育期叶绿素含量测定结果表明, 在接菌后的各个生育期内, 叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量虽然随病害发生程度的增加而降低, 但其降低的程度有所不同。叶绿素 a 含量在发病初期在各处理间差异不显著; 在发病中期和后期, 病情指数达到 78.7 和 86.7 的处理中其含量显著低于对照和其他处理。而叶绿素 b 含量在发病初期的病情指数为 21.0 的处理中就显著低于对照和其他处理, 其他处理的叶绿素 b 含量虽都比对照减少但其差异没达到显著水平; 在中后期叶绿素 b 含量在不同处理间差异性显著增大。其含量可以由四种植被指数精确反演。

#### 4.1.3 亚洲玉米螟为害和玉米弯孢菌叶斑病为害后产量损失和冠层光谱数据的分析

两年的玉米弯孢菌叶斑病为害造成的产量损失的试验均表明, 产量以及产量损失率和蜡熟期的一阶导数反射率最大值有最好的相关性关系, 所建立的回归方程的决定系数达到 1% 水平的极

显著相关。玉米螟为害后的产量可用乳熟期的冠层光谱数据来估测。两个试验中,还利用传统的估产方法,即以病情指数或单株蛀孔数为指标对玉米受病、虫危害后的产量进行相关分析,并建立了方程式。两种方法相比来看,在玉米螟为害试验中,利用光谱数据估产所建立的回归方程的相关系数达到0.78,利用每株蛀孔数估产所建立的方程的相关系数为-0.65,得出利用遥感方法估产的精确度大于传统的虫情调查法得到的结果,这个结论和F. W. Nutter等(2002)所得结论是一致的。在玉米弯孢菌为害的两年试验中,2005年产量和病情指数所建立的回归方程的决定系数为0.72,小于同年用光谱数据估产所得回归方程的决定系数0.76;而在2006年中,病情指数估产的决定系数达到0.85,光谱数据估产的决定系数仅为0.71。以上结论是基于本研究两年的结果,哪种方法能更加准确的估测最终的产量还需要进一步的深入研究。由于遥感估产的方法具有及时、大面积、省力、无损失等优点,相信在未来一定会得到很好的应用。

#### 4.1.4 亚洲玉米螟为害和玉米弯孢菌叶斑病为害后四种植被指数对食叶级别、病情指数及叶绿素含量的反演

四种植被指数由公式得出,可以近似于Landsat TM的数据进行理论上的应用。亚洲玉米螟为害后的乳熟期,再归一化植被指数RDVI和食叶级别的直线回归方程的决定系数为0.4022,达到1%水平的极显著相关。由于玉米螟为害后各处理间玉米叶片的叶绿素含量并没有显著差异,所以四种植被指数均不能很好的反演叶绿素含量。而玉米弯孢菌为害试验表明,在接菌后的各个时期不同的植被指数均可以很好的反演病情指数的变化。在接菌后的早期,病情指数和叶绿素的总含量与DVI以及NDVI相关性最高,而在后期,由于病情指数的增加,植株受害严重,叶片干枯,植被覆盖率下降,叶绿素含量急剧下降,使得病指和叶绿素总含量与RVI相关性最高。这个结论和不同的植被指数所适用时期的结论是一致的。综合四个生育期,再归一化植被指数RDVI与病情指数建立的直线回归方程的决定系数达到0.7856,为四种植被指数、三种回归方程的最佳拟合方程。达到了1%水平的极显著相关,所以可用RDVI来反演全生育期的病情指数。

## 4.2 高光谱遥感在病虫害监测中的应用展望

高光谱分辨率遥感以其分辨率高,信息丰富等优点,有着其他常规遥感不可比拟的优势。可以及时、大面积、无损的对作物病虫害造成的胁迫进行监测。其连续的光谱可以真实全面的反映植被固有的信息以及和病虫害胁迫后之间的差异性。并且有文献报道当作物受到病虫害侵染后的前期,健康作物和受侵染作物在可见光波段的光谱之间的差异不甚显著,但利用高光谱遥感测得的近红外光区的光谱特征已经可以显著的区分出健株和病株。因此较传统的利用人眼仅能对可见光区植株叶片颜色改变而作出的预报相比,高光谱遥感可以在病虫害的危害前期就做出预报

(Ansmus 等, 1972), 以采取相应的防治措施, 避免病虫害危害的进一步加剧。

利用统计分析法以及基于光谱位置(波长)变量的分析法可以很好的找出光谱参量和农学参量之间的关系。而利用不同波段所组成的各种植被指数可以很好的反演叶绿素含量、叶绿素密度、叶面积指数以及病情指数等农学参量。可对作物的长势情况, 受病虫危害情况进行实时的监测, 同时对作物最终产量进行精确预测。唐延林等(2004)利用水稻成熟期的冠层高光谱数据进行估产研究, 所得高光谱植被指数 $R_{990}-R_{440}$ 和 $R_{1200}-R_{440}$ 的估产效果最高精度可达95%。

3S (RS,GPS, GIS) 系统中的全球定位系统 (GPS) 可以实现调查研究中取样的精确定位, 而地理信息系统 (GIS) 在空间数据的管理, 空间分析、多元数据的整合、数据的统计分析、模型的建立和制图等方面具有强大的功能, 3S 系统相结合在实际的应用中已有许多成功事例。Nutter 等(2002)利用 Landsat TM 卫星遥感数据并结合 GIS 对大豆胞囊线虫的危害进行了遥感监测。黄敬峰等(2002)研究了基于 GIS 的水稻遥感估产模型, 并对浙江省水稻总产进行了预测, 精度高达95%以上。因此与 GPS 以及 GIS 的结合是今后遥感成功的应用于植被病虫肥胁迫监测和管理研究中的必然趋势。

## 参考文献

1. 常庆瑞, 蒋平安, 周勇, 申光荣, 李瑞雪, 赵鹏祥, 遥感技术导论. 科学出版社, 2004, 292-298
2. 程一松, 胡春胜等, 氮素胁迫下的冬小麦高光谱特征提取与分析. 资源科学, 2003, 25(1): 86-92
3. 程一松, 胡春胜, 王成, 于贵瑞, 养分胁迫下的夏玉米生理反应与光谱特征. 资源科学, 2001, 23 (6) :54-58
4. 代辉, 胡春胜, 程一松, 宋文冲, 不同氮水平下冬小麦农学参数与光谱植被指数的相关性. 干旱地区农业研究, 2005,23 (4) :16-20.
5. 傅俊范, 白元俊, 薛敏菊, 牟连晓, 玉米弯孢菌叶斑病流行动态及产量损失测定. 沈阳农业大学学报, 1996, 30 (3): 204-207
6. 傅俊范, 白元俊等, 玉米弯孢菌叶斑病产量损失估计模型的研制. 沈阳农业大学学报, 2000-10, 31(5): 468-471
7. 傅俊范, 李海春, 白元俊, 严雪瑞, 潘荣光, 玉米弯孢菌叶斑病传播梯度模型. 植物病理学报, 2003, 33 (5): 456-461
8. 顾成玉, 梁艳春, 张广芝, 一代区玉米螟产量损失与防治指标的研究. 昆虫知识, 1987, 24 (2): 78-80.
9. 郭胜伟, 高云东, 比色法测定中华芦荟叶片中叶绿素含量方法的研究. 中医药学刊, 2004, 22 (1) :53-54
10. 郭小勤, 翟凤艳, 玉米弯孢菌叶斑病重要流行环节的初步定量研究 II -病斑的潜育、显症、产孢与扩展. 吉林农业大学学报 2003, 25(1): 27-30
11. 何国金, 北京麦蚜虫害的光谱测量与分析. 遥感技术与应用, 2002,17(3): 119-124
12. 黄敬峰, 杨恩恩, 王人潮等, 基于 GIS 的水稻遥感估产模型研究. 遥感技术与应用, 2002, 17(3):125-128.
13. 黄木易, 王纪华, 黄义德, 黄文江, 赵春江, 刘良云, 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
14. 焦险峰, 杨邦杰, 裴志远, 王飞, 基于植被指数的作物产量监测方法研究. 农业工程学报, 2005, 21 (4): 104-108
15. 金震宇, 田庆久, 水稻叶绿素浓度与光谱反射率关系研究. 遥感技术与应用, 2003,18 (3) : 134-136
16. 井金学, 商鸿生, 张文军, 小麦赤霉病的为害损失估计模型. 植物保护学报, 1999, 26 (4): 299-304
17. 李文德, 陈素馨, 秦建国, 亚洲玉米螟危害蛀孔在春玉米上的分布及其与产量损失的关系. 植物保护, Dec.2002,28 (6): 25-28.
18. 刘秀丽, 宋平, 孙成明, 植物叶绿素测定方法的再探讨. 江苏农业研究, 1999, 20 (3): 46-47
19. 倪绍祥, 环青海湖地区草地蝗虫遥感监测与预测. 上海科学技术出版社, 2002
20. 农业遥感编写组, 农业遥感. 高等教育出版社, 1983
21. 浦瑞良, 宫鹏, 高光谱遥感及其应用. 高等教育出版社, 2000, 86-93
22. 乔红波, 麦蚜、白粉病危害后冬小麦冠层高光谱的测量与分析[硕士学位论文]. 北京: 中

- 国农业科学院, 2004
23. 乔红波, 程登发, 孙京瑞, 田喆, 陈林, 林芙蓉, 麦蚜对小麦冠层光谱特性的影响研究. 植物保护, 2005, 31 (2) :21-26
24. 孙莉, 陈曦, 棉花各生育期高光谱数据与叶片生物物理生物化学量的相关分析. 干旱区地理, 2004, Vol. 27. No.1:124-129
25. 谭昌伟, 黄义德, 黄文江, 王纪华, 赵春江, 刘良云, 夏玉米叶面积指数的高光谱遥感植被指数法研究. 安徽农业大学学报, 2004, 31(4): 392-397
26. 谭昌伟, 王纪华, 黄文江, 刘良云, 黄义德, 赵春江, 夏玉米叶片全氮、叶绿素及叶面积指数的光谱响应研究. 西北植物学报, 2004, 24 (6): 1041-1046
27. 唐延林, 黄敬峰, 王人潮, 水稻不同发育时期高光谱与叶绿素和类胡萝卜素的变化规律. 中国水稻科学, 2004, 18(1):59-66
28. 唐延林, 黄敬峰等, 水稻、玉米、棉花的高光谱及其红边特征比较. 中国农业科学, 2004, 37 (1): 29-35
29. 唐延林, 王纪华, 黄敬峰, 王人潮, 利用水稻成熟期冠层高光谱数据进行估产研究. 作物学报, 2004, 30 (8) :780-785.
30. 唐延林, 王秀珍, 王人潮, 玉米高光谱及其红边特征分析. 山地农业生物学报, 2003, 22(3): 189-194.
31. 王登伟, 李少昆, 棉花主要栽培生理参数的高光谱估测研究. 中国农业科学, 2003, 36(7):770-774
32. 王磊, 白由路, 陈仲新, 王兵, 低温胁迫下的夏玉米苗期高光谱特征. 农业网络信息, 2004, 4:27-33.
33. 王晓鸣, 戴法超等, 玉米弯孢菌叶斑病的发生与防治. 植保技术与推广, 2003, 23 (4): 37-39
34. 文丽萍, 王振营, 叶志华等, 亚洲玉米螟对玉米的危害损失估计及经济阈值研究. 中国农业科学, 1992, 25(1):44-49
35. 吴长山, 童庆禧, 水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的相关分析. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8 (1) :31-36
36. 吴继友, 倪建, 松毛虫危害的光谱特征与虫害早期探测模式. 遥感学报 1995, 10(4):250-258
37. 吴曙雯, 王人潮, 陈晓斌, 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), 2001(3) :73-76
38. 谢为民, 王蕴生, 杨桂华, 李建平, 张荣, 亚洲玉米螟危害玉米产量损失估算方法研究. 玉米科学, 1993, 1 (1) :61-64
39. 杨建国, 金晓华, 张建华, 赵连洪, 玉米螟危害产量损失研究. 昆虫知识, 1997, 34 (2): 70-71
40. 杨振德, 分光光度法测定叶绿素含量的探讨. 广西农业大学学报, 1996, 15 (2) :145-149
41. 贲少先, 张义奇, 石丽军, 玉米弯孢菌叶斑病发病规律及影响因子研究. 河北农业科学, 2005, 9 (2): 7-11
42. 张金恒, 王珂, 王人潮, 高光谱评价植被叶绿素含量的研究进展. 上海交通大学学报, 2003, 21 (1) :74-79
43. 赵德华, 李建龙, 高光谱技术提取不同作物叶片类胡萝卜素信息. 遥感信息, 2004.3:13-16

44. 赵德华, 李建龙, 宋子键, 高光谱技术提取植被生化参数机理与方法研究进展. 地球科学进展 2003, 18 (1): 94-98
45. 赵祥, 刘素红, 王培娟, 王锦地, 田振坤, 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
46. 赵英时, 遥感应用分析原理与方法. 科学出版社, 2003
47. 郑爽, 翟凤艳等, 玉米弯孢菌叶斑病重要流行环节的初步研究-孢子萌发、侵染、潜育、显症. 玉米科学, 2002, 10 (3): 87-89
48. 周大荣, 何康来, 文丽萍, 玉米螟综合防治技术. 北京: 金盾出版社, 1995
49. Ansmus. B. S; Hilty. J. W., Reflectance studies of healthy maize dwarf mosaic virus-infected, and *Helminthosporium maydis*-infected corn leaves. *Remote Sensing of Environment* 1972, 2: 77-81.
50. Bauer ME, Mroczynski RP, MacDonald RB, Hoffer RM., Detection of southern corn blight using color infrared aerial photography. *Proc, Bienn. Workshop Color Aerial Photogr. Plant Sci.*, 1971, 3rd, 114-126
51. Bisun Datt, Remote Sensing of Chlorophyll a,Chlorophyll b, Chlorophyll a1b, and Total Carotenoid Content in Eucalyptus Leaves. *Remote Sensing of Environment*, 1998,66:111-121
52. Blackmer. T. M; J. S. Schepers, and G. E. Varvel., Nitrogen deficiency detection capabilities of light reflection from irrigated corn canopies. *Agron* 1996a, 88:1-5.
53. Blackmer. T. M; J. S. Schepers, G. E. Varvel., Light reflectance compared to other N stress measurements in corn leaves. *Agron* 1994, 86:934-938.
54. Blackmer. T. M; J. S. Schepers, M. F. Vigil., Chlorophyll meter readings in corn as affected by plant spacing. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 1993, Vol.24, No.17-18, 2507-2516.
55. Blackmer. T. M; J. S. Schepers. Aerial photography to detect nitrogen stress in corn. *Crop Phys.*148:440-444.
56. Blackmer. T. M; J. S. Schepers., Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 1994, Vol. 25, No.9-10, 1791-1800.
57. Blackmer. T. M; J. S. Schepers., Use of a chlorophyll meter to monitor N status and schedule fertilization for corn. *Prod. Agric.* 8:56-60.
58. Blazquez CH, Edwards GJ., Infrared color photography and spectral reflectance of tomato and photo disease. *Appl. Photogr. Eng* 1983, 9:33-37.
59. Blazquez CH., Correlation of densitometric measurements of aerial color infrared photography with visualgrades of citrus groves. *Plant Disease* 1993, 77:4 77-79.
60. Carter. G. A., Response of leaf spectral reflectance to plant stress. *Am. Bot.* 1993,80:239-243.
61. Carter. G. A; T. R. Dell; W. G. Cibula., Spectral reflectance characteristics and digital imagery of a pone needle blight in the southeastern United State. *Can. J. For. Res.* 1996, 26: 402-407.
62. Clark RV, Galway DA, Paliwal YC., Aerial infrared photography for disease detection in field plots of barley, oats and wheat. *Phytopathology* 1981,71:867
63. Demetriades-Shah. T. H; Steven. M. D., High spectral resolution indices for monitoring crop growth and chlorosis. *Proceedings of 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing.* Aussois, France, (ESA SP-287, April 1988)
64. F. W. Nutter, Jr., J. Guan. Quantifying Alfalfa Yield Losses Caused by Foliar Diseases in Iowa, Ohio, Wisconsin, and Vermont. *Plant Disease*, March 2002:269-277.

65. George Alan Blackburn, Quantifying Chlorophylls and Carotenoids at Leaf and Canopy Scales: An Evaluation of Some Hyperspectral Approaches. *Remote Sensing of Environment*. 1998, 66:273-285
66. J. Guan, F. W. Nutter, Jr., Relationships between defoliation, leaf area index, canopy reflectance, and forage yield in the alfalfa-leaf spot pathosystem. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002:97-112.
67. Kieckhefer. R. W, B. H. Kantack., Yield losses in winter grains caused by cereal aphids in South Dakota. *J. Econ. Entomol.* 1988, 81:317-321.
68. Kieckhefer. R. W.; B. H. Kantack., Losses in yield in spring wheat in South Dakota caused by cereal aphids. *J. Econ. Entomol.* 1980, 73:582-585.
69. Kieckhefer. R. W; J. L. Gellner, W. E., Riedell. Evaluation of aphid-day standard as a predictor of yield loss caused by cereal aphids. *Agron* 1995, 87:785-788
70. Krause. G. H; E. Weis., Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 1991, 42:313-349.
71. Krause. G. H; E. Weis., Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology. Interpretation of fluorescence signals. *Photosynth. Res* 1984, 5: 139-157.
72. M. H. Zhang; Z. H. Qin. Detection of stress in tomatoes induced by late blight in California, USA, using hyperspectral remote sensing. *International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 4, 2003, 295-310
73. Malthus. T. J; Madeira. A. C., High resolution spectroradiometry: spectral reflectance of field bean leaves infected by *Botrytis fabae*. *Remote Sensing of Environment*. 1993, 45, 107-116
74. Nancy F. Glenna, Jacob T. Mundta, Keith T. Wever, Hyperspectral data processing for repeat detection of small infestations of leafy spurge. *Remote Sensing of Environment*. 2005(95): 399-412
75. Nilsson. H. E, Remote sensing of 2-row barley infected by net blotch disease, 1985, Vol. 34, *Växtskyddsrapporter-jordbruk*, ppsala
76. Nilsson. H. E., Remote sensing of oil seed rape infected by *Sclerotinia* stem rot and *Verticillium* wilt, 1985, Vol.33. *Växtskyddsrapporter-jordbruk*, ppsala
77. Nutter. F. W. Jr., Detection and measurement of plant disease gradients in peanut with a multispectral radiometer. *Phytopathology* 1989, 79: 958-963.
78. Pablo J. Zarco-Tejada, John R. Miller, Chlorophyll Fluorescence Effects on Vegetation Apparent Reflectance:II. Laboratory and Airborne Canopy-Level Measurements with Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*. 2000, 74:596-608
79. Riedell. W. E. and Kieckhefer. R. W., Nitrogen fertilizer management and grain yield loss to Russian wheat aphids. *Cereal Res. Commun* 1993, 21:57-61.
80. Riedell. W. E. and Kieckhefer. R.W., Feeding damage effects of three aphid species on wheat root growth. *Plant Nutrit* 1995, 18:1881-1891.
81. Riedell. W. E. and T. M. Blacker., Leaf reflectance spectral of cereal aphid-damaged wheat. *Crop Sci.* 39:1835-1840.
82. Riedell. W. E., Effects of Russian wheat aphid infestation on barley plant response to drought stress. *Physiol. Plantarum* 1989, 77:587-592

## 致 谢

本研究得到了国家科技“十五”攻关计划(2004BA509B01)和国家公益性研究专项资金(2001DIA10012)的资助。

本论文是在导师文丽萍副研究员的悉心指导下完成的，从论文的选题、设计到实验计划的实施及最后论文的撰写无不凝结着导师的心血和汗水。导师渊博的知识、严谨求实的治学态度、孜孜不倦的工作作风和兢兢业业的敬业精神是我今后工作和学习中的榜样。三年来，无论在学习、生活还是工作中，文老师都给予了巨大的帮助、鼓励和支持，在此向文老师致以我最诚挚的谢意！

本论文的完成离不开王振营研究员和何康来研究员的关心和帮助，在实验设计上王老师提出了宝贵的建议，何老师给予了耐心的技术指导，两位老师知识渊博、才思敏捷、为人谦和，永远是我学习的榜样。在此，向王老师和何老师致以最衷心的感谢！

感谢河北省农林科学院植物保护研究所石洁副研究员在我试验期间提供的巨大帮助，石老师在实验设计、方案实施及具体的试验细节上都给与了宝贵的建议和指导，并在生活上给与了很多帮助，在此向石老师致以最诚挚的谢意！刘玉瑛老师、张老章老师在我的试验过程中始终给与着最大的关心和帮助，在此向两位老师致以我最衷心的感谢！

感谢植保信息技术组乔红波师兄在光谱仪使用以及数据处理方面的热心帮助。感谢中国农业科学院植物保护研究所玉米螟组提供的良好学习和工作环境。感谢白树雄和宋彦英老师在生活学习和工作中的大力支持和帮助。感谢本组的博士生李霞、徐艳玲、杨瑞生，硕士生杜茜、刘慧、马嵩岳、常雪艳、吴研、邢珍娟、常雪、徐丽娜、鹿金秋、吕军、韩海亮、袁佳，实习本科生熊辉、张伟亮、李华、陈崇、周丽等同学在试验和生活中给予的热情帮助。

本试验的顺利完成离不开河北农业大学本科生刘树森、张谦、刘金娟、王岩、李燕以及长江大学本科生郭燕兵、乔木等同学的热心帮助，没有他们帮助我做田间的光谱测量、病虫为害调查等工作，要完成这样艰巨的任务是很难想象的。在此向他们表示我深深地谢意！

感谢研究生院和植保所各位老师的关心和帮助，使我在各方面不断进步。

最后，向不断给我支持和鼓励的父母、姐姐以及所有关心帮助过我的亲友致以我最衷心的感谢和祝福！

张永强

2007年6月

## 作者简历

姓名：张永强 性别：男  
出生年月：1981.8 民族：汉  
籍贯：山东淄博 政治面貌：中共党员

### 学习经历：

2000年9月-2004年7月就读于莱阳农学院植物保护系植物保护专业，获得农学学士学位。大学期间通过国家英语四、六级考试。2004年9月至今就读于中国农业科学院研究生院，攻读农业昆虫与害虫防治专业硕士学位。2004-2005学年度被评为中国农业科学院研究生院优秀学生干部。

### 在读期间发表的文章：

张永强，文丽萍，石洁，王振营，何康来，程登发，亚洲玉米螟为害后玉米冠层光谱变化和产量损失研究. 2007. 植物保护(已录用)

张永强，文丽萍，石洁，王振营，何康来，白树雄，玉米感染弯孢菌叶斑病后叶片的光谱特征及产量损失. 科技创新与绿色植保(研究简报及摘要): 713, 2006, 中国农业科学技术出版社

张永强，文丽萍，王振营，高光谱遥感在监测作物受病虫肥胁迫中的应用. 2006 中国科协年会会议论文. 中国科学技术出版社

ZHANG Yong-qiang, WEN Li-ping, SHI Jie, The Canopy hyper-spectrum character of maize damaged by *Curvularia lunata* (Wakker) Boed and yield loss estimation. The Abstract of 16<sup>th</sup> International Plant Protection Congress.