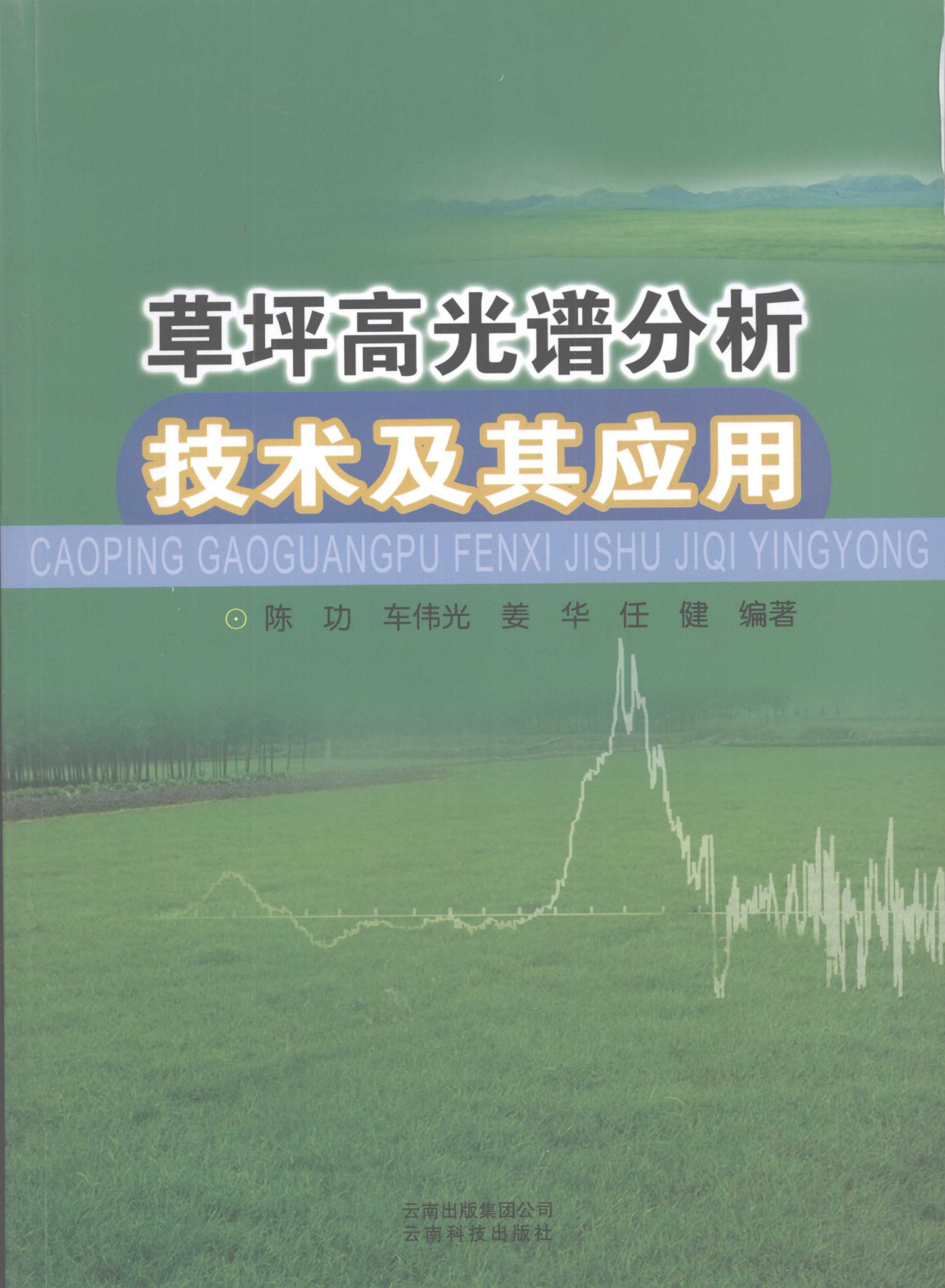




草坪高光谱分析 技术及其应用

CAOPING GAOGUANGPU FENXI JISHU JIQI YINGYONG

◎ 陈 功 车伟光 姜 华 任 健 编著

云南出版集团公司
云南科技出版社

公益性行业（农业）科研专项（nyhyzx07-022）资助

草坪高光谱分析技术及其应用

陈 功 车伟光 姜 华 任 健 编著

云南出版集团公司
云南科技出版社

· 昆 明 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

草坪高光谱分析技术及其应用/陈功等编著. —昆明:
云南科技出版社, 2009. 2

ISBN 978 - 7 - 5416 - 3177 - 1

I. 草… II. 陈… III. 光谱分辨率 - 光谱分析 - 应用 -
草坪 - 研究 IV. S688. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 021055 号

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码: 650034)

昆明市五华区教育委员会印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 9.5 字数: 230 千字

2009 年 3 月第 1 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

印数: 530 册 定价: 30.00 元

编写人员名单

主编：陈 功 车伟光 姜 华 任 健

参编：贺兰芳 张 文 龙光强 张 晔 吴建付 杨红丽

前 言

高光谱分析是当今遥感领域的前沿技术，具有分析速度快、精度高、结果稳定、对目标物无破坏等优点。高光谱分析技术在农业的许多领域已经得到了日益广泛的应用，但在草坪方面仍然处于起步阶段，存在许多空白，亟待开展相关的系统性研究。作者在参考国内外已有研究成果的基础上，针对草坪植被及其用途的特殊性，运用高光谱分析技术进行了多方面的探索实践，并取得了具有创新性的研究成果。

本书共包括 8 章。第一章介绍了高光谱技术在农业领域的研究和应用现状；第二章简要讲述了高光谱分析技术的基本方法；第三章介绍了影响草坪高光谱反射特征的主要因素，并列举出两种影响光谱反射数据的测定方式；第四章介绍了利用高光谱数据建立草坪色泽定量评价模型的理论与实践；第五章和第六章分析了混播草坪高光谱反射特征以及高光谱参数、植被指数与叶绿素含量之间的相关性；第七章分析了水分胁迫条件下马蹄金草坪反射光谱特征，及其与多项生理指标之间的相关性。第八章介绍了病害胁迫对草坪反射光谱特征的影响，并提出了如何利用高光谱分析法建立草坪病虫害预警体系的技术方案。

本书参考和引用了大量的专著文献，在此对其作者表示真挚的谢意。本书适宜于草业科学、环境绿化等领域的教学科研人员和学生作为参考书使用。

由于作者水平有限，书中的疏漏、不足甚至错误，敬请读者批评指正。

编 者

2008 年 12 月于昆明

目 录

第一章 高光谱分析技术及其在农业领域的研究与应用	(1)
1.1 高光谱遥感	(1)
1.2 植物反射光谱特征	(2)
1.3 高光谱分析技术和方法	(4)
1.4 高光谱技术在草地、作物领域的研究与应用	(6)
1.5 高光谱分析技术在草坪领域的研究与应用	(13)
第二章 草坪高光谱分析技术	(19)
2.1 草坪高光谱分析技术的发展、应用及前景	(19)
2.2 草坪高光谱参数及其提取方法	(20)
2.3 多元统计分析技术	(22)
2.4 基于光谱特征位置变量的分析技术	(23)
第三章 草坪反射光谱特征各影响因素	(25)
3.1 草坪草种 (品种)	(25)
3.2 草坪覆盖度	(26)
3.3 草坪土壤含水量	(28)
3.4 施肥	(31)
3.5 生长季节	(34)
3.6 反射光谱测定方式	(35)
第四章 草坪色泽高光谱分析	(36)
4.1 草坪色泽评价方法及其研究进展	(36)
4.2 试验设计与测定方法	(37)
4.3 草坪反射光谱特征	(39)
4.4 草坪光谱特征参数与色泽相关性分析	(44)
4.5 测定方式对草坪反射光谱特征的影响	(50)
4.6 对几个问题的讨论	(57)
4.7 小结	(60)
第五章 混播草坪冠层反射光谱特征	(62)
5.1 国内外混播草坪光谱研究概况	(62)

5.2	试验设计和研究方法	(63)
5.3	混播组分对草坪叶绿素含量及反射光谱特征的影响	(66)
5.4	季节对混播草坪叶绿素及反射光谱特征的影响	(67)
5.5	氮素水平对混播草坪叶绿素及反射光谱的影响	(70)
5.6	小结	(74)
第六章	混播草坪高光谱分析	(76)
6.1	基于光谱位置的微分参数变化规律	(76)
6.2	混播草坪冠层叶绿素含量与光谱特征波段的相关性	(81)
6.3	混播草坪冠层叶绿素含量与高光谱参数的相关性	(83)
6.4	混播草坪冠层叶绿素含量与植被指数之间的相关性	(87)
6.5	小结	(90)
第七章	干旱胁迫对草坪草生理指标及高光谱反射特征的影响	(91)
7.1	植物抗旱研究现状	(92)
7.2	反射光谱技术在植物生理学上的应用与研究	(98)
7.3	试验设计与测定方法	(99)
7.4	干旱胁迫对草坪草几项生理指标的影响	(101)
7.5	干旱胁迫对草坪反射光谱特征的影响	(107)
7.6	草坪反射光谱与土壤含水量、抗旱生理指标的关系	(109)
7.7	一阶微分光谱与土壤含水量、生理指标之间回归分析	(112)
7.8	植被指数与土壤含水量、生理指标间回归分析	(115)
7.9	小结	(117)
第八章	病虫害胁迫对草坪反射光谱特征的影响	(120)
8.1	草坪病虫害及其表现	(120)
8.2	草坪常见病害	(121)
8.3	草坪病虫害遥感监测机理	(124)
8.4	病虫害胁迫条件下草坪反射光谱特征	(125)
8.5	光谱分析技术在草坪病虫害防治中的应用	(126)
附表		(133)
参考文献		(135)

第一章 高光谱分析技术及其在农业领域的研究与应用

1.1 高光谱遥感

高光谱遥感 (Hyperspectral remote sensing) 是 20 世纪 80 年代和 90 年代人类在对地观测方面所取得的重大技术突破之一, 是当前遥感领域的前沿技术 (陈述彭等, 1998; 郑兰芬等, 1992), 它是指利用很多很窄 (一般波段宽度 $< 10\text{ nm}$) 的电磁波段从感兴趣的物体获取有关数据, 并能产生一条完整而连续的光谱曲线 (Vane *et al.*, 1993)。所谓的高光谱、高灵敏度, 是指高光谱分辨率的光谱仪, 可有几十至上百个连续的波段, 波段数越多, 越能充分利用地物在不同波段光谱响应特征的差别, 波段的取样间隔可达到 $3 \sim 10\text{ nm}$, 以便直接针对地物波谱曲线的微小差异来识别物质 (赵英时等, 2003)。

高光谱遥感的基础是测谱学 (Spectroscopy), 测谱学早在 20 世纪初就被用于识别分子和原子及其结构, 但直到 20 世纪 80 年代才产生成像光谱技术。成像光谱学在电磁波谱的紫外、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 (Lillesand *et al.*, 1994), 其成像光谱仪可以收集到上百个非常窄的光谱波段信息。高光谱遥感的成像仪可以分离成几十个甚至数百个很窄的波段来接收信息, 所有波段排列在一起能形成一条连续而完整的光谱曲线, 可以在连续的光谱曲线上研究地物的光谱特性, 光谱的覆盖范围从可见光到热红外的全部电磁辐射波谱范围 (浦瑞良等, 2000), 这是常规多光谱所不能达到的。

国际遥感界将光谱分辨率达纳米 (nm) 数量级范围内的遥感技术称之为高光谱遥感。一般来说, 光谱分辨率在 $10^{-1}\lambda$ 范围内的, 称之为多光谱 (Multispectral) 遥感, 如 TM 与 SPOT 等。光谱分辨率在 $10^{-2}\lambda$ 内的, 称为高光谱 (Hyperspectral) 遥感, 目前此类传感器有小型的高光谱成像光谱仪 (如 AIS、AVIRIS、CASI) 和一些便携式光谱仪。光谱分辨率在 $10^{-3}\lambda$ 以内的, 称为超光谱 (Ultraspectral) 遥感。

高光谱遥感具有分辨率高、波段连续性强、光谱信息量大等特点。它融合了成像技术和光谱技术, 实时获取研究对象的影像和每个像元的光谱分布。成像光谱仪将视域中观测到的各种地物以完整的光谱曲线记录下来, 这种数据能应用于多学科的研究和应用中 (Green *et al.*, 1998)。在遥感的发展历史上, 高光谱遥感的出现可以说是一个概念上和技术上的创新 (童庆禧等, 1990)。

遥感 (RS) 作为一门综合技术是美国学者 E. L. Pruitt 在 1960 年提出来的。为了比较全面地描述这种技术和方法, E. L. Pruitt 把遥感定义为 “以摄影方式或非摄影方式获得被探测目标的图像或数据的技术”。从现实意义看, 一般我们称遥感是一种远离目标, 通过

非直接接触而判定、测量并分析目标性质的技术。简单地说,遥感就是以非接触方式对目标电磁波谱特性(辐射、反射和散射)进行探测,通过对所获得的图像、光谱合一信息处理,达到识别目标物体理化特性的目的,并结合基础的应用学科理论,解决生产、生活实际中的清查、监测、预测及决策等问题。遥感技术集成了空间、电子、光学、计算机等现代学科的最新研究成就,成为一种以数学方法、物理手段及地学知识为基础的综合技术,而跻身于信息获取与处理分析的高科技领域。在成像过程中,它利用成像光谱仪以纳米级的光谱分辨率,以几十或几百个波段同时对地表地物成像,能够获得地物的连续光谱信息,实现了地物空间信息、辐射信息、光谱信息的同步获取。1972年,美国发射的第一颗地球资源卫星 ERS-1 (即 Land Sat-1) 拉开了遥感对地球资源及环境监测的序幕,遥感技术开始被广泛应用。遥感技术是建立在物体电磁波辐射理论基础上的。由于不同物体的形状、性质不同,所以自身发射、反射、散射电磁波的能力也不同。对地物遥感监测主要借助太阳光进行被动遥感,太阳光谱从波长小于 $10 \sim 3 \mu\text{m}$ 的 X 射线到波长大于 $1000 \mu\text{m}$ 的微波,从近紫外到中红外这一波段区间能量最集中而且相对来说最稳定,强度变化小。同时 $2.5 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 地物自身热辐射几乎等于零,传感器接收的能量基本是地物反射太阳光的能量。因此被动遥感主要利用紫外 UV ($0.3 \sim 0.38 \mu\text{m}$)、可见光 VIS ($0.38 \sim 0.74 \mu\text{m}$)、近红外 NIR ($0.74 \sim 1.3 \mu\text{m}$)、短波红外 SWIR ($1.3 \sim 3 \mu\text{m}$) 等稳定辐射 (Rouse *et al.*, 1974)。一个完整的遥感系统由 3 个部分组成: 传感器 (sensor)、载体 (carrier) 和指挥系统 (command system)。其中,载体也称平台 (platform), 是负载传感器的工具。根据遥感器所使用的平台,可将遥感分为航天遥感、航空遥感和近地面遥感。遥感通过信息获取系统、传输系统、接收系统、处理系统等四大模块所获取的资料来了解各种资源信息。遥感按其研究方向和侧重点可以分为遥感技术、遥感信息处理及遥感应用几个方面,其中遥感应用已经广泛深入到国民经济建设各个领域,所以,遥感是一门应用性很强的学科 (浦瑞良等, 2000)。

高光谱分辨率的光谱仪,可有几十至上百个连续的波段,波段数越多,越能充分利用地物在不同波段光谱响应特征的差别,波段的取样间隔可达到 $3 \sim 10 \text{ nm}$, 以便直接针对地物波谱曲线的微小差异来识别物质。高光谱为研究植被提供了丰富的信息,对光谱曲线进行研究可以实现理化参数的回归、长势的监测等。

20 世纪 80 年代,高光谱遥感技术兴起,使遥感领域发生了巨大的变化,它的出现是遥感界的一场革命,遥感技术及其应用大大加快了遥感技术从定性到定量发展的步伐,也是当前及今后几十年内的遥感前沿技术,因而在相关领域具有巨大的应用价值和广阔的发展前景。

1.2 植物反射光谱特征

植被的反射光谱特征主要由叶片中的叶肉细胞、叶绿素、水分含量和其他生物化学成分对光线的吸收和反射形成的,在不同波段,植被的反射光谱曲线具有不同的形态和特征,它是物体表面粒子结构、粒子尺度、粒子的光学性质、入射光波长等参数的函数 (李民赞, 2006)。

图 1-1 为典型的绿色植物反射光谱曲线, 光谱范围为 350 ~ 2500 nm。可以发现, 色素吸收决定着可见光波段的光谱反射率, 细胞结构决定近红外波段的光谱反射率, 而水汽吸收决定了短波红外的光谱反射率特性 (刘良云, 2002)。

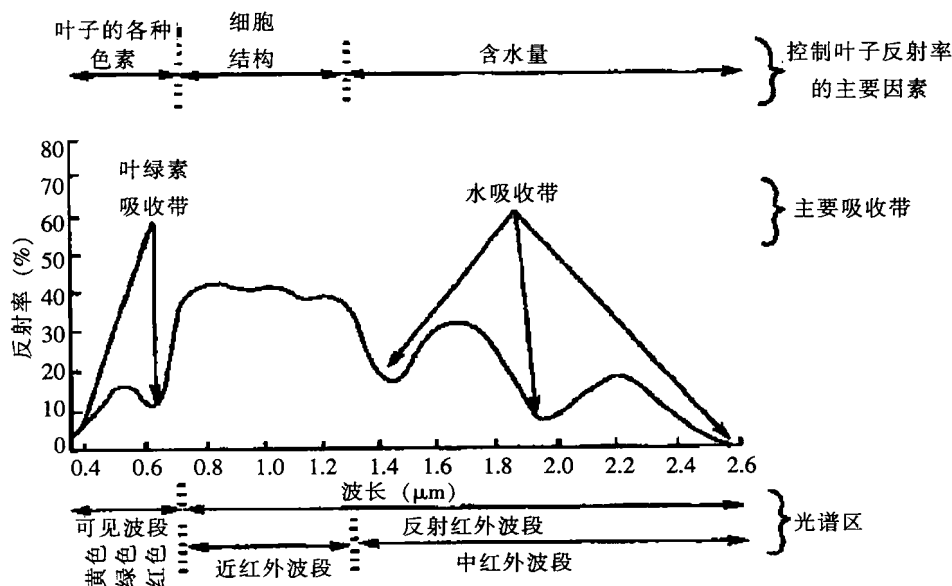


图 1-1 植物的反射光谱特性曲线 (孙家柄, 1997)

健康植被地物共有特征是叶片丰富的含水量和服务于光合作用的叶绿素等色素, 所以植被地物在可见—近红外波段呈现特有的光谱反射率特性。健康绿色植物的光谱特征主要取决于它的叶子。在绿色植物的叶片中, 一般叶绿素 a 约占 2/3, 故呈蓝色; 叶绿素 b 约占 1/3, 呈橄榄绿色。此外, 还有叶黄素、胡萝卜素、花青素等。在可见光谱段, 由于这些色素含量上的差异而形成不同的绿色及其他颜色, 显示了绿色植物的主要光谱响应特征。

●400 ~ 490 nm 波段的主要特征: 400 ~ 450 nm 波段为叶绿素的强吸收带, 425 ~ 490 nm 为类胡萝卜素的强吸收带, 叶绿素 a 对蓝光的吸收约为对红光吸收率的 1.5 倍; 叶绿素 b 对蓝光的吸收率约为对红光吸收的 3 倍, 即太阳辐射到达地面的紫外线绝大部分被植物吸收, 而反射和透射的极少。所以该波段的反射光谱曲线具有很平缓的形状和很低的数值。

●490 ~ 600 nm 波段的主要特征: 490 ~ 600 nm 为类胡萝卜素的次强吸收带, 但在 550 nm 波长附近是叶绿素的绿色强反射峰区, 同时叶绿素比类胡萝卜素和藻胆素占优势, 此波段植物的反射光谱曲线具有波峰的形态和中等的反射率数值, 在 550 nm 波长处又是植物吸收率的一个谷值, 而透射率在此波长处为一峰值。

●600 ~ 700 nm 波段的主要特征: 610 ~ 660 nm 波段是藻胆素中藻蓝蛋白的主要吸收带, 而 650 ~ 700 nm 波段则是叶绿素的强吸收带。植物的叶绿素有 a、b、c、d 四种形态。从数量和作用上看, 通常植物体中叶绿素 a 的含量是叶绿素 b 含量的 3 倍, 故叶绿素 a 对

植物反射光谱曲线的影响尤为明显,在 600 ~ 700 nm 波段植物的反射光谱曲线具有波谷的形态,并具有很低的反射值,从 670 ~ 680 nm 开始,随着波长的增加而急剧升高。

●700 ~ 750 nm 波段的主要特征:此波段的主要特征是植物反射率急剧上升,曲线陡而接近于直线的形状。其斜率与植物单位叶面积所含叶绿素 a + b 的含量有关。在 720 ~ 740 nm 有水的弱吸收,但被植物反射率的急剧增高所掩盖,在曲线形成上没有明显反映。

●750 ~ 1300 nm 波段的主要特征:此波段是植物的高反射区,波长较长易于透射,透射之后的光受细胞腔及冠层多层叶片的影响,造成多次反射,形成了近红外高台区。由高吸收低反射的红谷至高反射低吸收的近红外高台区之间有一近似直线称“红边”。植物的反射光谱曲线在此波段具有波状起伏的形成和高反射率的数值,植物在此波段的透射率也相当高,而吸收率极低。这种现象可以看成是植物预防过度增热的一种适应。此波段的平均反射率室内测定值多在 35% ~ 78% 之间,在 760 nm 波长处为水和氧的一个吸收谷点,850 nm 和 910 nm 波长处为水的弱吸收谷点;960 ~ 1120 nm 波长处为水的强吸收谷点,在 890 ~ 1080 nm 和 1260 nm 波长处,植物反射率表现为峰值;而在 1190 nm 波长处植物反射率表现为谷值,与植物本身的生物学特性有关。

●1300 ~ 1600 nm 波段的主要特征:植物反射光谱曲线在此波段具有波谷的形态和较低的反射率(大多数在 12% ~ 18%)数值,这种特点与 1360 ~ 1470 nm 波段是水和二氧化碳的强吸收带有关。

●1600 ~ 1830 nm 波段的主要特征:植物反射光谱曲线在此波段表现为波峰的形态,并具有较高的反射率(大多数在 20% ~ 39%)数值,这种特点与植物及所含水分的波谱特性有关。

●1830 ~ 2080 nm 波段的主要特征:植物反射光谱曲线在此波段具有波谷的形态和很低的反射率数值(大多数在 6% ~ 10%),这与水和二氧化碳在此波段为强吸收带有关。

●2080 ~ 2350 nm 波段的主要特征:植物反射光谱曲线在此波段具有波峰的形态和中等的反射率数值(大多数在 10% ~ 23%),这种特点与植物及其所含水分的波谱特性有关。此波段的反射率数值低与植物对光的吸收有所增加有关,这可以看成是植物体预防其本身过度变冷的一种适应。

1.3 高光谱分析技术和方法

1.3.1 光谱信息提取

科技发展促使了多学科的交叉融合,遥感技术即以物理学和数学为支撑,处理光谱数据既要掌握电磁波等物理原理,又要善于利用数学的方法提取有用的信息,如光谱微分技术、多元统计分析技术、基于光谱位置变量的分析技术、光学模型方法、参数成图技术、光谱匹配技术、混合光谱分解技术等(浦瑞良等,2000)。高光谱为研究植被提供了丰富的信息,选择合适参数和算法是保证高光谱遥感信息回归精度的关键,它决定着消除传感器老化、大气影响、地形效应等因素影响的效果(彭胜潮等,2004)。

对于如何提取有用信息前人已经做了深入的研究。除了直接应用植被某一波长处的反

射光谱对植被信息进行提取外,应用更广泛的光谱特征参数主要有植被指数、微分光谱、红边参数、反射峰吸收谷形状参数等。

传感器接收的植被信息通常受到土壤背景、冠层结构以及天气状况等因素干扰而影响冠层光谱信息的获取。为了消除这些因素对光谱信息的影响,提高光谱诊断的精度,前人采用不同波段光谱反射率比值或组合来构造植被指数,以回归作物一些生物物理和生物化学参量。在植被指数中,通常选用对绿色植物强吸收的可见光红波段(600~700 nm)和对绿色植物高反射和高透射的近红外波段(700~1100 nm)进行组合。如归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)定义为近红外波段与可见光波段反射率之差和这两个波段反射率之和的比值: $NDVI = (IR - R) / (IR + R)$; 比值植被指数(RVI)是近红外反射率与可见光反射率之比: $RVI = IR/R$; 差值植被指数(DVI)为近红外反射率与可见光反射率之差。这两个波段不仅是植物光谱、光合作用中的重要波段,而且它们对同一生物物理现象的光谱响应截然相反,形成明显反差,这种反差随叶冠结构、植被覆盖度而变化,因此可以对它们用比值、差分、线性组合等多种组合来增强或揭示隐含的植物信息。植被指数的定量测量可表明植被活力,而且植被指数比单波段用来探测生物量有更好的灵敏性。

微分光谱是将光谱求导数,它能压缩背景噪音对目标信号的影响或不理想的低频信号,提高植物信息的纯度(田高友等,2005)。微分光谱方法在生化组分的高光谱遥感回归中得到了成功的应用。孔维妹等(2004)分析了棉花导数光谱对消除测量背景影响及寻找特征波长方面的作用,从而证明用棉花导数光谱测定它的某些农学参数的可行性。王秀珍等(2003)采用单变量线性与非线性拟合模型和逐步回归分析对不同氮素营养水平的水稻地上鲜生物量进行了模拟和验证。结果表明,高光谱变量与地上鲜生物量之间的线性与非线性拟合分析中,蓝边内一阶微分的总和(SDb)与红边内一阶微分的总和(SDr)构成的植被指数与地上鲜生物量之间相关密切。

由于植物对红光的强吸收和对近红外光的强反射,在680~780 nm之间形成一近似直线反射率急剧上升的斜坡。“红边”是描述植物色素状态和健康状况的重要指示波段,近年来被广泛应用于叶面积指数、叶绿素含量、氮素含量等农学参数的估测上。大量研究表明,利用红边参数可以很好地回归叶片的叶绿素含量、叶面积指数以及氮素状况。刘伟东等(2000)研究表明,红边斜率主要与作物的覆盖度或LAI有关,红边位置与叶片的叶绿素含量有关。赵春江等研究表明,伴随着植株旺盛生长和群体的不断扩大,红边的位置呈逐渐偏向长波方向的“红移”;从灌浆期开始,随着个体衰老和群体减弱,红边位置又呈偏向短波的“蓝移”现象。可利用近红外平台振幅推算叶片全氮含量,用红边振幅推算Chla+b,并且红边振幅或近红外平台振幅推算叶面积指数分别在部分生育时期有较高的可靠性。

1.3.2 高光谱遥感技术的特点

与常规遥感或宽波段遥感相比,高光谱遥感具有其明显的特点。过去的多光谱遥感如TM、SPOT等,都是在几个离散的波段来获取图像,只能提供数个100~200 nm分辨率的

间断波段信息,而高光谱遥感则可提供几十以至数百个 10 nm 左右分辨率的连续波段信息,对目标进行连续的光谱成像,获取高光谱分辨率图像。因此,高光谱数据最显著的特点表现为:

●波段多 它的波段数目大大增加,一般在可见光和近红外光谱区间内有几十甚至数百个波段,如 AVIRIS 在 0.4 ~ 2.5 μm 光谱范围有 224 个波段。

●光谱分辨率高,光谱范围窄 成像光谱仪采样的间隔小,一般为 10 nm 左右,高光谱数据的光谱分辨率非常高。精细的光谱分辨率反映了地物光谱的细微特征,使得在光谱域内进行遥感定量分析和研究地物的化学分析成为可能。

●波段连续性强 在以波长为横轴,灰度值为纵轴的坐标系之中,高光谱图像上的每个像元点都获得了几十至几百个连续光谱的覆盖,在各通道的灰度值都可形成一条精细的光谱曲线,即所谓“谱像合一”,这是高光谱数据最显著的特点之一。

1.4 高光谱技术在草地、作物领域的研究和应用

农业高光谱遥感研究的主要内容包括种类识别与分类、长势检测与估产、生化成分的估测及农业生态评价等。建立各种从高光谱遥感数据中提取生物物理参数(如 LAI、生物量等)、生物化学参数(如光合色素、淀粉、脂肪和各种营养元素等)的分析技术,是农业遥感中十分重要的内容。

植物叶片在生长过程中,由于色素含量、细胞结构和水分含量特征,使其有选择吸收太阳辐射,从而决定了植物独特的反射光谱特征,因此,植物的反射光谱特征决定于植物的种类、生长期、叶片叶绿素含量、细胞结构和水分含量等(郑兰芬等,1995)。同样,植被光谱中的特征波段也能反映水分、木质素、淀粉、蛋白质等信息(Curran *et al.*, 1990)。

植物高光谱遥感依赖于对植物叶片和植被冠层光谱特性的认识。叶片内部结构的差异造成其光谱反射率的差异,尤其是在近红外区,受叶片内部复杂叶腔结构和腔内对近红外辐射多次散射控制。健康绿色植物的光谱特征主要取决于植物冠层叶片。大部分植物的明显光谱特征是由于内含的叶绿素等色素和液态水引起的。健康的绿色植物的光谱曲线总是呈明显的“反射峰”和“吸收谷”的特征。由于色素强烈吸收蓝光和红光而相对反射绿光,因此人们对健康植物的视觉效果是绿色的(浦瑞良等,2000);植物受害时,叶绿素大量减少,叶红素和叶黄素相对增加,在 700 nm 附近出现 5 ~ 17 nm “红移”现象,而反演植物养分的波段主要在短波红外区。这些现象在低光谱分辨率的遥感信息源上是难以区别的,为了从光谱上辨别绿色植物的许多重要特征,采用高光谱遥感技术的研究方法应运而生。高光谱遥感器既能对目标成像(有时也称成像光谱遥感)、又能测量目标物的光谱特性,因此,它不仅可以用来提高对植被类型的识别能力,而且可以用来监测植物长势和反演绿色植物的理化特性(唐延林等,2001)。

高光谱技术在植被中的应用比较广泛,相对于传统的费时、费力并且操作步骤复杂的化学测定方法,遥感技术为估测叶片或植株化学成分提供了一种快速、准确,并且非常实用的非破坏性手段,主要应用于以下几个方面:

1.4.1 植被生物量估测

在遥感技术出现的早期,人们就利用多光谱遥感及其变量来进行农作物和牧草的估产研究。20世纪80年代以来,高光谱技术的发展为植被生物量高精度遥感监测提供了可能。Mutang (2004) 和 Vander Meer (2004) 为了提高包括植被生物量在内的地表信息估测的准确性,研究了高光谱遥感信息独有的地物光谱吸收特征的提取方法;杨健 (1990) 对四川省若尔盖县的不同草地类型进行了野外多光谱测试,对不同通道进行组合,建立回归方程能有效地计算牧草的单产;刘占宇等 (2006) 通过对内蒙古锡林郭勒天然草地进行高光谱遥感地面观测,分析生物量与高光谱吸收特征参数变量的关系,建立以 840 nm、1132 nm、1579 nm、1769 nm 和 2012 nm 等 5 个原始高光谱波段反射率为变量的逐步回归高光谱遥感估测模型,估测草地地上生物量。

随着高分辨率遥感的出现,利用光谱估产的研究得以深入开展。王人潮 (2002)、Patel (1985)、Shao 等 (2001) 国内外专家分析了水稻光谱与产量的关系,开展了水稻估产研究;王秀珍等 (2003) 研究了高光谱特征值与水稻生物量之间的关系;柏军华等 (2007) 研究了棉花冠层高光谱反射率与生物量之间的关系;Hansena *et al.* (2003) 利用反射率高光谱数据在 438 ~ 884 nm (光谱波段间隔 1 nm) 范围内所有两波段间的相关关系,并且由此构建多种归一化光谱指数用于估测小麦地上鲜生物量。

作物产量估计除了寻找相关的波段和建立合适的光谱指数外,还需明确估产的最佳时期。唐延林等 (2004) 通过测定水稻抽穗后不同时期冠层光谱反射率、叶面积指数,最终以差值植被指数 DVI 建立了优化单变量估产模式,指出蜡熟期估产优于抽穗期和灌浆期,多时期复合估产模式的效果要优于单一生育期。刘良云等 (2004) 对冬小麦进行了关键生育期的光谱采集,指出抽穗期以前群体变化快,且土壤背景噪声较大不宜用于估产,而抽穗期至成熟期过程的光谱信息能反映小麦的光合物质积累,估产精度相对要高。利用高光谱遥感数据可以及时估测及预测作物的生物量、叶面积指数、地面覆盖率等参数,从而可以及时预测作物长势,为合理实施相关栽培措施提供依据。

杨红丽、吴建付 (2008) 对多花黑麦草主要生育期的反射光谱进行了测定,并比较了不同氮肥水平对多花黑麦草冠层叶绿素含量及红边位置的影响。试验结果证明,从分蘖期到拔节期,多花黑麦草反射光谱出现明显的“红移”现象,冠层叶绿素含量与红边位置之间存在有显著的相关性 (图 1-2);利用高光谱分析法能够快速准确地确定最佳施肥量;利用多种植被指数可以及时监测该种牧草长势,并建立了主要生育期地上干物质产量的估测模型。

王建伟 (2006) 通过测定山地灌草丛 (处于封育、退化两种条件下) 多时相冠层光谱反射率,比较分析了植被覆盖度、季相条件、植物生活型对草地反射光谱的影响,并以植被指数 (DVI 和 NDVI) 建立了草地在不同时期的地上生物量估测模型 (表 1-1);指出植被覆盖度对封育山地灌草丛反射光谱的影响最大,其次为季相条件和地上生物量;退化草地因植株低矮、植被覆盖度小、地上生物量低,其反射光谱曲线与绿色植被存在明显差异,呈现为绿色植被与土壤之间的过渡类型。

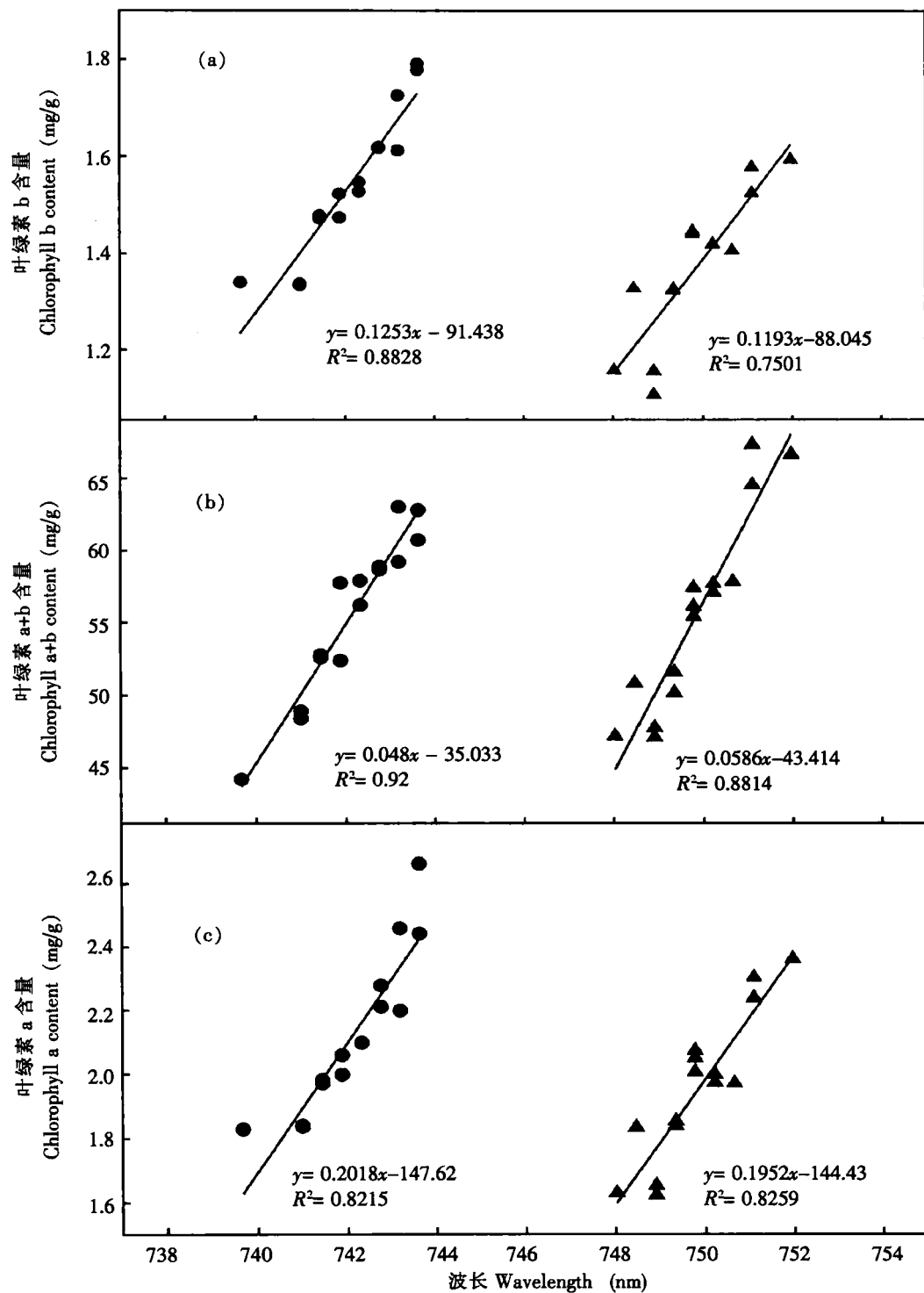


图 1-2 多花黑麦草红边位置与 (a) 叶绿素 a、(b) 叶绿素 b、(c) 叶绿素 a+b 之间的回归方程
(●分蘖期; ▲拔节期)

表 1-1 封育山地灌草丛地上生物量 (Y) 与植被指数 (x) 之间的回归模型

植被季相	植被指数	产草量估测回归方程	R^2
旺盛生长期	RVI	$Y = 77.317x^{0.3520}$	0.7597
旺盛生长期	NDVI	$Y = 1120.3x^{3.6703}$	0.7613
枯黄期	RVI	$Y = 0.2916x^2 + 49.846x + 287.99$	0.9129
枯黄期	NDVI	$Y = 13162x^2 + 15293x + 4687.3$	0.8753
返青期	RVI	$Y = 244.77\ln(x) + 299.3$	0.7241
返青期	NDVI	$Y = 1070.7x^{0.6317}$	0.8433

1.4.2 植被叶面积指数估测

植被叶面积指数与高光谱数据之间存在着密切联系,在对植被冠层生理参数的探测中,高光谱分辨率的信息可以比传统的植被指数能更精确地定量描述植被的冠层特征。叶面积指数是评价作物群体结构合理性与否的重要指标。随着高光谱遥感技术在植被的生化成分及作物农学参数估测研究领域的逐步深入,高光谱数据与叶面积指数之间相关关系的研究已日渐增多。Danson *et al.* (1995) 比较了林木植被指数 NDVI 与叶面积指数的相关关系,指出“红边”位置与叶面积指数高度相关。金仲辉 (1992)、刘伟东 (2000)、孙莉等 (2004) 研究了光谱反射率和作物叶面积指数之间的关系,结果表明, LAI 达到 3.0 时冠层光谱在可见光和中红外的反射率基本稳定。吕雄杰等 (2004) 对水稻整个生育期反射光谱进行监测,也得到了相似的结论,认为水稻在抽穗期 LAI 达最大,此时背景影响较小, LAI 与冠层反射光谱有较好的相关性。

1.4.3 作物营养成分含量预测

绿色植物的反射光谱波形是相似的,但不同植物在反射率的大小上存在一定区别。植物营养素变化会在叶片或冠层反射光谱中体现出来,因此,研究不同营养条件下作物的光谱特性具有重要意义。Peterson (1988)、Duli Zhao *et al.* (2005) 分别对森林冠层、高粱冠层的反射光谱进行了研究,认为使用反射光谱反演氮素含量是可行的。此外,很多学者对氮素营养水平与光谱特性之间的关系也做了大量的研究,Shihayama *et al.* (1986) 研究了氮素营养对水稻叶片光谱特性的影响,认为缺氮时的水稻叶片和正常营养的水稻叶片的光谱特征显著不同,并且认为叶绿素是导致光谱特征差异的主要内在因素,单位土地面积上叶片氮含量与 R_{620} 和 R_{760} 的线性组合以及与 R_{400} 、 R_{620} 和 R_{880} 的线性组合均有较好的回归关系,且不受品种类型的影响。周启发等 (1993)、王人潮等 (1993) 对水稻氮素营养水平与光谱特性进行了深入系统的研究,并指出诊断水稻叶片氮素营养的敏感波段为 760 ~ 900 nm、630 ~ 660 nm 和 530 ~ 560 nm; Kokaly (1999, 2001) 的研究发现 2054 nm 和 2172 nm 这两个波段与氮含量高度相关。

Fernandez *et al.* (1994) 认为用红、绿两个波段的线性组合可以反演小麦的氮含量, 且不受氮肥供应的影响。Lee *et al.* (2000) 研究了棉花叶片氮浓度与其比值植被指数之间的关系, 认为用红边位置与短波近红外波段的比值预测的精确度和准确度都比较高; 牛铮等 (2000) 的研究也表明, 用 2120 nm 和 1120 nm 处反射率一阶导数的线性回归方程可以较好地预测小麦叶片氮素含量。吕雄杰等 (2004) 研究水稻生长期的冠层光谱时发现, 灌浆期以前的几个生育期易于区分氮素水平的波段不相同, 但都集中于绿光和近红外波段, 确定诊断氮素营养水平的敏感波段范围为 560 ~ 610 nm 和 710 ~ 760 nm, 灌浆期以后不易区分。在建立的 4 个归一化植被指数之中, $(R_{760} - R_{560}) / (R_{760} + R_{560})$ 的效果最好。

20 世纪 80 年代以来, 为了探索植物叶片氮素遥感诊断的可能性, 有关科学家就进行了大量的基础研究, 寻找氮素的敏感波段及其反射率在不同氮素水平下的表现。研究发现许多植物在缺氮时无论是叶片还是冠层水平的可见光波段反射率都有所增加 (周启发等, 1993; 王人潮等, 1993; 王珂等, 1998; Walburg, 1982)。通过对氮含量变化最敏感波段的光谱测定和变量运算可以区分不同氮素营养水平。

Thomas *et al.* (1972) 通过测定甜椒叶片的反射率来估测氮素含量, 研究发现氮素营养水平对甜椒叶片在 550 nm 和 670 nm 波段反射率的影响最大, 并利用这两个波段建立了估测氮素含量的相关模型, 其精确度达 90%。Al - Ahas *et al.* (1974) 研究了不同营养 (N、P、K、Ch、Mg、S、Fe) 胁迫下不同叶位叶片的光谱特性, 认为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; 光谱反射率的差异主要在 530 nm 波段, 不同营养胁迫与正常生长条件下的玉米在该波段光谱反射率方差分析结果表明, 营养胁迫对 530 nm 波段处植物光谱反射率有显著影响。研究结果还表明, 叶片叶龄对光谱反射率也有很大影响。

Thomas *et al.* (1977) 研究了 8 种植物 (甜瓜、玉米、黄瓜、葛筐、高粱、棉花、烟草) 在不同氮素营养水平下的叶片光谱特性, 发现所有植物在缺氮时其可见光波段的反射率增加, 但不同植物其反射率的增加程度不一。反射率与叶绿素和类胡萝卜素含量呈负相关, 叶绿素和类胡萝卜素解释了 63.5% ~ 95% 的绿光反射率。Shihayama *et al.* (1986) 研究了氮素营养对水稻叶片光谱特性的影响。认为缺氮时的水稻叶片和正常营养水平的水稻叶片的光谱特征显著不同, 并且认为叶绿素是导致光谱特征差异的主要内在因素。

王人潮等 (1993)、周启发等 (1993) 从“七五”开始对水稻氮素营养水平与光谱特征的关系做了大量深入系统的研究, 认为缺氮使得早稻叶片在 680 nm 波段附近的吸收谷变浅, 在近红外区域的反射率降低, 在可见光区域的反射率增加, NDVI 和 RVI 等植被指数与稻叶含氮量间有良好的相关关系。诊断水稻氮素营养水平的叶片敏感波段为 760 ~ 900 nm、630 ~ 660 nm 和 530 ~ 560 nm。通过光谱测定及其变量的运算, 可以区分不同氮素营养水平。

Takebe *et al.* (1990) 的研究结果表明, 可以用冠层的 RNIR/RRED 光谱反射率比值来估测水稻的氮素状况, 这一结果在后来的研究中得到了证实 (Wang *et al.*, 2002)。Filella *et al.* (1994) 研究发现 R_{430} 、 R_{550} 、 R_{680} 、 λ_{red} 和 NPCI 都可以用来判别小麦氮素状