

Hyperspectral Experiment for Paddy Rice Remote Sensing

# 水稻高光谱遥感实验研究

◎ 黄敬峰 王福民 王秀珍 著 .....



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

1478394

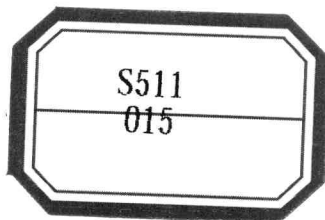
S511  
015



CS1635355

# 水稻高光谱遥感实验研究

黄敬峰 王福民 王秀珍 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

重庆师大图书馆

## 图书在版编目 (CIP)数据

水稻高光谱遥感实验研究 / 黄敬峰,王福民,王秀珍著.

—杭州:浙江大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-308-07965-5

I. ①水… II. ①黄… ②王… ③王… III. ①光谱分辨率—光学遥感—应用—水稻—栽培 IV. ①S511-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 178129 号

## 水稻高光谱遥感实验研究

黄敬峰 王福民 王秀珍 著

---

责任编辑 黄娟琴

文字编辑 陈静毅

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州中大图文设计有限公司

印 刷 浙江印刷集团有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 20.75

字 数 505 千

版 印 次 2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-07965-5

定 价 80.00 元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

# 序

高光谱遥感技术的出现,是地物光谱遥感研究领域新的飞跃发展。它能揭示和识别宽波段光谱研究不能解决的很多问题。《水稻高光谱遥感实验研究》是黄敬峰等坚持抓住我国粮食主栽作物——水稻,在不断吸取国内外研究成果的同时,持续 15 年全面系列的光谱遥感实验研究,取得了丰硕成果后撰写而成的科技专著。该书不仅多种实验设计科学合理、研究技术先进、取得的数据翔实可靠,而且内容新颖全面、成果水平较高,处于国内外前沿。该书对进一步深入研究水稻高光谱遥感技术非常有用,而且对其他地物光谱遥感研究也有很高的利用和参考价值。

我认为该书在以下几个方面取得了重大进展:一是科学地确定了水稻主要生物理化参数高光谱监测的敏感波段,构建了用于水稻生物量、叶面积指数、色素含量、氮素含量等参数监测的新型光谱指数;二是将神经网络和支持向量机等人工智能方法引入水稻参数高光谱遥感监测模型构建,显著提高了模型的精度和可靠性;三是发现了水稻二向反射的一般规律并构建水稻叶面/冠层二向反射模型;四是设计和开发了具有自主知识产权的水稻高光谱数据处理系统。总体结论是:突破了水稻高光谱遥感监测的一系列关键问题,构建了一套较为完备的水稻高光谱遥感实验方法和理论体系,研究成果达到国际同类研究领先水平,具有广阔的应用前景。

黄敬峰于 1985 年获南京气象学院(现为南京信息工程大学)学士学位,1992 年获硕士学位。参加工作后,曾多次获得国家和省部级的科技成果奖励,1994 年破格 3 年晋升副研究员。1996 年,他以人才引进的方式在浙江农业大学攻读农业遥感与信息技术博士学位,期间获中国科学院奖学金,1999 年被任命为浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所副所长,2000 年获博士学位。黄敬峰是一位勤学苦练、治学严谨的具有科研道德和敬业精神的科教工作者。《水稻高光谱遥感实验研究》就是他会同 20 多



位师弟、师妹,以及他的多位博士研究生,共同完成国家自然科学基金 6 项、国家 863 计划子课题 4 个、国家支撑项目子课题 1 个和科技部科技基础性工作专项子课题 2 个,以及浙江省科技项目多个等科学研究,取得大量科技成果后,并在发表论文 82 篇,其中 SCI 收录 20 篇、EI 收录 13 篇的基础上,经过汇总整理和深化提升后撰写而成的。该书完稿后,作者要求我先读并能提出意见。我为黄敬峰等能写出高水平的科学专著感到高兴,并为其作序,以示祝贺。

于浙江大学

2010 年 8 月 20 日

# 前 言

1985年我大学毕业,就参加中国气象局项目“北方冬小麦气象卫星动态监测与估产系统”(获1991年国家科技进步二等奖),开始利用模拟NOAA AVHRR CH1、CH2和LANDSAT TM1、TM2、TM3、TM4的简易多光谱仪测量小麦冠层光谱,分析小麦冠层反射率及其植被指数的季节变化特征,并用于长势监测和产量预报。其后主持和参加了“利用气象资料和气象卫星遥感资料预测新疆草场生产力的方法研究”(获1994年中国气象局气象科技进步四等奖)、“草地、小麦、土壤水分的卫星遥感监测与服务系统研究”(获1995年新疆科技进步二等奖)、“应用气象卫星综合监测干旱区域生态环境和预测研究”(1991—1997年)等课题,除了小麦以外,还开展了玉米、棉花等作物和天然草地的光谱测量。在这些研究中,我逐步认识到实际的生产需求是多样的,如政府和农业生产部门不但需要产量预报,更需要开展长势监测,还希望能进行作物营养诊断和灾害监测。因此,利用遥感技术不但要反演作物叶面积指数、生物量,以便进行长势监测和产量预报,而且反演作物营养状况以便为施肥提供依据,开展干旱、冻害、霜冻、冷害、病虫等灾害的影响研究与应用,有限的几个多光谱波段(如NOAA AVHRR有5个波段,LANDSAT TM有7个波段)就像万金油,缺乏针对性,难以满足实际需要,期望能有更多的波段来满足实际需要。

1997年,我考入浙江大学攻读博士学位,师从我国著名的农业遥感专家王人潮教授(浙江大学遥感所)。当时浙江大学遥感所已经拥有ASD光谱仪,而且已经数次获得国家自然科学基金资助。王老师已经指导研究生开展了“利用早稻光谱特性进行氮素营养诊断的可行性研究”(周启发,1988)、“水稻氮素营养水平与光谱特征的研究”(史颜鹏,1990)、“不同水稻品种的光谱特性研究(沈掌泉,1993)”。通过查询阅读国内外有关高光谱遥感的文献,认识到高光谱遥感的出现是遥感界的一场革命,是当前遥感前沿技术。电磁波波段宽度一般小于10mm能产生一条完整而连续的光谱曲线,这不是简单的数据量的增加,而是信息量的增加,信息量可增加十倍甚至数百倍,使本来在宽波段遥感中不可探测的



物质,在高光谱遥感中能被探测到,因此,我确定将高光谱遥感研究作为主攻研究方向。但是,当时没有航天高光谱影像数据,而航空高光谱数据获取也十分困难,同时考虑到作为科学实验及其结果必须具有可重复性,在实验室条件下用光谱能够准确测定的水稻生物物理和生物化学参数,在田间冠层条件下不一定可行,反过来,在实验室条件下证明光谱不能测定的水稻生物物理和生物化学参数,在田间冠层条件下和卫星水平则一定是不可行的。即使是在实验室和冠层条件下证明用光谱能够准确测定的水稻生物物理参数和生物化学参数,建立的模式,在卫星遥感水平也不一定可行。而实验室和小区实验具有环境条件容易控制、成本低等优点,因此,我们首先开展实验室和田间小区高光谱遥感实验。

十几年来,我们陆续得到国家自然科学基金、国家“863”等项目的资助,这些课题主要有:国家自然科学基金项目“氮素营养水平引起水稻光谱反射特性变异的机理研究”(1997—2000年)、“不同氮素水平的水稻高光谱诊断机理与方法研究”(2002—2004年)、“主要作物生物化学参数的高光谱遥感监测方法与模型研究”(2003—2005年)、“基于水稻生长模型的冠层高光谱模拟模型”(2006—2008年);国家“863”课题“基于多源波谱信息的稻麦病害识别技术研究”(2006—2010年)和“我国典型地物标准波谱数据库”子课题“水稻和油菜标准波谱数据的收集与测试”(2002—2005年)、“稻麦品质遥感监测与预报技术研究”子课题“水稻品质遥感监测研究与应用”(2001—2005年)、“国家粮食主产区粮食作物种植面积遥感测量与估产业务系统”子课题“水稻长势监测与产量估算统计遥感模型研究”(2006—2010年);国家科技支撑项目子课题“水稻主要病虫害监测与预测预报研究”(2006—2009年);科技部科技基础性工作专项子课题“区域农业资源环境基础数据与作物高光谱遥感数据”(2003—2006年);浙江省科技厅配套项目“基于多源波谱信息的稻麦病害识别技术研究”(2006—2010年)。

在完成以上课题过程中,多位博士研究生参与研究并完成博士学位论文,主要有:“水稻生物物理与生物化学参数的光谱遥感估算模型研究”(王秀珍,2001)、“水稻 BRDF 模型集成与应用研究”(李云梅,2001)、“水稻高光谱特征及其生物理化参数模拟与估测模型研究”(唐廷林,2004)、“水稻参数高光谱反演方法研究及其系统开发和水稻面积遥感提取”(王福民,2007)、“水稻遥感估产的不确定性研究”(陈拉,2007)、“基于神经网络和支持向量机的水稻遥感信息提取研究”(杨晓华,2007)、“水稻主要病虫害胁迫遥感监测研究”(刘占宇,2008)、“不同遥感水平水稻氮素信息提取研究”(易秋香,2008)。本书是在这些博士学位论文的基础上经过加工整理和深化提升撰写而成的。

全书共有 12 章,第 1 章详细地介绍了不同组分光谱和不同水稻品种、不同氮素水平、不同播期、不同发育期、不同背景条件下水稻冠层的光谱特征,简要介

绍了原始光谱的导数变换、对数变换、光谱位置和面积的特征参数、光谱吸收特征参数、基于连续统去除的特征参数等常见的高光谱变换与特征参数提取方法,后面章节用到的回归分析方法、主成分分析方法,后向传播神经网络模型、径向基函数神经网络模型和支持向量机模型等建模方法。第2章分析了水稻地上干生物量和鲜生物量与多光谱和高光谱变量的相关性,建立了水稻地上干生物量和鲜生物量多光谱和高光谱参数估算模型,并比较其预测精度。第3章分析了水稻叶面积指数与多光谱和高光谱变量的相关性,建立了叶面积指数多光谱和高光谱参数估算模型,并比较其预测精度;研究了近红外波段和红光波段中心位置与宽度对NDVI的影响及其对水稻叶面积指数估算的影响,优化了权重差值植被指数、土壤调节植被指数、土壤调节植被指数2、改进的转换型土壤调节植被指数参数,提出了用于水稻叶面积指数估算的绿波段归一化植被指数和绿蓝波段归一化植被指数。第4章重点介绍利用后向传播神经网络、径向基函数神经网络和支持向量机模型等建立水稻色素含量/密度的高光谱估算模型的方法,提出了用于水稻冠层叶绿素密度估算的改进叶绿素吸收连续统指数。第5章采用统计回归方法、后向传播神经网络模型、径向基函数神经网络模型和支持向量机模型,对叶片和冠层水平的水稻氮素含量估算方法进行系统研究。第6章确定了水稻主要病虫害胡麻斑病、干尖线虫病、穗颈瘟、稻纵卷叶螟和稻飞虱识别与监测的光谱敏感波段,研究了水稻胡麻斑病和干尖线虫病危害高光谱遥感方法。第7章分析了水稻产量与生物物理参数、水稻理论产量与实际产量、水稻产量与高光谱变量的相关性,建立了水稻产量的高光谱估算模型,并进行精度分析。第8章分别建立了稻穗、稻谷和稻米粗蛋白质和粗淀粉含量的高光谱遥感估算模型,并用2003年的实验资料进行精度检验。第9章介绍了利用主成分分析、波段自相关、逐步回归等方法确定水稻遥感信息提取最佳波段的方法。第10章通过对水稻冠层结构和叶片光谱的模拟,进而实现对水稻冠层垂直反射率和二向反射率的模拟。第11章介绍了水稻高光谱数据处理系统总体设计与功能模块。第12章介绍了1999年以来开展的实验室与田间小区实验设计、获取的资料情况。

水稻高光谱遥感是一项正在迅速发展的高新技术,虽然我们利用实验室和田间小区实验,较系统地分析了水稻冠层和组分光谱变化特征与规律,在确定水稻主要生物物理和生物化学参数估算的敏感波段,构建了用于水稻生物量、叶面积指数、色素含量、氮素含量估算的新型植被指数,引入神经网络和支持向量机等方法构建水稻参数高光谱遥感估算模型取得一些进展,遗憾的是未能利用航空和航天高光谱数据开展研究。幸运的是“高分辨率对地观测系统”已经列入“国家中长期科学和技术发展规划纲要”(2006—2020年),搭载了高光谱成像仪



HSI(Hyperspectral Imager)的环境与灾害监测预报小卫星星座(HJ-1 星)于2008年9月6日成功发射,利用航空和航天高光谱数据进行水稻信息提取将是今后研究的主攻方向。

本书出版之际,特别感谢我的恩师、我国著名的农业遥感专家、浙江大学农业遥感与信息技术学科的开拓者和建设者王人潮教授,是他在极其困难的条件下,根据学科特点和地域特色,开创了浙江大学的水稻遥感估产研究工作;是他以敏锐的学术洞察力,根据最新研究动态,不断开拓进取,取得了有特色和优势的研究成果,在国内外形成一定的影响,为我们的研究打下了很好的基础;是他坚韧不拔、永不放弃的精神,使浙江大学水稻遥感研究得以延续三十余年,始终处于学术前沿;是他的时时鞭策、支持、鼓励和指导,才有我们今天的研究成果。在实验和研究过程中,王纪华、刘良云、刘绍民、周启发、黄文江、李存军等提出过宝贵的意见和有益的建议,俞善贤、袁德辉、卫平、吴军、沈掌泉、王秀珍、李云梅、唐延林、Ousama Abou-Ismael、Ahmad Yaghi、申广荣、吴曙雯、张金恒、程乾、沈润平、周炼清、周清、唐蜀川、张玲、孔邦杰、刘英、丁菡、李军、徐俊锋、朱蕾、刘占宇、王渊、易秋香、杨晓华、陈拉、余梓木、金艳、彭代亮、邓睿、王红说、李波、石晶晶、罗艳芳、王晓明、许玉、牟昆仑、郑长春、钟晋阳、张峰、孙雪梅、陈维君、何秋霞、曾彩珍等提供了帮助,特此表示衷心的感谢!同时感谢浙江省农业遥感与信息技术重点研究实验室、杭州师范大学遥感与地球科学研究院和福建师范大学地理科学学院在经费上给予的支持。

黄敬峰

2010年8月

# 目 录

|                                      |    |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 水稻高光谱特征及其参数提取和分析方法 .....       | 1  |
| 1.1 水稻植株各组分的高光谱特征 .....              | 1  |
| 1.1.1 水稻植株不同组分的光谱特征 .....            | 2  |
| 1.1.2 水稻叶片的正面与背面反射特征 .....           | 2  |
| 1.1.3 不同氮素水平水稻叶片反射光谱特征 .....         | 2  |
| 1.1.4 不同水稻叶片层数的高光谱特征 .....           | 4  |
| 1.1.5 稻米及其蛋白质和淀粉提取物的高光谱特征 .....      | 4  |
| 1.2 水稻冠层高光谱特征 .....                  | 7  |
| 1.2.1 基于室内模拟背景的水稻冠层光谱特征 .....        | 7  |
| 1.2.2 田间条件下的水稻冠层光谱特征 .....           | 11 |
| 1.2.3 同一品种不同生育期水稻冠层的高光谱特征 .....      | 12 |
| 1.2.4 不同叶面积指数对应的水稻冠层高光谱反射率变化特征 ..... | 15 |
| 1.2.5 不同氮素营养水平的水稻冠层高光谱特征 .....       | 16 |
| 1.2.6 水稻冠层反射光谱的红边特征 .....            | 17 |
| 1.3 水稻反射光谱变换及其特征参数提取方法 .....         | 21 |
| 1.3.1 导数变换 .....                     | 21 |
| 1.3.2 对数变换 .....                     | 22 |
| 1.3.3 基于光谱位置和面积的特征参数 .....           | 22 |
| 1.3.4 基于连续统去除的特征参数 .....             | 24 |
| 1.3.5 光谱指数 .....                     | 26 |
| 1.4 数据分析与建模方法 .....                  | 31 |
| 1.4.1 回归分析方法 .....                   | 31 |
| 1.4.2 主成分分析法 .....                   | 32 |
| 1.4.3 神经网络 .....                     | 33 |
| 1.4.4 模型精度检验指标 .....                 | 34 |
| 1.5 小结 .....                         | 35 |



|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 第2章 水稻地上生物量的光谱遥感估算模型 .....                  | 36 |
| 2.1 地上鲜生物量的光谱遥感估算模型 .....                   | 36 |
| 2.1.1 地上鲜生物量的多光谱遥感估算模型 .....                | 36 |
| 2.1.2 地上鲜生物量的高光谱遥感估算模型 .....                | 41 |
| 2.2 地上干生物量的光谱遥感估算模型 .....                   | 48 |
| 2.2.1 地上干生物量的多光谱遥感估算模型 .....                | 48 |
| 2.2.2 地上干生物量的高光谱遥感估算模型 .....                | 53 |
| 2.3 小结 .....                                | 58 |
| 第3章 水稻叶面积指数的光谱遥感估算模型 .....                  | 59 |
| 3.1 水稻叶面积指数多光谱遥感估算模型 .....                  | 59 |
| 3.1.1 水稻叶面积指数与多光谱变量的相关分析 .....              | 60 |
| 3.1.2 水稻叶面积指数多光谱遥感估算的线性与非线性模型 .....         | 60 |
| 3.2 水稻叶面积指数高光谱遥感估算模型 .....                  | 65 |
| 3.2.1 水稻叶面积指数与高光谱变量的相关分析 .....              | 65 |
| 3.2.2 水稻叶面积指数高光谱遥感估算的线性与非线性模型 .....         | 66 |
| 3.3 水稻叶面积指数估算最佳波段位置及其宽度研究 .....             | 71 |
| 3.3.1 NDVI 红光波段和近红外波段运算区域和中心位置的确定 .....     | 71 |
| 3.3.2 近红外波段位置和宽度对 NDVI 的影响 .....            | 72 |
| 3.3.3 红光波段位置和宽度对 NDVI 的影响 .....             | 73 |
| 3.3.4 水稻叶面积指数估算最佳波段中心位置及其宽度研究 .....         | 77 |
| 3.4 面向水稻叶面积指数估算的植被指数参数优化研究 .....            | 80 |
| 3.4.1 权重差值植被指数的参数优化 .....                   | 81 |
| 3.4.2 土壤调节植被指数的参数优化 .....                   | 81 |
| 3.4.3 土壤调节植被指数 2 的参数优化 .....                | 82 |
| 3.4.4 改进的转换型土壤调节植被指数的参数优化 .....             | 82 |
| 3.5 面向水稻叶面积指数估算的新型植被指数的构建 .....             | 83 |
| 3.5.1 新型植被指数的构建 .....                       | 84 |
| 3.5.2 相关性分析 .....                           | 84 |
| 3.5.3 红、绿、蓝波段反射率对 LAI 敏感性及其构成的植被指数的比较 ..... | 85 |
| 3.5.4 基于标准差和变异系数的植被指数敏感性分析 .....            | 86 |
| 3.5.5 模型验证 .....                            | 89 |
| 3.6 小结 .....                                | 91 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| <b>第 4 章 水稻色素含量/密度的高光谱估算模型</b>       | 93  |
| 4.1 实验数据的统计描述及相关性分析                  | 93  |
| 4.1.1 水稻色素含量数据的统计分析                  | 93  |
| 4.1.2 不同色素之间的相关性分析                   | 94  |
| 4.1.3 不同叶位色素含量与冠层光谱的相关分析             | 94  |
| 4.2 水稻色素含量估算模型                       | 98  |
| 4.2.1 基于窄波段光谱指数的水稻色素含量估算模型           | 98  |
| 4.2.2 水稻组分色素含量的 BP 神经网络估算模型          | 105 |
| 4.3 水稻冠层叶绿素密度估算模型                    | 114 |
| 4.3.1 基于改进叶绿素吸收连续统指数的叶绿素密度估算         | 114 |
| 4.3.2 基于植被指数的水稻叶绿素密度神经网络和支持向量机遥感估算模型 | 116 |
| 4.3.3 基于高光谱变换的水稻叶绿素密度神经网络和支持向量机模型    | 128 |
| 4.4 小结                               | 135 |
| <b>第 5 章 水稻氮素含量的高光谱遥感估算模型</b>        | 136 |
| 5.1 基于叶片光谱的水稻氮素含量估算模型                | 136 |
| 5.1.1 水稻叶片光谱反射率的主成分分析                | 137 |
| 5.1.2 基于叶片光谱的水稻氮素含量估算统计回归模型          | 139 |
| 5.1.3 基于叶片光谱的水稻氮素含量估算神经网络与支持向量机模型    | 142 |
| 5.2 基于冠层光谱的水稻氮素含量估算模型                | 148 |
| 5.2.1 水稻冠层光谱反射率的主成分分析                | 149 |
| 5.2.2 基于冠层光谱的水稻氮素含量估算统计回归模型          | 150 |
| 5.2.3 基于冠层光谱的水稻氮素含量估算神经网络与支持向量机模型    | 153 |
| 5.3 小结                               | 159 |
| 5.3.1 不同遥感水平水稻氮素含量估算模型精度比较           | 160 |
| 5.3.2 不同建模方法构建的水稻氮素含量估算模型精度比较        | 160 |
| 5.3.3 不同输入变量构建的水稻氮素含量估算模型精度比较        | 161 |
| <b>第 6 章 水稻主要病虫害危害高光谱遥感研究</b>        | 162 |
| 6.1 水稻主要病虫害简介及其高光谱遥感实验               | 162 |
| 6.1.1 水稻胡麻斑病危害高光谱遥感实验                | 162 |
| 6.1.2 水稻干尖线虫病危害高光谱遥感实验               | 163 |
| 6.1.3 水稻稻纵卷叶螟危害高光谱遥感实验               | 164 |
| 6.1.4 水稻稻飞虱危害高光谱遥感实验                 | 165 |



|                                                   |            |
|---------------------------------------------------|------------|
| 6.1.5 稻瘟病危害高光谱遥感实验 .....                          | 166        |
| 6.2 水稻主要病虫害危害高光谱遥感敏感波段分析 .....                    | 166        |
| 6.2.1 基于连续统去除法的水稻主要病虫害危害高光谱遥感敏感波段选择 .....         | 166        |
| 6.2.2 基于光谱敏感度分析的水稻主要病虫害危害高光谱遥感敏感波段选择 .....        | 168        |
| 6.2.3 基于相关分析的水稻主要病虫害高光谱遥感敏感波段选择 .....             | 169        |
| 6.2.4 小结 .....                                    | 175        |
| 6.3 水稻胡麻斑病危害高光谱遥感方法研究 .....                       | 176        |
| 6.3.1 基于敏感波段的水稻胡麻斑病危害高光谱遥感识别 .....                | 176        |
| 6.3.2 水稻胡麻斑病危害高光谱遥感监测模型 .....                     | 183        |
| 6.4 水稻干尖线虫病危害高光谱遥感方法研究 .....                      | 188        |
| 6.4.1 面向水稻干尖线虫病监测的叶绿素含量高光谱遥感估算逐步回归模型 .....        | 188        |
| 6.4.2 面向水稻干尖线虫病监测的叶绿素含量高光谱遥感估算偏最小二乘<br>回归模型 ..... | 189        |
| 6.4.3 基于光谱指数的水稻干尖线虫病危害遥感监测模型 .....                | 190        |
| 6.5 小结 .....                                      | 193        |
| <b>第7章 水稻产量的高光谱遥感估算模型 .....</b>                   | <b>194</b> |
| 7.1 水稻产量与生物物理参数的相关性分析 .....                       | 194        |
| 7.2 水稻理论产量与实际产量的相关分析 .....                        | 196        |
| 7.3 水稻产量与高光谱变量的相关分析 .....                         | 196        |
| 7.3.1 产量构成要素与冠层光谱的相关性分析 .....                     | 197        |
| 7.3.2 水稻产量与冠层光谱的相关性分析 .....                       | 199        |
| 7.4 水稻产量的高光谱估算模型及其精度分析 .....                      | 201        |
| 7.4.1 水稻理论产量的高光谱估算模型 .....                        | 201        |
| 7.4.2 水稻实际产量的高光谱估算模型 .....                        | 203        |
| 7.5 基于在轨卫星植被指数模拟的水稻遥感估产研究 .....                   | 205        |
| 7.6 小结 .....                                      | 208        |
| <b>第8章 水稻品质高光谱遥感监测模型 .....</b>                    | <b>209</b> |
| 8.1 水稻品质的主要影响因素 .....                             | 209        |
| 8.2 稻穗及稻谷粗蛋白质和粗淀粉含量的高光谱遥感估算模型 .....               | 210        |
| 8.2.1 水稻不同组分粗蛋白质和粗淀粉含量随发育期的变化 .....               | 210        |
| 8.2.2 稻穗及稻谷粗蛋白质和粗淀粉含量与高光谱变量的相关分析 .....            | 212        |
| 8.2.3 稻穗及稻谷粗蛋白质和粗淀粉含量的高光谱遥感估算模型及其精度<br>检验 .....   | 217        |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 8.3 稻米粗蛋白质和直链淀粉含量遥感监测综合模型 .....       | 219        |
| 8.3.1 稻米粗蛋白质和直链淀粉含量与米粉干样光谱的相关分析 ..... | 219        |
| 8.3.2 稻米粗蛋白质和直链淀粉含量的遥感估算模型及其检验 .....  | 222        |
| 8.3.3 稻米粗蛋白质和直链淀粉含量的综合监测模型及其检验 .....  | 223        |
| 8.4 小结 .....                          | 225        |
| <b>第9章 水稻遥感信息提取最佳波段 .....</b>         | <b>226</b> |
| 9.1 基于主成分分析的波段选择 .....                | 226        |
| 9.2 基于波段自相关的波段选择 .....                | 230        |
| 9.3 基于导数相关系数的波段选择(一阶、二阶) .....        | 233        |
| 9.4 基于植被指数估算模型决定系数的波段选择 .....         | 235        |
| 9.5 基于逐步回归方法的波段选择 .....               | 237        |
| 9.6 小结 .....                          | 238        |
| 9.6.1 水稻叶面积指数监测光谱区间的确定 .....          | 238        |
| 9.6.2 水稻叶面积指数监测光谱波段的确定 .....          | 238        |
| <b>第10章 水稻冠层二向反射模型 .....</b>          | <b>241</b> |
| 10.1 水稻冠层二向反射率的一般规律 .....             | 241        |
| 10.1.1 水稻冠层二向反射率随观测天顶角和方位角的变化规律 ..... | 241        |
| 10.1.2 不同冠层结构下水稻冠层二向反射率的变化 .....      | 243        |
| 10.2 水稻 BRDF 模型 .....                 | 245        |
| 10.2.1 水稻冠层叶倾角分布模拟 .....              | 245        |
| 10.2.2 水稻叶片反射率模拟 .....                | 247        |
| 10.2.3 水稻冠层二向反射率的模拟 .....             | 249        |
| 10.3 小结 .....                         | 258        |
| <b>第11章 植被高光谱数据处理系统的设计和开发 .....</b>   | <b>259</b> |
| 11.1 程序的总体设计 .....                    | 259        |
| 11.1.1 设计目标 .....                     | 259        |
| 11.1.2 设计原则 .....                     | 260        |
| 11.1.3 结构设计 .....                     | 260        |
| 11.1.4 功能设计 .....                     | 260        |
| 11.1.5 开发方式 .....                     | 261        |
| 11.1.6 系统的软硬件环境 .....                 | 261        |



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 11.2 系统功能模块介绍 .....                   | 262        |
| 11.2.1 光谱变换数据分析模块 .....               | 262        |
| 11.2.2 数据分析建模模块 .....                 | 266        |
| 11.2.3 波段位置、宽度分析模块 .....              | 277        |
| 11.2.4 其他模块 .....                     | 280        |
| 11.3 小结 .....                         | 283        |
| <b>第 12 章 水稻高光谱遥感实验设计与参数测定 .....</b>  | <b>284</b> |
| 12.1 小区实验设计和数据获取 .....                | 284        |
| 12.1.1 1999—2000 年水稻田间实验设计与数据获取 ..... | 284        |
| 12.1.2 2002 年水稻田间实验设计与数据获取 .....      | 286        |
| 12.1.3 2003 年水稻田间实验设计与数据获取 .....      | 289        |
| 12.1.4 2004 年水稻田间实验设计与数据获取 .....      | 292        |
| 12.2 水稻生物理化参数测定方法 .....               | 295        |
| 12.2.1 水稻生物物理参数测定方法 .....             | 295        |
| 12.2.2 水稻生物化学参数测定方法 .....             | 298        |
| 12.3 小结 .....                         | 301        |
| <b>附录 研究组发表的相关论文 .....</b>            | <b>302</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                     | <b>307</b> |

# 第 1 章 水稻高光谱特征及其参数提取和分析方法

地物波谱的特征及其变化,既可为传感器波段的选择提供依据,又是遥感图像及数据处理和各种地表信息提取的基础,是遥感研究的核心内容之一。因此,许多从事遥感基础及其应用研究的单位,每年都要花费大量人力、物力,通过各种有效的探测手段收集、分析和提取各种地物波谱。本章根据影响水稻光谱的因素,介绍在不同条件下的水稻光谱特征及其参数提取和分析方法,主要包括在实验室条件下的组分光谱特征和在田间条件下的冠层光谱特征。

## 1.1 水稻植株各组分的高光谱特征

水稻绿色叶片反射光谱具有绿色植物叶片的一般特征:在可见光区域,其反射率主要受到各种色素的支配,其中叶绿素的作用最为重要,大部分被叶片吸收,反射率较小;在近红外区域,叶片的细胞结构是反射率最重要的影响因素,叶片的反射率较大,而吸收很少;短波红外区域,水稻叶片的光谱特性受叶片含水量的控制,叶片的反射率与叶片含水量成负相关,入射的辐射大部分能被吸收或反射,透射极少,如图 1.1 所示。除了水稻绿色叶片之外,本节主要分析水稻黄叶、叶鞘、穗、稻谷、稻米及其蛋白质和淀粉提取物等组分的高光谱特征。

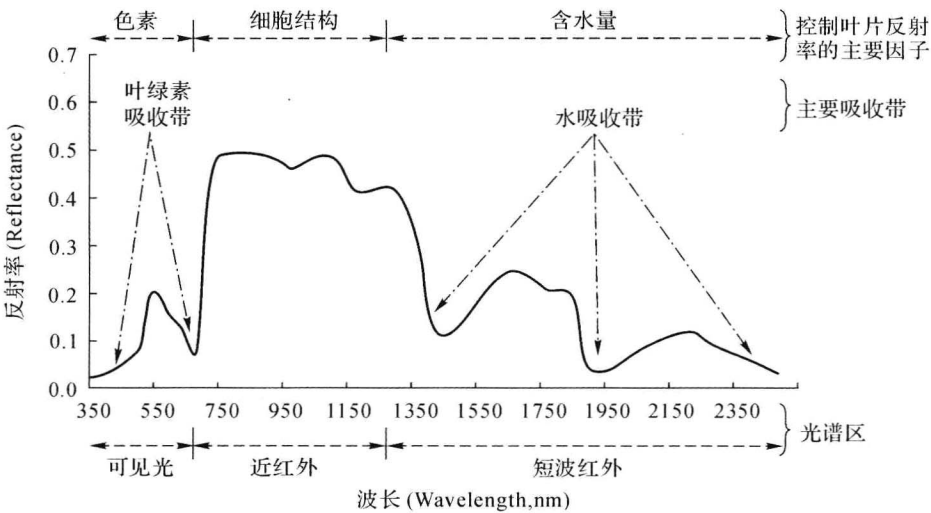


图 1.1 绿色水稻叶片的光谱特征

Fig. 1.1 Spectral characteristics of green rice leaf

### 1.1.1 水稻植株不同组分的光谱特征

图 1.2 是秀水 110 在乳熟期的绿叶、黄叶、叶鞘、穗及成熟稻谷的反射率光谱,如图 1.2 所示,黄叶和成熟稻谷光谱没有绿峰和红谷,其近红外反射率也比较高,旗叶、叶鞘和穗具有比较典型的绿色叶片的光谱特征,但由于乳熟期时穗已部分变黄,所以在绿光与红光区域其反射率较高。

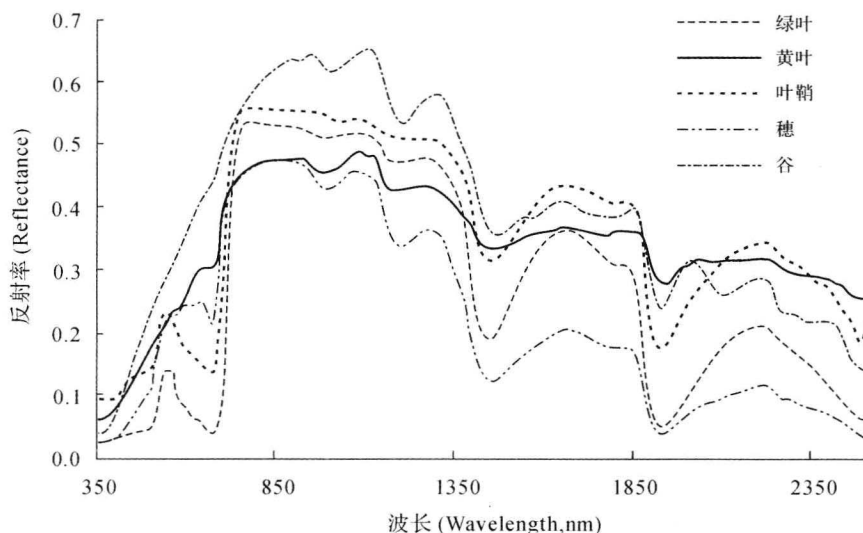


图 1.2 秀水 110 乳熟期各组分的反射光谱(2002 年, N1)

Fig. 1.2 Reflectance spectra of different components of Xiushui 110 at milking stage (2002, N1)

### 1.1.2 水稻叶片的正面与背面反射特征

图 1.3 是孕穗期秀水 110 旗叶的反射光谱(N1),其中 F 和 D 分别表示旗叶鲜叶和干叶正面的光谱反射率,FB 和 DB 分别表示鲜叶和干叶背面的光谱反射率。从图 1.3 可以看出,水稻旗叶无论是鲜叶还是干叶,其正面和背面的反射率曲线变化趋势是一致的;就其反射率大小而言,在可见光区域没有明显区别,但在近红外区域正面反射率要略大于背面反射率。鲜叶与干叶比较,鲜叶反射率整体上明显小于干叶的反射率,主要是由于鲜叶中水分吸收引起的反射率下降。

### 1.1.3 不同氮素水平水稻叶片反射光谱特征

图 1.4 为主要发育期不同氮素水平的叶片光谱特征比较。如图 1.4 所示,其共同特点就是在可见光区域,叶片光谱反射率随氮肥施用量的增加而降低,而在近红外区域,叶片光谱反射率随氮肥施用量的增加而增加。