

西北地区生态环境与作物长势遥感监测丛书

西北地区 水稻长势遥感监测

常庆瑞 秦占飞 刘京/著



科学出版社

西北地区生态环境与作物长势遥感监测丛书

西北地区水稻长势遥感监测

常庆瑞 秦占飞 刘 京 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书针对西北地区主要粮食作物之一——水稻，依据田间试验，将试验观测数据与地面高光谱影像、无人机高光谱影像和卫星多光谱影像等多源遥感数据相结合，进行水稻叶片、冠层和地块尺度的长势监测。主要内容包括：水稻长势遥感监测试验设计与数据测定、处理方法，水稻长势及其高光谱特性分析，叶绿素含量、叶面积指数、叶片氮含量的地面高光谱估测模型和 UHD 高光谱影像遥感空间反演，多光谱卫星遥感影像的水稻叶绿素含量、叶面积指数和叶片氮含量估算与遥感空间反演。

本书可供从事遥感、农业科学、地球科学、资源环境等学科领域的科技工作者使用，也可供高等院校农学、资源环境、地理学和遥感技术专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

西北地区水稻长势遥感监测 / 常庆瑞, 秦占飞, 刘京著. —北京: 科学出版社, 2019. 9

(西北地区生态环境与作物长势遥感监测丛书)

ISBN 978-7-03-062281-5

I. ①西… II. ①常… ②秦… ③刘… III. ①遥感技术-应用-水稻-生长势-监测 IV. ①S511②S127

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 193279 号

责任编辑: 李轶冰 / 责任校对: 樊雅琼
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2019 年 9 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 250 000

定价: 138.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

| 前 言 |

西北农林科技大学“土地资源与空间信息技术”研究团队从20世纪80年代开始遥感与地理信息科学在农业领域的应用研究。早期主要进行农业资源调查评价,土壤和土地利用调查制图。20世纪90年代到21世纪初,重点开展了水土流失调查、土地荒漠化动态监测、土地覆盖/变化及其环境效益评价。最近10多年,随着遥感技术的快速发展和应用领域的深入推广,研究团队在保持已有研究特色基础上,紧密结合国家需求和学科发展,重点开展生态环境信息精准获取与植被(重点是农作物)长势遥感监测研究工作,对黄土高原生态环境和西北地区主要农作物——小麦、玉米、水稻、油菜和棉花等生长状况遥感监测原理、方法和技术体系进行系统研究,取得一系列具有国内领先水平的科技成果。

本书是研究团队在水稻生长状况遥感监测领域多年工作的集成。先后受到国家高技术研究发展计划(863计划)课题“作物生长信息的数字化获取与解析技术”(2013AA102401)、国家科技支撑计划课题“旱区多遥感平台农田信息精准获取技术集成与服务”(2012BAH29B04)、高等学校博士学科点专项科研项目“渭河流域农田土壤环境与作物营养状况遥感监测原理与方法”(20120204110013)等项目的资助。

本书在这些项目研究成果的基础上,总结、凝练研究团队相关研究生学位论文和多篇公开发表的学术论文,由常庆瑞、秦占飞、刘京撰写而成。内容以西北地区主要粮食作物水稻生长状况监测为核心,根据田间试验和遥感观测数据,将水稻生长过程的生理生化参数与光谱反射率、地面高光谱影像、无人机高光谱影像和卫星多光谱影像等多源遥感数据相结合,对水稻叶片、冠层和地块尺度等不同层次生长状况的光谱特征、敏感波段及其光谱参数、建模方法进行系统论述。第1章,材料与方法。概括介绍田间试验方案设计,生理生化参数和生态环境测定的内容、仪器设备和方法,遥感信息采集的类型、方法、仪器设备,光谱与图像数据处理、特征参数提取、模型构建和精度检验方法。第2章,西北地区水稻的光谱特征。系统分析水稻生长发育过程中叶绿素含量、叶面积指数、土壤氮和碳含量的变化及其叶片和冠层光谱特征。第3章~第5章,水稻叶绿素含量、叶面积指数和叶片氮含量高光谱估测模型。在分析各生理生化指标与光谱及其特征参数相关性的基础上,应用不同数学方法,经过模型精度检验和误差比较,分别

构建叶绿素含量、叶面积指数和叶片氮含量的高光谱估测模型。第6章~第8章,高光谱影像和多光谱影像水稻叶绿素含量、叶面积指数和叶片氮含量遥感反演。系统分析水稻生长发育过程地面高光谱影像(SOC高光谱成像仪影像)、无人机高光谱影像(Cubert UHD185成像光谱仪影像)和高分一号卫星多光谱影像的波谱特征和响应能力,基于遥感影像特征光谱参数,进行地块和区域尺度的水稻叶绿素含量、叶面积指数和叶片氮含量的估测模型构建以及水稻生长状况遥感空间反演。

本书由常庆瑞主持组织编写,负责总体设计和任务分解。各章执笔人如下。前言,常庆瑞;第1章,常庆瑞、秦占飞、刘京;第2章,秦占飞、常庆瑞、刘京;第3章,秦占飞、常庆瑞;第4章,常庆瑞、秦占飞、刘京;第5章,秦占飞、常庆瑞、刘京;第6章,常庆瑞、秦占飞;第7章,秦占飞、常庆瑞;第8章,秦占飞、刘京;参考文献,刘京、秦占飞、常庆瑞。参考的研究生学位论文主要如下:博士学位论文,秦占飞《西北地区水稻长势遥感监测研究》(2016年);硕士学位论文,章曼《基于高光谱遥感的水稻生长监测研究》(2015年),严林《基于高光谱遥感的宁夏引黄灌区水稻生理生化参数研究》(2017年),武旭梅《宁夏引黄灌区水稻生理生化参数高光谱估算研究》(2018年)。

参加本著作基础工作的团队成员如下:作者,常庆瑞、秦占飞、刘京;团队核心研究成员,刘梦云、齐雁冰、高义民、陈涛、李粉玲;博士研究生,谢宝妮、赵业婷、申健、田明璐、郝雅璐、刘秀英、宋荣杰、王力、郝红科、班松涛、蔚霖、黄勇、塔娜、落莉莉、王琦;硕士研究生,刘海飞、马文勇、刘钊、王路明、白雪娇、张昶、侯浩、姜悦、刘林、李志鹏、孙梨萍、章曼、刘佳歧、张晓华、尚艳、王晓星、袁媛、楚万林、刘森、于洋、高雨茜、解飞、马文君、殷紫、严林、李媛媛、孙勃岩、罗丹、王烁、李松、余蛟洋、由明明、张卓然、武旭梅、徐晓霞、郑煜、杨景、王婷婷、齐璐、唐启敏、王伟东、陈澜、张瑞、吴文强、高一帆、康钦俊。在近10年的田间试验、野外观测、室内化验、数据处理、资料整理、报告编写和论文撰写过程中,全体团队成员头顶烈日、冒着酷暑、挥汗如雨、风餐露宿、忘我工作、无怨无悔。在本书出版之际,对于他们的辛勤劳动和无私奉献表示衷心的感谢!

由于作者学术水平有限,加之遥感技术发展日新月异,新理论、新方法、新技术和新设备不断涌现,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请广大读者和学界同仁批评指正,并予以谅解!

常庆瑞

2019年初夏

于西北农林科技大学 雅苑

| 目 录 |

前言

第 1 章 水稻遥感监测试验设计与方法	1
1.1 研究区概况	2
1.2 试验设计	2
1.3 高光谱遥感简介	5
1.3.1 高光谱遥感基本理论	5
1.3.2 植被高光谱遥感原理	6
1.3.3 高光谱植被指数	8
1.4 高光谱数据获取	8
1.4.1 非成像光谱测定	8
1.4.2 高光谱影像获取	10
1.5 水稻生理参数测定	12
1.5.1 叶绿素含量测定	12
1.5.2 叶面积指数测定	12
1.5.3 叶片氮含量测定	13
1.6 研究方法与技术路线	13
1.6.1 高光谱数据处理	13
1.6.2 建模方法	16
1.6.3 模型检验方法	19
1.6.4 技术路线	20
第 2 章 西北地区水稻的光谱特征	21
2.1 水稻叶片反射光谱特征	21
2.1.1 不同叶绿素含量水稻叶片反射光谱特征	21
2.1.2 不同土壤氮素水平水稻叶片反射光谱特征	23
2.1.3 不同土壤碳素水平下水稻叶片反射光谱特征	24
2.2 水稻冠层的波谱特性	25
2.2.1 不同生育期水稻冠层波谱特性	25
2.2.2 不同叶绿素含量水稻冠层波谱特性	26

2.2.3	不同叶面积指数水稻冠层波谱特性	27
2.2.4	不同 LNC 水稻冠层波谱特征	27
2.2.5	不同土壤氮素水平水稻冠层波谱特性	28
2.2.6	不同碳素水平水稻冠层波谱特性	29
2.3	水稻冠层光谱的红边特征	29
2.3.1	不同生育期水稻冠层红边特征	30
2.3.2	不同土壤氮素水平水稻冠层红边特征	31
2.4	讨论与结论	33
2.4.1	讨论	33
2.4.2	结论	33
第 3 章	水稻叶绿素含量高光谱估测模型	34
3.1	水稻叶片 SPAD 值的基本特征	34
3.2	水稻叶绿素含量普通回归模型估测	36
3.2.1	基于特征波段的水稻叶绿素含量估测	36
3.2.2	基于光谱反射率参数的水稻叶绿素监测	39
3.2.3	基于光谱指数的水稻叶绿素含量估测	42
3.2.4	基于“三边”参数的水稻叶绿素监测	48
3.3	水稻叶绿素含量多元模型估测	51
3.3.1	基于 BP 神经网络的水稻叶绿素含量估测	51
3.3.2	基于随机森林算法的水稻叶绿素含量估测	59
3.4	水稻幼苗期植株 SPAD 值高光谱影像遥感反演	62
3.4.1	水稻幼苗叶片高光谱影像的光谱特征	62
3.4.2	水稻幼苗 SPAD 值与高光谱影像光谱反射率相关性	63
3.4.3	水稻叶片 SPAD 值估测模型及单株 SPAD 值填图	63
3.5	讨论与结论	66
3.5.1	讨论	66
3.5.2	结论	67
第 4 章	水稻叶面积指数的高光谱估测模型	69
4.1	水稻叶面积指数在各生育期的变化	70
4.1.1	不同施氮条件下水稻叶面积指数随生育期的变化	70
4.1.2	不同施碳条件下水稻叶面积指数随生育期的变化	71
4.2	水稻叶面积指数与冠层光谱的相关性分析	72
4.2.1	叶面积指数与原始光谱、导数光谱的相关性	72
4.2.2	叶面积指数与高光谱特征参数的相关性	76

4.2.3	叶面积指数与植被指数的相关性	77
4.3	水稻叶面积指数普通回归模型估测	84
4.3.1	基于特征波段的水稻叶面积指数估测	84
4.3.2	基于植被指数的水稻叶面积指数估测	86
4.3.3	基于光谱参数的水稻叶面积指数估测	92
4.3.4	基于“三边”参数的水稻叶面积指数估测	94
4.4	水稻叶面积指数多元模型估测	97
4.4.1	基于 BP 神经网络的叶面积指数估测	97
4.4.2	基于支持向量机的水稻叶面积指数估测	105
4.4.3	基于随机森林算法的估算模型及精度检验	106
4.5	讨论与结论	108
4.5.1	讨论	108
4.5.2	结论	109
第 5 章	水稻叶片氮含量高光谱估测模型	111
5.1	水稻叶片氮含量在各生育期的变化	111
5.2	水稻叶片氮素与冠层光谱之间的关系	112
5.2.1	不同 LNC 的冠层光谱特征	112
5.2.2	水稻 LNC 与光谱反射率的相关性	113
5.2.3	水稻 LNC 与高光谱特征参数的相关性	116
5.2.4	水稻 LNC 与植被指数的相关性	117
5.3	基于光谱指数的水稻叶片氮含量估测	123
5.3.1	水稻叶片氮含量的最优光谱指数	123
5.3.2	水稻叶片氮含量光谱指数模型构建	125
5.3.3	各种光谱指数估测水稻叶片氮含量精度比较	129
5.4	水稻叶片氮含量估测的多变量模型构建	131
5.4.1	水稻叶片氮含量估测的多元线性模型	131
5.4.2	基于随机森林算法的水稻叶片氮含量估测模型	132
5.5	讨论与结论	134
5.5.1	讨论	134
5.5.2	结论	135
第 6 章	基于无人机高光谱影像的小区水稻长势监测	137
6.1	无人机高光谱影像数据采集与处理	137
6.2	无人机高光谱影像实现小区水稻生理生化参数监测	139
6.2.1	基于特征波段的水稻 SPAD 值和 LAI 遥感反演	139

6.2.2	基于 BP 神经网络的水稻 SPAD 值和 LAI 遥感反演	141
6.2.3	不同反演模型高光谱影像估测能力比较	143
6.3	讨论与结论	144
第 7 章	基于无人机高光谱影像的大田水稻长势监测	145
7.1	水稻 SPAD 值高光谱影像空间反演	145
7.2	水稻 LAI 高光谱影像空间反演	147
7.3	水稻 LNC 高光谱影像空间反演	148
7.4	讨论与结论	149
7.4.1	讨论	149
7.4.2	结论	150
第 8 章	高分一号遥感影像在水稻长势监测中的应用	151
8.1	影像预处理	152
8.2	卫星波段反射率模拟和植被指数	153
8.3	基于 GF-1 卫星数据的水稻 SPAD 值空间监测	154
8.3.1	光谱指数与水稻抽穗期 SPAD 值的相关性	154
8.3.2	水稻抽穗期 SPAD 值估算模型构建及验证	155
8.3.3	水稻抽穗期 SPAD 值空间反演	156
8.4	基于 GF-1 卫星数据的水稻 LAI 空间监测	157
8.4.1	光谱指数与水稻抽穗期 LAI 的相关性	157
8.4.2	水稻抽穗期 LAI 估算模型构建及验证	157
8.4.3	水稻抽穗期 LAI 空间反演	158
8.5	基于 GF-1 卫星数据的水稻 LNC 空间监测	159
8.5.1	光谱植被指数与水稻抽穗期 LNC 的相关性	159
8.5.2	水稻抽穗期 LNC 估算模型构建及验证	160
8.5.3	水稻抽穗期 LNC 空间反演	161
8.6	讨论与结论	162
8.6.1	讨论	162
8.6.2	结论	162
参考文献	164
附录 试验图片	175

第 1 章 | 水稻遥感监测试验设计与方法

水稻是世界三大粮食作物之一，全世界有超过 35 亿人以稻米为主食，确保水稻的高产稳产对世界粮食安全意义重大。水稻起源于中国，目前我国仍是世界上最大的稻米生产及消费国，水稻播种面积位居世界第二，总产量居世界之首，全国三分之二的人口以稻米为主食。近 50 年来，全国水稻年播种面积约占粮食作物种植面积的 27%，而水稻年产量却占粮食总产量的 43% 左右，水稻消费量占粮食消费量的 33%（王明华，2006；李波等，2008）。可见，水稻在我国农业生产中占有极其重要的地位。目前随着耕地面积日益减少，如何利用有限的土地资源获得水稻的优质高产就显得尤为重要。水稻的增产因素包括化肥使用量增加、水稻新品种的推广以及田间栽培管理水平的提升，其中氮素是水稻生长发育中最主要的影响因子，尽管氮肥的施用可以促进水稻的稳步增产，但由此带来的环境恶化问题也日趋凸显（吴麓，1979；赵英，1981；吕殿青等，1998；邵东国等，2015）。过量施用氮肥虽然在一定程度上增加了水稻的产量，但氮肥的过量投入并未形成等比例的水稻产出。过高的氮肥施用，不仅增加了生产成本，还造成了氮素利用率下降（张满利等，2010；剧成欣等，2013）。在我国，氮肥的施用量高居世界首位，远远高于欧美一些国家，而氮素的利用率仅为 35%，仅为欧美国家的 50%。过高的施用氮肥还会在不同程度上造成土壤酸化（李艾芬等，2014；于天一等，2014；周晓阳等，2015a，2015b；陈平等，2015），并由此带来一系列的环境恶化问题。由此可见，合理施用氮肥，提高氮素利用率，不仅可以促进水稻优质高产的形成，还可以大大降低生产管理成本，减少环境污染。合理高效的施用氮肥是建立在对水稻生育期长势精确掌控基础之上的，而水稻生长发育的实时监测是精准农业迫切需要解决的关键问题，也是精准农业和现代农业的重要研究前沿。

水稻叶绿素含量、叶面积指数（leaf area index, LAI）和叶片氮含量（leaf nitrogen content, LNC）是对水稻长势进行评估的重要参数。而传统的测定方法大多基于田间采样和实验室化学分析，这种方法虽然可以对目标进行准确测定，但费时、费力，而且成本较高，往往具有破坏性，很难实现大区域范围的实时监测。近年来随着遥感技术特别是高光谱遥感技术的快速发展，使大面积快速、无损、实时监测作物生长状况及生理参数成为可能，从而为作物的长势无损监测提供了新的思路和技术支撑。

本书旨在利用新兴的高光谱遥感技术实现西北地区水稻生理参数及长势的区域监测，建立行之有效的高光谱水稻长势监测技术体系。通过不同年份、不同生育期、不同氮素水平、不同生长环境的水稻田间试验，借助地面非成像光谱数据、低空无人机高光谱影像以及卫星影像数据获取不同遥感平台的水稻反射光谱特征，结合田间同步采样数据，综合运用光谱分析、遥感图像处理、数理统计以及参数成图等技术手段，通过寻找与水稻生理参数相关的特征波段及光谱植被指数，建立相应的估测模型，并将模型应用于遥感影像分析，实现西北地区水稻长势遥感监测。研究结果可为数字农业的信息快速采集提供有效技术途径，推动精准农业深入全面发展。

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区北部的河套平原，地貌类型为黄河冲积平原，地势平坦开阔，海拔 1200m 左右。属典型的温带大陆性气候，其主要特点是四季分明，春迟夏短，秋早冬长，昼夜温差大，雨雪稀少，蒸发强烈，气候干燥，风大沙多，无霜期较长等。该区年太阳辐射总量约 $6000\text{MJ}/\text{m}^2$ ，年日照时数大约 3000h，年均气温 8°C 左右， $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温 $3200 \sim 3400^\circ\text{C}$ ，无霜期为 150 ~ 190d。常年干旱少雨，年蒸发量 1400mm，年均降水量仅 200mm 左右，降水主要集中在 7 ~ 9 月。水稻是宁夏当地主要作物之一，该区土地肥沃，水利资源丰富，沟渠纵横，引黄河水灌溉，为水稻的栽种提供了得天独厚的地理条件。

1.2 试验设计

本研究试验包括小区试验和大田试验，具体分布如图 1-1 所示。小区试验布设在宁夏回族自治区青铜峡市叶盛镇宁夏农林科学院水稻示范基地。该基地位于东经 $106^\circ 11' 35''$ ，北纬 $38^\circ 07' 26''$ 。土壤为表锈灌淤土，有机质含量 $16.10\text{g}/\text{kg}$ ，全氮 $0.90\text{g}/\text{kg}$ ，全磷 $0.9\text{g}/\text{kg}$ ，速效钾 $112\text{mg}/\text{kg}$ ，pH 8.49，土壤容重 $1.40\text{g}/\text{cm}^3$ 。试验地种植水稻品种为宁粳 43 号。

大田试验位于银川市贺兰县四十里店乡桂文村。试验所选用水稻品种为宁粳 43 号，供试土壤为表锈灌淤土，土壤有机质含量 $15.8\text{g}/\text{kg}$ 、全氮含量 $0.94\text{g}/\text{kg}$ 、碱解氮含量 $62.2\text{mg}/\text{kg}$ 、有效磷含量 $15.94\text{mg}/\text{kg}$ 、速效钾含量 $148.06\text{mg}/\text{kg}$ 、pH 8.49，土壤容重 $1.40\text{g}/\text{cm}^3$ 。

试验设计为碳氮交互试验，设置了 4 个碳素水平、3 个氮素水平，共 12 个处理。3 个施氮（纯 N）水平： 0 、 $240\text{kg}/\text{hm}^2$ 、 $300\text{kg}/\text{hm}^2$ ，分别记为 N_0 、 N_1 、 N_2 ；4 个碳处理记为 C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 ，分别表示施生物质碳为 0 、 $4500\text{kg}/\text{hm}^2$ 、

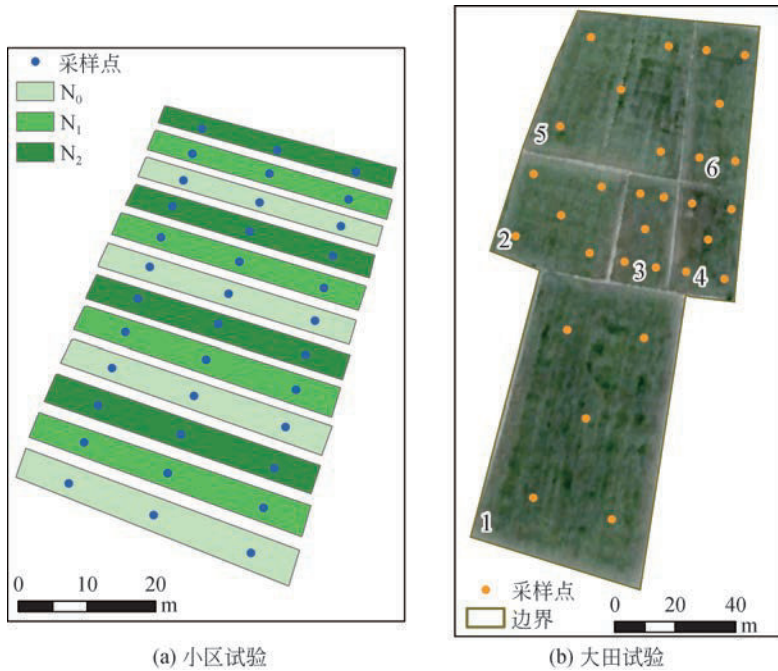


图 1-1 试验区位置图

9000kg/hm²、13 500kg/hm²，各小区面积 60m² (10m×6m) [图 1-1 (a)]。氮肥分 3 次施入，分别为基肥 60%、分蘖肥 20%、穗肥 20%，人为造成无肥、氮肥适中和氮肥过量 3 种情况。各小区磷、钾肥施用量相同，全部作为基肥。水稻的灌溉按照当地常规习惯进行，整个生育期间共灌水 18 次。本试验中使用的肥料为稻壳炭、尿素、重过磷酸钙和氯化钾。每个处理重复 3 次，共计 36 个小区。每个小区选择 2 个样点，共计 72 个样点进行田间观测和采样。具体施肥量如表 1-1 所示。

表 1-1 试验小区施肥参数

试验处理	生物质碳含量 (kg/hm ²)	N 含量 (kg/hm ²)	P 含量 (kg/hm ²)	K 含量 (kg/hm ²)
C ₀	N ₀	0	90	90
	N ₁	0	90	90
	N ₂	0	90	90
C ₁	N ₀	4 500	90	90
	N ₁	4 500	90	90
	N ₂	4 500	90	90

续表

试验处理	生物质碳含量 (kg/hm ²)	N 含量 (kg/hm ²)	P 含量 (kg/hm ²)	K 含量 (kg/hm ²)	
C ₂	N ₀	9 000	0	90	90
	N ₁	9 000	240	90	90
	N ₂	9 000	300	90	90
C ₃	N ₀	13 500	0	90	90
	N ₁	13 500	240	90	90
	N ₂	13 500	300	90	90

水稻大田共包括 6 块 [图 1-1 (b)], 施肥和田间管理都按当地正常水平进行。采样点的布置: 每块水稻大田设置 5 个采样小区, 按图 1-1 (b) 所示五个方位进行均匀布设, 中间小区位于大田的几何中心, 其余小区与中心小区大致距离相等。每个小区设置 3 个样点, 中间样点位于小区几何中心, 其余样点与中心点相距 3.5m。对每个样点进行标记, 以便后续连续观测。每次观测采集大田样品 30 个。

观测时间: 2014 年、2015 年和 2017 年, 选择水稻关键生育期进行田间观测采样。幼苗期 (6 月中旬), 植株矮小, 有 3~5 片叶, 田内有水, 无土壤裸露; 分蘖期 (7 月上旬), 叶鞘中有新分蘖的叶尖, 田内有水, 稍有裸露土壤; 拔节期 (7 月中旬), 植被特征表现为群体较小, 田内有水, 无裸露的土壤。抽穗期 (7 月下旬~8 月上旬), 植被盖度接近 90%, 基本无土壤裸露; 乳熟期 (8 月下旬), 叶片开始转黄, 水稻种子颗粒饱满, 籽粒呈绿色, 与正常谷粒大小相同, 谷粒中含白色乳状液体, 稻田内无水, 植被盖度接近 90%, 部分叶片开始枯黄, 脱落; 蜡熟期 (9 月中旬), 谷粒由绿变黄, 分蘖和叶片衰老, 田内无水。

2014 年田间观测采样时间分别为: 拔节期 (7 月 12 日), 抽穗期 (8 月 12 日), 乳熟期 (8 月 31 日), 蜡熟期 (9 月 17 日)。2015 年田间观测采样时间分别为: 幼苗期 (6 月 11 日), 分蘖期 (7 月 2 日), 拔节期 (7 月 14 日), 抽穗期 (7 月 31 日), 乳熟期 (8 月 20 日), 蜡熟期 (9 月 15 日)。2017 年水稻田间观测采样时间分别为: 抽穗期 (8 月 10 日), 乳熟期 (8 月 25 日) 和蜡熟期 (9 月 11 日)。

观测内容: ①水稻生理参数, 包括叶面积指数 (LAI)、叶绿素含量 (SPAD 值)、叶片氮含量 (LNC)。②光谱反射率和高光谱影像, 包括不同生育期水稻叶片光谱反射率、冠层光谱反射率, 地面植株高光谱影像、地面冠层高光谱影像, 无人机高光谱影像。

2015 年水稻各生育期长势情况见图 1-2。

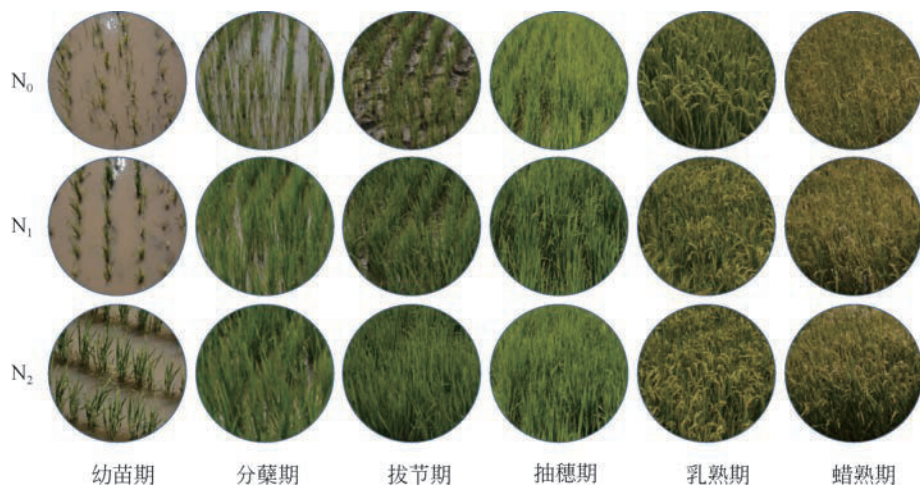


图 1-2 2015 年不同生育期不同氮素水平水稻长势情况

样本数目说明：根据布点设置，2014 年每个生育期可获得小区样本 72 个，大田样本 25 个（因其中一块大田水稻出现病害，2014 年实测大田为 5 块）。因此 2014 年小区 SPAD 样本总计 288 个，大田 SPAD 样本 100 个；叶片氮含量和 LAI 样本数与 SPAD 相同。2015 年每个生育期可获得小区样本 72 个，大田样本 30 个，LAI 不包括幼苗期。因此 2015 年小区 SPAD 样本总计 432 个，大田 SPAD 样本 180 个；小区 LAI 样本 360 个，大田 LAI 样本 150 个。2017 年观测获得小区样本 216 个。

1.3 高光谱遥感简介

1.3.1 高光谱遥感基本理论

高光谱遥感（hyperspectral remote sensing, HRS）发展于 20 世纪 80 年代，它以测谱学为基础（童庆禧等，2006），利用很多很窄的电磁波波段（一般小于 10nm）从感兴趣的目标物获取相关光谱信息。高光谱遥感不仅具有较高的光谱分辨率（波段宽度小于 10nm），而且在 400 ~ 2500nm 内有几百个波段，使其具有较强的波段连续性。除此之外，加上光谱导数和对数变换，使其数据量成千上万倍增加。而传统多波段遥感波段宽度较大（一般大于 100nm），并且波段不连续，不能完全覆盖可见光至红外光的波段范围。高光谱遥感的这些优点使其能以

足够的光谱分辨率对那些具有诊断性光谱特征的目标地物进行区分。

高光谱遥感需要搭载能够覆盖一定波段范围的非成像光谱仪和成像光谱仪作为传感器。借助非成像光谱仪在野外或实验室测量目标物的光谱反射特征，可以帮助人们理解目标地物的光谱特性，进而提高不同遥感数据的分析应用精度。目前较常用的地面非成像光谱仪有美国分析光谱仪器公司（ASD）生产的 ASD 野外光谱辐射仪、美国 SVC（Spectra Vista Corporation）生产的 GER 系列野外光谱仪以及 SVC 系列光谱仪。而成像光谱仪综合了成像技术和光谱技术，具有“图谱合一”的优势。它不仅可以获得目标地物的二维空间信息，还可以同时记录目标物的光谱信息。与非成像光谱仪相比，成像光谱仪实现了从点到面的光谱测量。与多光谱遥感相比，高光谱遥感影像上的每个像元都包含一条连续而平滑的光谱曲线，很好地解决了以往“光谱不成像”及“成像无光谱”的问题。

高光谱数据具有光谱信息的连续性，能够充分获取目标地物的光谱特征，可以将多光谱遥感中无法识别的地物信息检测出来，从而实现光谱数据与目标地物的有效匹配，并将目标物光谱分析模型应用于整个遥感过程。高光谱遥感的这些特点改变了以往遥感以定性分析为目的，在光谱维度上实现空间信息展开并进行目标地物生理过程的定量分析（Thenkabail et al., 2001; Govender et al., 2007; Hatfield et al., 2008; Zheng and Moskal, 2009）。

1.3.2 植被高光谱遥感原理

在电磁波作用下，目标地物在不同波段会形成不同的光谱吸收和反射特征，以反映其内部的物质成分和结构信息。地物在不同波段表现出来的不同光谱响应特性称为光谱特性。地物的光谱特征是探测物质性质和形状的重要依据（赵英时，2013）。对于植物而言，不同的植物具有不同的形态特征和化学组成，这种差异使其发射和反射的电磁波也不尽相同，在光谱学中表现为不同植物的光谱特征也不相同，因此可以根据植被的光谱反射特征来反演其化学组成。而其化学组成受品种、生育期、发育状况、健康状况及生长条件的影响，因此，理论上可以通过植物的高光谱特征来反演其生理生化组分及含量、冠层结构以及植株长势等。

绿色植物的叶片在叶绿素的作用下大量吸收红光和蓝光，并被植物的光合作用所消耗，而绿光的部分被叶绿素反射，红外辐射主要受叶片栅栏组织的影响，在近红外波段形成一个高反射平台。通常情况下，绿色健康植被在 350 ~ 2500nm 波段具有以下典型反射光谱特征（图 1-3）。

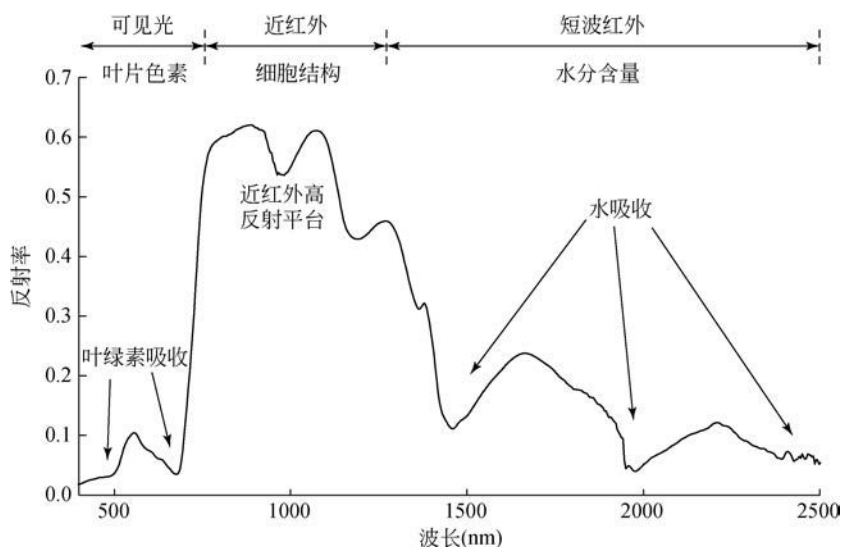


图 1-3 绿色植被的光谱特征

1) 在可见光的 350 ~ 700nm 波段，是叶绿素的吸收带。由于叶片的光合作用，红蓝光被强烈吸收，而绿光被强烈反射，在 550nm 附近形成一个小的反射峰——“绿峰”，因此健康植物一般呈绿色。叶绿素是植物活力的体现，当植物机能旺盛，营养充足时，叶绿素含量较高，此时的光合作用也较强，植物表现为明显的绿色。当植物遭受胁迫（如氮素、水分、重金属污染、病虫害等）时，植物体内因缺乏营养导致叶绿素含量减少，光合作用下降，此时，“绿峰”被削弱，植物也往往表现出黄色。因此，可以利用植物的这些光谱特征进行生理参数估测和营养胁迫的评估。

2) 在 700 ~ 1300nm 波段，受叶片细胞结构及多层叶片的多次反射影响，形成一个近红外平台。叶片的细胞结构影响单片叶子在近红外波段的反射率，而植株冠层结构影响叶片在近红外波段光谱反射的总次数，从而共同影响植被在近红外范围的光谱反射率。因此，覆盖度高、健康旺盛的植被在近红外波段的反射率较高；相反，当植物受到胁迫或衰老后，近红外波段的反射率就会降低。但需要注意的是，如果植被在遭受营养胁迫时失水过多，近红外波段的反射率反而会增大。

3) 在红光与近红外波段的过渡部分，由于叶绿素对红光的强吸收以及冠层对近红外光的强反射，形成一个反射率急剧上升的陡坡，称为“红边”（red edge position, REP）。“红边”是绿色植物独有的光谱特征，通常位于 680 ~ 760nm，与植物的生育期和体内组织成分密切相关。当植物长势旺盛，叶片叶绿素含量较高时，由于光合作用的增强，进而需要消耗更多的长波光光子，导致红边向长波方向移动（Collins, 1978），即“红边红移”。当植被遭受胁迫或逐渐衰老，叶片叶绿素含量较低时，由于光合作用减弱，植被“红边”表现出“蓝移”现象。因

此，可以通过红边来对植被的生理参数及长势进行定量估测。

4) 在 1300 ~ 2500nm，植被的光谱反射率主要受叶片含水量的影响，在 1450nm 和 1940nm 附近是水分的强吸收带，而其他物质（如蛋白质、木质素等）虽然在 1450 ~ 2450nm 存在吸收，但往往被水分的强吸收特征所掩盖。水分的这一吸收特征，使得 1300 ~ 2500nm 波段范围的光谱反射率与叶片含水量存在很高的相关性，植被光谱反射率随叶片含水量的增加而降低，而 1450nm 和 1940nm 更是进行叶片含水量反演的敏感波段。但在实际应用中，由于空气水分的影响，使得通过水分吸收波段反演叶片含水量的精度大大降低。

1.3.3 高光谱植被指数

植被的光谱信息主要通过植被的冠层光谱特性及其差异反映在高光谱遥感信息中。植被体内不同的组分及冠层不同的形态特征对应于不同的特征波段。如可见光范围的绿波段 520 ~ 590nm 对不同的植物类别反应敏感；红光范围 630 ~ 690nm 对不同的植被覆盖度和植被长势反应敏感。而近红外波段反射率主要受叶内细胞组织结构的影响；短波红外波段的反射率对叶内水分含量反应敏感。植被遥感不仅要区分植被类别，还要区分植被体内组分的差异，但是仅靠个别波段或多个单波段的光谱信息来反演植被信息往往具有一定的局限性。高光谱植被指数通过将光谱波段反射率经加、减、乘、除等运算，构建光谱波段的线性或非线性组合，从而以简单有效的形式实现作物长势信息的提取。应用最广泛的植被指数有归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI)、比值植被指数 (ratio vegetation index, RVI)、差值植被指数 (difference vegetation index, DVI)、垂直植被指数 (perpendicular vegetation index, PVI) 和土壤调整类植被指数，如土壤调节植被指数 (soil-adjust vegetation index, SAVI)、转换型土壤调节植被指数 (transformed soil-adjust vegetation index, TSAVI) 和修正土壤调节植被指数 (modified soil-adjusted vegetation index, MSAVI) 等。借助高光谱植被指数估测作物生理参数时，光谱指数的选择依赖于所要估测的生理参数以及该参数的预期取值范围，并且还要具备影响冠层光谱反射率的外部因素的先验知识 (Broge and Leblanc, 2001)。

1.4 高光谱数据获取

1.4.1 非成像光谱测定

水稻冠层和叶片光谱采用美国 SVC 生产的 HR-1024i 便携式地物光谱仪测