

多层次遥感 农田信息获取技术体系

方圣辉 龚 龔 彭 漪 编著



科学出版社

多层次遥感农田信息 获取技术体系

方圣辉 龚 龔 彭 漪 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

遥感技术以其大面积、快速、动态的优势可在不破坏植物物理结构的同时获得不同时间和空间尺度的植被信息,在识别植物种类、估算植被参数等方面得到广泛应用,为监测及分析植被生态系统的时空变化提供有力的数据支持。本书概述多层次遥感农田信息获取的基本理论和应用实例。第1章以我国华中及美国地区的典型农作物类型为研究对象,讨论利用遥感光谱数据反演关键植被参数的方法;第2章以小麦为主要研究对象,通过遥感数据同时提取植被的几何和光谱信息以反演作物典型参数;第3章针对不同光学遥感数据在时间分辨率、空间分辨率、光谱分辨率和辐射分辨率的差异问题研究多层次遥感信息辐射校正技术;第4章以油菜作为实验对象,结合冠层光谱反射率、光谱指数、光谱特征参数、无人机纹理特征参数等遥感数据综合分析评估油菜的长势变化;第5章讨论利用无人机平台获取农田信息的技术和应用实例。

本书适合从事农业、林业、环境、生态和遥感等领域的科学研究人员阅读,也可作为测绘科学与技术、遥感科学与技术、地理信息系统和农林院校相关专业研究生教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

多层次遥感农田信息获取技术体系/方圣辉,龚龔,彭漪编著. —北京:科学出版社,2018.6

ISBN 978-7-03-056223-4

I. ①多… II. ①方… ②龚… ③彭… III. ①遥感技术-应用-农田-信息获取 IV. ①S28-39 ②S-058

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 323712 号

责任编辑:杨光华/责任校对:谌 莉

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

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>

武汉精一佳印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2018 年 6 月第 一 版 印张:25 1/2

2018 年 6 月第一次印刷 字数:601 700

定价:258.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

我国自古以来就是一个农业大国,农业的发展一直是国民经济的命脉,直接关系到社会的稳定与发展。在当前耕地资源日益紧缺、人口不断膨胀、环境问题不断突出的背景下,加快推进农业农村现代化,利用科技创新来指导及辅助农业生产,实现农业高产、高效、生态安全的协调发展目标,是我国今后相当长时期内农业必须面对和解决的重大问题。农作物生长信息快速准确地获取和解析是现代化农业能够得以顺利决策和实施的基础,是实现精准农业生产系统的核心组件。遥感技术可以高效的、多尺度的记录植被吸收、反射或散射的太阳辐射信号,进而解析植被生理生化的相关信息,为大范围监测农田长势和健康状况提供有力的数据支持。

本书围绕农业遥感这一重要研究领域,针对当前农业遥感的主要前沿问题,系统地讨论不同层次的遥感观测数据如何来获取和分析农作物的生长变化信息,进而辅助精准农业的管理和决策。本书在内容组织方面,首先从植被地面光谱估测植被生理生化参数的角度讨论植被和太阳辐射能量相互作用的基本机理;然后通过几何与光谱信息结合分析、遥感信息辐射校正技术、多层次信息系统辅助分析技术等内容讨论“地面-航空-航天”的技术关联;最后讨论利用无人机遥感平台,形成多层次遥感农田信息获取技术体系的几个具体实例。

本书的内容主要是基于我们在2013~2017年完成的国家863课题“作物生长信息的数字化获取与解析技术”(2013AA102401)的研究成果,围绕开展的科研实例进行整理、归纳和总结,系统地讨论遥感农田信息获取的技术体系。本书从农田地面信息获取分析、低空和无人机农田信息获取分析等不同层次进行关键问题剖析,介绍一系列原创性多平台农业遥感信息获取的技术方法,主要包括基于混合像元的作物长势光谱精细化分析、油菜覆盖信息光谱自适应提取、几何光谱一体化作物分析仪器研发和基于多时相卫星影像的作物产量估算等多种新型技术。全书共5章。第1章以华中地区典型的植被种类以及美国地区典型植被类型为研究对象,研究利用高光谱遥感数据反演关键植被参数叶绿素含量、叶面积指数以及总初级生产力的方法。第2章以小麦作为主要研究对象,分别从小麦冠层的几何信息与光谱信息两个方面研究遥感数据估算植被叶面积指数的方法,将光谱指数统计模型和几何光学模型进行结合以提高遥感反演叶面积指数的精度。第3章针对国产多源卫星数据辐射校正问题,提出有效的多源卫星数据协同校正的方法,突破协同校正的关键技术,通过研发相关算法和软件程序实现典型国产光学卫星数据的辐射校正处理,改善遥感影像辐射质量,为航天遥感提供可靠的数据基础。第4章以油菜作为实验对象,通过建立农作物数据管理分析系统,对冠层光谱反射率、光谱指数、光谱特征参数、无人机纹理特征参数等数据与油菜长势参数进行相关分析,充分挖掘各类型数据与农作物长势参数之间的关系,通过回归得到反演模型,并探究多时序数据匹配应用于多时序农作物长势参数获取的有效性。第5章的研究与精准农业紧密结合,利用遥感地面与无人机平台对油菜进行天地动态立体监测。在作物生长的关键节点,利用地面采集及无人机

航飞作业方式实时获取光谱、理化参数信息,及时了解农田苗情以及生长状况。

本书由方圣辉对全书进行了统稿和最后定稿。各个章节的主要撰写人员分别为:第1章,方圣辉、彭漪、乐源、曾奥丽、邵佩佩、林志恒、王东、许凯秋;第2章,龚龔、彭漪、胡文烜、蒋琦、肖洁、李玉翠;第3章,龚龔、方圣辉、佃袁勇、舒欢、夏芷玥、周双百合、王科、杨振忠;第4章,方圣辉、龚龔、佃袁勇、胡卫、吕鑫晨、马驿、刘雅婷;第5章,彭漪、方圣辉、汤文超、杨光、段博、侯金雨、葛梦钰。

在此,特别感谢科技部农村中心,863 高科技发展计划提供的相关项目支持,使得我们的工作得以顺利开展。项目顾问罗锡文院士、赵春江院士、何勇教授及项目首席科学家朱艳教授对我们的科研提出大量的宝贵建议,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,敬请各位读者批评指正。

作 者
2017 年 12 月

目 录

第 1 章 植被地面光谱和碳汇信息获取与分析	1
1.1 引言	1
1.2 概述	2
1.2.1 研究意义和背景	2
1.2.2 研究进展	3
1.3 地面光谱数据和理化参数获取方法	9
1.3.1 实验区	9
1.3.2 数据采集与预处理	10
1.4 植被叶绿素及 LAI 反演方法	16
1.4.1 植被光谱影响因素分析	17
1.4.2 冠层光谱与冠层叶绿素的关系分析	19
1.4.3 反演模型概述	27
1.4.4 植被指数经验模型反演结果	30
1.4.5 物理模型与优化算法的反演结果	37
1.4.6 HyperScan 成像光谱数据的植被叶绿素反演	39
1.4.7 小结	41
1.5 基于连续小波变换的叶绿素含量反演	42
1.5.1 小波变换在植被参数反演中的应用	43
1.5.2 植被光谱的连续小波变换	44
1.5.3 叶片尺度反演结果	46
1.5.4 冠层尺度反演结果	49
1.5.5 交叉验证	51
1.5.6 小结	52
1.6 典型农作物碳汇能力监测分析	53
1.6.1 油菜 GPP 的遥感估计模型	53
1.6.2 小麦 GPP 的遥感估算模型	62
1.6.3 两种植被对比分析	69
1.6.4 小结	71
参考文献	73
第 2 章 几何与光谱信息结合的作物信息获取与分析	88
2.1 引言	88
2.2 概述	88
2.2.1 研究意义和背景	88
2.2.2 研究进展	89

2.2.3 研究目的和内容	90
2.3 研究对象及数据预处理	92
2.3.1 研究对象	92
2.3.2 研究仪器	92
2.3.3 数据获取与数据预处理	94
2.4 几何信息的处理	98
2.4.1 点云数据图像化	98
2.4.2 计算图像的灰度共生矩阵	101
2.4.3 提取灰度共生矩阵的特征参数	101
2.5 光谱信息的处理	105
2.5.1 辐射校正	105
2.5.2 植被指数的选择	106
2.5.3 获取小麦冠层的红边指数	107
2.6 回归分析	109
2.6.1 几何信息的回归分析	109
2.6.2 光谱信息的回归分析	117
2.7 本章小结	120
参考文献	122
第3章 多层次遥感信息辐射校正技术	124
3.1 引言	124
3.2 概述	125
3.2.1 研究意义和背景	125
3.2.2 研究进展	125
3.3 多源信息辅助的光学遥感影像辐射校正	126
3.3.1 数据获取与处理	128
3.3.2 机载-地面数据辅助辐射校正	136
3.3.3 星载数据辅助辐射校正	152
3.3.4 小结	163
3.4 光谱信息约束下的辐射校正模型	164
3.4.1 实验地区介绍和数据采集	165
3.4.2 研究方法简介	166
3.4.3 通用辐射定标模型	171
3.4.4 光谱信息约束下的辐射定标模型	172
3.4.5 两种模型的对比分析	177
3.4.6 小结	181
3.5 兼顾几何信息的多光谱相机辐射定标	182
3.5.1 研究区域及仪器介绍	183
3.5.2 多光谱相机辐射定标原理和方法	185

3.5.3 兼顾几何信息的辐射定标方法	190
3.5.4 多光谱相机辐射测量性能评估与辐射定标建议	202
3.5.5 小结	205
参考文献	206
第4章 多层次信息系统辅助作物长势分析技术	211
4.1 引言	211
4.2 概述	211
4.2.1 研究意义和背景	211
4.2.2 研究进展	212
4.2.3 研究内容	214
4.3 数据获取与数据处理	215
4.3.1 实验数据获取	215
4.3.2 数据处理	216
4.4 系统设计及基础功能实现	221
4.4.1 数据库设计	221
4.4.2 Oracle 与 VisualStudio 平台连接	222
4.4.3 数据上传	222
4.4.4 数据下载	224
4.4.5 数据查询、删除、修改	224
4.4.6 用户管理	225
4.5 农作物长势参数相关性分析和回归分析	225
4.5.1 相关分析	226
4.5.2 回归分析	238
4.5.3 小结	241
4.6 农作物多长势参数分析	242
4.6.1 相似性测度	242
4.6.2 单一生长期农作物长势分析	243
4.6.3 多时序农作物长势分析	259
4.6.4 小结	262
4.7 基于 BS 模式的农作物光谱信息系统设计	262
4.7.1 国内外光谱库研究进展	262
4.7.2 基于 BS 模式的农作物信息系统设计方案	264
4.7.3 农作物光谱信息数据库设计	265
4.7.4 农作物光谱信息系统前端设计	267
4.8 本章小结	272
参考文献	273
第5章 无人机平台农田信息获取技术	276
5.1 引言	276

5.2 概述	277
5.2.1 研究的意义和背景	277
5.2.2 研究进展	279
5.3 实验数据的采集与处理	285
5.3.1 实验区简介	285
5.3.2 地面平台数据的采集与预处理	287
5.3.3 无人机平台数据的获取与预处理	289
5.4 油菜冠层光谱影响因素分析	294
5.4.1 典型参数对油菜冠层光谱影响分析	294
5.4.2 不同生长期对冠层光谱及反演典型参数的影响分析	296
5.4.3 不同波段宽度敏感性分析	298
5.4.4 小结	306
5.5 地面平台油菜典型参数反演及产量估产	307
5.5.1 油菜叶面积指数和叶绿素反演	307
5.5.2 植被指数经验模型估产	319
5.5.3 小波变换方法估产	326
5.5.4 神经网络方法估产	332
5.5.5 油菜不同生长期对产量的贡献	334
5.5.6 不同估产方法比较	339
5.5.7 小结	341
5.6 无人机平台油菜典型参数反演及产量估产	342
5.6.1 植被覆盖率反演	342
5.6.2 油菜叶面积指数和叶绿素反演	353
5.6.3 经验模型估产	357
5.6.4 混合像元分析法估产	361
5.6.5 神经网络方法估产	367
5.6.6 组合预测方法估产	369
5.6.7 不同估产方法比较	372
5.6.8 施氮量对产量的影响	373
5.6.9 小结	375
5.7 油菜多时期多平台综合估产评价模型与估产模型	376
5.7.1 油菜各生长期叶面积指数与叶绿素含量的变化	376
5.7.2 油菜全时期多平台综合估产评价模型	378
5.7.3 油菜多时期多平台综合估产模型	382
5.7.4 小结	383
5.8 本章小结	384
参考文献	388

第 1 章 植被地面光谱和碳汇信息获取与分析

1.1 引言

绿色植物通过光合作用将太阳能转化成化学能,将大气中的二氧化碳转化成有机物,为人类提供最基本的物质和能量来源。植物的各种生态过程,诸如蒸发、蒸腾、初级生产、废物分解等,都与植物体内的生化参数如叶绿素以及物理参数如叶面积指数(leaf area index, LAI)密切相关。如何计算植物的固碳能力,估算植物的生产力、生物量和评价其生态效益价值成为目前各国学者研究的热点问题。遥感技术以其大面积、快速、动态的优势可在不破坏植物物理结构的同时获得不同时间和空间尺度的植物冠层信息。高光谱作为遥感发展的又一个里程碑,能提供更加丰富的光谱信息,在识别植物、反演植物的理化参数上具有更大的优势。本章以华中地区典型植被种类以及美国地区典型植被类型为研究对象,研究利用高光谱遥感数据反演关键植被参数——叶绿素、叶面积指数以及总初级生产力(gross primary productivity, GPP)的方法,主要的研究工作包括以下内容。

(1) 分别从叶片以及冠层尺度,分析叶绿素含量、叶面积对光谱的影响,发现利用高光谱反演植被叶绿素以及叶面积指数时,关键波段有 400~500 nm、525~600 nm、625~675 nm、720~730 nm 以及 800 nm 这几个波段。以小麦为研究对象逐层分析小麦冠层叶绿素含量与冠层光谱中各个光谱波段、各种光谱指数的相关性。结果表明:红边波段反映叶绿素含量的深度要优于其他波段;绿波段略高于红波段;近红外波段反映叶绿素含量的深度最浅,往往只能反映植被冠层表层的叶绿素含量。

(2) 分别利用植被指数经验模型与物理模型进行叶绿素以及叶面积指数反演。结果表明,基于红边波段的三种植被指数($CI_{rededge}$ 、NDRE、MTCI)无论是在叶片还是冠层水平,精度均较高。叶片尺度上,物理模型精度与植被指数经验模型相近,但在冠层水平上,由于实测参数的缺乏,物理模型的精度下降。利用华中地区 5 种典型阔叶植被光谱数据以及对应的叶绿素含量,对 Gitelson 建立的红边指数 $CI_{rededge}$ 经验模型进行参数优化。结果表明,优化后的模型决定系数达到 0.94,均方根误差为 46.95 mg/m²,优化后的模型相比原模型更适用于华中地区阔叶植被叶片的叶绿素含量反演,并且能够适用于不同的植被类型。

(3) 利用连续小波变换,分别在叶片与冠层两个尺度上,利用模拟数据与武汉地区实测数据进行叶绿素反演实验,寻找最适合用于叶绿素反演的小波尺度与波段,建立反演模型并与传统的植被指数经验模型进行比较分析。结果表明,无论是在叶片尺度还是冠层尺度,高相关的小波系数区域主要分布在 720 nm 附近的红边波段以及 780 nm 附近的近红外波段,并且最高相关的小波系数模型精度均高于植被指数模型。通过交叉验证,发现利用模拟数据的模型能够作用于实测数据,说明小波系数模型在不同数据集之间具有一定适应性。

(4) 由于碳汇能力与植被的光合作用和初级生产力密切相关,利用总初级生产力作为衡量植被碳汇能力的指标,以油菜和小麦在不同水和氮条件下的田间实验为基础,首先探究两种植被在不同水和氮条件下的冠层光谱曲线特征,然后分别研究油菜和小麦叶片 GPP 与叶片反射光谱的定量关系,并综合两种植被探究利用植被指数估计 GPP 的统一定量模型。

1.2 概 述

1.2.1 研究意义和背景

随着全球气候变暖、各种地质灾害频发,世界各国对地球生态环境问题越来越关心。大量研究表明,人类向大气中排放的温室气体所产生的温室效应导致了地表温度的升高,进而影响到人类的生存环境(Baret et al., 2009; Asner et al., 2009, 2008; Darvishzadeh et al., 2008; Gobron et al., 2006; 陈新芳等 2005; Goodenough et al., 2004)。植被占地球陆地表面的 70% 以上,是陆地生态系统的基本组成部分。植物通过光合作用积累有机物,为动物和人类提供最基本的物质和能量来源。植物将太阳能转化为化学能,吸收二氧化碳放出氧气,是生态系统能量交换与循环的先导因素。植被生态系统不仅为各种生物提供适宜的栖身场所,还具有改善地方气候、防止水土流失、减轻环境污染等作用。因此,观测植被时空动态的分布和变化,是分析和评估陆地生态系统存在和发展的基础,对研究气候变化、碳循环等重大环境问题具有深远的意义。

植被的生长与光合作用密切相关,光合作用是植物在可见光的照射下,经过光反应和碳反应,利用光合色素,将二氧化碳和水转化为有机物的生化过程,同时完成光能转变为化学能的能量转化过程。光合作用是一系列复杂的代谢反应的总和,是生物界赖以生存的基础,也是地球碳-氧循环的重要媒介,对于全球生态系统具有极其重要的意义。根据 Monteith 理论,植被进行光合作用固定有机物的过程可以描述为: $GPP = fAPAR \times PAR_{in} \times LUE$ 。其中: GPP 为植物总初级生产力,是光合作用的直接表述; PAR_{in} 为入射光合有效辐射,是指到达冠层的下行太阳辐射在 400~700 nm 范围内的入射总能量; fAPAR 是光合有效辐射比例,表示植被吸收的光合有效辐射在入射辐射总量中所占的比例; LUE 是光能利用率,表示植被将吸收的光合有效辐射转化为有机碳的能力。植被各种生化参数中,叶绿素是植被进行光合作用的主要色素,因此植被的叶绿素含量往往是植物营养胁迫、光合作用能力和发展衰老各阶段的良好指示剂。大量研究表明植被叶绿素含量(Chl)和 Monteith 理论中的两个重要生化参数(光合有效辐射比例和光能利用率)密切相关;叶面积指数是体现植被生长态势密度的相关参量,是表征植被的生长状态参数之一,也是进行植被群体和群落生长分析时的重要参数。LAI 与叶绿素含量以及 fAPAR 密切相关,由于 fAPAR 难以测量,许多光合模型中使用 LAI 代替 fAPAR(Wu et al., 2010)。

遥感技术以其大面积、快速、动态的优势可在不破坏植被结构的同时获得不同时间和空间尺度的植物冠层信息,与传统点尺度上耗时耗力的人工量测相比,遥感为获得植物冠层信息提供了便捷的手段(杨可明等, 2006; 陈新芳等, 2005; 王军邦等, 2004; Gitelson et al., 2003a; 张佳华等, 2003; Broge et al., 2002)。卫星遥感技术无需实地采样,在不破

坏植株的情况下,能够对实验区进行大范围的信息获取,且更新速度快,能及时有效地大面积估算植被参数,因此越来越广泛地应用于植被时空变化的监测评估。

随着航空、航天技术和传感器技术的快速发展,可提供从地面、机载到星载等不同尺度的海量遥感数据。空间分辨率从 0.5 m 到 1 km;陆地卫星时间分辨率也已提高到 1~3 天,地球同步静止卫星的时间分辨率可到 15 min 至半小时;光谱分辨率从 100 nm 提高到几纳米。随着遥感数据光谱分辨率的提高,高光谱遥感技术得到了迅速发展,各种类型的高光谱传感器层出不穷。各种地面测量的高光谱设备也陆续出现,通过测量地面的地物光谱来弥补航空和航天数据的可能畸变。各种主要的地面高光谱设备有 ASD、EPP、HyperScan 等。从航空高光谱成像光谱仪 AIS-1、AIS-2、AVIRIS,再到 MODIS、Hyperion、MightySat-II 卫星上 FTHSI 高光谱、PROBA 卫星 CHRIS 传感器、HJ 卫星 HSI 高光谱传感器,它们为大气、地学、植被、海洋等方面的研究和应用提供了大量的高光谱遥感数据。

与此同时,与遥感相关的一些大规模的地面实验也开展起来,建立了一些与陆地表面过程相关的观测网络。这些实验和观测网络建立的目的是为遥感模型的建立、验证,遥感传感器性能的检验提供依据和先验知识。如 GEWEX 实验用以观测大气、陆地表面和海洋表面的水循环和能量通量,并对此进行建模;FIFE 实验提供能从卫星上得到的陆地表面状态数据(如生物量、覆盖类型和温度)、陆地表面过程数据(如蒸发和光合作用);BROREAS 实验是研究森林生态系统的生物量动态过程以及它与全球能量、水、碳循环的关系;国内的表面实验有 1999 年 4 月的山东禹城遥感模拟实验和 2001 年 4 月的北京顺义大规模的卫星-飞机-地面同步对比实验。主要的测量数据包括:植物生态参数、土壤物理参数、气象数据、大气探空数据、地面多角度波谱观测、高光谱航空数据,地表通量数据等。大型的观测网络有 AERONET(aero robotic network),主要提供全球的气溶胶光学厚度产品及降水数据;FLUXNET 是一个微型气象塔的全球网络,该站点利用涡度自相关方法测量陆地生态系统和大气系统间的 CO_2 、水气和能量交换;BigFoot 站点其目标是为 MODIS 陆地产品(土地覆盖、LAI、fAPAR,NPP)提供真实性检验。

1.2.2 研究进展

遥感获取的是地表目标的辐射信号。图 1.1 描述了遥感的成像过程,太阳辐射信号通过大气达到地表,被地表目标反射后经过大气层进入传感器中,因此,遥感获取的信号包含了大气辐射信息、地表目标辐射信息等多种信息,而用户关心的是地表目标的各种参数如叶绿素、叶面积指数、植被类型等。遥感反演植被参数的本质是通过建立光谱信号与植被参数之间的关系模型,在此基础上,根据测量的光谱信号,采用各种算法推算植被的实时状态参数。在植被参数反演领域,高光谱遥感数据具有波段数量多、光谱信息丰富等特点,成为植被参数反演的主要数据源。

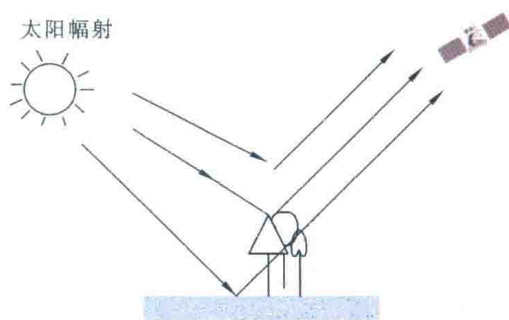


图 1.1 遥感技术成像过程

1. 高光谱传感器的发展

高光谱遥感技术在传感器方面的高速发展主要体现在两个方面:①高光谱遥感传感器获取光谱信息能力的不断提高;②高光谱遥感传感器搭载平台的拓展。获取光谱信息的能力包括传感器的光谱分辨率以及获取波段数量的能力。而搭载平台的拓展体现在地面、机载以及星载高光谱遥感传感器的出现以及可跨平台式的传感器的产生。

20 世纪 70 年代之前,具有高光谱分辨率的光谱仪已在天文、物理、化学等领域广泛使用。电子计算技术的出现将高分辨率光谱仪推入了现代遥感科研领域。1975 年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)首次使用了覆盖波段范围 400~2 500 nm 的便携式光谱仪对 Landsat-1(MSS)传感器的遥感影像数据进行影像解译,试图使用 MSS 影像进行矿物勘探。但是,由于 MSS 传感器的波段少(4 个波段),仅依靠各波段影像颜色的变化并不能清楚反映出地物特征,使得地物识别十分困难。因此,喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的图像处理实验室(Image Processing Laboratory, IPL)提出了在空中进行成像光谱测量的想法。随着电耦合组件的发明以及快速信号提取系统的发展,使得在高空移动平台搭载高分辨率光谱仪成为可能。1981 年, JPL 使用机载成像光谱仪 AIS-1 和 AIS-2 进行空中矿物勘探并取得成功。这两台光谱仪能采集覆盖 800~2 400 nm 波长范围、128 个波段的高光谱影像。但是波段分布设计的局限性使得该传感器没有得到广泛应用。1987 年,著名的机载摆扫式成像光谱仪 AVIRIS(airborne visible/infrared imaging spectrometer)试飞成功才真正拉开了高光谱遥感应用的序幕。AVIRIS 载有 4 个光谱测度仪,拥有 242 个光谱波段,覆盖整个大气窗口(380~2 500 nm)。由于辐射校正精确, AVIRIS 在其整个波段范围内具有极为出众的信噪比。服役 30 多年来, AVIRIS 一直是世界范围内表现最好的机载成像光谱仪,也因此成为其他仪器制造过程中效仿与竞争的对象。

AVIRIS 的诞生引起了世界各国对高光谱遥感技术的关注,并相继提出了各自的高光谱成像光谱仪的发展计划。1986 年,德国航天中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)宣布了建造 ROSIS(reflective optics imaging spectrometer)的计划。ROSIG 属于推扫式成像光谱仪,具有 128 个波段覆盖 450~850 nm 波长范围,于 1992 年投入运行,并不断升级使用至今。1989 年,加拿大 ITRES 公司开发出可见光-近红外光谱成像仪 CASI,具有 288 个波段覆盖 430~870 nm 波长范围。自 1996 年起,澳大利亚逐步推出了 HyMap 系列机载高光谱传感器。其具有 126 个光谱波段覆盖 450~2 500 nm 波长范围。1991 年,中国科学院上海技术物理研究所首先研制出 MAIS(modular airborne imaging spectrometer)。随后于 1994 年起,不断引进先进技术,先后制造了 OMIS(operational modular imaging spectrometer)系列以及 PHI(push-broom hyperspectral imaging system)系列等高光谱遥感传感器。

近年来,高光谱遥感传感器在成像技术和搭载平台上不断发展。在成像技术方面,通过瞬时视场角(instantaneous field of view, IFOV)以及波段带宽的减小,使其空间和光谱分辨率不断得到提高。例如,与 AVIRIS 传感器 10 nm 光谱分辨率相比较,我国自行生产的 PHI 以及 WHI 等传感器的光谱分辨率已小于 5 nm。在搭载平台方面,各国已逐步推动高光谱成像光谱仪向太空发展。美国于 2000 年成功发射了载有 Hyperion 高光谱成像

光谱仪的 EO-1 卫星,其空间分辨率为 30 m,在 400~2 500 nm 共有 220 个波段。欧洲于次年卫星成功发射,PROBA/CHRIS 传感器进入太空。我国于 2008 年 6 月成功发射了 2 颗搭载了多光谱可见光相机、高光谱成像仪以及红外相机的光学环境卫星遥感器 HJ-1 和 HJ-2。其中,高光谱成像仪覆盖 400~950 nm 的光谱范围,波段数为 115,平均光谱分辨率为 5 nm,地面分辨率 100 m,其各项指标接近或达到国际先进水平。此外,随着电子集成技术的发展,高光谱成像光谱仪,尤其是商用传感器,逐渐往小型化、跨平台化发展。如美国 RESONON 公司开发的 AIRBORNE 高光谱传感器即可搭载于普通飞机上,也可以搭载于小型无人机上。小型高光谱成像光谱仪的出现降低了高光谱测量成本,推动了高光谱遥感应用的普及并缩短了高光谱遥感技术的研发周期。

2. 高光谱遥感数据反演植被参数的基本原理

如图 1.2 所示,光线照射在植被叶片上,在经过植被叶片内各种色素的吸收作用,以及植被冠层中的散射作用后,形成了植被在 400~2 500 nm 波段内具有典型特征的光谱(图 1.3)。

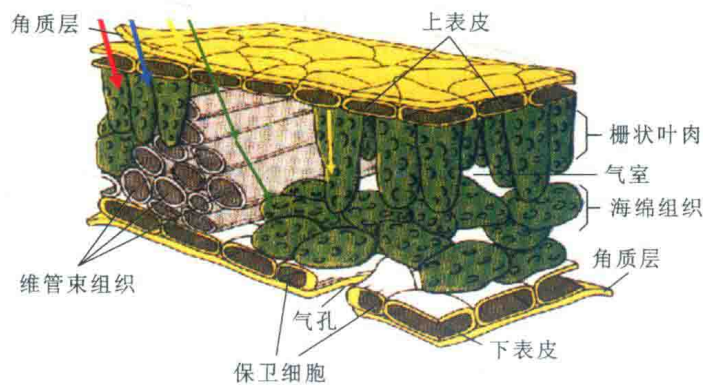


图 1.2 植被叶片结构

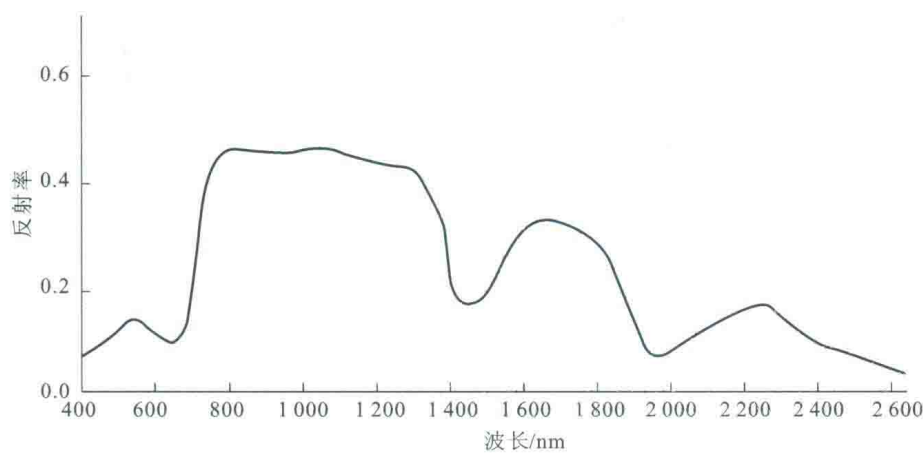


图 1.3 典型植被可见光到近红外的光谱特征

植被叶绿素在 400~500 nm、625~675 nm 处的强吸收特性导致了植被光谱在这两个波段范围内的低反射率,叶绿素在 525~600 nm 处的弱吸收特性导致了植被光谱在 550 nm

左右形成一个小的反射峰。因此,可见光近红外的反射光谱与植被的色素,特别是叶绿素有着密切的联系。此外,由于 700 nm 之后色素的吸收作用很弱,植被光谱在 700 nm 之后的反射光谱急剧上升,形成红边以及近红外平台。近红外平台处的反射率则与植被冠层的结构密切相关,植被冠层的不同导致光线在植被冠层中散射作用的不同,因此近红外平台处的反射光谱与叶面积指数密切相关。正是这种参数变化导致植被光谱的不同,使得我们能够根据地面实测或者遥感光谱来反演植被参数。

3. 基于高光谱数据的植被参数反演

1) 叶绿素含量、LAI 反演

植被叶绿素含量指的是单位面积叶片的叶绿素含量,主要包括叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量。植物叶片叶绿素含量与植被对光能利用有直接关系,准确估算叶绿素含量对研究森林的生态效益有着举足轻重的作用。LAI 的概念是由英国农业生态学家 Watson 最早提出,它的概念定义为单位土地面积上单面植物光合作用面积的总和 (Atzberger et al., 1995)。目前在遥感领域中定义的叶面积是指单位土地面积上所有叶子投影面积的总和,它的含义是通过感应器从树冠冠顶所能看到的最大叶面积值。LAI 作为陆地生态系统中一个非常重要的植被特征参量,能够量化植被冠层结构,同时也与许多植被的生物物理过程直接相关,在农业、林业、生态等领域广泛使用。传统的叶绿素含量与 LAI 获取采用地面实测法,具有一定的破坏性,也费时费力,在研究大的区域范围时存在明显的弊端。卫星遥感的发展为区域范围内叶绿素含量以及 LAI 的研究提供了一种解决方案。遥感数据具有高时间、空间分辨率,且覆盖范围广,所以利用遥感技术反演区域范围地表植被的叶绿素含量、LAI 成为一种主流技术。

在利用遥感数据反演植被叶绿素、LAI 方面,许多国家和组织都投入了大量人力物力,并专门成立项目组织实施数据观测、模型建立及推广成果应用。美国 NASA 于 1991 年成立 ACCP 计划 (Accelerated Canopy Chemistry Program), 该计划旨在为利用遥感数据提取生态系统的各种生化参数含量提供理论和经验上的基础。通过该计划实施不仅获取了大量生化数据和光谱数据,更推动了利用遥感提取生化参数的研究。随后,欧洲许多国家的组织和研究机构也都进行了大型实验,开展了类似研究。目前叶绿素反演方面的研究主要集中在利用地基、航空高光谱数据反演,但目前国内外还没有一个完整、系统的数据集。目前反演植被叶绿素中主要用到的高光谱数据主要包括地基的 ASD、EPP 光谱仪测量的非成像高光谱数据, HyperSCAN, HeadWall 等成像高光谱数据; 机载高光谱数据主要包括 OMIS-II, AVIRIS、CASI 等; 星载高光谱数据主要包括 HJ-1A/HSI, PROBA/CHRIS, EO-1/Hyperion 等。

总体来说,基于遥感数据反演 LAI 和叶绿素含量的方法主要有两种。①基于辐射传输理论的分析模型方法。该方法主要是利用辐射传输模型得到模拟的光谱反射率,通过优化算法与实测的光谱数据进行比较以估算植被参数。②基于光谱数据的经验/半经验方法通过分析植被在各波段的光学吸收物理特性,基于经验或半经验的分析模型,将反射光谱在不同波段的数据进行数学组合运算以增强植被光谱特性与植被参量关联,或者根

据智能算法建立光谱反射率与植被参数之间的关系,从而反演植被参数的含量。

物理模型方法通过分析植被的光谱特征和其结构、表面特征、生化组成、外界环境条件等因素的关系以建立植物光谱模型。当已知模型输入参数,就可以模拟植被光谱;当已知光谱特征后,就可通过一些最优化的数据算法反演植物的相关参数。这类模型主要分为辐射传输模型、几何光学模型、浑浊介质模型、计算机模型等。在植物叶片尺度上,典型的叶片光谱模型主要有 PROSPECT 模型和 LIBERTY 模型,其中 PROSPECT 模型针对阔叶叶片描述了植物叶片从 400~2 500 nm 的反射和透射光谱特性,LIBERTY 模型针对针叶描述叶片。在植被冠层参数反演中,用到的模型主要有 SAIL 模型,几何光学模型、蒙特卡罗光线追踪模型等。利用物理模型可以构建反演的目标函数,在构建出目标函数后,剩下的问题就是通过最优化算法求解目标函数,找到最优的参数值,由于目标函数的非线性且变量多等问题,因此对优化算法有较高的要求。目前,优化算法有基于梯度的优化算法如 Powell 算法,最速下降法、拟牛顿法等,基于神经网络、遗传算法、模拟退火等智能化算法等。在运用物理模型方法反演叶绿素方面,Maire 等(2004)在叶片尺度上运用 PROSPECT 模型模拟了大量叶片光谱,对自 1973 年以来提出的几乎所有光谱指数进行了验证,其中 mSR 指数的精度最高,其交叉验证的 $RMSE=2.1 \mu g/cm^2$ 。Feret 等(2011)利用在世界各地收集的大量不同叶片数据,证明了 PROSPECT 辐射传输模型利用红边波段(680~740 nm)和近红外波段,能够准确地对叶片叶绿素含量进行估算。Renzullo 等(2006)将通过 PROSPECT 模型反演得到的叶片叶绿素含量与化学方法测得的准确叶绿素含量进行比较,发现二者之间的决定系数达 0.696, $RMSE=10.63 \mu g/cm^2$ 。通过耦合 PROSPECT 与 SAIL 模型,Clevers 等(2012)用 PROSAIL 模型模拟出的冠层光谱数据与实测光谱数据一起来反演叶绿素含量,结果表明 Cl_{red-edge} 指数与冠层叶绿素含量线性相关且决定系数达到了 0.94。物理模型具有一定的物理意义,在参数足够的情况下反演精度较高,但模型所需参数往往难以获取,反演时易出现病态反演的问题。

经验/半经验模型通过混合光谱分析技术,多元逐步回归分析等方法,对一系列的观测数据做统计描述或者进行相关性分析,构建植被参数与光谱指数之间的回归方程,建立光谱反射率与叶片中各种色素含量的关系,反演叶绿素含量。光谱指数是指某些特定波段反射率的组合,他们与叶片色素或者光合作用以及植被的胁迫状态有密切的关系。为了反演植被叶片/冠层的叶绿素含量,很多研究者都重视在一定的理论基础上建立和应用一些高效的光谱指数。Sims 等(2002)研究了各种光谱指数对于不同植被与不同叶片结构的有效性与适应性。对于无损的估算叶片叶绿素含量,Richardson 等(2002)的研究表明,绿波段与红边波段(680~740 nm)对叶片的叶绿素变化比较敏感。Ciganda(2009)、Gitelson(2006, 2003a)等的研究表明,选用红边波段(695~735 nm)、绿波段(520~570 nm)和近红外波段(750~800 nm)组成 CI_{green} 与 $C_{irededge}$ 指数来反演叶片叶绿素含量,当叶片叶绿素含量在 10~805 mg/m²,叶绿素预测的均方根误差 < 38 mg/m²,变异系数(coefficient of variation, COV)小于 10.3%。Zarco-Tejada 等(2005)在冠层尺度上运用 NDVI、TCARI/OSAVI、MCARI 等植被指数估算叶绿素含量,结果表明 TCARI/OSAVI 指数的估算精度为 $RMSE=11.5 \mu g/cm^2$, $R^2=0.67$ 。Delegido 等(2010)采用 NAOC 指数,运用 Proba/CHRIS 数据估算一些农作物的叶绿素含量,预测结果的 $RMSE=4.2 \mu g/cm^2$,

$R^2=0.91$ 。Gitelson 等(2005)对大豆与玉米的冠层叶绿素含量进行了估算,结果利用 $CI_{rededge}$ 指数进行预测得到的反演精度为 $RMSE<0.32\text{ g/m}^2$, $R^2=0.95$ 。经验/半经验模型通常具有参数少、简便、适用性强等优势,但是,这类模型通常有明显的地域局限性,特别是不同季节、不同区域的相关系数差别通常很大,模型的可移植性较差。

2) 总初级生产力反演

GPP 是指在单位时间和单位面积上,绿色植物通过光合作用所固定的有机碳总量。GPP 和森林生态系统呼吸的季节性差异决定了二氧化碳在大气和森林生态系统之间的生态系统净交换,对于理解全球碳循环气候变化研究具有重要意义(Wu et al., 2010; Xiao et al., 2004)。因此,空间分布 GPP 的准确定量研究是监测植被状况和生态系统碳交换必要的参数(Gitelson et al., 2012; Wu et al., 2010)。植被生产力是太阳辐射被植被冠层截获的结果,因此,卫星遥感数据,包括反射和地球在不同波长发出的辐射,对植被的 GPP 估算具有重要的作用(Peng et al., 2011a)。

目前国内外已经提出了多种估算 GPP 的模型,其中大部分模型都是在 Monteith (1977, 1972)提出的模型基础上得来的。如式(1.1),Monteith 将 GPP 表示为光合有效辐射吸收率(fAPAR),入射光合有效辐射(PAR)和光能利用率(LUE)三者的乘积。

$$GPP=LUE \times fAPAR \times PAR \quad (1.1)$$

自此基础上,国内外学者提出了许多基于此模型的 GPP 估算模型。由于 LUE 和 fAPAR 难以获取,因此,利用此模型来进行 GPP 估算最关键的一点是找到与 LUE 以及 fAPAR 相关并且容易获取的参量。相关研究有 Gamon 等(1992)用光化学反射指数(PRI)作为 LUE 的代替来进行 GPP 的估算等。大量研究表明,某些简单并且易于获取的指标,尤其是植被指数可以作为 LUE 和 FAPAR 代替量(Wu et al., 2009; Yuan et al., 2007; Gitelson et al., 2005; Running et al., 2004; Xiao et al., 2004)。

另一种估计 GPP 的方法是基于过程的模型(Xiao et al., 2004)。然而,这些模型需要大量的辅助数据才能进行准确的估算(Peng et al., 2013)。因此,如何将模型根据遥感数据进行简化是值得研究的内容,目前国内外学者也提出了多种完全基于遥感数据的 GPP 估算模型。Sims 等(2008)提出了一个基于 MODIS EVI 和 LST 产品的 GPP 估算模型——温度与绿度模型。Gitelson 等(2006)提出了一个基于叶绿素相关的植被指数和 PAR 的模型。基于此模型,Gitelson 等(2011)提出了完全基于遥感数据的 $PAR_{potential}$ 模型。

总体来看,目前估计 GPP 的研究多在冠层级别,在叶片级别分析植被碳汇能力的比较少。因此,本书以小麦和油菜为观测对象,对叶片的净光合速率和初级生产力 GPP 进行估计,并探索性地进行分析 and 讨论。

4. 存在的主要局限性

基于植被指数的经验/半经验模型的方法通过直接分析传感器获取的观测数据,从遥感光学机理上理解植被光谱随植被参数的变化规律,以构建合适的植被指数,基于经验或半经验的模型通过统计分析来反演植被参数。植被指数是对地表植被状况的简单、有效和经验的度量,具有空间覆盖范围广、时间序列长、数据具有一致可比性等优点。这种方法几乎完全依赖遥感数据,不需要过多的地面辅助测量数据,算法简单快速,特别适合于