



定量遥感

理念与算法

梁顺林 李小文 王锦地 等 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助

定量遥感：理念与算法

梁顺林 李小文 王锦地 等 著

科学出版社

内 容 简 介

本书论述从遥感观测数据提取地表特征参量信息的定量遥感理念和算法技术,综合介绍近年来定量遥感研究的主要成果和最新进展。本书在绪论中通过概述遥感系统构成,综述全书内容、提示各章之间的联系,第一编介绍遥感辐射和几何信息的定量处理技术和重构高质量、时空连续遥感数据的方法,第二编至第四编分别针对地表辐射收支参量、生物物理和生物化学参数和水循环参量,重点讲解利用可见光、红外、微波波段和雷达遥感观测数据提取近 20 种地表参量的原理与方法,第五编主要介绍高级数据产品的集成估算方法、遥感数据产品生成系统与应用示例。全书包括了约 500 张图表、提供了近 1700 篇参考文献。

本书可以作为地理信息科学相关专业的高年级本科生和研究生教材,其中第二编到第五编的内容相对独立,每一编均可以单独用于教学。本书也可以作为一部参考书,服务于对遥感数据使用和应用有兴趣的读者。本书的最佳读者是已经修过有关遥感概论相关课程的人,对于只有少量遥感知识的读者来说,阅读本书也是有帮助的。

图书在版编目(CIP)数据

定量遥感:理念与算法/梁顺林,李小文,王锦地等著. —北京:科学出版社,2013.5
ISBN 978-7-03-035700-7

I. ①定… II. ①梁… ②李… ③王… III. ①遥感技术 IV. ①TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 236416 号

责任编辑:韩 鹏 陈婷婷/责任校对:张凤琴

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 5 月第一次印刷 印张:46 1/4 插页:16

字数:1 063 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

2010年夏,由梁顺林教授和李小文教授主持,在北京师范大学召开了遥感定量反演算法研讨会。我在会上讲了地理学和遥感科学在全球化进程中的作用。在21世纪,世界发展呈现出三个新的特点,即知识经济不断发展、全球化进程不断推进、可持续发展理念深入人心。地球科学的研究对象是人地关系,在全球化进程与可持续发展研究方面将大有可为。为此,中国地学研究应当树立全球视野,将研究视野扩展到整个世界,科学家应当更加关注全球性问题,更加关注地学与其他学科的交叉渗透,更加重视地学的定量化方法。

遥感是一种重要的对地观测手段,卫星传感器可以持续观察全球地表。随着遥感科学研究的不断深入,基于电磁波辐射传输机理的遥感模型,利用遥感数据定量提取陆地表面特征参量时空变化信息的研究,已成为遥感科学的一个重要发展方向。定量遥感方法生成的数据产品成为全球变化和许多应用领域研究的迫切需求,也是国内外研究的热点和难点。我国遥感科学家,特别是青年学者已充分认识到这一点,对遥感定量化研究的关注日益增强,因而对定量遥感基本原理和定量产品算法的求知欲望也就更加迫切。

在定量遥感的研究领域,李小文院士和梁顺林教授是长期的探索者,是取得举世瞩目研究成果的带头人,还是很多年轻学者信赖的导师和朋友。满足读者、特别是青年学生认知定量遥感的需要,也是他们的美好愿望。

针对广大遥感科研工作者和研究生的需求,在遥感定量反演算法研讨会的基础上,梁顺林教授和李小文院士邀请长期从事定量遥感研究的学者,用了近两年的时间,精心编写了该新书。书中介绍了定量遥感系统、遥感模型和近20种陆表特征参量的遥感定量反演算法及其现行的全球数据产品,总结了这方面研究的最新成果,对帮助读者理解定量遥感原理、地学相关学科研究人员的相互借鉴与交流,推动定量遥感成果的应用,都有重要参考价值。

希望该书能够对读者有帮助、对遥感的定量化研究有促进、对21世纪地球科学的发展有所贡献。

李 小 文

2012年1月

前言

在过去 20 年里,遥感技术的进步极大地提高了遥感数据产品的科学应用潜力。为了更好地满足社会需求,改进在全球到区域不同尺度上的模型预测能力,辅助各类决策支持系统的决策制定,大量卫星数据需要进一步转化为高级产品。通过数据中心发布更多的高级产品而非简单的初级卫星影像已经成为一种总体趋势。

越来越多不同学科领域的研究人员都在使用遥感数据,而用以处理和分析遥感数据的数学和物理方法变得日益复杂。遥感数据信息提取方法都分散在各种文献期刊中。因此,迫切需要一部教科书或者参考书系统论述这些方法。这样的书应该既是高度定量化的、技术性强的,同时又能让高年级本科生或者刚入学研究生容易理解。

为了满足这个需求,我们邀请了一批活跃在定量遥感前沿的科研工作者,从他们各自的研究专长出发,合作撰写了本书的各个章节。尽管有许多作者参与本书的撰写,但是本书的内容是经过精心设计和整合的。编辑和作者投入了大量的努力以保证本书论述的一致性和完整性。

除了第 1 章,本书包括五编:①数据处理方法和技术;②地表辐射收支参量估算;③生物物理和生物化学参数估算;④水循环参量估算;⑤高级遥感数据产品生产和应用示例。各章的题目和作者列表如下。

章序号	题目	作者
1	遥感系统综述	梁顺林,王锦地,江波
第一编 数据处理方法和技术		
2	几何处理与定位技术	袁修孝,季顺平,曹金山,余翔
3	数据合成、平滑和填补	肖志强
4	遥感数据融合技术	张继贤,杨景辉
5	光学影像的大气校正	赵祥,张鑫,梁顺林
第二编 地表辐射收支参量估算		
6	太阳辐射	张晓通,梁顺林
7	宽波段反照率	刘强,闻建光,瞿瑛、何涛,张晓通
8	地表温度和热红外发射率	程洁,任华忠
9	地表长波辐射收支	王文珩
第三编 生物物理和生物化学参数估算		
10	冠层生化特性	牛铮,颜春燕
11	叶面积指数	方红亮,肖志强,屈永华,宋金玲
12	吸收光合有效辐射比例	范闻捷,陶欣

续表

章序号	题目	作者
13	植被覆盖度	阎广建,穆西晗,刘耀开
14	植被高度与垂直结构	孙国清,庞勇,倪文俭,黄文丽,李增元
15	地上生物量	孙国清,孙皖肖,梁顺林,张志玉,陈尔学
16	陆地生态系统植被生产力	袁文平,陈卓奇
第四编 水循环参量估算		
17	降水	刘元波,傅巧妮,赵晓松,豆翠翠
18	陆面蒸散	王开存,Dickinson,马倩
19	土壤水分	梁顺林,江波,何涛,朱秀芳
20	雪水当量	蒋玲梅,杜今阳,张立新,施建成,潘金梅,熊川
21	蓄水量	刘元波,宋平
第五编 高级遥感数据产品生产和应用示例		
22	高级陆地产品融合方法	汪冬冬
23	遥感高级产品生产和数据管理系统	刘素红,赵祥
24	土地覆盖和土地利用变化	朱秀芳,梁顺林,江波

本书的第1章系统地综述了本书的内容,简要介绍了遥感系统的重要组成部分,即遥感平台、传感器、模型算法、信息提取技术和遥感数据应用。

本书的第一编包括有关数据处理的四章。其中,第2章介绍了处理遥感数据几何特征属性的各种方法和技术,包括:系统误差校正、几何校正与配准、数字高程模型和数字正射影像的制作。第3章介绍了重构高质量、时空连续的遥感影像方法。云和气溶胶可以部分地或者全部地阻碍卫星遥感获取地表信息。遥感观测时间分辨率越高、遥感数据越容易受到云和气溶胶的影响。本章介绍了两组生产高质量遥感数据的处理方法。第一组方法旨在将高时间分辨率(如天)数据整合成低时间分辨率(如周和月)数据;第二组方法讨论在不改变时间分辨率情况下,利用数据平滑和数据间隙填充技术去减少云和气溶胶的影响。第4章介绍了基于像元的不同时空分辨率和不同光谱特征(短波、热红外和微波)的多源遥感数据融合的基本原理和技术方法。本章主要涉及的是遥感数据初级产品的融合方法,有关遥感数据高级产品的融合方法将在第22章讨论。第5章介绍了光学遥感影像的气溶胶和水汽校正方法。有关热红外遥感数据和微波遥感数据的大气校正方法将分别在第8章和本书的第四编讨论。

本书的第二编主要介绍了地表辐射收支参量的估算。全波段净辐射 R_n ,通常被用来衡量地表能量的收支状况,它是短波净辐射和长波净辐射之和:

$$R_n = S_n + L_n = (S\downarrow - S\uparrow) + (L\downarrow - L\uparrow) = (1 - \alpha)S\downarrow + (L\downarrow - L\uparrow)$$

其中, $S\downarrow$ 为下行短波辐射; $S\uparrow$ 为上行短波辐射; α 为地表短波反照率; $L\downarrow$ 为下行长波辐射; $L\uparrow$ 为上行长波辐射。有关下行短波辐射和表面短波反照率的内容将分别在本书的

第 6 章和第 7 章里面讨论。长波净辐射可由下式计算:

$$L_n = \epsilon L \downarrow - \epsilon \sigma T_s^4$$

其中, σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; ϵ 为地表热红外发射率; T_s 为地表表层温度。有关地表温度和热红外发射率的估算方法将会在本书的第 8 章介绍, 而有关下行长波辐射和长波净辐射的估算会在本书的第 9 章介绍。

本书的第三编主要介绍植被冠层生物物理和生物化学参数的估算。其中, 第 10 章介绍了各种估算植被生物化学变量的方法, 如叶绿素、水分、蛋白质、木质素和纤维素。第 11~16 章介绍了有关生物物理变量的估算方法, 包括: 叶面积指数(第 11 章)、吸收光合有效辐射比例(第 12 章)、植被覆盖度(第 13 章)、植被高度与垂直结构(第 14 章)、地上生物量(第 15 章)、总初级生产力和净初级生产力(第 16 章)。这一部分还介绍了各种反演方法, 包括最优化方法(11.3.2 节)、神经网络(11.3.3 节, 13.3.3 节和 15.3.4 节)、遗传算法(11.3.4 节)、贝叶斯网络(11.3.5 节)、回归树(13.3.3 节)、数据同化方法(11.4 节)、查找表方法(11.3.6 节)。除了光学遥感影像外, 本编还涉及其他多种遥感数据影像, 如合成孔径雷达(SAR)、机载激光雷达(LIDAR)和星载极化 SAR 数据。

本书的第四编介绍了水平衡组分的估算。总的水平衡方程可以表达为下式:

$$P = Q + E + \Delta S$$

其中, P 为降水量; Q 为径流量; E 为蒸散量; ΔS 为蓄水量变化量。径流量目前很难通过遥感数据来估算, 而有关利用遥感数据估算降水量和蒸散量的方法分别在本书的第 17 章和第 18 章介绍。与蓄水量变化量相关的土壤水分、雪水当量和地表蓄水量的估算方法分别在第 19、20 章和第 21 章中介绍。其中第 19 章主要针对的是光学、热红外和微波遥感数据, 第 21 章简单介绍了重力恢复和气候试验(GRACE)中的地面重力数据。

本书的第五编介绍遥感数据高级产品的生产、集成和应用。其中, 第 22 章介绍了利用不同遥感数据源或者不同反演算法估算同一个参数(如叶面积指数)的方法。其中各种集成遥感数据低级产品的融合方法已经在第 4 章介绍过了。本部分的第 23 章将介绍从遥感数据低级产品加工成高级产品的常用方法, 以及有效管理海量遥感数据的数据管理系统。第 24 章展示了如何利用遥感数据产品研究土地覆盖、土地利用变化, 特别是如何利用遥感数据产品绘制主要土地利用类型图(如城市、森林和农田)、监测土地覆盖、土地利用变化以及评估土地覆盖、土地利用变化对环境的影响。

本书的一个重要特点是注重讲解如何利用遥感观测去提取地表信息。有关各章均遵循相同的写作框架: 从前沿、基本概念和原理介绍、基于大量参考文献的实用算法综述、代表性算法和案例研究的细致论述、当前遥感产品应用, 相关变量的时空变化分析, 到对未来研究方向的展望。本书包括了约 500 张图表和近 1700 篇参考文献。

本书可以作为对地观测相关专业的高年级本科生和研究生的教材。整本书可能对一个学期的教学量来说有些过长, 但是本书的第二编到第五编都是相对独立的, 其中每个编都可以单独用于教学。

本书也可以作为一部参考书, 服务于任何对遥感数据使用和应用有兴趣的读者。本书最适合已经修过遥感概论相关课程的读者, 但对于那些没有或者只有少量遥感知识的读者来说, 阅读本书也是有帮助的。

致谢

本书的最终完成离不开许多人的大力合作。首先,我们要感谢所有作者的努力,以及几次耐心地修改各个章节的内容。我们还要感谢来自 Elsevier 的高级组稿编辑 John Fedor博士和高级编辑项目经理 Katy Morrissey 女士的鼓励和大力支持,来自华盛顿大学的 Alan Gillespie 教授对本书总体设计的建议和意见,感谢科学出版社编辑韩鹏对本书写作出版的关注与支持,以及很多其他帮助编辑本书的人们,包括马莉娅、宋金玲、张玉珍和周红敏。

本书受国家科学技术部支持的国家高技术研究发展计划(简称“863”计划,项目编号 2009AA122100)以及国家重点基础研究发展计划(简称“973”计划,项目编号 2007CB714400)的资助。参与本书编写的作者也受很多其他项目的资助。

感谢“国家科学技术学术著作出版基金”资助本书的出版。

最后,我们还要感谢所有同事、朋友特别是家人在精神上给予的支持。

梁顺林 李小文 王锦地

2012 年 4 月

目 录

序

前言

第 1 章 遥感系统综述	1
1.1 引言	1
1.2 遥感平台与传感器系统	2
1.2.1 地球静止卫星	2
1.2.2 极地轨道卫星	4
1.2.3 美国的业务运行卫星计划	5
1.2.4 遥感传感器	6
1.2.5 遥感数据特征	7
1.3 数据传输与地面接收系统	11
1.4 数据处理系统	11
1.4.1 辐射标定	12
1.4.2 几何处理	12
1.4.3 图像质量增强	14
1.4.4 大气校正	14
1.4.5 影像融合与产品集成	16
1.5 地表参量制图	17
1.6 地表参量的定量估算	18
1.6.1 前向辐射模型	18
1.6.2 反演方法	21
1.7 高级数据产品的生产、归档和分发	22
1.8 产品验证	23
1.9 遥感应用	24
1.10 本章小结	25
参考文献	25

第一编 数据处理方法和技术

第 2 章 几何处理与定位技术	29
2.1 概述	29
2.2 卫星遥感影像几何检校	31
2.2.1 卫星遥感成像的系统误差源	31

2.2.2 卫星遥感影像试验场几何检校	37
2.3 单景遥感影像几何纠正	38
2.3.1 影像几何纠正模型	38
2.3.2 控制点布设	45
2.3.3 影像重采样	45
2.3.4 精度评定	47
2.4 遥感影像的几何配准	48
2.4.1 影像配准点的自动提取	48
2.4.2 影像配准的数学模型	53
2.5 数字地面模型的建立	54
2.5.1 DEM 概念和结构模型	54
2.5.2 DEM 数据预处理	55
2.5.3 DEM 数据内插	57
2.6 正射影像的制作	58
2.6.1 框幅式中心投影影像的数字微分纠正	58
2.6.2 线阵列推扫遥感影像的数字微分纠正	60
2.6.3 正射影像镶嵌	61
2.7 本章小结	65
参考文献	65
第3章 数据合成、平滑和填补	68
3.1 多时相数据合成	68
3.1.1 植被指数的最大值合成法	68
3.1.2 波段反射率的最小值合成方法	69
3.1.3 MODIS 植被指数合成法	69
3.1.4 地表温度最大值合成法	71
3.1.5 多种准则组合合成法	71
3.2 时间序列数据的平滑与填补	72
3.2.1 曲线拟合方法	73
3.2.2 基于生态分类的时间插值技术	75
3.2.3 时空滤波算法	76
3.2.4 基于小波变换的平滑与填补算法	78
3.3 本章小结	79
参考文献	79
第4章 遥感数据融合技术	82
4.1 遥感数据融合概述	82
4.1.1 多源数据融合模型与层次	82
4.1.2 融合评价标准	84
4.2 遥感像素级数据融合方法	84
4.2.1 基于变量替换技术融合方法	86

4.2.2 基于调制融合方法	87
4.2.3 基于多尺度分析的融合方法	89
4.3 遥感像素级数据融合统一模型	92
4.4 异构数据源融合技术	94
4.4.1 SAR 影像与光学影像融合	94
4.4.2 LiDAR 数据与光学影像融合	95
4.4.3 GIS 数据与光学影像融合	95
4.5 本章小结	96
参考文献	97
第5章 光学影像的大气校正	100
5.1 大气效应概述	100
5.1.1 大气在定量遥感模型中的表征	100
5.1.2 大气的组成	100
5.1.3 电磁波与大气的相互作用	101
5.1.4 大气校正的主要内容	102
5.2 消除气溶胶参数影响的大气校正	103
5.2.1 基于光谱特征	103
5.2.2 基于时间序列影像	105
5.2.3 基于角度信息	106
5.2.4 基于空间特征匹配	108
5.2.5 基于偏振信息	108
5.3 消除水汽影响的校正算法	109
5.4 其他大气成分的影响	110
5.5 常用的大气校正模型和软件	110
5.5.1 MODTRAN 模型	111
5.5.2 6S 模型	111
5.5.3 FLAASH	111
5.5.4 ACTOR	112
5.5.5 ACORN	112
5.6 本章小结	112
参考文献	113

第二编 地表辐射收支参量估算

第6章 太阳辐射	117
6.1 基本概念	117
6.1.1 太阳辐射光谱	117
6.1.2 太阳常数	117
6.1.3 短波辐射和光合有效辐射	118

6.1.4	太阳辐射的削弱	119
6.1.5	地表辐射收支平衡	119
6.2	地表辐射观测网	120
6.2.1	辐射观测仪器	120
6.2.2	全球能量平衡数据库(GEBA)	121
6.2.3	基准地表辐射网(BSRN)	121
6.2.4	地表辐射能量收支观测网(SURFRAD)	121
6.2.5	陆地生态系统通量观测网(FLUXNET)	123
6.3	卫星遥感及 GCM 模型估算地表辐射	125
6.3.1	统计回归方法	126
6.3.2	物理模型参数化方法	128
6.3.3	查找表方法	140
6.3.4	GCMs 模型辐射产品	148
6.3.5	全球辐射产品比较	150
6.4	总结与讨论	152
6.4.1	太阳辐射的时空变化	152
6.4.2	地形和高程对于辐射估算的影响	155
6.4.3	小结	156
	参考文献	156
第 7 章	宽波段反照率	161
7.1	地表二向反射模型	161
7.1.1	地表二向反射与宽波段反照率的定义和关系	161
7.1.2	地表二向反射观测数据	166
7.1.3	地表二向反射模型	172
7.2	基于二向反射模型反演的反照率估算方法	177
7.2.1	二向反射模型反演及窄波段反照率计算	177
7.2.2	窄波段反照率向宽波段反照率转换	179
7.3	地表反照率直接估算方法	181
7.3.1	直接估算法概述	181
7.3.2	基于地表二向反射率数据的反照率估算方法	182
7.3.3	基于大气层顶反射率的方法	187
7.4	地表-大气参数联合优化方法	190
7.4.1	基于暗目标大气校正的地表反照率反演方法	190
7.4.2	地表反照率和气溶胶光学厚度的联合优化方法	192
7.5	全球地表反照率产品和验证	194
7.5.1	全球地表反照率卫星遥感产品	194
7.5.2	反照率遥感反演产品验证中的尺度问题	197
7.6	全球陆面反照率时空分析	198
7.6.1	区域平均和月平均反照率的计算方法	199

7.6.2 全球反照率的时间变化	199
7.6.3 不同纬向带的地表反照率	204
7.6.4 不同地表类型的地表反照率	205
7.7 宽波段反照率研究中的问题和展望	207
参考文献	208
第8章 地表温度和热红外发射率	214
8.1 地表温度和发射率的定义	214
8.1.1 地表温度的定义	214
8.1.2 地表发射率的定义	216
8.2 地表平均温度估计方法	217
8.2.1 单波段热红外算法	219
8.2.2 分裂窗热红外算法	220
8.2.3 多波段热红外方法	222
8.2.4 微波方法	224
8.3 地表发射率估计方法	225
8.3.1 发射率测量方法	225
8.3.2 基于分类的方法	226
8.3.3 基于 NDVI 的方法	226
8.3.4 多波段方法	227
8.3.5 高光谱数据反演算法	230
8.3.6 地面长波宽波段发射率计算	239
8.4 温度与发射率产品	241
8.5 本章小结	242
参考文献	243
第9章 地表长波辐射收支	248
9.1 地表下行长波辐射	248
9.1.1 背景	248
9.1.2 基于大气廓线的方法	249
9.1.3 混合模型方法	250
9.1.4 基于气象数据的方法	257
9.2 地表上行长波辐射	261
9.2.1 温度-发射率方法	261
9.2.2 混合模型	261
9.3 地表净长波辐射	265
9.4 地表辐射观测网络和现有的遥感地表长波辐射产品	265
9.4.1 地表长波辐射观测网络	266
9.4.2 现有地表长波辐射收支产品	267
9.5 本章小结	269
参考文献	269

第三编 生物物理和生物化学参数估算

第 10 章 冠层生化特性	275
10.1 遥感提取植被生化组分的原理与方法	275
10.1.1 植被生化组分遥感	275
10.1.2 遥感提取理论与方法简介	281
10.2 经验和半经验方法提取	285
10.2.1 叶片水平生化组分含量提取	285
10.2.2 叶绿素含量的半经验提取方法	294
10.3 理论模型反演	299
10.3.1 反演方法	299
10.3.2 叶片水平生化组分反演	301
10.3.3 冠层水平生化组分反演	307
10.3.4 光谱分辨率对反演生化组分含量的影响及波段选择	309
10.4 结论与讨论	312
参考文献	313
第 11 章 叶面积指数	317
11.1 LAI 的定义与实测方法	317
11.1.1 LAI 的直接测量法	318
11.1.2 LAI 的间接估算法	318
11.2 统计方法	321
11.2.1 植被指数	321
11.2.2 基于植被指数的经验方法	322
11.3 冠层模型反演方法	322
11.3.1 辐射传输模型	322
11.3.2 优化技术	326
11.3.3 神经网络	328
11.3.4 遗传算法	331
11.3.5 贝叶斯网络	333
11.3.6 查找表方法	336
11.4 数据同化方法	338
11.4.1 四维变分数据同化方法	338
11.4.2 顺序同化算法方法	340
11.5 全球与区域 LAI 产品	342
11.5.1 MODIS LAI 产品	342
11.5.2 CYCLOPES LAI 产品	343
11.5.3 GLOBCARBON LAI 产品	343
11.5.4 ECOCLIMAP LAI 产品	343

11.5.5 GLASS LAI 产品	344
11.5.6 CCRS LAI 产品	344
11.6 LAI 的时空变化	344
11.7 本章小结	346
参考文献	346
第 12 章 吸收光合有效辐射比例	349
12.1 FAPAR 及相关概念	349
12.2 FAPAR 野外测量方法	351
12.3 冠层 FAPAR 的 Monte Carlo 模拟	352
12.3.1 MC 模拟原理	352
12.3.2 数据准备	354
12.3.3 MC 模拟结果分析	354
12.4 FAPAR 经验反演方法	358
12.4.1 基于 LAI 的经验算法	359
12.4.2 基于植被指数的经验算法	359
12.5 已有遥感 FAPAR 产品模型反演算法简介	361
12.5.1 MODIS FAPAR 反演算法	362
12.5.2 JRC_FPAR 反演方法	364
12.6 基于混合植被光谱模型的 FAPAR 反演方法	365
12.6.1 出发方程	366
12.6.2 与蒙特卡罗模拟结果对比分析	367
12.6.3 地面实验验证	369
12.6.4 FAPAR 反演算法	370
12.7 案例研究	372
12.7.1 研究区与数据	372
12.7.2 基于多角度高光谱数据的 FAPAR 反演	372
12.7.3 基于多波段数据 FAPAR 遥感反演	375
12.8 本章小结	377
参考文献	378
第 13 章 植被覆盖度	382
13.1 简介	382
13.2 植被覆盖度地面测量	383
13.2.1 目估法	383
13.2.2 采样法	383
13.2.3 仪器测量法	384
13.2.4 地面实测样例和讨论	386
13.3 植被覆盖度的遥感估算	389
13.3.1 回归模型法	389
13.3.2 线性混合像元分解模型法	392

13.3.3 计算机学习法	395
13.4 现有植被覆盖度遥感产品	398
13.5 植被覆盖度估算面临的挑战和未来发展前景	399
参考文献	400
第 14 章 植被高度与垂直结构	404
14.1 植被高度与垂直结构的地面测量	404
14.1.1 单木高度的测量	404
14.1.2 林木高与胸径的关系	406
14.1.3 样地尺度平均树高的计算	407
14.2 基于小光斑 Lidar 的植被高度与垂直结构反演	408
14.2.1 小光斑 Lidar 林业遥感基本原理及森林参数反演	408
14.2.2 基于单木分割及参数估计	411
14.2.3 样地尺度参数估计	412
14.3 基于大光斑 Lidar 的植被高度与垂直结构反演	415
14.3.1 大光斑 Lidar 林业遥感基本原理及林业应用现状	415
14.3.2 大光斑 Lidar 森林参数反演方法	416
14.4 基于 SAR 数据的植被高度与垂直结构反演	417
14.4.1 雷达干涉测量原理	417
14.4.2 基于多频率干涉数据的植被高度提取	418
14.4.3 基于极化干涉技术的植被垂直结构提取	419
14.5 展望	428
参考文献	429
第 15 章 地上生物量	433
15.1 生物量	433
15.2 异速生长方法	434
15.3 光学遥感方法	437
15.3.1 植被指数方法	438
15.3.2 多元回归分析方法	439
15.3.3 最邻近方法	441
15.3.4 人工神经网络	443
15.4 激光雷达和雷达数据	445
15.4.1 激光雷达数据	445
15.4.2 雷达数据	448
15.5 基于多源数据的生物量反演	453
15.5.1 回归模型	454
15.5.2 非参数化算法	455
15.6 未来发展方向	457
参考文献	458
第 16 章 陆地生态系统植被生产力	466

16.1	植被生产力的概念	466
16.2	植被生产力的地面观测	467
16.2.1	生物学法	467
16.2.2	涡度相关通量方法	469
16.3	基于植被指数的统计模型	470
16.4	基于遥感资料的光能利用率模型	472
16.4.1	光能利用率模型原理	472
16.4.2	主要的光能利用率模型	472
16.4.3	不同光能利用率模型的差异	479
16.4.4	光能利用率模型的不足	480
16.5	动态全球植被模型	484
16.5.1	动态全球植被模型简介	485
16.5.2	遥感数据在动态全球植被模型中的作用	486
16.6	全球植被生产力的时空分布格局	488
16.7	本章小结	490
	参考文献	490

第四编 水循环参量估算

第 17 章	降水	497
17.1	地表降雨测量技术	497
17.1.1	雨量计和测量网络	497
17.1.2	地基雷达	498
17.2	星载传感器降水反演算法	500
17.2.1	VIS/IR 降水反演算法	501
17.2.2	PMW 降水反演算法	501
17.2.3	雷达降水反演算法	503
17.2.4	多传感器联合反演降水算法	503
17.3	全球和区域数据集	505
17.3.1	TRMM	505
17.3.2	GSMaP	510
17.3.3	GPCP	512
17.4	全球降水的时空变化	514
17.5	展望	517
	参考文献	517
第 18 章	陆面蒸散	520
18.1	引言	520
18.2	λE 基础理论	524
18.2.1	莫宁-奥布霍夫相似理论	524