

定量遥感应用系列

CADYUAN SHENGTAI
HUANJING YAOSU
YAOGAN DINGLIANG
FANYAN JI YINGYONG
XITONG

草原生态环境要素 遥感定量反演及应用系统

何彬彬 行敏锋 全兴文 著



科学出版社

定量遥感应用系列

草原生态环境要素遥感定量 反演及应用系统

何彬彬 行敏锋 全兴文 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍草原生态环境要素的遥感定量反演方法及同化技术、草原生态环境评价和应用系统。其主要内容包括草原叶面积指数和植被生物量的定量遥感反演及数据同化技术;植被生物量及植被覆盖下土壤水分的主被动遥感协同反演技术与方法;基于卫星遥感数据的草原干旱指数产品算法及生产;草原生态环境评价指标体系与评价方法。基于上述草原生态环境要素反演方法及评价体系,最后介绍自主研发的软件系统“生态环境综合评价应用系统”。

本书可供从事遥感基础研究、定量遥感反演及遥感应用系统建设的专业人员参考,也可作为高等院校遥感和地理信息系统等相关专业研究生和高年级本科生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

草原生态环境要素遥感定量反演及应用系统/何彬彬,行敏锋,全兴文著. —北京:科学出版社,2016.6

ISBN 978-7-03-049179-4

I. ①草… II. ①何… ②行… ③全… III. ①遥感技术—反演—应用—草原—环境生态评价 IV. ①S812

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第145981号

责任编辑:杨 岭 李小锐/责任校对:贾伟娟

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

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

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2016年6月第一次印刷 印张:17

字数:338 000

定价:118.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

草原是一种重要的可再生农业自然资源,是维护陆地生态环境的天然屏障,起着调节气候、涵养水源、防风固沙、保持水土等作用,对保持人类生态环境和社会持续发展具有重要作用。因此,对草原生态环境要素进行实时、有效的监测,获取相应参数在时间和空间上的定量分布信息,已成为现阶段科技工作者努力探索和亟待解决的重大课题。多平台、多传感器、多分辨率和多谱段的遥感监测系统为监测草原生态环境要素提供了有效手段。如何从海量的遥感观测数据中挖掘有用信息,利用定量遥感技术建立一套快速、高效的草原生态环境要素反演方法,是草原生态环境评价的一个关键技术。然而,现有的观测系统主要是瞬时的离散观测,尚不能提供连续的时空观测。在研究如何反演草原环境要素信息的同时,如果能够获得此目标参数在时间序列上的变化分布信息,比只在某个单一时间点获取空间上的分布信息更具有应用价值。数据同化技术则是获取目标参数在时间序列上分布信息的有力手段。

本书是作者在主持中央高校基本科研业务费重点培育项目“生态脆弱区环境要素主被动遥感协同反演及综合评价(No. ZYGX2012Z005)”、国家自然科学基金“异质性草原植被 BRDF 模拟及弱敏感参数反演方法研究(No. 41471293)”、863 重大项目子课题“全球生态环境遥感监测与诊断专题产品生产体系(三)(No. 2013AA12A302)”等研究课题的基础上,总结提升并参考相关研究撰写而成的。本书较为系统地介绍草原生态环境要素的定量遥感反演模型及同化模拟技术,具体阐述草原环境参数的反演方法与草原生态评价方法,并介绍自主研发的软件系统“生态环境综合评价应用系统”。

本书共分 10 章,第 1 章主要简述草原生态环境参数的含义,以及定量遥感反演、数据同化和应用系统的研究进展;第 2 章基于双层冠层反射率模型及查找表算法,结合多源遥感卫星数据,通过综合考虑及引入大气-植被-土壤下垫面的先验知识,阐述草原植被叶面积指数的定量反演方法;第 3 章阐述几种主要的植被散射模型,研究建立主被动遥感协同反演草原草本植被生物量的方法,并进行验证分析;第 4 章探讨混合植被区不同植被的散射机理,研究以水云模型为基础建立的草原混合植被区的散射模型,并利用建立的散射模型反演了植被生物量;第 5 章阐述几种主要的土壤散射模型,研究以 IEM 模型和水云模型为基础建立的草原散射模型,并利用所建立的模型反演植被覆盖下的土壤水分;第 6 章研究利用

多幅不同年积日的遥感卫星光学影像数据，基于植被冠层反射率模型、Logistic 模型和集合卡尔曼滤波算法，进行草原叶面积指数估算的同化模拟；第 7 章研究基于 SWAP 模型、ACRM 模型和 4D-VAR 方法，进行草原植被生物量估算的同化模拟；第 8 章介绍全球干旱指数的产品算法及生产；第 9 章从评价指标体系构建、评价单元选择、评价方法、评价标准、评价指标获取及分析等几个方面阐述草原生态环境质量评价，并分析生态环境变化的驱动力；第 10 章主要阐述自主研发的“生态环境综合评价应用系统”的系统体系结构、数据库构建、功能模块划分及系统界面展示。

本书历时多年完成，凝聚了课题组多位成员的辛勤工作。第 1 章由何彬彬，行敏锋编写；第 2 章和第 6 章由全兴文、何彬彬编写；第 3~5 章由行敏锋、何彬彬编写；第 7 章由李星、何彬彬编写；第 8 章由廖展芒、何彬彬编写；第 9 章由周文英、何彬彬编写；第 10 章由靳有成、何彬彬编写。全书由何彬彬统一定稿。

此外，感谢恩师李小文院士在课题研究过程中给予的悉心指导和帮助，感谢科学出版社成都分社李小锐编辑对本书出版的关注和支持。

作 者

2016 年 4 月

目 录

1 绪论	1
1.1 草原生态环境要素	1
1.2 草原环境要素定量遥感反演现状与发展趋势	2
1.2.1 光学遥感数据参数反演	2
1.2.2 雷达遥感数据参数反演	4
1.2.3 主被动遥感数据协同参数反演	11
1.3 数据同化的现状与发展	13
1.4 应用系统	15
参考文献	16
2 叶面积指数反演	23
2.1 植被参数估算的经验拟合公式法	23
2.2 物理模型反演法	25
2.2.1 植被冠层反射率模型	25
2.2.2 植被参数物理反演算法	29
2.3 基于双层冠层反射率模型的叶面积指数反演	31
2.3.1 研究区数据集及预处理	31
2.3.2 反演模型及参数化	36
2.3.3 反演方法及策略	39
2.3.4 反演结果	41
2.3.5 分析及讨论	50
参考文献	51
3 草本植被生物量反演	53
3.1 植被散射模型	53
3.1.1 水云模型	54
3.1.2 MIMICS 模型	55
3.1.3 Roo 模型	56
3.1.4 Saatchi 模型	57
3.2 草本植被散射模型	58
3.2.1 草本植被散射模型的建立	59

3.2.2	改进的草本植被散射模型	59
3.2.3	光学遥感数据反演微波模型输入参数	61
3.3	草本植被生物量估算方法	61
3.4	结果与讨论	63
3.4.1	后向散射模拟	63
3.4.2	生物量估算结果	67
	参考文献	72
4	混合植被生物量反演	75
4.1	混合植被散射模型	75
4.1.1	改进的水云模型	75
4.1.2	光学遥感数据反演水云模型输入参数	78
4.2	混合植被生物量估算方法	78
4.3	混合植被后向散射模拟	79
4.4	生物量估算结果	81
	参考文献	87
5	草原土壤水分反演	89
5.1	土壤散射模型	90
5.1.1	理论模型	90
5.1.2	经验、半经验模型	95
5.2	植被对土壤水分反演的影响	98
5.2.1	植被衰减模型	98
5.2.2	改进的植被衰减模型	99
5.2.3	光学遥感数据反演微波模型的输入参数	99
5.3	后向散射模拟	100
5.4	土壤水分估算结果	107
	参考文献	110
6	基于数据同化技术的草原植被叶面积指数时序模拟	115
6.1	数据同化技术	115
6.1.1	四维变分算法	116
6.1.2	卡尔曼滤波算法	118
6.2	LAI 的遥感定量反演	120
6.3	动态模型拟合	122
6.4	集合卡尔曼滤波算法简介	123
6.5	草原植被 LAI 数据同化	125
	参考文献	128

7 基于数据同化技术的草原植被生物量时序模拟	129
7.1 SWAP 模型	130
7.2 利用 ACRM 模型反演 LAI	131
7.3 4D-VAR 方法	133
7.4 反演结果	134
7.4.1 SWAP 模型敏感性分析结果	134
7.4.2 LAI 反演及制图	135
7.4.3 同化结果	137
7.5 讨论	137
7.5.1 LAI 反演的不确定性	138
7.5.2 同化过程的不确定性	138
参考文献	141
8 全球草原干旱指数产品算法及生产	144
8.1 干旱指数	145
8.1.1 基于气象站点的气象干旱指数	145
8.1.2 遥感干旱指数	146
8.1.3 整合气象和遥感的干旱指数	148
8.2 全球干旱指数产品算法	148
8.2.1 GDI 的基本理论构建	148
8.2.2 反演 CWC 信息	149
8.2.3 估计 SM	150
8.2.4 归一化与降水, SM 和 SM 的协同构建 GDI	151
8.2.5 区域尺度的验证	152
8.2.6 全球 GDI 产品的生产	154
8.3 结果与讨论	155
8.3.1 CWC 反演方法的验证结果	155
8.3.2 利用 SPI 验证 GDI	156
8.3.3 基于 USDM 的 GDI 验证结果	160
8.4 结论	170
参考文献	171
9 草原生态环境评价	174
9.1 评价指标体系构建	174
9.1.1 指标选取原则	174
9.1.2 指标体系的概念框架模型	175

9.1.3 具体指标体系	176
9.2 评价单元选择	180
9.3 评价方法	181
9.3.1 指标标准化	181
9.3.2 综合评价	182
9.4 评价标准	182
9.5 评价指标获取及分析	183
9.5.1 压力指标	183
9.5.2 状态指标	191
9.5.3 响应指标	197
9.6 生态环境质量评价	197
9.6.1 数据标准化	197
9.6.2 权重确定	198
9.6.3 综合评价	200
9.7 结果与分析	203
9.8 生态环境变化的驱动力分析	204
9.8.1 自然因素	204
9.8.2 人为因素	205
参考文献	208
10 生态环境综合评价应用系统	210
10.1 系统需求分析	210
10.1.1 系统流程分析	211
10.1.2 系统用户分析	211
10.1.3 系统数据需求分析	212
10.1.4 系统安全分析	212
10.1.5 功能需求分析	214
10.2 设计原则	214
10.3 系统体系结构	215
10.3.1 系统总体架构	215
10.3.2 桌面端架构	216
10.3.3 Web 端架构	216
10.4 系统数据库设计	218
10.4.1 数据分析	218
10.4.2 生态环境专题数据库设计	218

10.4.3 数据存储管理	219
10.4.4 系统数据库表结构设计	219
10.5 系统功能设计	222
10.5.1 桌面端功能设计	222
10.5.2 Web 端功能设计	223
10.6 系统桌面端功能实现	224
10.6.1 系统显示界面	224
10.6.2 数据加载模块	225
10.6.3 数据管理模块	227
10.6.4 数据预处理模块	230
10.6.5 数据融合模块	231
10.6.6 数据同化模块	232
10.6.7 协同反演模块	236
10.6.8 生态环境评价模块	238
10.6.9 数据发布模块	241
10.6.10 专题制图模块	242
10.7 信息共享平台	245
10.7.1 生态环境综合评价信息共享平台界面	245
10.7.2 权限管理子系统	246
10.7.3 影像浏览	249
10.7.4 服务查询	250
10.7.5 三维地形展示	254
10.7.6 数据下载	257
10.7.7 专题图展示	259
参考文献	260

1 绪 论

1.1 草原生态环境要素

生态环境是人类生存与发展的物质基础和空间条件，是生命系统和环境系统通过物质循环、能量流动和信息交换而形成的有机整体。作为陆地生态环境重要组成部分之一的草原生态系统，其面积约占世界农业生产总用地面积的68.6%（刘政，1992），不仅是重要的畜牧业生产基地，而且是重要的生态屏障，起着调节气候、涵养水源、防风固沙、保持水土、改良土壤等重要作用（张苏琼和阎万贵，2006）。

草原生态环境要素能够以量化形式反映草原生态环境的局部或者某一方面的特征和状态，能够刻画草原表面生态和环境的生物、物理与化学参数。因此，通过研究草原生态环境要素可以更好地了解草原的变化趋势及其驱动因子。常用的草原生态环境要素主要包括以下内容。

（1）植被生物量

植被生物量体现了地球生态系统获取能量的能力，其对地球生态系统结构和功能具有十分重要的意义，是反映生态环境的重要指标之一。通过植被生物量可以判断群落生长状况、演替趋势、生产潜力和载畜能力。生物量与植被生态系统的其他指标相结合，能够客观、准确、有效地解释植被生态系统的现象和问题，反映植被生态系统的演替规律。20 世纪 60 年代，国际生物学计划的实施，使生态系统生物量和生产力的研究在生态学中占有重要的地位（方精云等，1996；冯宗炜等，1999）。

（2）叶面积指数

叶面积指数（leaf area index, LAI）通常定义为单位面积内植被单面叶片在水平面的投影面积，是影响植被与大气下垫面物质与能量相互交换过程的一个重要参数，并在一定程度上反映了植被的生长状况。

（3）植被指数

植被指数（vegetation index, VI）是由探测地表的卫星传感器的不同波段组合而成的，它是能够反映自然界生态环境中植物生长状况的指数。植物叶面在可见光波段和近红外波段有完全相反的物理特征，前者表现为强吸收性，后者则表现为强反射性，不同的植被指数主要是由这两个波段的组合而得的。常用的

植被指数有比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)、垂直植被指数(PVI)和环境植被指数(EVI)等。

(4) 土壤水分

土壤水分对全球水循环、能量平衡和气候气象变化都有重大的影响,是陆地表面非常重要的参数之一。对土壤水分含量在区域尺度或者全球尺度上进行监测是解决流域水文模型、全球水循环、农作物生长监测,以及环境干旱监测等相关问题的必要条件。

1.2 草原环境要素定量遥感反演现状与发展趋势

1.2.1 光学遥感数据参数反演

目前,利用遥感卫星影像数据大范围、多尺度、多时相等特点对地表地物,尤其是对植被进行实时、有效地监测,获取相应植被指数(参数)在空间上的连续分布信息,已成为遥感应用领域的热点之一(He et al., 2013; Qu et al., 2008)。各项植被参数,如叶面积指数(LAI)(杨燕和田庆久, 2007; 陈健等, 2008; Brougham, 1960)、叶绿素含量(C_{ab})(Bannari et al., 2007; Si et al., 2012; Curran and Edward, 1983; Gitelson et al., 2005; 乔振民等, 2012)及叶片等水分厚度(C_w)(Tucker, 1980)等都是表征植被生长特征及健康状况的有效指示参数(Houborg et al., 2007)。叶面积指数,指单位面积内植被单面叶子面积的总数,是植被冠层无量纲的一个重要结构参数,能反映植被冠层的生长状态,以及植被冠层与大气下垫面能量与物质交换能力的大小(Houborg et al., 2009)。叶片叶绿素含量是植被的一个重要生化参数,能表征植被受胁迫程度大小及叶片氮含量多少,是反映植被生长健康状况的重要指标之一。叶片水分含量同样作为植被的一个重要生化参数,当其值较低时,叶片气孔会关闭来降低蒸腾作用,减少水分的散失。同时,由于气孔是空气中二氧化碳进入植物体的通道,通道被阻断,进入植物体的二氧化碳量减少,植物能够利用的量减少,将阻碍植被正常生长。这些植被指数在遥感光学影像不同的光谱波段中具有不同的响应程度,如 LAI 在近红外波段(NIR)具有较强的波谱响应, C_{ab} 会吸收可见光中的红光(RED)波段并反射绿光(GREEN)波段, C_w 对中红外及远红外波段较敏感。因此,可利用植被参数在多光谱及高光谱光学影像中不同波段响应程度的不同,在空间上提取这些植被参数信息(Moran et al., 1995; Doraiswamy et al., 2004; Nilson and Kuusk, 1989; Darvishzadeh et al., 2008; Houborg et al., 2009)。

通常基于遥感卫星光学影像数据估计植被参数的方法有两种:一种是通过野

外目标植被参数实测值与单波段反射率或 NDVI、EVI 等植被指数建立经验统计关系,再通过相应的遥感卫星影像数据估计出目标参数在空间上的分布信息。这种方法因其表达式简单、运行速率快等优点,在以往的参数估计中得到了较广泛的应用 (Colombo et al., 2003; Houborg et al., 2007)。但是,这种方法具有明显的缺点,即缺乏通用性,反演的精度依赖于实测数据的质量、特定的植被类型及植被特定的时空生长环境等因素。另一种是通过基于具有明确物理机理的物理模型反演植被参数的方法,目前被认为是具有应用前景的反演方法,因其建立了植被参数与冠层反射率之间明确的物理关系 (Moran et al., 1995; Jacquemoud et al., 2000),不依赖于特定的植被类型及生长环境,具有较强的普适性 (Bicheron and Leroy, 1999; Darvishzadeh et al., 2008; He et al., 2013; Lavergne et al., 2007; Meroni et al., 2004; Schlerf and Atzberger, 2006; 姜志伟等, 2011; 杨飞等, 2010)。但是,应用这种方法反演植被参数时,由于物理模型的输入参数一般较多,而一般情况下,某些输入参数难以通过遥感的手段获取,使得出现所构建方程(模型)的个数小于方程中未知数个数的问題,其方程的解是欠定的,即基于物理模型的反演方法本质上是病态反演 (Combal et al., 2002; Combal et al., 2003; 李小文和王锦地, 1998)。先验知识的引入被认为是应对病态反演问题的有效手段。通过搜集研究对象的先验知识,可限定模型未知参数的取值范围,从而在一定程度上解决了病态反演问题。因此,许多研究人员通过利用研究区实地调研或历史数据得到的先验知识成功地反演了一些植被的重要参数 (Atzberger, 2004)。但是,针对某些特殊的研究区(如高寒山区),会出现某些参数的先验知识难于获取,或获取量有限等问题 (李小文和王锦地, 1998; 阎广建和吴均, 2002; 蔡博峰和绍霞, 2007),这将增大反演结果的不确定性。目前,先验知识一般考虑以下 3 类。

1) 通过对研究区的实地考察,对研究区大气-植被-土壤-水体等方面参数的分布范围能够有定性的了解及定量的测量,在使用冠层反射率模型时能够确定模型输入参数值或限定模型不确定输入参数的范围。例如,通过对叶片倾角的抽样测量,能大致了解研究区植被叶片的叶倾角分布类型,是水平型分布、竖直型分布还是球形分布等;对植被下垫面土壤类型及土壤湿度的定性研究,可大致确定土壤反射率的范围等。

2) 根据研究区不同类型植被选用不同冠层反射率模型。如果研究区植被为一维均匀浑浊分布植被类型(如草本植被)时,可考虑使用辐射传输模型作为植被参数反演的反演模型;如果植被几何特征明显(如离散分布树木),则考虑使用几何光学模型对其进行植被参数反演;如果植被介于二者之间(如茂密森林)则可考虑使用辐射传输模型与几何光学模型的混合模型。随着卫星空间分辨率的逐步提高,对于植被类型的区分除了通过实地考察获得之外,高空间分辨率的遥感影像图也是获取植被类型的有效手段之一。

3) 研究区辅助信息。这些信息包括相关行业部门提供的辅助信息, 以及关于实验区的一些多源卫星数据产品。例如, 利用微波对水的敏感性及对植被具有一定穿透性等特点, 可利用微波影像数据定量地估计叶片水分含量 (C_w) 及定性地估计植被下垫面土壤水分含量, 以减少其他植被参数及土壤背景反射率对目标植被参数 (如 LAI) 的干扰。此外, “中国典型地物标准波谱数据库” 的建立, 提供了典型农作物某些重要物理-生化参数的时序分布信息, 这无疑为解决病态反演问题提供了有效的辅助信息。

基于物理模型的反演方法通常有 3 种 (Houborg et al., 2009; Weiss et al., 2000): 查找表算法 (look up table)、人工神经网络算法 (Walthall et al., 2004) 及最优化算法。其中, 最优化算法具有较高的反演精度, 但由于算法每次迭代都需运行物理模型, 算法速率较低, 尤其是当物理模型较为复杂时, 所消耗的运行时间更长。人工神经网络算法和查找表算法的运行速率较最优化算法高, 其反演精度都依赖于样本大小, 较高的精度依赖较大的样本, 而较大的训练样本使运行时间较长。二者不同之处在于查找表算法为遍历寻优算法, 算法本身较为简单, 但需要构建代价函数; 人工神经网络只需要部分训练样本而非全部参数组合即可对神经网络进行训练, 达到反演的目的, 且不需要构建代价函数。Kimes 等 (1998) 及 Liang (2004) 对这 3 种算法进行了具体的阐释。查找表算法及最优化算法都需要构建代价函数, 一般代价函数的构建形式如下:

$$\chi = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\rho_j^* - \rho_j)^2} \quad (1.1)$$

式中, ρ_j^* 为模型模拟反射率; ρ_j 为遥感影像反射率 (观测值)。反演中, 使用最接近观测值的模型模拟值对应的模型输入参数值作为反演的最终结果, 即所关心的目标参数。

1.2.2 雷达遥感数据参数反演

1.2.2.1 植被生物量

应用雷达遥感数据反演植被生物量, 主要是基于植被散射模型选取或建立反演方法。按其反演原理, 可以分为经验模型、半经验模型和物理模型。

(1) 经验模型

经验模型不涉及遥感机理问题, 是对遥感信息参数和地面观测数据进行统计分析, 并以此为基础建立两者之间的拟合关系来估算植被生物量的一种方法。经验模型包括线性函数、幂函数、指数函数等多种形式。

Moreau 和 Le Toan (2003) 用 ERS SAR 数据, 建立了安第斯山脉中植被生物

量信息（鲜重和干重）和 C 波段 SAR 后向散射系数之间的一种对数经验关系，对该地区的湿地植被生物量进行了估算并进行植被生物量制图，获得了该研究区的植被生物量分布，为当地畜牧业的管理和评价提供了有价值的植被生物量信息。Hoekman 和 Quiriones (2000) 首先利用 C 波段、L 波段和 P 波段的多极化 AirSAR 数据分析和估算了亚马孙河流域的地表植被类型和生物量。其将地表植被分为原始林区、次生林区、近期砍伐林区，以及草地 4 类来区分不同的植被覆盖类型，并估算其植被生物量。然后，分别对不同波段与不同极化类型 SAR 数据的各种组合在植被生物量估算和土地覆盖分类时的精度进行比较和分析。结果发现，用 P 波段及 HV 极化方式的 L 波段估算植被生物量的效果最好；结合使用两种波段对土地覆盖类型进行分类时，其分类精度可以达到 90%。最后，利用 P 波段数据和 HV 极化方式的 L 波段数据对该地区的植被生物量进行制图。与其他波段相比，P 波段在区分原始林、次生林和草地等方面的能力最好，但其无法精确地区分森林和近期砍伐林，并且在使用上还存在一定的技术困难。Santos 等 (2003) 利用 P 波段多极化 AirSAR 数据建立了后向散射系数与巴西亚马孙河流域热带雨林的主生林和次生林植被生物量之间的经验关系，并采用指数模型和多项式模型估算了研究区的植被生物量，指出后向散射系数与植被生物量之间的相关系数为一元三次模型比对数模型高一些；HH 和 HV 极化方式比 VV 极化方式高一些。Imhoff (1995a) 利用 P 波段、L 波段和 C 波段，入射角为 40° 到 50° 的 JPL AirSAR 数据，通过建立夏威夷的热带常绿阔叶林及欧洲和北美的针叶林植被生物量与雷达后向散射系数之间的关系，得出各波段植被生物量监测的饱和度为 C 波段 (5.3GHz) 约为 2kg/m^2 ；L 波段 (1.25GHz) 约为 4kg/m^2 ；P 波段 (0.44GHz) 约为 10kg/m^2 。这表明，当植被生物量值达到一定阈值（饱和值）后，SAR 后向散射系数将对植被生物量的变化不敏感，不再随着植被生物量的变化而发生变化。并且，植被生物量阈值（饱和值）随 SAR 信号入射频率（波段）的不同而不同。同样，Dobson 等 (1992) 也利用 P 波段、L 波段和 C 波段的极化 AirSAR 数据分析了不同波段的后向散射系数与森林植被生物量的关系，得到的结论与 Imhoff 略有不同：对于 P 波段，后向散射系数与植被生物量呈线性增加关系，当植被生物量在 $10\sim 20\text{kg/m}^2$ 水平时达到饱和；后向散射系数在植被生物量最高和最低时的动态变化范围为 $15\sim 20\text{dB}$ 。对于 L 波段，后向散射系数也随着植被生物量的增加呈线性增加，在 $6\sim 10\text{kg/m}^2$ 时达到饱和；与 P 波段相比，L 波段后向散射系数的动态变化范围较小，约为 10dB 。与 P 波段和 L 波段相比，C 波段对植被生物量的敏感性较差，后向散射系数动态范围较小更小，约为 5dB 。Kurosu 等 (1995) 利用 ERS-1 C 波段 SAR 数据监测水稻生长，利用统计方法给出了水稻的雷达后向散射系数与水稻生长高度、天数、植被生物量等参数的经验公式，表明水稻后向散射系数随着水稻植被生物量的增加而增加。王臣立等 (2006) 系统地研究了热带人工林生物物

理参数和植被生物量与 Radarsat-1 SAR 信号之间的关系,结果表明,SAR 后向散射系数与森林的植被生物量、树高、胸径之间的关系可以用对数关系来模拟。

(2) 半经验模型

半经验模型结合了物理模型和经验模型的优点,既具有一定的物理意义,又比较简单实用,而且模型的输入参数较少,方便应用于植被参数的反演。在应用半经验模型进行植被参数反演的研究中,模型的一些输入参数可以用实际测量数据来确定。

Attema 和 Ulaby (1978) 提出的水云模型 (water cloud model, WCM), 是一种基于辐射传输方程理论一阶解的半经验植被后向散射模型。Taconet (1994) 利用机载散射计 C 波段、X 波段的 HH 和 VV 双极化数据, 研究了小麦的后相散射特性, 并利用水云模型提取了小麦的含水量。Inoue 等 (2002) 利用多频散射计测定了不同频率 (Ka、Ku、X、C 和 L)、不同入射角的后向散射系数与水稻冠层之间的关系, 并利用简化的水云模型进行分析。在没有考虑水稻结构的情况下, 借助地面调查的 LAI 和植被生物量鲜重数据来模拟和分析水稻的后向散射特性。结果显示, 用 C 波段和 L 波段来分析草本植被的生物量比较合适, 而 Ka 波段和 Ku 波段并不适合进行草本植被生物量的分析。Durden 等 (1995) 将水稻冠层看作是一层由离散的散射体组成的统一体, 将其下垫面模拟为一层光滑的镜面, 建立了水稻水云模型。基于雷达回波信号取决于从水面反射到冠层的衰减, 利用水云模型对水稻的叶面积指数进行了反演, 最后利用叶面积指数与生物量之间的拟合关系, 估算出了植被生物量。黎夏等 (2006) 利用 Radarsat-1 SAR 数据, 建立了红树林湿地植被生物量与 C 波段 SAR 后向散射系数之间的非线性模型, 利用遗传算法来模拟给定该模型的最优参数, 进而进行红树林生物量的估算。通过与 NDVI 数据估算的植被生物量进行对比分析, 表明雷达后向散射系数模型在稠密植被区域比 NDVI 模型的精度更高。分析其原因是, 雷达遥感对植被具有一定的穿透能力, 能够获取植被的垂直信息, 降低了植被生物量估算的误差。

(3) 物理模型

Ulaby 等 (1990) 建立了基于微波辐射传输方程一阶解的密歇根微波冠层散射模型 (Michigan microwave canopy scattering model, MIMICS), 该模型将植被覆盖地表分为 3 个部分: 植被冠层、植被茎秆部分及植被下垫面 3 个层次, 并将相应的微波后向散射分为 5 个部分。Kasischke 和 Bourgeau-Chavez (1997) 研究低矮植被微波散射模型, 提出了适合湿地植被散射机制的 Kasischke 模型, 认为 HH 极化方式的 C 波段是监测草本植被生物量的最佳波段。而 HH 极化方式的 L 波段是监测森林植被的最佳波段 (Henderson and Lewis, 2008)。Toan 等 (1997) 将水稻茎秆近似为有限长的圆柱体, 稻叶近似为椭圆盘, 稻田近似为无限大水面, 采用蒙特卡罗 (Monte-Carlo) 模型, 将各组成部分对水稻后向散射贡献综合, 提

出理论模型,并将其应用于水稻制图及植被生物量计算。Imhof (1995b) 基于 JPL AirSAR 的 P 波段、L 波段和 C 波段全极化数据,利用 MIMICS 模型和热带、亚热带阔叶林森林冠层的生物学特征数据,模拟了一系列森林植被生物量,分析了林分结构对植被生物量估算的影响。沈国状等 (2009) 利用 Envisat ASAR 的 HH 极化和 VV 极化数据,在分析 MIMICS 模型的基础上,利用人工神经网络对鄱阳湖湿地植被生物量进行了反演,并绘出了生物量分布图。董磊等 (2009) 利用 Envisat ASAR 双极化 (HH 和 VV) 雷达数据,基于改进的 MIMICS 模型模拟了鄱阳湖湿地的雷达后向散射系数,通过后向散射系数与植被生物量之间的关系,建立神经网络模型,估算出了鄱阳湖湿地植被的生物量分布。

物理模型虽然能够详尽地描述入射雷达波与目标地物之间的相互作用,可以使人们对于微波散射机理有很清楚的理解,但随着物理模型的不断建立和研究的深入,模型越来越复杂,利用模型进行植被参数的反演也变得十分困难。

综上所述,目前,雷达后向散射系数与植被生物量之间的经验、半经验模型是主动微波遥感反演植被生物量的主要方法。而且事实证明,因为物理模型的复杂性,参数获取的困难性,经验、半经验模型反演植被生物量仍然是十分有效的方法。

1.2.2.2 土壤水分反演

(1) 裸露地表土壤水分反演

土壤水分含量的变化会引起土壤介电常数发生改变,而土壤介电常数是雷达反映目标地物特性的一个决定因素,影响着雷达遥感观测目标地物的后向散射系数,这是通过微波遥感估算地表土壤水分信息的基本理论依据。对于裸露土壤及植被覆盖稀疏的状况,研究者已经在土壤水分反演方面取得了巨大成功。目前,利用不同波段、不同极化方式的雷达数据进行裸露地表土壤水分估算的经验半经验模型主要包括: Oh 模型 (Oh et al., 1992)、Dubois 模型 (Dubois et al., 1995),以及 Shi 模型 (Shi et al., 1997); 理论模型主要有基尔霍夫近似模型 (Kirchhoff approximation, KA) [物理光学模型 (physical optic model, POM) 和几何光学模型 (geometric optic model, GOM)]、小扰动模型 (small perturbation model, SPM)、积分方程模型 (integral equation model, IEM) (Fung et al., 1992)、先进积分方程模型 (advanced integral equation model, AIEM) 等。

Oh 模型利用多波段 (L 波段、C 波段和 X 波段) 全极化散射计进行多入射角观测,分析了不同粗糙度地表土壤对后向散射特性的影响,分别建立了同极化后向散射比 ($\sigma_{HH}^0 / \sigma_{VV}^0$) 和交叉极化后向散射比 ($\sigma_{HV}^0 / \sigma_{VH}^0$) 与土壤介电常数、土壤粗糙度之间的经验关系。Oh 模型能够适用于较宽的土壤粗糙度范围,特别是当粗糙土壤表面的均方根高度 s 为 0.1~0.6cm,相关长度 l 为 2.6~19.7cm 时, Oh