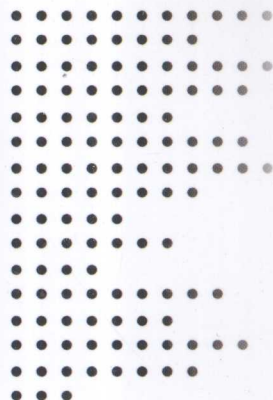
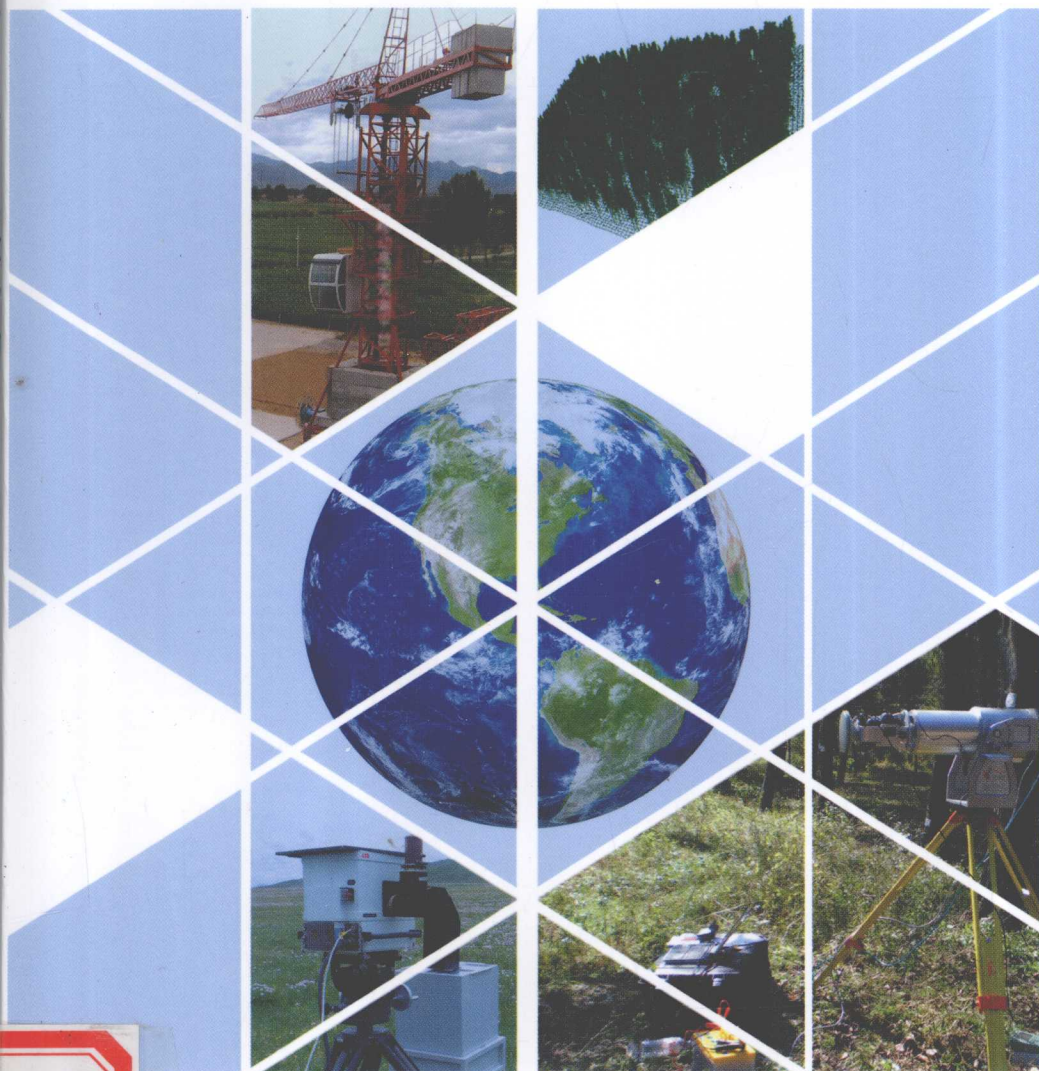




○ 柳钦火 辛晓洲 吴炳方 等著
唐 娉 廖静娟



定量遥感模型、应用及 不确定性研究



 科学出版社
www.sciencep.com

TP7
L754

定量遥感模型、应用及 不确定性研究

柳钦火 辛晓洲 唐 婷 廖静娟 吴炳方 等 著

科学出版社

北京

TP7
L754

内 容 简 介

针对当前定量遥感应用发展的现状和趋势,本书结合中国科学院遥感应应用研究所建设的“农情遥感监测”、“国土资源遥感监测”、“灾害遥感监测”三大遥感应用运行系统,阐述了遥感基础研究与应用研究中的模型、方法及不确定性方面的发展状况、学科前沿问题、发展趋势和应用成果,包括定量遥感应用在中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-338)等项目中取得的最新研究成果。

本书可供从事定量遥感基础研究、遥感应用研究、遥感项目规划管理以及遥感应用系统建设的科技和管理人员参考,也可作为各高校遥感和地理信息系统专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

定量遥感模型、应用及不确定性研究/柳钦火等著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-026286-8

I. 定… II. 柳… III. 遥感技术—研究 IV. TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 237672 号

责任编辑:韩 鹏 赵 冰 / 责任校对:包志虹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

2010 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2010 年 1 月第一次印刷 印张: 19 3/4

印数: 1—2 500 字数: 452 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 言

遥感应用水平要提高,遥感定量化是必由之路。定量遥感机理、建模和应用研究是国际遥感科学前沿领域。

中国科学院遥感应用研究所建设有“农情遥感监测”、“国土资源遥感监测”、“灾害遥感监测”三大遥感应用运行系统,在全国农作物估产、农作物长势旱情监测、洪水监测、国土资源调查等方面发挥了巨大的示范应用作用,多年来为国家提供了大量的决策咨询意见和建议,但是也存在定量化程度不高、精度不能满足需要等问题。2003年,中国科学院启动知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-338),由我担任首席科学家组织项目组,重点针对应用运行系统中的模型和方法不确定性开展深入系统研究,以提高遥感监测定量化水平,推动遥感应用系统的升级改造,并探索遥感基础研究与应用研究相结合的新模式。

项目组以青年骨干为主,是一支团结的攻关队伍。几年来,围绕遥感应用运行系统中定量遥感模型、应用方法及不确定性开展了系统深入的研究,取得了一批很好的研究成果。《定量遥感模型、应用及不确定性研究》是项目组相关研究成果的总结,既有理论深度,又与应用紧密结合,是定量遥感领域一本有价值的参考书。

定量遥感机理、实验、建模、反演与应用是遥感科学的前沿领域,遥感应用中的不确定性问题仍然是我们面临的关键科学问题,需要更多的青年科技骨干不畏艰难、继续开展更深入的研究。我衷心祝愿我国定量遥感科学研究能取得更大的突破。

李小文

2009年8月于北京

前 言

近 20 年来,定量遥感机理、建模和应用研究快速发展,在农业、林业、资源、环境和灾害等领域应用不断深入。作者在定量遥感研究方面,得到中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-338、KZCX2-YW-313)、国家自然科学基金重点项目(40730525)和面上项目(40671139、40601067、40371087)以及国家“973”项目(G2000077900、2007CB714400)的支持,取得的科研成果发表在各种学术期刊与会议论文中。2005 年,为推动定量遥感应用,中国科学院启动知识创新工程重要方向性项目(KZCX3-SW-338),围绕遥感应用研究所“农情遥感监测”、“国土资源遥感监测”、“灾害遥感监测”三大应用运行系统,探索遥感基础研究与应用研究相结合的模式,重点针对应用运行系统中的模型和方法不确定性开展深入系统研究,以提高遥感监测定量化水平,推动遥感应用系统的升级改造。本书为相关项目研究成果的总结。

全书共分 6 章,第 1 章介绍了定量遥感应用不确定性分析的理论和方法;第 2 章重点阐述定量遥感机理、建模与反演研究的最近成果;第 3 章介绍了土地利用/土地覆盖自动更新技术及其不确定性研究进展;第 4 章介绍了农作物长势遥感监测方法及其不确定性研究成果;第 5 章介绍了农田旱情遥感监测模型、方法与不确定性研究成果;第 6 章介绍了洪涝灾害雷达遥感监测方法及其不确定性分析。

本书的第 1 章由柏延臣等编写;第 2 章由柳钦火、刘强、李静、杜永明、唐勇、闻建光、姚延娟、黄华国、刘三超等编写;第 3 章由唐娉、张增祥等编写;第 4 章由吴炳方、蒙继华、李强子等编写;第 5 章由辛晓洲、柳钦火、辛景峰、刘强、李静等编写;第 6 章由廖静娟、王世新、周艺等编写。全书由柳钦火、辛晓洲统一定稿。

本书由李小文院士主审。他作为项目首席科学家,无论在项目的执行,还是在本书的撰写过程中,都给予了大力支持和帮助,他富有建树的学术成就和严谨的科学态度一直鞭策着课题组全体同仁努力工作。科学出版社韩鹏为本书的出版付出了辛勤的劳动,并提出了许多建设性的意见和建议;参与课题研究的其他老师和同学们为本书的出版作出了极大的贡献,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限,加上定量遥感研究依然是国际遥感科学研究的前沿热点领域,书中难免有疏漏和不足,敬请读者和同行专家批评指正。

柳钦火

2009 年 8 月于北京

目 录

序言

前言

第 1 章 定量遥感应用不确定性分析理论和方法	1
1.1 定量遥感应用不确定性研究现状	1
1.1.1 不确定性的概念和内涵	1
1.1.2 国内外研究现状	2
1.2 定量遥感应用中不确定性的来源	2
1.3 定量遥感应用中不确定性研究进展	4
1.3.1 定量遥感参数反演中的不确定性研究	4
1.3.2 遥感数据专题分类不确定性研究	7
1.4 小结	12
参考文献	12
第 2 章 定量遥感信息模型与反演	15
2.1 定量遥感信息模型与反演研究现状	15
2.1.1 地表二向反射特性和植被 BRDF 模型	15
2.1.2 地表热辐射方向性模型	18
2.2 定量遥感信息模型及其不确定性研究	20
2.2.1 均匀作物冠层的辐射传输模型——SAILE 模型	20
2.2.2 行结构作物冠层的辐射传输模型	32
2.2.3 基于仿真三维结构的计算机模拟模型	43
2.3 地表参数定量遥感反演及其不确定性	52
2.3.1 植被指数遥感提取及方向性校正	52
2.3.2 叶面积指数遥感反演	57
2.3.3 地表反照率遥感反演	66
2.3.4 地表温度遥感反演	75
2.4 小结	80
参考文献	80
第 3 章 土地利用/土地覆盖自动更新技术	88
3.1 土地利用/土地覆盖遥感监测与更新技术概况	88
3.1.1 遥感在土地利用/土地覆盖变化监测中的应用	88
3.1.2 土地利用/土地覆盖遥感动态监测研究进展	93
3.2 土地利用/土地覆盖分类特征的分析与评价	98

3.2.1	专家解译的类别特征	98
3.2.2	像素级类别特征的分析与评价	100
3.2.3	面向对象特征的分析与评价	122
3.3	基于对象的土地利用/土地覆盖自动更新技术	128
3.3.1	遥感图像提取对象技术概述	128
3.3.2	基于多分辨率分析的分水岭分割算法	132
3.3.3	基于分割对象的土地利用/土地覆盖自动更新技术	138
3.4	基于 GIS 的土地利用/土地覆盖自动更新技术	139
3.4.1	基于单幅遥感图像的变化检测机理	140
3.4.2	土地利用变化检测基础上实现土地利用图更新	146
3.4.3	试验及精度分析	148
3.5	土地利用/土地覆盖遥感更新的不确定性分析与精度评价	152
3.5.1	土地利用/土地覆盖遥感更新工作中的不确定性	152
3.5.2	土地利用/土地覆盖遥感更新的精度评价	155
3.6	小结	164
	参考文献	165
第 4 章	农作物长势遥感监测方法	169
4.1	农作物长势监测概述	169
4.1.1	直接监测方法	171
4.1.2	同期对比的方法	171
4.1.3	作物生长过程监测的方法	171
4.1.4	作物生长模型方法	172
4.1.5	诊断模型	172
4.2	已有基础	172
4.2.1	CCWS 中的作物长势监测	172
4.2.2	存在的问题	175
4.3	面向问题的长势监测新指标研究	176
4.3.1	遥感数据	176
4.3.2	野外调查数据	181
4.3.3	实时监测指标集	183
4.3.4	过程监测指标集	189
4.4	长势监测方法的不确定性分析	194
4.4.1	研究方法的不确定性	194
4.4.2	指标集和方法应用的不确定性	196
4.5	小结	198
	参考文献	199
第 5 章	农田旱情遥感监测模型与方法	202
5.1	农田旱情监测概述	202

5.1.1 农田旱情的概念、指标与特征	202
5.1.2 遥感监测旱情的光谱波段	203
5.1.3 遥感监测旱情的方法	205
5.2 基于干旱指数的农田旱情遥感监测方法及不确定性	211
5.2.1 基于 NOAA/AVHRR 数据的全国旱情监测	211
5.2.2 基于 TVDI 的新疆棉花旱情遥感监测	227
5.3 基于农田蒸散的旱情遥感监测模型及不确定性	232
5.3.1 农田蒸散用于旱情监测的方法——作物缺水指数法	232
5.3.2 农田蒸散遥感估算方法	233
5.3.3 农田蒸散遥感监测的不确定性	246
5.4 小结	256
参考文献	256
第 6 章 洪涝灾害雷达遥感监测方法	264
6.1 洪涝灾害遥感监测概述	264
6.1.1 洪涝灾害遥感监测方法	264
6.1.2 洪涝灾害遥感监测系统概述	267
6.2 雷达图像前期处理算法	270
6.2.1 基于 SAR 图像纹理的边缘提取方法	270
6.2.2 洪涝灾害 SAR 图像斑点滤波方法	275
6.3 洪涝灾害淹没区域自动信息提取方法	276
6.3.1 基于半变异函数的 SAR 图像地表淹没程度分析	276
6.3.2 基于纹理与成像知识的高分辨率 SAR 图像水体检测	282
6.3.3 面向对象技术用于多极化 SAR 图像地表淹没程度自动探测分析	287
6.4 洪涝灾害雷达监测信息机理及不确定性分析	293
6.4.1 洪涝灾害雷达监测信息不确定性的研究意义	293
6.4.2 洪涝灾害雷达监测信息不确定性的来源	294
6.4.3 提高洪涝灾害雷达遥感监测精度的方法	300
6.5 小结	303
参考文献	303

第1章 定量遥感应用不确定性 分析理论和方法

1.1 定量遥感应用不确定性研究现状

1.1.1 不确定性的概念和内涵

在定量遥感的不确定性研究中,常常涉及不同但又相关的概念和术语。正确理解不确定性的概念和内涵是深入开展遥感应用中不确定性问题研究的基础。

在定量遥感研究中,常见的与不确定性相关的术语包括误差(error)、精度(accuracy)、精确程度(precision)和偏差(bias)等。

误差一般被定义为观测(或模拟、预测)值与真实值之间的差别。对遥感数据来说,某像元 x_0 处的误差定义为

$$e(x_0) = \hat{z}(x_0) - z(x_0) \quad (1.1)$$

式中: $\hat{z}(x_0)$ 为观测(或模拟、预测)值; $z(x_0)$ 为对应像元上的真实值。

从定义可以看出,误差针对单个的测量或模拟、预测值,而非在统计意义上描述观测(或模拟、预测)值与真实值间的接近程度。

精度一般被定义为“观测、计算或估计值与真实值之间的接近程度(closeness)”。精度有时被看作是误差的反义词。但严格讲,精度是在统计意义上比较观测或模拟、预测的均值与真实均值之差(Burrough, 1986),因此是与统计模型相关联的,不能简单将其看作是误差的反义词。

精确度被定义为“某一值被表达的精确程度(exactness),而不管是对是错”(AGI, 1991)。Unwin (1995)将精确度更通俗地定义为“测量值的小数点位数”。这意味着精确度是和精度无关的量。高的精确度并不意味着高的精度,相反,虽然数据的表达非常精确,但却可能是完全错误的。Goodchild (1993)和Campbell (1987)将属性数据的精确度定义为“详尽程度”(detail)或遥感分类过程中定义类别数目。它代表分类所得专题图的综合水平。

不确定性(uncertainty)被定义为“……表达一个特定的数据特性的不可信性或不可知性的有用概念”(Van der Wel, 2000)。不确定性有时被看作是误差的同义词(Heuvelink, 1993),或比误差更一般的一个度量(Goodchild, 1995)。但由于误差必须有一个真实值存在,而在遥感中,像元尺度上的真实值很难得到,因此在遥感信息的评价中很难直接去评价其误差,而通常评价其不确定性。

不确定性的评价所用的指标因被评价信息的类型、信息获取的模型等的不同而不同。

1.1.2 国内外研究现状

伴随遥感的广泛应用,欧美等国家早在20世纪70年代末就开始了定量遥感不确定性的研究。早期的研究主要集中在遥感分类或解译结果的精度评价。目前,关于定量遥感不确定性的研究还是主要集中在遥感专题分类不确定性的研究上,而对定量参数反演中的不确定性问题的研究则很少。随着新一代对地观测卫星的成功发射,大量标准遥感数据产品的出现,带来了关于数据产品质量的验证问题,从而带动了新的定量遥感不确定性研究的高潮。

例如,在地球观测系统(Earth Observing System, EOS)的科学计划中,具有专门的“EOS验证计划”(Validation Program for EOS),其目标之一是“通过在统计上具有全球时空分布代表性的地面独立测量值系统评价数据产品的精度并估计其不确定性”。国际地球观测卫星委员会(Committee on Earth Observing Satellite, CEOS)也专门成立了定标与真实性检验工作组(Working Group on Calibration and Validation, WGCV)。两年一度的“自然资源与环境科学中的空间精度评价国际会议”已经成为研究空间数据精度的科学家们的盛会。该会议已经成功召开八届。第一届在美国弗吉尼亚威廉斯堡召开(1994),第二届在美国科罗拉多召开(1996),第三届在加拿大魁北克城召开(1998),第四届在荷兰阿姆斯特丹召开(2000),第五届在澳大利亚墨尔本召开(2002),第六届(2004)和第七届(2006)均在美国召开,第八届在中国杭州召开(2008)。在历届会议的文集中,很大一部分论文集中在讨论定量遥感中的不确定性问题。大量的关于遥感信息不确定性的研究论文发表在 *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*、*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*、*Remote Sensing of Environment*、*International Journal of Remote Sensing* 以及 *International Journal of Geographical Information Science* 等著名刊物上。

定量遥感不确定性的研究在我国也已经成为一个研究热点。国家自然科学基金、国家“863”计划等相继支持了一系列研究项目,已有一系列相关的专著(葛咏和王劲峰,2003;柏延臣和王劲峰,2003;承继成等,2004)出版。

1.2 定量遥感应用中不确定性的来源

在遥感数据的生命周期中,数据的获取、处理、分析、数据转换等各种操作中,都会引入不同类型和不同程度的不确定性,并在随后的各种处理过程中传播。最终总的不确定性则是各种不确定性不断积累的结果。不同的操作可能引入不同的不确定性。图1.1展示了典型遥感信息处理过程中误差的累计。

在遥感信息处理过程中,每一步都可能引入不同类型的不确定性。Bedard (1987)从地学应用的角度将遥感信息中的误差分为位置误差(locational error)和描述性误差(descriptive error);Chrisman (1991)则将其称为位置误差(positional error)和属性误差(attribute error);而Veregin (1989)则将其称为图形误差(cartographic error)和专题误差(thematic error)。Goodchild和Wang (1988)从数据处理不同阶段出发,

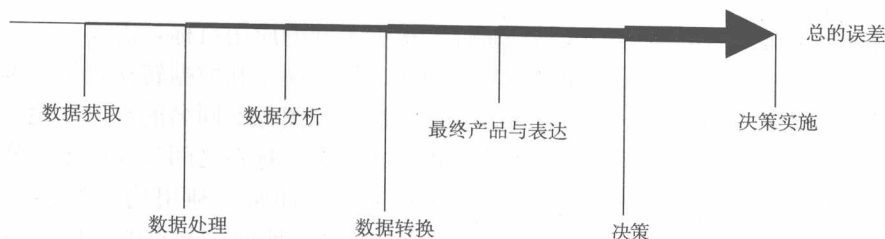


图 1.1 典型遥感信息处理过程中误差的累计

将遥感信息中的误差分为数据源误差 (source error)、处理误差 (processing error) 和产品误差 (product error); 无独有偶, Beard (1989) 将其分为源误差、处理误差和应用误差 (use error)。

在遥感信息处理流程的各个阶段引入不确定性的因素, 如图 1.2 所示。

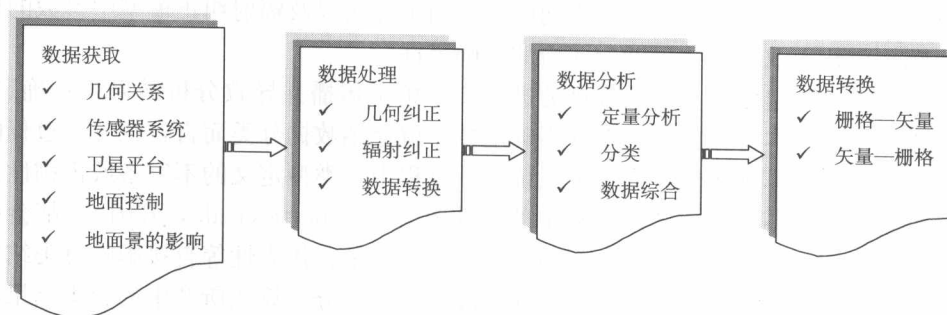


图 1.2 遥感信息处理流程的各个阶段引入不确定性的因素 (Lunetta et al., 1991)

在数据获取阶段, 传感器与地面景的几何关系直接影响图像的质量。理想状态下, 在一景图像中的辐射几何关系应该是一个常数。当在瞬时视场角 (IFOV) 较大时, 这种几何关系在一个范围内变化, 导致图像内的辐射畸变。同时, 这种大视场角也会导致图像内的几何畸变。传感器系统的特性对图像质量以及信息提取的不确定性有显著影响。传感器的物理参数不但决定获取遥感数据的空间、时间和辐射分辨率, 还决定数据的信噪比。同时, 传感器工作的电磁波范围决定了云对数据获取的影响以及大气吸收、辐射和散射等造成的遥感数据的辐射畸变。由传感器参数而决定的空间分辨率直接影响遥感信息提取 (如分类) 的精度。卫星平台的轨道高度、飞行速度和传感器的瞬时视场角一起决定图像的几何特性。卫星平台的稳定性严重影响遥感系统的几何精度。遥感图像所覆盖的地面景的复杂性也对遥感数据中的不确定性有影响。地形起伏不但会导致图像几何畸变, 而且会导致图像内迎光坡和背光坡均匀区域内光谱响应的巨大差异, 导致信息提取结果中很大的不确定性。对于特定物理参数的传感器所获取的遥感图像, 地表景观分布的复杂性和地表单元的大小共同直接影响遥感数据的分类不确定性。这些在数据获取时引入的不确定性有些可以纠正, 有些则无法纠正或处理, 它们终将影响最后遥

感信息中的不确定性。

遥感数据的处理过程也会引入不确定性。根据不同的应用目标,需要对遥感数据进行不同的处理。一般来说,对图像进行几何纠正、辐射纠正和数据转换是最基本的处理步骤。遥感图像的几何纠正一般通过选取地面控制点和图像上同名的点,在地面控制点坐标和同名点的图像坐标之间建立多项式,进而在两个坐标系之间建立联系,然后将遥感图像从图像坐标系转换到地面控制点的坐标系中。通常,利用均方根误差(root-mean-square error, RMSE)衡量参考像元的位置精度。地面控制点的选取对图像几何纠正精度起决定性作用。一般地面控制点从大比例尺的地形图选取。由于地形图的不同综合程度,控制点的位置总是存在一定偏差。即使地面控制点位置通过GPS精确得到,对于不同空间分辨率的遥感数据而言,在图像上选取对应于地面控制点的同名点的位置也会存在一定偏差。几何纠正过程中的重采样过程也可能引起图像整体或局部亮度值的变化,从而影响数据分析结果的精度。例如,Smith和Kovalick(1985)比较了不同重采样方法对图像分类精度的影响。辐射纠正的目的是消除大气效应、地形效应以及传感器引入的遥感数据中的辐射畸变。不同的辐射纠正方法以及辐射纠正模型中参数的精度常常影响辐射纠正效果,并可能引入新的不确定性。

不但上述不确定性会在遥感数据的进一步分析中传播并导致分析结果的不确定性,而且数据分析过程本身也会引入新的不确定性。就遥感数据分类而言,在分类过程的各个阶段都可能引入不确定性。在分类系统设计过程中,类型定义的不完备或模糊性、没有考虑混合像元、不同分类体系集成中的不兼容等(Lunetta et al., 1991),都会在分类结果中引入不确定性;在分类过程中,训练样本数量、代表性等直接影响分类结果的精度。分类算法本身也是一个重要的不确定源。不同的分类算法所产生的分类结果,其不确定性会有很大差别。

由于遥感数据的获取、处理、分析和转换等一系列步骤中都有不同类型和程度的不确定性引入,并在进一步分析中传播,在遥感信息提取过程中,不但要设法纠正数据获取过程中引入的不确定性,而且要选取合适的、对误差不敏感的处理和分析方法,使最后提取的信息包含最小的不确定性。以遥感数据分类结果的不确定性为例,最终分类结果的不确定性是数据获取、处理和分析等过程中不同不确定性传播、积累的结果。只有在数据源和各处理步骤完全相同的前提下,才有可能通过评价分类结果的不确定性来评价分类方法的有效性。

1.3 定量遥感应用中不确定性研究进展

1.3.1 定量遥感参数反演中的不确定性研究

定量遥感参数反演不确定性的研究目前主要集中在定量遥感数据产品的验证方面。

国际上定量遥感数据产品研究的经验和教训表明,科学、严格的真实性检验是遥感数据产品精度和数据使用可靠性的重要保证(Morisette et al., 2002)。国际地球观测卫星委员会定标与真实性检验工作组将真实性检验(validation)定义为“通过独立的手段评价来自系统输出的数据产品质量的过程”(the process of assessing by independ-

ent means the quality of the data products derived from the system outputs) (Justice et al., 2000)。Justice 等 (2000) 对定标 (calibration) 和真实性检验 (validation) 的区别作了说明, 指出定标是定量地定义系统对已知和可控的系统输入信号响应的过程, 而真实性检验则是通过和参考数据比较 (假定参考数据代表目标真实值) 以评价从卫星传感器信号延伸出的更高级产品的不确定性的过程。因此, 真实性检验过程中参考数据代表性和比较方法是关键。

大范围乃至全球范围的遥感数据产品真实性检验行动和方法研究是随着全球遥感数据产品的研制而逐步发展的。国际地圈-生物圈计划为了验证 IGBP-DIS 利用 AVHRR 数据生成的全球 1 km 土地覆被数据产品而专门成立了真实性检验工作组, 并以此来建立真实性检验方法并协调全球数据产品真实性检验计划的实施。EOS 的 MODIS 传感器于 1999 年成功发射后, 美国国家航空航天局 (NASA) 专门成立了 MODIS 陆地产品组 (MODLAND), 除了发展各种陆地数据产品生成的算法外, 还特别成立了 MODLAND 真实性检验小组, 独立地对 MODIS 发展的各种全球陆地数据产品进行系统真实性检验 (Morisette et al., 2002)。其真实性检验的数据产品包括地表反射率、地表温度、雪冰图、反照率/BRDF、植被指数、叶面积指数/FPAR、净初级生产力、植被覆盖度、野火和火烧迹地、土地覆被等。MODLAND 的真实性检验计划包括三个阶段: 第一阶段通过选择少量测量点和时间段的地面测量数据进行产品真实性检验; 第二阶段是对时空范围更广的地面测量点和测量时间段的数据进行真实性检验; 第三阶段通过在统计上具有全球时空分布代表性的地面独立测量值系统评价数据产品的精度, 并估计其不确定性。类似地, 在法国一些前期真实性检验计划基础上, 欧洲太空局 (简称“欧空局”) 启动了欧洲陆地遥感仪器验证计划 (Validation of Land European Remote Sensing Instruments), 对包括 MODIS、VEGETATION、MERIS、POLDER、AVHRR 等传感器在内的陆地遥感数据产品 (包括反照率、植被覆盖度、叶面积指数、植被指数、FAPAR 等) 进行全球真实性检验 (Baret et al., 2006)。2000 年, 在上述两大真实性检验计划基础上, CEOS 的数据定标与真实性检验工作组专门成立了陆地产品真实性检验 (land product validation, LPV) 子工作组, 负责协调包括两大真实性检验计划在内的国际陆地遥感产品真实性检验, 制定陆地遥感数据产品真实性检验的标准指南与规范 (standard guidelines and protocols), 促进陆地遥感产品真实性检验相关数据和信息的共享和交换 (Morisette et al., 2006)。2005 年, LPV 在前期真实性检验工作的基础上, 提出了产品的陆地多点基准分析与相互比较计划 (Benchmark Land Multisite Analysis and Intercomparison of Products), 强调除利用地面测量进行直接真实性检验外, 开展多传感器数据产品间的比较真实性检验。

在上述真实性检验计划和其他独立开展的相关真实性检验研究中, 检验的陆面遥感数据包括地表反照率、地表温度、叶面积指数 (leaf area index, LAI)、FPAR、植被指数、NPP 和 GPP、植被覆盖度、土地覆被类型、野火分布等。真实性检验样地的分布除各大计划的全球样地外, 还针对不同地表类型 (或生物群落) 进行真实性检验。各种真实性检验结果显示, 不但不同地表参数的遥感产品精度有很大不同, 而且同一种产品在不同地表类型间或不同区域的精度也有很大差异。因此, 虽然有全球尺度的遥感产

品真实性检验计划, 要保证数据使用的可信度, 必须在区域尺度上进行更详细的真实性检验。加拿大等国也对不同传感器的陆地遥感产品进行了全国尺度的区域真实性检验 (Chen, 2002; Abuelgasim et al., 2006)。我国科学家也对 MODIS LAI 等产品在中国进行了初步的流域尺度的验证。例如, 胡少英和张万昌对汉江、黑河等流域的 MODIS LAI 产品进行了初步的真实性检验; 由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所与比利时合作设置于甘肃山丹的草地样地等其他一些国内样地也已经被列入 VARELI 的补充样地和 CEOS LVP 的样地, 但总的来说, 我国还没有系统开展陆地遥感数据产品的真实性检验工作。

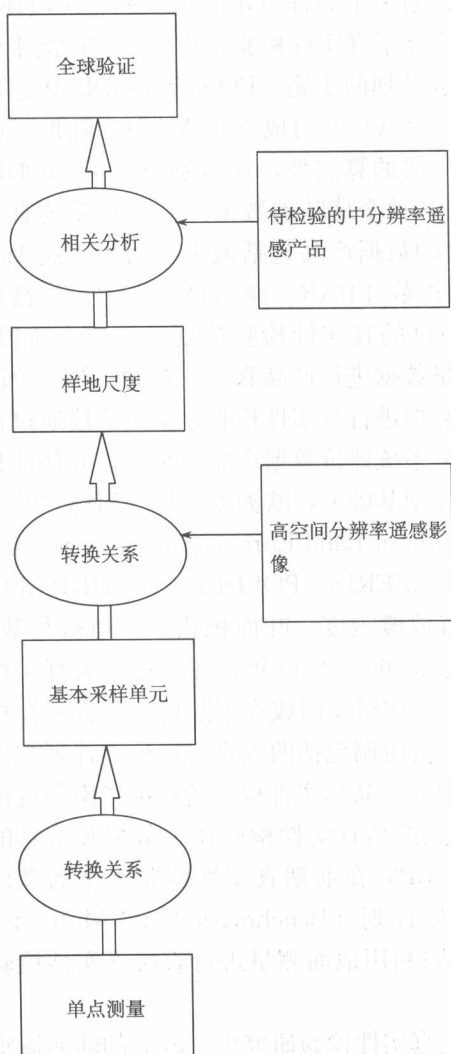


图 1.3 陆地遥感数据产品真实性检验
一般框架

在真实性检验方法上, 上述真实性检验计划发展了基本一致的“自下而上” (bottom-up) 的真实性检验框架 (图 1.3)。这个框架的基本构成是根据不同的地表类型或生物群落的全球分布, 在全球设置一定数量的真实性检验样地 (site), 每个样地内有若干基本采样单元 (elementary sampling unit, ESU), 每个 ESU 内进行一定数量的单点测量。检验的过程是在每个 ESU 内利用地面仪器进行一定数量待检验参数的单点测量, 然后通过一定的转换方法 (如算术平均法) 将单点测量值转换到 ESU 尺度上 (这里 ESU 的空间尺度应该和真实性检验所用的高分辨率遥感影像的分辨率相当); 再结合高分辨率遥感影像, 建立基本采样单元与样地之间的尺度转换关系, 得到样地水平上的地表参数值; 最后, 通过全球不同地表类型多个样地与陆地遥感数据产品进行比较和相关性分析, 评价全球遥感数据产品的精度。

虽然对定量遥感数据产品的验证已经开展了大量的研究工作, 但是对应定量遥感产品验证中各个环节上的不确定性的研究还没有系统开展, 特别是验证过程各个环节中引入的不确定性的量化及传递和对最终验证结果的影响方面的研究非常有限。同时对于定量遥感反演中数据和模型的不确定性表达和处理的研究还没有系统开展。

1.3.2 遥感数据专题分类不确定性研究

遥感数据分类的不确定性表达是和其评价方法联系在一起的。可以说,遥感分类不确定性的表达指标是不确定性评价的一部分。遥感分类不确定性评价方法经历了一个逐步细化和严格的过程。Congalton (1994) 将分类不确定性评价的发展分为四个阶段:第一阶段的精度评价方法以目视判断为主,显然这种精度评价方法是一种定性的评价方法,而且具有很大的主观性。第二阶段的精度评价方法由定性方法发展到定量方法,这一阶段中,精度评价主要通过比较分类所得的专题图中各类别的面积范围(或面积比例)与地面或其他参考数据中相应类别的面积范围(或面积比例)。与第一阶段的方法比较,这种评价方法具有定量和客观的优点。但这种方法的最大局限在于其非定位(non-site specific)本质。因为分类专题图中的某些类别面积即使占有正确的比例,但它可能在错误的位置。因此,这种评价方法可能掩盖分类结果的真实精度。第三个阶段以定位(site specific)类别比较和精度测量(accuracy metrics)为特征。在这一阶段,精度评价将特定位置的分类结果中的类别和地面实况或其他参考数据中相应点的类别进行比较,并在比较基础上发展出各种精度测量(如总体精度等)。第四阶段的评价方法是在第三阶段方法基础上的细化和发展。其核心是误差矩阵方法。其特点是在充分利用误差矩阵信息的基础上,计算出各种精度测量(如 Kappa 系数),且统计上更为严格。

误差矩阵精度评价方法是当前遥感分类精度评价的核心方法,有人建议将其作为分类精度评价的标准方法(Smits et al., 1999)。但以误差矩阵为基础的精度评价方法存在诸多局限性。随着对遥感数据分类问题认识的深入,以及不同精度评价目标的需求,科学家们进一步发展了许多新的误差评价方法和指标。同时,基于误差矩阵的精度评价方法也在不断发展和完善中。

表 1.1 列举了一些主要的遥感分类精度评价方法及其精度测量指标。从评价方法的角度,可以将它们归类为基于误差矩阵的方法、基于模糊分析的方法和其他方法三大类。

表 1.1 各种分类精度评价方法及特点

作者(年份)	关键字	总体精度	每一类精度	分类器比较
Rosenfield (1981)	方差技术	✓	—	—
Aronoff (1982, 1985)	生产者风险和用户风险	✓	✓	—
Congalton (1991, 1999)	混淆矩阵, Kappa 系数	✓	✓	✓
Czaplewski (1992); Zhu (1996)	多变量复合估计	✓	—	—
Gopal 和 Woodcock (1994); Woodcock 和 Gopal (2000)	模糊分析	✓	✓	✓
Ma 和 Redmond (1995)	Tau 系数	✓	✓	✓
Richards (1996)	贝叶斯估计	✓	✓	✓
Paul Smits (1999)	基于成本的误差评价	✓	✓	✓
Zhuang 等 (1995)	Tukey 分析	—	—	✓

注: 据 Smits 等, 1999, 经修改。

1. 基于误差矩阵的分类精度评价方法

误差矩阵 (error matrix) 又称混淆矩阵 (confusion matrix), 是一个用于表示分为某一类别的像元个数与地面检验为该类别数的比较阵列 (Congalton, 1991)。一般情况下, 阵列中的列代表参考数据, 而行代表由遥感数据分类所得的类别数据。一个典型的

		参考数据				
		A	B	C	D	n_{i+}
分类数据	A	N_{11}	N_{12}	$\cdots$	N_{1k}	N_{1+}
	B	N_{21}	N_{22}	$\cdots$	N_{2k}	N_{2+}
	C	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
	D	N_{k1}	N_{k2}	$\cdots$	N_{kk}	N_{k+}
	n_{+j}	N_{+1}	N_{+2}	$\cdots$	N_{+k}	N

图 1.4 误差矩阵示意图

误差矩阵如图 1.4 所示。从误差矩阵中可以直观地得到每一类别的包含误差 (commission error) 和丢失误差 (omission error)。包含误差指不该属于某类别的像元被分为该类别的误差, 它由该类别所在行的非对角线元素之和除以该行总和而得; 丢失误差指该属于某一类别的像元未被分为该类别的误差, 它由该类别所在列的非对角线元素之和除以该列的总和而得。

误差矩阵除了清楚地显示各类别的包含和丢失误差外, 还可以从误差矩阵中计算出各种精度测量指标, 如总体精度 (overall accuracy)、生产者精度 (producer's accuracy) 和用户精度 (user's accuracy)。总体精度是误差矩阵内主对角线元素之和 (正确分类的个数) 除以总的采样个数。生产者精度和用户精度可以表示某一单类别的精度。生产者精度为某类别正确分类个数除以该类的总采样个数 (该类的列总和); 而用户精度定义为正确分类的该类个数除以分为该类的采样个数 (该类的行总和)。

设 n 为遥感分类精度评价中总的样本数, k 为总的分类类别数目, 以 n_{ij} 代表样本中被分类过程分类为类别 i ($i=1, 2, \dots, k$) 而在参考类别中属于类别 j ($j=1, 2, \dots, k$) 的样本数目, 则样本在遥感分类中被分为类别 i 的样本数目为

$$n_{i+} = \sum_{j=1}^k n_{ij} \quad (1.2)$$

而参考类别为 j 的样本数目为

$$n_{+j} = \sum_{i=1}^k n_{ij} \quad (1.3)$$

总体精度 (OA) 为

$$OA = \frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} \quad (1.4)$$

生产者精度 (PA) 表示为

$$PA_j = \frac{n_{jj}}{n_{+j}} \quad (1.5)$$

用户精度 (UA) 表示为

$$UA_i = \frac{n_{ii}}{n_{i+}} \quad (1.6)$$

除了以上各种描述性的精度测量,在误差矩阵基础上利用各种统计分析技术可以用于比较不同的分类方法,其中最常用的是 Kappa 分析技术。

Kappa 分析技术 (Cohen, 1960; Congalton and Mead, 1983; Stehman, 1996) 是一种多变量统计分析技术,它在统计意义上反映分类结果在多大程度上优于随机分类结果,并可以用于比较两个分类器的误差矩阵是否具有显著差别 (Congalton and Green, 1999; Smits et al., 1999)。Kappa 分析产生的评价指标被称为 K_{HAT} 统计。根据误差矩阵,可以计算总体分类的 K_{HAT} 统计值和各类别的条件 Kappa 系数。

为便于公式表达,相应于 n_{ij} , 令 p_{ij} 为误差矩阵中第 (i, j) 栏中样本数占总样本数的比例,即

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n} \quad (1.7)$$

相应地, p_{i+} 和 p_{+j} 定义为

$$p_{i+} = \sum_{j=1}^k p_{ij} \quad (1.8)$$

$$p_{+j} = \sum_{i=1}^k p_{ij} \quad (1.9)$$

假设遥感分类精度评价中的样本采样模型为多项式采样模型,则 K_{HAT} 统计的计算公式为

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}} \quad (1.10)$$

K_{HAT} 估计的大样本方差为

$$\hat{\text{var}}(\hat{K}) = \frac{1}{n} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2-\theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_4-4\theta_2^2)}{(1-\theta_2)^4} \right] \quad (1.11)$$

其中:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k n_{ii} \\ \theta_2 &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i} \\ \theta_3 &= \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^k n_{ii} (n_{i+} + n_{+i}) \\ \theta_4 &= \frac{1}{n^3} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k n_{ij} (n_{j+} + n_{+i})^2 \end{aligned} \quad (1.12)$$

有时,为了检验两个误差矩阵是否有显著差别,需要通过统计检验确定两个误差矩阵的 K_{HAT} 值是否差别显著。

令 $\hat{K}_1$ 和 $\hat{K}_2$ 分别代表误差矩阵 1 和误差矩阵 2 的 Kappa 统计值, $\hat{\text{var}}(\hat{K}_1)$ 和 $\hat{\text{var}}(\hat{K}_2)$ 分别为相应的误差估计,单个误差矩阵的统计显著性检验表达为