



地球观测与导航技术丛书

全球地表覆盖遥感制图

陈军 陈晋 廖安平 等著



科学出版社

地球观测与导航技术丛书

全球地表覆盖遥感制图

陈 军 陈 晋 廖安平 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

地表覆盖及变化是环境变化研究、地球系统模式模拟、地理国情监测和可持续发展规划等方面不可或缺的重要科学数据和关键参量。面对我国及国际社会对高分辨率、高质量全球地表覆盖数据产品的迫切需求,我国科技工作者在国家 863 计划重点项目支持下,突破了全球 30m 分辨率地表覆盖遥感制图这一国际科技难题,成功研制出了世界上首套两期(2000 年、2010 年)30m 全球地表覆盖全要素数据产品(GlobeLand30),并提供给全世界共享使用,被国际同行称为“对地观测和开放地理信息领域的里程碑”。本书分析全球高分辨率、高质量地表覆盖遥感制图面临的难题与技术挑战,介绍我国这方面的科技创新成果与工程实践,包括全球地表覆盖遥感制图的基本原理、关键算法及工程技术,是第一本关于全球地表覆盖遥感制图的科技专著。

本书图文并茂,内容丰富,是了解全球地表覆盖遥感制图技术前沿与数据产品的首选参考资料。可供从事测绘、遥感、资源、环境,以及地理、区域规划等领域的科研、教学有关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

全球地表覆盖遥感制图/陈军等著. —北京:科学出版社,2016.8

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-049435-1

I. ①全… II. ①陈… III. ①遥感技术—制图 IV. ①TP7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 179543 号

责任编辑:苗李莉 朱海燕 / 责任校对:张小霞 何艳萍

责任印制:肖 兴 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 8 月第一次印刷 印张:30

字数:690 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委(按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江碧涛	江 凯	景贵飞
景 宁	李传荣	李加洪	李 京	李 明
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	闫国年	孟 波
秦其明	单 杰	施 闯	史文中	吴一戎
徐祥德	许健民	尤 政	郁文贤	张继贤
张良培	周国清	周启鸣		

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段，而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑，地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项；国家有关部门高度重视这一领域的发展，国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展；工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范；国家高技术研究发展计划(863计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题，首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前，“十一五”计划正在积极向前推进，“地球观测与导航技术领域”作为863计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下，把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书，集中发布，以整体面貌推出，当具有重要意义。它既能展示973计划和863计划主题的丰硕成果，又能促进领域内相关成果传播和交流，并指导未来学科的发展，同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展，科学出版社依托有关的知名专家支持，凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验，主持或参加863计划地球观测与导航技术领域的项目、973计划相关项目以及其他国家重大相关项目，或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结，或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信，通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作，将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世，成为我国地球空间信息科学中的一个亮点，以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展！

李德仁

2009年10月

序

为了有效地支撑我国全球变化研究与可持续发展,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》将“全球环境变化监测与对策”列为重要内容之一,科技部在863计划重点项目和全球变化研究专项中支持了多个研究项目,以推动全球变化关键参数和过程的多变量联合观(监)测、海量数据同化与集成应用,以及数据共享机制研究。

在国家863计划重点项目支持下,国家测绘地理信息局、教育部、中科院、农业部、林业局等部门的18家单位联合承担和完成了“全球地表覆盖遥感制图及关键技术研究”研究项目。经过四年多的产学研协同攻关,突破了30m空间分辨率全球地表覆盖遥感制图这一国际科技难题,成功研制出了世界上首套两期(2000年、2010年)30m全球地表覆盖数据产品——GlobeLand30,在该领域实现了从“跟踪到引领”的跨越式发展。2014年9月22日,中国政府领导人将其作为献给联合国气候峰会的国礼,赠送给联合国,供联合国及国际社会使用。这是中国向联合国提供的首个全球性的地理信息公共产品,被国际同行专家誉为“对地观测与地理信息开放共享的里程碑”。近两年来,该数据成果已在世界五大洲的近120个国家应用,成为全球环境变化和可持续发展研究的高质量科学数据,有力地提升了我国遥感的国际影响力,增强了我国在全球变化和可持续发展领域的话语权。

此书是根据我国这方面的科技创新实践及成果,系统地总结了全球地表覆盖遥感制图的基本原理、关键算法及工程技术,包括面临的主要难题与挑战、遥感影像几何与辐射处理、缺失数据处理与多时相重建、基于“像元-对象-知识”的POK分类提取、变化检测与更新、产品研制的工程技术体系等。其结构严谨、内容丰富,是第一本关于全球地表覆盖遥感制图的科技专著。其将为我国发展全球遥感监测和建立全球地理信息资源提供新思路、新方法,具有重要的参考价值。

有鉴于此,值此书出版之际,特作此序,以示鼓励。

徐冠华

2016年6月

前 言

地表覆盖是指地球表面各种物质类型及其自然属性与特征的综合体。其空间分布反映着人类社会经济活动过程,决定着地表的水热和物质平衡,其变化直接影响到生物地球化学循环,改变着陆地-大气的水分、能量和碳循环,以至引起气候变化。科学地测定地表覆盖的空间分布及其变化,研制高质量的地表覆盖及变化信息产品,对于模拟气候变化、研究环境效应、监测地理国(世)情,以及开展可持续发展规划与治理等具有十分重要的意义。

遥感是测定大范围地表覆盖分布及变化的主要技术手段。人们是利用航天、航空遥感影像中蕴含的丰富光谱、纹理特征及时空关系,结合各种参考资料和相关专业知识,采用数理统计、交互解译等方法,提取地表覆盖类型的属性信息和空间分布,测定其时空变化,生成相应的数据集、专题图及分析报告。鉴于地球表面景观及生态系统极其复杂,全球地表覆盖遥感一直是国际科技界关注的热点和难点。此前,美国和欧盟等利用遥感研制了多套全球地表覆盖数据产品,空间分辨率从最初的 1° 提高到 8km 、 1km 、 300m ,但空间分辨率仍然较低,而且时相局限性大、相互间一致性较差、第三方评价精度不高,难以满足全球变化研究、地球系统模式和可持续发展规划等方面的需要。

为了满足全球变化研究、可持续发展规划等对更高分辨率全球地表覆盖信息产品的迫切需要,科技部 2009 年启动了国家 863 计划重点项目“全球地表覆盖遥感制图及关键技术研究”,国家基础地理信息中心、北京师范大学、中科院遥感所、清华大学等 18 家单位的上百名研究和工程技术人员参与了项目研究。经过四年多的不懈努力,研究解决了 30m 空间分辨率全球地表覆盖遥感制图的有关技术难题,成功研制出了世界上首套两期(2000 年、2010 年) 30m 全球地表覆盖数据产品——GlobeLand30。2014 年 9 月 22 日,中国政府领导人将其作为献给联合国气候峰会的礼物,赠送给联合国,供联合国及国际社会使用。这是中国向联合国提供的首个全球性地理信息公共产品,被国际同行专家誉为“对地观测与地理信息开放共享的里程碑”。

本书主要介绍了国家 863 计划重点项目“全球地表覆盖遥感制图及关键技术研究”(项目编号:2009AA122000)的主要研究成果,共 9 章。第 1 章由陈军、陈晋和宫鹏撰写;第 2 章由唐娉、张宏伟、胡昌苗和周渊撰写;第 3 章由曹鑫、陈晋、朱孝林和饶玉晗撰写;第 4 章由陈学泓和陈军等撰写;第 5 章由陈学泓和陈军撰写;第 6 章由廖安平、韩刚、张委伟等撰写;第 7 章由廖安平、彭舒和武昊等撰写;第 8 章由陈利军、史学丽和居为民等撰写;第 9 章由陈军和陈晋撰写。全书由陈军、陈晋和张委伟统稿。刘耀林、童小华等参加了部分章节的编写工作。

本书是在科技部、国家测绘地理信息局、国家遥感中心、国家基础地理信息中心和项目各参与单位的大力支持下完成的。在项目立项和实施及成果推广过程中得到了徐冠华院士、徐德明局长、库热西·买合苏提局长等领导的全力支持,863 计划专家组及刘纪远研究员、李增元研究员、刘闯研究员、班艺舫教授、李志林教授、王东华研究员等给予了真诚帮助,在此一并致以衷心的感谢!

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

序

前言

第 1 章 引言	1
1.1 地表覆盖遥感制图现状	1
1.2 高分辨率 GLC 数据产品研制	7
1.3 本书章节安排	16
参考文献	17
第 2 章 影像辐射处理与几何纠正	21
2.1 全球遥感数据辐射处理	21
2.2 国产影像几何纠正处理	49
2.3 影像处理系统	61
2.4 影像产品质检	67
参考文献	80
第 3 章 缺失数据处理与多时相数据重建	85
3.1 缺失数据处理	85
3.2 多时相数据重建	110
参考文献	141
第 4 章 POK 分类方法	145
4.1 地表覆盖类型及 30m 影像特征分析	145
4.2 POK 分层分类	157
4.3 陆表水体提取方法	165
4.4 人造地表提取方法	173
4.5 耕地提取方法	182
参考文献	188
第 5 章 变化检测与更新	194
5.1 基于光谱斜率差异的变化检测算法	194
5.2 基于后验概率空间变化向量分析的变化检测	211
5.3 变化检测与分类结合的自动地表覆盖更新方法	218
参考文献	228
第 6 章 分类制图技术体系	230
6.1 分类提取指标与要求	230
6.2 异质异构参考资料集成	239

6.3	分类技术方法与流程	254
6.4	质量控制与成果优化	293
	参考文献	307
第 7 章	GlobeLand30 产品研制	310
7.1	分类影像及参考资料	310
7.2	生产型分类软件	325
7.3	样本采集	330
7.4	分区规模化提取	333
7.5	地表覆盖分幅产品	345
7.6	精度评价	348
7.7	产品服务系统	357
	参考文献	363
第 8 章	典型应用案例	365
8.1	地表覆盖空间格局分析	365
8.2	城市化研究	398
8.3	地表过程模拟示范	412
	参考文献	440
第 9 章	展望	444
9.1	数据分析与应用	444
9.2	持续更新与完善	449
9.3	集成服务与共享	456
	参考文献	460
	缩略词	465

第1章 引言

近年来,全球变化及其影响逐渐成为全人类关注的焦点。据全球语言监测机构报道,“全球变暖”和“911”是2000年至今全世界使用频率最高的词语。尤其是近几年相继举行的世界气候变化会议,更是反映出世界各国的政治家、科学家和普通公众对全球变化带来的影响的高度关注。为了有效地应对全球变化及其影响,国际社会正致力于研究全球变化带来的一系列科学问题,主要集中在综合分析全球变化的基本事实和客观规律及科学预测全球变化的未来趋势及其影响等方面。例如,美国国家科学基金会(NSF)2010年公布新的“地球科学远景”,将“地球系统复杂性和变化行为的理解与预测”列为三大挑战之一(张志强和安培浚,2009)。国际科学联合会(ICSU)确定了全球可持续发展的优先研究领域,提出未来地球计划,呼吁切实加强对未来环境条件及其对人类影响的科学预测、全球与区域环境变化观测与管理信息系统研制等,为应对全球环境变化提供有效的知识和信息支持(Reid et al., 2010; 徐冠华等, 2010)。我国《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》把“全球环境变化监测与对策”作为优先主题,先后启动了“全球地表覆盖遥感制图与关键技术研究”“全球地表参数遥感提取方法研究”等863计划重点项目。

1.1 地表覆盖遥感制图现状

1.1.1 地表覆盖及变化

地表覆盖(land cover)是指地球表面具有不同自然属性与特征的物质综合体,表征了地表水热和物质平衡、生物地球化学循环等过程的差异,其空间分布与变化也在一定程度上反映了自然与人类相互作用过程(Turner et al., 1993; 史培军等, 2000)。地表覆盖的变化改变了陆地-大气的水分、能量和碳循环,是全球气候变化的成因之一(Foley et al., 2005)。例如,地表覆盖变化将显著改变地表反照率、发射率等特性,从而影响地表水热收支过程,对气候系统产生强烈的反馈(Weng et al., 2007),其结果可能影响区域气候特征,如季风系统的调整(符淙斌和袁慧玲, 2001);同时,毁林及其他地表覆盖变化也是温室气体(CO₂)浓度增加的主要来源之一(IPCC, 2013; 秦大河等, 2014)。此外,地表覆盖变化也可以直接影响生态系统的稳定性和生物多样性(Naidoo et al., 2008)。

地表覆盖及其变化信息被公认为全球环境变化、地理国(世)情监测、可持续发展规划、土地资源管理等研究领域不可或缺的重要基础数据(Feddema et al., 2005; Xian and Crane, 2006; Reid et al., 2010; Pereira et al., 2013; 陈俊勇, 2012; 徐冠华等, 2013)。例如,在政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估第一工作组报告采用的大气-海洋环流模式中,地表覆盖是地球系统模式和气候模式的基础参数,其数据精度提高也是降低气候变化预测不确定性的关键之一

(IPCC, 2013)。政府间对地观测组织 (Group on Earth Observation, GEO) 将其列为地表过程研究的关键参量之一 (Zell et al., 2012)。因此, 科学准确地测定全球地表覆盖的空间分布与动态变化, 对于研究地球系统的能量平衡、碳循环及其他生物地球化学循环、气候变化、生物多样性等有着十分重要的意义 (葛全胜等, 2008)。

在过去的 30 余年中, 国际社会对地表覆盖及变化研究高度重视, 一直将其作为全球变化研究计划的重要组成部分 (如 IGBP 和 IHDP 计划中的 LUCC), 列为当前国际科学研究的前沿领域之一 (Meyer and Turner, 1992; Turner and Meyer, 1994; 史培军等, 2001; Lambin et al., 2001)。尤其是近年来, 人们开始将地表覆盖的动态作为一个耦合的人地系统来理解, 地表覆盖动态机制及其对地球系统结构和功能影响的综合研究正逐步发展形成一门新兴的专门科学 (Rindfuss et al., 2004; Turner et al., 2007)。

1.1.2 地表覆盖遥感制图技术

遥感是大范围地表覆盖制图与变化监测的唯一有效手段。地表覆盖遥感制图是指利用航天、航空遥感影像中蕴含的丰富光谱、纹理特征及其时空关系, 结合各种参考资料和相关专业知识, 采用数理统计、交互解译等方法, 提取其类型的属性信息和空间分布, 探测其时空变化并生成相应的数据集及分析报告 (史培军等, 2001; 刘纪远和邓祥征, 2009; Lu and Weng, 2007; 陈军等, 2014)。其主要技术环节包括四方面。

1. 遥感数据源选择

航天、航空遥感影像是地表覆盖遥感制图的主要数据源。就大范围地表覆盖遥感制图而言, 以往所利用的遥感数据主要包括: 多时相-中低空间分辨率数据 (300m 至 1km) 和单时相-高空间分辨率数据 (10~30m), 前者主要包括 NOAA/AVHRR、MODIS、SPOT/VGT、MERIS 等数据。例如, 在国际地圈生物圈计划 (IGBP) 计划的推动下, DeFries 等 (1995) 和 Hansen 等 (2000) 利用 AVHRR 资料完成了全球 1km 地表覆盖图; 波士顿大学的 Friedl 等 (2002) 利用 MODIS 多时相数据生成全球 1km 地表覆盖图; 欧洲空间局利用 ENVISAT/ MERIS 资料生成了全球 300m 地表覆盖产品 (Dash et al., 2007)。而后者主要包括 Landsat TM/ETM、SPOT/HRV 等数据, 例如, 刘纪远等 (2014) 利用 Landsat TM/ETM+数据完成的多期中国地表覆盖图。受卫星回访周期、云污染等因素的影响, 目前多时相-高空间分辨率数据在全球地表覆盖制图方面的应用仍存在一系列障碍和限制, 但随着对地观测技术的发展, 其在全球地表覆盖制图方面的应用将呈现出巨大潜力。

2. 图像预处理

图像预处理是进行地表覆盖分类的前期工作, 也是提高数据质量和分类精度的关键之一。主要处理方式包括如下三种。

(1) 几何处理。遥感图像的精确几何校正或图像配准是把不同的遥感数据结合使用的前提之一 (Jensen, 1996)。虽然相关技术方法已经较为成熟, 但用于处理大量不同时间获取的不同传感器、不同分辨率的数据时, 提高几何匹配精度的新技术方法仍需要进一步开发 (宫鹏, 2009)。

(2) 辐射处理。多时相遥感数据会受大气成分时空动态变化的干扰影响, 大气纠正是通过定量考虑大气影响, 将传感器获得的 DN 值转换为地表反射率。目前, 国际上已经发展了多种大气纠正方法, 从简单的暗物体法到基于复杂大气传输模型 (如 6S) 的大气纠正方法 (梁顺林等, 2013), 提高大气纠正精度的关键是对遥感数据同步的大气剖面数据的估计。此外, 对于山区, 遥感数据会受到地形的空间不均一性的影响, 地形纠正也非常重要 (Zhou et al., 2014); 如果不同区域的遥感数据获取时间有较大差异, 物候差异也必须考虑。

(3) 数据插补。受硬件失效、云污染等影响, 遥感数据也可能出现大面积数据缺失等质量问题, 须对其进行去云、缺失数据插补等处理 (Chen et al., 2011; Zhu and Woodcock, 2014)。

3. 特征选取与分类

(1) 特征选择。选择合适的特征是地表覆盖分类的重要环节。光谱特性、植被指数、纹理或上下文信息、多时相物候特征、多传感器图像, 以及辅助数据都可以用于分类。特征选取 (feature selection) 和特征提取 (feature extraction) 方法不仅可以减少遥感数据内部冗余, 也可以通过减少数据间的相关性, 提高分类精度。常用的方法包括主成分分析 (PCA)、最大噪声比变换 (maximum noise fraction, MNF)、判别分析、非参数加权特征提取等。此外, 还有多种特征选取的方法, 如图像分析 (条形光谱图、共同谱均值向量图、二维特征空间分布图和椭圆斑块图)、统计方法 (平均分离度、转换分离度、巴氏距离、J-M 距离)、模糊逻辑专家系统特征选取等。

(2) 遥感分类。分类方法是地表覆盖制图的核心, Lu 和 Weng (2007) 对近年来图像分类方法进行了总结, 根据不同准则分为监督分类和非监督分类、有参分类和无参分类、硬分类和软 (模糊) 分类、逐像元分类与子像元分类, 以及逐对象分类等。表 1-1 简要介绍了这些分类策略的准则、主要特征和例子。

过去 30 多年来, 随着对地观测技术、统计理论和计算机模式识别技术、计算机视觉技术、人工智能技术等的发展, 遥感分类方法得到很大发展。但以统计分类方法为基础, 同时结合专家解译仍是大尺度地表覆盖分类的主导方法。这种混合方法具有充分利用数据的统计特征和专家经验、算法成熟、操作性强等优点, 但也存在着用时长、对分析人员依赖性强、可重复性弱等局限性。近年来, 也有不少针对地表覆盖遥感分类的新方法研究, 主要包括人工智能的神经网络分类、分类树方法、多元数据的专家系统和计算机深度学习法等 (Lu and Weng, 2007)。其中, 分类树及神经网络方法已应用于 EOS MODIS 地表覆盖数据产品的生产, 并取得了成功。而专家系统与计算机智能识别在全球和大区域地表覆盖遥感分类领域的应用还鲜见报道。由于缺乏算法评价的统一标准, 以及全面、系统的测试样本等, 对新分类算法总体性能及其结果优劣的客观评价仍没有得到共识性结论。

4. 分类结果检验与精度评价

理想的精度评估需要以严格抽样理论为基础, 但野外实地检验数据的获取受经费预算、交通条件等因素的限制, 特别在严格的统计抽样设计要求下进行的实地检验更加困

表 1-1 分类方法汇总

准 则	策 略	特 性	例 子
训练样本利用与否	监督分类方法	定义土地利用类型；有充足的参考数据当训练样本；从训练样本中得到分类器特性来对图像进行分类	最大似然法、最小距离法、人工神经网络、决策树分类
	非监督分类方法	对图像光谱利用统计，再用聚类的方法对图像光谱信息进行聚类；不需要预先定义；分类者需要对聚类结果进行合并，得到有意义的分类结果	ISODATA、K-均值聚类方法
参数（均值向量、方差矩阵）利用与否	参数分类器	假设正态分布；训练样本中得到参数（均值）；当地貌复杂时，参数分类器得到的结果噪声很多；另一个主要缺点是不能辅助数据、空间和上下文分布、非统计信息结合分类	最大似然法、线性判别式分析
	非参数分类器	不需要正态分布假设；不需要统计特性来分类，可以和非遥感数据结合起来进行分类	人工神经网络、决策树分类、证据推理、支持向量机、专家分类
利用哪种像元信息进行分类	逐像元分类器	结合所有训练样本的光谱特性得到分类器；该分类器包含了训练样本集中所有样本的光谱贡献，忽略混淆光谱问题	最大似然法、最小距离法、人工神经网络、决策树分类、支持向量机等大多数方法
	子像元分类器	假设每个像元由所有纯类别线性或非线性组合而成；结果提供了每个像元中纯类别所占比例	模糊集分类器、子像元分类器、混合光谱分析
	面向对象分类器	分割把像元结合成物体，然后在物体基础上分类，而不是对每个像元分类；没有使用 GIS 数据	eCognition
	逐场分类器	GIS 数据在逐场分类器中很重要，把栅格数据和矢量数据结合到分类器中；矢量数据用来把图像分为不同的斑块，克服同一类别内的光谱变化	基于 GIS 分类方法
定义土地利用分类的输出结果与否	“硬”分类	每个像元分到一个特定的地表覆盖类别中；硬分类的区域评估会产生大的误差，尤其对低空间分辨率数据（混合光谱）	最大似然法、最小距离法、人工神经网络、决策树分类、支持向量机等大多数方法
	“软”（模糊）分类	提供每个像元到特别类别中的可能性；软分类能提供更多的信息和较好的精度，尤其对低空间分辨率数据	模糊集分类器、子像元分类器、混合光谱分析
空间信息利用与否	光谱分类器	分类中用纯光谱信息；同一类别在空间上的巨大变换导致分类结果存在很多噪声	最大似然法、最小距离法、人工神经网络
	上下文分类器	分类中应用空间邻域像元信息	迭代条件模型、点对点上下文校正、基于频率的上下文分类器
	光谱—上下文分类器	分类中用到光谱和空间信息；首先用无参或有参分类来得到初始分割结果，然后用上下文分类器进行优化	均一物体的提取和分类；参数或无参分类和上下文分类器相结合的方法

资料来源：Lu and Weng, 2007.

难。此外，对于低空间分辨率影像中普遍存在的混合像元，其分类精度评估也较难处理。这一缺陷在全球地表覆盖分类方法和产品中尤为显著，并成为制约地表覆盖分类制图产品广泛应用的瓶颈。

1.1.3 全球地表覆盖遥感制图现状

鉴于地球表面景观及生态系统的复杂性，全球地表覆盖（global land cover, GLC）遥感制图一直是国际遥感界关注的热点和难点（Townshend et al., 1991; Defries and Townshend, 1999; Verburg et al., 2011）。因此，该领域的国际性研究项目层出不穷，如联合国粮农组织（UN/FAO）土地利用分类项目、美国 NASA 土地利用/覆盖变化研究项目（the land use and land cover change program）、美国政府间气候变化科学项目中的土地利用项目（the land use program element in the inter-agency U.S. climate change science program），以及 IGBP 和 IHDP 土地利用/覆盖变化核心项目（the international geosphere

biosphere's land use and cover change (LUCC) core project)、由 CEOS 提出的森林和地表覆盖动态的全球观测 (global observation of forest and land cover dynamics, GOF-C-GOLD) 项目、国际应用系统分析研究所土地利用/覆盖和农业研究项目 (land use change and agriculture program, international institute of applied systems analysis, IIASA)、国际地理联合会 (IGU) 的土地利用与地表覆盖变化研究项目等。

IGBP 在其第二研究阶段, 对已执行了十年的全球变化与陆地生态系统 (GCTE) 和地表利用/覆盖变化 (LUCC) 两个核心计划进行合并, 形成全球土地计划 (global land project, GLP), 以更好地观测、模拟和理解人类与环境系统的相互耦合作用 (Foley et al., 2005)。其研究重点包括以下 3 个方面: ①鉴别耦合的人类-环境系统中变化的性质、结构和驱动因子及其对耦合系统的作用; ②评价土地利用/地表覆盖对生态系统功能和服务价值的影响; ③鉴别脆弱和持续稳定的人类-环境系统与外界扰动 (包括气候变化) 的相互作用。

美国地质调查局 (USGS) (Loveland and Belward, 1997)、马里兰大学 (UMD) (Hansen et al., 2000)、波士顿大学 (BU) (Friedl et al., 2002) 和欧洲空间局 (Fritz et al., 2003) 分别开展了粗分辨率 GLC 制图, 研制出 6 套 300~1000m 分辨率的数据产品。USGS 和 UMD 利用的是由 NOAA/AVHRR 数据合成的 1992~1993 年每旬的归一化植被指数 (NDVI), BU 使用的是 2000~2001 年的 MODIS 数据, 基于计算机聚类 and 人工解译编辑方法实现; 欧洲空间局则使用 1999~2000 年的 SPOT VEGETATION 传感器数据, 由世界上 19 个不同区域的大量工作人员使用不同算法, 研制出 GLC2000。表 1-2 列出了已有 300~1000m 分辨率的 6 套全球地表覆盖产品。从中可知, 美国 3 套 1km 全球地表覆盖图使用 IGBP 的 17 类覆盖类型的系统, 而欧盟的 GLC2000 和 GlobCover 采用了联合国粮农组织 22 类的分类方案 (FAO LCCS)。

表 1-2 已有的全球地表覆盖产品的特征比较

数据产品	分辨率	分类系统	数据年代	分类方法	精度评价
USGS	1km	IGBP 17 类分类系统	1992 年 (利用 1992~1993 年 AVHRR 数据合成的 NDVI 生产)	基于聚类和人工解译编辑	基于少数样点进行精度评价, 总体精度为 66.9%
UMD	1km	同上	同上	不同的分类树算法	同上
BU	1km	同上	2000 年 (利用 2000~2001 年的 MODIS 数据生产)	监督分类	基于少数样点进行精度评价, 总体精度为 78.3%
GLC2000	1km	FAO 的地表覆盖 22 类分类系统 (LCCS)	1999 年 (使用 1999~2000 年 SPOT 的 VEGETATION 数据生产)	分 19 个区域, 30 个合作伙伴用非监督、监督分类制作完成	558 个点, 总体统计精度为 68.6%
GlobCover 2005	300m	同上	2005 年 (利用 2004.12~2006.6 300m 的 ENVISAT/MERIS 数据生产)	全球分为 22 个生态气候区, 各区采用不同多维迭代聚类方法进行分类	16 位专家在全球 3000 个点进行验证, 总体精度为 73%
GlobCover 2009	300m	同上	2009 年 (利用 2009.1.1~2009.12.31 300m 的 ENVISAT/MERIS 数据生产)	全球分为 22 个生态气候区, 各区采用不同多维迭代聚类方法进行分类	14 位专家在全球 4164 个点进行验证, 总体精度为 70.7%

就分类精度而言, 这些产品的自我评价分类精度为 66.9%~78.3%, 如 16 位专家针对全球 3000 点进行的验证结果, GlobCover 2005 的总体精度为 73% (<http://www.>

esa.int/esaEO/SEMxB7TTGOF_index_0.html)。但这些精度评价结果是基于少数样点数据得到的, 缺少全球系统性的精度评价结果。而且, 不同产品之间的一致性也较差, 特别是地表覆盖类型异质性高的区域 (Mayaux et al., 2006; Herold et al., 2008)。

1.1.4 存在的主要问题

上述 6 套粗分辨率全球地表覆盖数据产品在地球系统模拟、气候变化研究中发挥了重要作用。但随着全球变化研究的不断深入, 这些粗分辨率全球地表覆盖数据产品的局限性与不足逐渐显现, 用户普遍认为其空间细节不够, 分类精度不高, 不同产品之间一致性较差, 远不能满足应用需求 (Herold et al., 2008; 宫鹏, 2009; Verburg et al., 2011)。主要问题表现为以下三个方面。

1. 分类体系不能满足地球系统模式研究的需求

如前所述, 美国 3 套全球地表覆盖数据产品采用的是国际地圈生物圈计划 (IGBP) 的 17 类覆盖分类系统, 而欧洲三套数据产品 GLC2000 和 GlobCover 采用的是国际粮农组织 22 类的分类方案 (FAO LCCS)。这些分类体系与地球系统模式需求有一定差异, 往往需要结合其他资料 (如温度) 进行处理转换, 方可生成模式参数化所需的植被功能型 (plant functional types, PFT) 分类 (Bonan et al., 2002)。美国 10 余名从事地球系统模式研究的科学院院士认为, 目前的地表覆盖分类系统并不完全满足地球系统模式的需求, 应该更加关注全球植被生态类型、木本植被季相 (常绿、落叶)、叶类型 (针叶、阔叶)、草本植被的光合作用途径 (C3、C4 植物类型), 以及植物受干扰的类型和强度等 (DeFries et al., 1995)。他们建议使用少量的地表覆盖类型-植被功能类型 (LC-PFT), 但是应尽量准确地刻画 PFT 的空间分布和比例来驱动陆面过程模型 (DeFries and Townshend, 1999; Hansen et al., 2002)。

2. 产品分类精度及一致性不能满足应用需求

4 套 1km 全球地表覆盖数据都是利用 1km 分辨率的 AVHRR、MODIS 和 VEGETATION 资料和计算机自动图像分类方法生成。最近的一些研究指出这些产品中存在大量错误和不一致性 (Sedano et al., 2005; Frey and Smith, 2007; Herold et al., 2008)。Sedano 等 (2005) 在莫桑比克约 105km² 的森林地区, 使用 400 个野外站点和陆地卫星 TM 图像进行了多套产品分类精度和一致性验证, 发现 BU 的全球地表覆盖图在该地区几乎完全错误。Frey 和 Smith (2007) 利用在俄罗斯西伯利亚约 106km² 的地区抽取 2161 个野外调查站点资料, 结合一些区域地表覆盖地图, 对 USGS 和 UMD 的全球地表覆盖产品进行验证, 发现这两套数据的总体精度分别只有 22% 和 11%。McCallum 等 (2006) 通过比较分析, 发现四套数据产品的分类结果比较一致的区域只有格陵兰岛的雪/冰覆盖地区、非洲的荒漠/稀树地区, 以及巴西的热带雨林, 总计占全球面积的 26%。Herold 等 (2008) 在非洲、亚洲、欧洲、北美洲、南美洲, 以及俄罗斯和澳大利亚选择了 7 片 500km×500km 的样区, 进行高空间分辨率遥感数据与四套 1km 全球地表覆盖产品的比较, 发现四套图的相互一致性只在南美洲超过 80%, 在其余六片样区的一致性都低于 20%, 尤其在地表覆盖类型复杂的地区, 这些产品之间存在明显差异。上述粗分辨率全

球地表覆盖数据的精度较低，相互间的一致性较差，难以用于许多对分类精度有一定要求的应用研究。

3. 产品时间局限性较大

USGS 和 UMD 的产品主要根据 NOAA/AVHRR 数据合成的 1992~1993 年每旬的归一化植被指数生成；BU 的产品是利用 2000~2001 年 MODIS 数据生成；GLC2000 产品是利用 20 世纪 90 年代 SPOT/VEGETATION 数据生成；GlobCover 2005 产品利用 2004~2006 年的 ENVISAT/MERIS 数据生成。由于已有的 6 套全球地表覆盖产品距现在已有 20 多年，在反映最新全球地表覆盖状况方面具有较大局限性，同时，这些产品只反映了某一时期（年代）全球地表覆盖状况，难以据此进行地表覆盖变化效应的研究。

1.2 高分辨率 GLC 数据产品研制

在过去的十多年里，我国在地表覆盖遥感制图方面开展了一系列研究与应用，如中科院地理所研发了我国 20 世纪 80 年代末到 2010 年 30m 空间分辨率 LUCC 数据库（刘纪远等，2002，2014）。但就总体而言，我国以往的研究工作主要限于国内，对全球尺度的地表覆盖制图涉及甚少，缺乏自主研制全球地表覆盖数据产品的技术能力，导致我国在开展全球变化相关工作时严重依赖美国和欧洲的产品，不能满足我国地球系统模式发展和全球变化研究的需求。面对国际科技前沿和国内外重大应用需求，我国于 2009 年年初启动了 863 计划重点项目“全球地表覆盖遥感制图及关键技术研究”，旨在研发大区域遥感制图关键技术，研制高分辨率、高质量 GLC 数据产品，以有效支撑我国全球变化研究、地球系统模拟和可持续发展研究（陈军等，2011）。

1.2.1 总体需求

满足地球系统模式分类要求，提高地表覆盖数据产品的时空分辨率，产出高质量数据产品，向全社会提供共享服务，是高分辨率、高质量 GLC 数据产品研发面临的主要需求。为此，需要研究和发展 GLC 产品遥感生成与更新的关键技术，研建实用的成套生产技术系统，形成 GLC 遥感产品的规模化生产、更新与服务能力；设计和研制全球高分辨率地表覆盖数据系列产品，为全球变化和地球系统模式研究等提供可靠的基础数据支撑；通过应用示范研究，对新一代地表覆盖产品进行定量评价。

1. 贴近地球系统模式分类需求

GLC 遥感制图研究的主要需求之一是全球变化研究和地球系统模式发展。20 世纪 80 年代，大区域地表覆盖遥感工作主要基于传统的遥感数据解译，虽可以满足某些应用需要，但很少强调地表覆盖类型与陆面过程等模式需求的结合。此外，地表覆盖分类系统也因地、因时和因人而异，很难相互进行比较和转换。90 年代以来，人们对地表覆盖及其特征含义进行了新的解读和界定，不仅将地表覆盖看作是单一的土地和植被类型，而且认为它是一系列自然社会属性和特征的综合体，包括土地类型和植被类型、植被冠层的密度、植被生长季节的动态特征、生长季累积生物量、地表覆盖度、光合作用类型

及能力等生物物理特征量。此外,该综合体还包括与地表覆盖类型密切相关的生态环境要素,如植被所处的生态区域、地形与气候条件、土壤的理化性质,以及土地利用状况等。这样一种以覆盖类型为核心、具有多维空间信息的综合体概念,可以更准确、完整地刻画地表覆盖的特征,对地表覆盖遥感制图与分析有着重要指导意义(DeFries et al., 1998)。

对传统地表覆盖分类系统进行改进是近年来又一重要发展趋势。过去大多是采用自上而下的等级分类系统,进行地表覆盖的遥感分类,即预先划定若干等级的地表覆盖类型和亚类型,然后对影像像元进行分类,归入某一类型。这是面向某种特定应用而定制的,难以满足其他应用需求。为克服这一局限性,Loveland等(2000)提出了“灵活的地表覆盖数据库”概念,利用卫星在生长季内获得的多时相数据,依据地表覆盖的动态过程,将影像像元划分为季节性地表覆盖单元,每个单元内部的像元具有相似的物候生长期、类似的地上累积生物量,以及相似的植被种类组合和生态环境。这些季节性地表覆盖单元及其光谱、地形、生态区、气候等属性特征,构成灵活的地表覆盖数据库的基本成分,成为分类系统中最底部的一层。用户可根据其类型和特征,按所需的地表覆盖系统进行调整和归并。这一新的地表覆盖分类策略曾在美国及全球1km地表覆盖数据库的研制中得以应用。

将地表覆盖类型转换为陆表过程等模式的参数时,1km或更粗空间分辨率的地表覆盖分类数据往往空间细节不够,且缺乏对PFT的定量表达,但顾及少量PFT类型的地表覆盖分类往往类型太少。解决的主要途径之一,是设计更适于地球系统模式需求的地表覆盖分类系统。例如,Sterling和Ducharne(2008)设计了一个新的地表覆盖分类系统,把10余种不同来源的地表覆盖图编辑在一起,用于陆表过程模拟研究。但由于其使用的地表覆盖数据来源在时间、详细程度、类型的转换等方面存在很大差异,因而不能反映某一时间全球地表覆盖的状况,必然给地球系统模拟带来很大的不确定性。途径之二是使用更高空间分辨率、多种传感器来源的遥感数据。途径之三是针对特定地表覆盖类型,设计特定的信息提取算法,如利用DMSP夜间灯光强度数据、MODIS NDVI和陆地卫星TM/ETM+等数据及其组合,提取居民地类型等单类型信息(Imhoff et al., 1997; Henderson et al., 2003; Lu et al., 2008);利用TM/ETM+数据等对北极圈的湖泊(Sheng et al., 2004)及中国的湿地进行制图等(牛振国等, 2012)。

2. 提高地表覆盖数据产品的时空分辨率

在过去的十多年里,GLC数据产品的空间分辨率已从最初的1°提高到8km、1km和300m。为满足新一代地球系统模式和全球变化研究的需要,GLC数据产品的空间分辨率将进一步向250m、100m和30m发展,局部地区甚至需要更高的空间分辨率。此外,不仅要提供地表覆盖类型,还需要提供亚像元尺度的比例信息,以满足未来地球系统模式高精度参数化的需要。同时,时间上则从特定单一年份向逐年、逐季产品发展,向动态监测和持续更新发展。

1) 选择30m空间分辨率

近年来,高分辨率GLC遥感制图研究与数据产品研制受到国际上的高度关注(Giri