

黄淮海区夏玉米 种植面积和空间分布变化 检测遥感研究

刘 珺 著



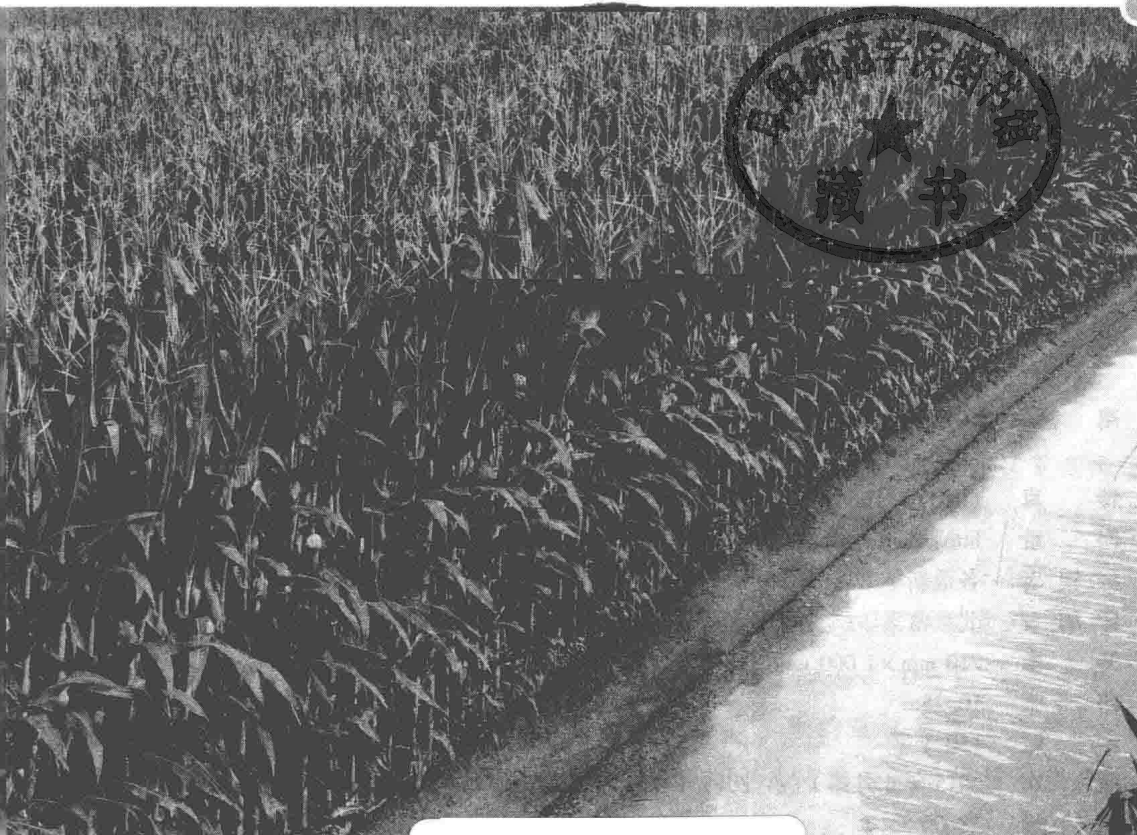
中国农业科学技术出版社

S513.019

1

黄淮海区夏玉米 种植面积和空间分布变化 检测遥感研究

刘 珺 著



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

黄淮海区夏玉米种植面积和空间分布变化检测遥感研究 / 刘 珺著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. 4
ISBN 978 - 7 - 5116 - 2022 - 4

I. ①黄… II. ①刘… III. ①遥感技术 - 应用 - 玉米 - 种植 - 面积 - 检测 - 研究②遥感技术 - 应用 - 玉米 - 种植 - 地理分布 - 检测 - 研究 IV. ①S513.019

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 060466 号

责任编辑 张孝安
责任校对 李向荣

出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081
电 话 (010) 82109708 (编辑室) (010) 82106624 (发行部)
(010) 82109703 (读者服务部)
传 真 (010) 82106650
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 各地新华书店
印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司
开 本 710 mm × 1 000 mm 1/16
印 张 10.25
字 数 150 千字
版 次 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

— 版权所有 · 翻印必究 —

内容摘要

ABSTRACT

玉米是重要的粮食作物，也是饲料和工业原料的重要来源。近年来，我国玉米种植面积不断增加。2011年，玉米已经超过小麦和水稻，成为我国第一大粮食作物。黄淮海区是我国最大的夏玉米集中产区，该区夏玉米种植变化对我国粮食安全、价格和玉米市场供需平衡有着直接和重大的影响。利用遥感技术不但可以及时准确地获取大区域范围内夏玉米种植面积和空间分布状况，而且可以掌握其年度间的动态变化信息，为指导我国农业生产和制定农业政策提供依据。

本项目以黄淮海区为研究区，以夏玉米的识别提取为重点，以夏玉米种植信息动态变化检测为目的，基于 MODIS EVI 影像，采用以分类后比较为基础的变化检测方法，围绕夏玉米种植面积和空间分布的变化进行了系统的研究。

在分析夏玉米遥感信息特征的基础上，首先，利用拟合法对黄淮海区夏玉米生长发育期进行了监测，得到了夏玉米苗期、拔节期、抽雄期和成熟期等关键物候期对应的时间；其次，采用三步法进行夏玉米分类。为了将夏玉米与其他一年两熟作物进行区分，研究提出了基于最佳时序谱段组合的夏玉米提取模式，并构造了加权平均分离距离（Weighed Average Separability Distance, D_{was} ），对多类别间的统计可分性进行了判断，得到了区别夏玉米和水稻的最佳时期（成熟期）和区分夏玉米与夏棉花的最佳时期（拔节期）。基于选定的最佳时序谱段组合，利用最大似然法和决策树算法将水稻、棉花等一年两熟作物进行了剔除，从而实现了夏玉米的识别提取。在此基础上，利用面积比例算法，得到研究区历年夏玉米种植面积。利用地面实测数据、较高空间分辨率 TM 数据的分类结果和统计资

料从种植面积和空间分布两个方面对基于 MODIS 数据的夏玉米提取结果进行了验证。最后,构造了基于二值化影像的图像叠合法,定量地表达了夏玉米种植变化信息,实现了夏玉米的变化检测。同时,本研究按地理位置将黄淮海区分为 4 个部分,结合变化检测影像,分区域对黄淮海区夏玉米种植的时空变化信息进行了分析。

通过研究,取得了以下主要成果和结论。

第一,黄淮海区夏玉米种植面积在 2000—2010 年的 11 年间增加了 2 513.81 km^2 ,总体趋势为先减少后增加。其中,北部区域呈持续减少态势;东部区域种植最少也最稳定,11 年间无明显变化;南部区域增幅最大;中部区域种植比重最大。夏玉米的空间分布在纵向上,随着纬度降低而增加,在横向上,随着经度的降低而增加。中南部种植比例明显增加,随着时间推移,整个区域夏玉米分布呈南移现象。

第二,获取了研究区的夏玉米关键物候期。基于 Logistic 模型得到夏玉米生长过程的拟合曲线,并利用最大斜率法和动态阈值法相结合的方法获取了遥感监测夏玉米的关键物候期(苗期、拔节期、抽雄期和成熟期)。同时,与 16d 合成的 MODIS 植被指数数据相比,研究构造的 8d 合成的植被指数数据有效地提高了物候监测误差。

第三,构造了表征夏玉米与其他作物可分性的加权平均分离距离 D_{was} 。该距离避免了平均 JM 距离对先验概率估计的误差,不仅可以降低多时相数据的维数,而且减少了分类过程中误差的累积。

第四,提出了拔节期和成熟期是识别夏玉米的最佳时序谱段。根据获取到的夏玉米物候期,将时序谱段进行了组合,然后对识别夏玉米的最佳谱段组合进行了判断,发现夏玉米拔节期时其与夏棉花的生长特征差异明显,夏玉米成熟期时,它与水稻的生长特征差异明显。为夏玉米提取模式的建立奠定了基础。

第五,基于最佳时序谱段选择的夏玉米提取模式,大大缩短了夏玉米分类时间和过程,有效地减少了分类误差,提高了工作效率。研究基于拔节期和成熟期内夏玉米的特征对其进行了识别,从而将夏玉米从一年两熟作物中提取出来。该提取模式快速地实现了数据降维,将夏玉米特征提取局限于较小范围的数据子集

中,有利于快速地监测到提取要素和特征,从而缩短了提取过程,减少了误差累积。

第六,构建了图像叠合法用于夏玉米种植信息变化检测。该方法是基于二值化分类影像而进行的变化检测方法。它不仅可以获取夏玉米种植面积变化情况,而且可以直接检测多年的夏玉米种植空间分布变化信息;不仅原理简单,易于操作和实现,而且可以直观地展示发生变化的空间分布。

为了使研究成果更加精确,在研究的过程中亦做了一些创新,主要表现在以下几个方面。

第一,针对夏玉米南北物候期的差异,提出了基于类别间统计可分性判断的夏玉米提取模式。该方法克服了南北物候差异问题,降低了数据维数,减少了数据冗余,避免了费时费力的作物特征选择,可快速确定作物分类的最佳波段或波段组合,从而在限定的波段子集中实现作物精确分类。

第二,构造了加权平均分离距离 D_{was} ,用于夏玉米与其他多种作物间统计可分性的强弱判断。与常用的平均 J-M 距离 ($\bar{J}$) 相比,加权平均分离距离 D_{was} 无需计算每类的先验概率,避免了计算的繁琐和计算过程中可能产生的误差,有助于地物的分类识别和提取。同时提高了提取精度。

第三,构造了用于变化检测的图像叠合法。该方法灵活性强,不受时间的约束,可以进行多目标、多时相的横向和纵向变化检测。

前 言

PREFACE

土地是人类赖以生存和发展的物质基础，人类的衣食住行离不开土地。而耕地是土地的精华，是人们获取粮食以及其他农产品不可替代的生产资料。新中国成立以来，我国的种植业生产得到了全面可持续的发展，基本可以满足人口增加与经济发展的需求。中国是农业大国，人多地少、耕地资源稀缺是制约我国经济发展的瓶颈之一。近年来，国家不断制定和出台各类“富农、强农”政策，鼓励和扶持农业发展，对耕地资源提出合理利用、科学布局、保护耕地、精耕细作，提高耕地利用率的要求。

耕地布局和农作物品种选配直接影响作物的生长发育、产量和品质。因此，加强耕地质量和分布的管理、因地制宜和科学合理的管控是农业生产重要的一条措施，也是维护社会稳定和促进经济可持续发展的重要保障。

近年来，我国农作物尤其是粮食作物的种植结构发生了显著的变化，小麦、水稻、玉米的种植面积和比例发生了较大的改变。作为饲料和口粮主要来源的玉米，其种植面积一再增加，从 20 世纪 80 年代以来的第三大粮食作物，发展到 2010 年的第一大粮食作物。受国家政策的鼓励和市场需求，2011—2014 年间，我国玉米种植面积持续增加，预计 2015 年还将稳步增长。基于上述原因，作者做了关于玉米种植信息及其变化的一些研究。

我国地域广阔，自然与社会经济条件复杂。黄淮海作为我国第二大玉米生产区，其玉米种植面积和产量在我国占有举足轻重的地位。区域内玉米生产安全直接影响我国的粮食市场价格走向及农民的种植意向。因此，作者选择了我国夏玉

米的主产地—黄淮海区作为研究区域，对该区近 11 年以来，夏玉米的种植面积和空间分布及二者的变化进行了研究。通过本书的研究，若能给同行的研究人员和相关部门的指导者以参考，则达到本书出版的目的了。

本书的研究获得国家“973”计划项目“气候变化对我国粮食生产系统的影响机理及适应机制研究”子课题的资助。其中的关键技术问题得到南京大学田庆久教授的大力支持与帮助，写作过程也是在田庆久教授的不断指正下修改完成的。此外，野外采样是在南京大学博士生和硕士生的帮助下完成的，在此向田庆久教授和共同协作的同学们表示真挚的感谢。

本书中部分细节存在一定的欠缺与不妥之处，望读者给予批评指正。

刘 璐

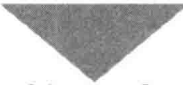
2015 年 3 月

目 录

CONTENTS

第一章 绪论	(1)
第一节 选题依据	(1)
第二节 国内外研究进展	(5)
第三节 主要研究内容与技术路线	(12)
第二章 研究区与数据支持	(15)
第一节 研究区概况	(15)
第二节 研究所用数据	(19)
第三节 遥感数据预处理	(30)
第四节 小结	(34)
第三章 夏玉米生长发育期的遥感信息特征及其物候期监测	(36)
第一节 植被光谱特性分析	(36)
第二节 夏玉米生长发育期的遥感信息特征分析	(37)
第三节 玉米关键物候期的遥感监测	(48)
第四章 利用 MODIS 数据提取黄淮海区夏玉米种植面积和 空间分布	(72)
第一节 基于 MODIS 时序植被指数的夏玉米遥感提取	(72)
第二节 利用 MODIS 数据提取的黄淮海区夏玉米分布结果	(81)
第三节 对 MODIS 数据提取夏玉米结果的检验	(85)

第四节 误差分析	(104)
第五章 黄淮海区夏玉米种植信息时空变化检测及分析	(106)
第一节 夏玉米种植面积变化检测及分析	(106)
第二节 夏玉米空间分布变化检测及分析	(109)
第三节 小结	(118)
第六章 结论与展望	(119)
第一节 主要成果	(119)
第二节 主要结论	(121)
第三节 本研究的创新点	(122)
第四节 本研究的不足之处	(123)
第五节 展望	(123)
附录	(125)
图索引	(133)
INDEX OF FIGURE	(135)
表索引	(139)
INDEX OF TABLE	(141)
参考文献	(143)



第一章

绪 论

第一节 选题依据

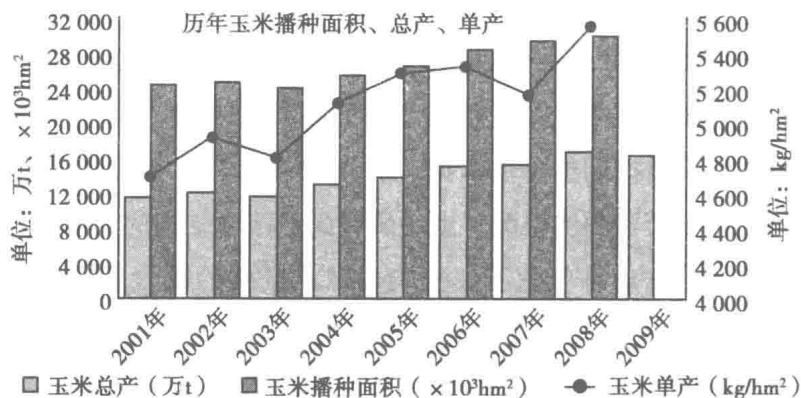
农业生产是人类社会存在的基础，大范围的、可靠的农情信息对粮食市场贸易及相关政策的制定至关重要，是保障区域和全球粮食安全的重要依据^[1]。掌握农作物种植信息是了解农产品的种类、结构、分布特征的重要信息来源，可为农业结构调整提供依据。农作物种植信息可以反映农业生产在空间范围内利用生产资源的情况，也是研究区域粮食结构的重要数据源^[2]。

农作物种植信息动态变化不仅影响全球或区域的粮食安全和社会稳定，而且对全球和区域的气候变化、生物地球化学循环、陆地-海洋相互关系都发挥着重要作用^[3,4]，已成为全球变化研究的热点课题^[5]。进行农作物种植信息动态变化检测是国家制定粮食政策和经济计划的重要依据，对于加强农作物生产管理，进一步发挥生产潜力，辅助政府有关部门制定科学合理的粮食政策具有重要意义^[6]。

中国是农业大国，粮食生产和安全对社会稳定和人民生活意义重大，因此，及时了解农作物种植信息变化情况，对我国粮食宏观调控和粮食贸易意义重大^[7]。种植面积和空间格局分布是农作物种植信息的重要组成部分，研

究农作物种植面积和空间格局的变化对宏观掌握农作物生产状况、了解农业生产、保证农业产业结构调整、保障农业可持续发展有着十分重要的意义。

玉米是重要的粮食作物之一。其主要用于口粮、饲料用粮、工业用粮和种子用粮及出口等几个方面。随着经济的持续发展、畜牧业的兴盛、饲料消费的增加及玉米深加工的扩大,2010年,国内玉米消费量达到1579.2亿kg,同比增加134.7亿kg,增幅9.3%。其中,城镇口粮19.5亿kg,同比增加4亿kg,增幅25.5%;农村口粮112.9亿kg,同比增加2.4亿kg,增幅2.2%;饲料用粮1019.1亿kg,同比增加85.1亿kg,增幅9.1%;工业用粮406.0亿kg,同比增加42.0亿kg,增幅11.5%;种子用粮21.8亿kg,同比增加0.8亿kg,增幅3.6%。玉米消费量位居前5位的省份中,位于黄淮海区的有3个省份,其中,山东省为193.5亿kg,同比增加38亿kg;河南省137.7亿kg,同比增加15.7亿kg;河北省98.8亿kg,同比减少11.2亿kg (<http://www.chinamaize.com.cn>)。玉米消费量的增加直接导致玉米种植面积不断扩大。



(图片引自 <http://www.moa.gov.cn>)

图 1-1 全国玉米播种面积、总产、单产

Figure 1-1 Distribution map for corn planting area, total output and yield in China

近年来,由于玉米价格持续高位运行、国家对玉米种植进行补贴以及部分地区积极推广农业政策性保险等原因,我国玉米播种面积不断扩大(图1-1)。2010年,全国玉米种植面积突破 $3.3 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 玉米成为全国第

一大农作物；2011年，全国玉米播种面积约为 $3.2 \times 10^7 \text{hm}^2$ ，比2010年减少 $1 \times 10^6 \text{hm}^2$ 。不仅如此，我国玉米种植面积年际间浮动也较大，如2000—2009年间全国玉米播种面积变幅达到10.3%；与2010年相比，2011年，我国玉米种植面积继续增加，增幅为2.9%。部分省市玉米种植面积变化也较大，如山东省2000—2009年间玉米播种面积变化占2009年全省玉米播种面积的20.9%。其中，山东省2005年玉米播种面积较2004年增加了 $2.8 \times 10^5 \text{hm}^2$ ；2007年玉米户均播种面积比2006年增加0.67%。

玉米种植面积的变化直接影响其产量，进而引起饲料、猪肉和禽肉，奶牛和肉牛的价格变化。比价效应也使得其他粮食和饲料的价格发生变化。例如，2007年国际市场玉米价格同比上升了72.0%，超过小麦（53.2%）、大豆（39.9%）和水稻（5.1%）。因此，关注和发展玉米生产、获取大范围内玉米的种植变化信息对保障我国粮食安全，促进社会稳定有着十分重要而深远的意义。

就农作物监测而言，每年的种植面积只能说明当年的种植情况（结构、比例、数量等），而掌握多年的变化信息，不仅可以了解作物种植结构的变化，而且可以预测未来发展趋势，从而更合理地指导农业生产。因此，监测作物种植信息的年际变化比监测其绝对面积更有意义^[8]。

黄淮海区覆盖山东省、河南省、河北省、江苏省北部、安徽省北部、北京市、天津市等区域，是中国重要的商品粮基地。我国玉米分为6个种植区，东北为第一大主产区，种植面积稳定在 $6.5 \times 10^5 \text{hm}^2$ ，占全国36%左右。但东北是我国的春播玉米主产区。而作为第二大玉米主产区的黄淮海区域是我国最大的夏玉米生产基地。黄淮海区夏播玉米区，以山东省和河南省为主，种植面积约 $6 \times 10^5 \text{hm}^2$ ，约占全国的32%，总产约2200万t，占全国34%左右（<http://finance.sina.com.cn/gnfinfo/20040903/1359998734.shtml>）。黄淮海区夏玉米种植变化也较大，据统计，1985—2000年间黄淮海区玉米的播种面积增长了26.9%，接近该区粮食总播种面积的30%^[9]。黄淮海区玉米种植在我国玉米生产中占有十分重要的地位，该区玉米生产状况是否良好直接影响我国粮食市场的起伏。因此，监测黄淮海区夏玉米种植信息及其变化对全

国农业生产有着极其重要和深远的意义。

长期以来,大范围作物监测一直是农业研究的重点和难点。传统的作物种植信息获取方式是通过国家统计局每年出版《中国农业统计年鉴》和《中国农村统计年鉴》来获得。通过这种方式获取数据的弊端有以下几方面。①不能得到实时数据,无法得到作物空间分布信息,因而无法全面了解作物种植情况,也无法对一季作物种植进行调控;②层层上报的统计数据往往不客观,基于这些信息进行宏观调控和管理,预期效果很难保证^[10];③农业生产面积大、范围广、区域差异大、季节性强,通过地面调查方式获取农作物种植信息,在技术和经济方面都无法承受。实践证明,常规的统计方式已不能适应我国社会发展的需求。

而遥感技术的应运而生解决了这一问题。应用遥感技术可以及时、准确地监测大范围农作物种植信息,并监测其变化信息。与常规的统计方法相比,遥感技术具有覆盖面大、重访周期短、成本低等特点,因此,被广泛应用于对地观测活动中,为大区域尺度掌握农作物种植面积变化提供了新的科学技术手段,成为目前快速、准确获取大范围农情信息的唯一、有效的方法^[1]。作物种植信息的遥感监测是在收集作物光谱特征的基础上,分析遥感影像记录的作物信息,进行作物类型识别,并检测其变化。遥感识别和变化检测是作物遥感监测的重要技术研究课题^[11~14]。以卫星遥感技术进行夏玉米种植信息动态变化监测,不但可以较好地反映夏玉米面积变化情况,而且可以直观地显示其空间分布的动态变化,具有其他监测方法不可比拟的优点。遥感技术与地理信息系统和全球定位系统相结合,不仅可以监测作物某一阶段的生长状况,而且可以动态监测农作物的整个生长发育过程;不仅可以监测作物种植的实时信息,而且可以得到作物种植的变化信息。

遥感技术应用于土地覆盖/利用、森林以及植被的变化监测的研究至今已有几十年的历史^[15]。多源、免费、丰富的遥感数据是获取土地利用/覆盖变化信息的基础,而遥感技术则使得快速、准确、有效地获取地面变化信息成为可能。近20多年来,利用遥感数据和技术手段进行土地利用/覆盖的动态

变化检测得到越来越广泛的应用和重视,并且已经形成和发展了许多基于遥感技术的动态变化检测方法^[16]。

随着遥感技术的发展和提高,遥感在农业领域的应用也越来越广泛。近些年,遥感技术被越来越多地应用在精细农业的各个领域,如利用遥感技术提取作物信息^[17~19],计算作物种植面积^[20~22];利用遥感技术进行作物估产^[23,24],监测作物种植格局^[25];利用遥感技术获得各种植被冠层状态变量值用来估算生物量;利用遥感技术手段研究气候变化对农业的影响^[26~28];利用遥感技术进行作物病虫害监测^[29];利用遥感技术提取地面信息;发挥不同波段的特长,以提取不同研究目的的信息。如遥感影像的微波波段提取土壤含水量和植物含水量的信息^[30],利用热红外波段提取植被含水状态^[31];利用遥感技术研究太阳波谱数据与叶面积指数和光合吸收辐射的关系;利用雷达影像获得植被结构的信息;利用高光谱遥感导数光谱技术消除植被覆盖、叶子颜色和土壤颜色等因素的影响,以便反映叶面积指数、叶绿素含量信息^[32]等。

在众多遥感数据中,MODIS 数据因其具有高时间分辨率和宽幅的特点,而被广泛应用于大范围的农作物监测中。其 1~2d 的时间分辨率可以获得作物生长期内的连续影像,为准确监测作物物候及生长变化提供了数据支持。此外,TM 等中高空间分辨率的卫星数据对小区域的检测发挥着重要作用,同时也是验证 MODIS 等中低空间分辨率影像分类识别效果的重要数据源。

本研究抓住当前玉米种植快速增长的热点,针对黄淮海区夏玉米种植变化对全国玉米市场影响重大的特征,充分利用 MODIS 数据宽覆盖面和高时间分辨率的优势,选取覆盖黄淮海区的数据,利用遥感技术手段实现研究区范围内夏玉米种植面积和空间分布变化信息的提取。以期为指导我国农业生产和制定农业政策提供依据,为我国农业生产做出预期贡献。

第二节 国内外研究进展

变化检测就是从不同时期的遥感数据中定量地分析和确定地表达变化的

特征与过程^[33~35]。它涉及变化的类型、分布状况与变化量。出于不同的研究目的,许多学者努力寻找适合自己应用领域的动态变化检测方法,已经形成和发展了许多基于遥感数据的变化识别与检测的方法。这些检测方法按照基于图像分类大致可分为3类:①以分类后比较为基础的方法;②以像元光谱的直接比较为基础的方法;③分类比较法和像元光谱直接比较法相结合的混合方法。随着遥感技术快速发展,也出现了一些新型的变化检测方法,如变化向量分析法、马尔科夫随机场模型、利用概率统计理论的基于图斑的变化检测法、面向对象技术分类法、独立成分分析混合模型和支撑向量机等变化检测方法^[36~41]。

以分类后比较为基础的方法是一种简单明晰的变化检测方法^[42],是目前应用最广泛的定量变化检测方法^[43]。其基本思路是首先对不同时相的影像进行单独分类,然后通过比较同一像元在不同分类影像中的信息来确定是否发生变化以及变化类型^[44]。这种方法的优点是可以直接获取变化的类型、数量和位置。以像元光谱直接比较为基础的方法是不经过分类,通过对同一像元不同时相遥感影像的光谱信息进行比较,直接确定发生变化的位置和范围,然后通过人工目视解译或分类获得变化的类型^[42]。以像元光谱直接比较为基础的方法又可分为以下几种方法:①不同时相的波段代数运算法,如差值法、比值法和植被指数法等;②回归法;③主成分分析法;④变化向量分析法(CVA)。随着变化检测对象的多样化、变化信息的复杂化,以及遥感数据多源化的发展,不断涌现新的变化检测方法。主要有利用概率统计学理论进行基于图斑的变化检测、利用支持向量机技术、利用变化向量分析法、面向对象分类技术、马尔科夫随机场模型等。

在以分类后比较为基础的变化检测法、以像元光谱直接比较为基础的变化检测法,以及将二者结合的混合方法之间,研究人员针对根据各自的研究对象、研究目的选择合适的研究方法进行各种土地覆盖/利用的动态变化检测。不同的方法各有其优点,同时也各有其不足。各种方法的优缺点比较结果如表1-1所示。

表 1-1 变化检测方法比较

Table 1-1 Comparison among different change detection methods

方法	优点	缺点	关键问题
以分类后比较为基础的 变化检测法	可以直接获取变化的类型、数量和位置 对研究区的土地覆盖变化不需要有先验知识 能回避所用多时相数据因获取季节不同和传感器不同所带来的归一化问题 不受时相数的限制，可同时进行两个时相以上的遥感影像的变化监测分析	无法检测出某一种土地覆盖类型内部的细微变化 必须进行两次图像分类且制定统一的分类标准 多次分类，费时费力，误差累积 变化分析的精度取决于图像分类的精度	需要选择充足的学习样本
以像元光谱直接比较为基础的 变化检测法	可以直接确定变化信息的位置，避免大范围分类，提高了检测速度	难以证实和标记变化类别，不能提供完全的变换矩阵	变化类别的标记
混合方法	通过分类消除非变化像元以减小分类误差	需要选择门限以确定变化类型	需要选择合适的门限区分变化和非变化区域

一、国外研究进展

国外对变化检测的研究起步较早，根据检测范围分为全球和区域两级，采用的数据主要有 NOAA 和 Landsat 数据。随着对地观测系统卫星的成功发射，近些年来，MODIS 遥感影像得到越来越多的应用。

分类后比较法由于其直观、简单、易操作等特点而被最早应用于变化检测中。Howarth 等^[45]利用分类后比较的方法检测三角洲地带的边界动态变化；Bhattacharya 等^[46]基于改进的后向传播神经网络（BP）分类法进行了线性地物的变化检测。而以像元光谱直接比较法应用得比较多，Weismiller 等^[47]利用差值法进行了沿海地区的环境变化检测；Byrne 等^[48]利用主成分分析法将两景 4 个波段的 Landsat 影像进行叠加，实现了土地覆盖变化检测；Nelson^[49]分别利用差值法、比值法和植被指数法监测了森林动态变化检测；Tucker^[50]基于多时相 AVHRR 的 NDVI 数据，采用主成分分析法，进行了非洲大陆的土地覆盖分类研究；Singh^[51]利用回归法进行了印度东北部典型森林环境的动态变化检测；Quarmby 等^[52]利用差值法进行了城市扩张的变化检测，得到由乡村演变为城市引起的土地利用面积