

An Overview of Research on Remote Sensing Technology for Estimating Yield of Crop in the Arid Region

Jin Wang^{1,2}, Mingfeng Yang², Huizhi Zhu², Shujun Bai²

¹Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi Xinjiang

²Wulanwusu Agrometeorological Experiment Station of Xinjiang, Shihezi Xinjiang

Email: apple6405@sohu.com

Received: Jan. 1st, 2015; accepted: Jan. 15th, 2015; published: Jan. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This article reviewed the research status and the development of remote sensing technology for estimating yield of crop, including: 1) historical synopsis using remote sensing technology for estimating yield; 2) spectrum characteristic agronomy basic research of the cotton; 3) choice of the best time phase using remote sensing technology for estimating yield of crop; 4) extraction of cotton cultivated area information; 5) discussion on the related problems of remote sensing technology for estimating yield of crop.

Keywords

Remote Sensing, Estimating Yield, Cotton

干旱区运用遥感技术对棉花进行估产的研究综述

王 进^{1,2}, 杨明凤², 朱惠芝², 白书军²

¹中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐

²乌兰乌苏农业气象试验站, 新疆 石河子

Email: apple6405@sohu.com

收稿日期：2015年1月1日；录用日期：2015年1月15日；发布日期：2015年1月23日

摘要

本文对目前棉花遥感估产的研究现状及进展进行了阐述，主要包括：1) 运用遥感技术估产的历史概况；2) 棉花光谱特性农学基础研究；3) 棉花遥感估产最佳时相的选择；4) 棉花种植面积信息的提取；5) 棉花遥感估产中有关问题的探讨。

关键词

遥感，估产，棉花

1. 引言

自 20 世纪 60 年代空间遥感技术发展以来，遥感技术在各领域得到广泛应用，特别是在农业方面，实现了快速准确对农作物产量的估算和作物长势的监测，如美国 1974 年到 1977 年的“大面积农作物估产实验”，1980 年到 1986 年的“农业和资源的遥感调查计划”，其主要目的是研制美国所需要的监测全球粮食生产的技术方法，满足美国进行资源管理和了解全球作物产量状况对有关信息的需要，估产精度达到 90% 以上。遥感技术的发展和运用，为作物的种植面积调查、长势监测和产量估算提供了一个新的科学手段。棉花是世界性重要的经济作物，棉花产量也是各级政府进行决策，生产部门指导农业生产，流通领域安排收购和销售，交通部门安排运输计划的重要的农作物。棉花生产中及时准确监测棉花长势长相、诊断水肥状况和产量估算，对提高棉花管理水平和水肥利用效率、减少过度施肥带来的环境污染和指导节水农业生产具有重要意义。棉花产量预报包括估算棉花实际种植面积，监测其长势情况，最终预报其产量的高低，利用遥感技术对棉花进行估产具有宏观、快速、准确和成本低等优点，发展潜力很大。本文对国内外棉花遥感估产的研究进展、研究重点以及存在的有关问题进行了综述及探讨。

2. 运用遥感技术估产的历史概况

利用遥感进行农作物估产从美国开展冬小麦估产以来已经有 25 年的历史。美国每年投资 8000 多万美元估计全球农作物产量，为美国在世界粮食贸易中获益高达 18 亿美元[1]-[4]。欧盟通过 MARS 计划，也成功地建成了欧盟区的农作物估产系统，并将结果应用于实施欧盟的共同农业政策，如农业补贴与农民申报核查[5]。由于欧盟区的大米主要从东南亚地区进口，为此建成了东南亚地区水稻雷达遥感估产系统，大量使用 ERS-1/2 雷达遥感数据估算东南亚地区水稻种植面积和产量。从 1974 年到 1977 年，美国农业部、国家海洋大气管理局、宇航局和商业部合作主持了“大面积农作物估产实验”计划。估产精度达到 90% 以上。1980 年到 1986 年，执行 LACIE 计划的几个部门又同内政部合作开展了“农业和资源的遥感调查计划”，其中包括了世界多种农作物长势评估和产量预报，并将遥感技术成功地应用于 Are Sampling Frame 方法。随后，将成熟的技术方法分别由不同的部门应用到生产实践当中[6]。

我国早在 1979 年就有人关注农作物遥感估产的意义。从“六五”计划开始，开展了农作物遥感估产研究[6]-[8]，并在区域尺度上开展产量估算试验。1983 年起农业部先后组织北京近郊小麦[9]，浙江杭嘉湖地区水稻及北方 6 省市小麦遥感估产。1984 年开始，国家气象局组织北方 11 省市开展冬小麦气象卫星遥感综合测产技术研究，组建了全国冬小麦遥感综合测产地面监测系统，开展了气象卫星监测冬小麦长势的研究，建立了不同类型的气象卫星遥感面积测算与估产方法[10]-[13]；“八五”期间，遥感估产成

为国家科技攻关内容,开展小麦、玉米、水稻大面积遥感估产试验研究,在1993~1996年的4年间分别对4省2市(河北、山东、河南、安徽北部和北京市、天津市)的冬小麦,湖北、江苏和上海市的水稻,吉林省的玉米种植面积、长势和产量开展监测预报[3][14]-[17]。

从1983年到1998年的15年间,我国在农作物遥感估产方面从冬小麦单一作物估产[6][13]发展到小麦、水稻和玉米等多种农作物遥感估产[3][14]-[17],从小区域到横跨11省市的遥感估产[13]。15年的遥感估产的重点是方法和机理研究,包括利用遥感数据估计单一作物的种植面积,主要采用陆地卫星遥感数据(TM)和气象卫星遥感数据(NOAA-AVHRR)[11][18][19],也有采用TM快视图像的[14]。合适时相的TM遥感数据可以得到高精度的冬小麦种植面积,研究表明采用TM的差值植被指数分割法得到的冬小麦种植面积的精度可达96%以上,方法简单,效果也好[2][14][20][21],部分原因归功于北方冬小麦种植面积范围大,生长期内有很长时间没有其它绿色植被,但阈值的选取直接制约着面积提取精度,且不同地区、不同时相的阈值不同,不同年份间的阈值也不同。在我国南方地区冬小麦的种植面积提取就很难利用该方法。在地理信息系统支持下,利用TM提取玉米和水稻种植面积的精度可达90%左右[22]-[24]。由于TM数据费用高,大面积遥感估产很难承受,大量的研究试图从几乎免费的NOAA AVHRR数据中提取作物种植面积,如像元分解法等[25][26],但受AVHRR数据空间分辨率的影响,效果并不理想且难以检验;成数抽样法可同时提取多种作物种植面积[4][27],美国[28]和欧盟也主要采用面积采样框架方法获得采样单元内的作物种植成数,前提是掌握采样单元内作物种植面积占土地总面积的成数。

3. 棉花光谱特性农学基础研究

3.1. 国外棉花光谱特性农学基础的研究

美国学者已利用棉花的水分、氮与植被指数的关系预测了加利福尼亚地区棉花的产量[29]。Thomas,等研究了棉花等七种植物在不同氮素营养水平下的叶片光谱特性,发现所有植物在缺氮时其可见光的反射率增加,反射率与叶绿素和类胡萝卜素含量呈负相关,叶绿素和类胡萝卜素解释了63.5%~95%的绿光反射率,对氮素含量变化最敏感的波段在530~560 nm区域,通过光谱测定及其近红外波段与红波段光谱反射率的比值,可以区分不同氮素营养水平[30]。明确了棉花的氮素敏感波段后,许多学者便通过各种统计方法来寻求含氮量与光谱反射率或其衍生量的关系,建立模型来估算棉花的含氮量。Lee Tarpley等分析了棉花叶片氮浓度与190个光谱比值指数的关系,并根据预测的精度和准确度进行聚类分析,结果表明用红边位置与短波近红外的比值预测的精确度和准确度都比较高[31]。Jackson和Ezra认为棉叶的生理、形态特征以及冠层结构决定棉花的光谱反映,在水分亏缺条件下,由于叶绿体对红光的吸收减弱,棉花叶片红光反射上升,可见光和热红外波段是棉花的敏感波段[32]。Willian认为,由于叶片含水量相对小的变化引起细胞膨胀压、气孔导率以及光合作用很大的变化,因此,用近红外(NIR)波段估算棉花叶片含水量变化,特别是用NIR反射率估算叶片缺水的生理特征时有缺陷[33]。Al-Abas等(1974),研究不同营养(N、P、K、Ca、Mg、S)胁迫下,不同叶位叶片的光谱特性,认为营养胁迫条件下,叶片的叶绿素含量会降低,缺氮时,叶绿素含量最低[34]。

3.2. 国内棉花光谱特性农学基础的研究

1) 测定棉花冠层光谱

在大田条件下多次培植5个不同氮素水平的棉花(严重缺氮、缺氮、氮正常、氮过剩、氮严重过剩),用光谱仪分别测定棉花各生育期的冠层和叶片的光谱(400~1100 nm)的反射特征曲线,以及棉株光谱(400~2500 nm)的反射特征曲线。经过光谱差异检验,结合遥感估产的实用性,选定诊断棉花氮素水平的冠层敏感波段为760~900 nm, 630~690 nm, 和520~550 nm [35]-[39]。

2) 推算棉花叶面积指数、叶绿素和氮素含量

利用敏感波段组成多个植被指数,与形成棉花产量关系最为密切的叶片含氮量、棉株含氮量、叶绿素含量、叶面积指数等农学参数进行相关分析,其中找到比值植被指数(RVI)、归一化植被指数(NDVI)与上述农学参数相关性最佳,其中叶绿素含量则与绿度的相关性最佳。证明了光谱测定可以推算叶绿素含量、叶片和棉花含氮量、叶面积指数(LAI)等[37] [40] [41]。

3) 不同生育时期棉花光谱反射特性的动态变化研究

棉花不同生育期的生长状况均发生较大变化,相应地光谱反射特征也有变化[42]。随发育期推移,棉花冠层光谱反射率在红光范围降低,在近红外区域增高,到开花盛期时两者差异最大;开花盛期以后,在可见光和近红外范围内反射率均降低;叶片反射光谱也随生育期变化,背面光谱反射率在350~1000 nm之间略高于正面反射率,而叶片对可见光和近红外光的透射率均明显低于其反射率。唐延林等研究结果表明:随发育期推移,棉花冠层光谱反射率在可见光范围降低,在近红外区域增高;叶片背面光谱反射率略高于正面,透射率小于反射率;叶面积指数、鲜叶重和干叶重与冠层反射光谱变量 ρ_{800} ρ_{550} 、 ρ_{800} ρ_{680} 、 ρ_{680} ρ_{570} 之间存在显著相关;叶片叶绿素和类胡萝卜素浓度与其反射光谱变量 ρ_{680} ρ_{570} 、 ρ_{673} ρ_{640} 、 ρ_{680} ρ_{550} 、PSSRa、PSNDa、RCh之间也呈显著相关[40]。

与氮相比,磷、钾对棉花叶片、冠层光谱特性影响的研究还未见报道。由于棉花品种很多,了解不同棉花品种的光谱特性差异,提高遥感估产精度也是十分必要的。潘学标等指出不同遗传型棉花品种有不同的光谱反射特性,黄叶棉在可见光区的反射率最高,红叶棉最低,绿叶棉居中,绿叶鸡脚叶与普通叶无明显差异;黄叶棉和绿叶棉在可见光区的反射峰在560 nm处,而红叶棉在610 nm处;近红外反射率可在一定程度上反映棉花群体大小的差异[43] [44]。

4. 棉花遥感估产最佳时相的选择

遥感图象是对地物种类及其组合方式的反映,其中地物光谱信息的相似性和相互干扰是影响地物遥感识别和分类的主要因素。在棉花生长过程中,棉花光谱信息与其它地物光谱信息差别最大的时相对棉花识别和面积估算最有利,为棉花识别最佳时相;棉花单产与遥感信息关系最显著的时相对单产光谱模型的建立最有利,为单产模拟最佳时相。最佳时相的选择可以强化棉花光谱信息及其与产量关系的显著性,弱化其它因子的干扰,降低遥感信息中的不确定性,减小信息处理的难度,它是棉花遥感监测和估产中的重要环节[45] [46]。

4.1. 棉花与其它作物的光谱差异

棉花与其它作物的光谱差异是棉花遥感识别的基础,光谱差异越明显,棉花识别越容易,识别精度越高。因此,最佳时相的选择应根据棉花全生长期中各种作物光谱差异的变化,把棉花与其它作物光谱差异最显著的时相作为最佳时相。研究结果证明棉花与其它作物的光谱差异在蕾期和吐絮初中期最明显,宜把这些时期作为棉花识别的最佳时相[47]-[49]。

4.2. 棉花与其它作物的物候历差异

农作物的状态和群体结构是影响作物光谱特征的主要因子。同一种作物在不同物候期的遥感图象上有不同的色调,不同作物在同一张图象上的色调也不相同。由此可见,就棉花识别最佳时相的选择而言,棉花与其它作物的光谱差异和物候历差异在一定程度上是等价的,可以用后者代替前者[47]。

4.3. 太阳高度角的变化

太阳高度有明显的年变化和日变化,并因纬度而异,它通过多种途径间接地影响地物反射光强度、

反射率和反射光谱，从而使地物光谱差异、植被指数及其对作物群体参数的敏感度因太阳高度而变。试验研究表明棉花遥感估产最佳时相的太阳高度角应尽量接近 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$ ，还应尽量避开植被指数对太阳高度敏感的生育期，即叶面积系数为 0.5~2.0 的时期[42]。

4.4. 棉花产量形成的关键期

棉花产量是在全生长期中各时段环境条件影响下形成的，它对不同时段的环境条件有不同的敏感度，而且不同时段的环境要素变率也明显不同，它们对棉花产量有不同的影响，其中影响最大的时期是花铃期，该生育期为棉花产量形成的关键期。此外，棉花生长后期的热量条件决定了铃重的高低，对产量也有一定的影响。因此，棉花单产模拟最佳时期相应在花铃期及其以后的时期中选择[42]。

4.5. 土壤光谱噪声的变化和棉花面积的代表性

土壤光谱信息是棉花光谱信息的重要干扰源，干扰强度在棉花覆盖度较小的时段内非常明显，而且因棉花覆盖度而变化。因此，不宜把棉花遥感的最佳时相定在苗期，而应该定在夏播之后。

5. 棉花种植面积估测

棉花面积估测是棉花遥感估产的重要内容，只有准确地估算出棉花播种面积，才能得出准确的棉花总产估产数据。由于中巴卫星的应用，我国已经建立了基于 CBERSI 数据的新疆棉花种植面积遥感监测运行系统的技术体系，对新疆农情的及时遥感监测成为可能，从而使遥感监测可以覆盖全国。为后续卫星在农业领域的大规模应用打下基础。以下是几种不同的遥感面积提取方法。

5.1. 遥感抽样调查方法

遥感抽样调查是根据一般抽样调查的基本方法，以遥感的手段获取地物面积的方法，适用于调查范围大，进行全面调查比较困难或必要性不大的情况。可根据需要采用航卫片等各种遥感资料。常用的有遥感影像分层抽样和成数抽样方法，前者首先将整个调查区域按与调查内容相关的某一属性或特征划分为不同的“层”，在每层内随机或机械抽取样本单元组成样本，进行总体估计。

5.2. 遥感图像解译

遥感图像解译的目标为调查年份和前一年的棉花地块分布。由于与棉花同期的植被类型比较复杂，为保证调查精度，应相应加强实地调查与验证[50]。

5.3. 面积计算

将解译图转入 ARC/INFO 进行编辑，与抽样框架叠加后统计面积。得出以抽样单元为单位的棉花种植面积变化率。

5.4. 野外调查

主要包括 2 种类型：1) 解译标志建立；2) 解译结果的实地验证，包括地类属性和地块面积的解译精度验证。

6. 棉花遥感估产中有关问题的探讨

6.1. “3S” 技术应用及棉花遥感估产系统建立

“3S” 技术是指 RS、GPS、GIS 的融合技术，既是实施棉花卫星遥感估产达到实用化的关键技术，

也是现代遥感技术的重要标志之一。棉花遥感估产需要棉花历史资料以及有关背景资料的支持,同时,为使估产结果具有更大的实用性,遥感估产应充分考虑不同的地域特点即空间性。因此,棉花估产应运用 RS、GPS、GIS 的融合技术,一方面有助于提高估产精度,另一方面使估产的结果空间化,具有更强的实际意义。在“3S”技术支持下,研制建立棉花遥感估产系统,利用棉花长势、面积及产量监测与预测等应用模型,则可为适时、准确、长期的棉花估产奠定基础。

6.2. 棉花遥感估产模型的建立

目前,国内在棉花遥感估产模型方面的研究还未见报道,但在棉花、水稻等其他农作物遥感模型研究比较多,遥感估产方法比较成熟,监测与预测精度较高,而棉花遥感估产,虽然在农学机理研究方面取得重要进展,但大面积估产还没有实现。本人参考其他农作物遥感估产方法提出以下几种估产模型。

6.2.1. 光谱估产模式

光谱估产模型是指在地面选择农作物的最佳生育期,运用光谱仪测定农作物的反射率,找出适宜的光谱变量(植被指数),建立起光谱变量与农作物产量及其农学参数之间的相关模式[51] [52]。

6.2.2. 卫星遥感估产模式

作为农作物生长的主要背景的背景土壤光谱反射率在红光(RED)波段比农作物高,到了近红外(NIR)部分又比农作物低。因此,反映在卫星遥感资料上的光谱反射特征是:农作物长势好,NIR 的反射越强,而 RED 反射越弱;农作物长势越差,NIR 的反射越弱,而 RED 的反射则越强。利用农作物与主要背景土壤之间的这一光谱反射特性,把 NIR 和 RED 反射数据组合成各种植被指数,以扩大不同长势农作物的差异,来实施农作物遥感估产。卫星遥感估产,由于卫星距离地面很远,太阳光的辐射值经过来回运行受到极大影响[47]。因此,要根据卫星遥感的特点做出特殊处理,尔后才能建立估产模型。国内研究提供的模型主要有以下几种:

1) 遥感植被指数模型。它是利用卫星资料计算出作物典型生育时期的 RVI 建立的估产模型。

2) 遥感动力模型。它是通过气象卫星获得不同生育期的绿度值,再通过绿度值叶面积的对对应关系估算农作物群体叶面积指数;结合叶面积比叶重的变化估算叶片干物重;通过农作物干物重累积过程中的物质分配规律和环境条件的影响,估算农作物干物重和产量[53]。

6.2.3. 光谱遥感估产与作物生长模拟估产的复合模型

光谱估产模型和卫星遥感估产模型均属统计回归模型,其回归系数随着作物生长状况、环境条件和农艺技术的不同而变化。因此,根据试验资料建立模型的相关系数有时可以相当高,但外推应用的稳定性不高。为此,浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所王人潮等,引进作物生长模拟模型与光谱估产复合建立水稻作物气候产量预报模型,取得了较为理想的初步结果[51]。

6.3. 高光谱遥感技术及相关支持系统的发展

在棉花遥感估产中,今后需要抓住高光谱遥感与精准农业研究的基础问题,如环境胁迫作用下的遥感机理和遥感标志研究,遥感与 GIS 的集成对棉花胁迫作用的诊断理论以及棉花生长环境和收获产量的实际分布的空间差异性机理和环境胁迫作用与产量形成的遥感定量关系;需要抓住高光谱、高分辨率、雷达等技术手段和“3S”集成等关键技术,对棉花的叶面积指数、生物量、全氮量、全磷量等生物物理参数进行分析和估算;需要基础农业信息系统的设计与建立,GIS 支持下棉花征兆信息提取和棉花诊断系统模型研究。用于精准农业的新型遥感技术和遥感信息定量、定性、定位一体化快速遥感技术研究仍是当前研究的主要内容之一,随着高光谱技术进入航天阶段以及传感器的进步、对地观测专业小卫星的

发展, 遥感技术必将成为推进我国数字农业(Digital Agriculture)和精准农业、生态农业的重要支撑。

基金项目

中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所沙漠基金项目(sqj2009009); 新疆气象局科研基金项目。

参考文献 (References)

- [1] 陈述彭 (1990) 遥感在农业科学技术中的应用. In: 陈述彭, 著, *地学的探索(第三卷)*, 遥感应用, 科学出版社, 北京, 20-32.
- [2] 陈沈斌, 主编 (1993) 小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集. 中国科学技术出版社, 北京.
- [3] 孙九林, 主编 (1996) 中国农作物遥感动态监测与估产. 中国科学技术出版社, 北京.
- [4] Mac Donald, R.B. and Hall, F.G. (1980) Global crop forecasting. *Science*, **208**, 670-679.
- [5] Csomai, G., et al. (1999) Operational crop monitoring by remote sensing in Hungary. *Operational Remote Sensing for Sustain a Development*, Vaughan & Molenaar.
- [6] 项月琴, 吴常山, 郑芬兰, 等 (1988) 遥感估算水稻产量. *环境遥感*, **4**, 308-316.
- [7] 侯学增, 主编 (1986) 京津冀小麦遥感估产试验研究论文集. 北京科技出版社, 北京.
- [8] 田国良, 冯强, 柳钦火, 等 (1989) 遥感估算水稻产量. *环境遥感*, **1**, 73-80.
- [9] 肖乾广 (1986) 用气象卫星数据对棉花进行估产. *环境遥感*, **4**, 260-269.
- [10] 肖淑昭, 姜东, 朱艳, 等 (1988) NOAA/AVHRR 资料在中小尺度地区进行棉花估产的应用研究. *环境遥感*, **3**, 299-307.
- [11] 肖乾广 (1989) 用 NOAA 气象卫星的定量资料计算棉花种植面积的两种方法. *环境遥感*, **3**, 191-196.
- [12] 李郁竹 (1992) 北方棉花卫星遥感监测及估产业务系统. *气象*, **11**, 14-16.
- [13] 李郁竹, 主编 (1993) 棉花气象卫星遥感动态监测与估产. 气象出版社, 北京.
- [14] 王乃斌, 主编 (1996) 中国小麦遥感动态监测与估产. 中国科学技术出版社, 北京.
- [15] 赵锐, 主编 (1996) 中国水稻遥感动态监测与估产. 中国科学技术出版社, 北京.
- [16] 万恩璞, 主编 (1996) 中国玉米遥感动态监测与估产. 中国科学技术出版社, 北京.
- [17] 熊利亚, 主编 (1996) 中国农作物遥感动态监测与估产集成系统. 中国科学技术出版社, 北京.
- [18] 王延颐, Malingreau, J.P. (1990) 应用 NOAA/AVHRR 对江苏省作物监测的可行性研究. *环境遥感*, **3**, 221-227.
- [19] Quarmby, N.A., Townshend, J.R.G., Settle, J.J., White, K.H., Milnes, M., Hindle, T.L. and Silleos, N. (1992) Linear mixture mode ling applied to AVHRR data for crop area estimation. *International Journal of Remote Sensing*, **13**, 415-425.
- [20] 王乃斌, 杨小唤, 刘红辉, 等 (1993) 应用 TM 图像采用模式识别技术自动提取棉花播种面积的研究. *遥感技术与应用*, **4**, 116-119.
- [21] 王乃斌 (1993) 应用 TM 图像采用模式识别技术自动提取棉花播种面积的研究. In: 陈沈斌, Ed., *小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集*, 中国科学技术出版社, 北京, 1-7.
- [22] 吴炳方 (1993) 水稻种植面积提取技术设计. In: 陈沈斌, Ed., *小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集*, 中国科学技术出版社, 北京, 34-38.
- [23] 薄立群 (1993) 玉米遥感中的图像处理 and 实验效果研究. In: 陈沈斌, Ed., *小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集*, 中国科学技术出版社, 北京, 8-15.
- [24] 吴炳方 (1997) 水稻种植面积估计的运行化遥感方法. *遥感学报*, **1**, 58-63.
- [25] 徐希孺, 陈良富, 张仁华, 等 (1990) 混合像元的因子分析方法及其在大面积棉花种植面积估算中的应用. *科学通报*, **4**, 317-320.
- [26] 徐希孺, 主编 (1991) 环境监测与作物估产的遥感研究论文集. 北京大学出版社, 北京.
- [27] 曲宝林 (1991) 在 TM 图像上进行成数抽样清查水稻种植面积方法的研究. In: 徐希孺, Ed., *环境监测与作物估产的遥感研究论文集*, 北京大学出版社, 北京, 52-55.
- [28] Chhikara, R.S., Houston, A.G. and Lundgren, J.C. (1986) Crop acreage estimation using a land sat based estimate or as

- an auxiliary variable. *IEEE Transactions on Geo Science and Remote Sensing*, **GE-24**, 155-168.
- [29] 王延颐 (1991) 南方稻区遥感水稻长势监测与估产研究. *遥感技术与应用*, **3**, 1-6.
- [30] Thomas, J.R. (1977) Leaf reflectance vs. leaf chlorophyll and carotenoid concentration for eight crops. *Agronomy Journal*, **69**, 799-802.
- [31] Mass, S.J. (1997) Structure and reflectance of irrigated cotton leaf canopies. *Agronomy Journal*, **89**, 54-59.
- [32] Jackson, R.D. (1985) Spectral response of cotton to suddenly induced water stress. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 177-185.
- [33] 王纪华 (2001) 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究. *中国农业科学*, **1**, 104-107.
- [34] Al-Abbas, A.H., Barr, R., Hall, J.D., Crane, F.L. and Baumgardner, M.F. (1974) Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. *Agronomy Journal*, **66**, 16-20.
- [35] 蒋桂英, 李少昆, 王登伟, 陈永芳, 雷永雯 (2002) 棉花遥感应用研究进展. *新疆农业大学学报*, **3**, 76-79.
- [36] 刘海启 (1999) 美国农业遥感技术应用状况概述. *中国农业资源与区划*, **2**, 94-96.
- [37] 王登伟, 李少昆, 田庆玖, 黄春燕, 曹连莆, 肖春华, 等 (2003) 棉花主要栽培生理参数的高光谱估测研究. *中国农业科学*, **7**, 770-774.
- [38] 浦瑞良 (2000) 高光谱遥感及其应用. 高等教育出版社, 北京, 316-324.
- [39] 蒋桂英, 李鲁华, 刁明, 陈永芳 (2003) 高光谱分辨率遥感在新疆棉花上的应用前景. *中国棉花*, **2**, 2-4.
- [40] 唐延林, 王秀珍, 黄敬峰, 孔维姝, 王人潮 (2003) 棉花高光谱及其红边特征(I). *棉花学报*, **3**, 215-220.
- [41] 马亚琴, 包安明, 王登伟, 孙莉, 黄春燕, 冯宪伟, 等 (2003) 水分胁迫下棉花冠层叶片氮素状况的高光谱估测研究. *干旱区地理*, **4**, 56-58.
- [42] 李明霞, 千怀遂 (1997) 中国棉花遥感最佳时相的选择. *河南大学学报(自然科学版)*, **2**, 123-126.
- [43] 潘学标, 张立祯, 王延琴, 崔秀稳, 李亚兵 (2003) 不同遗传型棉花品种光谱反射特性研究. *中国农业科学*, **2**, 107-109.
- [44] 曹卫彬, 杨邦杰, 裴志远, 宋金鹏 (2003) 新疆农作物遥感监测系统建立的对策. *石河子大学学报(自然科学版)*, **2**, 416-418.
- [45] Mass, S.J. (1998) Estimating cotton canopy ground cover from remotely sensed scene reflectance. *Agronomy Journal*, **90**, 384-388.
- [46] Mass, S.J. (2000) Linear mixture modeling approach for estimating cotton canopy ground cover using satellite multi-spectral imagery. *Remote Sensing of Environment*, **72**, 304-308.
- [47] 黄敬峰, 杨忠恩, 王人潮, 许红卫, 蒋亨显 (2002) 基于 GIS 的水稻遥感估产模型研究. *遥感技术与应用*, **2**, 69-72.
- [48] 汪逢熙 (1991) 棉花遥感识别的最佳时相及地面模式, 环境监测与作物估产的遥感研究论文集. 北京大学出版社, 北京, 86-91.
- [49] 黎泽文 (1996) 棉花种植面积监测方法的研究. 中国科学技术出版社, 北京, 92-98.
- [50] 焦险峰, 杨邦杰, 裴志远 (2002) 全国棉花种植面积遥感监测抽样方法设计. *农业工程学报*, **4**, 159-162.
- [51] 王人潮, 黄敬峰, 著 (2005) 水稻遥感估产. 中国农业出版社, 北京.
- [52] 周红妹, 杨星卫, 吴建平, 等 (1994) 水稻遥感动力估产模拟初探. *环境遥感*, **4**, 281-286.
- [53] 张晓阳 (1993) 水稻遥感单产估算实用化模型. In: 陈沈斌, Ed., *小麦、玉米和水稻遥感估产技术试验研究文集*, 中国科学技术出版社, 北京, 142-150.