

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.037

农业遥感研究现状与展望*

史舟¹ 梁宗正¹ 杨媛媛¹ 郭燕²

(1. 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 杭州 310058; 2. 河南省农业科学院农业经济与信息研究所, 郑州 450002)

摘要: 遥感技术具有覆盖面积大、重访周期短、获取成本相对低等优势,对大面积露天农业生产的调查、评价、监测和管理具有独特的作用。从20世纪70年代出现民用资源卫星后,农业成为遥感技术最先投入应用和收益显著的领域。特别是随着高空间、高光谱和高时间分辨率遥感数据的出现,农业遥感技术在长时间序列作物长势动态监测、农作物种类细分、田间精细农业信息获取等关键技术方面得到了突破。但是农业生产的分散性、时空变异性等特点,对当前农业遥感技术的应用还存在诸多挑战。本文简要回顾了农业遥感发展历程以及其应用的理论基础;再从农作物估产、农业资源调查、农业灾害监测和精准农业管理4个领域阐述了国内外相关研究和应用情况。最后提出农业遥感应加强与地面农业观测网技术的结合,推动新一代低空无人机遥感平台的发展,强化多源传感器融合以及农业过程模型与遥感数据同化的研究。

关键词: 遥感 农作物估产 无人机 农业灾害 土壤调查

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0247-14

Status and Prospect of Agricultural Remote Sensing

Shi Zhou¹ Liang Zongzheng¹ Yang Yuanyuan¹ Guo Yan²

(1. Institute of Agricultural Remote Sensing and Information Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China
2. Institute of Agricultural Economics and Information, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Remote sensing technology can cost-effectively access a wide range of real-time land surface spatial information, and provides an effective way for resource surveys, environmental monitoring and disaster prediction. With the help of remote sensing technology, geo-information can be acquired quickly, accurately, efficiently and comprehensively. Undoubtedly, remote sensing will play an increasingly important role in the fields of geosciences, agricultural sciences, and so on. In particular civil resources satellite was launched in the 1970s, which was applied in agriculture and benefited first. Moreover, significant developments were registered in some key fields along with the advancement of high resolution remote sensing. The combination of their high temporal frequency with extended geographical coverage makes them particularly useful for time series crop growth monitoring, crop types subdivision, and acquisition of field precision agriculture. The fact is of note that the new challenges followed as a result of the dispersion and spatial-temporal variability in agricultural production. An overview of the history and theoretical background of agricultural remote sensing technology was introduced. And then four aspects of yield estimation, agricultural resources survey, agricultural disaster monitoring and precision agriculture management were presented. Remotely sensed data from existing platforms and the ground observation network technology which can provide an important data source for supporting agriculture were expected. On the other hand, new generation remote sensing platform of low altitude unmanned aerial vehicle (UAV) should be promoted. Although progress has been made, current

收稿日期: 2014-09-12 修回日期: 2014-10-11

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2013AA102301)、国家自然科学基金资助项目(41271234)和浙江省重大科技计划资助项目(2011C13010)

作者简介: 史舟,教授,博士生导师,主要从事农业遥感与信息技术研究,E-mail: shizhou@zju.edu.cn

methods and techniques still bear potential to further explore multi-sensors, spectral data, surface characteristic parameters and existing crop model. The combination of multi-sensor data and assimilation will enhance the perspectives of using remotely sensed data for agriculture.

Key words: Remote sensing Crop yield estimation Unmanned aerial vehicle Agricultural disaster
Soil investigation

引言

农业生产是在地球表面露天进行的有生命的社会生产活动。它具有生产分散性、时空变异性、灾害突发性等人们用常规技术难以掌握与控制的基本特点,这是农业生产长期来处于被动地位的原因^[1]。现代遥感技术是应用各类主被动探测仪器,不与探测目标相接触,从卫星、飞机等平台来记录地面目标物的电磁波特性,通过分析,揭示物体的特征性质及其变化的综合性探测技术。由于遥感技术具有获取信息量大、多平台和高分辨率(时间和空间)、快速、覆盖面积大的优势,是及时掌握农业资源、作物长势、农业灾害等信息的最佳手段,对改变或部分改变农业生产的被动局面具有特殊的作用。从20世纪70年代开始,美国和欧洲国家就采用卫星遥感技术建立大范围的农作物面积监测和估产系统,不但服务于农业实际生产指导,同时为全球粮食贸易提供了重要的信息来源。20世纪90年代,农业遥感的重点转入作物管理^[2],农业资源调查、农业灾害遥感等方面的应用得到了拓展。近10年,特别是各类高空间分辨率民用卫星的出现,遥感与地理信息系统、全球导航技术以及最新物联网技术发展相结合在精准农业的管理与作业等方面得到了应用与推广。

我国的农业遥感起步于20世纪80年代,相对较晚。而且,由于作物种植种类分布的分散性以及地域复杂性,常规的地面调查方法,受人为因素影响较大,耗时费力,难以适应相关部门决策管理的需要,因此迫切需要大力发展农业遥感的相关技术。特别是关于粮食安全的全局性重大战略问题,发挥农业遥感技术的优势,及时、客观、准确地获取作物面积、长势、产量等信息在我国显得尤为重要。本文以卫星遥感为主,就国内外农业遥感的发展和现状进行综述与分析,并对农业遥感的发展趋势进行展望。

1 农业遥感概述

1.1 农业遥感技术的发展

遥感技术是在现代物理学、空间科学、电子计算机技术、数学方法和地球科学理论的基础上发展起来的一门新兴的、综合性的交叉学科,是一门先进

的、实用的探测技术^[3]。遥感技术从20世纪初的航空摄影技术为主到20世纪60年代进入到卫星遥感时代,已发展了多种不同平台不同方式的传感器,遥感探测地物的能力(包括地物的性质和大小)和应用范围得到了极大的拓展。

农业是遥感最先投入应用和收益显著的领域。据美国数据统计,农业遥感的收益占卫星遥感应用总收益的70%^[4]。目前,遥感技术在农业资源调查、生物产量估计、农业灾害预测和评估等方面得到了广泛的应用。特别是近年来,各国先后发射了各类民用卫星平台和传感器,从光学资源卫星为主向高光谱、高空间、高时间分辨率的方向发展。高光谱成像仪技术相继取得了很大的研究进展,如美国NASA和日本METI联合研制的ASTER,美国NASA研制的Hyperion等。2008年,我国也发射了环境一号卫星,该卫星上搭载了一个有115个波段的高光谱成像仪HSI,其数据可应用于农业灾害和资源调查。同时,诸如QuickBird、GeoEye-1、WorldView-2、Pléiades-1等商用化亚米级光学卫星,可与航片媲美,且成本低,精度高,更新周期短,对精确农业的发展是一个极大的机遇。另外,美国地球观测系统的中分辨率成像光谱仪(MODIS),从可见光、近红外到热红外设置有36个通道,覆盖周期为1~2d,并业务化提供标准的植被指数、地表温度、生物量等数据产品,为全球各地进行大面积农作物的周期性监测提供了重要的数据支撑。目前,不断有各类新型的遥感数据或遥感平台的出现,如米级分辨率的雷达卫星数据,每3d覆盖全球一次的微波遥感数据,各种灵活多样的无人机平台等,都为现代农业遥感技术的发展提供了新的机遇。

1.2 农业遥感的理论基础

电磁波作用下,会在某些特定波段形成反应物质成分和结构信息的光谱吸收与反射特征,这种对不同波段光谱的响应特性通常称为光谱特性。地球表面各类地物如土壤、植被、水体、岩石、积雪等光谱特性的差异是卫星遥感解译和监测的理论基础。

农业遥感监测主要以作物、土壤为对象,这两类地物的典型反射光谱曲线如图1所示。作物在可见光-近红外光谱波段中,反射率主要受到作物色素、细胞结构和含水率的影响,特别是在可见光红光波

段有很强的吸收波段,在近红外波段有很强的反射特性,这是植被所特有的光谱特性,可以被用来进行作物长势、作物品质、作物病虫害等方面的监测。土壤可见-近红外光谱总体反射率相对较低,在可见光谱波段主要受到土壤有机质、氧化铁等赋色成分的影响。因此,土壤、作物等地物所固有的反射光谱特性是农业遥感的理论基础。

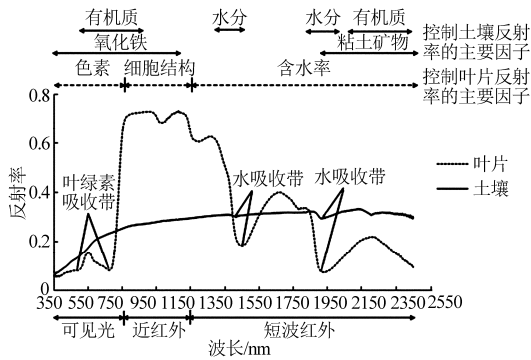


图 1 土壤和作物可见-近红外反射光谱特征

Fig.1 Visible-near infrared reflectance spectra of soil and crop

1.3 农业遥感技术应用框架

由于遥感技术具有覆盖面积大、重访周期短的特点,因此主要应用于大面积农业生产的调查、评

价、监测和管理,其在农业中的应用按内容归纳为下列 4 类:①农业资源调查。包括耕地资源、土壤资源等现状资源的调查,以及土地荒漠化和盐渍、农田环境污染、水土流失等动态监测,提供各类资源的数量、分布和变化情况,以及基于调查的各类资源评价,提出应该采取的对策,用于农业生产的组织、管理和决策。②农作物估产。包括小麦、玉米、水稻、棉花等大宗农作物的长势监测和产量预测,也包括牧草地草量估测、果树长势监测等。③农业灾害预报。包括农作物病虫害、冷冻害、洪涝旱灾、干热风等动态监测,以及灾后农田损毁、作物减产等损失调查和评估。④精准农业。主要是利用高空间分辨率的卫星数据进行农田面积和分布的现状调查,以及针对农田精准化施肥、施药和灌溉进行的农田尺度的作物长势、病虫害和土壤水分等信息的监测。

针对不同的应用,不同空间分辨率的光学遥感与微波遥感优势各异。如高空间分辨率的遥感数据主要应用田间尺度的精确农业,而高时间分辨率广覆盖遥感数据主要应用于大面积农作物长势监测。根据各类遥感数据的特点,其主要应用领域如表 1 所示。

表 1 不同空间分辨率代表性遥感数据在农业中的应用

Tab. 1 Agricultural application of remotely sensed imageries with different spatial resolutions

尺度	空间分辨率	代表性遥感数据		应用领域			
		光学遥感	微波遥感	农作物监测	农业灾害监测	农业资源调查	精细农业
全球/区域	公里	MODIS, NOAA	SMOS	多	多	少	无
区域	几十米	TM, CBERS, HJ	ASAR, ERS	多	多	多	少
农场/田块	米级	SPOT5, Ikonos	RADARSAT-2	少	少	多	少
田块	亚米	GeoEye, QuickBird	TerraSAR, Cosmo	少	少	少	多

2 遥感技术在农业中的应用

2.1 作物遥感估产

2.1.1 作物面积遥感监测技术

大规模的作物面积遥感调查最早始于 1974 年美国实施的“大面积作物估产实验”,即 LACIE 计划,主要是利用 Landsat MSS 影像来估测小麦种植面积。我国从 20 世纪 80 年代中期,在国家经委的支持下,以国家气象局为主组织开展了北方 11 省市冬小麦的 NOAA/AVHRR 卫星遥感估产研究,建立了遥感影像面积测算方法。20 世纪 90 年代,中国科学院等单位采用 Landsat/TM 和 NOAA/AVHRR 影像数据对我国主要粮食作物小麦、水稻、玉米的种植面积进行监测,其中小麦在河北、山东、河南、北京和天津进行,水稻在湖北和江苏进行,玉米在吉林进行,小麦的估算精度达 90%,水稻和玉米达 85% 以上^[5-7]。浙江大学采用 Landsat/TM 和 NOAA/

AVHRR 进行了浙江省、县、乡三级的水稻种植面积遥感调查,与统计数据相比,面积精度达到 95% 以上^[8]。2002 年以后,随着美国 MODIS 遥感数据产品的出现,大面积作物遥感调查开始采用长时间序列遥感数据进行面积的提取。如 Wardlow 等基于 MODIS 数据对美国中部大平原主要作物类型(紫花苜蓿、夏季作物、冬小麦)和主要夏季作物(玉米、高粱、大豆)进行分类和面积提取,二者的整体分类精度分别达到 94% 和 84%^[9]。Xiao 等利用 MODIS 数据提取中国南方 13 个省的水稻种植面积,估算精度达 89%^[10]。另外,针对多云多雨区作物生长期高质量遥感数据难以获取的情况,全天候的微波遥感在农作物种植面积监测中得到了广泛应用。如 Jiao 等利用 RADARSAT-2 极化细束(FQ)影像,对加拿大安大略东北部地区 5 种主要作物(小麦、燕麦、大豆、油菜籽和牧草作物)进行了分类和面积提取,整体精度高达 95%^[11]。

目前作物面积遥感提取方法除了常规的目视解译各种监督分类法外,还引入了面向对象提取和多时相分析等新方法。遥感监督分类法,是计算机自动提取农作物种植面积经常使用的一种手段。如美国 LACIE 计划,使用 Landsat MSS 数据,其中部分结合航空像片,在地面样方小麦种植情况和位置已知的前提下,采用分层监督分类的方法,提取小麦的种植面积,达到 90% 以上的提取精度^[12]。Yang 等使用 SPOT5 数据,比较 5 种监督分类法(最小距离、马氏距离、最大似然法、光谱角制图和支持向量机)在作物分类和面积提取效果上的差异,结果表明最大似然法和支持向量法的精度高于其他 3 种分类方法,其中最大似然法的整体分类精度最高可达 91%^[13]。

随着高时间分辨率卫星数据产品的出现(如 MODIS 数据),多时相分析方法在现阶段获得了广泛的应用。该方法的主要原理是利用不同类型作物生长的物候特征,与同时期遥感影像信息的时相变化规律来进行不同农作物类型的识别。如 Nuarsa 等利用每日时序 MODIS 数据,使用 NDVI、RVI 和 SAVI 3 种植被指数提取印度尼西亚巴厘省的水稻种植面积,整体精度可达 87.91%^[14]。Zhang 等使用时序 MODIS - EVI 数据,并结合玉米典型物候特征,大规模地提取中国东北部(黑龙江、吉林、辽宁)玉米种植面积,精度可达 79%^[15]。郑长春等利用 8 d 合成的 MODIS 陆地表面反射率数据和水稻典型物候特征,通过归一化植被指数(NDVI),增强型植被指数(EVI)和陆地表面水指数(LSWI)提取浙江省水稻种植面积,将提取结果与统计数据进行对比,精度可达 90% 以上^[16]。

2.1.2 作物长势动态监测技术

作物长势即作物的生长状况和趋势,这直接影响到作物最后的产量和品质。作物长势监测在为农业生产提供宏观管理依据的同时,也是农作物产量估测的重要资料。作物长势监测的方法主要有:直接监测法、同期对比法和作物生长过程监测法。

直接监测法的主要原理是使用不同波段的组合形成植被指数,通过植被指数来估算叶面积指数(LAI)、生物量、作物产量等反映作物生长特征的因子,最后结合地面监测数据和农学模型综合得出作物的长势信息。目前,国内外用于长势监测的植被指数有多种,其中 NDVI 指数使用最为广泛,随后针对 NDVI 指数“过饱和”和农田土壤背景影响的问题,新发展的 EVI 指数和土壤调整植被指数 SAVI,也得到了很好的应用。李卫国等讨论了基于 TM 影像的 NDVI 值与作物叶面积指数 LAI 的关系,直接

使用反演的 LAI 作为长势分级标准,对江苏省兴化市冬小麦的长势进行了监测^[17]。Bala 等讨论了基于 MODIS 影像的 NDVI、LAI、fPAR 数值与土豆的单产关系,对孟加拉国蒙希甘杰区土豆的长势进行了监测^[18]。何亚娟等对冬小麦不同生育期(抽穗期、灌浆期、收获期)的产量构成三因子(穗数、粒数、粒质量)进行实地抽样测定,并结合冬小麦不同生育期的生理生长特点,建立了相应的分阶段单产预测模型,试验发现,单因子预测模型可使冬小麦估产的预报时间提前到抽穗期,拟合精度达到 88% 以上;双因子模型可使预报时间提前至抽穗后期至灌浆期,拟合精度大于 90% 以上^[19]。Son 等利用 MODIS 数据,建立了水稻不同生长期双变量(EVI 指数、LAI 指数)与单产的关系模型,实现越南湄公河三角洲水稻的长势监测和产量预报^[20]。Son 比较分析了基于 MODIS - NDVI 和 EVI 两种指数的水稻产量估算情况,发现基于 EVI 的估产模型精度优于 NDVI^[21]。Gontia 等在印度西孟加拉邦使用 IRS P6 和 WiFS 影像,分析了时序 NDVI 和 SAVI 指数在农作物产量监测中的应用效果,结果表明 SAVI 的时序曲线积分值与冬小麦产量之间的统计相关性高于 NDVI^[22]。

同期对比法主要是利用现时 NDVI 值与去年、多年平均或者指定某一年的 NDVI 值的对比,反映年际间作物生长状况的差异,再将这种差异进行统计和分析,来显示该区域的作物生长状况。如黄青等在利用 MODIS - NDVI 时序分析提取作物种植结构的基础上,利用差值模型,通过与近年作物长势的平均状况进行对比,分析研究了中国东北地区 2009 年 4 种作物(春玉米、春小麦、一季稻及大豆)的长势状况^[23]。该方法在国内外主要作物长势遥感监测系统如欧盟区农作物估产系统(MARS)、中国科学院遥感与数字地球研究所建立的全球农情遥感速报系统(Crop Watch)、浙江大学等单位建立的水稻遥感估产运行系统中得到了广泛应用,是长势监测的主要方法之一^[8, 24]。

由于高时间分辨率的极轨卫星能够以天为单位对地表进行观测,使得农作物动态连续监测成为可能。目前,NDVI 的时间序列分析法,是实现作物生长过程监测的一种常用方法。作物种类不同甚至同种作物处在不同生长环境和发育状况下都会影响 NDVI 时间曲线的特征,因而 NDVI 的时间序列分析,成为了解作物生长发育状况和产量估算的一种有效手段。如江东等利用三次多项式对河南省 9 个县的作物 NDVI 时间曲线进行了拟合,认为作物生长状况的改变会使 NDVI 时间曲线相应地发生动态

变化,利用这一响应关系,可以实现作物长势监测^[25]。Labus等建立了NDVI时间曲线积分与作物单产之间的统计关系,实现了区域和农场两种尺度规模下的小麦产量估算^[26]。Ren等指出冬小麦孕穗、抽穗期的MODIS-NDVI空间累积值与区域冬小麦的产量之间具有最高的统计相关性^[27]。

除上述以作物产量为目标的长势遥感监测外,最近几年国内外也陆续开展了关于粮食作物品质的遥感监测。主要是利用遥感信息反演作物体内的生化组分含量,监测品质形成过程的环境影响因子,进而监测籽粒品质^[28]。目前,作物品质遥感监测研究多数集中在地面平台,即利用地面高光谱技术来建立特征光谱与作物籽粒蛋白质、淀粉积累量等品质指标之间的关系。大面积的航空航天遥感监测,主要有美国、日本、澳大利亚、德国等对小麦、水稻、甜菜、咖啡等作物开展品质遥感监测^[28]。如澳大利亚的Badri等研究发现,利用Landsat、Aster波段数据或变换指数可以预测小麦和大麦籽粒蛋白含量,而遥感影像获取时间最为关键,在麦子开花期获取的近红外光学影像与籽粒蛋白间呈显著的相关^[29]。如日本利用TM遥感数据监测稻谷氮素、直链淀粉、支链淀粉等品质指标,并指导合理施用氮肥,使实验区大面积的稻谷籽粒含氮量由7.7%下降到7.3%,提高了稻谷品质等级,经济效益显著^[30]。国内的国家农业信息化工程研究中心开展了利用地面高光谱以及EnviSat-ASAR、TM等多源遥感数据进行农作物品质监测的大量研究工作,并利用遥感统计模型和农业专家系统相结合初步实现了小麦的调优栽培及品质测报^[31-34]。

2.1.3 作物遥感估产业务系统发展

作物遥感估产系统主要集成了作物种植面积调查、长势监测和最后产量估测整个业务流程。目前国内外主要的作物遥感监测运行系统在美国、欧盟和中国。自20世纪70年代以来,美国等发达国家率先开展了主要粮食作物遥感监测。如美国早期开展的“大面积农作物估产实验(LACIE)”计划,“农业和资源的空间调查(AGRISTARS)”计划,并将较为成熟的技术方法应用于全球粮食面积监测和估产工作。欧盟从1988年开始实施“农业遥感监测(MARS)”计划,用了10年时间建立了欧盟区农作物估产系统,并将成果应用于实施诸如农业补贴与农民申报核查等欧盟的共同农业政策。2000年以后,欧盟的MARS计划也开始面向其他地区和全球遥感作物估产工作。联合国粮农组织(FAO)建立了全球粮食情报预警体系,进行全球作物面积监测

和产量预报;中国经过近30年的发展各相关部门建立了若干业务化运行系统,如中科院遥感与数字地球研究所中国农情遥感速报系统,中国气象局农作物监测系统和农业部遥感估产运行系统等。在这些已有成果基础上,中科院遥感与数字地球研究所开展“全球农作物遥感估产研究”,建成了全球尺度的估产数据库,并逐步将“中国农情遥感速报系统”的监测范围逐步推向全球尺度,发展了全球估产数据处理技术、全球农作物长势综合监测技术和全球作物产量估算技术。在其他地区,如日本、印度、泰国、印度尼西亚、越南等国家也进行了水稻遥感估产,取得了不同程度的收益^[35]。国际上主要两大农业遥感估产业务系统如表2所示。

2.2 农业资源遥感调查

2.2.1 耕地资源调查

耕地是农业生产的基本保障,耕地面积和质量的变化对粮食安全和生态环境都有十分重要的影响。特别是在中国,人均耕地还不到世界人均耕地面积的一半,为此必须对全国耕地实行严格的保护制度。由于遥感监测覆盖面积广、重访周期短等优势,使其成为我国当前耕地资源监测的重要手段。

国际上,美国的LACIE和欧盟的MARS计划包括了耕地面积遥感调查任务,俄罗斯农业部在2003年建设了全国农业监测系统,该系统主要获取耕地面积、耕地利用制图、作物生长状况等信息,主要依据MODIS植被指数的年内变化过程对作物与耕地面积进行估算分析^[36]。在非洲地区,埃及利用多时相MODIS数据和时间序列分析方法,分析了埃及尼罗河两岸不同时期的灌溉区卫星影像,实现了埃及全国农田面积调查提取和动态变化监测^[37]。

由于我国耕地地块面积相对小而破碎,因此国内较多采用TM和SPOT较高空间分辨率影像数据进行耕地监测和管理。如国土资源部每年利用SPOT卫星影像数据进行全国耕地面积违法占用情况调查。在区域尺度,如Zhao等通过分析不同时期的Landsat TM遥感影像,发现黄河三角洲的耕地面积总体在减少^[38]。王国芳利用TM数据和最大似然法监督分类进行昔阳县耕地面积遥感提取,分类结果精度高达93.3%^[39]。另外,国内还开展了利用遥感数据和实地数据相结合的方法进行耕地质量的评价调查。如杨建锋等以河南省宜阳县为研究区域,建立耕地质量评价指标体系,采用多光谱遥感技术,以Landsat5 TM遥感影像为数据源,开展耕地质量评定,探讨应用遥感技术进行耕地质量识别的可行性^[40]。

表2 国际上主要两大农业遥感估产业务系统

Tab.2 Two agricultural yield prediction systems using remote sensing in USA and EU

系统名称	LACIE 和 AGRISTARS 计划*	MARS 计划**
国家和机构	美国农业部 (USDA)	欧盟联合研究中心 (JRC)
研发开始时间	1972 年	1988 年
采用的遥感数据	(1) 面积监测主要采用 Landsat5 TM 和 Resourcesat-1 AWiFS (2) 长势监测主要采用 NOAA AVHRR NDVI (2 周合成) 和 MODIS NDVI 数据	(1) 面积监测主要采用 SPOT X, 部分采用 Landsat TM、IRS 和雷达数据 (2) 长势监测主要采用 SPOT-Vegetation NDVI 和 NOAA AVHRR NDVI
主要方法	抽样方法采用面积抽样框架	抽样方法采用分层面积抽样 估产方法采用遥感数据与地面气象数据、作物生产模型结合
主要监测作物种类	小麦、玉米、大豆、水稻等	小麦、大麦、水稻、玉米、油菜、向日葵、甜菜、土豆和牧草
监测范围	国家尺度和全球热点区域	欧盟地区及全球热点区域 (如非洲、中亚国家)
业务产品	每两周形成一份预测报告	每年提供 6~8 次欧盟和邻近国家的主要作物长势监测和产量预报
精度评价	主要作物面积监测精度的 kappa 系数从 0.8 到 0.9 以上, 与地面实际统计数据的相关性从 0.6 到接近于 1。 冬小麦估产精度大于 90%	

注: * 表示信息来源官方 USDA 网站: <http://www.nass.usda.gov/>, ** 表示信息来源官方 JRC 网站: <http://mars.jrc.it/>。

2.2.2 土壤遥感调查

(1) 土壤关键属性调查

早期的土壤遥感调查主要集中在土壤类型遥感制图,即利用遥感图像对土壤类型、组合进行人工目视解译和勾绘。其方法是依据土壤发生学原理、土被形成和分异规律,对遥感图像特征(包括色调、纹理和图型结构)或解译标志以及地面实况调查资料,进行地学相关分析,直接或间接确定土壤单元或组合界线。现在土壤遥感调查主要集中在土壤关键理化特性的调查与制图,特别是土壤水分的遥感监测。

大面积土壤含水率状况对农作物产量预测、合理灌溉、防洪抗旱有着重要意义。目前土壤水分遥感监测主要包括光学、热红外、主被动微波遥感等手段,反演方法包括植被指数法、热惯量法、温度-植被指数法、微波反演等方法。对于裸露或植被覆盖稀疏的土地,较适用热惯量法。该方法主要利用遥感获取的地表昼夜温差以及土壤热惯量与土壤水分含量之间的关系来进行土壤水分的反演。如胡猛等基于 MODIS 数据,利用热惯量模型,计算了表观热惯量,并与实测数据进行回归分析建模,反演了内蒙古额济纳盆地的土壤水分^[41]。对植被覆盖区,可以利用土壤与作物之间水分关系,来间接建立基于植被指数的土壤水分遥感监测。如卢志光等利用红外波段监测作物冠层温差,进而通过冠层温差与土壤水分之间的关系,确定土壤含水率^[42]。

另外,由于水分和土壤介电常数差异显著,水的介质常数接近于 80 dB,而干土仅为 3~5 dB,湿土可高达 20 dB 以上,因此土壤水分微波遥感监测机理

清晰,应用也较广。其中,主动微波遥感就是基于土壤介电常数从干土到饱和的不同引起后向散射系数的变化,对裸土来说,土壤湿度的增大会引起后向散射系数的增大。1978 年美国发射了世界上第一颗载有 SAR 系统的卫星“海洋卫星 Seasat-1”,实现了 SAR 系统由机载向星载的过渡。SAR 应用于土壤水分反演已经有 30 多年的历史,国际上提出了许多的模型和算法,包括理论模型和经验、半经验模型。目前较为常用的理论模型主要有:Kirchhoff 模型、小扰动模型 (SPM)、积分方程模型 (IEM) 以及改进的 AIEM 模型;适用于裸地、稀疏到中等密度的地表植被覆盖条件的经验和半经验模型主要有:Oh 模型、Dubois 模型和 Shi 模型;对于植被覆盖较密的地表常用的模型主要有:水-云模型 (Water-Cloud Model) 和基于辐射传输方程的 MIMICS 模型^[43]。国内在 SAR 土壤含水率反演方面也做了大量的研究,如王军战等基于改进的 AIEM 模型采用双极化的 ASAR 数据进行了土壤湿度的反演研究^[44]。余凡和赵英时融合 TM 数据和 ASAR 数据进行了黑河流域土壤水分含量的提取研究^[45]。最近几年,随着新一代雷达卫星 (ALOS/PALSAR、TerraSAR-X、Cosmo-SkyMed、RADARSAT-2) 的发射,其雷达数据的高分辨率、多入射角、多频段、多极化、多观测模式等优越性将逐渐显现,给土壤含水率的主动微波遥感监测带来新的潜力与希望。

另外,被动微波遥感主要是通过测量地表的微波辐射来监测土壤水分,是大尺度下具有较高精度的土壤含水率监测方法,常被应用于进行大区域以及全球尺度的土壤水分动态监测。如 SMOS 遥感系

统 3 d 能获取一幅覆盖全球的土壤含水率图。但是被动微波遥感空间分辨率低, 经常是数十公里的分辨率, 因此很多研究会结合多源数据来降低被动微波遥感的尺度, 同时保持微波遥感较高的监测精度^[46]。如 Sánchez-Ruiz 等设计了一个集成 MODIS 和 SMOS 数据的土壤水分监测降尺度新算法, 该方法将土壤水分制图的空间分辨率从 40 km 提高到 500 m, 同时土壤水分监测精度进一步提高^[47]。

其他土壤属性遥感调查, 集中在土壤有机质、土壤粗糙度、土壤质地等属性。其中土壤有机质或有机碳是土壤最关键的属性, 与土壤质量、肥力、碳库等直接相关。土壤有机质在可见光波段存在较宽的吸收波段, 主要受到了土壤发色团和有机质本身黑色的影响, 在视觉上表现为暗黑色的土壤比亮色的土壤有机质含量更高。而在近红外波段, 主要受到 NH、CH 和 CO 等基团的分子振动的倍频与合频吸收影响, 因此土壤有机质或有机碳的地面高光谱研究一直受到重视^[48-49]。利用卫星遥感探测土壤有机质的研究目前相对较少, 一般在裸土情况下可以直接采用遥感光谱特性; 而在植被覆盖时, 经常采用其他成土因子间接地预测土壤有机质。如 Gomez 等利用星载高光谱 Hyperion 数据和 PLSR 方法直接预测了澳大利亚农田土壤有机碳含量, 与田间实测数据比较后认为星载高光谱数据有可能用于土壤有机碳的预测和制图^[50]。Wang 等利用 MODIS 影像提取的植被指数建立与有机质的回归关系, 利用回归克里格法进行有机质的空间预测制图^[51]。Poggio 等利用多时相 MODIS 数据提取的 EVI、LAI、LST、NDWI、SAVI 等指数和高程、坡度、坡向等 DEM 相关因子一起采用广义加性模型 (GAMs) 和随机分类树方法进行整个苏格兰土壤有机碳的预测和制图, 取得了较好的结果^[52]。另外, 如 Bartholomeus 等利用地面光谱反射率和机载成像光谱仪以及铁的相关吸收特征, 来进行土壤中铁含量的预测^[53]。

(2) 土壤侵蚀退化与障碍性土壤调查

遥感技术很早就应用于土壤侵蚀、退化调查与监测, 主要有 2 种途径: ①利用图像的颜色、色调、形状、纹理、阴影等信息和背景辅助数据, 加上野外实地调查, 直接建立土壤侵蚀与退化的遥感解译标志或机助分类阈值, 制作解译结果图, 传统遥感调查方式多数采用此方式。②利用土壤侵蚀退化的评价模型, 如美国的通用流失方程 (USLE)。即先采用遥感资料来获取全部或部分参数数据, 然后计算土壤侵蚀量。目前遥感技术主要用于提取降雨侵蚀 R 、植被覆盖管理 C 和土壤保持工程措施 P 3 个因子。如卜兆宏等多年来利用遥感技术和地面辅助数据进行

土壤 USLE 模型的计算, 已经在江西、山东、福建等地大量应用, 与地面水文站监测流域年流失总量相比, 精度达到 90% 以上^[54]。另外, 如 Al-Abed 利用 SPOT 卫星数据计算 USLE 模型中的 C 值和 P 值, 然后结合降雨、土壤和 DEM 数据获得了叙利亚沿地中海地区的年土壤侵蚀量^[55]; Kumar 等利用遥感与改进的 USLE 模型进行印度喜马拉雅地区的土壤侵蚀研究, 其采用 TRMM 卫星数据来计算降雨侵蚀因子 R , TM 数据来计算植被覆盖管理 C ^[56]。

障碍性土壤一般指土壤属性存在影响作物生长和农业生产的障碍性因子的土壤。如盐碱土、沙土、酸性红黄壤、石灰岩土等。由于这些土壤植被覆盖相对稀疏, 土壤表层影象特征有一定的标志, 所以有利于大面积的遥感调查。同时低产土壤的专题调查与制图是土壤改良的重要基础。以影响最大的盐碱土为例, 早期主要是利用航空像片结合实地调查进行盐碱土等的分析。随着卫星遥感技术的发展, 一系列分辨率较高的遥感影像促进了盐碱土等障碍性土壤的监测的发展。1984 年我国对黄淮海平原开展了低产土壤遥感清查工作, 主要包括盐碱土、沙土、砂姜黑土 3 类低产土壤。通过野外路线调查和土样的光谱特征分析, 建立解译标志, 选用 1:20 万 MSS 假彩色合成片, 再套用地貌类型分区图, 目视解译成图。与常规地面调查结果比较, 解译定性精度为 88.9%, 定量精度为 80%^[57]。Kalra 等利用不同相不同数据源对印度南部一海滨平原的盐碱土进行调查, 根据不同季节影象变化, 区分出盐渍化程度不一的 3 种土壤类型, 同时还区分出钠质土与盐渍土的分布^[58]。Abbas 等则采用 IRS-1 B LISS-II 结合田间调查数据, 采用最大似然方法对盐碱土进行了分类, 总体精度达到了 90%^[59]。马驰探讨了采用 HJ-1A 影像数据研究大面积土壤盐渍化状况的可行性, 结果表明采用回归模型可以较好地进行土壤盐碱化遥感反演^[60]。

2.3 农业灾害遥感监测

2.3.1 旱涝灾害

农业旱灾和洪涝灾害是目前世界范围内最常见、影响最大的两种气候灾害。每年因旱灾造成的经济损失约占气候灾害造成的经济损失总量的一半。由于洪涝灾害的突发性极强, 每年我国农田大约受涝面积为 733 万 hm^2 , 造成 200 亿的直接经济损失, 占各类农业灾害损失的 30% 左右^[61]。

目前最为常用的干旱监测方法为作物缺水指数法、热惯量法、植被指数法等, 尤其是前 2 种方法。作物缺水指数法 CWSI (Crop water stress index, 作物缺水指数) 主要利用作物冠层与冠层上空大气的温

度差来反映作物根层的土壤水分信息,一般只适用于作物覆盖率较好的地区。但是现有的干旱指数多应用于具备干旱条件的地区,在潮湿地区作用有限,Rhee 提出一个新的干旱指数 SDCI (Scaled drought condition index),该指数综合了地表温度(LST)数据和来自 MODIS 传感器的归一化指数(NDVI)数据,以及从 TRMM 获得的降水数据^[62]。如李强子等基于环境减灾星的多光谱、热红外数据及 MODIS 数据构建旱情遥感综合指数,实现了旱情遥感监测、地表可用水资源监测和旱情对农作物的影响分析^[63]。热惯量法是基于土壤水分对于土壤温度变化的阻抗。通过遥感图像反演研究区昼夜温差来反映农业旱情,一般用于裸地或者作物比较稀疏的地区。如曾燕等和 Chen 等采用改进的表现热惯量模型在河北平原和江苏地区进行了干旱监测研究^[64-65]。

对于洪涝灾害的遥感监测技术已经逐渐成熟,微波遥感由于不受时间和天气的影响,可以全天时、全天候地用来监测洪涝动态信息,是洪涝灾害发生期间最常用的监测手段。而光学遥感数据如 TM 和 SPOT 等,一般被用于灾后农田面积统计。Tapia-Silva 等运用 Landsat 影像和辅助数据进行农作物受洪涝灾害后的损失情况估测,并建立了相关模型,试验结果表明该模型的准确率为 66%^[66]。

2.3.2 冷冻灾害

全球变暖的背景下,各类极端天气现象发生的频率和强度不断加强。频发的农业气象灾害严重制约着我国农业的平稳快速发展。以冷冻害为例,冷冻害是北方冬小麦和水稻的重大灾害之一,主要发生在越冬休眠期和早春萌动期^[67]。作物冷冻害遥感监测的技术方法一般可分为两种,地面温度监测和植被指数差异分析。其中,地面温度监测是利用遥感技术监测地面温度,尤其是最低气温,通常要求监测温度的精度小于 1℃。这是因为作物发生冻害与否,直接与温度的高低有关,1℃的气温差别往往会带来两种不同的危害结果。对此国内外学者进行了大量的研究,Lou 等应用 NOAA - AVHRR 数据采用分裂窗算法反演地面最低温度对茶园冻害进行了监测并对冻害造成的经济损失进行了评估^[68]。一般研究所用的遥感影像资料分辨率较低,而 MODIS 数据具有较高的空间时间分辨率,在农业气象灾害监测方面具有一定的优势。如 Romanov 利用 NOAA 和 MODIS 数据通过监测积雪覆盖和地面温度对乌克兰冬季作物低温冻害进行了研究^[69]。

作物遭受冷冻害后作物植株保持过冷却状态,体内叶绿素活性会减弱,对近红外光和红光的敏感度下降会导致植被指数发生变化^[70]。因此植被指

数差异分析主要是通过对比受灾前后植被指数的差值来判断受灾情况,其生物学意义较为明显。Feng 等研究了冬小麦冻害发生时及发生前后 MODIS - NDVI 的变化情况,提出利用生长恢复度来监测冬小麦冻害严重程度,认为生长恢复度与产量存在线性关系^[71]。但是在实际应用中,植被指数(NDVI)并不能及时反映农作物冷冻害,往往在发生一段时间后才有所察觉,具有一定的延迟性。因此,要想取得理想的监测效果,就需要将 NDVI 监测与农作物地表温度反演有机地结合起来。

2.3.3 病虫害

病虫害是影响农业生产的重要因素,给农业生产造成巨大的损失。据联合国粮农组织估计,世界粮食产量常年因病害损失 10% 以上,因虫害损失 10%。在我国,病虫害对于农业的收益有极为严重的影响,平均每年病虫害对我国农业生产造成的经济损失占各类农业灾害损失的 10% ~ 15% 左右^[72]。利用遥感大范围监测技术可以对农业病虫害做到早期发现,早期防治,及时响应,及时处理。遥感技术不仅能对农业虫害病情的发生、发展进行实时监测,而且能对虫害对于农作物生长影响作出有效的分析和评估。

病虫害遥感监测的原理是作物病虫害会导致作物叶片细胞结构色素、水分氮素含量及外部形状等发生变化,从而引起作物反射光谱的变化;对作物冠层来说,病虫害会引起作物叶面积指数生物量覆盖度等的变化,故病虫害作物的反射光谱与正常作物可见光到热红外波段的反射光谱有明显差异^[72]。国外,遥感技术用于虫害监测研究可追溯到 20 世纪 30 年代,Mirik 等研究了俄罗斯麦蚜虫危害的冬小麦反射率光谱和虫量之间的相关关系,并提出了预测虫量的光谱指数^[73]。Jonas 和 Menz 采用 3 个不同发病时期的 QuickBird 和航空 HyMap 影像,利用决策树方法来识别冬小麦白粉病和叶锈病不同的发病程度,结果表明早期预测结果一般,精度只有 56.8%,而 2 个月后的第三期影像预测最好,精度达到 88.6%^[74]。

2.4 精准农业与遥感

精准农业(Precision agriculture, PA)技术是按照田间每一操作单元的环境条件和作物产量的时空差异性,在合适的地点,合适的时间,施用适量的水、肥、药、种子等,从而精准地进行施肥、播种、灌溉、杀虫、除草、收获等,以期达到较小的投入获取较高的收益,并将给环境带来的污染降低到最小程度的农业耕作技术。精准农业已成为粮食生产链监测,保障农业生产质量和数量的一种有效方法^[75]。

遥感可为精准农业提供以下2类农田与作物的空间分布信息:一类是基础信息,这种信息在作物生育期内基本没有变化或变化较少,主要包括农田基础设施、地块分布等信息。另一类是时空动态变化信息,包括作物产量,作物养分状况,病虫害的发生发展状况,以及作物物候等信息。

2.4.1 农田现状精准化制图

基于遥感的农田现状精准化制图主要针对农田基础设施、地块分布制图,该图作为农田基础信息底图,为精准作业计划提供服务。农田基础设施主要包括农田道路,水利设施等,使用遥感技术可以在较大范围内实现农业基础设施的快速调查与精准制图。传统的遥感农田田块与基础设施信息提取主要有以下3种方法:人机交互模式下的人工解译提取技术,基于像元尺度的影像自动分类技术及自动识别跟踪方法。如周炼清等将 QuickBird 高分辨率遥感影像进行合成比值变量变换法融合后,采用目视解译方法获得 1:2 000 比例尺的高新农业园区底图^[76]。胡谭高等利用基于小波变换和分水岭分割方法,对北京地区 QuickBird 数据进行耕地地块的自动提取研究^[77]。基于高分辨率遥感影像的耕地地块边界和空间信息提取,不仅时效性强,精度高,而且符合中国农村高度分散条件下的精准农业的实施。

另外,精准农业的变量管理技术需要将农田分割为相对均一的管理单元来实现精耕细作。目前农田管理分区经常采用地面传感器和遥感采集信息相结合的方法来表征农田中产量肥力因子和限制因子的差异性,然后采用各种聚类方法进行分区研究。如 Li 等采用 SPOT 提取的 NDVI, EM38 电导率等数据结合模糊 c-均值聚类方法将研究田块分成 3 个子区,结果表明各子区的作物产量和土壤肥力因子存在显著的差异^[78]。

2.4.2 农田精准化施肥

农田变量施肥即根据土壤养分含量和作物养分胁迫的空间分布来精准地调整肥料的投入量以获取最大的经济效益和环境效益。实现这一目标就需要土壤和作物养分两方面的信息,通过近地和卫星遥感技术对作物生化参数(氮磷钾)和长势进行监测可以提供作物养分和生长状况信息,同时在地理信息系统、专家系统和决策支持系统的支持下,生成作物不同生育阶段生长状况“诊断图”(Diagnosis maps),为指导合理精准施肥提供可靠依据。

作物氮素营养和生长动态的监测与诊断是作物栽培调控和生产管理的核心内容,是农业技术指导部门和生产者制定管理决策的主要依据,为精准农

业的现代化管理提供必需的基础信息。因此,基于氮素营养状况的作物生长监测和诊断一直是农学领域中的核心研究内容之一^[79]。由于高分辨率卫星数据在时相和成本上都还存在一定的限制,因此近地遥感手段目前应用相对较多。基于近地光谱传感数据的精准化施肥始于 90 年代,国外学者基于不同叶位 SPAD 值测定叶绿素含量,反映植株受氮素胁迫程度,进而实施变量施肥。Stone 等最先利用近地光学传感器(671 nm 和 780 nm)实现田间行进式的作物氮素胁迫监测^[80]。之后,国内外学者不断研发了一系列近地传感器如:Yara N sensor、GreenSeeker (650、770 nm)、Crop Circle (590、880 nm 或 670、730、780 nm),这些传感器在作物营养监测中得到了广泛使用。例如,Kitchen 等使用 Crop Circle 提供的植被指数 GNDVI,监测作物氮素缺乏程度,进而指导变量施肥,结果表明该方法可以减少氮素的施用量,提高作物产量^[81]。在卫星遥感应用方面,主要是利用 Hyperion 高光谱数据或高空间分辨率遥感的植被指数。Wu 等成功地利用 Hyperion 高光谱数据红边反射的多个植被指数,对多种作物的叶绿素含量实施监测,为进一步氮素监测和变量施肥提供依据^[82-83]。Reyniers 等在田块尺度上利用高分辨率 Ikonos 遥感影像数据建立 NDVI 指数与小麦谷粒氮含量之间的相关关系,相关系数为 0.86,该结果表明 Ikonos 可以监测精细尺度下的小麦氮素胁迫^[84]。

2.4.3 农田精准化灌溉

精准灌溉指在 3S 技术(或其中之一)及其相关技术或自动检测控制技术条件下的精准灌溉工程技术(如喷灌、微灌和渗灌等),根据不同作物不同生育期间的土壤墒情和作物需水量,实施的实时精量灌溉。

农田小尺度的土壤含水量分布状况是实现精准灌溉的前提。目前,基于中低分辨率的光学遥感和被动微波遥感的土壤含水量监测方法只适用于全球或区域大尺度,并不适用于农田或田块小尺度下的土壤水分监测。然而随着高空间分辨率卫星数据的不断发展,使得田块小尺度下的农田蒸散量估算和土壤含水量监测成为可能,并指导精准灌溉实践。例如赵春江等建立了基于互补相关模型、Ikonos 遥感数据及气象观测资料的高分辨率农田蒸散量估算方法,并利用蒸渗仪观测数据对农田蒸散模型及时空扩展结果进行验证和分析,从而为农田精准灌溉提供更为精细的蒸散决策信息^[85]。Gherboudj 等利用 RADARSAT-2 SAR 影像和地面同步测量数据,建立了各个后向散射系数与土壤表面粗糙度、作物高

度、作物含水量的经验关系,利用这种经验关系来纠正土壤粗糙度和作物对半经验水-云模型的影响,在加拿大实现了不同作物(小麦、豌豆、小扁豆和油菜籽)田块的土壤水分监测^[86]。Baghdadi等利用高空分辨率 TerraSAR-X 的单极化数据来反演裸土水分,预测均方根误差仅为 2.81%,因此类似 TerraSAR-X 的米级雷达遥感数据在田间尺度的土壤水分反演方面有很大的潜力^[87]。

随着新兴的根区局部灌溉技术的发展,根据根区(0~50 cm)土壤墒情状况定时、定量实施灌溉成为当前节水灌溉的新思路,因而充分了解田间土壤在垂直方向上尤其是根层方向上的含水率分布状况,是实现精准灌溉的关键。目前,利用遥感数据反演土壤含水率存在深度较浅的问题,0~20 cm 的土壤含水率与遥感资料相关性较好,反演精度较高;而 30 cm 土层深度往下,遥感反演土壤水分精度越来越差,因而利用表层土壤水分反演深层土壤水分具有重要的使用价值。如李琴等在遥感影像热惯量模型的基础上,结合半经验模型建立了适用于干旱半干旱区 1 m 土体的土壤含水率反演模型,结果表明,壤土和壤质粘土这两类土壤含水率接近真实值,砂土在区域验证中,模拟与实测差值为 2.16%,整个模型模拟精度较好,能够准确地从时空上反演干旱半干旱地区 1 m 土体的土壤水分情况^[88]。

3 农业遥感技术新的发展趋势

3.1 新一代农业无人机技术应用

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)作为一种由动力驱动、机上无人驾驶、可重复使用的新型遥感平台,具有优于其他遥感平台的灵活性、实时性、移动性等特点。特别是随着可见-近红外航空成像光谱仪、航空 CCD 数字相机的小型化,使得随时获取厘米级空间分辨率的可见-近红外图像成为可能,所以无人机遥感系统目前在环保、农业、救灾等领域得到了迅速的拓展。

农业卫星遥感技术受到天气、轨道周期、空间分辨率等的影响,对田间尺度的农情监测还存在很多不足,往往很难及时提供高质量的遥感数据,无人机遥感可以与大面积卫星遥感相互配合,形成多尺度的农情信息监测网。无人机遥感可以发挥在农田精细尺度和动态连续监测的优势,应用于农田地块边界和面积调查、农作物种类识别和统计、农作物长势分析、农作物养分和土壤水分监测等,特别在农业灾后快速评估方面,无人机遥感技术将发挥独特的作用。

3.2 农业地面传感网与遥感技术相结合

目前,基于有线和无线传感器的各类地基观测技术和组网建设逐步发展和完善,为卫星遥感的地表参量反演、模型同化和耦合、精度验证等工作提供了重要的真实性信息。在农业领域,基于现代物联网技术的农业地面传感网在智能温室与大田精准作业管理方面得到了快速应用。特别是各类自动采集作物叶面到冠层、土壤表层到剖面理化信息,以及农田气温、湿度、光照等环境信息的传感器不断出现,加上无线传输网和智能控制系统,使得农田信息地面采集的便捷性、精确性、时效性得到了显著的提高。

显然,各类地面传感网与农业遥感相结合可以提高农业遥感的监测精度,加强农业信息的实时服务能力。但是由于卫星、航空、地面等传感器系统在观测模式、成像机理、应用目的和处理方式等方面存在很大的不同^[89],加上水、土、气、生等农业资源要素的时空异质性,因此目前实现农业地面传感网与遥感技术的充分融合或进行协同观测还存在很多困难。

3.3 农业专业模型与遥感技术的耦合

遥感技术优势在于多尺度、多角度、多波段、多时相地提供大范围的的对地观测数据,能够及时获取地表特征信息如植被指数、亮度指数和地表辐射温度等,并通过定量反演,进一步获取地表特征参数如地表反射率、叶面积指数、叶绿素含量、土壤水分含量等。但是农业遥感特别是农作物遥感监测,作物高度、叶面积、生物量等关键属性在生育期是连续变化的动态过程,单靠遥感数据很难保证观测的连续性。因此,大量的研究是将各种农业专业模型如作物生长模型、地表能量平衡模型等与遥感数据进行耦合或同化,来弥补遥感观测时间分辨率的缺陷。

新的发展趋势一是提高传统农业专业模型的适用性,克服模型完全以农田小区试验为样本,较少考虑地物空间异质性的缺点;二是发挥星地多源数据的优势,结合地面传感网提高信息采集的周期性;三是重视遥感数据产品的标准化和业务化,如 MODIS 系列数据产品,可以业务化提供 8 d 植被指数、叶面积等数据产品,使得传统农学家更容易将遥感数据引入到各类农业专业模型中。

4 结束语

农业是遥感最早应用和效益显著的领域,从 20 世纪 70 年代美国实施 LACIE 计划以来,农业遥感技术已得到长足的发展和广泛的应用。特别是随着新一代高空间、高光谱和高时间分辨率遥感数据的不断出现,使得农业遥感技术的监测对象、监测精

度、监测的业务化流程等方面得到了更大的突破。我国农业现在正处在由传统农业向现代农业发展的转型期,实施农田流转和规模化经营给遥感技术带来了新的机遇。及时总结国内外农业遥感发展历程和遥感技术发展新趋势,结合现代农业发展的新契

机,将进一步明确农业遥感技术的发展前景和应用潜力。我国农业遥感技术与发达国家之间还有一定差距,大力发展农业遥感新技术、扩展遥感新应用,借鉴当前最新理论研究成果应用于实践,必将对我国农业现代化产生巨大作用。

参 考 文 献

- 1 王人潮,史舟,王珂,等. 农业信息科学与农业信息技术[M]. 北京:中国农业出版社,2003.
- 2 Moran M S, Inoue Y, Barnes E M. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 61(3): 319-346.
- 3 胡著智,王慧麟,陈钦畚. 遥感技术与地学应用[M]. 南京:南京大学出版社,1999:1-5.
- 4 王人潮,蒋亨显,王珂,等. 论中国农业遥感与信息技术发展战略[J]. *科技通报*, 1999, 15(1):1-7.
Wang Renchao, Jiang Hengxian, Wang Ke, et al. On the developmental tactic of agricultural remote sensing and information system of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15(1):1-7. (in Chinese)
- 5 夏德深,李华. 国外灾害遥感应用研究现状[J]. *国土资源遥感*, 1996, 29(3):1-8.
Xia Deshen, Li Hua. The status quo of remote sensing application for natural disaster in some countries[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 1996, 29(3):1-8. (in Chinese)
- 6 熊利亚. 中国农作物遥感动态监测与估产集成系统[M]. 北京:中国科学技术出版社,1996.
- 7 陈沈斌,孙九林. 建立我国主要农作物卫星遥感估产运行系统的主要技术环节及解决途径[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(4):363-369.
Chen Shenbin, Sun Jiulin. Key technical links and solution ways of setting up a working system for yield estimations of the main crops of China by satellite remote sensing[J]. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(4): 363-369. (in Chinese)
- 8 王人潮,黄敬峰. 水稻遥感估产[M]. 北京:中国农业出版社,2002.
- 9 Wardlow B D, Egbert S L, Kastens J H. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U. S. Central Great Plains[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 108(3): 290-310.
- 10 Xiao X M, Boles, Liu J Y, et al. Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(4):480-492.
- 11 Jiao X F, Kovacs J M, Shang J L, et al. Object-oriented crop mapping and monitoring using multi-temporal polarimetric RADARSAT-2 data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 96:38-46.
- 12 王乃斌. 中国小麦遥感监测与估产[M]. 北京:中国科学出版社,1996.
- 13 Yang C H, James H E, Murden D. Evaluating high resolution SPOT 5 satellite imagery for crop identification[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 75(2):347-354.
- 14 Nuarsa I W, Nishio F, Hongo C, et al. Using variance analysis of multitemporal MODIS images for rice field mapping in Bali Province, Indonesia[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(17):5402-5417.
- 15 Zhang J H, Feng L L, Yao F M. Improved maize cultivated area estimation over a large scale combining MODIS-EVI time series data and crop phenological information[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 94:102-113.
- 16 郑长春,王秀珍,黄敬峰. 多时相 MODIS 影像的浙江省水稻种植面积信息提取方法研究[J]. *浙江大学学报:农业与生命科学版*, 2009, 35(1):98-104.
Zheng Changchun, Wang Xiuzhen, Huang Jingfeng. Mapping paddy rice planting area in Zhejiang Province using multi-temporal MODIS images[J]. *Journal of Zhejiang University: Agriculture & Life Sciences*, 2009, 35(1):98-104. (in Chinese)
- 17 李卫国,李花,王纪华,等. 基于 Landsat /TM 遥感的冬小麦长势分级监测研究[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(1):92-95.
Li Weiguo, Li Hua, Wang Jihua, et al. A study on classification and monitoring of winter wheat growth status by Landsat/TM image[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1):92-95. (in Chinese)
- 18 Bala S K, Islam A S. Correlation between potato yield and MODIS-derived vegetation indices[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(10): 2491-2507.
- 19 何娟,汪庆发,裴志远. 冬小麦产量分阶段预测模型[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1):89-93.
He Juan, Wang Qingfa, Pei Zhiyuan. Winter wheat yield forecast multi-stage model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1):89-93. (in Chinese)
- 20 Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. Prediction of rice crop yield using MODIS EVI-LAI data in the Mekong Delta, Vietnam [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(20): 7275-7292.
- 21 Son N T, Chen C F, Chen C R, et al. A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 197:52-64.
- 22 Gontia N K, Tiwari K N. Yield estimation model and water productivity of wheat crop (*Triticum aestivum*) in an irrigation command using remote sensing and GIS[J]. *Journal of Indian Society of Remote Sensing*, 2011, 39(1):27-37.
- 23 黄青,唐华俊,周清波,等. 东北地区主要作物种植结构遥感提取及长势监测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9):218-223.

- Huang Qing, Tang Huajun, Zhou Qingbo, et al. Remote sensing based monitoring of planting structure and growth condition of major crops in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):218-223. (in Chinese)
- 24 吴炳方, 蒙继华, 李强子, 等. 全球农情遥感速报系统(Crop Watch)新进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(10):1013-1022.
Wu Bingfang, Meng Jihua, Li Qiangzi, et al. Latest development of "CropWatch"—an global crop monitoring system with remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(10):1013-1022. (in Chinese)
- 25 江东, 王乃斌, 杨小唤, 等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律[J]. 生态学报, 2002, 22(2):247-252.
Jiang Dong, Wang Naibin, Yang Xiaohuan, et al. Principles of the interaction between NDVI profile and the growing situation of crops[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(2):247-252. (in Chinese)
- 26 Labus M P, Nielsen G A, Lawrence R L, et al. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(20):4169-4180.
- 27 Ren J Q, Chen Z X, Zhou Q B, et al. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, 10(4):403-413.
- 28 王纪华, 李存军, 刘良云, 等. 作物品质遥感监测预报研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(9):2633-2640.
Wang Jihua, Li Cunjun, Liu Liangyun, et al. Progress of remote sensing monitoring and forecasting crop quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9):2633-2640. (in Chinese)
- 29 Badri B B, Armando A A, Rob M K. Relating satellite imagery with grain protein content[C]//Proceeding of Spatial Sciences Conference, 2003:22-27.
- 30 小西教夫, 志贺弘行, 安積大治, 等. 美味しいお米を作るリモートセンシング[J]. 測量, 2000(7): 14-20.
Konishi N, Shiga H, Asaka D, et al. The application of remote sensing technology in high quality rice production [J]. Measurement, 2000(7): 14-20. (in Japanese)
- 31 Li C J, Wang J H, Wang Q, et al. Estimating wheat grain protein content using multi-temporal remote sensing data based on partial least squares regression[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(9): 1445-1452.
- 32 Liu L Y, Wang J H, Bao Y S, et al. Predicting winter wheat condition, grain yield and protein content using multi-temporal EnviSat-ASAR and Landsat TM satellite images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(4): 737-753.
- 33 Zhao C J, Liu L Y, Wang J H, et al. Predicting grain protein content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2005, 7(1): 1-9.
- 34 李卫国, 王纪华, 赵春江, 等. 基于 NDVI 和氮素积累的冬小麦籽粒蛋白质含量预测模型[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 506-514.
Li Weiguo, Wang Jihua, Zhao Chunjiang, et al. A model for predicting protein content in winter wheat grain based on Land-Sat TM image and nitrogen accumulation[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(3): 506-514. (in Chinese)
- 35 贾敬敦, 孙晓明, 陈昆松, 等. 农业前沿技术与战略性新兴产业[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- 36 吴炳方, 蒙继华, 李强子. 国外农情遥感监测系统现状与启示[J]. 地球科学进展, 2010, 25(10):1003-1012.
Wu Bingfang, Meng Jihua, Li Qiangzi. Review of overseas crop monitoring systems with remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(10):1003-1012. (in Chinese)
- 37 Hereher M E. The status of Egypt's agricultural lands using MODIS Aqua data[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2013, 16(1): 83-89.
- 38 Zhao G X, Lin G, Warner T. Using thematic mapper data for change detection and sustainable use of cultivated land: a case study in the Yellow River Delta, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(13): 2509-2522.
- 39 王国芳. 基于 TM 数据耕地面积提取方法研究[J]. 山西农业科学, 2011, 39(4): 374-375.
Wang Guofang. Method of cultivated land area extraction based on TM data[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(4): 374-375. (in Chinese)
- 40 杨建锋, 马军成, 王令超. 基于多光谱遥感的耕地等别识别评价因素研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 230-236.
- 41 胡猛, 冯起, 席海洋. 基于 MODIS 数据的干旱区土壤水分反演[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1):78-82.
Hu Meng, Feng Qi, Xi Haiyang. Retrieving soil moisture in arid area based on MODIS data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2014, 26(1):78-82. (in Chinese)
- 42 卢志光, 张宏名, 金仲辉. 应用遥感技术监测土壤湿度的研究——农田水分的红外温度监测[J]. 遥感技术与应用, 1993, 8(2):32-36.
Lu Zhiguang, Zhang Hongming, Jin Zhonghui. The study of soil moisture monitor using remote sensing technology (1)—infrared temperautre monitor of cropland water[J]. Remote Sensing Technology and Application, 1993, 8(2):32-36. (in Chinese)
- 43 陈书林, 刘元波, 温作民. 卫星遥感反演土壤水分研究综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(11):1192-1203.
Chen Shulin, Liu Yuanbo, Wen Zuomin. Satellite retrieval of soil moisture: an overview[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(11):1192-1203. (in Chinese)
- 44 王军战, 张友静, 鲍艳松, 等. 基于 ASAR 双极化雷达数据的半经验模型反演土壤湿度[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(2): 5-9.
Wang Junzhan, Zhang Youjing, Bao Yansong, et al. Surface soil moisture estimation based on ASAR dual-polarized data using semi-experience model[J]. Geography and Geo-Information Science, 2009, 25(2): 5-9. (in Chinese)
- 45 余凡, 赵英时. 基于主被动遥感数据融合的土壤水分信息提取[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 187-192.

- Yu Fan, Zhao Yingshi. Soil moisture information extraction based on integration of active and passive remote sensing data[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 187 - 192. (in Chinese)
- 46 Jackson T J, Bindlish R, Cosh M H, et al. Validation of soil moisture and ocean salinity(SMOS) soil moisture over watershed networks in the U. S. [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(5):1530 - 1543.
- 47 Sánchez-Ruiz S, Piles M, Sánchez N, et al. Combining SMOS with visible and near/shortwave/thermal infrared satellite data for high resolution soil moisture estimates[J]. Journal of Hydrology, 2014,516:273 - 283.
- 48 郭燕, 纪文君, 吴宏海, 等. 基于野外 vis-NIR 光谱的土壤有机质预测与制图[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(4): 1135 - 1140.
- Guo Yan, Ji Wenjun, Wu Honghai, et al. Estimation and mapping of soil organic matter based on vis-NIR reflectance spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(4):1135 - 1140. (in Chinese)
- 49 史舟, 王乾龙, 彭杰, 等. 中国主要土壤高光谱反射特性分类与有机质光谱预测模型[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(5):978 - 988.
- Shi Zhou, Wang Qianlong, Peng Jie, et al. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations[J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(5):978 - 988. (in Chinese)
- 50 Gomez C, Viscarra Rossel R A, McBratney A B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: an Australian case study[J]. Geoderma, 2008,146(3 - 4):403 - 411.
- 51 Wang B W, Zhou W J, Ma S, et al. Regression-kriging of soil organic matter using the environmental variables derived from MODIS and DEM[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(4):838 - 842.
- 52 Poggio L, Gimona A, Brewer M J. Regional scale mapping of soil properties and their uncertainty with a large number of satellite-derived covariates[J]. Geoderma, 2013, 209:1 - 14.
- 53 Bartholomeus H, Epema G, Schaepman M E. Determining iron content in Mediterranean soils in partly vegetated areas, using spectral reflectance and imaging spectroscopy[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2007, 9(2):194 - 203.
- 54 卜兆宏, 孙金庄, 周伏建, 等. 水土流失定量遥感方法及其应用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(3): 235 - 245.
- Bu Zhaohong, Sun Jinzhuang, Zhou Fujian, et al. A study on quantitative remote sensing method of soil erosion and its application[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(3): 235 - 245. (in Chinese)
- 55 Al-Abed M, Shi Z, Yaghi A. An integrated GIS/RS approach for soil erosion assessment and modeling in Syrian coastal soils[J]. Pedosphere, 2001, 26(5):465 - 473
- 56 Kumar A, Devi M, Deshmukh. Integrated remote sensing and geographical information system based RUSLE modeling for estimation of soil loss in western Himalaya, India[J]. Water Resource Management, 2014, 28(10): 3307 - 3317.
- 57 戴昌达, 杨瑜, 石晓日, 等. 黄淮海低产土壤的遥感清查[J]. 环境遥感, 1986, 1(2):81 - 91.
- Dai Changda, Yang Yu, Shi Xiaori, et al. Inventory of the low productive soils in Huang-Huai-Hai plain by using remote sensing [J]. Remote Sensing of Environment, 1986, 1(2):81 - 91. (in Chinese)
- 58 Kalra N K, Joshi D C. Potentiality of Landsat, SPOT and IRS satellite imagery for recognition of salt affected soils in Indian arid zone[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(15): 3001 - 3014.
- 59 Abbas A, Khan S, Hussain N, et al. Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2013, 55 - 57: 43 - 52.
- 60 马驰. 基于 HJ-1A 高光谱影像的土壤盐碱化遥感研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 180 - 184.
- Ma Chi. Research on soil salinization using remote sensing of HJ-1A hyper spectral images[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(2): 180 - 184. (in Chinese)
- 61 闫峰, 李茂松, 王艳姣, 等. 遥感技术在农业灾害监测中的应用[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(6):131 - 136.
- Yan Feng, Li Maosong, Wang Yanjiao, et al. Application of remote sensing technique to monitor agricultural disaster[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(6):131 - 136. (in Chinese)
- 62 Rhee J, Im J, Carbone G J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010,114(12):29875 - 2887.
- 63 李强子, 闫娜娜, 张飞飞, 等. 2010 年春季西南地区干旱遥感监测及其影响评估[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 771 - 780.
- Li Qiangzi, Yan Nana, Zhang Feifei, et al. Drought monitoring and its impacts assessment in southwest China using remote sensing in the spring of 2010[J]. Acta Geographica Sinica,2010, 65(7): 771 - 780. (in Chinese)
- 64 曾燕, 邱新法, 徐萌, 等. 2004 年秋季江苏省干旱遥感监测研究[J]. 气象科学, 2007, 27(3): 302 - 306.
- Zeng Yan, Qiu Xinfa, Xu Meng, et al. On monitoring of drought in Jiangsu province of 2004 autumn using remote sensing data [J]. Scientia Meteorological Sinica, 2007, 27(3): 302 - 306. (in Chinese)
- 65 Chen J, Wang L X, Li X D, et al. Spring drought monitoring in Hebei plain based on a modified apparent thermal inertia method [J]. Proceedings of SPIE 8006, MIPPR 2011; Remote Sensing Image Processing, Geographic Informations Systems, and Other Applications, 2011: 800615.
- 66 Tapia-Silva F O, Itzerott S, Foerster S, et al. Estimation of flood losses to agricultural crops using remote sensing[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011, 36(7 - 8): 253 - 265.
- 67 Wang H F, Guo W, Wang J H, et al. Exploring the feasibility of winter wheat freeze injury by integrating grey system model with

- RS and GIS[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013,12(7):1163-1172.
- 68 Lou W P, Ji Z W, Sun K, et al. Application of remote sensing and GIS for assessing of economic loss caused by frost damage to tea plantations[J]. *Precision Agriculture*, 2013, 14:606-620.
- 69 Romanov P. Satellite-derived information on snow cover for agriculture applications in Ukraine[M]//Kogan F, Powell A M, Fedorov O. Use of satellite and in-situ data to improve sustainability. Dordrecht: Springer, 2011: 81-97.
- 70 冯美臣, 王超, 杨武德, 等. 农作物冷冻害遥感监测研究进展[J]. *山西农业大学学报:自然科学版*, 2014, 34(4):296-300.
Feng Meichen, Wang Chao, Yang Wude, et al. Progress of remote sensing monitoring crop chilling and freeze injury[J]. *Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition*, 2014, 34(4):296-300. (in Chinese)
- 71 Feng M C, Yang W D, Cao L L, et al. Monitoring winter wheat freeze injury using multi-temporal MODIS data[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2009, 8(9):1053-1062.
- 72 张竞成, 袁琳, 王纪华, 等. 作物病虫害遥感监测研究进展[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(20): 1-11.
Zhang Jingcheng, Yuan Lin, Wang Jihua, et al. Research progress of crop diseases and pests monitoring based on remote sensing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(20): 1-11. (in Chinese)
- 73 Mirik M, Michels Jr G J, Kassymzhanova-Mirik S, et al. Reflectance characteristics of Russian wheat aphid (Hemiptera: Aphididae) stress and abundance in winter wheat[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 57(2):123-134.
- 74 Jonas F, Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing[J]. *Precision Agriculture*, 2007, 8(3): 161-172.
- 75 Gebbers R, Adamchuk V I. Precision agriculture and food security[J]. *Science*, 2010, 327: 828-831.
- 76 周炼清, 郭亚东, 史舟, 等. QuickBird 遥感影像的融合及在农业园区底图制作中的应用研究[J]. *科技通报*, 2004, 20(5):392-396.
Zhou Lianqing, Guo Yadong, Shi Zhou, et al. Study on fusion of QuickBird remote sensing in image and its application in producing basic map for agriculture guard[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2004, 20(5):392-396. (in Chinese)
- 77 胡潭高, 朱文泉, 阳小琼, 等. 高分辨率遥感图像耕地地块提取方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(10):2703-2707.
Hu Tangao, Zhu Quanwen, Yang Xiaoqiong, et al. Farmland parcel extraction based on high resolution remote sensing image[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(10):2703-2707. (in Chinese)
- 78 Li Y, Shi Z, Li F, et al. Delineation of site-specific management zones using fuzzy clustering analysis in a coastal saline land[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2007, 56(2): 174-186
- 79 赵春江. 农业遥感研究与应用进展[J]. *农业机械学报*, 2014,45(12): 277-293.
Zhao Chunjiang. Advances in remote sensing research and application in agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014,45(12): 277-293. (in Chinese)
- 80 Stone M L, Solie J B, Raun W R, et al. Use of spectral radiance for correcting in season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 1996, 39(5):1623-1631.
- 81 Kitchen N R, Sudduth K A, Drummond S T, et al. Ground-based canopy reflectance sensing for variable-rate nitrogen corn fertilization[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 102(1):71-84.
- 82 Wu C, Han X, Niu Z, et al. An evaluation of EO-1hyperspectral Hyperion data for chlorophyll content and leaf area index estimation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(4):1079-1086.
- 83 Wu C, Wang L, Niu Z, et al. Non destructive estimation of canopy chlorophyll content using Hyperion and Landsat/TM images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(8):2159-2167.
- 84 Reyniers M, Vrindts E. Measuring wheat nitrogen status from space and ground-based platform[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(3):549-567.
- 85 赵春江, 杨贵军, 薛绪掌, 等. 基于互补相关模型和 IKONOS 数据的农田蒸散时空特征分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8):115-124.
Zhao Chunjiang, Yang Guijun, Xue Xuzhang, et al. Temporal-spatial analysis of farmland and evapotranspiration based on complementary relationship model and IKONOS data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013,29(8):115-124. (in Chinese)
- 86 Gherboudj I, Magagi R, Berg A A, et al. Soil moisture retrieval over agricultural fields from multi-polarized and multi-angular RADARSAT-2 SAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(1): 33-43.
- 87 Baghdadi N, Aubert M, Zribi M. Use of Terra SAR-X data to retrieve soil moisture over bare soil agricultural fields[J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012,9(3):512-516.
- 88 李琴, 陈曦, Veroustraete F, 等. 干旱半干旱区土壤含水量反演与验证[J]. *水科学进展*, 2010, 21(2):201-207.
Li Qin, Chen Xi, Veroustraete F, et al. Validation of soil moisture retrieval in arid and semi-arid areas[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2):201-207. (in Chinese)
- 89 李德仁, 童庆禧, 李荣兴, 等. 高分辨率对地观测的若干前沿科学问题[J]. *中国科学:地球科学*, 2012, 42(6):805-813.
Li Deren, Tong Qingxi, Li Rongxing, et al. Current issues in high-resolution earth observation technology[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012,42(6): 805-813. (in Chinese)