

农业遥感研究与应用进展*

赵春江^{1,2}

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 农业部农业信息技术重点实验室, 北京 100097)

摘要: 农业是遥感技术应用最重要和广泛的领域之一, 本文回顾了遥感技术在国内外农业研究与应用中的进展, 概括和总结了农田辐射传输机理及作物参量遥感反演、作物遥感分类与识别、农田养分遥感与变量施肥决策、作物产量与品质预测、农情遥感监测与预报、农业遥感监测空间决策支持系统 6 个主要研究与应用方面。在此基础上, 针对农业遥感技术面临的问题与发展趋势, 指出了农业遥感技术今后的重点发展方向。

关键词: 农业遥感 应用进展 农情监测 空间决策支持系统

中图分类号: S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)12-0277-17

引言

20 世纪以来, 遥感技术作为一门先进的实用技术, 被广泛应用于多个领域, 农业是遥感技术应用最重要和广泛的领域之一。随着我国农业生产向集约化方向转变, 作物生产过程中对空间信息, 特别是对动态、大范围、快速及时的遥感信息需求非常迫切。遥感技术具有快速、无损获取地物信息的特点, 其迅猛发展能够为农业生产过程管理提供必要的信息。在我国农业遥感应用主要涉及农田辐射传输机理及作物参量遥感反演、作物遥感分类与识别、农田养分遥感与变量施肥决策、作物产量与品质预测、农情遥感监测与预报、农业遥感监测空间决策支持系统 6 个方面, 涵盖了农业遥感机理、模型和应用等多层次和多方面的研究与应用。随着空间技术的发展, 农业遥感已逐渐形成了以低、中、高空多层次遥感相结合、静态与动态相结合、机理与应用相结合的发展趋势, 遥感和计算机技术的广泛应用, 促使农业生产过程向机理化、定量化和精准化的方向发展, 农业科技水平正逐步提高。本文从以上提到的 6 个方面对遥感技术在农业中应用所取得的进展进行归纳总结。

1 农田辐射传输机理及作物参量遥感反演

1.1 农田辐射传输机理

不同地物对电磁波的反射、吸收、透射和发射特性不同, 这些特性通常称为地物的光谱特征。遥感技术即是依据地物的电磁波光谱特征进行目标探

测。因此, 深入理解农田土壤-叶片-冠层之间的辐射传输过程及机理对于开展定量遥感作物监测评价具有非常重要的作用。目前在农田辐射传输方面已取得了许多重要进展, 建立了 PROSAIL^[1]、ACRM^[2]、FRT^[3]、植被冠层 3D 热辐射传输模型^[4]等基于过程的物理模型。但现有模拟方法多关注地表辐射传输过程, 无法把地表辐射转换为大气层顶或传感器输出值, 从而降低了模拟方法的实用性和有效性。因此, 杨贵军等将扩展后的叶片-土壤-冠层辐射传输模型与数值解析大气辐射传输模型及传感器成像模型进行耦合, 建立了农田-大气-传感器一体化的辐射传输模拟系统, 实现了多时相、多角度、高光谱及高分辨率遥感数据模拟, 为农业定量遥感研究奠定了模型基础^[5]。

1.2 作物参量遥感反演

目前遥感技术已广泛用于提取作物关键生物理化参数信息, 如叶面积指数 (LAI)^[6]、叶绿素含量^[7]、地上部生物量^[8]、水分含量^[9-10]、作物株型等^[11], 其根本依据是作物特性 (冠层几何结构、叶片生化组分及内部组织结构等) 与冠层光谱反射特征 (尤其是可见光、近红外和中红外波段) 的内在联系^[12]。目前通常采用的方法有 2 种, 一是基于作物参数与敏感波段反射率或其数学组合 (即光谱植被指数) 的经验统计关系法^[8-9]; 二是基于物理过程的辐射传输模型反演方法, 该方法常用 3 种算法 (数值优化、查找表、人工神经网络等) 来简化推导过程、提高反演效率^[6,10,13-14]。

收稿日期: 2014-07-08 修回日期: 2014-07-28

* 国家自然科学基金资助项目 (41271345)、北京市自然科学基金资助项目 (4141001) 和北京市农林科学院科技创新能力建设资助项目 (KJCX20140417)

作者简介: 赵春江, 研究员, 博士生导师, 主要从事农业信息化技术研究, E-mail: zhaocj@nrcita.org.cn

经验统计法具有结构简单、便于应用等优点,但建立的经验关系模型多依赖于特定的传感器、地点和取样条件,其普适性较弱,且存在饱和效应等问题^[6,14]。针对上述问题,Hunt等构建了三角绿度指数(TGI),其对于叶面积指数较大的密闭冠层的叶绿素含量仍具有较强的敏感性,有效减弱了叶面积指数的影响,可用来精确估算作物叶绿素含量^[7]。Fu等结合冬小麦冠层高光谱波段深度信息与近红外波段组成的高光谱指数,利用偏最小二乘回归建立了生物量估算模型,可较好地克服饱和问题并有效提高生物量估算精度^[8]。Nguy-Robertson等研究表明,绿光波段取530~570 nm、红边波段取700~725 nm的宽动态范围植被指数(WDRVI)和叶绿素指数(CI)可以精确估算不同作物的叶面积指数,且所建模型在不同作物类型之间具有较强的普适性和抗饱和性^[15]。冠层辐射传输模型描述了冠层内部辐射传输的物理过程和机制,因此利用该模型反演作物参数信息可具有较强的普适性,但其存在的病态反演问题(即相同的光谱曲线可对应于模型不同的参数组合)被广泛关注^[10]。Li和Wang、He等研究表明,通过引入先验知识或改进模型反演算法可有效解决该问题^[13-14]。

另外,作物叶面积指数、叶角、叶绿素、水分含量、干物质含量等参数在冠层内的垂直分布存在较大差异,其对冠层光谱反射特性存在不可忽视的影响,在作物参数遥感估算研究中应给予充分关注,但目前相关研究还比较有限。赵春江等基于多角度冠层反射光谱构建了冬小麦上、中、下层叶绿素浓度反演指数,取得了较好的精度^[16]。Yang等建立了考虑冠层垂直结构特点的多尺度辐射传输模型,并通过挖掘多源遥感数据形成的多角度、多波段数据集,充分利用不同观测角度下冠层立体结构信息,有效提高了叶面积指数反演精度^[6]。Li和Wang构建了一个新的差值植被指数 $D(920,1080)$ 用来估算作物叶面积指数,该指数对叶面积指数大小响应较强而对垂直分布差异不敏感,具有在缺乏冠层垂向异质性先验信息的情况下估算叶面积指数的潜力^[17]。Wang和Li在已有冠层辐射传输模型的基础上构建了多层冠层辐射传输模型(MRTM),通过将冠层细分为若干层来处理不同层次生物理化参数的变化差异问题^[18]。李贺丽利用该MRTM模型通过设置不同冠层结构及色素、水分垂直变化情景,系统模拟分析了冬小麦垂向异质性及冠层高光谱和典型波段多角度光谱反射特性的影响^[19]。Gitelson等亦强调了作物参数遥感估算中考虑冠层垂向异质性的重要性^[20]。上述相关成果为其深入研究奠定了必要的

基础。

此外,基于不同卫星遥感数据反演得到的作物参数信息还存在估算精度、空间尺度不一致和时间不连续等问题,限制了其广泛应用。针对此问题已开展了相关研究。Zhang等基于动态贝叶斯网络推理算法将地面站点气象数据(最小温度、日照时数、水汽压差等)与MODIS数据进行同化,提高了叶面积指数时间序列的估算精度和一致性^[21]。董莹莹建立了一种基于切比雪夫多项式逼近理论的作物LAI和叶绿素空间尺度转换模型,能够有效校正尺度效应引起的作物叶面积指数和叶绿素多尺度反演差异^[22]。Liu等基于集合卡尔曼滤波技术并通过耦合冠层辐射传输模型和动态过程模型建立了一种综合利用多源遥感卫星不同时相、光谱和角度信息的叶面积指数反演方法,提高了叶面积指数估算结果的精度和时空连续性、一致性^[23]。今后需要进一步开展地面观测验证实验以使相关研究成果得到更为广泛的应用。

2 作物遥感分类与识别

作物遥感分类与识别是农情遥感监测的重要内容,是提取农作物种植面积、长势、产量、品质、灾害等监测的基础。利用作物生长与多源遥感之间的光谱特征、纹理特征、物候特征以及农学机理解析等信息,可以快速、高效、大范围地监测主要农作物的种植面积与空间分布。

2.1 基于光谱特征信息的作物遥感分类方法

作物遥感识别方法根据数据源的不同各有差异,目前多光谱和高光谱遥感是用来识别作物类型的主要遥感数据源。多光谱遥感作物分类是大面积作物分类的主要方法,根据采用的遥感影像的时相数可分为基于单时相、多时相和长时间序列遥感数据的作物分类。其中,基于单时相遥感的作物分类中常用的方法有传统的人机交互判别如人工数字化^[24]和基于植被指数的阈值法^[25]、半自动或全自动的土地覆盖类型分类如最大似然法、决策树、神经网络、面向对象的分类等^[26]。人机交互方法在大范围内应用性较差,自动半自动土地覆盖分类容易受不同类型在空间上的光谱差异、地物光谱的时间动态、作物与非作物间的光谱相似性等多方面因素的影响。基于多时相和长时间序列遥感的作物分类是综合利用遥感图像包含的波谱、空间和时间上的信息,针对作物不同生长发育阶段的光谱特性与其他地物间的差异,结合阈值法、变化向量分析等方法实现作物的分类与识别。二者的差异在于前者是依据对象作物的某几个特殊发育阶段的遥感影像提取光

谱信息为依据^[27],后者是以长时序的遥感影像数据为基础提取不同地物全年或多年的光谱特征^[28]。高光谱数据能记录地物间更细微的光谱差异,能够更准确地实现作物的详细分类与信息提取,光谱角分类和决策树分层分类是目前最常用的基于高光谱的作物分类方法,光谱角方法对太阳辐照度、地形和反照率等因素不敏感,可以有效地减弱这些因素的影响^[29]。

2.2 基于地块分类的作物种植面积监测方法

针对基于像元的作物分类所面临的光谱变异与光谱混合的问题,许多学者根据作物种植结构特点,采取以地块为基本单位的分类方式来克服像元分类所遇到的问题,以提高农作物分类的精度。基于地块的作物分类思想最早由 Derenyi 提出^[30]。多项研究均表明面向地块的作物分类方法完全能够提供比基于像元的传统分类法更精确的结果^[31]。地块分类法(Per-field classification)通常将遥感影像与数字化地块边界矢量数据联合处理,该方法利用了像元空间上下文信息,可克服由田块内部的光谱变异所引起的错分问题,同时边界矢量数据又使得影像图斑对象与地面实际地块相对应,能对地块的位置、形状进行十分准确的表达,因而地块分类法能有效地排除地块内部光谱变异和地块交界光谱混合的影响^[32]。在基于地块分类时,包含多种作物类型的地块所对应的图斑光谱均值也会具有两个或多个作物类型的性质,这时一个地块分成一类对于分类统计来说显然是不合适的,而引进混合地块分解的思想来处理地块分类过程中的不确定信息,对于提高信息提取精度来说显得较为合理。顾晓鹤等以冬小麦种植面积测量为研究目标,针对纯地块区域和混合地块区域分别进行纯地块分类和混合地块分解方法研究,能充分发挥特征向量维数较多的优势,有效地避免了像元分类中的“椒盐”现象,更有利于以地块为基本单元的田间肥水管理^[33]。

2.3 基于对地抽样的作物种植面积监测

抽样技术与遥感技术相结合形成的对地抽样调查技术,在作物种植面积统计领域应用日益广泛,二者相互补充,遥感为抽样调查提供详细的抽样框和分层信息,提高抽样调查效率;抽样技术为遥感提供充分的地面数据和验证依据。美国国家农业统计局(National Agricultural Statistics Service, NASS)通过将空间统计抽样方法与遥感监测技术的结合,对全美主要农作物面积进行多样框抽样调查,提高了全美农情信息获取速度^[34];欧盟 MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) 计划以 CLC (Corine Land Cover) 数据为基础进行土地利用调查,并以分

层系统抽样方法选择遥感影像,降低调查成本^[35]。

遥感与抽样相结合的测量方法能够准确地获取区域农作物总量面积,吴炳方等在农作物区划基础上构建面积抽样框架和产量抽样框架,获取区划单元内作物种植面积成数,提高了作物面积和产量调查效率^[36];胡潭高等探讨不同抽样遥感测量方法^[37];Guo 等采用 ALOS 影像解译样本乡镇的玉米种植面积,建立分层抽样推算模型,估算吉林省 2010 年玉米种植面积^[38]。Maxwell 等在玉米区域总量确定的前提下,将整个区域划分为“highly likely corn”、“likely corn”和“unlikely corn”进行玉米种植面积空间分布的分配^[39]。张锦水等在对地抽样的基础上研究了区域总量控制下的冬小麦种植面积空间分布优化方法^[40]。

3 农田养分遥感与变量施肥决策

3.1 作物氮素及其垂直分布遥感反演

3.1.1 作物氮素遥感反演

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。

目前作物氮素遥感反演主要关注植株/叶片氮浓度和含氮量两类指标,常采用的方法是基于高光谱敏感波段反射率或光谱植被指数的经验统计关系法。氮素反演敏感波段研究方面,在农作物冠层氮素的高光谱遥感反演试验研究基础上^[41],Shibayama 等对水稻的研究发现,单位土地面积上的叶片含氮量与 R620 和 R760 的线性组合以及与 R400、R620 和 R880 的线性组合均有较好的回归关系,且不受品种类型的影响^[42]。国内对水稻氮素营养水平与光谱特性研究指出诊断水稻叶片氮素营养的敏感波段为 760 ~ 900 nm、630 ~ 660 nm 和 530 ~ 560 nm^[43],并将光谱分析方法估测鲜叶含氮量的精度提高到了 85% 以上。刘良云等利用 1 690 nm 处反射峰特征,能够很好地反演小麦各个生育期冠层糖氮比,并建立了叶片和茎鞘在起身期-乳熟期的分段遥感反演模型^[44]。在氮素反演高光谱信息提取方法方面,浦瑞良等介绍了利用多元统计、基于光谱位置变量、光学模型以及参数成图技术反演植被氮素等生化组分的方法^[45]。Cho 等提出了一种新的计算作物冠层反射光谱红边位置的方法——线性外插法。基于此法提取的红边位置信息,建立了预测小麦植株、玉米叶片和混合牧草植株氮浓度信息的

预测模型^[46]。Eitel等提出光谱指数MCARI/MTV2,并用它很好地估测了春小麦叶片氮浓度^[47]。Chen等的研究表明,双峰冠层氮指数(DCNI)消除了叶面积变化对氮浓度诊断的干扰,从而达到准确探测植株氮浓度的目的^[48]。赵春江等研究认为用红边振幅和近红外平台振幅可以反演冬小麦叶片含氮量^[49]。陈鹏飞等实现了冬小麦和玉米氮营养指数(Nitrogen nutrition index, NNI)的遥感估测,能够很好地判定小麦和玉米的氮素营养状况^[50]。

3.1.2 作物冠层氮素垂直分布光谱探测

冠层氮素垂直分布的非均匀性自20世纪80年代以来引起国内外学者的大量关注,目前从植物生理学角度对其形成机理、影响因素及对光合性能的影响等已进行了广泛深入的讨论,但在遥感作物氮素垂直分布方面尚考虑不足^[51]。不过已有研究者认识到遥感作物冠层不同层次的氮素含量对于指导实际生产的重要性,并对其探测方法进行了多种尝试。

一类是基于垂向观测的冠层反射光谱探测方法。王纪华等研究表明运用偏最小二乘法(PLS)可利用垂向观测的冬小麦冠层光谱来反演不同层次的叶氮浓度^[52]。但考虑到去除下部叶层对冬小麦冠层反射光谱的影响不大,利用该法估算冠层下部叶层的氮浓度可能存在较大的不确定性^[53]。王之杰利用冬小麦差值植被指数(DVI)结合冠层各层次的光能截获量来推算不同叶层的氮密度^[54]。但对于大面积的作物遥感监测,冠层各层次的光能截获信息亦不易获取,可能会限制该法的实际应用。另一类是基于多角度观测的冠层反射光谱探测方法^[55]。赵春江等基于多角度冠层反射光谱构建了冬小麦上、中、下叶层的叶绿素浓度反演指数,取得了较好的精度^[16]。但由于氮素和叶绿素在冠层内的垂直分布形态存在明显差异,因此利用多角度高光谱信息探测冠层不同层次氮素的方法还需要进一步研究^[51]。

此外,王纪华、马吉锋等基于田间实验数据分析了不同层次叶片的光谱和荧光特性与叶氮浓度的相关性,为探寻作物冠层氮素垂直分布的遥感方法提供了必要的基础数据^[56-57],但实际应用中面临着目前遥感观测难以获取大面积作物冠层不同层次光谱反射信息的困境。通过耦合冠层氮分布数学模型与成像或非成像高光谱信息或为实现作物冠层氮素垂直分布的遥感估算提供了可能,今后亟待开展相关研究^[51]。

3.2 农田土壤养分遥感反演

耕地是农业生产的基地,农田土壤养分是影响

粮食产量的重要指标。与传统的野外调查与实验分析方法相比,遥感技术中的高光谱技术可获取窄波段且光谱连续的土壤光谱,多光谱传感器具有较高的空间分辨率,雷达和激光雷达则具有较高的穿透性,在分析农田土壤养分的空间分布格局上具有较大的优势。

土壤养分遥感监测是以土壤反射率光谱的形状和吸收特征为依据的,研究表明土壤理化参数与土壤光谱特征均有明显联系,土壤光谱特征是对土壤特性的一种反映^[58]。根据用于模拟土壤属性的遥感数据源,可以将农田土壤养分遥感估算的研究划分为以实验室实测光谱和以遥感影像数据为基础两类。在有区域土壤采样获取土壤光谱或成像高光谱数据与实测土壤属性数据的前提下,以土壤光谱数据为基础,研究分析土壤的光谱响应特征,采用各种技术手段提取反映各类土壤养分含量的光谱特征信息,如光谱变换^[59]、波段深度分析^[60]、主成分分析^[61]、小波变换^[62]、偏最小二乘法和多元回归分析等多变量回归法等^[63],构建基于点数据的土壤属性估算模型,分析各种方法在土壤养分遥感监测应用中的可行性。在土壤养分空间分布大范围监测上,主要依据遥感数据源传感器的波段响应函数,模拟其相应的宽波段数据,分析研究利用多光谱遥感数据大尺度监测土壤有机质含量的可行性,构建基于多光谱的土壤属性估算模型。目前,大部分关于土壤养分的遥感反演是以裸土或稀疏植被覆盖下的土壤为研究对象,以去除植被对土壤参数反演的影响。

农田土壤养分是耕地质量综合评价中的重要影响因子^[64],也是田间管理变量施肥决策过程中不可缺少的内容,遥感技术在很大程度上解决了人工调查方法费时、费力、高成本的缺点,能够实现土壤养分信息的快速更新。

3.3 农作物变量施肥技术

在农作物变量施肥技术方面,多依赖遥感反演出的氮/叶绿素浓度、氮/叶绿素累计量、叶面积指数、生物量、密度等参数中的某一种判定作物的氮素营养状况,根据农田土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾等监测结果判定土壤养分状况,进而进行施肥决策与管理。

在地面平台,基于田间作业机械、观测塔及人工携带的传感器来获取作物光学信息,如通过SPAD、GreenSeeker、Yara N-sensor、ASD FR2500等光谱仪,可以很好地无损检测植株含氮状况,进而指导合理施氮和氮素调控,避免盲目施肥,以达到提高氮肥利用效率的目标。Peng等提出了实时氮肥管理模式(Real-time nitrogen management, RTNM),该技术根

据水稻 SPAD 测定值进行氮素营养状况快速诊断, 实时测定结果与设定的 SPAD 阈值比较确定是否追施氮肥^[65]。Lukina 等利用 NDVI 反演冬小麦植株氮素积累量并估测潜在产量来进行变量施肥管理^[66]。密苏里州立大学 Scarf 等根据未施肥区玉米绿度值与饱和施肥区玉米绿度值的差异来判断未施肥区玉米氮素营养状况并开展变量施肥管理^[67]。Liang 等开展了基于光谱参数 (OSAVI) 的变量施肥与均一施肥的对比研究, 结果表明前者肥效高于后者^[68]。Song 等基于 QUICKBIRD 遥感影像及土壤养分进行了农田管理分区划分的研究^[69]。

国内陈立平等利用实测的田间地物光谱数据, 改进了 Lukina 等提出的基于光谱数据的施氮优化算法, 使其适合于北京地区的变量施肥, 扩展了算法的通用性^[70]。宋晓宇等利用航空成像光谱 (PHI) 数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势的影响, 研究表明利用航空遥感数据可以监测土壤基础养分差异及变量施肥对冬小麦长势的影响^[71]; 李翔利用冬小麦拔节期 OMIS 航空遥感影像进行了管理分区的划分研究, 并与基于产量数据划分的管理分区图进行了比较, 结果表明二者具有较好的空间一致性^[72]; 鲍艳松等以航空影像、地面冠层光谱数据及同步观测的植被生化数据为基础, 探讨了冬小麦冠层氮素监测的遥感方法, 并生成了基于航空高光谱 OMIS 影像数据的变量施肥处方图^[73]; 潘瑜春等研究了基于小麦长势遥感监测的土壤氮素累积估测研究, 研究结果表明追肥前的 NDVI 能够较好地估测小麦生育期内土壤碱解氮增量, 追肥前后 NDVI 绝对增量与追肥前的 NDVI 的比值是估测小麦生育期内土壤碱解氮增量的最好指标^[74]; 此外, 赵春江申请并获得了国家自然科学基金资助项目“基于遥感数据的冬小麦变量施肥算法及机理研究”, 进行了基于冬小麦冠层光谱指数 OSAVI 以及叶绿素 SPAD 值的多种冬小麦变量施肥算法的研究, 并与传统基于土壤肥力的算法进行了对比, 结果显示基于光谱数据的冬小麦变量施肥经济效益和生态效益要优于其他施肥算法^[75]。

4 作物产量与品质预测

4.1 作物产量遥感估算

将遥感技术应用于产量估算是最早的农业遥感应用方向之一, 早在 20 世纪 70 年代就已开始, 至今已经历了近 40 年的探索研究, 作物产量遥感估算技术从初期的以遥感植被指数为基础的简单统计回归模型, 发展到今天以遥感与作物生长模型同化技术为基础的区域生长模拟遥感模型来预测作物产量,

不论从机理性、广泛性, 还是从应用性方面, 都取得了长足的发展和进步^[76-80]。

遥感作为一种对地信息的探测手段, 用于作物产量监测, 其本质过程仍然是遥感信息作为输入变量或参数, 直接或间接表达作物生长发育和产量形成过程中的影响因素, 单独或与其他非遥感信息相结合, 依据一定的原理和方法构建产量模型, 进而驱动模型运行的过程^[76]。基于遥感数据信息的作物产量估算方法, 可大致分为 3 种: 经验统计方法、半经验半机理方法以及机理方法。

经验统计方法多是以遥感敏感波段和各种植被指数建立以数学统计分析方法为基础的经验估产模型, 早期的作物遥感估产研究多以此类方法为主, 由于此类方法可操作性强, 至今仍有广泛的应用。如 Tennakoon 等利用 Landsat TM 数据多个波段反射率建立多元回归模型估算水稻单产^[81]; Quarmay 等利用多时相 AVHRR 数据计算的累积 NDVI 分别估测小麦、玉米和水稻等作物产量^[82]; 王长耀等则采用来自 MODIS 数据集的植被指数 NDVI 和 EVI, 通过线性模型分别对美国的冬小麦产量进行预测^[83]; 徐新刚等基于最优权重组合方法, 应用多时相 Landsat TM 遥感影像的多植被指数开展了大麦作物估产研究^[84]。基于遥感信息的作物产量经验统计方法, 尽管使用当中具有可操作性和简洁性, 但往往缺乏深入的作物产量形成机理解释基础, 且时空应用扩展性不强。

半经验半机理的方法多以光能利用率模型 (常称参数模型) 为核心来估算区域作物地表干物质 (Dry matter, DM), 利用遥感信息可以很好地反演其中所涉及的主要参数, 进而结合作物收获指数 (HI), 通过干物质质量与收获指数乘积的形式实现作物产量的估算。光能利用率模型即植被净初级生产力为吸收光合有效辐射与光能利用率的乘积, 具有一定的生态物理基础, 又不涉及过多的输入变量且具有一定的精度, 应用较为广泛^[85-87]; 而收获指数 HI 的计算通常以常数方式或者经验线性模型给出^[87-88]。总得说来, 半经验半机理的作物产量估测方法相对于经验方法而言, 具有较好的机理性解释, 同时简化了机理模型的参数输入, 在区域作物产量估算有着较好的应用前景, 但该方法中涉及的关键参数光能利用效率 ϵ 及 HI 的时空分布定量模拟仍然需要开展大量的研究^[89-90]。

作物产量估算的机理方法, 主要表现在作物生长模型与遥感技术的融合方法研究。作物生长模型能对作物生长过程中的光合、呼吸和蒸腾等生理生化过程进行数学描述, 可动态模拟作物生长发育及

产量的形成过程,具有较深入的生理生态学解释机理,但生长模拟模型在小区点上应用时精度较高,外推到区域面上应用时,由于一些参数获取困难甚至是难以获得,已成为其区域应用中的瓶颈问题;将遥感技术与作物生长模型相融合,势必可以综合两者“点一面”结合的互补优势。遥感与作物生长模型相融合的方法可以大致分为驱动法和同化法,驱动法是指通过遥感反演的作物冠层参数信息直接更新甚至替换作物生长模型中的相应输入参数,以实现作物生长发育的动态模拟过程,在早期的遥感与作物模型的交叉融合研究中较多^[91-93];同化法则主要是指借助于优化算法,不断调整作物生长模型中难以获得的初始值或参数,使得模型模拟的一些关键输出参数的模拟值与遥感观测值间差值最小化,以此达到估计这些初始值或参数的目的,进而实现作物产量估算的过程^[94-98]。两者相比较,驱动法使用时相对简单,产量估测的精度受遥感反演作物冠层参数精度的影响较大,且要求观测值的数量要多;而同化法由于模拟与作物实际生长环境更接近,尽管计算复杂,但随着计算机技术的不断发展,遥感与作物生长模型的同化方法成为当前作物产量机理方法研究的热点。

4.2 作物品质遥感监测

利用遥感技术开展大面积作物品质指标(如籽粒蛋白质、淀粉含量等)的遥感监测预报,对指导分级收割、按质论价收购,以及制订优质作物进出口政策,具有现实的迫切需求。由于不同作物具有不同的品质指标,即使是同一种作物,由于用途不同使用的品质评价指标也有差异,因而相对于产量遥感估测,作物品质监测具有一定特定性和复杂性。当前的品质遥感预报监测也多是以作物目标品质指标形成过程的农学、生理生态的方法和原理为基础,应用遥感数据来反演与品质指标相关的理化参数,直接或间接地实现作物品质的预报监测。

基于遥感技术的作物品质监测预报,国外研究开展得较早,中国则是在近些年才逐步开展^[99]。从研究对象来看,主要集中在小麦与水稻两大作物上,尤以籽粒蛋白质品质监测预报居多。在冬小麦品质遥感监测方面,已有一些研究认为:小麦后期叶片全氮与成熟期籽粒品质组合之间具有强相关性,叶片全氮能够很好地监测小麦籽粒蛋白质与面筋含量,而叶片氮含量与冠层光谱间有较好的定量关系,因此可以通过冠层光谱间接地监测籽粒蛋白质含量,特别是利用开花期光谱信息可以提早实现对籽粒蛋白质指标的预测^[100-101]。小麦籽粒蛋白质品质的最终形成,除与开花期叶片氮含量紧密关联外,还受灌

浆期水分胁迫的影响,因而利用与叶片氮和水分胁迫相关的光谱指数,可以监测籽粒蛋白质含量^[102-103]。另有研究认为小麦灌浆期对氮素敏感的光谱植被指数,以及乳熟期对水分敏感的微波遥感变量能有效估测小麦籽粒蛋白质含量^[104]。此外,利用冠层高光谱的某些敏感波段及其构建的相关光谱指数,也可以估测水稻籽粒的蛋白质和淀粉含量^[105-107]。

从已有作物品质遥感监测的研究可以看出:当前的品质遥感监测多以“遥感变量+品质指标”和“遥感变量+中间农学参数+品质指标”模式的统计经验模型方法为主,往往缺乏深入的机理性解释,在时空扩展应用中常缺乏稳定性。同时,作物籽粒品质的形成是一个日积月累的过程,已有的品质遥感监测的经验方法往往使用少数时相的遥感数据,难以真正反映品质形成的累积效应。而作物生长模拟模型(如 CERES-Wheat、SWHEAT 和 APSIM-Nwheat 等)能够模拟作物籽粒品质参数的时间动态变化过程^[108-109],尽管作物模型在大区域应用时,往往出现大尺度模型参数获取困难的问题,但遥感技术具有面上信息获取的优势。因此,将作物生长模型与遥感进行优势互补,利用数据同化技术构建作物籽粒品质遥感估测机理模型是可行的途径^[99]。

5 农情遥感监测与预报

5.1 作物病虫害遥感监测与预测

作物病虫害遥感监测主要依赖于作物受不同胁迫影响后发生的光谱响应。作物在受到病虫害侵染后,常破坏色素系统,产生病斑、伤斑,导致可见光波长范围的反射率改变。当侵染加重后,会进一步引起植株的整体性损伤,如细胞破裂,植株萎蔫等,而引起近红外、短波红外谱段的反射率改变,以及在一些对植被健康状况敏感的特征变化,如红边蓝移^[110-111]。

近年来基于叶片或冠层光谱分析进行植物病虫害诊断和监测的研究不断增多。国内外学者通过实验观测和光谱分析筛选出小麦条锈病、白粉病、赤霉病、全蚀病、蚜虫,水稻稻瘟病、稻纵卷叶螟、稻干尖线虫病、水稻胡麻斑病、番茄晚疫病、芹菜菌核病等病害类型的光谱敏感波段以及适合于病害探测的光谱特征^[112-116]。由于病害的光谱信息相对其他类型胁迫强度较弱,多种数理统计方法和数据挖掘方法被用于病情严重度反演和病害光谱诊断模型的构建,如主成分分析(PCA)、神经网络(PNN)、支持向量机(SVM)、光谱角度制图(SAM)、连续小波分析(CWA)、光谱调谐匹配滤波技术(MTMF)

等^[112,117-118]。在确立某种类型病虫害的光谱响应特征后,基于航拍及卫星影像数据将这种关系扩展至地块、区域等较大的空间尺度。得益于高光谱遥感丰富的谱段信息和对各种精细光谱分析的支持,目前国内外学者利用高分辨率的航拍高光谱影像在病害监测方面能够取得较高的精度,目前已对小麦条锈病、番茄晚疫病、柑橘黄龙病等多种病害进行研究,监测制图精度可高至 90% 以上^[114,119-120]。然而,受限于现阶段高光谱图像获取高昂的仪器成本,研究人员已试图采用多光谱的航拍和高分辨率卫星影像进行病害制图。覃志豪等采用多光谱航拍数据监测水稻纹枯病^[121-122],采用 QUICKBIRD 影像监测小麦病害,识别精度达 88.6%。张竞成等以小麦白粉病为例,证实了采用多时相中分辨率(30 m)遥感影像在区域尺度上监测病害典型发生现场的可能性^[123]。

遥感信息除具有病害监测的潜力外,在病害预警方面,近年来部分学者通过遥感信息反应区域生境状况,将其作为一种辅助信息配合气象信息对病害发生适宜性进行综合预测。遥感反演地表温度、土壤、植被水分等参数能够在一定程度上反映作物生境状况,进而与气象背景场信息相结合预测发病概率,提高了病虫害预测能力^[116]。近年来在病虫害遥感监测与预警方面有两个重要趋势:一是对遥感信息的利用程度不断深入,这主要体现在如何结合多谱段、多时相和多模式(主被动遥感、荧光遥感和微波遥感)遥感观测对病虫害进行高专一性的识别和区分,对一些非病虫害性胁迫因素进行排除,这一工作已取得一些初期的进展^[118,124],但仍有待于不断深入。另一趋势是将遥感信息和非遥感信息(气象信息、无线传感信息、植保信息、农情统计信息)进行整合,解决病害监测、预测过程中的信息不对称问题。

5.2 农业干旱监测

干旱所造成的农业损失相当于各种气象灾害总和的 60%^[125]。农业干旱是气象、土壤和作物等多种因素相互作用的结果。首先是降水较历史同期持续减少产生气象干旱,随后农田土壤中根层水分减少造成土壤干旱,最后才导致作物供水受限,发生水分胁迫形成植被干旱^[126]。由于农作物对环境具有调节和适应能力,气象干旱、土壤干旱的发生并不必然导致农业干旱的发生。随着农田缺水强度和持续时间的增长,土壤和作物的不同组分在结构形态、生理生化上发生不同程度变化和响应。其中,部分关键表征参数可为遥感传感器有效探测,如土壤水分、植被水分、作物综合长势(叶面积指数、叶绿素、覆

盖度等)、冠层温度、蒸散发、热惯量等^[110]。遥感技术在农业干旱监测中的应用主要体现在土壤和植被干旱上。

传统的农业干旱监测更多侧重于气象干旱的监测,主要考虑降雨和温度等气象因子,构建反映干旱程度的干旱指数,如帕默尔干旱指数 PDSI 和标准降雨指数 SPI 等,划分干旱的区域及等级,评价干旱程度。基于遥感的土壤和植被干旱监测,根据不同传感器探测能力的差异,监测方法也各不相同。国内外已利用可见光-近红外、热红外和微波等遥感数据,从能量平衡、水分平衡等方面发展了涵盖土壤水分、植被水分等的农业干旱监测模型和方法。土壤干旱遥感监测以农田蒸散、地表温度、土壤水分的遥感监测为基础,开展土壤干旱状况的综合评价,如 Yang 等对 Hapke 土壤模型进行扩展反演了土壤水分^[127],Gao 等通过混合像元分解估计了小麦覆盖下土壤水分^[128];Yang 等证实了多极化雷达数据监测农作物覆盖下土壤水分的巨大潜力^[129],微波遥感先天对水分敏感且具有一定的传统能力,能获取农作物覆盖下土壤墒情信息,更有利于农业干旱监测。其中,雷达遥感具有更高的分辨率,适合于中国破碎地块条件下更精细尺度的旱情监测。赵春江等分析了农田蒸散的时空特征^[130],Yang 等估计了异质条件下的地表温度^[131],证实了基于热红外遥感获取土壤和作物冠层温度信息、进而监测地表蒸散发和土壤热惯量等指标的有效性,它们对区分水分胁迫与其他胁迫以及干旱预警至关重要。

植被干旱遥感监测方法有两大类,一类是基于水分含量的植被干旱监测,可见光-近红外遥感数据的应用最为普遍,Zhao 等建立了基于倒高斯模型和光谱吸收相对深度指数的植被冠层水分定量监测方法^[132-133],Liu 等发展了用光谱红边参数估计冬小麦植被水分的方法^[134],Jin 等利用灰色关联分析和偏最小二乘法估计叶片含水量^[135]。另一类是由于其快速、简单的优势,目前在实际的旱情监测系统中应用最为广泛的遥感干旱指数法^[132],较典型的如距平植被指数 AVI、植被条件指数 VCI、温度条件指数 TCI、温度植被干旱指数 TVDI、条件植被温度干旱指数 VTCI^[136]、垂直干旱指数 PDI^[137]、植被供水指数 VSWI、归一化差异水分指数 NDWI、全球植被水分指数 GVMI、以及作物水分亏缺指数 CWSI 等^[138],同时利用了不同波段的遥感数据。近年来,新发展的用于干旱监测的综合干旱指数则更加重视遥感与气象因子的耦合^[126,139-140]。

尽管如此,由于农业干旱成因复杂,不同作物在不同时期对水分需求不同,对水分胁迫的敏感程度

亦不相同,农业干旱的及时、准确监测依旧存在很大困难。部分关键特征参数的遥感反演精度仍无法满足农业干旱监测的需求;此外,遥感获取的信息尚需深入融合农业、水文、气象等模型,才能全面监测农业干旱发生过程,服务于农业干旱的早期预警、及时调控、风险评估以及损失评估等。

5.3 冬小麦冻害遥感监测

冻害是影响中国北方冬小麦生产最严重的灾害之一,虽然其发生频率低,但个别年份对冬小麦产量影响很大^[141]。在中国冬小麦主产区,冻害包括冬季冻害和早春冻害,其中春季霜冻灾害影响较大^[142]。20世纪80年代以来,在全球气候变暖的背景下,虽然全球霜冻日呈现减少的趋势^[143-145],但是冻害的潜在危险并没有明显减弱^[146]。例如,2010年2月28日,正值返青期的河北省冬小麦主产区遭遇强降温及强降雪天气,造成了冬小麦低温冻害,出现了苗龄小、分蘖少、死苗、断垄等现象^[147-148]。小麦品种耐寒性的降低和早播旺苗导致冬小麦冻害的脆弱性增大,一旦遭受冬季异常低温或春季倒春寒,将会造成冬小麦大面积冻害发生^[146,148]。

传统的冬小麦冻害监测方法是根据气象站点或者田间样点测量的最低空气温度,结合冬小麦的生长生育特征,判断冻害程度,然后通过大田抽样调查的方法估算区域受灾面积^[142,149-153]。由于这种方法需要大量的田间调查工作,因而很难在区域尺度上实施精确的冻害监测、及时灾害响应与灾情统计。利用遥感监测和评估冻害的方法可以分为:①从农作物冻害脆弱性角度出发的植被指数差值法^[147-148,154-155],农作物遭受冻害后植被指数会出现下降的趋势,通过比较受灾前后植被指数的差值来判断受灾情况。这种方法的植被生物学意义明显,简单易操作,但是植被指数对异常变化总存在滞后性,因而这种方法常常给冻害监测带来很大的被动性。②从冻害致灾因子角度出发的最低地表温度反演法^[150],是利用遥感数据反演最低地表温度,建立受灾程度与降温幅度的相关关系,进而确定冻害灾情,这种方法充分考虑到致灾因子的空间变化情况,但受制于遥感反演地表温度的精度,目前热红外遥感的空间分辨率普遍较低。③冻害风险评估法,利用高时间分辨率的卫星遥感数据,如NOAA/AVHRR、MODIS等数据,对稀疏的气象站数据进行空间化,然后利用GIS技术进行冻害风险制图^[156],该方法充分利用气象观测资料,但受高时间分辨率遥感数据的空间分辨率较低的影响,普遍存在混合像元问题。

6 农业遥感监测空间决策支持系统

随着农业遥感的深入发展,影像处理与分析耗时长、依赖于人工处理、缺乏业务性和周期性的软件支持、缺少基层管理人员自己能操作使用的简便的软件工具等问题引起广泛关注,为了满足农业管理决策等多方面的需求,对能够及时提供作物生长状态、产量、农情等信息的农业遥感监测系统的需求越发迫切。

针对这一需求,国内外均开展了广泛的工作。美国农业部外国农业局(USDA foreign agriculture service, FAS)开发了基于地理信息系统的CropExplorer决策支持系统^[161],提供基于遥感影像和气象数据的全球作物长势信息。欧盟的MARS项目自1992年开发并维护了作物预测系统(Crop forecasting system),在欧盟范围内提供及时的作物产量预测^[162-163]。联合国粮农组织(FAO)于1975年开发了“全球信息与预警系统”(Global information and early warning system, GIEWS)^[164],在全球尺度上开展食物供给和需求的监测,并对区域性的粮食短缺进行早期预警。系统所提供的信息主要用于识别近期的粮食安全危机,并为联合国世界粮食计划(World food program)及其他一些国际与国家机构进行国家级的需求评估提供依据。加拿大统计局“作物长势评估计划”(Crop condition assessment program, CCAP)项目^[165],自1989年起开始提供遥感监测服务,并于2000年开始提供Web服务,用户可以在获取最新一期遥感数据的24h内通过网络进行监测结果的浏览、查询。

中国科学院遥感与数字地球研究所的CropWatch系统由作物长势监测、作物旱情监测、主要作物产量预测、粮食产量预测、作物种植结构、复种指数监测以及粮食供需平衡预警7个子系统组成^[77]。目前已经监测中国及全球26个主要粮食生产国,覆盖全球粮食总产量80%以上的主要粮食生产国和消费国,以其及时、准确、连续的监测结果为国家重大决策提供了可靠的信息支持。中国农业科学院的CHARMS系统研发了基于多源遥感、气象、土壤和地面调查数据的主要农作物(小麦、玉米、水稻、棉花和大豆)和草地的面积、产量监测模块,实现了主要农作物、草地和农业灾害的实时监测^[166]。该系统已经投入到农业部的业务运行系列中,并纳入“国家农情信息发布日历”,成为有关部门进行农作物产量会商的三大信息源之一。

北京农业信息技术研究中心开发的主要农作物调优栽培决策支持系统是面向基层农业管理部门、

农业生产部门(如农场)、作物协会(如谷物协会)及大型涉农企业的专业技术及生产管理人员、对主要农作物的产前优良品种种植区划——产中调优栽培及产量、品质预报——产后指导按质收购等作物生产全过程进行信息化管理的综合系统,该系统是基于最新的 ENVI/IDL 技术、WebGIS、GPS、企业空间数据库、通信技术、作物模拟技术等信息技术和农学知识的高度集成而建立的信息化决策支持系统。

系统通过采用 ENVI/IDL 编程技术实现对遥感

影像的实时计算和处理,生成初步的作物分类结果以及影像光谱指数,结合野外采集的 GPS 定位数据和农学样点信息,综合分析各种常用的农学模型,通过 WebGIS 技术实现实时直观的专题图、统计图表、细节点击查询等多种展现方式,实现作物长势监测、产量估算、品质预测、病虫害监测、干旱监测、冻害监测、肥水诊断等作物生产全过程的信息化管理。

系统分为 6 个主要功能模块,如图 1~4 所示。本系统已经在互联网上线应用。

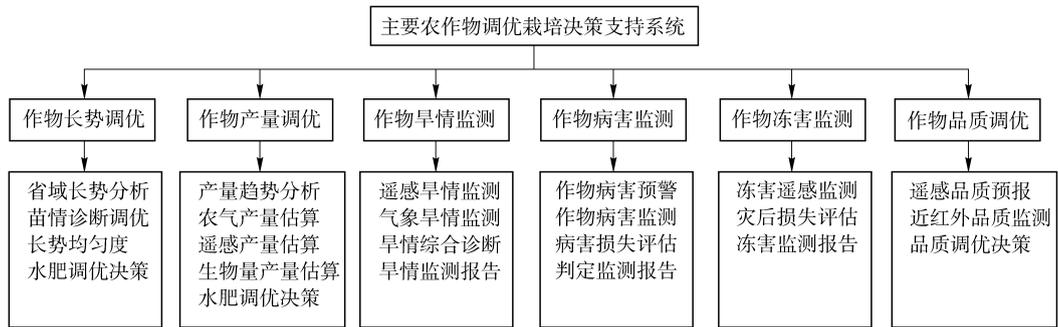


图 1 主要农作物调优栽培决策支持系统主要功能

Fig. 1 Main functions of information decision support system for adjusting and optimizing cultivation of main crops



图 2 根据长势分级情况可以查询处方措施(模块 1)

Fig. 2 Prescription measures based on crop growth classification



图 4 耕地干旱监测专题图(模块 3)

Fig. 4 Thematic map of arable land drought monitoring



图 3 作物品质专题图(模块 6)

Fig. 3 Thematic map of crop quality

7 问题与展望

农业遥感技术经过近二十年的快速发展,在农作物面积、长势、灾害、产量、品质等监测技术领域上取得长足进步,在支撑农业肥、水、药、害等管理上技术优势逐步得到行业认可。中国的农业遥感技术已经从学习国外经验阶段,转为结合中国国情发展中

国特色农业遥感技术的新阶段,并取得了一系列创造性的研究与应用示范结果,奠定了我国作为空间信息大国在农业应用领域的发展优势。但与其他发达国家相比,在部分重要技术上仍存在一定问题与差距。

(1) 遥感农学信息提取模型的适用性有待加强

基于遥感的农学信息提取模型较多,包括经验统计方法、半经验半机理方法及机理方法,其中经验统计方法所占比重较大。每种模型和方法均有特定的适用条件,经验、半经验的方法更是需要大量的实地观测数据的支撑。在基于遥感的机理模型方面,作物模型是世界上公认的农业研究的重要新方法,它能够将农业过程数字化,使农业科学从经验水平提高 to 理论水平。在国际上获得广泛认可的通用作物生长模型有荷兰的 WOSOFT、美国的 DSSAT、澳大利亚的 APSIM、FAO 的 AQUACROP 等。中国的 CCSODS 系列作物生长模型,虽然在国际上有一定

的影响力,但离主流的作物生长模型在通用性和可靠性方面还有一定的差距。中国农作物空间分布范围广泛,农作物种植的实地条件复杂且多变,为了更准确的利用遥感提取农学参量服务于田间管理,遥感农学信息提取模型的普适性有待进一步加强。

(2)多源多尺度遥感的发展对农业遥感应用提出了新的挑战

当前对地观测技术已经进入多平台、多传感器、多角度发展阶段,但是多源多尺度遥感在农业应用领域的模型和关键技术不完备,存在以下问题:遥感数据和研究尺度较为局限,对多源多尺度遥感信息的融合研究较少;对多源遥感信息和农学知识的结合关注不足;对遥感和传感、气象等非遥感信息的融合有待加强。而面向精准农业决策管理的、融合“星机地”多平台多尺度遥感数据的现代农业遥感技术,是实现未来规模化种植条件下现代精准农业的重要发展方向。因此,需要突破传统农情监测中的尺度限制,时空不连续等问题,解决针对作物养分精准决策和重大病虫害监测预报等重要需求的遥感

技术应用所面临的技术难题。

随着我国卫星遥感技术的发展,尤其是一系列具有国际先进水平的卫星的发射,未来5~10年,“星机地网”观测数据将呈爆发式增长,农业生产对时空连续信息的潜在需求将被激发,迫切需要海量观测数据转化为农业监测有效信息,提升我国农田参量精准监测能力,提高农业信息技术对农业产业发展的引领能力。因此,需要将卫星、航空、地面传感网络等多平台观测的遥感信息与作物模型、农学专家知识、气象等非遥感信息有机融合,形成能够贯穿作物生长全程的信息获取、校正、融合、解析方法和决策模型,重点关注规模化种植条件下的农田参量“星机地”多平台协同精准获取技术、多尺度遥感时空融合的农业精准决策技术、多源信息融合的农业重大病虫害监测预警技术、以及多尺度农业遥感信息融合与智慧服务关键技术的研发与突破,构建未来对地观测技术发展条件下,面向精准农业决策管理的农业遥感技术体系。

参 考 文 献

- 1 Jacquemoud Stéphane, Verhoef Wout, Baret Frédéric, et al. PROSPECT + SAIL models: a review of use for vegetation characterization[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(Supp. 1): S56 - S66.
- 2 Kuusk Andres. A two-layer canopy reflectance model[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2001, 71(1): 1 - 9.
- 3 Kuusk Andres, Nilson Tiit. A directional multispectral forest reflectance model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 72(2): 244 - 252.
- 4 杨贵军,柳钦火,刘强,等. 植被冠层3D辐射传输模型及热辐射方向性模拟[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(1): 38 - 44. Yang Guijun, Liu Qinhuo, Liu Qiang, et al. Directional simulation of thermal infrared radiation and 3D radiative transfer model of canopy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(1): 38 - 44. (in Chinese)
- 5 杨贵军,柳钦火,杜永明,等. 农田辐射传输光学遥感成像模拟研究综述[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2013, 49(3): 537 - 544. Yang Guijun, Liu Qinhuo, Du Yongming, et al. Review of optical remote sensing imaging simulation of farmland radiation transfer process[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(3): 537 - 544. (in Chinese)
- 6 Yang Guijun, Zhao Chunjiang, Liu Qiang, et al. Inversion of a radiative transfer model for estimating forest LAI from multisource and multi-angular optical remote sensing data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 49(3): 988 - 1000.
- 7 Hunt Jr E R, Doraiswamy P C, McMurtrey J E, et al. A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 103 - 112.
- 8 Fu Yuanyuan, Yang Guijun, Wang Jihua, et al. Winter wheat biomass estimation based on spectral indices, band depth analysis and partial least squares regression using hyperspectral measurements[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 100: 51 - 59.
- 9 Zhao C J, Zhou Q, Wang J, et al. Band selection for analyzing wheat water status under field conditions using relative depth indices (RDI)[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(13): 2575 - 2584.
- 10 Yebra Marta, Chuvieco Emilio. Linking ecological information and radiative transfer models to estimate fuel moisture content in the Mediterranean region of Spain: solving the ill-posed inverse problem[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(11): 2403 - 2411.
- 11 Zhao Chunjiang, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Spectral indices sensitively discriminating wheat genotypes of different canopy architectures[J]. *Precision Agriculture*, 2010, 11(5): 557 - 567.
- 12 Hoffer R M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data[M] // Swain P H, Davis S M. *Remote sensing: the quantitative approach*. New York: McGraw-Hill International Book Co., 1978: 227 - 281.
- 13 Li Pingheng, Wang Quan. Retrieval of leaf biochemical parameters using PROSPECT inversion: a new approach for alleviating

- III—posed problems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2499–2506.
- 14 He Binbin, Quan Xingwen, Xing Minfeng. Retrieval of leaf area index in alpine wetlands using a two-layer canopy reflectance model[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 21: 78–91.
- 15 Nguy-Robertson A L, Peng Yi, Gitelson A A, et al. Estimating green LAI in four crops: potential of determining optimal spectral bands for a universal algorithm[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 192–193: 140–148.
- 16 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 用多角度光谱信息反演冬小麦叶绿素含量垂直分布[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 104–109.
- Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. Extracting winter wheat chlorophyll concentration vertical distribution based on bidirectional canopy reflected spectrum[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(6): 104–109. (in Chinese)
- 17 Li Pingheng, Wang Quan. Developing and validating novel hyperspectral indices for leaf area index estimation: effect of canopy vertical heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*, 2013, 32: 123–130.
- 18 Wang Quan, Li Pingheng. Canopy vertical heterogeneity plays a critical role in reflectance simulation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 111–121.
- 19 李贺丽. 冬小麦冠层垂向异质性及其光谱响应研究[R]. 北京: 北京市农林科学院, 2013.
- Li Heli. Vertical heterogeneity characteristics of wheat canopy and its spectral response analysis[R]. Beijing: Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, 2013. (in Chinese)
- 20 Gitelson A A, Peng Yi, Huemmrich K F. Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250 m resolution data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147: 108–120.
- 21 Zhang Yuzhen, Qu Yonghua, Wang Jindi, et al. Estimating leaf area index from MODIS and surface meteorological data using a dynamic Bayesian network[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 127: 30–43.
- 22 董莹莹. 农作物群体长势遥感监测及长势参量空间尺度问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Dong Yingying. Analyzing spatial scale problems of crop growth parameters for growth monitoring with multi-scale remote sensing data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- 23 Liu Qiang, Liang Shunlin, Xiao Zhiqiang, et al. Retrieval of leaf area index using temporal, spectral, and angular information from multiple satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 145: 25–37.
- 24 Basnyat P, McConkey B, Meinert B, et al. Agriculture field characterization using aerial photograph and satellite imagery[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(1): 7–10.
- 25 张明月, 杨贵军, 宋伟东, 等. 遥感组合指数与不同分类技术结合提取农业用地方法[J]. *测绘科学*, 2011, 36(5): 73–76.
- Zhang Mingyue, Yang Guijun, Song Weidong, et al. A methodology of agricultural land extraction using remote sensing combined index and different classification technologies[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2011, 36(5): 73–76. (in Chinese)
- 26 Hay G J, Castilla G. Geographic object-based image analysis (GEOBIA): a new name for a new discipline? [M]// Blaschke T, Lang S, Hay G J. *Object-based image analysis—spatial concepts for knowledge-driven remote sensing applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 81–92.
- 27 顾晓鹤, 韩立建, 王纪华, 等. 中低分辨率小波融合的玉米种植面积遥感估算[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 203–209.
- 28 Xu Q, Yang G, Long H, et al. Crop discrimination in Shandong province based on phenology analysis of multi-year time series[J]. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 2013, 19(4): 513–523.
- 29 姚云军, 秦其明, 张自力, 等. 高光谱技术在农业遥感中的应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 301–306.
- Yao Yunjun, Qin Qiming, Zhang Zili, et al. Research progress of hyperspectral technology applied in agricultural remote sensing[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(7): 301–306. (in Chinese)
- 30 Derenyi E. A small crop information system[C]// *Proceedings of Remote Sensing for Natural Resources*, 1979: 78–87.
- 31 Michel F L U, Conrad S D C. Impact of feature selection on the accuracy and spatial uncertainty of per-field crop classification using support vector machines[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 85: 102–119.
- 32 De Wit A J W, Clevers J G P W. Efficiency and accuracy of per-field classification for operational crop mapping[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25: 4091–4112.
- 33 顾晓鹤, 潘耀忠, 何馨, 等. 以地块分类为核心的冬小麦种植面积遥感估算[J]. *遥感学报*, 2010, 14(4): 789–805.
- Gu X H, Pan Y Z, He X, et al. Measurement of sown area of winter wheat based on per-field classification and remote sensing imagery[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(4): 789–805. (in Chinese)
- 34 Cotter J, Nealon J. Area frame design for agricultural surveys[R]. U. S. Department of Agriculture: National Agricultural Statistics Service, 1987.
- 35 Meyerroux J, Vossen P. The first phase of the MARS project, 1988—1993: overview, methods and results[C]// *Conference on the MARS Project*, Luxembourg: Office for Publications of the EC, 1994: 33–81.
- 36 吴炳方. 全国农情监测与估产的运行化遥感方法[J]. *地理学报*, 2000, 55(1): 24–35.
- Wu Bingfang. Operational remote sensing methods for agricultural statistics[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(1): 24–35. (in Chinese)
- 37 胡潭高, 张锦水, 潘耀忠, 等. 基于不同抽样方法的遥感面积测量方法研究[J]. *国土资源遥感*, 2008, 77(3): 37–43.
- Hu Tangao, Zhang Jinshui, Pan Yaozhong, et al. Researches on remote sensing area measurement based on different sampling

- methods[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2008, 77(3): 37–43. (in Chinese)
- 38 Guo W, Qiao Hongbo, Gu Xiaohu, et al. Using stratified spatial sampling with typical country to estimate corn acreage[J]. *International Journal of Advancements in Computing Technology*, 2013, 5(5): 767–775.
- 39 Maxwell S K, Nuckols J R, Ward M H. An automated approach to mapping corn from landsat imagery[J]. *Computers and Electronic in Agriculture*, 2004, 43: 43–54.
- 40 张锦水, 赵莲, 陈联裙, 等. 区域总量控制下的冬小麦种植面积空间分布优化[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(21): 4384–4391.
- Zhang Jinshui, Zhao Lian, Chen Lianqun, et al. Spatial distribution optimization of wheat planting area based on regional area control[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(21): 4384–4391. (in Chinese)
- 41 杨敏华, 赵春江, 赵永超, 等. 用航空成像光谱数据获取小麦冠层信息的研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(6): 626–631.
- 42 Shibayama M, Akiyama T A. Spectroradiometer for field use. IV. Radiometric estimation for chlorophyll index of rice canopy[J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1986, 55(4): 433–438.
- 43 王人潮, 陈铭臻, 蒋亨显. 水稻遥感估产的农学机理研究: I. 不同氮素水平的水稻光谱特征及其敏感波段的选择[J]. *浙江农业大学学报*, 1993, 19(增刊): 7–14.
- 44 刘良云. 高光谱遥感在精准农业中的应用研究[D]. 北京: 中科院遥感所, 2002.
- Liu Liangyun. Hyperspectral remote sensing application in precision agriculture[D]. Beijing: Post-doctoral Dissertation of the Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- 45 蒲瑞良. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 46 Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: the linear extrapolation method[J]. *Remote Sensing Environment*, 2006, 101(2): 181–193.
- 47 Eitel J U H, Long D S, Gessler P E, et al. Using in-situ measurements to evaluate the new rapid eye TM satellite series for prediction of wheat nitrogen status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(18): 4183–4190.
- 48 Chen Pengfei, Driss Haboudane, Nicolas Tremblay, et al. New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(9): 1987–1997.
- 49 赵春江, 黄文江, 王纪华, 等. 不同品种、肥水条件下冬小麦光谱红边参数研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(8): 980–987.
- Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. Studies on the red edge parameters of spectrum in winter wheat under different varieties, fertilizer and water treatments[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(8): 980–987. (in Chinese)
- 50 陈鹏飞, 孙九林, 王纪华, 等. 基于遥感的作物氮素营养诊断技术: 现状与趋势[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40(增刊): 21–37.
- Chen Pengfei, Sun Jiulin, Wang Jihua, et al. Using remote sensing technology for crop nitrogen diagnosis: status and trends[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2010, 40(Supp.): 21–37. (in Chinese)
- 51 Li Heli, Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang, et al. Non-uniform vertical nitrogen distribution within plant canopy and its estimation by remote sensing: a review[J]. *Field Crops Research*, 2013, 142: 75–84.
- 52 王纪华, 黄文江, 劳彩莲, 等. 运用 PLS 算法由小麦冠层反射光谱反演氮素垂直分布[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(7): 1319–1322.
- Wang J H, Huang W J, Lao C L, et al. Inversion of winter wheat foliage vertical distribution based on canopy reflected spectrum by partial least squares regression method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(7): 1319–1322. (in Chinese)
- 53 肖春华, 李少昆, 王克如, 等. 叶片垂直分布对小麦冠层方向光谱响应研究[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(8): 2271–2278.
- Xiao C H, Li S K, Wang K R, et al. Response of canopy direction reflectance spectrum for the wheat vertical leaf distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(8): 2271–2278. (in Chinese)
- 54 王之杰. 冬小麦冠层氮素分布与品质遥感的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.
- Wang Zhijie. Prediction of canopy nitrogen distribution and grain quality using remote sensing in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [D]. Beijing: China Agricultural University, 2002. (in Chinese)
- 55 张东彦, 王秀, Coburn Craig, 等. 地面多角度农业遥感观测装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 174–178.
- Zhang Dongyan, Wang Xiu, Coburn Craig, et al. Design and experiment of ground-based agriculture-oriented multi-angle observation device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1): 174–178. (in Chinese)
- 56 王纪华, 王之杰, 黄文江, 等. 冬小麦冠层氮素的垂直分布及光谱响应[J]. *遥感学报*, 2004, 8(4): 309–316.
- Wang J H, Wang Z J, Huang W J, et al. The vertical distribution characteristic and spectral response of canopy nitrogen in different layer of winter wheat[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(4): 309–316. (in Chinese)
- 57 马吉锋, 朱艳, 姚霞, 等. 水稻叶片氮含量与荧光参数的关系[J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(1): 65–70.
- Ma J F, Zhu Y, Yao X, et al. Relationship between leaf nitrogen content and fluorescence parameters in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(1): 65–70. (in Chinese)
- 58 Stoner E R, Baumgardner M F. Characteristic variations in reflectance of surface soils[J]. *Journal of Soil Science Society of America*, 1981, 45(6): 1161–1165.
- 59 廖钦洪, 顾晓鹤, 李存军, 等. 基于连续小波变换的潮土有机质含量高光谱估算[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(23): 132–139.
- Liao Qinrong, Gu Xiaohu, Li Cunjun, et al. Estimation of fluvo-aquic soil organic matter content from hyperspectral reflectance

- based on continuous wavelet transformation[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(23): 132 - 139. (in Chinese)
- 60 Palacios-Orueta A, Ustin L S. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains I. Spectral analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(2): 170 - 183.
- 61 Palacios-Orueta A, Pinzon J E, Ustin L S, et al. Remote sensing of soils in the Santa Monica Mountains; II. Hierarchical foreground and background analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68(2): 138 - 151.
- 62 王延仓, 顾晓鹤, 朱金山, 等. 利用反射光谱及模拟多光谱数据定量反演北方潮土有机质含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 201 - 206.
- Wang Yancang, Gu Xiaohu, Zhu Jinshan, et al. Inversion of organic matter content of the North Fluvo-Aquic soil based on hyperspectral and multi-spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(1): 201 - 206. (in Chinese)
- 63 Selige T, Bohner J, Schmidhalter U. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image and field data in multivariate regression modeling procedures[J]. Geoderma, 2006, 136(1 - 2): 235 - 244.
- 64 王玲. 基于 GIS 和 RS 的干旱区绿洲耕地质量评价方法及应用研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2011.
- Wang Ling. Study on evaluation methods on quality of cultivated land and application in arid oasis based on GIS and RS[D]. Shihezi: Shihezi University, 2011. (in Chinese)
- 65 Peng S, Garcia F, Laza R, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice[J]. Field Crops Research, 1996, 47(2 - 3): 243 - 252.
- 66 Lukina E V, Freeman K W, Wynn K J, et al. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake[J]. Journal of Plant Nutrition, 2001, 24(6): 885 - 898.
- 67 Scharf P C, Lory J A. Calibrating corn color from aerial photographs to predict sidedress nitrogen need[J]. Agronomy Journal, 2002, 94(3): 397 - 404.
- 68 Liang Hongxia, Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang, et al. Variable-rate nitrogen application algorithm based on canopy reflected spectrum and its influence on wheat [C] // Proceedings of SPIE 5655, Multispectral and Hyperspectral Remote Sensing Instruments and Applications II, 2005.
- 69 Song Xiaoyu, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data[J]. Precision Agriculture, 2009, 10(6): 471 - 487.
- 70 陈立平. 精准农业变量施肥理论与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- Chen Liping. Theoretical and experimental studies on variable-rate fertilization in precision farming [D]. Beijing: China Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 71 宋晓宇, 王纪华, 薛绪掌, 等. 利用航空成像光谱数据研究土壤供氮量及变量施肥对冬小麦长势影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 45 - 49.
- 72 李翔. 基于“3S”技术的精准农业管理分区方法研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- Li Xiang. Delineating precision agriculture management zones based on 3S technology[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2005. (in Chinese)
- 73 鲍艳松, 王纪华, 刘良云, 等. 不同尺度冬小麦氮素遥感监测方法及其应用研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 139 - 144.
- Bao Yansong, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Approach to estimation of winter wheat nitrogen by using remote sensing technology on diverse scale and its application[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 139 - 144. (in Chinese)
- 74 潘瑜春, 王纪华, 陆安祥, 等. 基于小麦长势遥感监测的土壤氮素累积估测研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 58 - 63.
- Pan Yuchun, Wang Jihua, Lu Anxiang, et al. Estimation of soil nitrogen accumulation based on remotely sensed monitoring of winter wheat growth status[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 58 - 63. (in Chinese)
- 75 蒋阿宁, 黄文江, 赵春江, 等. 基于光谱指数的冬小麦变量施肥效应研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1907 - 1913.
- Jiang Aning, Huang Wenjiang, Zhao Chunjiang, et al. Effects of variable nitrogen application based on characteristics of canopy light reflectance in wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 1907 - 1913. (in Chinese)
- 76 徐新刚, 吴炳方, 蒙继华, 等. 农作物单产遥感估算模型研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 290 - 298.
- Xu Xingang, Wu Bingfang, Meng Jihua, et al. Research advances in crop yield estimation models based on remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 290 - 298. (in Chinese)
- 77 吴炳方, 蒙继华, 李强子, 等. “全球农情遥感速报系统(CropWatch)”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 crop watch-an global crop monitoring system with remote sensing[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(10): 1013 - 1022. (in Chinese)
- 78 徐冠华, 田国良, 王超, 等. 遥感信息科学的进展和展望[J]. 地理学报, 1996, 51(5): 385 - 397.
- Xu Guanhua, Tian Guoliang, Wang Chao, et al. Remote sensing information science: progress and prospect [J]. Acta Geographica Sinica, 1996, 51(5): 385 - 397. (in Chinese)
- 79 江东, 王乃斌, 杨小唤. 我国粮食作物卫星遥感估产的研究[J]. 自然杂志, 1999, 21(6): 351 - 354.
- Jiang Dong, Wang Naibin, Yang Xiaohuan. Study on forecasting of crop yield using satellite remote sensing in China[J]. Chinese Journal of Nature, 1999, 21(6): 351 - 354. (in Chinese)
- 80 吴炳方. 中国农情遥感速报系统[J]. 遥感学报, 2004, 8(6): 481 - 497.

- Wu Bingfang. China crop watch system with remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(6): 481 - 497. (in Chinese)
- 81 Tennakoon S B, Murty V V N, Eiumnoh A. Estimation of cropped area and grain yield of rice using remote sensing data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(3): 427 - 439.
- 82 Quarmay N A, Milnes M, Hindle T L, et al. The use of multi-temporal NDVI measurement from AVHRR data for crop yield estimation and prediction[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(2): 199 - 210.
- 83 王长耀, 林文鹏. 基于 MODIS EVI 的冬小麦产量遥感预测研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 90 - 94.
Wang Changyao, Lin Wenpeng. Winter wheat yield estimation based on MODIS EVI[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10): 90 - 94. (in Chinese)
- 84 徐新刚, 王纪华, 黄文江, 等. 基于权重最优组合和多时相遥感的作物估产[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 137 - 142.
Xu Xingang, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Estimation of crop yield based on weight optimization combination and multi-temporal remote sensing data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 137 - 142. (in Chinese)
- 85 Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. *Science*, 1998, 281: 237 - 240.
- 86 Lobell D B, Hicke J A, Asner G P, et al. Satellite estimates of productivity and light use efficiency in United States agriculture, 1982-1998[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 722 - 735.
- 87 Bastiaanssen W G M, Ali S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan[J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 2003, 94(3): 321 - 340.
- 88 Moriondo M, Maselli F, Bindi M. A simple model of regional wheat yield based on NDVI data[J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3): 266 - 274.
- 89 Turner D P, Gower S L, Cohen W B, et al. Effects of spatial variability in light use efficiency on satellite-based NPP monitoring[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 80(3): 397 - 405.
- 90 杨鹏, 吴文斌, 周清波, 等. 基于光谱反射信息的作物单产估测模型研究进展[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 262 - 268.
Yang Peng, Wu Wenbin, Zhou Qingbo, et al. Research progress in crop yield estimation models based on spectral reflectance data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 262 - 268. (in Chinese)
- 91 Mo X, Liu S, Lin Z, et al. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 183(2-3): 301 - 322.
- 92 Karvonen T, Laurila H, Meemola J. Estimation of agricultural crop production using satellite information[M]. *Husbandry: University of Helsinki, Department of Crop*, 1991, 26: 1 - 73.
- 93 Roebeling R A, Putten E, Genovese G, et al. Application of meteosat derived meteorological information for crop yield predictions in Europe[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(23): 5389 - 5401.
- 94 Launay M, Guerif M. Assimilating remote sensing data into a crop model to improve predictive performance for spatial applications[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 111(1-4): 321 - 339.
- 95 Doraiswamy P, Moulin S, Cook P W, et al. Crop yield assessment from remote sensing[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003, 69(6): 665 - 674.
- 96 Doraiswamy P, Sinclair T R, Hollinger S, et al. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 192 - 202.
- 97 靳华安, 王锦地, 柏延臣, 等. 基于作物生长模型和遥感数据同化的区域玉米产量估算[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(6): 162 - 173.
Jin Hua'an, Wang Jindi, Bo Yanchen, et al. Estimation on regional maize yield based on assimilation of remote sensing data and crop growth model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(6): 162 - 173. (in Chinese)
- 98 黄健熙, 武思杰, 刘兴权, 等. 基于遥感信息与作物模型集合卡尔曼滤波同化的区域冬小麦产量预测[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 142 - 148.
Huang Jianxi, Wu Sijie, Liu Xingquan, et al. Regional winter wheat yield forecasting based on assimilation of remote sensing data and crop growth model with Ensemble Kalman method[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(4): 142 - 148. (in Chinese)
- 99 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)
- 100 王纪华, 黄文江, 赵春江, 等. 利用光谱反射率估算叶片和籽粒品质指标研究[J]. *遥感学报*, 2003, 7(4): 277 - 284.
Wang Jihua, Huang Wenjiang, Zhao Chunjiang, et al. The inversion of leaf biochemical components and grain quality indicators of winter wheat with spectral reflectance[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(4): 277 - 284. (in Chinese)
- 101 Huang W, Wang J, Wang Z, et al. Inversion of foliar biochemical parameters at various physiological stages and grain quality indicators of winter wheat with canopy reflectance[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2409 - 2419.
- 102 Zhao C L, Liu J, Wang W, 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.

- 103 Wang Z J, Wang J H, Liu L Y, et al. Prediction of grain protein content in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) using plant pigment ratio (PPR)[J]. *Field Crops Research*, 2004, 90(2-3): 311-321.
- 104 Liu L Y, Wang J J, 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.
- 105 唐延林, 黄敬峰, 王人潮. 利用高光谱法估测水稻稻谷的粗蛋白质和粗淀粉含量[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1282-1287. Tang Yanlin, Huang Jingfeng, Wang Renchao. Study on estimating the contents of crude protein and crude starch in rice panicle and paddy by hyperspectra[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(9): 1282-1287. (in Chinese)
- 106 薛利红, 曹卫星, 李映雪, 等. 水稻冠层反射光谱特征与籽粒品质指标的相关性研究[J]. *中国水稻科学*, 2004, 18(5): 431-436. Xue Lihong, Cao Weixing, Li Yingxue, et al. Relationship between canopy spectral reflectance characteristics and grain quality traits in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2004, 18(5): 431-436. (in Chinese)
- 107 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)
- 108 Asseng S, Bar-Tal A, Bowden J W, et al. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 16(1): 25-42.
- 109 Ritchie J T, Godwin D C, Otter-Nacke S. CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model[M]. Michigan State University, East Lansing, AGRISTARS Publication, 1985: 252.
- 110 王纪华, 赵春江, 黄文江, 等. 农业定量遥感基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- 111 黄文江. 作物病害遥感监测机理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2009.
- 112 黄敬峰, 王福民, 王秀珍. 水稻高光谱遥感实验研究[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2010.
- 113 Bauriegel E, Giebel A, Geyer M, et al. Early detection of Fusarium infection in wheat using hyper-spectral imaging[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2011, 75(2): 304-312.
- 114 Zhang M H, Qin Z H, Liu X. Remote sensed spectral imagery to detect late blight in field tomatoes[J]. *Precision Agriculture*, 2005, 6(6): 489-508.
- 115 Zhang J C, Pu R L, Wang J H, et al. Detecting powdery mildew of winter wheat using leaf level hyperspectral measurements[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 85: 13-23.
- 116 张竞成. 多源遥感数据小麦病害信息提取方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. Zhang J C. Methods for information extraction of wheat disease based on multi-source remote sensing data[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)
- 117 Yuan L, Zhang J C, Shi Y Y, et al. Damage mapping of powdery mildew in winter wheat with high-resolution satellite image[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(5): 3611-3623.
- 118 Yuan L, Huang Y B, Loraamm R W, et al. Spectral analysis of winter wheat leaves for detection and differentiation of diseases and insects[J]. *Field Crops Research*, 2014, 156: 199-207.
- 119 Huang W J, Lamb D W, Niu Z, et al. Identification of yellow rust in wheat using in-situ spectral reflectance measurements and airborne hyperspectral imaging[J]. *Precision Agriculture*, 2007, 8(5): 187-197.
- 120 Li X H, Lee W S, Li M Z, et al. Spectral difference analysis and airborne imaging classification for citrus greening infected trees[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 83: 32-46.
- 121 Qin Z H, Zhang M H. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multispectral remote sensing[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 2(7): 115-128.
- 122 Jonas F, Menz G. Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing[J]. *Precision Agriculture*, 2005, 8(3): 161-172.
- 123 Zhang J, Pu R, Yuan L, et al. Monitoring powdery mildew of winter wheat by using moderate resolution multi-temporal satellite imagery[J]. *Plos One*, 2014, 9(4): e93107.
- 124 Mahlein A K, Rumpf T, Welke P, et al. Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 128: 21-30.
- 125 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- 126 Wu Jianjun, Zhou Lei, Liu Ming, et al. Establishing and assessing the integrated surface drought index (ISDI) for agricultural drought monitoring in mid-eastern China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 397-410.
- 127 Yang Guijun, Zhao Chunjiang, Huang Wenjiang. Extension of the Hapke bidirectional reflectance model to retrieve soil water content[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(7): 2317-2326.
- 128 Gao Zhongling, Xu Xingang, Wang Jihua, et al. A method of estimating soil moisture based on the linear decomposition of mixture pixels[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, 58(3-4): 606-613.
- 129 Yang Guijun, Shi Yuechan, Xu Qingyun. Estimation of soil moisture from multi-polarized synthetic aperture radar data-a case examination on radarsat-2 product over wheat growing areas[J]. *Sensor Letters*, 2013, 11: 1081-1086.

- 130 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 evapotranspiration based on complementary relationship model and IKONOS data[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 115-124. (in Chinese)
- 131 Yang Guijun, Pu Ruiliang, Zhao Chunjiang. Estimation of subpixel land surface temperature using the endmember index based technique: a case examination on ASTER and MODIS products over a heterogeneous area[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(5): 1202-1219.
- 132 Zhao Chunjiang, Zhou Qifa, Wang Jihua, et al. Band selection for analysing wheat water status under field conditions using relative depth indices (RDI)[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(13): 2575-2584.
- 133 Zhao Chunjiang, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Relationship of 2100-2300 nm spectral characteristics of wheat canopy to leaf area index and leaf N as affected by leaf water content[J]. Pedosphere, 2006, 16(3): 333-338.
- 134 Liu Liangyun, Wang Jihua, Huang Wenjiang, et al. Estimating winter wheat plant water content using red edge parameters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(17): 3331-3342.
- 135 Jin Xiuliang, Xu Xingang, Song Xiaoyu, et al. Estimation of leaf water content in winter wheat using grey relational analysis-partial least squares modeling with hyperspectral data[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(5): 1385-1392.
- 136 田苗,王鹏新,韩萍,等. 基于 SARIMA 模型和条件植被温度指数的干旱预测[J]. 农业机械学报,2013,44(2):109-116.
Tian Miao, Wang Pengxin, Han Ping, et al. Drought forecasts based on sarima models and vegetation temperature condition index[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 109-116. (in Chinese)
- 137 Ghulam Abduwasit, Qin Qiming, Zhan Zhiming. Designing of the perpendicular drought index[J]. Environmental Geology, 2007, 52(6): 1045-1052.
- 138 孙灏,陈云浩,孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. 农业工程学报,2012,28(14): 147-154.
Sun Hao, Chen Yunhao, Sun Hongquan. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural drought[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(14): 147-154. (in Chinese)
- 139 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: 2875-2887.
- 140 Du Lingtong, Tian Qingjiu, Yu Tao, et al. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23: 245-253.
- 141 王春乙,娄秀荣,王建林. 中国农业气象灾害对作物产量的影响[J]. 自然灾害学报, 2007,16(5): 37-43.
Wang Chunyi, Lou Xiurong, Wang Jianlin. Influence of agricultural meteorological disasters on output of crop in China[J]. Journal of Nature Disaster, 2007, 16(5): 37-43. (in Chinese)
- 142 冯玉香,何维勋,孙忠富,等. 中国冬小麦霜冻的气候分析[J]. 作物学报, 1999,25(3): 335-340.
Feng Yuxiang, He Weixun, Sun Zhongfu, et al. Climatological study on frost damage of winter wheat in China[J]. Acta Agronomica Sinica, 1999, 25(3): 335-340. (in Chinese)
- 143 马柱国. 中国北方地区霜冻日的变化与区域变暖相互关系[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 31-37.
Ma Zhuguo. Variation of frost days and its relationship to regional warming in northern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(Supp.): 31-37. (in Chinese)
- 144 叶殿秀,张勇. 1961-2007年我国霜冻变化特征[J]. 应用气象学报,2008,19(6):661-665.
Ye Dianxiu, Zhang Yong. Characteristics of frost changes from 1961 to 2007 over China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008, 19(6): 661-665. (in Chinese)
- 145 Bennie J, Kubin E, Wiltshire A, et al. Predicting spatial and temporal patterns of bud-burst and spring frost risk in north-west Europe: the implications of local adaptation to climate[J]. Global Change Biology, 2010, 16(5): 1503-1514.
- 146 李茂松,王道龙,钟秀丽,等. 冬小麦霜冻害研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2005,14(4): 72-78.
Li Maosong, Wang Daolong, Zhong Xiuli, et al. Cause analysis of frost damage to winter wheat in Huang-Huai-Hai plain during 2004-2005[J]. Journal of Nature Disaster, 2005, 14(4): 72-78. (in Chinese)
- 147 王慧芳,顾晓鹤,董莹莹,等. 利用变化向量分析法对冬小麦冻害及长势恢复监测[J]. 农业工程学报,2011,27(11): 145-150.
Wang Huifang, Gu Xiaohuo, Dong Yingying, et al. Monitoring freeze injury and growth recovery of winter wheat based on change vector analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(11): 145-150. (in Chinese)
- 148 董燕生,陈洪萍,王慧芳,等. 基于多时相环境减灾卫星数据的冬小麦冻害评估[J]. 农业工程学报,2012,28(20): 172-179.
Dong Yansheng, Chen Hongping, Wang Huifang, et al. Assessment of post-frozen winter wheat damage using multi-temporal HJ-1 satellite imagery[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(20): 172-179. (in Chinese)
- 149 陈怀亮,邓伟,张雪芬,等. 河南小麦生产农业气象灾害风险分析及区划[J]. 自然灾害学报,2006,15(1): 135-143.
Chen Huailiang, Deng Wei, Zhang Xuefen, et al. Analysis and zoning of agrometeorological disasters risk for wheat growing in Henan Province[J]. Journal of Nature Disaster, 2006, 15(1):135-143. (in Chinese)
- 150 张雪芬,陈怀亮,郑有飞,等. 冬小麦冻害遥感监测应用研究[J]. 南京气象学院学报,2006,29(1): 94-100.
Zhang Xuefen, Chen Huailiang, Zheng Youfei, et al. Monitoring the freezing injury of winter wheat by remote sensing[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2006, 29(1): 94-100. (in Chinese)

- 151 钟秀丽,王道龙,李玉中,等. 黄淮麦区小麦拔节后霜害的风险评估[J]. 应用气象学报,2007,18(1): 102-107.
Zhong Xiuli, Wang Daolong, Li Yuzhong, et al. Risk assessment of frost damage in wheat [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(1): 102-107. (in Chinese)
- 152 林晓梅,岳耀杰,苏筠. 我国冬小麦霜冻灾害致灾因子危险度评价:基于作物生育阶段气象指标[J]. 灾害学,2009, 24(4): 45-50.
Lin Xiaomei, Yue Yaojie, Su Yun. Frost hazard risk assessment of winter wheat: based on the meteorological indicator at different growing stages[J]. Journal of Catastrophology, 2009, 24(4): 45-50. (in Chinese)
- 153 代立芹,李春强,姚树然,等. 气候变暖背景下河北省冬小麦冻害变化分析[J]. 中国农业气象,2010,31(3): 467-471.
Dai Liqin, Li Chunqiang, Yao Shuran, et al. Variation analysis of freezing injury on winter wheat under climate warming in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(3): 467-471. (in Chinese)
- 154 杨邦杰,王茂新,裴志远. 冬小麦冻害遥感监测[J]. 农业工程学报,2002,18(2):136-140.
Yang Bangjie, Wang Maixin, Pei Zhiyuan. Monitoring freeze injury to winter wheat using remote sensing[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 136-140. (in Chinese)
- 155 Feng M C, Yang W D, Cao L L, et al. Monitoring winter wheat freeze injury using multi-temporal MODIS data[J]. Agricultural Science in China, 2009, 8(9): 1053-1062.
- 156 Pouteau R, Rambal S, Ratte J P, et al. Downscaling MODIS-derived maps using GIS and boosted regression trees: the case of frost occurrence over the arid Andean highlands of Bolivia[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(1): 117-129.
- 157 Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency. ALOS User handbook[M]. 2010.
- 158 Múcher C A, Hennekens S M, Bunce R G H, et al. Modelling the spatial distribution of Natura 2000 habitats across Europe[J]. Landscape Urban Planning, 2009, 92(2): 148-159.
- 159 Otto J C, Dikau R, Löwner M O. New GML-based application schema for landforms, processes and their interaction, landform-structure, evolution[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2010: 21-36.
- 160 Prima O D A, Echigo A, Yokoyama R, et al. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps[J]. Geomorphology, 2006, 78(3-4): 373-386.
- 161 USDA FAS, The FAS crop explorer: a web success story[EB/OL]. <http://www.fas.usda.gov/info/fasworldwide/2005/06-2005>, 2005.
- 162 EC JRC. The monitoring agricultural resources[EB/OL]. <http://mars.jrc.ec.europa.eu>, 2010.
- 163 EC JRC. MARS unit about us[EB/OL]. [http://mars.jrc.it/mars/About us](http://mars.jrc.it/mars/About%20us), 2010.
- 164 FAO, Global information and early warning system [EB/OL]. <http://www.fao.org/WAICENT/faoinfo/economic/gIEWS/english/index.htm>, 2010.
- 165 Statistics Canada. Overview of the crop condition assessment program[EB/OL]. <http://www26.statcan.ca/ccap/overview-aper-cu-eng.jsp>, 2010.
- 166 科学技术部国家遥感中心. 主要农作物遥感监测关键技术研究及业务化应用[R]. 国家遥感科技简报,2013(1):73.

Advances of Research and Application in Remote Sensing for Agriculture

Zhao Chunjiang^{1,2}

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

2. Key Laboratory of Agri-informatics, Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Agriculture is one of the most important and popular fields of remote sensing applications. The purpose of this paper is to review the advances of research and application in remote sensing for agriculture in the world. The review includes following six main aspects: cropland radiative transfer mechanism and remote sensing inversion of crop parameters, remote sensing classification and identification of crops, cropland nutrient and variable fertilization techniques, crop yield and quality perdition, agricultural disaster monitoring and forecasting, and spatial decision-making support system for agricultural remote sensing monitoring. Finally, the key directions needed more attention and technical breakthrough are figured out according to the current status and trends of agricultural remote sensing techniques.

Key words: Agricultural remote sensing Application advances Crop condition monitoring Spatial decision-making system