

面向精准农业的农田信息遥感获取系统^①

蒙继华^② 程志强 董文全 徐 晋 王一明 游行至

(中国科学院遥感与数字地球研究所 北京 100101)

摘 要 在精准农业的框架下,可以根据地块土壤、水肥、作物长势、产量等在时间与空间上的差异,来进行相适宜的变量管理。近 15 年来,遥感技术在精准农业领域开始发挥越来越大的作用,在指导农田灌溉、施肥、农作物收获及灾后损失评估等方面均取得了很多成功的应用。在长期研究的基础上,对面向农业生产管理过程优化的农田信息遥感获取技术进行了集成化开发,建成了“面向精准农业的农田信息遥感获取系统”,该系统以卫星遥感数据为主要数据源,具备遥感数据预处理、长势监测、单产预测、土壤养分监测、播种期与成熟期预测等功能,主要指标的预测与监测精度达到 85% ~ 90%,可在作物生育期连续提供定量化的农田空间差异信息,为农田播种、施肥、收割等生产管理活动的优化提供支撑。文章对该系统的结构、功能、模型方法以及应用案例进行了全面介绍,总结了系统特点,并对系统下一步发展需要解决的问题进行了展望。

关键词 精准农业, 遥感, 系统, 设计与开发, 监测方法

0 引 言

精准农业 (precision agriculture, precision farming, precision crop management) 又称精细农业、精确农业、精准农作和处方农业。精准农业基于农田作物和环境的空间差异性,通过各种技术手段来获取农田内不同单元的农田信息,并由此利用变量技术来进行农田优化管理,以便实现生产过程精细化、准确化的农业经营管理系统^[1]。鉴于我国及全球人口不断增长和土地资源减少的矛盾不可逆转,精准农业在减少投入、降低成本、减轻环境污染、农产品可控化、标准化和批量化等方面均有积极的作用和意义。

在精准农业中,田块内的作物状态及其生长环境的空间差异是进行农业精准管理的关键。遥感可在不同的电磁谱段内周期性地收集地表信息,已成

为人们研究、识别地球和环境的主要方法。遥感信息为精准农业所需空间信息差异参数的快速、准确、动态获取提供了重要的技术手段^[2]。早期由于受分辨率、时间周期、地理、空域、气象条件、监测成本极高以及遥感技术本身发展水平等因素的限制,致使遥感技术在农业领域的应用只局限于服务区域的重大决策。20 世纪 70 年代,遥感开始进入一个高速发展的阶段^[3],并广泛地应用于农业生产监测,在作物识别、面积估算、长势监测、旱情监测、灾害评估和作物产量估计等方面均取得了较大的成绩^[4],然而其所能提供的信息在时空分辨率及所提供信息的精度和丰度还不能满足精准农业对农田信息的需求。近 15 年来,随着遥感技术的发展,遥感技术在精准农业领域开始发挥越来越大的作用,在指导农田灌溉、施肥、病虫害防治、杂草控制、农作物收获及灾后损失评估等方面均取得了很多成功的应用。

目前中国在将遥感技术应用于精准农业领域的

① 中国科学院科技服务网络计划 (KFJ-EW-STS-069), 国家自然科学基金面上项目 (41171331, 41010118, 40801144) 和国家 863 计划课题 (2013AA12A302) 资助项目。
② 男, 1977 年生, 博士, 研究员; 研究方向: 农业遥感研究; 联系人, E-mail: mengjh@radi.ac.cn
(收稿日期: 2017-12-28)

研究主要集中于技术方法上,成熟的业务系统较少,这给其应用带来了困难。因此需要对“数据处理-信息提取-信息分析-农田管理决策”的全过程进行系统化集成与开发,以提高信息获取的效率并降低信息服务的成本,同时降低对系统应用机构或人员的专业素养要求^[5]。Infoterra 公司开发的 FarmStar 系统^[6]提供了很好的范例,该系统将遥感数据与先进数据处理技术相结合,实现了不需要地面采样支持的农田信息获取,同时系统整合了农学数据和气象数据,可向农田种植者和农学家提供友好的农田管理建议。RemoteAgri^[7]对信息服务的模式进行了提升,针对植被指数计算、植被监测、冠层绿度与温度监测等初步的应用实现了网络化的服务定制与提供。中科院遥感地球所与北京仲讯雄风公司联合研发的遥感监测与手机信息服务相结合的信息系统在山东禹城的应用^[8]也是一个好的尝试。

在长期研究的基础上,作者所在研究团队对面向农业生产管理过程优化的农田信息遥感获取技术进行了集成化开发,建成了“面向精准农业的农田信息遥感获取系统”,该系统以卫星遥感数据为主要数据源,可以在作物生育期连续提供定量化的农田空间差异信息,为农田播种、施肥、收割等生产管理活动的优化提供支撑。目前该系统已经在中国规模化农业发展较好的东北地区开展了多个应用示范^[9,10],文章对该系统所采用的方法、结构、功能以及应用案例进行了系统介绍,力图为开展精准农业遥感应用技术与系统开发的学者与技术人员提供參考,进一步推动卫星遥感技术在精准农业中的应用。

1 系统结构功能设计

1.1 需求分析

根据遥感技术、数据本身的特点,以及大田作物种植管理优化对农田空间差异信息的需求,系统应满足以下几个方面的要求。

数据选择:使用遥感数据开展面向精准农业的信息服务,首先就是要进行合理的数据选择,特别是遥感数据的分辨率。根据目标区域的农田景观与空

间异质性,选择合适空间分辨率遥感数据开展监测,可以避免因选择数据空间分辨率过低而不能反映田块间或农田内部差异,或分辨率过高而使监测成本大幅上升的问题^[10]。并可决定是否需要通过时空或光谱融合等技术手段来提供满足农田尺度动态监测需要的遥感数据^[11]。

遥感数据标准化预处理:这里的标准化预处理包括传统遥感数据预处理与数据融合两个方面的内容。其中传统遥感数据预处理需要针对不同的监测区,具备遥感影像辐射标定、几何纠正、大气校正、正射投影等自动化处理功能,生成不同传感器在时间上一致、空间上可比的遥感数据集。数据融合则是针对受技术条件的限制,在使用遥感数据对农田空间差异及其时间变化进行描述时不得不在时间与空间分辨率上进行取舍^[12]的问题,将不同传感器上具有不同时空分辨率特征的数据进行融合,生成同时具有高时间和高空间分辨率的遥感数据,满足农田尺度动态监测的需要。

农田参数获取:作物叶面积指数(leaf area index, LAI)是反映作物长势并预测作物产量的一个重要农学参数,可以为作物长势监测、单产估算及作物生长模拟提供有效的数据源^[13]。而叶绿素与水分是农作物主要的生化参数,是作物营养胁迫、光合作用能力和发展、衰老各阶段的良好指示剂,对动态监测农作物的长势、病虫害、农作物产量以及预测作物成熟期有重要的意义^[14]。因此需要对包括 LAI、叶绿素与水分状况等信息进行遥感估算,这些参数一方面可以直接用于评价作物的长势与水分胁迫等,另一方面可以在相应的模型方法下提供不同农业生产管理环节的决策信息。

专题信息获取:农业生产管理的主要环节包括播种、施肥、收割与病虫草害应对等,需要面向这些环节提供有效的支撑信息。在播种上,播种期对作物的千粒重、蛋白质含量、含油量等主要品质的影响较明显^[15],针对过早或过晚播种都会影响作物的产量和品质,不利于丰产增收^[16]的问题,需要开展农田的播种适宜性评估;在施肥上,需要提供土壤性状及肥力状况信息,用于农田管理分区和作物营养诊断,并指导实施农田变量施肥^[17];在收割上,作物收

获时间对作物的产量、品质有重要的影响,合理地预测作物收获时间,可以有助于提高农产品的品质和产量^[18];在病虫害害应对上,农作物长势是作物生长环境、农田管理水平及作物本身状况综合作用的结果,利用遥感技术监测作物的长势及其变化等,从中可及时发现作物生长过程中出现的问题^[19];此外,作物单产是农田耕种的最终目的,也是评估农田生产力和农民收益的直接指标^[20],因此还需要开展像元尺度的单产估算。

1.2 结构功能设计

面向精准耕作的农田信息遥感获取系统构架如图 1 所示。

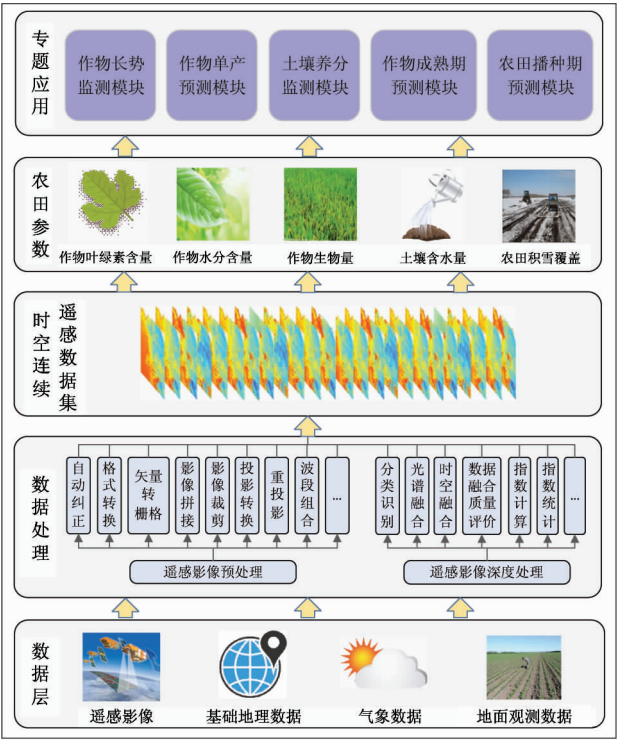


图 1 面向精准农业的农田信息遥感获取系统结构图

系统总体采用客户机/服务器模式 (Client/Server,C/S) 共存架构,逻辑上可分为 4 层:即数据层、数据处理层、参数反演层和专题应用层。

数据层:主要为农田信息遥感获取系统提供数据支持,主要包括:(1)多源遥感影像数据、基础地理信息数据、地面观测与验证数据及气象数据等;(2)支持用户管理和系统维护管理的用户数据、业务数据、日志数据、历史数据等数据。

数据处理层:主要开展包括遥感影像的格式转换、投影转换、数据拼接裁剪、数据融合、几何纠正、辐射校正、大气纠正等预处理在内的各类处理,在这个基础上进行一些系统所需遥感指数的计算,并开展遥感数据时空融合,提供满足农田尺度动态监测所需要的遥感数据集。

参数计算层:分别采用机理模型(如辐射传输模型)和统计模型,开展作物与土壤参数的计算,计算参数包括作物 LAI、冠层叶绿素与水分含量、土壤表层含水量等。

专题应用层:基于前几个层所提供的遥感数据,面向农业生产管理主要环节,开展专题监测,监测内容包括播种适宜性评价、农作物长势评估、单产估算、土壤养分监测、播种期与成熟期预测等。

从逻辑关系上来看,这 4 层是由前向后顺序开展工作的,每个层均以前一层为输入。数据层主要完成数据准备工作,数据处理层主要完成遥感数据的预处理与准备,农田参数层利用数据处理层的输出开展农田与作物信息的监测与反演,而专题应用层则是以农田参数层的输出为输入,提供主要农田生产管理环节优化的决策信息。

2 系统方法

从空间变异尺度分析、多源数据融合、作物参数反演、农田播种适宜性评估、作物长势评价、土壤养分状况遥感监测、作物成熟期预测以及作物单产估算等 8 个方面对系统所采用的方法进行详细的说明。

2.1 农田空间变异尺度分析

系统通过空间异质性的量化来确定所需要遥感数据的空间分辨率。空间异质性是指区域化变量在不同空间位置上存在明显差异的属性,其包括空间结构和空间变异两方面的内容。空间异质性的定量描述是基于数据类型的,变异函数(或半方差函数)是刻画区域化变量的结构性和随机性的有效方法和手段之一^[21],因此我们选择变异函数来分析农田的空间变异尺度,变异函数定义为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E[Z(x) - Z(x+h)]^2$$

其中, $\gamma(h)$ 为变异函数; $Z(x)$ 为系统某属性 Z 在空间位置 x 处的值, $Z(x+h)$ 是 Z 在 $x+h$ 处的值; $E[Z(x) - Z(x+h)]^2$ 是抽样间隔为 h 时的样本值方差的数学期望。根据 Nyquist-Shannon 采样定理, 当采样间隔小于权重变程的 $1/2$ 时, 则该景观的平均自相关范围将能被探测到^[21,22], 也就是说该景观的空间异质性可以区分, 因此可以作为遥感监测的空间分辨率要求。

2.2 多源遥感数据融合

根据目前两类主流算法的特点与应用情况(基于变换的方法和基于像元重构)^[23], 系统选择使用时空自适应性反射率融合模型(spatio-temporal adaptive reflectivity fusion model, STARFM)^[24]及其改进模型^[12]开展数据融合。STARFM 方法的理论基础是在忽略空间定位误差与大气纠正误差的前提下, 低分辨率遥感数据的像元值可以用同期高分辨率遥感数据像元值的面积比例的加权平均来计算, 在权重计算上, 由窗口中心的预测像元与窗口中其他像元(包括多时相数据)的光谱距离、时间距离与空间距离来决定, 对包括作物生长在内的地表渐变过程有较好的应用。

除了 STARFM 外, 对一些特定研究区和特定数据可以采用几种改进算法, 包括 ESTARFM^[25]、STAVFM^[12]和引入局部空间自相关指数的算法^[26]。其中 ESTARFM 算法利用两个时间点之间所观测的反射率变化趋势和光谱分离理论, 更好地预测反射率的变化, 解决非同质的地物类型; STAVFM 考虑了植被(包括作物)物候信息, 可更好地反映区域植被的真实状况及时间变化^[27]; 引入局部空间自相关指数改进融合时的权重函数, 使具有相似纹理结构的像元在融合时有更大的权重, 可提高融合数据的质量。

2.3 作物理化参数估算

选择作物叶面积指数、冠层叶绿素与水分含量 3 种生理、生化参数作为基本作物参数进行遥感估算。估算采用两种方法, 一种是在有地面观测数据支持的情况下, 开展所估算参数与对应敏感遥感指数的统计回归分析, 建立统计回归模型, 并利用模型进行估算^[13,28]; 另一种是利用作物冠层辐射传输模

型, 建立查找表, 采取模型反演的方法进行估算^[29], 物理模型采用 PROSAIL 前向模型, 在分析生理、生化参数对模型的全局敏感性的基础上, 基于查找表算法反演冠层叶面积指数与叶绿素含量。经验模型具有简单易用的特点, 但需要地面观测数据做支撑; 物理模型方面估算精度较稳定, 但在运行时也需要收集一定数量的作物特性参数^[30]。以 LAI 为例, 统计模型的精度可以 80% 以上, 机理模型的精度可以达到 75% ~ 80%^[28]。

2.4 农田播种适宜性评价

作物播种时需要适宜的温度、土壤湿度、日照时数和降水量等, 在一些特定的地区, 还需要考虑冻层厚度是否满足作物生长的需求, 因此首先需要进行农田环境信息的获取。这些环境信息中, 对于土壤冻融状况, 首先需要监测农田积雪融化状况, 考虑到数据的可获得性与成本等问题, 系统选择光学遥感中应用广泛的归一化积雪指数^[31](normalized difference snow index, NDSI), 开展农田积雪融化顺序遥感监测^[32], 在此基础上利用冻土和未冻土在介电常数上存在明显的差异^[33], 在微波数据的支持下制图, 并估算冻融层厚度。土壤湿度过低或过高都不利于作物出苗, 而且土壤湿度过大时不利于大型机械进入农田播种, 系统提供利用光学指数(normalized difference water index, NDWI)和主动微波技术两种方法开展土壤表层含水量估算^[34]。对于地表温度, 由于所需尺度监测的对地观测数据多只具备一个热红外通道, 因此提供单窗算法^[35]的农田地表温度反演。

系统通过数据库获取不同品种主要作物播种在土壤温度、含水量以及冻融层厚度等环境方面的需求, 与遥感监测的田块环境参数对比, 评价农田播种适宜性, 制订播种顺序。

2.5 作物长势评估

长势评估是农情遥感监测中发展较为成熟的主题, 主要采用实时监测与过程监测两种方法开展作物长势的综合监测^[36]。实时监测主要利用实时遥感指数, 通过其与历史同期对比, 反映实时的作物生长差异的空间变化, 并定性和定量地在空间上分析作物生长状况。过程监测则从时间系列上对遥感数

据进行趋势分析和历史累积对比。利用作物生育期内,作物生长状况和生长条件与遥感参数时间曲线的响应关系,推测作物的生长发育状况并监测作物长势^[37]。

为适应农田尺度的监测特点,对监测方法进行了补充。一是从时间与空间两个维度,对中国不同区域、不同农业种植模式以及不同物候阶段,主要遥感指数在长势评估中的适用性进行了评价,可以在相应的区域选择合适的指数^[38];二是对于实时监测,提出群体与个体特征相结合的长势监测方法^[39],该方法从作物单株性状和作物群体性状两个角度出发,选择群体长势监测指标和个体长势监测指标,开展田块尺度作物物候监测,进行生理、生化参数的物候归一化处理,结合物候的监测消除因物候差异给长势监测所产生的影响。在此基础上通过二维等权重表格的形式将个体与群体特征相结合,在农田尺度上开展大宗作物长势的综合、有效评估,利用该方法对苗情等级的评价精度高于 80%。物候修正的思路不仅适用于新的长势监测方法,在传统的实时长势监测和作物生长过程监测中也可以提高监测的有效性^[19,40]。

2.6 作物单产估算

基于遥感技术的作物单产估算模型可以简单概括为经验模型、半经验机理模型、机理模型,基于光能利用率和基于作物生长是机理模型两种主要实现方式^[20],两种方式在像元尺度上进行作物单产估算时,分别存在过于简化作物生理生化过程和参数标定代价过高的问题^[41]。

本系统通过耦合光能利用率模型(Carnegie-Ames-Stanford approach, CASA^[42,43])和作物模型(world food studies, WOFOST^[44])解决这些问题。其中,CASA 模型是耦合模型的主体框架,通过对作物第一净生产力(net primary productivity, NPP)的逐日模拟,得到干物质累积量(生物量)^[27],再通过收获指数得到作物产量,同时加入 WOFOST 模型的相关模块提升 CASA 模型在单产估算方面的能力。主要对干物质分配、蒸腾作用(土壤水循环)和养分胁迫作用(养分吸收及利用)三个过程进行了耦合,耦合分为三级,第一级是将干物质分配过程进行耦

合,增加 CASA 模型对不同生育期内干物质向存储器官分配的模拟能力,从而代替收获指数,避免不必要的误差;第二级是对水分胁迫的耦合,提升其对极端天气条件的应对能力;第三级是对养分胁迫的耦合,通过增加养分模块使 CASA 模型具备模拟作物对速效氮磷钾的吸收和利用的模拟能力。由于后面两级的耦合方式依然涉及较多的待标定参数,因此只在发生异常胁迫的时候对相应模块进行调用,以保证模型运行速度和成本。

耦合得到 CASA-WOFOST 单产估算模式,可以同时兼顾到 CASA 模型的运算速度和 WOFOST 模型的机理优势,同时能有效发挥遥感数据的作用,确保在较大尺度上进行单产估算的精度和稳定性,对主要粮食作物的估算精度可以达到 85%~90%。

2.7 土壤养分遥感监测

对于土壤有机质,系统利用可见光、近红外波段光谱信息与土壤有机质含量的相关性^[45],采用多元线性回归分析方法,构建有机质含量地面监测模型,并通过直方图匹配方法获取地面监测模型与卫星监测模型之间的傅里叶转换函数,将地面监测模型应用到卫星数据,实现农田土壤有机质含量遥感制图^[46],平均监测精度高于 90%。

对于直接影响作物生长的主要土壤速效养分(N、P、K),针对遥感监测中存在的光谱特征不显著、裸土遥感数据获取时间窗口短、表层与耕层养分差异明显等问题,提出了用作物模型与时间序列遥感数据相结合实现耕层土壤速效养分反演的新思路。该思路以养分缺失引起的作物长势参数的变化为切入点,在数据同化算法设计和养分模块优化改造的基础上,利用作物长势参数遥感估算结果与模型模拟结果的差异设计了养分反演算法,实现对土壤速效养分的有效、稳定反演^[47],提高了养分反演结果的应用价值。

该方法首先利用遥感数据同化技术将时间序列遥感数据同化到模型中,实现像元尺度作物参数的分阶段准确模拟,然后针对养分反演过程中的对模型结构和算法的要求对模型进行了优化和算法补充,在此基础上设计了土壤速效养分反演算法,实现了土壤中速效氮、有效磷和速效钾的有效模拟。该

方法采用集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filter, EnKF)作为遥感数据同化算法,使用 WOFOST 模型进行作物生长的模拟,模型通过重编码实现了养分模块的动态调用,同时通过引入作物养分吸收方程,实现养分吸收量的分生育期模拟,解决养分模块实时调用时产生的养分吸收问题。该方法在实验区尺度 N、P、K 三种养分的估算精度分别达到 87%、81% 和 72%。

2.8 作物成熟期遥感预测

大多数作物在成熟过程中,在籽粒与果实趋于成熟的同时,作物叶片与植株茎干性状也均会体现出规律性的单调变化,这种变化包括生理与生化两个方面,可以作为作物成熟度的指示因子。作物成熟过程中,植株不同部分的含水率和植株叶绿素含量的动态变化,通常表现为 de-greening 和 de-watering。从遥感可监测的指标上来看,冠层含水量和叶绿素含量对这一变化有很好的体现。通过分析作物成熟过程中作物单产、品质及性状的变化趋势,对这种规律性变化进行数字化表达,然后分析这种规律性变化在作物冠层水分与叶绿素含量上的体现,并通过作物冠层含水量与叶绿素含量的遥感监测实现作物成熟期的预测。目前这一方法已经在小麦^[48]、大豆^[49]、玉米^[30]等作物上取得了较好的应用效果。不同作物最佳收获期的目标是不同的,对于小麦和水稻通常以单产为主要因素,对于大豆,在考虑产量的同时还需要考虑油分含量等品质要素,对于玉米,则要更多考虑籽粒性状是否达到收割条件(通常籽粒含水量在 35% 以下时方能机收)。对于大宗作物,最佳收获期的预测误差小于 2.5 天。

作物成熟期预测对遥感数据的时效性要求较高,需要通过多星协同监测或时空分辨率融合的方法来获得满足需要的遥感数据^[18]。

3 系统实施

3.1 系统开发平台搭建

系统基于局域网环境下的客户机/服务器模式(C/S 结构)进行设计,采用 IDL + ArcGIS Engine + .NET Framework 的模式进行开发平台搭建。

IDL(interactive data language)是一种面向矩阵的新一代语言,提供了强大的数据处理能力,还为数据分析和结果的可视化提供了完整的编程环境,适合于遥感数据计算与可视化;ArcGIS Engine 是 ESRI 在 ArcGIS9 版本才开始推出的新产品,矢量与栅格数据的显示及地图制作提供了方便的接口;C#是面向对象的编程语言,可以快速地编写各种基于 Microsoft .Net 平台的应用程序。

IDL 在界面设计开发方面明显不具备优势,而 .NET Framework 和 ArcGIS Engine 恰好在界面设计方面的能力突出,因此,系统在实施过程中综合考虑各软件平台、开发语言的优缺点,取长补短。利用 .NET Framework 3.5 和 ArcGIS Engine 10.1 搭建系统各功能模块界面,负责模型计算参数的设定以及计算结果包括矢量和栅格数据的显示,IDL 语言实现具体功能算法,负责遥感影像运算及具体模块的算法运行,以 C#做为系统界面与 IDL 处理算法及数据库的交互语言搭建了系统。

3.2 系统实施

开发分模块进行,模块间保持高内聚、低耦合的关系。系统于 2014 年完成首版的开发,此后持续对新的数据和新的技术方法研究成果进行集成。系统主界面如图 2 所示。

系统服务器端采用 SQLServer 数据库。客户端应用系统通过 ODBC 进行数据库的访问,服务器端支持多用户访问。选择 SQLServer 主要是因为其安全、稳定、存储效率高,同时兼容性好,可运行于多种平台,易于操作和使用。

系统在开发完成后在 Windows 平台下运行,需要 IDL 运行时环境(IDL RE)、ArcGIS Engine Runtime、.NET Framework 3 种环境的支持。目前系统已经在黑龙江、山东、安徽等省进行了应用。

3.3 系统监测结果

原沈阳军区双山农副业基地是中国科学院与原沈阳军区推进“院-军”合作的精准农业示范区。2013 - 2016 年,系统在该示范区开展了业务监测。该示范区中心坐标 125°31'E、48°48'N,平均海拔 360m,实验区种植面积 4 万亩,田块平均大小 1500 亩。该地区主要种植玉米、大豆、小麦三种作物,玉

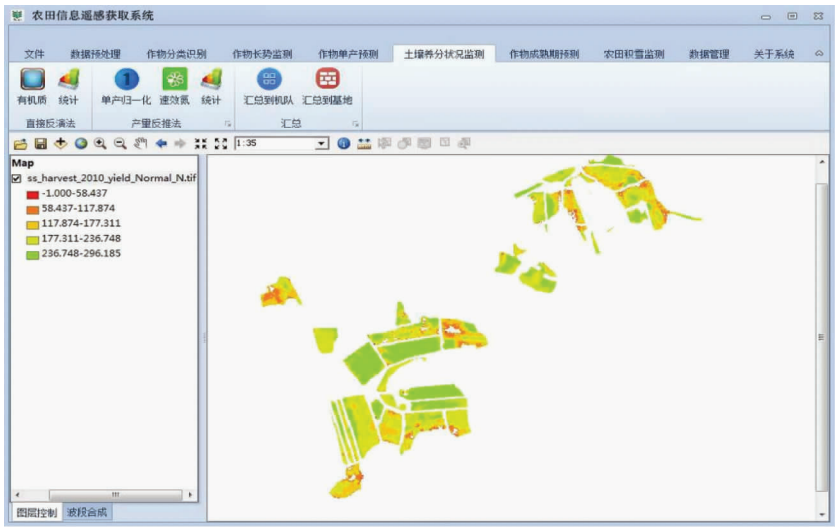


图2 面向精准农业的农田信息遥感获取系统主界面

米、大豆种植面积较大约占 90%，生长季为 5 - 10 月。

(1)系统准备

系统可以开展运行监测之前进行数据准备以及系统模型参数的标定。

1)数据准备:获取的该农场的各类基础数据,包括本底遥感影像数据、DEM 数据、田块分布数据以及当年的生产计划,对这些进行了整理,统一到相同的空间坐标体系下。进而将这些基础数据按相应的格式整合到系统中,部分数据(如气象数据)还需要进行入库操作。

2)系统模型参数的标定:在经过前一步准备后,已经可以在目标区域运行系统开展监测了,但如需要获取较高的监测精度,还需要对系统模型参数进行标定。主要是开展监测区域作物生理、生化参数的时间序列观测,观测包括叶面积指数、生物量、叶片含水量等,通过对比系统监测/模拟结果与观测数据,实现模型参数的本地化。

(2)监测结果

2015 - 2016 年以 HJ-1 数据为主要数据源的部分监测结果如下。

系统以 0.5 月为频率开展遥感数据的获取、处理以及相关参数的估算,以月为频率开展作物长势、

生物量、土壤养分等专题的监测,并以季为单位开展播种适宜性评价、成熟期预测以及单产估算。

4 系统特点

4.1 技术原创性

系统所采用的监测技术多为自主研发,原创性地提出利用遥感技术评价农田播种适宜性并预测作物成熟期,在播种与收割 2 个环节,实现利用卫星遥感技术优化作业时间与作业顺序,拓展了遥感在精准农业领域的应用范围。

在其他几个传统应用专题上,也通过方法创新提高了监测能力。在农作物长势评估上,同时将作物生长的个体与群体特征考虑进来,进行农作物长势综合评价,同时考虑物候差异的影响,实现了长势监测与评估的物候修正;在农作物单产估算上,将光能利用率模型和作物模型进行耦合,在兼顾运行效率的同时提高了算法的可扩展性,并可更好地适应极端天气条件下的模型应用;在土壤速效养分遥感监测上,提出了将作物模型与时间序列遥感数据同化相结合实现土壤速效养分反演的新思路,解决了传统光谱特征手段难以解决的土壤速效养分获取难题。

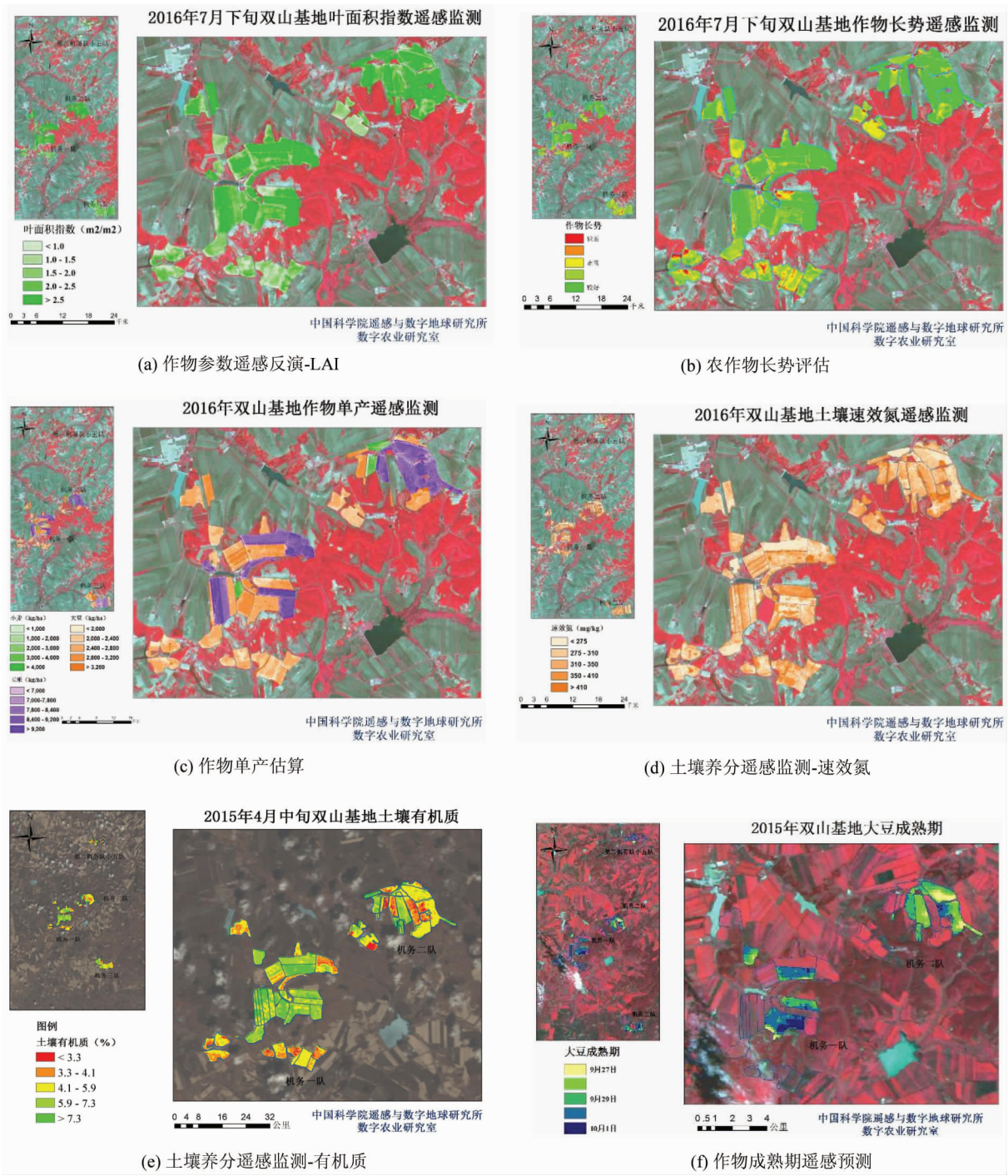


图3 系统监测结果(双山农场)

4.2 集成化

集成化是系统的主要特点之一。以往的农情遥感监测系统在部分数据处理环节上往往依赖一些遥感图像处理软件(如 ERDAS 或 ENVI),在信息提取方面又依赖于一些地理信息系统软件(如 ArcGIS),这样就出现两个问题,一方面系统在使用时用户必须购买和安装这些系统,增加了系统的使用成本;另

一方面也要求用户掌握(或部分掌握)这些软件的使用,提高了系统推广应用的技术门槛。

针对这两个问题,本系统进行集成化开发,将数据预处理、科学计算、信息提取及结果的输出都集成化开发到系统中,使用户仅使用本系统就可以完成农田遥感监测的全部任务,既降低了对用户的技术要求,也降低了系统的移植成本。

4.3 灵活易用性

系统可以根据用户的需求进行灵活的定制。在功能上,用户可以根据需要选择感兴趣的功能和模块,定制自己的农田遥感监测系统。系统监测区域也可以根据用户需求灵活的定制。

用户还可以根据需求自主地选择特定分辨率下的遥感数据开展业务监测。系统从方法上摆脱了对高光谱数据的依赖,利用常规多光谱遥感数据即可实现,降低了数据门槛与监测成本。同时随着中国对地观测系统的持续发展,包括 GF 系列、资源系列在内新型卫星遥感数据都可以支持系统的运行。

5 结论与展望

面向农业生产管理优化,以农业生产的主要管理环节为对象,研究团队对近 10 余年的研究成果进行了系统化集成,设计开发了面向精准农业的农田信息遥感获取系统。该系统以遥感数据为主要数据源,具体包括遥感数据分辨率需求分析、多源遥感数据融合、作物生理生化参数遥感估算、农田播种适宜性评价、作物长势评估、作物单产估算、土壤速效养分遥感监测、作物成熟期遥感预测。

目前系统所采用的核心监测方法均为团队自主研发,在现阶段具备原创性与先进性的特点,同时系统集成化程度高,灵活易用。然而目前系统在精准农业领域的应用,仍然以政府主导的“自上而下”推动为主,需要转变为以用户需要为主导的“自下而上”方式,这其中还有几个方面需要进一步完善。

(1)信息服务能力提升:监测精度不够高,与农业生产需求的结合不紧密,是限制系统广泛应用的主要障碍。需要提升遥感技术在农田信息的获取能力,一方面通过技术方法的完善提高监测精度,另一方面充分利用对地观测系统的发展与集成,提高信息服务的保障性、时效性与精细度。监测精度的提高,信息服务时效性的增强将进一步推动系统的应用推广。

(2)信息延伸:遥感技术所提供的多是“现势”,反映的是一个时间断面的信息,需要将作物模型与气象信息相结合,在时间维度上对监测结果进行外

延,使其具备一定预测能力,更好地服务于农业生产管理服务。同时只提供信息还不足以产生效益,要在信息链上进行延伸,形成可直接供农业生产使用的变量作业处方图。

(3)与新兴 IT 技术的结合:基于网络云平台的信息服务方式成为一个新的趋势,已有不少科研院所和高技术公司开展了这个领域的新尝试,并初步形成了有偿信息服务模式。同时大数据与 AI(人工智能)等技术的发展,也带来了新的契机,特别是可以通过数据挖掘,解决原来必须依赖农业专家(系统)才能获取的农田生产管理优化处方。

(4)监测专题的集成与补充:目前不同专题的监测相对独立,应更紧密地进行耦合,提供多专题协同的农田生产管理服务。目前系统中还缺少病、虫、草、旱等灾害的监测与评估,虽然长势监测的结果可以间接地反映部分内容,但还需要更针对性的监测。

致谢:感谢双山农副业基地在系统应用示范过程中提供的支持与帮助。

参考文献

- [1] Zhang N Q, Wang M H, Wang N. Precision agriculture: a worldwide overview [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 36 (2-3): 113-132
- [2] 蒙继华,吴炳方,李强子,等. 农田农情参数遥感监测进展及应用展望 [J]. *遥感信息*, 2010(3): 122-128
- [3] 李德仁. 摄影测量与遥感的现状及发展趋势 [J]. *武汉测绘科技大学学报*, 2000, 25 (1): 1-6
- [4] 杨邦杰,裴志远,周清波,等. 我国农情遥感监测关键技术研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2002, 18 (3): 191-194
- [5] 蒙继华,吴炳方,杜鑫等. 遥感在精准农业中的应用进展及展望 [J]. *国土资源遥感*, 2011, 23 (3): 1-7
- [6] Infoterra. Farm Management Services-FarmStar [EB/OL]. http://www.infoterra.co.uk/applications_land_farmstar.php: Infoterra, 2016
- [7] Karantzalos K, Karmas A, Tzotsos A. RemoteAgri: processing online big earth observation data for precision agriculture [C]. In: *Proceeding of the 10th European Conference on Precision Agriculture*, Televiv, Isreal, 2015. 421-425
- [8] Wu B F, Meng J H, Zhang F F, et al. Applying remote sensing in precision farming: a case study in Yucheng

- [C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Computer and Computing Technology Applications in Agriculture, Piscataway, USA, 2009
- [9] 齐明,宋良图,齐清文,等. 东北地区机械化条件下的精准农业工程实践[J]. 中国农村科技,2014(8):64-65
- [10] Meng J H, Li Z Y, Wu B F. Design, development and application of a satellite-based field monitoring system to support precision farming[C]. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Agro Geo-informatics, Beijing, China, 2014. 1-9
- [11] 游行至. 面向农田尺度动态监测的多源数据融合方法研究:[硕士学位论文][D]. 北京:中国科学院大学, 2014
- [12] 蒙继华,吴炳方,杜鑫,等. 高时空分辨率 NDVI 数据集构建方法[J]. 遥感学报,2011,15(1):52-59
- [13] 蒙继华,吴炳方,李强子. 全国农作物叶面积指数遥感估算方法[J]. 农业工程学报,2007,23(2):160-167
- [14] 徐晋,蒙继华. 农作物叶绿素含量遥感估算的研究进展与展望[J]. 遥感技术与应用,2016,31(1):74-85
- [15] Cirilo A G, Andrade F H. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination[J]. *Crop Science*, 1994, 34(4):1044-1046
- [16] Coventry D R, Gupta R K, Yadav A, et al. Wheat quality and productivity as affected by varieties and sowing time in Haryana, India[J]. *Field Crops Research*, 2011, 123(3):214-225
- [17] 王祥峰,蒙继华. 土壤养分遥感监测研究现状及展望[J]. 遥感技术与应用,2015,30(6):1033-1041
- [18] 蒙继华,吴炳方. 基于卫星遥感数据预测作物成熟期的可行性分析[J]. 遥感技术与应用,2013,28(2):165-173
- [19] 蒙继华,杜鑫,张森,等. 物候信息在大范围作物长势遥感监测中的应用[J]. 遥感技术与应用,2014,29(2):278-285
- [20] 程志强,蒙继华. 作物单产估算模型研究进展与展望[J]. 中国生态农业学报,2015,23(4):402-415
- [21] 万丽. 基于变异函数的空间异质性定量分析[J]. 统计与决策,2006(2):26-27
- [22] Garrigues S, Allard D, Baret F, et al. Quantifying spatial heterogeneity at the landscape scale using variogram models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(1):81-96
- [23] 董文全,蒙继华. 光学遥感数据时空融合研究进展及展望[J]. 国土资源遥感,2018,30(1):1-11
- [24] Gao F, Masek J, Schwaller M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: Predicting daily Landsat surface reflectance[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2006, 44(8):2207-2218
- [25] Zhu X L, Chen J, Gao F, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(11):2610-2623
- [26] 董文全. 多源遥感数据时空融合及其在农田监测领域的应用研究:[硕士学位论文][D]. 北京:中国科学院大学,2017
- [27] Meng J H, Du X, Wu B F. Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(3):203-218
- [28] 陈雪洋,蒙继华,杜鑫,等. 基于环境星 CCD 数据的冬小麦叶面积指数遥感监测模型研究[J]. 国土资源遥感,2010,22(2):55-58
- [29] Xu J, Meng J H. Retrieval of canopy chlorophyll content for spring corn using multispectral remote sensing data[C]. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Agro Geo-informatics, Beijing, China, 2014. 1-5
- [30] 徐晋. 基多光谱遥感数据的玉米长势监测与收获期预测应用研究:[硕士学位论文][D]. 北京:中国科学院大学,2015
- [31] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54(2):127-140
- [32] Dong W Q, Meng J H. Extracting fields snow coverage information with HJ-1A/B satellites data[C]. In: Proceedings of the International Society for Optics and Photonics on Remote Sensing, Toulouse, France, 2015. 96371D-96371D-7
- [33] Podest E, McDonald K C, Kimball J S. Multi-sensor microwave sensitivity to freeze/thaw dynamics across a complex boreal landscape[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(11):6818-6828
- [34] Zribi M, Hegarat-Masclé S L, Ottele C, et al. Surface soil moisture estimation from the synergistic use of the (multi-incidence and multi-resolution) active microwave ERS wind scatterometer and SAR data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(1):30-41
- [35] Sobrino J A, Jimenez-Munoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM5[J]. *Remote Sensing of environment*, 2004, 90(4):434-440

- [36] 蒙继华,吴炳方,李强子,等. 运行化的农作物长势遥感监测系统[J]. 高技术通讯,2007,17(1):94-99
- [37] 蒙继华,吴炳方,李强子,等. 集成化的省级农情遥感监测系统[J]. 农业工程学报,2011,27(6):169-175
- [38] 蒙继华. 农作物长势遥感监测指标研究:[博士学位论文][D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2006
- [39] 蒙继华,吴炳方. 一种个体与群体特征相结合的农作物长势遥感评价方法[P]. 中国专利: ZL201310219169.1,2016-03-23
- [40] 韩衍欣,蒙继华,徐晋. 基于NDVI与物候修正的大豆长势评价方法[J]. 农业工程学报,2017,33(2):177-182
- [41] Cheng Z Q, Meng J H, Wang Y M. Improving spring maize yield estimation at field scale by assimilating time-series HJ-1 CCD data into the WOFOST model using a new method with fast algorithms[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 303
- [42] 朴世龙,方精云,郭庆华. 利用CASA模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报,2001,25(5): 603-608
- [43] 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
- [44] Huang J X, Sedano F, Huang Y B. Assimilating a synthetic Kalman filter leaf area index series into the WOFOST model to improve regional winter wheat yield estimation[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 216:188-202
- [45] 刘焕军,张柏,刘殿伟,等. 基于反射率模拟模型的黑土有机质含量估测[J]. 光谱学与光谱分析,2008,28(12):2947-2950
- [46] 王祥峰,蒙继华. 基于HJ-1卫星的农田土壤有机质含量监测[J]. 农业工程学报,2014,30(8):101-108
- [47] 蒙继华,程志强,王一鸣. 基于WOFOST模型与遥感数据同化的土壤速效养分反演新方法[J]. 遥感学报, 2018,22(4):546-558
- [48] 蒙继华,吴炳方,杜鑫等. 基于HJ-1A/1B数据的冬小麦成熟期遥感预测[J]. 农业工程学报,2011,27(3): 225-230
- [49] Meng J H, Xu F, You X Z. Optimizing soybean harvest date using HJ-1 satellite imagery[J]. *Precision Agriculture*. 2015, 16(2): 164-179

A remote sensing-based field monitoring system to support precision agriculture

Meng Jihua, Cheng Zhiqiang, Dong Wenquan, Xu Jin, Wang Yiming, You Xingzhi

(Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract

In the frame of precision agriculture, variation management can be implemented based on the spatial and temporal difference in field in the aspect of soil, water, fertilization, crop growth and yield. In last 15 years, remote sensing technology is playing a more and more important role in precision agriculture. Successful applications of remote sensing in guiding field irrigation, fertilization, harvest and post-disaster evaluation were witnessed. Based on continuous research and development, we integrate remote-sensing-based field monitoring technologies for field management optimization into an Remote Sensing Based Field Monitoring System to Support Precision Agriculture. Taking satellite images as primary input, the system can implement satellite images pre-processing, crop condition evaluation, yield estimation, soil nutrients monitoring, as well as prediction of optimal seeding and harvesting date. An accuracy of 85% ~ 90% is achieved for primary monitoring themes. Quantitative information on field spatial variation can be provided continuously to support management optimization in seeding, fertilization and harvesting. The structure, function, methodology and application demonstration are introduced in detail in this paper. The characteristics of the system are concluded and future work is proposed.

Key words: precision agriculture, remote sensing, system, design and development, monitoring methodology