

中国农业气象观测自动化技术研究进展

孙景兰¹ 张志红² 余卫东² 邓天宏¹

(1 河南省气象局, 郑州 450003; 2 河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

摘要: 农业气象观测是我国农业气象业务服务的基础, 目前我国已从人工观测到利用卫星、无人机、近地面摄像机、机器学习等先进设备及技术手段在农作物生长状况、土壤墒情、农业小气候等方面开展自动化观测, 在空间维度和时间维度上增加了观测的覆盖度及频次, 有效支撑现代农业的发展。分析我国农业气象自动化观测的发展历程、现状及存在问题, 探索未来发展方向和面临的挑战, 提出构建农业气象智能化观测网络, 发展星-空-地协同观测体系等建议, 为推进我国农业气象观测自动化发展提供参考。

关键词: 自动观测, 协同观测, 作物观测, 农业气象

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.002

Research Progress on the Agrometeorological Automatic Observation in China

Sun Jinglan¹, Zhang Zhihong², Yu Weidong², Deng Tianhong¹

(1 Henan Provincial Meteorological Bureau, Zhengzhou 450003

2 Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003)

Abstract: Agrometeorological observation is the basis for agrometeorological service in China. At present, manual observation has been replaced by the use of advanced equipment and technologies, such as satellite remote sensing, unmanned aerial vehicles, near-surface cameras and machine learning. They have been applied in the automatic observation of crop growth, soil moisture and agricultural microclimate. These improvements have increased the observation coverage and frequency from both spatial and temporal dimensions, and have effectively supported the development of modern agriculture. This paper analyzes the development process, current situation and existing problems of agrometeorological automatic observation in China, and investigates the future directions and challenges. In addition, suggestions on the construction of smart agrometeorological observation network and the establishment of satellite-space-ground cooperative observation system are proposed so as to provide references for the development of agrometeorological automatic observation in China.

Keywords: automatic observation, cooperative observation, crop observation, agrometeorology

0 引言

农业气象观测是气象为农服务和科研工作的基础, 目前我国农业气象观测主要包括作物、土壤水分、自然物候、农业小气候以及畜牧、果树、林木、养殖渔业和蔬菜等^[1]。中国气象局在20世纪50年代开始构建农业气象观测站网, 统一观测技术规范 and 资料传输方式, 获取科学、客观的基础观测数据, 在防灾减灾、趋利避害和粮食安全生产中发挥了重要作用^[2-3]。

随着科学技术以及新兴科技的发展, 我国农业正在由传统农业向现代农业转变, 在内容、时效、形式上对气象服务提出了新的要求。农业气象观测作为气象服务的基础支撑, 传统农业气象观测已经远不能

满足现代农业生产的需求, 目前我国农业气象观测正由人工观测向自动化、智能化观测转变, 利用近地面摄像设备、无人机、卫星等多种设备和技术手段, 开展农作物生长状况、土壤墒情、农业气象灾害、农业小气候等要素的自动化观测。自动化观测初始于20世纪90年代, 我国科研工作者利用卫星遥感在农用地资源监测和保护、农作物长势监测和估产、农业气象灾害监测与预测等方面展开深入研究^[4-6], 卫星遥感土壤墒情也得到了发展^[7-9]。2000年以来, 采用频域反射(FDR)或时域反射(TDR)原理研制的土壤水分自动监测设备, 已经在全国范围内形成了覆盖不同气候区、土壤类型、生态下垫面的自动土壤水分观测网^[10-11]; 初步形成了满足不同服务需求的农业小气候观测站网; 基于生长模型和机器学习的作物田间自动化观测技术, 实现了作物形态结构的定量化模拟和可视化描述^[12-13], 深度学习技术近年来在作物自动化观

收稿日期: 2021年4月29日; 修回日期: 2021年8月31日
第一作者: 孙景兰(1963—), Email: sunjlxj@163.com

测中也取得了较快发展。

1 农业气象自动化观测历程

我国农业气象观测站网始建于20世纪50年代，1955年发展到全国范围，六七十年代曾一度中断，20世纪80年代逐步恢复，截止到2020年，已经建成农业气象观测站653个，其中一级站398个，二级站255个，还有70个农业气象试验站，构建了覆盖作物、土壤水分、物候、特种农业等物理要素和生物要素的中国农业气象观测站网(图1)。同时也形成了系统、全面的农业气象人工观测技术规范，并不断修订和完善。1979年编制和出版了《农业气象观测规范》，1993年对原来的农业气象观测规范进行了修订。观测记录方式为目测或简单器测、手工记录，观测数据通过人工编制旬月报和墒情报进行传输，2013年停止编发旬月报和墒情报，数据通过“农业气象测报业务系统”(AgMODOS)以Z文件方式进行传输，2020年底传输方式升级为XML格式的标准化传输。



图1 农业气象观测站网布局

Fig. 1 Layout of agrometeorological observation stations

目前我国农业气象自动化观测已取得了初步成效。土壤水分自动化观测已在全国范围内业务化运行，农业小气候自动化观测也在逐渐开展，作物、物候自动化观测已取得初步成果，遥感监测精度进一步提升(图2)。农业气象自动化观测正在由单要素观测向多要素观测转变，最终形成作物及其生长环境综合性、智能化、空天地一体的观测系统。

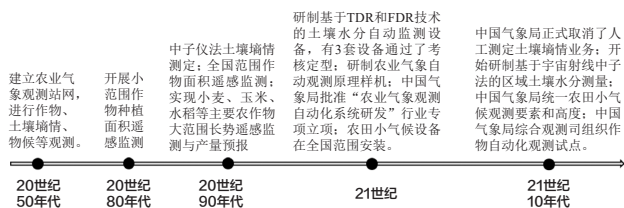


图2 农业气象观测发展历程

Fig. 2 The development of agrometeorological observation

1.1 土壤水分观测

土壤水分是土壤最重要的组成部分之一，是进行土壤水分分析的基础，对研究作物生长、节水灌溉等具有重要意义。

单点土壤水分人工观测：我国土壤水分观测开始于20世纪50年代，50年代初通过炒土称重法来测量土壤水分，随着电力普及，烘干设备升级为电烘箱，通过烘干称重法测定土壤水分，此种方法一直持续至现在(图3)。土壤水分人工观测地段分为三类：作物地段、固定地段、辅助地段；作物地段测定时间为每旬逢8进行，作物地段测定深度为0~50 cm，固定地段为0~100 cm；辅助地段观测时间和深度按服务需求进行。2013年，中国气象局正式取消了人工测定土壤水分业务。



图3 烘干称重法土钻和土盒
Fig. 3 The soil drill and box used in the drying weighing method

单点土壤水分自动观测：土壤水分自动化观测始于20世纪90年代的中子仪法，2000年开始研制基于TDR和FDR技术的土壤水分监测设备。截止到2009年，有3种自动土壤水分观测设备通过了考核定型，分别是DZN1型、DZN2型(图4)和DZN3型。自动土壤水分观测设备主要通过监测电磁脉冲信号在土壤中的传播时间来计算土壤体积含水量，具有快速、准确、连续等优势。目前土壤水分自动观测设备观测深度为100 cm，分为8个观测层次，分别是0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、70~80、90~100 cm，采集频次为10 min^[14-16]。2010年中国气象局颁布了《自动土壤水分观测规范》(试用)^[17]，统一了安装要求和数据传输格式，2013年，中国气象局正式取消了人工测定土壤水分业务，土壤水分自动化观测成为首个替代人工观测的业务项目^[18]。至2020年，我国共有2277个土壤水分自动观测设备通过田间标定和业



图4 DZN2型土壤水分仪
Fig. 4 DZN2 soil moisture meter

务验收,组成了全国自动土壤水分与干旱监测网络(图5),实现了土壤水分自动观测全覆盖。土壤水分观测数据主要用于农业气象旬月报、作物产量预报、土壤墒情监测公报、农业干旱监测预报等农业气象服务产品中。依据土壤水分自动化观测数据,国家级目前全国土壤墒情监测与评估日尺度的业务产品主要包括10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm等不同深度土壤相对湿度的5 km×5 km格点空间分布图,产品分为两类,分别是10~50 cm不同深度土壤墒情实况和实况墒情与前期墒情对比分析。

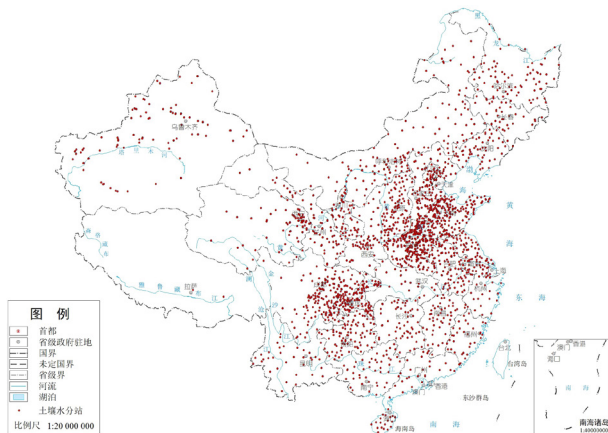


图5 土壤水分自动化观测站点分布
Fig. 5 Distribution of automatic soil moisture observation stations

区域土壤水分自动测定:利用TDR和FDR技术的土壤水分监测能够实现单点、自动、连续、精确监测,但监测范围小(1 m²内),难以得到土壤水分在一定地理区域分布上的信息,无法完全反映土壤水分的空间变异性。基于宇宙射线中子法进行的区域土壤水分测定技术在2014年进行研发,目前已取得阶段性进展,在河北、内蒙、西藏等地安装试用^[19](图6)。基于宇宙射线中子法进行的区域土壤水分测量,依据近地表宇宙射线快中子强度与土壤含水量呈反比关系,反演出土壤含水量。该方法能够实现百米范围的监测尺度,填补了



图6 区域土壤水分测量设备(河北保定)

Fig. 6 Regional soil moisture measuring equipment in Baoding, Hebei Province

传统点测量和遥感大范围监测的尺度空缺,为中小尺度气象、生态、水文、农业、大气科学等研究提供一种新的土壤水分监测技术。该方法具有无污染、连续、被动、免标定、非接触原位测量等优势,使得其在土壤水分监测研究中备受瞩目,发展前景良好。

1.2 农田小气候观测

农田小气候是农田—植被—大气所构成的连续体中各组成部分之间物质输送和能量转换的最终体现,它反映了农田内部的气象环境条件,对农作物的生长发育和产量以及病虫害都有很大的影响^[20-21]。不同作物,不同植株密度、行向、生育期和叶面积大小等都能形成特定的小气候^[22-25]。

在《农业气象观测规范》下卷中,详细规定了农田小气候观测仪器精度及不同场景下小气候观测方法、观测时间及数据处理等^[26]。受当时人力、物力及技术条件限制,人工观测需耗费大量人力,农田小气候观测未纳入业务,温度、空气相对湿度、风速等数据通常使用当地气象站资料替代,数据代表性较差。随着现代农业的发展,这种矛盾更加严重,各地为解决精细化农业的需求,农田小气候自动化观测在2000年后进入了大发展阶段。

目前我国农田小气候观测应用于多个领域,在业务服务中的应用也进行了初步探索^[27-28]。农田小气候观测设计包含观测项目和观测梯度。观测项目,即所要观测的农田小气候要素,依据观测目的确定。观测梯度,即气象要素在不同高度上的数值,因此高度的确定对观测结果至关重要。2018年中国气象局综合观测司颁布了《农业小气候自动观测规范(试行)》,对农田小气候的观测要素和高度进行了统一。观测要素包括:气温、空气相对湿度、风速、风向、雨量、地温、土壤水分、冠层叶温、光合有效辐射、总辐射,并对观测梯度依据不同的下垫面条件进行了规范。自2000年起,全国各地为满足高标准粮田、特色作物等服务需求,安装了1096套农田小气候观测仪(图7),观测数据主要用于特色农业气象服务及农业气象灾害评估中,依据不同的服务需求,形成专项产品或不定期产品服务当地农业。

1.3 作物观测

作物观测通过观测作物生长发育进程,为高产、优质、高效农业服务。作物作为一个有机的生命体,生育体征随着生育阶段不断变化,随着计算机图像处理技术的进步,作物生育状况识别成为可能。

2000年,广西气象减灾研究所同南京农业大学成功研制了农业气象自动观测原理样机,观测内容包

括田间小气候的气温、空气湿度、气压、风、降水等气象要素以及作物发育期等物候信息、冠层遥测温度、光合有效辐射、土壤温度、土壤湿度等农田小气候信息和地表水位、地下水位等环境信息^[29]。在此基础上，2009年中国气象局设立行业专项《农业气象观测自动化系统研发》，研究作物发育期、株高、盖度等自动观测技术方法，设计的自动农业气象观测系统分为硬件系统和软件系统，硬件系统包括作物生长自动采集传感器、农田小气候观测传感器、数据采集器等，软件系统包括资料自动采集和控制软件、信息处理与应用软件^[30]。此外，我国还有多名学者也进行了研究，利用计算机深度学习、图像处理等技术方法，对作物发育期、叶面积、密度及覆盖度等进行研究，取得了多方面的成果^[31-35]。

2009年，中国气象局开始规划现代农业气象观测业务，调整站网布局和观测项目，改进观测设备和手段，大力发展自动化农业气象观测，组建观测站

网，实现土壤水分、农田小气候实时、在线、自动化观测。2016年，中国气象局综合观测司组织，河南省气象局牵头，多个单位参与，先后在河南、新疆、广西、内蒙古四个省（区）的13个农业气象观测站开展了自动化观测试点工作。中国气象局气象探测中心依托自动化观测试点工作设计开发了农业气象自动化观测系统，实现数据收集、质控、存储、查询、统计、分析等功能，平台支持数据质量监视、作物生长特征识别、设备运行状态监视、数据产品和二次产品显示等功能（图8）。农业气象自动化观测试点作物包括小麦、玉米、水稻、棉花四种大宗农作物，三家企业参与，观测项目包括：发育期、密度、冠层高度、生长状况、叶面积指数、干物质质量及覆盖度七项要素。目前作物发育期、生长状况、冠层高度、稀植作物密度等（图9），已具备业务推广条件，而叶面积指数、干物质质量、密植作物密度精度较低，需优化算法或识别技术。



图7 农田小气候观测设备
Fig. 7 Farmland microclimate observation equipment

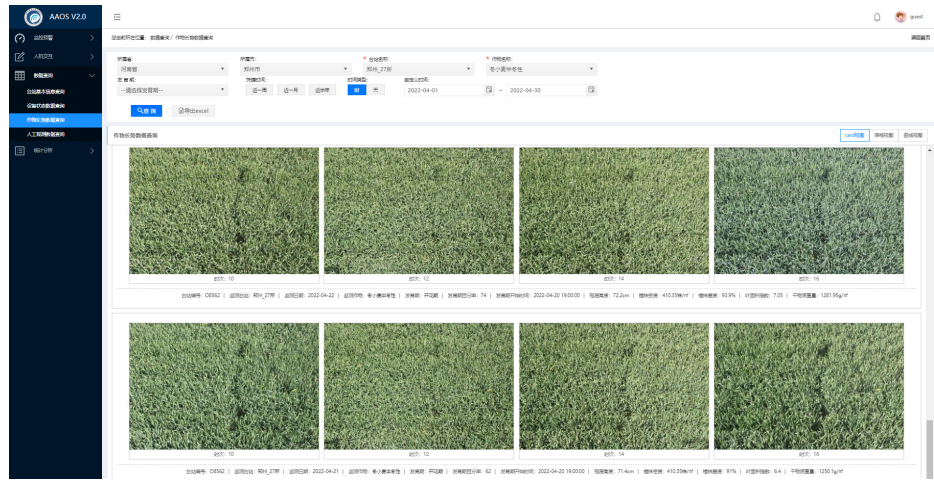


图8 农业气象自动化观测系统
Fig. 8 Automatic observation system of agrometeorology

作物发育期自动化观测原理是基于图像特征，利用计算机深度学习，辨识作物发育进程。就发育期特征而言，出苗、抽穗、开花等外形特征明显的发育期精度较高，越冬开始、拔节、乳熟等外形特征不明显的发育期精度稍低；就作物而言，植株个体较大，外形特征随生长发育变化明显的作物发育期识别精度较高。植株较小，种植方式为密植，植株间遮挡率较高的作物发育期识别精度稍低。冠层高度采用标杆或激光测高方法，精度基本满足了业务需求。玉米密度精度较高，而其余作物密度精度较低。以河南省小麦（密植、矮秆）、玉米（稀植、高秆）为例（表1~表3）。数据来源于中国气象局综合观测司组织的农业气象自

动化观测试点。

1.4 农业遥感观测

精准农业需要准确、及时地获取农田信息，卫星遥感和无人机遥感探测技术具有时效性强、成本低、大面积同步观测的优势，在农业气象观测中，可以弥补地面观测人工成本高和时效性差的不足，具有广泛的应用前景。针对农田环境与作物生长监测，卫星遥感与无人机遥感可以识别作物种类，估算作物种植面积，反演叶面积指数、覆盖度、株高、叶温等，监测作物长势、营养情况、土壤墒情，并可应用于农业气象灾害损失评估^[36]。我国的农业遥感也从依赖国外遥感数据到自主国产卫星遥感数据，通过航空遥感、无



图9 作物自动化观测设备
Fig. 9 Automatic crop-meteorological observation equipment

人机、地面近距离遥感等多种方式并用，形成“天-地-空”一体化的农业遥感信息协同综合获取的技术体系。

我国最早的作物种植面积遥感监测是1983年利用Landsat MSS影像和航片，采用目视解译的方法获得京津冀地区冬小麦面积的空间分布。到20世纪90年代末期开展了全国范围作物面积遥感监测，目前已实现对中国和世界粮食主产国多种大宗作物

面积遥感监测的业务运行。早期的作物面积遥感监测一般选择抽样调查，或全覆盖两种方式进行。随着中高空间分辨率遥感数据源的逐渐增多，在作物面积监测时，逐渐开始向中分辨率影像全覆盖监测方式转

表1 冬小麦发育期自动化观测绝对误差(单位: d)

Table 1 Absolute error of automatic observation during the winter wheat growing stage (unit: d)

年份	出苗	三叶	分蘖	越冬开始	返青	拔节	抽穗	开花	乳熟	成熟
2017	1.5	3.0	2.5	3.0	19.0	6.0	2.5	3.5	3.0	6.0
2018	2.5	5.0	7.5	7.5	3.0	3.7	1.3	1.3	2.0	3.0
2019	1.3	4.7	2.7	23.0	9.7	6.3	7.3	1.0	3.0	5.5
2020	1.3	1.3	3.0	5.0	1.3	11.7	2.0	3.0	3.0	3.7

表2 夏玉米发育期自动化观测绝对误差(单位: d)

Table 2 Absolute error of automatic observation during the summer maize growing stage (unit:d)

年份	出苗	三叶	七叶	拔节	抽雄	开花	吐丝	乳熟	成熟
2017	0.6	1.0	2.5	1.8	1.3	2.5	1.3	4.0	6.5
2018	1.1	0.9	3.2	8.2	4.3	4.2	4.9	6.2	10.8
2019	2.9	1.0	4.3	4.3	2.2	4.9	4.3	8.0	9.1
2020	1.8	2.2	3.1	3.3	2.4	2.0	2.7	6.1	2.0

表3 冬小麦冠层高度和夏玉米冠层高度及密度误差

Table 3 Error of canopy height and density in summer maize and winter wheat

误差分析	小麦冠层高度/cm				玉米冠层高度/cm				玉米密度/株*m ⁻²			
	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020	2017	2018	2019	2020
绝对误差	7.7	15.9	15.8	7.9	25.9	15.8	31.6	25	1.7	0.2	0.8	0.7
相对误差	15%	18%	19%	15%	18%	9%	22%	17%	30%	4%	12%	12%

变。高分卫星的成功发射，为我国作物种植面积遥感监测提供了更多的有效数据^[37]。

20世纪90年代我国初步实现了小麦、玉米、水稻、大豆等主要农作物大范围长势遥感监测与产量预报^[38]，所用遥感数据以中、低空分辨率NOVAA/AVHRR、EOS/MODIS、SPOT/VGA和FY卫星等多光谱遥感数据为主。随着高分系列卫星陆续发射，HJ-1A/B、GF-1、GF-2等卫星的高分辨率遥感数据也在作物长势监测和产量估算中得到一定应用。随着遥感同化技术的发展，基于遥感数据同化作物生长模型的农作物产量模拟技术逐渐成为前沿和有发展潜力的应用研究领域。不同主流模型、不同同化方法支持下的作物单产模拟比较研究，为提高农作物单产定量化模拟的技术精度和水平发挥了重要作用。丁美花等使用500 m空间分辨率的MODIS数据监测甘蔗长势，并结合30 m空间分辨率的ETM数据支持甘蔗产量估算^[39]。杨贵军等基于无人机多光谱影像和氮素优化算法对小麦潜在产量进行了预测^[40]。目前国家气象中心基本建立了北美、南美、欧盟、东南亚等粮食主产国作物产量遥感估算方法并形成了业务服务能力，针对美国大豆、玉米、小麦，建立了作物产量逐月遥感预报模型。国家气象中心每旬定期生成作物长势卫星遥感监测产品，将作物长势分为偏差、略偏差、持平、略偏好和偏好五个等级进行分析^[41]。

土壤含水量遥感反演方面，光学遥感数据目前仍然是土壤水分反演的主要数据来源，但微波遥感数据以及其与可见光/近红外、热红外之间的组合数据也受到越来越多的关注。反演技术方面，表观热惯量、温度植被指数TVDI和植被供水指数VSWI被广泛应用于土壤水分反演中。LAI的定量遥感反演数据源从单一类型的多光谱(如MODIS和TM等)，发展到目前被广泛应用的高光谱数据、激光雷达数据、高分数据以及无人机数据等^[42]。反演方法也逐步从经验统计方法向物理模型方法改进。卫星遥感土壤水分技术在地理信息系统(GIS)支持下，实现大区域土壤水分快速、及时、动态监测与评估，每旬定期生成格点产品，空间分辨率高、没有人为因素干扰，能够真实反映地面表层墒情^[43-45]。

近年来，高空间分辨率卫星遥感与无人机遥感被用于开展田块尺度的精密监测，无人机遥感兼具田间信息采集灵活、便捷的特点，较之传统卫星遥感手段在农业气象观测中更具应用优势^[46]。美国农业部采用无人机多光谱影像监测棉花病虫害，指导喷药作业^[47]。Bendig等基于无人机影像与作物冠层模型提取了作物冠层高度，并对作物生物量进行了估算^[48]。刘

峰等提出一种基于无人机多光谱影像的作物覆盖度估算方法,实现了板栗覆盖度监测与主要发育期监测^[49]。石涛等利用无人机多光谱遥感反演叶面积指数,建立水稻高温胁迫遥感识别模型^[50]。无人机遥感目前还处在科研阶段,在业务中主要用于灾害或作物长势调查,还未正式纳入业务运行。

2 存在问题

农业气象观测对象以生命体为主,观测内容复杂多样,自动化进程推进较慢,在设备研发、验证、维护及数据应用等方面也存在诸多问题。

土壤水分自动观测设备维护、标定工作量大。目前普遍安装的FDR测定设备,虽然安装较为便利,数据实现分钟级采集,但在实际测量中,传感器易受土壤类型、质地、颗粒凝结、田间碎石等因素的影响,存在数据异常情况,同时也存在仪器故障或采算失败,致使观测数据需要人工进行修订。FDR安装后标定时间过长,需持续6个月跨越干湿两季,人工取土30次以上,耗时耗力,台站负荷较重,影响了设备的进一步推广,需进一步简化标定方法,减轻人工工作量。

作物自动观测作物较少、观测精度有待提高。作物观测目前仅有小麦、玉米、棉花、水稻等四种作物,观测项目也只有发育期、高度、密度等7项,还未完成仪器定型,仍处于试点阶段;作物发育期观测中,图像识别技术还需进一步提高,田间环境复杂、天气现象多变,相机拍摄光照强度不同、曝光不均衡等多种因素均影响图像质量。某些发育期外形特征不明显,如拔节、乳熟等发育期依靠图像识别不易抓取发育期特征值,需综合多种要素进行推算。例如冬小麦拔节期的图像特征无法提取,目前根据返青到拔节期常年 ≥ 0 °C的积温进行推算,造成精度较低。农业气象作物观测中不同作物特征差异显著,每一种作物都需要特定的识别程序,特色作物的自动化观测仍需进一步探索。已经开展自动化观测的作物,某些产量构成要素,如粒数、粒重等要素还需人工观测,自动和人工观测并存将是未来一段时间农业气象观测发展的趋势。

农田小气候观测缺乏数据质量控制,装备保障能力不足,未实现业务化运行。2016年中国气象局发布了《农业小气候自动观测站功能规格需求书》,但至今未有一家产品取得中国气象局气象装备许可。全国气象部门、农业部门因服务需要已经大范围布设农田小气候观测设备,但设备种类繁多、观测数据精度不高、缺乏连续性、没有建立有效的数据质量控制方法和业务流程,计量检定、维修维护等装备保障体系和

保障能力缺乏,是目前农田小气候观测存在的普遍问题。抓紧农田小气候设备的列装、建立数据质量控制流程和相应的装备保障体系是当前急需解决的问题。

遥感模型误差订正,反演值真实性检验能力不强。星一地一空互验与尺度转换是发展遥感协同观测所需解决的关键技术。目前遥感真实性校准站,遥感模型误差订正,反演值真实性检验能力不强,应选择特征均匀的试验区,采用多点式地面观测获取作物参数的相对真值,并开展地面遥感信号和非遥感参数观测,通过地面同尺度遥感反演值和相对真值获取模型误差。在此基础上,以无人机遥感为中间的连接尺度,对星基—空基—地基不同尺度多级反演结果进行多尺度转换,并对地基资料与无人机高空间分辨率影像、无人机高空间分辨率影像与中低空间分辨率卫星影像、以及多种卫星资料之间同面积同模型的结果一致性进行检验,确定模型误差并进行反馈纠正,改进模型。

自动观测数据的分析与应用需进一步加强。加快提升小麦、玉米、棉花、水稻四种作物主要发育期精度,增加观测服务中必需的作物观测要素,对土壤水分自动观测数据进行必要的订正,分析农田小气候观测要素与气象站观测场之间由于观测设备、安装高度不同而造成的差异,修订作物温湿度指标。充分利用已有的自动观测数据,建立标准统一的农业气象自动化观测系统。

3 未来发展趋势

针对国家生态建设的要求,未来应推进农业气象观测向生态气象观测拓展,利用多源观测技术形成协同观测,进行星—空—地协同、天—空—地一体化农业气象综合立体观测。立足生态文明建设和气候变化应对服务需求,统筹考虑各类观测业务发展,按照“一站多用、一网多能”原则,在已有农业气象观测任务的基础上,增加土壤、生物、水环境等生态要素的自动化观测,推动农业气象观测向生态气象观测转型。

推进自动与人工相结合的农业气象观测业务。未来几年农业气象观测业务将以自动观测为主、人工观测为辅,部分不能实现自动观测的项目由人工进行辅助观测,确保数据的完整性和准确性。农业气象自动化观测短期内不追求全面无人化,在发育期等要素实现自动化的前提下,部分项目长期保留人工辅助观测。农业气象业务人员在承担农业气象服务工作的同时,承担人工辅助观测工作,避免业务人员脱离农业生产实际。据测算,发育期的观测工作量占据了农业气象总观测量的一半以上。发育期实现自动观测后,

消耗在路途上的时间将大幅度降低, 自动化观测将替代多数发育期观测及巡视工作, 小麦全生育期观测工作量将减少约2/3, 玉米工作量减少1/2, 极大减轻了人员的工作量。

改进土壤水分和农田小气候自动化观测技术。优化单点自动土壤水分观测设备田间标定技术和流程, 加快农业小气候观测设备和区域自动土壤水分观测设备列装, 开展土壤水分和农田小气候观测数据质量控制技术研究, 提高土壤水分和农田小气候观测数据质量, 构建保障有力的装备保障体系, 推进土壤水分和农田小气候观测数据应用工作。

研发农业气象观测项目参数反演技术与融合产品, 强化新一代静止、极轨气象卫星观测应用, 逐步改变农业气象以地面观测为主的现状。针对现代农业发展的需求, 利用多源观测技术形成协同观测, 开展农作物长势监测、作物产量预测、农业气象灾害监测与评估等。利用无人机、卫星遥感技术, 进行星—空—地协同、天—空—地一体化农业气象综合立体观测, 利用多源遥感数据开展农业气象观测参数反演技术与融合产品研发, 做好指标体系、相互验证、尺度转换等方面工作。建设农业气象遥感地面校准站。选择部分基础较好的观测站, 建立与地基、空基观测相配套的农业气象地基观测网络, 实现农作物生长与农田环境参数长期、连续的定位观测, 探索地基定点观测与卫星大尺度遥感、无人机百米至公里尺度的无缝隙、多尺度的立体观测技术。基于卫星遥感与无人机遥感, 结合作物生育期、苗情、灾情等观测需求, 开展各类农田参数的地面对比观测试验和可视化、实时、动态、连续、定量的监测, 经过对各类农田信息的整理分析, 制定综合多源星—空—地协同反演产品的作物长势和农业气象灾害监测指标, 开展协同反演数据集在作物长势监测、估产、农业气象灾害监测方面的适用性研究, 为星—空—地协同观测在农情监测、田间管理、产量估测等方面的业务化推广应用提供技术支撑。

发展农业气象移动观测。目前农业气象观测获取的数据多数还是针对定点作物及其生长环境, 不能完全代表区域范围的特性, 特别是在一些农事关键时期, 如预测粮食产量、评估灾害影响等情况, 需要扩大观测范围, 移动调查资料作为定点观测的补充。目前在灾害大范围发生时, 我国农业气象移动观测能力不足, 硬件装备和软件传输均不能满足需求, 不能很好地发挥效益。定点观测和移动观测互相补充, 同时结合遥感定量反演资料, 进行综合观测数据的时空耦合和同化, 实现对区域内作物生长状况的全面监测是

当务之急。

未来农业气象观测将从人工观测向自动化、智能化观测发展, 从单一观测向综合立体观测发展, 利用多种手段、多种技术实现高精度、高时空分辨率的连续、自动一体化定量观测, 满足现代农业精细化服务的需求。

参考文献

- [1] 中国气象局. 农业气象观测规范(上卷). 北京: 气象出版社, 1993.
- [2] 王建林. 现代农业气象业务. 北京: 气象出版社, 2010.
- [3] 侯英雨, 张蕾, 吴门新, 等. 国家级现代农业气象业务技术进展. 应用气象学报, 2018, 29(6): 641-656.
- [4] 余卫东, 杨光仙, 张志红. 我国农业气象自动化观测与展望. 气象与环境科学, 2013, 36(2): 66-71.
- [5] 邢素丽, 张广禄. 我国农业遥感的应用现状与展望. 农业工程学报, 2003, 19(6): 174-178.
- [6] 山西省农业遥感中心. 山西农业遥感发展和展望. 地球信息科学, 2001, 4: 34-36.
- [7] 周磊, 武建军, 张洁. 以遥感为基础的干旱监测方法研究进展. 地理科学, 2015, 35(5): 630-636.
- [8] 郭锐, 王小平. 遥感干旱应用技术进展及面临的技术问题与发展机遇. 干旱气象, 2015, 33(1): 1-18.
- [9] 张佳华, 侯英雨, 毛飞, 等. 基于遥感的华北地区作物干旱时空监测研究. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 255-259.
- [10] 曹婷婷, 邵楠, 李巍. 影响全国自动土壤水分站运行能力因素分析. 气象水文海洋仪器, 2017, 34(4): 27-32.
- [11] 吴东丽, 梁海河, 曹婷婷, 等. 中国自动土壤水分观测网运行监控系统建设. 气象科技, 2014, 42(2): 278-282.
- [12] Moraes Frasson R E, Krajewski W F. Three-dimensional digital model of a maize plant. Agricultural and forest meteorology, 2010, 150(3): 478-488.
- [13] 郭新宇, 赵春江, 刘洋, 等. 基于生长模型的玉米三维可视化研究. 农业工程学报, 2007, 23(3): 121-125.
- [14] 冶林茂, 吴志刚, 牛素军, 等. Gstar-I型电容式土壤水分监测仪设计与应用. 气象与环境科学, 2008, 31(3): 82-85.
- [15] 陈海波, 冶林茂, 李树岩, 等. FDR土壤水分自动监测仪的标定与检验. 微机计算机信息, 2009, 25(11): 104-106.
- [16] 郭卫华, 李波, 张新时, 等. FDR系统在土壤水分连续动态监测中的应用. 干旱区研究, 2003, 20(4): 247-251.
- [17] 中国气象局. 自动土壤水分观测规范(试行). 北京: 中国气象局, 2010.
- [18] 王建国, 孙景兰. 现代农业气象观测技术方法. 北京: 气象出版社, 2014.
- [19] 贾晓俊, 施生锦, 黄彬香, 等. 宇宙射线中子法测量土壤水分的原理及应用. 中国农学通报, 2014, 30(21): 113-117.
- [20] 翁笃鸣, 陈万隆, 沈觉成, 等. 小气候和农田小气候. 北京: 农业出版社, 1981.
- [21] 方文松, 朱自玺, 刘荣花, 等. 秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究. 干旱地区农业研究, 2009, 27(6): 123-128.
- [22] 李全起, 陈雨海, 于舜章, 等. 灌溉与秸秆覆盖条件下冬小麦农田小气候特征. 作物学报, 2006, 32(2): 306-309.
- [23] 朱自玺, 方文松, 赵国强, 等. 麦秸和残茬覆盖对夏玉米农田小气候的影响. 干旱地区农业研究, 2000, 18(2): 19-24.
- [24] 刘海军, 康跃虎, 刘士平. 喷灌对农田小气候的影响研究. 中国生态农业学报, 2003, 11(4): 103-107.
- [25] 葛道润, 曹宏鑫, 夏礼如, 等. 苏北农田林网对稻田小气候及水稻光合作用和产量的影响. 江苏农业学报, 2009, 25(5): 945-951.
- [26] 中国气象局. 农业气象观测规范(下卷). 北京: 气象出版社, 1993.
- [27] 李翠娜, 张雪芬, 李肖霞, 等. 农田小气候自动观测系统温度梯度观测设计. 气象科技, 2015, 43(1): 8-14.
- [28] 王柏林, 朱成欣, 阳艳红. 农田小气候自动气象观测系统. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(4): 1-3, 7.
- [29] 刘志平, 孙涵, 胡萌琦. 农业气象自动化观测原理样机的研制. 安

(下转29页)

- Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11: 4015-4024.
- [99] Saxena V K, Weintraub D C. Ice forming nuclei concentrations at Palmer Station, Antarctica. *Atmospheric Aerosols Nucleation*, 1988, 309: 679-682.
- [100] 游来光, 石安英. 北京春季大气冰核浓度变化特点的观测分析. *气象学报*, 1964, 34(4): 548-554.
- [101] 汪学林, 张万钧, 熊尚清. 白城地区春季的大气冰核. *气象学报*, 1965, 35(3): 223-239.
- [102] 赵剑平, 张溢, 王玉玺, 等. 我国北部地区大气冰核观测的分析和研究. *气象学报*, 1965, 35(4): 416-422.
- [103] 葛正谟, 周春科. 兰州市大气冰核的观测. *高原气象*, 1986, 5(2): 167-171.
- [104] 吴明林, 刘峻, 黄文娟, 等. 福建石塔山大气冰核的观测和分析. *热带气象*, 1986, 2(1): 72-78.
- [105] 黄文娟, 程铁军, 陈金荣, 等. 福建石塔山冰核浓度的观测结果. *南京气象学院学报*, 1986, 9(1): 62-68.
- [106] 陈金荣. 大气冰核浓度的测量及特征. *气象科学*, 1994, 14(2): 155-160.
- [107] 牛生杰, 安夏兰, 陈跃, 等. 贺兰山地区大气冰核浓度的测量及初步分析. *南京气象学院学报*, 2000, 23(2): 294-298.
- [108] 鄂大雄, 陈汝珍, 蒋耿旺. 黄土高原尘沙作为大气冰核的实验研究. *应用气象学报*, 1994, 5(2): 129-134.
- [109] 李娟, 黄庚. 黄河上游地区大气冰核浓度的观测研究. *气象*, 2001, 27(11): 8-12.
- [110] 马新成, 游来光, 王广河. 青海省河南县2002年秋季大气冰核观测的分析研究. *气象学报*, 2002, 28(增刊): 22-27.
- [111] 李淑日, 黄庚, 胡志晋. 黄河上游河南县地面大气冰核观测分析. *应用气象学报*, 2003, 14(增刊): 41-48.
- [112] 石爱丽, 郑国光, 游来光. 2003年秋季青海省河南县地面大气冰核观测分析. *应用气象学报*, 2006, 4(2): 245-249.
- [113] 李艳伟, 杜秉玉. 新疆天山山区大气冰核浓度的测量及分析. *南京气象学院学报*, 2003, 26(3): 364-370.
- [114] 张建新, 廖飞佳, 高子毅, 等. 夏季新疆中天山北坡大气冰核的浓度观测分析. *高原气象*, 2006, 25(1): 138-141.
- [115] 周德平, 洪也, 王扬锋, 等. 沈阳春夏季大气冰和浓度的观测研究. *气候与环境*, 2012, 17(6): 719-726.
- [116] Li L, Zhou D, Wang Y, et al. An observational study of atmospheric ice nuclei number concentration during three fog-haze weather periods in Shenyang, northeastern China. *Atmospheric Research*, 2017, 188: 11-19.
- [117] 周德平, 李炳昆, 陈光, 等. 用5L混合云室观测抚顺市大气冰核浓度. *气象与环境学报*, 2012, 28(6): 44-49.
- [118] 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 南京地区大气冰核浓度的测量及分析. *大气科学*, 2013, 37(3): 579-594.
- [119] 杨磊, 银燕, 杨绍忠, 等. 南京地区冬季大气冰核特征及其与气溶胶关系的研究. *大气科学*, 2013, 37(5): 983-993.
- [120] 苏航, 银燕, 陆春松, 等. 新型扩散云室搭建及其对黄山地区大气冰核的观测研究. *大气科学*, 2014, 38(2): 386-398.
- [121] Jiang H, Yin Y, Yang L, et al. The characteristics of atmospheric ice nuclei measured at different altitudes in the Huangshan Mountains in Southeast China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(2): 396-406.
- [122] Jiang H, Yin Y, Su H, et al. The characteristics of atmospheric ice nuclei measured at the top of Huangshan (the Yellow Mountains) in Southeast China using a newly built static vacuum water vapour diffusion chamber. *Atmospheric Research*, 2015, 153(1): 200-208.
- [123] 苏正军, 郑国光, 关立友. 人工冰核的核化速率试验. *气象*, 2010, 36: 46-49.
- [124] 陈丽, 银燕. 沙尘气溶胶对大气冰相过程发展的敏感性试验. *气象科学*, 2009, 30(5): 2208-2213.
- [125] 李丽光, 周德平. 大气冰核研究进展. *高原气象*, 2011, 30(6): 1716-1721.
- [126] 杨绍忠, 郑国光, 楼小凤. 一种移动式混合云室装置. 中国, 实用新型专利, 200420003595.8.2005, 1, 26.
- [127] Fletcher N H. *Physics of rain clouds*. Cambridge: Cambridge University Press, 1962: 386.
- [128] Young K. The role of contact nucleation in ice phase initiation in clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1974, 31: 768-776.
- [129] Meyers M P, DeMott P J, Cotton W R. New primary ice-nucleation parameterizations in an explicit cloud model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1992, 31(7): 708-721.
- [130] Cotton W, Anthes R. *Storm and clouds dynamics*. Academic Press, 1989: 833.
- [131] Phillips V, DeMott P J, Andronache C. An empirical parameterization of heterogeneous ice nucleation for multiple chemical species of aerosol. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2008, 65(9): 2757-2783.
- [132] Cooper W A. A method of detecting contact ice nuclei using filter samples. In: *Eighth international conference on cloud physics*. France: Clermont-Ferrand, 1980: 665-668.
- [133] 蒋惠, 银燕, 高仁杰, 等. 2012年秋季黄山地区大气冰核的观测分析. *科学技术与工程*, 2016, 16(28): 17-24, 36.
- [134] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

(上接29页)

- 徽农业科学, 2010, 38(17): 9287-9289.
- [30] 张雪芬, 薛红喜, 孙涵, 等. 自动农业气象观测系统功能与设计. *应用气象学报*, 2012, 23(1): 105-112.
- [31] 李翠娜, 石广玉, 余正泓, 等. 农作物实景监测中的图像数据质量控制方法研究. *气象*, 2020, 46(1): 119-128.
- [32] 陆明, 申双和, 王春艳, 等. 基于图像识别技术的夏玉米生育期识别方法初探. *中国农业气象*, 2011, 32(3): 423-429.
- [33] 李明, 张长利, 房俊龙. 基于图像处理技术的小麦叶面积指数的提取. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 205-209.
- [34] 刘航, 刘涛, 李世娟, 等. 基于深度残差网络的麦穗回归计数方法. *中国农业大学学报*, 2021, 26(6): 170-179.
- [35] 李存军, 王纪华, 刘良云, 等. 基于数字照片特征的小麦覆盖度自动提取研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2004, 30(6): 650-656.
- [36] 纪景纯, 赵原, 邹晓娟, 等. 无人机遥感在农田信息监测中的应用进展. *土壤学报*, 2019, 56(4): 773-784.
- [37] 马玉平, 王石立, 张黎, 等. 基于遥感信息的华北冬小麦区域生长模型及模拟研究. *气象学报*, 2005, 63(2): 204-215.
- [38] 江东, 王乃斌, 杨小唤. 我国粮食作物卫星遥感估产的研究. *自然杂志*, 1999, 21(6): 351-355.
- [39] 丁美花, 钟仕全, 谭宗琨, 等. MODIS与ETM数据在甘蔗长势遥感监测中的应用. *中国农业气象*, 2007, 28(2): 195-197.
- [40] 杨贵军, 李长春, 于海洋, 等. 农用无人机多传感器遥感辅助小麦育种信息获取. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 184-190.
- [41] 钱永兰, 侯英雨, 延昊, 等. 基于遥感的国外作物长势监测与产量趋势估计. *农业工程学报*, 2012, 28(13): 166-171.
- [42] 贾玉秋, 李冰, 程永政, 等. 基于GF-1与Landsat-8多光谱遥感影像的玉米LAI反演比较. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 173-179.
- [43] 肖国杰, 李国春. 遥感方法进行土壤水分监测的现状与进展. *西北农业学报*, 2006, 15(1): 121-126.
- [44] 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用气象卫星监测土壤水分的试验研究. *应用气象学报*, 1994, 5(2): 312-317.
- [45] 田国良. 土壤水分的遥感监测方法. *环境遥感*, 1991, 6(2): 89-99.
- [46] 金伟, 葛宏立, 杜华强, 等. 无人机遥感发展与应用概况. *遥感信息*, 2009, 1: 88-92.
- [47] Huang Y, Lan Y, Hoffmann W C. Use of airborne 8 multi-spectral imagery in pest management systems. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal*, 2008, 10: IT-07-010.
- [48] Bendig J, Yu K, Aasen H, et al. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2015, 39: 79-87.
- [49] 刘峰, 刘素红, 向阳. 园地植被覆盖度的无人机遥感监测研究. *农业机械学报*, 2014, 45(11): 250-257.
- [50] 石涛, 杨大明, 黄勇, 等. 无人机多光谱遥感监测水稻高温胁迫的关键技术. *中国农业气象*, 2020, 41(9): 597-604.