

大数据时代精准施肥模式实现路径 及其技术和方法研究展望

何山, 孙媛媛, 沈掌泉, 王珂*

(浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江杭州 310058)

摘要: 自上世纪 70 年代起, 我国开展了田间养分精准管理方法与技术的研究和推广, 包括测土配方施肥、土壤养分测试和作物营养诊断, 积累了大量土壤类型、肥力等基础数据以及农村地籍调查、农业普查、作物需肥规律等田间养分管理相关数据。但田间养分精准管理目前依旧存在重研究、轻应用, 重理论、轻技术, 专业分工太细, 分割化、碎片化严重, 传统与现代融合不够, 可实际应用的产品、技术较少, 农户体验差等问题。日渐成熟的信息互联、互通、互享技术与平台, 功能日益强化的人工智能技术等, 为实现田间养分管理走向精细化、信息化与系统化, 进而为实现跨越式发展提供了契机。本文从我国农田经营分散的实际国情出发, 根据精准施肥原理、认识与定位, 提出了“基准+精准”模式的田间养分管理方案, 以测土配方施肥为基础, 结合数据挖掘技术对现有数据进行综合分析, 更新制定当年田间养分管理“基准”施肥方案, 包括基肥和追肥的施用数量及施用时间, 同时利用云 GIS 可实现农田数据的空间信息化和施肥方案田块化管理的可视化, 为移动端施肥方案的推送和实现田块尺度上的信息化精细管理奠定基础。以数字图像无损诊断作为技术支撑, 通过机器学习作物数字图像特征参数来建立营养诊断模型, 判断得出作物营养胁迫种类及程度, 从而对当季田间作物长势及营养状况进行准实时监测与评价, 进而实现对田间“基准”施肥方案特别是追肥施用的“精准”修正。最后通过构建“云+手持终端+数字图像”系统架构实现“基准方案推送—无损诊断—精准修订—成效反馈—方案优化”的动态实施和更新, 对测土配方施肥技术体系进行完善, 同时实现相关成果更新和持续利用, 解决成果应用的“最后一公里”问题。

关键词: 测土配方施肥; 精准施肥; 大数据分析; 光谱营养诊断; “基准+精准”养分管理模式

Advances in coupling big data technique with nutrient site-specific management: scheme, methods and outlook

HE Shan, SUN Yuan-yuan, SHEN Zhang-quan, WANG Ke*

(Institute of Agriculture Remote Sensing and Information Technology Application, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In this review, the methods and techniques of the field nutrient precision management were summarized, including soil testing and formulated fertilization technique, soil nutrient testing technique and crop nutrition diagnosis technique. The long term promotion of precise nutrient management work in our country has accumulated large amounts of soil types, soil fertility and other basic data, as well as some data related to field nutrient management, such as rural cadastral survey, agricultural census, characteristics of crop's demand for nutrient and so on. However, some shortages remind to deal with. A lot of attention has been paid on theoretical researches but less on the application of the technical researches. The researchers are in state of over-divided and fragmented, hardly connecting traditional field nutrient managements with modern precision ones. The research achievements are also need to be modified for better practical application for both

收稿日期: 2017-08-14 接受日期: 2017-10-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31172023, 30571112); 863 自由探索项目(2006AA10Z104)资助。

作者简介: 何山(1991—), 女, 山东五莲人, 博士研究生, 主要从事农田养分信息化、精细化管理研究。E-mail: heshan33@zju.edu.cn

* 通信作者 王珂(1964—), 男, 浙江嘉兴人, 博士, 教授, 主要从事资源环境遥感监测、评价、规划及其信息系统研制。

E-mail: kwang@zju.edu.cn

technicians and farmers. Nowadays, the big data technology provides solutions for the explosive growing data integration, exchanging and sharing. In this review, a fertilization management scheme of “basic fertilization and precise adjustment” was proposed by using the big data technology. Firstly, the basic fertilization plan was created through a comprehensive analysis and data mining, combined with the principle of formulated fertilization technique. The basic plan included the time and quantity of basal and top-dressed fertilizers. At the same time, the spatial visualization of field management of fertilization scheme could be realized by the use of cloud GIS, which laid the foundation for pushing fertilization scheme on mobile terminal and realizing the spatial and precise management of field information. The type and degree of crop nutritive stress were recognized by the nondestructive diagnostic technology such as digital image processing and the nutritional diagnostic model by machine learning characteristic parameters of crops. Therefore, the near-real-time monitoring and diagnosing could be performed to generate a precise adjustment to the quantity of topdressing in basic fertilization plan. An operating mode of “Pushing basic fertilization scheme, nondestructive diagnosing, precise adjusting, receiving feedback and optimizing the scheme” by the system framework of “cloud technique, handheld terminal and digital image” was proposed to support the application and updating of the fertilization scheme.

Key words: soil testing and formulated fertilization; precision fertilization; big data analysis; spectral analysis for nutrition diagnosis; basic fertilization and precise adjustment for nutrition management

建国以来,我国开展了两次全国性的土壤普查,并大力推进测土配方施肥和耕地地力调查等系列工作,但化肥过量施用现象依旧普遍。据2015年世界粮农组织(FAO)统计,我国化肥平均施用量为 643.9 kg/hm^2 ,是世界平均施肥水平的4.62倍^[1]。2010年我国环保部发布的《第一次全国污染源普查公报》指出,我国农业面源污染已超过点源污染,成为水环境污染的最大污染源,而其中化肥的过度施用是引起相关污染的重要原因之一。为此,国家提出“化肥减量工程”以进一步提高区域耕地保护与管理水平和实现农业可持续发展。2015年农业部制定的《到2020年化肥使用量零增长行动方案》指出“力争到2020年,主要农作物化肥使用量实现零增长”。所以,如何集成现有海量土壤养分和施肥管理的数据、技术和成果,并通过现代信息技术转化为农技人员和农户提供更容易接受与采纳的服务方案和产品,是目前农业“减肥工程”迫切需要解决的重点工作之一。因此,建立一套基于大量土肥基础信息与当前科研和应用成果,又体现信息时代优势与特点的经济、高效、可持续的土壤养分管理和精准施肥模式及其支撑技术体系意义重大。

1 研究进展、存在问题以及基于大数据时代的对策

1.1 研究进展

1.1.1 数据积累 随着测土配方施肥的实施和农业信

息技术的大范围应用与普及,土肥数据量呈爆炸式增长。据统计,从2005年至2014年底,我国测土配方施肥工程共采集土壤样品1798万个,获得分析数据1.24亿个^[2],并且在土壤测试的基础上开展耕地地力专题调查,建立耕地土壤丰缺指标,开发县域耕地资源管理信息系统,初步摸清了1857个项目县(场)14亿亩耕地土壤养分状况^[2],建立了丰富多元化的土壤数据库。与此同时,广泛开展主要农作物的肥效试验,试验数累计达33万多个,初步摸清了土壤供肥量、肥料利用效率等基本参数,基本掌握了水稻、小麦、玉米等主要作物需肥规律,并向农户发放施肥建议卡共9.2亿份^[2]。以上工作积累了海量从县级到省级的土壤类型、土壤养分、土壤肥力等基础数据,以及农村地籍调查、农业普查、作物需肥规律、地形地貌、农田水利设施等与养分精准管理过程密切相关的空间数据和属性数据,为进一步制定合理的田间施肥方案、引导科学施肥等奠定了坚实基础。

1.1.2 原理和理论 科学施肥需要遵循一定的原理和理论。1840年,德国化学家李比希创立矿质养分归还学说,提出植物从土壤中带走的养分,需通过施肥的方式归还^[3],最小养分律、报酬递减律、营养元素的同等重要与不可替代律等,这些经典的施肥理论在指导田间合理施肥的历史进程中发挥了重要作用,也是未来精准养分管理、决策的重要理论依据^[4]。测土配方施肥是联合国在全世界推行的先进农业技

术,是目前世界公认的科学施肥方法之一。所谓测土配方是指通过测定土壤养分含量来因地制宜地制定田间施肥方案。测土配方施肥也是我国田间养分管理具有里程碑式的工作,取得了巨大的经济和社会效益。

1.1.3 方法与技术

1) 测土配方施肥是制定田间养分管理基础方案的方法依据。经典测土配方施肥方法主要包括地力分区配方法,目标产量配方法(养分平衡法、地力差减法),田间试验法(肥料效应函数法、养分丰缺指标法、NPK 比例法)。测土配方施肥方法所形成的一套包括“测土、配方、配肥、供应、施肥指导”五个核心环节的成熟理论体系对作物田间养分管理方案的制定具有重要的指导意义^[5]。

2) 土壤养分测试是制定田间养分管理基础方案的核心内容。传统的土壤养分测试技术主要为室内土样化学分析。随着现代化农业的发展,各种土壤养分测试新技术不断出现,包括高光谱遥感反演技术、多光谱遥感回归分析技术以及应用电磁感应传感器、探地雷达等设备原位获取田间土壤养分信息等新技术^[6-8],为快速、有效获取土壤养分状况提供了可能。

3) 作物营养诊断是实现作物田间养分精准管理的技术支撑。植物营养诊断技术主要包括专家经验判断、室内化学分析以及田间无损诊断技术。其中,田间无损诊断技术又包括 SPAD 测量技术、高光谱成像技术、数字图像诊断技术(数码相机、扫描仪等)以及航空、航天遥感技术等^[9-11]。

1.1.4 实践与成效 我国精准养分管理系列工作已取得了显著成效,在农业节本增效、增产增收等方面发挥了积极的作用。据农业部全国农业技术推广服务中心统计,目前全国测土配方施肥推广面积已近 14 亿亩,覆盖率达 60% 以上,而且我国 2015 年水稻、玉米、小麦三大粮食作物化肥利用率较 2005 年提高了 7.2 个百分点^[12];截至 2013 年底,全国累计减少不合理施肥 950 多万吨,有效减轻了农业面源污染^[2]。与此同时,各级农业部门建立了国家、省、市、县四级耕地质量监测网络,布设了 1 万多个耕地质量长期定位监测控制点,并于 2014 年底由农业部牵头完成了 2400 多个农业县的耕地地力调查与质量评价^[13]。精准农业系列工作不仅有效提高化肥利用率与实施耕地质量监测,还对不同地区土壤肥力、作物需肥规律以及作物产量做了大量系列调查与研究,并取得了丰硕成果。2017 年 3 月农业部发布的

《2017 年春季主要农作物科学施肥指导意见》对包括小麦、玉米、水稻在内的 9 大类作物提出了相应地区的科学施肥建议,对作物田间养分管理工作的进一步实施具有重要的意义。

1.2 存在问题

1) 重研究、轻应用,重理论、轻技术。精准施肥的相关研究大都停留在研究层面和小尺度多点试验,综合集成应用工作偏少^[14-16],区域养分管理实现路径、方法与技术的研究相对欠缺,尤其是针对测试技术、数据处理技术以及综合集成应用技术的研究较少,真正将研究成果进行田间实践和实际推广应用的并不多,以至于研究成果与生产实践部分脱节,阻碍了精准施肥方案的推广普及。通过什么样的方法、技术与渠道,将研究成果真正应用到实际中去,易为广大农户应用,一直是亟待解决的难题。

2) 专业分工太细,分割化、碎片化严重。土壤、植物、大气是一个统一的、动态的、互相反馈的连续系统^[17],这就导致精准施肥涉及土壤学、植物营养学等不同种类的相关学科知识背景。同时,随着信息化时代现代农业的不断发展,计算机技术、遥感技术、地理信息技术等专业领域的新兴技术也被广泛地应用于精准施肥领域^[18-19],而多学科的交叉导致在解决实际问题时专业分工太细,不同领域间综合性、系统性的有机结合不够,缺少将分散化的研究进行系统融合、协同运转的平台等问题。研究和应用分割化、碎片化的现象严重阻碍了田间精准养分管理的综合、全面实施。

3) 传统与现代技术融合不够。精准养分管理方案的实施需要在传统的分析技术中不断引入 3S 技术、遥感技术、移动 GIS 技术、云技术、机器学习、人工智能等现代化、智能化的新技术,不仅能够获取更多信息,而且能充分挖掘现有信息的价值,进而实现对田间土壤、作物等进行定位、定时、定量的监测与管理。美国、意大利、加拿大等发达国家精准农业的实施较为成熟,已经较好地实现了包括车载 GPS 土壤测绘传感器制图、GPS 施肥作业、田间计算机远程监控、航空以及航天遥感实时监测等现代技术与传统采样分析技术的有效融合^[20-24]。然而,在我国精准养分管理的实施中,传统技术与现代技术的融合严重滞后。因此,加强传统技术与现代技术有效、全面、深入的融合可以为我国未来全面实施精准养分管理奠定坚实的基础。

4) 可实际应用的产品、技术较少,农户体验差。随着精准施肥的不断发展,各类田间养分精准

管理相关产品也相继出现。除了向农户散发的施肥建议卡外, 一系列测土配方施肥综合服务系统、土壤养分管理与作物推荐施肥信息系统、田间养分管理专家决策支持系统、移动信息查询系统等农业服务产品^[25-30]也相继问世, 这些产品对田间养分科学、有效的管理产生了一定的作用。但是系统界面不友好、操作人性化水平低、用户体验差的问题仍然广泛存在, 真正得到用户认可并且能够在农户与农技管理人员中间广泛普及使用的产品与技术数量较少, 系统内数据的更新及系统升级也不够重视。

1.3 大数据时代的机遇与对策

1) 土壤、养分管理等数据积累日益丰富。一方面随着精准农业的实施和农业信息技术的大范围应用与普及, 土肥数据量呈爆炸式增长。另一方面, 特别是物联网技术的发展为大数据的获取带来新的契机, 其所产生和积累的数据具有范围广、数量大、类型丰富等特点, 可实现大数据的实时快速采集。而且目前由遥感卫星^[31-32]、无人机^[33-35]、地面设备^[9, 36]等平台搭载传感器组成的“天、空、地”立体监测网络逐渐发展起来, 其所获取的不同尺度遥感信息、地面监测数据、网络数据及其他信息正呈几何级增长。通过以上渠道的获取积累而日益丰富的土壤、养分管理等相关空间数据和属性数据为进一步制定田间养分精细化管理方案奠定了坚实的基础。

2) 大数据集成与分析能力越来越强。随着信息时代大数据量的爆炸式增长, 相应的大数据集成与分析能力也越来越强。其中, 数据挖掘技术在数据处理和可视化方面功能强大, 可以快速实现对大数据的分类、估值、预测、关联、聚类、描述以及可视化等方面的综合归纳、整理与分析^[37-41]。此外, 各种 meta 分析也为提升各个领域空间和属性大数据的综合集成与分析能力提供了有效渠道。由于大数据时代精准养分管理与大数据有紧密的联系, 因此通过对农业大数据的综合集成与分析可以助推精准养分管理走向精细化、信息化与系统化, 进而实现跨越式发展。

3) 信息互联、互通、共享的技术与平台日渐成熟。互联网、云计算、大数据挖掘以及移动 GIS 等前沿技术在信息化时代进程中相互联结在一起, 为急剧增长的海量信息提供了良好的互联、互通、共享的平台^[42-43]。其中, 云技术有着计算速度快、存储空间广、交互能力强等优点, 可以实现对海量、多元数据的弹性管理和灵活计算^[44-45]。此外, 智能手机、平板电脑等移动终端设备, 具有便携、操作简

单、功能多样、易传递等优点, 可以全程全网快速实现信息的在线查询、获取与传输。大数据时代精准养分管理应充分利用日渐成熟的信息互联、互通、共享技术, 从而提高农户与农技人员对相关数据的经济、快速获取能力, 以及信息反馈与交流的互动能力。

4) 人工智能与多样化和适应性。在中国耕地分散经营的体制下, 农业生产尤为复杂^[46], 精准养分管理需要根据长期经验积累和当季变化做出一定的适应性修正才能得到进一步推进。人工智能 (artificial intelligence, AI) 是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术, 可以实现对大数据的推理、判断和感知, 在面对田间复杂、多元的影响因素时, 具有一定的适应性、归纳性与自主性^[47-48]。人工智能与互联网的深度融合为大数据时代田间精准养分管理提供了契机, 未来的精准养分管理需把握住人工智能快速发展的机遇, 深入发掘人工智能和精准养分管理的有机结合, 在农业大数据的助力下, 实现田间施肥的信息化与智能化。

2 精准施肥的相关理论与模式

2.1 精准施肥理论

测土配方施肥所遵循的矿质养分归还学说、最小养分律、报酬递减律等经典施肥理论为田间养分管理提供了重要的理论依据。测土配方施肥是以土壤肥力变异性分析为基础, 根据不同区域土壤供肥性能、作物需肥规律以及肥料效应的不同, 提出针对特定区域的肥料施用数量、施用时间和施用方法, 从而实现按需供肥, 最终达到高产、优质和高效的目的, 是作物田间养分科学、有效管理的核心理论依据^[4]。

传统的农业生产把地块当作均质、统一的单元来进行管理, 导致地块内某些区域施肥不足或施肥过量。实际上, 土壤是一个开放的复杂体系, 其养分在时间与空间上的分布受生物、气候、母质、地形、时间^[49]以及人为活动等因素的共同影响, 因此土壤肥力要素、供肥保肥能力在时空分布上具有复杂的变异性。然而, 土壤养分的时空分布在一定条件下又是相对稳定的, 虽然在不同的农艺管理等外界因素影响下会产生波动, 但这种波动在一定的时空范围内不是随机的, 而是具有相关性和趋向性^[50-51], 是有规律可循的。因此, 田间土壤养分的历史积累数据仍然具有可持续利用价值, 通过数据挖掘技术可以实现对其演变规律的定量化, 从而为大数据时

代精准施肥方案的制定提供强有力的基础支撑。

2.2 精准施肥的认识、定位与目标

精准施肥是精准农业的核心内容之一，目标是实现经济、环境、资源等综合效益最大化，但在我国过量施肥仍较普遍的现实情况下，其首要任务是确保不过量施肥。实现不过量施肥的核心内容又是在充分了解土壤养分变异情况的基础上，因地制宜地制定每一操作单元的施肥方案，从而进行定量及平衡施肥作业，这对我国农田经营分散化的国情来说尤为重要，这也是我国过量施肥问题仍很严重的主要原因之一。此外，随着农业信息技术的广泛普及，根据作物、气候等影响因子来进行变量施肥成为可能，这种技术支撑下的变量施肥是对以土定肥法的进一步调整与提升。因此，精准施肥的首要目标是如何集成现有成果，利用现代信息技术，让农户及时获得指导性明确、操作性强的施肥方案和建议，使施肥减量化有据可循，从而确保不过量，这是精准施肥的根本。在此基础上充分把握信息技术快速发展的机遇，通过经济、便捷的技术进行变量施肥，进一步提升施肥精度，实现精准施肥综合效益最大化的目标。

2.3 精准施肥模式

根据我国国情和养分管理现状以及精准施肥的原理、认识与定位，通过建立“基准+精准”模式的田间养分管理方案，以作物田间施肥总量定额、基肥打底、变量追肥的路径实现养分管理目标。

2.3.1 “基准” 以现有土壤及养分管理大数据为基础，通过对土壤养分时空分布规律的定量化挖掘，可以初步获得田间土壤肥力分布情况。然后根据测土配方施肥的原理与方法，再结合作物需肥、气候等其他田间基础数据，可以制定田间“基准”施肥方案，明确不同农作物的施肥总量及其施肥方案，包括基肥与追肥的施用时间、施用数量以及施用结构，最终实现田间养分的科学有效管理。

2.3.2 “精准” 在“基准”施肥方案基础上进行追肥的“精准”修正，可适应土壤养分时空演变的波动性以及当季作物生长变化。作物从播种到收获，其产量与品质除了受土壤营养元素的影响外，还受气候、水分、光照和病虫害等多重因素的共同作用，这些因素最终都综合体现在作物植株上。然而现行的测土配方施肥等推荐施肥技术，虽能够定量地控制施肥总量，但难以做到根据植物生长的情况对肥料的施用进行适时调整^[25, 52-54]。土壤中营养物质的数量是否适宜于农作物生长，最准确的指标应该

是农作物本身，因为农作物生长状况和体内养分水平正是土壤提供作物营养物质的综合反映。因此，通过植物营养诊断对田间养分管理的“基准”施肥方案进行追肥的“精准”修正，实现作物田间养分的动态管理是非常必要的。

3 实现模式的路径、方法与技术

3.1 “基准”施肥量的确定

通过数据挖掘技术充分挖掘历史积累大数据的可持续利用价值，可以实现对土壤肥力、作物需肥规律、气候等养分管理关键因子的时空预测与分析，再结合测土配方施肥原理与方法，进而实现对土壤基础肥力评价与更新、测土配方施肥成果的完善与更新，最终制定每个年度田间“基准”施肥方案。

3.1.1 数据挖掘是技术支撑 数据挖掘为田间施肥“基准”方案的制定提供强有力的数据与技术支撑。农业部为充分发挥大数据在农业农村发展中的重要功能和巨大潜力，于2015年底出台了《农业部关于推进农业农村大数据发展的实施意见》。随着与精准农业相关的数据、产品、科研成果的共享门户开始陆续对社会开放，历史积累的土壤肥力、作物需肥等田间基础数据，以及气候、水利等辅助参考数据的获取愈发便捷。通过数据挖掘技术可实现对这些海量基础大数据潜在价值的充分挖掘，可制定田间“基准”施肥方案。

近年来出现的数据挖掘方法按不同目的可分为分类、估值、预测、关联、聚类、描述和可视化六大类。其中，空间聚类、关联规则、神经网络、决策树、时间序列分析和数据可视化等方法已应用到土壤养分变异分析、土壤肥力分级、耕地地力等级划分、田间管理区划分和产量、施肥模型建立等农业决策领域^[55]，使面向复杂空间决策问题时的决策能力大大提高。但当前研究主要围绕空间单层面，缺乏对大数据的时空分析。在数据呈爆炸式增长的信息时代，时间序列数据越来越多，虽可能存在部分缺失的现象，但其潜在价值巨大。因此，运用时空地统计学(Markov-Bayes等)^[56-58]、时空聚类法(ST-DBSCAN等)^[59-60]等时空序列四维分析技术，在填补田间历史遗留数据部分缺失的空隙的同时，可以挖掘田间大数据随时间变化的规律并进行趋势预测，是作物田间养分科学、有效管理坚实的数据支撑和决策方法。

3.1.2 测土配方施肥是方法依据和工作基础 测土配方施肥是制定田间“基准”施肥方案的方法依据。

根据测土配方施肥原理, 并结合田间历史大数据的挖掘成果, 可以初步确定“基准”施肥方案, 进而实现作物田间养分管理的有效决策。经典测土配方施肥方法中, 地力分区法方便简单、群众易接受, 但局限性较大、经验依赖性较多且对具体田块针对性不强^[61]; 田间试验法的正交、回归等田间试验设计^[62-63], 费时、费力且技术性较强, 适用于机理的研究, 推广应用较难; 目标产量配方法^[64-65], 概念清楚且容易掌握, 而且利用数据挖掘技术对历史遗留数据的潜在价值进行深入挖掘, 可以方便获取目标产量配方所需的土壤供肥性能和作物需肥规律等核心数据。因此, 在当前信息技术快速发展以及历史数据大量积累的基础上, 测土配方施肥方法中的目标产量法更具应用潜力。

3.2 “精准”追肥量的确定

通过植物营养诊断技术对田间作物的长势及营养状况进行监测与评价, 可以实现对田间“基准”施肥方案的“精准”修正, 基于化学分析、田间形态诊断等传统方法最终确定追肥施用量已有很好的研究与实践。传统的植物营养诊断主要依靠采集田间植株样品进行室内化学分析, 虽然准确性高, 但耗费大量的人力、物力、财力, 时效性差, 不利于推广应用^[66]。此外, 也有部分植物营养诊断是根据专家经验进行判断, 但受主观因素影响较大, 且对技术人员有较高要求^[67]。数字图像无损诊断技术具有快速、简单、经济、便携等优势, 可更好地实现对田间“基准”施肥方案的及时评价与“精准”修正, 具有巨大的发展空间。

随着无损诊断技术的发展与广泛应用, 通过光谱分析、数字图像处理技术可以实现水稻营养实时、快速、准确的诊断^[21, 60, 68-78], 为解决田间施肥无法适时调整的问题提供了可行路径。其中 SPAD 测量技术具有仪器便携、易操作的优点, 但在使用时易受叶脉、叶斑及操作人员的影响^[71, 79]。高光谱成像技术兼具光谱与图像信息, 信息丰富, 但光谱信息综合性强, 诊断专一性和特异性不够, 且仪器价格昂贵, 数据的采集对环境条件要求高, 很难在田间实际生产中应用推广^[80]。基于遥感影像的诊断模型通过航空或航天遥感获取作物冠层光谱信息, 然后将所确认的作物长势与地面数据相结合的方式分析植株营养情况, 具有监测面积大、快速、便捷等优势, 可以有效弥补地面数据的部分缺失, 但对遥感仪器以及专业技术人员依赖程度较高, 比较适用于规模大、组织管理统一的地区^[81-82], 而其中无人

航拍相片相对卫星影像灵活度高^[83-85], 在制定田间施肥方案时具有重要的辅助参考价值。

数字图像无损诊断技术能够直观反映水稻生长状况, 通过图像处理技术提取作物冠层、叶片的颜色、纹理、形态等特征来判断作物营养状况^[70, 86], 且仪器价格便宜、图像获取操作简单、信息丰富, 适合我国农村大部分为家庭联产承包责任制的国情。目前, 数字图像采集与处理技术已基本实现对水稻是否处于营养胁迫、营养胁迫种类以及营养胁迫程度的判断^[87-90]。虽然仅依靠数字图像分析直接指导田间施肥的专一性、可靠性和稳定性还不能完全解决, 但作为一种“辅助”手段, 充分发挥其快速、简单、经济、便携等优势, 实时监测水稻生长过程中的营养状况, 对田间养分管理方案做出及时的评价和精准修正, 为实现“按需供肥”、农业“减肥”提供辅助决策是有价值的, 特别是在测土配方施肥成果应用基础上, 作进一步“精准”应用是可行的, 值得进一步研究和系统应用及完善。

因此, 数字图像无损诊断和航空遥感无损诊断等信息化技术可以更好地实现对“基准”施肥方案快速、经济、便捷的“精准”修正。同时, 随着大数据时代人工智能、云技术、移动 GIS 技术、手持式终端以及便携式扫描仪的普及, 通过数字图像处理技术以及航空遥感图像处理技术对作物营养状况进行同步在线的快速精准识别更具实际应用价值和发展潜力。

4 精准施肥实现的构想

4.1 “基准+精准”

“基准+精准”模式可实现田间养分的精准、动态管理。

4.1.1 地块尺度“基准”施肥方案的制定

1) 将充分收集的海量基础数据进行整理、归纳与标准化, 从而建立包括土壤、作物、气象、耕种模式、灌溉等信息的田间基础数据库。然后运用 GIS、地统计学以及时空数据挖掘 (Markov-Bayes、ST-DBSCAN 等) 方法, 实现对田间大数据的时空定量化挖掘, 并结合耕地地力评价标准实现土壤基础养分与肥力的分等定级。在对测土配方施肥成果与应用以及土壤基础肥力的总结分析基础上, 参照灌溉、气候等田间辅助数据, 最终得到包括基肥和追肥的施用数量及时间的“基准”施肥方案。

2) 利用云 GIS 对制定施肥方案所需的基础空间数据进行存储和管理, 并以移动 GIS 组件来构建移

动端交互的 APP, 然后以大比例尺遥感影像图或农村地籍图为底图, 从而实现农田数据的空间信息化和施肥方案田块化管理的可视化, 并为移动端施肥方案的推送和实现田块尺度上的信息化精细管理奠定基础。

4.1.2 基于无损诊断技术的“精准修正” 国外主要基于收割时获取的产量图来修正下一年度的施肥方案^[91-92], 而我国目前还不能够自主获取相关数据, 因此该方法还不适应我国国情和发展阶段, 而无损测试可能是当下的替代方法。作物不同营养状况的长势、冠层光谱特性、叶片叶色及形态存在显著差异, 因此通过无人机遥感技术获取田间作物冠层图像, 计算叶面积指数 (LAI)、冠层覆盖度 (CC) 等指数, 然后通过聚类分析 (cluster analysis) 对作物长势情况进行等级分区, 可初步判断作物田间长势及营养状况。利用数码拍照、扫描等手段获取作物叶片数字图像, 通过对叶片特征的提取和量化, 计算叶片面积、周长、RGB 颜色均值、深绿色指数 (DGCI) 等特征参数, 再通过机器学习方法建立营养诊断模型, 判断作物是否处于营养胁迫、营养胁迫种类及胁迫程度, 最终依据营养诊断结果, 在已确定的“基准”方案的基础上, 实现对追肥量进行“精准”修正。

4.2 “云+手持终端+数字图像”

“云+手持终端+数字图像”模式可实现田间“基准+精准”施肥方案的推广普及。依托移动 GIS 和云技术, 构建“云+手持终端+数字图像”的田间养分管理运行模式, 可实现决策人员、管理人员、农户之间的多向互动, 进而实现田间养分管理方案的推广应用。手持终端的开发可依托于平板电脑或智能手机, 开发具有信息采集、查询和施肥方案推荐等功能的 APP, 实现田块信息查询、数字图像采集与上传、管理方案接收以及管理成效反馈等功能 (包括作物产量、施肥量、作物品质等信息); 云服务器可实现田间数据库管理及查询 (包括土壤基础数据、灌溉信息、作物产量、需肥量等)、作物数字图像无损营养诊断、田间养分管理方案的决策与推送等功能。通过“云+手持终端+数字图像”的系统架构实现“基准方案推送—无损诊断—精准修订—成效反馈—方案优化”的动态实施和更新模式, 可实现对测土配方施肥技术体系的完善, 同时实现相关成果更新和持续利用, 为“化肥减量工程”的推广普及做系统化技术支撑。

综上所述, 土壤肥力与作物养分需求规律在一

定的时空范围内是相对稳定并有规律可循的, 因此可通过对海量基础数据, 特别是对测土配方施肥系列成果的深入挖掘、有效整合以及空间管理, 建立每年施肥成果和方案更新的途径和方法, 进而获得田间养分管理的“基准”施肥方案。此外, 植物营养无损诊断技术可以快速获取作物营养状况, 从而可实现对“基准”方案特别是追肥施用的“精准”修正。最后通过“云+手持终端+数字图像”的系统架构实现作物田间养分管理的动态实施和推广应用。

5 “基准+精准”施肥模式的效益分析及实现对策

5.1 效益分析

新技术和新设备能否得到广泛应用与其成本投入和相应的产出极其相关。我国在测土配方施肥、耕地土壤普查、耕地地力调查等方面做了大量投入, 这些投入所产生的价值具有延续性和规律性, 通过进一步发掘应用这些成果, 可以实现其价值最大化, 而且在现有成果基础上进行二次加工与开发所需要的投入是相对较少的。

“基准+精准”田间养分管理模式的成本主要来源于农业大数据、田间作物数字图像、田间作物冠层信息等数据采集以及应用软件开发、云服务器购买和系统维护等。随着信息时代的发展, 国家日益重视数据共享, 例如浙江省专门成立省数据管理中心, 为农业大数据分析应用创造了条件和可能; 田间作物数字图像可直接通过农户手机实时拍照获得; 大面积作物冠层信息则可采用无人机直接获取。目前, 应用软件开发、云服务器购买以及系统维护在整个管理模式成本中占主要比重, 而如能在其应用中得到政府相关政策与资金以及相关科研单位和企业的支持, 其应用可以更容易实现。“基准+精准”作物田间养分管理模式的最终目标是面向农户, 实现相关成果更新和持续利用, 解决成果应用“最后一公里”问题。在推广应用精准施肥方案时, 可充分利用现有共享网络传播途径, 例如浙江省专门建立的农民信箱以及微信、微博等信息、资源共享平台, 而这些建设和应用的投入较少, 受益面广。

随着我国信息时代的到来以及耕地集约化程度的增加, 田间养分精准管理必将朝着智能化与信息化发展。“基准+精准”作物田间养分管理模式充分挖掘现有成果的可持续利用价值, 可在长期投入的基础上获得持续回报, 不仅有利于相关科研成果得到实际应用, 同时可使农业产出最大化进一步得到实现。

5.2 实现对策

大数据时代“基准+精准”作物田间养分管理模式的经济、科学、有效实现,不仅需要政府、科研院所、企业和农民扮演好各自的角色,更需要彼此间进行优势互补、相互协作,寻求人才、技术、资源配置的最优化,从而为“基准+精准”作物田间养分管理模式的动态实施和推广应用提供有效保障。

5.2.1 政府 需根据当地农业及企业的实际情况,依托相关科研院所的研究成果,出台相应的政策,同时提供必要的资金保障,为精准施肥的有效、有序实施提供政策保障以及支持。其中最主要的是提高精准农业产业链条上大数据的开放共享水平,打破政府各部门间、政府与民众间的界线,组织协调数据整合与共享开放,促进数据应用。为此,国家与地方政府已陆续出台相应政策,例如国务院 2015 年 8 月印发的《促进大数据发展行动纲要》以及各地方陆续出台的《政务信息资源共享管理暂行办法》、《大数据产业发展规划》等。此外,政府也应对精准施肥模式的基本运行以及研究成果产品化提供必要的资金支持,加大发展扶持力度,从而推动精准施肥的有效、有序实施。

5.2.2 科研院所 应开展并加强包括土壤学、植物营养学、遥感学、地理信息系统、计算机科学等不同学科间的交流与合作,重视科研成果的综合应用,特别是信息化的应用。例如美国哥伦比亚大学地球研究所国际地球科学信息网(CIESN)建立了基于网络的信息交流中心,将社会科学、自然科学、信息科学等多学科重要研究成果以及地理属性、空间数据资源进行存储与共享,加强了学科间的交叉互动。另外,科研院所也要加强与企业的合作,积极了解企业研发的产品在实际应用中所面临的问题,从而进行针对性研究,同时将最新的科研成果推广到实际应用中,使科研成果得到有效利用。

5.2.3 企业 作为科研成果产业化的主体,主要面向一线,面向用户,将最新的研究成果进一步转化为应用产品并在实际应用中检验。美国约翰迪尔公司在 2012 年推出的“绿色之星”精准农业系统和凯斯公司 2013 年初推出的新一代“先进农业”精准农业系统,是将全球定位系统、地理信息系统和物联网技术综合而成的新型精准农业系统,在美国得到了较为广泛的应用,是美国精准农业技术系统的集大成者。国内企业应在学习借鉴国外成功经验的基础上,研发出适合我国国情和发展阶段的应用产品,在为科研成果产品化提供技术支持的同时,还

需与政府部门和科研院所进行对接和优势互补,从而依靠科学和专业分析做出产品的优化调整决策,针对不同用户解决其反馈的具体问题,进而研发出更加经济、人性化、体验好且能为广大农户所接受的产品,成为研究创新的积极推动者。

5.2.4 农民 农民是精准施肥模式田间应用的最终实践者和受益者,例如美国农场主利用 3S 技术进行农作物的精确化种植,节省肥料 10%,小麦、玉米增产 15% 以上^[93];截止 2014 年底,我国也已有 1.9 亿农户参与了测土配方施肥工程,获得区域粮食作物单产提高 6% 至 10% 的良好收益^[94]。智能化与信息化是未来田间养分精准管理的发展趋势,农民应积极配合并参加相关部门开展的系列工作,了解、学习新理论,掌握、应用新技术,反馈产量、收益和产品使用等相关信息,从而为科研院所和企业提供理论创新、方法改进和产品升级的思路,进而帮助实现作物“基准+精准”田间养分管理模式的田间有效应用,最终实现化肥减量增效、农民减本增收的良好效益。

6 结语

作物田间养分的科学、有效管理对增产增收、资源节约、环境保护等方面具有重要的现实意义。在制定精准养分管理方案时应充分继承测土配方施肥的核心价值,挖掘现有大数据的潜在价值,做好关键技术的研究,走适合中国国情的精准农业发展道路。智能化与信息化是未来作物田间养分管理的发展趋势,本文提出通过将大数据、云技术、移动 GIS、人工智能等前沿技术与精准施肥现有成果的集成,构建包括原理基础、实现路径、实现方法与技术于一体的能够确定“基准”施肥与“精准”追肥施用模式的精准养分管理平台的设想,以期实现对测土配方施肥技术体系进行完善,同时也能实现相关成果更新和持续利用,最终解决成果应用的“最后一公里”问题。

参 考 文 献:

- [1] FAO. Statistical yearbook 2014 [M]. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2015.
- [2] 陈泓. 测土配方施肥工作的主要成效[N]. 北京: 农民日报数字报, 2014.
Chen H. The main effect of soil testing and formula fertilization [N]. Beijing: The Digital Newspaper of Farmer's Daily, 2014.
- [3] 李比希. 化学在农业和生理学上的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 1983.
Li B X. Applications of chemistry in agriculture and physiology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1983.

- [4] 自由路, 杨俐苹, 金继运. 测土配方施肥原理与实践—基于高效土壤养分测试技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Bai Y L, Yang L P, Jin J Y. Principle and practice of soil testing and formula fertilization based on high efficiency soil nutrient testing technology [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2007.
- [5] 张福锁. 测土配方施肥技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
Zhang F S. Soil testing and formula fertilization technology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.
- [6] Stevens F, Bogaert P, Wesemael B V. Detecting and quantifying field-related spatial variation of soil organic carbon using mixed-effect models and airborne imagery[J]. *Geoderma*, 2015, 259-260: 93-103.
- [7] Xu Y, Smith S E, Grunwald S, *et al.* Incorporation of satellite remote sensing pan-sharpened imagery into digital soil prediction and mapping models to characterize soil property variability in small agricultural fields[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 123: 1-19.
- [8] Gomez X, Lagacherie P, Coulouma G. Regional predictions of eight common soil properties and their spatial structures from hyperspectral Vis-NIR data[J]. *Geoderma*, 2012, 189-190: 176-185.
- [9] Gabriel J L, Zarco-Tejada P J, López-Herrera P J, *et al.* Airborne and ground level sensors for monitoring nitrogen status in a maize crop[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 160: 124-133.
- [10] Wang L, Zhou X, Zhu X, *et al.* Estimation of leaf nitrogen concentration in wheat using the MK-SVR algorithm and satellite remote sensing data[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 140: 327-337.
- [11] Génard T, Etienne P, Diquélou S, *et al.* Rapeseed-legume intercrops: plant growth and nitrogen balance in early stages of growth and development[J]. *Heliyon*, 2017, 3(3): e261.
- [12] 中华人民共和国农业部. 农业面源污染治理攻坚战专报2016年第1期[R]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016.
MOA. The first issue of the special report about the crucial governance of agricultural surface source pollution in 2016 [R]. Beijing: Ministry of Agriculture, 2016.
- [13] 缪翼. 加强耕地质量调查监测 夯实农业持续发展基础[N]. 北京: 农民日报数字报, 2016.
Miu Y. Strengthen monitoring and investigating the quality of cultivated land and stabilize the foundation of sustainable agricultural development [N]. Beijing: The Digital Newspaper of Farmer's Daily, 2016.
- [14] Cao Q, Miao Y, Li F, *et al.* Developing a new crop circle active canopy sensor-based precision nitrogen management strategy for winter wheat in north China plain[J]. *Precision Agriculture*, 2016, 18(1): 1-17.
- [15] Mohanty S K, Singh A K, Jat S L, *et al.* Precision nitrogen-management practices influences growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*) under conservation agriculture[J]. *Indian Journal of Agronomy*, 2015, 60(4): 617-621.
- [16] Zhao F, Jiang B. The research of decision support system about processing tomatoes precise fertilization [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016.
- [17] 孙菽芬. 土壤-植被-大气统一体内水分循环和能量交换—SPAC模型[J]. *力学进展*, 1984, 14(1): 1-9.
Sun S F. Soil - vegetation - atmosphere uniform water cycle and energy exchange - SPAC model[J]. *Advances in Mechanics*, 1984, 14(1): 1-9.
- [18] Chen C, Pan J, Shu K L. A review of precision fertilization research[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(9): 4073-4080.
- [19] Diacono M, Rubino P, Montemurro F. Precision nitrogen management of wheat. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2013, 33(1): 219-241.
- [20] Song X, Wang J, Huang W, *et al.* The delineation of agricultural management zones with high resolution remotely sensed data[J]. *Precision Agriculture*, 2009, 10(6): 471-487.
- [21] Saberioon M M, Amin M S M, Anuar A R, *et al.* Assessment of rice leaf chlorophyll content using visible bands at different growth stages at both the leaf and canopy scale[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2014, 32(10): 35-45.
- [22] Humphreys M T, Raun W R, Martin K L, *et al.* Indirect estimates of soil electrical conductivity for improved prediction of wheat grain yield[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 35(17-18): 2639-2653.
- [23] Eitel J U H, Long D S, Gessler P E, *et al.* Using *in-situ* measurements to evaluate the new RapidEye™ satellite series for prediction of wheat nitrogen status[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(18): 4183-4190.
- [24] Benedetto D D, Castrignano A, Sollitto D, *et al.* Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay[J]. *Geoderma*, 2012, 171-172: 53-63.
- [25] Papadopoulos A, Kalivas D, Hatzichristos T. GIS modelling for site-specific nitrogen fertilization towards soil sustainability[J]. *Sustainability*, 2015, 7(6): 6684-6705.
- [26] Bian F, Sha Z, Hong W. An integrated GIS and knowledge-based decision support system in assisting farm-level agronomic decision-making [J]. *Journal of Geographical Systems*, 1995, 3: 49-67.
- [27] Xie Y W, Yang J Y, Du S L, *et al.* A GIS-based fertilizer decision support system for farmers in Northeast China: a case study at Tongle village[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93(3): 323-336.
- [28] Zhang Q, Yang Z, Li Y, *et al.* Spatial variability of soil nutrients and GIS-based nutrient management in Yongji County, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(7): 965-981.
- [29] 郭军玲, 王永亮, 郭彩霞, 等. 基于GIS和测土配方数据的晋北县域春玉米专用肥配方筛选[J]. *农业工程学报*, 2016, 34(7): 158-164.
Guo J L, Wang Y L, Guo C X, *et al.* Formulas screening of special fertilizer for spring maize in county area of northern Shanxi based on GIS and soil testing data[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 34(7): 158-164.
- [30] 熊凯, 李言照, 韩仲志, 等. 测土配方施肥综合服务平台设计与实现[J]. *中国农学通报*, 2013, (18): 96-102.
Xiong K, Li Y Z, Han Z Z, *et al.* The design and implementation of soil testing and fertilizer recommendation integrated service platform[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, (18): 96-102.
- [31] Khanal S, Fulton J, Shearer S. An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 139: 22-32.
- [32] Brown M E. Satellite remote sensing in agriculture and food security assessment[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, 29: 307.
- [33] Vega F A, Ramirez F C, Saiz M P, *et al.* Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 132(13): 19-27.

- [34] Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2015, 81(4): 281–329.
- [35] Chang A, Jung J, Maeda M M, *et al.* Crop height monitoring with digital imagery from unmanned aerial system (UAS)[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 141: 232–237.
- [36] Karim F, Karim F, Frihida A. Monitoring system using web of things in precision agriculture[J]. *Procedia Computer Science*, 2017, 110: 402–409.
- [37] Nguyen P M, Haghverdi A, Pue J D, *et al.* Comparison of statistical regression and data-mining techniques in estimating soil water retention of tropical delta soils[J]. *Biosystems Engineering*, 2017, 153: 12–27.
- [38] Lu C, Zhou Z, Zhu Q, *et al.* Using residual analysis in electromagnetic induction data interpretation to improve the prediction of soil properties[J]. *Catena*, 2017, 149: 176–184.
- [39] Zhao B, Liu Y, Goh S H, *et al.* Parallel finite element analysis of seismic soil structure interaction using a PC cluster[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, 80: 167–177.
- [40] Sitton J D, Zeinali Y, Story B A. Rapid soil classification using artificial neural networks for use in constructing compressed earth blocks[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 138: 214–221.
- [41] Potashev K, Sharonova N, Breus I. The use of cluster analysis for plant grouping by their tolerance to soil contamination with hydrocarbons at the germination stage[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 485–486: 71–82.
- [42] Botta A, Donato W D, Persico V, *et al.* Integration of cloud computing and internet of things: A survey[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2016, 56(C): 684–700.
- [43] Jones J W, Antle J M, Basso B, *et al.* Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science[J]. *Agricultural Systems*, 2017, 155: 269.
- [44] Li T. Cloud-based decision support and automation for precision agriculture in orchards[J]. *IFAC-Papers On Line*, 2016, 49(16): 330–335.
- [45] Ojha T, Misra S, Raghuvanshi N S. Sensing-cloud: leveraging the benefits for agricultural applications[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 135: 96–107.
- [46] 朱宏登. 新时期我国耕地制度创新路径研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2011.
- Zhu H D. Study on the path of farmland institutional transformation in China [D]. Hohhot: PhD Dissertation of Inner Mongolia Agricultural University, 2011.
- [47] Popa C. Adoption of artificial intelligence in agriculture[J]. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary*, 2011, 68(1): 284–293.
- [48] Shafaei S M, Nourmohamadi-Moghadami A, Kamgar S. Development of artificial intelligence based systems for prediction of hydration characteristics of wheat[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 128: 34–45.
- [49] Krumbein W C. Factors of soil formation: A system of quantitative pedology by Hans Jenny[J]. *The Journal of Geology*, 1942, 50(7): 336–337.
- [50] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 27(4): 315–334.
- [51] Li Q, Zhou J H, Yang R S, *et al.* Soil nutrients spatial variability and soil fertility suitability in Qujing tobacco-planting area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4): 950.
- [52] Lu C, Wang B, Peng X Y, *et al.* Study of intelligent agricultural cultivation management plan model based on geographic information system[J]. *Open Biotechnology Journal*, 2015, 9(1): 150–156.
- [53] Wang J, Zhang F. Research on spatial data mining technology in agricultural spatial decision support system[J]. *Journal of the Institute of Brewing*, 2015, 46(2): 73–74.
- [54] 张海峰. 基于 Android 智能手机的农业信息服务平台应用展望[J]. *黑龙江农业科学*, 2014, (8): 126–128.
- Zhang H F. Prospect of application of agricultural information service platform based on android intelligent mobile phone[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2014, (8): 126–128.
- [55] 陈桂芬. 面向精准农业的空间数据挖掘技术研究与应用[D]. 长春: 吉林大学博士学位论文, 2009.
- Chen G F. Research and application of spatial data mining technology for precision agriculture [D]. Changchun: PhD Dissertation of Jilin University, 2009.
- [56] Vázquez-Quintero G, Solís-Moreno R, Pompa-García M, *et al.* Detection and projection of forest changes by using the markov chain model and cellular automata[J]. *Sustainability*, 2016, 8(3): 236.
- [57] Yang Y, Zhang C T, Zhang R. BME prediction of continuous geographical properties using auxiliary variables[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016, 30(1): 1–18.
- [58] 张贝, 李卫东, 杨勇, 等. 贝叶斯最大熵地统计学方法及其在土壤和环境科学上的应用[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 831–839.
- Zhang B, Li W D, Yang Y, *et al.* The bayesian maximum entropy geostatistical approach and its application in soil and environmental sciences[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4): 831–839.
- [59] Birant D, Kut A. ST-DBSCAN: An algorithm for clustering spatial-temporal data[J]. *Data and Knowledge Engineering*, 2007, 60(1): 208–221.
- [60] Agrawal K P, Garg S, Sharma S, *et al.* Development and validation of OPTICS based spatio-temporal clustering technique[J]. *Information Sciences*, 2016, 369: 388–401.
- [61] 朱磊, 盛建东, 武红旗. 基于GIS的和硕县耕地地力评价与耕地土壤改良分区制图[J]. *新疆农业科学*, 2013, 50(1): 132–139.
- Zhu L, Sheng J D, Wu H Q. Evaluation of soil fertility of the cultivated land and zoning of soil improvement in Heshuo county based on GIS technique[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2013, 50(1): 132–139.
- [62] Liu D, Chen G, Yu H, *et al.* A neural network ensemble method for precision fertilization modeling[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, 51(11–12): 1375–1382.
- [63] Zheng Z, Sha Z, Liu Y, *et al.* Modeling the impacts of alternative fertilization methods on nitrogen loading in rice production in Shanghai[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566–567: 1595–1603.
- [64] 孙桂清. 测土配方施肥的三类方法[J]. *农村实用科技信息*, 2007, (4): 13.
- Sun G Q. Three methods of soil testing and formula fertilization[J]. *Rural and Practical Technology Information*, 2007, (4): 13.
- [65] 范勇毅, 刘志强, 孙玉清. 利用目标产量法进行配方施肥的研究[J]. *内蒙古农业科技*, 2003, (6): 15–16.
- Fan Y Y, Liu Z Q, Sun Y Q. Studies on fertilizer balance application using target yield[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2003, (6): 15–16.

- [66] Bouma D. Diagnosis of mineral deficiencies using plant tests [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1983. 120–146.
- [67] Patil S S, Dhandra B V, Angadi U B, *et al.* Web based expert system for diagnosis of micro nutrients' deficiencies in crops[J]. Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2009, 2178(1).
- [68] Lee K J, Lee B W. Estimation of rice growth and nitrogen nutrition status using color digital camera image analysis[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 48(3): 57–65.
- [69] Shi J Y, Zou X B, Zhao J W, *et al.* Nondestructive diagnostics of nitrogen deficiency by cucumber leaf chlorophyll distribution map based on near infrared hyperspectral imaging[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 138: 190–197.
- [70] Wang Y, Wang D, Shi P, *et al.* Estimating rice chlorophyll content and leaf nitrogen concentration with a digital still color camera under natural light[J]. Plant Methods, 2014, 10(1): 36.
- [71] 何俊俊, 杨京平, 杨虎, 等. 光照及氮素水平对水稻冠层叶片 SPAD 值动态变化的影响[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2014, 40(5): 495–504.
- He J J, Yang J P, Yang H, *et al.* Effects of light intensity and nitrogen supply on the dynamic characteristics of leaf SPAD value of rice canopy[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2014, 40(5): 495–504.
- [72] Xue H, Han Y, Yabing L I, *et al.* Estimating light interception using the color attributes of digital images of cotton canopies[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(7): 1474–1485.
- [73] Chen P F, Haboudane D, Tremblay N, *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.
- [74] He L, Zhang H Y, Zhang Y S, *et al.* Estimating canopy leaf nitrogen concentration in winter wheat based on multi-angular hyperspectral remote sensing[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 73: 170–185.
- [75] Xia Y, Yan Z, Tian Y C, *et al.* Exploring hyperspectral bands and estimation indices for leaf nitrogen accumulation in wheat[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2010, 12(2): 89–100.
- [76] Li F, Miao Y, Feng G, *et al.* Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices[J]. Field Crops Research, 2014, 157(2): 111–123.
- [77] Feng W, Guo B B, Wang Z J, *et al.* Measuring leaf nitrogen concentration in winter wheat using double-peak spectral reflection remote sensing data[J]. Field Crops Research, 2014, 159(6): 43–52.
- [78] Li L, Lu J, Wang S, *et al.* Methods for estimating leaf nitrogen concentration of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using in situ leaf spectroscopy[J]. Industrial Crops and Products, 2016, 91: 194–204.
- [79] Jiang J P, Yang J P, Yang Z C, *et al.* Dynamic characteristics of SPAD value of rice leaf and adjacent leaf under different N application rates[J]. Journal of Zhejiang University, 2012, 38(2): 166–174.
- [80] Inoue Y, Sakaiya E, Zhu Y, *et al.* Diagnostic mapping of canopy nitrogen content in rice based on hyperspectral measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 126(6829): 210–221.
- [81] Mulla D J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps[J]. Biosystems Engineering, 2013, 114(4): 358–371.
- [82] Yao H, Huang Y. Remote sensing applications to precision farming[J]. Applied Physics Letters, 2013, 96(9): 93506.
- [83] 祝锦霞, 陈祝炉, 石媛媛, 等. 基于无人机和地面数字影像的水稻氮素营养诊断研究[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2010, 36(1): 78–83.
- Zhu J X, Chen Z L, Shi Y Y, *et al.* Diagnoses of rice nitrogen status based on spectral characteristics of leaf and canopy[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2010, 36(1): 78–83.
- [84] Ramon D V, Jesus Z T P, Vincenzo A, *et al.* Automatic identification of agricultural terraces through object-oriented analysis of very high resolution DSM and multispectral imagery obtained from an unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Environmental Management, 2014, 134(4): 117.
- [85] Duan T, Chapman S C, Guo Y, *et al.* Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle[J]. Field Crops Research, 2017, 210: 71–80.
- [86] Wang Y, Wang D, Zhang G, *et al.* Estimating nitrogen status of rice using the image segmentation of G-R thresholding method[J]. Field Crops Research, 2013, 149: 33–39.
- [87] Chen L S, Wang K. Diagnosing of rice nitrogen stress based on static scanning technology and image information extraction[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2013, 14: 382–393.
- [88] Chen L, Lin L, Cai G, *et al.* Identification of nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies in rice based on static scanning technology and hierarchical identification method[J]. PLoS One, 2014, 9(9): e113200.
- [89] 石媛媛. 基于数字图像的水稻氮磷钾营养诊断与建模研究[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2011.
- Shi Y Y. Rice nutrition diagnosis and modeling based on digital image [D]. Hangzhou: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2011.
- [90] 顾清, 邓劲松, 陆超, 等. 基于光谱和形状特征的水稻扫描叶片氮素营养诊断[J]. 农业机械学报, 2012, 43(8): 170–174.
- Gu Q, Deng J S, Lu C, *et al.* Diagnosis of rice nitrogen nutrition based on spectral and shape characteristics of scanning leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 170–174.
- [91] Johnson C K, Mortensen D A, Wienhold B J, *et al.* Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(2): 303–315.
- [92] Burks T F, Shearer S A, Sobolik C J, *et al.* Combine yield monitor test facility development[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 19(1): 5–12.
- [93] Schimmelpennig D E. Cost savings from precision agriculture technologies on U.S. corn farms [J]. Amber Waves, 2016.
- [94] 李莎莎. 基于农户需求导向的测土配方施肥技术推广服务机制研究[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2015.
- Li S S. Research on soil testing formula fertilization technology popularization service mechanism based on farmers' demand oriented [D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2015.