

化肥减施增效关键技术研究进展分析

唐 汉¹ 王金武¹ 徐常塑¹ 周文琪¹ 王金峰¹ 王 秀²

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要: 化肥作为现代农业生产基础物质之一,对保障粮食生产安全和农业高效高产具有重要作用,但因其长期盲目过量施用所引发的系列农产品安全、环境污染及资源浪费等问题日益突显,如何有效权衡粮食产量品质及生态安全与化肥减施增效间关系成为需要解决的系统工程问题。根据对科学施肥技术迫切需求,综合评价了中国化肥施用现状与形势,重点阐述分析了国内外测土配方施肥、缓控释肥施用、精准变量施肥、灌溉施肥及部分大宗农作物典型施肥等现代施肥技术的研究进展、技术特点、应用概况及存在问题等。在此基础上,结合可持续农业发展需求分析了我国化肥施用的发展趋势,提出未来主要发展建议,为构建符合中国国情的化肥减施增效科学管理技术体系及相关研究提供参考。

关键词: 化肥; 减施增效; 测土配方施肥; 缓控释肥; 精准变量施肥; 灌溉施肥

中图分类号: S224.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0001-19

Research Progress Analysis on Key Technology of Chemical Fertilizer Reduction and Efficiency Increase

TANG Han¹ WANG Jinwu¹ XU Changsu¹ ZHOU Wenqi¹ WANG Jinfeng¹ WANG Xiu²

(1. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Chemical fertilizer is one of the basic materials in modern agricultural production. It has important significance to the development of grain production safety and high-efficiency agriculture. The problems of agricultural safety production, environmental pollution and cost wastage are increasingly prominent which were caused by long-term blindly excessive application of chemical fertilizers in China. How to effectively balance the relation among grain production, ecological security and chemical fertilizer reduction has become a system engineering problem that must be faced. Considering the requirements for application of scientific fertilization technology, the present situation of chemical fertilizer application in China was illustrated and evaluated. The research progresses, technical features, application statuses and existing problems of modern fertilization technologies were analyzed, such as soil testing and formulated fertilization, slow/controlled release fertilization, precision variable-rate fertilization, irrigation and fertilization, and fertilization for staple crop. Finally, the trends of government policy, technology research and promotion training were expected clearly based on the requirement of sustainable agricultural development, which provided ideas for constructing a scientific fertilization technology and management system with the Chinese national condition and references for related research.

Key words: chemical fertilizer; reduction and efficiency increase; soil testing and formulated fertilization; slow/controlled release fertilization; precision variable-rate fertilization; irrigation and fertilization

0 引言

化肥是利用化学或物理方法制成含有一种或几

种农作物生长所需营养元素,以提供植物养分为主要功能,并兼具改善土壤性质的肥料,作为农业生产最重要基础物质之一,对保障粮食生产安全和农业

收稿日期: 2019-02-13 修回日期: 2019-03-05
基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设(CARS-01-44)和国家自然科学基金项目(51675093)
作者简介: 唐汉(1991—),男,讲师,博士,主要从事智能农机装备及关键技术研究, E-mail: tanghan19910102@163.com
通信作者: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究, E-mail: jinwuw@163.com

高效高产具有重要作用^[1-2]。中国是世界最主要化肥生产与施用大国,2016 年中国化肥总产量约 7 004 万 t(折纯量,下同),施用量约 5 984 万 t,占世界总施用量的 1/3,农作物用量 346.5 kg/hm²,远高于世界平均水平 120 kg/hm²,而肥料利用率较低,仅 30% 左右^[3]。我国化肥的盲目过量施用,致使农作物产量品质降低、土壤板结退化和水体严重污染,因此引发了系列农产品安全、环境污染与资源浪费等亟需解决的社会性问题^[4]。

化肥科学合理施用主要由化肥配制、施肥技术及配套机具三大系统完成。在政府长期大力支持下,经国内科研院所及企业多年创新研究与应用推广,中国化肥配制技术已达到较先进水平,多种氮磷钾肥及复合肥在一定程度可满足农作物生长需求^[5]。相对而言,施肥技术及配套机具与国外仍有较大差距。国外结合农作物栽培管理模式,采用测土配方施肥、缓控释肥、变量施肥、灌溉施肥等典型先进技术,配套机械化机具,有效提高肥料利用率,已进入了化肥减施增效的农业可持续发展阶段^[6-8]。国内整体施肥技术发展水平相对落后,肥料产品结构不合理,多数地区仍采用传统撒施及条施方式进行基肥、种肥及追肥施用作业^[9-10],仅部分地区实现精准施肥生产且机械化程度较低,长期粗放施肥直接造成系列生产环境问题,极不利于资源节约型社会构建^[11]。近些年,为贯彻落实中央农村工作会议、中央一号文件和全国农业工作会议精神,中央及各级地方政府相继出台系列政策,紧紧围绕“稳粮增收调结构,提质增效转方式”的工作主线^[12-13],逐步建立科学施肥管理技术体系,树立“增产施肥、经济施肥、环保施肥”理念,突破现代施肥关键技术瓶颈,大力推进化肥减施增效发展进程。

在此背景下,本文全面分析中国化肥施用现状和形势,重点阐述分析国内外多种现代施肥关键技术研究进展、技术特点、应用概况及存在问题等,并结合可持续农业发展需求,分别从政府政策、技术研究等方面提出未来发展建议,为构建符合中国国情的科学施肥管理技术体系及相关研究提供参考。

1 中国化肥施用现状与形势

1.1 化肥施用现状

近些年,中国化肥产业发展十分迅速,化肥需求量因农产品产量及价格快速上升而急剧增加^[14]。中国耕地面积仅占世界耕地面积 9%,而其化肥施用量占世界 1/3,化肥消耗量大而利用率低,且平均用量仍呈逐渐增长趋势。据联合国粮农组织(FAO)统计^[15],2007—2013 年中国化肥总产量与施用量逐年增加,至 2013 年国家大力推进系列化肥

减施增效政策,其施用增长率得到一定控制,总产量呈稳中略降趋势;2016 年施用量达 5 984 万 t,增长率首次呈现负值,近 10 年化肥施用量增长率逐年递减,其变化趋势如图 1 所示。

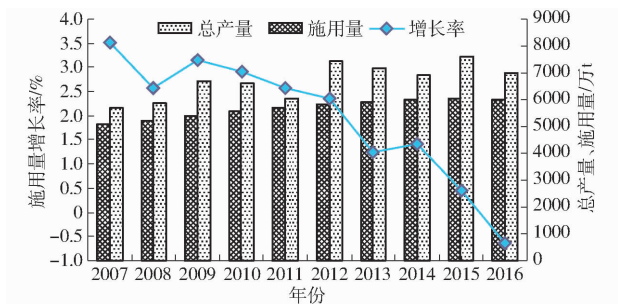


图 1 2007—2016 年中国化肥施用变化图

Fig. 1 Trend chart of chemical fertilizer from 2007 to 2016 in China

结合近年中国化肥产业发展及肥料施用情况^[16-17],分析肥料施用所存在主要问题:化肥用量偏高,其农作物平均用量 346.5 kg/hm²,远高于世界平均水平 120 kg/hm²,为美国 2.6 倍,欧盟 2.5 倍;化肥增产边际效应逐渐明显,水稻、玉米及小麦等大宗农作物化肥施用量过大,而产出水平较低,依靠增施化肥提高产量效应已近极限;施肥不均衡现象突出,中国东部经济发达区、长江下游区和城市郊区施肥量偏高,蔬菜及果树等附加值高的经济作物过量施肥现象较普遍;过度依赖无机化肥,有机肥料资源利用率较低,有机肥料资源总养分约 7 000 余万吨,实际利用率不足 40%,其中畜禽粪便养分还田率约 50%,农作物秸秆养分还田率约 35%;施肥结构不平衡,重无机化肥、轻有机肥料,重大量元素肥料、轻中微量元素肥料,重氮素肥料、轻磷钾素肥料的“三重三轻”问题突出;传统人工施肥方式仍占主导地位,配套施肥技术落后,机械化施肥仅占 35%~40%;传统增施化肥等农业增产措施已成为部分地区主要污染源,产量目标与生态环保间矛盾无法有效缓解。

1.2 化肥施用形势

纵观国外发达国家化肥减施增效发展进程,欧美及日韩等国化肥施用量皆呈先快速增长、达到峰值后保持稳中略降或持续下降的趋势^[18],且多种先进现代施肥技术不断发展,配套机具快速应用推广,已基本实现全面机械化施肥作业。相对而言,中国化肥过度施用与农作物增产压力大、耕地基础地力低且利用强度高、农户生产规模小、施肥技术落后和机械化程度低等因素相关,同时与化肥生产经营脱离农业需求、化肥产品结构不合理和管理制度不健全等问题亦具有重要关系^[19]。

“十三五”期间,以保障国家粮食生产安全和重要农产品有效供给为目标,依靠科技进步,依托新型

经营主体和专业农化农机服务组织,促进节本增效和节能减排的现实需求,明确“一控、两减、三基本”的农业污染治理目标,争取于 2020 年实现化肥施用量零增长,主要农作物肥料利用率达 40% 以上的目标^[20]。结合目前中国化肥施用形势,总结阐述肥料减施增效发展建议:具备丰富养分物质和优良理化性状的绿色高效肥料研究;优化高效肥料产品结构,包括多功能复合肥料、缓控释肥料、液体肥料、专用肥料(水稻、玉米及小麦等)和全水溶性肥料等;采用物质替代、养分平衡及生态控制原理,提高肥料利用率,合理控制施用量;快速发展多种现代施肥技术,研发适于多地区各类农作物机械化机具,加大关键技术推广及培训;构建信息技术服务平台与监测评估系统,实现肥料精准施用指导与监控;推进肥料生产企业与新型经营主体合作,实现规模化经营发展与示范引领效应;立足化肥产业发展,集成建立化肥减施增效技术体系。

2 化肥减施增效关键技术研究进展

化肥减施增效技术是在农作物营养供给各生长期采用现代技术手段将肥料按一定比例施于种子、根系或叶面附近而被高效吸收,有效提高农作物产量品质,减少资源浪费与环境污染,满足农业可持续发展要求,是肥料合理施用可靠保障^[21]。相对于传统粗放施肥方式,其紧紧围绕粮食增产、生产高效、资源高效及生态环保的理念,如最早开展的测土配方施肥以平衡土壤养分和提高农作物产量为目标;缓控释肥施用可一次性完成农作物各生长期养分供给;精准变量施肥可因地制宜全面平衡施肥用量;灌溉施肥可有效缓解水资源短缺及环境污染间矛盾;部分大宗农作物施肥可结合作物需肥规律有针对性地实现肥料施用。上述施肥技术皆在各环节贯彻着“4R”概念^[22],即正确肥料(Right source)、正确施量(Right rate)、正确时间(Right time)和正确位置(Right place)。结合国内外相关文献资料,重点对在现代农业生产中发挥关键作用的主要典型施肥技术——测土配方施肥、缓控释肥施用、精准变量施肥、灌溉施肥及部分大宗农作物施肥等研究进展进行阐述归纳,为化肥减施增效科学施用提供技术参考。

2.1 测土配方施肥技术

测土配方施肥是以土壤测试和肥料田间试验为依据,结合农作物需肥规律、土壤供肥特性和肥料效应,提出氮磷钾及中微量元素肥料配套施用量、施肥时期和施用方法的技术,可实现农作物营养供应平衡,有效提高肥料利用率及农作物产量品质^[23]。此项技术主要由测土、配方、配肥、供应和施肥等 5 个

关键系列环节组成,核心在于调节和解决农作物需肥与土壤供肥间矛盾,其技术流程如图 2 所示。



图 2 测土配方施肥技术流程
Fig. 2 Technical process of soil testing and formulated fertilization

自 1850 年,现代植物营养学奠基人尤·李比希首次以植物营养组成为依据建立了一套完整肥料施用体系,强调了科学施肥在土壤-植物系统中重要意义^[24];至 20 世纪 40 年代,国际普遍采纳了以土壤检测结果为依据的肥料施用标准。经 100 余年广泛研究与应用,测土配方施肥技术已成为典型现代施肥技术中最基础和最成熟技术,世界各国皆将其作为农业战略发展应用的主要技术。目前测土配方施肥主要应用方法^[25-26]包括:①土壤-植物测试推荐施肥法,即根据土壤供氮和农作物需氮情况对氮素进行动态监测和精准调控,结合土壤测试和养分平衡方法对磷素及钾素进行衡量监控,采用因缺补缺施肥策略对中微量元素进行养分矫正。②肥料效应函数法,即采用“3414”试验结果建立区域内农作物肥料效应函数,获取单位面积内农作物氮磷钾肥的最佳施肥量。③土壤养分丰缺指标法,即结合土壤肥效试验结果建立多种农作物不同区域的土壤养分丰缺指标,提供肥料配方措施。④养分平衡法,即根据农作物目标产量分析需肥量与土壤肥效间关系以精准计算对应补充施肥量。

国外测土配方施肥技术发展十分迅速,20 世纪 60 年代美国已建立较为完善测土配方施肥体系,各州皆设立了专业的土壤测试化验中心和测土工作委员会,负责土壤与农作物养分测定分析、配方方法制定及科学施肥指导等工作,已实现了全国范围内养分综合管理,目前美国测土配方已覆盖了 80% 以上耕地面积^[27]。以色列、英国及荷兰等国也制定了相关测土配方技术标准与管理措施,建立了区域范围内配方指导方案与施肥科学专家系统。近些年,国外测土配方施肥技术正逐渐向信息化和智能化方向发展,如地面与低空卫星遥感技术,在不破坏植物营养器官和状态情况下快速检测相关数据,科学分析农田养分施入管理,深入研究高通用性及相关性的检测方法,如 Mehlich 3 多元素通用浸提检测法等。

中国于 20 世纪 70 年代末开展测土配方施肥技术相关研究,国家土壤普查办公室在全国 16 个省、市及自治区相继组织召开了“土壤养分丰缺指标研究”会议,并逐步推广测土配方施肥技术;1995 年,已建立了多层次、多类型土壤肥料监测点 4 000 余个,涵盖 20 余种土壤类型^[28];2005 年,中国开展了大规模测土配方施肥行动,以政府为主导免费为农民测试土壤样品,并指导农民合理施肥,但由于中国农业高度分散,仍无法完全满足全国范围内需求;至 2015 年,通过测土配方施肥已使主要粮食作物氮肥、磷肥和钾肥利用率分别提高至 33%、24% 和 42%,肥料施用量增幅呈下降趋势^[29]。部分测土配方施肥示范及作物长势如图 3 所示。近些年,国内高校院所及企业将测土配方施肥与多种施肥方式相结合,保证农作物有效吸收肥料养分;逐步建立基于“3S”信息技术和传感器技术的精准施肥体系,获得肥料最优配比管理决策方案,实现测土配方精准施肥;研制多种具备数据获取处理和结果信息显示分析的田间快速便携式测土配方仪器^[30-31],一定程度解决了因耕地需肥差异造成施肥难度大问题。

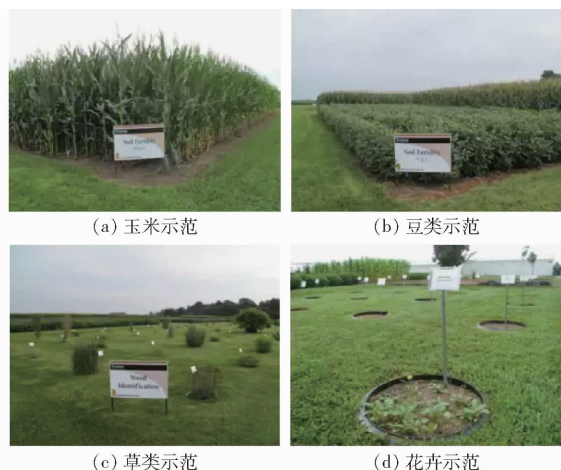


图 3 测土配方施肥示范及作物长势

Fig. 3 Demonstration field and crop growth by soil testing and formulated fertilization

目前,在测土配方施肥应用推广过程中存在的主要问题有:因土壤测试方法落后易造成后续配方和施肥环节的作业时效性及精准性下降;对供应环节忽略易造成各环节间配合较为困难;由于此项技术不断发展而缺乏专业技术人员,使其无法发挥最大作用;所施有机肥料和无机化肥均衡性较差,严重影响土壤质地并加速水体富营养化;易忽略部分重要微量元素(硼、锌、钼及锰等)施入,直接或间接影响农作物产量品质。

2.2 缓控释肥施用技术

缓控释肥是通过各种调控机制使肥料缓慢释放于土壤,延长农作物对养分吸收利用有效期,按一定释放速率缓慢释放养分的肥料^[32]。合理施用缓控

释肥并将其释放速率与农作物生长规律相结合,可提高肥料利用率 30%,有效减少施肥次数与施用量。缓控释肥多作为种肥在播种时期与种子同步正/侧位深施于土壤,根据其作用形式可分为缓释肥和控释肥。缓释肥施入土壤后其转化为农作物可利用有效形态的释放速率较常规肥料缓慢,但持续时间无法保证与农作物营养需求完全一致,易受外界土壤环境及灌溉水量等影响,以单质氮肥为主;控释肥通过各种机制措施预先设定肥料释放模式,使养分释放速率与农作物需肥规律同步,其释放速率仅受外界土壤温度影响^[33]。

中国于 20 世纪 60 年代末开始对缓控释肥开展相关研究,中国科学院南京土壤研究所^[34]首次成功研制了包膜长效碳酸氢铵,同期黑龙江省、湖南省及福建省等地农科院所也相继开展此方面研究;针对主要粮食作物及经济作物,研制多种包膜类型的缓控释肥,通过大量田间试验及生产示范获得肥料最佳制备工艺参数,证明了其可显著改善农作物根系生长指标,提高农作物产量品质^[35-36]。近些年,国内在缓控释肥制备生产方面发展十分迅速,主要开展肥料微溶化技术和包膜处理技术相关研究,前者代表产物为脲醛化合物,后者代表产物为硫包膜尿素和聚合物包膜尿素。国内高校院所与企业亦致力于各类型缓控释肥创制研究,并取得了实质性进展,部分肥料产品与配套设备已生产销售。郑州大学磷肥与复肥研究所^[37]以钙镁磷肥为包裹物研制的缓控释肥取得多项国际专利,并相继在国内及美国建立了肥料生产厂;华南农业大学资源环境学院^[38]长期致力于低成本缓控释肥材料和非专用设备生产包膜肥料的研究;山东农业大学与金正大生态工程集团合作^[39],开展缓控释肥产品改进与提升,建设了年产量达 30 万 t 肥料生产基地;北京市农林科学院植物营养与资源研究所^[40]研制了树脂包衣缓控释肥生产设备,并逐步生产适于各类农作物生长需求的系列缓控释肥新产品,但仍需进一步降低其生产成本,加快应用推广范围。部分缓控释肥施用示范及作物长势如图 4 所示。

目前,对缓控释肥养分释放与农作物吸收同步性、包膜材料回收处理及绿色包膜材料研发等方面研究相对较少。缺乏针对缓控释肥施用农艺指导,多采用常规施肥播种机具作为种肥以正/侧深施肥方式施于不同农作物种子附近,对其配套技术掌握程度相对较低,易造成施肥作业不合理等问题,肥料距根系过近易造成烧苗现象,肥料距根系过远易造成肥效降低;肥料对水分依赖性较强,若土壤缺水将直接影响养分释放速率,在国内干旱地区应用推广受到一定限制;应用成本较为昂贵,致使农民无法完



图 4 缓控释肥施用示范及作物长势

Fig. 4 Demonstration field and crop growth by slow/controlled release fertilization

全接受,对各类农作物应用推广亟需解决。

2.3 精准变量施肥技术

精准变量施肥是将农田土壤进行空间网格单元划分,以各单元内历年农作物产量信息与多层数据(土壤理化性质、病虫害害及气候等)叠合分析为依据,作物生长模型和作物营养专家系统为支撑,高产、优质、环保为目的,因地制宜地进行全面平衡施肥的先进技术^[41]。作为精准农业重要组成部分之一,其是信息技术、生物技术、机械技术及化工技术的优化组合。

精准变量施肥技术伴随精准农业发展而得到快速应用推广。20 世纪 60 年代初,法国 MATHERON

等创立的地统计学方法为定量描述土壤空间研究奠定了基础^[42],即通过数学插值方法准确获取土壤性状空间分布,但由于缺乏专业控制系统及配套机具无法满足空间变异施肥作业要求,仅部分农场根据土壤养分差异进行单元施肥管理,此即为精准变量施肥雏形;20 世纪 80 年代,由于部分发达国家农业经营管理存在资源紧缺和环境质量下降等问题,亟需开展新技术及新装备研究,以充分利用各种农资投入,提高农产品市场竞争力,为精准变量施肥技术发展提供了社会及经济需求;至 20 世纪 90 年代,随着现代信息技术高速发展,特别是全球卫星定位系统(Global positioning system, GPS)、地面信息系统(Geographical information system, GIS)、遥感技术(Remote senescing, RS)、作物栽培管理技术及农业工程技术等现代先进技术在农业中得到应用^[43-44],为实现空间变异精准操作奠定了可靠基础,即精准农业诞生。精准变量施肥技术是精准农业最早应用的领域,经 20 余年发展,此项技术有效解决了土壤-作物-养分间互作关系,引领精准农业技术进步。精准变量施肥技术体系主要由土壤数据与作物养分信息检测采集技术、施肥处方图生成与实时传感器技术和精准变量施肥控制技术等 3 部分组成,技术体系如图 5 所示。

2.4 灌溉施肥技术

灌溉施肥是将农作物生长所需基本因素水分和养分相结合,根据土壤养分含量和农作物需肥规律,通过灌溉系统将可溶性固体肥料或液体肥料配兑施入作物根部区域,保证农作物土壤所需水分和养分,

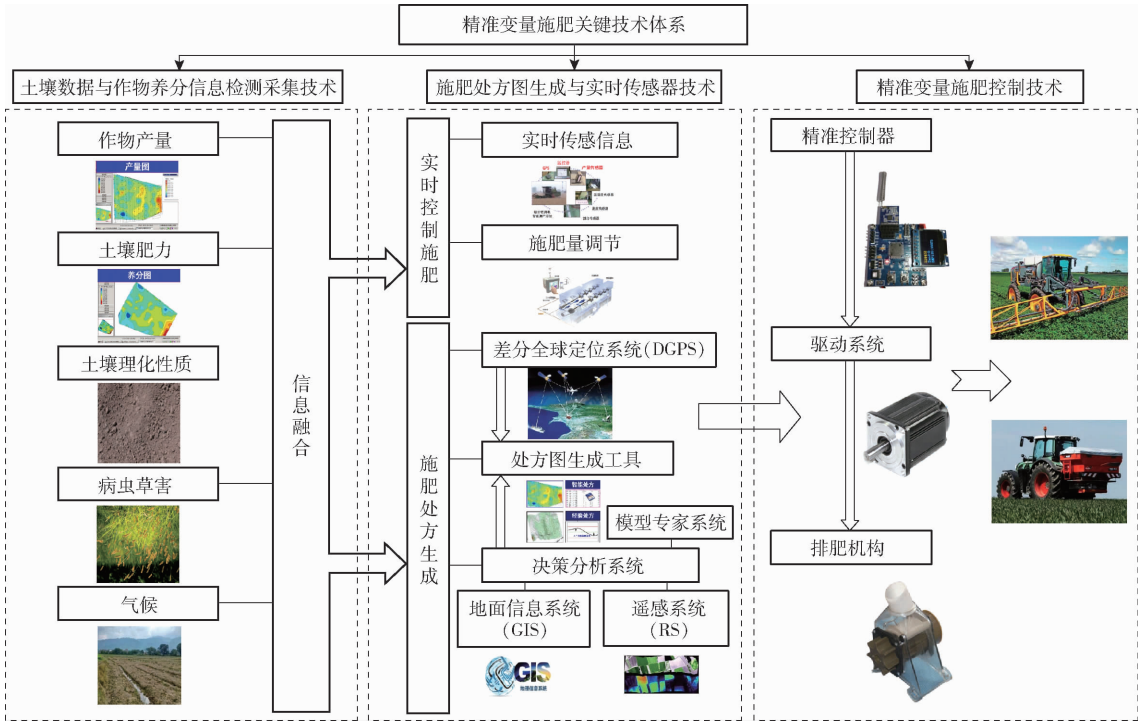


图 5 精准变量施肥技术体系

Fig. 5 Technical system of precision variable-rate fertilization

避免水肥深层渗漏和超量蒸发,是一项高效实用农业技术^[45],又称水肥一体化。相对于传统施肥方式,此项技术可满足农作物各生长期水分和养分需求,减少肥料与土壤接触面积,实现农田水分和养分综合调控及一体化管理,提升水肥综合利用率,为根系生长维持相对稳定的水肥环境,具有省肥节水、省工省时、控温调湿、减轻病害及提高农作物产量和品质等优点。国外于 20 世纪 60 年代初开始对灌溉施肥技术开展相关研究,经多年发展已在世界范围内得到了广泛应用,目前以色列及美国等农业生产多采用灌溉施肥作业。中国亦重点倡导和推广此项技术,最先由华北、东北及西北等资源性相对缺水地区开展推广,现应用面积已达 667 万公顷,其中新疆地区约 201 万公顷,东北地区约 254 万公顷,预计至 2020 年全国推广面积可达 1 000 万公顷,逐步形成了由旱区至全国、由设施至大田、由经济作物至粮食作物的趋势^[46]。由于其特定施肥载体为灌溉水,所需液态肥料或固态肥料应具备较强水溶性且含杂较少,如氨水、尿素及硝酸钾等,一般不建议使用颗粒复合肥,沼液及腐殖酸液肥需过滤避免堵塞管道。根据其作业方式可分为地表灌溉施肥、喷灌施肥、滴灌施肥和微喷施肥等,典型示范作业如图 6 所示。

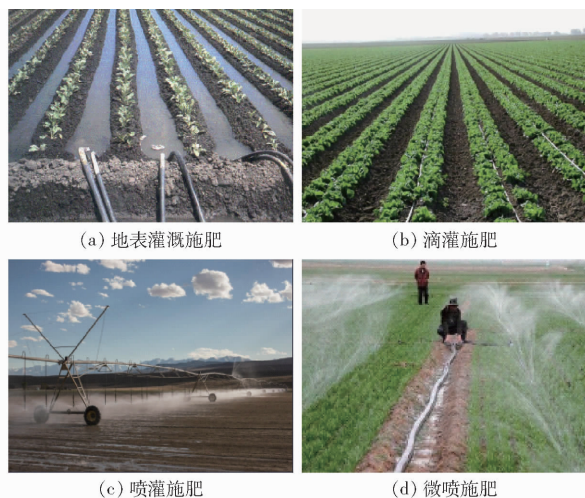


图 6 灌溉施肥示范

Fig. 6 Demonstration of irrigation and fertilization application

2.4.1 地表灌溉施肥技术

地表灌溉施肥是在常规无压灌溉条件下将肥料以一定比例溶于灌溉水中直接施于田间,是应用最传统的灌溉施肥方法^[47]。根据其作业形式可分为漫灌施肥、沟(畦)灌施肥和波涌灌施肥等;其中漫灌施肥将肥料撒施于地表并放水淹没,此种方式严重浪费水肥资源,在国内部分水稻和小麦种植地区仍有所应用;沟(畦)灌施肥将溶于肥料的灌溉水施于田间渠道或畦间,主要应用于蔬菜、葡萄及果树等经济作物;波涌灌施肥主要采用自动脉冲阀间断性

将不同流量灌溉水肥以振荡脉冲形式送至田间预定位置,在田间平整区域其施肥效率可接近有压灌溉施肥水平^[48]。

国外对地表灌溉施肥技术研究较早,目前此种方式仍占美国农业灌溉施肥 60% 以上。对传统沟(畦)灌施肥研究多采用试验方法探究灌溉施肥均匀性,建立相关数学模型分析土壤初始含水率、沟(畦)灌流量、入渗参数、田面粗糙率及施肥时间等对其效率影响^[49-50];随着激光平整、脉冲灌水及尾水回收利用等技术不断发展,其田间多采用管道输水施肥,通过管道直接将水肥送至沟畦,有效提高灌溉施肥均匀性及作业效率。相对而言,国内外学者对波涌灌施肥研究较多,1979 年,美国 STRAINGHAM 等首次提出波涌灌概念并应用至施肥领域^[51],在各地区先后开展波涌灌施肥与连续灌溉施肥田间效果对比;1986 年,美国农业部正式颁布了波涌灌溉施肥技术指南^[52],至此进入应用推广阶段。目前,对此项技术研究多集中于波涌灌施肥减渗机理探讨,建立权函数模型、梯函数模型和周期循环率模型等入渗模型,分析水肥平衡、完全水动力学、零惯性量和运动波等水肥流动模式。

由于地表灌溉施肥可有效节约施肥过程中劳动力投入,目前中国一半以上农业灌溉均采用此种无压灌溉方式,但较有压灌溉其施肥效率低,资源浪费严重且控制过程复杂,因此对其研究较少,技术发展较为缓慢。国内部分地区经济和社会因素无法实施有压灌溉施肥作业,随着计算机技术发展有效推动了地表灌溉施肥技术的优化实施,且农业化学品污染与地表灌溉具有密切关系,因此加快对地表灌溉施肥技术研究具有重要意义。国内专家学者建立了多种区域性地表灌溉系统,模拟地表及地下水溶质运移关系,特别针对地表溶质运移的弥散效应进行探讨,但相关模型多局限于单一农作物或某区域的灌溉施肥作业,其适用性及有效性有待考证。未来应结合环境及经济等因素,对农作物各生长期的地表灌溉施肥规律进行研究,将所建立的农作物模型与施肥效应结合,评估施肥措施对水分、养分、作物产量、经济效益及肥料淋失等系统影响,以有效提高肥料利用率。

2.4.2 滴灌施肥技术

滴灌施肥是将肥料注入滴灌系统,利用压力系统或地形自然落差,通过管道系统及安装在末级管道喷头将小流量水肥均匀精准地施于农作物根部附近^[53]。此种方式是基于滴灌作业发展的一项现代施肥技术,较常规施用方式可提高水资源利用率 40% ~ 60% 和肥料利用率 30% ~ 50%,满足农作物各生长期水肥需求。其中滴灌施肥系统主要由水源

工程、首部枢纽(供水系统、过滤系统、施肥系统及控制系统等)、配水管网(主管、支管及毛管等多级管道)、灌水器(滴头和滴灌管)和流量压力控制系统等组成^[54],其系统组成如图 7 所示。根据滴头布置深度可分为表面滴灌施肥和地下滴灌施肥;其中滴头流量小于 7.5 L/h,滴头处于 20 cm 以下土层且不影响表面耕作即地下滴灌施肥;滴头处于 20 cm 以上土层且田间管路需及时更换即表面滴灌施肥;此两种方式仅滴头所处深度具有一定差异,配套设备基本相同,目前表面滴灌施肥是应用最广的灌溉施肥方式。

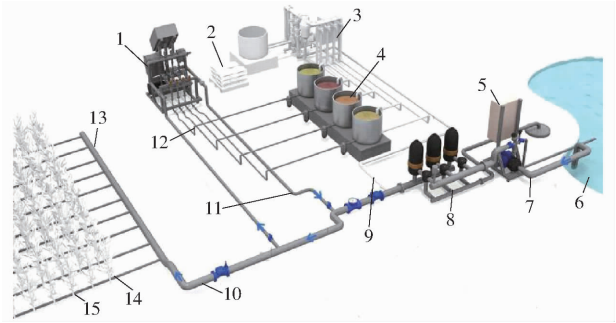


图 7 滴灌施肥系统组成

Fig. 7 Composition of drip irrigation and fertilization system
1. 灌溉施肥机 2. 肥料装置 3. 自动加水系统 4. 肥料 pH 中和罐 5. 变频控制器 6. 水源 7. 水泵 8. 过滤系统 9. 分流管 10. 出水/施肥管 11. 供水管 12. 吸肥管 13. 主管 14. 滴灌管 15. 滴头

国外于 20 世纪 60 年代初开始对滴灌施肥技术开展研究及应用。1964 年,以色列已建立了全国范围输水系统进行灌溉施肥,其一半以上耕地皆采用此种加压灌溉施肥作业^[55];20 世纪 70 年代,澳大利亚、以色列、墨西哥、新西兰、美国及南非等 6 个国家结合各国农业模式相继开展灌溉施肥技术研究并得到快速推广;至 20 世纪 80 年代,以色列开始进行自动化灌溉施肥系统研发,设计了施肥罐、文丘里施肥器和水压驱动比例注肥器等部件,结合自动控制技术及计算机技术创制了多种智能现代滴灌施肥系统及设备,有效提高所施养分均匀性及水肥利用率^[56]。目前,以色列已在农业各领域全面推广此项技术,其应用面积占灌溉面积 67.9%;美国是滴灌施肥及微喷灌施肥面积最大国家,研发了多种专用水溶性肥料,并创制配套水肥注入控制装置,已实现精细化灌溉施肥作业^[57]。国外已形成了肥料配制、设备生产及示范推广服务于一体的完善滴灌施肥技术体系,特别对水肥精准控制系统研究最为先进,如以色列爱达尔(Eldarhany)公司生产的 Frtimix/Fertigal 系列和耐特菲姆(Nertfim)公司生产的 Netajet/Fertikit 系列全自动智能灌溉施肥机^[58],结合传感器技术、互联网技术、EC/pH 综合控制系统、

气候控制系统及自动排水反冲洗系统等先进技术,可依据农作物类型及各生长期灌溉施肥特征,实时采集环境数据信息并检测水肥比例,经专家决策分析将肥料精准注入滴灌管道,配备水肥采样检测功能进行水肥浓度和流量自动化反馈调控,有效提高水肥耦合效率,实现水肥养分的全自动化管理。

中国对滴灌施肥技术研究较晚,1974 年由墨西哥引进滴灌系统,结合农艺栽培技术逐步开展滴灌施肥设备研究^[59];1980 年,国内自主研发了第一代成套滴灌施肥设备,在融合国外先进技术与生产工艺基础上,逐渐实现了规模化生产^[60];至 20 世纪 90 年代,国内对滴灌施肥理论进行深入研究,各级农业推广部门相继开展相关培训研讨。近些年,在国家政策支持与生产实际需求双重推动下,各地区逐渐建立滴灌施肥核心示范区,由小面积试验示范发展至大面积推广应用,辐射范围由华北区域扩大至西北旱区、东北地区及华南地区,覆盖设施栽培、无土栽培和果树栽培等多种栽培模式。如小麦滴灌施肥^[61]是对密植作物灌溉的一次革新,由地表灌溉施肥向地下灌溉施肥和膜下灌溉施肥模式发展,显著提高水分利用率 35% 和氮肥利用率 30%;新疆农垦科学院^[62-63]提出了膜下滴灌施肥综合管理技术,开发系列配套机械化装备,可一次完成开沟、施肥、播种、铺设滴灌带和覆膜等多项作业,有效推进棉花产业发展,整体技术已达国际领先水平,典型配套机具及示范效果如图 8 所示。



(a) 配套机具 (b) 示范作业

图 8 棉花膜下滴灌施肥机械化示范

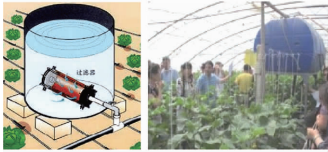
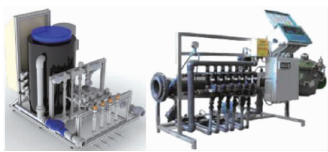
Fig. 8 Mechanization demonstration of cotton drip irrigation and fertilization under film

总体上,中国滴灌施肥技术已处于中级阶段,国内高校院所及企业不仅局限于对传统土壤状态及节水增效试验等研究,正逐步开展滴灌施肥条件下水肥耦合效应、农作物生理品质影响规律和土壤养分运移规律等研究,并从自动化滴灌施肥转变为智能变量滴灌施肥,部分智能控制系统应用于国内现代温室设备。但对田间滴灌施肥作业成熟度仍有待提高,应用面积较局限,水肥耦合理论与成果应用有待深入,且土壤养分数据及施肥数据获取难度较大,精准滴灌施肥作业操作难度大,土壤信息管理系统和专家决策系统应用成熟度不足,核心系统设备与国外同类先进产品仍存在一定差距。

滴灌施肥滴头、过滤装置、施肥装置及精准控制系统研究一直是国内外关注重点及热点。如针对喷头因化学物质沉淀、微生物生长或根系入侵等原因造成的田间管路堵塞和水肥分布不均等问题,国内外学者从材料选择、生产工艺及结构设计等方面进行大量研究,研制多种类型喷头,如低流量大口径和压力补偿式等^[64]。为防止滴灌施肥过程中泥沙及有机质堵塞管道和喷头,分别设计了多种过滤装置,如砂石过滤器、吸力自清洗式网式过滤器、低压自动冲洗叠片式过滤器和自动水力驱动无压进水口过滤器等^[65],并根据作业环境组合配置多级过滤系统。对施肥装置研究一直是滴灌施肥系统的核心内容,主要包括定量施肥装置(自压式施肥器和压差式施

肥罐)与比例施肥装置(文丘里施肥器、比例式注肥泵和全自动智能施肥机)。其中比例施肥装置供肥比例固定,可一定程度实现精准控制,避免水肥施用不均问题,部分典型滴灌施肥装置总体结构、工作原理及技术特点如表 1 所示^[66-67]。国内外专家学者对各类型施肥装置进行相关研究,以色列阿米亚德公司(AMIAD)等^[68]研制的水力驱动比例注肥泵无需额外动力输出设备,可实现精准控制肥料浓度功能;荷兰普瑞瓦(Priva)公司^[69]研发了多款压差式滴灌施肥器,实现温室水肥精准控制;韩启彪等^[70]采用理论分析与流体动力学(CFD)数值方法对文丘里施肥器进行了优化改进,并对比 6 种文丘里施肥器吸肥性能,探求其结构参数对水力性能影响规律。

表 1 部分典型滴灌施肥装置
Tab.1 Partial typical drip irrigation and fertilization devices

类型	总体结构	工作原理	技术特点
自压式施肥器		通过肥料源和灌溉田间高度差实现随水施肥;作业时需计算每轮灌溉区肥量,加水溶解稀释进入主流水灌溉系统	利用重力施肥,对地形差具有要求 无需配备额外加压设备 施肥均匀性低,易受水压差影响 多应用于山区和高地等自压区域
压差式施肥罐		由肥料灌、进出水管和调节阀等组成;通过调节阀前后进出口间压力差使水流进入施肥罐充分混合水肥并压入灌溉系统	成本低、易维护,适于提前追肥作业 肥液浓度逐渐降低 易造成主供水管道压力下降 自动化控制难度大
文丘里施肥器		水流经由大渐小再由小渐大的管道,在最窄处水流加大且压力减小,于喉管处将产生负压,肥液经小口径吸管吸入灌溉系统	结构简单,成本较低,且节约肥料 吸肥能力和施肥浓度易受水压影响 水流损失 30% ~ 50%,降低管道水压 易于自动化控制
比例式注肥泵		通过动力驱动泵体工作,吸入定量肥料与主管内水流充分混合注入灌溉系统;分为水力/机械驱动容积式、柱塞式、隔膜式和活塞式等	流量稳定,易实现自动控制施肥量 吸肥流量低,需配备灌溉管网水压 规格参数匹配性好,耐腐蚀性强 应用于设施农业和小规模灌溉系统
全自动智能施肥机		通过智能测定及决策分析后配比肥料,由水泵压入主管,其系统内部均以恒压水流工作,配置排气设备以排除混肥过程中多余空气	实现恒定浓度、精准施肥 自动吸取母液配置营养液, 监测营养液 EC/pH 值 需消耗额外电能,成本较高

在滴灌施肥控制系统方面,国外学者对其研究较早且深入,以色列 THOMPSONS 等^[71]设计配置以控制器和检测单元为核心的计算机专家系统,可依据所采集 EC/pH 值判别最佳的滴灌施肥作业时间;伊朗 MAHMOUD OMID 等^[72]运用 VB 程序语言设计了温室滴灌施肥监测系统,可根据温室湿润度、CO₂供给量和土壤温度等条件自动实施滴灌施肥;墨西哥 DOMINGO 等^[73]首次将 FPGA 技术(Field-programmable gate array)和模糊控制技术相结合,研制了具备在线调控水肥功能的温室灌溉施肥系统。

国内学者开展了大量关于设施农业滴灌施肥控制系统的研究,多采用单片机控制原理,结合硬件装置和软件系统实现滴灌施肥作业的精准控制和同步实施,集成多种自动化智能控制施肥决策系统及配套施肥设备,保证作业过程中可精准控制施肥量、灌溉水量和施肥浓度等。但所开发的控制系统研究方法单一,自动化程度低,EC/pH 值控制精度稳定性差且通用性低,多处于试验调试及小范围应用阶段,无法完全满足大田滴灌施肥精准控制的要求。

近些年,随着网络传输、信息感知、数据处理与现代控制等先进技术的快速发展及物联网技术逐渐兴起,基于农业物联网的智慧精准滴灌施肥技术及配套装备已成为未来发展必然趋势,实现大田栽培

科学管理、设施农业环境监测和灌溉施肥控制实时掌控,有效减少农业生产人力化管理,节约肥料及农业用水投入,降低生产成本,具有广阔应用前景,智慧精准滴灌施肥体系如图 9 所示。



图 9 基于农业物联网的智慧精准滴灌施肥体系

Fig. 9 Intelligent precision drip irrigation and fertilization system based on agricultural internet of things

此技术体系需配套互联网实时通讯的滴灌施肥全自动智能施肥设备和水肥运行管理控制器,并建设农作物灌溉施肥信息采集系统和多学科共享的集控服务器。其中集控服务器为数据处理和决策平台,负责发布灌溉施肥决策信息,多学科各种专家模型在此平台下汇集融合共享,可通过大数据后处理和专家库程序化、自学习和人工智能等知识进行开发;农作物灌溉施肥信息采集系统需建设专业气象环境站、土壤墒情及作物信息检测点,或配备无人机和卫星遥感等监测手段,通过农作物各生长期所需水肥规律和灌溉施肥分析决策进行数据处理,经互联网传输至专业服务器。水肥运行管理控制器具备与手机 APP 系统平台互联通信功能,负责管理全自动智能施肥设备、太阳能供电及一体化泵房等,其中设备运行、故障和费用支付等信息由控制器和传感器完成,可通过手机 APP 系统平台进入水肥运行管理控制器信息界面,获取灌溉施肥作业有效信息,经专家系统处理地图实时监测整体作业数据。

2.4.3 微喷灌施肥技术

微喷灌施肥是将肥料注入微喷或喷灌系统,由水泵加压或自然落差形成有压水肥并通过压力管道送入田间,经喷头喷射至一定高度空中,形成细小液滴并均匀洒落至土壤表面和农作物叶片^[74]。此种施肥方式具有对地形和土质适应性强,耕地利用率高,水分深层渗漏和地面径流效应较小等优点,但易受外界风力影响,风力达 3~4 级时需停止喷施,减少肥料蒸发损失。微喷及喷灌施肥系统所配置首部

枢纽与滴灌施肥基本相同,仅喷灌终端(喷灌机和喷头)具有一定差异,部分典型微喷灌施肥喷头总体结构及技术特点如表 2 所示^[75-76]。此种施肥方式与滴灌施肥最大区别在于将水肥直接喷施于叶面,适于微量元素肥料施用,可添加农用化学杀虫剂实现同步施肥喷药功效,主要应用于保护地种植和园艺作物等,正逐渐被滴灌施肥所替代。

国外对微喷灌施肥技术研究较早,配套基础农业设施较完善,所采用的微喷灌施肥装置主要为附加动力泵注式和压差式,目前美国喷灌施肥装置多采用维蒙特(Valmont)灌溉工业公司生产的柱塞式比例注肥泵^[77],配套大型机组灌溉机进行喷灌施肥,结合自动控制技术实现高效喷灌施肥作业,在中国内蒙古等地示范区亦有所应用。中国对微喷施肥技术研究相对成熟且应用广泛,结合微灌特点设计了多种类型施肥装置及喷头,但所开发的喷灌施肥系统仍存在诸多问题,典型泵注式和压差式施肥装置存在压力损失较大、施肥控制稳定性较差等问题,且尚无针对喷灌施肥的成套产品与技术规程,部分核心部件仍需购置国外原件,如典型压差式施肥装置其施肥性能易受喷灌机管道压力流量波动变化影响。国内专家学者多致力于泵注式喷灌施肥机及其关键部件研究,如中国农业大学严海军等^[78]以圆形喷灌机为载体,设计了多种配套比例式注肥泵,并开展田间试验检测其作业性能;江苏大学袁寿其等^[79-80]创制了多种类型喷灌机具及配套泵体,采用理论分析及虚拟仿真对泵体及喷头进行优化设计,

表 2 部分典型微喷施肥和喷灌施肥喷头
Tab.2 Partial typical sprinklers for micro-irrigation and sprinkler-irrigation fertilization

类型	形式	总体结构	技术特点
固定式	折射式		结构简单,工作可靠,各部件相对于喷管固定,以全圆周或扇形喷洒,水肥对农作物打击强度小,所需工作压力较低,且雾化程度较高;喷施射程近,均匀性较差,喷孔易堵塞
	缝隙式		
	离心式		
旋转射流式	摇臂式		由喷嘴、喷管、粉碎机构和转动机构等组成;绕其铅垂线旋转,流量调控范围大,喷施射程远,均匀性较高;当喷头垂直度无法保证时,对转速及喷施均匀性产生一定影响
	叶轮式		
	倒挂式		
孔管式	单/多列孔管式		由单根或多根微小直径滴管组成,顶部分布微小喷孔;工作压力低,且强度较高,易受风力影响,管内压力对地形适应性差,管孔易堵塞

部分成果已在喷灌施肥领域得到应用推广。

2.5 大宗农作物典型施肥技术

由于各类大宗农作物栽培管理模式具有一定差异,在实际生产中其配套施肥技术亦各不相同。为进一步分析各类农作物典型施肥技术在化肥减施增效发展中所发挥的重要作用,本文重点选取水稻侧深施肥、玉米机械化施肥及小麦机械化施肥等普遍应用关键技术进行阐述分析,以完善化肥施用科学技术管理体系。

2.5.1 水稻侧深施肥技术

水稻侧深施肥是在机械插秧或直播作业过程中将肥料(基肥、蘖肥或基蘖穗肥)同步施于秧苗侧位(苗侧 3~5 cm)具有一定深度土壤(深度 4~6 cm)的施肥方式^[81],其肥料呈条穴状施于耕层根系附近,可有效提高肥料利用率达 50% 以上,较常规撒肥提高 15~20 个百分点,节约肥料施用量 10%,减少人工作业次数,实现农业生产节本增效,已被农业农村部确定为 2018 年重大引领性农业技术。由于水田复杂多变作业环境,对此项技术实施及配套机具作业性能提出了较高要求^[82],即:结合水稻需肥规律、土壤供肥情况及侧施需求效果选择合适的专用缓控释肥为施用对象;田块精细平整,泡田后无过多稻秸残体等杂物漂浮,防止堵塞施肥装置;配套机

具作业平稳,肥料施用量准确且均匀,气力式或机械式排肥部件均匀排肥,防止肥料潮解固结。

国外对水稻侧深施肥技术及配套机具研究较早且深入,其中日本因其集约化及精准化农业生产模式,在中小型地块水田施肥技术领域研究较为领先,日本久保田、井关、东洋及洋马等公司^[83]对水田侧深施肥装置开展了大量创新性研究工作,并配置于高速水稻插秧机及直播机,形成系列化和标准化产品。所生产的侧深施肥装置多采用机械结构排肥和气力输肥方式进行施肥^[84-85],其中气力输肥系统基本采用正压风送原理实现颗粒肥料输送;机械排肥机构多采用直槽轮式排肥器,日本洋马公司生产的排肥机构可通过更替不同孔径排肥盘调节传动比,实现施肥量稳定变化。由于国外水稻侧深施肥农艺模式不同,且配套装置安装复杂,其与中国水稻种植机具匹配性较差。中国于 20 世纪 60 年代开始开展水稻侧深施肥装置研究,通过引进国外先进技术并结合水稻种植农艺要求,先后提出了 20 余种侧深施肥方案并研制配套机具,重点对其排肥机构、肥箱及压实平辊等进行改进,并开发肥料监测和堵塞报警系统,已可满足各区域水稻侧深施肥农艺要求。部分国内应用较广的典型水稻侧深施肥插秧机总体结构及技术特点如表 3 所示^[86-87]。

国内高校院所及企业对水稻侧深施肥技术亦开展了相关研究,开发多种适用于水稻插秧及直播作业的配套施肥装置,部分得到示范应用推广。罗锡文团队^[88]研制了一种同步开沟起垄侧深施肥水稻精量穴直播机,已与上海世达尔现代农机有限公司联合进行应用推广;陈长海等^[89]以独轮乘坐式插秧机为载体,配置了螺旋输送式侧深施肥装置,采用螺旋推杆将肥料强施于耕层,但存在肥口易堵塞问题;李革等^[90-91]结合水稻密苗栽植农艺要求,提出了多种侧深施肥装置改进方案;王金峰等^[92-93]设计了叶片调节式和气力输送式水稻侧深施肥装置,解决了施肥均匀性低和输肥管路堵塞等问题;左兴健等^[94]采用电机驱动排肥和风送输肥原理,结合 GPS 系统设计了风送式水稻侧深施肥装置。目前,国内对水稻侧深施肥技术研究仍处于模仿与探索阶段,其关键部件基础理论、精准控制方法及其田间适用性和可靠性研究较少,一定程度影响了此项技术进一步应用推广。

2.5.2 玉米机械化施肥技术

玉米机械化施肥是在其各生长期采用施肥机具以撒施、条施或穴施等方式将肥料施于种子、作物根系及叶面附近以供给所需养分^[95]。中国玉米种植面积广阔,根据土壤质地、气候变化及栽培模式等特点,玉米机械化施肥主要模式为:夏玉米采用基肥

表 3 部分国内典型水稻侧深施肥插秧机

Tab.3 Partial typical rice transplanting machines with side deep fertilizing devices in China		
型号/厂家	总体结构	技术特点
2FC-6 型乘坐式侧深施肥插秧机/洋马农机(中国)有限公司		采用转盘式排肥和气流输肥原理完成施肥;可手动将独立肥箱由中央向两侧抬起完成清肥作业;依靠气流作用可防止气料混合部位发生肥料堵塞;采用肥料齿盘精量分料配肥,通过微调旋钮可无级调节施肥量。施肥装置质量 55 kg,作业行数 6 行,肥箱容量 78 L(13 L/个×6 个),施肥量调节范围 60~915 kg/hm ² ,施肥位置侧向 50 mm、深度 40 mm,配套作业效率 0~0.55 hm ² /h
2FH-2.4 型多功能侧深施肥插秧机/久保田农业机械(苏州)有限公司		采用带槽滚筒式排肥和气流输肥原理完成施肥;通过回转带槽滚筒实现驱动排肥,气流输肥系统可吸收发动机周围热空气,保证输肥管道内部气流干燥,缓解因肥料潮解造成堵塞,可通过手动和机械方式调节施肥量。施肥装置结构质量 50 kg,作业行数 8 行,肥箱容量 73.5 L,施肥量调节范围 150~900 kg/hm ² ,施肥位置侧向 45 mm、深度 50 mm,配套作业效率 0~0.42 hm ² /h
2FH-1.8B 型乘坐式侧深施肥插秧机/东风井关农业机械有限公司		采用带槽滚筒式排肥和气流输肥原理完成施肥;独立肥箱位于驾驶员两侧,增加辅助加苗者活动空间;回转带槽滚筒呈两段交错式排布,降低了槽轮排肥时存在脉动现象;可采用手动和杆切方式无级调节施肥量。施肥装置结构质量 60 kg,作业行数 6 行,肥箱容量 60 L(30 L/个×2 个),施肥量调节范围 90~750 kg/hm ² ,施肥位置侧向 45 mm、深度 50 mm,配套作业效率 0~0.53 hm ² /h
2FHCJ-1.8 型侧深施肥插秧机/潍坊同方机械有限公司		采用螺旋推进式强制排肥原理完成施肥;侧深施肥控制系统分机械式和电机驱动式 2 种形式,采用双头螺旋推进器强制排肥,避免肥料在出肥口处堵塞,推进器皆配置安全离合保护装置,可通过 9 个挡位机械手柄调节施肥量。施肥装置结构质量 50 kg,作业行数 6 行,肥箱容量 40 L,施肥量调节范围 270~480 kg/hm ² ,施肥位置侧向 30~50 mm、深度 40~60 mm,配套作业效率 0~0.27 hm ² /h

(配方复合肥+种肥同播)+机械追肥;春玉米采用基肥(配方复合肥+秸秆还田)+种肥同播(专用种肥)+机械追肥。根据肥料施用时期可分为基肥施用、种肥施用、一次性分层施肥和中耕追肥等。

玉米基肥施用是在播种前采用施肥机具将有机肥和化肥施于土壤,并配合耕整地作业将肥料翻埋于耕层,实现培肥地力和疏松土壤目的,此种施肥方式与耕作制度密切相关^[96]。在传统耕作模式下,于播种前或前茬作物收获后采用人工或撒肥机将固态肥料撒施于地表并翻埋于耕层。常见固态肥料撒肥机包括全幅式、摆动式和离心式等,其中离心式应用最为广泛。随着保护性耕作模式推行实施,秸秆粉碎还田、腐熟还田、过腹还田、免耕及条带耕作等方式正逐渐取代传统基肥撒施。美国约翰迪尔(John Deere)公司^[97]生产的 JD1770NT 型玉米免耕施肥播种机,将基肥与种肥同步施于垄台内,并于垄侧距行中心 5 cm 处加施液态氮肥,满足追肥前作物所需氮肥营养;美国 DAWN 公司^[98]生产的 HS-AIR 系列施肥单元,将固态或液态肥料经输肥系统施于凿形铲所开深沟底层,其施肥深度可达 15~20 cm;中国东北玉米垄作地区多于联合整地机后侧配置施肥部件,将基肥条施于垄体正下方,完成灭茬、旋耕、施

肥、起垄及镇压等复合作业;李文哲等^[99]以沼液沼渣为基肥,设计了一种液态沼肥暗灌溉施肥机具,实现沼肥抽装运输、田间深松及暗灌施肥等多项作业。

玉米种肥施用是在播种期采用施肥播种机将肥料与种子按一定位置关系施于耕层。根据种肥位置关系可分为:种肥混施,即将种子与肥料混合同步施于沟底,需严格控制施肥量以避免肥料直接接触腐蚀烧伤种子;种肥侧位分施,即将肥料施于种子侧下位置(种侧 3~5 cm,种下 5 cm),因肥料集中于种子一侧易造成两侧肥效不均问题;种肥正位分施,即将肥料施于种子正下位置(种下 5 cm),其与种子间隔 3~5 cm 土层,引导种子幼苗根系向下生长,但所消耗配套动力较大。近年来国内市场常见施肥播种机及所研发新型施肥装置多采用肥料正/侧位分施方式。吉林省康达农业机械有限公司^[100]生产的 2BMF 系列玉米免耕播种机可在全覆秸条件下一次进地完成侧位分施、种床整备、精量播种和覆土镇压等多道工序;付乾坤等^[101]设计的玉米灭茬起垄施肥播种机,李复辉等^[102]设计的船轮式玉米免耕精量施肥播种机和陈海涛等^[103]设计的大垄玉米原茬地免耕施肥播种机,结合灭茬、耕整、条施肥及播种等部分环节,提高机具作业质量与效率;林静团

队^[104]设计了免耕播种机穴施肥控制系统,并开发配套算法实现穴施肥位置与肥量的精准调节。

玉米一次性分层施肥是在播种期采用分层施肥装置将肥料一次性、分多层施于耕层,有效提高肥料利用率,减少进地作业次数,其所施肥料种类多为高氮复混肥或缓控释肥。目前对此项技术研究多集中于农艺施肥效果探讨及关键部件开发。邹忠君等^[105]通过田间对比试验发现,分层施肥技术可满足玉米各生长期养分需求,显著提高农作物产量;王云霞等^[106]结合玉米需肥规律设计了一种可调式分层施肥器;姚万生等^[107]研制了一种组合式同沟分层施肥播种开沟器,可将种子及肥料按一定配比精准施于耕层;张俊雄等^[108]开发了一种玉米分层正位分层穴施肥机构,采用 SPH 算法对穴施肥状态进行模拟,验证机具设计合理性及可行性。

玉米中耕追肥是在其生长中后期供给养分的一项重要农业措施,常与中耕深松同步实施,一次完成松土、除草及施肥等作业。中耕追肥肥料种类以液态氮、液态硝铵尿素和固态尿素为主,合理追肥时期应在玉米养分需求最旺盛的拔节期至大喇叭口期^[109],但实际生产多于出苗后几周即进行追肥。主要由于部分地区采用人工追肥或将施肥播种机卸除播种单体后进行中耕施肥,因作业面积、天气降雨及机具地隙过低影响其田间通过性,且易造成苗带机械损伤。常见中耕追肥形式主要包括地表撒施、叶面喷施或条/穴深施等。国外对玉米中耕追肥技术及配套机具研究较为成熟,美国 Yetter 公司^[110]专业开发各类施肥器,生产了可适于免耕翻耕、地表残茬、施肥位置、土壤质地及强制入土等要求的系列开沟部件,被广泛应用于世界著名农机生产公司的耕种及施肥机具。针对常规施肥机具地隙较低、追肥期过早且无法完全满足农艺要求等问题,国外企业研发了多种高地隙叶面喷施追肥机具。美国十方(Hagie)公司^[111]生产的 STS 系列喷药机配置施肥悬挂系统,其离地地隙 183 cm,幅宽达 12.2 m,可一次完成 24 行玉米追肥作业;约翰迪尔(John Deere)公司^[112]生产的 JD2510L 型追肥机离地地隙达 76.2 cm,同时提高了其配套液灌车地隙,有效延长玉米追肥时间。随着信息化、自动化及智能化技术在中耕施肥机具应用,国外先进机型皆安装多种农用传感器,可根据玉米冠层营养诊断结果实现精准变量追肥作业。国内高校院所及企业引进先进高效中耕施肥机具,结合中国玉米种植农艺要求开展了配套机具相关研究。中国农业大学^[113]通过引进 Yetter 公司施肥器,配置设计了 2FZ2995-4 型高地隙玉米追肥机,可沿垄侧 20 cm 处进行条深施肥作业,离地间隙达 70 cm,最高可对 1.2 m 植株进行追

肥;胡红^[114]设计了一种小型玉米行间定点扎穴深施追肥机,玉米行间一次完成 2 行扎穴追肥;李沐桐^[115]研制了玉米苗期自动穴施肥控制机构,实现玉米中耕精准追肥作业。

国外玉米施肥作业主要采用大型专业施肥机具,其配套机具门类齐全,可满足玉米生产各环节施肥要求,呈现大型、复式及高效特点,正朝着自动化、智能化及精准化方向发展。相对而言,中国玉米施肥配套机具多由传统机械改造而成,缺乏系统性设计原则与方法,作业性能及技术指标相对落后,且自动化程度低。未来应逐步加大有机肥料施用比例,重点开发玉米中后期追肥的高地隙液态肥追肥机及液态有机肥运输施肥机等专业机具。

2.5.3 小麦机械化施肥技术

小麦机械化施肥是在其各生长期采用施肥机具实现肥料翻埋混施、种肥同施、根系深施和叶面喷施等功能,完成基肥、种肥及追肥等施用环节。根据农作物生长期及对温度需求可分为冬小麦和春小麦,中国以河南省及山东省等地种植的冬小麦为主。小麦需肥规律较为特殊^[116],其对土壤肥力依赖性较高,氮肥需求不宜过多,而对磷肥较为敏感,应合理注重基肥施用,减少种肥用量,适时分期追肥。

小麦基肥施用是其养分主要来源,占施肥总量 60% 以上,可有效促进麦苗早发及根系生长。目前,中国小麦基肥施用仍沿用地表撒施+深埋或旋耕深施方式,存在肥料无序投放且利用率较低等问题。国内专家学者从结合小麦种植农艺要求对其基肥施用方式及配套机具进行了研究。席天元等^[117]研究发现分层施用磷肥可明显促进冬小麦生长发育;祝清震等^[118]基于旋耕覆土原理提出了一种冬小麦基肥精准分层定深投送方法,并设计了配套施肥机具。此外,在部分小麦玉米轮作区、稻麦轮作区及稻麦油轮作区等地所开展秸秆还田作业亦一定程度替代了传统基肥施用。

小麦种肥施用主要以条施或穴施方式与播种作业同步实施。国外长期致力于大型高效小麦施肥播种机具研究,并配置条施或穴施部件实现种肥同施作业,美国约翰迪尔(John Deere)公司^[119]生产的 JD1030 型小麦免耕施肥播种机,配置双开沟系统将肥料条施于种下 5~8 cm 处以保证养分有效汲取。随着中国保护性耕作不断推广,小麦机械化施肥亦进入新的阶段,国内高校院所及企业不断研发新型配套机具,但由于小麦种植模式较为多样,各区域土壤质地、前茬状态及光温条件等不同,所开发关键部件及整机配置具有较大差异。河南豪丰机械制造有限公司^[120]生产的 2BSX 系列小麦免耕施肥播种机,可在秸秆还田地块一次完成平地、开沟、播种、施肥、

镇压、覆土及打畦等复合作业;王志伟等^[121]结合黄淮海小麦玉米轮作区种植特点,设计了一种小麦深松分层施肥宽苗带播种机;胡红等^[122]提出了适于长江中下游稻麦轮作区“种-肥-种”播种施肥和带状旋耕相结合防堵思路,设计配套稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机具。

适时追肥是保证小麦高产稳产重要保证,结合前期基肥+种肥施用及小麦需肥规律,在拔节期至灌浆期进行根区条/穴深施追肥或叶面喷施追肥。欧美等地应用较广的辐轮式液态肥深施机具可将液态肥注入小麦根区附近,减少对土壤结构破坏及肥料挥发损失^[123]。国内对小麦追肥技术及配套机具研究相对较少,多采用人工或简易机具进行根区深施或叶面喷施。冯慧敏等^[124]针对冬小麦返青后深施追肥作业需求,结合拖拉机自动驾驶技术研制了小麦精准对航精量深施追肥机具;陈满^[125]以所设计的冬小麦精准追肥机为研究载体,开发配套追氮专家决策系统。此外,采用滴灌施肥在小麦各生长期内进行全程灌溉施肥作业,可有效提高水肥利用率,已在部分地区得到大面积应用推广。

3 发展趋势分析与建议

目前,如何有效平衡粮食产量品质及生态安全与化肥减施增效间关系成为需要解决的系统工程问题,亦是多种现代施肥技术发展的重要驱动力。在国家大力发展可持续生态农业背景下,亟需结合区域特点,综合施策,创新发展多种先进施肥技术,建立化肥减施增效技术管理体系,力争于 2020 年实现主要农作物化肥施用量零增长目标。

在此背景下,结合中国化肥施用现状和形势,综合国内外现代施肥技术研究进展与应用情况,从政府政策、技术研究及宣传培训等方面进行趋势分析并提出未来发展建议:

(1)以政府为主导,构建完善扶持与监管政策体系,加强科学施肥法制保障。坚持以政府为主导,农民、企业及社会共同参与,构建长效机制形成攻坚合力;统筹考虑土肥水种等生产要素与耕作制度,促进农机农艺农信相结合,综合运用行政、经济、技术和法律等手段推进科学施肥作业;各级政府建立区域性的科学施肥专家系统,形成全国范围内肥效监测网络,及时准确掌握肥料效应评价数据;完善相关财政补贴机制,对新型经营主体和适度规模经营提供科学施肥服务,加强施用有机肥料、配方肥料、缓控释肥及配套机具等补贴力度,强制性报废部分低效率及高污染的施肥机具;制定化肥科学施用管理条例,加快建立健全各项肥料管理规章制度,打击假冒伪劣化肥产品及低性能机具,保证化肥产业健康

有序发展。

(2)创新发展现代施肥关键技术,建立化肥减施增效科学技术管理体系,推进新肥料新技术新装备应用。探索建立适于全国区域高效环保轻简施肥模式,积极引进融合国际先进前沿技术,重点开展共性关键技术研究,建立以骨干企业为主体,高校院所共同参与的科学施肥产学研推相结合的攻关团队与创新体系,提升技术研发及装备集成水平,开展农作物高产高效施肥技术研发、推广及全程服务,为科学决策和精准发力提供咨询服务;结合高产创建和绿色增效攻关模式,根据土壤养分状况和农作物需肥规律,分区域、分作物制定科学施肥指导手册,集成推广高产高效生态施肥技术。

针对化肥减施增效关键技术,建议重点开展:农作物养分链一体化管理技术和农作物养分调控技术研究,分析氮磷钾化肥转化与高效利用生物学机制,建立化肥减施控制基准与调控途径;结合农作物各生长期需肥规律,研究具备丰富营养物质和优良理化性状的系列高效绿色肥料,优化肥料产品结构,包括多功能复合肥料、缓控释肥、液体肥料、专用肥料、全水溶性肥料和有机肥料等集养分形态与功能融合的新型肥料,推动化肥产业转型升级;确定合理化肥施用比例,推广因地、因苗、因水和因时分期施肥技术;结合网络传输、信息感知及数据处理等先进技术,开展高精度且覆盖全面的土壤及作物养分信息高效检测采集技术和数字化营养管理系统研究;研发可快速精准监测农田多层信息传感器,建立适合多种农艺模式的精准施肥控制体系,提高作物生长模型及施肥专家决策分析系统通用性及适应性;构建化肥减施增效技术体系信息技术服务平台与监测评估系统,实现化肥精准施用指导与监控;将单一施肥作业逐渐转变为变量施肥作业,开发设计多种关键部件结构,实现多变量在线配肥及施肥功能,提高施肥系统自动化和智能化水平;结合高效节水灌溉技术,进行水肥耦合效应和土壤养分运移规律等基础探讨,重点开展基于农业物联网的智慧精准施肥技术及配套装备研究,加快推进滴灌施肥及喷灌施肥等节约型技术发展;结合现代农业发展及中国农业经营体制特性,积极探索有机养分资源利用的有效模式,支持规模化畜禽粪便有机肥有效利用,加快推广秸秆粉碎还田、快速腐熟还田及过腹还田等技术应用;结合基肥、种肥和追肥统筹原则,因地制宜地推进大宗农作物机械化种肥同播及液态肥深施等技术,研发高效配套装备;多项先进施肥技术措施积极配合,加强农业与互联网结合力度,实现“互联网+农业”新常态,建立健全科学施肥技术管理体系。

参 考 文 献

- [1] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报,2008,45(5):915-924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedagogical Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [2] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学,2018,51(11):2116-2125.
BAI Youlu. The situation and prospect of research on efficient fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2116-2125. (in Chinese)
- [3] 史常亮,李赞,朱俊峰. 劳动力转移、化肥过度使用与面源污染[J]. 中国农业大学学报,2016,21(5):169-180.
SHI Changliang, LI Yun, ZHU Junfeng. Rural labor transfer, excessive fertilizer use and agricultural non-point source pollution[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(5): 169-180. (in Chinese)
- [4] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. 农业工程学报,2017,33(6):214-221.
LIU Qinqu. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 214-221. (in Chinese)
- [5] 段洪斌,姚拓,韩华雯,等. 利用几种固体农业废弃物配制生物肥料载体的研究[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(1):147-151.
DUAN Qibin, YAO Tuo, HAN Huawen, et al. Formulation of biofertilizer carrier using solid agricultural residues[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(1): 147-151. (in Chinese)
- [6] SCHOONBEEK S, AZAD H, MAHMOUD H, et al. Organic agriculture and undernourishment in development countries: main potentials and challenges[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2013, 53(9):917-928.
- [7] BINDRABANI P S, DIMKPA C, NAGARAJAN L, et al. Revisiting fertilizers and fertilization strategies for improved nutrient uptake by plants[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(8):897-911.
- [8] 段洁利,李君,卢玉华. 变量施肥机械研究现状与发展对策[J]. 农机化研究,2011,33(5):245-248.
DUAN Jieli, LI Jun, LU Yuhua. Research status and development countermeasure of variable rate fertilization machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5): 245-248. (in Chinese)
- [9] 朱志立,邱君,方兴. 国外土壤保护的相关措施与启示[J]. 中国土壤与肥料,2015,52(2):1-4.
ZHU Zhili, QIU Jun, FANG Xing. Soil conservation measures and enlightenment in foreign countries[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2015, 52(2): 1-4. (in Chinese)
- [10] 付宇超,袁文胜,张文毅,等. 我国施肥机械化技术现状及问题分析[J]. 农机化研究,2017,39(1):251-255,263.
FU Yuchao, YUAN Wensheng, ZHANG Wenyi, et al. Present situation and problem analysis of the technology of fertilizer mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(1): 251-255, 263. (in Chinese)
- [11] 白由路. 国内外施肥机械的发展概况及需求分析[J]. 中国土壤与肥料,2016,53(32):1-4.
BAI Youlu. Analysis of the development and the demands of fertilization machinery[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2016, 53(32): 1-4. (in Chinese)
- [12] 全国农业可持续发展规划(2015—2030 年)[EB/OL]. http://www.china.com.cn/zhibo/2015-03/20/content_35108578.htm.
- [13] 财政部、农业部关于印发《测土配方施肥试点补贴资金管理暂行办法》的通知[EB/OL]. <http://www.huogiu.gov.cn/4664121/7708331.htm>.
- [14] 周静,胡芹远,章力干,等. 从供给侧改革思考我国肥料和土壤调理剂产业现状、问题与发展对策[J]. 中国科学院院刊,2017,32(10):1103-1110.
ZHOU Jing, HU Qinyuan, ZHANG Ligan, et al. Key scientific problems and development countermeasures of fertilizer industry based on agricultural supply-side reform[J]. Bulletin of Chinese Academy of Science, 2017, 32(10): 1103-1110. (in Chinese)
- [15] 王武强. 肥料产业趋势与展望—中国肥料产业科技发展报告发布[J]. 中国农村科技,2017,24(1):55-57.
WANG Wuqiang. Trend and prospect of fertilizer industry: report on scientific and technological development of fertilizer industry in China[J]. China Rural Science & Technology, 2017, 24(1): 55-57. (in Chinese)
- [16] 巨晓棠,谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(4):783-795.
JU Xiaotang, GU Baojing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795. (in Chinese)
- [17] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)
- [18] FIXEN P E, JUHNSTON A M. World fertilizer nutrient reserves: a view to the future[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(5): 1001-1005.
- [19] 朱兆良,DAVID N,孙波. 中国农业面源污染控制对策[M]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [20] 农业部关于印发《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》和《到 2020 年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.
- [21] 陈远鹏,龙慧,刘志杰. 我国施肥技术与施肥机械的研究现状与对策[J]. 农机化研究,2015,37(4):255-260.
CHEN Yuanpeng, LONG Hui, LIU Zhijie. Actuality and measures of fertilization technology and machinery in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(4): 255-260. (in Chinese)
- [22] ROBERT P C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management[J]. Plant and Soil, 2002, 247: 143-149.
- [23] 汪珺,陈乃祥. 测土配方施肥技术应用现状与展望[J]. 农业开发与装备,2018,24(10):201-202.

- WANG Jun, CHEN Naixiang. Application status and prospect of soil testing and formulated fertilization[J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2018, 24(10): 201–202. (in Chinese)
- [24] 尤·李比希. 化学在农业和生理学上的应用[M]. 刘更另, 译. 北京: 农业出版社, 1983.
- [25] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. *中国农技推广*, 2006, 22(4): 36–39. CHEN Xiping, ZHANG Fusuo. Establishment of technical index system for soil testing and formula fertilization through “3414” test[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2006, 22(4): 36–39. (in Chinese)
- [26] 张宁. 测土配方和土壤多参数分析系统的设计与实现[D]. 西安: 西安科技大学, 2018. ZHANG Ning. The design and implement of soil testing formula and soil multi-parameter analysis system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [27] 高祥照, 马常报, 杜森. 测土配方施肥技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [28] 黄德明. 十年来我国测土施肥的进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 495–499. HUANG Deming. Soil testing and fertilizer recommendations in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(4): 495–499. (in Chinese)
- [29] 高春雨, 高懋芳. 旱地测土配方温室气体减排碳交易核算[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 212–219. GAO Chunyu, GAO Maofang. Quantitative analysis of carbon trade of upland greenhouse gas emission reduction from precise fertilization[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(12): 212–219. (in Chinese)
- [30] 刘阳春. 变量配肥施肥精准作业装备关键技术研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2012. LIU Yangchun. Key technology on variable rate application system[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2012. (in Chinese)
- [31] LIN Jianhan, WANG Maohua, ZHANG Miao, et al. Development and modeling of soil nitrate and potassium simultaneous rapid detection system based on ion-selective electrodes[J]. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2007, 50(5): 635–640.
- [32] 王宜伦, 李潮海, 王瑾, 等. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(24): 254–257. WANG Yilun, LI Chaohai, WANG Jin, et al. Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(24): 254–257. (in Chinese)
- [33] 卢艳丽, 白由路, 王磊, 等. 华北小麦-玉米轮作区缓控释肥应用效果分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 209–215. LU Yanli, BAI Youlu, WANG Lei, et al. Efficiency analysis of slow/controlled release fertilizer on wheat-maize in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 209–215. (in Chinese)
- [34] 黄培钊, 廖宗文, 葛仁山, 等. 不同造粒工艺的肥芯包膜微结构特征与缓/控释性能的研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(8): 1605–1610. HUANG Peizhao, LIAO Zongwen, GE Renshan, et al. Study on microstructures characteristics and nutrition slow/controlled-release capability of fertilizer cores with different granulating techniques and their coating CRFs[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(8): 1605–1610. (in Chinese)
- [35] 何绪生, 廖宗文, 黄培钊, 等. 保水缓/控释肥的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 184–190. HE Xusheng, LIAO Zongwen, HUANG Peizhao, et al. Research advances in slow/controlled-release water-storing fertilizers[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5): 184–190. (in Chinese)
- [36] 陈宏坤, 徐广飞, 高璐阳, 等. 缓控释肥包膜材料的研究进展[J]. *磷肥与复肥*, 2016, 31(12): 19–21. CHEN Hongkun, XU Guangfei, GAO Luyang, et al. Research advance of coated material of slowly controlled release fertilizer[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2016, 31(12): 19–21. (in Chinese)
- [37] 陈迪. 包膜缓/控释肥中试研究及缓/控释肥规律测定[D]. 郑州: 郑州大学, 2016. CHEN Di. Pilot study on coated slow/controlled release fertilizer and the determination of slow/controlled fertilizer[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese)
- [38] 娄赞, 陈海斌, 张立丹, 等. 缓/控释肥料对甘蔗产量及氮素利用率的影响[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(2): 262–266. LOU Yun, CHEN Haibin, ZHANG Lidan, et al. Effect of slow/controlled release fertilizer on yield and nitrogen use efficiency of chewing cane[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(2): 262–266. (in Chinese)
- [39] 陈剑秋. 几种新型缓控释肥工艺及养分释放特征研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012. CHEN Jianqiu. Study on technology and nutrient release characteristics of new slow/controlled release fertilizers[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [40] 陈延华, 孙炎鑫, 薛高峰, 等. 基于 SUGIHARA 模型的树脂包衣控释肥在土壤中释放规律的研究[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 637–641. CHEN Yanhua, SUN Yanxin, XUE Gaofeng, et al. Study on releasing mechanics of resin-coated controlled-release fertilizer in soil based on SUGIHARA model[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 637–641. (in Chinese)
- [41] 陈金, 赵斌, 衣淑娟, 等. 我国变量施肥技术研究现状与发展对策[J]. *农机化研究*, 2017, 39(10): 1–6. CHEN Jin, ZHAO Bin, YI Shujuan, et al. Research on present situation and the development countermeasures of variable rate fertilization technology in China[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2017, 39(10): 1–6. (in Chinese)
- [42] VIEIRA S R, HATFIELD J L, NIELSEN D R, et al. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties[J]. *Hilgardia*, 1983, 51(3): 75.
- [43] 赵春江, 薛绍掌, 王秀, 等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 7–12. ZHAO Chunjiang, XUE Xuzhang, WANG Xiu, et al. Advance and prospects of agriculture technology system[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(4): 7–12. (in Chinese)
- [44] 罗锡文, 张泰岭, 洪添胜. “精细农业”技术体系及其应用[J]. *农业机械学报*, 2001, 32(2): 103–106. LUO Xiwen, ZHANG Tailing, HONG Tiansheng. Technical system and application of precision agriculture[J]. *Transactions*

- of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(2): 103–106. (in Chinese)
- [45] KABIRIGI M, PEAKSHS O, PRESCILLA B V, et al. Fertigation for environmentally friendly fertilizer application: constraints and opportunities for its application in development countries[J]. *Agricultural Sciences*, 2017, 8(4): 292–301.
- [46] 高祥照, 杜森, 钟永红, 等. 水肥一体化发展现状与发展[J]. *中国农业信息*, 2015, 27(2): 14–19, 63.
GAO Xiangzhao, DU Sen, ZHONG Yonghong, et al. The present situation and prospect of the integrated development of water and fertilizer[J]. *China Agricultural Information*, 2015, 27(2): 14–19, 63. (in Chinese)
- [47] 金宏智, 严海军, 钱一超. 国外节水灌溉工程技术发展分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(增刊): 59–63.
JIN Hongzhi, YAN Haijun, QIAN Yichao. Overseas development of water-saving irrigation technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(Supp.): 59–63. (in Chinese)
- [48] 史学斌, 马孝义, 聂卫波, 等. 地面灌溉的研究现状与发展趋势[J]. *水资源与水工程学报*, 2005, 16(1): 34–40.
SHI Xuebin, MA Xiaoyi, NIE Weiho, et al. Research status and trend of surface irrigation[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2005, 16(1): 34–40. (in Chinese)
- [49] 聂卫波. 畦沟灌溉水流运动模型与数值模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
NIE Weiho. Research on water flow model and numerical simulation for border and furrow irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- [50] 贺成, 廖娜. 我国节水灌溉技术体系概述[J]. *农业工程*, 2014, 4(2): 39–45.
HE Cheng, LIAO Na. Overview of water-saving irrigation technology system in China[J]. *Agricultural Engineering*, 2014, 4(2): 39–45. (in Chinese)
- [51] 安进强, 魏凯, 王立乾, 等. 基于物联网的精确灌溉控制技术研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(12): 220–226.
AN Jinqiang, WEI Kai, WANG Liqian, et al. Internet of things based on accurate automation irrigation[J]. *Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.)*, 2013, 41(12): 220–226. (in Chinese)
- [52] EBRAHIMIAN H, KESHAVARZ E R, PLAYAN E. Surface fertigation: a review, gaps and needs[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2014, 12(3): 820–837.
- [53] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 等. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 563–568.
SUN Wentao, SUN Zhanxiang, WANG Congxiang, et al. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 563–568. (in Chinese)
- [54] 李兴, 任杰, 王勇. 国外农业节水研究进展[J]. *内蒙古水利*, 2013, 33(1): 113–114.
LI Xing, REN Jie, WANG Yong. Research on water saving agricultural in worldwide[J]. *Inner Mongolia Water Resources*, 2013, 33(1): 113–114. (in Chinese)
- [55] LAMM F R, BORBOVSKY J P, SCHWANKL L J, et al. Subsurface drip irrigation: status of the technology in 2010[J]. *Transactions of the ASAE*, 2012, 55(2): 483–491.
- [56] 田敏. 基于物联网技术的作物养分信息快速获取与精准施肥智能控制系统研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.
TIAN Min. Research on crop nutrient information acquisition and precision fertilization intelligent control system based on internet of things[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018. (in Chinese)
- [57] 张承林, 郭彦彪. 灌溉施肥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [58] 李寒松, 贾振超, 张锋, 等. 国内外水肥一体化技术发展现状与趋势[J]. *农业装备与车辆工程*, 2018, 56(6): 13–16.
LI Hansong, JIA Zhenchao, ZHANG Feng, et al. Current development status and trend of fertigation technology at home and abroad[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2018, 56(6): 13–16. (in Chinese)
- [59] 韩启彪, 冯绍元, 黄修桥, 等. 我国节水灌溉施肥装置研究现状[J]. *节水灌溉*, 2014, 38(12): 76–79, 83.
HAN Qibiao, FENG Shaoyuan, HUANG Xiuqiao, et al. Research on fertilizer injection units in saving-water irrigation in China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014, 38(12): 76–79, 83. (in Chinese)
- [60] 宋坤. 水肥一体化智能设备关键技术研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
SONG Kun. Research on key technology of integrative water and fertilizer intelligent device[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017. (in Chinese)
- [61] 李小利, 李昊儒, 郝卫平, 等. 滴灌施肥对华北小麦-玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(4): 18–28.
LI Xiaoli, LI Haoru, HAO Weiping, et al. Impact of drip fertigation on yields and water use efficiency of wheat-maize rotation in North China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(4): 18–28. (in Chinese)
- [62] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 25–27.
XU Feipeng, LI Yunkai, REN Shumei. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Transactions of the CSAE*, 2003, 19(1): 25–27. (in Chinese)
- [63] 牛琪, 王士国, 陈学庚. 膜下滴灌水稻穴直播机研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 90–95.
NIU Qi, WANG Shiguo, CHEN Xuegeng. Design of rice planter with plastic film mulched drip irrigation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 90–95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s014&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.014. (in Chinese)
- [64] 严海军, 姚培培, 朱勇. 圆形喷灌机喷头配置技术与软件研究[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(6): 84–88.
YAN Haijun, YAO Peipei, ZHU Yong. Nozzle configuration and software for center pivot irrigation system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6): 84–88. (in Chinese)
- [65] 王栋, 薛瑞清. 滴灌用水动活塞叠片式自动过滤装置的研制[J]. *节水灌溉*, 2010, 34(3): 15–18, 22.
WANG Dong, XUE Ruiqing. Study on terrace automatic filter equipment with piston driven by water for drip irrigation[J].

- Water Saving Irrigation, 2010, 34(3): 15–18, 22. (in Chinese)
- [66] 杨军. 滴灌变量精准控制施肥装置设计与实现[D]. 石河子:石河子大学,2016.
YANG Jun. Research of precision control fertilization system design and accomplishment[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016. (in Chinese)
- [67] 聂晶,岑红蕾. 精准滴灌施肥自动控制系统的研究与实现[J]. 节水灌溉,2011,35(1):57–61.
NIE Jing, CEN Honglei. Research and realization of automatic control system of precision drip irrigation fertilization[J]. Water Saving Irrigation, 2011, 35(1): 57–61. (in Chinese)
- [68] 张琼. 基于嵌入式的灌溉施肥系统的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.
ZHANG Qiong. Study on fertigation based on embedded system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [69] 范军亮,张富仓,吴立峰,等. 滴灌压差施肥系统灌水与施肥均匀性综合评价[J]. 农业工程学报,2016,32(12):96–101.
FAN Junliang, ZHANG Fucang, WU Lifeng, et al. Field evaluation of fertigation uniformity in drip irrigation system with pressure differential tank[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 96–101. (in Chinese)
- [70] 韩启彪,黄兴法,刘洪禄,等. 6种文丘里施肥器吸肥性能比较分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(4):113–117,136.
HAN Qibiao, HUANG Xingfa, LIU Honglu, et al. Comparative analysis on fertilization performance of six venturi injectors[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 113–117, 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130420&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2013.04.020. (in Chinese)
- [71] 傅泽田,董玉红,张领先,等. 温室自动施肥机的设计与仿真[J]. 农业工程学报,2017,33(增刊1):335–342.
FU Zetian, DONG Yuhong, ZHANG Lingxian, et al. Design and simulation of automatic fertilizing machine for greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp. 1): 335–342. (in Chinese)
- [72] SUDDUTH K A, KIRCHEN N R, BOLLERO G A. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of electrical conductivity[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(3): 472–482.
- [73] DOMINGO G, ALVARO L L, GIBERTO H R, et al. Fuzzy irrigation greenhouse control system based on a field programmable gate array[J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(13): 3117–3130.
- [74] 郝明. 大田微喷灌水肥一体化技术研究与设备研制[D]. 泰安:山东农业大学,2018.
HAO Ming. Study on technology and development of equipment of fertigation in field micro-spray irrigation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [75] 马龙. 太阳能驱动喷灌施肥装置的设计与研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
MA Long. Design and research of the solar powered irrigation and fertilization device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese)
- [76] 向清江,陈超,魏洋洋. 变射程喷头在坡地喷灌中的应用[J]. 农业工程学报,2011,27(8):115–119.
XIANG Qingjiang, CHEN Chao, WEI Yangyang. Application of sprinkler with variable range of spray in sloping land[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 115–119. (in Chinese)
- [77] 赵伟霞,李久生,栗岩峰. 大型喷灌机变量灌溉技术研究进展[J]. 农业工程学报,2016,32(13):1–7.
ZHAO Weixia, LI Jiusheng, LI Yanfeng. Review on variable rate irrigation with continuously moving sprinkler machines[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 1–7. (in Chinese)
- [78] 严海军,王志鹏,马开. 圆形喷灌机注肥泵的设计与试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(5):456–460.
YAN Haijun, WANG Zhipeng, MA Kai. Design and experiment on fertigation plunger pump in center pivot irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 456–460. (in Chinese)
- [79] 袁寿其,李红,王新坤,等. 喷微灌技术及设备[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
- [80] 汤玲迪,袁寿其,汤跃. 卷盘式喷灌机研究进展与发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):1–15.
TANG Lingdi, YUAN Shouqi, TANG Yue. Analysis on research progress and development trend of hose reel irrigator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 1–15. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181001&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298. 2018. 10. 001. (in Chinese)
- [81] 夏艳涛,吴亚晶. 寒地水稻侧深施肥技术研究[J]. 北方水稻,2014,39(1):30–32.
WU Yantao, WU Yajing. Study on side deep fertilizing of rice in cold area[J]. North Rice, 2014, 39(1): 30–32. (in Chinese)
- [82] 潘圣刚,莫钊文,罗锡文,等. 机械同步深施肥对水稻群体质量及产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2013,32(2):1–5.
PAN Shenggang, MO Zhaowen, LUO Xiwen, et al. Effects of deeply mechanized fertilizer application on the quality and grain yield of direct seedling rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(2): 1–5. (in Chinese)
- [83] KAORU A, YASUO O. Wastewater treatment by using kenaf in paddy soil and effect of dissolved oxygen concentration on efficiency[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(2): 125–132.
- [84] 久保田株式会社. 施肥机:201220411889.9[P]. 2014–02–19.
- [85] 洋马株式会社,八鹿铁工株式会社. 施肥装置:200980146442.4[P]. 2014–06–18.
- [86] 鲍秉启,安龙哲,胡文英,等. 我国和日本等国水田机械发展概况[J]. 农机化研究,2002,24(3):23–25.
BAO Bingqi, AN Longzhe, HU Wenying, et al. The paddy field mechanization state in Japan and China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002, 24(3): 23–25. (in Chinese)
- [87] 位国建,荐世春,崔荣江,等. 水稻机插秧同步侧深施肥技术分析 & 试验[J]. 农机化研究,2017,39(9):190–194.
WEI Guojian, JIAN Shichun, CUI Rongjiang, et al. Analysis and experiment of mechanical transplanting rice sync with the side deep fertilizing technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 190–194. (in Chinese)

- [88] 陈雄飞,罗锡文,王在满,等. 水稻穴播同步侧位深施肥技术试验研究[J]. 农业工程学报,2014,30(16):1-7.
CHEN Xiongfei, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Experiment of synchronous side deep fertilizing technique with rice hill-drop drilling[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 1-7. (in Chinese)
- [89] 陈长海,许春林,毕春辉,等. 水稻插秧机侧深施肥技术及装置的研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2012,24(6):10-12.
CHEN Changhai, XU Chunlin, BI Chunhui, et al. Researching of rice transplanter deep side fertilizing technology and device [J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2012, 24(6): 10-12. (in Chinese)
- [90] 浙江理工大学. 水稻侧深施肥机构的可调肥量链驱动机构:201710442268.4[P]. 2017-09-15.
- [91] 浙江理工大学. 一种简单水稻侧深施肥排肥器及施肥机:201720067538.3[P]. 2017-11-24.
- [92] 王金峰,高观保,王金武,等. 叶片调节式水田侧深施肥装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):68-76.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WANG Jinwu, et al. Design and test of adjustable blades side deep fertilizing device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 68-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180308&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.008. (in Chinese)
- [93] 王金峰,高观保,翁武雄,等. 水田侧深施肥装置关键部件设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):92-104.
WANG Jinfeng, GAO Guanbao, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of key components of side deep fertilization device for paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 92-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180611&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.011. (in Chinese)
- [94] 左兴健,武广伟,付卫强,等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(3):14-21.
ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(3): 14-21. (in Chinese)
- [95] 米国华,伍大利,陈延玲,等. 东北玉米化肥减施增效技术途径探讨[J]. 中国农业科学,2018,51(14):2758-2770.
MI Guohua, WU Dali, CHEN Yanling, et al. The ways to reduce chemical fertilizer input and increase fertilizer use efficiency in maize in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(14): 2758-2770. (in Chinese)
- [96] 苏效坡,曾爱军,米国华. 中国和美国雨养玉米区机械化施肥技术比较分析[J]. 玉米科学,2015,23(6):142-148.
SU Xiaopo, ZENG Aijun, MI Guohua. Current status of mechanized fertilization techniques in rain-fed maize in China and the USA[J]. Journal of Maize Sciences, 2015, 23(6): 142-148. (in Chinese)
- [97] 龚艳,丁素明,傅锡敏. 我国施肥机械化发展现状及对策分析[J]. 农业开发研究,2009,15(9):6-9.
GONG Yan, DING Suming, FU Ximin. Mechanization development of China fertilizer situation and countermeasures [J]. Agricultural Development & Equipments, 2009, 15(9): 6-9. (in Chinese)
- [98] JEFFREY A V, GYLES W R. Corn production as affected by nitrogen application timing and tillage[J]. Agronomy Journal, 2004, 96: 502-509.
- [99] 李文哲,袁虎,刘宏新,等. 沼液沼渣暗灌施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(11):75-80.
LI Wenzhe, YUAN Hu, LIU Hongxin, et al. Biogas slurry fertilizer applicator for dark irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 75-80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20141112&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.012. (in Chinese)
- [100] 吉林康达2BMZF-6免耕指夹精量施肥播种机[EB/OL]. http://www.jlkdnj.com/comcontent_detail/i=9&comContentId=9.html.
- [101] 付乾坤,荐世春,贾洪雷,等. 玉米灭茬起垄施肥播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(4):9-16.
FU Qiankun, JIAN Shichun, JIA Honglei, et al. Design and experiment on maize stubble cleaning fertilization ridging seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 9-16. (in Chinese)
- [102] 李复辉,杜瑞成,刁培松,等. 舵轮式玉米免耕精量施肥播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):33-38.
LI Fuhui, DU Ruicheng, DIAO Peisong, et al. Design and experiment of helm-shaped no-tillage precision fertilization planter for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1): 33-38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s107&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.007. (in Chinese)
- [103] 陈海涛,侯磊,侯守印,等. 大垄玉米原茬地免耕播种机防堵装置设计与优化试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(8):59-67.
CHEN Haitao, HOU Lei, HOU Shouyin, et al. Design and optimization experiment of anti-blocking mechanism of no-tillage planter for grand ridge with raw corn stubble[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 59-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180807&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.007. (in Chinese)
- [104] 吴南,林静,李宝筏. 免耕播种机精量穴施肥系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):64-72.
WU Nan, LIN Jing, LI Baofa. Design and test on no-tillage planter precise hole fertilization system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 64-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180708&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.008. (in Chinese)
- [105] 邹忠君,孙艳华. 玉米一次性分层缓释施肥技术试验研究[J]. 农学学报,2011,1(4):6-9.
ZOU Zhongjun, SUN Yanhua. A test on slow-release fertilizer one-time stratification application technique in maize [J]. Journal of Agriculture, 2011, 1(4): 6-9. (in Chinese)

- [106] 王云霞,梁志杰,崔涛,等. 玉米分层施肥器结构与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):163-169. WANG Yunxiang, LIANG Zhijie, CUI Tao, et al. Design and experiment of layered fertilization device for corn[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 163-169. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2016s025&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.025. (in Chinese)
- [107] 姚万生,薛少平,朱瑞祥,等. 组合式下拉分层施肥播种开沟器的研制[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008,36(8):223-228. YAO Wansheng, XUE Shaoping, ZHU Ruixiang, et al. Development of the combined layered fertilizing-seeding ditcher[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat. Sci. Ed.), 2008, 36(8): 223-228. (in Chinese)
- [108] 张俊雄,刘华猛,高金,等. 玉米分层正位穴施肥精播机 SPH 仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(9):66-72. ZHANG Junxiong, LIU Huameng, GAO Jin, et al. Simulation and test of corn layer alignment position hole fertilization seeder based on SPH[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 66-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180907&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.007. (in Chinese)
- [109] 张福锁,陈新平,陈清,等. 中国主要作物施肥指南[M]. 北京:中国农业大学出版社,2009.
- [110] ROSS R B, JASON W H, MATIA L R, et al. Nutrient uptake, partitioning and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids[J]. Agronomy Journal, 2013, 105: 161-170.
- [111] 美国约翰迪尔 JD2510L 液肥追肥机[EB/OL]. https://www.deere.com/en_US/industry/agriculture/agriculture.page.
- [112] 黄燕,汪春,衣淑娟,等. 液体肥料的应用现状与发展前景[J]. 农机化研究,2006,28(2):198-200. HUANG Yan, WANG Chun, YI Shujuan, et al. The application situation of fluid fertilizer and its developmental prospects[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(2): 198-200. (in Chinese)
- [113] 宋德庆,黄正明,薛忠,等. 我国追肥施布机械及技术研究现状与展望[J]. 农机化研究,2014,36(2):241-244. SONG Deqing, HUANG Zhengming, XUE Zhong, et al. Present research situation and perspective of topdressing machine and technology in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(2): 241-244. (in Chinese)
- [114] 胡红. 玉米行间定点扎穴深施追肥机设计与试验[D]. 北京:中国农业大学,2017. HU Hong. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between maize rows[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [115] 李沐桐. 玉米苗期精准穴施肥机构设计及试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015. LI Mutong. Design and test analysis of maize precision fertilization mechanism of acupoint[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [116] 谭德水,刘兆辉,江丽华. 中国冬小麦施肥历史演变及阶段特征研究进展[J]. 中国农学通报,2016,32(12):13-19. TAN Deshui, LIU Zhaohui, JIANG Lihua. Fertilization history evolution and stage characteristics of winter wheat in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(12): 13-19. (in Chinese)
- [117] 席天元,李永山,谢三刚,等. 分层施肥对冬小麦生长及产量的影响[J]. 中国农业科技导报,2016,18(3):112-118. XI Tianyuan, LI Yongshan, XIE San'gang, et al. Effects of placing phosphorus fertilizer in different soil layers on winter wheat growth and yield[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(3): 112-118. (in Chinese)
- [118] 祝清震,武广伟,陈立平,等. 基于旋耕覆土的冬小麦基肥分层定深施用装置设计[J]. 农业工程学报,2018,34(13):18-26. ZHU Qingzhen, WU Guangwei, CHEN Liping, et al. Design of stratified and depth-fixed application device of base-fertilizer for winter wheat based on soil-covering rotary tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(13): 18-26. (in Chinese)
- [119] 美国约翰迪尔 JD1030 型小麦免耕播种机[EB/OL]. <https://www.deere.com/en/seeding-equipment/1030-no-til-drill/>.
- [120] 河南豪丰 2BSX-16 小麦施肥播种机[EB/OL]. https://www.hnhft.com/pro_content.php?classid=4109&inforid=384.
- [121] 王志伟,张银平,刁培松,等. 小麦深松分层施肥宽幅带播种机的设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(6):102-106. WANG Zhiwei, ZHANG Yinping, DIAO Peisong, et al. Design and experiment on wheat precision no-tillage planter with subsoiling layered fertilization and wide seedling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 102-106. (in Chinese)
- [122] 胡红,李洪文,李传友,等. 稻茬田小麦宽幅精量少耕播种机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(4):24-32. HU Hong, LI Hongwen, LI Chuanyou, et al. Design and experiment of broad width and precision minimal tillage wheat plant in rice stubble field[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(4): 24-32. (in Chinese)
- [123] 李金鹏. 轮式点状液体注肥机开发与试验[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2015. LI Jinpeng. The development and test of wheel point-shaped liquid fertilizer injection machine[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [124] 冯慧敏,高娜娜,孟志军,等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):60-67. FENG Huimin, GAO Na'na, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180407&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.007. (in Chinese)
- [125] 陈满. 基于近地光谱技术的冬小麦精准变量施肥机的研制[D]. 南京:南京农业大学,2016. CHEN Man. Precise variable fertilizer applicator for winter wheat based on canopy spectral reflectance[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)