

我国水肥一体化技术应用现状与发展对策

黄语燕, 刘现, 王涛, 陈永快* (福建省农业科学院数字农业研究所, 福建福州 350003)

摘要 在综述国外水肥一体化发展情况的基础上, 介绍了我国水肥一体化技术的应用现状, 主要包括水肥一体化技术的应用模式、施肥方法以及控制系统研究。分析了目前我国水肥一体化技术发展中存在的问题, 并提出了一些发展建议, 以期使水肥一体化技术得到更好的发展和运用, 并推动我国农业的快速发展。

关键词 水肥一体化; 现状; 发展对策

中图分类号 S365 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2021)09-0196-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.09.054



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Application Status and Development Countermeasures of Water and Fertilizer Integration Technology in China

HUANG Yu-yan, LIU Xian, WANG Tao et al (Institute of Digital Agriculture, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003)

Abstract On the basis of reviewing the development status of water and fertilizer integration in foreign countries, we introduced the application status of water and fertilizer integration technology in China, which mainly included the application mode of water and fertilizer integration technology, fertilization methods and research status of control systems. Then we analyzed the existing problems in the development of water and fertilizer integration technology in China, and put forward some development suggestions, so that water and fertilizer integration technology could get better development and application, and promote the rapid development of China's agriculture.

Key words Water and fertilizer integration; Status; Development countermeasures

水肥是植物生长不可缺少的条件, 目前广泛采用的灌溉施肥方式为漫灌和经验性施肥, 缺乏水肥耦合^[1]。2018年, 我国农业用水量为3 693.1亿m³, 占总用水量的61.4%, 灌溉水有效利用率仅为30%~40%, 远低于以色列、荷兰等国家^[2-3]。2018年我国农用化肥施用量为5 653.4万t, 是世界上化肥施用量最多的国家, 化肥的平均利用率仅为33%, 其中氮肥利用率为30%~35%, 磷肥利用率为20%~25%, 钾肥利用率也低于50%^[2,4]。传统的施肥方式存在浪费水肥资源、土壤板结等问题, 阻碍了我国农业的快速发展。水肥一体化技术是将肥料溶解在水中, 配制成为一定浓度的营养液后, 再输送到作物根部实现自动灌溉及施肥^[5]。近几年来, 国家大力倡导发展水肥一体化技术, 并出台了相关文件来支持节水灌溉、水肥一体化技术的发展, 比如《推进水肥一体化实施方案(2016—2020年)》文件指出应“推广普及水肥一体化等农田节水技术”;《国家节水行动方案》指出“大力推进节水灌溉”, “推广喷灌、微灌、滴灌、低压管道输水灌溉、集雨补灌、水肥一体化、覆盖保墒等技术”;2019年中央一号文件指出应该“发展高效节水灌溉”“开展农业节肥节药行动”;2020年中央一号文件指出“加大农业节水力度”^[6-8]。与传统灌溉模式相比, 水肥一体化技术具有节水节肥、省时省力、改善土壤环境等优点, 是农业可持续发展、解决我国农业灌溉施肥问题的关键^[9]。笔者在综述国外水肥一体化发展情况的基础上, 介绍了我国水肥一体化技术的应用现状, 主要包括水肥一体化技术的应用模式、施肥方法以及控制系统的研究。分析了目前我国水肥一体化技术发展中存在的问题, 并

提出了一些发展建议, 以期使水肥一体化技术得到更好的发展和运用, 并推动我国农业的快速发展。

1 国外水肥一体化技术发展现状

国外的灌溉施肥技术起步较早, 以色列、荷兰、美国等都已经普及推广水肥一体化技术, 并形成灌溉施肥机系列产品, 比如以色列NETAFIM公司的NetaJet和Fertikit系列, Eldar-Shany公司的Frtimix系列, 荷兰PRIVA公司的Nutri-line系列, 韩国普贤BH系列等灌溉施肥机^[10]。这些灌溉施肥机能够精确提供作物的养分和水分, 有些还可以根据作物类型、不同生育期特点、环境参数等提出不同的灌溉策略, 实现智能化灌溉施肥^[11]。

以色列从“沙漠之国”变成“农业强国”, 其主要措施是将灌溉技术、水溶肥技术、传感器技术及智能设施设备相结合并广泛应用于育苗、大田作物、果园、温室蔬菜与花卉等。截至2018年, 以色列90%以上的农业生产已经实现了水肥一体化管理。以色列在推广水肥一体化技术的过程中研制出多种灌溉施肥设备, 实现了施肥的定时、定量控制, 75%的农用废水被回收利用, 使得水分利用率提高了40%~60%, 肥料利用率提高了30%~50%, 同时有效提高了资源利用率, 实现了节水、增产、增效^[5]。

美国节水灌溉技术已经达到世界先进水平, 其中50%的农场面积进行喷灌, 43%的农场面积采用地面灌溉, 7%的农场面积采用其他灌溉方法, 是世界上推广微灌面积最多的国家^[12]。美国60%的马铃薯、33%的果树和25%的玉米都采用水肥一体化技术, 水肥一体化专用肥料占肥料总量的38%以上, 使肥料可以被作物快速吸收^[5]。为了保证水肥的有效管理, 农业农村部专门成立了一个水肥一体化管理部门, 并建立了服务于农业生产的云平台, 制定了一系列灌溉制度, 有效提高了水肥利用率^[13]。

基金项目 福建省农业科学院科技创新团队项目(STIT2017-2-12);福建省农业科学院自由探索项目(ZYTS2019029)。

作者简介 黄语燕(1987—), 女, 福建福州人, 助理研究员, 硕士, 从事农业电气化与自动化研究。*通信作者, 助理研究员, 硕士, 从事设施农业研究。

收稿日期 2020-09-28

为了在有限的土地产出更多的农作物,荷兰采用智能化水肥一体化灌溉技术,电脑可根据作物不同时期需要水肥的量,自动配比水肥进行灌溉,实现智能化控制^[4]。

2 我国水肥一体化技术应用现状

1974年,我国从墨西哥引进了滴灌设备,并建立了5.3 hm²的试验研究基地,我国水肥一体化技术研究自此拉开了序幕。自1974年以来,我国水肥一体化灌溉技术得到了一定的发展,研究力度不断加大,运用范围也不断扩大,并获得了良好的示范效果^[14-15]。

2.1 我国水肥一体化技术主要应用模式 目前主要的技术应用模式有喷灌、滴灌、微喷灌和膜下滴灌等模式,其中以色列滴灌技术应用最为广泛。

喷灌是利用喷头将具有一定压力的水喷射到空中,形成细小水滴或形成弥雾降落到作物上和土壤中的灌溉方式。喷灌可用于各种类型的土壤和作物,对各种地形的适应性较强,可以控制喷水量和均匀性,避免产生地面径流和深层渗漏损失,一般比漫灌节水30%~50%。刘钊^[16]以新疆马铃薯种植业为试验对象,研究畦灌、大型喷灌机喷灌等灌溉方式下的综合效益,结果表明大型喷灌机喷灌是最优选择,1.333 hm²的栽培面积中,15年纯效益为16.09万元,为畦灌的1.7倍。除了自压喷灌系统外,喷灌系统都需要加压,喷灌受风力的影响较大,有空中损失,对空气湿度的影响较大,存在表层土壤润湿充分、深层土壤润湿不足的缺点^[15]。

滴灌是将具有一定压力的营养液,利用灌溉管道将营养液通过滴头,将水分和养分一点一滴、均匀而又缓慢地滴入作物根区土壤中的灌溉技术^[17]。滴灌技术不破坏土壤结构,需要的工作压力小,可以减少无效的棵间蒸发,几乎没有深层渗漏,一次灌水延续时间较长,可以做到小水勤灌,具有较好的节水效果。于舜章^[18]利用滴灌施肥技术,在黄瓜大棚种植试验中,与农户习惯施肥相比,可以节肥3.7%~49.5%,节水21.0%~27.1%,增产9.9%~17.6%,每公顷减少成本3.86万~5.91万元。滴灌的缺点是滴头易结垢和堵塞,可能造成滴灌区盐分的累积,影响作物根系的发展。因此,滴灌对水质的要求较大,初期投资较大,必须安装过滤器并需要定期清理和维护^[4]。

微喷灌水肥一体化技术是营养液以较大的流速由低压管道系统的微喷头喷出,通过微喷头喷洒在土壤和农作物表面。微喷灌的优点是水肥利用率高、灵活性大、实用方便,可调节田间小气候。李娜等^[19]在小麦种植中采用微喷灌水肥一体化技术,与常规施肥相比增产545 kg/hm²,节约成本450~750元/hm²。微喷灌的缺点是对灌溉水源水质的要求较高,必须对灌溉水进行过滤,田间微喷灌的喷头易被杂草、作物茎秆等杂物阻塞,而喷洒质量、均匀度等受风的影响较大^[4]。

膜下滴灌技术是将滴灌管道铺设在膜下,通过管道系统将水肥送入滴灌带,由滴灌带上的滴头将水肥不断滴入土壤中。膜下滴灌水肥一体化的缺点如下:灌溉器容易阻塞,会引起浅层土壤盐分积累,限制根系的发展,高频率灌溉要求

水电保证率高。调查显示,与传统灌溉相比,膜下滴灌可以节水30%~50%,增产20%~30%^[20]。在新疆地区,有200万hm²面积的耕地在使用膜下滴灌技术,尤其是棉花膜下滴灌技术运用最为成熟,研究表明运用此技术可获得最优的经济产量以及最高的水分利用效率^[21-22]。焦有权等^[23]在设施番茄种植中使用膜下滴灌水肥一体化技术,与原有的大水漫灌的人工施肥方式相比,节水率为54%~57%,节肥37.5%。

2.2 水肥一体化系统的施肥方法 施肥是水肥一体化系统的关键环节,根据肥料溶液加入方式不同,水肥一体化施肥方法主要有文丘里施肥法、压差式施肥法、重力自压式施肥法等^[24]。

文丘里施肥法的工作原理如图1所示。当水流由管道的高压区向低压区流动时,经过文丘里管道喉部时流速加大,压力下降并形成负压,在管道内产生真空吸力,将肥料母液从肥料管吸取至灌溉系统。文丘里施肥法的优点是结构简单,成本低,安装方便,无需外部能耗,吸肥量范围大,可实现按比例施肥和保持恒定的养分浓度。因此,文丘里施肥法在施肥设备中应用范围最广。其缺点是压力损失较大,一般适于灌溉面积不大的场合^[25]。

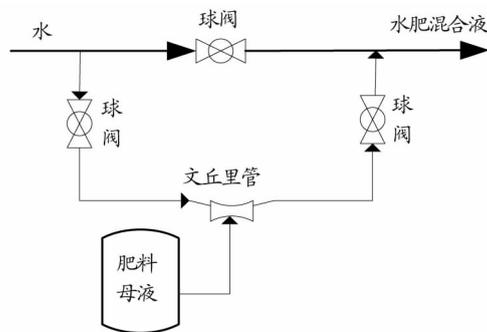


图1 文丘里施肥法的工作原理

Fig. 1 Working principle of Venturi fertilization method

压差式施肥法又称旁通罐施肥法,它由2根细管与主管道相连接,在主管道上2条细管(分别为进水管、排液管)之间设置一个调压阀,通过调节调压阀使施肥罐上的进水管和排液管之间形成压力差,使得一部分水由进水管流入施肥罐,水溶解罐中肥料后,肥料溶液由排液管进入主管道,将肥料带到作物根系^[26]。压差式施肥法的工作原理如图2所示。压差式施肥法的优点是制造成本低,操作简单,可直接使用固体肥料,无需预配肥料母液,不需要外加动力设备;其缺点是施肥浓度不恒定,肥料溶液浓度随施肥时间的延长而逐渐降低,施肥罐容积有限,反复添加肥料母液,操作过于烦琐^[4]。

重力自压式施肥法是在灌溉水池处建一个高于水池液面的肥料母液池,池底安装肥液流出管道,利用肥液自身重力流入灌溉水池。该方法适用于有地势落差的情况,如丘陵区果园等。该方法的优点是可以控制施肥浓度和速度,无需外部能耗,投资小,操作简便。该方法的缺点是灌溉水池易滋生藻类、苔藓等植物,需要定期清理^[26-27]。重力自压式施肥法的工作原理如图3所示。

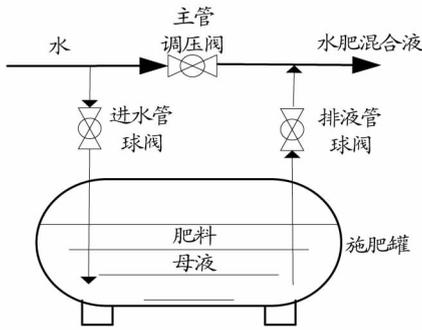


图2 压差式施肥法的工作原理

Fig. 2 Working principle of differential pressure fertilization method

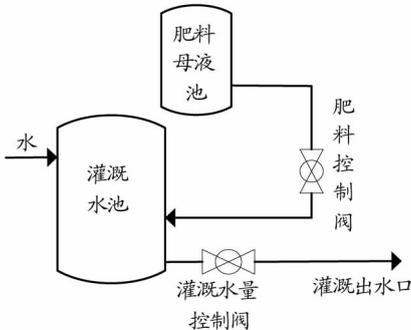


图3 重力自压式施肥法的工作原理

Fig. 3 Working principle of gravity self-pressure fertilization method

2.3 水肥一体化控制系统研究现状 水肥一体化控制系统是整个水肥一体化技术的核心,目前采用的控制器类型主要有单片机、PLC、ARM等。近年来,我国引进了国外一些先进的水肥一体化设备,比如张金良等^[3]引进了以色列NETAFIM公司福莱斯3G开放桶式施肥机,以黄瓜为试材,与传统手动简易灌溉施肥模式相比,自动灌溉水一体化系统可节肥30.4%,节水22.4%,使产量提高11.1%。我国在引进国外水肥一体机先进技术的基础上,也因地制宜地研发了多种水肥一体化精量灌溉控制系统,有些注重控制算法研究,有些结合各种传感器、图像识别实现精准灌溉,有些结合专家知识实现灌溉。

袁洪波等^[28]设计了一种水肥一体化循环灌溉系统,采用滴灌基质无土栽培模式并构建回收管路,实现水肥循环利用。在番茄栽培试验中,与传统土壤栽培模式相比,用水量是传统土栽模式的69.4%,水分利用效率是传统土栽模式的1.92倍。

阮俊瑾等^[29]研制了一种球混式精确施肥灌溉系统,采用文丘里管吸取肥料母液,配备STM32系列微控制器,搭载一套智能灌溉施肥应用软件,从而实现自动配肥、自动灌溉和自动决策,系统控制精度高、运行稳定,大大提高了水肥利用效率。

江新兰等^[30]设计了基于两线解码技术和云计算的设施农业水肥一体化灌溉系统,该系统通过两线解码技术,利用各种传感器实时采集作物生长环境信息,并存储于数据管理

云平台,根据作物需水需肥规律,利用云平台的计算和分析能力,科学制订不同环境中作物生长的水肥需求和灌溉施肥制度,实现水肥一体化的智能控制。应用试验表明,与传统灌溉方式相比,肥料利用率提高了15%~35%,水分利用率提高了25%~40%。

李友丽等^[31]设计了一种基于有机液肥制备的水肥一体化系统,该系统具有有机液肥制备、浓度调节和自动灌溉等功能,实现了有机栽培的营养液制备与管理一体化。将该系统运用在温室黄瓜基质栽培系统中,运行稳定,黄瓜总产量可达48 165 kg/hm²。

张育斌等^[32]研究了PID控制,建立了遗传算法优化的模糊PID控制模型,有效解决了传统PID控制在面向不确定、非线性对象时的局限性,并设计了可以同时完成氮肥、磷肥、钾肥和微量元素等肥液灌溉的系统,成功实现了水肥精量配比,大大提高了灌溉效率。

师志刚等^[33]设计了基于物联网的水肥一体化智能灌溉系统。该系统包括农田气象及土壤墒情系统、智能灌溉施肥系统、作物长势视频监控系统、能效监测系统、远程监控平台等。应用结果表明系统节水省工效果好,系统运行20年后的净现值为普通滴灌的7倍多。

姜岩等^[34]设计了基于专家系统的水肥一体化智能控制系统,通过接收专家系统的控制策略实现施肥的自动化、智能化,养分专家系统可根据输入的大棚基础信息、气象和土壤资料,快速推荐施肥方案。通过2016—2017年的草莓土壤种植试验表明,按照专家系统推荐的肥料比例及用量,与农户习惯施肥相比,分别增产43.3%和22.9%,维生素含量分别增加6.54%和12.74%。

陈东等^[35]利用机器视觉测量植物生长参数,并监测环境和土壤参数,以植物生长模型和模糊神经网络算法形成农作物智能水肥一体化管理系统。系统实现了精准水肥灌溉、PC和手机端的监控。与传统施肥模式相比,节水率在30%以上,节省肥料在40%以上,节省人工成本20%左右。

金奎奎等^[36]设计了云端服务器为核心的水肥一体化管控平台,实现了灌溉智能决策,具有现场和远程查看、操作、控制等功能。系统运用在种植面积约15 hm²的芦笋滴灌种植中,每次仅灌溉150 m³/hm²,与传统漫灌方式相比可节水60%以上。

李颀等^[37]设计了一种全自动在线监测和实时调节的精准智能化控制系统,采用改进非线性自抗扰解耦控制器,实现了灌溉营养液pH和EC的快速精确控制,pH和EC的调节时间分别为39和44 s,输出绝对误差分别小于0.2和0.1 mS/cm。番茄种植试验中与传统人启停灌溉模式相比,系统用水量、用肥量、用工量分别降低33.13%、35.75%和35.01%,作物产量提升15.16%。

3 我国水肥一体化技术发展存在的问题

随着水肥一体化设备的引进、自主研发与推广应用,我国水肥一体化技术有了一定的进步,产品基本可以满足农作物水肥一体化灌溉的要求,但目前与发达国家相比还有很大

的差距,无论是在推广、农技人才、服务以及技术本身等方面都还存在很多不足之处。①连片种植困难,水肥一体化一次性投入较高,一些市场产品仿照国外,产品价格偏高也不适用与国内生产的实际情况,影响推广速度。②缺乏专业农业科技人才,农民对水肥一体化设备的操作使用不够熟练,不了解整个的操作流程,许多农户只会进行简易操作,农户基本不懂科学维护设备。③培训及企业后期维护技术服务跟不上,维修费用高,使设备使用过程中出现问题不能及时解决。④目前缺乏性价比高的智能型水肥一体化灌溉设备,肥料配方、营养液浓度、施肥量、管理方法等一般仅靠农户个人经验,缺少成熟的针对不同作物的专家决策知识,缺乏智能的灌溉决策系统。

4 对策与建议

(1)加大政策和资金扶持力度。因地制宜,加强水肥一体化技术示范区推广,建设农民专业合作组织,为农民提供相应技术支持和设备维护。

(2)加强农业人才的培养,积极开展培训,不断提高农民科技文化水平。特别是要加强水肥一体化系统使用培训,制定简单明了的操作规程,让农户真正掌握水肥一体化技术。

(3)加强管护力量。建立健全、良好的售后维修制度,配备专业运维人员定期检修,并从技术层面降低运维成本。

(4)因地制宜,加大自主研发力度。加强农机与农艺的融合,结合遥感、人工智能技术,建立相关的专家决策系统,提高设备性能、精度和智能性,保证水肥一体化发展的实际需要。

水肥一体化技术具有节水、节肥、提高作物产量和品质等优点,该技术对于缓解我国水资源短缺,节能减排、生态文明建设,推动农业的可持续发展具有重要意义。在加大政策和资金支持、加强人才培养,加强管护,进一步提升水肥一体化技术的基础上,未来水肥一体化技术必将被越来越多的农民所使用,从而推动我国农业的发展。

参考文献

[1] 袁洪波,李莉,王俊衡,等. 温室水肥一体化营养液调控装备设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(8):27-32.

[2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019 [EB/OL]. [2020-07-25]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>.

[3] 张金良,梁新书,廉晓娟,等. 自动灌溉施肥模式对温室黄瓜产量及水肥利用的影响[J]. 节水灌溉,2017(5):1-4,10.

[4] 王振民,梁春英,黄丽萍,等. 我国水肥一体化技术研究现状与发展对策[J]. 农村实用技术,2020(3):85-87.

[5] 李传哲,许仙菊,马洪波,等. 水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J]. 江苏农业学报,2017,33(2):469-475.

[6] 新华社. 中共中央 国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见 [EB/OL]. (2019-02-19) [2020-07-26]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-02/19/content_5366917.htm.

[7] 新华社. 中共中央 国务院关于抓好“三农”领域重点工作确保如期实现全面小康的意见 [EB/OL]. (2020-02-05) [2020-07-26]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-02/05/content_5474884.htm.

[8] 苏秋芳. 水肥一体化技术在北京市设施农业中的应用与思考[J]. 农业工程,2020,10(4):96-100.

[9] 魏全盛,谷利芬. 温室智能水肥一体化微喷灌装置设计[J]. 农机化研究,2017,39(9):134-138.

[10] 李坚,刘云骥,王丹丹,等. 日光温室小型水肥一体灌溉机设计及其控制模型的建立[J]. 节水灌溉,2017(4):87-91.

[11] 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.

[12] SIMPSON A R, DANDY G C, MURPHY L J. Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization[J]. Journal of water resource planning and management, 1994, 120(4):423-443.

[13] 兰家祥. 基于 Zigbee 技术的水肥一体化调节系统的设计与试验[D]. 福州:福建农林大学,2019:6.

[14] 刘永来,李淮源,梁志雄,等. 东南烟区烟叶水肥一体化技术发展策略[J]. 广东农业科学,2020,47(4):68-76.

[15] 杨林林,张海文,韩敏琦,等. 水肥一体化技术要点及应用前景分析[J]. 安徽农业科学,2015,43(16):23-25,28.

[16] 刘钊. 不同灌溉方式下马铃薯种植综合效益分析[J]. 水利科技与经济,2020,26(2):81-84.

[17] 陈广锋,杜森,江荣凤,等. 我国水肥一体化技术应用及研究现状[J]. 中国农技推广,2013,29(5):39-41.

[18] 于舜章. 山东省设施黄瓜水肥一体化滴灌技术应用研究[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(6):173-176.

[19] 李娜,刘胜海. 望都县小麦微喷灌水肥一体化增产效益分析[J]. 农民致富之友,2013(6):102.

[20] 石岩,张金霞,董平国,等. 干旱缺水区膜下滴灌棉花节水机理及灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究,2018,36(2):77-85,100.

[21] 李明思,刘洪光,郑旭荣. 长期膜下滴灌农田土壤盐分时空变化[J]. 农业工程学报,2012,28(22):82-87.

[22] WANG H D, WU L F, CHENG M H, et al. Coupling effects of water and fertilizer on yield, water and fertilizer use efficiency of drip-fertigated cotton in northern Xinjiang, China[J]. Field crops research, 2018, 219: 169-179.

[23] 焦有权,冯吉. 农业水肥一体化灌溉经济效益分析[J]. 中国农业会计,2020(1):4-5.

[24] 张志洋,李红,陈超,等. 溶解混施水肥一体化装置施肥性能试验研究[J]. 排灌机械学报,2018,36(11):1115-1119.

[25] 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.

[26] 徐坚,高春娟. 水肥一体化实用技术[M]. 北京:中国农业出版社,2014:93-97.

[27] 杨林林,张海文,韩敏琦,等. 水肥一体化技术要点及应用前景分析[J]. 安徽农业科学,2015,43(16):23-25,28.

[28] 袁洪波,程曼,庞树杰,等. 日光温室水肥一体灌溉循环系统构建及性能试验[J]. 农业工程学报,2014,30(12):72-78.

[29] 阮俊瑾,赵伟时,董晨,等. 球混式精准灌溉施肥系统的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(S2):131-136.

[30] 江新兰,杨邦杰,高万林,等. 基于两线解码技术的水肥一体化云灌溉系统研究[J]. 农业机械学报,2016,47(S1):267-272.

[31] 李友丽,李银坤,郭文忠,等. 有机栽培水肥一体化系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(S1):273-279.

[32] 张育斌,魏正英,简宁,等. 水肥精量配比灌溉系统设计[J]. 农机化研究,2017,39(12):107-111.

[33] 师志刚,刘群昌,白美健,等. 基于物联网的水肥一体化智能灌溉系统设计与效益分析[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(3):221-227.

[34] 姜岩,唐勇伟,李成攻,等. 基于专家系统的水肥一体机智能控制系统[J]. 现代农业科技,2018(10):191-193.

[35] 陈东,杜绪伟,马兆昆. 基于物联网的智能水肥一体化管理系统构建[J]. 贵州农业科学,2020,48(4):161-163.

[36] 金永奎,盛斌科,孙竹,等. 水肥一体化管控系统设计和实现[J]. 农机化研究,2020,42(6):29-35.

[37] 李硕,马琳,王康. 水肥一体化施肥机 EC 和 pH 改进自抗扰解耦控制[J]. 中国农机化学报,2020,41(2):161-170.