

低碳环保型滴灌技术体系构建与研究现状分析

李云开 冯吉 宋鹏 周博 王天志 薛松

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 大力发展滴灌技术已成为缓解我国水资源短缺问题的重要途径之一,但是其迅猛发展的背后带来的一系列问题值得反思。在详细阐述我国滴灌技术应用现状与国家对发展滴灌技术提供的政策支持的基础上,重点反思了新疆滴灌技术应用获得巨大成功背后所带来的环境问题。由此,提出应构建低碳环保型滴灌技术体系,其基本内涵为构建以低能耗、低污染、低排放、高效能、高效益为目标的“三低、两高”低碳环保型滴灌技术。在此基础上详细阐述了实现“降耗”、“减污”、“减排”、“提效”、“增益”的关键技术。最后,提出了低碳环保型滴灌技术未来研究重点及急需解决的关键问题。

关键词: 滴灌; 低碳; 环保; 技术体系

中图分类号: S275.6; X21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)06-0083-10

Developing Situation and System Construction of Low-carbon Environment Friendly Drip Irrigation Technology

Li Yunkai Feng Ji Song Peng Zhou Bo Wang Tianzhi Xue Song

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: It is one of the important ways of solving water shortage to develop the drip irrigation technology. However, a series of problems brought by the rapid development need rethink profoundly. Based on the description of the drip irrigation technology application status and policy support to develop the drip irrigation, the environmental problems brought by the great success of drip irrigation technology used in Xinjiang Province were described in detail. A low-carbon environment friendly drip irrigation technology system is necessary, whose basic connotation is to realize the goal of “three lows and two highs”, including “low-energy”, “low-pollution”, “low-emission”, “high-effect” and “high-benefit”. At the same time, the key technologies were stated in detail. The technology of “consumption reduction” contains self-pressure drip irrigation technology and construction technology for low-pressure or micro-pressure drip irrigation system. The technology of “pollution abatement” contains security drip irrigation with poor quality water and drip irrigation with biodegradable mask or under mulch. The technology of “emission reduction” contains emission reduction of farmland greenhouse gas in drip irrigation and drip irrigation with clean energy to get water. The technology of “effect-raising” contains treatment technology of water quality, sedimentation and filtration technology, and product development of long-lasting anti-clogging drip irrigation emitters. The technology of “high-gain” contains irrigation with integration of water and fertilizer and so on. Eventually, the future research priorities and the key issues need to be resolved about low-carbon environment friendly drip irrigation technology were proposed.

Key words: drip irrigation; low-carbon; environment protection; technology system

收稿日期: 2015-12-15 修回日期: 2016-03-01

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201401078)、国家自然科学基金项目(51321001、51339007、51179190)和水利部“948”计划项目(2014433)

作者简介: 李云开(1975—),男,教授、博士生导师,主要从事滴灌灌水器堵塞机理与新产品开发研究, E-mail: liyunkai@126.com

引言

滴灌随着全球性水资源紧缺问题得到了广泛应用,但滴灌技术应用过程中伴生的能源消耗、地膜残留等环境问题已深受关注。低碳、环保已经成为时代的主题,相关理论、技术与方法已经深入到各行各业。低碳农业是低碳经济在农业领域的延伸,低碳环保型滴灌则是低碳农业技术在灌溉领域的具体体现形式。本文对低碳环保型滴灌发展需求、基本概念及其关键技术进行系统、深入的分析,旨在为保障我国滴灌技术的健康、快速和稳定发展提供参考。

1 滴灌技术迅猛发展后的反思

1.1 我国滴灌技术应用现状

水资源紧缺已成为制约国民经济和社会发展的瓶颈,农业灌溉用水量约占全国总用水量的 63%,但由于灌溉方式、灌溉管理等多因素影响,农业灌溉用水利用率极低,仅约为 45%,而发达国家可达 80%,解决水资源短缺问题的最主要途径之一是发展节水农业。全球大量的灌溉实践表明:滴灌技术是当今行之有效的节水灌溉技术之一,它比地面灌溉节水 70%~80%,比喷灌节水 40%、节能 60%,灌水质量好,可提高农作物产品质量^[1]。我国的滴灌技术在 1974 年由墨西哥引进,经过引进、消化、吸收及再创新,已经逐步建立了我国滴灌技术体系。1996 年全国滴灌面积约 7.3 万 hm^2 ,主要是以设施作物和果树为主,到 2010 年全国滴灌面积 140.7 万 hm^2 ,2014 年以滴灌技术为主的微灌总面积达到 468.1 万 hm^2 。滴灌技术的应用也开始由温室大棚高附加值作物灌溉向大田粮经作物滴灌扩展、由平地大面积灌溉向山区陡地发展、由农场集中大面积向农村小面积分散发展。滴灌技术逐渐得到广大用户的认可,表现出蓬勃发展态势。

1.2 国家对发展滴灌技术提供的政策支持

多年来我国滴灌技术发展成效显著,日益得到更为广泛的推广与重视。尤其是近年来,国家高度重视节水灌溉工作,出台了一系列政策支持滴灌技术的发展。2011 年中央一号文件中多处提到节水灌溉问题,明确要求“大力发展节水灌溉,推广渠道防渗、管道输水、喷灌滴灌等技术”、“普及农业高效节水技术”。2012 年中央一号文件中也同样明确指出“大力推广高效节水灌溉新技术、新设备”。2013 年中央一号文件中指出“大力发展高效节水灌溉”,文件中还提到“推进东北四省区节水增粮行动、粮食丰产科技工程”等也预示滴灌技术的巨大发展前景。国务院办公厅印发《国家农业节水纲要

(2012—2020 年)》,规划提出,到 2020 年“全国农田有效灌溉面积达到 10 亿亩,新增滴灌工程面积 3 亿亩,其中新增高效滴灌工程面积 1.5 亿亩以上”。尤其是 2014 年习近平总书记关于保障水安全提出的“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”重要思想战略,这无疑表明党和国家对发展农业节水的高度重视。水利部也提出了按照“东北节水增粮、华北节水压采、西北节水增效、南方节水减排”的思路全面推进高效节水灌溉,滴灌是其中主要技术之一。北京市委、市政府也新出台了《关于调结构转方式发展高效节水农业的意见》(京发[2014]16 号),明确提出大力发展喷、滴灌等高效节水灌溉技术。这意味着以滴灌技术为主要支撑的高效节水灌溉事业面临崭新的发展机遇与巨大的发展空间。

1.3 新疆滴灌技术应用获得巨大成功背后的反思

自 1996 年开始试验以来,新疆滴灌技术经过多年的试验、示范、推广,取得了良好的经济、生态、社会效益^[2],目前膜下滴灌种植面积已经突破 200 万 hm^2 。在新疆膜下滴灌技术应用获得巨大成功的同时,也需要对其进行反思:一是一次性薄壁滴灌带的使用引起的资源浪费以及薄膜残留等引起的环境污染问题。目前新疆膜下滴灌主要使用低成本一次性薄壁滴灌带,这种滴灌带在降低成本的同时也会造成灌水均匀性差、滴灌带回收成本高、巨大能源与资源消耗以及白色污染等一系列问题,在其它地区是否可以推广值得商榷。二是降低作物产量,破坏耕层土壤结构。由于地膜厚度小、强度弱,回收困难大,每年仍然有大量地膜残留在土地中,连续覆膜 10 年和 20 年单种棉花棉田中地膜残留量可分别达 $(259.70 \pm 36.78) \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $(307.90 \pm 35.84) \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。当土壤中残膜量达 $75 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 时,棉花单株铃数即减少 0.8~1.0 个,导致棉花产量降低 7.3%~21.6%^[3],其危害程度不容小觑。由于残膜降解速度慢,以碎片形式大量存在于土壤中的残膜会产生物理阻隔作用,也会导致土壤孔隙度下降、容重上升等土壤物理性质变化,从而破坏耕层土壤结构^[4]。如何解决新疆大田作物滴灌快速发展背后引发的环境问题,引人深思。

2 低碳环保型滴灌技术原理及基本内涵

对于低碳农业的实施,我国近些年从生态农业、绿色农业、循环农业等角度出发已经开展了一些探索性研究。结合低碳农业的概念与内容,笔者认为低碳环保型滴灌的内涵表现为:

(1) 低碳环保型滴灌是节约型的灌溉模式,能够节约资源消耗,降低滴灌系统、运行及生产资料

的消耗,要尽量降低对化石能源及其产物的依赖,提高能源利用效率及清洁能源使用率,大力发展低压、自压型滴灌技术及节水、减肥、减药型滴灌模式。

(2) 低碳环保型滴灌是效益型的灌溉模式,能够充分挖掘滴灌全封闭式管道化系统功能,借助水、肥、气、热等作物根区微生境多要素协同调控,并以滴灌系统为基础平台整合农机、农艺等高效农业生产技术,提升作物产量和品质,以较少的投入获得较大的农民收入及社会效益。

(3) 低碳环保型滴灌是安全型的灌溉模式,它通过技术创新及运行优化,将整个滴灌农业生产流程可能对土壤健康质量以及邻近的大气、水环境等造成的不良影响降到最低,尤其是农业的面源污染和温室气体排放。

(4) 低碳环保型滴灌是高效能型灌溉模式,它通过应用长效型滴灌管(带)产品并通过沉淀、过滤以及化学加氯等多种处理,解决灌水器堵塞问题以及劣质水源灌溉对灌溉系统关键设备的影响,保障系统安全运行及效能。

3 低碳环保型滴灌技术体系关键内容及研究现状

3.1 “降耗”关键技术

降低滴灌系统、运行及生产资料的消耗是建立节约型灌溉模式的关键,应大力发展自压滴灌技术及低压或微压滴灌系统构建技术。

(1) 自压滴灌技术

自压滴灌是利用自然地形落差,将管道累积起来的势能作为滴灌系统所需的工作压力水头,可通过水窖、水塘、沟渠、山泉等供水。BHATNAGAR 等^[5]研究了一种山地梯田中的自压滴灌系统设计方法,发明了一种“星状”自压滴灌方式。KUMAR 等^[6]也将自压滴灌应用于中喜马拉雅地带的丘陵梯田中。新疆盆地利用水源在高处、绿洲在低处的自然特点,大力发展自压滴灌技术,目前已建和在建的大型自压滴灌管网有 3 处(克拉玛依市农业开发区一期和二期工程共计 3.33 万 hm^2 、兵团 14 师皮墨垦区 1.47 万 hm^2 、兵团农二师 38 团苏塘灌区 2.00 万 hm^2)。新疆兵团第五师 84 团和 88 团实施 0.6 余万 hm^2 小麦自压滴灌示范项目,小麦产量较淹灌提高 1 500 kg/hm^2 ,运行成本较同地区加压滴灌低 900 元/ hm^2 。自压滴灌技术有效节省了水泵等加压设备的投资和庞大的系统运行成本,可保护生态并有效缓解能源供需矛盾,在山丘区具有广阔的推广应用前景。

(2) 低压或微压滴灌系统构建技术

低压和微压滴灌系统是相对于常压滴灌系统而言的,后者灌水器设计工作水头约为 10 m,因此灌水器工作压力在 5 ~ 10 m 的滴灌系统为低压滴灌系统,低于 5 m 的滴灌系统称为微压滴灌系统^[7]。POSETL 等^[8]提出了适用于贫穷地区小农户的低压滴灌技术。SINGH 等^[9]提出了适用于小块农地的低能耗滴灌技术与系统。以色列 Ein-Tal 公司专门开发了适应于中国农村土地经营方式的重力滴灌系统,采用水箱、水桶供水,工作压力 1 ~ 2 m,控制面积 0.07 ~ 0.13 hm^2 。以降低滴灌技术工作压力为突破口,研究开发节能经济型滴灌技术系统,综合考虑水力偏差、制造偏差、地面偏差及堵塞状况的灌水器适宜工作压力选择是目前低压滴灌系统构建的研究重点。KANG^[10]研究了不同坡度条件下压力变化对灌水均匀度的影响。BRALTS 等^[11-13]研究了压力变化、制造偏差及滴头堵塞等因素对灌水均匀度的影响。张国祥等^[14]、魏正英等^[15]、吴普特等^[16]及牛文全等^[17]研究了降低滴灌技术灌水器工作压力的可行性。同时,低压或微压滴灌系统可以使工程投资成本降低 30% ~ 70%、年运行费降低 50% ~ 70%,而且可以进一步降低滴灌工程输配水管网管材标准及系统投资,在地形较为平坦,田面最大高差小于灌水器设计工作水头的 5% 的地区具有极大的发展空间。

3.2 “减污”关键技术

降低滴灌农业生产过程可能对土壤健康质量以及邻近水环境等造成的不良影响是创建安全型灌溉模式的重要途径,主要表现在劣质水安全滴灌及可降解地膜膜下滴灌两个方面。

(1) 劣质水安全滴灌

劣质水主要包括再生水、微咸水、灌溉回归水等,可以作为灌溉水源和肥源,但通常含有一定量的有害成分,也是一种污染源,不适当的灌溉会引起土壤质量退化和临近水体污染问题,滴灌因其精量、可控的特性被认为是劣质水最适宜的灌溉方式^[18]。国内外学者围绕着劣质水滴灌开展了大量卓有成效的研究工作:ORON 等^[19]、李久生等^[20]认为应用地下滴灌,使土壤充当补充过滤器,可降低土壤污染,提高作物的产量,因此可适当降低回用水质标准。应用再生水地下滴灌时,其对土壤细菌总数的降低作用优于地面滴灌^[21-22]。万书勤等^[23-25]研究发现,可以采用微咸水滴灌黄瓜、番茄等对盐分中等敏感的作物。雷廷武等^[26]研究发现盐碱地微咸水滴灌并未形成土壤盐分累积,反而在一定程度上增加了西瓜的产量和品质。采用劣质水源滴灌可减缓日

益增长的粮食、人口、资源、环境矛盾,最大程度避免劣质水灌溉所带来的负面作用,在干旱、半干旱地区和滨海缺水地区采用劣质水安全滴灌具有巨大的应用前景。

(2)可降解地膜膜下滴灌及免膜滴灌

膜下滴灌既具备滴灌的防止深层渗漏、减少棵间蒸发、节水、节肥的特点,同时还具备地膜栽培技术的增温、保墒作用^[27],在中国西北干旱地区得到了广泛应用^[28],目前新疆膜下滴灌面积已突破200万hm²,成为世界上大田应用膜下滴灌面积最大的地区。但每年有大量地膜残留在土地中,限制了膜下滴灌技术的发展,可降解地膜膜下滴灌技术引起了人们的极大兴趣。申丽霞等^[29-30]研究认为,以可降解地膜替代普通地膜应用于农业生产具有可行性。目前新型可降解地膜主要包括可生物降解地膜、氧化生物降解地膜、酵母降解地膜3种类型^[31],可降解地膜的探索和研发是解决地膜污染的必由之路,但其降解特性受到自然条件的变异性、作物种类的多样性、农业生产活动的差异性等影响较大,其价格较普通地膜明显偏高,极大程度地限制了推广。

免膜滴灌是指在地膜应用区进行无膜覆盖种植,借助滴灌系统调控灌水定额、灌水次数、施肥量、施肥次数以及辅助农艺措施,以实现不显著降低作物产量甚至增产,解决地膜残留引起的白色污染问题。国内外部分研究学者也对免膜滴灌作物种植进行了研究。GODARA等^[32]研究发现免膜滴灌条件下,不同灌溉水平和施肥水平对茴香的生长、开花、产量和水分利用率均有显著影响,当施肥水平为100%时,茴香的株高最高。SEZEN等^[33]针对免膜滴灌不同灌溉制度对甜椒产量和水分利用率的影响进行研究,发现灌溉水平和累积蒸发量对甜椒平均果重、长度和宽度、株高和株茎有显著影响,灌溉水平 $K_{cp}=1.00$ 时产量最高。邢英英等^[34]研究无膜滴灌施肥条件下水肥组合对温室番茄根系生长、产量品质和水肥利用效率的影响,提出了同时满足高产优质高效的最接近的灌水施肥制度。无膜滴灌技术现已在新疆、内蒙古等地开展相关试点研究,并在西北、东北和西南等地膜残留较为严重地区具有巨大应用潜力。

3.3 “减排”关键技术

降低温室气体排放,提高能源利用效率及清洁能源使用率是创建安全型和节约型灌溉模式的重要途径,应大力发展农田温室气体滴灌减排技术和清洁能源提水滴灌技术。

(1)农田温室气体滴灌减排技术

传统灌溉方式肥料利用率低,肥料当季利用率

不足30%,这种过量的施肥必然会导致农田中排出大量温室气体。农田温室气体滴灌减排技术是借助滴灌系统实现水肥一体化灌溉,将肥水均匀、准确地施入作物根区土壤,提高施肥的均匀度和肥料利用率,达到温室气体减排的目的。众多专家学者对温室气体减排技术进行了相关研究。SCHEER等^[35]、KALLENBACH等^[36]发现滴灌会形成抑制反硝化反应环境、影响土壤水分运动方式,可以显著降低农田土壤N₂O的排放。针对覆膜滴灌技术特性,LI等^[37]认为覆膜滴灌通过增加土壤湿度、温度从而增加了土壤微生物的数量及活性,而导致土壤中CO₂浓度升高,但塑料薄膜阻挡了土壤与大气的传输,减少了土壤CO₂向大气中的排放。

(2)清洁能源提水滴灌技术

农田灌溉通常用电时间比较集中,但对电能保障要求并不高,采用太阳能、风能等清洁能源驱动水泵完全可以满足滴灌系统的需要,进而减少化石能源的消耗以及温室气体的排放,从而达到“减排”的效果。在欧美及印度、巴西、智利、尼日利亚等阳光充足的地区,光伏水泵逐步应用于小面积的农田灌溉。PANDE等^[38]、BOUZIDI等^[39]对大田和温室进行了光伏提水滴灌技术研究,表明光伏水泵所提供的清洁能完全可以满足滴灌系统,大幅度减少能耗。BOLANOS等^[40]、SHIVRATH等^[41]分别提出利用太阳能、风能混合动力驱动滴灌系统的最优模式。胡建栋等^[42]设计了一种新型的风力提水机及其滴灌系统。我国新疆和田皮山县的巴西兰干乡、奥依吐格拉克村开发的30kW光伏系统可以提供500亩农田灌溉,内蒙古自治区鄂尔多斯市境内的达拉特旗、内蒙古包头市达茂旗希拉穆仁镇等也建立了多处光伏提水滴灌示范区,在太阳能、风能等能源丰富但水资源、化石能源缺乏地区有着广泛的应用前景。

3.4 “提效”关键技术

应用长效型滴灌管(带)产品并通过劣质水源的深度处理、沉淀、过滤以及化学加氯等多种处理,解决劣质水源灌溉对灌溉系统关键设备的影响问题,保障系统安全运行及效能是创建高效能型灌溉模式的主要途径。

(1)水源水质处理技术

灌溉水源水质特征是导致滴灌系统灌水器堵塞最主要、最直接的原因^[43-44],尤其是使用再生水、微咸水等劣质水源进行滴灌时,水质处理效果将直接影响滴灌系统运行性能。再生水处理过程中单独使用某项技术很难满足滴灌水质要求,通常情况下需要采用反硝化生物滤池+超滤+臭氧接触池+紫外线消毒等组合工艺以及混凝沉淀、介质过滤(含生

物过滤)、膜处理、氧化等深度处理技术^[45],以达到滴灌水质要求。目前也陆续出现了一些新型水处理技术,比如利用微纳米气泡爆炸时的能量实现污染物的氧化降解和水质净化^[46];利用微生物电化学方法(例如除垢棒)在水源中通入高电压低电流后,使通过的微生物和颗粒带有相同电荷而互相排斥^[47],从而有效减少絮凝体的形成;利用磁化技术祛除微生物,并使滴灌系统中的 CaCO_3 和 MgCO_3 沉积物分解生成较松软的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 和 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 等^[48-59]。随着我国水环境污染与水资源紧缺问题日趋严重,这些技术有望被大面积示范应用。

(2) 沉淀、过滤技术

高含沙水源在进入滴灌系统前需要进行沉淀和过滤。我国众多灌区在高含砂水源泥沙沉淀技术上积累了大量宝贵的经验,研发了直线形沉沙池、曲线形沉沙池、沉沙条渠、混合形沉沙池及特殊形式的沉沙池等多种类型产品,在沉沙池的结构设计、流场分布、泥沙沉降规律、泥沙沉降计算方法以及运行设计、观测等方面开展了大量卓有成效的工作^[50-53]。目前也有学者提出集沉淀与过滤一体的重力式沉淀过滤复合系统,具有体积小,占地少,造价低,建设方便的优势。通过进一步对沉淀过滤复合系统中泥沙运行规律的试验研究、分析,采用沉沙池过滤网结合的形式可以清除 30% ~ 60% 以上的泥沙,处理效果明显,出池水质满足滴灌要求。目前,也有部分学者探索性的利用高目数滤网直接对高含沙水源进行无压过滤,允许部分泥沙进入滴灌毛管,水及养分(泥沙)一起通过滴头分配到田间供作物吸收利用,当系统均匀度降低到一定程度时,及时采取如冲洗等特殊的管理措施维持滴灌毛管在作物生育期正常运行。对于每项滴灌系统必须配置过滤设备/设施,部分学者认为高含沙水源比较适宜的过滤器搭配模式为离心过滤器+砂石过滤器+网式/叠片过滤器,而对于颗粒物极细的黄河泥沙过滤效果不显著;砂石过滤器+网式/叠片过滤器对再生水水源过滤效果较好^[54-55];具有自清洗功能的产品是未来的发展方向。

(3) 长效抗堵塞滴灌灌水器产品研发

开发经济、环保、高效的长效滴灌灌水器产品,核心和关键是对灌水器流道结构进行设计与优化,提高灌水器本身的抗堵塞能力。部分学者应用激光多普勒测速仪(Laser doppler velocimeter, LDV)^[56]、粒子图像测速技术(Particle image velocimetry, PIV)^[57-58]和粒子跟踪测速技术(Particle tracking velocimetry, PTV)^[59],借助透明原型^[60]、放大模型^[61-63]、平面模型^[64-65]和单元段模型^[66-67]等实现

了灌水器内部水流及颗粒物运动的可视化;部分应用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)软件对灌水器内部水流及颗粒物运动特性进行数值模拟^[68],对灌水器流道适宜几何参数^[69]以及边界优化形式^[70]进行相关研究,形成了“主航道”^[56]和“漩涡洗壁”^[69-70]两种抗堵塞设计方法。也有部分企业探索性地采用材料改性提升本身的抗堵塞性能,例如 Netafim 公司曾生产的 BIOLINE 系列压力补偿型滴灌管经过抗菌剂内部浸渍,也探索性地在滴灌系统中加入有机砷 10-oxybisphenoxarsine 来防止微生物生长及堵塞的形成。研发经济、长效、可回收型灌水器产品适宜的结构造型、材料配方、成型工艺以及配套的滴灌带回收机械并实现产业化,是当前的重要任务。

(4) 化学与生物控堵技术

周期性氯/酸处理是利用氯/酸的强氧化作用杀死或抑制微生物(细菌)的增殖和生长,防止粘液和块状物的形成,进而抑制堵塞物质形成与生长过程,也可以很好地防止和消除因碳酸盐沉淀引起的灌水器化学堵塞,配合毛管冲洗效果更佳^[71-72]。但是由于灌溉水质、灌水器类型等试验背景差异较大,不同研究者建议采用的加氯/酸浓度、注入频率、注入方式等运行参数的研究结论差异很大^[73],目前尚未形成统一可遵循的技术规范,而且长期、不恰当,甚至过量使用酸、氯处理还会给区域土壤环境带来风险。

部分学者开始探索利用微生物拮抗原理解决灌水器堵塞问题,并成功使得已堵塞的灌水器流量完全恢复^[74],这为利用微生物拮抗原理与群体响应机制控制灌水器堵塞提供了一种环境友好型的新方法。随后,有学者探索性地通过添加微生物制剂,降低了灌水器内部的 CaCO_3 沉淀形成以及化学堵塞^[75]。研发适宜的微生物制剂以及针对不同滴灌水源、作物品种的应用模式是目前急需解决的问题。

3.5 “增益”关键技术

如何借助滴灌封闭式管道系统实现水、肥、气、温等多要素协同调控一直是众多科研工作者研究的课题。水肥协同调控发展最早、最为迅速,是借助滴灌系统可以精量、便捷地将肥料随水滴入作物根区土壤,使得肥料利用率达 50% 以上,节肥 30% 以上,蔬菜、果树、棉花、玉米、马铃薯分别增产 15% ~ 28%、10% ~ 15%、10% ~ 20%、25% ~ 35% 和 50% 以上,农产品品质也明显提高^[76]。国内外学者针对不同的作物类型提出了相应的滴灌水肥一体化技术模式操作规程,其中包括粮食作物:玉米、小麦、马铃薯、大豆等;经济作物:甘蔗、棉花、油菜、茶叶等;果树:葡萄、香蕉、柑橘、西瓜等;蔬菜:叶菜类、瓜果类、

茄果类等^[77-78]。

水肥一体化最核心的是实现水肥同施,其中肥料的选择至关重要,现在市场上适用于滴灌水肥一体化的肥料包括:水溶性普通固体肥料,种类繁多,质量优劣不一;水溶性专用固体肥料,包含大量元素水溶肥、微量元素水溶肥、含氨基酸水溶肥、含腐殖酸水溶肥等,部分可兼做叶面喷施;液体肥料,分为清液肥料与悬浮液肥料,由于其养分均一,肥效高且生产成本低、能耗低,生产过程无任何排放的零污染,必将成为降耗增益的主流肥料。资料显示美国液体肥料占化肥总量的40%左右,以色列90%的农作物的灌溉系统使用液体肥料^[79-80]。尿素硝酸铵(Urea ammonium nitrate,UAN)溶液,是一种新型高效环保的液体肥料,也是除草剂、杀虫剂、杀菌剂、植物生长调节剂及天然活性物质(如黄腐酸、氨基酸、海藻提取物等)的良好载体,作为生产液体复合肥料的基础原料而成为研究和应用推广的热点。

目前也已衍生出了水肥气一体化滴灌、加温滴灌、磁化水滴灌等一系列新型滴灌增产技术。SURYA等^[81]采用水肥气一体化联合调控技术,在重粘土和盐渍土中种植番茄,结果表明番茄的果实产量和水分利用率均有较高提升。于贝贝^[82]应用CO₂施肥与水肥一体化结合的水肥气一体化协同耦合施用技术种植番茄,得出水肥气最佳协同施用比例。张凤娟等^[83]进行了加工番茄磁化水滴灌实验,研究发现磁化水滴灌可以促进加工番茄的生长发育、生物量与干物质累积,较常规滴灌增产最高可达9.4%。这些技术的应用实现了政府节水和用户增产、增收、增效两种需求的协调发展,有望在全国范围内的各种作物滴灌栽培上得到迅速应用。

4 未来研究重点及急需解决的关键问题

目前,灌溉水源紧缺、系统投资成本与运行能耗偏高、灌水器堵塞等问题已成为制约滴灌技术应用和推广的主要瓶颈,有关低碳环保型滴灌技术体系还未形成,存在以下难点问题急需研究和解决:

(1)基于水-碳-氮足迹评价的低碳、高效灌溉

决策技术模式

研究面向主要作物的轮作制度及适宜的水分生产力控制水平,构建基于土壤水分、降雨等数据驱动的作物生产力评估模型,建立基于水-碳-氮足迹评估理论与方法的低碳、高效灌溉决策技术,确定低碳环保型滴灌系统产品的使用寿命等关键指标,并基于此开发适宜的低碳环保型滴灌系统关键设备和灌水器新产品,研发基于动态数据驱动的低碳、高效灌溉决策信息化管理平台。

(2)规模化滴灌系统低碳运行调控关键技术及应用模式

研究适宜不同水源类型区滴灌系统灌水器堵塞行为,探索其随灌水器类型、系统工作压力变化的动态响应关系,综合考虑水力偏差、灌水器制造偏差、灌水器堵塞分布等因素,提出不同规模滴灌系统适宜的灌水均匀度、工作压力控制目标,开发基于太阳能、风能等清洁能源驱动水泵提水技术与装置,探索规模化滴灌系统管网水力学解析及优化设计方法,综合建立滴灌系统低碳运行调控技术集成范式。

(3)低碳环保型滴灌系统功能提升技术模式

研究针对不同作物、不同滴灌水源类型、不同气候类型区的滴灌系统水肥气热一体化技术模式及配套关键设备和灌水器新产品研发技术;进一步探索可降解地膜等清洁环保型地膜的生产工艺及功能提升效应,避免滴灌系统搭建、维护、拆装过程中工艺、机械水平不足造成的土壤污染问题;并进一步实现劣质水滴灌的合理化、有效化利用,避免过度及不当使用对土壤及环境带来的负面影响。

(4)不同滴灌类型区低碳环保型滴灌综合技术体系构建与集成示范

以实现滴灌系统节本、低耗、高效、安全为目标,将系统优化、低耗运行、清洁驱动、协调控堵、功能提升等关键技术进行有机集成与整合,建立适宜不同气候类型、不同滴灌水源类型区的低碳环保型滴灌综合技术体系与集成应用模式,并在此基础上进行示范与推广。

参 考 文 献

1 GOPALAKRISHNAN M. Sprinkler and micro-irrigated areas in some member countries of ICID[J]. Irrigation and Drainage, 2008, 57(5): 603-604.

2 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)

3 严昌荣,梅旭荣,何文清,等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269-272.

YAN Changrong, MEI Xurong, HE Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measure[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269-272. (in Chinese)

4 LI X D. A study on environmental pollution of agriculture and countermeasures under the double failure[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5: 204 – 208.

5 BHATNAGAR P R, SRIVASTAVA R C. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas[J]. *Irrigation Science*, 2003, 21(4): 151 – 157.

6 KUMAR A, KWATRA J, SHARMA H C, et al. Feasibility study of gravity-fed drip irrigation system on hilly terrace land in mid-Himalayan regions[J]. *Indian Journal of Soil Conservation*, 2012, 40(3): 202 – 206.

7 魏正英,温聚英,唐一平,等.微压滴灌灌水器设计及快速开发平台技术[J].*农业机械学报*,2008,39(10):59 – 64.
WEI Zhengying, WEN Juying, TANG Yiping, et al. Structural design and rapid development platform of emitters under lower water pressure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 39(10): 59 – 64. (in Chinese)

8 POSTEL S, PROJECT G W P, KELLER J, et al. Drip irrigation for small farmers; a new initiative to alleviate hunger and poverty [J]. *International Water Resources Association*, 2001, 26: 3 – 13.

9 SINGH A K, RAHMAN A, SHARMA S P, et al. Small holders’ irrigation-problems and options [J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(2): 289 – 302.

10 KANG Y H. Effect of operating pressures on microirrigation uniformity[J]. *Irrigation Science*, 2000, 20(1): 23 – 27.

11 BRALTS V F, Wu J P, GITLIN H M. Manufacturing variation and drip uniformity [J]. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24(1): 113 – 119.

12 BRALTS V F, WU J P, GITLIN H M. Drip irrigation uniformity considering emitter plugging[J]. *Transactions of the ASAE*, 1981, 24(5): 1234 – 1240.

13 BRALTS V F, EDWARDS D M. Field evaluation of drip/trickle irrigation submain units [J]. *Transactions of the ASAE*, 1986, 29(6): 1659 – 1664.

14 张国祥,吴普特.滴灌系统滴头设计水头的取值依据[J].*农业工程学报*,2005,21(9):20 – 22.
ZHANG Guoxiang, WU Pute. Determination of the design working head of emitter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(9): 20 – 22. (in Chinese)

15 魏正英,苑伟静,周兴,等.我国压力补偿灌水器的研究进展[J].*农业机械学报*,2014,45(1):94 – 107.
WEI Zhengying, YUAN Weijing, ZHOU Xing, et al. Research progress of pressure compensating emitters in micro-irrigation systems in China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 94 – 107. (in Chinese)

16 吴普特,冯浩.中国节水农业发展战略初探[J].*农业工程学报*,2005,21(6):152 – 157.
WU Pute, FENG Hao. Discussion of the development strategy of water saving agriculture in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(6): 152 – 157. (in Chinese)

17 牛文全,吴普特,范兴科.微灌系统综合流量偏差率的计算方法[J].*农业工程学报*,2004,20(6):85 – 88.
NIU Wenquan, WU Pute, FAN Xingke. Method for calculating integrated flux deviation rate of microirrigation system [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(6): 85 – 88. (in Chinese)

18 ORON M G, CAMPOS C, GILLERMAN L, et al. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities[J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 38(3): 223 – 234.

19 ORON M G, GOEMANS M, MANOR Y, et al. Poliovirus distribution in the soil-plant system under reuse of secondary wastewater[J]. *Water Research*, 1995, 29(4): 1069 – 1078.

20 栗岩峰,李久生,赵伟霞,等.再生水高效安全灌溉关键理论与技术研究进展[J].*农业机械学报*,2015,46(6):102 – 110.
LI Yanfeng, LI Jiusheng, ZHAO Weixia, et al. Review on irrigation technology applying sewage effluent—advances and prospects [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 102 – 110. (in Chinese)

21 PHENE C J, DAVIS K R, HUTMACHER R B, et al. Advantages of subsurface irrigation for processing tomatoes [J]. *Acta Horticulturae*, 1987, 200: 101 – 113.

22 HUTMACHER R B, MEAD R M, SHOUSE P. Subsurface drip: improving alfalfa irrigation in the west[J]. *Irrigation Journal*, 1996, 45:48 – 52.

23 万书勤,康跃虎,王丹,等.微咸水滴灌对黄瓜产量及灌溉水利用效率的影响[J].*农业工程学报*,2007,23(3):30 – 35.
WAN Shuqin, KANG Yuehu, Wang Dan, et al. Effects of saline water on cucumber yields and irrigation water use efficiency under drip irrigation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(3): 30 – 35. (in Chinese)

24 万书勤,康跃虎,王丹,等.华北半湿润地区微咸水滴灌番茄耗水量和土壤盐分变化[J].*农业工程学报*,2008,24(10): 29 – 33.
WAN Shuqin, KANG Yuehu, WANG Dan, et al. Effects of drip irrigation with saline water on tomato water use and soil salinity in semi-humid regions of North China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(10): 29 – 33. (in Chinese)

25 万书勤,康跃虎,王丹,等.华北半湿润地区微咸水滴灌对番茄生长和产量的影响[J].*农业工程学报*,2008,24(8):30 – 35.
WAN Shuqin, KANG Yuehu, WANG Dan, et al. Effect of saline water on tomato growth and yield by drip irrigation in semi-humid regions of north China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(8): 30 – 35. (in Chinese)

26 雷廷武,肖娟,王建平,等.地下咸水滴灌对内蒙古河套地区蜜瓜用水效率和产量品质影响的试验研究[J].*农业工程学报*,2003,19(2):80 – 84.
LEI Tingwu, XIAO Juan, WANG Jianping, et al. Experimental investigation into effects of drip irrigation with saline groundwater

- on water use efficiency and quality of honeydew melons in Hetao Region, Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 80–84. (in Chinese)
- 27 王振华,杨培岭,郑旭荣,等.膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J].农业工程学报,2014,30(4): 90–99.
WANG Zhenhua, YANG Peiling, ZHENG Xurong, et al. Soil salinity changes of root zone and arable in cotton field with drip irrigation under mulch for different years[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 90–99. (in Chinese)
- 28 张伟,吕新,李鲁华,等.新疆棉田膜下滴灌盐分运移规律[J].农业工程学报,2008,24(8):15–19.
ZHANG Wei, LÜ Xin, LI Luhua, et al. Salt transfer law for cotton field with drip irrigation under the plastic mulch in Xinjiang Region[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 15–19. (in Chinese)
- 29 申丽霞,王璞,张丽丽.可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J].农业工程学报,2012,28(4): 111–116.
SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili. Degradation property of degradable film and its effect on soil temperature and moisture and maize growth[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(4): 111–116. (in Chinese)
- 30 申丽霞,王璞,张丽丽.可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J].农业工程学报,2011,27(6):25–30.
SHEN Lixia, WANG Pu, ZHANG Lili. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 25–30. (in Chinese)
- 31 严昌荣,何文清,刘爽,等.中国地膜覆盖及残留污染防治[M].北京:科学出版社,2015.
- 32 GODARA S R, VERMA I M, GAUR J K, et al. Effect of different levels of drip irrigation along with various fertigation levels on growth, yield and water use efficiency in fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) [J]. The Asian Journal of Horticulture, 2013, 8(2): 758–762.
- 33 SEZEN S M, YAZAR A, EKER S. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper[J]. Agricultural Water Management, 2006, 81(1–2): 115–131.
- 34 邢英英,张富仓,张燕,等.膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J].农业工程学报,2014,30(21):70–80.
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 70–80. (in Chinese)
- 35 SCHEER C, WASSMANN R, KIENZLER K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized, irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: influence of nitrogen applications and irrigation practices [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(2): 290–301.
- 36 KALLENBACH C M, ROLSTON D E, HORWATH W R. Cover cropping affects soil N_2O and CO_2 emissions differently depending on type of irrigation[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2010, 137(3–4): 251–260.
- 37 LI Z, ZHANG R, WANG X, et al. Carbon dioxide fluxes and concentrations in a cotton field in northwestern China: effects of plastic mulching and drip irrigation[J]. Pedosphere, 2011, 21(2): 178–185.
- 38 PANDE P C, SINGH A K, ANSARI S, et al. Design development and testing of a solar PV pump based drip system for orchards [J]. Renewable Energy, 2003, 28(3): 385–396.
- 39 BOUZIDI B, HADDADI M, BEIMOKHTAR O. Assessment of a photovoltaic pumping system in the areas of the Algerian Sahara [J]. Renewable and Sustainable, 2009, 13(4): 879–886.
- 40 BOLANOS J A C, ORTIZ W, BHANDARI R. Techno-economic feasibility study of solar and wind based irrigation systems in Northern Colombia[M]. Basel:Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2015.
- 41 SHIVRATH Y, NARAYANA P B, THIRUMALASETTY S, et al. Design & integration of wind-solar hybrid energy system for drip irrigation pumping application[J]. International Journal of Modern Engineering Research, 2012, 2(4): 2947–2950.
- 42 胡建栋,邹占武,徐双信. FSH-400 型风力提水机的设计试验研究[J]. 太阳能学报,2013,34(5):895–901.
HU Jiandong, ZOU Zhanwu, XU Shuangxin. Design test and research of FSH-400 type wind power water pumping machine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(5): 895–901. (in Chinese)
- 43 NAKAYAMA F S, BUCKS D A. Water quality for drip/trickle irrigation: a review[J]. Irrigation Science, 1991, 12(4): 187–192.
- 44 CAPP A, SCICOLONE B. Assessing dripper clogging and filtering performance using municipal wastewater[J]. Irrigation and Drainage, 2005, 54(Supp. 1): 71–79.
- 45 甘一萍,白宇.污水处理厂深度处理与再生利用技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- 46 MOHAMED A, EHAB M, MOHAMED I. Effect of air injection under subsurface drip irrigation on yield and water use efficiency of corn in a sandy clay loam soil[J]. Journal of Advanced Research, 2013, 4(6): 493–499.
- 47 刘智安,赵婧,赵巨东,等.高压静电水处理器腔内电场分布分析与阻垢效果研究[J].中国电机工程学报,2014,34(35): 6296–6303.
LIU Zhian, ZHAO Jing, ZHAO Judong, et al. Electric field distribution analysis and scale inhibition effect research on intracavity of high-voltage electrostatic water processor[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 34(35): 6296–6303. (in Chinese)
- 48 卜东升,奉文贵,蔡利华,等.磁化水膜下滴灌对新疆棉田土壤脱盐效果的影响[J].农业工程学报,2010,26(14):163–166.
BU Dongsheng, FENG Wengui, CAI Lihua, et al. Effects of magnetization water on desalinization in cotton farmland of under-film

- dripping irrigation in Xinjiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(14): 163 – 166. (in Chinese)
- 49 方红卫,陈明洪,陈志和. 环境泥沙的表面特性与模型[M]. 北京:科学出版社,2009.
- 50 段喜明,冯浩,吴普特. 晋西黄土区旱井泥沙池结构形式试验设计[J]. 农业工程学报,2006,22(1):182 – 185.
DUAN Ximing, FENG Hao, WU Pute. Structural designs and experiments of depositional ponds in the loess region of western Shanxi Province[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(1): 182 – 185. (in Chinese)
- 51 蒋定生,高鹏,徐学选,等. 水窖泥沙池结构形式试验设计[J]. 农业工程学报,2001,17(5):27 – 31.
JIANG Dingsheng, GAO Peng, XU Xuexuan, et al. Trial study on designing of sand-settling tank for runoff harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 27 – 31. (in Chinese)
- 52 ELBANA M, de CARTAGENA F R, PUIG-BARGUÉS J. Effectiveness of sand media filters for removing turbidity and recovering dissolved oxygen from a reclaimed effluent used for micro-irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2012, 111: 27 – 33.
- 53 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J]. 农业机械学报,2013,44(2):22 – 29.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 22 – 29. (in Chinese)
- 54 ARBAT G, PUJOL T, PUIG-BARGUÉS J, et al. Using computational fluid dynamics to predict head losses in the auxiliary elements of a microirrigation sand filter[J]. Transactions of the ASABE, 2011, 54(4): 1367 – 1376.
- 55 ARBAT G, PUJOL T, PUIG-BARGUÉS J, et al. An experimental and analytical study to analyze hydraulic behavior of nozzle-type underdrains in porous media filters[J]. Agricultural Water Management, 2013, 126: 64 – 74.
- 56 魏正英,赵万华,唐一平,等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. 农业工程学报,2005,21(6):1 – 7.
WEI Zhengying, ZHAO Wanhua, TANG Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 1 – 7. (in Chinese)
- 57 ADRIAN R J. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991,23: 261 – 304.
- 58 ADRIAN R J. Multi-point optical measurement of simultaneous vectors in unsteady flow—a review[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1986, 7(2): 127 – 145.
- 59 葛令行,魏正英,唐一平,等. 迷宫流道内沙粒壁面碰撞模拟与 PTV 实验[J]. 农业机械学报,2009,40(9):46 – 50.
GE Lingxing, WEI Zhengying, TANG Yiping, et al. Simulation and experimental analysis on sand-wall collisions in labyrinth channel emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 46 – 50. (in Chinese)
- 60 李云开,杨培岭,任树梅,等. 圆柱型迷宫式流道滴灌灌水器平面模型试验研究[J]. 农业机械学报,2006,37(4):48 – 51.
LI Yunkai, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Plane model of labyrinth path drip irrigation column emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 48 – 51. (in Chinese)
- 61 李永欣,李光永,邱象玉,等. 迷宫滴头水力特性的计算流体动力学模拟[J]. 农业工程学报,2005,21(3):12 – 16.
LI Yongxin, LI Guangyong, QIU Xiangyu, et al. Modeling of hydraulic characteristics through labyrinth emitter in drip irrigation using computational fluid dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 12 – 16. (in Chinese)
- 62 魏正英,唐一平,温聚英,等. 灌水器微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵实验研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6): 1 – 9.
WEI Zhengying, TANG Yiping, WEN Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 1 – 9. (in Chinese)
- 63 王建东,李光永,邱象玉,等. 流道结构形式对滴头水力性能影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(13):100 – 103.
WANG Jiandong, LI Guangyong, QIU Xiangyu, et al. Effects of flow passage forms on hydraulic performance of emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(13): 100 – 103. (in Chinese)
- 64 牛文全,喻黎明,吴普特,等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报,2009,40(9):51 – 55.
NIU Wenquan, YU Liming, WU Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 51 – 55. (in Chinese)
- 65 李治勤,马静. 迷宫灌水器水流流态试验[J]. 农业工程学报,2012,28(1):82 – 86.
LI Zhiqin, MA Jing. Experiment on flow pattern in labyrinth emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 82 – 86. (in Chinese)
- 66 李云开,刘世荣,杨培岭,等. 滴头锯齿型迷宫流道消能特性的流体动力学分析[J]. 农业机械学报,2007,38(12):49 – 52.
LI Yunkai, LIU Shirong, YANG Peiling, et al. Hydrokinetics analysis on the pressure losses in sawtooth-labyrinth path drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 49 – 52. (in Chinese)
- 67 LI Y K, YANG P L, LIU H L, et al. Pressure loss mechanism analysed with pipe turbulence theory and friction coefficient prediction in labyrinth path of drip irrigation emitter[J]. Irrigation and Drainage, 2010, 60(2): 179 – 186.
- 68 WU D, LI Y K, LIU H S, et al. Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3 – 4): 497 – 506.
- 69 LIU H S, LI Y K, LIU Y Z, et al. Flow characteristics in energy dissipation units of labyrinth path in the drip irrigation emitters with DPIV technology[J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(1): 137 – 145.
- 70 李云开. 灌水器分形流道设计及其流动特性的测试研究与数值仿真[D]. 北京:中国农业大学,2005.

- LI Yunkai. Design of fractal flow path for emitters and experiment study and modeling on its fluid mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 71 TAJRISHYI M A, HILL D J, TCHOBANOGLOUS G. Pretreatment of secondary effluent for drip irrigation[J]. Irrigation Drainage, 1994, 120(4): 716–731.
- 72 李久生,陈磊,栗岩峰. 加氯处理对再生水滴灌系统灌水器堵塞及性能的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 7–13.
LI Jiusheng, CHEN Lei, LI Yanfeng. Effect of chlorination on emitter clogging and system performance for drip irrigation with sewage effluent[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(5): 7–13. (in Chinese)
- 73 LI J S, LI Y, ZHANG H. Tomato yield and quality and emitter clogging as affected by chlorination schemes of drip irrigation systems applying sewage effluent[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012, 11(10): 101–108.
- 74 ÜSTÜN A, MESUDE F D, FIKRETTIN A. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(4): 338–341.
- 75 SECKIN E, USTUN S, TALIP T, et al. Bacterial application increased the flow rate of CaCO_3 -clogged emitters of drip irrigation system[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 98(15): 37–42.
- 76 王金武,纪文义,冯金龙,等. 液态施肥机的设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 157–159.
WANG Jinwu, JI Wenyi, FENG Jinlong, et al. Design and experimental investigation of the liquid fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 157–159. (in Chinese)
- 77 徐卫红. 水肥一体化实用新技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- 78 KANG Shaozhong, SHI Wenjuan, ZHANG Jianhua. An improved water use efficiency for maize grown under regulated deficit irrigation[J]. Field Crops Research, 2000, 67(3): 207–214.
- 79 CHEN Y, SAMSON R. Integration of liquid manure into conservation tillage corn systems[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(3): 629–638.
- 80 黄燕,汪春,衣淑娟. 液体肥料施用装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(4): 85–88.
HUANG Yan, WANG Chun, YI Shujuan. Manufacture and the test analysis on the device of liquid fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 85–88. (in Chinese)
- 81 SURYA P B, LANCE P, MIDMORE D J. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils [J]. Scientia Horticulturae, 2006, 108(3): 278–288.
- 82 于贝贝. 番茄肥水气一体化施用技术研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
YU Beibei. Application technology research on integration of water, fertilizer and gas of tomato[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- 83 张凤娟,胡艳飞,张瑞喜,等. 加工番茄生长、NPK 营养及产量对磁化水滴灌的响应[J]. 农业工程, 2014, 4(3): 140–144.
ZHANG Fengjuan, HU Yanfei, ZHANG Ruixi, et al. Response of processing tomato growth, NPK nutrition and yield to magnetized water in drip irrigation system[J]. Agricultural Engineering, 2014, 4(3): 140–144. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 119 页)

- 27 邢英英,张富仓,张燕,等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 70–80.  
XING Yingying, ZHANG Fucang, ZHANG Yan, et al. Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(21): 70–80. (in Chinese)
- 28 周罕觅,张富仓,李志军,等. 桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 171–180.  
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Response of water demand signal, yield and fruit quality of peach tree to soil moisture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 171–180. (in Chinese)
- 29 刘志刚,王纪章,徐云峰,等. 不同灌溉方式下生菜根系生长模型研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 284–288.  
LIU Zhigang, WANG Jizhang, XU Yunfeng, et al. Root growth model of lettuce under different cultivation substrates and irrigation modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 284–288. (in Chinese)
- 30 FAVATI F, LOVELLI S, GALGANO F, et al. Processing tomato quality as affected by irrigation scheduling[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122(4): 562–571.
- 31 潘艳花,马忠明,吕晓东,等. 不同供钾水平对西瓜幼苗生长和根系形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(5): 536–541.  
PAN Yanhua, MA Zhongming, LÜ Xiaodong, et al. Effects of different potassium nutrition on growth and root morphological traits of watermelon seedling[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture, 2012, 20(5): 536–541. (in Chinese)
- 32 PATANÈ C, TRINGALI S, SORTINO O. Effects of deficit irrigation on biomass, yield, water productivity and fruit quality of processing tomato under semi-arid Mediterranean climate conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 129(4): 590–596.