

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.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2017.02.036

水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展

李传哲^{1, 2}, 许仙菊¹, 马洪波¹, 安霞¹, 盛金元³, 张永春¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业部江苏耕地保育科学观测实验站, 江苏 南京 210014; 2. 南京农业大学资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 3. 常熟市耕地质量保护站, 江苏 常熟 215500)

摘要: 水肥一体化技术是一项高效节水灌溉施肥技术, 是目前相关领域被关注的主要热点之一。本文对国内外水肥一体化技术的发展现状、水肥一体化技术的水肥利用效率等进行了综合分析, 提出了目前中国水肥一体化技术应用中存在的问题, 展望了水肥一体化技术在中国的发展趋势。

关键词: 水肥一体化; 节水灌溉; 水肥利用效率

中图分类号: S147.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)02-0469-07

Research advances in fertigation technology improving water and fertilizer use efficiency

LI Chuan-zhe^{1, 2}, XU Xian-ju¹, MA Hong-bo¹, AN Xia¹, SHENG Jin-yuan³, ZHANG Yong-chun¹

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation of Jiangsu Province, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Changshu Protection Station of Cultivated Land Quality, Changshu 215500, China)

Abstract: Fertigation technology, as an efficient water-saving irrigation measure, is one of the main focus at attention. Based on literature review, the development of domestic and foreign fertigation technology and water and fertilizer use efficiency were comprehensively analysed. The problems existing in fertigation technology at present were put forward, and the future development of the technology were outlooked.

Key words: fertigation; water saving irrigation; water and fertilizer use efficiency

随着中国经济的飞速发展, 城镇化脚步的加快, 人水矛盾日益突出, 水资源同粮食、石油一起成为国家的战略资源^[1]。中国农业发展方式粗放, 过度消耗资源, 尤其在农业生产中, 水、肥资源消耗巨大, 浪费严重^[2]。因此, 建设中国特色现代化农业, 实现

农业的可持续发展, 必须转变发展方式, 走资源高效利用的道路, 而水肥一体化是现代农业发展的必然选择。

水肥一体化技术在中国又称为微灌施肥技术, 是利用微灌系统, 根据土壤的水分和养分状况及作物对水和肥料的需求规律, 将肥料和灌溉水一起适时适量、准确地输送到作物的根部土壤, 供作物吸收^[3]。水肥一体化技术是在节水、提高肥料利用率、减少农药用量、提高作物产量与品质、节省灌溉和施肥时间、改善土壤环境等方面具有显著优势的农业重大技术^[4-9]。

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 江苏省农业三新工程项目 (SXGC[2014]293)

作者简介: 李传哲 (1990-), 男, 山东郓城人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源利用。(Tel) 15895995293, (E-mail) 1171458217@qq.com

通讯作者: 张永春, (E-mail) yczhang66@sina.com

1 水肥一体化技术发展现状

在许多国家,都在探索提高各个环节水的转化效率和生产效率的节水机制,以建立适合国情的水肥一体化技术^[10]。从世界范围看,水肥一体化技术广泛应用于干旱缺水以及经济发达的国家,但欧洲很多地区并不缺水,仍采用此项技术,考虑的是该项技术的其他优点,特别是对环境的保护效应。目前该技术已逐步向发展中国家推广。

1.1 国外水肥一体化技术的发展现状

1.1.1 以色列 从“沙漠之国”变成“农业强国”,以色列创造了世界一流的农业,其主要措施之一是灌溉技术、水溶肥技术及节水灌溉设备相结合并广泛应用于温室蔬菜、花卉、育苗、果园、大田作物等各领域,使水的利用率提高了 40%~60%,肥料利用率提高了 30%~50%,其瓜果、蔬菜产品已占 40% 的欧洲市场,并成为欧洲第 2 大花卉供应国。以色列农业用水占全国总用水量的 62%,所有灌溉农田都采用了喷灌和滴管等高科技灌溉技术和自动控制技术,使灌溉水的利用效率大大提高^[11]。

1.1.2 美国 现今美国农场面积的 50% 进行喷灌,43% 地面灌溉,7% 采用其他灌溉方法,其中地面灌溉设备逐渐走向精细化。美国的节水灌溉技术已达到了世界先进水平,是微灌面积最大的国家,25% 的玉米、60% 的马铃薯、33% 的果树均采用水肥一体化技术。2010 年美国微灌面积已发展到 1.53×10^6 hm^2 ,是世界上发展微灌最快的国家之一^[12]。

1.1.3 其他国家 目前一些国家如英国、瑞典、德国、丹麦、法国、奥地利、匈牙利等国家喷灌和微灌灌溉面积已达到总灌溉面积的 80% 以上。澳大利亚 2007 年设立 1.00×10^{10} 澳元的国家节水计划,其中约一半用于发展灌溉设施和水肥一体化。近 10 多年间,亚洲印度微灌面积也得到了快速增长,较 10 年前增加了 4 倍左右。日本已经实现了成熟的自动化管道灌溉系统。膜上灌溉技术、膜下灌溉技术在国外也得到了快速发展。采用膜上灌溉能减少深层渗漏,节水显著,同时还能增加土壤温度。膜下灌溉具有增温保墒、减少蒸发等优点^[13]。

1.2 中国水肥一体化技术的发展现状

中国作为一个缺水农业大国,近年来节水灌溉工程面积逐年增加,其中喷灌、微灌面积和低压管灌面积也逐年扩大(表 1)。目前中国水肥一体化技术

已由小范围试验示范发展为大面积推广应用,覆盖东北、华北、西北、南方的大部分地区,广泛应用在设施栽培、蔬菜、花卉、果树等多种作物。中国正在逐步分区域、规模化推进大田水肥一体化技术的推广与应用,但目前总体与世界一些国家相比还存在很大差距。

表 1 近年来中国农业灌溉情况

Table 1 Agricultural irrigation in recent years in China

年份	全国耕地 灌溉面积 ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	节水灌溉 工程面积 ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	喷、微灌面积 ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)	低压管灌面积 ($\times 10^3 \text{ hm}^2$)
2007	57 782	23 489	3 853	5 574
2008	58 472	24 436	4 071	5 873
2009	59 261	25 755	4 596	6 249
2010	60 348	27 317	5 141	6 680
2011	61 682	29 179	5 796	7 130
2012	62 491	31 217	6 600	7 526
2013	63 473	27 109	6 847	7 424
2014	64 540	29 019	7 843	8 271

数据来源:全国水利发展统计公报。

2 水肥一体化技术提高水利用效率研究进展

灌溉水利用率是指某个时期灌给作物利用的水量与水源灌溉取水量的比值。它反映了全灌区渠系输水和田间用水状况,是衡量从水源到大田灌溉水利用程度的一个重要指标,能够综合反映灌区灌溉工程情况、用水管理水平和灌溉技术水平。

2.1 国外水肥一体化技术提高水利用效率研究进展

以色列的灌溉土地都使用了压力补偿式灌溉技术,水的利用率大大提高,农田灌溉水量仅为 $390 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,较常规灌水量下降 50%~70%^[14]。与传统灌溉水利用效率只有 50% 左右相比,以色列的喷灌技术的水利用效率可达 75%,地表滴灌的水利用效率可达 88%,地下滴灌的水利用效率高达 95% 以上^[10]。滴灌技术的推广,不仅带动了节水农业的发展,而且也使水肥一体化技术逐渐兴起。现今以色列的滴灌管道无处不在,在建房、修路以前各处的灌溉用水管道已铺设齐备^[15]。

Phene 等^[16]指出滴灌能提高根系活性和吸收能力,减少根际水分和土壤盐分的深层渗透,提高水肥利用率。巴基斯坦的 Muhammad 等^[17]通过近 2 年的田间试验发现,与传统灌溉相比,小麦和水稻滴灌用水量低至畦灌的 26%,作物平均水分生产率达 3.95 kg/m^3 。Ayars 等^[18]的研究结果表明,与其他灌溉方式相比,滴灌可以提高作物产量,降低水分消耗,最大限度地提高水分利用率。Sharma 等^[19]对番石榴的研究结果以及 Mohammad^[20]对南瓜的研究结果都表明利用水肥一体化技术能够有效地提高作物的水肥利用效率,并且节水效果明显。Caves 等^[21]研究发现葡萄园灌溉过程中采用调亏滴灌灌溉和局部根系干旱灌溉,可以减少水分用量的 50%,不影响产量并能对产品质量产生一定的积极影响。Singandhupe 等^[22]的研究结果表明,与传统施肥方式相比,滴灌设施番茄栽培可以节水 31%~37%,明显提高水分利用率,节水效果显著。

2.2 中国水肥一体化技术提高水利用效率研究进展

中国水肥一体化技术的灌溉方式主要有滴灌水肥一体化、微喷灌水肥一体化、膜下滴管水肥一体化。滴灌水肥一体化:不会破坏土壤结构,渗透损失小,水的利用率达 90%以上^[23];微喷灌水肥一体化:喷灌在中国早已成熟,由于喷灌水蒸发漂移损失可达 42%^[24]且落到植物冠层的水分大部分也被浪费,微喷技术应运而生,在香蕉生产的应用中这种技术的灌水量为传统浇灌量的 31.6%,产量却增加 5.6%^[25];膜下滴管水肥一体化技术:最为成熟的当属新疆棉花膜下滴管,可减小水分蒸发,提高灌溉水的利用效率,与沟灌相比节水 53.96%^[26]。

邹晓霞^[27]总结了 14 篇与微灌有关的文献,结果显示微灌的节水幅度为 35%~70%,平均节水率为 52.7%,节水效果显著。杜军等^[28]研究结果表明,在滴灌条件下,大田水利用效率达 90%,相对于喷灌 50%~60%的水分利用率,其节水效果更明显。孙夫建^[29]研究结果表明利用膜下滴灌技术,水资源利用效率可达到 95%以上,比传统的地面沟灌、畦灌、漫灌等方式节水 50%~70%,比喷灌方式节水约 35%~60%,具有显著的节水效果。

陈静等^[30]对滴灌施肥试验的拟合结果表明,试验区冬小麦最佳 N 、 P_2O_5 和 K_2O 施用量分别为 206.63 kg/hm^2 、 86.72 kg/hm^2 和 88.07 kg/hm^2 ,在

黄淮海平原地区免耕冬小麦采用测墒补灌和滴灌施肥相结合的方法可以显著提高水分利用效率,较常规对照提高了 57.46%,并且小麦籽粒产量提高了 21.13%,主要是因为滴灌后水分扩散到作物根区内,减少了灌溉水深层渗漏,促进了作物对随水施入肥料的吸收,合理的滴灌施肥用水量较常规可节水 51.85%。姬景红等^[31]对玉米覆膜滴灌的研究结果表明:玉米覆膜滴灌和覆膜限量补灌与滴灌相比,分别提高水分利用效率 0.83 kg/m^3 和 1.23 kg/m^3 ,分别提高水分生产率 0.30 kg/m^3 和 0.36 kg/m^3 ,并且覆膜限量补灌在不影响光合产物积累的基础上,比覆膜滴灌又节水 60%。张丽萍等^[32]在日光温室蔬菜生产中运用滴灌技术后,节水 50%,省工 50%,降低湿度 10%~16%,明显减轻病害发生,增产增收达 15%~28%。杨小振等^[33]通过对西北地区设施早春栽培西瓜的研究发现,灌溉施肥的施肥量和灌水量分别控制在 $\text{N } 163.05 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 66.85 \text{ kg/hm}^2$ 、 $\text{K}_2\text{O } 202.18 \text{ kg/hm}^2$ 和水 $900 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 左右时,灌溉利用效率提高 35.73%,西瓜产量较高 (35888 kg/hm^2),水分利用效率较高 (39.88 kg/m^3),而且品质大大改善。

方栋平等^[34]通过比较滴灌条件下温室黄瓜不同水肥处理发现,温室黄瓜整个生育期所施肥料全程滴灌与一次性当基肥施入相比,黄瓜的产量和干物质分别增加 15.3% 和 16.8%,同时品质大为改善,水分利用效率增加 19.1%,而且全程滴灌减少用水 25%,为黄瓜优质、高产、节水的最佳处理。樊兆博等^[35]的研究结果表明,与传统漫灌施肥相比,设施番茄水分投入量降低了 46%,灌溉水利用效率提高 2 倍。曹琦等^[36]在黄瓜上的研究结果表明,交替隔沟灌溉减少了土壤水分的深层渗漏和土壤表面水分蒸发,可节水 37%~48%,控漏减蒸效果明显。赵志成等^[37]采用分根交替滴灌,在设施黄瓜产量没有显著下降的前提下,改善了品质和显著提高了水分利用效率,比常规滴灌方式用水量降低 1.5%,灌水量减少 17%,水分利用效率提高 18.6%,节水效果显著,可以作为设施节水增效的一种水肥一体化新模式。农业部全国农业技术服务中心节水处处长高祥照^[3]指出:应用水肥一体化,实现水、肥资源同步高效利用,水分生产效率可以提高 2 kg/m^3 ,大幅度提高农业综合生产力。

3 水肥一体化技术提高肥料利用效率研究进展

肥料利用率概念:国际上常用农学效率(AE)、偏生产力(PFP)、生理效率(PE)、肥料利用率(RE)来表征肥料的利用效率。在中国习惯用肥料利用率来描述作物对肥料的利用效率,计算公式(以氮肥为例):氮肥利用率=(施氮区作物吸氮量-不施氮区作物吸氮量)/施氮量。

3.1 国外水肥一体化技术提高肥料利用率研究进展

以色列第3大滴灌公司瑞沃达斯公司(Rivulis Irrigation)介绍:滴喷灌系统让水肥一体化成为可能,这种方式可以为作物根部提供最合理的水分和养分。在以色列,温室、田野、果园里都可以看到溶解水溶肥的储肥罐,在需要灌溉的时候根据施肥计划精确地将肥液注入灌溉水,几个储肥罐通过管道和计算机联系在一起,就能定期根据事先设定好的量注入定制的配方肥料。在以色列,90%以上的农业采用了水肥一体化技术,与传统的水肥施用方法相比,肥料利用率提高30%~50%,肥料利用效率远远高于中国^[38]。以色列农业生产中水肥的有效利用率能够保持在80%~90%,肥料能够节约30%~50%,而且当地为了预防土壤次生盐渍化问题的出现,对传统灌溉所使用的沟渠占地问题进行了处理,从而提升单位面积农作物产量,土壤条件已经不再是困扰作物生长的因素,仅仅成为作物生长过程中所需要依托的一种媒介^[39]。美国佛罗里达州的研究者发现,肥料撒施每生产1 t柑橘需N 2.75 kg,而滴灌施肥需N 2.57 kg,节约肥料7%^[40]。

Coston 等^[41]通过比较氮肥不同施用方法对盆栽桃树的试验效果发现,滴灌施肥量仅为土壤施肥量的1/4~1/2时,桃树叶片含氮量和径粗的增加量即可达到土壤施肥的效果,说明滴灌施肥可节约氮肥25%~50%。印度的Parikh 等^[42]通过对香蕉的研究发现,滴灌施肥与肥料撒施相比可节约氮肥60%,氮肥利用率提高了1倍。Hebbar 等^[43]研究发现相比于单纯的滴灌和沟灌,水溶性肥料灌溉施肥能够提高马铃薯的产量、肥料使用率、作物根系生长量和对氮、磷、钾的吸收量,减少土壤 NO_3^- -N的淋洗。Gardenas 等^[44]研究发现,在灌水快结束的时候加入肥料并且高频率地灌溉施肥,能够促进作物对

氮的吸收,减少氮的浸出。Zotarelli 等^[45]对番茄的研究发现,滴灌能够显著提高氮肥利用率,而且对磷积累量没有显著影响。

3.2 中国水肥一体化技术提高肥料利用率研究进展

2013年10月农业部《中国三大粮食作物肥料利用率研究报告》表明:目前中国水稻、玉米、小麦三大粮食作物氮肥、磷肥和钾肥当季平均利用率分别为33%、24%、42%。其中,小麦氮肥、磷肥、钾肥利用率分别为32%、19%、44%,水稻氮肥、磷肥、钾肥利用率分别为35%、25%、41%,玉米氮肥、磷肥、钾肥利用率分别为32%、25%、43%。已进入国际公认适宜范围内,但仍处于较低水平,还有很大的提升空间。2015年农业部指出力争到2020年主要农作物化肥用量零增长,肥料利用率达40%以上。水肥一体化技术作为既能提高肥料利用率又能节水节肥的技术得到各级政府的重视,越来越多的专家学者投入到水肥一体化的研究中。

尹飞虎等^[46]对新疆滴灌模式下春小麦的研究结果表明:滴灌施肥较常规施肥氮、钾利用率分别提高了4.7%和3.2%,但磷利用率差异不大。陈静等^[30]试验结果表明,在黄淮海平原地区免耕冬小麦采用测墒补灌和滴灌施肥相结合的方法,滴灌后水分移至作物根区内,减少了灌溉水深层渗漏的风险,促进了作物对随水施入肥料的吸收,合理滴灌施肥较常规施肥总体可节约氮肥23.47%、磷肥28.33%和钾肥47.89%。何进宇等^[47]对旱作水稻膜下滴灌的研究结果表明,膜下滴管直播种植方式与传统育秧种植相比肥料用量显著减少,而肥料利用率显著提高,节约氮肥37.5%、磷肥33.3%。张国娇等^[48]通过对玉米的研究发现,液体磷肥全部追施可以最大程度地提高磷肥的利用率(高达40.6%),比中国现阶段平均25.0%的利用率高出15.6个百分点,效果显著。

Hou 等^[49]研究结果表明,氮肥随水施用可显著提高棉花单株铃数、单铃质量和籽棉产量,促进棉花对氮、磷素的吸收,尤其在壤土棉田的效果较明显,磷肥随水滴施可提高氮、磷肥料利用率,与基施相比氮肥和磷肥利用率可分别提高4.85%~12.34%和36.75%~45.88%。尹飞虎等^[50]的研究结果表明:在膜下滴施条件下,滴灌专用肥的氮、磷、钾养分在土壤中的移动性比常规肥料强,养分在土层中的分

布与棉花根系分布特点基本一致,促进了棉花根系对养分的吸收,提高了养分利用率;棉花滴灌专用肥氮、磷、钾的生理利用效率较常规肥分别提高了3.62%、4.18%和1.45%,农学利用率较常规肥分别提高29.37%、29.2%和29.38%,在相同养分条件下,籽棉产量比常规施肥提高6.9%。

张大鹏等^[51]研究表明,采用合适的滴灌施肥可使苹果氮肥利用率从23.6%提高到38.69%,从而达到节约肥料,减小肥料投入支出的目的。严程明等^[52]通过对菠萝的研究发现,与常规施肥相比,使用滴灌施肥技术,产量可达81405 kg/hm²,增产39.04%,N、P₂O₅分别节省42.84%、52.67%,增产节肥效果非常明显。

樊兆博^[53]研究表明,与传统灌溉相比,水肥一体化显著提高番茄产量,全年增产6%,氮肥用量减少78%,并且氮素表观损失和硝态氮的淋洗量都大大降低。邢英等^[54]对番茄膜下滴灌水肥耦合的研究结果显示:滴灌施肥增大了植株的氮、磷、钾吸收效率(UPE)以及肥料偏生产力(PFP);灌水量越大,养分利用效率(NUE)越小,UPE和PFP越大;施肥量越大,NUE、UPE及PFP越小;50%常规用水量和N-P₂O₅-K₂O为120 kg/hm²-60 kg/hm²-75 kg/hm²处理的氮、磷和钾利用效率最大,常规用水量和N-P₂O₅-K₂O为120 kg/hm²-60 kg/hm²-75 kg/hm²处理的氮、磷和钾吸收效率及肥料偏生产力最大。

Zhang等^[55]指出在滴灌施肥条件下,增加灌水量可以提高果实产量和氮肥利用效率,而增大施氮量则降低黄瓜品质及氮素利用效率。方剑等^[56]对冬暖大棚黄瓜的研究结果表明:黄瓜采用滴灌施肥与灌溉冲肥相比可节约肥料130.95~1733.55 kg/hm²,节肥率可达3.7%~49.5%,氮、磷、钾肥利用率分别提高了11.1%~32.9%、3.0%~3.7%和8.8%~26.8%,不仅提高了品质和产量,还具有显著的节肥效果。周丽群等^[57]对京郊设施果类蔬菜生产的水肥需求特征进行研究,比较了优化灌溉模式下大量元素水溶肥在设施果类蔬菜生产中的应用效果,结果表明与传统施肥相比,施用果类蔬菜专用水溶肥增加果类蔬菜产量18.1%,氮肥偏生产力平均提高149.6%,并且果实品质也得到了改善。

不管是粮食作物,还是棉花、水果、蔬菜等作物,利用水肥一体化技术都能够显著提高肥料的利用

率,水肥一体化实现了集中施肥与平衡施肥相结合,减少了肥料的挥发和流失。肥料和水的结合,扩大了作物吸收水分和养分空间,适宜的水分可促进铵态氮硝化,增加作物对氮素的吸收,同时又能促进其他养分的释放。根据作物在不同生长期对肥料的需求特点,合理施肥,避免了营养过剩造成的肥料损失。通过对前人大量研究数据的分析,建立水肥与产量的经验模型,构建不同作物最佳的施肥量,从而制定不同作物生产管理措施,对推广水肥一体化技术具有重大意义。

4 水肥一体化技术应用展望

2012年农业部发布了《农业部关于推进节水农业发展的意见》,提出要大力发展水肥一体化技术;2013年农业部办公厅印发的《水肥一体化技术指导意见》中提出:到2015年,水肥一体化技术推广总面积要达到5.333×10⁶ hm²以上,新增推广面积3.333×10⁶ hm²以上,实现节水50%以上,节肥30%,粮食作物增产20%,每666.7 m²土地的经济作物节本增收600元以上;2015年3月农业部制定了《到2020年化肥使用量零增长行动方案》,其中提出到2020年水肥一体化技术推广面积1×10⁷ hm²,增加5.333×10⁶ hm²,水肥一体化技术是实施“化肥零增长”的重要保障措施之一。

目前,中国水肥一体化技术的推广应用发展非常迅速,但也存在不少问题:一是设施设备质量、价格差异大,安装人员技术素养不高,安装粗放,技术服务跟不上,设备使用过程中出现问题不能及时解决;二是水溶肥质量标准不严,生产企业发展太快,良莠不齐;三是针对不同作物、不同目标产量的施肥参数不甚明确,供肥、供水很难真正做到与作物需肥、需水规律同步,水肥一体化技术的节水、节肥、增效作用没有得到充分的发挥;四是水肥一体化技术的培训、宣传还不够,相应的投入也有待进一步加强。

水肥一体化技术具有节水,肥料利用率高,可减少灌水量和施肥量,能明显提高作物产量和改善品质等优点,符合中国对节能减排、生态文明建设的发展要求,有利于农业的可持续发展。在政策和资金扶持、技术和设备进一步完善、培训和宣传进一步加强的基础上,水肥一体化技术未来必将被越来越多的农民及其合作组织所接受并得到跨越式发展。

参考文献:

- [1] 左其亭,张云.人水和谐:量化研究方法及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [2] 夏敬源.抢抓机遇 乘势而上 大力示范推广水肥一体化技术[J].中国农技推广,2012(3):4-7.
- [3] 高祥照.水肥一体化是提高水肥利用效率的核心[J].中国农业信息,2013(14):3-4.
- [4] 高鹏,简红忠,魏样,等.水肥一体化技术的应用现状与发展前景[J].现代农业科技,2012(8):250-250.
- [5] 王道波,黄维,刘永贤,等.水肥一体化对红麻生长、纤维产量与品质的影响[J].南方农业学报,2015,46(2):204-209.
- [6] 吕艳东,孙立明,周健,等.膜下滴灌旱对寒地水稻产量构成因素及产量的影响[J].江苏农业科学,2016,44(4):145-148.
- [7] 张兰勤,唐新莲,黎晓峰,等.水肥一体化减量施肥对樱桃番茄产质量的影响[J].南方农业学报,2015,46(7):1270-1274.
- [8] 宋计平,王克安,孙凯宁,等.膜下滴灌对春拱棚茄子经济效益及土壤质量的影响[J].山东农业科学,2016,48(3):86-90.
- [9] 杨军,廉晓娟,王艳,等.滴灌条件下不同灌溉量对芹菜耗水量和水分利用效率的影响[J].江苏农业学报,2016,32(3):656-661.
- [10] 李含琳.当前国外节水农业技术的新进展及启示[J].天水行政学院学报,2011,12(4):3-8.
- [11] 孙锡铭,刘妍,袁湘月,等.节水灌溉设备研究现状[J].农业机械与木工设备,2014,42(3):11-14.
- [12] 袁寿涛,李红,王新坤.中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J].排灌机械工程,2015,33(1):78-92.
- [13] 李兴,任杰,王勇.国内外农业节水研究进展[J].内蒙古水利,2013(1):113-114.
- [14] 李咏梅,任军,刘慧涛,等.以色列“水肥一体化”技术简介与启示[J].吉林农业科学,2014,39(3):91-93.
- [15] 李晓俐.以色列灌溉技术对中国节水农业的启示[J].宁夏农林科技,2014,55(3):56-57.
- [16] PHENE C J, DETAR W R, CLARK D A. Real-time irrigation scheduling of cotton with an automated pan evaporation system[J]. Applied Engineering in Agriculture, 1992(6):787-793.
- [17] MUHAMMAD F, AFREEN S. Modeling annual maximum peak flows at various dams and barrages in Pakistan[J]. Journal of Hydrology & Hydromechanics, 2007, 55(1):43-53.
- [18] AYARS J E, CHRISTEN E W, SOPPE R W, et al. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: a review[J]. Irrigation Science, 2005, 24(3):147-160.
- [19] SHARMA S, PATRA S K, RAY R. Effect of drip fertigation on growth and yield of *Guava* cv. Khaja[J]. Environment and Ecology, 2011, 29(1):34-38.
- [20] MOHAMMAD M J. Utilization of applied fertilizer nitrogen and irrigation water by drip-fertigated squash as determined by nuclear and traditional techniques[J]. Nutrient Cycling in Agro Ecosystems, 2004, 68(1):1-11.
- [21] CAVES M M, ZARROUK O, FRANCISCO R, et al. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data[J]. Annals of Botany, 2010, 105(5):661-676.
- [22] SINGANDHUPE R B, RAO G G S N, PATIL N G, et al. Fertigation studies and irrigation scheduling in drip irrigation system in tomato crop (*Lycopersicon esculentum* L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2003, 19(2):327-340.
- [23] 李伏生,陆申年.灌溉施肥的研究和应用[J].植物营养与肥料学报,2000,6(2):233-242.
- [24] TARJUELO J M, ONEGA J F, MONTERO J, et al. Modelling evaporation and drift losses in irrigation with medium size impact sprinklers under semi-arid conditions [J]. Agricultural Water Management, 2000, 43(3):263-284.
- [25] 臧小平,邓兰生,郑良永.不同灌溉施肥方式对香蕉生长和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2009,15(2):484-487.
- [26] 刘兰育,柴付军,李明思.棉花膜下滴灌技术研究与应用[J].新疆农垦科技,2002(2):26-28.
- [27] 邹晓霞.节水灌溉与保护性耕作应对气候变化效果分析[D].北京:中国农业科学院,2013.
- [28] 杜军,沈振荣,张达林.宁夏引黄灌区滴灌水肥一体化冬小麦灌溉施肥技术研究[J].节水灌溉,2011(11):44-49.
- [29] 孙夫建.灌区滴灌节水技术措施研究[J].工程技术,2012(12):121-121.
- [30] 陈静,王迎春,李虎,等.滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1966-1975.
- [31] 姬景红,李玉影,刘双全.覆膜滴灌对玉米光合特性、物质积累及水分利用效率的影响[J].玉米科学,2015,23(1):128-133.
- [32] 张丽萍,柳建丽,孙胜伟,等.滴灌暗管蔬菜栽培技术的推广与应用[J].农业技术与装备,2012(13):54-55.
- [33] 杨小振,张显,马建祥,等.滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):109-118.
- [34] 方栋平,张富仓,李静,等.灌水量和滴灌施肥方式对温室黄瓜产量和品质的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1735-1742.
- [35] 樊兆博,林杉,陈清.滴灌施肥对设施番茄水氮利用效率及土壤硝态氮残留的影响[J].中国农业大学学报,2015,20(1):135-143.
- [36] 曹琦,王树忠,高丽红,等.交替隔沟灌溉对温室黄瓜生长及水分利用效率的影响[J].农业工程学报,2010,26(1):47-53.
- [37] 赵志成,杨显贺,李清明,等.不同膜下滴灌方式对设施黄瓜生理特性及水分利用效率的影响[J].生态学报,2014,(34)22:6598-6605.
- [38] 徐淑红.打造中以合作新典范 加快推进我国现代农业——金正全面考察以色列现代农业[J].中国农资,2015,9(7):9.
- [39] 宋喜赋.以色列节水农业对中国发展生态农业的启示[J].世界农业,2014(5):56-58.
- [40] 罗文杨,习金根.滴灌施肥研究进展及应用前景[J].中国热带农业,2006(2):35-37.

- [41] COSTON D C, PONDER H G, KENWORTHY A L. Fertilizing peach trees through a trickle irrigation system [J]. *Comm Soil Sci Plant Anal*, 1978, 9(3): 187-191.
- [42] PARIKH M M, SAVANI N G, SHRIVASTAVA P H, et al. Nitrogen economy in bannan through fertigation [C]//Hagin J. *Dahlia greidinger international symposium on fertigation*. Haifa Israel: Technion-IIT, 1995: 365-370.
- [43] HEBBAR S S, RAMACHANDRAPPA B K, NANJAPPA H V, et al. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. *European Journal of Agronomy*, 2004, 21(1): 117-127.
- [44] GARDENAS A I, HOPMANS J W, HANSON B R, et al. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(3): 219-242.
- [45] ZOTARELLI L, DUKES M D, SCHOLBERG J M S, et al. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(8): 1247-1258.
- [46] 尹飞虎, 曾胜和, 刘 瑜, 等. 滴灌春麦水肥一体化肥效试验研究 [J]. *新疆农业科学*, 2011, 48(12): 2299-2303.
- [47] 何进宇, 田军仓. 旱作水稻水肥耦合模型及经济效应 [J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(8): 716-723.
- [48] 张国桥, 王 静, 刘 涛, 等. 水肥一体化施磷对滴灌玉米产量、磷素营养及磷肥利用效率的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1103-1109.
- [49] HOU Z, LI P F, LI B G, et al. Effects of fertigation scheme on N uptake and N use efficiency in cotton [J]. *Plant and Soil*, 2007, 290(1/2): 115-126.
- [50] 尹飞虎, 刘洪亮, 谢宗铭, 等. 棉花滴灌专用肥氮磷钾元素在土壤中的运移及其利用率 [J]. *地理研究*, 2010, 29(2): 235-243.
- [51] 张大鹏, 姜远茂, 彭福田, 等. 滴灌施氮对苹果氮素吸收和利用的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 1010-1018.
- [52] 严程明, 张江周, 石伟琦, 等. 滴灌施肥对菠萝产量、品质及经济效益的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 496-503.
- [53] 樊兆博. 滴灌和漫灌施肥栽培体系下设施番茄产量和水氮利用效率的评价 [D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [54] 邢 英, 张富仓, 张燕膜, 等. 膜下灌水肥藕合促进番茄养分吸收及生长 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 70-80.
- [55] ZHANG H X, CHI D C, WANG Q, et al. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(6): 921-930.
- [56] 方 剑, 王春青, 徐建东, 等. 水肥一体化技术对冬暖大棚黄瓜生产的影响 [J]. *河北农业科学*, 2010, 14(5): 43-45.
- [57] 周丽群, 李宇虹, 高杰云, 等. 果类蔬菜专用水溶肥的应用效果分析 [J]. *北方园艺*, 2014(1): 161-164.

(责任编辑: 张震林)