

# 微润灌溉技术研究进展及展望

邹小阳<sup>1</sup>, 全天惠<sup>2</sup>, 周梦娜<sup>2</sup>, 杨庆理<sup>2</sup>, 石懿<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2. 深圳市微润灌溉技术有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** [目的] 对近年来国内外关于微润灌溉技术的研究成果进行综述, 探讨微润灌溉的未来研究方向, 为微润灌溉制度和灌溉参数的制定及该节水技术的推广提供依据。[方法] 总结微润灌溉的发展历程和应用现状, 微润灌溉条件下土壤水分运动规律, 微润灌溉对作物生长的影响, 并分析微润灌溉技术的不足之处。[结果] 微润灌溉是一种新型地下灌溉技术, 以连续灌溉方式不间断地向作物根系供应适量水分, 使植物吸水过程与田间灌溉过程具有同步性, 灌水量与植物耗水量相匹配, 实现无胁迫灌溉, 改善作物品质和产量。该技术已成为国际领先的仿生型连续灌溉系统, 在干旱半干旱地区具有广阔的应用前景。[结论] 今后应加强的研究领域主要包括: 微润灌溉对土壤养分运移的影响; 微润灌溉对不同种植模式作物生长的影响; 微润灌溉对农田生态系统温室气体排放的影响。

**关键词:** 微润灌溉; 应用现状; 水分运移; 作物生长

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)04-0150-06

中图分类号: TU991.64, S275

**文献参数:** 邹小阳, 全天惠, 周梦娜, 等. 微润灌溉技术研究进展及展望[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 150-155. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.025; Zou Xiaoyang, Quan Tianhui, Zhou Mengna, et al. Progress and prospects of moistube irrigation technology research[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 150-155. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.025

## Progress and Prospects of Moistube Irrigation Technology Research

ZOU Xiaoyang<sup>1</sup>, QUAN Tianhui<sup>2</sup>, ZHOU Mengna<sup>2</sup>, YANG Qingli<sup>2</sup>, SHI Yi<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Shenzhen Moisture Irrigation Science and Technology, Shenzhen, Guangzhou 518000, China)

**Abstract:** [Objective] The research progress of moistube irrigation technology was reviewed to investigate the future research direction and provide available bases for the formulation of water-saving irrigation system and parameters. In addition, this review would play a key role in popularizing moistube irrigation technology. [Methods] The paper summarized the development history and application status of moistube irrigation technology, soil water movement under moistube irrigation, effects of moistube irrigation on crops growth, etc. and the drawbacks of moistube irrigation technology were analyzed. [Results] Moistube irrigation is an underground irrigation technology, having the advantages of uninterrupted adequate water supply for plant absorption and field irrigation were synchronicity. Moistube irrigation water was matched with plant water consumption. Meanwhile, moistube irrigation can come into being no-stress irrigation. In addition, moistube irrigation plays an important role in improving crop quality and yield. The moistube irrigation technology has become a leading international bionic type continuous irrigation system, and will have broad prospect of popularization in arid and semi-arid region. [Conclusion] This paper reviewed the development history and application status of moistube irrigation, the research progress of moistube irrigation technology mechanism, migration rules of soil water and the effects of moistube irrigation on crop growth, and put forward the key research fields needed to be further study, including the effects of moistube irrigation on soil nutrient migration; the effects of moistube irrigation on crop growth with different planting patterns; the effects of moistube irrigation on greenhouse gas emissions of farmland ecosystem.

**Keywords:** moistube irrigation; application status; soil water movement; crop growth

收稿日期: 2016-10-24

修回日期: 2016-11-27

资助项目: 深圳市第五批科技攻关项目“用于实现精准地下连续灌溉的新型半透膜材料关键技术研发”(重 2014-137)

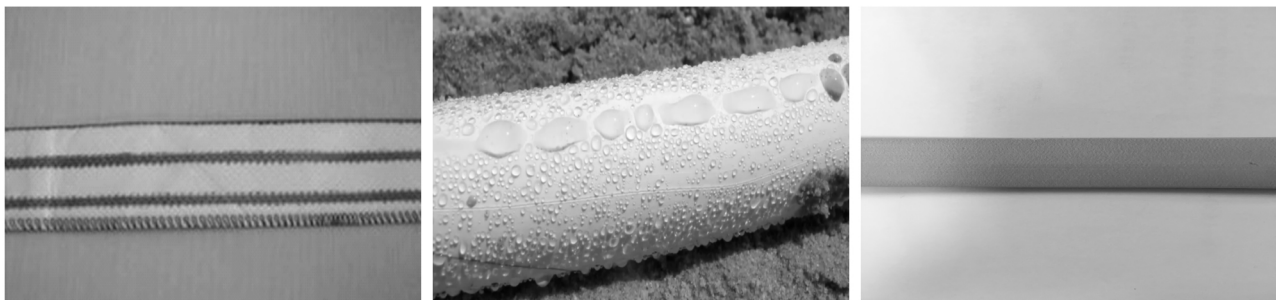
第一作者: 邹小阳(1993—), 男(汉族), 江西省新余市人, 硕士研究生, 研究方向为灌溉理论与节水技术。E-mail: 1543102669@qq.com。

通讯作者: 全天惠(1989—), 女(汉族), 海南省海口市人, 硕士, 助理工程师, 主要从事微润灌溉节水技术研究。E-mail: 594429081@qq.com。

微润灌溉是一种新型地下灌溉技术,微润管壁分布着数量巨大的微孔,微孔孔径达到纳米级(10~900 nm),水分透过半透膜管微孔缓慢渗出,输送至植物根区土壤;其主要驱动力为膜内外水势差,微润管出水量根据土壤含水率变化可精准调节,有效减少田间蒸发和提高灌溉水利用率,在干旱半干旱地区具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。微润灌溉模拟植物 24 h 不间断吸水过程,以连续灌溉方式不停地向作物根系供应适量水分,使植物吸水过程与田间灌溉过程实现时间上的同步性,灌水量与植物耗水量相匹配,实现无胁迫灌溉,改善作物品质和产量,该技术已成为国际领先的仿生型连续灌溉系统<sup>[4-5]</sup>。此外,微润灌溉技术运行的驱动能量为水位能和土壤势能,不需动力设备,运行成本较低。由于微润灌溉技术具有较高的节水效益、改善农田生态系统环境、运行成本较低和抗堵塞性能强等优势,总结现有关于微润灌溉技术的研究成果,探讨微润灌溉的未来研究方向,对于制定微润灌溉制度和灌溉参数及推广该节水技术具有重要意义。

## 1 微润灌溉的发展历程和应用现状

微润管是由深圳市微润灌溉技术有限公司于 2007 年研制出的一种新型节水灌溉产品,研制初期也称为“水缆灌溉”或“半透膜灌溉”<sup>[6]</sup>。微润管第一代产品为薄纳米孔膜,外有无纺布套层保护,具有双层结构的第一代产品在园林绿化,农业灌溉等领域具有高效的节水效果。随着微润管应用范围及应用面积的不断扩大,要求微润管安装更加简单方便,可操作性更强,特别是在沙漠治理、生态恢复方面需要更可靠更稳定的微润管产品,因此研究出了第二代微润管,其为单层的厚薄膜纳米管,厚度约为 1 mm。第二代微润管较第一代产品的优势有:出水量稳定、抗高温高寒、机械强度高、安装和维护简单方便等,在西部地区严峻的沙漠环境以及山丘地区中应用具有突出优势。第三代微润管是在第二代的基础上进行了改造,其出水稳定性、抗堵性进一步加强。第一代微润管至最新的第三代微润管如图 1 所示。



第一代微润管

第二代微润管

第三代微润管

图 1 不同类型微润管

微润灌溉技术已广泛应用于中国湖北、新疆、贵州、云南、内蒙古等地区,在促进蔬菜、果树和玉米等作物增产方面发挥了不可替代的作用。张立坤等<sup>[7]</sup>研究了微润灌和滴灌两种灌溉方式对娃娃菜生长的影响,发现地下微润灌溉适宜作为温室作物的灌溉方式。史丽艳等<sup>[8]</sup>以盆栽玉米为研究对象,分析了微润灌对玉米生长、叶绿素含量、光合速率和蒸发速率等生理指标的影响。汤英等<sup>[9]</sup>研究了桃树微润灌溉条件下土壤水分入渗和水分变化特征,期望将微润灌溉技术引入果树种植。何玉琴等<sup>[10]</sup>以膜下滴灌为对照,研究微润管不同埋设深度、间距和压力对玉米生长和产量的影响。魏镇华等<sup>[11]</sup>研究了交替灌溉与微润灌溉对番茄耗水和产量的调控效应,以探明微润灌溉技术在西北干旱区的适用性。韩庆忠等<sup>[12-13]</sup>研究了微润灌水肥一体化在湖北省三峡库区脐橙园的适用性。姚付启等<sup>[14]</sup>对比了微润灌溉、常规灌溉和雨

养灌溉对脐橙生长过程中生理生态参数的影响。柳祥林<sup>[15-16]</sup>介绍了微润灌溉水肥一体化技术在湖北省秭归县的推广情况,发现该技术改善了当地的农业灌溉模式、提高了灌溉水利用效率和灌溉质量。张子卓等<sup>[17-18]</sup>研究了微润管埋深和压力对番茄生长的影响,探明了微润灌溉对番茄株高、气孔导度和光合速率的影响规律。薛万来等<sup>[19]</sup>对比了微润灌溉和滴灌两种技术对温室番茄生长的影响,从而证明微润灌溉技术更适用于设施农业。余莹莹等<sup>[20]</sup>分析了微润灌溉技术在江苏省徐州市的应用效益,发现该系统具有维护成本低、投资回收期短和经济效益高等优点。巴音克西克<sup>[21]</sup>分析了微润灌溉技术在新疆地区的推广前景,发现微润灌溉技术可为葡萄、红枣提供连续、充分的水分,微润灌溉系统生产成本和运行费用较低,在新疆地区具有广阔的推广前景。

深圳市微润灌溉技术有限公司自成立初就致力

于我国微润灌溉新技术的推广。2012 年水利部牧区水科所在内蒙古地区种植牧草百余公顷,微润灌溉处理的牧草产量较滴灌增加 81%。2013 年青海省水科所使用微润灌溉技术在盐碱荒滩种植枸杞,实现了枸杞高产和减轻盐碱化的双重目标;微润灌溉显著减轻植物的盐碱胁迫,促进枸杞早熟和生长发育,且节水节能效益高于滴灌。2013 年湖北省秭归县水利局推广“雨洪集蓄+微润灌溉”的农业灌溉模式,广泛应用于柑橘、茶叶和核桃等作物的种植,应用面积高达 1 000 hm<sup>2</sup>。2014 年湖北省丹江口水利局将微润灌溉技术运用于茶叶种植,应用面积 100 hm<sup>2</sup>,提高了当地高效农业节水灌溉技术水平,提高了丹江口市农业水资源的利用率。2015 年云南省新平木道农业科技有限公司将微润灌溉技术大多应用于沃柑苗的种植上,使用面积为 40 hm<sup>2</sup>,使用效果与同期采用滴灌处理的幼苗进行对比,发现采用微润灌溉后沃柑苗抽梢较滴灌早,新梢生长快,长势好且更加节水节人工,地面杂草少等。2015 年广西省水利厅建设火龙果微润灌溉示范区,微润灌溉面积达 20 hm<sup>2</sup>;微润灌溉明显促进了火龙果的长势,较滴灌节水 50% 以上,节省人力物力。2016 年建设了贵州省山区现代水利微润灌溉区,微润灌溉面积达 66.7 hm<sup>2</sup>,明显促进了葡萄、桃和杏的生长,实现良好的经济效益。2016 年,内蒙古乌拉特国家级自然保护区引进微润灌溉技术,将其应用于自然保护区梭梭林的种植,有效改善了乌拉特梭梭林蒙古野驴国家级自然保护区生态环境,提高保护区防沙治沙、改善土壤及水资源利用率。目前,微润灌溉技术的推广应用集中于我国的西北和西南地区,正逐步向中部及东北部扩展,微润灌溉技术不仅具有高效节水功能,还具有改善土壤环境、提高肥效和降低运行成本等优势。因此,在我国湿润半湿润地区应加强微润灌溉技术的推广应用。

## 2 微润灌溉条件下土壤水分运动规律研究进展

微润管是利用功能性半透膜材料制成的灌水器,可实现作物根系周围区域的实时微压灌溉。微润灌溉引入了半透膜仿生技术,实现微润管的供水过程在时间上与植物的吸水过程同步,是一种持续向土壤供水的灌溉方式<sup>[22]</sup>。微润管内部充水后埋入植物根部附近土壤,因膜外侧相对干燥的根区土壤水势较低,膜内水势相对较高,在土壤水势梯度差的驱动下,微润管中的水分透过半透膜向外部运移,实现土壤湿润的目标。当植物根区土壤水分被根系吸收后,根区土壤含水量降低,膜内外的水势差增大,微润管向土壤

渗透水分的速率逐渐加快,增加土壤含水量<sup>[8-9]</sup>。现有研究主要通过室内土箱和土柱试验等方法分析微润灌溉条件下土壤水分运移规律。张俊等<sup>[4]</sup>研究发现,微润灌溉条件下,湿润锋推进速率和地表湿润时间均随着土壤初始含水量增加而增大,并与灌水时间呈幂函数关系;湿润锋体形状呈圆形,湿润体内土壤水分呈同心圆分布,灌溉均匀系数随土壤初始含水量的增加而增大。薛万来等<sup>[23-24]</sup>通过室内土箱模拟试验,发现湿润锋运移距离随土壤容重增加而减小,随土壤初始含水量和压力水头的增大而增大,但与微润管埋深相关性不显著;土壤水分分布范围随着压力水头的增加而扩大,且土壤含水量也呈增加趋势。祁世磊等<sup>[25]</sup>通过室内低压微润管出流和入渗试验,发现微润管在空气和土壤中的出流量与压力存在显著线性相关,湿润锋运移距离与通水时间呈良好的幂函数关系。谢香文等<sup>[26]</sup>通过室内土槽试验发现,微润灌溉形成的湿润体接近于圆形,湿润锋运移距离、运移速度与入渗时间存在良好的幂函数关系。史丽艳等<sup>[8]</sup>研究发现,微润灌溉稳定后土壤水分主要分布于 10—30 cm 土层。张珂萌等<sup>[27]</sup>研究发现,微润灌溉条件下,土壤含水量和水势均呈对称分布,微润灌溉的湿润面积高于地下滴灌。牛文全等<sup>[28]</sup>研究发现,矿化度对土壤湿润体形状无显著影响,矿化水湿润体体积大于清水处理,且微润灌的累积入渗量随矿化度增加而增大;压力水头是影响微润管流量的决定因素,湿润锋水平运移距离与宽深比均随埋深的增加而减小,垂直运移距离随埋深的增加而略微增大。邱照宁等<sup>[29]</sup>研究发现微润管出流量与水温具有较好的线性关系,水温对微润管出流量的影响程度随压力水头增大而增强。张俊等<sup>[5]</sup>基于室内土箱试验,发现微润灌溉湿润体是以微润管为轴心的柱状体,黏壤土近似为圆柱体,砂土湿润体的横剖面为“倒梨”形,微润灌溉均匀度高达 95.62%。李朝阳等<sup>[30]</sup>研究发现,微润灌溉呈立体供水状态,灌水均匀度高,且表土层易形成干燥层,0—30 cm 土层土壤含水量变异系数较小。张国祥等<sup>[31]</sup>发现,微润灌溉条件下,土壤水分累积入渗量与土壤黏粒含量呈负相关关系,水分运移速率随土壤黏粒含量增高而减缓。

## 3 微润灌溉对作物生长影响的研究进展

现有研究主要关注微润灌溉对玉米、番茄、柑橘等作物产量和品质的影响。微润灌溉的水分利用率高于其他微灌方式,微润灌溉有利于玉米籽粒发育和百粒质量的增加,微润管的工作压力对玉米产量和水分利用率的影响最大<sup>[10]</sup>。微润灌溉条件下番茄根系

集中分布于 0—30 cm,根系缠绕着微润管;并增强根系吸收土壤水分的能力,降低番茄耗水量,提高水分利用效率;微润管压力水头 180 cm、埋深 15 cm 处理的番茄株高分别较埋深 10 和 20 cm 处理增加 9.17% 和 7.55%,增产率分别为 3.24% 和 7.45%<sup>[11]</sup>。深圳市微润灌溉技术有限公司于 2013 年在三峡库区开展脐橙微润灌水肥一体化试验,树冠直径和新梢长较降雨灌溉分别增加了 8.7% 和 55.6%,脐橙果径和单果重分别增大了 66.7% 和 190%,脐橙色泽和口感均明显好于雨养处理;且脐橙叶片最大光合速率、叶片呼吸强度、表观初始量子效率、光合补偿点和叶片比表面积均优于雨养处理<sup>[12]</sup>。薛万来等<sup>[19]</sup>通过微润灌溉和滴灌培育温室番茄的对比试验,发现微润灌溉处理的土壤含水量基本维持在 20%,微润处理的番茄株高、茎粗较滴灌处理分别高于 6.36% 和 3.11%,产量较滴灌处理提高 0.49%。董瑾<sup>[33]</sup>对比了微润灌溉和常规滴灌对温室草莓生长的影响差异,微润灌溉条件下草莓的品质和产量均优于常规灌溉,微润灌溉处理草莓的 VC 含量较高;且微润灌溉处理的草莓平均生长速率、叶片总含水量、根长和根系数量均高于其他灌溉方式。

传统的间歇式灌溉方式,如滴灌、喷灌和根系分区交替灌溉等,是通过灌水量来控制土壤含水量的,而且控制时间仅局限于灌水当时的很短一段时间。水分一旦进入土壤,该控制过程即结束。间歇式灌溉过程中,受土壤基质势和重力势的共同影响,水分从灌溉原点进入土壤时随着时间不断推移向周围区域扩散<sup>[34]</sup>。当土壤中的水分分布范围达到一个合理的范围才能实现供应作物需水和提高灌溉水分利用率的双重目标。间歇式灌溉条件下,土壤湿润体内的含水量随湿润锋距离的增加而降低,湿润体临界边缘的土壤含水率接近于土壤初始自然风干状态下的含水量<sup>[35]</sup>。灌水流量越大,土壤湿润体内的含水量也相应增加,灌溉原点附近的土壤含水率与灌水流量成正相关关系<sup>[36]</sup>。与其他间歇式灌溉方式相比,微润灌溉不会形成地表积水的问题。滴灌等间歇式灌溉方式的灌水流量不易控制,当滴头流量高于土壤入渗速率时,滴头附近易形成地表积水,从而降低灌溉水利用率<sup>[37]</sup>。间歇式灌溉停止供水后,土壤水分在土壤基质势和重力势梯度的作用下继续运移,从灌溉原点向四周迁移,补充土壤含水率较低的区域,形成土壤水分再分布过程<sup>[38]</sup>。土壤水分再分布达到平衡时是整个土体势能平衡的时刻,在湿润体整体剖面上任意不同位置的总势能处处相等。在间歇式灌溉条件下,一般将土壤湿度的上限定为田间持水量  $\theta_f$ ,下

限为萎蔫系数  $\theta_p$ ,每一个灌溉周期土壤含水量都经历一次由  $\theta_f$  至  $\theta_p$  的变化。这种不断变化的含水量将直接影响植物的生长状态及生长速度。大量的研究<sup>[32]</sup>表明,作物不同生育阶段的生长状态与土壤含水量密切相关。

作物生长速度与土壤水分关系为一极大值曲线,在土壤含水量达到植物理想生长点之前,作物的生长速率或产量随着土壤含水量的增加而增大。土壤含水量超过理想生长点时,相应的作物生长速率下降<sup>[32]</sup>,植物生长速率达到理想生长点对应的土壤含水量低于田间持水量,称为土壤最佳含水量  $\theta_a$ ,植物在特定生长期  $\theta_a$  为唯一的。将土壤含水量控制在  $\theta_a$  水平,就意味着使植物的生长速率达到最高水平。同时, $\theta_a$  水平保持的时间越长,植物的高速率生长时间就越长,干物质积累越多。因此,土壤含水率维持在水平的时间对农业生长而言是很有意义的。微润灌溉以地下灌溉方式将水分直接送达植物的根部,并根据作物不同生育期的需水差异控制土壤的含水量。微润管半透膜与植物根半透膜以土壤为媒介组成一个水分的动态平衡系统。在灌溉过程中,通过压力调节,准确控制微润管给水量,使土壤水分处于收支平衡状态。大量研究<sup>[39-40]</sup>表明,通过调节灌溉系统的工作压力,可以获得不同的土壤含水量水平。在  $n$  天的一个灌溉周期中,如果始终保持某压力,则  $n$  天内土壤含水量将一直保持在  $\theta_i$  水平。这说明在微润灌溉条件下,突破了灌水后的  $n-1$  d 土壤含水量不可控难题,实现了全灌溉周期的土壤含水量可控。通过控制可以将土壤水分控制在  $\theta_a$  水平,并可在  $n$  天内稳定地保持,使作物在  $n$  天内一直以理想的最高生长速率生长。

## 4 微润灌溉技术的不足

微润灌溉技术具有灌水均匀、节省劳力、水肥一体化、增温保墒、抑制病虫害和便于作物管理等诸多优点,但也存在一些不足。

### 4.1 耗水型植物和植物生长旺盛期的适用性

植物耗水性的差异主要受植物本身的生理结构、代谢能力和环境因子影响,外界环境因子包括光照强度、空气温度、空气湿度、土壤含水率和风速等<sup>[41]</sup>。灌溉条件直接影响土壤含水率,进而影响植物的生长发育。前人的研究仅关注了微润灌溉对番茄、枸杞和娃娃菜等作物生长发育的影响,而缺少对耗水量较大作物及作物生长旺盛期的影响研究。为适应不同需水量作物的种植,深圳市微润灌溉技术有限公司于 2015 年研制的第三代微润管增加了出水量,通过设

置不同水平的纳米孔密度,生产出不同出水量的微润管。

#### 4.2 微润灌溉系统铺设成本较高

微润灌溉是一种地下灌溉方式,微润管需埋设在地下 20~30 cm,铺设微润管所需的劳力较多,增加了微润灌溉系统的前期投入。为提高微润管布设的自动化和降低前期成本,深圳市微润灌溉技术有限公司与中国农业大学工学院依托车辆与交通工程试验中心共同研发微润管铺设装置,以适应不同环境条件的作业。

#### 4.3 抗堵塞问题

灌溉水中的泥沙颗粒会影响微润管的出水量,当泥沙颗粒较大时,微润管易发生堵塞。微润灌溉系统堵塞主要是有物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞 3 个方面组成。物理堵塞是因为灌溉水体中的无机物悬浮颗粒、微生物残体和生物代谢产物引起的<sup>[22]</sup>。化学和生物堵塞均是由灌溉水中的可溶性盐分、氢氧化物和硅酸盐等化学成分及藻类、细菌、微生物分解物等生物成分引起的堵塞<sup>[42-43]</sup>。通过合理的灌溉系统管理并使用微润管活化剂(深圳市微润灌溉技术有限公司产)可有效消除微润管堵塞问题。

## 5 结论与展望

微润灌溉是一项全新思维和理念的节水灌溉技术,首次将高分子半透膜材料引入节水灌溉领域。微润管是以聚乙烯为主要材料,纳米膜级惰性填料为成孔剂载体,表面活性剂为成孔剂,制成的半透膜材料。水分子透过微润管管壁上的纳米孔向外渗透,湿润植物的根区土壤。微润灌溉可实现持续低流量灌溉,灌溉水量与作物消耗量相匹配,在时间节律上与作物吸水的生理过程同步。并且微润灌溉以地下埋设方式直接供给植物水分,提高了灌溉水分利用效率,避免了地表蒸发损失、径流损失和渗漏损失;使水分和养分直接运移至植物根系,改善作物品质,增产增收。微润灌溉技术具有诸多优点,但现有研究主要关注微润灌溉对土壤水分运移和作物生长等方面的影响。为全面揭示微润灌溉对土壤性质和作物生长的交互影响,今后应重点关注以下方面:① 土壤中水分和养分运移是决定农业生产力的 2 个重要因子,也是评价灌溉技术优劣的重要指标。两个因子存在紧密的相互依赖性,适宜的水肥条件是实现作物高产稳产的基础。基于现有的微润灌溉对土壤水分运移的大量研究,今后需加强微润灌溉条件下土壤养分运移规律的研究,可为制定合理的微润灌溉制度提供理论依据,对提高水肥利用效率和减少施肥污染等具有重要意

义。② 大田试验和温室试验因降雨、气温、土壤微生物和病虫害等因素存在差异,导致微润灌溉对作物生长的影响程度不同。今后深入研究微润灌溉对大田作物生长的影响规律,将有利于探明不同种植模式下微润灌溉对作物生长影响的差异性,为微润灌溉技术的大面积推广应用提供理论基础。③ 日益增加的农业源温室气体排放是全球农田生态系统主要面临的环境问题,农田生态系统对灌溉方式等措施的变化具有敏感而强烈的响应。今后应加强微润灌溉对农田生态系统温室气体排放和碳足迹的影响研究,以探明微润灌溉技术在温室气体减排方面的优势。

#### [参 考 文 献]

- [1] 杨文君,田磊,杜太生,等.半透膜节水灌溉技术的研究进展[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):60-63.
- [2] 刘国强,王铎,王立国,等.膜技术处理含油废水的研究[J].膜科学与技术,2007,27(1):68-72.
- [3] Ahmadi S H, Plauborg F, Andersen M N, et al. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: root distribution[J]. Agricultural Water Management, 2011,98(8):1280-1290.
- [4] 张俊,牛文全,张琳琳,等.微润灌溉线源入渗湿润体特性试验研究[J].中国水土保持科学,2012,10(6):32-38.
- [5] 张俊,牛文全,张琳琳,等.初始含水率对微润灌溉线源入渗特征的影响[J].排灌机械工程学报,2014,32(1):72-79.
- [6] 杨庆理.半透膜灌溉原理与应用:水缆及水缆灌溉[C]//甘肃天水:第八届全国微灌大会论文集,2009:245-255.
- [7] 张立坤,窦超银,李光永,等.微润灌溉技术在大棚娃娃菜种植中的应用[J].中国农村水利水电,2013(4):53-55.
- [8] 史丽艳,牛文全,张俊.灌水方式对轻度盐化土壤玉米生长及土壤水分的影响[J].干旱地区农业研究,2013,31(2):152-156.
- [9] 汤英,杜历,杨维仁,等.果树微润灌溉条件下土壤水分变化特征试验研究[J].节水灌溉,2014,4:7.
- [10] 何玉琴,成自勇,张芮,等.不同微润灌溉处理对玉米生长和产量的影响[J].华南农业大学学报,2012,33(4):566-569.
- [11] 魏镇华,陈庚,徐淑君,等.交替控水条件下微润灌溉对番茄耗水和产量的影响[J].灌溉排水学报,2014,33(4):139-143.
- [12] 韩庆忠,向琳,王功名,等.三峡库区脐橙园微润灌溉的初步应用[J].现代园艺,2013(21):18-19.
- [13] 韩庆忠,向琳,姜学枝,等.微灌施肥一体化技术在柑桔园的应用试验[J].现代园艺,2015(9):8-10.
- [14] 姚付启,刘惠英,李亚龙,等.微润灌溉对脐橙生理生态参数的影响研究[J].南昌工程学院学报,2014,33(6):11-14.

- [15] 柳祥林. 探索山区田间蓄水模式推广微润灌溉水肥一体化技术[J]. 农业与技术, 2014, 34(8): 33-33.
- [16] 向长海, 柳祥林, 范拥军, 等. 柑桔园田间蓄水和微润灌溉技术[J]. 中国果业信息, 2014, 31(11): 76-77.
- [17] 张子卓, 牛文全, 许建, 等. 膜下微润带埋深对温室番茄土壤水盐运移的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1112-1121.
- [18] 张子卓, 张珂萌, 牛文全, 等. 微润带埋深对温室番茄生长和土壤水分动态的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(2): 122-129.
- [19] 薛万来, 牛文全, 张子卓, 等. 微润灌溉对日光温室番茄生长及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(6): 61-66.
- [20] 余莹莹, 朱艳, 范敬兰, 等. 微润灌溉技术在徐州地区应用前景分析[J]. 江苏建筑职业技术学院学报, 2014, 14(3): 24-26.
- [21] 巴音克西克. 微润灌溉技术在新疆的推广价值分析[J]. 中国农业信息月刊, 2014(5): 191-192.
- [22] 朱燕翔, 王新坤, 程岩, 等. 半透膜微润管水力性能试验的研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 23-25.
- [23] 薛万来, 牛文全, 罗春艳, 等. 微润灌溉土壤湿润体运移模型研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 49-54.
- [24] 薛万来, 牛文全, 张俊, 等. 压力水头对微润灌土壤水分运动特性影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(6): 7-11.
- [25] 祁世磊, 谢香文, 邱秀云, 等. 低压微润带出流与入渗试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(2): 90-92.
- [26] 谢香文, 祁世磊, 刘国宏, 等. 地理微润管入渗试验研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(12): 2201-2205.
- [27] 张珂萌, 牛文全, 薛万来, 等. 间歇和连续灌溉土壤水分运动的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 11-16.
- [28] 牛文全, 张俊, 张琳琳, 等. 埋深与压力对微润灌湿润体水分运移的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 128-133.
- [29] 邱照宁, 江培福, 肖娟. 水温对低压微润管出流影响的试验研究[J]. 节水灌溉, 2015(6): 31-34.
- [30] 李朝阳, 夏建华, 王兴鹏. 低压微润灌灌水均匀性及土壤水分分布特性[J]. 节水灌溉, 2014(9): 9-12.
- [31] 张国祥, 申丽霞, 郭云梅. 微润灌溉条件下土壤质地对水分入渗的影响[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(7): 35-39.
- [32] 仵峰, 彭贵芳, 宰松梅, 等. 灌溉的趋势: 微续灌[J]. 节水灌溉, 2008(6): 1-3.
- [33] 董瑾. 新型节水设备及其在温室草莓上的应用效果对比[J]. 农业工程, 2013(3): 27-30.
- [34] 张珂萌, 牛文全, 薛万来, 等. 间歇和连续灌溉土壤水分运动的模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 11-16.
- [35] 彭振阳, 伍靖伟, 黄介生. 采用间歇灌溉进行土壤盐分淋洗的适用性[J]. 水科学进展, 2016, 27(1): 31-39.
- [36] 吕殿青, 王全九, 王文焰, 等. 膜下滴灌水盐运移影响因素研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 794-801.
- [37] 贾运岗, 张富仓, 李培岭. 大田滴灌条件下土壤水分运移规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(6): 15-18.
- [38] 夏卫生, 雷廷武, 杨文治, 等. 蒸发条件下土壤水分再分布的动力学研究[J]. 水利学报, 2002, 7(7): 7-41.
- [39] 杨文君, 田磊, 杜太生, 等. 半透膜节水灌溉技术的研究进展[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 60-63.
- [40] Hoogland J C, Feddes R A, Belmans C. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate[C]// III International Symposium on Water Supply and Irrigation in the Open and Under Protected Cultivation 119, 1981: 123-136.
- [41] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [42] 周博, 李云开, 裴旖婷, 等. 再生水滴灌水器附生生物膜生长对堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 146-151.
- [43] Hills D J, Nawar F M, Waller P M. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity [J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4): 1202-1206.