

## 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展

要家威, 齐永青, 李怀辉, 沈彦俊

引用本文:

要家威, 齐永青, 李怀辉, 等. 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(6): 1076–1084.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200980>

(向下翻页, 阅读全文)

---

### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

#### 滴灌灌水均匀系数与灌水量对土壤水分分布及温室番茄产量的影响

Effects of drip irrigation uniformity and amount on soil moisture and tomato yield in solar greenhouse

*中国生态农业学报(中英文)*. 2020, 28(2): 286–295 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190543>

#### 干旱区膜下滴灌向日葵农田蒸散发特征

Evapotranspiration characteristics of mulched drip-irrigated sunflower farmland in arid region

*中国生态农业学报(中英文)*. 2019, 27(8): 1195–1204 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190151>

#### 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究

Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain

*中国生态农业学报*. 2018, 26(10): 1454–1464 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180636>

#### 微润灌对作物产量及水分利用效率的影响

Effect of moistube-irrigation on crop yield and water use efficiency

*中国生态农业学报*. 2017, 25(11): 1671–1683 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170243>

#### 环渤海低平原农田多水源高效利用机理和技术研究

Efficient utilization of various water sources in farmlands in the low plain nearby Bohai Sea

*中国生态农业学报*. 2016, 24(8): 995–1004 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160162>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200980

要家威, 齐永青, 李怀辉, 沈彦俊. 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1076-1084

YAO J W, QI Y Q, LI H H, SHEN Y J. Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: A review[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1076-1084

## 地下滴灌技术节水潜力及机理研究进展\*

要家威<sup>1,2</sup>, 齐永青<sup>1</sup>, 李怀辉<sup>3</sup>, 沈彦俊<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 甘肃农业大学水利水电工程学院 兰州 730070)

**摘要:** 地下滴灌是一种用水效率极高的节水灌溉技术, 具有少量多次、节水增产的特点, 能有效减少土壤蒸发和深层渗漏, 提高灌溉水利用效率, 同时其自动化程度高, 可降低劳动力和运行管理成本, 已成为国内外水资源匮乏地区的重要灌溉技术之一。本文通过回顾地下滴灌技术的发展研究历程, 概述了早期发展存在的问题以及现今研究的热点。系统对比了多种灌溉方式对作物产量、灌溉量与蒸散量的影响, 指出地下滴灌技术具有极高的节水增产减蒸潜力; 通过总结室内控制试验与已建立的数学模型, 阐明了地下滴灌点源条件下多因素影响的土壤水分及养分运动过程, 揭示了其节水增产的内在机理。进一步指出地下滴灌系统的多种关键技术参数, 讨论了地下滴灌灌水设备、灌水均匀度、灌溉定额、灌水频率、滴灌带埋深与间距对作物产量与水分利用效率的影响。最后提出现阶段地下滴灌技术的应用难点和需进一步研究的问题。本文旨在阐述地下滴灌技术在水资源节约方面的潜力及产生机理, 为推动地下滴灌技术广泛应用提供科学依据。

**关键词:** 地下滴灌; 水分运动特征; 水分利用效率; 节水潜力

中图分类号: S275.6

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Water saving potential and mechanisms of subsurface drip irrigation: A review\*

YAO Jiawei<sup>1,2</sup>, QI Yongqing<sup>1</sup>, LI Huaihui<sup>3</sup>, SHEN Yanjun<sup>1\*\*</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Laboratory of Water-Saving Agriculture, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Subsurface drip irrigation is a water-saving irrigation technology with high water efficiency due to small irrigation volume and increased crop yield. Subsurface drip irrigation can effectively reduce evaporation and drainage and improve irrigation water productivity, whereas its' high degree of automation can reduce labor, operation, and management costs. This technique is an important irrigation technology in water-deficient areas in China. Here, we reviewed the development of subsurface drip irrigation technology, systematically compared the effects of various irrigation methods on crop yield, irrigation

\* 河北省重点研发计划国际科技合作专项(18397002D)、中国科学院国际伙伴计划(153E13KYSB20170010)、国家重点研发计划课题(2016YFC0401403)和国家自然科学基金面上项目(41877169)资助

\*\* 通信作者: 沈彦俊, 主要研究方向为农业水文与水资源、节水农业。E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

要家威, 主要研究方向为节水农业与灌溉技术。E-mail: yjwzh13@163.com

收稿日期: 2020-12-11 接受日期: 2021-02-05

\* This study was supported by the International Science and Technology Cooperation of Key Research and Development Project of Hebei Province (18397002D), the International Partners Program of Chinese Academy of Sciences (153E13KYSB20170010), the National Key Research and Development Project of China (2016YFC0401403), and the National Natural Science Foundation of China (41877169).

\*\* Corresponding author, E-mail: yjshen@sjziam.ac.cn

Received Dec. 11, 2020; accepted Feb. 5, 2021

volume, and evapotranspiration, discussed the soil water movement process influenced by multiple factors under subsurface drip irrigation (from indoor control experiments and established mathematical models), revealed the water-saving and yield-increasing mechanisms of subsurface drip irrigation, and highlighted the key technical parameters of subsurface drip irrigation systems and their effects on crop yield and water use efficiency. Finally, we presented the difficulties of this system and called attention to the problems that required further research. This study examined the water conservation potential of subsurface drip irrigation and its underlying mechanisms, providing a scientific basis for promoting the widespread application of subsurface drip irrigation technology.

**Keywords:** Subsurface drip irrigation; Water movement characteristics; Water use efficiency; Water saving potential

灌溉在全球粮食生产中起着极为关键的作用, 实现灌溉水资源的高效利用是保证粮食安全的中中之重<sup>[1]</sup>。世界上众多农业地区, 水土资源不匹配, 可利用水量占比小, 水资源利用率低, 地下水开采过量, 水资源成为农业发展的制约因素<sup>[2]</sup>, 尤其是在中国华北平原<sup>[3]</sup>、印度河平原<sup>[4]</sup>和美国高平原和中央山谷地区<sup>[5]</sup>。利用高效的微灌技术取代地面灌溉方式, 可以提高用水效率, 减缓水资源短缺问题, 保障农业可持续发展<sup>[6]</sup>。滴灌是最为高效的微灌技术, 其水分利用效率远高于喷灌(60%~80%)与地面灌溉(50%~60%), 最高可达 90%, 节水效果显著<sup>[7]</sup>。地下滴灌是在滴灌基础上形成的高效节水的新型灌溉技术, 即通过铺设在耕层中的滴灌管网系统将水和液体肥料小流量、长时间、高频率直接灌入作物根区, 供作物生长发育利用, 达到节水、节肥、增产等目的<sup>[8]</sup>。地下滴灌系统能有效减少深层渗漏和土壤蒸发, 提高水分利用效率, 同时节省劳动力并提高运行管理效率<sup>[9]</sup>, 是节水效率最高的灌溉方式之一。

目前地下滴灌技术的节水潜力与节水机理尚未得到系统的论述。本文将通过梳理地下滴灌农田应用、控制试验及模型模拟的研究成果, 对比多种灌溉方式下的作物产量、灌溉量与蒸散量, 阐述地理点源多因素影响的土壤水分运动过程, 总结地下滴灌数值模拟及模型的发展与应用, 探究地下滴灌技术的节水潜力, 并指出其关键技术参数及应用难点, 提出需进一步解决的问题。本文旨在为地下滴灌系统的广泛应用、大幅提升缺水地区用水效率提供有效途径。

## 1 地下滴灌技术的发展与趋势

1913 年美国学者 House 首先对地下滴灌技术进行了研究, 受当时技术条件限制, 未能增加根区土壤含水量, 并因其应用成本过高而放弃<sup>[10]</sup>。1920 年美国加利福尼亚的 Charles 发明了能使周围土壤湿润的多孔瓦罐, 被认为是地下滴灌技术的雏型<sup>[11]</sup>。进入 20 世纪 70 年代, 世界各地对地下滴灌技术进行了较大规模的田间试验, 主要应用于果树及大田作物<sup>[12]</sup>。1978 年山西省水土保持科学研究所开展了

为期 4 年的大田作物地下滴灌试验<sup>[13]</sup>, 1979 年美国亚利桑那州建成第一个棉花(*Gossypium hirsutum*)地下滴灌系统, 到 1985 年约有 8000 hm<sup>2</sup> 棉田安装了滴灌管道, 被称为“亚利桑那系统”<sup>[13]</sup>。但由于当时技术条件的限制, 早期地下滴灌系统存在灌水均匀性差, 灌水器易堵塞, 系统运行维护及管理难度大等问题。

20 世纪 80 年代以后, 地下滴灌技术的研究集中在改进灌水器质量、优化系统设计参数、研制过滤器和施肥装置等方面<sup>[14]</sup>。1982 年 Mitchell 等<sup>[15]</sup>编写了《地下滴灌系统设计、安装和运行管理指南》, 标志着地下滴灌技术进入规范化运行阶段。1989 年前后美国堪萨斯州立大学进行了连续多年的研究, 对地下滴灌系统设计、维护和经济性及长期效应做出了广泛的讨论, 编写了多种技术材料<sup>[16]</sup>。“九五”期间, 中国水利水电科学院在北京市昌平区建成 13.3 hm<sup>2</sup> 的地下滴灌试验示范区, 自主研发地下滴灌专用灌水器及田间配套技术, 取得了显著的节水增产成果<sup>[17]</sup>。

21 世纪以来, 国内外学者对瓜果蔬菜、棉花、苜蓿(*Medicago truncatula*)和玉米(*Zea mays*)等作物开展了大量田间试验, 主要研究了地下滴灌技术对作物生长发育的影响及其节水增产效益。部分研究基于数值模拟方法, 对多种土壤条件下土壤水与溶质运移规律进行了探讨, 并给出了最适的技术参数, 有效解决了地下滴灌系统灌溉过程中不可见的难题<sup>[18]</sup>。现阶段地下滴灌系统的研究热点主要集中在水肥气一体化的田间应用中, 2006 年, Bhattarai 等<sup>[19]</sup>对加气灌溉进行了研究, 指出使用地下滴灌加气技术能够缓解长时间地下滴灌产生的土壤通透性减弱问题, 增强根际土壤通透性, 提高土壤酶活性与氧气扩散率, 促进根系呼吸作用, 进而增加作物产量<sup>[20-21]</sup>。

## 2 地下滴灌节水潜力与理论基础

### 2.1 地下滴灌节水潜力概述

节水农业的本质是充分利用降水并高效利用灌溉水。地面灌溉方式水资源浪费严重, 无法保证缺

水地区的水资源供给平衡,与地面灌溉相比,喷灌技术可节水 40%~50%,滴灌可节水 80%<sup>[22]</sup>,其中水分损失主要来自输水过程中灌溉水的流失、田间土壤蒸发以及深层渗漏。作物生长发育用水主要来自植物蒸腾,土壤蒸发是作物无法利用的非生产性水资源,地下滴灌技术在减少非生产性耗水方面具有明显优势,可以有效降低表层土壤含水率,控制灌溉水留存于作物根区,并减少约 10%的蒸散量,缓解水资源短缺问题<sup>[23]</sup>。

地面灌溉、喷灌和地下滴灌 3 种灌溉方式对作物产量、灌溉量与蒸散量的影响有显著差异,主要是由 3 种不同方式的灌水强度以及不同的土壤水分分布特征引起的。相对地面灌溉方式,地下灌水可增加作物根区 20~55 cm 处的土壤含水率,降低土壤表层的水利传导系数,减少土壤水分向地表运动,保持表层干燥,土壤蒸发量显著降低 39.8%<sup>[24]</sup>。Bordovsky 等<sup>[25]</sup>发现地下滴灌的棉花产量和水分利用效率均高于低压管灌,在灌水强度为 2.54 mm·d<sup>-1</sup>时地下滴灌可提高 14%的棉花产量,提高灌水强度对增产效果影响不显著。郭学良等<sup>[26]</sup>试验表明,地下滴灌灌溉水主要分布在 10~35 cm 土层,喷灌灌溉水位于 10~40 cm 土层,地面灌溉水分运移至 60 cm 以下;与地面灌溉相比,地下滴灌和喷灌分别减少 50.8%和 37.5%的灌溉量,苜蓿产量分别提高 21%和 11%,灌溉水利用效率分别提高 148%和 41%。多数研究结果表明,与其他灌溉方式相比,地下滴灌可以将更多的灌溉水留存于植物根区,减少土壤蒸发量与深层渗漏量,提高作物产量与灌溉水利用效率。充分说明地下滴灌技术在降低灌溉量与提升用水效率方面的优势,具有极高的节水潜力。

滴灌技术主要分为地下滴灌和地表滴灌两类,两者对作物产量、灌溉量与蒸散量的影响同样显著。地下滴灌与地表滴灌的对比研究发现,地下滴灌技术在节水增产方面具有明显优势,在作物产量相同的前提下,柑橘(*Citrus reticulata*)使用地下滴灌技术可以减少 23%的灌溉量<sup>[27]</sup>;在灌溉量相同的条件下,地下滴灌提高 9%~12%的葡萄(*Vitis vinifera* L.)产量和 9%~11%的水分利用效率<sup>[28]</sup>;在低灌溉量条件下,地下滴灌对作物生长发育影响较大,可有效提高玉米光合速率以及干物质与氮素积累量,水分利用效率增加 7%左右<sup>[29]</sup>。相对地表滴灌,地下滴灌的土壤湿润锋形状深度更大、半径更小,且在地表形成 10 cm 左右的干土层<sup>[30]</sup>,降低土壤蒸发量。Valentín 等<sup>[31]</sup>发现玉米地下滴灌的蒸散量相对地表滴灌降低

39%,土壤蒸发量在整个生育期内减少约 40 mm,灌溉水生产力提高 25%。Umair 等<sup>[32]</sup>指出冬小麦(*Triticum aestivum*)地下滴灌蒸散量相对地面灌溉与地表滴灌减少约 80 mm 与 40 mm,且在生育期后期地下滴灌的日蒸散量比地面灌溉平均降低 2 mm·d<sup>-1</sup>。地下滴灌技术的蒸散量低于地表滴灌,主要原因是两者之间的土壤蒸发量不同,地表滴灌需要更多的灌水量以弥补土壤蒸发所带来的损失。综上所述,地下滴灌技术有着更高的产量、更低的灌溉量与蒸散量,尤其土壤蒸发得到有效降低,在水资源匮乏地区,地下滴灌技术可作为高效节水方案。

## 2.2 地下滴灌节水机理概述

前述大量田间试验指出地下滴灌技术能在保证产量的前提下,有效减少灌溉量。针对地下滴灌技术减少灌溉用水的原因,大量学者通过控制试验建立经验公式的方法对土壤水分运移情况进行了机理上的研究,指出减少土壤蒸发和地下渗漏是提高用水效率的关键<sup>[33]</sup>。

地下滴灌土壤水分运动过程主要是土壤质地、滴头流量、灌水时间、土壤初始含水率及滴灌带埋深等多种因素共同影响<sup>[34]</sup>。灌水完成时湿润体形态呈纺锤形,外部轮廓呈抛物线形,土壤含水率在滴头附近处最高,沿湿润锋方向逐渐降低;经水分再分布后,湿润锋垂直向下运移距离大于垂直向上运移距离<sup>[35]</sup>。地下滴灌土壤水分运动主要受土壤基质势和重力势驱使,其中重力势是导致土壤水分向上运移距离小于向下运移距离的主要原因。

众多学者研究了土壤水分运动特征的影响因素及驱动力,指出滴头流量和滴灌带埋深是地下滴灌性能的较为重要的参数,而土壤质地是决定两参数的重要因素<sup>[36]</sup>。湿润锋运移距离主要受土壤质地影响,在砂土中运移距离最大,壤土及砂壤土次之,黏壤土中最小<sup>[37-38]</sup>。同时湿润锋运移距离与滴头流速和灌水时长有关,其关系可以通过幂函数<sup>[37]</sup>描述:

$$D=k \times I^a \times t^b \quad (1)$$

式中:  $D$  为湿润锋在水平/垂直方向的运移距离(cm),  $I$  为滴头流量(mL·min<sup>-1</sup>),  $t$  为灌水时间(min),  $k$ 、 $a$ 、 $b$  均为经验系数。其中运移距离与灌水时间呈正相关,而滴头流量对运移距离的影响与土壤质地有关。当流量小于土壤饱和导水率时,运移距离与流量呈正相关;当滴头流量大于土壤饱和导水率时,运移距离与流量呈负相关;土壤黏性越高,减小幅度越大<sup>[37-40]</sup>。土壤初始含水率越高,向上运移的距离越小,运移速率也越小,向下运移距离和速度与之相

反<sup>[39]</sup>。某一点距滴头的距离与土壤含水率之间符合二次函数关系<sup>[41]</sup>, 公式如下:

$$\omega = Ax^2 + Bx + C \quad (2)$$

式中:  $\omega$  为水平/垂直方向的土壤含水率(%),  $x$  为距滴头水平/垂直方向距离(cm),  $A$ 、 $B$ 、 $C$  均为经验系数。含水率随距滴头距离的增加而减小。室内双点源交汇入渗情形下, 两湿润体交汇界面处湿润锋垂直向下运移距离总是大于垂直向上的距离, 经过水分再分布后, 湿润体体积随滴头间距增大而增大<sup>[41]</sup>。张松等<sup>[42]</sup>发现滴头在砂土中埋深 20 cm 的情况下, 在地下 5 cm 处含水率达较适合含水率时, 其余深度的含水率已超过饱和含水率, 不利于作物生长; 而埋深在 15 cm 时, 田间的土壤水分情况较好, 有利于作物生长。

相关学者就地下滴灌水氮及养分的运移情况进行讨论, 指出土壤养分的空间分布主要由水分运移进行调控, 土壤碱解氮与有效钾的含量沿湿润锋方向逐渐增加, 有效磷的趋势相反<sup>[43]</sup>。低浓度肥液将导致硝态氮在湿润锋边缘聚集; 高浓度肥液易于使硝态氮在滴头处积累, 分布与土壤含水率趋势相同<sup>[44]</sup>。相对其他灌溉方式, 地下滴灌根据不同土壤和作物类型选择适宜参数后, 可将含有养分的湿润体合理分布在作物主要根区处, 减少水分与养分的损失, 使作物更充分地利用水肥, 达到节水增产的目的。

现有成果已就大多数土壤条件下土壤湿润体的形态特征与运移过程进行了研究, 分析了各因素之间的相互关系, 但现有研究大多在控制条件下进行, 无法对土壤真实情况进行还原。实际应用中出现如滴灌管壁导水作用引起的土壤水分横向运移、沿管壁形成的土壤水力冲蚀通道等情况<sup>[45]</sup>, 对土壤水氮分布以及土壤蒸发的影响需进一步研究。

### 2.3 地下滴灌土壤水分运动模型

地下滴灌土壤水分运动过程的影响因素众多, 依靠经验公式或试验方法耗时费力, 并且试验过程中不确定因素对结果影响较大。数值模拟方法可清晰直观地实现土壤内部水分运动过程可视化, 为各种土壤条件提供预测结果。在实际应用过程中使用模型对地下滴灌水氮运移影响因素进行模拟, 有助于提高技术参数优化效率, 选择最符合节水农业的技术参数, 造成不必要的水分损失。

数学模型是土壤水分运动模型软件的内在核心, 建立符合实际情况的土壤水分运动模型极为关键。Philip 等<sup>[46-48]</sup>基于二维和三维地理点源滴灌土壤水

分运动模型, 研究了各种无限、半无限区域的水分运动过程, 利用球型波函数得到模型的精确解, 通过将稳态流中的非线性方程转换为线性方程, 给出了在非饱和土壤中的水分运动方程。土壤水运动理论和溶质运移对流-弥散方程是地下滴灌数学模型最常用的 2 个工具: 程先军等<sup>[49]</sup>基于此建立了地理点源土壤水运动和溶质运移数学模型, 计算结果与室内试验结果具有较好的吻合性, 指出对模型滴头边界进行简化后仍能较好地分析土壤水分运移; 刘玉春等<sup>[50]</sup>利用相同理论构建了水氮运移数学模型, 发现在滴头埋深 25 cm 时, 地表干土层较薄, 水氮向下运移距离相对较小, 利于减少土壤蒸发。

HYDRUS-2D<sup>[51-53]</sup>、SWMS-2D<sup>[54]</sup>和 WMTrace<sup>[55]</sup>等模型软件均可对地理点源条件下土壤水分运动进行模拟, 其中 HYDRUS-2D 软件具有模拟精度高、应用范围广等优点, 受到学者的广泛使用。使用 VG 模型求解<sup>[55]</sup>、HYDRUS-2D 软件反演<sup>[56]</sup>或试验实测所得土壤水力特征参数, 计算分析多因素对地下滴灌土壤水分分布的影响, 模拟结果与前文所述的试验现象吻合良好。Evet 等<sup>[57]</sup>优化了 ENWATBAL 模型, 模拟地表、地下 15 cm 和 30 cm 滴头的能量平衡和水平衡, 结果发现, 滴头埋深 15 cm 和 30 cm 时, 地下滴灌蒸发量与地表滴灌相比分别少 51 mm 和 81 mm; 使用埋深 30 cm 的滴头最大节水量可达季节性降水和灌水量总和的 10%。

为减小模拟过程的复杂程度, 现阶段大部分模型均进行一定的简化, 忽略了田间土壤异质性或土壤分层等情况, 以及作物根系对土壤水分运动的影响, 导致模型与实际情况存在一定差别。因此, 建立更符合实际的数学模型仍是今后研究的重点。

## 3 地下滴灌关键技术参数

### 3.1 地下滴灌灌水设备及灌水均匀度

地下滴灌技术可与精准施肥技术和自动化控制系统集成为水肥一体化系统, 实现精准灌溉施肥, 这也是节水农业的发展趋势。实现地下滴灌技术在农业生产中的广泛应用, 降低水资源的无效损失, 需对其关键技术参数进行选择, 根据作物种类、土壤质地、气候条件等因素制定最优灌溉制度与滴灌带布设参数, 选择满足对应要求的灌溉设备及滴灌带种类。

现阶段地下滴灌系统使用的灌溉设备源自地表滴灌, 两者最主要区别表现在滴灌带类型与过滤装置等方面。相较于地表滴灌, 地下滴灌滴头堵塞是

系统应用的难点之一。仵峰等<sup>[58]</sup>对使用了 8 年的迷宫式、微管式和孔口式灌水器进行调查,发现堵塞率分别达 16.7%、25.0%和 63.8%,并对其堵塞原因进行了分析。在此基础上,李云开等<sup>[59]</sup>指出灌溉水质差、负压吸泥及根系入侵等是导致灌水器堵塞的主要原因,通常滴头采用内镶式或压力补偿式可保证系统供水的稳定性,减少滴头堵塞。

灌水均匀度是地下滴灌系统运行的重要参数,也是评价系统灌水质量的重要指标。现行规范中指出系统实测灌水均匀度不应小于 80%,灌水均匀度的降低将会导致部分作物可利用水量的减少,影响作物正常生长发育,作物产量下降<sup>[60]</sup>。灌水均匀度通常采用克里斯琴森公式,使用系统的流量偏差率计算,水力流量偏差与制造流量偏差对系统流量偏差率影响最大<sup>[61]</sup>。滴头与施肥装置类型对灌水、施肥均匀度影响较大,滴头堵塞以及制造偏差导致的出流量降低,同样会减少灌水均匀度。Warrick 等<sup>[62]</sup>发现低流速、多滴头的压力补偿式滴灌带可以在很多土壤条件下获得较高的灌水均匀度;对具有压力调节作用的内镶式滴灌管,采用无纺布外包方式处理后可提高灌水均匀度<sup>[17]</sup>。现有研究大部分以灌水均匀度作为指标,评价地下滴灌系统的设计质量,但对作物产量及耗水特征的影响研究较少。降低灌水均匀度能否保证作物不减产、减少灌溉水损失仍需深入研究。

### 3.2 地下滴灌农田灌溉管理

灌溉制度是地下滴灌系统运行最为关键的技术参数,包括灌溉定额和灌水频率两个方面。地面灌溉单次灌溉量大,灌溉周期长,而地下滴灌技术的单次灌溉量小,灌溉频率高,通常为一天 1 次至一周 1 次。地下滴灌的少量高频灌溉可以有效将水分存储在作物根区,减少水分损失,符合按需供水、精准灌溉的要求。

地下滴灌的灌溉制度一般以作物种类、耗水特征以及土壤的保水能力和透水性能作为依据,综合考虑土壤含水量和蒸散量,多以作物需水量或田间持水量作为标准进行设计。李兴强等<sup>[63]</sup>指出茄子(*Solanum melongena*)在灌溉定额为 225 mm 的条件下,水分利用效率相对灌溉定额为 275 mm 处理提高 8%,增加灌溉量茄子产量并不会得到明显提高。Ma 等<sup>[28]</sup>发现相较灌溉定额为 65%作物需水量的处理,80%作物需水量的葡萄产量提高 6%,而水分利用效率降低 12%。产量与水分利用效率往往不具有同步性,适当降低灌溉量可提高作物水分利用效

率。孙章浩等<sup>[64]</sup>研究表明相较于灌水下限为 60%田间持水量,灌水下限为 80%田间持水量处理单次灌溉量低、灌溉频率高,可以有效提高小麦的株高、叶面积指数、干物质积累量以及产量,同时能延缓灌浆期旗叶绿素含量降低。适宜的灌水频率可以保证作物根区在整个生育期内拥有良好的水分与养分条件。有研究指出,在土壤水分亏缺量小于 20%时,从 1 天 1 次到 7 天 1 次的灌水频率对玉米产量无明显影响<sup>[65]</sup>;哈密瓜(*Cucumis melo* var. *Saccharinus*)的产量周灌大于日灌,洋葱(*Allium cepa*)则与之相反<sup>[66]</sup>;萝卜(*Raphanus sativus*)根系发育状况良好的最适灌溉频率为每 3 天 1 次<sup>[67]</sup>。一般来说,蔬菜等作物通常采用高频灌溉,而果树或大田作物可将灌水周期适当延长。地下滴灌技术的灌溉制度最符合精准灌溉施肥的要求,这也是节水农业的发展趋势。

在实际生产过程中,充分供给灌溉水虽可提高产量,但会造成水资源与能源的浪费,其净效益并非最大,不符合节水农业要求。由于地下滴灌系统的特殊性,仍需进一步完善不同土壤、不同作物的合理灌溉制度,设计中的不合理之处会影响作物的正常生长,过多的灌水量将会产生更大的蒸发损失与深层渗漏。

### 3.3 地下滴灌滴灌带布设参数

滴灌管的埋深和间距是地下滴灌系统设计的重要参数,关系到埋设时的工作量和工程造价。确定滴灌带埋深和间距时既要避免耕翻土壤等机械作业对地下管网的破坏,同时也需使作物根系处于生长过程中最适的土壤水分环境下。

滴灌带埋深与间距主要由气候条件、土壤性质、田间耕作以及作物种类等因素决定。滴灌带埋深多位于地下 20~70 cm,大田作物选择埋深 20~40 cm 较为合适<sup>[68]</sup>。较小的滴灌带间距适用于如小麦、苜蓿等密植作物、沙质土壤以及气候干旱地区,玉米等稀植作物以及气候湿润地区可以使用较大的滴灌带间距。廉喜旺<sup>[69]</sup>指出滴灌带埋深对作物各生育期生物量及产量的影响大于间距,采取间距 80 cm、埋深 30 cm 布设方式的苜蓿产量和水分利用效率最高。Sidhu 等<sup>[70]</sup>评估了不同间距和埋深对作物产量和灌溉水生产率的影响,结果表明埋深 15 cm 的小麦产量高于埋深 20 cm,同时指出滴灌带埋深和间距会影响产量与灌溉水利用效率,但影响未达显著;Grabow 等<sup>[71]</sup>发现当滴灌带间距为 91 cm 时,棉花产量和灌溉水利用效率均高于间距 182 cm 的处理,但

产量同样没有达到显著差异; Camp 等<sup>[72]</sup>得出了相同结论, 认为使用更宽的滴灌带间距可以降低地下滴灌的成本。部分学者针对滴灌带滴头的间距进行研究, Enciso 等<sup>[73]</sup>分析了 15 cm、20 cm 和 30 cm 滴头间距对洋葱产量的影响, 发现滴头间距对洋葱产量没有显著影响。多数研究指出滴灌带埋深与间距对作物产量和灌溉水生产率的影响并不显著, 灌溉量与气候条件对作物生长发育与产量的影响更大<sup>[74]</sup>, 滴灌带布设参数对应用成本影响较大, 滴灌带间距的增加可以减少工作量与工程造价<sup>[75]</sup>。

在水分供给充足的条件下, 滴灌带埋深与间距两因素主要作用在于调控土壤水分分布, 适宜的滴灌带间距可以使土壤水分均匀分布在作物根区, 适宜的滴灌带埋深可以有效控制土壤湿润体位置, 减少土壤蒸发和深层渗漏。目前地下滴灌滴灌带布设参数研究主要关注对作物生长发育的影响, 而对作物影响下土壤蒸发的定量研究较少。

#### 4 地下滴灌发展方向及应用难点

地下滴灌系统在灌溉过程中可保持地表相对干燥、大幅减少土壤表面蒸发、有效降低深层渗漏, 具有极高的节水潜力。系统操作简洁, 可与自动化设备配套使用, 显著提高劳动生产率, 一定程度上降低施肥和耕作的农艺成本, 使田间管理更加省工省时, 对水资源保护和农业可持续发展有着重要意义。但现阶段地下滴灌技术仍存在一系列应用难点。

1) 地下滴灌系统为减少土壤蒸发, 导致土壤表层长时间处于低水分状态, 不利于作物出苗及早期生长, 这是地下滴灌系统难以广泛使用的重要原因之一。现阶段大多数解决方案是使用其他灌溉方式保证作物出苗, 而针对播种技术层面上的改良, 能否有效解决出苗问题值得进一步探究。

2) 地下滴灌系统的土壤含盐量沿湿润锋方向逐渐增加, 导致湿润体上边缘的土壤含盐量增大, 在气候干旱地区地表 20 cm 以上出现土壤盐分表聚现象; 半湿润区受夏季集中降雨影响, 该问题并不显著。为解决干旱地区土壤表层积盐问题, 国内外目前解决方案仍为大水淋洗, 可供采用的优质方案仍需探究。

3) 灌水器堵塞是影响地下滴灌系统使用寿命的关键问题, 也是地下滴灌技术应用最主要的难点。堵塞导致滴头流速与灌溉量变化, 灌水均匀度降低, 影响土壤水分运移过程, 致使作物生长发育受限。灌溉水水质差、负压吸泥及根系入侵等是导致灌水器堵塞的主要原因<sup>[59]</sup>, 研究灌水器堵塞的发生特征

与诱发机理, 建立堵塞控制方法, 提高灌水均匀度是保障系统长期高效运行的关键。

4) 地下滴灌系统管网与灌水设备均埋于地下, 难以评估管理操作和实际情况的一致性, 因此对其安装精度与运行管理要求较高。当安装、运行和维护不当时, 系统设备易产生故障, 故障检查时间长, 维修成本高, 都是该系统应用的难点所在。

综上所述, 进一步探究地下滴灌系统的特殊性和复杂性, 充分发挥节水增效的优势, 优化关键技术参数, 解决现阶段存在问题, 可为地下滴灌技术提供科学依据和技术支撑, 对我国节水灌溉技术的发展有重要的意义。

#### 参考文献 References

- [1] 康绍忠. 水安全与粮食安全[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 880-885  
KANG S Z. Towards water and food security in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 880-885
- [2] 黄修桥, 高峰, 王宪杰. 节水灌溉与 21 世纪水资源的持续利用[J]. 灌溉排水, 2001, 20(3): 1-5  
HUANG X Q, GAO F, WANG X J. Water saving irrigation and sustainable utilization of water resources in the 21st century[J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(3): 1-5
- [3] CAO G L, ZHENG C M, SCANLON B R, et al. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain[J]. Water Resources Research, 2013, 49(1): 159-175
- [4] RODELL M, VELICOGNA I, FAMIGLIETTI J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India[J]. Nature, 2009, 460(7258): 999-1002
- [5] SCANLON B R, FAUNT C C, LONGUEVERGNE L, et al. Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012, 109(24): 9320-9325
- [6] 刘昌明. 中国农业水问题: 若干研究重点与讨论[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(8): 875-879  
LIU C M. Agricultural water issues in China—Discussions on research highlights[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 875-879
- [7] DASBERG S, OR D. Drip Irrigation[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999
- [8] 程先军, 许迪, 张昊. 地下滴灌技术发展及应用现状综述[J]. 节水灌溉, 1999(4): 13-15, 42  
CHENG X J, XU D, ZHANG H. A summary of development and application situations for subsurface drip irrigation technique[J]. Water Saving Irrigation, 1999(4): 13-15, 42
- [9] AYARS J E, FULTON A, TAYLOR B. Subsurface drip irrigation in California—Here to stay?[J]. Agricultural Water Management, 2015, 157: 39-47
- [10] HADAS A. Trickle irrigation for crop production—design operation and management[J]. Soil and Tillage Research, 1987,



- 10(2): 191–192
- [11] CAMP C R. Subsurface drip irrigation: a review[J]. Transactions of the ASAE, 1998, 41(5): 1353–1367
- [12] BOSCH D J, POWELL N L, WRIGHT F S. An economic comparison of subsurface microirrigation with center pivot sprinkler irrigation[J]. Journal of Production Agriculture, 1992, 5(4): 431–437
- [13] 仵峰, 宰松梅, 丛佩娟. 国内外地下滴灌研究及应用现状[J]. 节水灌溉, 2004, (1): 25–28  
WU F, ZAI S M, CONG P J. Research and application situations of subsurface drip irrigation at home and abroad[J]. Water Saving Irrigation, 2004, (1): 25–28
- [14] 张国祥. 地下滴灌(渗灌)的技术状况与建议[J]. 山西水利科技, 1995, (4): 51–54  
ZHANG G X. Technical condition and suggestions of subsurface drip irrigation (infiltration irrigation) [J]. Shanxi Hydrotechnics, 1995, (4): 51–54
- [15] MITCHELL W H, TILMON H D, MAGAZINE S. Underground trickle irrigation: The best system for small farms?[J]. Crops & Soils Magazine, 1982, (34): 9–13
- [16] 李光永. 世界微灌发展态势——第六次国际微灌大会综述与体会[J]. 节水灌溉, 2001, (2): 24–27  
LI G Y. The development trend of micro irrigation in the world—summary and experience of the sixth international micro irrigation conference[J]. Water Saving Irrigation, 2001, (2): 24–27
- [17] 张昊, 许迪, 程先军, 等. 几种地下滴灌(渗灌)灌水器性能的室内外试验研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(4): 10–14  
ZHANG H, XU D, CHENG X J, et al. Experimental study on performances of several watering devices for subsurface irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 1999, 18(4): 10–14
- [18] 易鑫, 刘洁, 魏青松, 等. 数值模拟在节水灌溉技术中应用的研究概述[J]. 节水灌溉, 2017(1): 87–89, 93  
YI X, LIU J, WEI Q S, et al. The research overview of the application of numerical simulation in water-saving irrigation technology[J]. Water Saving Irrigation, 2017, (1): 87–89, 93
- [19] BHATTARAI S P, PENDERGAST L, 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
- [20] 曹雪松, 郑和祥, 佟长福, 等. 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿土壤酶活性与根系脯氨酸的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 67–73  
CAO X S, ZHENG H X, TONG C F, et al. Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubbled water on soil enzyme activity and root proline of alfalfa[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(4): 67–73
- [21] 曹雪松, 郑和祥, 王军, 等. 微纳米气泡水地下滴灌对紫花苜蓿根际土壤养分和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 24–30  
CAO X S, ZHENG H X, WANG J, et al. Effects of subsurface drip irrigation with micro-nano bubble water on rhizosphere soil nutrients and yield of alfalfa[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 24–30
- [22] 张红亚, 王友贞. 安徽省淮北地区节水农业的主要途径[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2003, 11(4): 49–52  
ZHANG H Y, WANG Y Z. Main ways of developing water-saving agriculture in Huaibei District of Anhui Province[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture, 2003, 11(4): 49–52
- [23] EVETT S R, COLAIZZI P D, HOWELL T A. Drip and evaporation[C]//Proceedings of the Central Plains Irrigation Conference, Sterling: Colorado, 2005: 33–39
- [24] MESHKAT M, WARNER R C, WORKMAN S R. Evaporation reduction potential in an undisturbed soil irrigated with surface drip and sand tube irrigation[J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(1): 79–86
- [25] BORDOVSKY J, LYLE W M, SEGARRA E. Economic evaluation of Texas High Plains cotton irrigated by LEPA and subsurface drip[J]. Texas Journal of Agricultural and Natural Resources, 2000, 13: 67–73
- [26] 郭学良, 李卫军. 不同灌溉方式对紫花苜蓿产量及灌溉水利用效率的影响[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 1086–1090  
GUO X L, LI W J. Effects of different irrigation methods on alfalfa yield and irrigation water use efficiency[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(5): 1086–1090
- [27] MARTÍNEZ-GIMENO M A, BONET L, PROVENZANO G, et al. Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 206: 209–216
- [28] MA X C, SANGUINET K A, JACOBY P W. Direct root-zone irrigation outperforms surface drip irrigation for grape yield and crop water use efficiency while restricting root growth[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 105993
- [29] 杨明达, 关小康, 刘影, 等. 滴灌模式和水分调控对夏玉米干物质和氮素积累与分配及水分利用的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(3): 443–459  
YANG M D, GUAN X K, LIU Y, et al. Effects of drip irrigation pattern and water regulation on the accumulation and allocation of dry matter and nitrogen, and water use efficiency in summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(3): 443–459
- [30] 杨明达, 关小康, 白田田, 等. 不同滴灌模式对土壤水分空间变异及夏玉米生长的影响[J]. 河南农业大学学报, 2016, 50(1): 1–7  
YANG M D, GUAN X K, BAI T T, et al. Effect of different drip irrigation modes on spatial distribution variance of soil water and summer maize growth[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2016, 50(1): 1–7
- [31] VALENTÍN F, NORTES P A, DOMÍNGUEZ A, et al. Comparing evapotranspiration and yield performance of maize under sprinkler, superficial and subsurface drip irrigation in a semi-arid environment[J]. Irrigation Science, 2020, 38(1): 105–115
- [32] UMAIR M, HUSSAIN T, JIANG H B, et al. Water-saving potential of subsurface drip irrigation for winter wheat[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2978
- [33] 吕谋超, 仵峰, 彭贵芳, 等. 地下和地表滴灌土壤水分运动的室内试验研究[J]. 灌溉排水, 1996, 15(1): 42–44  
LYU M C, WU F, PENG G F, et al. Underground and surface



- drip irrigation soil water movement laboratory test research[J]. *Irrigation and Drainage*, 1996, 15(1): 42–44
- [34] AMALI S, ROLSTON D E, FULTON A E, et al. Soil water variability under subsurface drip and furrow irrigation[J]. *Irrigation Science*, 1997, 17(4): 151–155
- [35] 张和喜, 袁友波, 舒贤坤, 等. 地下滴灌条件下土壤水分运动研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(8): 3277–3279  
ZHANG H X, YUAN Y B, SHU X K, et al. Experimental study on soil-water movement under subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(8): 3277–3279
- [36] 许迪, 程先军. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移数学模型的应用[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 27–30, 12  
XU D, CHENG X J. Model application of water flow and solute transport during non-steady diffusion from subsurface emitter source[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(1): 27–30, 12
- [37] 王炳尧, 王伟, 刘立超, 等. 直插式地下滴灌土壤湿润体特征值变化规律及灌溉效果分析[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(4): 1–10  
WANG B Y, WEI W, LIU L C, et al. Water movement and its potential for uptake by roots under plug-in subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(4): 1–10
- [38] 王荣莲, 张智超, 嘉晓辉, 等. 地下滴灌水分运移规律及滴灌带适用性初步研究[J]. *节水灌溉*, 2017, (10): 31–34  
WANG R L, ZHANG Z C, JIA X H, et al. A preliminary research on water movement rule under subsurface drip irrigation and applicability of drip irrigation belt[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017, (10): 31–34
- [39] 任杰. 地下滴灌灌水设计参数对土壤水分运动规律的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2008  
REN J. Research on regulation of soil-water movement in irrigation design parameters under subsurface drip irrigation[D]. Shihezi: Shihezi University, 2008
- [40] SHIRI J, KARIMI B, KARIMI N, et al. Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 585: 124792
- [41] 王超. 地下滴灌条件土壤水分运移规律试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011  
WANG C. The experiment research on the soil moisture dynamic change of soil water movement under subsurface drip irrigation[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011
- [42] 张松, 李和平, 郑和祥, 等. 地埋滴灌点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. *节水灌溉*, 2017, (1): 25–27, 32  
ZHANG S, LI H P, ZHENG H X, et al. A study on soil water movement law of point source infiltration under buried drip irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017, (1): 25–27, 32
- [43] 宰松梅. 水肥一体化灌溉模式下土壤水分养分运移规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010  
ZAI S M. Soil water and nutrient transport under the integration of irrigation and fertilization[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010
- [44] 周少梁, 孙三民. 间接地下滴灌下水分及硝态氮的分布运移[J]. *甘肃农业大学学报*, 2019, 54(5): 169–175  
ZHOU S L, SUN S M. Distribution and transport of water and nitrate nitrogen under indirect subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2019, 54(5): 169–175
- [45] 李道西, 罗金耀, 彭世彰. 地下滴灌土壤水分运动室内试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(4): 26–28  
LI D X, LUO J Y, PENG S Z. Laboratory experimental study on soil-water movement of subsurface drip irrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(4): 26–28
- [46] PHILIP J R. Steady infiltration from buried, surface, and perched point and line sources in heterogeneous soils: analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1972, 36(2): 268–273
- [47] PHILIP J R, FORRESTER R I. Steady infiltration from buried, surface, and perched point and line sources in Heterogeneous soils: Flow details and discussion[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1975, 39(3): 408–414
- [48] PHILIP J R. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities[J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(5): 1039–1047
- [49] 程先军, 许迪. 地下滴灌土壤水运动和溶质运移的数学模型及验证[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 1–4  
CHENG X J, XU D. Mathematical model for simulating water flow and solute transport during non-steady diffusion from subsurface trickle source[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(6): 1–4
- [50] 刘玉春, 李久生. 层状土壤条件下地下滴灌水氮运移模型及应用[J]. *水利学报*, 2012, 43(8): 898–905  
LIU Y C, LI J S. Modeling of water and nitrogen transport in layered-textural soils under subsurface drip fertigation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(8): 898–905
- [51] 李红. 地下滴灌条件下土壤水分运动试验及数值模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2005  
LI H. Experiments and numerical simulations of soil-water movement in subsurface drip irrigation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005
- [52] ELNESR M N, ALAZBA A A. Computational evaluations of HYDRUS simulations of drip irrigation in 2D and 3D domains (ii-subsurface emitters)[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 163: 104879
- [53] ELMALOGLOU S, DIAMANTOPOULOS E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(11): 1587–1595
- [54] 刘尧兵. 地面滴灌以及地下滴灌的数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2017  
LIU Y B. Numerical study on surface drip irrigation and subsurface drip irrigation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- [55] 周云成. 地下滴灌土壤水分运动过程的数值解析与模拟[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005  
ZHOU Y C. Numerical analysis and simulation of soil water movement under subsurface irrigation[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2005

- [56] 俞明涛, 张科锋. 基于 HYDRUS-2D 软件的土壤水力特征参数反演及间接地下滴灌的土壤水分运动模拟[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(3): 458–468  
YU M T, ZHANG K F. Identification of soil hydraulic parameters based on HYDRUS-2D software and simulation of soil water movement under indirect subsurface drip irrigation[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2019, 31(3): 458–468
- [57] EVETT S R, HOWELL T A, SCHNEIDER A D. Energy and water balances for surface and subsurface drip irrigated corn[C]//Proceeding of Fifth International Microirrigation Congress. Lamm F R(ed.). St Joseph, MI: American Society for Agricultural Engineering, 1995: 135–140
- [58] 仵峰, 范永申, 李辉, 等. 地下滴灌灌水器堵塞研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 80–83  
WU F, FAN Y S, LI H, et al. Clogging of emitter in subsurface drip irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(1): 80–83
- [59] 李云开, 周博, 杨培岭. 滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 103–114  
LI Y K, ZHOU B, YANG P L. Research advances in drip irrigation emitter clogging mechanism and controlling methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 103–114
- [60] 李久生, 杜珍华, 栗岩峰. 地下滴灌系统施肥灌溉均匀性的田间试验评估[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 83–87  
LI J S, DU Z H, LI Y F. Field evaluation of fertigation uniformity for subsurface drip irrigation systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(4): 83–87
- [61] 范兴科, 吴普特, 牛文全, 等. 低压滴灌条件下提高系统灌水均匀度的途径探讨[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 18–20  
FAN X K, WU P T, NIU W Q, et al. The methods of improving system's irrigation uniformity under low-pressure drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 18–20
- [62] WARRICK A W, SHANI U. Soil-limiting flow from subsurface emitters. : Effect on uniformity[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1996, 122(5): 296–300
- [63] 李兴强, 孙兆军, 曾玉霞, 等. 地下渗灌不同埋深对大田茄子产量和水分利用效率的影响[J]. 节水灌溉, 2020(5): 27–31  
LI X Q, SUN Z J, ZENG Y X, et al. Effects of different buried depths on yield and water use efficiency of eggplant under underground infiltration irrigation condition[J]. Water Saving Irrigation, 2020(5): 27–31
- [64] 孙章浩, 黄令淼, 杨培岭, 等. 地下滴灌灌水下限与灌水器流量对冬小麦生长发育的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(11): 41–50  
SUN Z H, HUANG L M, YANG P L, et al. Effect of lower irrigation limit and emitter flow on winter wheat growth under subsurface drip irrigation[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(11): 41–50
- [65] CALDWELL D S, SPURGEON W E, MANGES H L. Frequency of irrigation for subsurface drip-irrigated corn[J]. Transactions of the ASAE, 1994, 37(4): 1099–1103
- [66] BROWN M J, BONDURANT J A, BROCKWAY C E. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping[J]. Transactions of the ASAE, 1981, 24(6): 1482–1489
- [67] WAN S Q, KANG Y H. Effect of drip irrigation frequency on radish (*Raphanus sativus* L.) growth and water use[J]. Irrigation Science, 2006, 24(3): 161–174
- [68] 徐林, 李杨瑞, 黄海荣. 地下滴灌技术的研究进展[J]. 广西农业科学, 2008, 39(6): 800–804  
XU L, LI Y R, HUANG H R. Advance in subsurface drip irrigation[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2008, 39(6): 800–804
- [69] 廉喜旺. 阿勒泰地区地下滴灌条件下苜蓿滴灌带布设方式及高用水研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014  
LIAN X W. Study on water efficiency and the laying of drip tape under the condition of underground drip irrigation of alfalfa in the areas of Altay[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014
- [70] SIDHU H S, JAT M L, SINGH Y, et al. Sub-surface drip fertigation with conservation agriculture in a rice-wheat system: a breakthrough for addressing water and nitrogen use efficiency[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216: 273–283
- [71] GRABOW G L, HUFFMAN R L, EVANS R O, et al. Water distribution from a subsurface drip irrigation system and dripline spacing effect on cotton yield and water use efficiency in a coastal plain soil[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(6): 1823–1835
- [72] CAMP C R, BAUER P J, HUNT P G. Subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern coastal plain[J]. Transactions of the ASAE, 1997, 40(4): 993–999
- [73] ENCISO J, JIFON J, WIEDENFELD B. Subsurface drip irrigation of onions: Effects of drip tape emitter spacing on yield and quality[J]. Agricultural Water Management, 2007, 92(3): 126–130
- [74] MURLEY C B, SHARMA S, WARREN J G, et al. Yield response of corn and grain *Sorghum* to row offsets on subsurface drip laterals[J]. Agricultural Water Management, 2018, 208: 357–362
- [75] SEIDEL S J, SCHÜTZE N, FAHLE M, et al. Optimal irrigation scheduling, irrigation control and drip line layout to increase water productivity and profit in subsurface drip-irrigated agriculture[J]. Irrigation and Drainage, 2015, 64(4): 501–518