

# 地下滴灌技术的研究现状与发展

黄兴法, 李光永

(中国农业大学)

**摘要:** 由于全球水资源短缺, 节水灌溉已经越来越引起人们的重视。地下滴灌系统是很重要的一种节水灌溉系统, 有其显著的优点, 也存在许多缺点。该文对其发展历史、对作物产量的影响、目前研究热点、系统设计和灌溉制度的拟定、施肥灌溉、环境及经济分析、系统的优缺点等进行了综述性讨论。它可为中国地下滴灌技术的发展提供借鉴。

**关键词:** 地下滴灌; 灌溉设计; 灌溉管理; 经济分析

**中图分类号:** S27514; S27516

**文献标识码:** A

**文章编号:** 100226819(2002)0220176206

地下滴灌是滴灌的一种重要形式。根据美国 A S A E 标准 S526 1(1996 年)“土壤与水基本概念”中地下滴灌的定义为“地下滴灌是指通过地表下灌水器(滴头)施水, 而灌水器流量范围与地表滴灌大致相同”<sup>[1]</sup>。它与地表滴灌相比, 有其显著的优点, 也存在许多缺点。全世界地下滴灌的面积在微灌中的比例还很小, 但由于地下滴灌的显著优点, 目前已经成为世界各国科学家研究的热点。本文就地下滴灌技术的发展与研究动态作一综述性的讨论。

## 1 地下滴灌的发展历程

美国加利福尼亚州的 Charle Lee 在 1920 年申请了一个多孔灌溉瓦罐的技术专利, 被认为是世界上最早的地下滴灌技术。二次世界大战后, 塑料工业的迅速发展加快了滴灌技术在美国、以色列英国等发达国家的发展。到 1959 年, 地下滴灌已在美国成为滴灌的重要组成部分。20 世纪 60 年代, 用 PE 和 PVC 制造的多孔管、缝隙管, 以及管上滴头已经用于地下滴灌。到 1970 年, 世界各地进行了较大规模的田间试验。用于地下滴灌试验的主要灌溉作物包括柑橘、甘蔗、菠萝、鳄梨等果树, 棉花、玉米、土豆、蔬菜等大田作物, 以及草地等<sup>[2~6]</sup>。通过这些试验, 也发现地下滴灌存在的诸多问题, 如灌水均匀性差, 滴头容易堵塞, 作物根系有可能穿破毛管, 系统维护困难等。

20 世纪 80 年代早期, 由于科学技术的飞速发展, 材料和设备费用的降低, 系统可持续运行多年, 使得地下滴灌系统的年平均投资成本大大下降。而且没有系统回收、重铺设等作业, 使系统维护成本及

劳动量减少, 因此又引起了人们的重视和关注。在这段时间内, 人们的主要研究兴趣集中在系统毛管适宜的埋深和毛管间距、肥料和化学药品注入设备与技术、地下滴灌与作物产量、水分入渗等方面。到 20 世纪 80 年代, 有些地方已经成功使用了地下滴灌系统近 10 年, 而且性能良好<sup>[4]</sup>。当地的研究和技术人员提出了一整套地下滴灌系统的设计、安装、管理和维护的技术资料, 为推广使用地下滴灌系统提供了有力的帮助。20 世纪 90 年代后, 人们对地下滴灌技术的研究兴趣大增, 主要研究集中于以下几个方面。

### 1.1 地下滴灌对作物产量的影响

现有的地下滴灌试验研究报告结果表明, 与其它灌水方法相比较, 地下滴灌的作物产量均高, 起码不会降低。美国佛吉尼亚州对花生、玉米和棉花等进行了试验<sup>[2,3]</sup>, 结果表明, 当使用含钠离子水进行灌溉时, 地下滴灌的花生产量高于喷灌的花生产量, 而使用一般的灌溉水源, 花生产量没有增加; 玉米在该 2 种灌溉水质和灌溉方法下产量基本相同, 但地下滴灌节省了近 30% 的灌溉用水; 在粉壤土中地下滴灌的棉花产量高于沟灌的棉花产量, 而在沙土中, 2 种灌溉下棉花产量没有差别, 但是, 在 2 种土壤中, 地下滴灌要省水 40% 左右。1995 年 Henggeler 在美国得克萨斯州西部几个县的试验结果表明<sup>[4]</sup>, 地下滴灌棉花产量要比沟灌棉花产量增产 20% 左右。在美国夏威夷进行的试验结果表明<sup>[5]</sup>, 地下滴灌苜蓿产量与喷灌的产量相似, 但却节省了大量的喷灌田间作业费用; 地下滴灌甘蔗产量大大高于沟灌下的产量; 在沙土中地下滴灌甘蔗产量大于沟灌的产量, 而在沙壤土中, 2 种灌溉方式下的产量相似。

对于玉米、棉花、高粱、阔叶林、果树及园艺作物等大多数作物, 地下滴灌的产量均等于或高于其它灌溉方式下的产量。Phene 和 Beale 在 1976 年的研

收稿日期: 2001210222 修订日期: 2002202210

作者简介: 黄兴法, 博士, 副教授, 北京市清华东路 中国农业大学(东校区) 146 信箱, 100083

究表明,甜玉米的产量在地下滴灌下比在喷灌和沟灌下要高 12%~14%,与沟灌相比,西红柿产量高 20%<sup>[6]</sup>。美国亚历桑那州的试验结果表明<sup>[7]</sup>,地下滴灌下的甜瓜、洋葱、胡萝卜、得州甜玉米的产量没有增加。L Rubeiz 在 1989~1991 年的研究结果表明<sup>[8,9]</sup>,地下滴灌下的卷心菜产量比沟灌下的高 350%,胡瓜的产量比沟灌和地表滴灌下的高 35%。

以色列和美国加利福尼亚州的研究结果表明<sup>[10,11]</sup>,地下滴灌甜玉米产量增加;美国新墨西哥州的试验结果表明<sup>[12]</sup>,在一个试验地,地下滴灌土豆产量增加,而在其它试验地,产量则没有增加。美国加利福尼亚州还对西红柿、芦笋、土豆等进行试验,研究结果表明<sup>[13]</sup>,其地下滴灌的产量均有不同程度的增加,而其灌溉用水只占普通地表滴灌用水量的 50%~70%。

## 1.2 地下滴灌的毛管深度与间距

毛管埋深很少作为一个变量来进行试验处理,因此很难对毛管埋深对作物产量的影响作出评价或估计。地下滴灌下毛管埋深范围为 0102~0170 m (取决于土壤和作物类型)。对于土豆,De Tar 等<sup>[10]</sup>在 1996 年发现 0108 m (位于种子上面)和 0146 m (位于种子下面)的毛管埋深是比较合适的。如需要考虑地下滴灌系统多年使用和进行土壤耕作,则在安装地下滴灌系统时,毛管埋深宜为 012~017 m;如土壤不需要进行耕作(例如种植草地、苜蓿等),则毛管埋深宜为 011~014 m (取决于土壤类型和作物根层大小)。

影响毛管埋深的另一个因素是考虑作物种子的萌芽问题。在萌芽阶段,一般要使用喷灌或地面灌溉,这就需要 2 套灌溉系统,增加了投资费用,减小了经济回报率。如果在地下滴灌下,为使种子发芽而采用超量灌溉,有可能导致过大的深层渗漏问题以及对地下水环境造成影响,并增加了费用。一个可行的方法是在不影响其它作业及系统性能下,减少毛管埋深,使种子周围湿润而容易发芽。1990 年 Schwanke 等<sup>[14]</sup>在美国加利福尼亚州进行的西红柿地下滴灌试验,试验结果表明,毛管埋深为 0115 m 或 0123 m,种子播种深度为 12 mm 或 38 mm,日灌水量大于等于 015 $E_{tc}$ (腾发量),是最佳的组合,但是,在萌芽阶段需要采用地面灌溉使土壤表面湿润。一般,在粗质土壤上,毛管应放在不影响耕作,且较浅的位置上,同时应使得地表湿润最小。

毛管间距范围为 0125~510 m,草坪灌溉时采用较小的间距,蔬菜、果树、葡萄等的灌溉要用较大的间距。虽然土壤和作物类型都影响毛管间距的大小,但对于大多数均匀种植的条播作物,两行一条毛

管的间距(115 m 左右)比较适当。通常毛管铺设在两行的中间位置。对于在沙土中种植的高效益经济作物,或在干旱地区,一般毛管间距选取得较小。

## 2 地下滴灌灌溉管理

### 2.1 灌水频率

在试验研究中,人们对灌水频率的范围选取从 1 d 多次到 1 周 1 次。Caldwell 等人在 1994 年的研究表明<sup>[11]</sup>,灌水频率从 1 d 到 7 d,对玉米的产量没有明显的影响,当然土壤应使玉米的水分应力在可接受的范围内。Bucks 等在 1981 年的研究发现<sup>[12]</sup>,对洋葱进行日灌水要好于周灌水;而对于甜瓜,则是周灌水要好于日灌水。而埃及的 ElGindy 等在 1996 年的研究结果为日灌水的西红柿和黄瓜产量比每 3 d 灌水的要高<sup>[13]</sup>。

### 2.2 灌水量

灌水量与一般灌溉方法相类似,与计算或实测的参考作物  $E_T$ 、实际作物  $E_{Tc}$ 、皿测蒸发量  $P_E$ 、土壤水分散失量或土壤基质势(土水势)等参数成比例。而所有这些参数是根据作物产量( $Y$ )和 $\delta$ 或用水效率( $WUE$ )等来确定的。Fangmeir 等在 1989 年研究发现<sup>[15]</sup>,棉花耗水量( $CU$ )为水面蒸发量的 113 倍时产量最高;而  $CU = 110$  时,用水效率  $WUE$  达到最大。1994 年 Caldwell 等在美国堪萨斯州的研究发现<sup>[11]</sup>,当土壤水分亏缺量小于 20% 时,灌溉频率或灌水量的变化对玉米产量没有影响。Lamm 等在 1995 年的研究结果表明<sup>[16]</sup>,当灌水量大于作物腾发量( $E_{Tc}$ )的 0175 倍时,玉米的产量不再增加。当灌水量减少到  $(016 \sim 017)E_{Tc}$  时,只要灌溉能维持土壤在一定的水分亏缺水平上,棉花和玉米的产量或其作物水分应力变化很小(Hutmacher 等, 1995; Howell 等, 1997)<sup>[17,18]</sup>。以色列对棉花(Plaut 等, 1985)和美国佛吉尼亚州对玉米(Powell 和 Wright, 1993)<sup>[19,20]</sup>采用蒸发皿蒸发量来确定灌水量,一般为  $(014 \sim 110)P_E$ 。Bucks 等在 1981 年研究发现<sup>[12]</sup>,灌水量为  $110E_{Tc}$  时,甜瓜和洋葱的产量达到最高。Martin 等在 1996 年研究发现<sup>[7]</sup>,在有限供水条件下,土壤水分亏缺为 20%~45% 时,胡萝卜、菜花、莴苣、洋葱、西红柿等的产量变化不大。

## 3 地下滴灌系统的施肥施药

地下滴灌的一个主要优点是可在作物生长的不同阶段按所需的频率随时施加各种所需的化学药品,如养分肥料、氯化物、酸及杀虫剂等,而且直接放入地下滴灌系统中,施用成本低。高频度地少量施肥,可减少淋洗损失,尤其是氮素,从而减少施肥量。

良好的系统过滤设备及化学药品注射装置对防止系统滴头堵塞、延长系统寿命是至关重要的。在系统管理良好场合下,化学药品施用量主要取决于灌水水质、土壤条件和类型、作物生长等情况。氯化物和其他化学药品主要用来防止系统内的生物活动及微生物的繁殖生长。酸主要用来防止滴头内的化学沉淀。定期施用酸,可去除滴头内的化学沉淀物,并可控制系统内水的酸碱度(pH 值)。

有些科学家研究了施用特殊元素对提高作物产量或最高经济收益的影响。Bracy 等 1995 年对胡椒的试验及 Clark 等 1991 年对西红柿的地下滴灌试验结果表明<sup>[21,22]</sup>,N 肥施用量与产量间没有直接的联系,而 Neibling 和 Brooks 等 1995 年对土豆, Camp 等 1997 年对棉花的地下滴灌试验研究发现<sup>[23,24]</sup>,减少 N 肥施用量,却仍可保持相等的产量。Phene 和 Beale 等 1979 年的试验结果表明<sup>[25]</sup>,当 N 和 K 肥施用量一直增加到  $168 \text{ kg} \cdot \text{öhm}^{-2}$  时,甜玉米的产量随着施肥量的增加而增加,但当施肥量增加到  $336 \text{ kg} \cdot \text{öhm}^{-2}$  时,产量并不再增加。Phene 等 1986 年对土豆,Bar2Yosef 等 1991 年对甜玉米的试验发现<sup>[26,27]</sup>,即使土壤中 P 的含量已经很高,再施加 P 肥仍然能增加产量,但对棉花却没有这样的结果。Rubeiz 等在 1989~1991 年间的试验研究表明<sup>[26,27]</sup>,对白菜和夏南瓜也没有这样的结果。Rubeiz 等发现在石灰质土壤中施加尿素磷肥,埋深为 20 cm 的滴灌带内水中的 P 含量浓度较高,2 次施用可延长土壤中的可利用 P 含量。Chase 在 1985 年的试验中发现<sup>[28]</sup>,地下滴灌施用 P 肥比在地面上施撒 P 肥,生菜的产量更高。施肥 20 周以后,土壤中的 P 含量虽然很高,但在播种第二茬作物时仍然需施用更多的 P 肥。Mikkelsen 在 1989 年的研究中得出结论<sup>[29]</sup>:由于地下滴灌的水量直接在根区,因此需施用 P 肥;P 的分布主要取决于土壤颗粒、P 肥来源及其施用量,及灌水量等;当灌溉水中含有较高的 Ca 和 Mg 离子时,酸中的 P 可防止不溶性磷盐的沉积,减少滴头堵塞的机率;在施用前,必须对肥料和水质进行对比试验。

## 4 地下滴灌系统设计与评价

### 4.1 系统的设计、安装和管理

地下滴灌系统设计与地面滴灌基本相同,特别是水力计算和灌水均匀度的确定。但为了保证地下滴灌系统的寿命和减少系统故障,良好的过滤设备、频繁的系统冲洗(尤其是毛管的冲洗)、安装空气阀等措施是十分必要的。修复和更换地下滴灌系统部件比地面滴灌系统的要费时得多,成本也高很多。

地下滴灌系统的水分在土壤剖面上的分布与地面滴灌系统的有很大区别。Philip 在 1968 年<sup>[30]</sup>提出了地埋点源和球形的 2 维和 3 维非饱和水流的数学理论模型。Bavel 等在 1973 年提出了自动化地下滴灌系统的一维动态模拟模型。Gilley 和 Alfred 在 1974 年<sup>[31]</sup>把作物吸水模型与解析解结合起来,以确定毛管的埋深及间距,并对预测值与实测值进行了比较。Zachman 和 Thomas 在 1973 年<sup>[32]</sup>提出了地下线源的稳定入渗物理过程,并于 1974 年提出了其解析解。在 1977 年温室内种植有大麦和玉米的试验土槽中得到了类似的结果。Dirksen 在 1978 年<sup>[33]</sup>提出了稳定水头条件下,4 条等间距布置的滴灌带线源瞬态和稳态的水流过程,并将计算值与用 C 射线法测量值进行了比较。Warrick 等在 1980 年<sup>[34]</sup>提出了各种稳定地下水源形式下描述有根系吸水的三维线性土壤水流的数学模型。BenAsher 和 Phene 在 1993 年<sup>[35]</sup>提出了分析地表及地下滴灌系统水流的二维数学模型,模型的计算结果可用于系统设计的第一次近似取值,尤其对毛管埋深和滴头间距等参数的选取。Philip 在 1992 年<sup>[36]</sup>提出了在方形 4 点源下土壤饱和度的理论影响。Or 等在 1995 年<sup>[37]</sup>使用随机方法提出了把土壤水力特性与土壤基质势及相对饱和度之间联系在一起的分析表达式,该结果可用于确定水分传感器的数量及其放置位置,并于 1996 年提出了玉米在 4 个滴头配置下吸水特性及二维水流的参数模型。

过滤设备与地表滴灌相似,只不过地下滴灌系统的滴头堵塞可能性更加大一些,确定和更换地下滴灌的堵塞滴头比地表滴灌系统的更困难和昂贵。由于一般要求地下滴灌系统的滴头工作寿命较长(一般超过 10 年),因此,用于减少滴头堵塞的过滤技术就比地表滴灌系统的更重要一些。

### 4.2 系统的灌水均匀度

由于滴头埋入地下,不能直接观测和测量到其出水情况,因此,地下滴灌系统的灌水均匀度的测定还是比较困难。监测系统压力和流量变化对评定系统性能是很有用的。

Mitchell 在 1981 年<sup>[38]</sup>对已经使用了 5 年之久的地下滴灌系统进行了评价,结果发现多孔毛管的质量并没有退化,但其流量稍有减少;若使用无水氨水作为氮源的肥料,则系统支管流量减少得并不多。Warrick 和 Shani 在 1996 年<sup>[39]</sup>考虑了地下滴灌中土壤类型对系统流量的影响,并建议使用小流量滴头或压力补偿式滴头来改善系统灌水均匀度。对于空间上极度不均匀的土壤,Ruskin 等在 1990 年<sup>[40]</sup>提出将可控制释放的杀虫剂注入到塑料滴头中,以

防止根系的侵入, 本方法已经成功使用了近 10 年。Solomon 和 Jorgensen 在 1992 年<sup>[41]</sup>对草坪灌溉的各种滴头进行了评估, 发现只有 2 个没有根系侵入。Zoldoske 等在 1995 年<sup>[42]</sup>研究发现, 在塑料材料中拌入特定的杀虫剂而制成的滴头, 在经过 5 年的使用后, 仍没有任何根系侵入。

Phene 等在 1992 年<sup>[43]</sup>对使用了 9 年后的地下滴灌系统的几种毛管类型的灌水均匀度进行了测定, 并与用各种模型得到的预测值进行了比较, 结果表明, 在假设滴头的堵塞处于最低限度时, 这些模型可以精确地预测地下滴灌系统的灌水均匀度。Camp 等在 1997 年<sup>[24]</sup>对使用了 8 年后的地表及地下滴灌系统进行了评估, 发现由于在系统改进时土壤进入系统干、支管而造成滴头堵塞, 地下滴灌系统的灌水均匀度小于地表系统的。

## 5 地下滴灌系统的经济性和环境因素

Bosch 等在 1992 年<sup>[5]</sup>对美国佛吉尼亚州大田作物利用模拟结果得出, 地下滴灌与大型时针式喷灌相比, 只有在小面积(小于 30 hm<sup>2</sup>)的玉米和大豆地上, 经济效益才更好。1995 年 Dhuyvetter 等<sup>[44]</sup>在对美国堪萨斯州的玉米进行经济分析时发现, 地下滴灌系统的经济效益与系统初始投资、系统寿命、作物产量等关系很大, 一般不如大型时针式喷灌系统。Henggeler 等在 1996 年<sup>[45]</sup>研究发现, 由于水资源有限, 得克萨斯州的一个 195 hm<sup>2</sup> 的农场把沟灌改为地下滴灌, 结果产量增加, 且由于销售价格稳定, 农场收益大增。另一个影响灌溉经济效益的因素是水资源及其可利用率、水价随时间的变化等。今后, 尤其在干旱地区, 水资源的竞争越来越激烈, 因此不可能准确预测长远的水资源利用率及其价格变化。相反, 减少农业用水的供应, 使得对土壤水分保持及高效用水的要求越来越高, 从而对地下滴灌系统也会引起相应的足够重视。

整个生长季节频繁、少量的灌水管理技术, 可减少养分径流损失和淋洗到根区以下, 尤其对雨水充足足以引起地表径流和深层淋洗的地区。1995 年 Lamm 等<sup>[16]</sup>估计了他们在美国堪萨斯州实验地的深层渗漏情况, 并得出使用地下滴灌系统可使地表径流和深层渗漏损失达到最小的结论。Martin 和 Slack 在 1995 年<sup>[7]</sup>对亚历桑那州的西瓜进行试验后得出, 只要从根区排出的水中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的含量小于 10 mg/L, 则西瓜产量可获得最高。

## 6 地下滴灌系统的缺点

地下滴灌系统的最大缺点是滴灌系统埋入地

下, 对灌水器流量不能进行直接测量, 因而对系统灌水均匀度的评价非常困难; 系统发生故障时, 检查、维修时间长, 费用高, 要求对系统日常管理非常严格; 如果作物发芽阶段需要灌溉, 则应采用其他灌溉方法, 增加了系统投资成本; 应频繁冲洗支、毛管, 以去除管中积累的土壤颗粒等沉积物; 在系统中应安装空气阀, 减少毛管中的负压, 以免土壤颗粒进入滴头中。

频繁的系统冲洗、优质的过滤设备和技术、良好的灌溉水质、以及先进的灌溉运行管理是维持系统较长寿命的主要因素。

## 7 其它影响

地下滴灌系统的另一个被人们所关注的问题是, 系统使用薄壁毛管、地面机械的行走或土壤本身的硬化或倒塌使得毛管变形, 减少了系统流量及灌水均匀度。Hills 等在 1989 年报道<sup>[46]</sup>, 在实验室内单层或双层壁毛管截面从圆形变形为椭圆形时, 毛管流量减少, 水头损失增加, 毛管长度需作调整以保持系统的性能。Chase 等在 1985 年报道<sup>[47]</sup>, 毛管埋在 0108~ 0113 m 深度, 作物种植工具和机械通行造成了对毛管的机械损坏和压实破坏。Barth 和 Welsh 在 1995 年的 2 篇文章中<sup>[48, 49]</sup>, 建议在地下滴灌系统毛管底部安装塑料或金属材料的隔水层, 以改变土壤水分分布, 减少其垂直向下的运动, 增加水平流动。Brown 等在 1996 年研究发现<sup>[50]</sup>, 在毛管下安装一个 U 型聚乙烯带, 可使湿润面积向上移, 并变宽。有文章报道, 虫害对毛管构成了危害, 并建议毛管深度为 30 cm, 可减少虫咬。

由于地下滴灌系统在地表并没有灌溉, 因此可抑制杂草生长。1990 年 Grattan<sup>[51]</sup>在美国加利福尼亚州进行了对比试验, 有沟灌和喷灌并施以除草剂、地下滴灌但没有施用除草剂等处理, 结果发现地下滴灌抑制杂草生长的效果与沟灌和喷灌并施以除草剂的效果一样。当然此结果不适用于降雨量大的地区, 因为这样的地方, 光靠降雨就足以杂草的生长。

### [参 考 文 献]

- [1] ASAE Standards, S526.1. Soil and water terminology [S]. 43<sup>rd</sup> Ed. St Joseph, Mich: ASAE, 1996
- [2] Adam sen F J. Irrigation method and water quality effect on peanut yield and grade [J]. Agron J, 1989, 81(4): 589~ 593
- [3] Adam sen F J. Irrigation method and water quality effect on corn yield in the MidAtlantic Coastal Plain [J]. Agron J, 1992, 41(5): 837~ 843
- [4] Henggeler J C. A history of drip irrigated cotton in

- Texas[C]. Proc 5th Int'l Microirrigation Congress 1995, 669~ 674
- [5] Bosch D J, Powell N L, Wright F S. An economic comparison of subsurface microirrigation with center pivot sprinkler irrigation[J]. J of Prod Agric, 1992, 5(4): 431~ 437.
- [6] Phene C J, Beale O W. High frequency irrigation for water nutrient management in humid regions[J]. Soil Sci Soc Am J, 1976, 40(3): 430~ 436
- [7] Martin E C, Slack D C, Pegelow E J. Crop coefficients for vegetables in Central Arizona[C]. Int Conf on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling 1996, 381~ 386
- [8] Rubeiz I G, Oebker N F, Stroehlein J L. Subsurface drip irrigation and urea phosphate fertigation for vegetables on calcareous soils[J]. J Plant Nutrition, 1989, 12(12): 1457~ 1465
- [9] Rubeiz I G, Stroehlein J L, Oebker N F. Effect of irrigation methods on urea phosphate reactions in calcareous soils[J]. Commun Soil Sci Plant Anal, 1991, 22(5, 6): 431~ 435
- [10] DeTar W R, Brown G T, Phene C J, et al. Real time irrigation scheduling of potatoes with sprinkler and subsurface drip systems[C]. Proc Int Conf on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling 1996, 812~ 824
- [11] Caldwell D S, Spurgeon W E, Manges H L. Frequency of irrigation for subsurface drip irrigated corn[J]. Trans of the ASA E, 1994, 37(6): 1099~ 1103
- [12] Bucks D A, Erie L J, French O F, et al. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping[J]. Trans of ASA E, 1981, 24(6): 1482~ 1489
- [13] El-Gindy A M, El-Raby A M. Vegetable crop response to surface and subsurface drip under calcareous soil [C]. Proc Int Conf on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling 1996, 1021~ 1028
- [14] Schwankel L J, Grattan S R, Miyao E M. Drip irrigation burial depth and seed planting depth effects on tomato germination[C]. Proc 3rd Nat Irrigation Symp. 1990, 682~ 687.
- [15] Fangmeier D D, Garrot Jr D J, Husman S H, et al. Cotton water stress under trickle irrigation [J]. Trans of the ASA E, 1989, 32(6): 1955~ 1959
- [16] Lanm f R, H Manges L, Stone L R, et al. Water requirement of subsurface drip irrigated corn in northwest Kansas[J]. Trans of the ASA E, 1995, 38(2): 441~ 448
- [17] Hutmacher R B, Phene C J, Davis K D, et al. Evapotranspiration, fertility management for subsurface drip acala and pima cotton[C]. Proc 5th Int Microirrigation Congress 1995, 147~ 154
- [18] Howell T A, Schneider A D, Evett S R. Subsurface and surface microirrigation of corn Southern High Plain[J]. Trans of ASA E, 1997, 40(3): 635~ 641.
- [19] Plaut Z, Rom M, Meiri A. Cotton response to subsurface trickle irrigation[C]. Proc 3rd Int Drip Trickle Irrigation Congress, 1985, II 916~ 920
- [20] Powell N L, Wright F S. Grain yield of subsurface microirrigated corn as affected by irrigation line spacing[J]. Agron J, 1993, 86(6): 1164~ 1169
- [21] Bracy R P, Edling R J, Moser E B. Drip irrigation management and fertilization of bell pepper in a humid area [C]. Proc 5th Int Microirrigation Congress, 1995, 181~ 186
- [22] Clark G A, Stanley C D, Maynard D N. Surface vs subsurface drip irrigation of tomatoes on a sandy soil [C]. Proc Fla State Hort Soc, 1993, 106: 210~ 212
- [23] Neibling H, Brooks R. Potato production using subsurface drip irrigation water and nitrogen management [C]. Proc 5th Int Microirrigation Congress, 1995, 656~ 663
- [24] Camp C R, Bauer P J, Hunt P G. subsurface drip irrigation lateral spacing and management for cotton in the southeastern Coastal Plain[J]. Trans of the ASA E, 1997, 40(4): 993~ 999
- [25] Phene C J, Fouss J L, Sanders D C. Water nutrient herbicide management of potatoes with trickle irrigation[J]. Am Potato J, 1979, 56: 51~ 59
- [26] Phene C J, Bar-Yosef, Hutmacher B, et al. Fertilization of high yielding subsurface trickle irrigated tomatoes[C]. Proc 34th Ann Calif Fertilizer Conf, 1986, 33~ 43
- [27] Bar-Yosef B, Phene C J, Hutmacher R B. Plants response to subsurface trickle fertigation[R]. BARD Project No. I21116286 Final Report Bet Dagan, Israel, 1991.
- [28] Chase R G. Subsurface trickle irrigation in a continuous cropping system [C]. Proc 3rd Int Drip Trickle Irrigation Congress, 1985, II 909~ 914
- [29] Mikkelsen R L. Phosphorous fertilization through drip irrigation[J]. J Prod Agric, 1989, 2(3): 279~ 286
- [30] Philip J R. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities [J]. Water Resour Res, 1968, 4(5): 1039~ 1047.
- [31] Gilley J R, Allred E R. Infiltration and root extraction from subsurface irrigation laterals [J]. Trans of the ASA E, 1974, 17(5): 927~ 933
- [32] Zachmann D W, Thomas A W. A mathematical

- investigation of steady infiltration from line sources [J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1973, 37(4): 495~ 500
- [33] Dirksen C. Transient and steady flow from subsurface line sources at constant hydraulic head in anisotropic soil[J]. *Trans of the ASA E*, 1978, 21(5): 913~ 919
- [34] Warrick A W, Lomen D O, Amoozegar Fard A. Linearized moisture flow with root extraction for 3 dimensional, steady conditions[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1980, 44(5): 911~ 914
- [35] Benasher J, Phene C J. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model [M]. *Subsurface Drip Irrigation Theory, Practice and Application*. St Joseph, Mich: Irrigation & Drainage Press, 1993, 185~ 202
- [36] Philip J R. What happens near a quasi-linear point source [J]? *Water Resour Res*, 1992, 28(1): 47~ 52
- [37] Or D. Soil water sensor placement and interpretation for drip irrigation management in heterogeneous soil [C]. *Proc 5th Int Microirrigation Congress*, 1995, 214~ 221.
- [38] Mitchell W H. Subsurface irrigation and fertilization of field corn[J]. *Agron J*, 1981, 73(6): 913~ 916
- [39] Warrick A W, Shani U. Soil limiting flow from subsurface emitters II Effects on uniformity[J]. *J Irrigation Drainage Engineering*, 1996, 122(5): 296~ 300
- [40] Ruskin R, Van Voris P, Cataldo D A. Root intrusion protection of buried drip irrigation devices with slow-release herbicides [C]. *Proc 3rd Nat Irrigation Symp*, 1990, 211~ 216
- [41] Solomon K H, Jorgensen G. Subsurface drip irrigation[J]. *Grounds Maintenance*, 1992, 27(10): 24~ 26
- [42] Zoldoske D F, Genito S, Jorgensen G S. Subsurface drip irrigation (SDI) on turfgrass: A university experience [C]. *Proc 5th Int Microirrigation Congress*, 1995, 300~ 302
- [43] Phene C J, Yue R, Wu I P, et al. Distribution uniformity of subsurface drip irrigation system [C]. St Joseph, Mich: 1992, A SAE Paper No. 922569
- [44] Dhuyvetter K C, Lamm F R, Rogers D H. Subsurface drip irrigation (SDI) for field corn: an economic analysis [C]. *Proc 5th Int Microirrigation Congress*, 1995, 395~ 401.
- [45] Hengler J, Kinniburgh J, Multer W, et al. Economic impact resulting from the adoption of drip irrigation cotton [R]. *Result Demonstration Report*, College Station, Tex: Texas Agric Ext Serv, Texas A&M University, 1996
- [46] Hills D J, Nawar F M, Waller P M. Effects of chemical clogging on drip-tape uniformity [J]. *Trans of the ASA E*, 1989, 32(4): 1202~ 1206
- [47] Chase R G. Phosphorus application through a subsurface trickle system [C]. *Proc 3rd Int Drip & Trickle Irrigation Congress*, 1985, 393~ 400
- [48] Barth H K. Resources conservation and preservation through a new subsurface irrigation system [C]. *Proc 5th Int Microirrigation Congress*, 1995, 168~ 174
- [49] Welsh D F, Kreuter U P, Byles J D. Enhancing subsurface drip irrigation through vector flow [C]. *Proc 5th Int Microirrigation Congress*, 1995, 688~ 693
- [50] Brown K W, Thomas J C, Friedman S, et al. Wetting patterns associated with directed subsurface irrigation [C]. *Proc Int Conf on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, 1996, 806~ 811.
- [51] Grattan S R, Schwankl L J, Lanini W T. Distribution of annual weeds in relation to irrigation method [C]. *Proc 3rd Nat Irri Symp*, 1990, 148~ 153

## Present Situation and Development of Subsurface Drip Irrigation

Huang Xingfa, Li Guangyong

(China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Water saving in agriculture becomes more and more urgent task in the world due to the shortage of global water resources. Subsurface drip irrigation (SDI) is one of the water saving irrigation system, with its obvious advantages and some disadvantages. The paper discusses development of SDI, its effect on crop yield, research focus, system design and management, irrigation scheduling, fertigation, analysis of environment and economics, advantage and disadvantages of SDI system, etc. It will be helpful for development of SDI technology in China.

**Key words:** subsurface drip irrigation (SDI); irrigation system design; irrigation management; economic analysis