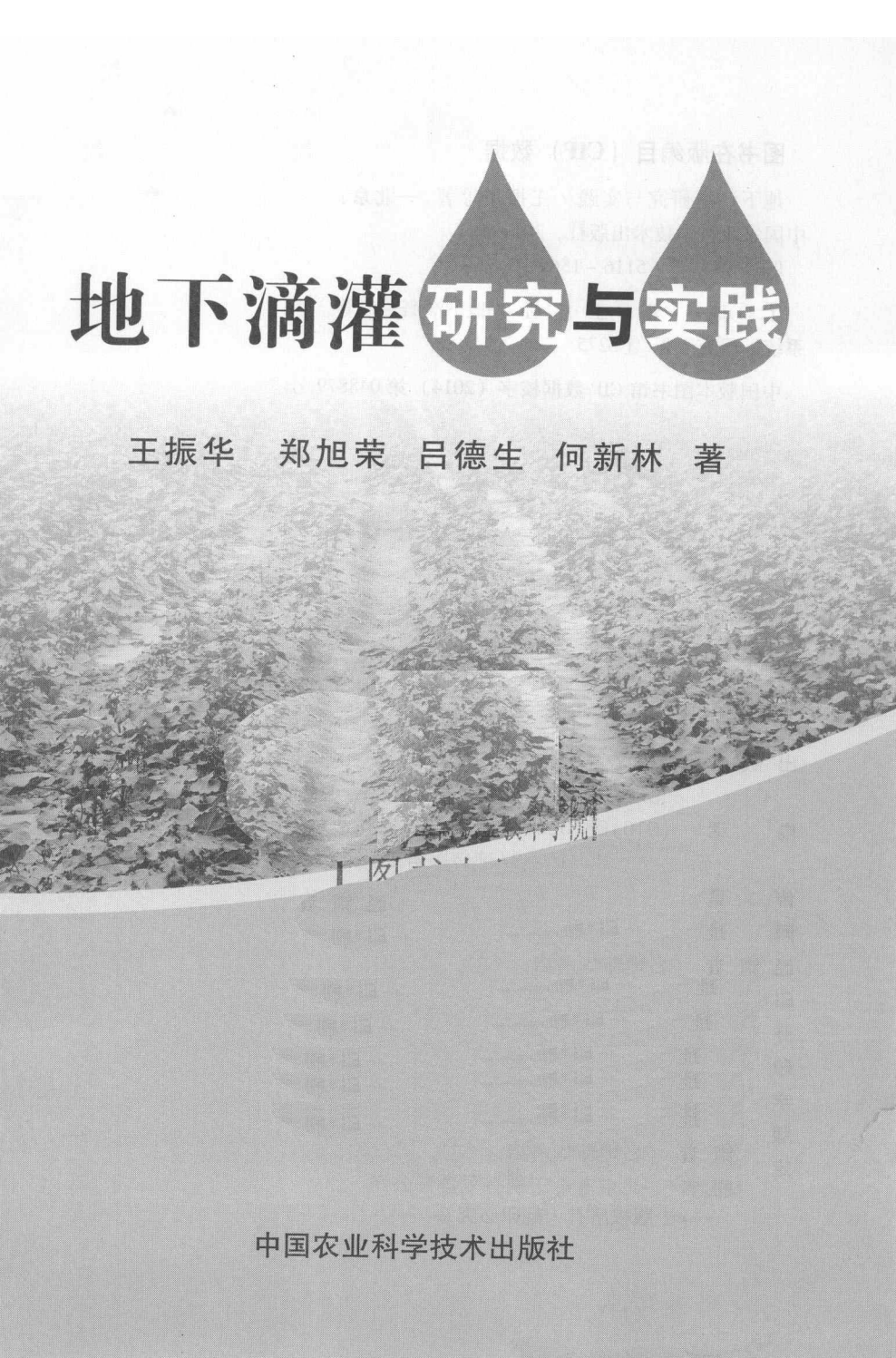


地下滴灌研究与实践

王振华 郑旭荣 吕德生 何新林 著



中国农业科学技术出版社



地下滴灌研究与实践

王振华 郑旭荣 吕德生 何新林 著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

地下滴灌研究与实践 / 王振华等著. —北京:
中国农业科学技术出版社, 2014. 5

ISBN 978 - 7 - 5116 - 1565 - 7

I. ①地… II. ①王… III. ①地下灌溉 - 滴管
系统 - 研究 IV. ①S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 048879 号

责任编辑 李冠桥
责任校对 贾晓红

出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081
电 话 (010)82106632(编辑室) (010)82109702(发行部)
(010)82109703(读者服务部)
传 真 (010)82106625
网 址 <http://www.castp.cn>
经 销 者 各地新华书店
印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司
开 本 850mm × 1 168mm 1/32
印 张 16. 25
字 数 451 千字
版 次 2014 年 5 月第 1 版 2014 年 5 月第 1 次印刷
定 价 48. 00 元

内容简介

本书围绕地下滴灌土壤水盐运动规律、地下滴灌毛管设计参数、北疆地下滴灌棉花耗水规律、无膜移栽地下滴灌棉花灌溉制度、地下滴灌棉花水肥高效利用技术、新疆维吾尔自治区（全书简称新疆）地下滴灌棉花应用实践等内容进行论述，并按以上内容分为六章。

本书可作为农业水土工程、作物栽培学、土壤物理等专业的研究生和高年级本科生的参考教材，也可供相关专业科研、教学和工程技术人员参考。

前 言

水资源的短缺已成为制约我国经济可持续发展的主要因素，大力推广节水灌溉技术是党中央和国务院的重大战略决策。在我国尤其是在地处干旱半干旱地区的新疆认真研究并大力推广先进的农业节水灌溉技术意义十分重大。近年来，随着科学的进步和社会的发展，新疆生产建设兵团（以下简称兵团）紧跟时代步伐，不断引领节水潮流，使得兵团的节水灌溉事业取得了令人瞩目的巨大成就，在棉花等经济作物上已大面积推广应用先进的灌溉方式之一的膜下滴灌技术。2001年，兵团又开始在棉花作物上试验应用另一种更加复杂、水利用效率也更高的地下滴灌技术。

地下滴灌技术在国外已较为成熟，美国、澳大利亚和以色列等灌溉先进国家大面积推广应用地下滴灌技术已有几十年历史，面积超过 $1.34 \times 10^5 \text{hm}^2$ 。由于新疆维吾尔自治区有许多盐碱荒地和盐碱农田，面积已达 $2.18 \times 10^7 \text{hm}^2$ ，在约 $4.08 \times 10^6 \text{hm}^2$ 耕地面积中，受不同程度盐化危害的面积约为 $1.23 \times 10^6 \text{hm}^2$ ，占耕地面积的 30.12%，占低产田面积的 63.20%。改造和利用这些土地资源，防止次生盐渍化的发生是新疆农业可持续发展的重要内容。新疆属于典型的温带大陆性气候，夏季炎热，冬季寒冷，寒暖交替剧烈，昼夜温差大，降水量极少，全疆平均年降水量仅为 147.4mm，蒸发强烈，平均蒸发强度高达 1512.1mm，更具特色的是，新疆有着丰富的天然盐源，在全疆许多地区都分布着含有大量盐类的白垩纪和第三纪地层，这些都为易溶性盐分在土壤中大量聚集创造了极为有利的条件。

因此，新疆农业节水和土壤水盐调控对农业发展均举足轻重，节水灌溉及土壤水盐运移问题越来越引起人们的高度重视，虽然已经有很多专家学者对土壤水盐运移问题进行了研究，并取

得了一些研究成果,但对于地下滴灌条件下田间的土壤水盐运移问题及地下滴灌棉花需水规律等问题的研究国内还比较少,一些根据室内试验得出的水盐运移模型等有关成果,由于没有和实践紧密的结合,还不足以用来了解和预测田间水盐的实际动态,尚不能指导生产实践。

本书紧密结合新疆兵团棉花地下滴灌示范区,先后在科技部农业科技成果转化资金项目“农业高效用水智能化调控技术集成应用(02EFN216510668)”、国家自然科学基金项目“新疆无膜移栽地下滴灌棉花需水规律研究(50809039)”、兵团农业科技攻关项目“地下滴灌棉花适宜灌溉控制指标及灌溉制度示范(2006YD27)”、石河子大学重大科技攻关项目“干旱区绿洲地下滴灌棉花关键技术集成研究(gxji2006-zdgg01)”、石河子大学自然科学研究项目“新疆棉花地下滴灌灌溉制度研究(ZRKX2005078)”与“新疆棉花地下滴灌毛管适宜设计参数研究(ZRKX2006-Q16)”、石河子大学高层次人才科研启动专项“新疆地下滴灌棉花水肥高效利用研究(RC-ZX200539)”等科研专项的资助下,系统研究了地下滴灌土壤水盐运动规律、地下滴灌毛管设计参数、北疆地下滴灌棉花耗水规律、地下滴灌棉花水肥高效利用技术,并对新疆地下滴灌棉花应用实践进行了指导及跟踪调研。

本书同时针对近年来新疆农业节水灌溉迅速发展中存在的日益严重的残膜污染问题,结合地下滴灌技术的特点,地下滴灌浅层干燥土壤将湿润土壤与干燥空气相隔离,无需采用覆膜技术即可达到抑制蒸发的目的,从而不存在白色污染问题,本书提出将棉花无膜移栽技术与地下滴灌技术相结合,形成一种新的集成创新技术——无膜移栽地下滴灌技术。通过两年盆栽、测坑和小区棉花栽培试验,证实了该技术的可行性,并对无膜移栽地下滴灌棉花耗水规律及灌溉制度进行了研究,制定了适合于北疆的无膜移栽棉花地下滴灌灌溉制度。研究成果将为盐碱地地下滴灌系统的设计、棉花灌溉制度的制定和田间水分管理提供科学依据,并对地下滴灌技术今后的理论研究和推广应用提供依据和重要参考。

本书相关研究成果先后在新疆生产建设兵团第五师 90 团、新疆生产建设兵团灌溉中心试验站、石河子大学节水灌溉试验站暨现代节水灌溉兵团重点实验室、石河子大学水利建筑工程学院水工试验大厅和灌溉排水实验室开展有关试验研究，对相关试验单位给予我们大力支持和帮助的有关同志表示衷心的感谢。

本书各章编著人员分工如下：第一章的地下滴灌土壤水盐运动规律由王振华、吕德生、温新明负责；第二章的地下滴灌毛管设计参数由王振华、温新明、任杰负责；第三章的北疆地下滴灌棉花耗水规律由王振华、温新明、安俊波负责；第四章的无膜移栽地下滴灌棉花灌溉制度由何新林、王振华、雷成霞负责；第五章的地下滴灌棉花水肥高效利用技术由郑旭荣、王振华、刘洪光负责；第六章的新疆地下滴灌棉花应用实践由王振华、郑旭荣、张金珠负责；全书统稿由王振华负责。参加本书相关科研课题的主要成员主要包括石河子大学水利建筑工程学院的王振华、郑旭荣、何新林、吕德生、刘洪光、任杰、安俊波、雷成霞、张金珠、吕廷波等，新疆生产建设兵团 222 团的温新明等，本书是对上述项目组成员研究成果的高度总结，其中包括了他们的研究成果。为本书相关成果提供指导和帮助的还包括石河子大学水利建筑工程学院的李明思、范文波、刘焕芳、刘建军、汤骅、王京、赵丽、李强、李恺、邢海峰、王建新、王艳云、刘贞姬、宗全利、杨海梅、李玉芳等，石河子大学节水灌溉试验站的王义华，新疆生产建设兵团水利局的杨贵森、李宁、宋建峰、谢云等，新疆生产建设兵团第五师 90 团的胡同军、段守明、刘卫国等，新疆农垦科学院的陆朝阳，新疆农业科学院的丁峰等，还有当时的一些研究生如魏闯、李朝阳、宁理科、宋常吉、王俊亭、胡苏翔、王一民、陈书飞、杨慧慧、李莎、孙敏、葛宇、贾文俊、李东伟、龚婷婷等，本书还参考了其他单位和个人的研究成果，均在参考文献中标注，在此一并表示感谢！

在本书成稿之际，向所有为本书出版提供支持和帮助的同仁表示衷心感谢。由于时间及经费所限，所取得的研究成果仅仅涵

盖了地下滴灌技术的一部分内容，而且相关研究仍需深入开展，对有些问题的认识还有待进一步深入。同时，囿于地域偏隅、学识视野和水平所限，在撰写中难免有疏漏和不妥之处，恳请同行专家批评指正。

作者 李

2014 年 2 月 28 日

目 录

第一章 地下滴灌土壤水盐运动规律	(1)
第一节 地下滴灌土壤水盐运动规律研究综述	(1)
一、问题的提出及研究的目的和意义	(1)
二、国内外研究现状	(4)
第二节 室内地下滴灌土壤水盐运移规律	(19)
一、试验材料与仪器	(19)
二、试验内容与方法	(19)
三、试验结果与分析	(21)
四、本节小结	(47)
第三节 棉田地下滴灌土壤水盐运移规律	(48)
一、试验地点概述	(48)
二、试验仪器、内容与方法	(49)
三、试验结果与分析	(50)
四、本节小结	(83)
第四节 结论与展望	(85)
一、主要研究结论	(85)
二、有待进一步研究的问题	(86)
第二章 地下滴灌毛管设计参数	(88)
第一节 绪论	(88)
一、问题的提出及研究的目的和意义	(88)
二、地下滴灌的发展及应用概况	(90)
三、土壤水分运动研究发展概况	(93)

四、地下滴灌条件下土壤水分运动研究动态	(95)
第二节 试验概况	(103)
一、试验材料与仪器	(103)
二、试验内容与方法	(104)
第三节 试验结果与分析	(106)
一、流量对地下滴灌土壤水分运动规律的影响	(106)
二、毛管埋深对地下滴灌土壤水分运动的影响	(119)
三、灌水量对地下滴灌土壤水分运动的影响	(131)
四、土壤初始含水率对地下滴灌土壤水分运移的 影响	(139)
五、覆膜对地下滴灌土壤水分运动的影响	(147)
六、地下滴灌灌水频率对土壤水分运移的影响	(149)
七、本章小结	(155)
第四节 结论与展望	(159)
一、结论	(159)
二、展望	(161)
第三章 北疆地下滴灌棉花耗水规律	(162)
第一节 绪论	(162)
一、问题的提出和研究目的及意义	(162)
二、研究领域国内外研究动态及发展趋势	(166)
三、本章小结	(195)
第二节 试验材料与方法	(196)
一、试验地概况	(196)
二、试验方法、装置及材料	(197)
三、观测内容和方法	(201)
四、土壤水分测定仪器的标定	(206)
五、土壤参数测定	(210)
六、棉花耗水量的计算	(212)

七、观测资料整理与统计分析	(213)
第三节 不同栽培方式对棉花生长的影响	(213)
一、不同栽培方式对棉花形态指标的影响	(213)
二、不同栽培方式对棉花籽棉产量和品质的影响	(228)
三、本节小结	(229)
第四节 不同灌水处理对无膜移栽地下滴灌棉花的 影响	(230)
一、不同灌溉定额对无膜移栽地下滴灌棉花形态的 影响	(230)
二、不同灌溉定额对无膜移栽地下滴灌棉花产量的 影响	(233)
三、不同灌水次数对无膜移栽地下滴灌棉花形态的 影响	(234)
四、不同灌水次数对无膜移栽地下滴灌棉花产量的 影响	(236)
五、本节小结	(237)
第五节 无膜移栽地下滴灌棉花耗水规律研究	(238)
一、全生育期不同深度土层水分动态变化	(238)
二、不同灌溉定额下无膜移栽地下滴灌棉花不同生育期 土壤水分动态变化	(241)
三、不同灌溉定额下无膜移栽地下滴灌棉花耗水 规律	(251)
四、不同灌水次数对不同灌溉定额处理小区棉花土壤水 分动态变化的影响	(255)
五、灌水次数对不同灌溉定额下无膜移栽地下滴灌棉花 耗水规律的影响	(260)
六、盆栽滴灌棉花土壤耗水变化特征	(265)
七、本节小结	(273)

第六节 水分生产函数及灌溉制度研究	(276)
一、无膜移栽地下滴灌棉花水分生产函数研究	(276)
二、无膜移栽地下滴灌棉花灌溉制度的初步拟定	(281)
三、本节小节	(281)
第七节 结论与展望	(282)
一、结论	(282)
二、展望	(283)
第四章 无膜移栽地下滴灌棉花灌溉制度	(285)
第一节 绪论	(285)
一、研究的背景及意义	(285)
二、国内外研究动态及存在的问题	(287)
三、论文研究的主要内容	(295)
第二节 试验材料与方法	(297)
一、试验地概况	(297)
二、试验布设与方案	(298)
三、观测项目与方法	(303)
四、观测资料的整理与统计分析	(306)
第三节 地下滴灌无膜移栽棉花生长发育特征研究	(306)
一、不同种植模式对棉花形态指标和产量的影响	(306)
二、移栽时机对地下滴灌无膜移栽棉花形态指标和产量的影响	(313)
三、缓苗期水分、地温对棉花生长及产量的影响	(322)
四、灌水次数对地下滴灌无膜移栽棉花形态和产量的影响	(325)
五、灌溉定额对棉花形态指标和产量的影响	(333)
六、本节小结	(337)
第四节 地下滴灌无膜移栽棉花需水规律研究	(338)
一、棉花需水量的计算公式	(339)

二、各处理棉花土壤水分变化及需水量	(340)
三、需水量与地上部干物质积累的关系分析	(343)
四、本节小结	(349)
第五节 地下滴灌无膜移栽棉花灌溉制度研究	(350)
一、作物水分生产函数	(350)
二、地下滴灌无膜移栽棉花灌溉制度的初步制定	(356)
三、本节小结	(357)
第六节 结论与展望	(357)
一、结论	(357)
二、展望	(359)
第五章 地下滴灌棉花水肥高效利用技术	(360)
第一节 绪论	(360)
一、高效节水农业发展概况	(361)
二、水肥耦合理论的研究进展	(368)
第二节 试验内容与试验设计	(373)
一、试验地点、材料	(373)
二、研究内容与试验方法	(376)
三、棉花的播种出苗情况	(380)
第三节 同一施肥水平下灌水对棉花生长的调控效应	(381)
一、不同处理棉花体内的含 N 浓度	(381)
二、各生育阶段耗水变化	(385)
三、棉花的生长状态	(391)
四、棉花的产量	(395)
五、本节小结	(402)
第四节 同一灌水水平下施肥对棉花生长的调控效应	(403)
一、不同处理棉花体内的含 N 浓度	(403)
二、不同施肥处理棉花的耗水变化	(409)
三、棉花的生长状态	(414)

四、棉花产量	(418)
五、本节小结	(427)
第五节 地下滴灌棉花水肥耦合效应	(428)
一、地下滴灌棉花籽棉产量水肥耦合作用	(429)
二、地下滴灌棉花干物质产量水肥耦合作用	(432)
三、地下滴灌棉花单铃重水肥耦合作用	(436)
四、地下滴灌棉花 100 株铃数水肥耦合作用	(440)
五、地下滴灌棉花生育期长度水肥耦合作用	(444)
第六节 结论、存在问题与展望	(448)
一、结论	(448)
二、讨论	(449)
三、展望	(450)
第六章 新疆地下滴灌棉花应用实践	(451)
第一节 新疆兵团棉花地下滴灌应用现状与发展探讨 ...	(451)
一、地下滴灌应用现状	(451)
二、应用地下滴灌存在的问题	(452)
三、应用地下滴灌的建议与思考	(455)
四、本节小结	(457)
第二节 非充分灌溉对地下滴灌棉花根系生长分布的 影响	(457)
一、试验内容与方法	(458)
二、试验结果与分析	(458)
三、本节小结	(463)
第三节 地下滴灌对棉花生理性状及产量的影响	(464)
一、地下滴灌与膜下滴灌下棉花的生育期对比 分析	(464)
二、地下滴灌与膜下滴灌下棉花的生理性状对比 分析	(465)

三、地下滴灌与膜下滴灌下棉花的产量对比分析	(466)
四、地下滴灌与膜下滴灌生理性状及根系分布对比 分析	(468)
五、本节小结	(470)
第四节 北疆无膜移栽地下滴灌棉花灌溉控制指标	(470)
一、试验材料与方法	(471)
二、试验结果及分析	(471)
三、本节小结	(479)
第五节 大田地下滴灌棉花水肥管理控制指标	(480)
一、研究方法	(480)
二、结果分析	(481)
三、本节小结	(484)
第六节 大田地下滴灌棉花灌溉制度应用	(485)
一、无膜移栽地下滴灌棉花与现行膜下滴灌棉花综合 效益对比分析	(491)
二、本节小结	(495)
主要参考文献	(497)

第一章 地下滴灌土壤水盐运动规律

第一节 地下滴灌土壤水盐运动规律研究综述

一、问题的提出及研究的目的和意义

人口爆炸、环境污染、水资源短缺,已严重威胁到人类的生存和进步,成为当今世界发展的三大难题。目前,全球已有 80 多个国家步入缺水国行列,有 23 亿人缺少合格的饮用水。进入 21 世纪,几乎世界上所有的大城市都将面临缺水危机,这种状况持续下去,就可能发生像 20 世纪 70 年代“石油危机”那样的“淡水危机”,下个世纪的战争将会是由水而不是由石油或政治原因引起的,这将直接影响世界的安全与稳定。

按我国的淡水总量来说,虽居世界前列,但人均拥有量却仅居世界第 109 位,约为世界人均占有量的 1/4。目前,已有 300 个大中城市缺水,40 个城市严重缺水,被列为 13 个贫水国之列。因而水资源的缺少已成为我国经济可持续发展的主要制约因素。而在我国占总用水量 80% 的农业,渠系水利用系数平均仅为 40%,用水浪费严重,节水潜力巨大。

因此,在我国,认真研究、大力推广农业节水灌溉技术意义重大。而处于内陆干旱地区缺水最严重的省区——新疆目前的水资源可利用总量为 $6.82 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (包括平原区生态环境需水量),从长远分析看,新疆的可利用水资源总量为 $7.58 \times 10^{11} \text{ m}^3$,而现已引用 $5.19 \times 10^{11} \text{ m}^3$,为最终可利用量的 68.4%,开发程度已经很高。而农业又是新疆的特大用水户,农业用水量占总供水量的 95% 以上,并且浪费现象极为严重,因此,在新疆大力研究和发

展并推广应用先进的节水灌溉技术显得尤为重要和必要。

在现有的农田节水灌溉技术中，滴灌技术是目前世界上最先进的灌溉方式之一，技术成熟，设备过关，已经用于大田生产，新疆生产建设兵团（全书简称新疆兵团）在棉花等经济作物上已经大面积的推广应用，节水效果显著。并且目前世界上滴灌技术正向自动化、智能化方向发展。

地下滴灌（subsurface drip irrigation, SDI）可能是目前最复杂、效率也最高的灌溉方法，也最适合自动化和智能化控制，在目前全世界所有的灌溉技术中，SDI 技术能够使作物产量和水利用率（water use efficiency, WUE）同时达到最佳。SDI 是在低压条件下，通过埋于作物根系活动层的灌水器，根据作物的生长需水规律定时、定量向土壤中渗水供给作物，由于灌水过程中对土壤结构扰动较小，有利于保持作物根系层疏松通透的土壤环境，并且最大程度地减少了土壤水分地面蒸发的损失，病、虫、草害明显减少，因此，地下滴灌更具有节水、增产、降耗等效益。同时田间输水系统埋地后便于田间作业，埋地管材抗老化增强，成本降低，使用寿命延长，建成后不再每年投入，年直接运行成本大为降低，综合运行成本也低于现有的地面滴灌。它不仅在机理上、技术上、经济上，而且在维护生态环境和保护水资源方面都被认为是最具发展前途的节水灌溉技术。

地下滴灌是近几年美国、澳大利亚和以色列等灌溉先进国家广泛推广的一种新的滴灌技术，即滴灌毛管铺设在耕作层以下，将农作物所需要的水肥直接灌溉到作物根部，有利于作物生长，减少土壤水分蒸发，延长滴灌毛管的使用寿命，同时减少大田作物耕种时，滴灌毛管的铺设和回收等机械和人工作业，降低劳动和运行管理成本，该系统适合棉花、玉米、番茄、马铃薯等大田条播作物，美国、澳大利亚和以色列等国家大面积推广地下滴灌技术已有十几年历史，应用面积 200 多万亩，该技术在海外已较为成熟。2002 年在国内首先示范推广，实现了国内地下滴灌大面积应用零的突破，到 2004 年安装应用推广超过 10 万亩。