

“九五”国家重点科技攻关项目专著

田间节水灌溉新技术 研究与应用

许迪 李益农 程先军 谢崇宝
刘群昌 黄斌 李福祥
编著

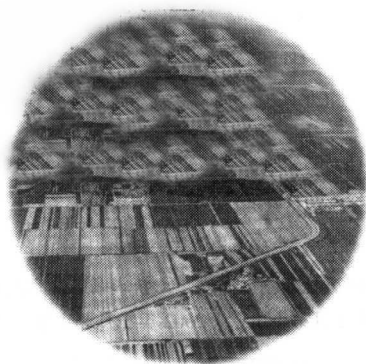


中国农业出版社

“九五”国家重点科技攻关项目专著

田间节水灌溉新技术 研究与应用

许 迎 李益农 程先军 谢崇宝 编著
刘群昌 黄 斌 李福祥



中国农业出版社

北京 100026
北京 100026

SB2100/02

图书在版编目 (CIP) 数据

田间节水灌溉新技术研究与应用/许迪等编著. —北京: 中国农业出版社, 2001.11

“九五”国家重点科技攻关项目专著

ISBN 7-109-07286-X

I. 田... II. 许... III. 节约用水—灌溉—新技术
IV. S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 071553 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 沈镇昭

责任编辑 赵立山 黄光利

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/32 印张: 7.25

字数: 195 千字 印数: 1~1000 册

定价: 30.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是中国水利水电科学研究院水利研究所承担的“九五”国家重点科技攻关计划项目专题“田间节水灌溉新技术研究”的研究成果。主要内容涉及到地下滴灌技术、波涌灌溉技术和水平畦田灌溉技术，详细论述了产品设备的研制开发、田间灌水设计参数与方法的确定、田间适应性分析、示范应用效果及效益等，既包括应用技术研究，又含有实际应用的效果分析。

本书资料翔实，内容丰富，具有技术与实地应用相结合的显著特点，可供广大从事节水灌溉技术应用研究和推广应用的科技人员和相关专业的大专院校师生参考。

前言

水资源短缺已成为我国国民经济和社会可持续发展的严重制约因素。由于农业用水约占全国总用水量的 70%，故农业节水在我国整个节水工作中处于最重要、最核心、最关键的地位。我国农业缺水问题在很大程度上要靠节水解决，发展农业节水技术是保障未来我国人口高峰期食品安全、水安全和生态安全的重要支撑条件与措施。

农业节水技术通常由节水灌溉技术、节水农艺技术和灌溉用水管理技术构成，主要应用于以下四个基本环节：一是减少渠系（管道）输水过程中的水量蒸发渗漏损失，提高灌溉水的输水效率；二是减少在田间灌溉过程中的水分深层渗漏和地表流失量，提高灌溉水的利用率；三是储水保墒，减少来自农田土壤的水分蒸发损失；四是减少作物的水分奢侈性蒸腾消耗，提高作物水分生产效率，获取较高产量和效益。其中节水灌溉技术主要由灌溉输水技术（渠道防渗、低压管道输水、田间闸管输水等）和田间节水灌溉技术（地面灌溉、喷灌、微灌等）等组成。在节水型用水管理状况下，采用高效输水工程将灌溉水送到田间后，对水的利用率主要取决于在田间实施的灌水技术与方法。借助各种田间灌水方法和灌溉设备与机具，把

水适量均匀地分配到作物根区土壤的同时又尽量减少深层渗漏是田间节水灌溉技术要解决的关键问题。

我国农业用水的绝大部分用于农田灌溉。由于灌溉过程中普遍存在着供水输配水系统效率偏低、灌区用水管理技术粗放、田间灌水方法落后、灌排工程不配套和老化失修等一系列突出问题，致使全国灌溉水的平均利用率仅有40%左右。这不仅造成灌溉用水的浪费和能源的无效消耗，还带来土壤盐渍化和面源污染等农田生态环境问题。因此，研究和推广节水灌溉技术，尤其是田间节水灌水技术，是提高灌水利用效率、改善灌水质量的重要措施与手段，是缓解灌溉用水供需矛盾、发展节水型农业的重要途径之一。为此，在“九五”国家重点科技攻关计划项目“节水农业技术研究及示范(96-006)”中，将“田间节水灌溉新技术研究(96-006-02-01)”列为一个专题，对研究的田间节水灌溉新技术中存在的突出问题开展攻关，为在我国大面积地推广应用这些技术奠定基础条件。

本专题由中国水利水电科学研究院水利研究所主持完成，得到北京市水利局科教处、北京市昌平区水资源局、新疆维吾尔自治区水利厅水管总站等单位的大力协助和支持。本书即是根据专题取得的研究成果，由参加课题研究的人员按章节内容分工合作编撰。第一章：许迪、李益农；第二章：程先军、许迪；第三章：谢崇宝、刘群昌、黄斌、许迪；第四章：李益

农、李福祥、许迪；第五章：李益农、程先军、谢崇宝、许迪。

除上述编写人员外，先后参加本专题研究的人员尚有：北京市昌平区水源局的姚文成；北京市昌平区百善镇水管站的徐立宏；北京市昌平区高口水管站的邢全福；新疆维吾尔自治区水利厅水管总站的周和平；新疆维吾尔自治区巴州水管处的诸葛五荪、李璵；中国水利水电科学研究院水利研究所的蔡林根、杨继富、武文凤、刘文朝、张昊、王桂芬。因此，本书也是这些同志劳动的结晶。

由于时间仓促，水平有限，文中欠妥或谬误之处，敬请读者批评指正，不吝赐教。

编著者

2001年8月

目 录

前言

第一章 绪 论	1
第一节 研究的意义	1
第二节 国内外现状综述	3
第三节 主要研究内容	10
第四节 关键技术成果	11
参考文献	19
第二章 地下滴灌技术	21
第一节 地下滴灌（渗灌）灌水器性能可比较试验	21
第二节 地下滴灌专用灌水器开发研制	30
第三节 地埋点源土壤水运动和溶质运移数值模拟	41
第四节 地下滴灌系统灌水设计参数对土壤水肥运 动的影响	54
参考文献	65
第三章 波涌灌溉技术	67
第一节 波涌灌溉设备开发研制	67
第二节 间歇供水条件下土壤特性分析	83
第三节 波涌灌溉技术田间适应性	91
第四节 波涌灌溉技术管理系统	105
参考文献	119

第四章 水平畦田灌溉技术	120
第一节 农田土地平整技术	120
第二节 平地技术组合应用	130
第三节 激光控制平地方法经济可行性分析	144
第四节 田面平整精度对畦灌系统性能的影响	154
第五节 水平畦田灌溉系统设计方法	166
参考文献	177
第五章 田间试验示范应用	178
第一节 地下滴灌技术试验示范区	178
第二节 波涌灌溉技术示范应用区	193
第三节 水平畦田灌溉技术试验示范区	201
第四节 田间节水灌溉技术推广应用前景	214
参考文献	221

第一章

绪 论

本项研究专题的主要任务是研究先进的田间节水灌溉新技术，其中包括地下滴灌技术、波涌灌溉技术和水平畦田灌溉技术。对这些灌水方法中存在的 key 技术问题开展室内外试验研究和数学模拟研究，开发研制相应的硬件设备和产品，为其在我国的大面积推广应用提供成套技术和支撑条件，提高田间灌溉质量，发展适合国情的节水灌溉技术。

本章阐述研究田间节水灌溉新技术的意义，对涉及的节水灌溉技术在国内外的发展现状进行综述，介绍这项研究的主要内容，对取得的关键技术成果进行概述。

第一节 研究的意义

田间节水灌溉技术主要由地面灌溉技术、喷灌技术、微灌技术等组成。地面灌溉方法是目前世界上普遍采用的田间灌水技术，全世界灌溉土地面积的 90% 以上正在使用各种类型的地面灌溉方法，如格田灌、畦田灌、沟灌、漫灌等^[1]。在田间灌溉技术较为先进的美国，1997 年的地面灌溉面积仍占总灌溉面积的 50.7%^[2]；而在我国 98% 以上的灌溉面积都在采用地面灌溉方式，且限于经济条件和国力状况的制约，当前乃至今后很长一段时期内，地面灌溉在我国仍将是主要的灌溉方法^[3]。地面灌溉是一种既古老又常见的田间灌水方式，它是利用地面沟、畦或

格田作为输（受）水界面，使进入田间的水在重力作用下渗入作物根区土壤，达到灌溉供水的目的。这种传统的灌水方法具有田间工程设施简单、能源消耗低、投资相对较少、技术易于实施等特点，但却存在着田间水量渗漏损失大、灌溉效率低、灌水均匀度差以及表层土壤易板结等缺陷。

在我国的干旱和半干旱地区，通常采用的地面灌溉技术是畦灌和沟灌。由于田间灌溉工程设施不完善、畦（沟）规格不合理、入地流量不适宜、土地平整状况较差以及田间灌溉管理措施粗放等原因，导致田间水的浪费现象十分严重。例如豫东平原井灌区，畦田长度小于 50m 的面积只占总数的 9.1%，超过 100m 的却占 45%；畦宽小于 4m 的面积只占总量 14%，而大于 6m 的占 34%，田间灌溉效率只有 50%~60% 左右。较低的田间灌溉效率意味着入地水量的渗漏损失严重，易造成土壤养分、肥料及农药的淋洗流失，对地下水产生污染；另一方面，灌水量的浪费还会导致地下水位抬升，引起或加重土壤的渍涝盐碱化，破坏农田生态环境。改进地面灌水技术主要是围绕提高田间灌水效率和灌溉均匀度开展的，在对传统的地面灌溉技术进行改造的基础上，推广应用了小畦灌溉、长畦短灌、细流沟灌等田间节水灌溉技术，取得了显著的节水增产效益。近年来我国还相继开展了对田间节水灌溉新技术（波涌灌、膜上灌、水平畦灌等）的研究与示范，其中波涌灌溉（间歇灌溉或涌流灌溉）技术和水平畦田灌溉技术克服了传统地面灌水方法的缺点，有效地提高了田间灌溉效率和灌水均匀度，较为适宜于在我国经济实力相对较强、农民文化素质水平较高的地区采用。

喷灌和微灌（滴灌、微喷灌、涌泉灌、地下滴灌等）是当今世界上最先进的田间节水灌溉技术，它可根据不同的自然条件，将灌溉水及时、适量、均匀地输送到作物根区，以满足作物在各个生育期间对水分的需求。与传统的畦灌方法相比，喷灌一般可节水 30% 以上，微灌可节水 50% 以上。尽管喷、微灌技术

具有显著的节水效果，但其投入却明显高于地面灌水技术，且需要具备较高的管理水平。因此，现阶段我国发展喷、微灌技术的应用对象，主要以高附加值的经济作物为主，在水资源相对贫乏、对节水灌溉有迫切需求的地区和在城郊温室大棚内使用最为适宜。近年来，我国在适度发展喷灌和滴灌技术的同时，还开展了地下滴灌技术的应用研究。与传统的地表滴灌方法相比，由于田间输配水系统和灌水器地埋后减少了土面蒸发损失，并有利于农田耕作和作物的栽培管理，因而地下滴灌技术有着自身的明显优点，具有较好的推广应用前景。

据预测，“十五”期间预计全国新发展节水灌溉面积 666.7 万 hm^2 ，其中依赖于地面灌技术改进的面积占总量的 79%，喷、微灌面积占 21%。这表明未来一段时间内我国灌溉农业的可持续发展在很大程度上仍将取决于地面灌溉技术的改进与完善。对占全国灌溉面积 95% 以上的传统地面灌溉技术进行研究和改善，是提高田间灌溉效率、建设节水型农业的关键所在。因此，在不断减少各级渠系的灌溉输水损失和提高灌溉用水管理水平的同时，大力开展对田间节水灌溉新技术的研究和应用推广工作具有十分重要的意义和作用。

第二节 国内外现状综述

一、地下滴灌技术

地下滴灌是微灌技术的典型应用形式之一，它是指水通过地埋毛管上的灌水器缓慢出流渗入附近土壤，再借助毛细管作用或重力作用将水分扩散到整个根层供作物吸收利用。由于灌水过程中对土壤结构扰动较小，有利于保持作物根层疏松通透的环境条件，并可减少土面蒸发损失，故地下滴灌技术具有明显的节水增产效益。此外，田间输水系统地埋后便于农田耕作和作物栽培管理，且地埋后管材抗老化性能增强并不易丢失或人为损坏。由于

地下滴灌技术具有这些明显的优点，因此，越来越受到人们的重视。

第二次世界大战后，塑料工业的发展为滴灌技术应用带来新的机遇，地下滴灌技术作为滴灌技术的一种形式开始被采用。地下滴灌管一般采用尼龙或 PVC 材质，并在管壁钻孔、扎孔或切口制成灌水器使用。这种地下滴灌系统运行于低水头下，对水质和过滤设备要求较低，应用中面临的主要问题是供水均匀性差，滴孔易堵塞。进入 20 世纪 70 年代后，伴随着科技进步与发展，地面滴灌设备无论是在滴头类型还是毛管性能方面均得到较大改善。但对地下滴灌系统，除在毛管铺设方法及打扎手段上有所改观外，灌水均匀性差、出水孔易堵塞等问题依旧存在，地下滴灌技术的发展速度远远落后于地面滴灌技术。从 80 年代至今，有关地下滴灌技术及其应用的研究主要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。与此相关的大量研究成果中，最为醒目是 Mitchell 等人于 1982 年提出了地下滴灌系统设计、安装和运行管理指南^[4]，这意味着地下滴灌技术开始步入实用阶段。

我国自 1974 年从墨西哥引入滴灌设备至今，地面滴灌技术应用和设备开发已取得长足的进展。但地下滴灌技术的初步应用则始于 80 年代初期^[5]，主要用于果树作物。90 年代以来，这项技术在山西省运城地区得到应用，取得了一些研究成果^[6,7]，但由于采用人工的扎孔方式制作灌水器，故系统的供水均匀性较差，出水孔易堵塞等问题没有得到很好解决，影响到地下滴灌系统的正常使用和运行。

地下滴灌技术在国外已得到一定程度的应用，灌溉作物以经济作物最为常见：多集中在果树、蔬菜及其他高产值作物上；大田作物中也有少量使用，以棉花和玉米等作物为主。国内地下滴灌技术的应用以果树为主。目前在山西运城地区 0.77 万 hm^2 的地下滴灌面积中，果树、蔬菜和大田作物的比例分别占总数的

78.3%、4.3%和17.4%，大田作物是棉花和冬小麦。地下滴灌下的作物产量均高于或至少等于其他灌水方法下的相应值，而灌溉用水量则显著小于后者。Adamsen 对地下滴灌和喷灌进行对比的结果表明，地下滴灌下的花生产量明显高于喷灌下的产量；而对玉米，虽然两种灌水方法下的产量没有显著差别，但前者省水约30%^[8]。DeTar 等人对地下滴灌与地面沟灌进行的对比试验结果表明，砂壤土下的地下滴灌棉花产量较高；砂质土时，两者产量基本相等，但无论对哪类土壤，地下滴灌的用水量都较沟灌低40%^[9]。Henggeler 对美国得克萨斯州西部地区进行的大面积调查表明，地下滴灌与沟灌相比，棉花产量可提高20%^[10]。Phene 等人的研究结果说明，在美国南卡罗来纳州，地下滴灌下的甜玉米产量比沟灌高12%~14%，番茄产量高20%，卷心菜和夏季南瓜产量均提高35%，而玉米、棉花、高粱、甜瓜和部分蔬菜的产量基本持平^[11]。山西运城地区的资料表明，与地面灌溉方法相比，果树可节水75%，增产50%；西瓜节水60%，增产30%；对大田作物，平均节水达50%，增加产量30%以上。地下滴灌技术不仅节水增产，还具有省劳、能耗低等诸多优点，还能有效抑制杂草的生长。

目前，国外使用的地下滴灌设备均来自地面滴灌系统，灌水器采用内镶式或带有补偿性能的滴头以确保系统供水的均匀性。地面滴灌系统的设计方法同样适用于地下滴灌系统，特别是在管道水力学性能和灌水均匀性等方面，当然地下滴灌系统的设计及管理还具有自身的特殊性。在地下滴灌系统中停止供水时，非常容易在管网内产生负压，造成毛管外的土壤微粒经灌水器流道被逆向吸入，引起滴头的堵塞，故常在系统上安装真空破坏装置，这对整个系统的运行管理要求较高。特别是在地势地形起伏较大的条件下，仅靠在系统上安装真空破坏装置的做法，有时并不能完全避免负压的产生，也就不能完全避免因负压引起的堵塞问题。

为了防止因系统负压引起的灌水器堵塞问题，除考虑在地下滴灌系统中设置真空破坏装置外，研制一种既可防止负压堵塞又具有良好水力性能的地下滴灌专用灌水器一直是人们在不断努力的目标。为了使地下滴灌技术得到更好的应用，有必要开展地下滴灌条件下土壤水分运动规律的研究，在探索点源地埋条件下土壤湿润体的几何尺寸及分布范围的基础上，根据当地的土壤条件、作物种类、耕作措施等因素正确地选择诸如滴头流量、滴头埋深和滴头间距等灌水设计参数，提出地下滴灌技术应用的田间适应性条件和优化设计的组合灌水参数。

二、波涌灌溉技术

波涌灌溉是一种新型的地面灌水方法，它采用大流量、快速推进、间断供水的方式向沟（畦）放水。与传统的连续水流沟（畦）灌溉相比，在波涌灌供水过程中，入地水流不再是一次连续的推进到沟（畦）末端，而是分阶段的由首端推进至末端。间歇供水与停水现象的交替发生，使得土壤表层边界条件发生变化，田间表面形成阻渗的致密层，降低了土壤入渗率，减少了田面糙率，产生“间歇效应”。该效应造成深层渗漏量的减少和地表水流推进速度的加快，有利于提高田间灌溉效率和灌水均匀度。目前，波涌灌水技术在灌溉自动化程度较高的国家如美国等得到了较为广泛的应用，取得了省水、节能、增产的显著效果。

1979年美国犹他州立大学 Stringham 和 Keller 博士在美国土木工程师协会灌溉排水专业会议上首先提出波涌灌溉的概念，最初犹他州立大学的研究者在开始研究波涌灌溉时，是为了寻求地面灌溉自动化的方法，但他们在变流量沟灌试验中却发现间歇灌溉条件下的水流推进速度比连续灌情况下要快。同年犹他州立大学的 Allen 和 Poole 在波涌灌溉的田间试验中发现，间歇供水使得表层土壤入渗率降低。随后 Walker、Coolidge、Samani 等人进

行了类似的田间试验研究,对间歇供水条件下入渗率减少的原因进行了分析,验证了波涌灌溉方法具有省水、水流推进速度快等特点。与此同时,对波涌灌溉地面水流数学模型和波涌灌溉设备的研究也取得了进展。

1986年美国专利局发布了 Stringham 和 Keller 博士的专利“沟灌方法和系统”,同年,美国农业部颁布了国家灌溉指南技术要点之五“波涌灌溉田间指南”,使得波涌灌溉技术开始走上推广应用的道路。1981年国家农业委员会派盐碱土改良考察组赴美国西部考察访问,参观了犹他州立大学波涌灌溉技术试验研究设备和田间灌水演示,并将波涌灌溉的概念初步介绍到我国,随后国内一些科研单位和大专院校在20世纪80年代后期较为详细地介绍了波涌灌水技术的原理和应用评价方法^[12,13,14]。自90年代初期,为探索波涌灌溉技术在我国适用性及节水效果,许多单位相继开展了大量的田间试验和基础研究方面的工作。1990年原水电部农水司下达了“涌流灌溉试验研究”的课题,由中国水利水电科学研究院水利研究所和河南省人民胜利渠共同承担,通过田间试验对波涌灌水技术的节水增产机理进行了探讨^[15]。1991年国家自然科学基金委员会批准立项“波涌灌溉理论及技术要素的试验研究”,西安理工大学对这一技术做了系统深入的分析研究,从理论上分析了波涌灌溉方法的节水机理、土壤致密层的形成发展过程、土壤入渗特性与地表水流特性的关系及相互影响^[16]。水利部农田灌溉研究所结合“七五”国家重点科技攻关项目“节水农业体系研究”,在河南商丘试验站对波涌灌溉与传统连续灌溉的对比做了大量的田间试验工作,对波涌灌溉方法的节水机理进行了研究^[17]。“八五”期间,在国家重点科技攻关项目“黄淮海平原农业持续发展综合技术研究”中,中国水利水电科学研究院水利研究所又对波涌灌溉技术作了大量的田间试验研究工作,对这项节水灌溉技术的田间适宜性进行了分析^[18]。

目前国内对波涌灌溉技术的研究主要集中在理论与田间试验两个方面。在理论上,集中在定量确定间歇供水条件下诱发的表土致密层形成发展过程、表层土壤入渗性能变化规律以及地表水流推进与消退特性等研究方面,并初步建立了波涌灌溉的数学模型;在田间试验应用方面,则通过完成小区试验对波涌灌水技术的实际应用和相应的田间管理措施进行了有益的尝试和探讨。总体看来,尽管我国在波涌灌溉技术理论及田间试验研究方面已取得重要进展,但在波涌灌溉的应用研究上还处于起步阶段,对波涌灌溉方法的田间适用条件和设计方法需开展深入研究,尤其是缺乏国产的波涌灌溉设备已成为制约该技术推广应用的瓶颈之一。为此,开发研制适于国情的波涌灌溉成套设备,评价波涌灌水技术的田间适宜条件,给出波涌灌溉的设计方法和管理模型,可以为大面积的推广应用这项节水灌溉技术提供必要的支撑条件。

三、水平畦田灌溉技术

水平畦田灌水技术是建立在激光控制土地精细平整技术应用基础上的一种地面灌溉技术,自 20 世纪 80 年代起在许多国家已得到推广应用^[19]。水平畦田灌溉系统中的田面通常为水平状态,要求的灌水流量较大,能在较短的时间内进入田块,均匀地分布在整个土壤表面。畦田可以是任意形状,周边由田埂封闭。畦块规格的设计取决于供水流量、土壤入渗特性等因素,一般在 4hm^2 左右,较大的可达到 16hm^2 。平整的农田表面有利于入渗水分的相对均匀分布,田间深层渗漏水量损失的有效减少,起到改善地面灌溉系统性能,提高田间灌溉效率和灌水均匀度的作用。经过合理的系统设计和田间管理,与其他传统的地面灌溉系统相比,水平畦田灌溉系统可使田间灌溉效率最高达到 90% 以上,灌水均匀度亦得到有效改善。土地精细平整还有益于田间农机耕作和栽培措施的实施,增加作物出苗率和种植密度,促进作