

# 小流量微压滴灌 技术理论与实践

张林 吴普特 朱德兰 范兴科 等 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 小流量微压滴灌 技术理论与实践

张林 吴普特 朱德兰 范兴科 等 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书针对目前滴灌系统存在的能耗高和初期建设成本大等问题,提出了小流量微压滴灌技术,通过理论分析、试验研究和数值模拟相结合的方法,不仅研究了小流量微压滴灌系统本身的问题,而且还将系统与土壤、作物结合起来,研究了系统对土壤水分运动及作物生长的影响,避免了孤立地就水论水。本书共7章,第1~2章通过理论分析提出了小流量微压滴灌技术理念;第3~5章重点研究了小流量微压滴灌系统水力性能,包括抗堵性能、灌溉质量和灌水小区水力设计等问题;第6章主要研究了小流量微压滴灌对土壤水分运动的影响;第7章重点研究了小流量微压滴灌在一些作物中的应用效果,包括温室生菜、室外盆栽辣椒和大田苹果等。

本书可作为农业水土工程专业研究生和高年级本科生的参考教材,也可供相关专业的科研、教学和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

小流量微压滴灌技术理论与实践 / 张林等著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2019.8  
ISBN 978-7-5170-7926-2

I. ①小... II. ①张... III. ①滴灌—研究 IV. ①S275.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第180641号

书 名	小流量微压滴灌技术理论与实践 XIAO LIULIANG WEIYA DIGUAN JISHU LILUN YU SHIJIAN
作 者	张林 吴普特 朱德兰 范兴科 等 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10印张 243千字
版 次	2019年8月第1版 2019年8月第1次印刷
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

滴灌是通过各级管道和灌水器将水直接输送到作物根区土壤，实现由“浇地”向“浇作物”的转变，其节水效果显著。滴灌技术问世半个多世纪以来，在世界各地，尤其是水资源短缺的干旱半干旱地区得到广泛应用。特别是以色列，因其节水高效的滴灌农业享誉全球。

长期以来，两个问题制约了滴灌技术的推广应用：一是使用成本高，二是对水质要求严格。自20世纪70年代，我国从墨西哥引入滴灌技术以来，众多的科技工作者和科研前辈为其广泛应用呕心沥血。但是，直到20世纪末，滴灌技术在我国推广一直处于徘徊不前的局面，究其原因主要是成本高昂，农民用不起。

我国滴灌技术第一次革命性突破是新疆天业（集团）有限公司研发的薄壁滴灌带和膜下滴灌技术，这极大地改变了滴灌技术的“贵族”身份，使亩均成本由几千元降低到几百元，滴灌技术不再仅适用于高附加值的经济作物，而且能广泛用于各种大田作物，实现节水增产增效的三重目标。经过20年的发展，我国新疆滴灌面积已突破300万 $\text{hm}^2$ ，成为世界滴灌面积推广最大的地区之一。

由于农业是国民经济的基础，农田水利特别是灌溉是农业的命脉，但农业也是弱势产业，对灌溉成本上涨的忍受能力较低。因此，使滴灌更廉价、更节水、更增产、更高效，仍然是我国广大农业水利科技工作者矢志不移的追求。

本书深刻总结了作者近十五年来在滴灌方面的研究成果，提出了小流量微压滴灌技术，系统论述了小流量微压滴灌系统抗堵性能、灌溉质量、水力设计和应用效果等问题。本书共包括7章。第1~2章详细介绍了小流量微压滴灌技术思想起源，充分论证了小流量微压滴灌技术可行性。第3~5章重点研究了小流量微压滴灌系统水力性能，包括抗堵性能、灌溉质量和灌水小区水力设计等问题。第6章主要研究了小流量微压滴灌对土壤水分运动的影响，从而为小流量微压滴灌技术应用参数的确定提供一定的理论依据。第7章重点研究了小流量微压滴灌在一些作物中的应用效果，包括温室生菜、室外盆栽辣椒和大田苹果等，结果表明小流量微压滴灌有利于作物生长，可提高作物产量和水分利用

效率。

本书是在国家“863”计划项目（2006AA100214、2010AA10A302）、国家科技支撑计划项目（2011BAD29B02、2015BAD22B01-02）和宁夏回族自治区重点研发计划课题（2018BBF02006）支持下完成的，在此表示感谢。

本书编写分工如下：第1~2章由张林和朱德兰撰写，第3章由张林和郑超撰写，第4~6章由张林、吴普特和范兴科撰写，第7章由张林、蔡耀辉和安伯达撰写。全书由张林统稿。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

**作者**

2019年7月

# 目录



## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 降低系统成本是滴灌技术发展和应用的前提 .....	1
1.2 降低灌水器工作压力是降低系统成本的突破口 .....	3
1.3 主要研究内容 .....	5
<b>第 2 章 小流量微压滴灌技术的提出</b> .....	7
2.1 滴灌系统工作压力降低的理论依据 .....	7
2.2 小流量微压滴灌技术的理论依据和可行性分析 .....	23
<b>第 3 章 小流量微压滴灌系统抗堵性能</b> .....	28
3.1 灌水器迷宫流道内水流流态和水头损失 .....	28
3.2 动态水压下迷宫流道水流运动特性 .....	34
3.3 动态水压下迷宫流道内颗粒物运动特性 .....	40
3.4 动态水压对迷宫流道灌水器堵塞的影响 .....	47
<b>第 4 章 小流量微压滴灌灌溉质量</b> .....	54
4.1 试验设计与方法 .....	54
4.2 灌水均匀度的表示方法 .....	55
4.3 各因素对灌水均匀度的影响 .....	57
4.4 各因素对灌水均匀度的影响程度分析 .....	61
4.5 提高微压滴灌质量的途径及方法 .....	63
<b>第 5 章 小流量微压滴灌小区水力设计</b> .....	64
5.1 考虑水力和地形偏差的流量偏差率 .....	65
5.2 考虑水力、地形及制造偏差的流量偏差率 .....	72
5.3 滴灌系统流量偏差率的允许值 .....	77
5.4 滴灌灌水小区水力设计方法 .....	82
<b>第 6 章 小流量微压滴灌条件下土壤水分运动</b> .....	88
6.1 小流量微压滴灌条件下土壤水分运移试验 .....	89

6.2	小流量微压滴灌条件下土壤水分运移数值模拟 .....	103
6.3	灌水器适宜流量的确定方法 .....	111
<b>第7章</b>	<b>小流量微压滴灌技术应用效果 .....</b>	<b>117</b>
7.1	温室生菜试验 .....	117
7.2	室外盆栽辣椒试验 .....	121
7.3	大田苹果试验 .....	132
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>147</b>

## 绪 论

### 1.1 降低系统成本是滴灌技术发展和应用的前提

随着水资源形势的日益严峻，节水农业越来越受到重视（山仑等，2000，2004，2006；康绍忠等，1999，2001，2004a，2004b；吴普特等，2003，2005，2006a，2006b；许迪等，2003；孙景生等，2000）。滴灌作为当今最先进和最行之有效的节水灌溉技术之一，是我国农业节水的一条重要途径（胡笑涛等，2000；魏正英，2003；王新坤，2004；张亚哲等，2007；任理等，2008）。滴灌属于局部灌溉，根据作物对于水分的需要，通过低压管道系统、机泵或高差对水加压，经过压力输水管道，输送到安装在田间的末级管道上的特制灌水器（滴头），由灌水器将作物生长所需要的水分和养料以较小的流量均匀、缓慢而又准确地直接输送到作物根部附近的土壤中，使作物根系活动区的土壤经常保持在最佳的水、肥、气含量状态，因此它具有节水增产、省工节肥及对地形适应能力强等许多优点（Kirnak et al.，2004；Wei et al.，2003）。表 1-1 给出了微灌与其他灌溉方式相比的节水和增产效果，表 1-2 比较了传统灌溉与微灌的水分生产效率（李光永，2001）。

表 1-1 微灌的节水和增产效果

作物	增产/%		节水/%		资料来源
	与地面灌比较	与喷灌比较	与地面灌比较	与喷灌比较	
鳄梨				50	以色列
香蕉	109	38			爱尔兰
椰子	75~100	75~100	60	60	印度
棉花	93	60~100			西班牙
辣椒	64				埃及
甘蔗	22	35	33	15	英国、马拉维
西红柿	27		35		美国

表 1-2 不同灌水方法的水分生产效率

作物	土豆	棉花	柑橘	鳄梨	苹果	香蕉
传统灌溉的水分生产效率/(kg/m <sup>3</sup> )	4.00	0.71	4.16	0.82	1.82	0.59
微灌的水分生产效率/(kg/m <sup>3</sup> )	10.00	1.00	5.00	1.25	4.00	1.54
微灌较传统灌溉提高的百分比/%	150	40	20	52	120	161

我国自 1974 年从墨西哥引进滴灌技术以来, 其在我国的发展已有 40 多年的历史, 大体经历了以下四个阶段 (王留运等, 2000; 李久生等, 2016)。

第一阶段 (1974—1979 年): 引进滴灌设备、消化吸收、设备研制和应用试验与试点阶段。1980 年研制生产了我国第一代成套滴灌设备, 从此我国有了自行设计生产的滴灌设备产品。

第二阶段 (1980—1986 年): 设备产品改进和应用试验研究与扩大试点推广阶段。由滴灌设备产品改进配套扩展到微喷灌设备产品的开发, 微喷灌设备研制与生产厂由一家发展到多家, 微灌试验研究取得了丰硕成果, 从应用试点发展到较大面积推广应用。

第三阶段 (1987—2000 年): 直接引进国外的先进工艺技术, 高起点开发研制微灌设备产品。这阶段由于许多地区连续干旱, 水资源短缺加剧, 城市人口急剧增加, 为了解决这些问题, 国家对农业节水十分重视, 加大了开发研制投资力度, 直接从国外引进部分先进技术和设备, 使滴灌技术在我国北方果园、设施农业及蔬菜保护地有了较大发展。

第四阶段 (2001 年至今): 通过不断的实践与创新, 逐步实现了关键设备的国产化和系列化, 形成多个符合我国国情又具有明显地域特色的微灌技术应用模式, 并制定了微灌产品和微灌工程技术规范行业标准, 使微灌工程建设与运行管理逐步走向规范, 我国的微灌技术已逐步趋于成熟。

截至 2013 年年底, 我国已发展微灌面积 385.7 万 hm<sup>2</sup> (李久生等, 2016), 但微灌面积仍只占我国有效灌溉面积的 6.07%。同时, 世界滴灌面积总体比例也很低。究其原因就是滴灌技术比较昂贵, 系统建设初期投资比较大, 且运行费用比较高。滴灌的主要技术与设备源于农业发达的以色列和美国 (徐建海等, 2001), 一开始使用便被称为“昂贵”的灌水技术, 主要用于经济效益高的作物。随着技术不断进步, 尤其是一次性薄壁滴灌带的出现, 使得滴灌工程投资有所降低, 应用范围也有所扩大, 但从总体看, 并未完全从昂贵中走出来。

滴灌工程最核心的部位是毛管, 以新疆棉花滴灌为例, 每公顷土地毛管的平均使用量 11100m (一管两行), 耐压等级不同, 壁厚不同, 毛管造价范围为 2100~12750 元, 再加上首部枢纽、地下管道和地面支管等输水管道, 每公顷首次投资达 7500~22500 元, 即若采用国产滴灌设备, 目前棉花滴灌每公顷最低投资为 7500 元, 最高价约为最低价的 3 倍, 若采用以色列、美国等国家的滴灌带, 则每公顷价格高达 22500 元以上 (王留运等, 1999, 2000; 王伟等, 2000), 农户只能望“洋”兴叹, 而且就我国目前农村体制来看, 基本是以“户”为单位进行农业生产, 即使最低价农民也难以承受 (董文楚, 1998; 童水森等, 1999), 所以滴灌技术昂贵的市场价格成为该技术在大田中大面积推广的最重要制约因素 (傅琳, 1998)。因此, 降低滴灌系统造价是广大科研工作者和滴灌生产厂家亟须

解决的问题。

## 1.2 降低灌水器工作压力是降低系统成本的突破口

### 1.2.1 降低灌水器工作压力的必要性

滴灌管网一般由首部枢纽（加压泵、过滤器、施肥器）、干管、支管、毛管、灌水器部分组成。灌水器工作压力影响到滴灌系统的各组成部分。

降低灌水器工作压力，能减少首部枢纽及运行费用。首部压力由管道（包括水泵吸水管、干管、支管、毛管等）沿程水头损失、局部水头损失、灌水器工作压力和地形高差等部分构成，可按式（1-1）计算（傅琳等，1987）：

$$H = \sum h_f + \sum h_j + h_d + \Delta Z \quad (1-1)$$

式中： $H$  为首部压力，m； $\sum h_f$  为管道沿程水头损失，m； $\sum h_j$  为管道局部水头损失，m； $h_d$  为灌水器设计工作压力，m； $\Delta Z$  为灌水区与水源面的地面高程之差，m。

当灌溉地形确定时， $\Delta Z$  为恒值，水头损失与管道流量、直径有关，管道流量、直径可在满足水力学要求的基础上优化设计得到，因此，干管进口压力降低与否直接与灌水器工作压力有关。同时，干管进口压力决定水泵扬程和电动机功率，在同一流量下，加压机组的投资与系统压力大小呈正相关，例如，流量为  $50\text{m}^3/\text{h}$ 、扬程为  $20\text{m}$  的水泵，单价为  $1500$  元；流量为  $50\text{m}^3/\text{h}$ 、扬程为  $50\text{m}$  的水泵，单价为  $3000$  元（朱尧洲，1989）。干管进口压力决定了运行费用，运行费用按式（1-2）计算：

$$F = \frac{\gamma EQHT}{\eta} \quad (1-2)$$

式中： $F$  为运行费用，元/年； $\gamma$  为水的容重， $\text{kN}/\text{m}^3$ ； $Q$  为流量， $\text{m}^3/\text{h}$ ； $H$  为水压力，m； $T$  为水泵年运行时数，h； $E$  为电费，元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$ ； $\eta$  为水泵工作效率。

由式（1-2）可以看出，首部压力  $H$  越大，运行费用越高。

降低灌水器工作压力可降低管网系统投资。滴灌管网由干管、支管和毛管组成。一般情况下，当地形平坦时，由于灌水质量的要求，毛管进口压力约为灌水器工作压力的  $1.2$  倍，支管工作压力约为灌水器工作压力的  $1.4$  倍（Valiantzas et al., 2005），干管进口压力等于支管进口水压力与干管水头损失之和，因此灌水器设计工作压力越大，所要求的干管、支管和毛管水压力越大，而管材厚度与管道工作压力成正比，见式（1-3）（朱树人，1999）：

$$e = \frac{DP}{2[\sigma]} \quad (1-3)$$

式中： $D$  为管道外径，mm； $P$  为管内水压力， $\text{kN}/\text{m}^2$ ； $[\sigma]$  为管材的抗拉强度， $\text{kN}/\text{m}^2$ ； $e$  为管材厚度，mm。

由式（1-3）可知，管内水压力越大，需要的管壁越厚，而管壁厚度决定了管道耗材量，厚度越大，耗材量越大，造价越高。

降低灌水器工作压力可降低灌水器造价。灌水器额定工作压力越大，相同流量下灌水器流道越长或越细，灌水器结构相对复杂，流道细则加工难度大，灌水器制造成本越高（王广智等，1998；王新华，1998）。因此，利用滴灌将水从水源灌入田间，灌水器设计工

作压力影响到系统的各组成部分，压力越高，各部分造价越高。

### 1.2.2 降低灌水器工作压力的可行性

多年来，滴灌系统压力常用 8~10m (郭庆人等, 2000; 徐建海等, 2001; 关新元等, 2002; 赵万华等, 2003)。例如，以色列 Plastro 公司和 Lego 公司生产的 TORNADO 大流道灌水器、KATIF 压力补偿式灌水器、SUPERTIF 压力补偿式灌水器 和 TUEFTIF 紊流灌水器 等，额定工作压力均为 10m，Netafim 公司生产的 PCJ 型管上式迷宫灌水器最小工作压力为 5m；美国雨鸟公司，澳大利亚哈迪公司，我国北京绿源公司、山东莱芜塑料制品厂生产的灌水器工作压力均为 5~20m。上述常用值使滴灌具备了能适应各种田面地形而不降低灌水均匀度的巨大优点，因而从来没有人对此值的选择依据详细论证并提出改进方法。在强调节约能源、降低系统造价的背景下，出现了薄壁滴灌带 (杨树寻等, 1999; 秦为耀等, 2000)，例如，澳大利亚 Hardie 滴灌带，当壁厚为 0.2mm 时，推荐的最小额定工作压力为 2.8m；美国雨鸟公司的 TPC 型压力补偿式滴灌带，壁厚 0.225mm 时，推荐的最小额定工作压力为 4m。为了进一步降低滴灌造价，出现了温室重力式滴灌。重力式滴灌具有在低压下工作 (2m 以下)、流量小 (1~2L/h) 等特点。该特点顺应了滴灌发展的潮流。重力式滴灌的成功应用，从实践上说明，在大多数条件下灌水器工作压力有大幅度降低的潜力。但是，在不同的地形条件下，在不牺牲滴灌优点的前提下，滴灌系统压力不能无限降低或随意取值，所以，有必要从理论上对该问题作深入研究，分析灌水器工作压力取值依据和降低的可能性。

进行滴灌水力计算时，首先需确定灌水器设计工作压力和设计流量，然后选定灌水器，使灌水器额定工作压力、额定流量与灌水器设计工作压力、设计流量相匹配。灌水器设计工作压力、设计流量与额定工作压力、额定流量有不同的内涵。灌水器出厂时，制造厂提供一系列水力参数，如工作压力范围、额定工作压力、额定流量、流态指数等，工作压力范围是一个区间，最低值称为最小工作压力，最高值称为最大工作压力，在此压力范围内，制造厂应保证灌水器正常运行，而且压力和流量满足：

$$q_n = kH_n^x \quad (1-4)$$

式中： $q_n$  为流量，L/h； $H_n$  为压力，m； $k$  为制造系数； $x$  为流态指数。

额定工作压力是工作压力范围内的一个压力 (常常是工作压力范围内的中间值或中偏大值)，又称最佳工作压力，灌水器在最佳工作压力下工作时的出流量称为额定流量，灌水器制造厂希望滴灌设计者和操作者尽可能使灌水器工作在该压力点或附近 (马福才等, 1992)。灌水器设计流量、设计工作压力与田面微地形、土壤、作物有关。设计流量需在满足作物灌溉制度的条件下使系统投资最小，同时要使滴水量的入渗速率在土壤的最小和最大入渗速率之间 (王新华, 1998; 张丰等, 1999)，所以，灌水器设计流量的确定有章可循、有理可依。设计工作压力是设计者确定的滴灌系统运行时灌水器工作压力。目前，在滴灌工程设计过程中，设计者往往参考生产厂家提供的灌水器水力参数，选定与设计流量相匹配的灌水器额定工作压力作为设计工作压力，灌水器额定工作压力常用值为 8~10m，导致设计工作压力值也为 8~10m。本来应该先确定灌水器设计工作压力，然后选择灌水器，使灌水器额定工作压力与设计工作压力相匹配，而目前设计中则由额定工作压

力决定设计工作压力, 究其实质, 是因为没有理论来指导设计工作压力如何取值, 没有人研究为什么灌水器额定工作压力常用值为  $8\sim 10\text{m}$ , 而不是  $1\sim 4\text{m}$ , 甚至更低。对灌水器额定工作压力传统的理解是: 灌水器额定工作压力和额定流量是“与生俱来”的, 是其内部特性(结构、尺寸、材料等)的外在表现, 滴灌系统设计者无法改变, 只能去适应。诚然, 灌水器一经生产出来, 其额定工作压力和额定流量是“与生俱来”的, 设计者无法改变, 但是研究者却能指导生产厂家生产什么样的灌水器。例如, 在大多数情况下, 灌水器设计工作压力为  $1\text{m}$ 、设计流量为  $3\text{L/h}$ , 而不是  $10\text{m}$ 、 $3\text{L/h}$ , 设计者需要“额定工作压力为  $1\text{m}$ 、额定流量为  $3\text{L/h}$ ”的灌水器, 换句话说“ $1\text{m}$  额定工作压力与  $3\text{L/h}$  额定流量匹配”的灌水器比“ $10\text{m}$  额定工作压力与  $3\text{L/h}$  额定流量匹配”的灌水器更有市场前景, 生产厂家马上会生产出“ $1\text{m}$  额定工作压力与  $3\text{L/h}$  额定流量匹配”的灌水器, 所谓“需要是第一生产力”。那么, 市场上是否需要“ $1\text{m}$  额定工作压力与  $3\text{L/h}$  额定流量匹配”的灌水器成为该问题的核心。

由于田面不平整(相对于均匀坡)或设计中的简化(如非水平面按水平面设计), 会使一条毛管上的某些灌水器的位置高程偏离设计高程, 当灌水器高程低于设计高程时, 灌水器的实际工作压力将高于设计值, 将  $\Delta Z_2$  定义为正偏离; 当灌水器高程高于设计高程时, 灌水器的实际工作压力将低于设计工作压力, 将  $\Delta Z_1$  定义为负偏离, 则田面局部高差  $\Delta Z = \Delta Z_2 - \Delta Z_1$  (聂世虎等, 2002)。朱德兰等于 2003 年在滴灌运用较多的田块, 随机选择地块测量田面微地形, 测量田块有新疆生产建设兵团的棉田、温室、果园, 共测量棉花地  $70\text{hm}^2$  (测点 800 个)、日光温室 50 个 (测点 1000 个)、果园  $35\text{hm}^2$  (测点 400 个), 经统计分析得出温室、棉田、果园田面局部高差分别为  $0.1\text{m}$ 、 $0.2\text{m}$ 、 $0.5\text{m}$ 。以毛管作为研究对象, 在地面坡度为零的情况下, 取允许流量偏差率为  $20\%$ , 经优化计算, 温室、棉田、果园的灌水器设计工作压力分别为  $0.4\text{m}$ 、 $1\text{m}$ 、 $2.48\text{m}$ 。这一结论初步为重力式滴灌成功地应用于温室找到依据, 同时也说明, 目前的灌水器设计工作压力常用值 ( $8\sim 10\text{m}$ ) 实际上引起了压力(能量)的浪费, 灌水器设计工作压力有大幅度降低的潜力。

### 1.3 主要研究内容

针对目前滴灌技术存在的系统能耗高和初期建设成本大等问题, 本书提出了小流量微压滴灌技术, 并对其作了大量的应用基础性研究。通过理论分析、试验研究和数值模拟相结合的方法, 不仅研究了小流量微压滴灌系统本身的问题, 而且还将系统与土壤、作物结合起来, 研究了系统对土壤水分运动及作物生长的影响, 这样避免了孤立地就水论水, 而是将水、土壤和作物三者结合起来进行系统研究。

本书共安排了 7 章。第 1~第 2 章, 通过理论分析提出了小流量微压滴灌技术理念。第 3~第 5 章, 重点研究了小流量微压滴灌系统水力性能, 包括抗堵性能、灌溉质量和灌水小区水力设计等问题。第 6 章主要研究了小流量微压滴灌对土壤水分运动的影响, 从而为小流量微压滴灌技术应用参数的确定提供一定理论依据。第 7 章重点研究了小流量微压滴灌在一些作物中的应用效果, 包括温室生菜、室外盆栽辣椒和大田苹果等。本书具体内容如下。

#### 1. 小流量微压滴灌技术的提出

系统昂贵依然是滴灌技术发展的重要制约因素, 降低系统成本是滴灌技术大面积推广

应用的前提和基础。通过理论分析指出,降低灌水器工作压力是降低系统成本的突破口。从经济性角度出发,以毛管为研究对象,以年综合费用为目标函数,以灌水均匀度为约束条件,构建灌水器设计工作压力计算方法;在此基础上,根据棉田、温室、果园田面微地形情况,分析确定棉田、温室、果园应采用的灌水器工作压力值,并探讨了滴灌系统灌水器设计工作压力降低的可能性。

降低滴灌系统灌水器工作压力,虽然能使系统成本大幅减小,但同时会对系统灌溉质量产生不利影响。为此,本书以现代水力学为基础,从理论上较为系统地分析了毛管管径、灌水器工作压力和流量与系统灌溉质量及毛管极限铺设长度的关系,并指出可通过同步降低滴灌系统工作压力、适当增大毛管管径、适当减小灌水器设计流量及管道壁厚等4种技术途径来实现既降低滴灌系统成本又保证系统灌溉质量的双重目标,由此提出了小流量微压滴灌技术理念,并对其可行性和经济性进行了分析。

## 2. 小流量微压滴灌系统的水力性能

小流量微压滴灌虽然能降低系统成本,但是灌水器较低的工作压力和较小的设计流量会降低水流在灌水器微小流道中的运动速度,使水流中的一些固定颗粒和杂质沉降下来,导致灌水器更易发生堵塞。为此,本书以滴灌灌水器最常用的迷宫流道为对象,重点研究了灌水器迷宫流道内水流流态和水头损失规律,分析了动态水压供水模式对灌水器迷宫流道水沙运动的影响,对比了恒定水压和动态水压供水条件下灌水器抗堵能力,并建议在工程实践中采用动态水压供水模式提高小流量微压滴灌系统抗堵能力。

为了不以牺牲系统灌溉质量来换取成本的降低,通过试验研究了微压条件下毛管进口压力、铺设长度、铺设坡度及管径等因素对灌水均匀度的影响,给出了一些参数的取值范围,分析了各因素影响灌水均匀度的程度,提出了对地形适当分区等改进和提高小流量微压滴灌系统灌溉质量的途径和措施。同时,为了提高小流量微压滴灌系统设计精度,从水力学的基本原理出发,通过对不同坡度毛管水头损失变化规律的分析,确定出不同坡度条件下滴灌系统最大、最小工作压力灌水器的分布情况,在此基础上建立了均匀坡度下滴灌系统流量偏差率与制造偏差率、水力偏差率和地形偏差率三者之间的函数关系,推导出考虑三偏差的滴灌系统综合流量偏差率计算方法,并提出小流量微压滴灌系统灌水小区设计方法。

## 3. 小流量微压滴灌条件下的土壤水分运动规律

为了进一步探讨小流量微压滴灌技术的可行性和科学性,同时,也为了科学地确定灌水器适宜流量,进行了小流量微压滴灌条件下土壤水分运移规律试验研究,针对砂壤土和黏壤土,重点分析了不同灌水器流量(尤其小流量)和灌水量对土壤水分运动状况的影响。依据小流量微压滴灌条件下土壤水分运动特征,结合非饱和土壤水动力学理论,建立了小流量微压滴灌条件下土壤水分运动数学模型,利用试验数据对模型进行了验证;在此基础上,针对不同作物和土壤类型,初步提出了滴灌系统中灌水器适宜流量的确定方法。

## 4. 小流量微压滴灌技术应用效果

任何灌水技术都是以应用为目标的,目的是为有效地给作物生长提供所需要的水分,以提高作物产量和水分利用效率。灌水技术不同,其应用效果也不同。通过小流量微压滴灌条件下温室生菜、室外盆栽辣椒以及大田苹果等试验,分析了小流量微压滴灌对作物生长及产量和品质的影响,以探究小流量微压滴灌技术实际应用效果。

# 小流量微压滴灌技术的提出

## 2.1 滴灌系统工作压力降低的理论依据

众所周知，滴灌具有适应各种地形的优点，但是这个优点来自于灌水器设计工作压力的高取值。目前，现行滴灌系统灌水器设计工作压力取值一般为 8~10m，这虽然扩大了滴灌技术对地形的适应性，但却忽略了大面积的滴灌系统都是建立在平原地区和温室大棚中，这些地区地形相对平坦，田面高差起伏较小，从而浪费了滴灌技术对地形的适应能力，使得设计工作压力在一定程度上变成了一种闲置的能量，造成了能量的无效浪费（张国祥等，2005；牛文全等，2005）。究其实质，是因为没有理论来指导灌水器设计工作压力如何取值。为此，本章从经济性角度出发，以毛管为研究对象，以年综合费用为目标函数，以灌水均匀度为约束条件，构建灌水器设计工作压力计算方法；在此基础上，根据棉田、温室、果园田面微地形情况，分析确定棉田、温室、果园应采用的灌水器工作压力值，并探讨滴灌系统灌水器设计工作压力降低的可能性。

### 2.1.1 平地上滴灌系统灌水器设计工作压力的确定

在工程实践中，绝大多数滴灌系统布置在地形平坦的地方，因此首先对平坦地形条件下的滴灌系统灌水器设计工作压力确定方法进行研究，并构建以毛管年综合费用最低为目标函数，灌水均匀度为约束条件的灌水器设计工作压力计算方法。

#### 2.1.1.1 毛管价格函数

水流由管道经灌水器流出，灌水器进口水压力等于灌水器内部对水流的摩擦阻力与出口的流速水头之和，并满足如下能量平衡方程（李远华，1999）：

$$H_d = H_{ef} + \frac{q^2}{2gA^2} \text{ 或 } q = A \sqrt{2g(H_d - H_{ef})} \quad (2-1)$$

式中： $H_d$  为灌水器设计工作压力，m； $A$  为灌水器过水断面面积， $m^2$ ； $H_{ef}$  为灌水器内部对水流的摩擦损失，m； $q$  为灌水器流量， $m^3/s$ 。

由式（2-1）可以看出，灌水器流量与其工作压力、过水断面面积、内部流道对水流的阻力有关。为了保证灌水器在小流量下工作并具有稳定的出流量，灌水器工作压力越

大, 相同流量下灌水器流道越长或过水断面越小, 灌水器结构相对复杂, 流道细则加工难度大, 灌水器价格相对较高。同时, 灌水器工作压力作为系统压力的一部分, 设计压力越大, 系统运行费和要求的管道系统压力越高, 所以从经济性考虑, 灌水器设计工作压力越低越经济。然而已有研究表明, 灌水器工作压力越低, 系统灌水均匀性越差 (牛文全, 2006), 因此, 灌水器设计工作压力的合理取值不仅要满足经济性要求, 而且需同时满足灌水质量要求。

田面高低不平是实际存在的自然现象, 毛管铺设在上面, 由于田面不平整使某些灌水器位置高程偏离设计高程。当灌水器位置高程低于设计高程时, 灌水器实际工作压力将高于设计值; 当灌水器位置高程高于设计高程时, 灌水器实际工作压力将低于设计值, 进而引起流量偏差。为了使这种偏差限制在允许范围内必然对灌水器设计工作压力提出一定要求, 灌水器设计工作压力越高, 这种偏差所占比重越小。因此, 灌水器设计工作压力的确定应以毛管为对象、以灌水均匀度作为约束条件进行研究。

毛管年综合费用主要包括材料投资和年运行费, 可用式 (2-2) 表示:

$$W = \frac{CV}{t} + 2.777 \times 10^{-6} ETQH \quad (2-2)$$

式中:  $W$  为毛管年综合费用, 元;  $V$  为毛管耗材量,  $\text{m}^3$ ;  $C$  为毛管材料单价, 元/ $\text{m}^3$ ;  $E$  为电费, 元/( $\text{kW} \cdot \text{h}$ );  $T$  为毛管年工作小时数,  $\text{h}$ ;  $Q$  为毛管进口流量,  $\text{L/h}$ ;  $H$  为毛管进口压力,  $\text{m}$ ;  $t$  为毛管折算年限, 年。

式 (2-2) 中  $V$  与毛管壁厚、毛管内径和毛管长度有关, 可按式 (2-3) 计算:

$$V = 10^{-6} \pi (De + e^2) L \quad (2-3)$$

式中:  $e$  为毛管壁厚,  $\text{mm}$ ;  $D$  为毛管内径,  $\text{mm}$ ;  $L$  为毛管长度,  $\text{m}$ 。

毛管壁厚  $e$  的计算分析如下:

$$2\sigma e = \int_0^\pi \frac{D}{2} p \sin QdQ = pD \quad (2-4)$$

$$\text{则} \quad e = \frac{pD}{2\sigma} = \frac{\gamma HD}{2\sigma} \quad (2-5)$$

式中:  $p$  为毛管进口工作压力,  $\text{kN/m}^2$ ;  $\sigma$  为管道允许拉应力,  $10^{-1} \text{kN/m}^2$ ;  $\gamma$  为水的容重, 为  $9.8 \text{kN/m}^3$ ;  $H$  为毛管最大水压力,  $\text{m}$ 。

将式 (2-3)、式 (2-5) 代入式 (2-2) 得:

$$W = \frac{10^{-6} \pi \gamma^2 CLD^2 H^2}{4\sigma^2 t} + \frac{10^{-6} \pi \gamma CLD^2 H}{2\sigma t} + 2.777 \times 10^{-6} ETQH \quad (2-6)$$

令  $K_1 = \frac{10^{-6} \pi \gamma^2 CL}{4\sigma^2 t}$  和  $\alpha = 2.777 \times 10^{-6} ET$ , 则式 (2-6) 变为

$$W = K_1 D^2 H^2 + 2\sigma \gamma^{-1} K_1 D^2 H + \alpha QH \quad (2-7)$$

式 (2-7) 即为毛管年综合费用计算公式, 该公式适用于任何压力管道。

### 2.1.1.2 灌水质量指标

灌水器流量偏差由水力偏差、田面微地形高差和灌水器制造偏差引起, 灌水器最大流量偏差率可近似表示 (张国祥, 2006) 为

$$q_{v\max} = q_{hv} + q_{mv} + q_{zv} \quad (2-8)$$

式中： $q_{v\max}$ 为灌水器最大流量偏差率，%； $q_{hv}$ 为灌水器水力流量偏差率，%； $q_{mv}$ 为灌水器制造流量偏差率，%； $q_{zv}$ 为微地形引起的流量偏差率，%。

当灌水器选定后， $q_{mv}$ 为定值， $q_{v\max}$ 取值由《微灌工程技术规范》（GB/T 50485—2009）给出，令 $q_v = q_{v\max} - q_{mv}$ ，则 $q_v$ 为定值。由式（2-8）得

$$q_{hv} = q_v - q_{zv} = q_v - \frac{\Delta Z x}{H_d} \quad (2-9)$$

灌水器水力流量偏差率 $q_{hv}$ 由水压力偏差引起，当地面坡度不大时，水压力偏差率 $H_{hv}$ 按式（2-10）计算：

$$H_{hv} = \frac{q_{hv}}{x} \left( 1 + 0.15 \frac{1-x}{x} q_{hv} \right) \quad (2-10)$$

毛管允许水头损失：

$$[\Delta h_1] = \mu H_d H_{hv} \quad (2-11)$$

式中： $\mu$ 为系数，当毛管进口安装调压管时，水力偏差全部分配给毛管， $\mu=1$ ；当毛管进口无调压管时， $\mu=0.55$ 。 $[\Delta h_1]$ 为毛管允许水头损失，m。

由式（2-9）、式（2-10）和式（2-11）可得

$$[\Delta h_1] = \mu \left[ \frac{H_d q_v}{x} + \frac{0.15(1-x)H_d q_v^2}{x^2} - \frac{0.3(1-x)\Delta Z q_v}{x} - \Delta Z + \frac{0.15(1-x)\Delta Z^2}{H_d} \right] \quad (2-12)$$

令 $G_1 = \mu \left[ \frac{0.3(1-x)\Delta Z q_v}{x} - \Delta Z \right]$ ， $G_2 = \mu \left[ \frac{q_v}{x} + \frac{0.15(1-x)q_v^2}{x^2} \right]$ 和 $G_3 = \mu [0.15 \times (1-x)\Delta Z^2]$ ，则式（2-12）变为

$$[\Delta h_1] = G_1 + G_2 H_d + \frac{G_3}{H_d} \quad (2-13)$$

毛管水头损失可按式（2-14）计算：

$$H_f = K F_1 f \frac{Q^m}{D^n} L \quad (2-14)$$

式中： $H_f$ 为毛管水头损失，m； $K$ 为考虑局部水头损失的系数； $F_1$ 为多孔系数； $f$ 为摩擦损失系数； $Q$ 为毛管流量，L/h； $D$ 为毛管内径，mm； $m$ 为流量指数； $n$ 为管径指数； $L$ 为毛管长度，m。

令 $[\Delta h_1] = H_f$ ，当已知灌水器设计工作压力、毛管直径、长度中的任意两个值时，可计算其余一个值。由式（2-13）和式（2-14）可得到毛管最大长度计算公式：

$$L_{\max} = \frac{(G_1 + G_2 H_d + G_3 / H_d) D^n}{K F_1 f Q^m} \quad (2-15)$$

同理，已知毛管长度和灌水器设计工作压力，毛管直径计算公式如下：

$$D = \left( \frac{K F_1 f L Q^m}{G_1 + G_2 H_d + G_3 / H_d} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-16)$$

当毛管长度和直径已知时，灌水器设计工作压力可用式（2-17）计算：

$$H_d = \frac{(H_f - G_1) + \sqrt{2(G_1 - H_f - 2G_2 G_3)}}{2G_2} \quad (2-17)$$

毛管进口最大水压力：

$$H = H_d + [\Delta h_1] = H_d + K F_1 f \frac{Q^m}{D^n} L_{\max} \quad (2-18)$$

毛管进口最大水压力还可表示为

$$H = G_1 + (1 + G_2) H_d + \frac{G_3}{H_d} \quad (2-19)$$

将式 (2-18) 代入式 (2-7) 得到

$$W = K_1 D^2 H_d^2 + 2\sigma K_1 D^2 H_d + \alpha Q H_d + 2K_1 K F_1 f D^{2-n} Q^m L_{\max} H_d + K_1 (K F_1 f)^2 D^{2-2n} Q^{2m} L_{\max}^2 + 2\sigma K_1 K F_1 f D^{2-n} Q^m L_{\max} + \alpha K F_1 f D^{-n} Q^{m+1} L_{\max} \quad (2-20)$$

将式 (2-19) 代入式 (2-7) 可得

$$W = K_1 D^2 \left( A_1 + A_2 H_d + \frac{A_3}{H_d} + A_4 H_d^2 + \frac{G_3^2}{H_d^2} \right) + \alpha Q \left[ G_1 + (1 + G_2) H_d + \frac{G_3}{H_d} \right] \quad (2-21)$$

其中:

$$A_1 = 2\sigma G_1 + G_1^2 + 2(1 + G_1) G_3$$

$$A_2 = 2\sigma(1 + G_2) + 2G_1(1 + G_2) + H_d$$

$$A_3 = 2\sigma G_3 + 2G_1 G_3$$

$$A_4 = (1 + G_2)^2$$

由式 (2-16) 可知,  $D$  是  $H_d$  的函数, 因此, 毛管年综合费用  $W$  是  $H_d$  的一元函数, 对应于最小年综合费用的  $H_d$  值为灌水器最优设计工作压力。

### 2.1.1.3 利用黄金分割搜索法 (0.618 法) 计算灌水器设计工作压力

当已知毛管长度, 灌水器工作压力和毛管直径需通过优化方法计算。

#### 1. 计算方法

利用黄金分割搜索法求一元函数极小值点, 黄金分割搜索法有两个过程, 首先利用黄金比率和二次插值确定函数的极小值点所在区间, 即用尽可能少的计算量来确定一个区间, 并保证函数的极小值点在这个区间内; 然后用黄金分割法求一元函数的极小值, 此时假设目标函数是单峰函数, 且已确定了极小值点所在的区间。

(1) 确定极小值点所在区间。任选区间初始点  $a$  和  $b$ , 初始值可选为

$$a = \frac{\Delta Z x}{0.9q_v}$$

$$b = \frac{\Delta Z x}{0.01q_v}$$

按如下步骤计算:

1) 确定下降方向, 设要求  $W(H_d)$  的极小值, 计算  $W(a)$  和  $W(b)$ 。若  $W(a) > W(b)$ , 则下降方向为从  $a$  到  $b$ , 沿  $a$  到  $b$  的方向按黄金比率选取一点  $c$ ; 若  $W(a) < W(b)$ , 将  $a$  和  $b$  位置进行交换, 则下降方向仍为从  $a$  到  $b$ , 沿  $a$  到  $b$  的方向按黄金比率选取一点  $c$ , 计算  $W(c)$ 。

2) 若  $W(a) < W(b)$ , 则  $[a, c]$  即为所求区间, 计算结束; 若  $W(a) > W(b)$ , 由  $(b, W(b))$ 、 $(c, W(c))$  进行二次插值, 求其极小值点  $\mu$  及  $\mu_{\text{lim}} = b + 1.618034(c - b)$ 。

3) 若  $\mu$  在  $b$  和  $c$  之间, 计算  $W(\mu)$ , 并作判断; 若  $W(\mu) < W(c)$ , 则  $[b, c]$  即为所求, 计算结束; 若  $W(\mu) > W(b)$ , 则  $[a, \mu]$  即为所求, 计算结束; 若上面条件均不满足, 则用黄金比率重新选点  $\mu = c + 1.618034(c - b)$  并计算  $W(\mu)$ 。

4) 当  $\mu$  在  $c$  和  $\mu_{\text{lim}}$  之间时, 若  $W(\mu) > W(c)$ , 则极小值点所在区间即为  $[b, \mu]$ , 结