

XUSHUI KENGGUAN
TURANG SHUIFEN YUNDONG YANJIU

蓄水坑灌 土壤水分运动研究

孙西欢 马娟娟 郭向红 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

蓄水坑灌 土壤水分运动研究

孙西欢 马娟娟 郭向红 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是由国家自然科学基金项目(50379031, 50979065)、山西省科技攻关项目(051115)和山西省青年科技研究项目(20031053)资助的蓄水坑灌法土壤水分运动研究的工作总结,是一部系统论述蓄水坑灌法土壤水分运动理论的专著。全书共分十三章,主要内容包括:不同入渗水头作用下一维土壤水分运动研究、蓄水单坑土壤水分运动特性研究、蓄水多坑土壤水分运动特性研究、蓄水坑灌果园土壤水分运动研究等。

本书可供节水灌溉理论与技术、土壤水动力学、土壤物理等研究领域的科研人员、工程技术人员和研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

蓄水坑灌土壤水分运动研究 / 孙西欢, 马娟娟, 郭向红著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 12
ISBN 978-7-5084-9353-4

I. ①蓄… II. ①孙… ②马… ③郭… III. ①坑洼蓄水—灌溉—土壤水—研究 IV. ①S275.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281437号

书 作 者 出版发行	名 者 行	蓄水坑灌土壤水分运动研究 孙西欢 马娟娟 郭向红 著 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 (发行部)
经 售	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 印 规 格 版 次 印 数 定 价	版 刷 格 次 数 价	中国水利水电出版社微机排版中心 北京市北中印刷厂 184mm×260mm 16开本 24印张 570千字 2011年12月第1版 2011年12月第1次印刷 0001—1500册 56.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言



在“十二五”开局之年，中共中央国务院发布了《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》，这是我国“十二五”的第一个中央一号文件，也是新中国成立62年来中共中央首次系统部署水利改革发展全面工作的决定。文件指出，“水是生命之源、生产之要、生态之基，水利是现代农业建设不可或缺的首要条件，在‘十二五’期间，把农田水利作为农村基础设施建设的重点任务，大力发展节水灌溉，把农田灌溉水有效利用系数提高到0.55以上。”由此可见，根据地区水土特性，因地制宜地大力发展新型节水灌溉技术，对于提高我国农业灌溉水的利用效率、土地生产力和促进全社会和谐可持续发展具有重要的战略意义。

随着社会经济的快速发展，人们生活水平的大幅度提高以及新农村建设的深入开展与农业种植结构的不断调整，我国果林种植面积逐年增大，高产优质果品需求量逐年增加。其中苹果树已成为我国北方农村种植最为广泛的果树之一，2006年，我国苹果栽培面积达190万 hm^2 ，约占世界的1/3，产量2610万t，约占世界总产的37%。然而，在这些地区水资源紧缺，干旱问题十分严重，直接影响着苹果的产量和品质，表现为平均单产水平低（约1000kg/亩，仅为美国的1/3，新西兰的1/5），优质商品果率不高（约占30%），高档商品果率更低（约占5%）等。因此，研究果林节水灌溉技术，提高水果的产量和品质，具有重要的现实意义。值得注意的是，在我国北方，除干旱问题外，制约农业发展的另一个问题是水土流失。对干旱和水土流失问题解决的一般措施是分别采取灌溉（例如畦灌、沟灌、喷灌、滴灌、膜上灌等）和水土保持措施（例如淤地坝、梯田、造林、育草等）。然而，在北方山丘区，干旱和水土流失在同一地域内往往是同时并存，仅对其中一个问题进行治理不能彻底解决问题。因此，发展一种能同时解决干旱和水土流失问题的新型节水灌溉方法是十分必要的。蓄水坑灌法便是一种能同时解决干旱和水土流失问题，适合于山丘区果林灌溉的新方法，该方法具有节水、保水、抗旱和水土保持等优点。蓄水坑灌土壤水分运动研究是蓄水坑灌法应用基础

理论中最为基础的问题，也是该方法应用的一个尤为关键的科学问题。对蓄水坑灌法的土壤水分运动特性进行系统研究，对促进蓄水坑灌法的推广和丰富土壤水分运动理论有重要意义。

蓄水坑灌法是1998年孙西欢教授根据我国北方地区干旱和水土流失双重问题而提出的一种新的灌水方法，其最大特点是灌溉水从坑的侧壁入渗，直接进入果树根层。与传统地面灌溉方法相比，根层供水迅速，且大大减小了地面蒸发。蓄水坑不仅可以蓄纳灌溉水，而且可以蓄纳田间雨水，并在相关的田间工程配合下，可以有效地控制水土流失。蓄水坑灌中，灌溉水进入侧壁土壤是一种变水头入渗，其土壤水分运动特异。作者历时13年，在国家自然科学基金项目“蓄水坑灌法理论与技术要素的研究(50379031)”和“蓄水坑灌施条件下土壤水氮的运移特性研究(50979065)”，山西省科技攻关项目“蓄水坑灌法技术要素与设施研究(051115)”以及山西省青年科技研究项目“蓄水坑灌法土壤水分运动试验研究(20031053)”等项目的支持下，系统地研究了不同水头和变水头作用下一维垂直和水平土柱入渗特性，揭示了入渗水头对入渗参数的影响机理，建立了不同水头和变水头作用下一维垂直和水平土壤水分运动数学模型；在室内，对蓄水单坑和多坑入渗条件下土壤水分运动和分布特性进行研究，揭示了蓄水坑灌法土壤水分运动规律，建立了蓄水单坑和多坑土壤水分运动数学模型，分别采用有限差分法和有限元法进行数值求解；在田间，对蓄水坑灌法田间水分运动和土壤蒸发进行系统研究，探明了蓄水坑灌法的节水、保水和抗旱机理，并建立了蓄水坑灌田间土壤水分运动数学模型。本书主要是对蓄水坑灌土壤水分运动研究成果的总结，希望本书的出版对丰富节水灌溉方法与理论，提高果园灌溉水利用系数有积极地促进作用。

本书由孙西欢、马娟娟和郭向红合作完成，其中，孙西欢负责绪论、第三章、第七章、第八章、第十章第三节、第十二章，马娟娟负责第一章、第二章、第四章、第五章、第九章、第十一章，郭向红负责第六章、第十章第一节和第二节、第十三章。全书由孙西欢统稿。

感谢研究生王晓红、郭文华、栗岩峰、周青云、王芳、李永业、毕远杰、朱李英、王春霞、吴能锋，汪增涛、蒯斌、牛世军、戴宏胜、李冰、李京玲、李嵘、于洲海、姚颖、柴向斌、王保刚、张文杰对蓄水坑灌法土壤水分运动研究做出的贡献，感谢研究生崔杰、李靖羿、申星、刘秋丽、郑霞、谷琮琮、樊晓波、尹燕喆、刘浩、龙远莎、张亚琮对本书的文字进行校对。

特别感谢国家自然科学基金委员会和山西省科技厅对蓄水坑灌法土壤水

分运动研究的大力支持。

本书参考和引用了许多专家、学者的文献，在此对他们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者和专家多加批评指正。

作者

2011 年 10 月

目 录



前言

绪论	1
第一节 研究背景	1
第二节 节水灌溉理论与技术研究进展	2
第三节 果园节水灌溉方法研究进展	5
第四节 蓄水坑灌法简介	9
参考文献	13

第一篇 不同入渗水头作用下一维土壤水分运动研究

第一章 不同入渗水头作用下饱和导水率研究	18
第一节 土壤饱和导水率研究动态	18
第二节 材料与方法	22
第三节 试验结果与分析	25
第四节 小结	32
参考文献	33
第二章 不同入渗水头作用下水平入渗特性研究	35
第一节 土壤入渗研究概况	35
第二节 土壤水分运动基础	39
第三节 不同入渗水头作用下水平入渗试验研究	46
第四节 不同入渗水头对土壤微结构的影响	59
第五节 不同水头作用下水平土柱入渗数值模拟	69
第六节 小结	76
参考文献	77
第三章 不同入渗水头作用下垂直入渗特性研究	79
第一节 不同入渗水头作用下垂直入渗试验研究	79
第二节 不同入渗水头条件下的 Green - Ampt 模型	89
第三节 不同入渗水头条件下土壤水分运动数值模拟	94
第四节 小结	102

参考文献	103
第四章 变水头入渗条件下一维垂直入渗特性研究	105
第一节 变水头作用下垂直入渗试验研究	105
第二节 基于 Green - Ampt 模型的变水头积水入渗模型与参数求解	107
第三节 变水头条件下土壤水分运动数值模拟	113
第四节 小结	117
参考文献	118

第二篇 蓄水单坑土壤水分运动特性研究

第五章 蓄水单坑土壤水分运动试验研究	119
第一节 土壤水分运动研究进展	119
第二节 蓄水单坑土壤水分运动试验的设备与方法	122
第三节 试验结果分析	130
第四节 小结	141
参考文献	142
第六章 蓄水单坑土壤水分运动有限差分模拟	146
第一节 土壤水分运动数值模拟研究进展	146
第二节 土壤水分运动参数的确定	153
第三节 蓄水单坑土壤水分运动模型	170
第四节 蓄水单坑土壤水分运动模型差分求解	173
第五节 试验验证	181
第六节 小结	185
参考文献	186
第七章 蓄水单坑土壤水分运动有限元模拟	189
第一节 蓄水单坑土壤水分运动数学模型建立	189
第二节 模型求解	191
第三节 试验验证	224
第四节 蓄水单坑湿润体影响因素分析与模拟	225
第五节 小结	231
参考文献	232

第三篇 蓄水多坑土壤水分运动特性研究

第八章 蓄水多坑土壤水分运动试验研究	234
第一节 试验材料与方法	234
第二节 蓄水多坑水分运动试验结果分析	235
第三节 小结	241

第九章 蓄水多坑土壤水分运动数值模拟	242
第一节 蓄水坑灌土壤水分运动数学模型	242
第二节 蓄水坑灌土壤水分运动数学模型的数值求解	245
第三节 坑壁变水头入渗边界条件的数值模拟	254
第四节 数值计算模型的验证	257
第五节 蓄水坑灌土壤水分运动数值模拟结果后处理	261
第六节 蓄水坑灌土壤水分运动模拟软件的设计	267
第七节 蓄水多坑土壤水分运动特性分析	273
第八节 小结	275
参考文献	276

第四篇 蓄水坑灌果园土壤水分运动研究

第十章 蓄水坑灌田间工程设计	277
第一节 试验区概况	277
第二节 试验区田间工程设计	278
第三节 蓄水坑灌闸管供水系统设计与水力计算	279
第十一章 蓄水坑灌果园土壤水分运动试验研究	285
第一节 田间土壤水分运动试验方案	285
第二节 地面灌溉与蓄水坑灌法土壤含水率分布特征对比分析	285
第三节 蓄水坑灌条件下土壤含水率分布特征	288
第四节 蓄水坑灌条件下坑深对土壤含水率分布特征的影响	291
第五节 小结	293
第十二章 蓄水坑灌条件下果园棵间蒸发与蒸腾研究	295
第一节 土壤蒸发研究进展	295
第二节 初始含水率均匀条件下室内土壤蒸发试验研究	301
第三节 蓄水坑灌条件下土壤蒸发室内模拟试验研究	304
第四节 蓄水坑灌条件下果园棵间蒸发研究	313
第五节 蓄水坑灌条件下果园蒸发蒸腾量计算	324
第六节 小结	335
参考文献	336
第十三章 蓄水坑灌果园土壤水分运动数值模拟	340
第一节 数学模型建立	340
第二节 模型求解	343
第三节 模型验证	368
第四节 小结	372
参考文献	373

绪 论

第一节 研 究 背 景

我国是一个水资源缺乏的国家。据有关文献报道,我国多年平均水资源总量约 28000 亿 m^3 , 居世界第 4 位, 但人均水资源量为 2200m^3 , 仅为世界人均占有量的 $1/4$, 相当于美国人均占有量的 $1/6$, 居世界第 121 位, 是世界人均占有水资源最贫乏的 13 个国家之一。预计到 21 世纪 30 年代, 我国人口达到 16 亿人高峰时, 在降水总量不减少的情况下, 人均水资源量将下降到 1760m^3 , 逼近国际公认的 1700m^3 的严重缺水警戒线。并且, 我国水资源时空分布不均衡, 地区分布差异性极大。80.4% 的水资源集中分布在长江流域及以南地区, 长江以北地区水资源只占全国的 19.6%, 而耕地却占我国的 59.2%。这种水土资源的极不匹配, 致使我国北方干旱半干旱地区旱灾频繁发生。随着国民经济迅速发展和人口急剧增长, 干旱缺水状况呈不断加剧趋势。据报道, 自 1949~1998 年, 全国平均每年受旱面积达 $21.6 \times 10^6 \text{hm}^2$ (3.24 亿亩), 约占全国播种面积的 17%。近年来, 北方地区由于干旱过量开发地下水, 已形成了一个淮河以北、松花江以南的严重缺水区。部分地区曾发生河水断流、河道萎缩、地下水位下降、地面沉降、土地荒漠化等现象。水资源的缺乏, 对我国的生存和发展已构成严重威胁, 成为阻碍我国国民经济可持续发展的“瓶颈”。

农业是我国的用水大户, 年用水总量 4000 亿 m^3 , 占全国用水总量的 70% 以上, 其中农田灌溉占农业用水量的 90%~95%。随着人口、经济的快速增长, 工业、城市用水必将大幅度增加, 农业用水在全国用水总量中的比重将不断降低。据专家预测, 到 2030 年农业用水将下降到全社会总用水量的 50%~60%。根据我国水资源条件和经济社会发展对水的需求, 今后农业灌溉用水不可能保持在正增长的水平上, 农业对灌溉将提出更高的要求。需强调的是, 目前我国每年缺水 400 亿 m^3 , 其中农业缺水 300 亿 m^3 。然而, 我国农业生产中水量浪费现象严重, 每年高达 1000 亿 m^3 。我国的农田灌溉水利用率只有 0.45 左右, 也就是说有一半多的水在输送和灌溉过程中被白白浪费掉了, 不能被农作物利用; 其次, 农田对自然降水的利用率低, 仅达到 56%; 第三, 农业用水的效率不高, 其中农田灌溉水的利用效率仅有 $1.0\text{kg}/\text{m}^3$ 左右, 旱地农田水分的利用效率为 $0.60 \sim 0.75\text{kg}/\text{m}^3$ 。据权威部门估计, 在不增加现有农田灌溉用水量的情况下, 2030 年全国缺水将高达 1300 亿~2600 亿 m^3 , 其中农业缺水 500 亿~700 亿 m^3 。若将农田灌溉水的利用率由目前的 0.4~0.5 提高到先进国家的水平 0.7, 则可节水 900 亿~950 亿 m^3 。如同时提高水的利用效率, 农业节水后不仅可满足我国 16 亿人口的食物生产用水, 还能节约出 400 亿~500 亿 m^3 的水量用于国民经济的其他重要行业。可见, 农业节水对保障国家用水安全、粮食安全和生态安全, 推动农业和农村经济可持续发展, 具有重要的战略地位

和作用。这就要求我国必须走节水农业之路,农田灌溉必须以节水求发展。因此,大力研究和发展节水灌溉方法与技术,已成为建立节水高效农业、解决工农业用水矛盾、缓解水资源紧张局面、促进国民经济可持续发展的一个重要课题。

对于我国北方地区而言,不仅存在着干旱问题,而且还存在着严重的水土流失现象。由于降水主要集中在6~9月,且暴雨较多,因而使含有大量肥分的表土随水流失,直接影响着农业生产及生态环境的良性发展。如黄河流域的黄土高原,水土流失面积高达总面积的70.9%,黄河流域的坡耕地年流失水量 $300\sim 600\text{m}^3/\text{hm}^2$,流失表土 $15\sim 75\text{t}/\text{hm}^2$,最高可达 $150\text{t}/\text{hm}^2$,流失的土壤中含有机质 $6\sim 8\text{kg}/\text{t}$,全氮 $0.8\sim 1.5\text{kg}/\text{t}$,全磷 $1.1\sim 1.5\text{kg}/\text{t}$,全钾 $20\text{kg}/\text{t}$,每年流失16亿t入黄泥沙中氮、磷、钾总量约4000多万t。严重的水土流失,大大降低了土地生产力。水资源短缺加之气候干旱和水土流失的双重作用,致使该地区农业用水更加紧张,严重影响到当地经济的可持续发展。所以,在我国北方既要发展节水灌溉方法与技术,还要注重降雨径流利用技术的研究与应用、防止水土流失,创造良好的生产和生态环境,这样才有利于实现可持续发展战略。

20世纪80年代以来,随着我国农业产业结构的不断调整,我国北方的果林种植面积大大增加,从1993年开始,我国果树栽培的面积和果品的总产量稳居世界第一位,至2003年我国果林面积达943.67万 hm^2 ,成为我国种植业中位列粮食、蔬菜之后的第三大产业,果林的灌溉用水量在农业用水中也占有较大比重。因此研究和开发具有水土保持作用的果林节水灌溉方法与技术,对于缓解我国北方水资源紧缺局面、提高水资源的高效利用、促进国民经济的可持续发展,具有重要的意义。

目前,我国的果林灌溉方法大多仍采用传统的地面灌水方法,虽然其方法简单,但水量浪费较为严重,据统计,灌溉水利用率仅为 $0.4\sim 0.5$ 。现阶段,国内外研究和应用的节水新技术主要有喷灌、微灌等,节水效果明显,技术较为成熟。这些新技术在发达国家得到了普遍应用,在我国的一些经济发达地区和具有较高经济效益作物的灌溉中也得到了一定的应用。但这些新技术对水源的水质要求较高,而且设备投资较大,因此在我国北方多沙河流和经济欠发达地区的推广有一定难度。同时,这些技术尚不具有利用当地降雨径流、有效控制水土流失及涵养水源的作用。国内有的学者曾提出了适用于干旱缺水地区果林灌溉的穴灌法,该方法在树冠下挖若干个坑穴,充填以秸秆并覆土,这使灌溉水能迅速入渗到根区,并减少蒸发,因而具有节水性,但该方法的土壤水分运动特性等诸多理论问题尚未进行深入研究,技术参数难以定量确定,与之配套的田间工程也未进行研究;同时该法在充分利用当地降雨径流方面也显得能力不足。在我国北方地区进行水资源合理利用,应坚持水的有效保持和水的高效利用并重的原则,“保持”是前提,“利用”是关键。据此现状,孙西欢教授提出了一种适合于我国北方山丘区果林灌溉的方法——蓄水坑灌法。蓄水坑灌条件下的土壤水分运动研究是该方法推广应用的基础理论问题之一,也是蓄水坑灌节水理论与技术形成的最关键问题之一。

第二节 节水灌溉理论与技术研究进展

农业是国民经济的基础,水利是农业发展的命脉。20世纪90年代以来,我国北方

地区干旱缺水情况日益严重,出现了水资源危机。国家实施可持续发展战略,提倡普及节水灌溉,强调把节水灌溉作为一项革命性措施来抓,要求采取多种措施,努力提高用水效率和效益,使农田灌溉从粗放的外延扩张为主,转到集约、内涵挖潜为主的轨道上来。

一、农田灌溉的节水途径

农田供水从水源到形成作物产量要经过四个环节(孙景生,2000;白丹等,2001),即从水源取水,通过输水、配水等一系列工程设施把水送到所需灌溉的作物地块;通过田间灌水技术将水源来水转化为土壤水;通过作物根系吸水,由土壤水转化为生物水;通过作物的一系列生理过程在作物水分的参与下形成作物产量。每一环节都有水的损失。长期以来,由于技术和管理水平落后、灌溉设施老化失修等原因,目前我国灌溉水的利用率仅为45%左右,与发达国家80%的利用率相差很远;我国水分生产效率仅为1.0kg左右,而发达国家大都在2.0kg以上,以色列已达到2.32kg。因此,提高水分利用效率是节水灌溉的核心,其关键在于探讨各个环节的节水途径、节水措施及其潜力,尽可能地减少每一环节中水的无效损耗。前两个环节涉及如何将作物所需水量从水源送到田间并转化为土壤水,与作物生理过程无直接联系,靠减少输水损失、提高灌水均匀度和减少田间深层渗漏等工程技术措施以及合理用水的节水灌溉制度,设法提高土壤储水量与水源取水量的比例、作物耗水量与土壤储水量的比例来提高水的利用效率。前两个环节节水潜力很大,是当前节水灌溉发展的主要方面。后两个环节关心的是如何高效利用土壤储水的问题,属基础节水范畴,靠减少棵间土壤蒸发的无效损耗和作物奢侈蒸腾的各种农业技术措施,设法提高蒸腾量与耗水量、生物量与蒸腾量和经济产量与生物量的比例来提高水的利用率。

二、农田灌溉的节水措施

节水灌溉是一项系统工程。现代节水灌溉的发展目标是以提高水的利用效率为核心(黄修桥等,2001),使水利工程措施和农业技术措施相结合,最大限度地利用水资源。要保证我国农业的持续发展,必须建立全方位的节水体系(冯广志,1998)。国内外全方位的节水灌溉体系主要包括如下(李远华,1998)。

(1) 水资源的开发利用。就是要充分利用现有水源、并扩大水源。现有水源工程有水库、井、蓄水池等。既要涵养这些水源,减少丰枯水量的变化;又要扩大水源,即通过地表水和地下水联合调度、污水回收、蓄积降水、海水淡化、微咸水分馏、人工降雨催化作用、拦蓄农田径流回补地下水等方法从整体上提高我国农业抗旱减灾能力(上官周平等,1999)。美国和日本等发达国家非常重视地表水和地下水的统一调度与合理利用,在美国加利福尼亚州南部,已有多年的地面水和地下水联合运用的历史。日本自1976年以来,已陆续修建了野母崎、皆福、常神和绫里川4座地下水库,有效地促进了水资源的合理开发利用(吴景社,1994)。将工业和生活污水用于农业灌溉正随着水资源的日益紧缺而备受各国关注,以色列、美国、澳大利亚和日本均发展了比较成熟的污水灌溉技术(古智生,1999)。我国目前已采用了包括雨水利用、劣质水和回归水重复利用等新水源开发技术来弥补灌溉水的不足(张祖新,2000;刘润堂等,2002)。

(2) 减少输水过程中的水量损失。为了提高灌溉水利用率,即使是美国、罗马尼亚和日本等喷微灌发展较快的国家,仍然十分重视对地面灌水技术的更新与改进。对于新建灌溉渠系实行管道化是地面灌溉发展的主趋势。目前,美国、日本大型灌区中一半已实现了管道化,在美国干旱地区,如英皮尔、盐河、全美以及圣华金等灌区的支渠以下输水系统已大部分采取地埋管道;罗马尼亚的地面灌溉系统中,斗渠以上一般采用 U 形钢筋混凝土渠道,农渠以下则全部采用管道。对于旧灌区改造,渠道衬砌则是减少渗漏,提高水利用率的主要措施。我国“七五”期间,低压管道输水灌溉技术被列入重点科技攻关项目,在管道管材及配套装置的研制上取得了一批成果。平原井灌区、渠灌区和提水灌区管道输水灌溉技术得以广泛应用,至 2007 年其应用推广面积约 557 万 hm^2 。

(3) 实施田间节水型灌水技术。田间灌水方法的好坏直接影响到灌水均匀度和田间水量损失的大小。世界各国中,以以色列为代表,推行高新技术(喷灌、滴灌)高投入、高效益的节水灌溉;以美国为代表,一方面改造地面灌溉工程,另一方面推行各种先进的灌溉技术,并创造出许多全新的方法,如波涌灌溉、绳索控制灌溉、负压差灌溉等。我国目前采用较多的节水型技术有节水型地面灌水技术,如隔沟(畦)灌、波涌灌、膜上灌等;喷灌;微灌,包括滴灌、微喷灌、涌泉灌和地下渗灌。

(4) 采取节水灌溉制度措施。节水灌溉理论是与“丰水高产”的充分灌溉理论相对应的,其模式有四种(高旺盛等,1999):①非充分灌溉制度(Limited Irrigation)(李杰,1998),在水源有限的条件下把有限水最优分配到作物需水关键期;②调亏灌溉制度(Regulated Deficit Irrigation)(史文娟等,1998;郭相平等,1998;P D Mitchell 等,1984;R C Ebel 等,1995),从作物生理角度出发,在一定时期内主动给作物施加一定程度的有益亏水,使作物经历亏水锻炼后达到节水增产,并改善农产品品质的目的;③局部灌溉,以滴灌、渗灌等方式按时按量把水直接输向植物根部,仅湿润植物根部土壤;④控制性分根交替灌溉(Control Root-splited Alternative Irrigation)(康绍忠等,1997),即人为保持和控制作物根系始终有一部分生活在干燥或较干燥的土壤区域中,限制该部分的根系吸水,让其产生水分胁迫的信号传递到叶气孔,形成最优的气孔开度,同时,通过人工控制,使根系活动层的干燥区域交替出现,使不同区域或部位的根系交替经受一定程度的干旱锻炼,减少棵间全部湿润时的无效蒸发损失和总的灌溉用水量,提高根系对水分和养分的利用率,以不牺牲作物的光合产物积累而达到节水的目的。

(5) 农艺节水措施。包括节水增产的水肥综合管理技术、蓄水保墒的耕作技术、适于种植作物的合理布局、秸秆及地膜覆盖的增温保墒技术、抗旱及保水的应用技术以及节水抗旱作物的选种技术等。进入 20 世纪 90 年代以来,美国农业生物技术领域极为活跃。在种植业领域,通过基因的转移和重组,已开发出一批高产、优质的作物新品种,不少生物技术产品已在大田中推广应用。分子生物节水技术、化学节水技术等已被纳入并作为我国 21 世纪节水农业高新技术中的重点研究领域(吴景社等,2000)。

(6) 节水管理措施。建立现代化的灌溉管理技术体系,应用高新技术使农业灌溉向精准化方向发展是当今发达国家的普遍趋势。在美国、以色列等国(Renato SF 等,1998),空间信息技术和计算机模拟技术被大量用于监测和预报作物水分和土壤墒情,灌溉预报技

术得到迅速发展,一些具有代表性的节水灌溉预报程序也广泛应用于灌区水管理。同时,各国十分重视发动农民参与水管理和加强量配水建设。在我国,管理是节水灌溉体系中最薄弱的环节,目前我国灌区现代化集成、配套灌溉管理技术水平较低,灌区缺乏数据自动收集系统和数据传输系统,控制系统方面已开发的产品多为面向温室的灌溉施肥系统,还没有形成大规模的、应用范围广的成套灌溉控制产品(张兵等,2003)。高效农业和精准农业要求的水资源高效利用体系尚处于研究示范阶段。因而国内专家提出建设国家节水灌溉试验与监测网络的建议,以期提升我国的灌溉管理水平,提高灌溉水利用效率,改善生态环境(康绍忠,2002)。

综上所述,农田灌溉的节水途径可分为四个环节,其中在将水源之水转化为土壤水的过程中节水潜力很大,可通过水资源的开发利用、减少输水过程中的水量损失和实施田间节水灌溉技术等措施提高水的利用率。国内外的节水灌溉实践已证实了这一点。结合我国北方地区的气象、水文、经济等实际情况,由于我国北方干旱和半干旱地区可开发利用的水资源很有限,许多地区已形成严重超采地下水的局面,因而只有合理利用现有水源、充分利用当地降雨径流及涵养水源才能实现水资源的可持续利用;只有采用注重科学的田间节水灌水方法才能实现水资源的高效利用。

第三节 果园节水灌溉方法研究进展

随着人们生活水平的提高,高产优质果品需求量逐年增加,果园的种植面积不断扩大。至2009年,我国果园面积由1978年的165.67万 hm^2 增加到1068万 hm^2 。而这些果园大多数分布在无灌溉条件或灌溉条件较差的坡地上,水的利用系数极低(40%以下)(史书强等,2002)。干旱直接影响着水果的产量和品质,表现为平均单产水平低、优质商品果率不高、高档商品果率更低等。因此,研究果园节水灌溉技术,提高水的利用率和利用效率,对于水果产量和品质的提高、节水农业的持续发展具有重要的现实意义。由于水资源的紧缺,节水灌溉技术不断发展,在果园得到普遍应用和推广的节水灌溉技术大致有:喷灌、滴灌、微喷灌、小管出流、渗灌和地面节水灌溉技术。

一、果园喷、滴灌等节水灌溉方法及发展

喷灌是利用专门的设备将有压水送到灌溉地段,并喷射到空中散成细小水滴,均匀地散布在田间进行灌溉的灌水方法。喷灌技术在国外发展较早(郭慧滨等,1998)。在20世纪30年代,世界上科技先进、经济发达的国家就开始研究喷灌这一先进的节水灌溉技术了。30~40年代,由于金属冶金、轧钢技术和机械工业的发展,投资大的地埋固定管逐渐被薄壁金属移动管代替,此时用缝隙或折射喷头喷洒作物;第二次世界大战后,由于大型自走式喷灌机和摇臂式喷头等技术的发展,使喷灌技术再次迅速发展。同时薄壁金属管的制造工艺和金属材料得到进一步改进提高,该喷灌系统在法国、意大利、罗马尼亚等欧洲国家得到普遍使用;70年代初期,随着特制PE输水管和塑料软管问世,卷管式喷灌机快速发展起来,使得喷洒质量大大改善。80年代,在西班牙LQD灌区应用的固定式、中心支轴式和平移式喷灌机,其均匀度分别达到68%、75%和80%(Dechmi F等,

2003)。喷灌的优点是：省水、省工、省地、增产、提高品质、保持水土、根据作物需水要求适时、适量灌水等，且便于机械化、自动化控制。其缺点是：受风的影响大，有空中飘移和植物截流量损失。目前，发达国家的喷灌技术均朝着低压、节能型方向发展，并借鉴微灌技术的特点，积极发展喷灌的多目标利用功能（余根坚等，2002）。

滴灌是按照果树需水要求，通过低压管道系统与安装在末级管道上的滴头，将水和养分均匀、准确地直接输送到果树根部附近的土壤表面或土层中进行灌溉。水流离开滴头进入土壤后，由于水势梯度的作用，水分向四周扩散，是典型的三维土壤水分入渗问题。微喷灌是通过低压管道将水送到作物植株附近并用专门的微喷头向作物根部土壤或作物枝叶喷洒细小水滴的一种灌水方法。滴灌和微喷灌技术是 20 世纪 50 年代后由于塑料工业的飞速发展而逐渐发展的。70 年代中期，在以色列、澳大利亚等国得到迅速推广应用。Mitchell 等于 1982 年提出了地下滴灌系统设计、安装和运行管理指南，意味着地下滴灌技术开始步入实用阶段（W. H. Mitchell 等，1982）。从 80 年代开始到现在，在国外，以美国的 C. R. Camp（1997）、Phene（1992）等为首的一批灌溉专家对地下滴灌技术进行的持续研究促进了这项技术的发展。由于滴灌和微喷灌系统要克服灌水器堵塞的缺陷，因此，发展速度不如喷灌快。但是，近一二十年来，以色列把微灌技术视为国宝，开发推广取得举世瞩目的成绩。在以色列，有微灌逐渐替代喷灌的趋势（G. Stanhill，1992），其根本原因在于以色列水资源十分紧缺，节水是开发推广微灌技术的首要目的。至 20 世纪 90 年代中期，以色列、美国、罗马尼亚的微灌面积分别占各国灌溉面积的 99%、40.2%、80%（吴景社，1994）。根据国际灌溉排水委员会（ICID）2000 年的调查，世界微灌面积增长迅速（李光永，2001）。美国在 20 世纪 90 年代间微灌面积增加了 73%，达 105 万 hm^2 ，占世界总微灌面积的 29.7%，灌溉方式上由地表微灌向地下滴灌发展，在灌溉作物上美国微灌技术的应用逐步由果树蔬菜等少数经济作物向大田作物发展（Thompson T. L. 等，2002）。根据国际灌溉排水委员会 2003 年公布结果（许志方等，2004），德国、法国等欧洲国家微灌面积已发展到占总灌溉面积的 90% 以上，喷灌多以大田粮食作物为主，滴灌主要灌溉园艺作物。美国、西班牙等国微灌面积占其总灌溉面积的 50%~70%，澳大利亚微灌面积占其总灌溉面积的 20%~30%，而发展中国家微灌面积仅仅占其总灌溉面积的 2.6%~5%。现代化的滴灌系统都带有施肥装置，并在田间设水分、养分传感器和测定计算水肥需求量的计算机，按时按量将水和肥料直接送入作物根部。这种全封闭式的配肥与灌水系统使水肥的利用率达到 90% 以上，用水量减少 30%，节省肥料 30%~50%，有效地防止了土壤盐碱化和板结，增加了作物产量（彭世彰等，2004）。据最新统计，目前世界上超过 10% 的果树在采用微灌技术进行灌溉，果树采用微灌的比例比所有灌溉作物采用微灌的比例多出 10 倍。

我国于 20 世纪 50 年代末引进喷灌技术和设备，70 年代中期才陆续开展喷灌技术研究和设备研制工作。喷灌技术最先用于果园后推广至大田，到 2003 年底，在全国 5590 万 hm^2 农田灌溉面积中，喷灌面积约 263.4 万 hm^2 ，灌溉面积所占比例小于 5%。喷灌的高投资是制约其在我国大面积推广的根本原因。在我国有条件的地区采用喷灌技术的资料表明，喷灌较地面灌溉省水 30%~50%，喷灌果树增产 15%~20%，水的利用率高达 80%~90%。在我国新疆，至 1996 年，喷灌面积占该地区已有节水灌溉面积的 90.2%。塔里

木盆地梨园喷灌试验结果表明,喷灌比沟畦灌节水 41% (季方等, 2001)。

我国自 1974 年从墨西哥引入滴灌设备, 开始滴灌技术的研究和设备的研制, 但收效甚微。1990 年以后, 生产微灌设备的外国公司纷纷到我国争夺市场, 促进了我国微灌的发展。如今, 我国地面滴灌技术应用和设备开发已取得长足的进展。滴灌时, 水以点滴或微细流方式输到作物根部, 供作物直接吸收, 使灌溉水基本上不产生深层渗漏、减少蒸发, 具有提高水的利用率、提高果实质量、节水、节能、增产的特点。2010 年, 全国耕地面积 18.27 亿亩, 有效灌溉面积 8.77 亿亩, 喷、滴灌溉面积 407.1 万 hm^2 , 其中滴灌面积 140.7 万 hm^2 , 主要用于果树等经济作物及温室大棚的设施农业作物。据有关滴灌果园试验结果证明 (卡邵东, 1999; 石扶生等, 2000), 在同样条件下, 滴灌较地面灌增产 4%~16%, 比地面灌节水 65%~75%, 滴灌时灌溉水的有效利用率达 95%。但因滴头堵塞问题长时期未能获得彻底解决, 滴灌设备的寿命较短、投资回收率不高, 而且在无降雨的地区单纯滴灌果树, 滴灌土层较浅, 根系横向发达而向下生长性差, 使得其抗风能力降低。这些因素致使滴灌技术在我国不能快速发展。针对这一状况, 卡邵东 (1999)、齐士福 (2000)、刘洪先 (2003)、汤全秀 (2004) 等对滴灌系统的防堵塞措施进行了研究, 韩丙芳等 (2004) 对滴灌管堵塞防治进行了试验研究并提出防治措施, 洪亮 (2004) 就地理滴灌系统使用中发现问题及处理方法进行了详细介绍。

渗灌是继喷灌、滴灌之后的又一节水灌溉新技术。是在低压条件下, 通过埋于作物根系活动层的灌水器 (微孔渗水管), 根据作物的需水量定时定量向土壤渗水供作物生长。渗灌技术的初步应用始于 20 世纪 80 年代初期, 主要用于果树。渗灌技术发展的关键是渗灌管的研制。美国利用废旧橡胶和塑料生产渗灌管, 法国的渗灌管是由塑料加发泡剂和成型剂混合后挤出成型, 我国曾利用渗水瓦管和塑料管打孔作为渗灌管进行了一系列的渗灌试验, 90 年代初, 山西运城等地以微孔聚乙烯管为灌水器再度掀起渗灌高潮。这些渗灌管均取得良好效果。渗灌技术在美国、法国和日本等已进入较大面积的推广应用阶段, 在一些严重缺水的国家和地区, 如中东已得到较广泛的应用。目前的应用范围集中于果树、蔬菜、花卉、庭院草坪和一些免耕的大田作物。我国有关资料表明, 果园采用渗灌措施比地面灌节水 80% 以上, 节水效果明显。曹昌林等 (2001) 就果园渗灌管的材料 (XSG 橡塑共混渗水管) 的使用技术和节水效应进行了研究。微孔渗灌具有明显节水、节能等特点, 但存在生物堵塞这一致命弱点, 对水质要求严格, 使其推广受到制约。为此, 王彦军 (1996) 较详细地介绍了渗灌系统的田间设计参数选择及生物堵塞的预防和处理办法; 李援农等 (1999) 在大田进行了微孔管防堵塞处理技术研究, 逢焕成等 (2004) 研制出了新型的亚表层节水防堵系统。这些为渗灌技术的应用和大规模推广奠定了基础。

微喷灌弥补和克服了滴灌和喷灌在果园应用中的许多弊病。节水试验表明, 微喷灌在节水、改善土壤物理性质, 枝叶、树冠、根系发育以及果实产量和单果重等都优于畦灌和传统漫灌。牛司美等 (1994) 研究探讨了微喷灌技术在山丘区果园灌溉中管网的设计、安装, 重点研究探讨了该技术应用于山区果园的灌溉制度和灌水定额。程文亮等 (2002) 认为对于低山丘陵果园, 微喷灌是最为合适的灌溉方式。在山东曲阜市南辛镇灌区果园实行了全自动化微喷灌, 与大水漫灌相比, 其节水节能率在 80% 以上, 增产、

增收效益显著。

小管出流灌溉（涌泉灌）是中国农业大学水利与土木工程学院研究开发的一种新型节水灌溉技术。其输配水系统和滴灌大致相同。主要技术改进之处是用大孔径的灌水器代替小孔径的滴头，克服了滴头易堵塞的特点，并配有稳流器，以保证整个系统出水的均匀性。出水时以低压水柱形式向外涌水，可满足果树单株需水量较大而又不浪费水的要求。近年来，小管出流灌溉已在我国新疆、山东及山西等地果园中进行了推广示范。有关资料表明，与地面大水漫灌相比，其节水率为 65%~70%，具有节水率高、增产、省工、故障少、运行可靠等优点，特别适用于果树和树木的灌溉需要。

滴灌、微喷灌、小管出流、渗灌技术在田间仅湿润部分土壤，与漫灌或喷灌相比，其可以更好地控制水的利用，提高水的利用率，精确施肥，因此这些灌溉技术更适用于我国北方干旱缺水区的果树灌溉。我国 2003 年微灌面积约为 37.1 万 hm^2 ，占我国总灌溉面积的 0.6%，主要应用在北方的果树滴灌，南方茶园微喷灌，大中城市郊区蔬菜地、花卉滴灌以及西北严重干旱缺水地大田作物的集雨工程滴灌中。果园究竟采用那种灌溉技术，要结合当地的社会经济条件、地形条件、水文状况等因素综合考虑。朱德兰等（1998）利用经济指标，在果园对不同的灌溉措施进行了经济效益分析、评价。从经济效益分析得出的益本比为：渗灌 0.89、小管出流灌 0.66、滴灌 0.75、微喷灌 0.55。李怀有（2001）对半固定式滴灌、固定式滴灌、渗灌、滴渗灌、（小管出流灌）涌泉灌 5 种果园微灌方式在滴灌湿润剖面、湿润区域与果树根系耦合性、灌水均匀度、运行管理、投资、用工量等方面进行了比较分析，建议固定式滴灌和渗灌应控制发展，滴渗灌、半固定式滴灌应加大力度推广，涌泉灌应加大配套管件开发，在经济条件较好的果园进行推广。

二、果园地面节水灌溉技术

与传统地面漫灌方法相比，喷、微灌具有明显的节水效益。但因其设备投资昂贵、技术要求高，这与目前我国广大农村经济欠发达、劳动管理人员水平低等现实不匹配。因而，我国 80% 的果园仍采用地面灌水方法。水资源的日益匮乏与果园灌溉水量不断增加这对新矛盾，促使许多学者研究和推广了适合我国广大农村经济条件、水源状况、劳力多等实际情况的简易果园地面节水灌溉技术。

1. 格田灌

格田灌是在果树间筑土埂，埂高一般为 15~20cm，把果园划分成许多长方形或正方形的小区，由输水沟向各小区供水的灌溉方法。一般一棵树为一个独立的小区。这种灌水方法能使灌溉水分与果树根系相接触，使整个根系受水均匀。但其主要缺点是需培筑许多纵横土埂，破坏土壤结构，且使土壤表面板结，又妨碍机械化耕作。

2. 环灌

环灌是修筑直径为树冠直径 $2/3 \sim 3/4$ 并带有土埂的环形沟，由输水沟向环形沟供水的灌溉方法。环灌湿润土壤范围较小，主要湿润果树根群部分的土壤，因此灌水量较小，用水较经济。此外，环灌对土壤结构的破坏也较小，但对机械化耕作仍有一定程度的妨碍。环灌多应用于幼龄果树，是一种较好的果园节水灌水方法。