

国家“十二五”公益性行业科研专项研究专著

中国北方旱区主要粮食作物 滴灌水肥一体化技术

尹飞虎 等 著

非
外
借



科学出版社

国家“十二五”公益性行业科研专项研究专著

中国北方旱区主要粮食作物 滴灌水肥一体化技术

尹飞虎 等 著

科学出版社

内 容 简 介

本书基于“十二五”公益性行业(农业)科研专项“北方旱作农业滴灌节水关键技术与示范”的研究成果,结合项目团队多年相关研究和生产实践,总结凝练形成了中国北方旱区主要粮食作物滴灌水肥一体化技术。全书共分七章,第一章主要分析了滴灌水肥一体化技术的国内外现状、存在的问题及发展趋势,概述了项目的研究进展及主要成就;第二章介绍了田间作物滴灌技术关键设备与配套产品的研发和应用成果;第三章从理论与实践两方面阐述了北方小麦、玉米等作物抗旱品种筛选技术及鉴定指标体系;第四章全面论述了主要粮食作物滴灌专用肥及水肥一体化智能决策和监测管理软件平台的研制与应用技术;第五章、第六章分别重点介绍了北方典型区域主要粮食作物滴灌条件下水肥运筹规律和水肥一体化高产高效栽培技术模式;第七章依据多年、多点的试验结果,总结分析了北方旱作类型区滴灌水肥一体化技术的经济效益、社会效益和环境效应。

本书核心内容来源于多年研究成果,并已付诸生产实践检验,对从事相关研究与应用的科技人员、政府决策及管理人员都具有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

中国北方旱区主要粮食作物滴灌水肥一体化技术/尹飞虎等著. —北京:科学出版社, 2017.12

ISBN 978-7-03-051916-0

I. ①中… II. ①尹… III. ①干旱区—粮食作物—滴灌—水肥管理—一体化—栽培技术 IV. ①S510.7 ②S365

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 036274 号

责任编辑:李 迪 / 责任校对:郑金红

责任印制:肖 兴 / 封面设计:刘新新

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张:29

字数:681 000

定价:188.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《中国北方旱区主要粮食作物滴灌水肥一体化技术》

著者名单

(按拼音排序)

第一章 尹飞虎

第二章 陈 林 程 莲 李 寒 田宏武 王士国 吴文彪
邢 振 杨 铭 姚 琼 张石锐 郑文刚

第三章 陈 云 杨国江

第四章 党红凯 郭进考 韩新年 柳斌辉 徐红军
张士昌 张文英

第五章 第六章 陈 静 董平国 黄兴法 兰印超 李 虎
李光永 刘慧涛 刘尹明 秦 焱 石晓华
孙云云 檀海斌 王国栋 胥婷婷 杨海鹰
杨建国 曾胜和 张 磊 张 荣 张 洋

第七章 董云社 高玉山 郭树芳 何 帅 刘方明 刘占卯
孟繁盛 彭 琴 石学萍 王凤新 王迎春 薛 源
杨林生 虞江萍

序

粮食生产与国计民生息息相关。由于中国人口数量大，水土资源人均占有量少，且空间分布不均衡，粮食安全显得尤为重要。进入 21 世纪以来，全国粮食生产重心北移，北方的粮食产量已逐渐超过南方。中国粮食由“南粮北运”向“北粮南运”转变，且随着南方工业化和城镇化的进一步发展，北方粮食生产的比例将继续增加。

“有收无收在于水”，这在我国北方特别是绿洲农业区更为突出。我国北方耕地约占全国的 65%，但水资源仅占全国的 1/3。一方面是水资源短缺，另一方面是用水的浪费，特别是农业灌溉用水量大、水分生产效率低。农业高效用水仍然是当今和今后需重点研究的问题。

肥料是作物的粮食，是决定作物产量高低的主要因素，长期以来一直是粮食增产的重要保证。但是，近年来由于地区间、农户地块间和氮磷钾养分间投入不平衡，粮食作物的单位面积化肥用量达到 $434.3\text{kg}/\text{hm}^2$ ，而化肥偏生产力仅为 $16.9\text{kg}/\text{kg}$ 。我国化肥的大量使用虽然提高了作物产量，但也给农民带来了经济效益的损失，还对环境产生了严重的负面影响，并威胁到我国农业的可持续发展。

水肥一体化技术是基于滴灌系统发展而成的节水、节肥、高产、高效的现代农业工程技术，可以实现水分和养分在时间上同步、空间上耦合，从根本上改变了传统的农业用水方式和农业生产方式，根据作物需水规律适时适量补水，不产生地面径流，减少渗漏损失，使水的有效利用率提高。运用滴灌随水施肥，肥料可根据作物需肥规律，按时、按量准确地随水将所需养分直接送达作物根部，并能保持较长时间的、有利于作物根系吸收的水肥环境，提高了肥料的利用率。同时，通过滴灌随水施肥技术的应用，降低了肥料使用量，抑制了氮肥挥发对大气的污染，减少了肥料对土壤和水体环境的污染。此项技术极大地发展了农业生产力，明显地提高了作物产量，经济效益、社会效益和生态效益显著，为我国北方主要粮食作物的绿色高效生产提供了强有力的技术支撑。

“北方旱作农业滴灌节水关键技术与示范”项目首席专家尹飞虎研究员及其科研团队 2012~2016 年在河北、吉林、山东、甘肃、宁夏、内蒙古、青海、新疆设立主要粮食作物水肥一体化示范田，研究春小麦、冬小麦、玉米、大豆、马铃薯、青稞等主要粮食作物在滴灌模式下的水、肥需求规律和施用技术及关键设备，建立了北方旱作农业类型区主要粮食作物滴灌绿色高效栽培技术模式，提高了作物灌溉保证率、水分利用效率和肥料利用率，支撑了区域农业高效用水、科学施肥和现代农业的发展。

该书内容丰富，创新性、科学性、系统性和实用性强，可为北方旱作区主要粮食作物水肥资源高效利用提供科学依据和技术指导。我特向广大节水农业与水肥高效利用研究和实践者推荐此书。



中国工程院院士
中国农业大学教授
2016年12月

前言

水、肥是农业生产中最基本的要素，也是影响作物生长发育和决定作物产量和质量的重要因素，在我国这样一个人口众多而耕地和水资源相对不足的国家，要发展粮食生产、保证粮食安全，合理的水肥管理显得尤为重要。

我国北方既是粮食主产区，又是水资源贫乏区，缺水是粮食生产的主要瓶颈。我国北方尽管拥有全国耕地总量的 65%，但水资源仅占全国的 1/3，在全国耕地每公顷水资源量不足 7500m³ 的 11 个省份中，北方地区占了 10 个。在缺水的同时，农业用水浪费现象也相当严重，灌溉水的利用率仅为 46% 左右，远低于发达国家水平（75%）。水资源的匮乏和不合理利用，近年已给我国农业生产造成了极大的损失。据有关报道：近 10 年来，因缺水，全国平均每年旱灾发生面积 4 亿亩^① 左右，是 20 世纪 50 年代的 2 倍以上，平均每年成灾面积 2 亿多亩，因旱损失粮食 300 亿 kg 以上。尤其在我国北方地区更为严重，仅 2009 年北方冬小麦就减产 5.8%，达 590 万 t。大力发展农业节水，提高农业水资源的利用率和灌溉保证率是确保我国粮食安全的关键所在。

肥料是决定作物产量高低的主要因素。20 世纪 80 年代以来，随着化肥投入量的加大，我国粮食产量无论是总产还是单产都大幅度增加，化肥对粮食产量的贡献率达 40% 以上。然而，1998~2009 年，我国在化肥施量持续增长的情况下，粮食的增产幅度则呈下降趋势，出现了增肥不增产、化肥施用效应递减、养分利用效率下降的现象。据 2001~2005 年全国 11 个省 1333 个肥料试验样本数统计显示：小麦 N、P₂O₅、K₂O 的利用率分别为 28.12%、10.17% 和 30.13%，玉米分别为 26.11%、11.10% 和 31.19%，与朱兆良先生 1998 年给出的我国主要粮食作物 N(30%~35%)、P₂O₅(15%~20%)、K₂O(35%~50%) 的利用率相比，N 利用率下降 7.5 个百分点、P₂O₅ 下降 3.4~8.4 个百分点、K₂O 下降 3.5~18.5 个百分点。“十二五”以来，农业部推行配方施肥技术，肥料利用率整体上有了回升，氮肥当季利用率为 30%~35%，P₂O₅ 为 15%~25%，K₂O 为 40%~50%，但仍比发达国家平均低 10 个百分点以上。

为了探索我国北方旱区主要作物水肥高效利用机制和应用模式，努力提升水肥生产效率，1996 年，我们在引进当今世界最先进的精量灌溉、精准施肥技术——滴灌技术的基础上，结合国家重大科技产业工程项目“西北干旱内陆河灌区节水农业综合技术集成与示范”(990210104)、863 计划“新疆干旱区现代节水农业技术与集成”(2006AA100218)及“北方干旱内陆河灌区节水农业综合技术集成与示范”(2002AA6Z3201)、科技部成果转化资金“地膜棉花高效微滴灌专用肥中试”(02EFN216510664)、科技部攻关计划

① 1 亩≈666.7m²。

“棉花喷滴灌专用肥的研究与示范”(2001BA901A23)、国家自然科学基金“CO₂浓度升高对新疆干旱区棉花-土壤系统的影响机制及其与氮素的耦合作用”(40973061)、国家科技支撑计划项目课题“天山北坡滴灌条件下粮食作物高效生产关键技术集成与示范”(2012BAD42B00)、公益性行业(农业)科研专项“北方旱作农业滴灌节水关键技术研究与示范”(201203012)等20余项国家重大、重点项目,就滴灌条件下北方旱区主要作物水肥高效利用关键设备及配套技术开展了研究。

本团队在2010年以前,主要致力于棉花、瓜果等经济作物的滴灌系统配置、水溶性肥料开发及灌溉施肥制度研究等。“十二五”重点是针对北方旱区小麦、玉米、大豆、马铃薯等粮食作物,开展了滴灌条件下水肥高效利用关键设备及技术的研究,研究完成了北方旱作农业类型区耐旱和水分高效利用作物品种的筛选、旱区主要粮食作物滴灌关键设备与产品的开发、旱区主要粮食作物滴灌条件下的需水需肥规律、旱区主要粮食作物滴灌专用系列肥产品、主要作物滴灌高产高效栽培技术研究与示范和区域滴灌节水技术应用的经济效益与环境效应评价;建立了北方旱作农业类型区主要粮食作物滴灌高产高效栽培技术模式,提高了灌溉水的利用率、农作物灌溉保证率、水分利用效率和肥料利用率,支撑了区域农业科学用水、科学施肥和现代农业的发展。

本书由尹飞虎研究员统筹编写、池静波研究员负责统稿,书中各章作者见著者名单。

本书在付梓之际,承蒙康绍忠院士作序,特此感谢!

在该项技术的研究过程中,始终得到科技部、农业部、水利部、新疆生产建设兵团(以下简称新疆兵团)相关领导和部门,以及李佩成院士、康绍忠院士等专家学者的大力支持和指导;在技术的示范推广过程中,各试验示范基地的同志付出了艰辛的劳动;在研究和应用的全过程中,本团队精诚团结、坚持不懈为之努力。对此,一并表示衷心感谢!

本书虽然经过多次讨论和反复修改,仍难免存在一些不妥之处,为使其更臻完善,敬请读者多加指正。

最后,希望本书的出版能够为发展节水农业和水肥资源高效利用提供科学依据,为滴灌水肥一体化技术研究、教学与培训提供参考,为国家节水增粮行动提供技术支撑。

尹飞虎

2016年12月

目 录

第一章 概述	1
第一节 研究目的与意义	1
第二节 技术背景	2
一、国外技术背景	2
二、国内技术背景	3
三、存在的主要问题	4
第三节 研究思路与目标	5
一、研究思路	5
二、研究目标	6
三、拟解决的科学与技术问题	6
第四节 研究内容与方案	7
一、研究内容	7
二、研究方案	10
第五节 研究取得的主要成果	11
一、品种筛选及种质资源创建	11
二、装备及产品	11
三、灌溉及施肥技术	12
四、技术模式	12
第六节 发展前景展望	22
一、现代农业发展需求	22
二、社会发展需求	22
三、技术适应性广	23
参考文献	23
第二章 大田作物滴灌技术关键设备与配套产品	24
第一节 滴灌系统设备与产品	24
一、国内外滴灌系统设备发展现状	24
二、滴灌系统设备分类和介绍	25
三、滴灌系统选型与配套	30
四、滴灌器材的创新与研制	39
第二节 滴灌智能控制设备	47
一、田间信息获取——土壤墒情信息监测传输设备	47
二、首部自动控制——精准灌溉施肥控制器	55

三、首部自动控制——自动反冲洗过滤器控制器	63
四、灌溉中央控制——可扩展中央灌溉控制设备	68
五、田间阀门控制——无线电磁阀及其灌溉控制系统	73
六、自动化灌溉控制软件平台	78
七、典型应用	83
第三节 滴灌田间作业机械	89
一、滴灌小麦播种机	89
二、膜下滴灌精密播种机	92
三、中耕作物免耕精量播种机	98
四、马铃薯种植机	100
五、滴灌带回收机	103
参考文献	105
第三章 主要粮食作物滴灌专用肥产品及施肥技术	108
第一节 无机水溶肥料	108
一、原料选择	108
二、生产工艺	120
三、产品简介	122
四、主要配方	124
第二节 有机无机水溶肥料	127
一、原料选择	127
二、生产工艺	130
三、产品简介	130
四、主要配方	133
第三节 生物有机水溶肥料	133
一、原料选择	133
二、生产工艺	135
三、产品简介	136
四、主要配方	138
第四节 主要作物滴灌水肥一体化智能决策与监测管理软件平台	138
一、设计目标	139
二、总体结构	139
三、关键技术	139
四、主要功能	142
五、结论	144
参考文献	145
第四章 大田主要粮食作物抗旱节水品种筛选	146
第一节 冬小麦耐旱品种筛选及鉴选指标	146
一、适合微灌、滴灌冬小麦品种的筛选	146

二、冬小麦抗旱节水品种鉴定指标	151
第二节 春小麦抗旱节水品种鉴定指标体系	154
一、春小麦鉴定指标	154
二、渗透调节与小麦抗旱性的关系	156
三、水分利用效率及抗旱指标	156
四、春小麦抗旱节水综合鉴定筛选指标体系	157
第三节 夏玉米抗旱节水品种评价指标体系	157
一、夏玉米抗旱节水品种鉴定指标	157
二、关键用水点形态和生理指标	158
三、水肥利用效率及抗旱指标	159
四、抗旱节水品种评价	160
五、抗旱节水综合鉴定筛选指标体系	161
参考文献	163
第五章 北方滴灌区主要粮食作物需水需肥规律及水肥耦合量化指标	165
第一节 西北滴灌区主要粮食作物需水需肥规律及水肥耦合量化指标	165
一、新疆小麦、玉米需水需肥规律及水肥耦合量化指标	165
二、宁夏小麦、玉米需水需肥规律及水肥耦合量化指标	183
三、甘肃小麦、玉米需水需肥规律及水肥耦合量化指标	201
四、青海春油菜需水需肥规律及水肥耦合量化指标	218
第二节 华北滴灌区主要粮食作物需水需肥规律及水肥耦合量化指标	229
一、河北小麦、玉米需水需肥规律及水肥耦合量化指标	229
二、山东小麦、玉米需水需肥规律及水肥耦合量化指标	249
第三节 东北滴灌区主要粮食作物需水需肥规律及水肥耦合量化指标	272
一、吉林大豆、玉米需水需肥规律及水肥耦合量化指标	272
二、内蒙古马铃薯、玉米需水需肥规律及水肥耦合量化指标	290
参考文献	303
第六章 主要粮食作物滴灌栽培技术模式	308
第一节 西北主要粮食作物滴灌栽培技术模式	308
一、新疆玉米、小麦滴灌栽培技术模式	308
二、宁夏小麦、玉米滴灌栽培技术模式	317
三、甘肃小麦、玉米滴灌栽培技术模式	323
四、青海春油菜滴灌栽培技术模式	330
第二节 华北主要粮食作物滴灌栽培技术模式	332
一、河北冬小麦、夏玉米滴灌栽培技术模式	332
二、山东小麦、玉米滴灌栽培技术模式	337
第三节 东北主要粮食作物滴灌栽培技术模式	342
一、吉林玉米、大豆滴灌栽培技术模式	342
二、内蒙古马铃薯、玉米滴灌栽培技术模式	348

参考文献 356

第七章 滴灌节水技术应用环境效应与经济效益评价 358

第一节 滴灌节水技术应用的环境效应 358

 一、滴灌节水技术应用对土壤环境质量的影响 358

 二、滴灌节水技术应用中作物重金属的安全评价 381

 三、滴灌节水技术应用对农田温室气体排放的影响 397

 四、结论 410

第二节 滴灌节水技术应用的经济效益 412

 一、新疆主要粮食作物滴灌节水技术应用的经济效益 412

 二、宁夏主要粮食作物滴灌节水技术应用的经济效益 415

 三、甘肃主要粮食作物滴灌节水技术应用的经济效益 419

 四、青海主要粮油作物滴灌节水技术应用的经济效益 421

 五、河北主要粮食作物滴灌节水技术应用的经济效益 424

 六、山东主要粮食作物滴灌节水技术应用的经济效益 429

 七、吉林主要粮食作物滴灌节水技术应用的经济效益 430

 八、内蒙古主要粮食作物滴灌节水技术应用的经济效益 432

第三节 滴灌节水技术应用综合效益评价 435

 一、滴灌节水技术应用综合效益评价指标体系的构建 435

 二、滴灌应用综合效益评价——以新疆兵团滴灌小麦为例 438

参考文献 446

第一章 概 述

第一节 研究目的与意义

我国是一个人口众多而耕地资源相对不足的国家,人均耕地面积约为世界平均水平的 1/3。在土地资源有限的情况下,保证粮食安全任务十分艰巨。东北、华北是我国粮食生产的主要基地,西北是我国粮食生产的后备基地。提升三北地区粮食生产的水平和能力,对确保我国粮食安全意义重大。

我国是一个严重缺水的国家,人均水资源仅为世界平均水平的 28%,列世界 121 位。我国是一个农业大国,农业用水约占总用水量的 63.4%。北方地区尽管拥有全国耕地总量的 65%,但水资源仅占全国的 1/3。在全国耕地每公顷水资源量不足 7500m^3 的 11 个省份中,北方地区占了 10 个。在水资源日益紧缺的同时,农业用水浪费现象也相当严重,耕地实际灌溉亩均用水量 418m^3 ,灌溉水的利用率仅为 46%左右,远低于发达国家水平(75%);按东部、中部、西部地区分析,耕地实际灌溉亩均用水量分别为 379m^3 、 378m^3 、 512m^3 ,西部比东部高近 1.35 倍^[1]。水资源的匮乏和不合理的利用,近年已给我国农业生产造成了极大的损失。据有关报道:近 10 年来,因缺水,全国平均每年旱灾发生面积 2667 万 hm^2 左右,是 20 世纪 50 年代的 2 倍以上,平均每年成灾面积 1333 万 hm^2 ,因旱损失粮食 300 亿 kg 以上。尤其在北方地区更为严重,仅 2009 年北方冬小麦减产 5.8%,达 590 万 t。大力发展农业节水,提高农业水资源的利用率和灌溉保证率是确保我国粮食安全的关键所在^[2]。

肥料是作物的粮食,是决定作物产量高低的主要因素。20 世纪 80 年代以来,随着化肥投入量的加大,我国粮食产量无论是总产还是单产都大幅度增加,化肥对粮食产量的贡献率达 40%以上。专家预测,如果立即停止使用化肥,全世界农作物将减产 40%~50%,21 世纪的农业发展离不开化肥,粮食安全离不开化肥。然而,1998~2009 年,我国在化肥施量持续增长的情况下,粮食的增产幅度则呈下降趋势,出现了增肥不增产、化肥施用效应递减、养分利用效率下降的现象。国内众多学者研究表明,化肥对粮食产量的贡献率已由 20 世纪 80 年代的 30%~40%下降到 10%左右。据 2001~2005 年全国 11 个省 1333 个肥料试验样本数统计显示:小麦 N、 P_2O_5 、 K_2O 的利用率分别为 28.12%、10.17%和 30.13%,玉米分别为 26.11%、11.10%和 31.19%,与朱兆良先生 1998 年给出的我国主要粮食作物 N (30%~35%)、 P_2O_5 (15%~20%)、 K_2O (35%~50%) 的利用率相比,N 利用率下降 7.5 个百分点、 P_2O_5 下降 3.4~8.4 个百分点、 K_2O 下降 3.5~18.5 个百分点。“十二五”以来,农业部推行配方施肥技术,肥料利用率整体上有了回升,氮肥当季利用率为 30%~35%,磷肥为 15%~25%,钾肥为 40%~50%,但仍比发达国家平均水平低 10 个百分点以上。同时,我国化肥使用对农业经济的贡献也仅相当于发达国家 15~20 年前的水平,我国万元农业 GDP (美元) 消耗化肥 2t 以上,欧美等发达

国家已下降到 1t 左右^[3]。

我国水肥利用率低的主要原因：一是灌溉方式和灌溉制度不合理，在我国大部分灌区，漫灌现象还很普遍，而且灌多少水也很难根据作物需求设定，大多还是随水源供给状况和凭经验灌溉，不合理的灌溉不仅造成水分损失，还会产生肥料淋失和农田面源污染，在盐碱地易发地区，土壤可能产生次生盐碱化；二是施肥方式和施肥制度不合理，在我国旱作区，施肥制度也基本没有根据作物需求设定，采用“一炮轰”“重基肥轻追肥”的现象越来越普遍，施肥量也有增加的趋势，据有关报道^[4]，全国已有 17 个省的氮肥平均用量超过国际公认的上限（225kg/hm²），不合理的施肥不仅浪费肥料资源，还会导致作物养分供给失衡、生长发育失调、作物产量和品质下降，以及土壤结构变差。

近年来，国家高度重视粮食安全和与粮食安全极其相关的节水农业及科学施肥工作，先后出台了一系列扶持政策推进节水农业和科学施肥的发展。“十一五”科技部设立了 863 计划节水农业重大专项和科技攻关项目，分别在我国北方灌区启动了一批节水农业研究课题，支撑和推进了我国节水农业的发展。2005 年，农业部决定在全国开展测土配方施肥工作，首批以全国 13 个粮食主产省为重点，选择 200 个县并开展试点，按每个县 100 万元的标准给予补贴，实施测土配方施肥面积达到 8000 万 hm²，辐射带动 1333 万 hm²。2010 年西南大旱，国家安排 3 亿元，用于地膜覆盖技术推广，第二年又安排 5 亿元用于西北地膜覆盖。“十二五”初，水利部、财政部、农业部联合召开东北四省（自治区）节水增粮行动项目工作会议，明确了东北四省（自治区）节水增粮行动的目标，用 4 年时间，投资 380 亿元，在东北四省（自治区）集中连片建设 253 万 hm² 高效节水灌溉工程，新增粮食生产能力 100 亿 kg，年均增收 160 多亿元。2013 年农业部印发了《水肥一体化技术指导意见》，指出 2015 年，水肥一体化推广面积达到 534 万 hm² 以上，实现节水 50% 以上，节肥 30%^[2]。

第二节 技术背景

滴灌及滴灌施肥技术起源于以色列，是当今世界上公认的最先进的精量灌溉、精准施肥技术之一，它是利用滴灌设施以最经济有效的方式供给作物所需的水分、养分，并使其限定在作物有效根域范围内，实现对供给的水分和养分，以及作物个体和群体的有效调控，旨在在作物的不同生育阶段将所需的水分和养分多次小量供给，水肥均匀地浸润在特定区域的耕层内，满足作物生长发育的需求，达到节水节肥、高产高效的目的。如今，这项技术已传播到世界上 80 多个国家和地区，在一定程度上缓解了全球水资源危机。

一、国外技术背景

以色列长期致力于开发节水新技术，以解决其水资源短缺问题。20 世纪 60 年代，以色列人创造了滴灌技术，并建成了世界上第一个滴灌系统。这一系统由不同口径的塑料管组成，灌溉水和溶于水的化肥从水源被直接输送到作物根部，呈点滴状缓缓而均匀地滴灌到作物根区的土壤中。滴灌使农业灌溉技术发生了根本性变化，标志着农业灌溉由粗放走向高度集约化和科学化，基本实现了按需供水、供肥，成为灌溉技术

的一项重大突破。以色列超过 80% 的灌溉土地使用滴灌方法,灌溉水的利用效率高达 95%,水分生产率达 $2.23\text{kg}/\text{m}^3$,氮肥利用率在 80% 以上。与此同时,以色列著名的 NETAFIM 滴灌技术设备公司,产品和服务遍及 70 多个国家和地区,年产滴头 300 多亿只,年销售额超过 2 亿美元,占全球灌溉设备市场总销量的 70%^[1]。20 世纪 60 年代后,滴灌技术开始在美国、澳大利亚、墨西哥、南非等地陆续研究和示范应用,印度近年发展很快。

美国属于水资源充沛国家,人均水资源占有量 $12\,000\text{m}^3$ 。有效灌溉面积约 2533 万 hm^2 ,不足我国的 50%,但喷灌和滴灌面积占有效灌溉面积的 87%,2010 年滴灌面积就达 153 万 hm^2 ;同时,注重对地下滴灌技术的研究和推广,美国堪萨斯州立大学 Freddie Lamm 教授 2011 年撰文报道,2003~2008 年美国在棉花、玉米、苜蓿等作物上应用地下滴灌面积 1.73 万 hm^2 ,与地表滴灌比,种植苜蓿用地下滴灌更能提高水的利用效率^[2]。

澳大利亚有 70% 的地区雨量在 500mm 以下,很容易发生旱灾,节水灌溉是该国采用的主要农业技术。20 世纪 70 年代后,开始将滴灌及灌溉施肥技术用于蔬菜、果树和甘蔗等,一般节水、增产都在 20% 以上,优质蔬菜的收获率由传统灌溉方法的 60%~70% 提高到 90%,同时采用滴灌施肥可减少 25%~50% 的氮肥损失;20 世纪末,T 系统国际股份有限公司(以下简称 T 系统公司)在班达伯格甘蔗上使用地下滴灌技术,获得了 5700m^3 的水生产 128t 甘蔗的结果,而漫灌 9800m^3 的水只生产了 98t 甘蔗。

印度是使用滴灌技术较早的亚洲国家,而且近年发展速度很快。2015 年印度 New Ag International 会议报道,至 2014 年,印度微灌面积达到 750 万 hm^2 ,其中滴灌 320 万 hm^2 、喷灌 430 万 hm^2 。Soman 博士介绍:Jain 灌溉公司用滴灌和灌溉施肥技术在水稻和小麦上做了 8 年研究,两种作物增产 25%~45%、节水 50%~60%。印度的水溶性肥约分为 16 个等级,2014~2015 年生产量已达到 150 000t,年增 15%~20%^[2]。

二、国内技术背景

我国从 20 世纪 70 年代开始引进滴灌技术,经过 30 多年的努力,通过引进、消化吸收、研发,在灌溉设备和配套技术等方面有了长足的发展,基本形成了国内具有区域特色的滴灌技术体系。

(一) 滴灌产品研发

通过引进、消化吸收,20 世纪 90 年代后,我国滴灌产品门类和系列基本配套。单翼迷宫边缝式滴灌带已处于成熟期,内镶扁平滴头式滴灌管正处于成长期,圆柱式滴头和压力补偿式滴灌管发展趋势好;滴灌工程大多用聚乙烯(PE)和聚氯乙烯(PVC)管及相应管件,国内多个厂家的产品质量和配套规格基本适应滴灌发展要求;在过滤装置方面,研制出了符合我国国情的筛网过滤器、叠片式过滤器、砂石过滤器、水沙分离器、LZ 型自动清洗立式过滤器、自动反冲洗过滤器及沉淀池等,但产品的精密度、技术规范与国外仍有较大差距;在施肥设备方面,普遍采用不透明的压差式施肥罐,文丘里式、水动泵等设备及控制装置的国产化和规模化应用相对缓慢;在田间管网铺设机械化作业方面,研制出了田间毛管铺设、铺膜播种一体机和干管铺设开沟机,并在棉花、甜菜、

豆类等多种作物上广泛应用,研制出适于大田农作物随水施肥的全营养速溶性高效滴灌固态复合肥,还研究开发出滴灌平衡施肥专家决策系统,并应用于生产,实现了条田施肥数字化管理。

(二) 滴灌系统配置研究

根据灌溉水源(河水、井水)和水质变化情况研制出了不同的滴灌首部过滤系统、地埋干管与地面支辅管相结合的“支管+辅管”滴灌系统、不使用辅管的“大支管轮灌系统”、移动首部滴灌系统、小农户滴灌系统、微压滴灌系统、自压滴灌系统、重力滴灌系统、自动化控制滴灌系统等多种形式的滴灌系统;针对不同作物研制出了棉花、加工番茄、甜菜等大田作物滴灌系统和适应设施农业的群棚及小型单棚滴灌系统;根据地形地貌研制出了丘陵滴灌系统和不同坡度的平原滴灌系统。

(三) 滴灌配套技术研究

1996年,新疆兵团引进以色列成套滴灌设备,将滴灌技术与地膜覆盖技术有机结合,创造了膜下滴灌技术。随后研究了在滴灌条件下,不同作物的需水需肥规律及高效灌溉制度、随水平衡施肥与水肥一体化耦合技术、化学调控技术、病虫害防治技术、高密度高产栽培技术,不同土壤质地水盐、养分运移规律和土壤次生盐渍化的综合防治技术,以及作物需水预测预报及农田灌溉调度管理、水库群灌优化调度等关键技术,形成了以棉花、加工番茄、瓜果等作物为主体的综合滴灌配套技术体系。同时,开展了滴灌技术在粮食作物上的应用研究,逐步使滴灌技术的应用由棉花拓展到玉米、小麦、甜菜、向日葵等作物,而且应用地域范围逐步扩大,由新疆逐步向西北、华北、东北等地推广。

三、存在的主要问题

通过多年的技术引进、消化和吸收,我国在滴灌设备研制及生产、系统设计及配置、配套产品与技术开发等方面都取得了突破性的进展,部分滴灌设备产品性能和田间作业机械配套及在棉花等经济作物上的应用效果已接近和达到国外同等水平。但在滴灌技术的应用范围、推广速度、应用效果等方面,在全国范围内存在较大的差异。这些问题反映在技术上,主要有以下几个方面^[5]。

(一) 工程规划设计欠规范

规划是滴灌系统设计的前提,它制约着滴灌工程投资、效益和运行管理等多方面的指标,关系到整个滴灌工程的质量及其合理性,是决定滴灌工程成败的重要工作之一;滴灌系统的设计是在科学规划的基础上,根据当地的地理环境、水源水质、作物及栽培耕作方式等条件,因地制宜地配置滴灌系统。但我国目前绝大部分地区还没有将滴灌工程纳入农田水利工程规划之中,在田间设计和系统配置上存在死搬硬套他人模式、与当地资源环境及农艺技术结合不够紧密等问题,导致出现了流域灌排不协调、条田林网死亡、经济效益及社会效益不突出等现象。

(二) 水肥一体化技术不到位

滴灌随水施肥是滴灌技术的重要组成部分,是实现水肥一体化、提高肥料利用率、

增产增收、节本增效的关键措施。但目前大部分滴灌区注重滴灌田间工程建设、关注强调节水分的因素较多,重视水肥结合、发挥肥的作用不够;实行氮肥随水施的较多,采用氮、磷、钾等多元素配方随水施的较少;大部分农户灌水施肥不是按照作物需水需肥规律进行的,多凭经验随意进行,甚至还在推行一次性全层次深施肥,滴灌技术精准灌溉、精准施肥的作用没能得到充分发挥。与发达国家相比,其水分生产率、肥料利用率仍有差距,发达国家水分生产率已达到 $2.2\text{kg}/\text{m}^3$,我国约为 $1.4\text{kg}/\text{m}^3$;发达国家氮肥利用率为 80%、磷肥利用率为 35%、钾肥利用率为 60%以上,而我国分别为 50%、24%和 50%左右。

(三) 滴灌应用的作物较单一

“九五”以前,我国滴灌技术的研究与应用主要集中在设施园艺、瓜果蔬菜等作物上。1996年后,新疆兵团将滴灌技术广泛应用于大田作物生产,但在 2005 年前也仅应用于棉花、加工番茄、甜菜等经济作物上,且在滴灌设备、田间管网和配套作业机械与灌溉施肥制度等方面的科研力量也主要集中于经济和设施园艺作物。将粮食作物应用滴灌技术纳入新疆兵团科研计划是从 2005 年开始的,而且在田间装置及农艺配套技术等方面,基本上参照或沿用了棉花滴灌模式,在北方旱作农业滴灌节水关键技术研究与示范项目启动前,试验区域也仅限于新疆地区。

(四) 基于滴灌的区域环境研究滞后

自 1996 年新疆兵团将滴灌技术应用于大田作物以来,对我国农业节水、作物增产增效、农民增收发挥了巨大的作用。滴灌技术应用会带来良好的经济效益,这已逐渐为人们所熟知,然而滴灌技术的应用对于区域环境(包括水环境、土壤环境、作物病虫害、农田小气候、区域生态)会造成什么样的影响,目前的相关研究在一定程度上滞后。缺乏滴灌所带来环境效益的考虑将使得滴灌效益评估显得不够全面,容易引起只重经济而轻视环境发展的不良后果。因此,只有清楚地了解滴灌所带来的区域环境效应才能更好地扬长避短,实现经济与环境的双赢,获取滴灌效益的最大化,以实现区域的可持续发展。

基于我国北方旱区粮食生产可持续发展的需求,以及与其相关的水资源极度短缺、农田土壤养分不足、降水量少而降水时期与作物生长需求错位、水肥利用效率低和新疆滴灌水肥一体化技术在全国类型区大田作物应用少等背景,新疆农垦科学院于 2009 年向农业部正式提请在我国北方旱作区开展滴灌技术的试验示范,农业部科技教育司于 2010 年将该研究列为“十二五”公益性行业(农业)科研专项。

第三节 研究思路与目标

一、研究思路

根据我国东北、华北、西北旱作农业类型区的地理、气候、水资源、作物及耕作特点和社会经济发展水平,针对该区域农田水肥资源短缺和农作物水肥利用率低等突出问题,以灌溉精准、施肥精准的滴灌水肥一体化技术为主体技术,总结和充分利用已有的滴灌水肥一体化技术基础,重点开展对小麦、玉米、大豆、马铃薯等作物水肥高效利用技术的研究,开发、完善一批适合北方旱作类型区域特点的主要粮食作物抗旱品种、滴