

国家自然科学基金项目
国家863计划项目 研究专著

THEORY AND PRACTICE
ON HIGH EFFICIENT USE OF WATER
AND FERTILIZER BY CROP IN ARID REGION
OF NORTHWEST CHINA

西北旱区作物水肥

高效利用的理论与实践

张富仓 刘小刚 杨启良 等◎著



科学出版社

国家自然科学基金项目
国家 863 计划项目 研究专著

西北旱区作物水肥 高效利用的理论与实践

**Theory and Practice on High Efficient Use
of Water and Fertilizer by Crop in Arid Region
of Northwest China**

张富仓 刘小刚 杨启良 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以甘肃河西石羊河流域绿洲灌区和陕西关中灌区为例,通过作者近 10 年在该地区长期定位研究成果的总结和凝练,系统探索了该地区主要大田作物和果树水肥高效利用机制和模式。全书共 14 章,包括概述、调亏灌溉对石羊河流域春小麦生长和水氮利用的影响、调亏灌溉对石羊河流域春玉米生长和水氮利用的影响、石羊河流域膜下滴灌棉花的水氮耦合效应、石羊河流域沟灌棉花的水氮耦合效应、调亏灌溉和施肥对关中地区农田冬小麦生长和水肥利用的影响、调亏灌溉和氮营养对关中地区玉米生长及水氮利用的影响、节水灌溉条件下作物根区水氮迁移和高效利用研究、亏缺灌溉和氮营养对关中地区茄子生长和水氮利用的影响、关中地区桃树需水信号对灌水量和微气象环境的响应研究、关中地区灌水和施氮对果树幼苗水分传输和耗水规律的影响、部分根区滴灌和环境因素对关中地区苹果幼树水分传输机制的影响、保水剂保水持肥特征及作物效应研究,以及甘肃河西地区不同储水灌溉农田水分特征分析等内容。

本书可供农田水利、水资源、作物学、生态、土壤、环境等专业的生产、教学、科研、管理及决策者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

西北旱区作物水肥高效利用的理论与实践 / 张富仓等著. —北京: 科学出版社, 2015.10

ISBN 978-7-03-045491-1

I. ①西… II. ①张… III. ①干旱区—作物—肥水管理—研究—西北地区 IV. ①S365

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 201542 号

责任编辑: 李秀伟 夏 梁 / 责任校对: 赵桂芬 刘亚琦
责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 北京铭轩堂广告设计有限公司

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>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 10 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2015 年 10 月第一次印刷 印张: 38 插页: 2

字数: 900 000

定价: 208.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

著者名单

第1章 张富仓 刘小刚 杨启良

第2章 张富仓 寇雯萍 刘小刚 吴立峰 李志军

第3章 刘小刚 张富仓 李志军 田育丰

第4章 李培岭 张富仓 李志军 贾运岗

第5章 李培岭 张富仓 贾运岗

第6章 张富仓 雷艳 郑彩霞 岳文俊 李志军

第7章 邢英英 岳文俊 张富仓 李志军

第8章 刘小刚 张富仓 李志军 杨启良

第9章 杨振宇 张富仓 李志军

第10章 周罕觅 张富仓 李志军

第11章 张志亮 张富仓 李志军 刘小刚

第12章 杨启良 张富仓 李志军 刘小刚

第13章 李常亮 张富仓 李志军

第14章 杨伟 张富仓 李志军 陈静静

前 言

在干旱半干旱地区,水分缺乏和土壤贫瘠是限制旱区农业发展的一个重要障碍。缺水是限制旱区土壤生产力提高的主要因素,不合理的灌溉及不合理的施肥不仅导致了土壤肥力的下降和土壤生态系统的环境恶化,而且浪费了水肥资源。

在我国西北干旱半干旱区,水资源不足始终是困扰农业生产的最主要的因素之一。作为西北绿洲最重要的农业生产基地之一,河西走廊的石羊河流域绿洲灌区为典型的大陆性荒漠气候,天然降水少,平原区年降水量为 150~300 mm,年蒸发量 1300~2600 mm,气候十分干燥。没有灌溉就没有农业,但在缺水的同时,农田灌溉定额普遍偏高,为 5850~6750 m³/hm²,农田灌溉用水比例高达 86%,过度开发水资源,严重挤占生态用水,导致流域生态环境急剧恶化。除了水资源短缺外,影响该地区粮食生产的一个重要问题就是土壤贫瘠和肥力低下,由于河西地区土壤主要是风沙土和灌漠土,土壤有机质含量低、缺氮、少磷、富钾,农业生产中存在大水漫灌、过量施肥等传统灌溉施肥方式,不仅水肥利用效率低,而且造成耕层土壤水分物理性质和养分环境条件严重失衡,严重影响了大田作物的生长。陕西关中地区是黄土高原最重要的粮食主产区之一,气候属于半湿润易旱地区,平均年降水量 680 mm,农业水资源贫乏,按人口和耕地平均占有水量分别为 400.5 m³和 4950m³/hm²,是全国平均水平的 17.3%和 15%。关中地区需水量为 74.27 × 10⁸ m³,而实际供水量只有 56.54 × 10⁸ m³,缺水率达 23.87%,属典型的资源性缺水。关中地区土壤是黄土,土层深厚,气候温和,无霜期 200d 左右,日照时间较长,很适宜农作物的生长。但在缺水的同时,关中灌区由于在小麦、玉米轮作的种植制度下,盲目施肥问题严重,表现为施肥量大,利用率低,配比不合理、不平衡等,导致土壤-植物-环境系统出现一系列问题,影响该地区农业可持续发展。

为了探讨石羊河流域和关中灌区主要作物水肥资源的高效利用机制与节水节肥模式,加速先进水肥高效利用技术的示范与推广,促进科技与生产的紧密结合,我们从 2000 年就开始在中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站和西北农林科技大学节水灌溉试验站进行此方面的田间和室内试验研究工作。先后在国家自然科学基金面上项目“分根交替灌溉条件下作物根际土壤微环境效应”(50579066)、“调亏灌溉条件下作物水氮高效利用机制和供水供氮模式”(50879073),国家高技术研究发展计划(863 计划)课题“精细地面灌溉技术研究”(2002AA242091)、“农田水肥联合调控技术与设备”(2011AA100504)的资助下,对西北旱区主要作物水肥高效利用技术与模式进行了研究。

我们的研究针对过去只考虑单一的农田灌溉节水效应、施肥效应,强调将灌溉和施肥结合起来,在考虑作物高效利用水肥的过程和阶段需水需肥的基础上,研究西北旱区不同区域适宜的水肥高效利用模式;针对过去只考虑最高产量的最佳水肥供应的经济效应,强调建立基于大尺度(群体及区域)水肥高效利用和生态需水需肥的农业高效用水用肥新模式,开拓基于不同作物、不同生长阶段的作物水肥高效利用与调控的新途径;针对过去只考虑单一的作物对水肥的耦合效应,强调将水肥协同效应与灌溉技术和方法、作物生长条件、土壤等结合起来,综合考虑研究基于 SPAC 系统及区域作物群体的水肥高效利用模式和灌溉施肥制度。先后开展了包括“石羊河流域春小麦调亏灌溉与水氮利

用试验”、“石羊河流域春玉米分根交替灌溉与水氮利用试验”、“民勤绿洲棉花不同灌溉方法与水氮耦合试验”、“调亏灌溉与施肥对关中地区农田冬小麦生长和水肥利用的影响试验”、“调亏灌溉与氮营养对关中地区农田玉米生长和水氮利用的影响试验”、“节水灌溉条件下作物根区水氮迁移与高效利用试验”、“亏缺灌溉和氮营养对关中地区茄子生长和水氮利用的影响试验”、“关中地区桃树需水信号对灌水量和微气象环境的响应试验”、“关中地区灌水和施氮对果树幼苗水分传输和耗水规律的影响试验”、“部分根区滴灌和环境因素对关中地区苹果幼树水分传输机制的影响试验”、“保水剂和氮肥混施对土壤保水持肥特征的影响及作物效应试验”等 20 多项野外定位科学试验,积累了宝贵的野外科学试验数据。上述野外试验数据为研究作物水肥高效利用机制和模式奠定了基础。

研究建立了不同生育阶段的灌水与施肥的互作效应在作物生长、生理、产量和品质与作物水肥高效利用之间的定量关系,提出适合本地区推广应用的、针对不同作物和生育阶段的水肥高效利用指标体系和最佳供水供肥模式;研究建立了适合石羊河流域绿洲灌区和陕西关中灌区主要农作物适宜的根系分区交替灌溉、调亏灌溉、膜下滴灌的最佳水肥控制指标及供水供肥模式,提出了主要农作物(小麦、玉米、棉花)和特色经济作物的水肥生产的函数模型,获得土壤水分、养分和盐分对作物缺水敏感指数调节的定量关系;研究建立了西北旱区主要作物的水肥联合调控技术和模式,研究了不同水肥条件下作物根-土微域中水肥耦合迁移动态、累积规律及有效性,探明了水肥迁移和残留量与灌水量和施肥量的关系,提出了基于作物的生长动态、干物质累积和产量形成机制、最佳灌水和施肥指标及耦合模式,为生产实践应用提供技术支撑。上述研究成果在生产上得到了大面积的推广应用,取得了重要的经济、社会和生态效益。该项成果在 *Agricultural Water Management*、*Soil Science Society of America Journal*、*Plant and Soil*、*Journal of Integrative Plant Biology*、*Scientia Horticulturae*、《农业工程学报》、《水利学报》、《中国农业科学》、《应用生态学报》、《土壤学报》等国内外刊物上发表论文 100 余篇,有的论文在学术界产生了一定的影响。

本书由张富仓、刘小刚、杨启良、李培岭、李志军、邢英英、周罕觅等著。各章的撰写人员在书中均有注明。全书由张富仓主编、统稿。

作者在有关西北旱区作物水肥高效利用的理论与实践的学习和研究过程中,始终得到了许多老前辈、领导的支持,以及同志们热情帮助。首先感谢西北农林科技大学水利与建筑工程学院有关领导的热情帮助和大力支持,以及中国旱区节水农业研究院、旱区农业水土工程教育部重点实验室的领导和老师的帮助,特别感谢中国农业大学石羊河流域农业与生态节水试验站的康绍忠院士在学术和试验研究上给予的大力帮助和支持。感谢在野外试验观测和资料分析整理过程中,西北农林科技大学农业水土工程专业硕士研究生高月、周琦、李静、方栋平、邹海洋、闫世程等的辛勤劳动。感谢吴普特、蔡焕杰、马孝义、贾志宽、邹志荣、许迪、冯绍元等教授对我们工作的指导。

西北旱区作物水肥高效利用问题的研究是一项十分复杂的系统工程,作者的研究成果也是初步的,对某些问题的认识还是较肤浅,还有待于进一步探索和深化。书中不足之处,恳请同行专家批评指正。

张富仓

2015 年 1 月 26 日

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 研究目的与意义	1
1.2 西北旱区作物水肥高效利用研究的总体思路	2
1.3 西北旱区作物水肥高效利用的技术与模式	12
参考文献	15
第2章 调亏灌溉对石羊河流域春小麦生长和水氮利用的影响	16
2.1 国内外研究进展	16
2.2 不同生育期灌水和施氮对春小麦生长的影响	20
2.3 不同生育期灌水和施氮对春小麦产量及水分利用的影响	31
2.4 不同生育期灌水和施氮对春小麦氮素吸收和根区土壤硝态氮分布的影响	34
2.5 水氮互作对石羊河流域春小麦群体产量和水氮利用的影响	41
2.6 限量灌溉对石羊河流域春小麦根区水氮迁移和利用的影响	47
参考文献	52
第3章 调亏灌溉对石羊河流域春玉米生长和水氮利用的影响	55
3.1 不同生育期灌水和施氮对春玉米生长及产量的影响	55
3.2 不同生育期亏水和施氮对春玉米生理指标的影响	67
3.3 不同生育期亏水和施氮对春玉米根区氮素运移的影响	73
3.4 不同生育期灌水和施氮对春玉米根区水氮吸收利用的影响	80
参考文献	88
第4章 石羊河流域膜下滴灌棉花的水氮耦合效应	89
4.1 不同滴灌毛管布置模式下棉花的水氮耦合效应	89
4.2 不同滴灌方式下棉花生物量和产量的水氮调控效应	96
4.3 膜下分区交替滴灌和施氮对棉花干物质累积与氮肥利用的影响	103
4.4 分根交替滴灌下水氮调控对棉花氮素吸收和利用特性影响	111
4.5 大田滴灌施肥条件下土壤湿润体水氮运移规律	116
4.6 不同滴灌带布置对根区水氮运移和植株吸氮量的影响	123
4.7 不同滴灌带布置对棉花生长和水分利用效率的影响	138
参考文献	144
第5章 石羊河流域沟灌棉花的水氮耦合效应	146
5.1 不同沟灌方式棉花水氮耦合效应	146

5.2 不同沟灌方式对棉花氮素吸收和氮肥利用的影响	155
5.3 不同沟灌方式下根区水氮调控对棉花群体生理指标的影响	163
参考文献	171
第6章 调亏灌溉和施肥对关中地区农田冬小麦生长和水肥利用的影响	173
6.1 国内外研究进展	173
6.2 调亏灌溉和氮营养对冬小麦生长和水氮利用的影响	176
6.3 限量灌水和施磷对冬小麦生长及养分吸收的影响	203
6.4 不同水氮磷耦合对作物生长、生理特性和解剖结构的影响	230
参考文献	243
第7章 调亏灌溉和氮营养对关中地区玉米生长及水氮利用的影响	246
7.1 国内外研究进展	246
7.2 水分亏缺和氮营养对玉米生长的影响	252
7.3 水分亏缺和氮营养对玉米氮素吸收和利用的影响	266
7.4 水分亏缺和氮营养对玉米水氮迁移与利用的影响	275
7.5 不同氮磷营养条件下苗期水分亏缺对玉米生长及水分利用的影响	285
7.6 沟灌方式和水氮对玉米产量与水分传导的影响	292
参考文献	302
第8章 节水灌溉条件下作物根区水氮迁移和高效利用研究	304
8.1 国内外研究进展	304
8.2 不同沟灌模式和施氮对玉米群体水氮利用及根区水氮迁移的影响	304
8.3 水氮同区、异区对玉米根区水氮迁移和利用的影响研究	325
8.4 调亏灌溉与氮营养对玉米根区水氮有效性的影响	332
8.5 交替隔沟灌溉和施氮对玉米根区水氮迁移的影响	342
8.6 控制性根系分区交替灌溉对玉米根区水氮迁移和利用的影响	349
8.7 玉米叶绿素、脯氨酸和根系活力对调亏灌溉和施氮的响应	356
8.8 调亏灌溉和施氮对玉米叶片生理生化特性的影响	363
参考文献	369
第9章 亏缺灌溉和氮营养对关中地区茄子生长和水氮利用的影响	372
9.1 国内外研究现状	372
9.2 不同生育期水分亏缺和施氮对茄子生长发育的影响	379
9.3 不同生育期水分亏缺和施氮对茄子光合特性的影响	391
9.4 不同水肥配合对茄子产量和水分利用效率的影响	398
9.5 不同生育期水分亏缺和施氮对茄子氮素吸收和根区土壤氮素迁移的影响	403
参考文献	410

第 10 章 关中地区桃树需水信号对灌水量和微气象环境的响应研究	412
10.1 国内外研究概况	412
10.2 试验概况	415
10.3 桃树树干液流对灌水量和微气象环境的响应	418
10.4 桃树冠层温度及冠层温度-气温差对灌水量和微气象环境的响应	422
10.5 桃树光合与蒸腾对灌水量和微气象环境的响应	426
10.6 不同灌水量处理对桃品质的影响	432
参考文献	434
第 11 章 关中地区灌水和施氮对果树幼苗水分传输和耗水规律的影响	437
11.1 国内外研究进展	437
11.2 试验概况	445
11.3 不同水氮处理对果树幼苗生理生长特性的影响	447
11.4 不同水氮对果树幼苗叶片导水特性的影响	451
11.5 不同水氮对果树幼苗根系和冠层导水特性的影响	456
11.6 不同水分、氮肥对果树幼苗茎流及耗水规律的影响	462
参考文献	474
第 12 章 部分根区滴灌和环境因素对关中地区苹果幼树水分传输机制的影响	477
12.1 部分根区滴灌和土壤水分对苹果幼树水分传输与利用的影响	477
12.2 部分根区滴灌和土壤养分对苹果幼树水分传导与利用的影响	493
12.3 部分根区滴灌和土壤盐分对苹果幼树水分传输的影响及抗盐胁迫机制	502
参考文献	516
第 13 章 保水剂保水持肥特征及作物效应研究	521
13.1 国内外研究概况	521
13.2 保水剂与氮肥混施对土壤持水持肥特性的影响	526
13.3 保水剂与氮肥混施对土壤蒸发及团聚性能的影响	537
13.4 保水剂与氮肥互作对玉米生理特性和水氮利用的影响	546
参考文献	554
第 14 章 甘肃河西地区不同储水灌溉农田水分特征分析	558
14.1 国内外研究进展	558
14.2 不同储水灌溉和生育期灌溉农田水分特征分析	565
14.3 不同储水灌溉条件下农田土壤水量平衡特征	579
14.4 不同储水灌溉对作物生长和产量的影响	584
参考文献	594

第1章 概 述

1.1 研究目的与意义

资源和环境是当今社会普遍关注的问题。在干旱半干旱地区,水分缺乏和土壤贫瘠是限制旱区农业发展的一个重要障碍。缺水是限制旱区土壤生产力提高的主要因素,由于不合理灌溉及不合理施肥不仅导致了土壤肥力的下降和土壤生态环境的环境恶化,而且浪费了水肥资源。问题的症结和解决问题的关键是如何综合调控土壤生态环境中水、肥、气、热的良性微生态环境,以期达到优质增产、合理利用土壤水肥资源和提高环境质量的目的。

我国水资源总量为 2.8 万亿 m^3 , 低于巴西、俄罗斯和加拿大, 与美国和印度尼西亚相当, 但人均和亩均水资源量仅约为世界平均水平的 1/4 和 1/2, 而且地区分布很不平衡, 长江流域以北地区, 耕地占全国耕地的 65%, 而水资源仅占全国水资源总量的 19%。目前全国正常年份农业缺水约 300 亿 m^3 。农业是用水大户, 其用水量约占全国用水总量的 70%, 在西北地区则占到 90%, 其中 90% 用于农业灌溉。因此, 为了应对日趋严重的缺水形势, 建立节水型社会, 特别是发展节水农业是一种必然选择。

在缺水的同时, 中国农业水利用效率很低。据农业部门测算, 我国农田自然降水利用率为 40% 左右, 而美国等发达国家达到 60%~70%。我国农田灌溉水利用系数为 0.5 左右, 美国已经达到 0.75, 还有 30% 的潜力。我国每立方米水的农业产出只有 0.83 kg, 比世界平均水平低 30%。我国是世界上最大的肥料生产国和消费国, 目前化肥年消费量达 6000 多万吨。目前, 化肥的利用率只有 25%~30%。化肥流失不仅造成资源的极大浪费, 而且严重污染了环境。农田主要农作物当季氮肥利用率不足 30%, 而世界平均 50%, 当季磷肥利用率 15%~25%, 世界平均 42%, 钾肥利用率 30%~50%, 世界平均 50%~70%, 这些都说明, 提高我国的肥料利用率, 还有很大的潜力。

造成我国水肥利用率低的主要原因: 一是过量灌溉, 在我国的大部分灌区, 大水漫灌现象还很普遍, 过量灌溉既造成了水分损失, 也会产生肥料淋失, 农田面源污染, 在盐碱化易发地区, 土壤可能产生次生盐碱化; 二是过量施肥, 据调查显示, 全国已有 17 个省的氮肥平均施用量超过国际公认的上限 ($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 过量施肥不仅浪费肥料资源, 而且会导致作物生长发育不协调、易倒伏和感染病虫害、贪青晚熟、作物产量和品质下降、土壤结构变差等问题。

在西北干旱半干旱区, 水资源不足始终是困扰农业生产的最主要的因素之一。作为西北绿洲最重要的农业生产基地之一, 河西走廊的石羊河流域绿洲灌区为典型的大陆性荒漠气候, 天然降水少, 年均降水量为 30~200 mm, 年蒸发量为 2000~3500 mm, 气候十分干燥, 绿洲主要依靠南部祁连山地高山冰雪融水, 山区降水形成三大内陆流域维

系绿洲的命脉。可以说,没有灌溉就没有农业。在石羊河绿洲灌区,除了水资源短缺外,影响该地区粮食生产的一个重要问题就是土壤贫瘠和肥力低下,由于河西地区土壤主要是风沙土及灌漠土,土壤有机质含量低、缺氮、少磷、富钾,加之采用传统的耕作方式和大水漫灌,土壤侵蚀和水土流失严重,导致耕层土壤结构和养分条件差,严重影响了大田作物的生长。陕西关中地区是黄土高原最重要的粮食主产区之一,气候属于半干旱易湿润地区,平均年降水量仅 680 mm,农业水资源贫乏,按人口和耕地平均占有水量分别为 400.5 m^3 和 330 m^3 ,是全国平均水平的 17.3% 和 15%。据现状分析,关中地区需水量为 $74.27 \times 10^8 \text{ m}^3$,而实际供水量只有 $56.54 \times 10^8 \text{ m}^3$,缺水率达 23.87%,属典型的资源性缺水地区。关中地区的土壤是黄土,土层深厚,气候温和,无霜期 200 d 左右,日照时间较长,很适宜农作物的生长。但土壤贫瘠、在缺水的同时农田灌溉水浪费等是影响该地区农业可持续发展的重要因素。

水分是土壤生态环境中最为活跃的因子之一,土壤水分状况不仅直接关系到土壤对作物的水分供应,还会影响土壤的肥、气、热及其他物理化学性质。以改善土壤水分状况为主导的土壤生态环境最优调控已成为旱区农业可持续发展的关键,越来越受到人们的广泛关注。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年)》也把研究农业高效节水、综合节水、水资源优化配置与综合开发利用作为水与矿产资源研究领域的发展思路 and 重点研究问题。由于旱区农业水资源的短缺,以提高灌溉水利用效率的节水灌溉技术越来越受到人们的广泛重视和应用,特别是近年来,国内外提出的如限水灌溉(limited irrigation)、非充分灌溉(no-full irrigation)与调亏灌溉(regulated deficit irrigation),从改变作物根系土壤湿润方式,有效刺激作物根系吸收补偿功能对提高水分养分利用效率方面考虑提出的“根系分区交替灌溉(CRDI)”等概念和方法,打破了传统丰水高产型灌溉的思想,使灌溉向节水优产型方向发展,对我国北方旱区尤其是西北旱区的农业节水具有重要的理论和现实意义。

水分和养分是农业生产中影响作物生长的两个重要因素,水肥之间的关系相当复杂,合理调配水分和养分能够起到以肥调水,以水促肥的增产效果。近些年以来,作物生长的水肥效应研究越来越广泛,也取得了不少研究成果,但大多集中在水分和养分对作物生理生态指标、产量效应的单因素试验方面,而对不同生育阶段的灌水与养分的互作效应研究较少,水肥的高效配合不仅是量上的配合,而且与作物的生育时期紧密相关。作物水肥利用率低是我国西北旱区农业生产发展中面临的重大问题。适宜的水分条件和合理的养分供应是作物高产优质的基本保证,水分胁迫、养分缺乏及二者供应的不同步都不利于作物生长。研究不同节水灌溉条件下不同作物水分和养分耦合利用效率、最佳水肥配合模式及水肥高效利用机制,对于促进我国西北旱区农业可持续发展具有重要的理论与现实意义,该方面的研究也是农业水土工程学科领域研究的热点。

1.2 西北旱区作物水肥高效利用研究的总体思路

农田水肥资源及作物水肥利用状况是决定本地区农业生产力、土地利用方式、农田种植结构和生态环境状况的主导因素。西北旱区水资源极其短缺、农田肥力状况不足、

降水量较少,特别是降雨期与农作物生长关键需水需肥期严重错位,导致本地区土地生产力极其低下,严重制约着本地区农业经济社会的可持续发展和农民致富奔小康目标的实现。近年来,为了提高农作物的单产潜力,农田投入的灌水量和施肥量激增,虽然这些措施对提高土地生产力起到积极的促进作用,但由于不合理的水肥供应,作物水肥利用效率极低,农田面源污染不断加重,改变了农田原有的生态环境系统,从而给本地区农业生产和生态环境带来了极大的挑战。农田水肥资源的合理配置和节水型生态农业建设必须考虑作物生长与水肥资源利用关系和农业种植结构调整带来的变化。西北旱区作物水肥高效利用的理论与实践研究的总体思路就是对过去只注重考虑农田生产力和作物单产潜力提高,不考虑农业生产对环境带来的不利影响转变为在保持作物持续稳定生产的同时,提高水和肥料的利用效率,减少土壤环境和地下水污染,实现节水节肥增效的目的。这需要在考虑作物高效利用水肥的过程和生态需水需肥的基础上,研究西北旱区不同区域适宜的水肥高效利用模式,同时也需要综合考虑农艺、生物及管理节水在解决西北旱区缺水问题中的作用。针对过去只考虑最高产量的最佳水肥供应的经济效应,还需要对这种生产模式生态环境效应进行评估。通过探索作物水肥高效利用的规律、进行面向生态的水肥资源合理配置、建立基于大尺度(群体及区域)水肥高效利用和生态需水需肥的农业高效用水用肥新模式、开拓基于不同生长阶段的作物水肥高效利用与调控的新途径。通过“以水调肥”、“以肥控水”的水肥互作效应机制来提高作物水肥利用效率,是西北旱区农业经济社会可持续发展的迫切需要。以作物与土壤水分养分之间的互作效应关系研究为核心,以减少奢侈生长消耗的水肥量而提高水肥资源利用效率为研究主线,通过点面结合、室内野外结合、定位试验与现场示范相结合,理论研究与技术开发应用相结合,系统探索西北旱区作物水肥高效利用的农业发展模式。

1.2.1 西北旱区作物水肥高效利用的研究现状

水肥是提高旱地农业生产力的关键,也是制约农业发展的主要因素,能否充分发挥水肥的增产效应对西北旱区粮食安全与农业可持续发展具有重要意义。水分或养分过多,特别是施肥量过多,都对作物生长不利。只有在一定范围内,肥料效应随土壤含水量的增加而提高,同时,又可提高水分的利用效率,即水肥之间存在明显的交互作用。多年来,很多学者进行了大量的研究,例如,在夏玉米生长关键时期补充灌水 15 mm,采用高量的氮磷配合(每公顷施 120 kg 氮和 26 kg 磷),与灌水 30 mm 采用中量氮磷配合(每公顷施 60 kg 氮和 13 kg 磷)时的玉米产量没有差异,灌水和施肥均提高了作物产量,它们之间有明显的正交互作用(李世清和李生秀, 1994; 李生秀和李世清, 1995)。对滴灌、喷灌条件下的水肥耦合效应研究表明,花生玉米间作套种,全生育期耗水量及水分生产效率均随施肥量的增加而增大(詹卫华等, 1999)。套播夏玉米全生育期耗水量保持在 $4800 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$,施纯氮和 P_2O_5 量分别保持在 $175 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $145 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 水平时,可获取 $9450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 以上产量,水分生产效率超过 $1.9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,显示出较好的节水增收效益(黄冠华等, 1999)。喷灌条件下花生产量与灌水量成一次正比关系,与施肥量的平方根成正比(冯绍元等, 1999)。王凤仙等(2000)以灌水和施氮总量为决策变量,以产量和

土壤水、氮资源利用效率为优化目标,根据作物-土壤联合模型模拟所得的目标函数,得到了不同降雨年型下小麦和夏玉米单季及中等降雨年型小麦-夏玉米周年的优化水氮管理措施方案。研究水肥投入的定量关系,优化水肥投入比例,有利于节水、节肥、高效增产。

根系分区交替灌溉(CRDI)和调亏灌溉(RDI)作为两种新的节水灌溉技术,研究其水肥调控效应和有效水肥供给模式具有重要的理论和现实意义。CRDI是康绍忠等在1996年基于节水灌溉技术原理与作物感知缺水的根源信号理论而提出的一种节水灌溉新方法。CRDI交替灌溉使不同区域的根系经受一定程度的水分胁迫锻炼,刺激根系吸收补偿功能,有利于作物部分根系处于水分胁迫时产生的根源信号脱落酸(ABA)传输至地上叶片,调节气孔开度,达到以不牺牲作物光合产物积累而大量减少其奢侈的蒸腾耗水。CRDI以刺激作物根系的吸水功能和改变根区剖面土壤湿润方式为核心,以调节气孔开度,减少“奢侈”蒸腾,提高水分利用效率,达到大量节水而不减少或提高品质为最终目的。CRDI在国外又称为部分根区干燥技术(partial root-zone drying, PRD)。

关于CRDI对作物养分吸收的影响, Benjamin等(1998)研究了隔沟灌溉带状施肥对玉米生长和氮肥吸收的影响,结果表明在干旱年份,当氮肥施在不灌水沟时,氮肥吸收降低50%;在相对湿润年份,灌水沟和不灌水沟之间肥料吸收无差异。Lehrsch等(2000)研究了不同隔沟灌溉方式对玉米生长和硝态氮淋洗的影响,结果表明交替隔沟灌溉在维持作物产量的同时,可使土壤氮的吸收增加21%。Skinner等(1998)报道了隔沟灌溉施肥对玉米根系分布的影响,不灌水沟与灌水沟相比根的生物量增加了26%,若生长季早期湿度合适,灌水沟和不灌水沟上下根层的根量都增加,氮的吸收也因此而增加。国内学者研究发现,在施肥和充分供水条件下,与常规灌溉(CI)相比,分根交替灌溉节水29.1%,总干物质质量和冠层干物质质量仅分别减少6.3%和5.6%,而水分利用效率和氮肥表观利用率分别提高24.3%和16.4%(梁继华等, 2006)。胡田田等(2005)对局部灌水方式的玉米不同根区氮素吸收和利用进行了研究,结果表明交替灌水的不同根区对作物吸收氮素有同等贡献。

关于CRDI对土壤微环境的研究主要有以下报道,高明霞等(2004)对不同灌溉方式下玉米根区硝态氮的分布研究表明,不同灌水方式条件下玉米根区硝态氮的分布不同。在3种灌水方式的湿润区, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的累积趋势为:交替灌水>固定灌水>常规灌水。李志军等(2005)的试验表明,土壤含水率较高,有利于冬小麦根系对土壤中离子态养分的吸收;土壤含水率下限相同时,3种不同的灌水方式中,土壤中 $\text{H}_2\text{PO}_4^- \text{-P}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 离子浓度均呈现出递减的趋势,而 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 离子浓度却呈现出明显的递增趋势,在同一土壤含水率下,CRDI对养分离子的吸收优于其他两种灌水方式。谭军利等(2005)研究表明,在低灌水量($450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)水平下,水肥异区交替灌溉处理的施肥区和灌水区之间存在水势梯度差异, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量也有差异;灌溉效率和肥料利用效率均高于均匀灌溉。在高灌水量($900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)水平下,水肥异区交替灌水与常规均匀灌水差异不显著,但养分离子发生了强烈的淋洗。收获后,交替灌溉的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 残留量比传统灌溉要高,而水分残留量则相反。研究结果发现,CRDI的灌水量为 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的产量与均匀灌

溉的灌水量为 $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时的产量相差并不大,即 CRDI 可节水一半。王金凤等(2006)研究了 CRDI 对玉米根区土壤微生物的影响,在同一灌水方式下,轻度的水分亏缺导致土壤微生物数量占有一定的优势,有时甚至高于充分灌水处理;1/2 根区交替灌水的根系两侧土壤微生物数量分布均匀。

RDI 是根据作物的遗传和生态特性,即从作物生理角度出发,在作物生长发育的某些时期受到一定程度的有益水分胁迫,通过影响光合产物向不同组织器官的分配,从而提高最终产量而舍弃营养器官的生长量和有机合成物质的总量,达到节水增产、改善作物品质的目标。调亏灌溉的关键在于从作物的生理角度出发,根据作物的需水特点进行主动调亏处理。实践证明,RDI 可以实现产量、水分利用、品质的全面提高。

合理施用并结合 RDI 可显著提高作物产量和水分利用效率,但应用不当则会适得其反。土壤干旱情况下,氮、磷营养虽然都可以增强作物的渗透调节能力,但由于氮、磷营养对作物地上和地下部分生长的不同作用,氮、磷营养对作物的水分状况产生了完全相反的影响。氮素营养可增强作物对干旱的敏感性,使其水势和相对含水量大幅度下降,蒸腾失水减少,自由水含量增加而束缚水含量减少,并使膜稳定性降低。磷素营养则明显改善了植株的水分状况,增大了气孔导度,降低了其对干旱的敏感性,增加了束缚水含量,并使膜稳定性增强(张岁岐等,2000)。孔庆波等(2005)研究了在 RDI 条件下施用生物有机肥对小麦苗期地上部分和根系生长量、根系活力及养分吸收状况的影响,以及复水后对植株干物质重及根系活力的影响。结果表明,水分是影响冬小麦苗期生长的主要因素;不同施肥处理对小麦产量的影响不同。在水分适宜条件下,施用生物有机肥和 N、P、K 肥对小麦干物质重及养分吸收量的影响差异不大;而施用生物有机肥的小麦根系活力比 N、P、K 肥处理的高。在水分中度、重度亏缺时,施用生物有机肥的处理小麦干物质、养分吸收和根系活力均比 N、P、K 肥处理高。尤其复水后,施用生物有机肥处理的小麦各指标,较施用 N、P、K 肥效果好。甘肃省河西绿洲灌区春小麦 RDI 对土壤磷素养分有显著影响,0~20 cm 和 0~40 cm 土层土壤全磷量和速效磷均与小麦全生育期供水量呈线性正相关,土壤速效磷随着全磷量的增加呈线性增加。春小麦 RDI 对土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾、pH 均有显著的影响作用。干旱条件下春小麦适度水分调亏对 0~20 cm 土层全钾和速效钾含量有不同程度的降低作用。RDI 处理的籽粒产量和生物产量均较高,造成籽粒和秸秆钾素携出量大,因而对土壤速效钾的消耗严重,导致土壤钾素含量降低。严重的水分亏缺降低钾从土壤向根系扩散的速率,而适度水分亏缺则会增加钾从土壤向根系扩散的速率,这也是土壤钾素养分含量降低的原因之一(张步翀,2007)。赵彦锋等(2002)研究发现,水、磷都有利于玉米株高、叶面积和总生物量的增加,磷的作用更明显,苗期玉米调亏控水结合施磷有利于玉米苗期建立较大的根/冠、培育壮苗、提高水分生产率;水、磷对氮、磷、钾养分向地上部运输都有促进作用,调亏控水条件下,施磷处理的氮、磷、钾向地上部运输的比例大于不施磷处理。黄高宝和张恩和(2002)试验得出,在小麦拔节后期(玉米苗期)以土壤相对含水率的 50%进行亏缺灌水,可明显提高间作系统总的生产力;间作农田土壤速效磷与根密度的垂直分布呈明显递减特性,30%以上的 P 和 40%以上的根干重分布在 0~10 cm 土

层,而表层含水率低于 10%,水分空间分布与根系和 P 的错位,限制了磷素养分肥效的发挥,通过磷肥深施(20 cm 土层以下)和玉米苗期的适度 RDI,可促进根系在土壤下层的分布,便于深层根系在中、后期对养分的吸收。速效氮在空间上的分布受灌溉影响很大,生育前期速效氮虽然在表层含量较高,但随生育期的推进,逐渐向下层运移,因此灌溉农田过量施氮或施氮方法不当,将造成氮素随水流失,降低氮肥利用效率。Pandey 等(2000)研究表明,RDI 和供氮水平对玉米的叶面积系数、作物生长系数和地上干物质的重量影响不同。在玉米苗期适宜地采取水分调亏可以促进根系下扎的深度,有利于根系向深层土壤中的水分的汲取,同时也减小了叶面积,降低了作物的蒸腾量。水分和氮肥的最优化投入可以获得最大的生物学产量和收获指数。通过 2 年的试验,研究了增加水氮供应对小麦的生物学产量的影响。结果表明,将氮肥供给增加到 $120 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,小麦会产生更大的叶面积、叶绿素含量、作物生长系数和地上部分的生物学产量。水氮交互作用对生物学产量影响显著。小麦生长参数随着调亏灌溉次数的增加而减小。研究还表明,如果把单位面积上的地上干物质产量和收获指数最大作为目标,就会限制本地区降低灌水定额的可能。在小麦的播种阶段的水氮最优投入是非常关键的,这将有助于作物以后的生长、生物学产量和收获指数的提高(Pandey et al., 2001)。

1.2.2 西北旱区作物水肥高效利用的研究目标

总体目标是通过认识西北旱区水肥资源高效利用规律及其与生态环境之间的相互关系,在探究作物高效利用水肥机制与环境的基础上,充分考虑节水与养分之间的关系及节流与开源的关系,提出与西北旱区水肥资源供需平衡相适应的节水型生态农业技术集成模式,合理配置本地区水肥资源,实现本地区水肥资源高效利用与生态系统良性循环。研究适宜于西北旱区不同作物的最佳调亏灌溉生育期、水分亏缺度及诊断作物缺水程度的技术指标。探明调亏灌溉对大田作物生理生态特征、产量、水分利用效率及品质的影响,构建调亏灌溉的水分生产函数;找到不同地区的大田作物的根系分区交替灌溉适用模式及相应的田间管理技术等;研究不同节水灌溉模式对土壤水肥微环境及理化特性的影响,为改善农田生态环境提供理论依据;研究不同灌水技术下作物生理响应(如导水率和茎流等)、节水机制(如保水剂的持水保肥特性等);将先进的灌水技术和施肥相结合,水肥吸收累积规律,摸清不同节水灌溉下作物水肥高效利用机制,找到适合于西北旱区主要作物的最佳水肥供应模式,实现水肥高效利用和优质稳产的发展目标。

在深刻认识西北旱区作物水肥高效利用过程和根区微环境的基础上,建立定量描述当地农业生产过程中“以水定肥,以肥控水”的水肥高效利用模式,力求反映节水灌溉和作物生产力提高对农田生态系统的影响;获得西北旱区水肥供应量改变与生态环境效应之间的定量关系,建立本地区水肥供应量改变所导致的生态环境效应评估指标体系与方法;确定生态环境脆弱条件下的最优水肥供应量的决策方法,把作物生长过程与调控和水肥资源优化配置有机地结合起来,实现水肥资源合理配置理论的新突破。针对西北旱区水资源紧缺、生态环境脆弱、农业用水浪费、农业节水潜力较大的现状,以提高作

物水肥利用效率、灌溉水利用率和改善农田生态环境为核心,建立适合本地区的作物水肥高效利用的理论与应用技术,提出基于不同生育阶段的作物水肥高效利用与调控新技术;通过节水灌溉条件下水分养分迁移转化理论及尺度效应的研究,把单点的水分养分迁移动力学模式扩转到尺度应用,为不同尺度水分养分转化过程的定量模拟和节水调控提供有力的工具。在作物水肥高效利用与根系分区交替灌溉、非充分灌溉和调亏灌溉理论研究中,注重节水灌溉条件下土壤、水、肥、盐迁移模型与尺度效应,考虑不同施肥量的本地区地表水-大气水相互转化关系,面向生态的水肥资源合理配置等重点领域建立新理论,提出新方法。

开发西北旱区水肥资源合理配置及农业生态节水的应用技术,建立本地区水肥资源合理配置的、综合考虑农艺和生物及管理节水的技术集成体系;通过作物水肥高效利用技术与调亏灌溉、非充分灌溉、根系分区交替灌溉、膜下滴灌等试验,建立适合西北旱区广泛使用的水肥高效利用技术、制订适合本地区农业发展的灌溉制度、适应本地区不同区域气候与水资源特点和土地资源状况的节水农业技术体系。对应用技术进行综合集成,建立主要农作物水肥高效利用的根系分区交替灌溉、调亏灌溉、非充分灌溉、膜下滴灌等技术的操作规程,与流域水资源供需平衡相适应的节水型农业种植格局、用水结构调整下的水肥资源合理配置模式,提出本地区考虑生态的农艺、生物及管理节水综合技术体系集成模式和技术规程,以及综合评价标准和指标体系。在本地区不同气候区不同水资源形成条件区,建立节水型农业高效利用水肥的示范区。

1.2.3 石羊河流域大田作物水肥高效利用研究的框架与体系

西北旱区作物水肥高效利用的理论与技术综合集成研究包括应用基础理论研究、应用技术研究和示范推广3个方面。应用基础研究是应用技术开发的依据,把基础研究和应用研究的技术与模式进行集成,并建立示范区,在西北旱区进行推广。

以水肥资源持续高效利用为中心,在深刻认识作物高效利用水肥的过程及其与生态环境之间的关系基础上,实施考虑环境的节水型生态农业技术措施与水肥资源的优化配置,其总体框架如图1-1所示。

1.2.4 需要解决的关键科学技术问题

根据西北旱区特别是关中地区及石羊河流域现有研究基础和条件,其作物水肥高效利用的理论与技术综合集成研究需要解决以下关键技术问题。

A. 建立不同生育阶段的灌水与肥料的互作效应在作物生长、生理、产量和品质与作物水肥高效利用之间的定量关系,提出适合本地区推广应用的针对不同作物和生育阶段的水肥高效利用指标体系和最佳供水供肥模式,这将对于促进我国西北旱区农业可持续发展具有重要的理论与现实意义,该方面的研究也为农业水土工程学科更好更快发展提供决策依据。该内容是为了回答“不同生育阶段的灌水与肥料之间的互作效应下西北旱区作物生长、生理、产量和品质与作物水肥高效利用之间如何响应”的科学问题,并期

望针对调亏灌溉、根系分区交替灌溉、非充分灌溉和膜下滴灌技术提供可操作性的灌水和施肥的最优调控指标。

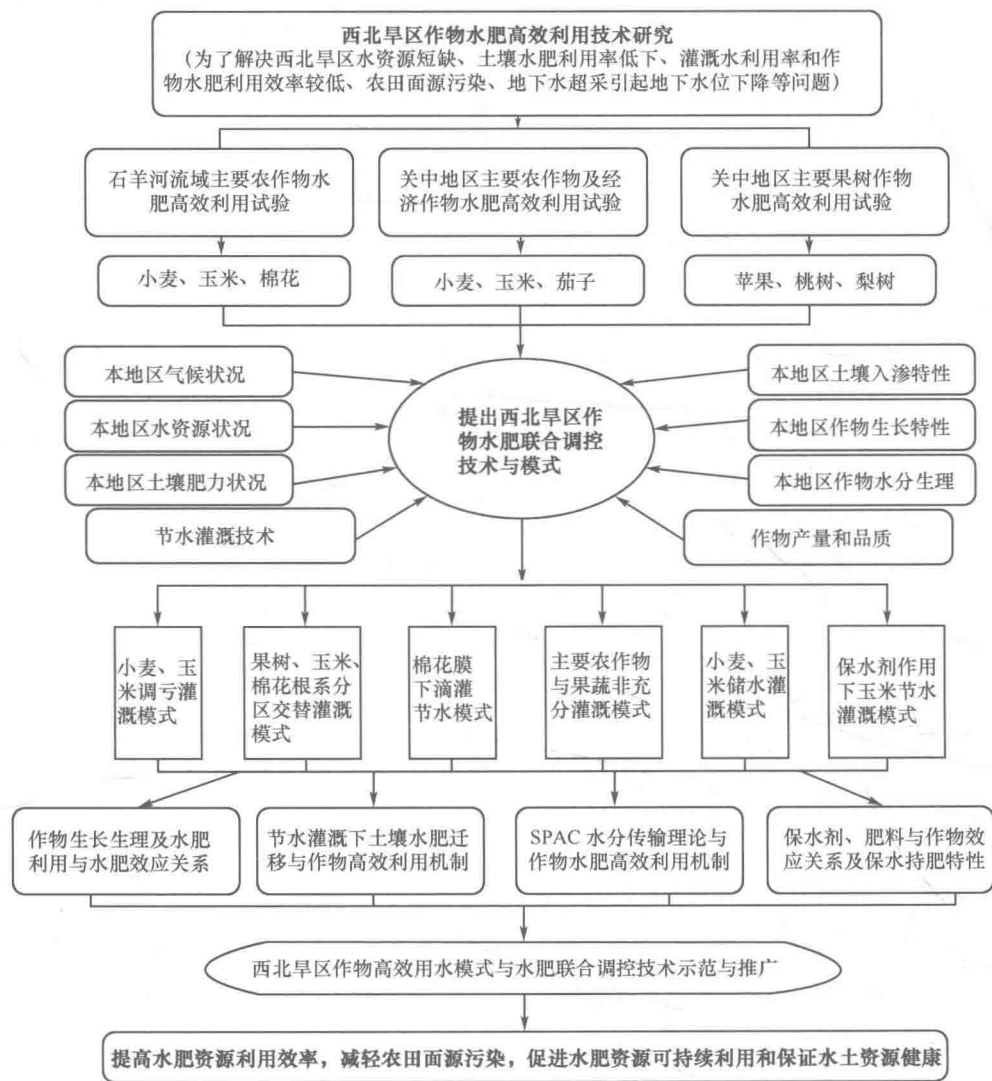


图 1-1 西北旱区作物水肥高效利用的理论与实践的总体框架

B. 建立西北旱区主要大田作物高效用水用肥的可控指标体系,为本地区节水潜力评估和水肥调控技术的应用提供科学依据;建立适合本地区的节水、高效及对环境友好的节水灌溉技术应用中(根系分区交替灌溉、调亏灌溉、非充分灌溉、膜下滴灌等技术)的最佳水肥控制指标及供水供肥模式,解决这些技术在存有土壤次生盐碱化的地区应用的可行性问题及农田面源污染控制的问题;建立主要农作物(小麦、玉米、棉花)和特色经济作物的水肥生产的关系模型,获得土壤养分和盐分对作物缺水敏感指数调节的定量关系;提出本地区主要农作物在节水灌溉条件下土壤水分养分运动规律及耦合效应关系;解决本地区土壤水分、养分和盐分之间的互作效应关系对作物生产的促进作用和对区域