

国家“十二五”863 计划课题研究专著

作物水肥高效利用理论与调控技术

Theory and Regulation Technology of Efficient Use of
Water and Fertilizer by Crops

张富仓 胡田田 李伏生 等/著

中国农业科学技术出版社

国家“十二五”863 计划课题研究专著

作物水肥高效利用理论与调控技术

Theory and Regulation Technology of Efficient Use of
Water and Fertilizer by Crops

张富仓 胡田田 李伏生 等/著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

作物水肥高效利用理论与调控技术 / 张富仓, 胡田田, 李伏生等著. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2016. 2

ISBN 978 - 7 - 5116 - 2220 - 4

I. ①作… II. ①张… III. ①作物 - 肥水管理 IV. ①S365

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 180169 号

责任编辑 范 潇

责任校对 贾海霞

出 版 者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82106625 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)

(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106625

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京华正印刷有限公司

开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张 37.25 彩插 8 面

字 数 893 千字

版 次 2016 年 2 月第 1 版 2016 年 2 月第 1 次印刷

定 价 208.00 元

—— 版权所有 · 翻印必究 ——

著者名单

第一章	张富仓	范军亮	胡田田	李伏生			
第二章	刘小芳	张岁岐	任媛媛				
第三章	漆栋良	胡田田	宋雪				
第四章	赵洪祥	刘慧涛	张丽华	边少锋	高玉山	彭涛涛	孙云云
第五章	农梦玲	李伏生	罗慧				
第六章	李伏生	刘水	陆文娟	傅丰贝			
第七章	刘西平	张国壮					
第八章	贾志宽	杨丽	许卫娜	蔡铁			
第九章	吴立峰	张富仓	王钊	李志军	范军亮		
第十章	李援农	谷晓博	周昌明	银敏华	蒋耿民	胡永翔	吕静
第十一章	邢英英	张富仓	张燕	李志军	范军亮		
第十二章	胡田田	牛晓丽	吴雪	陈思	刘杰		
第十三章	张富仓	李静	方栋平	李志军	范军亮		
第十四章	李建明	赵志华	潘铜华	刘国英			
第十五章	周罕觅	张富仓	李志军	范军亮			
第十六章	王旭东	赵世翔					
第十七章	范兴科	孔令阳					
第十八章	张振华	雷宏军					

序

“十二五”期间，科技部在 863 计划设立“农业高效用水精量控制技术与产品”(2011AA100500) 重点项目，并首次在该项目设立“农田水肥联合调控技术与设备”(2011AA100504) 课题。项目实施力图以作物生命健康需水过程为依据，借鉴生物、信息、新材料等高技术，开发节水前沿关键技术与重大产品，实现农业高效用水过程精量控制，提升我国节水农业技术装备水平与自主创新能力，引领现代节水农业技术发展方向，较大幅度提高农业用水效率与效益，确保国家粮食安全与战略水安全。

课题组通过 5 年的辛勤劳动，探索了作物灌水与施肥的高效耦合效应机理，以及作物生长、生理、产量和品质与作物水肥高效利用之间的定量关系；提出了适合不同气候类型区不同作物的最佳灌水和施肥指标、水肥高效利用耦合模式和提高水肥利用效率的技术手段与调控方法；较为系统的研究了我国主要大田农作物和设施果蔬作物水肥联合调控技术，并开发了相应的产品与设备；研究成果为作物高效生产实践提供了一定的理论与技术支撑。

在上述工作基础上，课题组完成了《作物水肥高效利用理论与调控技术》一书。在出版之际，邀请我作序，非常愿意借此机会向各位同仁推荐此书，更期望本书的出版在推动我国作物水肥联合调控技术的研究与实践过程中发挥较大的作用，也希望大家共同关注水肥联合调控这一新兴领域。

“十二五”国家 863 计划项目首席科学家
旱区作物高效用水国家工程实验室主任



2016 年 1 月 30 日

前 言

我国旱区主要分布在西北、华北、东北、西南等区域，耕地面积约 10.1 亿亩，占全国耕地总面积的 55%，是我国粮食增产潜力最大的地区，也是保障国家粮食安全的关键区域。然而，日益严重的干旱、水资源短缺和土壤肥力低下是制约旱区农业生产综合能力提升的主要瓶颈。如何高效利用有限的水和养分资源，进一步提高我国粮食生产能力，确保农业和环境的可持续发展是目前我国农业面临的重大挑战。

作物水肥高效利用理论与调控技术就是将灌溉与施肥技术有机结合的一项现代农业新技术。它实现了对作物的精准灌溉和施肥，将节水、节肥、节药等技术环节系统设计与管理，实现作物对水肥的协同管理和同步高效利用。自 20 世纪 90 年代开始，许多发达国家如美国、以色列、欧洲等发达国家投入较多资金研发作物灌溉和施肥技术，并广泛应用于大农场模式的作物水肥管理，不仅节水节肥增效显著，而且氮肥、磷肥用量分别下降了大约 30% 和 50%，曾经一度十分严重的地下水硝酸盐污染有所缓解。

相对于国外技术水平，中国发展水肥高效利用技术起步于 20 世纪 90 年代，到目前为止，也形成了较多具有自主知识产权的技术和产品，但自动化程度高的智能灌溉施肥设备多以进口为主，缺乏高水平以及自动化控制灌溉施肥设备，特别是与灌溉施肥及配套设备品种规格少，形式比较单一，技术含量低；大型过滤器和大容积施肥罐等装置尚属空缺。水肥高效利用与调控技术的研发尚未得到足够重视。还缺乏与灌溉施肥设备相适应不同作物水分养分管理技术，包括不同作物灌溉施肥制度、可溶性肥料研发技术、作物养分诊断技术以及配套的作物水分养分监测、土壤、作物水分信息传递反馈控制技术等。

农业在追求作物的最高产量、最佳品质和最低生产成本的同时也要保持可持续发展，实现这个目标的前提是要有一个最优且平衡的水分和养分的供应，环境、土地和水资源的保护也是我们需考虑的另一个重要方面。在半干旱和干旱气候条件下，有时甚至在湿润的气候条件下，最佳的供水状况取决于灌溉方式。在大部分情况下，供水是通过明渠、漫灌和沟灌来实现的。这些方法的水利用效率是相当低的，一般有 $1/2 \sim 1/3$ 的带有营养元素的灌溉水不能被作物利用。在加压灌溉系统中，水的利用率可达 70% ~ 95%，这种灌溉系统可以很好地控制水分和养分的供应并使水的损失最小化。

为了探讨我国北方旱区主要作物对水肥资源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。“十二五”期间，在科技部国家高技术发展研究计划（863 计划）课题“农田水肥联合调控技术与设备（2011AA100504）”的资助下，对我国北方旱区主要作物水肥高效利用理论与调控技术

进行了研究。

我们的研究针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。这需要我们在考虑作物水肥高效利用的土壤和生理过程及其调控的基础上,研究不同水肥供应下作物水分和养分—生物量—经济产量的转化过程,探明不同水肥供应下作物水分养分高效利用的土壤和生理过程与调控技术,揭示有利于作物健康生长的水肥互作机制与定向调控途径;研究旱作农田主要农作物和经济作物高效利用降水的养分平衡补给技术,提出不同土壤、不同作物的水分与养分最佳参数组合;研究灌溉农田主要农作物和经济作物水肥联合高效利用的灌水方式、灌溉制度与施肥技术,构建节水高产灌溉施肥技术指标体系;研究设施特色经济作物水肥一体化灌溉技术,并开发新产品;提出农田水肥高效利用的水肥联合调控理论和技术体系与产品,突破与创新作物水肥联合调控技术,实现作物优质高效增产。

作物水肥高效利用技术研究以实施精确控制为手段,以充分突出利用现代高新技术对传统农田灌溉施肥技术进行改造为特点,达到以实现作物优质高效生产的同时显著提高作物水肥利用效率。2011—2015年,课题组先后开展了包括“小麦、玉米、棉花、果蔬等主要农作物的水分、养分高效利用的土壤和生理过程与调控”、“旱作农田主要农作物和经济作物高效利用降水的养分平衡补给试验”、“灌溉农田主要农作物和经济作物水肥联合高效利用的灌水方式、灌溉制度与施肥技术试验”、“番茄、黄瓜、甜瓜等设施特色经济作物优质高产的灌溉施肥技术试验与产品研发”、“设施作物水气耦合高效利用技术试验与作物水—肥—气高效利用控制系统研发”等30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理论与调控技术奠定了基础。研究建立了主要大田与设施作物灌水与施肥的高效耦合效应以及作物生长、生理、产量和品质与作物水肥高效利用之间的定量关系,提出了适合不同类型区不同作物基于作物的生长动态、干物质累积和提质高产机理、最佳灌水和施肥指标及耦合模式和提高水肥利用效率的技术手段和调控模式,为作物高效生产实践提供技术支撑。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》《Field Crops Research》《Planta》《Journal of Integrative Plant Biology》《Scientia Horticulturae》《农业工程学报》《中国农业科学》《农业机械学报》《水利学报》《应用生态学报》《土壤学报》等国内外刊物上发表论文120余篇,有的论文在学术界产生了一定的影响。

本书由西北农林科技大学张富仓、胡田田、王旭东、李建明、刘西平、贾志宽、李援农、范军亮、李志军、吴立峰、邢英英、周罕觅等,中国科学院水利部水土保持研究所的张岁岐、范兴科,刘小芳、孔令阳、任媛媛,吉林省农业科学院的赵洪祥、刘洪涛、张丽华、边少锋等,广西大学李伏生、农梦玲、刘水等,鲁东大学张振华、雷红军等著。各章的撰写在书中均有注明。全书由张富仓主著、通稿。

作物水肥高效利用理论与调控技术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的,还有待于进一步探索 and 深化。书中

不足之处，恳请同行专家批评指正。

在作物水肥高效利用理论与调控技术研究过程中，始终得到了科技部、西北农林科技大学、吉林省农业科学院、广西大学、鲁东大学等领导和科技部门的大力支持。首先感谢国家“十二五”863计划现代农业技术领域“农业高效用水精量控制技术与产品”项目首席吴普特教授，主题专家康绍忠院士、许迪研究员、梅旭荣研究员、吴志杰研究员、刘凤权教授等对本课题的指导和大力支持，感谢西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院、水利与建筑工程学院的领导和老师的帮助。感谢在本书编写过程中，得到了蔡焕杰、马孝义、冯浩、司炳成、金继明、邹志荣、朱德兰、韩清芳、韩文霆、牛文全、赵西宁等专家对我们工作的热情帮助和技术指导。

张富仓

2016年1月26日于杨凌

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 研究目的与意义	(1)
第二节 作物水肥高效利用技术研究的总体思路	(2)
第三节 作物水肥高效利用技术与调控模式	(8)
参考文献	(15)
第二章 氮素形态和水分条件对玉米水分利用的调控	(17)
第一节 引言	(17)
第二节 氮素形态和水分条件对玉米生长发育的调控	(18)
第三节 氮素形态和水分条件对玉米生理过程的调控	(22)
第四节 氮素形态和水分条件对玉米水分利用的影响	(27)
第五节 讨论	(28)
第六节 小结	(32)
参考文献	(32)
第三章 玉米对局部供应水、氮的响应	(36)
第一节 国内外研究进展	(36)
第二节 研究内容和方法	(38)
第三节 局部供应水、氮条件下玉米根系的生长分布动态	(40)
第四节 局部供应水、氮条件下土壤水分和 $\text{NO}_3 - \text{N}$ 的分布动态	(50)
第五节 局部供应水、氮对玉米产量及水氮利用的影响	(56)
第六节 讨论与结论	(57)
参考文献	(59)
第四章 东北玉米水肥联合调控技术	(62)
第一节 引言	(62)
第二节 研究内容与方法	(63)
第三节 不同水肥供应对玉米生长和水肥利用的影响	(65)
第四节 半干旱区玉米水肥一体化灌溉技术与模式	(79)
参考文献	(88)
第五章 甜糯玉米根区局部灌溉水肥利用及其最佳供应模式	(89)
第一节 国内外研究进展	(89)
第二节 试验概况	(91)

第三节	不同时期根区局部灌溉和氮钾肥对玉米干物质积累和水肥利用的影响	(94)
第四节	灌溉方式和氮钾肥对玉米干物质积累和水肥利用的影响	(99)
第五节	灌溉和施肥方式对玉米干物质积累、产量和水肥利用的影响	(105)
第六节	沟灌—种植方式和施肥水平对玉米产量和干物质积累的影响	(111)
第七节	结论	(113)
参考文献		(113)
第六章	不同灌水施肥策略对土壤微生物活性和水肥利用的影响	(117)
第一节	国内外研究进展	(117)
第二节	试验概况	(119)
第三节	不同灌水施肥策略对土壤微生物量 C 和 N 的影响	(122)
第四节	不同灌水施肥策略对土壤呼吸的影响	(126)
第五节	不同灌水施肥策略对土壤酶活性的影响	(127)
第六节	不同灌水施肥策略对玉米干物质积累和水分利用的影响	(128)
第七节	结论	(137)
参考文献		(138)
第七章	旱地小麦根际促生菌调控技术及肥料制剂研发	(141)
第一节	引言	(141)
第二节	材料与方法	(143)
第三节	分离菌株所产生的 ACC 脱氢酶活性及促生潜力	(148)
第四节	产高活性 ACC 脱氢酶菌株的鉴定	(149)
第五节	不同土壤水分条件下筛选的不同细菌菌株的接种效应	(152)
第六节	结论与展望	(158)
参考文献		(162)
第八章	水肥耦合对冬小麦生长的协同效应	(166)
第一节	国内外研究概况	(166)
第二节	试验设计与方法	(172)
第三节	水肥耦合对冬小麦旗叶光合特性的影响	(175)
第四节	水肥耦合对冬小麦光合色素的影响	(181)
第五节	不同水肥条件对小麦种植区土壤含水量的影响	(186)
第六节	水肥耦合下冬小麦生物量的变化	(190)
第七节	水肥耦合对冬小麦产量的影响	(193)
参考文献		(198)
第九章	北疆棉花膜下滴灌施肥水肥供应模式研究	(206)
第一节	国内外研究进展	(206)
第二节	研究内容与方法	(208)
第三节	滴灌施肥棉花多目标的水肥耦合效应	(214)
第四节	不同滴灌施肥水平对棉花生长的影响	(227)

第五节 不同滴灌施肥水平对棉花养分吸收利用影响	(249)
第六节 主要结论	(262)
参考文献	(263)
第十章 主要粮食作物覆膜栽培与氮肥调控技术	(267)
第一节 夏玉米覆膜栽培技术与节水体系	(267)
第二节 小麦地膜覆盖栽培模式研究	(281)
第三节 油菜覆膜节水与增产效果	(289)
第十一章 温室番茄滴灌施肥水肥耦合效应与利用模式	(293)
第一节 国内外研究进展	(293)
第二节 研究内容与方法	(294)
第三节 滴灌施肥水肥耦合对番茄生长和生理特性的影响	(300)
第四节 番茄产量、品质及水肥利用效率的水肥耦合效应	(325)
第五节 温室番茄水肥耦合效应的综合评价	(338)
第六节 主要结论	(341)
参考文献	(342)
第十二章 番茄产量与品质对水肥调控的响应	(347)
第一节 国内外研究进展	(347)
第二节 研究内容与方法	(349)
第三节 番茄产量及水分利用对水肥调控的响应	(353)
第四节 番茄品质对水肥调控的响应	(364)
第五节 小结	(393)
参考文献	(394)
第十三章 温室黄瓜滴灌施肥水肥耦合效应与利用模式	(398)
第一节 国内外研究进展	(398)
第二节 研究内容与方法	(400)
第三节 灌水量和滴灌施肥方式对温室滴灌施肥黄瓜产量、品质和养分 吸收的影响	(403)
第四节 滴灌施肥条件下水氮供应对黄瓜生长、产量、品质的影响	(412)
第五节 结论	(420)
参考文献	(421)
第十四章 温室厚皮甜瓜水肥耦合效应与利用模式	(424)
第一节 国内外研究进展	(424)
第二节 研究背景和方法	(428)
第三节 水氮耦合对温室甜瓜产量和品质的影响	(429)
第四节 水钾耦合对大棚厚皮甜瓜产量和品质的影响	(435)
第五节 根系分区水肥耦合对大棚甜瓜产量和品质的影响	(441)
参考文献	(448)

第十五章	果树生长和生理特性及产量和品质对水肥调控的响应	(454)
第一节	国内外研究进展	(454)
第二节	研究内容与方法	(455)
第三节	苹果幼树生长和生理特性及水分生产率对水肥的响应研究	(459)
第四节	桃树需水信号及产量和果实品质对水分的响应研究	(473)
第五节	主要结论	(486)
	参考文献	(487)
第十六章	土壤水肥联合调控剂的研发和应用	(490)
第一节	国内外研究进展	(490)
第二节	研究内容和方法	(493)
第三节	高温活化处理下的矿物的性质变化	(493)
第四节	不同温度处理下生物质炭的性质	(495)
第五节	土壤添加矿物和生物质炭的水分保持特征	(496)
第六节	矿粉和生物质炭的保肥效应	(499)
第七节	结论	(500)
	参考文献	(500)
第十七章	滴灌系统低能耗文丘里施肥器	(505)
第一节	滴灌水肥一体化灌溉技术与施肥装置	(505)
第二节	文丘里施肥器特点及其研究应用现状	(509)
第三节	影响文丘里施肥器性能因素分析	(512)
第四节	滴灌系统中文丘里施肥器的选配方法	(533)
第五节	滴灌系统中文丘里施肥管路压力水头平衡设计	(536)
	参考文献	(538)
第十八章	循环曝气灌溉系统设计及其应用	(543)
第一节	循环曝气灌溉系统设计	(543)
第二节	循环曝气灌溉系统水气传输特性研究	(548)
第三节	循环曝气对作物生长及产量和品质影响	(556)
	参考文献	(575)

第一章 概 述

第一节 研究目的与意义

干旱缺水是一个世界性问题，我国北方地区尤其严重。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（1 亩 $\approx 666.7\text{m}^2$ ，全书同）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 。我国农业是用水大户，农业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，我们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 m^3 水的农业产出只有 1.0kg 左右，比世界平均水平低 30%，也有 30% 的潜力。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 6 000 多万 t，但化肥的利用率只有 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。我国农田主要农作物当季氮肥利用率不足 30%，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，还会产生肥料淋失，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 个省氮肥平均施用量超过国际公认的上限每公顷 225kg，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。

干旱缺水不仅限制我国的经济发展，而且造成了土壤沙漠化、沙尘暴等一系列环境问题，危及到了人类生存。随着人口的增长，工业化和城市化进程的加快，我国水资源供需之间的矛盾将进一步加剧。同时，农田水肥利用率低、肥力低下、水土环境恶化也是限制我国农业可持续发展中面临的重大问题。目前，世界各国均十分重视农业高效用水技术与产品研究与应用。然而一切先进的农业节水节肥技术要真正达到目的，都必须充分考虑土壤—作物系统的水分养分关系，实现水—土—作物关系的最优协调。国内外研究表明，充分利用土壤水肥资源和最大限度地提高作物对水分和养分的吸收和利用是

提高农田水分和养分利用效率的基本途径，而提高农田水分和养分利用效率，减少土壤和地下水污染，改善农田水肥环境，提高作物的产量和品质就成为进一步发展旱作农业和灌溉农业的一个中心问题。唯有如此，才有可能在进一步大幅度减少农业用水用肥方面取得新的突破（Behera, 2009）。

水分和养分是作物产量的决定因素，植物对养分的吸收、运转和利用都依赖于土壤水分，土壤水分状况在很大程度上决定着肥料的合理用量。近年来的研究发现，在旱地和有限灌溉条件下，肥是开发水分系统生产力的激活剂，水是肥效发挥的关键，二者互为制约，又互相促进，一个因子水平的升降，直接影响另一因子增产力的发挥，水分和养分存在明显的耦合现象。水分亏缺不但能影响土壤养分的迁移转化吸收，而且还影响植物体内的营养代谢；过量的灌溉不仅会造成土壤有效养分的淋洗，而且还会使土壤透气性差，影响根系对养分的吸收。研究还发现，在旱作农业条件下，施肥能补偿干旱条件下植物生长受抑的不良效应和改善植物的生理功能，提高水分利用效率。在灌溉农田，实施非充分灌溉技术，不但能有效地提高水分和养分利用效率，作物还会产生明显的生长补偿效应，品质也有明显的改善。在水资源日益短缺的今天，如何最大限度地提高水分和养分利用效率以及有限的水分和养分供应获得最大经济效益是当前我国旱区农业可持续发展中迫切需要研究的关键科学问题。

第二节 作物水肥高效利用技术研究的总体思路

作物水肥高效利用理论与调控技术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。这需要在考虑作物水肥高效利用的土壤和生理过程及其调控的基础上，研究不同水肥供应下作物水分和养分—生物量—经济产量的转化过程，探明不同水肥供应下作物水分、养分高效利用的土壤和生理过程与调控技术，揭示有利于作物健康生长的水肥互作机制与定向调控途径；研究旱作农田主要农作物和经济作物高效利用降水的养分平衡补给技术，提出不同土壤、不同作物的水分与养分最佳参数组合；研究灌溉农田主要农作物和经济作物水肥联合高效利用的灌水方式、灌溉制度与施肥技术，构建节水高产灌溉施肥技术指标体系；研究设施特色经济作物水肥一体化技术，并开发新产品；提出农田作物水肥联合调控理论和技术体系与产品，突破与创新作物水肥利用的关键技术，实现作物优质高效增产。

通过“以水调肥”“以肥控水”的水肥互作机制来提高作物水肥利用效率，是我国农业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，系统探索作物水肥联合高效利用技术与调控模式。

一、作物水肥高效利用理论与技术的研究现状

旱作农田合理施肥技术的研究是实现“以水定肥”“以肥促水”的重要基础，是农业高效用水关键技术之一。在旱地作物水肥耦合方面，国内外进行了大量的研究。Benbi (1989) 研究旱地小麦对氮肥的利用和土壤中可利用水量的机制，表明供水量有一阈值，超过此值，氮肥利用率不再随水分的增加而增加。Jerry (2001) 等总结认为，水分利用效率 (WUE) 和降水生产效率的差异最多可达 50%。由于农艺措施的使用，使土壤储水量增加，可提高 WUE 值。尹光华等 (2005) 对春小麦产量的水肥耦合效应研究表明，水肥单因子对 WUE 有显著影响，影响顺序为：水 > 磷 > 氮；水肥耦合的产量效应是：中水中肥效应最高，高水高肥次之，低水低肥最低；水肥交互耦合效应大小顺序是：氮水耦合 > 氮磷耦合 > 磷水耦合。吕殿青 (1994) 研究了水肥交互效应及对作物产量的影响，在一定条件下，氮磷、氮水的交互效应为协同作用型，磷水为拮抗型。旱作农业中作物水肥高效利用研究已经受到国内外的高度重视，但对不同区域、水资源状况、种植制度、地力基础条件下主要旱作农田养分供应与施肥管理模式、主要农作物生育期养分盈亏诊断与评价指标、获得最佳产量的水分与养分参数组合等问题还需进一步深入研究。

节水灌溉条件下作物水肥高效利用技术的研究是实现“以水促肥”“肥水协调”的重要基础，是农业高效用水的前沿技术之一。国内外研究者对于限水灌溉或非充分灌溉条件下作物水分高效利用的机理进行了许多研究，特别是节水型地面灌溉技术如分根区交替灌溉、精细地面畦灌、膜孔灌溉等，对控制灌溉条件下作物水肥高效利用技术的研究有重要的推动作用。自 20 世纪 80 年代以来，国内外许多学者就限水灌溉条件下不同灌水方式及不同水肥供应模式对作物根土微域中水分、养分耦合迁移的影响及其根系吸水、吸肥特征进行了大量的研究。在分根区交替灌溉方面，Benjamin (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 (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 (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根量都增加，氮的吸收也因此而增加。Wang (2007) 研究结果表明，部分根区干燥灌水技术可以很好的和局部供肥相结合，当局部土壤含水率比较低时施肥会降低养分的利用。谭军利 (2005) 研究表明，在低灌水量 ($450\text{m}^3/\text{hm}^2$) 水平下水肥异区交替灌溉，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 ($900\text{m}^3/\text{hm}^2$) 水平下，水肥异区交替灌水与常规均匀灌水差异不显著，但养分发生了强烈的淋洗；收获后交替灌溉的土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 残留量比传统灌溉要高，而水分残留量则相反。刘小刚、张富仓 (2009) 对分根交替灌溉下作物根区水氮迁移和高效利用进行了系统的研究，初步提出了适合不同旱区类型、不同作物的大田交替灌溉的灌水技术、供水供肥模式。梁艳萍、许迪 (2008) 对冬小麦生长期施用尿素条件下

不同畦灌施肥模式的土壤水和氮时空分布状况及变化趋势进行了研究,评价作物有效根系层土壤水氮沿畦长空间分布均匀性,探讨适宜的畦灌施肥模式。费良军等(2007)对膜孔灌肥液入渗氮素运移特性、水氮运移特性、水肥耦合特性进行了研究,探讨了适宜土壤水分和养分分布的膜孔灌技术和参数。

在调亏灌溉条件下作物水肥利用研究方面, Pandey (2000) 研究了水分调亏和施氮水平对玉米叶面积系数和地上干物质的影响。研究表明,玉米苗期适宜的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。Tavakkoli (1999—2002) 在伊朗西北部进行了田间试验,表明灌水量为充分灌溉的 $1/3$ 的处理显著地提高了作物产量和水分利用效率,补充灌溉明显地提高了水氮利用效率,在调亏灌溉条件下, $60\text{kgN} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和充分灌溉的 $1/3$ 灌水定额可以获得最大的水分利用效率。国内学者在近几年也做了大量的研究工作。张步翀(2007)对甘肃省河西绿洲灌区春小麦调亏灌溉两年后土壤速效磷和全磷变化进行了研究,干旱条件下春小麦适度水分调亏对 $0 \sim 20\text{cm}$ 土层全钾和速效钾含量有不同程度的降低作用,调亏灌溉处理的籽粒产量和生物产量均较高,造成籽粒和秸秆钾素养分携出量大,因而对土壤速效钾的消耗严重,导致土壤钾素含量降低。祁有玲、张富仓(2009),寇雯萍、张富仓(2010)等对不同旱区调亏灌溉条件下小麦、玉米等作物水氮高效利用与供水供氮模式进行了研究,初步提出了节水节肥型作物调亏灌溉和施肥技术。不同类型旱区、不同作物适合不同的灌水模式和技术、不同施肥方法和技术。目前,还缺乏地面灌溉(分根区交替灌溉、调亏灌溉、覆膜灌溉)和大田滴灌(地面滴灌、作物根区控制灌溉)条件下作物水肥高效利用调控技术与控制指标体系及产品。因此,需要进行大量的田间试验工作,研究不同灌溉方式下作物根区水肥耦合效应与调控途径,获得田间节水灌溉和施肥技术参数最优组合、定量指标体系和产品,使之定量化和可操作化。

国外一直非常重视作物灌溉施肥技术的研究,灌溉施肥应用十分普遍。在微灌水肥高效利用方面,以色列、美国、荷兰等国家对不同作物的施肥灌溉制度和微灌施肥灌溉专用液体肥料进行了 $20 \sim 30$ 年的研究,取得了丰富的成果,已经研制出了针对多种经济作物水肥高效利用的专家管理系统。智能型的自动控制系统在喷微灌系统的应用使水、肥能够适时精量的同步施入到作物根区,从而提高了水分和养分的利用率,最大限度地降低了水分、养分的流失和环境污染,优化了水肥耦合关系。利用 GPS 和 GIS、RS 和计算机控制系统等,对灌水施肥进行精确控制,为最大限度优化投入,提高灌溉系统运行性能与效率,成为节水农业发展的重要趋势。我国灌溉施肥技术始于微灌技术的推广应用。在 20 世纪 70 年代中,澳大利亚首赠中国政府滴灌设备,开始了关注和引进国外灌溉设备并开展微灌技术的应用试验。20 世纪 80 年代到 90 年代,在引进国外设备、技术的基础上,开始研发国产产品,并基本形成了有自主知识产权的设备和技术,在此基础上,开始有灌溉施肥内容的研究。20 世纪 90 年代后期至今,灌溉施肥的理论及应用技术逐渐被重视,技术研究和技术培训大力开展,灌溉施肥技术较大面积推广应用。到目前,灌溉施肥在中国尚处于发展阶段,灌溉施肥应用与理论研究正逐渐深入。由过去侧重土壤水分状况、节水和增产效益试验研究,逐渐发展到灌溉施肥条件下水肥耦合

效应及其对作物生长和产品品质影响；由单独注重灌溉技术、灌溉制度转变到灌溉与施肥的综合运筹。灌溉施肥设备也不断改进，灌溉施肥水平日益提高。目前，我国灌溉施肥系统管理水平较低，应用灌溉施肥技术面积所占比例较小，水肥结合应用理论研究成果较少，深度不够，某些灌溉施肥设备的质量与国外同类产品相比较仍然存在较大差距。还需要进一步研究挖掘适宜不同作物和生长条件的智能型的自动控制系统、不同作物的施肥灌溉制度和微灌施肥灌溉专用设备和产品。

二、作物水肥高效利用技术研究内容

针对我国农田水肥利用率低的问题，以北方旱区主要农作物小麦、玉米、棉花以及果蔬作物为重点，以同步提高作物水肥利用效率及其最优调控技术为目标，挖掘作物节水节肥潜力，提高土壤水肥生产潜力，实现高效优质增产。主要研究不同水肥供应下作物水分和养分—生物量—经济产量的转化过程以及生理调控技术；研究旱作农田主要农作物和经济作物高效利用降水的养分平衡补给技术，提出不同土壤、不同作物的水分与养分最佳参数组合；研究灌溉农田主要农作物和经济作物水肥联合高效利用的灌水方式、灌溉制度与施肥技术，构建节水高产灌溉施肥技术指标体系；研究设施特色经济作物水肥一体化灌溉技术，并开发新产品；研究设施作物水气耦合高效利用技术与设备。提出农田水肥联合调控技术体系与产品，整体提高农田水肥综合利用效率，实现作物优质高效增产。具体研究内容如下：

（一）主要农作物水肥高效利用的土壤和生理过程及其调控

研究建立土壤水分、养分迁移和转化耦合的动力学模型和作物根际水肥耦合循环与调控模型。研究不同水分、养分胁迫条件下作物水分养分吸收、生长发育和生理生态、同化物合成转化、运输与分配、以及产量和品质构成等的变化、作物根冠关系、源库关系、个体群体关系，提出不同水肥条件下作物群体光合产物的最优分配策略，开发考虑土壤养分和水分状况以及植物根系形态和吸收特征的作物生长过程模拟软件。

（二）旱作农田高效利用降水的养分平衡补给技术与养分盈亏评价指标体系

研究作物对土壤水分与施肥的响应规律，探讨作物各阶段需水需肥量、最适宜生长量与水分养分需求的关系、作物群体优化布局，获得最佳养分平衡参数组合；研究提出北方不同类型区主要农作物生育期养分盈亏分析与评价指标；研发和集成有机肥与化肥、大量元素与中微量元素合理的配方施肥方案；筛选能够提高作物水肥吸收能力和抗旱性能根际微生物种类/菌株，研发适合旱地主要农作物接种的促生菌菌剂。提出农作物高效利用降水的养分平衡补给技术体系。

（三）灌溉农田主要作物水肥联合高效利用技术、模式与产品

研究主要农作物调亏灌溉的水肥高效调控技术，建立调亏灌溉条件下作物水肥生产函数，提出既考虑产量又考虑品质要求的调亏灌溉与施肥模式和技术操作规程；研发与根系分区交替灌溉相适应的水肥高效利用技术，提出适宜的分根区交替灌溉与施肥模式；研究大田覆膜灌溉条件下的水肥联合调控技术；研究提出大田经济作物优质高效的