



干旱半干旱牧区 饲草料作物高效用水技术研究与实践

魏永富 张瑞强 李振刚 刘虎 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

干旱半干旱牧区 饲草料作物高效用水技术研究与实践

魏永富 张瑞强 李振刚 刘虎 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要依据水利部公益性行业科研专项经费项目“干旱半干旱牧区饲草料地高效用水技术研究”(项目编号:201201008)的试验和研究成果编著而成。本书主要内容包括牧区自然条件及发展问题、相关技术发展状况、典型牧区自然生态特征分析、饲草料作物需水规律和水肥关系、饲草料地节水灌溉工程技术、饲草料地高效用水技术的集成示范、人工草地建设对生态的影响和灌溉饲草料地 ET 遥感监测等。

本书可供从事农业高效用水技术与推广的科技人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

干旱半干旱牧区饲草料作物高效用水技术与实践/
魏永富等编著. — 北京:中国水利水电出版社,
2015.12

ISBN 978-7-5170-3923-5

I. ①干… II. ①魏… III. ①干旱区—草地—灌溉—
节约用水②半干旱—草地—灌溉—节约用水 IV.
①S812.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第296485号

书 名	干旱半干旱牧区饲草料作物高效用水技术与实践
作 者	魏永富 张瑞强 李振刚 刘虎 等 编著
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
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 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	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19印张 451千字
版 次	2015年12月第1版 2015年12月第1次印刷
定 价	68.00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

我国牧区面积广大，总土地面积达 432.6 万 km^2 ，占国土面积的 45.1%；草原面积约 38.25 亿亩，占全国草原面积的 64.9%，是我国面积最大的陆地生态系统；国界线长约 1.1 万余 km 。所以，牧区战略地位非常重要，对经济安全、生态安全、国家安全等意义重大。

牧区自然条件恶劣，干旱缺水，生态环境脆弱。多年社会经济和自然资源不平衡发展的压力，导致牧区迄今存在着我国最严重的自然生态问题：干旱、水蚀、风蚀、草原退化与荒漠化、盐碱化等。经验证明，维持牧区草原生态和社会、经济可持续发展的关键是加强草原生态的建设与保护，重视牧区水利工作，大力发展灌溉草业。

当前，我国经济发展进入新常态，正从高速增长转向中高速增长，如何在经济增速放缓背景下继续强化农业基础地位，促进农民持续增收，是必须破解的一个重大课题。农业水利将向着关注民生、节水高效、生态文明的方向发展。2015 年中央 1 号文件指出：“做强农业，必须尽快从主要追求产量和依赖资源消耗的粗放经营转到数量质量效益并重、注重提高竞争力、注重农业科技创新、注重可持续的集约发展上来，走产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业发展道路。”强调深入推进农业结构调整，“加快发展草牧业，支持青贮玉米和苜蓿等饲草料种植，开展粮改饲和种养结合模式试点，促进粮食、经济作物、饲草料三元种植结构协调发展”。

针对我国干旱半干旱牧区在灌溉饲草料地建设中所存在的工程技术落后、管理水平低下以及布局不合理等问题，坚持生态友好、生产高效的原则，采用精确试验、模型计算、遥感监测分析等方法，水利部牧区水利科学研究所于 2012—2014 年间承担水利部公益性行业科研专项经费项目“干旱半干旱牧区饲草料地高效用水技术研究”（项目编号：201201008），开展饲草料作物需水动态、节水灌溉工程技术、水肥耦合技术以及人工草地的生态影响等方面研究。通过技术试验研究和集成创新，形成实用干旱半干旱牧区灌溉饲草料地高效用水技术集成模式，指导牧区饲草料生产高效用水技术进步，科学合理地确定发展格局和规模，提高干旱半干旱牧区有限水资源的利用效率和水分生产效率。

本书内容主要为作者在内蒙古达茂旗、新疆阿勒泰等典型牧区开展青贮玉米、紫花苜蓿等饲草料作物高效用水技术试验研究、技术示范和推广应用的成果总结，主要内容包括牧区自然条件及发展问题、相关技术发展状况、典型牧区自然生态特征分析、饲草料作物需水规律和水肥关系、饲草料地节水灌溉工程技术、饲草料地高效用水技术的集成示范、人工草地建设对生态的影响、灌溉饲草料地 ET 遥感监测等。

本书主要由魏永富、张瑞强、李振刚、刘虎编著，参加编写的人员还包括高天明、岳征文、杨志勇、尹瑞平、刘桂香、运向军、李亮、朱俊峰、郝伟罡、王健、王丽霞、廖梓龙、龙胤慧、李锦荣、王育青等。

本书在编写过程中得到了中国灌溉排水发展中心韩振中总工程师、内蒙古农业大学魏占民教授、西安理工大学张建丰教授等专家的指导，在此表示诚挚谢意。

由于作者水平有限，书中谬误之处在所难免，敬请读者不吝赐教。

作 者

2015 年 6 月

前言

第 1 章 概论	1
1.1 牧区的条件及其发展问题	1
1.2 灌溉饲草料地建设对于牧区发展的重要性	4
1.3 相关技术国内外发展状况	5
1.4 干旱牧区农业高效用水技术发展趋势	19
第 2 章 重点区域的自然、生态与发展	21
2.1 内蒙古达茂旗主要气象要素变化趋势	21
2.2 新疆福海县气候与生态特点	41
第 3 章 干旱半干旱牧区饲草料地作物需水及水肥关系	46
3.1 主要饲草料作物生物性状	46
3.2 内蒙古牧区饲草料作物生长、需水规律和灌溉制度	49
3.3 新疆牧区饲草料作物水分适应性和灌溉制度	97
第 4 章 饲草料地节水灌溉工程技术	151
4.1 内蒙古牧区光伏提水技术	151
4.2 内蒙古牧区饲草料地滴灌、微润灌田间工程技术指标	162
4.3 墒情监测灌溉自动控制系统	169
4.4 新疆北部牧区浅埋式地下滴灌技术	172
第 5 章 干旱半干旱牧区饲草料地高效用水技术应用与体系集成	194
5.1 内蒙古牧区饲草料地高效用水技术推广应用	194
5.2 内蒙古牧区饲草料地高效用水技术集成模式	210
5.3 新疆北部牧区饲草料地高效用水技术集成模式与示范	217
第 6 章 人工草地建设对草原生态的影响	232
6.1 人工草地与天然草地植被特征差异	232
6.2 人工草地与天然草地土壤特征差异	235
6.3 人工草地与天然草地小气候特征差异	239
6.4 人工草地与天然草地水文特征差异	242
6.5 人工草地与天然草地水土流失特性差异	244

第 7 章 干旱半干旱牧区灌溉饲草料地 ET 的遥感监测 255

7.1 ET 的遥感监测方法 255

7.2 干旱草原典型区遥感监测 ET 时空变化 261

7.3 草地蒸散与植被生物量的相关性 271

第 8 章 干旱半干旱牧区灌溉饲草料地布局与发展模式 275

8.1 灌溉饲草料地发展规模与布局的影响因素 275

8.2 灌溉饲草料地布局的原则、依据和方法 276

8.3 典型区——内蒙古达茂旗水资源条件 276

8.4 土地资源开发利用情况 283

8.5 水资源及需求分析 284

8.6 灌溉水资源优化配置 285

8.7 典型牧区饲草料地规模及布局 286

第 9 章 结论与展望 288

9.1 结论 288

9.2 展望 290

参考文献 292

1.1 牧区的条件及其发展问题

1.1.1 牧区分布和自然条件

我国牧区面积广阔，东起黑龙江省三江平原的同江市，西至新疆帕米尔高原的克孜勒苏柯尔克孜自治州的阿克陶县，北起内蒙古呼伦贝尔市的额尔古纳右旗，南至云南省的禄劝县。东西长约 5000 余 km，南北宽约 3200 余 km。牧区总土地面积达 432.6 万 km²，占国土面积的 45.1%；草原面积约 38.25 亿亩，占全国草原面积的 64.9%。国界线长约 11000 余 km，包括内蒙古、新疆、西藏、青海、甘肃、四川、云南、宁夏、陕西、黑龙江、辽宁、吉林、河北共 13 个省（自治区）及新疆生产建设兵团，分别与俄罗斯、蒙古、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、阿富汗、巴基斯坦、印度、尼泊尔、不丹等 10 个国家接壤，战略地位十分重要。

按各地自然地理特征、草原类型和水土资源条件，将牧区分为东北牧区、内蒙古高原牧区、蒙甘宁牧区、新疆牧区、青藏高原牧区等五大区。牧区位于欧亚大陆腹地，大部分属于干旱半干旱地区，为温带、寒温带大陆性气候。光热资源较丰富、四季温差大、干旱少雨、蒸发强烈、多风沙，自然灾害频繁。牧区多年平均年降水量 335mm，相当于全国平均水平的 52%。分区分布为：东北牧区 420mm 以上，内蒙古高原牧区 100~400mm，蒙甘宁牧区 50~300mm，新疆牧区 100~200mm，青藏高原牧区 280~1000mm。牧区盆地及沙漠腹地的年降水量一般在 10mm 以下。降水年内分配不均，6—9 月降水量约占全年降水量的 70%，干旱地区达 80% 以上。多年平均年蒸发量为 1000~3000mm，多年平均气温为 -5~14℃，不小于 10℃ 积温 5000~6500℃。蒙甘宁牧区西北风盛行，平均风速在 3m/s 以上，大风日约 155~200d，扬尘、扬沙和沙尘暴时有发生。

1.1.2 牧区资源状况

我国牧区各类草地总面积 38.25 亿亩，可利用草地面积 32.23 亿亩。受生物气候带和土壤地理带分布的影响，牧区草原植被由东向西分布着灌草丛草原、草甸草原、典型草原、荒漠草原、草原化荒漠和荒漠。其中，灌草丛草原 5.10 亿亩，产草量 100~180kg/亩；草甸草原 4.93 亿亩，产草量 80~120kg/亩；典型草原 8.02 亿亩，产草量 60~90kg/亩；荒漠草原 10.08 亿亩，产草量 30~50kg/亩；草原化荒漠 1.43 亿亩，产草量 20~40kg/亩；荒漠 4.22 亿亩，产草量 10~20kg/亩。按不同草原产草量，可食牧草总产量约为 1020 亿 kg。按每羊单位日食干草 2kg，牧区天然草原适宜载畜量为 1.4 亿羊单位。全国牧区用于牲畜补饲舍饲的牧草产量折合干草 590 亿 kg，可饲养 0.8 万

羊单位。

根据全国第二次水资源评价成果,全国牧区水资源总量 4881.6 亿 m^3 , 其中地表水资源量 4659.6 亿 m^3 , 地下水资源量 1791.1 亿 m^3 , 与地表水不重复的地下水资源量为 222.0 亿 m^3 。各大牧区地表水和地下水资源量分别为:东北牧区 268.8 亿 m^3 和 197.1 亿 m^3 ; 内蒙古高原牧区为 44.1 亿 m^3 和 69.7 亿 m^3 ; 蒙甘宁牧区为 44.2 亿 m^3 和 44.6 亿 m^3 ; 新疆牧区为 498.6 亿 m^3 和 303.9 亿 m^3 ; 青藏高原牧区为 3803.9 亿 m^3 和 1175.8 亿 m^3 。2011 年,全国牧区总供水量为 464.57 亿 m^3 , 其中地表水供水量占 67%, 地下水供水量占 33%。总用水量中农牧业用水量为 379.12 亿 m^3 , 占总供水量的 81.6%, 其中灌溉饲草料地用水量为 32.94 亿 m^3 , 牲畜用水 7.71 亿 m^3 。

地表水资源特征为:①年际变化大,连丰连枯交替出现;②年内分配不均,来水与需水不匹配;③地区分布不均匀,水土资源不匹配;④北方牧区单位面积地表水资源量少,川滇牧区地高水低,开发利用难度量大。

地下水资源特征为:①单位面积资源量少,地下水天然匮乏;②单位面积可开采模数小,难以集中开发;③局部地区地下水矿化度高,难以利用。

1.1.3 牧区经济发展面临的问题

1.1.3.1 水资源开发利用方面,存在诸多问题

1. 水资源开发难度大

干旱牧区降水量少,蒸发量大,自然环境条件恶劣,牧民居住比较分散,畜牧业生产方式落后,决定了牧区供水具有明显的特殊性,诸如高寒、缺水、远距离、供水分散、供水量小,可利用程度低等,并且相当一部分牧区地下水矿化度^①较高,有的连灌溉标准也达不到。牧区水资源本来短缺,时空分布还不平衡,水土条件的不协调,一部分有水地区,地少;大部分地区,水少。牧区人烟稀少,劳动力极缺,地理环境偏僻,交通不便,经济实力弱,加之牧区科技落后,人才缺乏,管理水平不高等原因,开发利用水资源和改善供水条件都十分困难。水资源量少质差,开发利用率低,已成为草地畜牧业持续发展的制约因素。解决牧区生产和生活用水问题的方式也相对特殊,需要先进的专门技术来支持。

2. 饲草料地灌溉管理水平差,用水效率低下

干旱牧区虽然是我国牧区水资源严重短缺的地区,但由于其地处偏僻,经济、文化、科技发展技术水平比较落后,畜牧业的不断发展及工业规模地不断扩大,使本已严峻的水资源形势更趋于紧张,此外由于宣传教育等方面工作存在不足,加之少数民族文化、生活习惯等差异,人们对珍惜用水的重要性认识不足,特别是对水资源的稀缺性的认识还没有达到一定的高度。对水资源的管理仍停留在过去的以需定供、公益性、微本保利或无偿服务的阶段,观念落后,科技文化素养不够,灌溉系统管理水平差,计量手段落后,造成水资源浪费严重,利用率低下。

3. 水资源开发利用及用水结构、布局不合理,负面效应严重

干旱牧区由于水资源短缺,在长期以来的传统观念影响下,水资源的开发利用主要考

① 溶解性总固体,英文缩写 TDS,旧称矿化度,全书下同——编辑注。

虑的是满足生活和生产的需求,从未将生态需水纳入正常的水资源配置和流域或区域水资源的分配中。因此,生产用水挤占生态用水,最终导致生态环境恶化,生产和生活环境极度下降,整个区域或流域的水资源和水环境承载能力降低,水资源的可持续利用受到严重威胁,整个区域和流域的经济社会的可持续发展也受到相应的制约。在一些大中灌区,由于缺乏配套的灌排渠系和科学的灌溉制度,大量引入地表水大水漫灌,而忽视了地下水的合理开采,不采取井渠结合,使地下水位不断抬升,造成灌区及其周边土壤的次生盐碱化。在一些地下水井灌区,由于大量开采地下水,使地下水位大幅度下降,一方面使灌区周边的天然植被衰亡,草地沙化;另一方面使灌区下游的咸水倒灌,使灌区地下水环境恶化,土壤次生盐渍化发生。

1.1.3.2 草原生态环境恶化

近年来,随着自然气候变化和持续的超载过牧,导致草地水土流失和草原荒漠化加速、生产能力下降、草畜矛盾日益尖锐,生物多样性逐渐减少,目前草原退化面积已达90%以上,重度沙化草地约占60%。草原生态退化已成为制约牧区经济发展及生活环境改善的重要原因之一。例如,在本项目区之一——内蒙古达尔罕茂明安联合旗(以下简称“达茂旗”)调研发现,20世纪80年代初,该旗各类草场的平年载畜量,草原化荒漠、荒漠草原、干草原饲养一个羊单位需要草场面积分别为 3hm^2 、 2.5hm^2 、 2hm^2 ,而目前实际情况是平均每个羊单位占有草场 1.2hm^2 左右,草场退化,生产力水平低下,使牲畜在其整个生育过程中营养缺乏,直接影响了畜牧业的经济效益。新疆草地资源根据20世纪90年代普查,草地生态恶化情况也很严重,草地有效利用面积锐减,天山草原植被盖度由60年代的89.4%下降到30.0%~50.0%,牧草高度由24.6cm下降到14.2cm,鲜草产量由 $1470\text{kg}/\text{hm}^2$ 降至 $600\text{kg}/\text{hm}^2$ 。草地群落逆向演替情势严峻,优良牧草减少,杂草、不可食草、有毒草增多,草地品质变劣。

1.1.3.3 饲草料地基础建设水平低,管理、配套差,规模小

1. 现有灌溉饲草料地工程标准低、配套差,难以发挥应有的效益

在现有建成的饲草料地中(达茂旗约 1万 hm^2),保灌面积不足 $1/4$ 。大面积围起的围栏草场,光围不建,产草量并无太大变化。20世纪建成的一些地面灌溉工程主要以防洪为主,供水功能低,加之输配水工程配套差、老化失修,本来就低的供水功能也难正常发挥。近几年建成的饲草料地多数为以地下水为水源的节水灌溉工程,虽然当时建设时尽量考虑了较高标准,但水源工程与输配水工程不配套,灌溉面积小,也未能很好地发挥工程的效益。低压管灌占节水灌溉饲草料地的比例约为60%,虽解决了水分运输过程中的水分损失,但田间用水技术传统,用水效率低,水分生产率就没有保证。

2. 现有灌溉饲草料地节水灌溉面积小、设备陈旧、急需技术升级

现有灌溉饲草料地节水灌溉面积占节水灌溉面积的32%左右,技术以喷灌、滴灌为主,喷灌占28.01%,滴灌占4.35%。从灌溉饲草料地节水灌溉面积来看,节水灌溉面积比例低,同时喷灌、滴灌设备不同程度地都有跑冒滴漏等现象的发生。大部分节水设备自安装投产后,基本没有后期的维护、管理工作,导致节水效率低下。部分设备陈旧、闲置,急需技术升级,更新换代。

3. 灌溉饲草料地管理制度落后, 缺乏科学的技术指导

生活在广大草原牧区的牧民有别于长期在农区耕作的农民, 在长期的牧区生活中, 牧民以草原为家, 主要依靠天然草原的牧草维持牲畜的饲草料需求。因草原生态不断恶化, 草原保护工作的不断加强, 生态移民政策的贯彻落实等因素, 牧民开始尝试进行饲草料地建设, 但缺少工程建设专业知识和田间管理经验, 基本以照猫画虎的设计和粗放的管理方式为主, 不掌握牧草耗水规律和灌溉制度技术经验, 这样粗放、落后的管理水平就极大地制约着灌溉饲草料地发挥最大的作用。

1.1.3.4 灌溉人工草地发展规模与布局对天然草原生态影响不明

目前, 灌溉人工草地建设对天然草原生态影响存在颇多争议, 前人研究多以水资源、牲畜饲养需求、土地利用情况及地下水位变化等为着手点对灌溉人工草地规模与布局进行研究, 很少有从灌溉人工草地建设对天然草原植被、生态状况进行研究, 缺乏灌溉人工草地建设规模与布局对天然草原生态影响定量的研究。

概括来讲, 目前关于灌溉人工草地建设与高效用水方面存在以下 5 个方面的科学问题亟待研究解决: ①主要种植的灌溉人工牧草耗水规律和灌溉制度; ②中大尺度的灌溉人工草地用水效率问题; ③灌溉人工草地建设对流域水循环过程的影响问题; ④灌溉人工草地建设对草原生态环境的影响问题; ⑤灌溉人工草地的建设规模与合理布局问题。

1.2 灌溉饲草料地建设对于牧区发展的重要性

牧区水利工程是牧区草原畜牧业发展和草地生态保护赖以持续发展的最重要的基础设施之一。牧区水利多年发展经验证明, 以草地节水灌溉为支撑的集约化人工草地 (或改良天然草场) 建设, 已成为我国牧区提高草地生产力, 保障养畜规模稳定的有力措施。

牧区水利基础设施直接参加草原畜牧业生产全过程, 作为必要的生活、环境条件, 影响着牧区经济社会发展的各个方面。牧区水利作为基础设施, 不仅在解决人畜饮水困难和建设优质高产灌溉饲草料基地, 提供优质富足的饲草料, 缓解草畜矛盾等方面发挥重要作用, 同时还可带动饲草料加工业和新技术、新能源利用的发展, 因而加强牧区水利建设对改善畜牧业生产条件, 调整、优化畜牧业产业结构, 提高牧区防灾抗灾和综合生产能力具有重要意义。

当前, 我国经济发展进入新常态, 正从高速增长转向中高速增长, 如何在经济增速放缓背景下继续强化农业基础地位、促进农民持续增收, 是必须破解的一个重大课题。水利发展将向着关注民生、节水高效、生态文明的方向发展, 农业发展结构将进一步得到调整优化, 草牧业发展, 青贮玉米和苜蓿等优质饲草料种植得到进一步重视, 形成粮食、经济作物、饲草料三元种植结构协调发展的新格局。2014 年水利部制定并通过新的《牧区水利规划》。今后较长一个时期内, 牧区水利必然迎来大发展阶段, 这是牧区水利发展难得的历史机遇期。

内蒙古、新疆牧区处于欧亚大陆草原带腹地, 同属大陆性季风气候带, 是我国典型的干旱、半干旱草原区, 在我国草原畜牧业经济发展和北部生态屏障生态建设中担当着十分重要的作用。选择这些典型地区, 针对我国干旱半干旱牧区典型地区在灌溉饲草料地建设

中普遍存在的工程技术落后,管理水平低下以及布局不合理等问题,坚持生态友好、生产高效的原则,重点开展基于灌溉饲草料地布局优化,饲草料作物需水动态,节水灌溉工程技术,水肥耦合技术,以及人工草地的生态影响等方面研究,通过技术试验研究和集成创新,形成实用干旱半干旱牧区灌溉饲草料地高效用水技术集成模式,指导牧区饲草料生产高效用水技术进步,科学合理地确定发展格局和规模,提高干旱半干旱牧区有限水资源的利用效率和水分生产效率,对于促进牧区生态环境改善和草地畜牧业可持续发展具有十分重要的意义。

1.3 相关技术国内外发展状况

1.3.1 农业高效用水技术

1.3.1.1 国外发展状况

随着全球性水资源供需矛盾的日益加剧,世界各国,特别是发达国家都把发展节水高效农业作为现代农业可持续发展的重要措施,在工程节水、农艺节水、生物节水和用水管理节水等各方面均有较深研究,取得长足进步,同时十分重视各单项技术的有机结合与集成。

1. 工程节水技术

在采用激光控制土地精细平整技术基础上,实现了精细地面灌溉,水平畦田灌和波涌灌等先进的地面灌溉方法也成为可能。

除地面灌溉技术外,发达国家十分重视对喷、微灌技术的研究和应用。微灌技术是所有田间灌水技术中能够做到对作物进行精量灌溉的高效方法之一。美国、以色列、澳大利亚等国家特别重视微灌系统的配套性、可靠性和先进性的研究,将计算机模拟技术、自控技术、先进的制造成模工艺技术相结合开发高水力性能的微灌系列新产品、微灌系统施肥装置和过滤器。

为减少来自农田输水系统的水量损失,许多国家已实现灌溉输水系统的管网化和施工手段上的机械化。

2. 农艺节水技术

农艺节水技术措施主要包括耕作保墒、覆盖保墒、增施有机肥与秸秆还田、水肥耦合、节水农作制度和选用节水型品种、化学调控等技术措施。根据农艺节水机制,可分为保墒节水类措施、提高作物光合效率减少低效蒸腾类措施及二者相结合的措施。

节水农作制度主要是研究适宜当地自然条件的节水高效型作物种植结构,提出相应的节水高效间作套种与轮作种植模式。例如,在澳大利亚采用的粮草轮作制度中,实施豆科牧草与作物轮作会避免土壤有机质下降,保持土壤基础肥力,提高土壤蓄水保墒能力。

在抗旱节水作物品种的选育方面,发达国家已选育出一系列的抗旱、节水、优质的作物品种。特别是近年来,在植物抗旱基因的挖掘和分离、水分高效利用相关的基因定位以及分子辅助标记技术、转基因技术、基因聚合技术等,在抗旱节水作物品种的选育上取得了一些极富开发潜力的成果。

近年来,水肥耦合高效利用技术的研究已将提高水分养分耦合利用效率的灌水方式、

灌溉制度、根区湿润方式和范围等与水分养分的有效性、根系的吸收功能调节等有机地结合起来。通过改变灌水方式、灌溉制度和作物根区的湿润方式达到有效调节根区水分养分的有效性和根系微生态系统的目的,从而最大限度地提高水分养分耦合的利用效率。美国、以色列等国家将作物水分养分的需求规律和农田水分养分的实时状况相结合,利用自控的滴灌系统向作物同步精确供给水分和养分,既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污染的危险,也优化了水肥耦合关系,从而提高了农作物的产量和品质。

3. 生物节水技术

将作物水分生理调控机制与作物高效用水技术紧密结合开发出诸如调亏灌溉(RDI)、分根区交替灌溉(ARDI)和部分根干燥(PRD)等作物生理节水技术,可明显地提高作物和果树的水分生产效率。目前国际上有关调亏灌溉的研究主要是针对果树和番茄等蔬菜作物,对大田作物的研究较少。

目前的重点是将单点的单一作物耗水估算模型的研究扩展到区域尺度多种作物组合下的耗水估算方法与模型研究上,根据作物及其不同生育期的需水估算,使有限的水最优化分配到作物的不同生育期内,为研究适合不同地区的非充分灌溉制度提供基础数据和支撑。随着遥感技术的应用使得采用能量平衡法估算区域作物耗水量成为可能,通过遥感获得的作物冠层温度来估算区域耗水量分布的研究变得十分活跃,并在一些发达国家得到了一定的应用。

4. 用水管理节水技术

这方面的技术主要指将灌溉技术与信息技术、自动控制技术、计算机网络技术结合,实现灌溉的信息化、自动化、智能化管理,在减少灌溉输水调蓄工程的数量、降低工程造价费用的同时,既满足用户的需求,又有效地减少弃水,提高灌溉系统的运行性能与效率。

美国、澳大利亚等国已大量使用热脉冲技术测定作物茎秆的液流和蒸腾,用于监测作物水分状态,并提出土壤墒情监测与预报的理论和方法,将空间信息技术和计算机模拟技术用于监测土壤墒情。根据土壤和作物水分状态开展的实时灌溉预报的研究进展也很快,一些国家已提出几种具有代表性的节水灌溉预报模型,在此基础开展的适合不同地区的非充分灌溉模式的研究是干旱缺水条件下灌溉用水管理的基础,随着水资源短缺的不断加剧,其研究在国内外得到普遍重视。

亦有采用系统分析理论和随机优化技术,开展灌区多种水源联合利用的研究,以网络技术支持的智能化配水决策支持系统为基础,建立起多水源优化配置的专家系统,提出不同水源组合条件下的优化灌溉与管理模式,合理利用和配置灌区的地表水、地下水和土壤水,对其进行统一规划和管理。在最大限度地满足作物对水分需求的同时,改善灌区的农田生态环境条件。

5. 各种高效用水技术的集成与应用

以埃及、巴基斯坦、斯里兰卡、印度等为代表的经济欠发达国家,受社会经济与技术水平的限制,主要采用工程节水与农艺节水相结合的农业节水技术发展模式。而以美国、以色列、日本、澳大利亚等为代表的经济发达国家,在农业生产实践中,把提高灌溉

(降)水的利用率、单方水的利用效率、水资源再生利用率作为研究重点和主要目标。在采用工程节水和农艺节水技术措施的基础上,十分注重对生物节水技术和用水管理节水技术的研究与应用。在研究农业高效用水基础理论上,将生物、信息、计算机、高分子材料等高新技术与传统的农业节水技术相结合,提升农业高效用水技术的科技含量,建立适合国情的农业高效用水技术体系,加快由传统的粗放农业向现代化的精准农业转型的进程,构建现代农业高效用水技术发展模式。

1.3.1.2 国内发展状况

我国在过去20年里,国家十分重视农业高效用水技术研究,将“现代节水农业技术体系及新产品研究与开发”列为国家重大科技专项,实施了一批重点科技攻关计划项目和国家重大科技产业工程项目,取得不少优秀成果,为建立中国特色的现代节水农业技术体系打下坚实基础。主要成绩如下:

(1)研发了一批适合国情、具有自主产权与国际竞争力和具有较好性价比的节水新产品,初步实现产业化,基本摆脱农业节水产品长期依赖进口的被动局面。

(2)在前沿与关键技术创新方面取得突破性进展,为现代农业节水技术发展提供了强有力的技术储备与支撑。在抗旱节水植物品种筛选、作物水分生理调控与非充分灌溉、精细地面灌溉与精量控制灌溉、区域节水型农作制度与节水高效旱作保护耕作、非常规水安全利用等农业节水前沿与关键技术研究上取得突破性进展,部分领域跻身国际先进水平,提升了我国节水农业技术原始创新能力,初步构建起以提高灌溉水和降水利用率与利用效率为核心符合国情的现代节水农业技术体系,为我国现代农业节水技术的发展提供了强有力的技术储备与支撑。

(3)将现代节水农业关键技术及产品设备和实用技术相结合,提出了适合我国国情和不同区域特点的现代农业节水技术发展模式,取得了显著的经济社会效益。这些现代节水农业发展模式包括节水型灌溉农业、节水型旱作农业和节水型生态农业等3类,适合我国北方干旱内陆河灌区、半干旱平原井灌区、半干旱平原渠灌区、半干旱平原抗旱灌溉区、集雨补灌旱作区、半湿润井渠结合灌溉区、半干旱生态植被建设区、半干旱都市绿地灌溉区、南方季节性缺水地区等9种区域,每种模式都建立了相应的试验示范区。

(4)创立了国家、部门与地方、企业、科技人员与农民联合推动的农业节水发展新机制,初步实现了国家节水战略目标和农民节水增收目标的统一。在专项实施过程中,由科技部、水利部与农业部共同作为实施组织部门,前沿与关键技术创新课题以高校和科研单位为主承担,产品与设备研制课题以企业主并联合技术依托单位共同承担,技术集成与示范课题由示范区所在省(自治区、直辖市)的科技部门主持,由示范区所在地主管单位和技术依托单位共同承担,形成了示范区建设与国家节水工程建设相结合的组织新体制。

不过也存在不少问题,本项目在实施过程中所了解到的有:①发展不均衡,农区好于牧区。②深层次科学问题还需要进一步探讨,不仅包括已经有相当研究基础的老问题如生物节水、精确灌溉等,还有不少特殊问题如农田生态效应的尺度问题,在牧区常碰到开垦规模对生态环境的影响问题;蒸发部分耗水的意义,是不是一律可以省去“奢侈”消耗;影响农产品品质(如农作物的籽实和饲草料的全株)的灌溉制度问题。③节水灌溉技术产品市场需要加强管理。在主流产品推广应用的同时,市场还充斥着不少材质、工艺低劣的

节水灌溉产品,如在内蒙古牧区常见从山西、河北等地无名小厂、乡镇企业生产的滴灌管、喷头等,这些产品以极其价廉取胜,但产品质量堪忧,出水均匀度很差,无产品商标,无技术指标资料。

1.3.2 牧区饲草料地高效用水技术

我国牧区饲草料地灌溉起于 20 世纪 60 年代,目前已成为牧区水利发展与生态保护建设的重要组成部分。牧区草地节水灌溉技术是牧区水利研究中的一个重要研究方面。宏观上主要开展牧区水、草、畜平衡与草地可持续利用研究,寻求草地开发利用与生态保护的发展对策。在节水灌溉方面,主要开展牧草高效节水灌溉丰产综合技术、节水灌溉与水分高效利用技术、节水灌溉与水肥调控关键技术等实用技术的研究;同时开展人工灌溉草地对缓解天然草地压力,减少天然草地放牧或干扰的程度以及对天然草场生态修复的影响评估方面的研究。而且从机理上开展牧区草地生态需水、牧草水分生理与水分运移规律等方面的基础理论研究。

针对草地灌溉的关键技术问题,20 世纪 80 年代以来,先后开展了披碱草、紫花苜蓿、苏丹草、御谷、青贮玉米、饲用玉米等人工饲草料作物以及天然牧草群落需水规律与需水量的大田试验研究,推进了我国人工和天然草地需水研究进展,并从牧草水分生理生态的角度,在分析人工牧草耗水特性的基础上,提出了“起始耗水量、经济耗水量和最大耗水量”的耗水阈值特性,确定了披碱草、紫花苜蓿等人工牧草经济耗水量的阈值指标,为草原节水灌溉的发展奠定了技术基础。

近年来,随着草地灌溉研究的不断深入,牧草水分生理生态与胁迫诊断技术、草地 SPAC 系统水分运移规律、作物-水模型等受到关注,先后开展了毛乌素沙地的饲草料作物在节水灌溉条件下生理生育指标和作物水分响应模型等研究工作,建立了紫花苜蓿的 BP 神经网络模型,研究了紫花苜蓿、披碱草等人工草地 SPAC 系统中的能量分布规律和水分规律。同时,为解决区域性的生态需水问题,开展了草地生态系统需水量与水分高效综合利用研究,典型区域水-草-畜平衡与草地生态-生产系统综合优化技术与发展模式研究。经过多年的发展,草地灌溉研究已从单纯的作物需水规律、灌溉制度研究逐渐转变为基础理论不断完善、综合性应用技术持续发展的阶段。

在牧草灌溉理论研究基础上,开展了牧草节水灌溉技术研究,主要以牧草优质高产为目标,以土壤水分高效利用为核心,以调控土壤水分技术为关键,考虑农牧措施综合集成,开展了各种牧草节水灌溉技术的研究。其中,节水灌溉技术主要包括滴灌、微灌、喷灌、管灌等工程节水措施,通常这些工程措施在牧区草地灌溉中都有不同程度的运用,并且随着监测技术、通信技术、自动控制技术等的发展,节水灌溉系统逐步向自动控制方向发展。

近年来,节水灌溉研究正从工程节水转向如何提高土壤水分利用效率的研究上,包括草地植物生理水分代谢、水分特征、水分运移消耗规律,水分利用效率的影响因子,水分利用效率的时间和空间变化规律,提高水分利用效率的措施等。在此基础上,结合生物节水向非充分灌溉方面发展。在非充分灌溉条件下,从牧草抗旱和水分高效利用的生物学基础入手,研究牧草在水分亏缺条件下,牧草有效的抗逆反应机制,不同产量水平下的作物水分生产函数及田间耗水量等,提出牧草高效用水的生理调控措施。

总之,我国在饲草料地高效用水技术研究方面,经过多年的发展,特别在饲草料作物水分胁迫诊断技术、主要品种饲草料作物需水规律、水草畜系统平衡与优化配置建模等方面,已取得了不少研究成果,基本形成了从基础理论到工程技术一整套牧区水利技术体系。但总的来看,研究的深度和广度不够,如草地水、热、气交换规律,水肥耦合效应等;还有一些未知,但可能是必须弄清的问题缺乏研究,如灌溉人工草地建设对草原生态环境的影响和灌溉人工草地的建设规模与合理布局问题等。许多结论是在传统方法试验基础上提出的,对客观规律的把握不够精准。目前我国开展的作物水分生产函数以及作物灌溉制度及优化研究方面,研究对象仍然多集中于农作物,以小麦、玉米为主,少数为其他农作物及果蔬作物,而饲草料尤其是灌溉饲草料地的水分生产函数研究较少,并且国内研究成果基本集中在内蒙古牧区,而针对其他干旱牧区进行的非充分灌溉下的灌溉人工牧草作物-水分关系及灌溉制度优化仅仅刚起步,存在许多不完善之处,有待进一步发展。

1.3.3 光伏提水灌溉技术

1.3.3.1 国外发展状况

光伏提水是近30年迅速发展起来的一门新型技术,其工作原理是利用太阳能电池发出的电力,通过最大功率点跟踪器驱动直流永磁无刷电机或高效异步电动机带动水泵,将水从地下深处提至地面供农田灌溉、农村饮水或其他使用。

早在20世纪80年代以前,国外专家学者就开始了太阳能节水灌溉技术进行研究,太阳能最先用于节水灌溉系统中水泵抽水供能。1975年,世界上第一台光伏水泵面世。但因太阳能电池价格昂贵,且技术上还不够成熟,仅作为一种尝试,在局部地区进行了试用。1981年,世界银行通过论证认为光伏水泵有良好的发展前景,从而推动了世界范围内的相关研发,美国、英国、德国、日本、中国、丹麦等国研制并推出了一批光伏水泵,取得较好成果。此后不久,光伏水泵的发展因经费投入不足而陷入低谷,但研究尚未中断。1992年,联合国“世界环境与发展大会”确立了节能与环保的主题,随之而来的新能源研发热潮为光伏水泵的发展注入了新的活力。

目前,光伏提水灌溉技术在美国、欧洲以及亚洲部分国家已经推广使用,更多如滴灌、微灌系统使用太阳能作为能源的比例逐渐增加。光伏水泵研制方面德国和美国的光伏水泵较为先进,但他们的研究重点在微功率和中小功率太阳能光伏水泵系统上,其产品主要用于庭院或公共场所的小喷泉和功率不大的水循环动力系统(通常1.2kW以下)。随着太阳能供能技术的不断成熟以及风力发电技术的快速发展,国外一些学者利用现代网络技术将太阳能与风能结合起来组成一个系统,二者很好结合在一起,太阳能节水灌溉技术也呈现自动化、智能化的特点。

1.3.3.2 国内发展状况

我国光伏提水技术的研发工作起步于20世纪80年代初,其代表产品有深圳大明生产的DHB和安徽日泉生产的NSP等系列光伏水泵。DHB和NSP系列光伏水泵也是国内最早的一代光伏水泵,代表着我国20世纪80—90年代光伏提水技术水平。这两种光伏水泵通过实际应用表明其效果良好,但限于当时的太阳能光伏电池板价格昂贵,如果一味追求设备装机功率更大、扬程更高、流量更大,就需要更多更大的光伏电池板,那么整个系统的性价比会降低,因而得不偿失,光伏提水的大型化机组发展受到限制。

2000年以后,我国开始大量引进太阳能节水灌溉技术。时至今日,经过几十年的努力和积淀,特别是随着国家能源政策的颁布实施和近年太阳能电池板价格的不断下降,光伏提水技术又有了新发展,出现了许多新型设备。这些设备不仅功率更大,效率更高,而且在节能、环保、智能化和系列化等方面较早期同类设备性能有较大提高。主要表现在:①光伏电池广泛采用了MPPT最大功率跟踪器技术,并运用各种更加先进的算法保障不同光照条件下电池功率达到最高;②中小型机组中大量使用了永磁无刷无位置感应器直流电动机,因为这种电动机的机械性能更优良,调速范围宽,效率更高,从而使光伏水泵的整体性更先进,系列化程度更高,推广潜力更大。随着太阳能节水灌溉技术的不断发展,也出现了太阳能自动化节水灌溉技术。

众所周知,光伏提水的最大优点是无需电网供电或消耗化石能源,有利于保护环境和节能减排。另外,光伏水泵所使用的太阳能电池寿命长,维修费用较低。这些意味着该项技术在我国太阳能充足的地方,特别是西北缺水少电、经济欠发达的地区有着广泛的推广应用前景。目前我国光伏提水灌溉技术发展存在的较突出问题:①应用范围仍然很小,且比较分散;②太阳能提水灌溉系统整体集成度差,即根据不同草原地区特点集成配套太阳能电池组件及最大功率跟踪控制设备,太阳能提水专用水泵设备与控制技术,相配套的节水灌溉设备与技术等。

1.3.4 地下滴灌技术

地下滴灌是滴灌的一种重要形式。根据美国ASAE标准(1996年)“土壤与水基本概念”中地下滴灌(SDI)的定义为“地下滴灌是指通过地表下灌水器(滴头)施水,而灌水器流量范围与地表滴灌大致相同”。地下滴灌是在滴灌技术日益完善的基础上发展而成的一种高效、节水的灌水技术,将毛管埋于地下,通过出水口将水或水肥的混合液送到作物根区土壤中,供作物吸收。地下滴灌系统一般由水源、控制首部、田间控制系统、田间滴灌管线管网4个部分组成。

早在1913年,美国的House E B就开始了地下滴灌的研究,但由于受当时技术水平的限制,应用成本较高,试验不能继续进行,最后放弃了这项研究。1920年,美国加利福尼亚州的Charles Lee用瓦管作为试验材料,使其周围的土壤得以湿润,被认为是最早的地下滴灌(sub-surface drip irrigation, SDI)技术。随后,这项技术又被许多国家的学者改用其他材料进行研究。第二次世界大战后,塑料工业快速发展,同时也推动了地下滴灌的发展。灌水均匀性差以及滴孔易堵塞是当时地下滴灌面临的主要问题,但地下滴灌节水效果明显,一直受到各国学者的关注。到1959年,在美国,地下滴灌已成为滴灌的重要组成部分。20世纪40年代后期,德国用塑料管进行了地下灌溉研究。20世纪60年代,PVC管和聚乙烯管应用到了地下滴灌系统,并且带有灌水器(如孔、缝式滴头),与PVC管和聚乙烯管形成一体。20世纪70年代,由于地下滴灌灌水均匀性较差、堵塞严重等问题没有得到有效解决,地下滴灌技术研究进展缓慢,而此时地面灌溉得以很好的发展。20世纪80年代后,随着水资源的紧缺和环保意识的提高,地下滴灌技术又被各国学者所重视,经过大量的试验研究,地下滴灌技术在应用推广过程中有了明显的进展。1979年,在美国亚利桑那州Coolidge附近安装了第一个棉花地下滴灌系统,从此开始了真正意义上的地下滴灌系统应用和研究。在这段时间内,有关地下滴灌技术及其应用的研究主要集