

我国典型作物用水特征及现代农业灌溉技术模式

张宝忠^{1,2}, 彭致功^{1,2}, 雷波^{1,2}, 杜丽娟^{1,2}, 王蕾^{1,2}, 刘钰^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 理清农作物用水特征、灌溉技术模式、现代农业灌溉体系等问题, 对提高农业用水效率和实现农业水资源持续利用具有重要现实意义。本文以我国综合农业分区为基础, 重点以黄淮海小麦产区、东北水稻产区、长江中下游水稻产区、四川盆地水稻产区、内蒙古东部牧区、广西甘蔗产区及新疆棉花产区等为主要分区, 分析了典型作物的灌溉制度特点与规律, 筛选出优化技术模式, 同时提出了现代农业灌溉的技术特点及政策保障体系。主要结论如下: ①对各综合农业分区主要作物采用优化灌溉制度, 保证作物缺水敏感期水分供应, 节约灌溉水量, 稳产同时提高水分生产率; ②针对各综合分区特点及限制因素, 筛选出先进节水技术模式并推广应用, 确保优化灌溉制度精准实施, 实现了区域农业综合生产能力提高; ③为适应和支撑现代农业生产和经营体系, 提出了基于信息技术的现代灌溉技术及其相应的融资机制、水权管理机制等政策保障体系。

关键词: 灌溉需水量; 用水效率; 技术模式; 现代农业

中图分类号: S274 **文献标识码:** A

Water Use Features of Typical Crops and Technical Modes of Modern Agriculture Irrigation in China

Zhang Baozhong^{1,2}, Peng Zhigong^{1,2}, Lei Bo^{1,2}, Du Lijuan^{1,2}, Wang Lei^{1,2}, Liu Yu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research—Beijing, Beijing 100048, China)

Abstract: A survey of field crop water use features, agricultural irrigation technical modes, and modern agriculture irrigation systems is of instrumental and practical value to improve agricultural water use efficiency and achieve sustainable utilization of agricultural water resources. This paper analyzes the irrigation schedules of typical crops, covering in particular the Huanghuaihai Plains (the Yellow River, the Huai River, and the Hai River) wheat belt, the Northeast rice belt, the rice belt in middle and lower reaches of the Yangtze River, the Sichuan Basin rice belt, the eastern Inner Mongolia pasture, the Guangxi sugar cane belt, and the Xinjiang cotton belt, all classified according to the Chinese comprehensive agriculture zonation, and arrives at some optimal technology modes. Meanwhile, the technical features of modern agricultural irrigation are summarized and a policy assurance system for it is proposed. The main conclusions are as follows: ① Applying optimized irrigation program to major crops in each comprehensive agricultural zone not only ensures water supply in the sensitive water shortage period, but also saves irrigation water, stabilizes yields, and improves water productivity; ② In view of the characteristics and restraints in each zone, advanced water-saving technology modes are recommended and promoted, which supports the precision implementation of the optimized irrigation program and improves the comprehensive

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2018-09-19

通讯作者: 张宝忠, 中国水利水电科学研究院, 教授级高级工程师, 研究方向为节水灌溉理论与新技术; E-mail: zhangbz@iwhr.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国农业资源环境若干战略问题研究”(2016-ZD-10); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项 (ID0145B082017, ID0145B742017, ID0145B492017)

本刊网址: www.english.cn

production capacity of regional agriculture; ③ To match and support the modern agricultural production and management system, an IT-based modern irrigation technology and its corresponding financing mechanism and water rights management mechanism, among other policy assurance systems, are proposed.

Keywords: irrigation water requirement; water use efficiency; technical mode; modern agriculture

一、前言

我国耕地资源与水资源错位分布与北粮南运的粮食生产格局,加剧了农业用水总量短缺态势,也使水减粮增问题更加凸显 [1]。当前我国的灌溉水有效利用系数约为 0.54,与国际先进水平仍存在较大差距。针对我国农业用水紧缺与效率不高并存的局面,大力发展以提高水分生产率和灌溉水有效利用率为核心的节水农业,是解决我国农业缺水问题的关键 [2,3]。

农业用水受气候、土壤、作物、灌水技术、耕作方法及管理措施等诸多因素影响,不同区域限制因素各异,且经济条件不同,必须针对各区域特点来选取相适宜的节水技术模式,才能实现区域农业用水由低效到高效的利用转变。

本文在分析全国典型农作物灌溉需水量的基础上,以各典型农业综合主产区优化灌溉制度下作物用水特征为研究重点,筛选出了各典型区主要农作物先进节水优化技术模式,并提出了现代灌溉农业体系建设等基本内容,对提高全国主要作物水分高效利用、实现农业水资源合理配置和生态环境良性循环等具有重要参考价值。

二、全国典型作物灌溉需水量分布规律

以全国水资源三级区为基础,剔除部分农业用水少或缺资料的区域,同时将个别涉及范围较大三级区分为若干子区,最终确定 219 个研究分区。每个分区选定一个典型气象站,以该气象站资料为基础,对小麦、水稻和棉花等主要作物灌溉需水量进行分析。

小麦主要分布在河南、山东、河北、安徽、江苏、陕西、甘肃、新疆和山西等地,需补充灌溉水量由南向北递增,高值区位于西部的新疆克拉玛依市和西藏阿里地区,需补充灌溉水量达 500~600 mm;低值区位于淮河流域南部及长江中

下游地区,需补充灌溉水量为 100~200 mm。对于黄淮海地区,高值区位于由山东潍坊向西北延伸的德州、天津、保定、北京的条带上,需补充灌溉水量为 350~400 mm,向南北两侧递减。

水稻主要分布在长江中下游平原、云贵高原、四川盆地、东北地区的三江平原和辽河平原,而在新疆等地也有少量分布。中稻需补充灌溉水量由南向北递增,高值区位于新疆吐鲁番盆地和巴音郭楞蒙古自治州地区,需补充灌溉水量为 850~900 mm;低值区位于华南地区的广西东部及广东西部以及四川盆地,需补充灌溉水量为 100~150 mm。

棉花主要分布在新疆、山东、河南、河北、湖南、江苏、安徽等地,灌溉需水量高值区位于新疆克拉玛依地区,需补充灌溉水量为 600~700 mm;低值区位于华南地区广西东部及广东西部,需补充灌溉水量为 30~100 mm;东部地区灌溉水量一般在 150~250 mm。近年来,很多地区实行棉花覆膜种植,灌溉需水量可降低 75~120 mm。

三、我国主要分区典型作物用水效率特征及优化技术模式

(一) 黄淮海小麦产区

冬小麦作为黄淮海地区分布最广、播种面积最大的粮食作物之一,占该区域总播种面积的 30% 以上,占全国小麦播种面积的 68% [4]。冬小麦充分灌溉的净灌溉量为 119 mm,水分生产率为 1.46 kg/m³;亏缺灌溉的净灌溉量为 71 mm,水分生产率为 1.38 kg/m³;雨养条件下水分生产率为 0.77 kg/m³。在水资源紧缺的黄淮海平原北部,冬小麦采用亏缺灌溉能保证 87% 产量,灌水量可减少 40%。黄淮海平原夏玉米需水与降水的耦合程度高,通过选用抗旱玉米品种和配套应用综合农艺旱作技术,完全可以实现夏玉米雨养旱作;黄淮海平原夏玉米生育期降水量为 470 mm,耗水量为 363 mm,亩产量为 788 kg,水分生产率为 3.26 kg/m³。

针对超采漏斗区, 应适度压减高耗水作物种植面积, 严格控制新增灌溉面积, 大力发展水肥一体化等高效节水灌溉, 实行灌溉定额制度, 推行农艺节水 and 深耕深松、保护性耕作措施 [5]。推荐冬小麦节水稳产配套技术模式 (节水抗旱品种 + 土壤深松 / 秸秆还田 / 播后镇压 + 拔节孕穗水)、冬小麦保护性耕作节水技术模式 (免耕 / 少耕 + 秸秆还田 + 小麦免耕播种机复式作业)、水肥一体化高效节水技术模式 (水肥一体化 + 冬小麦 / 夏玉米 / 蔬菜 + 膜下滴灌 / 微喷 / 喷灌) 相结合的综合节水技术模式 [6]。

(二) 东北水稻产区

东北地区作为我国水稻优势产区, 粮食商品率高, 种植面积呈不断扩大趋势, 地下水资源连年超采已引发一系列生态环境问题 [7]。为应对严峻的水资源紧缺形势, 东北地区已改变以往传统的大水串灌方式, 多采用“浅晒浅”的水层管理模式, 并逐步探索发展在水稻正常生长过程中没有水层的控制灌溉技术。在“浅晒浅”与控制灌溉下的水稻灌溉量分别为 450~545 mm、275~345 mm, 相应水分生产率分别为 1.14~1.34 kg/m³ 和 1.53~2.25 kg/m³。与“浅晒浅”相比, 采用控制灌溉技术, 可减少灌溉量 145~175 mm, 减少耗水量 145~293 mm, 亩产增加 16~43 kg, 水分生产率提高 35%~60%。

东北地区制约性因素为“三低”(气温低、水温低、地温低)、“三化”(土壤潜育化、沼泽化、盐碱化) [8]。在东北地区, 推荐寒地水稻节水控制灌溉技术模式, 指在秧苗本田移栽后的各个生育期, 田面基本不再长时间建立灌溉水层, 也不再以灌溉水层作为灌溉与否的控制指标, 而是以不同生育期不同的根层土壤水分作为下限控制指标, 确定灌水时间、灌水次数和灌水定额的一种灌溉新技术。在水稻生长发育过程中, 适度进行水分胁迫, 会使水稻产生一定的耐旱性, 而且不会导致减产, 起到节水、优质、高效的作用, 该技术模式在东北地区得到了一定的推广应用 [9]。

(三) 长江中下游水稻产区

长江中下游地区是中国最重要的水稻生产区, 水稻种植面积和产量均占全国的 45% 以上 [10]。长江中下游中稻在淹灌与浅薄湿晒方式下的灌溉

量分别为 482 mm、413 mm, 水分生产率分别为 1.29~1.68 kg/m³、1.54~2.23 kg/m³, 采用浅薄湿晒水分生产率可提高 7%~34%。

长江中下游地区地势低平, 水热资源丰富, 制约性因素为农业面源污染严重。为控制农业面源污染, 实现农业可持续发展, 在长江中下游地区水稻灌区推荐采用农业面源污染生态治理模式和水稻田间水肥高效利用综合调控技术模式, 该模式为水稻灌溉制度、肥料运筹方式以及农业面源污染防治等的技术集成, 该技术在江西省得到大面积示范推广, 取得了显著的示范效果, 对促进农民增产增收, 减轻农业面源污染起到积极的促进作用 [11]。

(四) 四川盆地水稻产区

水稻是四川最重要的粮食作物, 丘陵区为四川盆地水稻的主体区域。近 50 年气象资料表明, 丘陵区春、夏、伏旱出现频率分别为 63%、71% 和 65%, 所以灌溉是水稻稳产的基本保证。与淹水灌相比, 四川盆地水稻湿润灌溉方式和湿晒浅间处理分别节水 27.31% 和 34.77%; 其中湿晒浅间处理的灌溉量较低, 仅为 522 mm, 但水分生产率最高达 1.69 kg/m³ [12]。

四川盆地地势低平, 土质肥沃, 季节性干旱时有发生 [13]。在四川盆地, 水稻推荐湿晒浅间控制性节水高效灌溉技术模式, 该技术根据水稻的抗旱性和高产水稻的需水规律, 实行控制性节水高效灌溉, 分蘖前期湿润灌溉促根促蘖, 分蘖后期排水晒田强根壮秆, 穗分化期浅水灌溉孕大穗, 灌浆结实期间隙灌溉养根保叶促灌浆, 该模式节水效果突出、增产效果显著 [14]。

(五) 内蒙古东部牧区

内蒙古东部牧区降水少, 草畜矛盾突出。青贮玉米新鲜样品中的粗蛋白质含量可达 3% 以上, 富含糖类, 且生产所占空间小, 可长期保存, 利于周年均衡供应, 是解决牲畜所需青贮饲料的一种最有效途径 [15]。青贮玉米在充分灌条件下亩产高达 6445 kg, 拔节期亏水后亩产仅 4548 kg, 抽雄期亏水后亩产 5078 kg; 水分生产率以抽雄期亏水后最大, 达 17.14 kg/m³, 拔节期亏水后最小, 仅 14.64 kg/m³。青贮玉米平水年净灌溉定额为 200 mm, 重点保障拔节期需水。

针对该地区特点, 适宜规模化发展青贮玉米喷灌、滴灌等高效节水技术。在内蒙古东部牧区, 青贮玉米推荐采用中心支轴式喷灌综合节水技术集成模式, 该技术模式综合考虑了青贮玉米需水需肥规律、水分利用率、肥料利用率和产量、效益等方面, 同时中心支轴式喷灌机操作方便、灌溉与施肥一体化, 又可以进行精准灌溉与施肥, 提高了水肥利用率, 在内蒙古牧区得到大面积推广应用 [16]。

(六) 广西甘蔗产区

广西是我国最重要的甘蔗及食糖生产基地, 多年平均条件下甘蔗生育期内降水量为 1391 mm, 总量上满足作物需水要求, 但由于降水时空分布不均匀, 季节性干旱时有发生。广西 90% 以上的蔗地为旱坡地, 水利灌溉基础设施落后, 抗旱能力低, 广西每年的春旱、秋旱等都对甘蔗萌芽、出苗、分蘖和拔节伸长造成严重影响 [17]。广西甘蔗在雨养和适宜灌条件下的水分生产率分别为 7.02 kg/m^3 、 10.12 kg/m^3 , 雨养下甘蔗水分生产率减少约 31%。可见, 适宜灌条件下灌溉量不到 300 mm, 具有增产增效双重作用。

广西甘蔗产区温光雨热同季, 适宜甘蔗生长, 但该区土壤瘠薄, 灌排等基础设施差 [18]。在广西甘蔗区, 推荐甘蔗膜下滴灌水肥一体化灌溉技术模式, 该模式集土地流转, 全程机械化耕作, 水、肥、农药一体化滴灌技术为一体, 可实现节约水、肥、农药 70% 以上, 已在广西崇左市大面积推广应用 [19]。

(七) 新疆棉花产区

新疆棉花主产区是我国最大的经济棉区, 种植面积和皮棉产量均居全国第一, 棉花生产也成为当地的支柱产业; 但新疆棉区干旱少雨, 属于典型的灌溉农业生产区。新疆棉花产区主要涉及准噶尔盆地南缘区、吐哈盆地区与塔里木盆地西缘北缘平原区等 3 个分区。在新疆塔里木盆地西缘北缘平原区与准噶尔盆地南缘区, 以灌溉水分生产率最大达 1.53 kg/m^3 时, 推荐灌溉定额为 375 mm [20]。在吐哈盆地, 棉花滴灌推荐灌水定额为 21 mm, 整个生育期内灌水 29 次, 灌溉定额为 609 mm。

新疆棉花产区光热资源丰富, 种植棉花条件得天独厚。该区棉花生产制约因素为严重缺水、土地

沙化, 农业节水技术发展方向为加快优良新品种、节水节肥和全程机械化等生产技术的推广。在新疆棉花主产区, 推荐棉花膜下滴灌综合技术模式, 该技术具有显著的节水、保温、抑盐、增产效果, 在新疆自治区棉田中已获得大面积推广应用 [21]。

四、现代农业灌溉体系建设

(一) 现代农业灌溉体系特征

以高效节水灌溉工程技术为基础, 融合水肥一体化、调亏灌溉等灌溉新技术, 在现代信息技术手段的支撑下推进现代农业灌溉体系建设, 适应和支撑现代农业生产和经营体系。现代农业灌溉体系具备以下基本特征: ① 高效节水灌溉技术呈现规模化和区域化发展趋势; ② 灌溉农业技术由单一的灌溉供水向水肥一体化综合供给发展, 技术手段由单纯的工程技术措施发展为集工程、农艺、农机、种子、化肥、信息技术等多项技术的综合集成; ③ 农业用水管理日趋信息化和智能化; ④ 以灌区生态文明, 维系良好水生态和水环境理念日益深入; ⑤ 以政府和社会资本合作 (PPP) 模式为代表的政府部门、科研机构、社会企业、受益主体等多方合力初步显现。

(二) 基于信息技术的现代灌溉技术

(1) 现代高效精准灌溉技术。以作物用水为核心, 采用低压管灌、喷灌、微灌等手段, 根据作物需水规律, 主动调控优化供水过程, 以达到高效精准灌溉。

(2) 输配水系统实时调控技术。通过在输配水系统关键节点安装的水位-流量监测装置、闸门启闭系统和数据传输装置, 以实时采集的灌区供需水信息为依托, 对输配水系统实行远程监控和自动化控制。

(3) 基于遥感的灌区需耗水预测预报技术。借助于无人机近地遥感和高分辨率卫星遥感信息提取灌区种植结构、土壤分布, 以及实际灌溉面积等参数的空间信息, 进行区域作物需耗水解析, 实现灌区需耗水快速预测与预报。

(4) 基于云平台的灌溉信息服务。借助物联网技术和云技术, 建立全国灌溉云服务平台, 将各地的灌溉试验数据, 以及区域种植结构与需耗水时空

格局、可供水量与工程状况等信息实现资料云化、管理智能化,利用云计算功能,对灌溉大数据进行分析处理,实现灌溉信息动态采集、管理、决策与服务。

(三) 政策保障体系

推进与现代灌区相适应的灌溉管理体制,改革,农田水利工程产权制度改革,农业水权市场建设和农业水价综合改革及取水与耗水双控机制。

(1) 创新多元投融资机制。按照公益的归政府、产业的放市场等基本原则,骨干水利基础设施部分主要由公共财政投入,田间或产业园区的节水灌溉设施应充分发挥企业和农户的投资意愿,政府可采用补贴等形式予以引导鼓励。

(2) 推进小型农田水利设施运行管理体制机制改革。在确保工程安全、公益属性和生态保护的前提下,允许小型农田水利设施以承包、租赁、拍卖、股份合作和委托管理等方式进行产权流转交易,搞活经营权,提高工程管理维护能力和水平,促进灌溉效益发挥。

(3) 全面推进农业水价综合改革。逐步建立农业灌溉用水总量控制和定额管理制度。全面加强农业灌溉用水监测计量,渠灌区逐步实现斗口计量,井灌区逐步实现井口计量。鼓励和发展农民用水自治、专业化服务、水管单位管理和用水户参与等多种形式的用水管理模式。逐步形成分级定价、分类定价、分档定价的农业水价形成机制,建立农业用水精准补贴机制和节水奖励机制。

(4) 探索建立取水与耗水双控机制。以行政区“三条红线”中取水总量控制为基础,探索基于耗水控制的水权管理机制,明确耕地的初始取水权和耗水权,建立以取水和耗水双控制来促进农户节水和水权交易的倒逼机制。

五、结论

(一) 以优化灌溉制度为核心,大力提高农作物水分生产率

优化灌溉制度,保证作物缺水敏感期水分供应,节约灌溉用水量,稳产同时提高水分生产率。在黄淮海地区,实行冬小麦调亏(或亏缺)灌溉与夏玉米雨养制度,与常规灌溉相比,每亩节水

50~100 m³;在稳产(亩产约1000 kg)前提下,较传统灌溉制度可提高作物水分生产率约10%。东北地区采用水稻控制灌溉制度,与“浅晒浅”相比,每亩至少节水95 m³,水分生产率增加35%以上。在内蒙古东部牧区,青贮玉米采用抽雄期干旱的灌溉制度,较拔节期干旱灌溉制度增产12%,水分生产率提高17%。长江中下游与四川盆地采取“浅薄晒晒(或湿晒浅间)”技术模式,亩均灌溉量可由520 m³降低到310 m³,增产约13%。在广西甘蔗主产区,采用适宜灌溉制度,较雨养条件下,亩产增加58%,而水分生产率提高44%。在新疆棉花主产区,采用亩灌溉定额为250 m³的灌溉制度,棉花水分生产率较大。

(二) 筛选先进节水技术模式,突破区域农业用水限制因素

筛选先进节水技术模式并推广应用,确保优化灌溉制度精准实施,突破区域农业用水限制因素,提高区域农业综合生产能力。在黄淮海地下水超采漏斗区,冬小麦推荐农艺节水、保护性耕作及水肥一体化等相结合的综合节水技术模式。在东北地区,水稻推荐寒地水稻节水控制灌溉技术模式,以突破区域“三低”“三化”限制。在内蒙古东部牧区,青贮玉米推荐中心支轴式喷灌综合节水技术集成模式,以提高区域规模化节水效益。在长江中下游地区,水稻推荐采用灌区农业面源污染生态治理模式,以控制区域农业面源污染。在四川盆地,水稻推荐“湿晒浅间”控制性节水高效灌溉技术模式,提高节水效果。在广西甘蔗产区,推荐甘蔗膜下滴灌水肥一体化灌溉技术模式,以大幅提高甘蔗水分生产率,并实现水、肥、药节约。在新疆棉花产区,推荐棉花膜下滴灌综合技术模式,实现节水、保温、抑盐、增产效果。

(三) 构建现代农业灌溉体系,实现农业用水由低效粗放型向适产高效型转变

我国农业栽培模式、生产方式和经营主体正发生着深刻变化,农业发展正逐渐步入适度规模化、全程机械化、高度集约化和资源环境硬约束等新常态,在未来农业用水量基本保持稳定且需认真应对气候变化的条件下,农业灌溉必须由低效粗放型向适产高效型转变。以高效节水灌溉工程技术为基础,

充分挖掘作物高效用水机制,融合水肥一体化、调亏灌溉等灌溉新技术,构建取水和耗水双控机制,并在现代信息技术支撑下推进现代农业灌溉体系建设,适应和支撑现代农业生产和经营体系。

参考文献

[1] 王庆锁,梅旭荣. 中国农业水资源可持续利用方略[J]. 农学报,2017,7(10): 80-83.
Wang Q S, Mei X R. Strategies for sustainable use of agricultural water resources in China [J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(10): 80-83.

[2] 康绍忠,霍再林,李万红. 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望[J]. 中国科学基金,2016(3): 208-216.
Kang S Z, Huo Z L, Li W H. High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: advance and future strategies [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2016 (3): 208-216.

[3] 许迪,龚时宏,李益农,等. 作物水分生产率改善途径与方法研究综述[J]. 水利学报,2010,41(6): 631-639.
Xu D, Gong S H, Li Y N, et al. Overview of recent study on improvement approaches and methods for crop water productivity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(6): 631-639.

[4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社,2016.
National Bureau of Statistics of the PRC. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2016.

[5] 河北省农业厅(河北省省委省政府农村工作办公室),河北省财政厅. 关于印发2016年度河北省地下水超采综合治理试点种植结构调整和农艺节水相关项目实施方案的通知(冀农业财发(2016)37号)[Z]. 2016-08-16.
Hebei Provincial Agriculture Department (Rural Work Office of Hebei Provincial Party Committee and Provincial Government), Hebei Provincial Finance Department. Notice on implementing planting structure adjustment and agronomic water-saving related projects for comprehensive treatment of groundwater overdraft in Hebei province in 2016 (Hebei Provincial Agriculture Department & Finance Department N0.(2016)37) [Z]. 2016-08-16.

[6] 武剑. 河北平原区冬小麦合理灌溉制度试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(4): 785-787.
Wu J. Experimental research on reasonable irrigation system of winter wheat in Hebei plain [J]. South-to-North water transfers and water science & technology, 2015, 13(4): 785-787.

[7] 安云凯. 三江平原发展水稻生产应当处理好的几个关系[J]. 黑龙江水利科技,2010,38(4): 123-125.
An Y K. Several relations should be well handled in rice production in Sanjiang plain [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2010, 38(4): 123-125.

[8] 李长明,段琪瑾,陈健. 三江平原节水灌溉技术模式及其推广对策[J]. 黑龙江水利科技,2005,33(5): 74-75.
Li C M, Duan Q J, Chen J. Water saving irrigation technology mode and its promotion rmeasures in Sanjiang plain [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2005, 33(5): 74-75.

[9] 何权. 寒地水稻控制灌溉技术在黑龙江省推广应用分析[J]. 黑龙江水利科技,2011,39(4): 170-171.
He Q. Application and analysis of rice controlled irrigation technology in cold area in Heilongjiang [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2011, 39(4): 170-171.

[10] 李勇,杨晓光,叶清,等. 1961—2007年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报,2011,27(9): 175-183.
Li Y, Yang X G, Ye Q, et al. Variation characteristics of rice water requirement in middle and lower reaches of Yangtze River during 1961—2007 [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 175-183.

[11] 顾宏,孙勇,叶明林. 南方灌区生态节水防污技术及应用——以高邮灌区为例[J]. 中国农村水利水电,2015(8): 55-58.
Gu H, Sun Y, Ye M L. The application of ecological water-saving and pollution mitigation technique in irrigation districts in south China: A case study in Gaoyou irrigation district [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015 (8): 55-58.

[12] 张荣萍. 不同灌水方式对水稻生育特性和产量及其水分利用率的影响[D]. 成都: 四川农业大学(硕士学位论文),2003.
Zhang R P. Effects of different irrigation methods on growth characteristics, yield and water use efficiency of rice [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University (Master's thesis), 2003.

[13] 孙文樵,周芸. 四川节水农业现状、发展趋势与对策研究[J]. 四川水利,2008,29(2): 13-17.
Sun W Q, Zhou Y. Current situation, development trend and countermeasures of water saving agriculture in Sichuan [J]. Sichuan Water Resources, 2008, 29(2): 13-17.

[14] 马均,郑家国,刘代银等. 四川盆地麦(油)茬杂交中稻优质高产生产技术模式[J]. 四川农业科技,2010(6): 17-18.
Ma J, Zhen J G, Liu D Y, et al. High quality & high yield of production technology mode of hybrid rice after wheat or rape in Sichuan Basin [J]. Science and Technology of Sichuan Agriculture, 2010 (6): 17-18.

[15] 范晓慧. 不同水分胁迫下青贮玉米需水量及优化灌溉制度的分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学(硕士学位论文),2012.
Fan X H. Study on maize water requirement and optimize irrigation system under different water stress [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University (Master's thesis), 2012.

[16] DB15/T681—2014. 青贮玉米中心支轴式喷灌施肥管理技术规程[S]. 2014.
DB15/T681—2014. Technical specification for water and fertilizer management of silage corn with central support sprinkler irrigation [S]. 2014.

[17] 任仕周. 蔗农采用甘蔗节水灌溉技术影响因素研究——基于广西甘蔗主产区农户的调查[D]. 南宁: 广西大学(硕士学位论文),2014.
Ren S Z. Research on influencing factors of sugarcane farmers' adoption of sugarcane water-saving irrigation based on the Guangxi mayor sugarcane producing areas' survey [D]. Nanning: Guangxi University (Master's thesis), 2014.

[18] 梁钧威,吴卫熊. 广西糖料蔗高效节水灌溉发展策略分析[J]. 广西水利水电,2015(3): 69-74.
Liang J W, Wu W X. Analysis of sugarcane efficient water-saving irrigation development strategy of Guangxi [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2015 (3): 69-74.

[19] 广西崇左市江州区水利局,农业局,糖业局,等. 广西崇左市江州区—糖料甘蔗膜下滴灌亩产八吨栽培技术规程[R]. 崇左:

- 广西崇左市江州区水利局, 农业局, 糖业局, 2012.
- Jiangzhou District Water Conservancy Bureau, Agriculture bureau, Sugar Bureau of Guangxi Chongzuo City, et al. Technical regulations for sugarcane with drip-irrigation under mulch of eight tons per-mu yield [R]. Chongzuo: Jiangzhou District Water Conservancy Bureau, Agriculture Bureau, Sugar Bureau of Guangxi Chongzuo City, 2012.
- [20] 郑耀凯. 干旱区棉花膜下滴灌水盐调控适宜灌溉制度试验研究 [D]. 石河子: 石河子大学 (硕士学位论文), 2009.
- Zhen Y K. Experimental research on optimum irrigation scheduling for moisture and salt regime of mulched drip-irrigation of cotton in arid area [D]. Shihezi: Shihezi University (Master's thesis), 2009.
- [21] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考 [J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 25-27.
- Xu F P, Li Y K, Ren S M. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang uygur autonomous region [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 25-27.