

农业绿色高效节水研究现状与未来发展趋势

陆红娜,康绍忠,杜太生,佟玲,丁日升,李思恩

(中国农业大学中国农业水问题研究中心,北京 100083)

摘要:农业绿色高效节水是保障中国粮食安全、农产品有效供给和农业可持续发展的重要措施。笔者分析了国内现代农业发展面临的新形势和国内外农业高效节水研究发展态势,指出了国内农业高效节水发展遇到的瓶颈和应关注的问题,提出了国内农业节水发展中应实现“四个转变”,即由单一节水灌溉技术向与农艺技术相结合转变,由单一高效节水向节水节肥节药一体化转变,由单一节水高产向节水提质高效转变,由重视节水面积数量向重视工程质量和效益转变;搞好“四个完善”,即完善节水科技推广与技术服务体系,完善农业节水试验与用水监测网络,完善农业节水补偿机制,完善节水产品市场准入机制;以及加强变化环境下农业高效节水科学研究工作的建议。指出了未来中国节水高效农业研究的关键科学问题,包括作物生命需水及对变化环境的响应、作物精量高效用水的多过程协同调控、作物生产-水资源-生态系统的互馈机制。

关键词:农业高效节水;生命健康需水;生态健康;绿色发展

中图分类号:S27

文献标志码:A

Current Status and Future Research Trend on Water-saving High-efficiency and Eco-friendly Agriculture

Lu Hongna, Kang Shaozhong, Du Taisheng, Tong Ling, Ding Risheng, Li Si'en

(Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: High-efficient and green water-saving in agriculture is an important measure to ensure food security, effective supply of agricultural products and sustainable agricultural development in our country. In the paper, we analyzed the current issues with the modern agricultural development in China and worldwide research trends in high-efficient water saving in agriculture. We also presented the bottlenecks and problems that need to be taken into consideration in developing high-efficient water-saving agriculture in China. “Four transformations” were proposed: from water-saving irrigation techniques alone to integrated irrigation techniques with agronomy measures, from high-efficient water saving alone to integrated water-saving, fertilizer-saving and pesticide-saving, from less water - high yield to less water-better quality - high efficiency; from promoting water-saving acreage alone to valuing quality and benefits of a project. We also proposed “four improvements”, i.e. improving water-saving technology promotion and service systems, improving experimental and monitoring networks on water-saving in agriculture, improving compensation mechanisms on water-saving in agriculture, and improving market entry mechanisms of water-saving products. More research on high-efficiency and water-saving agriculture under climate change was suggested. In the paper, we also put forward key science questions on future studies of water-saving and high-efficient agriculture in our country, including crop's water demand and its responses to climate change, multiple-

第一作者简介:陆红娜,女,1983年出生,河北沧县人,硕士,研究方向:节水灌溉理论与新技术。通信地址:100083北京市海淀区清华东路17号中国农业大学中国农业水问题研究中心,Tel:010-62737911,E-mail:luhongna24@126.com。

通讯作者:康绍忠,男,1962年出生,湖南桃源人,教授,博士,研究方向:农业高效节水与水资源。通信地址:100083北京市海淀区清华东路17号中国农业大学中国农业水问题研究中心,Tel:010-62737611,E-mail:kangsz@cau.edu.cn。

收稿日期:2017-11-04, **修回日期:**2017-11-28。

processes integrative regulation on crop's precise and high-efficient water consumption, and feedback mechanisms of crop production-water resources-ecosystem nexus.

Key words: High-efficiency and Water-saving Agriculture; Crop Healthy-growing Water Demand; Ecology Health; Green Development

0 引言

水资源紧缺是一个世界性的问题,农业是最主要的水资源消耗部门。农业用水占全球总用水量的70%,在一些非洲和亚洲国家,农业用水比例高达85%~90%,因此水资源高效利用的核心是农业水资源高效利用。人口增长、资源短缺、生态环境恶化及社会经济迅速发展的新形势给农业生产用水带来新的要求和挑战。农业绿色高效节水是新时代保障国内粮食安全、农产品有效供给和农业可持续发展的重要措施。

1 中国现代农业发展面临的新形势

未来20年是中国社会经济提质增效、转型升级的重要时期,迫切需要依靠科技创新培育发展新动力。坚持走产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业绿色发展道路,发展生态绿色高效安全的现代农业技术,确保粮食安全、主要农产品的有效供给和农业可持续发展是中国现代农业发展的永恒主题。2035年国内人口数量将超过15亿,人口增加给农产品供给提出了更高的要求,届时粮食需求量预计达7亿t^[1],耕地面积逼近1.2亿hm²“红线”,在水资源极度短缺及农业环境严重污染的背景下,农业生产面临更大挑战。

国内水资源总量为2.81万亿m³,人均约2100 m³,仅占世界平均水平的28%。水资源时空分布不均,呈现年内分配集中、年际变化大;南多北少、东多西少;水土资源不匹配等特点。水资源紧缺且时空分布不均,加之气候变化(主要指气候变暖),导致国内极端气候灾害频发。国内5种主要气象灾害每年均有发生,平均每年发生干旱灾害7.5次、干热风1.5次、洪涝灾害5.9次、台风灾害7.0次、冻害2.9次^[2]。每年气象灾害造成农作物受灾面积平均为5000万hm²,其中干旱和洪涝受灾面积分列第一、二位,占总受灾面积的60%~70%^[3]。气候变化与极端气候灾害频发使农业防灾减灾能力提升成为当务之急。

国内农业生产的比较效益逐年减小。2006—2013年,大米、小麦、玉米、大豆、棉花生产成本增加70%~90%,2014年主要农产品的国内价格开始明显高于国外农产品到岸完税价格,农产品价格出现倒挂。价格驱动型进口不断增加,对国内农业造成的冲击难以避免。法国、美国、以色列等发达国家的农业劳动生产率是中国的近100倍。激烈的国际竞争对加快转变农业

生产方式提出了新的要求。推进农业结构深度调整,提高农产品和食品质量水平,延伸农业产业链,促进农村一二三产业融合。专业大户、家庭农场、农业合作社、龙头企业等国内新型经营主体中,家庭农场最终将成为国内农业生产中的主要经营主体。产业融合和新型经营主体将催生新的农业产业革命。

2015年,国内农业科技进步贡献率超过56%,标志着农业发展已从过去主要依靠增加资源要素投入转入主要依靠科技进步的新时期,但这与发达国家仍有很大差距。发达国家农业产业化、组织化、合作化、规模化程度很高,实现了以机械化、良种化、化学化、电气化、信息化等为主要内容的全面农业现代化。现代农业面临全球化、市场化、互联网化、绿色化的趋势,农业生产条件和技术的现代化以及农业组织管理的现代化推动新的农业科技革命,并引领农业向资源替代、技术提升、领域拓展、节本提质增效的绿色可持续农业方向发展。产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的现代农业是当今世界农业发展的重大趋势。

气候智慧农业成为新的农业发展理念和目标。近年来,“气候智慧型农业”(Climate Smart Agriculture)又开始成为新的农业发展理念和目标。FAO于2010年提出后已经受到国际社会普遍关注,世界银行、欧盟委员会、美国和加拿大农业部等都开始制订相关政策和项目计划。2015年美国牵头成立国际气候智慧型农业联盟。气候智慧型农业充分考虑了应对粮食安全和气候变化挑战的经济、社会、环境等复杂性,通过发展技术,改善政策和投资环境,实现“三赢”,即保持农业发展和生产能力、增强气候变化适应能力、实现固碳减排。

近年来,中央对现代农业发展提出了新的目标和要求。中共中央十八大首次将生态文明建设提升为国家战略,已经形成了以生态文明建设为核心推动社会经济转型的大环境。“十三五”规划纲要提出了创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念。以2015年中央一号文件为主要标志,国内农业转型发展开始启动。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和质量效益并重、注重提高竞争力、注重农业科技创新、注重可持续发展上来。农业领域陆续出台关于农业结构调整、发展方式转变与可持续发展、化

肥农药零增长、农业补贴调整等系列政策文件。中央全面深化改革领导小组第二十九次会议审议通过《建立以绿色生态为导向的农业补贴制度改革方案》：“从制约农业可持续发展的重要领域和关键环节入手，突出绿色生态导向，加快推动落实相关农业补贴政策改革，……，把政策目标由数量增长为主转到数量质量生态并重上来。”《全国种植业结构调整规划(2016—2020年)》提出：“构建粮经饲统筹、农牧结合、种养加一体、一二三产业融合发展的格局，走产出高效、产品安全、资源节约、环境友好的农业现代化道路。”2017年中央一号文件《中共中央、国务院关于深入推进农业供给侧结构性改革，加快培育农业农村发展新动能的若干意见》提到：“优化产品产业结构，着力推进农业提质增效；推行绿色生产方式，增强农业可持续发展能力。深入推进化肥农药零增长行动，开展有机肥替代化肥试点，促进农业节本增效。大规模实施农业节水工程。把农业节水作为方向性、战略性大事来抓。”习近平总书记在中共中央十九大的报告中指出，建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计，必须树立和践行绿水青山就是金山银山的理念，坚持节约资源和保护环境的基本国策，像对待生命一样对待生态环境。

纵观中国农业发展面临的新形势，发展现代农业高效节水是保障国内粮食安全、水安全、生态安全及整个国家安全的重大战略，是适应农业生产方式转变、助力农业现代化的迫切要求，是促进农业节本提质增效、实现农业可持续绿色发展的关键所在。

2 国内外农业高效节水研究热点与发展态势

全球人口每年预计增加8000万，每年增加的水资源需求量达640亿 m^3 。预计到2025年，世界上2/3的人口将面临水资源短缺。高度依赖灌溉农业的旱区(非洲、南亚和中国北方)将出现严重缺水。粮食需求与农业供水量的矛盾是世界性问题，2030年世界人口总量将达83亿，粮食需求达30亿t，按现有用水效率计算，农业灌溉用水将增加36%(现有2810 km^3)，缺口达1012 km^3 ，水资源短缺已成为全球食品安全的主要制约因素^[4]。

Joshua Elliott等^[5]在《PNAS》发文指出，未来全球变化背景下保障粮食安全将需要更多的灌溉用水。Mueller Nathaniel D等^[6]在《Nature》发文指出，同等条件下通过水肥科学管理，作物产量可提高30%。变化环境下的农业高效用水已成为国际相关研究领域的热点，多个国家及国际组织启动了该领域的重大研究计划。美国建立了多部门联合资助的食物-能源-水资源研究平台，其中作物高效用水是重要的主题，美国国家

自然基金委2016年为该计划投入7500万美元。美国农业部农业研究局(United States Department of Agriculture- Agricultural Research Service)启动了农业水管理国家重大研发计划，旨在研究提高农业用水效率及发展新的灌溉技术，项目实施地点覆盖18个州，该项目成为农业领域17项重大研究计划之一，主要任务是开展提升农业用水效率、保障生态环境的基础研究及应用基础研究以及研发新一代农业高效用水及管理技术。德国联邦食品、农业和消费者保护部(Federal Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection)牵头启动了农业高效用水相关研究计划，以提高农产品和食品价值链的水资源利用效率，实现可持续管理。国际农业研究咨询联盟(Consultative Group on International Agricultural Research)的“挑战计划”(Challenge Programs)在世界七大典型流域实施，包括提高农作物水利用效率、流域上游水的多种利用、水生态系统、流域水综合管理、全球和国家的粮食-水系统等研究内容，重点关注农业资源利用与环境影响方面的科学问题。

纵观上述国际研究计划，近期农业高效用水国内外研究热点在于作物高效用水机理及耗水对变化环境响应、农业用水精量控制与调配、农业灌溉用水的生态环境效应等方面。

2.1 作物高效用水机理及耗水对变化环境的响应

作物高效用水是农业高效用水的核心与基础。国内外对作物高效用水的研究在其生理生态学机制、量化描述及调控技术方面取得了重要进展^[7-8]。

基于作物生命需水过程的节水理论成为国内外研究的热点，主要包括基于气孔调节和渗透调节的生命需水对于干旱胁迫响应。研究表明，在干旱胁迫下作物根系能够产生植物激素ABA，以调节气孔开度，在保证植株体内水分情况下尽可能降低作物叶片的奢侈蒸腾。渗透调节即作物通过增加细胞溶质浓度、降低渗透势、维持膨压及细胞张力等，增强作物的抗旱能力。此外，作物复水后的补偿生长也是作物高效用水理论的热点。作物对于干旱逆境引起的损失具有一定的弥补作用，在生理生态功能上得到一定程度的恢复或加强，表现出补偿作用，这是作物抵御干旱逆境的一种调节机制^[9]。

作物用水过程的量化表征是实现作物高效用水调控的重要基础^[10]。以植物生理为基础，逐渐加深了对叶片尺度光合-气孔-蒸腾耦合机理的认识，研究发现太阳辐射是叶片内部物理过程的驱动力，影响气孔调控水分的程度，并揭示了其过程与环境因子的关系，从而发展出气孔-光合-蒸腾的作物生理学模型^[11]；土壤—

植物—大气连续体(SPAC)中水分是最活跃的因素,而蒸发蒸腾量是SPAC水分运动中最重要的一环。采用同位素示踪技术发现蒸发蒸腾是陆地表面最大的水分通量,占总水分的80%~90%^[12]。在深入探讨SPAC水分传输与转化过程的基础上,对于叶气界面,形成了以水汽扩散理论与能量平衡为基础的耗水计算方法;对于根土界面,建立了逆境胁迫条件下作物根系吸水模型;对于作物尺度,作物生长模型已成为研究作物水分关系的重要工具。

气候变化对作物耗水及生产的影响已成为国际研究的热点。研究发现全球变化使得土壤水分减少,导致陆地蒸散发有减小的趋势^[13]。目前,可采用自由空气浓缩技术(Free-air Concentration Enrichment Technology)研究气候变化(T 、 CO_2 浓度升高)对作物耗水和产量的影响^[14]。

2.2 农业用水精量调配与控制

在农田灌水方面,目前多以水量平衡为核心,实现精细灌溉,减少渗漏损失。各类微灌技术已在全球得到广泛应用。近年来,利用植物生理特性改进植物水分利用策略的研究引起了国内外的关注,包括限水灌溉、非充分灌溉、调亏灌溉、分根区交替灌溉等由传统的丰水高产型灌溉转向节水优产型灌溉,对提高水的利用效率起到了积极作用。特别是近期发展的分根区交替灌溉成为一种干旱区全新的节水灌溉技术,目前该方面的研究已从技术层面转向对机理的揭示^[15]。最近几年,以作物最优生态为目标的生境过程协同调控技术研究成为国际上作物高效用水技术的新热点,通过充分提高根区水土肥气热对作物生长的协同效应,形成实用的综合调控技术^[16]。

在区域配水方面,高新技术在农业高效用水现代化管理中的应用日益广泛。在灌区用水管理中,各种预测技术、优化技术和灌溉用水计算机管理系统已在全球大面积应用,灌区的灌溉用水实现了由静态用水向动态用水的转变,为提高灌区水资源利用率提供了技术保障。可实现灌溉优化输配水的全过程控制技术得到了发展^[17]。揭示灌区输配水(大时滞网络)系统的动力响应机理,建立动力响应模拟模型,利用水联网云计算方法,探索模拟优化机制与过程控制方法,是实现农业用水精准调配的科学保障。

以物联网技术、大数据、移动互联、云计算、空间信息技术和智能装备等新一代信息技术为支撑和引领的智慧灌溉技术成为国际灌溉技术发展前沿。根据作物产量与品质和土壤性质以及管理措施的空间变化规律,采用先进技术监测土壤墒情及养分,实现作物时空

变量灌溉施肥,提高作物灌溉施肥精准程度,已成为现代精准灌溉的发展趋势。在融合土壤水肥信息实时监测信息及基于光谱分析技术与机器视觉技术的作物生长信息基础上,实现变量灌溉施肥的自动化、智能化^[18]。低能量精确灌溉(LEPA)受到广泛关注,太阳能等清洁能源在灌溉系统中的应用受到重视。

2.3 农业灌溉用水的生态环境效应

灌溉对农业局部气候的影响机制及互馈作用已成为国际研究的热点,有研究表明长期灌溉使得局部气候变冷,从而导致潜在蒸散发减少,引起农业灌溉需水及生态环境发生改变^[19]。农业节水导致的农田水循环改变对农区地表生态环境有明显的影响。已有研究表明,渠道衬砌使得渠床四周土壤水分减少,植物多样性降低。在灌区及区域尺度,农业节水灌溉引起了区域水循环的改变,导致地下水位下降。长期农业节水引发土壤次生盐渍化等问题。采用多尺度水循环耦合模型研究作物用水对区域生态的影响,探讨灌溉的可持续性已成为国际热点问题^[20]。水碳氮过程决定区域农业生产力的分布,气候变化及灌溉条件下区域水碳氮耦合过程的定量化描述及农业水生产力的估算是目前国际研究的方向^[21]。

2.4 农业高效节水研究的发展趋势

由单纯地考虑作物水分产量关系转变为考虑水分与产量、品质的耦合作用,由作物水分-产量关系研究深入到作物水分-产量-品质关系研究,由研究水量对产量的影响到更重视水对品质的影响;在水源上,从仅考虑资源型缺水到同时重视水质性缺水;在研究过程中考虑农业环境、生态、景观平衡,注重生态灌区建设、农村水环境与生态保护。

农业水循环及其伴生的多尺度水热碳氮盐及生态环境过程影响农业的稳定发展,相关过程已从定性研究逐渐向定量研究方向发展,已从单一的农田水循环逐渐扩展到渠系、灌区及流域尺度。以流域尺度水转化与消耗规律为基础,应用分布式水循环模型与植物水生产模拟模型,进行流域尺度面向生态的水资源科学配置与调控,进行基于水循环和生态需水的流域尺度农业与生态节水潜力评价及节水措施科学布局,建立节水、高效和对环境友好的农业与生态高效用水模式并示范推广,在此基础上,进行区域节水的水土环境效应评价,为深入进行流域尺度水资源转化过程与节水调控研究提供依据。

从农业用水单一环节的研究,转向为充分考虑输配水与水转化过程、水分消耗过程、光合产物与经济产量形成过程等农业用水多环节的系统性耦合研究。由

仅关注农业水效率形成的单过程、单要素驱动作用研究,逐渐转向综合考虑作物光合、农田耗水、田间灌水等多过程耦合和水、土、肥、气、热等多要素协同作用研究,实现多过程及多要素对农田水效率的协同提升是重要研究方向。

由静态农业用水供需平衡分析,转向动态农业水循环与生态格局演变物理关系分析,实现考虑生态健康的水资源动态调配。

加强农业节水对生态环境和生产的影响研究,结合国内低碳经济发展方式,考虑清洁能源的利用,对陈旧落后的井灌设备进行技术改造等,以适应节能减排的发展导向。

3 中国农业高效节水发展存在的问题

灌溉用水效率低、高效节水灌溉发展缓慢和管理手段落后是国内农业高效节水亟需解决的重点问题。2015年底,国内灌溉面积达7207万 hm^2 ,其中农田有效灌溉面积6587万 hm^2 ,包括高效节水的喷微灌面积900万 hm^2 ,喷微灌面积居世界第二位。2010—2015年喷微灌面积每年新增100万 hm^2 ,增速居世界第一位,但喷微灌面积仅占灌溉总面积的13.6%,加之高效节水灌溉技术与农艺技术不配套、灌溉用水缺乏科学调配与精量控制、区域灌溉水配置没有与作物需水相匹配等问题,导致国内的灌溉用水效率低、高效节水技术发展缓慢等。全国范围内灌溉水有效利用系数为0.536,与先进国家普遍达到的0.7~0.8还有差距,国内灌溉水利用率仍存在一定的上升空间。

新时期,农业绿色高效节水发展还面临农业节水补偿机制未形成,土地分散经营模式限制高效节水技术的应用,重节水工程建设、轻工程管理,缺乏经济、可靠、耐用、适应性广的先进实用技术,节水科技推广与技术服务体系不完善,农业节水试验与监测网络建设滞后,缺乏变化环境下节水的基础性研究工作等瓶颈。

4 推进中国农业绿色高效节水发展的建议

针对上述问题和瓶颈,国内农业高效节水应做到“四个转变”、“四个完善”和“一个加强”,即由单一节水

灌溉技术向与农艺技术相结合转变,由单一高效节水向节水节肥节药一体化转变,由单一节水高产向节水提质高效转变,由重视节水面积数量向重视工程质量和效益转变;完善节水科技推广与技术服务体系,完善农业节水试验与用水监测网络,完善农业节水补偿机制,完善节水产品市场准入机制;加强变化环境下农业高效节水的科学研究工作。

4.1 中国农业绿色高效节水发展应实现“四个转变”

4.1.1 由单一节水灌溉技术向与农艺技术相结合转变 节水高效农业的核心是通过集成多种措施最大限度减少输水、配水、灌水及作物耗水过程中的水损失,充分提高灌溉水利用率和水生产率,获得最佳经济、社会和生态效益。仅仅只有工程的完善,而没有农艺技术的集成和科学的管理,输送到农田的水分效益无法发挥。农艺节水是一种低成本的长效节水措施,发展高效节水灌溉,一定要与农艺技术结合好,农艺方面也要主动适应发展高效节水带来的新需求。

2012—2014年,笔者在甘肃石羊河实验站进行了不同种植密度下制种玉米产量和水分利用效率研究,结果表明,制种玉米在每公顷达到12.75万株时,总产量和水分利用效率最高(表1~2)。在种植密度有很大提升的情况下,如何科学控制植株的高度、群体结构、叶片形状等,使光和水肥的利用效率最大化,是农艺方面值得研究的课题。

4.1.2 由单一高效节水向节水节肥节药一体化转变 水肥药一体化是利用管道灌溉系统,把肥料和农药按照作物需要量溶解在灌溉水中,由灌溉管道带到田间每一株作物上,适时、适量地满足农作物对水分、养分和农药的需要,实现水肥药同步管理和高效利用的节水农业技术。优点在于节水、节肥、节药,省工、省力、省心,增产、增收、增效。水肥药一体化可实现渠道输水向管道输水变化、浇地向给作物供水变化、土壤施肥向作物施肥变化、农田打药向作物用药变化、分开施用向水肥药耦合变化、单一技术向综合管理变化、传统农业向现代农业变化,它是发展现代农业的重大技术,更是

表1 制种玉米种植密度试验处理

处理	行距/cm	株距/cm	密度/(万株/ hm^2)
D ₁	40	37	6.75
D ₂	40	30	8.25
D ₃	40	25	9.75
D ₄	40	22	11.25
D ₅	40	20	12.75
D ₆	40	18	14.25

表2 不同种植密度下制种玉米产量和水分利用效率

年份	项目	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆
2012	单株产量/(g/株)	120	120	110	110	100	
	总产量/(t/hm ²)	8.02	9.77	11.09	12.22	12.66	
	水分利用效率	1.84	2.15	2.34	2.46	2.46	
2013	单株产量/(g/株)	56.4	54.2	53.1	50.5	47.5	38.8
	总产量/(t/hm ²)	3.81	4.47	5.17	5.68	6.05	5.53
	水分利用效率	0.9	1.01	1.12	1.17	1.19	1.04
2014	单株产量/(g/株)	71.23	67.32	64.84	62.4	55.55	49.3
	总产量/(t/hm ²)	4.81	5.55	6.32	7.02	7.08	7.02
	水分利用效率	1.13	1.23	1.33	1.39	1.36	1.29

“资源节约、环境友好”的现代农业的“一号技术”。

笔者在甘肃河西走廊民勤县进行了玉米水肥一体化试验研究,根据实测数据和农户调研资料,结合中国农业大学石羊河实验站内的试验结果,甘河西走廊黄羊河农场实际生产中还有很大的节水节肥潜力。根据研究结论所得的推荐灌水施肥用量,相比实际用量,可节水 1935 m³/hm²、节肥 109.5 kg/hm²(折纯量),水分利用效率可提高 76%(表3)。

4.1.3 由单一节水高产向节水提质高效转变 由以土壤水平衡为基础的传统充分灌溉,转向综合考虑作物生理补偿、冗余控制、根冠通讯、控水调质的基于作物生命需水信息和SPAC定量调控的节水调质高效灌溉理论研究。依据作物水分-产量-品质-效益耦合关系与节水优质高效多目标决策方法,设计与控制作物需水过程,达到节水、优质、高效的综合目标。建立考虑有限水优化分配、时空亏缺调控灌溉和多要素协同控水调质的作物节水调质高效灌溉技术与决策支持系统,形成不同区域与不同作物的节水调质高效灌溉技术应用模式。

通过对不同水分条件与灌溉模式下作物外观品

质、风味品质、营养品质、贮运品质和加工品质参数的监测,分析不同品质参数对不同生育阶段水分的响应关系,建立不同作物的单一品质参数对水分的响应函数;应用主成分分析、层次分析等方法从所有品质参数中针对不同作物特点优选出水分敏感型品质指标;通过市场调查、专家打分,并应用模糊数学方法确定不同水分敏感型品质参数的权重,提出不同作物的综合品质评价指标;建立作物水分-产量-品质耦合模型。

陈金亮^[23]通过分析日光温室番茄产量、各单项品质指标和综合品质指数与番茄全生育期耗水量以及各生育阶段相对水分亏缺的相关关系,建立了温室番茄水分-产量-品质经验模型,得到了番茄产量和品质与水分的定量关系。根据番茄果实糖分代谢特点,基于SUGAR模型建模思想建立模拟番茄果实生长过程中糖分代谢变化的糖分机理模型(TOM-SUGAR模型),可模拟不同果实负载量条件下番茄果实生长过程糖分累积变化。将番茄果实生长模型与糖分模型相结合,构建了番茄果实生长和糖分耦合模型,实现了不同水分供应下番茄果实生长及糖分变化耦合模拟,耦合模型能够较好地模拟充分灌溉和水分亏缺条件下番茄果

表3 黄羊河农场玉米滴灌水肥实际用量与推荐用量比较

生育期	生产用量		推荐用量	
	灌水量/(m ³ /hm ²)	追肥量/(kg/hm ²)	灌水量/(m ³ /hm ²)	追肥量/(kg/hm ²)
苗期	784.5	19.5	405.0	9.0
拔节期	1815.0	72.0	1245.0	45.0
抽穗期	970.5	61.5	570.0	18.0
灌浆期	780.0	46.5	900.0	18.0
成熟期	750.0	0.0	45.0	0.0
合计	5100.0	199.5	3165.0	90.0
WUE/(kg/m ³)	1.16		2.04	

注:实际用量为黄羊河农场调研和试验测定结果,应用时还需考虑取样代表性和空间分布。

实干重和鲜重增长过程,以及果实可溶性糖和淀粉含量的变化。并基于水分-产量-品质经验模型构建了综合考虑产量和品质的优化灌溉决策方法,获得了温室番茄节水调质优化灌溉制度。

4.1.4 由重视节水面积数量向重视工程质量和效益转变 “十二五”期间,国家加快农村水利建设步伐,到2015年底,国内建成大中型灌区7700余处、小型农田水利工程2200余万处,节水灌溉工程面积达3107万 hm^2 ,其中高效节水灌溉面积1793万 hm^2 ,但一些大中型灌区建设或改造标准不高,农田水利“最后一公里”问题依然突出^[23]。目前有91%的灌区采用地面灌水技术,在一些自流灌区,大水漫灌现象仍然常见。农业用水方式粗放,水资源不足与灌溉用水浪费并存。

当前,应继续加强灌区现代化改造力度,加大农田水利工程建设投入力度,由仅重视节水面积数量向重视工程质量和效益转变。避免盲目建设导致使用效率不高、管理不完善、现代化水平低、重复投入等问题。农业节水工程的发展要因因地制宜、科学论证、合理规划、统筹安排,严格把控工程建设标准,争取做到新建一片、达标一片,改造一片、成功一片的效果。加强现代化管理与培训,实现向工程质量和效益的新局面。

4.2 中国农业绿色高效节水发展应搞好“四个完善”

4.2.1 完善节水科技推广与技术服务体系 推广节水科技,是改善生态环境、实现水资源可持续利用的重要途径,但有关部门和农民对节水技术仍不够重视,在农村推广普及节水科技尤为重要。政府部门应持续加强节水宣传教育和组织实施节水工程建设,完善投入机制,加大节水投入力度,建立高效农业节水核心示范区,并大面积推广,实现以点带面的效果,调动广大农民的积极性。加大培训力度,全面提高农民对农业节水重要性的认识和应用节水技术的水平。健全农业节水技术服务体系,通过制定规范化、标准化的应用技术规程,为农民提供“套餐式”服务,消除农民使用节水技术或工程的后顾之忧,促进节水技术的应用。

4.2.2 完善农业节水试验与用水监测网络 农业节水试验是制定节水灌溉制度、技术体系和应用模式的根本途径,应加大国家财政投入,合理布局,加强设备条件建设、人才队伍建设以及技术标准建设,提高农业节水与水资源可持续利用研究领域的理论创新能力。

农业用水准确计量是推动节水技术应用、评价节水技术效果和实施农业节水补偿的基础,但目前95%以上的地表水灌区没有安装田间用水计量设备。例如河北省共有机井90万眼左右,分布广且分散,成井年

限长短不一,大部分机井缺乏计量装置,而且部分水表计量传输不稳定容易造成跳闸,影响了节水限采等工作地有效实施。建议建立区域联网的农业用水监控系统,加强农业用水的定量控制和有效监测。

4.2.3 完善农业节水补偿机制 农业节水技术应用主体是农民,但由于灌溉水价低,大田作物节水仅减少少量水费成本,经济效益有限。例如河北目前地表灌区到斗口的灌溉水价为0.15元/ m^3 ,每公顷节水1500 m^3 仅减少225元水费成本,而农民采用滴灌节水技术每公顷需投入15000元以上,但在实际生产中又没有体现出多节水多补偿,所以农民缺乏自觉节水的内在动力。目前迫切需从政治制度、运行机制入手,通过创新管理体制,应用政策手段,建立农业节水长效经济补偿和激励机制,调动农民自觉节水的内在动力,促进农业节水发展。

4.2.4 完善节水产品市场准入机制 在节水工程建设中,灌溉设备材料质量良莠不齐,会诱发工程良性运行困难,导致可持续性差,节水效果大打折扣。建立与完善农业节水设备与产品市场准入制度,严格把关节水产品认证,杜绝性能不稳和耐久性差的节水产品流入市场。同时提高节水工程建设标准,严把施工质量,从而保证节水灌溉工程能够长期、有效运行。

4.3 加强变化环境下农业高效节水的科学研究工作

全球气候变化可能加剧中国水危机的风险,如何应对水危机、水灾害,保障水生态安全和粮食安全,推进中国社会绿色发展,必须加强变化环境下农业高效节水的科学研究工作。

探索不同典型区域生态环境变化与水平衡因素之间的定量关系,节水灌溉对区域水循环的影响及其生态环境效应;建立区域尺度水平衡关系改变的生态环境效应定量评估指标体系和方法,评估因不同区域节水灌溉发展对区域水循环的影响及其生态环境效应;建立农业水资源承载力的计算方法和区域优化配置的动态目标分解聚合模型及多维调控决策方法,提出系统的农业与生态用水配置理论,建立有利于节水、高效和对环境友好的区域高效用水调控模式。

5 未来农业绿色高效节水的关键科学问题

农业绿色高效用水要充分发挥作物潜力、田间潜力和区域潜力,以根本提升农业用水效率。首先,从作物本身出发,挖掘作物抗旱基因,培育抗旱节水型和高水分利用效率型新品种,利用作物本身生理调节功能降低耗水,提高产量和作物水分生产力,挖掘作物本身的节水潜力;其次,在田间用水环节,改进灌溉技术,实施农田水肥一体化,降低田间灌水量,改进灌溉均匀

度,提高灌溉水效率,挖掘田间节水潜力;再次,在区域灌溉系统方面,通过合理配水,减少系统无效蒸发或渗漏损失,提高系统效能,挖掘区域灌溉输配水系统节水潜力。在此基础上,考虑多尺度水循环过程对生态的响应与适应,揭示变化环境下农业高效用水及其生态响应机制,实现农业绿色高效节水发展,应关注以下关键科学问题。

5.1 作物生命需水及对变化环境的响应

研究作物叶片、单柱、群体尺度生命需水信息的科学探测方法及定量表征,识别作物不同尺度生命健康需水状态,解析生命健康条件下控制奢侈蒸腾的水分生理及生化关键过程;量化区域作物需水信息对变化环境的响应,实现变化环境下多尺度作物生命需水信息表征。

5.2 作物精量高效用水的多过程协同调控

基于作物理想耗水理论和实际耗水过程,利用作物生长状态方程,获得农田作物需水过程曲线及实时多阶段动态调整方案。基于叶片气孔行为及SPAC系统水分传输,研究作物生长过程、作物耗水过程、土壤水过程的耦合机制,明晰作物水分利用各过程的协同提升机理,建立作物生长及产量与SPAC系统水分传输的耦合模型,实现作物生命健康需水过程多要素协同调控。进行作物-农田-渠系-水源全过程用水效率协同调控研究,实现作物精量高效灌溉及农业水效率提升的多过程耦合与多要素协同作用。

5.3 作物生产-水资源-生态系统的互馈机制

明晰灌区水循环与生态系统能量循环的耦合作用,揭示变化环境下灌区多尺度水循环演变机理;解析生态系统对水资源的响应及适应机制,提出面向作物生产与生态环境的水资源多维临界调控理论与方法,认识作物生产-水资源-生态系统作用机理与适应机制,建立作物生产-水资源-生态系统的互馈机制。

参考文献

- [1] 梅方权.21世纪前期中国粮食发展分析报告(摘要)[J].中国食物与营养,1996(2):27-29,31.
- [2] 张家诚.中国气象洪涝海洋灾害[M].长沙:湖南人民出版社,1998:40.
- [3] 秦大河.影响中国的主要气象灾害及其发展态势[J].中国应急救援,2008(6):4-6.
- [4] Food security analysis[EB/OL]. <http://www.wfp.org/food-security>, 2012.
- [5] Elliott J, Deryng D, Müller C, et al. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2014,111(9):3239-3244.
- [6] Mueller N D, Gerber J S, Johnston M, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management[J]. Nature,2012,490(7419):254-257.
- [7] Lobell D B, Roberts M J, Schlenker W, et al. Greater Sensitivity to Drought Accompanies Maize Yield Increase in the U.S. Midwest[J]. Science,2014,344(6183):516-519.
- [8] Shyam N, Jeff J, Chenggang W. Efficiency of irrigation water use: a review from the perspectives of multiple disciplines[J]. Agronomy Journal,2013,105(2):351-363.
- [9] Steinemann S, Zeng Z, McKay A, et al. Dynamic root responses to drought and rewatering in two wheat (*Triticum aestivum*) genotypes [J]. Plant and Soil,2015,391(1-2):139-152.
- [10] Carr M K V, Lockwood G. Water relations and irrigation requirements of cocoa (*Theobroma cacao* L.): a review[J]. Experimental Agriculture,2011,47(4):653-676.
- [11] Pieruschka R, Huber G, Berry J A, et al. Control of transpiration by radiation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2010,107(30):13372-13377.
- [12] Jasechko S, Sharp Z D, Birks S J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration[J]. Nature,2013,496(7445):347-350.
- [13] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature,2010,467(7318):951-954.
- [14] Long S P, Ainsworth E A, Leakey A D B, et al. Food for thought: Lower- than- expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations[J]. Science,2006,312(5782):1918-1921.
- [15] Davies W J, Wilkinson S, Loveys B. Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture[J]. New Phytologist,2002,153(3):449-460.
- [16] Passioura J B. Environmental biology and crop improvement[J]. Functional Plant Biology,2002,29(5):537-546.
- [17] Mareels I, Weyer E, Ooi S K, et al. Systems engineering for irrigation systems: Successes and challenges[J]. Annual Reviews in Control,2005,29(2):191-204.
- [18] O' Shaughnessy S A, Evett S R, Colaizzi P D, et al. Dynamic prescription maps for site-specific variable rate irrigation of cotton [J]. Agricultural Water Management,2015,159:123-138.
- [19] Bonfils C, Lobell D. Empirical evidence for a recent slowdown in irrigation-induced cooling[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America,2007,104(34):13582-13587.
- [20] Schoups G, Hopmans J W, Young C A, et al. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California[J]. Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America,2005,102(43):15352-15356.
- [21] Schmitter P, Fröhlich H L, Dercon G, et al. Redistribution of carbon and nitrogen through irrigation in intensively cultivated tropical mountainous watersheds[J]. Biogeochemistry,2012,109(1-3):133-150.
- [22] 陈金亮.番茄果实生长和糖分模拟及节水调质优化灌溉决策研究[D].北京:中国农业大学,2016.
- [23] 全国人民代表大会常务委员会执法检查组关于检查《中华人民共和国水法》实施情况的报告[R].2016.