

· 研究进展 ·

旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状与展望*

康绍忠¹ 霍再林¹ 李万红^{2**}

(1. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083;
2. 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部, 北京 100085)

[摘要] 本文简述了旱区农业水资源利用所面临的挑战, 从作物高效用水理论与技术、农业水循环及其生态环境效应、旱区农业高效用水与绿洲稳定性的关系等方面综述了旱区农业高效用水研究现状及进展, 聚焦了旱区农业高效用水及生态环境效应的研究前沿与科学问题, 并提出了未来3—5年的相关科学目标和重点方向资助建议。

[关键词] 农业高效用水; 生态环境; 旱区; 现状与展望

我国旱区占国土面积的1/3, 水资源极度短缺, 农业用水占总用水85%以上。长期以来, 尽管旱区农业节水取得较大发展, 但与社会发展所提出的减少农业灌溉用水要求还相差甚远。同时, 长期的农业节水却引发了土壤次生盐渍化、区域生态环境退化等负面问题。因此, 进一步研究农业高效用水及生态环境效应, 对于创新农业高效用水理论与方法, 保障区域生态环境健康具有重要的现实意义。为了凝炼旱区农业高效用水及生态环境响应的关键科学问题, 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部、管理科学部和政策局于2015年7月2—3日举办了主题为“旱区农业高效用水及生态环境效应”的第139期“双清论坛”, 来自全国20所高校和科研单位的50余名专家应邀参加了本次论坛。与会专家通过充分深入的研讨, 凝炼出该领域的重要关键科学问题, 并提出了相应的国家自然科学基金资助建议。

1 旱区农业高效用水的现状与挑战

我国旱区农业灌溉是用水大户, 水资源已成为制约旱区经济发展及生态环境健康的关键因素, 破解旱区“水危机”的关键是实现农业高效用水。在我国耕地面积逼近18亿亩“红线”, 粮食需求呈刚性增长及水资源严重短缺的背景下, 突破粮食增产的“水

瓶颈”, 实施农业节水, 大幅度提升农业用水效率, 实现农业高效用水已成为必然选择。近年来, 我国农业节水的发展得到了党中央和国家领导人前所未有的高度重视。2014年习近平总书记提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期治水思路, 2015年2月10日在中央财经领导小组第九次会议上再一次指出“保障粮食安全, 要加快转变农业发展方式, 推进农业现代化, 既要实现眼前的粮食产量稳定, 又要形成新的竞争力, 注重可持续性, 增强政策精准性。保障水安全, 关键要转变治水思路, 按照‘节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力’的方针治水, 统筹做好水灾害防治、水资源节约、水生态保护修复、水环境治理”。我国连续12个中央1号文件都要求把农业节水作为重大战略举措。《国家中长期科技发展规划》已将“节水农业”列入优先发展领域, 2012年印发的《国家农业节水纲要(2012—2020年)》, 对农业节水提出了明确的发展目标和要求。2014年国务院确定了当前至“十三五”我国农业节水260亿方, 建设节水灌溉农田7800万亩的重大水利工程, 迫切需要农业节水增效技术给予支撑。为此, 我国制定了2020年农业灌溉水利用率达0.55以上的战略目标, 但在现有农业用水方式下大规模提升水效率已遇到了技术瓶颈, 依靠传统的工

收稿日期: 2016-01-27; 修回日期: 2016-03-14

* 本文内容根据第139期“双清论坛”的讨论内容整理。

** 通信作者, Email: liwh@nsfc.gov.cn

程节水技术难以突破用水效率提升的“天花板”。此外,传统的农业用水方式引发了突出的生态环境问题,倒逼农业生产必须加快实现农业高效用水与绿色生产,保护生态环境。总之,农业高效用水是保障粮食安全、水安全、生态安全的战略需要,是促进农业节本提质增效、实现农业可持续发展的关键所在,是适应农业生产方式转变、助力农业现代化的迫切要求。

旱区水资源短缺,且对气候变化及强人类活动敏感。我国西北旱区部分区域过度的农业用水已经造成了地表生态环境的恶化等问题,如甘肃河西走廊黑河流域、石羊河流域,新疆塔里木河流域中游农业用水增加导致了下游来水减少,地下水位下降、地表生态退化、土壤荒漠化等问题。尤为重要的是,我国西北旱区是国家战略“一带一路”中陆上丝绸之路的核心区域,保障该区域农业可持续发展、生态环境健康具有重要的战略意义。

2 旱区农业高效用水及生态环境效应研究现状

农业高效用水及生态环境效应是涉及水利工程、农学、生态学、气象学等多个学科交叉的研究领域,关键问题在于作物高效用水理论与技术、农业水循环及生态环境效应、农业高效用水与绿洲生态稳定性关系等方面。

2.1 作物高效用水理论与技术

作物高效用水是旱区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进展^[1,2]。

基于作物生命需水过程的节水理论成为了国内外研究的热点,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^[3]。

作物用水过程的量化表征成为实现作物高效用水的重要手段^[4]。其一是以植物生理为基础,逐渐加深了对叶片尺度光合—气孔—蒸腾耦合机理的认

识,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^[5];其二是在深入探讨土壤—植物—大气连续体(SPAC)中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。

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^[6]。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,以形成实用的综合调控技术^[7]。在此基础上,基于农田土壤水肥与作物水分养分实时监测进行变量灌溉施肥已成为现代精准灌溉的发展趋势^[8]。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^[9]。

2.2 农业水循环及生态环境效应

农业水循环是农业生产力的主要驱动过程,其伴生的多尺度水盐碳氮及生态环境过程影响着旱区农业的稳定发展。相关过程已从定性研究逐渐向定量方向发展,已从单一的农田水循环逐渐扩展到渠系、灌区乃至绿洲的尺度。

在农田尺度,Philip 提出 SPAC(Soil Plant Atmosphere Continuum)的概念^[10],奠定了具有学科交叉特点的农田水转化研究的理论基础。SPAC 系统物质通量研究是当今国际学术界的热点之一,相关研究主要集中于水及其伴生碳氮盐等物质的耦合过程及量化表征。旱区农田水循环伴生的盐分及养分等过程是决定农业生产力的关键,旱区盐分累积及养分迁移等对农业节水的响应成为该方面研究的热点,相关研究多集中于小尺度试验观测。在地下水浅埋条件下,潜水蒸发的存在使得农田水循环变得复杂,土壤盐渍化的风险加剧。此外,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,农业节水引起了区域水循环的改变,导致地下水位下降。

农业水循环及伴生过程的数学模型已成为相关研究的主要手段。目前,农田水循环过程的研究方法主要有土壤水量平衡模型、试验监测、数值模拟等。基于SPAC水分传输机理,包括根区土壤水分动态模拟、作物根系吸水模拟和蒸发蒸腾三个子系统,耦合水量平衡与能量平衡动态过程的农田SPAC模型已成为热点^[11]。随着计算机技术的发展,基于土壤水分运动机理(甚至涵盖SPAC水分运动过程)的数值模拟软件得到迅速开发,代表性的常用软件有ISAREG、SWAP、HYDRUS系列、WAVE等,且多数模型已耦合了水分运动、盐分及养分等其他物质的迁移转化。在此基础上,将作物生长模型与SPAC系统进行全过程耦合已成为农田水循环及伴生过程量化表征的发展趋势。水分不仅是碳氮循环与转化的重要环境要素,而且水循环与碳氮过程存在多层面的耦合。在农田尺度,叶气界面、土气界面、根土界面均存在水碳氮的耦合作用,水氮碳耦合作用机理成为水科学、生物地球科学及农业科学领域交叉研究的热点^[12]。

对于区域尺度,基于分布式水文模型的方法研究农业水循环是当前发展方向。自1966年第一个水文模型SWM问世以来^[13],很多学者根据不同研究问题的侧重点,相继开发了相应的水文模型^[14]。例如PRMS、TOPMODEL、SHE等一些基于物理概念的中小尺度区域水文模型已得到广泛应用^[15]。随后提出了耦合地表水与地下水的水文模型SWAT^[16],目前该模型已成为水文学领域研究地表水、地下水相互关系应用最广泛的分布式水文模型之一。在国内,清华大学开发了适应干旱区绿洲特点的散耗型水文模型^[17],该模型以水量平衡为中心,将河道来水、用水及输水,渠系的引水和输水,水库及地下水对水量的人工和自然的调蓄,灌溉地与各类非灌溉地的耗水及其相互的水量转化联系等综合成为一个有机的系统,从而进行水量转化和消耗的模拟分析。但是,该模型属于概念模型,缺乏对区域尺度水转化过程的动态分析。

采用多尺度水循环耦合模型研究农业用水对区域生态的影响,探讨灌溉的可持续性已成为国际研究的热点^[18]。此外,气候变化对农业耗水与灌溉农业对局部气候的影响及二者的互馈关系已成为国际

研究的热点,已有研究表明长期灌溉会导致局部湿度增加,引起区域农业耗水改变^[19]。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生产力的估算是目前国际研究的方向^[20]。

2.3 旱区农业高效用水与绿洲生态稳定性的关系

旱区水资源短缺,其社会经济和生态系统对水资源具有高度依赖性。旱区生态水文过程对农业用水活动的响应敏感,农业高效用水减少了对天然植被赖以生存的地下水的补给,影响绿洲生态稳定性。农业高效用水背景下维持绿洲生态稳定的适宜节水水平问题及适宜灌溉规模、灌溉用水与生态稳定性的互馈、绿洲尺度及流域尺度水资源优化配置是该方向研究的热点。

绿洲稳定性是旱区生态系统最重要的特征之一,事关旱区人类生存和经济的可持续发展。绿洲稳定性研究方法有野外生态学方法和数学生态学方法。Jiao等考虑绿洲水资源对植被的影响,建立了结合阶段结构和脉冲灌溉的绿洲植被退化模型,证明了模型的解及系统持续性条件^[21]。生态学家主要从生态系统、景观尺度评价生态稳定性,较少从流域水循环过程与生态系统演变的相互作用及反馈关系评价绿洲稳定性。在水资源利用对绿洲稳定性的影响及互馈研究方面,国外从绿洲灌溉制度、水资源利用对绿洲的影响、水资源管理与绿洲发展以及绿洲承载力等不同角度研究了绿洲生态系统稳定性^[22]。然而,缺乏从机理出发,揭示水资源利用与绿洲稳定性的关系。在绿洲适宜灌溉规模研究方面,基于水热平衡原理和绿洲生态系统圈层结构,研究一定可用水资源和一定绿度条件下的适度绿洲规模成为趋势。现有研究尚未考虑农业节水措施对人工绿洲规模的影响以及对区域水转化过程影响进而对生态植被的影响,不能反映绿洲农业空间分布格局的动态变化。同时,对气候变化引起的绿洲可用水资源的变化等不确定性也考虑不足。在旱区农业水资源配置方面,以静态水量的配置较多,很少考虑气候变化影响下来水的不确定性以及人类用水影响下地下水可开采量的变化,不能反映水转化过程的动态特点以及生态环境效应,需要研究考虑灌区地表水、地下水转化过程的模拟与水资源优化的耦合模型^[23],研究如何通过水的配置和调控,创建多功能的农业生态系统^[24],增加生态系统间的协同效应。

3 旱区农业高效用水及生态环境效应研究前沿、科学问题

经过深入、充分的主题研讨,本次论坛凝练和提出了以下我国在该研究领域急需关注和解决的重要基础科学问题。

(1) 作物生命需水过程与调控机理

研究作物不同尺度生命需水信息的科学探测方法,识别作物不同尺度生命健康需水状态,明确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;解析作物生命需水对变化环境的响应与适应机制,实现变化环境下多尺度作物生命需水信息的耦合表征;明晰旱区水肥盐综合调控机制,形成面向旱区节水调质的作物生命需水多过程协同调控理论与方法,实现作物精量高效灌溉及用水效率协同提升。

(2) 绿洲水循环及伴生过程表征

认识旱区农田水分耗用过程对不同节水措施的响应关系,明晰长期节水条件下作物根层土壤盐分累积规律与调控机制,揭示不同节水条件下水盐氮耦合作用机理及生态环境响应规律;建立节水条件下农田水盐氮耦合过程的定量表征模型,提出农业节水对旱区生态环境的评价方法;突破绿洲水循环与物质(盐、碳、氮)循环的多尺度及多过程耦合关键问题;明确气候变化对灌区水循环和农业用水的影响。

(3) 农业水资源利用的生态环境效应及绿洲稳定维持机制

认识农业用水—农业生产—生态环境动态过程,深入研究农业用水对水循环—近地气候条件的驱动作用及对农业生产与生态环境的反馈作用,揭示多尺度旱区农业高效用水的生态环境响应机理及互馈机制;研究环境变化下农业水资源的动态配置与调控机制,建立变化环境下区域耗水时空格局优化理论与方法;明确生态环境稳定的区域农业用水阈值,形成旱区面向水产平衡、水地平衡的适水种植模式。

4 未来3—5年科学目标、资助重点及立项建议

基于以上提出的科学问题,未来3—5年旱区农业高效用水及生态环境效应的研究目标是:探索挖掘作物高效用水潜力的新途径,揭示多尺度水循环及伴生生态环境演变的耦合机理,提出其量化表征方法,明晰农业水资源利用与绿洲生态稳定相互作用

机制,从农业高效用水机理、水循环及伴生过程响应、绿洲生态健康调控等方面提升旱区农业高效用水与生态环境效应的理论与技术水平。资助重点应集中在以下几个方面:作物生命需水过程及对变化环境响应、绿洲农业水循环与时空分异、农业水效率时空特征与协同提升机制、绿洲生态环境对农业用水响应与适应、农业节水高效与生态健康多目标下水资源多维临界调控。

随着社会经济的发展,旱区农业可用水量将进一步减少,农业高效用水势在必行。农村劳动力的减少、农业生产成本的上升呼唤着现代农业高效用水技术的发展。然而,大面积的农业高效用水所引起的生态环境问题突显出区域农业高效用水可持续性的重要。因此,在我国实施“一带一路”的战略背景下,开展旱区农业高效用水及生态环境效应方面的研究,加速现代农业高效用水的升级,保障旱区农业高效用水可持续性显得尤为重要。我国从“九五”开始关注农业高效用水的研究,相继启动了相关的“863”计划、科技支撑计划课题,形成了农业高效用水的系列相关技术,培养了农业高效用水研究队伍及平台。然而,农业高效用水涉及作物用水、农业水文、生态环境多学科的交叉问题,需要对旱区农业高效用水及生态环境效应前沿科学问题开展研究,进一步挖掘农业节水潜力,创新农业高效用水理论与技术,实现旱区农业高效用水与生态环境健康的双赢。因此,建议尽快启动该领域的重大项目或项目群,以集中支持“旱区农业高效用水与生态环境效应”的基础研究。

参 考 文 献

- [1] David BL, Michael JR, Wolfram Schlenker, et al. Greater Sensitivity to Drought Accompanies Maize Yield Increase in the U. S. Midwest. *Science*, 2014, 344:516—519.
- [2] Shyam N, Jeff J, Wang C. Efficiency of Irrigation Water Use: A Review from the Perspectives of Multiple Disciplines. *Agronomy Journal*, 2013, 105:351—363.
- [3] Steinemann S, Zeng Z, McKay A, et al. Dynamic root responses to drought and rewatering in two wheat (*Triticum aestivum*) genotypes. *Plant and Soil*, 2015, 391:139—152.
- [4] Carr M, Lockwood G. The water relations and irrigation requirement of cocoa: a review. *Experimental Agriculture*, 2011, 47:653—676.
- [5] Roland P, Gregor H, Joseph A. Control of transpiration by radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107:13372—13377.
- [6] Davies W, Wilkinson S, Loveys B. Stomatal control by chemical signaling and exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phycologists*, 2002, 153: 449—460.

- [7] Passioura J. Environmental biology and crop improvement, *Functional Plant Biology*, 2002, 29: 537—546
- [8] Nathaniel D, Mueller JS, Gerber MJ, et al. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*, 2012, 490:254—257.
- [9] Shaughnessy S, Evett S, Colaizzi P, et al. Dynamic prescription maps for site-specific variable rate irrigation of cotton. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 123—138.
- [10] Philip JR. Plant water relations: some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology*, 1966, 17:245—268.
- [11] 康绍忠, 刘晓明, 高新科, 等. 土壤—植物—大气连续体水分传输的计算机模拟. *水利学报*, 1992, 3: 1—12.
- [12] Philip RG, Tom W, Ron J, et al. A multi - criteria based review of models that predict environmental impacts of land use - change for perennial energy crops on water, carbon and nitrogen cycling. *Biogeochemistry*, 2013, 114:41—70.
- [13] Crawford NH, Linsley RK. Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV. Stanford Univ, Palo Alto, Calif, Tech Rep No. 39, 1966.
- [14] Leavesley GH, Stannard LG. The precipitation-runoff modeling system-PRMS. In: Singh VP (Eds.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 281—310, 1995.
- [15] Beven KJ, Lamb R, Quinn PF, et al. TOPMODEL. In: Singh VP (Eds.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Colorado: Highlands Ranch. , 1995, 627—668.
- [16] Arnold JG, Muttiah RS, Srinivasan R, et al. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, 2000, 227: 21—40.
- [17] 胡和平, 汤秋鸿, 雷志栋, 等. 干旱区平原绿洲散耗模型水文模型. *水科学进展*, 2004, 15:140—145.
- [18] Schoups G, Hopmans J, Young C, et al. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2005, 102: 15352—15356.
- [19] Céline B, David L. Empirical evidence for a recent slowdown in irrigation-induced cooling, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104:13582—13587.
- [20] Schmitter P, Frohlich HL, Dercon G, et al. Redistribution of carbon and nitrogen through irrigation in intensively cultivated tropical mountainous watersheds. *Biogeochemistry*, 2012, 109:133—150.
- [21] Jiao J, Cai S, Li L. Dynamics of an oasis vegetation degradation model with stage structure and impulsive irrigation in arid area. *Journal of computational and applied mathematics*, 2015, DOI 10.1007/s12190-015-0903-9.
- [22] Luis G, Alfredo G, Ana I. Strategies to reduce water stress in Euro-Mediterranean river basins, *Science of the Total Environment*, 2016, 543: 997—1009.
- [23] Safavi H, Esmikhani M. Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater: Application of Support Vector Machines (SVMs) and Genetic Algorithms. *Water Resources Management*, 2013, 27:2623—2644.
- [24] Gordon L, Finlayson CM, Falkenmark M. Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services, *Agricultural Water Management*, 2010, 97:512—519.

High-efficient water use and eco-environmental impacts in agriculture in arid regions: advance and future strategies

Kang Shaozhong¹ Huo Zailin¹ Li Wanhong²

(1. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083;

2. Department of Engineering and Material Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

Abstract We briefly introduced the challenges in agricultural water resources use in arid regions, and reviewed the state and progresses achieved in high-efficient water use in agriculture in arid regions in the following aspects: (1) theories and technologies in crop high-efficient water use, (2) water cycle in agriculture and its associated environmental impact, (3) the interrelation between high efficient water use in agriculture and oasis stability. Based on the review, we presented research front and scientific questions regarding the high-efficient water use in agriculture in arid regions and its potential ecological and environmental impacts, and put forward scientific goals and suggestions on the key funding areas in 3—5 years ahead.

Key words high-efficient water use in agriculture; ecology and environment; arid region; advance and future strategies