

· 学科进展与展望 ·

粮食生产中水资源高效利用的科学问题

——第74期“双清论坛”综述

康绍忠^{1*} 李万红² 霍再林¹

(1 中国农业大学, 北京 100083; 2 国家自然科学基金委员会, 北京 100085)

[摘要] 粮食生产中的水资源高效利用是国际上研究的热点之一。国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)近期召开了“水资源高效利用与保护”为主题的第74次双清论坛,其中“粮食生产中的水资源高效利用”是此次论坛的主要研讨内容之一。会议围绕粮食生产中水资源利用的工程背景和科学需求进行了讨论,凝练出了该领域需要解决的关键科学问题,包括作物理想耗水与调控阈值、农田水效率多过程驱动与协同提升、区域水资源水联网精准调配、农业高效用水与生态环境的互馈机制,并就开展该领域基础科学研究和建设农业水资源高效利用试验监测网络及数据平台等提出了建议。

[关键词] 水资源, 高效利用, 粮食生产, 科学问题, 双清论坛

水资源紧缺是一个世界性的问题,干旱缺水和水污染已成为世界农业可持续发展的重要制约因素。水资源高效利用与保护已成为当前全球关注的热点问题。明晰水的循环转化规律与消耗机理、通过科技进步与管理改革提高水的利用效率,改善水环境是解决当前水危机的根本途径。农业用水约占全球用水总量的70%,水资源高效利用的核心是农业水资源高效利用。开展水资源高效利用与保护重大科学问题的研究是探寻全球水危机破解之道的现实需求,是水利学科发展的必然趋势。为此,自然科学基金委于2012年5月23日在宜昌召开了主题为“水资源高效利用与保护”的第74次双清论坛。

本次论坛由清华大学王光谦院士、中国农业大学康绍忠院士、河海大学王超院士共同担任论坛主席,自然科学基金委工程与材料科学部王光谦主任、黎明常务副主任、政策局和管理科学部的同志出席了会议。参加会议的有来自清华大学、中国农业大学、武汉大学、河海大学、北京师范大学、西安理工大学等20余家单位的50余名专家。中国农业大学康绍忠院士作了“粮食生产中的水资源高效利用”的主题发言,与会人员对此进行了充分的讨论,分析了开

展粮食生产中水资源高效利用研究的必要性,凝练了重大科学问题,形成了拟采取的研究思路等。

1 工程背景和科学需求

1.1 工程背景

随着人口增加,保障粮食安全已成为世界可持续发展的首要问题,2030年世界人口将达83亿,粮食需求达30亿吨,按现有用水效率计算,农业灌溉用水将增加36%(现有2810 km³),缺口达1012 km³,水资源短缺已成为全球粮食安全的主要制约因素^[1]。我国水资源紧缺,人均2100 m³,仅占世界平均水平的28%。我国以占全球6%的淡水资源、9%的耕地,养活了全球21%的人口,在占全国耕地49%的灌溉地上生产了全国75%的粮食和90%以上的经济作物,农田灌溉功不可没^[2]。然而,我国粮食增产需求与农业可供水量短缺矛盾突出。2030年我国人口将达到16亿,粮食需求将达6.4亿吨^[3],按现有农业用水效率计算,尚缺水约800亿m³。2020年全国新增千亿斤粮食规划,北方缺水区域需贡献65%^[4]。然而,由于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

* 中国工程院院士。

本文于2012年7月31日收到。

配,我国作物水分生产率远低于发达国家。缓解粮食增产需求与农业可供水量短缺矛盾主要依靠提高农业用水效率。另一方面,世界农业用水大约占总用水量的70%,我国农业用水约占总用水量的63%,水资源高效利用的核心是农业水资源高效利用,继续提高农业用水效率呼唤着农业高效用水新理论与新技术的诞生。

与此同时,农业高效用水也是保障国家粮食安全与水安全的重大需求和学科热点。2011年和2012年中共中央一号文件对农业高效用水给予了足够关注,国家中长期科技发展纲要(2006—2020)重点领域将综合节水列为优先主题,自然科学基金委将“变化环境下的水资源高效利用”列为“十二五”发展规划跨学科优先领域。此外,水与粮食安全已成为世界各国共同关注的重大议题,2012年世界水日的主题为水与粮食安全,面对保障粮食安全与水资源短缺的现实,水资源农业高效利用也已成为相关国家和国际组织重大研究计划的主题。德国联邦食品、农业和消费者保护部正在牵头启动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。国际农业研究咨询联盟(CGIAR)也在世界七大典型流域组织实施了提高农作物的用水效率的“挑战计划”(CP)。世界粮农组织(FAO)近年来启动了多项农业水资源高效利用方面的项目,旨在提高农业用水效率,解决粮食增产与水资源短缺这一矛盾。因此,围绕粮食生产中水资源高效利用的主要环节系统地开展有关基础研究,促进相关领域研究前沿的学科交叉,以期引领农业水资源高效利用这一研究领域的国际前沿,跨越式提高我国在该领域的研究水平和地位,为保障我国粮食安全和供水安全提供理论和技术支持,具有重要的科学意义与应用前景。

1.2 现有理论与技术发展水平

作物用水、农田灌水、区域配水是粮食生产中水资源高效利用的3个重要过程(环节),目前已分别形成了较为成熟的核心理论与技术。

(1)对于作物用水环节,作物生理学家与农田水利学家分别以不同思路开展了深入研究,分别形成了成熟的作物用水理论。前者以植物生理为基础(如英国兰卡斯特大学),逐渐对叶片尺度光合-气孔-蒸腾耦合机理有了深入的认识,揭示了该过程与环境因子的相互关系,对作物光合产物形成过程与生境因子的关系进行了探讨^[5],如Tuzet等(2003)建立了叶片气孔-光合-蒸腾的作物生理学模型^[6]。后

者以农田水转化为中心,深入探讨了水分在土壤-植物-大气连续体(SPAC)的传输与转化过程,特别是对于叶气界面,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,实现在SPAC水转化过程模拟^[7]。在作物尺度,作物生长模型已成为研究作物水分关系的重要工具,代表性的有美国USDA-ARS及澳大利亚CSIRO发展的基于作物生长参数经验关系的模型(如DSSAT模型、APSIM模型)和荷兰瓦赫宁根大学发展的基于作物生理生化过程的物理性模型(如WOFOST模型、MACROS模型)^[8]。

(2)对于农田灌水环节,目前多以水量平衡为核心,实现精细灌溉,减少渗漏损失为主。以色列微灌技术是该方面最为先进的灌溉技术,已在全球得到广泛应用。利用植物生理特性改进植物水分利用效率的研究将会更加引人关注。近年来,国内外提出了许多新的概念和方法,如限水灌溉、非充分灌溉、调亏灌溉、分根区交替灌溉等,对由传统的丰水高产型灌溉转向节水优产型灌溉,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^[9]。目前该方面的研究已从技术层面转向机理的揭示,英国兰卡斯特大学Bill Davies小组已研究证明根源信号ABA控制叶片气孔的开闭,从而适应根区干旱^[10]。此外,国际上以作物营养、土壤水为优势的研究机构(如美国康奈尔大学)逐渐开始研究作物生境过程的协同调控技术,充分挖掘根区水土肥气热对作物生长的协同效应,从而形成实用的综合调控技术^[11]。

(3)对于区域配水环节,高新技术在现代化管理中的应用日益广泛,3S技术的应用将全面提升农业节水管理的现代化水平。在灌区用水管理中,综合各种预测技术、优化技术的灌溉用水计算机管理系统已在全球大面积应用,使灌区的灌溉用水实现了由静态用水向动态用水的转变,为提高灌区水资源的利用率提供了技术保障。为实现渠系优化配水的要求,应用计算机技术的渠道水量、流量实时调控的研究也在国际上逐步兴起。灌区用水管理系统方面,已逐步转向研究将数据库、模型库、知识库和地理信息系统有机结合的灌区节水灌溉综合决策支持系统。具有代表性的是西班牙CSIC的Lecina小组建立的集作物生长、农田土壤水分运动、渠道水流过程等的灌区水管理模型,大大提高了灌区配水的效率^[12]。

1.3 存在的问题及科学需求

(1) 传统的按水量平衡供水的灌溉理论面临严峻挑战。传统的充分灌溉理论按土壤水平衡给田间供水、没有考虑作物自身的生理调节功能、水分利用效率较低。大量研究结果表明,植物各个生理过程对水分亏缺的反应各不相同,而且水分胁迫可以改变光合产物的分配。同时一些研究还表明,水分胁迫并非完全是负效应,特定发育阶段、有限的水分胁迫对提高产量和品质是有益的。因此,需要发展基于作物生命需水过程的灌溉理论,以期充分提高作物用水效率。

(2) 迫切需求传统的节水高产理论向节水调质高效灌溉理论转变。过去该方面的研究主要集中在对产量影响方面,对品质影响研究较少。某些作物产量随灌水量增加而增加,但品质随灌水量增加而下降。探讨基于需水信息和水分-产量-综合品质-效益模型的作物节水调质高效灌溉理论与决策方法及灌溉控制阈值等科学问题,将会推动以作物水分-产量模型为基础的农田非充分灌溉理论,向以综合考虑水分-产量-品质耦合关系为基础的作物节水调质高效灌溉新理论的发展。

(3) 缺乏农田水效率协同提升的理论与方法。农田水效率取决于作物光合、耗水及灌水等多过程,同时受水土肥气等多因素的影响。目前关注的是作物光合、农田耗水、田间灌水等单一过程效率的提升或单因素对农田水效率的影响,很少涉及多过程、多因素对农田水效率的协同提升作用。如何实现多过程及多因素对农田水效率的协同提升是未来需要重点研究的方向。

(4) 现有灌溉配水方法缺乏高效机制。目前农业灌溉配水多依照静态灌溉制度调配,缺少需水信息获取及实时预报,缺乏考虑区域不同水源的时空变异及供需水时空适配,严重制约了配水效率的整体提升。如何发掘灌溉配水的高效机制,实现实时感知和动态配水是提高区域水资源高效利用的关键所在。

2 重大科学问题

论坛对“粮食生产中的水资源高效利用”主题凝练了4个重大科学问题:

(1) 作物理想耗水与调控阈值。基于已发现的光合与蒸腾对气孔开度响应不同这一现象,通过(叶片)气孔调节、(单株)株型调控、(群体)理想冠层构建,减少奢侈蒸腾,实现节水与增产统一。解析作物不同基因型与对水分的响应特征,定量描述冠层光合、蒸腾及干物质累积与分配过程,建立作物生长状态

方程,以期揭示作物理想耗水过程,并进行定量表征。

(2) 农田水效率多过程驱动与协同提升。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,实现农田水效率多过程耦合的定量表达,确定农田土壤适宜水分过程。

(3) 区域水资源水联网精准调配。基于作物理想耗水理论和水联网感知的实际耗水过程,利用作物生长状态方程,开发实时多阶段动态调整方法,获取农田作物未来最佳需水过程曲线。集合水文模型和水联网实时感知系统,提高多水源来水过程的预报精度,量化来水的不确定性及其时空分布。揭示输配水(大时滞网络)系统的动力响应机理,建立相应的模拟模型,利用水联网云计算方法,探索模拟一优化机制与过程控制方法。

(4) 农业高效用水与生态环境的互馈机制。研究水资源高效利用的生态环境效应在微观及宏观层面表现及生态环境对农业耗用水的反馈作用机理,获得面向生态环境健康的农业高效用水阈值。研究农业高效用水与生态环境二者相互作用的物理、生物、化学过程,实现农业高效用水对生态环境水、碳、氮过程影响的耦合过程定量表征。

3 研究思路和内容

围绕4个科学问题,从作物耗水微观机理入手,采用理论分析、田间定位试验、区域联网监测等方法,开展作物理想耗水、农田用水效率协同提升、区域水转化与调配、农业高效用水的生态环境效应、区域水联网平台集成等5部分研究内容。在作物高效用水理论层面,基于作物高效用水生理生态机制及多因素协同效应的研究,剖析作物理想耗水状态并对其进行定量描述,建立普适性作物高效用水理论。研究作物对逆境响应及高效用水的机制,明确作物高效用水主控因子,阐明多因素对作物高效用水的协同效应,发展作物高效用水的生理生态调控机制,创新提升作物高效用水的理论及方法。在区域水资源优化配置技术层面,发展基于量质耦合的农业水资源调配方法,并兼顾生态健康与环境保护,引入现代信息技术,形成水资源集成调控与管理技术。此外,本研究应关注农业高效用水的生态环境效应,重点明晰农业高效用水对生态环境的影响机制,定量表征农业生态、水转化及其伴生过程的耦合作用,探索生态环境变化与农业耗水过程的相互作用机理。

在上述研究的研究上,以模块化的集成思路,实现区域尺度农业耗水-水转化-输配水过程的精确表达,提升对农业高效用水过程的认识及调控能力,实现对区域农业水资源精细化管理的决策支持,建设区域水资源高效利用的水联网平台。

4 若干建议

本次论坛提出加强“粮食生产中水资源高效利用”研究的建议如下:

(1) 开展粮食生产中水资源高效利用基础性科学研究。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”、科技支撑计划课题,形成了农业高效用水的系列支撑技术,为开展该主题的研究培育了研究队伍及平台。然而,过去的科技计划多针对我国农业节水过程的适用技术而开展,尚未从粮食生产多过程的角度对水资源高效利用的基础科学问题进行系统研究。鉴于加强农业水资源高效利用研究的基础性和紧迫性,加之在该研究领域已具备了较好的研究基础和人才队伍,建议自然科学基金委尽快启动该领域的重大研究计划,大力支持“粮食生产中的水资源高效利用”的基础研究。

(2) 建设农业水资源高效利用试验监测网络及数据平台。长期以来,我国农业高效利用试验监测网络不尽完善,相关研究主要针对局部区域而进行,各区域试验数据缺乏监测标准及统一管理,直接导致试验成果产出效率低,研究成果地域异差性大,难以支撑农业高效用水技术的推广。为进一步深入开展粮食生产中水资源高效利用,促进研究成果的适用性,建议建设全国及区域性的农业水资源高效利

用试验监测网络及其数据平台,对各站点农业用水过程、指标采取统一监测方法、步长,有利于监测数据的分析,为开展相关重大研究提供数据支撑。

参 考 文 献

- [1] Food security analysis. <http://www.wfp.org/food-security>, 2012.
- [2] 陈雷. 大力加强农田水利保障国家粮食安全. 中国水利, 2012, 卷首.
- [3] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的粮食问题. 1996.
- [4] 中国发展改革委. 全国新增 1000 亿斤粮食生产能力规划 (2009—2020 年). 2009.
- [5] Carr M, Lockwood G. The water relations and irrigation requirements of cocoa: a review. *Experimental Agriculture*, 2011, 47, 653—676.
- [6] Tuzet A, Perrier A, Leuning R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26:1097—1116.
- [7] Coelho M, Villalobos F, Mateos L. Modeling root growth and the soil-plant-atmosphere continuum of cotton crops. *Agricultural Water Management*, 2003, 60:99—118.
- [8] Wang E, Smith C. Modelling the growth and water uptake function of plant root systems; a review. *Australian Journal of Agricultural Research*, 2004, 55:501—523.
- [9] Sepaskhah A, Ahmadi S. A Review on partial root-zone drying irrigation. *International Journal of Plant Production*, 2010, 4:241—258.
- [10] Davies W, Wilkinson S, Loveys B. Stomatal control by chemical signalling and the exploitation of this mechanism to increase water use efficiency in agriculture. *New Phytologist*, 153:449—460.
- [11] Passioura J. Environmental biology and crop improvement. *Functional Plant Biology*, 2002, 29:537—546.
- [12] Lecina S, Playan E. Model for the simulation of water flows in irrigation districts. I: Description. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering—ASCE*, 2006, 132:310—321.

SCIENTIFIC ISSUES ON HIGH EFFICIENT UTILIZATION OF WATER RESOURCES IN FOOD PRODUCTION PROCESS —Summary of the 74th Shuangqing Forum of NSFC

Kang Shaozhong¹ Li Wanhong² Huo Zailin¹

(1 China Agricultural University, Beijing 100083; 2 National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

Abstract The high efficient utilization of water resources in food production process has been one of the international research focuses. The National Natural Science Foundation recently held the 74th Shuangqing Forum themed as “high efficient utilization and protection of water resources. One of the main content is high efficient utilization of water resources in food production process”. Centering on issues as the background and scientific requirement of utilization of water resources in food production process, key scientific issues are compacted and discussed in the form, including ideal crop water consumption and regulation thresholds, multi-processes driven and cooperative promotion mechanism of water use efficiency in field,

(下转第 329 页)

3.2 优先研究领域

近期,建议选择下列优先研究领域:

(1) 基础燃烧理论。优先研究方向:低碳燃料、生物质燃料和混合燃料的着火特性和层流燃烧;湍流-复杂化学反应相互作用和湍流多相燃烧的理论模型及数值模拟;爆震燃烧模式理论;燃烧理论在工程实际燃烧问题中的应用。

(2) 燃烧化学反应动力学。优先研究方向:不同温度和压力条件下基元反应速率常数的测量和计算;实用运输燃料及其替代燃料组分、生物质燃料、含氮燃料的详细燃烧动力学模型发展;固体推进剂和吸热型碳氢燃料的热解和详细化学反应动力学模型发展;金属粒子(铝、硼)详细动力学模型发展;新型高能物质的燃烧机理和动力学模型发展;新型燃烧技术中的化学反应动力学研究。

(3) 气、液燃料燃烧。优先研究方向:内燃机新型燃烧理论与燃烧控制;燃料着火与火焰传播;喷雾特性与雾化机理;石油替代燃料发动机燃烧与排放

基础理论;燃气轮机燃烧基础理论与燃烧控制技术;航空及特种燃烧发动机理论及相关基础;微尺度、微重力燃烧基础理论及其控制。

(4) 固体燃料燃烧。优先研究方向:煤的燃烧;燃煤污染物的形成机理和控制技术;基于煤炭的高效清洁利用技术;其他固体燃料的高效燃烧及利用;固体燃料燃烧及利用过程的理论及数值计算;微尺度条件下固体燃料燃烧理论及控制。

(5) 火灾科学。优先研究方向:复杂受限空间内火蔓延和烟气输运的机制与规律;开放空间大尺度火灾的发展与突变规律;特殊环境和条件下火灾防治的热物理基础问题;能源利用中的火灾基础科学问题等。

(6) 燃烧诊断。优先研究方向:层流火焰污染物的光谱和质谱诊断;基于现代分析工具的原位诊断技术的发展;X射线瞬时成像技术和X射线小角/广角散射等新型燃烧诊断技术的发展;适用于工业燃烧过程及新型燃烧装置的燃烧诊断技术的发展。

DEVELOPMENT OF CHINA'S FUNDAMENTAL RESEARCH IN COMBUSTION

Liu Tao¹ Ji Jun¹ Qi Fei² Yang Lizhong²
Xu Minghou³ Huang Zuohua⁴ Yao Mingfa⁵ Yao Qiang⁶

(1 National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085; 2 University of Science and Technology of China, Hefei 230029;

3 Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 4 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

5 Tianjin University, Tianjin 300072; 6 Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Fundamental research in combustion is crucial for the development of effective and clean combustion techniques, optimal designs of combustion-driven power devices, control of pollutant emissions from combustion, fire safety and so on, which have positive effects on China's core interests such as sustainable development of economy and national security. This paper introduces the scientific interests, the strategic significances and the research progresses in China of the fundamental research in combustion. Furthermore, long-term objectives and encouraged research areas are also suggested in this paper for the development of China's fundamental research in combustion.

Key words fundamental research in combustion, energy utilization, control of pollutant emissions, encouraged research areas

(上接第 324 页)

regional water resources allocation based on water networking technology, interaction mechanism between agricultural water use and eco-environments. Suggestions are proposed on carrying out basic scientific researches and establishing experimental and monitoring networks for agricultural water resources utilization and data platform.

Key words water resources, high efficient utilization, food production, scientific issues