

现代节水农业技术发展趋势与未来研发重点

吴普特, 冯浩, 牛文全, 赵西宁

(西北农林科技大学, 中国科学院水利部水土保持研究所, 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

[摘要] 在分析我国节水农业技术发展现状与趋势的基础上, 结合现代节水农业技术发展与需求, 提出未来我国现代节水农业技术研发重点和发展方向, 即现代生物节水技术、非常规水高效安全利用技术、节水灌溉技术与装备、旱作高效用水技术与新材料、区域高效节水农业综合技术。

[关键词] 生物节水技术; 非常规水资源; 节水灌溉技术; 旱作高效用水; 技术集成

[中图分类号] S275 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)02-0012-07

20世纪是人类有史以来发展速度最快的100年, 世界人口增加了4倍, 工业生产总值增加了50倍, 但水资源消耗却增加了100多倍! 这种以资源过度消耗而换来经济快速增长的发展模式, 导致全球用水量已逼近水资源开发的最大潜力! 如何缓解日益严重的全球性水资源危机, 已成为21世纪世界各国普遍关注的重大战略性问题^[1,2]。

进入21世纪后, 随着干旱缺水态势不断加剧, 人口增长、城镇化和社会经济快速发展, 我国用水矛盾日益尖锐。农业是我国节水潜力最大的行业, 发展现代节水农业是确保我国粮食安全、水安全和生态安全的重大战略举措已经成为共识^[3~5]。我国现代节水农业发展正处在一个传统技术升级与高技术发展相互交织的关键时期, 如何在这一关键时期确定我国现代节水农业技术研发重点和发展方向, 对于我国节水农业的发展, 以及对确保我国战略水安全、生态安全与粮食安全均具有十分重要的意义。本文在分析现代节水农业技术发展现状与趋势的基础上, 结合我国现代节水农业技术需求, 提出未来我国现代节水农业技术的主要研发重点。

1 我国节水农业技术发展现状

针对水资源供需矛盾日益尖锐, 农业用水浪费严重且节水潜力巨大的现状, 我国自20世纪50年代就开始大力开发水资源, 发展农田灌溉, 并取得了举世瞩目的成就。尤其是20世纪90年代以来, 节水农业技术发展进入了一个新时期。“九五”期间, 节水农业技术与示范被列为国家科技攻关项目, 从节水灌溉新技术、水资源合理利用、主要农作物节水灌溉制度与节水灌溉设备等方面分别进行了深入与综合研究^[6]; “十五”期间, 经国家科教领导小组批准, 科技部、水利部、农业部于2002年联合启动实施了“现代节水农业技术体系及新产品研究与开发”重大科技专项, 并将其列入“八六三”高技术研究发展计划, 其重点是突破制约我国节水农业技术发展的“瓶颈”问题^[7~9]。上述项目的开展和完成对于提高我国节水农业应用基础理论研究水平、开发节水农业新产品与新材料并实现产业化起到了重要作用, 推动了节水农业领域的科技进步, 促进了国家节水目标与农民增收目标的有机融合, 为创建具有自主知识产权的现代节水

[收稿日期] 2005-09-12; 修回日期 2006-01-12

[基金项目] “八六三”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100217; 2006AA100204); 国家科技基础研究专项资助项目(2006FY210300)

[作者简介] 吴普特(1963-), 男, 陕西武功县人, 博士, 博士生导师, 西北农林科技大学教授, 中国科学院水利部水土保持研究所研究员, E-mail: Gjzwpt@vip.sina.com

农业技术体系和解决我国水资源短缺问题做出了巨大贡献。

在节水农业应用基础及前沿与关键技术创新方面,较为系统地揭示了土壤-植物-大气连续体水分、养分迁移规律和调控理论,以及作物非充分灌溉理论与模式,特别在农田水分转化规律、根冠信息传递与信号振荡、水分养分传输动态模拟、作物需水规律与计算模型及抗旱节水机理等方面取得了重大突破,为我国节水农业技术发展提供了强有力的技术储备与支撑^[10];取得的非传统水资源开发与高效利用技术、非充分灌溉与精细地面灌溉技术、节水产品激光快速成型技术等一系列成果,产生了明显的节水增产效益^[11];首次在国际上建立的节水产品激光快速研发平台,使微灌产品单循环周期由90~150 d缩短为3~5 d,成本由3~5万元降低为0.2万元,工效提高了30倍,成本仅为原来的1/20。筛选出的抗旱节水新品种在中等干旱条件下较对照产量提高10%,作物水分利用效率提高20%~40%;建立的激光控制平地自动作业技术,使土地平整精度达到2~3 cm,灌溉水利用率提高20%~30%;提出的基于作物生命需水信号的控制性分根交替灌溉技术,作物水分利用效率达2 kg/m³;研制的新型土壤固化剂集雨新材料比水泥土强度高出68%,集流效率达85%~91%,投资仅3~4元/m²;研制的植物生长营养调理剂可使生物集雨面郁蔽时间由3 a缩短为30 d,0.5 cm厚水层停留6 h不渗漏,径流量较对照提高30%。

在节水农业关键设备与重大产品研发及产业化方面成果显著,开发出温室微灌系统设备、行走式多功能蓄水保墒耕作设备、新型管材管件与量配水设备、自走式喷灌机组、新型多功能保水剂和可降解保水农膜等,初步形成了具有中国特色且具有自主知识产权的节水系列产品与成套设备,并带动新疆天业、福建亚通等一批节水龙头企业的快速发展^[12,13]。建立的滴灌管生产线,使滴灌管由1.2元/m降低到0.25元/m,滴灌带由0.15~0.2元/m降低到了0.08元/m,温室微灌系统由9 000~45 000元/hm²降低到5 250~15 000元/hm²,成本降低50%以上;采用层状硅酸盐矿物质与高分子复合物共聚工艺技术,创制出高吸水保水复合系列保水剂,具有吸液倍率高,保水能力强,抗盐性好的特点,价格由20 000元/t左右降低到9 000元/t;使用磁振荡吹膜技术,研制出的厚度为20 μm左右的全

降解保水农膜,可在一年内实现全降解,且技术性能够替代现有农膜。

在节水农业技术体系集成与示范方面,初步建立了适合我国国情和不同区域特点的现代节水农业技术发展模式。提出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个现代节水农业区域发展模式,并以此模式在我国西北、华北、东北,以及华东与南方季节性缺水地区建立了17个示范区,面积达 1.67×10^4 hm²、技术辐射 24.5×10^4 hm²,推广 1.3×10^7 hm²,节水约 24×10^8 m³,增产粮食 25×10^8 kg,增加经济产值48亿元。另外我国大田棉花膜下滴灌技术应用面积已达 33.33×10^4 hm²,雨水集蓄利用技术应用面积 200×10^4 hm²,均为世界之最^[14]。

我国节水农业技术虽具备一定的基础积累,取得了一些在生产实际中发挥重要作用的创新科技成果,但仍存在诸多重要的技术瓶颈,尚不具备为建设现代节水高效农业提供强有力的技术支撑,主要表现为:缺乏节水农业发展的基础数据资料积累和对农业用水状况的有效监测与控制;从纯基础到应用层面的应用基础研究还很欠缺;缺乏标准化、量化和集成化的农业节水综合技术体系和应用模式;节水设备与产品功能单一、性能不稳定且耐久性差,材料与工艺研究水平相对滞后;作物抗旱种质资源发掘与利用不够,缺乏高效快速鉴定评价植物抗旱性能的方法与指标;信息化技术应用水平较低,农业节水管理的信息采集、传输的可靠性差等^[15,16]。

2 现代节水农业技术发展趋势

2.1 应用生物技术充分挖掘植物本身节水潜力

利用作物生理调控和现代育种技术,从作物本身机能来提高产量和水分利用效率的生物节水技术是节水农业研究的一个热点,是实现用水从传统丰水高产型向现代节水优质高产型转变的关键性技术^[17]。发达国家十分重视利用转基因技术培育抗旱节水作物品种,如澳大利亚的小麦品种、美国的棉花品种、加拿大的牧草品种,以色列的水果品种等^[18,19]。这些品种不仅具备节水抗旱性能,还具有稳定的产量、性状和优良的品质特性。中国农业科

学院, 中国农业大学, 西北农林科技大学等单位也分别应用基因定位、分子标记、基因克隆和转基因遗传改良技术, 研究作物高效用水生理机理及调控技术, 初步建立了可操作性强的筛选鉴定技术与指标体系, 培育了一批抗旱节水型作物新品种。

基于植物生理需水调控的非充分灌溉技术, 如调亏灌溉 (RDI)、分根区交替灌溉 (ARDI) 和部分根干燥 (PRD) 高效用水技术, 可明显提高作物水分利用效率, 已在澳大利亚、以色列、葡萄牙、摩洛哥等国及我国部分地区进行推广, 与传统灌溉方式相比, 可大量减少灌溉水量、降低蒸腾而作物产量并不降低。西北农林科技大学, 中国农业科学院灌溉研究所, 中国农业大学等单位研究较多, 提出并完善了有关非充分灌溉理论和作物控制性根系分区灌溉技术。

2.2 非传统水资源开发利用技术成为关注的热点

天然雨水、污水以及微咸水等非传统水资源的开发利用已成为许多国家和地区解决用水危机的新途径, 并已成为现代节水农业领域关注的重点内容之一。

污水灌溉条件下作物需水量和耗水量的计算模型, 以及污水灌溉对植株、土壤及地下水影响的研究已取得较大进展, 初步形成了依据作物蒸散强度调控污灌量的灌溉优化模式。美国 45 个州开展了污水回用于农业的工作, 污水回用总量约为 $94 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 其中 60% 用于灌溉; 以色列建有 200 多个污水回用工程, 利用率达 70%, 约 2/3 用于灌溉, 占总灌溉水量的 1/5; 突尼斯再生水的灌溉用水量达到 $1.25 \times 10^8 \text{ m}^3$; 印度自 20 世纪 80 年代以来, 每年用于农田灌溉的污水占城市污水量的 50% 以上; 墨西哥城 90% 的城市污水回用于农田灌溉^[20,21]。浙江大学、河海大学、武汉大学等开展污水利用过程中有害物质在土壤以及作物中的累积效应研究, 提出污水的灌溉方法和理论, 但与国外先进国家相比差距较大。

在微咸水利用方面, 西班牙等国设有微咸水灌溉站来研究微咸水灌溉的技术和理论。以色列科学家发现西红柿、西瓜等一些农作物, 可用浓度高达 0.45% 的咸水实施滴灌, 且果实更甜并耐保存。美国的亚利桑那州, 科学家也发现棉花、大麦、甜菜、西红花等作物在用咸水灌溉时产量并不下降, 甚至有所提高^[22]。南京农业大学和中国农业大学, 主要利用现代控制技术, 研究微咸水对作物品质以

及土壤的影响, 提出微咸水的利用技术和模式。但我国微咸水灌溉的试验研究起步较晚, 技术还不够完全成熟。

在雨水利用技术方面, 国际雨水利用已从过去经验的总结向现代高技术应用和工业化技术方面转变, 如德国塑料容器的工业化批量生产和应用, 另外以色列、印度、日本、澳大利亚等利用 GIS 等技术, 研究雨水资源利用理论和方法^[23]。国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心、中国科学院石家庄现代化农业研究所, 提出了多种化学、生物及土壤固化剂集流材料和集流新技术, 研发新型雨水存贮窖体结构和材料, 并建立了雨水利用智能决策系统。目前, 我国拥有自主知识产权的农田雨水高效利用技术处于世界前列, 已初步形成了相对成熟的配套技术体系与技术标准, 在全国范围内推广应用面积达 $200 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 也使我国成为该项技术在全球范围内应用面积最多的国家。

2.3 信息技术、智能技术与 3S 技术不断推进节水管理高效化和现代化

作物水分监测与信息采集、作物生长决策模拟、支持农田信息实时采集的各种传感技术和传输技术已引起广泛关注。计算机管理系统使灌溉用水实现了由静态向动态的转变。用水管理已向将数据库、模型库、知识库和地理信息系统有机结合的综合决策转化。

美国根据作物水分蒸发量, 研究作物耗水与气象因素之间的关系, 进而确定农田土壤水分变化和适宜的灌水期与灌水量^[24]。较为广泛地使用地面红外线测温仪, 测定作物冠层和叶面以及周围空气温度, 确定作物需水量, 采用飞机航测和卫星遥测进行监控。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, 并提出土壤墒情监测与预报的理论和方法^[25]。根据土壤和作物水分状况开展的实时灌溉预报研究进展较快, 已提出一些具有代表性的节水灌溉预报模型^[26,27]。发达国家的灌溉水管理技术正朝着信息化、自动化、智能化方向发展。特别是近年来利用 3S 技术, 为最大限度地优化各项农业投入, 充分挖掘田间水肥差异性所隐含的增产潜力创造了条件。中国农业科学院新乡灌溉研究所、西北农林科技大学、中国水利水电研究院一直在开展作物水分监测和信息采集技术的研究, 并提出了数字节水的概念和思路, 研发了一系列节水灌溉综合决策系

统，在生产实践中产生了一定的效益，但与发达国家差距较大。

2.4 先进制造技术和新材料技术促进了节水产品开发与升级换代

多功能化、低能耗化、环保化、智能控制化是节水灌溉产品发展的新趋势。发达国家利用先进的制造技术和新材料，加快了节水产品开发进度，改善了产品性能，尤其是快速先进制造技术在节水灌溉技术领域中的应用，大大地缩短了产品开发周期。

利用生物技术、信息技术和监测技术提高灌溉和施肥精确性是其主要方向。以色列、美国、荷兰等国对不同作物的施肥灌溉制度和专用液体肥料进行了20~30年的研究，取得了丰富的成果，研制出针对多种经济作物水肥高效利用的专家管理系统^[28,29]。在节水灌溉产品快速开发平台技术中，高精度快速成型专用设备是研究的热点。国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心、西安交通大学、华中科技大学利用先进的激光快速成型制造技术，研发节水灌溉产品，提出了新型低压滴灌系统开发思路，开发了一系列灌溉控制系统和设备。中水新华灌溉排水公司应用新材料和新技术，开发出高强度中大口径塑料加筋输水管材。随着各国对节水农业投入的增加，节水设备技术进步与升级十分迅速，美国RAINBIRD和以色列NETAFIM公司、PLASTRO公司以及我国新疆天业集团、山东莱芜塑料厂等开发出了系列化的喷微灌节水设备，技术性能可靠、使用寿命较长。尤其是大田膜下棉花滴灌系统在干旱内陆河灌区应用面积已达到 $33.33 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，使我国成为世界上大田采用滴灌技术规模最大的国家。

化学保水剂及保水农膜是非常理想的节水灌溉材料。国外从煤炭中提取的保水剂，具有极好的吸水性^[30]。地膜覆盖是农业增产的一项重要技术，但也产生了严重的“白色污染”，发展可降解地膜能够较好地解决污染。国外提出一种聚苯乙烯合成可降解地膜，它的表面是接枝聚合物。新的制造技术能精确控制药物降解地膜，非常灵活和可调的原料配方使其具有广泛用途。近年来，美国、日本等国开发出的抗旱节水制剂系列产品，在经济作物上广泛使用，已取得了良好的节水增产效果^[31]。美国等将聚丙烯酰胺（PAM）喷施在土壤表面，起到了抑制农田水分蒸发、防止水土流失、改善土壤结构的明显效果。美国利用沙漠植物和淀粉类物质成

功地合成了生物类的高吸水物质，取得了显著的保水效果^[32,33]。我国在节水制剂与材料研发方面已初步解决了秸秆纤维的溶胀和交联技术，使研发的产品耐盐性大大提高，非离子高分子齐聚物接枝工艺和螯合剂处理技术取得了较大创新，使产品吸盐率达到40倍。全降解农膜研究工作在微细化淀粉原料制备和生产工艺方面也取得重大突破。

2.5 注重节水农业综合技术集成，选择适宜的节水发展模式

在发展节水农业的过程中，各国均十分重视工程节水、农艺节水、生物节水与管理节水的有机结合与集成，重视节水农业的综合效益，发展与国家经济水平、水资源数量相适应的节水农业技术模式。以埃及、巴基斯坦、印度为代表的经济欠发达国家由于受经济条件和技术水平的限制，节水农业技术主要采用以渠道防渗技术和地面灌水技术为主配合相应的农业措施以及天然降水资源利用技术的模式^[34,35]。而以以色列、美国、澳大利亚为代表的经济发达国家，节水农业技术主要采用以高标准的固化渠道和管道输水技术，喷、微灌技术与改进后的地面灌水技术为主的模式。如以色列基本实现了全程管道化输水，灌溉全部采用喷微灌技术；美国总灌溉面积中喷微灌所占比例高达30%以上^[36,37]。

3 我国未来现代节水农业技术研发重点

根据我国节水农业技术发展现状及其需求，结合现代节水农业技术发展趋势，建议未来我国现代节水农业技术的研究与开发主要集中在以下5个方面，并将现代生物节水技术作为一种前沿技术储备，这主要由于现代生物节水技术尚处于实验研究阶段，近期直接大规模应用于大田与生产实际时机尚不成熟。

3.1 现代生物节水技术

以主要农作物和林草为重点，进行种质资源的田间或室内抗旱性的鉴定、评价，筛选抗旱节水优异资源，建立农作物抗旱节水特性鉴定评价指标体系与方法；应用分子标记辅助选择、转基因、基因聚合技术，建立简便、有效的抗旱节水和水分高效利用型种质改良与育种技术，创制抗旱节水型或水分高效利用型的优异育种新材料，选育抗旱节水新品种；筛选具有控制蒸腾功能的外源物质，研究作物对外源物质的生理生态响应、外源物质与养分间

的复配技术；综合应用化学合成与螯合技术，研究植物蒸腾抑制剂；研制适用于旱作和非充分灌溉条件下具有抗旱节水、防病杀虫、高效环保等多种功能的种衣剂；研究不同区域主要农作物的水分生产函数与有限水量条件下的非充分灌溉模式；主要农作物调亏灌溉指标体系与灌溉模式；主要作物局部控水灌溉技术与方法。

3.2 非常规水高效安全利用技术

重点研发适合旱区应用的新型、高效工程和生物雨水集蓄形式，新型低成本、高效、绿色环保型的集雨材料。研究新型集雨设施结构形式和现场成型技术，提出雨水集蓄与高效利用工程系统设计软件，建立区域雨水资源高效利用技术体系和最优开发模式及智能决策系统软件；研究再生水灌溉对土壤、地下水及作物品质的影响，提出污灌安全指标量化体系，利用再生水灌溉的不同灌水方式、再生水净水混灌或轮灌的应用技术，不同再生水灌溉方式下的作物灌溉制度；研究低成本、节能型的微咸水开发利用技术与设备，微咸水灌溉下的控制指标体系和作物灌溉制度，微咸水灌溉下土壤水盐运动规律与调控技术，咸淡水混灌或轮灌模式，提出改善区域生态环境的微咸水利用成套技术等。

3.3 节水灌溉技术与装备

研究土地精平标准与激光控制平地技术，开发国产激光控制平地铲运设备和相应的液压升降控制系统，提出与其相配套的田间灌排工程系统模式；研究地面灌溉技术控制参数，开发田间波涌灌溉控制设备、田间多孔闸管灌溉系统和自动控制设备；研究根系分区交替灌溉技术要素和田间配套设备，建立保墒灌溉技术体系；构建喷微灌产品数字化设计及快速成型平台，开发喷微灌系统设计软件；研制节能异形喷嘴喷头、轻小型移动式喷灌机组、适用于低压管道输水灌溉系统的新型喷灌机组；研制微压超薄壁滴灌带，抗堵、耐用、价廉的微灌灌水器、自动反冲洗过滤器、精量注肥器、压力调节器、精量控制阀及微灌自动控制系统；利用纳米技术改进防渗材料性能，开发新型复合土工膜料和填缝材料，研究盐渍土和膨胀土等特殊土类渠道的专用防渗材料及应用技术，开发新型保温复合材料和环保型混凝土补强新材料；研制用于管道输水的高分子复合材料大口径管材、管件及配套设备，开发标准化与系列化的新型金属管材及管件，加筋高密度聚乙烯（PE）喷灌移动支管及管件。

3.4 旱作高效用水技术与新材料

建立主要农产品水分需求与水资源保障之间的关系模型和基础数据库，提出主要区域节水稳产型作物种植结构。建立与水资源相协调的适雨种植参数，提出适合区域特点的节水高效间作套种与轮作种植模式，农田蓄水保墒的少免耕技术，区域节水型农作制度优化设计软件；研究多功能行走式抗旱播种机具的结构及主要部件性能参数，研究基于机械仿生学原理的蓄水保墒耕作机具及配套设备，研究适合旱区小水源条件下应用的微型提水机具及局部灌溉系统；研制以生物材料（藻类、纤维、沙漠植物等）或化学材料为基质的吸水倍率适中、水分有效性高、成本低、有效期长的新型保水剂，生物基高分子吸水树脂，高效多功能土壤结构改良剂；研发由天然材料和改性材料（重点是植物纤维和淀粉类）制成的生物全降解塑膜，研制田间生物材料成膜技术与工艺及相关设备，开发具有增温、保墒、增产、无残留的多功能液体覆盖材料，改性和创制新型液膜等。

3.5 区域高效节水农业综合技术

研究区域作物水分信号监测技术与诊断指标体系，土壤墒情快速测定与预报技术。以土壤墒情预报、作物水分动态监测与作物生长信息结合为基础，运用神经网络技术和数据通讯技术，研究具有监测、传输、诊断、决策功能的作物精量控制智能化灌溉系统，研究基于网络技术与3S技术相结合的灌区动态管理信息采集、传输和分析技术，灌溉系统计算机识别技术，渠系配水模拟仿真和水量流量实时调控技术。研究灌区多种水源联合利用下的水资源优化配置与管理模型，区域多水源优化配置与管理智能决策支持系统，探索虚拟灌区实现技术。以农业节水高新技术和产品应用为载体，将生物节水技术、节水灌溉技术、农艺节水技术和用水管理技术组装配套后，在示范区形成各具特色的现代节水农业技术体系与模式。探讨以农民用水者协会为主的示范区管理机制与模式，探索有利于调动科研、企业、灌区和农民积极性的示范区建设多元化投入机制等。

4 结论与建议

1) 我国现代节水农业技术正处在一个传统技术升级与高技术发展相互交错的关键时期。在注重依靠高技术拉动传统技术应用与升级的同时，更要

重视现代节水高新技术的研究与开发,要将现代信息技术、生物技术与新材料等高新技术应到现代节水农业技术之中。

2) 现代生物节水技术是未来节水农业技术发展的一个重要方向,也是目前研究的一个热点与重点,但其技术研究在近期仍属于储备阶段,大面积应用时机尚不成熟。

3) 节水灌溉技术、非传统水资源开发技术、旱作高效用水技术应为近期我国现代节水农业技术研发的重点,其研发的主要内容应集中在解决技术应用过程中的难点问题,也是近期我国应大力支持与加大投入研发力度的重点内容之一。

4) 技术体系集成与示范是技术进入生产应用阶段的关键环节,也是目前我国节水农业技术发展的一个薄弱环节,加强这一工作的研发力度有利于技术的转化与大面积应用,同样应作为近期我国应重点支持的研发内容。

参考文献

- [1] 吴普特,冯浩.中国用水结构发展态势与节水对策分析[J].农业工程学报,2003,19(1):1~5
- [2] 石玉林,卢良恕.中国可持续发展水资源战略研究综合报告(第4卷)[M].北京:中国水利水电出版社,2001
- [3] 石玉林,卢良恕.中国农业需水与节水高效农业建设[M].北京:中国水利水电出版社,2001
- [4] 龚时宏,高占义,王晓玲,等.全国300个节水重点县节水灌溉技术推广应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2003,1(4):270~274
- [5] 刘江.21世纪初中国农业发展战略[M].北京:中国农业出版社,2000
- [6] 水利部农村水利司.节水灌溉——“九五”回顾[M].北京:中国水利水电出版社,2001
- [7] 康绍忠,胡笑涛,蔡焕杰.现代农业与生态节水的理论创新及研究重点[J].水利学报,2004,(12):1~7
- [8] 许迪,吴普特,梅旭荣,等.我国节水农业科技自主创新成效与进展[J].农业工程学报,2003,19(3):5~9
- [9] 许迪,龚时宏,高本虎.中国节水灌溉产品质量现状分析及改善对策[J].农业工程学报,2004,20(5):6~11
- [10] 山仓,康绍忠,吴普特.中国节水农业[M].北京:中国农业出版社,2004
- [11] 吴普特,冯浩.中国节水农业发展战略初探[J].农业工程学报,2005,21(6):152~157
- [12] 钱蕴璧,李英能,杨刚.节水农业新技术[M].郑州:黄河水利出版社,2002
- [13] 吴普特.中国节水农业科技战略与区域发展模式[A].中国节水农业发展战略研究与实践[C].北京:中国农业科学技术出版社,2006.18~23
- [14] 李光永,龚时宏,王建东.我国微灌技术的发展现状、潜力、差距与创新战略[A].中国节水农业发展战略研究与实践[C].北京:中国农业科学技术出版社,2006.427~433
- [15] 景蕊莲,黎裕.中国生物节水发展战略[A].中国节水农业发展战略研究与实践[C].北京:中国农业科学技术出版社,2006.56~60
- [16] 彭世彰,李远华,缴锡云.我国节水农业理论创新与发展趋势[A].中国节水农业发展战略研究与实践[C].北京:中国农业科学技术出版社,2006.52~55
- [17] 山仓,邓西平,康绍忠.我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J].水利学报,2004,(9):27~31
- [18] Theiveyanathan S, Benyon, R G, Marcar N E, et. al. An irrigation-scheduling model for application of saline water to tree plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2004,193(17): 97~112
- [19] Bustan, Amnon S, Moshe, et. al. Effects of saline irrigation water and heat waves on potato production in an arid environment[J]. Field Crops Research, 2004,90(8): 275~285
- [20] Juanico M, Milstein. Semi-intensive treatment plants for wastewater reuse in irrigation[J]. Water Science and Technology, 2004,50(2):55~60
- [21] Imenez J, Blanca, Chavez. Low cost technology for reliable use of Mexico city's wastewater for agricultural irrigation[J]. Journal of the Franklin Institute, 2003,(9): 95~108
- [22] Ceballos B S O, Soares N E, Moraes M R. Microbiological aspects of an urban river used for unrestricted irrigation in the semi-arid region of north-east Brazil[J]. Water Science and Technology, 2003,47(3): 51~57
- [23] Machiwal, Deepesh, Singh P K. Planning and design of cost-effective water harvesting structures for efficient utilization of scarce water resources in semi-arid regions of Rajasthan[J]. Water Resources Management, 2004, 18(3): 219~235
- [24] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia [J]. Agricultural Water Management, 2004,65(3):193~210
- [25] Battam M A. Soil pits as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems[J]. Irrigation Science, 2003, 22(3): 135~141

- [26] Sporre M, Jennifer L, Lanyon L F. Low-intensity sprinkler for evaluating phosphorus transport from different landscape positions[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2004, 20(5):599~604
- [27] Aydin M, Yang S, Kurt N. Test of a simple model for estimating evaporation from bare soils in different environments[J]. *Ecological Modeling*, 2005, 183(1):91~105
- [28] Hutton R, Robbins M, Menzies R, et al. Complementing micro-irrigation technology with improved irrigation management based on crop and soil parameters [J]. *International Water and Irrigation*, 2003, 23(4):43~46
- [29] Abbasi F, Feyen J, Roth R L, et. al. Water flow and solute transport in furrow-irrigated fields [J]. *Irrigation Science*, 2003, 22(2):57~65
- [30] Herwitz S R, Johnson L F, Dunagan S E, et. al. Imaging from an unmanned aerial vehicle: Agricultural surveillance and decision support [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 44(1):49~61
- [31] Begovich, Ofelia. Real-Time Implementation of a Fuzzy Gain Scheduling Control in a Multi-Pool Open Irrigation Canal Prototype [A]. *IEEE International Symposium on Intelligent Control-Proceedings*[C]. 2003, 304~309
- [32] Inman-Bamber N G, Smith D M. Water relations in sugarcane and response to water deficits[J]. *Field Crops Research*, 2005, 92(2):185~202
- [33] Greven M, Green S, Neal S, et. al. Regulated deficit irrigation (RDI) to save water and improve Sauvignon Blanc quality[J]. *Water Science and Technology*, 2005, 51(1):9~17
- [34] Amin S, Sadeghi J M, Salimi M A. Economic feasibility of saving water through controlling outflow of ghanats[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2004, 18(2):145~154
- [35] Peny, Calvin, Stuart. Precision pivot irrigation controls to optimize water application [J]. *International Water and Irrigation*, 2004, 24(3): 20~23
- [36] Leib B G, Matthews G, Kroeger M. Development of an on-time logger for irrigation systems [J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 62(1):67~77
- [37] Tognetti R, Palladino M, Minnocci A. The response of sugar beet to drip and low-pressure sprinkler irrigation in southern Italy[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 60(2):135~155

Technical Trend and R&D Focus of Modern Water-saving Agriculture

Wu Pute, Feng Hao, Niu Wenquan, Zhao Xining

(*Northwest A&F University; Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences; National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Yangling, Shanxi 712100, China*)

[**Abstract**] Based on analyzing research achievements and technical trend of modern water-saving agriculture in China, combining technical development and demand on modern water-saving agriculture, the author suggested five of technical research emphases on modern water-saving agriculture in the future, including the biological water-saving technique, inferior water resources development technique, water-saving irrigation technique and equipment, dryland water high-efficient agriculture, and the regional development mode of water saving in field for water-saving agriculture.

[**Key words**] biological water-saving technique; inferior water resources; water-saving irrigation technique; dryland water high-efficient agriculture; technical innovation and integration