

# 灌区水资源高效利用调控理论与技术研究进展

邵东国, 刘武艺, 张湘隆

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘 要:** 灌区水资源高效利用调控理论与技术研究, 对提高灌区水、肥资源利用率, 防止涝渍、盐渍灾害, 控制农田面源污染, 修复生态环境, 促进农业节水与水资源可持续利用具有重大意义。该文在总结国内外研究成果的基础上, 系统分析了灌区水资源高效利用调控理论和技术两方面的研究现状, 并指出了该项研究需进一步探讨和解决的问题。

**关键词:** 灌溉排水系统; 水资源高效利用; 调控理论与技术

**中图分类号:** S274.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2007)5-0251-07

邵东国, 刘武艺, 张湘隆. 灌区水资源高效利用调控理论与技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 251-257.

Shao Dongguo, Liu Wuyi, Zhang Xianglong. Review of the researches on theory and technology of regulation for high efficient utilization of water resources in the irrigation and drainage system[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 251-257. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

中国是发展中的农业大国, 灌区在保障粮食安全、增加农民收入, 维护社会和谐中发挥了巨大作用。但长期以来, 由于缺乏对灌区水资源的科学管理, 用水浪费与水安全问题日益突出。一方面, 缺乏对灌区水资源高效利用研究, 灌溉水利用效率低下, 导致灌溉用水占农业总用水的比重过大, 造成大量水资源浪费; 另一方面, 传统灌溉模式对水资源利用安全性缺乏考虑, 重灌轻排、灌排工程不配套, 导致灌区涝渍、盐渍灾害加剧; 与此同时, 大量农田排水携带氮、磷等营养物质和有毒化合物排入天然水体, 造成许多湖泊、水库和河流出现水体富营养化等污染现象, 导致灌区生态环境日益脆弱<sup>[1]</sup>。

本文在总结国内外有关节水灌溉与控制排水条件下的农田水分、养分调控理论及其对农田生态环境影响机理等研究成果基础上, 系统分析了灌区水资源高效利用调控理论与技术的研究现状, 并对该领域后续研究进行了展望。

## 1 灌区水资源高效利用调控理论研究

自 20 世纪 50 年代以来, 中国专家学者先后在全国

各地建立了诸多灌溉排水试验站, 开展了许多作物灌溉排水实验研究与计算, 在“四水”转换、作物需水量、水分生产函数、农业用水管理、灌溉节水与农田排水、灌排工程系统分析等方面进行了大量研究与实践, 取得了丰硕成果<sup>[2]</sup>。归纳起来, 近些年国内外在灌区水资源高效利用调控理论方面的研究主要集中在以下 3 个方面。

### 1.1 以灌区节水高产为目的, 开展农田水分、养分调控机理及其生态环境效应研究

灌区水资源高效利用调控研究需考虑利用作物本身生理功能挖掘节水潜力以减少无效蒸腾量, 研究精准灌溉模式下作物需水量的变化预测与控制。传统的能量平衡估算方法以及充分湿润条件下获得的作物系数并不适用于非充分湿润条件下的作物需水量估算, 因此, 国内外学者建立了作物高效用水和精准灌溉条件下的需水量计算模型(Howell, 2004; S. Ortega, 2004)。Ortega Faris(1993), Rana(1997), Alves(2000)等利用 Penman-Monteith 公式研究水分胁迫下的作物需水量。Goudriaan 等(1997)提出了不同作物种类参数化模型<sup>[3]</sup>, Wopereis 等(1996)探讨了水分限制条件下的 ORYZA\_W 模型<sup>[4]</sup>, Drenthet 等(1994)给出了养分限制下的 ORYZA\_N 模型, Bouman 等(2001)建立了一体化的 ORYZA 2000 模型; Liu 和 Hunsaker(2002)提出边际水利用效率(Marginal water use efficiency, MWUE)和水生产弹性(Elasticity of water production, EWP)的概念<sup>[5]</sup>, 用于研究作物产量动态变化相互关系、季节蒸发蒸腾量和水分利用效率的分析; F. Labbe' 等(2000)提出了田间水管理模型; M. K. Agrawal 等(2004)提出了雨季稻田水量平衡模型,

收稿日期: 2006-08-21 修订日期: 2007-01-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679068); “十一五”国家高技术研究发展计划(863 计划)研究课题(2006AA06Z342); “十一五”国家科技支撑计划重点项目“大型农业灌区节水改造工程关键支撑技术研究”

作者简介: 邵东国(1964-), 男, 湖南常德人, 教授, 主要从事水资源系统分析研究。武汉 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 430072。Email: dgshao@whu.edu.cn

Belder P. Spiertz 等(2005)研究了节水灌溉条件下稻田的氮经济和水生产率等<sup>[6]</sup>。国内茆智、李远华、崔远来等多年来一直从事水稻节水灌溉研究,并总结了水稻节水灌溉的4种水分调控模式及其环境影响<sup>[7,8]</sup>;雷志栋等(2003)在作物水分生产函数 Jensen 模型基础上,引入肥料因子构造了水肥生产函数的 Jensen 模型和人工神经网络模型<sup>[9]</sup>;康绍忠等(1998, 2004)探讨了调亏灌溉对玉米生理指标及水分利用效率的影响和控制性根系分区交替灌溉对冬小麦水分与养分利用的影响<sup>[10,11]</sup>;王康、沈荣开(2003)探讨了作物产量、氮素损失与农业生产要素(水分、氮素)实际投入量间的关系,并建立了节水条件下土壤氮素损失与环境评价概念型模型<sup>[12]</sup>;尹娟、费良军等(2005)综述了水稻田中氮肥损失及减少氮肥损失的措施<sup>[13]</sup>;上官行健(1993), Sass (1991, 1994), Teepe(2000), 王明星(2001)等还对稻田的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放进行了研究<sup>[14]</sup>。综上所述,以往研究多以灌区节水高产为目标,并集中于水肥单因子调控及其生态环境效应方面,对于如何确定水肥耦合灌溉制度及维持农田生态环境健康的水、肥临界条件缺乏深入研究。

## 1.2 以灌区水资源开源为目的,开展劣质水(污水)灌溉、农田排水资源化利用及其生态与环境影响研究

劣质水灌溉与农田排水资源化利用,可为灌区农业生产提供所需的水肥资源,提高水、肥利用率,开辟新的水源,但长期灌溉会引起土壤次生盐碱化,从而导致农业生态与环境恶化。近年来,国内外学者针对劣质水灌溉、农田排水资源化利用及其生态环境影响进行了系列研究,主要集中于以下方面:1)以劣质水灌溉安全高效利用为目的,开展灌溉污染物运移转化规律及其生态与环境影响研究。自20世纪80年代,国外学者开始研究污水灌溉污染物在非饱和土壤中的迁移规律,如:Feigin A(1978), I Ravinna(1991), L und L J(1981), V aisman I(1984)等针对污水灌溉条件下的氮平衡、氮的利用率等方面进行了一系列的研究工作<sup>[15-18]</sup>;Hu Xiandeng(2000)利用田间测量法,调查长期污水灌溉条件下 N、P 的富集情况,并对地表水及地下水的污染威胁进行了分析<sup>[19]</sup>。刘凌等(2002)分析了污灌过程中氮化合物在土壤及地下水中迁移转化规律及其污染风险分析<sup>[20]</sup>;杨金忠等(2004)进行了污水灌溉系统中氮磷转化运移的试验研究,并同时开展了污水灌溉系统中氮素转化运移的数值模拟分析研究<sup>[21]</sup>;黄爽、邵东国等(2003)在分析石家庄市未来30年污水水质与水量变化规律基础上,探讨了不同污水灌溉模式下土壤和作物的环境影响以及相应的需水量<sup>[22]</sup>;宋晓焱、尹国勋等(2006)探讨了污水灌溉对地下水污染的机理等<sup>[23]</sup>。2)

以提高灌溉水重复利用率为目的,开展农田排水资源化利用及其生态与环境影响研究。1995年在马来西亚召开过专门控制排水国际学术研讨会,主要议题是通过排水调控设施来调节田间地下水位,达到农田排水再利用、渍害治理、减少排水对承泄区污染等。Ingrid Wesström, Ingmar Messing 等(2001)建立了一个可以根据排水需求随季节来改变排水量和定量控制排水系统溶质量的田间实验工程,来评估控制排水对水文和环境的影响<sup>[24]</sup>。Safaa Abdelraouf Ahmed 等(2002)对埃及农田排水高效回归利用的方案选择进行了研究。马云瑞等(1997)对宁夏地区灌溉回归水再生利用进行了评价,并指出将其与渠水掺灌或轮灌对作物生长无不良影响<sup>[25]</sup>;马太玲、袁保惠(2001)针对内蒙河套灌区回归水灌溉系统进行了可行性分析<sup>[26]</sup>;邵东国等(2003, 2004)结合干旱区水盐动态观测实验与数值模拟,建立了盐碱地改良排水多准则优化设计模型<sup>[27]</sup>;许迪等(2004)在田间试验观测基础上,采用 SWAP 模型分析了灌区农田排水再利用下的土壤盐分季节性变化以及地下水位对土壤盐剖面分布的影响,并模拟农田排水补灌对作物产量的效应<sup>[28]</sup>;殷国玺(2006)针对中国南方丘陵地区农田控制排水实验,建立了既减少氮流失又防止涝渍的多目标控制排水模型<sup>[29]</sup>。但目前针对劣质水灌溉及其农田排水资源化利用的研究,主要集中于分析短期试验对灌区土壤、地下水位、水质、作物产量与品质的影响方面,在长期使用对灌区生态环境影响的累积效应方面尚缺乏深入研究。该方向的研究趋势是:进行灌区劣质水灌溉、农田排水资源化利用的长期生态与环境监测试验,研究长期使用对灌区生态与环境影响机理,在此基础上探讨基于灌区生态与环境友好的劣质水与农田排水资源化利用措施与标准。

## 1.3 以提高灌区水资源利用效率、效益和公平性为目的,开展灌排系统水资源优化配置研究

自 Norman J. Dudley(1971)将作物生长模型与二维随机动态规划结合<sup>[30]</sup>,对季节性灌溉用水进行了分配研究开始,Yeh(1973, 1979)、Takeuchi 和 Moreau(1974)<sup>[31]</sup>、Pearson(1982)、Weiner(1982)、Marino(1985)、Lee Soontak(1986)<sup>[32]</sup>、Willis(1987)等以产值最大或供水费用最小或当供水不足情况下缺水损失最小等为目标,以输水能力和预测需求值等为约束条件,用线性规划、二次规划等系统分析方法对区域用水量优化分配、地表水、地下水联合运行管理等问题进行了研究,但其目的主要是为了提高水资源利用的经济效益与效率。20世纪90年代以来,由于水污染和水危机的加剧,传统以供水量和经济效益最大为目标的水资源管理模式已不能满足需要,国外开始在水资源优化配置中

注重水质约束、水资源环境效益、生态需水、水资源质与量的统一管理及可持续利用的研究。决策支持系统(DSS)、大系统多目标模拟优化模型技术和资源价值的定量方法等开始在灌区水资源管理中得到应用。R. A. Fleming 和 R. M. Adams(1995)以经济效益最大为目标,考虑了水质运移的滞后作用,并用水力梯度作为约束来控制污染扩散,建立了地下水水质水量管理模型<sup>[33]</sup>;U. Pmanu Lal 等(1995)将地表水地下水的处理费用纳入管理目标,建立了地表水地下水联合运用系统的多目标管理模型;Wong, Hugh S. 等(1997)在需水预测中考虑当地地表水、地下水、外调水等多种水源联合运用和地下水恶化防治措施后,提出了支持地表水、地下水联合运用的多目标多阶段优化管理的原理和方法<sup>[34]</sup>。Carlos Percia 和 Gideon Oron(1997)以经济效益最大为目标,建立考虑了不同用水部门对水质不同要求的污水、地表水、地下水等多种水源管理模型<sup>[35]</sup>。S. D. Gorantiwar 和 I. K. Smout(2005)针对干旱半干旱地区提出了采用非充分轮灌分配有限水资源的灌溉模式<sup>[36]</sup>。自20世纪80年代,郭元裕(1984)、李寿声(1986)<sup>[37]</sup>、唐德善(1992)、贺北方(1995)<sup>[38]</sup>、田军仓(1998)、程吉林(1998)、马斌(2001)和邵东国<sup>[39]</sup>(2000、2003)等在灌区排涝系统优化、多水源联合调度、作物最优种植模式、灌区渠系优化配水等方面进行了许多研究工作。齐学斌等(2004)在进行井渠结合灌区地表水地下水联合优化调度时,采取了地膜覆盖集雨种植节水和引洪补源技术<sup>[40]</sup>。王浩等(2004)建立了市场经济条件下农业水资源高效利用模型,提出了宁夏河套灌区农业水资源高效利用模式<sup>[41]</sup>。周祖昊、袁宏源等(2003)建立了既考虑水库调度又考虑田间配水的有限供水条件下多水源多作物灌区优化配水整合模型,2005年又提出了相应的整合随机调度模型<sup>[42]</sup>。阮新建、王长德等(2004)用现代控制理论研究了渠道自动控制的设计理论和方法,探讨了渠道运行过程中的限制条件、性能指标和渠道运行全维状态反馈控制器的设计方法<sup>[43]</sup>。近些年来,信息化技术与灌区管理相结合开始成为新的发展趋势,“3S”技术在灌区水资源高效利用管理中得以应用。Iyngararasan M. 等(1993)开始用GIS评估大型灌溉系统的环境影响<sup>[44]</sup>;Safaa Abdelraouf Ahmed 等(2002)开发出了一种可以根据再利用水的水质快捷准确地做出不同决策的农田排水再利用专家系统。Fortes P S, Platonov A E, Pereira L S 等(2005)以概念性的半分布式水量平衡模型为基础,在GIS上建立了提高水利用率的灌溉制度模拟模型——GISAREG模型等<sup>[45]</sup>。未来该领域的研究趋势是将“3S”技术与灌区水资源优化配置技术集成,实现灌区水资源高效利用多维(水量、

水质、地下水位、生态)模拟与可视化仿真研究。

## 2 灌区水资源高效利用调控技术研究

### 2.1 灌区地表水与地下水联合调控技术

通过对各种水利工程施工进行控制和合理调度,达到高效使用地表水,合理开采地下水的目的。该技术的核心是在稳定地下水位的前提下,确定在引进一定的地表水量的条件下所能开采的地下水量,或在开采一定地下水量的条件下应引进的地表水量。开展井渠结合灌溉技术,通过地表水、地下水的联合调控,达到“井渠齐灌、渠水补源、井水保丰”的目标。常见的井渠结合灌溉模式包括“渠井双灌”和“渠井分灌”两种。齐学斌、樊向阳等(2004)根据水资源平衡的原理,对井渠结合灌区的地表水和地下水进行联合优化调度,并采取地膜覆盖集雨种植节水技术和引洪补源技术,实现灌区水资源的高效可持续利用<sup>[40]</sup>。曲兴辉、谷秀英(2005)提出了基于费用准则和供水量准则的地表水与地下水联合调控模型,以合理开发、优化调度区域水资源,充分发挥区域地表水库和地下含水层空间的联合调蓄作用,提高水资源的利用率,达到最佳的社会效益、环境效益和经济效益<sup>[46]</sup>。

### 2.2 灌区高效输配水技术

灌区水资源输配过程中的水量损失所占比重大,提高输水效率是灌区水资源高效利用的关键。1)渠道防渗技术。传统防渗材料有灰土、砌石、混凝土等,现代防渗材料包括高分子复合土工膜料、改性沥青防水卷材、聚合物纤维混凝土、土壤固化剂等,对支渠及其以上渠道优先防渗,井灌区无回灌补源任务的固定渠道及提水灌区渠道全部防渗措施。2)管道输水技术。较小流量输水采用低压管道输配水技术;在高扬程提水灌区和有发展自压管道输水条件的灌区,采用了自压式管道输水系统。3)灌区量测水与动态配水技术。开发精度高、造价低、适应性强、操作简便,便于管理和维护的小型量水设备,加强灌区用水管理,开发动态计划用水管理和实时灌溉预报技术。4)输水建筑物老化防治技术。研究输水建筑物老化防治技术、病害诊断技术和防腐蚀、修复、堵漏技术;开发出了输水建筑物加固技术的产品。

### 2.3 田间灌水技术

田间灌水技术既是提高灌区水资源利用率的最后环节,又是引水、输水和配水的基础,改进田间灌溉技术是灌区水资源高效利用的重点。1)通过开发小畦灌溉、细流沟灌、波涌灌溉、微喷灌等改进地面灌水技术,实现田间入畦(沟)流量、水头、灌水定额等灌溉要素的科学控制。2)稻田干湿交替灌溉技术。通过建立稻田适宜水层标准、土壤水分控制指标、晒田技术及相应的灌溉制度,开发稻田“干湿交替”、“钱湿浅”灌溉技术,无水

层控制灌溉技术等。3) 精准控制灌溉技术。研究作物生长与土壤水分、养分, 空气湿度、大气温度等环境因素的关系, 分析农作物水分生理特性和需水规律, 并计算出需补水的时间与水量, 实现作物适时适量灌溉。彭世彰等(1999) 在中国宁夏引黄灌区引进了水稻节水高产控制灌溉技术, 根据控灌技术原理及已有研究成果, 将现有技术指标体系与宁夏水稻灌区气候、土壤、地下水、低温冷害、生产水平等特点相结合, 提出了符合宁夏实际的水稻节水高产栽培模式和水稻各生育阶段适宜的土壤水分控制下限以及相应的灌水间隔时间、稻田土壤表象<sup>[47]</sup>。4) 非充分灌溉技术。在作物需水临界期及重要生长发育期灌“关键水”技术, 其技术重点是通过试验研究作物水分生产函数, 作物的经济灌溉定额和最优灌溉制度, 研究非充分灌溉和调亏灌溉技术(Regulated Deficit Irrigation) 增产机理及运用控制性分根交替灌溉技术。该项研究技术自 20 世纪 70 年代中期由澳大利亚持续灌溉农业研究所 Tatura 中心提出, 主要根据作物的遗传和生态特性, 在作物生长的某一适当阶段, 人为主动地对其施加一定程度的水分胁迫, 以影响作物的生理和生化过程, 对作物进行抗旱锻炼, 提高作物的后期抗旱能力, 即通过作物自身的变化实现高水分利用率<sup>[48]</sup>。中国从 20 世纪 90 年代开始此项技术研究, 实践证明该项灌溉措施可实现作物产量、水分利用、品质的全面提高。

#### 2.4 生物节水与农艺节水技术

生物节水与农艺节水技术可提高水分利用率和水分生产率, 节约灌溉用水量, 是灌区主要节水措施。1) 水肥耦合技术。即灌溉与施肥在时间、数量和使用方式上合理配合的技术。主要技术目标是: 以水调肥, 水肥共济, 提高水分和肥料的利用率。崔远来等根据湖北漳河灌区团林试验站开展的水稻水肥高效利用试验成果, 研究分析了不同水肥处理对水稻生长发育, 水稻产量及其构成, 稻田水肥利用率等的影响规律, 并提出采用节水灌溉进行田间水分管理从而高效利用水肥的调控技术措施<sup>[49]</sup>。2) 适水种植技术。根据当地的水、土、光、热资源条件, 以高效、节水为原则, 以水定作物, 合理安排作物的种植结构及灌溉规模, 使农作物种植制度和技术与当地的水资源条件相适应。其主要目标是限制和压缩高耗水、低产出作物的种植面积。3) 田间增、蓄水保墒技术和生物养地技术。该技术通过深耕、深松改善土壤结构, 提高土壤的蓄水、保水、供水能力, 通过田间覆盖地膜和浅沟播种, 达到增加自然降水利用率, 降低灌溉用水量的目的。4) 蒸腾、蒸发抑制技术。通过在作物需水高峰期对作物叶面喷洒抗旱剂, 达到抑制作物叶面蒸腾蒸发, 增加作物产量的技术。5) 抗旱、高产、优质农作物品种技术。利用抗旱节水农作物品种选育的分子生物学技

术, 选育抗旱、耐旱、水分子高效利用的新型作物品种, 采用多功能保水拌种剂达到抗旱、节水的目的。

#### 2.5 灌区常规与非常规水源综合利用技术

灌区常规水源主要包括降水、地表水、地下水等; 非常规水源包括土壤水、农田排水、污水、微咸水、再生水等。通过工程措施与非工程措施, 实现多种水源综合利用, 提高灌区水资源利用率。利用田间和附近地形滞蓄雨水, 使农作物耗水尽量利用天然降水; 在旱作农业区, 推广以滞蓄天然降水为主要目的的土地平整技术和改进耕作技术; 在水稻种植区, 积极推广水稻浅灌深蓄技术; 在干旱或半干旱地区以及保水能力差的山丘区, 推广田间集雨保水技术。通过灌排系统的统一管理, 实现农田排水资源化利用, 重新灌溉农田的技术。在无盐碱威胁地区杜绝无效退泄和低效排水; 在灌溉回归水水质不符合灌溉水质要求的地区, 积极发展“咸淡混浇”等简单易行的灌溉水质安全利用技术。开展一水多用和分质用水及非常规水(生活污水、微咸水)与淡水混合使用或交替使用技术。

#### 2.6 灌区信息化管理技术

基于 3S 技术的灌区信息化管理是利用地理信息系统的空间数据处理与分析功能、全球定位系统的瞬时快速定位及遥感的实时数据采集等功能实现灌区水源、气象、土壤、作物与农业生产信息的动态监测, 从而提高灌区水资源的用水效率。国外灌区信息化管理技术已较成熟, 如澳大利亚农业产量研究机构(APSRU) 研究开发了 APSIM 系统, 该系统可通过一系列互相独立的模块(如生物模块、环境模块、管理模块等)来表现被模拟的灌溉系统; 佛罗里达大学开发了 AFSIRS 系统, 用户可以根据作物类型、土壤情况、灌溉系统、生长季节、气候条件和管理方式等估计出灌溉需水量。中国灌区信息化建设尚处于起步阶段, 南海鹏等(2002) 采用遥感、遥测、遥控等高新技术构建了灌区配水自动化系统, 通过系统的实施可实现灌区按需、按期、按量自动供水, 做到计划用水、优化配水, 以达到灌溉和充分利用水资源的目的<sup>[50]</sup>。

### 3 灌区水资源高效利用调控理论与技术研究展望

现有灌区水资源高效利用调控理论与技术方面尽管已做了一系列探索性研究, 但大多研究仅是针对灌溉系统或排水系统单独进行, 将灌区灌溉节水系统与排水管理系统整体考虑, 开展灌区水资源从水源取水到渠系输配水、从田间供水和用水到农田生态与排水水量水质等的一体化管理及高效健康利用调控理论与技术研究, 需着重研究以下 4 方面问题。



### 3.1 灌区水资源高效利用标准与节水高效和环境友好型用水模式研究

研究节水灌溉条件下灌区主要农作物的先进灌溉制度与水资源高效利用标准,通过节水灌溉、控制排水、合理施肥等多个不同条件下的灌排系统水、肥资源调控模拟与实验,系统分析灌区水、肥利用效率与土壤、作物、生态间的动态响应关系;并联合运用节水灌溉、控制排水、复杂水资源系统分析、自动监控与3S等先进技术,实现灌区土壤墒情、作物、地下水位、排水水质等的信息监测与采集,在此基础上,研究灌区水资源高效利用模式与数字化设计理论;研究灌区水资源高效利用模式对区域水循环的影响及其水土环境效应,探索灌区水、肥、生态一体化调控模式;建立灌区不同农业高效用水技术的适应性评价方法,提出节水高效和生态环境友好的灌区水资源利用模式,以确保作物生长的水分、养分需求和农田生态与环境的健康。

### 3.2 灌区水肥耦合灌溉技术和生态与环境需水阈值研究

从作物水肥耦合灌溉制度与生长机理出发,通过土壤-植物系统内的质流、蒸腾、光合与同化作用关系建模,研究作物水肥耦合生产函数;建立田间水肥运移模型和水分、养分限制下的作物生长模型、农田生态环境需水预测模型、排水水质控制模型等;通过模拟计算与分析,得出非充分灌溉条件下不同灌水量、施肥量和不同控制排水条件下农田水肥运移规律以及作物生理生态、农田排水水量、水质间的相互关系;并进一步提出田间水肥调控和农田排水调控的临界条件,研究灌溉水、肥利用率与水盐调控模式、节水临界阈值间的定量关系,探讨基于生态健康和环境友好的灌区生态与环境需水定值方法与阈值。在此基础上,研究不同节水灌溉条件下作物水分、养分定量供应模型以及水肥联合调控和平衡管理技术模式;建立不同水肥资源条件下田间节水灌溉方法与农艺技术相结合的高效技术集成模式。

### 3.3 灌区农田排水调控与再利用关键技术研究

研究农田涝渍状况对作物生理、生态、产量的影响及农田排水后效应,提出除涝、防渍、涝渍兼治的农田排水方法与指标;研究节水灌溉条件下土壤水肥运移转换的时空变异规律,提出水肥调控的排水工程规模和标准化设计与管理模式;研究农田控制性排水技术参数指标与水位调控准则,开发控制性排水系统的相关控制设施,建立控制性排水系统的工程结构与布局优化模式;研究农田排水矿化度及排水中营养元素含量的动态特征,评价农田排水再利用的潜力,同时,探索灌区排水再利用关键技术,研究人工湿地在处理灌区农田排水过程中的生态功能以及人工湿地(沟渠)生态修复技术与工

艺;建立适合中国灌区推广的排水再利用工程结构形式与运行管理模式。

### 3.4 灌区水资源高效利用仿真技术与实时调控技术研究

在田间尺度上,运用现代节水灌溉理论与控制排水技术、复杂水资源系统分析方法、自动控制理论,以GIS为平台,以“节水高产、生态优良、环境健康”为目标,以农田水分、养分、作物生理生态、排水水量水质、地下水位等指标为约束,建立田间水资源高效利用多维多目标临界调控模拟与仿真研究。在灌区尺度上,研究动态配水模拟仿真技术与实时调控技术,开发灌区用水群决策支持模型和动态配水管理软件;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,开发集用水过程可视化、水量实时调度配置、用水测控管理一体化的灌区水资源利用信息化管理系统软件,以及用于表述数字灌区、数字渠系特征的计算机识别方法及数字化设计软硬件产品;研发集量控功能于一体的新型末端渠系量水与控制设备;建立灌区管理信息化标准结构体系及信息系统,开发灌区用水监控与调配的系统运行管理模式。

## 4 结 语

灌区作为水资源管理和利用的集中区域,对水资源进行合理调控,实现水资源的合理开发、节约、保护与高效利用,具有客观必要性和现实紧迫性。近年来,大部分灌区相继开展了以节水为核心的续建配套与更新改造工程,在灌区水资源高效利用和生态环境保护方面已取得了阶段性成果。但在灌区节水、提高灌区水肥利用率和水肥生产率、农业非点源污染和涝渍灾害防控、农田排水资源化再生利用等灌区水资源高效利用与管理的非工程措施方面,仍需做深入研究。

### [参 考 文 献]

- [1] 张蔚榛,张瑜芳,沈荣开.排水条件下化肥流失的研究——现状与展望[J].水科学进展,1997,8(2):197-203.
- [2] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M],北京:清华大学出版社,1988.
- [3] Langeveld C A, Leffelaar P A, Goudriaan J. Modelling nitrous oxide emissions at various scales[A]. Jarvis S C, Pain B F. Gaseous nitrogen emissions from grasslands [C]. CAB International, Wallingford, UK, 1997, 29: 331-337.
- [4] Woperies M C S, Bouman B A M, Tuong T P, et al. Rice growth model for irrigated and rainfed environments [A]. SARP Research Proceedings[C]. Grafisch Service Centrum Van Gils B. V., Wageningen. 1996: 159.
- [5] Liu W Z, Hunsaker D J, Li Y S, et al. Interrelations of

- yield, evapotranspiration, and water use efficiency from analysis of water production functions[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 56: 143– 151.
- [6] Belder P, Spiertz J H J, Bouman B A M, et al. Nitrogen economy and water productivity of lowland rice under water-saving irrigation[J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(2, 3): 169– 185.
- [7] 茆 智. 水稻节水灌溉及其对环境的影响[J]. *中国工程科学*, 2002, (7): 8– 16.
- [8] 崔远来, 李远华. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. *水科学进展*, 2004, (3): 280– 285.
- [9] 周智伟, 尚松浩, 雷志栋. 冬小麦水肥生产函数的 Jensen 模型和人工神经网络模型及其应用[J]. *水科学进展*, 2003, 14(3): 280– 284.
- [10] 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 1998, 14(4): 82– 87.
- [11] 康绍忠, 蔡焕杰, 冯绍元. 现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 1– 6.
- [12] 王 康, 沈荣开. 节水条件下土壤氮素的环境影响效应研究[J]. *水科学进展*, 2003, 14(4): 437– 441.
- [13] 尹 娟, 费良军, 田军仓, 等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 189– 191.
- [14] 王明星, 上官行健, 沈壬兴. 温度对稻田  $\text{CH}_4$  排放日变化及季节变化的影响[J]. *中国科学院研究生院学报*, 1994, 11(2): 214– 224.
- [15] Feigin A, Biorai H, Dag Y. The nitrogen factor in the management of effluent irrigated soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125: 4, 248– 254.
- [16] Feigin A, Ravinna I, Shalhevet J. Irrigation with treated sewage effluent[M]. Springer verlag Berlin: Heidelberg, Germany, 1991.
- [17] Lund L J, Page A L, Nelson C O, et al. Nitrogen balances for an effluent irrigation area[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10: 349– 352.
- [18] Feigin A, Vaisman I, Biorai H. Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II. Nutrient availability in soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13: 2, 234– 238.
- [19] Hu Xiandeng, Han Liebao. Sustainability of effluent irrigation schemes: a field investigation[J]. *北京林业大学学报*, 2000, 22(2): 28– 33.
- [20] 刘 凌, 陆桂华. 含氮污水灌溉实验研究及污染风险分析[J]. *水科学进展*, 2002, 13(3): 313– 320.
- [21] 杨金忠, Jayawardane N, Blackwell J, 等. 污水灌溉系统中氮磷转化运移的试验研究[J]. *水利学报*, 2004, (4): 72– 79.
- [22] 黄 爽, 张仁铎, 邵东国, 等. 石家庄污灌区污水灌溉技术的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(5): 29– 34.
- [23] 宋晓焱, 尹国勋, 谭利敏, 等. 污水灌溉对地下水污染的机理研究[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(1): 136– 138.
- [24] I Wesström I, Messing I, Linnér H, et al. Controlled drainage-effects on drain outflow and water quality[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, (47): 85– 100.
- [25] 马云瑞, 张益民, 苗济文. 宁夏灌溉回归水开发再利用的评价[J]. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 133– 138.
- [26] 马太玲, 袁保惠, 梅金铎. 内蒙河套灌区建立回归水灌溉系统可行性分析[J]. *灌溉排水*, 2001, 20(2): 69– 72.
- [27] 赵 丹, 邵东国, 代 涛. 干旱灌区水盐动态模拟与实验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(2): 42– 45.
- [28] 许 迪, 丁昆仑, 蔡林根, 等. 黄河下游灌区农田排水再利用效应模拟评价[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(5): 1– 5.
- [29] 殷国玺, 张展羽, 郭相平, 等. 减少氮流失的田间地表控制排水措施研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 926– 931.
- [30] Norman J. Dudley, Bradley W. Scott, Michelle L. Coelli, Trade-offs between the effectiveness and opportunity costs of water supplies to wetlands: an explanatory manual[M]. 1994.
- [31] Takeuchi K, Moreau D H. Optimal control of multi-unit interbasin water resource system[J]. *Water Resources Research*, 1974, 10(3): 407– 414.
- [32] Lee Soontak, Sung-sup Ahn. A system model for optimal water allocation through inter-basin water transfer [A]. *Proceedings Vol. I of APD 5th Congress of IAHR*, Seoul[C]. Korea, 1986.
- [33] Fleming R A, Adams R M, Kim C S. Regulating groundwater pollution: effects of geo-physical response assumptions on economic efficiency[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31: 1069– 1076.
- [34] Wong, Hugh S, Ne-Zheng Sun, et al. A two-step nonlinear programming approach to the optimization of conjunctive use of surface water and ground water[M]. Davis: University of California Water Resources Center, 1997.
- [35] Carlos Percia, Gideon Oron, Abraham Mehrez. Optimal operation of regional system with diverse water quality sources[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1997, 123(2): 105– 115.
- [36] Smout I K, Gorantiwar S D. Multilevel approach for optimizing land and water resources and irrigation deliveries for tertiary units in large irrigation schemes I: Method[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers, 2005, 131(3): 264– 272.
- [37] 郭元裕, 李寿声. 灌排工程最优规划与管理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [38] 贺北方, 丁大发, 马细霞. 多库多目标最优控制运用的模型与方法[J]. *水利学报*, 1995, (3): 84– 88.
- [39] 邵东国, 郭宗楼. 综合利用水库水量水质统一调度模型[J]. *水利学报*, 2000, (8): 10– 15.
- [40] 齐学斌, 樊向阳. 井渠结合灌区水资源高效利用调控模式[J]. *水利学报*, 2004(10): 119– 124.
- [41] 王 浩, 秦大庸, 韩素华. 宁夏河套灌区农业水资源高效利用模式研究[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(5): 585– 590.

- [42] 周祖昊, 袁宏源, 王浩, 等. 应用线性二次高斯控制进行灌区调度[J]. 水利学报, 2005, (2): 155–162.
- [43] 阮新建, 袁宏源, 王长德. 灌溉明渠自动控制设计方法研究[J]. 水利学报, 2004, (8): 21–25.
- [44] Iyengararasan M, Murty V V N. Assessing environmental impacts in large irrigation systems using GIS[A]. Tingsanchali T. Proceedings of the International Conference on Environmentally Sound Water Resources Utilization[C]. Bangkok, Thailand, 1993, (1): 35–42.
- [45] Fortes P S, Platonov A E, Pereira L S. GISAREG-a GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use and environmental control[J]. Agricultural Water Management, 2005, 77(1–3): 159–179.
- [46] 曲兴辉, 谷秀英. 平原区地表水与地下水联合调控模型研究[J]. 水文, 2005, 25(4): 23–25.
- [47] 徐宁红, 刘勇, 彭世彰. 水稻控制灌溉技术在宁夏的应用研究与推广[J]. 中国农村水利水电, 1999, (10): 8–10.
- [48] 蔡大鑫, 沈能展, 崔振才. 调亏灌溉对作物生理生态特征影响的研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2004, 35(2): 239–243.
- [49] 龚少红, 崔远来, 黄介生, 等. 不同水肥处理条件下水稻生理指标及产量变化规律[J]. 节水灌溉, 2005, (2): 1–4.
- [50] 南海鹏, 贾嵘, 朱岸明, 等. 节水灌区调度管理自动化应用系统[J]. 计算机工程, 2002, 28(7): 192–194.

## Review of the researches on theory and technology of regulation for high efficient utilization of water resources in the irrigation and drainage system

Shao Dongguo, Liu Wuyi, Zhang Xianglong

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Research on theory and technology of regulation for high efficient utilization of water resources in the irrigation and drainage system plays an important role in increasing the utilization ratio of irrigation water resources, preventing waterlogging and salinification, controlling agricultural non-point source pollution, renovating the ecological environment and promoting the sustainable utilization of water resources. Based on summarizing various researches, the theory and technology of regulation for high efficient utilization of water resources in the irrigation and drainage system were analyzed. And the further study and the unsettled problems are put forward.

**Key words:** irrigation and drainage system; high efficient utilization of water resources; theory and technology of regulation