

节水型生态灌区建设与展望

彭世彰¹, 纪仁婧^{1,2}, 杨士红^{1,2}, 刘笑吟^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要:节水型生态灌区的建设对于保障我国粮食安全和水资源安全具有重要意义。将水生态文明引入灌区建设中,探索性地将灌区视为一个自然、社会、经济与人“四位一体”的复合系统。在节水型生态灌区概念的基础上,分析灌区工程、灌水技术、生态系统、管理及文化的构建路径,提出节水型生态灌区建设评价指标体系与方法,指出灌区建设中存在水土资源配置不合理、未从机理角度寻求解决生态问题的措施、节水灌溉服务体系不健全、未能实现科学生产等的主要问题,展望了灌区建设需要研究的课题以及智慧型灌区的发展方向。

关键词:生态灌区;灌区建设;灌区管理;节水;综述

中图分类号:S274 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)01-0001-07

Construction and prospect of water-saving ecological irrigation district//PENG Shizhang¹, JI Renjing^{1,2}, YANG Shihong^{1,2}, LIU Xiaoyin^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The construction of water-saving ecological irrigation district is vital for China's food and water resources security. The water ecological civilization was introduced into the construction of the irrigation district, regarded as a quaternity-integrated system of "natural-social-economical-artificial". Based on the concept of water-saving ecological irrigation district, the construction of engineering, technology, ecosystem, management and culture of the irrigation district were analyzed, as well as the evaluation indicators system. Meanwhile, some main problems existing in the construction of water-saving ecological irrigation district were pointed out, such as the unreasonable allocation of land and water resources, the unsolved mechanism for the ecological problems, the incomplete water-saving irrigation service system and the failure to achieve scientific production. Some issues which need future study were pointed out in irrigation district construction as well as the development direction for intelligent irrigation district.

Key words: ecological irrigation district; irrigation district construction; irrigation district management; water-saving; review

1 节水型生态灌区建设的必然趋势

灌区是我国粮食规模化生产的重要基地。截至 2011 年年末,全国共有灌溉面积 6 680 万 hm²,其中大型灌区 456 处,中型灌区 7 316 处,小型灌区 205.82 万处。灌区平均产量超过 7 500 kg/hm²,是全国粮食平均产量的 1.8 倍,是旱田的 2~4 倍。在占全国耕地面积 1/8 的大型灌区有效灌溉面积上,生产了全国 1/4 左右的粮食,创造了全国 1/3 以上的农业生产总值。灌区为我国农业和国民经济的持续发展、粮食安全保障提供了不可替代的基础设施

和物质保证。

我国大部分灌区是在新中国成立后建成的。20 世纪 50—60 年代以建设新灌区、改建和扩建旧灌区为主,1965 年灌溉面积达到 3 000 万 hm²,粮食产量达 1 900 亿 kg,解决了建国初期人民群众的温饱问题。20 世纪 70 年代着重农田水利配套工程建设,全国有效灌溉面积大幅增加,粮食产量显著提高。随着水资源紧缺的矛盾日益显著,我国大型灌区从 2000 年开始陆续进行续建配套与节水改造工作,2005 年水利部组织对大型灌区节水改造项目进行中期评估,与 1998 年相比,评估的 255 个灌区有

效灌溉面积增加 64.6 万 hm^2 , 年灌溉用水量减少 62 亿 m^3 , 灌溉水利用系数由 0.425 提高到 0.499, 粮食产量增长 6.8%, 农业总产值增幅达 46.1%, 信息化试点工作也取得初步成效, 灌区管理水平显著提高。由于灌区建设始终以工程效益最大化为目标, 对区域生态和环境重视不够, 加之全球极端气候影响, 灌区水环境恶化、土壤质量退化、农田面源污染、生物多样性降低、生态系统破坏等一系列制约灌区未来可持续发展的突出问题不断涌现。良好的生态系统是灌区生产力发展的基础, 因此, 在全球气候变暖及粮食危机的背景下, 灌区必须由单一生产功能向肩负保障粮食安全、供水安全、服务节水型社会建设和水生态环境保护、农村景观建设等多重任务发展, 以水生态文明指导新阶段灌区建设, 突出水资源高效利用与生态环境保护这个主题以及围绕这个主题建立的配套体系是节水型生态灌区建设的主要内容。节水型生态灌区建设是水生态文明建设的重要组成部分, 是社会主义新农村建设的必然要求。

2 节水型生态灌区的概念和作用

2.1 节水型生态灌区的概念

近年来, 许多学者和专家都从不同方面论述了生态灌区的概念^[1-5]。顾斌杰等^[2-3]在生态灌区构建原理与关键技术方面进行了深入研究, 认为生态灌区是指灌区系统与流域生态环境相协调, 达到灌区水量和化肥农药施用节约化、水质自我净化、农产品品质无害化、水土保持和土壤结构持续利用化、工程布局 and 调控管理最优化、秸秆处置和沟渠河道生态化、经济和社会效益最大化。杨培岭等^[4]通过对生态灌区建设支撑技术体系的研究, 认为生态灌区是在人与自然和谐理念指导下, 通过灌区水资源高效利用、水环境保护与治理、生态系统恢复与重构、水景观与水文化建设、灌区生态环境建设及灌区管理等多方面的生态调控技术措施, 以维持灌区生态系统的稳定及修复脆弱的生态系统使其形成良性循环为目的, 形成的生产力高、灌区功能健全、水资源配置合理、生物多样性高而单位水量提供的生态服务功能最大的节水型灌区。

笔者认为, 节水型生态灌区是将水生态文明观融入灌区建设与管理中的各个环节, 构建一个工程体系与自然环境协调一致、管理方式与时俱进、水资源高效永续利用、生态系统健康、经济良性循环、具有自身人文景观特色的系统。该系统能够长期不对周围环境造成明显的改变并具有较高的生产力。节水型生态灌区建设就是遵循生态规律, 创造出比自然生态系统具有更高生产力的自然、社会、经济与人融合为一个有机整体所形成的互惠共生的复合系

统。简而言之, 节水型生态灌区是一类生态健康的灌区, 它应具有以下三方面特点: ①和谐性, 工程与自然、经济与自然、人与自然、人与社会和谐, 兼顾社会、经济和环境三者的整体利益, 在整体协调的秩序下寻求发展; ②高效性, 水土资源高效利用, 回归水与劣质水资源循环利用, 灌区工程配套, 经济效益好, 管理水平高; ③可持续性, 高度重视环境保护和生物多样性的维护, 合理配置资源, 形成生态生产观, 使生产力具有可持续性, 能够满足当代人和后代人生存发展的需要。

2.2 节水型生态灌区的功能与作用

与传统灌区相比, 节水型生态灌区具有更复杂、更全面的功能。灌溉依然是灌区最重要的功能, 可确保农业生产在需要时, 经由输水系统将水资源不断地输送到农田。渠系兼具输水和维护生态系统健康的任务。农田具有粮食及经济作物的生产、提高产品品质的功能, 还具有保持水土、储存和调节养分的功能, 经由灌溉浸润, 同时保证农田其他生命的需水要求。沟道不仅承担排涝、降渍的任务, 在节水型生态灌区中, 沟道与湿地协同, 共同承担农田排水的水质净化任务。灌区林草植被生态系统能够保持土壤、涵养水源、改善小气候, 兼具景观价值。节水型生态灌区能够有效巩固水利基础设施, 提高农业抗灾减灾能力, 保证粮食安全; 促进农业种植结构调整, 增加粮食及经济作物的产量, 促进地区经济发展; 提高灌区输配水能力和水资源利用率, 提高水资源综合生产能力, 同时保护生物多样性与生态环境, 提高人民生活水平与居住环境, 提升灌区形象; 在先进的理念与科学技术的指导下, 能够实现灌区的现代化管理。总之, 节水型生态灌区的建设与民生息息相关, 它具有保障粮食生产、保护生态与环境、促进经济发展、改善人民生活等多种功能和多重效益, 实现粮食作物高产、节水与生态安全之间的和谐, 实现农业增产、农民增收、农村繁荣的目标, 使水利事业服务于民生, 造福于民生, 保障于民生, 润泽于民生。

3 节水型生态灌区建设的技术路径

3.1 建设环境友好型的灌区工程

3.1.1 生态型渠道构建技术

输配水渠道系统是灌区的动脉, 不仅承担输水任务, 还应成为绿色走廊、生态通道。从生态角度, 土质渠床是多种草、水生生物、昆虫等繁衍栖息的场所。传统灌区为有效提高水资源利用率, 输配水渠道多采用衬砌形式, 阻断了水系、土壤与生物之间的天然联系, 对区域生物多样性造成不利影响。发达国家对衬砌渠道的生态危害认识较早, 日本于 20 世纪 90 年代初提出“亲水”观念, 并进行了实践, 研发出植被型生

态混凝土,在水稻种植区进行渠道衬砌时,为保证稻田生物链的完整性而设有鱼道;美国针对渠井双灌区,在俄亥俄州的 the Great Plains 灌区进行了渠道防渗衬砌对灌区地下水的影响研究,以确定渠道防渗衬砌的规模和标准^[6]。近年来,我国也逐步关注渠道衬砌对生态环境的影响问题,在衬砌材料方面,采用环保型绿色植被混凝土^[7]、无沙大孔隙混凝土,以利于植被生长。衬砌技术方面,在灌区节水改造工程中,只对渠道最高水位线以下的断面进行混凝土衬砌,最高水位线以上部分种植人工草皮。对于混凝土衬砌渠道可采用护坡不护底及复合式衬砌形式,或采用植生型防渗砌块技术、原生态植被防护、三维土工网垫技术等,其原理均是在衬砌渠道内开辟与外界相连的生态通道,形成类似于土渠的生态区域,在提高渠系水利用率的同时重现渠道生机。

3.1.2 明沟暗管排水系统

排水沟道系统用于排除农田过多水分,使土壤具有良好的通气状况和营养条件,是灌区系统的重要组成部分,也是农田面源污染物的主要汇集地和重要削减地。沟道系统栽种植物,不另外占用土地,通过缓解水流流速,促进泥沙颗粒沉淀,增强沟内植物对氮磷的立体吸收和拦截作用,可以有效减少农田养分流失对下游水体造成的面源污染,还能形成良好的生态景观。杨林章等^[8]在对太湖地区农业面源污染的治理中,研究了生态沟对农田排水中氮磷的拦截效果,结果表明生态沟对农田排水中总氮和总磷的多次平均去除率分别达 46.38% 和 40.53%;王岩等^[9]得出类似结论。植物所累积的氮磷总量要高于底泥的累积量,可见植物在生态拦截型沟渠中占有重要地位,也说明对沟渠植物管理的重要性^[10-11]。近年来,灌溉-排水-湿地协同系统对氮磷的去除效果一直是研究的热点,彭世彰等^[12]针对典型南方灌区稻麦轮作、自流灌溉、明沟排水等实际情况,提出了农田、生态沟和湿地协同系统(PEDWS),并研究了 PEDWS 原位削减排水中氮磷的效果,结果表明,系统出口总氮和总磷浓度分别降低 63.51% 和 25.00%;董斌等^[13]通过对灌溉-排水-湿地综合管理系统(WRSIS)的引进和改造,使早稻、晚稻排水中总氮总磷的含量分别减少 34.1%、27.7% 和 78.3%、40.0%。灌溉、排水、湿地系统的优化调度不仅能够减少农田排水中氮磷的含量,还能从源头减少农田污染物排放,提高灌溉保证率、水分利用率和粮食产量以及保护与修复生态系统。

暗管排水技术是干旱和半干旱地区防止土壤盐渍化的一项重要水利措施,淋洗盐渍土后的含盐水通过暗管集中排到明渠。雨季暗管对土壤盐分的降低幅度较大,平均降幅为 47.8%,旱季暗管对土壤盐分

的降低作用依然明显,平均降幅为 28.7%^[14]。于淑会^[15]研究分析了暗管排盐技术改良盐碱地后的生态系统服务功能变化,结果显示,暗管排盐技术实施前后,森林、草地、农田、湿地、水体与荒漠 6 种生态类型的单位面积生态系统服务价值均有不同程度的增加,总生态系统服务经济价值是实施前的 2.31 倍。宋绍宪^[16]曾比较上农下渔与暗管排水两种开发模式的生态服务价值情况,仅考虑农田在气候调节、涵养水源、水土保持等方面的生态服务价值,暗管排水开发模式是上农下渔开发模式的近 2.2 倍,说明暗管排水排盐技术的实施提升了区域的生态系统服务能力,增加了区域生态系统服务功能价值。暗管排水装置可与控制排水闸门协作,根据旱作物对地下水降落速度的不同要求,选择启用相应的排水措施,由此实现灌区内地表、地下两种水位的有效控制。

3.1.3 灌区建筑物的生态化改造

节水型生态灌区中的泵站、闸、桥、涵、渡槽等水工建筑物在设计施工时,需结合本身水利特性,并从美学角度及生态和环境方面加以考虑。朱丽娟等^[17]提出了一种泵站景观平台结构,改变了泵站进、出水池形式单一的渠道形象,在进水池和出水池的上方设置景观平台,平台板面满布或镂空,满布部分呈平面或凹凸面,可填土绿化,镂空部分可直接见水,形成水上花园。太浦河泵站在亲水、休闲、景观、生态方面进行了积极改造,不仅增加了绿化面积,还为人们提供了一个亲水休闲空间。叉梯式景观闸门、拱形景观闸门闸型结构新颖、视觉丰富,将水体、建筑物和周围环境充分融合。灌区水利设施总体规划布局应以生态、绿色、协调为特色,以水景和绿化衬托建筑物,使建筑物与景观带融为一体。

3.2 集成应用先进的灌水技术

灌区节水灌溉是一项系统工程,要将农业措施与水利措施相结合,工程措施与非工程措施相结合,实现各种灌水技术的组装、配套与集成。我国已探索并推广了许多节水灌溉模式,如非充分灌溉、调亏灌溉、控制灌溉、间歇湿润灌溉等。节水灌溉使渗漏量和地表排水量减少,土壤通透性增强,抑制了渗漏和地表排水中氮磷浓度的升高。彭世彰等^[18]依据 5 年的田间原位观测资料,分析控制灌溉稻田甲烷排放规律及其减排效果,结果表明控制灌溉稻田的稻季甲烷排放量较淹水灌溉稻田降低 83.5%,说明控制灌溉能较大幅度地减少甲烷排放。在灌溉技术方面,采用喷灌、滴灌、渗灌、微灌、膜上灌、波涌灌等,均有不同程度的节水效果,同时考虑灌区的生态需水量,可充分发挥水资源的经济效益和生态效益。近年来,灌水技术推广已从单一的技术模式向系统集成模式转变,并且与农业种植结合更加紧密。西

北地区的膜下滴灌技术就是滴灌、农膜、施肥、农业机械铺设等多项技术的集成。引黄灌区坚持“骨干渠道节水改造+田间节水工程规范化建设+用水户参与管理”的节水灌溉综合发展模式。井灌区主要发展“低压管道灌溉-射频卡自动控制”灌溉模式,实现了节水工程与管理技术的有机结合。针对不同土壤、肥力、地下水水位等条件,选用适宜的综合发展模式,是实现高产、大幅度节水及防污的有力保障。

3.3 构建健康的灌区生态系统

农田环境、土壤、农作物、各种昆虫和微生物是构成农田系统的主要因素。土壤有机质含量和土壤重金属含量是评价土壤质量的主要指标;土壤有机质含量是土壤肥沃程度的标志,是夺取作物高产的基础,增施有机肥、秸秆还田、发展绿肥、粮草轮作、粮草间作等是提高土壤有机质含量的有效途径。徐加宽等^[19-20]研究表明,作物籽实重金属含量与土壤中重金属含量呈正相关,土壤中重金属含量是影响作物品质的重要因素,可通过工程、物理、化学、生物手段修复。在全球气候变暖的背景下,控制灌区温室气体的排放同样是生态灌区建设的重点。

灌区林草生态系统主要由乔、灌、草及栖息在其中的动植物构成。景观的异质性越高,其内部生境的多样化程度越高,必然带来生物的丰富多样,也使景观更趋于稳定^[4]。灌区景观的不同种植模式对生态环境改善的贡献程度不同。林草套种,同时考虑适宜不同地区的树种草种及其生长的相互影响,利用当地充足的光照,便利的灌溉资源,能有效地改善生态。通过对景观斑块均匀性、多样性的构建,使林草生态系统兼具景观价值,提升灌区景观环境,充分发挥各景观斑块的生态功能。

节水型生态灌区具有较高的水污染防治水平,一方面通过减排措施减少人类活动对生态环境排放废弃物的压力,另一方面通过构建湿地生态系统加强生态环境自净能力和消纳容量。湿地系统能够通过土壤吸附、植物吸收、生物降解等一系列作用,降低进入下游受纳水体中的氮磷含量,对农田排水中氮磷污染的净化效果显著^[21-22]。茆智等^[22]试验结果表明,人工湿地对早稻和晚稻排水中总氮和总磷的去除率分别为 56.0%、17.2% 和 64.1%、76.7%; Tanner 等^[23]发现在没有种植植物的湿地中总氮和总磷的 7 d 去除率分别为 41% 和 36%,而在种植了棒灯芯草时分别为 75% 和 74%,当流入的污水中氮磷含量增加时,种植植物的湿地去除效果有一定程度的提高,没有种植植物的却下降。成水平等^[24]专门考察了香蒲和灯芯草两种湿地植物,发现人工湿地基质中氮磷的含量分别比无植物的对照基质低 18%~28% 和 20%~31%。王庆海等^[25]测试了 7 种北方常见

湿生植物对农田排水的净化能力,不同植物净化能力存在较大差异,其中芦竹的综合净化能力最强。

3.4 搭建灌区信息管理平台

生态灌区的建设应秉承“建管并重,软硬同举”的思想,运用现代化管理手段,建立适应新形势的高效管理模式,是实现节水型生态灌区的根本保证。①以搞好用水管理和工程管理为中心,合理规划灌区内部管理机构和管理人员,灌区法律、法规、规章配套,建立行之有效的水费征收机制,保证灌溉管理工作良性高效运行。②实现农业耕作机械化和工程施工机械化,在工程建设、维修、养护和运行管理中广泛采用高科技,对灌区的基本信息、工程资料等进行管理,建立工情管理系统。③建立信息采集系统,实现灌区水管理的自动化、信息化,保证水利信息网互联互通,实现对灌区各地的雨情、水位、流量、灌区干支渠配水量、灌区土壤墒情、农作物生长情况等信息的自动监测、数据采集、传输和处理。④建立水情预测系统,根据历史水文、气象资料以及信息采集系统的数据,通过分析进行来水预报,利用先进的计算机技术参与灌溉用水优化调度和统一管理,对灌溉设施运行实行自动化和半自动化调控,实行计划用水、科学灌溉,以促进水资源效能的最大发挥。⑤建立灌区环境监测系统,对灌区水环境与水生态等信息进行实时监测、及时反馈,为提高灌区管理水平与效率提供有效保障。

3.5 丰富节水型生态灌区的特色文化

生态灌区的特色文化以水为载体,建立在灌区自然环境和社会环境基础之上,是灌区在建设和发展过程中形成的精神文明、物质文明和政治文明的综合反映以及由此而形成的整体凝聚力,是灌区一定发展阶段的建设、管理和经济水平的集中体现。对灌区资源等诸方面的认识,如水资源节约高效利用的意识、生态文明观、可持续发展的思想都是灌区水文化的精神体现;“天人合一”的水利工程及与之相关的工程技术,优美的居住和生活环境,沟、渠、井、路、电、库、塘、田、林、园、村布置合理,田畴纵横,阡陌交错,绿树成荫,渠道水流清清,管理站环境幽雅,功能设施配套齐全,通过灌区工程与景观建设相结合,构建具有田园风光的生态灌区,是灌区水文化的物质体现;针对灌区制定的法律法规及规章制度等构成了灌区水文化的政治基础。灌区水文化对于生态型灌区建设具有重要的推动作用,丰富具有灌区特色的文化,全面提升灌区的生态文化品位,造福当代,惠泽未来。

4 节水型生态灌区的评价指标与方法

4.1 节水型生态灌区的评价指标

目前,对节水型生态灌区建设的评价指标体系

研究还很少,已有研究中评价指标的选取在宏观层面上大体相同,大部分是反映工程、经济、社会、生态方面的指标,只在微观层面上各有侧重。方延旭等^[26]在研究北野厂灌区生态系统健康的评价中,选取了相互独立且反映灌区生态系统的结构属性(作物多样性、农田景观格局、渠系布置)、生态环境要素(森林覆盖率、土壤理化性质、大气质量、地表及地下水水质)、整体功能性要素(水资源配置、灌溉水质达标率、安全饮水保证率、生态环境需水保证率、生态景观功能)及社会经济要素(作物产量、废水处理率、垃圾处理率、化肥农药施用强度、灌区环境保护意识、灌区管理水平)等典型敏感性指标。胡泊^[27]通过分析生态灌区的含义及构成元素,在参考有关专家意见的基础上,制定了评级标准,包括灌区功能保障与节水系统评价指标、灌区自然生态系统评价指标、灌排工程模式评价指标、灌区水环境系统评价指标、灌区管理系统评价指标,其中灌区自然生态系统评价指标有植被情况、土壤情况、水土保持情况、水面率及生物多样性。笔者在综合分析相关研究^[5, 26-28]的基础上,以科学性、代表性、全面性及可操作性为原则,提出5个评价准则,即灌区工程、水资源、生态环境、管理和社会经济准则。工程指标有工程设备配套程度、渠道防渗处理情况、渠道生态处理情况、排水系统生态处理情况、安全措施配套情况。水资源量满足生态、社会、经济的需求,是水生态文明建设的基本要求,评价指标有人均可用水量、灌溉水利用率、灌溉水水质、地下水可开采量、单位水量生产效率、生态需水量保证率、劣质水重复利用率。生态环境指标包括林草植被覆盖率、土壤有机质含量、土壤重金属含量、空气质量、化肥使用量、生物多样性、湿地布置情况。管理指标有基层水利服务情况、灌区水利信息监测情况、用水户参与灌溉管理情况、灌区组织管理情况。社会经济评价需以人为核心,具体指标有节水宣传情况、农民人均收入、文化生活设施配套情况、灌区总体效益。节水型生态灌区建设指标体系不是一成不变的,它随灌区地理位置、灌区尺度、灌区主要经济作物、灌区发展目标等的不同而存在较大差异,指标体系的建立需以现代社会理念及先进的科学技术为指导,随着人类对自然的认识、社会对灌区的要求不断完善。

4.2 节水型生态灌区的评价方法

节水型生态灌区是一个多功能、多目标的评价对象,其指标体系也较复杂。在具体评价工作中,指标体系的选用需符合灌区建设的长远目标,根据灌区实际情况,在通适性指标的基础上考虑灌区建设的差异性指标,并根据需要和指标的重要性确定权重。指标体系在运用时,需设置具体的基准状态作

为参考点,定量与定性分析相结合,在对比的基础上进行评价。传统的评价方法主要有层次分析法、主成分分析法、模糊综合评判法、可拓评价法、集对分析法、灰色关联法等,近年来人工神经网络和3S技术也逐渐应用于评价方法研究中。灌区评价方法发展也较为迅速,在指标量化方面,罗金耀提出了专家估测法和落影函数指标量化法,游黎^[29]提出了基于博弈论的方法,将主、客观赋权法进行组合优化。朱秀珍^[30]采用主观赋权法中的层次分析法和客观赋权法中的熵值法确定湖北省13个灌区所选取的评价指标的综合权重。在评价方法方面,近年来,对两种评价方法相结合的综合评价法研究较多,方延旭等^[26]提出了由层次分析法和模糊数学理论相结合的二级模糊综合评价模型,并用此评价北野厂再生水灌区的生态系统健康性;又如基于层次分析法的模糊综合评价法、基于层次分析法的灰色关联分析法等,能够克服单一方法评价的缺点,发挥其综合特性,提高评价的准确性,实践证明其评价精度较高^[31-32]。

5 节水型生态灌区建设存在的问题与展望

5.1 存在的主要问题

随着人口增长、经济发展、城市化推进,必然导致耕地面积的减少。要保证国家粮食安全和水资源安全,实现水资源高效利用,维护经济与生态和谐等多目标的灌区建设模式,就要以水生态文明指导灌区建设。我国节水型生态灌区建设刚刚起步,实践经验较少,还存在许多问题。

a. 未实现灌区水土资源的合理配置。灌区水资源和土地资源相互依存、相互制约,其合理配置涉及水土资源在不同部门之间及部门内部的科学分配,不仅仅局限于田间尺度上的水土资源耦合。灌区尺度的水土资源配置需与经济、社会、生态三者共同研究,实现在水土环境良性循环的条件下,获得最大的经济、社会效益和生态效益。

b. 未深入探求灌区生态环境受损退化机理。对于灌区存在的生态环境问题,仅采取措施进行治理是不够的,由于未从机理角度深入探求灌区生态环境受损退化发生、发展的原因,导致许多环境问题反复出现。今后需从机理角度探索灌区面源污染规律,探索现代节水灌溉技术对生态环境及地表地下水水文循环的影响,以经济适用、生态和谐为原则,针对具体问题因地制宜地实施相应的生态工程修复技术。

c. 节水灌溉服务体系不健全。节水灌溉技术有别于传统粗放的灌水方式,需要一定的理论和技术作为基础,农民在应用和维护节水灌溉系统时,缺乏及时、有效的技术服务支持,加之灌区水权不明晰,对节水的补贴和激励政策不到位,一定程度上影响了

节水灌溉技术的推广,造成水资源不必要的浪费。

d. 未能立足长期发展机制。节水型生态灌区建设需建立在高技术、高投入的基础上,立足长期的发展机制,实现灌区生产力可持续发展。由于管理系统成本过高,同时需要先进的科学技术作为支撑平台,导致与节水型生态灌区建设有关的科研成果、新技术及新材料等未能很好地应用于灌区建设中,多数科研成果不能及时转化为生产力,致使灌区改造的整体效益没有得到长足提高。

5.2 展望

a. 优化配置灌区水资源,充分发挥水资源综合效益。灌区水资源既要满足农业生产、农村生活,还要满足灌区生态需水要求,即维持灌区生物体自身生存及维护生物体所需生存环境的最低需水量。通过对灌区生态需水阈值的计算,寻求水资源在农业生产、农村生活与生态需水之间的合理配置,满足单位产值的水资源消耗最小、生态服务功能最大的要求,尤其对水资源缺乏地区及生态脆弱或退化地区,有助于合理优化配置区域水资源,保障水资源开发利用和生态环境保护同步开展,充分发挥水资源的综合效益。

b. 应用生态友好型的节水措施,实现节水高效和生态优良的目标。现代节水灌溉技术如喷灌、滴灌、微灌、渗灌、膜上灌等都有很好的节水效果。通过农业节水措施对生态环境影响机理的研究,改良和提高已有灌溉技术,使其具有节水、节能、增产、省工、省力等优点,同时能够保证生态系统的完整性。还应重视农机、农艺节水措施的生态效应,最终达到节水高效、生态优良的目的。

c. 合理构建灌区灌溉、排水、湿地系统运行模式。通过对不同尺度沟塘湿地的立体设计,包括区域性水生植物的种类、数量及其搭配方案,构建满足最佳去污要求的田间节水灌溉、沟系控制排水、库塘湿地截留净化的系统模式,明晰氮磷污染物在各个环节的最佳滞留时间及净化效果,确定达到最佳去污能力的系统调度方案,充分发挥节水灌溉-控制排水-湿地截留系统的净化作用。

d. 探索智慧型灌区构建模式。智慧型灌区是以灌区的信息化为基础,强调管理信息系统分析和解决问题的能力。通过对基本原理的理解与运用,能够自动收集、处理、反馈信息,形成对事物发展的前瞻性看法,从而实现对灌区自动、精准、及时的管理。由于灌区所具有的水情雨情变化性、农作物需水时效性、灌溉供水动态性等方面的特点,使灌区的水综合管理工作十分复杂,又由于灌区疆域问题、降水差异、蒸发不同、昼夜温度差异、海拔高度的不同等,想建立一个智能化的灌区管理系统,任务十分艰巨。利用3S技术、通信技术、网络技术等在水型生

态灌区的基础上寻求自动化、信息化、精准化,动态性、实时性,节水、高产、高效,更少人参与,决策更智能的智慧型灌区构建模式是灌区未来发展的方向。

参考文献:

- [1] BROOKES A. Restoration and enhancement of engineered river channels: some European experience[J]. Regulated River: Research and Management, 1990, 5(1): 45-56.
- [2] 顾斌杰. 生态型灌区构建原理及关键技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [3] 顾斌杰, 王超, 王沛芳. 生态型灌区理念及构建措施初探[J]. 中国农村水利水电, 2005(12): 7-9. (GU Binjie, WANG Chao, WANG Peifang. Study on concept of ecological irrigation district and its construction measures [J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(12): 7-9. (in Chinese))
- [4] 杨培岭, 李云开, 曾向辉, 等. 生态灌区建设的理论基础及其支撑技术体系研究[J]. 中国水利, 2009(14): 32-35. (YANG Peiling, LI Yunkai, ZENG Xianghui, et al. Ecological irrigation district: studies on theory basis and supporting technical system [J]. China Water Resources, 2009(14): 32-35. (in Chinese))
- [5] 张占庞, 韩熙. 生态灌区基本内涵及评价指标体系评价方法研究[J]. 安徽农业科学, 2009(18): 8621-8623. (ZHANG Zhanpang, HAN Xi. Study on evaluation method of basic meaning and evaluation index system in ecological irrigation district [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009(18): 8621-8623. (in Chinese))
- [6] HARVEY F E, SIBRAY S S. Delineating ground water recharge from leaking irrigation canal using water chemistry and isotopes [J]. Ground Water, 2001, 39(3): 408-421.
- [7] 孙永军, 刘学功, 程庆臣, 等. 环保型绿色植被混凝土的开发与应用[J]. 水利水电技术, 2004, 35(1): 85-86. (SUN Yongjun, LIU Xuegong, CHENG Qingchen, et al. The development and application of environmental protection concrete [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(1): 85-86. (in Chinese))
- [8] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11): 1371-1374. (YANG Linzhang, ZHOU Xiaoping, WANG Jianguo, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(11): 1371-1374. (in Chinese))
- [9] 王岩, 王建国, 李伟, 等. 生态沟渠对农田排水中氮磷的去除机理初探[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 586-590. (WANG Yan, WANG Jianguo, LI Wei, et al. Initial exploration of mechanism of ecological ditch intercepting nitrogen and phosphorus in drainage from farmland [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(6): 586-590. (in Chinese))
- [10] COTTON J A, WHARTON G, BASS J A B, et al. The effects of seasonal changes to in-stream vegetation cover on

- patterns of flow and accumulation of sediment [J]. *Geomorphology*, 2006, 77(3/4): 320-334.
- [11] JIANG C L, FAN X Q, CUI G B, Removal of agricultural non-point source pollutants by ditch wetlands: Implications for lake eutrophication control [J]. *Hydrobiologia*, 2007, 581: 319-327.
- [12] 彭世彰, 熊玉江, 罗玉峰, 等. 稻田与沟塘湿地协同原位削减排水中氮磷的效果[J]. *水利学报*, 2013, 44(6): 657-663. (PENG Shizhang, XIONG Yujia, LUO Yufeng, et al. The effect of paddy eco-ditch and wetland system on nitrogen and phosphorus pollutants reduction in drainage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(6): 657-663. (in Chinese))
- [13] 董斌, 茆智, 李新建, 等. 灌溉-排水-湿地综合管理系统的引进和改造应用[J]. *中国农村水利水电*, 2009(11): 9-12. (DONG Bin, MAO Zhi, LI Jianxin, et al. Introduction, adaptation and application of wetland-reservoir-subirrigation-system in rice-based irrigation systems of south China [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(11): 9-12. (in Chinese))
- [14] KELLENERS T J, KAMRA S K, JHORAR R K. Prediction of long term drainage water salinity of pipe drains [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 234(3/4): 249-263.
- [15] 于淑会. 暗管排盐技术适宜性评价及其对生态功能影响研究: 以环渤海河北省近滨海盐碱区为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.
- [16] 宋绍宪. 黄河三角洲重盐碱地生态开发模式分析[D]. 北京: 中国石油大学, 2010.
- [17] 朱丽娟, 徐立荣, 高占学. 一种泵站景观平台结构: 中国, CN201162211 [P]. 2008-12-10.
- [18] 彭世彰, 和玉璞, 杨士红, 等. 控制灌溉稻田的甲烷减排效果[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 100-107. (PENG Shizhang, HE Yupu, YANG Shihong, et al. Mitigation of methane emissions from paddy fields under controlled irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 100-107. (in Chinese))
- [19] 徐加宽, 杨连新, 王余龙, 等. 水稻对重金属元素的吸收与分配机理的研究进展[J]. *植物学通报*, 2005, 24(5): 614-622. (XU Jiakuan, YANG Lianxin, WANG Yulong, et al. Advances in the study uptake and accumulation of heavy metal in rice (*Oryza sativa*) and its mechanisms [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2005, 24(5): 614-622. (in Chinese))
- [20] 武淑华, 朱伊君, 顾亚中. 小麦重金属含量与土壤质量之间关系研究[J]. *黑龙江环境通报*, 2002(3): 97-100. (WU Shuhua, ZHU Yijun, GU Yazhong. Research of the relationship between the heavy metal content of wheat and the quality of soil [J]. *Heilongjiang Environment Bulletin*, 2002(3): 97-100. (in Chinese))
- [21] 何军, 崔远来. 生态灌区农田排水沟塘湿地系统的构建和运行管理[J]. *中国农村水利水电*, 2012(6): 1-3. (HE Jun, CUI Yuanlai. Farmland drainage ditch-pond wetland system's construction and its operation management of ecological irrigation districts [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(6): 1-3. (in Chinese))
- [22] 潘乐, 茆智, 董斌, 等. 人工湿地对稻田氮磷污染的去除试验[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2011, 44(5): 586-589. (PAN Le, MAO Zhi, DONG Bin, et al. Experimental analysis of N and P removal effect of constructed wetlands at paddy field [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2011, 44(5): 586-589. (in Chinese))
- [23] TANNER C C, CLAYTON J S, Upsdell M P. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands: II. removal of nitrogen and phosphorus [J]. *Water Research*, 1995, 29(1): 27-34.
- [24] 成水平, 夏宜琤. 香蒲、灯心草人工湿地的研究: II. 净化污水的空间[J]. *湖泊科学*, 1998(1): 62-66. (CHENG Shuiping, XIA Yizheng. Artificial wetland with cattail (*Typha angustifolia*), rush (*Juncus effusus*): II. purifying space [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998(1): 62-66. (in Chinese))
- [25] 王庆海, 段留生, 李瑞华, 等. 几种水生植物净化能力比较[J]. *华北农学报*, 2008, 23(2): 217-222. (WANG Qinghai, DUAN Liusheng, LI Ruihua, et al. Comparison of nutrient uptake from rural domestic sewage of aquatic plants [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008, 23(2): 217-222. (in Chinese))
- [26] 方延旭, 杨培岭, 宋素兰, 等. 灌区生态系统健康二级模糊综合评价模型及其应用[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(11): 199-205. (FANG Yanxu, YANG Peiling, SONG Sulan, et al. Secondary fuzzy comprehensive evaluation model for ecosystem health of irrigation district and its application [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(11): 199-205. (in Chinese))
- [27] 胡泊. 江苏省节水型生态灌区评价指标体系研究与软件开发[D]. 扬州: 扬州大学, 2011.
- [28] 韩振中, 姚宛艳, 张顺尧. 大型灌区现状和节水改造紧迫程度评价[J]. *中国农村水利水电*, 2002(6): 16-20. (HAN Zhenzhong, YAO Wanyan, ZHANG Shun Yao. Evaluation of present situation of large-sized irrigation districts and urgency of water saving reform [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2002(6): 16-20. (in Chinese))
- [29] 游黎. 大型灌区运行状况综合评价指标体系与评价方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2010.
- [30] 朱秀珍. 大型灌区运行状况综合评价研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [31] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. *水利学报*, 2004(3): 65-70. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(3): 65-70. (in Chinese))
- [32] 李小东. 层次—灰色关联分析法及其在污水处理方案优选中的应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2006.

(收稿日期: 2013-10-12 编辑: 熊水斌)