

灌区水综合管理的研究动态与发展方向

彭世彰¹, 刘笑吟^{1,2}, 杨士红^{1,2}, 纪仁婧^{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:为保障我国粮食安全、水资源安全和水环境安全,增强农田生态系统功能,实现农业生态效益、经济效益和社会效益的协调与可持续发展,必须实现灌区水综合管理。界定了灌区水综合管理的概念,分析了水综合管理在灌区发展中的重要作用及其必要性与迫切性,探讨了国内外灌区在节水灌溉、控制排水、农田面源污染控制等方面的研究动态,指出了灌区水综合管理存在的未充分考虑时空变异尺度效应、工程与技术集成不够、缺少衡量的指标体系以及未能发挥灌排整体系统的协同运行效应等问题,提出了水资源高效利用模式下灌区水综合管理在节水、减排、控污及其相互耦合方面取得突破的发展方向和创新的点,可为我国灌区的可持续发展及其相关研究提供新的支撑。

关键词:灌区;水综合管理;节水灌溉;控制排水;面源污染;研究进展

中图分类号:TV213.4;S274.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)06-0001-09

Advances in research and development on integrated water management of irrigation district//PENG Shizhang¹, LIU Xiaoyin^{1,2}, YANG Shihong^{1,2}, JI Renjing^{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 Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Implementation of integrated water management of irrigation district can benefit the agricultural ecology, economy and society in a coordinated and sustainable way. It not only improves the ecological function of farmland and maintains the safety of our domestic food supply, but also protects the water resources and environment. In this paper, we defined the concept of integrated water management of irrigation district and demonstrated its importance and urgency in irrigation district development. Then the research progresses of water-saving irrigation, drainage control and agricultural non-point source pollution control in irrigation district were discussed comprehensively at home and abroad as well as its existing problems including the lack of considering fully temporal variability, scale effect, integration of engineering and technology, indicator system, and the coordinative operation of irrigation and drainage systems. Finally, the future research trend and potential breakthrough point of study for the integrated water management of irrigation district were analyzed at the aspects of water saving, drainage control, pollution control and their coupled interactions, in order to utilize the water resources efficiently. The research results of this paper can support the sustainable development of irrigation district in our country and other relevant research works.

Key words: irrigation district; integrated water management; water-saving irrigation; controlled drainage; non-point source pollution; research advances

灌区水综合管理是一种先进模式,即通过公平、合理的方式,综合开发利用灌区水资源,协调好灌区人、水资源、水环境及水生态的关系,最大限度地创造出经济、社会与生态效益,实现灌区水的优化配置和灌溉水的合理调度,追求以更少的水生产更多的粮食及农田排水更加清洁的可持续发展目标。

水资源短缺、粮食生产能力不足不仅是经济问

题的核心,也是政治社会问题的中心议题。灌区水综合管理能通过节水灌溉和合理排水,高效利用有限的水资源,保障粮食生产与农田生态安全;有效控制农田面源污染与温室气体排放;还能实现节水高产、优质高效、控污减排的灌排-湿地调控模式,创新现代灌区发展理论。所以,灌区水综合管理是实现国家建设节水、高产、生态安全相和谐的高效节水型

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAD08B04,2011BAD25B07)

作者简介:彭世彰(1959—),男,上海人,教授,博士,主要从事节水灌溉理论与农田生态效应研究。E-mail:szpeng@hhu.edu.cn

通信作者:杨士红(1983—),男,山东蒙阴人,博士,主要从事节水灌溉与农田生态效应研究。E-mail:ysh7731@hhu.edu.cn

农业,建设节水型生态灌区,满足农业可持续发展战略需求的重要举措。

灌区水综合管理涉及灌区水资源的管理、灌区水的合理利用、农业种植结构的调整、灌区管理体制的改革、水价政策的制定和生态环境保护等,包括技术、工程、法律、行政和经济等措施,是一个多方位综合运行的水管理模式。20 世纪 70 年代,荷兰就采用了多目标决策的灌区水综合管理系统,旨在对水进行更好的分配,对水质进行严格的管理。美国提出了农田灌区水综合管理的概念,指出灌区水综合管理应结合环境目标,处理好水的高效利用、再次利用与非点源污染控制、水环境保护的关系^[1]。20 世纪末,美国俄亥俄州立大学的研究人员开发出了湿地-水库-地下灌溉系统(wetland-reservoir-subirrigation system, WRSIS),该系统是为了控制农田面源污染和解决水环境问题,通过地下管道和抽水泵站将控制排水、地下灌溉系统与水塘、湿地连接起来而形成的以水利措施为主的灌区水综合管理系统^[2-3]。借助 WRSIS 的理念和方法,为进一步解决我国农业生产中存在的面源污染、化肥流失等问题,武汉大学董斌等^[4-5]在广西、湖北开展的相关田间试验表明,以明沟排水为主的 WRSIS 可显著降低稻田排水中总氮、总磷的含量。李玲君等^[6-7]改进了 WRSIS 中的湿地系统、灌排系统、田间水位控制系统等,减排控污效果显著,并能达到修复农田水环境的目的。彭世彰等^[8]结合我国水稻灌区的基本情况以及治理农业面源污染的紧迫性,又提出了稻田与明沟湿地协同系统(paddy eco-ditch wetland system, PEDWS),该系统旨在高效利用灌溉水,控制农业面源污染,改善灌区水环境与水生态,是适合我国农业可持续发展的灌区水综合管理体系。近来西班牙通过 RIS(relative irrigation supply)、RWS(relative water supply)和 RRS(relative rainfall supply)3 个指标研究大型灌区水综合管理制度与措施,也取得了良好的成效^[9]。另外,武汉大学代俊峰等^[10-11]还在研究 SLURP、SWAT 等不同水文模型在灌区水管理中的运用。世界上其他国家,如澳大利亚、加拿大、印度、伊朗等,也都根据当地水文及作物生长情况不断推广和应用 SWAT 模型,旨在建立基于灌区特点的水管理模式,为灌区水综合管理及节水灌溉策略分析提供新的理论和方法。

1 加强灌区水综合管理的迫切性

1.1 水资源短缺,农业用水比例不断减小

破除水资源瓶颈制约的根本途径是实行最严格的水资源综合管理制度^[12],其核心是建立用水总量

控制制度,确立水资源开发利用控制红线。《全国水资源综合规划》以及国务院《实行最严格水资源管理制度意见》中都明确规定,2015 年、2020 年及 2030 年,全国用水总量控制目标分别为 6350 亿 m³、6700 亿 m³ 和 7000 亿 m³。以水的综合管理为抓手,推动灌区用水方式转变是水利工程供水的一项新实践,有利于水资源的合理配置,提高灌溉水的利用率和利用效率,也是当前水资源紧缺、水环境恶化条件下水资源互济的必然选择。目前我国水资源总量多年平均为 2.84 万亿 m³,人均占有量 2100 m³,不足世界人均占有量的 1/4。2011 年全国水资源总量为 23 256 亿 m³^[13],比 2010 年减少 24.8%,比多年平均水平也偏少 18.1%,时空分布不均更凸显资源性缺水日益加剧。近年来随着气候变暖和极端性天气频发,水资源可用量呈现下降趋势。用水量方面,自 1949 年以来全国总用水量总体呈缓慢上升趋势,但农业用水占总用水量的比例逐年减小,1949 年、1980 年和 2000 年农业用水占总用水量的比例分别为 97.1%、84.3% 和 68.8%,到 2011 年减小到了 61.3%^[14]。供水与需水的矛盾,加上对水资源的不合理开采和利用,对水环境肆意的破坏和污染,我国灌区发展呈现出资源性缺水、结构性缺水 and 水质性缺水的基本水情。

1.2 人口增加,土地减少,粮食需求呈刚性增长

在社会经济发展过程中,资源的开发和利用必须考虑人口增长的长期需要。我国每年新增人口约 700 万人,人口增加给粮食生产安全带来了巨大挑战。另一方面,我国土地资源被城市化建设大量占用,耕地每年减少约 26.67 万 hm²,直逼“18 亿亩红线”。受到工业、生活和生态需水的不断挤占,农业用水要在保证零增长或负增长的前提下保障我国粮食安全,无疑是一个严峻的挑战。土地减少是刚性的,人口增长是刚性的,因此最终只能靠提高单产来解决粮食问题。水利部相关会议也明确提出,要积极加快东北 3 省节水增粮行动,大力发展西南地区小水窖、小水池、小泵站、小塘坝、小水渠“五小水利”,重点抓好华中地区大中型灌区节水改造,加快推进西北、华北等重点地区规模化高效节水灌溉工程,以保障我国粮食生产安全。

1.3 极端气候频发,资源与环境面临巨大挑战

国际政府间气候变化委员会(IPCC)于 2007 年发布的第 4 次评估报告指出,气候变暖已成为不争的事实。过去的 100 年间,全球地表年平均温度上升了 0.74℃,我国平均气温升高 0.5~0.8℃,近 40 年来我国年平均气温还在以 0.022℃/a 的速度上升。气候变化改变了全球水文循环,影响到降水、蒸发、径流等水循环要素的时空分布,引起水资源在时

间和空间上的重新分配,导致了极端气候频发,生产生活环境和条件恶化。农业是对气候变化最为敏感的领域之一,温度升高将直接导致农业用水量增加。极端性天气及灾害的频发,改变了农业结构和作物水分利用情况,使粮食生长环境和生产条件恶化,对粮食安全造成极大压力。据统计,我国每年由于自然灾害造成的农业直接经济损失达 1 000 多亿元,约占国民生产总值的 3% ~ 6%。如不采取应对措施,到 2030 年我国种植业产量将减少 5% ~ 10%^[15]。因此,我国需因地制宜地搞好灌区节水改造,不断增强农田灌区综合生产能力和防灾减灾能力,切实构筑起一道应对极端气候的安全屏障。

1.4 农业基础设施薄弱,灌溉水利用率低

灌溉水利用系数是集中反映灌溉工程质量、灌溉技术水平和灌溉用水管理的一项综合指标^[16]。目前,全国有效灌溉面积仅为全部耕地面积的 48%,还有大量中低产田没有改造。农田水利基础建设十分薄弱,普遍存在水利设施老化失修、配套工程不足、建设投资标准低、工程效益衰减等问题,这使得我国灌溉水利用系数平均仅有 0.51^[13],远低于世界先进水平的 0.7 ~ 0.8。为实现《全国水资源综合规划》中提出的 2015 年、2020 年及 2030 年,农田灌溉水利用系数分别提高到 0.53、0.55 和 0.60 以上的目标,就必须加强灌区水综合管理,建立用水效率控制制度,确立用水效率控制红线,实现灌区水资源的优化配置和灌溉水的合理调度。

1.5 灌区生态及农田环境问题突出,面源污染控制任务重

过去农业生产过度追求粮食高产和经济效益最佳,忽视了社会、经济、生态的相互关系,导致了农业面源污染严重及农田、河湖生态的可持续发展。灌区生态的管理实质上就是灌区农业用水的管理,灌区农业用水管理应以植入环境敏感性因素的人类可持续发展指数为参考指标^[17],不能以牺牲生态与环境为代价。如今全国每年农田污染事故造成的损失超过 1 亿元,粮食减少 100 万 t 以上。而在我国水体污染物中,高达 81% 的氮和 93% 的磷来自于农业面源污染^[18],日益严重的农业面源污染又是水体富营养化和水环境恶化的主要原因。水量减少和水质恶化的恶性循环,加剧了水资源安全压力。如何有效控制农业面源污染,用生态的方法使劣质水清洁再生并在下游灌区再次利用,已成为当前我国灌区水综合管理以及水环境保护、水生态建设的重要任务。

综上所述,人口增加、土地减少、极端气候等给水资源安全、粮食生产安全带来了巨大挑战,水资源供需矛盾以及粮食需求增加又给水环境安全、农田

生态安全带来了极大压力,给灌区水综合管理提出了新的要求。加强灌区水综合管理,能满足在当今水资源短缺和水污染严重的形势下,对农业高效生产、生态发展的要求,能更快实现节水高产、优质高效和减排控污的和谐统一。因此,灌区水综合管理是水资源高效利用模式下生态健康、环境友好的自给、自足、自净的粮食生产模式,是关系到我国农业可持续发展、水生态保护以及粮食战略安全成败的重大问题,具有重要的科学价值和现实意义。

2 灌区水综合管理的发展动态

2.1 高效节水灌溉理论与技术迅速发展

国内外高效灌溉的实质是降低灌溉用水过程中水的无效损耗,研究不同时期水分胁迫对作物的影响及其提高水分、养分生产效率的机理与规律,保护灌区的生态环境,是节水灌溉研究的热点问题。基于水分胁迫条件下作物生理生产过程的反应,国内外提出了许多高效节水灌溉方法。非充分灌溉、调亏灌溉、控制灌溉、间歇湿润灌溉等灌溉模式的应用,改变了传统灌溉方式,提高了水的利用效率。很多研究^[19-21]表明,适度的水分调控可实现对作物叶片气孔的控制,限制无效蒸腾,并通过适时合理地灌溉补水诱导生理反弹与补偿生长效应的产生,从而获得较高的水分利用效率。适度水分亏缺条件下的气孔调节、叶绿素含量增加和比叶重增加的叶片生理生态适应是作物叶片实现水分与光能高效利用、叶片尺度生理补偿的基础。另一方面,田间水肥过程对农业面源污染产出也具有较大影响,张丽娟等^[22]研究表明,间歇灌溉条件下灌区产量较传统灌溉高,氮肥流失率约降低 1%。彭世彰等^[23-24]研究表明,控制灌溉与实地氮肥管理联合调控可使稻田土壤有机质分解加速,表层土壤中可溶性有机碳含量增加,消化过程增强, NH_4^+-N 含量降低,在节水的同时显著提高了水稻水分生产效率和氮肥吸收利用率。国外学者还提出了一种地下水恢复对作物产量影响最小的水资源可持续利用农业节水方法^[25],该方法模拟分析了一个灌区的计划灌溉产量,结果表明 39.2% 的农业节水对作物产量影响最小,小麦和玉米的产量损失总额小于采用灌溉定额时产量的 10%。

虽然作物高效吸收利用土壤水是减少作物耗水的重要途径,但从水源引水到形成土壤水的每一个环节中,都存在节水的潜力。水资源开发应在优化各种水资源配置的基础上,以维护灌区生态为前提,实现水的利用率最大化。集雨节灌、抗旱节灌工程模式,可充分利用降雨资源,最大限度减少灌水次数和灌水定额,是最省投资的节水措施之一;井灌区地

下水采补平衡的水资源高效利用综合技术是目前水资源紧缺地区开源的有效方法;在多分散水源地区,应实现地表水与地下水工程的连通,并与自动化控制技术集成,对农田供水的分散水源集中控制、统一调度,实现水资源的高效利用^[26]。井渠结合,以及天然降水、地表水和地下水的联合调控,既增加了灌溉水源调蓄能力,又减轻了灌区洪涝威胁,还弥补了地表水的不足,是目前合理、高效的水源取水措施。渠道防渗和低压管道输水是我国输配水工程中节约灌溉用水的主要技术措施,但目前在输水过程中使用的混凝土衬砌技术,虽能减少水在输送过程中的损耗,实现河道边坡的安全稳定,但也导致了农田系统水量分配在时间和空间上的改变,破坏了原可维持生态平衡的水循环路径。面对节约用水和生态保护的双重问题,顾宏等^[27-28]提出了混凝土衬砌渠道生态处理、植生型防渗砌块、三维土工网垫等“投资合算、节水高效、注重生态”的渠道衬砌技术,均能在满足渠道输水供水效率的前提下,保障原有的渠系生态不受破坏,维持渠系的生物多样性。目前喷灌、滴灌、微灌、雾灌、短管畦灌、细流沟灌和膜上灌等先进的田间节水技术也越来越成熟。喷灌比传统地面灌节水 30% ~ 50%,滴灌节水、节肥、省工,又比喷灌省水 15% 左右^[29]。目前在国内开展的土地精细平整技术的田间应用研究中,提出了激光控制平地技术与常规机械平地技术相结合的组合平地技术新模式,具有较强的田间实用性^[30]。新开发研制的地下滴灌技术专用灌水器,可有效防止因系统负压引起的滴头堵塞,具有良好的水力学特性。

2.2 先进的除涝降渍减排技术日趋成熟

早在 20 世纪 70 年代,国外学者就开始研究控制排水技术,主要涉及旱作物种植区的暗管控制排水。最初研究发现尽管出流量受到土壤类型、降水量、灌水量、排水类型等多重因素的影响,但对农田实行合理的控制排水措施,都可减少一定的排水量;之后 Ng 等^[31]通过沙壤土的试验发现,暗管控制排水中氮的浓度能显著降低,单位面积氮负荷可减少 36% 以上。Wesström 等^[32]的研究表明,在透水性较强的沙壤土中,暗管排水量可减少 79% ~ 94%,氮磷损失也分别减少 60% ~ 70% 和 58% ~ 85%。此外,国内外学者都有更深入研究^[33-34]表明浅埋密排的暗管布置方式能在土壤中形成降低氮浓度的“还原区”,农田排水通过“还原区”进行反硝化作用,可降低排水中硝态氮的浓度。所以,对旱田实施暗管控制排水,能很大程度降低排水流量,也能有效降低表层硝态氮的迁移,一定程度上抑制硝化作用,减少土壤侵蚀,起到肥培增墒的效果,且减排效果在一定范围

内随地下水控制水位的降低而增加^[35]。

除地下(暗管)控制排水,对稻作区或水旱轮作区,明沟控制排水对提高雨水利用效率和减少污染物负荷也有特殊意义。早在 20 世纪末,张瑜芳等^[36]就研究表明,控制排水沟水位与田面水层间的水位差,能够有效减少稻田渗漏量和氮肥流失量。之后有国外学者将排水沟道设计为 2 个台阶,较高台阶中的植物能吸收较低台阶的氮磷,既控制了排水强度,又减少了氮磷流失量^[37]。高焕芝等^[38]研究表明,控制水稻生育期中氮磷高浓度时段的排水,可使全生育期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和 TP 流失总量分别较常规灌排模式减少 38.07%、82.29% 和 52.15%。排蓄交替的明沟控制排水方式,能在减少沟道侵蚀的同时,增强硝化反硝化作用,促进沟内水体氮素的转化和去除,定向强化排水沟的氮磷净化能力。农沟、斗沟分级控制排水还能实现对稻田排水的逐级净化^[39]。近来谢升申等^[40]研究表明,在我国南方水旱轮作区,可综合明沟和暗管控制排水的优势,实现灌区内“格田-农沟-地下暗管”3 个位点的工程布局 and “地表-地下”2 种水位的有效控制,指出了一种农田控排减污的发展方向。

随着可持续生态农业的提出,农田排水的资源化利用也成为了我国灌区水综合管理中的重要技术环节。日本、埃及、美国、澳大利亚等国家先后都有研究表明,农田排水经不同处理后再灌溉,不仅可以减少排放水量和水土流失,还可提高排水中氮、磷等元素的高效再利用。控制排水作为最有效的灌区水综合管理措施之一^[41],为充分发挥其重要意义,目前研究已开始把除涝、降渍和排水的资源化利用作为一个统一过程,综合采用明沟与竖井、明沟与暗管等组合方式排水,考虑不同组合下农田排水水量、水质、气象因素和作物耐淹、耐渍等机理,逐步掌握了不同的农田排水资源化利用模式,以及农田灌溉系统的降水、地表水、地下水、农田排水、生态水联合调控技术^[42],实现了“五水”相互作用下农田排水排污的全面控制和水肥资源的高效利用。除此之外,目前已经开发出了自动给水栓、水力自动闸门等田间控制排水先进设备,它们可通过调节地下水位,达到排水再利用、治理渍害、减少排水对承泄区的污染等效果,最终建立稻田灌溉排水自动控制系统,为排水工程的现代化建设奠定基础。

2.3 农田面源污染控制系统发展前景广阔

灌区农业生产中大量使用化肥、农药,造成了较严重的农田面源污染,也成为灌区排泄水承载力降低、河湖水体富营养化的主要原因。因此,灌区农田面源污染物的截留、自净效应成为了灌区水综合管

理的重要研究课题。

a. 灌区各级排水沟道系统截留农田面源污染物的发展动态。沟道是农田排水的输送廊道,也是农业面源污染物迁移的主要通道。灌区排水沟道系统的拦截机理主要体现在沟内植物截留、吸收氮磷,以及各级沟道控制减缓流速和沉降泥沙等,所以生态沟道对农田排水中氮磷的拦截效果明显优于土质沟渠和混凝土沟渠。杨林章等^[43]针对太湖流域面源污染的特征提出了一种由工程和非工程措施相结合的生态拦截型沟渠系统,该系统对农田径流中 TN、TP 的去除率分别达 48.4% 和 40.5%。水生植物对氮磷的吸收是沟塘水质净化的重要途径,收割是实现其净化有效性的关键环节,仅移除芦苇和茭草茎叶,可去除氮 193.69 kg/hm²、磷 33.49 kg/hm²^[44]。在灌区原位条件下,何军等^[45]试验研究表明,灌区尺度典型排水沟渠对 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TP 的整体去除率分别为 44.6%、37.3%、9.9% 和 35.1%,去除净化效果显著且极具规律性。

b. 湿地系统截留农田面源污染物的发展动态。随着农业面源污染的加剧,人们意识到可以充分利用土壤-水生植物-微生物复合的水塘、沟槽等综合生态体系净化水质。通过对流域内各地块地表径流的储存,田间水塘能截留径流中的营养盐,还能通过土壤的吸附和截留、微生物降解、植物吸收以及根系效应等综合作用实现氮、磷等营养物质的去除。基于这种思路,美国俄亥俄州立大学研发了湿地-水库-地下灌溉系统,取得了良好的氮磷去除效果。潘乐等^[46]在人工湿地对稻田氮磷污染去除效应和规律的研究中发现,人工湿地能明显改善农田排水水质,塘堰湿地对 TN、TP 整体去除率可分别达到 45.88% 和 44.20%。何军等^[45]研究发现,塘堰对 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 和 TP 的平均去除率分别为 15.2%、15.6%、30.2% 和 -6.5%,表现出一定的抗冲击自修复性。同时我国许多流域、湖泊区都选用人工湿地作为农业面源污染物的净化系统^[47-49],证明人工湿地处理农田排水合理可行,具有良好的发展前景。国内外研究还表明,各种天然或人工湿地对去除农田排水中的氮磷都非常有效。鄱阳湖地区就是充分利用湖滩草洲大量分布的天然湿地净化处理农业面源污染物,也取得了显著的氮磷净化效果^[50]。

c. 河岸带植被截留农田面源污染物的发展动态。河岸带作为陆地和水生生态系统的交错地带,其植被覆盖变化不仅会对河岸土壤的有机质含量和分布特征产生影响,而且也会影响河流生态系统的稳定和健康,尤其是农田周边地区河岸带不仅能调蓄洪水,提供生物廊道,还能有效消减污染,净化水

土环境^[51]。20 世纪国外学者就研究表明,农田和水体之间合理的草地或林地缓冲带,可有效降低水体中氮、磷的含量,对农业面源污染治理效果显著^[52]。黄玲玲^[53]进一步研究表明,各营养元素的净化效果还受河岸带宽度的影响,20~30 m 的竹林河岸带可有效降低周围农田氮磷等营养元素的非点源排放,其中 20m 宽的竹林河岸带土壤水 TN、TP、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、NH₄⁺-N 和 PO₄³⁻-P 的浓度分别降低了 40.53%、84.53%、43.15%、51.39%、47.82% 和 75.14%,达到了显著减轻河流面源污染的效果。在农田灌区,农田与林带宽度比例为 100:40 或 150:40 时较合理^[54],这种模型既能少占耕地,又能净化水质,保护生态环境。

除此之外,为使农业面源污染物流失得到最大化控制,彭世彰等^[44]已有研究表明,通过沟-塘-湿地逐级减排和逐级净化,系统出流水中 TN 和 TP 平均质量浓度分别较入口减小 22.01% 和 9.59%。施肥后各系统的净化效果更为显著,排水中的 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 在农沟拦蓄后,氮素平均去除率分别为 63.9%、67.8% 和 83.2%,进入湿地再次净化后,氮素质量浓度进一步降低,平均去除率可分别达 47.7%、44.3% 和 82.0%,实现了对稻田排水中氮磷的原位削减^[55]。所以考虑各个控污系统的联合调控与协同运行将是今后研究的重要课题。

3 存在问题及发展方向

3.1 我国灌区水综合管理中存在的问题

a. 未充分考虑节水的时空变异和尺度效应。灌区水综合管理不仅仅局限于田间水分的管理,它包括对整个灌区水量、水质的调控以及对灌区及其周边相关系统的生态保护。田间尺度上的节水并不等于灌区尺度上的节水,灌区尺度上灌溉系统上游提高水利用效率后,可能对下游灌区的生态平衡产生负面影响^[56]。不同尺度上研究范围不同,节水效率的变化规律、衡量标准以及动力目标就有所不同,所选择的灌溉排水策略及相应的施肥管理策略也就不同。因此,今后需要解决不同时空耦合与不同尺度间水转化问题,切实提高灌区水的有效利用率。

b. 未能从灌区整体实现工程与非工程技术的集成应用。我国的节水灌溉技术受到经济、制度的限制,普遍存在重工程建设和经济效益、轻非工程建设和生态效益的倾向。通常认为在输水过程中采取渠道衬砌或管道输水等节水工程措施,在灌水时采取畦田灌溉、喷灌、滴灌等节水技术措施就可以实现灌溉节水;但从灌区整体看这些先进的工程技术不仅改变了灌区物质和能量循环,还导致了农田系统

水量平衡要素的变化。如何从灌区整体上实现工程与非工程技术的集成,如何在推广先进节水技术的同时维持农田生态平衡,如何将节水技术模式与管理控制形式有机结合都是今后探索研究的关键问题。

c. 缺少衡量灌区水综合管理的指标体系。从制定灌区水综合管理战略到落实相应水管理规划再到实施具体水管理工程技术,目前都没有一个明确的评价指标和衡量标准。灌区水综合管理涉及水利、农业、土壤、气象、生物、生态、环境、社会、经济、政治、教育、法律等多学科,在综合考虑各学科的影响及其交叉作用后制定出相应的评价指标体系,是灌区现代化建设中水综合管理的难点。今后只有突破这一瓶颈,我国灌区才能更好地落实发展性、现代性与可持续性建设,从而才能保障粮食安全、环境安全、国民经济发展与社会稳定。

d. 未能全面实现多目标的灌区水综合管理。过去追求以“高产”为目标的灌区发展方向导致了水资源、水环境、水生态问题突出,以“节水”为目标的发展方向也未考虑灌区水生态及周边生态系统的保护。在当今国家粮食安全难以保障、水资源紧缺与用水浪费、缺水与污水并存、生态健康与经济发展相矛盾的严峻形势下,单一目标的灌区水综合管理已不再能满足国家可持续发展的需求。今后需要全面落实以节水、高产、高效、低排、控污以及水生态文明为目标的全方位、多层次灌区水综合管理发展方向。

e. 灌排调控整体系统未能发挥较好的协同运行效应。目前灌区水综合管理各阶段、各系统在协同运行中缺乏整体性与耦合性,对本具有密切联系的取水、输水、配水、灌水、排水、净水的相关性认识不充分,使“农田-生态沟-湿地”的水综合管理模式不能体现整体效应和发挥协同作用,难以实现灌区节水高产与减排控污的和谐统一。今后灌区的发展不仅要充分发挥各系统的作用,更要重视各阶段相互作用下的机理效果与组合模式,最终形成立足国家目标、解决国家需求的灌区水综合管理体系。

3.2 灌区水综合管理的科学研究及创新突破点

a. 创新节水灌溉理论,构建灌区综合节水模式。节水灌溉新理论应以“保护水源、节约用水、优化用水、高效用水”为理念,以共同实现水生态安全、农田生态可持续发展为原则,以“水资源利用、水环境保护、水经济优化、灌区可持续发展”为节水外延,以降水、作物水、地表水、土壤水、地下水的农田“五水”转化为中枢,以污染物负荷效应研究及水量、水质管理为切入点,通过研究作物高效用水调控的响应机理及其农田生源要素的变化规律,构建节水控污的灌溉理论与模式;通过研究作物需水时空分异规律

与农田生境因子互动效应,明晰节水控污灌溉条件下农田生态系统的环境容量;通过研究农田氮磷运移规律及其农田灌溉的响应机理,确定“资源节约型”、“环境友好型”的农田水肥管理调控模式。最终系统集成精准灌溉技术、水肥高效利用技术、节水工程技术以及灌区水管理技术,形成适于我国国情的发展性、现代性、可持续性灌区综合节水模式。

b. 探索农田水位综合管理模式,发挥农田科学排水的资源环境效应。以控制排水为代表的农田水位综合管理已成为管理排水和控制农田面源污染的有效途径,受到了国内外的广泛关注。在节水灌溉和作物品种更新条件下,考虑气象因素、作物耐淹及耐渍机理,分析农田水位控制对地下水、土壤水之间水分转化的影响规律,探讨农田面源污染物的迁移转化机理,建立相应的水量水质转换关系,进行不同时空尺度上农田排水资源化利用的环境效应评价,制定明沟、暗管、竖井等多种方式结合的科学排水方案,最终构建高产、节水、减污的控制排水评价模型,突破农田水位综合管理模式优选、农田灌溉生态风险控制策略分析及农田排水资源化利用评价基本理论与技术关键。

c. 探索农田排水中污染物的输移转化规律,创建农田-生态沟-湿地系统运行模式。研究农田面源污染调控系统对氮磷等污染物的截留、净化机理是掌握农田排水污染物输移转化规律的关键。农田-生态沟-湿地系统能利用各自的特点与作用,逐级减排、逐级净化,使污染物浓度和负荷沿程不断降低,实现水肥资源的高效利用和农田排水中污染物的原位削减,延展传统灌溉系统的组成和功能,为我国粮食作物高效清洁生产方式发展提出创新性研究方向。同时还应充分考虑植被的生长特点和季节性变化,掌握各个子系统对农田污染物质的吸附、降解机理与整个系统特征参数的关系,明晰各环节的净化能力、净化效果和排出产物规律,确定最佳排水流速与污水在各个阶段的最适停留时间,以使农田-生态沟-湿地系统发挥最佳的耦合作用,力求创建出其系统调度方式和协同运行模式。

d. 明确灌排耦合的田间水分阈值,建立合理灌排耦合制度。应着重研究节水灌溉和控制排水的耦合作用。一方面使作物获得较高的水分和光能利用率,实现对作物生理生长的全面调控;另一方面应揭示排水对氮磷污染物负荷的影响规律,体现灌排耦合的生态效应。作物生长的土壤环境作为灌排耦合体是研究灌排耦合制度的关键,应考虑灌排水分生产率及重复利用率等指标随尺度的不同而有不同标准,明确各尺度上的灌排耦合土壤水分阈值,建立不同尺度下合理的灌排耦合制度及水分生产函数,使灌排整体系统充分发挥“1+1>2”的协同运行效果。

e. 构建灌区水生态文明建设长效机制,建设节水型生态灌区。灌区水综合管理就是将灌区节水与生态建设的理念贯穿于整个灌区规划、设计、施工和管理中。在大力开展灌区续建配套和节水改造的同时,要本着水安全、水环境、水景观、水文化、水经济“五位一体”的思想,全面落实水综合管理各项制度与措施,遵循可持续发展、因水制宜、水质水量两手抓、资源环境两不误等原则,全面、简洁、综合反映水生态文明建设的可行性与可操作性,力求在协调好灌区水资源配置的同时,构建水生态文明建设长效机制。另一方面,灌区水综合管理应根据灌区水资源时空分布特征,考虑灌排系统的水资源循环利用模式,通过实时预报、优化配置、实时监测、远程调度、动态仿真等多功能水管理智能化系统,深入研究农田生态格局演变趋势及其与水生态文明之间的耦合关系,建设节水、高效、生态与信息化、自动化、智能化相结合的智慧灌区,实现安全性、稳定性、景观性、自然性和亲水性的完美结合,最终走向人水和谐、生态与经济双赢的灌区发展必由之路。

参考文献:

[1] BOUWER H. Integrated water management: emerging issues and challenges [J]. Agricultural Water Management,2000,45(3):217-228.

[2] ALLRED B J, BROWN L C, FAUSEY N R, et al. Water table management to enhance crop yields in a wetland reservoir subirrigation system[J]. Applied Engineering in Agriculture,2003,19(4):407-421.

[3] 韩春玲,王修贵,金苗,等. 一种全新的农田水量水质综合水管理系统:美国“湿地-水塘-地下灌排综合水管理系统(WRSIS)” [J]. 湿地科学与管理,2008(2):57-59. (HAN Chunling, WANG Xiugui, JIN Miao, et al. A new field system of integrated water management: U. S. “integrated water management system (WRSIS) about wetlands-ponds-underground irrigation” [J]. Wetland Science & Management,2008(2):57-59. (in Chinese))

[4] 董斌. 灌溉-排水-湿地综合管理系统(WRSIS) [J]. 湿地科学与管理,2006,2(3):14-15. (DONG Bin. The wetland-reservoir-subirrigation-system in rice-based irrigation systems of South China(WRSIS) [J]. Wetland Science & Management, 2006, 2(3):14-15. (in Chinese))

[5] 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))

[6] 李玲君,李琳娜,邵孝侯,等. 湿地-水塘-地下灌排改进系统的效应[J]. 水资源保护,2012,28(3):75-78. (LI

Lingjun, LI Linna, SHAO Xiaohou, et al. Effects of improved wetland reservoir sub-irrigation system [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3):75-78. (in Chinese))

[7] 王海燕,邵孝侯,廖林仙,等. WRSIS 在灌溉农业水土环境修复中的应用及其展望[C]//中国土壤学会第十一届全国会员代表大会暨第七届海峡两岸土壤肥料学术交流研讨会论文集. 北京:中国土壤学会,2008:1-5.

[8] 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 Yujang, 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))

[9] MORENO-PÉREZ M F, ROLDÁN-CAÑAS J. Assessment of irrigation water management in the Genil-Cabra (Córdoba, Spain) irrigation district using irrigation indicators [J]. Agricultural Water Management,2013,120:98-106.

[10] 代俊峰,崔远来. SWAT 模型及其在灌区管理中的应用前景[J]. 中国农村水利水电,2006(6):34-36. (DAI Junfeng, CUI Yuanlai. SWAT model and its application prospect in irrigation district management[J]. China Rural Water and Hydropower,2006(6):34-36. (in Chinese))

[11] 周玉桃,崔远来,谢先红,等. SLURP 模型及其在灌区水管理应用中的研究进展[J]. 中国农村水利水电,2008(8):84-88. (ZHOU Yutao, CUI Yuanlai, XIE Xianhong, et al. SLURP model and its applied development of water management in irrigation districts[J]. China Rural Water and Hydropower,2008(8):84-88. (in Chinese))

[12] 陈雷. 保护好生命之源、生产之要、生态之基:落实最严格水资源管理制度[J]. 求是,2012(14):38-40. (CHEN Lei. Protect the source of life, the essence of production and the base of ecology: to implement the most stringent water management system[J]. Qiushi,2012(14):38-40. (in Chinese))

[13] 李训喜. 中国水利年鉴:2012[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.

[14] 王玉宝,吴普特,赵西宁,等. 我国农业用水结构演变态势分析[J]. 中国生态农业学报,2010,18(2):399-404. (WANG Yubao, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Development tendency of agricultural water structure in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2):399-404. (in Chinese))

[15] 农业部. 低碳农业:应对气候变化农业行动[M]. 北京:中国农业出版社,2009.

[16] 李英能. 浅论灌区灌溉水利用系数[J]. 中国农村水利水电,2003(7):23-26. (LI Yingneng. Elementary discussion on water use efficiency of irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower,2003(7):23-26. (in Chinese))

[17] 田辉,孙剑平,朱英明. HSDI:植入环境敏感性因素的人类可持续发展指数[J]. 中国软科学,2007(10):86-92. (TIAN Hui, SUN Jianping, ZHU Yingming. HSDI: a framework of human sustainable development indicators involving environment factor [J]. China Soft Science

- Magazine,2007(10):86-92. (in Chinese))
- [18] ONGLEY E D, XIAOLAN Z, TAO Y. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5):1159-1168.
- [19] ZHOU Jianbin, WANG Chunyang, ZHANG Hong, et al. Effect of water saving management practices and nitrogen fertilizer rate on crop yield and water use efficiency in a winter wheat-summer maize cropping system [J]. Field Crops Research, 2011, 122(2):157-163.
- [20] 彭世彰, 魏征, 孔伟丽, 等. 水肥亏缺下水稻叶片气孔导度与光合速率耦合模型 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(2):253-261. (PENG Shizhang, WEI Zheng, KONG Weili, et al. A coupled model of photosynthesis and stomatal conductance for rice leaves with soil moisture and nitrogen deficit [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(2):253-261. (in Chinese))
- [21] 于靖, 徐淑琴, 高婷. 分蘖期不同程度水分胁迫对水稻需水规律及生长发育的影响 [J]. 节水灌溉, 2012(7):21-23. (YU Jing, XU Shuqin, GAO Ting. Effects of different water stress on water demand and growth of rice in tillering stage [J]. Water Saving Irrigation, 2012(7):21-23. (in Chinese))
- [22] 张丽娟, 马友华, 石英尧, 等. 灌溉与施肥对稻田氮磷径流流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):7-12. (ZHANG Lijuan, MA Youhua, SHI Yingyao, et al. Effects of irrigation and fertilization on nitrogen and phosphorus runoff from paddy field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6):7-12. (in Chinese))
- [23] 彭世彰, 熊玉江, 庞桂斌, 等. 水氮调控对水稻氮素吸收与利用的影响 [J]. 节水灌溉, 2012(2):1-4. (PENG Shizhang, XIONG Yujiang, PANG Guibin, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer managements on nitrogen absorption and utilization in rice [J]. Water Saving Irrigation, 2012(2):1-4. (in Chinese))
- [24] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(11):99-104. (YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11):99-104. (in Chinese))
- [25] HU Yukun, MOIWO J P, YANG Yonghui, et al. Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang Irrigation District, North China Plain [J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(3):219-232.
- [26] 李英能. 关于我国节水农业技术研究的探讨 [J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1):11-15. (LI Yingneng. On development of water-saving agricultural techniques in China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(1):11-15. (in Chinese))
- [27] 顾宏, 黄万勇, 李江安, 等. 高邮灌区渠道生态衬砌形式与综合评价 [J]. 节水灌溉, 2012(12):51-53. (GU Hong, HUANG Wanyong, LI Jiangnan, et al. Ecological lining types of canals in Gaoyou Irrigation District and their comprehensive evaluation [J]. Water Saving Irrigation, 2012(12):51-53. (in Chinese))
- [28] 李波, 洪林, 李瑞鸿, 等. 渠道生态衬砌技术及其应用前景 [J]. 节水灌溉, 2010(10):64-65. (LI Bo, HONG Lin, LI Ruihong, et al. Canal eco-lining techniques and application prospects [J]. Water Saving Irrigation, 2010(10):64-65. (in Chinese))
- [29] 周荣. 因地制宜科学推广节水灌溉技术 [J]. 农业工程, 2012, 2(1):67-69. (ZHOU Rong. Scientific popularization water-saving irrigation technique with local conditions [J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(1):67-69. (in Chinese))
- [30] 祝桂梅, 王勇, 杨福荣. 节水农业技术的新进展和对今后发展趋势的探讨 [J]. 湖南农机, 2008(1):22-23. (ZHU Guimei, WANG Yong, YANG Furong. Probe on the water economy for country [J]. Hunan Agricultural Machinery, 2008(1):22-23. (in Chinese))
- [31] NG H, TAN C, DRURY C, et al. Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(1):81-88.
- [32] WESSTRÖM I, MESSING I, LINNÉR H, et al. Controlled drainage-effects on drain outflow and water quality [J]. Agricultural Water Management, 2001, 47(2):85-100.
- [33] BURCHELL M, SKAGGS R, CHESCHEIR G, et al. Shallow subsurface drains to reduce nitrate losses from drained agricultural lands [J]. Transactions of the ASAE, 2005, 48(3):1079-1089.
- [34] 殷国玺, 宋培青, 张国华, 等. 减少面源污染的农田排水工程设计标准与管理措施 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2):176-180. (YIN Guoxi, SONG Peiqing, ZHANG Guohua, et al. Design standards and management measures for farmland drainage systems to mitigate non-point source pollution [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2):176-180. (in Chinese))
- [35] BONAITI G, BORIN M. Efficiency of controlled drainage and subirrigation in reducing nitrogen losses from agricultural fields [J]. Agricultural Water Management, 2010, 98(2):343-352.
- [36] 张瑜芳, 刘培斌. 淹灌稻田的暗管排水中氮素流失的试验研究 [J]. 灌溉排水, 1999, 18(3):12-16. (ZHANG Yufang, LIU Peibin. Experimental study of leaching losses of nitrogen in effluent from drained paddy rice field [J]. Irrigation and Drainage, 1999, 18(3):12-16. (in Chinese))
- [37] WARD A, MECKLENBURG D, POWELL D E, et al. Designing two-stage agricultural drainage ditches [C]// Drainage VIII Proceedings of the Eighth International Drainage Symposium, 2004:386-397.
- [38] 高焕芝, 彭世彰, 茆智, 等. 不同灌排模式稻田排水氮磷流失规律 [J]. 节水灌溉, 2009(9):1-3. (GAO Huanzhi, PENG Shizhang, MAO Zhi, et al. N and P losses

- in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes [J]. Water Saving Irrigation, 2009(9):1-3. (in Chinese))
- [39] 郭相平,张展羽,殷国玺. 稻田控制排水对减少氮磷损失的影响[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2006, 24(3):307-310. (GUO Xiangping, ZHANG Zhanyu, YIN Guoxi. Effect of controlled drainage on loss of nitrogen and phosphorous from paddy field [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2006, 24(3): 307-310. (in Chinese))
- [40] 谢升申,俞双恩,丁继辉,等. 田间控制排水系统布局模式与相关技术的研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(12): 32-35. (XIE Shengshen, YU Shuangeng, DING Jihui, et al. Research on layout pattern for controlling drainage system and related technology in farmland [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(12): 32-35. (in Chinese))
- [41] AYARS J, CHRISTEN E, HORNBUCKLE J. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture [J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1):128-139.
- [42] 贺新春,邵东国,刘武艺,等. 农田排水资源化利用的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3):176-179. (HE Xinchun, SHAO Dongguo, LIU Wuyi, et al. Review of the researches on utilization of farmland drainage as resources [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 176-179. (in Chinese))
- [43] 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): 121-124. (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))
- [44] 彭世彰,高焕芝,张正良. 灌区沟塘湿地对稻田排水中氮磷的原位削减效果及机理研究[J]. 水利学报, 2010, 41(4): 406-411. (PENG Shizhang, GAO Huanzhi, ZHANG Zhengliang. Effect of pond wetland on N and P removal in drainage water from paddy field and its mechanism [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(4):406-411. (in Chinese))
- [45] 何军,崔远来,吕露,等. 沟渠及塘堰湿地系统对稻田氮磷污染的去除试验[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1872-1879. (HE Jun, CUI Yuanlai, LÜ Lu, et al. Experiments on removal effects of ditch-pond wetland system on N and P pollutants from paddy field [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1872-1879. (in Chinese))
- [46] 潘乐,茆智,董斌,等. 塘堰湿地减少农田面源污染的试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 130-135. (PAN Le, MAO Zhi, DONG Bin, et al. Experimental research on reduction of agricultural non-point source pollution using pond wetland [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(4): 130-135. (in Chinese))
- [47] 陈红,王声跃,刘俊. 抚仙湖流域农业面源污染控制研究[J]. 云南环境科学, 2002, 21(3): 27-29. (CHEN Hong, WANG Shenyue, LIU Jun. Research on agricultural area-source pollution control in fuxian lake [J]. Yunnan Environmental Science, 2002, 21(3): 27-29. (in Chinese))
- [48] 林金海,刘宏伟,周波,等. 松花湖流域农业面源污染调查分析[J]. 东北水利水电, 2011, 29(5): 45-47. (LIN Jinhai, LIU Hongwei, ZHOU Bo, et al. Investigate analysis of agricultural non-point source pollution in Songhua lake basin [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2011, 29(5): 45-47. (in Chinese))
- [49] 周军,叶珍,马云,等. 牡丹江流域农业面源污染特征及防治对策研究[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(2): 46-48. (ZHOU Jun, YE Zhen, MA Yun, et al. Research on the characters of agricultural non-point pollution and control countermeasures in Mudan River Basin [J]. Environmental Science and Management, 2011, 36(2): 46-48. (in Chinese))
- [50] 向速林,王全金,徐刘凯. 鄱阳湖区域农业面源污染来源分析与控制探讨[J]. 河南理工大学学报:自然科学版, 2011, 30(3): 357-360. (XIANG Sulin, WANG Quanjin, XU Liukai. The study on pollutant source analysis and controlling measures of agriculture non-point source in Poyang lake area [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2011, 30(3): 357-360. (in Chinese))
- [51] 夏继红,严忠民. 生态河岸带的概念及功能[J]. 水利水电技术, 2006, 37(5): 14-17. (XIA Jihong, YAN Zhongmin. Concept and function of ecological riparian zone [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(5): 14-17. (in Chinese))
- [52] HEATHWAITE A, GRIFFITHS P, PARKINSON R. Nitrogen and phosphorus in runoff from grassland with buffer strips following application of fertilizers and manures [J]. Soil Use and Management, 1998, 14(3): 142-148.
- [53] 黄玲玲. 竹林河岸带对氮磷截留转化作用的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2009.
- [54] 汤家喜,孙丽娜,孙铁珩,等. 河岸缓冲带对氮磷的截留转化及其生态恢复研究进展[J]. 生态环境学报, 2012, 21(8): 1514-1520. (TANG Jiayi, SUN Lina, SUN Tieheng, et al. Research advances on retaining and transformation of N and P and ecological restoration of riparian buffer zone [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(8): 1514-1520. (in Chinese))
- [55] 和玉璞,彭世彰,徐俊增,等. 生态沟-湿地系统对稻田排水中氮素的去除效果[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(5): 609-613. (HE Yupu, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Removal effect of eco ditch and wetland system on nitrogen in paddy field drainage water [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(5): 609-613. (in Chinese))
- [56] SECKLER D W. World water demand and supply, 1990 to 2025: scenarios and issues [M]. International Water Management Institute, 1998.

(收稿日期:2013-08-22 编辑:熊水斌)