

灌区排水再利用研究进展

王少丽^{1,2} 许迪^{1,2} 刘大刚³

(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048; 2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048;
3. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 长沙 410007)

摘要: 灌区排水再利用研究及其应用不仅对保障未来我国粮食安全和供水安全有积极作用,而且对提高农田水肥资源利用效率、保护水环境等都具有十分重要的意义。总结了国内外灌区排水再利用研究基础理论和关键技术,包括排水再利用基础理论研究、常见的排水再利用工程运行模式和减轻排水灌溉利用负面效应的管理措施。指出我国灌区排水再利用具有较大潜力,排水再利用的节水减污效果明显,目前关于排水中氮磷等营养成分的研究成果较多,对盐分及其他组分的研究相对较少,再利用的工程运行模式与灌溉管理措施是影响排水再利用效应的关键因素,排水水质和水量变化规律、最佳再利用模式和灌溉管理措施的选择、再利用的生态环境效应评价与风险分析等是今后排水再利用研究的重要内容。

关键词: 灌区; 排水再利用; 工程模式; 管理措施; 土壤-水-作物系统

中图分类号: S276 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)04-0042-07

Research Progress on Drainage Water Reuse in
Irrigation District

Wang Shaoli^{1,2} Xu Di^{1,2} Liu Dagang³

(1. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China
2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China
3. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: Researches on drainage water reuse and its application in the irrigation district have great significance. In addition to safeguarding future food supply, drainage water reuse also raises the application efficiency of irrigation water and fertilizer, and protects the water environment. Basic theory and key technology of drainage water reuse at home and abroad were summarized, including the related study results of basic theory, several engineering modes for drainage water reuse, and management measures to alleviate the negative effects resulting from irrigation with drainage water. Through a systematic analysis of the existing research results, it was pointed out that drainage water reuse had great potential in China, and it had great significance for water-saving and pollution abatement. The amount of research works about nitrogen and phosphorus in the drainage water was greater than those of salt and other components at present, and reuse engineering mode and irrigation management measures were the key factors affecting recycling effect. In the end, a study was put forward on the changing laws of drainage water quality and quantity, selection of optimal reuse mode, the best comprehensive management measures, evaluation for environment effect and research on risk analysis. These will be major themes of researches on drainage water reuse in the irrigation district in the future.

Key words: irrigation district; drainage water reuse; engineering mode; management measures; soil - water - plant system

收稿日期: 2015-10-29 修回日期: 2015-12-09
基金项目: 国家自然科学基金项目(51279212)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B00)和水利部公益性行业科研专项(201401007)
作者简介: 王少丽(1963—),女,教授级高级工程师,博士生导师,主要从事农田排水与生态环境保护研究,E-mail: shaoliw@iwhr.com

引言

灌区排水主要来自降雨或灌溉补给条件下从排水系统中流失的地表水和地下水,也包括部分企业废污水、生活污水排放等。灌区排水中通常含有一定数量的养分、盐分和其他化学物质,尽管其中的养分和一些微量物质对作物生长发育有利,但含有过量的盐分和其他化学物质将对下游承泄区的水体产生潜在的污染威胁。目前,世界很多水资源短缺国家既面临着灌溉水源不足的问题,又承受着水体被排水污染的威胁;干旱的频率和强度正在增加,对灌溉农业造成经济损失^[1]。排水用于灌溉既可节省水量,实现排水中氮、磷等养分的高效重复利用,同时又可以减少往下游排放的水量,由此减轻对下游环境的影响,对提高农田水肥利用效率和保护水环境具有重要的意义^[2-4]。灌区排水再利用作为一种挖掘水资源潜力的有效措施,已被当地人们所普遍重视并加以采用^[5-6]。在埃及,每年农业排水的40%,即约70亿m³的农业排水在与尼罗河水混合后被重复利用^[7]。在美国德州、加州、科罗拉多州等地区,利用灌区排水灌溉棉花、甜菜、苜蓿等作物,而在澳大利亚,则使用排水灌溉小麦和稻谷^[8]。前苏联大约有25%的灌溉农田布设了水平排水暗管系统,由于排水能力过剩将近一半的灌溉水量被排出,造成了一系列的水环境问题,而重复利用排水则成为一种有效的解决方案^[9]。在我国宁夏银北、甘肃景电、山东簸箕李等灌区,均开展了排水再利用的试验研究和生产应用,取得了良好的效果。随着水资源的紧缺,排水再利用不仅应用于干旱半干旱灌区,在其他农业水资源时空分布不均的湿润半湿润地区也相继得到应用,如我国黑龙江建三江地区为缓解近年来地下水灌溉带来的超采状态,在骨干沟或未级排水沟建闸拦蓄地表水及上游稻田排放水进行重复利用^[10]。安徽淮北地区近年来开展以排水大沟控制蓄水,对水资源进行调控的应用实践,对于解决当地水资源短缺和调控区域水资源时空分布起到积极的作用^[11]。

我国大部分农田还在采用传统的地面灌溉方式,与发达国家相比,农田灌溉水利用系数仍处于较低水平,农业水资源还有很大挖掘潜力,其中排水已成为一些灌区宝贵的补充水源,在科学合理的农业灌溉管理措施条件下,利用排水资源对解决近年来南方旱涝急转态势和北方水资源日趋紧缺局面将会发挥积极的作用。本文在系统总结国内外有关排水再利用的相关基础理论、再利用的工程模式、考虑土壤-水-作物系统的综合管理措施等研究成果基础

上,对开展该领域内的后续研究工作提出相应的建议和对策。

1 灌区排水再利用基础理论

1.1 排水量与水质变化规律

一定的水量和适宜的水质是实施灌区排水再利用的前提条件。在干旱半干旱地区,制约排水再利用的关键因素之一就是排水的矿化度相对较高,关注的重点是排水中盐分的变化规律;而在湿润半湿润地区,则是排水中氮磷等养分流失的变化规律,如何再利用排水使氮磷等养分得到有效的利用。自20世纪60年代以来,国内外学者对灌区不同灌排及施肥等管理措施条件下排水过程中的水量和水质变化规律进行了研究。汪珊等^[12]对宁夏青铜峡灌区水土盐量的衰减和积聚进程进行了分析,非灌溉期排水沟排放的水中可溶性总固体和各组分浓度均比灌溉期高得多,这与王少丽等^[13]的研究结论基本相同。罗炤等^[14]在宁夏灌区开展了稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究,将深度为1m的排水农沟中的水位控制在距地表0.6m时,作物生长期农沟地下水排放量可减少50%左右,田间地下水含盐量增幅仅为3.7%,远低于影响作物生长的临界含盐量。排水中盐分浓度随灌溉季节而变化,非灌溉期和灌前盐分浓度较高,而灌溉中后期盐分浓度下降,这一变化规律对适时适量取用排水进行灌溉有重要参考价值。围绕农田退水中氮磷流失规律的研究近年来较多,在灌排模式、施肥方式、作物类型等对氮磷径流流失的影响方面取得了较多成果,研究表明,降雨强度、作物类型、灌溉施肥方式、排水系统管理等是农田氮磷流失的主要影响因素,水稻全生育期控制灌溉和控制排水中氮磷流失量分别比常规灌溉和常规排水低^[15];控制排水和浅沟(管)排水可以减少排水量和硝态氮流失量^[16-17];少量多次的施肥方法、间歇灌溉均可减少氮磷流失量^[18-19];合理的有机与无机肥料配合施用以及化肥深施均可降低地表径流氮磷流失量^[20]。

灌区排水水量和水质的变化与气候条件、灌排工程措施、灌溉制度、灌水方法、耕作施肥方式、作物种植结构、土壤质地、地下水位等诸多条件有关,近年来随着人们对水环境问题的日益关注,对排水中氮磷等营养物质变化规律的研究受到高度重视,但对排水中盐分及其他组分随灌溉施肥等变化规律的研究还尚待加强。排水的水质与水量密切相关,应将水量和水质变化规律联系起来,将营养物质、盐分和重金属等结合加以研究,全面揭示灌区排水水量组成及水质变化规律。

1.2 排水再利用对作物及水土环境的影响

灌区排水中的氮磷等营养成分通常对作物生长发育有利,其中重金属和有毒性的有机污染物虽对土壤-水-作物系统有害,通常在工业废水排放量较少的农作区,其含量一般尚不足以致害,目前在灌区排水水质研究中关注不多。在土壤盐渍化地区,多数排水经淋洗土壤后产生,盐分含量相对较高,更易危害土壤-水-作物系统。当利用盐分过高的排水进行灌溉时,可能导致土壤次生盐渍化发生,污染地下水环境,影响作物的正常生长。

1.2.1 排水中全盐量及其盐分组成对土壤-水-作物系统的影响

MITCHELL等^[21]在美国加州山谷地区利用电导率EC为6.9 dS/m的咸排水进行灌溉试验表明,短期内可保证作物不减产,但对灌溉措施若不加管理约束,长时间的利用将引起表土盐分富集,存在次生盐渍化风险。EI-MOWELHI等^[22]在埃及尼罗河三角洲北部开展了排水再利用研究,总结分析了排水用于灌溉作物6个生长季后的效果,指出采用EC为1.1~3.64 dS/m的排水进行灌溉,短期内对农业生产和生态环境没有显著负面影响,但长期效应有待关注和深入研究。季方等^[23]的研究表明,灌区排水对塔里木河干流水体盐化的影响不断加重,资源化利用是减少排水对河水污染和促进人工绿洲与荒漠过渡带稳定的有效措施。许迪等^[24]在田间试验基础上,模拟利用农田排水补灌对作物产量影响的效应,利用含盐量为4 g/L以下的排水在冬小麦生长后期水分亏缺阶段进行补灌,在不影响随后夏玉米产量的基础上,能够不同程度地改善冬小麦产量。

排水中的盐分对土壤-水-作物系统会产生不良影响,但在排水总盐含量相同情况下,有时会产生不同的效应,原因在于排水中的盐分组成不同。盐分组成是影响排水再利用的一个重要因素,作物对排水中 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 的比例以及有毒元素硼(B)、 Na^{+} 、 Cl^{-} 产生不同的效应。YERMIYAHU等^[25]通过辣椒、小麦和番茄试验研究发现,在作物生长和产量方面,B的毒性和盐分的危害之间存在着相互抑制的作用,但对两者之间的交互作用机理还不十分清楚。姜伟^[26]对引起盐分积累的 KNO_3 、 K_2SO_4 及其混合盐(1:1)分别做了5种不同的辣椒胁迫试验处理,综合 KNO_3 、 K_2SO_4 及其混合盐胁迫对辣椒幼苗生长各指标的影响表明, K_2SO_4 对幼苗生长的抑制大于 KNO_3 和混合盐。AHMAD等^[27]发现玉米生长及其对磷的吸收受灌溉水中 Cl^{-} 含量的抑制,同时灌溉水中的 SO_4^{2-} 能促进土壤中磷素的交换和淋失。王少丽等^[28]以宁夏银北灌区5个长期

排水再利用地块为例,分析评价了排水沟水的化学特征和排水再利用的土壤环境效应,结果表明,大部分排水属氯化物钠型水,排水中有机污染指标远小于灌溉水质上限标准,且不存在重金属污染问题,此外,灌溉中后期排水中的各项盐碱化指标较初期明显减小,排水再利用灌溉带来的土壤盐渍化风险也相应降低。

1.2.2 节水减污效应

灌区排水中往往携带了一定数量的农药、化肥和其他溶解物,对其进行重复再利用,有利于农田生态系统较好地吸附消除排水中的污染物,在减少排水量的同时又降低了其携带的污染物负荷,起到保护水土环境的作用。GUERRA等^[29]指出许多国家的水稻田都在实施排水的循环利用。FENG等^[30]研究了循环灌溉系统条件下水稻田营养元素的输移转化规律,评价了在灌溉和暴雨期间水稻田营养元素的流失情况。由于循环利用了部分来自水稻田的排水,增加了水力滞留时间,进而有利于水稻田吸附营养元素,最终出流中的氮磷负荷也相对减少,且化学需氧量(COD)基本保持不变。TAKEDA等^[31]积累了长达8年7个月(8个灌溉期与9个非灌溉期)循环灌溉条件下水稻田的水质和水文监测资料,研究分析了水稻田污染物出流变化的长期规律和系统的净化功能。该系统对磷、COD起到了净化作用,但对氮的去除效果尚不明显;氮和COD的年负荷量与来水量之间有着很好的相关关系,而磷与来水量的关系则相对较差;灌溉期的净出流负荷量与水力滞留时间有关,并得出了氮、磷、COD的净出流负荷量为零的临界水力滞留时间。HAMA等^[32]对稻田排水再利用的研究表明,部分排水用于灌溉提供了作物需氮量的8%~16%,相应减少了氮肥施用量;Hama等^[33]也研究了稻田循环灌溉对磷负荷输出的影响,认为循环灌溉是减少磷负荷的有效方法。

在排水持续再利用条件下,土壤特性和环境变化会导致土壤生产力的下降,长期利用其灌溉对地下水环境将造成何种程度的影响、作物产量和品质是否会受到不良影响等,都是排水再利用中亟需关注 and 有待解决的问题。灌区排水的水质组成不同,其水质属性将存在差异,土壤-水-作物系统对其响应就不相同。由于影响因素较多且较为复杂,并且受地域条件的限制,关于排水水质组成对土壤-水-作物系统的影响机理及排水再利用对水土环境影响的长期效果如何还需要进一步研究。排水再利用虽然可能产生负面影响,但在节水减污方面的积极作用已经十分明显。

1.3 排水溶质运动及再利用模拟模型

无论是排水从田间排水系统排出,还是其再利用对土壤-水-作物系统的影响,都是非常复杂的物理、化学、生物过程。由于现场试验有很强的时间性、周期性和局限性,为了取得不同年份试验结果需要长时间的持续观测,并投入大量的人力和物力,因此模型模拟研究受到广泛重视。现有许多模拟模型用于预测农田排水中化学物质的流失过程,如农田尺度模型 DRAINMOD - N、CREAMS、GLEAMS 等。针对土壤水盐运移规律以及农田排水水盐动态的模型也很多,如应用较多的基于 Richards 方程的农田尺度模型 SWAP 和 HYDRUS - 1D/2D,基于水盐均衡理论的农田尺度模型 DRAINMOD - S 和 SALTMOD 模型。为反映空间变异性,结合 GIS 发展了 GSWAP、DRAINMOD - GIS 等模型。SARANGI 等^[34]利用 SALTMOD 模型和人工神经网络模型分别对水稻田地下排水系统的排水排盐效果进行了研究,发现前者预测作物根区盐分动态较为准确,而后者则在预测暗管排水盐分动态上更加快捷准确。VISCONTI 等^[35]开发了一种预测中长期土壤盐分变化规律的模型 SOLTIRSOIL 并用于西班牙南部,模拟的土壤浸提液和排水的钠吸附比 SAR 和 EC 值与实测值非常接近。SINGH 等^[36]在水稻种植区域,利用塘堰储存调节稻田排水并用于灌溉,为了优化灌溉和排水及其再利用除污的成本,开发了两个优化模型,分析结果表明要除去较高的污染物出流负荷,需保持更大面积的塘堰和排水沟,该模型可为整个区域选择最佳综合管理措施服务。

研究排水再利用模拟模型对探索排水水量和水质的变化规律以及对建立灌区水土环境管理模式、合理利用排水资源起到积极作用。由于模型对实际问题作了较多的概念性简化,应用中存在着一定程度的偏差,且各个模型有其自身的适用范围和局限性,需具体分析模型对实际问题的适应条件,必要时做适当改进和完善。目前模型常见的是模拟农田尺度排水中氮磷等营养物质流失或盐分动态,综合模拟排水中盐分、营养物质和重金属等不同组分以及灌区尺度排水再利用的水土环境效应模型有待开展进一步的研究。

2 灌区排水再利用工程运行模式

灌区不同类型排放水汇集到排水沟后,如何对其进行再利用,涉及到采取何种形式的再利用工程运行模式。目前几种常见的排水再利用模式主要有(图 1):①田间排水湿地(或塘堰)系统,对排水进行处理后,直接用于灌溉,或建立蓄水池进行调蓄灌

溉。②将上游排放的水用于下游,并根据水质情况,或直接利用排水灌溉,或与淡水混合利用、与淡水交替利用进行灌溉。③在排水沟下游修建泵站,通过联合调度利用排水。

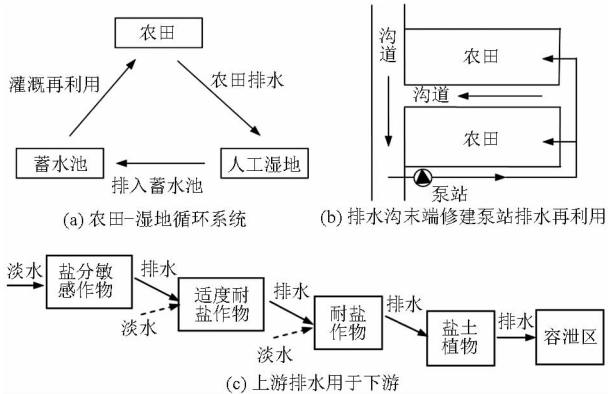


图 1 排水再利用运行模式示意图
Fig.1 Schematic diagram of operation mode for drainage water reuse

SINGH 等^[37]联合 FAIDS 和 RESBAL 模型模拟研究区 8 年的排水情况,设计了一系列串联的塘堰贮存排水,确定了相应的调度运行方案。董斌等^[38]借鉴灌溉-排水-湿地综合管理系统(WRSIS)的理念和思路,根据我国南方平原和浅丘陵地区水稻灌区灌排系统的特点,在广西青狮潭灌区以改造农田洼地成为人工湿地为主,在湖北漳河灌区以发现有灌溉塘堰的净化水质能力为主,开展相关的田间试验,经过处理后的排水用于灌溉下游农田或储存于塘堰中供灌溉之需。ZAPATA 等^[39]在连续梯田区采用格田灌溉方法逐级向下依次灌溉,将上游梯田的退水排放到下游直接利用,比较了田间排水再利用和传统灌溉模式的效果,发现前者的灌水均匀性和灌溉水利用系数均有所提高。GOTSIS 等^[40]采用上游排水与下游淡水联合利用方式,以经济效益最大为目标,基于半经验水分生产函数,研究不同淡水水价和不同排水水质条件下最优的排水可利用量。TAKEDA 等^[41]通过修建泵站实现排水的循环利用,其中处于下游最低处的泵站将混合后的部分排水和河水抽回到水稻田用于灌溉。王少丽等^[42]基于宁夏银北灌区排水再利用工程模式调研与经济分析,提出根据灌溉用水方式、排水沟水循环方式、取水量、输水距离以及沟水流量大小和沟道规模等因素选择工程运行模式的方法。

灌区排水再利用工程运行模式的选取主要由当地条件决定,如排水设施、地形条件和排水水量水质等,需综合考虑经济效益和环境效应因地制宜地加以选择。当排水的水质相对较好时,无需对其进行湿地净化或与淡水混合处理即可直接利用,若地形

满足要求,可采取上游排放、下游直接利用的方式;当排水水质较差时,则需先对其进行必要的处理,如采取与淡水混合的方式,可分为直接与渠水混合、与河水混合等方式。灌溉-排水-湿地(或塘)综合管理系统是一种既可对排水进行相应净化处理,又可调蓄排水水量的优化再利用模式,是未来的发展方向。应结合我国灌区的特点,探索构建具有特色的排水再利用生态系统,既达到节水减污目的,又具有经济合理、可操作性等特点。

3 灌区排水再利用灌溉管理措施

灌区排水资源在合理的管理措施条件下是可行的灌溉替代水源,并有助于减轻排水对下游水体的负面影响^[43-44]。利用排水进行灌溉的管理措施主要包括灌溉方式、灌水方法和灌溉频率等。灌溉方式一般有轮灌和混灌,其中,轮灌是指排水与渠水按一定的制度交替灌溉作物,一是通过作物轮作实现轮灌,即渠水灌溉盐分敏感的作物,排水灌溉耐盐度较高的作物,二是在作物萌芽期和幼苗期或者其他盐分敏感期,利用渠水灌溉,在作物盐分不敏感期,采用排水灌溉,轮灌可避免或减轻利用排水灌溉可能引发的不良效应。MOSTAFAZADEH-FARD 等^[45]研究了不同含盐量灌溉水和不同灌溉管理措施对小麦产量的影响,结果表明灌溉水盐分对作物产量的影响与作物生长阶段密切相关,适宜的灌溉管理和土壤盐分淋洗可以增加小麦产量。SHARMA 等^[46]的研究表明,在芥末和大麦作物的萌芽期,采用渠水灌溉,其余时期可利用 EC 为 12~15 dS/m 的排水进行灌溉,没有发生显著减产。杨树青等^[47]在内蒙河套灌区开展了不同微咸水利用方案的数值模拟,提出盐渍化土壤条件下对区域土壤环境影响较小的生育期淡水轮灌优化方案。混灌是指将淡水与排水按照一定比例混合后用于灌溉,在降低灌溉水中含盐量的同时减少淋洗用水消耗,一定程度上增加了灌溉水的供应量。马云瑞等^[48]对宁夏地区灌溉回归水再利用进行了评价,指出将其与渠水混灌或轮灌对作物生长无明显不良影响。RHOADES 的研究也发现,采用混灌方式利用排水存在着一定的局限性,效果不够理想^[49],轮灌比混灌更具可操作性和发展潜力^[50]。

常用的灌水方法包括地面灌溉、喷灌和滴灌等,单从灌溉效果分析,利用排水进行灌溉最适宜的灌溉方法是滴灌。滴灌具有较高的灌溉水利用率,且在滴头四周可形成维持作物根区相对湿润的环境和淋洗范围,有利于作物生长发育,保证产量。AYARS 等^[51]的研究结果表明,在中度盐碱化土壤

上和良好灌溉管理措施下,采用 EC 为 8.5 dS/m 的咸排水滴灌棉花,作物产量与用淡水灌溉的对照值相近。但利用排水进行滴灌需采用有效的过滤装置,并随时注意清洗,以免水中杂物堵塞管道和滴头。其次是地面灌溉,其优于喷灌,因喷撒的水会接触到作物枝叶,排水中有害物质可能通过根系和枝叶两种途径危害作物。灌溉频率的高低对排水的灌溉再利用效应也有影响,适当的高频灌溉有利于保持根系良好的湿润环境,起到改善滴灌施肥管理的作用,但在排水中含盐量较高条件下,较高的灌溉频率是否有利,目前尚无定论。DUDLEY 等^[52]采用模型模拟评价了不同灌溉频率、不同灌溉方法、不同作物耐盐度条件下利用咸排水进行灌溉的效果,发现增加灌溉频率对土壤积盐没有显著影响。

科学合理的灌水方法、灌溉方式、灌溉制度和管理措施是实现灌区排水资源安全利用、可持续发展的关键所在,其中滴灌系统和轮灌方式是合理利用排水的较适宜灌溉方法和灌水模式,对其他模式的使用效果及适应性,需要结合不同地区的土壤、作物、排水水质等特点加以探讨和比较,在有利于改善环境和保证作物产量品质基础上,因地制宜地制定和筛选合理的管理措施。

4 结束语

科学合理地利用灌区排水对充分挖掘水资源潜力、减缓农业水资源供需矛盾、保护水生态环境具有重要的意义和作用。国内外已开展了相关研究并取得了一定进展,但尚缺乏可借鉴的长期安全利用技术体系。灌区排水的水量和水质随地域条件、作物种类、土壤类型、农事活动等的差异而发生变化,不同地域下的排水再利用即有共性也有其差别,前者在于提高水肥资源利用效率、保证农业生产并减少排水对下游环境的影响,后者则随着排水水质条件的不同而有所区别。在干旱半干旱地区,应侧重排水的盐分组成对其再利用后产生的作物和水土环境效应,而在湿润半湿润地区,则应侧重排水中的养分和有毒元素带来的影响,做到避其害取其利,达到水肥高效利用和水土环境良性循环的目的。为此,研究适应不同排水水质的耐盐作物选择、灌溉模式、排水再利用的水土环境效应及其相应对策措施等显得尤为重要。

现有灌区排水再利用工程运行模式各具特色,针对不同的地区,应结合当地水源供应状况、排水特点、灌排措施等进行综合评价分析,选择最佳的再利用模式和管理措施,其中灌溉-排水-湿地系统可能是未来的发展方向。研究适应我国典型地域条件下

的排水灌溉利用模式、水肥输移和调控模式、综合考虑排水再利用下的作物和环境生态效应模拟模型,对持续高效的利用排水资源至关重要。滴灌、轮灌是合理利用咸排水的较好管理模式,需要结合土壤、作物、排水水质等差异,探讨和筛选适宜当地条件的排水再利用灌溉管理措施。此外,应加强排水再利用生态环境效应评价和风险分析研究,避免因盲目利用排水灌溉造成的不良环境后果。

参 考 文 献

- 1 VANGELIS S, SPILIOTIS M, TSAKIRIS G. Drought severity assessment based on bivariate probability analysis[J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(1):357–371.
- 2 AGNIHOTRI A K, KUMBHARE P S, RAO K V G K, et al. Econometric consideration for reuse of drainage effluent in wheat production[J]. *Agricultural Water Management*, 1992, 22(3):249–270.
- 3 王少丽. 基于水环境保护的农田排水研究新进展[J]. *水利学报*, 2010, 41(6):697–702.
WANG Shaoli. Advancement of study on farmland drainage technology based on water environment protection[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(6):697–702. (in Chinese)
- 4 许迪, 龚时宏, 李益农, 等. 农业水管理面临的问题及发展策略[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11):1–7.
XU Di, GONG Shihong, LI Yinong, et al. Problem and strategies on development of agricultural water management[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11):1–7. (in Chinese)
- 5 RAGAB R. Reuse of drainage water for irrigation: possibilities and constraints[C]//*Proceedings of the International Workshop on Drainage Water Reuse in Irrigation*, 1998.
- 6 SHARMA B R, MINHAS P S. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 78:136–151.
- 7 FLEIFLE A E, SAAVEDRA V O C, NAGY H M, et al. Simulation-optimization model for intermediate reuse of agriculture drainage water in Egypt[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2013, 139(3):391–401.
- 8 HAMDY A. Saline irrigation management for sustainable use: major issues[C]//*Florence INTECOL Seminar*, 1998.
- 9 TANWAR B S. Saline water management for irrigation[C]//*Proc. Work Team on Use of Poor Quality Water for Irrigation*, 2003.
- 10 孙东伟. 建三江管局将进一步推进排水主河道设置拦蓄设施[J]. *黑龙江水利科技*, 2011, 39(6):273–274.
SUN Dongwei. Jiansanjiang authority will further promote the development of storage facilities at the main drainage channel[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2011, 39(6):273–274. (in Chinese)
- 11 王友贞, 王修贵, 汤广民. 大沟控制排水对地下水水位影响研究[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(6):74–77.
WANG Youzhen, WANG Xiugui, TANG Guangmin. Effects of controlled drainage of main ditch on groundwater table[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(6):74–77. (in Chinese)
- 12 汪珊, 张宏达, 汪林. 宁夏青铜峡灌区水土盐量的衰减和积聚进程分析[J]. *水利学报*, 2005, 36(3):365–377.
WANG Shan, ZHANG Hongda, WANG Lin. Analysis on the process of deduction and accumulation of salinity in phreatic water and soil in irrigation area[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3):365–377. (in Chinese)
- 13 王少丽, 许迪, 方树星, 等. 宁夏银北灌区农田排水再利用水质风险评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(3):43–47.
WANG Shaoli, XU Di, FANG Shuxing, et al. Evaluation of water quality hazard of drainage reuse in Yinbei Irrigation District, Ningxia[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(3):43–47. (in Chinese)
- 14 罗纨, 贾忠华, 方树星, 等. 灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的实验研究[J]. *水利学报*, 2006, 37(5):608–612.
LUO Wan, JIA Zhonghua, FANG Shuxing, et al. Effect of drainage control on salt and water balance in rice field[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(5):608–612. (in Chinese)
- 15 孙亚亚, 俞双恩, 陈军, 等. 暴雨条件下不同灌排模式稻田排水中氮磷变化规律[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2014, 42(5):455–459.
SUN Yaya, YU Shuang'en, CHEN Jun, et al. Changes of nitrogen and phosphorus concentrations in surface drainage from paddy field under different irrigation and drainage modes[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2014, 42(5):455–459. (in Chinese)
- 16 SANDS G R, SONG I, BUSMAN L M, et al. The effects of subsurface drainage depth and intensity on nitrate load in a cold climate[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(3):937–946.
- 17 HELMERS M, CHRISTIANSON R, BRENNEMAN G, et al. Water table, drainage, and yield response to drainage water management in southeast Iowa[J]. *Journal of Soil & Water Conservation*, 2012, 67(6):495–501.
- 18 陈林兴, 胡志华, 孙建国. 稻田灌水量与化肥流失关系的研究[J]. *中国农村水利水电*, 2008(3):51–54.
CHEN Linxing, HU Zhihua, SUN Jianguo. Study on the relationship between rice irrigation quantity and fertilizer loss[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008(3):51–54. (in Chinese)
- 19 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)
- 20 石艳平, 段增强. 水肥综合管理对减少滇池北岸韭菜地氮磷流失的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10):2138–

2144.

- SHI Yanping, DUAN Zengqiang. Integrated management of water and fertilizer to reduce nitrogen, phosphorus loss from Chinese chive field in the north bank of Dianchi Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(10): 2138 – 2144. (in Chinese)
- 21 MITCHELL J P, SHENNAN C, SINGER M J, et al. Impacts of gypsum and winter cover crops on soil physical properties and crop productivity when irrigated with saline water[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45(1): 55 – 71.
- 22 EI-MOWELHI N M, ABO S M S, BARBARY S M, et al. Agronomic aspects and environmental impact of reusing marginal water in irrigation; a case study from Egypt[J]. Water Science & Technology, 2006, 53(9): 229 – 237.
- 23 季方, 马英杰, 樊自立. 塔里木河干流农田排水资源化的研究[J]. 农村生态环境, 2000, 16(2): 1 – 4.
- JI Fang, MA Yingjie, FAN Zili. Utilization of farmland drainage as resources in the Tarim river valley[J]. Rural Eco-Environment, 2000, 16(2): 1 – 4. (in Chinese)
- 24 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(2): 42 – 45.
- XU Di, DING Kunlun, CAI Lin'gen, et al. Simulation and evaluation on the effect of drainage water reuse in the lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(2): 42 – 45. (in Chinese)
- 25 YERMIYAHU U, BEN-GAL A, KEREN R, et al. Combined effect of salinity and excess boron on plant growth and yield [J]. Plant and Soil, 2008, 304(1 – 2): 73 – 87.
- 26 姜伟. 温室土壤次生盐渍化及其主要盐分对辣椒幼苗胁迫的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- JIANG Wei. Studies on secondary salinization of the greenhouse soil and effects of soil salt on pepper seedling[D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2010. (in Chinese)
- 27 AHMAD Z, YAMAMOTO S, HONNA T. Leachability and phytoavailability of nitrogen, phosphorus, and potassium from different bio-composts under chloride- and sulfate-dominated irrigation water[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(3): 1288 – 1298.
- 28 王少丽, 许迪, 杨建国, 等. 宁夏银北灌区排水沟水的化学特征及其灌溉效应[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 166 – 172.
- WANG Shaoli, XU Di, YANG Jianguo, et al. Chemical characteristics and its irrigation effect of drainage water in ditches of Yinbei Irrigation Districts[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2): 166 – 172. (in Chinese)
- 29 GUERRA L C, BHUIYAN S I, TUONG T P, et al. Producing more rice with less water from irrigated systems[G]. SWIM Paper 5, IWMI – IRRI, Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 1998: 24.
- 30 FENG Y W, YOSHINAGAB I, SHIRATANI E, et al. Characteristics and behavior of nutrients in a paddy field area equipped with a recycling irrigation system[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68: 47 – 60.
- 31 TAKEDA I, FUKUSHIMA A. Long-term changes in pollutant load outflows and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system[J]. Water Research, 2006, 40: 569 – 578.
- 32 HAMA T, NAKAMURA K, KAWASHIMA S, et al. Effects of cyclic irrigation on water and nitrogen mass balances in a paddy field[J]. Ecological Engineering, 2011, 37(10): 1563 – 1566.
- 33 HAMA T, AOKI T, OSUGA K. Reducing the phosphorus effluent load from a paddy-field district through cyclic irrigation[J]. Ecological Engineering, 2013, 54(4): 107 – 115.
- 34 SARANGI A, SINGH M, BHATTACHARYA A K, et al. Subsurface drainage performance study using SOLTMOD and ANN models[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84: 240 – 248.
- 35 VISCONTI F, PAZ J M, RUBIO J L, et al. SALTIRSOIL: a simulation model for mid to long-term prediction of soil salinity in irrigated agriculture[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(4): 523 – 537.
- 36 SINGH R K, EISAKA S, IKUO Y, et al. Optimisation models for reduction of effluent load from paddy field by recycling use of water[C]//Proceedings of Diffuse Pollution Conference, 2003.
- 37 SINGH J, KUMAR R. Drainage disposal and reuse simulation in canal irrigated areas in Haryana[J]. Irrigation and Drainage Systems, 1997, 12(1): 1 – 22.
- 38 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 – 15.
- DONG Bin, MAO Zhi, LI Xinjian, 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 – 15. (in Chinese)
- 39 ZAPATA N, PLAYAN E, FACI J M. Water reuse in sequential basin irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2000, 126(6): 362 – 370.
- 40 GOTSIS D, GIAKOUMAKIS S, ALEXAKIS D. Drainage water use options for a regional irrigation system[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2015, 168(1): 29 – 36.
- 41 TAKEDA I, FUKUSHIMA A, TANAKA R. Non-point pollutant reduction in a paddy-field watershed using a circular irrigation system[J]. Water Research, 1997, 31: 2685 – 2692.
- 42 王少丽, 王修贵, 瞿兴业, 等. 灌区沟水再利用泵站工程经济评价与结构模式探讨[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 66 – 70.
- WANG Shaoli, WANG Xiugui, QU Xingye, et al. Economic analysis and structure patterns of pumping engineering for reuse of drainage water in the irrigation district[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 66 – 70. (in Chinese)

777 – 789.

- 14 张文耀,蒋凌霄. 基于 HSV 颜色模型的二维流场可视化[J]. 北京理工大学学报,2010,30(3):302 – 306.
ZHANG Wenyao, JIANG Lingshuang. 2D flow field visualization based on HSV color model[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(3): 302 – 306. (in Chinese)
- 15 INOUE M, KUROMARU M, TANINO T, et al. Propagation of multiple short-length-scale stall cells in an axial compressor rotor [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2000, 122(1): 45 – 54.
- 16 PULLAN G, YOUNG A M, DAY I J, et al. Origins and structure of spike-type rotating stall [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2015, 137(5): 051007.
- 17 印刚. 基于粒子群优化算法的立式管道泵空化特性研究[D]. 镇江:江苏大学,2014.
- 18 ENGEDA A, KIM Y, AUNGIER R, et al. The inlet flow structure of a centrifugal compressor stage and its influence on the compressor performance[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(5):779 – 785.
- 19 KIM Y, ENGEDA A, AUNGIER R, et al. The influence of inlet flow distortion on the performance of a centrifugal compressor and the development of an improved inlet using numerical simulations[J]. Proc. IMech E, Part A: Journal of Power & Energy, 2001, 215(3): 323 – 338.
- 20 VAGNOLI S, VERSTRAETE T. URANS analysis of the effect of realistic inlet distortions on the stall inception of a centrifugal compressor[J]. Computers & Fluids, 2015,116:192 – 204.
- 21 ARIGA I, KASAI N, MASUDA S, et al. The effect of inlet distortion on the performance characteristics of a centrifugal compressor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 1983, 105(2): 223 – 230.
- 22 SAXER-FELICI H M, SAXER A P, INDERBITZIN A, et al. Prediction and measurement of rotating stall cells in an axial compressor[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1999, 121(1): 365 – 375.
- 23 QI L, ZOU Z, WANG P, et al. Control of secondary flow loss in turbine cascade by streamwise vortex[J]. Computers & Fluids, 2012,54: 45 – 55.
- 24 赵宇,王国玉,黄彪. 非定常空化流动涡旋特性分析[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(8):645 – 651.
ZHAO Yu, WANG Guoyu, HUANG Biao. Vortex dynamic analysis of unsteady cavitating flows around a hydrofoil[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8): 645 – 651. (in Chinese)
- 25 郎涛,施卫东,陈刻强,等. 不同比转数前伸式双叶片离心泵内部流动规律研究[J]. 农业机械学报,2015,46(12):89 – 95.
Lang Tao, Shi Weidong, Chen Keqiang, et al. Flow field in forward-extended double blades centrifugal pump at different specific speeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):89 – 95. (in Chinese)

(上接第 48 页)

- 43 CORWIN D L, LESCH S M, OSTER J D, et al. Short-term sustainability of drainage water reuse: spatio-temporal impacts on soil chemical properties [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(Supp.): S – 8 – S – 24.
- 44 GRATAN S R, BENES S E, PETERS D W, et al. Feasibility of irrigating pickleweed with hyper-saline drainage water [J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(Supp.): S – 149 – S – 156.
- 45 MOSTAFAZADEH-FARD B, MANSOURI H, MOUSAVI S F, et al. Effects of different levels of irrigation water salinity and leaching on yield and yield components of wheat in an arid region[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2009,135(1): 32 – 38.
- 46 SHARMA D P, TYAGI N K. On-farm management of saline drainage water in arid and semi-arid regions[J]. Irrigation and Drainage, 2004,53(1):87 – 103.
- 47 杨树青,丁雪华,贾锦凤,等. 盐渍化土壤环境下微咸水利用模式探讨[J]. 水利学报,2011,42(4):490 – 498.
YANG Shuqing, DING Xuehua, JIA Jinfeng, et al. Light-saline water use pattern in saline soil environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,42(4):490 – 498. (in Chinese)
- 48 马云瑞,张益民,苗济文,等. 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.
MA Yunrui, ZHANG Yimin, MIAO Jiwen, et al. An appraisal of the development and reuse of the return water of irrigation in Ningxia[J]. Journal of Natural Resources,1997,12(2):133 – 138. (in Chinese)
- 49 RHOADES J D. Intercepting, isolating and reusing drainage water for irrigation to conserve water and protect water quality[J]. Agricultural Water Management, 1989,16(1 – 2):37 – 52.
- 50 RHOADES J D, KANDIAH A, MASHALI A M. The use of saline water for crop production[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper 48, Rome,1992.
- 51 AYARS J E, HUTMACHER R B, SCHONEMAN R A, et al. Drip irrigation of cotton with saline drainage water[J]. Soil and Water Div. of ASAE, 1986, 29(6):1668 – 1673.
- 52 DUDLEY L M, BEN-GAL A, LAZAROVITCH N. Drainage water reuse: biological, physical, and technological considerations for system management[J]. Journal of Environment Quality, 2008, 37(Supp.):S – 25 – S35.