

# 灌排一体化工程对地下水埋深及作物生长影响的研究综述

王天宇<sup>1,2</sup>, 王振华<sup>2,3</sup>, 陈林<sup>1</sup>, 张金珠<sup>2,3</sup>, 李文昊<sup>2,3</sup>

(1. 新疆天业节水灌溉股份有限公司, 新疆 石河子 832000; 2. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000; 3. 现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆 石河子 832000)

**摘要:** 灌排一体化工程是提高农业水肥利用效率、减小旱涝灾害影响、提高作物产量的重要方式之一,近年来人们逐渐认识到灌溉与排水是紧密相连的两部分,对于农田灌溉排水工程的研究与相关建设也在不断增加。灌排系统从早期提高排水效率,到注重环境影响,逐渐发展为节水灌溉与新型排水技术相结合的灌排一体化工程。灌排一体化工程通过控制灌溉与排水过程,会对土壤含水率和地下水水位、地下水矿化度产生一定的影响,改变作物根系土壤水分条件,从而影响作物的水分吸收和生理生长过程,合理的灌排工程可以促进作物的生长,提高产量。我国南北方灌排系统功能存在一定差异,南方以除涝防渗为主,北方则以提高抗旱能力、治理土壤盐渍化为主。同时,我国灌排系统还存在前期投入成本高、运行维护管理不完善、系统操作技术难度高等问题急需解决。未来,灌排一体化工程应朝着管网化、信息化和自动化方向发展,进一步提高田间水肥利用效率,实现灌排现代化。

**关键词:** 旱涝灾害; 灌排一体化; 排水工程; 地下水水位; 作物生长

中图分类号: S277

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0174-07

## Literature review on the influence of integrated irrigation and drainage project on groundwater depth and crop growth

WANG Tianyu<sup>1,2</sup>, WANG Zhenhua<sup>2,3</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, ZHANG Jinzhu<sup>2,3</sup>, LI Wenhao<sup>2,3</sup>

(1. Xinjiang Tianye Water-saving Irrigation Co., Ltd., Shihezi 832000, China; 2. College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 3. Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation, Xinjiang Production and Construction Corps Science and Technology Bureau, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** The construction of integrated irrigation and drainage project is one of the important measures for increasing water and fertilizer utilization efficiency, reducing the impact of drought and flood disasters, and improving grain yield. In recent years, people gradually realize that irrigation and drainage are two closely connected parts, therefore the research and related construction of farmland drainage projects are increasing. In the early stage of the irrigation and drainage system application, people only focused on improving the drainage efficiency, and then began to pay attention to the environmental impact. Finally, the system developed into the integrated system combining water-saving irrigation and new drainage engineering. By controlling the system operation process, irrigation and drainage integration project will have a certain impact on the soil moisture content, groundwater level salinity, and in turn affect the water absorption and physiological growth process of the crops. A reasonable integrated irrigation and drainage project can promote the growth of crops and increase the yield. The functions of integrated irrigation and drainage project in southern and northern China are different. In the south, waterlogging and seepage control are the main functions, whereas improving drought resistance and controlling soil salinization are

收稿日期:2020-06-04; 修回日期:2020-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51869027); 石河子市重大科技项目(2018ZD03); 干旱区滴灌节水兵团科技创新团队项目(2019CB004); 兵团新疆重点产业创新发展支撑计划项目(202DB004)

作者简介:王天宇(1991-),男,山东济南人,博士研究生,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。

通讯作者:王振华(1979-),男,河南周口人,博士,教授,博士生导师,主要从事干旱区节水灌溉理论与技术研究。

the main functions in the north. In addition, there are some issues to be addressed, such as large demand for funds in the early stages, imperfect operation and maintenance management, and technical difficulties in system operation. In the future, the integrated irrigation and drainage engineering should be developed towards the pipe network, informatization and automation, so as to further save agricultural water and reduce fertilizer waste, realize the modernization of irrigation and drainage integration projects.

**Key words:** drought and flood disaster; irrigation and drainage integration; drainage engineering; groundwater level; crop growth

## 1 研究背景

旱涝灾害、土壤盐渍化问题是限制我国许多地区农业发展的重要原因,通过建设完善田间水利工程、提高田间管理能力等方式,治理改良土壤,提高田间排水效率,增强抗旱能力,是保障农业种植正常生产的常用措施<sup>[1-3]</sup>。人们认识到通过科学合理的灌溉方式,调控灌溉过程,可以有效促进农业生产,国内外的许多学者针对节水灌溉技术做出了大量研究,滴灌、喷管、微润灌等技术的推广应用,改变了以往灌溉方式,减少了水肥浪费,起到了节水、节肥、增产、提质的效果<sup>[4-8]</sup>。尤其是在农业用水资源短缺的地区,节水灌溉技术的应用还有效缓解了干旱胁迫、土壤盐渍化对作物生长带来的危害<sup>[9-11]</sup>。灌溉是农田水利中的主要组成部分,排水同样在农业种植中起着十分重要的作用,若忽视排水的重要性,缺少田间排水工程,将会对农田环境和作物生长带来巨大危害:一方面,田间排水效率低,过量降雨或灌溉导致的涝害会使得作物根系受到涝害胁迫,抑制作物生长,导致作物减产,造成经济损失<sup>[12-14]</sup>;另一方面,在地下水水质矿化度较高或土壤含盐量较大的干旱地区,若缺乏有效的排水措施而无法对土壤中过度累积的水分进行排疏,则高蒸发量会进一步加剧土壤盐渍化程度<sup>[15-16]</sup>,使土壤返盐问题难以控制,最终将导致土壤质量下降,甚至农田退化。因此,研究人员开始意识到田间排水的重要性,关于田间排水的相关研究近年来也在不断丰富,实践结果表明,水泵抽水、修建排水渠、打竖井引水、建立暗管排水等措施可以提高农田的排水效率,不同的排水措施均在控制土壤盐分和促进作物生长方面取得了一定的成效<sup>[17-19]</sup>。

随着对农田灌溉排水方面的深入研究,许多学者开始认识到农业灌溉与田间排水并不是两个独立的部分,协调灌溉与排水两者间的联系能起到相互促进的积极作用。张金龙等<sup>[20]</sup>利用漫灌淋洗与暗管排水协同调控,在改良盐碱土方面取得了一定成果,合理的暗管布设间距与灌溉淋洗量可以提高盐

分淋洗效率,从而减少暗管布设成本和灌溉淋洗用水量。Peng等<sup>[21]</sup>采用节水灌溉与控制排水一体化系统(WSI-CD)调节田间排水与灌溉需求,提高了水分利用效率。同时,国内外许多研究利用数值模拟,证实了灌排一体化工程的实施会对地下水水位、土壤水盐运移产生影响<sup>[22-24]</sup>。众多学者在关注灌排系统对土壤及地下水影响的基础上,也开始逐渐探究灌排一体化系统对整个农田生态系统和作物本身生理生长的影响,以便更好地为灌排一体化工程的未来发展建设提供理论基础和实践经验。

## 2 灌溉排水系统研究发展概况

### 2.1 以提高灌溉排水效率为主的灌排工程

国外较早地就意识到控制田间排水对于农业种植的重要性。捷克在20世纪70年代,便有农户开始尝试使用瓷砖来建立农田灌排系统,以达到灌溉和排水的效果,之后伴随着相关法律以及技术的完善,捷克的排水农田的总面积开始快速上升,促进了农业的进一步发展<sup>[25]</sup>。印度作为农业大国之一,为了解决农田排水问题,也较早地开始探索地下排水工程在农业工程中的应用,结果表明,农田地下排水工程是一种十分高效的土地管理和水盐平衡调控手段,虽然需要农户在排水系统的前期建设中投入一定的资金,但农田排水工程可以有效地改善因内涝造成的作物减产乃至停产现象,保障农业种植的长期经济效益<sup>[26]</sup>。

我国在20世纪70年代,交口抽渭灌区因严重内涝灾害导致10万亩土地有种无收,从而引起了人们对于灌区排水工程建设的重视,通过修建干、支沟,新建、改建排水站等方式,使得灌区每年可排出盐碱水近 $8\,000 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,带走盐分超 $40 \times 10^4 \text{ t}$ ,灌区土质得到极大改善,恢复了灌区的正常农业生产<sup>[27]</sup>。阎冠宇等<sup>[28]</sup>在20世纪初提出,灌溉排水基础设施是解决我国“三农”问题的基础,也是保障我国粮食安全的需要。曹伟等<sup>[29]</sup>研究了盐碱地滴灌灌溉与明渠排水条件下的土壤水盐运移规律,并通过土壤渗透系数、土壤给水度、区域地下水埋深条件

等因素,确立了合理的斗排间距,为其他地区的排水渠修建提供了参考。

早期的排水工程多以修建完善明渠、暗渠、排水竖井等方式为主,该类排水工程施工较为简单,为农田积水提供了有效的排泄渠道,通过结合滴灌等节水灌溉方式,在控制土壤盐分、减少旱涝灾害等方面取得了一定的成效。

## 2.2 基于环境影响的灌排工程研究

田间排水在将多余水分排出的同时,也会将土壤中因施肥而累积的氮、磷、钾等离子带出,当化学肥料使用不合理时,过量的硝酸盐、磷酸盐等便会随着农田排水进入到地下水或农田下游水体中,造成环境污染。因而,学者们开始不仅关注将多余水分排出农田,也开始关注排水水质对于环境的影响。Castellano 等<sup>[30]</sup>认为,排水虽然会促进作物的生长,但也会增加土壤中养分的流失,通过安装合理的排水系统,可以避免肥料过度损失,减少温室气体的排放。Christianson 等<sup>[31]</sup>利用木屑和反硝化生物反应器,结合排水工程设施,减少了农业排水中硝酸盐的含量,优化了排水水质,缓解了因肥料过度使用造成的环境污染。高焕芝等<sup>[32]</sup>在水稻排水口设置闸门来控制排水沟水位,以起到调节田间水分、控制灌排的作用,试验结果表明通过控制灌排,灌溉定额可减少 15% 以上,排水总量减少 50% 以上,作物未出现减产情况,并且有效减少了氮、磷等元素的流失。刘方平等<sup>[33]</sup>的研究结果也表明,通过排水沟生态改造,使排水沟同时具备排水和减污功能,在灌排系统与水肥调控的双重作用下,整个稻田生态区的经济效益、环境效益、生态效益均有所提高。

随着对于灌排工程的进一步研究,灌排工程的作用不再只是控制田间水分,其对于整个农田生态系统的影响也引起人们越来越多的重视。

## 2.3 新型灌排工程发展建设现状

随着现代农业技术的不断发展,许多新技术也开始应用在农业灌排中。对于节水灌溉,滴灌、喷灌、微润灌在不同地区和不同作物中的应用越来越广泛;而以暗管为主的新型排水技术,因其显著的排水排盐效果,推广应用范围也在不断扩大。周复雄等<sup>[34]</sup>针对设施农业种植的排水做出了相关的研究,通过暗管进行排水控制,可以有效地控制大棚土壤的盐分累积。也有研究表明,暗管控制排水条件不会对大棚作物的水分利用效率和氮肥利用效率产生影响,但不同的暗管间距和布设深度会对排水总量和排氮总量产生显著影响<sup>[35]</sup>。通过排水工程进行

排水回收循环利用也是人们关注的另一重点,Wahba<sup>[36]</sup>应用 DRAINMOD-S 水管理模拟模型,模拟了不同排水矿化度和淡水/排泄回收水循环方案,模拟结果表明,在灌排结合条件下,水质(电导率)为 4~12 dS/m 的亏缺灌溉方案,结合排泄回收水与淡水循环利用等方式,可以保障农业生产与作物产量。

在灌溉与排水技术进步的同时,灌溉与排水间的联系也越来越紧密,灌排一体化程度越来越高。陈月庆<sup>[37]</sup>通过控制灌排水量和灌排频率设计不同的灌排模式,探寻适宜盐渍土地区稻田水-盐调控的灌排技术,针对不同的土壤质地,提出了不同灌排模式的适用范围。也有学者针对水田设计了灌排一体化方案,该方案可以起到减少灌溉定额、避免肥料过度使用、保障作物产量的效果<sup>[38]</sup>。灌排一体化工程在农田生态与土壤环境方面均起到了有益效果,人们对于农田灌排工程一体化的建设也越来越重视,灌排工程的形式也逐渐多样化,提高了灌排工程对不同种植模式和种植作物的适用性。在此基础上,关于灌排结合对于作物生长方面的研究目前也越来越多。

## 3 灌排工程对作物的影响

### 3.1 排水以及地下水埋深对作物生长的影响

地下水埋深的动态变化是影响一个地区土壤盐碱化程度的重要因素之一<sup>[39]</sup>,尤其在干旱地区,持续的蒸发作用会导致土壤盐渍化程度不断加重<sup>[40-41]</sup>。田间灌溉会影响地下水埋深,灌溉前后地下水位会出现一定的波动,而地下水埋深的变化又会影响作物的生理生长。王晓红等<sup>[42]</sup>发现,地下水埋深会对作物根系生长、株体本身生长以及作物腾发量产生影响,因此一个地区的农业灌水量不仅要考虑作物本身的需水规律,也应考虑地下水埋深。刘战东等<sup>[43]</sup>的试验结果也表明,不同的地下水埋深会对玉米的生长形态产生影响,同时,地下水还起到动态调节作物耗水的作用,夏玉米的生育期耗水量会随着地下水埋深的增加而减少。有研究表明,当地下水位处于较浅状态时,作物会增强对水的吸收能力,但过浅的地下水水位会出现土壤返盐的可能性,导致作物根系吸收水分受阻,抑制作物生长<sup>[44]</sup>。Barbeta 等<sup>[45]</sup>利用同位素示踪法估算了地下水对作物蒸腾的影响,结果表明在气候干旱的地区,作物利用地下水补充自身水分需求的可能性会增大,旱季地下水对于作物吸水的贡献率可以达到 55.98%。因此,区域农业种植的发展需要提高对地下水埋深

变化的关注,随着农业节水意识的增强,节水灌溉技术的推广和应用改变了以往的灌溉条件,对地下水埋深也产生了不同的影响。姜凌峰等<sup>[46]</sup>通过 MIKE-SHE 模型模拟了节水灌溉对地下水水位的影响,结果表明随着滴灌比例的增加,地下水补给量会有所下降,滴灌应用对地下水下降的贡献比例为24.7%。Kaman 等<sup>[47]</sup>在 Akarsu 灌区观测灌溉对地下水埋深和地下水矿化度的影响,该区域由于土壤质地和排水系统不完善等原因,农业灌溉对于地下水水位以及矿化度的影响十分明显,结果显示在灌溉高峰的7月份,由于不合理的灌溉制度以及不完善的排水系统,土壤中盐分会升至全年最高。由此可以看出,排水工程在调节地下水水位、控制土壤含水率和含盐量方面有着十分重要的作用,从而影响作物的种植与生长。在农业种植中只关注灌溉,而忽略排水工程的建设,会对一个区域的地下水环境以及农业生产产生诸多影响,排水工程的建设是未来农业可持续发展中不可忽视的重要环节。

### 3.2 灌排结合对作物生长的影响

灌排一体化对土壤水分及土壤环境有着较为明显的影响,作为作物根系生长、吸收养分的主要区域,土壤水分、养分及气体条件的变化均会对作物的生长产生不同的影响。水稻一直是受旱涝灾害影响较为严重的一种作物,有研究表明,稻田灌排耦合可以改变水稻的需水量,使得水稻不同生育期的需水规律发生改变<sup>[48]</sup>,控制灌排模式也可以提高灌溉水利用系数,起到节水、减排、增产的效果<sup>[49]</sup>。俞双恩等<sup>[50]</sup>的研究结果表明,在分蘖期先旱后涝的情况下,水稻达到最大分蘖数的时间得到了提前,而茎蘖数的增长速率则有所下降,因而使得水稻的生长受到了一定程度的抑制;而在拔节孕穗期对水稻进行先旱后涝处理,水稻的株高生长速率有所下降,因而显著降低了水稻的株高;不同的灌排模式可以影响水稻株高和茎蘖数的生长时间以及生长速率,从而最终影响水稻的株高和分蘖数。也有研究表示通过灌排耦合效应,水稻的灌溉水量显著下降,较常规灌溉下降41.7%;灌排耦合调控还会显著降低水稻的蒸发蒸腾量,较常规灌溉下降24.9%;灌排耦合调控下水稻产量较常规灌溉下降1.9%,水分生产效率提高30.5%,作物产量基本保持稳定,作物水分利用效率有显著的提高<sup>[51]</sup>。

对于其他作物的种植,控制灌排同样会对作物的生长产生影响。邵光成等<sup>[52]</sup>评价了不同灌溉排水条件下的番茄品质,结果显示在灌水下限为80%

的前提下,灌溉量减为60%,且配合暗管排水埋深0.8 m,可以使得番茄的综合品质达到最优。孔琼菊等<sup>[53]</sup>对番茄种植的研究也表明,通过灌排结合适当减少土壤含水率,可以提高番茄的各项营养品质指标,改善番茄品质。Wang 等<sup>[54]</sup>的研究表明当排水水质矿化度在3~5 g/L 范围内时,棉花的种子萌发率有所下降,当田间排水水质矿化度大于5 g/L 时,种子的萌发收到严重的抑制。Matsuo 等<sup>[55]</sup>在日本西南部通过地下灌溉与排水系统相结合的方法,促进了大豆的生长,缓解了大豆的倒伏问题。

通过灌排结合对土壤含水率进行调节,可以较为有效地改善作物的根系生长环境,对于增强作物的抗倒伏性、提高水肥利用效率、促进农业生产都可以起到积极的作用。

## 4 我国南北方灌排体系发展现状及存在的问题

我国南北方农业种植存在着一定差异,南方以水田为主,主要种植农作物为水稻,而北方则以旱田为主,农业种植以小麦、玉米居多,两者在灌溉排水发展中的侧重点有所不同。南方地区的灌排系统更加重视田间排水除涝,同时也兼顾防渗措施。近年来,南方各省的农业高效节水面积不断增加,高标准农田建设逐步实施,有效解决了水田的涝害问题,确保了农业的稳定发展<sup>[56-58]</sup>。在我国北方地区,灌排系统则侧重于提高抗旱能力,控制土壤盐渍化,灌溉系统对地下水的开采较多,排水系统在排水的同时也起到将盐分带出土壤的作用,降低土壤中的含盐量。黑龙江垦区大力发展机电排灌,至2012年末,灌区机电井建成数量超过20 104眼,机电排灌面积 $485.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,伴随着机电井建设,黑龙江垦区有效灌溉面积10年内增长2.24倍,实现了农业快速发展<sup>[59]</sup>。山东滨州地区自2008年提出“方田”建设方案,完善农田渠道建设,优化田间水闸分布,实现了“旱能浇、涝能排”<sup>[60]</sup>。另外,北方部分地区由于地表淡水水源有限,常开采地下微咸水用于农业灌溉,合理的灌排工程可以更加安全合理地使用微咸水资源<sup>[61-62]</sup>。新疆自20世纪60年代便开始修建排水工程,排水工程对于新疆地下水水位及地下水矿化度的调控作用十分明显,灌溉后,排水工程可使地下水矿化度下降6.3 mS/cm,解决了因灌溉导致的地下水水位过度抬升问题<sup>[63]</sup>。

南北方的灌溉排水工程建设中,也存在着许多共同的问题:

(1) 额外成本较高。田间高效节水灌溉设施(滴灌、喷灌等)和田间排水设施(暗管、竖井等)的早期建设成本较高,部分地区缺少建设资金。灌排系统建成后,日常维护需要耗费额外的人力与财力,灌排系统损坏后维修难度大、费用高,额外增加的投入降低了农户对新型灌排设备的接受程度。

(2) 重建设,轻管理。水利工程设施在建设时投入了大量资金与人员,而在水利工程建成运行时,田间灌溉排水系统缺少完善的管理制度,部分灌排工程缺乏有效的管理。同时,缺少对管理人员的培训,日常管理人员人数少,水平参差不齐,增加了灌排系统的损坏率。

(3) 缺乏科学的灌排系统使用指导。相较传统灌溉,灌排一体化系统在使用和操作上存在一定的技术难度,对新型灌排设备的推广培训不够普及,增加了农户的使用难度,从而使灌排系统难以发挥真正的作用。

针对以上问题,提出以下建议:

(1) 适当加大财政扶持,减少农户对灌排工程前期投入的抵触心理,为农户宣传灌排工程在抗灾、抗风险方面的必要性,提高农户对灌排工程的接受程度。

(2) 建立完善灌排系统管理规章制度,对灌排系统管理人员进行理论知识和实践操作上的全面培训,提高管理人员的日常维护意识和水平,对潜在故障做到及时排查检修,重视灌排系统的日常维护。

(3) 在灌排系统建立初期,灌排系统设计建设方应先派专业人员进站操作,主持举办灌排系统操作培训,通过专业人员引导操作和日常培训,提高农户的操作水平。

## 5 对灌排一体化未来发展的思考

有关灌排一体化工程设计、数值模拟、设备研发等相关的研究目前越来越多<sup>[64-66]</sup>,人们对于灌排结合也越来越重视。越来越多灌排工程的建成也不断促进着农业的进一步发展,未来灌排工程的发展应朝着更加集约管网化和智能化的方向发展。

(1) 推进田间灌排系统管网化建设。发展地面管网化灌溉系统(滴灌、喷灌、微润灌),进一步提高灌溉水利用效率,同时,加快对地下排水系统管网化建设,加大暗管排水工程设施的推广。通过全面管网化的灌排一体化建设,实现地面系统与地下系统的全面协同调控,增加排水循环利用率,增强灌排系统排盐效果,进一步提高水的利用效率,灌排一体化

协同调控如图1所示。

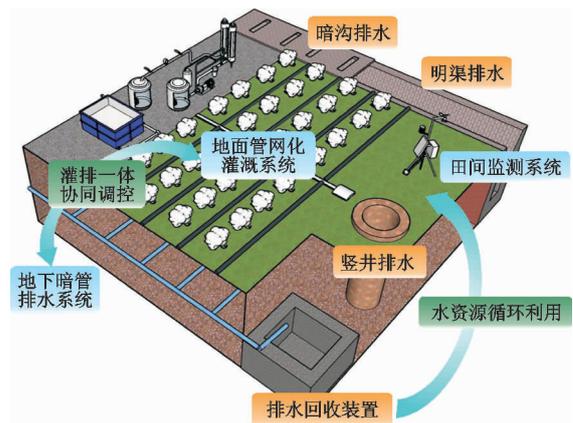


图1 灌排一体化协同调控示意图

(2) 逐步实施田间灌排系统信息化和自动化建设。通过田间监测系统,实时监测气候条件、土壤墒情、作物生长情况等数据,实现地面灌溉系统的全面数据化,为灌溉决策以及相关研究提供数据基础。在田间监测系统的基础上,建立自动化灌溉系统,做到灌溉、施肥、排水、排盐的自动化控制,达到精确灌溉、精准灌溉,提高灌溉现代化水平。

## 6 结论

(1) 灌排系统的发展从早期提高排水效率,到注重控制环境影响,最终发展为高效节水灌溉与新型排水技术相结合的灌排一体化系统,新型灌排系统加强了灌溉与排水之间的联系,在多种种植条件适用性及协同调控田间水分方面取得了显著成效。

(2) 灌排工程会影响地下水埋深动态变化及地下水水质特征,进而改变作物的水分吸收情况,合理的灌排模式可以促进作物对水分和肥料的吸收,改善作物品质,增加作物产量。

(3) 我国南北方灌排工程发展存在一定差异,南方灌排工程注重除涝防渗,而北方灌排工程则更侧重于提高抗旱能力,控制土壤盐分。我国的灌排工程目前还存在成本高、管理不完善、操作难度大等问题亟待解决。

(4) 灌排一体化的未来应朝着管网化、信息化和自动化的方向发展,进一步提高水肥利用效率,提高灌溉排水技术水平,实现灌排现代化。

### 参考文献:

- [1] 张兴旺, 秦晓珠. 近80年来国内旱涝灾害研究现状与研究趋势分析[J]. 南方农机, 2018, 49(2): 8-9.
- [2] 姚亚庆, 郑粉莉, 关颖慧. 近60年我国旱涝灾情时空特

- 征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 228 - 232 + 263.
- [3] 孙丽萍, 于德庆, 王英. 概论旱涝灾害成因与防治及水资源合理开发利用[J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(1): 94.
- [4] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(13): 98 - 105.
- [5] 邓忠, 白丹, 翟国亮, 等. 膜下滴灌水氮调控对南疆棉花产量及水氮利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2525 - 2532.
- [6] 李金鹏, 宋文越, 姚春生, 等. 微喷水肥一体化对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 1 - 9.
- [7] 吕丽华, 董志强, 李谦, 等. 微喷灌模式冬小麦产量形成及水分利用特性研究[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(2): 185 - 194.
- [8] 梁鹏, 申丽霞, 王银花, 等. 基于微润灌不同灌水方式对大棚辣椒生长的影响[J]. 节水灌溉, 2018(12): 5 - 7 + 11.
- [9] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 67 - 74.
- [10] 罗毅. 干旱区绿洲滴灌对土壤盐碱化的长期影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(8): 1679 - 1688.
- [11] 李阳阳, 耿青云, 费聪, 等. 滴灌甜菜叶丛生长期对干旱胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 201 - 206.
- [12] 张林. 水稻涝害的危害症状及防治措施[J]. 农业灾害研究, 2018, 8(2): 54 - 55 + 65.
- [13] BHUSAL N, KIM H S, HAN S G, et al. Photosynthetic traits and plant - water relations of two apple cultivars grown as bi-leader trees under long-term waterlogging conditions [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 176: 104111.
- [14] 向永玲, 方正武, 赵记伍, 等. 灌浆期涝害对弱筋小麦相对叶绿素含量及产量的影响[J]. 福建农业学报, 2019, 34(3): 264 - 270.
- [15] 姚一平, 瓦哈甫·哈力克, 伏吉芮. 西北干旱区绿洲沙漠化与盐渍化驱动力分析——以于田绿洲为例[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2015, 32(4): 519 - 525.
- [16] 罗金明, 王永洁, 柏林, 等. 扎龙盐沼湿地旱化特征及其对演替的影响[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1167 - 1172.
- [17] CORRADINI F, NÁJERA F, CASANOVA M, et al. Effects of maize cultivation on nitrogen and phosphorus loadings to drainage channels in Central Chile [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(11): 697.
- [18] 张开祥, 马宏秀, 孟春梅, 等. 竖井排盐对南疆枣田土壤盐分运移的影响[J]. 节水灌溉, 2018(11): 81 - 85.
- [19] WANG Zhenhua, HENG Tong, LI Wenhao, et al. Effects of subsurface pipe drainage on soil salinity in saline - sodic soil under mulched drip irrigation [J]. *Irrigation and Drainage*, 2020, 69(1): 95 - 106.
- [20] 张金龙, 刘明, 钱红, 等. 漫灌淋洗暗管排水协同改良滨海盐土水盐时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 98 - 103.
- [21] PENG Shizhang, LUO Yufeng, XU Junzeng, et al. Integrated irrigation and drainage practices to enhance water productivity and reduce pollution in a rice production system [J]. *Irrigation and Drainage*, 2012, 61(3): 285 - 293.
- [22] 俞双恩, 李倩倩, 陈凯文, 等. DRAINMOD 和 HYDRUS - 1D 模型对水稻控制灌排条件下农田水位的模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 46 - 52.
- [23] 孙建书, 余美. 不同灌排模式下土壤盐分动态模拟与评价[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4): 157 - 163.
- [24] FENG Genxiang, ZHANG Zhanyu, ZHANG Zemin. Evaluating the sustainable use of saline water irrigation on soil water - salt content and grain yield under subsurface drainage condition [J]. *Sustainability*, 2019, 11(22): 1 - 18.
- [25] KULHAVÝ Z, DOLEŽAL F, FUČÍK P, et al. Management of agricultural drainage systems in the Czech Republic [J]. *Irrigation and Drainage*, 2007, 56(S1): S141 - S149.
- [26] SATYANARAYANA T V, BOONASTRA J. Subsurface drainage pilot area experiences in three irrigated project commands of Andhra Pradesh in India [J]. *Irrigation and Drainage*, 2007, 56(S1): S245 - S252.
- [27] 张宗山, 唐顺平. 灌排结合, 交口抽渭灌区排水初见成效[J]. 陕西水利, 1985(1): 22 + 21.
- [28] 阎冠宇, 李远华. 对加强我国灌排基础设施建设的思考[J]. 中国水利, 2003(15): 53 - 56.
- [29] 曹伟, 魏光辉, 谷新保, 等. 农田明渠排水条件下土壤水盐运移规律研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(2): 234 - 238.
- [30] CASTELLANO M J, ARCHONTOULIS S V, HELMERS M J, et al. Sustainable intensification of agricultural drainage [J]. *Nature Sustainability*. 2019, 2(10): 914 - 921.
- [31] CHRISTIANSON L E, BHANDARI A, HAILERS M J. A practice-oriented review of woodchip bioreactors for subsurface agricultural drainage [J]. *Applied Engineering in Agriculture*. 2012, 28(6): 861 - 874.
- [32] 高焕芝, 彭世彰, 茆智, 等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉, 2009(9): 1 - 3 + 7.
- [33] 刘方平, 向爱农, 才硕, 等. 南方稻田灌排系统生态整治效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(4): 116 - 121.
- [34] 周复雄, 吴伟峰, 孙怀卫, 等. 控制排水对大棚土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 15 - 18.
- [35] 孙怀卫, 杨金忠, 王修贵, 等. 大棚控制排水对土壤水氮变化的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 37 - 45.

- [36] WAHBA M A S. Assessment of options for the sustainable use of agricultural drainage water for irrigation in egypt by simulation modelling [J]. *Irrigation and Drainage*, 2017, 66(1): 118 - 128.
- [37] 陈月庆. 松嫩平原苏打盐渍土灌区稻田水盐调控灌排模式研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- [38] 金秋,徐姗姗,夏美玲. 水田灌排一体化系统的开发与应用[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(6): 526 - 530.
- [39] 张蓉蓉. 陕西渭北农田土壤盐碱化空间分布及影响因素[D]. 杨陵:西北农林科技大学, 2017.
- [40] 李文昊,王振华,王凯飞. 蒸发条件下地下水埋深对土壤水盐含量的影响[J/OL]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2020: [2020-04-23]. <https://doi.org/10.13880/j.cnki.65-1174/n.2020.21.023>.
- [41] DADGAR M A, NAKHAEI M, PORHEMMAT J, et al. Potential groundwater recharge from deep drainage of irrigation water [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137105.
- [42] 王晓红,侯浩波. 浅地下水对作物生长规律的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(3): 13 - 16 + 20.
- [43] 刘战东,刘祖贵,俞建河,等. 地下水埋深对玉米生长发育及水分利用的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 32(7): 617 - 624.
- [44] 孔繁瑞,屈忠义,刘雅君,等. 不同地下水埋深对土壤水、盐及作物生长影响的试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2009(5): 44 - 48.
- [45] BARBETA A, PEÑUELAS J. Relative contribution of groundwater to plant transpiration estimated with stable isotopes [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 10580.
- [46] 姜凌峰,薛联青,刘远洪,等. 基于 MIKE SHE 模型的干旱区节水灌溉对地下水位的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(2): 59 - 65.
- [47] KAMAN H, CETIN M, KIRDA C. Effects of Lower Seyhan Plain irrigation on groundwater depth and salinity [J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2011, 9(1): 648 - 652.
- [48] 彭世彰,艾丽坤,和玉璞,等. 稻田灌排耦合的水稻需水规律研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(3): 320 - 325.
- [49] 杨文新,王文君. 不同灌排模式下水稻水分利用效率分析[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(S2): 40 - 44.
- [50] 俞双恩,张梦婷,陈凯文,等. 灌排模式和施氮水平对水稻株高与茎蘖生长动态的影响[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 210 - 218.
- [51] 和玉璞,张建云,徐俊增,等. 灌溉排水耦合调控稻田水分转化关系[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 144 - 149.
- [52] 邵光成,郭瑞琪,蓝晶晶,等. 避雨栽培条件下番茄灌排方案熵权系数评价[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(6): 733 - 737 + 744.
- [53] 孔琼菊,邓升,王萱子,等. 不同灌排模式对避雨环境下番茄品质的影响[J]. *江西农业学报*, 2017, 29(2): 45 - 48.
- [54] WANG Xingpeng, GAO Yang, DUAN Aiwang. Effects of irrigation with farmland drainage water on soil water and salt transport and early stage growth of cotton [J]. *Frese-nius Environmental Bulletin*. 2018, 27(12): 8191 - 8199.
- [55] MATSUO N, TAKAHASHI M, YAMADA T, et al. Effects of water table management and row width on the growth and yield of three soybean cultivars in southwestern Japan [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 192: 85 - 97.
- [56] 赵建强,朱秀鑫,赵哲远. 进一步推动高标准农田建设的对策研究——以浙江省为例[J]. *上海国土资源*, 2019, 40(3): 36 - 39.
- [57] 杨靠山. 温州高标准农田建设存在的问题与思考[J]. *新农村*, 2020(6): 17 - 18.
- [58] 程千云. 安徽固镇县高标准农田建设研究[J]. *黑龙江水利科技*, 2020, 48(6): 111 - 113.
- [59] 黄禹. 加快农田水利设施建设全面提升黑龙江省农业综合生产能力[J]. *现代化农业*, 2014(10): 29 - 31.
- [60] 王艺臻. 滨州市农田水利建设现状及建议[J]. *现代农业科技*, 2020(11): 189 + 191
- [61] 王兴鹏,段爱旺,李双. 农田利用排水灌溉对土壤入渗特性及棉花生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 100 - 106.
- [62] 韩合忠,陈风琴,黄延军. 鲁北地区咸水安全高效灌溉技术研究[J]. *北京农业*, 2012(6): 256 - 258.
- [63] 孙珍珍,岳春芳,侍克斌. 新疆节水灌区农田排水措施分析[J]. *节水灌溉*, 2015(5): 20 - 22 + 25.
- [64] 郝树荣,王子欣,潘永春,等. 稻田总磷迁移规律与最佳灌排模式研究[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(10): 306 - 314.
- [65] 于小彭,李蔚然,郝鹏,等. 浅析盘山县灌区农田自动化灌排设备应用前景[J]. *北方水稻*, 2020, 50(1): 61 - 62 + 64.
- [66] 孙景路,李欣欣,王正君,等. 拼接式农田灌排矩形渠结构的优化与数值模拟分析[J]. *黑龙江水利*, 2017, 3(11): 6 - 12.