

# 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统 响应研究进展\*

于淑会<sup>1,2</sup> 刘金铜<sup>1,3\*\*</sup> 李志祥<sup>4</sup> 刘慧涛<sup>1,3</sup> 谭莉梅<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049;  
3. 中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 4. 河北省土地整理服务中心 石家庄 050051)

**摘要** 暗管排水排盐技术是通过控制地下水位与高效利用降水或灌溉水资源改变土壤水盐运移规律,从而  
影响土壤盐分分布规律和土壤特性,达到改良盐碱地的效果。本文在对暗管排水排盐技术自身发展及其应用  
的关键条件总结概述的基础上,对其改良盐碱地机理与农田生态系统响应两方面的科学研究进展进行了综  
述。暗管排水排盐技术改良盐碱地机理方面的研究主要集中在暗管埋设对“四水”转化规律的改变以及由此带  
来的地下水埋深控制或灌溉制度变化、控制性排水和定水位排水条件下的土壤水盐运移规律、暗管埋设条件  
下土壤水盐运移模型模拟等方面。农田生态系统对暗管埋设排水的响应方面的研究主要集中在以土壤理化性  
状和土壤养分为主的土壤特性响应、作物生长发育和产量品质的生理生态适应性、农田生态系统土地与种植  
结构和服务功能的改变等方面。本文最后展望了未来研究的关注点。

**关键词** 暗管排水排盐 盐碱地改良 水盐运移 农田生态系统

中图分类号: S278 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2012)12-1664-09

## Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro-ecosystem response

YU Shu-Hui<sup>1,2</sup>, LIU Jin-Tong<sup>1,3</sup>, LI Zhi-Xiang<sup>4</sup>, LIU Hui-Tao<sup>1,3</sup>, TAN Li-Mei<sup>1,3</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 4. Hebei Provincial Land Consolidation Service Center, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract** Subsurface pipe drainage system is an efficient engineering approach to improve saline-alkali lands. It runs by controlling water tables to certain levels while leaching salt by rain-fed or irrigated water. Subsurface pipe drainage system changes the velocity, quantity and direction of soil water and salt movement. This induces soil salt redistribution and variations in soil features. This paper firstly summarized the technological development of subsurface pipe drainage system, discussed the conditions (natural and ecological) of application and the key engineering parameters. Based on literature analysis, the mechanism and response of agro-ecosystems to subsurface pipe drainage system regarding improving saline-alkali lands were then presented. Numerous research on the mechanism of subsurface pipe drainage systems had mainly focused on: 1) changes in circulation principles of precipitation, surface water, soil water and groundwater, especially the relationship between agriculture and water table level, irrigation system, waterlogging. 2) The features of soil water and salt migration under controlled and fixed water table drainage. Under controlled drainage conditions, soil salt varied with drainage frequency and intensity at supportable soil water content. Under fixed water table drainage conditions, the depth of subsurface pipe and the spacing between side-by-side pipes regulated drainage water and salt movements. 3) Simulated and modeled soil water and salt migration features. These researches focused on the theoretical innovation, key parameters determination, validation and suitability. Also research on agro-ecosystem response had mainly focused on: 1) soil features in agro-ecosystems; 2) adaptable crop planting, including physiological and ecological responses of crop growth, quality and yield to subsurface pipe drainage system; and on 3) agro-ecosystem structure and functional responses, including tillage system, land

\* 国家科技支撑计划项目(2009BAC55B04)资助

\*\* 通讯作者: 刘金铜(1965—), 男, 研究员, 主要从事生态系统可持续管理与生态工程研究。E-mail: jtliu@sjziam.ac.cn  
于淑会(1985—), 女, 博士研究生, 主要从事土壤水盐运移方面研究。E-mail: yushuhui126@126.com

收稿日期: 2012-09-06 接受日期: 2012-10-08

use and ecosystem services promotion. Finally, this paper put forward two strategies of future research on subsurface pipe drainage systems and applications.

**Key words** Subsurface pipe drainage system, Saline-alkali land improvement, Water and salt movement, Agro-ecosystem (Received Sep. 6, 2012; accepted Oct. 8, 2012)

20 世纪末至 21 世纪初以来, 我国人地矛盾日益激烈, 耕地资源已被较充分挖掘, 常规耕地生产力水平进一步提高面临瓶颈, 盐碱地的改良利用对于增加土地面积、提升耕地农业生产力水平具有重要的现实意义。暗管排水排盐技术是水利措施改良盐碱地的一种有效技术, 较其他盐碱地改良措施, 它具有占地少、零污染、寿命长的优点, 总结暗管排水排盐技术在改良盐碱地方面的应用与理论研究对暗管排水排盐技术在我国的大范围推广应用具有指导意义, 对提升我国耕地农业生产能力、增加耕地数量、保障国家粮食安全具有重要的现实意义。

暗管排水排盐技术是根据“盐随水来, 盐随水去”的水盐运移原理, 在有降水或灌溉发生时, 盐随水下移至暗管处, 通过暗管排出土体达到淋盐洗盐的效果, 同时通过暗管将地下水位控制在临界深度, 有效抑制高矿化度地下水的上移, 减轻土壤次生盐渍化, 从而达到盐碱地治理的目的<sup>[1-3]</sup>。暗管通过改变农田自然条件下的地下水位影响了土壤水、气及溶质的存在与运移状态, 研究暗管埋设条件下土壤水盐运移规律对于有效利用水资源、完善灌溉制度具有十分重要的意义。本文在揭示暗管排水排盐改良盐碱地机理的基础上, 综述了暗管埋设对农田生态系统的影响, 从机理与效果两个层次对暗管排水排盐改良盐碱地的研究进展做了阐述。

## 1 暗管排水排盐技术的发展、应用及改良盐碱地的关键条件

### 1.1 暗管排水排盐技术的发展及应用

#### 1.1.1 暗管排水排盐技术及其发展

传统的暗管排水排盐技术是利用暗管自流或提排技术将高于特定地下水位的水分排出土体从而达到防涝的目的。根据“盐随水来, 盐随水去”的水盐运移原理, 盐随灌溉水或降水下移至暗管处, 通过暗管排出土体, 在高矿化度地下水浅埋区, 暗管还可通过控制地下水位在临界水位来抑制高矿化度地下水的上移, 减轻土壤次生盐渍化, 因此, 暗管排水排盐技术发展至今更多地被应用于地下水浅埋盐碱区。随着暗管排水排盐技术的发展, 暗管埋设相关技术也发生质的飞跃, 暗管管材已由粘土瓦管发展为塑料管和 PVC 管, 排水管的外包材料趋向管滤结合的工厂化方向发展, 埋管也已机械化、自动化, 总而言之, 暗管排水排盐技术已日趋成熟<sup>[4-5]</sup>。

#### 1.1.2 暗管排水排盐技术在国内外的应用

公元前 2 世纪, 古罗马人就采用排水管在低洼潮湿地进行排水, 近代的暗管排水技术由英国首创, 继而被美国、苏联、日本、荷兰、捷克斯洛伐克和波兰等国广泛采用。我国暗管排水也有千年以上的历史, 河南省济源县在唐代就用三片瓦拼合而成的合瓦管进行排水, 发展至近代, 暗管已由原来的排水功能发展至现在的排水排盐双重功能, 暗管排水排盐技术也在我国山东、新疆和宁夏等干旱半干旱、地下水浅埋盐碱区得到广泛应用<sup>[1,3,6-9]</sup>。

### 1.2 暗管排水排盐改良盐碱地的关键条件

#### 1.2.1 暗管排水排盐改良盐碱地的自然生态条件

盐渍土的形成离不开水, “盐随水来, 盐随水去”。预防盐碱灾害主要应从控制水着手, 一方面控制地下水位在临界水位以下, 另一方面减少地下水通过毛细作用的蒸发<sup>[3]</sup>。因此, 影响暗管排水排盐技术排盐效果的主要因素有土壤渗透性、地下水埋深及降雨与蒸发等<sup>[10]</sup>。张兰亭<sup>[11]</sup>通过 6 年的试验发现适用暗管排水排盐技术改良盐碱地的地区为自表层以下土质为深厚的粉砂壤土、地下水位高、水质差、不宜用作灌溉水源, 且采用明沟排水边坡易坍塌淤积导致排水不畅的地区。

于淑会<sup>[10]</sup>从土壤渗透性、地下水埋深及降雨条件 3 方面对河北近滨海盐碱区的暗管排水排盐技术适宜性进行了分析, 认为在无淡水资源进行灌溉的河北滨海区, 因为深层土壤大孔隙的存在, 土壤  $K$  值较大, 年降水量虽仅有 600 mm 左右但却集中在雨季, 地下水埋深浅, 仅为 60~200 cm, 这样的自然生态条件是适宜埋设暗管进行盐碱地改良的。马凤娇等<sup>[12]</sup>从次降雨量、雨季降雨量、年降雨量 3 方面进行河北近滨海区暗管排盐技术的降雨有效性评价, 得出大于等于 70 mm 的次降雨量可以完全满足土壤的初次淋洗脱盐过程、雨季降雨可降低轻盐碱区土壤含盐量的结论。

#### 1.2.2 暗管排水排盐改良盐碱地的关键技术条件

暗管排水排盐改良盐碱地的关键技术条件为暗管的埋深与间距。关于暗管埋深、间距确定方法的研究已有很多。有学者提出暗管合适埋深与地下水临界深度、滞留水头及管径呈正相关<sup>[9]</sup>。间距的计算有 Hooghoudt 公式、翟兴业公式与张友义公式等, 以 Hooghoudt 公式为基础, 但由于其计算方式重复量大、计算工作繁琐, 并且土质的高异质性会导致

计算结果的精确度降低等原因,很多学者根据研究区的实际情况对 Hooghoudt 公式进行了改进。邵孝侯等<sup>[13]</sup>从经济角度探讨了南方圩区麦田塑料暗管埋深和间距的优化,建立了以单位面积工程费用最小为目标函数的塑料暗管间距和埋深的数学模型。21 世纪初,美国学者将土壤剖面水分平衡时的含水量、地下水和土壤剖面的水分存贮和移动等水文资料输入计算机进行暗管排水系统组合抉择和暗管间距决策,并应用 DSS 决策系统计算最适排水沟间距。荷兰也建立了相应的计算机程序用于计算暗管间距和埋深<sup>[4]</sup>。王艳芳等<sup>[14]</sup>应用系统分析的原理和方法,建立了单级暗管排水系统的埋深和间距的优化模型,求解了河套灌区单位面积投资最小的经济埋深和间距。高跃林等<sup>[15]</sup>借助计算机采用迭代法来完成 Hooghoudt 公式的计算,开发了适合宁夏引黄灌区暗管埋设间距的计算软件。陈香香等<sup>[16]</sup>将遗传算法应用于暗管间距设计中,采用实数编码遗传算法,对不同埋深、不同土壤性质条件下的暗管间距进行编码计算。Kumar 等<sup>[17]</sup>认为只要使用合适的公式,用反演技术确定排水管的管径等参数还是十分可行的,并通过试验证明基于 Glover 与 Dumm 公式的反演法是最合适的。

以上学者的工作主要针对单层暗管排水系统,为了更好地保存作物所需的水分与土壤养分,美国提出“双层暗管灌溉排水系统”,上层暗管浅埋密布层为灌溉系统,下层暗管深埋疏布层为排水系统,孙瑞鹤<sup>[18]</sup>、Hornbuckle 等<sup>[19]</sup>对单层排水系统及双层排水系统下的土壤盐分分布、地下水埋深及排水矿化度进行观测,认为双层排水系统的保墒效果更好、作物产量更高。我国宁夏引黄灌区银北地区早在 20 世纪 90 年代初即采用双层暗管排水技术改良黏重型盐渍土,上层为输水性较好的捆扎玉米秆层,下层为塑料波纹管,暗管间距为 30 m,增设 15 m 间距进行加密,上下层交错布置,捆扎玉米秆使上层水流可汇入下层排出,经试验证明 30 m 间距可满足淋盐要求<sup>[20]</sup>。

## 2 暗管排水排盐技术改良盐碱地的机理

### 2.1 暗管埋设条件下的“四水”转化特征

魏晓妹<sup>[21]</sup>研究表明,地下水位的变化可以导致包气带的水文及水文地质参数发生变化,从而改变地表水、土壤水与地下水的分配,若地下水位连续降落,形成大范围地下水降落漏斗,则可改变区域间的水量转化关系。因此,暗管可通过控制地下水位来影响埋设区的“四水”(大气降水、地表水、土壤水与地下水)转化。对于地下水埋深影响“四水”转化

的研究也有很多。王政友<sup>[22]</sup>研究发现,在固定流域,一定的气候和下垫面条件下,“四水”转化参数随地下水埋深变化而变化,总和为 1;地下水埋深小于极限埋深时,土壤蓄水库容小,包气带容纳降水入渗量也小,降水入渗参与陆面蒸散发的量也小,而此时潜水蒸发量大,土壤水资源量大,陆面蒸散量大,潜水蒸发补给土壤的量为陆面蒸散发量的主要量;各参数因地下水埋深变化而变化,超出地下水极限埋深时,潜水蒸发量为 0,各参数趋于稳定,相互关系也趋于稳定。胡望斌<sup>[23]</sup>分析江汉平原四湖地区“四水”转化关系,发现雨季地下水埋深较浅,土壤水接近或达到饱和状态,从而促使地下水与大气水、地表水水量交换的频率、强度均非常大;而在干季土壤初始含水量低,降雨补给土壤水较多,补给地下水相对较少。王政友<sup>[22]</sup>的研究结果也证明了此结论。

利用地下水埋深对“四水”转化的影响为农业生产服务的研究也很多。有研究表明控制平原区地下水位可有效拦蓄地表径流、补给地下水,从而提高作物对地下水的利用率<sup>[24]</sup>。黄志强等<sup>[25]</sup>在湖北江汉平原棉花种植区的试验结果显示暗管总排水量与出水口水位呈负相关,次降雨后暗管排水量与控制排水水位呈显著二次曲线相关关系;袁念念等<sup>[26]</sup>的研究表明,提高地下水位后,暗管能够减少排水流量峰值从而减轻下游防洪压力,暗管控制排水使得传统田块地表、地下排水量重新分配,提高地下水位可令地表排水量比例提高,总排水量较常规排水减少 36.4%~82.7%。罗纳等<sup>[27]</sup>也发现将地下水埋深控制在 60 cm 时,作物生长期内地表排水量减少 50% 左右。

国外有学者认为暗管排水结合灌溉制度进行综合管理可发展高效节水农业。如在桑普拉、哈里亚纳邦和印度等地进行的暗管模拟试验,模拟暗管排水条件下不同水管理方式的灌溉降盐以求得最佳土壤盐浸出率,拉普拉斯数值求解以获得每种处理下的水流模式与流量方程,从而给出盐分空间分布。模拟结果显示,在耕作前、试验中及以后各保持试验区全面积、半面积、1/4 面积积水 450 h,能达到与连续积水一样的降盐效果,但可节省 50% 的水量<sup>[28]</sup>。更有学者提出只改变地下水位而不改变灌溉制度,排水量变化不大,因此,通过暗管同时改变排水系统与灌溉系统能更好地进行浅水位水资源管理<sup>[29]</sup>。

### 2.2 暗管埋设条件下土壤水盐运移规律

#### 2.2.1 控制性排水条件下土壤水盐运移规律

控制性排水导致地下水埋深发生变化,从而引起“四水”转化特征的变化,影响田间土壤水分分布。Wesström 等<sup>[30]</sup>证明控制性排水对总排水量与排水类

型起非常重要的作用, 与常规排水区相比, 控制性排水区减少排水量 70%~90%, 且初始排水量越高, 田间瞬时存水量越低, 洪峰流量越高, 滞后时间与消退时间越短。而且控制水位高, 排水慢, 降雨后水分在田间滞留时间长, 会导致土壤含水量变化小<sup>[31]</sup>。控制性排水对浅层土壤含水量与深层土壤含水量的影响也是有差异的。袁念念等<sup>[31]</sup>通过两年的试验发现控制水位对浅层土壤含水量有显著影响、对深层土壤含水量影响不大, 表层 0~20 cm 的土壤体积含水量与 0~40 cm、0~60 cm、0~80 cm、0~100 cm 的体积含水量呈显著相关关系。

“盐随水走”, 控制排水条件下盐分分布也会发生改变。有研究发现控制排水措施对田间浅层地下水盐分浓度的空间差异性有较大的影响, 对于深层盐分影响则较小, 这与控制排水影响土壤水的规律一致<sup>[32]</sup>。因为控制排水条件下地下水位较高, 使得表土层中的水分难以下渗并与更深层的地下水进行交换, 同时控制排水田块由于田间水量不易排出而导致灌溉水量相对较小, 盐分没有得到充分淋洗, 因此, 控制排水条件下, 田间浅层地下水盐分平均浓度略高于常规排水, 除此外, 由于提高地下水位导致浅层土壤含水量高、干湿交替小, 控制排水没有出现常规排水条件下盐分浓度交替上升的现象<sup>[33]</sup>。虽然控制性排水会导致浅层土壤含盐量增加, 但根据贾忠华等的分析计算, 作物生长期中深层排水占地下水排水总量的 1/3, 而这一部分不受控制排水的影响, 深层排水在很大程度上“中和”或“缓冲”了由于控制排水作用对含盐量的影响<sup>[33]</sup>。为了确定土壤含盐量与排水控制率间的关系, 贾忠华等<sup>[33]</sup>在对双重排水情况下的水盐运动进行概化的基础上, 建立了基于特定地区排水特性的“浅层排水与深层排水比—浅层排水控制率—排水含盐量增加率”的关系。因此, 由于深层排水的存在, 地下水含盐量的变化很小, 浅层排水可以在作物生长期被控制在很低的水平, 满足作物的水盐要求。杨丽丽等<sup>[34]</sup>从水盐平衡的角度进行分析, 在排水的盐浓度低于作物忍受浓度水平的条件下, 控盐效果较理想, 控制排水试验区依然满足水盐平衡的要求。

### 2.2.2 定水位条件下土壤水盐运移规律

暗管埋设的深度与间距影响暗管排水的速率, 从而影响了土壤水盐运移特征。有研究显示暗管埋深越大, 降到同一水位的时间越短, 水位平均下降速度越快; 间距越小排水模数越大, 单位面积排水量越大, 排盐量越大<sup>[35]</sup>。Rao 等<sup>[36]</sup>、金彬彬<sup>[37]</sup>和 Wiskow 等<sup>[38]</sup>为模拟暗管排水下的盐分运移特征, 采集了同一深度不同暗管间距下的盐分数据, 数据分

析表明间距越小, 排盐效果越好。张亚年等<sup>[39]</sup>用室内渗流槽试验发现暗管排水条件下表层土壤盐分下降快, 深层土壤受上层土壤盐分累积和降雨的共同影响, 盐分下降速率存在滞后性, 盐分呈现先增后减的趋势; 在水平面上, 接近排水口的位置水动力条件较强, 水分运动较快, 因此洗盐效果更明显。李法虎等<sup>[40]</sup>从自相关的角度研究玉米种植区暗管排水条件下的水盐分布特征, 结果表明玉米地土壤含水率的自相关距离在 0.3~0.6 m 的土层为 20 m, 而在其他取样深度处都小于 5 m, 土壤 EC 和 SAR 的自相关距离随土壤深度的增加而加大, 但随玉米生长时间的增加而减小, 一般都小于 40 m。

### 2.3 暗管埋设条件下土壤水盐运移模型模拟

为了研究暗管埋设对地下水与土壤水运移特征的影响, 很多学者在各种水分运移理论的基础上模拟暗管埋设地下水与土壤水的运移规律。基于斯卡格斯排水模式的 WEPP(水侵蚀预报工程)模型输入土壤透水性、排水管间距及埋深、土壤深度和地下水位高度等参数可模拟地下水流向人工排水管或排水沟的情形<sup>[41]</sup>。邵孝侯等<sup>[42]</sup>应用非饱和土壤水分运动原理, 对塑料暗管排水条件下分层土壤的水分运动进行了数值模拟, 输入土壤容水度、土壤渗透性、模拟时段的蒸发、地下水埋深、初始土壤剖面含水量等参数可求得排水条件下灌溉或降雨后土壤水分的变化过程, 应用该模型可确定出试验区在一定外界气象条件下不同地下水降落速度时农田的受渍情况。有研究将水力传导度作为模拟暗管埋设条件下土壤水盐运移的重要参数来改进模型, 例如将土壤各层的饱和导水率与大孔隙度作为改进模型的一个参数可以提高模拟精度<sup>[43]</sup>, 将水力传导度的空间变异性加入模型可提高预测暗管埋设条件下大尺度范围内饱和和水力传导度的精确性<sup>[44]</sup>。Nieber 等<sup>[45]</sup>用基于有限差分方程的饱和异质媒介中的三维达西流来模拟单一土管情景下的饱和理想坡面流, 王友贞等<sup>[46]</sup>利用三维地下水运动模型模拟不同地下水位下田间地下水动态变化。Singh 等<sup>[43,47]</sup>用像土壤数据这样的常规数据及如土壤传递性函数类的技术对 DRAINMOD 模型进行校准与验证, 校正后的模型模拟结果显示暗管在 1.05 m 埋深、25 m 间距下的排水强度为  $0.46 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 这样的暗管设计足以在令排水量与硝态氮损失量最小时保证作物产量的最大化; 对暗管排水、地表径流与作物产量管理方面的模拟结果显示, 0.75 m 的排水深度与 1.2 m 的可控性排水深度可将地下水埋深控制在 0.6 m, 与传统的 1.2 m 自流排水相比, 可减少暗管排水量、增加地表径流, 但同时也存在作物多余水胁迫及产量降低的风险。

暗管埋设条件下土壤盐分运移的理论研究是以溶质运移理论为基础的,其主要影响因素为暗管埋深与间距。张展羽等<sup>[48]</sup>根据溶质运移理论及土壤水动力学理论,对滩涂盐渍地改良过程中暗管田间排水工程的技术参数进行分析研究,提出了不同脱盐标准条件下暗管埋深、管距及管径。张月珍等<sup>[49]</sup>运用溶质运移理论分析了冲洗条件下暗管排盐工程设计参数的理论模型和迭代求解方法,研究了脱盐标准与冲洗时间及冲洗定额之间的关系。张金龙等<sup>[50]</sup>把暗管排水条件下盐碱土漫灌冲洗改良水分运动视为二维稳定流,根据水盐运移特征和水量平衡原理,运用 Vedernikov 入渗方程、Van der Molen 淋洗方程等推求盐碱地灌排改良工程技术参数,提出了适应滨海区自然环境的灌排改良工程暗管埋深、暗管间距、暗管管径、淋洗定额等技术参数估算方法。Bahceci 等<sup>[51]</sup>用 SaltMod 模拟基于不同排水量、根系层盐分含量与地下水埋深的不同暗管埋深的改良效果,结果证明土耳其科尼亚平原 1.2 m 的埋深是比较可行的。Rao 等<sup>[36]</sup>用 Crank-Nicholson 有限差分求解一维对流弥散溶质运移模型并将其应用于铺设不同间距排水暗管的水稻田盐分监测,发现该模型的模拟值与实测值较一致,可用来预测相似土壤条件下不同暗管埋设间距下的土壤盐分动态变化。张亚年等<sup>[39]</sup>用概化后的 Hydrus 三维模拟数值模型模拟暗管排水条件下的土壤水盐运移特征,得到表层土壤盐分下降快,深层土壤盐分呈现先增后减的趋势,这与室内渗流槽试验结果一致。

对比与检验各种暗管排水模型模拟精度与适用性的研究也不少。对大尺度实地排水模型在暗管排水区的应用进行统计学检验及进行验证效率的计算发现,虽模型验证效率没有达到适用的最低限,但统计分析显示在洪峰流速与次数方面模拟值与实测值大体一致<sup>[52]</sup>。通过试验数据检验 WaSim 模型的模拟精度,发现该模型忽略土壤多次盐化-反盐化循环过程中解析、吸附、溶解等的差异,因此,只用来简单模拟暗管排水情况或为暗管埋设设计参数提供参考,若要提高模型预测水位与盐分变化精度,还需更多试验结果来支持<sup>[53]</sup>。Singh 等<sup>[54]</sup>在同一假定条件下调整基于 Ernst、Dagan 与 van Beers 方程的稳态排水方案,发现不同方程的计算结果趋势基本一致,预测值与实际值较吻合。Sarangi 等<sup>[55]</sup>认为 BP 神经网络模型比 SALTMOD 更适合模拟暗管排水的含盐情况,Liu 等<sup>[56]</sup>证明 DSSAT v4.5 模型可以很好地模拟控制排水与自由排水条件下的地表含水量、氮素流失量及作物产量。

### 3 农田生态系统对暗管埋设改良盐碱地的响应

#### 3.1 农田生态系统的土壤特性响应

##### 3.1.1 土壤理化特性

暗管排水创造了干湿交替的条件,有利于土粒脱水重组微团聚体,且排水后的土层内土壤胶体由溶胶状态变为凝胶状态,促使土壤结构化、土壤孔隙率增大,特别是非毛细孔隙的增加,提高了土壤含气量和通透性,暗管埋设年限越长土壤通气孔隙增加越明显<sup>[57-60]</sup>,有利于作物发育。土壤通透性的提高,使土壤内好气性细菌活动加强,减弱了土壤的还原作用,减少了土壤中的有毒物质,促进土壤养分矿化,发挥潜在肥力作用,增加土壤氮、磷、钾养分供应量,提高土壤肥力<sup>[57,61]</sup>。

##### 3.1.2 土壤养分

暗管埋设后改善了土体的通气状况,提高了土壤温度,加速土壤有机质分解,促进土壤养分矿化,从而增加了耕层土壤的速效钾、速效磷与碱解氮等的含量<sup>[60,62]</sup>。但也有研究表明暗管埋设后,随着排水量的增加,土壤易氧化有机质、速效磷、速效钾含量均有所下降<sup>[57]</sup>,这与暗管控制排水的时间与控制水位有关。

暗管控制性排水可有效减少土壤养分流失、减少污染物排放、保护农田生态环境。刘培斌<sup>[63]</sup>根据势能理论及溶质运移理论建立了流网法与动力学方法相结合的田间水氮动态混合模拟模型,研究淹灌稻田在排水条件下的氮素淋失规律,发现暗管排水量越大,氮素的流失量越大。Lalonde 等<sup>[64]</sup>的试验结果说明,将水位控制在 0.25 m,两年内能减少 62%~76%的氮素流失量,若将水位控制在 0.5 m,则可减少氮素流失量 69%~95%。水位太高会加强土壤反硝化作用,氮素转变为氮气逸出使土壤中氮素减少,影响作物生长;同时由于磷主要吸附或结合在土壤颗粒中,提高水位会使其溶解造成磷富营养化,因此要合理控制地下水位<sup>[65]</sup>。陈晓东等<sup>[66]</sup>认为减少稻田氮磷污染的控制排水措施为控制排水时间与控制降雨或灌溉水在农田中滞留时间。

暗管条件下的土壤养分特征受土壤渗透性、暗管埋深及间距等因素影响。Gilliam 等<sup>[67]</sup>的控制排水试验表明,排水较好地段没有明显反硝化现象,通过减少排水量能够减少硝态氮的损失量;但在排水较差地段,因为更多的硝态氮流向更深土层,控制排水并没有降低土壤剖面的氧化反而因排水多损失了近 50%的硝态氮。Kladivko 等<sup>[68]</sup>通过 15 年的暗管排水试验发现,窄间距暗管排水区的排水量及氮素

流失量较大, 排水中的氮含量并不随间距的变化而变化, 但随着试验时间延长氮素含量呈越来越小的趋势。曾文治等<sup>[69]</sup>用 DRAINMOD 模型模拟不同暗管控制水深、暗管间距和暗管埋深条件下暗管排水中硝态氮流失量的变化规律, 发现单一增加暗管出口控制水深或暗管埋深以及单一减小暗管间距都会使暗管排水中硝态氮流失量增加, 当暗管埋深不变时, 增大暗管间距的同时减小暗管出口控制水深有助于减小暗管排水中的硝态氮流失量。Singh 等<sup>[70-71]</sup>的印第安滨海黏土的暗管试验证明暗管排水可以控制根际氮素在  $0.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而排水不畅区氮素含量超过作物耐受限, 对作物产生氮毒害。对于不同类型地区暗管排水中硝态氮与铵态氮所占比例也不同, 他们的研究表明, 15 m 间距暗管埋设耕地区的暗管排水中硝态氮占主导, 而在重盐渍化土壤与 25 m、35 m 间距暗管埋设区的初始排水阶段中铵态氮占主导。Goswami 等<sup>[72]</sup>发现基流与地下排水管流中硝态氮的贡献率分别为 90% 与 10%, 基流起着主导作用, 并认为硝态氮中的氮含量主要取决于降水、土壤前期含水量、肥料施用时间与蒸发等。

暗管控制性排水改变了土壤养分的分布特征。有研究表明氮素与磷素最大流失时间点与最大排水量一致, 但与传统排水不同的是, 磷素的流失量与土壤温度没有呈现一致性<sup>[73]</sup>。根据溶质运移理论以及土壤水动力学理论研究暗管排水中氮素流失规律, 结果表明暗管径流中铵态氮排放量与暗管排水量呈线性正相关, 硝态氮排放量随控制水位降低而增加<sup>[25]</sup>。杨琳等<sup>[74]</sup>研究控制排水条件下硝态氮与铵态氮的空间分布特征, 发现无论采取控制排水与否, 土壤垂直剖面上的硝态氮均有一致的浓度变化规律: 0~40 cm 处浓度最高, 在 40~60 cm 浓度急剧减小, 60~80 cm 浓度值很小; 铵态氮与硝态氮迥然不同, 铵态氮在土壤垂直剖面上的含量变化不大。控制排水对土壤硝态氮的减小率有显著影响, 表现在控制水位越高, 土层间硝态氮减小率越大; 控制排水对铵态氮的含量也有一定的影响, 表现在控制排水位越低, 土壤中铵态氮的含量越小。

## 3.2 农田生态系统的作物生态适应性

### 3.2.1 作物生长发育的生理生态响应

暗管排水治理可改变农田烂泥渍害状况, 改善土壤理化条件, 增强土壤微生物活性, 促进作物根系向下深扎, 有利于根系吸收深层土壤养分<sup>[59]</sup>, 加快农作物生育过程。对小麦来说, 加大了根深, 促进了根系茎叶发育生长, 同时减少了黄脚烂根现象与常见赤霉病、锈病等病害; 对水稻来说, 加快了晒田期的排水, 增加了土壤的透气性, 协调了土壤中水

肥气热状况, 促进了分蘖与发育, 抽穗期株高更高、根更粗大, 暗管区水稻白根比例增加, 黑根比例下降, 总根量大大增加, 从而提高了农作物的产量<sup>[60,75]</sup>。

邵孝侯等<sup>[7]</sup>通过试验说明塑料暗管对冬灌小麦起到了保墒、节水与增温的综合效果。Ayars 等<sup>[76]</sup>证明如果控制水位从 1.5 m 降低到 0.9 m, 可以提高作物的耐盐性。李法虎等<sup>[40]</sup>的研究表明, 在暗管埋设条件下, 玉米高度、干物质量和籽粒产量的自相关距离分别为 20~25 m、10 m 和 22~42 m。玉米高度和产量与土壤含水率呈正相关而与土壤含盐量呈负相关, 土壤水分对玉米籽粒产量的影响程度远小于土壤盐分的影响, 土壤盐分对玉米干物质形成的影响远小于对玉米籽粒产量的影响, 因此, 盐碱地更适宜于种植饲料作物。

### 3.2.2 作物品质和产量响应

梁世炎等<sup>[77]</sup>在湖北省后湖农场进行的暗管试验证明, 利用暗管排水能够降低地下水位, 减少农田氮素流失量, 提高作物的氮素利用率及作物的水分利用率, 提高作物根系活动层的温度, 减少耕作层的还原性有毒物质, 从而达到改良土壤、增加作物质量与产量的目的<sup>[73,78-79]</sup>。邵孝侯等<sup>[7]</sup>证明塑料暗管在小麦拔节孕穗期可调控土壤水分, 在很大程度上加快了小麦干物质累计和矿质营养吸收; 陈士平等<sup>[62]</sup>的研究表明, 通过暗管可提高单季稻有效穗及改善穗部性状。

大量研究结果均显示暗管埋设试验区的棉花、水稻、小麦均有增产<sup>[35,58,79]</sup>。Ng 等<sup>[80]</sup>证明控制排水较自由排水氮素流失量减少 36%, 土壤含水量增加 21%, 水分利用率提高 11%, 作物(玉米)产量提高 64%。Muirhead 等<sup>[81]</sup>的试验结果表明, 浅埋暗管区较其他处理区洋葱产量增加 38%。杨学良等<sup>[9]</sup>的研究结果表明, 暗管排水试区平均粮食产量较治理前平均增产 2 250~3 000  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。张兰亭等<sup>[82]</sup>的试验表明, 埋设暗管 5 年后比埋管前粮棉产量翻了两番。

## 3.3 农田生态系统的结构与功能响应

### 3.3.1 农田耕作制度

暗管排水排盐技术的实施可以改变农田生态系统中作物生长条件, 并可能影响到农田灌溉制度, 进而改变了农田耕作制度。陈士平等<sup>[62]</sup>提出通过利用暗管排水改良山区冷浸田使其可以实行水旱轮作, 提高复种指数。张秀敏等<sup>[83]</sup>提出在暗管排水工程的基础上建设温室大棚, 充分利用土地资源, 同时水质和水质都得到了改善, 从而提高了作物质量与复种指数。迟道才等<sup>[4]</sup>也认为引进和推广暗管排水排盐技术可以提高水稻生产水平, 对发展水旱复种和水旱轮作有着重要的意义。

### 3.3.2 农田生态系统服务功能

于淑会<sup>[10]</sup>以海兴县典型盐碱区为例, 研究分析河北近滨海区域实施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分别增加  $1.55 \times 10^4$  元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、 $0.70 \times 10^4$  元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、 $4.98 \times 10^4$  元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、 $5.64 \times 10^4$  元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、 $3.57 \times 10^4$  元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup> 和  $0.11 \times 10^4$  元·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 与之对应的各类生态类型的生态服务功能价值分别增加  $0.08 \times 10^8$  元·a<sup>-1</sup>、 $0.048 \times 10^8$  元·a<sup>-1</sup>、 $23.38 \times 10^8$  元·a<sup>-1</sup>、 $9.54 \times 10^8$  元·a<sup>-1</sup>、 $5.91 \times 10^8$  元·a<sup>-1</sup> 和  $0.006 \times 10^8$  元·a<sup>-1</sup>, 海兴县全县总生态系统服务经济价值实施暗管技术后增加  $38.96 \times 10^8$  元·a<sup>-1</sup>, 是实施前的 2.31 倍, 说明暗管排水排盐技术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。

宋绍宪<sup>[84]</sup>曾比较过“上农下渔”与“暗管排水”两种开发模式的生态服务价值情况, 研究发现“上农下渔”开发模式下每公顷的年生态服务价值为 5 221.6 元, 为经济收益的 14.9%, “暗管排水”开发模式下每公顷的年生态服务价值为 11 356.98 元, 为经济收益的 74.7%, 在不计算水产养殖的水产品呼吸过程中吸收氧气、排放二氧化碳等对大气的负面效应, 仅以农田在气体调节、涵养水源、水土保持等方面的生态服务价值条件下, “暗管排水”开发模式是“上农下渔”开发模式的近 2.2 倍。

### 3.3.3 投资与效益分析

埋设暗管需要投入人力与物力, 尤其在机械埋管的条件下, 经济成本一般高于明沟排水。有学者专门对暗管埋设条件下的经济效益进行分析, 并得到一些结论。杨学良等<sup>[9]</sup>按静态法计算, 种植粮食作物的暗管排水区在 5~8 年内即可收回全部投资, 经济效益十分显著。姚中英等<sup>[79]</sup>也提出暗管排水与明沟排水相比不仅有节省土地面积 10%~15% 和提高土地利用效率 7.3% 等社会效益, 而且经济效益也很显著, 投资回收年限仅为 3.91 年, 益本比为 3.66, 均高于水利经济规划指标。周志贤等<sup>[75]</sup>计算湖北汉江圩区使用暗管排水排盐技术改良盐碱地的投资回收年限仅为 1.86 年。也有试验证明, 在黏重土壤上使用暗管排水能够增加作物产量, 但考虑到较高的埋管费用, 其内部转化率是低的, 从而提出可通过暗管改变黏重土壤质地以种植更大经济效益植物的设想<sup>[85]</sup>。

## 4 展望

综上所述, 暗管排水排盐技术在应用机理和农田生态系统响应的研究方面均已具有一定基础, 未

来在继续深入研究的同时, 可能更需要关注以下两个研究问题:

(1)暗管埋设条件下的水盐运移模型研究。暗管埋设条件下的水盐运移模型研究和应用在国外已具有一定基础和规模, 但在国内还处于初始阶段, 大量研究仅是理论研究或者只是针对某一特定条件, 不具有通用性, 主要原因在于对水盐运移的微观机制及田间土壤的理化性质的了解程度还有所欠缺, 因此没有建立起模型必要的参数数据库<sup>[86]</sup>。再者, 现今的水盐运移模型重点在水分运移上, 如 DRAINMOD 模型、SPACSYS 模型等, 模型中的盐分参数及暗管参数都需进一步完善, 综合各种土壤条件、植被条件、气象条件与暗管条件下的模型模拟是暗管排水排盐技术有效推广应用的重要手段。

(2)综合考虑暗管埋设条件下的排水制度与灌溉制度。暗管排水改良盐碱地的关键点为淡水淋盐, 如埃及引尼罗河水灌溉、山东引黄河水进行灌溉淋盐等, 但随着淡水资源的日益紧缺及人们节水意识的提高, 节水农业的发展已成为大势所趋。为保证暗管排水改良盐碱地的可持续性, 同时考虑暗管排水制度与灌溉制度的水资源管理研究是科研工作者面临的一项重要任务<sup>[29]</sup>。暗管排水制度也就是基于土壤水盐运移规律与作物需水耐盐度的暗管地下水位调控方案, 灌溉制度是通过基于暗管埋设条件下淡水高效利用方式与咸水利用方式的研究结果确定的, 淡水高效利用包括作物需水关键点灌溉与雨水收集回灌等。咸水灌溉的研究已有一些结论, 陈秀玲<sup>[87]</sup>研究发现在干旱地区作物生长的关键时刻(如播前水等)浇灌微咸水(含盐量为 2~5 g·L<sup>-1</sup>)可保苗, 将地下水位调控在临界动态, 能够充分利用雨季集中降雨, 促使咸水灌溉的土壤淋洗脱盐; Ayars<sup>[88]</sup>也得到类似结果。王卫光等<sup>[89]</sup>提出可通过调整咸水灌溉额与秋灌额比例实现土壤盐分的年内平衡。但以上研究对地下水位的考虑极少, 对于确定暗管埋设下排水与灌溉制度贡献不大。

## 参考文献

- [1] Ritzema H P, Nijland H J, Croon F W. Subsurface drainage practices: from manual installation to large-scale implementation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1/2): 60-71
- [2] 王树怀. 垦利县董集乡采用暗管排碱改良土壤[J]. *山东国土资源*, 2009, 25(5): 58
- [3] 彭成山, 杨玉珍, 郑存虎, 等. 黄河三角洲暗管改碱工程技术实验与研究[M]. 河南: 黄河水利出版社, 2006
- [4] 迟道才, 程世国, 张玉龙, 等. 国内外暗管排水的发展现状与动态[J]. *沈阳农业大学学报*, 2003, 34(3): 312-316
- [5] Stuyt L C P M, Dierickx W. Design and performance of mate-



- rials for subsurface drainage systems in agriculture[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 50–59
- [6] 李青霞, 徐红蔚, 王秀敬. 山东省咸水资源开发利用与治理措施研究[J]. 山东水利, 2008(7): 23–24
- [7] 邵孝侯, 刘才良, 俞双恩, 等. 暗管排水对滨海新垦区土壤盐分动态的影响及脱盐效果[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1995, 23(2): 88–93
- [8] 杨思谦. 暗管排水在甘肃省的应用[J]. 水利水电技术, 1990(9): 40–42
- [9] 杨学良, 那宇彤, 李润杰, 等. 暗排技术在湟水流域盐渍土改良中的应用[J]. 人民黄河, 1995(3): 32–36
- [10] 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
- [11] 张兰亭. 暗管排水改良滨海盐土的效果及其适宜条件[J]. 土壤学报, 1988, 25(4): 356–365
- [12] 马凤娇, 谭莉梅, 刘慧涛, 等. 河北滨海盐碱区暗管改碱技术的降雨有效性评价[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 409–414
- [13] 邵孝侯, 俞双恩, 金斌斌. 麦田塑料暗管排水的埋深和间距优化模式探讨[J]. 中国农村水利水电, 2000(12): 12–13
- [14] 王艳芳, 张学科. 宁夏河套灌区单级暗管排水系统的优化设计[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23(4): 43–45
- [15] 高跃林, 黄生利. Hooghoudt 公式在暗管排水设计中的计算程序及应用[J]. 宁夏农学院学报, 2002, 23(3): 40–42
- [16] 陈香香, 蒋晓红, 缪海洋. 遗传算法在暗管间距优化中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2006(1): 9–10
- [17] Kumar S, Gupta S K, Ram S. Inverse techniques for estimating transmissivity and drainable pore space utilizing data from subsurface drainage experiments[J]. Agricultural Water Management, 1994, 26(1/2): 41–58
- [18] 孙瑞鹤. 双层灌溉排水系统[J]. 上海水利, 1995(4): 34
- [19] Hornbuckle J W, Christen E W, Faulkner R D. Evaluating a multi-level subsurface drainage system for improved drainage water quality[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(3): 208–216
- [20] 杜历, 周华. 双层暗管排水技术改造盐碱荒地试验[J]. 中国农村水利水电, 1997(10): 33–34
- [21] 魏晓妹. 地下水在灌区“四水”转化中的作用[J]. 干旱地区农业研究, 1995, 13(3): 54–57
- [22] 王政友. 地下水埋深与“四水”转化参数关系探讨[J]. 地下水, 2009, 31(1): 57–60
- [23] 胡望斌. 江汉平原四湖地区地下水动态监测与四水转化关系研究[D]. 北京: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2003
- [24] 许晓彤, 王友贞, 李金冰. 平原区农田控制排水对水资源的调控效果研究[J]. 中国农村水利水电, 2008(1): 66–68
- [25] 黄志强, 黄介生, 谢华, 等. 控制平原湖区棉田暗管排水水位对氮素流失影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 20–23
- [26] 袁念念, 黄介生, 谢华, 等. 暗管控制排水对棉田排水的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(2): 28–31
- [27] 罗纳, 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试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 608–612, 618
- [28] Rao K V G K, Leeds-Harrison P B. Desalinization with subsurface drainage[J]. Agricultural Water Management, 1991, 19(4): 303–311
- [29] Soppe R W O, Ayars J E, Schouse P, et al. Shallow groundwater management to reduce excess drainage water production in arid and semi-arid irrigated areas[J]. ASAE paper 01–2017. St. Joseph, MI. ASAE, 2001
- [30] Wesström I, Ekbohm G, Linnér H, et al. The effects of controlled drainage on subsurface outflow from level agricultural fields[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(8): 1525–1538
- [31] 袁念念, 彭虹, 黄介生, 等. 棉田控制排水土壤含水量预测[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2011, 44(4): 225–448
- [32] 田世英, 罗纳, 贾忠华, 等. 控制排水对宁夏银南灌区水稻田盐分动态变化的影响[J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1309–1314
- [33] 贾忠华, 罗纳, 方树星, 等. 双重排水条件下控制措施对银南灌区水稻田水盐关系的影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 213–216
- [34] 杨丽丽, 刘建刚, 刘昕, 等. 银南灌区控制排水后水盐平衡分析[J]. 人民黄河, 2006, 28(7): 40–41, 44
- [35] 刘子义. 暗管排水技术在新疆干旱重盐碱地区的应用[J]. 新疆水利, 1993(3): 11–19
- [36] Rao K V R, Bhattacharya A K. Salinity distribution in paddy root zone under subsurface drainage[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48(2): 169–178
- [37] 金彬彬. 长江下游滨海地区暗管降渍脱盐技术研究[D]. 江苏: 河海大学, 2001
- [38] Wiskow E, Van der Ploeg R R. Calculation of drain spacings for optimal rainstorm flood control[J]. Journal of Hydrology, 2003, 272(1/4): 163–174
- [39] 张亚年, 李静. 暗管排水条件下土壤水盐运移特征试验研究[J]. 人民长江, 2011, 42(22): 70–72
- [40] 李法虎, Keren R, Benhur M. 暗管排水条件下土壤特性和作物产量的空间变异性分析[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 64–69
- [41] Savabi M R. 用 WEPP 模型模拟地下排水和地表径流[J]. 刘秉泽, 译. 黑龙江水利科技, 1996(2): 119–124
- [42] 邵孝侯, 王靖波, 刘才良, 等. 塑料暗管排降条件下麦田土壤水分变化规律模拟[J]. 南京农业大学学报, 2000, 23(2): 47–52
- [43] Singh R, Helmers M J, Qi Z M. Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes[J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(3): 221–232
- [44] Moustafa M M. A geostatistical approach to optimize the determination of saturated hydraulic conductivity for large-scale subsurface drainage design in Egypt[J]. Agricultural Water Management, 2000, 42(3): 291–312
- [45] Nieber J L, Warner G S. Soil pipe contribution to steady subsurface stormflow[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(4): 329–344
- [46] 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, 2004, 24(6): 74–77
- [47] Singh R, Helmers M J, Crumpton W G, et al. Predicting effects of drainage water management in Iowa's subsurface drained landscapes[J]. Agricultural Water Management, 2007, 92(3): 162–170
- [48] 张展羽, 郭相平, 汤建熙, 等. 滩涂盐种稻暗管工程技术参数的研究[J]. 水利学报, 1999(4): 30–34
- [49] 张月珍, 张展羽, 张宙云, 等. 滨海盐碱地暗管工程设计参数研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4): 96–99
- [50] 张金龙, 张清, 王振宇. 天津滨海盐碱土灌排改良工程技术参数估算方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 52–55
- [51] Bahçeci I, Dinç N, Tari A F, et al. Water and salt balance



- studies, using SaltMod, to improve subsurface drainage design in the Konya-Çumra Plain, Turkey[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 261–271
- [52] Hackwell S G, Prasher S O, Barrington S F. Testing of a field scale drainage model on subsurface-drained farmlands[J]. *Agricultural Water Management*, 1991, 20(1): 29–45
- [53] Hirekhan M, Gupta S K, Mishra K L. Application of WaSim to assess performance of a subsurface drainage system under semi-arid monsoon climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 88(1/3): 224–234
- [54] Singh K M, Singh O P, Ram S, et al. Modified steady state drainage equations for transient conditions in subsurface drainage[J]. *Agricultural Water Management*, 1992, 20(4): 329–339
- [55] Sarangi A, Singh M, Bhattacharya A K, et al. Subsurface drainage performance study using SALTMOD and ANN models[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(3): 240–248
- [56] Liu H L, Yang J Y, Tan C S, et al. Simulating water content, crop yield and nitrate-N loss under free and controlled tile drainage with subsurface irrigation using the DSSAT model[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1105–1111
- [57] 陆建贤, 张蚕生, 王国峰, 等. 浙北低洼圩区农田暗管排水对土壤性状和供肥的影响[J]. *浙江农业科学*, 1992(1): 24–28
- [58] 范业宽, 蔡烈万, 徐华壁. 暗管排水改良渍害型水稻土的效果[J]. *土壤肥料*, 1989(2): 9–12
- [59] 艾天成, 李方敏. 暗管排水对涝渍地耕层土壤理化性质的影响[J]. *长江大学学报 B: 自然科学版*, 2007, 4(2): 4–5, 8
- [60] 潘智, 黄平, 蒋代华, 等. 暗管排水治理渍害田初探[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1993, 2(2): 88–92
- [61] 宋功明, 程方武, 韩伟. 暗管排水技术在鲁北地区的应用探讨[J]. *山东水利*, 2005(10): 46, 49
- [62] 陈士平, 戴红霞. 暗管排水改造山区冷浸田的效果[J]. *浙江农业科学*, 2000(2): 59–60
- [63] 刘培斌. 暗管排水稻田中氮素淋失动态混合模型及应用[J]. *中国环境科学*, 2000, 20(1): 13–17
- [64] Lalonde V, Madramootoo C A, Trenholm L, et al. Effects of controlled drainage on nitrate concentrations in subsurface drain discharge[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 29(2): 187–199
- [65] 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
- [66] 陈晓东, 寇传和. 水田控制排水技术的环境效益初探[J]. *节水灌溉*, 2006(4): 32–33, 36
- [67] Gilliam J W, Skaggs R W, Weed S B. Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1979, 8(1): 137–142
- [68] Kladvik E J, Frankenberger J R, Jaynes D B, et al. Nitrate leaching to subsurface drains as affected by drain spacing and changes in crop production system[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(5): 1803–1813
- [69] 曾文治, 黄介生, 谢华, 等. 不同暗管布置下棉田排水的硝态氮流失量分析[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 89–93
- [70] Singh M, Pabbi S, Bhattacharya A K, et al. Nitrite accumulation in coastal clay soil of India under inadequate subsurface drainage[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 91(1/3): 78–85
- [71] Singh M, Bhattacharya A K, Nair T V R, et al. Nitrogen loss through subsurface drainage effluent in coastal rice field from India[J]. *Agricultural Water Management*, 2002, 52(3): 249–260
- [72] Goswami D, Kalita P K, Cooke R A C, et al. Nitrate-N loadings through subsurface environment to agricultural drainage ditches in two flat Midwestern (USA) watersheds[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(6): 1021–1030
- [73] Wesström I, Messing I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87(3): 229–240
- [74] 杨琳, 黄介生, 李大文, 等. 控制排水条件下土壤氮素的运移[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(11): 1063–1066
- [75] 周志贤, 何在友. 暗管排水治理圩区渍害田经济效益显著[J]. *灌溉排水*, 1995, 14(2): 58–59
- [76] Ayars J E, Grismer M E, Guitjens J C. Water quality as design criterion in drainage water management systems[J]. *ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(3): 154–158
- [77] 梁世炎, 雷新美, 蔡志文, 等. 暗管改造渍害型低产田的方法与效果[J]. *中国农村水利水电*, 1997(4): 14–15
- [78] Kang S Z, Liang Z S, Hu W, et al. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plants[J]. *Agricultural Water Management*, 1998, 38(1): 69–76
- [79] 姚中英, 赵正玲, 苏小琳. 暗管排水在干旱地区的应用[J]. *塔里木大学学报*, 2006, 17(2): 76–78
- [80] Ng H Y F, Tan C S, Drury C F, 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
- [81] Muirhead W A, Humphreys E, Jayawardane N S, et al. Shallow subsurface drainage in an irrigated vertisol with a perched water table[J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 30(3): 261–282
- [82] 张兰亭, 李龙昌, 孙香英. 暗管排水改良滨海盐土及其效果分析[J]. *农田水利与小水电*, 1992(2): 6–10
- [83] 张秀敏, 毛顺来. 风力提水用于暗管排水的探讨[J]. *海水水利*, 1992(4): 29–32
- [84] 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
- [85] Jorjani H, Van Vuuren W. Physical and economic benefits of subsurface drainage by soil type in eastern Ontario[J]. *Agricultural Water Management*, 1991, 19(3): 235–251
- [86] 郭瑞, 冯起, 司建华, 等. 土壤水盐运移模型研究进展[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(3): 527–534
- [87] 陈秀玲. 利用咸水灌溉抗旱增产[J]. *中国水利*, 1995(7): 32–33
- [88] Ayars J E. Field crop production in areas with saline soils and shallow saline groundwater in the San Joaquin Valley of California[J]. *Journal of Crop Production*, 2003, 7(1/2): 353–386
- [89] 王卫光, 张仁铎, 王修贵. 咸水灌溉下土壤水盐变化的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(3): 1–4, 13