



滨海盐碱农田暗管排盐渗流场模拟

李彦鑫, 徐丽, 齐菲, 高会, 于淑会, 付同刚, 刘金铜

Seepage field simulation of subsurface pipe salt drainage processes in coastal saline-alkali farmland

LI Yanxin, XU Li, QI Fei, GAO Hui, YU Shuhui, FU Tonggang, and LIU Jintong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20230004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐碱地水盐调控研究

Regulations of salt and water of saline-alkali soil: A review

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(10): 1528–1536

基于HYDRUS模型的华北平原小麦种植区水盐运移模拟

Water and salt transport simulation in the wheat growing area of the North China Plain based on HYDRUS model

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 1085–1094

我国暗管排水技术发展历史、现状与展望

Development history, present situation, and the prospect of subsurface drainage technology in China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(4): 633–639

河北滨海盐碱土地生态安全评价

Evaluation of ecological security of coastal saline land in Hebei

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(5): 778–786

盐地碱蓬生长对滨海重盐碱地的改土效应

Soil improving effect of *Suaeda salsa* on heavy coastal saline-alkaline land

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1578–1586

内蒙古河套灌区盐碱地治理中农户参与意识及其影响因素

Farmer's participation consciousness and the influencing factors in the reclamation of saline-alkali land in Hetao Irrigation Region, Inner Mongolia

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(4): 625–632



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20230004

李彦鑫, 徐丽, 齐菲, 高会, 于淑会, 付同刚, 刘金铜. 滨海盐碱农田暗管排盐渗流场模拟[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7): 1110-1120

LI Y X, XU L, QI F, GAO H, YU S H, FU T G, LIU J T. Seepage field simulation of subsurface pipe salt drainage processes in coastal saline-alkali farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(7): 1110-1120

滨海盐碱农田暗管排盐渗流场模拟*

李彦鑫^{1,2†}, 徐丽^{1,2†}, 齐菲^{1,2}, 高会¹, 于淑会³, 付同刚^{1**}, 刘金铜^{1**}

(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/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省土壤生态学重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 河北地质大学 石家庄 050031)

摘要: 暗管排水技术是治理滨海盐渍土的有效措施,为制定更为合适的灌排制度,本文以河北省沧州市南大港产业园区近滨海暗管排水排盐试验地为模拟研究对象,通过设置不同地下水埋深和补给水位对滨海农田春夏季不同水位条件进行模拟,使用 COMSOL 软件对其进行数值模拟,设计室内砂槽物理模型进行对比验证,模拟埋设暗管的滨海盐渍土在变水位条件下的水流迁移过程和盐分运移过程。研究结果表明:1) 暗管的排水排盐能力随地下水位升高而增强,水位变化导致水力边界变化,从而影响土体渗流场中的流线走向和水头分布;水力边界条件的改变对土体渗流场影响比水位变化影响更大,地下水位在地面以下时,水位升高 8 cm,渗流速度增加 $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,而地下水位由地下升至地表时,渗流速度增加 $1.68 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。2) 增加地下水位与暗管的垂直距离可以有效增快水盐运移速率,减少携带盐分的水流在土体中的停留时间,同时增快暗管排水排盐速率,防止土体返盐,在距离暗管 0.6 m 范围内的盐分迁移速度明显加快;地下水位升高 8 cm,含盐水流从补给水箱流向暗管的时间周期缩短 720 min。3) 暗管对土体水流的影响范围不随水力边界条件变化,在不同水位条件下,暗管附近 0.6 m 范围内水流和盐分的运移特征相似;在距离暗管 0.8 m 附近都出现了流线转折,水流由流向地下改为流向暗管。利用砂槽物理模型和 COMSOL 软件可以很好地模拟暗管排水排盐过程的水盐运移过程,为现有淋洗策略的优化提供更便利的试验方式,为不同质地滨海盐碱地暗管排水排盐路径优化和暗管施工设计布局提供更科学的依据。

关键词: 暗管排水; 渗流场; 水盐运移; 砂槽模型; 模型模拟; 滨海盐碱地

中图分类号: S278

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Seepage field simulation of subsurface pipe salt drainage processes in coastal saline-alkali farmland*

LI Yanxin^{1,2†}, XU Li^{1,2†}, QI Fei^{1,2}, GAO Hui¹, YU Shuhui³, FU Tonggang^{1**}, LIU Jintong^{1**}

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences / Hebei Provincial Key Laboratory of Soil Ecology, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China)

Abstract: Underground pipe drainage technology is an effective measure to control saline soil along the coast. To develop a more

* 河北省重点研发计划项目(20373304D, 22374202D)和河北省教育厅青年拔尖人才计划项目(BJ2020008)资助

** 通信作者: 付同刚,主要从事脆弱生态系统水土过程研究, E-mail: tgfu@sjziam.ac.cn; 刘金铜,主要从事生态工程方面研究, E-mail: jtliu@sjziam.ac.cn

† 共同第一作者: 李彦鑫,主要从事盐碱地治理研究, E-mail: liyixin9812@163.com; 徐丽,主要从事盐碱地治理研究, E-mail: 937809493@qq.com
收稿日期: 2023-01-03 接受日期: 2023-05-25

* The study was supported by the Key Research and Development Program of Hebei Province (20373304D, 22374202D) and the Youth Top Talent Program of Hebei Education Department (BJ2020008).

** Corresponding authors: FU Tonggang, E-mail: tgfu@sjziam.ac.cn; LIU Jintong, E-mail: jtliu@sjziam.ac.cn

† Equivalent contributors

Received Jan. 3, 2023; accepted May 25, 2023

suitable irrigation and drainage system for high water level conditions in the coastal area, this study took the near coastal underground pipe drainage and salt discharge experimental site of Nandagang Industrial Park in Cangzhou City, Hebei Province, as the simulation study object. By setting different initial water levels, the varying water level conditions of coastal farmland in spring and summer were simulated. COMSOL software was used to conduct numerical simulations, and indoor flume models were designed for comparative verification, simulating the water flow migration process during leaching and desalination and the water flow and salt migration process during groundwater reduction. The research results indicated that: 1) the underground pipe's drainage capacity and salt discharge capacity increased with the increase in groundwater level, and changes in water level led to changes in hydraulic boundaries, thereby affecting the flow direction and water head distribution in the soil seepage field. The change in hydraulic boundary conditions had a greater impact on the soil seepage field than the change in the water level. When the groundwater level was below the ground, the water level rose by 8 cm, and the seepage velocity increased by $0.21 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. However, when the groundwater level rose from the ground to the surface, the seepage velocity increased by $1.68 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$. 2) Increasing the vertical distance between the groundwater level and the underground pipe accelerated the water and salt transport rate, reduced the residence time of water carrying salt in the soil, and increased the underground pipe's drainage and salt discharge rate to prevent salt return from the soil effectively. When the groundwater level rose by 8 cm, the time required for saline water flow from the makeup water tank to the underground pipe was shortened by 720 min. Increasing the burial depth of an underground pipe improved its drainage and salt discharge efficiency effectively. 3) The burial of underground pipes changed the flow path, promoting salt leaching and drainage from the soil. Under different water levels, streamlines were turning around 0.8 meters from the underground pipe, and the water flow changed from flowing underground to flowing towards the underground pipe. The soil near the underground pipe had a high seepage velocity and a short seepage path. The salt in the soil far from the underground pipe was difficult to discharge, and the salt flowed into the deep soil, causing salt accumulation. The use of sand tank physical models and COMSOL software effectively simulated the water and salt transport processes of underground pipe drainage and salt discharge, providing a more convenient experimental method for the optimization of existing leaching strategies, a more scientific basis for the optimization of underground pipe drainage and salt discharge paths, and the design layout of underground pipe construction in coastal saline-alkali land with different textures.

Keywords: Subsurface drainage; Seepage field; Water and salt transport; Flume model; Model simulation; Coastal saline-alkali land

河北滨海盐渍区农田是我国中低产农田的典型代表。该地区降水的年际变率大、季节分配不均, 洪涝灾害与次生盐渍化, 土壤盐渍贫瘠和淡水资源短缺是农业生产发展的主要限制因素。暗管排水排盐技术遵循“盐随水来, 盐随水去”的水盐运移规律, 通过埋设暗管影响地下水渗流场, 改变土壤水盐运移速率和方向, 进行排水、排盐和排涝, 达到改良盐碱地的目的。该措施在盐碱地改良上已得到广泛应用^[1-2]。

国外针对滨海暗管排水已有较多研究进展, 包括滨海盐渍土形成原因, 滨海盐渍土时空分布和滨海盐渍土水盐运移过程研究^[3-7]。我国对滨海农田暗管排水技术推广应用时间较晚, 20 世纪 80 年代才逐步开始相关研究。先后在山东省打渔张灌区^[8]、广东省台山县滨海咸酸稻田^[9]、辽宁省盘锦地区轻度盐渍化水稻田^[10]、上海市五四农场沿海滩涂垦区^[11]、天津市滨海新区盐碱土^[12]开展了暗管改良滨海盐渍土的相关研究, 积累了大量的实践经验。刘慧涛等^[13]在河北省南大港农场开展暗管排水条件下土壤水盐变化的田间试验, 研究表明埋设暗管有效抑制滨海农田返盐现象, 并且较明沟排水在雨季能更好地缓解涝渍灾害, 对于河北滨海盐碱区具有较好的适用性。

然而, 基于实际场地的试验通常需要耗费大量

的人力物力, 试验周期长, 数据差异性大, 研究结果也主要针对当地的土壤环境, 所以缺乏普遍适用性。此外, 由于暗管本身具有布局的参数多、环境依赖大的特点, 在进行室外试验时, 很难针对性地对这些影响因素进行系统定量试验。因此, 有必要通过建立数值模型, 系统地研究暗管排水下的水盐运移过程, 有针对性地调节相关参数, 从而优化暗管布局, 制定更为合理的灌排措施。

国内外已有不少使用数值模型对暗管排盐进行研究的案例: Manal 等^[14]使用 DRAINMOD 研究俄亥俄州农田存在大孔隙时如何对排水参数进行修正; 刘洪光等^[15]基于 HYDRUS-2D 模拟了新疆区域滴灌加暗管条件下的土体盐分变化。COMSOL Multiphysics (下文简称为“COMSOL”)是由瑞典 COMSOL 公司研发的数值仿真软件, 以有限元法为基础, 通过求解偏微分方程(单物理场)或偏微分方程组(多物理场)来实现对真实物理现象的仿真。针对不同的具体问题, COMSOL 可求解稳态和瞬态问题、线性和非线性分析, 以及特征值和模态等各种数值分析。与专门针对土壤水盐模拟的软件相比, COMSOL 具有适用性更广、可编辑性更强的优点, 可以模拟与实际条件更为接近的工程环境。如 Wissmeier 等^[16]将该软件

应用于土壤中杀虫剂的运移模拟,并验证了该软件对土壤溶质运移模拟的适用性;焦会青等^[17]使用 COMSOL 较好地模拟了新疆盐渍土淋洗过程盐分离子的运移情况,并考虑了多种离子间的化学反应,研究结果的拟合程度较好。

本文采用 COMSOL 软件模拟暗管排水条件下滨海农田春夏季土体水位变化时的土壤水盐运移过程,基于 Darcy 定律和 Fick 定律定义偏微分方程组构建水分迁移耦合盐分运移模型,结合砂槽模型对土壤水盐运移进行系统研究,分析不同水位条件下农田水盐运移特征,揭示了暗管排水措施下水分与盐分的运移规律。

对排水工程实施后地下水渗流场的动态变化进行计算分析与预测,能够从理论上揭示与探明盐碱地改良过程水盐运移方面的运动趋向及规律。同时,研究地下水渗流场,可为暗管埋设设计最佳方案提供理论指导,有利于降低工程的经济成本和控制盐碱地的返盐程度。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

本研究的试验农田是河北省沧州市南大港农场的国土资源部/中国科学院的暗管排盐试验区。试验区占地 6.8 hm²,位于河北省沧州市黄骅市的滨海新区。该地地处环渤海区域,距离渤海的海岸线 10 km。研究区主要地貌为湿地、坑塘,呈现较为明显的滨海特征。研究区的年平均降雨量为 590 mm,其中 75% 的降雨集中在雨季。土地潜在年蒸发量为 1950 mm,年蒸发量最大的时间同样是每年的雨季。盐渍土的形成与地区降雨和蒸发密切相关,研究区土壤水分和盐分在垂直方向的上升与下降、积盐与脱盐过程具有鲜明的季节性特点。区内地下水埋深浅(0.3~1.2 m),但多为矿化度较高的咸水。测定结果表明,地下水阳离子中钠钾离子含量占比最高,阴离子中氯离子和硫酸根离子含量最高。地下水的含盐量为 6~10 g·L⁻¹,盐伴随春季多风期会随地下水位的上升上移到土壤表面导致土壤次生盐渍化严重。

试验区内布设有暗管排水排盐系统,渗水管采用直径为 11 cm 的带孔单壁波纹管,外包 15 cm 厚砂石滤料,埋设管道的坡降比为 0.7‰。研究区的暗管埋设方向为从南向北,集水管走向为从西向东,铺设暗管总长为 1100 m。暗管的埋设间距为 20 m、25 m、30 m、40 m 不等,埋设深度主要为 1.0 m、1.2 m 和 1.5 m。平均埋设间距为 35 m,平均埋设深度为 1.3 m。

1.2 试验设计

1.2.1 砂槽模型

参考试验区的暗管埋设参数,选择埋设间距为 20 m、埋深为 1 m 的试验地为模拟对象,进行砂槽物理模型的设计与制作。

砂槽物理模型试验设计与水利工程中的水工模型具有相似的原理。在设计水工模型时,须使模型与实际原型保持相似准则,如:几何相似准则、运动相似准则、功能相似等^[18-19]。为使模型和原型之间保持相似,在一定的比例关系前提下,应当保持两个模型具有相似的动力,不仅对模型尺度进行还原模拟,还要对模型的运动条件进行还原。因此,对渗流场的模拟需要依据达西定律进行边界条件的界定。

基于以上模拟准则,对试验地进行模拟,选取暗管一侧进行研究,以 5:1 的比例制作砂槽模型,选取厚度为 10 mm 的有机玻璃板作为砂槽物理模型的制作材料,完成砂槽模型的制作(图 1),砂槽长 240 cm、宽 20 cm、高 70 cm。试验装置由主要装置和附属装置两部分组成。

主要装置包括 3 部分:地下水补给水源的模拟供水装置、含水层模拟装置和暗管模拟装置。含水层模拟装置为试验的核心部位,内部填充砂土,长 200 cm、宽 20 cm、高 60 cm。模型中有 9 排间距为 25 cm,高差为 4 cm 的观测孔,用于布置示踪孔和盐分观测孔。本研究中只用到距离模型箱底部 56 cm、48 cm 和 40 cm 的作为示踪孔,距离模型箱底部 44 cm 的作为盐分观测孔。示踪孔由装有染色剂的橡胶套和连通砂槽的连通管组成,试验时挤压橡胶套释放染色剂就可以观察流线的运动轨迹。盐分数据由观测孔连接 DDS-307A 型号电导率仪测得。地下水补给水源的模拟供水装置由调节水箱、进水开关和稳水箱组成。调节水箱在含水层模拟装置一侧,长 35 cm、宽 20 cm、高 60 cm。进水开关位于调节水箱的一侧。稳水箱由厚 8 mm 有机玻璃制成,长宽高均为 25 cm,其中中间有一个长 25 cm、宽 25 cm、高 20 cm 的玻璃板,在试验中负责稳定补给水位的高度,以保证试验中水位条件为定水位条件。地下水补给水源的模拟供水装置和含水层模拟装置之间有一个孔眼过滤缓冲板。暗管模拟装置由暗管和控制暗管渗流量的阀门组成。暗管为长 25 cm、直径为 2 cm 的 PVC 硬管,平行槽体底部铺设在槽体 40 cm 高处,用于模拟暗管排水排盐地中埋深为 1 m 的暗管,暗管开孔率为 1.7%,孔眼长 0.7 cm、宽 0.1 cm。

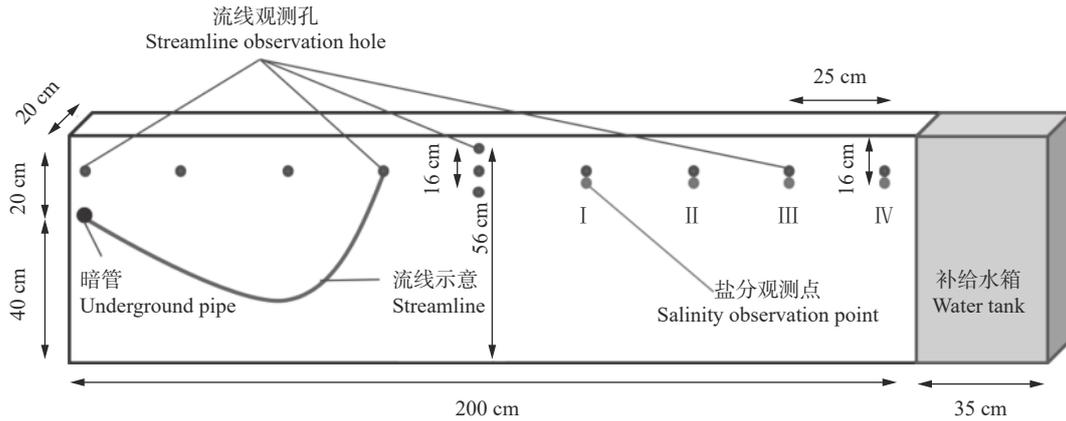


图 1 砂槽模型装置设计、布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the design and layout of the experimental device

附属装置包括调节水位的稳水箱、控制暗管装置和用来观测水位变化的测压装置, 试验槽体内盛装 60 cm 分选良好的人工石英砂 (中细粒级), 经测试石英砂的渗透系数为 $21.86 \text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

1.2.2 模拟方案

根据滨海农田春夏季地下水位回升返盐的实际情况, 参考沈荣开等^[20]提出的 30 cm 的淹水深度 (涝害发生的最小埋深) 和翁通^[21]对毛细水上升的研究, 与试验区土壤物理性质最为接近的土体毛细水上升最大高度为 70~90 cm, 在试验中设置不同的初始水位, 分别模拟农田淹水过程 (补给水位为 0 cm)、农田不发生涝灾的最大水位深度 (40 cm) 和农田不发生返盐的最小深度 (80 cm)。通过对砂槽施加这 3 个水位条件, 模拟暗管在这 3 种情况下的水盐运移情况。

对于滨海农田而言, 春夏季地下水位的上升是导致农田返盐的重要原因。为进一步模拟侧向补给水对农田返盐的影响, 验证模型对盐渍土水盐运移过程模拟的可行性, 设置两组侧向补给水为高浓度

咸水时, 补给埋设暗管农田的模拟试验。试验中选取试验地地下水中含量最高的钠离子与氯离子配制咸水溶液, 参考研究区地下水成分, 最终选择 $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液模拟高咸度地下水。设置初始水位为 40 cm、侧向补给水位为 0 cm (位于地表), 初始水位为 80 cm、侧向补给水位为 40 cm 两组试验, 模拟补给水位和农田初始水位的水位差相同时, 侧向补给水位高度对暗管排水排盐过程的影响。

基于以上模拟试验的水位设定条件, 以砂槽土体表面为基准面, 按照 5 : 1 比例设定砂槽模型的基本参数, 如表 1 所示。

根据设定的试验条件, 分别进行各条件下的砂槽模型试验。待砂槽模型测压板数据和暗管渗流量稳定后, 挤压浸润水位线以下示踪孔的橡胶球, 释放染色剂绘制流线。使用相机拍摄绘制下来的流线, 并记录暗管稳定渗流排水时的渗流速度。在进行盐分模拟试验时, 每隔 10 min 记录盐分观测孔数据, 直至盐分数据不发生明显升高为止。

表 1 模拟暗管排盐的砂槽模型的参数表

Table 1 Parameters of the flume model for simulation of underground pipe salt drainage

试验类型 Experiment name	暗管埋深 Depth of underground pipe (cm)	地下水埋深 Depth of groundwater (cm)	补给水埋深 Depth of make-up water (cm)	补给水含盐量 Salt content of make-up water ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
水流模拟 Water flow simulation	20	0	0	0
	20	8	8	0
	20	16	16	0
盐分模拟 Salt flow simulation	20	8	0	10
	20	16	8	10

1.3 模型基本原理

研究运用 COMSOL 软件中的多孔介质和地下水水流模块, 选用模块中的用于模拟饱和-非饱和水流的 Richards 方程作为水分运动的方程, 溶质运移基于 Fick 定律的对流-弥散方程。将两个模式耦合在

同一物理场中, 模拟不同水位条件下的土壤中水分和盐分运移过程。

水分与盐分在土壤中入渗的过程属于空间三维 (3D) 运动, 由于 3D 问题极其复杂, 本研究将问题简化为均质、各向同性的水盐运动二维问题来模拟。

基于砂槽模型和滨海农田实际情况^[22], 建立高 0.6 m、长 2.0 m 的长方形盐土土体模型, 并在与砂槽的盐分观测点等高位置设置观测面, 观测模型盐分浓度变化。

模型中的土壤水分运动控制方程使用 Richards 方程^[23] 表达为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] + \frac{\partial K(h)}{\partial z} + W \quad (1)$$

式中: θ 为土壤体积含水率; $K(h)$ 为水分渗透系数, $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$; h 为土壤基质势, cm ; z 为纵坐标, cm ; W 为源汇项。

模型的盐分移动过程采用二维对流-弥散方程进行描述^[24]。

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\theta D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial \theta c v_x}{\partial x} - \frac{\partial \theta c v_z}{\partial z} \quad (2)$$

式中: c 为溶质浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; D_{xx} 为 x 向扩散系数; D_{zz} 为 z 向扩散系数; v_x 为横向平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_z 为纵向平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

假设平均流速方向与 z 轴方向一致, 则:

$$D_{xx} = \alpha_L v + D_{mL} \tau_L \quad (3)$$

$$D_{zz} = \alpha_T v + D_{mL} \tau_L \quad (4)$$

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \quad (5)$$

式中: α_T 为纵向弥散度; α_L 为横向弥散度; v 为平均流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; D_{mL} 为氯离子在纯水中的扩散系数, 取 $1.296 \text{ cm}^2 \cdot \text{d}^{-1}$; τ_L 为曲折因子^[25]。

根据 COMSOL 模型中的理查兹方程需要, 对土壤水分特征曲线参数进行拟合, 土壤水分特性曲线 $\theta(h)$ 可用 van Genuchten 模型来表示^[26], 即:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |ah|)^m} \quad (6)$$

式中: θ_r 为残余土壤体积含水率; θ_s 为饱和土壤体积含水率; a 、 n 、 m 为土壤水分特征曲线的形状参数, $m=1-1/n$, $n>1$ 。

1.4 模型率定及验证

本次模拟共设置 5 种条件的模拟试验, 为保证模拟精度, 使用盐分模拟的 2 组试验用于模型的率定, 并将水流模拟的 3 组试验用于模型的验证。试验中, 对使用中细粒石英砂模拟滨海盐渍土进行粒径测定, 得出其中砂粒质量分数为 70%, 粉粒质量分数为 30%, 容重为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。为得到土体的水力学参数, 将粒径分布及容重输入 ROSETTA 软件中进行计算。

在参数率定方面, 首先对暗管排水速率进行率定, 然后对盐分观测点的数据进行率定。模拟过程

中, 提取暗管稳定排水时的排水速率以及累计排水量对比砂槽模型的排水速度和累计排水量。提取与盐分观测点位置相同的盐分变化数据, 每隔 10 min 进行数据采集, 试验时长为 360 min。将试验所得结果与模拟结果进行评价指标计算, 直至评价指标保持在可信度较高的范围, 得出最终率定后的土壤水盐运移特征参数。

率定后的土壤水盐运移参数为: 残余含水率 $\theta_r=0.0321 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; 饱和含水率 $\theta_s=0.3485 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$; $\alpha=0.0304$, $n=1.3803$, α 和 n 是影响水力函数形状的经验系数。

本文使用的评估模型精度的指标为均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和决定系数 (coefficient of determination, R^2)^[27]。将 COMSOL 模型模拟的地下水位、暗管速率以及土壤中盐分变化情况的模拟数据同对应的试验实测值进行计算, 进行模型精度的评估。评价指标计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2} \quad (8)$$

式中: n 表示数据个数, a_i 表示数据实测值, b_i 表示数据模拟值, \bar{a} 是实测数据的平均值。在以上两个指标中, RMSE 对于数据中的极值非常敏感, RMSE 越小说明数据的离散化程度越稳定; R^2 表示数据实测值与模拟值的相关性, R^2 越接近 1 说明模拟精度越高, 而建立的模型更具可靠性。

2 结果与分析

2.1 模型模拟结果

本文选取水头高度、渗流速度和流线作为渗流场特征进行研究, 以便分析埋设暗管条件下的渗流场变化特征。

通过将砂槽试验所绘制的流线进行拍照记录, 得到砂槽模型的流线图。提取出 COMSOL 软件模拟的流线结果, 并将其与砂槽模型结果进行对比, 由图 2 可得出不同补给水位的流线特征。

当地下水位位于地表时, 水流是从地表直接进入土体的渗流场中, 沿着地下水渗流路径流出暗管。离暗管近对应的流线为下凸的曲线簇; 离暗管远则

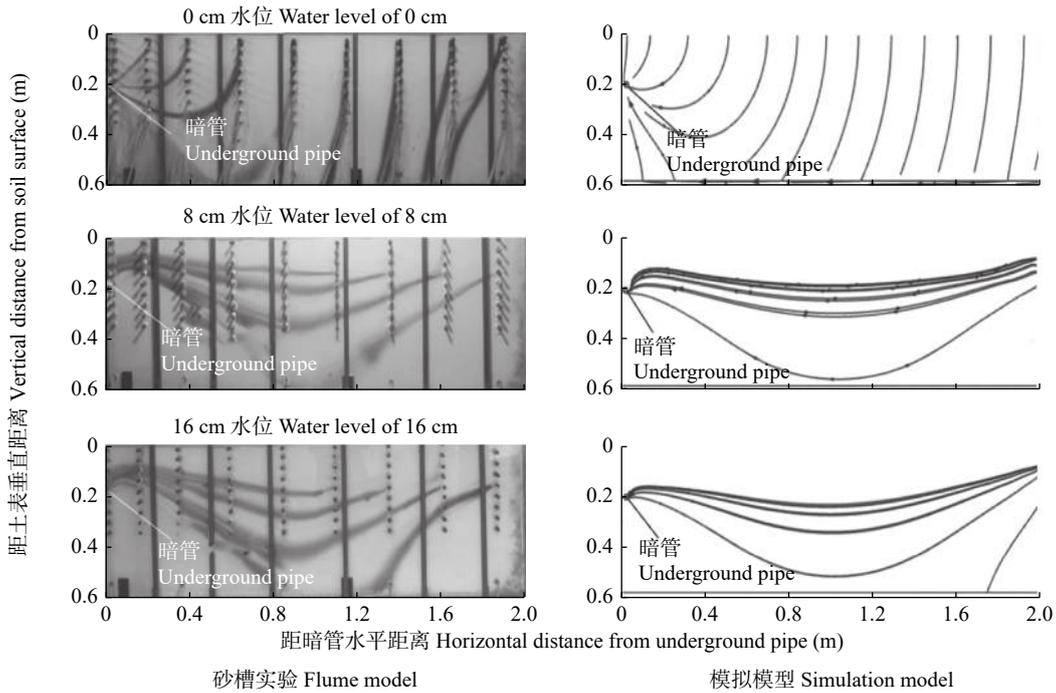


图 2 埋设暗管条件下不同补给水位的流线分布

Fig. 2 Streamline distribution of different groundwater levels under the condition of underground pipe

左侧图片为砂槽试验的模拟结果, 深色条带为染色剂绘制的流线; 右侧图片为 COMSOL 软件模拟结果, 线条为流线。The left image shows the simulation results of the flume model, with the dark stripes showing the streamlines drawn by the staining agent. The figure on the right shows the simulation results of COMSOL software, with the lines indicating the streamlines.

地下水流以垂直运动为主, 流线近似垂直向下。而靠近暗管的水体受暗管的水力边界条件影响, 水流由竖直转向水平。在水平渗流速度和竖直渗流速度相同时, 流线趋于 45°, 这种流线在距离暗管 0.8 m 的范围内出现, 其高度随着与暗管水平距离的增加而升高。

在地下水位距离地表 8 cm 时, 流线走向趋于水平, 该水位条件下, 在靠近暗管 0.8 m 处的水流明显抬升, 直到抬升高度与水头高度基本一致。当地下水位高度进一步下降至 16 cm 时, 流线整体走向与地下水位距离地表 8 cm 时基本一致, 在距离暗管较远的区域, 流线受重力作用, 下降更为明显, 呈现出流向地下的非完整流线。在靠近暗管时, 流线也不断抬升, 最终抬升高度也接近于侧向补给水位的高度。

提取 COMSOL 软件的模拟结果, 得到暗管排水稳定后的土体水头分布, 如图 3 所示。

由于埋设了暗管, 距离暗管较近的土体, 水头明显下降, 增加了暗管与地表间的水头差。水头差产生的势能是促使土体中水流排出暗管的重要动力。根据达西定律, 相同的间距下, 水头差越大, 渗流速度就越大, 即水头梯度差越大渗流速度越大(公式 1)。在暗管附近的土体, 水头变化更快, 水头梯度差明显

大于距离暗管较远的土体。在距离暗管 0.4 m 范围外, 水头变化变缓, 水头变化很小。在地下水位为 8 cm 和 16 cm 时, 暗管上部的水头仍保持较高水平, 水流

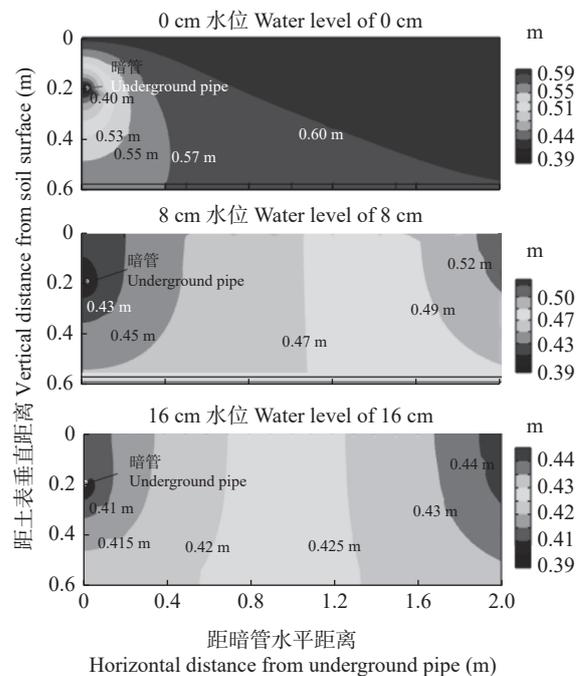


图 3 埋设暗管条件下不同补给水位的土壤压力水头分布

Fig. 3 Pressure head distribution at different groundwater levels under the condition of underground pipe

在水头差影响下发生抬升。

图 4 为不同水力条件下的渗流速度对比。在土体边界条件变化时,土体中的渗流路径不同,渗流速度也不同。这是由于地下水位高度发生变化时,土体水力边界条件发生了变化,暗管所起到的调控土体渗流场的作用也受到影 响。在地下水位处于地表时(淋洗状态),水流由地表流向暗管,渗流速度较快,为 $2.03 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$;在非淋洗过程中,水从侧向补给水箱流向暗管,其水力梯度下降平缓,渗流速度较小。地下水位位于地表、地下水位位于地面以下 8 cm 和 16 cm 的模型,水位差均是 8 cm,但是就渗流速度变化而言,前者渗流速度下降了 $1.68 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,后者仅下降 $0.22 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

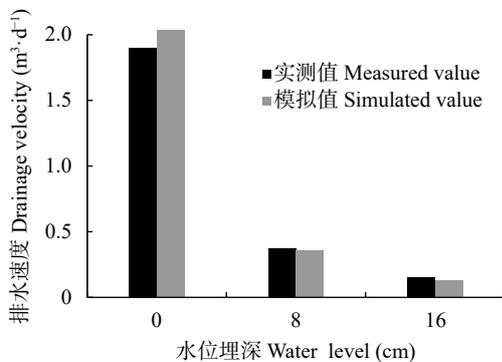


图 4 不同水位下砂槽试验与模拟实验的暗管排水速度
Fig. 4 Drainage velocities of underground pipe in flume model and COMSOL model under different water levels

为观察砂槽土体中水流中盐分运移过程,对盐分模拟模型中盐分观测点的数据进行分析,发现盐分浓度到达 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,COMSOL 软件所观测的盐分浓度小于 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,浓度为 $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。因此,选取 COMSOL 软件模拟结果的盐分观测点为 $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的数据,作为侧向补给水中的盐分基本到达观测点的时刻,并将其命名为盐分临界时刻(图 5)。

盐分临界时刻表示了侧向补给水箱中的高咸度地下水到达观测点的周期时间。可以看出,距离暗管 0.6~1.6 m 范围,临界时刻与距离补给水箱的距离呈线性关系,离水箱越远,临界时刻越久。初始水位距离地表 8 cm 时,观测点盐分浓度上升速度较快,距离补给水箱最远处的盐分浓度在 1160 min 时达 $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,距离暗管 0.6 m 范围内的观测点盐分到达 $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的时刻接近;初始水位距离地表 16 cm 时,观测点盐分上升最慢的位置为距离暗管 0.5 m 处,在 2820 min 时到达 $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,而距离暗管 0.5 m 范围内的观测点盐分上升速度明显加快,到达 $9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的时刻

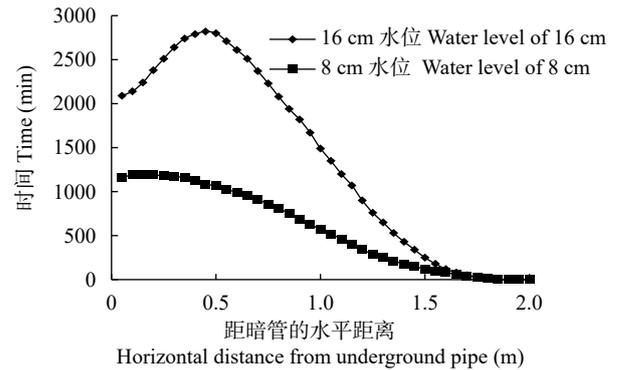


图 5 不同地下水位下侧向补给水盐分临界时刻
Fig. 5 Critical time of salt content of makeup water with different burying depth of groundwater

为 2090 min。这是由于含水层底部水流与暗管附近水流共同作用,加快了暗管附近盐分浓度上升。

2.2 数据对比验证

2.2.1 盐分拟合验证

为验证盐分运移-水分运移的耦合性,对模拟侧向补给水对埋设暗管区域补给咸水过程的模型进行拟合验证。选取砂槽中监测位点 II 和 III 的盐分变化,并与 COMSOL 模型中对应点位数值进行对比,模拟结果和精度如图 6 所示。

根据图 7 可以看出,砂槽模型的盐分运移过程的整体趋势与软件模拟结果基本一致,而观测点的 RMSE 值都小于 $1.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,而 R^2 数值除没有完全观测到的 16 cm 水位条件下的 II 号观测点,其余均在 0.9 以上(图 6),说明砂槽模型和模拟结果拟合程度较好,表明模型可以较好地模拟该砂槽试验的水分运移与盐分运移的耦合情况,验证了“盐随水来,盐随水去”的规律。

2.2.2 流线拟合验证

为进一步验证模型拟合程度,对模型的流线进行拟合验证。将试验所得流线照片经过 Origin 软件处理得到流线图,并与模型计算结果进行拟合对比。由于边界效应的影响,模拟结果只有部分为完整流线,选取模型中 4 条较为完整的流线进行拟合计算(图 7)。

根据图 7 数据进行评价指标的计算,得出表 2。其中, X 表示流线起点距暗管的水平距离。

流线的拟合结果基本较好,其中 RMSE 值基本在 0.1 m 以下,而 R^2 的值基本保持在 0.8 以上。这说明砂槽模型与模拟模型的试验结果流线基本保持一致,砂槽模型与模拟模型具有相似的运动过程,模型模拟结果具有一定的可信度。

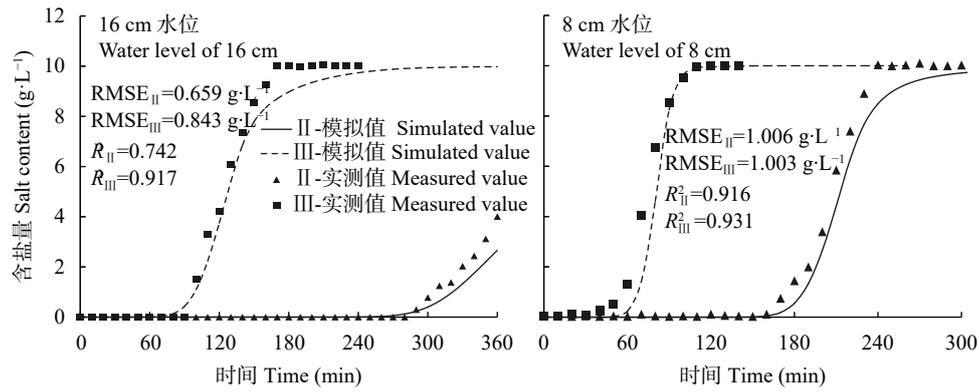


图 6 盐分观测点 II 和 III 的土壤含盐量变化模拟结果与模拟精度

Fig. 6 Simulation results and accuracies of salt contents dynamics in the observation points II and III

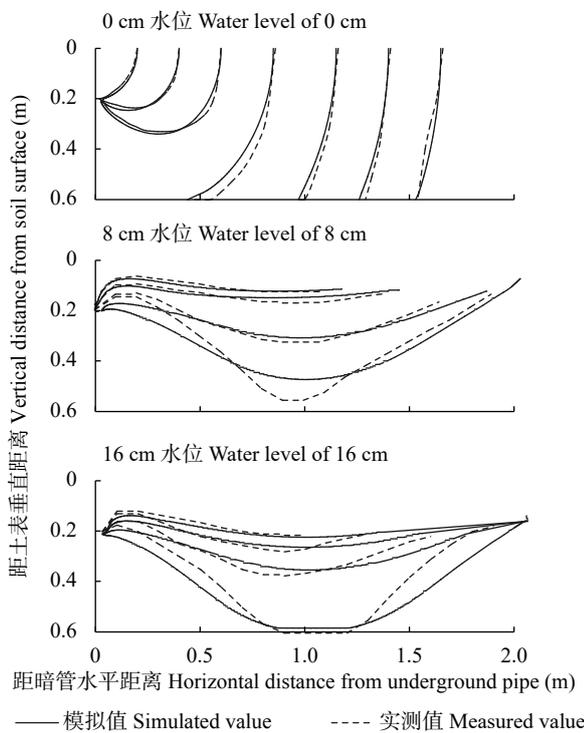


图 7 不同水位下砂槽模型和 COMSOL 模型的流线模拟结果对比

Fig. 7 Comparison of streamlines simulation results of flume model and COMSOL model under different water levels

3 讨论

在暗管相关参数的模拟研究中, 暗管的环境是导致暗管发挥效用不同的关键, 在不同水力和土壤条件下, 暗管排盐排水的效果也不同, 这在实际应用中大大限制了暗管埋设参数的通用性, 暗管埋设方式须因地制宜, 在充分了解当地水土资源情况后制定合理的铺设方案。滨海地区的地下水位埋深浅, 波动大, 为研究不同水位条件下埋设暗管农田的水盐运移过程, 本研究以室内砂槽试验为基础, 结合 COMSOL 软件模拟暗管排水排盐过程, 通过设置不

表 2 流线模拟效果评价指标

Table 2 Evaluation indicators of streamline simulation effect

水位 Water level (cm)	评价指标 Evaluation indicator	距暗管的水平距离 Horizontal distance to pipe (m)			
		0.2	0.4	0.6	0.8
0	RMSE (m)	0.013	0.010	0.020	0.049
	R^2	0.958	0.965	0.920	0.930
8	RMSE (m)	1	1.25	1.5	1.75
	R^2	0.008	0.010	0.020	0.045
16	RMSE (m)	0.877	0.739	0.895	0.892
	R^2	1	1.25	1.5	1.75
	RMSE (m)	0.059	0.027	0.020	0.149
	R^2	0.860	0.851	0.960	0.822

同的初始地下水位, 研究了单根暗管周围渗流场的水盐运移情况。

模型模拟的流线分布与走向 (图 2) 可以说明在埋设暗管条件下, 水力边界条件的改变会导致土体中水力梯度下降方向发生变化, 进而影响水流路径, 引起渗流速度变化。在地下水位位于地面时, 水流由地表流向暗管; 而地下水位位于地面以下时, 水流呈现水平状态, 水流由补给水箱流向暗管。地下水位埋深从 8 cm 减小到 0 cm (地下水位位于地表) 的模型, 其渗流速度从 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到 $2.03 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。而在同等水位差下, 地下水位埋深从 16 cm 减少到 8 cm 的模型的渗流速度从 $0.13 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 增加到 $0.35 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。这说明渗流速度发生变化不是因为水位的抬升, 而是由于水力边界条件发生了变化。通过水头变化图 (图 3) 可以看出, 地下水位位于地面以下的模型, 其水力梯度下降方向为从补给水向暗管, 水力梯度差变化较为平缓; 而当地下水位处于地表时, 其水力梯度下降方向改变为从地表向暗管, 水力梯度差变化较大, 水力梯度差的变化是导致渗流速度变化的直接原因。

地下水位位于地表常见于农田处于淋洗和降雨

情况下。由于流动的地下水移动速度较盐分的弥散速度快,所以流线的走向也很大程度表现了盐分移动路径。就渗流路径而言,距离暗管较近的土体中水流渗流路径明显较短,而距离暗管较远的土体渗流路径较长。就埋设暗管对土体渗流场影响而言,距离暗管越近,土体受暗管的影响越强,这个影响在距离暗管 0.6 m 范围内十分明显,而在该距离外,无论是水力梯度变化还是流线走向均呈补给水位与重力对水头和流线的影 响大于埋设暗管的影响。在水平渗流速度大于竖直渗流速度时,流线走向开始朝暗管方向快速变化。这个位置在流线图中表现为流线与水平线夹角为 45°。随着距离暗管的水平距离增加,水流由向下淋洗的状态转为排水状态的 45°转折点出现的位置也会降低。本研究中,最长的 45°完整流线的位置是距暗管水平距离 0.6 m 的位置,与暗管影响水头的范围有很强的重合度,可能是农田暗管能否有效排水排盐的关键。

本研究所涉及的暗管埋深条件以及试验环境下,在砂槽中暗管排水排盐效率最高为 0.6 m 范围内,超过该范围,水流的渗流速度和盐分运移速度都会有较大下降。由于模型是单管模拟并进行了 5:1 的比例换算,因此在本研究中埋深为 1 m 的暗管较为高效的埋设间距是 6 m。合适的暗管埋设间距可以提供更合适的水力条件,有助于加快农田快速排水,提高盐碱地淋洗盐分的效率。

在淋洗过程中,距离暗管较近的土体淋洗路径较短,在淋洗过程中会被反复淋洗,不仅淋走了盐分,还淋走对于植物生长有益的其他元素;而距离暗管较远的土体,水流在淋洗周期内可能无法经由暗管走出土体,这样的结果会导致表层盐分被水流淋入深层土体,在停止淋洗后可能会导致土体返盐,再次盐渍化。在实际应用中,没有埋设暗管的土体和距离暗管较远的土体,确实有淋洗后返盐的情况^[28]。发生这种情况的原因是水力边界对水流没有起到较好的引导作用。因此应该考虑通过人为改变水力边界条件,优化渗流路径的方式,提高暗管工作效率。孙雪雁等^[29]采用埋设交叉砂槽的方法,通过在土体中增加优先流路径,为水流提供更为宽敞的移动路径,提升了淋洗效率;Zhang 等^[30]通过在暗管上方埋设低渗透表层覆盖物(low-permeability surface mulch),延长了距离暗管较近土体的水流渗流路径,给距离暗管较远的水流提供更大的渗流空间,优化了渗流路径。

在滨海高咸度地下水对埋设暗管农田入侵的模拟研究中,发现暗管的存在明显加快了农田土体盐

分的运移速度,距离暗管 0.6 m 范围内盐分更快到达观测点。而初始水位较高的时候,水盐运移速度也更快。因此,对于埋设暗管的农田而言,在有足够的排水动力时,暗管可以有效地快速排出侧向补给水位中的水分与盐分,距离暗管越近,排水排盐速率越高;在初使水位较低时,盐分迁移速度有较为明显的下降,结合渗流速度来看,是因为水流与暗管的水位差降低。这会导致含盐水流在土体中的移动时间较长,这时候应该配合主动排水加速土体中的盐分排出,防止其中的咸水通过毛细水上升,导致土体返盐。

RMSE 与 R^2 的拟合计算结果表明,基于砂槽试验方法结合 COMSOL 建立的模型研究盐碱地水盐运移机理是可行的,评价结果的可信度较高。得益于砂槽模型的水力条件与土壤环境较为简单,模型模拟的精度也较高。其中,就模拟时间而言,模拟时间越久,拟合程度相对越差。这一点不仅体现在流线的拟合上,也体现在盐分的拟合结果上。一方面是因为随着水流移动时间的增加,其受到所处砂槽环境的干扰越大,水流与模拟结果的偏差越大;另一方面,随着试验的进行,水流越来越接近模型底部边界,受边界效应影响就越大,导致模型无法完全模拟出实际试验的结果。对比不同水位条件下的流线模拟结果,地下水位位于地表的流线模拟最好,拟合程度最高;而地下水位距离地表 16 cm 的模型流线拟合结果稍差,可能是因为砂土装填不均匀,在水流流速降低时,不同位置土体水流流速变化不均匀,导致流线拟合程度下降。

4 结论

本研究通过将室内砂槽模型和 COMSOL 模型相结合进行拟合,模拟了不同水力条件下暗管排水排盐过程的渗流场,对地下水位、暗管排水及水盐运移随时间的变化过程进行模拟分析,取得以下结论:

1) 根据滨海暗管埋设实际和春夏季返盐的水力条件设计了不同水力条件下埋设暗管农田的砂槽试验,模拟了暗管的排水和排盐过程,并通过 COMSOL 软件对流线和盐分进行了拟合评估,结果表明模拟值与实测值具有较好的一致性。

2) 根据模拟结果发现,暗管工作效率与水力边界有关,在改变水力边界时,土体中的水流渗流速度和流线走向变化较大。高水位条件下,暗管排盐排水能力较强,而中低水位下渗流速度有明显下降。在实际工程应用时,应对埋设暗管农田的土层结构和水力边界进行调查与监测,对于滨海农田水位条

件波动较大的区域应当采取有针对性的管理措施。

3) 对暗管影响范围进行了研究,发现在不同水力条件下土体水头变化较快的区域与流线转折区域以及盐分移动速度转折区域重合度较高,均在 0.6 m 范围内。推测暗管对土体的影响范围不受水力条件的影响,而只受土体自身结构影响。埋深变化及土层结构变化可能会对其产生影响。

本文以流线和水头为切入点,通过室内试验结合 COMSOL 软件建立的数值模型,更直观地表现了暗管建设条件下农田水盐运移路径,为研究水盐运移规律提供了新的研究思路。同时,研究结果对于实际工程也有较好的借鉴意义,对于优化暗管排水路径,指导暗管施工布置具有技术支持和理论指导作用。

参考文献 References

- [1] 于淑会, 刘金铜, 李志祥, 等. 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[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1664–1672
YU S H, LIU J T, LI Z X, et al. Mechanism of saline-alkali lands improvement of subsurface pipe drainage systems and agro-ecosystem response[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(12): 1664–1672
- [2] 杨劲松, 姚荣江, 王相平, 等. 中国盐渍土研究: 历程、现状与展望[J]. 土壤学报, 2022, 59(1): 10–27
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10–27
- [3] BAHÇECİ I, NACAR A S. Subsurface drainage and salt leaching in irrigated land in south-east Turkey[J]. *Irrigation and Drainage*, 2009, 58(3): 346–356
- [4] RITZEMA H P. Drain for gain: managing salinity in irrigated lands: a review[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 176: 18–28
- [5] 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
- [6] KING K W, WILLIAMS M R, MACRAE L M, et al. Phosphorus transport in agricultural subsurface drainage: a review[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(2): 467–485
- [7] FORD W I, KING K W, MARK R. Upland and in-stream controls on baseflow nutrient dynamics in tile-drained agroecosystem watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 556: 800–812
- [8] 张兰亭, 朱九鹤. 山东滨海盐渍土地区暗管排水的效益分析[J]. 灌溉排水, 1983, 2(9): 19–28
ZHANG L T, ZHU J H. Benefit analysis of concealed pipe drainage in coastal saline soil area of Shandong Province[J]. *Irrigation and Drainage*, 1983, 2(9): 19–28
- [9] 陈子平. 滨海咸酸稻田的治理及其效果分析[J]. 广东水电科技, 1994(1): 36–41
CHEN Z P. Management and effect analysis of coastal saline and sour rice field[J]. *Guangdong Hydropower Technology*, 1994(1): 36–41
- [10] 魏开基, 吴芝成, 韩宏儒, 等. 滨海盐渍土稻田暗管排水的研究[J]. 土壤通报, 1995, 26(2): 56–58
WEI K J, WU Z C, HAN H R, et al. Underground pipe drainage of coastal saline soil paddy field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(2): 56–58
- [11] 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, 1995, 23(2): 88–93
SHAO X H, LIU C L, YU S E, et al. Effect of underground pipe drainage on soil salt dynamics and desalination effect in coastal new reclamation area[J]. *Journal of Hehai University*, 1995, 23(2): 88–93
- [12] 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
ZHANG J L, ZHANG Q, WANG Z Y. Estimation method of technical parameters of Tianjin Binhai saline alkali soil irrigation and drainage improvement project[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(8): 52–55
- [13] 刘慧涛, 谭莉梅, 于淑会, 等. 河北滨海盐碱区暗管建设下土壤水盐变化响应研究[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(12): 1693–1699
LIU H T, TAN L M, YU S H, et al. Response of water and salt movement to subsurface pipe drainage system in saline-alkali coastal areas of Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(12): 1693–1699
- [14] MANAL H A, MOHAMED A Y, GEORGE M C, et al. DRAINMOD simulation of macropore flow at subsurface drained agricultural fields: model modification and field testing[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 242: 106401
- [15] 刘洪光, 白振涛, 李开明. 基于HYDRUS-2D模型的膜下滴灌暗管排水棉田土壤盐分变化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 130–141
LIU H G, BAI Z T, LI K M. Soil salinity changes in cotton field under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage using HYDRUS-2D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(2): 130–141
- [16] WISSMEIER L, BARRY D A. Simulation tool for variably saturated flow with comprehensive geochemical reactions in two- and three-dimensional domains[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(2): 210–218
- [17] 焦会青, 盛钰, 赵成义, 等. 基于COMSOL软件的绿洲盐渍化土壤中多离子耦合运移模型构建[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 100–107
JIAO H Q, SHENG Y, ZHAO C Y, et al. Modeling of multiple ions coupling transport for salinized soil in oasis based on COMSOL[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 100–107
- [18] 仵锋锋, 曹平, 万琳辉. 相似理论及其在模拟试验中的应用[J]. 采矿技术, 2007(4): 64–65, 78
WU F F, CAO P, WAN L H. Similarity theory and its application in simulation experiments[J]. *Mining Technology*, 2007(4): 64–65, 78
- [19] 吴持恭. 水力学(下)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 327
WU C G. *Hydraulics (B)*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 327
- [20] 沈荣开, 王修贵, 张瑜芳, 等. 涝渍排水控制指标的初步研究[J]. 水利学报, 1999(3): 72–75
SHEN R K, WANG X G, ZHANG Y F, et al. Preliminary study on the control indicators of waterlogging drainage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999(3): 72–75
- [21] 翁通. 盐渍土毛细水作用及击实特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2006
WENG T. Research on capillary water action and compaction characteristics of saline soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006
- [22] 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
- [23] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids in soil through porous media[J]. *Physic*, 1931, 1: 318–333
- [24] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998
LI Y Z, LI B G. *Soil Solute Transport*[M]. Beijing: Science Press, 1998
- [25] 石元春, 李韵珠, 陆锦文. 盐渍土的水盐运动[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1986
SHI Y C, LI Y Z, LU J W. *The Movement of Salt and Water in Salinized Soil*[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1986
- [26] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America*, 1980, 44(5): 892–898
- [27] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models part I: a discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282–290
- [28] 于淑会, 刘金铜, 刘慧涛, 等. 暗管控制排水技术在近滨海盐碱地治理中的应用研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3): 42–46
YU S H, LIU J T, LIU H T, et al. Application of subsurface controlled drainage for reclaiming saline-alkali soils in coastal region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(3): 42–46
- [29] 孙雪雁, 李品芳, 李保国, 等. 基于COMSOL的低渗性盐土内设砂柱洗盐定量模拟[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 111–117, 124
SUN X Y, LI P F, LI B G, et al. Simulation of salt leaching in coastal saline soil denoting sand columns based on COMSOL[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 111–117, 124
- [30] ZHANG J X, WERNER A D, LU C H. Improving salt leaching efficiency of subsurface drainage systems using low-permeability surface mulch[J]. *Advances in Water Resources*, 2022, 162: 104147