

密度驱动下盐分垂向迁移规律模拟研究^①

刘 娜¹, 黄权中^{2*}, 田德龙¹, 郑和祥¹, 王 军¹, 黄冠华², 张 渊³, 张晓庄³

(1 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 3 鄂托克前旗农牧和水利局, 内蒙古鄂尔多斯 016299)

摘 要: 本文以一维饱和土柱试验为基础, 利用试验数据对 SUTRA 模型进行率定和验证, 并对密度驱动下不同浓度、不同土壤质地、不同隔水底板深度盐分垂向迁移过程进行长序列模拟。模拟结果证明盐分垂向迁移受密度影响显著, 石英砂柱顶部输入 100 g/L 盐溶液, 采用传统的纯扩散模拟盐分垂向迁移速度慢, 历时 1 d 后仅向下迁移 10 cm, 与实测结果不一致; 而考虑密度驱动模拟盐分垂向迁移速度显著加快, 历时 9 h 即可迁移至底部并逐渐聚集, 与实测情形较为一致。土壤质地对盐分密度驱动迁移的速度影响显著, 粉砂壤土中盐分向下迁移的速度显著慢于石英砂。同时, 随迁移过程演进, 土柱上层含盐量逐渐减小而下层含盐量不断增大, 并最终趋于均匀分布, 形成地下水的高盐度带。隔水底板深度为 90、150、200 cm 时趋于均匀分布的时间分别需 10、20、30 a, 表明隔水底板越深则趋于均匀分布的时间越长。该研究在一定程度上揭示了密度驱动下灌区土壤盐渍化长期平衡规律和演变规律, 可为灌区水土资源可持续利用和土壤盐渍化有效控制提供新思路 and 理论依据。

关键词: SUTRA 模型; 密度驱动; 盐分迁移; 盐分平衡; 对流-弥散

中图分类号: S-3; S19 **文献标志码:** A

Simulation Study on Vertical Migration Law of Salinity Under Density-driven Conditions

LIU Na¹, HUANG Quanzhong^{2*}, TIAN Delong¹, ZHENG Hexiang¹, WANG Jun¹, HUANG Guanhua², ZHANG Yuan³, ZHANG Xiaozhuang³

(1 Institute of Pastoral Hydraulic Research, MWR, Hohhot 010020, China; 2 College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3 Etoke Qianqi Agricultural and Animal Husbandry Bureau and Water Conservancy Bureau, Ordos, Inner Mongolia 016299, China)

Abstract: Based on a one-dimensional saturated soil column experiment, this paper used the experimental data to calibrate and validate the SUTRA model, and conducted long-term sequence simulations of the vertical migration process of salt under density-driven conditions under different concentrations, different soil textures, and different depths of impermeable bottom plates. The simulation results proved that the vertical migration of salt is significantly affected by density: when 100 g/L salt solution was input at the top of the quartz sand column, the traditional pure diffusion simulation of salt vertical migration was slow, and only 10 cm downward migration occurred after 1 day, which was inconsistent with the measured results; while considering density-driven simulation, the speed of salt vertical migration was significantly accelerated, and it could reach the bottom and gradually accumulate within 9 hours, which was more consistent with the measured situation. Soil texture had a significant impact on the speed of salt density-driven migration. The downward migration speed of salt in silty loam soil was significantly slower than that in quartz sand. At the same time, as the migration process progressed, the salt content gradually decreased in the upper layer while continuously increased in the lower layer of the soil column, and eventually tended to be uniformly distributed, forming a high-salt zone of groundwater. When the depth of the impermeable bottom plate was 90, 150, and 200 cm, the time required for the distribution to become uniform gradually decreased to 10, 20, and 30 years, respectively, indicating that the deeper the impermeable bottom plate, the longer the time required for the distribution to become uniform. This

①基金项目: 中国水科院基本科研业务费项目(MKGP2024JK011)和国家自然科学基金项目(U2243217, U2443210)资助。

* 通信作者(huangqzh@cau.edu.cn)

作者简介: 刘娜(1997—), 女, 内蒙古阿拉善人, 硕士, 助理工程师, 主要从事灌区土壤及深层地下水盐分迁移机理研究。E-mail: 986859726@qq.com

research to some extent reveals the long-term balance and evolution laws of soil salinization in irrigation areas under density-driven conditions, and can provide new ideas and theoretical basis for the sustainable utilization of water and soil resources and the effective control of soil salinization in irrigation areas.

Key words: SUTRA model; Density driven; Salt migration; Salt balance; Convection-dispersion

密度流也称为异重流,是由重力和密度差引起的静压作用,使高密度流体逐渐侵入低密度流体之下。Forel^[1]于 1892 年首次发现异重流现象,携带泥沙的河流在注入清澈湖水时不与湖水混合,而是潜入湖水之下。Lowe^[2]提出,浊流是异重流的一种,按浓度不同分为低密度浊流(浓度<6%)与高密度浊流(浓度>20%~30%)。Mulder 等^[3]强调,异重是指高于一定的密度门槛,而不是高密度。Jiao 和 Hötzel^[4]指出,密度差为 3%~4% 时就会发生海水入侵淡水层。有研究表明,当侵入流体密度大于周围流体密度时,其不稳定性 and 指流现象可能导致溶质运移比纯扩散情形下更快,入渗速度可达 1 m/d^[5-6]。Schincariol 和 Schwartz^[7]发现,密度差仅为 0.000 8 g/cm³ 就可能导致不稳定移动。Geng 等^[8]发现,密度驱动的影响会产生复杂的瞬态速度场,并增强多孔介质中的混合过程。

盐渍化灌区中也会存在密度差,土壤包气带、饱和带、潜水区水分和盐分处于动态变化的过程。盐随水来,盐随水去,蒸发会引起盐分在土壤表层的积累,而降水和灌溉则会促进耕层土壤盐分向下运移^[9-11]。研究表明,盐分在作物根区累积后引起土壤溶液矿化度增高,可高达 30 g/L,往往远高于地下水矿化度^[12],这就为密度驱动提供了先决条件。盐碱地主要分布在我国的北方和西北地区,尤其是在干旱、半干旱的区域,盐渍化严重制约了农田的生产和生态功能^[13-14]。河套地区是我国盐渍化土壤集中分布区之一,以河套灌区为例,据统计,灌区每年积盐 120 万~150 万 t。但近年来节水改造后,灌区土壤盐渍化程度减轻,表聚作用弱化,灌区仍处于积盐状态,但积盐量呈下降态势,且土壤环境有所改善^[15-18]。那么,滞留在灌区的盐分归趋如何?基于密度流理论,考虑灌区内的大量盐分可能在密度驱动和浓度弥散两种不同的融合机制下向深层地下水迁移。另外,河套灌区黏土层呈交错分布,有研究发现障碍物/隔水底板的存在会阻碍密度流的进程^[19]。因此,最终会形成潜水区中特点各异的迁移规律和分布特征。

数值模拟是国内外学者研究变密度流问题常用的方法。对于流体密度变化引起的流动异质性进而导致的非 Fick 现象^[20-21],如出现早到达或长拖尾分布等不规则现象,传统的水流方程难以描述。而变密度

流方程则考虑了由溶液浓度和温度变化引起的变密度流,能够更真实地反映多孔介质中流场的分布特征^[22]。Oldenburg 和 Pruess^[23]模拟二维剖面中的盐分迁移过程,发现初始条件与分子扩散系数是影响变密度水流运动的敏感参数。数值模型是了解盐分等溶质在多孔介质中流动和扩散过程的关键工具,包括 SEAWAT、SUTRA 和 MODFLOW 等模型。SUTRA 模型在研究变密度地下水流运动和溶质运移中应用较为广泛,并且具有可以模拟饱和-非饱和带的优势。Etsias 等^[24]利用 SUTRA 模型模拟裂缝性无承压沿海含水层的盐水入侵过程;Mehta 等^[25]运用 SUTRA 模型对美国南部高原盐碱化进行研究。还有许多学者对 SUTRA 模型进行改进,薛显武等^[26]将 SUTRA 模型与 ArcGIS 有机结合,实现 SUTRA 模型的可视化;辛沛等^[27]改进 SUTRA 模型,模拟复杂盐沼系统孔隙水流动及溶质运移。

在节水灌溉背景下,河套灌区土壤盐渍化水平有降低趋势,盐分归趋是其中的关键,研究密度驱动下盐分垂向运移分布规律对于掌握灌区土壤盐渍化长期平衡规律和演变规律至关重要。目前,针对干旱灌区咸水密度驱动的研究还不多见,对于灌区表层盐分经降雨和蒸发淋洗形成的密度驱动效应有所忽略,并对潜水区不同浓度、不同隔水底板埋深的密度驱动融合过程缺乏理论分析。SUTRA 模型专门针对变密度水流-溶质耦合问题,适用于灌区高盐淋溶液的垂向迁移模拟,同时能够捕捉盐指对流和重力不稳定性,这是传统模型无法实现的。因此,本文在试验基础上结合 SUTRA 模型模拟,研究不同密度差水平和不同埋深隔水底板下的盐分垂向迁移机制及长序列演变规律,为灌区盐渍化防治提供新的理论支撑和技术路径。

1 材料与方法

1.1 试验布设

1.1.1 不同密度驱动下盐分迁移过程试验 试验装置如图 1 所示,采用高 115 cm、内径 11 cm 的有机玻璃柱,自下而上进行分层填装,每隔 10 cm 埋设土壤溶液提取器。试验介质为 0.5~1.0 mm 粒径的石英砂,填砂高度 100 cm。填装完毕后,采用去离

子水自下而上对砂柱进行完全饱和,最后从顶层灌入 5 cm 盐溶液,浓度分别为 150、100、60、40、12、6 g/L^[28]。

1.1.2 不同隔水底板深度下盐分迁移过程试验 试验装置预先埋入地下,由外柱和内柱两部分构成,如图 2 所示。外柱为直径 50 cm、高 200 cm,底部用法兰片密封的 PVC 柱子;内柱为直径 9 cm、高 175 cm

的 PVC 柱子,且分别于管深 65、125、175 cm 处通过对丝切割焊接人工设置隔水底板,每种隔水底板深度设置 3 组重复。填装介质为粉砂壤土,填装过程中同样采用去离子水进行饱和,并于不同深度处理设土壤溶液提取器。表层 0~25 cm 范围内灌入浓度为 100 g/L 的盐溶液至饱和,设置 3 种隔水底板深度: 90、150、200 cm,试验周期为 165 d。

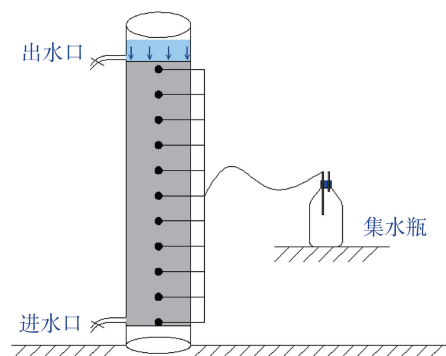


图 1 室内砂柱试验装置示意图
Fig. 1 Indoor sand column test device diagram



图 2 饱和土柱试验装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of saturated soil column test device

1.2 SUTRA 模型

SUTRA 模型 (Saturated-Unsaturated Variable-Density Ground-Water Flow with Solute or Energy Transport) 用于模拟饱和-非饱和带变密度地下水流动和溶质或能量的运移,可以模拟稳态或非稳态过程。地下水可以是饱和的,也可能是部分或完全非饱和的;流体密度可以是常数,也可以随浓度或温度变化而变化。

1.2.1 基本方程 SUTRA 模型采用 2D 或 3D 有限元和有限差分方法来近似描述两个控制方程:①与流体密度有关的饱和或非饱和地下水流动;②溶质或能量在地下水中的运移。

1) 水分运动方程:

$$\left(S_w \rho S_{op} + \varepsilon \rho \frac{\partial S_w}{\partial P} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \left(\varepsilon S_w \frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\frac{k k_r \rho}{\mu} \right) \cdot (\nabla P - \rho g) \right] = Q_p \quad (1)$$

式中: S_w 为饱和度, ≤ 1.0 ; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; S_{op} 为压缩性, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$; ε 为孔隙度; P 为流体压力, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$; C 为流体溶质质量分数, kg/kg ; k 为饱和导水率, cm/d ; k_r 为相对导水率, cm/d ; μ 为黏滞系数,一般取 $1 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; g 为重力加速度, m/s^2 ; Q_p 为源汇项流体质量, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$, 本研究中无流体源汇。

2) 溶质运移方程:

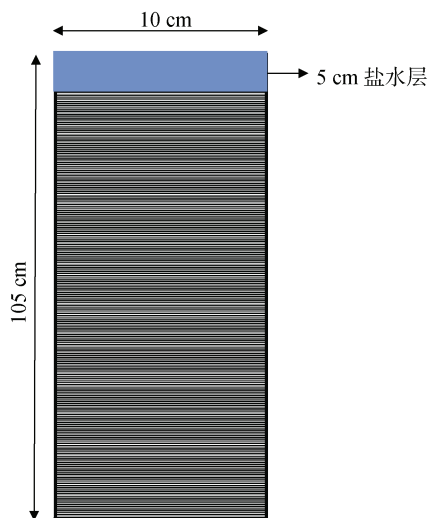
$$\frac{\partial (\varepsilon S_w \rho C)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\varepsilon S_w \rho v C) + \nabla \cdot [\varepsilon S_w \rho D_m \cdot \nabla C] + Q_p C^* \quad (2)$$

$$v = - \left(\frac{k k_r}{\varepsilon S_w \mu} \right) \cdot (\nabla P - \rho g) \quad (3)$$

式中: v 为平均孔隙流速, m/s ; D_m 为弥散系数, m^2/s ; C^* 为源汇项溶质浓度, kg/kg , 本研究中无溶质源汇。

1.2.2 模型建立 1) 不同密度驱动下的盐分迁移

情形。不同密度驱动下的盐分迁移模拟研究是以室内砂柱试验为基础,装置如图 1 所示,顶层 5 cm 灌入盐溶液浓度为 100 g/L,其余深度处浓度为 0。模型概化采用面积等效法,将直径 11 cm、灌水后总高为 105 cm 的砂柱等价转换为 10 cm×9.5 cm×105 cm 的长方体,面积相差 0.016%,在合理范围内。模拟周期为试验实际进行的 15 d。模型概化示意图见图 3。



(图中 5 cm 盐水层是纯盐水层,没有土层)

图 3 砂柱试验模型概化示意图

Fig. 3 Sand column test model generalization diagram

同时,对比纯扩散与考虑密度驱动下的盐分迁移规律。密度驱动下的盐分迁移过程运用 SUTRA 模型进行模拟,纯扩散情形下的盐分迁移过程运用 HYDRUS-1D 模型进行模拟,且孔隙度、渗透系数和

弥散度等基本参数取值与 SUTRA 模型相同;所不同的是,HYDRUS-1D 没有考虑密度驱动,其密度不随浓度变化,同时压力以水头形式表示,且压力水头不随浓度变化,因此初始节点压力不需要进行计算,利用水头 h 表示即可。

2) 不同隔水底板深度下的盐分迁移情形。研究不同隔水底板深度下的盐分迁移规律,是以饱和土柱试验(填装介质为粉砂壤土)为基础进行模拟。选内柱为模拟区域,假设外柱表层 0~25 cm 灌入的盐分均匀分配到每个内柱中,即内柱加高 25 cm,并且内柱顶层 25 cm 为 100 g/L 的饱和土土层,模拟周期为试验实际进行的 165 d。同样利用面积等效法,将直径为 9 cm,高分别为 90、150、200 cm 的圆柱等价转换为 9 cm×7 cm×90 cm、9 cm×7 cm×150 cm、9 cm×7 cm×200 cm 的长方体,面积相差 0.92%,在合理范围内。模型概化示意图见图 4。

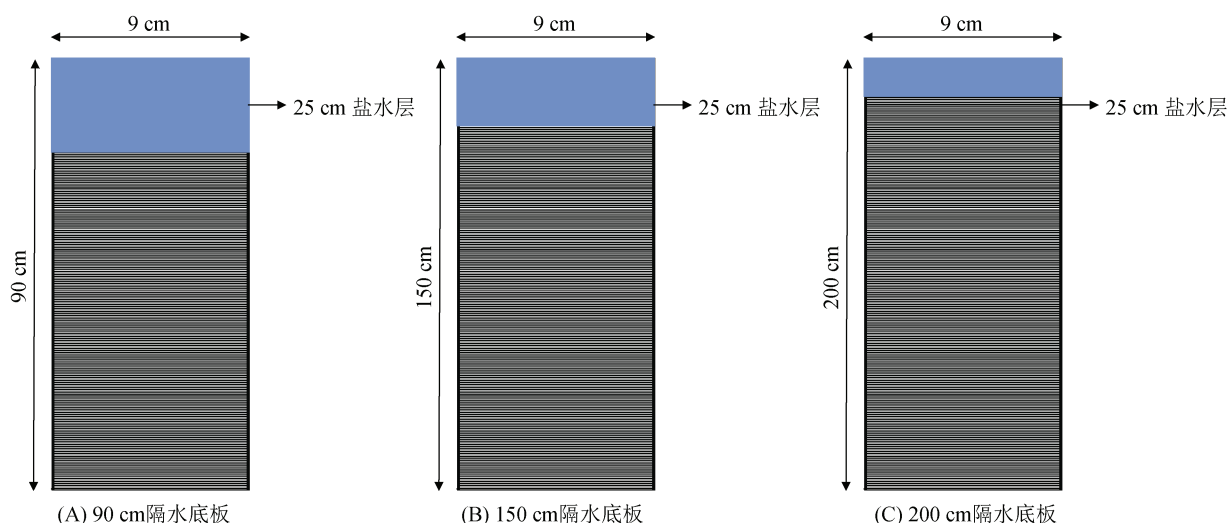
1.2.3 定解条件 1) 初始条件。以整个封闭的试验土柱为模拟浓度场,顶层灌入的盐溶液溶质质量分数记为 C_s ,对应的流体密度记为 ρ ;其余深度处的溶质质量分数 $C_0=0$,对应的流体密度记为 ρ_w 。

$$C_s = \frac{c}{\rho} \quad (4)$$

$$\rho = \rho_w + \frac{\partial \rho}{\partial C}(C_s - C_0) \quad (5)$$

$$P = \rho gh \quad (6)$$

式中: ρ_w 为纯水密度,取 1 000 kg/m³; $\frac{\partial \rho}{\partial C}$ 为流体密度随浓度变化的系数,一般在常温下取 700 kg/m³; P



(图中 25 cm 盐水层是灌入盐溶液的饱和土土层,不是纯盐水层)

图 4 土柱试验模型概化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of soil column test model

为流体压力, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; h 为水头, m 。

2) 边界条件。由于整个试验是在封闭的土柱中进行, 与外界没有流体以及溶质的交换, 因此模拟区域的上下左右边界均设置为水分和溶质零通量。

1.2.4 模型评价 模型模拟值和实测值的拟合程度采用决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、平均相对误差 MRE 以及模型效率系数 NSE 进行检验, 具体的表达式如下:

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(n_i - \bar{n})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - n_i)^2} \quad (8)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|C_i - n_i|}{C_i} \quad (9)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - n_i)^2}{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2} \quad (10)$$

式中: i 为第 i 个观测样本; N 为观测样本总数; C_i 为第 i 个观测样本浓度; $\bar{C}$ 为所有观测样本浓度的平均值; n_i 为第 i 个模拟浓度; $\bar{n}$ 为所有模拟浓度的平均值。

2 模型率定、验证与模拟

2.1 SUTRA 模型率定验证

模型参数的准确性与合理性决定了模型模拟结果的准确度及可信度。本研究中模拟参数的确定是依据相关参考文献, 对数据资料进行推求, 并结合试验数据率定而得。通过查阅文献和调节参数发现孔隙度、渗透率以及弥散度为模型敏感参数。本研究中石英砂、粉砂壤土 2 种不同介质的模型参数如表 1、表 2 所示。

表 1 介质为石英砂的模型参数
Table 1 Model parameters with quartz sand as medium

参数	符号	单位	数值
盐水层孔隙度	θ_w	—	1.0
石英砂孔隙度	θ_s	—	0.33
渗透率	k	m^2	5.1×10^{-10}
纵向弥散度	D_h	m	0.02
分子扩散系数	D_s	m^2/s	4.05×10^{-9}

图 5 为砂柱顶层输入不同浓度盐溶液条件下第 15 天后盐分迁移的模拟值与实测值对比。从模拟结

表 2 介质为粉砂壤土的模型参数
Table 2 Model parameters with silty-loam as medium

参数	符号	单位	值
孔隙度	θ	—	0.42
渗透率	k	m^2	1.02×10^{-12}
纵向弥散度	D_h	m	0.1
分子扩散系数	D_s	m^2/s	1.25×10^{-9}

果可以看出, 砂柱顶部输入不同浓度的盐溶液后, 盐分均受密度驱动影响迅速向下迁移, 仅 15 d 后盐分就聚集在底部隔水底板处, 盐分含量始终呈随深度增大而不断增大的趋势, 与试验结果相一致; 并且模拟值与实测值有着较好的拟合效果, 具体的模拟精度验证见表 3。

由表 3 可以看出, 砂柱顶层输入盐溶液浓度为 6、12、40、60、100、150 g/L 的决定系数 R^2 均接近于 1, 均方根误差介于 0.086~2.106 g/L, 平均相对误差 $\text{MRE} < 10\%$, 模型效率系数 $\text{NSE} > 0.8$ 。综合以上几项模拟精度的评价指标, 可以认为模型达到率定要求, 即模拟值与实测值之间具有较好的拟合效果。

2.2 密度驱动下盐分迁移动态过程模拟

图 6 为纯扩散情形和密度驱动下剖面含盐量随时间的动态变化, 其量化分析见表 4。可以发现, 密度驱动下盐分迁移变化较纯扩散情形明显加快(图 6A, 1 d 内)。顶层输入浓度为 100 g/L 的盐溶液后, 盐分在密度驱动作用下迅速向下迁移, 9 h 后, 剖面含盐量呈现出随深度增大而增大的现象, 盐分逐渐向底部聚集, 并在 10 h 后底部含盐量达到最大值, 随后又开始逐渐减小。原因可能是聚集在底部的盐分产生向上的分子扩散作用而导致含量减小。考虑密度驱动下, 顶部盐分含量 1 d 内减小了 91.40%; 而纯扩散模拟盐分历时 1 d 后仅向下迁移 10 cm 左右, 顶部含盐量 1 d 内仅减小 41.16%(表 4)。图 6B 为 15 d 内的动态变化过程, 结合表 4 可以看出, 15 d 后, 纯扩散情形下盐分向下迁移 25 cm 左右, 而密度驱动下则是聚集在底部的盐分含量缓慢减小, 1~15 d 内底部盐分含量减小了 2.11 g/L。

2.3 不同隔水底板深度下的盐分迁移模拟

图 7 是介质为粉砂壤土, 不同隔水底板深度下盐分含量的模拟值与实测值对比。可以看出, 模拟结果与试验所得规律基本一致, 盐分含量均随深度增大而不断减小, 盐分向下迁移的速度较石英砂介质中明显慢, 165 d 后盐分才基本迁移至 60 cm 处左右, 未到达隔水底板处。并且对比发现, 隔水底板深度越浅, 相同位置处盐分含量越高。

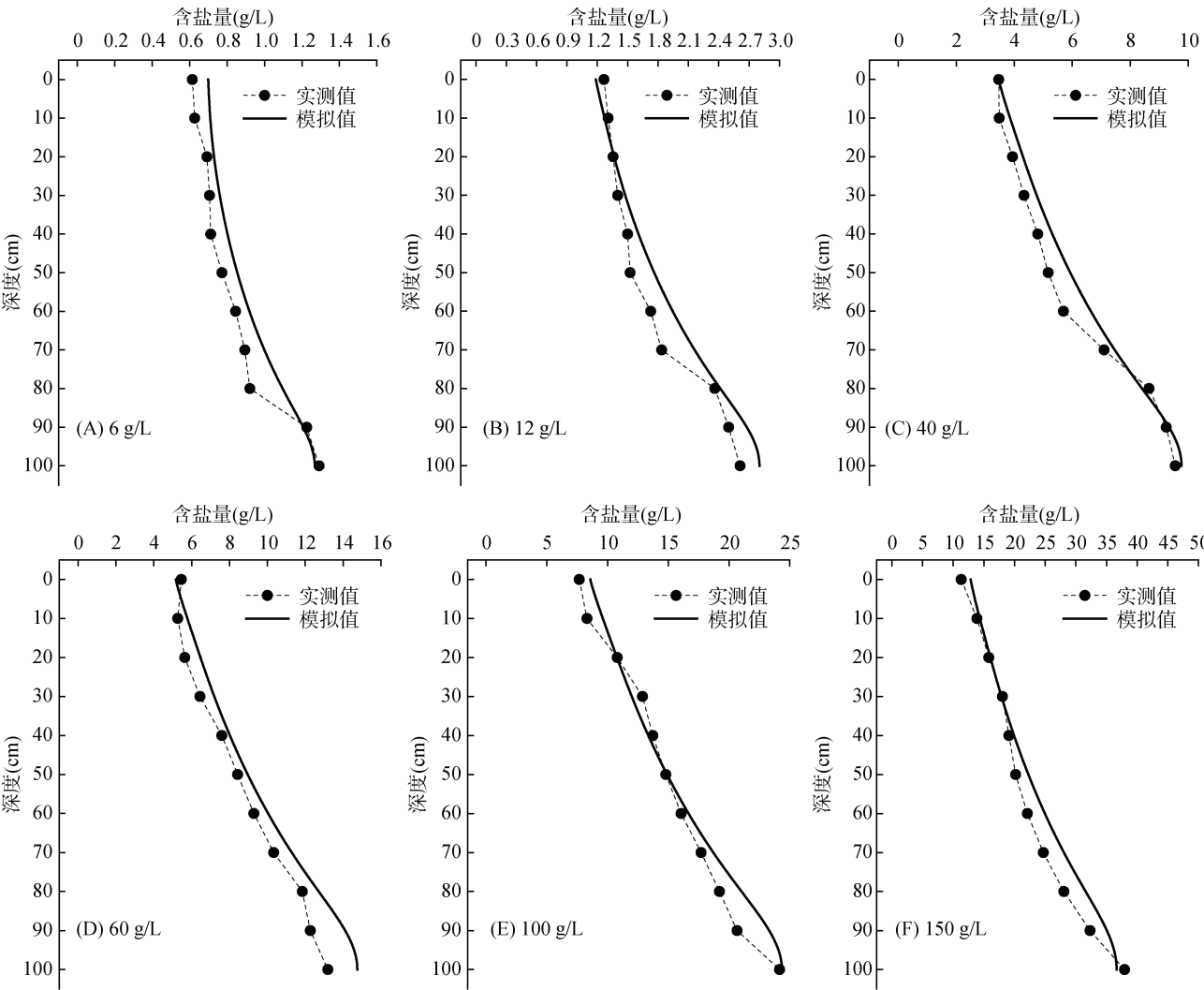


图 5 不同盐溶液浓度条件下第 15 天盐分迁移模拟值与实测值
Fig. 5 Simulated and measured salt contents on the 15th day under different salt solution concentrations

表 3 模型模拟精度验证
Table 3 Verification of model simulation accuracy

砂柱顶层盐溶液浓度(g/L)	决定系数 R^2	均方根误差 RMSE(g/L)	平均相对误差 MRE(%)	模型效率系数 NSE
6	0.947	0.086	9.64	0.844
12	0.961	0.167	7.73	0.877
40	0.981	0.470	7.55	0.954
60	0.989	0.957	9.5	0.880
100	0.968	1.175	6.41	0.943
150	0.964	2.106	7.74	0.925

由于 165 d 后盐分还未迁移至隔水底板处,且不同深度隔水底板的盐分迁移也存在差异,因此,继续进行更长周期的模拟。图 8 为不同深度隔水底板 30 a 内的剖面盐分变化。可以看出,模拟周期一定时,隔水底板较浅的相同位置处盐分含量更大。另外,随迁移过程演进,土柱上层含盐量呈现出随时间增加逐渐

减小的趋势,下层含盐量不断增大,并最终趋于均匀分布,形成地下水高盐区。剖面盐分量化分析见表 5,由表可知,隔水底板越浅,顶部与底部含盐量差值越小,其最终趋于均匀分布的时间也越短。90 cm 隔水底板的 10 a 后剖面含盐量基本呈均匀分布,顶部与底部相对含盐量差仅为 1.75%。此时,150 cm 和 200 cm

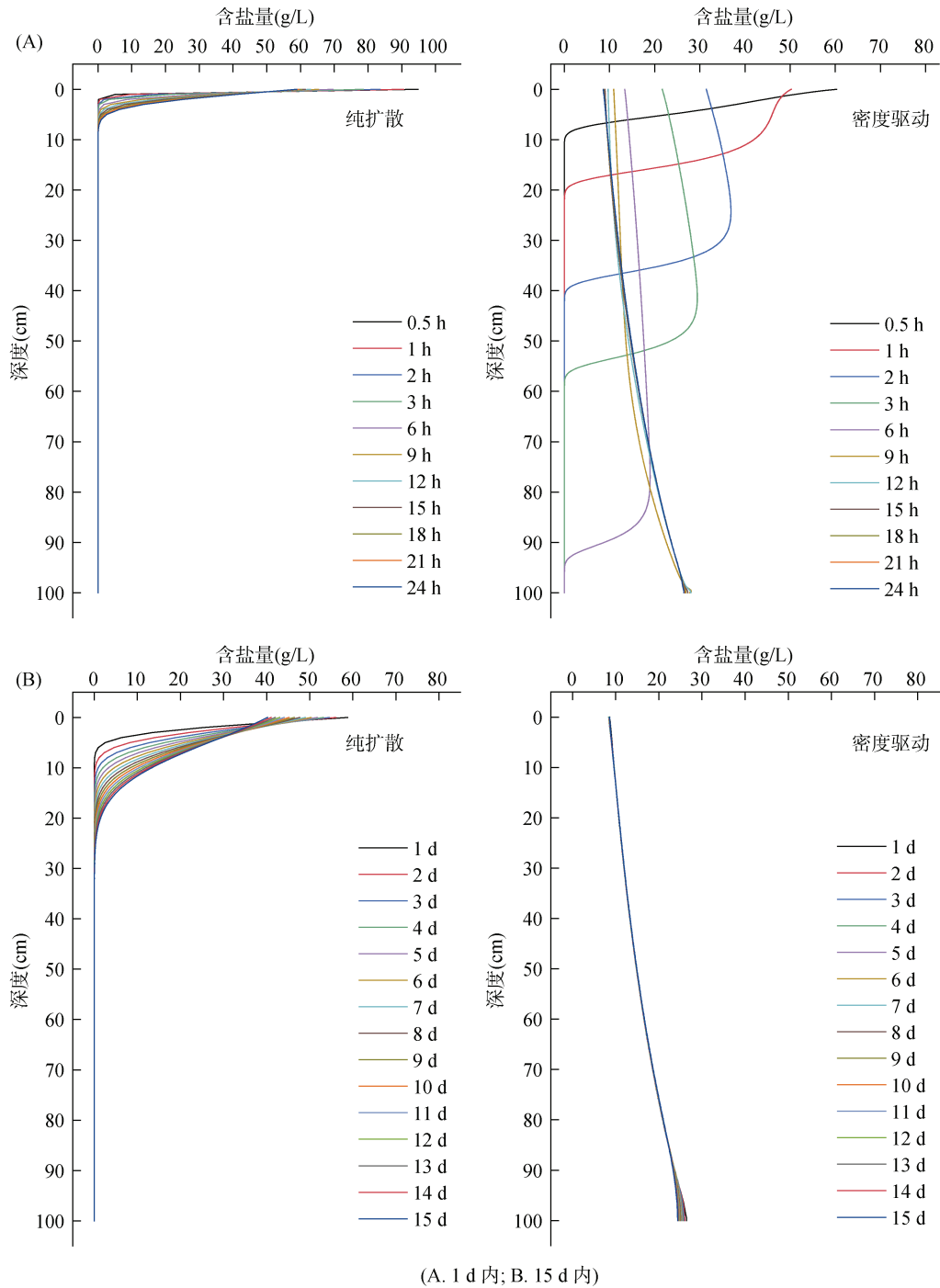
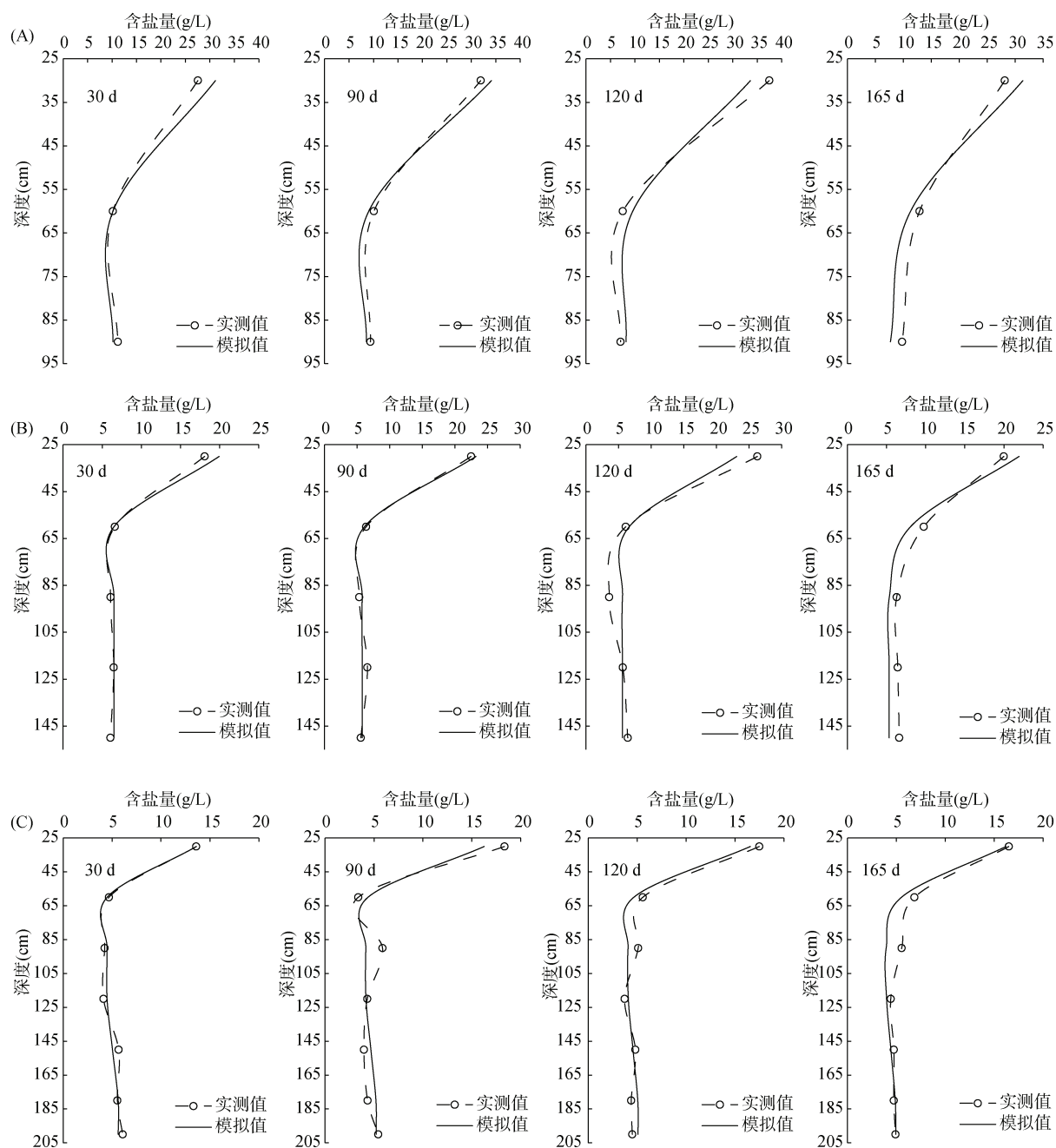


图 6 剖面含盐量随时间的动态变化
Fig. 6 Dynamic change of profile salt content over time

表 4 纯扩散与密度驱动下的剖面盐分量化分析(石英砂)

Table 4 Quantitative analysis of profile salinity driven by pure diffusion and density (Quartz sand)

深度(cm)	指标	纯扩散			考虑密度驱动		
		0 h	1 d	15 d	0 h	1 d	15 d
0	含盐量 (g/L)	100	58.84	40.17	100	8.60	8.59
	减小百分比(%)	—	41.16	31.73	—	91.40	0.12
100	含盐量(g/L)	0	0	1.06×10^{-19}	0	26.47	24.36
	增大值(g/L)	—	0	1.06×10^{-19}	—	26.47	-2.11



(A. 90 cm 隔水底板埋深; B. 150 cm 隔水底板埋深; C. 200 cm 隔水底板埋深)

图 7 不同深度隔水底板盐分含量模拟值与实测值对比

Fig. 7 Simulated and measured salt contents at different depths of water baffle floor

隔水底板的剖面含盐量还未达到均匀分布,顶部与底部相对含盐量差分别为 39.62%、68.55%。最终,150 cm 和 200 cm 隔水底板的剖面含盐量分别于 20 a 和 30 a 后基本呈均匀分布。

3 讨论

3.1 纯扩散情形与考虑密度驱动情形下的盐分迁移规律差异

密度流问题是国内外研究海水入侵、咸水运移等

方面的热点问题,密度差是其形成的关键,诸多学者研究指出,流体密度的变化可能是改变地下水流动和溶质运移过程的重要因素^[5]。海水入侵或潜水区上层淡水开采情形下咸淡水融合主要以密度驱动的侧向运动为主,迁移融合速度相对较慢,而强蒸发条件下潜水区上层咸水在密度驱动下则以垂向对流为主^[21,29],垂向的密度梯度会引起流体的掺混^[30-31]。本研究在土柱试验基础上,结合数值模拟,对密度驱动下盐分垂向迁移过程开展了长序列的模拟。通过调节参数发现,孔

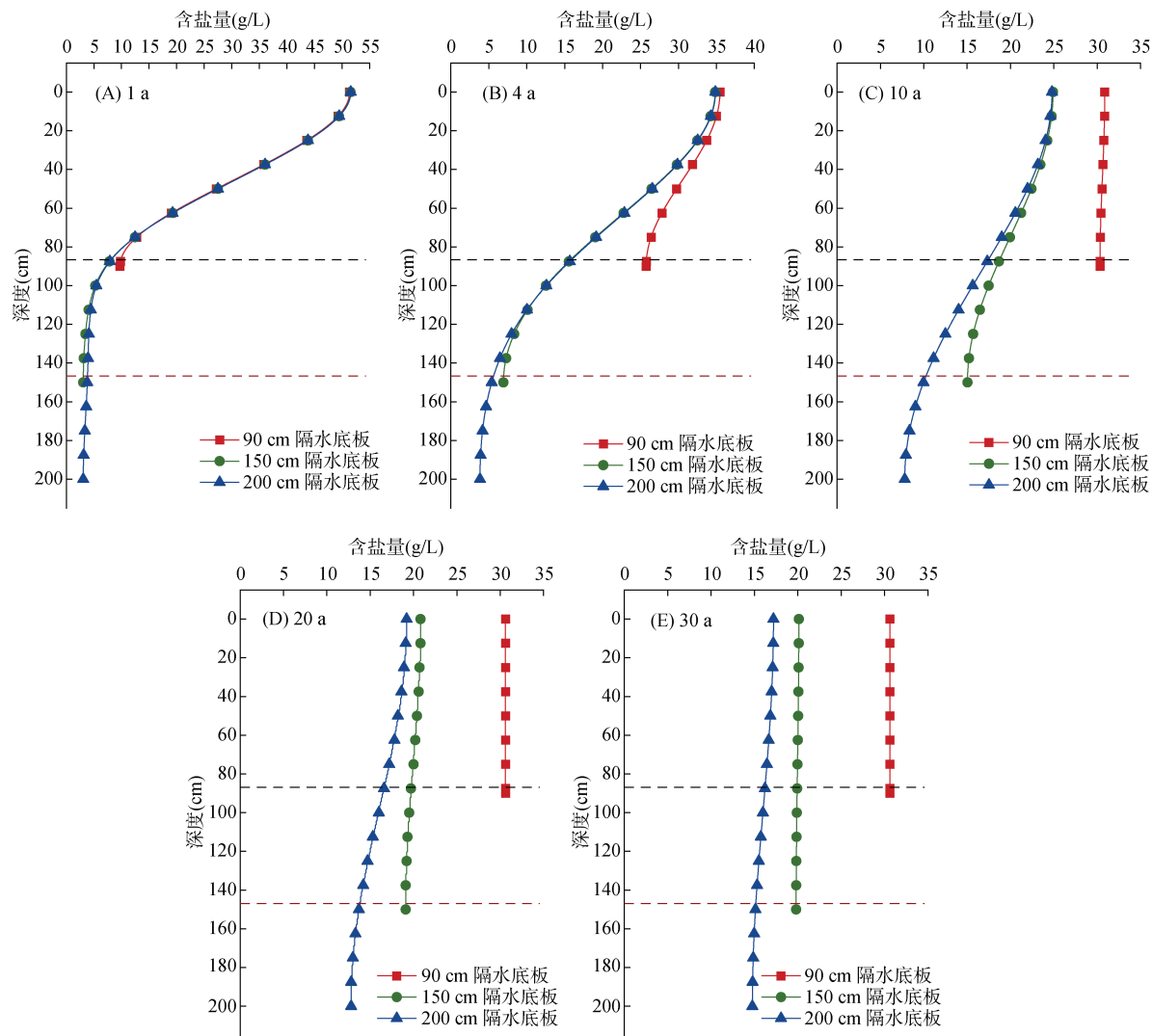


图 8 不同深度隔水底板模拟 30 a 内剖面盐分分布变化

Fig. 8 Changes of profile salt distributions in 30 years under different depths of water-proof floor

表 5 不同模拟周期剖面含盐量的量化分析

Table 5 Quantitative analysis of salt contents in different simulation periods

模拟周期(a)	隔水底板深度(cm)	顶部含盐量(g/L)	底部含盐量(g/L)	含盐量差值(g/L)	相对含盐量差(%)
1	90	51.37	9.73	41.64	81.06
	150	51.54	3.06	48.48	94.06
	200	51.59	3.06	48.53	94.07
4	90	35.46	25.74	9.72	27.41
	150	34.83	6.94	27.89	80.07
	200	34.87	3.85	31.02	88.96
10	90	30.87	30.33	0.54	1.75
	150	24.91	15.04	9.87	39.62
	200	24.80	7.80	17.00	68.55
20	90	30.60	30.60	0	0
	150	20.84	19.09	1.75	8.40
	200	19.19	12.77	6.42	33.45
30	90	30.60	30.60	0	0
	150	20.12	19.81	0.31	1.54
	200	17.19	14.76	2.43	14.14

注：表中相对含盐量差是指顶部与底部含盐量的差值除以顶部含盐量。

隙度、渗透率以及弥散度为本模型的敏感参数。从模拟结果可以看出,模拟值与实测值有较好的拟合效果, R^2 均接近于 1,均方根误差介于 0.086~2.106 g/L 范围内,平均相对误差 $MRE < 10\%$,模型效率系数 $NSE > 0.8$,综合评价 SUTRA 模型模拟结果具有较好的准确度及可信度。

有研究表明,当侵入流体密度大于周围流体密度时,其重力不稳定性 and 指流现象可能导致溶质运移比纯扩散情形下更快,范围更广^[5]。Simmons 等^[32]研究指出,密度驱动使盐分运移效率提升约 10 倍~50 倍。本研究发现,密度驱动下盐分迁移变化较纯扩散情形明显加快。质地为石英砂时,顶层输入浓度为 100 g/L 的盐溶液后,仅 9 h 盐分就在底部隔水底板处积聚,随后积聚在底部的盐分又由于向上的分子扩散作用而逐渐减少。而纯扩散情形下,1 d 内盐分仅向下迁移 10 cm 左右,15 d 后盐分也仅向下迁移 25 cm 左右。并且由图 6 可以看出,密度驱动下剖面盐分含量逐渐表现为随深度增大而不断增大,而纯扩散情形下始终是随深度增大盐分含量不断减小。综上表明,纯扩散情形下盐分基本聚集于潜水层表面,与实际情况不同,而密度驱动下模拟结果与实际相近,具有较高的可信度。研究结果证实了密度驱动效应是灌区盐分垂向重分布的核心作用机制,修正了传统以分子扩散理论为基础的盐渍化防治体系。

3.2 密度驱动下不同情境的盐分迁移规律

由于强烈的蒸发作用,河套灌区大量盐分积聚在表层土壤,而经过降雨和灌溉淋洗后又形成高浓度盐溶液,即与深层土壤及地下水存在密度梯度,进而会促使表层盐分向深层迁移。因此,从表观上看,灌区的盐渍化程度是降低了,但是盐分归趋如何? 本研究表明,砂柱顶部输入不同浓度的盐溶液后,盐分均在密度驱动作用下迅速向下迁移,仅 15 d 后盐分就聚集在底部隔水底板处。与 MacFarlane 等^[33]发现垃圾填埋场下含水层底部附近的盐分浓度最高的现象类似,主要是由密度差异引起的羽流垂向运动导致的。另外,本研究发现,土壤质地不同,密度驱动下盐分迁移分布规律存在较大差异。介质为石英砂时,历时 9 h 即可迁移至 100 cm 隔水底板处并逐渐聚集;而介质为粉砂壤土时,盐分向下迁移的速度明显变慢,165 d 后盐分才基本迁移至 60 cm 处左右。并且,通过进一步长序列的模拟发现,不同隔水底板深度也会影响盐分的迁移分布,这与 Huang 等^[19]的研究一致。同时,隔水底板深度越浅,相同位置处盐分含量越高,且在封闭的模拟浓度场中,隔水底板越浅,剖

面含盐量最终趋于均匀分布的时间也越短,90、150、200 cm 隔水底板深度的剖面含盐量分别于 10、20、30 a 后基本呈均匀分布,形成地下水的高盐度带。这与 Evans 和 Wilson^[34]以及 Xin 等^[35]的研究结论类似,当潜水区密度驱动的盐分运动为土壤表层积盐的主要消散途径时,若潜水区弱透水层埋深较浅,就容易在弱透水层上方形成咸水区。河套灌区咸水呈插花分布也与这一理论相吻合,长此以往会导致深层地下水不可逆矿化。研究揭示了密度驱动下灌区盐分的垂向迁移规律及其长期演变趋势,河套灌区的盐分平衡并非“灌溉=排盐”,而是一个受密度驱动调控的复杂长期过程。

4 结论

1) 盐分垂向迁移受密度驱动影响显著。石英砂柱顶层输入 100 g/L 的盐溶液后,盐分迅速向下迁移,10 h 后底部盐分含量达到最大值,随后由于向上的分子扩散作用,底部盐分含量开始逐渐减小。而纯扩散模拟盐分历时 1 d 后仅向下迁移 10 cm 左右。

2) 土壤质地对盐分密度驱动迁移的速度影响显著。质地为石英砂时,盐分在密度驱动作用下迅速向下迁移,质地为粉砂壤土时,165 d 后盐分才基本迁移至 60 cm 处左右。

3) 随时间推进,土壤剖面上层含盐量逐渐减小,下层含盐量不断增大,最终趋于均匀分布,形成地下水高盐区。90、150、200 cm 隔水底板深度的剖面含盐量分别于 10、20、30 a 后基本呈均匀分布。

参考文献:

- [1] Forel F A. Le Léman: Monographie limnologique[M]. Lausanne, Rouge F, 1892: 543.
- [2] Lowe D R. Sediment gravity flows: II depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. SEPM Journal of Sedimentary Research, 1982, 52: 279-297.
- [3] Mulder T, Syvitski J P M, Migeon S, et al. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits. A review[J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20 (6/7/8): 861-882.
- [4] Jiao C Y, Hötzl H. An experimental study of miscible displacements in porous media with variation of fluid density and viscosity[J]. Transport in Porous Media, 2004, 54(2): 125-144.
- [5] Buddemeier R W, Oberdorfer J A. Hydrogeology of enewetak atoll[M]//Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands. Amsterdam: Elsevier, 2004: 667-692.
- [6] Andersen M S, Nyvang V, Jakobsen R, et al. Geochemical processes and solute transport at the seawater/freshwater

- interface of a sandy aquifer[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(16): 3979–3994.
- [7] Schincariol R A, Schwartz F W. An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(10): 2317–2329.
- [8] Geng X L, Boufadel M C, Rajaram H, et al. Numerical study of solute transport in heterogeneous beach aquifers subjected to tides[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(3): e2019WR026430.
- [9] 朱伟, 杨劲松, 姚荣江, 等. 黄河三角洲中重度盐渍土棉田水盐运移规律研究[J]. *土壤*, 2021, 53(4): 817–825.
- [10] Xu X H, Xin P, Yu X Y. Interactions of macropores with tides, evaporation and rainfall and their effects on pore-water salinity in salt marshes[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130740.
- [11] 化骞寂, 冯绍元, 葛洲, 等. 河套灌区典型区周年内耕层土壤盐分时空变异研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 26–34.
- [12] Wu Y, Liu T X, Paredes P, et al. Water use by a groundwater dependent maize in a semi-arid region of Inner Mongolia: Evapotranspiration partitioning and capillary rise[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 152: 222–232.
- [13] 孙燕, 刘建旗, 吴建鑫, 等. 不同生物质材料对盐碱土理化特性及水盐运移特征的影响[J]. *土壤学报*, 2026, 63(3), DOI: 10.11766/trxb202409300379
- [14] 尚星玲, 裴志福, 兰天, 等. 秸秆还田下盐碱农田灌水前后盐分动态和有机碳变化耦合作用[J]. *土壤*, 2025, 57(3): 568–578.
- [15] 张璐, 杨劲松, 姚荣江, 等. 河套灌区盐渍土壤原核生物群落特征及其潜在功能研究[J]. *土壤学报*, 2024, 61(2): 527–538.
- [16] 史海滨, 杨树青, 李瑞平, 等. 内蒙古河套灌区水盐运动与盐渍化防治研究展望[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 1–17.
- [17] 王学全, 高前兆, 卢琦, 等. 内蒙古河套灌区水盐平衡与干排水脱盐分析[J]. *地理科学*, 2006, 26(4): 455–460.
- [18] 翟家齐, 张越, 何国华, 等. 内蒙古河套灌区节水对区域水盐平衡的影响分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(6): 24–29.
- [19] Huang S, Huang W R, Shen Q. Effects of bottom obstacle structure on density-induced flow[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 455(1): 012024.
- [20] Majid Hassanizadeh S, Leijnse A. A non-linear theory of high-concentration-gradient dispersion in porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 1995, 18(4): 203–215.
- [21] Post V E A, Houben G J. Density-driven vertical transport of saltwater through the freshwater lens on the island of Baltrum (Germany) following the 1962 storm flood[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 689–702.
- [22] 余期冲. 溶质运移拖尾分布影响因素的实验及数值模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [23] Oldenburg C M, Pruess K. Dispersive transport dynamics in a strongly coupled groundwater-brine flow system[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(2): 289–302.
- [24] Etsias G, Hamill G A, Campbell D, et al. Laboratory and numerical investigation of saline intrusion in fractured coastal aquifers[J]. *Advances in Water Resources*, 2021, 149: 103866.
- [25] Mehta S, Fryar A E, Brady R M, et al. Modeling regional salinization of the Ogallala aquifer, Southern High Plains, TX, USA[J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 238(1/2): 44–64.
- [26] 薛显武, 陈喜, 魏玲娜, 等. 基于 GIS 的海水入侵可视化数值模拟系统[J]. *地下水*, 2007, 29(1): 35–39.
- [27] 辛沛, 金光球, 李凌. 潮汐作用下盐沼孔隙水流动及溶质运移模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 379–384.
- [28] 刘娜, 黄权中, 陈宏泽, 等. 密度驱动条件下饱和介质盐分迁移规律[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(19): 67–74.
- [29] Salameña G G, Martins F, Ridd P V. The density-driven circulation of the coastal hypersaline system of the Great Barrier Reef, Australia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 105(1): 277–285.
- [30] Panagiotou C F, Kyriakidis P, Tziritis E. Application of geostatistical methods to groundwater salinization problems: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 615: 128566.
- [31] Abd-Elaty I, Kushwaha N L, Grismer M E, et al. Cost-effective management measures for coastal aquifers affected by saltwater intrusion and climate change[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 836: 155656.
- [32] Simmons C T, Fenstemaker T R, Sharp J M. Variable-density groundwater flow and solute transport in heterogeneous porous media: Approaches, resolutions and future challenges[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2001, 52(1/2/3/4): 245–275.
- [33] MacFarlane D S, Cherry J A, Gillham R W, et al. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study 1. Groundwater flow and plume delineation[J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 63(1/2): 1–29.
- [34] Evans T B, Wilson A M. Groundwater transport and the freshwater–saltwater interface below sandy beaches[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 563–573.
- [35] Xin P, Zhou T Z, Lu C H, et al. Combined effects of tides, evaporation and rainfall on the soil conditions in an intertidal creek-marsh system[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 103: 1–15.

(责任编辑: 毛小芳)