

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.078



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



考虑饱和度变化的黏土防渗垫层中污染物的运移规律研究

侯世伟¹, 单薪源¹, 孟素云¹, 杜修力²

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 沈阳 110168; 2. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 土体饱和度作为控制污染物运移速率的关键因素, 直接影响黏土垫层的长期防渗性能及污染物阻隔效能。为阐明垃圾填埋场黏土垫层饱和度变化对污染物运移规律的影响, 基于质量和能量守恒方程, 结合广义达西定律, 并考虑土体输运性质和物理特性的动态变化, 分别建立非饱和土的固结方程、孔隙水的流动控制方程、热传导控制方程和污染物运移控制方程, 共同构成了非饱和土中污染物运移的模型; 使用有限元平台 COMSOL Multiphysics 对模型进行数值求解, 通过算例验证模型的合理性; 进一步分析了饱和度变化对孔隙流体压力、污染物浓度、土体沉降量随时间变化的规律。结果表明: 土体孔隙流体压力、溶质运移和沉降过程均呈现显著的时间效应与饱和度依赖性; 孔隙流体压力在固结过程中由浅层负压向整体负压演化, 高饱和度($S_r > 0.85$)时的孔隙流体压力较中低饱和度提高 1~4 kPa; 溶质运移速率随饱和度升高增加 10%~25%, 其影响随深度呈非线性衰减关系; 土体沉降呈现先增后减的非线性特征, 在 1 a 左右达到沉降峰值, 高饱和度($S_r > 0.85$)的最大沉降量较中低饱和度增加 5%~10%。

关键词: 垃圾填埋场; 黏土垫层; 污染物运移; 饱和度; 基质吸力

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Contaminant transport mechanisms in clay liners under varying saturation conditions

HOU Shiwei¹, SHAN Xinyuan¹, MENG Suyun¹, DU Xiuli²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, P. R. China; 2. Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: As a critical factor governing pollutant migration rates, soil saturation directly influences the long-term impermeability and contaminant retention efficacy of clay liners in landfills. To elucidate the impact of

收稿日期: 2025-04-17

基金项目: 国家自然科学基金(52208356); 辽宁省科技厅项目(2024-MSLH-388); 辽宁省教育厅项目(LJ242410153045); 北京工业大学教育部重点实验室项目(2025B05)

作者简介: 侯世伟(1982-), 女, 博士, 副教授, 主要从事岩土防灾减灾研究, E-mail: hsw1375@126.com。

Received: 2025-04-17

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52208356); Project of Liaoning Provincial Department of Science and Technology (No. 2024-MSLH-388); Project of Liaoning Provincial Department of Education (No. LJ242410153045); Key Laboratory Project of the Ministry of Education at Beijing University of Technology (No. 2025B05)

Author brief: HOU Shiwei (1982-), PhD, associate professor, main research interests: research on rock and soil disaster prevention and reduction, E-mail: hsw1375@126.com.

saturation-dependent mechanisms of pollutant transport in practical clay liners, a dynamic coupled model for contaminant migration in unsaturated soils was developed in this study. Based on mass and energy conservation principles, the generalized Darcy's law was integrated into the framework, while dynamic variations in soil transport properties and physical characteristics were rigorously accounted. The governing equations for unsaturated soil consolidation, pore water flow, heat transfer, and contaminant transport were systematically formulated to establish the multi-physics model. Numerical simulations of the constructed model were conducted using the finite element analysis platform COMSOL Multiphysics, with case studies implemented to validate the model's rationality in civil engineering scenarios. Further analysis was conducted on the temporal evolution patterns of pore fluid pressure, contaminant concentration, and soil settlement under variations in saturation. Results demonstrate that pore fluid pressure transitions from shallow negative pressure to global negative pressure during consolidation, with 1 - 4 kPa higher pressure values being observed under high-saturation conditions ($S_r > 0.85$) compared to medium-low saturation cases; Solute migration rates were found to increase by 10% - 25% with elevated saturation, exhibiting nonlinear attenuation with depth; Soil settlement, characterized by a nonlinear trend, peaked at approximately one year, where 5% - 10% greater maximum settlement was recorded in high-saturation scenarios ($S_r > 0.85$) than in low-saturation cases.

Keywords: landfills; clay liners; contaminant transport; degree of saturation; matric suction

随着城市化和工业化的发展,生活垃圾产量急剧增加,截至2022年,全国有生活垃圾卫生填埋场共计444个,年处理3 043.2万t垃圾^[1];庞大的处理规模背后,大量未严格分拣的有毒有害物质随混合垃圾进入填埋系统,有害物质随着雨水渗透等作用溶出,形成含有较高浓度重金属和有机污染物的垃圾渗滤液^[2],有些渗滤液中汞、镉、铅和锰等有毒重金属也超标,在缓慢的迁移过程中可能进入食物链,不仅会引起人体中毒^[3],甚至影响土体稳定性。现有研究多聚焦于饱和土体的单一物理场作用,忽略了非饱和状态下多物理场的动态交互机制,土体饱和度变化会显著改变基质吸力、水力传导系数及污染物吸附能力,进而影响黏土垫层的整体防渗性能。所以,准确描述非饱和状态下填埋场黏土垫层中污染物的运移规律并预测相应条件下的土体变形特征具有重要的理论意义和工程价值。

固结作用对污染物迁移的影响受到了广泛的关注,研究表明,固结作用能显著促进污染物的流出,并缩短污染物的击穿时间^[4]。这种影响主要体现在两个方面:一是固结作用导致土体孔隙结构发生变化,引发污染物的对流迁移;二是固结过程会改变底泥中污染物迁移的关键参数。在固结-污染物迁移耦合机制研究方面,Pu等^[5]基于一维固结方程和对流-弥散输运方程,提出了考虑非线性压缩性和渗透性的自重固结与污染物迁移耦合的应变数值解。许照刚等^[6]通过深入研究衰减源作用下的污染物运移规律,进一步强调了固结压力及吸附参数在污染物迁移过程中的关键作用。此外,在热固结理论方面,钮家军等^[7]针对单层饱和土的一维热固

结问题,推导出了相应的解,为理解热固结过程中土体的变形和孔隙水压力的变化提供了重要的理论工具。

温度梯度作为热-水-力-化多场耦合作用的核心驱动力,对污染物在土体中的迁移行为产生显著的影响。Yang等^[8]在饱和多孔介质热渗透效应研究中发现,温度梯度可诱导产生热渗透流,其方向与常规达西流存在竞争或协同作用;Yan等^[9]构建的非等温扩散模型表明,温度升高通过双重机制影响污染物迁移,并且在界面处将产生显著的污染物滞留效应;田改奎等^[10]建立的耦合模型进一步深化了污染物迁移机理认识。该模型创新性地引入热固结参数,研究了其对污染物扩散进程的影响;针对工程防护体系,Qiu等^[11]提出的非等温三重衬垫解析解具有重要实践价值,这种各向异性迁移特征要求防渗设计需同时考虑温度场的空间分布特性,特别是在复合衬垫接缝处需设置温度补偿层。以上研究均说明温度对污染物运移进程具有较大的影响。

在污染物运移规律的研究中,大部分研究对象是饱和土体,但在现实情况下,大多数的垃圾填埋场处于非饱和状态,因此,了解非饱和状态下污染物运移规律具有现实意义。难点在于多相多态,徐浩峰等^[12]从质量守恒的角度,避免了非饱和土中气相体积难以确定的困难,建立了土体的一维连续方程。之后的研究更加注重于平衡方程的应用,秦冰等^[13]基于质量守恒、动量守恒及整体能量守恒方程,建立了非饱和土中多场耦合数学模型,考虑了温度作用下非饱和土体热膨胀、热渗流、液态水相变、干燥空气溶解及土体骨架变形等现象的耦合;周凤玺

等^[14]基于多孔介质理论及连续介质热弹性力学,研究了温度梯度作用下重金属离子在非饱和黄土中的迁移机理;Cai等^[15]基于不饱土壤的一维固结模型和传统的热传导方程,建立了一个说明了固结和温度的综合效应污染物运输模型,使用变量分离法和积分变换法得到了解析解;陈正汉等^[16]研究了土体密度、土体应力状态及温度等因素对土水特征曲线的影响。总体而言,现有研究存在以下不足:非饱和土中的多场动态耦合机制的理论描述不完善;饱和度变化对于孔隙流体压力、污染物运移和土体变形的协同影响缺少系统分析。由此可见,现有模型在非饱和条件下多场耦合的动态交互机制,尤其是饱和度时变效应的定量表征方面仍存在不足。所以,饱和度的影响在污染物运移预测研究中应予以重视。

笔者基于质量-能量守恒框架,将广义达西定律与污染物运移耦合方程整合,建立包含固结变形、孔隙水流动、热传导及污染物运移的全耦合控制方程组,深化传统模型对单一物理场的简化假设,填补了非饱和土多场耦合动态模型的不足,为垃圾填埋场防渗系统的优化设计提供了理论依据与方法支撑。

1 非饱和土污染物运移理论模型

1.1 基本假设与可行性分析

在运移模型建立时假设:

1) 土体是各向同性、均质、小变形的线弹性体。在实际工程中,对于小尺度、土质相对均匀的黏土防渗垫层,可近似视为均质和各向同性。陈正汉

等^[16]指出,在低应力水平下,非饱和土的力学行为可通过线性弹性理论近似描述,且各向同性假设在均质黏土垫层中具有工程适用性。

2) 土体变形、孔隙水流动和溶质运移只发生在竖直方向。该假设简化了问题分析的维度,适用于一维或简单二维问题。但在复杂三维问题中,该假设的局限性明显。需考虑多方向的变形和流动,建立三维耦合模型。

3) 孔隙水流动符合广义达西定律。广义达西定律在描述层流条件下孔隙水流动方面具有良好的适用性,对于存在复杂流动路径或高速渗流的情况,需对流动定律进行修正。

4) 污染物运移符合菲克定律。菲克定律在描述污染物扩散过程方面具有明确的物理意义,适用于浓度梯度较小的情况,但是不适用于所有的扩散情况,需要具体分析。

尽管上述假设可能忽略土体各向异性、大变形及非线性扩散等复杂现象,但研究聚焦于饱和度变化对污染物运移的宏观趋势影响。通过引入动态修正参数,可在一定程度上反映非饱和土的非线性响应。此外,模型验证结果表明,简化假设下的数值解与文献解析解高度吻合,证实了假设的合理性。按照图1的分析思路展开研究,首先构建非饱和土多场耦合理论模型,明确控制方程及边界条件;其次通过有限元数值实现并与文献解析解对比,验证模型合理性;最后基于已验证模型,系统分析饱和度对孔隙压力、污染物运移及沉降的调控机制。形成“理论建模-数值验证-参数分析”的研究链条依次分析。

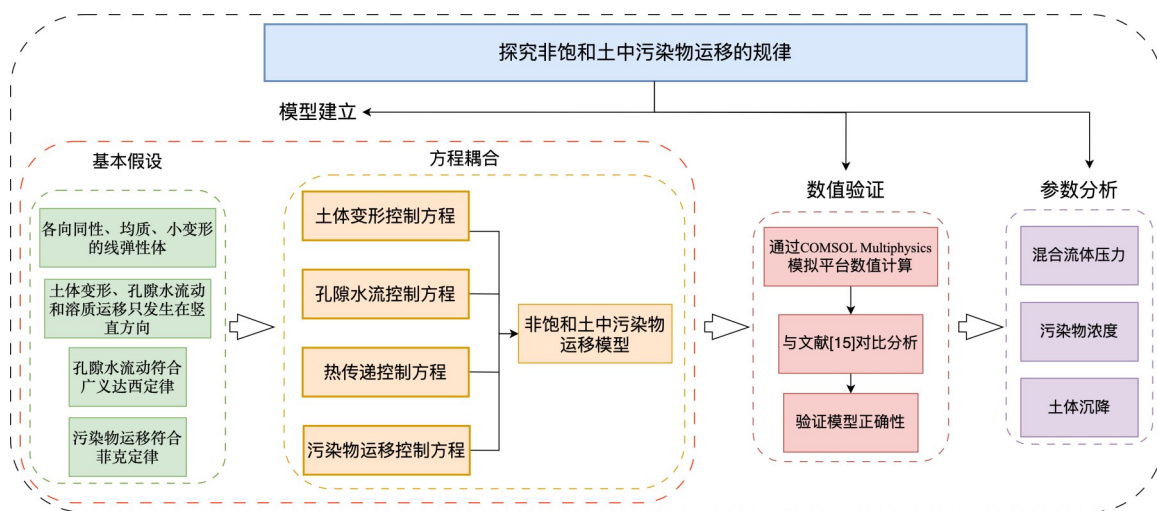


图1 模型计算分析流程图

Fig.1 Flowchart of model computational analysis

1.2 土体变形控制方程

土体变形主要由有效应力变化引起,有效应力

与总应力、孔隙流体压力及孔隙水重度密切相关,土体饱和度的变化会显著影响基质吸力,进而改变

有效应力,导致土体变形。

选取均质、各向同性的土体单元,并且只考虑一维竖直方向应力平衡时,应力平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + f_z = 0 \quad (1)$$

式中: σ_z 为竖直方向总应力; f_z 为体积力,并且 f_z 可以表示为

$$f_z = [(1-n)\rho_s + nS_r\rho_f]g \quad (2)$$

式中: n 为孔隙率; ρ_s 为土颗粒密度; S_r 为饱和度; ρ_f 为孔隙流体密度; g 为重力加速度。

根据非饱和土体有效应力原理,有效应力可以表示为^[17]

$$\sigma' = \sigma - p_f + r_w h_0 \quad (3)$$

式中: σ' 为有效应力; σ 为总应力; p_f 为孔隙流体压力; r_w 为孔隙水重度; h_0 为渗滤液水头。

土体竖直方向上的应力应变本构关系可以表示为

$$\sigma' = (\lambda + 2\mu)(\epsilon_z - \epsilon_c - \epsilon_T) \quad (4)$$

式中: ϵ_z 为竖直方向总应变; ϵ_c 为化学渗透引起的应变; ϵ_T 为热效应引起的应变。其中Lame系数 λ 和 μ 可以表示为

$$\lambda = \frac{vE}{(1+v)(1-2v)} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+v)} \quad (6)$$

式中: E 为弹性模量; v 为泊松比。

竖直方向总应变和位移的关系可以表示为

$$\epsilon_z = -\frac{\partial w_z}{\partial z} \quad (7)$$

式中: w_z 为土体竖直方向位移。

化学渗透应变可以表示为

$$d\epsilon_c = -m_\pi d\pi = -m_\pi RTdc - m_\pi RcdT \quad (8)$$

式中: m_π 为溶质浓度作用下体变系数; R 为普适气体常数; T 为温度; c 为浓度。

热固结应变引起的应变可以表示为

$$\epsilon_T = -\alpha(T - T_r) \quad (9)$$

式中: α 为土体热膨胀系数; T_r 为标准温度。

将式(2)~(8)式代入(1)中,可得土体变形控制方程为

$$-2G \frac{1-v}{1-2v} \left[\frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} - m_c \frac{\partial c}{\partial z} - (m_\pi Rc + \alpha) \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{\partial p_f}{\partial z} - r_w \dot{h} + [(1-n)\rho_s + nS_r\rho_f]g = 0 \quad (10)$$

式中: G 为剪切模量。

1.3 孔隙流体流动控制方程

孔隙流体流动受孔隙流体压力梯度、温度梯度

及浓度梯度共同作用,其流动规律可用广义达西定律描述。饱和度的增加会增大孔隙水相占比,为污染物扩散提供连续的液相路径,从而显著影响孔隙流体的流动特性。

根据质量守恒方程,孔隙流体质量守恒可得

$$\frac{\partial(\rho_f n)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_f n v_f)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

式中: v_f 为孔隙流体渗透速度。

采用François^[18]所建模型,式(11)可以简化为

$$\rho_f \frac{\partial(n)}{\partial t} + n \frac{\partial(\rho_f)}{\partial t} + n \rho_f \frac{\partial(v_f)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

土体孔隙率可表示为

$$n = n_0 - \Delta n = n_0 - m_v \sigma' - m_c c - \alpha(T - T_r) \quad (13)$$

式中: n_0 为初始孔隙率; Δn 为孔隙率的变化; m_v 为力学荷载作用下体变系数。

式(13)由孔隙率随时间变化可得

$$\frac{\partial n}{\partial t} = m_v \frac{\partial p_f}{\partial t} - m_c \frac{\partial c}{\partial t} - (m_\pi Rc + \alpha) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (14)$$

孔隙流体密度可表示为孔隙流体压力和温度的函数

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} = \rho_f \beta_f \frac{\partial p_f}{\partial t} - \rho_f \beta_f^T \frac{\partial T}{\partial t} \quad (15)$$

式中: β_f 为孔隙流体压缩系数; β_f^T 为孔隙流体热膨胀系数。

孔隙流体的渗流速度可表示为

$$v_f = v_r + v_s \quad (16)$$

式中: v_r 为孔隙流体相对于土体的流速; v_s 为土体移动速度。可以分别表示为

$$v_r = \frac{1}{n} v \quad (17)$$

$$v_s = \frac{\partial w_z}{\partial t} \quad (18)$$

在外加荷载、温度梯度及浓度梯度共同作用下,孔隙流体广义达西速度可表示为

$$v = v_c + v_T + v_u + v_h = \omega \frac{RT}{M} \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial c}{\partial z} + k_T \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial p_f}{\partial z} + k_m i \quad (19)$$

式中: v_c 为化学渗透压力梯度引起的达西速度; v_T 为温度梯度引起的达西速度; v_u 为孔隙流体压力引起的达西速度; v_h 为水力梯度引起的达西速度; ω 为化学渗透效率系数; k_m 为水力传导系数; k_T 为热效应系数。其中 k_m 可以表示为

$$k_m = \frac{k_h}{S_r} \quad (20)$$

将式(11)~式(18)式代入式(10)中,可得孔隙流体流动控制方程为

$$(m_v + n\beta_f) \frac{\partial p_f}{\partial t} - m_c \frac{\partial c}{\partial t} - (m_\pi R c + \alpha + n\beta_f^T) \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(\omega \frac{RT}{M} \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial c}{\partial z} + k_T \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial p_f}{\partial z} + k_m i - n \frac{\partial w_z}{\partial t} \right) \quad (21)$$

1.4 热传递控制方程

热传递过程主要受土体固有热传导率、孔隙流体比热容及孔隙流体流速等因素影响。温度梯度会引起孔隙流体的流动,形成热对流,进而影响污

$$\begin{aligned} & [(1-n)C_{ps}\rho_s + nC_{pf}p_f] \frac{\partial T}{\partial t} + (T - T_r) \frac{\partial}{\partial t} [(1-n)C_{ps}\rho_s + nC_{pf}p_f] = \\ & - \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} + C_{pf}p_f(T - T_r) \left(\omega \frac{RT}{M} \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial c}{\partial z} + k_T \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial p_f}{\partial z} + k_m i \right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

式中: C_{ps} 为土颗粒比热容; C_{pf} 为孔隙流体比热容; λ_T 为土体固有热传导率。

1.5 污染物运移控制方程

污染物运移主要受对流、扩散和热扩散等机制共同作用。对流作用由孔隙流体流动驱动,扩散作用由浓度梯度驱动,而热扩散作用则由温度梯度驱动。

根据液相质量守恒,孔隙流体中污染物质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial(nS_r c)}{\partial t} = - \frac{\partial J_f}{\partial z} \quad (23)$$

式中: J_f 为孔隙流体中污染物质量通量。由式(24)所示3部分组成。

$$J_f = J_a + J_{D_c} + J_{D_T} \quad (24)$$

式中: J_a 为污染物的对流通量; J_{D_c} 为污染物的分子扩散通量; J_{D_T} 为污染物的热扩散通量。

其中对流通量可以表示为

$$\frac{\partial(nS_r c)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[(1-\omega) \left(-\frac{k_m}{r_w} \frac{\partial p_f}{\partial z} + k_m i \right) c + \omega \frac{RT}{M} \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial c}{\partial z} c + k_T \frac{\partial T}{\partial z} c - nS_r D_c \frac{\partial c}{\partial z} - n\tau D_0 S_T c \frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (29)$$

根据固相质量守恒,固体土颗粒中污染物质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s S]}{\partial t} = - \frac{\partial J_s}{\partial z} \quad (30)$$

式中: S 为固体土颗粒吸附的污染物质量; J_s 为固体土颗粒中的污染物通量。

其中固体土颗粒中的污染物通量可以表示为

$$J_s = (1-n)v_s \rho_s S \quad (31)$$

其中固体土颗粒吸附的污染物质量可以表示为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(nS_r c)}{\partial t} + \frac{\partial[(1-n)\rho_s k_d c]}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[(1-\omega) \left(-\frac{k_m}{r_w} \frac{\partial p_f}{\partial z} + k_m i \right) c + \omega \frac{RT}{M} \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial c}{\partial z} c + k_T \frac{\partial T}{\partial z} c - \right. \\ & \left. nS_r D_c \frac{\partial c}{\partial z} - n\tau D_0 S_T c \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[(1-n) \frac{\partial w_z}{\partial t} \rho_s k_d c \right] \end{aligned} \quad (34)$$

式(10)、式(21)、式(22)和式(34)共同构成了污染物在非饱和土中扩散运移模型。

染物的运移。

采用 Thomas 等给出的热传递方程形式,土体单位体积热通量表达式中孔隙流体流速采用式(17),则能量守恒可表达为^[19]

$$\begin{aligned} J_a &= cV = c[(1-\omega)(v_u + v_h) + v_c + v_T] = \\ & c \left[(1-\omega) \left(-\frac{k_m}{r_w} \frac{\partial p_f}{\partial z} + k_m i \right) + \right. \\ & \left. \omega \frac{RT}{M} \frac{k_m}{r_w} \frac{\partial c}{\partial z} c + k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (25)$$

其中污染物的分子扩散通量可以表示为

$$J_{D_c} = -nS_r D_c \frac{\partial c}{\partial z} \quad (26)$$

式中: D_c 为有效扩散系数,可以表示为

$$D_c = \tau(1-\omega)D_0 \quad (27)$$

式中: D_0 为开放水体中的污染物扩散系数。

其中污染物的热扩散通量可以表示为

$$J_{D_T} = -\tau D_0 S_T c \frac{\partial T}{\partial z} \quad (28)$$

式中: S_T 为 Soret 系数。

将式(24)~式(28)代入式(23)中,可得孔隙流体中污染物质量守恒方程为

$$S = k_d c \quad (32)$$

式中: k_d 为土体线性吸附系数。

将式(31)、式(32)代入式(30)中,可得固体土颗粒中污染物质量守恒方程为

$$\frac{\partial[(1-n)\rho_s k_d c]}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial z} \left[(1-n) \frac{\partial w_z}{\partial t} \rho_s k_d c \right] \quad (33)$$

将孔隙流体中污染物质量守恒方程和固体土颗粒中污染物质量守恒方程相加,即可得到总的污染物质量守恒方程为

2 非饱和模型的数值实现与验证

Cai 等^[15]基于非饱和土一维固结模型和传统热

传导方程,建立了考虑固结与温度综合影响的污染物运输模型。采用变量分离法和积分变换法得到解析解,并用数值软件进行了数值计算。其模型与本文均考虑非饱和土固结与温度耦合效应,方程构建基础相似,并且考虑相同的参数取值和边界条件,为证明所建模型的正确性,将研究结果与文献[15]进行对比。模型计算所选参数取值如表 1 所示。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

初始孔隙率 n_0	上边界初始浓度 c_0 /(kg/mol)	泊松比 ν
0.5	10	0.4
弹性模量 E /(10^6 Pa)	Sorte 系数 S_T /(1/K)	饱和度 S_r
1.48	0.21	0.6

数值模拟初始和边界条件如下:

初始条件: $u(z, 0)=0, c(z, 0)=0, T(z, 0)=288\text{K}, W(z, 0)=0$; 上边界条件: $u(0, t)=0, T_1(0, t)=311.1\text{K}, c(0, t)=c_0$; 下边界条件: $u(L, t)=0, T_2(L, t)=284.8\text{K}, W(L, t)=0, c(L, t)=0$ 。即上边界溶质浓度恒定不变,下边界污染物浓度为零,这适用于透水边界,并且模型下边界固定。

在相同的模拟条件下,采用有限元平台 COMSOL Multiphysics 的 PDE 自定义模块,并选取弱形式偏微分方程降低计算误差,通过设置初始值和边界条件之后开展数值计算,并将结果与 Cai 等^[15]的模拟结果进行对比分析,结果如图 2 和图 3 所示。由图 3 可见,本文得出的污染物浓度随土体深度的变化规律曲线与文献[15]的模拟结果基本吻合,证明了模型的正确性和有效性。

3 饱和度对污染物运移规律的影响

3.1 模型分析条件

为探究污染物在非饱和土的运移规律,数值分析选取 1 m 厚黏土垫层,以 NaCl 为溶质。NaCl 作为经典的可溶无机盐,其扩散-对流机制与重金属及有机污染物具有相似性,可作为污染物运移的简化模型,并且填埋场渗滤液中 Cl^- 的离子浓度普遍较高,研究其运移机制具有现实意义。结合实际填埋场黏土垫层的设计依据,初始饱和度通常介于 0.7~0.95 之间,选取 $S_r=0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ 四组工况,涵盖典型非饱和至完全饱和状态,以系统揭示饱和度阈值效应。假定初始时刻黏土垫层 NaCl 浓度为零,上边界为浓度恒定污染源,下边界为透水边界,即下边界污染物浓度始终为零。数值模拟参数取值如表 2 所示^{[10][15]}。

在验证实例的基础上,设定数值模拟的初始和

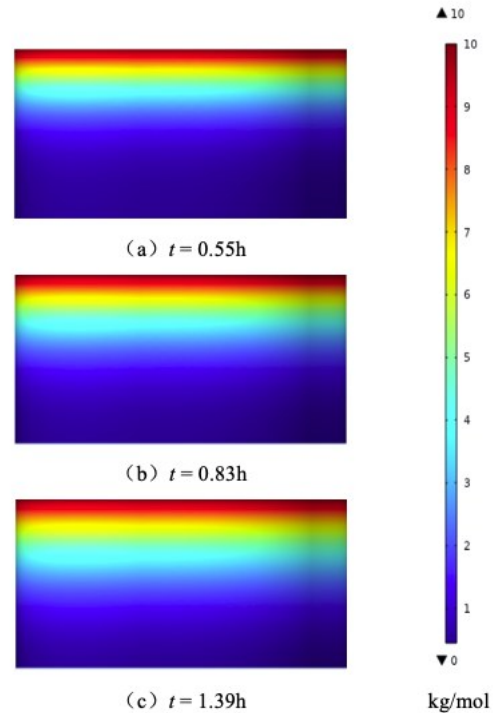


图 2 污染物浓度随深度变化云图

Fig.2 Contaminant concentration contour profile with depth

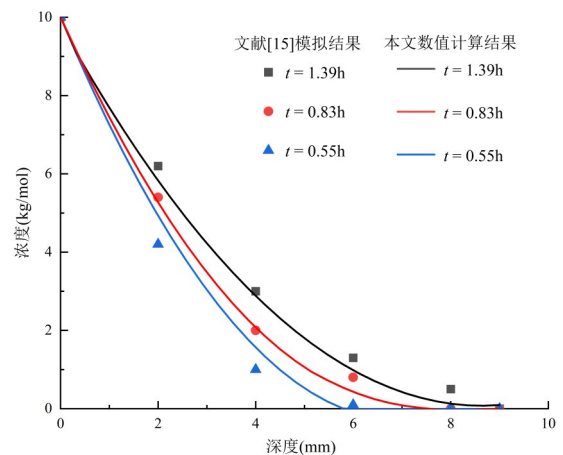


图 3 污染物浓度随深度变化对比曲线

Fig.3 Comparative profiles of contaminant concentration versus depth

边界条件。上边界条件: $T_1(0, t)=313\text{K}, c(0, t)=c_0$; 下边界条件: $T_2(L, t)=293\text{K}$ 。

3.2 不同饱和度的影响

图 4 为不同饱和度条件下孔隙流体压力随深度的分布规律曲线。由图 4 可见,在初始时刻(0.1 a),孔隙流体压力呈现土体浅层负压,深层正压的特征;随着时间的推移(1 a 以后),孔隙流体压力转化为负值并伴随持续消散过程。当黏土垫层饱和度提升时,孔隙流体压力呈现系统性增长,如图 4 可知,高饱和度工况($S_r>0.85$)的孔隙流体压力较低饱和度高 1~4 kPa。这是因为土体饱和度的增加,使水相占据的孔隙平均半径增大。根据 Laplace 方

表 2 数值模拟参数

Table 2 Numerical simulation parameters

参数	取值
有效扩散系数 D_0	$5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$
化学渗透效率系数 ω	0.005
水力传导系数 K_h	$1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$
初始孔隙率 n_0	0.5
力学荷载体变系数 m_v	$5 \times 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^2/\text{kg}$
溶质浓度体变系数 m_c	$2.5 \times 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^2/\text{kg}$
上边界初始浓度 c_0	30 kg/m^3
NaCl 相对分子质量 M	0.058 5 kg/mol
普适气体常数 R	$8.214 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$
孔隙液重度 γ_w	10 kN/m^3
泊松比 ν	0.4
弹性模量 E	$1.48 \times 10^6 \text{ Pa}$
土体热膨胀系数 α	$2.4 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$
孔隙流体压缩系数 β_f	$4.5 \times 10^{-10} \text{ 1/Pa}$
初始温度 T_r	288 K
热渗透系数 K_T	$3.14 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{K} \cdot \text{s}$
固体土颗粒比热容 C_{ps}	$732 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
孔隙流体比热 C_{pf}	$4186 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$
孔隙流体密度 ρ_f	1000 kg/m^3
土体固有热传导率 λ_T	$1.69 \text{ W/K} \cdot \text{m}$
Soret 系数 S_T	0.21 1/K
孔隙流体热膨胀系数 β_{rf}	$3.5 \times 10^{-4} \text{ 1/K}$
线性吸附系数 K_d	$0.814 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$
重力加速度 g	9.8 m/s^2
饱和度 S_r	0.7, 0.8, 0.9, 1.0

程在土体中的毛细现象简化形式,当孔隙半径增大时,会使基质吸力减小,导致土体孔隙水压力升高,同时孔隙流体压力也随之增加。即使后期流体压力整体进入负压阶段,基质吸力的调控效应仍然持续发挥作用,致使高饱和度工况始终维持在相同的流体压力水平。

图 5 为不同饱和度条件下溶质浓度随深度的分布规律曲线。由图 5 可见,在初始时刻(0.1 a),曲线具有明显拐点,由于运移时间过短,土体饱和度对污染物运移基本没有作用;随着时间的推移(1 a 以后),饱和度对污染物运移速度的调控作用显著增强,饱和度的升高使污染物运移速率增加 10%~25%,其影响随深度呈非线性衰减,这意味着,饱和度的增大直接使黏土防渗垫层的污染物阻隔能力降低,显著增加了渗漏风险。这是因为污染物在土体中运移主要靠对流和扩散作用,土体饱和度的增加会显著增加这两种机制的作用,土体未饱和时,孔隙中存在空气和水两相,空气占据部分孔隙通道,阻碍水的连续流动,随着土体饱和度增大,会导致土体中水相占比提高,为污染物扩散提供了连续的液相路径,进而提高了污染物运移的速度。虽然

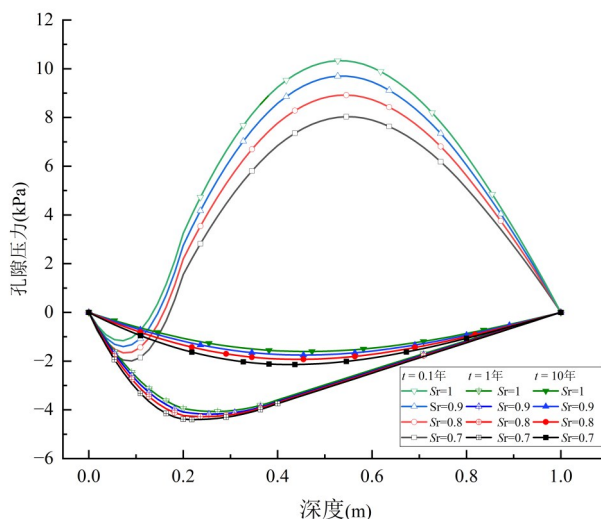


图 4 不同饱和度条件下孔隙流体压力随深度的分布规律

Fig.4 Distribution characteristics of pore fluid pressure with depth under varying degrees of saturation

垫层饱和度的升高会加快污染物运移进程,但是不影响场地的稳定性,避免填埋场失稳引起的事故^[20]。因此,在工程实践中,应严格控制垫层的饱和度,避免垫层持续过高的饱和度,进而影响垃圾填埋场的使用寿命,可通过预测不同饱和度下污染物运移进程,制定相应策略,以降低渗漏风险。

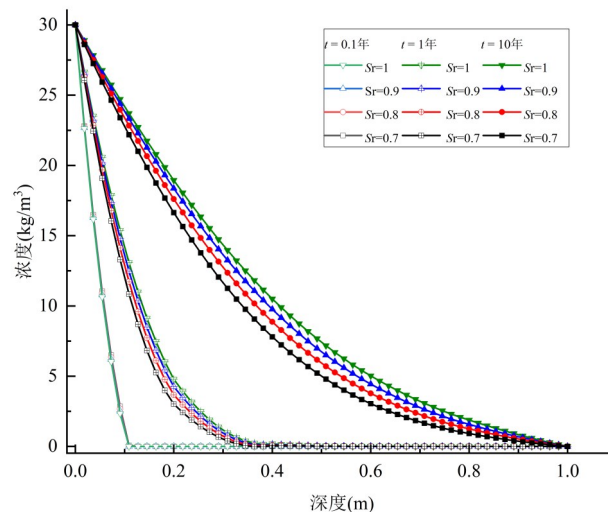


图 5 不同饱和度条件下污染物浓度随深度分布规律

Fig.5 Depth-dependent distribution patterns of contaminant concentration under varied saturation conditions

图 6 为不同饱和度条件下土体沉降量随时间变化规律。由图 6 可见,土体沉降量先增大后减小,并且饱和度不同造成了沉降量的差异,土体饱和度和土体沉降呈现正相关趋势,高饱和度($S_r > 0.85$)工况土体最大沉降量较中低饱和度增加 5%~10%,沉降量在 1 a 左右达到峰值。该现象可通过非饱和土多场耦合本构关系予以阐释:根据 Bishop 有效应

力原理,基质吸力随着饱和度的增大而减小,从而使有效应力降低,土体抵抗变形的能力减弱,同时,高饱和度会使土颗粒间的水膜变厚,可以理解为土颗粒间的黏结作用减弱,这种细观力学响应的改变在宏观上通常表现为沉降量增加。所以在工程实际中,应该通过合理设计饱和度来控制土体的沉降量,确保填埋场长期运行的结构安全。结合图6的分析结果,建议将填埋场黏土防渗垫层的允许沉降量控制在峰值沉降量的80%以内,作为结构稳定性容限。对于高饱和度区域,应进一步将容限降低至峰值沉降量的70%,以确保结构安全。

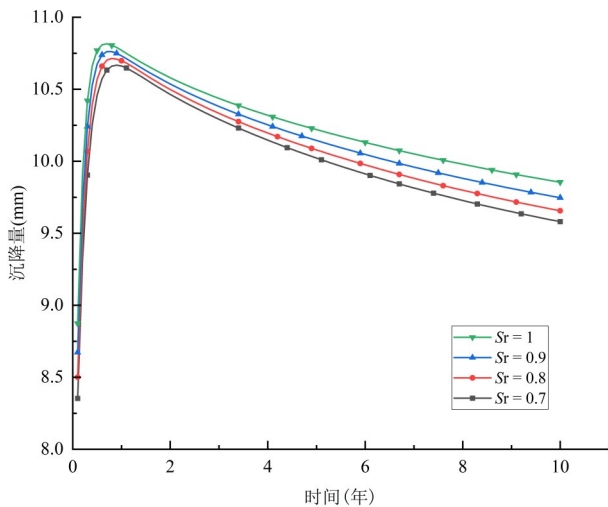


图6 不同饱和度条件下土体沉降量随时间变化规律

Fig.6 Time-dependent evolution of soil settlement under varied saturation conditions

4 结论

建立的非饱和土污染物运移理论模型在通用平台予以实现并验证其准确性,通过模拟计算得到了饱和度变化对孔隙流体压力、污染物浓度、土体沉降量随时间变化的规律,具体结论如下:

1) 土体孔隙流体压力呈现显著的时间效应与饱和度依赖性。初始阶段(0.1 a)土体浅层出现负压特征,深部保持正压;随固结过程推进(1 a以后),孔隙流体压力均转为负值并持续消散;高饱和度($S_r > 0.85$)的孔隙流体压力较低饱和度高1~4 kPa,表明垫层土体饱和度的增加会使土体孔隙流体压力增大,这一发现对于理解非饱和土体在固结过程中的压力演化机制具有重要意义。

2) 溶质运移受时间-饱和度耦合调控。初始阶段(0.1 a)饱和度对污染物运移无显著影响;随时间推移(1 a以后)饱和度升高使污染物运移速率增加10%~25%,其影响随深度呈非线性衰减。这一结论深化了饱和土污染物运移模型研究,说明填埋场在运行阶段合理监控垫层饱和度可以显著降低其

渗漏风险。本研究针对一维竖直方向的污染物运移问题,对于三维条件的多方向变形和流动考虑不足,后续将进一步研究。

3) 土体沉降呈现非线性时变特征。沉降量随时间呈现先增大后减小的趋势,沉降量在1 a左右达到峰值,高饱和度($S_r > 0.9$)工况最大沉降量较中低饱和度增加5%~10%,表明饱和度的升高会增强土体压缩性。在工程实际中,通过合理监测饱和度,可有效控制土体沉降量,对于高饱和度区域,应进一步将容限降低至峰值沉降量的70%,以确保填埋场长期运行的结构安全。

参考文献

- [1] 刘航, 苏宇, 成宇涛, 等. 塑料垃圾填埋衍生的微塑料环境污染风险[J]. 化学进展, 2025, 37(1): 32-45.
LIU H, SU Y, CHENG Y T, et al. Environmental microplastic pollution risks associated with plastic waste landfilling [J]. Progress in Chemistry, 2025, 37(1): 32-45. (in Chinese)
- [2] 龙於洋, 范丽娇, 沈东升, 等. 基于文献计量的垃圾填埋场污染物研究现状与趋势分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(1): 97-104.
LONG Y Y, FAN L J, SHEN D S, et al. Bibliometric analysis of research status and developing trends on landfill pollutants [J]. Environmental Pollution & Control, 2023, 45(1): 97-104. (in Chinese)
- [3] 彭小红, 郑泽根, 丁文川, 等. 垃圾填埋场的污染与防治[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(4): 140-143.
PENG X H, ZHENG Z G, DING W C, et al. The pollution of landfill and its prevention [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(4): 140-143. (in Chinese)
- [4] 邱金伟. 成层土中大变形固结与污染物迁移的耦合规律研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
QIU J W. Investigation of coupled behavior of large-strain consolidation and solute transport in layered soils [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] PU H F, WANG K, QIU J W, et al. Large-strain numerical solution for coupled self-weight consolidation and contaminant transport considering nonlinear compressibility and permeability [J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 88: 916-932.
- [6] 许照刚, 张志红, 杜修力, 等. 衰减源作用下固结压力及吸附参数对污染物运移规律的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(2): 94-103.
XU Z G, ZHANG Z H, DU X L, et al. Effect of consolidation pressure and adsorption parameter on contaminant transport considering the biodegradation of contami-

- nant at source [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(2): 94-103. (in Chinese)
- [7] 钮家军, 凌道盛, 王秀凯, 等. 饱和单层土体一维热固结精确解[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(9): 1715-1723.
NIU J J, LING D S, WANG X K, et al. Exact solutions for one-dimensional thermal consolidation of single-layer saturated soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(9): 1715-1723. (in Chinese)
- [8] YANG Y, GUERLEBECK K, SCHANZ T. Thermo-osmosis effect in saturated porous medium [J]. Transport in Porous Media, 2014, 104(2): 253-271.
- [9] YAN H X, SEDIGHI M, DING H, et al. Analytical model for non-isothermal diffusion of contaminants in unsaturated composite liner [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: 126848.
- [10] 田改垒, 张志红. 考虑热效应的污染物在土中扩散、渗透和固结耦合模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(2): 278-287.
TIAN G L, ZHANG Z H. Coupled model for contaminant diffusion, osmosis and consolidation in soil considering thermal effects [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(2): 278-287. (in Chinese)
- [11] QIU J, HE Y, SONG D, et al. Analytical solution for solute transport in a triple liner under non-isothermal conditions [J]. Geosynthetics International, 2023, 30(4): 364-381.
- [12] 徐浩峰, 谢康和. 高饱和度土的一维连续方程及其固结分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5): 23-27, 68.
XU H F, XIE K H. One-dimensional continuity equation and consolidation analysis of unsaturated soils with high degree of saturation [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2011, 33(5): 23-27, 68. (in Chinese)
- [13] 秦冰, 陈正汉, 方振东, 等. 基于混合物理论的非饱和土的热-水-力耦合分析模型 I [J]. 应用数学和力学, 2010, 31(12): 1476-1488.
QIN B, CHEN Z H, FANG Z D, et al. Analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated soils based on theory of mixtures I [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(12): 1476-1488. (in Chinese)
- [14] 周凤玺, 罗场, 马强. 温度梯度作用下非饱和土中铅离子迁移机理研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(9): 1822-1830.
ZHOU F X, LUO Y, MA Q. Migration mechanism of lead ions in unsaturated loess under temperature gradient [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(9): 1822-1830. (in Chinese)
- [15] CAI G Q, YIN F J, GUO S J, et al. Analytical solution of a pollutant transport model for unsaturated soil considering the effects of consolidation and temperature [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2024, 262: 104326.
- [16] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.
CHEN Z H, GUO N. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-54. (in Chinese)
- [17] 曹雪山, 殷宗泽. 一维非饱和土固结简化计算的改进方法[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 1-5.
CAO X S, YIN Z Z. An improved method of simplified computation of 1D consolidation for unsaturated soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(10): 1-5. (in Chinese)
- [18] FRANÇOIS B, LALOUI L, LAURENT C. Thermo-hydro-mechanical simulation of ATLAS in situ large scale test in Boom Clay [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(4): 626-640.
- [19] THOMAS H R, HE Y. A coupled heat-moisture transfer theory for deformable unsaturated soil and its algorithmic implementation [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1997, 40(18): 3421-3441.
- [20] 彭仁, 侯瑜京, 陈祖煜, 等. 山谷型垃圾填埋场失稳模式离心模型试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(6): 67-72.
PENG R, HOU Y J, CHEN Z Y, et al. Centrifuge tests on the instability of valley-type municipal solid waste landfill [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(6): 67-72. (in Chinese)

(编辑 XXX)