

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.109



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



岩土体热盐双扩散耦合理论 research 进展

范正豪^{1,2}, 张铂渡², 王新凯², 崔景成², 鲍挺²

(1. 中国地质科学院 自然资源部碳封存与地质储能工程技术创新中心, 北京 100037; 2. 重庆大学
土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:近年来,盐渍土路基防灾减灾、土地资源保护、石质文物保护、地热开发、CO₂地质封存、核废料处理等领域遇到的工程问题层出不穷。开展岩土体热盐双扩散耦合理论相关研究,可为防治土地盐渍化、预防基础设施与石质文物病害、提升地热提取效率、强化封存效果、降低地下水污染风险提供核心理论支撑。围绕岩土体热盐双扩散耦合理论,分别总结土体、岩体热盐双扩散耦合的研究方法,梳理各类典型理论模型。在此基础上,结合新时代能源开发与生态环境保护的现实需求,探讨各工程领域中岩土体热盐双扩散耦合理论亟待深入研究的方向,并对比分析各类岩土体热盐双扩散耦合模型。基于上述总结与对比分析,针对咸水层 CO₂封存、盐区地热开发、盐穴核废料处理等工程问题,阐明开展岩石裂隙内热盐双扩散耦合理论研究的重要意义;针对土、石质文物保护,对岩土体热盐扩散与力学效应耦合相关研究进行展望。

关键词:盐渍土;热盐传质;双扩散;耦合效应;理论模型

中图分类号:P642.11 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)05-0171-15

Research progress on the coupling theory of thermohaline double diffusion in rock and soil

FAN Zhenghao^{1,2}, ZHANG Bodu², WANG Xinkai², CUI Jingcheng², BAO Ting²

(1. Technology Innovation Center for Carbon Sequestration and Geological Energy Storage, Ministry of Natural Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Engineering challenges related to saline soil roadbed disaster prevention and mitigation, land resources, protection of rock relics, geothermal development, carbon dioxide geological storage, and nuclear waste disposal have recently become increasingly prominent. A critical factor in addressing these issues is

收稿日期:2024-08-29

基金项目:国家自然科学基金(52378326);重庆市创新发展联合重点基金(CSTB2022NSCQ-LZX0001);中国地质科学院自然资源部碳封存与地质储能工程技术创新中心开放课题(MNRCCUS012301);重庆市杰出青年基金(cstc2021jcyj-jqX0017)

作者简介:范正豪(1999-),男,主要从事岩土多场耦合研究,E-mail:fanzh12022@163.com。

鲍挺(通信作者),男,博士,教授,E-mail:ting.bao@cqu.edu.cn。

Received: 2024-08-29

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52378326); Chongqing Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund (No. CSTB2022NSCQ-LZX0001); Chinese Academy of Geological Sciences, Ministry of Natural Resources, Technology Innovation Center for Carbon Sequestration and Geological Energy Storage Open Fund (No. MNRCCUS012301); Funds for Distinguished Youths of Chongqing (No. cstc2021jcyj-jqX0017)

Author brief: FAN Zhenghao (1999-), main research interest: geotechnical multi-field coupling, E-mail: fanzh12022@163.com.

BAO Ting (corresponding author), PhD, professor, E-mail: ting.bao@cqu.edu.cn.

understanding the coupling theory of thermohaline double diffusion in rock and soil. This theory is essential for preventing soil salinization, preventing deterioration of infrastructure and decay of rock relics, enhancing heat extraction efficiency, improving sealing effectiveness, and reducing groundwater pollution. This paper first summarizes the methods related to the coupling theory of thermohaline double diffusion in rock and soil. It then systematically reviews typical theoretical models in this field, followed by the future research directions for the coupling theory of thermohaline double diffusion, particularly in the context of modern energy demands and environmental protection needs. Comparative analyses of different coupling models of thermohaline double diffusion are also presented. Finally, the importance of studying the coupling theory of thermohaline double diffusion in rock fissures is highlighted, especially in relation to critical engineering problems such as CO₂ storage in saline aquifers, geothermal exploitation in salt zones, and nuclear waste disposal in salt caverns. Additionally, the paper outlines future research prospects for the coupling of thermohaline double diffusion with mechanical effects in the context of rock and soil conservation, particularly for the preservation of cultural relics.

Keywords: saline soil; thermohaline transport; double diffusion; coupling effect; theoretical model

随着人们对提高土地利用率的重视与低碳环保意识的增强,盐碱地改良技术、CO₂地质封存技术、地热资源开发技术和核废料处理技术的研究均取得长足发展。上述工程涉及的岩土体处于温盐梯度交织的复杂环境,会产生显著的热盐双扩散耦合效应。在该效应下,热量扩散会影响盐度通量、改变盐度分布,盐分扩散会改变热通量大小、影响岩土体温度分布,最终对岩土工程、生态环境产生重要影响。

为解决上述问题,研究者建立了揭示岩土体热盐双扩散耦合效应的理论体系。鉴于农业发展的重要性,土体热盐双扩散耦合相关研究起步相对较早,Nassar等^[1]针对热盐耦合扩散输运过程开展了一维数值模拟,基于Darcy、Fourier和Fick定律与连续性方程,建立了非定常条件下热盐扩散耦合控制方程;Noborio等^[2-3]拓展了该耦合方法,并进行了热盐运移的二维动态模拟。随着可持续水土资源管理需求的持续提升,土体热盐双扩散耦合理论现已成为发展可持续农业、开展生态环境保护工作的重要理论工具。

多孔介质中的双扩散对流理论为岩土体热盐双扩散耦合研究奠定了基础,学者基于连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程建立了多种理论模型,相关模型已广泛应用于地球物理领域,如含盐地热田^[4]、CO₂地质封存^[5]、地热能开发^[6]以及核废料处理^[7]等场景。以CO₂地质封存为例,热盐双扩散过程会改变咸水层的温度场与盐度场,诱发密度驱动流,造成CO₂溶解失稳,进而显著影响CO₂封存效果^[7]。

笔者归纳近年来岩土体热盐双扩散耦合理论的研究进展,梳理该领域典型理论模型,结合实际工程问题,探讨岩土体热盐双扩散耦合的研究方

法,展望该领域未来的研究热点。

1 土体热盐双扩散耦合

土体热盐双扩散耦合理论考虑了水、热、盐之间的相互作用,以及上述物理量在土中的分布规律。如图1所示,盐分浓度会影响水分扩散速度,改变土中水的水力特性。土体中的热扩散通常受含盐量的影响,盐分的存在会改变土体的热力学特性,进而影响土体的热扩散规律与温度分布。温度变化会引起水分相变,进一步影响盐分的扩散与分布^[8-10]。

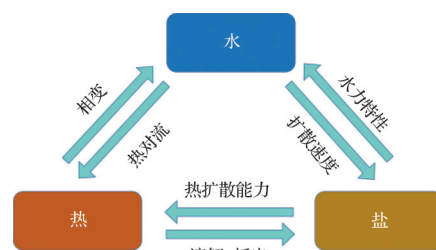


图1 水、热、盐之间的相互作用

Fig. 1 Interaction among water, heat and salt

1.1 热盐双扩散耦合模型

水是土体热盐扩散的重要载体,建立土体热盐双扩散耦合模型需充分认识土体水盐运移规律与水热扩散机制。无论在冻结还是蒸发条件下,饱和土体水分相变是水盐迁移的根本驱动力^[11-12]。蒸发过程中,土体内部液态水吸收热量后转化为水蒸气;孔隙气压与孔隙水压的差值形成基质吸力,进而驱动液态水流动,如图2所示。针对冻结条件下的水运驱动理论,学界提出两种公认理论,即潜土理论和水动力模型^[13]。前者认为水分输运的驱动力主要来自土体基质的势能,后者阐释了冻结过程中热传导、水分迁移与相变引发的土体水分场、温度

场相互作用。

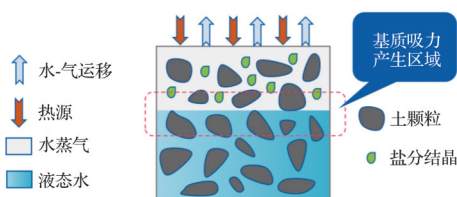


图2 蒸发条件下水运驱动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of water transport drive under evaporation conditions

土体水热耦合扩散数值模型基于Fick定律与等温水分模型构建。温度会显著影响水分运移,传统等温模型无法准确描述变温条件下土体水分的运动。目前,土体水热耦合扩散模型主要有两类:

一是基于质能平衡理论构建的模型。Philip等^[14]建立非等温条件下多孔介质水热传输理论,开创性地将土体水分蒸发归结为土体内部能量与水分交换共同作用的结果,同时,考虑非等温蒸发过程,提出基于质能平衡的水-气-热耦合扩散理论。Milly^[15-16]对Philip的模型进行改进,采用基质势梯度代替含水量梯度,使修正模型适用于非均质土。Harlan^[17]采用解析法求解土体一维水热耦合扩散方程,建立了最具代表性的非经验水热耦合扩散模型。

二是基于不可逆热力学的线性模型。Taylor等^[18]建立了基于不可逆热力学的线性方程,分析了水分对热量扩散的影响。Cary等^[19]结合前人已有理论,依据不可逆热力学定律建立了温度梯度作用下土体水分运动理论。上述研究为土体热盐双扩散耦合理论的发展奠定了基础。

温度变化会使土体水分发生相变,通常分为以下两种情况:

1) 正温

正温度条件下,Nassar等^[1,20]指出热、盐的扩散同时发生,研究复杂性与难度较高,因此,建立了描述水分运动、热运动和溶质运移的3组控制方程,从理论上分析土体热盐扩散的动态过程;并在Philip等^[14]模型的基础上开发了一维热盐双扩散耦合数学模型,研究温度梯度作用下封闭土柱内的热盐耦合运移,模拟土体水蒸气、热量与盐分的扩散过程,通过试验证实盐分的存在会显著影响水分运移。

Nassar等^[21]运用该模型预测给定蒸发速率下露天土柱的温度与盐分分布,试验与模型预测结果均表明,蒸发表面会出现盐分堆积。Nachshon等^[22]研究土体均质性与非均质性对热盐扩散的综合作用,构建了热盐双扩散耦合的数学模型;研究发现,盐分向上扩散并析出,空间分布不均,盐沉淀会堵塞

微小孔隙,水汽仅能经由大孔隙运移。因此,土体表层盐分聚集会削弱热盐双扩散耦合效应,均质土自身大孔隙较多,更多盐分向上运移并在土柱顶部富集,抑制作用更为显著。Gran等^[23]研究了盐碱土蒸发过程中的热盐扩散机理并建立了数学模型,发现水蒸气不仅向上扩散,受温度梯度作用还会自蒸发,锋面向下扩散。

2) 负温

研究者发现,负温度条件下盐分的存在会对土体水分冰点和未冻水含量 ω 产生影响,冻结过程中,盐分以离子形式随未冻水迁移,在冻结区内形成分层分布的盐晶体,该晶体对冻胀有抑制作用,进而改变土体热盐扩散过程^[24-25]。Wan等^[26]通过研究盐分对土体水分冰点与未冻水含量的影响规律发现,结晶盐填充土体孔隙,使土体孔隙率发生改变,进而改变土体的水力特性、导热性等物理性质及冻土内热盐的迁移特性。孟祥传等^[27]测试含不同浓度NaCl、 Na_2CO_3 盐溶液土体的冰点与未冻水含量发现,土体水分冰点随初始盐浓度的升高而逐渐降低,盐类种类同样会影响土体未冻水含量。图3为不同研究团队所得土体含盐量与初始冻结温度的关系曲线。由图3可知,相较于 Na_2CO_3 ,增大NaCl盐浓度对土体水分冰点的影响更为显著。

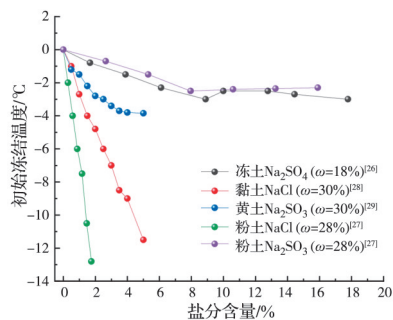


图3 初始冻结温度-含盐量关系

Fig. 3 Relation between initial freezing temperature and salt content

水分冻结与盐分结晶产生的膨胀应力会引发冻土变形;低盐浓度下土体膨胀以水分结冰作用为主,高盐浓度下则以盐分结晶膨胀为主^[30]。Zhang等^[31]指出,盐渍土冻结是复杂、动态的水-热-盐-力耦合物理过程,在归纳现有研究成果后提出了针对非饱和冻土内气相迁移对热盐扩散影响问题的改进数学模型,完整模拟水分迁移、热量传递、水汽运移、盐分输运与土体变形的全过程。由此可见,负温度环境下土体热盐双扩散耦合演化需考虑土体变形的影响。基于此,近年来诸多学者围绕负温度条件下土体热盐双扩散耦合效应开展研究。

此外,在正、负温循环作用下,热盐双扩散引发

的力学效应是干旱地区土、石质文物损毁的主导因素。土、石质文物的劣化机理包含水分对可溶盐的溶解与迁移、温度变化诱发的盐分结晶过程,结晶膨胀压力是土、石质材料发生不可逆破坏的关键原因^[32]。降温与蒸发作用均会促使盐分从土体孔隙溶液中析出结晶;盐分可沿热流、水势梯度发生迁移,由高温区向低温区、高含水率区向低含水率区运移并富集结晶^[33]。

干湿循环与冻融循环作用下,水、盐共同侵蚀土、石质材料,致使其内部膨胀开裂。干湿循环主要通过浸润与溶蚀作用弱化矿物颗粒间的联结,降低材料力学性能^[34]。冻融循环则通过改变盐分溶解度,使盐分反复溶解与结晶,引发颗粒脱落并产生裂隙^[35],如图 4 所示。冻结过程中,岩样表层温度率先降低,液态水凝结形成冰晶,表层区域盐分溶解度下降,盐分析出并产生膨压力。同时,岩样内部未冻水不断向表层迁移,内部盐分持续结晶并挤压孔隙,破坏土体微观结构、增大内部孔隙体积,且表层冰晶在内部未冻结水的补充下体积变大^[36]。当岩样表层孔隙内冰晶的冻胀力(盐浓度较低)或盐分结晶压力(盐浓度较高)超过孔隙壁屈服强度时,孔隙结构发生破坏并持续发育,孔隙相互贯通形成裂缝,最终造成岩样表层颗粒剥落。

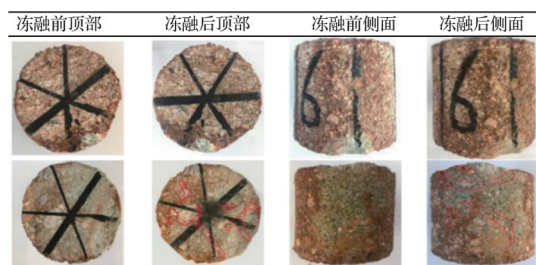


图 4 冻融循环下试样颗粒损失和产生裂缝^[36]

Fig. 4 Sample particle loss and crack generation under freeze-thaw cycles^[36]

土、石质文物的破坏涉及热盐双扩散过程,因此亟需针对岩土体热盐双扩散与力学效应耦合模型开展深入研究,揭示热盐耦合作用诱发的土、石质文物损伤破坏机制,为土、石质文物的科学、高效保护提供理论与技术支撑。

1.2 土层上边界条件

明确各类耦合模型的边界条件,是提升模型表征工程实际问题能力的关键。针对盐碱地改良、盐渍土路基病害等工程问题,土层上边界条件决定边界处土体与外界的热、盐交换强度,例如热辐射、冰雪覆盖等工况。热辐射作用下土体热盐扩散耦合演化过程复杂,涵盖辐射能吸收、土体热量调控、土

内热盐相互作用多个环节。土体表层吸收太阳辐射能后,热量分布不均会诱发水分蒸发,促使盐分在蒸发区富集,过程如图 5 所示。随着地表覆盖防护技术的快速发展,诸多学者针对热辐射条件下土体热盐双扩散耦合机制开展大量研究,研究成果可指导农业生产、防控土体盐渍化。

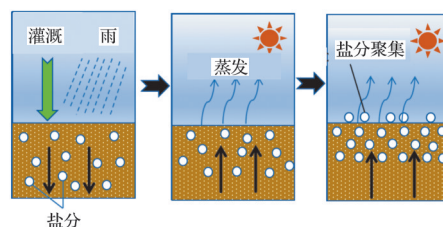


图 5 热辐射下土体热盐双扩散示意图

Fig. 5 Schematic diagram of thermohaline double diffusion of soil under thermal radiation

在土体表层覆盖一定厚度砂土或秸秆,可有效阻隔水分蒸发、抑制盐分向地表迁移,显著降低表层土体含盐量并提升土体含水率,进而有效防控上层土体盐渍化^[37]。Wang 等^[38]研究秸秆还田对土体热盐双扩散规律的影响发现,秸秆还田能抑制冻土融化后的水分蒸发。冰雪融水可提升土体含水率,而土体盐分的分布与扩散过程受水分输入、热扩散的共同调控。当冰雪融化后,水分会带动盐分向下迁移,易造成盐分在土体深层聚集。

此外,寒冷地区上层土体经多次冻融循环后,孔隙结构与渗透性均会发生改变,进而调控热盐迁移扩散过程,因此诸多学者针对冰雪覆盖工况下上层土石质土体的热盐双扩散机理开展研究。Tan 等^[39]探究了区域冰层覆盖对土体热盐迁移扩散的影响,结果表明,冰层覆盖可有效抑制秋灌后土体的盐渍化。积雪既能降低土体平均温度,又可避免土体出现极端低温。在积雪较多的年份,土体孔隙较多,融雪水可通过冻结层渗入到深层土体以补给土层水分;而在少雪年份,长期冻融循环会加剧春季土体表层水分蒸发耗散,放大热盐扩散效应^[40]。在路基工程中,Zhang 等^[30]研究了路基-桥涵过渡段的变形过程,分析了热盐双扩散对路基结构破坏的影响,结果表明,寒冷季节涵洞周围形成的盐分富集区是路基结构盐膨胀的主要诱因。

现有研究表明,不同边界条件对土体热盐双扩散过程的影响差异显著。需结合实际边界条件构建适配的数学模型,并开展针对性试验验证模型的准确性,将数值模拟与试验相结合,从工程实际层面解决相关问题。

2 岩体热盐双扩散耦合

裂隙发育使岩体热盐双扩散机制较土体更为复杂,二者数值模型采用的理论假设也不相同。在解决实际问题中,分析岩体时更多考虑热盐共同驱动下水产生的双扩散对流效应。由此可见,土体与岩体的热盐双扩散耦合演化过程存在明显区别,有必要对两类介质分别展开讨论。

地下岩层普遍存在盐度梯度与温度梯度,当两类梯度数值较大时,岩体多孔介质内部会产生明显的热盐双扩散对流现象,该现象在水热型地热开发、咸水层 CO_2 地质封存(GCSIA)和核废料地下处理工程中表现突出^[41-42],需纳入分析。

2.1 热盐双扩散工程案例

1) 地热开发

近年来,地下咸水层、矿井水地热的开发受到广泛关注^[43-44]。地层存在盐分,此类地热开发不可忽略盐度与温度的相互作用及其对取热效率的影响。二者作用机理如下:高盐度会增大孔隙水、井巷水等流体的密度,高温则会降低流体密度,二者对流体密度的影响相反,进而形成热盐双扩散效应。温度与盐度空间分布存在差异会诱发热盐双扩散,生成受浮力驱动的耦合流,改变热量扩散行为,显著影响取热效率。

开展地热井采热作业时,垂直温度梯度诱发的密度驱动流会造成取热井内部及井外上部水体盐碱化^[45]。以咸水层地热开发为例,如图6所示,采热井内温度 T_1 通常显著高于浅层咸水层中水体温度 T_2 ,温差会使井内热量向咸水层传递,使生产井套管产生热损失。井筒周围的咸水层受热后水体密度减小,与咸水层上部温度较低的天然水体形成密度差;在密度驱动流作用下盐分沿取热井从井底向上扩散,引起咸水层浅层水体盐渍化^[46-47]。

咸水层原有盐度差异会抑制温差诱发的密度驱动流。为评估二者对咸水层系统稳定性的影响

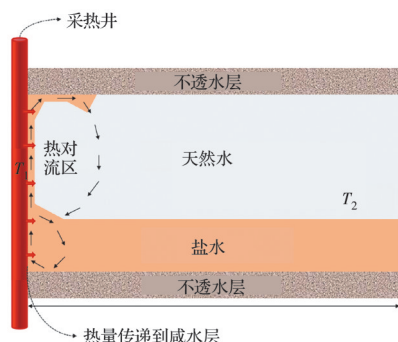


图6 咸水层地热开发中盐水向上扩散示意图^[48]

Fig. 6 Schematic diagram of upward diffusion of salt water in the geothermal development of salt water layer^[48]

程度, van Lopik 等^[48]使用二维 SEAWAT 模型(变密度地下水流与溶质运移模型)模拟穿透式热井热损耗驱动下 50 m 厚含水层内的自由对流。结果表明, 30 a 内,由密度差异驱动的地下水流使规模较大的盐团迁移至井筒周边含水层顶部。该过程会提升套管温度与导热系数,同时降低地层孔隙率,强化热扩散效应,加剧井筒向含水层的热量传递,进而促进密度驱动流的产生并推动盐分向上运移,改变产热区域盐度与温度的分布。

类似现象同样存在于矿井水地热开发场景。两类工况虽均因低温淡水位于高温咸水之上产生热盐双扩散对流,但作用机理存在差异,矿井系统的研究对象由井筒外部转为矿井内部,同时体系内存在显著的温盐分层现象^[49]。其作用机制为:矿井水直接采热过程存在热损失,井筒下部水体温度通常高于井筒上部;温度升高会降低水体密度,低密度水体处于高密度水体下方,浮力作用形成的密度驱动流会带动井筒内盐分自下向上扩散。Bao 等^[50]采用多物理场模拟法成功再现了矿井水-热-盐分层的形成和演化过程,结果表明,侧向热通量是诱发热盐分层现象的必要条件,无需侧向盐度通量参与。如图7所示,假设初始时刻井内温度与盐度呈线性分布,模拟 4.5 d 后,井筒上部区域盐度显著升高,温盐总体呈层状分布。

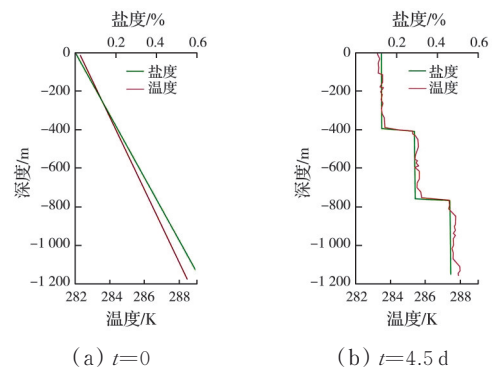


图7 温度和盐度沿井中心轴的垂直分布

Fig. 7 Vertical distribution of temperature and salinity along the central axis of the well

沿海含水层与海岛区域的地热开发系统同样存在温盐双扩散对流效应。受气候影响,各海域降水量、蒸发量存在差异,海洋盐度分布不均,进而形成盐度梯度。在地热开发过程中,注采井内水体与周边地层存在温度梯度,进而诱发热盐双扩散对流(如图8所示)。一方面,温度梯度对该区域的盐度通量产生影响,盐度梯度亦可反过来改变热通量大小。特别是在密度驱动流作用下,两类梯度相互耦合时,温度梯度增大会降低盐度通量,而盐度梯度

增大会减少热源的热损失^[51]。由此可见,探究水平温度梯度与盐度梯度耦合诱发的密度驱动流,对该类地热开发具有重要意义。

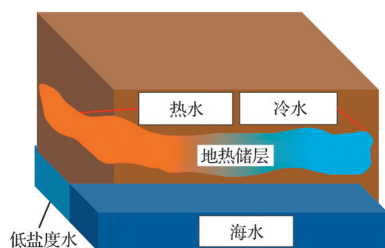


图 8 水平盐度梯度和温度梯度下的地热储层^[51]

Fig. 8 Geothermal reservoirs under horizontal salinity gradients and temperature gradients^[51]

2) 咸水层 CO₂ 地质封存

咸水层孔隙度与渗透率较高,可实现大规模 CO₂ 地质封存^[52]。溶解封存是长期储存 CO₂ 的重要机制。溶解封存过程中,如果发生密度驱动的对流混合,将大幅提升 CO₂ 的溶解速率^[53]。咸水层内 CO₂ 的对流溶解过程如图 9 所示。对流混合的产生,一方面是部分注入的 CO₂ 溶于地层后高密度富含 CO₂ 的流体位于低密度原生流体上方,造成浮力驱动的对流失稳^[54-56]。如图 10 所示,该不稳定性促进了富含 CO₂ 的流体向下扩散,溶质瑞利数(Ra_s)升高,CO₂ 扩散能力增强,显著提升了 CO₂ 在地层盐水中的溶解速率^[57]。

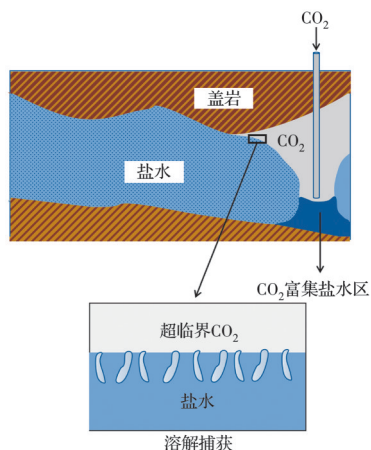
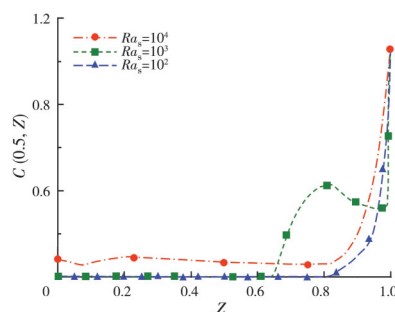


图 9 咸水层中 CO₂ 的对流溶解示意图

Fig. 9 Schematic diagram of CO₂ convective dissolution in saline aquifer

另一方面,地层垂直的温度梯度同样会改变含水层内的流体密度。温差与浓度差的共同作用使 CO₂ 注入后体系失稳,进而诱发双扩散自然对流^[58]。但有学者发现^[59],相较深层含水层内 CO₂ 溶解扩散产生的密度驱动流,温度梯度对含水层中对流的开始时间无显著影响;因此,在线性稳定性分析中,可采用等温条件对该类含水层的 CO₂ 封存开展长期数



注: C 为 CO₂ 溶液浓度; Z 为纵向无量纲距离; Ra_T (热瑞利数)=100; Le (路易斯数)=1。

图 10 不同 Ra_s 下的 CO₂ 浓度分布^[57]

Fig. 10 CO₂ concentration profiles for different Ra_s ^[57]

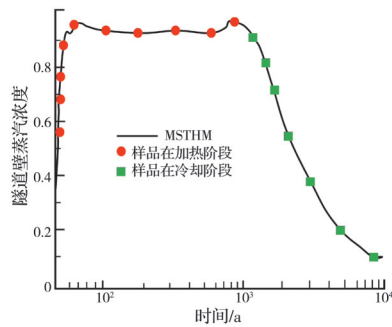
值模拟。Islam 等^[60]也对该理论开展了数值分析,发现垂直方向的浓度差与温度差诱发的双扩散自然对流会加快 CO₂ 溶于盐水中的速率,除非浮力比 N 较低且趋近 1,否则温度梯度不会显著干扰自然对流过程,该结论与前述研究成果一致。随后,Islam 等^[61-62]也进行了线性稳定性分析,结果表明,温度效应对整体溶解过程影响微弱,通常可忽略,仅在超长期模拟(大于 500 a)中需要考虑。

3) 核废料处理

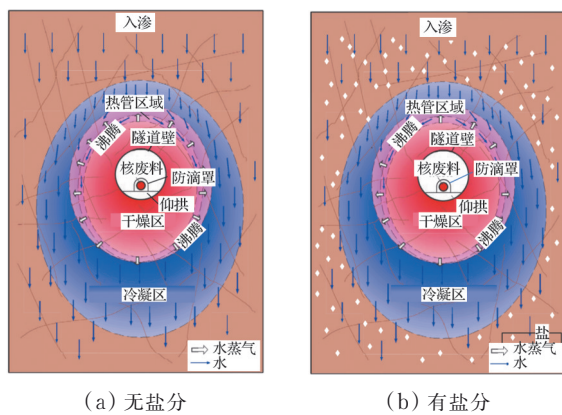
岩盐具有极低的孔隙度和渗透率、稳定的力学性能和良好的密封性,且能形成巨大的地下空间,因此,盐穴、盐矿被广泛用作地下能源储存介质和核废料贮存区^[63-64]。核废料的放射性衰变会释放热量,改变核废料处置库安置隧道中的溶质运移过程,不仅引发热-盐、水-热双扩散,还会在储存库周围形成高于沸点的温度区域^[65]。一方面,高温将促使周围岩石中的水分蒸发,在一定程度上延缓液态水与核废料包装的接触。蒸发后的水分会迁移到安置隧道中,双扩散对流将推动水蒸气从热域输送到冷域,造成水分凝结,冷凝水分可能腐蚀防滴罩和废料包装材料。另一方面,热量扩散会促进围岩矿物溶解,在化学作用下引发矿物蚀变^[66],改变岩石孔隙度和渗透性,增大放射性核素运移至地下含水层的可能性;防控地下水放射性污染是评估储存库整体系统性能的焦点^[65,67]。因此,现阶段针对盐穴或其他地下空间核废料处理的双扩散问题,主要考虑单纯的水-热双扩散或 CO₂ 影响下的水-热双扩散。

对于非饱和区核废料处置库安置隧道内的水-热双扩散对流现象,Hao 等^[67]研究表明,在模拟隧道内热量与溶质运移过程时,热浮力和质量浮力的耦合效应发挥着重要作用。如图 11 所示,在隧道临近冷却区域,热浮力可增强蒸汽浓度梯度产生的质量浮力,进一步促进隧道内水蒸气的运移。

Spycher 等^[68]研究发现,在水-热双扩散过程中,

图11 两个不同阶段隧道壁的蒸汽浓度演化^[67]Fig. 11 Vapor concentration evolution of tunnel walls at two different stages^[67]

蒸汽冷凝水向沸腾锋回流,并在此受热,持续沸腾,该过程会在干燥区与冷凝区间形成热管区域,如图12(a)所示,该规律与Hao等^[67]的研究结果吻合。但Spycher等^[68]进一步考虑了CO₂引起的矿物蚀变效应,具体过程为:高温区内孔隙水蒸发使CO₂从溶解态无机碳酸盐中逸出,引发化学反应,生成并沉淀方解石;而在冷凝区,孔隙水含量升高,CO₂持续溶解,环境的pH值下降,经化学反应溶解方解石,使围岩中的孔隙、流动通道增多,最终降低核废料处置库的安全性能。

图12 核废物安置隧道周围水-热双扩散过程概念模型^[68]Fig. 12 Conceptual model of water-heat double diffusion process around a nuclear waste placement tunnel^[68]

然而,将核废料贮存于盐穴时,如图12(b)所示,盐度梯度和温度梯度耦合形成热盐双扩散效应,盐分扩散不仅会影响水蒸气的运移过程,热量扩散还会抬升围岩温度,造成部分岩盐溶解、孔隙度增大,促使放射性核素向地下水迁移,引发不利后果。若在地下盐穴内贮存核废料,岩石裂隙内的盐分扩散过程会受温度场影响,回填物(如黏土)与裂隙水之间的盐交换将通过浮力效应提升放射性核素的逃逸率^[69]。但现有针对盐穴、盐矿核废料处置的热盐双扩散研究十分匮乏,因此,亟须依托岩石热盐双扩散耦合理论评估盐穴内核废料处置的有效性与安全性。

2.2 热盐双扩散耦合理论

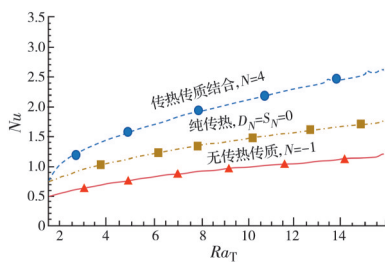
针对工程实例,目前已有诸多针对多孔介质的热盐双扩散耦合理论。在岩土与地下工程中,咸水岩层与地热储层属于大尺度多孔介质体系,因此多孔介质双扩散对流理论同样适用。例如,随着CO₂的地质储存增多,文献[70]将多孔介质的双扩散对流与咸水层的自然对流过程联系起来。Bouzgarrou等^[57]基于多孔介质的非定常双扩散对流机理,采用二维动力学模型对GCS进行数值模拟,分析多个控制参数(热瑞利数 Ra_T 、溶质瑞利数 Ra_s 、路易斯数 Le 和储层纵横比 A)对储层中热盐扩散及分布规律的影响,最终得到了温度与浓度的时空分布特征。针对同样的问题,Bouzgarrou等^[5]采用经典有限体积法进行数值求解,绘制了压力、速度、温度、浓度与上述4个控制参数的关系曲线,用于估计注入CO₂后引发的储层介质在双扩散对流作用下的热盐扩散速率。

早期针对饱和多孔介质二元流体自然对流的研究多围绕底部加热、加盐水平岩层的双扩散稳定性问题展开,研究手段以线性稳定性理论为主,且研究对象为各向同性的多孔介质。Nield^[71]率先基于线性稳定性理论开展了多孔介质双扩散对流的相关研究。在此基础上,Goyeau等^[72]利用Darcy-Brinkman模型给出了动量守恒方程的物理模型,探究了热浮力与溶质浮力耦合驱动的多孔介质自然对流规律。Mohamad等^[73]采用上述研究方法发现,当溶质浮力与热浮力比值处于特定区间时,流体流动将失稳。

鉴于岩石具有非均质性与各向异性,为探究各向异性对多孔介质双扩散对流的影响规律,Bennacer等^[74]将Darcy定律的Brinkman扩展模型用于高孔隙率各向异性多孔介质的双扩散对流研究,分析了 Ra_T 、 N 、 K 、 Le 、 A 对热盐分布特征的影响,结果表明,相同条件下,各向异性与各向同性多孔介质的热盐分布规律存在显著差异。Nield等^[75]分别研究了强、弱非均匀性对地层内部加热与溶质梯度耦合作用诱发双扩散对流的影响机制,结果表明,施加垂直盐度梯度时,双扩散对流的开始时间受系统非均匀性的影响。若孔隙度沿竖向递增,溶质瑞利数 Ra_s 减小,溶质扩散效应减弱,进而推迟对流失稳的开始时间。

在连续体假设下,描述流体与岩体间热量交换的模型有局部热平衡模型(LTE)和局部热非平衡模型(LTNE)。在地热系统等工程场景中,流体与岩体存在温度梯度,且二者的热扩散率也显著不同,难以完全满足LTE模型的假设,因此,诸多学者采用LTNE模型结合非线性稳定性理论开展多孔

介质双扩散对流相关研究。LTNE 模型假定多孔介质表征单元体内的流相与固相间存在热量交换,需分别建立各相能量守恒方程,并将相间的热量交换作为源项,此时多孔介质满足局部热非平衡条件^[76]。Malashetty 等^[77]利用非线性稳定性理论分析底部加热、顶部冷却条件下饱和多孔介质处于 LTNE 状态的双扩散对流规律,指出 LTNE 状态对热盐分布有显著影响。Bera 等^[78]则认为 LTNE 状态对传热速率、温度分布的影响显著,对传质过程的影响可忽略。Lakshmi 等^[79]同样基于 LTNE 假设探究双扩散对流,结果表明,温度梯度与溶质梯度叠加会使浮力效应增强,随着浮力比的增加,热量与溶质的传输速率均会提高,如图 13 所示。



注: Nu 为努塞尔数; Ra_T 为热瑞利数; D_N 为杜伏数; S_N 为索瑞数; 所采用参考值 $A=1$, $Le=1$, $D_N=0.05$, $S_N=0.03$ 。

图 13 不同 N 下 Nu 与 Ra_T 的关系图^[79]

Fig. 13 Relationship between Nu and Ra_T under different N ^[79]

近年来,多孔介质内热盐双扩散耦合理论已取得较大进展,众多学者针对各类问题推导得到一系列解析解、半解析解与数值解。

1) 解析解

求解解析解需对模型进行合理简化并引入若干理论假设。在多孔介质双扩散对流的相关研究中,多数研究者采用引入 Boussinesq 近似的 Darcy 模型,结合平行流近似理论进行解析求解。Boussinesq 近似指自然对流问题中仅动量方程浮力项的密度取温度相关变量,其余控制方程内的密度均近似为常数,该假设可大幅降低控制方程的求解难度、减小计算量。Benhadji 等^[80]基于 Boussinesq 近似的 Darcy 模型探究饱和浅孔腔内非牛顿流体的双扩散对流,借助平行流理论完成解析求解,推导出努塞尔数 Nu 与舍伍德数 Sh 的解析解,该解析解与数值解基本一致。Kalla 等^[81]结合平行流近似理论和 Boussinesq 近似研究了 Ra_T 、 Le 、 N 对双扩散对流的影响,同样验证了解析解与数值解的一致性。Makayssi 等^[82]采用上述方法研究了非牛顿幂律流体内部双扩散自然对流,相较 Kalla 等^[81]的研究还考虑了幂律行为指数 N' 、广义普朗特数 Pr 对热质扩散的影响,结果表明,随着 N' 的增加,流体流动强度减弱,热质扩散速率降低;当 Pr 取值足够大时,双扩散对

流整体特征不再随 Pr 改变。

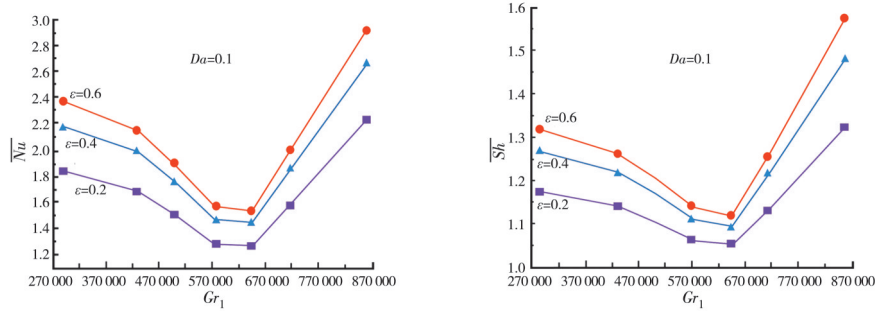
2) 半解析解

解析解可规避数值解对算力的需求并给出高精度结果,因其不存在数值误差,有助于更深入地揭示物理过程。但解析解通常仅适用于特定边界条件与几何构型,若不对控制方程做大幅简化,则难以求解得到解析解。半解析解结合了解析解的高准确性与数值解的高灵活性,能求解复杂、实际边界条件下的完整数学模型。采用傅立叶级数 (FS) 方法求解密度驱动流模型获得的解析解与半解析解通常仅适用于二维稳态情形^[51]。Fahs 等^[83]研究了在方形多孔空腔垂直壁处施加不同盐浓度形成的密度驱动流,使用傅立叶-伽辽金 (FG) 方法获得二维条件下速度与浓度分布的稳态半解析解,并通过数值模拟验证了该半解析解的正确性。

当多孔介质性质、流体性质与边界条件在三维方向上的变化均可忽略时,二维模拟的有效性才能满足要求。随着计算能力的提高,三维密度驱动流 (DDF) 的模拟变得更容易,诸多学者开始采用三维模拟结果验证半解析解的正确性。Shao 等^[84]使用 FG 法推导得到一套半解析解,用以描述三维多孔介质内两组水平交叉盐度梯度诱发的 DDF,但该研究未考虑温度梯度的影响。Tabrizinejadas 等^[51]基于 Shao 等^[84]的研究将 FS 扩展至求解水平交叉温度梯度与浓度梯度共同作用下多孔介质热盐双扩散对流问题,分析了二者耦合作用产生的密度驱动流,获得瞬态三维半解析解。结果表明,浮力比 N 的改变会显著影响流动方向与流动强度,且温度梯度的增加会降低盐度通量。

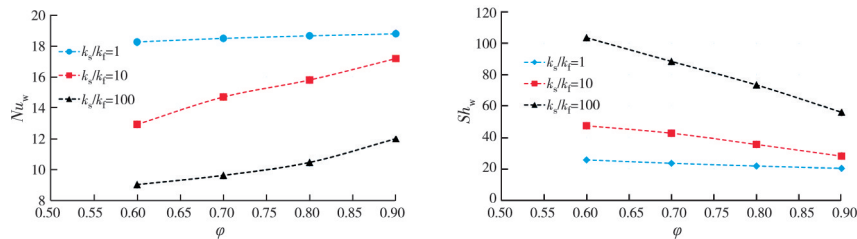
3) 数值解

由于解析解求解难度较大,且需要对模型进行进一步简化,多数学者依托数值方法求解控制方程,以此获得数值解。研究早期,学者多采用有限差分法对控制方程进行离散求解。Chamkha 等^[85]研究了在均匀多孔介质填充的矩形外壳内二元流体的非定常层流双扩散对流问题,基于有限差分法得到数值解,并讨论了各种参数对浓度与温度分布的影响。后续研究多采用有限体积法开展数值求解。Sivasankaran 等^[86]采用有限体积法分析了温度梯度与浓度梯度对多孔腔内浮力驱动自然对流密度极值区域的影响规律,结果表明,热盐输运速率随达西数和孔隙率的增大而增加,且受到密度极大值的影响。Carvalho 等^[87]基于 LTNE 模型同样指出 Nu 和 Sh 的大小与孔隙率相关,同时强调热导率也是重要控制因素。图 14 为 Sivasankaran 等^[86]和 Carvalho 等^[87]得到的 Nu 、 Sh 与孔隙率、孔隙比的关系。



注: ε 为孔隙率; Da 为达西数; Gr_1 为格拉晓夫数。

(a) 不同孔隙率下 $\overline{Nu}$ 、 $\overline{Sh}$ 与 Gr_1 的关系^[86]



注: k_s/k_f 为固液热导率比; φ 为孔隙比。

(b) 不同固液热导率比下 Nu 、 Sh 与孔隙比的关系^[87]

图 14 不同研究团队的研究成果^[86-87]

Fig. 14 Research results from different research teams^[86-87]

随着数值方法的逐步成熟,学者开展了双扩散对流的三维模拟研究。Hadidi 等^[88-89]研究了 N 、 Le 对热盐扩散的影响,分别完成二维、三维流动数值模拟。Zhu 等^[90]基于广义非达西模型模拟反向热浮力、溶质浮力共同作用下的三维非定常双扩散自然对流,采用高阶有限体积法得到流动结构与热盐分布特征。结果表明,随各向异性比 h 、浮力比 N 、溶质数 Ra 的增加,流动结构由传导为主变为以对流为主,从而影响热盐的分布特征。近年来,受工业应用需求推动,内部加热多孔介质内的双扩散对流得到广泛关注。Ali 等^[91]研究了内部加热非均匀各向异性多孔介质内的双扩散对流,结果表明,内部加热能提升热质传递速率。

岩体属于多孔介质,但内部裂隙会使热盐双扩散耦合过程更为复杂,若仅采用单一多孔介质模型描述裂隙岩体的双扩散耦合过程,计算结果会与实际工况产生偏差。Warren 等^[92]提出双孔隙介质系统模型(如图 15 所示),该模型包含有孔隙的基质系统和裂隙系统,可模拟裂隙岩体内的流体流动,两个系统按照特定规律进行彼此间的传热、传质交换。

目前针对岩石裂隙内热盐双扩散耦合特性的研究仍较为匮乏,尤其在地下盐穴核废料贮存工程中,鲜有考虑安置隧道围岩裂隙的热盐双扩散耦合效应对热盐运移的影响。Wang 等^[93]的研究表明,碳酸盐岩区裂隙发育程度高,裂隙水流动会改变热扩

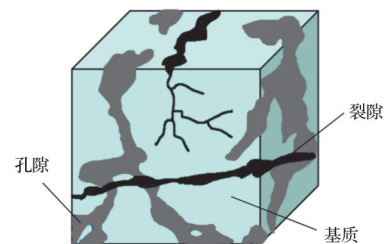


图 15 储层双孔隙介质系统示意图

Fig. 15 Schematic diagram of reservoir double-porosity media system

散过程,显著影响埋地管道与岩体间的热交换,但该研究未考虑盐分扩散作用。碳酸盐岩区域浅层地热资源丰富、换热能力强,是浅层地热能开发的优质区域,因此,亟须构建裂隙岩体热盐双扩散耦合理论模型,进一步提升该类场地的地热提取效率。

3 模型讨论与对比

表 1 汇总了岩土体热盐双扩散耦合领域部分代表性理论模型,梳理并对比了各模型的特点与基本假设。表 1 内土体类热盐扩散模型大多假定土体为各向同性介质,同时考虑了非等温条件。其中,模型 1 仅可预测稳态条件下盐渍土的土水分分布情况,且仅与无溶质简化理论做对比,计算精度不高;模型 2 考虑垄沟状土体表面与大气间的热质交换,更贴合田间的实际条件,模拟精度较好;模型 3 适用于模拟冻土条件下的路基工程问题,考虑风速、热

辐射、蒸发、湿度条件,但并未考虑盐分结晶对路基的影响;模型 4 适用于模拟干燥、湿润地区土体的热盐扩散过程,考虑含水量减少、盐分析出引起的孔隙度、导热性、渗透率及水力特性变化,模拟结果与试验观测值一致性较好;模型 5 针对盐渍土冻结问题,在已有模型基础上分析了冻土水、气相变对热盐扩散的影响,适用于寒区干旱环境下的非饱和土体,计算精度较好。

岩体与土体的相同点在于,二者控制方程的建立均基于 3 个基本方程,即连续性方程(质量守恒方程)、动量守恒方程和能量守恒方程。岩体热盐双扩散模型的构建基本依据多孔介质双扩散对流理论,大部分采用 Boussinesq 假设和 Darcy-Brinkman 模型。其中,模型 1 仅适用于孔隙流体处于力学平衡状态的情况,限定浓度、温度仅沿横向变化,且垂

直方向的浓度梯度、温度梯度不超过特定值,利用该模型得出的模拟结果能较好地反映各状态变量的时空演变规律;模型 2 限定浓度、温度沿垂直方向无变化,浓度梯度与温度梯度仅存在于水平方向,该模型可在一定程度上反映倾角对多孔介质双扩散对流的影响,模拟精度较好;模型 3 在模型 2 的基础上进行了改进,但仍存在局限性,虽为三维模型,但浓度和温度变化仅体现在水平方向上;模型 4 适用于描述渗透率各向异性多孔介质内的三维双扩散对流,模拟精度较好,但限定温度、浓度梯度仅存在于垂直方向;模型 5 的优势在于结合了自然对流双能量方程模型与双扩散模型;模型 6 适用于温度与浓度梯度呈水平交叉分布的工况,其优势为考虑了多方向的温度与浓度变化,缺点是仅适用于各向同性多孔介质。

表 1 岩土体热盐双扩散耦合模型
Table 1 Coupling model of thermohaline double diffusion in rock and soil body

介质	模型	模型特征及对比
土体	1. Nassar 等 ^[1,20]	1)一维非定常条件;2)均质各向同性;3)考虑盐分析出
	2. Noborio 等 ^[3]	1)二维非定常条件;2)均质各向同性;3)未考虑盐分析出
	3. Wang 等 ^[94]	1)热非平衡条件;2)水汽相变、水冰相变;3)未考虑盐分析出
	4. Gran 等 ^[95]	1)非等温条件;2)考虑盐分析出及其对孔隙率、热导率、水力性质的影响
	5. Zhang 等 ^[31]	1)各向同性;2)水冰相变;3)考虑盐分析出
岩体	1. Bouzgarrou 等 ^[57]	1)二维非定常条件;2)热平衡条件;3)Boussinesq 近似;4)流体呈各向异性
	2. Hadidi 等 ^[88]	1)均质各向同性;2)二维非定常条件;3)局部热平衡条件;4)Boussinesq 近似;5)Darcy-Brinkman 模型
	3. Hadidi 等 ^[89]	1)均质各向同性;2)三维非定常条件;3)热平衡条件;4)Boussinesq 近似;5)Darcy-Brinkman 模型
	4. Zhu 等 ^[90]	1)各向异性;2)三维非定常条件;3)局部热平衡条件;4)Boussinesq 近似;5)Darcy-Brinkman 模型
	5. Carvalho 等 ^[87]	1)各向同性;2)二维非定常条件;3)局部热非平衡条件;4)双能量传热方程
	6. Tabrizinejadas 等 ^[51]	1)均质各向同性;2)三维非定常条件;3)Boussinesq 近似;4)广义 Darcy 模型

由于岩体存在裂隙,相关研究更为复杂,仅考虑岩体多孔基质无法贴合实际工况。因此,未来需将孔隙介质与裂隙介质分开考虑,进一步开展岩体裂隙内的热盐双扩散耦合研究。此外,在土体与岩体热盐双扩散耦合研究中,因工程背景存在差异,二者的边界条件有所不同。在所述工程问题中,土体模型需考虑热辐射、覆盖条件等因素,并根据实际工程条件计入相变效应;岩体模型则需考虑地热储层温度梯度对岩体热盐双扩散的影响,因此其控制方程大多引入局部热非平衡模型假设进行构建。

4 结论与展望

分别以土体、岩体为研究对象,系统总结了岩土体热盐双扩散耦合理论的研究进展。现有研究表明,土体热盐双扩散过程离不开水分运移,不同温度条件下,土中水分的蒸发与冻结会引起水的相变,而水分相变是热盐迁移的根本驱动力,直接影响热盐双扩散过程。相比之下,关于岩体热盐双扩

散耦合理论的研究相对较少。基于多孔介质双扩散对流理论,总结梳理了现有热盐双扩散耦合模型。通过文献梳理发现,现有研究对土体冰、水相变及岩体裂隙对热盐双扩散的影响考量不足,后续可从以下方面开展进一步研究:

1)冻结条件下,冰、水相变与盐分结晶动态演化过程中的热量传递和盐分输运会引发复杂的热盐双扩散过程;结冰与盐结晶诱发的力学响应存在差异,目前该方向仍有待深入研究。例如,可基于毛细作用、吸附薄膜理论、薄膜水迁移理论等水分迁移理论,开展正、负温条件下非饱和盐渍土热盐耦合迁移机制的室内试验,重点探究不同冻结条件下盐渍土的热盐运移规律。

2)目前岩石热盐双扩散耦合理论的研究较少,且多局限于岩石基质,忽略了裂隙内双扩散效应。在地热开发、CO₂地质封存、核废料处理等工程领域,针对岩体基质-裂隙热盐双扩散耦合效应的研究尤为匮乏。因此,可在现有多孔介质双扩散对流模

型基础上,结合地下涉盐工程实际设定边界条件,开展不同裂隙空间分布、不同温盐梯度方向下的岩土体热盐双扩散的数值模拟研究。

3)土、石质文物劣化机理涉及岩土体热盐扩散与力学破坏的耦合作用,盐分结晶产生的撑裂效应是文物劣化的核心诱因。现有研究仅侧重分析温湿度变化对盐分结晶的影响,忽略了文物内部热盐双扩散的动态演化过程。后续试验可采用宏观与微观相结合的手段,探究干湿、冻融循环条件下土、石质文物热盐耦合迁移规律,并结合损伤力学理论,揭示热盐双扩散作用下土、石质文物的劣化机理。

参考文献

- [1] Nassar I N, Horton R. Water transport in unsaturated nonisothermal salty soil: I. Experimental results[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(5): 1323-1329.
- [2] Noborio K, McInnes K J, Heilman J L. Two-dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil: II. Field evaluation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1010-1021.
- [3] Noborio K, McInnes K J, Heilman J L. Two-dimensional model for water, heat, and solute transport in furrow-irrigated soil: I. Theory[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1001-1009.
- [4] Tizakast Y, Kaddiri M, Lamsaadi M. Double-diffusive mixed convection in rectangular cavities filled with non-Newtonian fluids[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 208: 106667.
- [5] Bouzgarrou S, Akermi M, Nasr S, et al. CO₂ storage in porous media unsteady thermosolutal natural convection-Application in deep saline aquifer reservoirs[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2023, 125: 103890.
- [6] Alzahrani S M. Enhancing thermal performance: a numerical study of MHD double diffusive natural convection in a hybrid nanofluid-filled quadrantal enclosure[J]. AIMS Mathematics, 2024, 9(4): 9267-9286.
- [7] Emami-Meybodi H, Hassanzadeh H. Two-phase convective mixing under a buoyant plume of CO₂ in deep saline aquifers[J]. Advances in Water Resources, 2015, 76: 55-71.
- [8] Zhang X D, Ye P, Wu Y J, et al. Experimental study on simultaneous heat-water-salt migration of bare soil subjected to evaporation[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127710.
- [9] Zhang X D, Shu C J, Fujii M, et al. Numerical and experimental study on water-heat-salt transport patterns in shallow bare soil with varying salt contents under evaporative conditions: a comparative investigation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 621: 129564.
- [10] Wen W, Lai Y M, You Z M. Numerical modeling of water-heat-vapor-salt transport in unsaturated soil under evaporation[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 159: 120114.
- [11] 李文昊, 王振华, 王凯飞. 蒸发条件下地下水埋深对土壤水盐含量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2020, 38(4): 443-448.
Li W H, Wang Z H, Wang K F. Effect of groundwater depth on soil water and salt content under evaporation[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2020, 38(4): 443-448. (in Chinese)
- [12] 张晓光, 孔繁昌. 基于模拟蒸发数据的滨海盐渍土水分光谱模型[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 14-19.
Zhang X G, Kong F C. Using hyperspectral imagery to estimate soil moisture and calculate evapotranspiration from coastal saline soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 14-19. (in Chinese)
- [13] Zhang X D, Shu C J, Wu Y J, et al. Advances of coupled water-heat-salt theory and test techniques for soils in cold and arid regions: a review[J]. Geoderma, 2023, 432: 116378.
- [14] Philip J R, de Vries D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. Transactions, American Geophysical Union, 1957, 38(2): 222-232.
- [15] Milly P C D. Moisture and heat transport in hysteretic, inhomogeneous porous media: a matric head-based formulation and a numerical model[J]. Water Resources Research, 1982, 18(3): 489-498.
- [16] Milly P C D. A simulation analysis of thermal effects on evaporation from soil[J]. Water Resources Research, 1984, 20(8): 1087-1098.
- [17] Harlan R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.
- [18] Taylor S A, Cary J W. Linear equations for the simultaneous flow of matter and energy in a continuous soil system[J]. Soil Science Society of America Journal, 1964, 28(2): 167-172.
- [19] Cary J W, Papendick R I, Campbell G S. Water and salt movement in unsaturated frozen soil: principles and field observations[J]. Soil Science Society of America Journal, 1979, 43(1): 3-8.
- [20] Nassar I N, Horton R. Water transport in unsaturated nonisothermal salty soil: II. Theoretical development[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(5): 1330-1337.
- [21] Nassar I N, Horton R. Salinity and compaction effects on soil water evaporation and water and solute distribu-

- tions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(4): 752.
- [22] Nachshon U, Weisbrod N, Dragila M I, et al. Combined evaporation and salt precipitation in homogeneous and heterogeneous porous media[J]. Water Resources Research, 2011, 47(3): W03513.
- [23] Gran M, Carrera J, Massana J, et al. Dynamics of water vapor flux and water separation processes during evaporation from a salty dry soil[J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(3/4): 215-220.
- [24] Wu D Y, Lai Y M, Zhang M Y. Thermo-hydro-salt-mechanical coupled model for saturated porous media based on crystallization kinetics[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 133: 94-107.
- [25] Zhang J, Lai Y M, Li J F, et al. Study on the influence of hydro-thermal-salt-mechanical interaction in saturated frozen sulfate saline soil based on crystallization kinetics [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 146: 118868.
- [26] Wan X S, Liu E L, Qiu E X, et al. Study on phase changes of ice and salt in saline soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 172: 102988.
- [27] 孟祥传, 周家作, 韦昌富, 等. 盐分对土的冻结温度及未冻水含量的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 952-960.
- Meng X C, Zhou J Z, Wei C F, et al. Effects of salinity on soil freezing temperature and unfrozen water content [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 952-960. (in Chinese)
- [28] Wang C, Lai Y M, Yu F, et al. Estimating the freezing-thawing hysteresis of chloride saline soils based on the phase transition theory[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 135: 22-33.
- [29] Bing H, Ma W. Laboratory investigation of the freezing point of saline soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(1/2): 79-88.
- [30] Zhang Y, Tian R Z, Wang T L. Study on salt expansion mechanism of subgrade-culvert transition section in saline soils and cold regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 205: 103701.
- [31] Zhang X D, Zhai E C, Wu Y J, et al. Theoretical and numerical analyses on hydro-thermal-salt-mechanical interaction of unsaturated salinized soil subjected to typical unidirectional freezing process[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(7): 04021104.
- [32] 严绍军, 彭立洲, 农明艳, 等. 大雁塔盐害及劣化模拟试验研究[J]. 文物保护与考古科学, 2022, 34(1): 71-78.
- Yan S J, Peng L Z, Nong M Y, et al. Research on the salt disease and deterioration simulation of the Great Wild Goose Pagoda[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2022, 34(1): 71-78. (in Chinese)
- [33] Yan S J, Xie N, Liu J H, et al. Salt weathering of sandstone under dehydration and moisture absorption cycles: an experimental study on the sandstone from Dazu rock carvings[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2022, 47(4): 977-993.
- [34] Wellman H W, Wilson A T. Salt weathering, a neglected geological erosive agent in coastal and arid environments[J]. Nature, 1965, 205: 1097-1098.
- [35] Dong Y, Peng N B, Hong J, et al. Experimental study on salt weathering of sandstone with different weathering degrees[J]. Journal of Asian Architecture and Building Engineering, 2024, 23(3): 1036-1049.
- [36] 杨鸿锐, 刘平, 孙博, 等. 冻融循环对麦积山石窟砂砾岩微观结构损伤机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(3): 545-555.
- Yang H R, Liu P, Sun B, et al. Study on damage mechanisms of the microstructure of sandy conglomerate at Maijishan grottoes under freeze-thaw cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(3): 545-555. (in Chinese)
- [37] Lu X H, Li R P, Shi H B, et al. Successive simulations of soil water-heat-salt transport in one whole year of agriculture after different mulching treatments and autumn irrigation[J]. Geoderma, 2019, 344: 99-107.
- [38] Wang W N, Wang W S, Wang P, et al. Impact of straw return on soil temperature and water during the freeze-thaw period[J]. Agricultural Water Management, 2023, 282: 108292.
- [39] Tan X, Wu J W, Wu M S, et al. Effects of ice cover on soil water, heat, and solute movement: an experimental study[J]. Geoderma, 2021, 403: 115209.
- [40] Li Z G, Zhang S B, Meng X H, et al. Effect of snow cover on water and heat transfer in alpine meadows in the source region of Yellow River[J]. Science of the Total Environment, 2023, 859: 160205.
- [41] Tizakast Y, Kaddiri M, Lamsaadi M. Rayleigh-Bénard double-diffusive mixed convection in two-dimensional rectangular cavities filled with non-Newtonian fluids[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 227: 107448.
- [42] Li Q, Lin Z J, Cai W H, et al. Dissolution-driven convection of low solubility fluids in porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 217: 124624.
- [43] Bao T, Liu Z. Geothermal energy from flooded mines: modeling of transient energy recovery with thermohaline stratification[J]. Energy Conversion and Management,

- 2019, 199: 111956.
- [44] Bao T, Liu Z, Meldrum J, et al. Field tests and multi-physics analysis of a flooded shaft for geothermal applications with mine water[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 169: 174-185.
- [45] Bao T, Cao H, Qin Y H, et al. Critical insights into thermohaline stratification for geothermal energy recovery from flooded mines with mine water[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 273: 122989.
- [46] Colombani N, Fronzi D, Palpacelli S, et al. Modelling shallow groundwater evaporation rates from a large tank experiment[J]. *Water Resources Management*, 2021, 35(10): 3339-3354.
- [47] Paldor A, Aharonov E, Katz O. Thermo-haline circulations in subsea confined aquifers produce saline, steady-state deep submarine groundwater discharge[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 580: 124276.
- [48] van Lopik J H, Hartog N, Zaadnoordijk W J, et al. Salinization in a stratified aquifer induced by heat transfer from well casings[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 86: 32-45.
- [49] Radko T, Bulters A, Flanagan J D, et al. Double-diffusive recipes. Part I: Large-scale dynamics of thermohaline staircases[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2014, 44(5): 1269-1284.
- [50] Bao T, Liu Z. Thermohaline stratification modeling in mine water via double-diffusive convection for geothermal energy recovery from flooded mines[J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 566-580.
- [51] Tabrizinejadas S, Fahs M, Ataie-Ashtiani B, et al. A Fourier series solution for transient three-dimensional thermohaline convection in porous enclosures[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(11): e2020wr028111.
- [52] Kumar S, Foroozesh J, Edlmann K, et al. A comprehensive review of value-added CO₂ sequestration in subsurface saline aquifers[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 81: 103437.
- [53] Rasmusson M, Fagerlund F, Tsang Y, et al. Prerequisites for density-driven instabilities and convective mixing under broad geological CO₂ storage conditions[J]. *Advances in Water Resources*, 2015, 84: 136-151.
- [54] Green C P, Ennis-King J. Steady dissolution rate due to convective mixing in anisotropic porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 73: 65-73.
- [55] Sainz-Garcia A, Abarca E, Nardi A, et al. Convective mixing fingers and chemistry interaction in carbon storage [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 58: 52-61.
- [56] Thomas C, Dehaeck S, de Wit A. Convective dissolution of CO₂ in water and salt solutions[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 72: 105-116.
- [57] Bouzgarrou S, Harzallah H S, Slimi K. Unsteady double diffusive natural convection in porous media-application to CO₂ storage in deep saline aquifer reservoirs[J]. *Energy Procedia*, 2013, 36: 756-765.
- [58] Emami-Meybodi H, Hassanzadeh H, Green C P, et al. Convective dissolution of CO₂ in saline aquifers: progress in modeling and experiments[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 238-266.
- [59] Javaheri M, Abedi J, Hassanzadeh H. Linear stability analysis of double-diffusive convection in porous media, with application to geological storage of CO₂[J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 84(2): 441-456.
- [60] Islam A W, Sharif M A R, Carlson E S. Numerical investigation of double diffusive natural convection of CO₂ in a brine saturated geothermal reservoir[J]. *Geothermics*, 2013, 48: 101-111.
- [61] Islam A W, Lashgari H R, Sephernoori K. Double diffusive natural convection of CO₂ in a brine saturated geothermal reservoir: study of non-modal growth of perturbations and heterogeneity effects[J]. *Geothermics*, 2014, 51: 325-336.
- [62] Islam A, Korrani A K N, Sepehrnoori K, et al. Effects of geochemical reaction on double diffusive natural convection of CO₂ in brine saturated geothermal reservoir[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 77: 519-528.
- [63] Lankof L. Assessment of Permian Zubers as the host rock for deep geological disposal[J]. *Energies*, 2020, 13(9): 2239.
- [64] Ren Y W, Yuan Q, Kang Y F, et al. Experimental determination of polycrystalline salt rock thermal conductivity, diffusivity and specific heat from 20 to 240 °C[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 835974.
- [65] Huang X, Tang S B, Tang C A, et al. Numerical simulation of cracking behavior in artificially designed rock models subjected to heating from a central borehole[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 98: 191-202.
- [66] Sun Y, Buscheck T A, Lee K H, et al. Modeling thermal-hydrologic processes for a heated fractured rock system: impact of a capillary-pressure maximum[J]. *Transport in Porous Media*, 2010, 83(3): 501-523.
- [67] Hao Y, Nitao J J, Buscheck T A, et al. Double-diffusive natural convection in a nuclear waste repository [J]. *Nuclear Technology*, 2008, 163(1): 38-46.
- [68] Spycher N F, Sonnenthal E L, Apps J A. Fluid flow and reactive transport around potential nuclear waste

- emplacement tunnels at Yucca Mountain, Nevada[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2003, 62: 653-673.
- [69] Winberg-Wang H, Neretnieks I. Visualization of mass transfer between source and seeping water in a variable aperture fracture-Impact of tracer density [J]. *Nuclear Technology*, 2020, 206(10): 1553-1565.
- [70] Gautam K, Narayana P A L, Hill A A. Thermo-convective carbon sequestration in horizontal porous layers[J]. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 2019, 84(3): 650-668.
- [71] Nield D A. Flow of stratified fluids in porous media[J]. *Bulletin of the American Physical Society*, 1968, 13(11): 1597-1610.
- [72] Goyeau B, Songbe J P, Gobin D. Numerical study of double-diffusive natural convection in a porous cavity using the Darcy-Brinkman formulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1996, 39(7): 1363-1378.
- [73] Mohamad A A, Bennacer R. Natural convection in a confined saturated porous medium with horizontal temperature and vertical solutal gradients[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2001, 40(1): 82-93.
- [74] Bennacer R, Tobbal A, Beji H, et al. Double diffusive convection in a vertical enclosure filled with anisotropic porous media[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2001, 40(1): 30-41.
- [75] Nield D A, Kuznetsov A V. The effect of heterogeneity on the onset of double-diffusive convection induced by internal heating in a porous medium: a layered model[J]. *Transport in Porous Media*, 2013, 100(1): 83-99.
- [76] Noon N J, Haddad S A. Stability analysis of double diffusive convection in local thermal non-equilibrium porous medium with internal heat source and reaction effects[J]. *Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics*, 2023, 48(1): 25-39.
- [77] Malashetty M S, Swamy M, Heera R. Double diffusive convection in a porous layer using a thermal non-equilibrium model[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2008, 47(9): 1131-1147.
- [78] Bera P, Pippal S, Sharma A K. A thermal non-equilibrium approach on double-diffusive natural convection in a square porous-medium cavity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 78: 1080-1094.
- [79] Lakshmi K M, Laroze D, Siddheshwar P G. Natural convection of a binary liquid in cylindrical porous annuli/rectangular porous enclosures with cross-diffusion effects under local thermal non-equilibrium state[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 184: 122294.
- [80] Benhadji K, Vasseur P. Double diffusive convection in a shallow porous cavity filled with a non-Newtonian fluid [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2001, 28(6): 763-772.
- [81] Kalla L, Vasseur P, Benacer R, et al. Double diffusive convection within a horizontal porous layer salted from the bottom and heated horizontally[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2001, 28(1): 1-10.
- [82] Makayssi T, Lamsaadi M, Naïmi M, et al. Natural double-diffusive convection in a shallow horizontal rectangular cavity uniformly heated and salted from the side and filled with non-Newtonian power-law fluids: the cooperating case[J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(8): 2016-2025.
- [83] Fahs M, Younes A, Mara T A. A new benchmark semi-analytical solution for density-driven flow in porous media[J]. *Advances in Water Resources*, 2014, 70: 24-35.
- [84] Shao Q, Fahs M, Hoteit H, et al. A 3-D semianalytical solution for density-driven flow in porous media[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(12): 10094-10116.
- [85] Chamkha A J. Double-diffusive convection in a porous enclosure with cooperating temperature and concentration gradients and heat generation or absorption effects [J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2002, 41(1): 65-87.
- [86] Sivasankaran S, Kandaswamy P, Ng C O. Double diffusive convection of anomalous density fluids in a porous cavity[J]. *Transport in Porous Media*, 2008, 71(2): 133-145.
- [87] Carvalho P H S, de Lemos M J S. Double-diffusive laminar free convection in a porous cavity simulated with the two-energy equation model[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2017, 82: 89-96.
- [88] Hadidi N, Bennacer R, Oold-Amer Y. Two-dimensional thermosolutal natural convective heat and mass transfer in a bi-layered and inclined porous enclosure[J]. *Energy*, 2015, 93: 2582-2592.
- [89] Hadidi N, Bennacer R. Heat and mass transfer by natural convection in a bi-layered cubic enclosure with opposing temperature and concentration gradients[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 132: 534-551.
- [90] Zhu Q Y, Zhuang Y J, Yu H Z. Three-dimensional numerical investigation on thermosolutal convection of power-law fluids in anisotropic porous media[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 104: 897-917.
- [91] Ali S A, Rudziva M, Sibanda P, et al. A numerical study of double-diffusive convection in the anisotropic porous layer under rotational modulation with internal heat

- generation[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 137: 106266.
- [92] Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3: 245-255.
- [93] Wang L, Ren Y L, Deng F Q, et al. Study on calculation method of heat exchange capacity and thermal properties of buried pipes in the fractured rock mass-taking a project in carbonate rock area as an example[J]. Energies, 2023, 16(2): 774.
- [94] Wang T H, Hu C S, Li N, et al. Numerical analysis of ground temperature in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China Series E: Technolical Science, 2002, 45(4): 433-443.
- [95] Gran M, Carrera J, Olivella S, et al. Modeling evaporation processes in a saline soil from saturation to oven dry conditions[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(7): 2077-2089.
- (编辑 朱备)