



文章栏目：土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.202011113 中图分类号 X53 文献标识码 A

詹明秀, 刘立朋, 顾海林, 等. 原位热修复过程中土壤内热质传递研究现状与展望[J]. 环境工程学报, 2022, 16(4): 1272-1283. [ZHAN Mingxiu, LIU Lipeng, GU Hailin, et al. Recent advances and prospects of heat and mass transfer in soil during in-situ thermal remediation[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(4): 1272-1283.]

原位热修复过程中土壤内热质传递研究现状与展望

詹明秀^{1,2}, 刘立朋¹, 顾海林^{1,✉}, 张涛³, 韦金义³, 徐旭¹, 焦文涛², 籍龙杰^{2,4}, 田汪洋⁵, 池作和¹

1. 中国计量大学计量测试工程学院, 杭州 310018; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域国家重点实验室, 北京 100085; 3. 广西金投环境科技有限公司, 南宁 530022; 4. 北京建工环境修复股份有限公司, 北京 100015; 5. 浙江宜可环保科技有限公司, 湖州 313000

摘要 近年来, 原位热修复技术因其具有修复周期短、可靠性高、适用性强、二次污染可控等优点, 已被广泛应用于有机污染地块修复领域。概述了国内外原位热修复技术研究进展, 对比了蒸汽强化抽提技术(SEE)、电阻加热技术(ERH)和热传导加热技术(TCH)3种典型原位热修复技术的优缺点和适用条件, 并分析了污染物性质、土壤非均质性、含水率及加热温度等主要因素对不同技术的修复效果的影响。在此基础上, 从理论、实验和数值3方面阐述了原位热修复过程中热质传递机理的研究现状。

关键词 有机污染土壤; 原位热修复技术; 热质传递机理; 数值模拟; 多场耦合

近年来, 土壤污染问题日益严重。我国人口众多、可利用土地资源少, 污染土壤修复问题已成为关注重点^[1]。有机污染(农药、石油烃和多环芳烃)场地面积约占全国超标土壤的35.49%^[2], 高于其他类型的土壤污染。由于污染物种类繁多, 污染场地土壤类型多样、空间差异大, 对土壤修复技术提出了较高要求。现有的土壤修复技术正朝着5大方向发展, 即绿色友好的生物修复、联合组配的原位修复、综合修复、基于设备化的快速场地修复和基于环境功能材料的修复^[3-4]。原位热修复技术因其适用范围广、环境干扰小、修复效果彻底和可操作性强等优势受到广泛关注^[5]。原位热修复技术是少数几种能够去除NAPL的技术之一, 并且涉及使用载气或真空系统, 该系统将挥发的污染物吹扫到气体处理系统, 方便进行二次或异地处置。但是, 由于土壤水分和异质性带来的复杂性, 使得原位热修复技术大规模应用具有挑战性^[6]。

污染土壤修复技术早在二十世纪70年代就已在海外开始应用^[4], 近年由于国内原位热修复需求日益增多, 相关技术被逐步引进。根据加热方式不同, 原位热修复技术主要分为蒸汽强化抽提技术(Steam-Enhanced Extraction, SEE)、电阻加热技术(Electrical Resistive Heating, ERH)和热传导加热技术(Thermal Conduction Heating, TCH)3种^[7]。对于上述3种原位热修复技术, 由于其加热机制不同, 所适用的场合也各不相同。如SEE技术, 仅适用于低沸点、高渗透率的污染物场地, 其修复

收稿日期: 2020-11-20; 录用日期: 2021-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42077126); 国家重点研发计划项目(2018YFC1802100)

第一作者: 詹明秀(1989—), 男, 博士, 副教授, zhanmingxiu@cjlu.edu.cn; ✉通信作者: 顾海林(1990—), 男, 博士, 讲师, hlg@cjlu.edu.cn

效率低但修复成本也较低；ERH 技术同样仅适用于低沸点污染物，但其升温效率和温度均匀性较好；而 TCH 技术可适用于含高沸点污染物场地，修复效果彻底、周期短，但其修复方式粗犷，成本较高。表 1 对比了 3 种典型原位热修复技术的优缺点和各自适用场合。

表 1 典型原位热修复技术优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of typical in-situ thermal repair technology

| 技术手段 | 修复成本概况 | 加热方式 | 温度范围 | 适用场合 | 技术优势 | 技术缺陷 |
|------|-----------------------------------|-----------|-------------------------|--|---|-------------------------------------|
| SEE | 修复挥发性、半挥发性有机物成本较低 ^[10] | 蒸汽、热空气 | 0~170 °C ^[7] | 挥发性有机物，高渗透率土壤，地下流速大 | 去除效率较高、成本低、易操作、可与其他技术灵活组合 | 受土壤不均质性、渗透率、含水率影响大，处理温度低 |
| ERH | 修复成本高 ^[10] | 电阻加热 | 0~100 °C | 挥发性有机物，中低渗透率土壤，适合质地细密的土壤 ^[11] | 对地下非均质性不敏感，加热均匀性强 ^[6] ，可与生物修复联合使用 ^[9] | 不适合干燥的土壤，难以处理高沸点污染物 ^[12] |
| TCH | 修复氯化挥发性有机物成本较高 ^[13] | 电加热棒、高温烟气 | 700~800 °C | 挥发、半挥发、难挥发有机物，中、低渗透率土壤 | 升温速率快，加热温度高，不受渗透率、土壤质地的影响 | 能耗高，易受高地下水通量的影响 |

虽然原位热修复技术的工程应用已较为成熟，积累了丰富的工程经验，但其内在的热质传递机理尚不清晰，由此，导致工程设计往往仅依赖于实践经验而缺乏相关理论指导。本综述将分别从理论、实验、数值研究等方面对原位热修复过程中土壤内热质传递的研究现状与进展进行讨论与分析，以期能够推动土壤原位热修复技术的优化，为工程应用提供参考。

1 原位热修复过程中热质传递机理及影响因素

1.1 蒸汽强化抽提技术 (SEE)

SEE 技术由于其具有易操作、成本低等优势，早期被广为使用。KINGSTON 等^[14]、康绍果等^[15]在研究中提到，自 1988 年到 2007 年蒸汽加热技术的应用案例为 46 例，占总原位加热处理技术的 25.2%。SEE 技术的工作原理如图 1 所示，高温蒸汽或热空气通过加热井注射到深层土壤，提高污染区域温度，使得非水相液体污染物 (Non-aqueous Phase Liquids, NAPLs) 发生解析、溶解和蒸发，在注入气体的推动下移动至抽提区附近进行收集和后处理^[16-18]。其热质传递机理为，在高温蒸汽作用下，NAPLs 粘度降低、移动性增强；同时，当蒸汽与 NAPLs 混合时可能发生正共沸，从而降低了沸点。

SEE 技术修复非水相液体污染物 NAPLs 的效果受其性质影响^[19]，如黏度和挥发性。当污染土壤内通入高温蒸汽，在毛细管压力和重力的共同作用下，驱动 NAPLs、水和蒸汽的共同流动。SEE 技术和轻油采集技术等都是通过注入高温蒸汽增强剩余非水相液体到蒸汽相的传质的方法，使得进入蒸汽中的 NAPLs 被运输到运移的前端并凝结，从而降低原 NAPLs 的黏度，并且高温蒸汽还增加特定区域的蒸汽压和分子扩散系数，其传热效果使 NAPLs 热膨胀，相对渗透率增大，这些机理的综合作用导致了 NAPLs 性质改变，蒸汽驱动效率高。

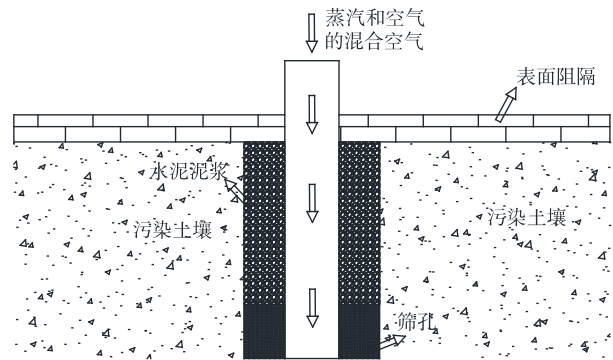


图 1 SEE 技术工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the working principle of SEE technology

非均质性是SEE技术重要影响因素^[20]。作为典型多孔介质的土壤，它的非均质性主要影响了修复区域的气体通透性，较容易形成优势通道，使得气体流经修复区域时沿着优势通道运移，因而出现“绕流”现象，减少了NAPLs随气流的去除量。土壤的非均质性还影响了热量的传递，使热在修复区域前进不均匀，这将导致去除效率的降低。土壤的非均质性会造成吸附性不一致，吸附性越大，去除效果越小。其他如通风流量、土壤含水率、污染物的饱和蒸汽压等也对该技术的修复有一定影响^[21-23]。

1.2 电阻加热技术 (ERH)

ERH技术是一种基于焦耳定律发热原理对土壤进行加热的修复方式^[15]，其原理图如图2所示。ERH的实现方法是将异相电极装在污染场地的不同位置，当通入电流时，土壤、电极和地下水形成回路并产生热量，从而加热土壤。当土壤温度接近沸点时，水分快速蒸发，此时水蒸汽携带污染物蒸汽向上运动；同时，由于水分的挥发，导电性降低，因此，在修复过程中需不断补充水分。有研究表明，电阻加热技术能使土壤快速达到100℃^[9]，但由于水分和土壤孔隙结构的限制，最高达到的温度约120℃。ERH技术并不是直接去除地下污染物，而是在物理、化学和生物条件方面产生变化，促进污染物从地下清除或就地转化为潜在的无毒物质^[24]。

在ERH技术修复过程中，含水率的影响至关重要^[25]。有实验证明了含水量较高的土壤，其升温速率也高于干燥土壤^[26]。此外，水分还能与特定污染物发生正共沸，从而有利于污染物的解析和挥发。HAN等^[27]利用实验室规模ERH设备研究了多环芳烃去除效率的影响因素，水与多环芳烃发生正共沸被证实是ERH去除多环芳烃的主要机理。

电相分布是影响ERH技术修复效果的另一因素^[28-30]。近年来，三相系统和六相系统已经发展成为加热低渗透层的可靠技术^[31-33]。相比三相系统，六相系统加热均匀性更强，可有效防止加热区域中出现未升温区域，但是由三相电转化为六相电的成本较高^[12]，大规模应用受限，六相系统适用于对加热均匀性有硬性要求的实验或工程实践。目前，六相系统多应用于小试研究，而三相系统多用于现场^[8]。有研究表明，电加热引起的热力学变化可以有效去除淤泥和粘土的氯化溶液^[33-34]。电相之间的变换有利于加热区域的均匀性分布，六相系统加热土壤能提高污染物的去除。

此外，电极布置方式、污染物性质、土壤类型等也会对ERH修复技术产生影响^[35]。最佳的电极间距不受土壤类型、水饱和度和地下电导率的影响。电极间距越近，温升越快，修复周期越短，但成本较高。由于土壤类型的不同，其导电系数相差较大，最大可达几百倍，因此修复的难易程度及修复效果也相差较大^[36]。另外，电阻加热会降低NAPLs的黏度和与水的界面张力，增强溶解性，使去除速率加快。上述因素都会不同程度地影响ERH技术的修复效果。

1.3 热传导加热技术 (TCH)

TCH技术利用电加热棒或高温烟气对污染土壤进行加热，热量通过热传导和热对流方式在污染地块中进行传递，土壤内的水分和污染物受热蒸发，由抽提井捕集并输送到地面进行处理，其原理示意图如图3所示。TCH修复过程中涉及了热量传递、水分迁移、蒸汽扩散、多相流动、气

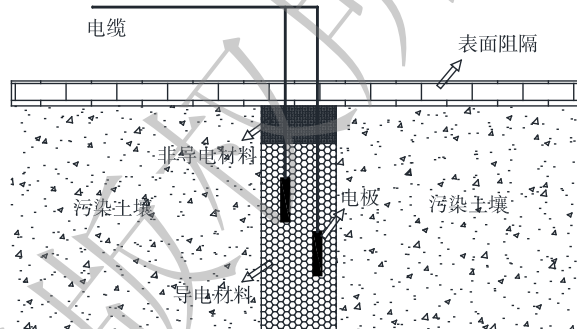


图2 ERH技术工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of ERH technology

液相变和污染物脱附及迁移、热解等机制。BAKER等^[36]和LACHANCE等^[37]阐述了饱和和多孔介质中挥发性有机物TCH修复的相关机制，其中包含了蒸发、蒸馏、沸腾、水解、氧化和热解，并认为最重要的去除机制是蒸发。

加热温度是影响TCH修复过程的主要因素^[38-41]。温度越高，修复周期越短，但能耗和成本也较高，因此，需要进行平衡，一般选取加热温度为500℃^[42]。研究表明^[43]，当加热温度达到一定程度后，升温速率放缓，此时提升温度将导致能量大幅损失。加热温度过高对于环境修复并不可取，在较低温度下，通过延长加热时间也可达到较好的修复效果。

此外，升温速率也是影响TCH热脱附的重要因素。加热速率能够直接控制土壤和载气之间的传热速率以及解吸和降解速率，从而影响去除过程的效率^[44]。白四红等^[45]对多氯联苯污染土壤热脱附的实验研究表明，升温速率增大，降解速率升高，脱附效率下降。其主要原因是，在低温区间主要发生脱附反应，升温速率越慢，脱附反应的时间越长。

2 原位热修复过程中热质传递机制研究进展

土壤作为典型的多孔介质，它包含了土壤固体颗粒、土壤溶液和气体等，因此，在研究土壤热质传递时，利用多孔介质现有的研究成果不失为一种好的方法。土壤中湿分的存在状态对土壤的热质传递特性影响很大，因此，依据土壤中水分含量将土壤的形态大概分为3类：湿饱和土壤(空隙内充满液态水)、非饱和土壤(空隙内同时存在气态和液态水)、干饱和土壤(空隙内只存在气态水)。在自然状态下，土壤大多为包含固体颗粒、水分、蒸汽和空气的非饱和多相系统。在对污染土壤进行原位热修复过程中，科研工作者应充分考虑大气环境等外部因素和土壤物理结构等内部因素对湿分场、温度场及污染物场的影响。然而，这一过程很复杂，难以简单地利用实验方法进行分析，下面将从理论研究、实验研究及数值研究3方面进行阐述。

2.1 理论研究

由于土壤特性和热质传递过程的复杂性，在进行理论研究之前，需要对研究对象进行一定的假设处理。如将土壤视为均质各向同性的不可压缩介质；液相和气相均为连续，忽略气体吸附效应；土壤内空气和水蒸气为理想气体；各相处于局部热平衡；忽略土壤内的热辐射、流体压缩功和粘性耗散；忽略有机污染物相变潜热；忽略重力等。土壤多孔介质主要热质传递机理如图4所示，将迁移机制归纳为热量迁移、湿分迁移、污染物迁移以及耦合迁移4类。

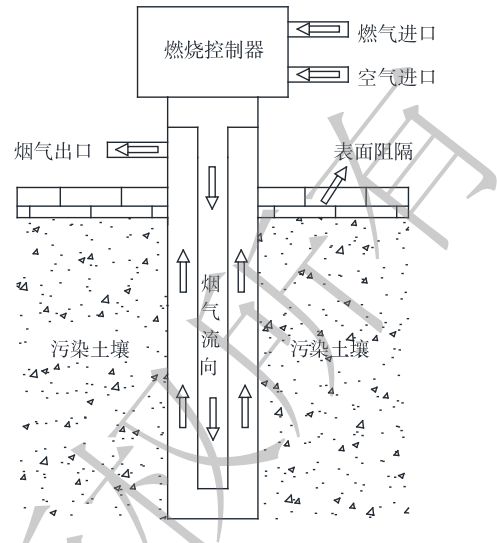


图3 TCH技术(燃气加热)工作原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the working principle of TCH technology (gas heating)

升温速率增大，降解速率升高，脱附效率下降。其主要原因是，在低温区间主要发生脱附反应，升温速率越慢，脱附反应的时间越长。

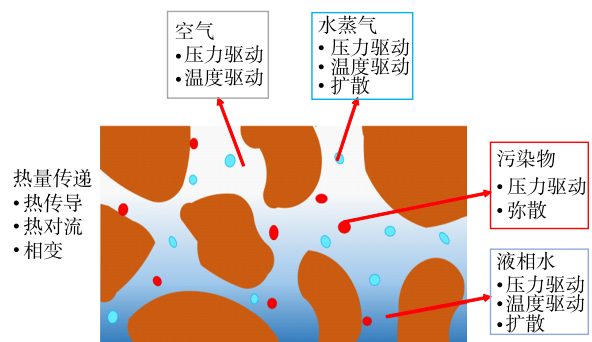


图4 土壤内热质迁移机制示意图

Fig. 4 Schematic diagram of heat and mass transfer mechanism in soil

土壤内湿分迁移包括液相水和水蒸汽。液相水的迁移机制研究从 Darcy 提出著名的达西定律开始^[46-47]。此后,众多研究者提出了相关理论。SHERWOOD 和 COMINGS^[48]在固体干燥研究过程中发现了液态水的运动是在重力、外加外力或毛细作用引起的压力差的影响下发生,且认为在一般干燥过程中液体运动是由于毛细作用引起。DE VRIES 和 PHILIP^[49-50]以土壤为研究对象,考虑到之前温度梯度下简单的水汽扩散理论,忽略了水蒸气、液相和固相的相互作用以及土壤整体温度梯度的差异等关键问题,故在多孔介质领域首次提出以温度梯度和湿分梯度为推动势的双场热-湿耦合传递数学模型。其中,液相迁移基于非饱和 Darcy 定律而蒸汽迁移基于 Stefan 扩散定律。该模型被广泛应用于地下储能和地源热泵(地理热管换热器)的研究^[51-53]。LIU 等^[54]对上述模型进行了改进,采用连续介质模型和体积平均法,对自然条件下干湿分层土壤内热湿迁移发展了相关理论模型;同时,考虑了液态水、水蒸气和不可凝性空气的迁移以及气液相变对热质传递的影响,该模型具有较强的普适性,但方程过于复杂,不利于数值求解。到目前为止,湿分迁移机制主要有压力梯度引起的渗流(基于非饱和 Darcy 定律),分子扩散(基于 Fick 扩散定律),温度梯度引起的扩散(Soret 效应),以及由对流、扩散和相变引起的水蒸气迁移等。

土壤内热量传递主要包括热传导、对流和相变换热。其中,热传导发生于固体骨架、液体和气体之间,由傅里叶导热定律确定;热对流包括液相和气相的对流和扩散,相变潜热主要为水的气液相变。LARBI^[55]研究中阐述了 LUIKOV 将不可逆热力学应用到多孔介质热质传递的研究,在 1954 年建立了以温度和湿度为参变量的热质耦合双参数理论模型,1964 年提出了包含温度场、湿度场和应力场的偏微分控制方程组,期望能够描述热质传递过程中各驱动力与因变量的关系;但方程组中的唯象因子不全都具有实际的物理意义,在计算过程中需要大量的假设和经验参数,缺乏科学的理论依据。在传热过程中,热导率和比热容是关键参数。籍龙杰等^[56]指出,土壤热导率受温度和含水率的影响,随含水率的增大,土壤热导率缓慢增加,最后趋于平稳;而比热容随温度先增大后减小。

土壤内污染物的迁移方式包括随液相水的运移以及在气相中的流动。在液相水中的迁移机制包括对流、分子扩散、机械弥散以及挥发,其中,附着于固体表面和游离在液相水中的污染物通过物理方式进入气相。NIELSON 等^[57]结合溶质迁移基本原理和连续性方程,首次提出了对流-弥散方程,这使得研究热-湿-污染物的相互作用成为一种可能。NASSAR^[58]在研究封闭土柱的热质传递问题过程中发现,土壤冻融循环过程的热质传递受多种相互作用机理的影响,其中土壤含水量和土壤溶液浓度对结冻深度有较大影响。CLASS 等^[59]和 CLASS 等^[60]提出水-气-NAPL 模型,用于描述低压(大气压力数量级)下的非等温水-气-NAPL 系统,利用该模型验证了热管效应等,缺点是忽略了固体基质中污染物的吸附作用。曾敏等^[61]采用曲线坐标系下压力与速度耦合的 SIMPLEX 算法,模拟复杂多孔介质腔体内的自然对流换热问题,讨论了 Darcy 数和孔隙率等对自然对流换热的影响。杨通等^[62]利用有限元分析软件 ADINA 对多孔介质热流固耦合进行了分析,以热力采油为例,分析了注蒸汽以及流体流动等因素对采油的影响。

耦合迁移主要包括热-湿迁移和热-湿-污染物迁移,其中热-湿迁移研究机理较深入。WANG 等^[63]提出了应用于多孔介质的两相运输模型,此模型为理解多孔介质复杂的两相流动开辟了前景,但未包括惯性流动,不适用于全部非达西定律流动。JIN 等^[64]建立了非饱和土温度和水分子时空分布数值模型,但该模型仅考虑热传导对温度和水分分布的作用,未考虑水分运移的影响。GAO 等^[65]建立了温度梯度和湿度梯度双驱动的一维非饱和土热湿传递模型,研究热效应下的非饱和土热湿耦合作用,经实验和数值模拟得出土壤水分传递通量与热源温度呈正相关。该项研究还发现,在相同的热源温度下,水分含量低的土壤具有较强的水分传递,水分含量高的土壤具有较强的传热能力,这为研究热湿传递理论奠定良好基础。

为了研究多相传热传质过程，HU等^[66]提出了一种基于新能量方程的多孔介质流动沸腾修正多相混合模型。该模型利用动力学焓对多相混合模型的能量方程进行重构，以提高模型的收敛性和精度，消除了非物理跳跃，保持单相和两相区域之间的平稳过渡，并通过蒸腾冷却实例，研究了低压对温度分布的影响，揭示了动态响应延迟和蒸汽堵塞效应的潜在风险。WHITAKER^[67]做了必要的假设对表征体元采用体积平均理论和引入连续介质力学相关理论，建立了基于连续介质模型的热质传递模型，将热质传递过程从微观水平提升到了宏观水平。这为进一步的理论工作和复杂多相过程模型的建立提供良好的基础，该方法最大缺陷是拥有大量的待定传输系数。

此外，一些研究者将热质传递对象的某些结构和参数也纳入考虑范围。白苗苗^[68]认为，目前所建立的传统模型没有充分考虑土壤物理结构的影响，只是将其假设为连续性介质。在土壤热质传输过程中，不能真实反映多孔介质内部复杂的拓扑结构，也不能合理解释一些如优势流现象等，故提出将孔道网络理论引用到土壤热质传递研究，并通过相关模拟和试验的对比分析得出所建立的模型能够较好的描述实际土壤的热质传递过程。沈妍等^[69]通过双向热流固耦合研究，分析了压降和骨架微观变形机制，并进行了多孔介质水力性能测试。LIU等^[54]认为，湿分扩散系数、水力传导系数和有效导热系数是影响热湿迁移的关键参数，这些参数受温度和饱和度(含水率)的共同影响，并提出了它们之间的函数关系。多场耦合的迁移机制本质上是各种参数之间的内在耦合关系，且各因素相互牵连，十分复杂。图5表现了有机污染土壤内典型传质过程。

2.2 实验研究

实验研究是理论研究的前提，理论研究为实验研究的结果，且实验研究还可以验证数值研究，故实验研究的重要性不言而喻。王华军等^[70]建立了土壤高温储热热湿迁移实验台，研究80℃下热湿耦合迁移规律，发现高温储热条件下，温度场和湿度场之间具有较强的关联性。CHEN等^[71]依托地源热泵课题搭建一维水平简化土柱实验平台，研究土壤充热过程热湿传递的耦合作用，分析了热源温度和初始湿度对土壤中热量和水分传递的影响。FORSYTH^[72]以控制容积有限元法为基础建立了DNAPL污染现场蒸汽冲洗数值模型，并利用非线性磁通限制器求解多相、多组分地下流动方程，分析得出蒸汽注入与空气注入相比，蒸汽注入对注入井周围土壤的非均质性并不敏感，这为SEE技术的应用提供了理论指导；但该方法具有一定的缺陷：一是过渡使用磁通限制器会导致少量NAPL的虚假外观，二是算法的收敛性在某些方面会很差。CHERATI等^[53]对单根储热桩周围的土壤热湿迁移进行了研究，利用格林函数将Philip提出的热-湿耦合理论模型的偏微分方程组转化为常微分方程组，获得的解析解与实验数据吻合较好。表2为几种典型原位热修复过程多场耦合案例。

2.3 数值研究

数值研究来源于理论研究，数值研究以控制方程为核心，以相关软件为手段，以建立相应几何模型，做出合理假设以及设立相应边界条件为具体措施，扩展研究原位热修复技术的影响因子，从而达到优化实施方案，降低能源损耗的目的。其中，边界条件主要包括流动边界条件和温度边界条件。针对土壤水分运动情况设置流动边界条件，针对热量交换情况设置温度边界条件。控制方程主要包括质量迁移方程和热量迁移方程。

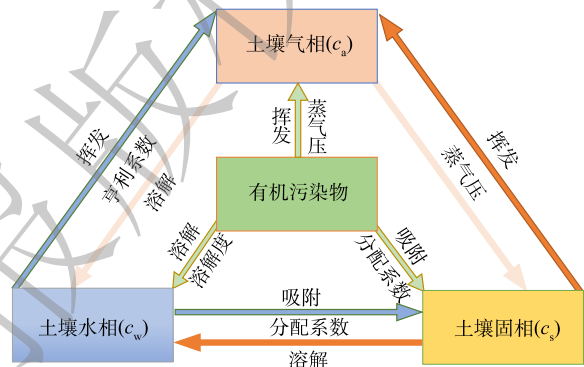


图5 有机污染土壤内物质输运过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of material transport process in organic contaminated soil

表2 原位热修复多场耦合研究现状

Table 2 Research status of in-situ thermal repair multi-field coupling

| 污染物 | 处理方式 | 实验装置 | 研究变量 | 参考文献 |
|------------|------|--------|--------------|------|
| 三氯乙烯 | ERH | 沙箱 | TCE浓度、亨利定律常数 | [34] |
| 燃油 | ERH | 管式炉 | 土壤、温度、含水率 | [73] |
| 四氯化乙烯 | ERH | 沙箱 | 温度、硫酸盐浓度 | [74] |
| 多环芳烃 | ERH | 坩埚+管式炉 | 水分、盐分、电强度 | [75] |
| 三氯乙烷、氯仿 | ERH | 沙箱 | 温度、电流、地下水流 | [76] |
| Cr污染 | ERH | 沙箱 | 柠檬酸电解液浓度 | [77] |
| 苯和多环芳烃 | TCH | 燃烧器 | 温度、压力 | [78] |
| 非水相液体、四氯乙烯 | TCH | 二维水槽 | 温度、时间 | [36] |

液相水迁移控制方程(包括压力梯度引起的渗流、分子扩散和热扩散项、相变源项)如式(1)所示。

$$\frac{\partial(\rho_l \theta_l)}{\partial t} + \nabla(\rho_l \theta_l \vec{V}_l) = \nabla(\rho_l(D_{T,l} \nabla T + D_{\theta,l} \nabla \theta_l)) - \dot{m} \quad (1)$$

式中： ρ_l 为土壤内液相密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； θ_l 为土壤内液相体积分数，该参数与孔隙度直接相关，可影响沸腾阶段维持时间； \vec{V}_l 为液相对流速度， $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ (可由非饱和 Darcy 公式或 Brinkman 方程求得)； $D_{T,l}$ 、 $D_{\theta,l}$ 分别为热致液体扩散系数和等温液体扩散系数， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ ； \dot{m} 为水相变质量， kg 。

水蒸气迁移控制方程(包括压力梯度引起的对流项、扩散项、相变源项)如式(2)所示。

$$\frac{\partial(\rho_v \theta_g)}{\partial t} + \nabla(\rho_v \theta_g \vec{V}_g) = \nabla(D_v \nabla \rho_v) + \dot{m} \quad (2)$$

式中： ρ_v 为土壤内水蒸气密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； θ_g 为土壤内气相体积分数； \vec{V}_g 为气相对流速度， $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ； D_v 为水蒸气在空气中的扩散系数， $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ； \dot{m} 为水相变质量， kg 。

气相(包含水蒸气、不凝性空气、污染物蒸汽)整体迁移方程(包括对流项和相变源项)如式(3)所示。

$$\frac{\partial(\rho_g \theta_g)}{\partial t} + \nabla(\rho_g \theta_g \vec{V}_g) = \dot{m} \quad (3)$$

式中： ρ_g 为土壤内气相密度， $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ； θ_g 为土壤内气相体积分数； \vec{V}_g 为气相对流速度， $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ； \dot{m} 为水相变质量， kg 。

液相污染物迁移方程(包括对流项、弥散项和热脱附源项)如式(4)所示。

$$\frac{\partial(\theta_l C_l)}{\partial t} = -\nabla(\vec{V}_l C_l - \theta_l D_l \nabla C_l) - \dot{W} \quad (4)$$

式中： θ_l 为土壤内液相体积分数； \vec{V}_l 为液相对流速度， $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ； C_l 为液相污染物浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，污染物浓度为考察土壤原位热修复工程实践达标与否的重要标准，只有降到相关国家安全标准以下，修复的土壤才可以被继续利用； D_l 为污染物在液相水中弥散系数； \dot{W} 为污染物相变质量， kg 。

气相污染物迁移方程(包括对流项、弥散项和热脱附源项)如式(5)所示。

$$\frac{\partial(\theta_g C_g)}{\partial t} = -\nabla(\vec{V}_g C_g - \theta_g D_g \nabla C_g) + \dot{W} \quad (5)$$

式中： θ_g 为土壤内气相体积分数； \vec{V}_g 为气相对流速度， $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ； C_g 为气相污染物浓度， $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ；

D_g 为污染物气相弥散系数; W 为污染物相变质量, kg。

热量迁移方程(包括固、液、气的热传导, 气、液的扩散和对流换热, 水分蒸发冷凝的相变潜热)如式(6)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}[(\rho c)_m T] + c_{p,l} T [\vec{V}_l \nabla(\rho_l \theta_l)] + c_{p,g} T [\vec{V}_g \nabla(\rho_g \theta_g)] + c_{p,l} \theta_l [\vec{V}_l \nabla(\rho_l T)] + c_{p,g} \theta_g [\vec{V}_g \nabla(\rho_g T)] = \nabla(\lambda_m \nabla T) - \gamma \dot{m} \quad (6)$$

式中: ρ_l 、 ρ_g 分别为土壤内液相和气相密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; θ_l 、 θ_g 分别为土壤内液相和气相体积分数; \vec{V}_l 、 \vec{V}_g 分别为液相和气相对流速度, $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$; T 为温度, K; λ_m 为有效导热系数, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$; c_m 为比热容, $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$; \dot{m} 为水相变质量, kg; γ 为水相变潜热, 由液态水变为气态水需要吸收大量热量, 是耗能的重要组成部分。

在选定控制方程的基础上, 借助仿真软件对选定研究对象进行计算, 从而得到目标结果。WANG 等^[79] 就现场热修复过程中的传热性能, 提出了原位土壤热修复的质量模型和热模型, 利用 COMSOL 数值仿真软件对土壤加热过程中的传热特性进行了研究, 分析得出地下水渗流对土壤温度和含水量的分布有显著影响。龙回龙等^[80] 利用计算流体力学 CFD 方法建立了耦合低温水气变换反应的多孔介质二维拟均相反应器模型, 对反应器内组分浓度、速度场及黏度进行了可视化分析。李绪萍等^[81] 采用数值计算方法研究了多孔介质内自然对流时驱动力与流动阻力的关系, 进而探讨了多孔介质中物质和能量的输运问题。ZHU 等^[82] 利用 CMG'S STARS 软件研究了 ERH、VAPEX 混合修复中电极布置、电压、井距和非均匀性效应等因素对混合修复过程的影响, 发现混合过程横向格局表现良好。宋明启^[83] 基于粗宏观表征体元 RMV 科学提出了多孔介质保温材料的热质传递“三箱”模型, 但该模型只涉及导热过程, 没有对流和辐射传热过程。LIM 等^[84] 发现, 过去对土壤蒸汽提取效率的研究, 主要应用一维和二维模型, 但这不能完全模拟非均质性土壤中复杂流体流动和运移过程, 故采用 COMSOL 软件去识别质量传递值, 预测了实验室中污染土壤去除 NAPL 的情况。该仿真结果表明, 瞬态传质系数对 SVE“拖尾”效应具有重要意义。赵静^[85] 就淋洗修复、表面活性剂强化修复、原位生物修复等问题, 采用 FLUENT 软件模拟了石油污染物在流体及土壤相互作用下的迁移及浓度变化, 其模拟结果与实验结果总体趋势一致, 吻合度较好, 对现场修复具有一定的指导意义。BORTONE 等^[86] 利用 COMSOL 软件模拟了地下水和污染物流 100 年内的变化, 提出了渗透性吸附屏障 (PABS) 模型, 数值模拟再现了在含水层和阻挡层内部发生的运移和吸附现象, 现场数据验证了模型污染物拦截和降低浓度的有效性。

3 问题与展望

3.1 热质传递机理研究

原位热修复热质传递是一个多物理场动态耦合问题, 目前没有合适的模型能涵盖所有问题^[87], 对热质传递机理认识仍不够充分, 有必要对其理论模型开展更为深入的研究。主要原因为: 1) 非饱和流动和饱和流动的差异性, 使现有饱和流动模型无法应用到非饱和流动研究; 2) 多孔介质热质传递的复杂性, 流体在微小的骨架孔隙空间流动时, 各组分含量不断变化, 使得物性也不断变化; 3) 非饱和多孔介质中物质间相互作用复杂, 包括毛细力、固体颗粒对液体的 Darcy 阻力、气体与液膜之间的相互作用、液膜运动的惯性力及自身的重力等; 4) 多孔介质的换热机制复杂, 包括固体骨架、流体和气体的导热、蒸发-冷凝交换的潜热换热、蒸汽和液体的扩散、对流和辐射换热等; 5) 目前有许多测定液体扩散系数、水分、水分传递势和比的实验方法, 这些复杂的物理值称为土壤的传质特性, 但这些参数的测定仍存在一定误差, 这增加了传质机理预测的难度。

现有热质传递机理研究集中在单场单组分和双场耦合研究, 随着研究的深入, 多相多组分多场耦合研究也进入研究者的视线。国内外已经提出了一些适用于多相耦合的热质传递模型, 但

该模型往往只是在个别实验中适用,并不具有广泛适用性。未来的研究方向将会向多组分多场耦合热质传递模型发展,期望发展一个通用的数学模型。

3.2 热质传递数值研究

目前,国内外多孔介质多相多组分的热质传递研究主要以模型与机理研究、应用研究和实验研究为主,由于包含多相流动并伴随流体相变的多孔介质内部的流动及各相含量的变化都难以通过实验测量,故模型与机理研究相对较多。其中,以数值研究为主导的模型与机理研究较为薄弱,多数研究者主要采用“实验为主、数值为辅”的研究思路。导致这种情况的主要原因为:1)参数化问题,目前的模型很多是由经验公式获得的,但迄今为止的水热参数经验公式还不完善,没有完全解决其机理性问题^[88];2)现有科研工作者往往采用一种软件去验证自己提出的模型或者结论,但由于不同软件的侧重方向不同,这将导致模拟结果不同;3)因土壤实际条件十分复杂,同样的模型在不同的条件下(土壤质地、含水量、土壤温度等)其模拟效果不同。

有关热质传递数值研究,未来的主要发展方向可能基于热质传递数值模拟方法,将数值模拟的结果与大数据结合,利用统计方法确定模拟关键参数,分析对污染物时空分布规律的影响,这有助于进一步明确耦合作用关系,快速分析不同情况下的修复效果从而指导工程实践。

参考文献

- [1] 邓忆凯,韩彪,黄世友,等.挥发性有机物污染土壤修复技术研究[J]. 科技创新与应用, 2020(28): 163-164.
- [2] 安浩. 土壤污染及植物修复技术的研究进展[J]. 宁夏农林科技, 2012, 53(10): 113-115.
- [3] 胡立凯. 污染土壤修复技术研究前沿与展望[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(2): 118-120.
- [4] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, 21(Z1): 558-565.
- [5] 葛松,孟宪荣,许伟,等. 原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素[J]. 环境科学, 2020, 41(8): 3822-3828.
- [6] KUPPUSAMY S, THAVAMANI P, VENKATESWARLU K, et al. Remediation approaches for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contaminated soils: technological constraints, emerging trends and future directions[J]. *Chemosphere*, 2017, 168: 944-968.
- [7] 杜玉吉,刘文杰,王海刚,等. 污染土壤原位热修复应用进展及综合评价[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(12): 26-31.
- [8] BEYKE G, FLEMING D. In situ thermal remediation of DNAPL and LNAPL using electrical resistance heating[J]. *Remediation journal*, 2005, 15(3): 5-22.
- [9] FRIIS A K, HERON G, ALBRECHTSEN H J, et al. Anaerobic dechlorination and redox activities after full-scale electrical resistance heating (ERH) of a TCE-contaminated aquifer[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 2006, 88(3/4): 219-234.
- [10] DING D, SONG X, WEI C, et al. A review on the sustainability of thermal treatment for contaminated soils[J]. *Environmental pollution*, 2019, 253: 449-463.
- [11] LIU L, LI W, SONG W, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: principles and applicability[J]. *Science of the total environment*, 2018, 633: 206-219.
- [12] 焦文涛,韩自玉,吕正勇,等. 土壤电阻加热技术原位修复有机污染土壤的关键问题与展望[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2027-2036.
- [13] HERON G, PARKER K, GALLIGAN J, et al. Thermal treatment of eight CVOC source zones to near nondetect concentrations[J]. *Ground water monitoring & remediation*, 2009, 29(3): 56-65.
- [14] KINGSTON J L T, DAHLEN P R, JOHNSON P C. State of the practice review of in situ thermal technologies[J]. *Ground water monitoring and remediation*, 2010, 4(30): 64-72.
- [15] 康绍果,李书鹏,范云. 污染地块原位加热处理技术研究现状与发展趋势[J]. 化工进展, 2017, 36(7): 2621-2631.
- [16] STEWART L D, UDELL K S. Mechanisms of residual oil displacement by steam injection[J]. *SPE reservoir engineering*, 1988, 3(4): 1233-1242.
- [17] AZIZAN N A, KAMARUDDIN S A, CHELLIAPAN S. Steam-enhanced extraction experiments, simulations and field studies for dense Non-Aqueous phase liquid removal: a review[J]. *MATEC web of conferences*, 2016, 47: 5012.
- [18] WU C H. A critical review of steamflood mechanisms[C]//Society of Petroleum Engineers, SPE California Regional Meeting, California, 1977.
- [19] OSSAI I C, AHMED A, HASSAN A, et al. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: A review[J]. *Environmental technology & innovation*, 2020, 17: 100526.
- [20] WEBB S W, PHELAN J M. Effect of soil layering on NAPL removal behavior in soil-heated vapor extraction[J]. *Journal of contaminant hydrology*, 1997, 27(3): 285-308.

- [21] 贺晓珍,周友亚,汪莉,等. 土壤气相抽提法去除红壤中挥发性有机污染物的影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2008(5): 679-683.
- [22] 殷甫祥,张胜田,赵欣,等. 气相抽提法(SVE)去除土壤中挥发性有机污染物的实验研究[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1454-1461.
- [23] 杨乐巍,沈铁孟,肖锋,等. 含有非水相液体(苯)的土壤气相抽提体系传质实验研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1046-1050.
- [24] ARUN G B, MOHIT B B, WENDY C B. Cost and performance review of electrical resistance heating (ERH) for source treatment[J]. 2007.
- [25] ZHAO C, DONG Y, FENG Y, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: a review[J]. *Chemosphere (Oxford)*, 2019, 221: 841-855.
- [26] 周昱,徐晓晶,保嶽,等. 电加热在土壤气相抽提(SVE)中的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(3): 277-280.
- [27] HAN Z, JIAO W, TIAN Y, et al. Lab-scale removal of PAHs in contaminated soil using electrical resistance heating: removal efficiency and alteration of soil properties[J]. *Chemosphere*, 2020, 239: 124496.
- [28] WEN D D, FU R B, LI Q. Removal of inorganic contaminants in soil by electrokinetic remediation technologies: a review[J]. *Journal of hazardous materials*, 2021: 401(5): 123345.
- [29] 王殿二,陈春红,李超,等. 有机污染土壤原位热脱附及尾气处理研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(10): 55-59.
- [30] MILLAN M, BUCIO-RODRIGUEZ P Y, LOBATO J, et al. Strategies for powering electrokinetic soil remediation: A way to optimize performance of the environmental technology. *Journal of environmental Management* 2020, 267: 110665.
- [31] HERON G, CARROLL S, NIELSEN S G. Full-scale removal of DNAPL constituents using steam-enhanced extraction and electrical resistance heating[J]. *Ground water monitoring & remediation*, 2005, 25(4): 92-107.
- [32] BUETTNER H M, DAILY W D. Cleaning contaminated soil using electrical heating and air stripping[J]. *Journal of environmental engineering*, 1995, 121(8): 580-589.
- [33] BERGSMAN T M, ROBERTS J S, LESSOR D L, et al. Field test of six-phase soil heating and evaluation of engineering design code[J]. 1993.
- [34] HERON G, VAN Zutphen M, CHRISTENSEN T H, et al. Soil heating for enhanced remediation of chlorinated solvents: a laboratory study on resistive heating and vapor extraction in a silty, low-permeable soil contaminated with trichloroethylene[J]. *Environmental science & technology*, 1998, 32(10): 1474-1481.
- [35] KROL M M, JOHNSON R L, SLEEP B E. An analysis of a mixed convection associated with thermal heating in contaminated porous media[J]. *Science of the total environment*, 2014, 499: 7-17.
- [36] BAKER R S, HERON G, LACHANCE J, et al. 2-D Physical models of thermal conduction heating for remediation of DNAPL source zones in aquitards[J]. *Consoil* 2008.
- [37] LACHANCE J, BAKER R S, COM J, et al. Application of 'thermal conductive heating/in-situ thermal desorption (ISTD)' to the remediation of chlorinated volatile organic compounds in saturated and unsaturated settings[J]. 2004.
- [38] BULMÄU C, MĂRCULESCU C, LU S, et al. Analysis of thermal processing applied to contaminated soil for organic pollutants removal[J]. *Journal of geochemical exploration*, 2014, 147: 298-305.
- [39] QI Z, CHEN T, BAI S, et al. Effect of temperature and particle size on the thermal desorption of PCBs from contaminated soil[J]. *Environmental science and pollution research*, 2014, 21(6): 4697-4704.
- [40] LUNDIN L, AURELL J, MARKLUND S. The behavior of PCDD and PCDF during thermal treatment of waste incineration ash[J]. *Chemosphere*, 2011, 84(3): 305-310.
- [41] STEGEMEIER G L, VINEGAR H J. Thermal conduction heating for in-situ thermal desorption of soils[C]. 2001.
- [42] O'BRIEN P L, DESUTTER T M, CASEY F X M, et al. Thermal remediation alters soil properties-a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 826-835.
- [43] 高国龙,蒋建国,李梦露. 有机物污染土壤热脱附技术研究与应用[J]. 环境工程, 2012, 30(1): 128-131.
- [44] XU X Y, HU N, WANG Q, et al. A numerical study of optimizing the well spacing and heating power for in situ thermal remediation of organic-contaminated soil. *Case studies in thermal engineering*, 2022, 33: 101941.
- [45] 白四红,陈彤,祁志福,等. 载气流量及升温速率对污染土壤中多氯联苯热脱附的影响[J]. *化工学报*, 2014, 65(6): 2256-2263.
- [46] NIMMO J R. The Public Fountains of the City of Dijon[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(4): 1311-1312.
- [47] 温智,马巍,薛珂,等. 基于pF meter基质势传感器的冻土水分迁移研究[J]. *土壤通报*, 2014, 45(2): 370-375.
- [48] COMINGS E W, SHERWOOD T K. The drying of solids VII moisture movement by capillarity in drying granular materials[J]. *Industrial and engineering chemistry*, 1934, 26(10): 1096-1098.
- [49] DE VRIES D A. Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media[J]. *Transactions-american geophysical union*, 1958, 39(5): 909-916.
- [50] PHILIP J R, DE VRIES D A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients[J]. *Transactions american geophysical union*, 1957, 2(38): 222.
- [51] GAN G. Dynamic thermal performance of horizontal ground source heat pumps-The impact of coupled heat and moisture transfer[J]. *Energy (Oxford)*, 2018, 152: 877-887.
- [52] SANI A K, SINGH R M. Response of unsaturated soils to heating of geothermal energy pile[J]. *Renewable energy*, 2020, 147: 2618-2632.

- [53] CHERATI D Y, GHASEMI-FARE O. Analyzing transient heat and moisture transport surrounding a heat source in unsaturated porous media using the green's function[J]. *Geothermics*, 2019, 81: 224-234.
- [54] LIU B C, LIU W, PENG S W. Study of heat and moisture transfer in soil with a dry surface layer[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2005, 48(21-22): 4579-4589.
- [55] LARBI S. Heat and mass transfer with condensation in capillary porous bodies[J]. *Scientific world journal*, 2014, 2014: 194617.
- [56] 籍龙杰, 刘鹏, 韦云霄, 等. 单根加热管原位加热土壤过程中温度变化规律[J]. *环境工程*, 2019, 37(2): 165-169.
- [57] NIELSEN D R, BIGGAR J W. Miscible displacement: III. theoretical considerations[J]. *Soil science society of America journal*, 1962, 3(26): 216.
- [58] NASSAR I N. Simultaneous heat and mass transfer in soil columns exposed to freezing/thawing conditions[J]. *Agronomy publications*, 2000, 9(2-3): 176-181.
- [59] CLASS H, HELMIG R. Numerical simulation of non-isothermal multiphase multicomponent processes in porous media: 2. Applications for the injection of steam and air[J]. *Advances in water resources*, 2002, 25(5): 551-564.
- [60] CLASS H, HELMIG R, BASTIAN P. Numerical simulation of non-isothermal multiphase multicomponent processes in porous media: 1. An efficient solution technique[J]. *Advances in water resources*, 2002, 25(5): 533-550.
- [61] 曾敏, 王刚, 谢公南, 等. 复杂多孔介质腔体内自然对流换热的数值研究[J]. *计算物理*, 2008(4): 445-449.
- [62] 杨通, 刘峰. 多孔介质热流固耦合有限元分析[J]. *河北理工大学学报(自然科学版)*, 2011, 33(1): 12-17.
- [63] WANG C, BECKERMANN C. A two-phase mixture model of liquid-gas flow and heat transfer in capillary porous media-I. Formulation[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 1993, 11(36): 2747-2758.
- [64] JIN H, GUO Y, DENG H, et al. A simulation model for coupled heat transfer and moisture transport under the action of heat source in unsaturated soils[J]. *Scientific reports*, 2018, 8(1): 7750.
- [65] GAO Y, DONG S, WANG C, et al. Effect of thermal intensity and initial moisture content on heat and moisture transfer in unsaturated soil[J]. *Sustainable cities and society*, 2020, 55: 102069.
- [66] HU H, JIANG P, OUYANG X, et al. A modified energy equation model for flow boiling in porous media and its application to transpiration cooling at low pressures with transient effect[J]. *International journal of heat and mass transfer*, 2020, 158: 119745.
- [67] WHITAKER S. The transport equations for multi-phase systems[J]. *Chemical engineering science*, 1973, 1(28): 139-147.
- [68] 白苗苗. 土壤多孔介质热质传递过程数值模拟与试验研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
- [69] 沈妍, 张红, 许辉, 等. 多孔介质-钠液体系微尺度热流固耦合模拟[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(2): 54-58.
- [70] 王华军, 齐承英, 王思宇, 等. 土壤高温储热条件下热湿迁移过程的实验研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(7): 824-828.
- [71] CHEN H, DING H, LIU S, et al. Experimental study on heat and moisture transfer in soil during soil heat charging for solar-soil source heat pump compound system[J]. *Applied thermal engineering*, 2014, 70(1): 1018-1024.
- [72] FORSYTH P A. Three-dimensional modelling of steam flush for DNAPL site remediation[J]. *International journal for numerical methods in fluids*, 1994, 19(12): 1055-1081.
- [73] ROLAND U, HOLZER F, KOPINKE F. Influence of low-and High-frequency electrical heating on biodegrading microorganisms in soil: soil respiration[J]. *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, 2013, 47(3): 186-198.
- [74] CHOWDHURY A I, GERHARD J I, REYNOLDS D, et al. Low permeability zone remediation via oxidant delivered by electrokinetics and activated by electrical resistance heating: proof of concept[J]. *Environmental science & technology*, 2017, 51(22): 13295-13303.
- [75] XUE Y J, LIU J, ZHOU Y, et al. Treatment of petroleum hydrocarbon contaminated soil by basic oxygen furnace slag activated persulfate oxidation in presence of electromagnetic induction heating[J]. *Journal of environmental chemical engineering*, 2022, 10(2): 107267.
- [76] MUNHOLLAND J L, MUMFORD K G, KUEPER B H. Factors affecting gas migration and contaminant redistribution in heterogeneous porous media subject to electrical resistance heating[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2016, 184: 14-24.
- [77] 肖朝政. Cr污染土壤电动修复过程中电极捕获潜力的实验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.
- [78] 赵涛, 周宇, 马刚平, 等. 焦化类污染场地原位热脱附修复效果试验研究[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 201-205.
- [79] WANG W, LI C, LI Y, et al. Numerical analysis of heat transfer performance of in situ thermal remediation of large polluted soil areas[J]. *Energies*, 2019, 12(24): 4622.
- [80] 龙回龙, 许明杰, 于东华, 等. 基于FLUENT水气变换反应在多孔介质内的两温度模型[J]. *计算机与应用化学*, 2012, 29(8): 981-985.
- [81] 李绪萍, 王宏伟, 张树光. 多孔介质内自然对流驱动力与流动阻力关系的数值模拟[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2013, 16(4): 43-46.
- [82] ZHU Z, ZENG F, ZHAO G, et al. Evaluation of the hybrid process of electrical resistive heating and solvent injection through numerical simulations[J]. *Fuel*, 2013, 105: 119-127.
- [83] 宋明启. 基于“三箱”模型保温材料多孔介质热质传递机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.
- [84] LIM M W, LAU E V, POH P E. A comprehensive guide of remediation

- technologies for oil contaminated soil -present works and future directions[J]. *Marine pollution bulletin*, 2016, 109(1): 14-45.
- [85] 赵静. 石油污染饱和带土壤原位修复数值模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- [86] BORTONE I, CHIANESE S, ERTO A, et al. An optimized configuration of adsorptive wells for the remediation of an aquifer (责任编辑: 靳炜)
- contaminated by multiple aromatic hydrocarbon pollutants[J]. *The science of the total environment*, 2019, 696: 133731.
- [87] 李书鹏, 焦文涛, 李鸿炫, 等. 燃气热脱附技术修复有机污染场地研究与应用进展[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2037-2048.
- [88] 孙昭萱, 张强, 王胜. 土壤水热耦合模型研究进展[J]. *干旱气象*, 2009, 27(4): 373-380.

Recent advances and prospects of heat and mass transfer in soil during in-situ thermal remediation

ZHAN Mingxiu^{1,2}, LIU Lipeng¹, GU Hailin^{1,*}, ZHANG Tao³, WEI Jinyi³, XU Xu¹, JIAO Wentao², JI Longjie^{2,4}, TIAN Wangyang⁵, CHI Zuohe¹

1. China Jiliang University, College of Metrology and Testing Engineering, Hangzhou 310018, China; 2. Research Center for Ecological Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Cities and Regions, Beijing 100085, China; 3. Environmental Technology of Guangxi Jintou Co., Ltd, Nanning 530022, China; 4. Environmental Remediation of Beijing Construction Engineering Co., Ltd, Beijing 100015, China; 5. Environmental Protection Technology of Zhejiang Yikeou Co., Ltd, Huzhou 313000, China

*Corresponding author, E-mail: hlgu@cjlu.edu.cn

Abstract In recent years, in-situ thermal remediation technology has been widely used in the remediation of organic contaminated land because of its short remediation cycle, high reliability, strong applicability, and controllable secondary pollution. This article summarized the research progress of in-situ thermal remediation technology for contaminated land at home and abroad. It compared the advantages of three typical in-situ thermal remediation technologies: namely steam enhanced extraction (SEE), electrical resistance heating (ERH) and thermal conduction heating (TCH). Disadvantages and applicable conditions, and analyzed the effects of main factors such as the nature of pollutants, soil heterogeneity, moisture content and heating temperature on its remediation effect. On this basis, the research status of the heat and mass transfer mechanism in-situ thermal remediation was explained from three research aspects of theory, experiment and numerical value.

Keywords organic contaminated soil; in-situ thermal remediation technology; heat and mass transfer mechanism; numerical simulation; multi-field coupling