

温度梯度作用下非饱和黏土中热湿运移及重金属离子时空分布

贺勇^{1,2,✉}, 李旺强^{1,2}, 邹艳红^{1,2}, 姜伟³, 张召^{1,2}, 张可能^{1,2}

1. 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙, 410083; 3. 湖南省和清环境科技有限公司, 长沙, 410221

摘要 以某重金属污染场地粉质黏土为研究对象, 采用自主研发的一维非饱和土热-水-化耦合试验系统开展温度梯度作用下非饱和黏土中热湿运移及重金属离子迁移试验。试验结果表明: 试样两端施加一定温度差后, 土体中水分由高温侧向低温侧运移, 土体内部水分场重新分布。土样的初始含水率对土体水分场分布的影响最为显著, 当初始含水率为 12% 时, 离子运移效果显著, 土体高温侧含水率降低了 79.3%, 低温侧升高了 40.5%。同时, 随着土样两端温度梯度的增大或土样干密度的降低, 水分运移效果越显著。在温度梯度作用下, 非饱和黏土中重金属离子随液态水一同迁移, 其中, 高温端重金属离子浓度减少量为 28.4%~54.7%, 低温端浓度增加量为 19.5%~37.6%。此外, 重金属离子的迁移效果也与离子种类和离子初始浓度相关。

关键词 非饱和黏土; 重金属污染; 温度梯度; 重金属离子; 热湿运移

随着全球工业化规模日益扩大, 我国作为全球最大的有色金属生产和消费国, 土壤和地下水重金属污染日趋严重^[1-4]。据报道, 我国土壤污染总超标率高达 16.1%, 重污染企业用地、工业废弃地、工业园区、采矿区土壤超标率分别高达 36.3%、34.9%、29.4% 和 33.4%^[5], 重金属污染场地的修复治理行动迫在眉睫。因此, 研究土体内重金属污染物的迁移转化机制具有重要意义。

温度梯度作用下土体中水分运移问题一直备受国内外专家学者高度关注。MILLER 和 HARLAN 等^[6-7]揭示了温度作用下土体中水分迁移的一般规律。PART^[8]发现温度梯度和初始含水率是影响冻融过程中水分迁移的 2 个重要因素。王铁行等^[9-12]开展了大量的室内试验及模型试验, 研究了冻结及高温条件不同因素影响下的水分迁移规律。ZHANG 等^[13]研究发现土壤温度在 40~90 °C 时含水率对土壤的传热特性有较大影响, 温度小于 40 °C 时则影响较小。CHEN 等^[14]通过考虑液相、黏度、温度、压力之间的相互作用, 建立了非饱和多孔介质中的水-热耦合模型。

研究发现, 温度梯度影响非饱和土体内部水分场分布的同时, 土体中重金属离子随液态水一同迁移^[9,15-17]。MARTIN 等^[18]通过试验发现温度梯度下会产生水化作用驱动盐分迁移。ROSANNE 等^[19-20]通过试验得出, 温度梯度作用下压实黏土中存在污染物热扩散现象。KONIORCZYK 等^[21-22]建立了一种描述多孔介质中水-热-盐耦合的数学模型, 该模型考虑了土体中水分及盐分对热力学平衡的影响。杨宁芳等^[23]开展模型试验得出温度梯度作用下, 重金属元素随水分的迁移从土体的暖端向冷端迁移聚集, 且迁移速率与温度梯度的大小呈正相关。吴珣等^[24]和 PENG 等^[25-26]指出温度梯度能够影响土体的物理力学性质及与污染物迁移过程相关的参数, 进而影响污染物迁移过程。BAI 等^[16]发现温度驱动下非饱和土中重金属 Pb(II) 的迁移距离随初始水分含量的增大而增大。郭文凯^[27]开展模型试验发现温度驱动下土柱中液态水分迁移能够有效促进重金属运移扩散, 迁移效果与重金属对流作用密切相关。ZHOU 等^[28]研究得出温度梯度作用下非饱和土的水盐迁移过程中, 盐的吸附作用会通过影响土体的孔隙改变土中的水盐迁移过程。目前, 已有研究主要针对温

收稿日期: 2023-11-09; 录用日期: 2024-01-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2019YFC1805905); 国家自然科学基金资助项目 (42372333; 42072318; 41807253); 中南大学创新驱动计划资助项目 (2023CXQD044)

第一作者: 贺勇 (1987—), 男, 博士, 教授, 研究方向为环境工程地质和非饱和土力学, heyong18@csu.edu.cn ✉通信作者

度影响下非饱和黏土体内水分或重金属污染物的迁移规律，但对于温度影响下非饱和黏土体水分运移及重金属离子时空分布特征耦合影响的研究较为少见。

本研究选取湖南省某铁合金厂场地粉质黏土为研究对象，开展温度梯度作用下非饱和黏土的热湿运移及重金属污染非饱和黏土中重金属离子迁移试验，揭示干密度、温度梯度、初始含水率对粉质黏土热湿运移的影响机理，探讨温度影响下重金属污染非饱和黏土中离子时空分布规律。研究成果可为重金属污染场地中污染物阻控预防与重金属修复提供指导性建议，具有重要理论与实践意义。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1) 试验用土。试验用土采用取自某铁合金厂场地的粉质黏土，该场地原有一条金属铬湿法冶炼生产线，根据场地环境调查报告^[29]，该场地主要污染物以 Cr(VI)、Zn(II) 为典型代表，污染范围较广，污染程度较高。为保证试验用土中重金属污染物分布均匀且浓度恒定，试验土样取自该场地上游未污染粉质黏土，取样深度为 1.0~3.5 m。试验前将土在 60 °C 下烘干 24 h 至恒重，过 1 mm 筛备用。土样颗粒粒径级配曲线及基本物理性质指标参数如图 1 及表 1 所示。

2) 污染土制备。按照目标含水率和污染物浓度取一定质量重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$)、硫酸锌 ($ZnSO_4$) 粉末和去离子水，配制试验所需浓度的重铬酸钾、硫酸锌溶液，向烘干土样中均匀喷洒溶液使土的含水率达到设定值，拌合均匀后密封。

3) 试验试剂。试验用水为去离子水，试验所用化学试剂：重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$)、硫酸锌 ($ZnSO_4$)、氯化钙 ($CaCl_2$) 等均为分析纯。

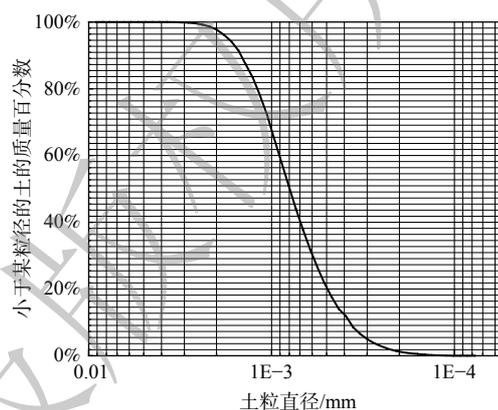


图 1 试验粉质黏土颗粒粒径级配曲线

Fig. 1 Test silty clay particle size gradation curve

表 1 试验用土的基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of soil

天然比重 G_s	天然含水率 $w/\%$	天然干密度 / ($g \cdot cm^{-3}$)	塑限 $W_L/\%$	液限 $W_P/\%$	黏粒含量 $CF/\%$	有机质含量/ $\%$
2.76	10.34	1.47	22.4	37.3	22.6	0.93

1.2 试验装置

本试验装置为自主研发的一维非饱和土热-水-化耦合试验系统，如图 2 所示。试验系统主要包括试验箱体、空心黄铜板、恒温水浴循环槽、温湿度传感器、数据采集仪、电脑等。

试验箱体由亚克力板加工而成，内径尺寸为 $100 \times 80 \times 80$ mm。箱体两端接有空心黄铜板连接恒温水浴循环槽，作为土体恒温热源。恒温水浴循环槽采用 HH-501 型超级循环恒温水浴锅，温度控制范围为室温+5~95 °C，温度控制误差为 ± 0.01 °C；温湿度传感器采用 RS-WS-N01-TR 型土壤温湿度传感器，温度测量精度为 ± 0.1 °C，湿度测量精度为 ± 1 %；数据采集仪采用 RS-XZJ-100-Y 环境监控主机变送器，可接入本试验所用温湿度传感器，并将数据实时上传至云平台。

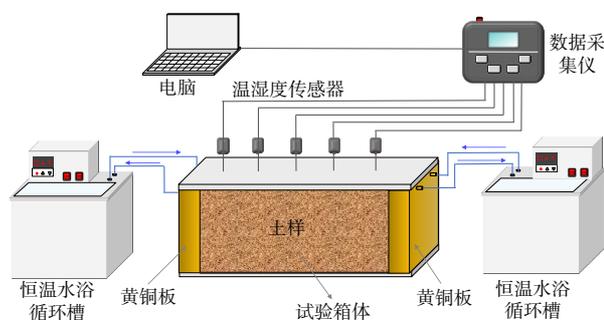


图 2 一维非饱和土热-水-化耦合试验系统

Fig. 2 One-dimensional unsaturated soil thermal-hydro-chemical coupling test system

1.3 试验方案

1) 温度梯度作用下非饱和黏土热湿运移试验。将配置好的土样分层击实填入试验箱体内。土样装填完毕后,在距离高温热源端 1、3、5、7、9 cm 处分别插入温湿度传感器,记为测点 I、II、III、IV、V。将 HH-501 型超级循环恒温水浴锅与土样两端黄铜板连接,试验箱体外包裹两层 2.5 cm 厚保温棉。开启恒温水浴锅设定所需温度,待温度恒定后开始试验,依据预实验结果选择 3 d 作为试验时间,试验条件如表 2 所示,编号为 Z1~Z7。试验期间温湿度数据由数据采集系统自动采集。试验结束后将土样按 1 cm 等间距切割,采用烘干法测量含水率分布情况。

2) 温度梯度作用下重金属污染非饱和黏土中重金属离子迁移试验。依据非饱和黏土的热湿运移试验结果选取适宜水分运移的干密度 $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、温度梯度 $60\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、初始含水率 12% 作为初始条件,配置相应浓度的重金属污染粉质黏土,按照 1) 中步骤开展温度梯度条件下重金属污染非饱和黏土的离子迁移试验,为确保重金属离子充分迁移选择 7 d 作为试验时间,试验条件如表 2 所示,编号为 T1~T3。试验结束后取出土体样本测定含水率、重金属离子浓度分布。

表 2 试验条件
Table 2 test condition

编号	初始含水率 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	试验时间/d	浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		温度设置	
				Zn(II)	Cr(VI)	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$
Z1	12	1.4	3	0	0	40	25
Z2	12	1.4	3	0	0	50	25
Z3	12	1.4	3	0	0	60	25
Z4	6	1.4	3	0	0	60	25
Z5	18	1.4	3	0	0	60	25
Z6	12	1.3	3	0	0	60	25
Z7	12	1.5	3	0	0	60	25
T1	12	1.4	7	100	0	60	25
T2	12	1.4	7	500	0	60	25
T3	12	1.4	7	0	100	60	25

3) 重金属污染物离子浓度测试。切取 5 g 土体样本,按照土液比 1:10 加入 $50 \text{ mL } 0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 溶液,转移至恒温振荡箱内振荡 120 min,确保充分反应。采用离心机离心分离 5 min,取上清液通过电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测试 Zn(II)、总 Cr 浓度。

2 结果与讨论

2.1 土样中温度分布规律

温度梯度作用下非饱和黏土热湿运移试验中温度场变化如图 3 所示。在水浴加热初始阶段,热量最先传递到近热源端的测点,测点温度迅速升高。随着加热时间增加,近热源端土体得到的热量一部分用于自身温度升高,另一部分通过热传递的方式用于远端土体升温,相当于远端土体的热源。因此,距离热源端较远位置处的土体不断从近热源端的土体得到热量,温度上升。由图可知,各测点温度随时间的变化曲线可近似视呈“7”型分布,温度变化大致可分为温度骤变期、温度渐变期、温度

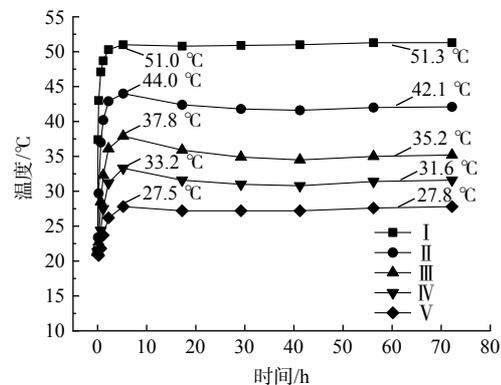


图 3 各测点温度随时间变化图(温度梯度 $60\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、初始含水率 12%、干密度 $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

Fig. 3 The temperature change diagram of each measuring point with time (temperature gradient $60\sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$, initial moisture content 12%, dry density $1.4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

平稳期 3 个时期。

温度骤变期。升温速率快，短时间内可升至较高温度值，此时期土体各测点温度随时间变化的曲线可视为直线。距离热源端越近的土体温度骤变期出现的越早，且骤变期内温度随时间变化的曲线越陡峭。

温度渐变期。随着加热时间的延长，土体由温度骤变期过渡为温度渐变期，升温速率变小，此时期土体各测点温度随时间变化的曲线斜率逐渐放缓，以至土体温度达到最大值时，开始趋于稳定。由图 3 可知，距离热源端越近，温度渐变期越短，结束渐变期的时间越早。

温度平稳期。虽然热源端水浴加热温度为 60 ℃，但各测点温度并不会达到热源温度，而是在经历温度骤变期、温度渐变期之后，进入温度平稳期并稳定在某一温度值。由图 3 可知，距离热源端越近，稳定时温度值越高；距离热源端越远，稳定时温度值越低。

不同试验时刻各测点温度分布如图 4 所示。由图 4 可知，在开始水浴加热 5 h 后，土体中各测点的温度读数已达到最大值，各测点已经过温度骤变期、温度渐变期，此时温度场沿土柱长度方向呈线性分布，表明此时温度场的分布主要受热源温度影响。试验进行 72 h 后稳定时的温度场沿土柱长度方向呈曲线分布。曲线斜率随距热源端距离的增大而减小，表明靠近热源端部分的土体温度梯度较大，受热源端的影响较大，土体导热性能较好，热传导系数较高，温度变化较大；远离热源端的土体温度梯度较小，土体导热性能较差，热传导系数较低，温度变化较小。

2.2 土样中含水率分布规律

1) 干密度对含水率分布的影响。图 5 为 Z5、Z6、Z7 试验后土体含水率距热源端位置分布图。由图 5 可知，土样 Z5、Z6、Z7 中高温端含水率降低 67.5%~82.1%，低温端升高 26.5%~42.7%。在温度梯度作用下，不同干密度对试验后土样含水率分布产生一定影响，主要表现为：3 组试验后含水率随热源距离的分布曲线均较为陡峭，且都在距热源端 5~7 cm 处出现含水率分布突变区，试验后土样含水率的变化幅度随干密度的增大而减小。

图 6 为 Z5、Z6、Z7 试验后含水率时空分布图。由图 6 可知，干密度对非饱和和黏土体含水率动态分布的影响较小。随着干密度增大，非饱和黏土体中水分迁移速率减小。这是因为干密度不同时固体颗粒排列方式不同，土样饱水程度不同。干密

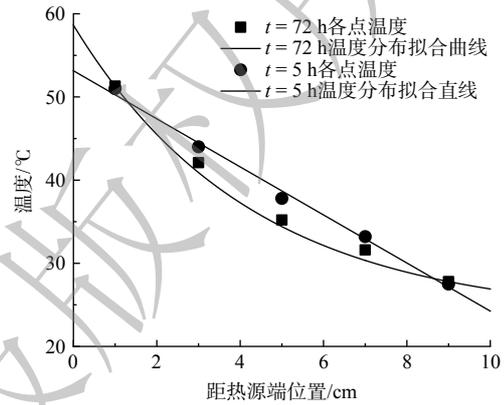


图 4 各测点的温度分布图

Fig. 4 The temperature distribution map of each measuring point

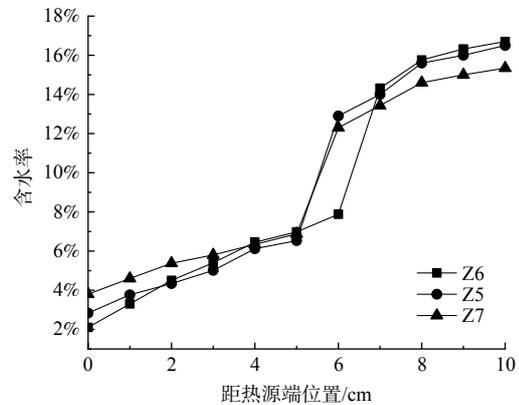


图 5 不同干密度条件下土体含水率距热源端位置分布图

Fig. 5 The distribution map of soil moisture content from the heat source end under different dry density conditions

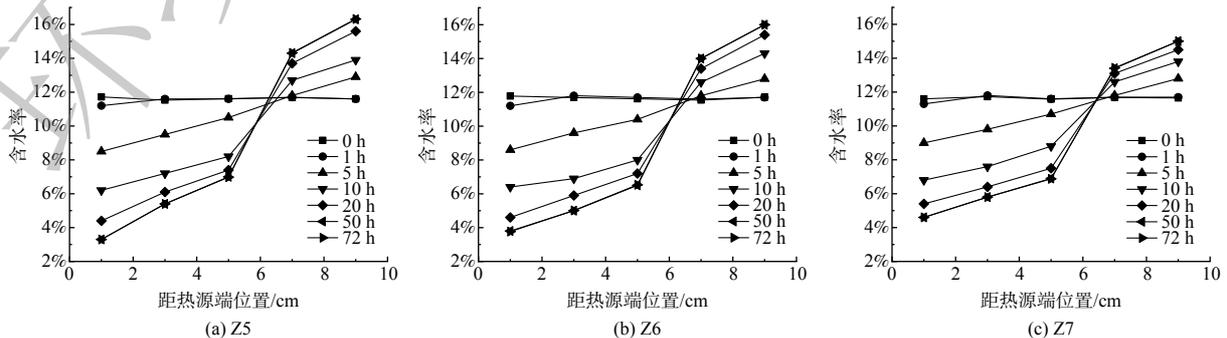


图 6 不同干密度条件下含水率时空分布图

Fig. 6 The spatial and temporal distribution of water content under different dry density conditions

度较大时，土样较为密实，孔隙率较小，提供水分运移的空间较小，渗透系数较小，水分运移能力较弱，运移速率较小；干密度较小时，土样较为松散，土体中有足够的孔隙用作水分运移的通道，土体水分运移现象相对显著，运移速率较大。因此，干密度变化在一定程度上影响了温度梯度条件下非饱和黏土体中水分的运移。

2) 温度梯度对含水率分布的影响。图 7 为 Z1、Z2、Z3 试验后土体含水率距热源端位置分布图。由图 7 可知，土样 Z1、Z2、Z3 中高温端含水率降低 64.1%~79.2%，低温端升高 23.9%~41.0%。对土体两端施加的温度梯度越大，试验结束后土体两端含水率差值越大，水分运移效果越明显。主要表现为：三组试验结束后土体内均会产生明显的水分运移现象，但相较于 Z3 土样，土样 Z1、Z2 中不会产生明显的含水率分布突变区，试验中含水率随热源距离的分布曲线相对平缓。

图 8 为 Z1、Z2、Z3 试验后含水率时空分布图。由图 8 可知，不同温度梯度下非饱和黏土体含水率的动态分布存在一定差异。随着温度梯度增大，非饱和黏土体中水分运移速率增大。试验开始 5 h 后，在 60~25 °C 的温度梯度下，Z3 中距离热源 5~7 cm 处逐渐产生含水率分布突变区，10 h 时在距离热源 5~7 cm 处产生 4.6% 的含水率差值，并在试验结束时达到 7.5%。

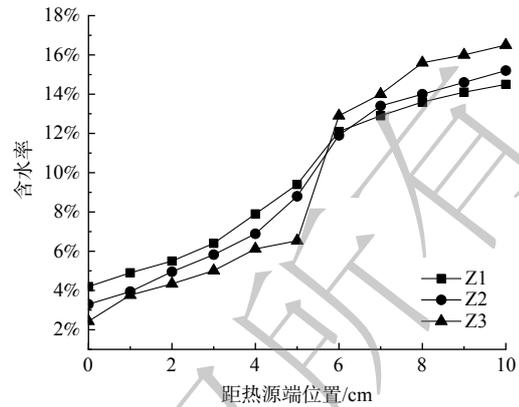


图 7 不同温度梯度条件下土体含水率距热源端位置分布图
Fig. 7 The spatial and temporal distribution of water content under different temperature gradient conditions

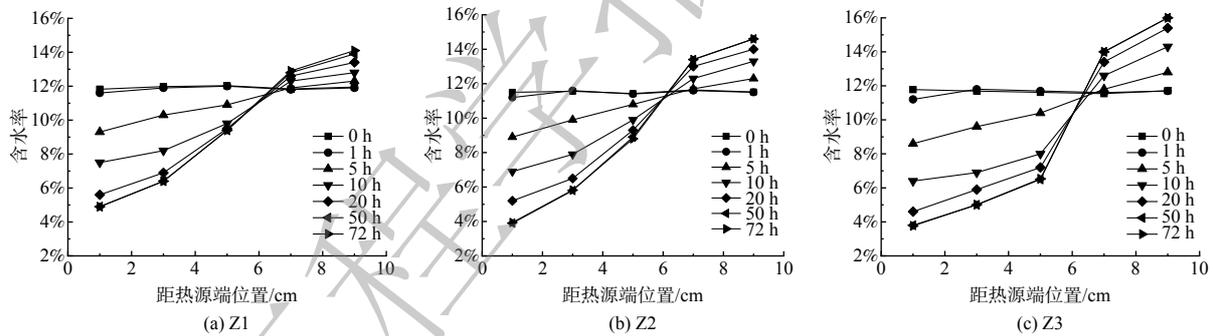


图 8 不同温度梯度条件下含水率时空分布图

Fig. 8 The spatial and temporal distribution of water content under different temperature gradient conditions

温度梯度对试验后土样含水率分布影响较大，温度越高水的粘滞性越低，部分结合水转变成自由水，水分子的活跃度越高，渗透系数越高，促使水分向低温区域迁移^[29-30]。因此，土体两端施加温度梯度越大，试样水分迁移速率越大，试样两端的含水率差值越大，造成含水率随热源距离的分布曲线越陡峭。

3) 初始含水率对含水率分布的影响。图 9 为 Z3、Z4、Z5 试验后土体含水率距热源端位置分布图。由图 9 可知，土样 Z3、Z4、Z5 中高温端含水率降低 12.3%~79.2%，低温端升高 6.2%~41.0%。在温度梯度作用下，初始含水率对试验后土样含水率的分布影响最显著，主要表现为：Z4 土样试验后含水率随热源距离的分布曲线斜率较为突出，但

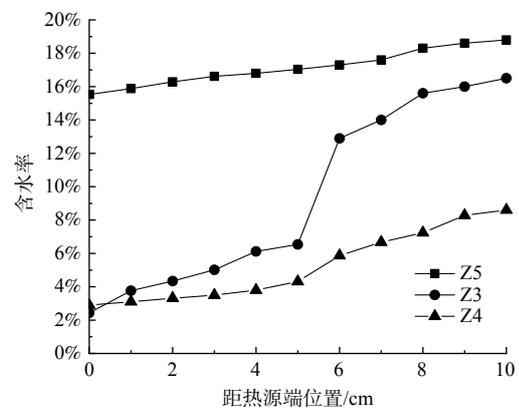


图 9 不同初始含水率条件下土体含水率距热源端位置分布图
Fig. 9 The distribution map of soil moisture content from the heat source end under different initial moisture content conditions

曲线较为平整，并未出现含水率分布突变区域，试验后高温端含水率 2.9%，低温端含水率 8.6%，水分运移现象较明显；Z3 土样试验后含水率随热源距离的分布曲线最陡峭，且在距离热源 5~7 cm 位置处含水率从 6.1% 升为了 12.3%，发生了含水率分布突变，试验后高温端含水率仅 2.4%，低温端含水率 16.5%，含水率变化幅度最大，水分运移现象最显著；Z5 土样试验后含水率随热源距离的分布曲线最平缓，高温端含水率 15.5%，低温端含水率 18.8%，含水率变化幅度最小，水分运移情况不显著。

图 10 为 Z3、Z4、Z5 试验后含水率时空分布图。由图 10 可知，不同初始含水率下非饱和黏土体含水率的动态分布差异较大。相较于 Z3 土样在试验开始 5 h 内高温侧含水率明显下降，出现明显的水分重分布现象；土样 Z4、Z5 在试验开始 5 h 内高温侧含水率仍有提升，在 10~20 h 内才出现高温侧含水率降低、低温侧含水率升高的现象，表明 Z4、Z5 土样水分运移速率相对较小。

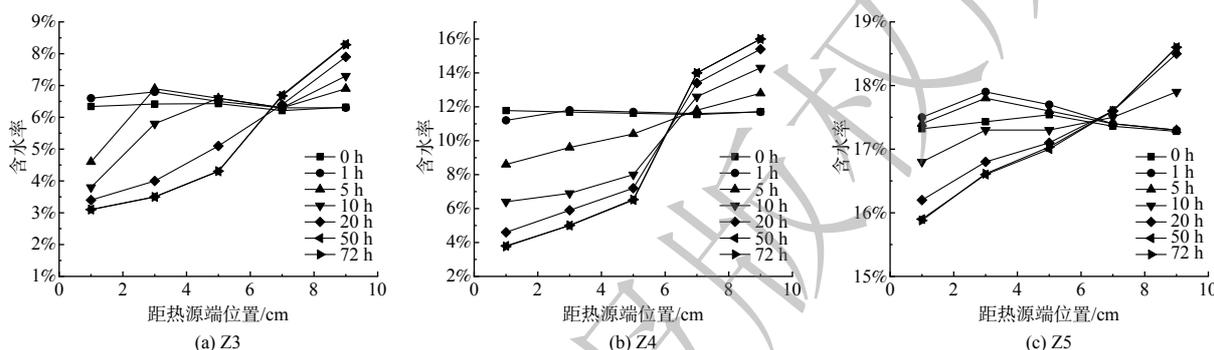


图 10 不同初始含水率条件下含水率时空分布图

Fig. 10 The Spatial and temporal distribution of water content under different initial water content conditions

这是因为初始含水率较低时，土体表面张力作用较强，水分以小液滴状附着在土颗粒表面或是滞留在土颗粒之间的孔隙当中，对水分运移的阻碍程度较大，土体中水分运移现象并不显著；当含水率较高时土颗粒间的润滑效果较强，土体表面张力作用比较弱，水分以液膜状附在土颗粒表面，有利于水分在土体内运移；理论上初始含水率越高水分运移效果越显著，但含水率越高的土样饱和度越高，造成土样渗透系数越小，从而阻碍水分运移。因此，初始含水率对试验后土体水分场分布的影响有一定局限性，初始含水率过高或过低的土样水分运移效果不明显，初始含水率在一定范围内的土体水分运移速率较大，水分运移效果显著。这与王铁行等^[31]、叶万军等^[15]进行温度梯度作用下非饱和黄土水分运移试验所获取的结果类似。

2.3 土样中重金属离子浓度分布规律

图 11 为 T1、T2、T3 及 Z3 试验后含水率距热源端位置分布图。由图 11 可知，试验后非饱和和粉质黏土内水分均发生了明显的运移，土体中水分由高温侧向低温侧迁移，试样 T1、T2、T3、Z3 试验后高温端含水率接近在 2%~3%；试样 T1、T2、T3 试验后低温端含水率在 14.5% 左右，试样 Z3 低温端含水率可达到 16.5%。

图 12 为 T1、T2、T3 试验后重金属离子浓度距热源端位置分布图。由图 12 可知，试样 T1 高温端 Zn(II) 浓度减少了 28.4%、低温端 Zn(II) 浓度增加了 19.5%；T2 高温端 Zn(II) 浓度减少了 42.7%、低温端 Zn(II) 浓度增加了 34.5%；T3 高温端 Cr(VI) 浓度减少了 54.7%、低温端 Cr(VI) 浓度增加了 37.6%。

随着水分运移，Zn(II)、Cr(VI) 由高温端向低

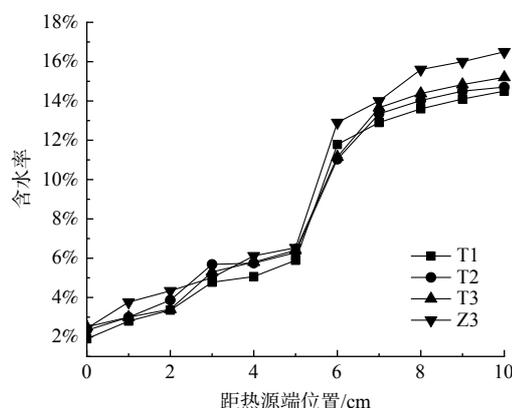


图 11 重金属污染非饱和和粉质黏土体含水率距热源端位置分布图

Fig. 11 The distribution map of water content of unsaturated silty clay contaminated by heavy metals from the heat source end

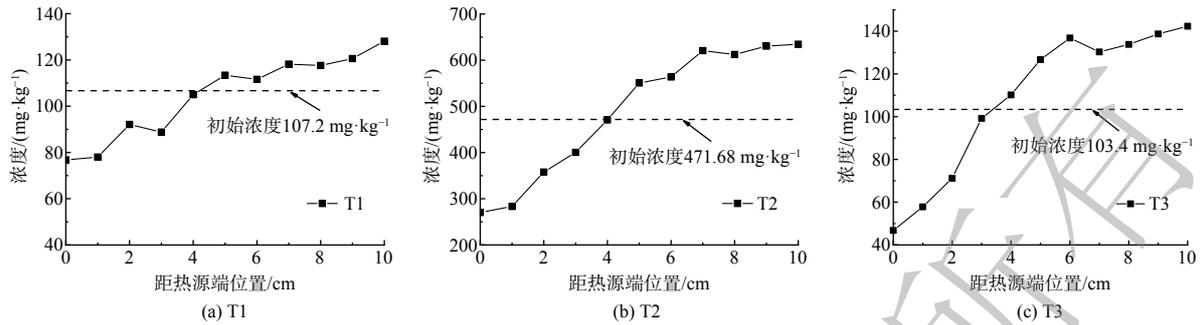


图 12 重金属离子浓度距热源端位置分布图

Fig. 12 The distribution map of heavy metal ion concentration from the heat source end

温端迁移。这是由于近热源端土体中结合水厚度高于低温端，在对流和分子扩散的协同作用下，水分子间的吸力促使水分携带重金属污染物 $Zn(II)$ 、 $Cr(VI)$ 迁移，且 $Zn(II)$ 、 $Cr(VI)$ 具有从高质量分数向低质量分数迁移并趋于均匀的趋势，土体内高温端重金属离子浓度降低，低温端浓度升高^[32-33]。相较于温度梯度作用下非饱和黏土体两端产生的含水率差值，土体两端产生的重金属离子浓度差值相对较小。这可能是由于较多重金属离子被土颗粒所吸附并未发生迁移，只有部分离子存在于孔隙水中并随着水分一同迁移。由 T1 和 T2 对比可知，初始 $Zn(II)$ 浓度较高时所发生的离子迁移情况更显著，这可能是由于初始 $Zn(II)$ 浓度越高，此时土壤的吸附能力越有限，从而在土壤中迁移的机会就可能增多；由试样 T1 和 T3 对比可知，不同重金属污染物离子在同一初始浓度下所发生的迁移现象存在较大差别， $Cr(VI)$ 的迁移量明显高于 $Zn(II)$ 的迁移量，这可能是因为 $Zn(II)$ 以阳离子形式存在， $Cr(VI)$ 以络阴离子形式存在，试验条件下土壤中的胶体物质表面带正电，对 $Zn(II)$ 的吸附量大于 $Cr(VI)$ 。由 T1、T2、T3 可知，试样高温端重金属离子减少量高于低温端重金属离子增加量，上述现象产生的原因可能是高温促使土壤中稳定化形态的重金属转化为可溶性形态，增加其溶解度，同时高温还可以促进土壤中重金属离子的扩散、交换和吸附解吸反应，从而有利于重金属离子在土体内部迁移。温度梯度作用下污染黏土中水分与重金属离子驱动机制如图 13 所示。因此，在土体内部施加一定温度梯度可以有效调控重金属污染物的时空分布，实现重金属污染物的集中处理，为重金属污染场地土壤修复治理应用提供理论参考。

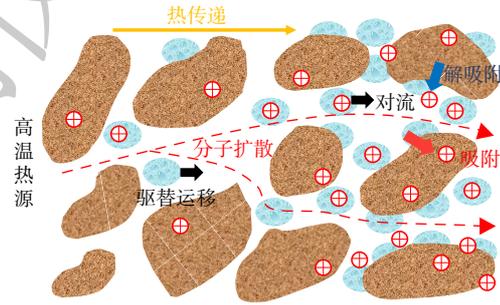


图 13 温度梯度作用下污染黏土中水分与重金属离子驱动机制

Fig. 13 Driving mechanism of water and heavy metal ions in contaminated clay under temperature gradient

3 结论

1) 在均匀非饱和黏土体两端施加一定温度差后，其内部水分场会发生显著变化，水分由高温侧向低温侧运移。

2) 初始含水率对试验后土体水分场分布影响最大，初始含水率较小时，土体表面张力作用较强，对水分运移阻碍程度较大；初始含水率较大时，土壤中孔隙被水填满，使得水分难以进入或流出，运移效果同样不明显；当初含水率适中时，水分运移速率较大、运移效果显著。土样两端温度梯度越大、土样干密度越小，水分运移效果越显著。

3) 随着水分由高温侧向低温侧运移，在对流和分子扩散的协同作用下，水分子间的吸力促使水分携带重金属离子迁移，土样高温端重金属离子减少量为 28.4%~54.7%，低温端增加量为 19.5%~37.6%，迁移效果与重金属离子种类和离子初始浓度相关。在土体内部施加一定温度梯度可以有效调控重金属污染物的时空分布，实现重金属污染物的集中处理，为重金属污染场地土壤修复治理应用提供理论参考。

参考文献

- [1] 刘松玉, 詹良通, 胡黎明, 等. 环境岩土工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 6-30.
- [2] 薛强, 詹良通, 胡黎明, 等. 环境岩土工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 81-94.
- [3] HE Y, HU G, WU D Y, et al. Contaminant migration and the retention behavior of a laterite-bentonite mixture engineered barrier in a landfill[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114338.
- [4] 贺勇, 胡广, 张召, 等. 污染场地六价铬迁移转化机制与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 1-11.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 2014-04-17.
- [6] MILLER R D. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils[J]. *Highway Research Record*, 1972, 393: 1-11.
- [7] HARLAN R L, NIXON J F. Ground thermal regime[J]. *Geotechnical Engineering for Cold Regions*, 1979, 15(2): 103-108.
- [8] PART M. Analysis of experiments of moisture migration caused by temperature differences in unsaturated porous medium by means of two-dimensional numerical simulation[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1986, 29(7): 1033-1039.
- [9] 王铁行, 陆海红. 温度影响下的非饱和和黄土水分迁移问题探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1081-1084.
- [10] 王铁行, 贺再球, 赵树德, 等. 非饱和黏土体气态水迁移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(18): 3271-3275.
- [11] 王铁行, 王娟娟, 张龙党. 冻结作用下非饱和和黄土水分迁移试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(1): 7-13.
- [12] 李彦龙, 王俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和和土水分迁移研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(10): 2839-2844.
- [13] ZHANG H F, GE X S, YE H, et al. Heat conduction and heat storage characteristics of soils[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2007, 27(2-3): 369-373.
- [14] CHEN W Z, TAN X J, YU H D, et al. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for unsaturated porous media[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2009, 1(1): 31-40.
- [15] 叶万军, 刘忠祥, 杨更社, 等. 温度变化条件下重塑黄土水分迁移试验[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 126-130.
- [16] BAI B, XU T, NIE Q K, et al. Temperature-driven migration of heavy metal Pb^{2+} along with moisture movement in unsaturated soils[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 153: 119573.
- [17] 周凤玺, 周立增, 王立业, 等. 温度梯度作用下非饱和和盐渍土水盐迁移及变形特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 45(4): 126-130.
- [18] MARTIN M, CUEVAS J, LEGUEY S. Diffusion of soluble salts under a temperature gradient after the hydration of compacted bentonite[J]. *Applied Clay Science*, 2000, 17(1): 55-70.
- [19] ROSANNE R, PASZKUTA M, TEVISSSEN E, et al. Thermodiffusion in compact clays[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 267(1): 194-203.
- [20] ROSANNE R, PASZKUTA M, Adler P M. Thermodiffusional transport of electrolytes in compact clays[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 299(2): 797-805.
- [21] KONIORCZYK M, GAWIN D. Numerical modelling of coupled heat, moisture and salt transport in porous materials[J]. *Computer Assisted Mechanics & Engineering Sciences*, 2006, 13(4): 565-574.
- [22] KONIORCZYK M, GAWIN D. Heat and moisture transport in porous building materials containing salt[J]. *Journal of Building Physics*, 2008, 31(31): 279-300.
- [23] 杨宁芳, 牛富俊, 林战举. 重金属元素在冻土与融土中迁移的对比试验[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(3): 36-39.
- [24] 吴珣, 施建勇, 何俊. 非等温条件下有机污染物在黏土衬垫中的扩散分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 120-124.
- [25] PENG M Q, FENG S J, CHEN H X, et al. Analytical model for organic contaminant transport through GMB/CCL composite liner with finite thickness considering adsorption, diffusion and thermodiffusion[J]. *Waste Management*, 2021, 120(9): 448-458.
- [26] PENG M Q, FENG S J, CHEN H X, et al. An analytical solution for organic pollutant diffusion in a triple-layer composite liner considering the coupling influence of thermal diffusion[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 137: 104283.
- [27] 郭文凯. 非饱和土中的水热传输过程及重金属污染物迁移试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [28] ZHOU L Z, ZHOU F X, YING S, et al. Study on water and salt migration and deformation properties of unsaturated saline soil under a temperature gradient considering salt adsorption: Numerical simulation and experimental verification[J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 134: 104094.
- [29] 湖南省和清环境有限公司. 土壤及地下水重金属污染综合治理场地环境调查报告[R]. 长沙: 湖南省和清环境有限公司, 2018.
- [30] HABIBAGAH K. Temperature effect and the concept of effective void ratio[J]. *Indian Geotechnical Journal*, 1977, 7(1): 14-34.
- [31] 王媛, 施斌, 高磊, 等. 黏性土渗透性温度效应实验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(3): 351-356.
- [32] 王铁行, 李宁, 谢定义. 非饱和黄土重力势、基质势和温度势探讨[J]. 岩土工程学报, 2004(5): 715-718.
- [33] 李敏, 齐振霄, 姚昕好, 等. 基于可视角度下重金属污染物在介质中的迁移规律[J]. 环境工程学报, 2023, 17(4): 1303-1312.

(责任编辑: 金曙光)

Heat and moisture transport and spatiotemporal distribution of heavy metal ions in unsaturated clay under temperature gradient

HE Yong^{1,2,*}, LI Wangqiang^{1,2}, ZOU Yanhong^{1,2}, LOU Wei³, ZHANG Zhao^{1,2}, ZHANG Keneng^{1,2}

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China; 3. Hunan HIKEE Environmental Technology CO., LTD., Changsha 410221, China

*Corresponding author, E-mail: heyong18@csu.edu.cn

Abstract Silty clay layer from a typical heavy metal contaminated site was selected, and a self-developed one-dimensional unsaturated thermal-hydro-chemical coupled test system was employed to investigate heat and moisture transport and migration behaviors of heavy metal ions in unsaturated silty clay under a temperature gradient. Experimental results demonstrated that moisture inside the soil migrated from the high-temperature side to the low temperature one after an application of temperature gradient, leading to a redistribution of the moisture field. The water field distribution inside soil was significantly influenced by initial water content, and the migration of heavy metal ions was remarkable at the initial water content of 12%, accompanied with a 79.3% decrease of water content at the high-temperature side and a 40.5% decrease at the low-temperature side. Simultaneously, the transport of water became more and more obviously with the increases of the temperature gradient or the soil dry density. Heavy metal ions migrated together with liquid water under the action of temperature gradient, corresponding to a 28.4%~54.7% decrease in heavy metal concentration at the high-temperature side and a 19.5%~37.6% increase at the low-temperature side. Besides, the migration of heavy metals was also related to the ion type and the initial concentration.

Keywords unsaturated clay; heavy metal contamination; temperature gradient; heavy metal ions; heat and moisture transport