

赵润苛, 张永波, 李京玲, 等. 砷、汞在水位波动带中迁移转化规律的试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(4): 158-166. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.013

ZHAO Runke, ZHANG Yongbo, LI Jingling, et al. Experimental study on the migration and transformation patterns of arsenic and mercury in water level fluctuation zone [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(4): 158-166. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.013

砷、汞在水位波动带中迁移转化规律的试验研究

赵润苛¹, 张永波¹, 李京玲¹, 时红², 郑强²

(1. 太原理工大学水利科学与工程学院, 山西太原 030024; 2. 太原理工大学环境与生态学院, 山西晋中 030600)

摘要:【目的】对污染物在地下水位波动带中迁移转化规律的认识是探究地下水污染根源的重要突破口。【方法】以地下水溶质运移理论为基础, 通过进行水位波动下的土柱模拟试验, 分析了水位波动带中砷、汞在不同水位波动幅度($\Delta H=0$ cm、10 cm、20 cm)情况下的迁移转化规律。【结果】结果显示: 各取样点土壤水中总砷和 As(V) 浓度的变化幅度与水位波动幅度增减趋势相同, 整体表现为柱3($\Delta H=20$ cm)>柱2($\Delta H=10$ cm), 但土壤水中汞的浓度不受水位波动的影响, 整体呈上升趋势。【结论】结果表明: 水位的周期性波动主要通过影响波动带介质中关键环境要素特征, 进而影响砷在波动带中的迁移转化规律, 且水位波动幅度与该影响程度呈正相关, 故在进行地下水砷污染风险评价时, 不可忽视地下水位波动对砷运移的影响。

关键词: 水位波动; 波动幅度; 水环境; 砷; 汞; 迁移转化

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.04.013

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: X523

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)04-0158-09



Experimental study on the migration and transformation patterns of arsenic and mercury in water level fluctuation zone

ZHAO Runke¹, ZHANG Yongbo¹, LI Jingling¹, SHI Hong², ZHENG Qiang²

(1. College of Water Resources and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. College of Environmental and Ecology, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, Shanxi, China)

Abstract: [Objective] Understanding the migration and transformation patterns of contaminants in the groundwater level fluctuation zone is crucial for uncovering the root causes of groundwater pollution. [Methods] Based on the theory of groundwater solute transport, soil column simulation experiments were conducted to investigate the migration and transformation patterns of arsenic and mercury under different water level fluctuation amplitudes ($\Delta H=0$ cm, 10 cm, 20 cm) in the water level fluctuation zone. [Results] The results showed that the variation amplitude of total arsenic and As(V) concentrations in soil solution at

收稿日期: 2024-03-31; 修回日期: 2024-05-20; 录用日期: 2024-05-27; 网络出版日期: 2024-06-25

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0406403); 山西省青年基金项目(202303021222011); 山西省应用基础研究计划项目(20210302123192); 山西省基础研究计划项目(202303021211048、201901D111059)

作者简介: 赵润苛(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水环境及水生态研究。E-mail: zhaorunke0586@163.com

通信作者: 张永波(1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事为水文地质与水污染治理研究。E-mail: zhangyongbo2021@sina.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

sampling points followed the same trend as the water level fluctuation amplitudes, with an overall performance of column 3 ($\Delta H=20\text{ cm}$) > column 2 ($\Delta H=10\text{ cm}$). However, the concentration of mercury in the soil solution was not affected by the water level fluctuation and showed an overall increasing trend. [Conclusion] The result indicate that the periodic fluctuation of the water level mainly affects the characteristics of key environmental factors in the medium of the fluctuation zone, which in turn impacts the migration and transformation patterns of arsenic in this zone. The amplitude of water level fluctuation is positively correlated with the degree of this effect. Therefore, in groundwater arsenic pollution risk assessments, the impact of groundwater level fluctuation on arsenic migration should not be overlooked.

Keywords: water level fluctuation; fluctuation amplitude; water environment; arsenic; mercury; migration and transformation

0 引言

过去几十年, 全球经济的迅猛发展伴随着地下水污染问题的日益加剧, 严重威胁着环境安全和公众健康, 地下水危机及地下水安全问题引起了国内外学者的重视^[1-3]。砷和汞作为地下水典型污染物, 其在土壤和地下水系统中的迁移转化规律成为环境科学、土壤科学、地下水科学研究的热点问题^[4-5]。砷和汞具有剧毒难降解、易迁移、生物蓄积性、环境持久性等特点^[6-7], 主要来源于污水灌溉、农药化肥的大规模使用、固体废物的堆放等, 极易在降水、灌溉、地下水位波动和渗漏等作用下进入土壤-地下水系统中, 并在地下含水层迁移扩散, 恶化地下水水质, 严重威胁当地居民饮用水安全^[8-10]。

污染物在土壤和地下水系统中的迁移转化主要与土-水环境条件有关, 大气降水、农田灌溉、河流的侧向补给、过量开采等均会造成地下水位的变化^[11]。在地下水位波动影响下, 包气带-饱水带界面发生变化, 使得土壤含水量、物理化学生物特征以及水动力条件等环境因子随水位升降发生变化, 从而控制污染物在土壤-地下水系统中的迁移转化^[12-13]。因此, 污染物在地下水位波动中的迁移转化成为环境研究领域的热点问题之一, 目前的研究主要集中在水位变化对石油烃类化合物、三氮、土壤盐分、Pb、Cr、Fe、Mn 等迁移转化规律的影响^[14-19]。研究表明, 地下水位波动对污染物迁移影响有多种途径, 一方面, 地下水位的升降直接影响土壤介质空隙中的水分、 O_2 和 CO_2 含量, 从而影响土壤中溶解氧含量、氧化还原环境以及污染因子之间相互转化的能力, 进而对污染物的迁移转化产生影响; 另一方面, 低浓度的水源补给起到了混合稀释的作用, 直接改变了污染物在含水层中的浓度分布, 水位的变动与介质的不均匀性直接影响了污染物在非饱和带与饱和带之间的迁移转化过程^[20-22]。

国内外在进行地下水位波动对污染物迁移影响

研究时, 主要应用野外调查、室内试验以及数值模拟等方法^[23-28]。目前野外调查主要通过利用监测站点的水文地质信息和土地管理数据来验证水位变化对污染物浓度影响的试验结果, 野外调查数据显示水位波动影响了土壤及地下水的理化性质, 对硝酸盐在波动带中的迁移产生了显著影响^[29]。BUSTOS 等^[30]通过原位试验和数值模拟探讨了水位变化对氢氧化铁堵塞井的影响, 研究表明水位波动引起了井内外水化学组分的时空变化, 形成了清晰的氧化还原分层, 进而影响氢氧化铁的形成与迁移。地下水位波动影响室内试验主要包括二维砂箱模拟试验和室内土柱模拟试验研究。目前已有关于室内试验的研究主要针对三氮迁移转化机理的探讨, 通过室内土柱波动试验模拟并探讨了氮素在地下水位波动带中的迁移转化规律^[31-34], 研究发现, 地下水位波动影响土壤水中 DO 含量, 使得地下水中氮素的浓度发生变化。近期的研究集中在将室内试验和数值模拟结合起来研究土层中污染物在水位波动影响下的运移规律研究, 污染因子主要集中在氮素、LNAPL 和重金属铬等^[35-37], 研究表明, 地下水位、Eh(氧化还原电位)、pH 和污染物浓度相互作用, 共同影响污染物在土-水系统的迁移过程, 并且所建模型能够较好地应用在实际场地当中, 可对地下水中溶质运移情况进行模拟预测, 从而为地下水环境评价提供一定的技术支持。

综上所述, 国内外研究者关于地下水位波动对污染物迁移影响的研究主要包括两方面, 一方面是针对地下水位波动下稳定的污染物的迁移机理研究, 另一方面是针对受地下水位波动引起的氧化还原条件变化影响大的污染物的迁移转化规律研究。砷和汞是变价离子, 容易受氧化还原环境的影响, 但是关于地下水位波动对砷、汞的迁移转化规律的影响却鲜有报道。因此, 本文在分析近年来国内外有关文献的基础上, 结合动态土柱波动试验分析不同水位波动幅度中水位波动影响下砷、汞的迁移转化规律, 为水位

波动影响下砷、汞迁移转化的模拟和预测提供基础数据, 为土壤和地下水污染的修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用细砂收集于山西省太原市某耕作用地埋深 1~3 m 处, 基于其较高的孔隙率和渗透性, 因此被选定为模拟污染物随水位波动迁移的理想试验介质。柱内细砂粒径为 0.125~0.250 mm, 容重为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 阳离子交换量为 $1.57 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质含量为 0.27%, pH 为 7.77。试验用水为蒸馏水, 试验所用试剂除浓酸类(优级纯)均为分析纯。

1.2 试验装置

试验设计 3 个高 100 cm, 内径 10 cm 的有机玻璃柱, 以反映非饱和带土壤的典型深度, 能够充分展现污染物在垂直方向上的迁移行为, 同时保持试验操作的可行性, 试验装置如图 1 所示。有机玻璃柱一侧设有取样点, 取样点间隔 10 cm, 取样点均布置 Rhizon 土壤溶液采集器(型号: 5 cm), 进水口位于有机玻璃柱底部, 底部通过软管与水槽连通, 利用水槽升降改变砂柱水位。

1.3 试验仪器及方法

试验仪器主要包括原子荧光光度计(型号: AFS-8510; 厂商: 北京海光仪器有限公司)和便携式多参数分析仪(型号: DZB-718; 厂商: 上海仪电科学仪器股份有限公司)。

土壤水中 As(III)、As(V)、Hg(II) 的测定均采用原子荧光法, 该方法 As(III) 和 As(V) 的相对标准偏差为 0.18%~2.89%, Hg(II) 的相对标准偏差

小于 2.83%; pH 值、Eh 值和温度采用便携式多参数分析仪测定, 其中, pH 值的测量精度为 ± 0.01 , Eh 值的测量精度为 $\pm 0.1\% \text{ FS}$, 温度的测量精度为 $\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.4 试验方案

试验在室温环境($26.0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$)下进行。通过水槽向柱内注入蒸馏水, 调整水位至 40 cm 刻度处, 静置 1 周, 待柱内毛细现象和自然固结稳定后, 将 2 L 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 As(V) 及 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Hg(II) 的混合溶液从土柱顶端均匀倒入土柱中, 注入后水位上升, 利用蠕动泵抽水, 控制水位稳定在初始水位 40 cm 上, 静置 3 d, 试验过程中砂柱水位随时间的变化情况如图 2 所示, 共进行两个周期, 以模拟自然条件下由降雨和灌溉引发的周期性水位波动, 以此来量化水位波动对土壤中污染物迁移行为的具体影响。每次水位波动前取样检测各取样点土壤水中的 As(III)、As(V)、Hg(II) 的浓度以及 pH、Eh 值。具体试验变量设计如表 1 所列。

表 1 地下水位波动试验变量设计

Table 1 Design of experimental variables for groundwater level fluctuation

序号	土壤质地	水位变幅 $\Delta H/\text{cm}$	水位波动带区域/cm	浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
1		0	0	200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ As(V) 与 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Hg(II) 混合溶液
2	细砂	10	30~50	
3		20	20~60	

2 结果与分析

2.1 柱内环境指标变化规律

整个试验过程中各土柱温度和 pH 值变化不显著, 温度变化范围为 $26.0 \pm 1.5 \text{ }^\circ\text{C}$, pH 值变化范围为 7.2~8.4, 呈弱碱性。各土柱取样点土壤水中 Eh 值变化规律如图 3 所示。柱 1 位于非饱和带的 1[#]—3[#] 取样点土壤水中 Eh 值呈平稳状态, 处于饱和带中 4[#]—6[#] 取样点土壤水中 Eh 值呈缓慢下降的趋势。柱 2 和柱 3 中处于非饱和带中的 1[#] 取样点的 Eh 值基本保持不变, 基本不受水位波动的影响; 第一次水位上升至最高水位再恢复至初始水位 40 cm 的过程中, 两柱 2[#]—6[#] 取样点土壤水中 Eh 值均呈下降趋势; 水位由初始水位降至最低水位再恢复至 40 cm 的过程中, 各取样点处 Eh 值

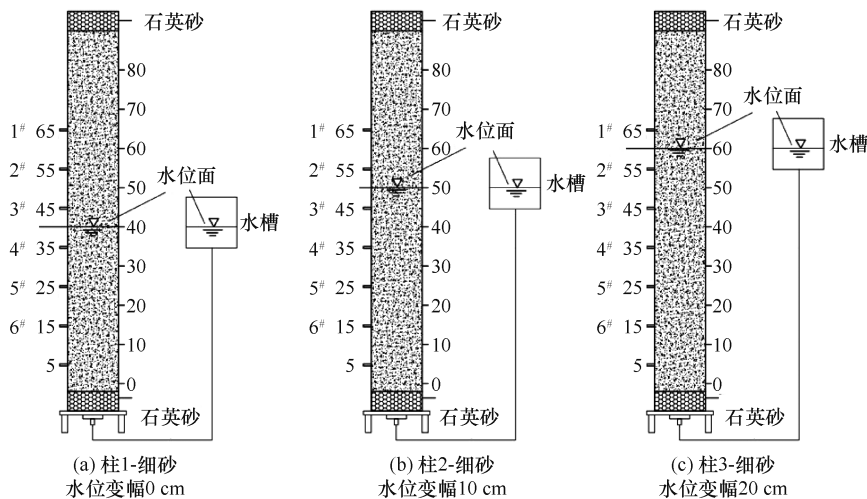


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental setup

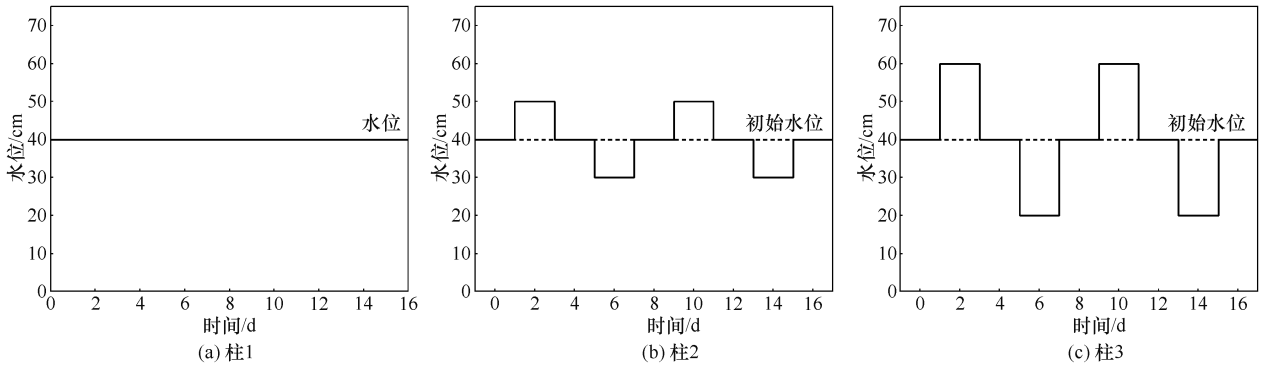


图2 水位变化
Fig. 2 Water level variation

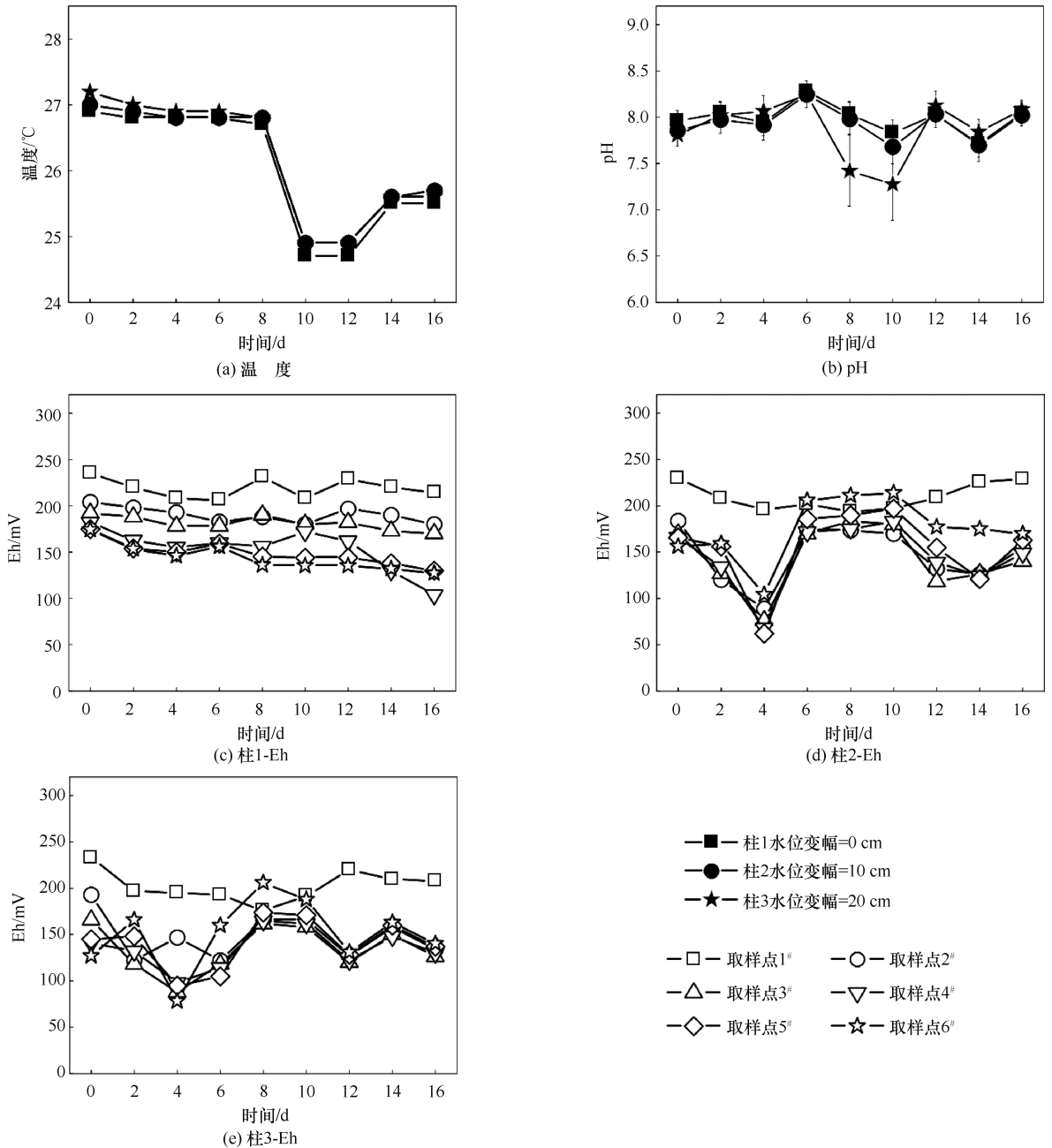


图3 柱1、柱2、柱3中温度、pH和Eh值的变化规律
Fig. 3 Variation patterns of temperature, pH, and Eh values in columns 1, 2, and 3

均呈上升趋势; 水位波动的第二个周期中, 2[#]—6[#]取样点处 Eh 值整体呈下降趋势。

2.2 土壤水中总砷的动态变化规律

各土柱取样点土壤水中总砷浓度变化趋势如图 4 所示。从图中可以看出, 各土柱土壤水中总砷浓度随着土柱深度的增加整体呈下降趋势, 这可能是砷在细砂中的迁移能力相对较弱, 且越靠近柱底, 污染物浓度越低, 基本被细砂吸附。柱 1 中各取样点土壤水中总砷浓度随时间整体呈减小的趋势, 柱 2 和柱 3 中各取样点土壤水中总砷浓度随水位变化而变化, 水位上升, 浓度下降, 这主要是由于水位上升, 水槽内水中总砷含量较低, 水源补给对柱内土壤水中总砷浓度起稀释作用导致总砷浓度下降; 水位下降, 浓度上升, 这主要是由于水位下降, 上层污染物随水流移至下层导致各取样点位置处土壤水中总砷浓度上升。柱 2 中各取样点土壤水中总砷浓度平均变化幅度分别为: 13.70%、14.13%、8.62%、14.87%、33.09% 和 48.53%, 柱 3 中各取样点土壤水中总砷浓度平均变化幅度分别为: 10.66%、14.67%、16.78%、22.66%、43.27% 和 52.23%, 总砷浓度变化幅度整体表现为柱 3>柱 2。这是因为地下水位波动带中补给水源的入渗量和入渗速率是直接影响污染物迁移的关键因素^[33]。在水位波动的过程中, 水位波动幅度越大, 一方面水源补给量增大, 补给对柱内土壤水中溶质起稀释作用导致总砷浓度下降幅度增大; 另一方面, 水位波动带厚度增大, 土壤水与包气带中污染物的接触范围增加, 这两方面因素共同导致各取样点土壤水中砷浓度的变化幅度表现为柱 3>柱 2。

2.3 土壤水中 As(V) 的动态变化规律

试验过程中各取样点土壤水中 As(V) 浓度在不同水位变幅下的动态变化趋势如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 柱 1 内 1[#]—6[#] 取样点土壤水中 As(V) 的含量随时间呈缓慢下降的趋势, 柱 2 和柱 3 中 1[#]—6[#] 取样点 As(V) 的浓度变化受水位波动影响明显, 随土柱深度整体呈缓慢下降的趋势。通过对比图 4 与图 5 可知, As(V) 的浓度变化趋势与各对应取样点总砷浓度变化趋势基本相同。柱 2 中各取样点土壤水中 As(V) 的浓度平均变化幅度分别为: 7.74%、15.79%、10.89%、13.76%、30.14% 和 77.99%, 柱 3 中各取样点土壤水中 As(V) 的浓度平均变化幅度分别为: 12.93%、10.81%、14.57%、22.72%、29.28% 和 96.47%, 柱 3 中相同位置土壤水中 As(V) 浓度变化幅度基本上均大于柱 2 中 As(V) 浓度变化幅度, 这主要是因为在水位降低的过程中, 柱

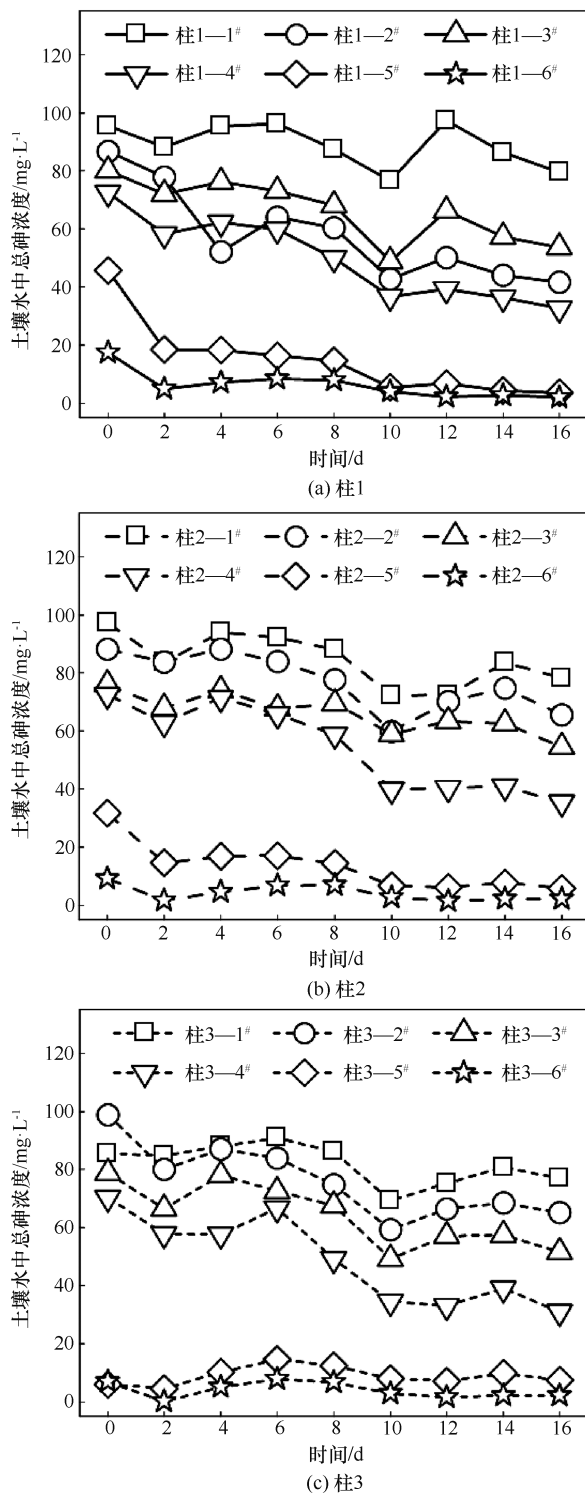


图 4 柱 1、柱 2、柱 3 中各取样点土壤水中总砷浓度的变化规律

Fig. 4 Variation patterns of total arsenic concentration in soil solution at sampling points in columns 1, 2, and 3

2 中 1[#]—4[#] 和柱 3 中 1[#]—5[#] 采样点均处于包气带, 柱 3 水位下降幅度较柱 2 更为显著, 因此, 柱 3 的给水度大于柱 2^[38-39], 相同位置上, 柱 3 包气带中毛细效

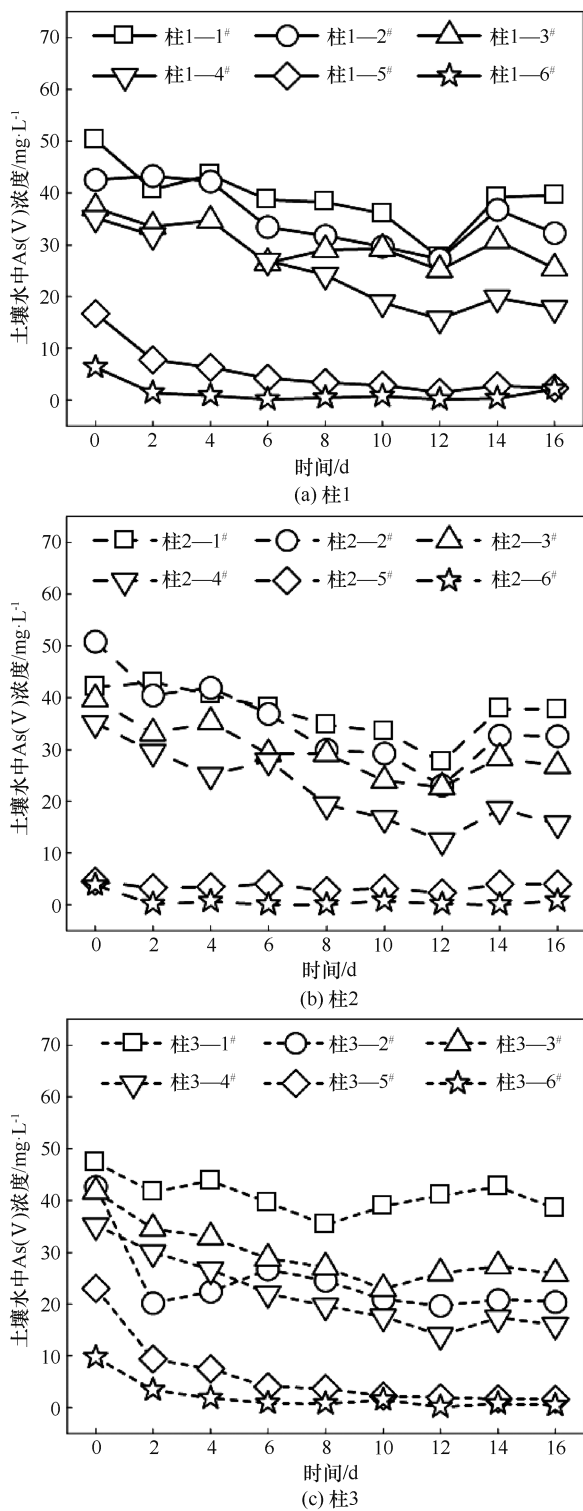


图5 柱1、柱2和柱3中各取样点土壤水中As(V)浓度变化趋势

Fig. 5 Variation trends of As(V) concentration in soil solution at sampling points in columns 1, 2, and 3

果减弱程度更显著, 使得土壤自由含水量减少量更大, 土壤空隙中空气浓度更大, 进而增加了土壤孔隙水与 O_2 的接触面积, 导致As(V)浓度的变化幅度更

大。当水位上升时, 柱3水位的上升幅度大于柱2, 柱3低溶解氧含量的水源补给量更多, As(V)被稀释的更多, 并且更多的As(V)转化为As(III)随水流迁移。

2.4 土壤水中Hg(II)的动态变化规律

不同水位变幅下Hg(II)在细砂中的浓度变化趋势如图6所示。结果显示, 柱1、柱2和柱3内各取样点土壤水中Hg(II)的浓度随时间整体呈增加的趋势, 各土柱取样点土壤水中Hg(II)浓度的变化趋势基本一致, 表明水位变化幅度对土壤水中Hg(II)的迁移影响不明显; 并且, 随着土柱深度的增加, 土壤水中Hg(II)的浓度分布均匀, 基本维持在 $6 \sim 14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围内。这是由于砂质土壤结构十分有利于汞的迁移, 当外源汞进入土壤后, 汞能迅速向下运移, 因此, Hg(II)受水位波动的影响较小。

2.5 结果讨论

在进行地下水位波动对污染物迁移影响研究时, 相较于现场试验、数值模拟等方法, 室内土柱试验在精确控制砂柱水位变幅、污染物种类和环境变量等试验条件具有显著优势, 适用于探索在受控条件下污染物的迁移转化规律, 如在特定土壤类型、污染物浓度和水文条件(不同水位变幅等情景)下, 但其在模拟自然土壤环境复杂性方面具有一定的局限性, 因此, 本研究选取室内土柱试验来探索不同水位变幅下砷和汞的迁移转化规律。本研究结果对比李翔^[39]关于地下水位波动对氮素运移影响规律的研究, 二者均得出水位变幅与其对污染因子的影响程度呈正相关的结论, 但影响程度不一, 推测与污染物种类以及土壤类型有关。目前仅研究了水位波动及波动幅度对砷和汞在土壤中的迁移转化规律, 其尺度较小, 可能无法完全反映大规模现场条件下的复杂性。今后的研究应该结合现场试验, 通过实地监测和高级分析技术, 深入探究不同水位波动条件下砷和汞的生物地球化学行为, 揭示其迁移转化的微观机制, 以期有效控制土壤和地下水中砷、汞污染提供科学依据。

3 结论

(1) 细砂介质中水位波动带内环境指标中Eh值受水位波动影响明显, 整体上与水位波动呈负相关, 但水位波动对温度及pH的影响不明显。

(2) 水位波动可显著影响水位波动带中砷的迁移转化规律, 对汞的影响不明显。水位的变化导致初始水位以上区域的总砷含量随之增减, 而初始水位以下区域的总砷含量变化趋势与上述区域相反, 并在第

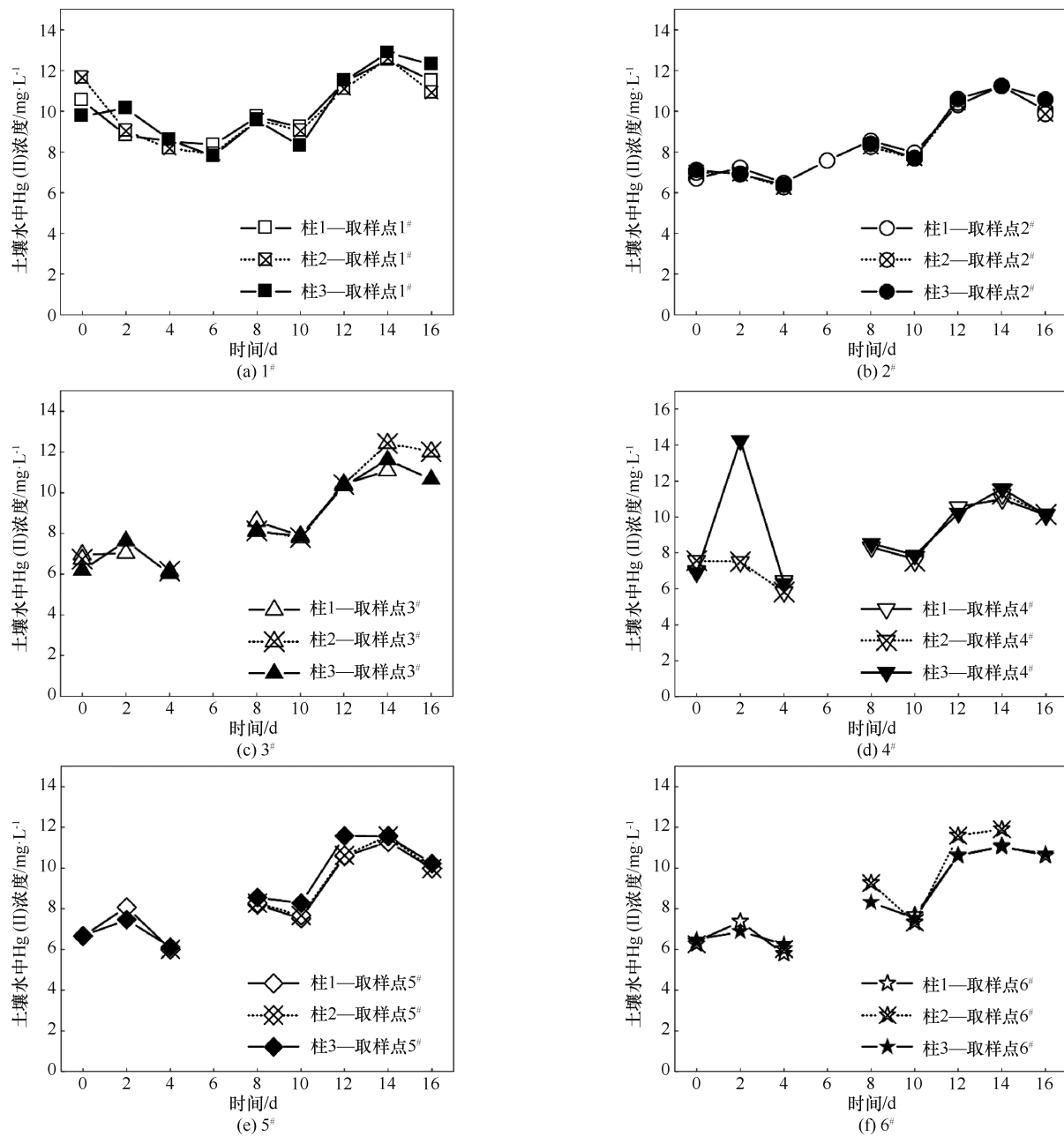


图6 柱1、柱2和柱3中各取样点土壤水中Hg(II)的浓度变化趋势

Fig. 6 Variation trends of Hg(II) concentration in soil solution at sampling points in columns 1, 2, and 3

二个周期后呈现整体下降。同时,土壤水中As(V)占总砷比例与Eh值的变化趋势基本一致,水位上升时土壤水中Eh值降低,As(V)比例下降;水位下降时土壤水中Eh值升高,As(V)比例增加。

(3)增大水位波动幅度能显著增大土壤水中总砷和As(V)浓度的变化幅度,然而对于土壤溶液中汞浓度的影响不大。

(4)水位的周期性波动加速了砷自土壤层向地下水的溶解过程,从而促进了砷的垂直迁移过程,增加了地下水砷污染的潜在风险,对地下水环境质量的影

响值得高度关注。

参考文献 (References):

[1] BURRI N M, WEATHERL R, MOECK C, et al. A review of threats to groundwater quality in the anthropocene [J]. Science of the Total Environment, 2019, 684: 136-154.

[2] LI P Y, TIAN R, XUE C Y, et al. Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of human activities in China with a special focus on western China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24 (15): 13224-13234.

- [3] SHENG D R, WU J, WEN X H, et al. Contamination and ecological health risks of heavy metals in groundwater of a typical agricultural area in NW China [J]. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 2020, 20(4): 440-450.
- [4] GUO T, LI L G, ZHAI W W, et al. Distribution of arsenic and its biotransformation genes in sediments from the East China Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 253: 949-958.
- [5] LIU R P, LIU F, JIAO J G, et al. Potential toxic impacts of Hg migration in the disjointed hyporheic zone in the gold mining area experiencing river water level changes [J]. *Water*, 2022, 14(19): 16.
- [6] 姚爱军, 青长乐, 牟树森. 腐殖酸对矿物结合汞环境迁移性的影响及其机制研究[J]. *生态学报*, 2004(2): 274-277.
YAO Aijun, QING Changle, MOU Shusen. Effects of humus on environmental mobility of mineral bound mercury[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004(2): 274-277.
- [7] 杨倩, 王方园, 申艳冰. 砷、汞对植物毒性影响及其迁移富集效应探讨[J]. *能源环境保护*, 2020, 34(2): 87-91.
YANG Qian, WANG Fangyuan, SHEN Yanbing. Study on the effects of arsenic and mercury on phytotoxicity and their migration and enrichment effects [J]. *Energy Environmental Protection*, 2020, 34(2): 87-91.
- [8] VAREDA J P, VALENTE A J M, DURAES L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 101-118.
- [9] WU X Y, COBBINA S J, MAO G H, et al. A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(9): 8244-8259.
- [10] JIA M Q, BIAN X, YUAN S H. Production of hydroxyl radicals from Fe(II) oxygenation induced by groundwater table fluctuations in a sand column [J]. *Science of Total Environment*, 2017, 584: 41-47.
- [11] 崔荣阳, 刘刚才, 胡万里, 等. 水位波动和氮浓度变化对氮转化功能基因丰度的影响[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(11): 5378-5386.
CUI Rongyang, LIU Gangcai, HU Wanli, et al. Effects of water table fluctuations and nitrogen concentration variations on the abundances of nitrogen-transforming functional genes in soil profiles [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(11): 5378-5386.
- [12] 刘明遥. 石油烃在包气带中迁移转化规律与数值模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
LIU Mingyao. Research on the Migration and Transformation Laws of Petroleum Hydrocarbons in Gas Filled Zones and Numerical Simulation [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [13] 李翔, 席北斗, 姜永海, 等. 水位波动带氮素迁移转化规律[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(12): 4703-4708.
LI Xiang, XI Beidou, JIANG Yonghai, et al. Nitrogen migration and transformation in fluctuation belt of water table [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, 7(12): 4703-4708.
- [14] 陆垂裕, 何鑫, 唐克旺. 全球地下水问题及应对策略探讨[J]. *水利发展研究*, 2022, 22(3): 3-6.
LU Chuiyu, HE Xin, TANG Kewang. Exploration of Global Groundwater Issues and Response Strategies [J]. *Water Resources Development Research*, 2022, 22(3): 3-6.
- [15] YAN X C, YANG B, HE E, et al. Fate and transport of chromium in industrial sites: Dynamic simulation on soil profile [J]. *Science of Total Environment*, 2023, 858: 10.
- [16] LI Y P, BAI G, ZOU X, et al. Nitrogen migration and transformation mechanism in the groundwater level fluctuation zone of typical medium [J]. *Water*, 2021, 13(24): 14.
- [17] SASIKALA S, TANAKA N, WAH H, et al. Effects of water level fluctuation on radial oxygen loss, root porosity, and nitrogen removal in subsurface vertical flow wetland mesocosms [J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(3): 410-417.
- [18] LIU Y, YE Y Y, LI Y P. Experimental and numerical study on Zn and Pb migration in the farmland soil under wastewater irrigation conditions [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(8): 6371-6386.
- [19] LI Y P, WANG L Y, ZOU X, et al. Experimental and simulation research on the process of nitrogen migration and transformation in the fluctuation zone of groundwater level [J]. *Applied Sciences-Basel*, 2022, 12(8): 21.
- [20] 沈俊豪. 地下水位波动对氧化还原敏感微生物功能群的影响机制 [D]. 北京: 中国地质大学, 2023.
SHEN Junhao. The Impact Mechanism of Groundwater Level Fluctuations on Redox Sensitive Microbial Functional Groups [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2023.
- [21] 涂婧, 刘鹏瑞, 彭慧, 等. 武汉市白沙洲岩溶区地下水水位动态变化研究[J]. *水利水电快报*, 2023, 44(6): 80-88.
TU Jing, LIU Pengrui, PENG Hui, et al. Analysis on dynamic change of groundwater level in Baishazhou karst area of Wuhan City [J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2023, 44(6): 80-88.
- [22] 徐云翔, 左锐, 潘明浩, 等. 基于参数敏感性分析的轻质非水相液体在非均质包气带中迁移模拟研究[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(4): 450-457.
XU Yunxiang, ZUO Rui, PAN Minghao, et al. A simulation study of the migration of light non-aqueous phase liquid in heterogeneous vadose zone based on parameter sensitivity analysis [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2023, 45(4): 450-457.
- [23] FIORI A, ZARLENGA A, GOTOVAC H, et al. Advective transport in heterogeneous aquifers: Are proxy models predictive? [J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(12): 9577-9594.
- [24] KRAUSE S, BRONSTERT A, ZEHE E. Groundwater-surface water interactions in a North German lowland floodplain - Implications for the river discharge dynamics and riparian water balance [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 347(3-4): 404-417.
- [25] ZHANG W J, LIN X Y, SU X S. Transport and fate modeling of nitrobenzene in groundwater after the Songhua River pollution accident [J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(11): 2378-2384.
- [26] 娄利华. 白石水库水位变化对水质及浮游藻类的影响[J]. *水土保持应用技术*, 2023(6): 24-25.

- LOU Lihua. The impact of water level changes in Baishi Reservoir on water quality and planktonic algae[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2023(6): 24-25.
- [27] 梅渝, 黄平, 王鹏, 等. 水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(5): 2715-2726.
- MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, et al. Effects of water level fluctuations and vegetation restoration on soil prokaryotic microbial community structure in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(5): 2715-2726.
- [28] 李发鹏, 韩中华. 北京市地下水储备管理保护的主要做法与启示[J]. *水利发展研究*, 2023, 23(4): 21-24.
- LI Fapeng, HAN Zhonghua. Main practices and experience of groundwater reserve management and protection in Beijing[J]. *Water Resources Development Research*, 2023, 23(4): 21-24.
- [29] LI X, LI J, XI B D, et al. Effects of groundwater level variations on the nitrate content of groundwater: A case study in Luoyang area, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(5): 3969-3983.
- [30] MEDINA D A B, VAN DEN BERG G A, VAN BREUKELEN B M, et al. Iron-hydroxide clogging of public supply wells receiving artificial recharge: Near-well and in-well hydrological and hydrochemical observations [J]. *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(7): 1393-1412.
- [31] 刘静, 朱鑫宇, 李顺江, 等. 地下水位波动对不同施氮量农田土壤硝态氮运移影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(1): 154-162.
- LIU Jing, ZHU Xinyu, LI Shunjiang, et al. Effects of groundwater fluctuation on nitrate nitrogen transport after nitrogen application in cropland soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(1): 154-162.
- [32] 刘鑫, 左锐, 孟利, 等. 地下水位上升过程硝态氮(硝酸盐)污染变化规律研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(1): 232-238.
- LIU Xin, ZUO Rui, MENG Li, et al. Study on the variation law of nitrate pollution during the rise of groundwater level [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(1): 232-238.
- [33] 刘鑫, 左锐, 王金生, 等. 地下水位波动带三氮迁移转化过程研究进展[J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(2): 27-36.
- LIU Xin, ZUO Rui, WANG Jinsheng, et al. Advances in researches on ammonia, nitrite and nitrate on migration and transformation in the groundwater level fluctuation zone [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(2): 27-36.
- [34] 赵荣博, 汪洋, 蔡绪怡, 等. 河套灌区典型农业区浅层地下水氮磷变化特征及来源分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(11): 98-109.
- ZHAO Rongbo, WANG Yang, CAI Xuyi, et al. Variation characteristics and source analysis of nitrogen and phosphorus in shallow groundwater in a typical agricultural area of the Hetao Irrigation District[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(11): 98-109.
- [35] 王柳月. 地下水位波动带铬的迁移机理研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- WANG Liuyue. Research on the Migration Mechanism of Chromium in the Fluctuation Zone of Groundwater Level [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.
- [36] 杨洋. 考虑地下水位波动的土层污染物运移模型研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
- YANG Yang. Research on Soil Pollutant Transport Model Considering Groundwater Level Fluctuations [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015.
- [37] 潘明浩, 时健, 左锐, 等. 水位波动下包气带透镜体影响 LNAPL 迁移的数值模拟研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 154-63.
- PAN Minghao, SHI Jian, ZUO Rui, et al. A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 154-163.
- [38] 朱强, 王素梅, 胡红青, 等. 三峡库区消落带土壤对 Cu(II)、Zn(II) 的吸附特征[J]. *环境化学*, 2013, 32(8): 1456-1462.
- ZHU Qiang, WANG Sumei, HU Hongqing, et al. Adsorption of Cu(II), Zn(II) by the purple soils in water-level fluctuating belt of the Three-Gorge-Reservoir reg [J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(8): 1456-1462.
- [39] 李翔, 杨天学, 白顺果, 等. 地下水位波动对包气带中氮素运移影响规律的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(12): 2443-2450.
- LI Xiang, YANG Tianxue, BAI Shunguo, et al. The effects of groundwater table fluctuation on nitrogen migration in aeration zone [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(12): 2443-2450.

(责任编辑 王璐)