

DOI: 10.11779/CJGE202201229

水位波动下砂层中颗粒运移及沉积特性试验研究

崔先泽^{1,2,3}, 文 韬^{2,3,4}, 李志祥^{2,3}, 杨广栋^{2,3}, 李 晋^{2,3}, 吴大洲^{2,3}, 范 勇^{*2,3}

(1. 中国地质大学(北京)地下水循环与环境演化教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 受大型水利工程调控及季节性降水影响, 江河湖沿岸地下水位呈现出周期性变化规律, 水位波动是地下水回灌等工程中影响砂层中颗粒运移及沉积特性的重要因素。通过砂层迁移-沉积试验系统开展了颗粒迁移-沉积特性试验, 并采用浊度-浓度关系、穿透曲线、颗粒粒径、沉积量、流出液颗粒粒径分布、孔隙水压力及细观观测等方式实现了从宏观到细观、从定性到定量分析颗粒的迁移-沉积规律。结果表明: 在相同的波动幅度下, 随着水位的不断升高, 悬浮颗粒横向扩散的趋势愈加显著且渗透力作用逐渐增强, 颗粒更容易沉积在多孔介质表面或孔隙通道角落中; 在不同波动幅度下, 注入小粒径颗粒时, 随着波动幅度增加流出液浓度及峰值增大, 大粒径颗粒与小粒径颗粒呈现相反规律; 在相同尺寸的多孔介质中, 悬浮颗粒粒径越大相对浓度峰值越低, 大颗粒在孔隙中更容易由于筛滤作用发生沉积, 从而造成多孔介质孔隙率和渗透性降低。

关键词: 地下水源热泵; 多孔介质; 硅微粉; 水位波动; 迁移-沉积

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)05-1094-08

作者简介: 崔先泽(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下水资源利用及灾害防控与环境岩土工程等方面的教学和科研工作。E-mail: cuixianze@ctgu.edu.cn。

Retention and transport behavior of silicon micropowder in sand under periodical water level fluctuations

CUI Xianze^{1,2,3}, WEN Tao^{2,3,4}, LI Zhixiang^{2,3}, YANG Guangdong^{2,3}, LI Jin^{2,3}, WU Dazhou^{2,3}, FAN Yong^{2,3}

(1. MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing

100083, China; 2. Hubei Key Laboratory of Construction and Management in Hydropower Engineering, China Three Gorges University,

Yichang 443002, China; 3. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

4. Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, China)

Abstract: Due to the regulation of large-scale water conservancy projects and the influences of seasonal precipitation, the groundwater levels along the banks of rivers and lakes undergo periodic changes. The water level fluctuation is an important factor affecting the particle migration and sedimentation characteristics in the sand layer in groundwater recharge and other projects. In this study, a self-developed sand test system is used to evaluate the migration and sedimentation characteristics of particles under water level fluctuations. The results show that for the same fluctuation range, the continuous rise in the water level causes the number of suspended particles undergoing migration in the pore channels to increase. The horizontal diffusion becomes increasingly obvious, which drives the suspended particles to roll or move in the pore channels and increases their contact with the porous media, making it easier for the suspended particles to deposit on the surfaces of the porous media or in the corners of the pore channels. For different fluctuation amplitudes, when the smaller particles are injected, the overall concentration and peak value of the effluent also increase with the increasing fluctuation amplitude. Larger and smaller particles show opposite trends.

Key words: groundwater heat pump; porous medium; silicon micropowder; water level fluctuation; migration-retention

0 引言

地下水热泵是一种利用浅层地下水相对恒温特性进行制冷和取暖的空调系统, 因其节能、高效及环

基金项目: 地下水循环与环境演化教育部重点实验室开放基金项目(2021-001); 国家自然科学基金项目(41702254); 湖北省自然科学基金项目(2022CFB248); 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划(T2020005); 湖北省青年拔尖人才培养计划

收稿日期: 2022-10-07

*通信作者(E-mail: yfan@ctgu.edu.cn)

保的特点具有广阔的发展空间^[1](见图1)。然而,由于回灌水中易掺杂各类原生(如黏粒、粉粒等)和次生颗粒(如铁锈、胶体、微生物代谢物等),导致很难将抽取的地下水完全回灌,回灌困难问题广泛存在^[2-3]。中国地下水源热泵工程主要分布于长江中下游等河网密布、地下水资源较丰富的地区^[4-5]。在河湖沿岸区域,地下水源热泵抽回灌含水层往往被江河湖切割,地下水与江河湖水力联系密切。受季节性降水及大型水利工程调度影响,江河湖水位呈现出季节性变化规律,进而引发地下水位波动,典型区域波动幅度可达12 m以上^[6]。因此,江河湖沿岸区域地下水源热泵工程回灌含水层中呈现出饱和期—停井期—非饱和期—停井期周期性变化规律。地下水是颗粒的运移载体,水位波动将显著影响颗粒在地层孔隙通道中的迁移、沉积及聚集特性,这与当前认为的抽回灌含水层始终饱和明显不同。因此,开展水位波动下砂层中回灌颗粒迁移沉积特性研究,成为阐明江河流域地下水源热泵回灌堵塞机理,解决其诱发的环境及地质灾害的关键问题。

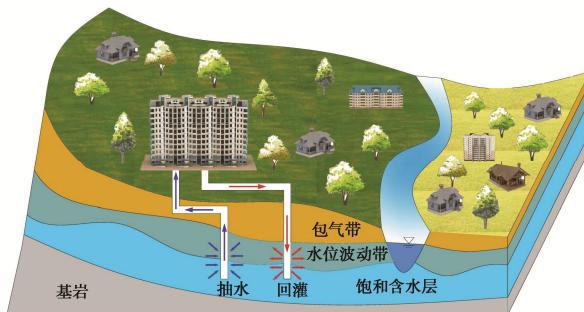


图1 沿江地下水热泵工程示意图

Fig. 1 Schematic graph of groundwater heat pump along river

颗粒在多孔介质中的运移过程受颗粒浓度、尺寸、温度及矿物成分等多因素影响。Bai等^[7]、Yang等^[8]试验发现,在利于沉积区,高浓度颗粒更易发生沉积,穿透曲线存在临界浓度。对聚苯乙烯颗粒,当粒径比为0.01~0.1时,颗粒浓度是影响沉积过程的核心因素。Bear^[9]、Guo等^[10]发现随颗粒粒径减小,吸附作用增强,筛滤作用降低。另外,粒径比能显著影响沉积形态,并与筛滤系数呈指数关系。针对加速迁移现象,Cervantes-Avilés等^[11]发现,孔隙中颗粒迁移速度普遍高于平均流速,该现象在大颗粒上更为显著。Massei等^[12]发现,当达到一定流速时加速迁移现象消失,颗粒迁移速度甚至低于平均流速。Mesticou等^[13]、Godinho等^[14]在研究颗粒脱离过程中发现,颗粒的释放过程按照超指数形式进行,提高流速、pH和降低离子浓度可有效提高沉积颗粒脱离速率。陈星欣等^[15]在研究重力对颗粒运移过程的影响时发现,向下流动时流出液颗粒浓度峰值更高,且到达峰值时间更早。

除此之外,渗流速度、孔隙结构、矿物组成及pH等均可影响颗粒运移过程^[16-20]。然而在江河湖沿岸地下水源热泵工程中存在地下水位波动情况,流速、饱和度、颗粒浓度等因素共同影响回灌水中掺杂颗粒的运移过程。水位周期性波动下悬浮颗粒在多孔介质中如何迁移、沉积,颗粒的沉积形态及分布特征如何,沉积后是否会脱离再迁移,这些问题值得深入研究。

本文采用自主研发的砂层颗粒迁移-沉积试验系统进行不同水位下颗粒运移及沉积特性试验。试验针对2种粒径组合在0.047 cm/s的渗流速度分别进行3组不同波动幅度下颗粒迁移-沉积特性试验(水位变化为110~220, 110~330, 110~440 mm),并对试验砂柱进行取样分析,采用浊度-浓度关系、穿透曲线、颗粒粒径、沉积量、流出液颗粒粒径分布、孔隙水压力及细观观测等方式实现了从宏观到细观、从定性到定量分析颗粒的迁移-沉积规律。

1 试验方案

1.1 试验仪器

试验设备为自主研发的砂层颗粒迁移沉积试验系统,如图2,3所示。试验管内径为60 mm,高度为550 mm,内壁加装5个压力传感器,并与外部数据采集器相连接以实时监测压力变化。高纯度去离子水以及含悬浮颗粒的悬浊液通过蠕动泵驱动连续注入砂柱,采用流量计测量液体流速。出水口每隔3 s对流出液进行采样30 mL,然后利用浊度计测试浊度。进水口及出水口均采用筛网覆盖,筛网孔径远小于石英砂粒径、远大于悬浮颗粒粒径。液体能均匀流入和流出砂柱,而石英砂不随水流流出,从而在保证砂柱结构完整性的同时不影响浊度测量。颗粒级配曲线及圆度采用欧美克 Topsizer Plus 激光粒度仪及其配套的DS-1000 动态图像附件进行测量。

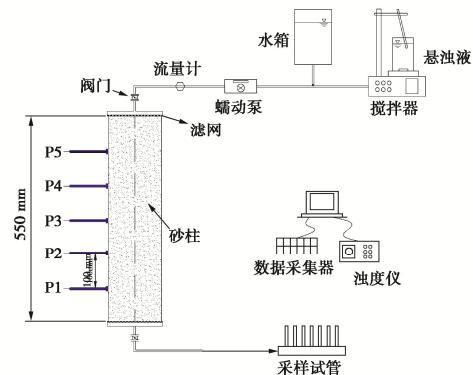


图2 试验装置图

Fig. 2 Test devices

1.2 试验材料

试验中采用天然河砂作为砂层填充料,其主要由

天然石英砂组成，其中 SiO_2 的含量不低于 99.5%，莫氏硬度为 7，性脆无解理，贝壳状断口，油脂光泽，颗粒相对质量密度为 2.65。试验前先用高纯去离子水对河砂反复冲洗直至无悬浮杂质，然后放置于 105°C 条件下进行烘干。悬浮颗粒采用白色硅微粉作为材料，其形状为近似球形，物理化学性质稳定，取样后易于观测。综合前期研究成果与制样的便宜性^[2-20-21]，选择中值粒径分别为 14, 24 μm 的两种硅微粉作为颗粒材料。颗粒粒径与形状是影响其运移及沉积特性的重要因素，其特征如图 4 所示。石英砂及硅微粉具体参数如表 1 所示。

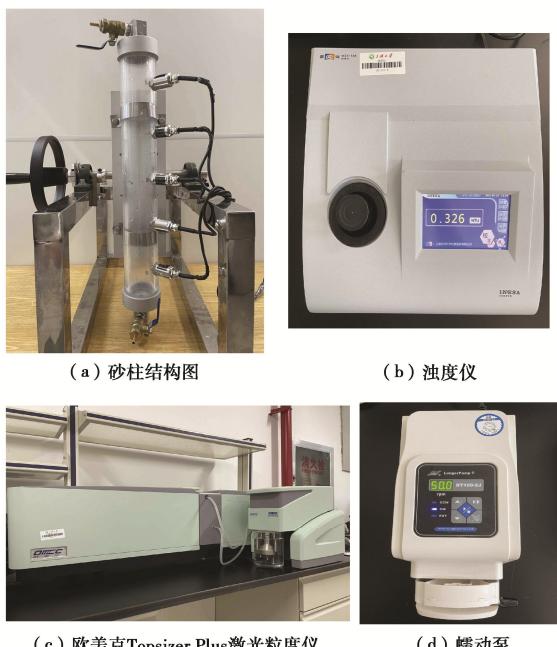
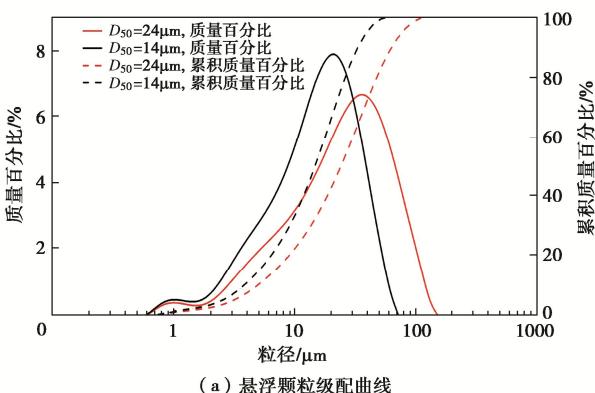


图 3 试验细节图

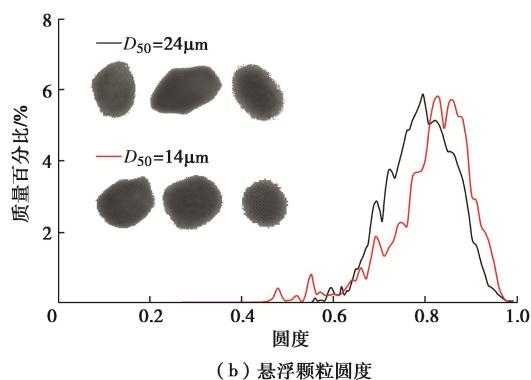
Fig. 3 Test details

1.3 试验步骤

石英砂按以下步骤装填：在砂柱出口处用筛网覆盖并关闭底部阀门，通过长颈漏斗将烘干的石英砂分 10 层装填并捣实，填装完成后使用筛网覆盖并打开顶部阀门。通过蠕动泵由顶部注入去离子水至设计水位高度，调整底部阀门使水位保持不变，定时对土柱中流液进行浊度测试，待其低于 2NTU 时开始试验。



(a) 悬浮颗粒级配曲线



(b) 悬浮颗粒圆度

图 4 悬浮颗粒的级配曲线及圆度分布
Fig. 4 Grain-size distribution curves and roundnesses of quartz powder

表 1 石英砂及硅微粉物理参数

Table 1 Physical parameters of quartz sand and quartz powder

材料	粒径范围/ μm	中值粒径/ μm	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	孔隙率/%
石英砂	1000~2000	1568	7.942	40
硅微粉 1	6~21	14	772.329	—
硅微粉 2	9~39	24	571.69	—

对 2 种粒径组合进行定水头穿透试验（水位高度分别为 110, 220, 330, 440 mm），流速为 0.047 cm/s。随后分别进行 3 组不同波动幅度下颗粒迁移-沉积特性试验（水位变化为 110~220, 110~330, 110~440 mm）。每组试验水位由 110 mm 先上升至设计水位后再下降至 110 mm，并进行 3 个循环，每个周期向砂柱连续注入 1.5 L 悬浊液（0.5 g/L）。试验中对流出液浊度取样测量，使用粒度分析仪对流出液中悬浮颗粒粒径进行分析。最后通过悬浮液浊度和浓度的关系对流出水样的颗粒浓度进行分析，整个试验过程中实时监控砂柱内部压力变化。

浊度采样完毕后，关闭下部阀门，打开顶部盖子并取出筛网，从深度为 55 mm 处开始对砂柱进行取样。之后每隔 55 mm 取样一次直至深度达到 550 mm，共取 10 次样。每次取样 15 g 置于滤网中并用 50 mL 去离子水冲洗沉积在孔隙通道、砂粒表面上的颗粒至烧杯中，搅拌均匀后对烧杯中的悬浊液进行浊度测试。

2 试验结果

2.1 浊度-浓度关系

悬浮颗粒浓度通常采用过滤烘干后称重测量的方法，此法不仅过程繁琐且难以连续监测。Ahfir 等^[22]研究发现悬浮颗粒浊度与浓度之间呈高度线性相关，因此本试验采用浊度仪测量颗粒浊度，随后再与浓度进行换算。试验选用颗粒的浊度-浓度的关系如图 5 所示，可见两者具有高度线性相关性。

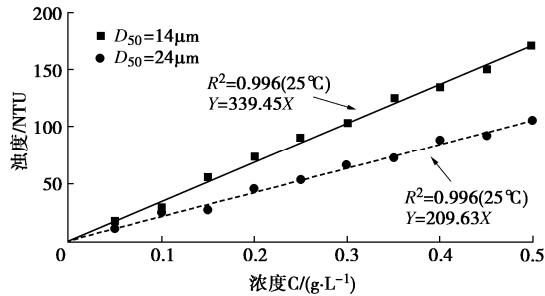


图 5 悬浮颗粒浊度-浓度关系

Fig. 5 Relationship between turbidity and concentration

2.2 不同波动幅度下穿透曲线

首先进行不同水位高度下颗粒迁移-沉积特性试验, 研究中采用孔隙体积比 P_V 作为横坐标, 悬浮颗粒浓度及初始颗粒浓度之比 C/C_0 作为纵坐标, 其中 P_V 含义为

$$P_V = \frac{V_{\text{inj}}}{V_p} = \frac{V_0 t}{V_p} \quad \text{。} \quad (1)$$

式中: V_p 为砂层孔隙体积; V_0 为单位时间注入悬浊液体积; t 为时间; V_{inj} 为注入水的体积。

试验穿透如图 6 所示。结果表明, 随着水位升高, 流出液颗粒浓度呈现出先升高直至峰值, 后下降的规律。在悬浊液注入初期, 颗粒随水流穿过砂柱并分散在砂层中, 流出液浊度呈下降趋势。随着悬浊液持续

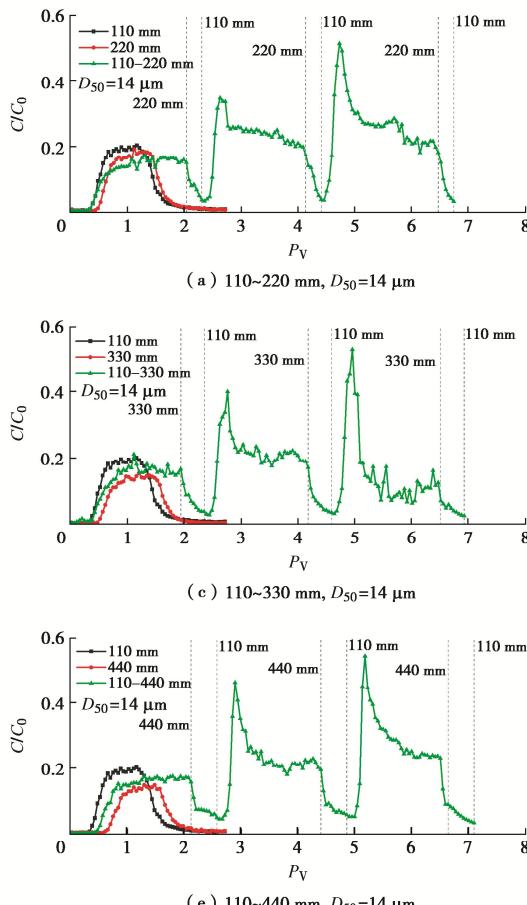


图 6 不同波动幅度下穿透曲线

Fig. 6 Penetration curves under different fluctuation amplitudes

注入, 颗粒逐渐出现在流出液中, 并在达到峰值浓度后下降。当水位降低时, 流出液浓度下降速率相较于水位升高时明显变快。柱内水位下降至 110 mm 后进行下一周期试验, 流出液浓度峰值高于上一周期。

分析认为由于悬浊液不断注入, 沉积在多孔介质表面和孔隙通道中的悬浮颗粒逐渐增多, 悬浮颗粒在水动力作用和渗透力双重作用下开始进行新一轮迁移, 引发沉积颗粒流出并使流出液浓度增大。

由图 6 (a) ~ (f) 可以看出, 与定水位试验相比, 当 $D_{50}=14 \mu\text{m}$ 时, 在第一个周期内流出液浓度处于两组对照试验之间, 第二周期与第三周期峰值均大于对照组; 当 $D_{50}=24 \mu\text{m}$ 时, 第一周期内流出液浓度小于两组对照试验, 随着水位不断增高第二周期和第三周期流出液浓度峰值逐渐小于对照组。

图 7, 8 表明, 在粒径相同时, 流出液浓度在不同周期均呈现先升高再降低的趋势, 前一周期流出液整体浓度及峰值均小于后一周期, 随着波动幅度的不断增大穿透曲线呈现出滞后性。注入悬浮颗粒粒径不同时穿透曲线也不同。注入小粒径颗粒时, 流出液整体浓度以及峰值随波动幅度增大而增大。注入大粒径颗粒时规律与之相反, 流出液整体浓度以及峰值随波动幅度增大而减小。分析认为随着波动幅度不断增大,

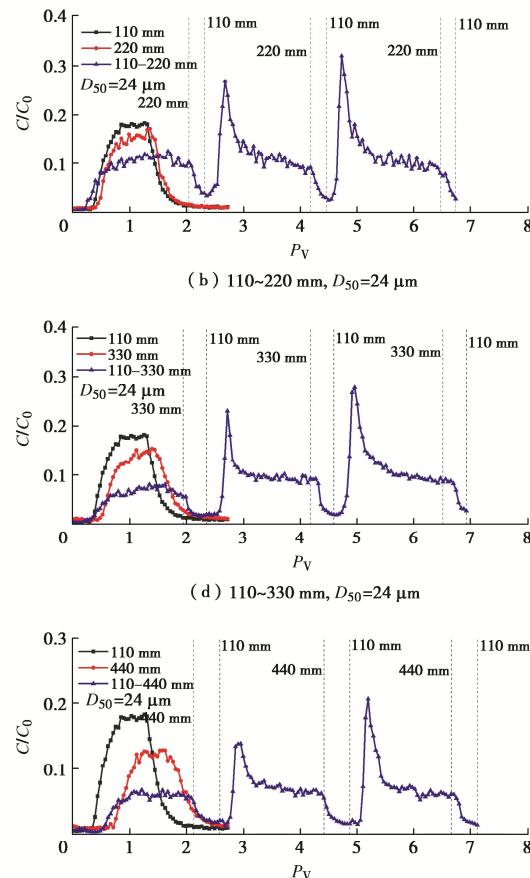


图 6 不同波动幅度下穿透曲线

Fig. 6 Penetration curves under different fluctuation amplitudes

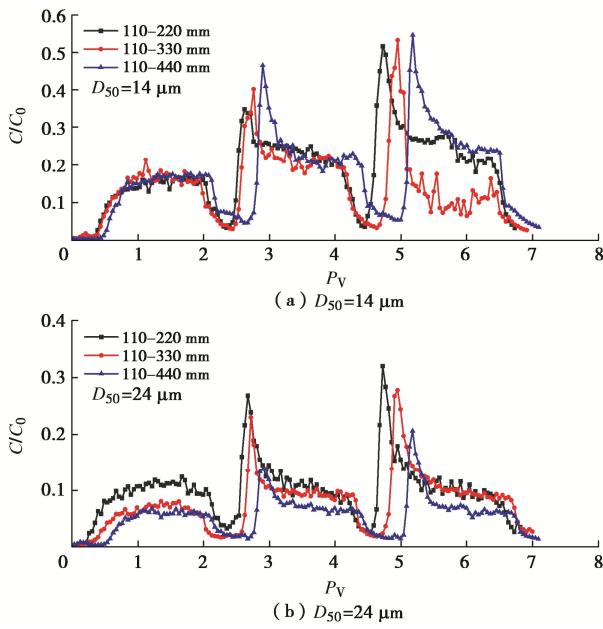


图 7 同一粒径组合下不同波动幅度穿透曲线

Fig. 7 Penetration curves of different wave amplitudes under same particle size combination

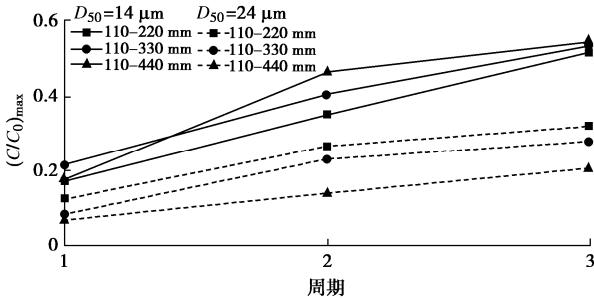


图 8 不同波动幅度下各周期峰值

Fig. 8 Peak values of each cycle under different fluctuation amplitudes

水位高度也不断升高，悬浮颗粒在运移过程中的孔隙通道不断增多且在横向扩散的趋势越来越明显。2组相较于1组颗粒粒径更大，因此在孔隙通道不断变多的条件下更容易发生堵塞。

试验中渗流自上而下进行，如将砂层视为均匀，则渗透力也是均匀分布且方向与重力相同。在高水位时，由于渗透力较强，渗透力带动悬浮颗粒在孔隙通道中滚动或移动，增加与多孔介质的接触，使得悬浮颗粒更容易沉积在多孔介质表面或孔隙通道角落中。因此相同渗流速度下，水位越高越容易发生堵塞；而对于相同尺寸的多孔介质，粒径较小的悬浮颗粒更容易通过多孔介质中的孔隙通道，也更容易随水流迁移，因此两组试验呈现相反规律。

2.3 颗粒粒径影响分析

图9表示的是在同一种多孔介质中，2种不同粒径分布的悬浮颗粒迁移-沉积特性试验结果。试验砂柱原为无悬浮颗粒的状态，水位高度为110 mm，随着这部分水排除，砂层逐渐处于硅微粉悬浮液中，引起

相对浓度值逐渐增大，并在某一时刻到达峰值。随后由于部分悬浮颗粒沉积在砂粒表面，砂层孔隙率逐渐降低，通透性下降，且由于注入悬浮液持续增加，相对浓度呈下降的趋势。

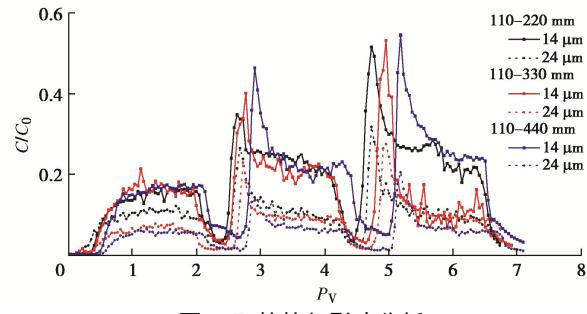


图 9 颗粒粒径影响分析

Fig. 9 Effects of particle size

图9表明在固定尺寸多孔介质中，悬浮颗粒粒径越大，相对浓度峰值越低。这一方面由于大颗粒在孔隙中更容易由于筛滤作用发生沉积，从而造成多孔介质孔隙率降低，孔隙通道变窄，通透性降低。这反过来又增加悬浮颗粒通过孔隙通道的难度，最终使通过砂层的悬浮颗粒浓度降低，即 C/C_0 值下降。另一方面，随着水位不断升高，悬浮颗粒运移孔隙通道不断增多且在横向扩散的趋势愈加明显。与此同时渗透力作用也不断增强，从而带动悬浮颗粒在孔隙通道中滚动或移动，增加与砂粒的接触，使悬浮颗粒更容易沉积在砂层表面或孔隙角落中。两方面因素最终导致试验中悬浮颗粒粒径越大，相对浓度峰值越低。

2.4 沉积量

浊度采样完毕后，关闭下部阀门，打开顶部盖子并取出筛网，从55 mm深度处开始每隔55 mm对砂柱进行取样。每组试验共取10次样。每次取样15 g置于滤网中并用50 mL去离子水冲洗在砂粒表面及孔隙中的颗粒至烧杯中，搅拌均匀后对烧杯中的悬浊液进行浊度测试，随后通过浊度与浓度关系换算获取硅微粉含量。如图10, 11所示。



(a) 取样称量

图 10 沉积量测量

Fig. 10 Sedimentation measurement

图11表明越接近于进水口处颗粒沉积量越多，例如 $D_{50}=24 \mu\text{m}$ 时，在110~440 mm波动幅度下，沉积颗粒百分比从顶部0.0039%变化到底部0.0003%。分

析认为进水口处砂层最先接触到悬浊液, 悬浮颗粒由此处首先开始沉积。可将其视为一个过滤层, 随着悬浊液的不断注入, 沉积在进口处的颗粒越来越多。

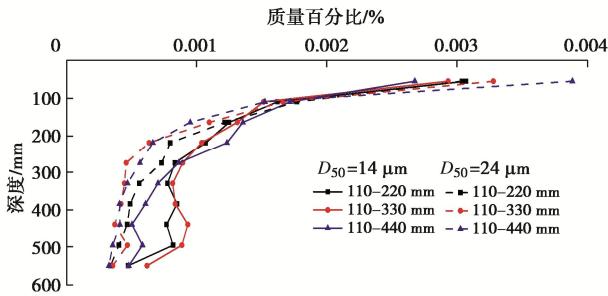


图 11 不同深度下沉积颗粒质量百分比

Fig. 11 Mass percentages of particles at different depths

图 11 可发现大粒径颗粒相较于小粒径颗粒更容易沉积在砂层中, 且受水位波动效应影响有所不同。水位波动幅度越大, 大粒径颗粒越容易沉积在砂层中, 而小粒径颗粒则呈现相反的趋势, 即波动幅度越小反而越容易沉积, 这与穿透曲线所表现出来的规律相一致。

2.5 流出液粒径

图 12 表示对每个周期流出液进行浊度取样测试, 并使用 Topsizer Plus 粒度分析仪对流出液中悬浮颗粒粒径进行分析得到的结果。图 12 (a) ~ (f) 可看出流出液粒径整体小于悬浮颗粒初始粒径, 这是因为悬浊液中较大粒径的颗粒沉积在砂层表面以及孔隙通道

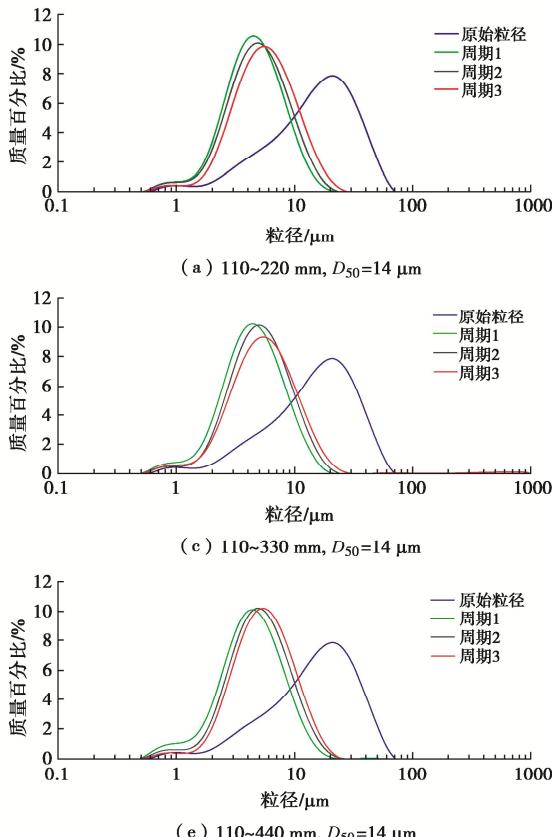


图 12 不同波动幅度下各周期流出液粒径分析

Fig. 12 Particle size analysis of effluent in each cycle under different fluctuation amplitude

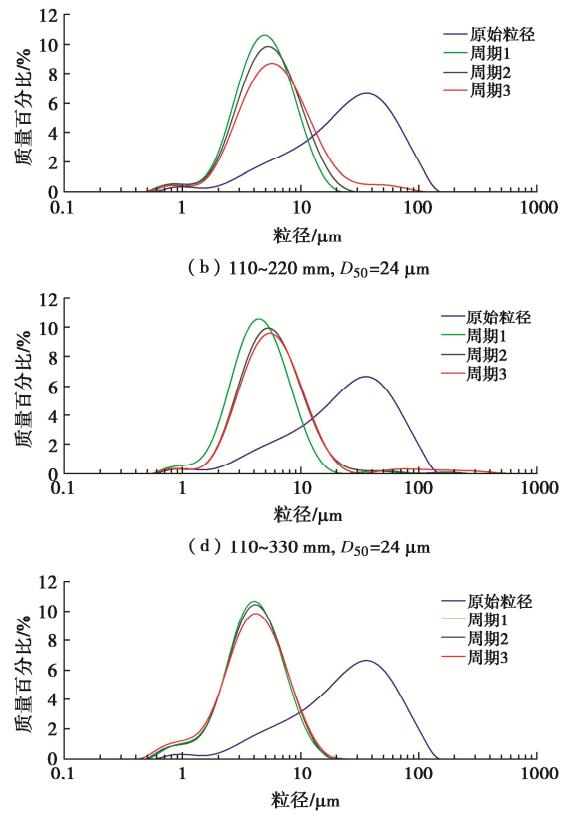
中导致的。不同周期流出液颗粒中值粒径有所不同, 后一周期相较于前一周期流出液中值粒径逐渐增大。例如 $D_{50}=14 \mu\text{m}$ 时, 在 110~220 mm 波动幅度下流出液中值粒径从第一周期的 4 μm 变化到第三周期的 7 μm 。分析认为在水动力作用下原本沉积在砂层表面及孔隙中粒径较小的颗粒发生迁移, 并随着水流逐渐流出砂柱。

2.6 孔隙水压力

为直观反映水位波动下砂管中水位及孔隙水压力变化, 选取 110~330 mm 波动幅度下孔隙水压力进行分析, 如图 13 所示。当水位为 330 mm 时, 传感器 1 压力为 2.5 kPa 且 3 个周期压力峰值均相等。这说明各个周期均达到设计水位, 传感器 2, 3 在水位 330 mm 时压力变化为 1.6, 0.7 kPa, 而传感器 4, 5 压力在整个试验过程中均为 0 kPa, 这是由于水位高度并未达到传感器所在位置。水位高度不同导致砂柱内部压力不同, 随着水位高度变化孔隙水压力呈现出周期性变化规律, 与实际情况相吻合。

2.7 细观观测

为研究硅微粉在砂层孔隙中的沉积位置及沉积形态, 采用金相显微镜对试验样品进行细观观测。图 14 (a) ~ (c) 为干燥状态下纯净石英砂细观照片, 图 14 (d) ~ (f) 为试验取样后烘干状态下石英砂细



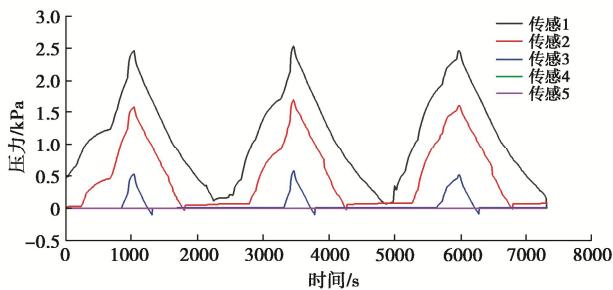


图 13 110~330 mm 波动幅度下孔隙水压变化图

Fig. 13 Pore water pressures under fluctuation of 110~330 mm 观照片。通过两组图片的比较可以看出砂层的孔隙通道通常是复杂多变、弯曲、不规则的。试验后悬浮颗粒在石英砂表面或角落中沉积较多, 形成表面颗粒覆盖层和孔隙堵塞区, 显著改变砂层孔隙的尺寸及孔隙通道形态。另外可发现随着悬浮颗粒粒径的增大, 颗粒更容易沉积于砂层孔隙中, 这与前述试验现象及结果是相吻合的。

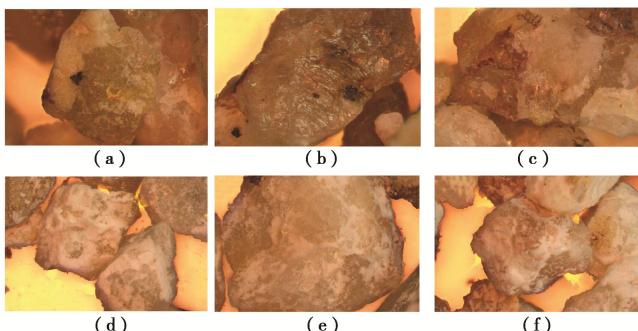


图 14 细观观测图片

Fig. 14 Photos of mesoscopic observation

3 讨 论

影响多孔介质中颗粒运移规律的因素众多, 水的黏性、水动力及渗透力作用、颗粒粒径的变化都会对其造成影响, 而主要影响因素则会随着试验条件的变化而发生改变。本试验中随着水位高度逐渐升高, 试验管内压力也逐渐升高, 但压力作用对水的粘性影响并不显著。由细观结构图片可以发现, 砂层孔隙通道纵横交错较为复杂, 当悬浮颗粒粒径相同时, 流出液浓度在不同周期均呈现先升高再降低的趋势, 并且每一周期峰值均不同。前一周期流出液整体浓度及峰值均小于后一周期, 且随着波动幅度不断增大穿透曲线呈现出滞后性。注入悬浮颗粒粒径不同时穿透曲线也不同, 当注入小粒径颗粒时, 随着波动幅度的增高流出液整体浓度及峰值随之增大。注入大粒径颗粒时规律与之相反, 随着波动幅度增高, 流出液整体浓度及峰值却随之减小。这是由于随着波动幅度的不断增大, 水位高度也不断升高, 悬浮颗粒运移的孔隙通道不断增多且在横向扩散的趋势越来越明显。2组相较于 1

组颗粒粒径较大, 因此在孔隙通道不断变多的条件下更容易发生堵塞。

此外, 渗透力对悬浮颗粒运移的影响也不可忽视。渗透力大小与水力梯度成正比, 即在水位升高时渗透力增强, 水位降低时渗透力减弱。试验中渗流方向自上而下, 若将砂层视为均匀, 则渗透力也是均匀分布且方向与重力相同。在高水位时, 由于渗透力较强, 渗透力能够带动悬浮颗粒在孔隙通道中滚动或移动, 增加与多孔介质的接触, 使得悬浮颗粒更容易沉积在表面或角落中。这就解释了为何相同渗流速度下, 水位越高, 越容易发生堵塞。而对于相同尺寸的多孔介质, 粒径较小的悬浮颗粒更容易通过多孔介质中的孔隙通道, 也更容易随着水流进行迁移, 因此两组试验呈现相反规律。

4 结 论

(1) 在相同的波动幅度下, 随着水位不断升高, 悬浮颗粒在运移过程中的孔隙通道不断增多且在横向扩散的趋势越来越明显且渗透力作用逐渐增强。其带动悬浮颗粒在孔隙通道中滚动或移动, 增加与多孔介质的接触, 使得悬浮颗粒更容易沉积在多孔介质表面或孔隙通道中。

(2) 在不同波动幅度下, 大粒径颗粒与小粒径颗粒呈现相反规律。即注入小粒径颗粒时, 随着波动幅度增大, 流出液整体浓度以及峰值也随之增大。注入大粒径颗粒时则与之相反, 随着波动幅度的增高, 流出液整体浓度以及峰值却随之减小。

(3) 在固定尺寸的多孔介质中, 悬浮颗粒粒径越大, 相对浓度峰值越低, 大颗粒在孔隙中更容易由于筛滤作用发生沉积, 从而造成孔隙率降低, 孔隙通道变窄, 通透性降低。这又会增加悬浮颗粒通过孔隙通道的难度, 最终使流出液中悬浮颗粒浓度降低。

参 考 文 献:

- [1] LI J N, ZHOU Q Z, CAMPOS L C. The application of GAC sandwich slow sand filtration to remove pharmaceutical and personal care products[J]. Science of the Total Environment, 2018, **635**: 1182-1190.
- [2] 庄涵, 王谋薇, 藏春月, 等. 地下水源热泵回灌堵塞的研究现状与展望[J]. 地球环境学报, 2017, **8**(4): 320-326. (KANG Han, WANG Mouwei, ZANG Chunyue, et al. Research status and prospect of recharge clogging of groundwater heat pump[J]. Journal of Earth Environment, 2017, **8**(4): 320-326. (in Chinese))
- [3] 潘鼎, 唐红, 刘军. 地下水源热泵回灌非饱和渗流淤堵分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(4): 842-850.

- (PAN Ding, TANG Hong, LIU Jun. Analysis of unsaturated seepage siltation of groundwater source heat pump recharge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(4): 842-850. (in Chinese))
- [4] 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.
- [5] 周志芳, 王萍, 李雅冰, 等. 一种求解承压含水层水文地质参数的新配线法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, **47**(1): 7-12. (ZHOU Zhifang, WANG Ping, LI Yabing, et al. A new type curve method for estimating hydrogeological parameters of confined aquifers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, **47**(1): 7-12. (in Chinese))
- [6] 王军霞. 江汉—洞庭平原流域水文模型与地下水数值模型耦合模拟研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015. (WANG Junxia. Study on Coupled Simulation of Watershed Hydrologic Model and Groundwater Numerical Model in Jianghan-Dongting Plain[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese))
- [7] BAI B, ZHOU R, CAI G Q, et al. Coupled thermo-hydro-mechanical mechanism in view of the soil particle rearrangement of granular thermodynamics[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **137**: 104272.
- [8] YANG W, FENG T T, FLURY M, et al. Effect of sulfamethazine on surface characteristics of biochar colloids and its implications for transport in porous media[J]. Environmental Pollution, 2020, **256**: 113482.
- [9] BEAR J. Dynamics of Fluids in Porous Media[M]. London: Courier Corporation, 2013.
- [10] GUO Z, LIU X M, MA L, et al. Effects of particle morphology, pore size and surface coating of mesoporous silica on Naproxen dissolution rate enhancement[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, **101**: 228-235.
- [11] CERVANTES-AVILÉS P, HUANG Y X, KELLER A A. Multi-technique approach to study the stability of silver nanoparticles at predicted environmental concentrations in wastewater[J]. Water Research, 2019, **166**: 115072.
- [12] MASSEI N, DIEPOIS B, HANNAH D M, et al. Multi-time-scale hydroclimate dynamics of a regional watershed and links to large-scale atmospheric circulation: application to the Seine River catchment, France[J]. Journal of Hydrology, 2017, **546**: 262-275.
- [13] MESTICOU Z, KACEM M, DUBUJET P. Influence of ionic strength and flow rate on silt particle deposition and release in saturated porous medium: experiment and modeling[J]. Transport in Porous Media, 2014, **103**(1): 1-24.
- [14] GODINHO J R A, CHELLAPPAH K, COLLINS I, et al. Time-lapse imaging of particle invasion and deposition in porous media using in situ X-ray radiography[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, **177**: 384-391.
- [15] 陈星欣, 白冰. 重力对饱和多孔介质中颗粒输运特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1661-1667. (CHEN Xingxin, BAI Bing. Effect of gravity on transport of particles in saturated porous media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1661-1667. (in Chinese))
- [16] 刘泉声, 崔先泽, 张程远, 等. 粒径对多孔介质中悬浮颗粒迁移-沉积特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(10): 1777-1783. (LIU Quansheng, CUI Xianze, ZHANG Chengyuan, et al. Effects of particle size on characteristics of transportation and deposition of suspended particles in porous media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(10): 1777-1783. (in Chinese))
- [17] 饶登宇, 白冰. 孔隙尺度下三维多孔介质扩散迂曲度的SPH计算[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(5): 961-967. (RAO Dengyu, BAI Bing. Pore-scale SPH simulations of diffusive tortuosity in 3-D porous media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(5): 961-967. (in Chinese))
- [18] 张鹏远, 白冰, 蒋思晨. 孔隙结构和水动力对饱和多孔介质中颗粒迁移和沉积特性的耦合影响[J]. 岩土力学, 2016, **37**(5): 1307-1316. (ZHANG Pengyuan, BAI Bing, JIANG Sichen. Coupled effects of hydrodynamic forces and pore structure on suspended particle transport and deposition in a saturated porous medium[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(5): 1307-1316. (in Chinese))
- [19] CUI X Z, WU D Z, WANG H X, et al. Pore features and seepage characteristics of natural gap-graded sand with two size distributions[J]. Géotechnique, 2022: 1-12.
- [20] CUI X Z, FAN Y, WANG H X, et al. Experimental investigation of suspended particles transport in porous medium under variable temperatures[J]. Hydrological Processes, 2019, **33**(7): 1117-1126.
- [21] BAI B, NIE Q K, ZHANG Y K, et al. Cotransport of heavy metals and SiO_2 particles at different temperatures by seepage[J]. Journal of Hydrology, 2021, **597**: 125771.
- [22] AHFIR N D, HAMMADI A, ALEM A, et al. Porous media grain size distribution and hydrodynamic forces effects on transport and deposition of suspended particles[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, **53**: 161-172.