



基于化学示踪的海床细颗粒渗流测量方法研究

王 虎, 黄 博, 孙永福

Measuring method on the seepage of fine particles on seabed based on chemical tracer

WANG Hu, HUANG Bo, and SUN Yongfu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022012802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南海南部浅表层柱状沉积物孔隙水地球化学特征对甲烷渗漏活动的指示

Pore water geochemistry of shallow surface sediments in the southern South China Sea and its implications for methane seepage activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 112

新西兰Hikurangi俯冲带沉积物成岩作用示踪研究：来自孔隙流体Sr同位素证据

A tracing study of sediment diagenesis in the Hikurangi subduction zone, New Zealand: Evidence from Sr isotope of pore fluid

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 115

珠江口盆地阳江东凹始新统的源汇过程：碎屑锆石定年及物源示踪

Tracing source-to-sink process of the Eocene in the Eastern Yangjiang Sag, Pearl River Mouth Basin: Evidence from detrital zircon spectrum

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 124

基于模型优化的广义自由表面多次波压制技术在印度洋深水海域的应用

Generalized free surface multiple suppression technique based on model optimization and its application to the deep water of the Indian Ocean

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 221

海洋天然气水合物储层蠕变行为的主控因素与研究展望

Controlling factors and research prospect on creeping behaviors of marine natural gas hydrate-bearing-strata

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 3

生物载体对海底冷泉-热液极端环境的地球化学记录

Geochemical records of biological carriers on deepsea hydrothermal vent and methane seep fields

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 42



关注微信公众号，获得更多资讯信息

王虎, 黄博, 孙永福. 基于化学示踪的海床细颗粒渗流测量方法研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 200-206.

WANG Hu, HUANG Bo, SUN Yongfu. Measuring method on the seepage of fine particles on seabed based on chemical tracer[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 200-206.

基于化学示踪的海床细颗粒渗流测量方法研究

王虎^{1,2}, 黄博¹, 孙永福²

1. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 青岛 266237

摘要: 海床内部孔隙水及细颗粒的渗流和输运对于海底沉积动力过程、海床稳定性有重要影响。针对海床内部渗流发展过程难于描述、细颗粒渗流难于定量测定的问题, 本文以在海床中物理化学性质稳定的白色氢氧化镁粉末作为示踪剂, 通过分层取样加盐酸反应及离子色谱测试等手段, 实现海床细颗粒渗流的指示及定量测量。试验及分析表明, 本方法清晰显示了细颗粒在动荷载引起的粉土海床内部超孔隙水压力和向上的渗流压力梯度作用下向上运移, 形成规模和形状各异的渗流通道, 最终部分到达海床表面的渗流发展过程, 实现了细颗粒从海床内部至床面逐层渗流量的定量表征, 对于进一步理清波浪作用下粉土海床液化、渗流、再悬浮耦合机理及开发相应的定量评价方法具有重要意义。

关键词: 细颗粒; 化学示踪; 海床; 渗流; 超孔隙水压力

中图分类号: P716.7

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022012802

Measuring method on the seepage of fine particles on seabed based on chemical tracer

WANG Hu^{1,2}, HUANG Bo¹, SUN Yongfu²

1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract: The seepage and transport of pore water and fine particles on the seabed have an important impact on the dynamic process of seabed deposition and the stability of seabed. To solve the difficulty in describing the seepage development process and quantifying the seepage mass of fine particles on seabed, we used white magnesium hydroxide powder that has good physical and chemical stability at seabed to indicate and qualify the process of fine sediments seepage via stratified sampling, reacting with hydrochloric acid, and ion chromatography. Experiments and analysis indicate that the proposed method could clearly describe the whole seepage development process including the upward migration of fine particles, the formation of different-scaled seepage channels, and the reach of partial tracer to the seabed surface, from which the seabed silt movement under cyclic load-induced excess pore water pressure and upward seepage pressure gradient were clearly presented and thus quantitative characterization of the layer-by-layer seepage of fine particles from the interior of the seabed to the bed surface was realized. This study in silt seabed. Moreover, the proposed method achieves quantitative characterization of the seepage mass of fine particles from the interior to the surface of seabed, which provides a practical tool for further clarify the coupling mechanism and developing quantitative evaluation methods of wave-induced liquefaction, seepage, and re-suspension of silt seabed.

Key words: fine particles; chemical tracer; seabed; seepage; excess pore water pressure

渗流指流体在孔隙介质中的流动^[1], 陆地沉积层水体渗流对地下水资源开发^[2]、水利与岩土工程安全有重要影响。除此之外, 海床渗流也普遍存在, 水槽试验^[3-5]和现场观测^[6]均发现, 波浪等外部荷载作用下海床内部产生超孔隙水压力, 与自由排水海床面之间形成渗流压力梯度, 引起海床内部孔

隙水和细颗粒向床面渗流^[7]。海床孔隙水和细颗粒渗流影响海水与沉积层之间的物质交换^[8], 在铁板砂^[9]、塌陷凹坑^[10]等海底动力地貌演化过程中扮演重要角色, 还能导致海床承载力下降^[11]、管线弯折^[12]及平台失稳^[13]。因此, 准确描述海床细颗粒渗流发展过程并精确测定其渗流量, 对于科学认知海底动

资助项目: 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室开放基金(MGQNLN-KF201810); 国家自然科学基金“基于波致动力固结的黄河三角洲铁板砂形成过程研究”(41702307)

作者简介: 王虎(1986—), 男, 副教授, 主要从事海洋工程地质方面的研究, Email: hu.wang@tju.edu.cn

收稿日期: 2022-01-28; 改回日期: 2022-05-03. 张现荣编辑

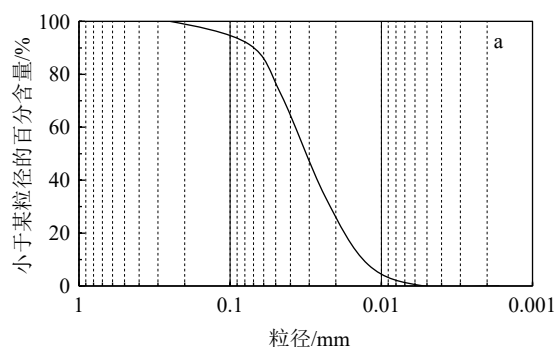
力沉积过程、合理评价海床稳定性至关重要。海床内部孔隙水及细颗粒渗流是涉及水动力作用下床面、床内耦合的动态响应过程^[9], 现场观测受复杂环境变量影响, 渗流过程无法捕捉、细颗粒渗流量难以精确测定^[7], 相比而言, 室内模拟试验^[5] 具有便于控制试验变量、易于观察试验现象及方便开展分析测试等优势。

同位素示踪、温度示踪、染色示踪及化学示踪等示踪方法是研究物质迁移的常用方法。Burnett 和 Dulaiova^[14] 通过连续观测孔隙水中天然同位素 ^{222}Rn 浓度研究了海底地下水排泄及其动态变化过程。陈建生等^[15] 通过在单孔水中均匀标记人工同位素 ^{131}I 溶液并测定其浓度变化, 进而得到流速、流向等水力学参数, 分析大坝渗漏通道。孙晓宇等^[16] 利用温度示踪法反演库水-地下水的垂向交换速率。Cascarano 等^[17] 运用荧光染色示踪方法研究海床沉积物-水界面水体和保守溶质运移。上述方法中, 稳定同位素示踪剂种类少、价格昂贵、测定复杂, 温度示踪和染色示踪主要用于研究大范围水体及溶质渗流、并且以定性描述为主, 无法描述沉积物孔隙中的细颗粒渗流, 化学示踪一般选取遇水呈现惰性、易于分离和测定的化学物质作为示踪剂^[18], 研究流体及固体颗粒的渗流和运移。因此, 本文基于化学示踪的思路, 优选出氢氧化镁粉末作为示踪剂, 提出了一种海床细颗粒渗流定量测量方法, 并通过室内模拟试验初步验证了该方法的可行性。

1 海床细颗粒渗流测量方法

1.1 试验用土

海床细颗粒渗流需满足以下条件: ① 海床土新



近沉积且级配良好, 以黏粒为主的细颗粒可在大颗粒骨架之间能够形成渗流通道; ② 有波浪等外部荷载作用在海床上, 引起海床内部超孔隙水压力及垂直床面向上的渗流压力梯度。现代黄河三角洲由以粉土为代表的粉质类土新近沉积而成, 波浪及风暴事件引起的海床渗流现象多发^[19-21]。因此, 本文选择黄河三角洲原始沉积粉土为试验用土, 粒径累积曲线如图 1(a) 所示。

1.2 氢氧化镁粉末示踪剂

经多次测试, 本文最终优选出氢氧化镁粉末作为化学示踪剂, 原因如下:

(1) 氢氧化镁粉末可用于近似替代黏粒。氢氧化镁粉末难溶于水, $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时溶解度仅为 $0.0009\text{ g}/100\text{ g}$, 在海水环境下与粉土各矿物成分不发生化学反应、不产生明显吸附, 具有良好的物理和化学稳定性, 并且氢氧化镁粉末中值粒径为 0.006 mm (图 1b), 颗粒密度为 $2.49\text{ g}/\text{cm}^3$, 然而, 黏粒颗粒密度为 $2.6\sim 2.68\text{ g}/\text{cm}^3$, 粒径小于 0.005 mm ^[22], 氢氧化镁粉末与黏粒性质接近, 可用于近似替代黏粒。

(2) 氢氧化镁粉末可以很好地指示海床细颗粒渗流过程。如图 2 所示, 在圆柱形有机玻璃筒中自下而上依次铺设 10 cm 饱和粉土、 1 cm 氢氧化镁粉末、 10 cm 饱和粉土。静置并达到稳定后, 以质量为 1 kg 的圆盘自距离床面 0.5 m 处自由下落作为动荷载, 重复施加 300 次。从图 2 中可以看出, 白色氢氧化镁粉末与土体颜色明显不同, 很好地指示了动荷载作用下细颗粒在粉土海床中的渗流过程及其形成的不同规模、不同形状的渗流通道。

1.3 示踪测量方法

基于氢氧化镁粉末示踪的海床细颗粒渗流测

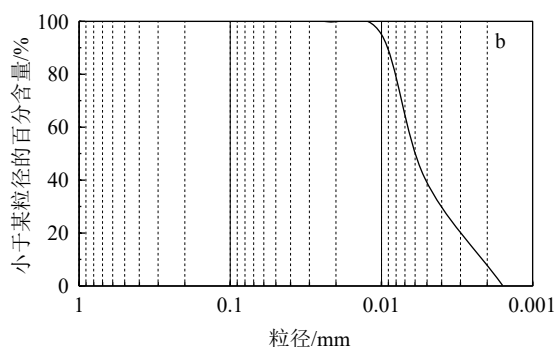


图 1 粒径累积曲线

a. 粉土, b. 氢氧化镁粉末。

Fig.1 Particle size accumulation curve

a. Silt, b. magnesium hydroxide powder.

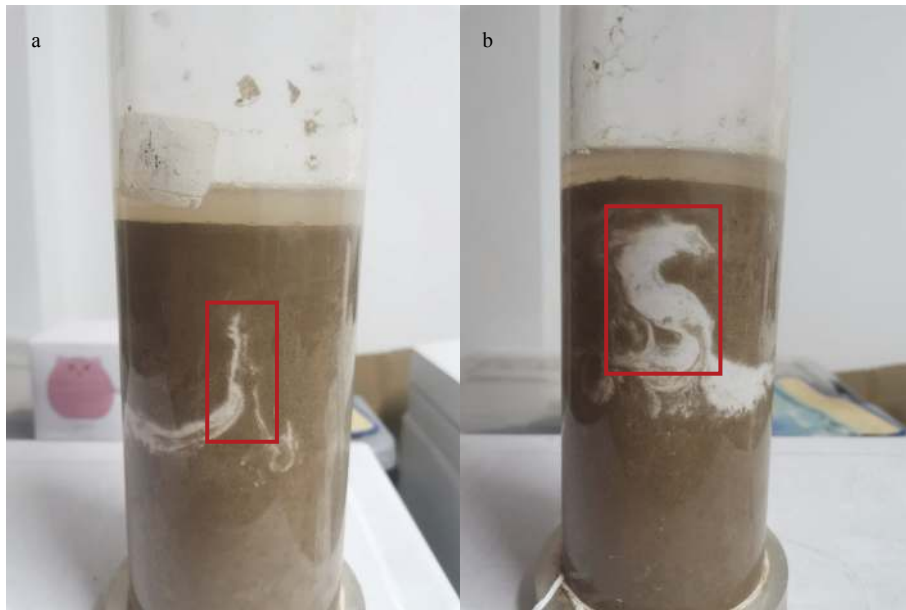


图2 氢氧化镁粉末向上渗流及形成的渗流通道
a. 土柱正面, b. 土柱反面。

Fig.2 Upward seepage of magnesium hydroxide powder and the formed seepage channel
a. Front view, b. reverse side of soil column: rear view.

量步骤如下: ① 将试样称重得到质量 m_1 , 乘以土中背景镁离子浓度 p , 得到背景镁元素含量 $m_2 = m_1 p$; ② 在试样中加过量盐酸充分反应后过滤, 得到体积 V 的滤液, 使用离子色谱仪测试得到镁离子浓度 c , 从而得到总镁元素质量 $m_3 = cV$; ③ 计算渗流镁元素含量 $m_4 = m_3 - m_2$, 根据 $Mg(OH)_2$ 分子式计算渗流氢氧化镁质量 $m_5 = 58 m_4 / 24$; ④ 对海床分层取样, 重复上述步骤即可得到不同土层氢氧化镁粉末质量, 进而实现对海床细颗粒垂向渗流过程的定量描述。

为验证测量方法定量测定土体镁元素的准确性, 取 10 g 粉土样品并加入氢氧化镁粉末 0.68 g, 根据镁离子背景浓度 0.26% 及氢氧化镁分子式计算得到镁元素理论值为 $10 \text{ g} \times 0.26 \text{ g} + 0.68 \times 24 / 58 = 0.307 \text{ g}$; 按照本文步骤得到镁元素测量值为 0.305 g, 二者偏差仅为 0.65%。

2 渗流模拟试验

进一步开展动荷载作用下粉土海床渗流模拟试验并分层测定细颗粒渗流量, 用以验证本文方法的有效性。

2.1 试验装置

如图 3 所示, 试验装置由水槽、孔隙水压力测量系统以及荷载施加装置组成。水槽为有机玻璃

制作, 尺寸为 $55 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。孔隙水压力测量系统由 3 个孔隙水压力传感器(西安微正电子科技有限公司, CYY2 型, 精度 0.1 kPa)以 5 cm 的垂向间隔安装于指向不同方位的支架水平杆外缘, 线路通过支架水平杆和立柱统一输出海床, 以保证孔隙水压力传感器之间及与海床表面不发生水力联系。荷载施加装置由一圆柱形砝码固定于圆形铁片上, 圆形铁片直径 20 cm, 总重 75 N, 用于施加外部荷载。

2.2 试验步骤

(1) 海床制备及示踪粉末的埋置。将取自黄河三角洲潮滩的土样风干, 加水搅拌成均匀, 流塑状态的泥浆。在水槽中央预先放置带有孔隙水压力传感器的支架, 将泥浆沿侧壁缓慢注入水槽至高度 10 cm, 在其上铺设总质量 500 g、厚约 0.1 cm 的氢氧化镁粉末层, 之后继续铺设厚度 5 cm 的粉土泥浆, 在海床表面加入 2 cm 水, 确保海床始终处于饱和状态。

(2) 动荷载施加、孔隙水压力与渗流量测定。将海床静置直至监测到的孔隙水压力等于该深度土体有效自重, 即海床完成自重固结。将海床表面水排干, 在距离水槽右侧壁 10 cm 处插入一塑料隔板, 将海床分为试验区 and 对照区(图 3)。在对照区取样, 测试得到海床土体物理参数见表 1。在试验区人工施加动荷载, 将荷载施加装置由距床面 50 cm

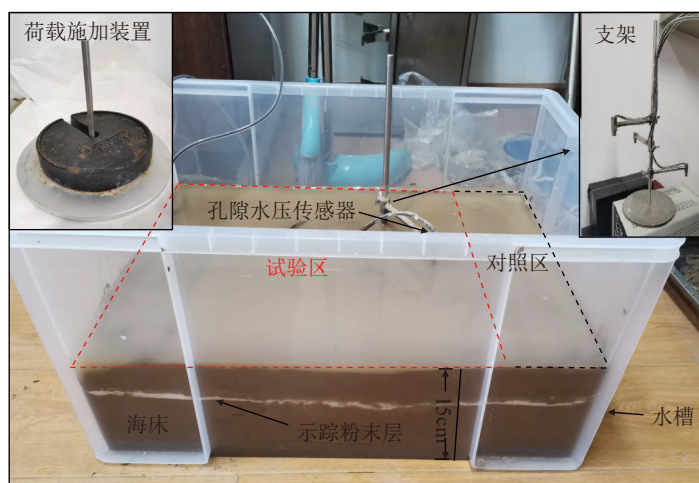


图 3 试验装置

Fig.3 The design of the experiment

表 1 海床土体物理参数

Table 1 Physical parameters of seabed soil

容重 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率 w /%	孔隙比 e	密度 G_s	粒径 d_{50} /mm
19	30	0.7	2.7	0.035

高度处自由下落, 重复 500 次、持续时间约 0.5 h。试验过程中实时监测海床孔隙水压力并观察海床细颗粒渗流现象。待孔隙水压力保持稳定且不再有新的渗流现象产生, 将试验区海床自床面向下每 1 cm 为 1 层进行取样, 按照 1.3 节方法测定每层海床中的氢氧化镁含量, 得到自床面以下 5 cm 示踪层至床面的逐层示踪物渗流量。

2.3 试验结果

图 4 给出了试验过程中孔隙水压力变化情况, 可以看出, 施加动荷载前各深度处孔隙水压力与静水压力值一致, 显示出粉土海床处于正常固结状态。施加动荷载后, 各深度的孔隙水压力均快速累积升高, 5 cm 处孔隙水压力峰值达到 1.09 kPa、超过上覆土体自重 0.95 kPa, 海床发生液化, 10 cm 处孔隙水压力最大值为 1.88 kPa、接近上覆自重 1.9 kPa, 海床接近发生液化。结束动荷载后, 各深度处的孔隙水压力在逐步消散。海床内部孔隙水压力累积升高, 及其引起的指向床面的压力梯度, 是引起海

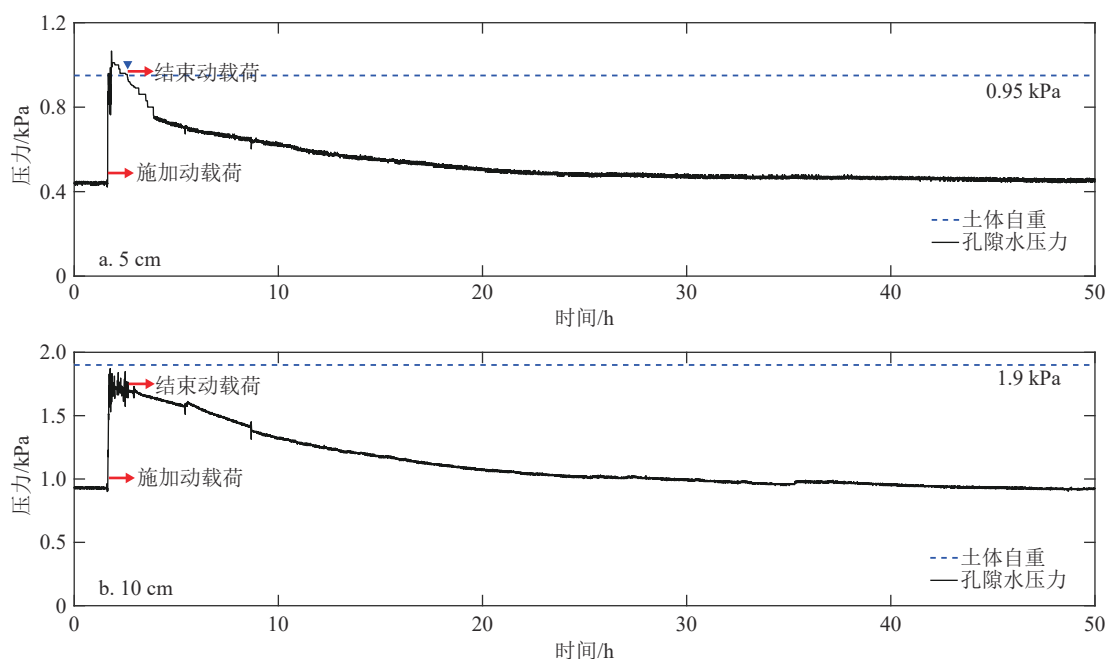


图 4 海床表面以下不同深度处孔隙水压力变化情况

Fig.4 Variation of pore water pressure at different depths beneath seabed surface

床内部孔隙水和细颗粒垂向渗流的驱动力。

与海床内部孔隙水压力累积升高相对应,在动荷载开始施加约 10 min 后,从水槽侧壁观察到位于床面以下 5 cm 的细颗粒示踪粉末开始脱离土骨架向上渗流,形成多个规模、形状各异的渗流通道。如图 5 所示,白色氢氧化镁示踪粉末清晰显示了渗流通道形态及细颗粒渗流发展过程,各渗流通道直径呈现出自下而上逐渐减小的趋势,部分渗流通道(如 7 号)贯通至海床表面。与此同时,未施加荷载的对照区示踪粉末保持原来位置不动、未观察到渗流现象。循环荷载停止后,孔隙水压力逐渐消散(图 4)、作为驱动力的渗流压力梯度逐渐减小直至消失,导致部分粉末自示踪层发生向上渗流但未及到达床面;此外,形成的渗流通道的形态、规模各异,其携带示踪粉末量、向上输运速度不同,所以,观察到示踪粉末渗流量呈现出自示踪层向上逐渐较少、仅部分示踪粉末到达床面的现象。

取样测试得到的每层海床氢氧化镁粉末含量如图 6 所示,渗出到海床表面的示踪物为 2.216 g,仅占示踪物总质量的 0.4%,示踪物含量自床面向下逐层递增,自示踪层向上渗流的细颗粒共 129.48 g,占示踪物总质量的 25.896%。以上结果与试验中观

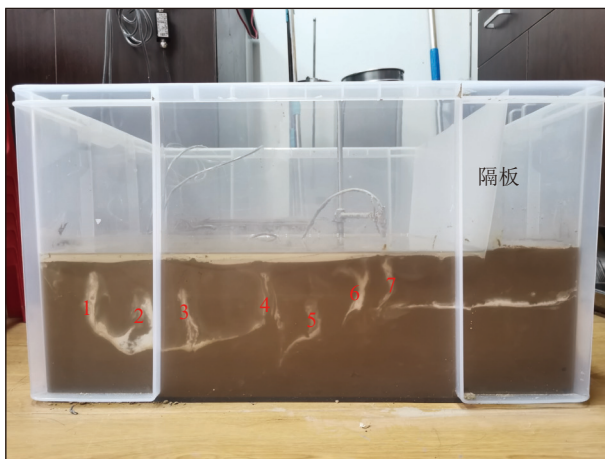


图 5 试验结果

Fig.5 Results of a test

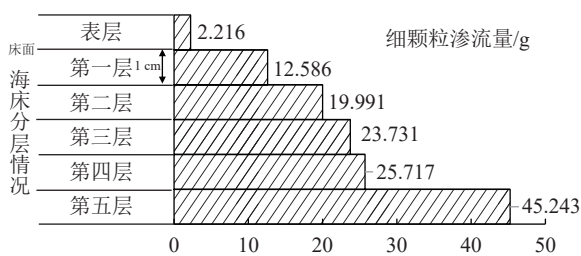


图 6 不同深度的海床细颗粒渗流量

Fig.6 Seabed fine particle seepage at different depths

察到的示踪物大部分留在原示踪层位置、部分示踪物沿渗流通道向上运移、渗流通道规模自下向上逐渐减小、仅个别渗流通道连通到床面的现象一致。

3 讨论

稳定性、指示性和可测性决定了示踪剂能否发挥其效能。本文采用的氢氧化镁粉末与孔隙水及沉积物矿物成分不发生化学反应,与沉积物颗粒不发生明显吸附,在海床沉积及渗流环境下具有较好的物理和化学稳定性,避免了稀土元素^[23-24]、天然同位素及人工同位素^[25-28]渗流示踪过程中由于示踪剂损失造成的误差。试验结果显示,氢氧化镁示踪粉末清晰指示细颗粒物质在动荷载及其引起的超孔隙水压力和向上的渗流压力梯度作用下自示踪层开始向上运移,形成规模和形状各异的渗流通道、部分到达海床表面的渗流发展过程。与水槽试验中通过孔隙水和黏粒迁移观察渗流现象、以床面黏粒含量升高判断细颗粒物质垂向渗流^[29]相比,本文白色氢氧化镁示踪粉末与周围海床土形成明显对比,更加直观、准确指示出了渗流通道形成发展及细颗粒物质向上渗流的过程。此外,与天然及人工同位素示踪方法相比,氢氧化镁粉末廉价易获取,可按照需求加工成不同粒径满足不同层次的细颗粒渗流示踪需求,只需盐酸和离子色谱仪等常见化学分析试剂和仪器,测量方法安全、简便。

传统的同位素、温度、染色等示踪方法主要用于定性及定量描述水体渗流情况,本文方法则在室内模拟试验层面实现了对海床细颗粒渗流的定量描述。以波浪为外部荷载、粉土海床为作用对象、细颗粒渗流现象明显的水槽试验^[30]为例,其人工海床尺寸为 3.8 m×0.5 m×0.6 m,从海床内部渗流至床面的细颗粒质量为 9.5 kg,假设不同深度海床对细颗粒渗流的贡献均等,计算出厚度 1 mm 海床渗流到单位面积(1 m²)渗流量为 8.3 g;本文海床尺寸 0.55 m×0.4 m×0.15 m,渗流到床面的细颗粒为 2.2 g,可计算出 1 mm 示踪层渗流到床面的细颗粒为 10.1 g,二者处于一个数量级且较为接近,说明本文定量测量的合理性。另外,水槽试验现有方法只能确定整个海床渗流至海床表面的细颗粒质量,本文方法可得到海床不同深度土层渗流量,实现了从源头至海床面细颗粒渗流的定量描述,更加细致地刻画了海床内部渗流过程,对于从实验室定量角度明确波浪作用下海床内部细颗粒渗流过程及分布规律、进一步理清波浪作用下粉土海床液化、渗流、

再悬浮机理并开展相应的定量评价有重要意义。

4 结论

(1) 基于氢氧化镁化学示踪方法具有以下特征, 决定了其可用于海床细颗粒渗流测量。首先, 氢氧化镁示踪剂的颗粒密度、粒径与海床黏粒接近, 难溶于水、不与海床土发生反应、物理化学性质稳定。其次, 示踪剂为白色, 与海床土颜色形成鲜明对比, 能够清晰指示渗流通道。再者, 将混有示踪剂的土样与盐酸充分反应, 经离子色谱仪测定溶液镁离子, 即可得到氢氧化镁示踪剂含量, 测定方法简便、精确。

(2) 动荷载作用下粉土海床内部超孔隙水压力及垂直床面向上的压力梯度是细颗粒渗流的驱动力, 本化学示踪方法清晰指示了细颗粒自示踪层向上渗流输运及其发展过程, 测量得到的海床内部至床面细颗粒渗流量逐层递减的趋势, 以及示踪物大部分留在原示踪层位置、渗流通道规模自下而上逐渐减小、仅个别渗流通道连通到床面的试验现象, 从实验室层面实现了海床细颗粒垂向渗流的定量解释, 有望为进一步揭示波浪作用下粉土海床液化、渗流、再悬浮机理并实现定量评价提供新的方法支持。

参考文献 (References)

- [1] Wang J, Leung C, Chow Y. Numerical solutions for flow in porous media [J]. *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2003, 27(7): 565-583.
- [2] Tam V T, Nga T T V. Assessment of urbanization impact on groundwater resources in Hanoi, Vietnam [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 227(1): 107-116.
- [3] Jia Y, Zhang L, Zheng J, et al. Effects of wave-induced seabed liquefaction on sediment re-suspension in the Yellow River Delta [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 89(1): 146-156.
- [4] Guo Z, Jeng D S, Zhao H, et al. Effect of seepage flow on sediment incipient motion around a free spanning pipeline [J]. *Coastal Engineering*, 2019, 143: 50-62.
- [5] Liu X, Jia Y, Zheng J, et al. An experimental investigation of wave-induced sediment responses in a natural silty seabed: New insights into seabed stratification [J]. *Sedimentology*, 2017, 64(2): 508-529.
- [6] 单红仙, 刘涛, 陈友媛, 等. 波浪荷载导致黄河口潮坪沉积物垂向运移现场观测研究[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(2): 216-221. [Shan Hongxian, Liu Tao, Chen Youyuan, et al. Field observational study on vertical migration of tidal flat sediments in the Yellow River Estuary caused by wave loads [J]. *Chinese Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(2): 216-221.]
- [7] Zhang S, Jia Y, Wen M, et al. Vertical migration of fine-grained sediments from interior to surface of seabed driven by seepage flows: "sub-bottom sediment pump action" [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2017, 16(1): 15-24.
- [8] Uchiyama Y, Nadaoka K, Rölke P, et al. Submarine groundwater discharge into the sea and associated nutrient transport in a sandy beach [J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(6): 1467-1479.
- [9] 王虎, 粟莉, 白玉川. 河口海岸铁板砂研究进展[J]. *水科学进展*, 2019, 30(4): 601-612. [WANG Hu, SU Li, BAI Yuchuan. Research progress of estuarine and coastal iron plate sand [J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(4): 601-612.]
- [10] 张民生, 王秀海, 刘红军, 等. 循环水压作用下粉土渗流试验研究[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2014(9): 82-89. [ZHANG Minsheng, WANG Xiuhai, LIU Hongjun, et al. Experimental study on silt seepage under the action of circulating water pressure [J]. *Journal of Ocean University of China: Natural Science Edition*, 2014(9): 82-89.]
- [11] Takahashi H, Sassa S, Morikawa Y, et al. Stability of caisson-type breakwater foundation under tsunami-induced seepage [J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(4): 789-805.
- [12] 白玉川, 杨细根, 冀自青, 等. 波浪条件下海底管线与沙质海床间的相互作用[J]. *天津大学学报*, 2011, 44(1): 64-68. [BAI Yuchuan, YANG Xigen, JI Ziqing, et al. Interaction between submarine pipeline and sandy seabed under wave conditions [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(1): 64-68.]
- [13] Cheng X, Li G, Chen J, et al. Seismic response of a submarine tunnel under the action of a sea wave [J]. *Marine structures*, 2018, 60: 122-135.
- [14] Burnett W C, Dulaiova H. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements [J]. *Journal of environmental radioactivity*, 2003, 69(1-2): 21-35.
- [15] 陈建生, 董海洲, 李兴文, 等. 新安江右坝裂隙岩体渗流同位素示踪研究[J]. *水科学进展*, 2001, 12(3): 336-342. [CHEN Jiansheng, DONG Haizhou, LI Xingwen, et al. Isotope tracing of seepage in the fractured rock mass of Youba in Xin'anjiang River [J]. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 336-342.]
- [16] 孙晓宇, 刘华, 何长林, 等. 温度示踪法确定库水-地下水垂向交换速率[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(1): 56-64. [SUN Xiaoyu, LIU Hua, HE Changlin, et al. Determining the vertical exchange rate of reservoir water and groundwater by temperature tracing method [J]. *Bulletin of Oceanology and Limnology*, 2020(1): 56-64.]
- [17] Cascarano R N, Reeves D M, Henry M A. A Dye Tracer Approach for Quantifying Fluid and Solute Flux Across the Sediment-Water Interface [J]. *Groundwater*, 2021, 59(3): 428-437.
- [18] 高兴军, 徐薇薇, 余义常, 等. 智能化示踪剂技术及其在油藏监测中的应用[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(05): 532-544. [GAO Xingjun, XU Weiwei, YU Yichang, et al. Intelligent chemical tracer technology and its application in reservoir monitoring [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(05): 532-544.]
- [19] 张丽萍, 贾永刚, 侯伟, 等. 液化过程对海床土性质改造的波浪水槽试验[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(3): 171-180. [ZHANG Liping, JIA Yonggang, HOU Wei, et al. Wave flume experiment on seabed soil property modification by liquefaction process [J]. *Marine*

- [Geology & Quaternary Geology](#), 2013, 33(3): 171-180.]
- [20] 张少同, 贾永刚, 刘晓磊, 等. 现代黄河三角洲沉积物动态变化过程的特征与机理[J]. [海洋地质与第四纪地质](#), 2016, 36(6): 33-44. [ZHANG Shaotong, JIA Yonggang, LIU Xiaolei, et al. Characteristics and mechanism of sediment dynamic change process in modern Yellow River Delta [J]. [Marine Geology & Quaternary Geology](#), 2016, 36(6): 33-44.]
- [21] Wang H, Liu H. Evaluation of storm wave-induced silty seabed instability and geo-hazards: A case study in the Yellow River delta [J]. [Applied Ocean Research](#), 2016, 58: 135-145.
- [22] 李广信. 高等土力学[M]. 清华大学出版社, 2004. [Li Guangxin. [Advanced Soil Mechanics](#) [M]. Tsinghua University Press, 2004.]
- [23] Wang L, Liang T, Kleinman P J A, et al. An experimental study on using rare earth elements to trace phosphorous losses from nonpoint sources [J]. [Chemosphere](#), 2011, 85(6): 1075-1079.
- [24] Lin R, Soong Y, Granite E J. Evaluation of trace elements in US coals using the USGS COALQUAL database version 3.0. Part I: Rare earth elements and yttrium (REY) [J]. [International Journal of Coal Geology](#), 2018, 192: 1-13.
- [25] Wang X, Li N, Feng D, et al. Using chemical compositions of sediments to constrain methane seepage dynamics: a case study from Haima cold seeps of the South China Sea [J]. [Journal of Asian Earth Sciences](#), 2018, 168: 137-144.
- [26] Jasechko S, Gibson J J, Birks S J, et al. Quantifying saline groundwater seepage to surface waters in the Athabasca oil sands region [J]. [Applied Geochemistry](#), 2012, 27(10): 2068-2076.
- [27] Su C, Zhang X, Fei Y, et al. Lateral seepage scope of downstream of Yellow River after the operation of Xiaolangdi reservoir and its impact on groundwater environment [J]. [Geology in China](#), 2021, 48(6): 1669-1680.
- [28] Balvín A, Hokr M, Šteklová K, et al. Inverse modeling of natural tracer transport in a granite massif with lumped-parameter and physically based models: case study of a tunnel in Czechia [J]. [Hydrogeology Journal](#), 2021, 29(8): 2633-2654.
- [29] 王刚, 许国辉, 黄哲, 等. 粉质土底床液化塌陷量形成试验研究[J]. [海洋地质与第四纪地质](#), 2014, 34(5): 171-178. [WANG Gang, XU Guohui, HUANG Zhe, et al. Experimental study on the formation of liquefaction and collapse of silty soil bed [J]. [Marine Geology & Quaternary Geology](#), 2014, 34(5): 171-178.]
- [30] 刘晓磊. 波浪导致现代黄河三角洲海床沉积物非均质化过程研究[D]. 中国海洋大学, 2013. [LIU Xiaolei. Study on the heterogeneity process of seabed sediments in the modern Yellow River Delta caused by waves [D]. Ocean University of China, 2013.]