

粗糙底床泥-水界面有效扩散系数的影响 因素及其标度关系

陈春燕, 赵亮, 王道增, 樊靖郁

(上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海, 200072. *通讯作者, Email: jyfan@shu.edu.cn)

摘要: 泥-水界面是河流、河口、湖泊、水库、湿地以及近海等自然水体中重要的环境边界。粗糙底床泥-水界面区域物质交换过程不仅与水动力作用和底床渗透率有关, 还涉及颗粒/粗糙元尺度的床面粗糙度影响。本文通过实验室环形水槽实验, 测量得到不同粒径模型沙粗糙底床条件下, 界面物质交换通量的定量数据和变化特征, 分析有效扩散系数与其主要影响参数之间的标度关系。实验结果表明, 在本文实验参数范围内, 粗糙底床条件下泥-水界面有效扩散系数与光滑底床相比有所增大, 与其主要影响参数之间存在较为一致的标度关系。对于相对较高渗透率的粗糙底床情形, 有效扩散系数与不同形式雷诺数之间大致呈 2 次方标度关系, 其适用范围可采用合适的无量纲参数 (如渗透率雷诺数) 阈值来表征。与光滑底床相比, 粗糙底床条件下的这一阈值由于粗糙床面湍流渗透影响增强而有一定程度的减小。

关键词: 粗糙底床; 泥-水界面; 有效扩散系数; 标度关系

1 引言

泥-水界面是河流、河口、湖泊、水库、湿地以及近海等自然水体中重要的环境边界。泥-水界面区域的物质交换过程对环境水体中溶解氧、氮/磷营养盐、重金属以及有机污染物的迁移转化起着控制和调节作用。界面物质交换通量及其影响因素的研究, 受到环境流体力学以及水环境、水资源和水生态等相关领域国内外学者的共同关注^[1-3]。

对于粗糙底床而言, 泥-水界面区域的物质交换过程不仅受水动力作用的影响, 床面粗糙度和渗透率的影响也不容忽视^[4-5]。自然水体中底床通常由不同粒径的泥沙颗粒组成, 底床表面受水流作用易形成不同尺度的沙纹和沙波等床面形态, 即使对于平整底床, 颗粒尺度粗糙床面也会使得水力光滑不再满足 (即构成水力粗糙床面)。以往研究表明, 在缺乏床面形态的情况下, 粗糙床面附近区域存在上覆水/孔隙水耦合流动和湍流渗透, 对界面物质交换特性产生重要作用^[5]。但目前粗糙底床界面物质交换特性及其影响因素方面还缺乏

深入研究^[6]，如在有效扩散系数的影响因素方面，一些研究者较少关注床面粗糙度的影响，仅作为一个与渗透率紧密相关的参数^[7]，或是认为床面粗糙度的影响已通过摩阻流速得以体现^[8]。有效扩散系数与其主要影响参数（如不同形式的雷诺数）之间的标度关系，不同研究者的结果并不一致^[8-9]。

因此，本文主要通过实验室环形水槽实验和机理分析，测量得到不同粒径模型沙粗糙（平整）底床条件下，界面物质交换通量的定量数据和变化特征，分析有效扩散系数与其主要影响参数之间的标度关系。

2 实验装置和测量方法

实验在上海大学力学所自制的环形水槽中进行。环形水槽主体装置由有机玻璃制成，包括底槽、内外壁和上部的剪力环，内外壁直径分别为 0.6m 和 1m，构成宽度为 0.2m、高度为 0.4m 的环形槽道。上部剪力环由电机驱动，通过控制系统调节剪力环升降和转速 (R) 带动水体表面流动，在环形槽道内可按实验工况要求控制上覆水平均流速 (U) 和水深 (H)。实验过程中保持水深不变 ($H=15\text{cm}$)，上覆水总体积 (V_w) 也保持不变。剪力环转速限制在避免底泥发生再悬浮的低速范围 ($R \leq 20\text{r/min}$)，可近似忽略水槽内形成的二次流。

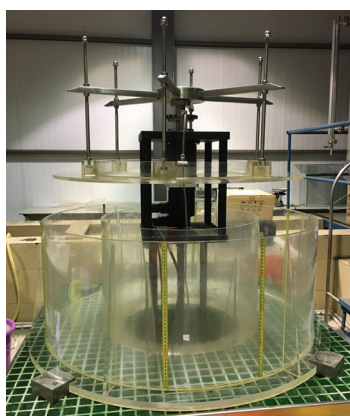


图1 环形水槽实验装置

环形水槽实验底泥样品采用不同粒径 (d_g) 的模型沙，粒径范围分别为 (0.2~0.45mm)、(0.6~1.0mm) 和 (1.0~2.0mm)。样品孔隙度 (θ) 采用水蒸发法测定，3种底泥样品孔隙度分别为0.42、0.44和0.45。样品渗透率 (K) 可根据Kozeny-Carmen公式估算^[9]。实验过程中将厚度 (h_s) 为15cm的模型沙均匀铺设于水槽底部，底床表面积 (A_s) 和体积 ($V_s=A_s \times h_s$) 均保持不变。床面粗糙高度 (k_s) 和摩阻流速 (u_*) 可由经验公式给出^[8]。

上述特征量可构成不同形式的无量纲影响参数，如上覆水雷诺数 ($Re=UH/\nu$)、粗糙雷

诺数 ($Re_k = u \cdot k_s / \nu$) 以及渗透率雷诺数 ($Re_K = u \cdot K^{1/2} / \nu$) 等不同形式的特征雷诺数。水槽实验参数和工况详见表1。由表1可见, 通过改变平均流速和底床泥沙粒径, 本文实验参数范围涵盖水力光滑区 ($Re_k < 5$)、过渡粗糙区 ($5 \leq Re_k \leq 70$) 和完全粗糙区 ($Re_k > 70$)。

表1 实验参数和工况

实验工况 Run	平均流速 $U(\text{cm/s})$	水深 $H(\text{cm})$	孔隙度 θ	渗透率 $K(\text{cm}^2)$	摩阻流速 $u_*(\text{cm/s})$	粗糙雷诺数 Re_k	渗透率雷诺数 Re_K
1	5.65	15.0	0.42	2.21×10^{-6}	0.35	4.52	0.052
2	10.6	15.0	0.42	2.21×10^{-6}	0.66	8.48	0.098
3	15.34	15.0	0.42	2.21×10^{-6}	0.96	12.28	0.143
4	5.65	15.0	0.44	1.36×10^{-5}	0.38	10.94	0.141
5	10.6	15.0	0.44	1.36×10^{-5}	0.72	20.53	0.265
6	15.34	15.0	0.44	1.36×10^{-5}	1.04	29.72	0.384
7	10.6	15.0	0.45	6.69×10^{-5}	0.78	46.92	0.639
8	15.34	15.0	0.45	6.69×10^{-5}	1.13	67.9	0.925
9	20.92	15.0	0.45	6.69×10^{-5}	1.54	92.63	1.263

采用非吸附性氯化钠 (NaCl) 作为代表性溶质 (上覆水中分子扩散系数为 D_m , 孔隙水中为 D'_m), 每个实验工况上覆水初始浓度 (C_0) 保持相同。在实验过程中, 通过虹吸采样并测量得到上覆水 NaCl 浓度随时间的变化 (C), 即可确定不同工况的界面物质交换通量 (J) 和有效扩散系数 (D_{eff})^[5,8]。

3 结果和分析

泥-水界面区域的垂向物质交换过程可由多种不同尺度且相互作用的水动力机制驱动, 包括分子扩散、剪切离散、湍流渗透以及孔隙水对流等, 有效扩散系数反映了多种机制的共同作用。典型工况 (Run 5) 和不同流速条件下的实验结果如图 2 和图 3 所示。

由图 2 可见, 上覆水浓度 (C/C_0) 在初始交换阶段下降较快, 随后交换速率逐渐减缓, 直至达到交换平衡 (平衡浓度约为 $C/C_0 \approx 0.7$)。初始交换阶段, 界面物质交换速率正比于 $t^{1/2}$, 通过浓度下降曲线的初始斜率可拟合得到 D_{eff} 的定量数据, 这也说明采用有效扩散系数可以较好地描述多种机制共同作用的界面物质交换过程。由图 3 可见, 对于相同的粗糙底床, 随上覆水平均流速 U (或雷诺数 Re) 的增大, 界面物质交换通量显著增大。上覆水雷诺数 Re 对驱动界面物质交换的各种机制都有重要影响, 尤其对上覆水/孔隙水耦合流动特性起着主要作用。

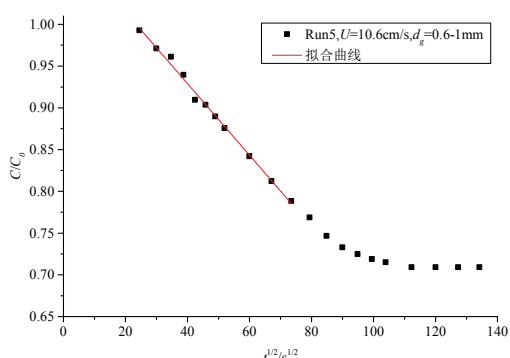


图2 典型工况上覆水浓度随时间变化 (Run 5)

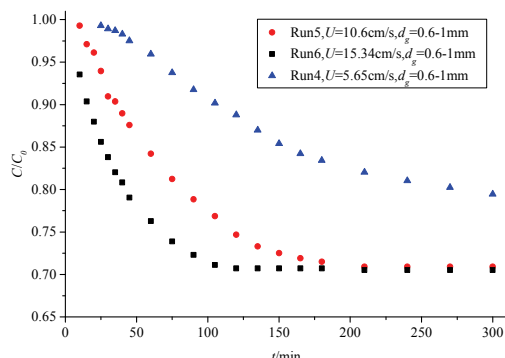


图3 不同流速条件下上覆水浓度随时间变化

为进一步分析底床渗透率和床面粗糙度对界面物质交换特性的影响，图4和图5给出了不同粒径模型沙底床条件下的实验结果。由图4可见，底床渗透率和床面粗糙度对界面物质交换特性具有不可忽视的影响，在相同的平均流速条件下，随底床渗透率和床面粗糙度的增大，与光滑底床相比，粗糙底床条件下界面物质交换通量有所增大。由图5可见，在一定的参数范围内，有效扩散系数与主要影响因素（渗透率雷诺数 Re_K ）之间存在较为一致的标度关系。对于具有较高渗透率的粗糙底床，完全粗糙区有效扩散系数与 Re_K 大致呈2次方标度关系，这一标度关系与更大粒径的粗沙和砾石底床条件下的文献结果一致^[5,9]。过渡粗糙区有效扩散系数存在一定程度的增大趋势，与 Re_K 之间仍呈2次方标度关系，而水力光滑区有效扩散系数与 Re_K 之间的文献结果较为分散。

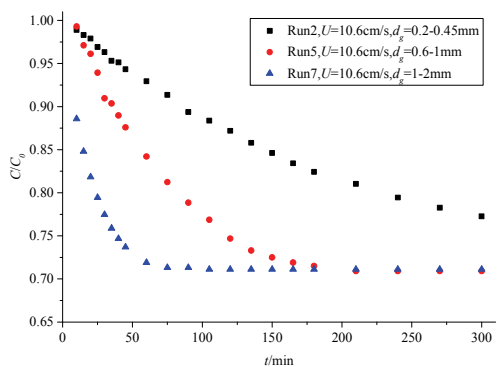


图4 不同底床条件下上覆水浓度随时间变化

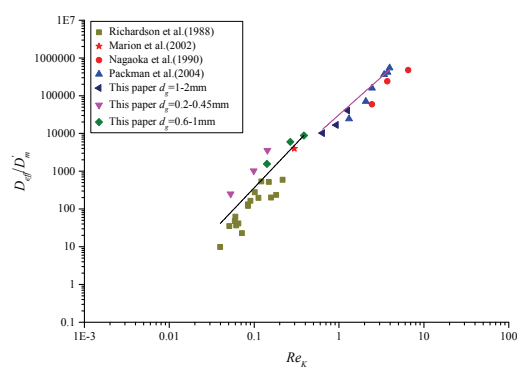


图5 有效扩散系数和渗透率雷诺数的标度关系

综合上述结果可见，对于粗糙底床而言，在较大的无量纲影响参数范围内，底床渗透性和床面粗糙度对泥-水界面区域物质交换特性的影响程度存在差异。可采用合适的无量纲参数阈值来表征不同标度关系的适用范围，如采用渗透率雷诺数来表征，与光滑底床相比，

粗糙底床条件下的这一阈值由于过渡区内湍流渗透影响增强而有一定程度的减小。

4 结论

粗糙底床泥-水界面区域的物质交换过程受到水动力作用、床面粗糙度和渗透性的综合影响。本文通过实验室环形水槽实验,在不同粒径模型沙粗糙床面条件下,分析界面物质交换通量的变化特征以及有效扩散系数与其主要影响参数之间的标度关系。实验结果表明,在本文实验参数范围内,不同粗糙底床条件下,与光滑底床相比,泥-水界面有效扩散系数有所增大,与其主要影响参数之间存在较为一致的标度关系。对于相对较高渗透率的粗糙底床,有效扩散系数与特征雷诺数大致呈 2 次方标度关系,其适用范围可采用合适的无量纲参数(如渗透率雷诺数)阈值来表征。与光滑底床相比,粗糙底床条件下这一阈值由于粗糙床面湍流渗透影响增强而有一定程度的减小。

致谢

国家自然科学基金(11472168)资助。

参考文献

- 1 雷沛,张洪,王超,等. 沉积物-水界面污染物迁移扩散的研究进展. 湖泊科学, 2018, 30(6): 1489-1508.
- 2 孙娇,袁德奎,冯桓,等. 沉积物-水界面营养盐交换通量的研究进展. 海洋环境科学, 2012, 31(6): 933-938.
- 3 Feng ZG, Michaelides EE. Secondary flow within a river and contaminant transport, *Environmental Fluid Mechanics*, 2009, 9: 617-634.
- 4 Huettel M, Røy H, Precht E, Ehrenhauss S. Hydrodynamical impact on biogeochemical processes in aquatic sediments, *Hydrobiologia*, 2003, 494(1-3): 231-236.
- 5 Packman AI, Salehin M, Zaramella M. Hyporheic exchange with gravel beds: Basic hydrodynamic interactions and bedform-induced advective flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(7): 647-656.
- 6 Inoue T, Nakamura Y. Effects of hydrodynamic conditions on DO transfer at a rough sediment surface, *Journal of Environmental Engineering*, 2011, 137(1): 28-37.
- 7 Voermans JJ, Ghisalberti M, Ivey GN. The variation of flow and turbulence across the sediment-water interface, *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 824: 413-437.
- 8 Grant SB, Stewardson MJ, Marusic I. Effective diffusivity and mass flux across the sediment-water interface

in streams, *Water Resources Research*, 2012, 48(5): W05548.

- 9 Voermans JJ, Ghisalberti M, Ivey GN. A model for mass transport across the sediment-water interface, *Water Resources Research*, 2018, 54(4): 2799-2812.

Influencing parameters and scaling relationship of effective diffusion coefficient at sediment-water interface for rough bed

CHEN Chun-yan, ZHAO Liang, WANG Dao-zeng, FAN Jing-yu

(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China.

*Corresponding author, Email: jyfan@shu.edu.cn)

Abstract: Sediment-water interface (SWI) is an important environmental boundary in natural aquatic systems, such as rivers, estuaries, lakes, reservoirs, wetlands and coastal waters. The mass exchange across the SWI for rough bed depends on not only the hydrodynamic feature and the sediment permeability, but also the bed roughness at grain size/roughness element scales. In this paper, by means of an annual flume experiment, the quantitative data and variation feature of the interfacial mass exchange flux have been measured under the conditions of the rough beds composed of different grain-sized model sands, and the scaling relationship between the effective diffusion coefficient and its main influencing parameters has been analyzed. The experimental results indicate that within the variation range of the present flow and sediment conditions, the rough bed shows the enhanced mass exchange rate across the SWI compared to smooth bed, and a consistent scaling relationship between the effective diffusion coefficient and its main influencing parameters occurs. The effective diffusion coefficient for the case of the rough bed with relatively high permeability is shown to be approximately proportional to the square of a variety of the Reynolds numbers, and an appropriate threshold value of dimensionless control parameters (such as the permeability Reynolds number) is likely to characterize the applicability of this scaling relationship. The corresponding threshold value of the permeability Reynolds number for the rough bed tends to decrease appreciably, due to the enhancement of turbulence penetration, compared to that for the smooth bed.

Key words: Rough bed; Sediment-water interface; Effective diffusion coefficient; Scaling relationship.