

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.11.018

微生物作用下不同类型沉积物的起动研究

李昕隆¹, 许 峥², 张 敏², 张仪萍¹, 周永潮¹, 张土乔¹

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 中国电建集团华东勘测设计研究院
有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘 要: 沉积物淤积是排水管道的主要功能性病害之一,研究微生物作用下不同类型含有机质沉积物的起动规律,定量分析主体颗粒特性对起动规律的影响,是科学控制管道功能性病害的重要基础。为此,对含有机质沉积物进行微生物培养,采用明渠水槽冲刷试验和微观观测的方法,基于黏性泥沙起动输移规律,揭示了在微生物作用下不同密度、粒径和有机质含量的不同类型含有机质沉积物的起动规律。结果表明,在微生物作用下,含有机质沉积物的抗侵蚀能力随着其密度的增大而增大,随着其粒径的增大呈现先减小后增大的趋势,其中粒径为20~40 μm时抗侵蚀能力最弱。此外,分别利用响应面法与BP神经网络模型建立了微生物作用下不同类型有机质含量沉积物的临界起动剪切应力公式,结果表明,两种方法的决定系数(R^2)与纳什效率系数(NSE)相等,分别为99.6%和99.9%;对比两种方法的平均绝对误差(MAE)、NSE与平均绝对百分比误差(MAPE),发现响应面法具有更高的准确度。

关键词: 排水管道; 沉积物; 微生物作用; 颗粒特性; 有机质; 临界起动剪切应力

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)11-0130-07

Initiation of Different Types of Sediment under Microbial Influence

LI Xin-long¹, XU Zheng², ZHANG Min², ZHANG Yi-ping¹, ZHOU Yong-chao¹,
ZHANG Tu-qiao¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058,
China; 2. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: Sediment deposition represents one of the primary functional defects in drainage pipelines. Investigating the initiation characteristics of various organic-containing sediments under microbial influence and quantitatively analyzing the impact of dominant particle characteristics on these initiation characteristics constitute critical foundations for the scientific management of pipeline functional defects. In this study, microorganisms were cultured in organic-containing sediments. Furthermore, it revealed the initiation behaviors of various types of organic-containing sediments with differing densities, particle sizes, and organic matter contents under microbial influences by employing open channel flushing experiments, microscopic observation and the laws of initiation and transportation of cohesive sediments. Under the action of microorganisms, the anti-erosion capability of organic-containing sediments increased with the increase of density. However, it exhibited a trend of first

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3207502)

通信作者: 周永潮 E-mail: zhoutang@zju.edu.cn

decreasing and then increasing with the increase in particle size. Notably, the anti-erosion capability was the weakest for particles in the 20–40 mesh range. In addition, the critical initiation shear stress formulas for sediments with varying organic matter contents, under the action of microorganisms, were established separately using the response surface method and the BP neural network model. The coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE) values of the two methods were equal, at 99.6% and 99.9%, respectively. By comparing the mean absolute error (MAE), NSE, and mean absolute percentage error (MAPE) of the two methods, it was evident that the response surface method demonstrated higher accuracy.

Key words: drainage pipeline; sediment; microbial influence; particle characteristics; organic matter; critical initiation shear stress

排水系统作为城市的重要基础设施,承担着雨水、污水的收集和排放工作,在城市水污染防治等方面发挥着关键作用。沉积物淤积是排水系统在长期运行中出现的问题之一,造成包括堵塞管道、削弱排水能力等管道病害现象。管道排放的污染负荷中有30%~80%来源于管道沉积物^[1]。

早期关于沉积物起动的研究只考虑水流作用力和自身重力对颗粒起动的影响,忽略了沉积物颗粒之间的黏性作用^[2-3]。使用希尔兹曲线对沉积物临界起动剪切应力进行计算,是无黏性颗粒起动判定的主要方法。而在实际环境中,沉积物颗粒之间存在的黏性力将细颗粒泥沙的临界起动剪切应力提升了2~3倍。黏性力来源多样、影响因素复杂,导致黏性泥沙与无黏性泥沙的起动规律存在很大差异。因此,国内外学者充分考虑黏性力对颗粒起动的影响,推求了一系列沉积物颗粒在黏性作用下的起动公式。

近年来研究发现,由于微生物作用,真实管道内含有有机质沉积物表面普遍存在具有生物稳定作用的生物膜^[4],这使得沉积物起动规律产生了变化。因此,对含有有机质沉积物的起动公式推导需要考虑生物稳定作用。Righetti等^[5]认为生物稳定作用是一种表面力,其大小为生物黏性系数与泥沙粒径平方的乘积。在此基础上,Fang等^[6]通过水槽试验发现生物稳定作用还与微生物培养时间有关,并利用试验数据拟合得到生物黏性系数表达式。Zhou等^[7]则将管道沉积物的有机性纳入考虑,探究了有机质含量对微生物作用下沉积物起动规律的影响,修正了生物黏性系数表达式。

然而,沉积物由有机质和无机主体颗粒构成,

主体颗粒密度与粒径的不同,会造成含有机质沉积物起动规律的差异。现有的研究中仍未充分考虑主体颗粒特性对起动规律的影响,无法全面揭示微生物作用下含有机质沉积物的起动输移规律。因此,为探究不同类型含有机质沉积物在微生物作用下的宏观运动规律,开展微生物作用下不同类型含有机质沉积物的起动影响因素与规律研究;并进一步引入数据驱动方法,建立适于微生物作用下不同类型含有机质沉积物的颗粒起动公式。

1 材料和方法

1.1 试验装置与方案

本研究采用小型直流式明渠水槽作为试验装置,装置分为进水区、整流区、冲蚀区和采样区,如图1所示。装置全长为700 mm,宽为50 mm,高为160 mm;斗状采沙盒的尺寸为300 mm×50 mm×6 mm;明渠末端溢流堰高30 mm,用以稳定水位。

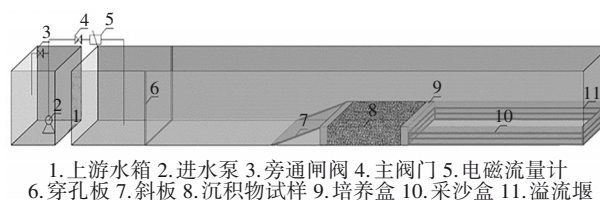


图1 明渠水槽冲刷试验装置示意

Fig.1 Diagram of open channel flushing experiments device

试验开始前,通过调节阀门使明渠处于满流状态,随后将沉积物培养盒缓慢放至冲蚀槽,装配引流板后开始冲蚀试验。通过阀门4调节流量控制水流强度,待水流稳定后记录水槽内水位高度和电磁流量计读数。在采样区放置采沙盒,收集3 min内的沉积物推移质;同时,在明渠末端采集1 L溢流出

水水样测定悬移质。每级冲刷持续3 min。在不同水流强度下重复上述试验步骤,直至培养盒中的沉积物试样被完全侵蚀。对收集到的悬移质和推移质样品进行抽滤,抽滤后的沉积物同滤纸一同烘干至恒质量,称量总质量及单张滤纸的干质量。

1.2 沉积物的配制与培养

研究表明,城市排水管道沉积物的粒径主要分布在0.02~2 mm之间,密度约为1.17~2.47 g/cm³[8-9],合流制雨水管道沉积物的有机质以碳和氮为主,含量高达17.6%^[10]。因此,本研究以面粉作为有机质,选取5种不同粒径和密度的无机沙作为主体颗粒,混合得到29组不同类型的含有机质沉积物样品。冲刷试验前,样品均匀铺设在培养盒,放入盛有真实污水的培养箱中进行统一培养,通过曝气维持培养箱水体的DO浓度在2.0 mg/L左右,同时控制培养水体温度在24~26℃。培养20 d时微生物作用对沉积物抗侵蚀能力的提升最大^[11],因此,本研究以20 d作为微生物的培养时间。

1.3 数据分析与计算

沉积物试样的冲蚀率由沉积物冲蚀量计算:

$$M = \frac{m_0}{t} \quad (1)$$

$$m_0 = m_1 + m_2 \times Q \times t \quad (2)$$

式中: M 为沉积物冲蚀率,g/s; m_0 为沉积物冲蚀量,g; m_1 为推移质质量,g; m_2 为1 L溢流水中悬移质的质量,g; Q 为流量,L/s; t 为冲刷时间,s。

本研究选用床面剪切应力对近床面水流强度进行表征。水流剪切应力的计算公式如下:

$$\tau = \rho_w u_*^2 \quad (3)$$

式中: τ 为水流剪切应力,N/m²; ρ_w 为水的密度,kg/m³; u_* 为摩阻流速,m/s。

基于无因次输沙率的概念,前人研究中常用沉积物颗粒的临界起动剪切应力表征沉积物的抗侵蚀能力^[12-13]。研究表明,沉积物的冲蚀率与水流剪切应力呈幂函数关系^[14]。沉积物临界起动冲蚀率 M_0 的表达式如下:

$$M_0 = 0.0002gl(\rho_s - \rho_w) \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} gd^3} \quad (4)$$

式中: ρ_s 为沉积物的密度,kg/m³; ρ_w 为水的密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²; d 为沉积物的中值粒径,m; l 为水流断面宽度,此处取明渠水槽宽度,m。本研究将冲蚀率达到其临界起动冲蚀率时对应

的水流剪切应力作为临界起动剪切应力。

1.4 起动公式推导与评价

本研究采用响应面法和BP神经网络模型分别对微生物作用下含有机质沉积物的起动公式进行推导。其中,响应面法是一种综合试验设计和数学建模的优化方法,通过分析各样本的响应值与所选参数的关系,探究影响因素之间的交互作用,采用较简单的数学方程对试验结果进行数学拟合,得到能够表示响应值与参数之间复杂关系的显式函数表达式。BP神经网络是指基于误差反向传播算法的多层前向神经网络,一般由输入层、隐含层和输出层构成,每层都有不同数目的神经元,称为单元或者节点;该方法能够以任意精度逼近任何非线性映射,可以学习和自适应未知信息,具有一定的容错性,因此构造出来的系统具有较好的鲁棒性,适合处理复杂问题。

采用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)、决定系数(R^2)和纳什效率系数(NSE)对起动公式预测模型的预测性能进行评价。其中,MAE、RMSE与MAPE越接近0, R^2 与NSE越接近1,表明该模型的预测性能越好。

1.5 检测方法

主体颗粒物粒径采用Malvern-MS2000型马尔文激光粒度仪检测;沉积物真密度采用TD-1200型真密度分析仪测定。前人研究表明,胞外聚合物(EPS)的多糖含量是影响生物膜稳定作用的重要因素,本研究采用苯酚-浓硫酸法对不同类型沉积物中EPS多糖的相对含量进行测定^[15]。

2 结果和讨论

2.1 不同密度主体颗粒的起动规律

图2为微生物作用下不同密度主体颗粒的冲蚀率变化。可知,主体颗粒密度越大,冲蚀率增长得越缓慢。相比于无微生物作用,微生物存在情况下产生的生物稳定作用显著增强了不同密度主体颗粒的抗侵蚀能力,使其冲蚀率的增长速度得到不同程度的降低。在微生物作用下,当主体颗粒密度为1.517 g/cm³时,沉积物0.05 g/s冲蚀率对应的水流剪切应力为0.193 N/m²;然而当主体颗粒密度为3.434 g/cm³时,0.192 N/m²的水流剪切应力仅能达到0.009 g/s的冲蚀率。

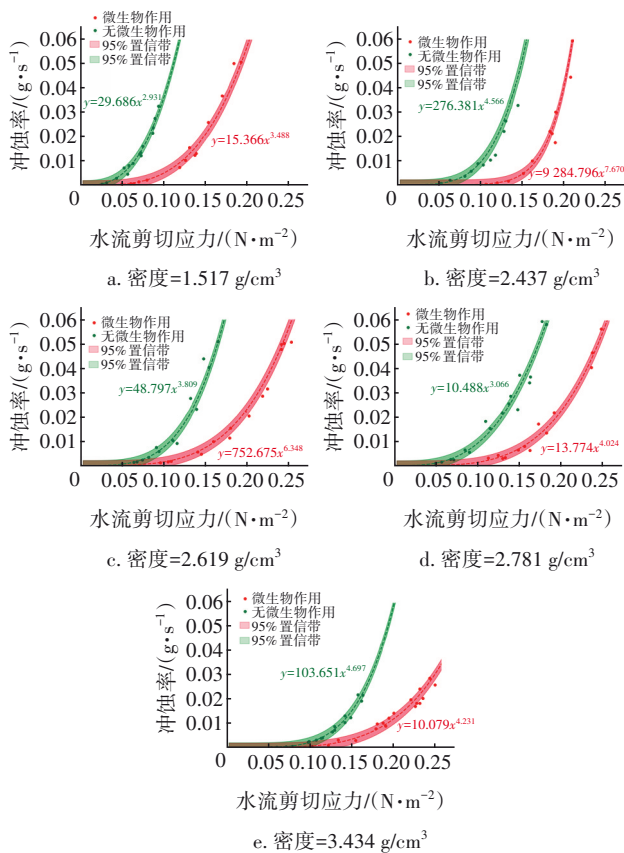


图2 不同密度主体颗粒的冲蚀率变化

Fig.2 Variation of erosion rate with different particle densities

由此可见,微生物作用的存在,使主体颗粒的临界起动剪切应力在原基础上有了较大提高。因此,可将微生物作用下的临界起动剪切力视为由基础剪切应力与生物黏性附加剪切应力组成。根据图2所示冲蚀率拟合曲线,计算可得不同密度主体颗粒的临界起动剪切应力变化,如图3所示。

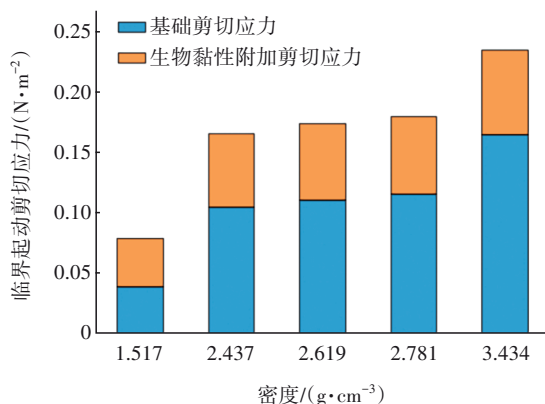


图3 不同密度主体颗粒的临界起动剪切应力变化

Fig.3 Variation of critical shear stress with different particle densities

由图3可知,基础剪切应力与生物黏性附加剪切应力均随密度的增加而增大。当主体颗粒密度为1.517 g/cm³时,生物稳定作用最微弱,其附加剪切应力为0.040 N/m²;当密度为2.437、2.619、2.781 g/cm³时生物黏性附加剪切应力相近,增长较为缓慢;当密度为3.434 g/cm³时生物稳定作用最显著,生物黏性附加剪切应力达到0.070 N/m²。

EPS多糖含量是生物稳定作用的主要贡献因素,不同密度含有机质沉积物的EPS多糖含量见图4。在微生物作用下沉积物的EPS多糖含量随其密度的增加而增大,与生物黏性附加剪切应力变化相一致。这可能是微生物作用下主体颗粒密度变化导致沉积物起动规律变化的主因。

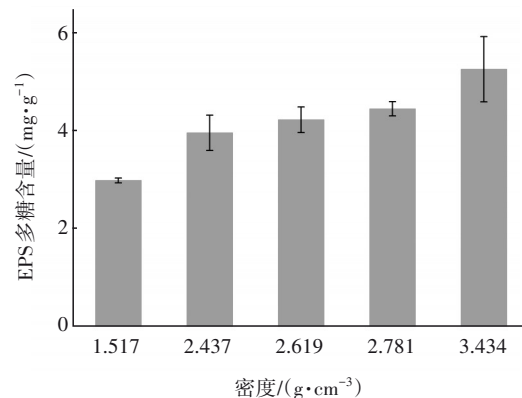


图4 微生物作用下不同密度主体颗粒的EPS多糖含量变化

Fig.4 Variation of polysaccharide content in EPS with different particle densities under microbial influence

利用扫描电子显微镜(SEM)对主体颗粒的微观形貌进行分析,结果如图5所示。

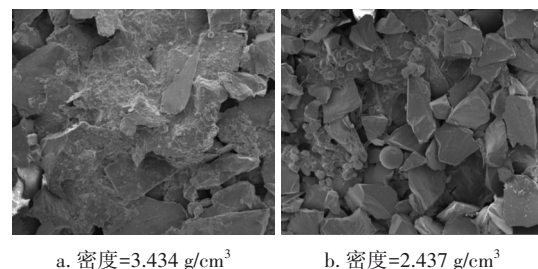


图5 微生物作用下不同密度主体颗粒的SEM图像

Fig.5 SEM images with different particle densities under microbial influence

从SEM照片可以看出,微生物作用下密度为2.437 g/cm³的主体颗粒表面有少量微生物附着,大部分都暴露在外,棱角分明,颗粒之间无联系;而密度为3.434 g/cm³的主体颗粒表面和间隙生长了大

量微生物,将主体颗粒连接成一个较大的聚合体。致密的微生物膜显著增强了主体颗粒的抗侵蚀能力。这进一步证明主体颗粒密度的差异会对微生物作用产生影响,从而改变沉积物起动规律。

2.2 不同粒径主体颗粒的起动规律

选用同一类型不同粒径的主体颗粒进行冲刷试验,结果如图6所示。可知,无微生物作用时冲刷率的增长速度随着沉积物粒径的增大而减小,这是由于沉积物的粒径越大,其自身的重力就越大,抗侵蚀能力也随之增强;不同粒径含有机质沉积物的冲刷率增长速度不同;微生物作用使冲刷率的增长速度得到不同程度的降低,随着粒径的减小,对冲刷率的增长速度降低幅度增大。

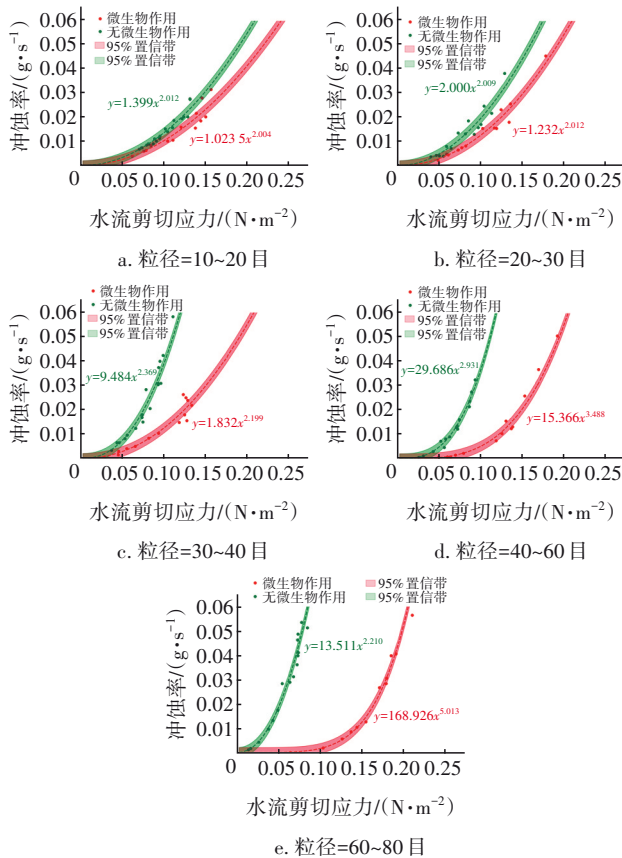


图6 不同粒径主体颗粒的冲刷率变化

Fig.6 Variation of erosion rate with different particle sizes

通过图6的冲刷率拟合曲线,计算得到不同粒径主体颗粒的临界起动剪切应力,结果见图7。基础剪切应力随粒径的减小而减小,而生物黏性附加剪切应力随粒径的减小而增大,两者共同变化使主体颗粒的临界剪切应力随粒径的减小呈现先减小后增大的趋势,其中20~40目粒径的主体颗粒具有

最小的临界起动剪切应力。这是由于小粒径主体颗粒具有较大的比表面积和较小的床面水流剪切应力,有助于营养物质的吸附和微生物的附着^[12-13],因此较小主体颗粒具有较高的多糖含量(见图8),从而造成了更大的生物黏性附加剪切应力。

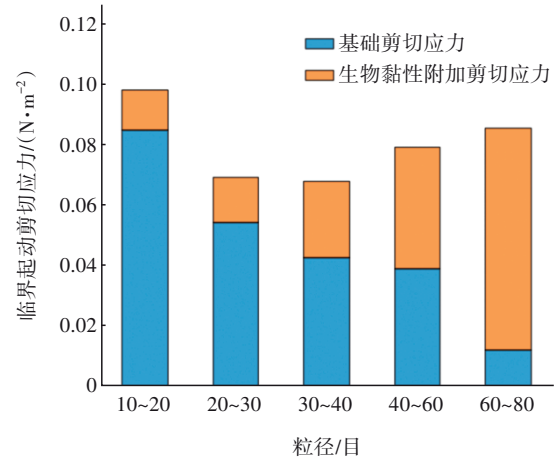


图7 不同粒径主体颗粒的临界起动剪切应力变化

Fig.7 Variation of critical initiation shear stress with different particle sizes

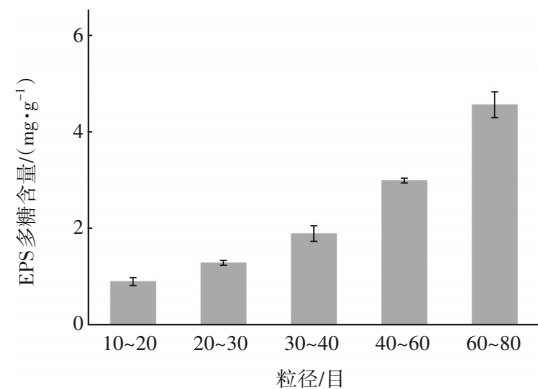


图8 微生物作用下不同粒径主体颗粒的EPS多糖含量变化

Fig.8 Variation of polysaccharide content in EPS with different particle sizes under microbial influence

2.3 微生物作用下主体颗粒的起动公式

为确定不同粒径、密度、有机质含量下主体颗粒的起动公式,分别采用响应面法和BP神经网络模型对临界起动剪切应力进行预测。

将冲刷率数据分为训练集与测试集,将预处理后的训练集数据输入BP神经网络,依据信号的前向传播和误差的反向传播来调整网络,直到网络全局误差小于设定的训练目标,训练结束。利用训练好的BP神经网络对测试集进行仿真和反归一化,得到测试集对应的临界起动剪切应力预测值。

同时,选用二阶多项式作为响应面拟合函数形式,利用最小二乘法对试验数据进行响应面函数拟合,得到临界起动剪切应力(τ_0)的最优响应面函数,如下所示:

$$\begin{aligned} \tau_0 = & -0.1189 + 99.04d + 2.025 \times 10^5 d^2 + \\ & 1.79 \times 10^{-4} \rho_s - 6.107 \times 10^{-9} \rho_s^2 - \\ & 0.1083C_{OM} - 0.2209d\rho_s \end{aligned} \quad (5)$$

式中: C_{OM} 为有机质含量。

响应面法和BP神经网络模型的预测值和试验值对比结果如图9所示。可知,两种方法的预测值与试验值均分布在最优拟合线上,表明训练后两种方法均能较为准确地预测微生物作用下不同主体颗粒的起动剪切应力。

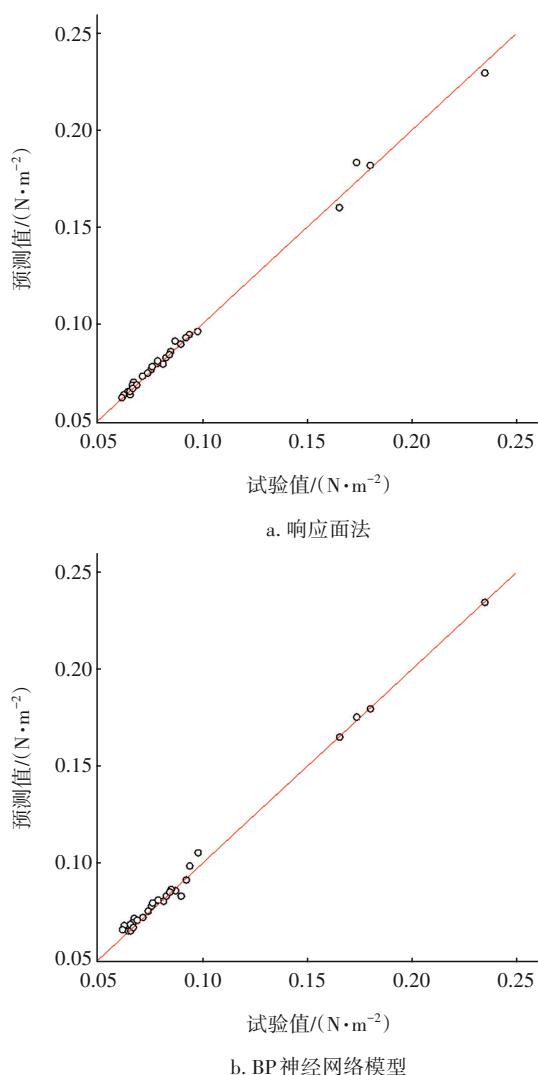


图9 临界起动剪切应力预测值与试验值对比

Fig.9 Comparison between predicted values and experimental values of critical initiation shear stress

图10为两种方法的预测性能评价指标雷达图。可以看出,BP神经网络模型与响应面法的 R^2 与NSE相等,分别为0.996和0.999。同时,响应面法的RMSE、MAPE与MAE均小于BP神经网络模型,这表明响应面法预测的准确性略高于BP神经网络模型。综上所述,通过响应面法得到的适用于微生物作用下不同类型含有机质沉积物的起动公式,表现出高度准确性和预测能力。

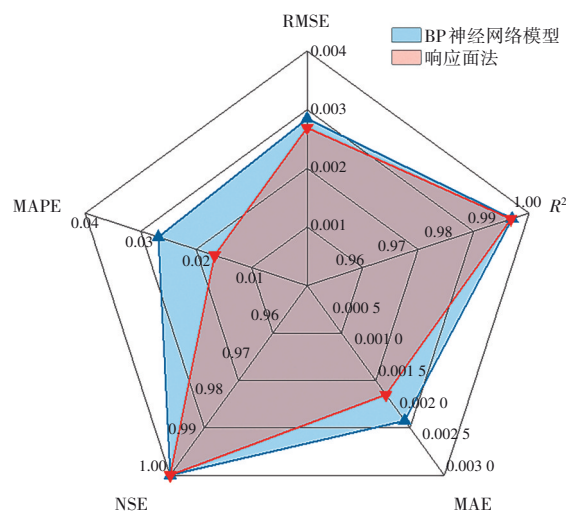


图10 预测性能评价指标雷达图

Fig.10 Radar chart of evaluation indicators of predictive performance

3 结论

① 微生物作用下沉积物的抗侵蚀能力由主体颗粒自身的基础剪切应力与微生物作用产生的生物黏性附加剪切应力组成。微生物作用下主体颗粒密度的增大使自身的基础剪切应力与生物黏性附加剪切应力同时增加。在二者的共同作用下,沉积物的抗侵蚀能力随着密度的增加而增大。

② 在微生物作用下,随着主体颗粒粒径的增大,一方面增强了自身基础剪切应力,另一方面削弱了微生物作用,减少了生物黏性附加剪切应力。两者综合作用下,沉积物的抗侵蚀能力随着粒径的增大呈现先减小后增大的趋势。

③ 利用响应面法和BP神经网络模型预测微生物作用下不同类型含有机质沉积物的临界起动剪切应力,结果表明,二者都具有较好的预测效果和可信度。在性能评价指标中,两者的 R^2 与NSE相等,分别为0.996和0.999;对比两者的MAE、NSE与MAPE发现,响应面法的预测准确性略高于BP神

经网络模型,响应面法可以得到适用于微生物作用下不同类型含有机质沉积物的起动公式。

参考文献:

- [1] ASHLEY R, CRABTREE B, FRASER A, *et al.* European research into sewer sediments and associated pollutants and processes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(4): 267-275.
- [2] 付博文, 金鹏康, 石山, 等. 西安市污水管网中沉积物特性研究[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(17): 119-122, 127.
FU Bowen, JIN Pengkang, SHI Shan, *et al.* Sediment characteristics of sewer network in Xi'an City [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(17): 119-122, 127 (in Chinese).
- [3] BUTLER D, MAY R, ACKERS J. Self-cleansing sewer design based on sediment transport principles [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(4): 276-282.
- [4] CHEN G H, LEUNG D H W, HUNG J C. Biofilm in the sediment phase of a sanitary gravity sewer [J]. *Water Research*, 2003, 37(11): 2784-2788.
- [5] RIGHETTI M, LUCARELLI C. May the Shields theory be extended to cohesive and adhesive benthic sediments? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007. DOI: 10.1029/2006JC003669.
- [6] FANG H, SHANG Q, CHEN M, *et al.* Changes in the critical erosion velocity for sediment colonized by biofilm [J]. *Sedimentology*, 2014, 61(3): 648-659.
- [7] ZHOU Y C, YAO X Y, GU Y Q, *et al.* Biological effects on incipient motion behavior of sediments with different organic matter content [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21: 627-640.
- [8] 司韦, 于江华, 解丽媛. 雨水管道沉积物粒径分布与污染特征研究[J]. *环境科技*, 2021, 34(1): 35-40.
SI Wei, YU Jianghua, XIE Liyuan. Study on the particle size distribution and pollution characteristics of rainwater pipe sediments [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 34(1): 35-40 (in Chinese).
- [9] 贾朝阳. 雨水管道沉积物控制措施及其效果研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2012.
JIA Zhaoyang. Study on Control Measures and the Effect on Sewer Pipe Sediment [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012 (in Chinese).
- [10] 杨云安, 管运涛, 许光明, 等. 老城区不同功能区排水管道沉积物性质研究[J]. *给水排水*, 2011, 37(9): 159-162.
YANG Yun'an, GUAN Yuntao, XU Guangming, *et al.* Research on sediment properties of drainage pipelines in different functional areas of old city [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, 37(9): 159-162 (in Chinese).
- [11] 王文韬. 微生物作用下含有机质沉积物微观特性和起动规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
WANG Wentao. Study on the Microscopic Characteristics and Incipient Motion of Sediments with Bio-adhesive Effect [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021 (in Chinese).
- [12] FANG H W, CHEN M H, CHEN Z H, *et al.* Effects of sediment particle morphology on adsorption of phosphorus elements [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(2): 246-253.
- [13] WANG S G, JIN X C, PANG Y, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption characteristics in relation to the sediment compositions of shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River region, China [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2005, 289(2): 339-346.
- [14] JEPSEN R, ROBERTS J, LICK W. Effects of bulk density on sediment erosion rates [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1997, 99(1/4): 21-31.
- [15] NIU T, ZHOU Z, SHEN X, *et al.* Effects of dissolved oxygen on performance and microbial community structure in a micro-aerobic hydrolysis sludge in situ reduction process [J]. *Water Research*, 2016, 90: 369-377.

作者简介: 李昕隆(1999-), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 主要从事城市排水管网沉积物管理研究。

E-mail: 22112064@zju.edu.cn

收稿日期: 2024-02-25

修回日期: 2024-04-06

(编辑: 刘贵春)