DOI：10.16285/j.rsm.2025.0022 **CSTR:**32223.14.j.rsm.2025.0022

虑及时间序列不同 pH 值环境下珊瑚砂渗透试验及预测模型

霍玉龙[1,2]，胡明鉴[1]，唐健健[1]

（1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程安全全国重点实验室，湖北 武汉 430071；2. 中国地震局 地震研究所，湖北 武汉 430071）

摘 要：珊瑚砂渗透性关系着吹填岛礁淡水透镜体的形成，是描述礁砂地层渗透特性的重要参数，对岛礁可持续发展具有重要意义，其大小除了受粒径、级配和孔隙特征影响外，还受渗透液酸碱度和渗透持续时间影响。为探究不同 pH 值环境下，渗透持续时间、粒径、级配等对珊瑚砂渗透性的影响，开展常规渗透试验，并通过 D8Advance X 射线衍射仪和激光粒度仪分析试验前后砂柱的矿物含量和颗粒组分变化规律。研究结果表明：中性渗透液条件下孔隙率一定时，渗透系数初始值随着有效粒径增大而增大，渗透系数初始值与曲率系数呈负对数函数关系，与不均匀系数呈对数函数关系；酸性环境下渗透系数与时间呈二次函数关系，中性环境下渗透系数无明显变化，增长幅度随着 pH 值的减小而增大；酸性环境下方解石含量增加，文石、钙镁方解石以及岩盐含量降低，中性环境下矿物变化不明显，渗透液首先经过的层位细颗粒含量增加显著，相同层位条件下，pH 值越低细颗粒砂增多越显著。通过回归分析初步建立了渗透系数初始值和最终稳定值预测模型，同时建立了考虑时间效应和渗透液 pH 值的机器学习模型，该模型可为礁砂地层渗透性评估和淡水透镜体演化分析提供参考。

关 键 词：珊瑚砂；渗透系数；pH 值；时间序列；预测模型

中图分类号：TU451 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－7598 (2025) 12－3784－13

Experimental and predictive modeling of coral sand infiltration in different pH environments considering time series

HUO Yu-long[1,2], HU Ming-jian[1], TANG Jian-jian[1]

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering Safety, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The permeability of coral sand is related to the formation of freshwater lenses in blown-in islands and reefs, and is an important parameter describing the permeability characteristics of reef sand strata, which is of great significance to the sustainable development of islands and reefs. The permeability of coral sand is affected by the percolating solution pH and permeation duration in addition to the particle size, gradation, and pore characteristics. To investigate the effects of permeate duration, particle size and gradation on the permeability of coral sand in different pH environments, we carried out conventional permeability tests, and analyzed the changing rules of mineral content and particle fraction of the sand columns before and after the tests by using D8Advance X-ray diffractometer and laser particle sizer. Results show that, under neutral percolating solution and fixed porosity, the initial hydraulic conductivity increases with the effective grain size. The initial hydraulic conductivity coefficient and the curvature coefficient follow a negative logarithmic relationship, while the initial hydraulic conductivity coefficient and the uniformity coefficient follow a logarithmic relationship. Under acidic conditions, hydraulic conductivity has a quadratic relationship with time; under neutral conditions, hydraulic conductivity remains largely unchanged. The increase in hydraulic conductivity intensifies as pH decreases. In acidic environments, the calcite content of coral sand increases, while aragonite, calcium and magnesium calcite, and rock-salt contents decrease; mineral changes are not obvious under neutral conditions. The percolating solution first passes through a layer with a significantly increased fine-particle content; under the same layer conditions, a lower pH leads to a more pronounced increase in the fraction of fine particles. We developed a preliminary regression-based model to predict the initial and final stabilized

收稿日期：2025-01-06 录用日期：2025-05-19
基金项目：国家重点研发计划（No.2022-101）；国家自然科学基金面上项目（No.42377176）。
This work was supported by the National Key R&D Program of China (2022-101) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (42377176).
第一作者简介：霍玉龙，男，1994 年生，硕士，工程师，主要从事工程地质和水文地质方面的研究。E-mail: 1309840428@qq.com
通讯作者：胡明鉴，男，1974 年生，博士，研究员，主要从事工程地质和水文地质方面的研究。E-mail: mjhu@whrsm.ac.cn

hydraulic conductivity. A machine-learning model incorporating time effects and percolating solution pH was also developed. These models can be used to assess reef-sand permeability and to analyze the evolution of freshwater lenses.

Keywords: coral sand; hydraulic conductivity; pH; time series; predictive modeling

1　引　言

研究 pH 值对岩土体渗透性的影响，不仅为工程安全设计、环境保护与治理、资源高效开发提供科学依据，还推动岩土力学与地球化学交叉学科的发展，为岩土体多场耦合理论的发展提供新的研究视角。系统开展 pH 值对岩土体渗透性影响的研究，对于完善岩土体渗透理论体系、促进相关学科发展以及指导工程实践都具有重要的学术价值和现实意义。珊瑚砂渗透性关系着吹填岛礁淡水透镜体的形成，渗透系数是描述礁砂地层渗透特性的重要参数，近年来国内外学者在珊瑚砂渗透研究领域取得了丰硕的成果。

这些成果主要集中在渗透变形及渗透破坏、渗透性微观机制、改良砂渗透性规律以及影响因素分析与建模等 4 个领域。在渗透变形及渗透破坏研究领域，段伦良等[1]研究海床土瞬态液化问题，认为当海床垂向渗透系数在一定范围内时，海床最大液化深度随垂向渗透系数增大而减小；鞠远江等[2]研究认为，在渗流过程中细颗粒流失的主要粒径范围受级配影响，粗颗粒含量越少，流失细颗粒越细，渗流时间越长、水力梯度越大，流失细颗粒越粗；Ding 等[3]认为渗流变形破坏模式受细粒含量的影响，颗粒运移受粗颗粒之间约束的影响，不同颗粒接触形式限制细颗粒发生运移的能力是不同的。该研究领域主要针对地震、爆破等特殊工况下的超孔隙水压力及超临界水力梯度问题展开。

工程现象是内在机制在宏观领域的外在表现，开展微观试验可揭示珊瑚砂渗透性不同于陆源砂的机制。在珊瑚砂渗透性微观机制研究领域主要采用 CT 扫描等微观技术。马登辉等[4]认为珊瑚砂渗透能力具有各向异性，颗粒内的孔隙渗流速度较慢，不同颗粒之间渗流能力差距较大，颗粒内孔隙的绝对渗透率仅占总绝对渗透率的 1.26%；崔翔等[5]认为导致珊瑚砂渗透性特殊的微观因素包括颗粒表面性质和颗粒形状性质两方面；Yuan 等[6]认为珊瑚砂的棱角和不规则程度明显高于福建砂，细粒珊瑚砂渗流通道狭窄且不规则，颗粒更容易堵塞，颗粒的内孔隙增大了渗透通道；Fan 等[7]认为孔隙数和孔隙分布是决定不同粒径珊瑚砂渗透性的关键因素，当粒径大于 1.45 mm 时，内部孔隙的存在对孔隙总数和渗透性的影响更大。

渗透性变化常常用于珊瑚砂改性效果评估，改性方法主要集中在微生物诱导碳酸钙技术（microbial induced carbonate precipitation，简称 MICP）方面。Li 等[8]开发了一种自制的装置进行渗透试验，在同一相对密实度的条件下，每个 MICP 处理周期渗透系数的减少随着曲率系数 C_c 和不均匀系数 C_u 的增加而增加，渗透系数与 C_c 和 C_u 成正比，经过多次 MICP 处理后，渗透系数与 C_c 和 C_u 没有很好的相关性；方祥位[9]、马瑞男[10]等也开展 MICP 改性珊瑚砂渗透试验，均得到改性后的珊瑚砂渗透性降低 1～2 个数量级的结论；此外，Zhang 等[11]采用室内入渗灌浆试验评价水浆和珊瑚砂特征参数对渗透率的影响，结果表明浆体在珊瑚砂中的渗透率与水灰比、灌浆压力、水泥粒径 d_{90} 呈正相关；Peng 等[12]提出了一种新的钙藻酸盐聚合物密封胶珊瑚砂防渗方法，在钙–海藻酸盐聚合物密封胶的作用下，渗透性降低了 5 个数量级；王新志等[13]开展了硫酸锌胶结珊瑚砂渗透试验，得到经过处理后的渗透系数降低了 70.17%～95.79%的结论；张小燕等[14]开展含橡胶纤维珊瑚砂渗透试验，得到纤维含量对珊瑚砂渗透性几乎无影响的结论。改性加固技术可以很好地解决礁砂地层存在的工程地质问题，但渗透性过低可能影响淡水透镜体的形成，改性加固技术往往忽略了岛礁淡水体形成和发展这一问题，基于改性礁砂地层开展淡水体涵养相关研究十分必要。

陆源材料渗透性研究始于法国工程师达西提出的著名的达西定律[15]，之后国外学者提出了应用较为广泛的太沙基公式[16]、Amer 公式[17]、Shahabi 公式[18]、哈增公式[19]、柯森公式[20]。国内学者刘杰[21]、张宜健[22]、朱崇辉[23]、曹志翔[24]、包孟碟[25]和曲诗章[26]等也提出了相关预测模型。在珊瑚砂渗透性影响因素及预测模型研究领域，胡明鉴等[27]开展现场双环渗透试验，建立了考虑压实度和颗粒级配的渗透系数预测模型；钱琨[28]和 Wang[29]等研究了珊瑚砂级配、孔隙比和渗透性之间的相互关系，建立了渗透系数计算模型；Wang 等[30]研究认为随着 C_u 和 C_c 的增加，渗透系数从下降趋势过渡到上升趋势；王新志等[31]研究了珊瑚粉土渗透系数与干密度、初始含水率之间的相关性，论证了 Samarasinghe

与 Mesri 公式在计算珊瑚粉土渗透系数上的可靠性；Hu 等[32]利用自制的渗流仪对不同材料的多孔介质进行了系统的渗流试验，根据大量渗流试验借助遗传程序中的符号回归，建立了阻力模型。此外，渗透性还受工况条件下外部荷载和岩土体内部颗粒形状的影响，Li 等[33]研究了珊瑚砂在外载荷作用下渗透系数的变化规律，可知 C_c 和 C_u 越大，初始相对密度越小，渗透系数越大，加载前后渗透系数的变化越明显；Wang 等[34]研究了在外载荷作用下珊瑚砂渗透系数的变化规律，得到了考虑相对破碎率 B_r 在内的渗透系数计算公式；任玉宾等[35]对珊瑚砂的颗粒形状进行了定量描述，认为渗透性受颗粒形状影响；郑思维等[36]为探究颗粒形状对珊瑚砂渗透性的定量影响，采用 PartAn^{3D} 颗粒图像分析仪获取试样的形状参数，初步建立了考虑颗粒形状参数在内的渗透系数预测模型。

上述研究集中在级配、粒径、孔隙、荷载和颗粒形貌等方面对渗透性的影响，另一方面，渗透性还受渗透液的盐浓度和 pH 值影响。陈信升等[37]以珊瑚软泥为研究对象，考虑孔隙液离子浓度对渗透性的影响，得出渗透系数随渗透液盐浓度的增大而减小的结论。郑思维等[38]为探究盐溶液环境对珊瑚砂渗透性的影响，采用 KAST 渗透仪开展渗透试验，建立了考虑渗透液含盐量因素在内的渗透系数计算公式。通常岩土体处于富含多种盐离子且具有一定酸碱性的溶液环境中，考虑渗透液 pH 值对珊瑚砂渗透性影响方面目前成果较少，在该领域的研究主要基于陆源材料。其中，肖桂元等[39]以红黏土为研究对象，开展 pH 值溶液对渗透性影响试验并进行微结构分析；朱伟等[40]以污泥固化体为研究对象开展渗透液 pH 值对渗透性影响的研究；赖永明[41]和诸利一[42]等以尾矿砂为研究对象开展渗透液 pH 值对渗透性影响的研究。既有研究成果虽在常规材料渗透性研究方面取得重要进展，但其理论模型对珊瑚砂这类特殊介质的适用性仍需深入验证。实际工程中，珊瑚砂渗透行为多发生于复杂化学环境（如盐溶液侵蚀、pH 值波动）条件下，其渗透系数本质上属于时变参数而非稳定参数。现有以恒定渗透系数为基础的岛礁工程设计方法及淡水涵养研究体系，难以准确反映渗透特性的动态演化特征。为此，本研究通过开展多 pH 值渗透试验，系统分析化学−时间耦合作用下的渗透规律演变机制，并基于机器学习算法构建时变渗透系数预测模型，为提升岛礁工程设计的可靠性与可持续性提供理论支撑。

2 试验概况与试验结果

2.1 试验材料

试验所用珊瑚砂取自南海某岛礁，属典型高孔隙比材料（珊瑚砂土粒相对密度 G_s 较高，其值为 2.81），其内孔隙发育且碳酸钙含量超过 90%，主要矿物组成为文石、钙镁方解石、方解石及岩盐。受矿物稳定性差及单颗粒强度低（易破碎）影响，材料表现出显著的结构敏感性。渗透溶液以去离子水为基液配制，鉴于研究区海水中硫酸根离子具有含量高、分布广的特征，选择稀硫酸溶液作为溶质调配不同 pH 值的渗透液，试验前共制备 100 L 梯度 pH 值溶液备用。

试验采用 TST-70 型渗透仪开展常规渗透测试，该仪器内径为 Φ(100±0.22) mm，高度为 400 mm。基于干密度控制原理，通过高精度电子天平称取试样重量，严格试样初始孔隙比并严格按照相关规范要求开展试验。

2.2 试验方案

试验材料级配如图 1 所示。选取具有典型工程意义的间断级配（试样 1）与连续级配（试样 2）两类礁砂材料开展渗透试验。设置 3 种不同孔隙度的试验组，3 种孔隙度分别对应密实、中密实、松散 3 种地层结构，可反映不同埋置深度处礁砂地层的渗透特征，每一组孔隙度对应设置有 3 种不同 pH 值（见表 1）。基于正交试验原理，两类试样各配置 9 组试验工况，共计 18 组渗透试验。考虑物理−化学耦合作用并根据太沙基一维固结理论，不难看出吹填地层渗透系数具有时变特性。本文用试验持续时间 h 来表征时间序列这一变量。试样 1 和试样 2 设计时间序列最大值约 40 h，试验开始后大约每小时

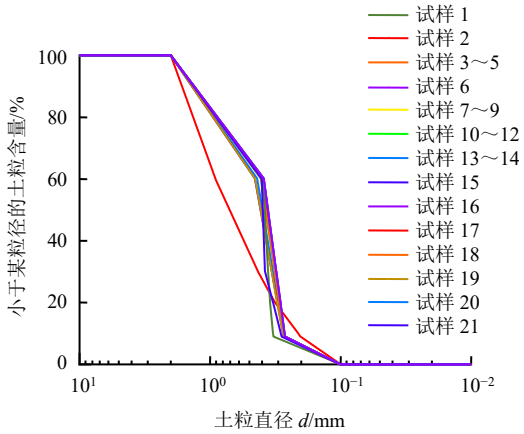


图 1 试验用珊瑚砂粒度分布曲线

Fig.1 Grain size distribution curves of coral sand for the test

表 1　试验用珊瑚砂物性参数及渗透方案

Table 1　Physical parameters and infiltration scheme of coral sand for the test

编号	d_{10} /mm	d_{20} /mm	C_c	C_u	实测孔隙率 n	渗透液 pH 值
1	0.33	0.35	1.00	1.19	0.519 5、0.546 7、0.573 9	4.0、5.5、7.0
2	0.21	0.32	0.96	4.32		
3～6	0.27	0.29	0.93	1.44	0.588 1	7.0
7～9	0.27	0.29	0.92	1.47	0.588 1	7.0
10～12	0.27	0.29	0.92	1.50	0.588 1	7.0
13～14	0.27	0.30	0.91	1.59	0.588 1	7.0
15	0.27	0.30	0.91	1.64	0.588 1	7.0
16	0.27	0.29	0.93	1.44	0.588 1	7.0
17	0.27	0.29	0.93	1.47	0.588 1	7.0
18	0.27	0.30	0.92	1.50	0.588 1	7.0
19	0.27	0.30	0.91	1.63	0.588 1	7.0
20	0.29	0.29	0.92	1.44	0.588 1	7.0
21	0.29	0.33	0.93	8.37	0.588 1	7.0

注：d_{10}、d_{20} 分别对应累计含量 10%、20%的粒径值。

测量一次渗透系数，试验后期大约每两小时测量一次渗透系数，直至渗透系数基本稳定，具体测量次数根据试验实际情况适当增减。

试样 3～21 针对岛礁吹填地层的特殊沉积特征及其水文地质特性开展渗透性试验研究。基于现场勘查结果，礁砂地层主要由间断级配砂砾组成，整体呈现松散堆积结构，其中表层砂体因长期受大气降雨淋滤作用影响，其松散程度及渗透特性与下部地层存在显著差异。为准确表征表层砂体的渗流特征，研究团队设计了以松散密实度为控制条件的试验组（试样 3～21），重点探讨间断级配参数对渗透系数的影响机制。试验设计主要考虑以下关键因素：①模拟实际环境条件，选用中性渗透液（pH = 7.0）以对应大气降雨条件；②试验持续时间作为时间序列变量，当渗透系数实测值趋于稳定时终止试验；③建立渗透系数与级配参数的量化关系。选取的级配特征参数包括特征粒径 d_{10}、d_{20}，以及曲率系数 C_c 和不均匀系数 C_u。其中，d_{10} 和 d_{20} 可有效反映砂样中细颗粒的分布特征，而 C_c 和 C_u 的组合参数可综合表征砂样的级配连续性与颗粒分布均匀性。本试验方案通过系统控制试样的颗粒级配参数，结合动态渗透试验数据，旨在揭示松散态级配礁砂地层渗透规律。试验数据将重点分析各特征参数（d_{10}、d_{20}、C_u、C_c）对渗透系数的单因素影响及多参数耦合作用，为建立岛礁吹填地层渗透性预测模型提供依据。

采用 D8Advance X 射线衍射仪与激光粒度分析系统，分别对渗透试验前后的试样进行多尺度表征分析。通过射线衍射仪对试样进行物相定量分析，揭示渗透作用引起的矿物成分演变规律；同时应用激光粒度仪对不同层位试样进行渗透试验前后的粒径分布特征对比，建立颗粒级配变化与渗透过程的对应关系。基于矿物组成与颗粒结构的协同演化特征，从矿物溶解−迁移效应和颗粒重组−运移机制两个维度，系统阐释渗透性演变的微观作用机制。

2.3　试验结果

2.3.1　虑及时间条件不同 pH 值作用下试验结果

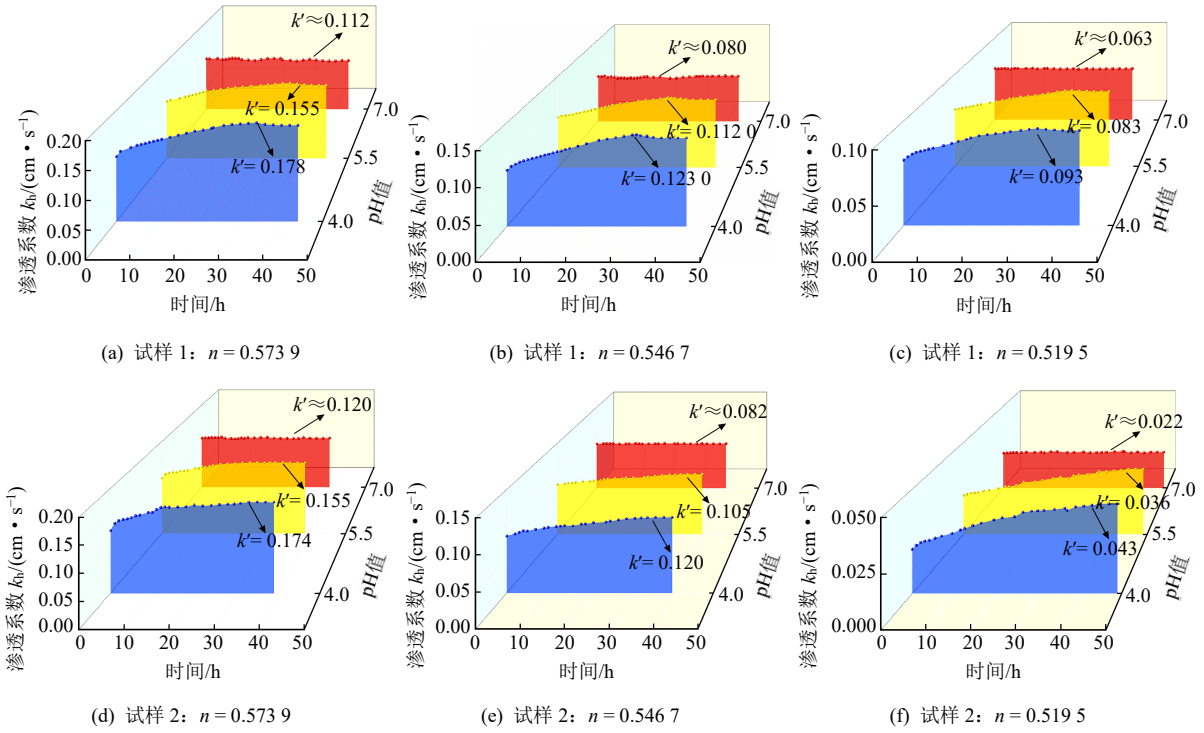
试样 1 为间断级配砂，试样 2 为连续级配砂。酸性试验组渗透系数随着试验时间序列的增加而增加。图 2 中 k_h 为渗透系数实时变化值，k'为渗透系数的最终稳定值。试验曲线在时间序列上可分为两个阶段：第 1 阶段（0～30 h）表现为渗透系数随试验进程快速增大；第 2 阶段（30 h 后）渗透系数先达到峰值后逐渐回落，最终趋于稳定值。值得注意的是，中性试验组与酸性试验组呈现不同规律——其渗透系数始终在小幅波动范围内保持稳定，未出现显著增减趋势（见图 2）。

对比 pH = 4.0 与 5.5 条件下的渗透试验结果发现，两者渗透系数演变规律具有一致性（见图 3）。酸性试验组（pH = 4.0 与 5.5）的初始渗透系数测定值差异小于 5%。高孔率（n = 0.573 9）试验组关系曲线呈凸型增长，随着孔隙率逐渐减小（n = 0.573 9→0.519 5），曲线凸型特征逐渐减弱直至消失。

低 pH 值试验组中渗透系数 k_h 随时间 h 的变化符合二次函数关系。其拟合优度 R^2 最小值超过 0.96，表明数学模型具有良好适用性。其中，参数 A 为二次函数的二次项系数，参数 B 为一次项系数，参数 C 为常数项系数，拟合公式与试验组编号相对应（见表 2）。参数间相关性大小用相关系数γ来表示，分析显示：系数 A 与 B 呈现高度相关（γ = 0.986 8），而系数 A 与 C 之间（γ= 0.762 1）以及系数 B 与 C 之间（γ= 0.756 1）具有中等程度相关性。值得注意的是，渗透系数初始值 k 与系数 C 之间表现出极强的相关性（γ= 0.995 9）。诸利一等[42]以尾矿砂为研究对象，得出渗透系数与酸溶液浸泡时间呈二次函数关系，验证了本文渗透性变化规律。朱伟等[40]以污泥固化体为研究对象，酸性条件下渗透系数随着时间的增加而增加，大约 12 d 后进入一个稳定阶段，总体上与本文研究规律一致，但进入稳定阶段历时更久。

2.3.2　中性 pH 值不同级配条件下试验结果

绘制了渗透系数初始值 k 和 d_{10}、d_{20} 的散点图并进行回归分析（见图 4），当 pH = 7.0 且 n = 0.588 1 时，k–d_{10} 关系曲线满足 k = 75.669d_{10}−1.960 8 和

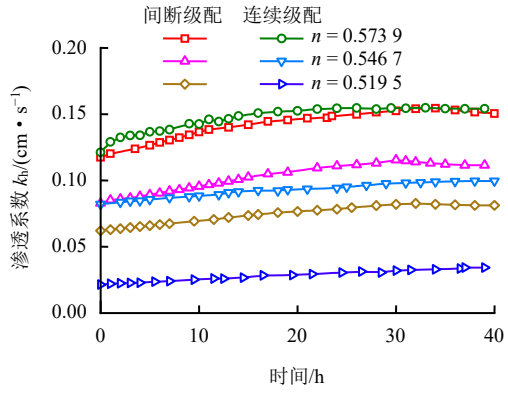


(a) 试样 1：n = 0.573 9　(b) 试样 1：n = 0.546 7　(c) 试样 1：n = 0.519 5

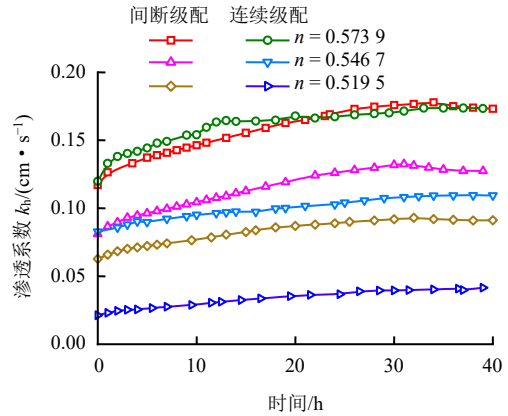
(d) 试样 2：n = 0.573 9　(e) 试样 2：n = 0.546 7　(f) 试样 2：n = 0.519 5

图 2　珊瑚砂渗透系数与时间序列关系曲线

Fig.2　Curves of coral sand hydraulic conductivity versus time series



(a) pH = 4.0



(b) pH = 5.5

图 3　不同 pH 值条件下级配珊瑚砂渗透系数演变规律

Fig.3　Variations of hydraulic conductivity of graded coral sand under different pH conditions

表 2　珊瑚砂渗透系数与时间序列拟合函数各项参数

Table 2　Various parameters of coral sand hydraulic conductivity and time series fitting function

试验组编号	二次项系数 $A/10^{-5}$	一次性系数 $B/10^{-3}$	常数项系数 C	R^2
试样 1-4.0-0.5739	−4.0	2.9	0.122 3	0.992 7
试样 1-4.0-0.5467	−4.0	2.6	0.083 4	0.987 6
试样 1-4.0-0.5195	−2.0	1.5	0.062 9	0.992 1
试样 2-4.0-0.5739	−3.0	1.8	0.128 1	0.989 8
试样 2-4.0-0.5467	−0.6	0.7	0.082 3	0.992 3
试样 2-4.0-0.5195	−0.2	0.4	0.021 4	0.994 6
试样 1-5.5-0.5739	−3.0	2.0	0.117 9	0.992 0
试样 1-5.5-0.5467	−3.0	1.9	0.080 9	0.986 6
试样 1-5.5-0.5195	−1.0	1.0	0.061 1	0.991 5
试样 2-5.5-0.5739	−4.0	2.6	0.133 5	0.962 2
试样 2-5.5-0.5467	−0.9	1.0	0.085 2	0.989 1
试样 2-5.5-0.5195	−0.8	0.8	0.022 5	0.995 3

k–d_{20} 关系曲线满足 k = 32.634d_{20}−0.869 6，渗透系数初始值 k 随着有效粒径（d_{10}、d_{20}）增大而增大，决定系数分别为 0.876 8 和 0.880 3。

当 pH = 7.0 且 n = 0.588 1 时，k–C_c 关系曲线满足负对数函数关系 k = −0.068lnC_c+0.083 7 和 k–C_u 关系曲线满足对数函数关系 k = 0.061 8lnC_u+0.064，渗透系数初始值 k 随着 C_c 的增大而减小，随着 C_u 的增大而增大，决定系数分别为 0.865 7 和 0.887 5（见图 5）。

3　结果分析与讨论

3.1　渗透系数改变量分析

本研究采用实时渗透系数 k_h 与初始渗透系数 k 的比值表征渗透系数增长幅度（见图 6）。试验结果显示：酸性渗透液组的渗透系数随时间推移持续递增；中性渗透液组的渗透系数基本保持稳定，始终在 1±5%范围内波动。值得注意的是，间断级配砂的渗透系数增长曲线呈现明显峰值特征，而连续级配砂的渗透系数曲线则未出现显著峰值。

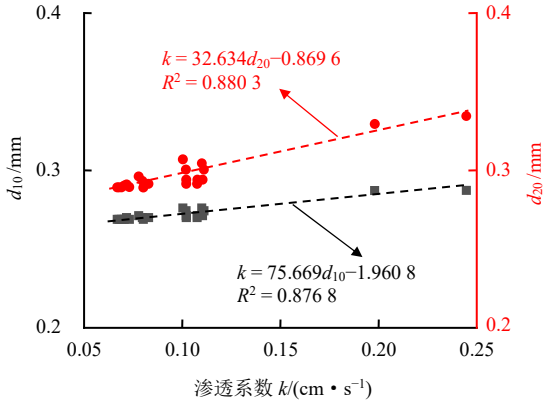


图 4　渗透系数初始值 k 和有效粒径（d_{10}、d_{20}）关系曲线

Fig.4　Relation between initial value of hydraulic conductivity k and effective grain size (d_{10}, d_{20})

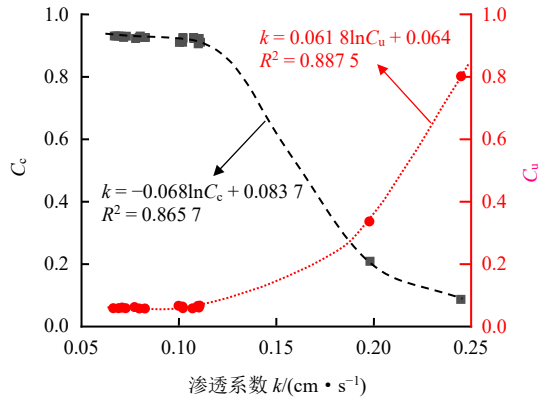
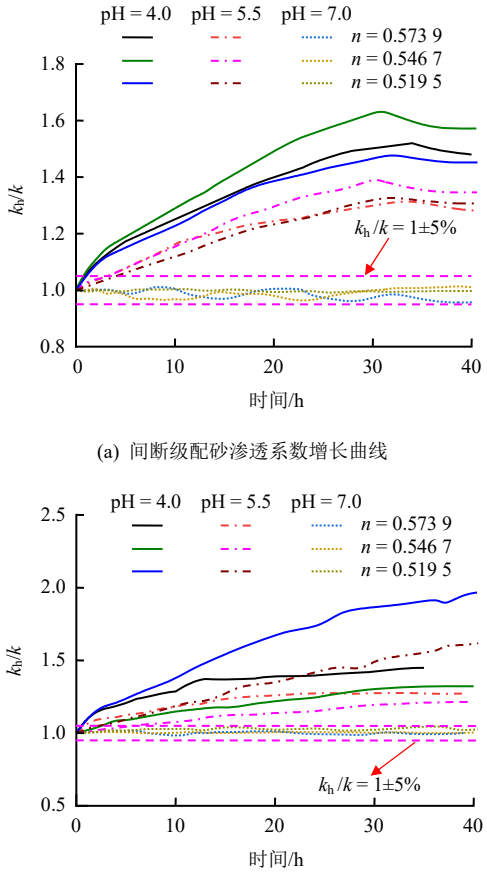


图 5　渗透系数初始值 k 和级配系数关系曲线

Fig.5　Relationships between initial value of hydraulic conductivity k and gradation factor

3 种不同孔隙比的试验材料对应 3 种密实度礁砂地层。试验结果表明（见图 7）：随着渗透液 pH 值降低，间断级配砂与连续级配砂的渗透系数增长幅度均呈递增趋势，其中低密实度（n = 0.573 9）连续级配砂增幅最为显著。具体而言，在 pH = 4.0 酸性渗透液作用下，低密实度间断级配砂渗透系数增幅达 1.520 倍；当 pH 值升至 5.5 时，增幅降至 1.315 倍；而在中性渗透液环境中，其渗透系数仅增长 0.965 倍。

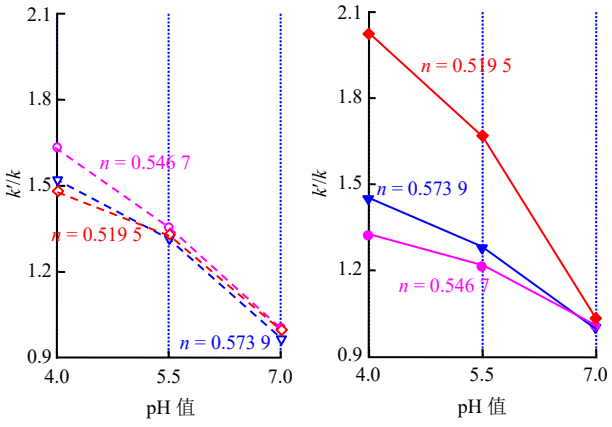


(a) 间断级配砂渗透系数增长曲线

(b) 连续级配砂渗透系数增长曲线

图 6　珊瑚砂渗透系数增长曲线

Fig.6　Growth curves of hydraulic conductivity of coral sand



(a) 试样 1：间断级配砂　　(b) 试样 2：连续级配砂

图 7　珊瑚砂 pH 值与渗透系数增长幅值关系图

Fig.7　Coral sand pH versus hydraulic conductivity growth amplitude

试验结果显示（见图 7），间断级配砂在不同 pH 值条件下的渗透特性呈现显著差异：当 pH = 4.0 时，3 种密实度样本的渗透系数平均增幅达 1.545 倍，其中高密实度组增幅最小（1.481 倍）。这表明礁砂地层埋深越大，其自重应力越高、密实度越大，

对酸性溶液的渗透溶蚀抵抗能力越强。而在 pH = 5.5 环境中，该组样本平均增幅降至 1.333 倍，此时低密实度组反而呈现最小增幅（1.315 倍），反映出浅层低密实度礁砂对中等酸性溶液的渗透作用具有更强抗性。

连续级配砂的响应规律则相反：在 pH = 4.0 条件下，高密实度组展现最大增幅（2.024 倍），显著高于平均值 1.598 倍；当 pH = 5.5 时，高密实度组仍保持最大增幅（1.669 倍），超过平均增幅 1.387 倍。这揭示出深埋级配礁砂对酸性溶液具有特殊敏感性，其溶蚀速率受颗粒组成与堆积结构的综合影响。

综合分析表明，酸性环境中礁砂地层的溶蚀动力学特征呈现显著时空分异规律，其本质源于材料微观结构特征与宏观赋存环境间的耦合作用。

图 8(a)、8(b)揭示同一间断级配砂渗透系数、pH、孔隙率 n 构成的三维曲面图，图中散点位于同一凹型平面上。在相同粒径级配条件下，渗透系数初始值 k 与稳定值 k'均与孔隙率 n 呈显著正相关。图 8(c)、8(d)对应连续级配砂的三维关系图，其数据点集形成凸型曲面结构，同样存在渗透系数随孔隙率增长的趋势。图 8(d)进一步显示：在相同孔隙率条件下，渗透系数稳定值 k'随溶液 pH 值降低而显著提升，当 pH 从 7.0 降至 4.0 时，k'增幅平均可达 62.26%。

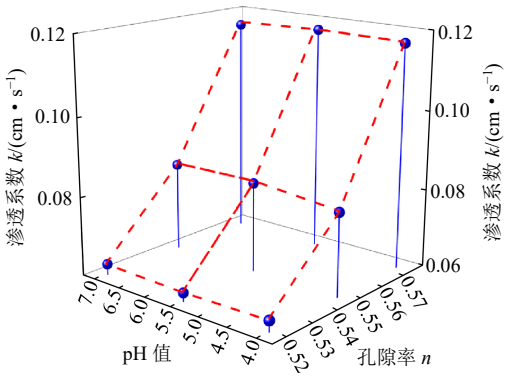
3.2 渗透规律变化的内在微观机制

渗流过程中伴随着矿物的增减，矿物含量的变化会导致内孔隙改变为开孔隙，导致连通孔隙的增加，进而对渗透性具有一定的影响[43]。砂柱试验采用分层供水设计（上层→中层→下层），试验前后使用 D8AdvanceX 射线衍射仪进行矿物组分分析（见图 9）。初始试样矿物组成及占比为：文石（72.65%）、钙镁方解石（15.76%）、方解石（9.84%）、岩盐（1.75%）。

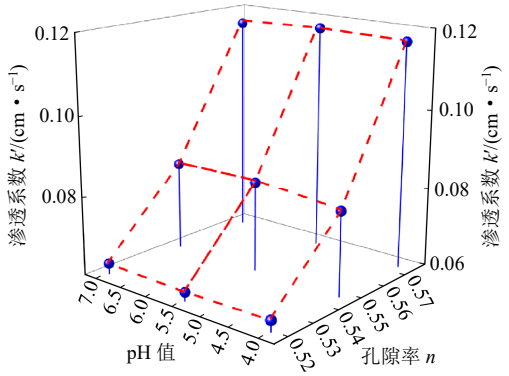
酸性环境试验组（pH = 4.0）呈现显著矿物相变：文石含量整体降低，其中上层衰减明显（较试验前降低 3%）；钙镁方解石呈梯度递减，上层减少 6%，中层和下层减少 1%；方解石呈现逆向富集，上层增幅达 10%且随深度增加衰减；岩盐完全溶失。

中性环境对照组（pH = 7.0）矿物相变特征：文石稳定性最高（含量波动<0.5%）；钙镁方解石与方解石同步增加，上层增幅为 1%，与酸性环境变化趋势相异；岩盐同样完全溶失。

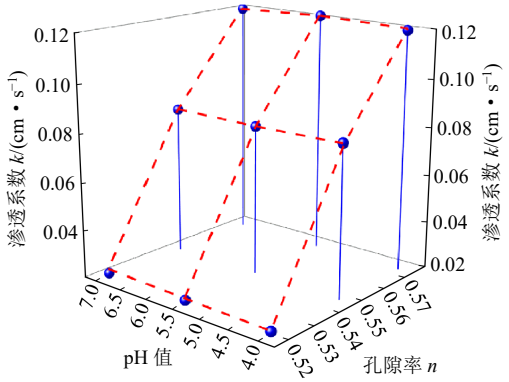
对比表明：酸性环境引发“三减一增”相变响应（文石↓、钙镁方解石↓、岩盐↓；方解石↑），而中性



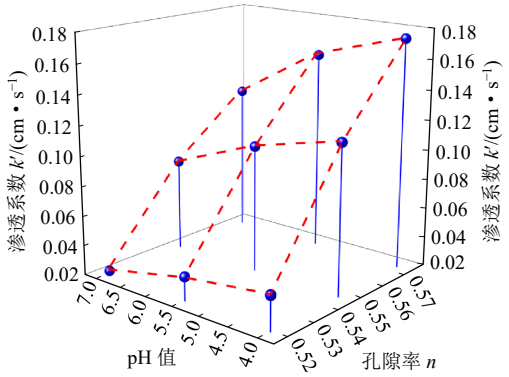
(a) 间断级配砂 k、pH 和 n 耦合关系图



(b) 间断级配砂 k'、pH 和 n 耦合关系图



(c) 连续级配砂 k、pH 和 n 耦合关系图



(d) 连续级配砂 k'、pH 和 n 耦合关系图

图 8 珊瑚砂 k、pH 和 n 耦合关系图

Fig.8 Coupling relationship of k, pH, and n

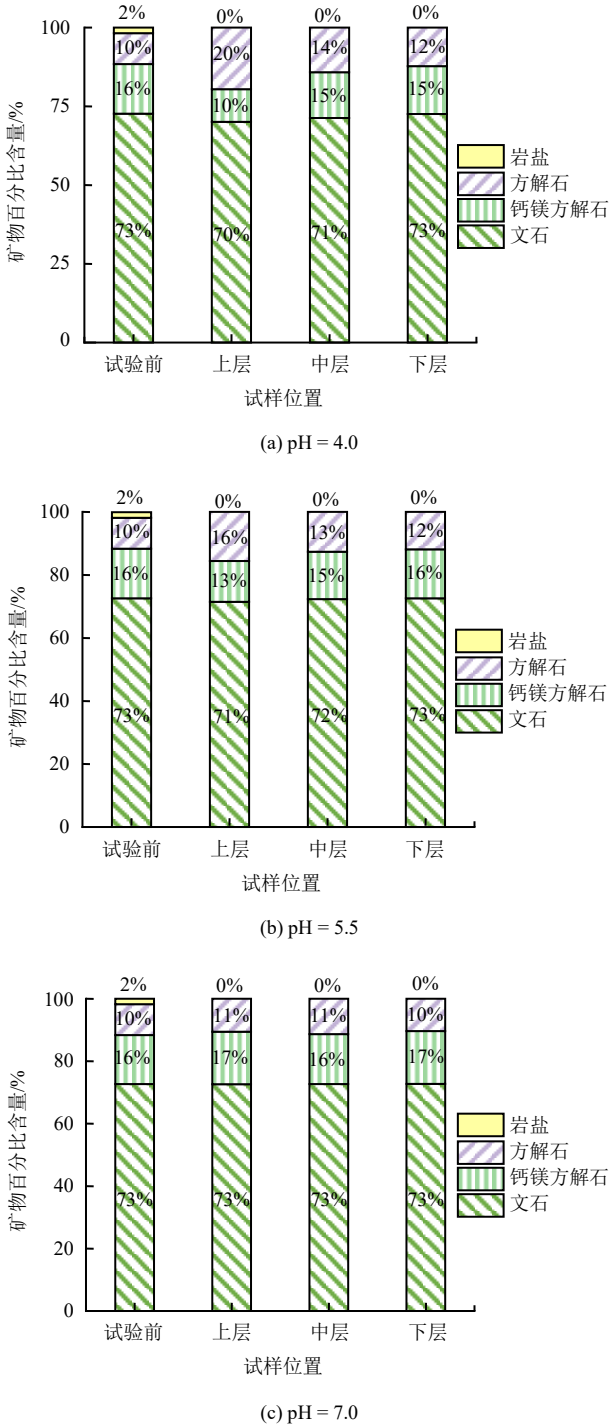


图 9　矿物含量、渗透液 pH 值及取样点位置耦合关系图

Fig.9　Coupled relationship between mineral content, percolating solution pH and sampling point location

环境主要表现为次生碳酸盐矿物的弱富集过程。

如图 10 所示，通过激光粒度仪对初始粒径 0.25～0.5 mm 的间断级配珊瑚砂开展试验，发现酸性渗透作用显著改变颗粒组成：pH = 4.0 的试验组试验后，0.25 mm 以下的颗粒含量分别为 20.3%（上层）、14.1%（中层）和 7.5%（下层）；pH = 5.5 的试验组，0.25 mm 以下的颗粒含量分别为 16.6%（上层）、10.5%（中层）和 5.1%（下层）；pH = 7.0 的对照组，0.25 mm 以下的颗粒含量分别为 8.2%（上层）、5.4%（中层）和 4.0%（下层）。

渗流路径控制空间分异：沿渗透方向（上层→中层→下层），细颗粒富集强度衰减率达 63%（pH = 4.0 组从 20.3%降至 7.5%），表明水力迁移存在显著层间阻滞效应。pH 敏感性强相关：酸性环境每降低 1 个 pH 单位，上层细颗粒含量平均增加 4.0%（从 pH = 7.0 到 pH = 4.0，增量为 12.1%）。工程响应机制：细颗粒迁移导致孔隙曲折度发生改变，直接引发渗透系数发生改变。

在渗透液持续作用下，砂柱发生多尺度协同演变：矿物相变主导孔隙重构，矿物含量改变（如文石溶蚀、方解石沉淀）直接调控孔隙结构，使开放孔隙占比增加。颗粒级配驱动骨架调整，细颗粒迁移导致粒径分布曲线左移，引发颗粒骨架接触模式由点–面接触向点–点接触转化。在宏观响应方面酸性试验组渗透系数随试验持续时间呈二次函数变化，表明细颗粒迁移存在显著时间效应。

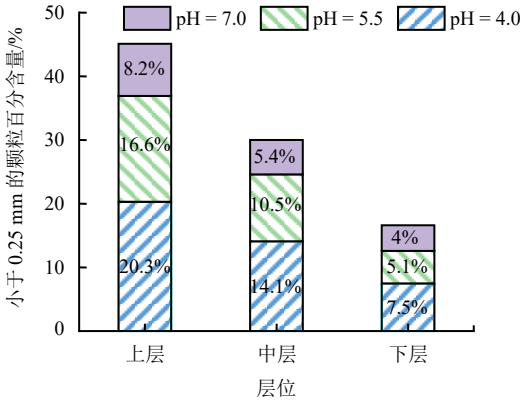


图 10　小于 0.25 mm 颗粒含量、渗透液 pH 值及取样点位置耦合关系图

Fig.10　Coupled relationship among particle content less than 0.25 mm, percolating solution pH and sampling point location

4　渗透系数预测模型构建

4.1　常见的渗透模型及评估

尽管陆源砂渗透系数预测模型已形成较完善体系（详见文献[44]），但其对珊瑚砂这类生物成因多孔介质的适用性仍需验证。本研究通过系统比选方法，对 6 种典型模型[17-18, 21-23, 28]开展珊瑚砂适应性评估。

基于 37 组珊瑚砂渗透试验数据，计算各模型预测值并与实测值对比；采用决定系数 R^2（$0 \leqslant R^2 \leqslant 1$）评估模型整体精度，相关系数$\gamma$（$-1 \leqslant \gamma \leqslant 1$）表征数据趋势匹配度，见表 3。

表 3 常见的渗透系数预测模型评价指标统计
Table 3 Statistics of evaluation indexes of common hydraulic conductivity prediction models

模型名称及来源	决定系数 R^2	实测值和预测值相关系数γ
刘杰[21]	0.74	0.86
张宜健[22]	0.58	0.76
Amer 等[17]	0.72	0.85
Shahabi 等[18]	0.67	0.83
朱崇辉[23]	0.29	0.53
钱琨等[28]	0.48	0.69

陆源砂渗透模型，如刘杰[21]、Amer[17]、Shahabi[18]模型虽呈现统计相关性（R^2≈0.7，$|\gamma|$>0.8），但预测曲线与实测值存在系统性偏差（见图 11）；钱琨模型[28]是基于珊瑚砂建立的渗透模型，通过引入孔隙比 e、不均匀系数 C_u、特征粒径 d_{10} 等参数优化了适应性，但因未考虑渗透液化学耦合效应（如 pH = 4.0 导致的颗粒溶蚀），其预测误差仍超工程允许范围。

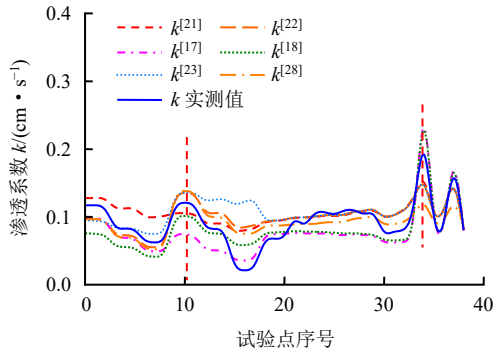


图 11 常见的渗透系数预测模型对比图
Fig.11 Comparison of hydraulic conductivity prediction models

4.2 渗透系数模型的构建

基于本文试验结果及现有的预测模型开展了回归分析，初步建立了考虑渗透液特点的预测模型，该模型决定系数 R^2 = 0.913 0，相关系数γ = 0.955 7，RMSE = 2.7×10^{-4}，可用于不同 pH 值渗透液作用下渗透系数预测，具体模型公式为

$$k = A\ln(d_{10}^{1.55} d_{20}^{2.5} C_u^{0.58} n^{3.5} e^{2.2} / \mathrm{pH}^{0.1}) - B \quad (1)$$

式中：A、B 为模型参数可根据试验确定，本文分别为 0.083 3、1.373 2。

4.3 考虑时序渗透系数最大值预测

考虑渗透液的长时间作用，渗透系数最终稳定值或最大值对礁砂地层防渗或淡水资源具有重要意义。本文根据渗透液 pH 值及渗透系数初始值，初步建立了渗透系数最终稳定值预测模型，该模型决定系数为 0.980 8，相关系数γ为 0.990 4，RMSE 为 9.65×10^{-5}，拟合效果较好，该模型可用于在已知渗透液 pH 值和渗透系数初始值预测渗透系数最值稳定值，模型公式为

$$k' = Ak + B(1 - \mathrm{pH}/7) - C \quad (2)$$

式中：A、B 和 C 为模型参数，可根据试验取值，本文分别为 1.054、0.101 2、0.004 857。

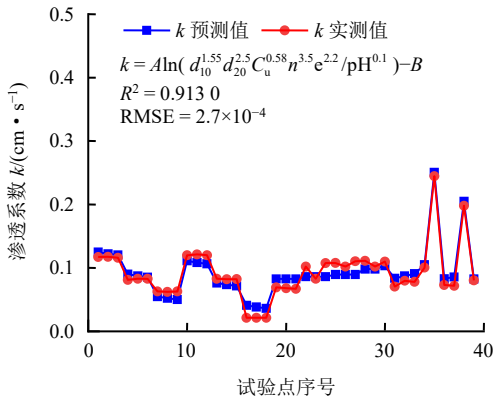


图 12 本文提出的渗透系数模型值与实测值对比图
Fig.12 Comparison of modeled and measured values of hydraulic conductivity proposed in this paper

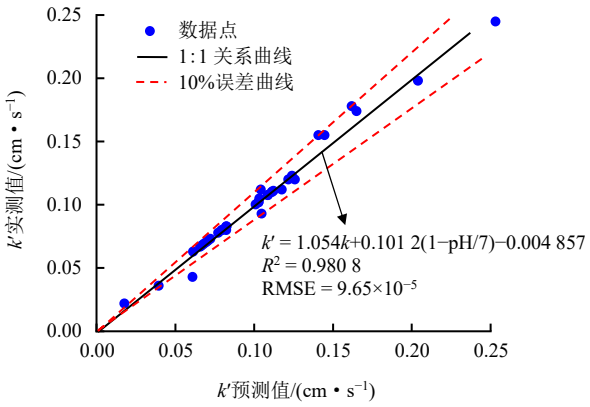


图 13 渗透系数最大值或稳定值与预测值散点关系图
Fig.13 Scatter plot of maximum or stabilized values of hydraulic conductivity versus predicted values

4.4 考虑时间序列渗透系数实时变化模型

式（1）、（2）给出了渗透系数初始值、最终稳定值计算方法。最终稳定值计算依赖于初始值计算的稳定性，且以上两式仅能估算个别时间点上的渗透系数值。渗透系数的时空变化规律对淡水透镜体形成具有重要意义，考虑时间序列建立渗透系数预测模型十分必要，珊瑚砂渗透性研究领域目前还缺乏相关的研究。

针对上述难点问题，机器学习领域为解决这一类型问题提供了可能。回归树（regression tree，简称 RT）模型、相关向量机（relevance vector machine，

简称 RVM）模型在解决工程问题上具有广泛应用。此外，基于简单模型建立起的集成模型在岩土工程领域有广泛应用。梯度提升回归树（gradient boosting regression tree，简称 GBRT）与随机森林回归（random forest regression，简称 RFR）作为集成学习领域的两大经典模型，均通过构建多棵决策树的组合来提升预测性能。二者的核心差异体现在集成策略的底层逻辑上：RFR 采用 Bagging 集成方法，通过对训练样本进行有放回抽样（Bootstrap）生成多个自助样本集，每棵决策树基于独立样本集生长，并在特征选择时引入随机子集策略。这种并行化的训练方式有效降低了模型的方差，尤其擅长处理高维数据和捕捉非线性关系。GBRT 则基于 Boosting 框架，以序列方式迭代构建树模型。每棵新树的生成目标是拟合前序模型的预测残差，通过梯度下降优化损失函数。这种机制使得 GBRT 能够精准捕捉数据中的复杂模式。

在应用场景上，RT 为简单回归树模型，该模型具备可解释性强，预处理要求低，模型参数少等优点；RFR 因其天然的并行特性和抗过拟合能力，更适合快速建模和特征重要性分析；而 GBRT 通过梯度优化机制，在高精度预测的场景中表现突出。

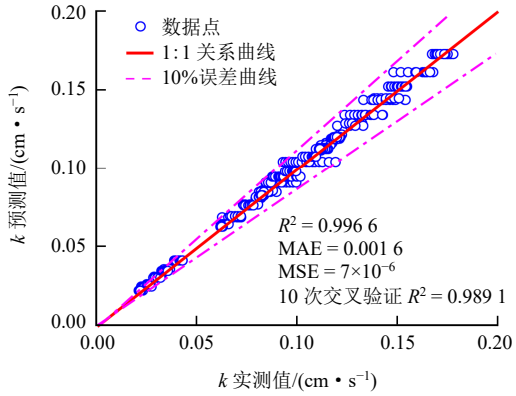
本文进行的模型输入特征向量的主要包括时间序列变量 h、孔隙率 n、渗透溶液 pH、有效粒径 d_{10}、不均匀系数 C_u、曲率系数 C_c 等 6 个变量，模型样本数据共 492 组，均为试验实测所得，考虑时间因素在内，每个时间节点内均需测量渗透系数，因此，试样 1 共计 252 组试验，试样 2 共计 240 组试验，两者合计 492 组渗透系数实测值。通过模型训练最终确定模型的最优参数。其中，max_depth 表征决策树能够生长的最大深度；n_estimators 表征评估器（或决策树）的数量；RVM 模型采用多项式核函数，degree 为多项式阶数；n_iter 为迭代次数；α为正则化参数。具体模型参数详见表 4。

表 4　机器学习模型参数

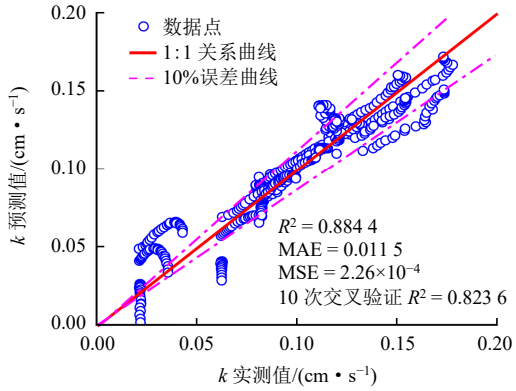
Table 4　Machine learning model parameters

序号	模型	模型参数
1	RT	max_depth = 6
2	RVM	$\alpha = 1\times10^{-5}$, degree=2, n_iter=500
3	GBRT	max_depth=3, n_estimators = 100
4	RFR	n_estimators=100, max_depth = 5

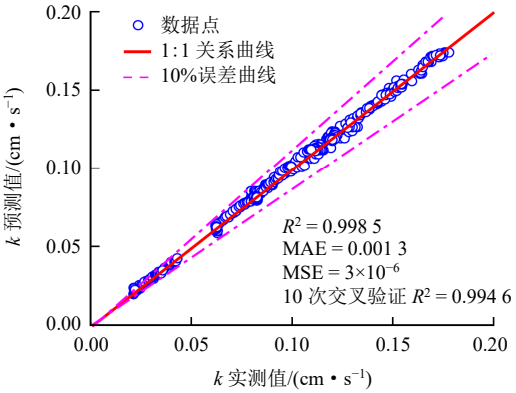
基于机器学习模型的实测值与预测值散点图（见图 14）分析结果表明，回归树模型、梯度提升回归树模型和随机森林模型均表现出优异的预测性



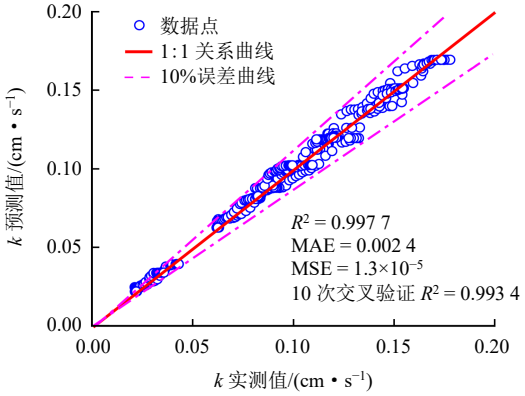
(a) 回归树模型



(b) 相关向量机模型



(c) 梯度提升回归树模型



(d) 随机森林回归模型

图 14　机器学习模型预测效果对比图

Fig.14　Comparison of predictive effects of machine learning models

能，其决定系数 R^2 均大于 0.99，且所有预测值与实测值的数据点均落在±10%的误差线范围内。这表明上述模型能够准确预测不同 pH 值条件下渗透溶液的实时渗透系数，验证了以回归树为代表的简单模型以及基于决策树的集成模型在该任务中的显著预测能力。

相比之下，相关向量机模型的预测性能相对较弱，其决定系数 R^2 为 0.88，且较多数据点超出了±10%的误差线范围。进一步分析发现，该模型在渗透系数小于 0.1 cm/s 时预测效果较差，而在渗透系数大于 0.1 cm/s 时虽具有一定的预测能力，但其整体性能与回归树类模型存在显著差距。这一结果表明，相关向量机模型在处理渗透系数预测任务时存在一定的局限性，尤其是在低渗透系数范围内的预测精度亟待提升。

4.5 模型评估

在本研究中，我们首先采用随机抽样的方法将数据集划分为训练集和测试集，其中 80%的样本用于模型训练，20%的样本用于模型验证。为了进一步评估模型的稳定性和泛化能力，避免过拟合现象，我们实施了 10 折交叉验证。具体而言，我们对 4 种预测模型进行了系统性评估，计算了其平均绝对误差 MAE、均方误差 MSE 以及 10 次交叉验证的决定系数（R^2）平均值。这些评估指标的结果详见表 5，为模型的性能比较提供了全面的量化依据。

表 5 机器学习模型评价统计表

Table 5 Evaluation statistics of machine learning model

模型	决定系数 R^2	平均绝对误差 MAE	均方误差 MSE	交叉验证 R^2
RT	0.996 6	0.001 6	7.0×10^{-6}	0.989 1
RVM	0.884 4	0.011 5	2.3×10^{-4}	0.823 6
GBR	0.998 5	0.001 3	3.0×10^{-6}	0.994 6
RFR	0.997 7	0.002 4	1.3×10^{-5}	0.993 4

5 结 论

（1）建立了考虑时间序列变量 h、孔隙率 n、渗透溶液酸碱度 pH、有效粒径 d_{10}、不均匀系数 C_u、曲率系数 C_c 等 6 个变量的机器学习模型，回归树、梯度提升回归树、随机森林等回归树类模型优于相关向量机模型，回归树类模型准确性高，误差率低，稳定性好，可实现中酸性渗透液条件下不同时间段的渗透性预测。

（2）当 pH = 7.0 且 n = 0.588 1 时，渗透系数初始值 k 随着 d_{10} 和 d_{20} 增大而增大，具有良好的线性关系；k–C_c 曲线呈负对数函数关系，k–C_u 曲线满足对数函数关系，渗透系数初始值 k 随着 C_c 的增大而减小，随着 C_u 的增大而增大。通过回归分析初步建立了渗透系数初始值和最终稳定值预测模型。

（3）低 pH 值试验组渗透系数 k_h 与时间 h 呈二次函数关系，R^2 最小值大于 0.96，拟合度效果理想；中性试验组渗透系数无明显变化，整体上在 1±5%的区间波动。珊瑚砂渗透系数增长幅度随着 pH 值的减小而增大。

（4）在酸性环境下珊瑚砂方解石含量增加，文石、钙镁方解石以及岩盐含量降低。在中性环境下，文石矿物变化小于其他矿物，钙镁方解石变化情况与酸性环境相异。渗透液首先经过的层位小颗粒含量增加显著，在层位相同条件下，pH 值越低小颗粒砂增多越显著。

参 考 文 献

[1] 段伦良, 郑东生, 王少华, 等. 波浪荷载作用下各向异性海床瞬态液化研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(4): 741-747.
DUAN Lun-liang, ZHENG Dong-sheng, WANG Shao-hua, et al. Numerical study on wave-induced oscillatory liquefaction in anisotropic seabed[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2019, 54(4): 741-747.

[2] 鞠远江, 胡明鉴, 秦坤坤, 等. 珊瑚礁岛钙质砂细颗粒渗透运移规律研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(5): 1245-1253.
JU Yuan-jiang, HU Ming-jian, QIN Kun-kun, et al. Experimental study of filtration & fine particles migration of calcareous sand in coral reef island[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2021, 42(5): 1245-1253.

[3] DING H Z, WANG X Z, WEN D S, et al. Seepage deformation characteristic of gap-graded coral sand in the South China Sea[J]. **Applied Ocean Research**, 2024, 143: 103865.

[4] 马登辉, 韩迅, 关云飞, 等. 珊瑚颗粒孔隙结构及渗流特性分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 223-230.
MA Deng-hui, HAN Xun, GUAN Yun-fei, et al. Pore structure and seepage characteristics analysis of coral sand particles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.2): 223-230.

[5] 崔翔, 朱长歧, 胡明鉴, 等. 珊瑚砂渗透性的微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2336-2341.
CUI Xiang, ZHU Chang-qi, HU Ming-jian, et al. Microscopic mechanism of permeability of coral sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(12): 2336-2341.

[6] YUAN H, ZHANG Z, HUANG X. Study on microscopic mechanisms of slurry infiltration in calcareous sand based on CT scanning[J]. **IOP Publishing Series: Earth and Environmental Science**, 2024, 1333: 012034.

[7] FAN Z H, HU C, ZHU Q L, et al. Three-dimensional

pore characteristics and permeability properties of calcareous sand with different particle sizes[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80: 2659-2670.

[8] LI Y J, CHEN J W. Experimental study on the permeability of microbial-solidified calcareous sand based on MICP[J]. **Applied Sciences**, 2022, 12(22): 11447.

[9] 方祥位, 申春妮, 楚剑, 等. 微生物沉积碳酸钙固化珊瑚砂的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2773-2779.
FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, CHU Jian, et al. An experimental study of coral sand enhanced through microbially-induced precipitation of calcium carbonate[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2773-2779.

[10] 马瑞男, 郭红仙, 程晓辉, 等. 微生物拌和加固钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 2): 217-223.
MA Rui-nan, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui, et al. Permeability experiment study of calcareous sand treated by microbially induced carbonate precipitation using mixing methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl.2): 217-223.

[11] ZHANG H X, GUO Y H, SUN T, et al. Investigation on the penetrability of cement slurries with three solid-phase particle sizes in coral sands with different gradations[J]. **Construction and Building Materials**, 2024, 424: 135941.

[12] PENG Z, MING L, LIANG X C. In situ microbially induced Ca-alginate polymeric sealant in calcareous sand and potential engineering applications[J]. **Acta Geotechnica: An International Journal for Geoengineering**, 2024, 19(6): 4217-4226.

[13] 王新志, 黄鹏, 雷学文, 等. 硫酸锌胶结珊瑚砂渗透特性试验及工程应用探讨[J]. 岩土力学, 2024, 45(7): 2094-2104.
WANG Xin-zhi, HUANG Peng, LEI Xue-wen, et al. Permeability test of zinc sulfate bonded coral sand and discussion on its engineering application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(7): 2094-2104.

[14] 张小燕, 张益, 张晋勋, 等. 含橡胶纤维钙质砂的渗透和固结特性试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2115-2122.
ZHANG Xiao-yan, ZHANG Yi, ZHANG Jin-xun, et al. Experimental study on permeability and consolidation of calcareous sand mixed with rubber fiber[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(8): 2115-2122.

[15] 陈崇希, 林敏. 地下水动力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
CHEN Chong-xi, LIN Min. Underground water dynamics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.

[16] 卡尔·太沙基, 劳尔夫·皮·帕克. 工程实用土力学[M]. 蒋彭年译. 北京: 水利电力出版社, 1960.
KARL Terzaghi, RALF B Park. Soil mechanics in Engineering practice[M]. Translated by JIANG Peng-nian. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1960.

[17] AMER A M, AWAD A A. Permeability of cohesion-less soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1974, 100(12): 1309-1316.

[18] SHAHABI A A, DAS B M, TARQUIN A J. An empirical relation for coefficient of permeability of sand[C]// Proceedings of the 4th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics. Perth, Australia: [s. n.], 1984: 54-57.

[19] HAZEN A. Discussion of “dams on sand foundation” by A.C. Koenig[J]. **Transactions American Society of Civil Engineers**, 1911, 73: 199-203.

[20] 米切尔 J K. 岩土工程土性分析原理[M]. 高国瑞, 韩选江, 等译. 南京: 南京工学院出版社, 1988.
MITCHELL J K. Geotechnical analysis principle ofgeotechnical engineering[M]. Translated by GAO Guo-rui, HAN Xuan-jiang, et al. Nanjing: Nanjing Institute of Technology Press, 1988.

[21] 刘杰. 土的渗透稳定与渗流控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
LIU Jie. Soil permeability stability and seepage control[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1992.

[22] 张宜健. 不同粒径级砂性土渗透特性试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
ZHANG Yi-jian. Experimental study on infiltration characteristics of sandy soils with different grain size classes[D]. Xi’an: Xi’an University of Architecture and Technology, 2013.

[23] 朱崇辉. 粗粒土的渗透特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
ZHU Chong-hui. Study on the coarse-grained soil permeability characteristic[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.

[24] 曹志翔, 王媛, 赵素华, 等. 粗粒土渗透系数计算模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(增刊 2): 3701-3708.
CAO Zhi-xiang, WANG Yuan, ZHAO Su-hua, et al. Calculation model and experimental study of permeability coefficient of coarse-grained soil[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2019, 38(Suppl.2): 3701-3708.

[25] 包孟碟, 朱俊高, 吴二鲁, 等. 基于级配方程的粗粒土渗透系数经验公式及其验证[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(8): 1571-1576.
BAO Meng-die, ZHU Jun-gao, WU Er-lu, et al. Empirical formula for permeability coefficient of coarsegrained soil based on gradation equation and itsverification[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(8): 1571-1576.

[26] 曲诗章, 刘晓明, 黎莉, 等. 基于双分形级配模型参数的粗粒土渗透系数计算公式[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(1): 144-152.
QU Shi-zhang, LIU Xiao-ming, LI Li, et al. Formula for

permeability coefficient of coarse-grained soil based on parameters of two-dimensional fractal gradation model[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2023, 45(1): 144-152.

[27] 胡明鉴, 蒋航海, 朱长歧, 等. 钙质砂的渗透特性及其影响因素探讨[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 2895-2900.
HU Ming-jian, JIANG Hang-hai, ZHU Chang-qi, et al. Discussion on permeability of calcareous sand and its influencing factors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(10): 2895-2900.

[28] 钱琨, 王新志, 陈剑文, 等. 南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1557-1564.
QIAN Kun, WANG Xin-zhi, CHEN Jian-wen, et al. Experimental study on permeability of calcareous sand for islands in the South China Sea[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1557-1564.

[29] WANG X Z, WANG X, CHEN J W, et al. Experimental study on permeability characteristics of calcareous soil[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2018, 77(4): 1753-1762.

[30] WANG Z, SHENG J C, WANG Q X, et al. Experimental study on vertical seepage of coarse-grained calcareous sand[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2024, 181: 108661.

[31] 王新志, 王星, 胡明鉴, 等. 吹填人工岛地基钙质粉土夹层的渗透特性研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(11): 3127-3135.
WANG Xin-zhi, WANG Xing, HU Ming-jian, et al. Study of permeability of calcareous silty layer of foundation at an artificial reclamation island[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(11): 3127-3135.

[32] HU M J, WANG Y, LI Y W, et al. Development of drag force model for predicting the flow behavior of porous media based on genetic programming[J]. **Powder Technology**, 2023, 413: 118041.

[33] LI X D, QIU Y Y, LI H J, et al. Influence of impact load on permeability of saturated calcareous sand[J]. **Marine Georesources & Geotechnology**, 2024, 42(3): 223-232.

[34] WANG S, LEI X W, MENG Q S, et al. Experimental study on the influence of load on permeability coefficient of calcareous sand[J]. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 2019, 304(5): 052066.

[35] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 491-497.
REN Yu-bin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 491-497.

[36] 郑思维, 胡明鉴, 霍玉龙. 钙质砂渗透性影响因素及预测模型[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 217-224.
ZHENG Si-wei, HU Ming-jian, HUO Yu-long. Factors affecting permeability of calcareous sands and predictive models[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 217-224.

[37] 陈信升, 丁选明, 蒋春勇, 等. 吹填珊瑚岛礁钙质软泥的渗透特性试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(4): 58-66.
CHEN Xin-sheng, DING Xuan-ming, JIANG Chun-yong, et al. Experimental study on permeability characteristics of calcareous soft mud in blown-in coral reefs[J]. **Journal of Civil and Environmental Engineering**, 2021, 43(4): 58-66.

[38] 郑思维, 胡明鉴, 霍玉龙, 等. 盐溶液环境下钙质砂渗透性影响因素分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3522-3530.
ZHENG Si-wei, HU Ming-jian, HUO Yu-long, et al. Analysis of factors affecting permeability of calcareous sand in salt solution environment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(12): 3522-3530.

[39] 肖桂元, 陈学军, 韦昌富, 等. 酸雨作用下红黏土渗透性影响机制及压实度控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3283-3290.
XIAO Gui-yuan, CHEN Xue-jun, WEI Chang-fu, et al. Mechanism of permeability and control of compaction for red clay under the influence of acid rain[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.1): 3283-3290.

[40] 朱伟, 李磊, 林城. 生物化学作用对污泥固化体渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 933-938.
ZHU Wei, LI Lei, LIN Cheng. Biochemical effects on permeability of solidified sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(6): 933-938.

[41] 赖永明, 俞缙, 刘士雨, 等. 低 pH 值下微生物诱导碳酸盐沉淀加固尾矿砂试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(6): 1583-1596.
LAI Yong-ming, YU Jin, LIU Shi-yu, et al. Experimental study on reinforcement of tailings sand by microbially induced carbonate precipitation at low pH[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(6): 1583-1596.

[42] 诸利一, 杨鹏, 吕文生, 等. 不同化学条件下孔隙比对尾矿砂渗透性影响试验[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(9): 2190-2200.
ZHU Li-yi, YANG Peng, LÜ Wen-sheng, et al. Experimental on influence of pore ratio on tailings sand permeability under different chemical conditions[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2020, 30(9): 2190-2200.

[43] 王志兵, 孙广, 刘金明, 等. 基于三维重构钙质砂的结构特征及相关性分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(10): 4090-4097.
WANG Zhi-bing, SUN Guang, LIU Jin-ming, et al. Structural characteristics and correlation analysis of calcareous sand based on 3D reconstruction[J]. **Science Technology and Engineering**, 2022, 22(10): 4090-4097.

[44] 霍玉龙. 钙质砂渗透性及其影响因素试验研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2021.
HUO Yu-long. Experimental study on permeability and influencing factors of calcareous sand[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2021.