

鄱阳湖固化淤泥耐蚀性能与微观结构试验研究

周志美¹, 贾东洋², 邹非凡¹, 王耀宗², 王 剑³, 李长明²

(1. 抚州港辉水利建筑有限公司, 江西 抚州 344100; 2. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450045;
3. 江西省水利科学院, 江西 南昌 330029)

摘要: 针对鄱阳湖湖底淤泥高含水率、细颗粒富集的复杂特性, 采用复合激发技术与微观结构试验, 探究了利用鄱阳湖湖底淤泥研制固化复合材料的可行性。通过掺入矿粉等工业废料及 Na_2SiO_4 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaOH 等激发剂, 系统评估了固化淤泥的力学性能、耐水蚀性能和抗冻融性能; 结合微观结构分析, 揭示了复合激发剂对固化淤泥性能的调控机制。结果表明, 复合激发剂的掺入促进了团絮状胶凝物质的生成, 有效填充孔隙并增强颗粒间联结, 优化了固化淤泥的微观结构, 为鄱阳湖湖底淤泥资源化利用的可行技术路径。其中, Na_2SiO_4 与 NaOH 形成 $\text{Na}^+\text{-OH}^-$ 双驱网络, 显著促进了淤泥中无定形 SiO_2 与 Al_2O_3 的解聚-缩聚反应, 生成 C-A-S-H、N-A-S-H 等碱凝胶; 水化产物的有序分布大幅提升固化淤泥 28 d 抗压强度至 11.61 MPa, 较对照组提高 69.0%, 耐水蚀与抗冻融性能同步增强。

关键词: 固化淤泥; 碱激发; 耐蚀性能; 微观结构; 资源化利用; 鄱阳湖

中图分类号: X705; P642.13⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2025)06-0098-09

Experimental study on corrosion resistance and microstructure of solidified sediment from Poyang Lake//ZHOU Zhimei¹, JIA Dongyang², ZOU Feifan¹, WANG Yaozong², WANG Jian³, LI Changming² (1. Fuzhou Ganghui Water Conservancy Construction Co., Ltd., Fuzhou 344100, China; 2. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 3. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: To address the complex characteristics of high water content and fine-grained composition in Poyang Lake sediment, composite activation technology and microstructure tests were adopted to explore the feasibility of developing solidified composite materials from Poyang Lake sediment. By incorporating industrial waste materials such as mineral powder, along with activators including Na_2SiO_4 , Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , and NaOH , the mechanical properties, water-erosion resistance, and freeze-thaw resistance of the solidified sediment were systematically evaluated. Combined with microstructure analysis, the regulatory mechanism of the composite activators on the performance of the solidified sediment was revealed. The results show that the addition of the composite activators promotes the formation of flocculent cementitious substances, effectively fills the pores, enhances the interparticle bonding, and optimizes the microstructure of the solidified sediment, providing a feasible technical path for the resource utilization of Poyang Lake sediment. In particular, the $\text{Na}^+\text{-OH}^-$ dual-drive network formed by Na_2SiO_4 and NaOH significantly promotes the depolymerization-polycondensation reaction of amorphous SiO_2 and Al_2O_3 in the sediment, generating C-A-S-H, N-A-S-H and other alkali gels. The ordered distribution of hydration products significantly increases the 28-day compressive strength of the solidified sediment to 11.61 MPa, a 69.0% increase over the control group, while simultaneously improving water-erosion resistance and freeze-thaw resistance.

Key words: solidified sludge; alkali excitation; corrosion resistance; microstructure; resource utilization; Poyang Lake

在全球极端气候频发、水资源管理挑战加剧的背景下, 湖泊作为全球关键淡水储存库及生态系统核心组成部分, 其健康状况对区域乃至全球的水资

源安全、生物多样性保护及气候调节具有深远影响^[1]。作为中国最大的淡水湖, 鄱阳湖被誉为“长江之肾”, 其丰富的水资源与独特的生态系统对江

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(24A570004); 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室开放基金项目(LYBEPR202104)

作者简介: 周志美(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事水工材料研究。E-mail: 1796871629@qq.com

通信作者: 李长明(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事水工材料研究。E-mail: lichangmingh@163.com

西省及周边地区的生态平衡维持、水资源有效调控及社会经济可持续发展至关重要^[2]。

近年来,鄱阳湖湖底淤泥因自然沉积加速与人类活动增强而迅速淤积,严重威胁湖泊生态健康,影响区域水资源管理与社会经济发展,已成为亟待解决的严重问题。监测数据显示,鄱阳湖湖底淤泥的大量淤积,压缩了湖泊的有效容积,削弱了调蓄能力^[3-4]。此外,淤泥中潜在有害物质的释放,还会导致水质恶化,进而影响整个生态系统的稳定性。旱涝灾害频发进一步加剧了淤泥沉积,影响湖泊水质、渔业及航运功能。传统的淤泥处理方式,如堆存、填埋等,虽然能在一定程度上缓解淤积问题,但会占用大量的土地资源,易引发二次污染问题,难以从根本上解决淤泥处理的难题^[5-6]。因此,探索环保高效的淤泥处理与资源化利用方法,对保护与恢复鄱阳湖生态环境具有迫切的现实意义。

随着固体废弃物资源化利用技术的快速发展,疏浚淤泥的再生利用已成为当前研究的热点。化学固化技术作为疏浚淤泥资源化利用的有效路径,其技术体系正经历从传统胶凝材料优化向复合活化机制的创新转变。早期研究聚焦于固化组分设计,王旭影等^[7]的试验结果表明,电石渣粉含量为6%时,钢渣-矿渣固化淤泥的无侧限抗压强度最优;Phummiphan等^[8]研究发现,高钙粉煤灰地聚物与粒化高炉矿渣混合物作为路面基层材料,展现出良好的力学及耐久性能;姬凤玲等^[9]则从工程应用角度验证了固化淤泥向砌块、路基材料转化的可行性;Bernal等^[10]探讨了碳酸盐在激活矿渣结合料中的化学演变,揭示了其在水化反应中的关键作用;饶春义等^[11]基于扰动状态理论和重塑土特性,构建了描述高含水率疏浚淤泥固化土压缩特性的模型;王士权等^[12]研究揭示,碱激发剂对水泥基材料水化反应的调控可显著提升海积软土的抗剪强度,其增强效应与胶凝产物多尺度结构优化密切相关;朱伟等^[13]通过固化和轻量化处理,将淤泥转化为轻质高强的工程基础材料,实现了技术经济效益并缓解了环境负荷。

在机理认知深化的基础上,复合活化技术成为突破性能瓶颈的关键。吕擎峰等^[14]通过正交试验发现,当NaOH溶液pH值超过13时可显著破坏蒙脱石层间连接,促进胶凝相由无序态(C-(A)-S-H)向有序态(N-A-S-H)转化,这一机制为黏土矿物的活化提供了理论支撑。Shen等^[15]进一步提出碱激发剂-工业固废二元协同激发策略,证实工业废渣与碱激发的耦合作用可提升淤泥固化材料28d抗压强度,揭示了复合激发的增效潜力。张兴武等^[16]提

出了碱激发-微生物矿化协同固化技术,利用巴氏芽孢杆菌诱导碳酸钙沉淀,与碱激发产生的C-S-H凝胶协同作用,有效增强了淤泥颗粒间的胶结力,为淤泥固化提供了新的技术思路。此外,叶家元等^[17]采用纳米SiO₂改性碱激发淤泥体系,发现纳米颗粒能有效填充孔隙,细化水化产物晶粒尺寸,显著提高固化淤泥的抗冻融性能。荀小伟等^[18]构建了碱激发剂在淤泥中的三维活化路径模型,阐明了Ca²⁺或Na⁺离子置换对黏土矿物解聚的梯度催化效应,其成果为优化激发剂渗透性能提供了重要依据。

应用水泥或工业废渣对淤泥进行固化处理,不仅能将固化淤泥转化为可利用的建筑材料,还减轻了工业废料和淤泥对环境的负面影响。然而,鄱阳湖湖底淤泥因较高的含水率及黏土成分,其固结特性显著区别于黏土及工业废渣,传统固化技术并不适用。具体而言,单纯增加水泥用量虽可提升早期强度,但后期水化产物分布不均易导致耐久性劣化,且传统单一激发剂难以有效解聚淤泥矿物层间水合结构及表面羟基活性位点,导致固化效果有限,这揭示了现有技术中材料适配性与环境友好性的内在矛盾。

在湖泊工程材料应用中,复合材料常面临水体长期浸泡、水位波动及季节性温度变化引起的性能退化问题^[19]。尽管鄱阳湖地区冬季绝对低温不及北方,但昼夜温差与周期性低温仍会引发表层孔隙水发生反复相变,导致材料内部产生微裂纹并逐步扩展,影响长期稳定性。因此,系统评估固化淤泥的耐水蚀与抗冻融性能,是验证其在鄱阳湖区域工程化应用可行性的关键环节,也是揭示复合激发剂调控机制需重点关注的耐久性维度。

本文采用掺入矿粉并结合Na₂SiO₄、Na₂SO₄、Na₂CO₃和NaOH等激发剂,通过调控激发剂种类及比例来改性鄱阳湖湖底淤泥,并全面评估改性固化淤泥的力学性能、耐水蚀性能、抗冻融性能及微观结构演变,深入剖析激发剂在提升湖底淤泥基复合材料性能中的关键作用及内在机制。通过资源化利用湖底淤泥,以有效应对鄱阳湖湖底淤泥淤积引发的环境生态挑战,为绿色建材研发开辟新路径。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

淤泥样品采自江西省九江市共青城市周边鄱阳湖环湖区域,该淤泥天然含水率高达49.20%,经烘干及破碎处理后呈棕色粉末状,如图1所示。烘干处理后淤泥含水率降至2.30%,密度为1.56g/cm³。

淤泥矿物构成如图2所示,主要矿物相为石英(SiO₂)与钠长石(NaAlSi₃O₈)。从图3可以看出,淤



图1 烘干淤泥原样

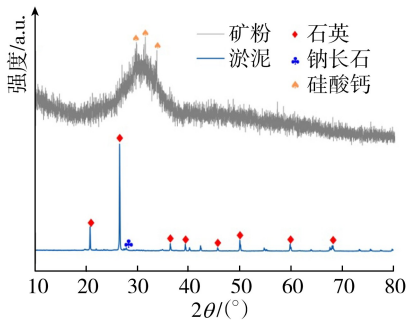


图2 淤泥及矿粉 XRD 图谱

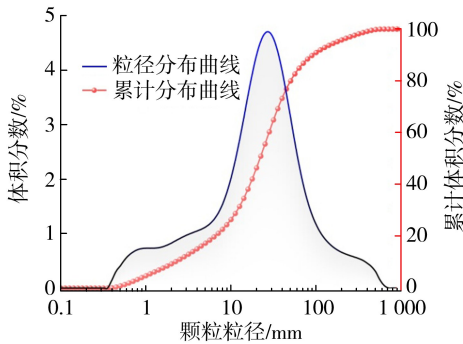


图3 淤泥粒度分布及累计分布曲线

泥粒径较小,集中分布于 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 区间,中值粒径为 $21.91 \mu\text{m}$ 。该淤泥初始含水量高且颗粒细小,矿物组成以石英为主。

试验用矿粉为 S95 高炉矿渣粉,主要成分为 CaSiO_4 ,密度 2.94 g/cm^3 ,比表面积 $4225.61 \text{ cm}^2/\text{g}$,含水量 0.15% ;生石灰来自天津市恒兴试剂有限公司; Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaOH 为天津市科密欧试剂有限公司生产的 99% 分析纯试剂。 Na_2SiO_4 溶液(模数为 2.0)纯度为 99.90% ,密度为 1.33 g/cm^3 , Na_2O 质量分数为 8.12% , SiO_2 质量分数为 27.10% 。试验过程中,将 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaOH 试剂分别配制成 1 mol/L 的标准溶液,并与 Na_2SiO_4 溶液充分混合,制备复合激发剂。

1.2 试验方法

1.2.1 试件制作与成型

试件固体混合料激发剂质量比例恒定为 $88:12$,其中固体混合料由 70% (质量分数,下同)淤泥、 15% 矿粉和 3% 生石灰组成,激发剂种类与用

量如表 1 所示。经前期试验验证, 6% 用水量可实现激发剂在淤泥体系中的充分溶解与均匀分散,促进结构致密化。试件采用钢模压力成型方法制作:将处理后的淤泥、矿粉和生石灰依次倒入净浆搅拌机,干拌 5 min 后,掺入复合激发剂,高速搅拌 90 s 后再低速搅拌 60 s ,随后压力成型。模具构型如图 4 所示,为内径 50 mm 、外径 60 mm 、高度 130 mm 的空心圆柱状设计。配套压力杆为直径 49.8 mm 、高 150 mm 的实心圆柱体,垫片为直径相同、高度 10 mm 的圆柱体。

表 1 激发剂种类与用量

试件	用量/%			
	Na_2SiO_4	Na_2SO_4	Na_2CO_3	NaOH
对照组	6			
A 组	6	6		
B 组	6		6	
C 组	6			6



图4 模具构型(单位:mm)

为确保试件质地均匀,成型工序分为灌装与压制两个阶段。通过设定压力杆的高度,控制试件至预设高度。施加压力至 50 mm 处,并维持此压力状态 3 min 以巩固结构。试件脱模后,于 80°C 鼓风干燥机中覆膜养护 24 h ,再移至标准养护室(温度 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度大于或等于 98%)进行标准养护。

1.2.2 抗压强度测试

抗压强度采用 UTM5105 型万能试验机测试,测定固化淤泥特定龄期时的抗压强度。鉴于地聚物改性材料缺乏明确的力学强度测定标准,本文参照 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检测方法(ISO 法)》对淤泥固化试件进行测试。测试过程中确保试件纵轴与加压板的中心一致,试验机以 2500 N/s 的速率垂直加载至试件破坏。抗压强度计算公式为

$$R_c = F_c / A \quad (1)$$

式中: R_c 为试件抗压强度(精确至 0.01 MPa); F_c 为试件破坏时的最大荷载(精确至 0.01 N); A 为试件受压面积(精确至 0.01 mm^2)。

为提升试验数据的可信度与精确度,采用 3 次重复试验的算术平均值作为最终试验结果,并剔除与平均值偏差超过 15% 的数据。

1.2.3 吸水率与软化系数测试

固化淤泥的吸水率与软化系数是评估其耐水性能和水稳定性能的重要指标。吸水率试验采用自由浸水法,参考 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》进行。试件吸水率测试流程如下:取出养护 28 d 的圆柱体试件,确保试件表面平整、无裂缝;将试件置于温度为 105℃±5℃ 的烘箱中干燥至恒重,记录此时的干质量(精确至 0.01 g);将干燥后的试件完全浸入室温下的蒸馏水中,浸泡 7 d 后取出,用湿布轻轻拭去表面水分并立即称重,记录此时的湿质量(精确至 0.01 g);湿、干质量的差值与干质量的比值即为试件的吸水率。

此外,将试件烘干至恒重测定其干燥状态下的抗压强度(R_d),随后将同组试件完全浸入蒸馏水 7 d 后测定试件饱和状态抗压强度(R_w),将 R_d/R_w 定义为软化系数。

1.2.4 抗冻融性能测试

为评估固化淤泥的耐久性和可靠性,采用快冻法进行冻融循环测试。参考 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,在试件湿润状态下进行快速冻融试验,在-18℃ 的冻融箱中冷冻 2 h,随后在 25℃ 环境下解冻 2 h,构成一个 4 h 的冻融循环过程。分别测量试件 3、6、9 次冻融循环后的质量,评估其损伤程度,并在冻融循环试验结束后测量其抗压强度。试件质量损失率按下式计算:

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中: Δm 为质量损失率(精确至 0.01%); m_0 、 m_n 分别为冻融循环前和冻融循环 n 次后试件的质量(精确至 0.01 g)。

1.2.5 水化产物与微观结构

对淤泥试样进行破碎取样后,采用无水乙醇浸泡以终止其水化反应。为确保终止完全,浸泡 3 h 后更换无水乙醇并继续浸泡 24 h,然后将试样置于 40℃±1℃ 的鼓风干燥机中干燥 12 h,经玛瑙研钵研磨并过 60 μm 筛网。采用 Bruker D8 Advance 型衍射仪测定试样的矿物组成,具体参数设置如下:铜靶,X 射线波长为 2.41 Å,工作电压为 40 kV,电流为 40 mA,扫描范围(2θ)为 10°~90°,扫描速度为 2°/min,步长为 0.02°。

选取具有代表性的淤泥碎块进行扫描电镜(SEM)测试,经真空干燥与喷金预处理后,采用 ZEISS Gemini 300 型扫描电子显微镜观测其微观结构与水化产物;同时,结合能量色散光谱仪对选定区域进行元素组成分析。测试参数如下:加速电压为

0.02~30 kV,探针电流为 3 pA~20 nA,放大倍数为 10~10⁶ 倍,光谱工作距离为 8.5 mm。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

如图 5 所示,固化淤泥试件的抗压强度随养护龄期延长持续增长,其中对照组 7 d 的抗压强度已达到 28 d 强度的 70%。此现象归因于高温预养护激活了淤泥体系中活性硅铝矿物与激发剂的火山灰反应,加速生成水化产物,形成致密的微观结构。相较而言,常温养护后期因水化反应动力学衰减,导致胶结产物生成速率降低,强度增长缓慢。

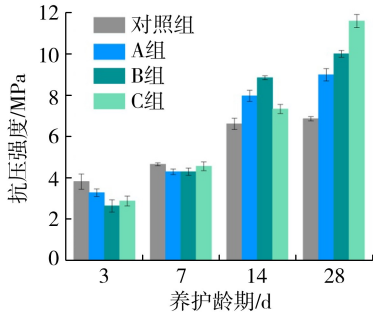


图 5 激发剂种类对固化淤泥抗压强度的影响

在试验探索阶段,纯淤泥材料因缺乏胶结能力而无法制备成型。生石灰、矿粉及激发剂的掺入,促使淤泥发生离子交换、结晶反应及碳酸化反应^[20]。其中,淤泥固化反应中石灰消解产生大量的 Ca²⁺,能够置换淤泥中的低价阳离子,改变水膜厚度,增强离子键合作用,进而提升淤泥抗压强度^[19-21]。同时,Ca(OH)₂ 与 CO₂ 反应生成稳定的 CaCO₃,其与淤泥颗粒的胶结作用及对孔隙填充作用进一步加固试件,增强其抗压强度。此外,矿粉的水化胶凝作用也显著提升了试件抗压强度^[22]。

相较于对照组,A、B 两组 3 d 和 7 d 龄期的抗压强度略低,但 14 d 和 28 d 龄期的抗压强度均显著高于对照组。B、C 两组 28 d 龄期的抗压强度分别达到 10.02 MPa 和 11.61 MPa,较对照组分别提升了 45.8% 和 69.0%。综合分析表明,复合激发剂的掺入显著提升了固化淤泥体系的 pH 值,促使更多的硅铝酸盐溶解并参与聚合反应,从而加速了硬化过程^[23]。此外,激发剂还可能通过影响固化淤泥的微观结构、调控 Si—O—Si、Al—O—Si 等化学键的解聚与重构过程,进一步加速淤泥原料中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 的溶解,促使更多凝胶物质的生成与积聚^[24]。

具体而言,Na₂SiO₄ 不仅提供了 SiO₄²⁻ 参与胶凝产物的形成,还能在淤泥颗粒表面形成一层硅质膜,增强颗粒间的胶结作用^[25]。NaOH 作为强碱,通过提供大量的 OH⁻ 来调节体系 pH 值,激活矿物表面

羟基化反应,为水化进程提供活性离子源。 Na_2CO_3 除了调节 pH 值外,其解聚出的 CO_3^{2-} 能与 Ca^{2+} 反应,在一定程度上促进胶凝产物的生成,同时 Na_2CO_3 的加入还能改善体系的离子平衡,加速水化反应进程^[26]。 Na_2SO_4 则通过解聚出的 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 结合,可调节水化产物生成速率,使水化产物更加均匀地分布在淤泥颗粒之间^[27]。凝胶物质的形成增强了试件内部的胶结效应,使试件结构更为致密,从而实现了抗压强度的大幅提升。其中, Na_2CO_3 与 NaOH 对抗压强度的提升效果较为明显,相比之下, Na_2SO_4 虽能提升抗压强度,但效果较差。

固化淤泥抗压强度随养护龄期的变化规律与水泥等无机非金属材料相似。因此,参考水泥强度的评估方法,以 28 d 无侧限抗压强度 q_{28} 为基准,将任意养护龄期 T 的抗压强度 q_T 进行归一化处理,得到比值 q_T/q_{28} ,以此评估固化淤泥抗压强度的发展速率。该指标可量化固化淤泥抗压强度随时间的增长情况,并有效比较不同配比固化淤泥抗压强度的发展规律。由图 6 可知,各组试件的 q_T/q_{28} 随龄期延长而增大,但增速递减。在养护初期(1~7 d),固化淤泥抗压强度发展迅速, q_T/q_{28} 显著增大;而 7~28 d 间, q_T/q_{28} 增速减缓,并趋于平稳。这表明固化淤泥的抗压强度发展具有显著的时间依赖性,初期快速增长,后期趋于稳定。

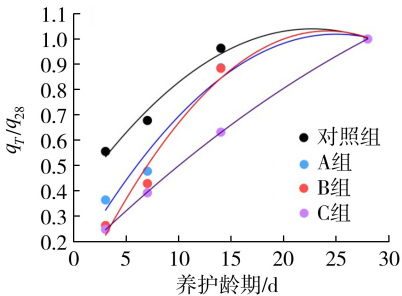


图 6 固化淤泥抗压强度与养护龄期的相关性分析

为深入探究固化淤泥抗压强度与养护龄期的关系,对 q_T/q_{28} 与养护龄期进行了相关性分析,并线性拟合得到对照组、A 组、B 组、C 组预测方程分别如式(3)~(6)所示,各预测方程的相关性系数 R^2 均超 0.90,表明固化淤泥的抗压强度与养护龄期存在显著的统计相关性,这些方程直观展现了固化淤泥抗压强度与养护龄期的定量关系,为预测其抗压强度发展趋势提供了有效工具。

$$q_T/q_{28} = 36.854 + 5.918T - 0.130T^2 \quad (R^2 = 0.9037) \quad (3)$$

$$q_T/q_{28} = 12.134 + 7.182T - 0.143T^2 \quad (R^2 = 0.9037) \quad (4)$$

$$q_T/q_{28} = -1.936 + 8.689T - 0.180T^2 \quad (R^2 = 0.9437) \quad (5)$$

$$q_T/q_{28} = 12.742 + 4.071T - 0.034T^2 \quad (R^2 = 0.9999) \quad (6)$$

2.2 耐水蚀性能

表 2 为对照组与分别添加 Na_2SO_4 (A 组)、 Na_2CO_3 (B 组)、 NaOH (C 组)的淤泥试件水蚀 7 d 后的性能,复合激发剂的掺入显著提升了固化淤泥的耐水蚀性能。

表 2 淤泥试件吸水率与软化系数

试件	吸水率/%	软化系数
对照组	15.24	0.28
A 组	9.02	0.65
B 组	8.16	0.76
C 组	10.21	0.58

对照组试件呈现显著的水敏感特性,其吸水率高达 15.24%,软化系数仅为 0.28,耐水蚀性能差且强度保持能力极低。相比之下,A 组试件吸水率降至 9.02%,软化系数提升至 0.65,初步验证了 Na_2SO_4 对固化淤泥耐水蚀性能的改善作用。B 组试件展现出最佳的耐水蚀性能,其吸水率仅 8.16%,软化系数达 0.76,较对照组提升了 171.43%,证明了 Na_2CO_3 作为激发剂的性能调控优势。C 组试件软化系数虽有一定提升,但提升幅度较 B 组(107.14%)低 37.50%。图 7 为各组试件在水蚀前后的形态对比,对照组淤泥试件因较低的抗压强度和松散的微观结构,水蚀后出现了明显的结构劣化,宏观表现为试件膨胀变形、层状剥落与边缘溃散。而 A、B、C 3 组试件保持了良好的结构完整性和性能稳定性,验证了复合激发剂的掺入对淤泥水稳性提升的显著作用。

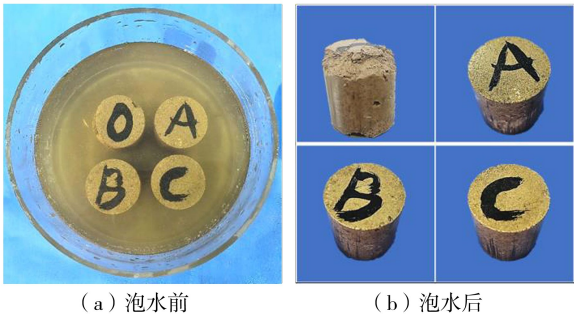


图 7 固化淤泥水蚀前后形态对比

2.3 抗冻融性能

冻融循环是道路基层、河岸护坡等工程材料常见的自然环境考验,显著影响其性能^[28]。在低温环境下,试件内部孔隙水相变产生的结晶压力导致基体内部微裂缝的产生与扩展,伴随冻融次数的增加,损伤呈现非线性累积特征,宏观力学性能衰减^[29]。

依据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,本文选取质量损失率和抗压强度作为抗冻融性能的双控指标。

由表 3 可见,各组试件冻融循环后的性能表现存在显著差异。对照组试件经 3 次冻融循环后,质量损失率达 1.84%,同时抗压强度大幅下降至 4.01 MPa,仅为原始抗压强度的 58.10%。随着冻融循环次数的增加,质量损失率持续上升,至 9 次冻融循环后升至 15.21%。图 8 直观呈现了试件的劣化特征,其体积形变、表层剥蚀及裂缝发育程度较水蚀尤为突出,形成贯穿性破坏形态,表明固化淤泥在低温环境下物理损伤显著,内部结构遭到不可逆破坏,导致抗压强度下降,揭示了单一激发剂对试件抗冻融性能改良作用的局限性。

表 3 淤泥试件冻融循环后质量损失率与抗压强度

组别	质量损失率/%			抗压强度/MPa		
	循环 3 次	循环 6 次	循环 9 次	循环 3 次	循环 6 次	循环 9 次
对照组	1.84	6.11	15.21	4.01	1.33	
A 组	2.35	3.01	4.39	7.69	6.00	3.02
B 组	1.39	2.14	2.93	9.13	8.66	7.21
C 组	0.47	0.86	1.24	11.01	10.45	9.22



图 8 固化淤泥 9 次冻融循环后形态对比

相比之下,A 组试件经 3 次冻融循环后,质量损失率为 2.35%,略高于对照组,可能与硫酸盐的结晶有关。但其强度保持率为 85.44%,仍保持较高水平。经 9 次冻融循环后,试件表面出现明显裂缝,其抗压强度降至 3.02 MPa,仍显著高于对照组。可见 Na_2SO_4 对固化淤泥抗冻融性能的提升作用有限,可能与 Na_2SO_4 结晶在试件内部形成应力集中点有关,加剧了微裂缝的产生和扩展^[30]。

Na_2CO_3 通过优化固化淤泥的孔隙结构,有效抑制了水分渗透及冰晶生长对试件的破坏效应。由表 3 可知,B 组试件经历 3 次冻融循环后,质量损失率仅 1.39%,强度保持在 9.13 MPa。随冻融循环次数的增加,质量损失率与强度损失虽有增长,但幅度相对较小。至 9 次冻融循环后,试件仍保持结构完整,质量损失率为 2.93%,抗压强度仍高达 7.21 MPa,验证了 Na_2CO_3 能有效提升试件的抗冻融性能。C 组试件在经历 9 次冻融循环后的质量损失率仅 1.24%,抗压强度损失率 20.59%,均显著优于其他试验组。 NaOH 的强碱性有效促进了淤泥固

化反应的进程,形成了更加致密稳定的结构,从而降低孔隙率,减少内部水分积聚,削弱了冻融循环对试件结构的破坏作用^[31]。

2.4 水化产物分析

通过 XRD 分析对比了各组试件的物相构成及其变化特征,结果如图 9 所示,各组试件的主要矿物相均为石英(SiO_2)和钠长石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$),激发剂的引入并未引发新物相的生成。但相较于原状淤泥,石英在 $2\theta=26.50^\circ$ 处的衍射峰强度明显降低,并伴随衍射峰宽度增大及衍射峰右移现象。在碱激发环境中,激发剂通过调节体系的 pH 值与离子浓度,打破了淤泥原有矿物结构的稳定性。 Na_2SiO_4 溶于水后,释放出大量的 SiO_4^{2-} , Na_2CO_3 和 NaOH 的加入则显著提高了溶液的 pH 值,使体系呈现强碱性。在此条件下,淤泥中的铝硅酸盐矿物发生解聚反应, Si-O 键和 Al-O 键断裂,释放出 Si^{4+} 、 Al^{3+} 等离子进入溶液,并与激发剂提供的 Ca^{2+} 、 Na^{+} 等阳离子结合,发生一系列复杂的水化反应^[32]。同时,化学反应引发的晶面间距调整,是导致衍射峰右移的主要原因^[22]。晶体结构参数的变化揭示了激发剂对石英晶体结构的影响,表明部分淤泥在激发作用下参与了水化反应进程。但在 XRD 图谱中并未观测到新衍射峰的出现,可能与水化反应产物的生成量或结晶形态相关,其具体物相组成需结合 SEM-EDS 分析进一步探究。

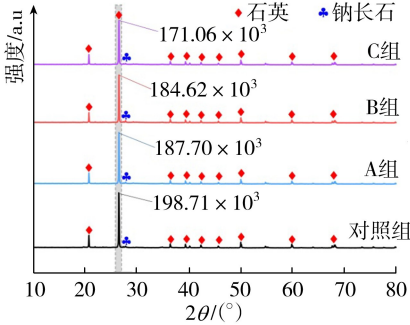


图 9 固化淤泥 XRD 图谱

2.5 微观结构分析

采用 SEM-EDS 分析了不同激发剂对固化淤泥微观形貌及水化产物的影响机制。如图 10 所示,对照组的微观结构较为松散,淤泥颗粒无序分布,颗粒间缺乏有效胶结物质,导致内部存在大量的孔隙与微裂缝。松散的微观结构削弱了固化淤泥的力学性能和耐久性能。相比之下,复合激发剂的掺入显著优化了固化淤泥的微观结构。图 10~13 显示 A、B、C 3 组试件的微观结构均较致密,颗粒间孔隙得到有效填充。此外,淤泥颗粒表面包覆着团簇状和絮状胶凝产物,这些水化产物不仅填充了颗粒间隙,还

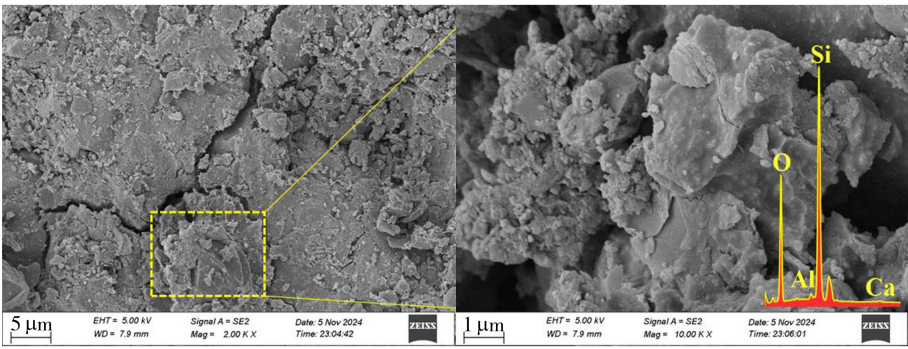


图 10 对照组试件 SEM 图

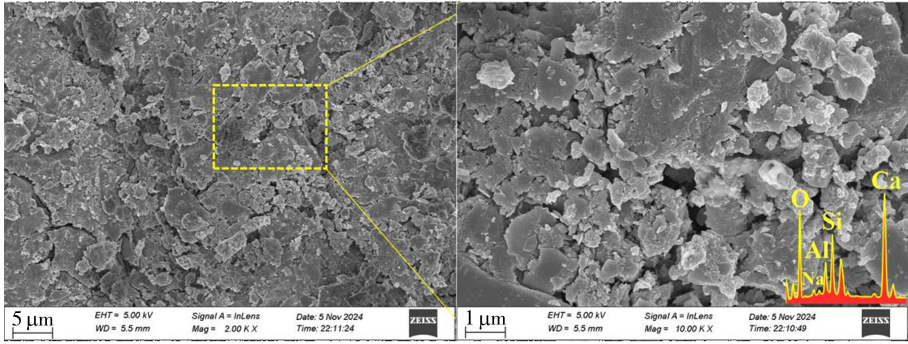


图 11 A 组试件 SEM 图

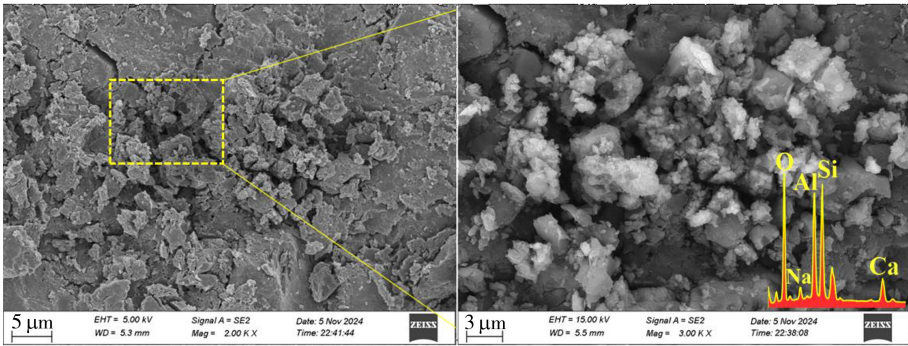


图 12 B 组试件 SEM 图

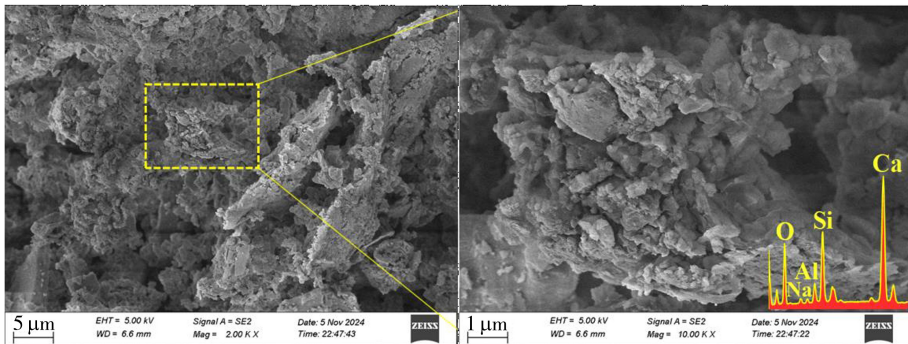


图 13 C 组试件 SEM 图

通过表面吸附作用强化了颗粒间的联结强度^[33-34]。 Na_2SiO_4 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaOH 的掺入,对固化淤泥微观结构的优化与水化产物的生成起到了关键作用。

EDS 能谱分析揭示了胶凝产物的化学组成特征;3 组试件中的水化产物均富含 Ca 、 Si 、 Al 、 O 等元

素,结合物相特征可推测其主要为水化硅酸钙凝胶(C-S-H)与碱凝胶(C-A-S-H 、 N-A-S-H 等)^[26];A 组和 C 组试件中 Ca 元素质量占比分别为 29.02% 和 35.25%,表明其水化产物以 C-S-H 凝胶为主,同时伴有少量 C-A-S-H 凝胶,而 B 组试件中 Al 元素含量显著高于 Ca 元素,说明 C-A-S-H 凝胶为其主要产物。

水化产物的有序生成与三维网络状分布,不仅显著提升了试件的抗压强度,还通过致密化微观结构,有效增强了试件的耐水蚀和抗冻融性能。激发作用诱导的微观结构优化与水化产物生成,为固化淤泥力学性能与耐久性能的同步提升提供了有力的支撑与依据。

3 结 论

a. 通过掺入矿粉及多种激发剂 (Na_2SiO_4 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaOH) 可制备出工程性能优异的固化淤泥复合材料,复合激发剂的使用克服了单一激发剂的局限性,优化了淤泥的微观结构,促进了水化产物的有序形成。

b. 与对照组相比,掺入复合激发剂显著提高了固化淤泥的抗压强度,其中 Na_2CO_3 和 NaOH 的增强效果最优,分别提升了 45.8% 与 69.0%。试件强度随养护龄期的延长呈现初期迅速提升后期趋于稳定的特征。

c. 复合激发剂的掺入提高了固化淤泥的耐水蚀性能和抗冻融性能,其中 Na_2CO_3 在耐水蚀方面表现最优, NaOH 则在抗冻融方面效果突出。这些改善归因于微观结构的均匀化与致密化。

d. 结合不同激发剂资源化利用湖底淤泥,可为解决鄱阳湖湖底淤泥淤积问题提供创新方案。通过调控固化淤泥的性能,能够满足不同环境下的工程需求,具有显著的环境与经济价值。

参考文献:

[1] 张运林,秦伯强,朱广伟,等. 论湖泊重要性及我国湖泊面临的主要生态环境问题[J]. 科学通报,2022,67(30): 3503-3519. (ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al. Importance and main ecological and environmental problems of lakes in China [J]. Chinese Science Bulletin,2022,67(30): 3503-3519. (in Chinese))

[2] 肖长江,石雨鑫,刘涛,等. 基于生态系统服务流的环鄱阳湖城市群的横向生态补偿研究[J]. 生态学报,2025,45(24): 1-15. (XIAO Changjiang, SHI Yuxin, LIU Tao, et al. Ecological compensation in the Poyang Lake urban agglomeration based on ecosystem services flow [J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(24): 1-15. (in Chinese))

[3] 蒋涛,张旭东,江聪,等. 近 40 年鄱阳湖面积变化及其归因分析[J]. 安全与环境工程,2024,31(5): 219-227. (JIANG Tao, ZHANG Xudong, JIANG Cong, et al. Area change and attribution analysis of Poyang Lake in the past 40 years [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024,31(5): 219-227. (in Chinese))

[4] 赵辉,陈振,冯超帆,等. 基于 Landsat 影像的鄱阳湖面积监测及其与水位关系研究[J]. 自然资源遥感,2024,36(2): 198-206. (ZHAO Hui, CHEN Zhen, FENG

Chaofan, et al. Monitoring of the area of Poyang Lake based on Landsat images and its relationship with the water level [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024,36(2): 198-206. (in Chinese))

[5] 汤德意,沈杰. 生态清淤及淤泥处置技术在水库整治中的应用[J]. 水利水电科技进展,2018,38(3): 70-75. (TANG Deyi, SHEN Jie. Application of ecological dredging and silt disposal technique in reservoir dredging engineering [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2018,38(3): 70-75. (in Chinese))

[6] 祝珺,李长明,狄龙飞,等. 黄河淤泥固化改性材料力学性能与微观结构试验研究[J]. 水利水电科技进展,2023,43(1): 99-104. (ZHU Jun, LI Changming, DI Longfei, et al. Experimental study on mechanical properties and microstructures of modified Yellow River sludge materials [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(1): 99-104. (in Chinese))

[7] 王旭影,乔京生,赵建业,等. 电石渣激发钢渣-矿渣固化淤泥质土的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2022,41(2): 733-739. (WANG Xuying, QIAO Jingsheng, ZHAO Jianye, et al. Solidification of muddy soil with steel slag and ground granulated blast-furnace slag activated by calcium carbide slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2022,41(2): 733-739. (in Chinese))

[8] PHUMMIPHAN I, HORPIBULSUK S, RACHAN R, et al. High calcium fly ash geopolymer stabilized lateritic soil and granulated blast furnace slag blends as a pavement base material [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 341: 257-267.

[9] 姬凤玲,朱伟,张春雷. 疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学,2004,25(12): 1999-2002. (JI Fengling, ZHU Wei, ZHANG Chunlei. Study of treatment technology of dredging sludge with geosyntheticizing method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(12): 1999-2002. (in Chinese))

[10] BERNAL S A, PROVIS J L, MYERS R J, et al. Role of carbonates in the chemical evolution of sodium carbonate-activated slag binders [J]. Materials and Structures, 2015, 48(3): 517-529.

[11] 饶春义,朱剑锋,潘斌杰,等. 基于扰动状态概念理论的固化淤泥一维压缩模型[J]. 岩土工程学报,2019,41(增刊1): 173-176. (RAO Chunyi, ZHU Jianfeng, PAN Binjie, et al. One-dimensional compression model for solidified silt based on theory of disturbed state concept [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(Sup1): 173-176. (in Chinese))

[12] 王士权,王瑞,陈钰,等. 碱激发粉煤灰固化淤泥的强度特性及微观机制研究[J]. 河南工程学院学报(自然科学版),2022,34(3): 34-37. (WANG Shiquan, WANG Rui, CHEN Yu, et al. Study on the strength characteristics and microscopic mechanism of sludge solidified by alkali-activated coal ash [J]. Journal of Henan University of

- Engineering(Natural Science Edition), 2022, 34(3): 34-37. (in Chinese))
- [13] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39-41. (ZHU Wei, ZHANG Chunlei, LIU Hanlong, et al. The status quo of dredged spoils utilization[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 25(4): 39-41. (in Chinese))
- [14] 吕擎峰,何俊峰,王子帅,等. 黏土矿物与碱激发地聚物的相互作用机理[J]. 工程地质学报, 2020, 28(6): 1205-1212. (LYU Qingfeng, HE Junfeng, WANG Zishuai, et al. Study on interaction mechanism between clay minerals and alkali activated geopolymers [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(6): 1205-1212. (in Chinese))
- [15] SHEN S, TIAN J, ZHU Y, et al. Explore the synergic and coupling relationships of multiple industrial solid wastes in the preparation of alkali-activated materials under different curing regimes[J]. Materials Today Sustainability, 2022, 19: 100169.
- [16] 张兴武,刘鹏,程钰. 矿化微生物对赤泥基碱激发胶凝材料性能的增强研究[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(1): 9-15. (ZHANG Xingwu, LIU Peng, CHENG Yu. Enhancement of properties of alkali-activated red mud based cementitious materials by mineralizing microbe[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(1): 9-15. (in Chinese))
- [17] 叶家元,张文生. 纳米改性碱激发胶凝材料的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(8): 1263-1277. (YE Jiayuan, ZHANG Wensheng. Research progress on nano-modified alkali-activated cementitious materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2020, 48(8): 1263-1277. (in Chinese))
- [18] 荀小伟,肖亚雄,张佰发,等. 碱激发地聚物的反应机理、性能与应用的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(6): 83-90. (XUN Xiaowei, XIAO Yaxiong, ZHANG Baifa, et al. Recent progress on reaction mechanism, properties, and application of alkali-activated geopolymer [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(6): 83-90. (in Chinese))
- [19] 何俊,朱元军,李文静. 干湿循环与侵蚀耦合作用下碱渣固化淤泥的强度与损伤[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 94-103. (HE Jun, ZHU Yuanjun, LI Wenjing. Strength and damage of silt solidified with soda residue under coupling effect of dry-wet cycle and erosion [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 94-103. (in Chinese))
- [20] CHU J, LIM T T, GOI M H. Potential use of stabilized sewage sludge for land reclamation[J]. Journal of the Institution of Engineers, Singapore, 2002, 42(6): 36-42.
- [21] 史钰鹏. 碱激发矿渣粉煤灰固化淤泥力学性能和经济性研究[J]. 广东土木与建筑, 2023, 30(9): 27-29. (SHI Yupeng. Study on mechanical properties and economy of solidified sludge from alkali-excited slag fly ash [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2023, 30(9): 27-29. (in Chinese))
- [22] 何俊,吕晓龙,朱元军. 养护温度对碱渣-矿渣-电石渣固化淤泥强度性质的影响机制[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(5): 58-65. (HE Jun, LYU Xiaolong, ZHU Yuanjun. Influencing mechanism of curing temperature on strength properties of silt solidified with soda residue, ground granulated blast furnace slag and carbide slag[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(5): 58-65. (in Chinese))
- [23] LI Changming, CHENG Haifeng, FU Yubing, et al. Properties and microstructure evolution of Pisha sandstone after water/alkali leaching[J]. Construction and Building Materials, 2024, 428: 136327.
- [24] YUKSELEN Y, KAYA A. Zeta potential of kaolinite in the presence of alkali, alkaline earth and hydrolyzable metal ions[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2003, 145(1): 155-168.
- [25] 罗文彬,许晔,李中林,等. Ca/Si 对复合胶凝材料力学性能的影响及复合凝胶材料的水化机理[J]. 有色金属:冶炼部分, 2025(1): 141-152. (LUO Wenbin, XU Ye, LI Zhonglin, et al. Effect of Ca/Si on mechanical properties and hydration mechanism of composite cementitious materials [J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2025(1): 141-152. (in Chinese))
- [26] LIU Xuanbo, GAN Jing, NIRASAWA S, et al. Effects of sodium carbonate and potassium carbonate on colloidal properties and molecular characteristics of konjac glucomannan hydrogels [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 117: 863-869.
- [27] 陈宇,季军荣,周洲,等. 超硫酸盐水泥早期强度影响因素及提高途径[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5): 1413-1419. (CHEN Yu, JI Junrong, ZHOU Zhou, et al. Influencing factors and enhancement methods of early strength of supersulfated cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(5): 1413-1419. (in Chinese))
- [28] 陶攀. 干湿-冻融循环下水泥固化淤泥土的力学性能与裂隙发育特征[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(1): 34-40. (TAO Pan. Mechanical properties and crack development characteristics of cement-solidified mud soil under dry-wet-freeze-thaw cycles [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(1): 34-40. (in Chinese))
- [29] 胡学涛,梁冰,陈亿军,等. 冻融循环对固化污泥力学及微观结构特性影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1317-1323. (HU Xuetao, LIANG Bing, CHEN Yijun, et al. Mechanical and microstructural properties changes of solidified sewage sludge due to cyclic freezing and thawing [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1317-1323. (in Chinese))

(下转第 133 页)

River[J]. Pearl River Water Transport, 2024(18): 131-133. (in Chinese))

[3] 唐立模,叶志恒,杨家启,等. 赣江南昌河段水位降低现状 & 影响因素[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(6): 13-18. (TANG Limo, YE Zhiheng, YANG Jiaqi, et al. Status analysis and influence factors of water level dropping in Nanchang reach of Ganjiang River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018, 38(6): 13-18. (in Chinese))

[4] 胡苑成,陈龙,杨欢. 赣江尾闾防洪形势变化分析[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(12): 202-208. (HU Yuancheng, CHEN Long, YANG Huan. Changes in flood control regime for the tail of Ganjiang River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41(12): 202-208. (in Chinese))

[5] 戴中山,李海峰. 2011—2020 年赣江上游主要流水沙变化特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 178-186. (DAI Zhongshan, LI Haifeng. Variation of runoff and sediment in the main tributaries of the upper Ganjiang River in the period from 2011 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 178-186. (in Chinese))

[6] 陈龙,李友辉,李明辉,等. 二维非恒定流数学模型在赣江河流治导线研究中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 18-21. (CHEN Long, LI Youhui, LI Minghui, et al. Application of a two-dimensional unsteady flow model in research of regulation line of Gan River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(4): 18-21. (in Chinese))

[7] 周迎,肖瑜,张书花. 闸站合建枢纽对渠道水流流态影响的数值模拟研究[J]. 陕西水利, 2022(1): 34-36. (ZHOU Ying, XIAO Yu, ZHANG Shuhua. Numerical simulation study on the influence of joint junction of gate station on channel flow pattern [J]. Shaanxi Water Resources, 2022(1): 34-36. (in Chinese))

[8] 马超,陈明,周绪生,等. 岷江张坎航电枢纽船闸引航道通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2024(7): 124-130. (MA Chao, CHEN Ming, ZHOU Xusheng, et al. Optimization of navigable flow conditions for approach channel of Zhangkan navigation-power junction ship lock on Minjiang River [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(7): 124-130. (in Chinese))

[9] 方锦涛,赵建钧,辜晋德,等. 赣江南支吉里枢纽通航水流条件试验研究及其优化措施[J]. 水运工程, 2022(6): 139-144. (FANG Jintao, ZHAO Jianjun, GU Jinde, et al. Experimental study on navigable flow conditions of Jili junction in southern branch of Ganjiang River and optimization measures[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(6): 139-144. (in Chinese))

[10] 裴子玥,肖洋,张涛涛,等. 赣江尾闾南支枢纽通航水流条件数值模拟研究[J]. 水运工程, 2024(5): 143-150. (PEI Ziyue, XIAO Yang, ZHANG Taotao, et al. Numerical simulation of navigable water conditions at Nanzhi hydro-junction in Ganjiang River [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(5): 143-150. (in Chinese))

[11] 胡雨涵,王志超,郝嘉凌,等. 赣江象山枢纽一期临时航道通航水流数值模拟应用研究[J]. 江西水利科技, 2022, 48(2): 87-92. (HU Yuhan, WANG Zhichao, HAO Jialing, et al. Application research on numerical simulation of navigable flow in the temporary channel of the first-stage Xiangshan junction of Ganjiang River[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2022, 48(2): 87-92. (in Chinese))

[12] 都利亚,王兆礼,祁旭阳,等. 基于 TELEMAC-2D 模型的城区水库溃坝洪水数值模拟: 以广州市龙洞水库为例[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(5): 850-859. (DU Liya, WANG Zhaoli, QI Xuyang, et al. Numerical simulation of dam-break flood in urban area based on TELEMAC-2D model: a case study for Longdong Reservoir in Guangzhou, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(5): 850-859. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-11-29 编辑: 俞云利)

(上接第 106 页)

[30] 李星星,王思敬,肖锐铨,等. 硫酸钠溶液在降温结晶过程中的盐胀与冻胀[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2069-2077. (LI Xingxing, WANG Sijing, XIAO Ruihua, et al. Saline expansion and frost heave of sodium sulfate solution during cooling crystallization process[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 2069-2077. (in Chinese))

[31] MOHAMMED B S, HARUNA S, WAHAB M M B A W. Optimization and characterization of cast in-situ alkali-activated pastes by response surface methodology [J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 776-787.

[32] 魏浩光,高璇,周仕明,等. 激发剂对碱矿渣水泥砂浆中碱-硅酸反应的影响[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(4): 1266-1272. (WEI Haoguang, GAO Xuan, ZHOU Shiming, et al. Effects of activators on alkali-silica reaction in alkali-activated slag cement mortars [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(4): 1266-1272. (in Chinese))

[33] LI Changming, FU Yubing, CHENG Haifeng, et al. Development of environment-friendly engineering composite materials utilizing PISHA sandstone and solid waste under different curing conditions [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02925.

[34] 李长明,张婷婷,王立久. 砗磲岩火山灰活性及碱激发改性[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(8): 1090-1098. (LI Changming, ZHANG Tingting, WANG Lijiu. Pozzolanic activity of Pisha sandstone and mechanical properties of alkali-activated PISHA sandstone materials [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(8): 1090-1098. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-02-19 编辑: 熊水斌)