

DOI: 10.11779/CJGE2024S20025

膨胀土生态治理研究进展

白玉霞¹, 常 顺¹, 肖衡林^{*1}, 李丽华¹, 何 俊¹, 邱 季¹, 周文卓¹, 邓永锋^{1,2}

(1. 湖北工业大学土木建筑与环境学院河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室; 湖北 武汉 430068; 2. 东南大学交通学院, 江苏 南京 211189)

摘 要: 膨胀土是一种遇水急剧膨胀变形、失水迅速收缩开裂的问题土, 需对其进行治理以满足工程要求。对近年来新发展的膨胀土生态治理材料进行了归纳、总结, 并根据其组分、特点分为地聚合物类、离子固化剂、有机高分子材料类、微生物与酶类和生物胶类, 并阐述了各类固化剂的材料特点、固化效果及作用机理, 均符合新时代发展要求, 可作为一种可持续的、环保的、多功能的技术大范围推广应用, 最后从生态治理和推广应用角度探讨了目前需要克服的问题。

关键词: 膨胀土; 生态治理; 固化效果; 改性机制; 研究进展

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)S2-0060-08

作者简介: 白玉霞(1991—), 女, 博士, 主要从事特殊土改良、微生物岩土、岩土体边坡生态修复与稳定性评价等方面的研究工作。E-mail: byxhhu@163.com。

Research progress in ecological treatment of expansive soil

BAI Yuxia¹, CHANG Shun¹, XIAO Henglin¹, LI Lihua¹, HE Jun¹, QIU Ji¹, ZHOU Wenzhuo¹, DENG Yongfeng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology; Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, Wuhan 430068, China; 2. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The expansive soil is a kind of problematic soil that rapidly expands and deforms when encountering water and rapidly shrinks and cracks when losing water. It needs to be treated to meet the engineering requirements. The newly developed ecological treatment materials for the expansive soil in recent years are summarized and categorized, and the are classified according to their components and characteristics into-geopolymer, ion curing agent, organic polymer material, microorganism and enzyme, and biopolymer. The material characteristics, treatment effectiveness, and stabilization mechanisms of various treatment materials are elaborated, and they all meet the requirements of the new era and can be widely promoted and applied as a sustainable, environmentally friendly and versatile technology. Finally, the urgent issues that need to be addressed from the perspectives of ecological governance and promotion are discussed.

Key words: expansive soil; ecological treatment; stabilization effect; stabilization mechanism; research progress

0 引 言

膨胀土是一种具有高分散性和高塑性的特殊黏土, 其成分主要为蒙脱石、伊利石等强亲水性矿物, 遇水急剧膨胀变形、失水迅速收缩开裂, 具有强胀缩性、多裂隙性和强度衰减等特点^[1]。膨胀土对于干湿气候变化、人类活动等外部因素极为敏感, 常给膨胀土地区工程建设和安全带来危害^[2], 并且这种破坏具有反复性和长期性, 被称为“工程癌症”和工程建设的“拦路虎”。我国是膨胀土分布广、面积大的国家之一, 在26个省区中至少有3亿人生活在膨胀土分布区。据报道, 中国每年因膨胀土造成的经济损失高达数百亿元。因此, 开展膨胀土治理研究对保障膨胀土地区

经济社会的发展具有重要意义。

膨胀土工程治理一直是膨胀土地质灾害防治研究的主要方向之一, 经长时间的研究实践, 已形成了多种膨胀土治理技术, 如物理处治、化学改性、刚性支挡及柔性防护技术^[3-4]。膨胀土治理的关键在于: ①从膨胀土自身特性出发, 通过换填、改性等方法降低其胀缩性和裂隙性; ②采取有效的封闭包盖措施控制坡

基金项目: 国家自然科学基金项目(52208339, U22A20232, 52278347); 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室开放研究基金项目(HGKFZP007); 湖北省自然科学基金创新发展联合基金项目(2022CFD172)

收稿日期: 2024-06-21

***通信作者** (E-mail: xiao-henglin@163.com)

体内部含水率的变化在合理范围。近些年来, 随着人们环保意识增强及绿色可持续发展理念的深入, 出现了许多新的膨胀土生态治理材料和方法, 如使用工业固废^[5-6]、离子固化剂^[7-8]、有机高分子材料^[9-10]、微生物与酶^[11-12]及生物胶^[13-14]等生态环保材料对膨胀土进行治理, 如图 1 所示。

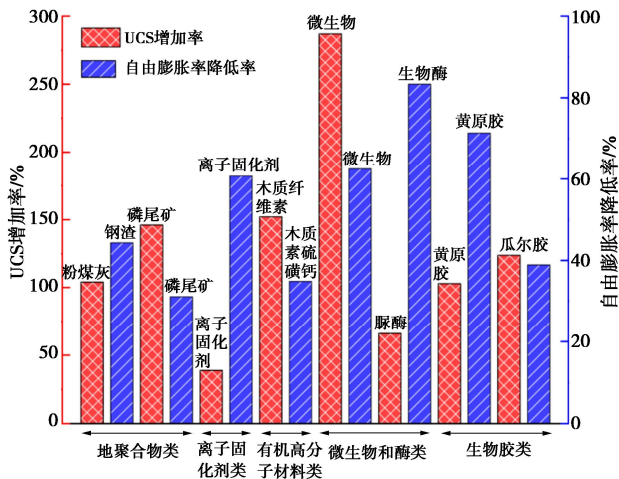


图 1 不同固化剂改善膨胀土 UCS 与自由膨胀率效果^[5, 8, 10, 13, 15-21]

Fig. 1 Efficiencies of UCS and free expansion rate of stabilized expansion soil with different kinds of treatment materials ^[5,8,10,13,15-21]

目前, 膨胀土生态治理方法繁多, 新的化学、生物处治技术方兴未艾, 有必要对这些方法和材料进行梳理、归类和总结, 以便更好地应用这些方法和技术, 发挥更有效的作用。因此, 本文对近些年来国内外膨胀土治理的研究成果进行了归纳、总结, 阐述了各方法的效果及优缺点, 分析了固化机理, 探讨了膨胀土生态治理机理, 对现阶段膨胀土治理面临的问题与挑战进行了论述, 并从生态治理的发展方向对膨胀土灾害防治研究进行了讨论和展望。

1 膨胀土生态治理方法

1.1 地聚合物类

地聚合物是替代传统硅酸盐水泥的一种环境友好型无机硅铝酸盐材料, 通常由富含无定形二氧化硅和氧化铝的原料和碱性激发剂组成^[22]。常见的硅铝原材料来源于工业固废, 如粉煤灰、矿渣等, 在 NaOH、KOH、水玻璃等碱性激发剂作用下溶解, 通过溶解、扩散、缩聚和硬化等过程在土颗粒间形成凝胶材料胶结土体, 同时体系中的高价阳离子和土颗粒表面的低价离子发生离子交换, 改变土颗粒表面特性, 增强土粒连接和强度^[23]。Seyrek 等^[15]发现掺入 30%粉煤灰, 膨胀土的膨胀百分比、膨胀压力分别由 7.03%, 57.63 kPa 降低至 1.04%、14.77 kPa, UCS 提高了 96%; Sharma

等^[24]指出高炉矿渣和粉煤灰联合可以进一步降低膨胀土的液限和塑性指数。近些年, 一些新的工农业废弃物, 如磷尾矿^[5]、钢渣^[16]等也被证实可以有效降低膨胀土亲水性, 改善胀缩性 (图 1), 抑制裂缝发展, 庄心善等^[5]通过一系列物理力学试验表明磷尾矿对膨胀土的强度及胀缩性有一定程度的改善。此外, 李丽华等^[6]、Taha 等^[25]、Zha 等^[26]也关注将多种地聚合物作为固化剂改性膨胀土, 并取得了许多进展。Cokca 等^[27]、Parsaei 等^[28]将水泥与高铝矿渣复掺后对膨胀土的性能进行了研究, 结果表明水泥与高铝矿渣复掺物可以抑制膨胀土的胀缩, 降低膨胀百分比。地聚合物改性土效果与最终产物有关, 而这与硅铝质原料、碱激发剂、反应条件等有关, 其中影响较为显著的是硅-铝比, 其值为 1~3 时, 地聚合物性能表现较好^[22]。

1.2 离子固化剂类

离子固化剂是由大量离子组成的有机混合物, 通过一系列复杂的离子交换、吸附、包裹等反应, 降低黏土矿物晶层间水敏性, 改变土颗粒表面的双电层结构, 从而降低土体的膨胀性^[7]。近些年, 诸多学者研发了 ISS、LISS、NaCl 及尿素等多种离子固化剂: 刘清秉等^[7, 17]发现 ISS 能够降低土壤亲水性, 改善土体物理力学特性, 掺入 ISS 后土体黏聚力、内摩擦角分别提高了 75%、0.8%, 而且在加入 ISS 后, 膨胀土的压缩系数降低, 压缩模量增大, 土体更加密实; He 等^[8]证实了 LISS 可以明显改善土壤的胀缩性、膨胀潜力, 并且能够提高土体的 UCS (图 1); Zou 等^[29]发现膨胀土的胀缩性、膨胀压力随 NaCl 浓度增加而降低; 马田田等^[30]进一步研究了 NaCl 溶液浓度对膨胀土土-水特征曲线及收缩曲线的影响, 发现盐分对膨胀土的收缩、膨胀曲线有显著的影响; 黄春等^[31]发现尿素/ K^+ /PEG 与尿素/ NH_4^+ /PEG 的复合物可以明显改善蒙脱石的分散、水化以及膨胀特性。

可见, 离子固化剂是一种有效的膨胀土改良方法, 经济环保, 但由于其改良膨胀土效果、机理研究缺乏相应的标准及完整体系、实际应用效果差异较大等^[32], 导致离子固化剂的实际应用仍受到限制。

1.3 有机高分子材料类

有机高分子材料是由一种或多种分子或分子团以共价键结合成具有多个重复单元的大分子, 通过与土颗粒进行物理化学作用改变颗粒表面亲水特性, 同时利用自身黏性包裹土粒, 增强土粒间的连接, 从而提高土体宏观性能。因为效果显著、绿色环保以及施工方便等优点被广泛关注和研究 (图 1): 南京大学自主研发的 STW 型土壤固化剂能够防止膨胀土边坡的水土流失和冲刷破坏^[9]; 朱锐等^[18]发现木质素可以明显改善冻融循环下膨胀土的体变及物理力学性能; Taher

等^[33]发现掺入 5% 乙烯基类共聚物可以使膨胀压力和膨胀势分别降低 14%，70%。此外，其他高分子材料，如木质素磺酸钙^[10]、VAE^[34]、PU^[35]等也都被证明了可以有效改良膨胀土。

该类固化剂虽被证明了可以改善膨胀土特性，但由于价格高昂未广泛使用，今后可以将其与其他材料/技术相结合或改进生产工艺以降低成本。此外，有一些合成有机聚合物自身存在毒性，在工程中的大量使用可能会对地下水和周边环境造成污染。

1.4 微生物与酶类

(1) 微生物

近年来使用微生物生态固土成为了环境岩土工程的研究热点之一，使用微生物治理土体不仅生态环保，而且效果显著。在膨胀土生态治理研究中，使用微生物固化膨胀土，尤其是以微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）为代表的固化技术吸引了大量学者的关注（图 1）：魏然等^[11]发现土体的膨胀变形量随着菌液用量的增加而降低；Tiware 等^[19]进一步证明了 MICP 可以降低土体的自由膨胀指数、膨胀压力和膨胀效应，并且能显著提高土体的 UCS；Chittoori 等^[36]确定了 MICP 改性膨胀土 UCS 与碳酸钙生成量呈正比，自由膨胀率与碳酸钙生成量呈反比；Ouyang 等^[37]验证了 MICP 固化膨胀土的黏聚力及内摩擦角与固化时间成正比；Tian 等^[38]发现经 MICP 处理后的膨胀土的长期抗剪强度明显提高，在 100，150，200 kPa 的围压下其长期抗剪强度分别提高了 72.2%，60.9%，73.1%。

但不可否认的是，MICP 仍面临许多挑战，如注浆胶结的均匀性、细菌培养困难增加成本、对细粒土效果不显著等^[19, 36]，在进一步推广应用时亟需解决这些现实问题。

(2) 酶

酶是一种天然的有机分子，在土壤中可通过孔隙水扩散至整个土体中，通过离子作用或者作为催化剂促进与土体的作用而达到治理土体目的。许多生物酶，如 Perma-Zyme^[20]、Eko Soil^[39]、Terra-Zyme^[40]等（图 1）已被证实可以有效改善土颗粒表面亲水特性，增强土颗粒间的黏结，降低胀缩性，提高强度。近年来，为克服 MICP 的一些局限性，一些学者提出了脲酶诱导碳酸钙沉淀技术（EICP），即从植物或细菌中直接提取脲酶，利用其催化尿素水解成氨和二氧化碳，通过提供尿素和钙源，诱导产生碳酸钙沉淀，加固土体^[41]。Li 等^[12]发现膨胀土自由溶胀率随着 EICP 处理液物质的量浓度增加而降低，添加 1 mol/L 胶结液自由膨胀率降低了 90%；Mehmood 等^[21]发现固化 28 d 后膨胀土膨胀压力降低 75%，UCS 提高 66%（图 1）；EICP

这一过程受很多因素的影响，如脲酶的活性及浓度，尿素及钙源浓度、反应条件等^[21]。此外，为进一步提高 EICP 固化效果，有学者创新性的引入脱脂奶粉^[42]、生物聚合物^[43]、高分子聚合物^[44]等外掺剂，发现外掺剂不会干扰酶的活性部位，并且可以通过为碳酸钙沉淀提供成核点和降低沉淀速率来促进沉淀。

1.5 生物胶

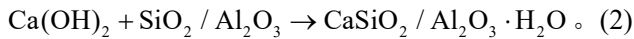
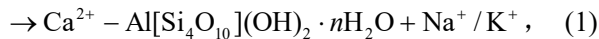
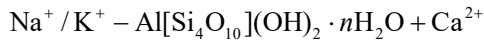
生物胶是一种来源于植物、动物、微生物等的天然聚合物，通过附着在土壤颗粒表面形成的水凝胶、离子作用改善膨胀土的工程性质，生态环保，已成为近年来的研究热点（图 1）。王天亮等^[13]通过系列室内试验发现瓜尔胶改良膨胀土强度优于黄原胶，而黄原胶改良土稳定性更好；Hamza 等^[45]发现膨胀土的塑性指数、UCS 与黄原胶掺量呈正比，溶胀压力与黄原胶掺量呈反比，并且黄原胶的掺入可以有效提高膨胀土的保水性和抗裂性；Latifi 等^[46]证实黄原胶的掺入可以提高膨胀土和高岭土的强度、降低压缩系数和膨胀指数，并且对膨胀土的效果优于高岭石；Vydehi 等^[47]通过条形线性收缩试验发现生物胶达到一定掺量时改性土呈不规则块体，表面先出现裂隙并向内部发展，随后出现轻微突起并向上卷曲。此外，壳聚糖^[14]、琼脂胶^[48]、海藻胶^[49]等生物胶也可用于膨胀土的生态治理。

可见，目前对黄原胶、瓜尔胶改良膨胀土研究较多，对其他胶类的研究较少，并且胶体在湿态下强度低、水敏性高和易降解^[50]是其应用面临的主要问题，因此有必要对生物胶固化膨胀土展开系统性研究。

2 膨胀土生态治理机理分析

2.1 地聚合物类

膨胀土胀缩的本质原因在于含有大量的蒙脱石和伊利石等亲水矿物，微观形态上多为扁片状，端部卷翘（图 2（a）），该类矿物晶体结构为两层硅片夹一层铝片，晶层通过弱范德华力发生键合，这使得水分子及水化阳离子极易进入层间形成扩散层，扩大层间间距，土体膨胀；而当土中水分蒸发后，扩散层收缩，土壤收缩、开裂^[1]。添加地聚合物后，一方面体系中的高价离子（ Al^{3+} 、 Ca^{2+} 等）与膨胀土颗粒表面的低价离子（ Na^{+} 、 K^{+} 等）发生离子交换（式（1））^[6]，减小扩散双层厚度，降低土体胀缩潜势，并增加土颗粒黏聚力；同时，地聚合物体系经历溶解、扩散、聚合和胶结 4 个阶段形成无定形水化物凝胶（如 C-S-H、C-A-H、C-A-S-H（式（2））^[6]与黏土相互胶结形成强度；此外，地聚合物体系还会填充孔隙，提高土体密实度，抑制土体开裂，如图 2（b）所示。



2.2 离子固化剂类

离子类固化剂是含有大量离子的有机混合物,但目前对该类固化剂确切成分的介绍较少,多为一些商用产品,关于此类固化剂加固土体的机理一般认为是反应体系中的强阳离子、阴离子和土颗粒通过吸附、化学反应及离子交换来改变晶层间(内)的结构特征,从而减小土颗粒表面的电荷和扩散层厚度^[7,29],进而提高土颗粒的团聚作用(图2(c)),改善膨胀土的工程性能。并且,通常是离子固化剂中的中强阳离子置换出膨胀土中的低价离子,压缩扩散层厚度,阳离子交换大体顺序为 $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Ba}^{2+} < \text{Cu}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Fe}^{3+} < \text{H}_3\text{O}^{+}$ ^[7]。刘清秉等^[7]通过系列理化试验将 ISS 改性膨胀土的机理概括为解离的阳离子置换土颗粒表面的可交换性阳离子,减小结合水膜厚度;通过吸附、离子交换等作用,利用相邻键节上的正电荷或羟基将相邻的土颗粒通过分子搭接,形成整体性的网状结构;体系中的活性剂在土颗粒表面形成包裹膜,降低了土体水敏性。

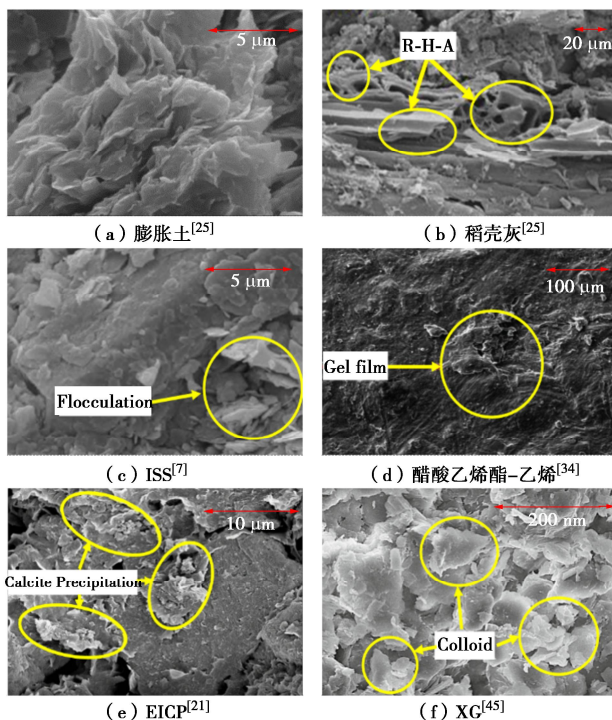


图2 各类固化剂改良膨胀土 SEM 图

Fig. 2 SEM images of different stabilizers-improved expansive soil

2.3 聚合物类

有机高分子材料和生物胶均属于聚合物类,二者固化膨胀土的机理相似,可以概括为(图3):①聚合

物分子链中的官能团,通过静电力、键合作用及阳离子交换等改变土颗粒表面的带电特性^[10],促进颗粒的凝絮。②聚合物分子链中的亲水基团和水发生乳化,形成凝胶,利用自身的黏性包裹、缠绕土颗粒、填充孔隙,形成稳定的三维网状结构,从而改善膨胀土性能(图2(d),2(f))^[47]。需要注意的是,聚合物凝胶随水分蒸发会不断干缩,黏性和弹性显著提升,随之表现出较好的土体加固效果。可以看出,聚合物类的掺入不会改变土体中原有的矿物组分,但会明显改善土体的孔隙结构和颗粒级配^[51]。此外,一些阳离子型聚合物携带的阳离子会与土颗粒表面的负电荷发生中和反应,进一步减小扩散双层厚度,减小土体分散性,改善膨胀土的胀缩性^[9,45]。

此外,聚合物类改性膨胀土(细粒土)多与水配成溶液与土体拌合使用或采用干拌法,因为聚合物溶液黏性高,对土体特别是细粒土的渗透有限。

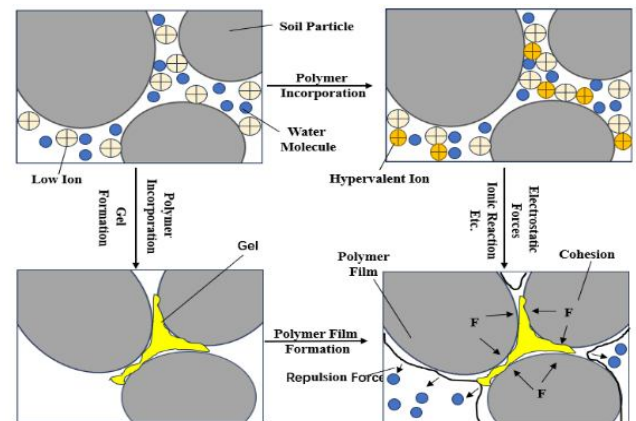


图3 聚合物改良膨胀土机理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of mechanism of polymer-modified expansive soil

2.4 微生物与酶类

微生物和酶改良膨胀土的作用机理相似,由于生物酶具有较强的专一性,其催化土体化学反应的体系和机理较为复杂,目前尚未形成统一的观点。根据已有研究成果^[11,38-39],生物酶对膨胀土的固化机制可以概括为:①生物酶直接催化有机分子和土颗粒之间的化学作用,改变土颗粒表面的带电特性和亲水特性,增强土颗粒间的连接力;②酶和土体体系中的有机分子特性结合,增强晶层的化学键作用,减弱颗粒间的排斥作用,降低扩散双层的厚度,使土壤颗粒团聚;③生物酶体系中的其他组分参与反应,降低土颗粒表面张力,进一步促进土颗粒团聚。对于不同的生物酶类,其固化作用有些许差异,但生物酶需具有较好的流动性或扩散能力,以随孔隙溶液流动扩散至土壤各个位置,达到较好的加固效果。

此外,一些微生物与酶还会在激发剂的作用下诱导生成难溶性化合物(如 MICP 和 EICP,公式(3),(4))^[19],这些沉淀物通常会附着、填充在土壤颗粒表面和孔隙中(图 2(e))^[12],降低土体亲水性和孔隙率,阻隔水分的流动并减少疏水通道,同时增强土颗粒的连接,从而改善膨胀土的性能,如图 4 所示。

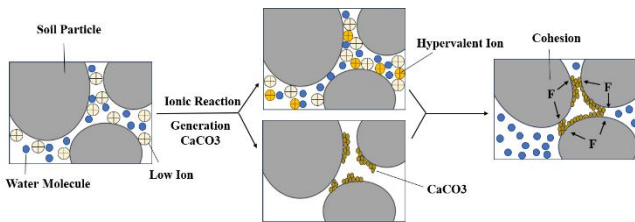
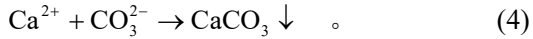
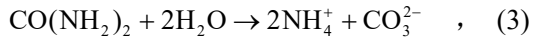


图 4 EICP 改良膨胀土机理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mechanism of EICP-improved expansive soil

3 面临的问题与挑战

综上所述,目前已形成许多优秀方法对膨胀土进行生态治理,虽然在一定程度上解决了膨胀土的问题,但是随着研究深入,仍面临较多问题和挑战。

(1) 目前关于膨胀土生态治理材料种类繁多,缺乏相应的系统研究和分类、治理评价使用标准,在实际应用中无法根据具体应用场景和工程需求等选择合适的治理材料。

(2) 这几类材料大规模应用的局限之一仍在于如何实现土壤拌合的均匀性,这不仅会影响治理效果,也会增加施工难度,今后可围绕探索新的工艺或研发新剂材促进治理材料和土体间的反应等进行研究。此外,材料成本也是影响其应的主要因素,特别是有机合成材料和生物类材料的成本较高。

(3) 新的生态环保材料各自仍面临需改进的问题,如生物胶类,湿态下强度低,耐水性差以及易降解等问题亟需解决;EICP 面临的缺乏成核位点、固化均匀性差、脲酶提取保存和现场应用复杂以及副产物氯化铵对环境的影响等问题也限制了其推广应用。

(4) 前述膨胀土生态治理材料在来源、自身组构、治理效果和环境效益等方面各有自己的特点和优势,如何根据具体应用情况将各类材料进行综合利用以达到工程造价、治理效果和环境效益三者间的平衡也是未来值得关注的问题。

(5) 缺乏对治理膨胀土的理论研究,特别是关于复杂环境下工程特性预测、材料劣化与破坏机制、与数字模拟技术结合的研究匮乏。

4 结 语

本文从治理材料、固化效果及机理等方面展示了近些年膨胀土生态治理的研究现状,阐述了地聚合物类、离子固化剂、有机高分子材料类、微生物与酶及生物胶等材料的特点、优势,改善膨胀土特性及作用机理,均符合新时代发展要求,可作为一种可持续的、环保的、多功能的技术大范围推广应用。然而,该类技术仍然要克服许多问题:①缺乏相应的系统研究和分类、治理评价使用标准;②施工可操作性和材料成本有待改进;③两种或者多种治理材料综合利用以达到更好的效果;④相关理论研究匮乏。总的来说,还需对膨胀土生态治理进行大量深入的研究以达到最好的治理效果,实现工程安全和绿色发展的共赢。

参考文献:

- [1] 冷挺,唐朝生,徐丹,等. 膨胀土工程地质特性研究进展[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 112-128. (LENG Ting, TANG Chaosheng, XU Dan, et al. Advance on the engineering geological characteristics of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 112-128. (in Chinese))
- [2] 杨和平,李宇峙,陈虔礼. 膨胀土路基病害及防治措施[J]. 公路, 1995, 40(5): 8-12. (YANG Heping, LI (Yu)(Shi)(Zhi), CHEN Qianli. Disease of expansive soil subgrade and its prevention measures[J]. Highway, 1995, 40(5): 8-12. (in Chinese))
- [3] 杨和平,章高峰,郑健龙,等. 膨胀土填筑公路路堤的物理处治技术[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(4): 491-500. (YANG Heping, ZHANG Gaofeng, ZHENG Jianlong, et al. Physical treating techniques of highway embankments filled with expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(4): 491-500. (in Chinese))
- [4] 徐永福,程岩,肖杰,等. 膨胀土滑坡和工程边坡新型防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1281-1294. (XU Yongfu, CHENG Yan, XIAO Jie, et al. New prevention and control technology for expansive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1281-1294. (in Chinese))
- [5] 庄心善,杨文博,胡其志. 磷尾矿改良合肥膨胀土强度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(5): 281-284. (ZHUANG Xinshan, YANG Wenbo, HU Qizhi. Experimental study on strength improvement of Hefei expansive soil by phosphorus tailings[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(5): 281-284. (in Chinese))

- [6] 李丽华, 黄 畅, 李文涛, 等. 稻壳灰-矿渣固化膨胀土力学与微观特性研究[J]. 岩土力学, 2023, **44**(10): 2821-2832, 2842. (LI Lihua, HUANG Chang, LI Wentao, et al. Study on mechanical and microscopic characterization of expansive soil solidified by rice husk ash-granulated blast furnace slag[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, **44**(10): 2821-2832, 2842. (in Chinese))
- [7] 刘清秉, 项 伟, 崔德山, 等. 离子土固化剂改良膨胀土的机理研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 648-654. (LIU Qingbing, XIANG Wei, CUI Deshan, et al. Mechanism of expansive soil improved by ionic soil stabilizer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 648-654. (in Chinese))
- [8] HE S, YU X B, BANERJEE A, et al. Expansive soil treatment with liquid ionic soil stabilizer[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, **2672**(52): 185-194.
- [9] 黄 河, 施 斌, 刘 瑾, 等. STW 型生态土壤稳定剂改性膨胀土水理性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(8): 1236-1240. (HUANG He, SHI Bin, LIU Jin, et al. Water-physical properties of expansive soils modified by STW ecotypic soil stabilizer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(8): 1236-1240. (in Chinese))
- [10] 孟令超, 朴 淼, 张鸿秋, 等. 干湿循环条件下木质素改良膨胀土胀缩特性[J]. 工程地质学报, 2023, **31**(2): 386-396. (MENG Lingchao, PIAO Miao, ZHANG Hongqiu, et al. Swelling and shrinkage behaviour of expansive soil ameliorated by calcium lignosulphonate during wetting-drying cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, **31**(2): 386-396. (in Chinese))
- [11] 魏 然, 张丽雅, 肖智睿, 等. 基于 MICP 技术的膨胀土变形控制机理研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(增刊 1): 92-96. (WEI Ran, ZHANG Liya, XIAO Zhirui, et al. Study on deformation control mechanism of expansive soil based on MICP technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(S1): 92-96. (in Chinese))
- [12] LI M, TAO X, LANG C, et al. Enzyme-induced carbonate precipitation using yellow soybean for eco-friendly treatment of expansive soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, **24**(3): 04024007.
- [13] 王天亮, 王 林, 刘松松, 等. 黄原胶和瓜尔胶改良膨胀土力学特性试验研究[J]. 中国铁道科学, 2023, **44**(2): 1-10. (WANG Tianliang, WANG Lin, LIU Songsong, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil improved by xanthan gum and guar gum[J]. China Railway Science, 2023, **44**(2): 1-10. (in Chinese))
- [14] FIRMANSYAH D A, SOMANTRI A K, SIHOMBING A V R, et al. Optimization of the Atterberg Limits on expansive soil stabilized with chitosan biopolymer[J]. E3S Web of Conferences, 2024, **479**: 06002.
- [15] SEYREK E. Engineering behavior of clay soils stabilized with class C and class F fly ashes[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2018, **25**(2): 273-287.
- [16] KABETA W F, LEMMA H. Modeling the application of steel slag in stabilizing expansive soil[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2023, **9**(4): 4023-4030.
- [17] 刘清秉, 项 伟, 张伟锋, 等. 离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(8): 2286-2290. (LIU Qingbing, XIANG Wei, ZHANG Weifeng, et al. Experimental study of ionic soil stabilizer-improves expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(8): 2286-2290. (in Chinese))
- [18] 朱 锐, 王燕杰, 黄英豪, 等. 木质素纤维改良膨胀土的冻融特性及微观机理[J]. 农业工程学报, 2024, **40**(2): 263-272. (ZHU Rui, WANG Yanjie, HUANG Yinghao, et al. Freeze-thaw characteristics and microscopic mechanism of expansive soil improved by lignin fiber[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, **40**(2): 263-272. (in Chinese))
- [19] TIWARI N, SATYAM N, SHARMA M. Micro-mechanical performance evaluation of expansive soil biotreated with indigenous bacteria using MICP method[J]. Scientific Reports, 2021, **11**(1): 10324.
- [20] SHARMA J K, KHANDELWAL S. Performance evaluation of kota's black soil using perma-zyne[M]// Techno-Societal 2022. Cham: Springer International Publishing, 2023: 125-136.
- [21] MEHMOOD M, GUO Y C, WANG L, et al. Influence of enzyme induced carbonate precipitation (EICP) on the engineering characteristics of expansive soil[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2024: 1-16.
- [22] HUANG J, KOGBARA R B, HARIHARAN N, et al. A state-of-the-art review of polymers used in soil stabilization[J]. Construction and Building Materials, 2021, **305**: 124685.
- [23] 刘景锦, 罗昊鹏, 雷华阳, 等. 碱激发地质聚合物固化粘土的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2023, **42**(2): 565-574. (LIU

- Jingjin, LUO Haopeng, LEI Huayang, et al. Research progress on application of alkali-activated geopolymers to stabilize soft soil[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, **42**(2): 565-574. (in Chinese))
- [24] SHARMA A K, SIVAPULLAIAH P V. Ground granulated blast furnace slag amended fly ash as an expansive soil stabilizer[J]. Soils and Foundations, 2016, **56**(2): 205-212.
- [25] TAHA M M M, FENG C P, AHMED S H S. Modification of mechanical properties of expansive soil from North China by using rice husk ash[J]. Materials, 2021, **14**(11): 2789.
- [26] ZHA F S, LIU S Y, DU Y J, et al. Behavior of expansive soils stabilized with fly ash[J]. Natural Hazards, 2008, **47**(3): 509-523.
- [27] COKCA E, YAZICI V, OZAYDIN V. Stabilization of expansive clays using granulated blast furnace slag (GBFS) and GBFS-cement[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2009, **27**(4): 489-499.
- [28] PARSAEI M, VAKILI A H, SALIMI M, et al. Effect of electric arc and ladle furnace slags on the strength and swelling behavior of cement-stabilized expansive clay[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, **80**(8): 6303-6320.
- [29] ZOU W L, YE J B, HAN Z, et al. Effect of montmorillonite content and sodium chloride solution on the residual swelling pressure of an expansive clay[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, **77**(19): 677.
- [30] 马田田, 于海文, 韦昌富, 等. 物理化学效应对膨胀土收缩特性的影响机制[J]. 岩土力学, 2024, **45**(3): 697-704. (MA Tiantian, YU Haiwen, WEI Changfu, et al. Mechanism of physicochemical effect on the shrinkage of expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, **45**(3): 697-704. (in Chinese))
- [31] 黄 春, 刘尚营, 张春光, 等. NH_4^+ , 尿素和聚乙二醇对蒙脱土的抑制膨胀作用[J]. 化学学报, 2003, **61**(7): 983-988. (HUANG Chun, LIU Shangying, ZHANG Chunguang, et al. Inhibition behavior of NH_4^+ , urea and polyethylene glycol on swelling of montmorillonite[J]. Acta Chimica Sinica, 2003, **61**(7): 983-988. (in Chinese))
- [32] 钟玉健, 张晓超, 袁 锐, 等. 非钙基土壤固化剂加固机理及其应用性能研究进展[J]. 材料导报, 2022, **36**(14): 154-162. (ZHONG Yujian, ZHANG Xiaochao, YUAN Rui, et al. Research progress in the stabilization mechanism of non-calcium-based soil stabilizer and its application performance[J]. Materials Reports, 2022, **36**(14): 154-162. (in Chinese))
- [33] TAHER Z J, SCALIA J I, BAREITHER C A. Comparative assessment of expansive soil stabilization by commercially available polymers[J]. Transportation Geotechnics, 2020, **24**: 100387.
- [34] SABERIAN M, PERERA S T A M, ZHU J S, et al. Investigating the impact of vinyl acetate-ethylene polymer on the mechanical and microstructural properties of expansive clay subgrade[J]. Road Materials and Pavement Design, 2024: 1-24.
- [35] AL-ATROUSH E M. Reduction of soil swelling potential using PU polyurethane liquid foam[C]//Geo-Extreme 2021. Savannah, Georgia. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021: 190-202.
- [36] CHITTOORI B C S, RAHMAN T, BURBANK M. Microbial-facilitated calcium carbonate precipitation as a shallow stabilization alternative for expansive soil treatment[J]. Geotechnics, 2021, **1**(2): 558-572.
- [37] OUYANG Q W, XIAO H B, LI Z Y, et al. Experimental study on the influence of microbial content on engineering characteristics of improved expansive soil[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, **10**: 863357.
- [38] TIAN X W, XIAO H B, SU H, et al. Experimental study on creep and long-term strength characteristics of expansive soil improved by the MICP method[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2024, **17**(6): 202.
- [39] POONI J, GIUSTOZZI F, ROBERT D, et al. Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation[J]. Transportation Geotechnics, 2019, **21**: 100255.
- [40] TIWARI A, SHARMA J K, GARG V. Stabilization of expansive soil using terrazyme[M]// Lecture Notes in Civil Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2021: 113-125.
- [41] DILRUKSHI R A N, NAKASHIMA K, KAWASAKI S. Soil improvement using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation[J]. Soils and Foundations, 2018, **58**(4): 894-910.
- [42] DONG J, LIU X B. Application of improved enzyme induced calcium carbonate precipitation (EICP) technology in surface protection of earthen sites[J]. Journal of Cultural Heritage, 2022, **54**: 146-154.

- steady-state temperature field with typical freezing tube layout employed in freeze-sealing pipe roof method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **79**: 336-345.
- [8] MING F, CHEN L, LI D Q, et al. Estimation of hydraulic conductivity of saturated frozen soil from the soil freezing characteristic curve[J]. Science of the Total Environment, 2020, **698**: 134132.
- [9] LI M K, CAI H B, LIU Z, et al. Research on frost heaving distribution of seepage stratum in tunnel construction using horizontal freezing technique[J]. Applied Sciences, 2022, **12**(22): 11696.
- [10] ZHANG X D, WU Y J, ZHAI E C, et al. Coupling analysis of the heat-water dynamics and frozen depth in a seasonally frozen zone[J]. Journal of Hydrology, 2021, **593**: 125603.
- [11] YANG X, JI Z Q, ZHANG P, et al. Model test and numerical simulation on the development of artificially freezing wall in sandy layers considering water seepage[J]. Transportation Geotechnics, 2019, **21**: 100293.
- [12] ZHOU L Z, ZHOU F X, YING S, et al. Study on water and salt migration and deformation properties of unsaturated saline soil under a temperature gradient considering salt adsorption: Numerical simulation and experimental verification[J]. Computers and Geotechnics, 2021, **134**: 104094.
- [13] GAO G Y, GUO W, REN Y X. Numerical study on coupled modelling of artificial freezing marine soil[J]. Computers and Geotechnics, 2023, **159**: 105409.
- [14] WANG B, RONG C X, CHENG H, et al. Temporal and spatial evolution of temperature field of single freezing pipe in large velocity infiltration configuration[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, **175**: 103080.

(编校: 孙振远)

(上接第 66 页)

- [43] ALMAJED A, LEMBOYE K, ARAB M G, et al. Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique[J]. Soils and Foundations, 2020, **60**(2): 356-371.
- [44] PRABHAKAR, ANNADURAI R. Synergistic effect of Polyvinyl Acetate (PVA) and Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) on the mechanical properties of natural sands[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, **20**: e03323.
- [45] HAMZA M, NIE Z H, AZIZ M, et al. Strengthening potential of xanthan gum biopolymer in stabilizing weak subgrade soil[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2022, **24**(9): 2719-2738.
- [46] LATIFI N, HORPIBULSUK S, MEEHAN C L, et al. Improvement of problematic soils with biopolymer—an environmentally friendly soil stabilizer[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, **29**(2): 04016204.
- [47] VYDEHI K V, ALI BAIG MOGHAL A, MARIYAM RASHEED R. Shrinkage characteristics of biopolymer treated expansive soil[C]// Geo-Congress 2022. Charlotte, North Carolina. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2022: 92-99.
- [48] KANTESARIA N, CHANDRA P, SACHAN A. Stabilization of expansive soil using agar biopolymer[C]// IFCEE 2021. Dallas, Texas. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2021: 272-281.
- [49] LIU S H, DU K, WEN K J, et al. Stabilization of expansive clayey soil through hydrogel for mechanical improvements[J]. International Journal of Civil Engineering, 2023, **21**(9): 1423-1431.
- [50] SHIBAEV A V, MURAVLEV D A, MURAVLEVA A K, et al. pH-dependent gelation of a stiff anionic polysaccharide in the presence of metal ions[J]. Polymers, 2020, **12**(4): 868.
- [51] CAI G J, ZHANG T, LIU S Y, et al. Stabilization mechanism and effect evaluation of stabilized silt with lignin based on laboratory data[J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2016, **34**(4): 331-340.

(编校: 孙振远)