

植物源脲酶诱导碳酸钙沉淀技术的应用进展与前景

师永杰*, 林 媛, 张翀宇

重庆科技大学安全科学与工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年5月8日; 录用日期: 2025年6月4日; 发布日期: 2025年6月16日

摘 要

植物源脲酶诱导碳酸钙沉淀技术因其环境友好、反应高效等特点, 在土壤加固、扬尘抑制等领域受到广泛关注。本文综述了近年来国内外从植物提取脲酶以沉淀碳酸钙技术的发展现状。首先分析了建筑施工过程中产生的土壤扬尘来源, 并阐述了在建筑施工过程中产生的土壤扬尘所带来的安全与环境问题, 再介绍了脲酶诱导碳酸钙作为一种新型技术的原理。在此基础上, 重点讨论了植物源(如大豆、刀豆和西瓜种子)脲酶诱导碳酸钙沉淀技术的研究进展, 且系统分析了常用于该技术的添加剂, 通过这些添加剂可以更加明显地改善诱导产生碳酸钙的晶体类型与晶体分布。最后讨论了植物源脲酶诱导碳酸钙技术的未来发展趋势。

关键词

脲酶, 土壤扬尘, 碳酸钙

Application Progress and Prospect of Plant Urease Induced Calcium Carbonate Precipitation Technology

Yongjie Shi*, Yuan Lin, Chongyu Zhang

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: May 8th, 2025; accepted: Jun. 4th, 2025; published: Jun. 16th, 2025

Abstract

Plant-derived urease induced calcium carbonate precipitation technology has received widespread

*通讯作者。

文章引用: 师永杰, 林媛, 张翀宇. 植物源脲酶诱导碳酸钙沉淀技术的应用进展与前景[J]. 生物过程, 2025, 15(2): 194-200. DOI: 10.12677/bp.2025.152026

attention in the fields of soil reinforcement and dust suppression due to its environmentally friendly and highly efficient reaction. This paper summarizes the current development of urease extraction from plants to precipitate calcium carbonate technology at home and abroad in recent years. It firstly analyzes the source of soil dust generated in the process of building construction and describes the safety and environmental problems caused by soil dust generated in the process of building construction, and then introduces the principle of urease-induced calcium carbonate as a novel technology. On this basis, the progress of urease-induced calcium carbonate precipitation from plant sources (e.g., soybean, snap bean, and watermelon seeds) is discussed, and the additives commonly used in this technique are systematically analyzed, through which the crystal type and crystal distribution of induced calcium carbonate can be more significantly improved. Finally, the future development of urease-induced calcium carbonate technology of plant origin is discussed.

Keywords

Urease, Soil Dust, Calcium Carbonate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国经济的快速发展,建筑业已经进入了规模化建设的发展时期,但也伴随着严重的大气污染问题[1]。空气污染对人类造成严重的呼吸道疾病。吸入不同大小的颗粒物质甚至会导致长期的健康问题,包括多种心血管和呼吸系统疾病[2]。此外,一些污染物还会透过缝隙进入机械设备内部,在增加运转能耗的同时还为日后正常运转埋下了安全隐患[3]。因此,大气中颗粒物的暴露和相关的健康影响已引起广泛关注。建筑业是粉尘污染的主要来源之一,从地基开挖到场地最终清理的施工过程中,不可避免地会产生粉尘排放。建筑工地的各种活动,包括整地、抹灰、浇筑混凝土、装卸作业、移动建筑材料以及石材工程,都会导致 $PM_{0.5}$ 至 PM_{10} 范围内的尘埃颗粒物污染空气,这在城市环境中尤为明显。这些粉尘颗粒不仅给工厂的工人带来了健康问题,而且对居住在建筑工地附近的居民也产生了负面影响[4]。

非硬化路面及土方堆存现场产生的扬尘所占比重大[5]-[8]。在建筑施工现场产生的土壤扬尘控制方面,国内目前采用的控制措施主要分为三类,洒水、铺设防尘网和喷洒化学抑尘剂。其中,防尘网使用率最高,但防尘网采用极难降解高密度聚乙烯作为原料,会加剧环境污染。由于难以固定,极易被风吹破或吹走而失去抑尘作用。而洒水抑尘主要以水为喷淋物质,在使用过程中存在耗水量大,抑尘时间短,易产生二次扬尘等问题[9]。化学抑尘剂虽然具有良好的抑尘效果,但也存在诸多问题,如有毒、有腐蚀性、难以降解和二次污染等。因此,寻求绿色环保、高效抑尘、经济适用的抑尘剂已渐渐成为抑尘剂领域的研究热点。

近年来,酶诱导碳酸盐诱导沉淀技术作为一种新兴生物技术,在改善土体方面得到了广泛的应用[10]-[12],包括微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP)和脲酶诱导碳酸钙沉淀技术(EICP)两大类。MICP 以微生物中的酶作为间接催化剂,而 EICP 直接以商品酶或从植物中提取的酶作为直接催化剂,通过催化尿素水解生成碳酸根,再与钙离子结合生成碳酸钙,所生成的碳酸钙能够填充土壤中的孔隙,增强土壤的力学与机械性能,从而达到改善土体的效果[13][14]。随着研究的不断深入, MICP 应用过程中的不足逐渐暴露出来,尿素水解型的微生物价格昂贵,并且其活化、培养和接种的操作过程复杂,微生物还可能对土壤环境存在负面影响,这都限制了 MICP 技术的规模化应用。而 EICP 直接利用脲酶催化反应,节约了微生物

物培养的成本与时间,且对环境的适应性更强。脲酶的尺寸更小,能够有效地填充较小的孔隙,从而达到更均匀的加固效果[15]。

2. 脲酶诱导碳酸钙技术的应用研究现状

微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)技术中使用的细菌价格昂贵,培养过程复杂。为了简化培养微生物提取脲酶工艺的过程,近年来国内外学者提出从植物中提取脲酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术,并取得了良好的效果。

2.1. 大豆源

大豆中蕴含着丰富的脲酶。Nam I [16]等从大豆植物中提取出粗酶,根据 XRD 衍射及扫描电镜的结果:这种粗酶具有代替纯度很高的商用脲酶进行诱导碳酸钙沉积的潜质。Wu [17]等使用大豆制备脲酶,制作了无毒、腐蚀性小的环境友好型生物抑尘剂。由于脲酶可以促进尿素的水解,水解产物与 CaCl_2 发生反应后生成的 CaCO_3 沉淀吸附于煤尘表面,改变煤尘的粒度,从而对二次扬尘有一定的抑制作用。Aghaalizadeh S [18]等使用磷酸盐缓冲液提取刀豆,获得的改良土壤样品的最高单轴抗压强度为 380 kPa。能量色散 X 射线光谱和扫描电子显微镜的结果表明,颗粒碳酸钙能够有效地结合土壤。Weng [19]在进行大豆脲酶降解土壤生物矿化试验的基础上,还探究了以氯化钙、乙酸钙和硝酸钙为钙盐的影响,在试验条件下(1 mol/L 钙盐-尿素),氯化钙的生物矿化效果最好,乙酸钙次之,硝酸钙最差。阴离子对大豆脲酶活性也有抑制作用,其中硝酸根对脲酶活性的抑制作用强于醋酸根和氯离子。Liu [20]等通过改变大豆-尿素酶溶液(SUS)浓度、水泥固化液(CS)浓度、EICP 溶液用量和处理周期等因素,对沙漠沙进行了风沙试验。风速为 5~15 m/s 的气流中引入一定数量的撞击颗粒来模拟风沙流。EICP 处理能有效降低沙漠沙的风蚀潜力,在风剪切力和撞击颗粒的耦合作用下,EICP 处理土壤的风蚀速率显著降低。

2.2. 西瓜种子源

研究者对从西瓜种子中提取的脲酶也进行了调查。Kumar P [21]等使用丙酮分级分离、阴离子交换和尺寸排阻色谱纯化西瓜种子中的生物活性脲酶,实现 121 倍的增长和 3216 U/mg 的比活性。西瓜脲酶与脲酶和木豆脲酶具有血清学相似性,最适 pH 值为 7.3。Dilruksh R [22]等仍然选取西瓜种子并将其压碎获得脲酶的粗提取物,通过改变反应液的浓度进行固砂,获得了几千帕至几兆帕不等的单轴抗压强度。Neda J [23]等从西瓜种子这一生活废弃物中采用低技术手段获取到了脲酶,并评估了其应用的潜力,发现该种脲酶可达到的最大碳酸钙生成量大约占到理论值的 64%。

2.3. 刀豆源

刀豆同样富含脲酶,Abdel-Gawwad H [24]等研究的重点是利用刀豆来源的尿素酶-尿素混合物去除水中的重金属作为纳米碳酸盐矿物的成分。通过将 PbCl_2 、 CuCl_2 和 NiCl_2 溶液与尿素酶-尿素混合物单独混合,然后在 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 下孵育 24 小时来进行生物去除过程。在 8 h 内对 Pb 的去除率高达 99%以上,对 Cu 和 Ni 的去除率分别为 67.91%和 58.49%。Liu [25]等研究了刀豆粗脲酶(JCU)和大豆粗脲酶(SCU)介导的 EICP 对沙漠风积沙表面的生物胶结作用。JCU 的脲酶活性是 SCU 的 3.4 倍,从而导致更高的碳酸钙含量和表面强度的 JCU 处理的表土。在 40 g/L 刀豆和 80 g/L 大豆中, CaCO_3 含量和表面强度最高。在风速为 13.8 m/s 的风沙流条件下评价了抗风蚀能力,抗风蚀能力与表面强度呈正相关。JCU 比 SCU 具有更大的表层土壤稳定潜力。Khodadadi T [26]等对刀豆、刀豆粉、大豆和西瓜籽的粗提取物和纯化提取物的试管测试表明,在这四种植物来源中,粗刀豆提取物的单位产量最高,定义为每初始质量的来源材料的脲酶含量。将使用粗刀豆提取物进行生物胶结的 EICP 与三种市售酶通过颗粒土壤生物胶结的功效进

行了比较。通过 EICP 对经过生物胶结的颗粒土壤样品进行无限压缩测试表明,粗提取物和纯化程度较低的市售酶实际上比市售的高度纯化的脲酶更有效地提高土壤强度,这种效果归因于纯度较低的酶来源中存在互补蛋白。

大豆、西瓜种子和刀豆作为蕴含脲酶丰富的植物来源,已经被广泛应用到 EICP 技术中。在同一变量添加下,刀豆脲酶活性最高,其次是刀豆和西瓜种子。并且提取的脲酶均为具有较高的热稳定性,在 5℃~55℃下都随着温度的增加而大幅增加。这与 MICP 使用的微生物有显著不同,高温条件下会对微生物产生明显影响,从而导致产生的脲酶活性下降或热稳定性变化较大。不同植物源的脲酶活性最优 pH 值略有不同,其中刀豆和刀豆的最优 pH 值为 8,西瓜种子为 7。

植物源 EICP 技术提取出的脲酶尺寸较小,可用于细粒土的加固。但随着国内外学者深入的研究,发现游离态的脲酶不能为 CaCO_3 提供充足的成核位点,导致生成的 CaCO_3 晶体分布零散。通过添加特定的无机物或有机物,在提供成核位点的同时,还能提高土壤力学性能。

2.4. 添加剂

Li [27]等探讨了蔗糖和山梨醇两种成核剂对大豆-尿素酶诱导碳酸钙沉淀的影响,山梨醇或蔗糖的加入使文石的含量从 10.07%降低到 1.81%~3.93%,表明山梨醇或蔗糖对球文石向稳定方解石的转化有促进作用。山梨醇的加入使 EICP 的结晶尺寸增大,热稳定性提高,结晶度提高。蔗糖调节的 EICP 表现出中等的热稳定性,比没有成核剂的 EICP 差,表明蔗糖的加入降低了 EICP 的结晶度。Yin [28]等添加脱脂奶粉能提高脲酶活性,提高化学转化效率和强度。微观结构和粒度分析表明,脱脂奶粉的存在有利于砂粒之间形成更大的晶体团簇,从而产生更强的结合力和更好的力学性能。Han [29]等掺入不同比例的废弃面膜纤维(0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%),测定固化后的无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度。结果表明废弃面膜纤维的存在促进固定化,催化碳酸钙的生产,并最终在 0.2%的含量最佳。Zhang [30]等研究了 EICP-木质素粉土的无侧限抗压强度、弹性模量、粘聚力、内摩擦角和微观结构。所有的强度参数都随着木质素含量的增加而先增加后减小,木质素含量约为 5%时,其值最佳。具体而言,最佳的 UCS 强度,凝聚力和内摩擦角提高到约 5、10、和 3 倍。Arab [31]等将 EICP 和 1.5%海藻酸钠组合用于制备生物砖,并且测定了压缩和弯曲强度。这种混合技术提高了生物砖的抗弯强度。生产的生物砖显示出与 20%水泥处理的砂相当的抗折强度,从而满足这种砖的机械性能和吸水性要求。Yan [32]等以厨余蛋壳粉作为 EICP 的添加剂。蛋壳粉的高外表面积和对钙离子的亲和力使其成为碳酸钙沉淀的合适成核位点。实验结果表明,蛋壳粉的掺入,通过增加成核位点的数量和促进碳酸钙的沉淀,降低了对酶产物的抑制作用,调节了碳酸钙的沉淀模式,改善了颗粒的粒度分布,从而显著提高了试样的无侧限抗压强度。

不用添加剂对 EICP 的强化效果不同,糖类物质如蔗糖、海藻酸钠和纤维素,可以在碳酸钙形成过程中提供更多的成核位点,从而使得生成的碳酸钙更加密实。碳酸钙的晶体类型有方解石、球霏石和文石,其中方解石热稳定性最高。未使用添加剂时,植物源 EICP 生成的碳酸钙均存在三种晶体类型。在糖类物质作为添加剂后,生成的碳酸钙晶型向方解石转化,从而使得结晶尺寸和结晶度有所增大。脱脂奶粉中富含酪蛋白质,也能够在生成碳酸钙时提供成核位点。除此之外,还能提高脲酶活性从而提高化学转化效率。所生成的碳酸钙更容易结合形成晶体簇,从而具备更好的结合强度和机械性能。蛋壳粉的高比面积可以在 EICP 过程中提高对钙离子的亲和力,从而结合更多的钙离子以促进碳酸钙的生成。将厨余垃圾蛋壳粉作为添加剂,不仅改善了 EICP 技术,也实现了垃圾的绿色利用。

2.5. 工程应用案例

Zhan [33]等为了控制扬尘污染,应用 EICP 技术配制抑尘剂以探究实际应用效果。自主搭建风洞实验

平台并设置风速为 4、6、9、12 m/s 吹蚀 1 h 后, 未使用抑尘剂的治理损失分别为 500、1300、2000 和 2600 g/(m²·h)。喷洒抑尘剂后无论风速大小, 质量损失均小于 30 g/(m²·h)。以水为对照组, 将喷洒抑尘剂于室外 100 m² 土壤面积, 结果表明 10 天后大豆种子出芽率为 93%, 水的仅为 89%。且喷洒抑尘剂的土壤中大豆幼苗具有更好的长势与叶片颜色, 因为抑尘剂喷洒后的土壤具有更好的保水性。这表明配制的抑尘剂具有良好的生态相容性。Wang [34] 等将利用刀豆源 EICP 制备的抑尘剂应用于现场试验, 以总悬浮颗粒物(TSP)浓度为指标监测一个月内现场 TSP 浓度, 喷洒过程按 2 L/m² 的喷雾量进行实际应用。30 天后, 喷洒抑尘剂的区域 TSP 平均浓度为 60.89 μg/m³, 而喷洒水的区域为 99.1 μg/m³。这表明喷洒该抑尘剂能够起到长期抑尘效果。Wu [17] 等使用大豆源 EICP 制备抑尘剂, 并以普通碳钢、铁素体不锈钢和铝合金为材料进行腐蚀性实验, 结果表明抑尘剂对各类材料的腐蚀速度均小于水, 因为材料表明有白色物质碳酸钙的产生, 从而降低了腐蚀速率。以小鼠急性经口毒性试验来评价抑尘剂的毒理性, 小鼠经口急性毒性剂量为 5000 mg/kg 的抑尘剂和水, 均未见明显中毒现场。计算了假设控制 1000 m² 的尘样污染的成本效率分析, 并将喷洒量、喷洒车油耗和人工成本计算入成本后得出: 一年后喷洒水的成本总价为 253,675 元, 该抑尘剂的为 170636.4。因为喷洒水虽对环境无害, 但高温下易挥发的特性抑尘效率有效, 使得成本上升。

以上研究为 EICP 的广泛应用奠定了基础, 但也存在明显不足。在应用过程中, 大部分是在实验室进行的, 更大规模的使用和更贴合实际应用场景的研究亟待开展。并且在实验过程中, 考虑的因素仍不够全面, 如不同外加钙源和对脲酶提取液的研究较少。脲酶作为一种生物酶, 需要合适的保存温度。提取植物源脲酶后, 脲酶的保存仍需要开展大量的研究。

3. 发展趋势

我国城市化建设步伐加快, 人们对城市建筑的需求快速增加。部分城市为了满足居民的居住需求, 开始了持久的城市扩张和扩建。随着建筑面积的扩大、施工工地的增多, 施工扬尘污染带来的环境问题已经不容小觑[35] [36]。而许多城市在城市建设中, 由于裸露地面的大量存在和城市周边生态环境的恶化, 使得扬尘污染进一步加重。可以预计今后相当长的一段时期内扬尘污染仍将是影响我国城市空气质量的重要因素[37]。抑尘剂的使用对扬尘控制起到重要作用, 新型抑尘剂的研究得到飞速发展。抑尘剂组成也由单一型向性能优异的复合型、无二次污染的环保型发展, 寻找价格低廉、材料来源广泛、能抵抗各种恶劣条件的新型抑尘剂是未来的发展方向。而生物型抑尘剂具有其他传统化学抑尘剂原料所不具备的天然降解性, 绿色环保, 更加符合当今环保要求。同时, 生物原料属于可再生资源, 来源广泛, 易于获取, 在达到良好抑尘效果的同时, 可大大降低抑尘剂生产成本[34]。因此, 具有抑尘效率高、符合环保理念的生物型抑尘剂具有广阔的发展前景, 是未来环保型抑尘剂研究的主要方向[16]。

4. 结语

目前国内外关于植物源脲酶诱导碳酸钙技术的研究已取得一定进展, 但大多集中在实验室阶段, 主要通过小规模实验来对该技术进行探究。脲酶来源广泛, 其中对大豆、西瓜种子和刀豆的研究较为丰富。但不同来源脲酶的催化活性和稳定性差异较大, 这就需要对其他来源的脲酶也开展研究。添加剂能够有效改善生成碳酸钙的晶体类型与研究, 研究者们对加入添加剂后的改善效果已经有了许多研究, 但关于添加剂如何调控碳酸钙晶体成核与生长的微观机制仍缺乏系统分析。后续可以通过分子角度出发, 考察晶体成核与生长的微观机制。综上所述, 该项技术在未来可聚焦于拓展工程应用场景和优化脲酶提取工艺等方面, 确保该技术的可持续性和经济可行性, 为环境治理与可持续发展提供新的技术支撑。

基金项目

重庆科技大学研究生创新计划项目“基于刀豆脲酶的生物抑尘剂性能和机理研究”(YKJCX2420701)。

参考文献

- [1] Ma, Y., Gong, M., Zhao, H. and Li, X. (2020) Contribution of Road Dust from Low Impact Development (LID) Construction Sites to Atmospheric Pollution from Heavy Metals. *Science of the Total Environment*, **698**, Article 134243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134243>
- [2] Wang, M., Yao, G., Sun, Y., Yang, Y. and Deng, R. (2023) Exposure to Construction Dust and Health Impacts—A Review. *Chemosphere*, **311**, Article 136990. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136990>
- [3] Cheriyan, D. and Choi, J. (2020) A Review of Research on Particulate Matter Pollution in the Construction Industry. *Journal of Cleaner Production*, **254**, Article 120077. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120077>
- [4] Manzhilevskaya, S. (2024) Dust Pollution in Construction Sites in Point-Pattern Housing Development. *Buildings*, **14**, Article 2991. <https://doi.org/10.3390/buildings14092991>
- [5] Shao, B., Hu, Z., Liu, Q., Chen, S. and He, W. (2019) Fatal Accident Patterns of Building Construction Activities in China. *Safety Science*, **111**, 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.019>
- [6] Azarmi, F., Kumar, P., Marsh, D. and Fuller, G. (2016) Assessment of the Long-Term Impacts of PM10 and PM2.5 Particles from Construction Works on Surrounding Areas. *Environmental Science: Processes & Impacts*, **18**, 208-221. <https://doi.org/10.1039/c5em00549c>
- [7] Araujo, S., Priscylla, I., et al. (2016) Particulate Matter Concentration from Construction Sites: Concrete and Masonry Works. *Journal of Environmental Engineering*, **142**, 05016004.
- [8] Sung, W., Yoo, S. and Kim, Y. (2021) Development of a Real-Time Total Suspended Particle Mass Concentration Measurement System Based on Light Scattering for Monitoring Fugitive Dust in Construction Sites. *Sensors and Actuators A: Physical*, **331**, Article 113017. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113017>
- [9] Zhou, G., Ding, J., Ma, Y., Li, S. and Zhang, M. (2020) Synthesis and Performance Characterization of a Novel Wetting Cementing Agent for Dust Control during Conveyor Transport in Coal Mines. *Powder Technology*, **360**, 165-176. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.10.003>
- [10] Arab, M.G., Refaei, M., Alotaibi, E., et al. (2024) Optimizing the Compressive Strength of Sodium Alginate-Modified EICP-Treated Sand Using Design of Experiments. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **36**, Article 04024017.
- [11] Almajed, A., Moghal, A.A.B., Nuruddin, M. and Mohammed, S.A.S. (2024) Comparative Studies on the Strength and Swell Characteristics of Cohesive Soils Using Lime and Modified Enzyme-Induced Calcite Precipitation Technique. *Buildings*, **14**, Article 909. <https://doi.org/10.3390/buildings14040909>
- [12] Naeem, M., Arab, M.G., Elbaz, Y., Omar, M., Ezzat, H. and Zeiada, W. (2024) Resilient Behavior of Bio-Cemented Sandy Soil Treated with Enzyme-Induced Carbonate Precipitation for Pavement Applications. *Construction and Building Materials*, **411**, Article 134434. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134434>
- [13] Sun, X., Miao, L., Wang, H., Yuan, J. and Fan, G. (2021) Enhanced Rainfall Erosion Durability of Enzymatically Induced Carbonate Precipitation for Dust Control. *Science of the Total Environment*, **791**, Article 148369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148369>
- [14] Fatehi, H., Abtahi, S.M., Hashemolhosseini, H. and Hejazi, S.M. (2018) A Novel Study on Using Protein Based Biopolymers in Soil Strengthening. *Construction and Building Materials*, **167**, 813-821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.028>
- [15] Bian, Y., Chen, Y., Zhan, L., Guo, H., Ke, H., Wang, Y., et al. (2024) Effects of Enzyme-Induced Carbonate Precipitation Technique on Multiple Heavy Metals Immobilization and Unconfined Compressive Strength Improvement of Contaminated Sand. *Science of the Total Environment*, **947**, Article 174409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174409>
- [16] Nam, I., Chon, C., Jung, K., Choi, S., Choi, H. and Park, S. (2015) Calcite Precipitation by Ureolytic Plant (*Canavalia ensiformis*) Extracts as Effective Biomaterials. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **19**, 1620-1625. <https://doi.org/10.1007/s12205-014-0558-3>
- [17] Wu, M., Hu, X., Zhang, Q., Zhao, Y., Sun, J., Cheng, W., et al. (2020) Preparation and Performance Evaluation of Environment-Friendly Biological Dust Suppressant. *Journal of Cleaner Production*, **273**, Article 123162. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123162>
- [18] Aghaalizadeh, S., Kalantary, F., Ghanati, F., et al. (2024) Improving the Stability of Sandy Soils by Using Urease Enzyme in Soybean Plants. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, **11**, 4275-4288.
- [19] Weng, Y., Zheng, J., Lai, H., Cui, M. and Ding, X. (2024) Biomineralization of Soil with Crude Soybean Urease Using

- Different Calcium Salts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **16**, 1788-1798. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.09.033>
- [20] Liu, Y., Gao, Y., He, J., Zhou, Y. and Geng, W. (2023) An Experimental Investigation of Wind Erosion Resistance of Desert Sand Cemented by Soybean-Urease Induced Carbonate Precipitation. *Geoderma*, **429**, Article 116231. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116231>
- [21] Kumar, P., Divya, and Kayastha, A.M. (2024) Exploring the Catalytic Potential of Watermelon Urease: Purification, Biochemical Characterization, and Heavy Metal Precipitation. *International Journal of Biological Macromolecules*, **282**, Article 136798. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.136798>
- [22] Dilrukshi, R.A.N., Nakashima, K. and Kawasaki, S. (2018) Soil Improvement Using Plant-Derived Urease-Induced Calcium Carbonate Precipitation. *Soils and Foundations*, **58**, 894-910. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2018.04.003>
- [23] Javadi, N., Khodadadi, H., Hamdan, N. and Kavazanjian, E. (2018) EICP Treatment of Soil by Using Urease Enzyme Extracted from Watermelon Seeds. *IFCEE* 2018, Florida, 5-10 March 2018, 115-124. <https://doi.org/10.1061/9780784481592.012>
- [24] Abdel-Gawwad, H.A., Hussein, H.S. and Mohammed, M.S. (2020) Bio-Removal of Pb, Cu, and Ni from Solutions as Nano-Carbonates Using a Plant-Derived Urease Enzyme-Urea Mixture. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 30741-30754.
- [25] Liu, L., Gao, Y., Geng, W., Song, J., Zhou, Y. and Li, C. (2023) Comparison of Jack Bean and Soybean Crude Ureases on Surface Stabilization of Desert Sand via Enzyme-Induced Carbonate Precipitation. *Geoderma*, **435**, Article 116504. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116504>
- [26] Khodadadi Tirkolaei, H., Javadi, N., Krishnan, V., Hamdan, N. and Kavazanjian, E. (2020) Crude Urease Extract for Biocementation. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **32**, Article 04020374. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0003466](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003466)
- [27] Li, M., Yang, Y., Zhang, S., Chen, X., Yin, H. and Zhu, L. (2023) Effects of Sorbitol and Sucrose on Soybean-Urease Induced Calcium Carbonate Precipitate. *Biogeotechnics*, **1**, Article 100052. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100052>
- [28] Yin, J., Zhang, L., Zhang, K., Zhang, C., Yang, Y., Shahin, M.A., *et al.* (2025) Efficacy of Milk Powder Additive in Biocementation Technique for Soil Stabilization. *Biogeotechnics*, **3**, Article 100111. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100111>
- [29] Han, Y., Chen, Y., Chen, R., Liu, H. and Yao, X. (2023) Effect of Incorporating Discarded Facial Mask Fiber on Mechanical Properties of MICP-Treated Sand. *Construction and Building Materials*, **395**, Article 132299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132299>
- [30] Zhang, J., Wang, X., Shi, L. and Yin, Y. (2022) Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) Combined with Lignin to Solidify Silt in the Yellow River Flood Area. *Construction and Building Materials*, **339**, Article 127792. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127792>
- [31] Arab, M.G., Omar, M., Almajed, A., Elbaz, Y. and Ahmed, A.H. (2021) Hybrid Technique to Produce Bio-Bricks Using Enzyme-Induced Carbonate Precipitation (EICP) and Sodium Alginate Biopolymer. *Construction and Building Materials*, **284**, Article 122846. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122846>
- [32] Liu, Y., Xia, Y., Mehmood, M., Wang, L., Nie, W., Zhao, Y., *et al.* (2024) Soil-Water Retention Capacity of Expansive Soil Improved through Enzyme Induced Carbonate Precipitation-Eggshell Powder. *Biogeotechnics*, **2024**, Article 100146. <https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100146>
- [33] Zhan, Q., Qian, C. and Yi, H. (2016) Microbial-Induced Mineralization and Cementation of Fugitive Dust and Engineering Application. *Construction and Building Materials*, **121**, 437-444. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.016>
- [34] Wang, X., Shi, Y., Hu, Y., Lin, Y., Chen, H., Zhang, C., *et al.* (2025) Preparation of Eco-Friendly Dust Suppressant by Extracting Biological Enzyme from Jack Bean: Performance Evaluation and Mechanism Exploration. *International Journal of Biological Macromolecules*, **305**, Article 140580. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140580>
- [35] Zhu, Y., Cui, Y., Shan, Z., Dai, R., Shi, L. and Chen, H. (2021) Fabrication and Characterization of a Multi-Functional and Environmentally-Friendly Starch/organo-Bentonite Composite Liquid Dust Suppressant. *Powder Technology*, **391**, 532-543. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.06.050>
- [36] Zinchenko, A., Sakai, T., Morikawa, K. and Nakano, M. (2022) Efficient Stabilization of Soil, Sand, and Clay by a Polymer Network of Biomass-Derived Chitosan and Carboxymethyl Cellulose. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **10**, Article 107084. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107084>
- [37] Lee, T., Kim, S., Kim, S., Kwon, N., Rho, S., Hwang, D.S., *et al.* (2020) Environmentally Friendly Methylcellulose-Based Binders for Active and Passive Dust Control. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 50860-50869. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c15249>