

## 微藻生物矿化作用及其应用前景

张维<sup>†</sup>, 王田田<sup>†</sup>, 徐纪龙, 郭明志, 王玉鑫, 朱梦璐

(安徽科技学院, 安徽 滁州 233100)

**摘要:** 微藻能够在细胞外形成多样化的矿化结构, 因其具有纳米孔洞、生物学胶黏性和优良机械性能等特点, 可以广泛地应用于材料科学、医学领域、水资源净化、合成纳米颗粒、仿生矿化和维护生态环境等领域。归纳了微藻领域已报道的两种典型生物矿化现象——生物钙化和生物硅化, 并综合性分析了微藻矿化作用产物在各个相关领域中的应用前景。微藻生物矿化作用可与传统生物质培养与生产相结合, 以建立更经济与多样化的微藻节能减排与资源化利用新技术。

**关键词:** 微藻; 生物矿化; 节能减排; 资源化利用

中图分类号: TU525

文献标志码: A

文章编号: 2096-3491(2024)05-0422-06

### Biom mineralization of microalgae and its application prospects

ZHANG Wei<sup>†</sup>, WANG Tiantian<sup>†</sup>, XU Jilong, GUO Mingzhi, WANG Yuxin, ZHU Munlu

(Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, Anhui, China)

**Abstract:** Microalgae, with their wide variety of species, are an efficient biological resource. Many studies have been reported the phenomenon of biomineralization in algae, which can be mainly classified into two categories: biocalcification and biosilicification, according to the composition of mineralization products. The biomineralization products are formed by the catalysis of biomacromolecules produced by microalgal growth and metabolism. They are characterized by nanopores, biological adhesion, and excellent mechanical properties, and can be widely used in the fields of material science, the medical field, water purification, synthesis of nano-particles, biomimetic mineralization, and maintenance of the ecological environment. Moreover, many biomineralization products often appear outside the cell. These products can be combined with traditional biomass cultivation and production to establish more economical and diversified new technologies for energy-saving, emission reduction and resource utilization of microalgae.

**Key words:** microalgae; biomineralization; energy conservation; resource utilization

### 0 引言

微藻是一种可以进行光合作用的浮游微生物类群, 其种类繁多, 广泛存在于江河、湖泊以及海洋等水生环境中。根据目前的报道, 地球上存在三万多种不同的微藻品种, 形态各异<sup>[1]</sup>。它们是高效的生物资源, 在地球环境系统中, 有高达90%的光合作

用是由海洋藻类完成的, 是不可多得的高效固碳生物体<sup>[2]</sup>。藻类生物质应用广泛, 其中不乏许多具有高营养与功能价值的经济型品种, 可以用作食品、药物以及化学品的生产原料, 此外产油微藻被认为在节能减排以及可持续能源生产上具有巨大的应用潜力<sup>[3]</sup>。生物矿化作用是指在生物体的生命活动中, 选择性地吸收外界的无机元素, 并调控无机矿物产

收稿日期: 2024-04-04 修回日期: 2024-08-08 接受日期: 2024-10-14

作者简介: 张维(1979-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 藻类生物技术, E-mail: zhangwei@ahstu.edu.cn; 王田田(2001-), 男, 硕士生, 研究方向: 微藻应用技术, E-mail: 1768411065@qq.com; <sup>†</sup> 对本研究有同等贡献, 为本文共同第一作者

基金项目: 安徽省教育厅重点项目(2023AH051843); 安徽科技学院高层次人才引进项目(SKYJ202002); 国家级大学生创新创业训练计划(202110879028 S202210879298)

引用格式: 张维, 王田田, 徐纪龙, 等. 微藻生物矿化作用及其应用前景[J]. 生物资源, 2024, 46(5): 422-427.

Zhang W, Wang T T, Xu J L, et al. Biom mineralization of microalgae and its application prospects [J]. Biotic Resources, 2024, 46(5): 422-427.

生的过程。有关该方面的应用研究已经成为国际上研究的热点领域之一,被认为在生物材料、生物陶瓷、生物玻璃以及环境等领域具有广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。有关藻类的生物矿化现象在国内外文献中广泛报道,除了包括颗石藻(coccolithophores)等典型矿化物种外,还涉及很多被广泛应用的单细胞微藻类型,如聚球藻、集胞藻、小球藻、绿球藻等。考虑到生物矿化作用很多都发生在细胞外环境,由微藻生长代谢分泌的生物大分子催化形成,并不会干扰胞内代谢物的合成<sup>[5,6]</sup>。如果能够将微藻生物质生产与矿化作用相结合,将有可能进一步提升微藻生产与应用价值<sup>[7]</sup>。因此,归纳总结目前藻类领域所报道的生物矿化作用现象及其机制,并分析这些生物矿化作用产物在未来生产领域中的应用前景,将有可能为利用微藻节能减排生产与资源化利用技术研究提供新的思路与方案。

## 1 藻类中的生物矿化作用

生物矿化不同于无机矿化作用,在矿化物的成核和生长过程中主要由有机大分子和无机离子的相互作用所控制<sup>[8]</sup>。它对于地球生态环境和资源的形成与稳定具有重要作用,而且有多方面的报道表明其在地球地质形态的形成与演变过程中意义重大<sup>[9]</sup>。

### 1.1 生物钙化

具有生物钙化现象的藻类往往被称为钙藻,也叫作石灰藻,是一类具有分泌和沉积钙质功能的藻类的通称。这种钙化过程主要是一种无机碳酸钙的形成过程。例如,颗石藻作为一种单细胞海洋浮游微生物,在海洋中能够产生碳酸钙沉淀,并且有研究显示颗石藻的年碳酸钙产量约为海洋年碳酸钙总产量的三分之一<sup>[10]</sup>。有研究显示,九寨等地石灰华的生物成因是蓝藻通过生物矿化作用产生的 $\text{CaCO}_3$ 在藻体上原位沉积<sup>[11]</sup>。

$\text{CaCO}_3$ 的产生必须满足两个必要条件:水体中碳酸盐达到饱和和存在成核位点。微藻的钙化多发生于细胞内,但是也有很多藻类在细胞间沉积钙化物,如珊瑚藻晶核是存在于细胞壁的聚多糖,钙化晶体在细胞外产生,其机制都是将 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ 转化为 $\text{CaCO}_3$ 的过程。具体过程包括: $\text{CO}_2$ 的摄取造成 $\text{HCO}_3^-$ 的积累,在碳酸酐酶(CA)作用下 $\text{HCO}_3^-$ 将其转化为 $\text{CO}_2$ ,同时释放 $\text{OH}^-$ 离子;pH升高,产生 $\text{CO}_3^{2-}$ ,最后 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{CO}_3^{2-}$ 产生 $\text{CaCO}_3$ 沉淀<sup>[12]</sup>。

微藻钙化是可控的,并且受到光照、温度、污染

物等多种因素的影响,是一个复杂的过程,如海洋酸化对颗石藻生长及钙化作用既有积极作用也有消极作用。有研究显示藻类的胞外聚合物(EPS)可从微观层面对 $\text{CaCO}_3$ 晶体的成核、取向及尺寸进行调控。例如褐藻能通过产生海藻酸盐和聚海藻糖来调控其生物矿化 $\text{CaCO}_3$ 形貌的产生。颗石藻则是一类对外部环境变化响应灵敏的浮游微生物,表层海水中的颗石藻死亡后,由颗石球细胞分泌的颗石会沉降在海底沉积物中,成为深海碳酸盐最重要的组成部分<sup>[13]</sup>。

$\text{CaCO}_3$ 是自然界中最丰富的生物矿物,生物体从环境中摄取 $\text{Ca}^{2+}$ 将其转变为碳酸钙沉淀有利于维持细胞内低 $\text{Ca}^{2+}$ 浓度,还起到支撑和保护的作用<sup>[14]</sup>。例如,有研究表明颗石藻钙化作用产生的颗石粒可以保护藻细胞避免受光损伤<sup>[13]</sup>,并且该过程有助于微藻吸收并储存 $\text{CO}_2$ ,为碳的固定提供了有效途径。生物矿化碳酸钙能产生高附着力的细胞壁,帮助微藻在恶劣环境中生长,扩大了微藻的生长环境范围<sup>[15]</sup>。藻类生物是构成浮游钙化生物的主体,在碳酸盐的沉积过程中发挥重要作用。例如,有研究显示在北塔里木盆地奥陶纪的石灰岩中发现了钙化藻类化石<sup>[16]</sup>。

### 1.2 生物硅化

硅藻可从海洋中吸收硅,并以硅酸的形式运输,最后积累在细胞壁,形成硅酸盐沉淀。据统计,全世界硅藻已超过10 000种并且硅藻生长范围广泛,在维持生态平衡方面发挥着重要的作用<sup>[17]</sup>。硅藻能够迅速响应环境因素的变化,因此可以作为海洋环境的指示剂<sup>[18]</sup>。此外硅藻能够形成硅质外壳,不易被溶解,能在沉积物中长期保存。因此,研究表层沉积硅藻对于海洋古地理环境的研究具有重要意义。

硅藻能够产生硅酸盐沉淀,更为确切地说是无定形水合二氧化硅<sup>[19]</sup>。硅化形成的原理是当硅藻生长环境中的硅酸从外部环境移动到生物体的细胞或隔间内,并在硅藻中积累沉积形成水合二氧化硅的过程<sup>[20]</sup>。首先,二氧化硅形成的过程涉及组氨酸氮原子的质子转移、水分子的释放、硅酸与丝氨酸残基的共价结合以及水分子的释放等;然后,这种丝氨酸键合的硅酸分子会重复该反应周期调控高元硅酸低聚物的产生,并且在硅藻中蛋白质能够诱导二氧化硅发生聚合<sup>[21]</sup>。

微藻生物硅化是一种复杂且受到精密调控的生物矿化过程。硅藻通过细胞膜内的硅转运蛋白将硅酸盐从外部吸收到细胞内。在细胞内,硅酸盐会被转运到一个胞泡中,该胞泡中含有硅缩合体和其他

相关物质。硅缩合体可能由硅酸分子、蛋白质和其他有机分子组成。在胞泡中,硅酸分子会聚合形成二氧化硅团簇,最终沉积在细胞壁或硅壳中<sup>[22]</sup>。硅壳具有有规律的孔排列的二维微米级图案,除了能提供一般的机械支撑和保护作用,还具有生物传感器的功能,这种生物传感器的功能可能有助于硅藻在动态环境中适应生存。硅藻可以根据环境条件的变化来调整硅壳的生成速率和结构,这种高度可控的矿化过程为微藻提供了一种适应外界变化的策略,使其能够在不断变化的环境中生存和繁衍。微藻生物硅化过程的多功能性和可控性,为进行定向合成和工程调控提供了机会,将来可能通过基因编辑和生物工程技术进一步优化硅藻生物硅化的特性,以满足不同领域的需求。通过对硅藻硅化过程的深入理解,可以探索更广泛的生物技术和生物医学应用,并为未来的生物工程和材料科学研究提供新的思路 and 方向。

## 2 微藻矿化沉淀的应用现状

微藻通过生物矿化能够产生不同的矿化材料,这些由生物矿化产生的矿物质往往具有较强的机械强度、良好的韧性、良好的生物相容性以及具有纳米孔洞等性质<sup>[23]</sup>。正是由于这些特殊的性质,关于微藻矿化沉淀的应用发展较快,并且随着对微藻矿化的研究被引入到无机化学、分子生物学、细胞生物学等领域,不同学科从不同角度对微藻矿化展开了系统的研究。有关微藻矿化的沉淀已被应用于工业领域,如无机矿化材料的制备、生物医药;如制备药物载体、污水的净化、纳米材料、仿生材料;如人体的骨骼修复材料的制备和环境保护等领域<sup>[24]</sup>。

### 2.1 无机矿化材料

微藻的生物矿化作用是一个高度可控的过程,产生的矿化沉淀与非生物成因的矿物质相比在结构、形貌和性质等方面具有明显的不同<sup>[6]</sup>。相对于普通的无机材料,由微藻矿化产生的沉淀除了具有无机成分,往往还含有部分有机成分,使得矿化材料具有更强的机械性能,良好的韧性以及光滑的表面等性质。例如,有研究证明贝壳珍珠层的文石片具有极高的韧性,这是其他文石片无法比拟的<sup>[25]</sup>。因此,通过对微藻生物矿化过程研究,有可能实现生物矿化的自主调控并生成复杂且具有分级结构无机材料,这将大大促进材料科学和生物学相关领域的发展和创新<sup>[12]</sup>。

目前对微藻矿化机制和矿化材料的研究,已经为人类的生产生活带来了便利和创新。例如,一些

特殊的微藻生物矿化体还可用于制作骨再生材料和组织工程支架等。此外,微藻生物矿化还可以用于制备具有特定性能的钙化产品,如光敏剂、生物荧光剂、紫外线吸收剂等<sup>[25]</sup>。根据生物矿化原理制备的类似水泥的碳酸钙胶凝材料,还可以增加建筑物的稳定性和耐久性,对建筑材料起封堵加固作用<sup>[26]</sup>。虽然微藻无机矿化材料制备技术还处于发展阶段,技术成本较高、规模化难度较大,然而进一步完善其相关技术和设备,将有助于推动该类资源的高效利用。

### 2.2 生物与医药

CaCO<sub>3</sub>对人体的亲和性与无毒性已经成为一种有前景的药物载体。微藻矿化产生的碳酸钙,具有孔洞结构,以及较好的生物学胶黏性,更适合应用于药物的运输<sup>[27]</sup>。有研究显示,微藻能够产生富有纳米孔洞的轻质碳酸钙晶体,可用作基质材料制备纳米复合水凝胶,该碳酸钙沉淀因其多孔性和较好的生物学胶粘性,能够提高水凝胶吸收和释放药物的性能,能够高效地将有效成分传递至药物活性位点并发挥功能。微藻本身也有极高的医学研究价值,如有研究显示,从红藻门植物中提取的多肽、糖类物质具有抗氧化、抗炎活性、抗肿瘤活性和免疫调节等生物活性<sup>[28]</sup>。除了碳酸钙沉淀,硅藻产生的硅酸盐沉淀也广泛应用于药物的传递。例如,硅藻产生的二氧化硅可以成功作为药物载体应用于植入药物的运输<sup>[29]</sup>。

此外,生物矿化材料由于具有良好的生物学胶粘性和高机械强度,在医疗材料和器械的制备中也得到了广泛的应用。例如,生物矿物可以用于制造人工骨骼、关节、牙科修复材料等医疗器械,并可用于替代或修复受损的组织 and 器官;微藻产生的矿化沉淀可以作为骨骼修复材料植入人体,其高机械强度可以提供更好的支持和稳定性<sup>[30]</sup>。未来该领域研究的不断推进将会大大推动微藻矿化技术在药物载体、医疗器械和药物筛选等方面的应用,将对生物医药领域的发展具有极大的推进作用。

### 2.3 净化水资源

微藻作为海洋的初级生产力,能够通过生物矿物作用影响和改变水体中的元素分布,在净化海洋环境中发挥重要作用。一方面,微藻产生的矿化沉淀具有纳米孔洞,能够吸附重金属和有机物等污染物,并将其沉积于海底,从而减少海洋污染的扩散<sup>[31]</sup>。同时,这种生物矿物还能够吸收氮、磷等营养物质,减轻水体的富营养化。例如,已有大量报道利用石油化工废水、生活废水等不同类型的废水

来培养黄丝藻能够净化污水,并且其产生的生物质可用于生物燃料等高附加值产品的生产<sup>[32]</sup>。另一方面,微藻可以利用重金属作为矿化的原料,形成矿化沉淀达到净化海水的目的。例如,有研究显示,微藻 FZUI-321 可以将可溶性的  $Pb^{2+}$  矿化,起到净化海水的目的<sup>[31]</sup>。多方面的研究结果均表明,微藻矿化材料以其良好的吸附性,在水资源净化方面展现了广阔的应用前景,可应用于污水处理、水体富营养化和饮用水处理等方面。随着相关技术的逐渐成熟,将会不断解决运行稳定性差的问题,大大推动微藻矿化在水资源净化方面的应用。

#### 2.4 合成纳米颗粒

硅藻通过生物矿化能够产生硅质外壳,硅质壳在构造上非常精细,被广泛应用于生物纳米材料的合成中。已有大量报道利用硅藻来制备金、银等纳米粒子。例如,有研究显示能够利用局部分离的硅藻进行孵育,加入氯化金得到氯化金细胞,再经过 EDTA、SDS 和正己烷等处理后,即可得到金纳米颗粒<sup>[29]</sup>。利用硅藻矿化产生的纳米金颗粒具有特殊的物理化学性质,其在电化学生物传感器中有越来越多的应用。此外有研究显示,通过调控淡水硅藻可合成不同形态和尺寸的硅锆纳米颗粒。有研究报道,由硅藻合成的纳米颗粒能够诱导细胞凋亡等作用,在抗癌和抗癌药物的研发中具有重要意义<sup>[28]</sup>。通过微藻调控的矿化形成过程,可以控制纳米材料的形貌、尺寸和结构,有利于制备特定纳米材料,具有广泛的发展前景,但同时也面临着挑战,需要推动微藻矿化技术与纳米材料合成技术的结合,以实现更广泛的应用。

#### 2.5 仿生矿化

微藻产生的矿物沉淀是一种有机-无机复合材料,是一种高度有序的层次结构。通过生物矿化产生具有精细结构的材料,吸引越来越多的科学家致力于仿生矿化的研究,如今仿生矿化已经成为生命、化学、材料和物理等学科中一个极其活跃的前沿领域<sup>[33]</sup>。仿生矿化就是科学家利用生物体矿化机制来制备复合材料的过程,通过仿生矿化可以形成结构复杂、形貌多样和尺寸可控的先进材料。有研究显示,近年来一系列仿生物矿化多孔材料已在传感器、催化剂、药物传递等方面得到了应用。现如今,仿生骨骼材料、人工牙齿材料以及仿蜘蛛纤维已经被成功仿生合成出来<sup>[34]</sup>,并且已经有研究显示,通过仿生物矿化制备的壳聚糖氧化锌复合材料有良好的抗菌作用,对解决生物污损问题也具有广泛的应用前景<sup>[35]</sup>。通过对微藻矿化机制的研究将有助于推动仿

生合成技术与纳米矿化材料的进一步发展,具备重要的实际应用意义。

#### 2.6 维护生态环境

微藻生物矿物还可以为海洋生态系统提供基础结构,并促进生物多样性的维持。例如,珊瑚礁是由珊瑚动物骨骼形成的生物矿物,它们为众多海洋生物提供栖息地和食物来源。除此之外,生物矿物还能提供保护屏障,减少海岸侵蚀和风浪侵害,保护海洋生态系统的稳定性<sup>[36]</sup>。因此,生物矿物在净化海洋环境、维护生态平衡方面扮演着非常重要的角色。加强对生物矿化的研究和保护,有助于改善海洋生态环境,保护海洋资源。有研究显示,藻类的碳酸盐生物沉积对构建珊瑚礁、形成海底石灰岩等地质现象起着重要作用<sup>[37]</sup>。因此,研究微藻矿化不仅有利于净化水资源和保护生态,而且有利于推动生物能源的发展,在维护生态环境方面具有巨大的潜力。但目前仍面临着微藻矿化沉淀的生产成本相对较高、生产技术不完善和市场需求仍不够清晰等挑战,通过对微藻矿化的持续研究,微藻将会在生态环境保护 and 可持续发展中发挥重要作用。

### 3 小结

微藻中的生物矿化研究主要集中在生物钙化和生物硅化两方面,从原理上讲,这两种过程都是通过微藻的代谢作用将环境中游离的无机离子转变成聚集的矿化沉淀物形式,生物钙化在细胞外形成无机的碳酸盐沉淀,生物硅化则形成硅质化的细胞壁结构。目前传统的微藻生产过程多集中于其胞内代谢产物的提取、加工与利用,两类生物矿化物的生产均有潜力同传统微藻产业实现很好的互补效果。因此,不断挖掘具有胞内物质和无机矿化产物双功能的微藻品种资源,建立相关的耦合性生产过程与工艺技术,将有助于解决微藻生产规模化难度大和工业应用成本高等诸多问题,为实现高效的微藻可持续化生产与资源利用奠定理论与应用基础。

相比于化学矿化过程,生物矿化反应条件较为温和,且通常对底物浓度要求不高,生产过程不会带来额外环境污染问题,相反还可实现节能环保的效果。虽然这些微藻的生物矿化产物往往具有纳米孔隙、精细的结构、良好的韧性、优良的机械强度和良好的生物学胶黏性等特点,在多方领域具有潜在的应用价值。但是生物矿化过程依赖于微藻细胞的生长代谢,过程较为缓慢、效率有待提高,而且微藻是如何通过调控生物矿化作用来影响矿化产物的形貌及特征的有待进一步研究,这需要依赖于人类对生

物矿化作用与形成机制认识的不断加深,以及代谢工程及合成生物学技术在该领域的不断应用,从而实现具有矿化过程高度可控性的微藻品种资源的人工选育与构建。通过对微藻生物矿化的不断研究,必将发掘更多关于微藻生物矿化的潜力,为人类生活带来更多的便利与创新。

## 参考文献

- [1] 江红霞, 郑怡. 微藻的药用、保健价值及研究开发现状[J]. 亚热带植物科学, 2003, 32(1): 68-72.  
Jiang H X, Zheng Y. A review of pharmaceutical and health care value of microalgae and their current status of research and development [J]. Subtropical Plant Science, 2003, 32(1): 68-72.
- [2] Udaypal, Goswami R K, Mehariya S, *et al.* Advances in microalgae-based carbon sequestration: current status and future perspectives [J]. Environ Res, 2024, 249: 118397.
- [3] 刘天中, 张维, 王俊峰, 等. 微藻规模培养技术研究进展[J]. 生命科学, 2014, 26(5): 509-522.  
Liu T Z, Zhang W, Wang J F, *et al.* A review of mass cultivation technology for microalgae [J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2014, 26(5): 509-522.
- [4] 王婉蓉, 秦雯, 顾俊婷, 等. 细菌介导生物矿化的研究进展[J]. 中国材料进展, 2021, 40(11): 930-937.  
Wang W R, Qin W, Gu J T, *et al.* Progress of bacteria-mediated biomineralization [J]. Materials China, 2021, 40(11): 930-937.
- [5] 孙林, 秦松, 刘正一, 等. 藻类生物钙化研究进展[J]. 海洋湖沼通报, 2023, 45(3): 164-171.  
Sun L, Qin S, Liu Z Y, *et al.* Progresses in algal calcification [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(3): 164-171.
- [6] Yates K K, Robbins L L. Production of carbonate sediments by a unicellular green alga [J]. American Mineralogist, 1998, 83(11-12): 1503-1509.
- [7] Xu H L, Wang H, Liang Z X, *et al.* A novel biomineralization-inspired flocculation approach for harvesting high quality microalgal biomass: dual action of cationic polyelectrolytes and nanosilica [J]. Bioresource Technology: Biomass, Bioenergy, Biowastes, Conversion Technologies, Biotransformations, Production Technologies, 2023, 388: 129739.
- [8] Cano M, Giner-Casares J J. Biomineralization at fluid interfaces [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2020, 286: 102313.
- [9] 王宝利, 刘丛强. 水体内藻类的生物地球化学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(1): 79-82.  
Wang B L, Liu C Q. Algal biogeochemistry in aquatic system [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2004, 23(1): 79-82.
- [10] 林燕妮, 王寅初, 任庆敏, 等. 不同基因型颗石藻 (*Emiliania huxleyi*)对海洋酸化及高光耦合的生理响应[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2023, 36(4): 399-409, 493.  
Lin Y N, Wang Y C, Ren Q M, *et al.* Physiological response of different genotypes of *Emiliania huxleyi* to ocean acidification and high light coupling [J]. Journal of Yantai University (Philosophy and Social Science Edition), 2023, 36(4): 399-409, 493.
- [11] 田友萍, 何复胜. 石灰华的生物成因研究: 以四川九寨沟和贵州黄果树等地石灰华为例[J]. 中国岩溶, 1998(1): 51-57.  
Tian Y P, He F S. A study on biogenetic of calcareous tufa: exemplified by the tufa in Jiuzhaigou, Sichuan, and Huangguoshu, Guizhou [J]. Carsologica Sinica, 1998(1): 51-57.
- [12] Collins M T, Marcucci G, Anders H J, *et al.* Skeletal and extraskeletal disorders of biomineralization [J]. Nature Reviews Endocrinology, 2022, 18(8): 473-489.
- [13] 邹翔. 颗石藻生物矿化作用及其环境指示意义[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.  
Zou X. Biomineralization in coccolith and its environmental indication significance [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2017.
- [14] 刘媛媛. 藻对钙锶生物矿化中的生命效应研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.  
Liu Y Y. Study on the life effect of algae on calcium and strontium biomineralization [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016.
- [15] 贾强, 陈晓瀚, 孙增斌, 等. 微生物诱导沉积碳酸钙提高产量的试验研究[J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30(5): 423-428.  
Jia Q, Chen X H, Sun Z B, *et al.* The raising calcite yield experiment for bacteria induced precipitation [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2015, 30(5): 423-428.
- [16] 刘丽静, 杨海军, 潘文庆, 等. 中国新疆塔里木盆地上奥陶统良里塔格组的钙藻化石[J]. 微体古生物学报, 2012, 29(1): 18-38.  
Liu L J, Yang H J, Pan W Q, *et al.* Calcareous algae from the upper ordovician lianglitage formation in the tarim basin, Xinjiang, China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2012, 29(1): 18-38.
- [17] 陈玉婷, 李楠. 硅藻的价值及应用[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(2): 24-28.  
Chen Y T, Li N. The value and application of diatom [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(2):

- 24-28.
- [18] 宋汶轩, 王振东, 李亚堃, 等. 硅藻基因组学研究进展[J]. 特种经济动植物, 2023, 26(10): 96-103.  
Song W X, Wang Z D, Li Y K, *et al.* Research progress of diatom genomics [J]. Special Economic Animal and Plant, 2023, 26(10): 96-103.
- [19] 王颖, 匡少平. 海洋硅循环研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(20): 53-55.  
Wang Y, Kuang S P. A review of marine silicon circulation [J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(20): 53-55.
- [20] 梁金燕. 淡水桥弯藻科硅藻分子系统学初步研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2023.  
Liang J Y. Preliminary study on molecular systematics of diatoms in freshwater pontiaceae [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2023.
- [21] Kröger N. Prescribing diatom morphology: toward genetic engineering of biological nanomaterials [J]. Current Opinion in Chemical Biology, 2007, 11(6): 662-669.
- [22] Liu B, Cao Y Y, Huang Z H, *et al.* Silica biomineralization via the self-assembly of helical biomolecules [J]. Advanced Materials, 2015, 27(3): 479-497.
- [23] Tang S X, Dong Z Y, Ke X, *et al.* Advances in biomineralization-inspired materials for hard tissue repair [J]. International Journal of Oral Science, 2021, 13(1): 42.
- [24] Barra L, Chandrasekaran R, Corato F, *et al.* The challenge of ecophysiological biodiversity for biotechnological applications of marine microalgae [J]. Marine Drugs, 2014, 12(3): 1641-1675.
- [25] Moradian-Oldak J, George A. Biomineralization of enamel and dentin mediated by matrix proteins [J]. Journal of Dental Research, 2021, 100(10): 1020-1029.
- [26] 钱春香, 王欣, 於孝牛. 微生物水泥研究与应用进展[J]. 材料工程, 2015, 43(8): 92-103.  
Qian C X, Wang X, Yu X N. Research and application development of microbe cement [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(8): 92-103.
- [27] Trushina D B, Borodina T N, Belyakov S, *et al.* Calcium carbonate vaterite particles for drug delivery: advances and challenges [J]. Materials Today Advances, 2022, 14: 100214.
- [28] Liu Y L, Zhi X, Yang M, *et al.* Tumor-triggered drug release from calcium carbonate-encapsulated gold nanostars for near-infrared photodynamic/photothermal combination antitumor therapy [J]. Theranostics, 2017, 7(6): 1650-1662.
- [29] Briceno S, Chavez-Chico E A, González G. Diatoms decorated with gold nanoparticles by *in situ* and *ex situ* methods for *in vitro* gentamicin release [J]. Materials Science & Engineering, C Materials for Biological Applications, 2021, 123: 112018.
- [30] Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E L, *et al.* Commercial applications of microalgae [J]. Journal of Bioscience & Bioengineering, 2006, 101(2): 87-96.
- [31] 韩冉, 林文挺, 杨鹏, 等. 微藻矿化去除Pb<sup>2+</sup>的研究[J]. 高校地质学报, 2015, 21(4): 608-615.  
Han R, Lin W T, Yang P, *et al.* Study on the removal of Pb<sup>2+</sup> by biomineralization media via microalgae [J]. Geological Journal of China Universities, 2015, 21(4): 608-615.
- [32] 丁彦明, 张海涛. 红藻门植物提取物生物活性的研究进展[J]. 医学综述, 2021, 27(17): 3473-3477.  
Ding Y M, Zhang H T. Research progress in bioactivity of extracts from rhodophyta [J]. Medical Recapitulate, 2021, 27(17): 3473-3477.
- [33] 周玥旻, 王晓雨, 唐睿康. 从生物矿化到仿生矿化: 构筑新功能生命体[J]. 大学化学, 2022, 37(3): 59-76.  
Zhou Y M, Wang X Y, Tang R K. From biological to biomimetic mineralization: construction of new functional life forms [J]. University Chemistry, 2022, 37(3): 59-76.
- [34] 张林林. 仿生物矿化模板法制备多孔材料的研究进展[J]. 现代化工, 2015, 35(9): 38-42.  
Zhang L L. Development of porous materials prepared via imitation of biomineralization templating method [J]. Modern Chemical Industry, 2015, 35(9): 38-42.
- [35] 冯花. 仿生矿化法制备壳聚糖氧化锌复合材料用于抗菌和抗微藻的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.  
Feng H. Biomimetic mineralization method to prepare composite materials of chitosan and zinc oxide for research on antibacterial and antimicrobial [D]. Xiamen: Xiamen University, 2021.
- [36] 方义, 刘继伟, 谷庆宝, 等. 生物矿化在环境保护方面的应用[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(4): 1209-1215, 1233.  
Fang Y, Liu J W, Gu Q B, *et al.* Application of biomineralization in environmental protection [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(4): 1209-1215, 1233.
- [37] Maillet M, Huang W T, Li X, *et al.* Late Pennsylvanian carbonate platform facies and coral reef: new insights from Southern China (Guizhou Province) [J]. Facies, 2021, 67(1): 3.

□

(编辑: 杨晓翠)