

张耕铭, 蔡泽宇, 梁安琪, 等. 聚苯乙烯纳米颗粒和纳米硅对杜氏盐藻生理生化特性影响[J]. 广东工业大学学报, 2025, 42(5): 21-30. doi: 10.12052/gdutxb.250048.
Zhang Gengming, Cai Zeyu, Liang Anqi, et al. Effects of polystyrene nanoplastics and elemental silicon nanoparticles on the physiological and biochemical characteristics of *Dunaliella salina*[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2025, 42(5): 21-30. doi: 10.12052/gdutxb.250048.

聚苯乙烯纳米颗粒和纳米硅对杜氏盐藻 生理生化特性影响

张耕铭, 蔡泽宇, 梁安琪, 李春阳, 郝毅, 许鑫鑫, 马传鑫

(广东工业大学 生态环境与资源学院, 广东 广州 510006)

摘要: 本文聚焦于工程纳米材料(Engineered Nanomaterials, ENMs)对海洋生态系统的影响, 选择常见的聚苯乙烯纳米颗粒(Polystyrene Nanoplastics, PS NPs)和具有有益特性的纳米硅颗粒(Elemental Silicon Nanoparticles, Si NPs), 探究二者对主要海洋初级生产者——绿色微藻细胞即杜氏盐藻(*Dunaliella salina*)的影响。将ENMs于*Dunaliella salina*的对数生长期加入到培养基中, 在暴露初期, 这两种ENMs均促进细胞生长, 细胞内光合色素的质量浓度增加了1.6%~13.3%, 甜菜碱的质量比提高了2.7%~45.3%。然而, 在暴露的后期, 藻细胞抗氧化酶活性增加, 产生氧化应激反应, 在透射电子显微镜(Transmission Electron Microscopy, TEM)下观察到细胞形态发生破碎。转录组学分析显示, 光合作用相关基因上调, 进一步证明了细胞光合能力增强。本文研究表明, 虽然ENMs初期可以促进细胞生长并提高光合性能, 但细胞环境的变化引发了氧化应激反应, 最终导致细胞损伤。这些发现对ENMs在海洋藻类细胞中高效安全应用提供了重要参考。

关键词: 杜氏盐藻; 聚苯乙烯纳米塑料; 纳米硅; 光合作用; 分子响应

中图分类号: X55,X171.5

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2025)05-0021-10

Effects of Polystyrene Nanoplastics and Elemental Silicon Nanoparticles on the Physiological and Biochemical Characteristics of *Dunaliella salina*

Zhang Gengming, Cai Zeyu, Liang Anqi, Li Chunyang, Hao Yi, Xu Xinxin, Ma Chuanxin

(School of Ecology, Environment and Resources, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: This study focuses on the effects of engineered nanomaterials (ENMs) on marine ecosystems, specifically examining the impact of common and elemental ENMs with beneficial properties on primary marine producers, such as green microalgae cells. *Dunaliella salina* was selected as the experimental organism to investigate the influences of polystyrene nanoplastics (PS NPs) and elemental silicon nanoparticles (Si NPs). The ENMs were introduced to the algal cultures during their logarithmic growth phase. Initially, both materials promoted cell growth, with intracellular photosynthetic pigment content increasing by 1.6% to 13.3% and betaine content rising by 2.7% to 45.23%. However, in the later stages of exposure, algal cells exhibited increased antioxidant enzyme activity, leading to oxidative stress responses and morphological fragmentation observed under transmission electron microscopy (TEM). In the transcriptome analysis, the upregulation of photosynthesis-related genes further demonstrated the enhancement of cellular photosynthetic capacity. In this study, while ENMs can initially enhance cell growth and improve photosynthetic performance, changes in the cellular environment can trigger oxidative stress responses that may ultimately harm the cells. These findings hold significant implications

收稿日期: 2025-02-26 录用日期: 2025-03-21 网络首发日期: 2025-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42177191)

作者简介: 张耕铭(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新型纳米材料的环境行为及生物效应, E-mail: 2112224041@mail2.gdut.edu.cn

通信作者: 马传鑫(1985-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为新型纳米材料农业应用、微纳米塑料环境健康、新污染物在土壤中的环境行为及生态毒理、植物抗逆生理, E-mail: chuanxin.ma@gdut.edu.cn

for the effective application of ENMs in marine algal cell research.

Key words: *Dunaliella salina*; polystyrene nanoplastics; elemental silicon nanoparticles; photosynthesis; molecular response

随着纳米技术的快速发展,工程纳米材料(Engineered Nanomaterials, ENMs)在电子、医学和环境科学等各个领域得到广泛的应用^[1-2]。然而,其伴随的环境问题,特别是关于其对水生生态系统的影响不容忽视,其中藻细胞的生理和生化反应机制尤其值得关注。藻细胞作为海洋生态系统的基本组成部分,与ENMs相互作用,可能引发氧化应激、细胞膜损伤、光合效率降低等问题^[3-6]。因此,研究ENMs与藻细胞之间的相互作用对于评估其对水生环境的生态影响至关重要。作为海洋生态系统中的初级生产者,杜氏盐藻(*Dunaliella salina*, *D. salina*)具有维持生态平衡和改善水质生态效应的作用^[7-8]。同时,*D. salina*对各类环境具有良好的适应性,被广泛应用于多种研究^[9-10]。甜菜碱是广泛存在于植物和一些微生物中的天然化合物,在调节渗透压、保护细胞、减少氧化应激损伤、增强光合能力和参与细胞代谢等方面起到关键作用,能够有效促进细胞生长^[10-11]。

聚苯乙烯纳米颗粒(Polystyrene Nanoplastics, PS NPs)因其优越的物理化学性质和多功能性而在医疗保健和食品包装中应用广泛,而由于该产品的磨损及碎片化,导致部分PS NPs以固体颗粒的形式进入到生态系统中^[12]。目前,针对PS NPs的研究主要集中于其对海洋生物的毒性作用,在食物链转移、降解过程中对海洋生态系统的长期影响^[13-14]。纳米硅颗粒(Elemental Silicon Nanoparticles, Si NPs)目前常用于土壤修复、土壤质量改善,以及二氧化硅对于藻细胞的毒性研究。由于材料产生损耗,并伴随排污水流进入海洋, Si NPs通常以颗粒的形式悬浮在海洋环境中^[15]。大量研究表明,这2种ENMs在海洋环境中的浓度通常在1 mg/L左右^[12, 16]。目前,关于ENMs的研究主要集中于不同尺寸、不同材料老化程度对海洋生物的影响^[12, 17-18],而关于2种ENMs在不同浓度条件下对*D. salina*的生物效应并没有得到充分研究。

在本文中,将*D. salina*暴露于质量浓度为25、50、100 mg/L的PS NPs和5、25、50 mg/L的Si NPs环境中,评估不同暴露浓度下藻细胞的生理和生化响应,包括生长抑制、光合作用、氧化应激、细胞结构以及甜菜碱质量比变化。此外,利用转录组学,分析2种材料对藻类的关键代谢途径产生分子响应机制。本文旨在通过多层次分析,阐明不同ENMs暴露条件下对藻细胞的毒性效应,为ENMs增强水生生态系统能量流

动和营养循环的应用研究提供系统数据支持,并为水污染修复提供技术方法。

1 材料与方法

1.1 纳米材料表征

PS NPs购自江苏海安智川电池材料科技有限公司,粒径为200 nm,并掺入铕(Eu)用于跟踪。Si NPs购自宁波金雷纳米材料科技有限公司,直径为100 nm。2种材料的微观形态观察、粒径分布分析利用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, 型号: SU8220)进行分析,Zeta电位和池壁电位使用Zeta电位分析仪(型号: Malvern Zetasizer Nano ZS90)进行分析。

1.2 实验设计

1.2.1 藻类培养

*D. salina*取自中国科学院淡水藻种库。使用F/2生长培养基(盐度30‰, pH 7.5, 主要成分包括NaCl、KCl等无机盐, CuSO₄、ZnSO₄等微量元素以及B1、B12等微生物,水源取自纯水机(型号: PC1LSCXM2, 电导率18.2 MΩ),于25 °C光照培养箱中进行培养,光/暗循环为12 h交替。

1.2.2 暴露实验

将达到对数生长期的细胞接种至新培养基中,并将其再次培养至对数生长期,随后,将紫外线灭菌处理的2种ENMs加入培养基中进行暴露,培养整个生长周期。使用分光光度计(型号: GENESYS 180)在不同时间节点(接种第1、4、7、9、11、13、17、21 d,材料于接种的第7 d加入到培养基中)取样后,在680 nm下测量细胞密度,绘制生长曲线。

1.3 光合色素质量浓度

参照生长曲线测样时间节点分别测定光合色素质量浓度:取10 mL藻液,使用离心机离心后,去除上清液并加入相同体积的95%乙醇,放置于4 °C下暗室保存24 h后使用离心机离心,然后使用分光光度计于649 nm(A_{649})、665 nm(A_{665})和470 nm(A_{470})测定上清液的吸光度,根据吸光度计算添加材料后叶绿素a(Chlorophyll a, C_a)、叶绿素b(Chlorophyll b, C_b)和类胡萝卜素(Carotenoids, C_{ar})质量浓度,并根据色素质量浓度计算添加材料后的细胞数量^[19]。公式为

$$C_a(\text{g/L}) = 13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649}$$

$$C_b(\text{g/L}) = 24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665}$$

$$C_{ar}(\text{g/L}) = (1\,000 \times A_{470} - 2.05 \times C_a - 114.8 \times C_b) / 245$$

1.4 甜菜碱测定

使用雷氏试剂法测定不同暴露条件下藻细胞中甜菜碱的质量比。藻细胞样品在强酸条件下形成银白色沉淀,使用丙酮将沉淀物溶解,并产生红色溶液。将所得溶液置于分光光度计中,于525 nm处测量其吸光度。按照如下公式,计算甜菜碱(Betaine)质量比:

$$W_{\text{Betaine}}(\text{mg/g}) = (xV_i)/W$$

式中: x 为测定质量浓度,mg/mL; V_i 为提取后的总体积,1 mL; W 为烘干样品质量,g。

1.5 抗氧化酶活性的测定

对暴露后的细胞中丙二醛(Malondialdehyde, MDA)物质的量浓度、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)和过氧化氢酶(Catalase, CAT)活性进行了测定。将10 mL藻类溶液样品在3 500 g下离心10 min,弃上清液。随后,加入1 mL磷酸盐缓冲液(Phosphate Buffer Saline, PBS, pH=7.2)并充分混合。然后以相同的转速离心混合物以去除NMs,并向藻泥沉淀中加入5 mL PBS。使用超声波破碎器将藻细胞破碎5 min。然后,将混合物在3 500 g下离心10 min,收集上清液,按照试剂盒说明书的操作步骤,加入相应试剂,充分反应,使用分光光度计测量相应的吸光度,以计算MDA物质的量浓度、SOD、POD和CAT的活性^[20]。

1.6 可溶性蛋白和可溶性总糖测定

使用考马斯亮蓝G-250测定可溶性蛋白质。将G-250溶液加入提取物中(提取方法参考抗氧化酶提取液),在595 nm处测量吸光度以确定可溶性蛋白单细胞质量^[21]。使用苯酚-硫酸法测定可溶性总糖。将苯酚试剂和硫酸与提取物混合,冷却后,在490 nm下测量吸光度^[22-23]。

1.7 形态观察

2种ENMs暴露14 d后,取10 mL藻细胞溶液进行低速离心(800g, 20 min),并使用PBS冲洗后重复离心2次。然后将沉淀细胞在4 °C下使用4%戊二醛溶液固定24 h。随后,使用乙醇溶液对细胞进行脱水,并使用冻干机进行冷冻干燥。使用超微切片对样品进行切片。切片后用柠檬酸铅溶液和50%乙醇饱和的乙酸铀酰溶液染色5 min,然后风干。最后,使用TEM(型号:JEM-F200)对细胞进行成像和分析,并用能量

色散X射线光谱(Energy Dispersive Spectroscopy, EDS)扫描。

1.8 转录组学分析

根据光合色素、抗氧化酶活性等实验数据,转录组学分析选择将暴露实验的样品分为2组:对照组与50 mg/L PS NPs处理组、对照组与25 mg/L Si NPs处理组。收集的藻细胞用PBS洗涤一次,离心得到细胞沉淀,然后在液氮中快速冷冻并储存在-80 °C下,并将样品送往诺禾公司进行分析。

使用Trizol试剂盒(Invitrogen, Carlsbad, USA)提取总RNA并用生物分析仪(型号:Agilent 2100 bioanalyzer)检测RNA完整性。在碎片缓冲液(Fragmentation Buffer)对mRNA进行随机打断,构建测序文库。通过qRT-PCR对文库有效浓度进行准确定量,然后在Illumina NovaSeq 6000平台上测序。本文采用了无参分析。测序读数被组装成转录本,并使用Corset程序对转录本进行分层聚类。随后根据聚类序列进行了差异显著性分析、功能富集等环节^[24]。使用标准 $|\log_2 \text{fold change}| > 1$ 和 $P < 0.05$ 进行差异基因的筛选。

1.9 统计分析

使用SPSS Statistics 27对数据进行统计分析,所有实验结果均以平均值±标准误差进行表示。各图中的误差棒表示数据的标准偏差,不同字母表示 $P < 0.05$ 的显著差异。

2 实验结果及讨论

材料表征结果显示,PS NPs粒径为238.03 nm, Si NPs粒径为104.22 nm(见图1),其中,PS NPs的Zeta电位为(-34.7±5.8)mV,池壁电位为(-100.6±7.0) mV, Si NPs的Zeta电位为(-15.8±2.1) mV,池壁电位为(-31.0±7.8) mV, PS NPs的Zeta电位相高于Si NPs,结合材料表征数据分析杜氏盐藻的生理生化响应。

2.1 杜氏盐藻在PS NPs和Si NPs暴露下的生理反应

对照相比,PS NPs暴露处理前期*D. salina*细胞中的光合色素质量浓度显著增加2.2%~11.2%。在暴露进行至第13 d,处理组中细胞光合色素均已低于对照组水平(见图2(a))。在25 mg/L Si NPs暴露下, C_a 和 C_b 的质量浓度在第2 d相较于对照组,分别增长13.3%和5.8%;随着暴露时间增长,2种色素质量浓度没有明显变化。此外, C_{ar} 质量浓度在暴露初期一直显著高于对照组,暴露至第13 d,细胞整体光合色素质量浓度降低(见图2(b))。研究表明,暴露于高浓度的

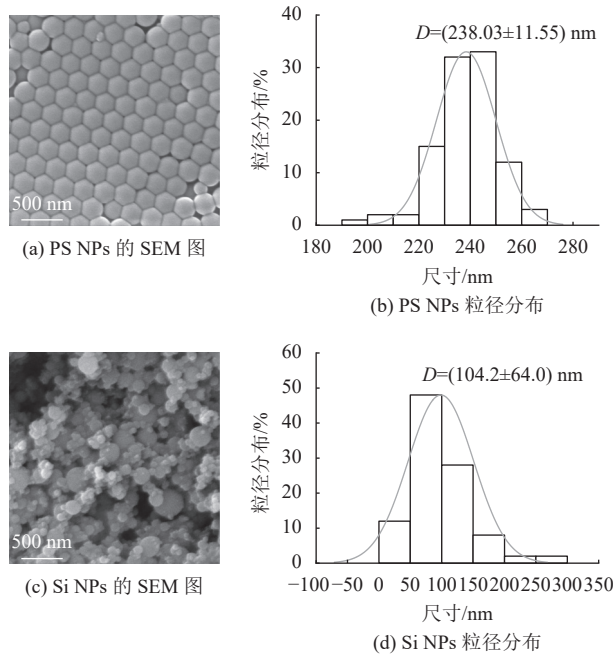


图1 PS NPs和Si NPs的材料表征

Fig.1 Material characterization of PS NPs and Si NPs

PS NPs最初会增加*D. salina*细胞中的光合色素质量浓度,然后随暴露时间增加而最终下降^[25-26]。细胞内部分色素合成不受Si NPs影响,同时,可以通过增加*D. salina*内的 C_{ar} 质量浓度,增强藻细胞的抗氧化能力^[27]。此外,PS NPs和Si NPs的Zeta电位呈现负值,会导致ENMs富集在细胞表面,产生遮蔽效应,长时间暴露后细胞光合色素由高降低。

在2种ENMs处理组中细胞数量在暴露前期(1~12 d)整体高于对照组,并于后期(第13 d)降至对

照水平以下(见图2(c~d)),表明2种材料在暴露初期对藻细胞具有明显的促生效应。

针对不同处理组细胞中甜菜碱质量比的测试表明,与对照相比,暴露于2种ENMs均导致甜菜碱含量显著提升(见图2(e~f))。甜菜碱在促进植物光合作用方面起到关键作用,细胞内甜菜碱质量比的增加进一步证明暴露于2种ENMs会增强藻细胞光合能力,同时不同暴露浓度对细胞的影响程度也存在差异^[28]。

2.2 PS NPs和Si NPs对抗氧化酶活性的影响

暴露于PS NPs和Si NPs 2种ENMs会导致藻细胞中MDA增长,其中Si NPs处理组增加显著,例如,在25 mg/L Si NPs处理组相较于对照组,增长了161.3% (见图3(a~b))。MDA水平升高表明细胞激活了抗氧化防御机制,进一步证明暴露于2种ENMs会诱导藻类氧化应激。同时,2种ENMs造成藻细胞SOD活性增加(见图3(c~d)),这表明藻细胞可能会调节其代谢途径以适应新的环境条件,SOD活性的上调被认为是一种保护性反应,可以减轻氧化应激引起的损伤^[29]。此外,POD和CAT活性的增加能够增强细胞分解过氧化氢的能力(见图3(e~h)),从而减轻了氧化损伤。这种防御机制通过协同作用直接缓解氧化应激,并保持细胞结构和功能的稳定性^[30]。藻细胞在暴露于50 mg/L的PS NPs和25 mg/L的Si NPs下表现出最显著的氧化应激反应(提升3.4%~161.3%),即高浓度暴露造成的氧化胁迫远超细胞的自我调节能力,进而造成细胞损伤^[31-33]。

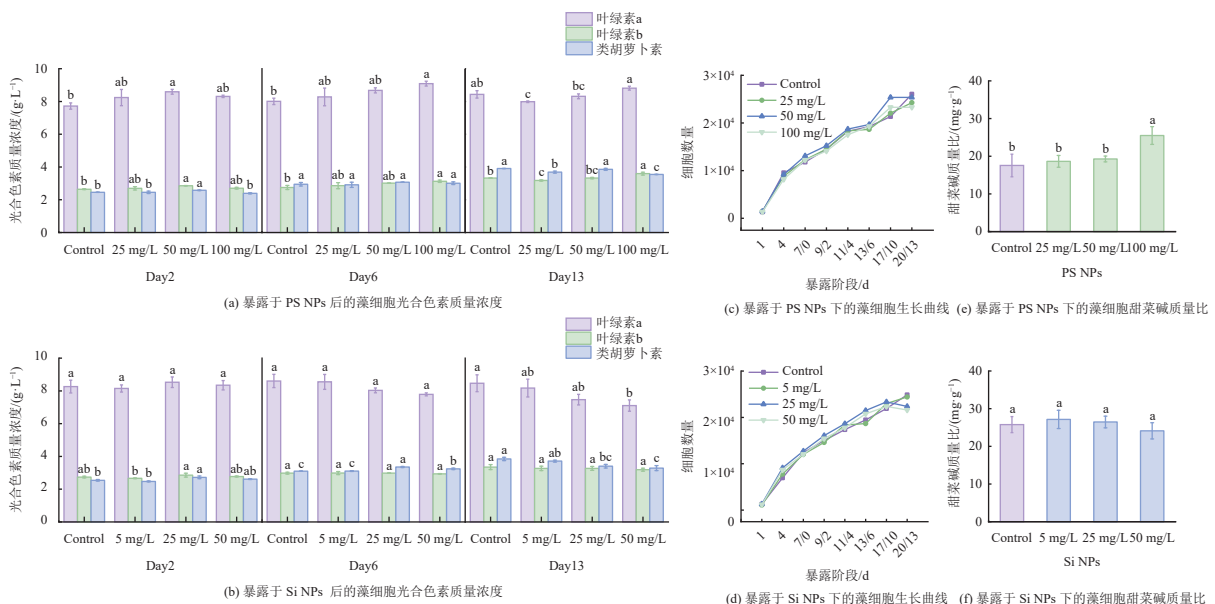


图2 杜氏盐藻在PS NPs和Si NPs暴露下的生理反应

Fig.2 Physiological responses of *D. salina* to PS NPs and Si NPs exposure

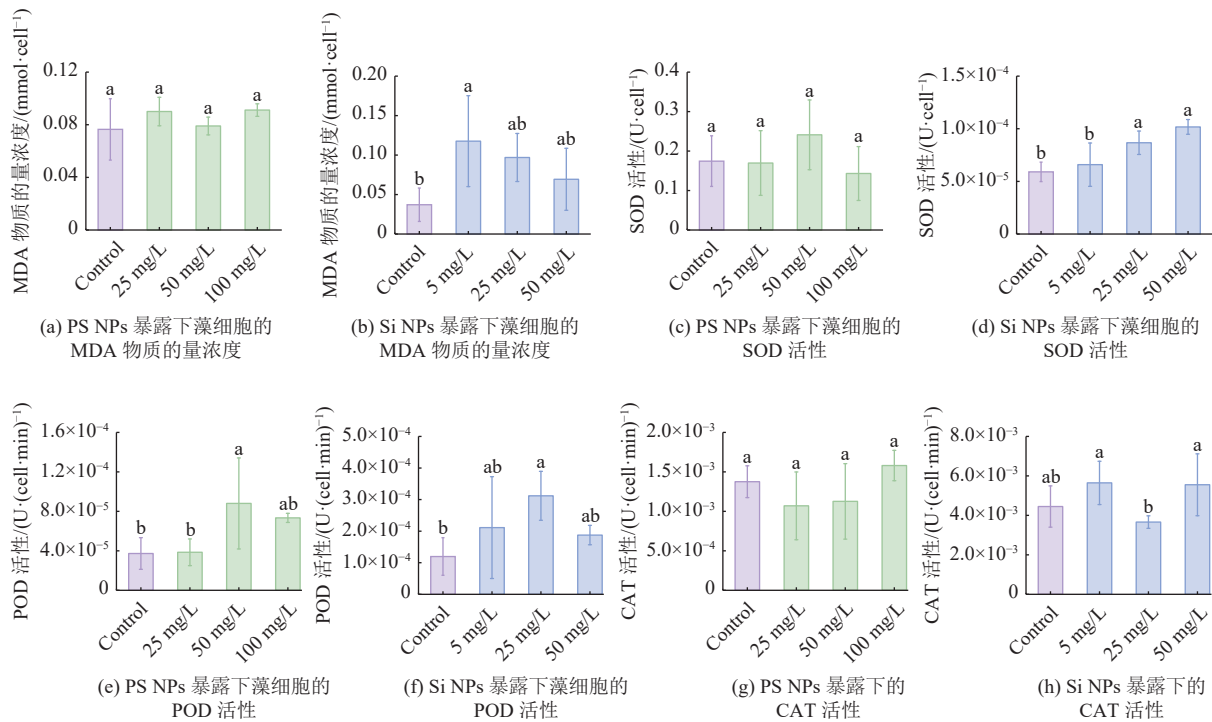


图3 PS NPs和Si NPs暴露下对抗氧化酶的影响

Fig.3 Effects of PS NPs and Si NPs on antioxidant enzymes activity

2.3 PS NPs和Si NPs对可溶性蛋白和可溶性总糖含量的影响

藻细胞内的可溶性蛋白单位细胞质量随着PS NPs和Si NPs暴露浓度的增加而增加(见图4(a-b))。这一趋势表明,随着ENMs浓度的增加,藻细胞对环境胁迫的适应能力进一步增强。同时,如图4(c-d),细胞中可溶性总糖单位细胞质量也呈上升趋势。值得注意的是,与对照组相比,50 mg/L PS NPs和25 mg/L Si NPs处理组可溶性总糖单位细胞质量增长最多,分别为42.3%和87.4%(见图4(c-d)),这可能与藻对环境胁迫的适应性反应机制密切相关^[34-35]。

在2种NMs暴露的条件下,研究发现可溶性蛋白和可溶性总糖单位细胞质量呈现出不同程度的增加,这表明藻细胞在应对氧化应激时具有自我保护机制,即可溶性蛋白的增加可以作为藻细胞减轻环境压力的防御策略。藻细胞可以通过产生保护性蛋白质,降低胁迫条件下细胞功能受损的风险并维持生理平衡以有效抵消氧化损伤。同时,可溶性总糖作为细胞的能量储备和细胞结构的重要组成部分,可溶性总糖单位细胞质量的波动反映了细胞代谢状态的变化。在ENMs暴露条件下,藻细胞可以通过增加合成可溶性总糖,以提供额外的代谢能量。这一过程为抗氧化防御机制提供了充足的能量供应,并为修复细胞结构和功能提供了必要支持^[36-37]。

因此,本文研究表明ENMs暴露引发的氧化应激反应导致藻细胞进行代谢调整,增强其抗逆性。不同暴露浓度的ENMs对细胞的影响不同,其中50 mg/L PS NPs和25 mg/L Si NPs实验结果最为显著。因此,在后续TEM成像和转录组学分析,选择这两个处理组进一步研究藻细胞在细胞与分子层面的响应机制,为ENMs的藻细胞生理效应分析提供系统研究方法,同时,为ENMs海洋安全应用提供生态风险评估。

2.4 PS NPs和Si NPs暴露下细胞形态变化

在50 mg/L PS NPs暴露条件下,*D. salina*出现明显的细胞结构裂解现象。TEM图像证实,PS NPs能够透过细胞膜结构,进入细胞内部(见图5(a)),说明该浓度条件下,PS NPs严重影响了细胞的完整性,并损害正常的生理功能。同样,在25 mg/L Si NPs处理组中,较之对照组细胞,ENMs暴露后的细胞出现裂解现象,细胞内同样观察到Si NPs颗粒(见图5(b)),进一步证实Si NPs严重威胁细胞结构与功能的稳定性^[24]。EDS结果显示,50 mg/L PS NPs处理组中,在细胞内PS NPs存在区域精确检测到Eu信号,进一步证实了材料能够进入细胞内部(见图5(c))。同样,在25 mg/L Si NPs处理组中,在与破碎细胞图像中Si NPs的相对应位点检测到Si信号,进一步证实Si NPs能够进入细胞内部(见图5(d))。本文研究证明直接暴露于PS NPs和Si NPs均导致相应的ENMs进入藻细胞,并

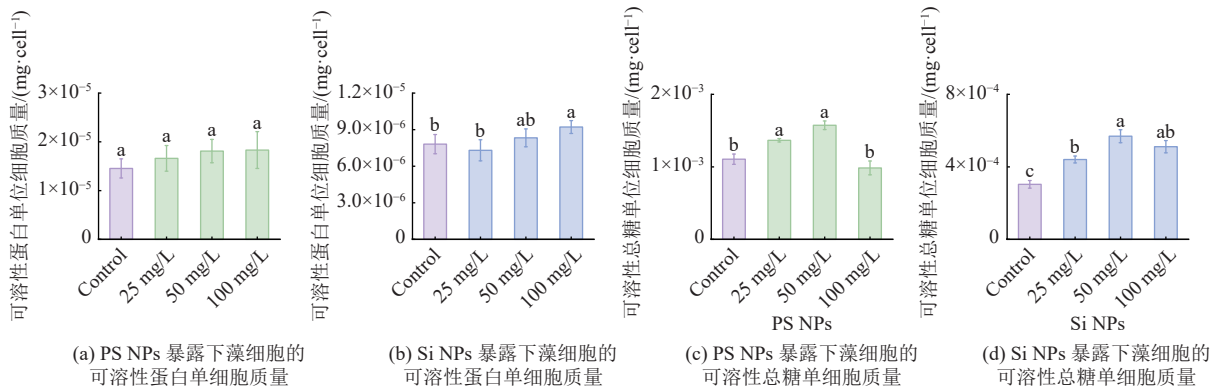


图4 PS NPs和Si NPs暴露下对可溶性蛋白和可溶性总糖的影响
Fig.4 Soluble protein and total soluble sugar content as affected by PS NPs and Si NPs

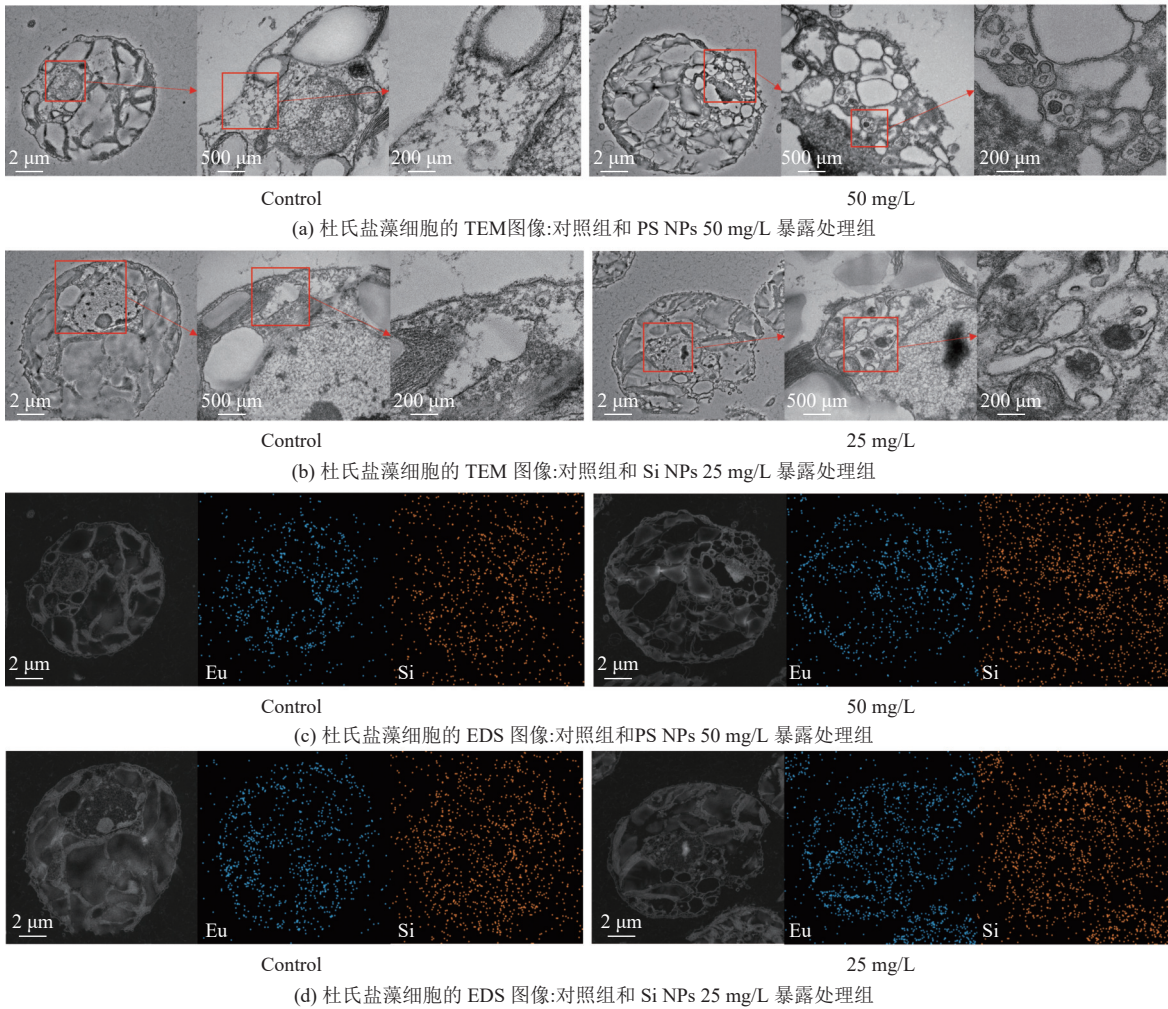


图5 PS NPs和Si NPs暴露下细胞形态变化

Fig.5 Morphological changes of cells exposed to PS NPs and Si NPs

在细胞内部不同区域积累^[38-39]。TEM图像显示,在ENMs暴露中,除去部分ENMs会附着在细胞表面或进入细胞内部,更多材料可能主要以颗粒形式悬浮于液体培养基中,进一步证明ENMs在海洋中部分被海洋生物附着吸收,更多会以颗粒形式悬浮于海洋

环境中^[12]。值得注意的是,2种材料中,PS NPs的表面附着数量远高于Si NPs,这可能与材料的浓度、自身的粒径大小及Zeta电位有关,相较于Si NPs,PS NPs的粒径更大、Zeta电位相更高(见图1),因此更容易附着在细胞表面。

总的来说,不同质量浓度的ENMs短时间暴露虽然在一定程度上促进细胞生长,但长期直接暴露会导致藻细胞氧化损伤并造成细胞结构损伤。

2.5 转录组学分析

组间平行样品有高的相关性(见图6(a)),表明数据可靠。此外,2种ENMs处理组分别与对照组之间的相关性都较低,表明ENMs暴露后基因表达模式发生明显变化,ENMs改变了细胞的生长环境,在*D. salina*中引发了不同的分子响应^[40]。此外,每个处理组组内的重复样本分布紧密,进一步表明*D. salina*对PS NPs或Si NPs暴露的转录组反应高度一致。

然而,与对照组相比,暴露于这2种条件下的样本表现出明显的分离(见图6(b)),表明不同ENMs对细胞主要成分产生显著影响。在这2种ENMs暴露条件下,

分别有1 047和2 395个基因发生差异表达(|log₂fold change|>1和P<0.05)。具体而言,在PS NPs处理组中,958个基因上调,89个基因下调。同时,在Si NPs处理组中,1 621个基因上调,774个基因下调(见图6(c))。这些差异性表达的基因进一步证明暴露于ENMs会引起基因表达谱的广泛变化及对藻细胞生物过程的潜在影响^[41]。

热图显示(见图6(d)),对照组分别与2种ENMs处理组相比,在ENMs处理组中出现了不同的新次级亚群并与对照组存在显著差异。这说明暴露于这2种ENMs会导致生物分子群体的表达模式发生显著变化,进一步证实了ENMs在分子层面对细胞生理状态的实质性影响^[42]。

此外,差异基因表达分析结果表明藻细胞参与

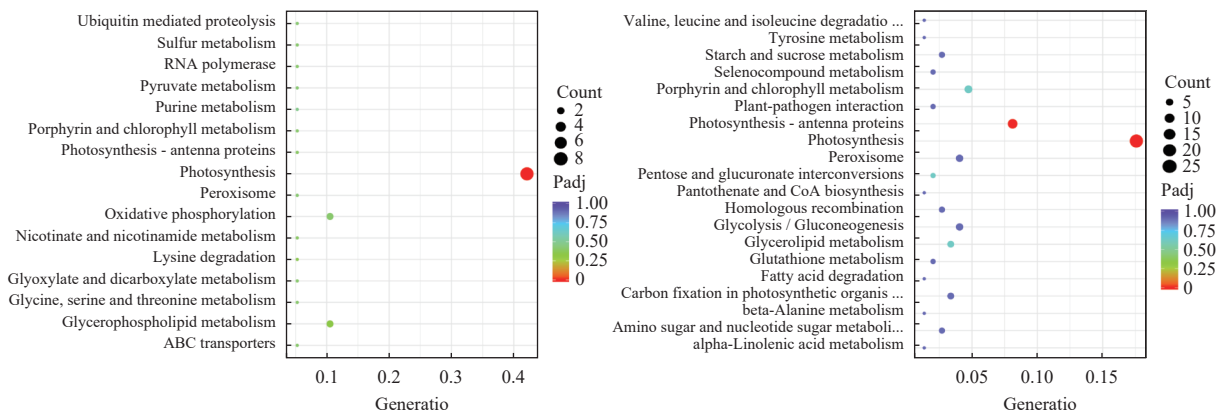
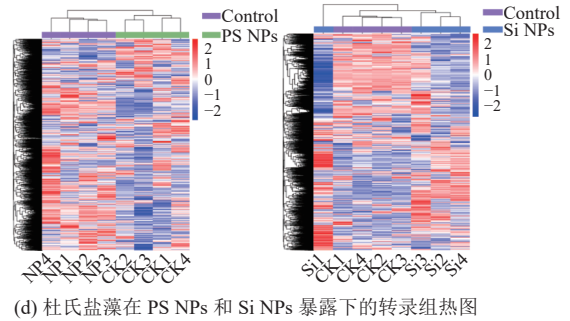
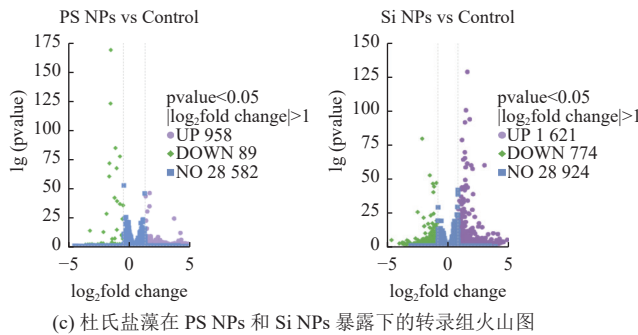
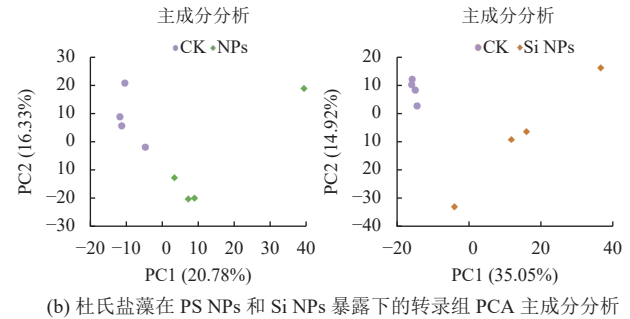
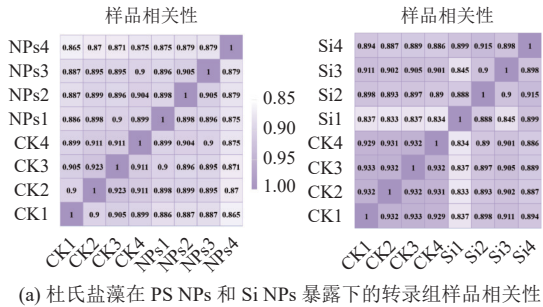


图 6 PS NPs和Si NPs暴露下杜氏盐藻的转录组学分析
Fig.6 Transcriptomic analysis of *D. salina* exposed to PS NPs and Si NPs

的关键代谢途径(如光合作用和甘油脂质代谢)出现不同程度的上调。值得注意的是,2个处理组与对照组相比,其中与光合作用相关的代谢途径显示出统计学上显著的 $P < 0.05$ (见图6(e)),证实了这些ENMs对藻细胞代谢活性的增强作用^[43]。这些发现突显了PS NPs和Si NPs对细胞代谢的多方面影响及在水生系统中的潜在生态影响。

2.5.1 PS NPs处理组通路分析

在PS NPs暴露条件下, *PsbD*、*PsbB*、*PsbE*、*PsbJ*、 α 、*a*、*G3PDH*、*CEK4*这8个基因显著上调,代表着几个关键的生物过程上调,如光系统II(PSII)、光合作用中的ATP合成和甘油脂质代谢(见图7)。其中, *PsbD*在PSII中至关重要,它能捕获光能并促进电子转移。类似地, *PsbB*吸收光能并有效地将其转移到核心反应中心。这些蛋白质协同工作确保PSII的稳定运行,并显著提高光合作用的效率。此外, *PsbE*、*PsbJ*的上调有助于稳定PSII结构,增强其功能性^[44]。

关于ATP合成方面, α 和*a*亚基的上调促进了ATP合成,并增强了细胞内的能量供应。这表明PS NPs处理刺激了藻细胞中能量产生的代谢活性^[45]。正因为上述PS NPs暴露下藻细胞光合作用相关基因上调,藻细胞光合色素质量浓度增加(见图2(a)),这进一步证实了PS NPs有助于增强藻类光合作用,并为评估其生态功能提供了重要依据。

此外,在甘油脂质代谢途径中, *G3PDH*、*CEK4*的上调与藻细胞对环境胁迫的反应密切相关。*G3PDH*在调节细胞脂质和维持细胞膜稳定性方面至关重要^[40]。同时, *CEK4*对于激活甘油脂质代谢的调节机制,增强细胞适应性非常重要。这些基因的联合上调,以及图2所示的酶活性变化,表明PS NPs处理显著改变了细胞的生长环境,可能导致一定程度的氧化应激反应^[44]。

2.5.2 Si NPs处理组通路分析

在Si NPs暴露下,50个基因上调,参与了几个关键的生物过程,包括光合作用(如光系统I(PSI)、光系统II和ATP酶)、光收获蛋白(如光收获复合物I和II)、叶绿素代谢、光合生物中的碳固定和甘油脂质代谢(见图7)。与对照组相比,这些光合作用相关基因的显著上调表明Si NPs对光合作用机制有重大影响。

在PSI中,结构组分 *PsaA*、*PsaB*增强了光能捕获和转换的能力。*PsaE*、*PsaF*等基因的上调支持PSI的结构稳定性,促进电子转移,提高整体光合效率^[34]。

在卟啉和叶绿素代谢途径中, *GSA*、*Cys*的上调表明了它们在叶绿素合成过程中以中间体发挥关键作用,促进了叶绿素在藻细胞内的合成和积累。此外, *CAO*有助于转化叶绿素前体,而 *BchM*、*BchB*和 *3PCR*等基因则参与叶绿素的形成和转化。正因为上述Si NPs暴露下光合作用相关基因上调,藻细胞中的

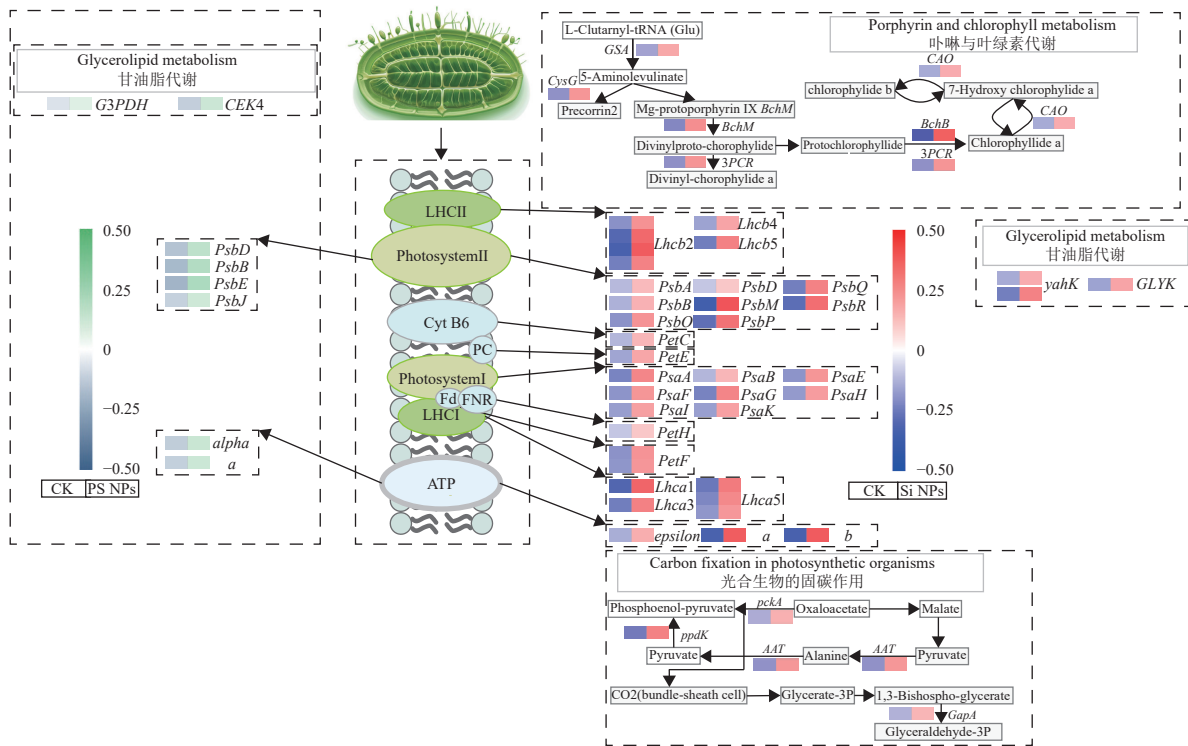


图7 PS NPs和Si NPs暴露下杜氏盐藻的转录组学通路图

Fig.7 Transcriptomic pathway diagram of *D. salina* exposed to PS NPs and Si NPs

光合色素增加(见图2(b))。

在甘油脂质代谢途径中,*yahK*、*GLYK*的上调表明它们在脂质合成和代谢中起着重要作用,促进细胞膜形成和能量储存。与PS NPs暴露类似,这些变化表明Si NPs暴露改变了细胞的生长环境,导致氧化应激反应的产生。这种压力反映了细胞对环境变化的适应机制;然而,长期暴露可能对细胞生理功能构成潜在威胁。了解Si NPs影响*D. salina*的机制对于优化其在生物技术和环境修复中的应用至关重要。

3 结论

研究表明,当*D. salina*暴露于PS NPs和Si NPs时,光合色素质量浓度增加,在一定程度上有助于其生长。此外,转录组中光合作用相关基因的上调为这一促生效应在生化层面与分子层面提供了有力证明。然而,甘油脂质代谢的上调和抗氧化酶活性的增加说明ENMs暴露导致了藻细胞氧化应激。TEM测试发现添加这些ENMs后,ENMs导致细胞结构严重破坏,并造成细胞裂解。本文表明,PS NPs和Si NPs这2种ENMs在一定暴露条件下可以促进细胞生长,但随着暴露时间以及暴露质量浓度的提升也会对藻细胞造成一定程度的伤害。本文有助于进一步了解ENMs释放到海洋环境中的潜在生态风险。后续研究将集中于如何在确保ENMs增强藻细胞光合作用强度的同时,尽量减少其对藻类的环境胁迫。

参考文献:

- [1] COCKBURN A, BRADFORD R, BUCK N, *et al.* Approaches to the safety assessment of engineered nanomaterials (ENM) in food[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(6): 2224-2242.
- [2] AAGA G F. Zinc oxide and its engineered derivative nanomaterials: insight into energy, environmental, medical, agricultural, and food applications[J]. *Materials Today Sustainability*, 2024, 28: 101051.
- [3] LIU L, YIN H, XU Y, *et al.* Environmental behavior and toxic effects of micro(nano) plastics and engineered nanoparticles on marine organisms under ocean acidification: a review[J]. *Environmental Research*, 2024, 263: 120267.
- [4] LI X, HE F, WANG Z, *et al.* Roadmap of environmental health research on emerging contaminants: inspiration from the studies on engineered nanomaterials[J]. *Eco-Environment & Health*, 2022, 1(3): 181-197.
- [5] RANA S, KUMAR A. Toxicity of nanoparticles to algae-bacterial co-culture: knowns and unknowns[J]. *Algal Research*, 2022, 62: 102641.
- [6] ZOU W, HUO Y, ZHANG X, *et al.* Toxicity of hexagonal boron nitride nanosheets to freshwater algae: phospholipid membrane damage and carbon assimilation inhibition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 465: 133204.
- [7] HARVEY M, BARRETT L T, MORRIS R L, *et al.* Ocean sprawl: the global footprint of shellfish and algae aquaculture and its implications for production, environmental impact, and biosecurity[J]. *Aquaculture*, 2024, 586: 740747.
- [8] HAN Y, ZHANG Y, HE H, *et al.* External nitrogen influxes hinder the efficacy of lanthanum-modified bentonite (LMB) on phosphorus and algae control in shallow lakes[J]. *Environmental Research*, 2025, 264: 120364.
- [9] GE Y, ZHANG H, FU J, *et al.* Parabens, bisphenols, and triclosan in coral polyps, algae, and sediments from sanya, China: occurrence, profiles, and environmental implications [J]. *Environmental Pollution*, 2024, 361: 124839.
- [10] JIANG Y, NIU S, WU J. The role of algae in regulating the fate of microplastics: a review for processes, mechanisms, and influencing factors[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 949: 175227.
- [11] DAS S, GIRI S, SHAH J, *et al.* Fluorescent nanoplastics increase the toxic effects of Graphene oxide nanoparticles in freshwater algae *Scenedesmus obliquus*[J]. *Toxicology Reports*, 2024, 13: 101759.
- [12] GUPTA C, KAUSHIK S, HIMANSHU, *et al.* Bioaccumulation and toxicity of polystyrene nanoplastics on marine and terrestrial organisms with possible remediation strategies: a review[J]. *Environmental Advances*, 2022, 8: 100227.
- [13] MARTIN-FOLGAR R, SABROSO C, CAÑAS-PORTILLA A I, *et al.* DNA damage and molecular level effects induced by polystyrene (PS) nanoplastics (NPs) after *Chironomus riparius* (Diptera) larvae[J]. *Chemosphere*, 2024, 346: 140552.
- [14] XIANG T, SUN Y, DING D, *et al.* Microscopic Raman-based rapid detection of submicron/nano polypropylene plastics in tea and tea beverages[J]. *Food Chemistry*, 2024, 454: 139657.
- [15] ZHANG H, LEUNG Y, LOUDEN D, *et al.* The potential intrinsic and extrinsic toxicity of silica nanoparticles and its impact on marine organisms[J]. *Nano*, 2008, 3(4): 271-278.
- [16] 李宏亮, 陈建芳, 刘子琳, 等. 北极楚科奇海和加拿大海盆南部颗粒生物硅的粒级结构[J]. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 72-78.
- [17] NAMJOYAN S, SOROOSHADEH A, RAJABI A, *et al.* Nano-silicon protects sugar beet plants against water deficit stress by improving the antioxidant systems and compatible solutes[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2020, 42(10): 157.
- [18] HAJIHASHEMI S, KAZEMI S. The potential of foliar application of nano-chitosan-encapsulated nano-silicon donor in amelioration the adverse effect of salinity in the wheat plant[J]. *BMC Plant Biology*, 2022, 22(1): 148.
- [19] WANG X, ZHAO Y, ZHAO L, *et al.* Effects of microplastics on the growth, photosynthetic efficiency and nutrient composition in freshwater algae *Chlorella vulgaris* Beij[J]. *Aquatic Toxicology*, 2023, 261: 106615.
- [20] LI R R, WANG B L, NAN F R, *et al.* Effects of polystyrene nanoplastics on the physiological and biochemical characteristics of microalga *Scenedesmus quadricauda*[J]. *Environ-*

- mental Pollution, 2023, 319: 120987.
- [21] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1): 248-254.
- [22] ROVER M R, JOHNSTON P A, LAMSAL B P, *et al.* Total water-soluble sugars quantification in bio-oil using the phenol-sulfuric acid assay[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 104: 194-201.
- [23] CHEN W, GAO L, SONG L, *et al.* An improved phenol-sulfuric acid method for the quantitative measurement of total carbohydrates in algal biomass[J]. Algal Research, 2023, 70: 102986.
- [24] SHANG H, LI C, CAI Z, *et al.* Biosynthesized selenium nanoparticles as an effective tool to combat soil metal stresses in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. ACS Nano, 2024, 18(30): 19636-19648.
- [25] CHAE Y, KIM D, AN Y J. Effects of micro-sized polyethylene spheres on the marine microalga *Dunaliella salina*: focusing on the algal cell to plastic particle size ratio[J]. Aquatic Toxicology, 2019, 216: 105296.
- [26] WANG S C, LIU G Z, LIU F F. Physiological and metabolic toxicity of polystyrene microplastics to *Dunaliella salina* [J]. Environmental Pollution, 2023, 316: 120544.
- [27] SUN Z, ZHANG S, ZHENG T, *et al.* Nanoplastics inhibit carbon fixation in algae: the effect of aging[J]. Heliyon, 2024, 10(8): e29814.
- [28] SONG X, KONG F, LIU B F, *et al.* Lipidomics analysis of microalgal lipid production and heavy metal adsorption under glycine betaine-mediated alleviation of low-temperature stress[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 480: 135831.
- [29] LI X, CHU Z, FENG C, *et al.* Unveiling the molecular mechanisms of size-dependent effect of polystyrene micro/nano-plastics on *Chlamydomonas reinhardtii* through proteomic profiling[J]. Chemosphere, 2024, 358: 142220.
- [30] DING N, FEI Q, XIAO D, *et al.* Highly efficient and recyclable Z-scheme heterojunction of Ag₃PO₄/g-C₃N₄ floating foam for photocatalytic inactivation of harmful algae under visible light[J]. Chemosphere, 2023, 317: 137773.
- [31] JIANG J, CHEN Y, ZHANG R, *et al.* New insights on the impact of light, photoperiod and temperature on the reproduction of green algae *Ulva prolifera* via transcriptomics and physiological analyses[J]. Marine Pollution Bulletin, 2025, 211: 117393.
- [32] WANG H, WU P, LI F, *et al.* Molecular characterization of a catalase gene in the freshwater green alga *Closterium ehrenbergii* and its putative function against abiotic stresses [J]. European Journal of Protistology, 2024, 95: 126111.
- [33] LONG S, HAMILTON P B, WANG C, *et al.* Bioadsorption, bioaccumulation and biodegradation of antibiotics by algae and their association with algal physiological state and antibiotic physicochemical properties[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 468: 133787.
- [34] XUE H, WANG J, CHEN R, *et al.* Physiological and transcriptomic analysis reveals the toxicological mechanisms of polystyrene micro- and nano-plastics in *Chlamydomonas reinhardtii*[J]. Science of The Total Environment, 2024, 947: 174660.
- [35] JAGADEESH E, KHAN B, CHANDRAN P, *et al.* Toxic potential of iron oxide, CdS/Ag₂S composite, CdS and Ag₂S NPs on a fresh water alga *Mougeotia* sp[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2015, 125: 284-290.
- [36] KERAMANE B, SANCHEZ-CAMARGO A D P, MONTERO L, *et al.* Pressurized liquid extraction of bioactive extracts with antioxidant and antibacterial activity from green, red and brown Algerian algae[J]. Algal Research, 2023, 76: 103293.
- [37] ZRIBI I, ELLOUZI H, MNASRI I, *et al.* Effect of shading imposed by the algae *Chaetomorpha linum* loads on structure, morphology and physiology of the seagrass *Cymodocea nodosa*[J]. Marine Environmental Research, 2023, 188: 106001.
- [38] ZHANG J, MA C, XIA X, *et al.* Differentially charged nanoplastics induce distinct effects on the growth and gut of benthic insects (*Chironomus kiinensis*) via charge-specific accumulation and perturbation of the gut microbiota[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(30): 11218-11230.
- [39] RUI M, MA C, TANG X, *et al.* Phytotoxicity of silver nanoparticles to peanut (*Arachis hypogaea* L.): physiological responses and food safety[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(8): 6557-6567.
- [40] WANG Y, WANG Y, LIU M, *et al.* Micro-/nano-plastics as vectors of heavy metals and stress response of ciliates using transcriptomic and metabolomic analyses[J]. Environmental Pollution, 2024, 360: 124667.
- [41] QIANG L, ZHAO N, LIAO K, *et al.* Metabolomics and transcriptomics reveal the toxic mechanism of Cd and nano TiO₂ coexposure on rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 453: 131411.
- [42] GUO S, ZHANG X, SUN H. Transcriptomic mechanism for foliar applied nano-ZnO alleviating phytotoxicity of nanoplastics in corn (*Zea mays* L.) plants[J]. Science of The Total Environment, 2023, 905: 166818.
- [43] SUN M, CAI Z, LI C, *et al.* Nanoscale ZnO improves the amino acids and lipids in tomato fruits and the subsequent assimilation in a simulated human gastrointestinal tract model[J]. ACS Nano, 2023, 17(20): 19938-19951.
- [44] CAI Z, MA C, HAO Y, *et al.* Molecular Evidence of CeO₂ Nanoparticle Modulation of ABA and Genes Containing ABA-Responsive Cis-Elements to Promote Rice Drought Resistance[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(49): 21804-21816.
- [45] LIU S, HAN J, YAO L, *et al.* Integrated multilevel investigation of photosynthesis revealed the algal response distinction to differentially charged nanoplastics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 475: 134815.

(责任编辑: 张玮欣 英文审核: 熊荣斌)