

重金属锌对海洋微藻藻源氨基酸产出的影响

黄文秋, 周玉萍, 谭丽菊, 王江涛

(中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 锌是海洋微藻生长必需的金属元素, 低浓度时可促进微藻的生长, 而在高浓度时则表现为抑制其生长。受人类活动的影响, 海洋中锌有富集增加的趋势, 从而会对海洋微藻的生长产生影响。本论文探究了锌离子以及纳米氧化锌对硅藻中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)生长的影响, 特别是对藻源氨基酸产生的影响, 结果发现: 纳米金属颗粒会通过释放离子的形式抑制海洋浮游植物的生长, 中肋骨条藻比新月菱形藻对锌的响应更敏感。锌离子和纳米氧化锌可通过抑制浮游植物的生长来减少氨基酸的释放量和改变藻源氨基酸的种类, 从而可能会对海洋氮循环过程产生影响。

关键词: 锌; 藻源氨基酸; 锌纳米颗粒; 新月菱形藻; 中肋骨条藻

中图分类号: X173, Q946.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2019)05-0011-08

DOI: 10.11759/hyxx20190126002

重金属锌是海洋微藻生命活动所必需的金属元素, 低浓度时可促进微藻的生长, 而在高浓度时则表现为抑制其生长, 并对微藻的细胞形态以及生命活动产生影响。

纳米颗粒, 被定义为粒径在 1~100 nm 之间的粒子。由于纳米颗粒具有良好的导电、感光、传热等性能, 从 20 世纪 80 年代开始便引起了人们的关注。纳米氧化锌(Nano-ZnO)广泛地应用于遮光剂、防晒霜、塑料、陶瓷、玻璃、医药及食品(提供营养元素 Zn)等领域。Nano-ZnO 可通过皮肤、呼吸道或消化道进入生物体并在体内积累, 但机体难以排除这类微小物质, 因此 Nano-ZnO 具有一定的生物毒性效应, 对其生物安全性的研究已成为目前研究热点^[1]。

随着工农业的发展以及工业纳米材料的广泛应用, 海洋中纳米氧化锌和锌离子有富集增加的趋势, 从而会对海洋微藻产生重要的影响。海洋微藻是海洋重要的初级生产者, 也是海洋氨基酸的重要来源。微藻的生长变化将会影响释放到海洋中的氨基酸含量和种类, 进而会影响海洋氮循环过程, 干扰生物地球化学循环。本文的研究拟通过不同浓度 Zn²⁺ 和 Nano-ZnO 对中肋骨条藻和新月菱形藻的抑制试验和相关参数的测定, 来探究重金属锌的毒性及纳米颗粒对海洋微藻生长的影响, 为研究重金属对微藻藻源氨基酸产出和海洋氮循环的影响提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

培养实验中选用的两种硅藻新月菱形藻和中肋骨条藻, 均取自中国海洋大学海洋污染生态化学实验室藻种室。培养微藻的海水为胶州湾的陈化海水。

1.2 培养方法

陈化海水经混合纤维滤膜(0.45 μm)过滤后, 于高压灭菌锅中(120℃, 20 min)灭菌, 室温冷却后, 加入 f/2 培养基^[2]接入藻种。

先将微藻接入 5 L 锥形瓶进行扩大培养, 待微藻进入指数生长期后再分瓶接入多个 500 mL 锥形瓶进行抑制实验。微藻的培养条件: 培养温度为 20±1℃, 光照强度为 4 000 lx, 光暗比(L : D)12 h : 12 h, 每天摇瓶数次。

1.3 抑制试验

配制的两种重金属锌试剂分别为七水合硫酸锌

收稿日期: 2019-01-26; 修回日期: 2019-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(41876078); 山东省基金(ZR2018MD016)
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41876078; Shandong Provincial Natural Science Foundation of China, No. ZR2018MD016]

作者简介: 黄文秋(1995-), 女, 硕士研究生, 河南省洛阳市人, 主要从事海洋污染生态化学研究。E-mail: WQHuang666@163.com; 王江涛(1967-), 通讯作者, 男(蒙古族), 河北省承德市人, 教授, 主要从事海洋化学和生态学研究。E-mail: jtawang@ouc.edu.cn

储备液和 Nano-ZnO 储备液。在新月菱形藻的培养实验中, Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 的添加浓度都为 1~20 mg/L, 各设置 7 个不同浓度。在中肋骨条藻的培养实验, Zn^{2+} 的添加浓度为 0.3~5 mg/L, 共设置 7 个不同浓度, Nano-ZnO 的添加浓度为 0.5~10 mg/L, 共设置 7 个不同浓度。每组浓度设置 3 个平行样, 培养时间为 4 d。

1.4 测定方法

1.4.1 细胞数目计数

藻细胞密度用血细胞计数板于倒置生物智能显微镜下计数, 结果采用 Origin Pro 9.0 进行平均值和标准偏差的计算。

1.4.2 藻液中 Zn^{2+} 的测定和样品扫描电镜的观察

取抑制实验处理 96 h 的藻样, 进行藻液中 Zn^{2+} 的测定。将藻液离心并收集上清液, 然后使用 Thermo Fisher Scientific 的 ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱(USA)测定。取抑制实验处理 24 h 的藻样, 进行扫描电镜观察。将藻液离心后收集藻细胞, 在藻细胞中加入戊二醛(2.5%)并于 4℃ 冰箱中过夜。将藻细胞样品用 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(PBS, pH=7.4)冲洗 3 遍, 每次冲洗完后离心去除上清液, 并保留底部藻细胞。之后依次用不同浓度乙醇溶液(30%、50%、80%、90%和 100%)进行样品的梯度脱水, 每步脱水持续 20 min。脱水后的样品加入叔丁醇于 4℃ 冰箱中进行固定, 冷冻干燥后涂布在导电胶上, 使用 Hitachi 的 S-4800 SEM 冷场发射扫描电子显微镜(Japan)进行观察。

1.4.3 氨基酸样品的采集和分析

取抑制实验处理 48 h 的藻样, 进行氨基酸样品的采集和测定。取出藻液并离心去除上清液。用超纯水定容到原始体积, 反复离心清洗 3 次, 确保不含有胞外有机物(EOM), 然后用细胞破碎机将细胞进行破碎, 使得藻细胞释放出胞内有机物(IOM), 最后离心获取上清液 IOM, 使用 Hitachi-2000 高效液相色谱仪(Japan)进行氨基酸的分析。溶解态氨基酸(DFAA)直接取 1.0 mL 样品于色谱瓶中上机测定。氨基酸样品的分析测定采用改进的柱前邻苯二甲醛(OPA)衍生方法^[3,4]进行测定。用梯度洗脱所得氨基酸标准的色谱图如图 1 所示。

实验中测定的 14 种氨基酸谱图依次是 Asp(天冬氨酸)、Glu(谷氨酸)、Ser(丝氨酸)、His(组氨酸)、Gly(甘氨酸)、Thr(苏氨酸)、Arg(精氨酸)、Ala(丙氨酸)、Tyr(酪氨酸)、Val(缬氨酸)、Met(甲硫氨酸)、Phe(苯丙氨酸)、Ile(异亮氨酸)、Leu(亮氨酸)^[5]。

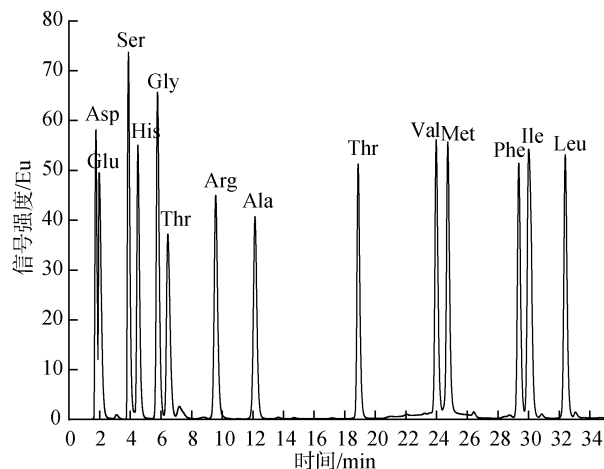


图 1 氨基酸谱图

Fig. 1 Amino acid chromatography

1.5 数据处理

取抑制实验处理 48 h 的藻样, 进行生长抑制率的计算。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验各个 7 处理组之间显著性差异($P < 0.05$)。生长抑制率 IR 计算公式为: $IR(\%) = (1 - T/C) \times 100\%$, T 为实验组微藻细胞密度, C 为对照组微藻细胞密度。

半数效应浓度 EC_{50} 用统计软件 SPSS 19 计算, 置信区间为 95%。

2 结果

2.1 生长抑制率

对两种微藻在抑制试验处理 48 h 后的抑制率进行了计算和处理, 如图 2 所示, 两种硅藻新月菱形藻和中肋骨条藻的生长均受到了 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 的抑制, 其抑制率随着加入的 Zn^{2+} 或 Nano-ZnO 浓度的增加而增加, 且对 Zn^{2+} 的响应程度大于 Nano-ZnO。对于新月菱形藻, 当 Zn^{2+} 的浓度为 15 mg/L 时, 其抑制率达到 58.2%。当 Nano-ZnO 浓度为 20 mg/L 时, 其抑制率达到 56.1%。对于中肋骨条藻, Zn^{2+} 的浓度为 4 mg/L 时, 其抑制率达到了 57.2%。Nano-ZnO 的浓度为 15 mg/L 时, 其抑制率达到 66.1%。

引入半数效应浓度 EC_{50} 来进一步探讨新月菱形藻和中肋骨条藻对 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 的敏感程度及不同形态锌的毒性大小, 结果如表 1 所示。两种藻的 EC_{50} 表现出相同的变化趋势, 即 Zn^{2+} 对两种藻的抑制作用要大于 Nano-ZnO。中肋骨条藻对锌的敏感度要高于新月菱形藻, 这与此前李芳芳等^[6]的研究结果一致。

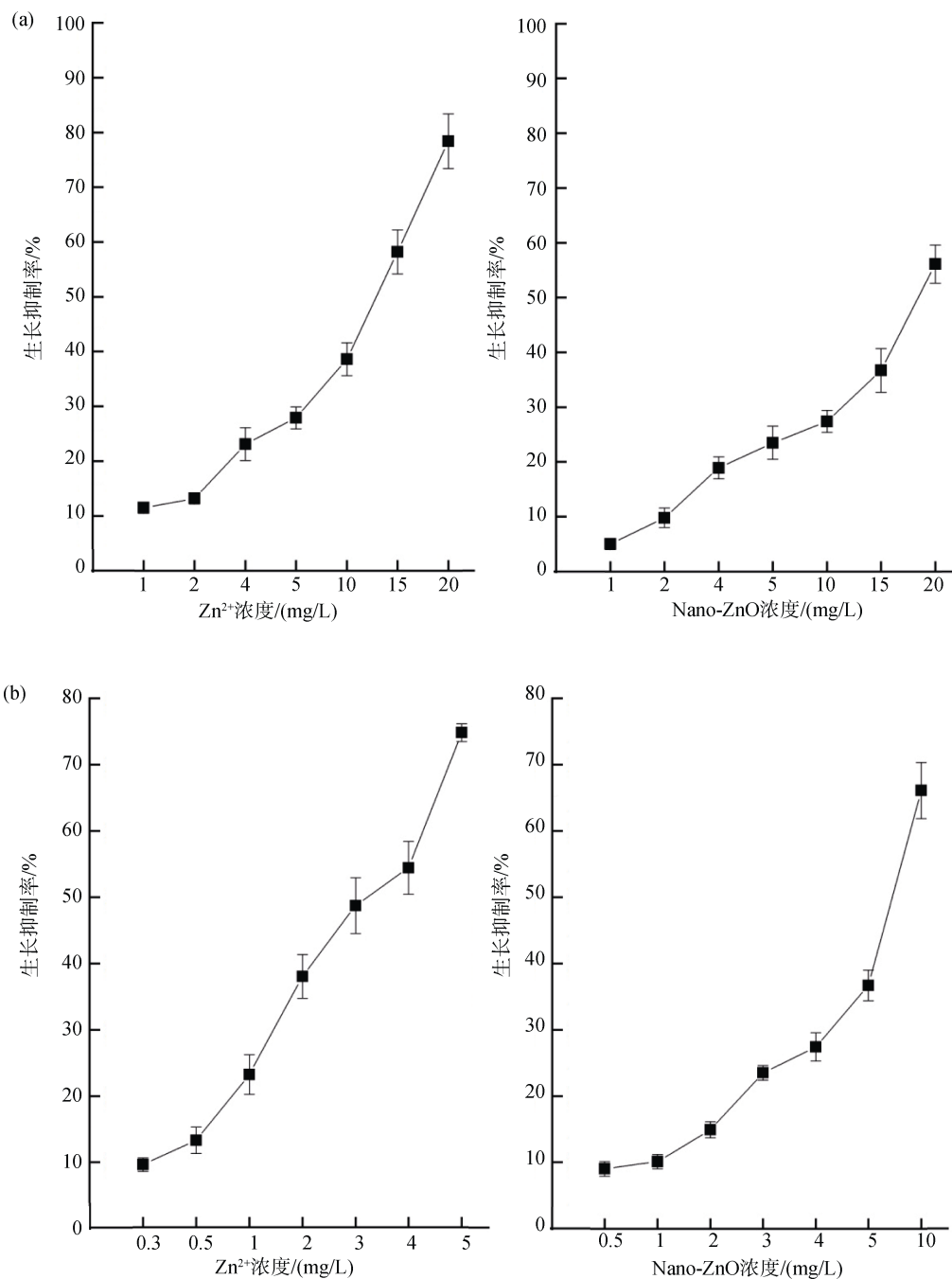


图 2 锌对新月菱形藻(a)和中肋骨条藻(b)的抑制率

Fig. 2 Inhibition rate of (a) *Nitzschia Closterium*, and (b) *Skeletonema costatum* exposed to Zn

表 1 中肋骨条藻和新月菱形藻的 EC₅₀

Tab. 1 EC₅₀ of *Nitzschia closterium* and *Skeletonema costatum*

藻种	半数效应浓度: EC ₅₀ (mg/L)			
	Zn ²⁺	置信区间	Nano-ZnO	置信区间
<i>Nitzschia closterium</i>	11.7	(8.9~14.7)	17.8	(13~20.5)
<i>Skeletonema costatum</i>	3.41	(1.2~5.45)	8.47	(5.3~10.8)

2.2 藻液中 Zn²⁺ 浓度

为了更好地对比 Zn²⁺和 Nano-ZnO 对藻的影响

机制, 在抑制实验第 4 d, 测定了所有藻液培养基中的 Zn²⁺浓度(如图 3)。由图可知, 藻液中的 Zn²⁺浓度

随着加入的 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 增加而增加。溶液中 Zn^{2+} 的实际浓度要低于添加浓度，这是因为培养基中的一部分 Zn^{2+} 被微藻吸收或吸附于微藻表面。从图中也可以看出 Nano-ZnO 在海水中的溶解度较低。Nano-ZnO 浓度为 5.0 mg/L 的溶液中 Zn^{2+} 浓度为 0.26 mg/L，其中肋骨条藻的抑制率为 36.7%，因此 Nano-ZnO 还可能通过其他的途径影响微藻的生长^[6]。

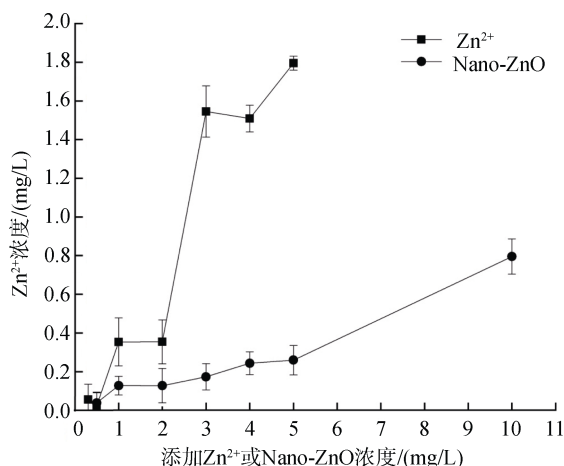


图3 添加 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 培养实验体系中 Zn^{2+} 的实测浓度

Fig. 3 Measurement of Zn^{2+} in the experimental system with added Zn^{2+} and nano-ZnO

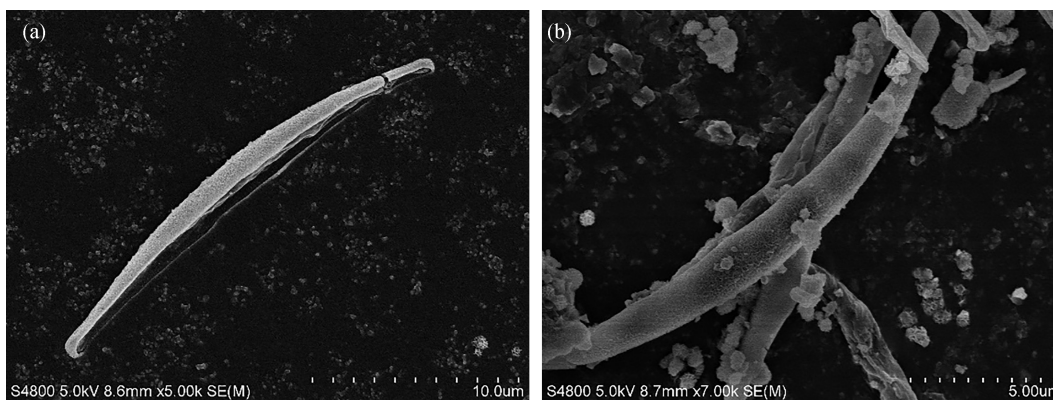


图4 Nano-ZnO 暴露处理新月菱形藻的电镜图

Fig. 4 SEM images of the adsorption of nano-ZnO on *Nitzschia Closterium*

注: a: 未经处理的新月菱形藻, b: 处理组新月菱形藻

3 讨论

3.1 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 对微藻生长的影响

重金属锌是海洋浮游植物生长所必须的微量元素，在保持微藻蛋白核的完整中起着重要的作用^[9]，但是浓度过高会抑制浮游植物的光合作用降低叶绿

2.3 团聚与吸附

团聚和吸附是纳米颗粒物抑制海洋微藻生长的重要机制^[7]。如图4电镜扫描图所示，Nano-ZnO 会吸附在新月菱形藻的表面，以前的研究也发现 Nano-ZnO 也会吸附在中肋骨条藻表面。同时 Nano-ZnO 也会团聚在一起，形成粒径更大的纳米颗粒，如图4b中所示。

2.4 重金属锌对两种藻源氨基酸的影响

重金属粒子会对微藻产生氧化损伤、抑制光合效率等，从而抑制微藻的生长。同时因为重金属离子对藻体的蛋白质合成等产生影响，微藻也可以通过自身的调节来抵御重金属的毒害，这种调节主要为胞内蛋白质的变化。本研究测定了 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 暴露处理 48 h 后，两种硅藻细胞内溶解态氨基酸的变化(图5)。从图5可以看出，重金属锌会抑制新月菱形藻和中肋骨条藻胞内氨基酸的合成，藻细胞内氨基酸含量随着 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 浓度的增加而逐渐降低。Glu、Ser、Ala 和 Gly 是这两种藻细胞内的主要氨基酸，占总含量的 40% 以上^[8]。在新月菱形藻中的占比分别为 8.6%、17.9%、23.9% 和 12.6%，在中肋骨条藻中占比分别为 18.9%、9.6%、16.4% 和 8.5%。当氨基酸总含量降低的时候，这四种氨基酸的含量也受到重金属粒子的抑制作用合成量降低。

素的量，也会引起细胞形态的变异^[10]。纳米材料可能通过多种途径进入环境而成为纳米污染物，如纳米材料直接向环境的释放、工厂和实验室的废物排放、纳米产品在使用过程中向环境的释放等^[11]。

在抑制实验中发现， Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 都会显著抑制浮游植物的生长，随着浓度的增加其抑制程度

也增加。李雅洁^[12]等也发现 Nano-ZnO 对斜生栅藻的抑制作用, 随浓度的增加而增加。同时, 不同微藻

对重金属锌的敏感度不同, 中肋骨条藻比新月菱形藻敏感。

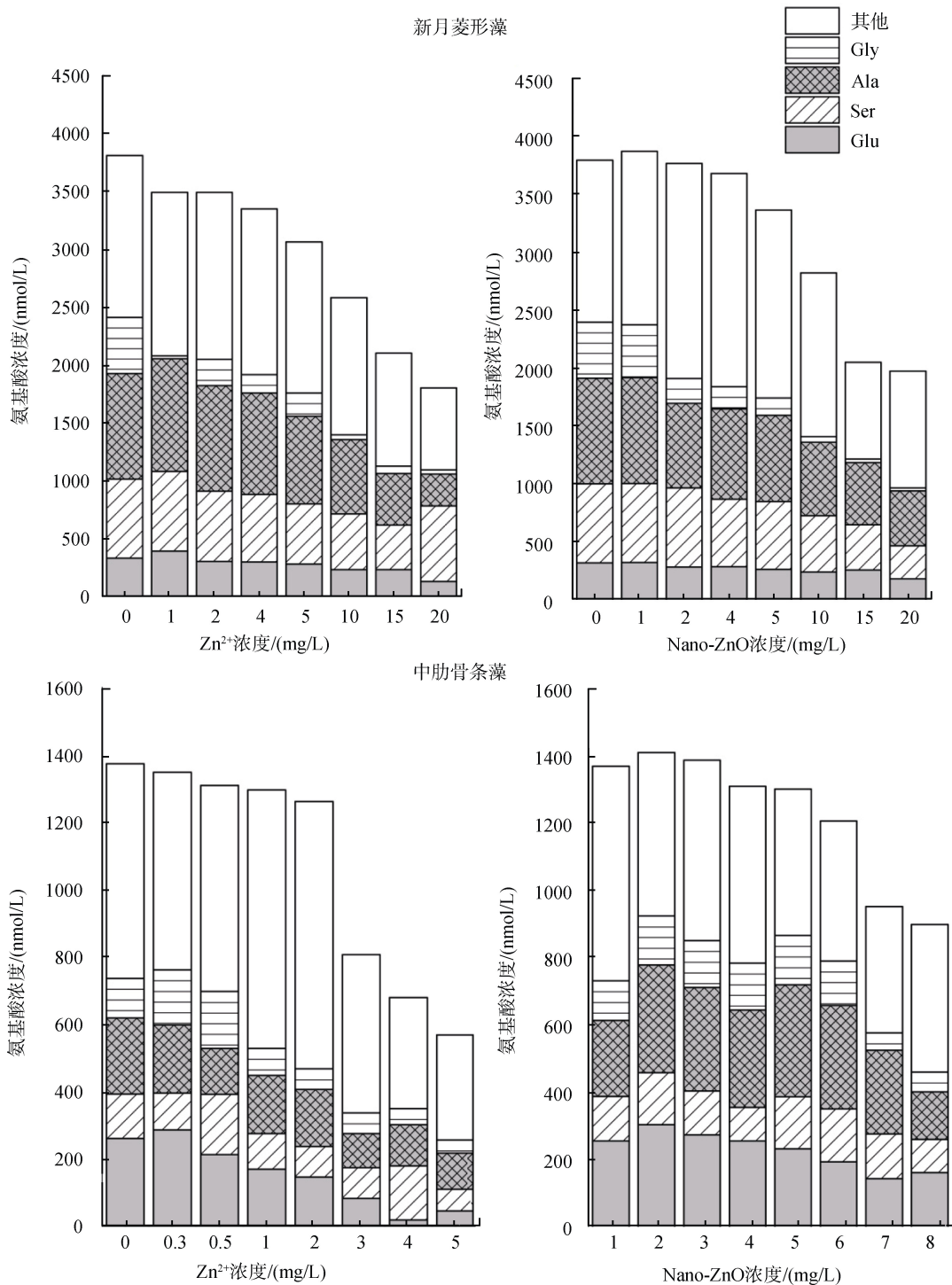


图 5 锌暴露处理中新月菱形藻和中肋骨条藻氨基酸组成的变化

Fig. 5 Amino acid composition of *Nitzschia closterium* and *Skeletonema costatum* exposed to Zn

3.2 Nano-ZnO 对微藻生长的抑制机制

Nano-ZnO 在海水中会释放出 Zn^{2+} , 进而对微藻的生长和形态产生影响。这与 Chen^[13]等研究的

Nano-ZnO 对生物造成毒性作用主要是从纳米颗粒中释放到溶液中的溶解 Zn^{2+} 的结果一致。

在中肋骨条藻的抑制实验中, 当加入的 Zn^{2+} 浓

度为 1.0 mg/L 时,藻液中 Zn^{2+} 浓度约为 0.2 mg/L 左右时,抑制率为 24.2%;而当加入的 Nano-ZnO 浓度为 5.0 mg/L 时,藻液中 Zn^{2+} 浓度为 0.26 mg/L 时,其抑制率却为 36.7%,高于 Zn^{2+} 加入组的抑制率。由此可以推断, Nano-ZnO 除通过释放 Zn^{2+} 抑制浮游植物的生长,还可通过其他途径影响浮游植物的生长。

目前有研究表明,已知的纳米材料对藻类的毒性机理包括破坏细胞膜或膜电位、蛋白质氧化、遗传毒性、能量传递中断,形成活化氧或释放有毒成分等^[14]。本研究的扫描电镜图也显示, Nano-ZnO 会发生团聚和吸附效应。由于纳米颗粒比表面积大,处于热力学不稳定状态,极易发生团聚^[15]。Nano-ZnO 团聚在一起形成的大粒径纳米颗粒,会造成微藻的自团聚和机械损伤。吸附作用会使 Nano-ZnO 覆盖在微藻表面产生遮光效应或造成细胞壁和细胞膜的破损,同时也会阻碍微藻与周围环境进行物质和能量的交换,从而抑制微藻的生长^[16-18]。通过 Ji 等^[19]的实验结果发现, Nano-TiO 和 Nano-ZnO 对小球藻具有明显的毒性效应,且 Nano-ZnO 对小球藻的毒性效应不仅是 Nano-ZnO 在溶液中溶出了 Zn^{2+} ,其致毒机理还包括产生 ROS 对藻类造成损伤等。

3.3 重金属锌对藻源氨基酸的影响

研究中发现藻源溶解态氨基酸的含量也会随着 Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 浓度的增加而显著降低。两种藻细胞内氨基酸主要为 Gly、Glu、Ser 和 Ala,藻的生长受到抑制时也会显著降低这四种氨基酸的含量,新月菱形藻胞内氨基酸中 Ser 和 Ala 含量较高,而中肋骨条藻则是 Glu 和 Ala 含量较高,两者的变化都会影响海域氨基酸的组成。

浮游植物是海洋氨基酸的重要来源,浮游植物可以通过胞外释放和残骸分解过程向海域供给氨基酸^[5],外界因素会影响氨基酸的释放种类^[20],氨基酸在海洋氮循环中为异养细菌的生长提供氮源^[21-22],因此浮游植物的生长变化将会影响释放到海洋中的氨基酸总量和种类,从而影响海洋氮循环过程,干扰生物地球化学循环。

4 结论

Zn^{2+} 和 Nano-ZnO 都会对海洋浮游植物的生长产生影响,抑制程度随着浓度的增加而增加。Nano-ZnO 主要通过释放 Zn^{2+} 以及团聚和吸附来抑制海洋浮游植物的生长,不同微藻对重金属离子的敏感度

不同,中肋骨条藻比新月菱形藻敏感。海水中的重金属离子会对海洋浮游植物的生命活动产生影响,并可通过抑制其生长,来改变其释放到海洋中的氨基酸总量和种类,进而对海洋氮循环过程产生影响。

参考文献:

- [1] 刘建新,杜青平,陈展明,等. 纳米氧化锌对羊角月牙藻毒性效应及其在藻细胞内外的分布[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(5): 103-110.
Liu Jianxin, Du Qingping, Chen Zhanming, et al. Toxicities of ZnO nanoparticles on *Selenastrum* and its distributions intra- and extra-cells[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(5): 103-110.
- [2] Guillard R R, Ryther J H. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana hustedt*, and *Detonula confervacea* (CLEVE) gran[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1962, 8(2): 229-239.
- [3] Zhang P Y, Yang G P, Chen Y, et al. Temporal and spatial variations of particulate and dissolved amino acids in the East China Sea[J]. Marine Chemistry, 2016, 186: 133-144.
- [4] Lindroth P, Mopper K. High performance liquid chromatographic determination of subpicomole amounts of amino acids by precolumn fluorescence derivatization with ophthalaldehyde[J]. Analytical chemistry, 1979, 51(11): 1667-1674.
- [5] 张鹏燕,陈岩,杨桂朋. 秋季东海溶解态和颗粒态氨基酸的组成与分布[J]. 海洋与湖沼, 2015, 46(2): 329-339.
Zhang Pengyan, Chen Yan, Yang Guipeng. Composition and distribution of dissolved and particulate amino acids in the East China Sea in autumn[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 2015, 46(2): 329-339.
- [6] 李芳芳,潘容,张偲,等. 纳米铜粉对中肋骨条藻的毒性效应[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2874-2880.
Li Fangfang, Pan Rong, Zhang Cai, et al. Inhibition effects of copper nanoparticles on the growth of *Skeletonema costatum*[J]. China Environmental Science, 2015, 35(9): 2874-2880.
- [7] 王震宇,赵建,李娜,等. 人工纳米颗粒对水生生物的毒性效应及其机制研究进展[J]. 环境科学, 2010, 31(6): 1409-1418.
Wang Zhenyu, Zhao Jian, Li Na, et al. Review of ecotoxicity and mechanism of engineered nanoparticles to aquatic organism[J]. Environmental Science, 2010, 31(6): 1409-1418.
- [8] Linares F. Effect of dissolved free amino acids (DFAA) on the biomass and production of microphytobenthic communities[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2006, 330(2): 469-481.
- [9] Leusch A, Holan Z R, Volesky B. Biosorption of heavy

- metals (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) by chemically - reinforced biomass of marine algae[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1995, 62(3): 279-288.
- [10] 路艳君, 姜爱莉, 窦柏蕊, 等. Cd (II), Zn (II)对新月菱形藻生长及生化成分的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2010, 25(2): 178-182.
Lu Yanjun, Jiang Aili, Dou Bairui, et al. Effects of Cd (II) and Zn (II) on growth and biochemical composition of alga *Nitzschia closterium*[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2010, 25(2): 178-182.
- [11] 章军, 杨军, 朱心强. 纳米材料的环境和生态毒理学研究进展[J]. *生态毒理学报*, 2006, 1(4): 350-356.
Zhang Jun, Yang Jun, Zhu Xinqiang. The advancement of environmental and ecotoxicological research of nanomaterials[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(4): 350-356.
- [12] 李雅洁, 王静, 崔益斌, 等. 纳米氧化锌和二氧化钛对斜生栅藻的毒性效应[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(6): 1122-1127.
Li Yajie, Wang Jing, Cui Yibin, et al. Ecotoxicology effects of ZnO and TiO₂ nanoparticles on microalga *Scenedesmus obliquus*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6): 1122-1127.
- [13] Chen X L, O'Halloran J, Jansen M A K. The toxicity of zinc oxide nanoparticles to *Lemna minor* (L.) is predominantly caused by dissolved Zn. *Aquatic Toxicology*, 2016, 174: 46-53.
- [14] Klaine S J, Alvarez P J J, Barley G E, et al. Nanomaterials in the environment: Behavior, fate, bioavailability and effects[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, 27(9): 1825-1851
- [15] 陈永. 纳米材料制备与改性[M]. 沈阳: 万卷出版公司, 2008, 7: 133.
Chen Yong. Preparation and Modification of Nanomaterials[M]. Shenyang: Wanjuan Publishing Co., Ltd., 2008, 7: 133.
- [16] Tang Y, Li S, Lu Y, et al. The influence of humic acid on the toxicity of Nano-ZnO and Zn²⁺ to the *Anabaena* sp.[J]. *Environmental toxicology*, 2015, 30(8): 895-903.
- [17] Zhang C, Wang J, Tan L, et al. Toxic effects of Nano-ZnO on marine microalgae *Skeletonema costatum*: Attention to the accumulation of intracellular Zn[J]. *Aquatic Toxicology*, 2016, 178: 158-164.
- [18] 陈晓华, 张偲, 谭丽菊, 王江涛. 人工纳米材料对海洋微藻的毒性研究进展[J]. *海洋科学*, 2017, 41(6): 134-143.
Chen Xiaohua, Zhang Cai, Tan Liju, Wang Jiangtao. Research progress in toxicity of nanomaterials manufactured on microalgae[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(6): 134-143.
- [19] Ji J, Long Z, Lin D. Toxicity of oxide nanoparticles to the green algae *Chlorella* sp. [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 170(s2-3): 525- 530.
- [20] 王大志, 朱友芳. 七种微藻蛋白质含量和氨基酸组成的比较[J]. *应用海洋学学报*, 1999, 18(3): 297-302.
Wang Dazhi, Zhu Youfang. Studies of protein content and amino acid composition of seven microalgae[J]. *Journal of Applied of Oceanography*, 1999, 18(3): 297-302.
- [21] 夏清艳, 杨桂朋, 高先池, 等. 南海北部表层海水中溶解氨基酸的分布与组成研究[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(6): 774-779.
Xia Qingyan, Yang Guipeng, Gao Xianchi, et al. Distribution and composition of dissolved amino acids in surface seawater in the northern South China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(6): 774-779.
- [22] 陈岩, 杨桂朋, 纪崇霄, 等. 南海北部海水中氨基酸的分布及其对溶解有机物降解行为的指示研究[J]. *海洋学报*, 2017, 39(9): 58-70.
Chen Yan, Yang Guipeng, Ji Chongxiao, et al. Distributions of amino acids and their indications for the degradation of dissolved organic matter in the northern South China Sea[J]. *Acta Marinel Sinica*, 2017, 39(9): 58-70.

Effect of heavy metal Zinc on the output of amino acids in marine algae

HUANG Wen-qiu, ZHOU Yu-ping, TAN Li-ju, WANG Jiang-tao

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Jan. 26, 2019

Key words: zinc; algae-derived amino acid; zinc nano-particles; *Nitzschia closterium*; *Skeletonema costatum*

Abstract: Zinc is an essential metal for marine microalgae. Low concentrations of zinc promote the growth of microalgae, while zinc can inhibit the growth of microalgae at higher concentrations. Under the influence of human activities, the enrichment of zinc in the ocean tends to increase, which will have great impacts on the growth of marine microalgae. This article investigated the effects of zincous ions and zinc nano-particles on *Skeletonema costatum* and *Nitzschia closterium* and the production of algae-derived amino acid. The results showed that zinc nano-particles inhibited the growth of marine phytoplankton by releasing ions. As compared to *Nitzschia closterium*, the *Skeletonema costatum* was more sensitive to zinc. Zinc may affect the marine nitrogen cycle by reducing the growth of phytoplankton, which causes a reduced release of amino acids and alters the types of released algae-derived amino acids.

(本文编辑: 赵卫红)