

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2024.02.003

## 重金属锌对绿藻缘管浒苔光合生理特性的影响\*

吴诗琦<sup>1a</sup>, 陆周玥<sup>1a</sup>, 胡思雨<sup>1a</sup>, 徐军田<sup>1a,c,2</sup>, 马静<sup>1a,b</sup>

(1. 江苏海洋大学 a. 海洋科学与水产学院; b. 江苏省海洋生物资源与环境重点实验室;  
c. 江苏省海洋生物产业技术协同创新中心, 江苏 连云港 222005; 2. 江苏省海洋资源开发研究院, 江苏 连云港 222005)

**摘要:**以绿藻缘管浒苔(*Ulva linza*)为实验材料,分析不同浓度的锌离子( $Zn^{2+}$ )对缘管浒苔光合生理特性的影响。随 $Zn^{2+}$ 浓度升高,缘管浒苔的相对生长速率显著降低。与对照组相比,相对生长速率分别降低了37.8%,42.1%,76.8%和88.4%;藻体的呼吸作用速率和净光合作用速率随之降低,当 $Zn^{2+}$ 浓度为200  $\mu\text{mol/L}$ 时,呼吸作用速率和净光合作用速率与对照组相比分别降低了68.1%和93.0%;藻体最大量子产量也不断降低,最低可至0.3。同时发现,50  $\mu\text{mol/L}$   $Zn^{2+}$ 处理时可促进藻体Chl a和Chl b的合成。结果表明,缘管浒苔对低浓度 $Zn^{2+}$ 具有一定的生理抗性,但高浓度的 $Zn^{2+}$ 会抑制其光合生理特性。

**关键词:**光合特性;生长速率;缘管浒苔; $Zn^{2+}$

**中图分类号:**X55 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-8248(2024)02-0017-06

**引用格式:**吴诗琦,陆周玥,胡思雨,等. 重金属锌对绿藻缘管浒苔光合生理特性的影响[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版),2024,33(2):17-22.

## Effects of Heavy Metal $Zn^{2+}$ on Photosynthetic Physiological Characteristics of *Ulva linza*

WU Shiqi<sup>1a</sup>, LU Zhouyue<sup>1a</sup>, HU Siyu<sup>1a</sup>, XU Juntian<sup>1a,c,2</sup>, MA Jing<sup>1a,b</sup>

(1. a. School of Marine Science and Fisheries; b. Jiangsu Key Laboratory of Marine Bioresources and Environment;  
c. Co-innovation Center of Jiangsu Marine Bio-industry Technology, Jiangsu Ocean University,  
Lianyungang 222005, China; 2. Jiangsu Institute of Marine Resources Development, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** *Ulva linza*, a species of green tides, was selected as the experimental material, the effects of different concentrations of  $Zn^{2+}$  on the photosynthetic and physiological characteristics of *U. linza* were analyzed. The results showed that the relative growth rate of *U. linza* decreased significantly with the increase of  $Zn^{2+}$  concentration. Compared with the control group, the relative growth rates decreased by 37.8%, 42.1%, 76.8% and 88.4%, respectively. The respiration rate and net photosynthetic rate of *U. linza* also decreased. When the concentration of  $Zn^{2+}$  was 200  $\mu\text{mol/L}$ , the respiratory rate and net photosynthesis rate decreased by 68.1% and 93.0% respectively compared to the control group. The yield of *U. linza* also decreased, with the lowest value of 0.3. Meanwhile, it was found that 50  $\mu\text{mol/L}$   $Zn^{2+}$  treatment could promote the synthesis of Chl a and Chl b in algae. The results showed that *U. linza* had physiological resistance to low concentration of  $Zn^{2+}$ , but high concentration of  $Zn^{2+}$  would inhibit

\* 收稿日期:2023-04-25;修订日期:2023-06-19

**基金项目:**江苏省自然资源开发专项基金(海洋科技创新)项目(JSZRHYKJ2020001,JSZRHYKJ202206);现代渔业江苏省产业研究体系(JATS[2022]522);江苏省高等教育大学生创新创业培养计划;中国博士后基金项目(2019M651431);江苏省高校优势学科发展计划

**作者简介:**吴诗琦(1997—),男,江苏南通人,硕士研究生,研究方向为紫菜生态栽培,(E-mail)wsq57go@163.com.

**通信作者:**马静(1989—),女,山西临汾人,副教授,博士,研究方向为重金属污染对海藻毒性效应,(E-mail)majing129@126.com.

its photosynthetic and physiological characteristics.

**Key words:** photosynthetic characteristics; growth rate; *Ulva linza*;  $Zn^{2+}$

缘管浒苔(*Ulva linza*),又名海白菜、长石莼、海青菜、海菠菜,属于泛暖温带性藻类,大多分布在日本、美国西海岸及我国的辽宁、江苏和福建等地的潮间带岩石上,孢子多附着于贝壳和岩石上,生长时易受氮磷营养盐、光照和盐度等环境因素影响<sup>[1]</sup>。藻体螺旋卷曲,边缘具有褶皱,无分支,可呈披针形、倒卵形和线形等,颜色为黄绿色至深绿色。叶片基部逐渐变细,细胞形态偏纵长。近年来,缘管浒苔等绿藻类浮游植物在海洋大量增殖,对生态造成严重影响,如污染环境、破坏海域生物多样性、改变生物群落结构和影响海底生态系统平衡等。绿潮在世界范围内是一种普遍现象,近年发生频率升高,规模增大,对近海养殖渔业造成不利影响。缘管浒苔在绿潮形成初期具有一定的指示作用,常生长在入海河道和紫菜养殖筏架上。对堤坝固着绿藻进行调查,显示缘管浒苔最早在12月出现,而调查区域未发现其他绿藻<sup>[2]</sup>。次年7月下旬会逐渐消亡<sup>[3]</sup>,此时海区偶见少量漂浮。近岸适宜的温度、盐度以及营养盐会为缘管浒苔生长提供便利条件,在该条件下过量繁殖的缘管浒苔可能导致绿潮灾害的暴发<sup>[4]</sup>。

人类生产活动排放的污水含重金属,有毒废物汇入海洋湖泊,极大影响了海洋环境。汇入自然水体中的重金属对藻类的毒害和对海洋生态系统的破坏引起了国内外的广泛关注<sup>[5-6]</sup>。大型海藻是海洋生态系统重要组成部分,不可避免地会受到重金属污染的影响<sup>[7]</sup>。研究发现,浒苔对不同浓度  $Pb^{2+}$  具有一定的生理抗性<sup>[8]</sup>。缘管浒苔对镉( $Cd^{2+}$ )的耐受性较低,但高于对铜( $Cu^{2+}$ )的耐受性,在  $Cd^{2+}$  的胁迫下光合作用易受到影响<sup>[9]</sup>。缘管浒苔通过渗透调节保持光合活性来适应  $Cd^{2+}$  胁迫<sup>[10]</sup>。在高水平或急性金属污染物下,活性氧水平超过细胞的应对能力会损害藻细胞,有藻体通过诱导如超氧化物歧化酶等来响应重金属胁迫<sup>[11]</sup>。研究指出  $Fe^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  等是藻类生存代谢所必需的微量元素。 $Zn^{2+}$  对保持藻体蛋白核完整起关键作用。但过量的重金属  $Zn^{2+}$  会抑制藻类生长和光合作用,减少藻体内的色素细胞数量,引发细胞畸变<sup>[12]</sup>,甚至改变自然环境藻类群落组成<sup>[13]</sup>。

2007年至2022年期间,随着经济和工业的发展,我国连续十几年暴发了大规模绿潮,这对海洋生

态系统造成了严重的破坏。日益严重的海洋重金属污染会对生物生长代谢和环境稳定造成不利影响。基于此,本文以缘管浒苔为实验材料,研究不同  $Zn^{2+}$  浓度对藻体光合生理特性的影响,旨在探讨缘管浒苔对重金属  $Zn^{2+}$  胁迫的响应,为进一步评估重金属污染对绿藻暴发的影响提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

缘管浒苔采自连云港市高公岛海域(119.3°E, 34.5°N),新鲜藻体采回后用无菌海水清洗去除污染物和杂藻,在灭菌海水中通气培养一周,收集放散孢子并在光照培养箱(GXZ智能光照培养箱,宁波江南仪器厂)通气培养,设置培养光强  $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光周期为12 L:12 D,温度为20℃。待幼苗长至约5 cm时随机挑取形态相似藻体进行实验。

### 1.2 实验方法

将0.02 g缘管浒苔置于含营养盐( $8 \mu\text{mol}/\text{L}$   $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ,  $60 \mu\text{mol}/\text{L}$   $\text{NaNO}_3$ )的500 mL灭菌海水培养瓶中,在光照培养箱培养,光强  $130 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光周期12 L:12 D,温度10℃。设5个  $Zn^{2+}$  浓度,分别为自然海水(对照组,  $Zn^{2+}$  浓度约为  $0.007 \mu\text{mol}/\text{L}$ ), 50, 100, 150 和  $200 \mu\text{mol}/\text{L}$ ,各处理设3个平行。实验期间每两天更换一次培养基并测定藻体的相对生长速率(relative growth rate, RGR),持续12天。待稳定后测定叶绿素荧光参数、光合作用速率、呼吸作用速率以及叶绿素含量。

### 1.3 相对生长速率测定

两天测一次藻体质量。RGR计算公式为

$$\text{RGR}(\%) = (\ln m_2 - \ln m_1) / (t_2 - t_1) \times 100\%$$

式中,  $m_1, m_2$  分别代表  $t_1, t_2$  藻体的质量。

### 1.4 叶绿素荧光参数测定

使用手持式叶绿素荧光仪(AquaPen AP-P 100, Photon Systems Instruments, 捷克)测定叶绿素荧光参数,将藻体剪成约1 cm大小,置于光照培养箱恢复2 h。再调整仪器选择实验所用光强  $130 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  所在的挡位,使实时荧光值在300~500,将剪好的藻体样品暗适应15 min后测定最大量子产量。

### 1.5 光合作用参数测定

使用液相氧电极(YSI5300A, Yellow Springs Instrument Co., 美国)测定藻体净光合作用速率和呼吸作用速率。称取约 0.01 g 的藻体,剪成 1 cm 左右的小段后在培养箱中恢复 2 h。在氧电极加入 8 mL 海水后再加入藻段,温度为 10 °C,待 2~3 min 数值稳定后每 30 s 记录一次数值,分别在黑暗、光照条件下测定呼吸作用速率和净光合作用速率。计算公式为

$$P = 8Mat / (100m)。$$

式中: $M$  表示培养温度为 10 °C 时蒸馏水中溶解氧的量; $a$  是反映光合作用变化的数值; $t$  表示记录所间隔的时间; $m$  表示测量前的藻体质量。

### 1.6 光合色素测定

将 0.01 g 藻体放入装有 8 mL 无水甲醇的 15 mL 离心管中,用锡箔纸遮光后放入 4 °C 环境 24 h,再使用分光光度计(Ultrospec 3000 pro, Biochrom Ltd, 英国)测定;Chl  $a$  和 Chl  $b$  的含量计算公式为<sup>[14]</sup>

$$\omega(\text{Chl } a) = (16.29A_{665} - A_{652}) / (Vm),$$

$$\omega(\text{Chl } b) = (30.66A_{652} - 13.58A_{665}) / (Vm)。$$

式中, $A_{652}$  和  $A_{665}$  分别为叶绿素在波长为 652 nm 和 665 nm 条件下的吸光值; $V$  为无水甲醇的体积(mL); $m$  为藻体鲜质量(g)。

### 1.7 数据处理

实验数据均通过 Excel 及 Origin 7.0 软件计算处理,并用平均值±标准差表示, $n=3$ ,不同  $\text{Zn}^{2+}$  浓度对藻体相对生长速率、量子产量、光合呼吸速率、叶绿素含量等实验数据通过 One-way ANOVA 进行处理分析。不同时间处理后藻体质量用 Two-way ANOVA 分析。所有检验方法均为 Tukey 检验且检验显著性水平均为 95%。

## 2 实验结果

### 2.1 不同浓度 $\text{Zn}^{2+}$ 对缘管浒苔相对生长速率的影响

图 1 是不同浓度  $\text{Zn}^{2+}$  条件下藻体的鲜质量随时间的变化曲线。从图中可以看出,随着培养时间的延长,不同  $\text{Zn}^{2+}$  浓度下缘管浒苔质量的增长趋势明显不同, $\text{Zn}^{2+}$  浓度越高,藻体生长越缓慢。在 200  $\mu\text{mol/L}$  培养的藻体增长尤其缓慢,且显著低于对照组( $P < 0.05$ )。由表 1 方差分析可以看出, $\text{Zn}^{2+}$  浓度和时间对缘管浒苔质量有显著交互作用,且  $\text{Zn}^{2+}$  和时间对藻体质量具有显著效应( $P < 0.05$ )。

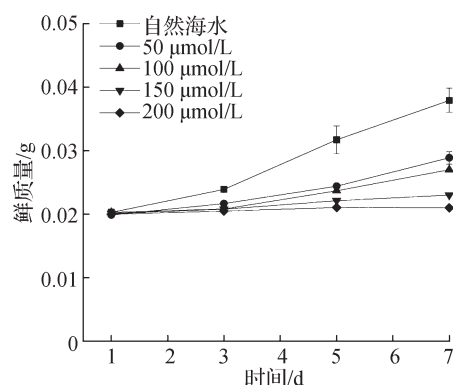


图 1 不同浓度  $\text{Zn}^{2+}$  对缘管浒苔鲜质量的影响

Fig. 1 Effect of different  $\text{Zn}^{2+}$  concentrations on fresh weight of *U. linza*

表 1 藻体质量双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA for the fresh weight of algae

处理	自由度	F	显著性
$\text{Zn}^{2+}$ 浓度	4	109.749	<0.001
时间	3	659.836	<0.001
时间× $\text{Zn}^{2+}$ 浓度	12	94.940	<0.001

从图 2 可以发现,随着  $\text{Zn}^{2+}$  浓度的增高,藻体的相对生长速率显著降低。与对照组相比,藻体相对生长速率分别降低了 37.8% (50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Zn}^{2+}$ ), 42.1% (100  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Zn}^{2+}$ ), 76.8% (150  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Zn}^{2+}$ ) 和 88.4% (200  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Zn}^{2+}$ ), 存在显著性差异( $P < 0.05$ )。  $\text{Zn}^{2+}$  浓度为 50 和 100  $\mu\text{mol/L}$  时,藻体相对生长速率分别为  $(7.22 \pm 0.37)\%/d$  和  $(6.73 \pm 0.04)\%/d$ , 无显著性差异( $P > 0.05$ )。当  $\text{Zn}^{2+}$  浓度为 150 和 200  $\mu\text{mol/L}$  时,藻体相对生长速率显著性降低,分别为  $(2.71 \pm 0.44)\%/d$  和  $(1.39 \pm 0.34)\%/d$ , 且两浓度间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

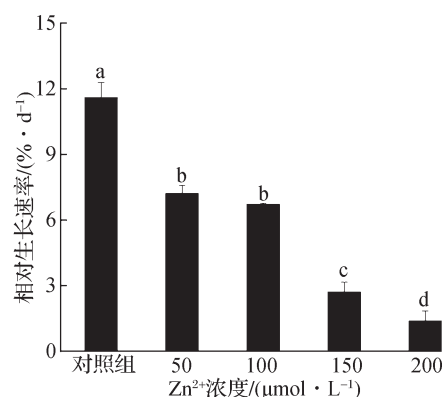


图 2 不同浓度  $\text{Zn}^{2+}$  对缘管浒苔相对生长速率的影响

Fig. 2 Effect of different  $\text{Zn}^{2+}$  concentrations on the relative growth rate of *U. linza*

## 2.2 不同浓度 $Zn^{2+}$ 对缘管浒苔量子产量的影响

$Zn^{2+}$  浓度增加,量子产量降低(见图 3),与对照组相比所有处理均具有显著性差异( $P < 0.05$ )。  $Zn^{2+}$  浓度为 50 和 100  $\mu\text{mol/L}$  时,量子产量分别为  $0.46 \pm 0.31$  和  $0.37 \pm 0.02$ ,两者无显著性差异( $P > 0.05$ )。  $Zn^{2+}$  浓度为 150 和 200  $\mu\text{mol/L}$ ,量子产量水平进一步降低,分别为  $0.33 \pm 0.01$  和  $0.30 \pm 0.06$ ,两者无显著性差异( $P > 0.05$ )。当  $Zn^{2+}$  浓度不低于 100  $\mu\text{mol/L}$  时,不同处理下量子产量无显著性差异( $P > 0.05$ )。

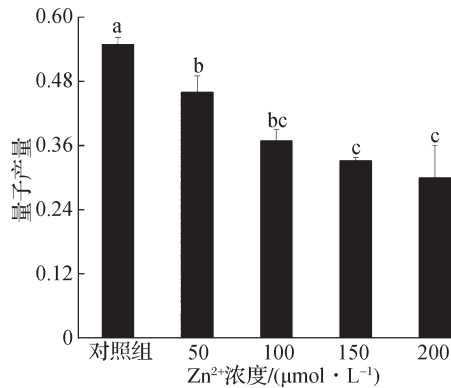


图 3 不同浓度  $Zn^{2+}$  对缘管浒苔量子产量的影响

Fig. 3 Effect of different  $Zn^{2+}$  concentrations on the yield of *U. linza*

## 2.3 不同浓度 $Zn^{2+}$ 对缘管浒苔净光合作用和呼吸作用速率的影响

如图 4a 所示,随  $Zn^{2+}$  浓度的增加,藻体的光合作用速率呈降低趋势。与对照组相比,50  $\mu\text{mol/L}$   $Zn^{2+}$  浓度处理的藻体的净光合作用速率显著降低,为  $(22.73 \pm 2.32) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$  ( $P < 0.05$ );在  $Zn^{2+}$  浓度不低于 100  $\mu\text{mol/L}$  时,藻体净光合作用速率较对照组显著降低( $P < 0.05$ ),但不同处理间无显著性差异( $P > 0.05$ )。与对照组相比,50  $\mu\text{mol/L}$  浓度处理的藻体呼吸作用速率无显著性差异,为  $(17.11 \pm 4.17) \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$  ( $P > 0.05$ )。如图 4b 所示,100,150,200  $\mu\text{mol/L}$  浓度处理条件下藻体的呼吸作用速率显著降低( $P < 0.05$ ),与对照组相比分别降低 53.22%,58.79%,68.15%。如图 4c 所示,与对照组相比,不同浓度  $Zn^{2+}$  处理后的光合活性均有显著性降低( $P < 0.05$ );但不同浓度  $Zn^{2+}$  处理下的藻体之间光合活性无显著性差异( $P > 0.05$ )。当光合活性大于 1,表示可以保证藻体自身的生长;当光合活性等于 1,表示勉强可以维持藻体自身生长;当光合活性小于 1,表示不能维持藻体自身生长,因此只有低于 100  $\mu\text{mol/L}$  浓度处理时藻体可保证自身生长。

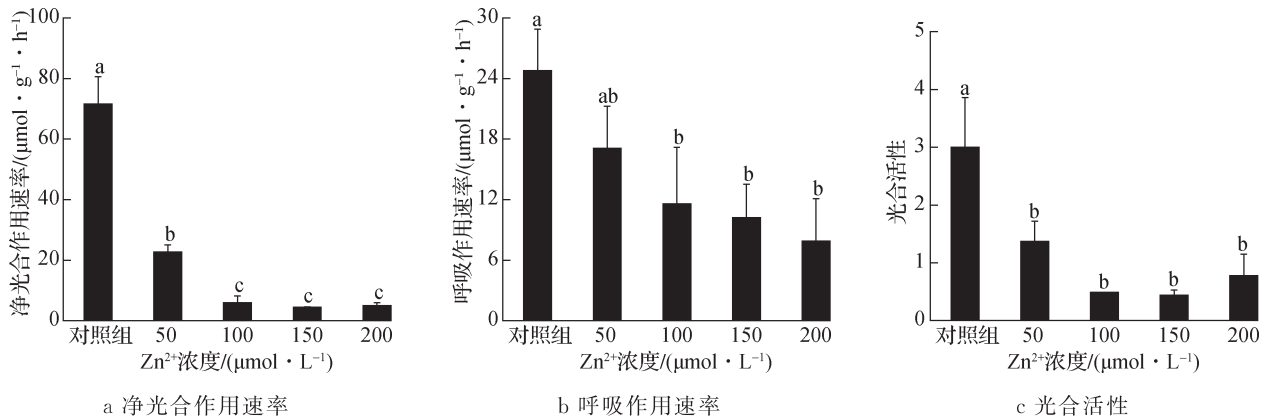


图 4 不同浓度  $Zn^{2+}$  对缘管浒苔净光合作用速率、呼吸作用速率和光合活性的影响

Fig. 4 Effect of different  $Zn^{2+}$  concentrations on net photosynthetic rate, respiration rate and photosynthetic activity of *U. linza*

## 2.4 不同浓度 $Zn^{2+}$ 对缘管浒苔叶绿素含量的影响

不同浓度  $Zn^{2+}$  处理后缘管浒苔 Chl *a* 和 Chl *b* 的含量存在显著性差异。如图 5a 所示,与对照组相比,  $Zn^{2+}$  浓度为 50  $\mu\text{mol/L}$  时,藻体 Chl *a* 含量可升高至  $(2.48 \pm 0.53) \text{mg/g}$ 。  $Zn^{2+}$  浓度高于 200  $\mu\text{mol/L}$  时, Chl *a* 含量降低,说明  $Zn^{2+}$  在低浓度下促进了 Chl *a* 合

成,在高浓度下抑制其合成。  $Zn^{2+}$  浓度为 200  $\mu\text{mol/L}$  时,藻体中 Chl *a* 含量与对照组相比有显著性差异( $P < 0.05$ ),仅为  $(0.60 \pm 0.18) \text{mg/g}$ 。  $Zn^{2+}$  浓度为 50 和 200  $\mu\text{mol/L}$  时,藻体中 Chl *a* 的含量有显著性差异( $P < 0.05$ ),但与其他浓度相比,藻体无显著性差异( $P > 0.05$ )。如图 5b 所示,不同  $Zn^{2+}$  浓度条件下,

缘管浒苔的 Chl *b* 含量变化趋势同 Chl *a* 含量变化相似。Zn<sup>2+</sup> 浓度为 50 μmol/L 时藻体中 Chl *b* 含量为 (1.23 ± 0.21) mg/g, 与 Zn<sup>2+</sup> 浓度为 100, 150 和 200 μmol/L 时均有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 但该组与对照组之间无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。当 Zn<sup>2+</sup> 浓

度高于 100 μmol/L 时, Chl *b* 含量无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。如图 5c 所示, Chl *a* 与 Chl *b* 含量之比可以反映出藻体对光能的利用情况, 与对照组相比, 4 个实验组的 Chl *a* 与 Chl *b* 含量之比均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

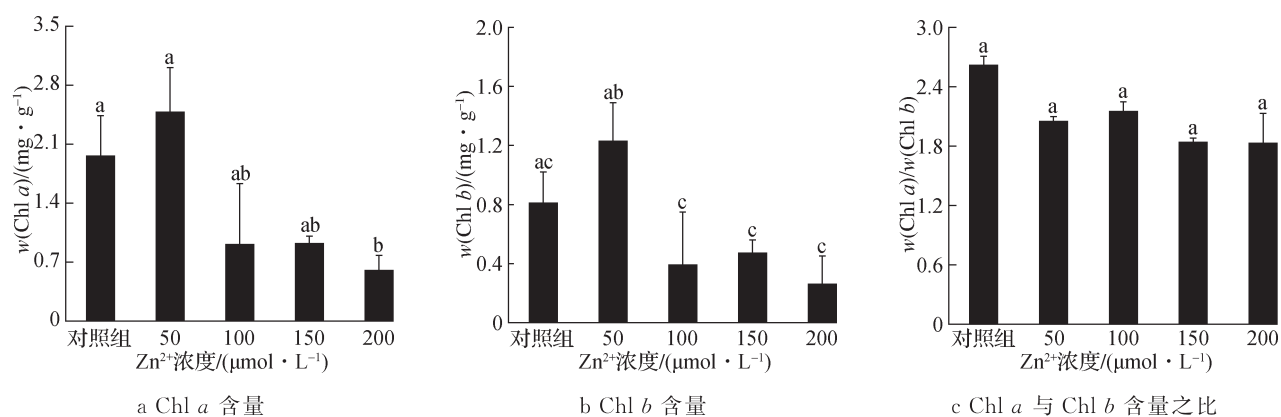


图 5 不同 Zn<sup>2+</sup> 浓度对缘管浒苔叶绿素含量的影响

Fig. 5 Effect of different Zn<sup>2+</sup> concentrations on the contents of chlorophyll in *U. linza*

### 3 讨论

通过研究不同浓度 Zn<sup>2+</sup> 对缘管浒苔相对生长速率、最大量子产量、光合作用以及叶绿素含量 (Chl *a* 和 Chl *b*) 的影响, 发现随着重金属 Zn<sup>2+</sup> 浓度的增加, 藻体的生长变缓慢, 最大量子产量、呼吸作用速率和净光合作用速率均下降, 叶绿素含量也呈下降趋势。

Saleh<sup>[15]</sup> 认为石莼在 Cu<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> 和 Cd<sup>2+</sup> 的重金属胁迫下, 其特定生长率、Chl *a*、Chl *b* 和类胡萝卜素均会显著降低。与其他金属相比, Pb<sup>2+</sup> 处理下更为明显。刘雅萌<sup>[16]</sup> 研究表明, 高浓度的 Cu<sup>2+</sup> 会明显抑制浒苔光合效率, 并且藻体遭 CO<sub>2</sub> 和高浓度 Cu<sup>2+</sup> 双重胁迫时, 光合色素、光合作用以及生长速率都会显著降低, 这可能是由于重金属 Cu<sup>2+</sup> 使藻体产生大量活性氧, 进而抑制细胞分裂, 影响新细胞物质的形成, 最终抑制藻体生长甚至导致死亡。Kondzior 等<sup>[17]</sup> 研究发现, 高浓度的 Zn<sup>2+</sup> 会抑制藻体生长, 影响光合作用, 此时藻体内的叶绿素含量下降, 类胡萝卜素与叶绿素含量比值失衡, 此外还会造成藻类的渗透性增加, 这一系列过程会对细胞产生胁迫, 甚至改变藻类的形态。重金属胁迫下, 藻体细胞内叶绿素和类胡萝卜素等色素的积累是提高逆境耐受的有效机制之一, 这类色素在消除重金属暴露产生的活性氧过程中起重要作用。活性氧过多可能会改变蛋白质的表达模式或导致细胞死亡。本实验中当 Zn<sup>2+</sup> 浓度较低

(50 μmol/L) 时藻体中的 Chl *a* 和 Chl *b* 的含量较对照组升高, 高于 100 μmol/L 时, 藻体中 Chl *a* 和 Chl *b* 的含量被明显抑制, 此时藻体的呼吸作用速率和净光合作用速率也显著下降, 这可能是由于低 Zn<sup>2+</sup> 浓度会激活藻体积累色素对抗重金属的胁迫, 而高浓度 Zn<sup>2+</sup> 则会通过抑制相关酶活性来限制色素的合成并降低相对生长速率<sup>[15]</sup>。

Filova 等<sup>[18]</sup> 认为较低浓度的 Zn<sup>2+</sup> 可导致海洋浮游生物天然群落的光合能力下降。本实验中藻体的呼吸作用速率和净光合作用速率随着 Zn<sup>2+</sup> 浓度的升高而降低, 光合作用始终被抑制。Zn<sup>2+</sup> 在低浓度下可作为藻体生长代谢所必需的微量元素存在, 但过量的重金属离子会对藻类的生长产生毒性作用, 这可能是由于 Zn<sup>2+</sup> 在与含氧或含氮的物质结合后经转运到达藻体细胞内, 对藻类的光合作用系统、碳酸氢酶活性等生理生化过程有潜在的破坏作用, 同时重金属导致的活性氧积累也会对藻体造成严重的氧化损伤<sup>[18]</sup>。

高浓度 Zn<sup>2+</sup> 抑制藻体生长, 该结果与 Zhong 等<sup>[19]</sup> 的一致。另外 Zn<sup>2+</sup> 对藻体光合生理特性的影响还受其他环境因子的影响, 当温度为 20 °C 时, 0 ~ 0.52 mg/L Zn<sup>2+</sup> 浓度对浒苔类绿藻的量子产率有不同程度的抑制。随着温度的上升, 在较高浓度的 Zn<sup>2+</sup> 下, 潜在的光合能力会受到限制, 随着 Zn<sup>2+</sup> 浓度的升高, 其对缘管浒苔光系统 II 量子产量和电子传递速率的抑制作用也得到增强, 藻体的光合保护能力受

到抑制<sup>[19-20]</sup>。这可能是由于高浓度  $Zn^{2+}$  会抑制藻体胞外多糖的合成,进而降低细胞对重金属离子的耐受性,增加胞内  $Zn^{2+}$  的转运量,导致类囊体膜的超微结构部分改变,最终对光系统II的活性产生负面影响。

## 4 结论

近年来,随着经济和工业的发展,海洋重金属污染日益严重。藻类作为海洋中重要的初级生产者,在生态系统中具有重要地位。本实验研究了不同浓度  $Zn^{2+}$  对缘管浒苔光合生理特性的影响。研究发现随着重金属  $Zn^{2+}$  浓度的升高,缘管浒苔的相对生长速率显著降低,并且藻体的呼吸作用速率和净光合作用速率也随之降低,但在  $Zn^{2+}$  浓度大于  $100 \mu\text{mol/L}$  时,藻体的净光合作用速率和呼吸作用速率变化无显著差异。随着  $Zn^{2+}$  浓度的增加,藻体最大量子产量也不断降低。水体中低浓度重金属  $Zn^{2+}$  的存在可能对缘管浒苔的暴发产生一定影响,但未来重金属污染的加剧可能会对缘管浒苔的生长繁殖以及海洋生态系统产生影响。

### 参考文献:

- [1] 刘宣宏,周玲洁,蔡春尔,等. 温度和光照对缘管浒苔光合作用的短期交互影响[J]. 大连海洋大学学报,2022, 37(6):960-967.
- [2] 邓邦平,徐韧,刘材材,等. 江苏陆地海岸线绿潮藻种类组成及分布特征[J]. 环境科学学报,2015,35(1):137-143.
- [3] 王艺. 绿潮早期发生过程及显微繁殖体贡献力研究[D]. 上海:上海海洋大学,2018.
- [4] 王圣,赵亮,张海彦,等. 黄海绿潮生消过程及其主导因素[J]. 海洋与湖沼,2022,53(6):1338-1348.
- [5] ZWOLAK A, SARZYNSKA M, SZPYRKA E, et al. Sources of soil pollution by heavy metals and their accumulation in vegetables: a review[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2019, 230: 1-9.
- [6] ZENG Xiangfeng, CHEN Xijuan, ZHUANG Jie. The positive relationship between ocean acidification and pollution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 91(1): 14-21.
- [7] JIN Peng, ZHANG Jiale, WAN Jiaofeng, et al. The combined effects of ocean acidification and heavy metals on marine organisms: a meta-analysis[J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 801889.
- [8] 朱明,郭赣林,刘兆普,等. 浒苔对重金属  $Pb^{2+}$  的生物吸附及其生理反应[J]. 水产科学,2011,30(11):681-684.
- [9] 温嘉怡. 大气  $CO_2$  水平升高背景下大型海藻对  $Cu^{2+}$  胁迫的响应研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.
- [10] JIANG Heping, GAO Bingbing, LI Wenhui, et al. Physiological and biochemical responses of *Ulva prolifera* and *Ulva linza* to cadmium stress[J]. The Scientific World Journal, 2013, 6: 289537.
- [11] 郭昕晔. 锰污染溪流附生硅藻:基于基质的种群分布特征及单一藻株锰暴露响应特性[D]. 南宁:广西大学,2022.
- [12] 刘璠. 微藻处理单一及混合重金属废水的实验研究[D]. 南宁:广西大学,2022.
- [13] 杜明勇. 重金属对太湖流域主要浮游藻类生长及群落结构的影响[D]. 南京:南京农业大学,2014.
- [14] RITCHIE R. Consistent sets of spectrophotometric chlorophyll equations for acetone, methanol and ethanol solvents[J]. Photosynthesis Research, 2006, 89(1): 27-41.
- [15] SALEH B. Physiological response of the green algae *Ulva lactuca* (Chlorophyta) to heavy metals stress[J]. Journal of Stress Physiology and Biochemistry, 2015, 11(3): 38-51.
- [16] 刘雅萌. 浒苔光合生理特性对海洋环境变化的响应[D]. 南京:南京农业大学,2014.
- [17] KONDZIOR P, BUYAREWICZ A. Effect of heavy metals (Cu and Zn) on the content of photosynthetic pigments in the cells of algae *Chlorella vulgaris*[J]. Journal of Ecological Engineering, 2018, 19(3): 18-28.
- [18] FILOVA A, FARGARGASOVA A, MOLNAROVA M. Cu, Ni, and Zn effects on basic physiological and stress parameters of *Raphidocelis subcapitata* algae[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28: 58426-58441.
- [19] ZHONG Zhihai, WANG Yong, QIN Song, et al. High temperature promotes the inhibition of  $Zn^{2+}$  to physiological performance of green tide-forming seaweed *Ulva prolifera* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 424-431.
- [20] 邵安琪,赵伟华,李青云,等. 典型污染物对藻类生态毒性效应研究进展[J]. 长江科学院院报,2015,32(6):100-109.
- [21] 张磊,李航霄,吴敏,等. 不同温度下海水酸化对中肋骨条藻光合生理特性的影响[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版),2020,29(1):1-7.

(责任编辑:李琴,秦海明 实习编辑:张昌保)