

节旋藻对 Pb^{2+} 生理响应及吸附效应研究

刘恒恒, 董世瑞, 张宏宇, 陈瑾, 王素英* (天津商业大学生物技术与食品科学学院, 天津 300134)

摘要 通过测定不同 Pb^{2+} 浓度下节旋藻的生理响应, 探讨 Pb^{2+} 对节旋藻生理特性的影响及节旋藻对重金属 Pb^{2+} 的吸附效应。结果表明, Pb^{2+} 对节旋藻形态与生理特性具有显著影响; 当水环境中 Pb^{2+} 浓度为 50 mg/L 时, 对节旋藻的生长具有明显的抑制作用, 此时藻体内的藻胆蛋白、叶绿素 a 和类胡萝卜素含量都出现最低值, 并且藻蓝蛋白对 Pb^{2+} 浓度变化的生理反应比藻绿蛋白更为敏感。节旋藻对 Pb^{2+} 的吸附量大致与 Pb^{2+} 浓度呈正相关, 但在 40~50 mg/L 时吸附量急剧增加; 吸附率大致与 Pb^{2+} 浓度呈负相关, 但在 40 mg/L 时吸附率急剧增加。可见, 节旋藻作为处理废水中重金属 Pb^{2+} 的生物吸附剂时, 其吸附效应与节旋藻的生理状态及 Pb^{2+} 浓度有很大关系, 对节旋藻吸附重金属 Pb^{2+} 的初步研究为节旋藻作为生物吸附剂的广泛应用提供理论基础。

关键词 节旋藻; Pb^{2+} ; 生理响应; 吸附效应

中图分类号 X 171 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)09-0072-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.09.021



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Study on Physiological Response and Adsorption Effect of *Arthrospira* sp. to Pb^{2+}

LIU Heng-heng, DONG Shi-rui, ZHANG Hong-yu et al (College of Biotechnology and Food Science, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134)

Abstract This study explored the effects of Pb^{2+} on the physiological characteristics of *Arthrospira* sp. and the adsorption effect of *Arthrospira* sp. on Pb^{2+} by measuring the physiological response of *Arthrospira* sp. under different concentrations of Pb^{2+} . The results showed that Pb^{2+} had significant effects on the morphological and physiological characteristics of *Arthrospira* sp. When the concentration of Pb^{2+} in the water environment was 50 mg/L, it had a significant inhibitory effect on the growth of *Arthrospira* sp. The phycobiliprotein, chlorophyll a and carotene content had the lowest value, and the physiological response of phycocyanin to changes in Pb^{2+} concentration was more sensitive than that of allophycocyanin. The adsorption amount of *Arthrospira* sp. to Pb^{2+} was approximately positively correlated with the concentration of Pb^{2+} , but the adsorption amount increased sharply at 30~50 mg/L. The adsorption rate was roughly negatively correlated with the concentration of Pb^{2+} , but the adsorption rate increased sharply at 40 mg/L. It can be seen that when *Arthrospira* sp. was used as a bio-adsorbent for the treatment of heavy metal Pb^{2+} in wastewater, its adsorption effect had a strong relationship with the physiological state and Pb^{2+} concentration of *Arthrospira* sp. The preliminary study on the adsorption of heavy metal Pb^{2+} by *Arthrospira* sp. provide a theoretical basis for the widespread application as bio-adsorbent of *Arthrospira* sp.

Key words *Arthrospira* sp.; Pb^{2+} ; Physiological response; Adsorption effect

人类活动对生态环境的影响日渐增强, 工业的飞速发展使得重金属污染问题愈发严重。重金属类污染物生物毒性显著且难以降解, 引入环境后长时间保留^[1-3], 在生物链的放大作用下持续地被富集, 积蓄于生物体中, 不仅威胁人类的健康, 而且严重影响各个生物群体的生长与繁殖^[4-5]。铅因其抗侵蚀性、高膨胀系数及良好的延展性等, 被广泛应用于采矿、航空和涂料等诸多工业领域。含 Pb^{2+} 的工业废水持续大量排放造成了铅污染范围不断地扩大, 铅通过消化道、呼吸道及皮肤进入人体后, 主要毒性效应是贫血症、神经机能失调和肾损伤^[6]。

传统处理水体中 Pb^{2+} 的方法包括化学和物理法, 如化学沉淀法、离子交换法及活性炭吸附法等, 这些方法大部分成本较高或者还存在造成二次污染的风险。生物吸附剂利用生物本身的特性, 通过表面络合、静电吸附或酶促作用等机理来实现分离水体中的重金属离子^[7-8]。生物吸附剂根据来源主要分为微生物和农业废弃物。在蓝藻中已发现螺旋藻、鱼腥藻、微囊藻和颤藻等可用于富集水环境中的重金属离子^[9-11]。微藻生长繁殖迅速, 对于重金属的吸附作用明显且

具有选择吸附性, 因此具有良好的应用前景。

该研究以节旋藻 TJS091 藻株为试验材料, 测定节旋藻在不同浓度 Pb^{2+} 胁迫时的生理状态及对 Pb^{2+} 的吸附特性, 评价不同浓度 Pb^{2+} 对节旋藻生理特性的影响及节旋藻对不同浓度 Pb^{2+} 的生物吸附和生长耐受能力, 以期应用节旋藻作为水体中重金属铅离子的生物吸附剂提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料 节旋藻(*Arthrospira* sp.) TJS091 分离自天津滨海湿地。将藻种按 10% 比例接种于 200 mL AB 培养基^[12]中, 光照 12 h (32 °C)、黑暗 12 h (28 °C)、光照强度 3 000 lx 培养 12 d, 每日摇匀 3 次。

1.2 生理指标的测定

1.2.1 形态记录。光学显微镜(尼康 ECLIPSE Ci-L 型)测定节旋藻的细胞宽度、螺径和螺距。

1.2.2 浊度测定。紫外分光光度计(HITACHI U-5100 型)测定节旋藻藻液 $OD_{560\text{ nm}}$ 。

1.2.3 干重测定。取藻液 20 mL 在已称重的 0.45 μm 滤膜上抽滤, 用蒸馏水清洗, 滤膜放入称量瓶中, 在 70 °C 烘箱中烘至恒重, 待冷却至室温后用分析天平称重(SQP 型), 根据过滤前后滤膜重量差, 计算藻细胞的干重。

1.2.4 藻胆蛋白浓度的测定。取藻液 30 mL 过滤, 藻泥加入 20 mL 磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L, pH 6.8)使其重悬浮, -20 °C 放置 1 h, 反复冻融 3 次, 经超声波细胞粉碎机(Scientz-

基金项目 国家自然科学基金项目(31270050); 天津商业大学青年基金项目(140105)。

作者简介 刘恒恒(1994—), 女, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向: 微生物资源的前期开发。* 通信作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事微生物资源及前期开发利用研究。

收稿日期 2020-01-02; **修回日期** 2020-02-14

IID 型) 破碎 5 min, 6 000 r/min 离心 5 min, 取上清液测量其 OD_{615 nm} 和 OD_{652 nm}。按公式(1)和(2)计算浓度^[13]:

$$C_{\text{藻蓝蛋白}}(\text{mg/L}) = (\text{OD}_{615 \text{ nm}} - 0.474 \times \text{OD}_{652 \text{ nm}}) / 5.34 \quad (1)$$

$$C_{\text{别藻蓝蛋白}}(\text{mg/L}) = (\text{OD}_{652 \text{ nm}} - 0.208 \times \text{OD}_{615 \text{ nm}}) / 5.09 \quad (2)$$

1.2.5 叶绿素 a 浓度的测定。取 4 mL 藻液 8 000 r/min 离心 30 min, 弃上清, 加入 4 mL 无水乙醇, 4 °C 放置 24 h, 5 000 r/min 离心 30 min, 取上清, 紫外分光光度计测定 OD_{665 nm} 和 OD_{649 nm}。按公式(3)计算浓度^[14]:

$$C_{\text{叶绿素 a}}(\text{mg/L}) = 13.70 \times \text{OD}_{665 \text{ nm}} - 5.76 \times \text{OD}_{649 \text{ nm}} \quad (3)$$

1.2.6 类胡萝卜素浓度的测定。取藻液 30 mL 过滤, 藻泥加入 20 mL 蒸馏水悬浮。反复冻融 3 次后定容至 25 mL 并混匀。取 2.5 mL 节旋藻藻液于 50 mL 离心管中, 加入 22.5 mL 无水丙酮, 避光放置 30 min。滤纸过滤, 分光光度计测定其 OD_{440 nm}、OD_{644 nm} 和 OD_{662 nm}。按公式(4)计算浓度^[15]:

$$C_{\text{类胡萝卜素}}(\text{mg/L}) = 4.7 \times \text{OD}_{440 \text{ nm}} - (1.38 \times \text{OD}_{662 \text{ nm}} + 5.48 \times \text{OD}_{644 \text{ nm}}) \quad (4)$$

1.3 Pb²⁺ 吸附试验 设置 10 个 Pb²⁺ 浓度梯度 (10~100) mg/L 及对照组 (0 mg/L), 每组 3 个重复。Pb²⁺ 用蒸馏水配制成 100 mg/L 的母液, 稀硝酸溶液稀释到 20、40、60、80 和 100 mg/L 作为标准液绘制标准曲线。在 Pb²⁺ 胁迫 24 h 后, 按步骤“1.2”测定指标, 将“1.2.3”所得滤液通过原子吸收分

光光度计 (普析通用 AFG 型), 采用氢化物法 (苏州流量计有限公司 WHG-630A 型) 测定其中的铅离子浓度, 空白对照溶液为 0 mg/L 组的滤液。参数设置如下: 吸收线波长为 283.3 nm, 灯电流为 2 mA, 狭缝宽度为 0.4 nm, 燃烧器高度为 11 mm, 乙炔流量为 1 500 mL/min。参照标准曲线及样品溶液的吸光度计算 Pb²⁺ 浓度。按公式(5)、(6)计算^[16]:

$$M = (C_0 - C_1) V / ms \quad (5)$$

$$P = (C_0 - C_1) 100\% / C_0 \quad (6)$$

式中, M 表示吸附量 (mg/g), C_0 为溶液初始浓度 (mg/L), C_1 为吸附平衡浓度 (mg/L), V 为溶液体积 (L), ms 为藻生物量 (g), P 为吸附率 (%)。

1.4 数据处理 使用 SPSS 17.0 软件对数据进行 ANOVA 分析, 通过 OriginPro 8.0 软件绘制统计图。

2 结果与分析

2.1 形态及干重的变化 表 1 为不同浓度 Pb²⁺ 处理的节旋藻的形态特征与干重描述。方差分析表明, 螺距、螺径、宽度及干重均差异极显著 ($P < 0.01$)。当 Pb²⁺ 浓度处于 0~50 mg/L 时, 藻丝体的螺距变化显著, 60~100 mg/L 时趋于平缓。螺径在 Pb²⁺ 浓度为 40 mg/L 时出现最小值, 100 mg/L 时又明显下降。Pb²⁺ 浓度在 20~80 mg/L 时细胞宽度明显小于 0~10 mg/L 时的细胞宽度, 但在 80~100 mg/L 时细胞宽度开始持续增加。节旋藻干重在 Pb²⁺ 浓度为 50 mg/L 时有最小值。

表 1 节旋藻细胞形态及干重指标的多重比较

Table 1 Multiple comparisons of cell morphology and dry weight indicators of *Arthrospira* sp.

Pb ²⁺ 浓度 Pb ²⁺ Concentration//mg/L	细胞宽度 Cell width//μm	螺距 Screw pitch//μm	螺径 Screw diameter//μm	干重 Dry weight//mg
0	1.953 2±0.007 4 abA	11.867 1±0.167 7 bB	3.754 8±0.131 3 abAB	0.951 8±0.012 9 bB
10	2.057 9±0.022 5 aA	10.068 6±0.177 5 gF	3.716 1±0.209 6 abAB	0.964 8±0.016 1 bB
20	1.677 1±0.021 6 cdBC	10.724 1±0.083 9 efDE	3.338 0±0.081 3 bBC	0.856 7±0.013 7 dDE
30	1.864 0±0.022 6 bAB	12.888 8±0.106 3 aA	3.620 4±0.120 5 abAB	1.050 2±0.015 9 aA
40	1.728 3±0.005 4 cBC	11.778 7±0.024 4 bB	2.829 4±0.073 9 cC	0.831 4±0.000 7 deE
50	1.524 0±0.014 7 eC	10.470 5±0.094 0 fgEF	3.581 2±0.100 2 abAB	0.647 3±0.005 1 fF
60	1.594 2±0.016 9 dC	11.455 6±0.102 2 bcdBC	3.759 4±0.036 7 abAB	0.805 9±0.007 6 eE
70	1.649 2±0.014 3 cdBC	11.258 1±0.083 4 cdBCD	3.539 5±0.050 2 abAB	0.834 0±0.003 1 deDE
80	1.540 5±0.036 0 eC	11.666 3±0.099 9 bcBC	3.971 4±0.080 8 aA	0.940 0±0.008 8 bBC
90	1.705 9±0.113 6 cdBC	11.127 0±0.062 3 deCD	3.712 9±0.096 9 abAB	0.887 9±0.009 1 cCD
100	1.956 4±0.029 4 abA	11.427 2±0.172 3 bcdBC	3.322 9±0.079 0 bBC	0.921 3±0.006 0 bcBC

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)

Note: Different lowercase letters after the same column data indicate significant differences ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate extremely significant differences ($P < 0.01$)

2.2 生长量变化 方差分析表明, 不同浓度的 Pb²⁺ 对节旋藻的生长具有极显著的影响 ($P < 0.01$)。从图 1 可看出, 当 Pb²⁺ 浓度为 10 mg/L 时节旋藻生长无明显变化, 10~30 mg/L 时先下降后上升, 超过 30 mg/L 时受到强烈的抑制作用; 50 mg/L 时达到最低值, 这与节旋藻的生长活力有关, 同时与节旋藻干重指标的试验结果相符合; 之后随着 Pb²⁺ 浓度的不断升高, 其生长也在不断回升并趋于平缓, 这可能与藻类在重金属离子胁迫下的保护机制有关^[17]。

2.3 藻蓝蛋白含量的变化 方差分析表明, 藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白均差异极显著 ($P < 0.01$)。从图 2 可以看出, Pb²⁺ 的加入使得藻蓝蛋白和别藻蓝蛋白的浓度显著降低。当 Pb²⁺

浓度在 10~50 mg/L 时, 二者的含量在总体上均呈现先下降后上升再下降的过程, 均在 50 mg/L 时达到最低值, 说明此时藻体的生理代谢受到强烈的抑制作用; 而超过 50 mg/L 时, 二者的含量基本保持不变。这与藻体生长曲线的变化趋势相吻合, 且藻蓝蛋白响应 Pb²⁺ 的胁迫比别藻蓝蛋白更为敏感。

2.4 叶绿素 a 含量的变化 方差分析表明, 不同浓度的 Pb²⁺ 对节旋藻叶绿素 a 含量具有极显著的影响 ($P < 0.01$)。从图 3 可看出, 叶绿素 a 浓度的变化趋势呈现“M”形, 当 Pb²⁺ 浓度为 10 mg/L 时, 叶绿素 a 含量明显上升, 达到最大值; 10~50 mg/L 时持续下降, 于 50 mg/L 达到最低值; 在 50~

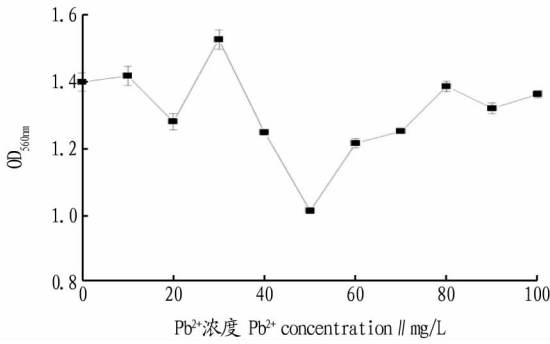


图1 节旋藻的生长量曲线

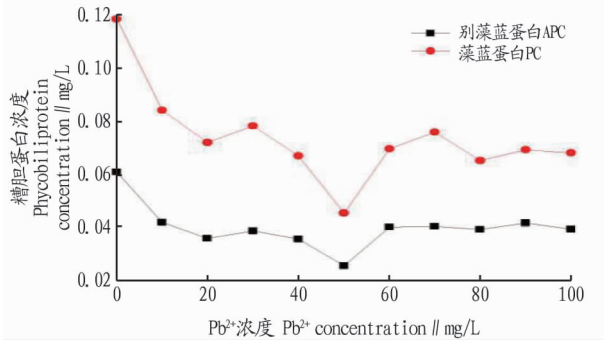
Fig. 1 The growth curve of *Arthrospira* sp.

图2 节旋藻的藻胆蛋白浓度变化

Fig. 2 Changes of phycobiliprotein concentration of *Arthrospira* sp.

80 mg/L 时出现上升, 80 mg/L 时处于较高值; 当超过 80 mg/L 后又出现直线下降的趋势。

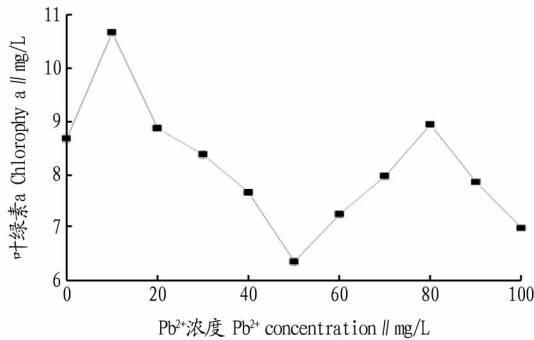


图3 节旋藻的叶绿素 a 变化

Fig. 3 Changes of chlorophyll a of *Arthrospira* sp.

2.5 类胡萝卜素含量的变化 方差分析表明, 不同浓度的 Pb²⁺ 对节旋藻类胡萝卜素含量具有极显著的影响 ($P < 0.01$)。从图 4 可看出, 当 Pb²⁺ 浓度在 0~50 mg/L 时, 类胡萝卜素含量基本呈持续下降趋势, 50 mg/L 时处于最小值; 超过 50 mg/L 后明显上升, 在 60~70 mg/L 时又出现下降; 在 70~90 mg/L 时出现上升, 但超过 90 mg/L 后, 类胡萝卜素含量又明显下降。

2.6 Pb²⁺ 的吸附效应 以 Pb²⁺ 浓度 (C) 为横坐标、Pb²⁺ 浓度所对应的吸光度 (A) 为纵坐标绘制标准曲线, 所得标准曲线方程为 $A = 0.0531C - 0.0139$ ($R^2 = 0.9956$)。

从表 2 可以看出, 节旋藻的吸附量和吸附率均差异极显著 ($P < 0.01$)。节旋藻对 Pb²⁺ 的吸附量随着 Pb²⁺ 浓度的增大

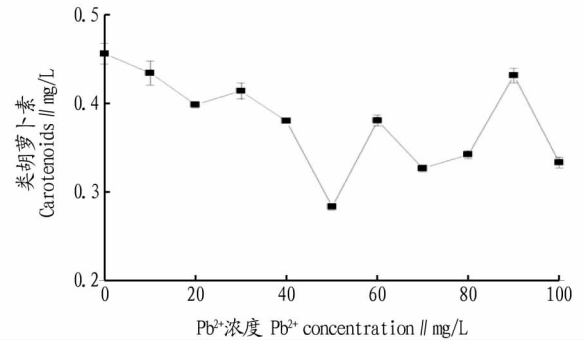


图4 节旋藻的类胡萝卜素变化

Fig. 4 Changes of carotenoid of *Arthrospira* sp.

基本呈上升趋势, 在 60~70 mg/L 时, 其吸附量稍有降低, 但随后又上升。而节旋藻对 Pb²⁺ 的吸附率随着 Pb²⁺ 浓度的增大大致呈减小趋势, 在 40 mg/L 时, 其吸附率突然升高, 随后持续降低。

表2 节旋藻的吸附量和吸附率的多重比较

Table 2 Multiple comparisons of adsorption capacity and adsorption rates of *Arthrospira*

Pb ²⁺ 浓度 Pb ²⁺ concentration mg/L	吸附量 Adsorption capacity mg/g	吸附率 Adsorption rate / %
10	9.855 3±0.141 1 iH	47.517 6±0.118 3 aA
20	18.006 1±0.318 3 hG	38.543 9±0.215 4 cC
30	20.784 4±0.522 2 gG	36.374 1±0.958 1 dD
40	43.380 3±0.097 5 fF	45.084 8±0.102 5 bB
50	51.865 8±1.370 9 dD	33.561 3±0.643 5 eDE
60	48.539 3±0.862 8 eDE	32.589 0±0.366 3 fF
70	47.529 2±0.504 5 eE	28.315 2±0.328 8 iH
80	56.222 2±0.186 6 cC	33.030 0±0.231 6 eE
90	61.077 3±0.703 2 bB	30.122 0±0.036 3 hG
100	65.923 6±0.019 3 aA	30.367 6±0.188 3 gG

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.01$)

Note: Different lowercase letters after the same column data indicate significant differences ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate extremely significant differences ($P < 0.01$)

3 讨论

生物活性细胞吸附重金属离子包含胞外吸附和胞内积累 2 个过程。胞外吸附主要由位于细胞壁上的基团与金属离子结合而吸附金属^[18], 藻类的细胞壁表面皱褶多且多孔, 有较大的比表面积, 且带有负电荷, 可以通过静电吸引、离子交换和络合等方式吸附; 胞内积累主要是利用生物体新陈代谢作用产生的能量, 通过单价或二价离子转移系统把金属离子输送到胞内后积累于某些细胞器, 然后转化为毒性较小的化合物, 这是胞内重金属解毒机制。胞内积累为主动吸附, 超负荷积累金属离子会抑制酶活、破坏抗氧化系统, 增大细胞膜透性使得藻类停止生长^[19]。对于藻类吸附金属离子的研究大都处于实验室阶段^[20-22]。

节旋藻的生长由生长素诱导, 其对节旋藻的促生长作用存在最适浓度, 较小时效果不明显, 较大时出现抑制作用, 而 Pb²⁺ 的存在则会破坏生长素的结构。周长芳等^[23] 研究发现, 当 Pb²⁺ 浓度小于 50 mg/L 时促进螺旋藻生长, 大于 60 mg/L

时出现抑制作用。胡一兵等^[24]研究发现,当 Pb²⁺ 浓度超过 50 mg/L 时对钝顶螺旋藻生长的毒害作用明显。该试验中发现,当 Pb²⁺ 浓度小于 30 mg/L 时节旋藻的生长仍然呈上升趋势,达到 50 mg/L 时,藻体生长到抑制。

藻胆蛋白主要包括藻蓝蛋白(PC)和别藻蓝蛋白(APC),作为蓝藻中普遍存在的 2 种捕光色素蛋白是重要的活性物质,并且在光的传递过程中起着桥梁的作用^[25]。Pb²⁺ 可透过细胞壁作用于细胞膜,严重破坏细胞膜的透性。节旋藻在 Pb²⁺ 长时间胁迫条件下细胞膜受到伤害,影响选择透过性,大量的细胞内容物外渗,藻胆蛋白解离溶出^[26]。叶绿素含量的降低可能由于 Pb²⁺ 直接干扰叶绿素的合成,一方面,高浓度的铅离子可以抑制叶绿素合成过程中叶绿素酸酯还原酶的活性,并影响氨基-γ-酮戊酸的合成,二者均为叶绿素合成所必需的前体物质^[27-28];另一方面,Pb²⁺ 会取代叶绿素分子中的 Mg²⁺ 或与叶绿体中可溶性蛋白质上的巯基结合,破坏叶绿素的结构和功能^[29]。另外,细胞受到 Pb²⁺ 胁迫后活性氧自由基和叶绿素酶都可能引起光合色素的降解^[30]。类胡萝卜素能够清除活性氧自由基,防止脂质过氧化。当藻体细胞遭受 Pb²⁺ 胁迫时,细胞内的电子传递链受阻,因此导致代谢过程中产生的活性氧自由基发生累积。类胡萝卜素主要发挥抗氧化作用,因此含量不断下降。试验中当 Pb²⁺ 浓度超过 50 mg/L 时,类胡萝卜素的含量变化较明显,可能细胞内的抗氧化系统遭到破坏,超出了细胞抵御逆境胁迫的能力,说明高浓度的 Pb²⁺ 对节旋藻的伤害程度较严重。

4 结论

当水环境中 Pb²⁺ 在低浓度(30 mg/L 以下)时,Pb²⁺ 对节旋藻没有明显的抑制作用,对生长具有微弱的促进作用,但叶绿素 a 含量起伏较大,类胡萝卜素含量持续下降直至 30 mg/L 时略有回升。当 Pb²⁺ 浓度在 50 mg/L 时,藻胆蛋白、叶绿素 a 和类胡萝卜素均出现最低值,但吸附量突然升高,吸附率却小于 40 mg/L 时的吸附率,此时节旋藻生长受到强烈抑制。由于活性微生物吸附剂存在抗性范围^[31],因此这很可能是由于节旋藻对金属离子吸附与吸收超负荷而影响了细胞自身的生理活动,表明其对 Pb²⁺ 的吸附效应与生理代谢和细胞活动关系密切。当 Pb²⁺ 浓度在 50 mg/L 以上时,藻胆蛋白、叶绿素 a 和类胡萝卜素稍有回升但随着 Pb²⁺ 浓度增大而低于低浓度 Pb²⁺ 时的含量,这也表明金属离子对细胞损害的严重性。

参考文献

[1] LI J N, HASHIMOTO Y, RIYA S, et al. Removal and immobilization of heavy metals in contaminated soils by chlorination and thermal treatment on an industrial-scale [J]. Chemical engineering journal, 2019, 359: 385-392.

[2] WANG J, WANG P Y, WANG H H, et al. Preparation of molybdenum disulfide coated Mg/Al layered double hydroxide composites for efficient removal of chromium(VI) [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(8): 7165-7174.

[3] WANG Q W, DONG S Y, ZHANG D, et al. Magnetically recyclable visible-light-responsive MoS₂@Fe₃O₄ photocatalysts targeting efficient wastewater treatment [J]. Journal of materials science, 2017, 53(2): 1135-1147.

[4] SCOTT G R, SLOMAN K A. The effects of environmental pollutants on complex fish behaviour: Integrating behavioural and physiological indicators of toxicity [J]. Aquatic toxicology, 2004, 68(4): 369-392.

[5] 许思思, 宋金明, 袁华茂, 等. 镉、汞、铅和石油烃复合污染对渤海湾常见渔业资源生物的影响初探 [J]. 生态毒理学报, 2010, 5(6): 793-802.

[6] GRACIA R C, SNODGRASS W R. Lead toxicity and chelation therapy [J]. American journal of health-system pharmacy, 2007, 64(1): 45-53.

[7] 杨倩. 生物吸附法处理水体中重金属离子的研究进展 [J]. 云南化工, 2018, 45(7): 76-78, 81.

[8] 段杨慧. 生物吸附法处理重金属离子废水研究进展 [J]. 中国锰业, 2016, 34(5): 100-102.

[9] 周旭东, 李彩云, 高鹏程, 等. 活体微藻吸附水体中 Cd²⁺ 的性能特征 [J]. 微生物学通报, 2017, 44(5): 1182-1188.

[10] 胡琴, 曹艳, 张结倩, 等. 不同微藻吸附重金属离子 Cd²⁺ 的实验研究 [J]. 上海环境科学, 2017, 36(4): 179-184.

[11] AVERY S V, CODD G A, GADD G M. Caesium accumulation and interactions with other monovalent cations in the cyanobacterium *Synechocystis* PCC 6803 [J]. Journal of general microbiology, 1991, 137(2): 405-413.

[12] OGAWA T, TERUI G. Studies on the growth of *Spirulina platensis*. (I) On the pure culture of *Spirulina platensis* [J]. Journal of fermentation technology, 1970, 48(6): 361-367.

[13] BENNETT A, BOGORAD L. Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga [J]. The journal of cell biology, 1973, 58(2): 419-435.

[14] LOBBAN C S, CHAPMAN D J, KREMER B P, et al. Experimental phyecology: A laboratory manual [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 563-589.

[15] 王业勤, 李勤生. 天然类胡萝卜素: 研究进展、生产、应用 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1991: 25-132.

[16] MARQUES P A S S, ROSA M F, PINHEIRO H M. pH effects on the removal of Cu²⁺, Cd²⁺ and Pb²⁺ from aqueous solution by waste brewery biomass [J]. Bioprocess engineering, 2000, 23(2): 135-141.

[17] DAO L H T, BEARDALL J. Effects of lead on growth, photosynthetic characteristics and production of reactive oxygen species of two freshwater green algae [J]. Chemosphere, 2016, 147: 420-429.

[18] 李恺, 耿存珍, 张阳, 等. 活性和非活性海藻吸附重金属的研究 [J]. 环境工程, 2013, 31(1): 51-55, 34.

[19] 郑玉建, 张杰, 依不拉音. 微生物在水体重金属污染治理中的应用 [J]. 国外医学(医学地理分册), 2006, 27(1): 39-42.

[20] 陈必链, 吴松刚. 钝顶螺旋藻对 7 种重金属的富集作用 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 1999, 15(1): 81-85.

[21] 骆巧琦, 陈长平, 梁君荣, 等. 利用藻类去除电镀废水中重金属的实验研究 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006, 45(S1): 277-280.

[22] 刘慧君, 龚仁敏, 张小平, 等. 极大螺旋藻 (*Spirulina maxima*) 对六种重金属离子的生物吸附作用 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2004, 27(1): 68-70.

[23] 周长芳, 吴国荣, 陆长梅, 等. 铅污染对钝顶螺旋藻生长及某些生理性状的影响 [J]. 湖泊科学, 1999, 11(2): 135-140.

[24] 胡一兵, 刘辉平, 胡军. 几种水体污染因子对钝顶螺旋藻生长的影响 [J]. 湖北民族学院学报(自然科学版), 2001, 19(4): 16-18.

[25] 韩博平, 韩志国, 付翔. 藻类光合作用机理与模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[26] ANEJA R K, CHAUDHARY G, AHLUWALIA S S, et al. Biosorption of Pb²⁺ and Zn²⁺ by non-living biomass of *Spirulina* sp. [J]. Indian journal of microbiology, 2010, 50(4): 438-442.

[27] 杨刚, 伍钧, 唐亚. 铅胁迫下植物抗性机制的研究进展 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1507-1512.

[28] PRASAD D D K, PRASAD A R K. Effect of lead and mercury on chlorophyll synthesis in mung bean seedlings [J]. Phytochemistry, 1987, 26(4): 881-883.

[29] KÜPPER H, KÜPPER F, SPILLER M. Environmental relevance of heavy metal-substituted chlorophylls using the example of water plants [J]. Journal of experimental botany, 1996, 47(2): 259-266.

[30] FOYER C H, NOCTOR G. Redox sensing and signalling associated with reactive oxygen in chloroplasts, peroxisomes and mitochondria [J]. Physiology plantarum, 2003, 119(3): 355-364.

[31] GUO H J, LUO S L, CHEN L, et al. Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulaor endophytic bacterium *Bacillus* sp. L14 [J]. Bioresource technology, 2010, 101(22): 8599-8605.