

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190311002

http://www.yykxjz.cn/

袁艳敏, 刘福利, 杜欣欣, 梁洲瑞, 汪文俊, 孙修涛. 极北海带对氮、磷吸收和砷、镉、铅吸附的研究. 渔业科学进展, 2020, 41(3): 25-31

Yuan YM, Liu FL, Du XX, Liang ZR, Wang WJ, Sun XT. Study on the assimilation of nitrogen and phosphorus and on the sorption of heavy metals in *Laminaria hyperborea*. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(3): 25-31

极北海带对氮、磷吸收和砷、镉、铅吸附的研究*

袁艳敏^{1,2} 刘福利^{2,3①} 杜欣欣⁴ 梁洲瑞^{2,3} 汪文俊^{2,3} 孙修涛^{2,3}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛 266071;

3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071;

4. 青岛农业大学海洋科学与工程学院 青岛 266109)

摘要 极北海带(*Laminaria hyperborea*)分布于大西洋东北海域,有很高的经济和生态价值,有望成为我国海藻资源增值的对象。本研究通过分析极北海带在不同温度下对N、P营养盐的吸收,以及对不同重金属离子的吸附,研究其对富营养化和重金属的去除能力。结果显示,1)温度为9°C~13°C时,极北海带对N、P的吸收率均最高,其中72 h后其对P的吸收率达到了95%~98%,对氨氮的吸收率为96%,对硝酸氮的吸收率约为42%,表明其对N、P有显著的去作用。2)极北海带对As⁵⁺的富集量为168.33 mg/kg,藻体表面和内部As⁵⁺含量无显著差异,分别占藻体As⁵⁺总量的55%和45%,As⁵⁺处理6 d后极北海带的相对生长速率为-0.92%/d,极北海带生长不正常。极北海带对Cd²⁺的吸附量为15 mg/kg,且91%的Cd²⁺位于藻体表面,仅9%的Cd²⁺位于藻体内部,相对生长速率为5.78%/d,说明其对极北海带生长有抑制。极北海带对Pb²⁺的吸附量为320 mg/kg,其中96.5%的Pb²⁺被吸附于藻体表面,3.5%的Pb²⁺位于藻体内部,其相对生长速率为6.73%/d,表明Pb²⁺对极北海带的生长无显著影响。

关键词 极北海带;富营养化;温度;重金属;生物修复

中图分类号 S917.3 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2020)03-0025-07

当前,我国近海海水富营养化和重金属污染问题日益严重,大型藻类是重要的初级生产者,具有吸收利用水体营养盐和增加溶解氧、吸附重金属离子的功能,可用于海洋生态系统富营养化和重金属污染的生物修复。

海水中营养盐存在的主要形式是氨氮、硝氮和活性磷,其中氨氮在动物养殖水体中含量较高(胡海燕等,2003),而硝氮是水体中无机氮的主要存在形式,且极易被藻类和植物利用,无机正磷酸盐为大部分海藻的主要P源。海藻吸收N、P营养盐已有不少研究

* 青岛市民生科技计划项目(17-3-3-65-nsh)、现代农业产业技术体系藻类体系离岸式养殖岗位专项(CARS-50)和农业农村部农业国际合作交流项目“一带一路”热带国家水产养殖科技创新合作共同资助 [This work was supported by Qingdao Science and Technology Project of People's Livelihood(17-3-3-65-nsh), China Agriculture Research System(CARS-50), and Projects of International Exchange and Cooperation in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs of China, Technology and Innovation Cooperation in Aquaculture with Tropical Countries Along the Belt and Road]. 袁艳敏, E-mail: yuanyym2991@163.com

① 通讯作者: 刘福利, 副研究员, E-mail: liufl@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2019-03-11, 收修改稿日期: 2019-04-01

(韩婷婷等, 2018; 包杰等, 2008; Liu *et al.*, 2016; 李恒等, 2013)。刘静雯等(2001)研究了细基江蓠繁枝变型(*Gracilari tenuistipitata* var. *liui*)、孔石莼(*Ulva pertusa*)和蜈蚣藻(*Grateloupia filicina*)在不同温度和盐度下对氨氮的吸收情况; 徐智广等(2011)以龙须菜(*Gracilariopsis lemaneiformis*)为材料, 研究温度、光照强度和硝氮浓度下龙须菜对无机磷吸收的影响。在海藻对各种重金属去除效果方面, 朱明等(2011)、郭赣林等(2011)证实了浒苔(*Enteromorpha prolifera*)对重金属Cu、Cd、Pb均有去除效果, 可用于含Cu²⁺和Pb²⁺废水的生物修复; 黄鹤忠(2013)也发现江蓠对Cu、Cd、Ni、Pb等也有较好的去除效果。因此, 开发新型经济海藻, 用于去除N、P等富营养盐和吸附重金属离子, 对当前近海富营养化和重金属污染的修复有重要参考依据。

极北海带(*Laminaria hyperborea*)属于褐藻纲(Phaeophyceae)、海带目(Laminariales)、海带科(Laminariaceae)、海带属(*Laminaria*), 广泛分布于大西洋东北海域、底质类型为岩礁的潮下带, 其自然分布海域南到葡萄牙北至挪威、俄罗斯(Kain, 1967、1971; Bekkby *et al.*, 2009)。极北海带藻体较大, 藻体明显分为叶(呈掌状, 完整藻体一般分叉形成30片叶)、柄和固着器, 柄和叶的最大长度一般分别为1~3 m和1~2 m(Kain, 1971)。因此, 多年生的极北海带可为其他海洋生物提供索饵场、产卵场或栖息地, 在维护多样性、海洋生物修复等方面有重要价值, 尤其是其极耐低光, 光补偿点可低至4.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 适应在较深的水域生长(梁洲瑞等, 2018)。当前, 我国正在积极推进海洋牧场建设, 海藻场是关键的重要组成部分, 由于我国近海透明度普遍较低, 投放的人工鱼礁水层较深, 由于光照限制很难增殖起规模化的“海藻森林”, 而极北海带的“个体大、多年生、耐低光”的三大特征, 可作为构建海藻场的优良藻种。本研究以极北海带为对象, 分析其对N、P吸收和对砷、Cd²⁺、铅吸附的能力, 评价其在海洋生物修复方面的潜力, 为近海生态环境修复和海洋牧场建设提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用极北海带幼苗通过配子体克隆技术培育约3个月左右获得, 叶片长度约为5~10 cm, 极北海带配子体来源于法国布列塔尼半岛海区。幼苗培养条件: 温度为11℃~13℃, 光合有效照射度

(Photosynthetically active radiation, PAR)为40~50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 光周期为12 L: 12 D, 天然海水经过滤、高压灭菌冷却后, 作为培养液, 添加营养盐(PO₄³⁻-P: 0.4 mg/L, NO₃⁻-N: 4 mg/L)。

1.2 实验方法

1.2.1 极北海带对N、P的吸收 实验在1 L的玻璃瓶中进行, 分别在5℃、9℃、13℃和17℃下充气培养, 每个玻璃瓶中分别添加1 L培养液、PO₄³⁻-P (0.3 mg/L)、NO₃⁻-N (3 mg/L)、NH₄⁺-N (3 mg/L)、(1.00±0.05) g的极北海带叶片, 其他培养条件: 光合有效照射度为40~50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 光周期为12 L: 12 D, 每个温度组3个平行。实验开始后分别在0、24、48和72 h取水样冻存, 使用Nitrate Test in Seawater (Spectroquant, 德国)测定水样中的NO₃⁻-N, Ammonium Cell Test (Spectroquant, 德国)测定水样中的NH₄⁺-N, Phosphate Test (Spectroquant, 德国)测定水样中的PO₄³⁻-P, 测定操作按照说明书进行, 计算各时间点水样中营养盐的百分含量, 营养盐百分含量=各时间点的营养盐浓度×体积/(初始营养盐浓度×体积)

1.2.2 极北海带对As⁵⁺、Cd²⁺、Pb²⁺离子的吸附 海藻吸附重金属, 一部分吸附在藻体表面, 一般是可逆的, 能与强络合剂EDTA(乙二胺四乙酸)形成稳定的络合物, 进而从藻体表面解吸附(雷鸣等, 2008); 一部分吸收进藻体里, 一般不可逆。基于上述理论, 设置以下4个实验。(1)每个瓶子称量(2.00±0.05) g的极北海带叶片(海带大小均匀, 长度5 cm×10 cm, 选取的海带假根尽量小), 记录该重量数值。培养条件: 1 L海水, 温度13℃, 光照60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 硝酸氮3 mg/L, 磷酸盐0.3 mg/L。(2)对照组不加重金属, 处理组添加单一重金属离子, 分别加Cd²⁺ 0.1 mg/L, Pb²⁺ 0.5 mg/L, As⁵⁺ 0.5 mg/L, 培养液中重金属离子浓度以实际测定为主, 每组均为3个重复。培养液中重金属离子的最终浓度是按照第四类海水标准(GB3097-1997)重金属离子浓度的10倍计算得到的。(3)实验在GXZ智能光照培养箱中进行, 各组在培养0、2、4、6 d后, 取25 ml海水保存。第4天取海水保存后, 不更换培养液, 但在瓶子中补充一定量(N 1 mg/L, P 0.1 mg/L)的营养盐继续培养海带。(4)培养6 d后, 分别把极北海带取出, 用蒸馏水冲洗3次。吸干极北海带表面的水分, 称鲜重, 记录该重量数值, 计算各处理条件下极北海带6 d的相对生长速率。每组极北海带分成2份(每份1 g以上)。其中1份放进0.1 mol/L的EDTA钠盐溶液中浸泡30 min, 使表面的重金属离子被吸附下来, 然后

用蒸馏水把极北海带冲洗干净,用来测定藻体内重金属离子的含量。另外1份不经EDTA钠盐溶液的浸泡,用来测定藻体内外重金属离子的总量。将2份极北海带分别包进锡箔纸或离心管中,放入鼓风干燥箱,60℃下烘干24 h或更长时间,直至恒重后分开保存在自封袋中待检测。

相对生长率(RGR, %/d)采用以下公式计算:

$$RGR = [\ln(W_t/W_0)/t] \times 100\%$$

式中, W_0 为起始时的鲜重, W_t 为 t d 后的鲜重, t 为时间, 本实验 t 为 6 d。

水样中重金属含量的测定采用 US EPA 200.7: 2001, 藻体中 As^{5+} 的测定采用 GB 5009.11-2014 第一法, Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 分别采用 GB 5009.15-2014、GB 5009.12-2010 规定的方法测定。

1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0 数据统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、Duncan 多重比较, 以 $P < 0.05$ 作为显著性差异, 使用 Excel 软件绘制图形。

2 实验结果

2.1 不同温度下极北海带对 N、P 的吸收

如图 1a 所示, 温度显著影响极北海带对 P 的吸收, 其中, 24 h 时 9℃、13℃、17℃ 培养液中 P 营养盐含量显著低于 5℃ ($P < 0.05$), 且 13℃ 组的 P 含量显

著低于 9℃ 组 ($P < 0.05$), 其他组无显著性差异 ($P > 0.05$)。48 h 和 72 h 时 9℃、13℃ 组的 P 含量显著低于 5℃、17℃ 组 ($P < 0.05$), 且 17℃ 组显著低于 5℃ 组 ($P < 0.05$), 9℃、13℃ 组的 P 含量无显著性差异 ($P > 0.05$)。各温度组的 P 含量在 48 和 72 h 时无显著性差异 ($P > 0.05$), 但均显著低于 0 和 24 h ($P < 0.05$)。总的来说, 温度为 9℃~13℃ 时, 极北海带对 P 的吸收率较高, 达到了 95%~98%。

如图 1b 所示, 同一时间点各温度下硝酸氮含量均无显著性差异 ($P > 0.05$)。各温度组不同时间点的分析结果如下: 温度在 5℃ 和 9℃ 下各时间点间均有显著性差异 ($P < 0.05$)。温度在 13℃ 和 17℃ 时, 0 h 时硝酸氮含量均显著高于其他 3 个时间点 ($P < 0.05$), 24 h 时显著高于 72 h ($P < 0.05$), 其他各点间均无显著性差异 ($P > 0.05$)。温度对极北海带吸收硝酸氮无显著性影响, 相对而言, 9℃~13℃ 为其适宜温度, 吸收率约为 42%。

图 1c 为相同营养盐、不同温度条件下培养液中氨氮含量的变化情况。同一温度不同时间点间培养液中的氨氮含量均有显著性差异 ($P < 0.05$)。各时间点不同温度下的分析结果如下: 24 h 时 5℃ 培养液中氨氮含量显著高于 17℃ ($P < 0.05$), 其他温度间无显著性差异 ($P > 0.05$)。48 h 时 5℃ 下氨氮含量显著高于其他 3 个温度 ($P < 0.05$), 72 h 时 5℃ 和 17℃ 氨氮含量显著高于 9℃、13℃ ($P < 0.05$), 其他无显著性差异 ($P > 0.05$)。9℃~13℃ 为极北海带吸收氨氮的适宜温度, 吸收率达到了 96%。综合图 1b 和图 1c 可知, 同等条件下极北海带优先吸收利用氨氮。

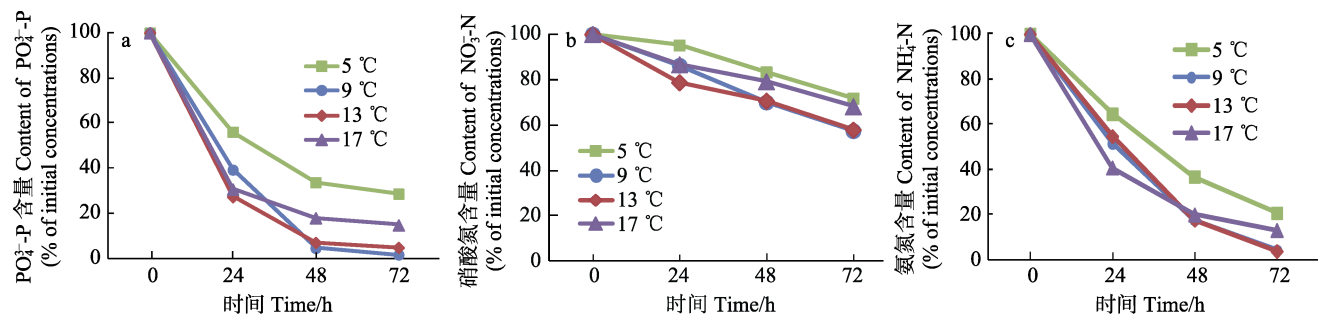


图 1 不同温度、不同时间下培养液中磷(a)、硝酸氮(b)、氨氮(c)的百分含量
Fig.1 Percentage of phosphorus (a), nitrate nitrogen (b) and ammonia nitrogen (c) in culture medium at different temperatures and different times

2.2 极北海带对 As^{5+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 离子的吸附

As^{5+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 对极北海带相对生长速率的影响如图 2 所示, 其中, As^{5+} 对极北海带生长的抑制作用最显著 ($P < 0.05$), 处理 6 d 后, 极北海带的相对生长速率为 $-0.92\%/d$, 质量低于初始时的质量, 极北海带在

0.46 mg/L 的 As^{5+} 离子溶液中不能正常生长。0.06 mg/L Cd^{2+} 处理 6 d 后, 极北海带的相对生长速率为 $5.78\%/d$, 显著低于对照组 $7.59\%/d$ ($P < 0.05$), 说明, 此 Cd^{2+} 对极北海带生长有显著的抑制作用。极北海带在 0.09 mg/L 的 Pb^{2+} 溶液中的相对生长速率为 $6.73\%/d$, 此浓度的 Pb^{2+} 溶液对极北海带的生长无显著影响 ($P > 0.05$)。

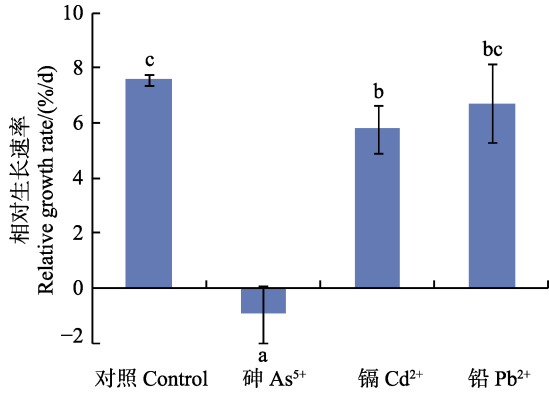


图2 As⁵⁺、Cd²⁺、Pb²⁺处理6d后极北海带的相对生长速率
Fig.2 Relative growth rate of *L. hyperborea* treated with arsenic, cadmium and lead ions for 6 days

不同字母表示差异性显著，下同
Different letters denoted significant differences.
The same as below

培养液和藻体 As⁵⁺含量变化如图3所示。图3a为培养液中 As⁵⁺含量变化，0 h时培养液中 As⁵⁺含量显著高于2 d(P<0.05)，极北海带在2 d内对 As⁵⁺进行了

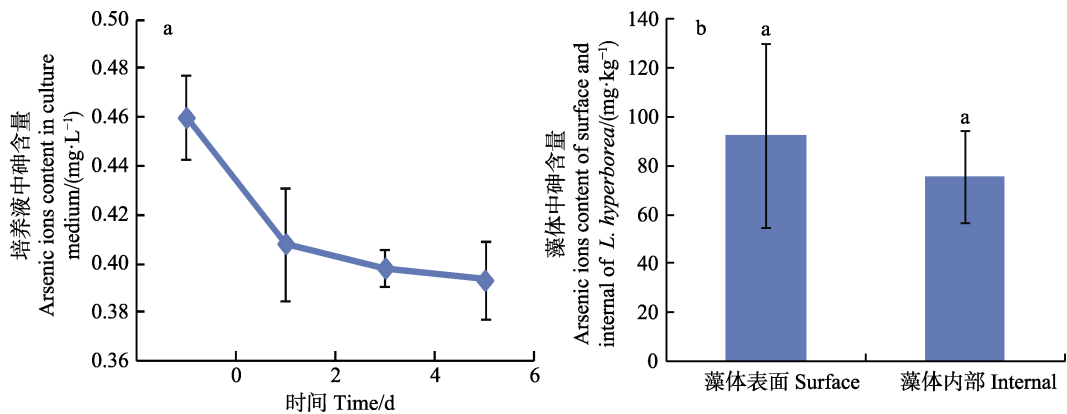


图3 不同时间下培养液 As⁵⁺离子含量(a)和培养6d后极北海带藻体内外 As⁵⁺离子含量(b)
Fig.3 The arsenic ions content in culture medium at different time and the arsenic ions content of surface and internal of *L. hyperborea* after 6 days

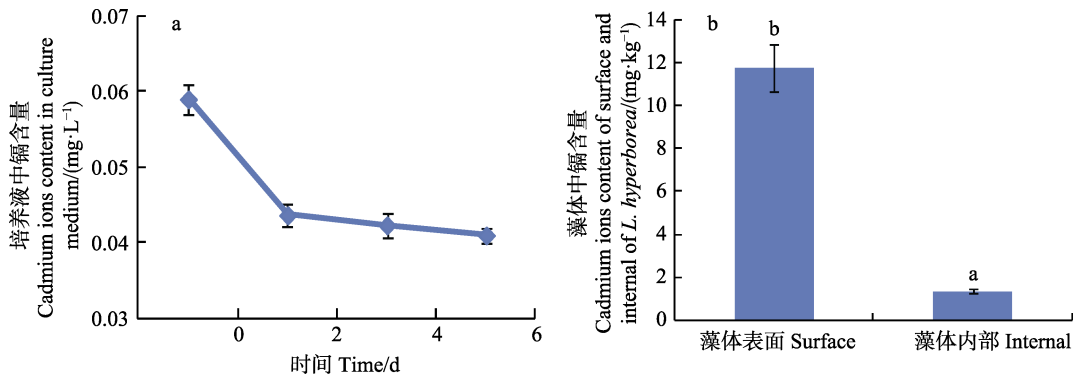


图4 不同时间下培养液 Cd²⁺含量(a)和培养6d后极北海带藻体内外 Cd²⁺含量(b)
Fig.4 The cadmium ions content in culture medium at different time and the cadmium ions content of surface and internal of *L. hyperborea* after 6 days

较多的吸收，大量的 As⁵⁺对极北海带藻体造成了一定的损害，2 d后吸收效果不显著(P>0.05)，说明极北海带对 As⁵⁺的吸收在2 d接近饱和。图3b为 As⁵⁺在极北海带藻体的含量分布，藻体表面吸附的 As⁵⁺和藻体内部吸收的 As⁵⁺含量无显著差异(P>0.05)，分别占 As⁵⁺总量的55%和45%。极北海带在此浓度的 As⁵⁺溶液中不能正常生长，As⁵⁺能对藻体造成伤害(图2)。

培养液和藻体 Cd²⁺含量变化如图4所示，图4a为培养液中 Cd²⁺含量变化，0 h时培养液中 Cd²⁺含量显著高于2、4和6 d(P<0.05)，且后3个时间点间无显著性差异(P>0.05)，说明极北海带对 Cd²⁺的吸收在2 d接近饱和。图4b为极北海带藻体内外 Cd²⁺含量分布，其中，91%的 Cd²⁺位于藻体表面，9%的 Cd²⁺位于藻体内部。极北海带对 Cd²⁺的吸附主要在2 d内，且主要是通过物理吸附而存在于藻体表面，通过生物吸收进入藻体内部的量很少，但依然会显著抑制极北海带的正常生长(P<0.05，图2)。

培养液和藻体 Pb²⁺含量变化如图5所示，图5a为

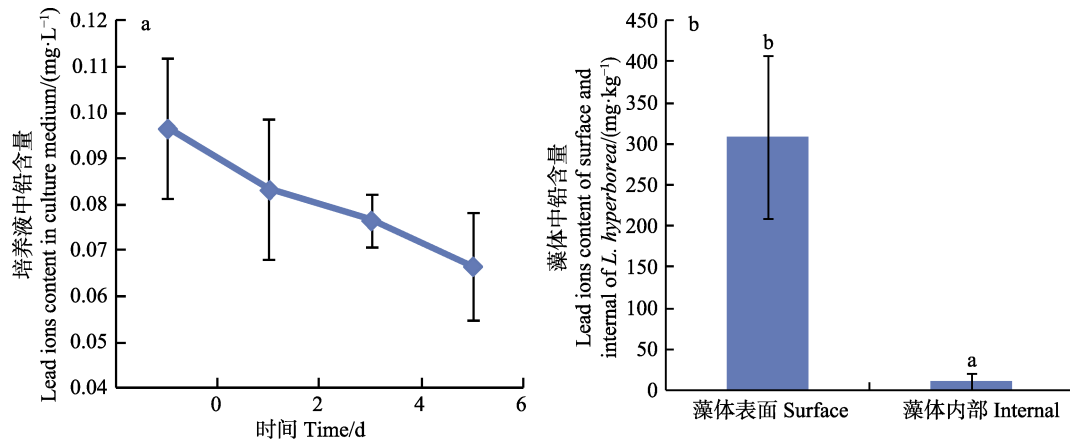


图5 不同时间下培养液 Pb^{2+} 含量(a)和培养6d后极北海带藻体内外 Pb^{2+} 含量(b)

Fig.5 The lead ions content in culture medium at different time and the lead ions content of surface and internal of *L. hyperborea* after 6 days

培养液 Pb^{2+} 含量变化, 其中, 0 h 时培养液 Pb^{2+} 含量显著高于 6 d ($P < 0.05$), 其他各时间点间无显著性差异 ($P > 0.05$), 说明极北海带对 Pb^{2+} 的吸收不同于对 As^{5+} 和 Cd^{2+} 的吸收, 其吸收过程相对平缓, 而非 2 d 内即接近吸收的饱和值。图 5b 为 Pb^{2+} 在极北海带藻体的分布情况, 其中, 96.5% 的 Pb^{2+} 被吸附于藻体表面, 3.5% 的 Pb^{2+} 位于极北海带藻体内部。培养液中的 Pb^{2+} 主要被吸附在藻体表面, 且在实验阶段内吸附速率趋于稳定持续, 0.1 mg/L 的 Pb^{2+} 浓度对极北海带的生长状态影响不显著 ($P > 0.05$, 图 2)。

3 讨论

N、P 等是大型海藻生长所必需的营养元素, 影响海藻的生长和光合作用等生理活动 (Lapointe, 1987), 温度对海藻呼吸作用及光合作用有影响 (凌晶宇等, 2016; 姚海芹等, 2016)。本研究中, 极北海带在温度为 $9^{\circ}C \sim 13^{\circ}C$ 时, 对 P、氨氮和硝酸氮的吸收率均最高; 梁洲瑞等 (2018) 研究了不同温度对极北海带幼苗生长及光合特性的影响, 证实在 $9^{\circ}C \sim 15^{\circ}C$ 时极北海带幼苗的相对生长速率、光系统 II 最大荧光产量 (F_v/F_m)、光合作用和呼吸作用速率等均高于其他温度, 本研究中, 极北海带在温度为 $9^{\circ}C \sim 13^{\circ}C$ 时具有最大的 N、P 营养吸收率, 这说明 $9^{\circ}C \sim 15^{\circ}C$ 是极北海带幼苗生长的最适温度范围。王翔宇等 (2011) 研究了 6 种大型海藻吸收 N、P 营养盐的能力, 其中, 日本马泽藻 (*Mazzaella japonica*) 对活性磷和氨氮的吸收率最高, 分别为 90.8% 和 98%, 本研究中, 适宜温度范围内极北海带对活性磷和氨氮的吸收率分别为 95%~98% 和 96%, 稍高于日本马泽藻; 而其对硝酸氮的吸收率较低 (42%), 低于孔石莼 (82%) 和日本马泽

藻 (76.9%)。

海带对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 As^{5+} 等重金属离子均有较好的富集作用, 肖君等 (2010) 证实海带对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附量大于很多其他藻类吸附剂, 可用于重金属化水质的改善。本研究中, 极北海带 2、4 和 6 d 对 0.06 mg/L Cd^{2+} 的吸收率分别为 26.0%、28.2% 和 30.5%; 在 2 d 内的吸附速率较高, 吸附量较多, 占总吸附量的 85.2%, 此后吸附速率减慢, 吸附量也较少; 极北海带对 Cd^{2+} 的富集量为 15 mg/kg, 富集后的 Cd^{2+} 主要分布在极北海带藻体表面, 占吸附总量的 91%。0.1 mg/L Pb^{2+} 溶液中, 极北海带 2、4 和 6 d 的吸收率分别为 13.8%、20.7% 和 31.0%, 吸收速率较稳定, 藻体对 Pb^{2+} 的富集量为 320 mg/kg, 被富集的 Pb^{2+} 主要分布在藻体表面, 占总吸附量的 96.5%。推测, 极北海带对 Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 的富集主要是其细胞表面的吸附作用, 相对而言, Cd^{2+} 和 Pb^{2+} 对极北海带生长的影响较小。海藻中砷大多以有机态存在, 无机态砷含量较少, 但在海水中, 砷大多以有毒的砷盐的形式存在 (范晓等, 1997; Andreae et al., 1978)。聂新华等 (2013) 研究表明, 威海市俚岛和崮山海带养殖区中的海带对无机砷的富集量分别为 0.20 和 0.24 mg/kg, 远低于本研究中极北海带对 As^{5+} 的富集量 (168.33 mg/kg), 其原因可能是本研究中的培养液砷浓度远高于自然海区的砷浓度。

综上所述, 极北海带对 N、P 营养盐具有较强的吸收能力, 72 h 对 P 的吸收率达到了 95%~98%, 对氨氮的吸收率为 96%, 对硝酸氮的吸收率约为 42%, 在一定程度上吸附 As^{5+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 重金属离子。同时, 极北海带还具有“多年生、个体大、耐低光”的特征, 可形成“海底森林”, 因此有望成为我国海洋

藻场建设和生态修复的潜力藻种。

参 考 文 献

- Andreae MO. Distribution and speciation of arsenic in natural waters and some marine algae. *Deep-Sea Research*, 1978, 25(4): 391–402
- Bao J, Tian XL, Dong SL, *et al.* Effect of temperature, salinity and light intensity on nitrogen and phosphorus uptake by *Sargassum thunbergii*. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(2): 293–300 [包杰, 田相利, 董双林, 等. 温度、盐度和光照强度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响. *中国水产科学*, 2008, 15(2): 293–300]
- Bekkby T, Rinde E, Erikstad L, *et al.* Spatial predictive distribution modelling of the kelp species *Laminaria hyperborea*. *Ices Journal of Marine Science*, 2009, 66(10): 2106–2115
- Fan X, Sun B. Studies on chemical forms and metabolic mechanism of arsenic in seaweeds. *Marine Sciences*, 1997, 21(3): 30–33 [范晓, 孙彪. 海藻中砷的化学形态及代谢机制. *海洋科学*, 1997, 21(3): 30–33]
- Guo GL, Zhu M, Xu JT, *et al.* Biosorption of Cu^{2+} and Cd^{2+} by *Enteromorpha prolifera* and their physiological responses. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(6): 850–837 [郭赣林, 朱明, 徐军田, 等. 浒苔对重金属 Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 的生物吸附及其生理反应. *海洋环境科学*, 2011, 30(6): 850–852]
- Han TT, Qi ZH, Huang HH, *et al.* Effects of enrichment with three nitrogen sources on growth and biochemical composition of *Sargassum hemiphyllum* seedlings. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(4): 159–166 [韩婷婷, 齐占会, 黄洪辉, 等. 3 种氮源加富对半叶马尾藻幼苗生长和生化组成的影响. *渔业科学进展*, 2018, 39(4): 159–166]
- Hu HY, Lu JW, Yang HS. Ecological function of macroalgae in fish culture system. *Marine Sciences*, 2003, 27(2): 19–21 [胡海燕, 卢继武, 杨红生. 大型藻类对海水鱼类养殖水体的生态调控. *海洋科学*, 2003, 27(2): 19–21]
- Huang HZ. The bioremoval of nitrogen, phosphorus, cadmium, chromium, copper and nickel by *Gracilaria* and its physiological and biochemical responses. Doctoral Dissertation of Yangzhou University, 2013 [黄鹤忠. 江蓠对 N、P 和重金属 Cd^{2+} 、 Cr^{6+} 、 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 污染的去效及其生理生化响应. 扬州大学博士研究生学位论文, 2013]
- Kain JM. Populations of *Laminaria hyperborea* at various latitudes. *Helgoländer Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 1967, 15(1–4): 489–499
- Kain JM. Synopsis of biological data on *Laminaria hyperborea*. *FAO Fisheries Synopsis No. 87*, 1971
- Lapointe BE. Phosphorus- and nitrogen-limited photosynthesis and growth of *Gracilaria tikvahiae* (Rhodophyceae) in the Florida Keys: An experimental field study. *Marine Biology*, 1987, 93(4): 561–568
- Lei M, Tanaka M, Liao BH, *et al.* Treatment of heavy metals from wastewater containing EDTA with sulfide precipitation. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1): 150–154 [雷鸣, 田中干也, 廖柏寒, 等. 硫化物沉淀法处理含 EDTA 的重金属废水. *环境科学研究*, 2008, 21(1): 150–154]
- Li H, Li MZ, Cao J, *et al.* Effects of temperature on nitrogen uptake and growth in several species of macroalgae. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(1): 159–165 [李恒, 李美真, 曹婧, 等. 温度对几种大型海藻硝氮吸收及其生长的影响. *渔业科学进展*, 2013, 34(1): 159–165]
- Liang ZR, Liu FL, Yuan YM, *et al.* Effect of different temperatures on growth and photosynthetic characteristic of *Laminaria hyperborea* young seedling. *Marine sciences*, 2018, 42(4): 71–78 [梁洲瑞, 刘福利, 袁艳敏, 等. 不同温度对极北海带幼苗生长及光合特性的影响. *海洋科学*, 2018, 42(4): 71–78]
- Ling JY, Liang ZR, Wang FJ, *et al.* Effects of high temperature on the antioxidant enzymes and chlorophyll fluorescence parameters of *Saccharina japonica*. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(3): 120–125 [凌晶宇, 梁洲瑞, 王飞久, 等. 高温对海带(*Saccharina japonica*)抗氧化酶及叶绿素荧光参数的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(3): 120–125]
- Liu H, Fang W, Wang Q, *et al.* A comparative study of the nutrient uptake and growth capacities of seaweeds *Caulerpa lentillifera* and *Gracilaria lichenoides*. *Journal of Applied Phycology*, 2016, 28(5): 1–7
- Liu JW, Dong SL, Ma S. Effects of temperature and salinity on growth of *G. tenuistipitata* var. *liui*, *U. pertusa*, *G. filicina* and $\text{NH}_4\text{-N}$ uptake of *G. tenuistipitata* var. *liui*. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 23(2): 109–116 [刘静雯, 董双林, 马牲. 温度和盐度对几种大型海藻生长率和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸收的影响. *海洋学报*, 2001, 23(2): 109–116]
- Nie XH, Zhang XC, Liu ZY. Distribution characteristics and enrichment regularity of arsenic in kelp. *Agro-Environment and Development*, 2013, 30(4): 58–61 [聂新华, 张学超, 刘缙延. 海带中砷的分布特征及富集规律研究. *农业资源与环境学报*, 2013, 30(4): 58–61]
- Wang XY, Zhan DM, Li MZ, *et al.* Preliminary studies on the nitrogen and phosphorus absorption capability of macroalgae. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, 32(4): 67–71 [王翔宇, 詹冬梅, 李美真, 等. 大型海藻吸收氮磷营养盐能力的初步研究. *渔业科学进展*, 2011, 32(4): 67–71]
- Xiao J, Miyamoto C, Yu KF, *et al.* Biosorption of Cd^{2+} , Pb^{2+} onto *Laminaria japonica*. *Environmental Chemistry*, 2010, 29(2): 226–230 [肖君, 宫本周宪, 于克锋, 等. 海带对镉、铅的吸附作用及其机理. *环境化学*, 2010, 29(2): 226–230]
- Xu ZG, Zou DH, Gao KS, *et al.* Effects of temperature, irradiance level and nitrate concentration on the uptake of inorganic phosphorus in *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta). *Journal of Fisheries of China*, 2011, 35(7): 1023–1029 [徐智广, 邹定辉, 高坤山, 等. 不同温度、光照强度和硝氮浓度下龙须菜对无机磷吸收的影响. *水产*

学报, 2011, 35(7): 1023–1029]

Yao HQ, Liang ZR, Liu FL, *et al.* Preliminary studies on the photosynthetic and respiration rate of young sporophyte of a new *Saccharina* variety “Haitian No.1” using liquid-phase oxygen measurement system. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(1): 140–147 [姚海芹, 梁洲瑞, 刘福利, 等. 利用液相氧电极技术研究“海天1号”海带(*Saccharina*

japonica)幼孢子体光合及呼吸速率. *渔业科学进展*, 2016, 37(1): 140–147]

Zhu M, Guo GL, Liu ZP, *et al.* Bioabsorption of Pb^{2+} and physiological responses in green alga *Enteromorpha prolifera*. *Fisheries Science*, 2011, 30(11): 681–684 [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. *水产科学*, 2011, 30(11): 681–684]

(编辑 马瑾艳)

Study on the Assimilation of Nitrogen and Phosphorus and on the Sorption of Heavy Metals in *Laminaria hyperborea*

YUAN Yanmin^{1,2}, LIU Fuli^{2,3①}, DU Xinxin⁴, LIANG Zhouhui^{2,3}, WANG Wenjun^{2,3}, SUN Xiutao^{2,3}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266071; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 4. College of Marine Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109)

Abstract *Laminaria hyperborea* is an economically and ecologically important kelp. It can grow lushly in the subtidal zone and from the seaweed forest, playing a significant ecological function. In this study, the absorption rates of nitrogen and phosphorus of *L. hyperborea* was determined at different temperatures (5°C, 9°C, 13°C, 17°C), as well as relative growth rate (RGR) and accumulation of selected heavy metal ions (arsenic ions As^{5+} , cadmium ions Cd^{2+} , lead ions Pb^{2+}), aiming to evaluate whether *L. hyperborea* is a potentially feasible candidate species for marine bioremediation. The main results are as follows: (1) the experimental specimens illustrated maximum absorption rates of nitrogen and phosphorus at 9°C~13°C after 72 h. The maximum absorption rates of phosphorus, ammonia nitrogen and nitrogen nitrate were 95%~98%, 96% and 42% respectively, indicating that the removal of nitrogen nitrate, ammonia nitrogen, and phosphorus by *L. hyperborea* from seawater is significant. (2) The total arsenic ions content accumulated in the *L. hyperborea* was 168.33 mg/kg, there was no significant difference between the surface (55%) and inner (45%) of the algae; the relative growth rate was -0.92%/d when *L. hyperborea* were treated with arsenic ions for 6 days. The total cadmium ions content accumulated in *L. hyperborea* was 15 mg/kg, and the surface content (91%) was significantly higher compared to the inner content (9%); the relative growth rate of those individuals who were treated with Cd^{2+} enriched solution for 6 days was 5.78%/d (lower than the control). The total lead ion content accumulated in the *L. hyperborea* was 320 mg/kg. The surface concentration (96.5%) was significantly higher compared to that of the inner concentration (3.5%) of the algae; the relative growth rate of those individuals who were treated in Pb^{2+} enriched solution for 6 days was 6.73%/d, which had no significant difference with control condition. The results suggested *L. hyperborea* could be an ideal candidate in marine bioremediation.

Key words *Laminaria hyperborea*; Eutrophication; Temperature; Heavy metal ions; Bioremediation

① Corresponding author: LIU Fuli, E-mail: liufl@ysfri.ac.cn