

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20231017003

http://www.yykxjz.cn/

曹金凤, 李秋芬, 黄经献, 罗梓峻, 张传涛, 孙祥山. 温度和光照强度对强壮硬毛藻氮磷营养盐吸收效果的影响. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 105-113

CAO J F, LI Q F, HUANG J X, LUO Z J, ZHANG C T, SUN X S. The effects of temperature and light intensity on nutrient absorption of *Chaetomorpha valida*. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 105-113

温度和光照强度对强壮硬毛藻 氮磷营养盐吸收效果的影响*

曹金凤¹ 李秋芬^{2①} 黄经献¹ 罗梓峻² 张传涛¹ 孙祥山^{1①}

(1. 中国水产科学研究院下营增殖实验站 山东 潍坊 261312;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071)

摘要 为了解温度和光照对强壮硬毛藻(*Chaetomorpha valida*)吸收营养盐效果的影响, 探索其达到最佳吸收效果的环境条件, 本文研究了该藻在不同温度(5、15、25 °C)和光照[90 000、180 000、270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]条件下对海水中常见营养盐成分的吸收效果。结果显示, 强壮硬毛藻在5 °C以上和90 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光照强度以上对水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 都有较好的吸收效果, 但温度和光照对强壮硬毛藻吸收营养盐均有显著影响, 在设定范围内, 营养盐吸收速率与温度和光照强度均呈正相关关系。极差分析结果显示, 温度的影响大于光照强度的影响。方差分析结果显示, 光照强度和温度的主效应都极显著, 而且具有叠加效应, 吸收率最高的条件为25 °C/270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组合, 该条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的营养盐吸收率最高, 3 h吸收率分别为(99.70±0.52)%、(99.99±0.01)%和(91.31±0.32)%。该藻的广温性吸收能力对我国北方地区低温和高温季节育苗用水和养殖尾水的净化具有非常重要的意义。

关键词 强壮硬毛藻; 营养盐吸收; 温度; 光照强度; 海水养殖水质净化

中图分类号 X55 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2024)02-0105-09

随着我国陆地工农业和海水养殖业的快速发展, 大量含有氨氮、亚硝酸盐、磷等营养盐的废水排入海中, 导致沿岸海域水质富营养化现象相当严重, 海洋生态环境质量下降明显, 以至于海水养殖苗种培育和养成生产用水难以满足需要。现阶段, 水产养殖用水处理主要分为物理法、化学法和生物法三大类(唐菠等, 2020), 针对不同污染物进行方法的细分和搭配使用。水生植物和微生物等常被用来吸收、转化营养盐和有机物(肖茂华等, 2023)。藻类作为初级生产者, 可以吸收大量氮、磷作为自身生长的营养, 同时通过

光合作用产生 O_2 , 提高水体溶解氧含量(高尚德等, 1984)。目前利用藻类进行水质净化, 研究对象包括微藻(贾晓彤等, 2022; 李大伟等, 2022; 鲁敏, 2021)和大型藻类(刘棋琴等, 2018), 但大型藻类相对于微藻, 因其结构特性, 更易收集和控制在池塘中, 也能有效地截留悬浮的有机颗粒(栗越妍等, 2010; 张桐雨等, 2013), 因此, 不同种类的江蓠[*Gracilaria verrucosa* (Huds.) *Papenf.*]和海带(*Laminaria japonica*)常被当作池塘和近岸水域养殖环境生物修复的工具种。但江蓠和海带等大型藻类受温度等环境限制, 在北方越冬难, 夏季易腐烂,

* 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2022YJ11; 2023TD13)、国家自然科学基金(42176219)和国家重点研发计划蓝色粮仓创新专项(2019YFD0020-2)共同资助。曹金凤, E-mail: 13465698432@163.com

① 通信作者: 孙祥山, 高级工程师, E-mail: 13583692105@163.com; 李秋芬, 研究员, E-mail: liqf@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2023-10-17, 收修改稿日期: 2023-12-07

使其实际应用受到一定限制。因此,以富营养化海水处理为目的,进行大型藻种筛选和净化效果研究具有重要意义。

强壮硬毛藻(*Chaetomorpha valida*),隶属于刚毛藻科(Cladophoraceae),硬毛藻属(*Chaetomorpha*)。它作为一种外来入侵大型藻(迟永雪等,2009;邓蕴彦,2010),常在中国北方池塘、沿岸、潟湖等水域暴发,对沿海养殖业造成了严重危害(崔雅诺等,2019)。为了探索如何防控其暴发式生长,以免影响对虾、海参等养殖生物,前期针对该藻的发育、生长及其影响因素有较多的研究报告(Li *et al.*,2020),结果表明,该藻的生长和繁育与温度、光照、氮源及N/P等因子密切相关。因该藻藻体坚硬、易碎、弯曲,以往多采用人工捞取后丢弃,造成极大的生物资源浪费(崔雅诺等,2019)。如何将该藻变害为宝、加以利用也是值得探索的方向。有研究表明,强壮硬毛藻可以制成生物炭,用于吸附水中的磷酸盐(吴超等,2022),但目前尚未见到利用活体硬毛藻作为富营养化海水生物净化工具物种的研究报告,因此,本文以强壮硬毛藻为研究对象,研究不同温度和光照条件下其对氮、磷等营养盐的吸收特性,以期探明其吸收营养盐的能力、规律和最佳环境条件,有望为利用该藻对我国北方地区高温和低温季节养殖生产中育苗用水和养殖尾水进行净化提供新的思路和理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用藻取自中国水产科学研究院下营增殖实验站蓄水池。实验用水为经过1000目网袋过滤的自然海水,先用强壮硬毛藻将其中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 全部吸收。实验开始时,再加入一种营养盐,根据莱州湾养殖废水的水质状况,设定实验中添加的营养盐浓度为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (3 ± 0.3) mg/L、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (1 ± 0.1) mg/L和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ (0.5 ± 0.05) mg/L。

1.2 实验方法

实验地点为中国水产科学研究院下营增殖实验站的生态实验室,实验室进行避光改造以消除自然光对实验的影响。实验在置于光照培养架上的30 L透明塑料箱中进行;用培养架上可控光强的日光灯控制光强,可以设置90 000、180 000和270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 3个光照强度。

温度实验前,将6个200 L的方形桶分别放入6个加有水的400 L方形桶中,在200 L方形桶中加入

100 L实验用水,通过外部水浴加热的方式来使实验用水迅速达到设定温度,然后取25 L加入到30 L透明塑料箱中并充气进行实验,实验开始后通过空调来辅助保持水温。

1.2.1 温度对硬毛藻吸收效果单因子影响实验

实验在180 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 恒定光强条件下进行,同时开展 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 3个处理组实验(每层1个处理组,每个处理组设置3个重复),设置5、15、25 $^{\circ}\text{C}$ 3个实验海水温度,每次开展1个温度条件的实验,开展3轮。每次向含有一种营养盐的实验用水塑料箱中投放强壮硬毛藻,投放密度为10 g/L,同时在另一个光照培养架上设置3个无藻组作为空白对照,处理方式同实验组。实验开始后40 h内,1 h采集1次水样,测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 或 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度,考察不同温度条件下,强壮硬毛藻对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收效果和吸收速率变化。

1.2.2 光照强度对硬毛藻吸收效果单因子影响实验

实验在15 $^{\circ}\text{C}$ 恒定水温条件下,设置90 000、180 000和270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 3个光照强度,每个光照强度占一层架子,放置3个塑料箱作为1个处理组,每次开展1个营养盐指标实验,共3轮。在含 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的透明塑料箱中加入等量强壮硬毛藻,投放密度为10 g/L,同时设置3个无藻组作为空白对照,处理方式同实验组。实验开始后40 h内,每小时采集1次水样,测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度,考察光照强度对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收效果和吸收速率的影响。

1.2.3 温度和光照双因子三水平全面实验 同时设置温度和光照强度双因素三水平的全面实验组合,温度三水平为5、15、25 $^{\circ}\text{C}$,光照强度三水平为90 000、180 000和270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。分析在一定时间内温度和光照因素对强壮硬毛藻 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸收率的联合影响,并找出营养盐吸收效果最佳的条件组合。强壮硬毛藻的投放密度仍为10 g/L。各组处理方式同1.2.1和1.2.2。

1.3 水质测定与数据分析方法

1.3.1 水质检测方法 水质指标测定参照海洋监测规范(GB 17378.4-2007)。具体水质检测指标和方法见表1。

1.3.2 计算参数 强壮硬毛藻对营养盐的吸收速率计算公式如下:

$$U=(C_{t_1}-C_{t_2})V/(t\cdot G) \quad (1)$$

式中, U 为吸收速率,mg/(g·h); C_{t_1} 为 t_1 时间下实验

表 1 检测指标及分析方法
Tab.1 Detection index and analysis methods

检测指标 Test index	分析方法 Analysis methods
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂比色法(闫修花等, 2003)
NO ₂ ⁻ -N	萘乙二胺分光光度法(海洋监测规范(GB 17378.4-2007))
PO ₄ ³⁻ -P	钼蓝分光光度法(海洋监测规范(GB 17378.4-2007))

组水体中营养盐浓度, 单位为 mg/L; C_{t_2} 为 t_2 时间下实验组水体中营养盐浓度, 单位为 mg/L; V 为所用水体体积, 单位为 L; t 为 t_1-t_2 的实验时间, 单位为 h; G 为强壮硬毛藻鲜质量, 单位为 g。

吸收率计算公式为:

$$\eta = (C_{t_0} - C_t) / C_{t_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, η 为营养盐吸收率, 单位为%; C_{t_0} 为 t 时间时空白对照组水体中营养盐浓度, 单位为 mg/L; C_t 为 t 时间时实验组水体中营养盐浓度, 单位为 mg/L。

1.3.3 数据分析方法 数据分析采用软件 IBM SPSS Statistics (SPSS 11.0)和 Office Excel, 数据图使用 OriginPro 绘制。

2 结果与分析

2.1 温度对强壮硬毛藻吸收营养盐的效果的影响

在 180 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 恒定光照条件下, 强壮硬毛藻对 NH₄⁺-N 的吸收在各温度条件下都呈现出较高的吸收速率。但不同温度实验组对营养盐的吸收效果呈现出不同的趋势(图 1a), 在 5、15、25 °C 的温度条件下, 对 NH₄⁺-N 的吸收随温度升高而加快, 各组间有显著差异, 在 5 °C 条件下的吸收速率最低, 34 h 才达到 100%, 25 °C 条件下的 NH₄⁺-N 吸收速率最高, 6 h 即可完全吸收。同一温度条件下, 强壮硬毛藻对 NH₄⁺-N 的吸收速率基本呈现由高到低的过程, 6~8 h 吸收速率最高。

实验结果显示, 强壮硬毛藻对 NO₂⁻-N 的吸收极快, 随温度的升高而加快(图 1b), 在 5、15、25 °C 温度条件下, 强壮硬毛藻对 NO₂⁻-N 完全吸收的时间分别为 7、5 和 4 h。

强壮硬毛藻对磷酸盐的吸收较 NO₂⁻-N 慢, 也是随温度升高而加快。在 5、15 和 25 °C 的 PO₄³⁻-P 完全吸收时间分别为 17、10 和 5 h (图 1c)。

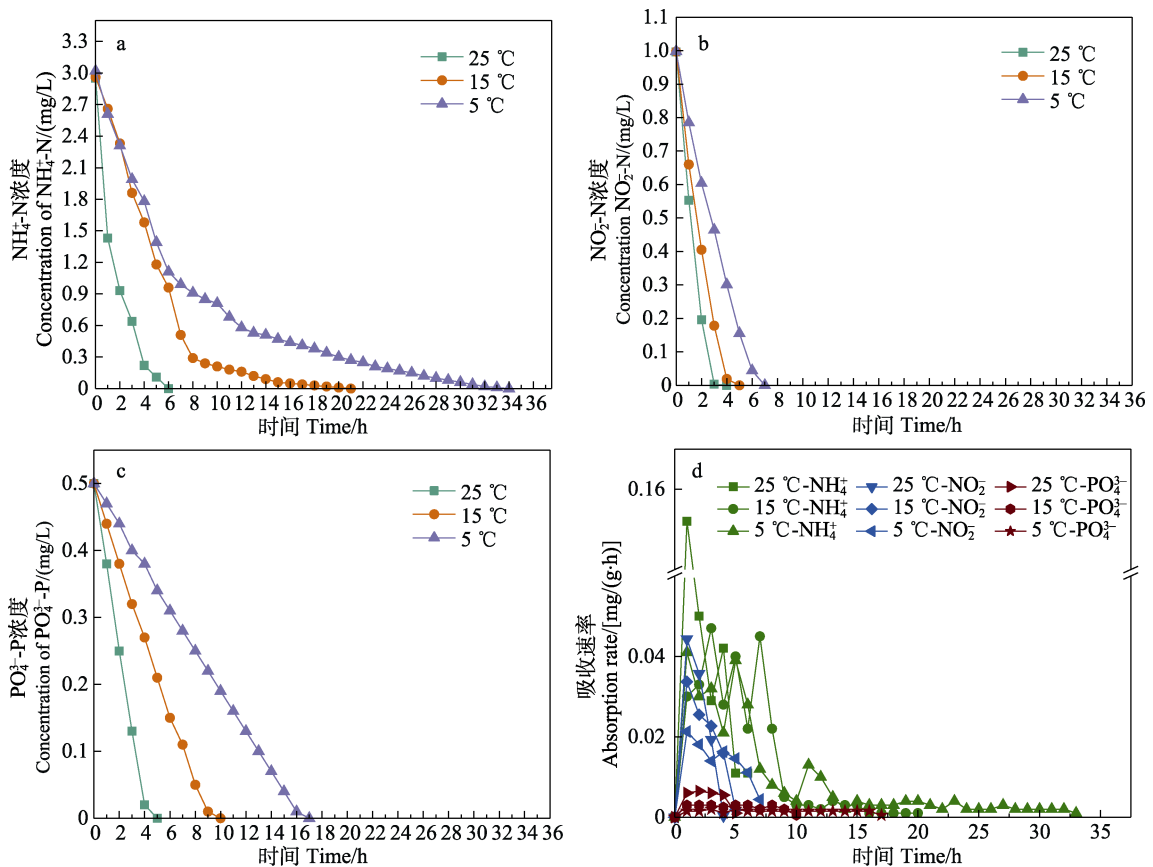


图 1 不同温度处理条件对强壮硬毛藻营养盐吸收效果的影响

Fig.1 Effects of different temperature treatments on the nutrient absorption rate of *C. valida*

实验结果显示,强壮硬毛藻对3种营养盐的吸收表现出优先级,最先被吸收的为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$,其次才是 $\text{PO}_4\text{-P}$ (图1d),在25℃同一条件下, $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的最高吸收速率分别为0.1520、0.0443和0.0065 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。综上,强壮硬毛藻对营养盐的吸收效果与温度呈正相关性,即较低温度下强壮硬毛藻对3类营养盐吸收较慢,随温度升高吸收也逐渐加快。

2.2 光照强度对强壮硬毛藻吸收营养盐效果的影响

由图2可知,在15℃恒温条件下,强壮硬毛藻在不同光照强度下对3种营养盐的吸收效果有明显的差异(图2)。在90 000、180 000和270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下,水体的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分别在38、21和8h完全被吸收(图2a), $\text{NO}_2\text{-N}$ 分别在21、5和4h时被完全吸收(图2b),但270 000和180 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组的差异不显著, $\text{PO}_4\text{-P}$ 分别在7、10和12h被完全吸收(图2c)。强壮硬毛藻对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收速度与光照强度呈显著正相关,在光照强度为270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,强壮硬毛藻对3种营养盐的吸收速度都要优于

180 000和90 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 处理组。

270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸收速率最高[0.1110 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$](图2d),同条件下对的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 吸收速率也最高[分别为0.0475和0.004 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$],前9h是强壮硬毛藻吸收营养盐的高峰期,吸收速率随实验时间的推移而降低。

2.3 温度和光照强度对强壮硬毛藻吸收营养盐的联合影响

如表2所示,在本实验所设条件范围内,强壮硬毛藻对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收率与温度和光照强度都呈正相关,方差分析结果显示,光照强度和温度的主效应都极显著($P<0.01$),表明2种环境条件都能很大程度地影响强壮硬毛藻的吸收效果。相较于其他处理温度,25℃条件下该藻的吸收效果最好,对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的吸收都能在50%以上;相较于其他光照强度,270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 条件下的吸收效果也是最好的。25℃/270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 组合处理条件下,强壮硬毛藻对3种营养盐的吸收率均最高,说明温度和光照强度对强壮硬毛藻吸收3种营养盐的效率具有叠加作用,因此,在本研究的设定

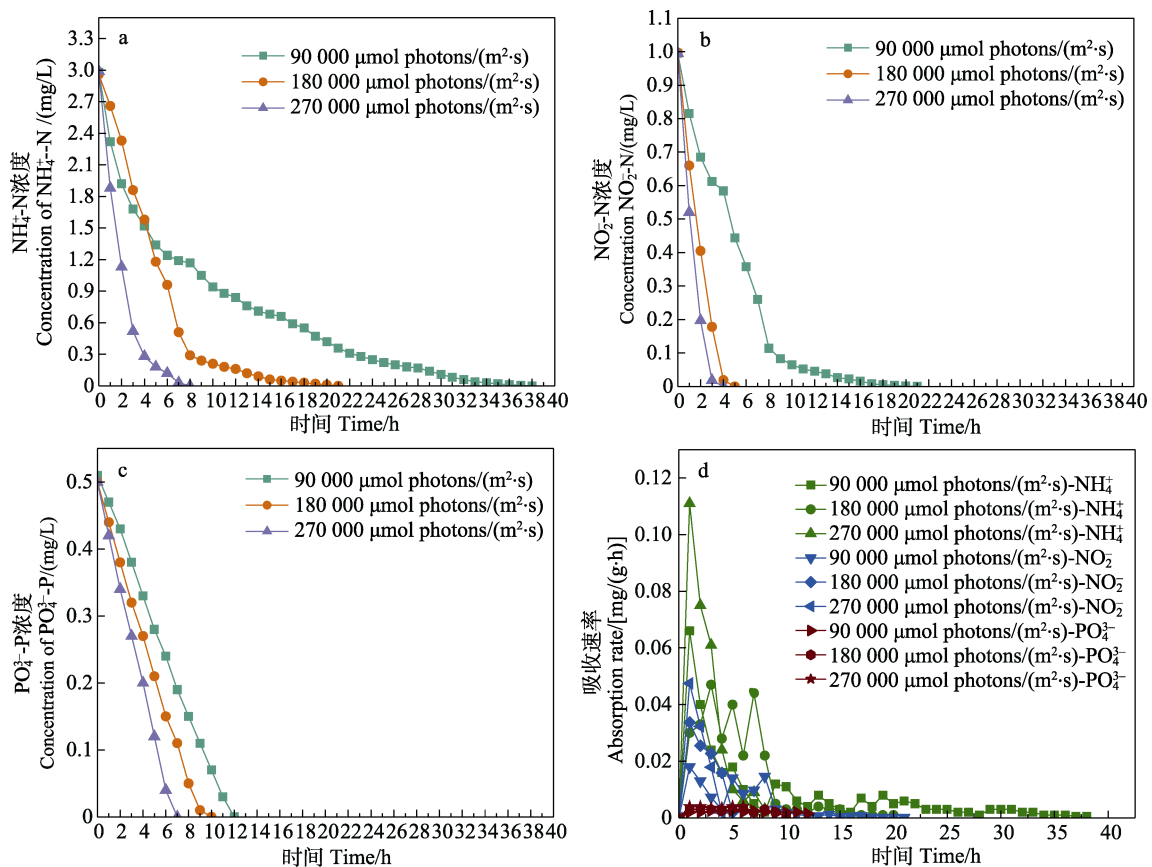


图2 不同光照强度处理对强壮硬毛藻营养盐吸收效果的影响

Fig.2 Effects of different light intensity on the nutrient absorption rate of *C. valida*

分组中, 25 °C 和 270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 是强壮硬毛藻吸收营养盐的最佳条件组合。

不同温度和光照强度组合条件下, 强壮硬毛藻对不同营养盐吸收率的极差分析结果如表 3 所示, k_1 、 k_2 和 k_3 分别代表 2 个影响因子 3 个水平下的实验指标, 由此可以判断各影响的最差水平和最优水平。 R 为其极差, 表示每个影响因子所引起的吸收率的变化范围, 代表该因子对吸收率的影响程度, 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 3 种营养盐来说, 温度的 R 值分别为 43.06、51.19 和 55.18, 光照强度的 R 值分别为 37.82、43.78 和 21.69, 由此可见, 温度对该藻吸收率的影响大于光照的影响。

3 讨论

生物处理系统中, 菌、藻或高等植物生长繁殖活性都与环境温度密切相关, 在低温环境下, 其营养盐的吸收效果受到不同程度的抑制(肖茂华等, 2023), 如狐尾藻(*Myriophyllum aquaticum*) 在低温环境下对氨氮和总氮的净化率受到较大影响(安娜, 2019)。15 °C 时, 龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*) 对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率较 20 °C 时明显降低, 这主要是由于在低温条件下, 藻体参与光合作用暗反应的酶活性较低, 产生的用来还原硝酸盐的底物也较缺乏(刘棋琴等, 2018)。值得注意的是, 强壮硬毛藻作为暖温性大型藻, 虽然其最适生长和生殖温度在 21~29 °C 之间(Deng *et al.*, 2012), 但本研究发现, 在低温环境(5 °C) 时, 强壮硬毛藻对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的吸收速率虽较 15 和 25 °C 时低, 但仍能在 34 h 内完全吸收实验水体中的营养盐。而肠浒苔(*Ulva intestinalis*) 和龙须菜在 15~30 °C 条件下 48 h 内基本吸收全部的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (刘棋琴等, 2018)。海黍子(*Sargassum muticum*)、脆江蓠(*Gracilaria chouae*) 和真江蓠(*Gracilaria asiatica*) 在 10 °C 条件下, 200 h 才能将培养液中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 几乎全部吸收(刘静雯等, 2004), 在 22.5~31.5 °C 温度范围内, 浒苔(*Enteromorpha prolifera*) 对氮磷营养盐的吸收速率影响不显著, 在 25 °C 时, 96 h 可将水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 几乎消耗殆尽, 144 h 将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 几乎全部吸收(葛红星等, 2019), 相对于其他藻类, 强壮硬毛藻的这种抗低温吸收能力对我国北方地区和低温季节育苗用水和养殖尾水的净化具有重要的意义。

水深的变化会改变水体中的光照强度, 从而影响藻体的光合作用(刘寒, 2021), 强壮硬毛藻在较低光照条件下[90 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$] 能良好生长

(邓蕴彦, 2010), 本研究设置的光照强度范围为 90 000~270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 对应室外池塘水深约为 0~2 m, 硬毛藻在此范围内营养盐吸收均有良好效果。另外, 大型海藻对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收可分为 3 个阶段, 即起始短期的快吸收、内部氮控制的吸收、外界营养盐(浓度)控制的吸收(刘静雯等, 2004), 这正好解释了实验中发现的强壮硬毛藻对 3 种营养盐的吸收速率在前 9 h 最高, 实验中后期吸收速率变低的现象, 这与江蓠等其他大型藻类对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收动力学过程一致(温珊珊等, 2008), 其原因可能与实验水体中营养盐被藻体吸收殆尽, 随实验时间延长浓度差值($C_{t1}-C_{t2}$) 逐渐变小有关。王翔宇等(2015)报道, 浒苔(*Ulva prolifera*) 对无机氮和磷的吸收速率分别为 0.022 mg N/(g·h) 和 0.006 mg P/(g·h), 本研究测得强壮硬毛藻对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的最高吸收速率分别为 0.044 3 和 0.006 5 mg/(g·h), 相较于其他藻类, 强壮硬毛藻吸收废水中的营养盐用时更短且吸收率更高(胡春义等, 2022; 刘亮等, 2022)。因实验条件所限, 本研究中, 强壮硬毛藻对营养盐的最佳吸收效率的条件均处于所设温度和光照条件的最高值, 这是因为藻类生长需要通过光合作用将无机营养盐转化为有机物, 良好的光温条件是其进行光合作用的必要条件, 在一定范围内, 光照越强, 温度越高, 越有利于光合作用中酶活性的发挥。这与夏季刺参(*Stichopus japonicus*) 和对虾养殖池强壮硬毛藻容易暴发的现象一致。在实际育苗生产过程中, 在育苗季节, 自然环境中的水温一般都在 25 °C 以下, 受水深影响, 强壮硬毛藻接受的日平均光照强度在 90 000~270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 范围内是比较合理的, 在后续的研究中, 可扩大温度和光照强度的范围, 观察其对强壮硬毛藻吸收营养盐的影响, 并找到最佳环境条件, 同时也应在应用中适当控制温度和光照, 避免其大规模暴发后发生腐烂、污染水质。正是因为不同类型的大型藻类对光温条件的要求范围不同, 也为我们根据实际用途筛选不同的藻类创造了条件。

强壮硬毛藻在低温和低光照环境中良好的营养盐吸收效果, 能弥补在恶劣工况环境下水产养殖用水和尾水处理效率低的问题。在实际应用中, 可与藻菌共生系统或人工湿地、生态浮床净化系统相结合, 弥补各季节交替温度变动产生的不利影响, 同时利用物种间的营养级差异, 可以为营养盐转化和吸收提供协同作用, 提升养殖用水和尾水净化系统的净化效率。此外, 对于人工培育条件下大型藻类过度繁殖也是之后需要考虑的问题, 温度变化和水质 N/P 也是影响藻

表 2 光温变化下强壮硬毛藻的营养盐吸收率
Tab.2 Nutrient absorption rate of *C. valida* under different light strength and temperature/%

水温 Water temperature/°C	NH ₄ ⁺ -N 吸收率			NO ₂ ⁻ -N 吸收率			PO ₄ ³⁻ -P 吸收率		
	Absorption rate of NH ₄ ⁺ -N			Absorption rate of NO ₂ ⁻ -N			Absorption rate of PO ₄ ³⁻ -P		
	90 000 μmol photons/(m ² ·s)	180 000 μmol photons/(m ² ·s)	270 000 μmol photons/(m ² ·s)	90 000 μmol photons/(m ² ·s)	180 000 μmol photons/(m ² ·s)	270 000 μmol photons/(m ² ·s)	90 000 μmol photons/(m ² ·s)	180 000 μmol photons/(m ² ·s)	270 000 μmol photons/(m ² ·s)
5	20.27±0.26 ^a	34.11±0.36 ^a	63.55±0.27 ^a	9.63±0.17 ^a	53.51±0.37 ^a	70.74±0.42 ^a	13.73±0.23 ^a	20.17±0.35 ^a	31.25±0.32 ^a
15	43.62±0.46 ^b	37.16±0.23 ^a	82.61±0.52 ^b	38.49±0.25 ^b	82.15±0.52 ^b	98.19±0.44 ^b	25.49±0.42 ^b	36.27±0.32 ^b	46.25±0.29 ^b
25	68.81±0.43 ^c	78.31±0.56 ^b	99.99±0.01 ^c	90.55±0.42 ^c	97.20±0.61 ^c	99.70±0.52 ^b	64.52±0.52 ^c	74.87±0.35 ^c	91.31±0.32 ^c

注: 同列中不同的小写字母表示在 $P=0.05$ 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate the significant differences at 0.05 level.

表 3 不同光温下强壮硬毛藻的营养盐吸收率极差分析
Tab.3 Range analysis of the nutrient absorbance range of *C. valida* under different light intensity and temperature

实验组 Experimental group	NH ₄ ⁺ -N			NO ₂ ⁻ -N			PO ₄ ³⁻ -P		
	温度 Temperature /°C	光照强度 Light intensity/[μmol photons/(m ² ·s)]	吸收率 Absorption rate/%	温度 Temperature /°C	光照强度 Light intensity/[μmol photons/(m ² ·s)]	吸收率 Absorption rate/%	温度 Temperature /°C	光照强度 Light intensity/[μmol photons/(m ² ·s)]	吸收率 Absorption rate/%
	5	90 000	20.27	5	90 000	9.63	5	90 000	13.73
1	5	90 000	20.27	5	90 000	9.63	1.00	90 000	13.73
2	5	180 000	34.11	5	180 000	53.51	2.00	180 000	20.17
3	5	270 000	63.55	5	270 000	70.74	3.00	270 000	31.25
4	15	90 000	43.62	15	90 000	38.49	4.00	90 000	25.49
5	15	180 000	37.16	15	180 000	82.15	5.00	180 000	36.27
6	15	270 000	82.61	15	270 000	98.19	6.00	270 000	46.25
7	25	90 000	68.81	25	90 000	90.55	7.00	90 000	64.52
8	25	180 000	78.31	25	180 000	97.20	8.00	180 000	74.87
9	25	270 000	99.99	25	270 000	99.70	9.00	270 000	91.31
k ₁	39.31	44.23		44.63	46.22		k ₁	34.58	
k ₂	54.46	49.86		72.94	77.62		k ₂	43.77	
k ₃	82.37	82.05		95.82	89.54		k ₃	56.27	
R	43.06	37.82		51.19	43.32		R	21.69	

类繁殖的主要因素(韩汶均等, 2019; 曹晓峰等, 2022), 通过调节水体 N/P 及控温、控光对强壮硬毛藻的繁殖数量和溢散范围进行人为调控和干预, 将更有利于该物种的规模化利用。

4 结论

温度和光照对强壮硬毛藻吸收营养盐均有显著影响, 且有叠加效应, 在设定范围内, 吸收速率与温度和光照强度呈正相关, 且温度的影响大于光照强度的影响; 强壮硬毛藻的对营养盐吸收率最高的组合为 25 °C 和 270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 该条件下 3 h 的营养盐吸收率最高, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸收率分别为 99.99 ± 0.01 、 99.70 ± 0.52 和 91.31 ± 0.32 。强壮硬毛藻在 5 °C 以上和 90 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 以上对水体中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 均有较好的吸收效果。本研究结果为利用强壮硬毛藻处理富营养化的育苗用水和养殖尾水提供了新的思路。

参 考 文 献

- AN N. Optimization of the treatment of aquaculture wastewater by *Myriophyllum aquaticum*-biofilm membrane. Master's Thesis of Hebei University of Science and Technology, 2019 [安娜. 狐尾藻-生物膜强化稳定塘处理养殖废水工艺优化. 河北科技大学硕士研究生学位论文, 2019]
- CAO X F, JI Z H, LAN H C, *et al.* Eutrophication control of lake/reservoir water sources and assurance of drinking water safety in China considering global climate change. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 34–40 [曹晓峰, 冀泽华, 兰华春, 等. 气候变化背景下我国湖库型水源富营养化控制与饮用水安全保障策略. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 34–40]
- CHEN L H, XING R X, JIANG A L, *et al.* Effects of nitrogen source and N/P on growth and photosynthesis in the invasive marine macroalga *Chaetomorpha valida*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27: 24272–24283
- CHI Y X, WANG L M, LUAN R X, *et al.* *Chaetomorpha valida*-A new recorded green alga species in Genus *Chaetomorpha* Kuetzing in China. *Fisheries Science*, 2009, 28(3): 162–163 [迟永雪, 王丽梅, 栾日孝, 等. 中国硬毛藻属新记录种——强壮硬毛藻. *水产科学*, 2009, 28(3): 162–163]
- CUI Y N, BIAN Y, WANG H W. Effects of salinity and transparency on growth and development of green alga *Chaetomorpha valida*. *Fisheries Science*, 2019, 38(4): 550–554 [崔雅诺, 卞瑶, 王宏伟. 盐度和透明度对强壮硬毛藻生长发育的影响. *水产科学*, 2019, 38(4): 550–554]
- DENG Y Y, TANG X R, HUANG B X, *et al.* Effect of temperature and irradiance on the growth and reproduction of the green macroalga, *Chaetomorpha valida* (Cladophoraceae, Chlorophyta). *Journal of Applied Phycology*, 2012, 24(4): 927–933
- DENG Y Y. Experimental taxonomy of *Chaetomorpha* and its epiphytic algae. Master's Thesis of Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanography), 2010 [邓蕴彦. 硬毛藻及其附生藻的实验分类学. 中国科学院研究生院(海洋研究所)硕士研究生学位论文, 2010]
- GAO S D, DONG L F, ZHANG W. Preliminary studies on the uptake of phosphate conducted by sporophytes of *Laminaria japonica*. *Journal of Shandong College of Oceanology*, 1984, 14(4): 63–67 [高尚德, 董良峰, 张维. 海带孢子体吸收磷酸盐的初步研究. *山东海洋学院学报*, 1984, 14(4): 63–67]
- GE H X, CHEN Z, LI J, *et al.* Effects of temperature on the growth rate and nitrogen uptake of *Ulva prolifera*. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(6): 138–144 [葛红星, 陈钊, 李健, 等. 温度对浒苔生长及不同氮源吸收特性的影响. *渔业科学进展*, 2019, 40(6): 138–144]
- HAN W J, XU Y T, JIANG Y Y, *et al.* Effects of N/P ratio, salinity and pH on growth and photosynthesis of sea weed *Chaetomorpha valida*. *Journal of Dalian Ocean University*, 2019, 34(6): 776–784 [韩汶均, 许彦婷, 蒋阳杨, 等. 氮磷比、盐度、pH 对强壮硬毛藻生长和光合作用的影响. *大连海洋大学学报*, 2019, 34(6): 776–784]
- HU C Y, SHI Y Y, TENG X Y, *et al.* Study on the treatment of mariculture wastewater by immobilized microalgae. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(12): 46–49 [胡春义, 石瑶瑶, 滕晓芸, 等. 微藻固定化处理海水养殖废水的研究. *中国资源综合利用*, 2022, 40(12): 46–49]
- JIA X T, HE X J, FENG J M, *et al.* Optimization of conditions for purification of wastewater treatment plant effluent by microalgae-bacteria symbiotic system. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(4): 1177–1184 [贾晓彤, 何小娟, 封吉猛, 等. 菌藻共生系统净化污水处理厂尾水的条件探究与优化. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1177–1184]
- LI D W, MENG F P, CUI H W. Cultivation of an oil-producing microalga in effluents from municipal sewage treatment plants: Nutrient removal and biomass production. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2022, 52(2): 94–103 [李大伟, 孟范平, 崔鸿武. 利用市政污水厂尾水培养产油微藻——营养盐去除与生物质生产. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(2): 94–103]
- LI Y Y, MENG R, HE L S, *et al.* Screening of algae for purifying aquaculture wastewater. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(6): 67–70 [栗越妍, 孟睿, 何连生, 等. 净化水产养殖废水的藻种筛选. *环境科学与技术*, 2010, 33(6): 67–70]
- LIU H. Adaptation mechanism of submerged macrophytes in eutrophic lakes to low underwater light. Doctoral Dissertation of University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Botanical Garden), 2021 [刘寒. 沉水植物适应富

- 营养化湖泊弱光环境的生理生态学机制. 中国科学院大学(中国科学院武汉植物园)博士研究生学位论文, 2021]
- LIU J W, DONG S L. Nature of NH_4^+ uptake kinetics of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* and *Ulva pertusa*. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(2): 95–103 [刘静雯, 董双林. 氮饥饿细基江蓠繁枝变型和孔石莼氨氮的吸收动力学特征. 海洋学报, 2004, 26(2): 95–103]
- LIU L, ZHAO L Y, XU N N, *et al.* Study on submerged vegetation combined with immobilized microorganism technology in purification of eutrophic river channel. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2022, 40(7): 193–195 [刘亮, 赵燎原, 许宁宁, 等. 沉水植被协同固定化微生物技术净化富营养化河道研究. 中国资源综合利用, 2022, 40(7): 193–195]
- LIU Q Q, YANG P, MA M J, *et al.* The effects of temperature on the absorption efficiency of nitrogen and phosphorus and photosynthetic physiological characteristics in four macroalgae species. *Acta Hydrologica Sinica*, 2018, 42(5): 1050–1056 [刘棋琴, 羊芑, 马明婕, 等. 温度对 4 种大型海藻氮磷吸收效率及光合生理特性的影响. 水生生物学报, 2018, 42(5): 1050–1056]
- LU M. Analysis of nitrogen and phosphorus removal effect of optimized microalgae in the tail water of intensive culture. Master's Thesis of Zhejiang Ocean University, 2021 [鲁敏. 优选微藻对集约化养殖尾水氮磷的去除效果分析. 浙江海洋大学硕士研究生学位论文, 2021]
- TANG B, ZHONG G H. Research progress of aquaculture tail water treatment technology. *Yunnan Chemical Technology*, 2020, 47(11): 17–19 [唐波, 钟高辉. 水产养殖尾水处理技术研究进展. 云南化工, 2020, 47(11): 17–19]
- WANG X Y, WU H Y. Nutrient uptaking and growth performance of *Ulva prolifera*. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2015, 31(4): 243–246, 252 [王翔宇, 吴海一. 浒苔的营养盐吸收及生长特性研究. 广西科学院学报, 2015, 31(4): 243–246, 252]
- WEN S S, ZHANG H Y, HE W H, *et al.* Study on $\text{NH}_4\text{-N}$ removing efficiency and kinetics in *Gracilaria asiatica*. *Journal of Fisheries of China*, 2008, 32(5): 794–803 [温珊珊, 张寒野, 何文辉, 等. 真江蓠对氨氮去除效率与吸收动力学研究. 水产学报, 2008, 32(5): 794–803]
- WU C, HAN Y, LI Q Y, *et al.* FeCl_3 modification and phosphate adsorption capacity of green alga *Chaetomorpha valida* biochar. *Journal of Dalian Ocean University*, 2022, 37(6): 985–992 [吴超, 韩宇, 李秋雨, 等. 强壮硬毛藻生物炭的 FeCl_3 改性及其对磷酸盐的吸附性能. 大连海洋大学学报, 2022, 37(6): 985–992]
- XIAO M H, LI Y J, WANG X C, *et al.* Research progress of aquaculture tailwater treatment technology and equipment. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(1): 1–13 [肖茂华, 李亚杰, 汪小岳, 等. 水产养殖尾水处理技术与装备的研究进展. 南京农业大学学报, 2023, 46(1): 1–13]
- YAN X H, WANG G Z, CHEN D J. To determine $\text{NH}_4\text{-N}$ directly in sea-water using nessler's reagent-colorimetry. *Environmental Monitoring in China*, 2003, 19(6): 8–10 [闫修花, 王桂珍, 陈迪军. 纳氏试剂比色法直接测定海水中的氨氮. 中国环境监测, 2003, 19(6): 8–10]
- ZHANG T Y, TANG X P, LI H W, *et al.* Efficiency of nitrogen and phosphorus removal from shrimp breeding wastewater by *Chlorella* sp. HNC11 and *Amphora* sp. HNY. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(18): 169–171, 185 [张桐雨, 唐选盼, 李洪武, 等. 小球藻和双眉藻对虾塘养殖废水氮、磷的去除效果. 广东农业科学, 2013, 40(18): 169–171, 185]

(编辑 马璀艳)

The Effects of Temperature and Light Intensity on Nutrient Absorption of *Chaetomorpha valida*

CAO Jinfeng¹, LI Qiufen²①, HUANG Jingxian¹, LUO Zijun²,
ZHANG Chuantao¹, SUN Xiangshan¹①

(1. Xiaying Breeding Experimental Station, Chinese Academy of Fishery Sciences, Weifang 261312, China;
2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract *Chaetomorpha valida* is an invasive species in shrimp and sea cucumber ponds and shallow sea areas in north China. Several studies have investigated its growth characteristics and the

① Corresponding author: SUN Xiangshan, E-mail: 13583692105@163.com; LI Qiufen, E-mail: liqf@ysfri.ac.cn

environmental factors required to control its bloom and avoid any harmful effects on cultured shrimp or sea cucumber. However, the possibility of utilizing these algae to remove nutrients from eutrophic seawater for breeding and maricultural waste water treatment should be explored because eutrophication has become a serious problem in near-shore sea areas and is threatening the sustainable development of mariculture and the eco-environment of oceans. Nevertheless, no study has been conducted on the nutrient absorption ability or the utilization of live *C. valida*, except one report on utilizing *C. valida* as a bio-carbon to absorb phosphate. Temperature and light intensity plays important roles in the nutrient absorption, growth, and reproduction of macroalgae. Different macroalgae species exhibit different responses to changes in temperature and light intensity. To understand the effect of temperature and light intensity on nutrient absorption of *C. valida*, the ability of the algae to absorb $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at different temperatures and light intensities was investigated and the best conditions for nutrient absorption were identified in this study. The experiments were carried out in a reformed lab with no natural light. *C. valida* was cultivated in nutrient-removed sea water after adding a single nutrient and under artificially controlled temperature (5, 15, and 25 °C) and light intensity (90 000, 180 000, 270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$). Three parallel groups were set up for each environmental factor, and the groups without algae were set up as control. The concentrations of $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were determined every hour for a total of 40 h. The results showed that *C. valida* exhibit significant absorption ability for $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ under temperatures of over 5 °C and light intensity of over 90 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. Temperature and light intensity was positively correlated with nutrient absorption of *C. valida* under the range of conditions studied. At 25, 15, and 5 °C, ammonium was almost totally absorbed at 6 h, 21 h, and 34 h, respectively; nitrite was absorbed at 4 h, 5 h, and 7 h, respectively; and phosphate was absorbed at 5 h, 15 h, and 17 h, respectively, under a fixed light intensity of 180 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. Under light intensities of 270 000, 180 000, and 90 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ and at a fixed temperature of 15 °C, ammonium was almost totally absorbed at 8 h, 21 h, and 38 h, respectively; nitrite at 4 h, 5 h, and 21 h, respectively; and phosphate at 7 h, 10 h, and 12 h, respectively. *C. valida* exhibited a high absorption rate in the first 9 h, and the highest absorption rates for ammonium, nitrite, and phosphate were 0.152 0, 0.044 3, and 0.006 5 $\text{mg}/(\text{g}\cdot\text{h})$, respectively, at the light intensity of 270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; subsequently, absorption slowed down with time. ANOVA results show that the influence of temperature and light intensity has a superposition effect. The highest absorption rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were obtained at the highest temperature and light intensity in this study [25 °C and 270 000 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$], which were 99.99%, 99.70%, and 91.31%, respectively. The result of range analysis showed that the values of R (range) of the three nutrients for temperature were 43.06, 51.19, and 55.18 and those for light intensity were 37.82, 43.78, and 21.69, respectively, suggesting the influence of temperature was greater than that of light intensity. Our results provide a new understanding of the nutrient absorption characteristics of *C. valida* at different temperatures and light intensities. *C. valida* can absorb nutrients effectively in a shorter time than other macroalgae, with the potential to be used as a tool to purify eutrophicated sea water under controlled conditions. Thus, we provide a new idea and theoretical basis for water purification for breeding and maricultural water treatment. Especially, the absorption ability of *C. valida* at low and high temperatures may be of great significance for the purification of seedling water and mariculture waste water in the coldest and hottest seasons in north China.

Key words *Chaetomorpha valida*; Nutrient absorption; Temperature; Light intensity; Maricultural water purification