

温度、盐度和光照强度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响

包杰, 田相利, 董双林, 姜宏波

(中国海洋大学 水产学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 在实验室条件下, 研究了不同的温度和盐度组合, 温度和光照强度组合对鼠尾藻 (*Sargassum thunbergii*) 氮、磷吸收速率的影响。结果表明, 上述3个环境因子对鼠尾藻氮、磷吸收速率均有显著影响。其中, 温度和盐度对鼠尾藻氮、磷吸收速率有极显著影响 ($P < 0.01$), 二者交互作用也极显著 ($P < 0.01$)。在盐度20、温度25℃条件下和盐度30、温度30℃条件下, 鼠尾藻对氮有较高吸收速率, 分别为 $11.26 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 和 $11.01 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$; 在盐度40、温度15~30℃范围内对磷的吸收速率较大, 达到 $1.5 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 以上。温度和光照对鼠尾藻氮、磷吸收速率均有极显著影响 ($P < 0.01$), 二者交互作用极显著 ($P < 0.01$)。在温度15℃和光照强度 $140 \sim 180 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以及温度20~25℃和光照强度 $60 \sim 100 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件下, 鼠尾藻对氮有较高吸收速率, 均在 $9.60 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 以上; 在温度25℃和光照强度 $60 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件下, 鼠尾藻对磷的吸收速率达到最大, 为 $1.30 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 。本研究结果表明, 鼠尾藻总体上对水体中的氮、磷均具有较高的吸收速率, 且能较好地同时吸收 NH_4^+-N 和 NO_3^--N , 显示了它对海水环境中营养盐具有较强的吸收能力。[中国水产科学, 2008, 15(2): 293~300]

关键词: 鼠尾藻, 温度, 盐度, 光照强度, 氮, 磷, 吸收速率

中图分类号: Q142

文献标识码: A

文章编号: 1005-8737-(2008)02-0293-08

随着海水养殖业的迅速发展, 养殖对象的排泄物及残饵的积累和腐化分解导致近海养殖水体营养盐的不断累积, 严重威胁到近海的生态环境^[1-3]。因为藻体内的营养盐含量与环境水体中营养盐浓度间存在着密切的关系^[4], 而大型海藻又是海洋生态系统中重要的初级生产者以及海水养殖的重要对象, 所以国内外学者一致认为, 混养大型藻类可能是吸收、利用营养物质和延缓水质富营养化的有效措施之一^[5-6], 近年来利用大型海藻防治海水富营养化的研究方兴未艾, 并已取得很大进展^[7]。

鼠尾藻 (*Sargassum thunbergii*) 为中国暖温带多年生种类, 属褐藻门, 马尾藻属, 不仅是海参育苗和养殖的理想饵料, 还具有较高的工业、营养和药用价值^[8-11]。尽管国内外已有较多关于环境因子对大型藻类营养吸收影响的研究, 如许忠能等^[12]对细基江蓠繁枝变种 (*Gracilaria tunuistipitata* V. liui) 的氮、磷吸收速率进行了研究; 刘静雯等^[13]研究了孔石莼 (*Ulva pertusa*) 和蜈蚣藻 (*Grateloupia filicina*) 对氨氮的吸收情况; Lartigue 等^[14]则研究了盐度波动对 *Ulva lactuca* 无机氮吸收的影响等。

但是, 目前对鼠尾藻生态学方面的研究报道却还少见, 且多集中在对其生长和生殖季节的研究^[15-17], 而关于环境因子对其营养吸收的研究尚未见报道。本研究主要分析了温度、盐度、光照强度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响, 旨在为富营养化海区的治理开辟一条既能改善水域生态环境, 又可取得经济效益的新途径提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

鼠尾藻采自青岛太平角。选择健康藻体, 除去表面附着物, 实验前在室内水族箱中适应1周。培养用水为加富消毒海水 (N: $100 \mu\text{mol}/\text{L}$, P: $8 \mu\text{mol}/\text{L}$, 微量元素使用 f/2 配方), 每天更换1次培养海水。适应期水温为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 盐度为20, pH 值为8.0~8.3, 光照强度为 $100 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光周期为12L:12D。

1.2 实验设计

1.2.1 温度、盐度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响 实验设置了5个温度水平 (10°C 、 15°C 、 20°C 、 25°C 、

收稿日期: 2007-04-25; 修订日期: 2007-10-05.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2006BAD09A01); 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA10Z409).

作者简介: 包杰 (1980-), 女, 博士研究生, 主要从事水产养殖生态学研究. E-mail: yh_baojie@163.com

通讯作者: 田相利. E-mail: xianglitian@ouc.edu.cn

30 ℃) 和 4 个盐度水平 (10、20、30、40), 共 20 个温度、盐度组合, 每个处理分别设置 3 个重复和 1 个对照 (不放藻体, 用以监测其他有机体对 N、P 的利用和转化, 并在实验结果中作为本底扣除)。

1.2.2 温度和光照强度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响

实验设置了 4 个温度水平 (10 ℃、15 ℃、20 ℃、25 ℃) 和 5 个光照强度水平 [$20 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $60 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $100 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $140 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $180 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$], 共 20 个温度、光照强度组合, 每个处理设置 3 个重复和 1 个对照 (不放藻体)。

1.3 氮、磷吸收速率的测定方法

用 250 mL 培养瓶添加 200 mL 培养液 (培养液为经石莼吸收营养盐后的消毒海水配制, $\text{NH}_4^+-\text{N} < 1.00 \mu\text{mol/L}$, $\text{NO}_3^--\text{N} < 2.00 \mu\text{mol/L}$, NO_2^--N 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 含量用本实验方法未检测到, 可视为 $0 \mu\text{mol/L}$), 培养液中添加总无机 N 至浓度 $100 \mu\text{mol/L}$ (NH_4^+-N : NO_3^--N 为 1:1), 添加磷酸盐至浓度 $8 \mu\text{mol/L}$ ($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$), 添加碳酸盐至浓度 $2.5 \mu\text{mol/L}$ (用来补充 C 源)。每个培养瓶中培养的鼠尾藻湿质量为 $(0.522 \pm 0.010) \text{g}$, 每次均取相同部位的藻体进行实验。在测量藻湿质量前, 首先将其表面的水分用滤纸吸干。吸水用的滤纸先经蒸馏水浸洗, 以除去亚硝酸氮、硝酸氮, 再经 60 ℃ 烘干后供实验使用。实验持续时间设置为 12 h, 实验结束后测定水样中 N、P 含量, 按下式计算吸收速率:

$$U = (C_0 - C_t) \cdot V / (t \cdot G)$$

式中, U 为营养盐吸收速率 $\mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$, C_0 为实验结束时对照组培养液中营养盐含量 ($\mu\text{mol/L}$), C_t 为实验结束时实验组培养液中营养盐含量 ($\mu\text{mol/L}$), V 为培养液体积 (L), t 为实验时间 (h), G 为鼠尾藻湿质量 (g)。其他培养条件同暂养条件。

1.4 数据处理与分析

数据以平均值 $\pm$ 标准差 ($\bar{X} \pm \text{SD}$) 表示。所得数据用统计软件 SPSS11.0 进行双因子方差分析以及 Duncan's 多重比较, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平。

2 结果与分析

2.1 温度和盐度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响

研究表明, 温度和盐度对鼠尾藻总 N 吸收速率均有极显著影响 ($F_1=16.43$, $F_5=11.00$; $P < 0.01$), 二者的交互作用极显著 ($F=12.01$, $P < 0.01$)。其中, 温度对总 N 吸收速率的影响大于盐度的影响。温度和盐度对鼠尾藻总 N 的吸收速

率见图 1。在盐度为 10 条件下, 鼠尾藻对总 N 的吸收速率开始随温度升高而升高, 15 ℃ 达到最大, 之后随温度的升高而下降; 在盐度为 20 条件下, 鼠尾藻对总 N 的吸收速率随着温度的升高而上升, 在 25 ℃ 时达到最大, 当温度升高至 30 ℃ 时开始下降; 而在盐度为 30 和 40 条件下, 鼠尾藻对总 N 的吸收速率均随温度的升高而升高。总体上看, 在盐度 20、温度 25 ℃ 和盐度 30、温度 30 ℃ 条件下, 鼠尾藻对总 N 有较高的吸收速率, 分别为 $11.26 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 和 $11.01 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 。

总 N 吸收速率 (U) 与温度 (T)、盐度 (S) 的回归关系可以表示为:

$$U = -0.0592 + 0.04854S + 0.724T - 0.00432S^2 - 0.02307T^2 + 0.01138S \cdot T$$

$$(n=20 \quad R=0.736 \quad P < 0.01)$$

不同温度和盐度组合下鼠尾藻对不同化合态 N 的吸收速率见表 1。可以看出, 在 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 浓度比值为 1:1 条件下, 鼠尾藻在不同温度和盐度组合下对 NO_3^--N 的吸收速率都要高于 NH_4^+-N 。在盐度为 10、温度 20 ℃ 处鼠尾藻对 NH_4^+-N 的吸收速率较大; 在盐度 20 到 40 条件下, 均在 15 ℃ 处吸收速率较大。而鼠尾藻对 NO_3^--N 的吸收速率则有所差异。在盐度为 10 的条件下, 吸收速率随温度的升高而降低; 在盐度为 20 条件下, 吸收速率随温度升高而升高, 在 25 ℃ 时达到最大; 在盐度为 30 和 40 条件下, 其吸收速率也随温度的升高而升高, 在 30 ℃ 时达到最大。

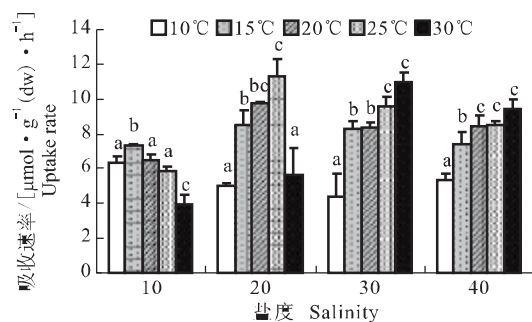


图 1 不同温度、盐度下鼠尾藻对总 N 的吸收速率

注: 同一盐度组中标有不同字母的数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig.1 Uptake rates of total N by *Sargassum thunbergii* at different temperatures and salinities

Note: Data in the same salinity groups with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

表 1 不同温度和盐度组合条件下鼠尾藻对不同化合态 N 的吸收速率

Tab.1 Uptake rates of different chemical forms of N by *Sargassum thunbergii* under different temperature and salinitie combinations
 $n=4; \bar{X} \pm SD; \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} (\text{dw}) \cdot \text{h}^{-1}$

化合态 Chemical forms	温度 /℃ Temperature	盐度 Salinity				
		10	15	20	25	30
NH_4^+-N	10	1.480±0.419 ^a	2.133±0.208 ^b	2.871±0.237 ^c	2.547±0.217 ^{bc}	1.147±0.206 ^a
	20	2.510±0.096 ^a	2.689±0.360 ^b	1.790±0.065 ^c	1.490±0.075 ^c	0.511±0.061 ^d
	30	2.111±0.134 ^a	2.202±0.148 ^a	1.467±0.231 ^b	1.115±0.003 ^c	0.849±0.125 ^d
	40	1.521±0.231 ^a	3.000±0.273 ^b	1.099±0.422 ^{ac}	0.610±0.040 ^d	0.937±0.088 ^{cd}
NO_3^--N	10	4.897±0.210 ^a	5.482±0.307 ^b	3.582±0.158 ^c	3.346±0.168 ^c	2.769±0.553 ^d
	20	2.503±0.077 ^a	5.809±1.209 ^{bd}	7.959±0.032 ^{bc}	9.776±2.203 ^c	5.141±1.556 ^d
	30	2.318±1.217 ^a	6.084±0.316 ^b	6.907±0.128 ^b	8.430±0.514 ^c	10.161±0.083 ^d
	40	3.791±0.341 ^a	4.401±0.877 ^a	7.367±0.449 ^b	7.861±0.253 ^{bc}	8.503±0.435 ^c

注: 同一列标有不同字母的数据间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Data in the same column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$) .

双因子方差分析表明, 温度和盐度对鼠尾藻 P 的吸收速率影响极显著 ($F_T=148.36$, $F_S=417.25$, $P<0.01$), 二者对 P 吸收速率的交互作用也极显著 ($F=40.97$, $P<0.01$), 其中盐度的影响要大于温度的影响。不同温度和盐度条件下鼠尾藻对 P 的吸收速率见图 2。在盐度为 10 和 20 条件下, P 吸收速率随着温度的升高而上升, 在 25℃ 时达到最大, 之后当温度升至 30℃ 时, 其吸收速率有所下降。在盐度为 30 和 40 条件下, 鼠尾藻对 P 吸收速率均随着温度的升高而上升。总体上看, 在盐度 40 条件下, 温度 15~30℃ 范围内, 鼠尾藻对 P 的吸收速率显著高于其他盐度处理组 ($P<0.01$), 吸收速率达到 $1.5 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 以上。

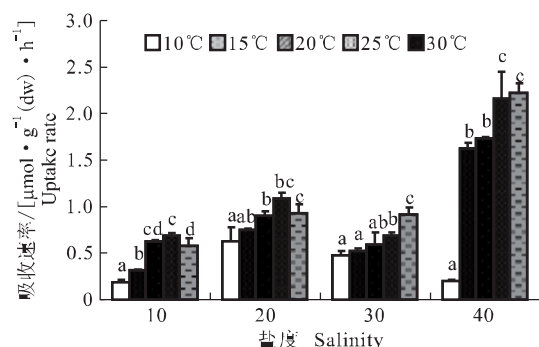


图 2 不同温度、盐度组合条件下鼠尾藻对 P 的吸收速率

注: 图中同一盐度组标有不同字母的数据间差异显著 ($P<0.05$)。

Fig.2 Uptake rates of P by *Sargassum thunbergii* under different temperature and salinitie combinations

Note: Data in the same salinity group with different superscripts are significantly different ($P<0.05$) .

P 吸收速率 (U) 与温度 (T)、盐度 (S) 的回归关系可以表示为:

$$U=0.282-0.0825S+0.0804T+0.001435S^2-0.00235T^2+0.002092S \cdot T$$

$$(n=20, R=0.860, P<0.01)$$

2.2 温度、光照强度对鼠尾藻营养盐吸收的影响

双因子方差分析表明, 温度和光照强度对鼠尾藻总 N 吸收速率均有极显著的影响 ($F_T=135.88$ 和 $F_L=33.60$, $P<0.01$), 二者对总 N 吸收速率的交互作用也极显著 ($F=26.07$, $P<0.01$), 其中, 温度对总 N 吸收速率的影响要大于光照的影响。从图 3 中可以看出, 在 15℃ 时, 鼠尾藻对总 N 的吸收速率随着光照强度的增加而升高; 而在其他几个温度梯度组中, 其吸收速率则是先随着光照强度的升高而升高, 在光照为 $100 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时达到最大, 之后随着光照强度的继续增大, 其吸收速率呈下降趋势。从总体上看, 鼠尾藻在温度为 10℃ 下吸收速率最慢, 在 15℃ 时吸收速率较快。在温度为 15℃、光照强度为 $180 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处出现较高 N 吸收速率, 为 $10.55 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 。

鼠尾藻对总 N 吸收速率 (U) 与温度 (T)、光照强度 (L) 的回归关系可以表示为:

$$U=-13.799+2.046T+0.08255L-0.0493T^2-0.000272L^2-0.00179T \cdot L$$

$$(n=20, R=0.747, P<0.01)$$

不同温度和光照强度下鼠尾藻对不同化合态 N 的吸收速率见表 2。可以看出,在不同温度和光照强度组合下,鼠尾藻对不同化合态 N 的吸收速率表现出与不同温度和盐度组合不同的规律。在较低温度条件下 (10 °C),在各光照强度下鼠尾藻对 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的吸收速率相近,为 $2 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 左右;在温度 15 °C 条件下,其对 NO_3^- -N 的吸收速率则随光照强度的升高而增加;在温度 20 °C 和 25 °C 条件下,随着光照强度的升高其吸收速率均在 $100 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 达到最大,而后随光照强度的增大,其吸收速率呈现出下降趋势。鼠尾藻对 NH_4^+ -N 的吸收速率与对 NO_3^- -N 有所不同,其在低温条件下 (10~15 °C) 吸收速率要高于高温条件下 (20~25 °C),而光照强度对其吸收速率无显著影响 ($P>0.05$)。

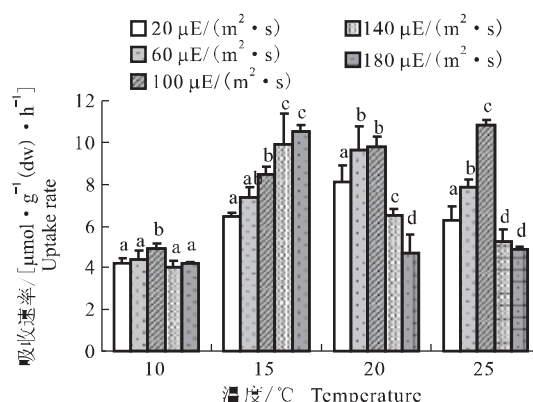


图 3 不同温度光照强度组合下鼠尾藻对总 N 的吸收速率
注: 图中同一温度组标有不同字母的数据间差异显著 ($P<0.05$)。

Fig.3 Uptake rates of total N by *Sargassum thunbergii* under different temperature and light intensity combinations

Note: Data in the same temperature group with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

表 2 不同温度和光照强度组合条件下鼠尾藻对不同化合态 N 的吸收速率

Tab.2 Uptake rates of different chemical forms of N by *Sargassum thunbergii* under different temperature and light intensity combinations
 $n=4; \bar{X} \pm \text{SD}; \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}(\text{dw}) \cdot \text{h}^{-1}$

化合态 Chemical forms	温度 / °C Temperature	光照强度 / [$\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] Light intensity				
		20	60	100	140	180
NH_4^+ -N	10	2.067 ± 0.117^a	2.164 ± 0.302^a	2.483 ± 0.240^a	2.167 ± 0.291^a	2.082 ± 0.056^a
	15	2.054 ± 0.160^a	2.785 ± 0.171^b	2.686 ± 0.314^b	2.303 ± 0.104^a	2.137 ± 0.082^a
	20	2.338 ± 0.287^a	2.274 ± 0.401^a	1.732 ± 0.121^b	2.113 ± 0.197^{ab}	2.141 ± 0.084^{ab}
	25	1.782 ± 0.028^a	2.108 ± 0.180^{bc}	1.472 ± 0.089^b	1.753 ± 0.104^a	2.137 ± 0.082^c
NO_3^- -N	10	2.125 ± 0.205^a	2.240 ± 0.118^a	2.472 ± 0.062^b	1.866 ± 0.089^b	2.105 ± 0.083^a
	15	4.376 ± 0.118^a	4.616 ± 0.643^{ab}	5.774 ± 0.537^b	7.602 ± 1.294^c	8.409 ± 0.319^c
	20	5.769 ± 0.521^a	7.355 ± 0.805^b	8.059 ± 0.398^b	4.379 ± 0.204^c	2.574 ± 0.769^d
	25	4.490 ± 0.647^a	5.726 ± 0.214^b	9.341 ± 0.193^c	3.485 ± 0.494^d	2.747 ± 0.125^c

注: 图中同一列标有不同字母的数据表示相互差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Data in the same column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$).

光照强度和温度对鼠尾藻 P 吸收速率影响极显著 ($F_L=24.14$ 和 $F_T=137.66$, $P<0.01$), 二者对 P 吸收速率的交互作用也极显著 ($F=2.93$, $P<0.01$)。其中,温度对 P 吸收速率的影响要大于光照强度的影响。从图 4 中可以看出,在每一温度梯度下,鼠尾藻对 P 的最大的吸收速率均出现在光照强度为 $60 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处,而后随着光强的继续增加,其吸收速率呈下降趋势。而在相同光照强度下,其对 P 的

吸收速率则随着温度的升高而上升。总体上看,在温度为 25 °C、光照强度为 $60 \mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,鼠尾藻对 P 有最大吸收速率,为 $1.30 \mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ 。P 吸收速率 (U) 与温度 (T)、光照强度 (L) 的回归关系可以表示为:

$$U = 0.581 - 0.00531T + 0.0028L + 0.000969T^2 - 0.0000162L^2 - 0.0000158T \cdot L$$

($n=20$, $R=0.901$, $P<0.01$)

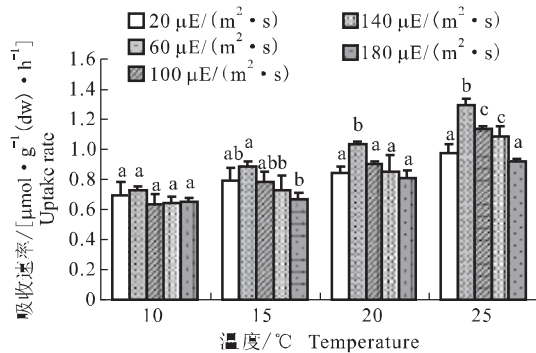


图4 不同温度、光照强度下鼠尾藻对P的吸收速率

注: 图中同一温度组标有不同字母的数据间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig.4 Uptake rates of P by *Sargassum thunbergii* at different temperatures and light intensities

Note: Data in the same temperature group with different superscripts are significantly different ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 温度和盐度对鼠尾藻氮、磷吸收的影响

因种类的差异,不同的大型海藻栖息环境相差也较大。一般来讲,生长在深水条件下的海藻所处的环境条件相对比较稳定,而生长在潮间带的海藻则始终处于生态因子剧烈变化的环境条件中,其中,以海水盐度和温度的变化更为突出,如潮水的涨落、降水的影响等等。而盐度和温度的变化都能相应地引起海水渗透压的变化。例如,当海藻暴露于大气而失水干燥时,会使藻体表面的盐分上升,渗透压升高,藻体温度也相应会提高,而当其再次浸没在海水中时则又会经历相反的过程。因此,海藻在其生长过程中需要随时对藻体的渗透压进行相应的调节^[18]。一般来讲,当环境中渗透压变小时,藻体通常会通过改变离子浓度进行渗透调节,而渗透压增大时则通过改变离子和甘露醇浓度进行渗透调节^[19]。由此可见,温度和盐度是影响海藻半透膜内外水分分布和对营养盐吸收的重要因子。本研究结果显示,温度和盐度对鼠尾藻N、P吸收速率影响极显著,二者交互作用也极显著。从图1和图2可以看出,在较高温度条件下,鼠尾藻对N、P吸收速率明显高于低温条件。分析其原因可能在于两方面:一方面,温度对呼吸作用及光合作用暗反应有关的酶活性有显著的影响,低温条件下光合作用暗反应的酶活性较低,产生的用来还原硝氮盐的底物也较缺乏^[20],因此相应地也减少了对营养盐的

摄入;另一方面,温度还会改变藻类细胞膜的生理特性,低温可能会阻止膜转送蛋白质构象的变化,进而阻止了蛋白质携带可溶性营养分子通过,从而减慢了对营养盐的吸收速率^[21]。盐度高低决定海水渗透压大小,对海藻来说,渗透压将影响细胞中的含水量及对N、P的吸收。

本研究中,温度15~30℃范围内,鼠尾藻对P的吸收速率均在高盐40处达到最大,为1.5 μmol/[g(dw)·h]以上。这可能由于在高盐度条件下,藻类生长需要更多的能量以维持其正常的渗透条件以及特定的离子浓度^[22],因此会加快其对于P的吸收。不同种类的海藻对盐度的适应范围有所不同。研究表明,海黍子(*Sargassum muticum*)一般适宜盐度在20~35之间^[23],而马尾藻(*Sargassum filipendula*)的适宜的盐度为15~35^[24]。而本研究中鼠尾藻在盐度10~40之间对氮、磷都进行了较好的吸收。可以看出虽然各种类之间的适盐范围有所不同,但多数马尾藻类为广盐性种类。

3.2 温度和光照强度对鼠尾藻营养吸收的影响

藻类细胞合成需要的能量主要来自光合作用,这一过程需要从外界环境中的营养源吸收营养盐^[25],而温度对光合作用暗反应的酶活性有显著的影响^[26],因此,温度和光照强度是影响藻类生长和N、P营养盐吸收的重要影响因子^[27]。光照强度主要通过光合磷酸化调控ATP的转换而影响N的吸收速率,尤其是对NO₃⁻-N的吸收^[28]。适宜的光照能增加海藻中的硝酸还原酶活性,促进藻体对NO₃⁻-N的吸收^[29],因此,大型藻类在有光照条件下对N的吸收速率远高于黑暗条件^[30]。本研究发现,在光照强度20~100 μE/(m²·s)范围内,鼠尾藻对N的吸收速率随光照强度的增加而增大,但是当光照强度超过140 μE/(m²·s)时,鼠尾藻对N的吸收速率明显下降;而当光照强度超过100 μE/(m²·s)时,P的吸收速率也开始下降,这可能与过强的光照产生的光抑制作用有关。过强的光照会使海藻光系统II中的D1蛋白裂解,从而使光合速率下降,进而导致N、P吸收速率的减慢^[31]。而在低温条件下,光照强度对总N的吸收速率则无显著影响,可能是由于低温条件下光合作用暗反应的酶活性较低,产生的用来还原硝氮盐的底物也较缺乏^[27],在15℃低温条件下,鼠尾藻在高光照强度下并不影响其对硝态氮的吸收,可能是由于高光照强度下,硝态氮会对藻类产生抑制作用,而低温可降低这种抑制作用^[27]。

随着光照强度的变化,藻类对不同化合态N的吸收速率呈现出不同的变化规律^[32]。不同光照强度对鼠尾藻总氮的吸收有极显著的影响,但其对氨氮的吸收速率却无显著影响。可以看出,相对于硝氮,鼠尾藻吸收氨氮时对于光的依赖性较弱,这可能是由于硝酸氮通过细胞膜时需要光提供能量,因而对光依赖性较强^[33]。

在各种光照强度下,鼠尾藻对P的吸收速率均随温度的升高而升高。温度升高之所以能引起磷酸盐吸收速率增大,可能与藻类利用磷酸盐的量有关。藻类的光合磷酸化和氧化磷酸化过程均需要磷酸盐。在本研究的温度范围内(10~25℃),当温度升高时,上述两个生理过程都加快,因此当介质中磷酸盐浓度相同时,藻类会随着温度的升高加快对磷酸盐的吸收^[34]。另外,光照强度影响大型海藻的光合作用,而光合作用速率与藻类对P的同化量也呈正相关^[29]。因此,本研究中鼠尾藻在各个温度梯度下对P的吸收速率均随光照强度的升高而升高。

3.3 尾藻对不同化合态氮的吸收速率的影响

许多大型海藻和微藻会优先吸收环境中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,且在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 存在的条件下会抑制对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收^[35-36]。但本研究发现,在不同环境条件下,鼠尾藻可同时吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,并且对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收速率要高于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,这和多数研究结果有所不同。但有些学者也发现海带(*Laminaria groenlandica*)对于两种形态的氮的吸收并不相互抑制,并且吸收速率十分接近。当培养液中氮的浓度超过20 $\mu\text{mol/L}$ 时,巨藻(*Nereocystis luetkeana*)也会出现优先选择 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的情况^[37]。这可能与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的吸收和同化速率受自身营养库的大小所调节有关。在氮充足条件下,细胞内的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的氮库是大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的^[38], $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 较大的储存能力也会加快其吸收速率,而过多的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 积累储存则可能会对藻体有一定的毒害作用^[39]。

4 结论

对于大型海藻来说,其能充分利用周围的各种营养盐是一种很大的生存竞争优势。鼠尾藻在不同环境条件下都能较快地吸收水体中的N、P,并且能较好地同时吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,显示了它对环境中营养盐具有较强的吸收能力。因此,在富营养化严重的海区中,通过人工养殖鼠尾藻,利用其

吸收水体中过量的营养盐,再通过收获将水体中的营养物质转移出富营养化区域,可能会对缓解乃至消除海区富营养化起到很大的作用。

参考文献:

- [1] Naylor R L. Nature's subsidies to shrimp and salmon farming[J]. Science, 1998, 282: 883-884.
- [2] 舒延飞, 罗琳, 温琰茂. 海水养殖对近岸生态环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 74-79.
- [3] 谢伟. 养殖水体富营养“污染与防治”[J]. 内陆水产, 2001, 26(3): 32-33.
- [4] Ryther J H, Corwin N, Debusk T A. Nitrogen uptake by the red algae *Gracilaria tikvahiae* [J]. Aquaculture, 1981, 26: 107-115.
- [5] Ahn O, Petrell R J, Harrison P J. Ammonium and nitrate uptake by *Laminaria saccharina* and *Nereocystis leutkeana* originating from a salmon sea cage farm[J]. J Appl Phycol, 1998, 10: 333-340.
- [6] 董双林, 李德尚, 潘克厚. 论海水养殖德养殖容量[J]. 青岛海洋大学学报. 1998, 28(2): 245-250.
- [7] Gao K, McKinley K R. Use of macroalgae for marine biomass production and CO_2 remediation: review [J]. J Appl Phycol, 1994, 1: 45-60.
- [8] 王学琦, 张尔贤. 鼠尾藻多糖对人粒细胞超氧阴离子自由基释放的影响[J]. 中国海洋药物, 1992, 11(2): 4-6.
- [9] 张尔贤, 俞丽君, 肖湘. 鼠尾藻多糖清除氧自由基作用的研究 I. 对 O_2^- 与OH抑制活性的评价[J]. 中国海洋药物, 1995, 1: 1-4.
- [10] Park P J, Heo S J. Reactive oxygen scavenging effect of enzymatic extracts from *Sargassum thunbergii*[J]. J Agric food chem, 2005, 53(17): 6666-6672.
- [11] 魏玉西, 李敬, 赵爱云, 等. 鼠尾藻多糖的制备及其抗凝血活性的初步研究[J]. 中国海洋药物研究, 2006, 25(2): 41-44.
- [12] 许忠能, 林小涛, 计新丽. 环境因子对细基江蓠繁枝变种氮、磷吸收速率的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 417-421.
- [13] 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[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 109-116.
- [14] Lartigue J, Neill A, Hayden B L, et al. The impact of salinity fluctuations on net oxygen production and inorganic nitrogen uptake by *Ulva lactuca* (Chlorophyceae) [J]. Aquat Bot,

- 2003, 75: 339-350.
- [15] Umezaki I. Ecological studies of *Sargassum thunbergii* (Mertens) O. Kuntze in Maizuru Bay, Japan Sea [J]. Bot Mag, 1974, 1008: 258-292.
- [16] Koh C H, Kim Y, Kang S G. Size distribution, growth and production of *Sargassum thunbergii* in an intertidal zone of Padori, west coast of Korea [J]. Hydrobiologia, 1993, 260/261: 207-214.
- [17] 郑怡, 陈灼华. 鼠尾藻生长和生殖季节的研究 [J]. 福建师范大学学报, 1993, 9(1): 81-85.
- [18] 方同光, 张学明, 赵学武. 几种海藻的渗透生理与它们在潮间带分布的关系 [J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(1): 85-96.
- [19] Bisson M A, Kirst G O. Osmotic adaptation in the marine alga *Griffithsia monilis* (Rhodophyceae): the role of ions and organic compounds [J]. Aust J Plant Physiol, 1979, 6(4): 523-538.
- [20] Lomas M W, Glibert P M. Interactions between NH_4^+ and NO_3^- uptake and assimilation: Comparison of diatoms and dinoflagellates at several growth temperatures [J]. Mar Biol, 1999, (133): 541-551.
- [21] Long S P, Woodward F I. Plants and temperature [M]. Cambridge, United Kingdom: Company of Biologists, 1988, 237-258.
- [22] Gimmler H, Wiedemann C, Mller E M. The metabolic response of the halotolerant green alga *Dunaliella parva* to hyperosmotic shocks [J]. Ber Dtsch Bot Gesell, 1981, 94: 613-634.
- [23] Norton T A. Ecological experiments with *Sargassum muticum* [J]. J Mar Biol Ass UK, 1977, 57: 33-43.
- [24] Clinton J D, David A T. Physiological responses of perennial bases of *Sargassum filipendula* from three sites on the west coast of Florida [J]. Bull Mar Sci, 1988, 42(2): 166-173.
- [25] Harris G P. Photosynthesis, productivity and growth; the physiological ecology and phytoplankton [J]. Ergeb Umvol, 1978, 10: 1-171.
- [26] 姚南瑜. 藻类生理学 [M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987: 259.
- [27] Hanisak M D, Harlin M M. Uptake of nitrogen by *Codium fragile* subsp. *Tomentosoides* (Chlorophyta) [J]. J Phycol, 1978, 14: 450-454.
- [28] Falkowski P G, Stone D P. Nitrate uptake in marine phytoplankton: energy sources and the interaction with carbon fixation [J]. Mar Biol, 1975, 32: 77-84.
- [29] 严国安, 李益健, 王志坚. 固定化栅藻对污水的净化及其生理特征的变化 [J]. 中国环境科学, 1995, 15(1): 10-13.
- [30] Peckol P, Rivers J S. Physiological responses of the opportunistic macroalgae *Cladophora vagabunde* (L) van den Hock and *Gracilaria tikvahiae* (mclachlan) to environmental disturbances associated with eutrophication [J]. J Exp Mar Biol, 1995, 190: 1-16.
- [31] 荆玉祥, 匡延云, 李德葆. 植物分子生物学 [M]. 北京: 科学出版社. 1995, 102-114.
- [32] Falkowski P G. Enzymology of nitrogen assimilation [C]// Carpenter E J and Capone D G. Nitrogen in the marine environment. New York: Academic Press Inc, 1983.
- [33] Anderson S M, Rods O A. Effects of light intensity on nitrate and nitrite uptake and excretion by *Chaetoceros curvisetus* [J]. Mar Biol, 1981, 62: 257-261.
- [34] 黄邦钦, 洪华生. 几种藻类吸收磷酸盐动力学的初步研究 [J]. 厦门大学学报, 1994, 33 (suppl): 7-11.
- [35] Dortch Q. The interaction between nitrate and ammonium uptake in phytoplankton [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1990, 61: 183-201.
- [36] Flynn K J. Algal carbon-nitrogen metabolism: a biochemical basis for modeling the interactions between nitrate and ammonium uptake [J]. J Plankt Res, 1991, 13: 373-387.
- [37] Ahn O, Petrell R J. Ammonium and nitrate uptake by *Laminaria saccharina* and *Nereocystis luetkeana* originating from a salmon sea cage farm [J]. J Appl Phycol, 1998, 10: 333-340.
- [38] Mcglathery K J. Changes in intracellular nitrogen pools and feedback controls on nitrogen uptake in *Chaetomorpha linum* [J]. J Phycol, 1996, 31: 393-401.
- [39] Lotze H K, Schramm W. Ecophysiological traits explain species dominance patterns in macroalgal blooms [J]. J Phycol, 2000, 36: 287-295.

Effect of temperature, salinity and light intensity on nitrogen and phosphorus uptake by *Sargassum thunbergii*

BAO Jie, TIAN Xiang-li, DONG Shuang-lin, JIANG Hong-bo

(Fishery College, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: There was a close relationship between ambient nutritional concentrations and nutritional content in macroalgae. Previous studies revealed that it was a feasible way to apply seaweeds to assimilate nutrient, i.e., nitrogen, phosphorus, etc., in eutrophic water environment. *Sargassum thunbergii*, as a kind of macroalgae, has great importance in feed, nutrition, medicine and industry. So most studies focused on the growth and reproduction of *S. thunbergii*, however, while few studies were reported about their nutritional uptake until now. In this study, the effect of temperature, salinity and light intensity on the uptake of nitrogen and phosphorus by *Sargassum thunbergii* were investigated under laboratory conditions. Two two-factor experiments were designed. Part one: *S. thunbergii* were exposed to the combinations of temperature (10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C) and salinity (10, 20, 30, 40). Part two: *S. thunbergii* were exposed to combinations of temperatures (10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C) and light intensity (20, 60, 100, 140, 180 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$). There were three replicates and one control without seaweed for each treatment. *S. thunbergii* were cultured in beakers with seawater containing total nitrogen of 100 $\mu\text{mol/L}$ ($\text{NH}_4^+-\text{N} : \text{NO}_3^--\text{N}=1 : 1$) and phosphorus of 8 $\mu\text{mol/L}$ ($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$) for 12 h, then nitrogen and phosphorus concentrations in the solution were measured. The results showed that all of the three environmental factors had significant effects on the uptake rates of nitrogen and phosphorus. Significant differences in the uptake rates of nitrogen and phosphorus among different temperatures or salinities were observed, and there was significant interaction between temperature and salinity as well ($P<0.01$). The uptake rates of nitrogen reached as high as 11.26 $\mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ and 11.01 $\mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ under moderate combinations of salinity 20 and temperature 25 °C, salinity 30 and temperature 30 °C, respectively. While in the temperature of 15–30 °C, the uptake rate of phosphorus was higher at salinity of 40 than at any other salinities, which reached up to 1.50 $\mu\text{mol}/\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}$. There were significant differences in nitrogen and phosphorus uptake rates among different temperatures or light intensities ($P<0.01$). The temperatures and light intensities had significantly interactive effects on nitrogen or phosphorus uptake ($P<0.01$). The nitrogen uptake rates were higher at temperature of 15 °C and light intensity of 140–180 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 20–25 °C and 60–100 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, which all reached up to 9.60 $\mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$. The uptake rate of phosphorus reached 1.30 $\mu\text{mol}/[\text{g}(\text{dw}) \cdot \text{h}]$ at temperature of 25 °C and light intensity of 60 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, which was the highest among all the combinations of temperature and light intensity. Therefore, *Sargassum thunbergii* has high ability of uptaking nutrient from water environment, and could uptake ammonium and nitrate simultaneously. [Journal of Fishery Sciences of China, 2008, 15 (2): 293–300]

Key words: *Sargassum thunbergii*, temperature, salinity, light intensity, nitrogen, phosphorus, uptake rate

Corresponding author: TIAN Xiang-li. E-mail: xianglitian@ouc.edu.cn