

doi: 10.7541/2018.129

## 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

刘棋琴<sup>1</sup> 羊 芑<sup>1</sup> 马明婕<sup>1</sup> 周丽亚<sup>1</sup> 李亚鹤<sup>1</sup> 杨 锐<sup>1,2</sup>

(1. 宁波大学海洋学院, 宁波 315211; 2. 宁波大学浙江省海洋生物工程重点实验室, 宁波 315211)

**摘要:** 研究以裂片石莼(*Ulva fasciata*)、肠浒苔(*Ulva intestinalis*)、龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)、坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)为实验材料, 分析了不同温度(15、20、25、30℃)下4种大型海藻对海水中N、P元素的吸收效率和光合特性的特点。结果显示: (1)4种大型海藻对水体N、P均有明显的吸收效果, 吸收能力高低依次为肠浒苔>裂片石莼>坛紫菜>龙须菜; (2)温度过高或过低都会限制藻类对N、P的吸收和正常生长, 同时降低4种藻的相对电子传递速率及光化学效率; (3)裂片石莼与肠浒苔的N、P吸收能力强, 且光合系统对温度耐受性高, 是实施养殖污水生物净化的良好材料; (4)4种海藻对水体中N、P营养盐的吸收在48h内基本完成, 实地应用中可考虑24—48h周期换水或采用流通循环式的培养模式, 以达到既促进藻类的生长又提高营养盐吸收效率的目的, 以避免藻体因营养缺乏引起负生长而造成二次污染。

**关键词:** 大型海藻; 温度; 营养盐; 吸收效率; 荧光参数

**中图分类号:** S968.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3207(2018)05-1050-07

近年来, 海水养殖业发展迅猛, 沿海养殖场中池塘养殖的废水排放量与日俱增, 导致近岸海水的富营养化日益严重<sup>[1]</sup>, 其主要污染指标为无机氮和活性磷酸盐<sup>[2]</sup>。水体恶化导致更多灾难性环境事件发生<sup>[3]</sup>, 严重影响了海水养殖业的可持续发展及海洋生态安全<sup>[4]</sup>。富营养化水体的治理已成为当今世界性难题<sup>[5]</sup>。国内外学者一致认为, 大型海藻具有极佳的水体净化能力, 并具有较高经济价值, 是进行养殖污水处理和富营养化水体修复的有效方式<sup>[6-9]</sup>。20世纪70年代大型海藻作为生物过滤器净化水体开始发展, 后来被很多专家学者所重视, 逐渐发展并完善了大型海藻与鱼、虾、贝等混养的综合生态养殖模式, 筛选合适的藻类和净水处理工艺是利用大型海藻进行污染水体的生物修复亟待解决的问题<sup>[10]</sup>。

海洋藻类是海洋初级生产力的重要组成, 可利用CO<sub>2</sub>和氮、磷等营养元素进行光合作用。近海大型海藻的大规模养殖可以消耗生活海区大量C、N、P等元素, 改变了海区的物质循环; 有的甚至可以起

到了控制赤潮延缓海域富营养化的作用。至今为止, 关于大型海藻用于水体营养盐吸收的研究有很多<sup>[11-15]</sup>, 同时, 对不同营养盐的吸收速率受环境因素如温度、光照强度的影响, 并表现出一定的种间差异<sup>[13, 14, 16, 17]</sup>, 其次, 即使是同一藻种, 对氨氮、硝氮等不同营养盐的吸收对环境因素的响应也不同, 如石莼、铁钉菜、蜈蚣藻对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N<sup>[18]</sup>的吸收速率在低温5℃时最高, 但对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N的吸收则在15℃时最高<sup>[18]</sup>。考虑到水产养殖及运用大型海藻进行废水处理的季节性, 这其中温度是主要的影响因素, 结合浙江当地沿海养殖废水的实际状况, 本实验以常见大型经济海藻裂片石莼(*Ulva fasciata*)、肠浒苔(*Ulva intestinalis*)、龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)、坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)为材料, 通过评估不同温度下它们的N、P吸收效率、生长及光合生理特性等, 获得不同温度下N、P去除效率高、生理指标相对较优的藻种, 优化养殖废水处理模式, 为实地实践提供备选藻类和处理方案。

**收稿日期:** 2017-06-05; **修订日期:** 2017-12-17

**基金项目:** 浙江省科技计划项目(2015C32004); 宁波市科技富民项目(2015C10062); 浙江省新苗人才计划项目(2016R405045)资助 [Supported by Zhejiang Science and Technology Project (2015C32004); the Project of Science and Technology Department of Ningbo (2015C10062); Zhejiang Xinmiao Talents Project (2016R405045)]

**作者简介:** 刘棋琴(1996—), 女, 浙江温州人; 本科; 研究方向为大型海藻应用生态。E-mail: 943254948@qq.com

**通信作者:** 杨锐(1972—), 女, E-mail: yangrui@nbu.edu.cn

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

裂片石莼、肠浒苔、龙须菜、坛紫菜于2016年采于温州市平阳县鳌江镇附近海域(120°20'E, 27°35'N)。挑选鲜活健康的藻体,用消毒海水清洗,软毛刷除净表面附着物,并用0.7%的KI溶液浸泡10min,除去杂藻和细菌,然后用灭菌海水冲洗两次备用。实验开始前,每种藻取3 g至1000 mL烧杯中在光照培养箱中充气预培养1d(培养光强100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光周期为12h L:12h D),温度与实验温度一致。预培养海水为人工配制<sup>[19]</sup>,盐度为30。

### 1.2 实验方 法

将裂片石莼、龙须菜、肠浒苔、坛紫菜放置在富营养化水体中,分别在15、20、25、30℃条件下光照培养48h。培养过程中于0、6、12、24、36、48h进行水质检测,培养结束后测定海藻生长速率及叶绿素荧光参数。

**培养条件** 温度梯度设置15、20、25、30℃,在人工海水中依次加入 $\text{NaNO}_2$ 、 $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 药品,培养基中N、P终浓度为 $\text{C}(\text{NO}_2\text{-N})=10.87 \mu\text{mol}/\text{L}$ , $\text{C}(\text{NO}_3\text{-N})=70.97 \mu\text{mol}/\text{L}$ , $\text{C}(\text{NH}_4\text{-N})=100 \mu\text{mol}/\text{L}$ , $\text{C}(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})=8.46 \mu\text{mol}/\text{L}$ 。培养时,取(1±0.005) g的藻体(湿重)置于1 L的烧杯中,初始培养液体积为832 mL,培养条件同预培养条件。

**水样指标测定** 培养后0、6、12、24、36、48h进行水质取样,测定培养基中的N、P含量。对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的分析采用萘乙二胺分光光度法,对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 分析采用次溴酸盐氧化法,对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的分析采用磷钼蓝分光光度法,对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分析采用锌镉还原法。检测方法参照GB/T 12763.4-2007《海洋调查规范第四部分:海洋化学要素调查》中的相关标准进行。

**生长速率的测定** 培养前和培养后进行藻体鲜重的测定。用吸水纸吸干藻体表面的水分,使用电子天平称量藻体鲜重。相对生长速率计算公式为( $\text{RGR}, \%/d$ )= $100 \times (\ln W_n - \ln W_{n-1}) / (t_n - t_{n-1})$ , $W_{n-1}$ 、 $W_n$ 分别为为 $t_{n-1}$ 、 $t_n$ 时的藻体鲜重。

**叶绿素荧光参数的测定** 在每个条件下培养48h后,采用叶绿素调制荧光仪(water PAM)进行荧光参数的测定。具体操作如下:不同处理的样品在黑暗条件下处理15min,在培养光强条件下(光化光接近培养光强)进行叶绿素荧光诱导曲线的测定,获得最大( $F_v/F_m$ )及培养光强下的有效光化学效率( $F_v'/F_m'$ )。设置8个光强梯度[114、167、257、379、570、861、1218及1692  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]进行快速光响应曲线(RLC)的测定,每个光强梯度持续时

间为10s,饱和脉冲为5000  $\mu\text{mol} \cdot \text{photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。相对电子传递速率( $rETR$ )通过以下的公式计算: $rETR = PAR / (a \times PAR + b \times PAR + c)$ ,其中a、b、c为拟合参数,并以此计算出光能利用效率 $\alpha$ 、最大电子传递速率 $rETR_{\text{max}}$ 和饱和光强 $E_k$ ,计算公式如下<sup>[20]</sup>:

$$a = \frac{1}{c}; rETR_{\text{max}} = \frac{1}{b + 2 \times \sqrt{ac}}; E_k = \frac{c}{b + 2 \times \sqrt{ac}}$$

### 1.3 数据处 理

采用Origin 7.0和SPSS统计软件进行数据处理和统计分析,用t检验法(t-tests)方差分析检测平均数之间的差异(P),以 $P < 0.05$ 作为差异的显著性水平。

## 2 结 果

### 2.1 藻类生 长

在15—25℃内,温度变化对裂片石莼生长无显著影响( $P > 0.05$ )。龙须菜、坛紫菜和肠浒苔的生长在不同温度下差异显著( $P < 0.05$ ),最高相对生长率均出现在20℃与25℃,温度为15℃和30℃时相对生长率明显降低,坛紫菜在30℃时甚至出现负增长,说明高温对坛紫菜的正常生长造成威胁。4种藻中肠浒苔长得最快,20℃时每天的相对生长率高达24%,20℃与25℃时生长情况明显优于其他3种藻类。

### 2.2 营养盐吸收情况

对比分析(图2)显示:在15—30℃内,肠浒苔和裂片石莼对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收能力明显优于龙须菜和坛紫菜,绿藻培养基中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在12h内均基本被吸收完毕,且肠浒苔对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸收能力略优于裂片石莼( $P > 0.05$ )。而在不同温度下龙须菜与肠浒苔水体中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在48h内也基本被藻体吸收,说明4种海藻 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收能力均较佳。15℃时龙须菜对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收速率明显降低,说明低温对其 $\text{NH}_4\text{-N}$ 吸收效果造成明显限制。

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 吸收能力的排名依次为肠浒苔、坛紫

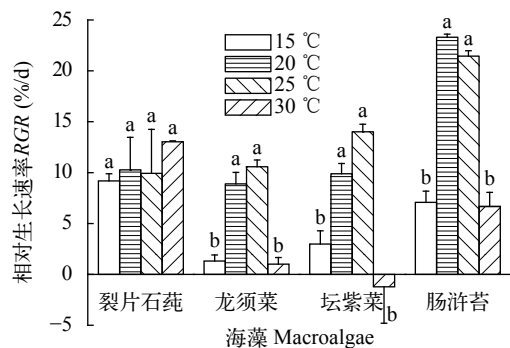


图1 不同温度下4种藻类的生长情况

Fig. 1 RGR of 4 macroalgae species of different temperatures

菜、裂片石莼、龙须菜(图3)。肠浒苔及坛紫菜对水体中 $PO_4^{3-}$ -P的吸收较为迅速,36h内培养基中 $PO_4^{3-}$ -P浓度已接近于0。值得注意的是,30℃高温强烈抑制坛紫菜正常生长与代谢,因此藻体严重腐烂发白,其培养基中 $PO_4^{3-}$ -P浓度的降低可能与微生物分解活动相关。

$NO_3^-$ -N在不同藻类的培养基中浓度变化较为缓慢。在开始12h内浓度无明显变化,之后下降。裂片石莼和肠浒苔培养基水体中 $NO_3^-$ -N浓度的下降速度在不同温度下均维持在较快水平,48h内已基本被吸收完毕(图4)。15℃时,坛紫菜培养基中 $NO_3^-$ -N浓度在12—24h内下降趋势明显,36h时达到极低水平,说明该温度下坛紫菜吸收 $NO_3^-$ -N的能力强。而龙须菜对 $NO_3^-$ -N吸收效果不明显。

$NO_2^-$ -N在培养基中浓度变化较为缓慢,开始12h内浓度无明显变化,之后开始下降,龙须菜对

$NO_2^-$ -N吸收效果不明显。15℃时,坛紫菜培养基中 $NO_2^-$ -N浓度在12—24h内下降趋势明显,36h时到达极低水平,说明该温度下坛紫菜吸收 $NO_2^-$ -N能力强。总体来说,肠浒苔培养基水体中 $NO_2^-$ -N浓度的下降速度在不同温度下均维持在较快水平,48h内已基本被吸收完毕。其次,除30℃条件外,裂片石莼和坛紫菜对 $NO_2^-$ -N的吸收效果均十分明显(图5)。

本研究发现,4种藻类对水体中的营养盐吸收均十分显著,按照营养盐吸收能力高低排序为:肠浒苔>裂片石莼>坛紫菜>龙须菜;裂片石莼和肠浒苔在不同温度下对水体中各营养盐吸收效果较好,具有去除N、P能力强、适温范围广的特点;其中肠浒苔对 $NH_4^+$ -N、 $NO_2^-$ -N、 $PO_4^{3-}$ -P的吸收能力均为最佳;在15℃和20℃环境下,坛紫菜对 $NO_3^-$ -N的吸收能力十分显著,但其营养盐吸收受高温限制;

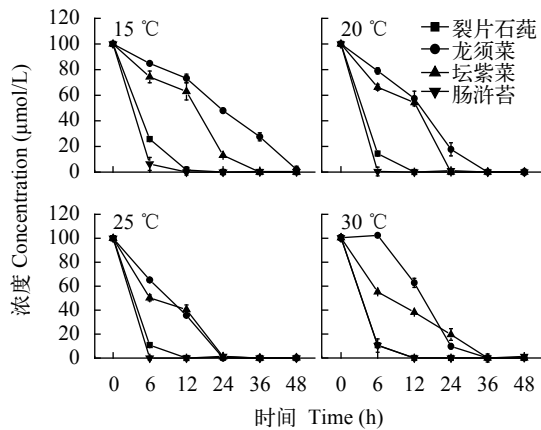


图2 不同温度处理下氨氮浓度随时间变化曲线

Fig. 2 The changes of  $NH_4^+$ -N concentration in culture medium under different temperatures

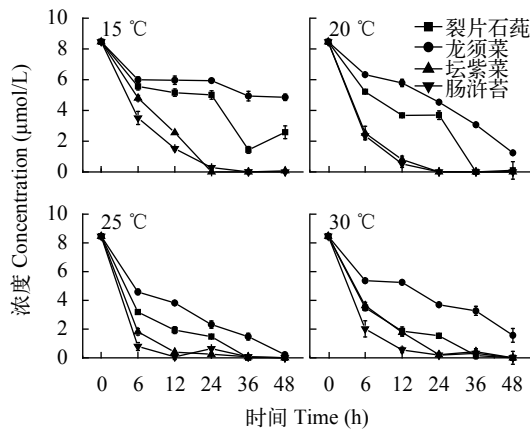


图3 不同温度处理下活性磷浓度随时间变化曲线

Fig. 3 The changes of  $PO_4^{3-}$ -P concentration in culture medium under different temperatures

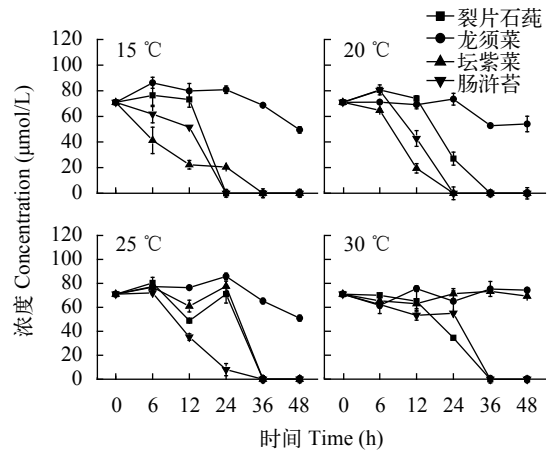


图4 不同温度处理下硝氮浓度随时间变化曲线

Fig. 4 The changes of  $NO_3^-$ -N concentration in culture medium under different temperatures

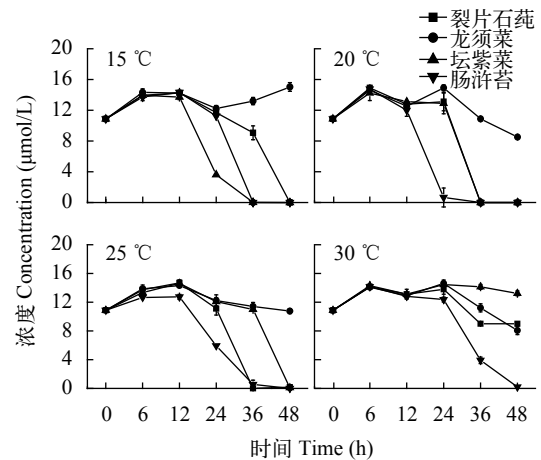


图5 不同温度处理下亚硝氮浓度随时间变化曲线

Fig. 5 The changes of  $NO_2^-$ -N concentration in culture medium under different temperatures

龙须菜对 $\text{NH}_4^+$ -N吸收能力强, 对其他营养盐吸收能力相对较弱, 且低温会对其吸收效果造成明显限制。

### 2.3 荧光参数

随着温度升高,  $rETR_{\max}$ 与 $I_k$ 均呈先上升后下降的趋势, 25℃时, 裂片石莼、龙须菜、坛紫菜与肠浒苔的 $rETR_{\max}$ 显著增高, 在15℃和30℃时数值相对较低; 温度对其表观光能利用效率的影响不显著 ( $P>0.05$ ) (表 1)。温度对裂片石莼和肠浒苔的最大 ( $F_v/F_m$ ) 及有效光化学效率 ( $F_v'/F_m'$ ) 无明显影响, 说明这2种藻温度耐受范围较广。在15℃培养时, 龙须菜的 $F_v/F_m$ 及 $F_v'/F_m'$ 均降低; 而30℃时不影响龙须菜 $F_v/F_m$ , 但明显抑制了 $F_v'/F_m'$ 。坛紫菜在25℃时 $F_v/F_m$ 和 $F_v'/F_m'$ 显著增高, 至30℃时 $F_v/F_m$ 和 $F_v'/F_m'$ 均迅速下降 (图 6), 说明30℃对坛紫菜的PSII系统造成伤害。总体来讲, 肠浒苔与裂片石莼

$rETR_{\max}$ 与 $I_k$ 数值较高, 与 $F_v/F_m$ 与 $F_v'/F_m'$ 数值表现一致。

## 3 讨论

### 3.1 温度对大型海藻营养盐吸收的影响

藻类对营养盐的吸收受温度的影响, 温度是控制大型海藻氮吸收的重要因子, 温度对呼吸作用及光合作用暗反应的酶活性有显著的影响<sup>[21]</sup>。大型海藻对营养盐的吸收效果在一定的温度范围内, 过高或过低均不利于其对营养盐的吸收, 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, 产生的用来还原硝氮盐的底物也较缺乏, 导致营养盐的吸收速率降低, 而在高温条件下, 藻体的呼吸作用显著增加, 用于生长的能量也相对较少, 降低藻体的生长, 进而减少对营养盐的吸收<sup>[22, 23]</sup>。有研究表明, 大型海藻对营养盐吸收可分为起始的

表 1 不同温度下4种大型海藻的相对电子传递速率与光强关系的最佳拟合参数

Tab. 1 The best fitting parameters derived from relative electron transport rate ( $rETR$ ) v.s. irradiance curve of four macroalgae species under different temperatures

海藻 Macroalgae	指标 Index	温度 Temperature (°C)			
		15	20	25	30
裂片石莼	$rETR_{\max}$	55.05±0.044 <sup>b</sup>	70.549±1.072 <sup>b</sup>	96.161±13.282 <sup>a</sup>	60.450±8.206 <sup>b</sup>
	$\alpha$	0.273±0.036 <sup>b</sup>	0.265±0.013 <sup>b</sup>	0.335±0.002 <sup>a</sup>	0.350±0.008 <sup>a</sup>
	$I_k$	206.182±32.417 <sup>bc</sup>	266.945±9.793 <sup>ab</sup>	287.022±38.295 <sup>a</sup>	173.525±27.587 <sup>c</sup>
龙须菜	$rETR_{\max}$	27.991±1.189 <sup>c</sup>	53.593±4.907 <sup>b</sup>	71.978±3.765 <sup>a</sup>	31.264±2.261 <sup>c</sup>
	$\alpha$	0.641±0.080 <sup>a</sup>	0.383±0.055 <sup>bc</sup>	0.298±0.004 <sup>c</sup>	0.494±0.065 <sup>ab</sup>
	$I_k$	44.601±7.394 <sup>c</sup>	144.531±33.455 <sup>b</sup>	241.118±9.163 <sup>a</sup>	63.760±3.758 <sup>c</sup>
坛紫菜	$rETR_{\max}$	15.205±1.838 <sup>c</sup>	41.135±3.498 <sup>a</sup>	38.927±0.535 <sup>b</sup>	26.609±4.697 <sup>c</sup>
	$\alpha$	0.149±0.029 <sup>c</sup>	0.195±0.009 <sup>b</sup>	0.233±0.012 <sup>a</sup>	0.174±0.054 <sup>b</sup>
	$I_k$	108.603±33.407 <sup>b</sup>	210.498±8.014 <sup>a</sup>	167.631±6.701 <sup>a</sup>	160.392±23.003 <sup>ab</sup>
肠浒苔	$rETR_{\max}$	88.617±2.099 <sup>a</sup>	96.500±16.516 <sup>a</sup>	96.236±5.633 <sup>a</sup>	61.059±2.734 <sup>b</sup>
	$\alpha$	0.314±0 <sup>bc</sup>	0.294±0.022 <sup>c</sup>	0.356±0.032 <sup>ab</sup>	0.366±0.003 <sup>a</sup>
	$I_k$	282.474±6.553 <sup>a</sup>	325.748±31.635 <sup>a</sup>	273.729±40.145 <sup>a</sup>	166.876±8.922 <sup>b</sup>

注:  $rETR_{\max}$ 为最大相对电子传递速率,  $\alpha$ 为表观光能利用效率,  $I_k$ 为饱和光强 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

Note:  $rETR_{\max}$ , the maximum rate of  $rETR$ ;  $\alpha$ , the apparent photosynthetic efficiency;  $I_k$ , the initial light saturation point [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

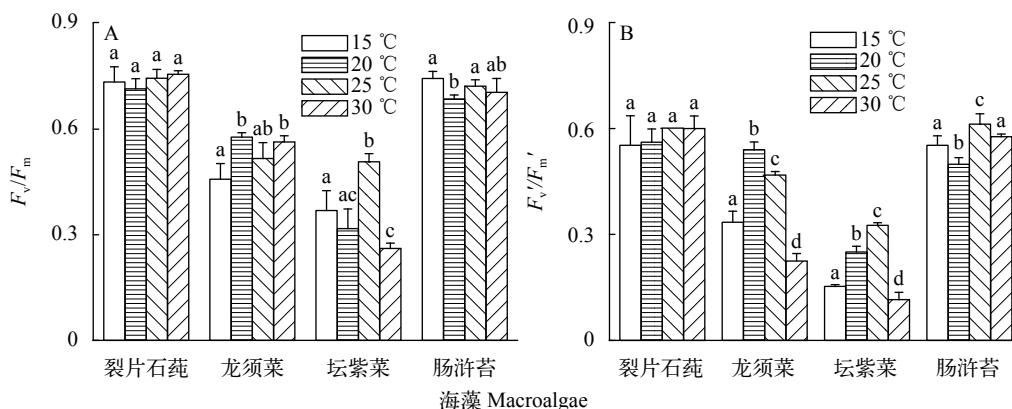


图 6 不同温度处理下最大光化学量子产量 ( $F_v/F_m$ , A) 及有效光化学量子产量 ( $F_v'/F_m'$ , B) ( $P<0.5$ )

Fig. 6 Effects of different temperatures on  $F_v/F_m$  and  $F_v'/F_m'$

短期快速吸收,内部营养盐控制的稳定吸收和外界营养盐控制吸收在内的3个阶段<sup>[24, 25]</sup>,这一发现解释了本实验 $\text{NH}_4^+$ -N与 $\text{PO}_4^{3-}$ -P浓度变化曲线中,开始6h内培养基中营养盐浓度迅速下降其后逐渐趋于平缓的现象(图2、图3)。 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_3^-$ -N被认为是大型海藻生长最重要的氮源,但一般认为前者更容易吸收,在 $\text{NH}_4^+$ -N将近耗尽之后,藻体开始利用 $\text{NO}_3^-$ -N<sup>[26]</sup>,因此在本实验中 $\text{NO}_3^-$ -N的浓度变化在初始阶段减少的趋势相对较缓。 $\text{NO}_2^-$ -N在4种藻类培养基中分解速度最慢,这是由于 $\text{NO}_2^-$ -N为 $\text{NO}_3^-$ -N与 $\text{NH}_4^+$ -N的氧化中间态,转换过程受水体中微生物活动影响,是不稳定的形态,因此 $\text{NO}_2^-$ -N在水体中存在时间较长<sup>[27]</sup>。

### 3.2 温度对藻类生长及光合作用的影响

温度是影响藻类生长发育,也是影响植物生理成分的重要因素<sup>[28]</sup>,研究在不同温度条件下叶绿素荧光的特性,能够指示出藻类光合系统的温度适宜和抑制范围<sup>[29]</sup>。在本研究中,裂片石莼具有较高的适温能力,坛紫菜对高温的耐受性相对较弱。肠浒苔的生长速率在4种藻类中最高,且在不同温度下均维持较好的生长状况(图1),已有的研究发现,在我国由浒苔(*Ulva prolifera*)引发的绿潮事件中,往往混有肠浒苔,肠浒苔作为绿潮物种之一,在5—30℃内都可以存活,具有旺盛的生长力<sup>[30, 31]</sup>。因此利用肠浒苔进行养殖污水处理时应注意水域封闭性,避免造成生态污染。

龙须菜、坛紫菜、肠浒苔在20℃与25℃时生长较快,15℃与30℃生长受抑制。这可能是由于在适宜温度范围内,一定程度的气温升高能够加快藻类的代谢,促进藻类的生长,一旦超过这个范围,就会引起藻体同化和异化作用减弱、水分和营养吸收减慢、酶活性降低,藻类光合作用受到抑制,进而阻碍了藻类的正常生长<sup>[32, 33]</sup>。

高温30℃对龙须菜 $F_v/F_m$ 影响不显著,但显著降低其 $F_v'/F_m'$ ,且该温度下其生长速率也明显下降(表1、图6),这可能是在30℃条件下,温度胁迫阻碍PSII的电子传递,使光合作用器官受氧化的风险增强,这种氧化作用导致PSII系统的慢性损伤,导致叶绿素荧光参数改变,但并未使PSII系统完全失活<sup>[35]</sup>。尽管龙须菜是抗高温品种,但在30℃条件下其部分生理指数有显著降低,证明该温度对龙须菜已经造成一定胁迫。

### 3.3 利用藻类进行污水处理的方案

本实验结果提示:肠浒苔和裂片石莼适应温度范围大,N、P吸收能力强,是利用大藻净化污水实地应用的良好选择。尤其肠浒苔对 $\text{NH}_4^+$ -N的吸收

能力显著,处理高 $\text{NH}_4^+$ -N水体时可优先考虑。由于不同藻类吸收营养盐的特性不同,在利用大型海藻净化养殖废水时,要“因地制宜”,根据实际情况选择适宜净水材料及方案。例如,对虾工厂化养殖废水中 $\text{NO}_3^-$ -N高达TN的60%—70%,养殖温度为23℃至27℃之间<sup>[35]</sup>,因此,选择肠浒苔与裂片石莼,利用其耐受高温, $\text{NO}_3^-$ -N吸收能力强的特点进行废水处理会提高效率;而因为坛紫菜不耐受高温,龙须菜 $\text{NO}_3^-$ -N吸收能力差,所以二者不在考虑范围内。在苏州地区南美白对虾、塘罗氏沼虾、河蟹池塘养殖中,养殖水中 $\text{NH}_4^+$ -N浓度较高<sup>[36]</sup>,肠浒苔对 $\text{NH}_4^+$ -N的吸收能力最佳,可优先考虑。2012—2013年调查发现,流沙湾海水养殖区溶解无机磷(DIP)浓度较低(普遍小于0.05 mg/L),而溶解无机氮(DIN)浓度则普遍较高,尤其是春季(0.692—3.067 mg/L)和夏季(0.521—0.979 mg/L),水体属于明显的P限制,该地区常年养殖海域均处于严重的富营养化状态,且春夏季的有机污染严重<sup>[37]</sup>。基于当地营养盐成分特点,可采用耐受高温且P吸收能力较差的龙须菜进行海区修复。

值得注意的是,裂片石莼与肠浒苔在36h内已达到净水目的,龙须菜和坛紫菜在48h内培养基中的营养盐浓度也达到极低水平,这说明在实际应用中应考虑到换水周期(一般情况下36—48h即可更换水体)或采用流通循环式的培养模式,以达到既能去除N、P等营养盐,又能促进大型海藻的生长并避免因藻体腐烂造成的二次污染的目的。当然,不同藻类净水效果不同,因此可根据实际情况调整净水工艺。另外,温度胁迫将造成大型海藻生长效率与同化作用减弱,影响净水效果,并且大型海藻具有一定的生长季节,在夏秋季节利用大型海藻进行养殖污水处理将存在一定的局限性。发掘抗高温藻类,利用多种海藻轮作,深入研究大型藻类与鱼、虾、贝类等互利机制是利用大型海藻进行海水修复的重要趋势。

### 参考文献:

- [1] Villares R, Carballeira A. Seasonal variation in the concentrations of nutrients in two green macroalgae and nutrient levels in sediments in the Rías Baixas (NW Spain) [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2003, **58**: 887—900
- [2] Zheng H. Analysis on purification effect of the three typical seaweeds on N and P in eutrophic water [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2016, **32**(3): 222—225 [郑辉. 3种典型大型海藻对富营养化水体氮磷净化效果的分析. 科技通报, 2016, **32**(3): 222—225]
- [3] McClanahan T R, Carreiro-Silva M, DiLorenzo M. Ef-

- fect of nitrogen, phosphorous, and their interaction on coral reef algal succession in Glover's Reef, Belize [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, **54**(12): 1947—1957
- [4] Lin Z X, Ru S G, Yang Y, *et al.* Prospect for bioremediation of large-sized seaweed cultivation in eutrophic bays [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2006, **40**(4): 128—134 [林贞贤, 汝少国, 杨宇峰, 等. 大型海藻对富营养化海湾生物修复的研究进展研究. 海洋湖沼通报, 2006, **40**(4): 128—134]
- [5] Chai S Y, He P M. Trends of marine eutrophication in China and ecological restoration strategy [J]. *Science*, 2013, **65**(4): 48—52 [柴邵阳, 何培民. 我国海洋富营养化趋势与生态修复策略. 科学, 2013, **65**(4): 48—52]
- [6] He J, Liu Y, Zhang L Y, *et al.* Study on the nutrient uptake kinetics of three kinds of macroalga [J]. *Fishery Modernization*, 2010, **37**(1): 1—5 [何洁, 刘瑀, 张立勇, 等. 三种大型海藻吸收营养盐的动力学研究. 渔业现代化, 2010, **37**(1): 1—5]
- [7] Kraemer G P, Carmona P R, Chopin T, *et al.* Evaluation of the bioremediatory potential of several species of the red alga *Porphyra* using short-term measurements of nitrogen uptake as a rapid bioassay [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2004, **16**(6): 489—497
- [8] Chen T, Li J R, Wang L, *et al.* Effects of dissolved oxygen on nitrogen release from Jialu River sediment [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2011, **2**(6): 82—84
- [9] Xu S N, Wen S S, Wu W X, *et al.* Bioremediation of caged fish aquaculture by the red alga *Gracilaria verrucosa* in an integrated multi-trophic aquaculture system [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **28**(4): 1466—1475 [徐珊珊, 温珊珊, 吴望星, 等. 真江蓠(*Gracilaria verrucosa*)对网箱养殖海区的生态修复及生态养殖匹配模式. 生态学报, 2004, **28**(4): 1466—1475]
- [10] Yang Y F, Song J M, Lin X T, *et al.* Seaweed cultivation and its ecological roles in coastal waters [J]. *Marine Environment Science*, 2005, **24**(3): 77—80 [杨宇峰, 宋金明, 林小涛, 等. 大型海藻栽培及其在近海环境的生态作用. 海洋环境科学, 2005, **24**(3): 77—80]
- [11] Carmona R, Kraemer G P, Yarish C. Exploring Northeast American and Asian species of *Porphyra* for use in an integrated finfish-algal aquaculture system [J]. *Aquaculture*, 2006, **252**(1): 54—65
- [12] Ignacio Hernández, Abraham Pérez-Pastor, Juan J, *et al.* Studies on the biofiltration capacity of *Gracilariaopsis longissima*: From microscale to macroscale [J]. *Aquaculture*, 2006, **252**(1): 43—53
- [13] Li H, Li M Z, Cao J, *et al.* Effects of temperature on nitrogen uptake and growth in several species of macroalgae [J]. *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]
- [14] Cheng L W, Zou D H, Zheng Q S, *et al.* Effects of temperature and light intensity on the nitrate uptake kinetics of nitrogen starved and replete *Ulva lactuca* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, **29**(5): 939—944 [程丽巍, 邹定辉, 郑青松, 等. 光照和温度对氮饥饿及饱和营养条件下石莼(*Ulva lactuca*)的硝态氮吸收动力学影响. 生态学杂志, 2010, **29**(5): 939—944]
- [15] Xu Z G, Li M Z, Sun F X, *et al.* Effects of temperature, irradiance level and nutritional history on the uptake of inorganic phosphorus in *Hizikia fusiforme* [J]. *South China Fisheries Science*, 2013, **9**(3): 8—13 [徐智广, 李美真, 孙福新, 等. 温度、光强和营养史对羊栖菜无机磷吸收的影响. 南方水产科学, 2013, **9**(3): 8—13]
- [16] Shao F, Fei L, Wu H L. Effect of environmental factors and algae density on the growth and nutrient uptake in *Porphyra yezoensis* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(21): 6164—6171 [邵飞, 费岚, 吴海龙. 环境因子及藻体密度对条斑紫菜生长与氮磷去除效率的影响. 生态学报, 2014, **34**(21): 6164—6171]
- [17] Qian L M, Xu Y J, Jiao N Z, *et al.* Effects of environmental factors on uptake of nitrogen and phosphorus by *Gracilaria lemaneiformis* and *G. lichevodes* [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, **13**(2): 257—262 [钱鲁闽, 徐永健, 焦念志, 等. 环境因子对龙须菜和菊花心江蓠N、P吸收速率的影响. 中国水产科学, 2006, **13**(2): 257—262]
- [18] Zhang Y Z, Wang P, Gui F K, *et al.* Utilization of nitrogen of *Ulva lactuca*, *Ishige foliaceoakamura* and *Graciloupia filicina* [J]. *Marine Environmental Science*, 2012, **31**(3): 341—345 [张永正, 王萍, 桂福坤, 等. 石莼、铁钉菜和蜈蚣藻对氮源利用的研究. 海洋环境科学, 2012, **31**(3): 341—345]
- [19] Morel F M M, Rueter J G. Aquil: a chemically defined phytoplankton culture medium for trace metal studies [J]. *Journal of Phycology*, 1979, **15**(2): 135—141
- [20] Eilers PHC, Peeters JCH. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton [J]. *Ecology Modelling*, 1988, **42**(3): 199—215
- [21] Yao N Y. Algal Physiology [M]. Dalian: Dalian Institute of Technology Press. 1987, 259 [姚南瑜. 藻类生理学. 大连: 大连工学院出版社. 1987, 259]
- [22] Lomas M W, Glibert P M. Interactions between  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{NO}_3^-$  uptake and assimilation: Comparison of diatoms and dinoflagellates at several growth temperatures [J]. *Marine Biology*, 1999, **133**(3): 541—551
- [23] Pan R C, Dong Y D. Plant Physiology [M]. Beijing: Higher Education Press. 1995, 74—77 [潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社. 1995, 74—77]
- [24] Liu J W, Dong S L. Nature of  $\text{NH}_4^+$  uptake kinetics of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* and *Ulva pertusa* [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **26**(2): 95—102 [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. 青岛海洋大学学报, 2004, **26**(2): 95—102]
- [25] 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* [J]. *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]
- [26] Jin Y L, Wu W T, Chen W Z. Effects of different tempera-

- ture and salinity on growth and biochemical constituents of *Gracilaria chouae* [J]. *South China Fisheries Science*, 2012, **8**(2): 51—57 [金玉林, 吴文婷, 陈伟洲. 不同温度和盐度条件对脆江蓠生长及其生化组分的影响. 南方水产科学, 2012, **8**(2): 51—57]
- [27] Lei Y Z. Aquaculture Environmental Chemistry [M]. China Agriculture Press. 2004, 116—117 [雷衍之. 养殖水环境化学. 中国农业出版社. 2004, 116—117]
- [28] Li W X, Zhu Z J, Liu F X. Introduction of Phycology [M]. Shanghai: Shanghai science and Technology Press. 1982, 224—225 [李伟新, 朱仲嘉, 刘凤贤. 海藻学概论. 上海科学技术出版社. 1982, 224—225]
- [29] Song T, Zhang M, Gao J X, *et al.* Fast chlorophyll fluorescence kinetics and its application in plant physiology research [J]. *Journal of Biology*, 2011, **28**(6): 81—86 [宋婷, 张谧, 高吉喜, 等. 快速叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用. 生物学杂志, 2011, **28**(6): 81—86]
- [30] Wang Y, Wang Y, Zhu Lin, *et al.* Comparative studies on the ecophysiological differences of two green tide macroalgae under controlled laboratory conditions [J]. *PLoS One*, 2012, **7**(8): 1—16
- [31] Lotze H K, Schramm W, Schories D, *et al.* Control of macroalgal blooms at early developmental stages: *Pilayella littoralis* versus *Enteromorpha* spp [J]. *Oecologia*, 1999, **119**(1): 46—54
- [32] Li W Q, Li Q, Liao Q B, *et al.* Effect of temperature on the fatty acid composition of four species of marine microalgae [J]. *Marine Science Bulletin*, 2003, **5**(1): 40—44
- [33] Liu J W, Dong S L. Interactions between light and temperature on the growth and levels of chemical constituents of *Gracilaria tenuistipitata* var. *Liui* [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2001, **31**(3): 332—338 [刘静雯, 董双林. 光照和温度对细枝江蓠繁枝变型的生长及生化组成影响. 青岛海洋大学学报, 2001, **31**(3): 332—338]
- [34] Schansker G, Rensen J J S V. Performance of active photosystem II centers in photoinhibited pea leaves [J]. *Photosynthesis Research*, 1999, **62**(2): 175—184
- [35] Liu H Y. Water quality characteristic of industrial shrimp farming and effects of higher dissolved oxygen on its farming [D]. Ocean University of China, Shandong. 2006 [刘海英. 对虾工厂化养殖水质特征及高溶解氧对养殖的影响. 中国海洋大学, 山东. 2006]
- [36] Chen D X. Water quality, discharge pollutants, nitrogen and phosphorus budget in five types of aquaculture pond [D]. Shanghai Ocean University, Shanghai. 2012 [陈东兴. 5种养殖池塘水质、污染物排放强度及氮、磷收支. 上海海洋大学, 上海. 2012]
- [37] Guo Y J, Luo S L, Li J W, *et al.* Assessment of water environmental quality of mariculture areas in Liusha Bay in 2012-2013 [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2015, **42**(19): 130—136 [郭永坚, 罗昭林, 李俊伟, 等. 2012-2013年流沙湾海水养殖区水环境质量评价. 广东农业科学, 2015, **42**(19): 130—136]

## THE EFFECTS OF TEMPERATURE ON THE ABSORPTION EFFICIENCY OF NITROGEN AND PHOSPHORUS AND PHOTOSYNTHETIC PHYSIOLOGICAL CHARACTERISTICS IN FOUR MACROALGAE SPECIES

LIU Qi-Qin<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>, MA Ming-Jie<sup>1</sup>, ZHOU Li-Ya<sup>1</sup>, LI Ya-He<sup>1</sup> and YANG Rui<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Sciences in Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Marine Bioengineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Purifying wastewater with biological methods is highly important in the field of ecological recirculating aquaculture. To study the effects of temperature on the absorption of nitrogen and phosphorus and photosynthetic performance of macroalgae in sea water, four species including *Ulva fasciata*, *Ulva intestinalis*, *Gracilaria lemaneiformis* and *Pyropia haitanensis* were cultured under four temperature conditions (15, 20, 25 and 30°C). The results showed that: (1) most N and P had been absorbed by the four macroalgae species, and the absorbing ability from high to low is *Ulva intestinalis*>*Ulva fasciata*>*Pyropia haitanensis*>*Gracilaria lemaneiformis*; (2) extremely high and low temperature will limit the absorbing of N and P, growth, relative electron transfer rate, and chlorophyll fluorescence in four macroalgae species; (3) *U. fasciata* and *U. intestinalis* were the best choices due to their high absorption rates of N and P and the tolerance of a wide temperature range; (4) nitrogen and phosphorus could be completely absorbed within 48h by the four macroalgae species. To promote algal growth, improve the removal efficiency of nutrients, as well as prevent secondary pollution caused by nutrition limited negative growth of macroalgae, it's better to replace the wastewater within 24—48h, or apply the circulation mode in the process of wastewater treatment.

**Key words:** Macroalgae; Temperature; Nutrient; Absorbing ability; Fluorescence parameters