

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

徐智广¹, 邹定辉², 高坤山³, 李美真^{1*}

(1. 山东省海水养殖研究所, 山东 青岛 266002;

2. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006;

3. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 龙须菜的细胞壁含有丰富的胶质成份,是琼胶生产的良好原料,在中国沿海已经形成了大规模的人工养殖。同时,随着中国近海富营养化现象的日趋严重,龙须菜的规模养殖被认为是缓解海水富营养化的一条有效途径。以探讨龙须菜的生物修复功能为目的,研究了龙须菜对无机磷吸收的基本特征以及不同温度、光照强度和硝氮浓度对其的影响。整个实验在实验室可控条件下进行,分别设置了3个不同温度:15、23和31℃;3个不同的光照强度:0、30和200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和3个不同的硝氮浓度:0、30和200 $\mu\text{mol/L}$,测定了在不同的条件下培养的龙须菜对无机磷吸收的动力学曲线。结果表明:龙须菜对无机磷的吸收动力学曲线符合典型的米氏方程特征,并且吸收能力随温度和硝氮浓度的升高而增大,吸收效率在较低温度(15℃)和接近自然海水的硝氮浓度条件(30 $\mu\text{mol/L}$)下较高;而低光照强度下[30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]的吸收能力和吸收效率均高于黑暗和高光强条件[200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]。由此可见,温度、光照强度及硝氮浓度等环境因子都影响龙须菜对无机磷的吸收特性,但是,其具体的机制仍需进一步深入研究。

关键词: 龙须菜;无机磷;吸收动力学;温度;光照强度;硝氮

中图分类号: S 968.43⁺⁴

文献标志码: A

近年来,由于陆源污染物对近海环境的污染日益严重,加上海水养殖业的迅猛发展,海洋富营养化现象日趋加重^[1]。国内外学者普遍认为养殖大型海藻是吸收、利用营养物质,延缓并修复水域富营养化的有效措施之一^[2-4]。因此,研究海藻营养代谢的基本特征以及与环境因子之间的相互关系,对于大型经济海藻的开发利用和海洋环境保护具有重要的意义。

龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)属于江蓠属(*Gracilaria*),是一种大型经济红藻,原产于山东省和辽宁省,自引种成功以后,在中国沿海已经形成相当规模的养殖^[5]。除了经济上的效益,龙须菜的大规模养殖也是降低中国近海富营养化的一条有效途径^[6],被作为解决富营养化问题的推荐养殖品种^[4]。目前,对于龙须菜的研究主要集

中在光合作用特性^[7]、营养盐供应对其的生理影响^[8]以及龙须菜对水体富营养的去除方面^[9],而关于龙须菜营养盐吸收特性方面的研究仍非常缺乏。

磷是海藻生长的必需营养元素,参与细胞体内很多生物化学过程,包括核酸的合成、膜结构的组装以及识别和调节蛋白和酶的活性等^[10]。随着海水富营养问题的日益严重,对海藻磷吸收的研究正受到越来越多的关注。但国内外对于磷的吸收和生长动力学研究主要集中在海洋浮游藻类^[11-12],对大型海藻磷吸收利用的研究比较少^[13],尤其是关于龙须菜无机磷吸收动力学的研究仍未见报道。本文初步探讨了龙须菜无机磷吸收动力学的基本特征以及温度、光照强度和硝氮浓度对其的影响,以期对龙须菜养殖和其对

收稿日期:2010-08-17 修回日期:2011-04-26

资助项目:国家海洋公益性行业科研专项经费项目(20090519-2,200905020-2);山东省科技攻关计划(2009GG10005012);国家自然科学基金资助项目(No. 41076094和30970450);教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-10-0375)

通讯作者:李美真,E-mail:li-meizhen@163.com

海水富营养化的生物修复作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

龙须菜于2006年5月28日采自广东省汕头市南澳岛近海筏式养殖区。采集时选择健康一致的藻体,长25 cm,放于盛有少量海水的塑料袋中,用低温箱(温度4℃)在2 h内运到实验室,暂养在高压灭菌的自然海水[pH 8.2,盐度33,无机氮浓度10 μmol/L,无机磷(Pi)浓度0.5 μmol/L]中2 d。培养条件:温度23℃,光照强度100 μmol photons/(m²·s),光暗比为12 L:12 D,24 h充气。

1.2 培养水体的配制

人工海水的配制 参照LARSSON等^[14]的方法,在蒸馏水中溶解:NaCl 450 mmol/L,KCl 10 mmol/L,CaCl₂ 10 mmol/L,MgSO₄ 30 mmol/L,NaHCO₃ 2.2 mmol/L。

无机磷(Pi)缺乏的*f*/2加富培养基的配制 参照BOROWITZKA^[15]的方法,其中不加入NaH₂PO₄,使培养水体中不缺乏其他营养元素而保证Pi浓度为零。

1.3 对藻体的不同处理

分别对藻体进行不同温度、光照强度和硝氮浓度的培养后,对其在不同培养条件下进行Pi的吸收动力学实验,测定温度、光照强度和硝氮浓度3种单因子分别对龙须菜Pi吸收动力学的影响。培养的不同条件下,均保持培养液中的Pi浓度为0,从而在培养过程使藻体消耗掉自身体内储存的磷库,以避免藻体内磷库对测定结果的影响。

温度对龙须菜Pi吸收动力学的影响 设置3个温度,15、23和31℃。藻体分别在3种条件下培养24 h后,进行各个温度条件下的Pi吸收动力学实验,每种条件做4个重复。3种处理除了温度,其他培养条件均相同:培养水体为Pi缺乏的*f*/2加富培养基,其中加入NaNO₃,使硝氮浓度为200 μmol/L,光照强度为200 μmol photons/(m²·s),光暗比为12 L:12 D,24 h充气。

光照强度对龙须菜Pi吸收动力学的影响 设置3个光照强度,0、30和200 μmol photons/(m²·s)。藻体分别在3种条件下培养24 h后,进行各个光照强度条件下的Pi吸收动力学实验,每种条件做4个重复。3种处理除了光照强度,

其他培养条件均相同:培养水体为Pi缺乏的*f*/2加富培养基,其中加入NaNO₃,使硝氮浓度为200 μmol/L,温度为23℃,光暗比为12 L:12 D,24 h充气。

硝氮浓度对龙须菜Pi吸收动力学的影响 通过在培养基中添加硝酸盐设置3个硝氮浓度,0、30和200 μmol/L。藻体分别在3种条件下培养24 h后,进行各个硝氮浓度条件下的Pi吸收动力学实验,每种条件做4个重复。3种处理除了硝氮浓度,其他培养条件均相同:培养水体为Pi缺乏的*f*/2加富培养基,温度为23℃,光照强度为200 μmol photons/(m²·s),光暗比为12 L:12 D,24 h充气。

1.4 Pi吸收动力学曲线的获得

通过测定实验过程培养介质中营养盐的浓度变化,用营养盐的减少速率来表示藻体对这一营养盐的吸收速率。具体公式如下:吸收速率 = $(N_o - N_t) \cdot V / (W_o \cdot t)$ 。其中, N_o 为实验开始时培养水体中营养盐的浓度, N_t 为实验结束时营养盐的浓度, V 为培养水体的体积, W_o 为实验开始时藻体的湿重, t 为实验时间,单位为小时(h),吸收速率的单位为μmol/(h·g·FW)。Pi浓度的测定采用磷钼蓝分光光度法^[16]。本实验通过在Pi缺乏的*f*/2加富培养基中加入NaH₂PO₄,配制8个Pi初始浓度梯度(0.5、2、5、10、20、40、60和80 μmol/L)的培养水体,用多瓶法在3 h内分别测定一定湿重的龙须菜在各个初始浓度下Pi的吸收速率。龙须菜的吸收动力学曲线利用米氏方程进行非线性拟合: $V = V_m \cdot [S] / (K_s + [S])$ 。其中, V 为在不同的底物浓度($[S]$)下Pi的吸收速率; V_m 为最大吸收速率,代表着龙须菜对Pi的吸收能力; K_s 为吸收速率达到最大值一半时的底物浓度,即半饱和常数,表示藻体对Pi的亲合力;另外,用最大速率与半饱和常数的比值(V_m/K_s)来评价藻体对Pi的吸收效率。

1.5 计算和统计分析

所有测定结果表示为平均数 ± 标准差($n \geq 3$),用方差分析(ANOVA)和*t*-检验进行统计显著性分析,以 $P = 0.05$ 作为差异的显著性水平。

2 结果

2.1 吸收速率和米氏方程

各处理组中,龙须菜对Pi的吸收速率与其初

始 Pi 浓度的关系均符合米氏方程 ($R^2 > 0.9$)。通过拟合曲线求得各个条件下的最大吸收速率 (V_m) 和半饱和常数 (K_s)。

2.2 温度的影响

龙须菜对 Pi 的吸收速率随着温度的升高而增大(图 1),同时最大吸收速率和半饱和常数也与温度成正相关, V_m/K_s 在较低的温度下(15 °C)的值反而最大(表 1)。可见,温度的升高可以提高龙须菜对 Pi 的吸收能力,同时,温度越低,龙须菜对底物 Pi 的亲和力越大,且较低的底物浓度下龙须菜的吸收效率更高。

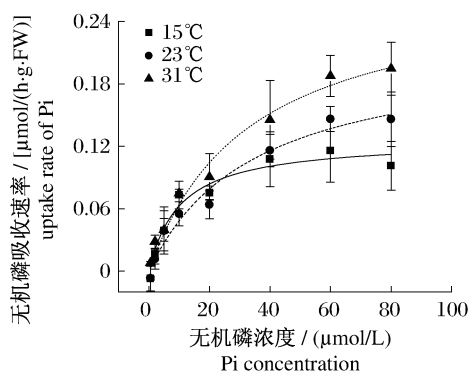


图 1 不同温度下龙须菜的无机磷吸收动力学曲线
Fig. 1 Kinetics curves of inorganic phosphorus (Pi) uptake in *G. lemaneiformis* at different temperatures

表 1 不同温度下龙须菜无机磷吸收动力学曲线参数
Tab. 1 Kinetics parameters obtained from inorganic phosphorus (Pi) uptake curves of *G. lemaneiformis* at different temperatures

	温度/°C temperature		
	15	23	31
最大吸收速率/ [$\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{g} \cdot \text{FW})$] V_m	0.118 ± 0.012 ^a	0.175 ± 0.030 ^b	0.398 ± 0.021 ^c
半饱和常数/($\mu\text{mol}/\text{L}$) K_s	8.288 ± 2.785 ^a	21.032 ± 3.271 ^b	62.136 ± 6.886 ^c
V_m/K_s 比值 V_m/K_s	0.015 ± 0.003 ^a	0.008 ± 0.002 ^b	0.008 ± 0.001 ^b

注:平均数 ± 标准差 ($n=4$); 同一行内不同字母上标的数值之间差异显著。

Notes: Values are means ± SD ($n=4$); Values with different superscripts in the same row are significantly different from each other.

2.3 光照强度的影响

龙须菜对 Pi 吸收的最大速度和 V_m/K_s 在光强为 30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时最大,黑暗和高

光照强度下都相对较低,而半饱和常数趋势则相反(图 2 和表 2)。由此可知,相对于 30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的低光照强度,黑暗和高光照强度下都会使龙须菜对 Pi 的吸收能力和吸收效率降低,并使其对底物的亲和力减弱。

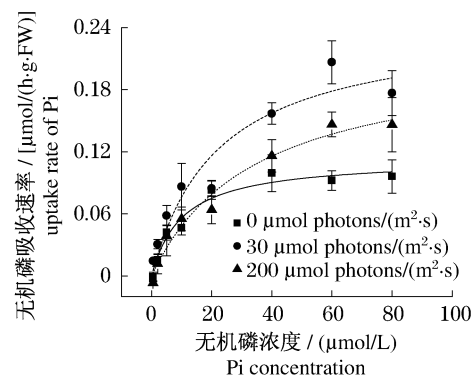


图 2 不同光照强度下龙须菜的无机磷吸收动力学曲线
Fig. 2 Kinetics curves of inorganic phosphorus (Pi) uptake in *G. lemaneiformis* at different irradiance levels

表 2 不同光强下龙须菜无机磷吸收动力学曲线参数
Tab. 2 Kinetics parameters obtained from inorganic phosphorus (Pi) uptake curves of *G. lemaneiformis* at different irradiance levels

	光照强度/[$\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] irradiance		
	0	30	200
最大吸收速率/ [$\mu\text{mol}/(\text{h} \cdot \text{g} \cdot \text{FW})$] V_m	0.207 ± 0.006 ^a	0.228 ± 0.012 ^b	0.175 ± 0.030 ^c
半饱和常数/($\mu\text{mol}/\text{L}$) K_s	26.051 ± 2.867 ^a	12.605 ± 1.271 ^b	21.032 ± 3.271 ^a
V_m/K_s	0.014 ± 0.001 ^a	0.016 ± 0.000 ^b	0.008 ± 0.002 ^c

注:平均数 ± 标准差 ($n=4$); 同一行内不同字母上标的数值之间差异显著。

Notes: Values are means ± SD ($n=4$); Values with different superscripts in the same row are significantly different from each other.

2.4 硝氮浓度的影响

如图 3 和表 3,硝氮浓度的增大使龙须菜对 Pi 的最大吸收速率逐渐增大,半饱和常数也表现出相同的趋势,但 V_m/K_s 在 30 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 的硝氮浓度最高,在 0 和高硝氮浓度下的值都相对较低。可见,随着硝氮浓度的增大,龙须菜对 Pi 的吸收能力增加,对底物的亲和力降低,但吸收效率却在接近自然海水的硝氮浓度(本实验所用自然海水的硝氮浓度为 40 $\mu\text{mol}/\text{L}$)条件下最大。

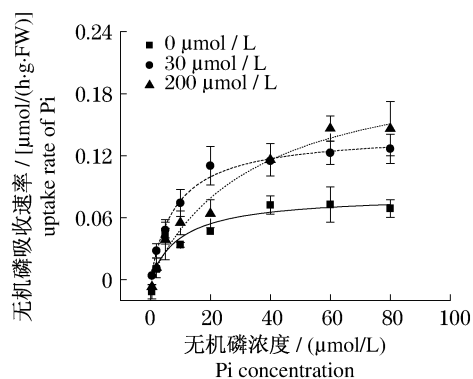


图3 不同硝氮浓度下龙须菜的无机磷吸收动力学曲线
Fig.3 Kinetics curves of inorganic phosphorus (Pi) uptake in *G. lemaneiformis* at different nitrate concentrations

表3 不同硝氮浓度下龙须菜无机磷吸收动力学曲线参数
Tab.3 Kinetics parameters obtained from inorganic phosphorus (Pi) uptake curves of *G. lemaneiformis* at different nitrate concentrations

	NO ₃ ⁻ 浓度/(μmol/L) nitrate concentrations		
	0	30	200
最大吸收速率/ [μmol/(h·g·FW)] V _m	0.077 ± 0.010 ^a	0.153 ± 0.009 ^b	0.175 ± 0.003 ^c
半饱和常数/(μmol/L) K _s	6.889 ± 0.216 ^a	11.069 ± 1.855 ^b	21.032 ± 3.271 ^c
V _m /K _s	0.010 ± 0.000 ^a	0.014 ± 0.003 ^b	0.008 ± 0.002 ^a

注:平均数±标准差(n=4);同一行内不同字母上标的数值之间差异显著。

Notes: Values are means ± SD (n = 4); Values with different superscripts in the same row are significantly different from each other.

3 讨论

一般来说,植物对磷是主动吸收的,而且高等植物和很多浮游藻类的磷吸收动力学基本都符合米氏方程^[12,17],但很多大型海藻对磷的吸收有时候并不遵循简单的米氏方程。如圆扁江篱(*G. tikvahiae*)对磷的吸收呈现3个阶段,即低浓度下的两个饱和阶段(0~0.2与0~2 μmol/L)和一个直线阶段(0~11 μmol/L)^[18]。另外,HURD等^[19]根据区域和季节的不同选择了5种中潮带墨角藻,研究其磷吸收动力学特征的结果表明,在开始的30 min内有一个快吸收,随后的30 min内几乎不吸收,然后维持几个小时的中度吸收速率。这种吸收率随时间变化的原因可能是藻体细胞内的营养库导致,开始的快吸收(10~60 min)用于

充盈细胞内的营养库,随后吸收率下降至稳定阶段可能是胞内营养库反馈调节的结果^[20]。本研究中,在测定龙须菜的Pi吸收动力学之前对藻体进行磷饥饿处理,使测定初始藻体内的营养库没有磷的储存,然后测定比较长的一段时间(3 h)内藻体的平均吸收速率,不考虑藻体短时间内充盈胞内营养库时吸收速率的变化,结果表明,龙须菜在不同Pi初始浓度下的平均吸收速率与其浓度关系符合典型的米氏方程。这可能是因为在经历了短时间的藻体内营养库的充盈后,Pi的吸收速率主要受培养介质中底物浓度所控制。由于长期生长在海洋中相对稳定的磷浓度下,这一结果对于生长在自然海水中龙须菜磷代谢过程的研究具有更加重要的意义。

另外,本实验结果还证明,海水中的重要环境条件,如温度、光照强度、硝氮营养盐浓度等对龙须菜Pi的吸收动力学特征都产生了显著的影响。

PEDERSEN等^[21]研究了几种紫菜的营养盐吸收与温度的关系,结果表明在较高的NaH₂PO₄浓度下培养的几种紫菜,温度每升高10℃,其Pi吸收速率就增大2倍左右;而在较低NaH₂PO₄浓度下,5℃下培养的藻体其Pi吸收速率却大于15℃培养的藻体。本研究中,随着温度的升高,龙须菜对Pi的吸收能力增强,并且在15℃时的V_m/K_s值比23℃和31℃时相对较大,说明当底物浓度较低时,在较低的温度下龙须菜对Pi的吸收效率更高(表1和图1),这与PEDERSEN等^[21]的结果相似。这可能是因为,较高的温度下,与Pi吸收相关酶的活性增强,促进了Pi的吸收;同时藻体的呼吸作用随温度升高而更加活跃,为Pi的主动吸收提供更多的能量,从而也加大了藻体的吸收能力。另一方面,在较低的温度下,藻体的吸收能力相对较低,所以介质中较低的底物浓度就能使其吸收速率达到饱和,但其具体机制需进一步研究。

光能够促进海藻营养盐的吸收^[22],本研究中黑暗下龙须菜对Pi的吸收能力比较低(表2和图2),这可能是由于在黑暗条件下没有光合作用为Pi的主动吸收提供能量导致。另外,在低光照强度[30 μmol photons/(m²·s)]下龙须菜对Pi的吸收能力和吸收效率比在高光照强度[200 μmol photons/(m²·s)]下强(表2和图2),这可能是因为高光照下藻体的光合作用更强,对CO₂的

固定和吸收加强,形成的碳代谢产物对 Pi 吸收的抑制所导致,但直接证据仍需进一步研究。

目前,学者们对于海藻利用不同形态氮营养盐的研究比较多^[13,23-24],而对氮磷利用之间关系的研究比较少。LUNDBERG 等^[25]用核磁共振法研究了石莼(*Ulva lactuca*)对氮磷利用的相互关系,结果表明当培养水体中氮营养盐浓度升高时,细胞内作为磷营养库的多聚磷酸盐含量下降,并且 Pi 的吸收受抑制。这一现象的原因可能是硝氮通过与磷传递体结合来直接抑制 Pi 吸收,也可能是通过硝氮吸收和还原争夺光合作用产生的能量来降低 Pi 吸收及多聚磷酸盐的合成,因为这一过程也需要消耗能量。本研究中,硝氮浓度的升高提高了龙须菜对 Pi 的吸收能力(表 3 和图 3),与 LUNDBERG 等^[25]的结果不同,这可能是海藻种类和实验条件不同导致,本实验在 200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的高光照强度下研究硝氮浓度对 Pi 吸收的影响,高光强下龙须菜的光合作用较强,能够为氮、磷代谢提供充分的能量,所以氮吸收不会通过争夺能量来抑制 Pi 吸收,而表现出明显的促进作用,这也符合藻体对氮、磷按一定比例需求的规律^[26]。

本次研究结果表明,大型经济海藻龙须菜对于无机磷的吸收有着适合的温度和光照强度。温度的升高能够刺激无机磷的吸收,但吸收效率在达到一定温度时就不再升高;合适的光照强度下,龙须菜对磷的吸收能力和效率都达到最高,光照强度太高对磷的吸收会起到负面影响。因此,在养殖龙须菜时应考虑与温度和光照强度相关的因素,如水温、养殖悬挂深度等等。另外,水体中氮的充分供应能够刺激龙须菜对磷的更快吸收,二者的吸收速率呈现一定的正相关。

参考文献:

- [1] NAYLOR R L. Nature's subsidies to shrimp and salmon farming[J]. *Science*, 1998, 282: 883 - 884.
- [2] AHN O, PETERLL R J, HANRRISON P J. Ammonium and nitrate uptake by a *Laminaria saccharina* and *Nereocystis luetkeana* originating from a Salmon sea cage farm[J]. *Journal of Applied Phycology*, 1998, 10: 333 - 340.
- [3] 杨宇峰,费修纭. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J]. *青岛海洋大学学报*, 2003, 33(1): 53 - 57.
- [4] FEI X G. Solving the costal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation [J]. *Hydrobiologia*, 2004, 512: 145 - 151.
- [5] 张学成,费修纭,王广策,等. 江蓠属海藻龙须菜的基础研究与大规模栽培[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(5): 947 - 954.
- [6] 汤坤贤,游秀萍,林亚森,等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 3044 - 3051.
- [7] XIE X J, WANG G C, PAN G H, *et al.* Variations in morphology and PSII photosynthetic capabilities during the early development of tetraspores of *Gracilaria vermiculophylla* (Ohmi) Papenfuss (Gracilariales, Rhodophyta) [J]. *BMC Developmental Biology*, 2010, 10: 43.
- [8] 徐永健,钱鲁闽,王永胜. 氮素营养对龙须菜生长及色素组成的影响[J]. *台湾海峡*, 2006, 25(2): 222 - 228.
- [9] ZHOU Y, YANG H S, HU H Y, *et al.* Bioremediation potential of the macroalga *Gracilaria lemaceiformis* (Rhodophyta) integrated into fed fish culture in coastal waters of north China [J]. *Aquaculture*, 2006, 252: 264 - 276.
- [10] IRIHIMOVITCH V, YEHUDAI-RESHEFF S. Phosphate and sulfur limitation responses in the chloroplast of *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2008, 283: 1 - 8.
- [11] GROVER T P. Non-steady state dynamics of algal population growth: Experiments with two chlorophytes [J]. *Journal of Phycology*, 1991, 27: 70 - 79.
- [12] 张诚,邹景忠. 尖刺拟菱形藻氮磷吸收动力学以及氮磷限制下的增殖特征[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28(6): 599 - 603.
- [13] 许忠能,林小涛,林继辉,等. 营养盐因子对细基江篱繁枝变种氮、磷吸收速率的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(3): 366 - 374.
- [14] LARSSON C, AXELSSON L, RYBERG H, *et al.* Photosynthetic carbon utilization by *Enteromorpha intestinalis* (Chlorophyta) from a Swedish rockpool [J]. *European Journal of Phycology*, 1997, 32: 49 - 54.
- [15] BOROWITZKA M A. Micro algal biotechnology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1988: 457 - 465.
- [16] HARRISON P J. Determining phosphate uptake rates of phytoplankton [M] // Lobban C S, Chapman D J, Kremer B P, eds. *Experimental phycology: a*

- laboratory manual. New York: Cambridge University Press, 1988: 186 – 195.
- [17] CLASSEEN N, BARBER S A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants [J]. *Plant Physiology*, 1974, 54: 564 – 568.
- [18] FRIEDLANDER M, DAWES C J. *In situ* uptake kinetics of ammonium and phosphate and chemical composition of the red seaweed *Gracilaria tikvahiae* [J]. *Journal of Phycology*, 1985, 21: 448 – 453.
- [19] HURD C L, DRING M J. Phosphate uptake by intertidal furoid algae in relation to zonation and season [J]. *Marine Biology*, 1990, 107: 281 – 289.
- [20] PEDERSON M F, PALING E I, WALKER D I, *et al.* Nitrogen uptake and allocation in the seagrass *Amphibolis Antarctica* [J]. *Aquatic Botany*, 1997, 56: 105 – 117.
- [21] PEDERSEN A, KRAEMER G, YARISH C. The effects of temperature and nutrient concentrations on nitrate and phosphate uptake in different species of *Porphyra* from Long Island Sound (USA) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 312: 235 – 252.
- [22] CLOERN J E. Effects of light intensity and temperature on *Cryptomonas ovata* (Cryptophyceae) growth and nutrient uptake rates [J]. *Journal of Phycology*, 1977, 13: 389 – 395.
- [23] 徐智广, 邹定辉, 张鑫, 等. 光照和不同形态氮营养盐供应对坛紫菜硝酸还原酶活性的影响 [J]. *水产学报*, 2007, 31(1): 90 – 96.
- [24] OMAS M W, GLIBERT P M. Interactions between NH_4^+ and NO_3^- uptake and assimilation: Comparison of diatoms and dinoflagellates at several growth temperature [J]. *Marine Biology*, 1999, 133: 541 – 551.
- [25] LUNDBERG P, WEICH R G, JANSEN P, *et al.* ^{31}P and ^{14}N NMR studies of the uptake of phosphorus and nitrogen compounds in the marine macroalgae *Ulva lactuca* [J]. *Plant Physiology*, 1989, 89: 1380 – 1387.
- [26] SANUDO-WILHELMY S A, TOVAR-SANCHEZ A, *et al.* The impact of surface-adsorbed phosphorus on phytoplankton redfield stoichiometry [J]. *Nature*, 2004, 432: 897 – 901.

Effects of temperature, irradiance level and nitrate concentration on the uptake of inorganic phosphorus in *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta)

XU Zhi-guang¹, ZOU Ding-hui², GAO Kun-shan³, LI Mei-zhen^{1*}

(1. Maricultural Institute of Shandong Province, Qingdao 266002, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

3. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: *Gracilaria lemaneiformis* (Bory) Weber-van Bosse is an economically important red seaweed that is cultivated on a large scale in China due to the quantity and quality of agar in its cell walls. This alga is also considered an excellent species for alleviating coastal eutrophication, which has become ever more serious in China. To aim at such a function of bioremediation, in this study, the characteristics of inorganic phosphorus (Pi) uptake in *G. lemaneiformis* were investigated. Thalli were incubated in artificial seawater with $f/2$ enrichment and different Pi concentrations under different conditions of temperature (15, 23, 31 °C), irradiance levels [0, 30, 200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] and nitrate concentrations (0, 30, 200 $\mu\text{mol/L}$), and the uptake dynamics of Pi were determined. The results showed that the uptake dynamic curve of Pi was always accordant with Michaelis-Menten equation under various conditions. The maximal uptake rate of Pi increased with the enhancements of temperature and nitrate concentration. However, the ratio of maximal uptake rate and half-saturation constant (V_m/K_s), which represented the efficiency of Pi uptake, was the highest at the lowest temperature (15 °C) and the level of nitrate concentration close to natural seawater (30 $\mu\text{mol/L}$). Both the maximal uptake rate and efficiency were higher at lower irradiance level [30 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] than at higher level [200 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] or dark [0 $\mu\text{mol photons}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]. It is concluded that environmental factors such as temperature, irradiance level and nitrate concentration, could significantly affect the Pi uptake in *G. lemaneiformis*, and the mechanisms should be further studied in detail.

Key words: *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta); inorganic phosphorus; uptake dynamics; temperature; irradiance; nitrate

Corresponding author: LI Mei-zhen. E-mail: li-meizhen@163.com