

两种甲藻对人工海水中胶体磷的利用初探

周理斌¹ 林良师² 柳欣¹ 蔡毅华² 黄邦钦¹

(1. 福建省海陆界面生态环境重点实验室、厦门大学环境与生态学院 福建 厦门 361005;
2. 厦门大学海洋与地球学院 福建 厦门 361005)

摘要:采用批次培养方法,研究了东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)和链状亚历山大藻(*Alexandrium catenella*)对胶体磷的生物可利用性,并初步探讨了甲藻利用胶体磷的机制问题.结果表明东海原甲藻和链状亚历山大藻均能利用胶体磷生长繁殖.东海原甲藻在接种11 d后细胞密度在无机磷和胶体磷培养基中分别为 10.53×10^7 和 3.43×10^7 个/dm³.链状亚历山大藻在接种11 d后细胞密度在无机磷和胶体磷培养基中分别为 39.0×10^5 和 28.3×10^5 个/dm³.通过对比细胞密度,胶体磷对东海原甲藻生长的促进作用要低于无机磷的作用;胶体磷对链状亚历山大藻生长的促进作用与无机磷的作用相当.东海原甲藻和链状亚历山大藻在胶体磷源下碱性磷酸酶活性迅速升高,前期均显著高于各自无机磷组的碱性磷酸酶活性,碱性磷酸酶活力最高值分别为0.29和0.30 μmol/(dm³·h).初步结果表明,两种甲藻均能通过碱性磷酸酶的降解来利用胶体磷.

关键词:海洋生物学;胶体磷;东海原甲藻;链状亚历山大藻;碱性磷酸酶

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2013. 01. 013

中图分类号: P735

文献标识码: A

文章编号: 2095-4972 (2013) 01-0095-07

1861年,作为胶体化学的创始人,英国科学家Thomas首先提出了胶体的概念^[1]. 20世纪90年代以来,切向超滤(CFF)技术的迅速发展和广泛应用,使胶体能够有效的从“溶解相”中提取出来,独立的进行研究^[2-3]. 研究表明,胶体物质大量存在于淡水、海水和沉积物间隙水中^[4-6]. 它们由于粒径小,比表面积大,又富含有机官能团,而具有强大的络合能力,对于环境中的有机物质、痕量金属和放射性核素的生物地球化学循环具有重要作用^[7-9].

磷是水体初级生产力的主要限制因子之一^[10]. 研究表明当海水中无机磷(DIP)限制藻类生长时,许多藻类可以通过碱性磷酸酶(AP)水解等方式,直接或间接的利用溶解有机磷(DOP)^[11-13]. 在水柱上层,尤其是表层和叶绿素最大层,胶体有机磷(COP)常成为DOP的主要形态,直接影响到DOP的生物可利用性和循环途径^[14-16]. 一些研究表明,胶体物质对藻类生长有一定的影响,但由于未将胶体磷作为唯一磷源或未定量胶体磷浓度等原因,胶

体磷的生物可利用性尚有待深入研究^[17-20]. 近几年我国频繁发生甲藻赤潮,开展胶体磷生物可利用性研究具有重要的现实意义.

本研究选取我国近海重要浮游植物优势种——东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)和链状亚历山大藻(*Alexandrium catenella*)为研究对象,将胶体磷作为唯一磷源,以无机磷为对照,研究胶体磷对甲藻生长的影响,并通过碱性磷酸酶活力的变动来探讨甲藻利用胶体磷的途径和机制问题,为研究胶体磷的生物可利用性和生态效应提供数据.

1 材料和方法

1.1 胶体制备

采集厦门大学白城近海海水,使用0.4 μm(即400 nm)孔径的聚碳酸酯滤芯(GE water)预过滤,而后采用配备有产家标称孔径1 nm的超滤膜(P2PLACC05, Millipore)的Pellicon板框式低残留丙烯酸超滤系统(XX42PLK50, Millipore)进行超滤. 取

收稿日期: 2012-05-08

基金项目: 国家973计划资助项目(2011CB403603); 国家自然科学基金资助项目(41176112, 40906040); 福建省自然科学基金资助项目(2011J01277); 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室开放基金资助项目(LMEB201103)

作者简介: 周理斌(1986~),男,硕士研究生; E-mail: zhou_libin@foxmail.com

通讯作者: 黄邦钦,男,教授; E-mail: bqhuang@xmu.edu.cn

胶体截留液,用超纯水脱盐,得到纯胶体溶液.经过实验室的进一步刻度,该超滤膜的孔径实际上应为 10 nm.因此,本研究采用的胶体粒径范围应为 10 ~ 400 nm.

1.2 实验藻种

本实验所用藻种为链状亚历山大藻和东海原甲藻.藻种由近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学)海洋微型生物保种中心(CCMBP)提供.将藻种接种在以 f/2 为基础的低磷培养基(磷酸盐含量约为 2 μmol/dm³)中,进行 3 ~ 4 个世代的低磷驯化培养.正式实验时,接种处于指数期生长的细胞于新的培养基中.

表 1 两种甲藻对人工海水中胶体磷的利用实验中改良后的 f/2 配方

Tab.1 Modified f/2 medium in utilization experiment of colloidal phosphorus in artificial seawater by 2 dinoflagellates

组分名称	组分含量/mg · dm ⁻³	组分名称	组分含量/mg · dm ⁻³
NaNO ₃	75	FeCl ₃ · 6H ₂ O	3.15
NaH ₂ PO ₄ · 2H ₂ O	5	ZnSO ₄ · 5H ₂ O	0.022
Na ₂ SiO ₃ · 9H ₂ O	20	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.01
Na ₂ EDTA	4.36	CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.01
维生素 B ₁	0.1	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O	0.006
维生素 B ₁₂	0.0005	MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.18

表 2 两种甲藻对人工海水中胶体磷的利用实验中各组培养介质及初始磷浓度

Tab.2 Medium and initial P concentration in each culture in utilization experiment of colloidal phosphorus in artificial seawater by 2 dinoflagellates

藻种	磷源	培养介质	C _{DIP} /μmol · dm ⁻³	C _{DOP} /μmol · dm ⁻³
东海原甲藻	无机磷(KH ₂ PO ₄)	人工海水	2.60	未添加
	胶体磷组(CP)	脱盐胶体人工海水	0.26	1.70
链状亚历山大藻	无机磷(KH ₂ PO ₄)	人工海水	2.50	未添加
	胶体磷组(CP)	脱盐胶体人工海水	0.50	1.70

1.4 参数测定

1.4.1 藻细胞计数 培养开始后,每天取藻液,采用酸性 Lugol's 试剂固定,使用藻类细胞计数框(0.1 cm³)进行显微镜计数.

1.4.2 磷含量的测定 每天取 20 cm³ 培养液通过醋酸纤维膜抽滤用于测定培养液中 DOP 和 DIP 的含量. DIP 采用以抗坏血酸为还原剂的磷钼蓝显色法测定,总溶解态磷(TDP)采用酸性过硫酸钾(K₂S₂O₈)氧化法进行测定.样品在 125 °C 高压消解 120 min,冷却后采用以抗坏血酸为还原剂的磷钼蓝显色法测定. DOP 的含量以 TDP 减去 DIP 含量的差值表示.

1.4.3 碱性磷酸酶活力测定 AP 活力:参照 Hoppe(1983)的方法^[21],加入 4-伞基酮磷酸盐 MUP

1.3 培养条件

实验前 2 d 添加抗生素(硫酸链霉素与青霉素钠盐)在预接种的藻液中,进行灭菌处理.藻类培养均采用由超纯水或脱盐胶体配制的人工海水作为基础的介质.培养基除磷以外的营养盐按 f/2 配方(表 1)添加,121 °C 高压湿热灭菌 30 min 后备用.设计各组有相近的磷含量,分组情况及实测初始磷含量见表 2.无机磷组以 KH₂PO₄ 作为磷源,胶体磷组以胶体磷作为磷源,每个实验组设 3 个平行.光暗周期 14:10,光照强度约 4 000 lx,培养温度 20 ± 1 °C,培养周期 11 d.

(Sigma)作为反应底物,在 20 ± 1 °C 下避光培养 3 h;对照水样培养前不加入反应底物,培养结束后再加入等量反应底物.样品采集后立即使用荧光分光光度计进行测定,最后通过标准曲线计算 AP 活力 [μmol/(dm³ · h)].

2 结果与分析

2.1 生长状况

与对照组(无机磷)相比,2 种甲藻在胶体磷为磷源的条件下均能生长,但存在种间差异(图 1).东海原甲藻在培养的前期(前 5 d),对照组和胶体磷组的生长状况不存在显著差异(p > 0.05,单因素方差分析),然而 6 d 之后,胶体磷组东海原甲藻的生长明显减缓,细胞密度维持在 27.0 × 10⁶ ~ 34.3 × 10⁶ 个/dm³.对照组东海原甲藻在第 8 天进入稳

定期, 细胞密度维持在 $96.0 \times 10^6 \sim 105.3 \times 10^6$ 个/ dm^3 . 东海原甲藻对照组与胶体磷组的最大细胞密度存在显著差异 ($p < 0.05$) (图 1 a).

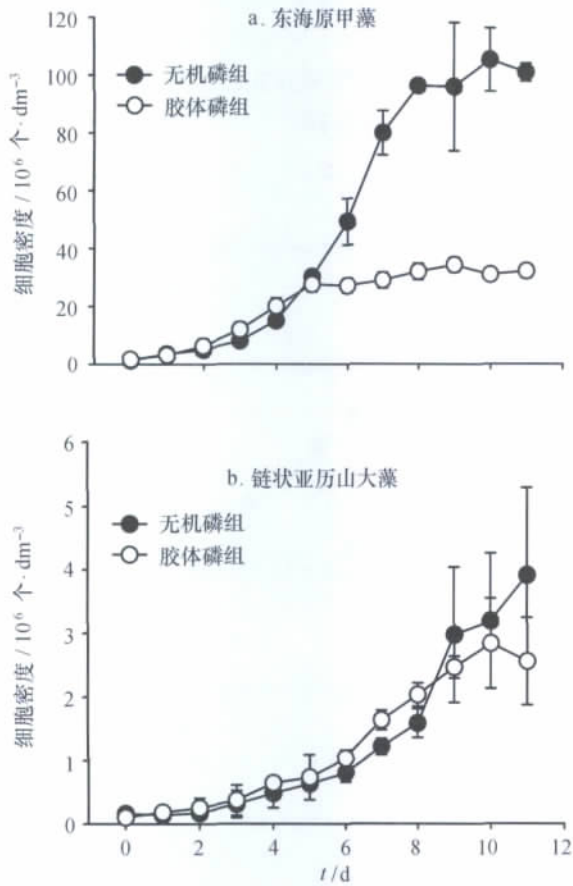


图 1 无机磷源与胶体磷源下东海原甲藻和链状亚历山大藻的生长曲线

Fig. 1 Growth curves of *Prorocentrum donghaiense* and *Alexandrium catenella* under KH_2PO_4 and colloidal phosphorus cultures

与东海原甲藻不同, 链状亚历山大藻不同处理组的生长状况呈更为相近的趋势, 在整个培养周期中不存在显著差异 ($p > 0.05$). 对照组细胞密度在第 11 天达到最大值 3.9×10^6 个/ dm^3 , 而胶体磷组则在第 10 天达到最大值 2.83×10^6 个/ dm^3 (图 1 b).

2.2 培养体系中磷浓度变化

结果显示 2 种甲藻均能利用胶体磷作为磷源支持其生长, 但 2 种甲藻对胶体磷的利用情况略有差异 (图 2). 在东海原甲藻的对照组, DIP 含量在前 4 d 迅速下降至 $1.25 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 第 5 天起下降速度减慢, 在第 8 天降至 $0.33 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 后基本稳定. 在胶体磷处理组, 东海原甲藻培养体系中 DOP 含量从第 2 天起开始显著下降, 第 4 天含量下降至低值 $0.45 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 之后稳定在 $0.40 \sim 0.60 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$

之间 (图 2a、c).

在链状亚历山大藻无机磷组中, DIP 含量以较为恒定的速度下降, 在第 8 天时含量下降至 $0.43 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$, 此后基本保持稳定. 在胶体磷处理组, 链状亚历山大藻培养体系中 DOP 从培养开始就迅速降低, 在第 5 天下降至 $0.45 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 的低值, 此后一直保持在较低水平 (图 2b、d).

2.3 培养体系中碱性磷酸酶活性变动

结果显示 2 种甲藻在利用胶体磷过程中均呈碱性磷酸酶活性上升, 并在培养前期显著高于对照组 (图 3).

东海原甲藻对照组 AP 活力呈逐渐升高的趋势, 培养结束时达 $0.20 \mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$; 胶体磷组 AP 活力从培养开始迅速升高, 在第 3 天达到最高值 $0.29 \mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$ 后逐渐降低, 后期保持在较稳定的高值. 前 7 d, 胶体磷组 AP 活力显著高于对照组 ($p < 0.05$) (图 3 a).

链状亚历山大藻对照组 AP 活力亦有随时间逐渐增加的趋势, 在第 5 天后达到高值, 第 7 天时达最高值 $0.19 \mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$. 胶体磷组 AP 活力在第 6 天达到最大值 $0.30 \mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$, 第 7 天起下降, 之后在 $0.20 \mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$ 附近波动, 在培养的前 6 d 内, 胶体磷组 AP 活力显著 ($p < 0.05$) 高于无机磷组 (图 3b).

3 讨论

3.1 胶体磷对 2 种甲藻生长的影响

胶体被认为是颗粒态与真溶解态之间的中间形态, 并可能在元素迁移过程中起到泵的作用, 在 DOP 的各种组分中, COP 对 DOP 的生物可利用性和循环途径起着重要的作用^[22].

从实验结果来看, 以胶体磷为磷源的东海原甲藻和链状亚历山大藻都能够进入生长期, 最终细胞密度都明显增加. 说明东海原甲藻和链状亚历山大藻在一定程度上可以利用胶体磷作为磷源, 因此自然海水中胶体磷对 2 种藻赤潮形成及维持过程中的作用不可忽视. 到实验结束时, 东海原甲藻培养体系中的 DOP 含量约为起始的 35%, 而在链状亚历山大藻培养体系中约为 37%. 2 种甲藻胶体磷组的 TDP 含量均高于各自无机磷组的 DIP, 这说明胶体磷中有一部分磷是藻类不能利用的. 这可能是因为胶体磷中存在的较大分子有机磷超出微藻的利用能力.

链状亚历山大藻胶体磷组 DOP 含量虽然在第 5 天达到较稳定的低值, 但其细胞的生长则是持续到第 10 天. 而且最大细胞密度与无机磷组之间不存在

显著差异. 说明胶体磷对链状亚历山大藻生长的促进作用与无机磷作用相当. 从东海原甲藻的生长来看, 在培养前 5 d 胶体磷组生长与无机磷组相比, 不存在显著差异, 说明此阶段东海原甲藻可以利用胶体磷维持生长, 从第 5 天起胶体磷组的细胞基本停止生长, 相应地 DOP 含量在第 4 天降到一个低值后基本不再变化, 无机磷组的细胞密度则是持续增长至第 8 天. 说明胶体磷对东海原甲藻生长的促进作

用要低于无机磷的作用. 胶体磷对 2 种藻的生长促进作用有所差别, 可能是因为藻种间对胶体磷利用能力的差异^[18-19]. 此外, 作者对威氏海链藻 (*Thalassiosira weissflogii*) 的初步研究结果显示, 胶体磷源培养下的细胞数较无机磷源对照组少, 而细胞磷含量较高, 因此推测本研究中的东海原甲藻可能存在类似的情况, 需进一步研究.

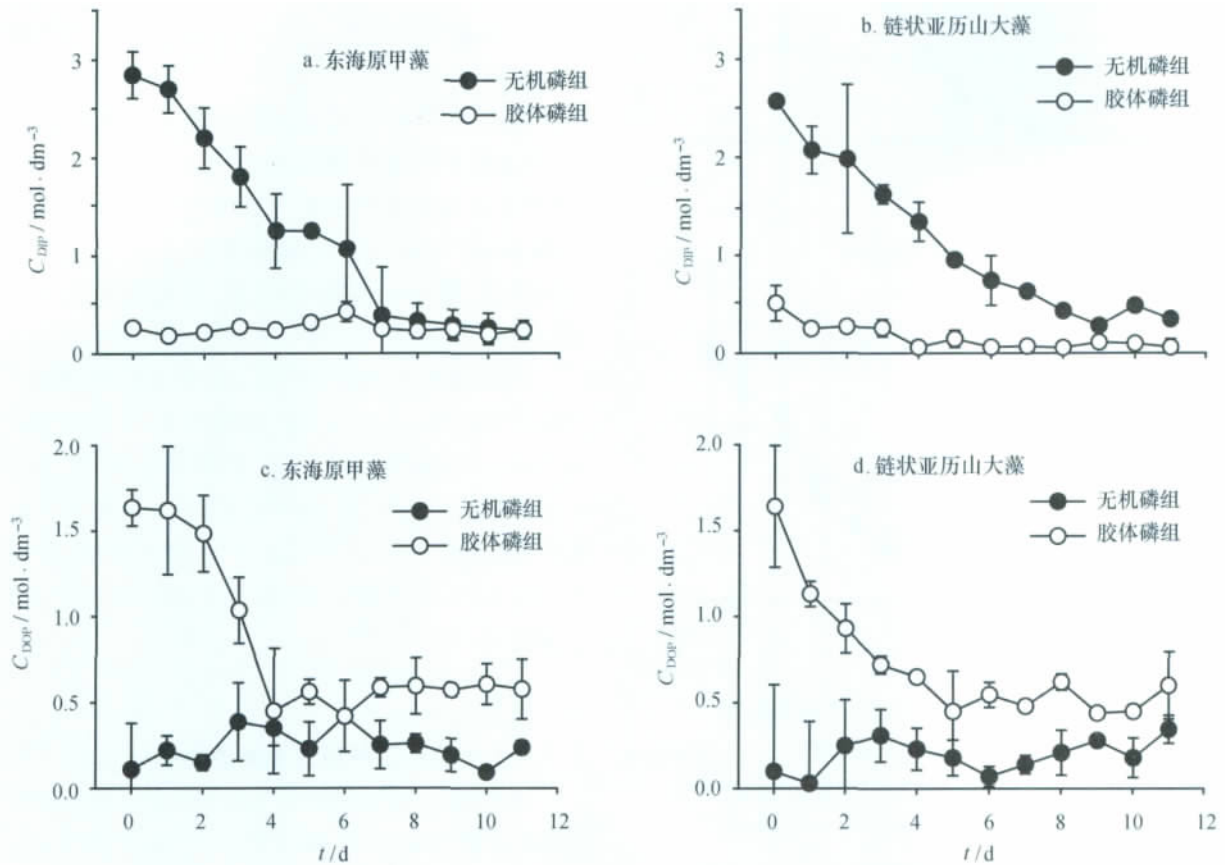


图 2 无机磷源与胶体磷源培养条件下东海原甲藻和链状亚历山大藻溶解无机磷 (DIP) 和溶解有机磷 (DOP) 浓度变化
Fig. 2 Concentration variations of dissolved inorganic and organic phosphorus of *Prorocentrum donghaiense* and *Alexandrium catenella* under KH_2PO_4 and colloidal phosphorus cultures

3.2 两种甲藻对胶体磷的利用机制

AP 活力的大小已被广泛应用于指示海区磷限制或胁迫状态^[23-25]. 在本实验中, 胶体磷组两种藻的 AP 活力均随时间逐渐升高, 达到各自的最大值后逐渐下降并稳定, 与之相应的是 DOP 含量的迅速降低. 在实验后期 DIP 含量非常低时, 无机磷组 2 种藻大量诱导产生碱性磷酸酶, AP 活力均上升至与胶体磷组相同的较高水平.

对于藻类吸收利用有机磷的机理, 黄邦钦等 (1999) 提出了藻细胞吸收利用有机磷的 2 种途径: 第一条是小分子的有机磷, 藻类对其的利用方式, 与对 DIP 一样, 能直接吸收利用; 第二条是对于较大分

子的有机磷, 则要经过碱性磷酸酶等水解后方可吸收利用^[26]. 胶体磷组东海原甲藻在初期 AP 活力就达到高值, 在同一时期 DOP 迅速减少, 表明东海原甲藻对胶体磷的吸收利用可能通过第二条途径, 胶体磷受到碱性磷酸酶作用, 迅速水解以供藻细胞生长. 胶体磷组链状亚历山大藻培养基中的 DOP 在接种后就迅速降低, 但其 AP 活力并没有立刻迅速升高, 第 3 天才达到高值, 此时的 DOP 含量已降至 1.0 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 以下, 在 AP 活力保持高值的同时, DOP 持续降低, 表明链状亚历山大藻对胶体磷的吸收利用可能是两条途径相结合, 在初期 AP 活力未达到高值的时候, 对胶体中的小分子磷采取直接吸收利

用的方式;待这部分小分子磷消耗完毕后,藻细胞诱导产生碱性磷酸酶,对剩余大分子磷通过第二条途径吸收利用。

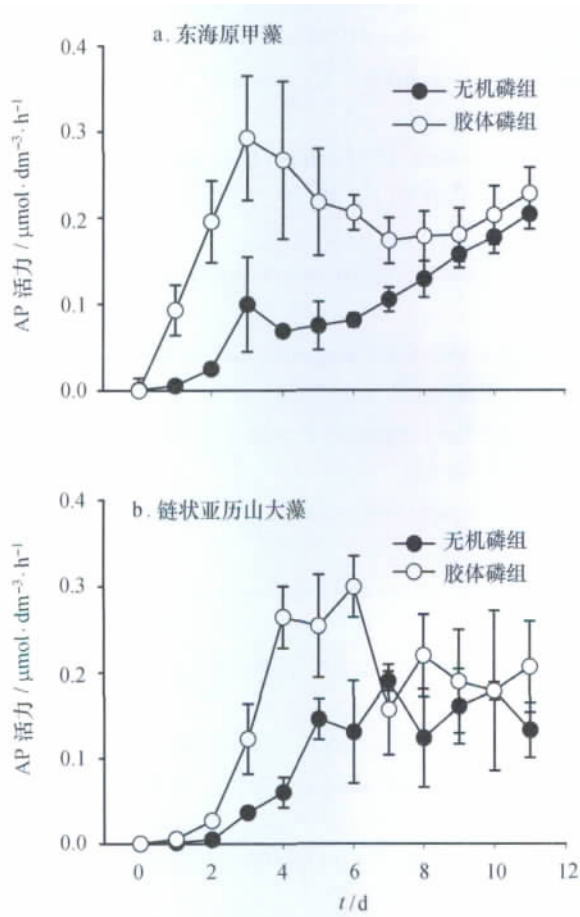


图3 无机磷源和胶体磷源下东海原甲藻和链状亚历山大藻的碱性磷酸酶(AP)活力变化

Fig.3 Alkaline phosphatase activity variations of *Prorocentrum donghaiense* and *Alexandrium catenella* under batch cultures with addition of KH_2PO_4 and colloidal phosphorus

海洋中的胶体有机磷主要由磷酸酯及磷酸酯组成,按磷含量计算,两者的含量比例约为3:1^[15,27]。其中,磷酸酯包含磷酸单酯及磷酸多酯。在有机磷的化合物中,碱性磷酸酶水解的对象主要为磷酸单酯。

参考文献:

- [1] 沈钟,王果庭. 胶体与表面化学[M]. 2. 北京: 化学工业出版社, 1997: 1-104.
- [2] Whitehouse B G, Yeats P A, Strain P M. Cross-flow filtration of colloids from aquatic environment [J]. *Limnol Oceanography*, 1990, 35 (6): 1 368.
- [3] Buesseler K O, Bauer J, Chen R, et al. An intercomparison of cross-flow filtration techniques used for sampling marine colloids: overview and organic carbon results [J]. *Marine Chemistry*, 1996, 55: 1.
- [4] Krom M D, Sholkvitz E R. Nature and reactions of dissolved organic matter in the interstitial water of marine sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, 41: 1 565-1 573.
- [5] Sigleo A C, Helz G R. Composition of estuarine colloidal material: major and trace components [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45: 2 501-2 509.
- [6] Orlandini A L. Colloidal behaviour of actinides in an oligotrophic lake [J]. *Environmental Science and Technology*, 1990, 24:

Suzumura 等人(1998)在日本东京湾的研究结果表明^[28],碱性磷酸酶可水解的磷酸单酯仅占胶体有机磷的约10%。这一结果远低于本文获得的结果,即约60%的胶体有机磷可被藻类利用。造成这一显著差异的可能原因是磷酸单酯之外的有机磷化合物,包括磷酸多酯、磷酸酯,甚至磷脂等也具有相当的生物可利用性,但是仅靠单一的碱性磷酸酶却无法将它们水解。

Suzumura 等(1998)的研究结果还表明在碱性磷酸酶及磷酸二酯酶同时存在的情况下,即磷酸二酯的多级水解发生的情况下,COP的水解度可增加至约35%^[28]。尽管这一结果已经大大提高了COP的生物可利用性,但仍然低于本研究的结果,间接说明仍有一部分有机磷化合物的生物可利用性可能通过这2种酶化学之外的过程表现出来。

此外,胶体有机磷被细菌利用以及光化学降解也可能提高胶体有机磷的生物可利用性。细菌倾向于优先利用核苷酸及磷酸酯等有机磷化合物^[14],在北太平洋 ALOHA 站的观测结果显示新鲜的有机磷(大部分为胶体有机磷)具有很强的细菌可利用性,其周转速率可短至1 d的时间尺度^[29]。尽管在实验开始进行了灭菌处理,但在后续培养过程中无法完全排除细菌生长的可能性,因此,实验过程中可能存在着细菌对胶体有机磷的利用及降解。而在同一站位的光降解试验表明高达66%的有机磷可以被紫外光所降解,尽管这一实验室结果可能高于天然海区的实际结果,但也证实有机磷的光降解特性是不容忽视的。本研究在培养过程中的光照因此完全有可能促进胶体有机磷的生物可利用性。

从另一方面考虑,其他因素,如培养系统中细菌等的作用也会影响AP活力和磷浓度变化。虽然在培养初期有添加抗生素,但是在整个实验过程中很难保持绝对无菌状态。这需要在未来进一步研究。

- 706-712.
- [7] Dai M H , Martin J M , Gauwet G. The significant role of colloids in transport and transformation of organic carbon and associated trace metals (Cd , Cu , Ni) in the Rhone delta(France) [J] . Marine Chemistry , 1995 , 51: 159-175.
- [8] Benner R , Bopaiah B , Black B , et al. Abundance , size distribution , and stable carbon and nitrogen compositions of marine organic matter isolated by tangential-flow ultrafiltration [J]. Marine Chemistry , 1997 , 57: 243-247.
- [9] Kuma K , Katsumoto A , Ishioka J N , et al . Size-fractionated iron concentrations and Fe(III) hydroxide solubilities in various coastal waters [J] . Estuarine Coastal and Shelf Science , 1998 , 47 (3) : 275-283.
- [10] Benitez-Nelson C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems [J]. Earth-Sci Rev , 2000 , 51: 109-135.
- [11] 黄邦钦,王海黎,洪华生,等. 厦门海域浮游植物和细菌对溶解有机磷的利用 [J]. 厦门大学学报:自然科学版 , 1996 , 35 (4) : 625-630.
- [12] Huang B Q , Hong H S. Alkaline phosphatase activity and utilization of dissolved organic phosphorus by algae in subtropical coastal waters [J]. Mar Pollut Bull , 1999 , 39: 205-211.
- [13] Huang B Q , Ou L J , Hong H S , et al . Bioavailability of dissolved organic phosphorus compounds to typical harmful dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* Lu [J] . Mar Pollut Bulletin , 2005 , 51: 838-844.
- [14] Björkman K M , Karl D M. Bioavailability of inorganic and organic phosphorus compounds to natural assemblages of microorganisms in Hawaiian coastal waters [J]. Mar Ecol Prog Ser , 1994 , 111: 265-273.
- [15] Kolowith L C , Ingall E D , Benner R. Composition and cycling of marine organic phosphorus [J]. Limnol Oceanogr , 2001 , 46: 309-320.
- [16] Cai Y H , Guo L D. Abundance and variation of colloidal organic phosphorus in riverine , estuarine , and coastal waters in the northern Gulf of Mexico [J]. Limnol Oceanogr , 2009 , 54 (4) : 1 393-1 402.
- [17] 赵新淮,张正斌,韩喜江. 海水胶体与 PO_4^{3-} 、 Cu^{2+} 的作用及对微藻生长的影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报 , 2002 , 34 (6) : 776-779.
- [18] 郑爱榕,陈敏,吕娥,等. 海洋胶体中氮、磷和铁对微藻生长的效应 [J]. 自然科学进展 , 2004 , 14 (3) : 339-343.
- [19] 赵卫红,崔鑫,王江涛,等. 赤潮水体中胶体物质对赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo*) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 生长的影响 [J]. 生态学报 , 2009 , 29 (2) : 573-580.
- [20] 王芳,朱广伟,许海,等. 太湖梅梁湾水体中胶体对铜绿微囊藻生长的促进效应 [J]. 中国环境科学 , 2009 , 29(5) : 538-542.
- [21] Hoppe H G. Significance of exoenzymatic activities in the ecology of brackish water: measurements by means of methylumbelliferyl-substrates [J]. Marine Ecology Progress Series , 1983 , 11: 299-308.
- [22] Hydesa D J , Gowenb R J , Hollida Y P , et al . External and internal control of winter concentrations of nutrients(N , P and Si) in northwest European shelf seas [J]. Estuarine , Coastal and Shelf Science , 2004 , 59: 151-161.
- [23] Pettersson B K. Alkaline phosphatase activity and algal surplus phosphorus as phosphorus-deficiency indicators in Lake Erken [J]. Arch Hydrobiol , 1980 , 89(1/2) : 54-87.
- [24] Annis E R , Cook C B. Alkaline phosphatase activity in symbiotic dinoflagellates (*zooxanthellae*) as a biological indicator of environmental phosphate exposure [J]. Marine Ecology Progress Series , 2002 , 245: 11-20.
- [25] Dignum M , Hoogveld H , Matthijs H C P , et al. Detecting the phosphate status of phytoplankton by enzyme-labelled fluorescence and flow cytometry [J] . FEMS Microbiol Ecol , 2004 , 48: 29-38.
- [26] 黄邦钦,黄世玉,翁妍,等. 溶解态磷在海洋微藻碱性磷酸酶活力变化中的调控作用 [J]. 海洋学报 , 1999 , 21 (1) : 55-60.
- [27] Sannigrahi P , Ingall E D , Benner R. Nature and dynamics of phosphorus-containing components of marine dissolved and particulate organic matter [J]. Geochimica et cosmochimica acta , 2006 , 70(23) : 5 868-5 882.
- [28] Suzumura M , Ishikawa K , Ogawa H. Characterization of dissolved organic phosphorus in coastal seawater using ultrafiltration and phosphohydrolytic enzymes [J]. Limnology and Oceanography , 1998 , 43: 1 553-1 564.
- [29] Björkman K M , Karl D M. Bioavailability of dissolved organic phosphorus in the euphotic zone at station ALOHA , North Pacific Subtropical Gyre [J]. Limnology and Oceanography , 2003 , 48(3) : 1 049-1 057.

Preliminary study on utilization of colloidal phosphorus in artificial seawater by two dinoflagellates

ZHOU Li-bin¹, LIN Liang-shi², LIU Xin¹, CAI Yi-hua², HUANG Bang-qin¹

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Coastal Ecology and Environmental Studies, College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. College of the Ocean and Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on batch culture, the bioavailability of colloidal phosphorus (CP) for *Prorocentrum donghaiense* and *Alexandrium catenella* was studied and the mechanism of dinoflagellate utilizing CP was preliminary discussed. The results showed that both species could utilize colloidal phosphorus for growth. For *P. donghaiense*, after 11 d, the cell densities of K_2HPO_4 and CP treatment were 10.53×10^7 and 3.43×10^7 cells/dm³, respectively. For *A. catenella*, after 11 days, the cell densities of K_2HPO_4 and CP treatment were 39.0×10^5 and 28.3×10^5 cells/dm³, respectively. The growth rate of *P. donghaiense* in CP was significantly lower than that in K_2HPO_4 ; while there is no significant difference between the effects of K_2HPO_4 and CP for *A. catenella*'s growth. In CP treatment, the concentrations of alkaline phosphatase activity of *P. donghaiense* and *A. catenella* raised rapidly and got the highest values of 0.29 and 0.30 $\mu\text{mol}/(\text{dm}^3 \cdot \text{h})$, respectively, both significantly higher than those in K_2HPO_4 treatment during early stage. Preliminary data showed that these 2 dinoflagellates could utilize CP via the induction of alkaline phosphatase.

Key words: marine biology; colloidal phosphorus; *Prorocentrum donghaiense*; *Alexandrium catenella*; alkaline phosphatase

DOI: 10.3969/J. ISSN. 2095-4972. 2013. 01. 013

(责任编辑: 杜俊民)