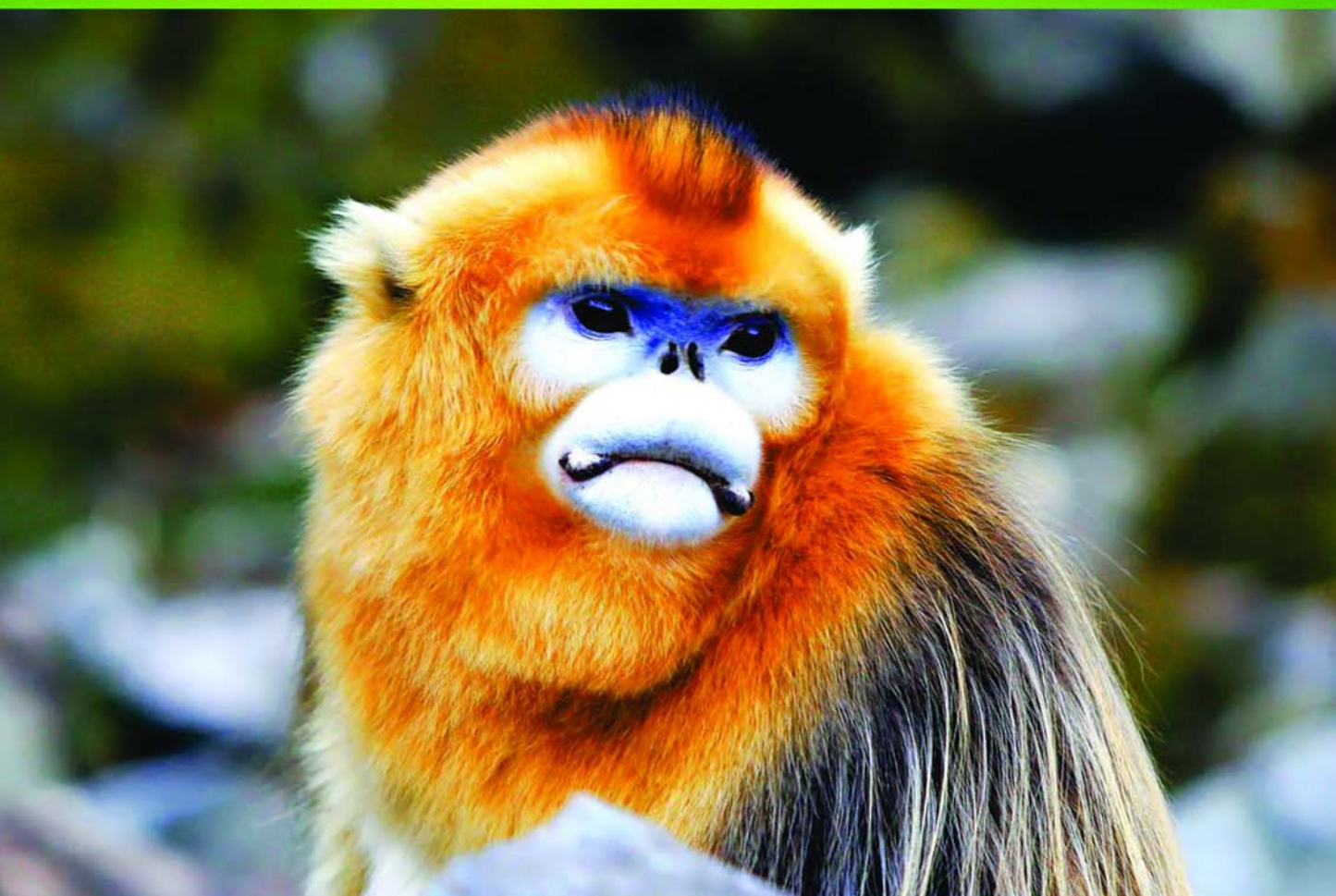


ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

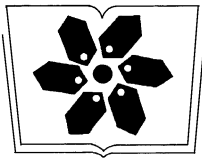
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第2期 Vol.32 No.2 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 2 期

2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

北部湾秋季底层鱼类多样性和优势种数量的变动趋势	王雪辉,邱永松,杜飞雁,等 (333)
中国大陆鸟类和兽类物种多样性的空间变异	丁晶晶,刘定震,李春旺,等 (343)
粉蝶盘绒茧蜂中国和荷兰种群学习行为及 EAG 反应的比较	王国红,刘 勇,戈 峰,等 (351)
君主绢蝶的生物学及生境需求	方健惠,骆有庆,牛 犇,等 (361)
西南大西洋阿根廷滑柔鱼生物学年间比较	方 舟,陆化杰,陈新军,等 (371)
城市溪流中径流式低坝对底栖动物群落结构的影响	韩鸣花,海燕,周 斌,等 (380)
沉积再悬浮颗粒物对马氏珠母贝摄食生理影响的室内模拟	栗志民,申玉春,余南涛,等 (386)
太平洋中西部海域浮游植物营养盐的潜在限制	徐燕青,陈建芳,高生泉,等 (394)
几株赤潮甲藻的摄食能力	张清春,于仁成,宋静静,等 (402)
高摄食压力下球形棕囊藻凝聚体的形成	王小冬,王 艳 (414)
大型绿藻浒苔藻段及组织块的生长和发育特征	张必新,王建柱,王乙富,等 (421)
链状亚历山大藻生长衰亡相关基因的筛选	仲 洁,隋正红,王春燕,等 (431)
太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响	刘忠华,李云梅,吕 恒,等 (438)
程海富营养化机理的神经网络模拟及响应情景分析	邹 锐,董云仙,张祯祯,等 (448)
沙质海岸灌化黑松对蛀食胁迫的补偿性响应	周 振,李传荣,许景伟,等 (457)
泽陆蛙和饰纹蛙蝌蚪不同热驯化下选择体温和热耐受性	施林强,赵丽华,马小浩,等 (465)
麦蚜和寄生蜂对农业景观格局的响应及其关键景观因子分析	赵紫华,王 颖,贺达汉,等 (472)
镉胁迫对芥蓝根系质膜过氧化及 ATPase 活性的影响	郑爱珍 (483)
生姜水浸液对生姜幼苗根际土壤酶活性、微生物群落结构及土壤养分的影响	韩春梅,李春龙,叶少平,等 (489)
九州虫草菌丝体对 Mn 的耐性及富集	罗 毅,程显好,张聪聪,等 (499)
土霉素暴露对小麦根际抗生素抗性细菌及土壤酶活性的影响	张 昊,张利兰,王 佳,等 (508)
氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响	沈芳芳,袁颖红,樊后保,等 (517)
火炬树雌雄母株克隆生长差异及其光合荧光日变化	张明如,温国胜,张 瑾,等 (528)
湖南乌云界自然保护区典型生态系统的土壤持水性能	潘春翔,李裕元,彭 亿,等 (538)
祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响	赵锦梅,张德罡,刘长仲,等 (548)
沙质草地生境中大型土壤动物对土地沙漠化的响应	刘任涛,赵哈林 (557)
腾格里沙漠东南缘可培养微生物群落数量与结构特征	张 威,章高森,刘光琇,等 (567)
塔克拉玛干沙漠南缘玉米对不同荒漠化环境的生理生态响应	李 磊,李向义,林丽莎,等 (578)
内蒙古锡林河流域羊草草原 15 种植物热值特征	高 凯,谢中兵,徐苏铁,等 (588)
不同密度条件下芨芨草空间格局对环境胁迫的响应	张明娟,刘茂松,徐 驰,等 (595)
环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响	任学敏,杨改河,王得祥,等 (605)
海藻酸铈配合物对毒死蜱胁迫下菠菜叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响	栾 霞,陈振德,汪东风,等 (614)
城市化进程中城市热岛景观格局演变的时空特征——以厦门市为例	黄聚聪,赵小锋,唐立娜,等 (622)
基于遥感和 GIS 的川西绿被时空变化研究	杨存建,赵梓健,任小兰,等 (632)
亚热带城乡复合系统 BVOC 排放清单——以台州地区为例	常 杰,任 远,史 琰,等 (641)
研究简报	
不同水分条件下毛茛苔草枯落物分解及营养动态	侯翠翠,宋长春,李英臣,等 (650)
大山雀对巢箱颜色的识别和繁殖功效	张克勤,邓秋香,Justin Liu,等 (659)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 330 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-01	



封面图说: 雄视——中国的金丝猴有川、黔、滇金丝猴三种,此外还有越南和缅甸金丝猴两种。金丝猴是典型的森林树栖动物,常年栖居于海拔 1500—3300m 的亚热带山地、亚高山针叶林、针阔叶混交林,常绿落叶阔叶混交林中,随着季节的变化,只在栖息的生境中作垂直移动。川金丝猴身上长着柔软金色长毛,十分漂亮。个体大,嘴角处有瘤状突起的是雄性金丝猴的特征。川金丝猴只分布在中国的四川、甘肃、陕西和湖北省。属国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201012141778

徐燕青, 陈建芳, 高生泉, 王奎, 金海燕, 李宏亮, 曾淦宁. 太平洋中西部海域浮游植物营养盐的潜在限制. 生态学报, 2012, 32(2): 0394-0401.
Xu Y Q, Chen J F, Gao S Q, Wang K, Jin H Y, Li H L, Zeng G N. Potential nutrient limitation of phytoplankton growth in the Western and Central Pacific Ocean. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 0394-0401.

太平洋中西部海域浮游植物营养盐的潜在限制

徐燕青^{1,2}, 陈建芳^{1,*}, 高生泉¹, 王奎¹, 金海燕¹, 李洪亮¹, 曾淦宁²

(1. 国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 杭州 310012;

2. 浙江工业大学 化学工程与材料学院 海洋系, 杭州 310014)

摘要: 2009 年 8 月至 9 月期间在太平洋西部 N1 站和中部 N2 站进行现场营养盐加富培养实验。结果显示: N1 站, 浮游植物生物量对 N 或者 P 添加都有较强的响应, 其中 N+P+Si 组和 N+P 组浮游植物长势迅速, 叶绿素 a 从初始的 0.03 $\mu\text{g/L}$ 分别达到 2.12 $\mu\text{g/L}$ 和 1.83 $\mu\text{g/L}$, 同时 P 先于 N 和 Si 之前被耗尽; 说明 N1 站为 N、P 共同限制, P 是首要限制因子。而 N2 站, 浮游植物生物量仅对 N、P 共同添加有明显响应, N 先于 P 和 Si 被浮游植物消耗殆尽。利用培养过程中营养盐比值变化推断, N1 站浮游植物以低于 Redfield ratio (16N:1P) 吸收 N 和 P; 而 N2 站浮游植物以高于 Redfield ratio (16N:1P) 吸收 N 和 P。这可能解释了太平洋西部的寡营养盐海域为潜在 P 限制, 而在太平洋中部海域则为潜在 N 限制。

关键词: 现场培养; 营养限制; 浮游植物; 太平洋

Potential nutrient limitation of phytoplankton growth in the Western and Central Pacific Ocean

XU Yanqing^{1,2}, CHEN Jianfang^{1,*}, GAO Shengquan¹, WANG Kui¹, JIN Haiyan¹, LI Hongliang¹, ZENG Ganning²

1 Second Institute of Oceanography, SOA, Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou 310012, China

2 Department of Oceanography, College of Chemical Engineering and Materials Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China

Abstract: An increase in N_2 fixation by diazotrophic organism due to increased stratification driven by climate changes, may decrease phosphate concentrations and result in P limitation in the oligotrophic upper ocean, which challenges the traditional view that nitrogen is generally the primary nutrient limiting phytoplankton productivity in oceanic waters. Which nutrient, N or P, is the most limiting nutrient for phytoplankton growth in the oligotrophic Pacific Ocean has been on debate over recent years. More studies on nutrient limitation are apparently needed to resolve this debate in the Pacific Ocean. In August and September of 2009, nutrient enrichment bioassays were conducted at two representative stations, N1 (160.58° E, 21.61° N) in the western Pacific Ocean with extremely low nutrient (below detect limit) and Chl a concentrations, and N2 (154.12° W, 10.12° N) in the eastern Pacific Ocean with shallower nutricline due to the influence of equatorial currents, in order to examine the spatial variability in the potential limiting nutrient for phytoplankton growth in the Pacific Ocean. Nutrients were added in 5 combinations in bioassays: control (no addition), $\text{NO}_3 + \text{PO}_4$ (N+P), $\text{NO}_3 + \text{SiO}_4$ (N+Si), $\text{PO}_4 + \text{SiO}_4$ (P+Si), and $\text{NO}_3 + \text{PO}_4 + \text{SiO}_4$ (N+P+Si). The limiting nutrient was judged based on the response of algal biomass and nutrient depletion among treatments. Phytoplankton exhibited different response to nutrient additions at two study sites. Phytoplankton biomass increased dramatically in response to both N and P additions at station N1 where the

基金项目: 国际海底区域研究开发“十一五”项目 (No. DYXM-115-01-3-3); 国家自然科学基金项目 (40676044); 中国博士后基金 (20110491829)

收稿日期: 2010-12-14; **修订日期:** 2011-06-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: biogeo_chen@hotmail.com

concentrations of Chl *a* increased from 0.03 $\mu\text{g/L}$ at the beginning to 2.12 $\mu\text{g/L}$ and 1.83 $\mu\text{g/L}$ in N+P+Si and N+P treatments at the end of incubation, respectively. However, the maximum Chl *a* concentration achieved in N+Si treatment was slight higher than that in and P+Si treatment. Furthermore, P was depleted before N and Si in the N+P and N+P+Si treatments at station N1. In contrast, algal biomass was significantly stimulated only when both N and P were added at station N2, where the concentrations of Chl *a* increased profoundly from 0.10 $\mu\text{g/L}$ to 0.34 $\mu\text{g/L}$ and 0.40 $\mu\text{g/L}$ at the end in N+P+Si and N+P treatments, respectively, while they was not stimulated in the N+Si and P+Si treatments. Furthermore, N always disappeared before P and Si in N+P, N+Si and N+P+Si treatments. These results showed that the limiting nutrient varied spatially during summer in the Pacific Ocean. N and P co-limitation occurred at both stations, with P being the primary limiting nutrient at N1 and N at N2. In addition, changes in the N:P ratios during the incubation demonstrated distinct patterns, likely due to difference in the phytoplankton composition. N:P ratios rose from 15.7 at the beginning to 59.2 at the end of the incubation at N1, while N:P ratios decreased from 15.3 to 0.06 at N2. This implied that the uptake ratio of N:P was lower than the Redfield ratio (16N:1P) at N1, but higher than the Redfield ratio at N2. This might explain why P was the primary limiting nutrient in the western Pacific Ocean but N in the central Pacific Ocean. It is speculated that P limitation possibly is associated with N_2 fixation in the oligotrophic western Pacific Ocean.

Key Words: nutrient enrichment experiment; nutrient limitation; phytoplankton; Pacific Ocean

浮游植物是海洋中的主要初级生产者,其光合作用的制约因素是光、温度与营养元素。由水平环流、上升流及河流、大气边界输入等过程控制的真光层营养盐的供应与比例,不仅决定着海区的初级生产力,而且也决定了海洋浮游植物群落的粒径、组成与结构。对海洋 N 限制还是 P 限制的争议由来已久,海洋生物学家和海洋化学家都对此有过深入的讨论^[1-5]。而目前最新研究表明不同海域,营养限制情况是不同的。如 Karl^[6]认为北太平洋亚热带的生态系统经历了由 N 限制转变为有效 P 控制的过程,Wu 等^[7]发现在北大西洋海域 P 被大量耗尽而造成的初级生产力受限,Hiroaki^[8]认为在亚北极 HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) 地区存在着 Si 的潜在限制。

现场营养盐加富的培养实验已广泛应用于海洋浮游植物的营养限制研究,其优点为贴近自然,直观明显,操作性强等。近年来各地实验的研究成果表明:全球海洋主要以 N 限制为主,特别是水交换较好的大洋,如张武昌等^[9]在培养过程中发现白令海峡潜在的 NO_3^{2-} 限制,以及中印度洋海区、东澳大利亚流海域及波罗的海也存在明显 N 限制^[10-13];在沿岸和较封闭海域易发生 P 限制,如邹立等^[14]报道渤海南部的浮游植物 P 限制,以及东海海区 P 限制^[15-16],Zohary^[17]报道的地中海 P 限制等;而在咸淡水交界的河口地带较易出现几种营养盐的同时或交替限制,如蒲新明、赵卫红在长江口附近海域春、秋季培养实验得到 N、P 共同限制^[18-19]。此外法国的 Brest 湾则是 Si 限制^[20]。

北太平洋亚热带环流区 (NPSG) 因其远离大陆而较少被认识。Karl 在 HOTs 站点的长期观测发现 NPSG 生态系统出现 P 限制的发展趋势,Solange^[21]在 ALOHA 站 (22°45'N, 158°W) 培养实验也发现该地区的浮游植物对 P 响应明显。依托大洋第 21 次科学考察,在太平洋亚热带海区分别选择较为代表性的站位进行培养实验,借此了解北太平洋亚热带环流区表层浮游植物的营养盐限制情况。

1 实验方法

1.1 现场培养方法

现场表层采样分别于 2009 年 8 月 13 日、9 月 20 日在“大洋一号”船进行。按培养所需体积分别在站位 N1 和 N2 (分别为 160.58°E, 21.61°N 和 154.12°W, 10.12°N) 采集表层水,如图 1。其测站环境参数见表 1。站位 N1 具有北太平洋亚热带西部的典型特征,表层 N、P 含量极低,生物量少,属于寡营养盐海域;站位 N2 主要受北赤道流影响,表层营养盐含量较低,营养盐跃层较 N1 站浅。

取表层海水通过 200 μm 筛网滤去大型浮游动物,分装于 10 个预先用 10% HCl 浸泡并清洗干净的 3.8 L

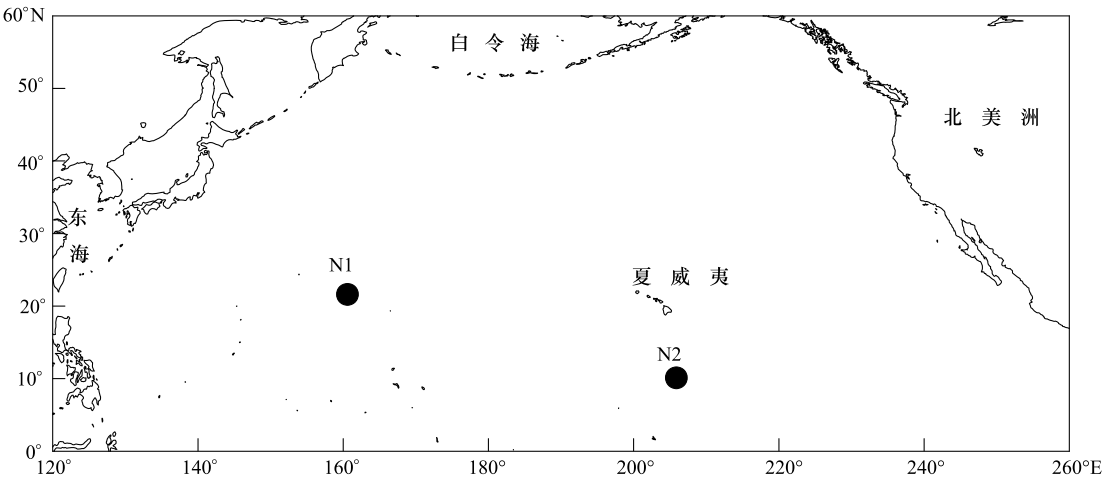


图1 采样站位
Fig. 1 Map of sampling stations

透明塑料培养瓶中,分别为对照组、N+P 组、N+Si 组、P+Si 组和 N+P+Si 组,每组平行双样。按一定组合分别添加硝酸盐(NO_3^-)、磷酸盐(PO_4^{3-})和硅酸盐(SiO_3^{2-})溶液(表2)。盖住瓶口将10个培养瓶置于甲板上的具有流动海水温控系统的培养槽内。培养箱外层贴有Largo Blue膜,避免光照强度过大^[22-23]。为保持培养介质中空气溶解量和防止生物聚集,每日早晚摇晃瓶各1次。

表1 培养站位的营养盐浓度
Table 1 The ambient concentrations of nutrients at sampling stations

站位 Stations	Chl a /($\mu\text{g/L}$)	PO_4^{3-} / /($\mu\text{mol/L}$)	DIN /($\mu\text{mol/L}$)	SiO_3^{2-} / /($\mu\text{mol/L}$)	DIN:P	Si:DIN	Si:P
N1	0.03	<0.02	<0.05	5.83	—	>116.6	>291.5
N2	0.10	0.14	0.06	6.47	0.6	107.8	46.2

N1 站的 PO_4^{3-} 和 DIN 低于检测限,N:P 无数据

表2 营养盐添加组合
Table 2 Five treatments of nutrient enrichment bioassays

试验组类型 Treatments	对照组 Control	N+P 组 N+P	N+Si 组 N+Si	P+Si 组 P+Si	N+P+Si 组 N+P+Si
$\text{NO}_3\text{-N}$ /($\mu\text{mol/L}$)	—	15.0	15.0	—	15.0
$\text{PO}_4\text{-P}$ /($\mu\text{mol/L}$)	—	1.0	—	1.0	1.0
$\text{SiO}_3\text{-Si}$ /($\mu\text{mol/L}$)	—	—	10.0	10.0	10.0

1.2 取样与测定

采样前将培养瓶中海水充分摇匀,每天或隔天取300 mL培养液,用GF/F玻璃纤维滤膜进行过滤,过滤物用于测定叶绿素,滤液用于测定五项营养盐。营养盐和叶绿素a生物化学参数的测定参照《海洋调查规范》(GB12763—2007)^[24],即 $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用锌-镉还原偶氮法, $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用重氮-偶氮法, $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用靛酚蓝法。溶解无机氮(DIN)为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度之和。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 采用磷钼蓝法, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 采用硅钼蓝法。叶绿素a测定采用萃取荧光法。

2 结果与讨论

2.1 培养过程中叶绿素a的变化

图2给出了N1、N2站位培养实验中叶绿素a的变化曲线。N1站叶绿素a初始浓度低,为0.03 $\mu\text{g/L}$,培养的前4d各组叶绿素a浓度变化不大,从第5天开始各组叶绿素a浓度发生明显变化。表现为:N+P组和N

+P+Si 组叶绿素 a 浓度快速上升,第 12 天到达最高值(分别为 1.83, 2.12 $\mu\text{g/L}$),其后又开始下降(第 14 天);而 N+Si 组和 P+Si 组的叶绿素 a 浓度在第 7 天出现峰值(0.99, 0.90 $\mu\text{g/L}$);对照组浓度一直维持在较低水平,变化较小(0.11 ± 0.099) $\mu\text{g/L}$)。从培养实验结果表明 N 或者 P 的添加对浮游植物的生长都有很大的促进作用,说明 N、P 共同限制。N2 站叶绿素 a 起始浓度比 N1 站略高(0.10 $\mu\text{g/L}$),营养盐添加培养的第 2 天开始各组叶绿素浓度出现不同变化。N+P 组和 N+P+Si 组随着培养的进行,其浓度不断升高,至第 8 天叶绿素 a 浓度分别为 0.34, 0.40 $\mu\text{g/L}$;而对照组、N+Si 组和 P+Si 组的叶绿素 a 浓度却有随着培养时间增加基本没有增加,有时甚至呈缓慢下降趋势,最终浓度分别为 0.05、0.07、0.05 $\mu\text{g/L}$ 。从叶绿素 a 浓度变化显示同时添加 N、P,可促进浮游植物生长繁殖,而 Si 添加对浮游植物生长基本无影响,说明 N、P 共同限制。尽管添加了相同量的 N 和 P,N2 站叶绿素 a 的峰值比 N1 站要低的多,这可能与 2 个海域不同的浮游植物种群结构有关。N1 站位于西太平洋亚热带环流区,其表层浮游植物有甲藻、硅藻、原绿球藻等,而位于中太平洋的 N2 站包含有甲藻、硅藻低、丰度的原绿球藻和高丰度的 AAPB(aerobic anoxygenic phototrophic bacteria)等浮游植物^[25]。此外,摄食压力的不同也会造成最终浮游植物生物量的不同。

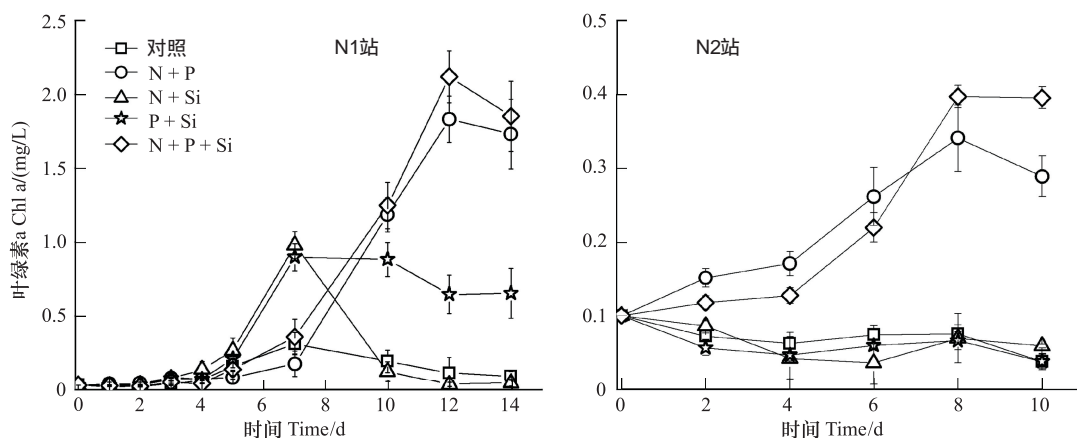


图2 培养期间叶绿素 a 的变化

Fig. 2 Variations in chlorophyll a concentrations in five treatments during incubation period at station N1 and station N2

2.2 培养过程中营养盐的变化

由图 3、图 4 可见,培养过程中 DIN 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度变化与叶绿素 a 的浓度变化基本呈相反的趋势。即叶绿素 a 浓度升高时,营养盐浓度随之降低。另外对照组的营养盐含量接近检测限($\text{DIN} < 0.05$ $\mu\text{mol/L}$, $\text{PO}_4\text{-P} < 0.02$ $\mu\text{mol/L}$),并在培养过程中各参数均无明显变化,故不在图中列出。

在 N1 站,N+P+Si 组中 3 种营养盐均有明显的消耗下降,其中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 从初始 0.99 $\mu\text{mol/L}$ 于第 7 天几乎消耗殆尽, DIN 从初始的 15.5 $\mu\text{mol/L}$ 消耗至 0.89 $\mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 从 15.0 $\mu\text{mol/L}$ 降低至 6.32 $\mu\text{mol/L}$ 。表明 N、P、Si 被浮游植物快速消耗,叶绿素 a 相对应迅速增高。在 N+P 组中 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度至第 10 天几乎耗尽, DIN 被消耗至 0.87 $\mu\text{mol/L}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 从 5.82 $\mu\text{mol/L}$ 降低至 2.91 $\mu\text{mol/L}$,叶绿素 a 浓度也相应升至 1.83 $\mu\text{g/L}$ 。N+Si 组中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量有所降低,而 DIN 反而略有增高,叶绿素 a 在前 7 d 略有上升,但其后时间又迅速降低。P+Si 组的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 部分被吸收,且 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度有一定的上下浮动。从 N+P 组和 N+P+Si 组 N、P 消耗速度不同之处在于 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的加入能加快浮游植物对营养盐的吸收。而 N+Si 和 P+Si 组的营养盐只有部分被浮游植物所吸收,即 P 或 N 的缺少都限制了另外两种营养盐的吸收利用。从各组的营养盐变化情况说明该区域表层浮游植物对营养元素添加有明显的响应,但因添加营养盐种类不同,其响应情况也不同:其中对 P 的响应更为明显,而对 Si 的响应相对较小。在同时加入 N 和 P 的组合中(如 N+P 组、N+P+Si 组),P 总是先于 N 被消耗完,显示 P 是首要的限制因子。

在 N2 站中,除 P+Si 组无 N 添加外,其余 3 组的 DIN 浓度均持续减少至几乎消耗殆尽。表明该区域浮游

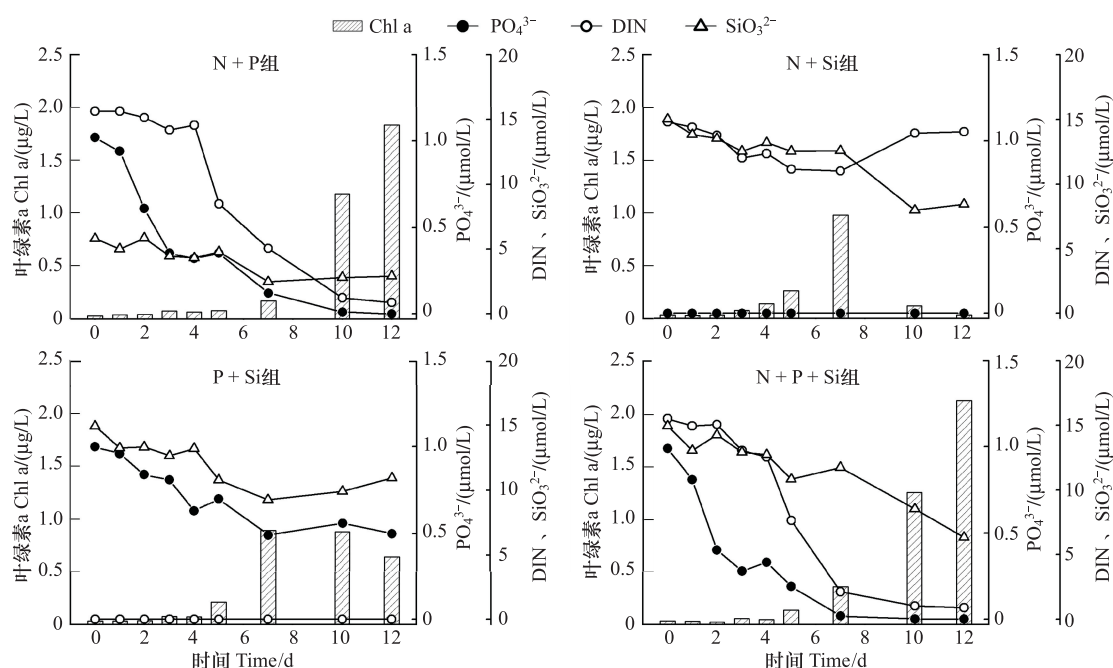


图3 N1站培养期间营养盐浓度变化

Fig. 3 Changes in nutrient concentrations in four treatments during incubation period at station N1

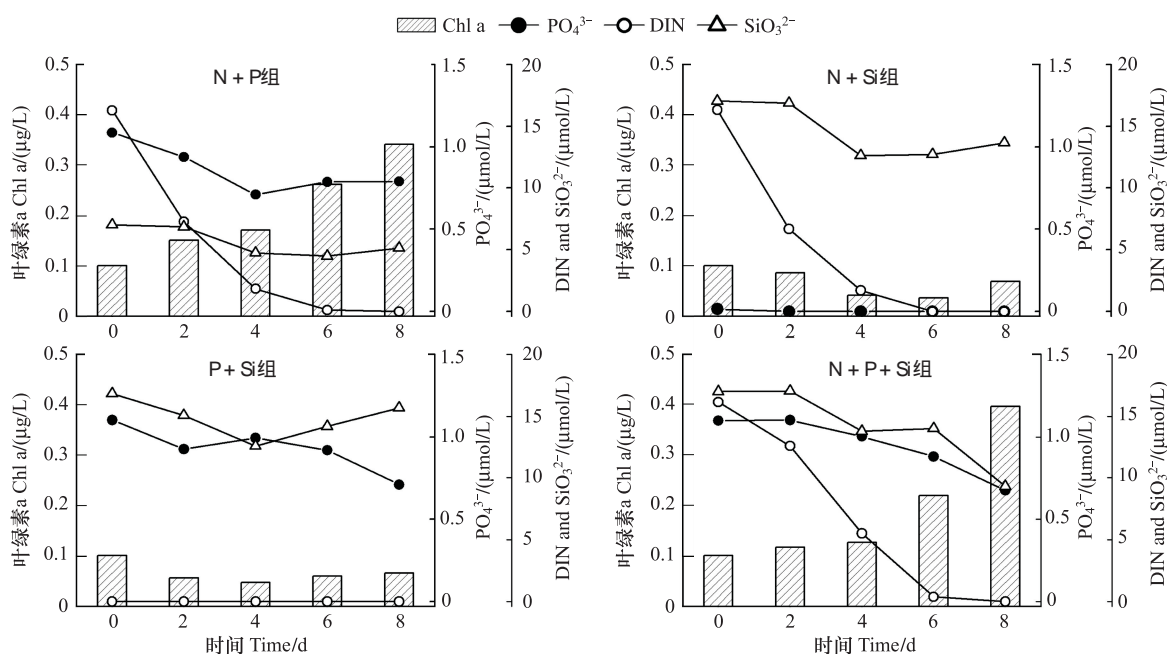


图4 N2站培养期间营养盐浓度变化

Fig. 4 Changes in nutrient concentrations in four treatments during the incubation at station N2

植物对 N 需求很大。而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度变化相对较小,表明只有部分 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 被浮游植物吸收利用。其中 N+P 组和 N+P+Si 组的 P、Si 部分被吸收,而 N+Si 和 P+Si 组的 P、Si 则较少被生物利用。比较这 4 组的培养情况可以发现该区域表层浮游植物在添加营养元素的条件下只有 N+P+Si 组和 N+P 组表现响应,而另两组的添加对浮游植物无促进作用。再比较各组的营养盐浓度的变化可见,该区域的浮游植物对 N 的需求较大,而对 Si、P 的相对较小。在 N+P 组和 N+P+Si 组, N 总是先于 P 被消耗完,说明 N 是首要的限制营

养盐。

2.3 营养盐比值变化

海水中适宜的 N:P、N:Si 和 Si:P 值有利于浮游植物的生长和繁殖,反之,其中某种营养元素的缺乏将限制生物的生长和繁殖。Redfield^[26]指出,海水中平均氮磷原子比为 15:1,浮游植物生长时氮和磷以 15:1 的比例被消耗掉,而实验室分析浮游植物组成的氮磷比平均为 16:1。因此,结合表 1 添加 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$,并观察培养期间 N:P、N:Si 和 Si:P 比值的变化情况,进而直观判断浮游植物对营养盐的吸收利用情况。

随着培养进行,各组的营养盐结构发生了不同的变化(图 5)。N1 站,同时添加 N 和 P 的组合里,如 N+P 组和 N+P+Si 组,初始的 N:P 比值接近 16:1,随着培养时间的推移,P 被最先消耗。10 d 后, $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量已低于检测限($<0.02 \mu\text{mol/L}$),此时它们的 N:P 值分别 >62.0 和 >52.1 ,远超过 Redfield 比值(15—16),而在 N+P+Si 组中, Si:P 值高达 426。由此我们推测 N1 站的浮游植物以小于 Redfield ratio (N:P=16:1) 的比率吸收 N 和 P;导致 P 在 N 和 Si 之前耗尽,形成 P 限制。在 N+Si 组和 P+Si 组的 N:Si 值和 Si:P 值都略有升高,但总体而言变化较小。

N2 站的营养盐比值变化与 N1 站有显著差异。N2 站,同时添加 N 和 P 的组合里,如 N+P 组和 N+P+Si 组,初始的 N:P 也比值接近 16:1,随着培养时间的推移,第 8 天 N 已被消耗至低于检测限(<0.05),N+P 组和 N+P+Si 组的 N:P 值分别为 <0.06 和 <0.07 ,大大低于 Redfield 比值。同时 N+Si 组和 N+P+Si 组的 N:Si 值分别为 <0.003 和 <0.005 。此外在第 8 天 P+Si 组的 Si:P 值为 22.1。由此可见在 N2 站,浮游植物以大于 Redfield ratio 吸收 N 和 P,N 在 P 和 Si 之前耗尽,形成 N 限制。

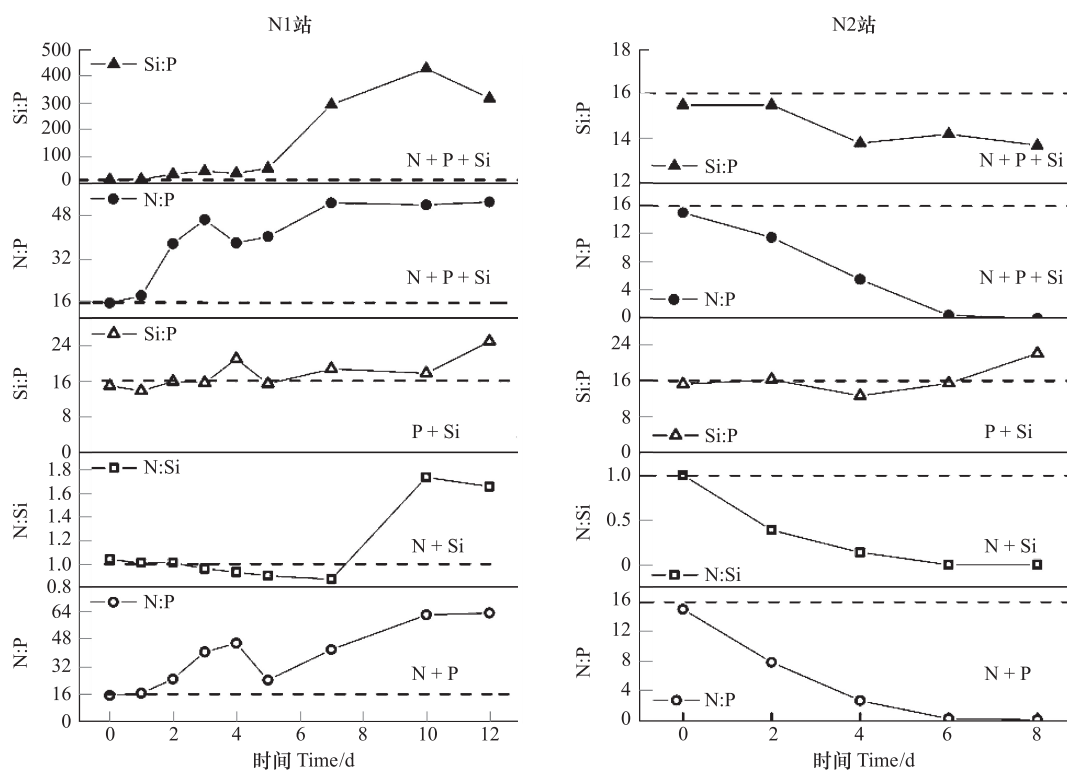


图 5 营养盐比例随时间的变化情况

Fig. 5 Variations in nutrient ratios during incubation period

作为寡营养盐海域的 N1 站,表层浮游植物对 P 有较明显的响应。西太平洋在无大规模的的营养物质的输入情况下,可能存在较强固氮作用^[27-29],造成了 P 的相对减少,这与 HOTs 站点的生态系统从 N 限制转为 P 限制有相似之处^[6]。而受到北赤道流影响的 N2 站表层浮游植物表现为对 N 的大量需求,初步判断在北太平洋中部存在 N 的潜在限制,这与北赤道流和较浅的营养盐跃层有着直接的关系。西太和中太 Si 元素含量差

异不大,在培养实验中并无 Si 的强烈需求或响应,说明硅藻在浮游植物所占的比重不高,也可能是亚南极高浓度 Si 对这两个区域有着一定的影响^[30-32]。但也有研究表明在 180°W,从 8°S 到 8°N 区域环境中的硅酸盐浓度对生物硅的生产限制^[32],有待进一步深入研究。太平洋西部和中部培养实验有显著的差异,其中 N1 站的浮游植物对营养盐的响应远高于 N2 站,即 N2 站叶绿素 a 的培养高值明显低于 N1 站,此外 N1 站的 P 潜在限制也不同于 N2 站的 N 的潜在限制。造成二者差异的主要原因是不同海域环境中的浮游植物群落的差异性,从而表现出对营养盐添加的不同吸收和响应。

3 结论

运用了营养盐加富实验,从生物量响应,营养盐消耗以及营养盐吸收比率的角度,分析了太平洋海域表层浮游植物的营养盐限制情况。实验显示:N1 站浮游植物对 N 或者 P 的添加都有较强相应,在添加 N 或者 P 的组合里,叶绿素增加 10 倍或者更多,然而在这组合中 P 先于 N 和 Si 之前被耗尽,显示 N1 站浮游植物受 N 和 P 共同限制,但是 P 为首要限制因子。这可能是因为那里的浮游植物以低于 Redfield ratio (16N:1P)吸收 N 和 P 有关。而 N2 站,浮游植物仅对 N 和 P 同时添加有较强相应,叶绿素增加了 3—4 倍。而且这些组合中 N 几乎被浮游植物消耗殆尽。说明 N2 站为 N 和 P 共同限制,N 为首要限制因子。这可能与那里的浮游植物以高于 Redfield ratio (16N:1P)吸收 N 和 P 有关。结果表明太平洋西部的寡营养盐海域表层的浮游植物主要受到 P 的潜在限制,而太平洋中部海域表层则主要受到 N 的潜在限制。

致谢:国家海洋局第二海洋研究所的高晓辉、赵军和厦门大学孙佳、童金炉以及大洋一号船员在实验期间给与帮助,特此致谢。

References:

- [1] Ryther J H, Dunstan W M. Nitrogen, phosphorus, and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 1971, 171 (3975): 1008-1013.
- [2] Codispoti L A. Phosphorus vs nitrogen limitation of new and export production//Berger W H, Smetacek V S, Wefer G, eds. *Productivity of the Ocean: Present and Past*. New York: John Wiley and Sons, 1989: 377-394.
- [3] Codispoti L A. Is the ocean losing nitrate?. *Nature*, 1995, 376(6543): 724.
- [4] Falkowski P G. Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean. *Nature*, 1997, 387(6630): 272-275.
- [5] Tyrrell T. The relative influences of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production. *Nature*, 1999, 400(6744): 525-531.
- [6] Karl D M, Björkman K M, Dore J E, Fujieki L, Hebel D V, Houlihan T, Letelier R M, Tupas L M. Ecological nitrogen-to-phosphorus stoichiometry at station ALOHA. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(8/9): 1529-1566.
- [7] Wu J F, Sunda W, Boyle E A, Karl D M. Phosphate depletion in the western North Atlantic Ocean. *Science*, 2000, 289(5480): 759-762.
- [8] Saito H, Tsuda A, Nojiri Y, Nishioka J, Takeda S, Kiyosawa H, Kudo I, Noiri Y, Ono T, Taira T, Suzuki K, Yoshimura T, Boyd P W. Nutrient and phytoplankton dynamics during the stationary and declining phases of a phytoplankton bloom induced by iron-enrichment in the eastern subarctic Pacific. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53(20/22): 2168-2181.
- [9] Zhang W C, Sun S, Li C L A, Zhou L, Jing M M, Lu Y. A simple nutrient enrichment incubation in the Bering Sea. *Chinese Journal of Polar Research*, 2000, 12(4): 245-252.
- [10] Tang S, Jiang L, Wu Z J. Adding nitrate and phosphate separately or together in the Central Indian Ocean: a nutrient enrichment experiment. *Ocean Science Discussion*, 2009, 6(3): 2649-2666.
- [11] Hassler C S, Djajadikarta J R, Doblin M A, Everett J D, Thompson P A. Characterisation of water masses and phytoplankton nutrient limitation in the East Australian Current separation zone during spring 2008. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 58(5): 664-677.
- [12] Hillebrand H, Sommer U. Response of epilithic microphytobenthos of the Western Baltic Sea to *in situ* experiments with nutrient enrichment. *Marine Ecology Progress Series*, 1997, 160: 35-46.
- [13] Lignell R, Seppälä J, Kuuppo P, Tamminen T, Andersen T, Gismervik I. Beyond bulk properties: responses of coastal summer plankton communities to nutrient enrichment in the northern Baltic Sea. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1): 189-209.
- [14] Zhou L, Zhang J. Experimental study on the nutrient limitation in the spring of Bohai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(6):

672-678.

- [15] Li Y B, Han X R, Hu Y C, Wang X L, Zhu C J, Li R X. Test on effects of nutrients on growth of phytoplankton in East China Sea in situ. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(2): 113-117.
- [16] Liu Y, Cao Z R, Huang B Q, Lin Y A. Phytoplankton growth response to nutrients addition in typical sea area in Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Xiamen University(Natural Science)*, 2004, 43(Z1): 147-152.
- [17] Zohary T, Robarts R D. Experimental study of microbial P limitation in the eastern. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(3): 387-395.
- [18] Pu X M, Wu Y I, Zhang Y S. Nutrient limitation of phytoplankton in the Changjiang Estuary I. Condition of nutrient limitation in autumn. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22(4): 60-66.
- [19] Zhao W H, Li J T, Wang J T. Study on nutrient limitation of phytoplankton enrichment of Changjiang Estuary in summer. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(4): 1-5.
- [20] Foullaron P, Claquin P, L'Helguen S, Huonnic P, Martin-Jézéquel V, Masson A, Longphuit S N, Pondaven P, Thouzeau G, Leynaert A. Response of a phytoplankton community to increased nutrient inputs; a mesocosm experiment in the Bay of Brest (France). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, 351(1/2): 188-198.
- [21] Solange D, Dyhrman S T, Karl D M. Alkaline phosphatase activity and regulation in the North Pacific Subtropical Gyre. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(3): 1414-1425.
- [22] Cade-Menun B J, Paytan A. Nutrient temperature and light stress alter phosphorus and carbon forms in culture-grown algae. *Marine Chemistry*, 2010, 121(1/4): 27-36.
- [23] Hegarty S G, Villareal T A. Effects of light level and N: P supply ratio on the competition between *Phaeocystis* cf. *pouchetii* (Hariot) Lagerheim (Prymnesiophyceae) and five diatom species. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, 226(2): 241-258.
- [24] State Technology Supervision Bureau. The Specification for Oceanographic Survey (GB/T 17378—2007). Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [25] Brzezinski M A, Dickson M L, Nelson D M, Sambrotto R. Ratio of Si, C and N uptake by microplankton in the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(3/4): 619-633.
- [26] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46(3): 205-222.
- [27] Hansell D A, Olson D B, Dentener F, Zamora L M. Assessment of excess nitrate development in the subtropical North Atlantic. *Marine Chemistry*, 2007, 106(3/4): 562-579.
- [28] Fennel K, Spitz Y H, Letelier R M, Abbott M R, Karl D M. A deterministic model for N₂ fixation at stn. ALOHA in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2002, 49(1/3): 149-174.
- [29] Deutsch C, Sarmiento J L, Sigman D M, Gruber N, Dunne J P. Spatial coupling of nitrogen inputs and losses in the ocean. *Nature*, 2007, 445(7124): 163-167.
- [30] Beucher C P, Brzezinski M A, Crosta X, Silicic acid dynamics in the glacial sub-Antarctic: implications for the silicic acid leakage hypothesis. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21: 1-13.
- [31] Brzezinski M A, Nelson D M, Franck V M, Sigman D E. Silicon dynamics within an intense open-ocean diatom bloom in the Pacific sector of the Southern Ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 48(19/20): 3997-4018.
- [32] Leynaert A, Tréguer P, Christiane L, Martine R. Silicon limitation of biogenic silica production in the Equatorial Pacific. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2001, 48(3): 639-660.

参考文献:

- [9] 张武昌, 孙松, 李超伦, 邹立, 金明明, 卢勇. 白令海浮游植物添加营养盐培养实验. *极地研究*, 2000, 12(4): 245-252.
- [14] 邹立, 张经. 渤海春季营养盐限制的现场实验. *海洋与湖沼*, 2001, 32(6): 672-678.
- [15] 李雁宾, 韩秀荣, 胡跃诚, 王修林, 祝陈坚, 李瑞香. 营养盐对东海浮游植物生长影响的现场培养实验. *海洋环境科学*, 2008, 27(2): 113-117.
- [16] 刘媛, 曹振锐, 黄邦钦, 林以安. 东、黄海典型海区浮游植物对营养盐添加的响应. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2004, 43(Z1): 147-152.
- [18] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 I. 秋季的营养限制情况. *海洋学报*, 2000, 22(4): 60-66.
- [19] 赵卫红, 李金涛, 王江涛. 夏季长江口海域浮游植物营养限制的现场研究. *海洋环境科学*, 2004, 23(4): 1-5.
- [24] 国家技术监督局. 海洋调查规范 GB/T 17378—2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.2 January ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Dynamics of demersal fish species diversity and biomass of dominant species in autumn in the Beibu Gulf, northwestern South China Sea	WANG Xuehui, QIU Yongsong, DU Feiyan, et al (333)
Spatial variation in species richness of birds and mammals in mainland China	DING Jingjing, LIU Dingzhen, LI Chunwang, et al (343)
Comparative study on learning behavior and electroantennogram responses in two geographic races of <i>Cotesia glomerata</i>	WANG Guohong, LIU Yong, GE Feng, et al (351)
Biological characteristics and habitat requirements of <i>Parnassius imperator</i> (Lepidoptera: Parnassidae)	FANG Jianhui, LUO Youqing, NIU Ben, et al (361)
Annual variability in biological characteristics of <i>Illex argentinus</i> in the southwest Atlantic Ocean	FANG Zhou, LU Huajie, CHEN Xinjun, et al (371)
The impact of run-of stream dams on benthic macroinvertebrate assemblages in urban streams	HAN Minghua, YU Haiyan, ZHOU Bin, et al (380)
Effect of suspended sediment on the feeding physiology of <i>Pinctada martensii</i> in laboratory	LI Zhimin, SHEN Yuchun, YU Nantao, et al (386)
Potential nutrient limitation of phytoplankton growth in the Western and Central Pacific Ocean	XU Yanqing, CHEN Jianfang, GAO Shengquan, et al (394)
Ingestion of selected HAB-forming dinoflagellates	ZHANG Qingchun, YU Rencheng, SONG Jingjing, et al (402)
Formation of aggregation by <i>Phaeocystis globosa</i> (Prymnesiophyceae) in response to high grazing pressure	WANG Xiaodong, WANG Yan (414)
Growth and reproduction of the green macroalga <i>Ulva prolifera</i>	ZHANG Bixin, WANG Jianzhu, WANG Yifu, et al (421)
Screening of growth decline related genes from <i>Alexandrium catenella</i>	ZHONG Jie, SUI Zhenghong, WANG Chunyan, et al (431)
Analysis of inherent optical properties of Lake Taihu in spring and its influence on the change of remote sensing reflectance	LIU Zhonghua, LI Yunmei, LU Heng, et al (438)
Neural network modeling of the eutrophication mechanism in Lake Chenghai and corresponding scenario analysis	ZOU Rui, DONG Yunxian, ZHANG Zhenzhen, et al (448)
The compensatory growth of shrubby <i>Pinus thunbergii</i> response to the boring stress in sandy coast	ZHOU Zhen, LI Chuanrong, XU Jingwei, et al (457)
Selected body temperature and thermal tolerance of tadpoles of two frog species (<i>Fejervarya limnocharis</i> and <i>Microhyla ornata</i>) acclimated under different thermal conditions	SHI Linqiang, ZHAO Lihua, MA Xiaohao, et al (465)
Effects of landscape structure and key landscape factors on aphids-parasitoids-hyper parasitoids populations in wheat fields	ZHAO Zihua, WANG Ying, HE Dahan, et al (472)
Effects of cadmium on lipid peroxidation and ATPase activity of plasma membrane from Chinese kale (<i>Brassica alboglabra</i> Bailey) roots	ZHENG Aizhen (483)
Effects of ginger aqueous extract on soil enzyme activity, microbial community structure and soil nutrient content in the rhizosphere soil of ginger seedlings	HAN Chunmei, LI Chunlong, YE Shaoping, et al (489)
Manganese tolerance and accumulation in mycelia of <i>Cordyceps kyusyuensis</i>	LUO Yi, CHENG Xianhao, ZHANG Congcong, et al (499)
Influence of oxytetracycline exposure on antibiotic resistant bacteria and enzyme activities in wheat rhizosphere soil	ZHANG Hao, ZHANG Lilan, WANG Jia, et al (508)
Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation	SHEN Fangfang, YUAN Yinghong, FAN Houbao, et al (517)
Differences in clonal growth between female and male plants of <i>Rhus typhina</i> Linn. and their diurnal changes in photosynthesis and chlorophyll fluorescence	ZHANG Mingru, WEN Guosheng, ZHANG Jin, et al (528)
Soil water holding capacity under four typical ecosystems in Wuyunjie Nature Reserve of Hunan Province	PAN Chunxiang, LI Yuyuan, PENG Yi, et al (538)
The effect of different land use patterns on soil properties in alpine areas of eastern Qilian Mountains	ZHAO Jinmei, ZHANG Degang, LIU Changzhong, et al (548)
Responses of soil macro-fauna to land desertification in sandy grassland	LIU Rentao, ZHAO Halin (557)
Characteristics of cultivable microbial community number and structure at the southeast edge of Tengger Desert	ZHANG Wei, ZHANG Gaosen, LIU Guangxiu, et al (567)
Physiological and ecological responses of maize to different severities of desertification in the Southern Taramakan desert	LI Lei, LI Xiangyi, LIN Lisha, WANG Yingju, et al (578)
Characterization of caloric value in fifteen plant species in <i>Leymus chinensis</i> steppe in Xilin River Basin, Inner Mongolia	GAO Kai, XIE Zhongbing, XU Sutie, et al (588)
Spatial pattern responses of <i>Achnatherum splendens</i> to environmental stress in different density levels	ZHANG Mingjuan, LIU Maosong, XU Chi, et al (595)
Effects of environmental factors on species distribution and diversity in an <i>Abies fargesii</i> - <i>Betula utilis</i> mixed forest	REN Xuemin, YANG Gaihe, WANG Dexiang, et al (605)
Effects of alginate cerium complexes on ascorbate- glutathione cycle in spinach leaves under chlorpyrifos stress	LUAN Xia, CHEN Zhende, WANG Dongfeng, et al (614)
Analysis on spatiotemporal changes of urban thermal landscape pattern in the context of urbanisation: a case study of Xiamen City	HUANG Jucong, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (622)
The analysis of the green vegetation cover change in western Sichuan based on GIS and Remote sensing	YANG Cunjian, ZHAO Zijian, REN Xiaolan, et al (632)
An inventory of BVOC emissions for a subtropical urban-rural complex: Greater Taizhou Area	CHANG Jie, REN Yuan, SHI Yan, et al (641)
Scientific Note	
Litter decomposition and nutrient dynamics of <i>Carex lasiocapa</i> under different water conditions	HOU Cuicui, SONG Changchun, LI Yingchen, et al (650)
Nest-box color preference and reproductive success of great tit	ZHANG Keqin, DENG Qiuxiang, Justin Liu, et al (659)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 2 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 2 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元