

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂ 低温催化还原 NO 性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO₂ 吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫄,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu²⁺、Cd²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验

黄伟^{1,2}, 朱旭宇^{1,2}, 曾江宁^{1,2}, 寿鹿^{1,2}, 陈全震^{1,2*}, 江志兵^{1,2}

(1. 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. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要: 采用微宇宙实验方法, 研究了不同氮磷比条件 (1N: 1P、4N: 1P、8N: 1P、16N: 1P、32N: 1P、64N: 1P、128N: 1P 和 256N: 1P) 培养 30 d 对东海近岸浮游植物群落生长的影响。结果表明, 不同氮磷比对浮游植物群落的物种丰富度、细胞丰度、Chl-a (叶绿素 a) 含量、比生长率以及硅、甲藻相对比例均产生了显著影响; 6 d 时高氮磷比组的物种丰富度、细胞丰度、Chl-a 含量和比生长率显著高于低氮磷比组; 30 d 时氮磷比接近 Redfield 比值的处理组 (8N: 1P、16N: 1P 和 32N: 1P) 细胞丰度显著高于其它组。各处理组中浮游植物群落都呈先硅藻后甲藻的基本演替规律, 不同氮磷比对甲藻发生时间和优势种产生了明显影响; 实验前期 (0~12 d) 各处理组中硅藻占绝对优势; 18 d 时, 4N: 1P、16N: 1P 和 32N: 1P 组中甲藻占浮游植物总细胞丰度的比例超越硅藻; 随后 (24~30 d), 其它处理组中甲藻的比例也相继超越硅藻而占据优势; 30 d 时, 除 8N: 1P、16N: 1P 和 32N: 1P 组外, 其它各处理组中甲藻均占绝对优势。

关键词: 营养盐; 浮游植物; 群落结构; 细胞丰度; Chl-a

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1832-07

Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea

HUANG Wei^{1,2}, ZHU Xu-yu^{1,2}, ZENG Jiang-ning^{1,2}, SHOU Lu^{1,2}, CHEN Quan-zhen^{1,2}, JIANG Zhi-bing^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry of State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China; 2. The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In the present study, a microcosm experiment was conducted in situ for 30 days, in order to investigate the effects of different N/P ratios (1N: 1P, 4N: 1P, 8N: 1P, 16N: 1P, 32N: 1P, 64N: 1P, 128N: 1P, and 256N: 1P) on phytoplankton community growth in the East China Sea. The results indicated that the species number, cell abundance, Chl-a content, specific growth rate as well as species composition of the phytoplankton community significantly varied with the N/P ratios. After 6 days of culture, the species number, cell abundance, Chl-a content and specific growth rate in the high N/P ratio groups were significantly higher than those in the low N/P ratio groups. After 30 days of culture, the cell abundance in the groups close to the Redfield ratio (8N: 1P, 16N: 1P, and 32N: 1P) was significantly higher than those in the other treatments. On the other hand, the phytoplankton community in all the treatments was observed a definite succession from diatoms to dinoflagellates during the present study. Nonetheless, the N/P ratios strongly affected the duration of dinoflagellate bloom as well as the dominated species; at the beginning of culture (0th day-12th day), the diatoms dominated the phytoplankton community; then the relative contribution of dinoflagellates to the total cell abundance exceeded diatoms in the 4N: 1P, 16N: 1P, and 32N: 1P groups on the 18th day. After that, the relative contribution of dinoflagellates exceeded diatoms ordinarily in the other groups from the 24th day to 30th day. At the end of culture, the phytoplankton community was dominated by the dinoflagellates in all the groups except for the 8N: 1P, 16N: 1P, and 32N: 1P treatments.

Key words: nutrients; phytoplankton; community structure; cell abundance; Chl-a

东海作为陆架海, 受长江冲淡水、沿岸流、黑潮、黄海冷水团和台湾暖流等环流和水团的综合影响, 其生态环境复杂、多样, 是世界上具有重要研究价值的代表性海区之一^[1]。另一方面, 东海的污染状况在中国四大海区中较为严重, 国家海洋局 2010 年公布的《中国海洋环境质量公报》指出, 2009 年东海未达到清洁海域水质标准的面积为 68 190 km², 严重污染海域主要集中在长江口、杭州湾、象山港和乐清湾, 主要污染物为无机氮和活性磷酸盐。人类活动在改变海水中营养盐浓度的同时也扰乱了主要营养盐氮、磷、硅间的自然比例, 导致东海近岸海

域营养盐结构发生了变化, 呈现出 N/P 比升高、Si/N 比降低的变化趋势, 例如, 长江口 N/P 比由 1959 年的 17.6 增加至 2002 年的 35, 而 Si/N 比则

收稿日期: 2011-08-12; 修订日期: 2011-09-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB428903); 海洋公益性行业科研专项 (200805069); 中国博士后科学基金项目 (20110491828); 浙江省自然科学基金项目 (Y5100401, Y5110131); 国家海洋局青年科学基金项目 (2011106); 浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室开放基金项目 (2010F30003); 国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项 (SZ1119, JT0806)

作者简介: 黄伟 (1981~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为海洋生态学, E-mail: huangwei8182@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: chenqz6509@126.com

由 1959 年的 3.9 降低至 2005 年的 0.94^[2,3]。

浮游植物是海洋生态系统中最主要的初级生产者,其群落结构和演替受地理位置、温度、盐度、光照、营养盐、浮游动物摄食及菌藻关系等多种因素的综合影响^[4,5]。其中,氮磷等营养盐作为海洋浮游植物必需的生源要素,不但是决定浮游植物生长的重要因子而且是关联种间竞争格局的主要因素之一^[6,7]。一般而言,海洋浮游植物对营养盐的吸收利用大致遵循 N/P 比为 16:1 的 Redfield 定律,然而不同类群藻细胞的元素组成存在差异,对各类营养物质的需求也不尽相同,最佳 N/P 比也会因浮游植物类群的不同而变化,环境会优先选择与之相适应的特征藻种形成适者生存的生物群落^[8~10]。因此,N/P 比会在一定程度上通过影响浮游植物的种间竞争及群落的演替,从而改变浮游植物群落的结构组成。对 German Bight、Chesapeake Bay、Black Sea、Tolo Harbor 和渤海湾的连续监测以及一系列的现场围隔实验均证实了这一观点^[11~15]。

近年来,东海海域的浮游植物群落发生了很大的变化,以有害藻华物种(如东海原甲藻 *Prorocentrum dentatum*、米氏凯伦藻 *Karenia mikimotoi*) 丰度的增加尤为明显。因此有学者认为东海营养盐结构变化很可能是造成浮游植物群落结构变化的重要原因之一^[16],然而此观点仍有待进一步现场调查资料和室内受控实验的证明。本研究采用微宇宙实验的方法,分析了不同 N/P 比条件对东海浮游植物群落的物种组成、细胞丰度、光合色素含量的影响,旨在探究 N/P 比变化与浮游植物群落演替的内在联系,为深入研究环境变化对东海生态系统的影响提供基础资料和科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

实验于 2010 年 11 月在浙江省海洋水产养殖研究所洞头基地进行,平潮时取离岸 500~1 000 m 的表层天然海水[盐度 27 ± 0.3 , pH 8.12 ± 0.21 , NO_3^- -N (74.64 ± 2.14) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^- -N (0.21 ± 0.014) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N (0.857 ± 0.029) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, SiO_3^{2-} -Si (49.79 ± 0.68) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, PO_4^{3-} -P (1.48 ± 0.010) $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$],用 CQ14 标准筛绢(505 μm)滤去大型浮游动物后用作实验用水。实验在聚乙烯水族箱(容积 200 L)中进行,每个水族箱分别引入 150 L 实验海水。根据相关资料及预实验结果,设置氮磷比为 1:1、4:1、8:1、16:1、

32:1、64:1、128:1 和 256:1 共 8 个梯度(表 1),每个梯度设 3 组重复。

表 1 各处理组初始设定氮磷浓度及氮磷比

N/P	DIN/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	DIP/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$
1:1	75.71	75.71
4:1	75.71	18.93
8:1	75.71	9.46
16:1	75.71	4.73
32:1	75.71	2.37
64:1	94.72	1.48
128:1	189.44	1.48
256:1	378.88	1.48

用去离子水将 NaNO_3 (AR, 国药化学试剂公司)和 NaH_2PO_4 (AR, 国药化学试剂公司)分别配制含 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaNO_3 -N 和 1 000 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaH_2PO_4 -P 的储备液,使用时取适量储备液分别加入装有实验海水的水族箱中配成设定浓度的实验溶液。实验时将水族箱(随机)放入一加循环海水的水池中水浴控温,使实验期间箱内溶液温度与外界环境保持一致($16.0^\circ\text{C} \pm 1.1^\circ\text{C}$),光源为自然光(4 000~8 000 lx),光周期约为 14:10,实验期间微充气。实验连续进行 30 d,每 6 d 取样 1 次,显微镜(Nikon-E200, Japan)下对浮游植物进行物种鉴定和数量统计,并测定水体中营养盐的浓度及 Chl-a 含量。根据每次对水样中营养盐的测定结果向箱内补充添加营养盐,使箱内水体营养盐浓度维持在设定水平,直至实验结束。每天 08:00 用塑料棒充分搅动水体,以减少浮游植物的下沉和器壁效应。

1.2 培养液中营养盐的测定

分别从各水族箱中取水样 200 mL 经 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤后用于营养盐的测定, NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N、 SiO_3^{2-} -Si 和 PO_4^{3-} -P 的分析方法参考文献[17]进行。其中, NO_3^- -N 采用铈-镉还原法, NO_2^- -N 采用重氮-偶氮法, NH_4^+ -N 采用次溴酸钠氧化法, SiO_3^{2-} -Si 采用硅钼黄法, PO_4^{3-} -P 采用磷钼蓝法。

1.3 物种鉴定与细胞计数

分别从各水族箱中取水样 500 mL,立即加入中性福尔马林固定(使最终浓度为 1%),静置 24 h 后浓缩到适当体积,充分混匀后取 100 μL 样品于浮游植物计数框在显微镜下进行物种鉴定与细胞计数,重复计数 3 次。

1.4 群落比生长率的计算

参照以下计算公式^[18]:

$$u = \frac{\ln C_1 - \ln C_0}{T_1 - T_0}$$

式中, C_0 和 C_1 分别为 T_0 和 T_1 时的细胞丰度.

1.5 Chl-a 含量的测定

分别从各水族箱中取水样 100 mL 加入 1 mL $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 MgCO_3 悬浊液(防止叶绿素分解),经 GF/F 玻璃纤维滤膜(Whatman, USA)减压过滤(抽滤压 $< 50 \text{ kPa}$). 将过滤后的滤膜放入 10 mL 丙酮(体积分数为 90%) 中于低温黑暗条件下萃取 24 h, 用荧光仪(Turner Designs Trilogy, USA)测定丙酮萃取液的荧光值并计算水样中 Chl-a 含量.

1.6 统计分析

文中数据以平均值 \pm 标准误(mean \pm S. E. M)表示,用 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验分别对数据进行正态性和同质性假设检验. 如果数据同时满足正态性和同质性假设,则用单因子方差分析(One-way ANOVA)和 Tukey 多重比较法对数据进行组间差异显著性分析. 如果 2 个假设中的任 1 项未被满足,则将数据进行对数转换后,再进行方差分析和多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著. 文中统计分析采用 SPSS 软件(SPSS 15.0, Chicago, IL, USA),绘图采用 SigmaPlot 软件(SigmaPlot 9.0, Systat Software Inc., California, USA)进行.

2 结果与分析

2.1 N/P 比对浮游植物群落物种丰富度的影响

本实验累计鉴定出浮游植物 4 门 40 属 74 种(其中未定名 5 种),其中硅藻门 30 属 59 种(其中未定名 4 种),甲藻门 8 属 13 种,隐藻门 1 属 1 种,绿藻门 1 属 1 种. 实验起始时(0 d)鉴定出 8 种浮游植物,各组间物种丰富度差异不显著(ANOVA, $P > 0.05$, 图 1). 随着实验的进行,6 d 时 N/P 比对各组的物种丰富度产生了显著影响(ANOVA, $P < 0.05$),其中,高 N/P 比组(256N:1P)的物种丰富度达 23 种,显著高于低 N/P 比组(1N:1P、4N:1P、8N:1P、16N:1P 组中为 10~15 种, Tukey's test, $P < 0.05$). 然而,实验 12、18、24 和 30 d N/P 比对各处理组物种丰富度均无显著影响(ANOVA, $P > 0.05$).

2.2 N/P 比对浮游植物群落细胞丰度的影响

实验起始时(0 d)各处理组中浮游植物细胞丰度水平较低,为 $0.025 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, 各组间无显著差异(ANOVA, $P > 0.05$, 图 2). 此后,各组细胞丰

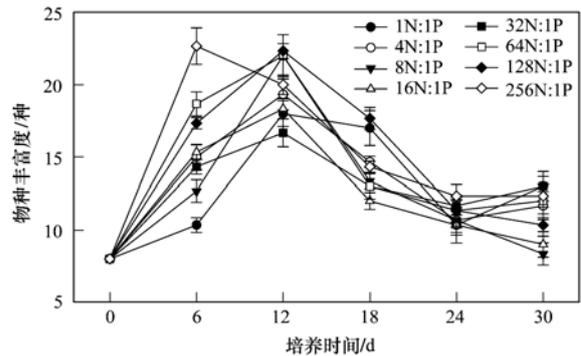


图 1 不同 N/P 比培养 30 d 对浮游植物群落物种丰富度的影响

Fig. 1 Changes in species richness (means \pm S. E. M, $n = 3$) of phytoplankton community under different N/P ratios during 30 days of culture

度逐渐增加,至 6 d 时,64N:1P、128N:1P 和 256N:1P 组细胞丰度分别为 1.24×10^6 、 2.52×10^6 和 $3.03 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$,显著高于其它处理组($0.41 \times 10^6 \sim 1.11 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$). 12 d 时,各处理组中浮游植物丰度水平达一峰值,为 $7.74 \times 10^6 \sim 13.63 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$,各组间无显著差异(ANOVA, $P > 0.05$). 此后,细胞丰度在 18 和 24 d 呈逐渐降低趋势,且 N/P 比对浮游植物细胞丰度未产生显著影响(ANOVA, $P > 0.05$). 至实验结束时(30 d),各处理组丰度水平又呈现升高趋势,其中,8N:1P、16N:1P 和 32N:1P 组细胞丰度分别为 7.95×10^6 、 8.35×10^6 和 $8.08 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$,显著高于其它各组($1.58 \times 10^6 \sim 5.90 \times 10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$).

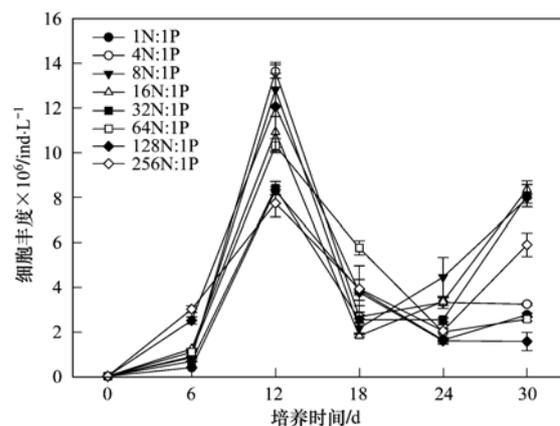


图 2 不同 N/P 比培养 30 d 对浮游植物群落细胞丰度的影响

Fig. 2 Changes in cell abundance ($10^6 \text{ ind} \cdot \text{L}^{-1}$, means \pm S. E. M, $n = 3$) of phytoplankton community under different N/P ratios during 30 days of culture

2.3 N/P 比对浮游植物群落 Chl-a 含量的影响

各处理组中浮游植物的 Chl-a 含量在起始时(0

d) 水平较低, 仅为 $0.71 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 且各处理组间 Chl-a 含量无显著差异 (ANOVA, $P > 0.05$, 图 3)。6 d 时, N/P 比对 Chl-a 含量产生了显著影响, 其中 128N:1P 组 ($12.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 含量显著高于 1N:1P 组 ($1.84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$)。12 d 时各处理组中 Chl-a 含量达到峰值, 其中 1N:1P 组 Chl-a 含量 ($18.21 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 显著低于其它各组 ($82.37 \sim 119.68 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$)。此后, 各处理组中 Chl-a 含量经历了先降低后升高的过程, 然而, N/P 比对 18、24 和 30 d 的 Chl-a 含量未产生显著影响 (ANOVA, $P > 0.05$)。本实验中, 浮游植物群落的 Chl-a 含量与细胞丰度的关系为显著正相关关系 ($R = 0.652$, $P < 0.001$, 图 4), Chl-a 含量随着细胞丰度的增加而明显升高。

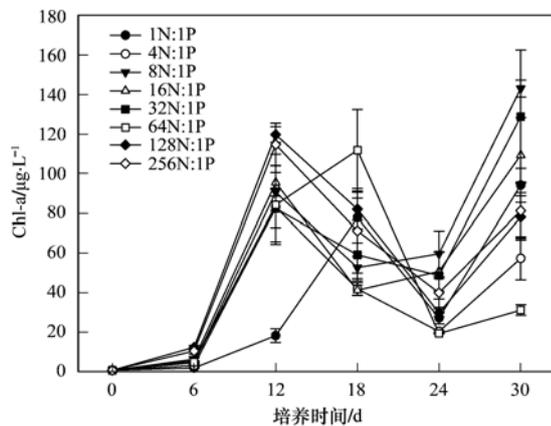


图 3 不同 N/P 比培养 30 d 对浮游植物群落 Chl-a 含量的影响

Fig. 3 Changes in Chl-a content ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, means \pm S. E. M, $n = 3$) of phytoplankton community under different N/P ratios during 30 days of culture

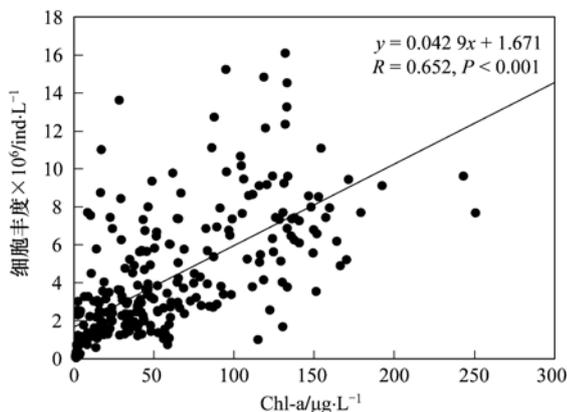


图 4 浮游植物群落 Chl-a 含量与细胞丰度的相关关系

Fig. 4 Relationship between Chl-a content and cell abundance of the phytoplankton community

2.4 N/P 比对浮游植物群落比生长率的影响

实验过程中, 6 d 时浮游植物群落的比生长率

最高 ($0.46 \sim 0.79 \text{ d}^{-1}$), 且 N/P 比对各处理组比生长率产生了显著影响, 其中 16N:1P、64N:1P、128N:1P 和 256N:1P 组比生长率分别为 0.65 、 0.63 、 0.76 和 0.79 d^{-1} , 显著高于其它处理组 ($0.46 \sim 0.59 \text{ d}^{-1}$, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$, 图 5)。12 d 时 1N:1P、4N:1P、8N:1P 和 32N:1P 组比生长率分别为 0.50 、 0.46 、 0.44 和 0.42 d^{-1} , 显著高于其它各组 ($0.15 \sim 0.37 \text{ d}^{-1}$, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$)。此后, 在 18 d 时各处理组的比生长率降至最低 ($-0.30 \sim -0.10 \text{ d}^{-1}$), 且 N/P 比对 18、24 和 30 d 的比生长率均未产生显著影响 (ANOVA, $P > 0.05$)。

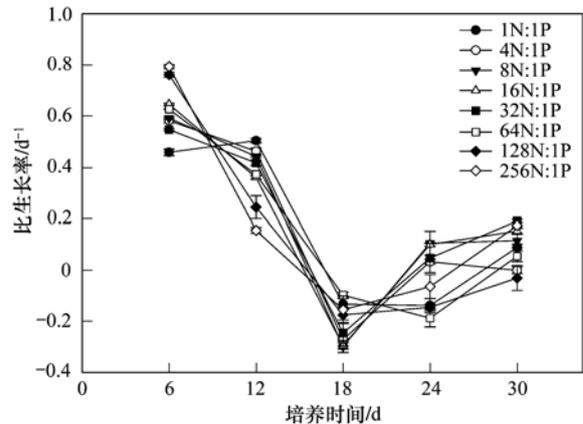


图 5 不同 N/P 比培养 30 d 对浮游植物群落比生长率的影响

Fig. 5 Changes in specific growth rate (d^{-1} , means \pm S. E. M, $n = 3$) of phytoplankton community under different N/P ratios during 30 days of culture

2.5 N/P 比对硅、甲藻占浮游植物总细胞丰度比例的影响

实验开始时 (0 d), 硅藻在各处理组中占绝对优势, 其占浮游植物总细胞丰度的比例为 78.7% (图 6)。随着实验的进行, 硅藻所占比例进一步增加, 6 和 12 d 时, 硅藻在各处理组中的比例分别为 97.0% ~ 99.1% 和 96.9% ~ 99.4%, 各组间无显著差异 (ANOVA, $P > 0.05$)。18 d 时, 硅藻所占比例开始降低, 甲藻逐渐占优势, 其中 4N:1P 和 16N:1P 组硅藻比例为 36.9% 和 39.0%, 显著低于 1N:1P 和 64N:1P 组 (分别为 92.0% 和 80.3%, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$)。实验结束时, 8N:1P、16N:1P 和 32N:1P 组硅藻所占比例分别为 88.4%、89.1% 和 60.1%, 显著高于其它各处理组 (29.3% ~ 43.3%, ANOVA Tukey's test, $P < 0.05$)。

3 讨论

研究表明, 东海近岸海域浮游植物的生长主要

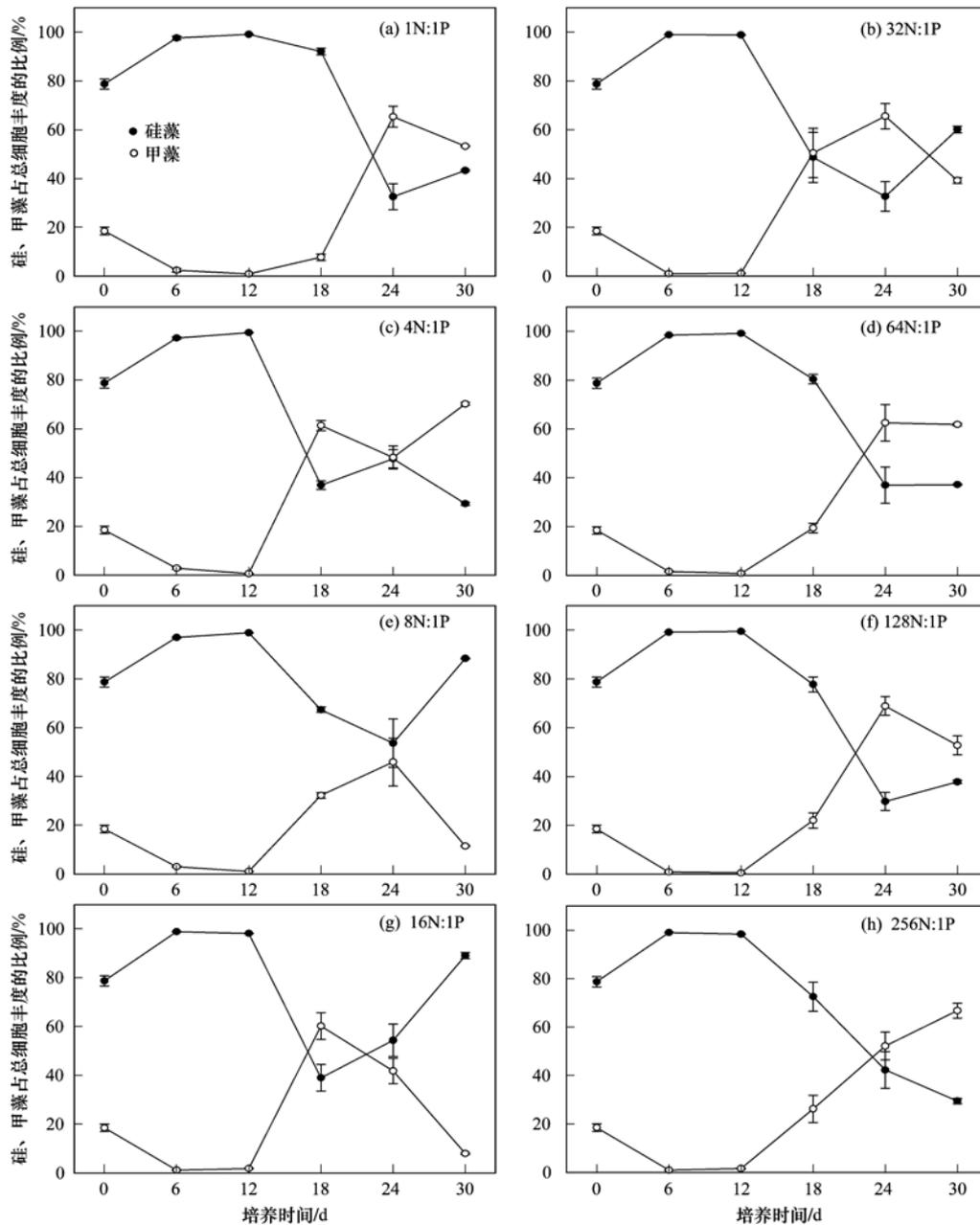


图6 不同 N/P 比培养 30 d 硅藻、甲藻占浮游植物总细胞丰度比例的变化情况

Fig. 6 Species composition of the total phytoplankton groups under different N/P ratios during 30 days of culture

受 P 限制, P 加富可以促进浮游植物的生长^[19, 20]. 例如, Harsion 等^[21] 对厦门湾钙质角毛藻 *Chaetoceros calcitrans* 的培养实验结果表明 N/P 比为 16:1 的培养条件下, 其生长速率显著高于 80:1 和 656:1 组. 而本实验结果与此结论并不相同, 实验初期(6 d), 高 N/P 比组浮游植物群落的细胞丰度显著高于低 N/P 比组(此时中肋骨条藻 *Skeletonema costatum* 在各处理组中占绝对优势, 优势度为 0.63~0.79, 对群落的细胞丰度贡献最大). 表明在本实验条件下演替初期 N 较之 P 对浮游植物生长的促进作用更为明显, 使高 N/P 比组浮游植物的光合

用速率加快, 细胞生理活动保持在旺盛水平. 与此相似, 刘东艳等^[22] 在不同 N/P 比条件下对中肋骨条藻进行 10 d 的培养, 其结果也表明在 N/P 比 > 16:1 的状态下其生长速率和细胞丰度均高于 N/P 比 < 16:1 的培养条件. 这种差异很可能是由实验的理化条件和受试物种的不同所造成, 以后还需对此问题进行更深入的研究. 当实验进行到 12 d 时各组中细胞丰度水平达到第一次峰值, 优势种为中肋骨条藻和旋链海链藻 *Thalassiosira curviseriata*, 尽管此时低 N/P 比组的细胞丰度总体上高于高 N/P 比组, 但其差异并不显著. 实验结束时(30 d), 各处理组的细胞

丰度达到第二次峰值,其中 8N:1P、16N:1P 和 32N:1P 组的细胞丰度显著高于其它各处理组,表明 N/P 比接近 Redfield 比值对浮游植物群落在较长时间的演替中更为有利。

Chl-a 是浮游植物将光能转化为化学能的主要色素,其合成量直接决定浮游植物的光合作用能力和对水域中碳含量的贡献^[23]。围隔及室内实验结果表明如果水体中营养盐充足,那么 Chl-a 含量在初始阶段的快速增长是一个普遍发生的现象,这与围隔水体中光照的增加以及有机质流失量的减少(自然环境中水平对流、扩散和沉降过程都会造成有机质的流失)密切相关^[24]。本实验中 Chl-a 含量的变化与细胞丰度的变化趋势相似,分别在 12 和 30 d 出现了两次峰值。Chl-a 含量峰值的出现说明 2 种情况:①藻细胞对新环境已经适应,在吸收大量营养盐的基础上,合成大量叶绿素,为藻细胞进入快速分裂期提供能量基础;②藻细胞的生长进入静止期,细胞分裂速度减缓,能量开始储存^[23, 25]。本实验中,尽管实验初期高 N/P 比组叶绿素含量显著高于低 N/P 比组,但到实验后期不同的 N/P 比处理并未对 Chl-a 含量产生明显作用,这可能是由于 N/P 比并非是影响浮游植物 Chl-a 含量的唯一因素,其它因素如 N、P 的绝对质量浓度也会对其产生重要影响^[26]。

本实验中,尽管各处理组中浮游植物群落都呈现先硅藻后甲藻的基本演替规律,但不同 N/P 比却对甲藻发生的时间和优势种产生了明显影响:实验前期(0、6 和 12 d)各处理组中硅藻占绝对优势;18 d 时,4N:1P、16N:1P 和 32N:1P 组中甲藻占浮游植物总细胞丰度的比例超越硅藻;随后,其它各处理组中甲藻的比例也相继超越硅藻而占据优势;至实验结束时(30 d),除 8N:1P、16N:1P 和 32N:1P 组中硅藻仍占优势外(优势种为柔弱几内亚藻 *Guinardia delicatula*),其它各组中甲藻均占绝对优势(优势种为尖叶原甲藻 *Prorocentrum triestinum* 和锥状施克里普藻 *Scrippsiella trochoidea*)。一系列其它围隔及室内实验结果同样表明在相对稳定的生态系统内会先出现硅藻的水华,尔后甲藻占优势并出现甲藻水华的演替顺序^[27~29]。这与硅藻和甲藻自身的生理、形态及生态特性密切相关,由于硅藻细胞内大部分空间被液泡所占据,也就意味着其用于胞内物质更新的支出较少,从而使硅藻的生长速率高于其它藻类^[30],这为其在演替前期营养盐充足的条件下占据竞争优势创造了条件^[24, 31]。与硅藻不同,甲藻对营养盐具有更强的亲和性再加上甲藻具有较

小的体积(表面积/体积比较大,有利于营养盐吸收),因此它可以在营养盐缺乏的条件下更有效地利用营养盐,从而使其在演替后期取得竞争优势^[32, 33]。但是如果水体交换性能较好,又有持续的营养盐供给,将会扰乱此演替顺序,硅藻数量可以持续维持在高水平上并阻碍甲藻形成优势^[29]。本实验中,尽管营养盐(N、P、Si)为持续添加,并未出现营养盐限制的情况,但各处理组中甲藻仍先后取得了竞争优势。其原因可能是实验在封闭水体中进行,水体交换性能差,因此未能出现硅藻持续维持在高细胞丰度的情况。此外,某些浮游植物可以通过分泌外代谢物(如抗生素、抗菌素、神经毒素等)对自身或其它类群的生长、繁殖产生促进或抑制的化感作用,这也会在一定程度上影响浮游植物群落的演替过程^[34, 35]。

总之,由于海洋生态系统自身的复杂性,再加上近海高营养盐浓度环境,使得在不同海区进行的营养盐对浮游植物群落影响的围隔及室内实验结果并不完全一致,甚至出现相悖的情况。这可能是由于浮游植物的生长受到多种因素的综合影响,而营养盐只是其中的一个因素,其它环境因子如光照、温度、盐度和 pH 等也对其生长起着不可忽略的作用^[36, 37]。此外,不同海区浮游植物的生长特性也有所差别,实验浮游植物的来源也可能对实验结果产生一定程度的影响。

4 结论

(1) 不同氮磷比对浮游植物群落的物种丰富度、细胞丰度、Chl-a 含量、比生长率以及硅藻、甲藻相对比例均产生了显著影响。

(2) 浮游植物群落的 Chl-a 含量与细胞丰度的关系为显著正相关关系。

(3) 各处理组中浮游植物群落都呈现出先硅藻后甲藻的基本演替规律,不同氮磷比对甲藻发生时间和优势种产生了影响。

致谢:实验过程中得到了浙江省海洋水产养殖研究所谢起浪、李尚鲁、柴雪良、吴洪喜、林少珍、王铁杆、张鹏、张立宁等人的帮助,谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 焦念志,王荣,李超伦. 东海春季初级生产力与新生生产力的研究[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(2): 135-140.
- [2] 王修林,孙霞,韩秀荣,等. 2002 年春、夏季东海赤潮高发区营养盐结构及分布特征的比较[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(4): 323-331.
- [3] 张传松,王修林,石晓勇,等. 东海赤潮高发区营养盐时空

- 分布特征及其与赤潮的关系 [J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2416-2424.
- [4] 曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2000, **11**(3): 445-448.
- [5] 宁修仁, 史君贤, 蔡显明, 等. 长江口和杭州湾海域生物生产力锋面及其生态学效应 [J]. 海洋学报, 2004, **26**(6): 96-106.
- [6] 齐雨藻, 张家平, 吴坤东, 等. 中国沿海的赤潮—深圳湾富营养化与赤潮研究 [J]. 暨南大学学报 (自然科学版, 赤潮研究专刊), 1989, (10): 25-31.
- [7] 周成旭, 马斌, 王飞雄, 等. 海洋原甲藻与三角褐指藻混合培养条件下的种群生长与氮磷营养盐变化 [J]. 海洋科学, 2006, **30**(12): 58-61.
- [8] 丰茂武, 吴云海, 冯仕训, 等. 不同氮磷比对藻类生长的影响 [J]. 生态环境, 2008, **17**(5): 1759-1763.
- [9] 吕颂辉, 陈翰林, 何智强. 氮磷等营养盐对尖刺拟菱形藻生长的影响 [J]. 生态环境, 2006, **15**(4): 697-701.
- [10] Rhee G Y. Effects of N:P atomic ratios nitrate limitation on algal growth, cell composition, nitrate uptake [J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, **23**(1): 10-25.
- [11] 林昱, 唐森铭, 庄栋法, 等. 海洋围隔生态系中无机氮对浮游植物演替的影响 [J]. 生态学报, 1994, **14**(3): 323-326.
- [12] Fisher T R, Peele E R, Ammerman J W, *et al.* Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, **82**(1): 51-63.
- [13] Fouillaron P, Claquin P, L'Helguen S, *et al.* Response of a phytoplankton community to increased nutrient inputs: a mesocosm experiment in the Bay of Brest (France) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2007, **351**(1-2): 188-198.
- [14] Hodgkiss I J, Ho K C. Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms? [J]. *Hydrobiologia*, 1997, **353**(1-3): 141-147.
- [15] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, *et al.* Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure [J]. *Nature*, 1997, **386**(6623): 385-388.
- [16] 周名江, 颜天, 邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1031-1038.
- [17] GB 17378. 4-1998, 海洋监测规范 [S].
- [18] 孙军, 宁修仁. 海洋浮游植物群落的比生长率 [J]. 地球科学进展, 2005, **20**(9): 939-945.
- [19] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(12): 1483-1489.
- [20] Wong G T F, Gong G C, Liu K K, *et al.* 'Excess nitrate' in the East China Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **46**(3): 411-418.
- [21] Harrison P J, Hu M H, Yang Y P, *et al.* Phosphate limitation in estuarine and coastal waters of China [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1990, **140**(1-2): 79-87.
- [22] 刘东艳, 孙军, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻生长特性的影响 [J]. 海洋湖沼通报, 2002, (2): 39-44.
- [23] 孙军, 刘东艳, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比率对青岛大扁藻、新月柱鞘藻和米氏凯伦藻生长影响及其生存策略研究 [J]. 应用生态学报, 2004, **15**(11): 2123-2126.
- [24] Estrada M, Berdalet E, Vila M, *et al.* Effects of pulsed nutrient enrichment on enclosed phytoplankton: ecophysiological and successional responses [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, **32**(1): 61-71.
- [25] Brand L E, Guillard R R L, Murphy L S. A method for the rapid and precise determination of acclimated phytoplankton reproduction rates [J]. *Journal of Plankton Research*, 1981, **3**(2): 193-414.
- [26] 李建平, 吴立波, 戴永康, 等. 不同氮磷比对淡水藻类生长的影响及水环境因子的变化 [J]. 生态环境, 2007, **16**(2): 342-346.
- [27] Carter C M, Ross A H, Schiel D R, *et al.* In situ microcosm experiments on the influence of nitrate and light on phytoplankton community composition [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2005, **326**(1): 1-13.
- [28] Schlüter L. The influence of nutrient addition on growth rates of phytoplankton groups, and microzooplankton grazing rates in a mesocosm experiment [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1998, **228**(1): 53-71.
- [29] 林昱, 庄栋法, 陈孝麟, 等. 初析赤潮成因研究的围隔实验结果 II. 浮游植物群落演替与甲藻赤潮 [J]. 应用生态学报, 1994, **5**(3): 314-318.
- [30] Egge J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? [J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, **16**(3): 191-198.
- [31] Egge J K, Aksnes D L. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1992, **83**(2-3): 281-289.
- [32] Granéli E, Carlsson P, Turner J T, *et al.* Effects of N:P:Si ratios and zooplankton grazing on phytoplankton communities in the northern Adriatic Sea; I. Nutrients, phytoplankton biomass, and polysaccharide production [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1999, **18**(1): 37-54.
- [33] Hlaili A S, Chikhaoui M A, Grami B E, *et al.* Effects of N and P supply on phytoplankton in Bizerte Lagoon (western Mediterranean) [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2006, **333**(1): 79-96.
- [34] 王悠, 俞志明, 宋秀贤, 等. 大型海藻与赤潮微藻以及赤潮微藻之间的相互作用研究 [J]. 环境科学, 2006, **27**(2): 274-280.
- [35] 张东鹏, 武宝珩. 几种赤潮藻对温度、氮、磷的响应及藻间相互作用的研究 [J]. 暨南大学学报 (自然科学与医学版), 2000, **21**(5): 82-87.
- [36] 王修林, 邓宁宁, 祝陈坚, 等. 磷酸盐、硝酸盐组成对海洋赤潮藻生长的影响 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 2004, **34**(3): 453-460.
- [37] Montagnes D J S, Franklin D J. Effect of temperature on diatom volume, growth rate, and carbon and nitrogen content: reconsidering some paradigms [J]. *Limnology and Oceanography*, 2001, **46**(8): 2008-2018.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行