

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示	高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)
2013年1月北京市PM _{2.5} 区域来源解析	李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)
2013年1月北京市一次空气重污染成因分析	程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)
上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征	常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)
厦门春季PM ₁₀ 中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析	张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)
硫氧同位素示踪南京北郊大气PM _{2.5} 中硫酸盐来源	魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)
结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程	包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)
春季华东高山背景区域PM _{2.5} 和PM _{2.5-10} 中水溶性无机离子特征	苏彬彬,张智胜,陶俊,许梹洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)
落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究	杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)
四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征	何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)
深圳市船舶排放清单与时空特征研究	杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)
超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性	孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)
空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征	张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)
基于氢氧稳定同位素的黄土高原下二次蒸发效应	靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)
黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响	张永领,王明仕,董玉龙(1249)
调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响	王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)
春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响	于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)
降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析	任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)
北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价	钟惠舟,韦朝海(1277)
丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析	李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)
三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例	操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)
营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响	王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖雪(1301)
一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究	杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)
昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析	梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)
河道曝气提升河流水质的WASP模型研究	朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)
γ辐射降解水中的盐酸丙沙星的研究	祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)
电化学氢化物发生法处理含锑废水及对锑的回收	陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)
Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水	孙文静,王亚旻,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)
生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素	孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)
308 nm光作用下α-Fe ₂ O ₃ 表面HNO ₃ 的光解	陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)
L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚	何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)
酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究	许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)
枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性	马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)
喹啉降解菌筛选及其对焦化废水强化处理	李静,李文英(1385)
Fe ³⁺ 对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N ₂ O释放的影响	李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)
内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究	赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)
利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻	王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)
进水渗滤液总氮和BOD ₅ /TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响	杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)
重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析	师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)
湖南攸县典型煤矿和工矿区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析	张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)
沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响	苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)
施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响	王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)
不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复	邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)
陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价	齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)
有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响	王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)
玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究	程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)
硼锑交互作用对水稻吸收积累锑和硼的影响	向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)
丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响	郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)
滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究	陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)
不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系	吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)
工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析	王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)
《环境科学》征订启事(1216)	
《环境科学》征稿简则(1248)	
信息(1163,1194,1248,1424)	

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响

王睿喆^{1,2}, 王沛芳^{1,2*}, 任凌霄^{1,2}, 王超^{1,2}, 王颖雪^{1,2}

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

摘要: 外源营养盐输入会对湖泊水体中磷的形态转化及藻类生长产生影响。为研究其影响规律, 于春季选取太湖梅梁湾水体为研究对象, 以 KNO_3 和 K_2HPO_4 添加系列氮磷负荷, 在试验过程中对各形态磷的浓度、藻类生物量 (Chl-a) 和碱性磷酸酶活性 (APA) 进行同步分析测定。结果表明, 春季太湖梅梁湾水体中浮游植物的生长主要受到磷限制, 加氮对其生长没有明显的促进作用。加磷至 $\text{SRP} = 0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的水体中浮游植物生长情况最好, 叶绿素 a 的含量和生长速率 (μ) 最大。添加硝酸盐能显著促进 APA 的增长, 提高水生生物对磷的吸收利用能力, 加快磷循环的速率; 磷酸盐对 APA 则具有活性诱导-抑制机制, 当水体中磷酸盐浓度在一定范围内 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P} \leq 0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 酶活性有显著提高。对水体中磷的循环转化过程和碱性磷酸酶的活性诱导-抑制机制的研究结果有助于揭示藻类生长过程中营养盐的补偿途径, 为深入揭示藻类暴发机制提供理论基础。

关键词: 碱性磷酸酶; 磷形态; 氮磷添加; 浮游植物; 太湖

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1301-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.022

Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake

WANG Rui-zhe^{1,2}, WANG Pei-fang^{1,2*}, REN Ling-xiao^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, WANG Ying-xue^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to determine the effects of nutrient inputs on changes of phosphorus forms and phytoplankton growth in large shallow lakes, an enrichment bioassay was conducted using surface lake water collected from the Meiliang Bay of Taihu Lake in spring. The concentration of different phosphorus forms, phytoplankton biomass (chlorophyll a) and alkaline phosphatase activity (APA) was analyzed after the addition of different concentrations of inorganic nutrients. The results showed that the phytoplankton biomass increased significantly with the addition of phosphorus (P), but with no primary effect from nitrogen (N), which suggested the phytoplankton growth was mainly limited by P. The maximum growth rate and the highest concentration of chlorophyll both occurred in the SRP $0.015 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ treatment. Nitrate addition could improve the bioavailability of phosphorus, accelerate the phosphorus cycling process and promote the growth of APA. There was an induction-repression mechanism resulting in a negative relationship between APA and orthophosphate concentration. The APA was obviously stimulated under $\text{PO}_4^{3-} - \text{P} \leq 0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. This paper researches the transformation and cycling process of phosphorus in water and the induction-repression mechanism between the APA and orthophosphate concentration. The result can help to reveal the compensation path of nutrients in algae growth process and provide a theoretical basis for the further reveal of the mechanism of algae outbreaks.

Key words: alkaline phosphatase; phosphorus forms; N and P input; phytoplankton; Taihu Lake

磷是水生生物进行物质合成及能量传输所必需的营养元素,也是湖泊初级生产力的主要限制性因子^[1]。水体中磷存在的主要形式是溶解态有机磷 (dissolved organic phosphorus, DOP) 和颗粒态磷 (particulate phosphorus, PP)^[2]。浮游生物可直接利用的是以正磷酸盐为主要形态的反应活性磷 (soluble reactive phosphorus, SRP), 仅占总磷 (total phosphorus, TP) 的 5% ~ 8%^[3]。尽管 DOP 和 PP 一般不能被直接利用,但是在一定条件下可转化成 SRP 并为生物吸收和利用^[4]。碱性磷酸酶是水体中广泛存在的一种磷酸酯水解酶。当水体中 SRP 含量较低时,浮游植物和细菌等诱导产生大量碱性磷酸酶,对有机磷进行酶促水解,释放正磷酸盐,这是水

中生物可利用磷来源的一种重要补偿机制^[3]。因此,碱性磷酸酶在有机磷的酶促水解和无机磷的释放过程中扮演重要角色,其活性 (alkaline phosphatase activity, APA) 与浮游动植物的组成分布、活性磷浓度和藻类生物量等因素有着密切联系^[5,6]。

氮磷对藻类生长的调控作用一直是人们研究的热点问题^[7,8],常用的生态调查方法由于影响因素

收稿日期: 2014-08-11; 修订日期: 2014-11-27

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) 项目 (2010CB429006); 中央高校基本科研业务费专项 (2014B03814)

作者简介: 王睿喆 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湖泊水环境生态修复, E-mail: wrz916313@126.com

* 通讯联系人, E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

复杂,难以真实地反映营养盐与浮游植物生长之间的关系,因此营养盐添加试验越来越成为研究相关问题的有效手段^[9]. 当前,通过向自然水体中添加系列氮磷负荷,研究磷营养盐的吸收、储存、利用和释放等一系列过程,以及碱性磷酸酶在此过程中的调控作用,并与藻类生长情况相联系鲜见报道,尤其是氮对 APA 的影响尚未引起重视. 梅梁湾是太湖北部水质污染最严重的湖湾之一,直湖港、梁溪河和武进港^[10]等入湖河流常年向太湖输入了大量污水^[11, 12]. 因此,本研究通过向梅梁湾水体中添加系列氮磷负荷,试验模拟外源营养盐汇入时,水体中磷形态转化和 APA 的变化规律,从而研究 SRP 对 APA 的诱导-抑制机制,以及浮游藻类的生长响应,以期深入认识湖泊水体中磷的循环过程和藻类暴发机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2014 年春季在太湖梅梁湾(31°29.575' N, 120°12.442'E)进行水样采集,用有机玻璃采

水器采集水样后,低温避光保存于 25 L 聚乙烯采样桶中,立即带回实验室. 24 h 内测定初始水体中各形态氮磷的质量浓度和叶绿素 a(Chl-a)等水质指标. 剩余水样经 200 μm 筛网过滤,去除大颗粒悬浮物和大型浮游动物后,用于营养盐添加试验.

1.2 试验方法

将采集的原水均匀分配到 10 个 2 L 玻璃烧杯中,每个烧杯中初始水样体积为 2 000 mL,以质量浓度(以 N 和 P 计)为 1 000 mg·L⁻¹的 KNO₃和 50 mg·L⁻¹的 K₂HPO₄作为母液分别进行氮磷添加. 水样分为 3 种处理: A 处理添加 PO₄³⁻-P, B 处理添加 NO₃⁻-N, 对照不进行营养盐添加,各组添加营养盐后的氮磷含量如表 1 所示. 试验在室内常温下进行,每天用洗净的玻璃棒轻轻搅拌水体,尽量使水体混合均匀. 第 1、3、5、8、11、14、17 d 的 09:00 用 50 mL 注射器采集水样,同时记录水温和 pH. 取样后立即测定水体中 Chl-a 浓度、各形态磷(TP、TDP、SRP、DOP、PP)的质量浓度和碱性磷酸酶活性.

表 1 培养试验添加氮、磷浓度

Table 1 Nitrogen and phosphorus concentrations for nutrient enrichment bioassays

处理	对照	加磷					加氮			
		A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4
氮含量 DIN/mg·L ⁻¹	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2.0	3.0	5.0	8.0
磷含量 SRP /mg·L ⁻¹	0.009	0.015	0.030	0.050	0.100	0.300	0.009	0.009	0.009	0.009
氮磷质量比 DIN: SRP	373:1	224:1	112:1	67:1	34:1	11:1	492:1	738:1	1 230:1	1 968:1

1.3 指标测定及分析方法

1.3.1 理化因子的测定

通过过硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法对水体中 TP 和 TDP 的质量浓度进行测定, SRP 的质量浓度采用钼酸铵分光光度法测定. TDP 与 SRP 的差值即为水体中 DOP 的质量浓度, PP 则由 TP 减去 TDP 获得. 水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后, 滤膜用于 Chl-a 浓度的测定^[13]. 利用 AA3 型连续流动分析仪(Continuous Flow Analyzer, 德国 Seal 公司)对滤后水样中的氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝氮(NO₂⁻-N)进行测定.

1.3.2 水体中碱性磷酸酶活性的测定

以对硝基苯磷酸二钠盐(*p*-NPP)作底物, 反应产物对硝基苯酚(PNP)的产生速率作为 APA 的指标. 根据文献^[14]选择的试验反应条件为: pH 8.4 (Tris 缓冲液调节)、温度 30℃、反应物体积 5 mL, 在恒温培养箱中反应 6 h, 用 TU-1901 系列紫外可见

分光光度计在 410 nm 波长下测定.

1.3.3 碱性磷酸酶活性的最大反应速率($V_{\max}$)和米氏常数(K_m)的计算^[15]

在 0.01 ~ 3.0 mmol·L⁻¹ 的浓度范围内, 取 8 个不同的底物浓度, 分别测定 APA. 根据 Michaelis-Menten 方程:

$$V = V_{\max} \cdot [S] / (K_m + [S])$$

式中, V 和 $V_{\max}$ 分别为酶的反应速率和最大反应速率, 单位为 μmol·(L·min)⁻¹; $[S]$ 为底物浓度, 单位为 mmol·L⁻¹; K_m 为米氏常数, 单位为 μmol·L⁻¹. 用 Sigmaplot 12.5 软件中的 Enzyme Kinetics Module 模块直接求出 $V_{\max}$ 及 K_m .

1.3.4 藻类生长速率的计算^[16]

生长速率计算公式:

$$\mu = \ln(X_2/X_1) / (T_2 - T_1)$$

式中, μ 为生长速率, 单位为 d⁻¹; $T_2 - T_1$ 为某一时间间隔, 单位为 d; X_2 和 X_1 分别为时间间隔终结和

开始时的藻类现存量,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 梅梁湾水体中氮磷含量及形态特征

由表 2 可见,春季太湖梅梁湾水体中 TP 和 TN 的质量浓度分别为 $0.112\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $2.302\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 不同形态的磷中,SRP 和 DOP 的质量浓度较低,分别为 $0.009\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.004\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, PP 最高 ($0.099\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 占 TP 的 88.4%. 无机氮中 NO_3^- -N 为主要组分,占 TN 的 64.3%.

揣小明^[17]确定太湖 TP 的基准和控制标准参考值分别为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.06\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,可见梅梁湾上覆水中 TP 含量均已超过该基准值和控制标准参考值. Rosenberg 等^[18]提出,当 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 同时出现在介质中时,浮游植物优先吸收氨氮. 但相对于 NH_4^+ -N, NO_3^- -N 才是太湖水体中氮的主要存在形态,其影响不容忽视^[19]. 从营养比例结构来看,春季 TN: TP (46: 1) 和 DIN: TP (30: 1) 均大于王玉珏等^[20]和 Smith^[21]提出的磷限制标准 (16: 1 和 5: 1).

表 2 水体中初始氮、磷浓度及比例结构特征

Table 2 Initial concentrations of nitrogen and phosphorus and their ratios in water					
氮形态	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	磷形态	浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	氮磷比	比值
TN	2.302	TP	0.112	TN: TP	46
DIN	1.516	SRP	0.009	DIN: TP	30
NH_4^+ -N	0.015	DOP	0.004	DIN: SRP	373
NO_3^- -N	1.480	PP	0.099		
NO_2^- -N	0.021				

2.2 藻类生长对营养盐添加的响应

藻类生物量(以 Chl-a 表示)在不同处理中呈现出了不同的变化规律(图 1),A 处理中的 Chl-a 浓度呈先上升后下降的趋势,对照和 B 处理则在波动中下降. A 处理的 Chl-a 浓度从第 1 d 起就迅速上升,第 3 d 左右达到峰值,然后藻类生长进入衰退状态,Chl-a 浓度下降,直至维持在较低的浓度水平[图 1 (a)]. 对照和 B 处理的 Chl-a 浓度只在试验开始时略微上升,然后便在波动中下降,一直处于较低状态

[图 1(b)]. 加磷后藻类的生长速率(μ)明显提高,但添加不同浓度的氮对其影响不大,B 处理的藻类最大生长速率(μ_{max})均在 $0.06\sim0.08\text{ d}^{-1}$ 之间,与对照相比,加氮没有明显加快藻类的生长(表 3). 试验结果显示了磷限制的特点,即藻类生长对单独加氮的响应相对较弱,加磷对藻类生长有明显促进作用. 这可能是因为水体中的初始 DIN 已经很高 ($1.516\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), SRP 的质量浓度仅为 $0.009\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水体中的磷处于匮乏状态.

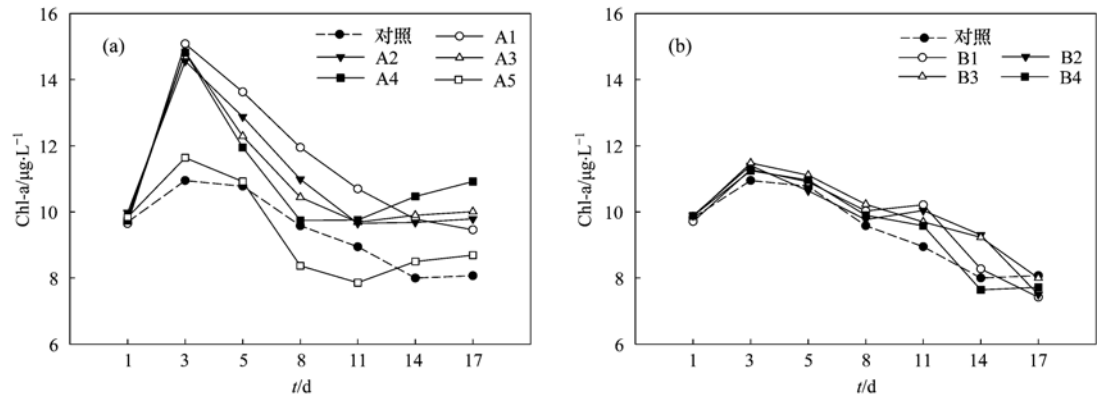


图 1 不同处理中的藻类生长状况

Fig. 1 Responses of phytoplankton biomass (Chl-a) to nutrient enrichment in incubation

在前 11 d, A1 的 Chl-a 浓度一直保持最高,最大生长速率(μ_{max})也高于其他各组(表 3). 到试验后期,随着水体中磷营养盐的不断消耗, A4 和 A5 的 Chl-a 浓度又有所上升,最终各处理的 Chl-a 浓度

为: $A4 > A3 > A2 > A1 > A5 >$ 对照,这表明并非水体中磷浓度越高对藻类生长越有利,磷浓度过高有时也会对浮游植物的生长产生抑制. 陈永根等^[22]通过调查分析太湖水体中叶绿素 a 与氮磷浓度的关

表 3 试验前后 Chl-a 含量以及藻类最大生长速率

Table 3 Initial and final Chl-a and $\mu_{\max}$ in incubation

处理	编号	含氮量 DIN /mg·L ⁻¹	含磷量 SRP /mg·L ⁻¹	初始 Chl-a /μg·L ⁻¹	Chl-a 峰值 /μg·L ⁻¹	结束 Chl-a /μg·L ⁻¹	最大生长速率 $\mu_{\max}$ /d ⁻¹
对照		1.5	0.009	9.83	10.95	8.07	0.05
加磷	A1	1.5	0.015	9.65	15.08	9.46	0.22
	A2	1.5	0.030	9.98	14.56	9.79	0.19
	A3	1.5	0.065	9.84	14.83	10.01	0.21
	A4	1.5	0.125	9.74	14.82	10.92	0.21
	A5	1.5	0.400	9.84	11.64	8.69	0.08
加氮	B1	2.0	0.009	9.71	11.28	7.42	0.07
	B2	3.0	0.009	9.89	11.40	7.50	0.07
	B3	5.0	0.009	9.86	11.48	8.00	0.08
	B4	8.0	0.009	9.88	11.25	7.72	0.06

系发现,在梅梁湾水体中,当 TP 浓度较低时,Chl-a 浓度与 TP 浓度呈正相关;当 TP 浓度较高时(超过 0.31 mg·L⁻¹),Chl-a 浓度与 TP 浓度呈负相关,与本研究结果相近.王小冬等^[23]通过氮磷加富试验也认为,氮磷营养盐的添加在一定程度上能够促进浮游植物的生长,但并非营养盐添加越高浮游植物生物量就越高.

3 d 后各处理中的 Chl-a 浓度缓慢降低,说明仅通过添加氮磷营养盐,藻类的生物量不能获得持续增长,与王玉珏等^[20]和王婷婷等^[24]的研究结果一致.这主要是因为随着室内培养的进行,水中的氮

磷虽然充足,但铁、锌、铜、锰等微量元素以及钙、镁、钠、钾等常量元素是有限的.另外,3~4 月藻类生长正处于复苏期,生理、生化活性缓慢恢复,还未进入生物量增加的生理阶段^[25].因此,在今后研究中还需进一步扩展至不同季节,以探究不同生长阶段的藻类对氮磷添加的响应.

2.3 营养盐输入对磷形态转化的影响

2.3.1 磷添加对磷形态转化的影响

添加不同浓度的磷酸盐后,水体中各形态磷占 TP 的百分比如图 2 所示. SRP 的百分比在试验前期不断下降, DOP 和 PP 则逐渐升高.随着 SRP 不

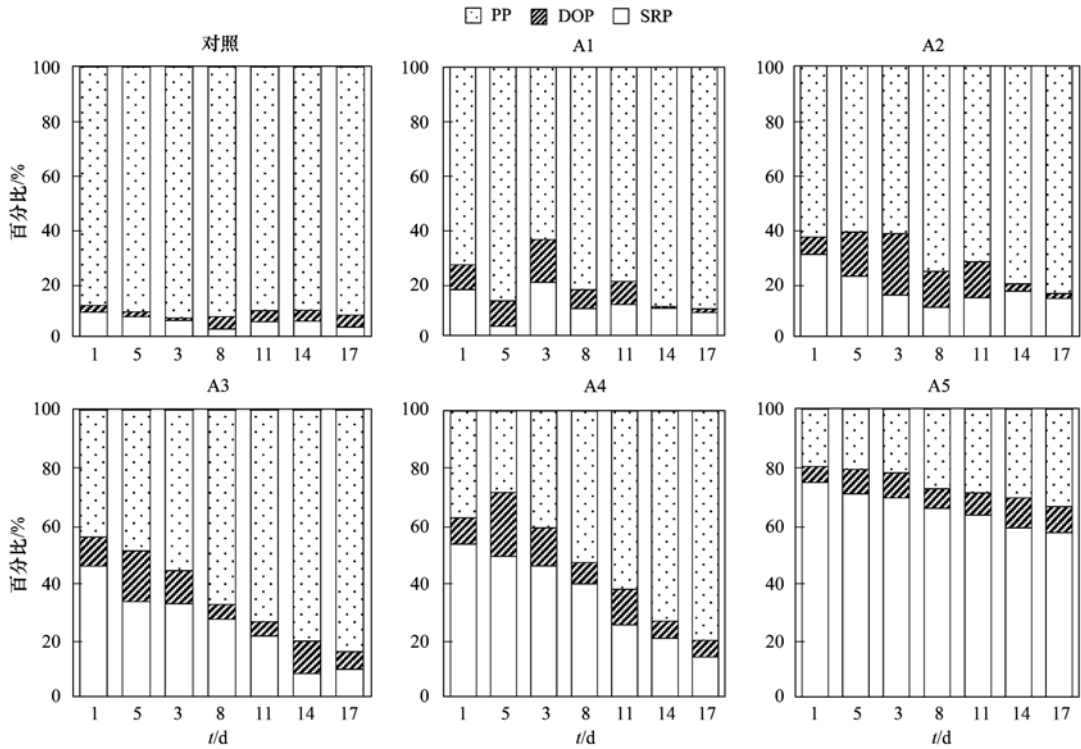


图 2 不同加磷处理中磷形态的转化规律

Fig. 2 Changes of phosphorus forms under different P treatments

断消耗,有机磷库的部分可酶解磷又水解成活性磷,使生物可利用磷得到补充,SRP 的比例上升. 添加的无机磷越多,SRP 由下降转为上升的拐点出现得越晚. A1、A2 和 A3 分别在第 5 d、第 11 d 和第 17 d, A4 和 A5 由于有充分的可直接利用的无机磷,SRP 一直处于下降状态,试验过程中从未上升,有机磷则不断增加.

A1、A2、A3 和 A4 的 DOP 百分比都在试验过程中有明显下降, A5 的 DOP 却比试验开始时增加. 这是因为当水体中 SRP 含量不足时, DOP 可被细菌和藻类产生的碱性磷酸酶水解后利用^[26], 少量 DOP 组分还可被生物直接吸收利用, 如 ATP 和 6-磷酸葡萄糖等, 最终都转变成细胞中的有机成分: 磷脂、脂酸及核酸等. A5 中的 SRP 含量充足, 因此 DOP 主要被合成而不需消耗.

藻类生物量呈先上升后下降的变化趋势(图 1), 而 PP 总体呈上升趋势, 表明试验过程中水生生物对水体中的磷进行了吸收、富集和利用^[2]. 藻类吸收磷后, 有利用和储存两种途径. 在试验前期, 藻类吸收并利用水中的磷用于自身生长; 到了后期, 即使藻类生长不再需要大量的磷, 藻体也会继续吸

收, 储存在体内的磷库中^[27], 在体内积累后慢慢利用, 即藻类对营养盐有“奢侈消费”的能力^[24].

2.3.2 氮添加对磷形态转化的影响

从图 3 可以看出, 加氮处理后, 水体中的 SRP 质量浓度(c_{SRP}) 随时间呈下降-上升-下降的波动变化. 并且, 与对照相比, 添加不同浓度的硝态氮后, SRP 的变化规律存在明显差异. 初始水体中 SRP 的质量浓度为 $0.009 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 添加 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 后所有水样中的 SRP 均显著下降, 第 3 d 加氮处理中的 c_{SRP} 都低于对照, 大小顺序为: $c_{\text{SRP}}(\text{B4}) < c_{\text{SRP}}(\text{B3}) < c_{\text{SRP}}(\text{B2}) < c_{\text{SRP}}(\text{B1}) < c_{\text{SRP}}(\text{对照})$. 可见, 在最初 3 d, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 输入越多, SRP 下降得越快. 但从第 5 d 起, 各处理中的 SRP 又先后出现上升趋势, B4 中的最先出现. 第 8 d 所有处理的 SRP 都上升至峰值, 对照则降至最低, 即 $c_{\text{SRP}}(\text{B4}) > c_{\text{SRP}}(\text{B3}) > c_{\text{SRP}}(\text{B2}) > c_{\text{SRP}}(\text{B1}) > c_{\text{SRP}}(\text{对照})$, 此后各处理的 SRP 呈下降趋势至试验结束. 另外, 与加磷处理类似, 加氮试验结束时各处理中的 PP 百分比也有所增加(图 4). 从磷形态的循环转化来看, 对照中的磷形态转化稳定而缓慢, 加氮处理中的则相对迅速.

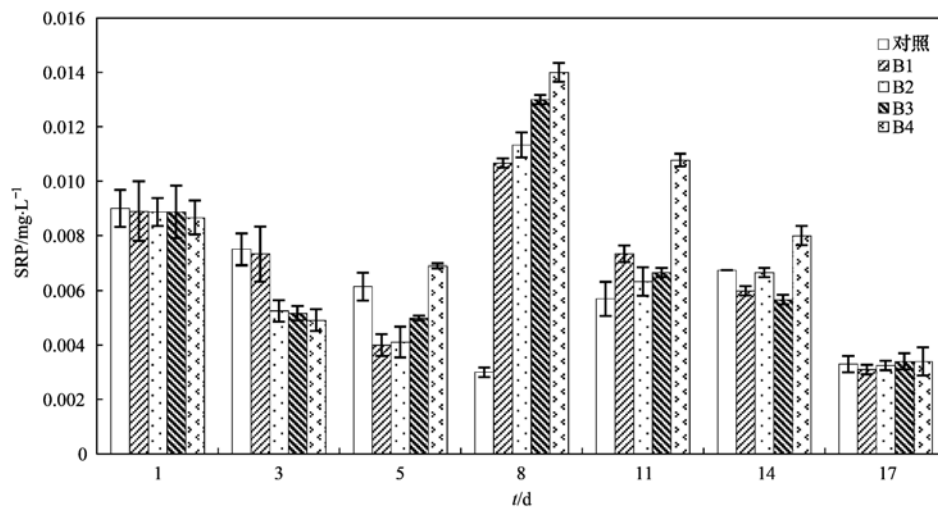


图 3 不同氮浓度下 SRP 浓度随时间的变化

Fig. 3 Time course incubation results of SRP concentrations under different N treatments

以上结果表明, 添加一定浓度的氮营养盐, 确实能提高水生生物对磷的吸收利用能力, 加快磷循环的速率. 水生生物的生长需要分别摄取一定比例的氮和磷, 近年来许多学者进行过不同配比营养盐对藻类生长影响的研究^[28~30]. 添加一定量的硝态氮后, 水生生物大量生长时缺乏磷, 增加了藻类和细菌对磷的需求, 从而使细胞吸收和利用更多的磷, 导致水体中的生物可利用磷迅速减少. 因此, 以碱性磷

酸酶水解有机磷为主导的磷转化活动就更加迅速和剧烈. 这与 Xu 等^[19]的研究结果相符, 该研究认为, 氮源输入的增加, 同样会引起生物对磷利用的增加, 利于藻类暴发.

2.4 碱性磷酸酶的动力学参数变化特征

A 处理中碱性磷酸酶活性的 V_{max} 在小幅下降后上升, 呈 S 型增长趋势[图 5(a)]; B 处理的 V_{max} 则呈 J 型增长趋势, 一直保持上升趋势直至试验结束

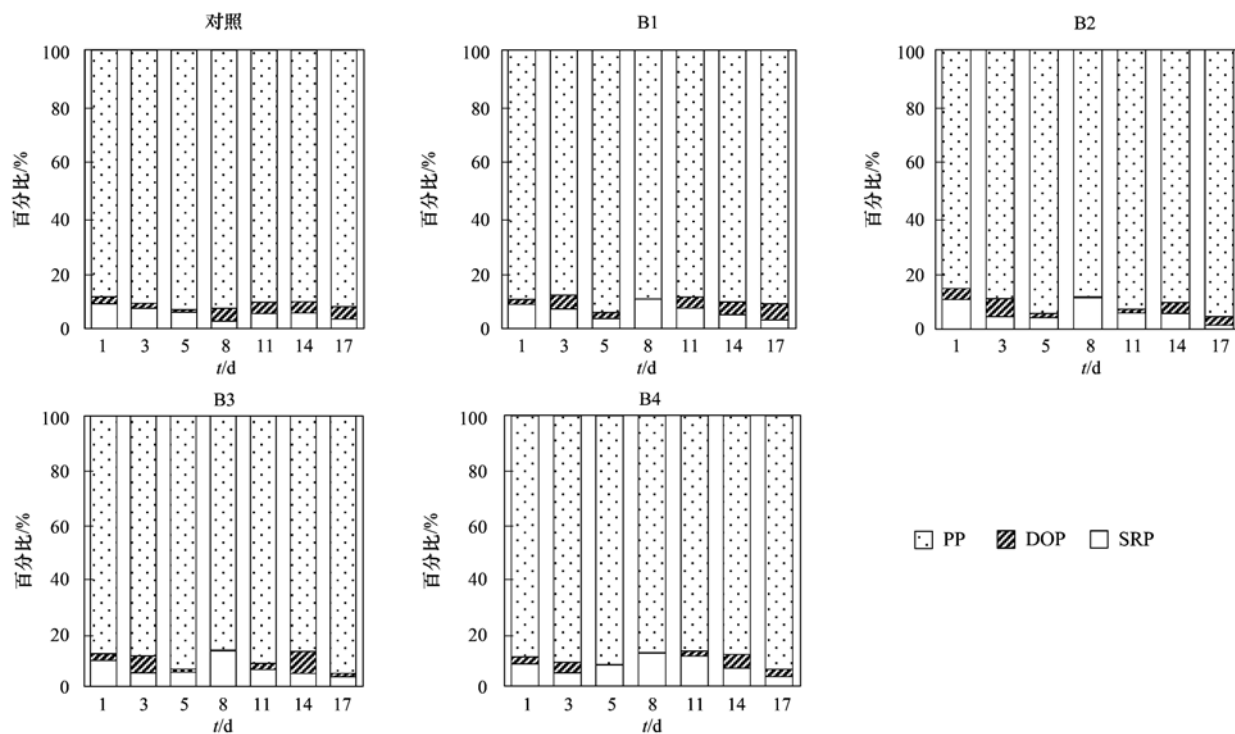


图 4 不同加氮处理中磷形态的转化规律

Fig. 4 Changes of phosphorus forms under different N treatments

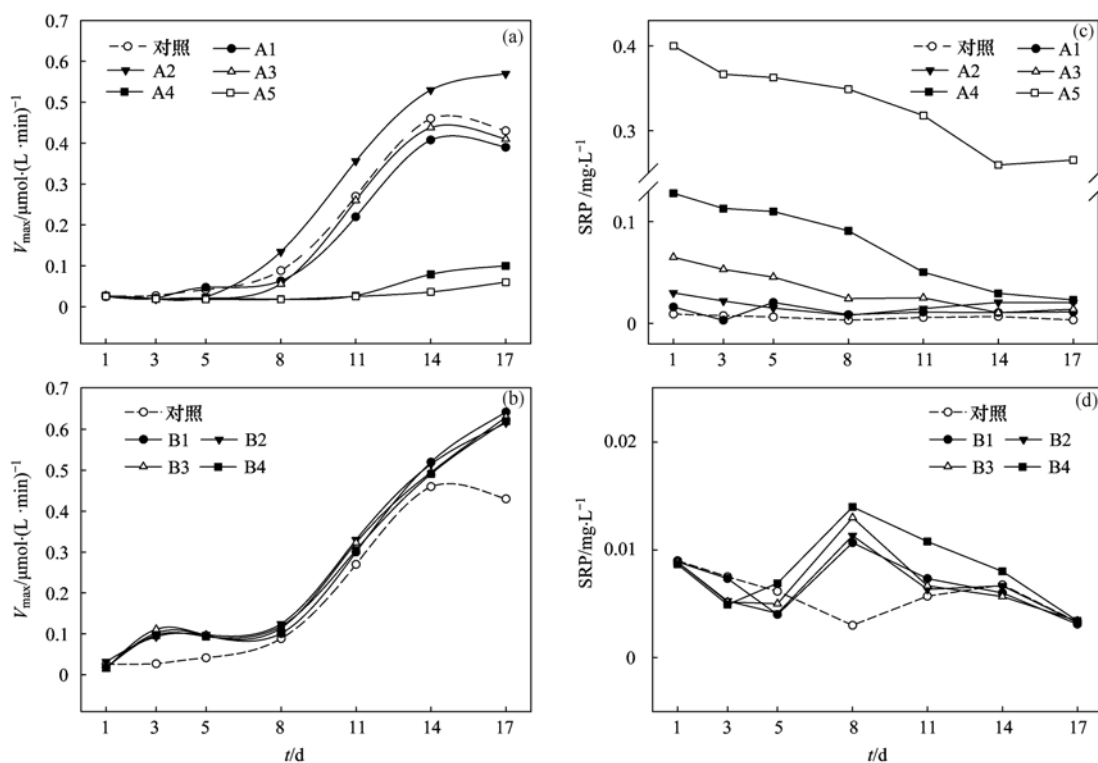
[图 5(b)]. 与对照相比,加磷处理中只有 A2 的 $V_{\max}$ 值高于对照;而所有加氮处理的 $V_{\max}$ 值均显著高于对照. A 处理中 $V_{\max}$ 值在开始时略微下降,是由于磷酸盐的添加抑制了藻类和细菌对碱性磷酸酶的分泌. 随着水中磷酸盐的消耗,酶活性显著增强. 对照和 A1 由于初始 SRP 的质量浓度很低,第 3 d 均已降至 $0.003 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,磷酸酶受诱导增加分泌,继而 $V_{\max}$ 在第 5 d 就出现小幅上升. 随着 SRP 迅速下降,对照、A1、A2 和 A3 的 APA 从第 8 d 起都进入快速上升期. 此时,对照和 A2 的 SRP 都已降至最低,A1 和 A3 中的 SRP 也从 5 d 后就一直保持在较低水平(低于 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). A4 和 A5 的水体中由于 SRP 的质量浓度较高, $V_{\max}$ 一直以小幅度平稳下降,处于较低水平,直到第 11 d 才略有上升[图 2 和图 5(a)].

由此可见,磷含量确实对 APA 有重要影响,但该影响机制较为复杂,主要包括直接影响和间接影响两方面,所以并非简单地呈负相关关系. 直接影响即 SRP 浓度对 APA 的诱导-抑制调控机制:在 SRP 缺乏的状态下,浮游生物会诱导产生大量碱性磷酸酶,从而在较大范围内接触并分解有机磷底物(DOP 和 PP);反之,当正磷酸盐浓度较高时,酶的活性则会受到抑制^[31, 32]. 间接影响则是通过影响

水生生物的生长情况来进行的,由于碱性磷酸酶主要是由浮游植物和细菌产生的,适当提高水中无机磷的浓度,能促进它们的生长,提高其生物量,从而增加碱性磷酸酶的分泌. 因此,在本研究结果中,虽然对照的含磷量最低,但其 $V_{\max}$ 值低于 A2 [图 5(a)].

由图 5(b)可以看出,添加硝酸盐对碱性磷酸酶活性有显著促进作用,提高了水体中生物对磷的利用能力,但添加不同浓度的氮之间,对酶活性的促进作用并未发现显著差别. 浮游细菌是水体中碱性磷酸酶的重要来源之一,文献[33, 34]通过研究海洋生态系统中氮营养盐与细菌 APA 的关系发现,APA 不仅受到磷的调控,还受到含氮化合物和有机碳的调控,充足的氮可以增强 APA,与本研究结果一致. 微生物在利用水体无机氮的同时,需积极分泌磷酸酶以弥补相应的磷组分或增加的细胞个体数,相应提升了 APA.

有学者提出,营养盐添加试验中藻类有 3 个生长阶段^[35, 36]:第一阶段生物量无明显增加,藻类吸收营养盐储存在体内;第二阶段水体中营养盐开始减少,生物量开始增加;最后水体中营养盐不足,藻类利用自身储存的营养盐. 本研究中 APA 的增长说明藻类生长已进入第三个阶段,不仅吸收和积累

图5 不同处理中 V_{max} 和 SRP 随试验时间的变化Fig. 5 Changes of V_{max} and SRP in different treatments during the bioassays

了水体中的磷,还对细胞内储存的磷进行了利用,因此才会诱导碱性磷酸酶的增加^[37]。

3 结论

(1) 春季太湖梅梁湾水体中浮游植物的生长主要受到磷限制,加氮对藻类生长没有明显的促进作用。试验期间叶绿素 a 呈先上升后下降的变化趋势,藻类在加磷至 $\text{SRP} = 0.015 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的水样中生长最快,叶绿素 a 的浓度最高,最大生长速率达 0.22 d^{-1} 。

(2) 磷酸盐浓度对碱性磷酸酶活性有重大影响,当 $\text{SRP} \leq 0.025 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,对 APA 有显著促进作用。并非正磷酸盐的含量越低,APA 越高,少量磷源汇入有利于水生生物的生长繁殖,从而增加了碱性磷酸酶的分泌,在本试验条件下,加磷至 $\text{SRP} = 0.03 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的处理中酶活性最高。

(3) 添加各种浓度的氮营养盐均能显著促进水体中碱性磷酸酶的产生,酶的最大反应速率最高可达 $0.64 \mu\text{mol}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$,这提高了浮游植物和细菌对磷的吸收利用能力,加快了磷循环过程。

参考文献:

[1] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments - Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J].

Chemosphere, 2002, **46**(8): 1147-1155.

- [2] 张润宇,王立英,吴丰昌,等. 太湖春季沉积物间隙水中磷的分布特征及界面释放的影响[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 902-907.
- [3] Halemejkó G Z, Chrost R J. The role of phosphatases in phosphorus mineralization during decomposition of lake phytoplankton blooms[J]. Archiv Fur Hydrobiologie, 1984, **101**(4): 489-502.
- [4] 李军,刘丛强,周志华,等. 长江中下游浅水湖泊水体磷形态的组成和分布特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2008, **25**(增刊): 104-105.
- [5] Kwon H K, Oh S J, Yang H S. Ecological significance of alkaline phosphatase activity and phosphatase-hydrolyzed phosphorus in the northern part of Gamak Bay, Korea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(11): 2476-2482.
- [6] 李宝,丁士明,范成新,等. 滇池福保湾间隙水氮磷分布及其与底泥微生物和磷酸酶相互关系[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(4): 420-427.
- [7] Falkowski P G, Barber R T, Smetacek V. Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production [J]. Science, 1998, **281**(5374): 200-206.
- [8] Thingstad T F, Zweifel L, Rassoulzadegan F. P limitation of heterotrophic bacteria and phytoplankton in the northwest Mediterranean [J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(1): 88-94.
- [9] 王小冬,秦伯强,高光,等. 氮磷的不同供应比例和频度对藻类水华形成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, **30**(12):

- 2533-2541.
- [10] 张大伟, 李杨帆, 孙翔, 等. 入太湖河流武进港的区域景观格局与河流水质相关性分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1775-1783.
- [11] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(5): 439-445.
- [12] 祝鹏, 华祖林, 张润宇, 等. 太湖溶解有机质光谱和氮磷污染的区域分布差异特征[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(2): 129-136.
- [13] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 164-187.
- [14] 路娜, 胡维平, 邓建才, 等. 太湖水体中碱性磷酸酶的空间分布及生态意义[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2898-2903.
- [15] Chróst R J, Overbeck J. Kinetics of alkaline phosphatase activity and phosphorus availability for phytoplankton and bacterioplankton in lake plu see (North German Eutrophic Lake)[J]. Microbial Ecology, 1987, **13**(3): 229-248.
- [16] 许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(12): 2230-2236.
- [17] 揣小明. 我国湖泊富营养化和营养物磷基准与控制标准研究[D]. 南京: 南京大学, 2011. 125-126.
- [18] Rosenberg G, Probyn T A, Mann K H. Nutrient uptake and growth kinetics in brown seaweeds: response to continuous and single additions of ammonium [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1984, **80**(2): 125-146.
- [19] Xu H, Paerl H W, Qin B, *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(1): 420-432.
- [20] 王玉珏, 洪华生, 王大志, 等. 台湾海峡上流区浮游植物对营养盐添加的响应[J]. 生态学报, 2008, **28**(3): 1321-1327.
- [21] Smith V H. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton[J]. Science, 1983, **221**(4611): 669-671.
- [22] 陈永根, 刘伟龙, 韩红娟, 等. 太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(12): 2062-2068.
- [23] 王小冬, 秦伯强, 高光, 等. 无机氮磷添加对太湖来源浮游植物和附着生物生物量的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(10): 2257-2261.
- [24] 王婷婷, 易齐涛, 胡友彪, 等. 两淮采煤沉陷区水域水体富营养化及氮、磷限制模拟实验[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 916-926.
- [25] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
- [26] Hayes V E A, Ternan N G, McMullan G. Organophosphonate metabolism by a moderately halophilic bacterial isolate [J]. FEMS Microbiology Letters, 2000, **186**(2): 171-175.
- [27] Sterner R W, Andersen T, Elser J J, *et al.* Scale-dependent carbon: nitrogen: phosphorus seston stoichiometry in marine and freshwaters[J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(3): 1169-1180.
- [28] 郑杰, 黄显怀, 尚巍, 等. 不同氮磷比对藻类生长及水环境因子的影响[J]. 工业用水与废水, 2011, **42**(1): 12-16.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 路娜, 胡维平, 邓建才, 等. 引江济太对太湖水体碱性磷酸酶动力学参数的影响[J]. 水科学进展, 2010, **21**(3): 413-420.
- [32] Raheb J, Naghdi S, Flint K P. Alkaline phosphatase activity of *Flexibacter chinensis* under starvation stress in water microcosms [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2006, **40**(1): 13-16.
- [33] Nausch M. Experimental evidence for interactions between bacterial peptidase and alkaline phosphatase activity in the Baltic Sea[J]. Aquatic Ecology, 2000, **34**(4): 331-343.
- [34] Wasmund N, Nausch G, Schneider B, *et al.* Comparison of nitrogen fixation rates determined with different methods: a study in the Baltic Proper[J]. Marine Ecology Progress Series, 2005, **297**: 23-31.
- [35] Van Moorleghe C, De Schutter N, Smolders E, *et al.* Bioavailability of organic phosphorus to *Pseudokirchneriella subcapitata* as affected by phosphorus starvation: An isotope dilution study[J]. Water Research, 2013, **47**(9): 3047-3056.
- [36] Yao B, Xi B D, Hu C M, *et al.* A model and experimental study of phosphate uptake kinetics in algae: Considering surface adsorption and P-stress[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, **23**(2): 189-198.
- [37] Rose C, Axler R P. Uses of alkaline phosphatase activity in evaluating phytoplankton community phosphorus deficiency[J]. Hydrobiologia, 1997, **361**(1-3): 145-156.

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-guo, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinpo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行