

环境科学

(HUANJING KEXUE)

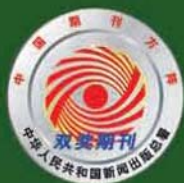
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015年北京市两次红色预警期间PM_{2.5}浓度特征 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM_{2.5}变化特征对气象因素的响应 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO₂交换通量变化过程及其环境影响 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co₃O₄活化过一硫酸盐降解金橙G 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX₂的筛选及脱氮特性 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N₂O排放及其影响因素 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N₂O排放研究 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe₂O₃及其NH₃-SCR活性探究 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应

王振红¹, 张汉鹏¹, 罗专溪²

(1. 闽南师范大学化学与环境学院, 福建省现代分离分析科学与技术重点实验室, 漳州 363000; 2. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021)

摘要: 为更好地认识和预测淡水环境中砷的生态风险, 通过室内培养实验分析了铜绿微囊藻在溶解态无机磷 (DIP) 和有机磷 [腺苷-5'-三磷酸二钠盐 (ATP-P)、 β -甘油磷酸钠 (β -P)] 这 3 种不同磷源下的生长差异, 并探讨了不同磷源下藻细胞对砷酸盐 [As(V)] 的胁迫响应。结果表明, 该藻在不同磷源下均可进行生长繁殖, 且在前 5 d 内无明显差异; 之后与 DIP 相比, 有机磷 (DOP) 源下的藻细胞增殖相对较差; 培养 7 d 时 β -P 和 ATP-P 环境下藻体光密度 (D) 分别只有 DIP 的 78.0% 和 75.4%。各磷源下藻体实际光能转化率 (Yield) 与叶绿素 a (Chl-a) 和 D 的负相关表明 Yield 不能作为藻体营养缺乏与否的稳定性衡量指标。不同磷源下藻体对 As(V) 胁迫的响应因磷形态不同而表现出明显差异, Yield 能很好地表征这种胁迫响应。由 D 、Yield 和 Chl-a 得出铜绿微囊藻对 As(V) 的 96 h EC_{50} 均表现为 $DIP > \beta$ -P > ATP-P; β -P 和 ATP-P 条件下其对 As(V) 的耐受性较接近, 但与 DIP 相比差 1~5 个数量级。

关键词: 铜绿微囊藻; 砷酸盐 [As(V)]; 溶解态有机磷; 无机磷; EC_{50}

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2570-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.020

Response of *Microcystis aeruginosa* Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes

WANG Zhen-hong¹, ZHANG Han-peng¹, LUO Zhuan-xi²

(1. Fujian Province Key Laboratory of Modern Analytical Science and Separation Technology, College of Chemistry and Environment and Fujian Province, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China; 2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: To better understand and then to predict the ecological risk of arsenic influenced by phosphorus regimes in freshwater environment, the growth differences of *Microcystis aeruginosa* (*M. aeruginosa*) as well as its responses to the toxic stress of arsenate [As(V)] were investigated under orthophosphate (DIP) and dissolved organic phosphorous (DOP) [adenosine triphosphate (ATP-P) and β -sodium glycerophosphate (β -P)] culture conditions. The results showed that *M. aeruginosa* grew and proliferated without any differences under DOP and DIP conditions during the first 5 days, while slower growth rates were observed in DOP conditions. Herein, the cell optical density (D) of *M. aeruginosa* in β -P and ATP-P conditions was 78.0% and 75.4% of that under DIP condition respectively on the 7th day. The negative correlations between actual quantum yield (Yield) and Chlorophyll a (Chl-a) and D indicated that Yield should not be used as a stable index to reflect the nutrition conditions of algae. However, Yield was a sensitive index to exactly represent the responses of *M. aeruginosa* to As(V) toxicity, which showed significant differences under different phosphorus regimes. Obtained by D , Yield and Chl-a, the 96h EC_{50} was in the order of $DIP > \beta$ -P > ATP-P. The similar toxic tolerant abilities to As(V) of *M. aeruginosa* under β -P and ATP-P conditions were lower than that of EC_{50} under DIP conditions by one to five orders of magnitude.

Key words: *Microcystis aeruginosa*; arsenate [As(V)]; dissolved organic phosphorus; orthophosphate; EC_{50}

近年来水体富营养化问题普遍存在, 水华暴发已成为紧缺淡水资源的严重威胁^[1,2]。铜绿微囊藻 (*M. aeruginosa*) 被认为是世界范围内广泛存在的最为普遍的藻类之一, 由其引发的藻类水华对动植物具有危害^[3]。铜绿微囊藻作为富营养化水体最常见的蓝藻水华优势藻种之一^[4,5], 其对极端环境的强抗逆性和原核细胞的特殊结构, 使其不仅能维持极强的生命力和繁殖力, 并且使得该藻对水环境中包含砷在内的多数金属离子具有高吸附性能和累积能力^[6,7]。

砷 (As) 作为一种有毒的、非必需类金属元素, 已被国内外列为优先控制污染物^[8,9]。砷酸盐 [As(V)] 作为水环境中砷的主要形态存在^[10,11], 其与磷酸盐 (PO_4^{3-}) 具有相似的化学性质, 可通过磷转运通道进入植物细胞^[12,13]。As(V) 对天然水体中的群落结构具有显著效应^[14], 其对浮游植物的毒

收稿日期: 2015-10-31; 修订日期: 2016-01-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41401552, 41271484); 闽南师范大学新世纪优秀人才支持计划项目 (MX14002)

作者简介: 王振红 (1979~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水环境微污染控制, E-mail: zhhwang1979@163.com

性大小可由磷酸盐质量浓度调节^[15]。磷作为淡水水体的主要限制性营养元素,对藻类的生长繁殖有重要影响^[14,15]。水体中磷常以正磷酸盐、聚磷酸盐、聚合磷酸盐和有机磷等多种形态存在。水环境中有机磷主要由磷脂、磷酸糖类、磷酸酯和磷酸盐等组成^[16,17]。局部水体中溶解态有机磷(DOP)质量浓度甚至比无机磷(DIP)质量浓度要高出一个数量级而成为营养物质的主要成分^[18,19]。水体中溶解性磷质量浓度很低时,某些水华蓝藻能够利用有机磷大量繁殖^[20],从而使得有机磷化合物亦能促进特定藻类的增殖。当前浮游藻类对As(V)的转化及毒性响应研究主要关注无机磷环境,极少涉及有机磷环境时藻类对As(V)胁迫的响应研究,不利于对藻类砷转化的全面认识。腺苷-5'-三磷酸二钠盐(ATP-P)和 β -甘油磷酸钠(β -P)作为合成生物体内许多重要物质的原料和生命活动有关的最基本物质,与生物的生命活动有着密切关系,是生物体内包括蓝藻不可缺少的营养成分^[17,21]。因此选取 ATP-P 和 β -P 为有机磷源、 PO_4^{3-} 为无机磷源,探讨不同磷源下铜绿微囊藻对水体中砷胁迫的响应,对于全面认识湖泊环境中砷的生物地球化学过程,预测其生态风险,保障湖泊生态系统健康和饮用水源安全,具有重要的理论价值和现实意义。

1 材料与方法

1.1 实验藻种的来源及培养

铜绿微囊藻 FACHB-905 购自中国科学院水生生物研究所国家淡水藻种库。藻种于可控光温的培养箱中进行,培养条件如下:温度为 25℃,光暗比为 16 h:8 h、光照强度为 115 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$,每天振荡 3 次。不同有机磷源的藻种培养分别采用腺苷-5'-三磷酸二钠盐(ATP-P)和 β -甘油磷酸钠(β -P)取代 BG11 培养基中的磷酸盐(TP 质量浓度一致)进行,并于 4℃ 保存备用(所用试剂均为分析纯)。所有工作在超净工作台进行。

1.2 藻的磷饥饿处理

取一定体积纯化的藻液,5 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 15 min,弃掉上清液,用无菌水洗涤两次,再离心,弃去上清液以除去藻液中的磷酸盐,然后移至已灭菌的无磷 BG-11 培养液中,以上过程均在无菌条件下完成。在无磷培养液中饥饿培养 48 h,并认为该条件下的藻细胞为磷缺乏状态^[22]。另外,所有容器须在 10% HNO_3 溶液中浸泡 24 h,以除去外界砷和磷的干扰,实验中所有容器及试剂需经灭菌处理,避免细

菌对藻细胞的干扰,影响实验结果。实验用水均为灭菌后超纯水。

1.3 有机磷源下藻的生长

将上述经磷饥饿培养后的藻体离心,经无菌去离子水洗涤两次后,分别转移至无机磷(DIP)和 ATP-P、 β -P 有机磷(DOP)培养液中连续培养 7 d(分别设 3 个平行,其初始藻密度为 1.0×10^6 $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$)。间隔 24 h 取样,分别测定其藻体生物量、叶绿素荧光特性和培养介质中无机磷质量浓度(c_{DIP})变化。

1.4 藻细胞对As(V)的胁迫响应

将质量浓度为 20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的含 As(V) 储备液($\text{Na}_3\text{AsO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$)采用逐级稀释的方法分别投加至上述不同形态磷源下对数生长期的藻细胞溶液中(藻密度不低于 1×10^6 $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$),使其分别暴露于不同质量浓度 As(V) 环境中 96 h,观察其生长变化。As(V) 的质量浓度梯度为:0、2、 2×10^2 、 2×10^3 、 2×10^4 、 2×10^5 、 1×10^6 、 2×10^6 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (皆以 As 元素计),均设 3 个平行。间隔 24 h 取样,分别测定其藻体生物量和叶绿素荧光特性的变化。

与对照组各指标的比值所确定的比率作为生物终点来估算不同形态磷源下 As(V) 对藻的效应。计算结果用 Sigma Plot 10 的 S 型剂量-响应曲线进行拟合^[23]:

$$e = e_{\min} + \frac{e_{\max} - e_{\min}}{1 + 10^{(\lg \text{EC}_{50} - c_{\text{As}}) \times \text{Hillslope}}}$$

式中, e 为生物响应, e_{\max} 和 e_{\min} 分别指最大和最小生物响应, c_{As} 指培养液中无机砷的质量浓度, EC_{50} 是对应于抑制率为 50% 的半数效应质量浓度。Hillslope 是描述曲线倾斜度的斜率因子。所有拟合取 Hillslope 值均为 1.0。

1.5 测定方法

1.5.1 藻体生物量测定

取一定量新鲜藻液转移到 10 mm 石英比色皿中于 682 nm 波长处测其光密度(D)。藻细胞比生长率(μ)用公式: $\mu = \ln(c_t/c_0)/t$ 计算,式中, μ 为细胞比生长率(d^{-1}); c_t 和 c_0 分别代表时间 t 和初始时的光密度; t 为 As(V) 添加下的暴露时间^[24]。

1.5.2 介质中无机磷质量浓度的测定

取 2 mL 新鲜藻液,经离心分离后,取上清液过 0.45 μm 的一次性醋酸纤维素注射器式过滤器,滤液经适当稀释后,用磷钼蓝分光光度法测定其溶解性无机磷(DIP)质量浓度(GB 17378.4-2007)。

1.5.3 叶绿素荧光特性测定

取新鲜藻液 2 mL, 经 5 min 暗适应后, 通过高级浮游植物荧光分类仪 (PHYTO-PAM, 德国 Walz) 对藻液中的叶绿素 a (Chl-a) 和实际光能转化率 (Yield) 进行分析测定。

1.6 数据处理和分析

实验结果均为 3 次平行数据的平均值和标准差, 实验数据采用统计软件 IBM SPSS Statistics 21 进行单因素方差分析 (ANOVA) 和 Pearson 相关关系分析, 采用 GraphPad Prism 6.0 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 不同磷源下铜绿微囊藻的生长特性

从不同磷源下铜绿微囊藻光密度 (D) 随时间的变化 [图 1(a)] 可见, 初始的 5 d 内藻细胞增殖无明显差异 ($P > 0.1$), 其细胞密度呈线性增加 (DIP、ATP-P 和 β -P 源下比生长率 μ 分别为 0.101、0.095 和 0.105 d^{-1}), β -P 相对表现出较高的生长潜能。有机磷 (ATP-P 和 β -P) 源下藻细胞在第 5 d 达到峰值, 之后则表现出细胞增殖的相对停滞, 而无机磷 (PO_4^{3-}) 源下藻细胞比生长率则持续上升 (0.15 d^{-1})。以上表明外界磷形态的变化对细胞增殖的影响在短时间 (5 d) 不能充分体现, 这可能是受胞内残留磷及 DOP 介质中亦有部分 DIP 存在的共同影响^[25,26]。培养期内 (7 d) β -P 较 ATP-P 磷源下铜绿微囊藻较高的 μ 值说明该藻更容易吸收利用低分子量的磷形态。第 7d 时 ATP-P 和 β -P 源下藻细胞密度分别为 DIP 源的 78.0% 和 75.4%, 说明磷作为制约藻类生长的限制性因子之一, 其形态上的差异

能影响藻类的繁殖, 同时也说明铜绿微囊藻可单独以该两种形态的有机磷为磷源进行繁殖^[21]。这与先前研究所证实的 *Synechococcus* 和 *Trichodesmium* 可分别以 ATP-P 和 β -P 为唯一磷源相一致^[21,27]。DIP 作为藻类生长需求的最佳磷源, 其含量被耗尽或者不足时, 浮游藻类可以通过水解酶的作用利用部分溶解态有机磷 (DOP) 进行生长繁殖^[28-31]。

Chl-a 作为浮游藻类光合作用的重要产物, 可有效反映藻体生物量和营养状态的变化。DIP、ATP-P 和 β -P 这 3 种磷源下 Chl-a 与 D 均显著正相关 ($P < 0.01$), 其 Pearson (双侧) 相关系数分别为: 0.893、0.568 和 0.851。虽然不同磷源时 Chl-a 随时间也均呈增加趋势, 但不同磷形态间则表现出较大差异 [图 1(b)]。可见, 藻体 Chl-a 较 D 值更能直观地反映出不同形态磷源对铜绿微囊藻生长的影响。 β -P 条件下铜绿微囊藻的 Chl-a 相对较高 [图 1(b)], 说明其较 DIP 和 ATP 在短时间内更有利于藻细胞 Chl-a 的合成。ATP-P 条件下 Chl-a 在前 5d 相对较低, 之后则表现出明显的增高, 甚至高于 DIP 和 β -P 源下铜绿微囊藻的 Chl-a。这可能与先前研究曾指出的 β -P 可以被藻类直接吸收利用, 而 ATP-P 则需要经过碱性磷酸酶水解后才能被吸收利用有关^[29]。以上说明铜绿微囊藻对 DOP 的适应性受其磷形态的影响而有所差异; 不同形态 DOP 对藻细胞 Chl-a 的合成在作用时间上也不尽相同。Fu 等^[21] 研究指出集胞藻 (*Synechococcus* CCMP 1334), 在 P 限制状态时吸收 ATP-P 比 DIP 更快。本实验中铜绿微囊藻 Chl-a 的增长则表现出相同的趋势。

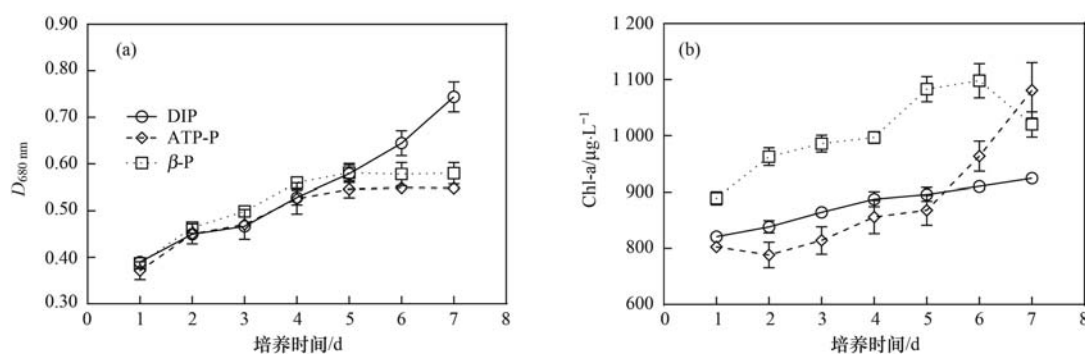


图 1 不同磷源下藻细胞 D 值和 Chl-a 随时间变化

Fig. 1 Changes in algal cell optical density (D) and Chlorophyll a (Chl-a) of *M. aeruginosa* with time under different phosphorus regimes

Yield 作为反映藻细胞生理的最核心指标, 可以很好地反映藻细胞的“生长潜能”。由不同 P 源下铜绿微囊藻 Yield 随时间变化 (图 2) 可知: 藻体 Yield

在前 3 d 没有明显差异, 之后则表现出随时间增加 Yield 值降低的趋势, 说明其生长潜能逐渐降低, 但 DIP 源下藻体较 DOP 时则表现出相对较高的“生长

潜能”,说明作为藻类必需营养盐——磷,其形态上的差异在影响藻体磷摄取的同时,也影响藻体对光能的转化. DOP 为唯一磷源时不利于藻体对光能的转化,究其原因可能是 DOP 导致藻体磷营养受限而所致. 这和先前研究一致,即磷作为藻类发生光合作用的底物,其含量的缺乏或者限制会使得藻体 Yield 值降低^[32]. Kruskopf 等^[33]通过研究曾指出 Yield 不能作为藻体营养状态或相对生长率的一个稳定性指标,这与本实验中得到的不同磷源下藻体 Yield 值与 Chl-a 和 *D* 均呈负相关关系相一致,亦即 Yield 不能有效响应藻体的营养差异和细胞增殖及生物量的增加,其相关系数如表 1 所示.

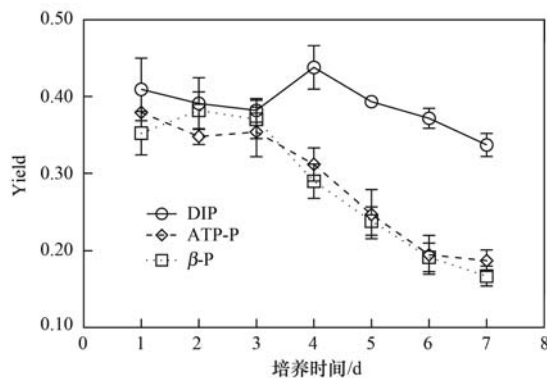


图 2 不同磷源下藻细胞 Yield 随时间变化

Fig. 2 Changes in algal Yield of *M. aeruginosa* under different phosphorus regimes

表 1 不同磷源下 Yield 值与 Chl-a 和 *D* 的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 1 Pearson correlation coefficient between Chl-a and *D* with Yield under different phosphorus regimes

项目	DIP	β-P	ATP-P
Chl-a	-0.202	-0.601 **	-0.864 **
<i>D</i>	-0.434 *	-0.662 **	-0.599 **

1) * 表示 $P < 0.05$ (双侧), ** 表示 $P < 0.01$ (双侧), $n = 21$

2.2 不同磷源下介质中 DIP 变化

铜绿微囊藻在不同磷源培养条件下,每天测得介质中 DIP 质量浓度变化如图 3 所示. 可明显看出, DIP 源下介质中 DIP 质量浓度呈线性急剧下降, 培养 7 d 时介质中 DIP 减少 25%, 说明铜绿微囊藻对 DIP 具有很高的吸收、储存能力,这与 Li 等^[34]在不同 DIP 水平 ($0.1 \sim 4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下得出的结果相一致. DOP 源下介质中第 1 d 即测到 DIP,且质量浓度随培养时间呈上升趋势,到第 7 d 时介质中磷基本以 DIP 形式存在,说明铜绿微囊藻具有将 ATP-P 和 β-P 转化为 DIP 的能力. ATP-P 和 β-P 源下介质中 DIP 质量浓度在前 2 d 基本一致,从第 3 d 开始则

表现出 ATP-P 源下介质中 DIP 质量浓度要高于 β-P,说明藻体对淡水环境中这两种有机磷的转化, ATP-P 相对更快. 有研究指出铜绿微囊藻胞内磷的缺乏,会导致其分泌磷酸产生的关键性化学物质——碱性磷酸酶^[35]. 因此,铜绿微囊藻可通过碱性磷酸酶对 DOP 的持续水解,将 DOP 转变为 DIP,从而提高对 DOP 进行利用^[34]. 但也有研究指出浮游藻类对 DOP 的代谢并不受碱性磷酸酶^[25]的调节. 可见,碱性磷酸酶并不是影响藻类利用 DOP 的唯一因素. 目前依然没有证据证明藻细胞可以直接吸收利用 DOP,因而关于铜绿微囊藻对 DOP 的转化与代谢机制仍待深入研究.

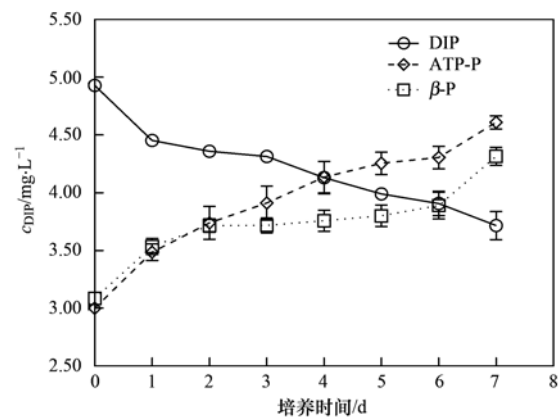


图 3 不同磷源下介质中 DIP 质量浓度的变化

Fig. 3 Changes of DIP in *M. aeruginosa* culture media under different phosphorus regimes

由 Pearson (双侧) 检验得出: DIP 源下介质中 DIP 与 Chl-a 显著负相关 ($P < 0.01$), 相关系数为 -0.859 , 说明该磷源下藻细胞的增殖通过摄取介质中的无机磷实现, DIP 是该体系初级生产力的支配因子. 而 ATP-P 和 β-P 源下介质中 DIP 质量浓度与 Chl-a 显著正相关 ($P < 0.05$), 相关系数为 0.848 和 0.409 , 与藻体 Yield 值显著负相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 -0.849 和 -0.642 , 说明藻体增殖可加速介质中有机磷向无机磷转化,但这种转化并不利于藻体生长潜能(光能转化率)的提高,这可能是由于受限于外界磷形态的差异而导致. 藻细胞一方面可以将外界有机磷转化为无机磷,而另一方面外界磷形态的转化也影响着藻细胞磷的摄取与生长,具体表现为第 5~7 d 时藻细胞 *D* 值基本不变[图 1 (a)]进入一个相对适应期.

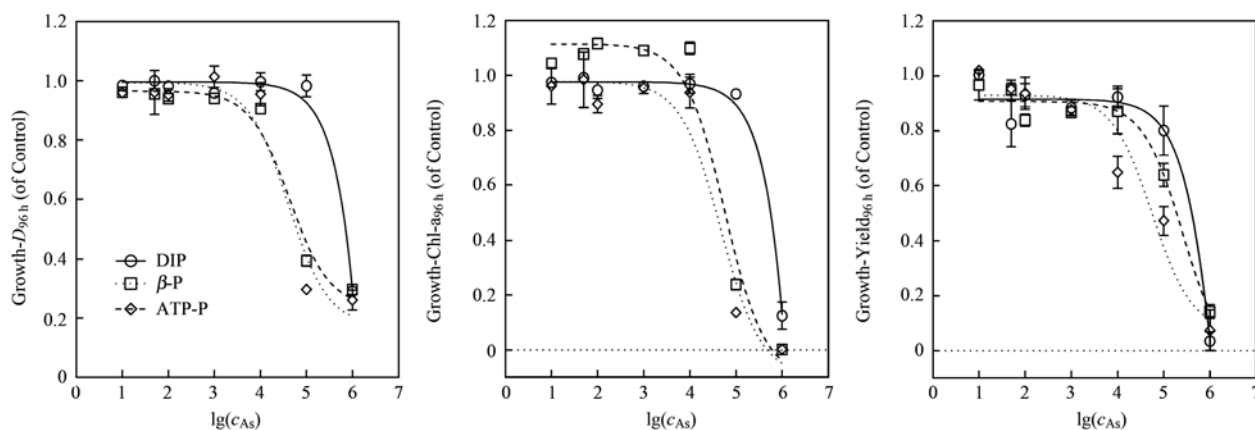
2.3 砷酸盐对藻的生长胁迫

为确定不同磷源下 As(V) 对铜绿微囊藻生长的胁迫特征,测定了各磷源下铜绿微囊藻对 As(V) 的 96 h 生长响应,并对结果进行 S 型剂量-响应曲

线拟合以得出其 96 h EC_{50} (图 4). 由 D 、Chl-a 和 Yield 分别所得出的 96 h EC_{50} 及其相关系数 (R^2) 如表 2 所示, 结果表明不同磷源下 $As(V)$ 对铜绿微囊藻的毒性数据均能够用 S 型剂量-响应曲线很好地进行拟合. 由 D 、Chl-a 和 Yield 这 3 个指标的方差分析得出铜绿微囊藻对 $As(V)$ 的无可观测效应质量浓度 (NOEC) 和最低可观测效应质量浓度 (LOEC) 一致, 均表现为 β -P 和 ATP-P 源下两者相同 (NOEC 和 LOEC 分别为: $10^4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10^5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 而 DIP 源要高出 DOP 源 1 个数量级 (NOEC 和 LOEC 分别为: $10^5 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10^6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), 说明对所选择的 3 种磷源而言藻体对 $As(V)$ 的毒性响应不受 DOP 形态差异的影响, 仅与其摄取的磷源是有机还是无机形态有关; 无机形态磷可显著减轻铜绿微囊藻受 $As(V)$ 的胁迫.

尽管不同指标所得出的 96 h EC_{50} 间存在较大

差异, 但不同磷源下藻体对 $As(V)$ 的耐受性均表现为: $DIP > \beta\text{-P} > \text{ATP-P}$ (表 2). DIP 为磷源时所得到的 96 h EC_{50} 值以 D 指标为最高, 其次是 Chl-a; Yield 指标则表现为最敏感, 较 Chl-a 和 D 要低近 3 个数量级. 与此相反, β -P 和 ATP-P 为磷源时的 96 h EC_{50} 则表现为: $D < \text{Chl-a} < \text{Yield}$, 说明藻体对 $As(V)$ 的毒性响应受磷源不同而表现为生理指标间存在较大差异. 各磷源下由 D 和 Chl-a 得出的 96 h EC_{50} 数量级相一致, 而由 Yield 值则表现出明显的不同, 这与先前研究所证实的 D 和 Chl-a 具有很好相关性, 而 Yield 并非藻体营养缺乏与否的较好衡量指标^[36]相一致. Yield 作为反映藻体生长潜能的重要指标, 由其得出的不同磷源下藻体对 $As(V)$ 的 96 h EC_{50} 间较 D 和 Chl-a 而言具有较好的区分度 (表 2), 可很好地表征不同磷源下 $As(V)$ 对藻细胞的胁迫响应.



此处 Growth 是指用对照组样品的各指标进行标准化后的数值

图 4 不同磷源下 $As(V)$ 对铜绿微囊藻 96h 的生长胁迫及 S 型剂量-响应曲线拟合

Fig. 4 The *M. aeruginosa* 96h growth (D , Chl-a and Yield) dependence on $As(V)$ concentrations under different phosphorus regimes

表 2 不同磷源下各指标所得 96h $EC_{50}/\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 96h EC_{50} obtained from D , Chl-a and Yield under different phosphorus regimes/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	DIP	β -P	ATP-P
D	5.08×10^9	4.28×10^4	4.02×10^4
R^2	0.974	0.975	0.919
Chl-a	1.60×10^9	5.70×10^4	4.67×10^4
R^2	0.979	0.964	0.929
Yield	3.11×10^6	2.57×10^5	5.58×10^4
R^2	0.916	0.925	0.896

3 结论

(1) 以 DOP 为磷源的铜绿微囊藻生长较缓; 铜绿微囊藻可单独利用有机的 β -P 和 ATP-P 磷源进行生长, 但更易吸收利用环境中低分子量的 β -P, 其在 β -P 磷源下生长相对更好.

(2) DOP 磷源下介质中 DIP 质量浓度的增加证实铜绿微囊藻可将 DOP 进行磷酸化, 且对介质中高分子量的 ATP-P 的磷酸化更快.

(3) Yield 不能作为不同磷源下藻体营养缺乏与否的稳定性衡量指标, 但其可以很好地表征 $As(V)$ 对藻细胞的胁迫响应.

(4) 不同磷源下铜绿微囊藻对 $As(V)$ 的耐受性均表现为: $DIP > \beta\text{-P} > \text{ATP-P}$, 与其在不受 $As(V)$ 影响时的生长相一致. 由 D 、Chl-a 和 Yield 得出的 96h EC_{50} 表明铜绿微囊藻对 $As(V)$ 的生长响应在 DIP 源下以 Yield 表现最敏感, 而 DOP 磷源下 D 最为敏感.

参考文献:

[1] 张洪, 林超, 雷沛, 等. 海河流域河流富营养化程度总体评

- 估[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2336-2344.
- [2] 金颖薇, 朱广伟, 许海, 等. 太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 936-945.
- [3] Silva E I L. Emergence of a *Microcystis* bloom in an urban water body, Kandy lake, Sri Lanka[J]. Current Science, 2003, **85**(6): 723-725.
- [4] 周庆, 韩士群, 严少华, 等. 凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 597-604.
- [5] 吴轩浩, 高佳逸, 严杨蔚, 等. 无机氮和有机氮对铜绿微囊藻生长和产毒影响的比较[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(3): 677-683.
- [6] 王振红, 罗专溪, 车霏霏, 等. 不同磷水平下铜绿微囊藻对砷酸盐的吸收和净化[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 533-538.
- [7] Wang Z H, Luo Z X, Yan C Z. Accumulation, transformation, and release of inorganic arsenic by the freshwater cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(10): 7286-7295.
- [8] 张兰英, 刘娜, 孙立波, 等. 现代环境微生物技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [9] Smedley P L, Kinniburgh D G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters [J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**(5): 517-568.
- [10] Rahman M A, Hasegawa H, Lim R P. Bioaccumulation, biotransformation and trophic transfer of arsenic in the aquatic food chain[J]. Environmental Research, 2012, **116**: 118-135.
- [11] Duncan E G, Maher W A, Foster S D. Contribution of arsenic species in unicellular algae to the cycling of arsenic in marine ecosystems[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(1): 33-50.
- [12] Lewis Jr W M, Wurtsbaugh W A, Paerl H W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of inland waters [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(24): 10300-10305.
- [13] Lei M, Wan X M, Huang Z C, et al. First evidence on different transportation modes of arsenic and phosphorus in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* [J]. Environmental Pollution, 2012, **161**: 1-7.
- [14] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [15] Scavia D, Allan J D, Arend K K, et al. Assessing and addressing the re-eutrophication of Lake Erie: central basin hypoxia[J]. Journal of Great Lakes Research, 2014, **40**(2): 226-246.
- [16] Nanny M A, Minear R A. Characterization of soluble unreactive phosphorus using ^{31}P nuclear magnetic resonance spectroscopy [J]. Marine Geology, 1997, **139**(1-4): 77-94.
- [17] Bai F, Liu R, Yang Y J, et al. Dissolved organic phosphorus use by the invasive freshwater diazotroph cyanobacterium, *Cylindrospermopsis raciborskii* [J]. Harmful Algae, 2014, **39**: 112-120.
- [18] 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 等. 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4118-4126.
- [19] Karl D, Michaels A, Bergman B, et al. Dinitrogen fixation in the world's oceans[J]. Biogeochemistry, 2002, **57**(1): 47-98.
- [20] Huang B Q, Hong H S. Alkaline phosphatase activity and utilization of dissolved organic phosphorus by algae in subtropical coastal waters[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, **39**(1-12): 205-211.
- [21] Fu F X, Zhang Y H, Feng Y Y, et al. Phosphate and ATP uptake and growth kinetics in axenic cultures of the cyanobacterium *Synechococcus* CCMP 1334 [J]. European Journal of Phycology, 2006, **41**(1): 15-28.
- [22] Harke M J, Berry D L, Ammerman J W, et al. Molecular response of the bloom-forming cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa*, to phosphorus limitation [J]. Microbial Ecology, 2012, **63**(1): 188-198.
- [23] Karadjova I B, Slaveykova V I, Tsalev D L. The biouptake and toxicity of arsenic species on the green microalga *Chlorella salina* in seawater [J]. Aquatic Toxicology, 2008, **87**(4): 264-271.
- [24] Zeng J, Yang L Y, Wang W X. Cadmium and zinc uptake and toxicity in two strains of *Microcystis aeruginosa* predicted by metal free ion activity and intracellular concentration [J]. Aquatic Toxicology, 2009, **91**(3): 212-220.
- [25] Huang B Q, Ou L J, Hong H S, et al. Bioavailability of dissolved organic phosphorus compounds to typical harmful dinoflagellate *Prorocentrum donghaiense* Lu [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **51**(8-12): 838-844.
- [26] Wu Z X, Shi J Q, Li R H. Comparative studies on photosynthesis and phosphate metabolism of *Cylindrospermopsis raciborskii* with *Microcystis aeruginosa* and *Aphanizomenon flos-aquae* [J]. Harmful Algae, 2009, **8**(6): 910-915.
- [27] Orchard E D, Ammerman J W, Lomas M W, et al. Dissolved inorganic and organic phosphorus uptake in *Trichodesmium* and the microbial community: The importance of phosphorus ester in the Sargasso Sea [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55**(3): 1390-1399.
- [28] Lövdal T, Tanaka T, Thingstad T F. Algal-bacterial competition for phosphorus from dissolved DNA, ATP, and orthophosphate in a mesocosm experiment [J]. Limnology and Oceanography, 2007, **52**(4): 1407-1419.
- [29] 杨维东, 钟娜, 刘洁生, 等. 不同磷源及浓度对利玛原甲藻生长和产毒的影响研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2760-2765.
- [30] Sebastian M, Ammerman J W. Role of the phosphatase PhoX in the phosphorus metabolism of the marine bacterium *Ruegeria pomeroyi* DSS-3 [J]. Environmental Microbiology Reports, 2011, **3**(5): 535-542.

- [31] 于倩,王清,袁泽轶,等.不同形态磷源对具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)生长和磷酸酶活性的影响[J].海洋与湖沼,2015,46(5):1018-1023.
- [32] Lippemeier S, Frampton D M F, Blackburn S I, et al. Influence of phosphorus limitation on toxicity and photosynthesis of *Alexandrium minutum* (Dinophyceae) monitored by in-line detection of variable chlorophyll fluorescence [J]. Journal of Phycology, 2003, 39(2): 320-331.
- [33] Kruskopf M, Flynn K J. Chlorophyll content and fluorescence responses cannot be used to gauge reliably phytoplankton biomass, nutrient status or growth rate [J]. New Phytologist, 2006, 169(3): 525-536.
- [34] Li J H, Wang Z W, Cao X, et al. Effect of orthophosphate and bioavailability of dissolved organic phosphorous compounds to typically harmful cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 92(1-2): 52-58.
- [35] Hoppe H G. Phosphatase activity in the sea [J]. Hydrobiologia, 2003, 493(1-3): 187-200.
- [36] Napoléon C, Raimbault V, Claquin P. Influence of nutrient stress on the relationships between pam measurements and carbon incorporation in four phytoplankton species [J]. PLoS One, 2013, 8(6): e66423.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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