

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚梦丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
苾芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响

王执伟^{1, 2}, 刘冬梅^{1, 2*}, 张文娟^{1, 2}, 崔福义^{1, 2*}

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 城市水资源开发利用(北方)国家工程研究中心, 哈尔滨 150090)

摘要: 在静态暴露的条件下, 利用流式细胞术等检测技术, 考察了不同浓度的溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响, 并对溴酸盐的毒性作用机制进行了初步的探索. 结果表明, 当溴酸盐浓度达到 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 持续暴露 96 h 时, 能够引起普通小球藻比生长率显著降低、细胞膜完整性显著降低、酯酶活性显著升高、线粒体膜电位显著升高、活性氧水平显著增加. 扫描电镜可直观表明细胞膜受到损伤. 由此说明, 由于溴酸盐毒性的持续作用, 使得活性氧在藻细胞内积累, 普通小球藻自身的调节功能不能及时消除过多的活性氧, 从而引起细胞膜完整性、酯酶活性和线粒体膜电位出现异常情况, 藻细胞生理功能出现紊乱, 藻细胞结构遭到破坏, 最终导致普通小球藻生长受到抑制或死亡.

关键词: 溴酸盐; 普通小球藻; 流式细胞术; 生理特性; 致毒机制

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2158-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.06.019

Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of *Chlorella vulgaris*

WANG Zhi-wei^{1, 2}, LIU Dong-mei^{1, 2*}, ZHANG Wen-juan^{1, 2}, CUI Fu-yi^{1, 2*}

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. National Engineering Research Center of Urban Water Resources, Harbin 150090, China)

Abstract: The effects of bromate on the growth and physiological characteristics of *Chlorella vulgaris* were investigated via the static exposure experiments and tested by flow cytometry. The results showed that when *Chlorella vulgaris* was continuously exposed to bromate for 96 h at $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the specific growth rates and cell membrane integrity decreased significantly, while the esterase activity, mitochondrial membrane potential and reactive oxygen species (ROS) increased significantly. The membrane-damaged cells could be found from the scanning electron microscopy analysis. It could be identified that ROS were overproduced in presence of bromate, which could not be eliminated by *Chlorella vulgaris* in time through self-regulation. The excess ROS could lead to abnormal situation of cell membrane integrity, esterase activity and mitochondrial membrane potential, disorder of physiology function and damage of cell structure. It could be concluded that *Chlorella vulgaris* died or their growth was inhibited by the existence of bromate.

Key words: bromate; *Chlorella vulgaris*; flow cytometry; physiological characteristics; toxicity mechanism

溴酸盐是一种比较常见的氧化剂, 在食品加工(我国已经禁用)、黄金提取和羊毛生产等领域中都有广泛的应用^[1]. 同时溴酸盐也是一种典型的饮用水臭氧消毒副产物. 由于溴酸盐能够诱发试验动物肾脏细胞肿瘤、腹膜间皮肿瘤和甲状腺滤泡细胞肿瘤而被人们广泛关注^[2~5]. 国际癌症研究机构将溴酸盐归为 2B 类致癌物. 我国生活饮用水卫生标准规定在使用臭氧时, 水质溴酸盐含量的限值为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

有研究表明, 溴酸盐一旦进入水体则具有高度的稳定性, 常规水处理工艺很难将其去除^[6], 而其他针对溴酸盐去除或控制的工艺和技术正在开发和研究阶段^[1], 这使得人类活动产生的溴酸盐对自然水体存在潜在的健康风险. Genuino 等^[7]研究发现菲律宾马尼拉自来水中溴酸盐含量为 $7 \sim 138 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 河流中平均溴酸盐浓度为 $15 \sim 80 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 地下水和废水样品中溴酸盐含量高达 $246 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

和 $342 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 在我国, Wu 等^[8]调研发现上海水样的溴酸盐浓度最高可达 $28.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 由此可知, 溴酸盐已经对某些国家和地区的自然水体造成了污染, 但是有关溴酸盐对水生生物的影响还不确定, 对溴酸盐的毒性作用机制还没有系统地报道.

藻类是水生生态系统食物链中的初级生产者^[9], 进入水体中的污染物对其产生的毒性效应将影响水生食物链的能量传递, 进而影响高营养级生物及整个水生生态系统^[10]. 同时藻类具有个体小、繁殖快、对毒物敏感等特点而广泛地应用于水体安全评价^[11]. 普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 是一种

收稿日期: 2015-12-06; 修订日期: 2016-01-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808052); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07403-001)

作者简介: 王执伟(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: wangzw13@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mei18@hit.edu.cn; hit_cuifuyi@hotmail.com

典型绿藻,在淡水环境中广泛存在,并且在生态毒理学研究中是一种很好的模式生物^[12],在纳米材料^[13]、金属离子^[14]、农药^[15]以及一些新兴污染物^[16]的毒性研究中都有广泛的应用.流式细胞术是一种在液流系统中观测细胞的技术,它可以在功能水平上对单细胞或其他生物粒子进行定量分析^[17],并且具有简单、快速、准确等特点,近年来也逐渐应用到藻类毒性检测的研究中^[18].

本研究以普通小球藻为试验对象,通过流式细胞术等检测技术,考察在不同浓度的暴露过程中,溴酸盐对藻细胞的生长以及生理特性的影响,探讨溴酸盐对藻细胞的毒性作用机制,以期溴酸盐潜在的生物健康风险提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 主要试剂

溴酸钾 (Potassium bromate, KBrO_3), 购于国药集团化学试剂有限公司,分析纯. 用超纯水配制成 $250 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液, 4°C 保存. 碘化丙啶 (Propidium iodide, PI) 购于 Sigma 公司,用超纯水配制成 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液, 4°C 保存. 荧光素二乙酸酯 (Fluorescein diacetate, FDA) 购于 Sigma 公司,用丙酮配制成 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液, -20°C 保存. 罗丹明 123 (Rhodamine 123, Rh123) 购于 Sigma 公司,用超纯水配制成 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液, 4°C 保存. 2', 7'-二氯荧光素二乙酸酯 (2', 7'-Dichlorodihydrofluorescein diacetate, H_2DCFDA) 购于 Sigma 公司,用乙醇配制成 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的储备液, -20°C 保存.

1.2 藻种与培养

普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*), 购于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库, 编号 FACHB1068. 培养条件为: 温度 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 光照强度约 $3\,000 \text{ lx}$, 光暗比为 12:12, 在无菌条件下用 BG11 培养基进行培养, 每天定时人工振荡若干次.

1.3 溴酸盐暴露试验

在无菌条件下, 选取生长状态良好并处于对数生长期的普通小球藻进行溴酸盐静态暴露试验. 试验设置溴酸盐浓度分别为 0、0.5、1、2、4、8 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 初始藻密度为 $12.5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$. 试验连续进行 4 d, 分别于 0、24、48、72、96 h 测定相应指标.

1.4 藻细胞比生长速率的测定

用紫外-可见分光光度计 (T6 系列, 普析通用)

测定藻液在 680 nm 下的光密度, 通过藻细胞血球计数板显微计数与光密度之间的线性方程计算藻细胞密度, 进而计算藻细胞的比生长速率. 计算公式如下:

$$\mu = \frac{\ln N_t - \ln N_0}{t - t_0} \quad (1)$$

式中, μ 为时间 $0 \sim t$ 之间的比生长速率; N_0 、 N_t 分别为 0 和 t 时刻的藻细胞数.

1.5 流式细胞仪检测

试验采用流式细胞仪 (FACSCalibur 型, BD 公司) 检测藻细胞各个荧光参数.

参照 Liu 等^[19]的方法, 用 PI 染色方法对普通小球藻细胞膜完整性进行检测. 染色时, 取 1 mL 藻液, 加入 PI 储备液使 PI 终浓度为 $60 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 室温避光孵育 20 min , 经筛网过滤后上流式细胞仪, 用 FL2 通道检测.

参照 Shi 等^[20]的方法, 用 FDA 染色方法对普通小球藻酯酶活性进行检测. 染色时, 取 1 mL 藻液, 加入 FDA 储备液使 FDA 终浓度为 $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 室温避光孵育 8 min , 经筛网过滤后上流式细胞仪, 用 FL1 通道检测.

参照 Liu 等^[19]的方法用 Rh123 染色方法对普通小球藻线粒体膜电位进行检测. 染色时, 取 1 mL 藻液, 加入 Rh123 储备液使 Rh123 终浓度为 $26 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 室温避光孵育 30 min , 染色后用 PBS 清洗 3 次细胞, 经筛网过滤后上流式细胞仪, 用 FL1 通道检测.

参照 Yu 等^[21]的方法, 用 H_2DCFDA 染色方法对普通小球藻细胞内活性氧水平进行检测. 染色时, 取 1 mL 藻液, 加入 H_2DCFDA 储备液使 H_2DCFDA 终浓度为 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 室温避光孵育 60 min , 染色后用 PBS 清洗藻细胞, 经筛网过滤后上流式细胞仪, 用 FL1 通道检测.

以相对荧光强度表示各个指标测试水平.

$$\text{相对荧光强度} = \frac{\text{测试组平均荧光强度}}{\text{对照组平均荧光强度}} \times 100\% \quad (2)$$

1.6 藻细胞微观形貌观察

将藻液于 $5\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 5 min , 倒掉上清液收集藻细胞, 用 PBS 清洗 3 次, 然后将藻细胞悬浮于 2.5% 的戊二醛中固定, 离心后用 PBS 清洗 3 次, 经系列乙醇脱水、干燥、喷金后, 用扫描电子显微镜 (Helios Nanolab600i, FEI 公司) 观察藻细胞表面的微观形态.

1.7 数据处理

试验数据中试验组和对照组之间的显著性差异采用 SPSS 20.0 统计分析软件中的单因素方差分析方法进行统计分析,以 $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 溴酸盐对普通小球藻比生长速率的影响

经不同浓度的溴酸盐暴露后,对普通小球藻比生长速率的影响如图 1 所示。从中可以发现,当溴酸盐浓度小于 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,普通小球藻的比生长速率与空白组相比没有明显区别,而当溴酸盐浓度为 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,则比生长速率有明显的下降,分别为空白组的 87.8% 和 83.7%。由此说明,当溴酸盐的浓度达到一定程度时,普通小球藻的生长会受到抑制作用,并且溴酸盐浓度越高抑制作用越明显。除比生长速率外,其他能够反映藻细胞生理特性的检测指标也非常重要,有利于考察溴酸盐毒性作用机制。

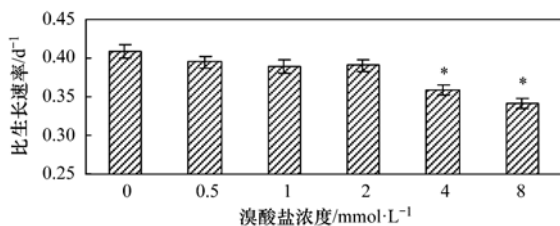


图 1 溴酸盐对普通小球藻比生长速率的影响

Fig. 1 Effect of bromate on the specific growth rate of *Chlorella vulgaris*

2.2 溴酸盐对普通小球藻细胞膜完整性的影响

细胞膜往往是细胞抵御外界伤害的第一道屏障^[19],细胞膜的完整性对于藻细胞正常生理代谢有着十分重要的意义,因此细胞膜完整性是反映藻细胞生理特性的一项重要指标。PI 是一种核酸染料,当细胞膜受损时,PI 可以进入细胞内与核酸结合,同时发出红色荧光;而当细胞膜结构完整时,则 PI 染料不能进入细胞内部而不显荧光^[22]。因此,通过流式细胞仪检测 PI 荧光信号可以分析藻细胞膜的完整性,PI 荧光强度越强说明细胞膜受损越严重。

溴酸盐对普通小球藻细胞膜完整性的影响如图 2 所示。从中可以看出,在溴酸盐暴露 24 h 时,浓度小于 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溴酸盐对细胞膜完整性的影响不大,与空白组相比没有显著性差别。而当浓度为 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PI 相对荧光强度与空白

组相比有显著性增强,表明细胞膜完整性受到损伤。但是随着暴露时间的延长,增加到 48 h 和 72 h 时,所有试验组 PI 相对荧光强度与空白组相比均无显著性差异。由此可以说明,当普通小球藻暴露于溴酸盐 24 h 内,大于 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的溴酸盐能够引起细胞膜受到损伤,但随着暴露时间的延长,细胞逐渐适应溴酸盐毒性的影响,藻细胞自身的修复作用使得受损细胞膜得到修复。当溴酸盐暴露 96 h,浓度为 2、4 和 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,PI 相对荧光强度再次显著增强,达到 129.1%、134.6% 和 172.5%。说明此时藻细胞自身的修复能力已经无法抵挡溴酸盐的毒性作用,导致细胞膜完整性受到破坏。藻细胞膜在毒性胁迫下受到损伤的现象在很多毒理学研究中都有报道^[23~25]。

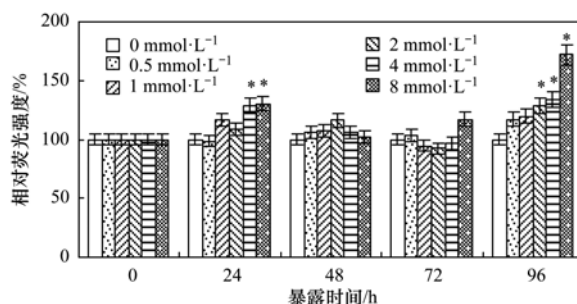


图 2 溴酸盐对普通小球藻细胞膜完整性的影响

Fig. 2 Effect of bromate on the cell membrane integrity of *Chlorella vulgaris*

2.3 溴酸盐对普通小球藻酯酶活性的影响

酯酶活性可以反映细胞的新陈代谢活性^[20],在毒理学的研究中是比较敏感的指标。FDA 能够透过细胞膜进入细胞内部,但本身不发荧光,经细胞内的酯酶水解产物可以发出荧光。因此,通过检测相应的荧光信号可以分析藻细胞的酯酶活性^[26]。

图 3 为溴酸盐对普通小球藻酯酶活性的影响。从中可知,当溴酸盐暴露时间为 24 h 时,各个试验组对普通小球藻酯酶活性没有显著性影响。随着暴露时间的延长,溴酸盐浓度越高,酯酶活性越大。尤其是暴露 96 h 时,有非常明显的剂量-效应关系,当溴酸盐浓度为 2、4、 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,FDA 相对荧光强度为 144.1%、167.3%、184.5%。酯酶活性的升高表明细胞的新陈代谢活性增加,一方面藻细胞保持较高的酯酶活性可能是一种修复策略,通过提供更多的能量来维持酶和化合物的合成以及基因的表达^[27],避免藻细胞死亡,另一方面可能是溴酸盐的毒性作用使得藻细胞代谢功能紊乱,不利于藻细胞生长繁殖。Liu 等^[19]的研究表明,全

氟烷酸能够引起斜生栅藻细胞内 FDA 荧光强度的增强,并且认为此时的细胞膜通透性增强,细胞膜的选择透过性减弱。

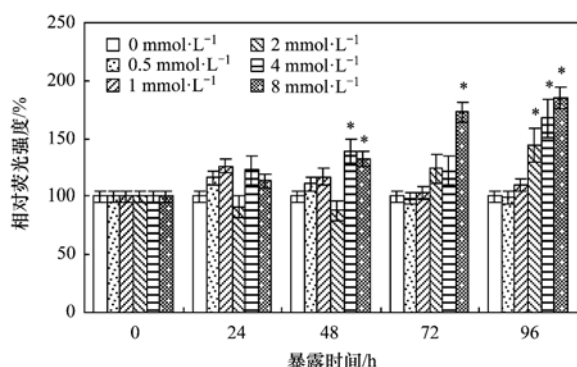


图3 溴酸盐对普通小球藻酯酶活性的影响

Fig. 3 Effect of bromate on the esterase activity of *Chlorella vulgaris*

2.4 溴酸盐对普通小球藻线粒体膜电位的影响

除细胞膜完整性和酯酶活性外,线粒体膜电位的变化也是表征细胞生理特性的重要指标。线粒体是细胞生成 ATP 的主要地点,是一种具有高负电性膜电位的细胞器^[28],其功能的异常对细胞的能量代谢有重要的影响。Rh123 是一种可透过细胞膜的阳离子荧光染料,能够与线粒体结合,其荧光强度可以反映线粒体膜电位大小^[29]。通过分析线粒体膜电位变化可以判断线粒体功能是否正常,进而分析细胞的生理状态。

图4是溴酸盐对藻细胞线粒体膜电位的影响。从中可以看出,在溴酸盐暴露24h时,浓度为4 mmol·L⁻¹和8 mmol·L⁻¹的溴酸盐使线粒体膜电位显著升高,但随着暴露时间延长到48h和72h时,线粒体膜电位重新回到正常水平。因此可以说明暴露24h时,线粒体膜电位的升高是由于溴酸盐的毒性作用引起的应激反应。此外,从图4中还可以看出,在试验所考察的96h内,浓度低于2 mmol·L⁻¹的溴酸盐始终都未能引起线粒体膜电位出现明显异常,说明在此浓度范围内,普通小球藻通过自身调节可以抵抗溴酸盐的毒性作用,使线粒体保持正常的生理功能。但当暴露时间为96h,浓度为8 mmol·L⁻¹的溴酸盐会再次引起线粒体膜电位显著升高,相对荧光强度达到172.4%。说明此时已经超出藻细胞自身的调节能力,线粒体功能出现紊乱,能量代谢受到影响,进而影响藻细胞繁殖,使藻细胞生长受到抑制作用。线粒体膜电位升高的现象在Cu²⁺对月牙藻^[28]和全氟烷酸对斜生栅藻^[19]的影响中也有报道。

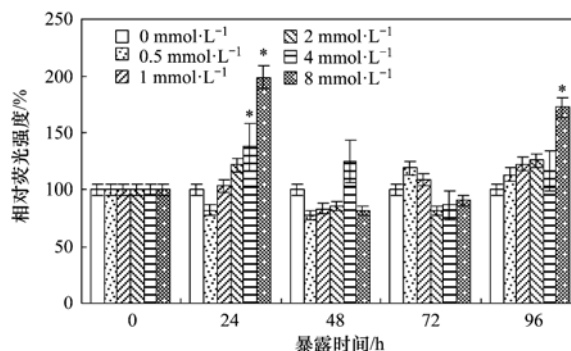


图4 溴酸盐对普通小球藻线粒体膜电位的影响

Fig. 4 Effect of bromate on the mitochondrial membrane potential of *Chlorella vulgaris*

2.5 溴酸盐对普通小球藻细胞内活性氧水平的影响

H₂DCFDA 是检测细胞中 ROS 水平的有效试剂,进入细胞后原来无荧光的 H₂DCFDA 经一系列反应,会被 ROS 氧化生成能够产生绿色荧光的物质^[30]。在藻细胞的正常生理代谢过程中,叶绿体和线粒体等细胞器均可能产生 ROS^[31]。正常生长的藻细胞内 ROS 的产生和清除处于动态平衡状态,不会对藻细胞产生严重损伤。但当藻细胞处于逆境中时,活性氧水平会增多^[32],如果超过生物体内在的防御能力,就会造成藻细胞的损伤。

图5是溴酸盐对普通小球藻细胞内 ROS 水平的影响。从中可以看出,在所考察的暴露时间内,当溴酸盐的浓度小于2 mmol·L⁻¹时,藻细胞内 ROS 与空白组相比无显著性差别,说明此时细胞内在的防御体系(例如超氧化歧化酶,过氧化氢酶等抗氧化酶)可以抵抗溴酸盐的毒性作用。而随着溴酸盐浓度的升高,暴露时间的延长,ROS 水平增多,并且远高于空白组 ROS 水平。暴露96h时,浓度为4 mmol·L⁻¹和8 mmol·L⁻¹的溴酸盐使相对荧光强度达到175.4%和196.0%。说明此时藻细胞自身

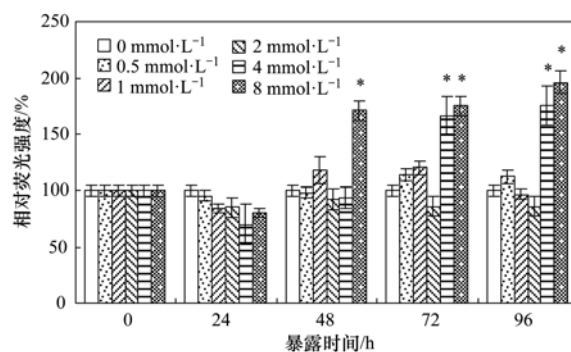


图5 溴酸盐对普通小球藻 ROS 水平的影响

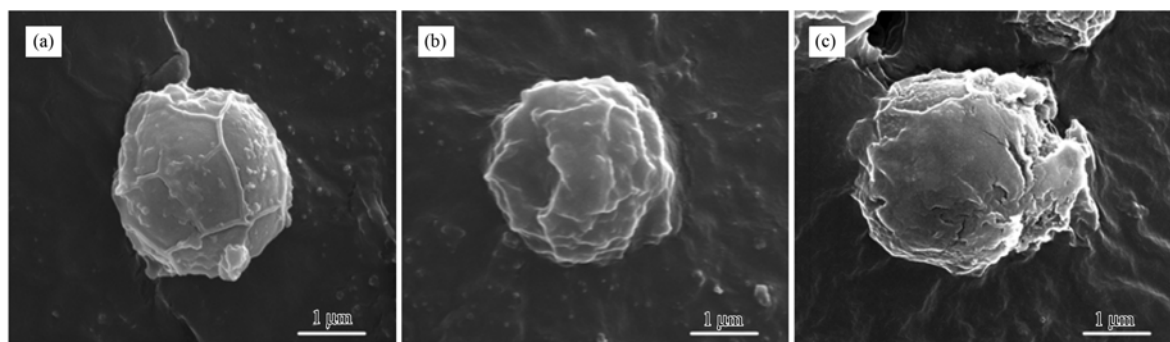
Fig. 5 Effect of bromate on the levels of reactive oxygen species of *Chlorella vulgaris*

的防御能力无法抵抗高浓度溴酸盐的毒性作用. 过多的 ROS 可以引起细胞膜发生膜脂过氧化, 酶抑制, DNA 和蛋白质损伤^[33], 从而抑制藻细胞生长或造成藻细胞死亡.

2.6 溴酸盐对普通小球藻微观形态的影响

图 6 是溴酸盐暴露 96 h 后对普通小球藻微观形态的影响. 从中可以看出, 空白组藻细胞表面光

滑且个体饱满. 当溴酸盐浓度为 $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 细胞表面出现褶皱, 但细胞大小变化不大, 细胞膜和细胞壁仍保持完整状态. 当溴酸盐浓度为 $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 藻细胞细胞膜出现破损现象, 并且藻细胞体积变大. 这表明在溴酸盐的毒性作用下, 藻细胞的细胞结构已经出现损伤, 藻细胞生理功能将受到影响, 藻细胞生长受到抑制或死亡.



(a) $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; (b) $2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; (c) $8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

图 6 暴露 96 h 后溴酸盐对普通小球藻微观形态的影响

Fig. 6 Effect of bromate on the microstructure of *Chlorella vulgaris* after 96 h exposure

通过对试验结果的分析 and 讨论可以发现, 由于藻细胞自身的调节作用, 短时间内能够抵抗溴酸盐的毒性作用, 使藻细胞生理功能维持正常水平. 但随着溴酸盐的持续作用, 自身调节能力不足以抵抗高浓度溴酸盐的毒性作用, 使得 ROS 在细胞内积累, 增多. 过多的 ROS 导致细胞膜完整性、线粒体膜电位和酯酶活性出现异常情况, 藻细胞生理功能发生紊乱, 细胞结构遭到破坏, 最终抑制藻细胞生长繁殖或导致细胞死亡. 因此, 溴酸盐引起藻细胞产生过多活性氧导致藻细胞生理功能异常是其重要的毒性作用机制.

3 结论

(1) 高浓度溴酸盐能够引起普通小球藻生长受到抑制, 并且溴酸盐浓度越高抑制作用越明显.

(2) 溴酸盐毒性作用能够引起普通小球藻细胞结构遭到破坏, 新陈代谢功能紊乱, 线粒体功能紊乱, 活性氧水平增加.

(3) 溴酸盐引起藻细胞产生过多活性氧导致藻细胞生理功能异常是其重要的毒性作用机制.

致谢: 感谢哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室李哲煜老师在流式细胞仪的使用与数据处理方面所给予的帮助.

参考文献:

[1] Butler R, Godley A, Lytton L, *et al.* Bromate environmental

contamination: review of impact and possible treatment [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2005, **35**(3): 193-217.

[2] Ahlborn G J, Delker D A, Roop B C, *et al.* Early alterations in protein and gene expression in rat kidney following bromate exposure [J]. Food and Chemical Toxicology, 2009, **47**(6): 1154-1160.

[3] Arai T, Kelly V P, Minowa O, *et al.* The study using wild-type and *Ogg1* knockout mice exposed to potassium bromate shows no tumor induction despite an extensive accumulation of 8-hydroxyguanine in kidney DNA [J]. Toxicology, 2006, **221**(2-3): 179-186.

[4] Crosby L M, Morgan K T, Gaskill B, *et al.* Origin and distribution of potassium bromate-induced testicular and peritoneal mesotheliomas in rats [J]. Toxicologic Pathology, 2000, **28**(2): 253-266.

[5] Kurokawa Y, Takayama S, Konishi Y, *et al.* Long-term in vivo carcinogenicity tests of potassium bromate, sodium-hypochlorite, and sodium-chlorite conducted in Japan [J]. Environmental Health Perspectives, 1986, **69**: 221-235.

[6] 刘润生, 张燕. 饮用水中溴酸盐的去除技术 [J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(12): 66-70.

[7] Genuino H C, Espino M P B. Occurrence and sources of bromate in chlorinated tap drinking water in Metropolitan Manila, Philippines [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, **62**(3): 369-379.

[8] Wu Q, Zhang T, Sun H W, *et al.* Perchlorate in tap water, groundwater, surface waters, and bottled water from China and its association with other inorganic anions and with disinfection byproducts [J]. Archives of Environmental Contamination and

- Toxicology, 2010, **58**(3): 543-550.
- [9] Xiong B, Zhang W, Chen L, *et al.* Effects of Pb(II) exposure on *Chlorella protothecoides* and *Chlorella vulgaris* growth, malondialdehyde, and photosynthesis-related gene transcription [J]. Environmental Toxicology, 2014, **29**(11): 1346-1354.
- [10] 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维. 四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3386-3390.
- [11] 雷静静, 冯佳, 谢树莲. 纳米氧化镍对3种绿藻的毒性效应[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(10): 1842-1849.
- [12] Liu J Q, Sun Z Q, Lavoie M, *et al.* Ammonium reduces chromium toxicity in the freshwater alga *Chlorella vulgaris* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(7): 3249-3258.
- [13] Zhou H, Wang X J, Zhou Y, *et al.* Evaluation of the toxicity of ZnO nanoparticles to *Chlorella vulgaris* by use of the chiral perturbation approach [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2014, **406**(15): 3689-3695.
- [14] Ouyang H L, Kong X Z, Lavoie M, *et al.* Photosynthetic and cellular toxicity of cadmium in *Chlorella vulgaris* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2013, **32**(12): 2762-2770.
- [15] Liu L, Zhu B, Wang G X. Azoxystrobin-induced excessive reactive oxygen species (ROS) production and inhibition of photosynthesis in the unicellular green algae *Chlorella vulgaris* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(10): 7766-7775.
- [16] Pablos M V, García-Hortigüela P, Fernández C. Acute and chronic toxicity of emerging contaminants, alone or in combination, in *Chlorella vulgaris* and *Daphnia magna* [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(7): 5417-5424.
- [17] 李超, 韩金路, 王玉刚, 等. 流式细胞仪的工作原理及应用[J]. 中国实用医药, 2009, **4**(20): 235-236.
- [18] Suman T Y, Rajasree S R R, Kirubakaran R. Evaluation of zinc oxide nanoparticles toxicity on marine algae *Chlorella vulgaris* through flow cytometric, cytotoxicity and oxidative stress analysis [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **113**: 23-30.
- [19] Liu W, Chen S, Quan X, *et al.* Toxic effect of serial perfluorosulfonic and perfluorocarboxylic acids on the membrane system of a freshwater alga measured by flow cytometry [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, **27**(7): 1597-1604.
- [20] Shi X L, Kong F X, Yu Y, *et al.* Survival of *Microcystis aeruginosa* and *Scenedesmus obliquus* under dark anaerobic conditions [J]. Marine and Freshwater Research, 2007, **58**(7): 634-639.
- [21] Yu Y, Kong F X, Wang M L, *et al.* Determination of short-term copper toxicity in a multispecies microalgal population using flow cytometry [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **66**(1): 49-56.
- [22] 苏文, 孔繁翔, 于洋, 等. 水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 150-155.
- [23] Wang Z Y, Li J, Zhao J, *et al.* Toxicity and internalization of CuO nanoparticles to prokaryotic alga *Microcystis aeruginosa* as affected by dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(14): 6032-6040.
- [24] 冯政, 郑新梅, 刘红玲, 等. 全氟辛酸对斜生栅藻细胞膜特性影响研究[J]. 生态毒理学报, 2010, **5**(4): 537-542.
- [25] Xia B, Chen B J, Sun X M, *et al.* Interaction of TiO₂ nanoparticles with the marine microalga *Nitzschia closterium*: growth inhibition, oxidative stress and internalization [J]. Science of the Total Environment, 2015, **508**: 525-533.
- [26] Vigneault B, Percot A, Lafleur M, *et al.* Permeability changes in model and phytoplankton membranes in the presence of aquatic humic substances [J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(18): 3907-3913.
- [27] Hong Y, Hu H Y, Li F M. Physiological and biochemical effects of allelochemical ethyl 2-methyl acetoacetate (EMA) on cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **71**(2): 527-534.
- [28] Machado M D, Lopes A R, Soares E V. Responses of the alga *Pseudokirchneriella subcapitata* to long-term exposure to metal stress [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **296**: 82-92.
- [29] 岳磊, 张垚, 张楠曦. 流式细胞仪检测线粒体膜电位方法的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2015, **31**(4): 393-397.
- [30] Saison C, Perreault F, Daigle J C, *et al.* Effect of core-shell copper oxide nanoparticles on cell culture morphology and photosynthesis (photosystem II energy distribution) in the green alga, *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. Aquatic Toxicology, 2010, **96**(2): 109-114.
- [31] Apel K, Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction [J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, **55**(1): 373-399.
- [32] Liu W H, Au D W T, Anderson D M, *et al.* Effects of nutrients, salinity, pH and light: dark cycle on the production of reactive oxygen species in the alga *Chattonella marina* [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, **346**(1-2): 76-86.
- [33] Dat J, Vandenabeele S, Vranová E, *et al.* Dual action of the active oxygen species during plant stress responses [J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2000, **57**(5): 779-795.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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