

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

**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

编者按 ..... (403)

我国化学品的风险评价及风险管理 ..... 王铁宇,周云桥,李奇锋,吕永龙 (404)

土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用 ..... 吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)

中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素 ..... 黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)

关中地区冬季PM<sub>2.5</sub>中碳气溶胶的污染特征及来源解析 ..... 田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)

利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分 ..... 刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)

南京夏季市区VOCs特征及O<sub>3</sub>生成潜势的相关性分析 ..... 杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)

北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系 ..... 孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)

重庆垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究 ..... 段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)

三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征 ..... 张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)

长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析 ..... 谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)

青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程 ..... 孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)

西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估 ..... 郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)

坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价 ..... 余成,陈爽,张路 (499)

近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征 ..... 沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)

舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征 ..... 郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄煊芳 (513)

模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究 ..... 李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)

中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究 ..... 王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)

江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献 ..... 韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)

巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征 ..... 奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)

合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)

桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征 ..... 朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态 ..... 李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)

洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析 ..... 李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)

三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响 ..... 江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)

pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响 ..... 王辉,孙波,关小红 (588)

EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响 ..... 周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)

镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能 ..... 王婷,朱春山,胡承志 (602)

微生物对砷的氧化还原竞争 ..... 杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)

处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征 ..... 曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)

污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应 ..... 景明,王磊 (622)

异养硝化-好氧反硝化菌 *Burkholderia* sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析 ..... 邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫渊辉 (630)

基于新一代测序技术的A<sup>2</sup>O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析 ..... 田美,刘汉湖,申欣 (638)

1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性 ..... 孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)

纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究 ..... 舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)

3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性 ..... 徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)

合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究 ..... 范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)

芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性 ..... 吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)

芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能 ..... 张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)

季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响 ..... 林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)

增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响 ..... 陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)

基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征 ..... 王幼奇,白一茹,王建宇 (710)

不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制 ..... 朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素 ..... 王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)

几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响 ..... 刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)

河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征 ..... 吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶澍,刘文新 (740)

湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响 ..... 罗鹏程,李航,王曙光 (750)

溴酸盐对水生生物的急性毒性效应 ..... 王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)

自组装哑铃状Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解 ..... 黄鑫辰,宗刚,刘焯焯,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)

盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N<sub>2</sub>O产生的影响 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)

污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例 ..... 丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)

《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)

# 溴酸盐对水生生物的急性毒性效应

王执伟, 刘冬梅\*, 张文娟, 崔福义\*

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

**摘要:** 采用标准毒性测试方法, 分析了溴酸钾、溴酸钠、溴化钾对水生生态系统中不同营养级生物包括发光菌、绿藻、水蚤、斑马鱼的急性毒性效应。结果表明, 3 种污染物对发光菌发光强度几乎没有影响, 溴酸钾对斜生栅藻的 96 h  $EC_{50}$  为  $738.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 对大型蚤和裸腹蚤的 48 h  $EC_{50}$  分别为  $154.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $161.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 48 h  $LC_{50}$  分别为  $198.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $175.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 对斑马鱼的 96 h  $LC_{50}$  为  $931.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。溴酸钠对斜生栅藻的 96 h  $EC_{50}$  为  $540.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 对大型蚤和裸腹蚤的 48 h  $EC_{50}$  分别为  $127.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $111.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 48 h  $LC_{50}$  分别为  $161.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $123.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 对斑马鱼的 96 h  $LC_{50}$  为  $1065.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而溴化钾对以上几种受试生物的影响远小于溴酸钾和溴酸钠的影响, 对比可知引起受试生物产生毒性效应的原因是由溴酸盐引起的。毒性作用规律显示, 随着暴露时间的增加, 溴酸盐的毒性效应越明显, 受试生物对溴酸盐的毒性效应的敏感顺序为: 大型蚤、裸腹蚤 > 斜生栅藻 > 斑马鱼 > 普通小球藻、发光菌。

**关键词:** 溴酸盐; 毒性效应; 发光菌; 水蚤; 绿藻; 斑马鱼

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0756-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.047

## Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms

WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei\*, ZHANG Wen-juan, CUI Fu-yi\*

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** Acute toxic effects of potassium bromate, sodium bromate and potassium bromide on luminescent bacteria, water flea, green alga and zebrafish were studied using standard toxic testing methods. The results showed that the pollutants had no effect on the luminous intensity of luminescent bacteria. The 96 h  $EC_{50}$  of potassium bromate on *Scenedesmus obliquus* was  $738.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 48 h  $EC_{50}$  on *Daphnia magna* and *Moina* was  $154.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $161.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , while 48 h  $LC_{50}$  was  $198.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $175.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and 96 h  $LC_{50}$  on zebrafish was  $931.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . The 96 h  $EC_{50}$  of sodium bromate on *Scenedesmus obliquus* was  $540.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 48 h  $EC_{50}$  on *Daphnia magna* and *Moina* was  $127.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $111.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , while 48 h  $LC_{50}$  was  $161.80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $123.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , and 96 h  $LC_{50}$  on zebrafish was  $1065.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ . But the effects of potassium bromide on the above several kinds of aquatic organisms were far smaller than those of potassium bromate and sodium bromate. The toxic effects on test organisms were due to the impacts of bromate after the comparison of different pollutants, and the effects were more obvious with the increase of exposure time. The order of sensitivity to the toxic effects of bromate was *Daphnia magna*, *Moina* > *Scenedesmus obliquus* > zebrafish > *Chlorella vulgaris*, luminescent bacteria.

**Key words:** bromate; toxic effects; luminescent bacteria; water flea; green alga; zebrafish

溴酸盐是一种典型的饮用水臭氧消毒副产物。当原水中含有  $\text{Br}^-$  时,  $\text{Br}^-$  可以被臭氧分子直接氧化生成溴酸盐或者通过  $\cdot\text{OH}$  氧化生成溴酸盐<sup>[1]</sup>。目前, 很多研究表明溴酸盐可以诱发试验动物肾脏细胞肿瘤<sup>[2,3]</sup>, 另外许多遗传毒性试验也呈现阳性结果<sup>[4-7]</sup>。因此国际癌症研究机构将溴酸盐归为 2B 类致癌物。我国的生活饮用水卫生标准 (GB 5749-2006), 首次将溴酸盐纳入饮用水国家标准, 规定在使用臭氧时, 水质溴酸盐含量的限值为  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[8]</sup>。同样, 我国食品安全国家标准 (GB 19298-2014) 中也规定, 包装饮用水中溴酸盐含量不得超过  $0.01 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[9]</sup>。

然而溴酸盐不仅仅在饮用水中产生, 还可以通

过氯化或臭氧化电厂冷却水, 次氯酸钠等消毒剂的生产和使用等过程产生<sup>[10]</sup>。同时溴酸盐在食品加工 (我国已经禁用)、黄金提取和羊毛生产等领域中有广泛的应用<sup>[11]</sup>。这些人类活动势必会导致溴酸盐进入自然水体, 同时由于溴酸盐一旦进入水体则具有高度的稳定性, 因此这会促进溴酸盐对自然水体的污染<sup>[11]</sup>。

以前普遍认为溴酸盐在地表水和地下水中一般

收稿日期: 2015-05-27; 修订日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50808052); 国家自然科学基金创新研究群体项目 (51121062)

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

不存在,但是随着溴酸盐检测技术的发展,溴酸盐已经在许多调查研究中检出<sup>[12]</sup>。例如,英国地下水蓄水层中溴酸盐的含量达到  $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[11]</sup>; 印度西南沿海喀拉拉邦自来水中浓度为  $5.34 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,但在井水中则未检出<sup>[13]</sup>; 美国洛杉矶两处水库的溴酸盐含量分别为  $68 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $106 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[14]</sup>; 菲律宾马尼拉自来水中溴酸盐含量为  $7 \sim 138 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,两条河流的平均溴酸盐浓度为  $15 \sim 80 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而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  $342 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[15]</sup>。在我国, Wu 等<sup>[16]</sup> 调研发现上海水样的溴酸盐浓度最高可达  $28.4 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。刘勇建等<sup>[17]</sup> 研究发现北京有 3 个饮用水厂的源水中含有溴酸盐,含量为  $0.6 \sim 2.2 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。杨永亮等<sup>[18]</sup> 发现沈阳细河浅层地下水中,有两处溴酸盐的浓度存在超标的情况,分别为  $31 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $15 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

由以上研究可知,溴酸盐已经对许多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态系统的潜在风险还不确定,对水生生物的影响还没有系统的报道,因此评估溴酸盐对水生生态系统的潜在影响,探讨其对水体不同营养级生物的毒性效应具有重要意义。

一个健全的水生生态系统主要包括单细胞生物、浮游植物、浮游动物和鱼类等营养级生物。其中,发光菌、绿藻、水蚤和斑马鱼是几个不同营养级的代表性生物,并且在水生生物毒理学中也常常作为判断某种物质毒性的标准测试生物。本研究通过分析溴酸盐对明亮发光杆菌、费氏弧菌、青海弧菌、斜生栅藻、普通小球藻、大型蚤、裸腹蚤和斑马鱼的急性毒性,探讨溴酸盐毒性作用的特征,以期评价溴酸盐的毒性效应提供基础数据,判断其对水生生物可能造成的危害,为有关生态风险评价提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

溴酸钾、溴酸钠、溴化钾购于国药集团化学试剂有限公司,分析纯。

发光菌(明亮发光杆菌 502、费氏弧菌、青海弧菌 Q67)冻干粉,由北京滨松光子技术股份有限公司提供。

绿藻(斜生栅藻 *Scenedesmus obliquus*、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,编号分别为 FACHB417, 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。

水蚤(大型蚤 *Daphnia magna*、裸腹蚤 *Moina*),大型蚤购买于中国科学院生态环境研究中心,裸腹蚤捕捞于松花江。两者均在实验室条件下培养 3 代以上,形成单克隆纯品系。培养条件为:温度  $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ,光照强度  $800 \sim 1\ 000 \text{ lx}$ ,光暗比为  $16:8$ 。培养用水为曝气 3 d 以上的自来水,每天用去除培养基的普通小球藻喂食。

斑马鱼,购买于中科院水生生物研究所,平均体长  $3 \text{ cm} \pm 0.5 \text{ cm}$ ,体重  $0.3 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$ 。实验室驯化 1 个月以上。培养条件为:雌雄比  $1:1$ ,水温  $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 、光暗比  $14:10$ ,光照强度约  $1\ 000 \text{ lx}$ 。培养用水为曝气 3 d 以上的自来水,每日喂食两次冷冻赤虫。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 发光菌发光抑制试验

首先按照各发光菌的使用说明书对菌种进行复苏。具体操作步骤为:将明亮发光杆菌 502、费氏弧菌、青海弧菌 Q67 冻干粉置于室温下平衡 15 min,分别加入一定量的复苏稀释液,溶解后的冻干粉置于室温下 10 min 后即可用于样品的测定。

取调节好渗透压的样品 2 mL 于测试管中,以复苏稀释液作为空白对照,加入 0.05 mL 发光菌复苏液,轻轻振荡,使之充分混匀,室温放置 15 min 后,用 BHP9514 型饮用水安全快速检测仪测定发光菌的发光强度。

按照以下公式计算样品相对发光强度:

$$\text{相对发光强度} = \frac{\text{样品发光强度}}{\text{对照发光强度}} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.2 绿藻生长抑制试验

参照文献[19]进行试验。根据预试验结果,在无菌条件下,取一定量处于对数生长期的藻液及污染物储备液,用新鲜无菌 BG11 培养基稀释,使斜生栅藻和普通小球藻的初始藻密度约为  $12.5 \times 10^5 \text{ ind} \cdot \text{mL}^{-1}$  和  $12.5 \times 10^5 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,污染物浓度按等对数间距设置为  $0, 0.5, 1, 2, 4, 8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。记录第 0、24、48、72、96 h 藻液在波长为 680 nm 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,进而计算生长抑制率,通过抑制率与污染物浓度对数之间的线性方程计算 96 h 半抑制浓度  $\text{EC}_{50}$ 。

藻的生长速率及生长抑制百分率按下式计算:

$$\mu = \frac{\ln N_t - \ln N_0}{t - t_0} \quad (2)$$

$$I = \frac{\mu_c - \mu_t}{\mu_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中,  $\mu$  为时刻 0 ~  $t$  之间的平均生长速率;  $N_0$ 、 $N_t$  分别为 0 和  $t$  时刻的细胞数;  $I$  为生长抑制百分率,  $\mu_c$  和  $\mu_t$  分别为对照组和试验组中藻的平均生长速率。

### 1.2.3 水蚤急性毒性试验

参照文献[20]进行试验。根据预试验结果,按照等对数间距设置浓度梯度,每个浓度设置 5 组,每组放 5 只个体均匀,出生 6 ~ 24 h 的水蚤。试验容器为 50 mL 烧杯,试验过程不换试验溶液,中间不喂食。记录大型蚤和裸腹蚤 24 h 和 48 h 累计运动抑制数及死亡数。通过寇氏法计算 24 h 和 48 h 半抑制浓度  $EC_{50}$  和半致死浓度  $LC_{50}$  及相应的 95% 置信区间。

计算公式以  $LC_{50}$  为例,如下:

$$\lg(LC_{50}) = X_m - i \left( \sum P - 0.5 \right) \quad (4)$$

式中,  $X_m$  为最高浓度的对数;  $i$  为相邻浓度比值的对数;  $\sum P$  为各组死亡率的总和(以小数表示)。

95% 置信区间的计算公式如下。

先求标准差:

$$S \lg(LC_{50}) = i \sqrt{\sum \frac{pq}{n}} \quad (5)$$

式中,  $p$  为 1 个组的死亡率;  $q$  为  $1 - p$ ;  $i$  为相邻浓度比值的对数;  $n$  为各浓度组水蚤的数量。

$$95\% \text{ 置信区间} = \lg(LC_{50}) \pm 1.96S \lg(LC_{50}) \quad (6)$$

### 1.2.4 斑马鱼急性毒性试验

参照文献[21]进行试验。根据预试验,按照等对数间距设置浓度梯度,每个浓度设置 3 组,每组放 10 尾,个体差异不大,游动灵活的斑马鱼于 2 000 mL 烧杯中进行试验,试验过程不换试验溶液,中间不喂食。试验开始后,记录 24、48、72、96 h 斑马鱼死亡数目及任何不正常的行为。通过寇氏法计算 24、48、72、96 h 半致死浓度  $LC_{50}$  及相应的 95% 置信区间。

### 1.3 数据处理

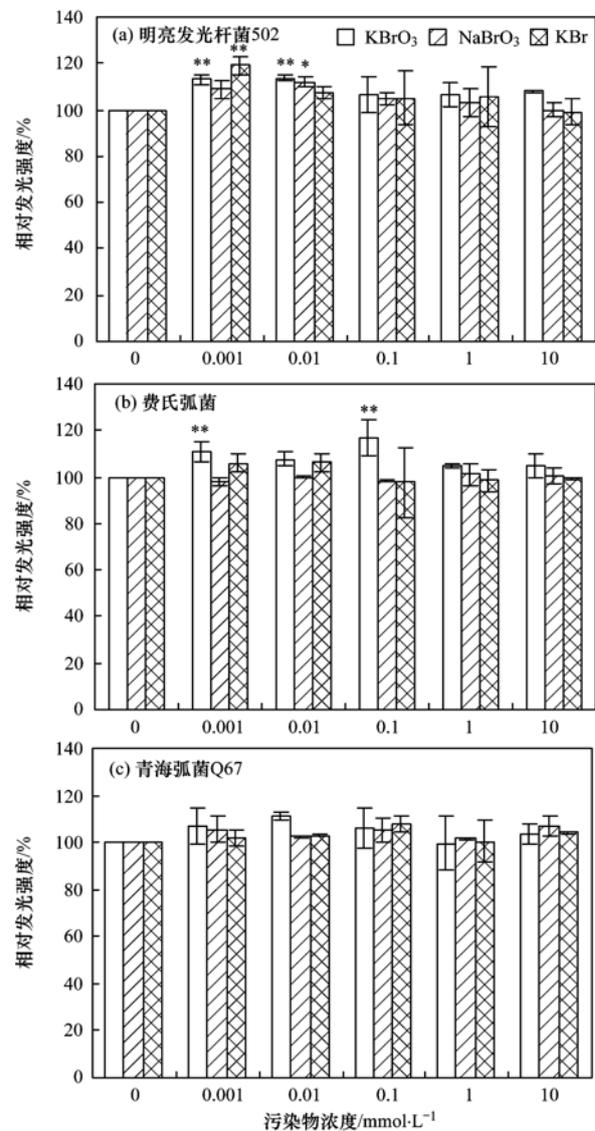
试验数据中试验组和对照组之间的显著性差异采用 SPSS 20.0 统计分析软件进行分析,以  $P < 0.05$  表示差异具有统计学意义。

## 2 结果与讨论

### 2.1 溴酸盐对发光菌的急性毒性效应

发光菌毒性测试方法具有快速、灵敏等特点,

广泛用于饮用水及废水的急性毒性测定<sup>[22]</sup>,通过测定发光菌发光强度的变化来反映水体的污染情况。图 1 是不同浓度的溴酸钾、溴酸钠和溴化钾分别作用于明亮发光杆菌 502、费氏弧菌、青海弧菌 Q67 15 min 后,对各个发光菌的相对发光强度的影响。从中可以看出,在如此大的测定浓度范围内,无论是溴酸钾、溴酸钠还是溴化钾对 3 种发光菌的相对发光强度均在 97% ~ 120% 之间,除个别数据外,整体上试验组与空白组相比没有显著性差异,并且随着污染物浓度的升高,发光菌的相对发光强度不呈规律性变化。因此说明发光菌对溴酸盐的毒性效应反



\* 表示与空白组相比具有显著性差异  $P < 0.05$ ,

\*\* 表示  $P < 0.01$

图 1 污染物对发光菌相对发光强度的影响

Fig. 1 Effects of  $KBrO_3$ ,  $NaBrO_3$  and  $KBr$  on the relative luminous intensity of luminescent bacteria

应不明显,不适于检测和评价溴酸盐的毒性效应.

### 2.2 溴酸盐对绿藻的急性毒性效应

绿藻是水生食物链的初级生产者<sup>[23]</sup>,外源化合物对绿藻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和整个水生生态系统<sup>[24]</sup>.藻类因其个体小、繁殖快、对毒物敏感<sup>[25]</sup>、在较短时间内就可得到化学物质对其世代及种群水平的影响<sup>[26]</sup>,并可直接观察细胞水平上的中毒症状等特点而得到广泛的应用.

图2为藻细胞密度与光密度之间的线性关系.从中可知,在试验所考察的不同藻密度下,显微计数得到的藻细胞密度和680 nm的光密度之间呈现良好的线性关系,斜生栅藻的线性回归方程为  $y = 112.82x - 0.0226$  ( $R^2 = 0.9986$ ),普通小球藻的线性回归方程为  $y = 193.88x - 0.6218$  ( $R^2 = 0.9983$ ),根据相应的线性回归方程,可以通过测定藻液在680 nm处的吸光度代替显微计数来确定藻细胞密度,简化试验操作.

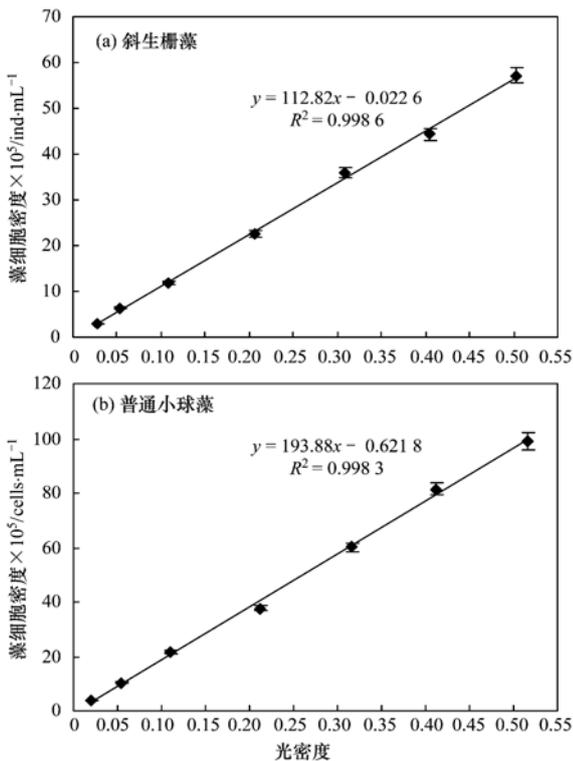


图2 斜生栅藻和普通小球藻与光密度之间的线性关系

Fig. 2 Linear relationship between cell density and optical density of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella vulgaris*

图3为斜生栅藻暴露在不同浓度的溴酸钾、溴酸钠和溴化钾中的生长曲线.从中可以看出,当暴露在溴酸钾和溴酸钠条件下,斜生栅藻都受到了不同程度的影响,随着污染物浓度的升高,斜生栅藻的

生长速度逐渐变慢,当污染物浓度达到  $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,斜生栅藻几乎停止了生长.但是当暴露在溴化钾时,斜生栅藻的生长几乎没有受到影响.图4是在不同浓度的污染物下暴露96 h后,斜生栅藻的藻密度.从中可以看出,在溴酸钾和溴酸钠的影响下,随着污染物浓度的升高,藻密度逐渐下降.当溴酸钾和溴酸钠浓度为  $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时,相应的藻密度分别为空白值的50.5%和55.2%,与空白值相比具有显著性差异.而在溴化钾的暴露下,试验组与空白组相比没有显著性差异.表1是在暴露96 h后,各污染物对斜生栅藻的半抑制浓度.从中可以看出溴

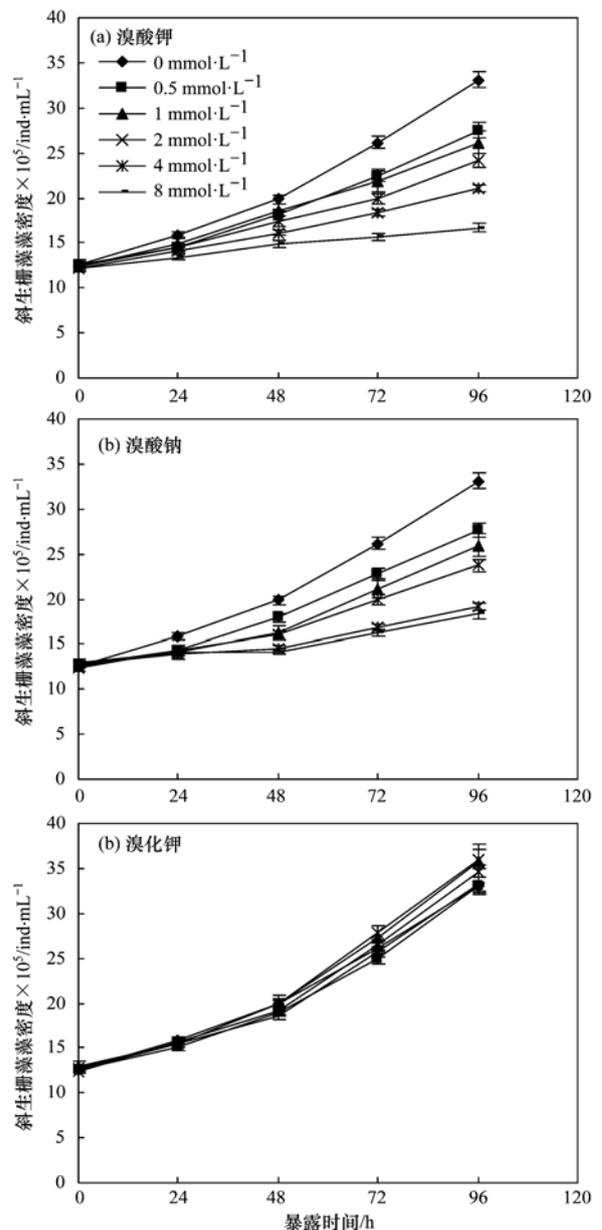


图3 污染物对斜生栅藻生长的影响

Fig. 3 Effects of  $\text{KBrO}_3$ ,  $\text{NaBrO}_3$  and  $\text{KBr}$  on the growth of *Scenedesmus obliquus*

酸钾对斜生栅藻的 96 h  $EC_{50}$  为  $4.42 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 换算成质量浓度为  $738.18 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 溴酸钠对斜生栅藻的 96 h  $EC_{50}$  为  $3.58 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ , 换算成质量浓度为  $540.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 由于溴化钾没有对斜生栅藻的生长产生抑制效果, 所以没有半抑制浓度数值. 对比可知, 虽然溴酸钾和溴酸钠的 96 h  $EC_{50}$  有一定差别, 但与溴化钾相比差别更大. 通过以上结果及分析可以得出, 溴酸钾与溴酸钠对斜生栅藻的毒性效应很相似, 其差别可能是由阳离子的不同而引起的. 但两者与溴化钾对斜生栅藻的影响差别非常显著, 这是由阴离子的不同而引起的, 因此可以说明造成斜生栅藻生长受到抑制的主要原因是溴酸盐 (即  $\text{BrO}_3^-$ ) 的毒性作用的影响.

表 1 污染物对斜生栅藻的急性毒性

Table 1 Acute toxicity of  $\text{KBrO}_3$ ,  $\text{NaBrO}_3$  and  $\text{KBr}$  on *Scenedesmus obliquus*

污染物	回归方程	96 h $EC_{50}/\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$	$R^2$	96 h $EC_{50}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
溴酸钾	$y = 16.988x + 24.763$	4.42	0.8989	738.18
溴酸钠	$y = 17.412x + 27.814$	3.58	0.9295	540.26
溴化钾	—	—	—	—

图 5 是试验开始 96 h 后, 在溴酸盐暴露下斜生栅藻藻液的宏观照片. 从中可以看出, 在溴酸盐的作用下斜生栅藻藻液颜色逐渐黄化失绿, 说明藻细胞密度逐渐降低, 死亡藻细胞逐渐增多. 显微观察发现经溴酸盐暴露后, 藻细胞出现粘连和聚集现象, 沉淀现象明显, 同时形成了一些 8 细胞群体, 并逐渐处于优势地位, 而对照组中依然是 4 细胞群体处于

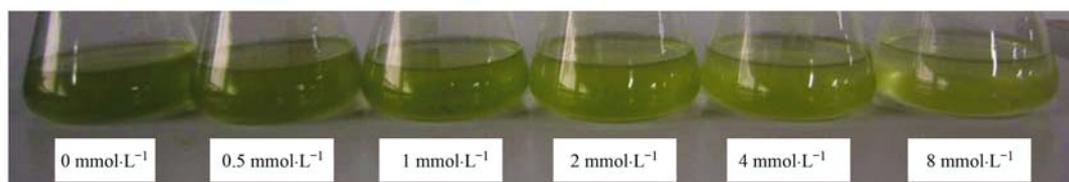
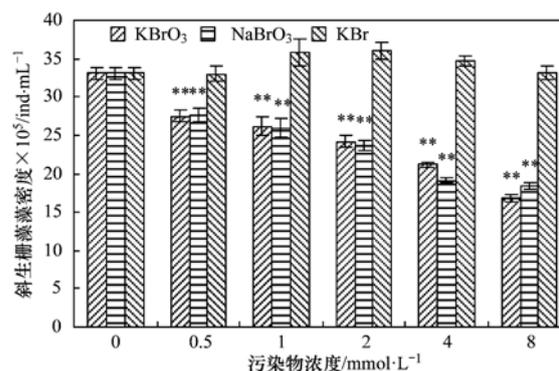


图 5 斜生栅藻藻液的照片

Fig. 5 Photo of the culture solution of *Scenedesmus obliquus*

为了考察溴酸盐对其他藻细胞是否同样存在抑制作用, 以普通小球藻为受试生物考察溴酸盐的毒性效应. 图 7 分别为普通小球藻暴露在不同浓度的溴酸钾、溴酸钠、溴化钾 96 h 内的生长曲线. 从中可以看出, 普通小球藻的生长并没有出现像斜生栅藻那样随着溴酸盐浓度的升高生长速度明显减慢的现象, 即使在溴酸盐为  $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 也没有出现非常明显的抑制效果. 图 8 为暴露 96 h 后普通小球藻的藻密度. 从中可以发现, 只有当溴酸钾和溴酸钠的浓度大于  $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 试验组才与空白组出



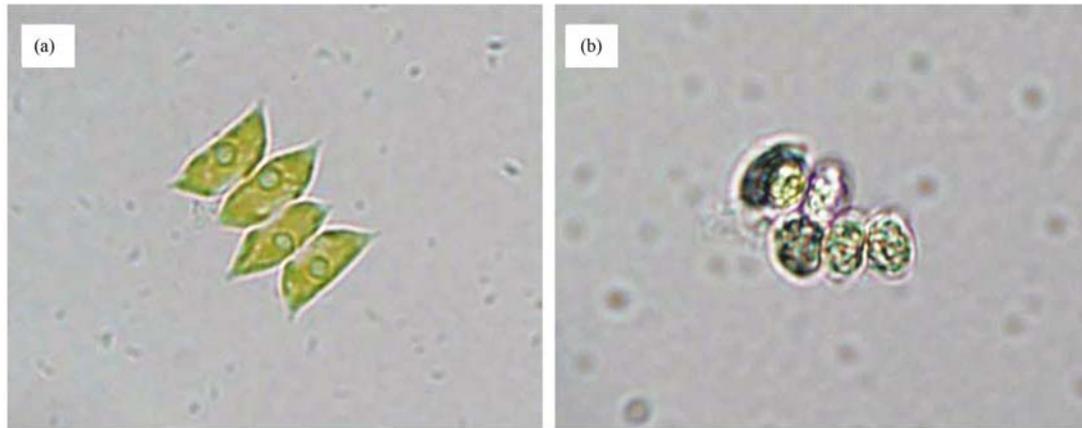
\* 表示与空白组相比具有显著性差异  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

图 4 暴露 96 h 后污染物对斜生栅藻生长的影响

Fig. 4 Effects of  $\text{KBrO}_3$ ,  $\text{NaBrO}_3$  and  $\text{KBr}$  on the growth of *Scenedesmus obliquus* after 96 h exposure

优势, 这可能是由于为了抵抗外来毒物的侵袭而自发形成的一种抵御状态. 另外死细胞及藻细胞分解碎片随着溴酸盐浓度的增加和培养时间的延长逐渐增多. 图 6 分别是暴露在  $0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  溴酸盐 96 h 后斜生栅藻的细胞形态. 从中可以发现, 在溴酸盐的作用下, 藻细胞变形, 干瘪, 细胞分裂畸形, 出现异型胞, 藻细胞处于濒临死亡的状态.

现显著性差异, 而溴化钾试验组与空白组则始终没有显著性差异. 当溴酸钾和溴酸钠浓度为  $8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 相应的藻密度为空白值的 77.3% 和 79.4%. 由于 96 h 暴露后, 普通小球藻的半抑制率在最高浓度下也没有超过 50%, 因此没有给出对普通小球藻的半抑制浓度. 因此通过上述结果可以发现溴酸盐对普通小球藻的生长抑制作用要比对斜生栅藻的生长抑制作用小得多. 相比而言, 斜生栅藻对溴酸盐的毒性更为敏感, 同时说明并非所有浮游藻类都对溴酸盐的毒性敏感. 这主要是由于不同藻



(a) 0 mmol·L<sup>-1</sup>; (b) 8 mmol·L<sup>-1</sup>

图 6 暴露 96 h 后斜生栅藻的细胞形态

Fig. 6 Cell morphology of *Scenedesmus obliquus* after 96 h exposure

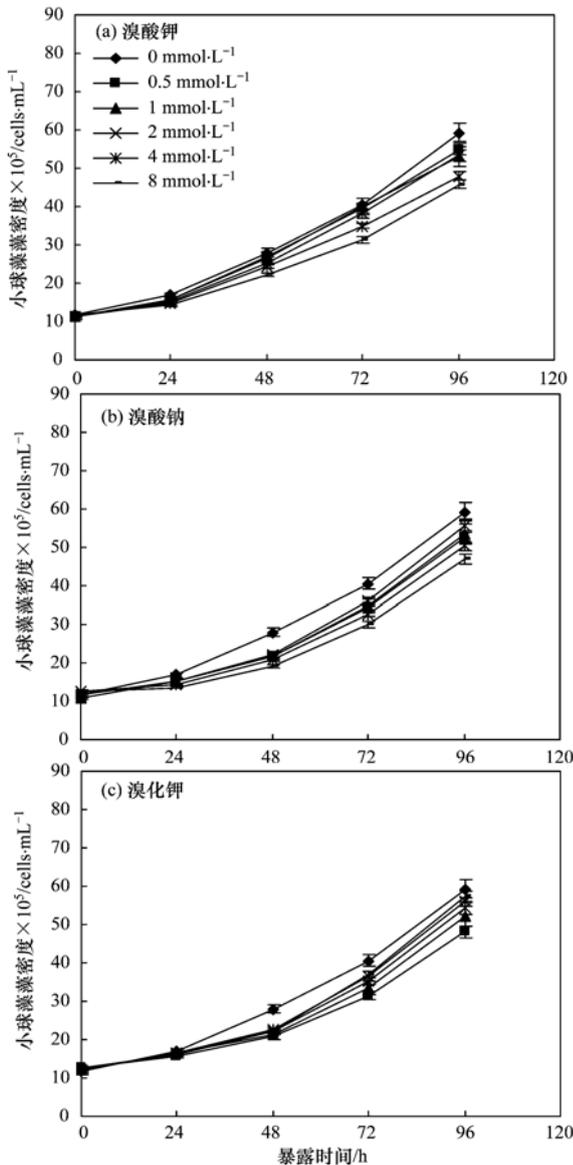
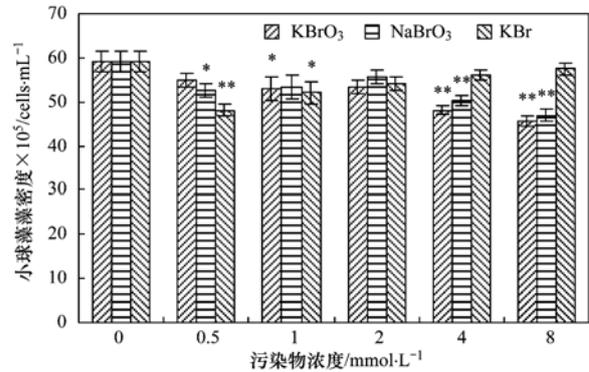


图 7 污染物对普通小球藻生长的影响

Fig. 7 Effects of  $\text{KBrO}_3$ ,  $\text{NaBrO}_3$  and  $\text{KBr}$  on the growth of *Chlorella vulgaris*

类自身生理差异造成的,这种差异还影响了不同藻类对污染物的敏感性和耐受性<sup>[27]</sup>. Fisher 等<sup>[28]</sup>以球等鞭金藻为试验生物考察了溴酸钠的毒性效应,结果表明球等鞭金藻对溴酸钠的耐受性非常强,72 h  $\text{EC}_{50}$  为 15 954  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,最大无影响浓度为 5 277  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,最低有影响浓度为 10 554  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,这与本研究结果差异较大,由此也可进一步说明不同藻类对溴酸盐毒性的敏感性和耐受性存在差异.



\* 表示与空白组相比具有显著性差异  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$

图 8 暴露 96 h 后污染物对普通小球藻生长的影响

Fig. 8 Effects of  $\text{KBrO}_3$ ,  $\text{NaBrO}_3$  and  $\text{KBr}$  on the growth of *Chlorella vulgaris* after 96 h exposure

对于普通小球藻,仍然选取在溴酸盐溶液中暴露 96 h 后的藻液进行观察. 图 9 和图 10 分别为普通小球藻藻液的宏观照片和光学显微镜观察照片. 从图 9 可以看出各浓度组藻液的颜色差别不大,并且图 10 中对照组和溴酸盐暴露组的藻细胞大都比较饱满、完整,细胞表面光滑,因此可以说明溴酸盐对普通小球藻的生长和细胞形态影响不大,与斜生栅藻相比普通小球藻对溴酸盐的毒性效应不敏感.

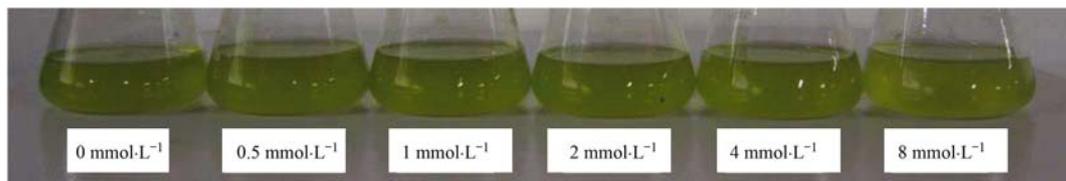


图 9 普通小球藻藻液的照片

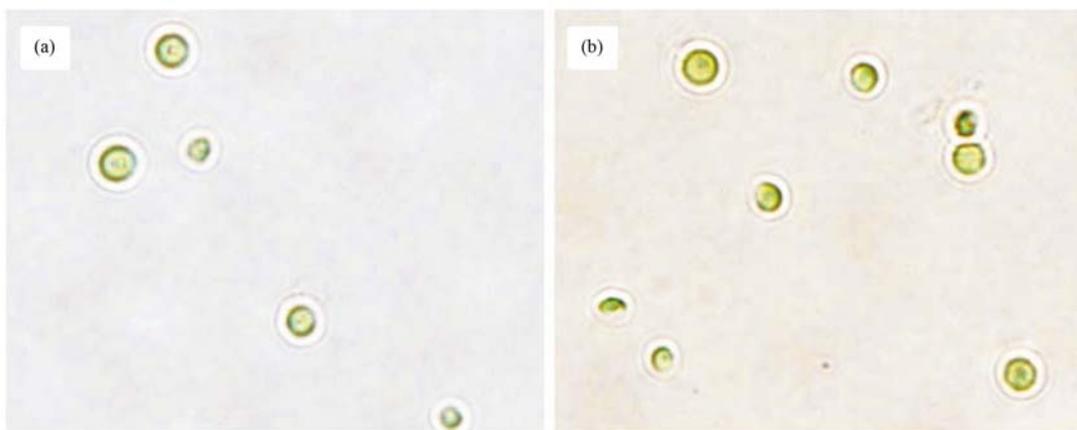
Fig. 9 Photo of the culture solution of *Chlorella vulgaris*(a) 0 mmol·L<sup>-1</sup>; (b) 8 mmol·L<sup>-1</sup>

图 10 暴露 96 h 后普通小球藻的细胞形态

Fig. 10 Cell morphology of *Chlorella vulgaris* after 96 h exposure

### 2.3 溴酸盐对水蚤的急性毒性效应

水蚤既是藻类、细菌、有机残渣的捕食者,又是鱼类等一些水生生物的饵料,是水生食物链的重要环节<sup>[29]</sup>,也是对污染物较为敏感的关键性生物<sup>[30]</sup>,对水生生态系统的健康起着重要作用. 它广泛地被用作标准化的测试方法和基本的生态毒性研究.

当外界有毒物质进入水环境后,会对大型蚤等浮游动物产生多方面的影响,首先会表现在行为上的变化<sup>[31]</sup>. 水蚤在溴酸盐暴露后首先出现快速游动,无方向性,在烧杯底部打转,随后游动缓慢、触角摆动变慢等现象,最后失去游动能力,沉入烧杯底部,直至死亡. 并且随着溴酸盐浓度的增加,死亡率逐渐升高,而对照组水蚤则未出现任何不正常现象.

表 2 和表 3 为不同暴露时间下溴酸钾、溴酸钠、溴化钾对大型蚤和裸腹蚤的  $EC_{50}$  和  $LC_{50}$ . 对比 3 种污染物对这两种水蚤的  $EC_{50}$  和  $LC_{50}$ ,可以发现溴酸钾和溴酸钠对水蚤的  $EC_{50}$  和  $LC_{50}$  远远小于溴化钾的数值,这说明阳离子的差异所产生的影响远小于阴离子差异的影响,因此造成水蚤运动受抑制和死亡的原因是由溴酸盐(即  $BrO_3^-$ )所引起的. Hutchinson 等<sup>[32]</sup>对前人研究的综述发现溴酸盐对大型蚤 48 h  $LC_{50}$  为  $179 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以  $BrO_3^-$  计),此结

果与本研究结果相近,而 Fisher 等<sup>[28]</sup>的报道为溴酸钠对大型蚤的 24 h 和 48 h  $LC_{50}$  分别为  $112.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $55.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,此结果与本研究结果有一定差异,这可能是由试验方法的差异造成的. 从表 2 和表 3 中可以发现溴酸钾和溴酸钠对大型蚤和裸腹蚤  $EC_{50}$  和  $LC_{50}$  数值相差不大,这说明大型蚤和裸腹蚤对溴酸盐的毒性敏感度相近. 同时对于两种水蚤而言,48 h 的  $EC_{50}$  和  $LC_{50}$  均小于 24 h 的  $EC_{50}$  和  $LC_{50}$ ,表明这两种蚤在溴酸盐的暴露下,毒性效应随着时间的延长越大,蚤的耐受程度越低.

### 2.4 溴酸盐对斑马鱼的急性毒性效应

斑马鱼基因与人类基因相似度高达 87%,有关化学物质在斑马鱼体内得到的毒理学研究结果在多数情况下也适用于人体环境<sup>[33]</sup>,同时作为水生生态系统的消费者,水体中的污染物也会严重影响到鱼类. 因此,在研究水生生态毒理学时开展对鱼类毒性试验也是非常必要的.

当斑马鱼与溴酸盐接触后,中毒症状表现为首先快速游动,呼吸加快,随后失去平衡,侧翻,摆动频率和游动速度减慢,最后沉入水底死亡,而对照组斑马鱼则未出现任何不正常现象.

表 4 为不同暴露时间下溴酸钾、溴酸钠、溴化钾对斑马鱼的  $LC_{50}$ . 通过对斑马鱼的  $LC_{50}$  的对比,

可以发现虽然溴酸钾和溴酸钠对斑马鱼的  $LC_{50}$  有所区别,但都远远小于溴化钾的数值,因此说明造成斑马鱼毒性效应的原因是由溴酸盐(即  $BrO_3^-$ )所引

起的.同时随着暴露时间的增加, $LC_{50}$ 降低,说明溴酸盐对斑马鱼的暴露时间越长,所表现出的毒性效应就越大,斑马鱼的耐受程度越低.

表 2 污染物对大型蚤的急性毒性

Table 2 Acute toxicity of  $KBrO_3$ ,  $NaBrO_3$  and  $KBr$  on *Daphnia magna*

项目	溴酸钾		溴酸钠		溴化钾	
	24 h	48 h	24 h	48 h	24 h	48 h
$EC_{50}/mmol \cdot L^{-1}$	1.82	0.92	2.20	0.85	8.81	7.01
$EC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	304.55	154.01	331.45	127.90	1 575.98	1 547.96
$EC_{50}95\%$ 置信区间/ $mg \cdot L^{-1}$	281.29 ~ 329.73	141.18 ~ 168.00	298.12 ~ 368.50	114.89 ~ 142.38	1 464.31 ~ 1 696.17	1 418.21 ~ 1 689.58
$LC_{50}/mmol \cdot L^{-1}$	2.63	1.19	3.01	1.07	10.32	9.41
$LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	439.48	198.52	455.26	161.80	1 875.24	1 891.50
$LC_{50}95\%$ 置信区间/ $mg \cdot L^{-1}$	414.60 ~ 465.86	183.77 ~ 214.47	416.37 ~ 497.78	146.42 ~ 178.79	1 764.05 ~ 1 993.44	1 763.28 ~ 2 029.05

表 3 污染物对裸腹蚤的急性毒性

Table 3 Acute toxicity of  $KBrO_3$ ,  $NaBrO_3$  and  $KBr$  on *Moina*

项目	溴酸钾		溴酸钠		溴化钾	
	24 h	48 h	24 h	48 h	24 h	48 h
$EC_{50}/mmol \cdot L^{-1}$	1.10	0.97	1.39	0.74	6.81	4.78
$EC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	184.14	161.80	209.56	111.07	2 027.56	896.12
$EC_{50}95\%$ 置信区间/ $mg \cdot L^{-1}$	163.98 ~ 206.77	142.18 ~ 184.12	190.98 ~ 229.93	100.07 ~ 123.29	1 644.56 ~ 2 499.75	715.83 ~ 1 121.81
$LC_{50}/mmol \cdot L^{-1}$	1.25	1.05	1.44	0.82	9.02	5.77
$LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	209.56	175.68	217.08	123.47	2 132.68	1 099.6
$LC_{50}95\%$ 置信区间/ $mg \cdot L^{-1}$	189.30 ~ 231.98	155.19 ~ 198.87	197.45 ~ 238.66	111.48 ~ 136.74	1 795.80 ~ 2 532.76	887.61 ~ 1 362.22

表 4 污染物对斑马鱼的急性毒性

Table 4 Acute toxicity of  $KBrO_3$ ,  $NaBrO_3$  and  $KBr$  on zebrafish

暴露时间/h	溴酸钾			溴酸钠			溴化钾		
	$LC_{50}/mmol \cdot L^{-1}$	$LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	95% 置信区间/ $mg \cdot L^{-1}$	$LC_{50}/mmol \cdot L^{-1}$	$LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	95% 置信区间/ $mg \cdot L^{-1}$	$LC_{50}/mmol \cdot L^{-1}$	$LC_{50}/mg \cdot L^{-1}$	95% 置信区间/ $mg \cdot L^{-1}$
24	9.79	1 635.7	1 559.8 ~ 1 715.4	11.69	1 765.1	1 572.0 ~ 1 982.0	21.12	2 513.6	2 267.1 ~ 2 786.9
48	7.36	1 228.9	1 170.5 ~ 1 290.2	9.24	1 394.7	1 219.6 ~ 1 594.9	15.87	1 888.4	1 713.8 ~ 2 080.7
72	6.30	1 052.0	993.4 ~ 1 114.0	8.21	1 239.8	1 087.9 ~ 1 412.8	14.35	1 707.1	1 557.3 ~ 1 871.2
96	5.58	931.4	880.6 ~ 985.1	7.06	1 065.6	945.9 ~ 1 200.4	13.19	1 569.3	1 434.7 ~ 1 716.6

通过以上结果和分析表明,造成水生生物生长速度变慢、运动受抑制或死亡率增加的原因主要是由溴酸根离子,即溴酸盐引起的,并且随着溴酸盐浓度的升高,相应的生长速度或存活率也随之下落.同时溴酸盐暴露的时间越久,表现出的毒性效应越明显.对比可知,在所考察的水生生态系统中的几个营养级的受试生物对溴酸盐的毒性效应的敏感性差别很大,即使是同一营养级也会有差别.其中大型蚤和裸腹蚤最敏感,斜生栅藻次之,然后是斑马鱼,而普通小球藻和发光菌最不敏感.

一定浓度的化学物质可能对某一营养级某种生物的生存没有毒害作用,但可能对另一个营养级的某种生物的生存存在强烈的毒害作用<sup>[34]</sup>,因为水生态系统的稳定性和功能与每一个营养级上的生物都密切相关,因此仅依赖一种生物的毒性研究结果对溴酸

盐进行毒性分级和探讨其对水生生态系统的毒性效应是片面的.因此,本研究综合考虑包括发光菌、浮游植物、浮游动物、鱼等多营养级水生生物来测定和评估溴酸盐的毒性效应,为环境中溴酸盐的毒性作用特征和风险评价提供了更有效、全面的信息.

### 3 结论

(1) 溴酸钾和溴酸钠对斜生栅藻、大型蚤、裸腹蚤和斑马鱼的  $EC_{50}$  和  $LC_{50}$  数值远小于溴化钾的数值,造成绿藻生长受到抑制,大型蚤和斑马鱼活动受到抑制或死亡的原因主要是由溴酸盐(即  $BrO_3^-$ )的毒性效应引起的.

(2) 斜生栅藻、大型蚤、裸腹蚤和斑马鱼的  $EC_{50}$  或  $LC_{50}$  随着暴露在溴酸盐中时间的增加呈下降趋势,反映溴酸盐的毒性效应随时间增大,斜生栅

藻、大型蚤、裸腹蚤和斑马鱼对溴酸盐毒性效应的耐受程度随时间降低。

(3) 不同受试生物对溴酸盐的毒性效应的敏感性不同。其中大型蚤和裸腹蚤最敏感,斜生栅藻次之,然后是斑马鱼,而普通小球藻和发光菌最不敏感。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 安东, 李伟光, 崔福义, 等. 溴酸盐的生成及控制[J]. 水处理技术, 2005, **31**(6): 54-55, 78.
- [ 2 ] 李宁. 溴酸钾的安全性毒理学研究进展[J]. 国外医学卫生学分册, 2006, **33**(1): 44-46.
- [ 3 ] Nakajima M, Kitazawa M, Oba K, *et al.* Effect of route of administration in the micronucleus test with potassium bromate [J]. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 1989, **223**(4): 399-402.
- [ 4 ] 王伟, 蒋颂辉, 朱惠刚, 等. 溴酸盐的遗传毒性[J]. 环境与健康杂志, 2003, **20**(3): 137-138.
- [ 5 ] 沈明浩, 王月娇, 李嘉, 等. 溴酸钾的毒理学研究[J]. 食品科学, 2008, **29**(8): 591-593.
- [ 6 ] Ishidate Jr M, Sofuni T, Yoshikawa K, *et al.* Primary mutagenicity screening of food additives currently used in Japan [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 1984, **22**(8): 623-636.
- [ 7 ] Suzuki T, Hayashi M, Hakura A, *et al.* Combination effects of clastogens in the mouse peripheral blood micronucleus assay[J]. *Mutagenesis*, 1995, **10**(1): 31-36.
- [ 8 ] GB 5749-2006, 生活饮用水卫生标准[S].
- [ 9 ] GB 19298-2014, 食品安全国家标准 包装饮用水[S].
- [ 10 ] Weinberg H S, Delcomyn C A, Unnam V. Bromate in chlorinated drinking waters: Occurrence and implications for future regulation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(14): 3104-3110.
- [ 11 ] 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.
- [ 12 ] Kruihof J C, Meijers R T. Bromate formation by ozonation and advanced oxidation and potential options in drinking water treatment[J]. *Water Supply*, 1995, **13**(2): 93-103.
- [ 13 ] Anupama V N, Kannan K, Prajeesh P V G, *et al.* Perchlorate, chlorate and bromate in water samples from the South-West coast of India [J]. *Water Science and Technology-Water Supply*, 2012, **12**(5): 595-603.
- [ 14 ] Kemsley J. Bromate in Los Angeles water [J]. *Chemical & Engineering News*, 2007, **85**(52): 9.
- [ 15 ] 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.
- [ 16 ] 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.
- [ 17 ] 刘勇建, 牟世芬, 林爱武, 等. 北京市饮用水中溴酸盐、卤代乙酸及高氯酸盐研究[J]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 51-55.
- [ 18 ] 杨永亮, 刘崴, 刘晓端, 等. 辽宁省西部和沈阳地区河水及地下水中溴的分布与污染特征[J]. *环境化学*, 2009, **28**(6): 924-928.
- [ 19 ] GB/T 21805-2008, 化学品 藻类生长抑制试验[S].
- [ 20 ] GB/T 13266-1991, 水质 物质对蚤类(大型蚤)急性毒性测定方法[S].
- [ 21 ] GB/T 13267-1991, 水质 物质对淡水鱼(斑马鱼)急性毒性测定方法[S].
- [ 22 ] 张泽光, 黄满红, 陈东辉, 等. 十溴联苯醚对大型蚤和发光菌的毒性研究[J]. *环境工程*, 2013, **31**(增刊): 299-302.
- [ 23 ] Wen Y Z, Yuan Y L, Chen H, *et al.* Effect of chitosan on the enantioselective bioavailability of the herbicide dichlorprop to *Chlorella pyrenoidosa* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(13): 4981-4987.
- [ 24 ] 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.
- [ 25 ] Parr L B, Perkins R G, Mason C F. Reduction in photosynthetic efficiency of *Cladophora glomerata*, induced by overlying canopies of *Lemna* spp. [J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1735-1742.
- [ 26 ] Ma J Y, Zheng R Q, Xu L G, *et al.* Differential sensitivity of two green algae, *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa*, to 12 pesticides [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2002, **52**(1): 57-61.
- [ 27 ] 冯鸣凤, 赵娜, 王轲, 等. 不同 pH 下对硝基酚(p-NP)对小球藻和斜生栅藻的毒性[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(2): 210-215.
- [ 28 ] Fisher D, Yonkos L, Ziegler G, *et al.* Acute and chronic toxicity of selected disinfection byproducts to *Daphnia magna*, *Cyprinodon variegatus*, and *Isochrysis galbana* [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 233-244.
- [ 29 ] 王良韬, 吴永贵, 廖芬, 等. Cu<sup>2+</sup> 对水生食物链关键环节生物的毒性效应[J]. *贵州农业科学*, 2011, **39**(5): 226-230.
- [ 30 ] 吴永贵, 黄建国, 袁玲. 利用水蚤的趋光行为监测水质[J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(3): 336-339.
- [ 31 ] Fernandezcasalderrey A, Ferrando M D, Andreuoliner E. Effect of sublethal concentrations of pesticides on the feeding behavior of *Daphnia magna* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1994, **27**(1): 82-89.
- [ 32 ] Hutchinson T H, Hutchings M J, Moore K W. A review of the effects of bromate on aquatic organisms and toxicity of bromate to oyster (*Crassostrea gigas*) embryos [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, **38**(3): 238-243.
- [ 33 ] 王佳佳, 徐超, 屠云杰, 等. 斑马鱼及其胚胎在毒理学中的实验研究与应用进展[J]. *生态毒理学报*, 2007, **2**(2): 123-135.
- [ 34 ] 牧辉, 彭新品, 戴宁, 等. 离子液体[C<sub>8</sub>mim]PF<sub>6</sub> 对水生生物的毒性作用[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(11): 1196-1201.

## CONTENTS

Editor's comment .....	( 403 )
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China .....	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> ( 404 )
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution .....	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng ( 413 )
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010 .....	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming ( 420 )
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Guanzhong Area .....	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> ( 427 )
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS .....	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> ( 434 )
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District .....	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> ( 443 )
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area .....	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> ( 452 )
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing .....	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> ( 459 )
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China .....	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> ( 466 )
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha .....	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> ( 475 )
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau .....	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> ( 482 )
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet .....	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> ( 490 )
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika .....	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu ( 499 )
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang .....	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> ( 507 )
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China .....	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> ( 513 )
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch .....	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> ( 520 )
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed .....	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> ( 527 )
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province .....	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> ( 534 )
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake .....	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> ( 542 )
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China .....	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> ( 548 )
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay .....	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> ( 558 )
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou .....	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> ( 565 )
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors .....	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> ( 573 )
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas .....	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> ( 580 )
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate .....	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong ( 588 )
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe .....	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> ( 595 )
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property .....	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi ( 602 )
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic .....	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 609 )
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland (SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water .....	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> ( 615 )
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria .....	JING Ming, WANG Lei ( 622 )
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02 .....	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> ( 630 )
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A <sup>2</sup> O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology .....	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin ( 638 )
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment .....	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> ( 655 )
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water .....	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> ( 662 )
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions .....	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> ( 668 )
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions .....	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> ( 680 )
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge .....	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> ( 689 )
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period .....	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> ( 697 )
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland .....	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> ( 703 )
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City .....	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu ( 710 )
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas .....	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> ( 717 )
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil .....	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> ( 726 )
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies .....	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> ( 734 )
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province .....	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> ( 740 )
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment .....	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang ( 750 )
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms .....	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 756 )
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls .....	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> ( 765 )
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N <sub>2</sub> O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 775 )
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method .....	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> ( 782 )

# 《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 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	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