

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范娟, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环走廊湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛昱, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晓冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究

陈善佳, 陈秀荣*, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建

(华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 考察了不同浓度双酚 A (BPA) 对普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*) 生长特性的影响, 以及普通小球藻生长过程对 BPA 的去除效能。研究表明, 低浓度 BPA ($0 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对普通小球藻生长具有促进作用, 而高浓度 BPA ($20 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对普通小球藻生长具有抑制作用, 且抑制效应与 BPA 浓度呈正相关关系。低剂量 BPA ($< 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对叶绿素含量并无明显的影响, 高剂量 BPA ($> 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 造成叶绿素含量降低。在 BPA 初始浓度 $2 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的范围内, 普通小球藻对其都有一定的去除效能, 单位普通小球藻对 BPA 去除速率与其初始浓度呈正相关关系。BPA 投加量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, BPA 去除速率最大, 且最大速率出现于延滞期与对数期之间。

关键词: 普通小球藻; 双酚 A (BPA); 细胞密度; 叶绿素 a; 抑制或促进

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1457-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.036

Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and *Chlorella vulgaris*

CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, ZHAO Jian-guo, ZHANG Fei, JIANG Zi-jian

(College of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The effects of different concentrations of bisphenol A (BPA) on *Chlorella vulgaris* and removal capacity of BPA by *Chlorella vulgaris* were investigated. Results showed that a low concentration ($0 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) of BPA promoted the growth of *Chlorella vulgaris*, whereas a relative high concentration ($20 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) of BPA inhibited the growth of *Chlorella vulgaris*, and the inhibition effect was positively correlated with the concentration of BPA. Likewise, a high dose of initial BPA ($> 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) led to a decline in the content of chlorophyll a. *Chlorella vulgaris* had BPA removal capacity when initial BPA concentration ranged from $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. There was positive correlation between the removal rate of BPA per cell and initial BPA concentration. The removal rate of BPA was the highest when initial BPA was $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which appeared between lag phase and logarithmic phase.

Key words: *Chlorella vulgaris*; bisphenol A; cell density; chlorophyll a; promotion or inhibition

微藻作为初级生产力, 对自然界物质循环的重要性不言而喻。微藻具有生物量大、生长速率快、收获时期短、光合利用效率高等特点, 是目前最有希望替代化石能源的原料之一^[1~3]。同时, 微藻生长过程中会吸收大量氮、磷, 可用于污水脱氮除磷^[4~6]。普通小球藻是对有机污染物耐受力最强的 8 种藻类之一^[7], 因此利用普通小球藻去除毒性有机污染物常见报道^[8,9]。在小球藻对有机污染物去除的过程中, 也可借助小球藻灵敏的生长特性变化来反映目标污染物的毒性^[10], 进而综合评估目标污染物的环境风险。据此, 本研究选择 BPA 为目标污染物, 考察小球藻对 BPA 去除效能及 BPA 对小球藻生长特性的影响。BPA 作为环氧树脂等工业原料的前体物质^[11], 是最常见的内分泌干扰物之一^[12], 世界范围内其产量高达 270 万 t^[13]。环境中 BPA 的一个重要来源是聚碳酸酯 (PC) 塑料瓶^[14], 其有可能在水体或其他环境中与小球藻等水生生物广泛接触, 对水生生物的急性毒性以及雌激素干扰作用^[15]

一直以来备受关注, 故选择 BPA 作为目标污染物研究其与普通小球藻相互影响具有一定的现实意义。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

实验藻种为普通小球藻 (*Chlorella vulgaris*, FACHB-31), 购自中国科学院武汉水生生物研究所。实验中所用双酚 A 购自阿拉丁试剂。

1.2 主要设备与仪器

主要仪器包括博迅光照培养箱 SPX-250B-G, MOTIC 光学显微镜 BA200, 海尔冰箱 BCD-208, Techcomp 分光光度计 UV1102, 岛津高效液相色谱 HITACHI L2000 (配 L-2450 二极管阵列检测器和

收稿日期: 2013-08-12; 修订日期: 2013-09-28

基金项目: 上海市浦江人才计划项目 (13PJJD009); 国家自然科学基金项目 (51008124, 51378207); 国家杰出青年科学基金项目 (51125032)

作者简介: 陈善佳 (1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: csj489@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xrchen@ecust.edu.cn

L2200 自动进样器),博迅不锈钢手提式压力蒸气灭菌器 YXQ-LS-18SI,六联磁力搅拌器 HJ-6,博迅洁净工作台 VS840-1,卢湘离心机 TDZ5-WS.

1.3 实验方法

普通小球藻采用 BG-11 培养基光自养培养,温度 25℃,光暗比 14:10,光照度为 2 000 lx. 培养 12 d. 设置 5 组实验,BPA 浓度分别为 2、5、10、20、50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每组 3 个平行样.0、40、88、136、208、256 h 各取样一次.测定细胞密度、叶绿素以及双酚 A 含量.测定指标如表 1 所示.

表 1 实验过程中分析测定方法

Table 1 Analytical methods in the experiment

项目	测定指标	测定方法	主要仪器
生长指标	细胞密度	血球计数	光学显微镜
	叶绿素	分光光度法	分光光度计
水相指标	BPA	高效液相色谱法	岛津高效液相色谱

2 结果与讨论

为了考察 BPA 与小球藻的相互影响过程,从毒性环境培养过程中普通小球藻的生长指标与 BPA 的去除效果出发,分别测定了普通小球藻细胞密度和叶绿素,以及培养基中双酚 A 的含量变化.

2.1 不同浓度 BPA 对普通小球藻生长特性的影响

2.1.1 不同浓度 BPA 对普通小球藻细胞密度增长的影响

实验藻液为在 BG-11 培养基中光自养培养的普通小球藻藻液,在实验对数期,取密度为 $5 \times 10^7 \text{ mL}^{-1}$ 藻液 10 mL 接种于 100 mL BG-11 培养基中,培养 12 d. 培养周期中细胞密度如图 1 所示,表明 BPA 初始浓度在 0 ~ 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 各梯度时,藻细胞密度随时间而增长的过程.

由图 1 可知,小球藻延滞期出现在 0 ~ 50 h 之间,且空白组与实验组并无明显差异,而 Gao 等^[16]在对小球藻暴露于壬基苯酚的研究表明,小球藻的生长延滞期有明显滞后.在本研究中,BPA 对小球藻的毒性作用并未表现为延长延滞期,在 0 ~ 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围内,小球藻能较快适应毒性环境进入对数期.鉴于文献结论与本研究结论的差异,认为是与毒性物质的作用机制不同有关.小球藻细胞在 50 h 左右的适应后,开始对数增长.在 150 ~ 250 h 时段内,各组细胞数均增长达到峰值,其中空白组峰值为 $23.38 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$,而最大峰值在 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA 一组中出现,其峰值达到 $38.25 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$,最小峰值在 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 组出现 ($7.58 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$).结果

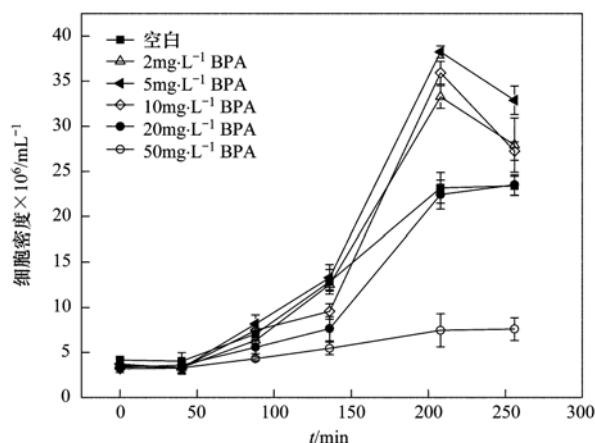


图 1 不同 BPA 初始浓度时小球藻细胞密度增长

Fig. 1 Increment of *Chlorella vulgaris* cell density at different initial BPA concentrations

表明,50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BPA 初始浓度对普通小球藻细胞密度增长呈现显著的抑制效应,培养过程中,其细胞密度显著低于空白组.而 BPA 初始浓度小于 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 个组则表现出对小球藻生长的促进作用,尤其在 150 h 后促进作用更加明显,藻细胞密度的峰值 (33.25×10^6 、 38.25×10^6 和 $35.92 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$) 也显著高于空白组 ($23.38 \times 10^6 \text{ mL}^{-1}$). Gulnaz 等^[17]和 Takashi 等^[18]研究指出,当 BPA 浓度超过 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 会抑制普通小球藻生长. BPA 等内分泌干扰物普遍存在剂量效应,南京大学卫立等^[19]研究表明,低剂量 BPA 对 MCF2 细胞增殖作用产生倒 U 型非单调剂量效应关系,在低浓度的上升期表现出类雌激素效应,高浓度的下降期表现出细胞毒性作用.方堃^[20]研究表明,微藻对低剂量的 PCBs 有一定耐受力,且低剂量的 PCBs 对藻的生长有轻微的刺激作用.从本研究中 BPA 对普通小球藻的作用效果来看,低浓度 BPA (低于 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对普通小球藻的增殖也有促进作用,而在高浓度 (高于 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 则表现出明显的毒性效应.

2.1.2 不同浓度 BPA 对普通小球藻细胞生长速率的影响

为表征普通小球藻生长活性受不同浓度 BPA 的影响,实验考察了不同初始浓度 BPA 对普通小球藻生长速率的影响,实验结果如图 2 所示.

由图 2 可知,在整个培养过程中,空白组小球藻细胞数增长速率从 0 ~ 40 h 的 $-2.92 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$ 提高到 136 ~ 208 h 的 $143.75 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$,此后开始下降到 208 ~ 256 h 的 $97.22 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$.当培养基中投加 BPA 后,小球藻增长速率受到了显著影响.总体而言,如图 1 中所示,

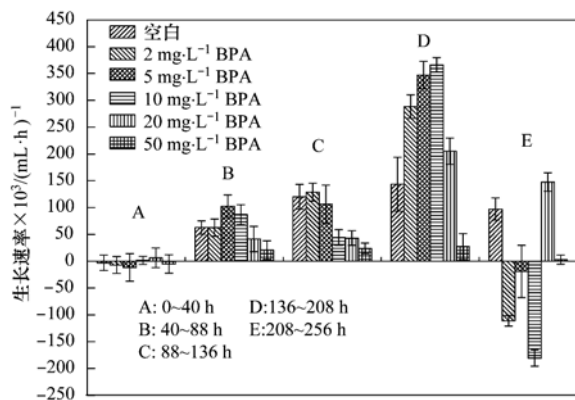


图2 投加不同浓度 BPA 对普通小球藻生长速率的影响

Fig. 2 Effects of BPA concentrations on growth rate of *Chlorella vulgaris*

增长速率还是遵循 0 ~ 208 h 阶段上升, 208 ~ 256 h 下降的规律. 在对数生长阶段的 136 ~ 208 h 期间, BPA 初始浓度分别为 2、5、10、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [分别达到 288.19×10^3 、 346.99×10^3 、 366.20×10^3 和 $205.32 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$] 各组的生长率都明显高于空白组 [$143.75 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$]. 这表明, 0 ~ 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度范围的 BPA 对于小球藻对数期的增长速率有促进作用; 而对于 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BPA 浓度而言, 小球藻生长速率在整个培养过程中都受到了抑制, 5 个阶段生长率分别为 -5.00×10^3 、 20.83×10^3 、 23.96×10^3 、 27.66×10^3 和 $2.95 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$, 全程低于空白组, 且没有出现明显的对数增长期. 各组小球藻增长速率峰值 [143.75×10^3 、 288.19×10^3 、 346.99×10^3 、 366.20×10^3 、 205.32×10^3 和 $27.66 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$] 都出现在 136 ~ 208 h; 经过增长速率峰值后, BPA 初始浓度为 2、5、10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 3 组小球藻细胞在 208 ~ 256 h 阶段出现衰减 [分别为 -111.11×10^3 、 -19.10×10^3 和 $-180.56 \times 10^3 (\text{mL}\cdot\text{h})^{-1}$], 表明其已进入衰亡期, 其余组生长率均大于 0. 李睿等^[11]研究表明, 4 ~ 6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 双酚 A 会导致微小环藻的增长减慢, 生长周期延长; 而 8 ~ 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 双酚 A 对藻细胞生长产生明显抑制作用. 结合本实验结果可知, 低剂量 BPA 的存在也会导致普通小球藻衰亡期的提前出现.

2.1.3 不同浓度 BPA 对普通小球藻细胞叶绿素含量的影响

普通小球藻细胞内叶绿素含量变化可从细胞质量特性方面表征小球藻生长状况, 如图 3 所示.

由图 3 可知, 在 0 ~ 256 h 内, 空白组小球藻细胞内叶绿素含量呈持续上升趋势, 叶绿素含量峰值

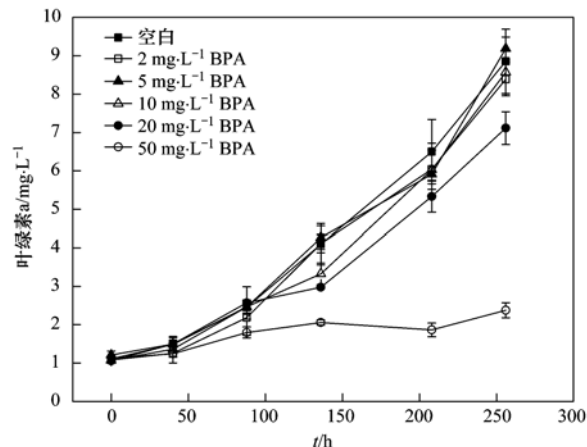


图3 不同浓度 BPA 对普通小球藻培养过程叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of BPA concentrations on Chlorophyll a contents of *Chlorella vulgaris*

出现在 256 h ($8.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 整个培养过程中未见叶绿素有下降现象. 结合图 2 和图 3 可知, 叶绿素含量变化与藻细胞密度变化趋势一致, 区别在于藻细胞增长曲线有明显拐点, 出现于 208 h 左右, 而叶绿素含量呈持续上升. 这说明, 叶绿素合成与藻细胞分裂过程存在不同步现象. 究其原因, 可能是开始阶段较低的叶绿素 a 积累足以满足小球藻的光合作用所需, 但随着藻密度的增加, 细胞之间遮光效果趋于严重, 致使一部分藻细胞捕捉光能、转换光能的效率降低, 从而影响了细胞数的增加, 而光照条件不足情况下, 藻细胞则会采取提高叶绿素含量来提高光的利用率^[21]. Li 等^[22]研究表明, 低浓度 BPA (低于 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对冠盘藻的叶绿素抑制不明显, 高浓度 BPA 会导致其叶绿素含量降低. 本研究中 BPA 初始浓度为 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对小球藻细胞叶绿素含量呈显著抑制作用; 而 BPA 初始浓度 2、5 和 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对叶绿素含量并无明显抑制, 至培养末期, 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA 组的小球藻细胞叶绿素含量出现最高值 ($9.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2.2 普通小球藻对不同浓度 BPA 的去除情况

在小球藻培养过程中, 为了评价小球藻对 BPA 的去除效能, 考察了不同初始浓度 BPA 的培养过程中, 小球藻对 BPA 的去除效果. 普通小球藻的培养过程中, BPA 浓度的变化如表 2 所示.

投加不同浓度 BPA 后, 普通小球藻均对其有不同程度的去除效能. 随 BPA 投加浓度增大, 水相 BPA 损失量也越大. 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 投加量下, BPA 浓度从 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 0.76 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而当初始 BPA 投加量增至 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 最终水相中 BPA 浓度为 34.21 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, BPA 去除量为 17.79 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 对于小球藻

去除 BPA 的效能,可以利用单位藻细胞对 BPA 的 去除速率来反映.

表 2 BPA 浓度随时间的变化¹⁾/mg·L⁻¹
Table 2 BPA concentrations at different time points/mg·L⁻¹

时间/h	BPA 投加量/mg·L ⁻¹				
	2.00	5.00	10.00	20.00	50.00
40	1.95 ± 0.07	4.94 ± 0.06	9.66 ± 0.61	19.50 ± 0.34	48.40 ± 1.99
88	1.75 ± 0.15	4.24 ± 0.12	8.67 ± 0.04	18.15 ± 0.65	43.55 ± 1.87
136	1.43 ± 0.21	3.78 ± 0.23	8.01 ± 0.24	16.45 ± 1.75	41.44 ± 2.58
208	1.08 ± 0.26	3.45 ± 0.21	7.34 ± 0.34	15.36 ± 0.51	37.44 ± 1.70
256	0.76 ± 0.47	3.14 ± 0.08	6.65 ± 0.51	13.67 ± 1.10	34.21 ± 3.00

1)“±”后为 3 次平行样测定标准差,表征 3 次测定结果的分散程度

如图 4 所示,随着 BPA 初始投加量的提高,单位普通小球藻对 BPA 的去除速率提高,在 50 mg·L⁻¹初始投加量阶段去除率达到最大,即在不同初始 BPA 投加量的情况下,普通小球藻对 BPA 的去除速率与 BPA 初始投加量呈正相关关系($r > 0.95, P < 0.01$). 2、5、10、20 和 50 mg·L⁻¹初始 BPA 投加量下,BPA 去除速率最大的时间阶段均为 40~88 h,分别达到 14.67×10^{-10} 、 26.47×10^{-10} 、 51.44×10^{-10} 、 100.67×10^{-10} 和 308.98×10^{-10} mg·(cell·h)⁻¹. 在这个阶段,正是生长延滞期结束,小球藻适应培养基环境,增长速率大幅提高的阶段,但并非增长速率最大(136~208 h)阶段.

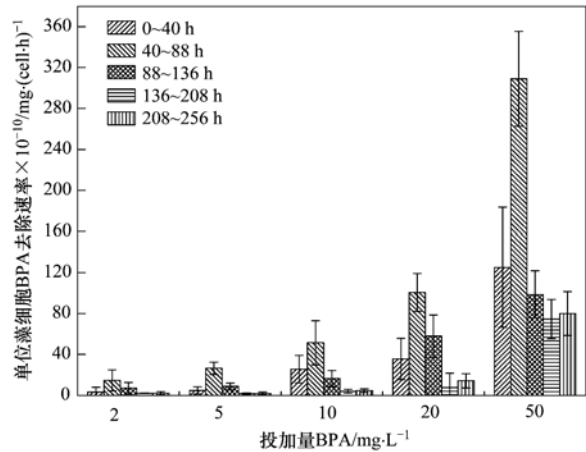


图 4 不同时间内单位藻细胞 BPA 去除速率
Fig. 4 Removal rate per cell in different phases

在生长速率最高的 136~208 h 阶段和最大降解速率的 40~88 h 阶段,不同 BPA 初始投加浓度下,生长速率与 BPA 去除速率之间的关系如图 5 所示. 从中可知,在生长速率最大的阶段(136~208 h),普通小球藻对不同初始投加浓度 BPA 的去除速率全程低于 40~88 h 阶段,即延滞期到对数期的过渡阶段. 因此,结合图 4 可知,本实验中 BPA 最大去

除速率与小球藻生长速率存在不同步现象. 分析认为,在过渡阶段,普通小球藻适应了 BPA 存在的环境,因此加快了 BPA 的去除速率,迟杰等^[23]对普通小球藻降解邻苯二甲酸二异辛酯(DEHP)的研究表明,普通小球藻对 DEHP 的降解速率最快阶段是在延滞期和对数期之间,这与本研究结果一致. 另外,微藻对 BPA 的去除途径包括吸附、胞内降解^[24]、胞外降解(胞外降解的一种途径是通过藻细胞分泌物使环境中生成·OH达到去除污染物的目的^[25])等. 在不同生长阶段,BPA 的去除机制也有差异,故本研究出现了 BPA 去除速率与生长速率不同步现象. 关于不同步现象发生的确切原因,尚待后续实验深入研究.

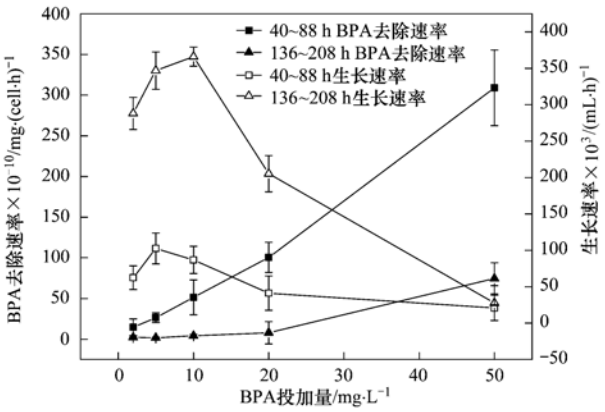


图 5 不同 BPA 初始投加量对 BPA 去除率
与小球藻生长速率影响比较

Fig. 5 Comparison of effects on BPA removal rate and *Chlorella vulgaris* growth rate at different initial BPA concentrations

3 结论

(1) 在含有 BPA 的培养基环境下,普通小球藻生长可被抑制也可被促进,决定因素在于 BPA 投加浓度. 培养基环境中 BPA 浓度高于 20 mg·L⁻¹时,即表现出对普通小球藻生长的抑制,低于 20 mg·L⁻¹

表现为促进作用。

(2) 叶绿素含量变化与藻细胞密度变化趋势基本一致, 区别在于藻细胞增长曲线有明显拐点, 而叶绿素含量变化没有。低剂量 BPA ($< 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对叶绿素含量并无明显的影响, 高剂量 BPA ($> 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 造成叶绿素含量降低。

(3) 普通小球藻对 BPA 表现出一定的去除效能, 对比投加的各浓度梯度的 BPA, 单位普通小球藻对 BPA 去除速率与 BPA 初始浓度呈正相关关系 ($r > 0.95$, $P < 0.01$), BPA 投加浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 去除速率最大。普通小球藻对 BPA 的去除速率最大的阶段在于延滞期到对数期之间。

参考文献:

- [1] 缪晓玲, 吴庆余. 微藻生物质可再生能源的开发利用[J]. 可再生能源, 2003, **109**(3): 13-16.
- [2] 宋东辉, 侯李君, 施定基. 生物柴油原料资源高油脂微藻的开发利用[J]. 生物工程学报, 2008, **24**(3): 341-348.
- [3] 缪晓玲, 吴庆余. 微藻油脂制备生物柴油的研究[J]. 太阳能学报, 2007, **28**(2): 219-222.
- [4] Hu H Y, Li X, Yu Y, *et al.* Domestic wastewater reclamation coupled with biofuel/biomass production based on microalgae: A novel wastewater treatment process in the future[J]. Journal of Water and Environment Technology, 2011, **9**(2): 199-207.
- [5] Kang C D, An J Y, Park T H, *et al.* Astaxanthin biosynthesis from simultaneous N and P uptake by the green alga *Haematococcus pluvialis* in primary-treated wastewater [J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, **31**(3): 234-238.
- [6] 张向阳, 邢丽贞, 张彦浩, 等. 固定化小球藻去除污水中氮、磷的试验研究[J]. 中国给水排水, 2008, **24**(1): 95-97.
- [7] Abdel-Raouf N, Al-Homaidan A A, Ibraheem I B M. Microalgae and wastewater treatment [J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2012, **19**(3): 257-275.
- [8] Lin Y H, Leu J Y, Lan C R, *et al.* Kinetics of inorganic carbon utilization by microalgal biofilm in a flat plate photoreactor[J]. Chemosphere, 2003, **53**(7): 779-787.
- [9] 刘玉豹, 于玲红. 小球藻降解苯酚的研究[J]. 科技信息, 2010, (1): 304-305.
- [10] 张宇, 王萌, 刘艳萍, 等. 高效氯氟氰菊酯对普通小球藻的毒性[J]. 农药, 2011, **50**(2): 125-127.
- [11] 李睿, 刘玉, 谭凤仪, 等. 双酚 A 对微小环藻的毒性效应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, **45**(3): 110-113.
- [12] Nakajima N, Teramoto T, Kasai F, *et al.* Glycosylation of bisphenol A by freshwater microalgae[J]. Chemosphere, 2007, **69**(6): 934-941.
- [13] Vandenberg L N, Hauser R, Marcus M, *et al.* Human exposure to bisphenol A (BPA) [J]. Reproductive Toxicology, 2007, **24**(2): 139-177.
- [14] Ballesteros-Gómez A, Rubio S, Pérez-Bendito D. Analytical methods for the determination of bisphenol A in food[J]. Journal of Chromatography A, 2009, **1216**(3): 449-469.
- [15] 严贵芬. 几种水生植物对水环境低浓度 BPA 去除效果的研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2011. 3-4.
- [16] Gao Q T, Wong Y S, Tam N F Y. Removal and biodegradation of nonylphenol by different *Chlorella* species [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **63**(5-12): 445-451.
- [17] Gulnaz O, Dincer S. Biodegradation of bisphenol A by *Chlorella vulgaris* and *Aeromonas Hydrophilia* [J]. Journal of Applied Biological Sciences, 2009, **3**(2): 79-84.
- [18] Hirooka T, Nagase H, Uchida K, *et al.* Biodegradation of bisphenol A and disappearance of its estrogenic activity by the green alga *Chlorella fusca* var. *vacuolata* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, **24**(8): 1896-1901.
- [19] 卫立, 王斌, 刘树生, 等. 低剂量双酚 A 与 17 β 雌二醇对 MCF-7 细胞增殖作用的剂量效应关系及其联合作用探索[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 968-972.
- [20] 方堃. 海洋微藻对多氯联苯的吸附作用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2006. 32-34.
- [21] 曾艳艺, 黄翔鹤. 温度、光照对小环藻生长和叶绿素 a 含量的影响[J]. 广东海洋大学学报, 2007, **27**(16): 36-40.
- [22] Li R, Chen G Z, Tam N F, *et al.* Toxicity of bisphenol A and its bioaccumulation and removal by a marine microalga *Stephanodiscus hantzschii* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72**(2): 321 - 328.
- [23] 迟杰, 李金娟, 刘华. 普通小球藻对 DEHP 的富集和降解动力学[J]. 天津大学学报, 2005, **38**(5): 422-425.
- [24] Silva C P, Otero M, Esteves V. Processes for the elimination of estrogenic steroid hormones from water: A review [J]. Environmental Pollution, 2012, **165**: 38-58.
- [25] Peng Z E, Wu F, Deng N S. Photodegradation of bisphenol A in simulated lake water containing algae, humic acid and ferric ions [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(3): 840-846.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria natans</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUGE Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行