

环境科学

(HUANJING KEXUE)

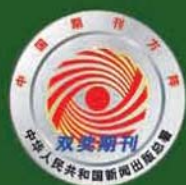
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2015 年北京市两次红色预警期间 PM _{2.5} 浓度特征	
..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)	
北京市冬季雾霾天人体呼吸高度 PM _{2.5} 变化特征对气象因素的响应	张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)
兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析	李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)
南京北郊冬季 PM _{2.5} 中芳香酸的测定及来源解析	张亚飞, 马嫣, 仝鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)
海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响	孔亚文, 盛立芳, 刘骞, 李秀镇 (2443)
新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价	杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)
重庆地区大气场降水氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系	温艳茹, 王建力 (2462)
湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析	
..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)	
河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例	
..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)	
亚热带典型岩溶流水气界面 CO ₂ 交换通量变化过程及其环境影响	李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)	
淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放 DOM 的光谱特征: 荧光光谱	
..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)	
华东地区某水源水中 13 种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价	
..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)	
北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平	张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)
输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险	昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)
卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征	何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)
岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)
哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性	孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)
降水对泃河水质和水体微生物的影响	卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)
不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对砷酸盐的响应	王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)
布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究	景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邵义萍, 樊静静 (2577)
化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响	蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)
活性炭负载 Co ₃ O ₄ 活化过一硫酸盐降解金橙 G	王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)
碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙 G 过程及动力学	张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)
碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素	邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)
铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中 AOX、色度和 TOC 的去除效果研究	
..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)	
Fenton 氧化去除制药企业活性污泥中 AOX 的效果研究	陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑伟 (2625)
中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估	刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)
基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究	鲍林林, 陈婉秋 (2639)
异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究	李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)
基于高通量测序的 ABR 厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析	
..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)	
NUA-DAS 生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究	汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)
葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合	程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)
拉乌尔菌 sari01 的分离及其异养硝化好氧反硝化特性	颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)
海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌 SLWX ₂ 的筛选及脱氮特性	成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)
焦化废水活性污泥中降解硫化物细菌种群多样性分析	徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)
浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应	戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)
磷脂脂肪酸 (PLFA) 法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构	左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)
半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应	赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)
三峡库区消落带 N ₂ O 排放及其影响因素	李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)
不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与 N ₂ O 排放研究	高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)
冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征	易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀兰, 木志坚 (2738)
藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析	罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)
基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析	宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)
水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响	丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)
减磷施肥有机肥对紫色土旱坡地磷素流失的消减效应	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)
水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律	
..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)	
组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较	
..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)	
生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制	商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)
热处理天然褐铁矿制备 γ-Fe ₂ O ₃ 及其 NH ₃ -SCR 活性探究	徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)
《环境科学》征订启事 (2569) 《环境科学》征稿简则 (2576) 信息 (2744, 2769, 2790)	

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合

程鹏飞^{1,2}, 王艳³, 杨期勇^{1,2}, 汤明^{1,2}, 刘天中⁴

(1. 九江学院鄱阳湖生态经济研究中心, 九江 332005; 2. 九江市流域管理与生态保护重点实验室(九江学院), 九江 332005; 3. 九江学院电子商务学院, 九江 332005; 4. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 青岛 266101)

摘要: 工业废水污染日趋严重, 水体中重金属钴污染因难处理、高危害等问题成为废水净化的关键。传统治理重金属工业废水的方法难以应用。为寻求处理工业废水“绿色生态”可行性路径, 本文以葡萄藻 *Botryococcus braunii* SAG 807-1 为研究对象, 应用贴壁培养技术对含钴工业废水进行处理研究。结果表明, 葡萄藻贴壁培养可处理工业废水, $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Co}^{2+}$ 对葡萄藻生长影响不大, 却可以促进长链烃类的合成, 提高烃产量。葡萄藻贴壁培养去除 Co^{2+} 的能力为 $1473.9 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于报道的微藻 *P. littoralis*。本研究为绿色高能燃料烃类的生产与工业废水处理耦合提供理论基础。

关键词: 葡萄藻; 贴壁培养; 烃类; 含钴工业废水; 耦合

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2666-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.033

Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with *Botryococcus braunii* Biofilm Attached Cultivation

CHENG Peng-fei^{1,2}, WANG Yan³, YANG Qi-yong^{1,2}, TANG Ming^{1,2}, LIU Tian-zhong⁴

(1. Poyang Lake Eco-economy Research Center of Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 2. Jiujiang Key Laboratory of Basin Management and Ecological Protection, Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 3. E-business Institute of Jiujiang University, Jiujiang 332005, China; 4. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China)

Abstract: Industrial wastewater pollution is an increasing problem. The wastewater infiltrated cobalt is a key to purify wastewater because it is seriously hazardous and hard to treat. Traditional management method of heavy metals in industrial wastewater is difficult to apply. To seek for "green ecological" feasible approaches of industrial wastewater treatment, this paper studied the effect of industrial wastewater containing cobalt on the growth and hydrocarbon accumulation of *Botryococcus braunii* SAG 807-1 with biofilm attached cultivation. The research results obtained were as follows: *B. braunii* with biofilm attached cultivation could treat industrial wastewater, and $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ cobalt could accelerate the accumulation of hydrocarbon while having little influence on the growth of *B. braunii*, the ability of *B. braunii* with biofilm attached cultivation to remove Co^{2+} from industrial wastewater was $1473.9 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, which was much higher than the report of *P. littoralis* culture. Through the study in this paper, the theoretical basis for the coupling of production of green high energy fuel hydrocarbon and industrial wastewater treatment was established.

Key words: *Botryococcus braunii*; biofilm attached cultivation; hydrocarbon; industrial wastewater containing cobalt; coupled

在当今环境污染中, 水体污染已严重威胁着社会发展与人类健康, 成为亟待解决的主要污染问题之一^[1, 2]。一直以来, 金属污染因其危害大、治理难等特点成为工业废水治理过程中的一大难题^[3, 4]。随着冶金、电镀及核技术等迅猛发展, 水体重金属污染中钴元素污染也随之而来。当钴离子浓度较高时会对植物产生毒害作用, 危害人类健康。目前的方法对于废水中 Co^{2+} 的去除比较困难, 普遍采用的物理-化学处理方法效果不佳^[5]。因此, 治理工业废水中难处理、高危害的金属污染问题成为净化废水的重中之重。

传统治理重金属工业废水的方法一般如化学沉淀、溶剂萃取、离子交换及膜分离等^[6]。这些技术由于金属去除不完全、昂贵的设备及大量的试剂和能量需求等原因而难以应用^[5, 7]。一种以具有替代不可再生资源潜力的微藻净化为首的生物学方法, 可克服传统物理-化学方法缺陷成为金属废水污染净化或恢复的研究热点^[8, 9]。利用微藻处理工业废水的同时, 还可以固定 CO_2 , 生产生物燃料, 这对缓

收稿日期: 2015-10-27; 修订日期: 2016-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560724)

作者简介: 程鹏飞(1984~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: pfcheng1792@163.com

解化石燃料短缺与改善水体环境都有重要意义^[10]。然而,前人研究表明通过传统的液体悬浮培养藻类净化富含金属废水,藻细胞生长受到抑制,生物产率较低^[11]。因此,寻求开发高效的微藻培养方式处理废水具有重要意义。

相比于传统液体悬浮培养,微藻的生物膜贴壁培养是一种新型培养模式。不同的是,生物膜贴壁培养是根据光稀释与固定化的原理,将藻细胞与培养基相分离,并固定在一定生物膜材料上,极少量的培养基液体通过附着多孔材料的背面或内部滴入以使藻细胞处于半干湿润状态,并在一定光照强度与 CO_2 浓度下进行生长的培养方式(图1),其在培养过程中的取样和培养后的培养液回收均比传统液体悬浮培养更为经济、简便^[12]。前期对包括葡萄藻在内的多种藻类的生物膜贴壁培养进行了深入研究,其中葡萄藻可见光光能利用率最高可达14.9%,培养过程每生产1kg生物量所需培养基 NaNO_3 仅为27.5g,生物产率和烃产率等也都优于传统培养方式^[13]。贴壁培养因为藻细胞与培养基相分离,利用废水进行微藻的生物膜贴壁培养,藻细胞培养完成后无需离心,具有一定优势。在生产生物燃料的同时耦合处理环境废水,为工业废水处理净化提出新的尝试。

众多微藻中,葡萄藻因能产生大量的烃类而闻名。从生物能源替代化石能源的角度,烃类燃料比脂肪酸甲酯更接近于传统化石燃料^[14]。而且葡萄藻生成的烃类燃烧后产热值高且对大气 CO_2 含量无净增加,是一种非常有潜力的可再生能源^[15, 16]。Sawayama等^[17]用经过二次处理的生活污水(second

treated sewage, STS)培养葡萄藻,发现生活污水中的氮和磷含量大大减少,而同时有毒重金属元素砷、铬、镉等的浓度也大为降低。本研究利用废水培养葡萄藻可以净化环境、降低培养成本,以期为葡萄藻生物燃料生产奠定基础。

本文结合贴壁培养反应装置的特殊性及前人的实验研究,主要考察了电镀厂排放的含钴工业废水对葡萄藻贴壁培养生长及烃积累情况的影响,以期净化工业水环境,在生产生物燃料的同时降低葡萄藻贴壁培养工艺成本。

1 材料与方法

1.1 藻种来源与培养

藻株:A品系葡萄藻(*Botryococcus braunii* SAG 807-1, A race)购买于德国哥廷根大学。

葡萄藻种子液培养:将培养至对数期葡萄藻接种于含Chu 13培养基的玻璃柱800 mL(高80 cm×直径5 cm)中^[13],使其初始培养浓度约 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,温度 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$,连续光照强度 $(100 \pm 10) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$,通入含有1%(体积分数) CO_2 的压缩空气(0.1 MPa),气体流速为 $1 \text{ mL} \cdot \text{s}^{-1}$,培养液的pH值约为7.5。

1.2 葡萄藻贴壁培养及生物量测定

葡萄藻的贴壁培养反应装置如图2所示,一长0.4 m,宽0.2 m,厚3 mm的玻璃板置于 $0.5 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的玻璃腔中,玻璃板的一面附有滤纸,并接受正上方的光照。将葡萄藻藻种接种到醋酸纤维素膜上,贴于附着在玻璃板的滤纸上,将附有藻种的玻璃板放入玻璃腔室内,为保障玻璃腔室内的稳定环境,用保鲜膜封住玻璃腔的一面。二氧化碳混合气通过玻璃腔的小孔进入培养室,培养基通过循环泵滴加(培养基循环使用)。为了培养液更好均匀地渗入藻细胞内,将玻璃培养腔放置一定倾斜角度,荧

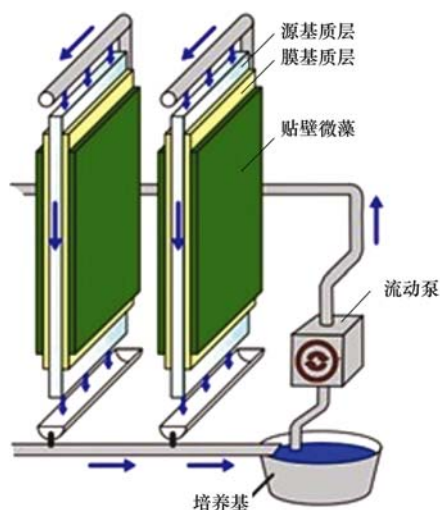


图1 葡萄藻生物膜培养装置示意

Fig. 1 Schematic of the attached cultivation device for *B. braunii*

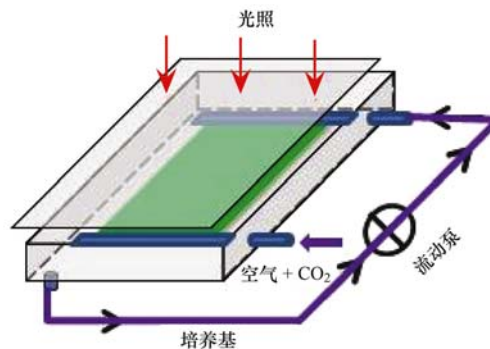


图2 葡萄藻贴壁培养实验装置

Fig. 2 Test device of attached cultivation for *B. braunii*

光灯置于培养腔正上方提供光源. 贴壁培养条件与种子液培养条件相同.

葡萄藻生物量测定: 将孔径 0.45 μm, 面积 0.001 m² 的醋酸纤维膜煮沸 3 次后, 在 105℃ 烘箱中烘至恒重(W_1), 将待测藻样(DW)用蒸馏水冲洗完全入干净烧杯中, 并倒入抽滤装置内抽滤至已称重的膜上, 将附有藻的膜放入 105℃ 烘箱中烘至恒重(W_2), 用分析天平称量藻样的重量($g \cdot m^{-2}$):

$$DW = (W_2 - W_1) / 0.001 \quad (1)$$

1.3 葡萄藻烃类的提取与分析

将葡萄藻溶液于 2 500 r·min⁻¹ 离心 8 min, 洗涤离心 3 次后收集藻体, 然后进行冷冻干燥. 称取一定质量的干燥藻粉, 加入正己烷超声 15 min, 1 500 r·min⁻¹ 离心 10 min 后, 收集正己烷提取液, 提取过程重复 3~4 次, 直到提取液无色, 合并正己烷提取液, 25℃ 水浴下旋转蒸发掉正己烷, 室温下用氮气吹干所剩残余, 称其重量即为“粗烃”质量, 计算后得到粗烃含量. 本研究中涉及到的“烃”如无特殊说明均指“粗烃”.

粗烃经硅胶柱(硅胶粒度 200~300 目, 层析柱尺寸 10 mm×100 mm, 正己烷为流动相)纯化, 收集黄色条带出来之前的所有样品, 25℃ 旋转蒸发掉正己烷, 氮气吹干所剩残余, 称重得到“纯烃”质量, 计算后得到纯烃含量^[18, 19]. 然后硅胶柱分别用氯仿和甲醇进行洗脱, 分别收集洗脱后的样品, 旋转蒸发、氮气吹干, 称重, 即得非极性脂肪酸和极性脂肪酸含量^[20].

GC/GC-MS 分析^[21, 22]: 气相色谱为安捷伦 7890A, 检测器为 FID 检测器, 所得到的纯烃溶于色谱纯的正己烷中, 色谱柱为 Agilent HP-5-二苯基聚硅氧烷共聚物色谱柱(30 m×0.25 id), 进样口温度 240℃, 检测器温度 250℃; 初始温度 130℃ (5 min), 然后以 8℃·min⁻¹ 的速度升到 200℃ (2

min), 再以 5℃·min⁻¹ 的速度升到 280℃ (20 min). 质谱条件: 电子能量 70 eV, 质荷比 m/z 范围 40~600, 结果鉴定对比已报道谱图.

1.4 葡萄藻贴壁培养基中 N 浓度与 Co²⁺ 浓度的测定

葡萄藻贴壁培养液中氮含量的测定方法参照 Collos 等^[23] 的实验研究. 准确量取 2 mL 培养液, 10 000 r·min⁻¹ 下离心 5 min, 收集上清液在 220 nm 下分光光度计测定, 氮的浓度参照以下公式:

$$c = 0.2829D_{220} - 0.0388 \quad (r^2 > 0.99) \quad (2)$$

式中, c 是氮浓度($mmol \cdot L^{-1}$).

葡萄藻贴壁培养液中钴浓度的测定参照 Wang 等^[24] 的离子色谱法.

1.5 工业废水应用于葡萄藻的贴壁培养

将葡萄藻种子液培养 14 d 后, 在温度 (25±1)℃, 连续光照强度 (100±10) μmol·(m²·s)⁻¹, 1% (体积分数) CO₂ 条件下接种于二次工业废水中(由青岛黄岛废水处理厂提供), 培养 8 d 后, 研究葡萄藻贴壁培养生长及烃类积累情况.

1.6 统计分析和数学计算

本实验中, 多组数据间差异显著性分析利用 SPSS 11.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) 的方差分析 (ANOVA) 程序完成, 当 $P < 0.05$ 时表示差异显著. 实验中, 曲线作图及拟合用 Sigmaplot 8.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA) 完成.

2 结果与讨论

2.1 工业废水贴壁培养葡萄藻

本研究首先将青岛黄岛废水处理厂提供的二次工业废水与正常 Chu 13 培养基在相同条件下贴壁培养, 其中工业废水各主要参数指标见表 1. 相比于正常 Chu13 培养基, 工业废水培养基(表 1)中 Co²⁺ 浓度为 0.86 mg·L⁻¹, 明显高于正常 Chu 13 培养基中 Co²⁺ 浓度(约为 0.09 mg·L⁻¹).

表 1 工业废水各主要参数指标

Table 1 Content of different components in industrial wastewater

项目	pH	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Co ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	TOC
数值/mg·L ⁻¹	8.3	1250	20.8	51.37	40.94	0.86	108.5	155.4	52.6	272.2	84.3

实验研究工业废水与正常培养基下贴壁培养葡萄藻生长与烃积累情况. 由图 3 (a) 与 3 (b) 可知, 葡萄藻在工业废水及正常 Chu 13 培养基下长势相当, 培养 8 d 后工业废水贴壁培养葡萄藻生长状况略优于正常培养基下培养, 分别约为 6.0 g·(m²·d)⁻¹ 与 5.6 g·(m²·d)⁻¹. 对于烃类积累而

言[图 3 (c)], 葡萄藻在工业废水中烃含量高于正常 Chu 13 培养基中的含量, 分别约是 60.2% 和 51.2%; 而相应的工业废水贴壁培养葡萄藻烃产率为 3.6 g·(m²·d)⁻¹, 高于正常 Chu 13 培养基中的 2.9 g·(m²·d)⁻¹.

同时, 还观察了葡萄藻在工业废水与正常 Chu

13 培养基贴壁培养 8 d 的细胞显微图(图 4)。从图 4 的光学显微照片可看出,葡萄藻在正常 Chu 13 培养基中贴壁培养藻细胞较为鲜绿[图 4(a)]。整个藻体细胞串状集落生,类似成串葡萄,由形态不规则且长短各异的绳索状透明胶质部分(折射绍丝)连接而成外型不规则或略近球形的复合集落。相比较而言,葡萄藻在工业废水中培养,藻细胞中脱落在培养基中“杯鞘”较正常 Chu 13 培养基中的多;而且

培养基中分散的透明颗粒状堆积物也较正常培养基中多,这些或许是分泌烃类的产物。

葡萄藻在工业废水中贴壁培养生长与烃类的积累情况优于正常 Chu 13 培养基,这或许因为工业废水中氮等营养盐浓度优于正常 Chu 13 培养基。值得注意的是,本研究工业废水中 Co^{2+} 浓度相比较正常 Chu 13 培养基约高 10 倍,这是否是促进葡萄藻生长和烃积累的关键因素,具体原因需要设计实验研究。

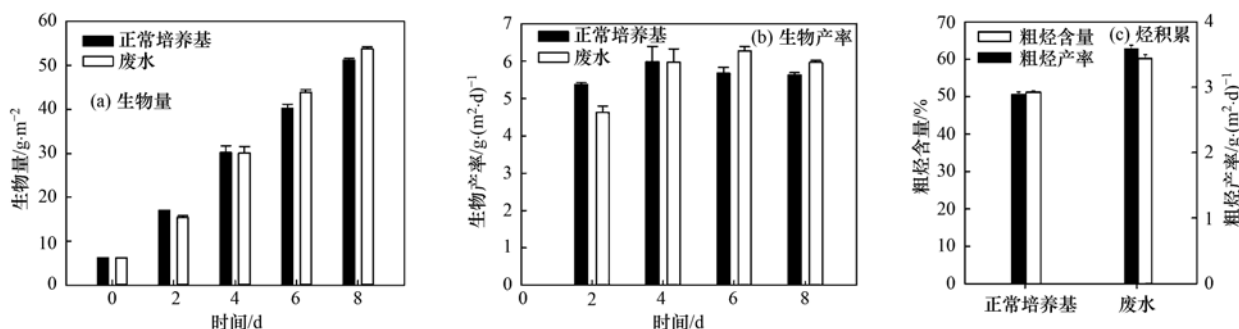


图 3 工业废水对葡萄藻贴壁培养生长与烃积累的影响

Fig. 3 Effect of industrial wastewater on the growth and hydrocarbon accumulation of *B. braunii* with biofilm attached cultivation

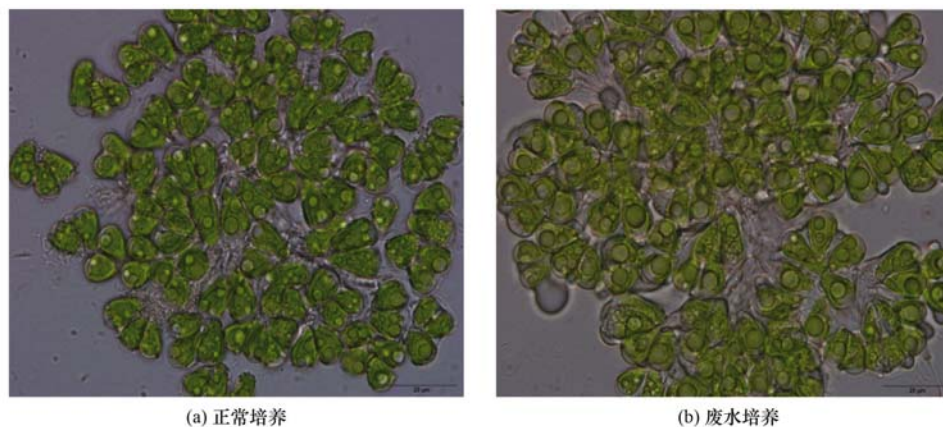


图 4 葡萄藻在工业废水与正常培养基贴壁培养下藻细胞显微图

Fig. 4 LM images of *B. braunii* in industrial wastewater and Chu 13 with biofilm attached cultivation

2.2 Co^{2+} 浓度对葡萄藻贴壁培养生长影响

为了进一步验证 Co^{2+} 浓度对葡萄藻贴壁培养生长的影响,在上述实验基础上于正常 Chu 13 培养基中分别设计了不同钴浓度 0.09 (正常)、0.18、0.45、0.90、4.50、45.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 对葡萄藻贴壁生长的影响(图 5)。由图 5 可知,在相同条件下 Co^{2+} 浓度从 0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 至 4.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 均能支持葡萄藻贴壁培养较好的生长。从图 5 (b)可看出,在葡萄藻贴壁培养 8 d 内, Co^{2+} 浓度为 0.09、0.18、0.45、0.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下生物产率相差不大,分别是 6.9、6.6、6.5 和 6.6 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。当 Co^{2+} 浓度

为 4.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,葡萄藻贴壁培养前 4 d 内生物产率与正常培养相差不大,培养 8 d 后生物产率略微下降,约为 5.5 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$; 当 Co^{2+} 浓度为 45.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,葡萄藻贴壁培养生长明显受到抑制,培养 8 d 后生物产率仅为 0.98 $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 。由此可知,4.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 钴浓度对葡萄藻贴壁生长影响不大。在此基础上,为进一步研究 Co^{2+} 对葡萄藻贴壁培养烃合成的影响,实验选取 Co^{2+} 浓度 0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (正常)与 4.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (钴富余)为研究对象,研究烃积累情况及培养基中 Co^{2+} 浓度变化情况。

2.3 Co^{2+} 浓度对葡萄藻贴壁培养烃积累影响

在相同条件下,本实验研究了 Chu 13 培养基中钴富余($4.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)与正常培养($0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下烃积累的情况(图 6)。从图 6 可看出,随着培养时间的延长无论是 Co^{2+} 富余还是正常下烃的含量都增加,但烃含

量在 Co^{2+} 富余下相对较高。培养 8 d 后,葡萄藻贴壁培养在 Co^{2+} 富余与正常浓度下烃含量分别是 52.9%、43.2%。因为 Co^{2+} 富余下生物产率低于正常的,因而其对应的烃产率与正常 Co^{2+} 浓度相当,分别约是 $2.8 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 、 $2.9 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ [图 6(b)]。

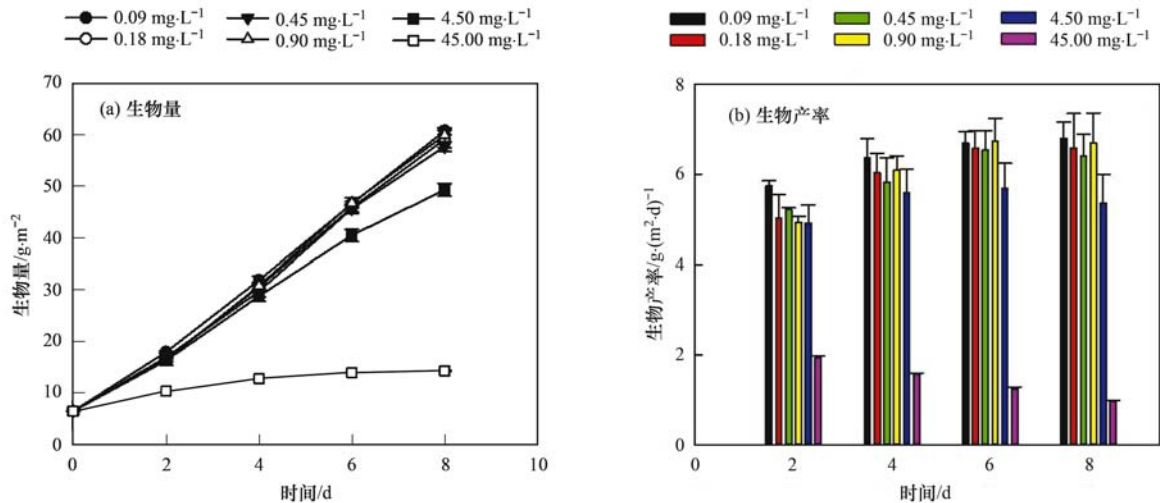


图 5 Co^{2+} 浓度对葡萄藻贴壁生长的影响

Fig. 5 Effect of cobalt concentration on the growth of *B. braunii* under attached cultivation

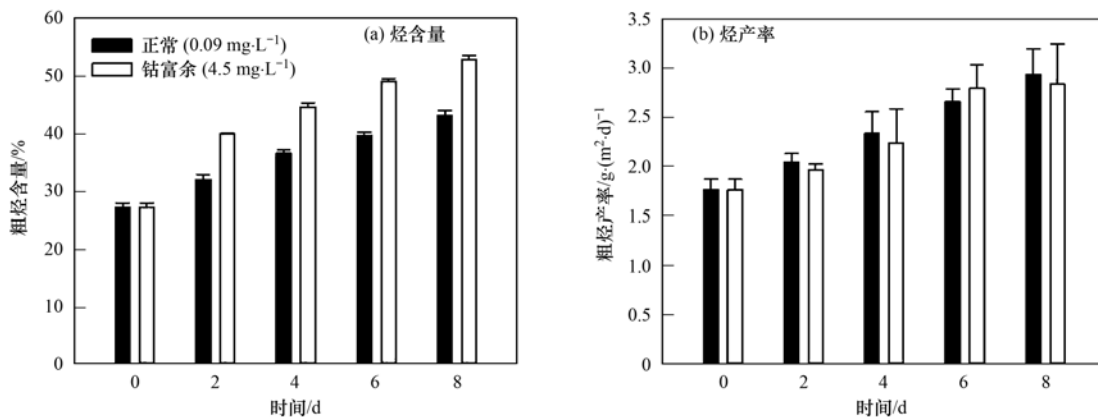


图 6 Co^{2+} 对葡萄藻贴壁培养烃含量、烃产率的影响

Fig. 6 Effect of cobalt on the content of hydrocarbon and productivity of hydrocarbon for *B. braunii* with attached cultivation

一般地, A 品系葡萄藻所产烃类为 C_{25} - C_{31} 奇数二烯和三烯类化合物。本实验中 A 品系葡萄藻在 Co^{2+} 富余与正常浓度下贴壁培养所合成烃构架如图 7 所示。从中可知, Co^{2+} 富余下 C_{31} 含量约为 24.9%, 高于 Co^{2+} 含量正常下的 15.3%; C_{27} 的含量低于正常 Co^{2+} 浓度下的量, 分别约为 13.9% 与 18.0%; 而 C_{29} 下的含量在两种 Co^{2+} 浓度下相当。总体来说, 其它类型的烃类含量正常 Co^{2+} 浓度下略高于 Co^{2+} 富余下的量。Dennis 等^[25] 认为一定的高 Co^{2+} 浓度可以提高钴-卟啉复合酶的活性, 进而促进

脂肪醛到烃类的转换。因此, $4.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Co^{2+} 促进了葡萄藻长链烃等的合成。

2.4 葡萄藻贴壁方式下培养基中 Co^{2+} 与 N 浓度变化情况

本研究葡萄藻贴壁培养在 Chu 13 培养基中 Co^{2+} 富余 ($4.50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 与正常情况下 ($0.09 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 培养基中 N、 Co^{2+} 的消耗情况(图 8)。由图 8(a)可知, 葡萄藻在 Co^{2+} 富余下培养, Co^{2+} 浓度在前 2 d 急剧下降, 而在随后的 6 d 中 Co^{2+} 浓度减少趋于平缓, 培养 8 d 后最终 Co^{2+} 浓度约为 0.71

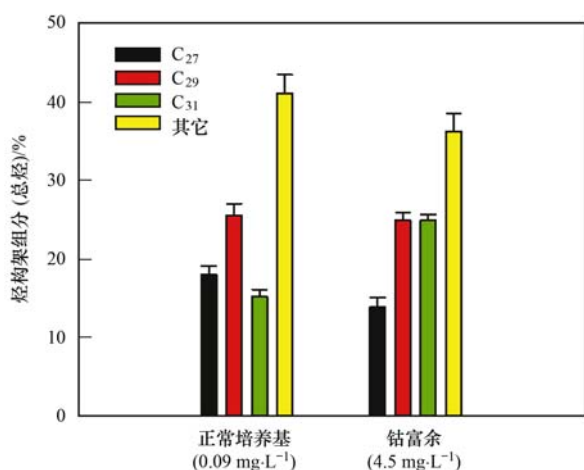
图7 Co^{2+} 对葡萄藻贴壁培养烃构架的影响

Fig. 7 Effect of cobalt on the hydrocarbon profile of *B. braunii* with biofilm attached cultivation

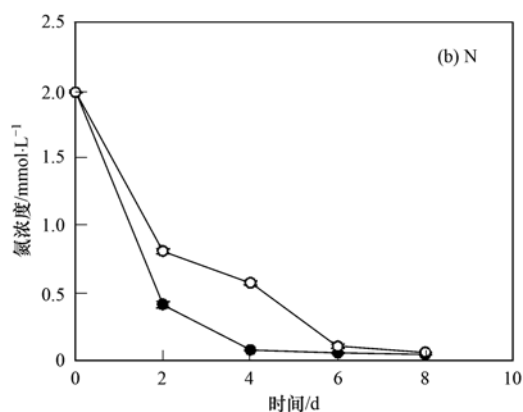
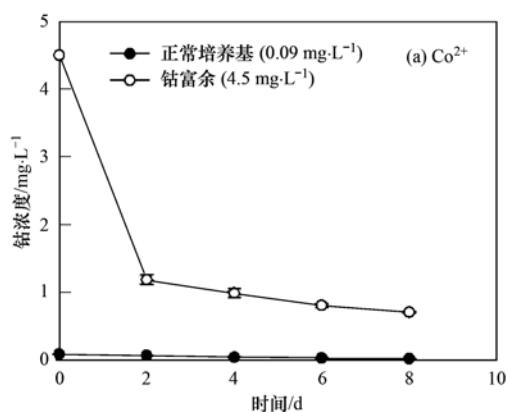
图8 葡萄藻贴壁培养下培养基中 Co^{2+} 、N 含量的变化情况

Fig. 8 Effects of cobalt enrichment on the cobalt and nitrate concentrations in cultivation broth of *B. braunii* with biofilm attached cultivation

3 结论

(1) 葡萄藻贴壁培养对工业废水中重金属钴元素的去除效率较高,而且可以促进生物燃料烃类的合成. 在利用藻类生产生物燃料的同时,去除工业废水中 N、P 及重金属元素,可为绿色高能燃料烃类的生产与工业废水处理耦合提供理论基础,为工业废水处理提供“绿色生态”途径.

(2) 葡萄藻贴壁培养可处理含钴工业废水,一定范围内 Co^{2+} 浓度 ($< 4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对藻细胞生长影响不大,反而有利于烃类的合成. $4.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Co^{2+} 可以促进葡萄藻长链烃类的合成,提高烃产量.

(3) 葡萄藻贴壁培养去除工业废水中 Co^{2+} 的能力为 $1473.9 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于报道的微藻 *P.*

littoralis. 这说明葡萄藻在 Co^{2+} 富余浓度下的贴壁培养基中约 85% 的 Co^{2+} 被去除. 结合生物产率计算,葡萄藻贴壁培养 Co^{2+} 的结合能力为 $1473.9 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$, 远高于 Carrilho 等^[26] 的报道微藻 *P. littoralis* 的结合力 $560 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$.

从图 8(b) 可看出,培养基中 N 含量的消耗在 Co^{2+} 浓度富余情况下消耗速率低于正常值,但最终趋势类似, N 浓度均从最初的 1.98 mmol 降到约 0. 通过比较图 8 发现,在当培养基中 Co^{2+} 含量变化不大后, N 的消耗继续直至消耗殆尽. 这可能是因为培养基中 Co^{2+} 的消耗伴随着离子交换,当培养基中 Co^{2+} 浓度较高时阻止 N 通过位于细胞膜上的离子通道输出细胞^[27]. 由此可知,葡萄藻贴壁培养或许在钴元素去除方面比其它培养方式更有优势.

littoralis.

参考文献:

- [1] 孟伟. 中国流域水环境污染综合防治战略[J]. 中国环境科学, 2007, 27(5): 712-716.
- [2] 郑丙辉, 罗锦洪, 付青, 等. 基于人体健康风险的水污染事件污染物安全阈值研究[J]. 环境科学, 2012, 33(2): 337-341.
- [3] Guo X J, Yang Z, Dong H Y, et al. Simple combination of oxidants with zero-valent-iron (ZVI) achieved very rapid and highly efficient removal of heavy metals from water[J]. Water Research, 2016, 88: 671-680.
- [4] 马迎群, 时瑶, 秦延文, 等. 浑河上游(清原段)水环境中重金属时空分布及污染评价[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 108-116.
- [5] Eccles H. Removal of heavy metals from effluent streams-why select a biological process? [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1995, 35(1-3): 5-16.

- [6] 支田田, 程丽华, 徐新华, 等. 藻类去除水体中重金属的机理及应用[J]. 化学进展, 2011, **23**(8): 1782-1794.
- [7] 王建龙, 陈灿. 生物吸附法去除重金属离子的研究进展[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(4): 673-701.
- [8] Pittman J K, Dean A P, Osundeko O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(1): 17-25.
- [9] Wijffels R H, Barbosa M J. An outlook on microalgal biofuels [J]. Science, 2010, **329**(5993): 796-799.
- [10] 高政权, 孟春晓. 微藻与水环境修复[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(3): 30-34.
- [11] Mehta S K, Gaur J P. Use of algae for removing heavy metal ions from wastewater: progress and prospects[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2005, **25**(3): 113-152.
- [12] Liu T Z, Wang J F, Hu Q, *et al.* Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production [J]. Bioresource Technology, 2013, **127**: 216-22.
- [13] Cheng P F, Wang J F, Liu T Z. Effects of nitrogen source and nitrogen supply model on the growth and hydrocarbon accumulation of immobilized biofilm cultivation of *B. braunii* [J]. Bioresource Technology, 2014, **166**: 527-533.
- [14] Banerjee A, Sharma R, Chisti Y, *et al.* *Botryococcus braunii*: a renewable source of hydrocarbons and other chemicals [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2002, **22**(3): 245-279.
- [15] Keasling J D, Chou H. Metabolic engineering delivers next-generation biofuels[J]. Nature Biotechnology, 2008, **26**(3): 298-299.
- [16] Rude M A, Schirmer A. New microbial fuels: a biotech perspective[J]. Current Opinion in Microbiology, 2009, **12**(3): 274-281.
- [17] Sawayama S, Minowa T, Dote Y, *et al.* Growth of the hydrocarbon-rich microalga *Botryococcus Braunii* in secondarily treated sewage [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1992, **38**(1): 135-138.
- [18] Inoue S, Dote Y, Sawayama S, *et al.* Analysis of oil derived from liquefaction of *Botryococcus braunii* [J]. Biomass and Bioenergy, 1994, **6**(4): 269-274.
- [19] Okada S, Murakami M, Yamaguchi K. Hydrocarbon composition of newly isolated strains of the green microalga *Botryococcus braunii*[J]. Journal of Applied Phycology, 1995, **7**(6): 555-559.
- [20] Singh Y, Kumar H D. Lipid and hydrocarbon production by *Botryococcus* spp. under nitrogen limitation and anaerobiosis[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1992, **8**(2): 121-124.
- [21] Metzger P, Villarreal-rosales E, Casadevall E. Methyl-branched fatty aldehydes and fatty acids in *Botryococcus braunii* [J]. Phytochemistry, 1991, **30**(1): 185-191.
- [22] Metzger P, David M, Casadevall E. Biosynthesis of triterpenoid hydrocarbons in the B-race of the green alga *Botryococcus braunii*. Sites of production and nature of the methylating agent [J]. Phytochemistry, 1986, **26**(1): 129-134.
- [23] Collos Y, Mornet F, Sciandra A, *et al.* An optical method for the rapid measurement of micromolar concentrations of nitrate in marine phytoplankton cultures [J]. Journal of Applied Phycology, 1999, **11**(2): 179-184.
- [24] Wang W N, Chen Y J, Wu M T. Complementary analytical methods for cyanide, sulphide, certain transition metals and lanthanides in ion chromatography[J]. Analyst, 1984, **109**(3): 281-286.
- [25] Dennis M, Kolattukudy P E. A cobalt-porphyrin enzyme converts a fatty aldehyde to a hydrocarbon and Co[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1992, **89**(12): 5306-5310.
- [26] Carrilho E N V M, Gilbert T R. Assessing metal sorption on the marine alga *Pilayella littoralis* [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2000, **2**(5): 410-415.
- [27] Crist R H, Martin J R, Carr D, *et al.* Interaction of metals and protons with algae. 4. Ion exchange vs adsorption models and a reassessment of scatchard plots; ion-exchange rates and equilibria compared with Calcium Alginate[J]. Environmental Science & Technology, 1994, **28**(11): 1859-1866.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollutional Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrochemical Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sarI01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行