

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,范嫻,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)
循环廊道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 株铁基质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,薛翌,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)	

碘普罗胺降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢降解性能研究

徐冰洁, 高品*, 薛罡, 何梦琦, 吴凡

(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 菌株 *Pseudomonas* sp. I-24 (I-24) 难以利用碘普罗胺(IOP)作为唯一的碳源和能源进行生长和代谢, 因此本研究选用淀粉、麦芽糖、葡萄糖和甘油作为 I-24 共代谢 IOP 的外加碳源, 考察了在摇瓶实验中, 不同外加碳源对 I-24 生长及降解 IOP 的影响。结果表明, I-24 共代谢 IOP 符合一级反应动力学特征, 淀粉对共代谢过程的促进作用最为显著, IOP 的五日降解率可达到 92.7%, I-24 的 IOP 降解酶活力在培养第 3 d 达到最高 0.182 mU, 淀粉投加的最佳浓度为 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 然而葡萄糖和麦芽糖分别对 I-24 的生长和电子传递系统活性(ETSA)有着最佳促进作用, 表明降解菌生长过快将导致竞争性抑制, 降低 IOP 降解率, 同时 ETSA 与共代谢作用无直接关联。此外, 从空白样表现出的酶活力得出 IOP 降解酶即使在低基质条件下同样可被诱导产生。

关键词: 碘普罗胺; 降解菌; 共代谢; 酶活力; 外加碳源; 电子传递系统活性

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1443-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.034

Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain *Pseudomonas* sp. I-24 via Co-Metabolism

XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, HE Meng-qi, WU Fan

(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: Strain *Pseudomonas* sp. I-24 (I-24) cannot utilize iopromide (IOP) as the sole carbon and energy source, so different carbon sources (starch, malt sugar, glucose and glycerol) were used as the additional carbon sources to study their effects on I-24 growth and IOP degradation in flask tests. The results showed that the IOP degradation process by I-24 matched the first-order kinetics. Among these four co-substrates, starch was found to be the most efficient to enhance IOP degradation. The corresponding degradation efficiency was as high as 92.7% and the highest enzymatic activity of 0.182 mU appeared in the third day. The optimum starch concentration was $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Since glucose and malt sugar better promoted I-24 growth and electron transport system activity (ETSA), indicating that the IOP degradation process would probably be restrained by excess growth, which decreased the degradation efficiency of IOP. In addition, no direct correlation between ETSA and co-metabolism process was found. The detected enzymatic activity of I-24 in control sample indicated that the key enzymes could be still induced in low-concentration of co-substrates.

Key words: iopromide; degradation strain; co-metabolism; enzymatic activity; additional carbon source; electron transport system activity (ETSA)

碘普罗胺(iopromide, IOP, 见图 1)作为碘化造影剂被用于人体器官和血管 X 光造影, 在世界范围内被大量使用^[1], 但因其稳定的结构和极高性的性质而难以被人体代谢, 直接排入污水处理厂后, 传统的处理方式无法对其有效去除^[2]。虽然目前尚未发现 IOP 对环境生物具有毒性作用^[3], 但其潜在类雌激素影响作用仍值得重视和关注^[4]。

目前关于从环境中去除 IOP 的方法研究主要包括 UV/S₂O₈²⁻/H₂O₂法^[5]、TiO₂催化氧化法^[6]、臭氧氧化法^[7]、高铁酸盐氧化法^[8]和生物法^[9~11]等, 从经济性方面考虑, 生物法更具有优势。针对难生物降解有机物, 共代谢(又称协同代谢)被认为是去除这类物质的重要方式, 其定义为在生长基质存在时, 对非生长基质的氧化^[12]。因此, 研究共代谢条件下

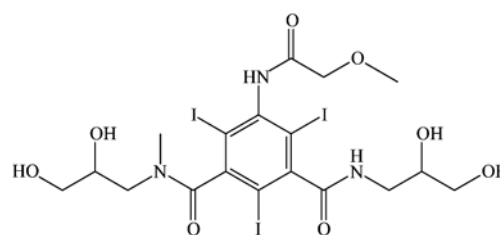


图 1 IOP 化学结构式

Fig. 1 Chemical structure of IOP

收稿日期: 2013-08-02; 修订日期: 2013-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178093, 51208086); 中央高校基本科研业务费专项; 上海市浦江人才计划项目(13PJ1400100); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20120075110012)

作者简介: 徐冰洁(1987~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制与水质安全, E-mail: xubingjie30@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pingao@dhu.edu.cn

某一高效菌株对目标污染物的降解可为生物处理污水技术提供理论依据,指导实际水处理工程运行^[13]。目前许多难生物降解有机物被证实可通过共代谢作用被不同程度地降解去除^[14,15]。尽管如此,目前关于共代谢作用去除 IOP 的研究还鲜有报道。

本研究采用从城市污水处理系统活性污泥中筛选分离得到的 1 株 IOP 高效降解菌,考察其对 IOP 的共代谢降解作用及其影响因素,分析并讨论不同共代谢基质对降解菌的生长、IOP 降解效果及其酶活力的影响,结合其降解动力学研究,初步探索了 IOP 降解关键酶的诱导机制。

1 材料与方法

1.1 培养基及标准溶液的配制

本实验培养基为 IOP 无机盐培养基,通过在无机盐溶液中加入 IOP 和外加碳源(淀粉、葡萄糖、麦芽糖或甘油),投加浓度分别为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。空白样(即对照组的培养基)仅由无机盐培养基和 IOP 组成,无任何外加碳源。无机盐溶液的组成如下($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): K_2HPO_4 4.35, KH_2PO_4 1.7, NH_4Cl 2.1, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.03, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01, MgSO_4 0.2, MnSO_4 0.05, pH 为 6.8 ~ 7.2,培养基使用前先在 121°C 下高温灭菌 20 min。IOP 注射液 $[37 \text{ g(I)} \cdot (100 \text{ mL})^{-1}]$ 购自德国拜耳公司,乙腈(HPLC 级)购自美国 Honeywell Burdick&Jackson 公司,碘硝基四唑紫(INT,98.0%)购自日本 TCI 公司,其它化学药剂均购自国药集团。

IOP 储备液的配制方法如下:使用无菌注射器从 IOP 注射液小瓶中抽取 0.2 mL,使用蒸馏水稀释并定容至 50 mL,即得浓度为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 IOP 储备液,在 4°C 条件下保存备用。

Tris-HCl 溶液(pH 7.1)配制方法如下:将 50 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 三羟甲基氨基甲烷(Tris)溶液与 45.7 mL $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸混匀后,加水稀释至 100 mL。

1.2 实验仪器

高效液相色谱仪(Agilent 1100,安捷伦科技(中国)有限公司)、高速冷冻离心机(Thermo,赛默飞世尔科技(中国)有限公司)、恒温水浴锅(DK-S22,上海精宏实验设备有限公司)、紫外-可见分光光度计(TU-1810,北京普析通用仪器公司)、超声波细胞破碎机(JY 96-II,浙江新芝公司)、恒温摇床(DKY-II,上海杜科自动化有限公司)。

1.3 降解菌的来源

本实验室在前期研究中从城市污水处理系统活性污泥中筛选分离出 1 株能够高效降解 IOP 的菌株,经鉴定属恶臭假单胞菌(*Pseudomonas* sp.),命名为 I-24,菌株具体筛选方法及其生理生化特性见文献[16]。

1.4 实验方法

1.4.1 IOP 浓度的测定

将待测菌液以 4°C 、 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件离心 15 min 后,将上清液通过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤,然后采用高效液相色谱进行定量检测分析,检测器为二极管阵列检测器,流动相为乙腈/水 = 9/91(体积比),色谱分离柱为 Eclipse XDB C18($150 \text{ mm} \times 4.6 \text{ mm} \times 5 \mu\text{m}$),色谱条件如下:流速 $0.4 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温 25°C ,检测波长 242 nm,进样量 20 μL ,每个样品测定 3 次,取平均值。

1.4.2 生长曲线的测定

向培养基中投加体积分数为 10% 的菌液,在 30°C 和 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的条件进行培养,每日测定发酵液的 D_{600} 值,为期 7 d,从而可得菌株 I-24 的生长曲线。

1.4.3 电子传递系统活性(electron transport system activity,ETSA)测定方法

取 0.5 mL 菌液与 1 mL 浓度为 2% 的 INT 进行混合,避光培养 20 min 后加入 0.1 mL 浓度为 37% 的甲醛终止反应,混匀后,在 $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下离心 5 min,倒去上清液,加入 4 mL 浓度为 96% 的甲醇进行充分溶解沉淀,再在 $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下离心 5 min,取上清液进行 D_{495} 测定。ETSA 活性计算方法如下: $\text{ETSA} = D_{495} V / kmt$,式中,ETSA 单位为 $\mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, V 为萃取剂体积(mL), k 为标准曲线斜率, m 为菌体干重(g), t 为培养时间(h)。

1.4.4 酶活力的测定

基于上清液与菌体分别破碎所得的胞外酶与胞内酶活力进行测定,得出胞外酶对 IOP 无降解去除效果,因此随后的实验均采用胞内酶进行酶活力测定。测定方法如下:取 40 mL 菌液,在 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下离心 30 min,倒去上清液,加入 4 mL pH = 7.1 的 Tris-HCl 缓冲液清洗菌体,再以 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 30 min,倒去上清液,重复清洗一次,加入 20 ~ 30 mL Tris-HCl 缓冲液进行混匀沉淀,然后放入超声波细胞破碎机中冰浴破碎 30 min,破碎条件如下:功率 300 W,工作时间 2 s,休息时间 1 s,破碎完成后即得粗酶液,标记为 IOP 降解酶;取 1 mL 粗酶液

稀释约含 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 蛋白质的溶液,加入 3 mL $\text{pH} = 7.1$ 的 Tris-HCl 缓冲液、 1 mL 浓度为 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 IOP 溶液,然后将其置于 30°C 恒温水浴锅中培养 2 h ,空白组置于 80°C 水浴中灭活 10 min ,然后在 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速下离心 20 min ,取上清液在 242 nm 处测定吸光度,以空白组与样品组的吸光度之差与 IOP 标准曲线比对计算酶活力,IOP 降解酶的活力单位(U)定义为单位时间(min)降解 $1\text{ }\mu\text{mol}$ IOP 所需的酶量.测定时每次 3 组平行样,取平均值.

2 结果与讨论

2.1 外加碳源对 IOP 共代谢降解效果的影响

不同外加碳源下,降解菌 I-24 对 IOP 共代谢降解效果如图 2 所示. IOP 的稳定结构使其难以为微生物直接利用,在无任何外加碳源的情况下,空白样培养基中的 IOP 浓度基本无任何变化,通过 5 日培养后,空白样中 IOP 的去除率仅为 1.34% ,相比存在外加碳源条件下,降解菌 I-24 在单 IOP 基质条件下对其基本无去除效果.

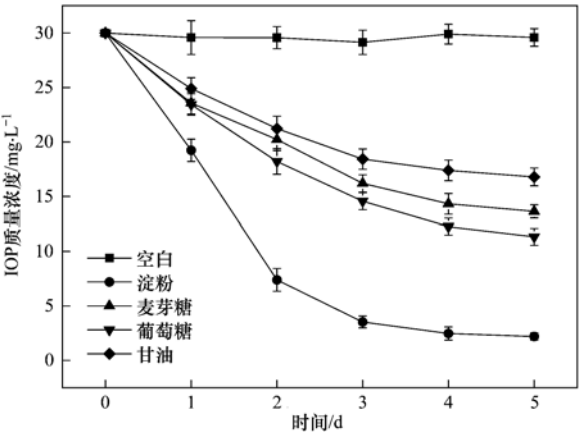


图 2 外加碳源对 IOP 降解过程的影响
Fig. 2 Effects of additional carbon sources on IOP degradation

在共代谢条件下,淀粉作为外加碳源时对 IOP 的降解去除具有显著的促进作用,其 5 日降解去除率可达 92.7% . 与此同时,投加葡萄糖、麦芽糖或甘油的培养基中,经检测分析可知,IOP 的降解去除率分别为 62.2% 、 54.5% 和 44.0% ,虽然不同外加碳源对 IOP 的降解去除促进效果不尽相同,但相比无外加碳源时均有明显提高. 与此同时,通过对 IOP 质量浓度($\rho/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和降解时间(t/d)进行拟合分析(表 1)可知,降解菌 I-24 对 IOP 的降解符合一级反应动力学特征,拟合的动力学方程能较好地描述降解菌对 IOP 降解反应的变化趋势.

表 1 不同外加碳源下 IOP 降解动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of IOP degradation with different additional carbon sources		
外加碳源	动力学方程	R^2
淀粉	$\ln \rho = -0.57 t + 3.88$	0.946
麦芽糖	$\ln \rho = -0.16 t + 3.50$	0.964
葡萄糖	$\ln \rho = -0.20 t + 3.55$	0.975
甘油	$\ln \rho = -0.11 t + 3.46$	0.936

有研究报道采用淀粉和葡萄糖作为外加碳源共代谢难生物降解有机物^[17,18],虽然葡萄糖在特定条件下对共代谢过程存在抑制作用^[19],但绝大多数情况下,葡萄糖在共代谢过程中对目标污染物的促进作用比淀粉更为显著,分析原因可能是淀粉的多糖分子结构相比葡萄糖的单糖和麦芽糖的双糖分子结构更为复杂,不利于降解微生物迅速代谢吸收. 尽管如此,本研究结果表明,相比葡萄糖,淀粉对 I-24 共代谢降解 IOP 的促进作用更为显著,其原因可能是降解菌 I-24 对淀粉的存在更为敏感,能够有效地促进降解菌 I-24 中降解 IOP 的活性基团发挥作用,从而达到高效降解 IOP 的目的.

2.2 降解菌 I-24 在 IOP 共代谢过程中的生长变化情况

图 3 为降解菌 I-24 在 IOP 共代谢过程中的生长变化曲线,分析可知,以葡萄糖作为外加碳源时,降解菌 I-24 生长情况最佳,其 D_{600} 在培养第 1 d 即达到 0.740 ,而以麦芽糖和淀粉作为外加碳源时,降解菌 I-24 的生长速率虽不及以葡萄糖作为外加碳源时的生长速率,但也同样在第 1 d 后即进入稳定生长期. 相比之下,以甘油作为外加碳源时,降解菌 I-24 的生长速率较为缓慢,其 D_{600} 在第 2 d 时为 0.583 ,可能是因为甘油的分子结构相对复杂,降解菌 I-24 对其代谢较慢,对其生长产生一定的抑制作用. 尽管如此,根据 2.1 节的分析结论,降解菌的生长情况与 IOP 降解去除率并无直接联系,Nie 等^[20]也报道过类似的现象.

与此同时,在以 IOP 为唯一碳源的空白样中,降解菌 I-24 的生长基本处于稳定不增殖的状态,以 D_{600} 作为判别标准已无法指示出降解菌的生长周期. 由于 IOP 的苯环结构使得降解菌 I-24 对其难以有效地代谢,因此只能通过内源代谢以保持其活性,结合前述所得结论,表明降解菌 I-24 只有在获得充足能量,保持其正常生长的条件下,才能对 IOP 进行有效降解. 但是,一旦共代谢基质易于被代谢吸收,也会导致 IOP 与共代谢基质之间形成竞争作用,因

此降解菌 I-24 利用共代谢基质进行生长繁殖受到抑制,从而降低 IOP 的降解去除率。

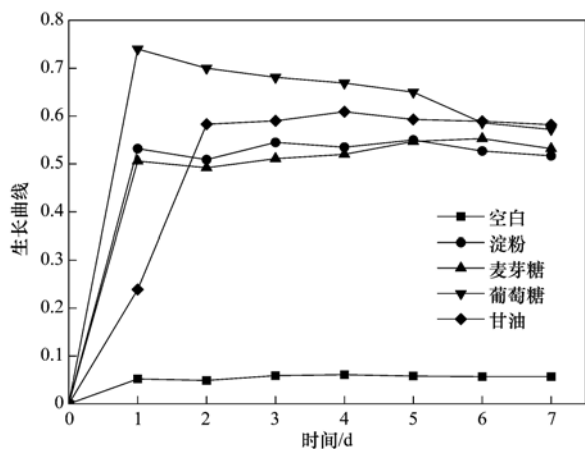


图3 共代谢过程中 I-24 的生长曲线

Fig. 3 Growth curve of strain I-24 during co-metabolism process

2.3 IOP 共代谢过程中降解菌的 ETSA

ETSA 是指微生物呼吸链上电子的传递速率,通过测定好氧条件下微生物的呼吸活性可以间接表示活性微生物量及其对有机物的代谢能力^[21,22].若微生物细胞内发生氧化还原反应时,INT 因接受氢原子而被还原,并发生颜色变化,通过还原后溶液的颜色变化可考察酶对底物 (INT) 的反应活性^[23],从而判断还原型辅酶经过电子传递再氧化的效率^[24].图 4 为不同外加碳源条件下降解菌 I-24 共代谢 IOP 过程中 ETSA 变化情况,分析可知,随着时间的延长,各系统中微生物的活性均呈现下降趋势,并在第 4 d 左右达到稳定,与 D_{600} 的变化趋势类似,空白样中 ETSA 值始终处于较低水平.由于 ETSA 主要由基质代谢活性与内源呼吸代谢活性两部分组成^[25],外加碳源作为电子供体能加速基质 ETSA 的释放,因此当不存在有效的碳源提供电子供体时,降解菌 I-24 的内源呼吸代谢活性远低于其它外加碳源培养基中的活性,仅为 $2.5 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右.相比之下,麦芽糖所释放的代谢活性最强,培养第 1 d 为 $32.12 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,约为淀粉所释放的两倍 [$17.28 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$].由于降解微生物对小分子类电子供体的利用率较高,可释放出较多的基质代谢脱氢酶^[10],麦芽糖是一种双糖,结构简单,且易被分解成单糖,从而促进基质 ETSA 的释放,而淀粉的多糖结构水解步骤较多,但到反应后期,大量的淀粉水解产物逐渐减缓了 ETSA 的下降速率。

尽管如此,由上述分析可知,淀粉的存在对降解菌 I-24 的共代谢过程具有更为显著的促进作用,说

明 ETSA 只能作为降解菌 I-24 反应活性的一个表征数值,而无法将其与 IOP 的共代谢过程建立直接的相关关系,或者说,降解菌 I-24 共代谢对 IOP 的共代谢过程只与其内部关键酶有关。

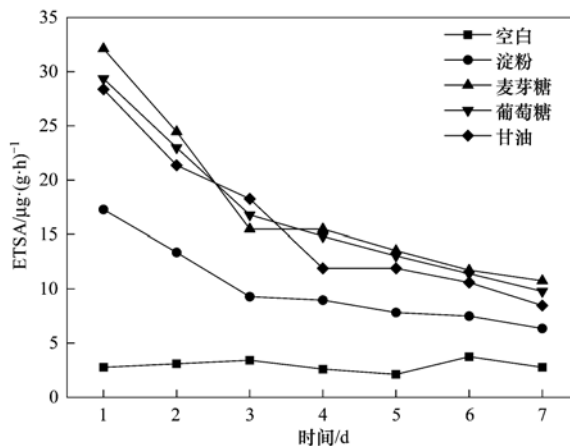


图4 共代谢过程中外加碳源对 I-24 ETSA 的影响

Fig. 4 Effects of additional carbon sources on ETSA of I-24 during co-metabolism process

2.4 共代谢过程中 I-24 的 IOP 降解酶活力

2.4.1 不同外加碳源条件下 I-24 的 IOP 降解酶活力

图 5 为降解菌 I-24 共代谢过程中 IOP 降解酶活力的变化情况.由于测定时,粗酶液的蛋白质浓度均被稀释至大约为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此酶比活力与酶活力的变化趋势是一致的,本节内容选择酶活力作为比较数据.由图 5 分析可知,当外加碳源为淀粉时,降解菌酶活力在第 3 d 可达 0.182 mU ,而在其它条件情况下,降解菌酶活力分别为:麦芽糖 0.119 mU 、空白样 0.074 mU 、葡萄糖 0.053 mU 和甘油 0.046 mU .空白样中降解菌 I-24 虽然生长情况一般,ETSA 活性较低,对 IOP 的降解去除效果较差,但其酶活力却高于葡萄糖和甘油培养基,分析可知,内源代谢虽然抑制降解菌 I-24 对 IOP 的降解作用,但仍可诱导降解关键酶的产生,只是其活性受到抑制.通过超声破碎将粗酶液提取后,关键酶在适宜的条件下仍可恢复其活性。

在第 3 d 后,各个培养基中降解菌 I-24 的酶活力呈逐渐下降趋势,分析原因可能是 IOP 降解过程中所产生的代谢产物发生累积,从而对关键酶产生一定的毒性抑制作用,同时关键酶自身的老化也会影响其活性,即使相关的蛋白酶能够修复关键酶,减弱代谢产物的毒性,但也只能减缓酶活力的下降速率。

2.4.2 降解菌 I-24 在不同淀粉浓度下酶活力变化情况

有研究报道,外加碳源浓度的不同会对共代谢

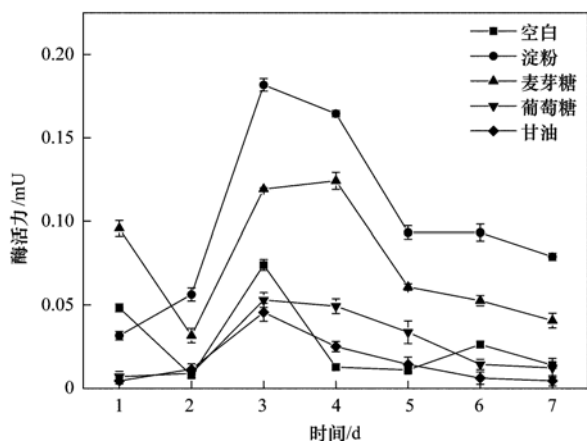


图5 共代谢过程中 IOP 降解酶活力

Fig. 5 IOP-degrading enzymatic activity during co-metabolism process

结果产生影响^[26],同样也会影响关键酶活力. 本研究3组无机盐培养基中分别加入浓度为0.5、1、1.5和2 g·L⁻¹的淀粉和30 mg·L⁻¹的IOP,在培养2 d后对酶活力进行测定,结果如图6所示,分析可知,当淀粉投加浓度为1 g·L⁻¹时,降解菌 I-24 的酶活力最高,达0.114 mU. 淀粉的投加可以促进 IOP 的共代谢降解,但当淀粉浓度偏低时,无法满足微生物生长繁殖的需要,从而影响对关键酶的诱导,而当淀粉浓度过高时,降解菌 I-24 会大量代谢淀粉,影响降解 IOP 基因的有效表达,与 IOP 产生竞争性抑制^[27].

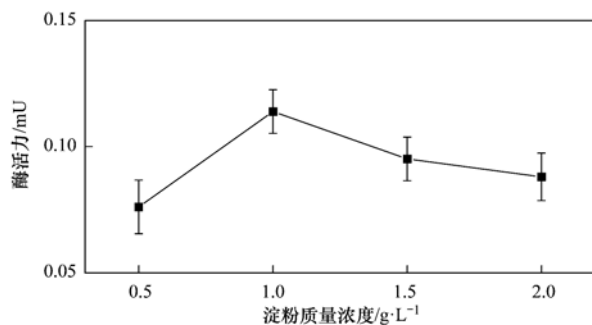


图6 不同淀粉浓度下 IOP 降解酶活力

Fig. 6 IOP degradation enzymatic activities under different starch concentrations

3 结论

(1)考察了淀粉、麦芽糖、葡萄糖和甘油对降解菌 *Pseudomonas* sp. I-24 共代谢 IOP 的影响,结果表明以淀粉作为外加碳源时,降解菌 I-24 对 IOP 的降解效果最好,可达92.7%,之后依次为葡萄糖、麦芽糖和甘油,空白样中 IOP 难以生物降解. 此外,降解菌 I-24 对 IOP 的降解过程符合一级反应动力学.

(2)外加碳源对降解菌 I-24 的生长具有明显的

促进作用,并且降解菌 I-24 在含有葡萄糖的培养基中生长情况最佳.

(3)降解菌 I-24 在含有麦芽糖的培养基中电子呼吸系统活性最高,可达32.12 μg·(g·h)⁻¹,但通过 ETSA 与 IOP 降解过程进行对比分析可知,ETSA 与共代谢过程无明显的直接关系.

(4)当以淀粉作为外加碳源时,IOP 降解酶活力在第3 d 可达0.182 mU,且淀粉的最佳投加量为1 g·L⁻¹,同时空白样中降解菌 I-24 同样具有酶活力,表明关键酶的诱导即使在低基质条件下也可进行,过高或过低的外加碳源浓度均会抑制关键酶的诱导与表达.

参考文献:

- [1] Pérez S, Barceló D. Fate and occurrence of X-ray contrast media in the environment[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, **387**(4): 1235-1246.
- [2] Ternes T A, Hirsch R. Occurrence and behavior of X-ray contrast media in sewage facilities and the aquatic environment [J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(13): 2741-2748.
- [3] Steger-Hartmann T, Länge R, Schweinfurth H. Environmental risk assessment for the widely used iodinated X-ray contrast agent iopromide (Ultravist) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1999, **42**(3): 274-281.
- [4] Krause H, Schweiger B, Schuhmacher J, et al. Degradation of the endocrine disrupting chemicals (EDCs) carbamazepine, clofibric acid, and iopromide by corona discharge over water[J]. Chemosphere, 2009, **75**(2): 163-168.
- [5] Chu W, Wang Y R, Leung H F. Synergy of sulfate and hydroxyl radicals in UV/S₂O₈²⁻/H₂O₂ oxidation of iodinated X-ray contrast medium iopromide[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **178**: 154-160.
- [6] Doll T E, Frimmel F H. Kinetic study of photocatalytic degradation of carbamazepine, clofibric acid, imeprol and iopromide assisted by different TiO₂ materials-determination of intermediates and reaction pathways[J]. Water Research, 2004, **38**(4): 955-964.
- [7] Seitz W, Jiang J Q, Schulz W, et al. Formation of oxidation by-products of the iodinated X-ray contrast medium imeprol during ozonation[J]. Chemosphere, 2008, **70**(7): 1238-1246.
- [8] Anquandah G, Ray M B, Ray A K, et al. Oxidation of X-ray compound ditriazoic acid by ferrate (VI) [J]. Environmental Technology, 2011, **32**(3): 261-267.
- [9] Batt A L, Kim S, Aga D. Enhanced biodegradation of iopromide and trimethoprim in nitrifying activated sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(23): 7367-7373.
- [10] Kalsch W. Biodegradation of the iodinated X-ray contrast media diatrizoate and iopromide[J]. Science of the Total Environment, 1999, **225**(1-2): 143-153.

- [11] Haiß A, Kümmerer K. Biodegradability of the X-ray contrast compound diatrizoic acid, identification of aerobic degradation products and effects against sewage sludge micro-organisms[J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(2): 294-302.
- [12] Leadbetter E R, Foster J W. Oxidation products formed from gaseous alkanes by the bacterium *Pseudomonas methanica* [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 1959, **82**(2): 491-492.
- [13] 董怡华, 胡筱敏, 和英滇, 等. 共代谢条件下光合细菌对 2-氯苯酚的生物降解[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(5): 1280-1286.
- [14] Baggi G, Bernasconi S, Zangrossi M, *et al.* Co-metabolism of di- and trichlorobenzoates in a 2-chlorobenzoate-degrading bacterial culture; effect of the position and number of halo-substituents [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, **62**(1): 57-64.
- [15] Wen J, Gao D W, Zhang B, *et al.* Co-metabolic degradation of pyrene by indigenous white-rot fungus *Pseudotrametes gibbosa* from the northeast China [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2011, **65**(4): 600-604.
- [16] Liu Y, Hu J, Xu B, *et al.* Isolation and identification of an iopromide-degrading strain and its application in an A²O system [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **134**(1): 36-42.
- [17] 邓伟光, 谌建宇, 李小明, 等. 壬基酚和双酚 A 降解菌株的分离、鉴定和特性研究[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(3): 700-707.
- [18] 李剑, 谢春娟. 废水中苯胺的好氧共代谢降解实验研究[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(6): 51-55.
- [19] 朱婷婷, 倪晋仁. 不同碳源对苯并[a]芘降解菌生长和降解性能影响的研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2012, **48**(2): 343-346.
- [20] Nie M Q, Yin X H, Ren C Y, *et al.* Novel rhamnolipid biosurfactants produced by a polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacterium *Pseudomonas aeruginosa* strain NY3 [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(5): 635-643.
- [21] 尹军. 消化污泥脱氢酶活性检测的若干问题[J]. *中国给水排水*, 2000, **16**(10): 47-49.
- [22] 尹军, 谭学军, 任南琪. 用 TTC 与 INT-电子传递体系活性表征重金属对污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2005, **26**(1): 56-62.
- [23] 雷欢, 黄栩, 田蕴, 等. 一株菲降解细菌的筛选及其降解条件的优化[J]. *海洋科学集刊*, 2009, **49**: 104-112.
- [24] 曲艳慧. 基于不同碳源类型条件下倒置 A²/O 工艺与常规 A²/O 工艺脱氮除磷机理及微生物代谢活性对比研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011. 25-26.
- [25] 尹军, 付瑶, 王翠兰, 等. 活性污泥的基质代谢脱氢酶活性测定[J]. *中国给水排水*, 2002, **18**(9): 50-52.
- [26] 宋卫锋, 严明, 孙水裕. 浮选废水中苯胺黑药与外加基质的共代谢特性[J]. *中国有色金属学报*, 2012, **22**(7): 2090-2096.
- [27] Boonchan S, Britz M L, Stanley G A. Degradation and mineralization of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by defined fungal-bacterial cocultures[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(3): 1007-1019.

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