

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油中对肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)
《环境科学》征订启事 (447)	《环境科学》征稿简则 (493)
信息 (508, 588, 610, 731)	专辑征稿通知 (788)

链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究

谢练武, 方继前, 郭亚平

(中南林业科技大学理学院, 长沙 410004)

摘要: 从印染厂污泥中筛选到 1 株对偶氮染料红 30 (AR30) 具有较强脱色降解作用的菌株 *Streptomyces* sp. FX645. 通过降解产物的紫外-可见吸收光谱、LC-MS 分析及各降解产物在发酵体系中浓度随时间变化的规律, 探讨了菌株 FX645 对 AR30 的可能降解途径, 首先在偶氮还原酶的作用下 AR30 发生偶氮键的裂解, 生成 4-硝基-2,6-二氯苯胺与 2-[(4-胺苯基)-(2-氰乙基)-氨基]乙酸乙酯, 然后分别发生硝基还原、氨基酰化、氰基水解作用, 生成一系列的苯胺类化合物.

关键词: 偶氮染料; 脱色降解; 链霉菌; 降解机制; 偶氮还原酶

中图分类号: X172; X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)02-0611-05

Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by *Streptomyces* sp. FX645

XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping

(School of Science, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: One strain, identified as *Streptomyces* sp. FX645 which was isolated from the sludge collected in a printing and dyeing mill, had high potency of degradation and decolourisation of azo dye Red 30 (AR30). The microbial degradation mechanism on AR30 by strain FX645 was proposed through analyzing the UV-vis spectra and LC-MS spectra of the degradation products and investigating the variations in the concentrations of the degradation products in the culture. It is suggested that the azo bond of AR30 was initially cracked by azo reductase to produce 2,6-dichloro-4-nitrobenzenamine and 2-[(4-aminophenyl)-(2-cyanoethyl) amino] ethylacetate, which then generated several aromatic amine compounds under the actions of nitroreduction, aminoacylation and cyano hydrolysis, respectively.

Key words: azo dye; decolourisation and degradation; *Streptomyces* sp.; degradation mechanism; azo reductase

偶氮染料广泛应用于纺织、食品、造纸、化妆品、制药等行业, 是指含有芳环或杂环母核与偶氮双键的一类化合物, 很难在环境中降解^[1], 属于“三致”化合物^[2~4]. 研究偶氮染料化合物的生物降解作用, 对构建经济高效与环境友好的偶氮染料废水处理工艺具有重要指导意义^[5~7]. 目前, 报道的偶氮染料降解微生物种类主要有真菌^[8,9]、细菌^[10,11]和藻类^[12~14], 作用机制主要是吸附和降解等^[15], 而且效果非常明显. 本研究从印染厂污泥中筛选到 1 株对偶氮染料红 30 (AR30) 具有较强脱色降解作用的菌株 *Streptomyces* sp. FX645, 并对降解机制进行了初步探讨.

1 材料与方法

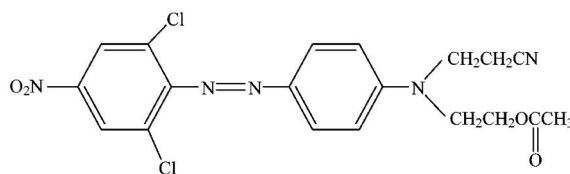
1.1 污泥样品

本研究中污泥样采自湖南省株洲市棉纺厂印染车间废水滤池, 运输时使用冰袋保护包装, 使用前放入实验室 -20℃ 冰箱中冷冻保存.

1.2 试剂与仪器

1.2.1 试剂与培养基

偶氮染料 AR30 ($C_{19}H_{17}O_4N_3Cl_2$), 分析纯, 由浙江润土染料有限公司赠送, 相对分子质量为 449, 结构式如下:



染料母液: 用二甲亚砜 (DMSO) 配制成 $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 AR30 母液, 经 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤除菌备用.

筛选培养基: 琼脂 20 g, 染料母液 2 mL, 无菌水定容至 1 L.

富集培养液: 葡萄糖 5 g, 蛋白胨 2 g, 牛肉膏 3 g, Na_2HPO_4 3.5 g, KH_2PO_4 1.5 g, MgSO_4 0.2 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, 无菌水 1 L, 调 pH 为 7.0.

收稿日期: 2012-04-21; 修订日期: 2012-06-30

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (200909066); 湖南省科技计划项目 (2011TT2062); 校青年基金项目 (QJ2008017B, QJ2010025B)

作者简介: 谢练武 (1972~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为化合物的微生物降解与结构转化, E-mail: xielcw@126.com

脱色降解培养液: NH_4Cl 5 g, Na_2HPO_4 3.5 g, KH_2PO_4 1.5 g, MgSO_4 0.2 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.01 g, 染料母液 2 mL, 无菌水 1 L, 调 pH 为 7.0.

1.2.2 主要仪器

YXQ-LS-75S 自动立式高压灭菌锅(苏州江东精密仪器有限公司), YJ-1000 型超净工作台(吴江天润净化设备有限公司), D2F-6050 型真空干燥箱(上海精宏实验设备有限公司), HYG-A 恒温培养箱(江苏太仓市实验设备厂), UV-2100 型紫外可见光谱仪(北京北分瑞利分析仪器公司). 降解产物 LC-MS 数据经送样外测获得.

1.3 实验方法

1.3.1 菌株的筛选及鉴定

称取污泥样 5.0 g, 放入盛有 50 mL 无菌水并带有玻璃珠的三角烧瓶中, $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡约 20 min 后进行梯度稀释, 得到稀释 10 、 10^2 、 10^3 、 10^4 、 10^5 、 10^6 、 10^7 倍的稀释液. 分别取稀释液 200 μL 涂布于筛选培养基中, 32°C 培养 3 ~ 5 d, 挑选脱色圈较大的菌落进一步分离纯化, 并对照文献[16]进行初步鉴定.

1.3.2 脱色降解菌的富集与染料共培养发酵

用接种环挑取纯化的菌株于装有 100 mL 富集培养液的 250 mL 三角瓶中, 于 32°C 培养 2 d. 取 10 μL 菌液接种于 100 mL 染料浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的脱色降解培养液中, 厌氧培养 5 d, 发酵液备用.

1.3.3 紫外-可见光谱分析

取上述 5 mL 染料共培养发酵液, $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心, 上清液用乙酸乙酯萃取 3 次, 合并萃取液, 以乙酸乙酯为参比, 在 200 ~ 900 nm 范围内进行紫外-可见扫描, 观察 AR30 的紫外-可见光谱变化.

1.3.4 LC-MS 分析

将上述染料共培养发酵液 500 mL 于 $8000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心, 用乙酸乙酯萃取上清液 3 次, 合并萃取液, 浓缩干燥得降解混合产物, 进行液相色谱-质谱分析, 并与初始染料进行对照.

液相色谱条件: 进样 10 μL , 波长 289 nm, 流动相流速 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 流动相为 H_2O 与 CH_3CN 的比例在 30 min 内由 80:20 变为 20:80; 色谱柱为 Agilent XDB- C_{18} (Φ 4.6 mm $\times$ 250 mm; 5 μm).

质谱条件: 离子源为电喷雾离子源(ESI); 扫描方式为正离子扫描(Positive); 毛细管电压 4.0 kV; 去溶剂温度 350°C ; 去溶剂流速 $10 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 菌株鉴定结果

从株洲棉纺厂污泥样品中分离筛选到了 1 株对偶氮染料 AR30 具有较强脱色效果的菌株. 该菌株在高氏 I 号培养基上菌丝较细, 生长缓慢, 菌落质地致密, 表面呈较紧密的绒状. 营养菌丝匍匐生长于培养基内, 菌落与培养基结合紧密, 不易挑起. 气生菌丝叠生在营养菌丝上, 覆盖整个菌落表面. 孢子丝呈弯曲状, 孢子为球形, 表面光滑, 灰黄色, 不产生色素, 对照文献[16], 这些生理生化特点基本符合链霉菌生长形态特征. 另外通过 16S rDNA 分析, 测得的 800 bp 碱基对中的 30 ~ 650 bp 与 *Streptomyces variabilis* (AB184884) 同源性 100%. 最后选取 11 株模式菌株进行系统发育分析, 用 Clustal X 软件和 MEGA4.0 软件构建系统发育树(见图 1), 并将其定名为 *Streptomyces* sp. FX645.

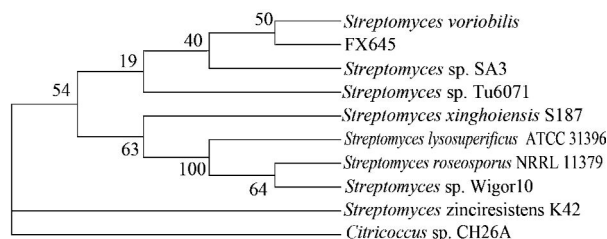


图 1 FX645 和相关菌株的系统发育树

Fig. 1 Phylogenetic tree of strain FX645 and its relatives

2.2 紫外-可见光谱分析结果

图 2 描述了 AR30 降解前后的紫外-可见吸收光谱变化情况. 降解前, AR30 的特征吸收峰在 289 nm 与 445 nm 处, 其中 445 nm 吸收峰是由偶氮染料的发色基(偶氮键)、助色基(硝基、氰基等)产生的. 对 AR30 降解产物而言, 紫外光区 289 nm 和可见光区 445 nm 处吸收峰均基本消失, 而在 220 ~ 250 nm 范围吸光强度较大. 这说明 AR30 已经被链霉菌 FX645 降解, 在降解过程中产生了其他化合物, 这些化合物在 250 nm 处的吸光度很强, 说明可能仍具有苯环结构.

2.3 LC-MS 分析结果

偶氮染料 AR30 质谱图与降解产物液质联用色谱、质谱图如图 3 ~ 5 所示.

由质谱图(图 3)可以看出, 染料 AR30 的 $[M + H]^+$ 与 $[M + Na]^+$ 峰的丰度都较大, 相对分子质量为 449. 从降解产物的液相色谱图(图 4)可以看出, 5 个色谱峰的保留时间分别为 2.506、5.908、6.892、9.716、11.013 和 13.841 min, 而在 AR30 的保留值 25 min 处的峰已经消失, 说明 AR30 已经基本降解完全, 并生成 5 种降解产物.

根据降解产物的质谱图(图 5), 与 AR30 结构

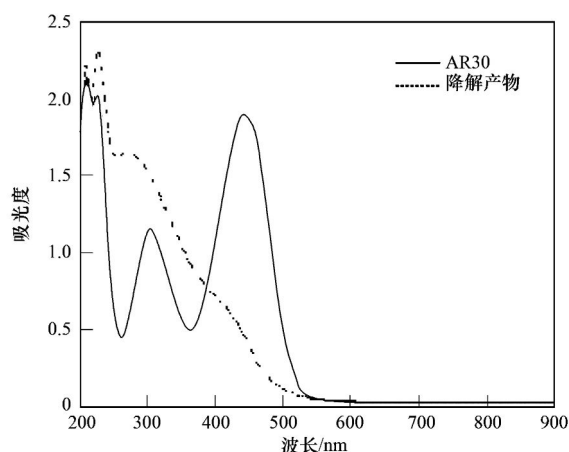


图2 降解前后 AR30 的紫外-可见吸收光谱

Fig. 2 UV-Vis absorption spectra of AR30 before and after degradation

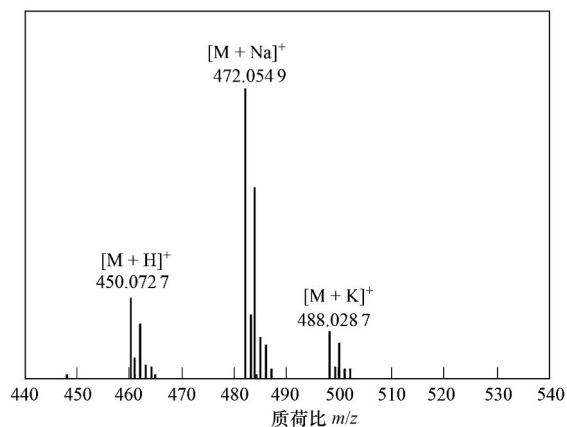


图3 染料 AR30 质谱图

Fig. 3 Mass Spectrum of AR30

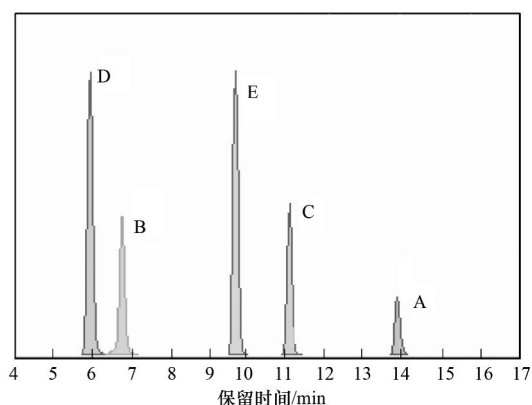


图4 染料 AR30 降解产物 LC-MS 色谱图

Fig. 4 Chromatography in LC-MS of AR30 degradation products

式加以比较,分析得到 5 个降解产物的结构式,如下。

产物 A: 4-硝基-2,6-二氯苯胺 (2,6-dichloro-4-nitrobenzenamine, $M_r = 206$); 产物 B: 2,6-二氯-1,4-

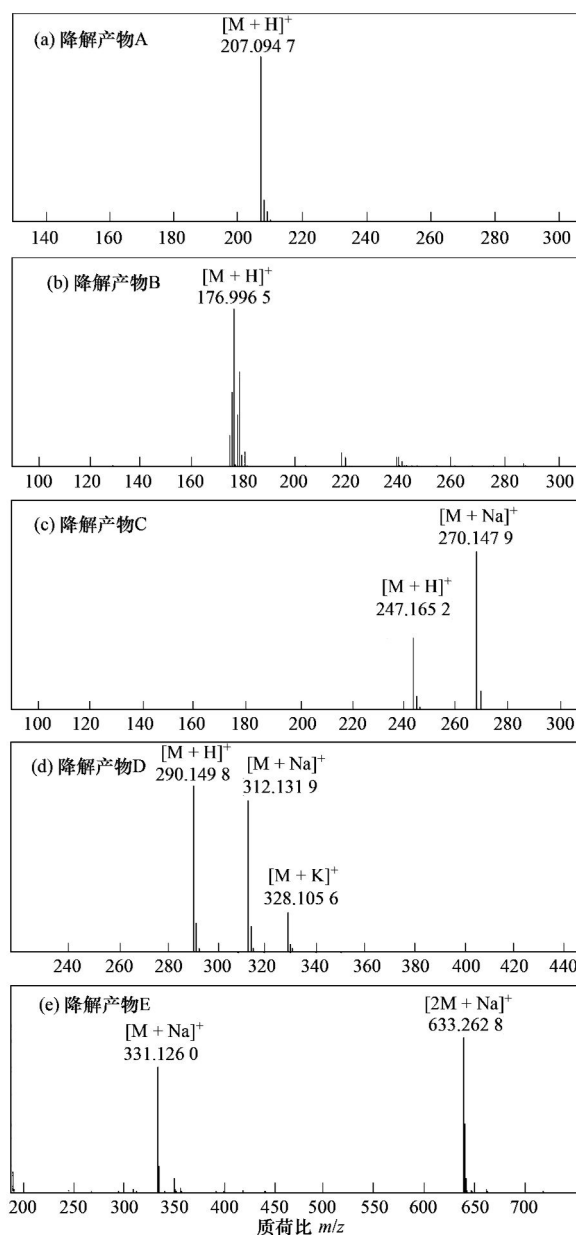


图5 链霉菌 FX645 降解 AR30 的 5 种产物质谱图

Fig. 5 Mass spectra of 5 degradation products of AR30 by FX645

苯二胺 (2, 6-dichlorobenzene- 1, 4-diamine, $M_r = 176$); 产物 C: 2-[(4-胺苯基)-(2-氰乙基)-氨基]乙酸乙酯 [2-[(4-aminophenyl) (2-cyanoethyl) amino] ethyl acetate, $M_r = 247$]; 产物 D: 2-[(4-乙酰胺苯基)-(2-氰乙基)-氨基]乙酸乙酯 [2-[(4-acetamidophenyl) (2-cyanoethyl) amino] ethyl acetate, $M_r = 289$]; 产物 E: 3-[(4-乙酰胺苯基)-(2-乙酰氧乙基)-氨基]丙酸 [3-[(4-acetamidophenyl) (2-acetoxyethyl) amino] propanoic acid, $M_r = 308$].

在降解发酵体系中,12 h 时 5 种产物中的 A、C 浓度较高,而 E 浓度很低;随降解时间的延长,B、E 浓度逐渐升高,而 A、C 浓度则急剧下降;36 h 时体

系中 AR30 浓度几近于 0,而只含有 B、D 与 E 化合物。据此,推测出 *Streptomyces* sp. FX645 降解分散染料 AR30 的可能途径,如图 6 所示。

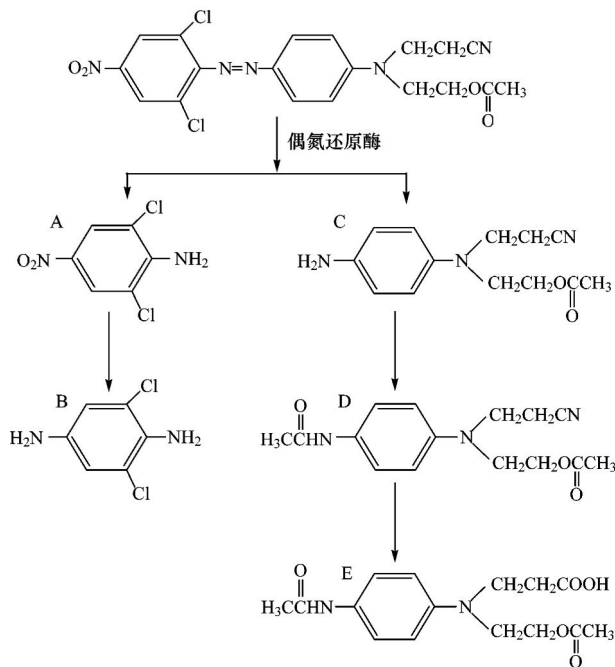


图 6 菌株 FX645 对 AR30 可能降解途径

Fig. 6 Proposed pathway of AR30 degradation by *Streptomyces* sp. FX645

有研究者认为,偶氮化合物在偶氮还原酶的作用下,可能经过了一个中间过渡态——加氢偶氮苯,也就是说偶氮键的断裂是经由两步还原完成^[17~20]。由于加氢偶氮苯类物质在整个反应过程中的相对丰度一直较低,不能累积到一定的量,说明它在反应体系中不太稳定,可以推断它们一旦生成就会很快分解。同样,本研究中 AR30 可能也是在偶氮还原酶作用下生成了化合物 A 与 C。然后发生硝基还原反应 A 生成了 B, C 发生氨基酰化反应生成 D, D 继而发生氰基水解反应生成了 E。

通过以上谱图分析,AR30 脱色降解机制为:在厌氧条件下,偶氮染料的偶氮双键被链霉菌 FX645 的偶氮还原酶还原裂解,并产生一系列中间产物芳香胺类化合物,其中偶氮双键的还原是偶氮染料脱色降解的关键一步。

3 结论

从株洲棉纺厂印染车间污泥样品中分离筛选到了 1 株对偶氮染料 AR30 具有较强降解脱色能力的菌株 *Streptomyces* sp. FX645。根据降解产物的光谱数据,可知 *Streptomyces* sp. FX645 可将 AR30 降解

为 4-硝基-2,6-二氯苯胺、2,6-二氯-1,4-苯二胺、2-[(4-胺苯基)-(2-氰乙基)-氨基]乙酸乙酯、2-[(4-乙酰胺苯基)-(2-氰乙基)-氨基]乙酸乙酯和 3-[(4-乙酰胺苯基)-(2-乙酰氧乙基)-氨基]丙酸等 5 种苯胺类物质,并根据各降解产物浓度变化规律,提出在偶氮还原酶作用下的降解途径。生成的苯胺类物质可以转入具有芳香胺降解矿化作用的微生物体系中,进一步降解矿化。如果将两类微生物加以结合建立组合生物反应器,用于偶氮染料的微生物降解与矿化,有望成为处理偶氮染料废水的重要方法之一。

参考文献:

- [1] Banat I M, Nigam P, Singh D, *et al.* Microbial decolorization of textile-dyecontaining effluents: a review [J]. *Bioresource Technology*, 1996, **58**(3): 217-227.
- [2] Amjad A K, Qayyum H. Potential of plant polyphenol oxidases in the decolorization and removal of textile and non-textile dyes[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(4): 396-402.
- [3] Chen B Y, Wang M Y, Lu W B, *et al.* Use of active consortia of constructed ternary bacterial cultures via mixture design for azo-dye decolorization enhancement [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **145**(3): 404-409.
- [4] 郭建博, 张立辉, 杨景亮, 等. 耐盐偶氮染料脱色菌株 GYW 的筛选及特性[J]. *微生物学通报*, 2009, **36**(5): 644-651.
- [5] Chen C Y, Kuo J T, Cheng C Y, *et al.* Biological decolorization of dye solution containing malachite green by *Pandora* *pulmonicola* YC32 using a batch and continuous system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **172**(2-3): 1439-1445.
- [6] Tony B D, Goyal D, Khanna S. Decolorization of textile azo dyes by aerobic bacterial consortium [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2009, **63**(4): 462-469.
- [7] 陈杏娟, 许玫英, 孙国萍. 不同形态铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 230-236.
- [8] Singh S, Pakshirajan K. Enzyme activities and decolourization of single and mixed azo dyes by the white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, **64**(2): 146-150.
- [9] Qu Y Y, Shi S G, Ma F, *et al.* Decolorization of reactive dark blue K-R by the synergism of fungus and bacterium using response surface methodology [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8016-8023.
- [10] Xiao X, Xu C C, Wu Y M, *et al.* Biodecolorization of naphthol green B dye by *Shewanella oneidensis* MR-1 under anaerobic conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **110**: 86-90.
- [11] Cui D Z, Li G F, Zhao D, *et al.* Microbial community structures in mixed bacterial consortia for azo dye treatment under aerobic and anaerobic conditions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **221-222**(30): 185-192.
- [12] Liu J Q, Liu H T. Degradation of azo dyes by algae [J]. *Environmental Pollution*, 1992, **75**(3): 273-278.
- [13] El-Sheekh M M, Gharieb M M, Abou-El-Souod G W.

- Biodegradation of dyes by some green algae and cyanobacteria [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009, **63** (6): 699-704.
- [14] 孙红文, 黄国兰, 丛丽莉, 等. 藻类对偶氮染料的降解及定量结构-生物降解性研究[J]. 中国环境科学, 1999, **19**(4): 289-292.
- [15] Pandey A, Singh P, Iyengar L. Bacterial decolorization and degradation of azo dyes [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2007, **59**(2): 73-84.
- [16] Bergy D, Holt J G. Bergey's manual of determinative bacteriology (9th ed.) [M]. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 1993.
- [17] Hong Y G, Xu M Y, Guo J, *et al.* Respiration and growth of *Shewanella decolorationis* S12 with an azo compound as the sole electron acceptor[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, **73**(1): 64-72.
- [18] Nakanishi M, Yatome C, Ishida N, *et al.* Putative ACP phosphodiesterase gene (*acpD*) encodes an azoreductase [J]. The Journal of Biological Chemistry, 2001, **276**(49): 46394-46399.
- [19] 洪义国, 郭俊, 王敏妮, 等. 具有广谱偶氮还原能力柠檬酸菌 AzoR-2 的分离鉴定和还原特性研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1397-1403.
- [20] Chang J S, Chou C, Lin Y C, *et al.* Kinetic characteristics of bacterial azo-dye decolorization by *Pseudomonas luteola* [J]. Water Research, 2001, **35**(12): 2841-2850.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i>	(409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i>	(416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i>	(424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i>	(434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i>	(441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui	(448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun	(455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i>	(462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i>	(468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i>	(476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i>	(484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan	(494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao	(499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i>	(509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i>	(517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i>	(525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i>	(532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i>	(540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i>	(547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i>	(555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke	(561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i>	(570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i>	(576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya	(583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i>	(596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i>	(604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping	(611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i>	(616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i>	(622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i>	(629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i>	(635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen	(642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i>	(647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i>	(653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i>	(662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei	(668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i>	(676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i>	(685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i>	(692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i>	(698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i>	(705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i>	(712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i>	(718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i>	(732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i>	(740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i>	(746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i>	(753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i>	(760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i>	(767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i>	(773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i>	(781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i>	(789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i>	(795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i>	(804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i>	(810)

《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)

2013年2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 15, 2013

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