

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

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

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究 窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明(1)

厦门城区大气颗粒物 PM₁₀ 中有机酸源谱特征分析 杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水正(8)

兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析 李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思(15)

气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO₂ 和 NO_x 的影响 王鸿,朱天乐,王美艳(21)

麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较 汪军,王德建,张刚,王远(27)

单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物 陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋(34)

碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究 张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨(39)

夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜(DMSO)的浓度分布 王敏,张洪海,杨桂朋(45)

2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析 闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇(51)

基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测 李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙(61)

基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究 郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁(69)

重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究 徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍(77)

区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型 陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军(84)

秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征 李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元(91)

湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用 蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山(98)

丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价 张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男(108)

汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布 李晋昌,张红,石伟(116)

黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估 张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强(121)

胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征 刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军(129)

基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选 卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新(137)

海洋细菌 *Marinobacter adhaerens* HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用 王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦(145)

水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响 苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民(150)

化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响 高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳(156)

无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析 王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐(163)

天然有机物的相对分子量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响 胡孟柳,林洁,许光红,董秉直(169)

不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响 徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺(177)

基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究 曾宪委,刘建国,聂小琴(182)

负载型 TiO₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究 张小娜,周少奇,周晓(188)

污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析 吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇(194)

微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响 刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根(198)

不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N₂O 产生量的影响 韩雪,高大文(204)

模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响 谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢(209)

嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换 白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立栲,何宝燕,李跃鹏(217)

阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究 夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳(226)

活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究 孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南(231)

北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析 杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛(237)

北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究 齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福(244)

北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估 千志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏(251)

多效应残差法(MERA)表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用 霍向晨,刘树深,张晶,张瑾(257)

利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌 吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远(263)

不同白腐真菌复配方式对产酶的影响 孟瑶,梁红,高大文(271)

不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响 张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林(277)

垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响 霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国(283)

黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征 董洪芳,于君宝,管博(288)

丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究 方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇(293)

重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究 陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟(302)

无定形 Fe(OH)₃ 和 Fe₃O₄ 共沉淀态 As 的化学提取 陈义萍,王少锋,贾永锋(308)

铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响 李华,黄建国,袁玲(315)

污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究 段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎(321)

高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能 李坤权,李焯,郑正,桑大志(328)

基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究 田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易(336)

微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展 侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强(347)

2012 城市生态学术研讨会会议论文

北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征 何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛(357)

北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征 唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正(364)

北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析 任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强(373)

洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析 虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维(379)

低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析 施晓清,李笑诺,杨建新(385)

北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究 邓俊,徐琬莹,周传斌(395)

人工湿地在应用中存在的问题及解决措施 黄锦楼,陈琴,许连煌(401)

《环境科学》征订启事(26) 《环境科学》征稿简则(68) 信息(76,144,301,400) 专辑征稿通知(394)

嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换

白洁琼¹, 尹华^{2,3*}, 叶锦韶¹, 彭辉¹, 唐立涛¹, 何宝燕¹, 李跃鹏¹

(1. 暨南大学环境工程系, 广东省高校有害性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632; 2. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 3. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

摘要: 研究了投菌量、金属浓度和戊二醛浓度对嗜麦芽窄食单胞菌吸附水体中 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 特性的影响, 分析了重金属生物吸附、 NO_3^- 去除与菌体离子释放的关联, 从离子吸附、交换、转化与释放的角度探讨了重金属生物吸附机制. 结果表明嗜麦芽窄食单胞菌对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 吸附性能良好, $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 干菌体处理浓度为 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液 120 min 后, Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附率分别达 96.3% 和 83.9%. 菌体对 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶液的吸附过程存在 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的表面吸附与胞内运输、 NO_3^- 胞内积累、 NO_3^- 还原为 NO_2^- 等行为, 而且 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的胞内运输、 NO_3^- 积累和还原需要消耗能量, 并会促进 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 等离子的释放. 红外光谱分析表明菌体酰胺基、羟基与羧基均参与了 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附. X-光电子能谱分析显示吸附后 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的价态不发生变化.

关键词: 生物吸附; 铜; 镉; 离子; 嗜麦芽窄食单胞菌

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)01-0217-09

Characteristic and Ion Exchanges During Cu^{2+} and Cd^{2+} Biosorption by *Stenotrophomonas maltophilia*

BAI Jie-qiong¹, YIN Hua^{2,3*}, YE Jin-shao¹, PENG Hui¹, TANG Li-tao¹, HE Bao-yan¹, LI Yue-peng¹

(1. Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. The Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The characteristics of Cu^{2+} and Cd^{2+} biosorption by *Stenotrophomonas maltophilia* (*S. maltophilia*) under different biomass, metal concentration and glutaraldehyde content were studied and the correlations among metal biosorption, NO_3^- removal and ion release were analyzed. The mechanism was explored through ion biosorption, exchange, conversion and release. The experimental results demonstrated that *S. maltophilia* was an efficient strain to remove Cu^{2+} and Cd^{2+} . The biosorption efficiencies of Cu^{2+} and Cd^{2+} achieved 96.3% and 83.9%, respectively after dealing with $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ aqueous solutions for 120 min with dry biosorbent dosage of $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Cu^{2+} and Cd^{2+} biosorption by *S. maltophilia* included surface adsorption, transmembrane active transportation, bioaccumulation of NO_3^- and reduction of NO_3^- to NO_2^- . The intracellular transfer and reduction of NO_3^- to NO_2^- during biosorption by *S. maltophilia* were energy-consuming biological processes. It could also promote the release of Cl^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Na^+ , NH_4^+ , K^+ and Ca^{2+} . From FTIR investigation, involvement of various functional groups like acetylamino, hydroxyl and carboxyl in the binding of Cu^{2+} and Cd^{2+} was evident. Moreover, XPS results proved that the valence state of Cu^{2+} and Cd^{2+} did not changed by biosorption.

Key words: biosorption; copper; cadmium; ion; *Stenotrophomonas maltophilia*

微生物对重金属具有良好的生物吸附和生物转化作用, 可以将重金属从废水和污泥中去除, 达到治理污染、回收重金属和处理后水体回用的目的^[1,2]. 重金属废水的生物吸附法具有对中低浓度重金属废水处理效率高、处理费用低、菌种来源广泛、二次污染少、可回收贵重重金属和对不同的重金属具有吸附专性和泛性等优点^[3,4], 在解决重金属污染和水资源短缺等方面具有广阔的应用前景.

迄今为止, 国内外许多科研工作者已就重金属微生物吸附剂的筛选、预处理、固定化、吸附性能、菌剂再生、低成本制备和吸附机制等方面做了大量

研究工作^[5~7]. 但是, 重金属的微生物吸附机制研究仍缺乏有机的耦合, 如只关注重金属离子的吸附, 却忽视了吸附过程中离子的生物代谢与转化行为以及重金属的吸附与菌体阴阳离子的释放与交换等存在的内在关系. 为此, 本文选取重金属污染环境中普遍存在的铜和镉作为代表物, 以本课题组前期研

收稿日期: 2012-04-05; 修订日期: 2012-06-08

基金项目: 国家自然科学基金-广东省联合基金重点项目 (U0933002); 国家自然科学基金项目 (50978122); 暨南大学优秀本科推免生科研创新培育计划项目

作者简介: 白洁琼 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与修复, E-mail: 451842720@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: thyin@jnu.edu.cn

究中筛选获得的高效重金属吸附菌嗜麦芽窄食单胞菌 (*Stenotrophomonas maltophilia*) 为吸附菌株, 研究铜镉硝酸盐溶液中的金属吸附性能、 NO_3^- 去除与转化, 分析铜镉吸附与菌体阴阳离子释放、交换等行为的关联, 并利用傅里叶红外光谱与 X-光电子能谱分析菌体吸附前后活性基团及重金属的价态变化, 从离子吸附、交换、转化与释放的角度探讨重金属生物吸附的机制。

1 材料与方法

1.1 实验材料

吸附菌: 嗜麦芽窄食单胞菌 (*S. maltophilia*) 从前期研究中筛选获得^[8]。

培养液: 牛肉膏 5 g、蛋白胨 10 g、NaCl 5 g、双蒸水 1 000 mL、pH 7.0 ~ 7.2。

$10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cu}^{2+}$ 、 Cd^{2+} 储备液分别由优级纯 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 溶于去离子双蒸水中得到。

1.2 微生物的扩大培养

将 *S. maltophilia* 接种到培养液中, 于 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡培养 24 h, $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min 获取菌体, 利用去离子双蒸水清洗菌体 3 次, 测定清洗后的菌体干重。

1.3 重金属吸附与离子释放实验

投菌量对重金属吸附与离子释放的影响: 在 $0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的重金属溶液中投加菌体, 使其最终干重浓度分别为 0.005、0.010、0.020、0.040、0.100、0.200 和 $0.400 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡处理 120 min 后, 于 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min 取上清液, 利用火焰吸收法测定重金属浓度; 利用 ICS-900 离子色谱仪测定 Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度, 其中阴离子分析柱为 Dionex IonPac[®] AS14 (4 mm \times 250 mm), 流动相为 $3.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3$ 和 1.0

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$, 流速 $1.2 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样体积为 $50 \mu\text{L}$ 。 阳离子分析柱为 Dionex IonPac[®] CS12A (4 mm \times 250 mm), 流动相为 $1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$, 流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 进样体积为 $50 \mu\text{L}$ 。

重金属浓度对菌体吸附重金属的影响: 利用 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 菌体于 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡处理浓度分别为 0.01、0.05、0.10、0.20、0.50、1.00 和 $2.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的金属溶液 120 min 后, 测定残留金属浓度。

失活菌体对重金属的吸附与离子释放: 将一定量戊二醛加入 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的菌液中, 使菌液中戊二醛的最终浓度分别为 0、0.5%、1.0%、2.5%、5.0%、7.5% 和 10.0%, 固定菌体 24 h 后, 用去离子双蒸水清洗菌体至 pH 中性。 取失活后菌体投加到重金属溶液中, 使菌体的最终浓度为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 于 $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $130 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 摇床中振荡处理 120 min。

1.4 X-射线光电子能谱实验

利用 ESCALAB 250 X-射线光电子能谱仪对吸附重金属后的菌体进行元素分析。 样品结合能荷电校正采用污染碳 Cl s (284.8 eV) 定标, 元素谱分峰采用 XPSpeak41 软件拟合。

1.5 红外光谱实验

把吸附重金属后的菌体于 $-57 \sim -60^\circ\text{C}$ 冷冻干燥仪中干燥 24 h, 取干燥菌体于玛瑙研钵, 加入 KBr 粉末, 研磨 5 min 混匀。 将混合好的粉末压片并放置于傅里叶变换红外吸收光谱仪 (德国 Bruker EQUINOX55) 的检测台上进行检测。

2 结果与讨论

2.1 投菌量对菌体吸附铜和镉的影响

Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除均随投菌量的增加呈先上升后下降的趋势, 当投菌量为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 两者的去除率分别可达到 96.3% 和 83.9% [图 1(a)]。

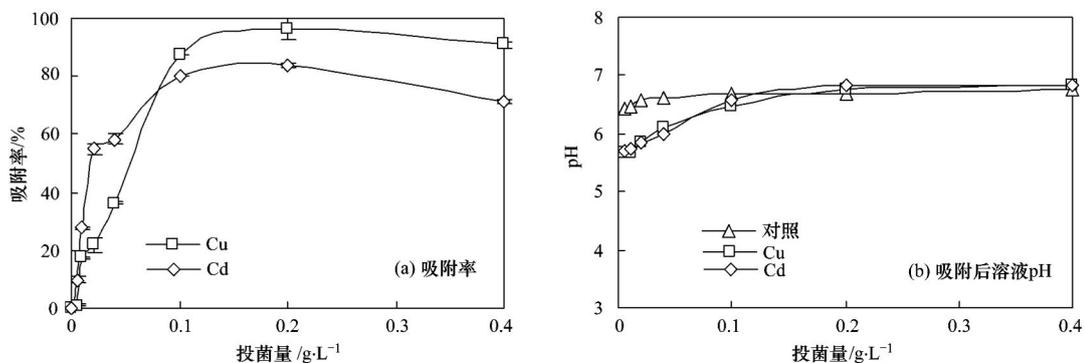


图 1 投菌量对铜和镉吸附的影响

Fig. 1 Effect of biomass on copper and cadmium biosorption

投菌量过高, Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附率出现下降可能与几方面的原因有关: 投菌量过高时, 菌体向胞外分泌的物质会改变吸附体系的 pH 值, 从而改变菌体表面的物化性质或影响重金属离子在水中的存在形态, 并进一步削弱菌体对金属离子的吸附效果; 菌体向胞外分泌的阳离子也可能会与目标吸附质发生吸附竞争^[9, 10]; 此外, 微生物对重金属具有生物解毒的能力^[11, 12]. 在合适的吸附质与吸附剂比例下, 当部分重金属被积累到体内后, 菌体会产生多种适应机制, 如改变细胞膜的离子运输通道, 使溶液中的重金属更难运输进细胞内; 或者把已积累在细胞内的重金属运输至胞外. 另外, 也有研究提出由于菌量过高, 菌体会相互吸附、成团, 从而减少吸附的有效点位^[13-15]. 但是, 该推测的可能性很小, 因为菌体的大小一般达 μm 级, 而重金属离子的大小为 nm 级水平, 菌体的团聚不会抑制重金属离子的传质, 特别是在摇床振荡处理的条件下, 菌体不会出现明显的团聚现象. 为阐明投菌量过高吸附率反而下降的原因, 本实验测定了吸附过程体系的 pH 值, 并在后续的研究中设计了活细胞和失活细胞吸附 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 过程的离子释放实验. 图 1(b) 显示, 溶液的 pH 值会随着投菌量的增加而升高, 当投菌量为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, pH 值的变化很小, 因此, pH 的变化不是投菌量过大时, Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 吸附效果下降的主因.

2.2 重金属浓度对菌体吸附铜和镉的影响

铜是生物必需的微量元素^[16], 在低浓度时, 可以作为酶的辅助因子, 使酶呈现出活性, 进而促进正常生命活动. 但是, 当浓度过高时, 会对生物体产生抑制或毒害作用. 镉作为对生物体毒害最大的 5 种重金属之一, 微量摄入即可对微生物造成伤害. 因此本实验将重金属浓度设为兼有低、中、高水平的 0.01

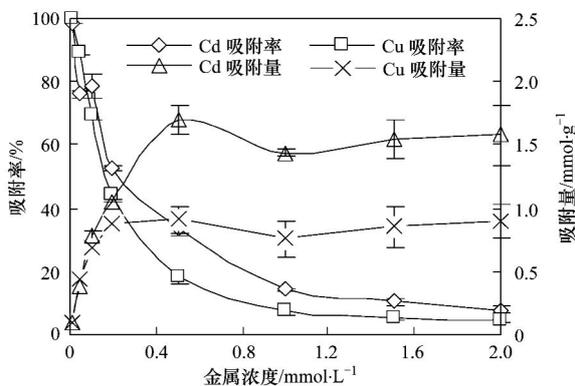


图 2 重金属浓度对铜和镉吸附的影响

Fig. 2 Effect of heavy metal concentration on copper and cadmium biosorption

$\sim 2.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 考察 *S. maltophilia* 对不同浓度水平 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附行为. 图 2 表明, 随着重金属浓度的增加, Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 吸附率一直呈现下降的趋势. 单位质量菌体对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附量则呈先上升, 后平稳的态势. 该结果证明了 *S. maltophilia* 对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 具有饱和吸附量, 分别为 $0.9 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.7 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$, 吸附质与吸附剂的比例均为 $5 \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$. 此时, 菌体对重金属的表面吸附以及向胞内运输的速率与重金属的解吸速率相等.

2.3 失活菌体对铜和镉的吸附

本实验利用不同浓度戊二醛作为失活剂固定菌体, 可以将细胞活性状态时的结构和菌体表面的功能基团完整地保留, 并不同程度地终止菌体正常的生理生化功能, 从而考察菌体表面吸附与内部扩散作用对重金属生物吸附贡献大小. 图 3 显示, 菌体失活前后对 Cu^{2+} 的吸附效果不变; 但是, 随着戊二醛浓度的增加, Cd^{2+} 的生物吸附会呈下降的趋势. 该结果证明了 Cu^{2+} 的吸附主要可能以表面吸附为主, 也可能存在活性菌体对 Cu^{2+} 进行跨细胞膜的胞内运输, 但同时将等量的 Cu^{2+} 重新运输至胞外, 从而出现了活性菌体和失活菌体对 Cu^{2+} 的吸附效果一致的结果; 而 Cd^{2+} 的生物吸附则存在表面吸附和胞内积累行为, 失活后, 菌体不具备对 Cd^{2+} 进行胞内积累的能力, 从而导致了 Cd^{2+} 吸附率的下降. 当重金属浓度较高时 (图 2), Cd^{2+} 的饱和吸附量大于 Cu^{2+} 的饱和吸附量也进一步说明了胞内积累在 Cd^{2+} 吸附中的贡献.

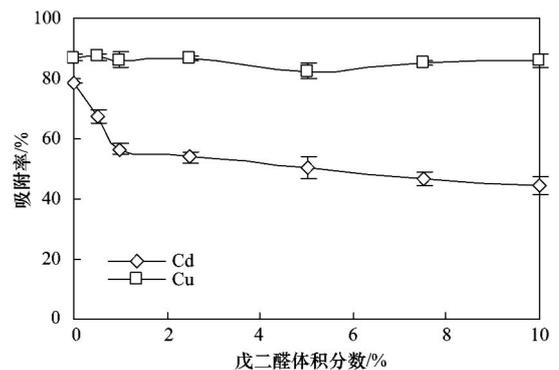


图 3 失活菌体对铜和镉的吸附

Fig. 3 Copper and cadmium biosorption by inactive *S. maltophilia*

2.4 不同投加量菌体吸附铜和镉过程中离子的释放与转化

图 4 显示, 溶液中 Cl^- 、 NO_2^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 的浓度均随投菌量的增加而上升, 说明菌体吸附 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的过程均会向溶

液中释放胞内的阴阳离子. 该现象与多种原因有关:①实验所用的重金属溶液均由去离子双蒸水配制,溶液渗透压低,从而诱发了胞内离子的释放;②胞内某些阳离子与溶液中的重金属离子存在离子交

换现象^[17, 18]. 为明确重金属吸附与各离子释放的关系,本实验进一步对 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的吸附量与溶液中其它离子的浓度进行了相关性分析. 表 1 表明, Cu^{2+} 的吸附与 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、

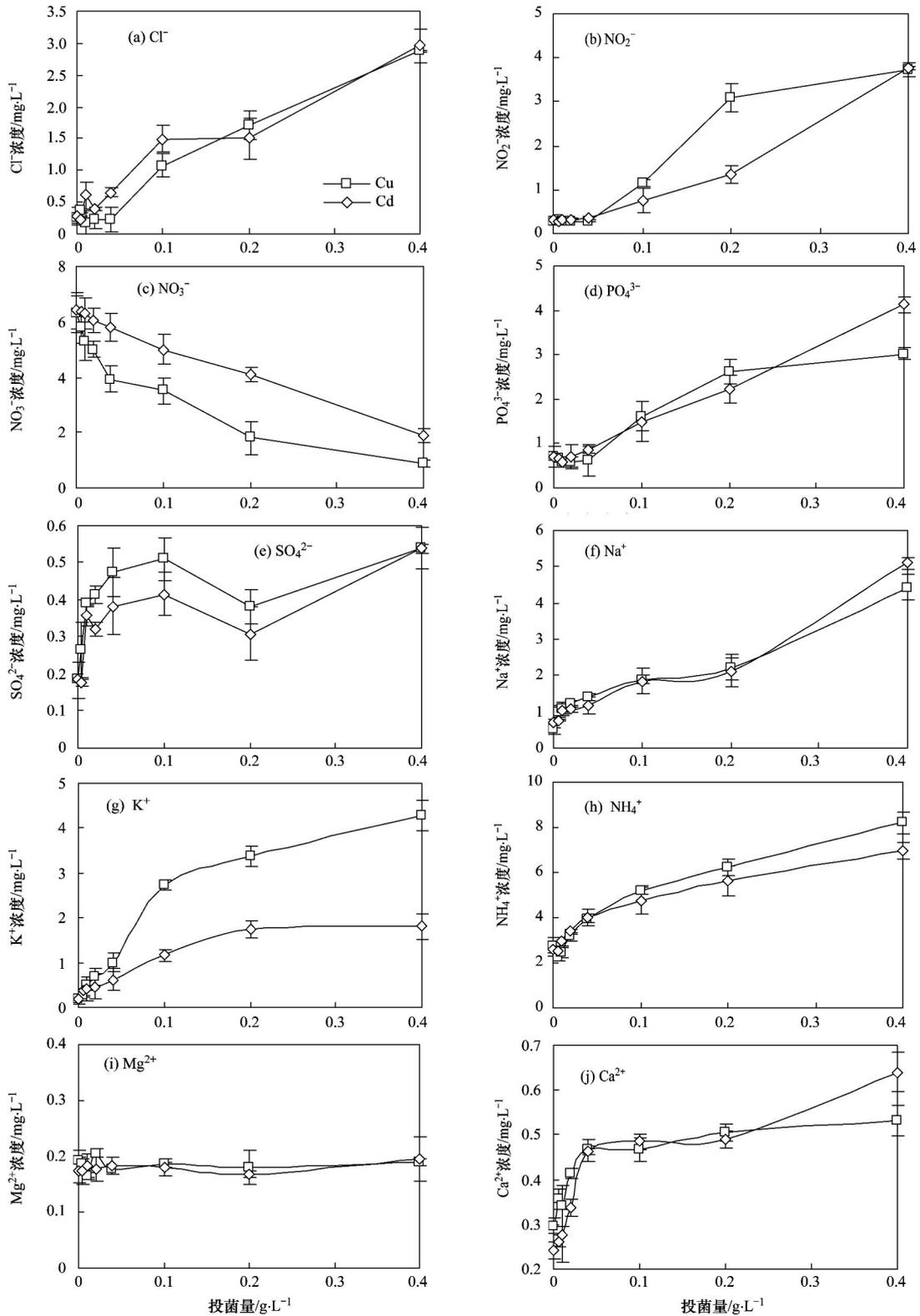


图 4 投菌量对菌体吸附重金属后离子释放的影响

Fig. 4 Effect of biomass on ion releases after biosorption

表 1 活菌体重金属吸附与离子释放的相关性¹⁾Table 1 Relation between heavy metal biosorption and ion release by active *S. maltophilia*

项目	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
Cu ²⁺	0.785 *	0.916 **	0.959 **	-0.094	0.897 **	0.826 *	0.843 **	-0.931 **	0.889 **	0.718 *
Cd ²⁺	0.569	0.818 *	0.82 *	0.208	0.854 **	0.687	0.487	-0.684	0.595	0.733 *

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

NO₂⁻、PO₄³⁻ 和 SO₄²⁻ 释放显著正相关,与 NO₃⁻ 浓度变化呈显著的负相关; Cd²⁺ 的吸附与 NH₄⁺、K⁺、Ca²⁺ 和 SO₄²⁻ 释放显著正相关. 该结果证明了 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的吸附存在表面吸附和胞内积累. Na⁺ 和 K⁺ 的释放与运输主要与 Na⁺、K⁺-ATP 酶有关; PO₄³⁻ 的释放则由高能物质腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)与二磷酸腺苷(ADP)的相互转化引起; 由于吸附液中没有营养物质,而且 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 具有毒性,因此,会导致菌体利用部分胞内包括蛋白质在内的生物大分子进行内源呼吸,从而释放出 NH₄⁺; Ca²⁺ 的释放则与 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 发生的阳离子交换有关.

由于 Cu(NO₃)₂ 和 Cd(NO₃)₂ 溶液中初始 NO₃⁻ 浓度较高,该离子浓度随投菌量增加而下降[图 4(c)],表明菌体对 NO₃⁻ 具有吸附或转化的作用. NO₂⁻ 可能来源于菌体的胞内释放或者是 NO₃⁻ 的还原. 图 4(b) 中 NO₂⁻ 增加的摩尔量与图 4(c) 中 NO₃⁻ 减少的摩尔量的比值均小于 1(图 5),证明即使存在转化作用,也只有部分 NO₃⁻ 还原为 NO₂⁻,而有部分 NO₃⁻ 被吸附于细胞内.

2.5 失活菌体吸附铜和镉过程离子的释放

为了证实 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 吸附与菌体离子的交换、释放与转化的相互关系,进一步研究了失活菌体吸附 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 过程中菌体离子的释放,结果如图 6 所示.

失活后的菌体减少了 Cl⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、K⁺ 和 Ca²⁺ 等离子的释放,并且没有向溶液中释放出 NO₂⁻

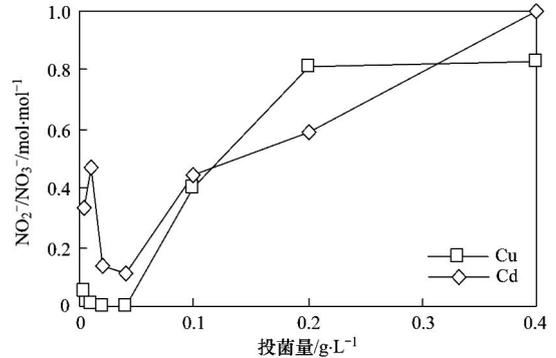
表 2 失活菌体重金属吸附与离子释放的相关性¹⁾Table 2 Relation between heavy metal biosorption and ion release by inactive *S. maltophilia*

项目	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
Cu ²⁺	0.546	0.582	0.383	0.289	0.716	0.361	-0.341	0.426
Cd ²⁺	0.941 **	0.953 **	0.835 *	-0.033	0.661	0.920 **	-0.787 *	0.435

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

2.6 X-射线光电子能谱实验

将对照菌体与吸附 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 2 h 后的菌体于 -57 ~ -60℃ 冷冻干燥 24 h 后,进行 X 射线光电子能谱分析,吸附后菌体表面检测到 Cu、Cd、O、

图 5 NO₂⁻ 增加的摩尔量与 NO₃⁻ 减少的摩尔量的关系Fig. 5 Relation between increase of NO₂⁻ and decrease of NO₃⁻

和 PO₄³⁻. 溶液中 NO₃⁻ 的浓度与初始浓度相符[图 6(b)],由此可见,菌体对 NO₃⁻ 没有表面吸附作用,图 4(c) 中 NO₃⁻ 的减少是由活菌体对其向细胞内的运输与还原造成的,溶液中的 NO₂⁻ 则是其还原产物[图 4(b)],这些行为均需要耗能并释放 PO₄³⁻. 由于被戊二醛固定后,菌体丧失了产能的功能,没有主动运输的能力,所以没有因金属的运输而向细胞外释放 PO₄³⁻. 对失活菌体吸附 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的吸附量与溶液中其它离子的浓度进行相关性分析表明(表 2),Cu²⁺ 的吸附由于吸附率基本没有变化(图 3),因此与各检测的离子没有显著的相关性;而 Cd²⁺ 的吸附则与 Na⁺、NH₄⁺、K⁺ 和 Cl⁻ 这 4 种离子的释放显著正相关. 菌体失活后,在吸附 Cd²⁺ 的过程,这 4 种离子显著减少,相应地菌体对 Cd²⁺ 的吸附效果也明显下降,说明了这 4 种离子参与了 Cd²⁺ 胞内运输.

P、C 和 N 等元素的峰谱(图 7 和图 8). Cu 2p 和 Cd 3d 峰谱图经软件拟合后的[图 7(a) 和图 7(b)] 峰位分别为 933.3 eV 和 405.5 eV,表明吸附后 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的价态均没有发生变化(<http://srdata.nist>.

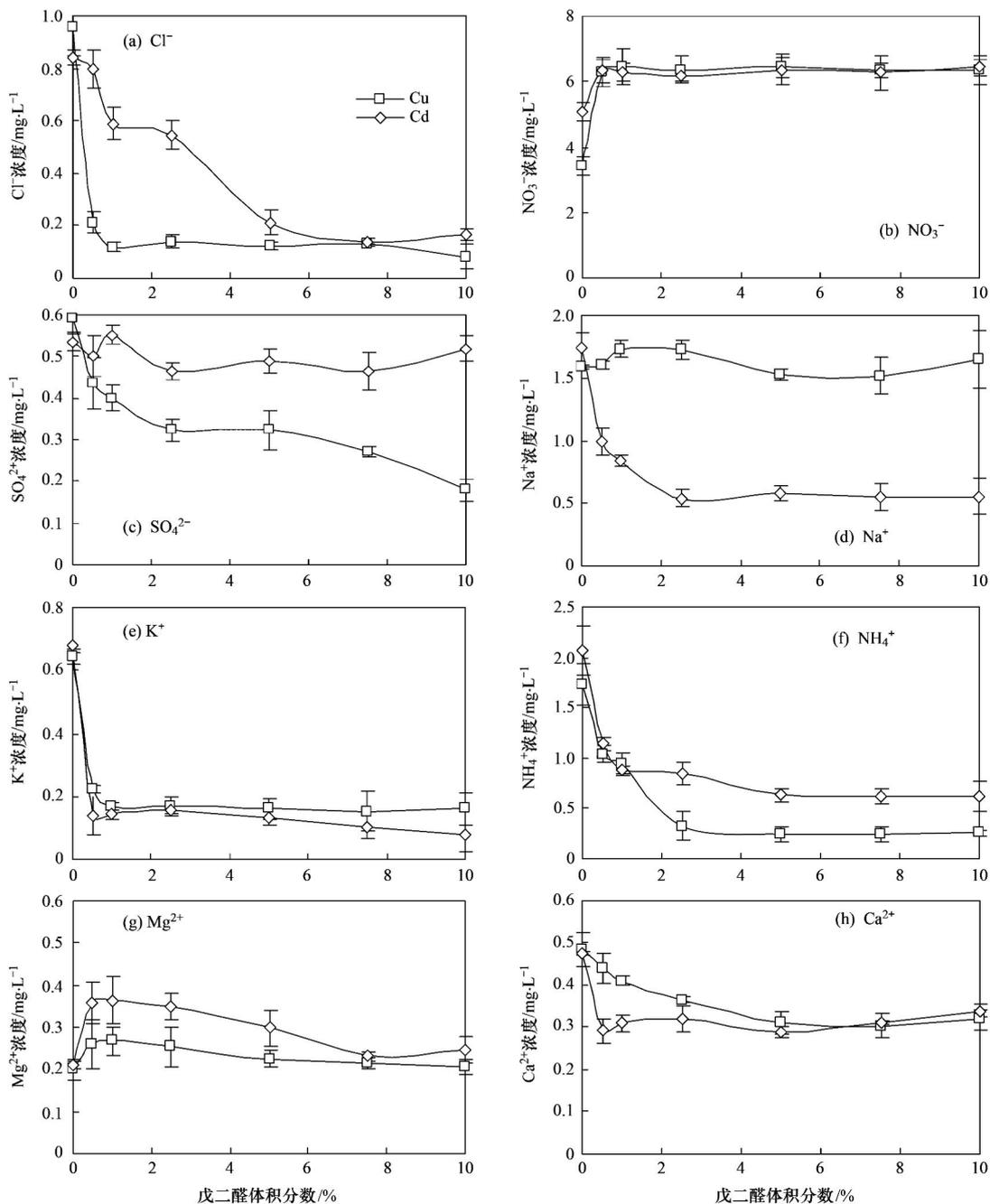


图6 失活菌体吸附铜和镉过程离子的释放

Fig. 6 Release of ions after copper and cadmium biosorption by inactive *S. maltophilia*

gov/xps/selectEnergyType.aspx).

C1s 峰谱图,经拟合得到3个峰[图7(c)],峰位分别为284.8、286.2和288.0 eV,分别代表了 $[-CH_2CHOH-]_n/[-CH_2CH_2-]_n$ 、 $-CH_3/CH_3CH_2OH$ 和 $[-CH_2O-]_n$ 等成分^[19]. O 1s 峰谱图,经拟合得到3个峰[图7(d)],峰位分别为533.3、532.5和531.4 eV,代表成分分别有C—O—C/SO₄²⁻、OH—/SO₄²⁻/—O—CH₃/O=C—、O=C—O/CO₃²⁻和C—OH^[20]. N 1s 峰谱图,拟合后得

到1个峰[图7(e)],峰位为400.02 eV,代表成分有—NH₂和—NH₃^[21]. P 2p 峰谱图,拟合后得到1个峰[图7(f)],峰位为133.6 eV,代表成分有PO₄³⁻.上述结果表明菌体表面含有—OH、—COOH、—NH₂、—PO₄³⁻和—CHO等基团.

对照菌体中未检测出Cu和Cd元素,C 1s、N 1s和P 2p的峰谱图峰位与所代表的基团和吸附Cu和Cd后的菌体一致.O 1s的峰位分别为532.9、532.0和531.2 eV;S 1s峰位为163.6 eV,代表成分

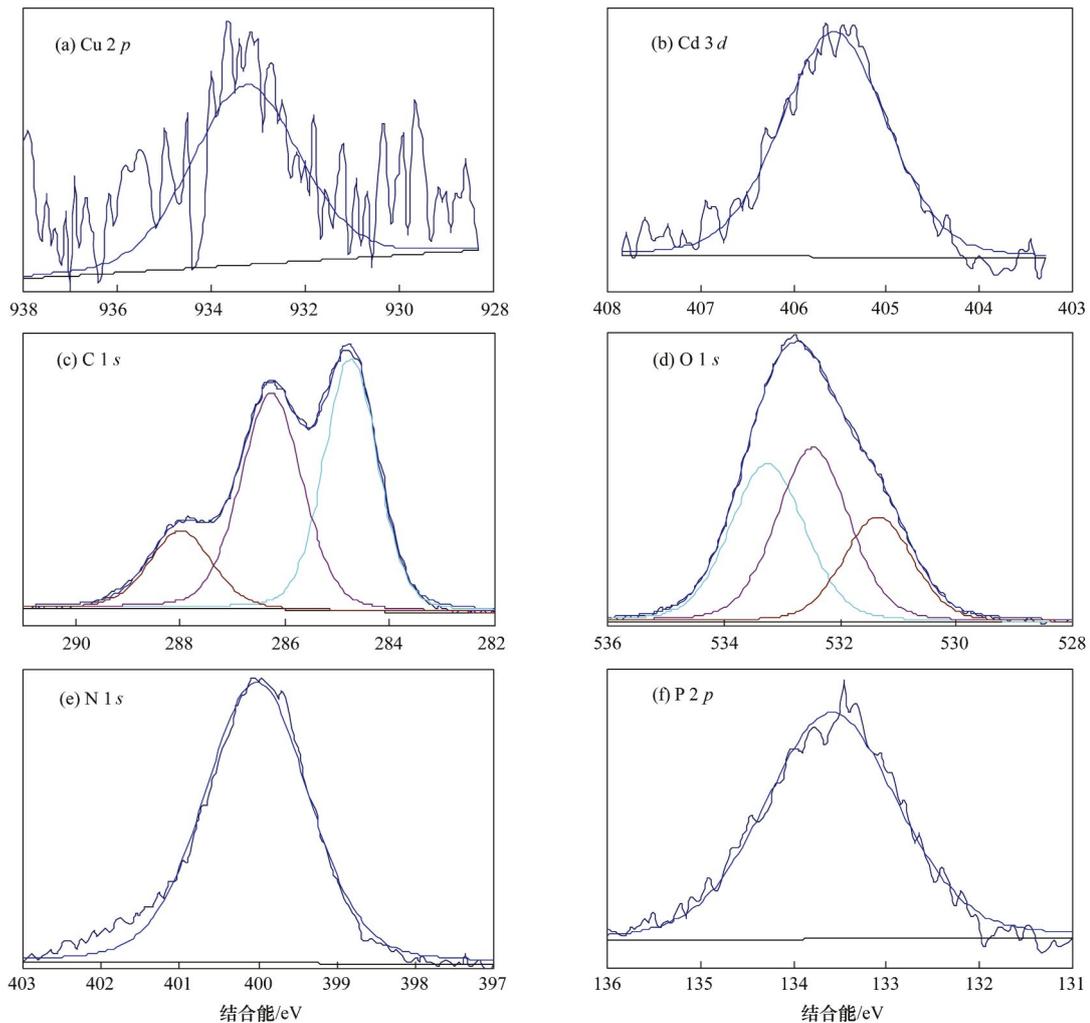


图7 吸附铜和镉后菌体主要元素的XPS峰谱图

Fig. 7 XPS spectra of the elements of *S. maltophilia* after biosorption

有 $[-C_6H_4S-]_n$ 、 $[-C_6H_5NS-]_n$ 和 $C_{10}H_{21}SH$ 。吸附后的菌体没有检测到S 1s峰位,可能与吸附过程 SO_4^{2-} 的释放有关。

2.7 铜和镉吸附过程菌体基团变化

如图9所示,对吸附 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 前后的吸附菌进行的红外光谱($4000 \sim 500 \text{ cm}^{-1}$)分析表明菌体吸附 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 前后的峰形接近,但是某些峰发生了漂移。各实验体系的菌体在官能团区和指纹区均有吸收峰,主要吸收带在 $3400 \sim 2800 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1660 \sim 600 \text{ cm}^{-1}$ 。

高波数区 $3500 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰是醇和苯酚O—H伸缩振动以及芳香胺N—H伸缩振动的叠加^[22]。 $3000 \sim 2900 \text{ cm}^{-1}$ 是脂质CH、 CH_2 或 CH_3 基团C—H的反对称伸缩振动^[23]; $2900 \sim 2400 \text{ cm}^{-1}$ 是C—H伸缩振动或 $R-CH_2-S-C$ 伸缩振

动。 $1650 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$ 是酰胺(I)或羧基C=O伸缩振动、酰胺(II)N—H弯曲、C—N伸缩振动或酰胺(III)C—N伸缩振动,羧基O—C=O伸缩振动,其中酰胺(I)C=O伸缩振动因该C原子含有N取代基,吸收峰波数位于 $1644.1 \sim 1636.5 \text{ cm}^{-1}$ ^[24]。 $1395.4 \sim 1392.8 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰是氨基酸C—N或末端羧基振动^[24, 25]。 $1650 \sim 1400 \text{ cm}^{-1}$ 处强的特征吸收带及对应吸收峰发生了漂移,结合菌体吸附Cu和Cd过程 NH_4^+ 的释放[图4(h)],证明包括蛋白质在内的生物大分子参与了Cu和Cd的吸附。吸附后的菌体分别在 1238.38 cm^{-1} 与 1240.4 cm^{-1} 吸收峰处出现 $-C(CH_3)_3$ 、乙酸酯、芳香仲胺C—N伸缩和多糖P=O伸缩振动,结合图4(d) PO_4^{3-} 的释放,推测菌体的脂质参与了重金属的吸附。

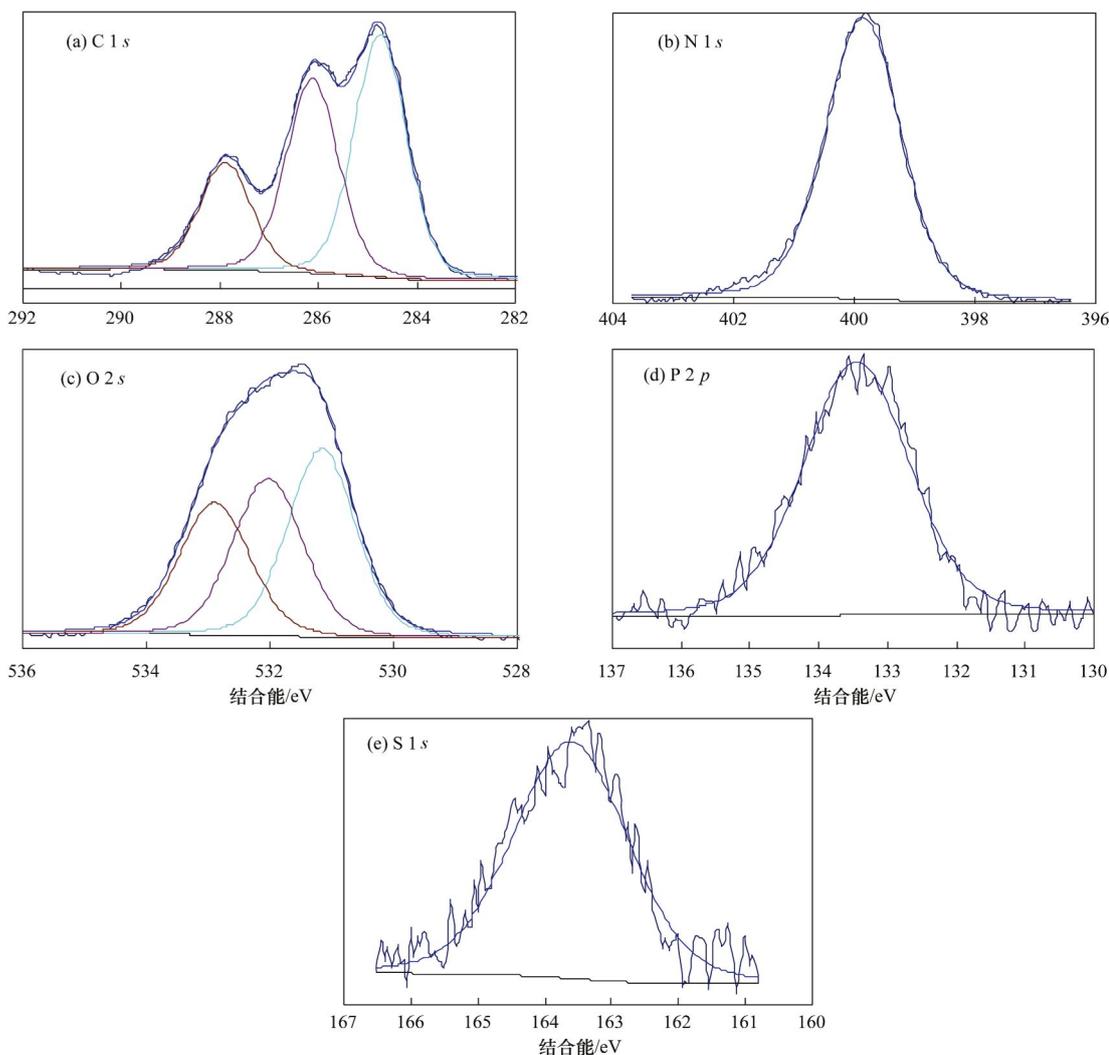


图8 对照菌体主要元素的 XPS 峰谱图

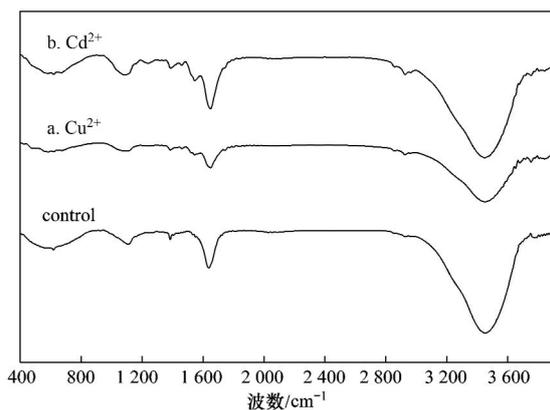
Fig. 8 XPS spectra of the elements of *S. maltophilia* before biosorption

图9 吸附铜和镉前后菌体表面的红外光谱图

Fig. 9 FTIR spectra of *S. maltophilia* before and after biosorption

3 结论

(1) 嗜麦芽窄食单胞菌对 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 吸附性能良好, 0.2 g·L⁻¹ 菌体于 25°C ± 2°C, 130 r·min⁻¹ 摇

床中处理 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 浓度为 0.05 mmol·L⁻¹ 的 Cu(NO₃)₂ 和 Cd(NO₃)₂ 溶液 120 min 后, Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的吸附率分别达 96.3% 和 83.9%。

(2) 菌体对 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的吸附存在表面吸附、胞内运输、NO₃⁻ 积累、NO₃⁻ 还原、NO₂⁻ 生成以及 Cl⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺ 和 Ca²⁺ 释放等行为。其中 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的胞内运输、NO₃⁻ 积累、NO₃⁻ 还原和 NO₂⁻ 生成是一个耗能过程。

(3) 菌体蛋白质和脂质参与了 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的吸附, 吸附后 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的价态不发生变化。

参考文献:

- [1] Volesky B. Biosorption and me[J]. Water Research, 2007, 41 (18): 4017-4029.
- [2] Bulgariu D, Bulgariu L. Equilibrium and kinetics studies of heavy metal ions biosorption on green algae waste biomass[J]. Bioresource Technology, 2012, 103(1): 489-493.

- [3] 曹玉娟, 张扬, 夏军, 等. ϵ -聚赖氨酸生产废菌体对六价铬吸附影响的研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(2): 499-504.
- [4] Areco M M, Hanela S, Duran J, *et al.* Biosorption of Cu(II), Zn(II), Cd(II) and Pb(II) by dead biomasses of green alga *Ulva lactuca* and the development of a sustainable matrix for adsorption implementation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **213-214**: 123-132.
- [5] Liu C C, Wang M K, Chiou C S, *et al.* Biosorption of chromium, copper and zinc by wine-processing waste sludge: single and multi-component system study [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **171**(1-3): 386-392.
- [6] Rodríguez-Tirado V, Green-Ruiz C, Gómez-Gil B. Cu and Pb biosorption on *Bacillus thioeparans* strain U3 in aqueous solution: kinetic and equilibrium studies [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **181 - 182**: 352-359.
- [7] Abd-Alla M H, Morsy F M, El-Enany A W E, *et al.* Isolation and characterization of a heavy-metal-resistant isolate of *Rhizobium leguminosarum* bv. *viciae* potentially applicable for biosorption of Cd^{2+} and Co^{2+} [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2012, **67**: 48-55.
- [8] 叶锦韶. 单胞菌对铜-苯并[a]芘的生物吸附、降解特性与机理[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2010
- [9] Cochrane E L, Lu S, Gibb S W, *et al.* A comparison of low-cost biosorbents and commercial sorbents for the removal of copper from aqueous media[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **137**(1): 198-206.
- [10] Xu H, Liu Y. Mechanisms of Cd^{2+} , Cu^{2+} and Ni^{2+} biosorption by aerobic granules[J]. Separation and Purification Technology, 2008, **58**(3): 400-411.
- [11] Dubovskiy I M, Grizanov E V, Ershova N S, *et al.* The effects of dietary nickel on the detoxification enzymes, innate immunity and resistance to the fungus *Beauveria bassiana* in the larvae of the greater wax moth *Galleria mellonella* [J]. Chemosphere, 2011, **85**(1): 92-96.
- [12] Zakaria Z A, Zakaria Z, Surif S, *et al.* Biological detoxification of Cr (VI) using wood-husk immobilized *Acinetobacter haemolyticus*[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **148**(1-2): 164-171.
- [13] Sheng P X, Wee K H, Ting Y P, *et al.* Biosorption of copper by immobilized marine algal biomass [J]. Chemical Engineering Journal, 2008, **136**(2-3): 156-163.
- [14] Özdemir S, Kilinc E, Poli A, *et al.* Biosorption of Cd, Cu, Ni, Mn and Zn from aqueous solutions by thermophilic bacteria, *Geobacillus toebii* sub. sp. *decanicus* and *Geobacillus thermoleovorans* sub. sp. *stromboliensis*; equilibrium, kinetic and thermodynamic studies [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **152**(1): 195-206.
- [15] Özer A, Gürbüz G, Çalimli A, *et al.* Biosorption of copper (II) ions on *Enteromorpha prolifera*; application of response surface methodology (RSM)[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **146**(3): 377-387.
- [16] De Romaña D L, Olivares M, Uauy R, *et al.* Risks and benefits of copper in light of new insights of copper homeostasis [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2011, **25**(1): 3-13.
- [17] Ahmady-Asbchin S, Andrés Y, Gérente C, *et al.* Biosorption of Cu (II) from aqueous solution by *Fucus serratus*: surface characterization and sorption mechanisms [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(14): 6150-6155.
- [18] Ramrakhiani L, Majumder R, Khowala S. Removal of hexavalent chromium by heat inactivated fungal biomass of *Termitomyces clypeatus*: surface characterization and mechanism of biosorption [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, **171**(3): 1060-1068.
- [19] Vinod V T P, Sashidhar R B, Sreedhar B. Biosorption of nickel and total chromium from aqueous solution by gum kondagogu (*Cochlospermum gossypium*): a carbohydrate biopolymer [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **178**(1-3): 851-860.
- [20] Zheng J C, Feng H M, Lam M H W, *et al.* Removal of Cu(II) in aqueous media by biosorption using water hyacinth roots as a biosorbent material[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **171**(1-3): 780-785.
- [21] Deng S B, Ting Y P. Characterization of PEI-modified biomass and biosorption of Cu(II), Pb(II) and Ni(II) [J]. Water Research, 2005, **39**(10): 2167-2177.
- [22] Ye J S, Yin H, Mai B X, *et al.* Biosorption of chromium from aqueous solution and electroplating wastewater using mixture of *Candida lipolytica* and dewatered sewage sludge[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(11): 3893-3902.
- [23] Yu J X, Tong M, Sun X M, *et al.* A simple method to prepare poly (amic acid)-modified biomass for enhancement of lead and cadmium adsorption [J]. Biochemical Engineering Journal, 2007, **33**(2): 126-133.
- [24] Jain M, Garg V K, Kadirvelu K. Chromium(VI) removal from aqueous system using *Helianthus annuus* (sunflower) stem waste [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **162**(1): 365-372.
- [25] Han X, Wong Y S, Wong M H, *et al.* Biosorption and bioreduction of Cr(VI) by a microalgal isolate, *Chlorella miniata* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **146**(1-2): 65-72.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop- <i>p</i> -ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 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

国内外公开发行人