

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岫璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

Geobacter sulfurreducens 对汞的甲基化及其影响因素研究

邹嫣, 司友斌*, 颜雪, 陈艳

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘要: 在实验室模拟条件下, 研究了铁还原菌 *Geobacter sulfurreducens* 对汞的甲基化作用及其影响因素。结果表明, *G. sulfurreducens* 在低浓度汞溶液中能够生长, 但生长受到一定程度的抑制, 主要表现在菌株生长曲线迟缓期的延长。 *G. sulfurreducens* 在生长过程中能同时将溶液中无机汞转化为甲基汞, 甲基化过程受多种环境因素的制约。在初始 HgCl_2 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 35°C 、 pH 6.0、0.9% 盐度的厌氧环境条件下, *G. sulfurreducens* 对汞的甲基化率可达 38%。适当增加 HgCl_2 初始浓度与盐度能提高甲基汞的转化率, 但过高汞浓度和盐度会造成微生物的死亡; 温度在 $4 \sim 35^\circ\text{C}$ 范围内, 温度越高甲基汞转化率越高; 弱酸性环境比酸性或中碱性环境更利于汞的甲基化。此外, 腐殖酸和半胱氨酸等均影响甲基汞的转化效率, 其中腐殖酸对汞甲基化有一定的抑制作用, 而半胱氨酸有较强的促进作用。该研究为自然水体生态系统中铁还原菌参与汞甲基化的过程提供了直接证据。

关键词: *Geobacter sulfurreducens*; 汞; 甲基化; 腐殖酸; 半胱氨酸

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3247-06

Research on Mercury Methylation by *Geobacter sulfurreducens* and Its Influencing Factors

ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, CHEN Yan

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Mercury methylation by *Geobacter sulfurreducens* and the effects of environmental factors were studied under laboratory conditions. The results showed that *G. sulfurreducens* could grow well in the presence of low concentrations of mercuric chloride, but its growth was inhibited to a certain extent, mainly expressed in the prolonged lag phase. *G. sulfurreducens* could transform inorganic mercury into methylmercury, and this process was affected by many environmental factors. The efficiency of mercury methylation reached 38% under anaerobic conditions with $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ HgCl_2 and 0.9% salinity at 35°C , pH 6.0. Increasing the initial HgCl_2 concentration or salinity in an appropriate manner improved mercury methylation, but the concentration of methylmercury reduced when the concentrations of HgCl_2 and salinity were too high. The efficiency of mercury methylation increased with the increasing temperature in range of $4 \sim 35^\circ\text{C}$. Weakly acidic environment was more beneficial to mercury methylation than acidic, neutral or alkaline conditions. In addition, the efficiency of mercury methylation was also affected by humic acid and cysteine. Humic acid inhibited mercury methylation, whereas cysteine could improve the efficiency of mercury methylation. This study provided a direct evidence for mercury methylation mediated by iron-reducing bacteria in the natural aquatic ecosystem.

Key words: *Geobacter sulfurreducens*; mercury; methylation; humic acid; cysteine

汞是一种特殊的重金属,是常温下唯一的液态金属,其所有化合物对人体都有毒害作用。不同形态汞的毒性差别很大,一般无机汞比有机汞的毒性小很多。但是在好氧和厌氧环境中,无机汞可以通过生物甲基化作用转化为毒性极高的甲基汞,甲基汞可以在鱼和其它水生生物体内富集,通过食物链传递进入人体,对人类健康造成危害,1956年的日本水俣病事件正是由甲基汞通过食物链富集所致。

1968年Wood等^[1]首次发现产甲烷菌能利用甲基钴胺素把无机汞转化为甲基汞,从此汞的生物甲基化开始受到科学家们的关注。此后的大部分研究表明硫酸盐还原菌(SRB)是无机汞生物甲基化的重

要微生物^[2~4]。2006年,Fleming等^[5]的研究发现抑制硫酸盐还原菌活性后,汞甲基化抑制不到一半,所分离出来的铁还原菌菌株 *Geobacter* sp. strain CLFeRB 在纯培养时的汞甲基化率与硫酸盐还原菌相当。由此,铁还原菌(FeRB)在汞甲基化的研究中脱颖而出,成为近年来研究的重点和热点。铁还原菌在自然界中分布广泛,具有丰富的多样性,变形杆菌 δ 亚纲中土杆菌科(Geobacteraceae)^[6]的成员以及 γ 亚

收稿日期: 2011-11-02; 修订日期: 2011-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971182, 41171254)

作者简介: 邹嫣(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境生物修复技术, E-mail: zouyanlucy@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ybsi2002@yahoo.com.cn

纲希瓦氏菌属(*Shewanella*)^[7]的成员是发现相对较早的两类铁还原微生物。

Geobacter sulfurreducens 是一种非常典型的铁还原菌, *G. sulfurreducens* 在国内外的微生物燃料电池的研究^[8,9]中发挥着举足轻重的作用, 同时在污染物的转化中也存在重要作用, *G. sulfurreducens* 可利用电极作为电子受体而氧化乙酸盐^[10]。本研究通过对 *G. sulfurreducens* 进行纯培养, 在实验室模拟条件下, 探讨 *G. sulfurreducens* 对汞甲基化的作用和不同环境因素对汞甲基化的影响, 以期在水体甲基汞污染的防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

氯化汞 (HgCl_2 , 纯度 95% 以上), 甲基汞 (MeHg , 纯度 95% 以上) 均购于 Merck 公司。甲基汞溶于甲醇作为储存液, 用棕色瓶保存于 4℃ 冰箱; 所需稀溶液用超纯水依次逐级稀释。四丁基溴化铵 (TBABr), 纯度 $\geq 99\%$; 甲醇, 色谱纯; 水为 Mili-Q 超纯水, 其他试剂均为分析纯。

菌种来源: *Geobacter sulfurreducens* 由清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点实验室提供。

Geobacter sulfurreducens 培养基: NH_4Cl $1.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NaH_2PO_4 $0.6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KCl $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NaHCO_3 $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NaAc $0.82 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、富马酸钠 $8.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、Wolfe 微量维生素混合液 $10 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、微量矿物元素混合液 $10 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ (具体可参见美国菌种库 ATCC Medium 1957)。

1.2 实验方法

在无菌操作条件下, 将 *G. sulfurreducens* 菌悬液接种至盛有液体培养基的棕色玻璃瓶中, 再向容器中添加 HgCl_2 溶液, 使 HgCl_2 的初始浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧处理后, 恒温避光静置培养。培养时间为 20 d, 分别于 0、1、2、3、5、7、9、11、13、16 和 20 d 取样, 测定 HgCl_2 和甲基汞含量。实验同时设计不同初始汞浓度、温度、pH、盐度、腐殖酸、半胱氨酸等因素对汞甲基化的影响。每处理 3 次重复。

1.3 样品处理与汞的测定

样品经 25% KOH /甲醇溶液提取后, 用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤, 再加入 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ TBABr 溶液混合衍生成络合物, 然后进样测定。

无机汞与甲基汞的测定采用 Agilent 1100 高效

液相色谱仪, 配可变波长紫外检测器和 HP 化学工作站。

色谱操作条件^[11]: C_{18} Hypersil ODS 色谱柱 ($4.6 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, $5 \mu\text{m}$), 流动相为含 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ TBABr 和 $0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 的水溶液: 甲醇 = 45 : 55 (体积比), 柱温 35°C , 流速 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 检测波长为 225 nm, 进样量为 $20 \mu\text{L}$ 。

2 结果与讨论

2.1 *Geobacter sulfurreducens* 的生理特性及在汞液中的生长曲线

G. sulfurreducens 为有机化能菌, 革兰氏染色阴性, 严格厌氧, 无芽孢, 在三价铁或元素硫条件下可氧化各种有机物而获取能量支持生长。它体内所含的多种细胞膜结合的还原性辅酶, 如依赖性三价铁还原酶和细胞色素 c, 为细胞内电子传递介质^[12]。

从图 1 可以得知 35°C 、pH 7.0 的条件下, *G. sulfurreducens* 在培养的第 4 d 才达到对数生长期, 这主要是由于 *G. sulfurreducens* 是一种严格厌氧菌, 生长周期较长。汞的加入对 *G. sulfurreducens* 的生长有一定程度的抑制作用, 这种抑制主要体现在生长曲线迟缓期的延长。 *G. sulfurreducens* 在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ HgCl_2 环境中生长迟缓期比原来延长了约 24 h。但是, 对于对数生长期天数没有明显影响, 最大生长量也较为接近。这也说明 *G. sulfurreducens* 在经过人工驯化后能在低浓度 HgCl_2 的环境中良好生长。

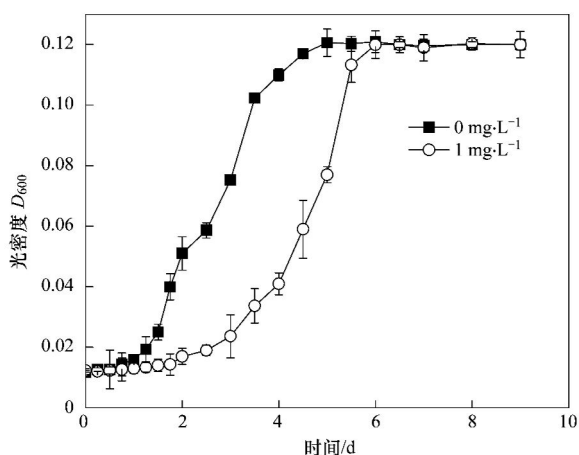


图 1 汞浓度对 *G. sulfurreducens* 生长的影响

Fig. 1 Effect of HgCl_2 concentration on the growth of *G. sulfurreducens*

2.2 *Geobacter sulfurreducens* 对汞的甲基化

初始 HgCl_2 浓度 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 35°C 、pH 6.0、0.9% 盐度的厌氧条件下, *G. sulfurreducens* 对汞的甲基化动力学如图 2 所示。

随着时间推移, HgCl_2 的含量在 *G. sulfurreducens* 的作用下不断下降, 在第 7 d 后溶液中已检测不到 HgCl_2 。同时, MeHg 的含量不断上升, 也在第 7 d 达到最高值, 大约为 $0.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 推测其余的 Hg^{2+} 大部分还残留在细胞体内, 还有小部分被转化为单质汞挥发^[13]。这表明 *G. sulfurreducens* 在一定的环境条件下能把 HgCl_2 转化为 MeHg , 转化率可达 38%。

微生物对汞的甲基化过程主要是发生在细胞内的酶促反应^[14]。Choi 等^[15]的研究表明, 硫还原菌 *Desulfovibrio desulfuricans* LS 通过某种胞内酶促反应利用甲基钴胺素进行汞的甲基化, 在初始 HgCl_2 浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下甲基化率高达 50%。Kerin 等^[16]研究多种铁还原菌, 发现 *Geobacter metallireducens* GS-15 与 *G. sulfurreducens* 在初始 HgCl_2 浓度为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下甲基化率分别为 8% 和 18%。这些铁还原菌能利用 Fe^{3+} 、硝酸盐及延胡索酸盐为最终电子受体进行汞甲基化, 其中以 Fe^{3+} 为最终电子受体时甲基化效率最高, 这也表明在铁还原菌体内, 铁呼吸作用对细胞内汞甲基化的过程非常重要。

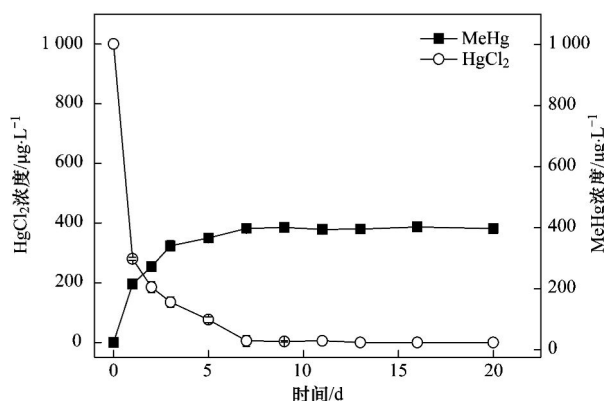


图2 汞的甲基化动力学

Fig. 2 Dynamics of mercury methylation

2.3 汞甲基化的影响因素

2.3.1 初始汞浓度对 *G. sulfurreducens* 汞甲基化的影响

在其它条件相同, 初始汞浓度分别为 0、0.5、1、2、3、4 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 培养 7 d 后, 溶液中生成甲基汞浓度如图 3 所示。初始汞浓度对微生物甲基化的影响很大, 从 0 ~ $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 生成甲基汞的量不断地上升, 当 HgCl_2 的浓度 $> 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, 甲基汞的生成量明显减少。当 HgCl_2 的浓度达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其甲基汞转化率仅为 0.5%, 这主要是因为高浓度的

汞对 *G. sulfurreducens* 的生长有较强的抑制作用。不同浓度 HgCl_2 条件下甲基汞的生成量差别较大, 低浓度范围内随着初始汞浓度的增加而增加, 然后随着汞浓度的增加迅速下降, 在 HgCl_2 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时产生甲基汞最多。

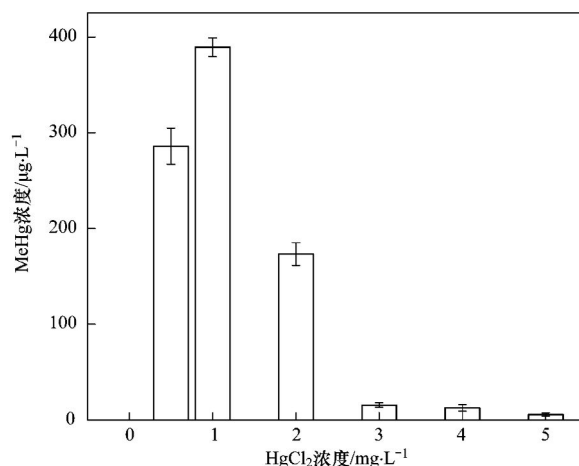


图3 初始汞浓度对汞甲基化的影响

Fig. 3 Effect of initial HgCl_2 concentration on mercury methylation

2.3.2 温度对汞甲基化的影响

在自然界中, 夏季水体中汞的甲基化效率可达到四季最高水平, 说明汞在水体中的甲基化存在季节性的差异, 而产生季节性差异的根本原因就是温度的影响^[17]。实验研究了不同温度下汞的甲基化效率, 从图 4 可知温度在 4 ~ 35°C 范围内, 甲基汞生成量随着温度的升高而上升, 35°C 时甲基汞的生成量最大。在 4°C 时甲基汞生成量最低, 这是因为温度太低, 影响了微生物的生长与活性。当达到 35°C 后, 温度再上升会抑制汞的甲基化, 高温使菌体生长受阻甚至死亡从而使甲基化率大幅度下降。

2.3.3 初始 pH 对汞甲基化的影响

从图 5 可以看出, pH 6.0 时, 甲基汞的生成量最大。通常认为酸性条件有利于甲基汞的形成, 但是过酸的环境会影响微生物对汞的吸收而影响甲基化效率, 而碱性条件则不利于甲基汞的形成。Lee 等^[18]的研究结果表明, pH 的变化并不直接影响无机汞的甲基化率, 是由于汞和甲基汞的溶解性和流动性都依赖于酸碱度的变化, 酸雨可以增加环境中甲基汞或其他形态汞的溶解度, 而使水环境中汞离子的输入量增加, 从而使得水体中甲基汞浓度升高。Fitzgerald 等^[19]的研究表明, 高 pH 有利于单质汞的挥发, 导致甲基化的底物减少, 从而减少甲基汞的生成。

2.3.4 厌氧/好氧环境对汞甲基化的影响

由图 6 可知, 在厌氧条件下, *G. sulfurreducens*

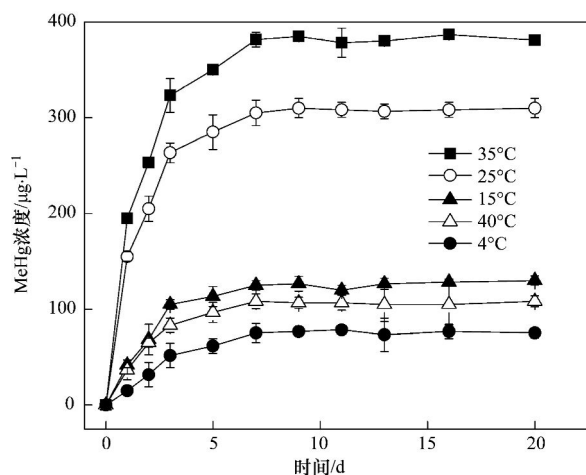


图4 温度对汞甲基化的影响

Fig. 4 Effect of temperature on mercury methylation

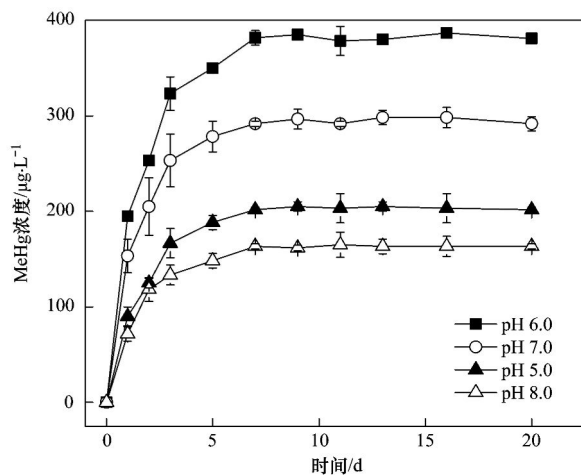


图5 初始 pH 对汞甲基化的影响

Fig. 5 Effect of initial pH value on mercury methylation

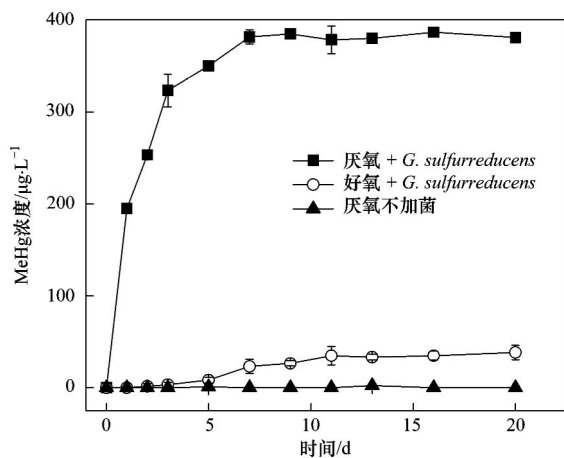


图6 厌氧/好氧环境对汞甲基化的影响

Fig. 6 Effect of anaerobic/aerobic condition on mercury methylation

对甲基汞的转化率较高。在好氧环境且加入 *G. sulfurreducens* 的条件下,甲基汞的转化率大约为

3.5%, 远远低于厌氧同等条件下的转化率,这说明厌氧条件能加速汞的甲基化。而且 *G. sulfurreducens* 本身是一种严格厌氧菌,氧气会严重制约它的活性。而在厌氧不加菌的情况下,实验体系中几乎检测不到甲基汞的生成。这说明实验培养条件下,菌体是甲基汞转化的主导因素,也排除了实验过程中汞的非生物甲基化因素的影响。

2.3.5 盐度对汞甲基化的影响

从图7可以看出,培养液中低浓度盐分对汞的甲基化有一定的促进作用,而超过0.9%再提高盐浓度会对汞甲基化产生强烈的抑制效果。当盐浓度达到4.0%时,整个实验体系中已检测不到甲基汞的生成。这主要是因为微生物是汞甲基化的主导因素,而在高盐度的状态下微生物细胞会发生质壁分离现象,严重的会导致微生物的死亡。Compeau等^[20,21]的多次研究结果表明高盐度的状态促进了脱甲基化作用,高盐度沉积物中甲基汞的含量大大低于低盐度沉积物中甲基汞的含量。Olson等^[22]的研究发现,汞甲基化速率与厌氧沉积物中的盐度呈现较好的负相关性。

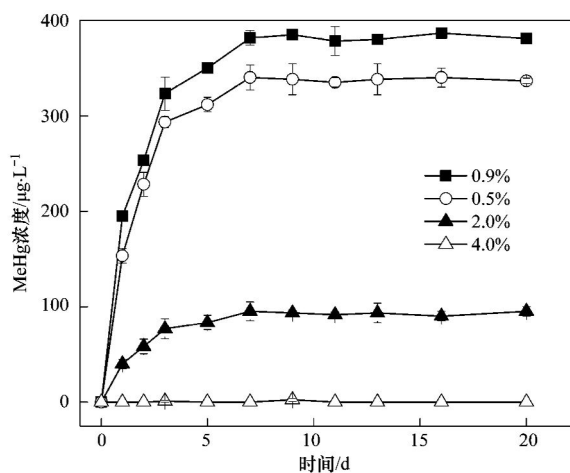


图7 盐度对汞甲基化的影响

Fig. 7 Effect of salinity on mercury methylation

2.3.6 腐殖酸对汞甲基化的影响

从图8可以看出,随着腐殖酸浓度的升高,甲基汞的生成量不断降低。腐殖酸是一种可溶性有机质,它对汞甲基化有双重效应,即可以通过刺激微生物活动增加汞甲基化^[23],也可以与无机汞结合使甲基化效率降低^[24]。还有研究发现,腐殖酸和胡敏酸可直接参与非生物甲基化过程^[25]。康德梦等^[26]发现在河流表层沉积物中,腐殖酸可以作为细菌繁殖的营养基质,同时某些微生物可以通过生物化学作用导致汞的甲基化,这主要是由于腐殖酸结合汞导

致的。但是离子态的 HgCl_2 比腐殖酸结合态汞更容易被微生物甲基化, 由于实验体系中营养物质丰富, 腐殖酸的加入对于微生物的生长繁殖没有起到促进作用。也就是说, 腐殖酸在这种情况下已经不是汞甲基化的积极因素, 而腐殖酸与汞结合后更难被微生物甲基化, 从而导致甲基化率的下降。

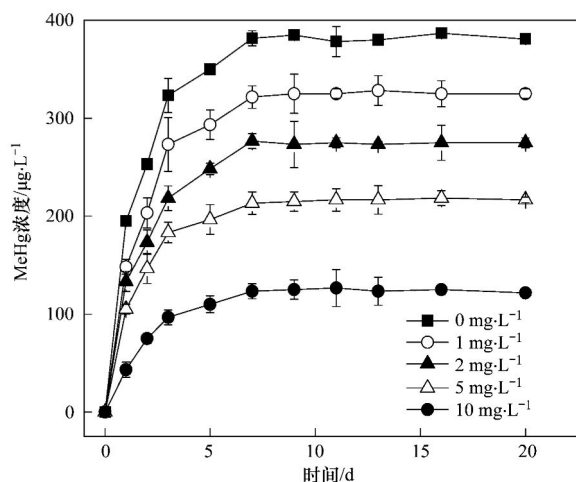


图8 腐殖酸含量对汞甲基化的影响

Fig. 8 Effect of humic acid concentration on mercury methylation

2.3.7 半胱氨酸对汞甲基化的影响

半胱氨酸能够影响微生物细胞内汞的甲基化作用, 通过与汞形成一种可以透过细胞膜、容易进出细胞的络合物, 从而使能够进入细胞内进行甲基化的汞含量提高, 也就是说增加了细胞能利用的汞含量^[27]。如图9所示, 未加入半胱氨酸时, 甲基汞的转化率约为28%, 投加 HgCl_2 第9 d后甲基汞的含量趋于稳定。加入 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 半胱氨酸后, 甲基汞生成率提高到38%, 而且在第7 d后甲基汞的含量就趋于稳定。半胱氨酸含量从 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到

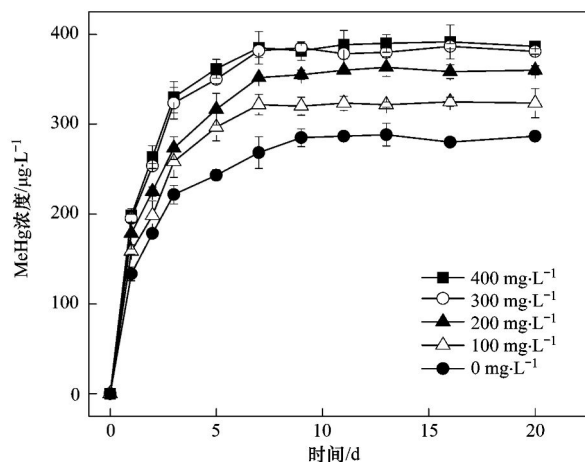


图9 半胱氨酸含量对汞甲基化的影响

Fig. 9 Effect of cysteine concentration on mercury methylation

$300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 甲基汞转化率不断提高, 达到 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后再增加半胱氨酸含量对汞甲基化率提高的作用不明显。Schaefer 等^[28]的研究表明半胱氨酸之所以能提高甲基汞的生成量还能加速这种反应的进行, 主要是由于半胱氨酸带有一SH 基团, 与汞形成的络合物在细胞膜上的传输不能单纯地只以被动扩散解释, 而是以某种未知的促进传输的方式进行。Kelly 等^[29]和 Golding 等^[30]发现对于汞在细胞膜上的传输而言, 促进吸收如被动扩散一样, 都是微生物会使用的细胞传输机制。

3 结论

(1) *G. sulfurreducens* 在低浓度汞溶液中能够生长, 但生长受到一定程度的抑制, 这种抑制主要体现在菌株生长曲线迟缓期的延长。

(2) 在初始 HgCl_2 浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、温度 35°C 、pH 6.0、盐度 0.9% 的厌氧条件下, *Geobacter sulfurreducens* 能在细胞体内把 HgCl_2 转化为 MeHg, 甲基化率达到 38%。

(3) 在厌氧条件下, 汞甲基化效率在温度 35°C 时最高; 弱酸性 (pH 6.0) 比酸性和中碱性更有利于汞的甲基化; 适当的盐度 (0.9%) 对汞甲基化有一定的促进作用; 腐殖酸对汞的生物甲基化有一定的抑制作用; 而半胱氨酸能提高细胞内的汞含量从而促进汞甲基化。

参考文献:

- [1] Wood J M, Kennedy F S, Rosen C G. Synthesis of methylmercury compounds by extracts of a methanogenic bacterium[J]. Nature, 1968, **220**(5163): 173-174.
- [2] King J K, Kostka J E, Frischer M E, et al. A quantitative relationship that remonstrates mercury methylation rates in marine sediments are based on the community composition and activity of sulfate-reducing bacteria [J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(12): 2491-2496.
- [3] Benoit J M, Mason R P, Gilmour C C, et al. Constants for mercury binding by dissolved organic carbon isolates from the Florida Everglades [J]. Geochim Cosmochim Acta, 2001, **65**(24): 4445-4451.
- [4] Acha D, Hintelmann H, Yee J. Importance of sulfate reducing bacteria in mercury methylation and demethylation in periphyton from Bolivian Amazon region[J]. Chemosphere, 2011, **82**(6): 911-916.
- [5] Fleming E J, Mack E E, Green P G, et al. Mercury methylation from unexpected sources: molybdate-inhibited freshwater sediments and iron-reducing bacterium [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(1): 457-464.
- [6] Coates J D, Phillips E J, Lonergan D J, et al. Isolation of

- Geobacter* species from diverse sedimentary environments [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1996, **62**(5): 1531-1536.
- [7] Arnold R G, Hoffmann M R, Dichristina T J, *et al.* Regulation of dissimilatory Fe (Ⅲ) reduction activity in *Shewanella putrefaciens* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, **56**(9): 2811-2817.
- [8] 张锦涛, 倪晋仁, 周顺桂. 基于铁还原菌的微生物燃料电池研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14**(2): 290-295.
- [9] Lovely D R. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2006, **17**(3): 327-332.
- [10] Bound D R, Holmes D E, Tender L M, *et al.* Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments[J]. Science, 2002, **295**(5554): 483-485.
- [11] Ho Y S, Uden P C. Determination of inorganic Hg (Ⅱ) and organic mercury compounds by ion-pair high-performance liquid chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 1994, **688**(1-2): 107-116.
- [12] 李英明, 李葳, 王正荣. 几种有发展前途厌氧菌的介绍[J]. 四川生理科学杂志, 2003, **25**(2): 81-84.
- [13] Wiatrowski H A, Ward P M, Barkay T. Novel reduction of mercury (Ⅱ) by mercury-sensitive dissimilatory metal reducing bacteria[J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(21): 6690-6696.
- [14] Benoit J M, Gilmour C C, Heyes A, *et al.* Geochemical and biological controls over methylmercury production and degradation in aquatic ecosystems[J]. Biogeochemistry of Environmentally Important Trace Elements, 2003, **835**(19): 262-297.
- [15] Choi S C, Bartha R. Cobalamin-mediated mercury methylation by *Desulfovibrio desulfuricans* LS[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1993, **59**(1): 290-295.
- [16] Kerin E J, Gilmour C C, Roden E, *et al.* Mercury methylation by dissimilatory iron-reducing bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2006, **72**(12): 7919-7921.
- [17] Korthals E T, Winfrey M R. Seasonal and spatial variations in mercury methylation and demethylation in an oligotrophic lake [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, **53**(10): 2397-2404.
- [18] Lee Y H, Huhberg H. Methylmercury in some Swedish surface waters[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1990, **9**(7): 833-841.
- [19] Fitzgerald W F, Mason R P, Vandal G M. Atmospheric cycling and air-water exchange of mercury over mid-continental lacustrine regions [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, **56**(1): 745-747.
- [20] Compeau G C, Bartha R. Effect of salinity on mercury-methylating activity of sulfate-reducing bacteria in estuarine sediments[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, **53**(2): 261-265.
- [21] Compeau G C, Bartha R. Methylation and demethylation of mercury under controlled redox, pH and salinity conditions[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1984, **48**(6): 1203-1207.
- [22] Olson B H, Cooper R C. Comparison of aerobic and anaerobic methylation of mercuric chloride by San Francisco Bay sediments [J]. Water Research, 1976, **10**(2): 113-116.
- [23] Barkay T, Wagner-Dübler L. Microbial transformations of mercury: Potentials, challenges, and achievements in controlling mercury toxicity in the environment[J]. Advances in Applied Microbiology, 2005, **57**: 1-52.
- [24] Barkay T, Gillman M, Turner R R. Effects of dissolved organic carbon and salinity on bioavailability of mercury[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, **63**(11): 4267-4271.
- [25] Weber J H. Review of possible paths for abiotic methylation of mercury (Ⅱ) in the aquatic environment [J]. Chemosphere, 1993, **26**(11): 2063-2077.
- [26] 康德梦, 林玉环, 贾省芬, 等. 腐殖酸结合汞甲基化作用的探讨[J]. 环境化学, 1985, **4**(4): 18-24.
- [27] Schaefer J K, Morel F M M. High methylation rates of mercury bound to cysteine by *Geobacter sulfurreducens* [J]. Nature Geoscience, 2009, **2**(2): 123-126.
- [28] Schaefer J K, Rocks S S, Zheng Wang, *et al.* Active transport, substrate specificity, and methylation of Hg(Ⅱ) in anaerobic bacteria[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, **108**(21): 8714-8719.
- [29] Kelly C A, Rudd J W M, Holoka M H. Effect of pH on mercury uptake by an aquatic bacterium; implications for Hg cycling[J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(17): 2941-2946.
- [30] Golding G R, Sparling R, Kelly C A. Effect of pH on intracellular accumulation of trace concentrations of Hg(Ⅱ) in *Escherichia coli* under anaerobic conditions, as measured using a *mer-lux* bioreporter [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2008, **74**(3): 667-675.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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)

2012年9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊