

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

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

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思 (1225)
鼎湖山 PM _{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全 (1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思 (1236)
深圳市 PM _{2.5} 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武 (1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽 (1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干 (1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平 (1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇 (1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰 (1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军 (1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国 (1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆 (1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健 (1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美 (1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚 (1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红 (1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅 (1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平 (1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非 (1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞 (1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华 (1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉 (1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾 (1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅 (1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿 (1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏 (1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟 (1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙 (1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥 (1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛 (1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞 (1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影 (1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿 (1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪助 (1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新 (1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东 (1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱 (1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维 (1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽 (1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢 (1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军 (1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎 (1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳 (1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲 (1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生 (1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生 (1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新 (1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君 (1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水 (1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠 (1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新 (1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提 (1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅 (1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志 (1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增 (1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华 (1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞 (1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰 (1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来 (1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)	

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化

刘子旭^{1,2}, 孙力平^{1,2}, 李玉友^{1,2,3}, 邱春生^{1,2}

(1. 天津城市建设学院环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 3. 日本东北大学环境科学研究科, 日本仙台 980-8576)

摘要: 红霉素是一类具有一定生物毒性的抗生素类药品, 为探明红霉素对产甲烷菌的抑制作用及其可驯化能力, 依次在厌氧瓶中进行厌氧毒性试验、在升流式厌氧污泥床反应器 (UASB) 中进行连续实验, 测定累计甲烷产量、相对产甲烷速率、COD 去除率、甲烷含量。结果表明, 红霉素为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时产甲烷速率降为 56.1%; $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时反应速率降低 99% 以上, 活性受到完全抑制。保持红霉素投加量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 连续运行 60 d, COD 去除率、甲烷含量可达到 81.4%、64.2%。红霉素对甲烷菌有抑制作用, 半抑制浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。甲烷菌对红霉素有一定的驯化能力, 驯化 60 d 后 COD 去除率、甲烷含量较未驯化时可提高 15.13%、22.05%。

关键词: 红霉素; 产甲烷菌; 产甲烷速率; 抑制; 甲烷含量

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1540-05

Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation

LIU Zi-xu^{1,2}, SUN Li-ping^{1,2}, LI Yu-you^{1,2,3}, QIU Chun-sheng^{1,2}

(1. Institute of Environmental & Municipal Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Water Quality Science and Technology, Tianjin 300384, China; 3. Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Sendai 980-8576, Japan)

Abstract: Erythromycin is a kind of antibiotic drugs with certain biological toxicity. In order to investigate the inhibitory effect of erythromycin on methanogens and its acclimation capacity, Anaerobic Toxicity Assay (ATA) and continuous experiment were conducted in anaerobic bottles and the Up-flow Anaerobic Sludge Blanket Reactor (UASB), respectively, to determine the accumulated methane production, ratio of methane production rate, COD removal efficiency, and methane content. The results showed that the methane production ratio was reduced to 56.1% in the presence of $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of erythromycin and it was reduced by 99% when the erythromycin reached $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, indicating that the activity was completely inhibited. Keeping the erythromycin at a concentration of $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the process of continuous operation for 60d, the COD removal efficiency and methane content reached up to 81.4% and 64.2%, respectively. The results suggested that erythromycin had an inhibitory effect on methane bacteria, and the half inhibitory concentration was $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{IC}_{50}: 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). The COD removal efficiency and methane content were increased by 15.13% and 22.05%, respectively, after domestication for 60 d.

Key words: erythromycin; methanogenium; methane production ratio; inhibition; methane content

制药废水是一类 COD 浓度较高的生产废水, 同时由于药品中的内分泌干扰物及某些副作用将最终产生某些特定的生物效应, 使得制药废水对水生环境存在一定的潜在危害^[1,2]。其中抗生素类制药废水由于难降解的、溶解性的有机物质浓度高^[3]、生物毒性物质多等特点已成为国内外水处理的热点问题。制药废水通常经混凝、过滤、沉淀、离子交换、活性炭吸收、高级氧化、生物处理等方法进行处理^[4,5], 其中厌氧生物处理是一种主要的制药废水处理方法, 在国内外得到广泛应用。

文献[6~8]研究了抗生素对水体环境的危害、生物降解性及抑制作用。Oktem 等^[9]研究了实验室规模 UASB (up-flow anaerobic sludge blanket) 反应器处理混合制药废水的处理效果, 研究结果表明当 OLR 为 $8 \text{ kg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时可达最大 COD 去除率

72%。文献[10~13]研究了升流式污泥床、固定床处理磺胺甲基嘧啶 (Sulfamerazine)、安替比林 (Antipyrine) 等制药废水的处理情况, COD 去除率可达到 70%~80% 左右。国内也有学者做了相关研究, 徐灏龙等^[14]和 Zhang 等^[15]研究了 UASB-MBR、生物膜组合工艺处理制药废水。这些研究大都从工艺的角度重点考察 COD 的去除情况, 未能说明特定种类抗生素对厌氧代谢过程中的重要阶段产甲烷阶段的抑制情况。本实验通过采用活性实验及连续实验的方法, 研究了红霉素对产甲烷菌活性的抑制情况及其驯化能力; 实验先通过厌氧毒性试验测得相对产甲烷

收稿日期: 2012-07-26; 修订日期: 2012-09-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07308-002)

作者简介: 刘子旭 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与污水资源化, E-mail: nanjipole@163.com

速率,得到红霉素对产甲烷菌活性的抑制程度;随后由于有研究表明氰化物、三氯甲烷等毒性物质可采用间歇投加低浓度的方法对厌氧微生物实现成功驯化,同时由活性实验结果可知红霉素对甲烷菌抑制作用适中,本实验采用连续投加低浓度抑制剂的方法,考察其驯化能力;最后将未接触过抑制剂的污泥、开始接触抑制剂的污泥及驯化后期的污泥进行比较,考察其活性的变化情况。

1 材料与方法

1.1 厌氧毒性试验(anaerobic toxic assay, ATA)

种泥取自实验室规模 UASB 有机酸培养颗粒污泥,培养液组成(表 1),红霉素(Erythromycin)是一类大环内酯类抗生素,分子式见图 1。向 125 mL 厌

氧瓶中投加 1.2 g 颗粒污泥、营养液 80 mL,污泥浓度为 $1.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,pH 7.0~7.2。向瓶中依次投加 50、100、150、200 和 $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的红霉素,充 N_2 2 min 保持厌氧环境,瓶口处使用橡胶塞及螺帽密封,置于恒温振荡箱内培养(35°C 、 $106\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)^[16,17],观察累计甲烷产量与时间的变化关系。

1.2 连续实验

在 UASB(up-flow anaerobic sludge blanket)反应器中进行连续实验,实验用反应器由有机玻璃制成,总容积 10 L、有效容积 6.28 L、反应区总高度 82 cm(图 2)。采用乙酸、丙酸、丁酸混合有机酸作为营养基质,COD 为 $5\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,向基质中连续投加 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 红霉素,观察 COD 去除率及气体中的甲烷含量。

表 1 毒性试验基质组份

Table 1 Substrate contents in the ATA test								
组份	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	KH_2PO_4	NH_4Cl	CaCl_2	$\text{FeCl}_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$	$\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	NaHCO_3	微量元素
含量/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	1.4	0.4	1.0	0.02	0.4	0.21	4.0	10 mL

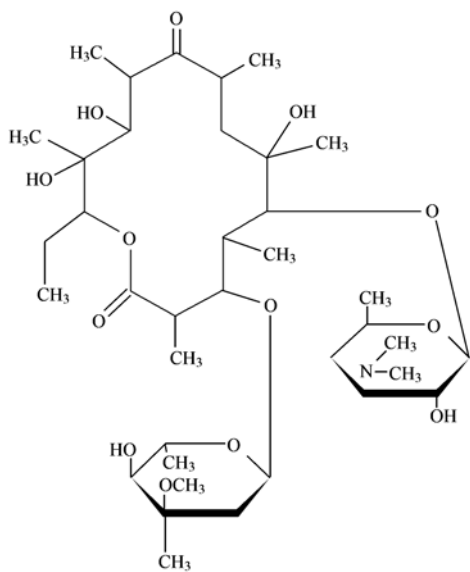


图 1 红霉素分子结构式

Fig. 1 Erythromycin molecular structure

1.3 测定方法

气体组成中甲烷含量的测定使用气相色谱仪(PerkinElmer Clarus500 GC、TCD 检测器)进行测定,载气为氩气,进样口、检测器、色谱柱初始温度分别为 45、200、 45°C 。

2 结果与分析

2.1 累计甲烷产量

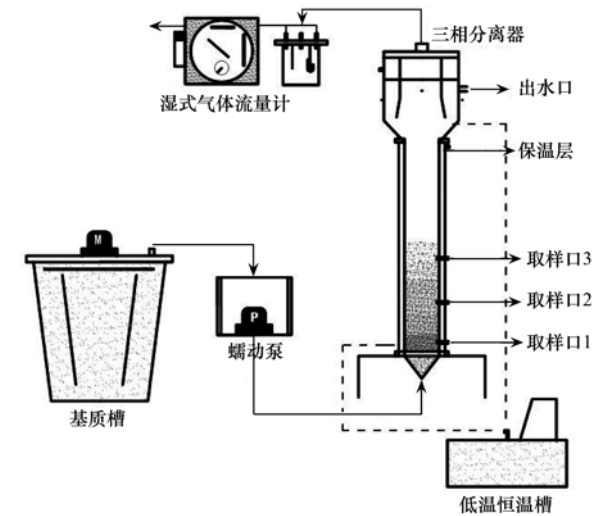


图 2 试验装置图示意

Fig. 2 Equipment setup

甲烷产量随时间的关系曲线[图 3(a)]:同一浓度下甲烷产量随时间的增加而增长,反应初始阶段甲烷产量随时间呈线性增长,在此阶段可得到最大产甲烷速率。相同反应时间下,甲烷产量随红霉素浓度的增加而降低。未投加抗生素的空白与红霉素投加量为 50、100、150、200、 $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的各组中最大产甲烷量分别为 121、101、77、65、48、25 mL。

2.2 产甲烷速率

由累计甲烷产量得出的相对速率与时间关系曲

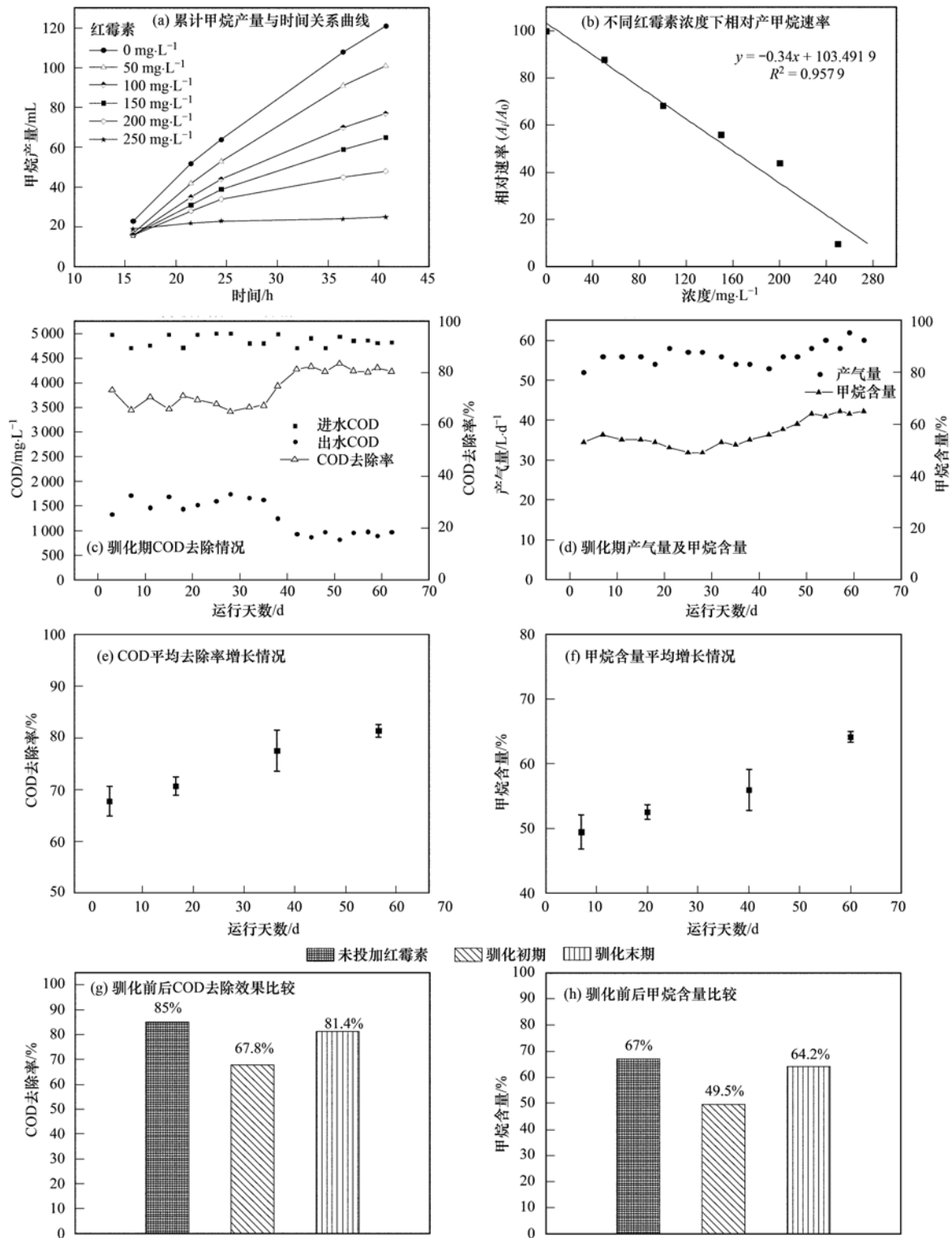


图3 产甲烷速率、COD去除率、甲烷含量及驯化前后COD去除效果、甲烷含量比较

Fig. 3 Methane production ratio, COD removal efficiency, methane content and comparison the change of COD removal efficiency, methane content before and after domestication

线[图3(b)];红霉素投加量为50、100、150、200和250 mg·L⁻¹时与未投加抗生素的空白对照相比,最大产甲烷相对速率分别为0.878、0.683、0.561、

0.439、0.097.

2.3 COD去除率

向混合有机酸营养基质中投加20 mg·L⁻¹红霉

素后 COD 去除率迅速降至 67.8%。保持红霉素投加浓度不变连续运行 60 d, COD 去除率有所恢复。运行到 20、40、60 d 时 COD 去除率依次为 70.7%、77.6%、81.4%,但仍低于未投加红霉素时的 85% 的去除效果。

2.4 甲烷含量

向混合有机酸营养基质中投加 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 红霉素后甲烷含量降至 49.5%。保持红霉素投加浓度不变连续运行 60 d, 运行到 20、40、60 d 时甲烷含量增长为 52.6%、56%、64.2%,但仍低于未投加红霉素时的 68% 的甲烷含量。

3 讨论

3.1 红霉素对甲烷菌活性抑制作用

累计甲烷产量及相对产甲烷速率随红霉素浓度的增加而降低。红霉素投加量为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 累计甲烷产量为 25 mL, 相对速率仅为 0.097, 产甲烷量下降 79.3%, 最大产甲烷速率下降 99%, 活性受到完全抑制。红霉素浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 累计甲烷产量降为 53.7%, 最大产甲烷速率降为 56.1%, 活性降低一半, 确定 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为红霉素对产甲烷菌的半抑制浓度。Sanz 等^[17] 研究指出红霉素、氯四环素、氯霉素同属于抑制蛋白质合成的抗生素类药物, 氯四环素、氯霉素浓度分别为 $152 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时甲烷产量菌降低 80%, 相比之下红霉素的毒性较弱, 更适合用于考察未接触过抗生素的厌氧污泥的驯化能力。

3.2 产甲烷菌驯化能力

Richard 等^[18] 研究指出毒物的投加方式对生物体的驯化程度影响很大, 以毒物半抑制浓度的 $1/5 \sim 1/10$ 为最佳投加量, 可达到较好的驯化效果。根据活性实验中得到的半抑制浓度 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在连续实验中投加浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的红霉素时, COD 去除率由未投加抗生素时 85% 降为 67.8%, 甲烷含量由 67% 降为 49.5%。说明即使抗生素投加量明显低于半抑制浓度, 在连续运行时仍会对产甲烷菌活性产生影响。保持红霉素 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度不变, 连续运行 60 d 考察甲烷菌对红霉素的驯化能力。研究发现经 60 d 的连续运行, COD 去除率、甲烷含量均有一定的增长[图 3(c) ~ 3(f)], 最终 COD 去除率达到 81.4%、甲烷含量 64.2%, 相比在基质中投加红霉素初期时 COD 去除率、甲烷含量分别提高了 15.13%、22.05% [图 3(g) ~ 3(h)]。但仍低于未投加红霉素时的 85% 的 COD 去除率、67% 的甲

烷含量, 两者分别下降了 4%、4.2%。Sponza 等^[10] 研究了 UASB/CSTR 联合工艺对磺胺类抗生素药物的处理效果, 研究指出磺胺类浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 甲烷含量为 76%、COD 去除率为 97%, 均高于本实验中驯化后的平均水平: 甲烷含量 64.2%、COD 去除率 81.4%, 但是实验中抗生素的投加量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高于 Sponza 研究中的 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 投加量, 同时本实验采用单一工艺主要考察微生物可驯化能力, 并非组合工艺中重点考察处理效果。Sreekanth 等^[11] 研究了不同条件下抗生素发酵废水的处理效果, 指出 OLR 为 $9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时 COD 去除效果最佳为 65% ~ 75%, 本实验与之相比 COD 去除效果略高。

4 结论

(1) 红霉素会对甲烷菌的活性产生抑制作用, $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的红霉素可使甲烷产量、产甲烷速率降低 50% 左右, $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时甲烷菌活性基本受到完全抑制。

(2) 甲烷菌对红霉素具有一定的驯化能力, 投加 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 红霉素连续运行 60d, 可使 COD 去除率、甲烷含量分别提高了 15.13%、22.05%, 但未能恢复到未投加红霉素时的水平。

参考文献:

- [1] Kasprzyk-Hordern B, Dinsdale R M, Guwy A J. The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in surface water in South Wales, UK[J]. Water Research, 2008, 42(13): 3498-3518.
- [2] Sim W J, Lee J W, Oh J E. Occurrence and fate of pharmaceuticals in wastewater treatment plants and rivers in Korea[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1938-1947.
- [3] 杨军, 陆禹, 胡纪萃, 等. 抗生素工业废水生物处理技术的现状与展望[J]. 环境科学, 1997, 18(3): 83-85.
- [4] Oz N A, Ince O, Ince B K. Effect of wastewater composition on methanogenic activity in an anaerobic reactor[J]. Journal of Environmental Science and Health-Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2004, 39(11-12): 2941-2953.
- [5] Shreeshivadasan C, Paul J S. Application of anaerobic biotechnology for pharmaceutical wastewater treatment[J]. The IIOAB Journal Special Issue on Environmental Management for Sustainable Development, 2011, 2(1): 13-21.
- [6] Klaus K. Antibiotics in the aquatic environment-A review-Part I[J]. Chemosphere, 2009, 75(4): 417-434.
- [7] Stefan G, Elke U, Radka A, et al. Anaerobic inhibition and biodegradation of antibiotics in ISO test schemes[J]. Chemosphere, 2007, 66(10): 1839-1848.

- [8] Massé D I, Lu D, Masse L, *et al.* Effect of antibiotics on psychrophilic anaerobic digestion of swine manure slurry in sequencing batch reactors [J]. *Bioresource Technology*, 2000, **75**(3): 205-211.
- [9] Oktem Y A, Ince O, Sallis P, *et al.* Anaerobic treatment of a chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater in a hybrid upflow anaerobic sludge blanket reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(5): 1089-1096.
- [10] Sponza D T, Demirden P. Treatability of sulfamerazine in sequential upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)/ completely stirred tank reactor (CSTR) processes [J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, **56**(1): 108-117.
- [11] Sreekanth D, Sivaramakrishna D, Himabindu V, *et al.* Thermophilic treatment of bulk drug pharmaceutical industrial wastewaters by using hybrid up flow anaerobic sludge blanket reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(9): 2534-2539.
- [12] Liu X L, Ren N Q, Yuan Y X. Performance of a periodic anaerobic baffled reactor fed on Chinese traditional medicine industrial wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(1): 104-110.
- [13] 刘红丽, 谢文军, 王新华. UASB/MBR 组合工艺处理抗生素废水的研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(15): 52-54.
- [14] 徐灏龙, 王长智, 章一丹, 等. 生物膜组合工艺处理医药综合废水的中试研究 [J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(7): 41-44.
- [15] Zhang R H, El-Mashad H M, Hartman K, *et al.* Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(4): 929-935.
- [16] Neves L, Oliveira R, Alves M M. Co-digestion of cow manure, food waste and intermittent input of fat [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(6): 1957-1962.
- [17] Sanz J L, Rodríguez N, Amils R, *et al.* The action of antibiotics on the anaerobic digestion process [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1996, **46**(5-6): 587-592.
- [18] Richard E S, 李亚新. 工业废水的厌氧生物技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 273-275.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 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