

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 叶华香,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(*Crassostrea* 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)

咪唑氯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)

铝盐混凝除磷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,杜兴庄,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,袁伊,王志伟,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 *Alcaligenes* 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 蓝舟琳,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 PO₄³⁻ 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)

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

(华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 以处理有毒难降解有机污染物 *N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF) 的序批式好氧活性污泥系统 (SBR) 为对象, 在进水化学需氧量 (COD) 为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, 各初始 DMF 浓度 (40 、 80 、 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 驯化阶段皆为 30 d , 运行周期为 12 h , 溶解氧 (DO) 为 $2.0 \sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 研究了 DMF 在水、泥相的分布及污泥有机毒性变化趋势; 探讨了单个运行周期内, 出水 COD、水相和泥相 DMF 浓度及毒性随时间的变化趋势. 研究表明, 各 DMF 浓度运行阶段的污泥毒性都体现为先升高后降低的趋势, 污泥毒性随初始 DMF 浓度的升高而升高, 污泥有机毒性主要由 DMF 降解过程引起, 且主要集中在内层胞外聚合物 (EPS) 以及胞内区域.

关键词: *N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF); 序批式活性污泥系统 (SBR); 污泥有机毒性; 污泥驯化; 毒性物质空间分布

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1363-06

Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs

HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, XU Wen-lu, CHEN Xiu-rong, AI Qi-feng, CHEN Shan-jia, WANG Li-peng, HUANG Hua

(College of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The aerobic sequencing batch activated sludge system (SBR) was used to remove the toxic and refractory organic pollutant, *N,N*-dimethylformamide (DMF). The formation property and spatial distribution of the organic toxicity in sludge were studied. The operation parameters were controlled as follows: influent COD was about $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, every DMF concentration phase lasted 30 d ($40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), the SBR cycle lasted 12 h , and DO was $2.0 \sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The results showed that the sludge toxicity increased in the beginning and then decreased to a steady range at each DMF concentration phase; there was a positive correlation between the sludge toxicity and the initial DMF concentration; most of the sludge organic toxicity was caused by DMF biodegradation and existed in the inner extracellular polymeric substances (EPS) and intracellular section of sludge flocs.

Key words: *N,N*-dimethylformamide (DMF); sequencing batch reactor (SBR); organic toxicity of sludge; sludge acclimatization; spatial distribution of poisonous substances

随着城市污水处理量的增加, 污泥产量日渐增大. 目前, 综合比较各污泥处置方式, 剩余污泥的土地利用是一种经济有效的方法, 并已经成为极其重要的资源化方向^[1~5]. 但人们主要关注污泥中重金属引起的环境毒性, 而对污泥中有机有毒物引起的毒性重视不足. 但已有些学者研究污泥农用后植物中有机污染物的累积效应和土壤中残留作用的问题^[6~11]. 目前我国对有机污染物治理还缺乏完善的限量控制标准^[12]. Alvarenga 等^[13]指出重金属含量对于评价活性污泥对土地利用的毒性风险不够全面. 也有学者指出有机毒物污染是污泥农用污染新特点, 也是污泥农用最大的安全隐患^[14]. 污泥的无害化处理方法 (如干燥、堆肥等) 也难以彻底去除其中的有毒重金属和难降解有机有毒物^[15,16]. 污泥的重金属毒性已有广泛研究^[17~21], 但我国对污泥中有机有毒污染物质的研究还处于初步阶段. 污泥成分复杂, 单纯的化学分析无法表征污泥毒性特性, 无法

为后续消减污泥有机毒性提供依据. 在一些工业废水的生化处理装置中, 活性污泥中往往积累了较高浓度的有毒物质^[22], 其中一部分毒物随剩余污泥排出造成二次污染^[12]. 因此, 针对大量存在于工业废水中, 可生物降解且毒性较大有机污染物来讲, 对其剩余污泥的有机毒性特性研究具有重大意义.

本试验选取 *N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF) 为目标污染物. DMF 有“万能溶剂”之称^[23], 被广泛应用于化工行业. DMF 可大量溶于水相, 在水体中生物富集作用较弱^[24], 极易与活性污泥相结合. DMF 作为毒性难降解物质, 可通过生物处理手段将其从污水相去除^[25]. 故本试验重点研究 DMF 生物处理过程所

收稿日期: 2012-07-10; 修订日期: 2012-09-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51008124); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 胡园园 (1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物处理, E-mail: huyuan_yuan_good@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xrchen@ecust.edu.cn

产生的有机毒性从水相向泥相的迁移、转化规律,进而为污泥有机毒性消减的后续优化处理过程提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 原水水质及试验条件

本试验系统使用序批式活性污泥系统,反应器为透明有机玻璃制成,有效容积为 10 L。试验原水为人工配水,初始 COD 浓度为 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,碳:氮:磷(C:N:P)为 100:5:1。其中空白组 COD 全部由蛋白胨提供,对照组 COD 由蛋白胨和 DMF 提供。DMF 试验浓度分 3 个梯度:40、80、 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,驯化时间皆为 30 d。

空白组和对照组反应器各项运行参数:污泥泥龄(SRT)为 20 d,单个运行周期水力停留时间(HRT)为 12 h(采用间歇式好氧曝气,曝气 6 h,静置 6 h),DO 控制在 $2.0 \sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,污泥状况良好且稳定,污泥沉降比(SV)为 25%~30%,混合液悬浮固体浓度(MLSS)为 $2.5 \sim 3.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥指数(SVI)为 100 左右,稳定培养 2 个月以上,为后续污泥驯化做准备。

1.2 试验及分析方法

试验的常规指标分析如 COD(采用重铬酸钾回流法测定)、SV、MLSS 等,依照《水和废水监测分析方法》(第四版)的国标法测定,其他指标测试方法如表 1 所示。

表 1 试验过程中分析测定方法介绍

Table 1 Analytical methods in the experiment

项目	测定方法	主要仪器
污泥毒性测定	外层 EPS 毒性 超声 + 阳离子树脂搅拌提取 EPS,明亮发光杆菌 T3 菌种毒性测试国标法 超声破胞法,明亮发光杆菌 T3 菌种毒性测试国标法	生物毒性测试仪 DXY-2,恒温磁力搅拌器 85-Z,六联磁力搅拌器 HJ-6,微量高速离心机 TG16-W,超声波处理器 FS-300
DMF 吸附试验毒性测定	灭活污泥 未灭活污泥	摇床摇动,每隔 2 h 测试毒性
DMF 含量测定	对照组污泥	以对照组污泥每隔 2 h,采用高效液相色谱测定 DMF 含量法

2 结果与讨论

2.1 各 DMF 初始浓度段出水 COD 及 DMF 含量

由图 1 可知,在整个驯化过程中,空白组与对照

组污泥系统的出水 COD 均维持在一个较低的水平,对照组污泥系统并未因投加含 DMF 模拟废水而出现出水 COD 上升、水质恶化的情况。对照组与空白组系统出水 COD 均较理想。

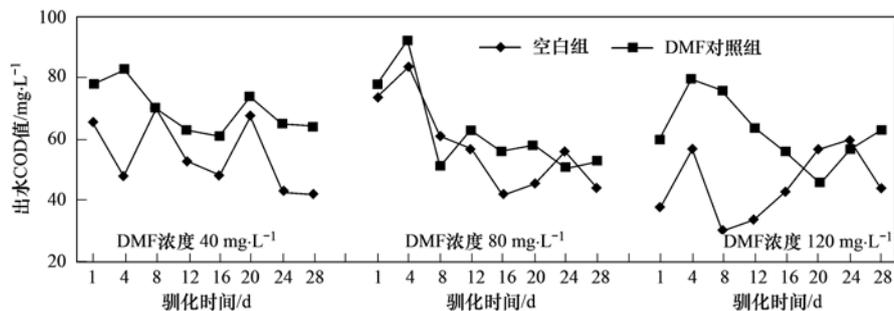


图 1 DMF 各初始浓度阶段出水 COD 值

Fig. 1 Effluent COD in phases with different DMF concentrations

在每个 DMF 浓度的运行阶段内,前期因为模拟废水中 DMF 含量上升,导致系统出水 COD 有所上升,后期随着驯化时间的延长,出水 COD 整体呈下降趋势,在驯化末期出水 COD 均低于 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

在测定各初始 DMF 浓度的 SBR 系统出水 COD 变化的同时,使用液相色谱仪测定出水的 DMF 含

量,考察 DMF 在对照组系统水、泥相中的分布情况,如表 2 所示。

由表 2 所示,在各 DMF 浓度的运行阶段,在运行周期末,对照组系统出水 DMF 浓度均低于检测限,即出水中 DMF 含量极低,可忽略不计。这表明,本试验中各 DMF 初始浓度的模拟废水在好氧 SBR 系统里是可以有效生物降解的。

表 2 各 DMF 浓度运行阶段中周末污泥系统水、泥相 DMF 含量¹⁾

Table 2 Concentration of DMF in effluent and sludge of acclimated sludge system at the end of a cycle

运行浓度	项目	驯化天数/d						
		1	4	8	12	16	20	24
40 mg·L ⁻¹	水相	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
	外层 EPS	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
	总泥相	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
80 mg·L ⁻¹	水相	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
	外层 EPS	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
	总泥相	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
120 mg·L ⁻¹	水相	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
	外层 EPS	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL
	总泥相	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL	< DL

1) DL 为检测限, 本试验中 DMF 液相检测限为 0.10 mg·L⁻¹

2.2 驯化过程中对照组与空白组的污泥毒性对照

污泥经超声破胞后, 通过显微镜观察, 活性污泥系统内微生物细胞基本全部破碎. 故认为胞内物质全部溶出至上清液中, 经高速离心测定上清液毒性即为污泥胞内外总毒性. 由图 2 可知, 在每个 DMF 浓度阶段初期(0~4 d), 此时对照组污泥未完全适应或处于适应 DMF 阶段, 污泥对 DMF 初步降解造成的毒性积累较少, 故对照组污泥总毒性与空白组

相当或略低; 在 4~20 d 期间, 由于对照组污泥对 DMF 降解速率较快, 毒性积累显著, 故对照组污泥总毒性逐渐上升并显著超过空白组; 在末期即第 20~24 d, 由于对照组污泥对 DMF 降解过程中积累的毒性物质逐步消耗, 对照组污泥毒性出现降低, 故两组污泥总毒性差距减小. 随初始 DMF 浓度增加, 污泥总毒性未呈显著上升, 范围皆在 30%~60% 之间.

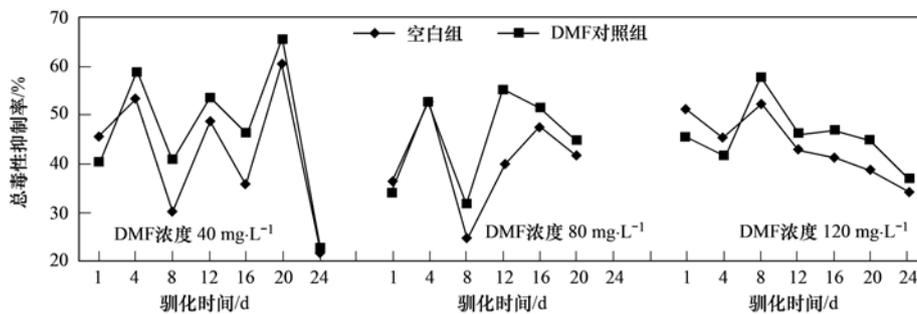


图 2 DMF 各浓度下污泥总毒性抑制率

Fig. 2 Total toxicity of sludge at different DMF concentrations

由图 3 可知, 在不同 DMF 初始浓度时, 对照组与空白组污泥外层 EPS 毒性差距不大, 不超过 20%, 且对照组污泥外层 EPS 毒性并未随初始 DMF 浓度的增加而显著升高. 且由表 3 可知, DMF 在对照组中污泥系统的水相及泥相中均无积累. 综合表

3 和图 3 可知: 外层 EPS 属多糖物质, 本身毒性很小, 且其中未含毒性物质.

2.3 运行周期中污泥毒性变化

2.3.1 对照组水相 COD 和 DMF 含量变化

试验过程中, 针对 DMF 初始浓度为 120 mg·L⁻¹

表 3 不同污泥对 DMF 吸附效能对照/mg·L⁻¹

Table 3 Adsorption performance comparison of different kinds of sludge with DMF/mg·L⁻¹

污泥类型	指标	0 h	2 h	4 h	6 h	8 h	10 h
空白组灭活污泥	上清液 DMF 浓度	106.86	78.60	80.36	83.10	85.87	83.67
	吸附去除 DMF 浓度	13.14	41.40	39.64	36.90	34.13	36.33
空白组未灭活污泥	上清液 DMF 浓度	113.15	103.03	101.79	100.55	100.62	99.73
	吸附/降解去除 DMF 浓度	6.85	16.97	18.21	19.45	19.38	20.27
对照组未灭活污泥	上清液 DMF 浓度	99.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	吸附/降解去除 DMF 浓度	20.22	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00

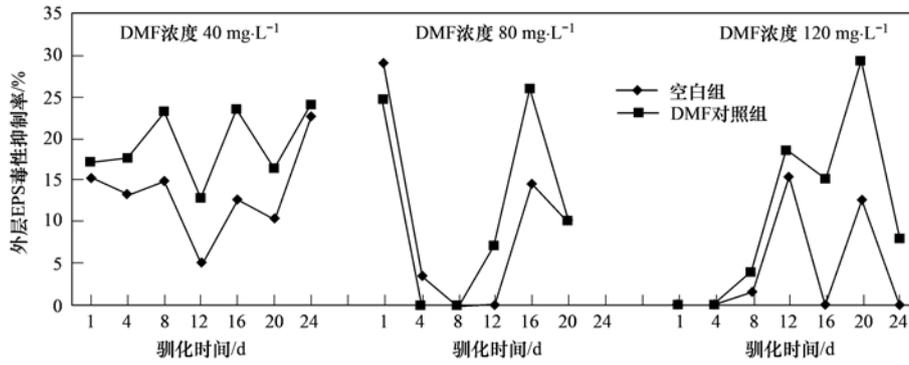


图3 DMF各浓度下外层EPS毒性抑制率

Fig. 3 Toxicity of outer EPS at different DMF concentrations

的阶段,每隔2 h 取样,分析对照组污泥中DMF含量变化,以及水相COD和DMF浓度变化,如图4和5所示.如图5所示,初始浓度 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的同一周期内,每15 min 取样测定的结果表明,水相中DMF的含量不断减小,在2 h 时,水相DMF浓度低于 $3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;6 h 时,水相DMF无检出.结合图4中的COD变化可知,0~2 h 内,DMF去除率即为97.9%,说明该SBR系统可有效去除水相DMF.水相COD和DMF在2 h 内皆迅速降低为活性污泥快速吸附所致.

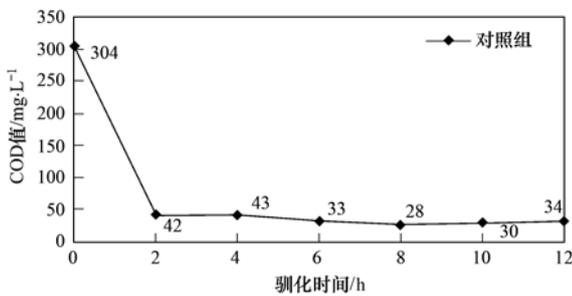


图4 DMF浓度为 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 周期内上清液COD变化

Fig. 4 Variation of supernatant liquid COD in a cycle with DMF concentration of $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

分析认为,在单个运行周期的0~2 h 内,对照组污泥对水相中蛋白胨及难降解有机物DMF的去除体现为快速吸附过程,导致水相COD显著下降;2~8 h 阶段,水相DMF和其他有机物在泥相中被大量水解,并继续通过生物代谢过程予以去除;10~12 h 阶段,由于DMF中间降解产物部分被释放到水相致COD上升.试验研究表明,该活性污泥系统对DMF模拟废水降解性能良好,DMF易于被活性污泥吸附与降解.

2.3.2 对照组污泥毒性空间分布特性

在DMF初始浓度为 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其运行初

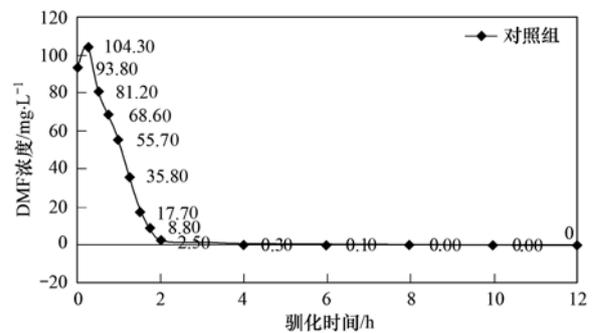


图5 DMF初始浓度为 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 周期内水相DMF变化

Fig. 5 DMF concentration variation in liquid in a cycle with DMF concentration of $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

期(第6 d)和末期(第20 d)的单个周期内污泥总毒性和外层EPS毒性变化趋势如图6所示.

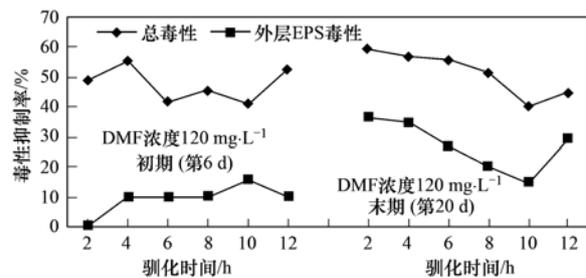


图6 DMF浓度为 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时对照组污泥外层EPS毒性与总毒性对比

Fig. 6 Comparison between outer EPS and total toxicity of sludge at a DMF concentration of $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$

由图6可知,在总体趋势上,对照组污泥总毒性与外层EPS在运行初期(第6 d)的毒性皆分别低于末期(第20 d)相应毒性.分析认为,有两种可能:其一是DMF的有毒降解产物长期积累至胞内外;其二是长期降解DMF诱导微生物产生毒性代谢产物累积.其具体原因还有待于后续研究证实.

2.4 污泥对DMF的吸附试验

为了验证对照组污泥毒性是吸附 DMF 所致或因降解 DMF 所致, 以下采用了空白组灭活污泥、空白组未灭活污泥、对照组污泥对 DMF 进行吸附试验, 以便给出进一步解释。

吸附试验中, 所采用污泥为运行周期末即运行 12 h 后, 取 100 mL 泥水充分混合液, 加入到 250 mL 锥形瓶中, 此时认为锥形瓶中污泥浓度与装置内污泥浓度相同。加入 DMF 使其初始浓度为 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 锥形瓶以单层纱布包裹, 可透气, 以保证好氧条件。因此, 吸附试验的环境条件与活性污泥处理装置的运行条件相当。

2.4.1 污泥对 DMF 吸附能力对照

此处取得上清液的操作条件是 10 min , $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心。由于是低速离心, 不会提取出大量 EPS, 而对污泥中吸附 DMF 的提取也极其有限, 此处忽略。上清液 DMF 浓度相当于污泥吸附或降解 DMF 后, 残余的 DMF 量, 用初始 DMF 浓度 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 减去此值, 视为被污泥吸附或降解的 DMF

量。吸附过程中, 上清液中 DMF 浓度及吸附/降解去除 DMF 浓度值如表 3 所示。

由表 3 可知, 对照组未灭活污泥水相上清液在 2 h 时 DMF 浓度已接近于 0, 而另外两组污泥, 空白组灭活污泥水相中 DMF 浓度几乎没有降低, 空白组未灭活污泥在 2 h 时有少许降低, 随后便无明显降低, 浓度保持在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。

分析认为, 相对于空白组污泥, 对照组污泥对 DMF 不仅有吸附还有较好的生物降解能力, 故对照组水相 DMF 浓度减少最快。但对两组空白组污泥而言, 未灭活污泥虽对 DMF 有较弱的生物降解效能, 但灭活污泥呈松散、解体状, 吸附表面积增大, 一定程度上增强了其对 DMF 的物化吸附效能, 故体现为两者对 DMF 从水相去除效能相当。

2.4.2 吸附试验中污泥毒性对照

吸附过程中, 空白组灭活污泥、空白组未灭活污泥、对照组未灭活污泥的不同毒性变化趋势如图 7 所示。

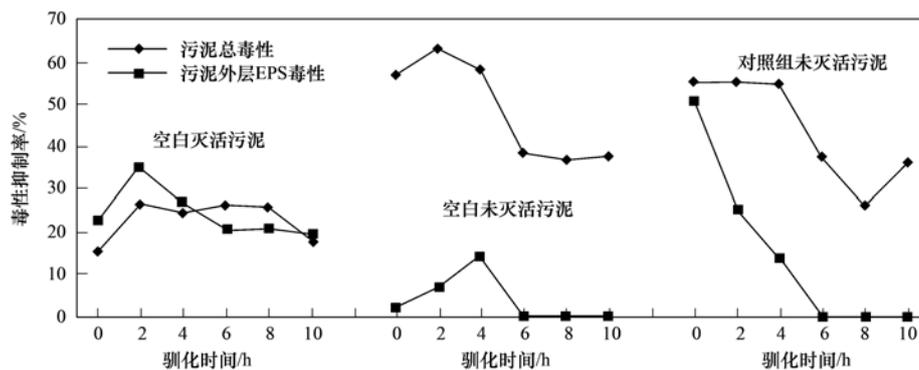


图 7 污泥对 DMF 吸附过程中污泥各分区毒性变化

Fig. 7 Toxicity distribution in various sludge fractions during DMF adsorption

图 7 可知, 空白组灭活污泥总毒性与其外层 EPS 毒性相当, 均为 30% 左右。这是因为空白组灭活污泥松散、解体, 呈现均一性, 故污泥絮体各区域吸附性能相当。

由图 7 所示, 在 0 ~ 8 h 期间, 未灭活的空白组和对照组污泥总毒性总体皆呈下降趋势, 但随 HRT 延长至 8 h 后, 毒性反升。对照来看, 8 ~ 10 h 内, 对照组污泥毒性反升幅度显著高于空白组污泥。这是由于 HRT 延长至 8 h 后, 污泥絮体出现解体, 絮体内毒性物质释放, 造成毒性反升。而对照组污泥较空白组污泥对 DMF 降解能力更强, 故造成絮体内毒性物质积累较多, 故毒性反升更显著。

总结来看, 不同污泥对 DMF (浓度 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的吸附试验中, 空白组未灭活污泥总毒性为 40% ~

70%; 对照组未灭活污泥总毒性为 30% ~ 60%; 只有吸附而无降解的空白组灭活污泥总毒性较低, 为 15% ~ 40%。分析认为: 对照组未灭活污泥对 DMF 的降解作用最为显著, 污泥毒性最高说明毒性主要是由降解过程引起。相应地, 虽然空白组未灭活污泥对 DMF 吸附性能与对照组污泥相近, 但由于其对 DMF 降解能力较弱, 故污泥总毒性较低; 而对 DMF 物化吸附效能较强但无生物降解能力的空白组灭活污泥来讲, 其污泥总毒性最小。这也间接证明, 污泥毒性并非污泥对 DMF 吸附引起, 而主要是由污泥对 DMF 的降解过程引起。

由图 7 可知, 未灭活的空白组与对照组污泥外层 EPS 毒性均较低, 说明 DMF 吸附和降解造成的毒性主要集中在胞内和内层 EPS 区域, 外层 EPS 毒

性无累积。

3 结论

(1) SBR 污泥系统对含 DMF 模拟废水处理效果较理想,在 DMF 初始浓度分别为 40、80 和 120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 阶段,在 12 h 运行周期末,出水 DMF 检不出,且 COD 皆低于 60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2) DMF 在水相及泥相中基本无残留,而污泥毒性却随运行时间而出现积累,对照组污泥毒性主要由 DMF 降解过程引起,而非吸附 DMF 所致。

(3) 在各 DMF 初始浓度(40、80、120 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 运行阶段,对照组污泥毒性主要集中在内层 EPS 和胞内区域。

参考文献:

- [1] McGrath S P, Zhao F J, Dunham S J, *et al.* Long-term changes in the extractability and bioavailability of zinc and cadmium after sludge application[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(3): 875-883.
- [2] Oliver I W, McLaughlin M J, Merrington G. Temporal trends of total and potentially available element concentrations in sewage biosolids; A comparison of biosolid surveys conducted 18 years apart[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **337**(1-3): 139-145.
- [3] 武淑文. 城市污泥资源化利用研究进展[J]. *广西轻工业*, 2009, (4): 113-167.
- [4] 杨金满, 贾瑞宝. 城市污泥资源化利用研究进展[J]. *工业用水与废水*, 2011, **42**(5): 1-5.
- [5] 李海波, 柳青, 孙铁珩, 等. 中国城市污泥资源化利用研究进展[J]. *三峡环境与生态*, 2008, **1**(2): 42-47.
- [6] Nadal M, Schunhacher M, Domingo J L. Levels of PAHs in soil and vegetation samples from Tarragona County, Spain[J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(1): 1-11.
- [7] Oleszczuk P, Baran S. Influence of soil fertilization by sewage sludge on the content of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in crops [J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2005, **40**(11): 2085-2103.
- [8] Oleszczuk P, Baran S. Kinetics of PAHs losses and relationships between PAHs properties and properties of soil in sewage sludge-amended soil [J]. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 2005, **25**(3): 245-269.
- [9] Oleszczuk P, Baran S. Polycyclic aromatic hydrocarbons content in shoots and leaves of willow (*Salix viminalis*) cultivated on the sewage sludge-amended soil [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, **168**(1-4): 91-111.
- [10] 申荣艳, 骆永明, 章钢娅, 等. 城市污泥农用对植物和土壤中有机污染物的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(2): 651-657.
- [11] 蔡全英, 莫测辉, 朱夕珍, 等. 城市污泥对通菜-水稻土中有机污染物的累积效应[J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(3): 321-326.
- [12] 李琼, 华路, 徐兴华, 等. 城市污泥农用的环境效应及控制标准的发展现状[J]. *中国生态农业学报*, 2011, **19**(2): 468-476.
- [13] Alvarenga P, Palma P, Gonçalves A P, *et al.* Evaluation of chemical and ecotoxicological characteristics of biodegradable organic residues for application to agricultural land [J]. *Environment International*, 2007, **33**(4): 505-513.
- [14] 董文茂. 污泥农用: 引发土壤污染风险[J]. *环境*, 2007, (3): 65-67.
- [15] 杨子江. 城市污泥的综合利用研究[J]. *再生资源研究*, 2004, (1): 32-36.
- [16] 易浩勇, 郭宏伟, 虞维平. 城市污泥处理与资源化利用[J]. *能源研究与利用*, 2005, (6): 49-52.
- [17] 陈茂林, 胡忻, 王超. 我国部分城市污泥中重金属元素形态的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(6): 1102-1105.
- [18] 陈同斌, 黄启飞, 高定, 等. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(5): 561-569.
- [19] Kidd P S, Domínguez-Rodríguez M J, Díez J, *et al.* Bioavailability and plant accumulation of heavy metals and phosphorus in agricultural soils amended by long-term application of sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(8): 1458-1467.
- [20] Cheng H F, Xu W P, Liu J L, *et al.* Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(1): 96-104.
- [21] Wei Y J, Liu Y S. Effects of sewage sludge compost application on crops and cropland in a 3-year field study[J]. *Chemosphere*, 2005, **59**(9): 1257-1265.
- [22] Wang J L, Qian Y, Horan N, *et al.* Bioadsorption of pentachlorophenol (PCP) from aqueous solution by activated sludge biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2000, **75**(2): 157-161.
- [23] 刘兴泉, 唐毅, 戴汉松, 等. *N,N*-二甲基甲酰胺的生产与应用[J]. *化工科技*, 2002, **10**(1): 46-49.
- [24] 潘志彦, 金红茂, 王春能, 等. 二甲基甲酰胺环境标准浓度值研究[J]. *环境科学与技术*, 2007, **30**(2): 37-38.
- [25] 宋姗姗, 张林生. *N,N*-二甲基甲酰胺 (DMF) 废水处理研究进展[J]. *江苏环境科技*, 2007, **20**(3): 67-70.

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-ru, 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 Changde 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 Phosphorus 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 Floes	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 Floes	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-wei, <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