

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM_{2.5}中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM_{2.5}中碳组分的污染特征 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM_{2.5}排放特性分析 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细微颗粒物浓度及粒径谱特征的研究 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu₂O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH₂PO₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ¹³C值的影响 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N₂、N₂O、NO、CO₂和CH₄排放的影响 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM_{2.5}能力研究 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO₂排放的时空特点分析 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究

金鹏康, 常晋, 王先宝, 刘柯君, 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要: 通过对 A²/O 污水处理工艺长期的分析监测, 探明了城市污水处理厂原水中有机物不同生物降解性及碳源赋存形态比例. 原水中大部分有机物以颗粒态存在, 占进水有机物的 61%. 原水中快速、慢速、难生物降解有机物比例分别为 15.8%、54.2% 和 30%, 快速生物降解有机物主要以溶解态存在, 慢速生物降解有机物则主要以颗粒态存在. 通过快速、慢速生物降解有机物的沿程监测分析, 明确了两种碳源在污水处理过程中的变化规律, 厌氧池与缺氧池内均存在微生物水解发酵引起的慢速生物降解有机物的转化作用, 其中厌氧反应池的转化效率最高. 分析计算了污水处理过程中不同碳源的转化, 明确了快慢速有机物在各单元的转化和利用情况, 结果指出, 2 h 内慢速生物降解有机物在厌氧池与好氧池转化率分别为 33% 和 20%. 从脂肪酸的种类及含量来说, 厌氧池与缺氧池的脂肪酸的种类及含量均高于原水.

关键词: 城市污水处理; 快速降解有机物; 慢速生物降解有机物; 碳源转化; 挥发性脂肪酸

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3443-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.09.027

Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process

JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, LIU Ke-jun, WANG Xiao-chang

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The biodegradability and speciation of organics were studied through long-term analysis of A²/O treatment. The majority of the organic matters were particle organics which accounted for 61% of the total organics. The proportions of rapidly degradable, slowly degradable and refractory organics were 15.8%, 54.2% and 30% respectively. Rapidly biodegradable organics were mainly dissolved organics while slowly biodegradable organics were particle organics. The variation of these two kinds of carbon sources was analyzed during the treatment process. It was noted that microbial hydrolysis fermentation took place in the anaerobic and anoxic tanks, which led to the transformation of slowly biodegradable organics and the anaerobic tank had the highest transformation rate. The transformation and utilization of rapidly/slowly biodegradable organics were analyzed through calculation. The results showed that the transformation efficiency of slowly biodegradable organics in the anaerobic and anoxic tanks in two hours was 33% and 20%, respectively. Furthermore, the amount and species of aliphatic acid increased in the anaerobic and anoxic tanks comparing with raw water.

Key words: urban sewage treatment; rapidly degradable organics; slowly degradable organics; carbon source transformation; volatile fatty acids

有机污染物作为城市污水处理厂的主要污染物, 一般以 COD 或 BOD 来表征. 但是, 传统的 COD 无法反映水质组成的差异. 当前, 比较公认的是国际水协系列活性污泥模型 (activated sludge models, ASM_s) 对废水 COD 组分的划分^[1~4]. 这些组分的定量表征也成为 ASM_s 应用的必要前提. 其中, 快速易生物降解 COD 组分 (S_s) 和慢速可生物降解 COD 组分 (X_s) 是 ASM_s 中最重要的 2 种组分, 直接与微生物增殖、氧利用动态特性以及营养物的去除有关^[5]. 因此, 这 2 种组分的准确表征对于 ASM_s 的理论研究和应用具有十分重要的意义. 易生物降解有机物 (S_s) 由挥发性脂肪酸和低分子碳水化合物等简单物质组成. 慢速降解有机物 (X_s) 包括高分子可溶性、胶体有机物质、胶体颗粒性有机物质^[6~8]. 它们必须通过胞外水解作用转化为小分子物质, 才可被降解利用.

基于此, 本文以西安市某 A²/O 污水处理厂为

研究对象, 评价了原水中碳源的分布情况, 并解析了污水厂各处理单元的碳源利用与转化情况. 该污水厂主要接纳和处理西安市东南郊、东郊、东北郊产河 4 568 hm² 区域范围内的生产废水和生活污水, 其中生活污水约占 70%, 生产废水约占 30% (生产废水经厂内处理基本达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 后进入城市污水处理系统), 与同类城市污水相比, 具有典型代表性^[9]. 本研究通过 1 a 的水质监测与分析, 得到了污水处理过程中快慢速生物降解有机物的变化规律, 以期对污水中污染物去除效率提高提供参考.

收稿日期: 2014-01-22; 修订日期: 2014-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178376); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2011ZX07317-001); 新世纪优秀人才项目 (NCET-12-1043); 陕西省创新团队项目 (IRT 2013KCT-13)

作者简介: 金鹏康 (1974~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水和废水的深度处理技术, E-mail: pkjin@hotmail.com

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

0.45 μm 滤膜(醋酸纤维素膜); 硫酸-硫酸银溶液、硫酸亚铁铵溶液等; ATU 试剂; 溶解氧测定仪; 磁力搅拌器一套; 恒温水浴箱; Matlab 软件; Agilent 6890N 气相色谱仪(双检); PE WAX ETR 色谱柱; 色谱小瓶; 甲酸等.

1.2 实验方法

(1)OUR 测定 测定间歇式呼吸速率的方法, 分别取生物池的污泥 1 000 mL 于反应器内, 添加 ATU 试剂, 抑制生物硝化过程. 测定过程中采用恒温水浴箱对反应器外围的循环水温度控制, 从而使反应温度调节在 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. 并且采用磷酸盐缓冲液调节系统 pH 在中性. 在密闭反应器中, 用曝气头充氧气. 密闭监测时用磁力搅拌器搅拌, 搅拌强度使污泥不发生沉降即可. 用溶氧仪在线监测 DO 变化, 变化速率为 OUR. 当溶解氧浓度从 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降到 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时开曝气装置, 溶解氧达到 $6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时停止曝气继续监测溶氧变化. 通过 Matlab 软件及相关公式可以算出快速及慢速生物降解有机物的含量^[10~12].

(2)Agilent 气相条件 检测器为 FID 检测器, 色谱柱采用 PE WAX ETR 毛细柱. 升温程序起始于 100°C , 保留 2 min, 以 $3^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升温至 160°C , 保留 2 min. H_2 流量为 $35 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 空气流量为 $350 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 尾吹气 (N_2) 流量为 $20 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样量为 $1 \mu\text{L}$.

(3)VFA 测定 将所测水样现场固定, 用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤 5 mL, 加入甲酸 250 μL . 固定后可存放 1 周. 使用气相色谱测定 VFA 时, 程序运行正常后, 即可通过自动进样器进样, 得到不同时间下水样中的物质的峰, 利用标线可以得到相对应酸类的浓度.

(4)COD 测定 待测污水通过 $0.45 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤后, 测定其 COD 即为溶解态 COD. 颗粒态 COD 则是通过污水总 COD 减去溶解态 COD 得到. COD 测定采用国标法中的回流法.

(5)颗粒态 COD 中组分测定 颗粒态 COD 中快速、慢速和惰性降解物所占比例均是通过测定原污水及过滤后污水的快速、慢速和惰性降解物的含量后相减所得.

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂原水碳源分析

西安市某 A^2/O 污水处理厂原水中进水 COD

为 $360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 如图 1 所示. 其中颗粒态 COD(SCOD)高达 $220 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 约占总 COD 的 61%, 溶解态 COD(DCOD)为 $140 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 约占总 COD 的 39%, 说明污水处理厂原水中大多数有机物以颗粒态的形式存在. 经过 1 a 的分析监测, 原污水的 TN、TP 浓度平均在 $47.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $4.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此可以得出污水中的 C/N 约为 5~8, C/P 约为 60~85, 这一结果表明污水中的 C、N、P 比例适中, 在生物脱氮除磷工艺中碳源充足.

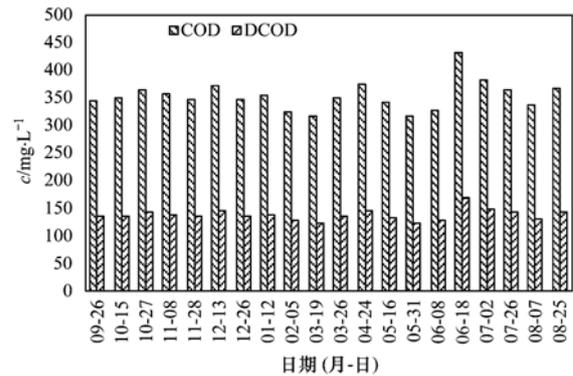


图 1 原水中有机物变化情况

Fig. 1 Variation of organic matter in raw water

运用间歇式呼吸速率法对污水处理厂原水中有机物按生物降解性进行分类, 结果如图 2 所示. 可以看出原水中快速生物降解有机物浓度相对较低, 浓度为 $56.78 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 9.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 占进水有机物的 15.8%, 慢速可生物降解有机物是进水的主要部分 (54.2%), 浓度范围 $180.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 35.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其余部分 (约 30%) 为惰性有机物.

图 3 为溶解态 COD 及颗粒态 COD 中不同生物降解性碳源组分分析结果. 从中看出, 溶解态 COD 占总 COD 的 38.75%, 其中快速降解有机物占

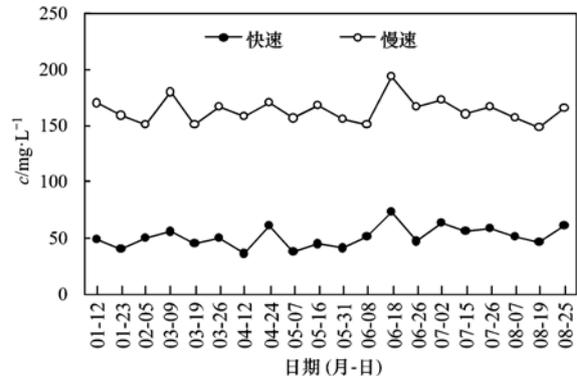


图 2 原水快慢速有机物变化

Fig. 2 Variation of rapidly and slowly biodegradable organics in raw water

41.76%，慢速降解有机物占 33.31%，惰性有机物占 24.93%。而颗粒态 COD 中快速降解有机物只有 5.32%，说明颗粒态中快速易生物降解有机物很少，很可能是少量快速降解有机物吸附在颗粒表面所致。颗粒态中慢速降解有机物占到 55.01%，表明颗粒态有机物中绝大多数为慢速降解有机物。另有 39.67% 比例为惰性有机物，可以发现颗粒态中有相当比例有机物是难于降解的，这些物质可能在一级

处理中随污泥排出一部分，在生物池活性污泥中吸附一部分，出水中惰性难降解有机物总量减少可以进一步解释这一现象^[13]。快速降解有机物中 82.22% 为溶解态，17.78% 为颗粒态；慢速降解有机物中有 26.28% 为溶解态，73.72% 为颗粒态。总体表明，快速生物降解有机物绝大部分以溶解态存在，而慢速生物降解有机物中大部分以颗粒态存在^[14,15]。

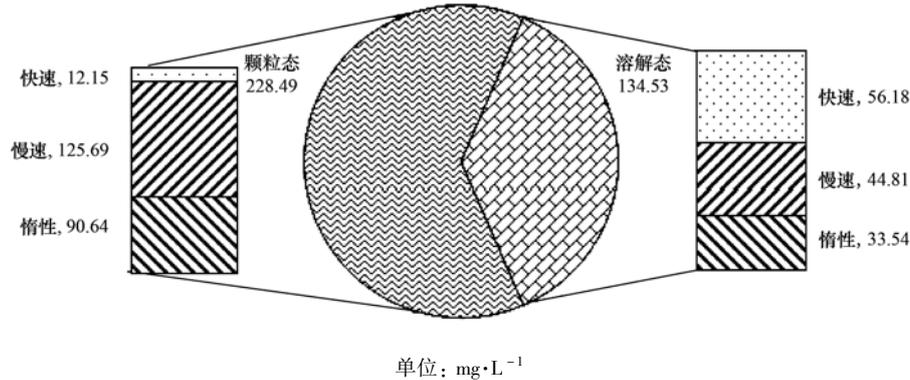


图 3 原水溶解性 COD 与颗粒态 COD 碳源分析

Fig. 3 Carbonsource analysis of SCOD and DCOD in raw water

由以上分析可以看出，该污水处理厂进水碳源以慢速生物降解有机物为主，而慢速生物降解有机物主要以颗粒态形式存在，颗粒态碳源组分高并不利于污水处理厂脱氮除磷过程，这部分碳源必须水解转化为溶解性有机物才能被微生物所用，这也是污水处理厂存在的普遍问题。因此对于各污水处理厂而言，虽然理论计算原污水中碳氮比、碳磷比满足生物脱氮除磷需求，但因原污水中的悬浮性有机物较多，在污水处理厂一级处理单元中导致大量颗粒态碳源的无效流失，从而加剧了生物处理单元碳源不足的问题，因此对于原污水中存在高悬浮性颗粒态碳源的污水处理厂，应适当弱化前期预处理单元，减少颗粒态碳源的流失，并有效利用水中颗粒态碳源，通过系统合理配置完成该类有机碳源的转化。

2.2 不同碳源在污水处理工艺中的沿程变化

快速及慢速生物降解有机物在污水处理工艺中的沿程变化如图 4 所示，通过初沉池可去除 30% 的慢速生物降解有机物，主要原因在于慢速生物降解有机物中很大一部分以颗粒态存在，会随着悬浮性颗粒在初沉池中沉淀而去除。快速生物降解有机物在初沉池中也有所降低，但降低不到 10%，这主要是吸附在颗粒态表面的溶解性物质随颗粒物去除而流失。

两种碳源在生物池浓度显著降低，分别降低至 32.13 mg·L⁻¹ 和 55.76 mg·L⁻¹，其主要原因应是 A²/O 生物池大容积的稀释作用。慢速生物降解有机物在厌氧池、缺氧池及好氧池 3 个处理单元中均逐渐降低，3 个处理单元中分别降低 12.6、6.6 及 12.4 mg·L⁻¹。虽然厌氧池停留时间较短(2 h)，但

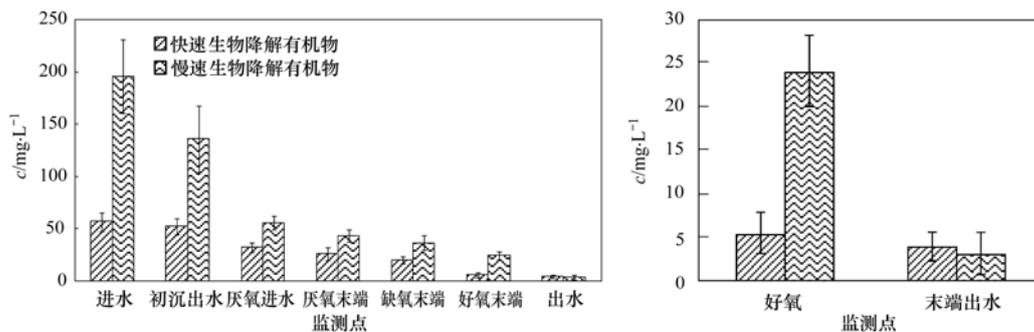


图 4 不同种类碳源在污水处理工艺中沿程变化

Fig. 4 Variation of different kinds of carbon sources in wastewater treatment

其对慢速生物降解有机物的去除作用最大,这主要因为原水首先进入厌氧池,大部分慢速生物降解有机物为颗粒态物质,厌氧环境有利于颗粒态物质水解为溶解性物质^[16]. 此后在缺氧池经过 5.5 h,慢速生物降解有机物降低至 36.6 mg·L⁻¹. 好氧池末端的慢速生物降解有机物约为 24.18 mg·L⁻¹,好氧池去除比例达到 33.9%. 为了进一步说明慢速生物降解有机物在生物反应池中的转化情况,取原水中实际的慢速颗粒态有机物为研究对象,通过模拟实验于厌氧及好氧两种条件下分别测定了慢速生物降解有机物的转化情况,结果如图 5 所示. 在前 2 h 中,厌氧条件下的慢速生物降解有机物降解率可达 33%,而好氧条件下的降解率为 20%,表明厌氧条件下的确存在慢速生物降解有机物的转化. 根据颗粒态以及难降解碳源在厌氧池、缺氧池及好氧池中转化与利用过程,为提高该类有机物在生物脱氮除磷过程中的利用效率,A²/O 工艺厌氧、缺氧、好氧处理单元中应适当增加厌氧、缺氧所占比例,这两部分所占总生物处理单元的比例以 40%~50% 为佳,这也是本研究中的污水处理厂能够高效脱氮除磷的原因之一. 对原水与生物池水样测定,检测到 VFA 这类快速生物降解有机物的存在,有别于原水 VFA 中有机酸种类及量的变化,如图 6 所示. 从中看出,原水中只有乙酸、丙酸与丁酸,经厌氧池到缺氧池,VFA 中酸的种类及含量均发生变化,出现了丁酸、戊酸及异戊酸等酸类物质,并且乙酸与丙酸的含量在厌氧池均有所升高,厌氧池中 VFA 总含量也相较于原水有所增加. 这一结果说明了在生物池中存在慢速生物降解有机物的转变现象^[17].

厌氧池聚磷菌释磷及缺氧区反硝化过程会首先利用快速生物降解有机物^[18,19],而快速生物降解有机物在厌氧池与缺氧池浓度中仅降低 5.9 mg·L⁻¹

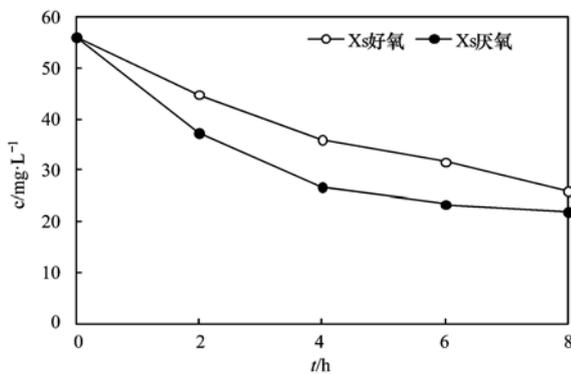


图 5 慢速降解有机物在厌氧与好氧条件下的降解情况

Fig. 5 Degradation of slowly degradable organic matter in anaerobic and aerobic conditions

及 6.1 mg·L⁻¹,缺氧池易生物降解有机物浓度仍保持在 20 mg·L⁻¹左右. 这主要是因为微生物在利用快速降解有机物的同时,厌氧及缺氧环境下颗粒态慢速降解有机物发生了如图 5、6 所示的酸化作用而产生易生物降解有机物,因此保持易生物降解有机物在一个较高浓度. 二沉池的出水中快速及慢速生物降解有机物分别为 3.2 mg·L⁻¹及 5.5 mg·L⁻¹,与好氧池末端相比慢速生物降解有机物明显降低,说明颗粒态慢速生物降解有机物主要被活性污泥所吸附,在二沉池中沉淀在污泥中,不会随出水流出.

2.3 不同碳源的脱氮除磷利用

综合污水厂一年来的数据分析,得到了不同碳源在沿程中的转化情况如图 7 所示. 原水至初沉池出水的一级处理中,快速降解有机物变化不大,慢速

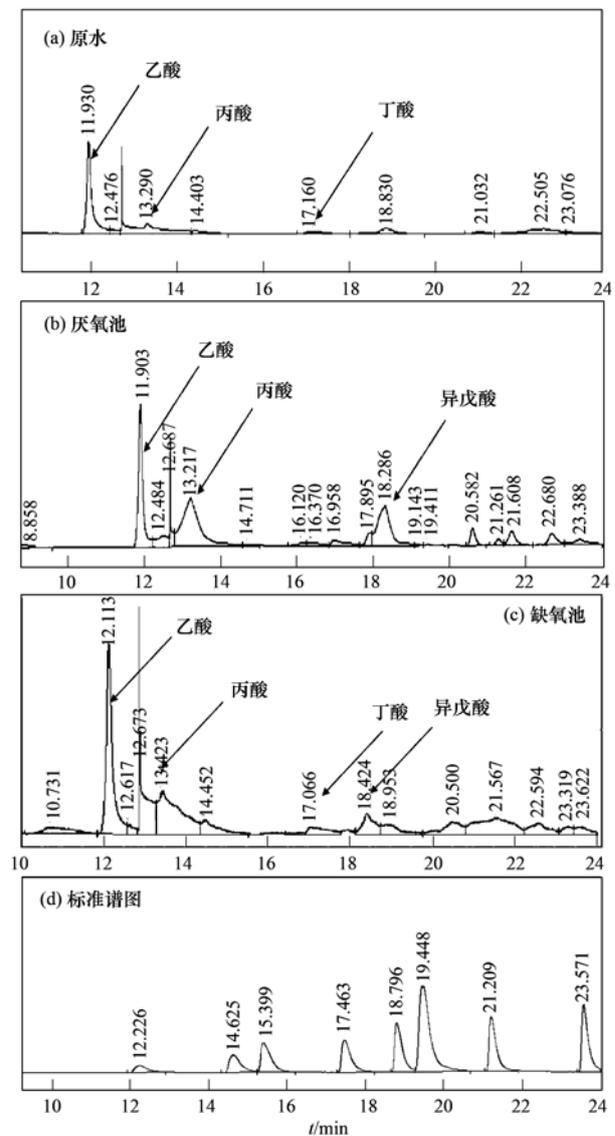
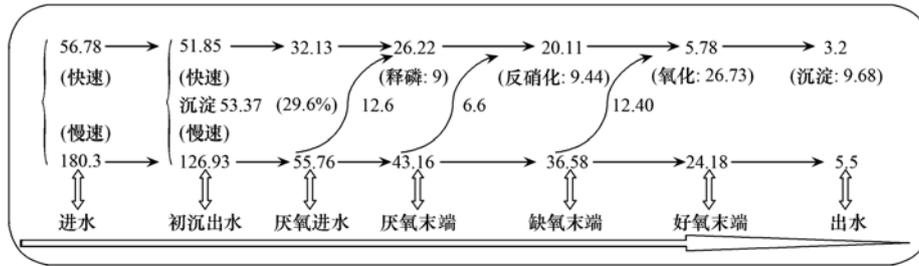


图 6 不同污水处理单元中 VFA 色谱图

Fig. 6 VFA chromatograms in different wastewater treatment units

生物降解有机物减少了 30%, 这主要是由于初沉池的沉淀作用, 一部分颗粒态有机物上吸附的慢速生物降解有机物随着初沉池的排泥作用被去除. 根据对该污水处理厂的长期水质监测, 厌氧池平均释磷量约为 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 通过分析计算释磷速率, 可以得到厌氧池释磷需要约 $9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD 的碳源^[20]. 研究表明, 除磷所需碳源一般为优质碳源, 在厌氧池中检测到 VFA 这类脂肪酸的变化, 聚磷菌会优先使

用 VFA 用于释磷过程^[21~23]. 厌氧池中快速及慢速生物降解有机物分别降低了 $5.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 及 $12.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 则可以推断 $5.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 易生物降解有机物几乎全部提供给聚磷菌利用, 约有 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 慢速生物降解有机物用于聚磷菌释磷, 其除磷利用率约为 24.5%. 同时, 慢速生物降解有机物中仍会降低 $9.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 应归因于其它微生物的生命活动及水解所致^[24].



单位: $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

图 7 不同碳源在污水处理过程中的转化解析

Fig. 7 Transformation of different kinds of carbon sources in wastewater treatment

缺氧池总氮浓度约降低 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此该系统反硝化脱氮需要 COD 为 $9.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而该污水处理厂缺氧池有机物消耗为 $12.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明大部分碳源被反硝化细菌所利用, 这与反硝化细菌可利用不同碳源进行脱氮过程吻合^[25,26]. 在好氧池内停留 8.9 h 的过程中, 氧化作用最明显, 有机物消耗多. 好氧池中的快速降解有机物及由慢速生物降解有机物转化的快速降解有机物则主要用于氧化作用, 慢速生物降解有机物的转化率达 33.90%. 从好氧至出水过程中快速降解有机物变化不大, 慢速生物降解有机物降低, 主要原因是沉淀作用明显.

3 结论

(1) 污水处理厂原水中有机物主要以慢速生物降解有机物为主, 占进水有机物的 54.2%, 慢速生物降解有机物主要以颗粒态存在, 快速生物降解有机物仅占 15.8%, 快速生物降解有机物基本以溶解态存在.

(2) 快速与慢速生物降解有机物在生物系统中均沿程降低, 慢速生物降解有机物在厌氧池、缺氧池中分解转化并被利用, 其中厌氧池对慢速生物降解有机物的转化效率最高, 而好氧池对快速生物降解有机物的去除效果最为明显, 慢速生物降解有机物在好氧池中主要随同活性污泥被沉淀去除.

(3) 在 2 h 内厌氧池和好氧条件慢速生物降解有机物转化效率分别为 33% 和 20%. 原水中只有

乙酸、丙酸与丁酸, 从 VFA 的种类及含量来看, 厌氧池与缺氧池的 VFA 均高于原水, 表明在生物池存在慢速生物降解有机物转化的现象.

(4) 对于原污水中高悬浮性有机物的污水处理厂而言, 应适当弱化一级处理单元功能以减少颗粒态碳源的流失, 并在 A^2/O 工艺厌氧、缺氧、好氧处理单元中提高厌氧、缺氧所占比例, 强化颗粒态碳源在厌氧、缺氧环境的水解转化, 达到提高系统脱氮除磷效率与节能降耗的目的.

参考文献:

- [1] Henze M, Gujer W, Mino T, et al. Activated sludge model No. 2D, ASM2D [J]. Water Science and Technology, 1999, 39 (1): 165-182.
- [2] Gujer W, Henze M, Mino T, et al. Activated sludge model No. 3 [J]. Water Science and Technology, 1999, 39 (1): 182-193.
- [3] 周振, 吴志超, 王志伟, 等. 基于批式呼吸计量法的溶解性 COD 组分划分 [J]. 环境科学, 2010, 30 (1): 75-79.
- [4] 黄满红, 李咏梅, 顾国维. 生活污水典型有机污染物与 ASMs 模型水质特性参数相关性研究 [J]. 环境科学, 2009, 30 (5): 1499-1505.
- [5] 邓科. 城市生活污水有机成分与 ASM 水质特性参数关系研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006. 5-15.
- [6] Hu Z Q, Chandran K, Smets B F, et al. Evaluation of a rapid physical-chemical method for the determination of extant soluble COD [J]. Water Research, 2002, 36 (3): 617-624.
- [7] 蒋敏, 周振, 麦穗海, 等. 污水中易生物降解有机物的测定方法及研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2010, 35 (7): 111-114.
- [8] 吴志超, 唐书娟, 周振. 慢速可生物降解有机物水解数学模

- 型的研究进展[J]. 工业水处理, 2009, **29**(5): 5-9.
- [9] Fan J, Tao T, Zhang J, *et al.* Performance evaluation of a modified anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O) process treating low strength wastewater [J]. *Desalination*, 2009, **249**(2): 822-827.
- [10] 肖凡, 顾国维. ASM1 中废水和污泥组分浓度的测定方法研究[J]. 环境科学与技术, 2003, **26**(S2): 1-3, 27.
- [11] 王可, 毛志伋. 基于 Matlab 实现最小二乘曲线拟合[J]. 北京广播学院学报(自然科学版), 2005, **12**(2): 52-56.
- [12] 付艳茹. 基于 MATLAB 曲线拟合的应用研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2010, (2): 55-58.
- [13] 李亚新, 周鑫, 赵义. A^2/O 工艺各段对焦化废水中难降解有机物的去除作用[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(14): 4-7.
- [14] 艾海男, 张代均, 何强, 等. 基于 ASM_2 的快速易生物降解 COD 组分表征方法构建[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(9): 2005-2008.
- [15] Melcer H, Dold P L, Jones R M, *et al.* Methods for wastewater characterization in activated sludge modeling[M]. Netherlands: Water Environment Research Foundation, 2004. 1-18.
- [16] Eastman J A, Ferguson J F. Solubilization of particulate organic matter during the acid-phase of anaerobic digestion [J]. *Water Pollute Control Federation*, 1981, **53**(3): 352-366.
- [17] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacterial by using three different types of electron acceptors[J]. *Water Research*, 2003, **37**(14): 3463-3471.
- [18] 徐伟锋, 陈银广, 顾国维, 等. A^2/O 污水处理工艺中基质转化机理研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2228-2232.
- [19] Abu-Ghararah Z H, Randall C W. The effect of organic compounds on biological phosphorus removal [J]. *Water Science & Technology*, 1991, **23**(4-6): 585-594.
- [20] Lie E, Christensson M, Jönsson K, *et al.* Carbon and phosphorus transformations in a full-scale enhanced biological phosphorus removal process [J]. *Water Research*, 1997, **31**(11): 2693-2698.
- [21] Hood C R, Randall A A. A biochemical hypothesis explaining the response of enhanced biological phosphorus removal biomass to organic substrates [J]. *Water Research*, 2001, **35**(11): 2758-2766.
- [22] 荣宏伟, 张可方, 张朝升. VFA 作为衡量生物除磷指标的研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2005, **21**(3): 288-291.
- [23] 由阳, 彭轶, 袁志国, 等. 富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养与特性[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2242-2248.
- [24] 豆俊峰, 罗固源, 刘翔. 生物除磷过程厌氧释磷的代谢机理及其动力学分析[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(9): 1164-1169.
- [25] 袁敏. 补充碳源生物脱氮除磷研究[D]. 上海: 同济大学, 2008. 2-12.
- [26] Rodríguez D C, Ramírez O, Mesa G P. Behavior of nitrifying and denitrifying bacteria in a sequencing batch reactor for the removal of ammoniacal nitrogen and organic matter [J]. *Desalination*, 2011, **273**(2-3): 447-452.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue, <i>et al.</i>	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing, <i>et al.</i>	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang, <i>et al.</i>	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang, <i>et al.</i>	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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@reces. 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@reces. 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