

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

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

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO ₂ 的来源	刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)
广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映	廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)
北京雾霾天气期间气溶胶光学特性	于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)
白马泉风景区夏季大气 PM _{2.5} 中二次有机物的初步研究	代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)
机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性	乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)
法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究	王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)
胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨	薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)
基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价	郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)
流域水质时空分布特征及其影响因素初析	黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)
潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究	崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)
春季盘溪水质日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)
西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究	肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)
三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价	郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)
淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究	徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)
三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验	王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)
沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征	李振伟, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)
合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性	李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)
鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析	张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)
三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价	敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)
黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价	刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)
竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算	姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)
雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析	赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)
中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究	潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)
三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征	邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)
海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究	田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)
新生态铁的混凝作用探索	杨雪, 张景成, 关小红 (1221)
饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究	岳婵媛, 缪恒峰, 任洪艳, 阮文权 (1227)
核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究	王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)
络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究	秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯奎 (1241)
赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物	张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)
掺氮 Ta ₂ O ₅ 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究	赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)
O ₃ /H ₂ O ₂ 降解水中扑灭通效能研究	李绍峰, 孙楚 (1260)
Pr-N 共掺杂 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿动力学	沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)
铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究	张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)
聚合铝铁对 A ² /O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响	温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)
温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响	张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)
温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响	李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)
好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究	王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)
除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析	李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)
利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌	王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)
紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究	于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)
1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究	陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)
氨氮对稀有鮕鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究	王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)
多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响	孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)
生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响	王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)
水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴ C连续标记法	聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)
油田污染土壤残油组成与特征参数分析	王坚, 张旭, 李广贺 (1352)
挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究	孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)
田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究	黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)
中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响	马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)
基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究	袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)
填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式	兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)
生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化	方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)
岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析	杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)
《环境科学》征订启事 (1062) 《环境科学》征稿简则 (1107) 信息 (1135, 1215, 1396)	

好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究

王硕¹, 于水利^{1,2*}, 时文歆¹, 暴瑞玲³, 衣雪松¹, 李建政¹

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 制糖工业废水经厌氧生物处理后, COD 大幅下降, 但是出水中 N、P 含量仍然较高, 严重破坏水体生态平衡. 利用好氧颗粒污泥对制糖工业废水的厌氧出水进行脱氮除磷处理, 讨论了其除磷过程. 经复合底物(乙酸盐、丙酸盐、丁酸盐)培养的好氧颗粒污泥直径 1.7 mm, SVI 为 38.43 mL·g⁻¹, TP 去除率达 90.9%, 出水磷含量仅为 1.3 mg·L⁻¹, 单位 COD 释磷率为 0.571, 厌氧条件下磷的释放速率达到 5.73 mg·(g·h)⁻¹, 好氧颗粒污泥表现出较好的沉淀性能和较高的除磷活性. 由于底物中丙酸盐、丁酸盐含量增加, 使得聚磷菌在反硝化过程中 NO₃⁻-N 的利用率增加, 即消耗单位质量的 NO₃⁻-N 可以吸收更多的磷. 好氧颗粒污泥及其胞外聚合物中 P 元素的含量与其中 Mg、Ca、Fe 元素的含量表现出很高的相关性, 胞外聚合物对 P 的吸附使得体系除磷能力进一步增强. 通过对污泥反硝化除磷的研究发现, 反硝化聚磷菌占总聚磷菌的 61.9%, 其吸磷量与消耗硝酸盐的比值 $[m(P)/m(NO_3^- - N)]$ 为 1.14.

关键词: 好氧颗粒污泥; 胞外聚合物; 除磷特性; 反硝化聚磷菌; 制糖工业废水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1293-06

Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment

WANG Shuo¹, YU Shui-li^{1,2}, SHI Wen-xin¹, BAO Rui-ling³, YI Xue-song¹, LI Jian-zheng¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: COD decreased obviously in normal molasses wastewater after anaerobic treatment, however, concentrations of nitrogen and phosphorus were still higher in the effluent which seriously damaged the ecological balance. In this study, aerobic granules cultivated in sequencing batch airlift reactor (SBAR) were carried out for treating the effluent; phosphorus removal processes and characteristics were discussed as well. The mean diameter of aerobic granules cultivated by multiple carbon sources (acetate, propionate and butyrate) was 1.7 mm. The average phosphorus removal efficiency was 90.9% and the level of phosphorus in effluent was only 1.3 mg·L⁻¹; TP released per COD consumed was 0.571 and the specific rate of TP released was 5.73 mg·(g·h)⁻¹. NO₃⁻-N usage of phosphorus accumulating organisms (PAOs) improved during denitrifying process because the concentration of propionate and butyrate increased in multiple carbon sources which means the phosphorus uptake efficiency increased when per NO₃⁻-N consumed. Phosphorus content represented a stronger correlation with magnesium, calcium and ferrum contents in aerobic granules and their extracellular polymeric substances (EPS), the phosphorus adsorption by EPS could enhance phosphorus removal. 61.9% of phosphorus accumulating organisms were denitrifying phosphorus accumulating organisms in aerobic granules and TP uptake per NO₃⁻-N consumed was 1.14 which was higher than that of aerobic granules only cultivated by acetate.

Key words: aerobic granules (AGS); extracellular polymeric substances (EPS); phosphorus removal characteristics; denitrifying phosphorus accumulating organisms; normal molasses wastewater

制糖工业废水具有高 COD 浓度, 高氮磷的特点, 其以糖蜜为主要成分, 易于被微生物降解. 目前, 大多数制糖厂采取厌氧发酵法对制糖工业废水进行处理, 并且已经形成工业化应用. 文献[1,2]已经成功利用制糖工业废水进行氢气的生产, 并取得了极好的效果, 其单位 COD 产氢量达到 0.30 mmol·g⁻¹. 近年来, 随着高效产酸发酵菌群, 高效产氢菌种^[3]的开发和应用, 实现了 COD 降解同时伴随着大量氢

气和甲烷的产生, 有效地实现了废水资源化. 然而, 经过厌氧生物处理的制糖工业废水, 其出水中磷含量较高, 排入水体后会引引起富营养化, 因此对厌氧生

收稿日期: 2011-06-30; 修订日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978068); 科技部国际合作项目(2010DFA92460); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07424-005)

作者简介: 王硕(1984~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为给水、污水、工业水处理, E-mail: dreamy2064@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: ysl@tongji.edu.cn

物处理后的制糖工业废水进行脱氮除磷十分必要。

好氧颗粒污泥是一种特殊的生物膜结构,因其具有良好的沉降性能,低成本,较高的生物量和处理效能而极具发展潜质。目前该技术已被广泛应用在生活污水,有毒有害废水,含重金属废水^[4~7]等多领域的处理中。De Kreuk 等^[8]利用好氧颗粒污泥对城市生活污水进行处理,获得了较高的氮磷同步去除效果,而且已经在中试试验中取得成功。好氧颗粒污泥的培养是制约其发展的关键,其对底物的要求较高,目前培养好氧颗粒污泥的底物以二碳、六碳化合物为主,以乙酸钠作为底物培养好氧颗粒污泥的较为常见,也有学者以葡萄糖、苯酚为底物培养出好氧颗粒污泥^[9],采用其它底物培养好氧颗粒污泥时,一方面污泥形成颗粒较为困难,另一方面污泥形成颗粒后也较容易解体。制糖工业废水的厌氧出水以乙酸、丙酸、丁酸为主^[10],而在实际培养好氧颗粒污泥的过程中却很少以乙酸盐、丙酸盐、丁酸盐为复合底物培养好氧颗粒污泥。

Liu 等^[11]在好氧颗粒污泥的研究中,发现其会产生大量 EPS,并认为 EPS 中的蛋白质成分是形成好氧颗粒污泥的重要因素,在颗粒中起骨架作用。污水中磷的去除是在聚磷菌和磷酸盐沉淀协同作用下完成的^[12]。好氧颗粒污泥因为在其内部存在温度、O₂ 梯度,有利于聚磷菌(包括反硝化聚磷菌)的生长和富集,研究表明^[13],在反硝化聚磷菌参与的除磷过程中,其除磷效果相当于总聚磷菌的 50%。近年来研究者^[14]发现在生物除磷系统中,其污泥胞外聚合物(EPS)中也存在相当数量的磷,而对于好氧颗粒污泥中 EPS 对磷的去除作用的报道却很少。

在本研究中,以乙酸钠、丙酸钠、丁酸钠为复合底物培养好氧颗粒污泥,考察了好氧颗粒污泥的性能及其除磷效果,并与以单一乙酸钠作为底物培养的好氧颗粒污泥的除磷效果进行比较。另外,也探讨了反硝化聚磷菌和 EPS 参与的制糖工业废水厌氧出水的除磷过程和效能。

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行

试验采用序批污泥气提式反应器(sequencing batch airlift reactor, SBAR)反应器,有效容积 8.0 L,控制曝气量为 $(0.20 \pm 0.01) \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,制糖工业废水的厌氧出水经过进水泵从反应器底部泵入,排水区域位于反应器中部,以保证排水量在 50%。反应器

运行周期为 6 h,其中闲置期 30 min,进水期 30 min,沉淀期 5 min,排水期 5 min,其余为曝气时间。

1.2 种泥和废水

试验污泥取自哈尔滨市某污水处理厂,污泥浓度 $2.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验用水参考制糖工业废水的厌氧出水自行配制,每个周期进水 4.0 L,水质主要成分如下($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$):乙酸钠 600,丙酸钠 200,丁酸钠 300, NH_4Cl 400, KH_2PO_4 30, K_2HPO_4 60, MgSO_4 40, CaCl_2 80, EDTA 40, NaHCO_3 100, 对应 COD、TN、TP 浓度分别为 1 200、65、15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。另外添加微量元素液 $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$,其成分^[15]如下($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.5, H_3BO_3 0.15, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.03, KI 0.03, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.12, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.06, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.12, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.15。

1.3 分析方法

COD、TN、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、TP、MLSS 和污泥体积指数(sludge volume index, SVI)通过标准方法进行测定^[16]。颗粒污泥形态通过 SEM (S-4300N, Japan)进行观察。乙酸盐、丙酸盐、丁酸盐浓度通过气相色谱仪(Model-112)进行测定^[17]。好氧颗粒污泥的粒径分布采用 Bao 等^[9]所述的筛分法进行测定。EPS 的提取采用 Adav 等^[18]的方法,其主要成分多糖类和蛋白质成分采用文献[19,20]的测定方法。好氧颗粒污泥内及其 EPS 中各元素含量采用 ICP(Perkin-Elmer, Optimas 5300)进行测定。好氧颗粒污泥及其 EPS 内金属元素与 P 的相关性采用 Excel Correl 软件进行分析。

1.4 反硝化聚磷菌数量

好氧颗粒污泥培养成熟后,取出部分污泥用自来水冲洗后放入 3 个烧杯中,加入制糖工业废水的厌氧出水,然后分别向其中投加 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_2^-$ -N、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NO}_3^-$ -N 及以 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 曝气,通过反硝化吸磷速率来确定反硝化聚磷菌数量。

2 结果与分析

2.1 好氧颗粒污泥的形成

SBAR 启动 9 d 后有颗粒出现并逐步生长,随着沉降性能较差的污泥被冲出反应器,至第 30 d 成熟稳定的好氧颗粒污泥形成,其呈微黄色,结构紧密,表面存在大量通道以供传质传氧(图 1)。培养成熟的好氧颗粒污泥其粒径在 0.5 ~ 2.5 mm 的颗粒所占比最大,占总污泥质量分数的 76.4%,颗粒污泥平均粒径 1.7 mm, SVI 38.43 $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$,污泥浓度 $3.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

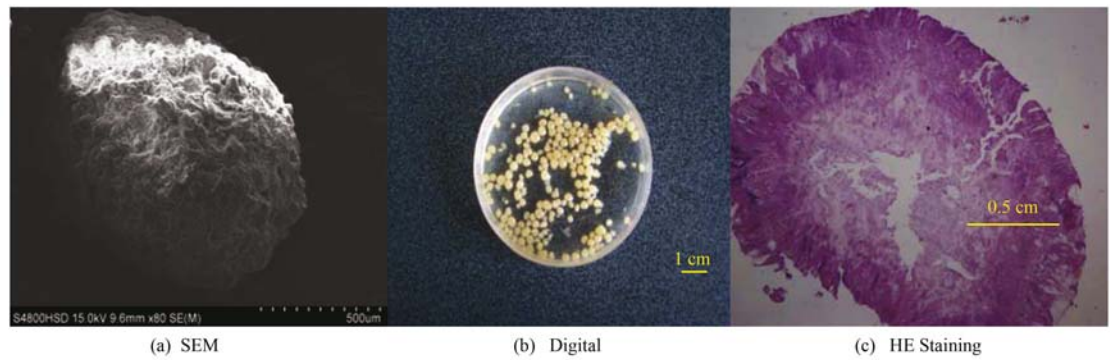


图1 好氧颗粒污泥形态

Fig. 1 Morphology of aerobic granules

2.2 SBAR 的运行

由于污泥从污水处理厂取回后在 4℃ 下保存数日,因此在其接入 SBAR 后,其对 COD、TN、TP 的去除能力相对较差. 经过 14 d 的驯化培养,活性污泥对 COD、TN、TP 的去除能力逐渐提高. 待好氧颗粒污泥驯化成熟后,反应器内 COD、TN、TP 去除率分别达到 88.5%、79.4%、90.9% (图 2, 3),实现了 C、N、P 的高效同步去除,出水中 P 的含量只有 1.3 mg·L⁻¹,同步硝化与反硝化效率为 83.4%,同时硝

化与反硝化速率达到 0.49 mmol·(L·h)⁻¹. 单位 COD 释磷率为 0.571,厌氧条件下磷的释放速率达到 5.73 mg·(g·h)⁻¹.

3 讨论

3.1 复合底物培养好氧颗粒污泥的除磷性能

污水中的有机质对于聚磷菌的释磷有很大影响. 在不同的外碳源条件下,聚磷菌对其内部磷的释放与吸收外碳源合成体内贮存物的类型有明显的差异. 磷的释放取决于厌氧进水中有机质的性质而不是单独的厌氧状态本身(图 4 和表 1).

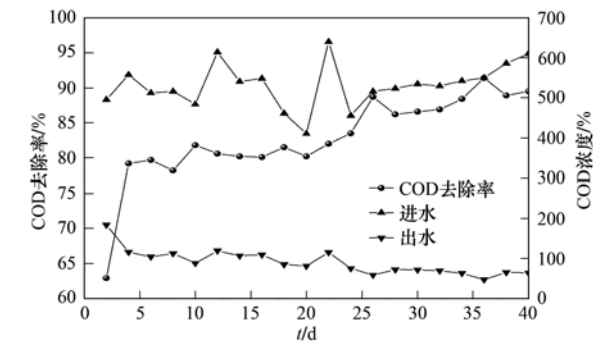


图2 好氧颗粒污泥培养过程中 COD 的变化

Fig. 2 Variations of COD in the formation process of aerobic granules

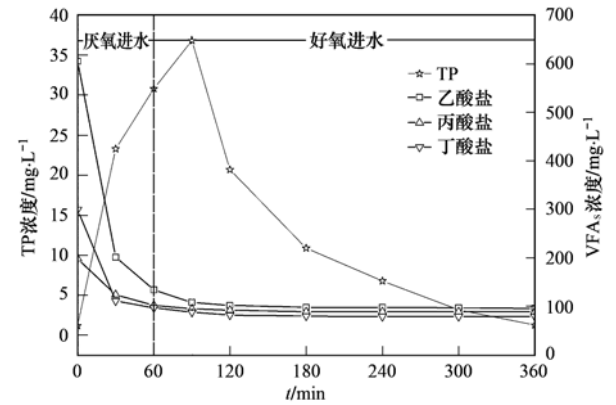


图4 复合碳源培养的好氧颗粒污泥的除磷规律

Fig. 4 TP removal of aerobic granules by mutple carbon sources

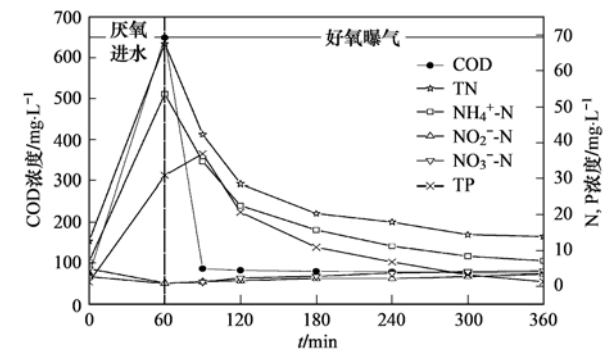


图3 完整周期内 COD、TN、TP 变化趋势

Fig. 3 Variations of COD, TN and TP in the whole cycle

表 1 不同底物培养的好氧颗粒污泥的除磷特性对比

Table 1 TP removal characteristics of aerobic granules by different carbon sources

项目	乙酸盐	乙酸盐、丙酸盐、丁酸盐
厌氧段释磷量/mg·L ⁻¹	31.2	36.8
好氧段吸磷量/mg·L ⁻¹	23.7	34.3
NO ₃ ⁻ -N消耗量/mg·L ⁻¹	26.9	30.0
吸磷量/NO ₃ ⁻ -N消耗量	0.88	1.14
TP 去除率/%	85.9	90.9

由于 SBAR 中颗粒的粒径较大,而污泥浓度为

$3.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对于絮状污泥颗粒污泥的比表面积大幅减小, 颗粒污泥对 COD 等有机质的吸附能力较小. 厌氧阶段总磷释放量为 $36.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 其平均磷的释放速率为 $9.95 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 与 Wang 等^[21] 在 A_2N 系统及 Hu 等^[22] 在 SBR 系统中以乙酸盐为碳源得出的磷的释放速率略小. 在反应释磷结束后投加 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 好氧段磷的吸收速率较小, 为 $8.58 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$, 远小于 A_2N 系统的 $18.99 \sim 23.36 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 这主要是由于颗粒内部的传质限制^[23], 另一方面好氧颗粒污泥没有经过好氧吸磷的驯化. 而在 AO 运行的絮状污泥系统中污泥的反硝化吸磷速率只有 $3.0 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 可见由于好氧颗粒污泥内部溶解氧扩散限制的影响, 颗粒污泥内部存在利于反硝化聚磷菌生长的环境^[24]. 反硝化吸磷过程中(图 5), 吸磷量为 $34.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 硝酸盐的消耗量为 $30.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 因此吸磷量与消耗的硝酸盐的比值 $[m(\text{P})/m(\text{NO}_3^- - \text{N})]$ 为 1.14, 而反硝化聚磷菌的吸磷量与硝酸盐的消耗量比值为 2.10^[21], 因此, 本试验中反硝化聚磷菌吸收 $34.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的磷只需要 $16.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$, 所以有 $13.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是通过反硝化作用去除的.

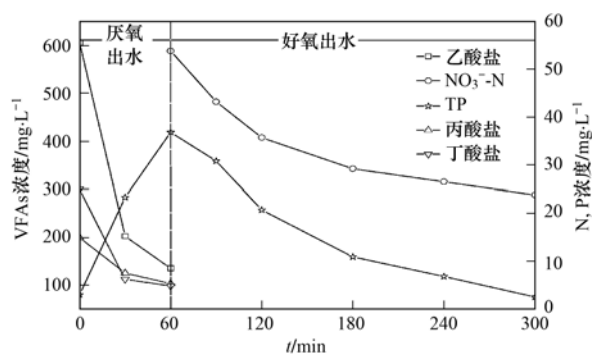


图 5 好氧颗粒污泥的反硝化除磷过程

Fig. 5 Denitrifying phosphorus removal process of aerobic granules

与利用乙酸盐为底物培养的好氧颗粒污泥相比, 由于基质中丙酸盐、丁酸盐含量的增加^[25], 聚磷菌在反硝化过程中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的利用率增加, 即消耗单位质量的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可以吸收更多的磷. 另外, 在以乙酸盐为底物培养好氧颗粒污泥时, 出现了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累现象, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量为 $4.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[9], 之后 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度逐渐减小消失. 而在其它碳源条件下, 并没有出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累. 利用乙酸盐、丙酸盐、丁酸盐复合底物培养的好氧颗粒污泥具有较高的碳氮磷同步去除特性, 其 TP 去除率可以达到 90.9%, 与 Wang

等^[21] 和 Chen 等^[25] 在常温以及 Bao 等^[7,9] 和 De Kreuk 等^[8] 在低温条件下取得的除磷效果较为接近. 图 6 描述了好氧颗粒污泥除磷过程中 PHAs 的变化情况, 在聚磷菌释磷过程中, PHA 和 PHB 含量显著增加, 说明聚磷菌利用外源有机物储存在体内合成 PHA; 在聚磷菌吸磷过程中, PHA 和 PHB 含量都逐渐降低, 表明聚磷菌细胞内 PHA 和 PHB 的好氧代谢提供大量能量, 使得聚磷菌可以达到超量吸磷的除磷效果. 同时, 在聚磷菌的除磷过程中, PHV 和 PH2MV 的变化较小, 说明 PHB 在聚磷菌除磷过程中起主要作用.

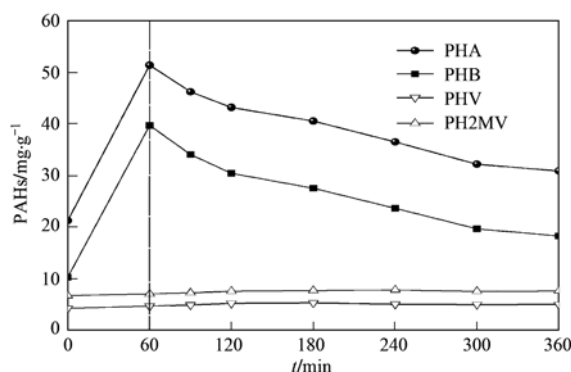


图 6 除磷过程中 PHAs 的变化

Fig. 6 Variation of PHAs in phosphorus removal

3.2 EPS 除磷

EPS 在好氧颗粒污泥的形成中起重要作用, 其主要成分多糖类物质和蛋白质有助于黏附微生物使其聚集而形成颗粒^[26]. 普通活性污泥中的磷含量为 1.5% ~ 2.0%, Cloete 等^[14] 在研究中发现污泥 EPS 中也存在相当数量的磷, 使磷的含量提高到 5% ~ 7%^[27]. SBAR 运行稳定后, 考察磷在颗粒内部的去除, 通过对颗粒及其 EPS 中各元素的分析(表 2)发现, 其内磷的含量分别达到 $14.293 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $18.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 如表 2 所示, P 元素含量与 Mg、Ca、Fe 元素含量表现出很高的相关性, 相关系数分别为 0.9999、0.9212、0.9749 和 0.9768、0.9971、0.9963. EPS 内(以 MLSS 计)多糖类物质含量为 $10.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 蛋白质含量 $3.97 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ $[m(\text{PN})/m(\text{PS}) = 0.40]$, 其对磷具有较强的吸附作用. SBAR 内 pH 始终维持在 8.0 ~ 8.2 (闲置期和进水期 pH 一般在 7.8 ~ 7.9), 在颗粒内部 EPS 吸附及生物诱导作用可以生成磷酸盐沉淀. 因此, 在颗粒污泥内部存在着除聚磷菌的过量吸磷以外的多种磷的去除形式.

表 2 好氧颗粒污泥内及其 EPS 中元素分析

Table 2 Elements analysis in aerobic granules and their EPS

项目	Mg/mg·kg ⁻¹	Ca/mg·kg ⁻¹	Fe/mg·kg ⁻¹	P/mg·kg ⁻¹
颗粒污泥 (40 d)	2 083	8 872	1 401	8 839
颗粒污泥 (50 d)	2 381	10 261	1 475	12 051
颗粒污泥 (60 d)	2 584	14 793	1 589	14 293
相关系数	0.999 9	0.921 2	0.974 9	

项目	Mg/mg·L ⁻¹	Ca/mg·L ⁻¹	Fe/mg·L ⁻¹	P/mg·L ⁻¹
EPS (40 d)	1.105	10.31	2.552	10.06
EPS (50 d)	1.317	11.60	3.260	15.17
EPS (60 d)	1.640	12.29	3.624	18.81
相关系数	0.976 8	0.997 1	0.996 3	

3.3 反硝化聚磷菌除磷

好氧颗粒污泥培养驯化成熟后,分别以NO₂⁻-N、NO₃⁻-N和 O₂ 作为电子受体进行反硝化除磷研究 (图 7),其反硝化吸磷速率分别为 0.91、1.22 和 1.55 mg·(g·h)⁻¹,通过 Hu 等^[22]的方法计算,反硝化聚磷菌占总聚磷菌的比例为 61.9%. 而在 Lee 等^[24]的试验中,厌氧/好氧方式运行的絮状污泥反应器中,反硝化聚磷菌只占总聚磷菌的 11%,而在运行期间加入缺氧阶段形成的(AO)₂SBR,反应器中反硝化聚磷菌的比例为 64%. 可见,在厌氧/好氧运行的 SBAR 内,在颗粒污泥内部积累了较高比例的反硝化聚磷菌^[13]. 颗粒污泥内部的基质与溶解氧的传输限制,使其内部不同的微环境更有利于反硝化聚磷菌的生长^[24],因此,在厌氧/好氧条件下培养得到的好氧颗粒污泥内部仍然具有较高的反硝化聚磷菌比例.

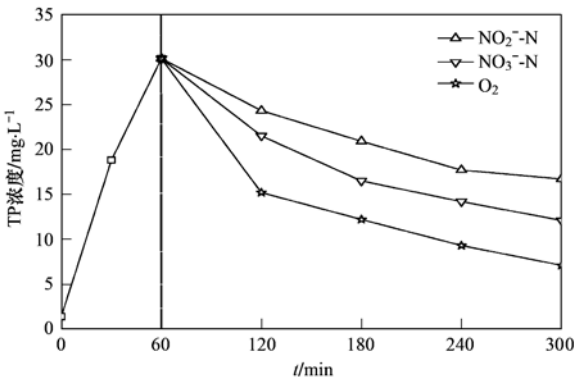


图 7 不同电子受体对反硝化吸磷的影响

Fig. 7 Effects of different electron acceptors on denitrifying phosphorus removal

4 结论

(1)利用乙酸盐、丙酸盐、丁酸盐为底物经培养的好氧颗粒污泥直径 1.7 mm, SVI 为 38.43 mL·g⁻¹,并且表现出较好的沉降能力和较高的除磷

能力,TP 去除率达 90.9%,出水磷含量仅为 1.3 mg·L⁻¹;单位 COD 释磷率为 0.571,厌氧条件下磷的释放速率达到 5.73 mg·(g·h)⁻¹.

(2)由于制糖工业废水厌氧出水底物较为复杂,废水中丙酸盐、丁酸盐含量的增加使得聚磷菌在反硝化过程中NO₃⁻-N的利用率增加,即消耗单位质量的NO₃⁻-N可以吸收更多的磷.

(3)好氧颗粒污泥及其 EPS 中 P 元素的含量分别为 14 293 mg·kg⁻¹和 18.81 mg·L⁻¹,其含量与 Mg、Ca、Fe 元素的含量表现出很高的相关性,好氧颗粒污泥可以通过 EPS 吸附而提高除磷效能.

(4)通过对污泥反硝化除磷的研究发现,反硝化聚磷菌占总聚磷菌的 61.9%,其吸磷量与消耗的 NO₃⁻-N 的比值 [m (P)/m (NO₃⁻-N)] 为 1.14. 好氧颗粒污泥内部的基质与溶解氧的传输限制,使其内部不同的微环境有利于反硝化聚磷菌的生长,因此,在厌氧/好氧条件下培养得到的好氧颗粒污泥内部仍然具有较高的反硝化聚磷菌比例.

参考文献:

[1] Ren N Q, Li J Z, Li B K, *et al.* Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, **31** (15): 2147-2157.

[2] Li J Z, Li B K, Zhu G F, *et al.* Hydrogen production from diluted molasses by anaerobic hydrogen producing bacteria in an anaerobic baffled reactor (ABR) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, **32**(15): 3274-3283.

[3] Xing D F, Ren N Q, Wang A J, *et al.* Continuous hydrogen production of auto-aggregative *Ethanoligenens harbinense* YUAN-3 under non-sterile condition [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, **33**(5): 1489-1495.

[4] Moy B Y P, Tang J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules [J]. Letters Applied Microbiology, 2002, **34**(6): 407-412.

[5] Jiang H L, Tay J H, Tay S T L. Changes in structure, activity

- and metabolism of aerobic granules as a microbial response to high phenol loading [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2004, **63**(5): 602-608.
- [6] Xu H, Liu Y, Tay J H. Effect of pH on nickel biosorption by aerobic granular sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2005, **97**(3): 359-363.
- [7] Bao R L, Yu S L, Wu J P, *et al.* Contaminants conversion processes and removal by aerobic granular sludge at low temperature [J]. *Journal of Biotechnology*, 2008, **136**: S670.
- [8] De Kreuk M K, Pronk M, Van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperature [J]. *Water Research*, 2005, **39**(18): 4476-4484.
- [9] Bao R L, Yu S L, Shi W X, *et al.* Aerobic granules formation and nutrients removal characteristics in sequencing batch airlift reactor (SBAR) at low temperature [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **168**(2-3): 1334-1340.
- [10] Li J Z, Ren N Q, Li B K, *et al.* Anaerobic biohydrogen production from monosaccharides by a mixed microbial community culture [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(14): 6528-6537.
- [11] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. *Applied Microbiology Biotechnology*, 2004, **65**(2): 143-148.
- [12] Frijters C T M J, Eikelboom D H, Mulder A. Treatment of municipal wastewater in a circox airlift reactor with integrated denitrification [J]. *Water Science Technology*, 1997, **36**(1): 173-181.
- [13] Kuba T, Van Loosdrecht M C M, Brandse F A, *et al.* Occurrence of denitrifying phosphorus removing bacteria in modified UCT-type wastewater treatment plants [J]. *Water Research*, 1997, **31**(4): 777-786.
- [14] Cloete T E, Oosthuizen D J. The role of extracellular exopolymers in the removal of phosphorus from activated sludge [J]. *Water Research*, 2001, **35**(15): 3595-3598.
- [15] Smolders G J F, Klop J M, Van Loosdrecht M C M, *et al.* A metabolic model of the biological phosphorus removal process. I. Effect of the sludge retention time [J]. *Biotechnology Bioengineering*, 1995, **48**(3): 222-233.
- [16] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. (20th ed). Washington DC: American Public Health Association, 1998.
- [17] Li J Z, Zheng G C, He J G, *et al.* Hydrogen-producing capability of anaerobic activated sludge in three types of fermentations in a continuous stirred-tank reactor [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, **27**(5): 573-577.
- [18] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [19] Frolund B, Griebe T, Nielsen P H. Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1995, **43**(4): 755-761.
- [20] Lowry O H, Rowebrough N J, Farr A L, *et al.* Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**(1): 265-275.
- [21] Wang Y Y, Peng Y Z, Stephenson T. Effect of influent nutrient ratios and hydraulic retention time (HRT) on simultaneous phosphorus and nitrogen removal in a two-sludge sequencing batch reactor process [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(14): 3506-3512.
- [22] Hu J Y, Ong S L, Ng W J, *et al.* A new method for characterizing denitrifying phosphorus removal bacteria by using three different types of electron acceptors [J]. *Water Research*, 2003, **37**(14): 3463-3471.
- [23] Beun J J, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor [J]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 702-712.
- [24] Lee D S, Jeon C O, Park J M. Biological nitrogen removal with enhanced phosphate uptake in a sequencing batch reactor using single sludge system [J]. *Water Research*, 2001, **35**(16): 3968-3976.
- [25] Chen Y G, Chen Y S, Xu Q, *et al.* Comparison between acclimated and unacclimated biomass affecting anaerobic-aerobic transformations in the biological removal of phosphorus [J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(2): 723-732.
- [26] McSwain B S, Irvine R L, Hausner M, *et al.* Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(2): 1051-1057.
- [27] Wang Y Y, Jiang F, Zhang Z X, *et al.* The long-term effect of carbon source on the competition between polyphosphorus accumulating organisms and glycogen accumulating organism in a continuous plug-flow anaerobic/aerobic (A/O) process [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 98-104.

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO ₂ by Carbon Isotope Composition	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM _{2.5} Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ ¹⁵ N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River	 CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period	 GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area	 WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta	 LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment	 WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta ₂ O ₅	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O ₃ /H ₂ O ₂	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO ₂ Photocatalyst	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A ² /O System	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (<i>nosZ</i>)	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow	WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

《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4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 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. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人