

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

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 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响

刘小鹏¹, 王建芳^{1,2,3}, 钱飞跃^{1,2,3}, 王琰¹, 陈重军^{1,2,3}, 沈耀良^{1,2,3*}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技学院江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 本研究在柱形 SBR 反应器中接种市政污水厂活性污泥, 以乙酸钠为碳源, 考察了逐步提高进水有机负荷 (OLR) 对好氧颗粒污泥 (AGS) 形成的影响, 并分析了污泥外观形态、微生物活性与胞外聚合物 (EPS) 组成的演化规律。结果表明, 当进水 OLR 在 $3.20 \sim 4.84 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 污泥粒径的增长速率最快。更高的 OLR 将导致絮状污泥的大量出现, 需辅以应急性排泥, 才能保持 AGS 在反应器中的主导地位。成熟 AGS 的污泥浓度 (MLSS)、污泥体积指数 (SVI_{30})、平均粒径、沉降速率和比耗氧速率 (SOUR) 分别达到 $23.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 1.4 mm 、 $102 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $50.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。污泥颗粒化过程不仅使污泥形态发生了根本变化, 也显著增强了微生物活性。在此期间, 胞外聚合物中 PN、PS 含量的变化对生物量累积、颗粒生长表现出良好的响应关系。充分发挥 EPS 组分的指示功能, 将有助于优化现有 AGS 的培养方法。

关键词: 好氧颗粒污泥; 有机负荷; 颗粒粒径; 微生物活性; 胞外聚合物

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3352-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.030

Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge

LIU Xiao-peng¹, WANG Jian-fang^{1,2,3}, QIAN Fei-yue^{1,2,3}, WANG Yan¹, CHEN Chong-jun^{1,2,3}, SHEN Yao-liang^{1,2,3*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of organic loading rate (OLR) on the formation of aerobic granular sludge (AGS), a lab-scale cylindrical SBR reactor (sodium acetate as carbon source) was constructed and inoculated with collected sewage sludge. The evolution of morphology, microbial activity and extracellular polymeric substances (EPS) characteristics of sludge samples in the reactor were recorded and analyzed. The results showed that AGS has the highest growth rate under the condition of $3.20 \sim 4.84 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ OLR, and a selective discharging strategy of the floccular sludge was suggested to maintain the predominance of AGS in reactor. The accumulated sludge concentration, SVI_{30} , mean granule size, settling velocity and SOUR value of the AGS in steady-state operated SBR was $23.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $20 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 1.4 mm , $102 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ and $50.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The granulation process not only obviously changed the sludge appearance, but also significantly improved the microbial activity. Meanwhile, linear correlation was observed between the variation of protein/polysaccharide concentration and the granule size of AGS. Thus, variation of protein/polysaccharide concentration of the EPS could be applied as an indicator for optimization of the cultivation method of AGS.

Key words: aerobic granular sludge; organic loading rate; mean granule size; microbial activity; extracellular polymeric substances

污泥颗粒化是微生物自凝聚与固定化的一种形式^[1]。与普通活性污泥相比, 好氧颗粒污泥 (AGS) 具有结构稳定、沉降性能好、微生物量大、耐冲击负荷和毒性等优点, 但 AGS 的培养过程比较复杂^[2~4]。众多研究表明, 接种污泥性质、有机负荷、沉降时间、剪切力和 pH 条件等都能显著影响颗粒污泥的形成过程与最终性能^[5~9]。

其中, 合理控制有机负荷 (OLR) 对于协调生物量累积与颗粒生长过程至关重要。当进水 OLR 很低时, 微生物增殖速率缓慢, 很难在较强的水力剪切环境中形成聚集体^[10]。Ni 等^[11] 利用 COD 为 $170 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的低浓度生活污水, 历时 300 d 才培养出平

均粒径约 0.8 mm 的好氧颗粒污泥。相反地, 当进水 OLR 达到 $6 \sim 9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 微生物快速增殖, AGS 表面易形成较大厚度的松散层, 使其沉降性能降低^[12]。尽管 López-Palau 等^[13] 在 OLR 为 $22.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的极高负荷条件下成功实现了污泥颗粒化, 但此时维持反应器的稳定运行已变得相当困难。Long 等^[14] 的研究表明, 当进水 OLR 升至 15

收稿日期: 2015-01-29; 修订日期: 2015-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51308367); 江苏省高校自然科学基金项目 (14KJB610008, 14KJB610009); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 刘小鹏 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向废水生物处理理论与技术, E-mail: LXP6486@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ylshenniu@126.com

$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 以上时, AGS 内部“厌氧核”将变得不稳定, 颗粒结构强度被严重削弱, 极易发生解体。

为进一步验证 OLR 在好氧颗粒污泥培养过程中的特殊作用, 本研究在柱形 SBR 反应器中接种絮状活性污泥, 以乙酸钠为碳源, 考察了逐步提高进水 COD 负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响, 并通过分析污泥形态、微生物活性与 EPS 组成的演化规律, 阐明了不同进水 OLR 条件下, 生物量累积与颗粒生长之间的相互关系。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行工况

实验装置图如图 1 所示, 采用有机玻璃材质的圆柱形 SBR 反应器, 其内径为 7 cm, 有效容积为 3.9 L ($H/D = 14.28$)。在反应器底部设置曝气装置, 控制曝气量为 $2.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 表面上升流速约为 $1.1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过时间程序控制器设置反应周期, 单个周期为 3 h。其中, 进水 5 min, 反应 170 min, 除应急性排泥期间 (第 98 ~ 102 d) 沉降时间缩短至 2 min 以外, 正常沉降时间为 5 min, 其余为排水、闲置时间, 排水比为 2/5。反应温度控制在 $28 \sim 32^\circ\text{C}$ 。

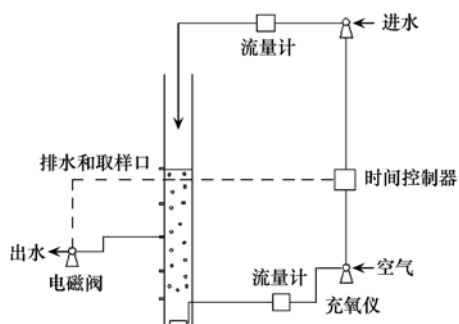


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the lab-scale SBR

1.2 接种污泥与用水

本研究所使用的接种污泥取自苏州某市政污水处理厂氧化沟内, 呈灰褐色絮状。种泥经 24 h 闷曝、静置浓缩后, 加至 SBR 反应器中, 使 MLSS 为 $6.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 其 MLVSS/MLSS (F 值) 为 0.47, SVI_{30} 约 $73 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

进水采用与刘文如等^[15] 相同成分的人工配水, 以乙酸钠和氯化铵分别作为碳源和氮源, 用碳酸氢钠调节碱度, pH 控制在 7.8 ~ 8.0 之间。在好氧颗粒污泥的培养过程中, 进水有机负荷逐步从 $0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高至 $5.12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

1.3 分析方法

(1) 化学需氧量 (COD)、悬浮固体浓度 (MLSS)、挥发性悬浮固体浓度 (MLVSS)、污泥体积指数 (SVI_5 和 SVI_{30}) 等指标采用国家标准方法测定^[16], pH 采用赛多利斯酸度计测定, 溶解氧 (DO) 浓度采用多水质分析仪 (903P 般特) 测定, 污泥形态通过 OLYMPUS CX41 型显微镜观察, 颗粒污泥沉降速率采用清水静沉测速法测定。

(2) 絮状污泥平均直径使用 LeicaDM2500 显微镜测定。颗粒污泥的粒径分布采用筛分法测定^[17], 使用孔径分别为 1.6、1.25、0.8、0.5 和 0.3 mm 的分样筛, 计算截留在筛网上的污泥质量百分比, 通过加权平均计算平均粒径。

(3) 胞外聚合物 (EPS) 的提取与测定: 污泥 EPS 采用甲醛-NaOH 法提取^[18]。蛋白质采用 Lowry 法测定, 以牛血清蛋白作为标准物质^[19]。多糖采用苯酚-硫酸法测定, 以葡萄糖作为标准物质^[20]。利用污泥干重 (以 MLVSS 计), 对 EPS 组分含量进行单位化, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

(4) 比耗氧速率 (SOUR) 的测定: 从反应器中取出一定量污泥, 经超纯水冲洗后在 $3300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 5 min, 弃去上清液, 重复以上操作 3 次。随后, 将污泥装入 250 mL 标准 BOD 瓶中, 并用 DO 接近饱和状态的基质溶液充满, 基质配方与张子健等^[21] 相同。在密闭条件下, 定期记录 DO 浓度读数变化。利用最小二乘法拟合计算耗氧速率 (OUR)。比耗氧速率 (SOUR) 即为 OUR 与 MLVSS 的比值, 单位为 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。

(5) 相关计算公式

在相同有机负荷条件下, 污泥粒径增长速率

$$(\mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}) = \frac{D_x - D_y}{\text{运行时间}(\text{d})}$$

式中, D_x 为第 x 天平均粒径, 单位 mm; D_y 为第 y 天平均粒径, 单位 mm; 运行时间为 $(x - y)$, 单位 d。

2 结果与分析

2.1 颗粒污泥形成过程中性能的变化

在为期 125 d 的好氧颗粒污泥培养过程中, 通过逐步提高进水 OLR, 反应器内污泥量呈现总体上升的趋势, 见图 2(a)。需要指出的是, 在第 90 ~ 97 d, 对应 OLR 为 $4.48 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 反应器内出现了大量沉降性能较差的白色絮状污泥。为了防止絮状污泥在基质竞争中占居优势, 保持颗粒污泥在反应器中的主导地位, 需暂时缩短 SBR 沉降时间, 进

行应急性排泥操作. 待稳定后, 将进水 OLR 提高至 $5.12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 污泥浓度持续累积, MLSS、MLVSS 升至峰值 $23.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $13.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 分别为接种污泥的 4.0 倍和 4.6 倍.

另外, 反应器在 OLR 为 $0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 条件下运行 7 d 后, 污泥出现沙化, 沉降性能明显改善, SVI_{30} 由最初的 $86 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 $51 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, 如图 2 (b) 所示. 运行至第 84 d, 污泥 SVI_{30} 稳定在 $15 \sim 20 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. Mañas 等^[22]指出, $\text{SVI}_5/\text{SVI}_{30}$ 值越接近 1.0 意味着污泥颗粒化程度越高. 在本研究中, 成熟颗粒污泥的 $\text{SVI}_5/\text{SVI}_{30}$ 值约为 1.1, 平均沉降速率达到 $102 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, 在 $30 \sim 112 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 的文献数据中处于顶尖水平^[12,23,24].

由图 2(c) 可知, 尽管 OLR 在整个培养过程中提高了近 8 倍, 但污泥对 COD 的去除率始终呈现稳步上升的趋势, 由最初的 65% 增至 90% 以上. 即使是在第 98 ~ 102 d 的应急性排泥阶段, MLSS 由 $19.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $6.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器对 COD 的去除率仍维持在 $(93 \pm 3)\%$, 絮状污泥的排出并未明显削弱 SBR 的除污能力. 如图 2(d) 所示, 反应器对有机物的去除负荷 (ORR) 与进水 OLR 呈现良好的线性正比关系. 这意味着污泥颗粒化过程不仅使污泥形态发生了根本变化, 也显著增强了反应器的除污效能.

2.2 OLR 对污泥颗粒生长的影响

图 3 给出了不同 OLR 条件下, 污泥的粒径分布与平均粒径增长速率. 在第 11 d, 污泥仍呈现絮状, 平均直径仅为 0.22 mm . 当进水 OLR 由 $0.96 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 逐步提高至 $2.56 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 反应器内 MLVSS/MLSS 值由 45.5% 上升至 65.3%, 粒径在 $0 \sim 0.3 \text{ mm}$ 的污泥质量百分比由 59.2% 增至 76.0%, 而粒径在 0.5 mm 以上的 MLSS 始终稳定在 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 污泥平均粒径的增长速率为负值. 这意味着当 OLR 较低时, 提高进水 COD 浓度有利于微生物增殖形成微小聚集体, 但不能有效促进粒径较大污泥的生长^[25]. 当进水 OLR 升至 $3.20 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $3.84 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 污泥平均粒径的增长速率分别达到 $27.8 \mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $60.0 \mu\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$, 粒径 0.5 mm 以上的颗粒状污泥开始占主导. 然而, 在更高的 OLR 条件下, AGS 的粒径增长速率迅速放缓, 平均粒径达到 $1.2 \sim 1.4 \text{ mm}$, 污泥结构变得更加密实. 在第 115 d, OLR 为 $5.12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 粒径 0.5 mm 以上的污泥质量百分比为 98.5%, 1.6 mm 以上的大颗粒质量百分比达到 22.6%.

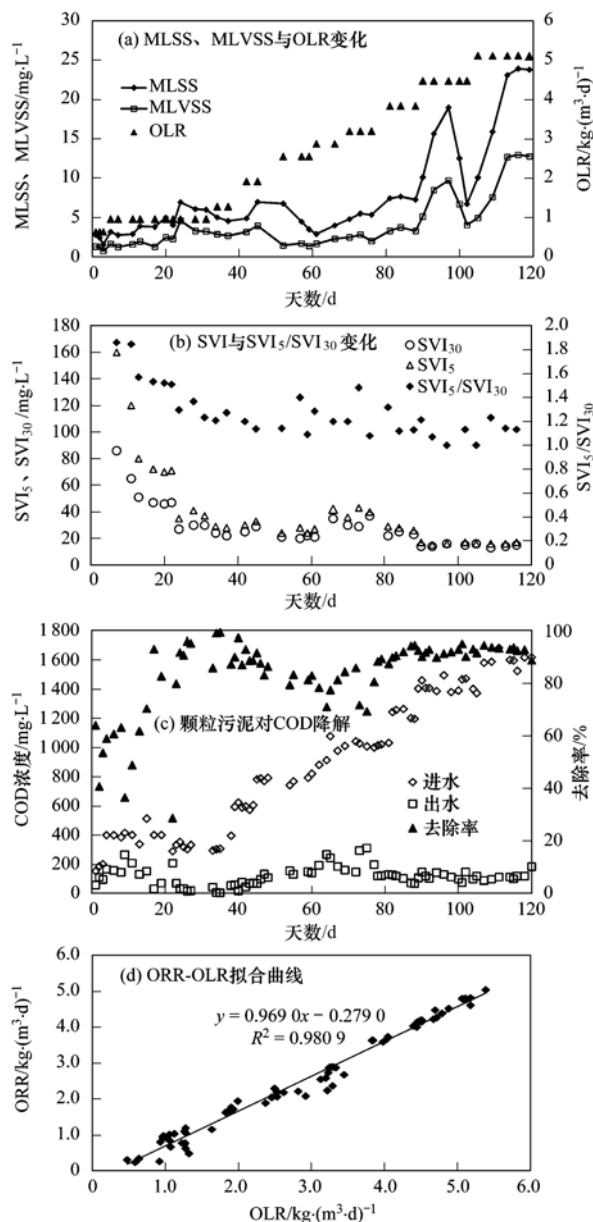


图2 不同有机负荷条件下, 污泥性状与反应器效能的变化过程

Fig. 2 Performance of the SBR reactor and the variation of biochemical characteristics of sludge under different OLR conditions

在本研究中, 根据污泥的性状差异, 将培养过程分为以下 4 个阶段, 如表 1 所示.

在第 I、II 期, 沉降性能良好的絮状污泥相互凝聚, 逐渐形成结构密实、形状规则的小颗粒, 如图 4(a) ~ 4(c) 所示. 在中等 OLR 条件下, 微生物活性 (SOUR) 大幅提高, 生物量 (MLSS) 累积速率加快, 污泥颗粒变得膨松且不规则, 呈棉花状, 表面有明显的丝状菌包裹, 见图 4(d). Tay 等^[10]的研究表明, 提供较高的 COD 浓度和足够的水力剪切力, 有助于降低 AGS 表面及内部的传质阻力, 显著改善颗粒密实度. 随着反应器内 MLSS 的持续增长, 进一步提

表 1 污泥颗粒化过程中,各阶段的污泥特性

Table 1 Sludge characteristics under different states of the granulation process				
运行阶段	絮体聚集期(Ⅰ)	颗粒初期(Ⅱ)	颗粒生长期(Ⅲ)	颗粒成熟期(Ⅳ)
运行时间/d	1~7	8~41	42~95	96~125
OLR/kg·(m ³ ·d) ⁻¹	0.64~0.96	0.96~1.28	1.92~4.48	4.48~5.12
污泥颜色	灰褐色	乳白色	白色	淡黄色
沉降速率/m·h ⁻¹	1.6~2.1	9.2~18.7	31.7~63.0	99.3~105.6
SOUR/mg·(g·h) ⁻¹	12.1~18.5	27.5~37.1	35.8~40.9	50.1~50.3

高进水 OLR,可充分利用丝状菌的骨架作用,形成稳定的颗粒结构,如图 4(f)所示. 由表 1 可知,成熟颗粒污泥的沉降速率、SOUR 值分别比接种污泥提高了 50 倍和 3 倍,微生物聚集度与活性均大幅提高.

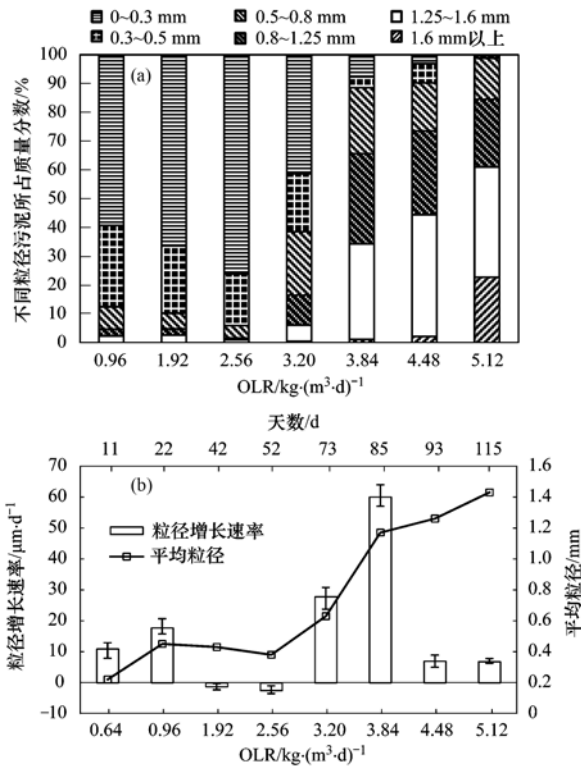


图 3 不同有机负荷条件下,污泥粒径分布与平均粒径的变化过程

Fig. 3 Variation of size distribution of sludge granules and mean size of sludge granules under different OLR conditions

2.3 污泥颗粒化过程中 EPS 组分的变化

EPS 是微生物实现自适应与固定化的重要结构性物质,其中,蛋白质(PN)与聚多糖(PS)可占到 EPS 总量的 70% 以上. 众多研究表明,AGS 的结构性状与 PN、PS 的相对含量密切相关^[26~28].

在污泥颗粒化过程中,胞外多聚物中 PN、PS 含量的变化曲线如图 5 所示. 在本研究中,污泥 EPS 总量随运行时间呈现单调上升的趋势,PN/PS 值由

1.53 提高至 3.22. 出于维持特殊结构的需要,颗粒污泥的 EPS 总量通常高于絮状污泥的水平^[29,30]. 其中,PN 含量的持续增加与好氧颗粒污泥 MLVSS、SOUR 和平均粒径的变化过程是一致的. 这不仅是生物量累积、污泥活性增强的必然结果,也是改善颗粒表面疏水性、促进微生物聚集的前提条件^[31].

相比之下,PS 常被描述成一种高分子量、强络合能力的“生物胶水”. 在 AGS 形成过程中,PS 组分的增量较小,但其通常贯穿于整个颗粒污泥中,对维持结构的稳定非常重要^[32]. Adav 等^[19]认为,PS 中含有大量羟基、羧基等负电官能团,可与 Ca²⁺ 等阳离子通过吸附、架桥作用形成网状骨架,为微生物的聚集生长创造有利条件. 由图 5 可知,PS 成分在反应器运行的前 55 d 内处于缓慢上升阶段,浓度值在 20~30 mg·g⁻¹. 但在颗粒生长与成熟期,PS 含量出现了 2 次大幅度波动. 结合图 2、图 3 可知,在第 73 d,PS 含量增至 43.7 mg·g⁻¹,稳定数天后开始减少. 此时,污泥粒径的增长速率跃升至 27.8 μm·d⁻¹,并首次出现了 1.25~1.6 mm 的粒径区间. 其次,在第 113 d,PS 含量达到峰值约 63.6 mg·g⁻¹,随后又逐渐降回最初的水平. 这与粒径 1.6 mm 以上的污泥质量百分比由 2.1% 大幅增至 22.6% 几乎是同时出现的. Zhu 等^[33]在培养 AGS 的过程中也有类似发现,当 SBR 运行到第 40 d,伴随着污泥浓度快速上升、SVI₃₀ 趋于稳定,胞外聚合物中 PS 的含量成倍增加. 随后,颗粒污泥逐渐成熟,部分多糖被新增的微生物所利用,PN/PS 比值重新恢复至 4.2 左右. Franco 等^[34]的研究也表明,颗粒污泥与絮状污泥的性状差异与 PS 含量的高低是一致的.

总之,在污泥颗粒化过程中,尽管 PN、PS 含量具有不同的变化趋势,但两者对于生物量累积和颗粒生长表现出良好的响应关系. 在后续的工作中,有必要深入研究 EPS 组分的指示功能,以期为完善、优化现有好氧颗粒污泥的培养方法提供理论指导.

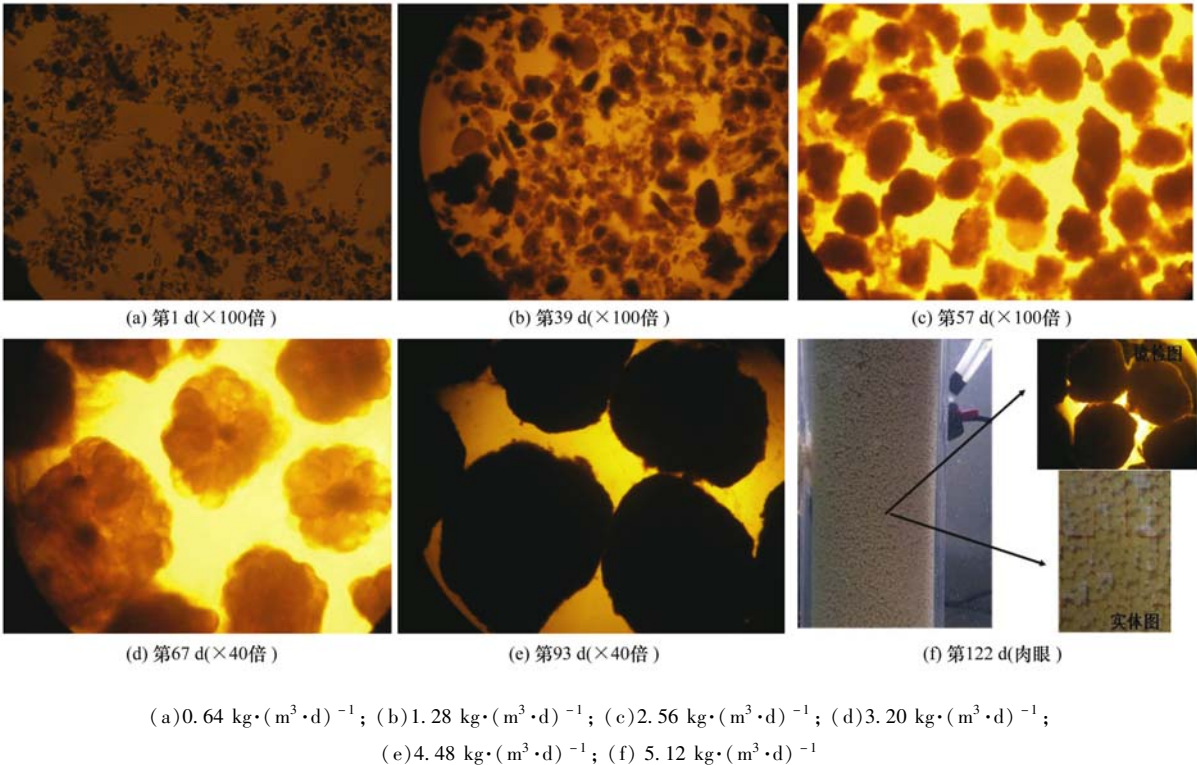


图 4 不同有机负荷条件下,污泥形态的显微镜照片

Fig. 4 Microscopic images of sludge granules under different OLR conditions

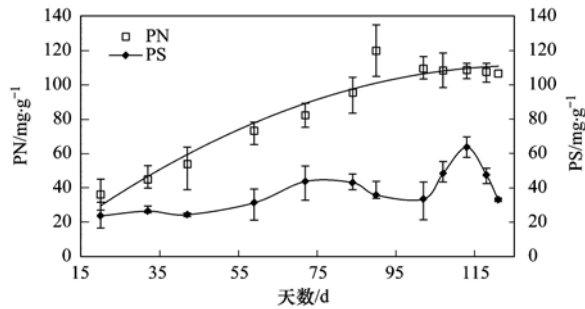


图 5 污泥颗粒化过程中,胞外聚合物中 PN、PS 含量的变化过程

Fig. 5 Variation of protein and polysaccharide concentration in EPS during sludge granulation

3 结论

(1) 将 SBR 反应器进水有机负荷由 $0.64 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高至 $5.12 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,可以有效促进污泥的颗粒化进程. 反应器 ORR 值、污泥平均粒径与 SOUR 值的变化过程表明,污泥颗粒化不仅使污泥形态发生了根本变化,也显著增强了微生物活性.

(2) 成熟好氧颗粒污泥的 MLSS、 SVI_{30} 、平均粒径、沉降速率和 SOUR 分别达到 $23.9 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 1.4 mm 、 $102 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $50.2 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,

反应器对 COD 去除率高于 90%.

(3) 在本研究中,当进水 OLR 为 $3.20 \sim 4.84 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,污泥平均粒径的增长速率最快. 但在更高的 OLR 条件下,絮状污泥的大量出现使得必须采取应急性排泥措施,才能保持 AGS 在反应器中的主导地位.

(4) 在好氧颗粒污泥的培养过程中,胞外聚合物中 PN、PS 含量的变化对生物量累积、颗粒生长表现出良好的响应关系. 因此,有必要对 EPS 组成的指示功能开展深入研究.

参考文献:

[1] Wu L, Peng C Y, Peng Y Z, *et al.* Effect of wastewater COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(2): 234-241.

[2] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 449-473.

[3] Chen Y, Jiang W J, Liang D T, *et al.* Aerobic granulation under the combined hydraulic and loading selection pressures [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(16): 7444-7449.

[4] Qin L, Liu Y, Tay J H. Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2004, **21**(1): 47-52.

[5] 张蓉蓉, 任洪强, 张志, 等. 不同类型污泥接种源培养的好氧颗粒污泥脱氮性能比较 [J]. *食品与生物技术学报*,

- 2006, **25**(4): 105-108.
- [6] 李慧琴, 涂响, 孔云华, 等. 交变负荷调控法培养好氧颗粒污泥的试验研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 743-749.
- [7] 苏馈足, 邓绣坤, 郑丽, 等. 好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 [J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2473-2479.
- [8] 王超, 郑晓英. 剪切应力对好氧颗粒污泥形态结构和微生物活性的影响机制研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2235-2241.
- [9] 傅金祥, 唐玉兰, 王海彪, 等. 不同 pH 值下好氧颗粒污泥形成过程与特性 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, **26**(4): 734-738.
- [10] Tay J H, Pan S, Tay S T, *et al.* The effect of organic loading rate on the aerobic granulation; the development of shear force theory [J]. Water Science and Technology, 2003, **47**(11): 235-240.
- [11] Ni B J, Xie W M, Liu S G, *et al.* Granulation of activated sludge in a pilot-scale sequencing batch reactor for the treatment of low-strength municipal wastewater [J]. Water Research, 2009, **43**(3): 751-761.
- [12] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Potential cause of aerobic granular sludge breakdown at high organic loading rates [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, **85**(5): 1601-1610.
- [13] López-Palau A, Dosta J, Mata-Álvarez J. Start-up of an aerobic granular sequencing batch reactor for the treatment of winery wastewater [J]. Water Science & Technology, 2009, **60**(4): 1049-1054.
- [14] Long B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Tolerance to organic loading rate by aerobic granular sludge in a cyclic aerobic granular reactor [J]. Bioresource Technology, 2015, **182**: 314-322.
- [15] 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 等. 接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究 [J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2302-2308.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [17] Zhang B, Chen Z, Qiu Z G, *et al.* Dynamic and distribution of ammonia-oxidizing bacteria communities during sludge granulation in an anaerobic-aerobic sequencing batch reactor [J]. Water Research, 2011, **45**(18): 6207-6216.
- [18] Adav S S, Lee D J. Characterization of extracellular polymeric substances (EPS) from phenol degrading aerobic granules [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2011, **42**(4): 645-651.
- [19] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **154**(1-3): 1120-1126.
- [20] Luo J H, Hao T W, Wei L, *et al.* Impact of influent COD/N ratio on disintegration of aerobic granular sludge [J]. Water Research, 2014, **62**: 127-135.
- [21] 张子健, 吴伟伟, 王建龙. SBR 反应器中全自养硝化颗粒污泥的特性研究 [J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1257-1262.
- [22] Mañas A, Biscans B, Spérandio M. Biologically induced phosphorus precipitation in aerobic granular sludge process [J]. Water Research, 2011, **45**(12): 3776-3786.
- [23] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Characteristics of aerobic granules grown on glucose and acetate in sequential aerobic sludge blanket reactors [J]. Environmental Technology, 2002, **23**(8): 931-936.
- [24] Moy B Y P, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules [J]. Letters in Applied Microbiology, 2002, **34**(6): 407-412.
- [25] De Kreuk M K, De Bruin L M M, Van Loosdrecht M C M. Aerobic granular sludge; from idea to pilot plant [A]. In: Bathe S, De Kreuk M K, Me Swain B S, *et al.* (eds). Aerobic Granular Sludge. Water and Environmental Management Series [C]. Munich: IWA Publishing, 2005. 165-169.
- [26] Zhu L, Lv M L, Dai X, *et al.* Role and significance of extracellular polymeric substances on the property of aerobic granule [J]. Bioresource Technology, 2012, **107**: 46-54.
- [27] Laspidou C S, Rittmann B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [J]. Water Research, 2002, **36**(11): 2711-2720.
- [28] 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.
- [29] 王浩宇, 苏本生, 黄丹, 等. 好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性 [J]. 环境科学, 2012, **33**(5): 1614-1620.
- [30] Long B, Yang C Z, Pu W H, *et al.* Rapid cultivation of aerobic granular sludge in a pilot scale sequencing batch reactor [J]. Bioresource Technology, 2014, **166**: 57-63.
- [31] Lv J P, Wang Y Q, Zhong C, *et al.* The effect of quorum sensing and extracellular proteins on the microbial attachment of aerobic granular activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2014, **152**: 53-58.
- [32] 俞言文, 朱亮, 戚韩英, 等. 废水处理系统中生物聚集体胞外多聚物研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18**(2): 338-343.
- [33] Zhu L, Qi H Y, Lv M L, *et al.* Component analysis of extracellular polymeric substances (EPS) during aerobic sludge granulation using FTIR and 3D-EEM technologies [J]. Bioresource Technology, 2012, **124**: 455-459.
- [34] Franco A, Roca E, Lema J M. Granulation in high-load denitrifying upflow sludge bed (USB) pulsed reactors [J]. Water Research, 2006, **40**(5): 871-880.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行