

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

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

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O₃来源识别 李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)

厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)

近10年海南岛大气NO₂的时空变化及污染物来源解析 符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)

稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成 洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)

气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H₂)浓度 栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)

小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO₂特征及扩散通量 张永领, 杨小林, 张东(40)

夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究 李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)

基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度 张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)

温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别 马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)

人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例 于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)

太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究 汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)

鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应 沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)

影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析 李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)

水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响 刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)

蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响 吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)

汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化 程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)

三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)

三峡库区农林畜复合小流域水体汞的时空变化特征 赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)

环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响 宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)

三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征 高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)

舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)

太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)

厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估 程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)

两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例 王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)

大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价 张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)

铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验 陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张良林, 肖军(202)

铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究 陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)

一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究 吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)

磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为 张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)

腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附 朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)

降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响 赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)

FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究 陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)

微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响 邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)

微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化 曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)

舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)

四川凉山彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究 周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)

铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用 徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)

外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响 熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)

厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征 洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)

洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素 商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)

不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)

畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化 商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)

华南某市生活垃圾组成特征分析 张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)

生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥 刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)

基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究 徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)

一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测 刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)

典型黄土区油松树干液流变化特征分析 张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)

利用巨藻发酵联产氢气与挥发性有机酸的研究 赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)

人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响 李曼璐, 姜玥璐(365)

《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236,243,273,300)

降温过程对 ANAMMOX 工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响

赵志瑞^{1,2,3}, 苗志加^{1,2}, 李铎^{1,2}, 崔丙健³, 万敬敏¹, 马斌⁴, 白志辉^{3*}, 张洪勋³

(1. 石家庄经济学院水资源与环境学院, 石家庄 050031; 2. 河北省水资源可持续利用与开发重点实验室, 石家庄 050031; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 北京工业大学市政环境工程学院, 北京 100124)

摘要: 厌氧氨氧化是污水脱氮工艺中的重要环节, 系统中的菌群结构决定了其处理效果. 低温厌氧氨氧化技术因节省大量能源更具有良好的发展前景, 厌氧氨氧化细菌在其中起着至关重要的作用. 为了探讨降温过程中(由 30℃ 降为 20℃ 时)厌氧氨氧化反应器处理城市污水时微生物群落的变化, 利用磷脂脂肪酸(PLFA), 定量 PCR 和 PCR-DGGE 分析方法对城市生活污水厌氧氨氧化系统中的微生物的量、厌氧氨氧化菌的量以及功能微生物菌群的变化进行了研究. 磷脂脂肪酸分析结果显示当温度由 30℃ 降为 20℃ 时, 微生物的总量首先降低, 随着运行时间的延续逐渐升高. 定量 PCR 结果显示厌氧氨氧化菌 16S rRNA 基因拷贝数由 30℃ 的 $1.19 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$ 增至 20℃ 的 $1.86 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$, 系统出水氨氮降低. PCR-DGGE 结果显示降温过程中颗粒污泥中厌氧氨氧化菌群由 *Candidatus Kuenenia* sp. 为主, 转变为 *Candidatus Brocadia* sp. 和 *Candidatus Kuenenia* sp. 为主的混合菌.

关键词: 生物脱氮; 厌氧氨氧化; 厌氧氨氧化菌; 定量 PCR; PCR-DGGE

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0237-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.031

Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process

ZHAO Zhi-rui^{1,2,3}, MIAO Zhi-jia^{1,2}, LI Duo^{1,2}, CUI Bing-jian³, WAN Jing-min¹, MA Bin⁴, BAI Zhi-hui^{3*}, ZHANG Hong-xun³

(1. College of Water Resources and Environment, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 2. Key Laboratory of Water Resources Sustainable Use and Development of Hebei, Shijiazhuang 050031, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. School of Municipal and Environmental Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Anaerobic ammonium oxidation is an important part of the biological nitrogen removal process, and the performance of the process is determined by the microbial community structure. Low-temperature anaerobic ammonium oxidation technology has good prospects for saving a lot of energy, and anaerobic ammonium oxidation bacteria play a vital role in the removal of total nitrogen from waste water. To explore the microbial community structure changes of anammox reactor in sewage treatment during the cooling process (from 30℃ to 20℃), the total amount of the microbial, the quantity of anaerobic ammonium oxidation and the change of functional microbial community were investigated in a sewage treatment process using the phospholipid fatty acid method (PLFA), quantitative PCR and the clone library of bacterial 16S rRNA. The PLFAs results showed that the total amount of microbial was first decreased and then gradually increased with the running time, when the temperature dropped from 30℃ to 20℃, and the NH_4^+ -N content in the effluent of the system was decreased. The quantitative PCR results showed that 16S rRNA gene copies of anammox bacteria increased from $1.19 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$ to $1.86 \times 10^8 \text{ copies} \cdot \text{mL}^{-1}$ in the wastewater. The PCR-DGGE results showed that when the temperature decreased, the anammox bacteria were further enriched. A shift of anammox bacteria community from single *Candidatus Kuenenia* sp. to a combination of *Candidatus Brocadia* sp. and *Candidatus Kuenenia* sp. was observed.

Key words: biological nitrogen removal; anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); ANAOB; quantitative PCR; PCR-DGGE

传统的脱氮工艺首先在有氧条件下把 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- 然后进一步氧化为 NO_3^- , 在无氧条件下反硝化为 N_2 , 该工艺需要消耗大量的氧气同时需要添加有机碳源. 半短程亚硝化-厌氧氨氧化联合脱氮工艺是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型高效脱氮工艺^[1,2], 与传统脱氮工艺相比, 脱氮工艺反应途径较短. 在硝化阶段通过控制溶解氧浓度, NH_4^+

只有一部分被氧化为 NO_2^- , 厌氧阶段厌氧氨氧化菌以 NH_4^+ 为电子供体, 以 NO_2^- 为电子受体, 将 NH_4^+

收稿日期: 2014-06-24; 修订日期: 2014-08-06

基金项目: 中国科学院重点部署项目 (KZZD-EW-09-3); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07203-006); 水利部公益性行业科研专项 (201401078)

作者简介: 赵志瑞 (1975 ~), 女, 博士, 主要研究方向为水处理及环境微生物, E-mail: zhiruizh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhbai@cees.ac.cn

和 NO_2^- 转变成 N_2 [3], 该工艺减少了供氧量, 不需要碱度和有机碳源的投加, 节约了能源和运行成本. 因其大大节约了能源越来越受到国内外的重视. 通常情况下厌氧氨氧化脱氮温度在 30°C 左右, 但我国大部分地区温度常年低于 30°C , 为使厌氧脱氮顺利进行, 在脱氮过程中需要加热升高温度. 为了节省能源, 研究常、低温条件下厌氧氨氧化菌的脱氮性能变得尤为重要 [4]. 近来温度小于 25°C 条件下厌氧氨氧化菌脱氮性能已开始被人研究, 但研究主要集中在高氨氮废水处理及菌群变化情况 [5,6], 对在低温条件下低氨氮城市污水处理过程中厌氧氨氧化菌群性能鲜有报道 [7], 但研究厌氧氨氧化低温处理城市污水更具有实际意义 [8,9].

本文以厌氧氨氧化反应器处理城市污水的颗粒污泥为研究对象, 在 30°C 高效脱氮的基础上, 逐渐降低反应器的运行温度至 20°C , 考察降温过程中微生物菌群结构的变化. 有研究指出厌氧氨氧化菌生长非常缓慢 [10,11], 其最大增长速率为 $0.003 \cdot \text{h}^{-1}$ (倍增时间为 11 d). 当 NO_2^- 浓度超过 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧氨氧化菌完全受到抑制; 但是加入微量的厌氧氨氧化菌代谢中间产物, 其活性又可完全恢复, 如 $1.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的联氨. 另有研究报道厌氧氨氧化细菌对 NO_2^- 的适应质量浓度可达 $710 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 可能是由于反应器中富集了高浓度的厌氧氨氧化菌. 本研究采用 PLFA 方法对反应器的微生物群落结构整体情况进行定量分析, 检测不同温度和氨氮浓度下, 微生物群落量的变化; 同时运用定量 PCR 方法对厌氧氨氧化菌在不同温度下进行定量分析, 采用 PCR-DGGE 方法, 对 ANAMMOX 工艺的活性污泥系统中的细菌的多样性进行分析, 以期 ANAMMOX 反应系统在常温下处理城市污水提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置和样品

本试验以上向流污泥床反应器 (UASB) 作为厌氧氨氧化反应器, 反应装置为有机玻璃材质, 如图 1 所示, 反应器高 170 cm, 内直径 8 cm, 有效容积约 8 L. 反应器外裹水浴套桶, 亦为有机玻璃材质, 反应器外壁包裹黑色橡胶保温材料. 水浴套桶内以气循环带动水循环, 保证水浴均匀, 通过温控仪和水浴套, 将反应器温度控制在所需温度范围. 本试验采用具有厌氧氨氧化活性的絮体污泥作为接种污泥, 通过逐渐提高进水流量, 从而提高上升流速来培养颗粒污泥. 试验进水采用半亚硝化短程反应器的出水作为原水.

试验定期取水样, 经过 $0.22 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后进行水质指标的测定, 分析测定方法参考文献 [12].

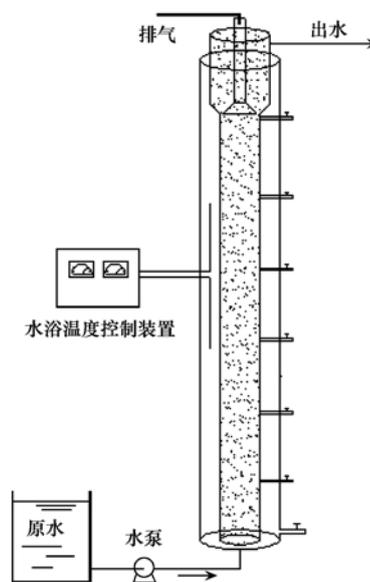


图 1 ANAMMOX 工艺流程和反应器

Fig. 1 Schematic diagram of the ANAMMOX process and reactor

1.2 试验方法

1.2.1 颗粒污泥形态及表面特征的测定

为了研究颗粒污泥的形态与表面特征, 利用扫描电镜 (SEM, HITACHI S-4300, Japan) 对颗粒污泥表面进行了考察, 颗粒污泥的前处理参照文献 [13] 的方法.

1.2.2 磷脂脂肪酸的分析

磷脂是大部分微生物细胞膜的重要组成部分, 在通常情况下其含量相对稳定, 不同的微生物类群含有不同种类和数量的 PLFAs, 一些特性 PLFAs 存在于某类微生物的细胞膜中, PLFAs 可作为微生物量和群落结构变化地生物标记. 分析方法参照文献 [5] 的方法.

1.2.3 实时荧光定量 PCR 分析

试验采用 SYBR Green 染料法, 对出水中的厌氧氨氧化菌 16S rRNA 基因分别进行了定量分析. 标准曲线质粒采用 *Candidatus Kuenenia* 的 16S rRNA 基因序列. 引物 Pla46/Amx820 用作定量 ANAMMOX 16S rRNA 基因 [14,15]. 将质粒溶液稀释成不同浓度梯度作为模板, $25 \mu\text{L}$ 反应体系中含正向引物和反向引物各 $0.5 \mu\text{L}$ ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), $2 \mu\text{L}$ 待测样品和质粒标准品 DNA, $9 \mu\text{L}$ $2.5 \times$ Master Mix (SYBR Green, TIANGEN), 每个样品做 3 个平行试验, 结果取平均值. 仪器为 Mx3000P 荧光定量 PCR 仪 (Genetimes 公司). 以标准品拷贝数的对数

值为横坐标,以测得的 C_i 值为纵坐标,绘制标准曲线. 对系统中的厌氧氨氧化菌进行定量,根据样品的 C_i 值,即可在标准曲线中定出样品的拷贝数.

1.2.4 巢式 PCR-DGGE 指纹图谱分析

浮霉菌属利用常规 16S rRNA 基因常规引物很难获得目标片段. 巢式 PCR 用于扩增较难直接获取的目标片段,试验采用浮霉菌特有引物 Pla46、Amx820 第一轮扩增,第二轮用 F338/R518 扩增,对大多数细菌的 16S rRNA 基因 V3 区具有特异性的引物对: F338GC/R518^[16] PCR 反应条件: 为减少 PCR 过程中的非特异性扩增,PCR 扩增程序选用 Touchdown 方法,预变性条件为 94℃ 4 min,前 20 个循环为 94℃,1 min, 65 ~ 55℃,45 s 和 72℃,45 s (每个循环降 0.5℃),后 10 个循环为 94℃,1 min, 55℃,50 s 和 72℃,45 s,最后在 72℃ 下延伸 10 min^[17]. PCR 反应的产物用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测. 采用 Bio-Rad 公司的基因突变检测系统 (Dcode™ Universal Mutation Detection System) 对 PCR 产物电泳进行 DNA 分离. 制备含有变性剂(尿素和甲酰胺)的 8% 的聚丙烯酰胺凝胶,变性剂的浓度为 40% 和 60%,先在 2 mL 0% 变性胶中加入 9 μL TEMED 和 29 μL 10% 的 APS 缓慢注入固定好的两块玻璃板中间,封住底部,封口胶凝固后,用注射器吸取 20 mL 40% 和 60% 两种浓度的变性胶,再分别加入 25 μL TEMED 和 100 μL 10% APS,固定在灌胶设备上,缓慢转动灌胶轮将两种浓度的胶体以不同速度注入玻璃板中间,制成 40% ~ 60% 变性梯度的胶,在室温下凝胶 4 h 以上,待胶完全凝固后拔下梳子. 配制 1 × TAE 缓冲液倒入电泳槽,把胶放入电泳液,开始加热使电泳液温度预热至 60℃,在每

个加样孔中加入 PCR 产物 45 μL,先在 20 V 电压下电泳 20 min,待电泳液温度升至 60℃,将电压调到 60 V,在 60℃ 电泳 16 h. 电泳完毕后,将凝胶在 EB 中染色 15 min,然后放入纯水中,脱色 15 min. 将脱色后的凝胶置于 Quantity One 凝胶成像系统下分析并拍照,得到 DGGE 图谱,结果分析采用 Quantity One 软件. 巢式 PCR 专有引物为引物 Pla46/Amx820.

2 结果与分析

2.1 污泥与进出水水质

培养成功的厌氧氨氧化颗粒污泥从外观上看呈红色^[18,19],由于厌氧氨氧化菌内羟氨氧化还原酶和联氨氧化酶含有血红素 C. 此外丝状菌的存在可能是形成颗粒污泥的有利因素之一,研究发现丝状菌对大多数惰性载体材料有很强的吸附作用^[20,21]. 当厌氧氨氧化反应器内上升流速逐渐增加时,水流扰动增强,接种的絮体污泥中的丝状菌会被吸附到污泥中的惰性颗粒上,同时此过程也会将厌氧氨氧化菌微小聚集体嵌入其中,逐渐形成沉降速度较大的颗粒污泥,优质的颗粒污泥是出水水质的重要保证.

由表 1 看出,出水 NO_3^- -N 浓度明显较高,可能由于厌氧氨氧化反应器进水中 COD 浓度较低,且大多数为难降解有机物,厌氧反硝化作用很难发生,且在进水过程中有少量氧气被带入,所以 NO_3^- -N 有所升高且难以去除. 为了进一步保证城市污水自养脱氮系统整体出水水质,满足国家或地方对出水 TN 的要求,可以将 ANAMMOX 反应器出水部分回流至系统 A/O 反应器的缺氧段,利用活性污泥法出水中剩余的碳进行反硝化,去除水中的硝酸盐氮.

表 1 进出水水质指标

Table 1 Quality indices of the influent and effluent

温度/℃	进水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			出水/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			流量/ $\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$	HRT ¹⁾ /h	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
	NH_4^+ -N	NO_2^- -N	NO_3^- -N	NH_4^+ -N	NO_2^- -N	NO_3^- -N			
30	16.6	20	12.6	1.9	1.5	16.9	775.0	0.14	26.5
25	19.2	22.8	13.2	8.5	4.7	20.1	1253	0.17	24.2
20	18.5	22.6	16.2	6.1	5.3	22.2	929	0.25	27.5

1) HRT 为水力停留时间

2.2 磷脂脂肪酸结果

由图 2 可以看出在 0 ~ 90 d 当温度 30℃ 时,逐渐降低 HRT 时间,从开始 1.26 h 逐渐降低,到第 60 d 时 HRT 为 0.35 h,从第 60 d 开始 HRT 由 0.35 h 降低为 0.14 h,由于 HRT 降低,可能造成部分微生物不适应新的环境,在该工况下微生物的量有所降低,然后在该工况下运行到第 90 d,微生物的量逐渐

增加,到第 90 d 时,微生物的量达到最大值. 当 HRT 降低时微生物的量有所降低,然后回升,第 90 d 时达到最高. 当随后随着温度降低到 25℃ 时,可以看出,微生物的量开始降低,氨氮去除率下降明显,主要是因为温度降低使得反应器容积氮去除速率下降,微生物活性减弱,有些微生物甚至死亡,而进水氮负荷却未下降相应的量,从而造成氨氮去除

率下降,微生物总量下降. 但当第 120 d 时微生物的量又开始逐渐增加,到 135 d 时微生物的量超过了温度 30℃ 时第 90 d 微生物的量. 在第 150 d,当温度降低到 20℃ 时,微生物的量明显减少,但在第 165 d 时微生物的量快速反弹,甚至超过温度 30℃ 时微生物的量,证明在反应器运行过程中,污泥被逐渐驯化,耐冲击负荷能力加强.

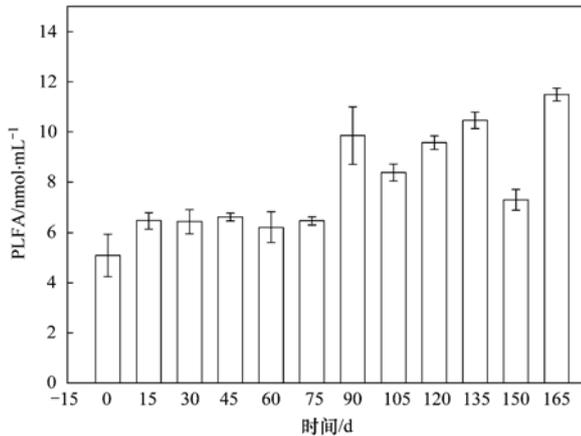


图 2 不同温度下城市污水处理 ANAMMOX 反应器中微生物总量的变化

Fig. 2 Variation of total microbial biomass in the municipal sewage ANAMMOX reactor at different temperatures

2.3 实时定量 PCR 结果

反应器的脱氮率除了与厌氧氨氧化菌的活性有关,还与其数量有关,因此在低温条件下通过提高厌氧氨氧化菌的生物量可以获得较高的反应器脱氮效率. 所以厌氧氨氧化菌的有效停留就尤其重要,因为只有使新增殖的厌氧氨氧化菌有效停留在反应器内,才能把反应器内的厌氧氨氧化菌的生物量保持在较高的水平. 本研究中采用了活性炭为载体形成颗粒污泥,把颗粒污泥作为厌氧氨氧化菌的聚集体,原则上可以实现菌的有效富集.

定量 PCR 结果显示(图 3),在温度由 30℃ 降为 20℃ 的过程中厌氧氨氧化菌的量不但没有降低,反而稍有所升高,20℃ 运行结束时污泥混合液中含有厌氧氨氧化菌拷贝数由 30℃ 条件下的 1.19×10^8 copies·mL⁻¹ 增至 1.86×10^8 copies·mL⁻¹. 可以明显看出降温过程中,厌氧氨氧化菌得到了进一步富集.

2.4 巢式 PCR-DGGE 结果

采用浮霉菌特有引物 Pla46、Amx820 第一轮扩增,第二轮用 F338/R518 扩增. 通过 DGGE 分析低氨氮 ANAMMOX 中厌氧氨氧化菌群的变化如图 4, 1~12 分别代表样品 0~165 d,其中 1~7 表示温度在 30℃ 样品,8~10 表示温度在 25℃ 样品,11~12

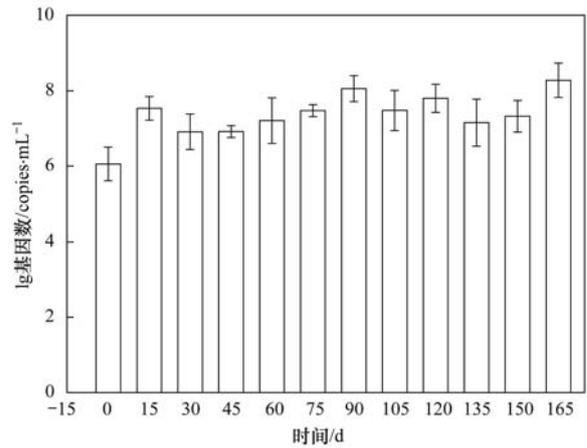


图 3 厌氧氨氧化菌的 16S rRNA 基因在废水中的变化

Fig. 3 Variation of log number of ANAMMOX bacteria 16S rRNA gene in wastewater

表示温度在 20℃ 样品. 在 DGGE 胶中相同的微生物用相同的数字标注,选取较亮的片段切胶进行分析. 从 DGGE 图谱可以看出在不同的样品中菌群的结构有着明显的变化. 在低氨氮城市污水中有 10 个不同的条带.

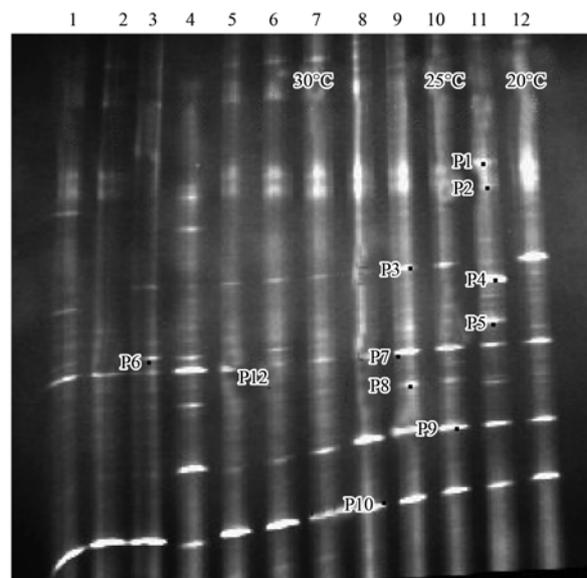


图 4 厌氧氨氧化反应器中厌氧氨氧化菌 16S rRNA 基因 V3 区的 PCR-DGGE 图谱

Fig. 4 Denaturing gradient gel electrophoresis profiles of the V3 region of 16S rRNA gene of ANAMMOX bacteria in ANAMMOX reactor

测序序列经过和库中的已知序列比对得到 9 个 OTUs,其中 P5 和 P6 属于同一个 OTU.

在图 4 中 P7 和 P10 在所有样品中都出现,P6 在 8 号以后的样品中消失,表明该种菌属的细菌在温度降低过程中逐渐被淘汰,但大部分条带在经过富集驯化过程中逐渐出现,如 P1、P2、P3、P4、P5、

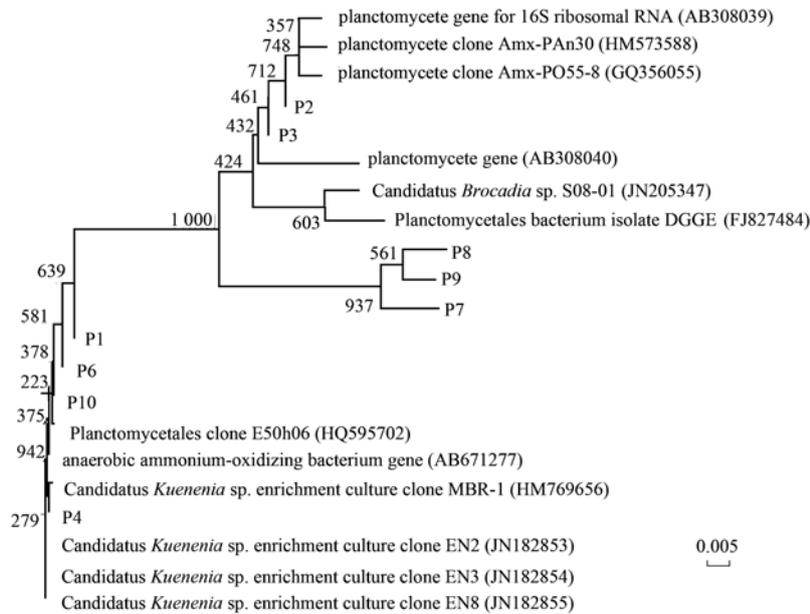


图 5 低氮 ANAMMOX 工艺中浮霉菌的系统发育树

Fig. 5 Phylogenetic tree of planctomycete bacteria in ANAMMOX reactor

P8、P9,但随着温度的降低,一些非优势菌群逐渐显示,如 P4、P5、P8. 但有些菌群出现之后成为优势菌群,而且含量非常丰富如 P9、P3,但 P9 含量更多,P3 含量稍微少些. 由图 4 也可以看出随着温度的降低,厌氧氨氧化菌的量逐渐增加,而且种类也在增加,表明在温度 20℃ 时,水力负荷减小,更有利于厌氧氨氧化菌的增长. 而且由图 5 可以看出,P1、P6、P10、P4 与已知厌氧氨氧化菌种的 *Candidatus Kuenenia* sp. 相似,而 P2、P3、P7、P8、P9 与 *Candidatus Brocadia* sp. 最为接近. 因此与 30℃ 条件下培养的颗粒污泥中的厌氧氨氧化菌菌群相比,20℃ 条件下运行结束时颗粒污泥中的菌群结构发生了很大变化,即 *Candidatus Brocadia* sp. 的量得到了相对增加,而 *Candidatus Kuenenia* sp. 的量相对减少.

3 讨论

反应器容积氮的去除速率不但与厌氧氨氧化菌的数量有关,而且与厌氧氨氧化菌的活性也有关^[22]. 因此在低温条件下厌氧氨氧化菌的生物量增加可以获得较高的反应器脱氮效率,但厌氧氨氧化菌的有效停留也同样重要. 只有将新增殖的厌氧氨氧化菌有效持留在反应器内才能使反应器内的厌氧氨氧化生物量保持在较高的水平. 在 25℃ 时出水 NH_4^+ -N 浓度逐渐升高,由 $3.38 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 变为 $8.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,由去除率可以看出,本试验阶段厌氧氨

化脱氮效率出现降低,氨氮去除率下降明显,主要是因为温度降低使得反应器容积氮去除速率下降,进水氮负荷却未下降相应的量,从而造成氨氮去除率下降. 本阶段厌氧氨氧化反应器对亚硝酸态氮的去除率也出现了下降,但与氨氮去除率下降幅度相比,亚硝酸态氮下降幅度较低. 出水 NO_2^- -N 浓度由平均 $2.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 变为 $4.54 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

当温度继续降低到 20℃,为了保证出水水质,在厌氧氨氧化反应器脱氮性能下降时,就降低进水流量来降低进水氮负荷,HRT 逐渐增加. 在本阶段前期,出水 NH_4^+ -N 浓度较高,随着运行时间的增加,出水 NH_4^+ -N 浓度逐渐降低. 这是为了降低出水 NH_4^+ -N 浓度而逐渐降低了进水流量,增加了 HRT,即在反应器脱氮能力不变的情况下,降低进水氮的负荷,以提高出水水质. 因为反应器厌氧氨氧化菌的数量与该菌有效停留时间密切相关,由于 HRT 增加使新增殖的厌氧氨氧化菌有效持留在反应器内,使反应器内的厌氧氨氧化生物量增加.

由 DGGE 试验结果显示,当温度 30℃ 时,厌氧氨氧化颗粒污泥中的厌氧氨氧化菌主要为 *Candidatus Kuenenia* sp.,当温度降低到 20℃ 时,厌氧氨氧化菌主要为 *Candidatus Brocadia* sp.. 文献 [23,24] 研究也发现在厌氧氨氧化工程中运行一段时间后,污泥中的优势厌氧氨氧化菌由接种污泥中的 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 转变为 *Candidatus Brocadia anammoxidans*,分析原因可能

是: *Candidatus Brocadia anammoxidans* 对亚硝态氮的半饱和系数比较高,但是 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 的半饱和常数比较低,因此在低亚硝态氮浓度时更有利于 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* 的增长^[25,26]. 而本试验也符合这些结论. 本试验中温度由 30℃ 降至 20℃ 后,可能由于在低温下发生了水解发酵作用产生了挥发性脂肪酸,而这些脂肪酸有利于 *Candidatus Brocadia sp.* 生长,这或许是本试验中厌氧氨氧化菌由 *Candidatus Kuenenia sp.* 向 *Candidatus Brocadia sp.* 转变的一个原因.

4 结论

(1) 低氨氮 ANAMMOX 反应器处理城市污水,运行温度由 30℃ 降至 20℃ 过程中,反应器内微生物的量有所增加,同时厌氧氨氧化菌的数量也有所升高,20℃ 运行结束时污泥混合液中含有厌氧氨氧化菌拷贝数由 30℃ 条件下的 1.19×10^8 copies·mL⁻¹ 增至 1.86×10^8 copies·mL⁻¹.

(2) 温度从 30℃ 降低到 20℃ 过程中颗粒污泥中厌氧氨氧化菌的菌群发生了明显的变化,由 *Candidatus Kuenenia sp.* 单一菌群变为 *Candidatus Kuenenia sp.* 和 *Candidatus Brocadia sp.* 的混合菌群. 同时与 30℃ 条件下相比,20℃ 条件下运行结束时颗粒污泥中的 *Candidatus Brocadia sp.* 的量得到了相对增加,而 *Candidatus Kuenenia sp.* 的量相对减少.

参考文献:

- [1] Kartal B, Geerts W, Jetten M S M. Cultivation, detection, and ecophysiology of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. *Methods in Enzymology*, 2011, **486**: 89-108.
- [2] De Almeida N M, Maalcke W J, Keltjens J T, *et al.* Proteins and protein complexes involved in the biochemical reactions of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. *Biochemical Society Transactions*, 2011, **39**(1): 303-308.
- [3] Vázquez-Padín J R, Fernández I, Morales N, *et al.* Autotrophic nitrogen removal at low temperature [J]. *Water Science and Technology*, 2011, **63**(6): 1282-1288.
- [4] Jaeschke A, Op den Camp H J M, Harhangi H, *et al.* 16S rRNA gene and lipid biomarker evidence for anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (ANAMMOX) in California and Nevada hot springs [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, **67**(3): 343-350.
- [5] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1448-1456.
- [6] 孙洪伟, 王淑莹, 张树军, 等. 高氮渗滤液短程深度脱氮及反硝化动力学[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 129-133.
- [7] 李斌, 赵志瑞, 马斌, 等. 克隆文库方法分析厌氧氨氧化反应器中细菌群落结构[J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(12): 159-164.
- [8] 黄俊丽, 邹寒艳, 王贵学, 等. 单级自养脱氮系统中厌氧氨氧化菌的分子生物学鉴定[J]. *中国生物工程杂志*, 2010, **30**(6): 60-64.
- [9] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [10] 赵志瑞, 侯彦林. 半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2834-2842.
- [11] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [12] 国家环境保护总局. 水与废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境出版社, 2002.
- [13] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge: From macro-to micro-scale [J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 807-814.
- [14] Schmid M C, Maas B, Dapena A, *et al.* Biomarkers for in situ detection of anaerobic ammonium-oxidizing (Anammox) bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(4): 1677-1684.
- [15] Bae H, Chung Y C, Jung J Y. Microbial community structure and occurrence of diverse autotrophic ammonium oxidizing microorganisms in the ANAMMOX process [J]. *Water Science and Technology*, 2010, **61**(11): 2723-2732.
- [16] Ovreås L, Forney L, Daae F L, *et al.* Distribution of bacterioplankton in meromictic lake Saelenvannet, as determined by denaturing gradient gel electrophoresis of PCR-amplified gene fragments coding for 16S rRNA [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(9): 3367-3373.
- [17] Silvestri G, Santarelli S, Aquilanti L, *et al.* Investigation of the microbial ecology of Ciauscolo, a traditional Italian salami, by culture-dependent techniques and PCR-DGGE [J]. *Meat Science*, 2007, **77**(3): 413-423.
- [18] Tsushima I, Kindaichi T, Okabe S. Quantification of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in enrichment cultures by real-time PCR [J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 785-794.
- [19] Shimamura M, Nishiyama T, Shigetomo H, *et al.* Isolation of a multiheme protein with features of a hydrazine-oxidizing enzyme from an anaerobic ammonium-oxidizing enrichment culture [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(4): 1065-1072.
- [20] Shimamura M, Nishiyama T, Shinya K, *et al.* Another multiheme protein, hydroxylamine oxidoreductase, abundantly produced in an ANAMMOX bacterium besides the hydrazine-oxidizing enzyme [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2008, **105**(3): 243-248.
- [21] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-

- loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [22] Schmid M C, Hooper A B, Klotz M G, *et al.* Environmental detection of octahaem cytochrome *c* hydroxylamine/hydrazine oxidoreductase genes of aerobic and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 3140-3149.
- [23] van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale ANAMMOX reactor in Rotterdam [J]. *Water Research*, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [24] 刘冬英, 邱艳玲, 袁宪正, 等. 厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3208-3213.
- [25] Park H, Rosenthal A, Ramalingam K, *et al.* Linking community profiles, gene expression and N-removal in ANAMMOX bioreactors treating municipal anaerobic digestion reject water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(16): 6110-6116.
- [26] van der Star W R L, Miclea A I, van Dongen U G J M, *et al.* The membrane bioreactor: a novel tool to grow ANAMMOX bacteria as free cells [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **101**(2): 286-294.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2014年9月26日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2013年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2013年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分76.6,排名第一,总被引频次6941,影响因子1.266.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2013年度《环境科学》综合评价总分76.6,在被统计的33种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i>	(1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i>	(11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i>	(18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i>	(25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i>	(34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong	(40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng	(49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenritang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling	(64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i>	(72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i>	(80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i>	(87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang	(107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i>	(114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i>	(121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i>	(136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i>	(151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i>	(163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i>	(172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i>	(179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i>	(186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i>	(194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i>	(202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i>	(209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i>	(215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i>	(221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui	(227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i>	(237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i>	(244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i>	(252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i>	(259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i>	(266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i>	(274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i>	(280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i>	(295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i>	(301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i>	(309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i>	(314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i>	(325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i>	(333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i>	(343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i>	(349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i>	(357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu	(365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 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