

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第6期

Vol.36 No.6

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

南京北郊春季气溶胶吸湿性分析	徐彬, 张泽锋, 李艳伟, 秦鑫, 缪青, 沈艳 (1911)
南京北郊秋冬季相对湿度及气溶胶理化特性对大气能见度的影响	于兴娜, 马佳, 朱彬, 王红磊, 严殊祺, 夏航 (1919)
南京北郊冬季霾天 PM _{2.5} 水溶性离子的污染特征与消光作用研究	周瑶瑶, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 王荔 (1926)
京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系	李梦, 唐贵谦, 黄俊, 刘子锐, 安俊琳, 王跃思 (1935)
长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征	莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 邵敏, 勾斌 (1944)
贵阳酸雨中溶解态重金属质量浓度及形态分析	朱兆洲, 李军, 王志如 (1952)
北京市火葬场大气污染物排放现状及污染特征	薛亦峰, 闫静, 田贺忠, 熊程程, 李敬东, 吴晓清, 王玮, 朱家昕 (1959)
北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征	胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 王琛, 陈圆圆, 何明 (1966)
燃煤电厂湿烟卤降雨成因分析	欧阳丽华, 庄焯, 刘科伟, 陈振宇, 顾鹏 (1975)
Mn-Ce/分子筛的脱汞特性研究	谭增强, 牛国平, 陈晓文, 安振 (1983)
办公室内颗粒物载带溴系阻燃剂的人体呼吸暴露	李岫雯, 曾辉, 倪宏刚 (1989)
森林生物质燃烧烟尘中的有机碳和元素碳	黄柯, 刘刚, 周丽敏, 李久海, 徐慧, 吴丹, 洪蕾, 陈惠雨, 杨伟宗 (1998)
北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能	王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松 (2005)
气相中乙酸乙酯光解的光子效率: 波长和催化剂的影响	方雪慧, 赵洁, 舒莉, 高永, 叶招莲 (2010)
长江口邻近海域赤潮水体浮游植物光吸收特性分析	刘洋洋, 沈芳, 李秀珍 (2019)
深圳近岸海域全氟化化合物的污染特征	刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 刘国卿, 王艳萍, 王鑫璇, 李静, 董炜华 (2028)
杭州西湖“香灰土”沉积物轻、重有机质组成特征及其环境意义	李静, 朱广伟, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军 (2038)
小清河表层沉积物重污染区重金属赋存形态及风险评价	黄莹, 李永霞, 高甫威, 徐民民, 孙博, 王宁, 杨健 (2046)
调水型水库藻类对调水氮、磷浓度与水量的响应	万由鹏, 尹魁浩, 彭盛华 (2054)
三峡库区回水区营养盐和叶绿素 a 的时空变化及其相互关系	张磊, 蔚建军, 付莉, 周川, Douglas G. Haffner (2061)
藻华聚集的环境效应: 对漂浮植物水葫芦光合作用的影响	包先明, 顾东祥, 吴婷婷, 石祖良, 刘国峰, 韩士群, 周庆 (2070)
巢湖沉积物有效磷的原位高分辨分析研究	李超, 王丹, 杨金燕, 王燕, 丁士明 (2077)
贵州施秉白云岩喀斯特区水化学和溶解无机碳稳定同位素特征	肖时珍, 蓝家程, 袁道先, 王云, 杨龙, 敖向红 (2085)
长沙地区不同水体稳定同位素特征及其水循环指示意义	李广, 章新平, 张立峰, 王跃峰, 邓晓军, 杨柳, 雷超桂 (2094)
元阳梯田水源区土壤水氢氧同位素特征	张小娟, 宋维峰, 吴锦奎, 王卓娟 (2102)
植草沟控制道路径流污染效果的现场实验研究	黄俊杰, 沈庆然, 李田 (2109)
Fe/Cu 催化还原降解饮用水中溴氯乙腈的性能研究	丁春生, 马海龙, 傅洋平, 赵世督, 李东兵 (2116)
三维花状结构 α -FeOOH 协同 H ₂ O ₂ 可见光催化降解双氯芬酸钠	许俊鸽, 李云琴, 黄华山, 苑宝玲, 崔浩杰, 付明来 (2122)
UV/H ₂ O ₂ 降解羟苯甲酮反应动力学及影响因素	冯欣欣, 杜尔登, 郭迎庆, 李华杰, 刘翔, 周方 (2129)
钼掺杂 TiO ₂ 光催化降解全氟辛酸	刘晴, 喻泽斌, 张睿涵, 李明洁, 陈颖, 王莉, 匡瑜, 张搏, 朱有慧 (2138)
低频无极灯降解偶氮染料酸性橙 7	吴朋, 吴军, 高士祥, 孙成, 蒋正方 (2147)
纳米 Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ 非均相类 Fenton 体系对 3,4-二氯三氟甲苯的降解	孙正男, 杨琦, 纪冬丽, 郑琳 (2154)
流变相法制备包覆型 CMC-Fe ⁰ 及降解水中 TCE 的研究	樊文井, 成岳, 余淑贞, 范小丰 (2161)
Pd-Fe/石墨烯多功能催化阴极降解 4-氯酚机制研究	祁文智, 王凡, 王辉, 施钦, 逢磊, 卞兆勇 (2168)
锰氧化物改性硅藻土对苯胺的去除动力学与机制	肖少丹, 刘露, 姜理英, 陈建孟 (2175)
铅-十六烷基三甲基氯化铵改性活性炭对水中硝酸盐和磷酸盐的吸附特性	郑雯婧, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (2185)
聚(丙烯酸酰胺-二乙烯基苯)对水溶液中刚果红的吸附	张变变, 廖运文, 高和军, 王忠志, 帅超 (2195)
大型再生水厂不同污水处理工艺的能耗比较与节能途径	杨敏, 李亚明, 魏源送, 吕鑑, 郁达伟, 刘吉宝, 樊耀波 (2203)
污泥水热液化水相产物中氮元素变化规律的研究	孙衍卿, 孙震, 张景来 (2210)
不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征	张海芹, 王翻翻, 李月寒, 陈重军, 沈耀良 (2216)
基于微波-过氧化氢-碱预处理的污泥水解影响因素	贾瑞来, 魏源送, 刘吉宝 (2222)
蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究	雍佳君, 成小英 (2232)
不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析	王润芳, 王琴, 张红, 齐嵘 (2239)
石油降解菌的分离鉴定及 4 株芽胞杆菌种间效应	王佳楠, 石妍云, 郑力燕, 王喆, 蔡章, 刘杰 (2245)
Sheewanella oneidensis MR-1 对针铁矿的还原与汞的生物甲基化	司友斌, 孙林, 王卉 (2252)
根表铁氧化物胶膜对水稻吸收诺氟沙星的影响	马微, 鲍艳宇 (2259)
不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响	禄兴丽, 廖允成 (2266)
城市区域近地表灰尘及重金属沉降垂向季节变化	李晓燕, 张舒婷 (2274)
中山市农业区域土壤-农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染特征	李彬, 吴山, 梁金明, 梁文立, 陈桂贤, 李拥军, 杨国义 (2283)
经口摄入土壤多溴联苯醚生物可给性变化及影响因素的体外消化模拟	张云惠, 刘伟健, 程芳芳, 熊冠男, 杨笑寒, 王歆, 陶澍, 邢宝山, 刘文新 (2292)
生物炭输入对土壤本底有机碳矿化的影响	陈威, 胡学玉, 陆海楠 (2300)
改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用	曾伟铨, 宋波, 袁立竹, 黄宇妃, 伏凤艳 (2306)
蒙脱石-OR-SH 复合体材料对土壤镉的钝化及机制	曾燕君, 周志军, 赵秋香 (2314)
焦岗湖湿地土地利用格局演变及区域可持续性评价	杨阳, 蔡怡敏, 白艳莹, 陈卫平, 杨秀超 (2320)
《环境科学》征订启事 (1965) 《环境科学》征稿简则 (2115) 信息 (1925, 2076, 2084, 2146)	

不同类型及不同浓度抗生素条件下活性污泥丝状菌种群多样性分析

王润芳¹, 王琴¹, 张红², 齐嵘^{2*}

(1. 河北大学化学与环境科学学院, 保定 071002; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 采用平行好氧生物膜反应器对人工配水螺旋霉素(大环内酯类)、土霉素(四环素类)、链霉素(氨基糖苷类)抗生素废水进行了6个月的连续运行处理。Eikelboom及Jenkins法镜检结果显示, 长期高溶解性有机物及高C/N比条件下反应器均出现一定程度的丝状菌过量生长而导致的污泥膨胀现象。结合荧光原位杂交法(FISH)对生物膜及悬浮污泥中的丝状菌种群定性分析结果表明, 反应器中的主要优势丝状菌种群均为 *Nostocoida limicola* (*N. limicola*) II 及 *Thiothrix* II。在不同抗生素浓度(5 mg·L⁻¹、25 mg·L⁻¹)条件下, 平行反应器的COD去除效果均无明显变化, NH₄⁺-N在高浓度链霉素条件下出现一定累积(20 mg·L⁻¹左右); 丝状菌丰度均有所抑制, 且随抗生素浓度升高而更为显著; *N. limicola* II 较 *Thiothrix* II 抑制现象更为明显。土霉素对丝状菌种群具有明显的抑制效果, 其次为链霉素和螺旋霉素。

关键词: 抗生素; 活性污泥; 丝状菌; 种群丰度; 抑制

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)06-2239-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.06.043

Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics

WANG Run-fang¹, WANG Qin¹, ZHANG Hong², QI Rong^{2*}

(1. College of Chemistry and Environmental Science, Hebei University, Baoding 071002, China; 2. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Three kinds of synthetic antibiotic (spiramycin, oxytetracycline, streptomycin) wastewater were continuously treated by parallel aerobic biofilm reactors for 6 months, respectively. Sludge bulking phenomenon caused by overgrowth of filamentous bacteria was observed under long-term high rbCOD and high C/N conditions in all reactors as showed by the Eikelboom and Jenkins examinations. The qualitative analysis of filamentous bacterial population in the biofilm and suspended sludge using fluorescence *in situ* hybridization (FISH) showed that the dominated filamentous bacteria in the bioreactor were *N. limicola* II and *Thiothrix* II. Under conditions of different antibiotic concentrations (5 mg·L⁻¹, 25 mg·L⁻¹), there was no obvious change in the COD removal efficiency of the parallel reactors, while the NH₄⁺-N concentration (about 20 mg·L⁻¹) occurred under high streptomycin concentration. The filamentous bacteria abundance was reduced with the increasing antibiotic concentration, especially significant for *N. limicola* II. Terramycin had a significant inhibitory effect on filamentous bacteria population, followed by Streptomycin and Spiramycin.

Key words: antibiotics; activated sludge; filamentous bacteria; population abundance; inhibition

抗生素废水是一类成分复杂、生物毒性大, 含多种抑制物质的难降解高浓度有机废水。由于其特殊的性质, 在生物处理过程中会对活性污泥中的主要微生物功能种群产生较大的影响, 不仅影响着种群的动态变化, 同时也会造成污染物去除效果的变化^[1-9]。

丝状菌(filamentous bacteria)是活性污泥中的重要功能种群, 由于其自身特殊的表现形状及生理生化特性, 一方面它作为絮体的主要骨架结构, 保证菌胶团菌的附着生长并发挥活性污泥的功能与作用; 另一方面, 丝状菌在一定环境因子条件刺激下发生显著的过量生长现象, 引起絮体的解絮和菌胶团菌的流失, 从而导致污泥膨胀现象的产生并最终

影响出水水质^[10-18]。

本研究采用平行运行的好氧生物膜反应器, 通过Eikelboom及Jenkins镜检、荧光原位杂交等分析方法, 重点考察典型抗生素废水长期好氧生物去除过程中, 活性污泥系统中丝状菌的优势种群类型、丰度变化及对出水水质的影响; 探讨在不同抗生素及不同浓度胁迫条件下, 主要丝状菌与其的响应关系, 以为抗生素废水生物处理过程的稳定运行提供一定的科学基础。

收稿日期: 2015-01-09; 修订日期: 2015-02-20

作者简介: 王润芳(1989 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为污水生物处理污泥膨胀解析及控制, E-mail: Wangrunf@126.com

* 通讯联系人, E-mail: qirong@rcees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 反应器的启动及运行

实验采用4个平行好氧生物膜反应器(A、B、C、D),材质为有机玻璃,有效容积均为2 L,水力停留时间(HRT)为24 h,接种污泥为北京某城市污水处理厂活性污泥,污泥浓度(MLSS)为3 000 mg·L⁻¹. 本实验以目前生产及生活中广泛使用的三类抗生素:大环内酯类(螺旋霉素)、四环素类(土霉素)及氨基糖苷类(链霉素)为研究对象. 其中螺旋霉素为窄谱抗生素,主要作用于革兰阳性球菌、杆菌及少数革兰阴性球菌等;土霉素为广谱抗生素,对革兰氏阳性菌和阴性菌均有抑制作用;链霉素为广谱杀菌抗生素. 实验用水为人工配水,主要成分及水质指标如表1所示. 其中反应器A为空白对照,未投加抗生素,反应器B投加螺旋霉素(大环内酯类),反应器C投加土霉素(四环素类),反应器D投加链霉素(氨基糖苷类). 初始抗生素浓度均为5 mg·L⁻¹(Ⅰ期),连续稳定运行100d后,浓度提升至25 mg·L⁻¹(Ⅱ期)并连续稳定运行. 微量元素储备液浓度见表2.

表1 人工配水的主要成分及进水水质指标¹⁾
Table 1 Components and water quality indexes of synthetic antibiotic wastewater

主要成分	浓度/mg·L ⁻¹	水质指标	浓度/mg·L ⁻¹
羧甲基纤维素钠	50	COD	400
可溶性淀粉	100	NH ₄ ⁺ -N	30
葡萄糖	150	螺旋霉素	5 ^a /25 ^b
胰蛋白胨	100	土霉素	5 ^a /25 ^b
(NH ₄) ₂ SO ₄	126	链霉素	5 ^a /25 ^b
KH ₂ PO ₄	31		
微量元素储备液	1 mL·L ⁻¹		

1) a 为Ⅰ期抗生素浓度; b 为Ⅱ期抗生素浓度

表2 微量元素储备液

Table 2 Composition of trace element stock solution

主要成分	浓度/mg·L ⁻¹	主要成分	浓度/mg·L ⁻¹
H ₃ BO ₃	50	CuSO ₄ ·5H ₂ O	10
MnSO ₄ ·4H ₂ O	40	CoCl ₂	10
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	40	KI	10
Na ₂ MoO ₄ ·4H ₂ O	20	NiCl ₂	10

1.2 分析方法

COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N的测定均采用文献[19]中的标准方法. 丝状菌形态鉴定及丰度定量采用Eikelboom^[20]法(相差显微观察结合革兰氏和奈瑟氏染色)及荧光原位杂交技术(FISH)^[21].

2 结果与分析

2.1 反应器运行

如表3所示,随着抗生素浓度的升高,4个平行反应器的COD去除效果前后均无明显变化,但C反应器的COD出水浓度始终高于B、D反应器. 由此可知:相同抗生素浓度水平下,土霉素对微生物群落较先出现抑制作用. NH₄⁺-N去除结果显示,在不同抗生素浓度条件下,NH₄⁺-N的去除存在一定变化:当Ⅰ期进水抗生素浓度为5 mg·L⁻¹时,4个反应器NH₄⁺-N去除效果均在96%以上;当Ⅱ期进水抗生素浓度升至25 mg·L⁻¹时,除B反应器NH₄⁺-N出水浓度没有明显变化,C、D反应器均出现一定程度的出水NH₄⁺-N浓度的上升,其中C反应器出水NH₄⁺-N上升无波动,较稳定,但D反应器在Ⅱ期初始NH₄⁺-N出水无明显变化在4 mg·L⁻¹左右波动,之后NH₄⁺-N出水开始出现大波动,最高出水为20 mg·L⁻¹左右. 由此可知:相同抗生素浓度水平下,链霉素对氨氧化细菌抑制较明显,其次为土霉素.

表3 各反应器COD和NH₄⁺-N去除率

Table 3 COD and NH₄⁺-N removal performance of different reactors

项目	进水 /mg·L ⁻¹	去除率/%	
		Ⅰ期	Ⅱ期
COD A(空白)	400	88.50	90.50
B(螺旋霉素)	400	85.00	88.25
C(土霉素)	400	84.75	84.50
D(链霉素)	400	89.50	90.75
NH ₄ ⁺ -N A(空白)	30	99.17	99.23
B(螺旋霉素)	30	97.40	98.30
C(土霉素)	30	97.40	94.93
D(链霉素)	30	98.23	83.47

2.2 反应器活性污泥系统中的丝状菌丰度变化及与污泥性状关系

利用Eikelboom及Jenkins法对种污泥、连续处理过程中生物膜及悬浮污泥中的丝状菌进行了系统镜检观察,结果如图1,表4,表5所示. 镜检结果显示,活性污泥中主要优势丝状菌均为骨架丝状菌Type 0041和Type 0092,丰度均为0~1级,污泥性状良好. 随着反应器的长期运行及进水抗生素浓度的变化,4个反应器中生物膜、悬浮污泥性状及其丝状菌种群均发生了显著变化.

Ⅰ期反应器连续运行90 d,抗生素进水浓度稳定在5 mg·L⁻¹. 由于填料作用,与接种污泥性状相比,4个反应器生物膜上的污泥粒径增加明显,均保

持在 100 ~ 200 μm. 空白反应器 A 生物膜上丝状菌数量增加显著, 丰度由种污泥时的 0 ~ 1 级升至 3 级; 同期 B、D 生物膜上丝状菌也显著增长, 丰度达到 3 ~ 4 级; C 反应器生物膜中丝状菌丰度变化不大, 仅为 1 ~ 2 级. 与接种污泥相比, 4 个反应器除 D 中生物膜絮体产生松散现象外, 其余各反应器生物膜污泥絮体结构均为牢固或略牢固, 未受丝状菌丰度增加而产生明显变化. 同期 4 个反应器池内的悬浮颗粒物浓度有所增加, 悬浮颗粒物粒径较小, 显微镜下悬浮颗粒物上丝状菌丰度与生物膜上较为一致. 与种污泥相比, 除 C 中悬浮污泥絮体结构没有发生太大变化外, 其余反应器悬浮污泥絮体结构均变为松散.

II 期反应器连续运行 180 d, 抗生素进水浓度稳定在 25 mg·L⁻¹. 与 I 期相比, 空白反应器 A 生物膜污泥性状及丝状菌丰度无明显变化; B、D 反应器中生物膜上丝状菌丰度与低浓度期相比显著减少, 丰度降至 2 级; C 反应器生物膜中丝状菌丰度保持 1 ~ 2 级不变. 与空白反应器 A 相比, B、C、D 反应器生物膜污泥性状发生明显变化, 污泥粒径显著增加, 均大于 200 μm. 同时, A、B、C 生物膜絮体结构继续保持牢固状态, 而 D 中絮体结构也转为牢固. 同期 4 个反应器池内悬浮颗粒物粒径增加, 丝状菌丰度与生物膜上较为一致. 除 A 反应器因未投加抗生素絮体结构保持松散外, B、D 均由 I 期时的松散转为牢固.

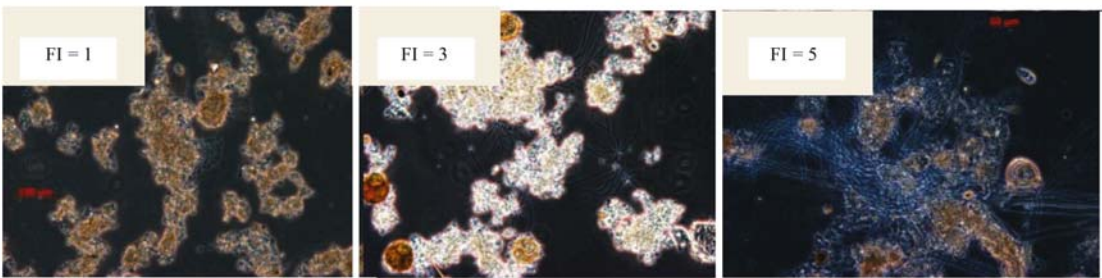


图 1 丝状菌丰度变化 (100 ×)
Fig. 1 Changes in abundance of filamentous bacteria

表 4 生物膜各阶段污泥性状

项目	A(空白)		B(螺旋霉素)		C(土霉素)		D(链霉素)	
			I 期	II 期	I 期	II 期	I 期	II 期
丰度	4	4	4	2	1	1	4	3
丝状菌对絮体影响	无	无	小	无	无	无	打开絮体	无
絮体性状	略牢固	略牢固	略牢固	略牢固	牢固	牢固	松散	略牢固
粒径/μm	≥150	≥200	100 ~ 200	≥200	50 ~ 150	≥300	50 ~ 200	≥200

表 5 各反应器内悬浮污泥性状

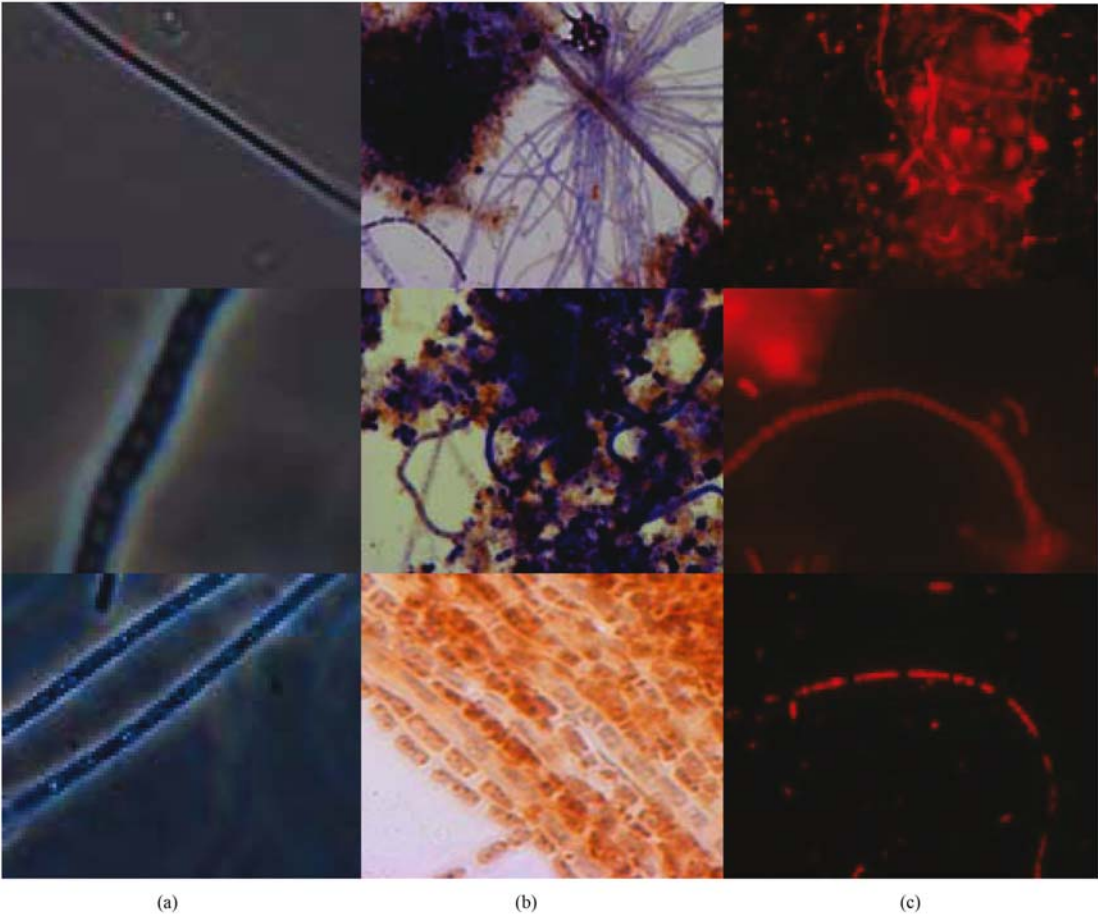
项目	接种泥	A(空白)		B(螺旋霉素)		C(土霉素)		D(链霉素)	
				I 期	II 期	I 期	II 期	I 期	II 期
丰度	1	5	4	5	3	1	1	5	3
丝状菌对絮体影响	无	打开絮体	打开絮体	打开絮体	小	无	无	打开絮体	小
絮体性状	牢固	松散	松散	松散	略牢固	牢固	牢固	松散	略牢固
粒径/μm	≥100	≥150	≥200	≤150	100 ~ 200	50 ~ 150	100 ~ 300	100 ~ 200	100 ~ 300

2.3 各反应器内优势丝状菌的种类及其丰度变化

根据 Eikelboom 法镜检观测并结合 FISH 定性技术, 对接种污泥及 4 个反应器内不同阶段的优势丝状菌进行了定性分析, 其定性鉴定如图 2 所示, 丰度变化如图 3 所示.

从图 3 和图 4 可以看出, 种污泥中的优势丝状菌为 Type 0041、*N. limicola* II 及 Type 021N, 多样性

较高且丰度较低(均为 1 级), 是丝状菌整体丰度的主要贡献者. A 反应器未投加抗生素, 其生物膜中的丝状菌在 I 期时演替为 *N. limicola* II 和 *Thiothrix* II, 并将优势保持至 II 期; 优势丝状菌的丰度也从种污泥时的未到 1 级分别迅速增至 I 期时的 4 级与 3 级, 并在 II 期保持. 文献[22]报道高浓度快速生物降解 COD 存在情况下易引起 *N. limicola* II 及



(a)相差1 000 ×下的 *Thiothrix* II、*N. limicola* II、*Sphaerotilus natans*；(b)奈瑟氏染色1 000 ×下的 *Thiothrix* II、*N. limicola* II、*Sphaerotilus natans*；(c)为 FISH 1 000 ×下的 *Thiothrix* II (GAM42a, 5'-cy3)、*N. limicola* II (ALF968, 5'-cy3)、*Sphaerotilus natans* (BET42a, 5'-cy3)

图 2 反应器内优势丝状菌的鉴定

Fig. 2 Identification of dominant filamentous bacteria in reactors

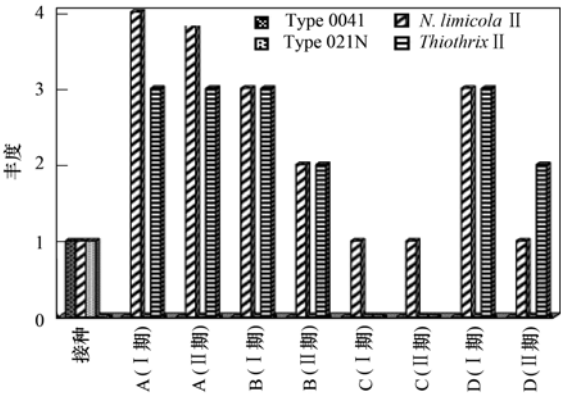


图 3 各反应器内生物膜丝状菌丰度

Fig. 3 Abundance of filamentous bacteria in biofilms of different reactors

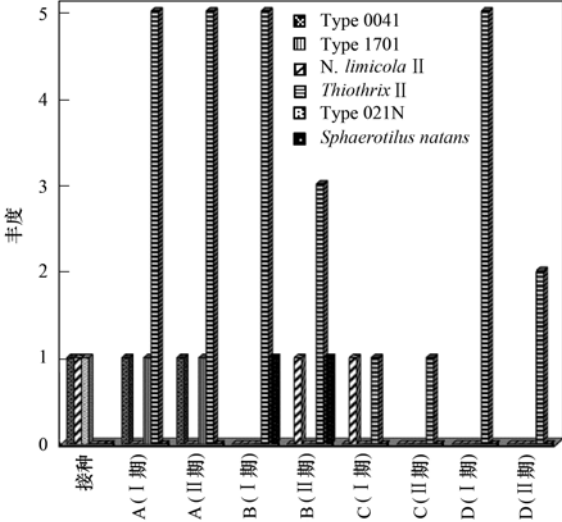


图 4 各反应器内悬浮污泥丝状菌丰度

Fig. 4 Abundance of filamentous bacteria in suspended sludge of different reactors

Thiothrix II 的快速生长,而 N 缺乏的条件更适宜 *Thiothrix* II 的生长. 反应器的进水为人工配水,且含有较高的可溶性 COD(可溶性淀粉及葡萄糖占总进水体积比为 1:4),C/N 比为 13.3/1,这是造成这两

类丝状菌占据优势而并使之取代原有骨架丝状菌成

丝状菌整体丰度主要贡献者的原因。A 反应器悬浮污泥中 I 期与 II 期的主要优势丝状菌为 *Thiothrix* II, 丰度为 5 级, 这主要是相比于生物膜, 悬浮污泥与进水有更好的传质接触, 从而造成丝状菌更好地优势生长。

B、C、D 反应器生物膜及悬浮污泥上的优势丝状菌则受到抗生素种类及浓度的影响, 演替趋势和丰度变化规律各不相同。B、D 反应器生物膜上优势丝状菌尽管也为 *N. limicola* II 及 *Thiothrix* II, 但在 I 期时丰度仅增至 3 级, 明显低于 A 反应器。当进水抗生素浓度提高时, B 中优势丝状菌在 II 期中的丰度则均降至 2 级; 而 D 中 *N. limicola* II 的丰度下降更为明显, 为 1 级, *Thiothrix* II 的丰度降至 2 级。B、D 反应器悬浮污泥中优势丝状菌的种类及丰度均与 A 反应器相同, I 期为 *Thiothrix* II, 丰度 5 级, 而在 II 期中的丰度则分别下降至 3 级与 2 级, 与各自生物膜上的丰度变化趋势相同。C 反应器生物膜上的优势丝状菌尽管在 I 期和 II 期均为 *N. limicola* II, 但丰度很低, 均仅为 1 级; 悬浮污泥中优势丝状菌 I 期为 *N. limicola* II 及 *Thiothrix* II, 丰度为 1 级; 而 II 期时仅剩 *Thiothrix* II, 丰度也维持在 1 级的较低水平。B 反应器投加抗生素为螺旋霉素, 是一种窄谱抑菌抗生素, 对革兰阳性球菌、杆菌及少数革兰阴性球菌等细菌的生长有抑制作用。尽管进水的组成成分有利于 *N. limicola* II 及 *Thiothrix* II 的生长, 与 A 反应器相比, 两类优势革兰氏阴性丝状菌的生长均受到抗生素的明显抑制, 且抑制作用随着抗生素浓度升高而更为显著; 同时螺旋霉素对 *N. limicola* II 抑制较 *Thiothrix* II 更为显著。D 反应器投加广谱杀菌抗生素链霉素, 其对优势革兰氏阴性丝状菌及丰度抑制过程与 B 反应器较为类似。C 反应器中投加广谱抑菌抗生素土霉素, 该类抗生素对革兰氏阳性及阴性菌均有抑制作用。在本实验中, 无论 I 期的低浓度还是 II 期的高浓度, 土霉素对生物膜上及池内悬浮丝状菌均产生了较强的抑制作用。

因此, 当存在高浓度易生物降解的有机物且进水 C/N 比较高的情况下, *N. limicola* II 和 *Thiothrix* II 菌快速生长, 同时造成生物膜反应器内悬浮颗粒浓度增加, 且悬浮颗粒粒径较小。随着抗生素的进入, 尽管其进水浓度均超过螺旋霉素、土霉素和链霉素对敏感菌的最低抑制浓度 (螺旋霉素为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[23], 土霉素为 $250 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[24], 链霉素为 $190 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[25]), 但对两类优势丝状菌的抑制作用效果并不相同, 土霉素抑制效果最为明显, 而链霉素

强于螺旋霉素; 抗生素对丝状菌的抑制作用均随浓度升高而升高。同时比较 A 与其余 3 个反应器中悬浮污泥性状, 投加抗生素的污泥紧固程度明显要高于未投加抗生素的污泥。值得注意的是, 本实验采用生物膜反应器, 其水力停留时间 (HRT) 及污泥停留时间 (SRT) 均较长, 工艺条件适合硝化细菌的生长, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化与丝状菌变化并未呈现出明显关联, 可能是由抗生素投加所造成, 且投加链霉素的反应器影响较为显著。

3 结论

(1) 不同抗生素种类胁迫下, 反应器中丝状菌丰度发生了明显的变化, 不同抗生素对丝状菌的抑制程度并不相同, 土霉素对丝状菌的抑制程度最为明显。

(2) 不同抗生素浓度胁迫下, 螺旋霉素、土霉素、链霉素均对优势丝状菌 *N. limicola* II、*Thiothrix* II 产生较强的抑制作用, 且抑制作用随抗生素浓度升高而升高; 抗生素对其抑制作用顺序为: 土霉素 > 链霉素 > 螺旋霉素。

(3) 土霉素对丝状菌有较好的抑制作用, 低浓度时 (投加浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 丝状菌丰度为 1 级, 且对出水水质无较大影响。

(4) 抗生素对丝状菌的抑制作用机制仍需后续深入的研究, 且会对目前一些实际问题, 如丝状菌形成的膜污染控制提供帮助。

参考文献:

- [1] 孟金凤. 厌氧/好氧-MBR 工艺处理抗生素废水的实验研究 [D]. 济南: 济南大学, 2014. 43-48.
- [2] 陈婷婷, 唐崇俭, 郑平. 制药废水厌氧氨氧化脱氮性能与毒性机理的研究 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(4): 504-509.
- [3] Martinez A G, Sanchez A R, Toledo M V M, et al. Effect of ciprofloxacin antibiotic on the partial-nitrification process and bacterial community structure of a submerged biofilter [J]. Science of the Total Environment, 2014, 476-477: 276-287.
- [4] Zhang Y, Xie J P, Liu M M, et al. Microbial community functional structure in response to antibiotics in pharmaceutical wastewater treatment systems [J]. Water Research, 2013, 47(16): 6298-6308.
- [5] Matos M, Pereira M A, Parpot P, et al. Influence of tetracycline on the microbial community composition and activity of nitrifying biofilms [J]. Chemosphere, 2014, 117: 295-302.
- [6] Fatone F, Battistoni P, Pavan P, et al. Operation and maintenance of full-scale municipal membrane biological reactors: A detailed overview on a case study [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(21): 6688-6695.
- [7] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, et al. Filamentous

- bulking sludge—a critical review [J]. *Water Research*, 2004, **38**(4): 793-817.
- [8] 梅丽, 杨平, 尚书勇, 等. 膜生物反应器在制药废水处理的研究进展[J]. *河南化工*, 2004, (10): 1-4.
- [9] 赵英, 百晓琴, 高飞亚, 等. 膜生物反应器在污水处理中的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(12): 33-36.
- [10] 侍宽, 薛罡, 高品, 等. 丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2241-2248.
- [11] 赵霞, 赵阳丽, 陈忠林, 等. 好氧颗粒污泥发生丝状菌污泥膨胀的控制措施[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(3): 15-19.
- [12] 米闯, 谢丽, 周琪, 等. 膜生物反应器中污泥膨胀与生物泡沫的形成与控制研究进展[J]. *水处理技术*, 2011, **37**(6): 1-5.
- [13] 任南琪, 刘娇, 王秀薇. 低温时污泥膨胀对 MBR 中膜污染的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 155-159.
- [14] 王嵘, 王华, 王金保. 膜生物反应器污泥培养过程中丝状菌污泥膨胀的控制[J]. *中国给水排水*, 2009, **25**(3): 46-49.
- [15] 张云霞, 郭淑琴, 季民, 等. 膜生物反应器发生污泥膨胀后的控制措施研究[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(9): 64-66.
- [16] 孙寓姣, 王勇. 膜-生物反应器中污泥膨胀对生物相及微生物多样性影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2006, **38**(6): 887-892.
- [17] 孙寓姣, 王勇, 黄霞. MBR 系统内丝状菌污泥膨胀的分子生态学解析[J]. *环境科学*, 2004, **25**(S1): 56-58.
- [18] 龙腾锐, 何强, 林刚. 活性污泥中丝状菌与絮体结构的关系研究[J]. *中国给水排水*, 2000, **16**(2): 5-8.
- [19] 国家环境保护局. 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, 2003.
- [20] Eikelboom D H. Filamentous organisms observed in activated sludge[J]. *Water Research*, 1975, **9**(4): 365-388.
- [21] Nielsen P H, Daims H, Lemmer H. FISH handbook for biological wastewater treatment; identification and quantification of microorganisms in activated sludge and biofilms by FISH [M]. IWA Publishing, 2009.
- [22] Tandoi V, Jenkins D, Wanner J. Activated sludge separation problems; theory, control measures, practical experiences[M]. IWA Publishing, 2005.
- [23] Chan E C, Al-Joburi W, Cheng S L, *et al.* In vitro susceptibilities of oral bacterial isolates to spiramycin [J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 1989, **33**(11): 2016-2018.
- [24] Halling-Sørensen B, Sengeløv G, Tjørnelund J. Toxicity of tetracyclines and tetracycline degradation products to environmentally relevant bacteria, including selected tetracycline-resistant bacteria[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, **42**(3): 263-271.
- [25] Nałęcz-Jawecki G, Wadhia K, Adomas B, *et al.* Application of microbial assay for risk assessment biotest in evaluation of toxicity of human and veterinary antibiotics [J]. *Environmental Toxicology*, 2010, **25**(5): 487-494.

CONTENTS

Hygroscopic Properties of Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing in Spring	XU Bin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Relative Humidity and Aerosol Physicochemical Properties on Atmospheric Visibility in Northern Suburb of Nanjing	YU Xing-na, MA Jia, ZHU Bin, <i>et al.</i> (1919)
Pollution Characteristics and Light Extinction Effects of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter Hazy Days at North Suburban Nanjing ...	ZHOU Yao-yao, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1926)
Characteristics of Winter Atmospheric Mixing Layer Height in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Their Relationship with the Atmospheric Pollution	LI Meng, TANG Gui-qian, HUANG Jun, <i>et al.</i> (1935)
Process-based Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Paint Industry in the Yangtze River Delta, China	MO Zi-wei, NIU He, LU Si-hua, <i>et al.</i> (1944)
Concentrations and Speciation of Dissolved Heavy Metal in Rainwater in Guiyang, China	ZHU Zhao-zhou, LI Jun, WANG Zhi-ru (1952)
Situation and Characteristics of Air Pollutants Emission from Crematories in Beijing, China	XUE Yi-feng, YAN Jing, TIAN He-zhong, <i>et al.</i> (1959)
Emission Characteristics of Water-Soluble Ions in Fumes of Coal Fired Boilers in Beijing	HU Yue-qi, MA Zhao-hui, FENG Ya-jun, <i>et al.</i> (1966)
Analysis on Mechanism of Rainout Carried by Wet Stack of Thermal Power Plant	OUYANG Li-hua, ZHUANG Ye, LIU Ke-wei, <i>et al.</i> (1975)
Removal Characteristics of Elemental Mercury by Mn-Ce/molecular Sieve	TAN Zeng-qiang, NIU Guo-ping, CHEN Xiao-wen, <i>et al.</i> (1983)
Indoor Exposure to Particle-Bound BFRs via Inhalation	LI Xiu-wen, ZENG Hui, NI Hong-gang (1989)
Organic Carbon and Elemental Carbon in Forest Biomass Burning Smoke	HUANG Ke, LIU Gang, ZHOU Li-min, <i>et al.</i> (1998)
Atmospheric Particle Retaining Function of Common Deciduous Tree Species Leaves in Beijing	WANG Bing, WANG Xiao-yan, NIU Xiang, <i>et al.</i> (2005)
Photonic Efficiency of Ethyl Acetate Photolysis in Gas Phase: Dependence on Wavelength and Catalyst	FANG Xue-hui, ZHAO Jie, SHU Li, <i>et al.</i> (2010)
Phytoplankton Light Absorption Properties During the Blooms in Adjacent Waters of the Changjiang Estuary	LIU Yang-yang, SHEN Fang, LI Xiu-zhen (2019)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Offshore Marine Area of Shenzhen	LIU Bao-lin, ZHANG Hong, XIE Liu-wei, <i>et al.</i> (2028)
Composition and Environmental Effects of LFOM and HFOM in "Incense-Ash" Sediments of West Lake, Hangzhou, China	LI Jing, ZHU Guang-wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (2038)
Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from the Heavily Polluted Area of Xiaoqing River	HUANG Ying, LI Yong-xia, GAO Fu-wei, <i>et al.</i> (2046)
Response of Algae to Nitrogen and Phosphorus Concentration and Quantity of Pumping Water in Pumped Storage Reservoir	WAN You-peng, YIN Kui-hao, PENG Sheng-hua (2054)
Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Chlorophyll a, and Their Relationship in Pengxi River Backwater Area, Three Gorges Reservoir	ZHANG Lei, WEI Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2061)
Environmental Effects of Algae Bloom Cluster: Impact on the Floating Plant Water Hyacinth Photosynthesis	BAO Xian-ming, GU Dong-xiang, WU Ting-ting, <i>et al.</i> (2070)
<i>In Situ</i> High-Resolution Analysis of Labile Phosphorus in Sediments of Lake Chaohu	LI Chao, WANG Dan, YANG Jin-yan, <i>et al.</i> (2077)
Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotope of Shibing Dolomite Karst Area in Guizhou Province	XIAO Shi-zhen, LAN Jia-cheng, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2085)
Stable Isotope Characteristics in Different Water Bodies in Changsha and Implications for the Water Cycle	LI Guang, ZHANG Xin-ping, ZHANG Li-feng, <i>et al.</i> (2094)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Soil Water in the Water Source Area of Yuanyang Terrace	ZHANG Xiao-juan, SONG Wei-feng, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2102)
Performance of Grass Swales for Controlling Pollution of Roadway Runoff in Field Experiments	HUANG Jun-jie, SHEN Qing-ran, LI Tian (2109)
Performance Study of Bromochloroacetonitrile Degradation in Drinking Water by Fe/Cu Catalytic Reduction	DING Chun-sheng, MA Hai-long, FU Yang-ping, <i>et al.</i> (2116)
Catalytic Degradation of Diclofenac Sodium over the Catalyst of 3D Flower-like α -FeOOH Synergized with H ₂ O ₂ Under Visible Light Irradiation	XU Jun-ge, LI Yun-qin, HUANG Hua-shan, <i>et al.</i> (2122)
Degradation of Organic Sunscreens 2-hydroxy-4-methoxybenzophenone by UV/H ₂ O ₂ Process: Kinetics and Factors	FENG Xin-xin, DU Er-deng, GUO Ying-qing, <i>et al.</i> (2129)
Photocatalytic Degradation of Perfluorooctanoic Acid by Pd-TiO ₂ Photocatalyst	LIU Qing, YU Ze-bin, ZHANG Rui-han, <i>et al.</i> (2138)
Efficient Photolysis of Acid Orange 7 Using Low-frequency Electrodeless Lamp	WU Peng, WU Jun, GAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (2147)
Degradation of 3,4-Dichlorobenzotrifluoride by Fe ₃ O ₄ /CeO ₂ -H ₂ O ₂ Heterogeneous Fenton-Like Systems	SUN Zheng-nan, YANG Qi, JI Dong-li, <i>et al.</i> (2154)
Preparation of Coated CMC-Fe ⁰ Using Rheological Phase Reaction Method and Research on Degradation of TCE in Water	FAN Wen-jing, CHENG Yue, YU Shu-zhen, <i>et al.</i> (2161)
Degradation Mechanism of 4-Chlorophenol on a Pd-Fe/graphene Multifunctional Catalytic Cathode	QI Wen-zhi, WANG Fan, WANG Hui, <i>et al.</i> (2168)
Removal Kinetics and Mechanism of Aniline by Manganese-oxide-modified Diatomite	XIAO Shao-dan, LIU Lu, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (2175)
Adsorption Characteristics of Nitrate and Phosphate from Aqueous Solution on Zirconium-Hexadecyltrimethylammonium Chloride Modified Activated Carbon	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2185)
Removal Congo Red from Aqueous Solution Using Poly (AM-co-DVB)	ZHANG Luan-luan, LIAO Yun-wen, GAO He-jun, <i>et al.</i> (2195)
Energy Consumption Comparison and Energy Saving Approaches for Different Wastewater Treatment Processes in a Large-scale Reclaimed Water Plant	YANG Min, LI Ya-ming, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (2203)
Transformation Regularity of Nitrogen in Aqueous Product Derived from Hydrothermal Liquefaction of Sewage Sludge in Subcritical Water	SUN Yan-qing, SUN Zhen, ZHANG Jing-lai (2210)
Start-up Performance of ANAMMOX Enrichment with Different Inoculated Sludge in Anaerobic Baffled Reactor	ZHANG Hai-qin, WANG Fan-fan, LI Yue-han, <i>et al.</i> (2216)
Influencing Factors for Hydrolysis of Sewage Sludge Pretreated by Microwave-H ₂ O ₂ -OH Process	JIA Rui-lai, WEI Yuan-song, LIU Ji-bao (2222)
Enrichment and Characterization of a Denitrifying Bacteria Consortium from Lihe River's Sediment	YONG Jia-jun, CHENG Xiao-ying (2232)
Investigation for Filamentous Bacteria Community Diversity in Activated Sludge Under Various Kinds and Concentration Conditions of Antibiotics	WANG Run-fang, WANG Qin, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2239)
Isolation and Identification of Petroleum Degradation Bacteria and Interspecific Interactions Among Four <i>Bacillus</i> Strains	WANG Jia-nan, SHI Yan-yun, ZHENG Li-yan, <i>et al.</i> (2245)
Effects of Dissimilatory Reduction of Goethite on Mercury Methylation by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	SI You-bin, SUN Lin, WANG Hui (2252)
Effect of Root Iron Plaque on Norfloxacin Uptake by Rice	MA Wei, BAO Yan-yu (2259)
Effects of Tillage on Soil Respiration and Root Respiration Under Rain-Fed Summer Corn Field	LU Xing-li, LIAO Yun-cheng (2266)
Seasonal Provincial Characteristics of Vertical Distribution of Dust Loadings and Heavy Metals near Surface in City	LI Xiao-yan, ZHANG Shu-ting (2274)
Characteristics of Phthalic Acid Esters in Agricultural Soils and Products in Areas of Zhongshan City, South China	LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (2283)
Variations and Influencing Factors of Oral Bioaccessibility of Polybrominated Diphenyl Ethers in Soils Using an <i>In-vitro</i> Gastrointestinal Model	ZHANG Yun-hui, LIU Wei-jian, CHENG Fang-fang, <i>et al.</i> (2292)
Impacts of Biochar Input on Mineralization of Native Soil Organic Carbon	CHEN Wei, HU Xue-yu, LU Hai-nan (2300)
Effects of Remedies on the Remediation of Typical Pb and Zn-contaminated soil in Huanjiang, Guangxi	ZENG Wei-quan, SONG Bo, YUAN Li-zhu, <i>et al.</i> (2306)
Mechanism Study of the Smectite-OR-SH Compound for Reducing Cadmium Uptake by Plants in Contaminated Soils	ZENG Yan-jun, ZHOU Zhi-jun, ZHAO Qiu-xiang (2314)
Land Use Pattern Change and Regional Sustainability Evaluation of Wetland in Jiaogang Lake	YANG Yang, CAI Yi-min, BAI Yan-ying, <i>et al.</i> (2320)

《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6月15日 第36卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 6 Jun. 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