

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思	(1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全	(1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思	(1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武	(1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽	(1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干	(1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平	(1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇	(1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰	(1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军	(1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国	(1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆	(1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健	(1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美	(1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚	(1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶花香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红	(1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅	(1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平	(1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非	(1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞	(1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华	(1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉	(1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾	(1374)
咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅	(1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿	(1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏	(1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟	(1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙	(1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥	(1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛	(1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞	(1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影	(1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿	(1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪勋	(1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新	(1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东	(1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱	(1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维	(1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽	(1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢	(1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军	(1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎	(1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕	(1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳	(1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲	(1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生	(1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生	(1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新	(1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君	(1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水	(1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠	(1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新	(1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提	(1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅	(1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志	(1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增	(1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华	(1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞	(1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰	(1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来	(1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)		

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟

周振¹, 吴志超², 王志伟², 杜兴治³, 蒋玲燕³, 邢灿¹

(1. 上海电力学院环境与化学工程学院, 上海 200090; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 3. 上海城投污水处理有限公司, 上海 201203)

摘要: 数学模拟是污水处理系统教学科研、工艺评估、运行优化和自动控制的重要工具, 在污水处理厂中得到了广泛应用. 利用过程数据对 ASM2d 模型进行校正, 并分析评估了校正模型在多模式厌氧/缺氧/好氧(AAO)工艺 3 个模式 15 个工况下稳态模拟及 AO 模式下动态模拟的可靠性. 15 个工况的稳态模拟表明, 校正模型能准确模拟污泥浓度和出水水质; 在 AO 模式的动态模拟中, 模拟曲线与出水水质以及污泥浓度的变化趋势相一致, 模拟结果具有较高的准确度.

关键词: 污水处理; 模拟; 活性污泥; 数学模型; 厌氧/缺氧/好氧工艺

中图分类号: X11 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1442-06

Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process

ZHOU Zhen¹, WU Zhi-chao², WANG Zhi-wei², DU Xing-zhi³, JIANG Ling-yan³, XING Can¹

(1. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Chentou Wastewater Treatment Limited Company, Shanghai 201203, China)

Abstract: Mathematical modeling is a useful tool for professional education, process development, design evaluation, operational optimization and automatic control of the wastewater treatment system, and has been extensively applied in numerous full-scale wastewater treatment plants. The ASM2d model was calibrated by the process data, and used to simulate 15 operational test runs of the multimode anaerobic/anoxic/aerobic (AAO) process. After calibration, the model was capable of simulating the sludge concentrations and effluent data in 15 test runs of the multimode AAO system. The dynamic simulation results showed an overall good agreement between the measured and simulated data, for both effluent data and sludge concentrations, with a good reproduction of dynamic processes in AO test runs.

Key words: wastewater treatment; simulation; activated sludge; mathematical model; anaerobic/anoxic/aerobic process

污水生物处理系统的数学模拟是利用数学模型类比复杂的生化反应以寻求过程规律的一种方法, 是数学模型在污水处理厂应用的关键性步骤^[1,2]. 自从活性污泥数学模型(ASM_s)^[3]推出以来, 数学模拟在污水处理厂的应用得到了快速发展, 并出现了许多专业模拟软件^[4]. 污水处理系统的数学模拟具有 4 方面的重要作用: ①教学科研, 通过模拟加深对流程的理解, 并根据构思开发新工艺^[5,6]; ②工艺评估, 通过模拟评估对比多个工艺方案^[7], 在升级改造处理中应用较多^[5,8,9]; ③运行优化, 通过工艺策略选择提高工艺稳定性, 改善出水水质、降低系统能耗^[10,11]; ④自动控制, 将工艺模型简化后纳入自动控制算法中, 提高系统的控制品质^[12].

本研究将以多模式厌氧/缺氧/好氧(AAO)工艺为对象, 以倒置 AAO 工艺的运行数据校正 ASM2d 模型, 并分析校正模型在 AAO、倒置 AAO

和 AO 模式 15 个运行工况下稳态模拟及 AO 模式下动态模拟中的准确性, 以评估数学模拟在同一进水条件、不同运行工艺下应用的可靠性.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行工况

多模式 AAO 试验装置位于白龙港污水处理厂, 共设 3 套, 其选择池、缺氧池、厌氧池和好氧池的有效体积分别为 2.7、18.9、10.8 和 52.8 L; 二沉池体积为 62.4 L, 深度为 1.05 m. 多模式 AAO 工艺可根据季节变化、排放要求和进水情况通过内回流的回流点调整或启闭在 AAO、倒置 AAO 和 AO 模式间灵活切换, 如图 1 所示.

收稿日期: 2012-07-27; 修订日期: 2012-09-05

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA063403); 上海市晨光计划项目(2011CG60); 上海市教委科研创新项目(12YZ137)

作者简介: 周振(1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水处理原理与技术, E-mail: zhouzhen09@yahoo.com.cn

污水以恒定流量(Q_i) $200\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 以分段进水方式分别进入装置选择池和厌氧池,以分段进水因子 f 表征进入选择池的水量占总进水量的体积分数. 污泥内外回流比(r 和 R)范围分别为 $25\% \sim 100\%$ 和 $25\% \sim 200\%$. 好氧池溶解氧(DO)和pH分别控制为 $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.0 \sim 7.5$. 污泥龄(SRT)通过剩余污泥排放控制为 $10 \sim 20\text{ d}$. 试验主要工况操作条件如表1所示.

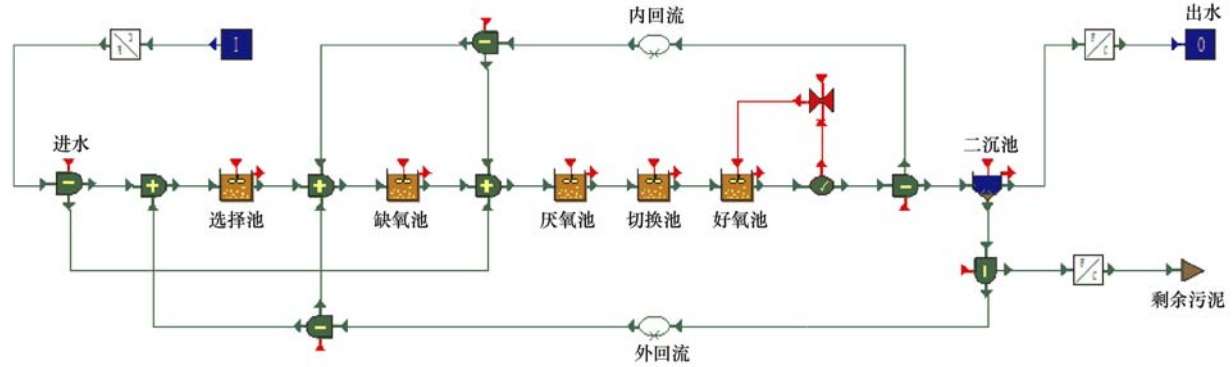


图1 多模式 AAO 系统的工艺模型
Fig. 1 Runtime model of the multimode AAO process

表1 多模式 AAO 现场试验工况参数与进水水质表

Table 1 Operational parameters and influent pollutants of pilot-scale multimode AAO test runs														
运行模式	编号	运行天数/d	水温/ $^{\circ}\text{C}$	SRT/d	f / $\%$	r / $\%$	R / $\%$	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	S_{NH} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	S_{NO} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	S_{PO} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	X_{TSS} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
AO	P1	25	19.5 ~ 23.5	15	100	—	100	243.2	23.07	0.92	32.94	1.48	3.39	123.3
	P2	35	15.0 ~ 19.5	15	100	—	50	287.6	25.52	0.65	35.39	1.48	3.55	108.4
	P3	25	11.9 ~ 14.2	15	100	—	25	292.2	27.52	0.74	35.69	1.31	3.41	184.0
	P4	60	16.8 ~ 25.0	10	100	—	50	273.3	27.78	0.36	34.75	1.88	3.51	128.3
	P5	60	24.2 ~ 30.0	20	100	—	50	234.1	26.34	0.54	31.35	1.67	2.75	119.7
倒置 AAO	R1	35	19.5 ~ 23.5	15	50	50	100	241.0	22.70	0.82	32.31	1.50	1.60	112.0
	R2	35	15.0 ~ 19.5	15	30	50	50	287.6	26.28	0.65	35.39	1.48	3.55	131.4
	R3	25	11.9 ~ 14.2	15	30	25	25	292.2	28.39	0.74	35.69	1.31	3.41	140.0
	R4	55	16.8 ~ 24.0	10	30	25	25	276.1	28.28	0.45	34.78	1.83	3.48	163.3
	R5	85	24.0 ~ 30.0	20	30	25	25	234.7	24.47	0.50	31.70	1.70	2.90	131.2
AAO	C1	35	19.5 ~ 23.5	10	100	100	60	253.0	24.99	0.51	31.65	2.16	3.71	130.6
	C2	45	15.8 ~ 22.0	15	100	200	30	289.8	22.25	0.57	33.63	1.49	3.57	183.7
	C3	65	22.0 ~ 30.2	10	100	200	30	259.6	23.9	0.73	30.68	1.82	3.11	154.9
	C4	75	18.5 ~ 25.2	20	100	100	30	256.7	24.42	0.69	31.70	1.67	3.26	192.3
	C5	45	17.6 ~ 25.4	15	100	200	60	289.8	26.77	0.42	33.63	1.49	3.57	183.7

1.2 样品采集与分析方法

每隔2~3 d取进水、出水 and 好氧池混合液进行常规分析,分析指标包括进水和出水 COD、氨氮(S_{NH})、硝态氮(S_{NO})、总氮(TN)、正磷酸盐(S_{PO})、总磷(TP)和总悬浮固体(X_{TSS}),以及混合液悬浮固体(MLSS)、挥发性悬浮固体(MLVSS)和污泥体积指数(SVI),同时测定好氧段的DO和pH值. 工艺过程数据(各反应段的 S_{NH} 、 S_{NO} 和 S_{PO})则每周测定一次. 各工况的进水常规分析指标平均值如表1所示.

脱氮除磷系统的数学模拟还需进行进水COD和氮磷组分划分. COD组分包括溶解性惰性组分 S_1 、颗粒性惰性组分 X_1 、易生物降解组分 S_5 、慢速

生物降解组分 X_5 、异养菌 X_{H} 、自养菌 X_{AUT} 和聚磷菌 X_{PAO} ,组分划分可采用3组批式试验^[13]完成. 由于组分划分工作量较大,将其作为模型输入值时将不考虑季节等因素的影响,假定各组分在COD中所占比例在所有水样中均为恒定值,具体划分比例参见文献[14]. 氮磷组分转化因子则通过参数校正确定.

2 结果与讨论

2.1 模型构建与参数校正

模型构建采用WEST 3.7.5完成. 多模式AAO工艺试验由于装置体积较小,基本可以充分混合,水力模型可采用串联反应器模式近似^[2]. 根据这一原

则构建的多模式 AAO 工艺模型如图 1 所示. 生化反应模型选择 ASM2d 模型的改进版本 ASM2dTemp, 该模型可在不同温度下模拟碳氧化、硝化-反硝化以及包括反硝化除磷在内的生物除磷过程等. 二沉池模型则选用一维分层模型——双指数模型.

本研究的模型参数校正采用倒置 AAO 模式运

行数据, 以过程数据为主、出水水质为辅的校正策略, 具体校正方法与过程参见文献[14]. 除了氮磷组分因子 i_N 和 i_P 外, ASM2d 模型校正只需调整 $K_{NH,AUT}$ 、 $\eta_{NO,H}$ 、 q_{fe} 和 $\eta_{NO,PAO}$ 4 个动力学参数(表 2). 二沉池模型参数根据 SVI 等操作参数计算调整^[15]. 在本研究的稳态和动态模拟中, 除表 2 所列校正值和特别说明外, 其它参数均取默认值.

表 2 模型校正中调整的参数默认值与校正值

Table 2 Calibrated and default parameters of the process model

参数	名称	单位	默认值	校正值
$i_{N,XI}$	X_I 的 N 含量 $[m(N)]/[m(COD)]$	$g \cdot g^{-1}$	0.03	0.01
$i_{N,XS}$	X_S 的 N 含量 $[m(N)]/[m(COD)]$	$g \cdot g^{-1}$	0.04	0.02
$i_{P,SF}$	S_F 的 P 含量 $[m(P)]/[m(COD)]$	$g \cdot g^{-1}$	0.01	0.005
$i_{P,XI}$	X_I 的 P 含量 $[m(P)]/[m(COD)]$	$g \cdot g^{-1}$	0.01	0.005
$i_{P,XS}$	X_S 的 P 含量 $[m(P)]/[m(COD)]$	$g \cdot g^{-1}$	0.01	0.005
$K_{NH,AUT}$	X_{AUT} 的氨氮半饱和系数(以 N 计)	$mg \cdot L^{-1}$	1.0	0.5
$\eta_{NO,H}$	X_H 的反硝化降低因子	—	0.8	0.6
q_{fe}	发酵速率常数	d^{-1}	3.0	1.5
$\eta_{NO,PAO}$	X_{PAO} 的缺氧降低因子	—	0.6	0.8

2.2 多模式 AAO 不同运行模式的稳态模拟

采用表 1 所列的多模式 AAO 系统 15 个工况的工艺参数, 以进水污染物平均浓度为输入值, 利用表 2 的校正参数对污泥浓度和出水水质进行稳态模拟. 稳态模拟值为多模式 AAO 系统长期稳定运行(至少 100 d)的模拟值; 而实测值则为各个工况稳定运行阶段的平均值($\bar{x}$). 对比时还考虑实测值 95% ($\alpha = 0.05$) 的置信区间(CI), 计算如式(1)所示.

$$CI = \bar{x} \pm 1.96 \left(\frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right) \quad (1)$$

式中, σ 为总标准差, n 为样品数量.

多模式 AAO 工艺 15 个工况下好氧池污泥浓度实测值与稳态模拟值的对比如图 2 所示. 从中可见, 除工况 C3 外, 所有工况条件下 MLSS 的稳态模拟值均在实测值 95% 的置信区间内; 而在 MLVSS 模拟中, MLVSS/MLSS 取 15 组工况实测平均值 0.64, 有 4 个工况(R5、P4、P5 和 C3)的模拟值明显偏离实测值. 经分析知, 工况 C3 出现偏离是由于现场试验多次故障导致运行不稳定; 而 R5 和 P5 的偏离则是由于 $MLVSS/MLSS = 0.53 \pm 0.02$, 明显低于 0.64 所致. 总体而言, 校正后的工艺模型对多模式 AAO 系统污泥浓度的稳态模拟较为准确.

多模式 AAO 工艺试验各工况条件下出水 TSS、COD、 S_{NH} 、TN 和 TP 的实测值与稳态模拟值对比如图 3 所示. X_{TSS} 的准确模拟是出水 COD、TN 和 TP

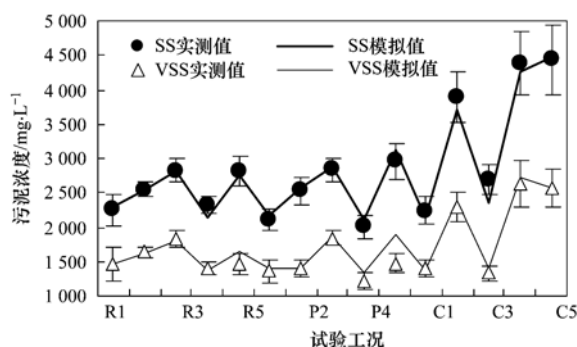


图 2 多模式 AAO 工艺试验 15 个工况污泥浓度的稳态模拟

Fig. 2 Simulation of sludge concentrations for 15 multimode AAO test runs

等指标准确模拟的前提^[16]. 除工况 C1 外, 表 1 中的其它 14 个工况均测定了 X_{TSS} . 在图 3(a) 中, 有 3 个工况(P2、P4 和 C4)的模拟值明显偏离实测值. 这主要是由于在小规模试验中, 二沉池运行易于受各种因素干扰所致, 同时系统运行故障导致的好氧池 MLSS 波动也会造成 X_{TSS} 的明显变化. 显然, 这些外界干扰所造成的二沉池运行波动很难在二沉池模型中体现. 不过总体而言, 校正后的工艺模型基本能够预测正常运行条件下各工况的 X_{TSS} .

在 COD 的稳态模拟中, 工况 R5、P4 和 C3 的模拟值明显偏离实测值, 但偏差均在 $5 mg \cdot L^{-1}$ 以内. 工况 P4、C2 和 C5 中 S_{NH} 的稳态模拟值偏离实测值 95% 的置信区间, 但偏差均小于 $0.2 mg \cdot L^{-1}$. 5 个工况(R4、P4、C1、C3 和 C4)的 TN 稳态模拟值在实测值置信区间外, 但平均相对标准偏差仅为

9.7%. 15 个工况下 TP 的稳态模拟值与实测值最为接近, 仅工况 R5 和 C1 略有偏差. 由图 3(d) 和 3(e) 可知, 降低回流比 (P1 ~ P3、R1 ~ R3) 能有效降低出水 TP, 但出水 TN 会显著上升^[14]; 延长污泥龄 (P4 与 P5、R4 与 R5) 能削减出水 S_{NH} ^[1,17], 但会造成出水 TP 反弹^[18]. 模拟值能很好地反映上述变化趋势. 由以上分析知, 校正模型的稳态模拟值与实

测值基本吻合.

2.3 多模式 AAO 系统的动态模拟

工况 R2 的动态模拟曾用于校正模型的验证, 其实测值与动态模拟曲线基本吻合^[14]. 本研究将以 AO 模式工况 P2 动态模拟分析同一进水条件、不同工艺下校正模型应用的可靠性. 动态模拟的初始值为前一工况 (P1) 的长期稳态模拟值. 模拟的准确程度采用式 (2) 所示的平均相对误差 (ARD) 评估:

$$ARD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| 1 - \frac{c_{sim}(t_i)}{c_{exp}(t_i)} \right| \quad (2)$$

式中, $c_{sim}(t_i)$ 和 $c_{exp}(t_i)$ 分别为 t_i 时刻模拟和实测值.

由图 4 可见, 校正后的污水处理工艺模型能够很好地反映工况 P2 好氧段 MLSS 和 MLVSS 实测值的变化趋势. 在工况 P2 中, MLSS 和 MLVSS 模拟的 ARD 值分别为 4.81% 和 5.02%. 由于受进水污染物浓度波动的影响, 工况 P2 前 5 d 和最后 10 d 均出现了活性污泥浓度显著性增长的趋势, 校正后工艺模型的动态模拟准确描述了这一规律.

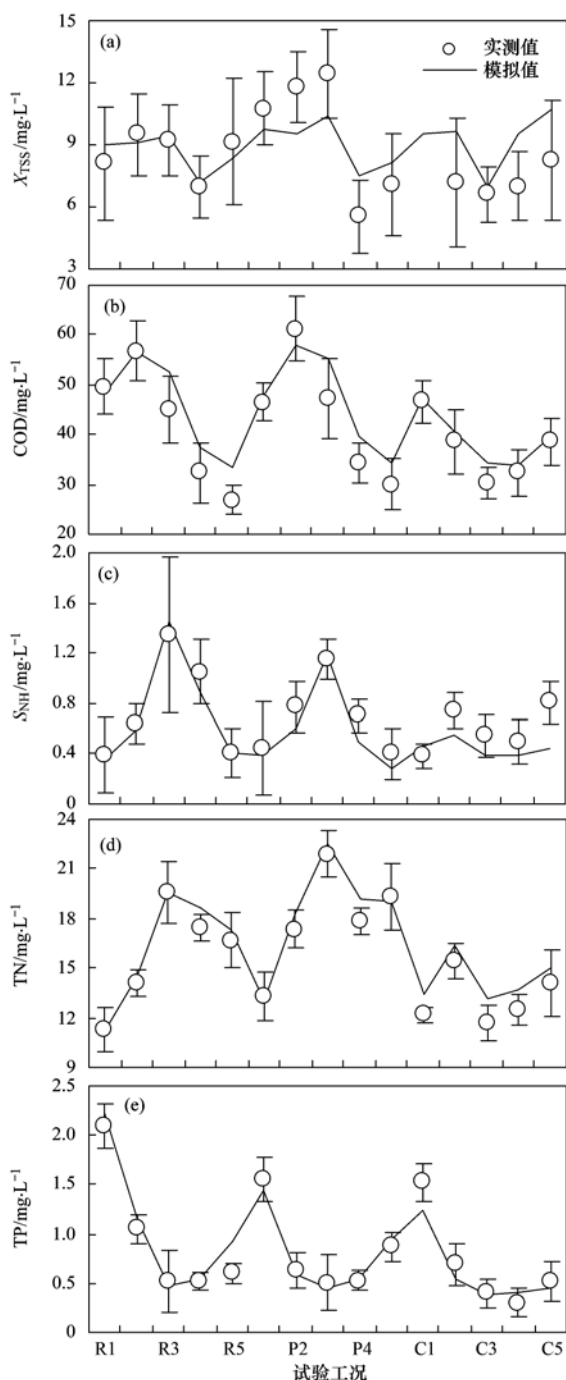


图3 多模式 AAO 工艺试验 15 个工况出水污染物的稳态模拟

Fig. 3 Simulation of effluent pollutants for 15 multimode AAO test runs

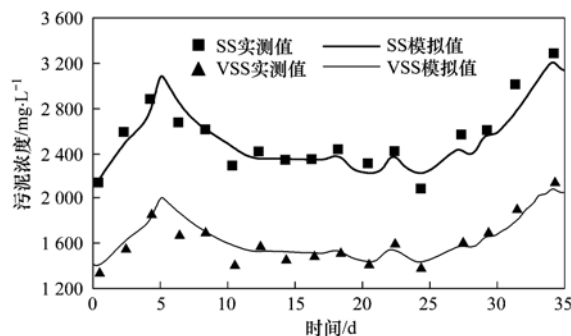


图4 工况 P2 中好氧池污泥浓度的实测值与模拟值的对比

Fig. 4 Measured and simulated sludge concentrations of test run P2

图 5(a) 描述了工况 P2 中 X_{TSS} 模拟值和实测值的变化. 工况 P2 前 16 d, $SVI(49.8 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1})$ 高于后期 ($41.3 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) 造成后期出水 X_{TSS} 较低. 由于出水 X_{TSS} 对低浓度区沉降特性参数 γ_p 的变化十分灵敏^[15,19], 因此动态模拟时采取分阶段设定 γ_p 的方法, 16 d 前后 γ_p 分别设为 0.021 6 和 0.007 2. 采用该方法后 X_{TSS} 的 ARD 为 16.8%, 误差集中于沉降性能波动较大的 14 d 和 16 d, 但模拟曲线基本可反映 SS 的变化趋势.

图 5(b) 对比了工况 P2 出水 COD 实测值和动态模拟值的变化. 校正后的工艺模型模拟 COD 的 ARD 值为 11.3%, 其中第 27 d 实测值 ($80.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 偏离较大. 从出水组分来看, 由于 S_i 在系

统中无法降解也无法沉降去除^[3,20,21],该组分在出水 COD 中所占比例很高,这与文献[16,22]报道结论类似。

出水综合性指标 TN 和 TP 可用于系统总体脱氮除磷效果的评价。由图 5(c)知,出水 TN 浓度的模拟值与实测值基本吻合,工况 P2 动态模拟的 ARD 为 6.12%。而 TP 动态模拟的 ARD 为 14.8%,沉降性能波动较大的 14 d 和 16 d 以及第 27 d 的误差较大。但动态模拟曲线基本能够反映 TP 的波动趋势及出水 SS 波动对 TP 的显著性影响[图 5(d)]。但在工况 P2 最后 15 d 中,TP 的模拟值略高于实测值,这可能是由于最后 15 d 实际温度降低至 15.0℃,而模拟采用平均温度 17.3℃。由于 X_{PAO} 属于嗜冷性细菌^[23~25],因此实际试验的除磷效率会略高于模拟值。

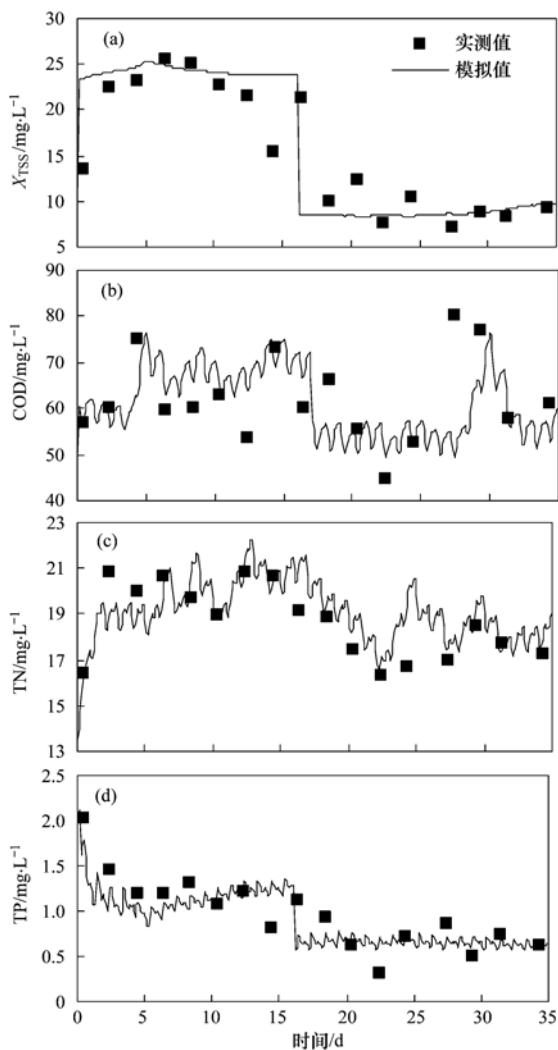


图 5 工况 P2 的出水综合性指标实测值与动态模拟值的对比

Fig. 5 Measured and simulated effluent composite variables of test run P2

3 结论

以倒置 AAO 模式过程数据对 ASM2d 模型进行校正,并将校正模型应用于多模式 AAO 系统 3 个模式 15 个工况的模拟。15 个工况污泥浓度和出水水质的模拟结果表明,校正后模型的稳态模拟值基本都在实测值 95% 的置信区间内。对 AO 模式的动态模拟结果表明,模型校正后的模拟曲线与出水 X_{TSS} 、COD、TN 和 TP 以及好氧段活性污泥的变化趋势相一致,模拟结果具有较高的准确度。

参考文献:

- [1] Gernaey K V, Van Loosdrecht M C M, Henze M, *et al.* Activated sludge wastewater treatment plant modelling and simulation: State of the art [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, **19**(9): 763-783.
- [2] Makinia J, Rosenwinkel K H, Spering V. Long-term simulation of the activated sludge process at the Hanover-Gümmerwald pilot WWTP[J]. *Water Research*, 2005, **39**(3): 1489-1502.
- [3] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 [R]. London: IAW Publishing, 2000.
- [4] 周振,吴志超,顾国维. 活性污泥系统仿真软件的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(4): 1-5.
- [5] Salem S, Berends D, Heijnen J J, *et al.* Model-based evaluation of a new upgrading concept for N-removal[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **45**(6): 169-176.
- [6] Morgenroth E, Arvin E, Vanrolleghem P. The use of mathematical models in teaching wastewater treatment engineering [J]. *Water Science and Technology*, 2002, **45**(6): 229-233.
- [7] Hao X D, Van Loosdrecht M C M, Van Meijer S C F, *et al.* Model based evaluation of two BNR processes-UCT and A_2N [J]. *Water Research*, 2001, **35**(12): 2851-2860.
- [8] 郝晓地,仇付国,张璐平,等. 应用数学模拟技术升级改造二级污水处理工艺[J]. *中国给水排水*, 2007, **23**(16): 25-29.
- [9] 张代钧,卢培利,陈丹琴,等. 传统活性污泥法 COD 去除及脱氮改造的模拟[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(4): 448-453.
- [10] Ni B J, Xie W M, Liu S G, *et al.* Modeling and simulation of the sequencing batch reactor at a full-scale municipal wastewater treatment plant[J]. *AIChE Journal*, 2009, **55**(8): 2186-2196.
- [11] Xie W M, Zhang R, Li W W, *et al.* Simulation and optimization of a full-scale Carrousel oxidation ditch plant for municipal wastewater treatment [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **56**(1-2): 9-16.
- [12] Shen W H, Chen X Q, Corriou J P. Application of model predictive control to the BSM1 benchmark of wastewater treatment process[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2008, **32**(12): 2849-2856.
- [13] 周振,吴志超,王志伟,等. 基于活性污泥数学模型的污水

- COD 组分划分方案研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1478-1482.
- [14] Zhou Z, Wu Z C, Wang Z W, *et al.* Simulation and performance evaluation of the anoxic/anaerobic/aerobic process for biological nutrient removal[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2011, **28**(5): 1233-1240.
- [15] Zhou Z, Wu Z C, Gu G W, *et al.* Parameter estimation protocol for secondary clarifier models based on sludge volume index and operational parameters [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2011, **6**(3): 266-273.
- [16] Nuhoglu A, Keskinler B, Yildiz E. Mathematical modelling of the activated sludge process-the Erzincan case [J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(7): 2467-2473.
- [17] Kargi F, Uygur A. Nutrient removal performance of a sequencing batch reactor as a function of the sludge age[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2002, **31**(6): 842-847.
- [18] Lee J K, Choi C K, Lee K H, *et al.* Mass balance of nitrogen, and estimates of COD, nitrogen and phosphorus used in microbial synthesis as a function of sludge retention time in a sequencing batch reactor system [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(16): 7788-7796.
- [19] Verdickt L, Smets I, Van Impe J. Sensitivity analysis of a one-dimensional convection-diffusion model for secondary settling tanks[J]. Chemical Engineering Communications, 2005, **192**(12): 1567-1585.
- [20] 周振, 吴志超, 王志伟, 等. 基于批式呼吸计量法的溶解性 COD 组分划分[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 75-79.
- [21] 周振, 吴志超, 王志伟, 等. 污水中溶解性惰性有机物含量的测定方法及其研究进展[J]. 工业水处理, 2010, **30**(10): 17-20.
- [22] Roelleveld P J, Van Loosdrecht M C M. Experience with guidelines for wastewater characterisation in the Netherlands[J]. Water Science and Technology, 2002, **45**(6): 77-87.
- [23] Panswad T, Doungchai A, Anotai J. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system[J]. Water Research, 2003, **37**(2): 409-415.
- [24] Panswad T, Tongkhammak N, Anotai J. Estimation of intracellular phosphorus content of phosphorus-accumulating organisms at different P: COD feeding ratios [J]. Journal of Environmental Management, 2007, **84**(2): 141-145.
- [25] Lopez-Vazquez C M, Oehmen A, Hooijmans C M, *et al.* Modeling the PAO-GAO competition: Effects of carbon source, pH and temperature[J]. Water Research, 2009, **43**(2): 450-462.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《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)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行