

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放 何吉成(1)

北京上甸子站气相色谱法大气 CH₄ 和 CO 在线观测方法研究 汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)

2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子 朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)

广东东江流域多氯萘的大气沉降研究 王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)

塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征 段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)

紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究 王灿,席劲瑛,胡洪管,姚远(32)

春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征 丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)

春季胶州湾海水汞的形态研究 许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)

丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素 蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)

塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化 陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)

某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟 马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)

北京市城市降雨径流水质评价研究 侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)

重庆市路面降雨径流特征及污染源解析 张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)

沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究 陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)

Pd/TiO₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究 张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)

pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响 冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)

给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究 陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)

安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价 宋大平,庄大方,陈巍(110)

染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析 曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)

间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究 谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)

pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响 庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)

硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究 吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)

农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用 徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)

高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究 廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)

活性污泥对四环素的吸附性能研究 陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)

加油站油类污染物自然衰减现场试验研究 贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)

生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法 宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)

利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数 王晓玲,尹军,高尚(175)

数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响 董峰,张捍民,杨凤林(181)

不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响 刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)

间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究 曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)

鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究 陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)

北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估 陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)

外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究 杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)

赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建 朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)

邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究 别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)

纳米 TiO₂ 对短裸甲藻的毒性效应 李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)

苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险 李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)

电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析 王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)

洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险 刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)

湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价 刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)

广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律 项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)

缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究 吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)

可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复 付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)

胡敏酸对汞还原能力的测定和表征 江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)

Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响 黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)

油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究 张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)

利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地表微生物群落结构 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)

黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究 封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)

鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析 张健,关连珠,颜丽(323)

杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响 赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)

《环境科学》征稿简则(7) 《环境科学》征订启事(19) 信息(47,70,202,304)

数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响

董峰, 张捍民*, 杨凤林

(大连理工大学环境学院, 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 大连 116024)

摘要: 以生物膜数学模型和活性污泥数学模型为基础, 建立好氧颗粒污泥一维数学模型, 并模拟营养物质的去除、颗粒粒径变化、反应器周期表现以及好氧颗粒污泥内 DO 和菌群分布. 模拟有机物 S_0 浓度和出水 NH_4^+ -N 浓度逐渐降低, 在大约 50 d 左右达到稳定, 50 d 后模拟出水浓度分别 $< 25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $< 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 模拟出水 NO_3^- -N 浓度随着粒径的增加呈现降低趋势. 当颗粒粒径由模拟 30 d 时的 1.1 mm 增加到 100 d 时的 2.5 mm, 颗粒污泥缺氧区面积相应增加, 总氮 (TN) 的去除率由不到 10% 增加到 91% 左右, 最终模拟出水 NO_3^- -N 浓度降低到 $< 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在好氧颗粒污泥系统内, 由于氧气传质阻力, 模拟颗粒污泥外层 DO 浓度高而内层浓度低, 颗粒内可以发生同时硝化反硝化, 且好氧颗粒污泥内 DO 特征随时间而发生变化. 在好氧初期, 好氧颗粒污泥代谢活性高, 模拟 DO 传质深度大约为 100 ~ 200 μm ; 而在好氧末期, 模拟 DO 传质深度为 800 μm . 模拟自养菌主要分布在 DO 浓度高的颗粒外层, 异养菌分布在颗粒. 当水力剪切系数 k_{de} 由 $0.25 (\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ 逐渐增加到 $5 (\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 模拟颗粒平衡粒径依次由 3.5 mm 左右减小到大约 1.8 mm. 在不同水力剪切强度下模拟颗粒污泥生长特征相似, 其平衡状态下粒径随曝气强度的增加而减小, 可以通过控制曝气强度来控制好氧颗粒污泥的平衡粒径.

关键词: 好氧颗粒污泥; 数学模型; 生物膜; 活性污泥数学模型; 水力剪切; 颗粒粒径

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0181-10

Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter

DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering, School of Environment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A one-dimension aerobic granule mathematical model was established, basing on mathematical biofilm model and activated sludge model. The model was used to simulate simple aerobic granule process such as nutrients removal, granule diameter evolution, cycle performance as well as depth profiles of DO and biomass. The effluent NH_4^+ -N concentration decreased as the modeling processed. The simulation effluent NO_3^- -N concentration decreased to $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ as the granules grew. While the granule diameter increased from 1.1 mm on day 30 to 2.5 mm on day 100, the TN removal efficiency increased from less than 10% to 91%. The denitrification capacity was believed to enhance because the anoxic zone would be enlarged with the increasing granule diameter. The simultaneous nitrification and denitrification occurred inside the big aerobic granules. The oxygen permeating depth increased with the consumption of substrate. It was about 100-200 μm at the beginning of the aeration phase, and it turned to near 800 μm at the end of reaction. The autotrophs (AOB and NOB) were mostly located at the out layer where the DO concentration was high. The heterotrophic bacteria were distributed through the whole granule. As hydrodynamic shear coefficient k_{de} increased from $0.25 (\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ to $5 (\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$, the granule diameter under steady state decreased from 3.5 mm to 1.8 mm. The granule size under the dynamic steady-state decreased with the increasing hydrodynamic shear force. The granule size could be controlled by adjusting aeration intensity.

Key words: aerobic granule; mathematical modeling; biofilm; activated sludge model; hydrodynamic shear force; granule diameter

好氧颗粒污泥是一种近似球形的密实微生物聚集体, 粒径范围为 0.5 ~ 5 mm^[1]. 好氧颗粒污泥组成包括活性微生物体 (主要是具有一定功能的细菌)、微生物胞外聚合物 (EPS) 以及有机和无机惰性物质^[2]. 与传统的污泥絮体相比, 好氧颗粒污泥具有沉降性能优越、活性生物保有量高、抗有机冲击负荷能力强、同步硝化反硝化等优点^[3, 4]. 在 SBR 反应器内, 高强度曝气会产生的强烈的液相湍流作用, 促

进水-颗粒间的剪切作用以及颗粒之间的相互碰撞、摩擦和剪切, 最终形成好氧颗粒污泥. 曝气强度不仅影响好氧颗粒污泥的形成, 同时也决定好氧颗粒污

收稿日期: 2011-02-24; 修订日期: 2011-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50878034); 大连市科学技术基金项目 (2008E12SF179)

作者简介: 董峰 (1986 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: dongdut@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: zhanghm@dl.cn

泥的粒径^[6~10]. 在小曝气强度下, 易形成大尺寸好氧颗粒污泥, 其通常表现不稳定, 易于解体, 限制了好氧颗粒污泥反应器长时间稳定运行^[11, 12].

影响颗粒粒径的因素, 除了曝气强度之外, 还包括有机负荷、溶解氧(DO)和操作周期等因素^[13~17]. 在实际研究中, 不同研究者研究好氧颗粒污泥的环境条件和操作参数各异, 难以系统、清晰比较不同曝气强度下好氧颗粒污泥粒径变化特征. 数学模型作为有效工具, 不仅可以减轻实验室研究重复工作所带来的经济和时间压力, 同时也可以作为理论分析手段, 其在水力剪切对生物膜影响方面有比较好的应用^[18]. 好氧颗粒污泥可以被视为没有惰性基底的特殊球形生物膜, 为了分析曝气强度对好氧颗粒污泥的影响, 可以利用生物膜数学模型建立好氧颗粒污泥数学模型, 分析好氧颗粒污泥对营养物质的去除规律和菌群分布特征, 模拟水力剪切作用对颗粒粒径的影响, 识别曝气强度和颗粒粒径的关联关系.

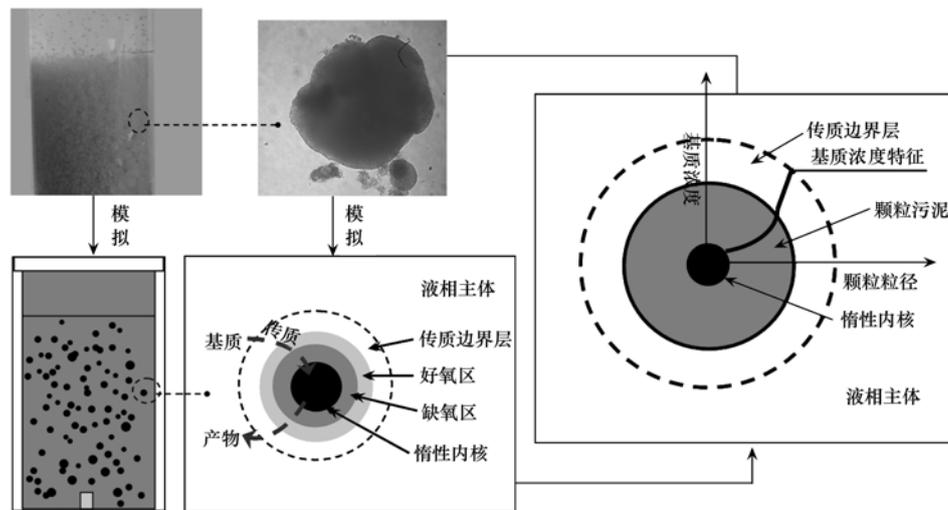


图 1 一维模拟反应器和单个好氧颗粒污泥示意

Fig. 1 One-dimension model of aerobic granules in the reactor scale and the individual scale

本模型涉及 5 类固体物质, 分别为: 氨氧化菌(X_{AOB})、亚硝酸盐氧化菌(X_{NOB})、异养菌(X_{H})、惰性物质(X_{I})和胞内储存聚合物(X_{STO}); 5 类溶解性物质, 分别是: 氨氮($S_{\text{NH}_4^+}$)、硝酸盐($S_{\text{NO}_3^-}$)、亚硝酸盐($S_{\text{NO}_2^-}$)、氧气(S_{O_2})和有机碳源(S_{S}). 定义好氧颗粒污泥的孔隙率为 ε , 颗粒内固体物质(X_{AOB} 、 X_{NOB} 、 X_{H} 和 X_{I})的密度为 ρ_i , 则每种固体物质占单个颗粒污泥的体积可以表示为 X_i/ρ_i , 有式(1)关系:

$$\sum_i X_i/\rho_i + \varepsilon = 1 \quad (1)$$

对于溶解性物质 S_i , 如果忽略荷电效应, 将其视为中性分子, 各溶解性物质在传质边界层和颗粒污

1 材料与方法

1.1 模型的建立

利用 AQUASIM 应用软件建立以生物膜数学模型为基础的一维颗粒污泥数学模型^[19, 20], 模拟 SBR 反应器内颗粒污泥的生长和代谢活动. 模型的建立分为 2 个层次: 反应器层次和单个颗粒污泥层次(图 1). 假定整个反应器内污泥由若干性质相同的好氧颗粒污泥组成, 在单颗粒层次上建立好氧颗粒污泥传质-反应模型, 其涉及 3 个主要区域: 好氧颗粒污泥固相主体, 在该区域各菌群利用营养物质进行生长和衰亡等代谢活动; 反应器液相主体, 溶解性物质(氧气和各营养基质)分布在该区域, 且各溶解性物质浓度保持一致; 传质边界层区域, 存在于颗粒污泥固相主体和反应器液相主体之间, 溶解性物质经过该区域由液相向固相传递.

泥孔隙内液相的传递过程视为分子扩散, 则物质 i 在液相的浓度变化可以表示为:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i \frac{\partial S_i}{\partial x} \right) + r_i = D_i \frac{\partial^2 S_i}{\partial x^2} + r_i \quad (2)$$

稳态时有:

$$D_i \frac{d^2 S_i}{dx^2} + r_i = 0 \quad (3)$$

式中, x 为好氧颗粒污泥模型模拟坐标系的纵向坐标(m), 其中颗粒中心坐标为 0 m; D_i 为物质 i 在液体中的分子扩散系数, ($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); S_i 为好氧颗粒污泥内物质 i 的浓度, ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); r_i 为物质 i 在好氧颗粒污泥内的反应速率, [$\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$].

好氧颗粒污泥微生物代谢模型以活性污泥 3 号模型 (ASM3) 为基础^[21] (表 1), 好氧颗粒污泥内各菌群代谢动力学过程、动力学参数和化学计量系数如表 2 ~ 表 4 所示, 具体代谢过程为: 氨氧化菌 (AOB) 利用氨氮和氧气生成亚硝酸盐, 亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 利用亚硝酸盐和氧气生成硝酸

盐, 还考虑自养菌 (AOB 和 NOB) 在好氧和缺氧状态下分别具有不同的内源代谢速率. 异养菌在有机碳源丰富时将其储存为胞内有机聚合物 (PHB), 然后 PHB 作为能源物质用于异养菌好氧或缺氧生长和内源呼吸, 同时其衰减生成惰性物质 (图 2).

表 1 模型矩阵/ $g \cdot m^{-3}$

Table 1 Stoichiometric matrix considered in the model/ $g \cdot m^{-3}$

| 菌种 | 序号 | 过程 | 溶解性物质 | | | | 固体物质 | | | | |
|------------------------------|----|-----------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|------------------|-----------|
| | | | $S_{NH_4^+}$ | $S_{NO_2^-}$ | $S_{NO_3^-}$ | S_{O_2} | S_S | X_{AOB} | X_{NOB} | X_H | X_{STO} |
| 氨氧化菌 (X_{AOB}) | 1 | 生长 | -1 | 1 | | $-(3.43 - Y_{AOB})$ | Y_{AOB} | | | | |
| | 2 | 好氧内源呼吸 | | | | $-(1 - f_i)$ | -1 | | | f_i | |
| | 3 | 缺氧内源呼吸 (NO_2^-) | | $-(1 - f_i)/1.71$ | | | -1 | | | f_i | |
| | 4 | 缺氧内源呼吸 (NO_3^-) | | | $-(1 - f_i)/2.86$ | | -1 | | | f_i | |
| 亚硝酸盐 氧化菌 (X_{NOB}) | 5 | 生长 | | -1 | 1 | $-(1.41 - Y_{NOB})$ | | Y_{NOB} | | | |
| | 6 | 好氧内源呼吸 | | | | $-(1 - f_i)$ | -1 | | | f_i | |
| | 7 | 缺氧内源呼吸 (NO_2^-) | | $-(1 - f_i)/1.71$ | | | -1 | | | f_i | |
| | 8 | 缺氧内源呼吸 (NO_3^-) | | | $-(1 - f_i)/2.86$ | | -1 | | | f_i | |
| 异养菌 (X_H) | 9 | S_S 好氧储存 | $-i_{NS}$ | | | $-(1 - Y_{STOO_2})$ | -1 | | | Y_{STOO_2} | |
| | 10 | S_S 缺氧储存 (NO_2^-) | $-i_{NS}$ | $-(1 - Y_{STONO_2^-})/1.71$ | | | -1 | | | $Y_{STONO_2^-}$ | |
| | 11 | S_S 缺氧储存 (NO_3^-) | $-i_{NS}$ | | $(Y_{STONO_3^-} - 1)/2.86$ | | -1 | | | $Y_{STONO_3^-}$ | |
| | 12 | 好氧生长 | $-i_{NH}$ | | | $-(1/Y_{HO_2} - 1)$ | | | 1 | $-1/Y_{HO_2}$ | |
| | 13 | 缺氧生长 (NO_2^-) | $-i_{NH}$ | $-(1/Y_{HNO_2^-} - 1)/1.71$ | | | | | 1 | $-1/Y_{HNO_2^-}$ | |
| | 14 | 缺氧生长 (NO_3^-) | $-i_{NH}$ | | $-(1/Y_{HNO_3^-} - 1)/2.86$ | | | | 1 | $-1/Y_{HNO_3^-}$ | |
| | 15 | X_{STO} 好氧呼吸 | | | | -1 | | | | -1 | |
| | 16 | X_{STO} 缺氧呼吸 (NO_2^-) | | $-1/1.71$ | | | | | | -1 | |
| | 17 | X_{STO} 缺氧呼吸 (NO_3^-) | | | $-1/2.86$ | | | | | -1 | |
| | 18 | 好氧内源呼吸 | | | | $-(1 - f_i)$ | | -1 | | f_i | |
| | 19 | 缺氧内源呼吸 (NO_2^-) | | $-(1 - f_i)/1.71$ | | | | -1 | | f_i | |
| | 20 | 缺氧内源呼吸 (NO_3^-) | | | $-(1 - f_i)/2.86$ | | | -1 | | f_i | |

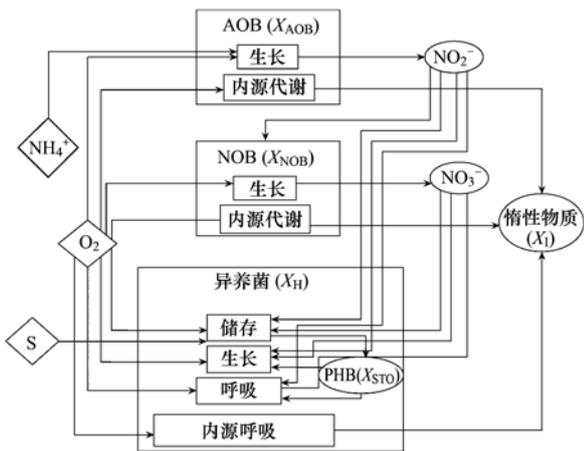


图 2 模拟好氧颗粒污泥内微生物代谢示意

Fig. 2 Model schematic of microbial metabolism within aerobic granules

溶解性物质在边界层的传递过程可以理解为分子扩散过程, 传递过程可以表示为:

$$j_{bound} = -D_i \left. \frac{\partial S_i}{\partial z} \right|_{bound} = k_i (S_{iL} - S_{iB}) \quad (4)$$

式中, j_{bound} 为溶解性物质 i 在传质边界层内的通量 [$g/(m^2 \cdot d)^{-1}$]; D_i 为物质 i 在水中的分子扩散系数 ($m^2 \cdot d^{-1}$); k_i 为物质 i 的传递系数 ($m \cdot d^{-1}$); S_{iL} 为物质 i 在液相主体的浓度 ($g \cdot m^{-3}$); S_{iB} 为物质 i 在传质边界层接近固相的浓度 ($g \cdot m^{-3}$).

在利用生物膜数学模型和 AQUASIM 软件模拟好氧颗粒污泥生长过程时, 好氧颗粒污泥的粒径增长速率可以用式 (5) 表示:

$$\frac{dL_F}{dt} = u_L \quad (5)$$

式中, u_L 为好氧颗粒污泥粒径增加速率 ($m \cdot d^{-1}$). u_L 如式 (6) 表达:

$$u_L = u_F(AG) - u_{de} + u_{at} \quad (6)$$

式中, $u_F(AG)$ 为好氧颗粒污泥内生物量的增加导致好氧颗粒污泥粒径的增加速率 ($m \cdot d^{-1}$); u_{de} 表示水力剪切对好氧颗粒污泥粒径的减少速率 ($m \cdot d^{-1}$); u_{at} 表示游离固体物质粘附好氧颗粒污泥对粒径的增加速率 ($m \cdot d^{-1}$). 在本研究中, 忽略游离固体物

表 2 模型动力学表达式
Table 2 Kinetic rate expression in the model

| 菌种 | 序号 | 过程 | 过程速率表达式/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ |
|------------------------------|----|---|---|
| 氨氧化菌 (X_{AOB}) | 1 | 生长 | $Z_{\text{O}_2} \cdot Z_{\text{NH}_4^+} \cdot q_{\text{maxAOB}} \cdot \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{S_{\text{NH}_4^+} + K_{\text{NH}_4^+ \text{AOB}}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{AOB}}} \cdot X_{\text{AOB}}$ |
| | 2 | 好氧内源呼吸 | $Z_{\text{O}_2} \cdot b_{\text{AOB}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{AOB}}} \cdot X_{\text{AOB}}$ |
| | 3 | 缺氧内源呼吸 (NO_2^-) | $Z_{\text{NO}_2^-} \cdot b_{\text{AOB}} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{AOB}}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{AOB}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{S_{\text{NO}_2^-} + K_{\text{NO}_2^- \text{AOB}}} \cdot X_{\text{AOB}}$ |
| | 4 | 缺氧内源呼吸 (NO_3^-) | $Z_{\text{NO}_3^-} \cdot b_{\text{AOB}} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{AOB}}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{AOB}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_3^-}}{S_{\text{NO}_3^-} + K_{\text{NO}_3^- \text{AOB}}} \cdot X_{\text{AOB}}$ |
| 亚硝酸盐氧化菌 (X_{NOB}) | 5 | 生长 | $Z_{\text{O}_2} \cdot Z_{\text{NO}_2^-} \cdot q_{\text{maxNOB}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{S_{\text{NO}_2^-} + K_{\text{NO}_2^- \text{NOB}}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{NOB}}} \cdot X_{\text{NOB}}$ |
| | 6 | 好氧内源呼吸 | $Z_{\text{O}_2} \cdot b_{\text{NOB}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{NOB}}} \cdot X_{\text{NOB}}$ |
| | 7 | 缺氧内源呼吸 (NO_2^-) | $Z_{\text{NO}_2^-} \cdot b_{\text{NOB}} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{NOB}}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{NOB}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{S_{\text{NO}_2^-} + K_{\text{NO}_2^- \text{NOB}}} \cdot X_{\text{NOB}}$ |
| | 8 | 缺氧内源呼吸 (NO_3^-) | $Z_{\text{NO}_3^-} \cdot b_{\text{NOB}} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{NOB}}}{S_{\text{O}_2} + K_{\text{O}_2 \text{NOB}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_3^-}}{S_{\text{NO}_3^-} + K_{\text{NO}_3^- \text{NOB}}} \cdot X_{\text{NOB}}$ |
| 异养菌 (X_{H}) | 9 | S_{S} 好氧储存 | $Z_{\text{O}_2} \cdot Z_{\text{S}} \cdot k_{\text{STO}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{S}}}{K_{\text{SH}} + S_{\text{S}}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 10 | S_{S} 缺氧储存 (NO_2^-) | $Z_{\text{NO}_2^-} \cdot Z_{\text{S}} \cdot \eta \cdot k_{\text{STO}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{K_{\text{NO}_2^- \text{H}} + S_{\text{NO}_2^-}} \cdot \frac{S_{\text{S}}}{K_{\text{SH}} + S_{\text{S}}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 11 | S_{S} 缺氧储存 (NO_3^-) | $Z_{\text{NO}_3^-} \cdot Z_{\text{S}} \cdot \eta \cdot k_{\text{STO}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_3^-}}{K_{\text{NO}_3^- \text{H}} + S_{\text{NO}_3^-}} \cdot \frac{S_{\text{S}}}{K_{\text{SH}} + S_{\text{S}}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 12 | 好氧生长 | $Z_{\text{STO}} \cdot Z_{\text{O}_2} \cdot \mu_{\text{H}} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{S_{\text{NH}_4^+} + K_{\text{NH}_4^+ \text{H}}} \cdot \frac{f_{\text{STO}}}{K_{\text{STO}} + f_{\text{STO}}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 13 | 缺氧生长 (NO_2^-) | $Z_{\text{STO}} \cdot Z_{\text{NO}_2^-} \cdot \eta \cdot \mu_{\text{H}} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{H}}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{S_{\text{NH}_4^+} + K_{\text{NH}_4^+ \text{H}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{S_{\text{NO}_2^-} + K_{\text{NO}_2^- \text{H}}} \cdot \frac{f_{\text{STO}}}{K_{\text{STO}} + f_{\text{STO}}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 14 | 缺氧生长 (NO_3^-) | $Z_{\text{STO}} \cdot Z_{\text{NO}_3^-} \cdot \eta \cdot \mu_{\text{H}} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{H}}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{S_{\text{NH}_4^+} + K_{\text{NH}_4^+ \text{H}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{S_{\text{NO}_2^-} + K_{\text{NO}_2^- \text{H}}} \cdot \frac{f_{\text{STO}}}{K_{\text{STO}} + f_{\text{STO}}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 15 | X_{STO} 好氧呼吸 | $Z_{\text{O}_2} \cdot Z_{\text{STO}} \cdot b_{\text{STO} \text{O}_2} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 16 | X_{STO} 缺氧呼吸 (NO_2^-) | $Z_{\text{NO}_2^-} \cdot Z_{\text{STO}} \cdot b_{\text{STO} \text{NO}_2^-} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{H}}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{K_{\text{NO}_2^- \text{H}} + S_{\text{NO}_2^-}} \cdot X_{\text{STO}}$ |
| | 17 | X_{STO} 缺氧呼吸 (NO_3^-) | $Z_{\text{NO}_3^-} \cdot Z_{\text{STO}} \cdot b_{\text{STO} \text{NO}_3^-} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{H}}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_3^-}}{K_{\text{NO}_3^- \text{H}} + S_{\text{NO}_3^-}} \cdot X_{\text{STO}}$ |
| | 18 | 好氧内源呼吸 | $Z_{\text{O}_2} \cdot Z_{\text{STO}} \cdot b_{\text{HO}_2} \cdot \frac{S_{\text{O}_2}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot X_{\text{STO}}$ |
| | 19 | 缺氧内源呼吸 (NO_2^-) | $b_{\text{HNO}_2^-} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{H}}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{K_{\text{NO}_2^- \text{H}} + S_{\text{NO}_2^-}} \cdot X_{\text{H}}$ |
| | 20 | 缺氧内源呼吸 (NO_3^-) | $b_{\text{HNO}_3^-} \cdot \frac{K_{\text{O}_2 \text{H}}}{K_{\text{O}_2 \text{H}} + S_{\text{O}_2}} \cdot \frac{S_{\text{NO}_3^-}}{K_{\text{NO}_3^- \text{H}} + S_{\text{NO}_3^-}} \cdot X_{\text{H}}$ |

质粘附的影响,即 u_{at} 为 $0 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$; 水力剪切对粒径的影响用如式(7)表示:

$$u_{\text{de}} = k_{\text{de}} \cdot z^2 \quad (7)$$

式中, k_{de} 为水力剪切速率常数 [$(\text{m} \cdot \text{d})^{-1}$]; z 为好氧颗粒污泥的粒径坐标值 (m).

1.2 模型初始化条件

模型构架如图 3 所示,将整个反应器分为 2 个模块,一部分为好氧颗粒污泥模块,模拟反应器内的好氧颗粒污泥部分;另外一个部分为完全液相混合模块,模拟反应器的液相部分.当向反应器曝气时,设置气体模块,与好氧颗粒污泥模块的液相部分建立扩散传递连接,模拟向好氧颗粒污泥提供氧气.在

表 3 模型动力学参数

Table 3 Kinetic parameters for the simulation

| 菌种 | 符号 | 定义 | 数值 | 文献 |
|----------------------|--|--|-------|------|
| 氨氧化菌(X_{AOB}) | q_{maxAOB} | 最大基质消耗速率 $[\text{COD}_S/(\text{COD}_X \cdot t)]/\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$ | 5.33 | [22] |
| | $K_{\text{NH}_4^+ AOB}$ | $S_{\text{NH}_4^+}$ 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.7 | [23] |
| | $K_{\text{NO}_2^- AOB}$ | $S_{\text{NO}_2^-}$ 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.001 | [23] |
| | $K_{\text{NO}_3^- AOB}$ | $S_{\text{NO}_3^-}$ 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.001 | [23] |
| | $K_{\text{O}_2 AOB}$ | S_{O_2} 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.01 | [23] |
| | μ_{maxAOB} | AOB 最大比生长速率/ d^{-1} | 0.8 | [23] |
| | b_{AOB} | 衰减速率/ d^{-1} | 0.1 | [23] |
| 亚硝酸盐氧化菌(X_{NOB}) | q_{maxNOB} | 最大基质消耗速率 $[\text{COD}_S/(\text{COD}_X \cdot t)]/\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$ | 26.83 | [22] |
| | $K_{\text{NO}_2^- NOB}$ | $S_{\text{NO}_2^-}$ 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.05 | [23] |
| | $K_{\text{NO}_3^- NOB}$ | $S_{\text{NO}_3^-}$ 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.001 | [23] |
| | $K_{\text{O}_2 NOB}$ | S_{O_2} 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.02 | [23] |
| | μ_{maxNOB} | NOB 最大比生长速率/ d^{-1} | 1.1 | [22] |
| | b_{NOB} | 衰减速率/ d^{-1} | 0.1 | [22] |
| 异养菌(X_H) | μ_{maxH} | 最大比生长速率/ d^{-1} | 2 | [23] |
| | $K_{\text{O}_2 H}$ | S_{O_2} 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.2 | [23] |
| | $K_{\text{S} H}$ | S_S 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 2 | [23] |
| | $K_{\text{NO}_2^- H}$ | $S_{\text{NO}_2^-}$ 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.5 | [23] |
| | $K_{\text{NO}_3^- H}$ | $S_{\text{NO}_3^-}$ 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 0.5 | [23] |
| | k_{STO} | 基质储存速率/ d^{-1} | 5 | [23] |
| | K_{STO} | X_{STO} 饱和常数/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ | 1 | [23] |
| | $b_{\text{STO} \text{O}_2}$ | 基于 X_{STO} 好氧衰减速率/ d^{-1} | 0.2 | [23] |
| | $b_{\text{STO} \text{NO}_2^-}$ | 基于 X_{STO} 缺氧衰减速率/ d^{-1} | 0.1 | [23] |
| | $b_{\text{STO} \text{NO}_3^-}$ | 基于 X_{STO} 缺氧衰减速率/ d^{-1} | 0.1 | [23] |
| | b_{HO_2} | 好氧衰减速率/ d^{-1} | 0.2 | [23] |
| | $b_{\text{HNO}_2^-}$ | 缺氧衰减速率/ d^{-1} | 0.1 | [23] |
| | $b_{\text{HNO}_3^-}$ | 缺氧衰减速率/ d^{-1} | 0.1 | [23] |
| | q_{maxH} | 最大基质利用速率 $[\text{COD}_S/(\text{COD}_X \cdot t)]/\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$ | 3.17 | [23] |
| η | 缺氧衰减常数/ d^{-1} | 0.5 | 理论值 | |
| f_{STO} | $(X_{\text{STO}} + 0.001)/(X_H + 0.001)$ | | [23] | |
| 其它 | Z_S | $1/[1 + \exp(-200 S_S + 4)] + 1e - 12$ | | [22] |
| | Z_{O_2} | $1/[1 + \exp(-200 S_{\text{O}_2} + 4)] + 1e - 12$ | | [22] |
| | $Z_{\text{NO}_2^-}$ | $1/[1 + \exp(-200 S_{\text{NO}_2^-} + 4)] + 1e - 12$ | | [22] |
| | $Z_{\text{NO}_3^-}$ | $1/[1 + \exp(-200 S_{\text{NO}_3^-} + 4)] + 1e - 12$ | | [22] |
| | Z_{STO} | $1/[1 + \exp(-200 S_{\text{STO}} + 4)] + 1e - 12$ | | [22] |

表 4 模型化学计量系数

Table 4 Stoichiometric parameters for the model

| 符号 | 定义 | 数值 | 文献 |
|--------------------------------|--|-------|------|
| Y_{AOB} | 消耗单位基质 $S_{\text{NH}_4^+}$ 时 X_{AOB} 产率 $[\text{COD}_{AOB}/\text{N}_{\text{NH}_4^+}]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.15 | [22] |
| Y_{NOB} | 消耗单位基质 $S_{\text{NO}_2^-}$ 时 X_{NOB} 产率 $[\text{COD}_{NOB}/\text{N}_{\text{NO}_2^-}]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.041 | [22] |
| $Y_{\text{STO} \text{O}_2}$ | 消耗单位基质 S_S 时 X_{STO} 好氧产率 $[\text{COD}_{\text{STO}}/\text{COD}_S]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.85 | [23] |
| $Y_{\text{STO} \text{NO}_2^-}$ | 消耗单位基质 S_S 时 X_{STO} 缺氧产率 $[\text{COD}_{\text{STO}}/\text{COD}_S]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.8 | [23] |
| $Y_{\text{STO} \text{NO}_3^-}$ | 消耗单位基质 S_S 时 X_{STO} 缺氧产率 $[\text{COD}_{\text{STO}}/\text{COD}_S]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.8 | [23] |
| Y_{HO_2} | 消耗单位 X_{STO} 时 X_H 好氧产率 $[\text{COD}_H/\text{COD}_{\text{STO}}]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.63 | [23] |
| $Y_{\text{HNO}_2^-}$ | 消耗单位 X_{STO} 时 X_H 缺氧产率 $[\text{COD}_H/\text{COD}_{\text{STO}}]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.54 | [23] |
| $Y_{\text{HNO}_3^-}$ | 消耗单位 X_{STO} 时 X_H 缺氧产率 $[\text{COD}_H/\text{COD}_{\text{STO}}]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.51 | [23] |
| i_{NS} | X_{STO} 的 N 含量 $[\text{N}/\text{COD}_{\text{STO}}]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.02 | [23] |
| i_{NH} | X_H 的 N 含量 $[\text{N}/\text{COD}_X]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.07 | [23] |
| f_1 | 内源呼吸时 X_1 产率 $[\text{COD}_1/\text{COD}_X]/\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$ | 0.2 | [23] |

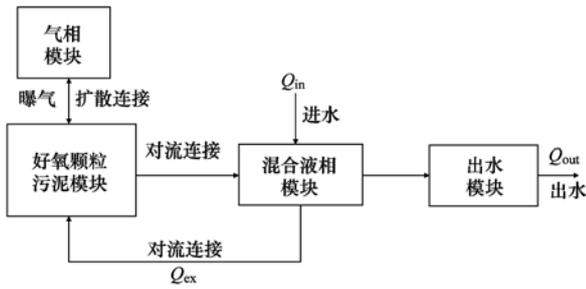


图3 利用 AQUASIM 模拟好氧颗粒污泥构架

Fig. 3 Schematic draw of modeling aerobic granules with AQUASIM in SBR

实际反应器内颗粒和液相完全均匀混合,为了模拟反应器内液相和好氧颗粒污泥之间的传质-反应,将好氧颗粒污泥模块的液相和完全液相混合模块连通并设置大交换通量 Q_{ex} ,以模拟好氧颗粒污泥与液相的充分接触;模拟进水时,在曝气开始前模拟进水进入混合液相模块,进水流量为 Q_{in} ;模拟出水时,设置出水模块模拟出水,出水流量为 Q_{out} .

根据反应器的初始条件,设置模型初始参数如表4所示.

本研究模拟 SBR 反应器内好氧颗粒污泥的形成,模拟操作周期为:进水 10 min,曝气 270 min,出水 10 min,忽略沉淀时间在 1 个周期内对好氧颗粒污泥的影响,模拟操作天数为 300 d. 通过改变水力剪切速率常数 k_{de} 来模拟不同曝气强度对好氧颗粒

表4 好氧颗粒污泥初始参数设置

Table 4 Initial parameters used in the simulation

| 参数 | 定义 | 数值 |
|-----------------|-------------------------------------|--------------------|
| D_O | 氧气在水中扩散系数/ $m^2 \cdot d^{-1}$ | 0.000 8 |
| D_S | 营养基质在水中扩散系数/ $m^2 \cdot d^{-1}$ | 0.000 2 |
| ρ_x | 微生物密度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | 2×10^5 |
| ρ_I | 惰性物质密度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | 4×10^5 |
| ρ_{STO} | 胞内聚合物密度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | 1×10^8 |
| k_{de} | 脱附率系数/ $(m \cdot d)^{-1}$ | 0.25 ~ 5 |
| k_{at} | 粘附率系数/ $(m \cdot d)^{-1}$ | 0 |
| S_{Sin} | 进水有机物浓度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | 300 |
| S_{Oin} | 初始 DO 浓度/ $g \cdot m^{-3}$ | 8 |
| $S_{NH_4^+ in}$ | 进水 NH_4^+ -N 浓度/ $g \cdot m^{-3}$ | 50 |
| X_{AOBin} | 初始 AOB 浓度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | $0.1\rho_x$ |
| X_{NOBin} | 初始 NOB 浓度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | $0.1\rho_x$ |
| X_{Hin} | 初始异养菌浓度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | $0.1\rho_x$ |
| X_{STOin} | 初始胞内聚合物浓度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | 0 |
| X_{Iin} | 初始惰性物质浓度(COD)/ $g \cdot m^{-3}$ | 0 |
| NG | 好氧颗粒数目 | 1×10^6 |
| R_{in} | 初始颗粒粒径/m | 5×10^{-5} |

污泥形成的影响, k_{de} 取值分别为 0.25、0.5、0.75、1、2 和 5 $(m \cdot d)^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 模拟营养物质去除和颗粒粒径变化

为了确认模型的有效性,本研究首先选取一组典型操作参数(表4), k_{de} 取 $1 (m \cdot d)^{-1}$ 进行模拟,分析各溶解性物质在整个模拟过程的变化情况以及好氧颗粒污泥粒径随时间的变化特征(图4).

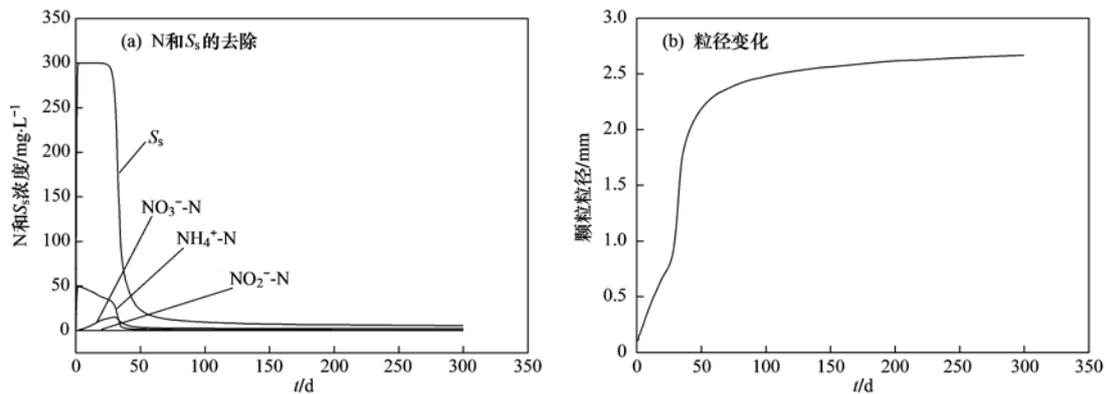


图4 模拟 300 d 好氧颗粒污泥对 N 和有机的去除和颗粒粒径变化

Fig. 4 Dynamics of effluent nutrients and granular size for the 300 days simulation

在模拟到 100 d 时, NH_4^+ -N 和 COD 几乎完全被去除. 模拟结果显示,出水 NO_2^- -N 浓度 $< 0.6 mg \cdot L^{-1}$,表示大部分 NH_4^+ -N 更倾向于转化为 NO_3^- -N,没有积累 NO_2^- -N (图4). 在模拟初始阶段,随着 NH_4^+ -N 逐渐消耗, NO_3^- -N 浓度逐渐增加,在 28

d 左右时达到最大值,但是模拟出水中 NO_3^- -N 浓度远小于 NH_4^+ -N 减少量,说明在好氧颗粒污泥内部发生同时硝化反硝化过程. 28 d 后,模拟出水 NO_3^- -N 浓度逐渐降低,最后在模拟稳定阶段,出水 NO_3^- -N 浓度 $< 3 mg \cdot L^{-1}$. 说明稳定状态下好氧颗粒污泥内部

反硝化活性较高,其原因可能是当氧气由颗粒外层向内层传递时,存在明显的浓度梯度,使得好氧颗粒污泥外层呈现为好氧区,内层为缺氧区或厌氧区^[24, 25].因在大尺寸好氧颗粒污泥内部有足够的缺氧环境利于细菌反硝化代谢.

好氧颗粒污泥反硝化活性随着颗粒粒径的增加而增强,因为当粒径增加时内缺氧区面积会相应增加^[3].氧气在好氧颗粒污泥内的传质深度为 200 ~ 500 μm ^[26],在好氧颗粒污泥粒径 < 500 μm 时,其主要部分为好氧区,脱氮效率不高.当颗粒继续长大后,缺氧区域会相应的增加,导致脱氮效率随粒径的增加而增加.从本模拟结果可知,前 28 d 颗粒粒径 < 800 μm ,反硝化活性不高,对应着 NO_3^- -N 的累积.随后颗粒粒径迅速增加,其脱氮效率也相应增加.

2.2 模拟营养物质周期表现

图 5 所示为模拟 30 d 和 100 d 时好氧颗粒污泥对营养物质的去除表现.在进水阶段,由于有机物充足,同时没有氧气存在, NO_3^- -N 浓度有明显的下降.

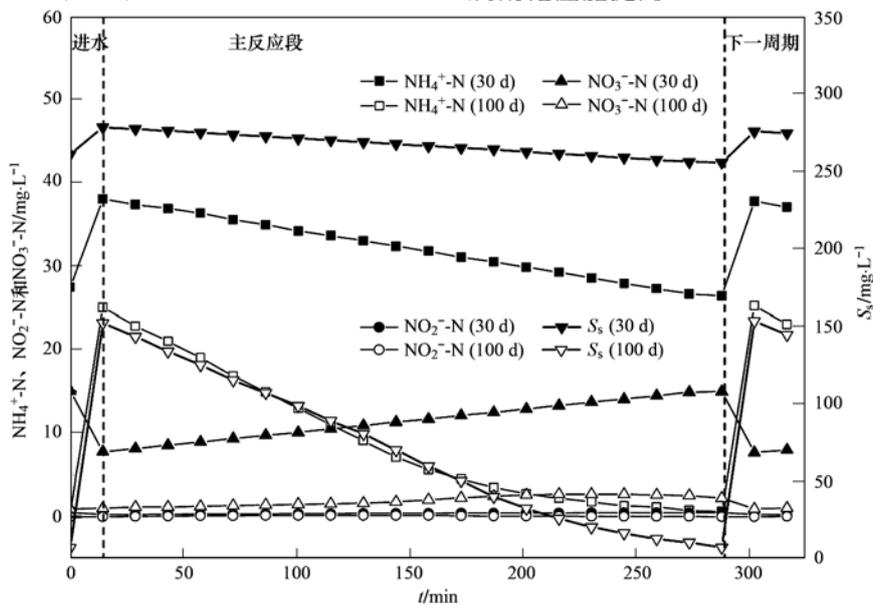


图 5 模拟 30 d 和 100 d 时 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 和有机的周期表现

Fig. 5 Model the cycle performance of NH_4^+ -N, NO_2^- -N, NO_3^- -N and organics on day 30 and 100, respectively

2.3 模拟固体物质和 DO 在好氧颗粒污泥内分布

模拟 50 d 后,好氧颗粒污泥内自养菌 (AOB 和 NOB) 几乎没有发生变化,异养菌在模拟 250 d 后的变化率 < 10%. AOB (X_{AOB})、NOB (X_{NOB})、异养菌 (X_{H})、惰性物质 (X_{I}) 以及胞内聚合物 (X_{SPO}) 在好氧颗粒污泥内的分布如图 6(a) 所示.自养菌主要分布在好氧颗粒污泥外层,惰性物质分布于整个颗粒,异养菌几乎分布于整个颗粒,其中胞内聚合物与异养

菌分布趋势一致.由于氧气传质阻力,好氧颗粒污泥外层溶解氧高,内部溶解氧低[图 6(b)].在生物膜系统内,自养菌生长速率慢,其存在于溶解氧浓度高的生物膜外层区域^[28, 29].在好氧颗粒污泥系统内,氧气传质阻力也会导致内层溶解氧不足,因此自养菌存在于 DO 较高的外层.在好氧颗粒污泥系统,基质一般分布于整个颗粒污泥内,其并不是限制因素^[30],因此异养菌在颗粒各个层面都能得到充足营

养基质而分布在颗粒污泥内. 图 6(b) 所示为一个周期内 DO 在不同阶段的分布, 在好氧颗粒污泥代谢活性高时, 模拟 DO 传质深度大约为 100 ~ 200 μm ; 在好氧末期, 模拟 DO 传质深度为 800 μm . 有报道在一个周期内, 好氧颗粒污泥内 DO 特征随时

间而发生变化. 在一个周期内, 液相营养物质不断被好氧颗粒污泥内微生物所消耗, 颗粒内微生物活性也随着营养物质的减少活性不断降低, 因此氧气在颗粒内的代谢速率同时随之减小, 颗粒内 DO 浓度会相应增加^[26, 31].

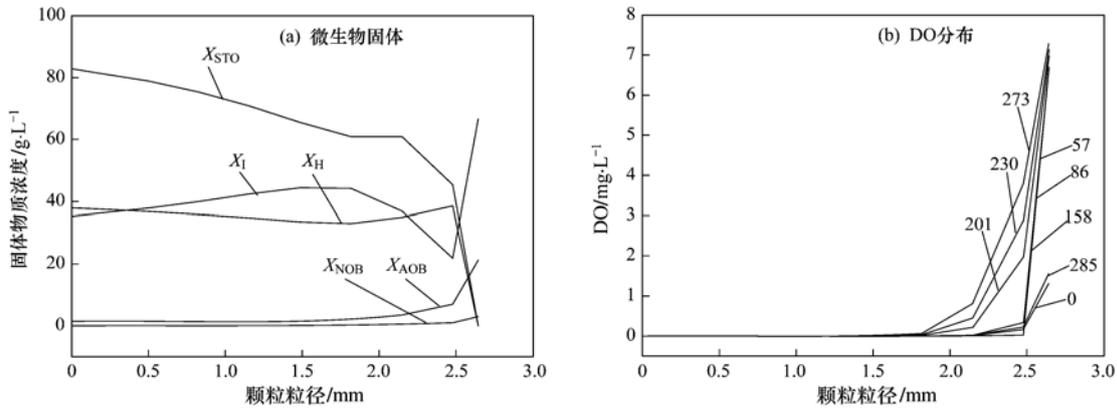


图 6 模拟 250 d 时固体物质和 DO 在好氧颗粒污泥内分布
Fig. 6 Simulate the depth profiles of biomass and DO in aerobic granules on day 250

2.4 模拟不同曝气强度对好氧颗粒污泥粒径的影响

本研究利用所建立的好氧颗粒污泥模型, 模拟曝气强度单因素对好氧颗粒污泥粒径的影响(图 7). 选取 S_{Sin} 为 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, S_{Oin} 为 8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, k_{de} 取值为 0.25 ~ 5 $(\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$, 依次模拟曝气强度不断增加. 由图 7(a) 可以看出, 在不同的 k_{de} 下, 好氧颗粒污泥生长特征相似. 模拟好氧颗粒污泥粒径增长可以分

为 3 个阶段: 前 50 d 左右时间为慢速增加阶段; 50 ~ 100 d 为快速增加阶段; 100 ~ 300 d 为平衡阶段. 当 k_{de} 由 0.25 $(\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ 增加到 5 $(\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 颗粒平衡粒径由 3.5 mm 左右减小到 1.8 mm 左右. 随着 k_{de} 的增加, 好氧颗粒污泥平衡时的粒径不断减小, 而且增加的幅度越大, 平衡时粒径减小得越多, 平衡粒径所需的时间也越短[图 7(b)].

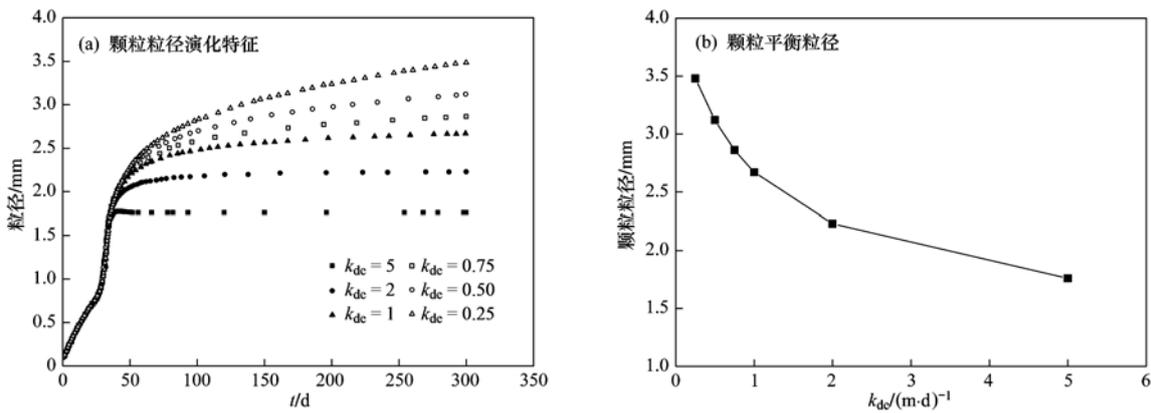


图 7 模拟不同曝气强度下好氧颗粒污泥的粒径变化
Fig. 7 Simulate the evolution of granule diameter under different aeration intensity

生物膜的生长与水力剪切存在平衡关系, 当生物膜生长与外界水力剪切达到平衡时, 生物膜达到稳定状态^[32]. 当生物膜快速生长时, 在小水力剪切力下, 所形成的生物膜结构会变得多孔而宽松; 在

大水力剪切作用下形成的生物膜结构表现更加密实^[33]. 好氧颗粒污泥作为特殊的生物膜结构也具有类似特性, 高水力剪切力下培养的颗粒污泥具有更加密实的稳定结构, 其粒径也比小水力剪切条件下

的好氧颗粒污泥粒径要小^[34]. 当好氧颗粒污泥生长速率越大, 则所需平衡剪切力也越大. 对于生长速率慢的颗粒污泥, 可以减小曝气强度来平衡好氧颗粒污泥小生长速率, 从而降低系统能耗.

3 结论

(1) 利用生物膜数学模型建立了一维好氧颗粒污泥模型. 在模拟有机物和 NH_4^+ -N 的去规律, COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 周期变化特征以及微生物固体物质在颗粒内分布特征方面, 模拟结果与实际情况较为符合. 由于氧气传质阻力, 其传质深度随着颗粒内微生物代谢活性的降低而增加. 在 250 d 时, 模拟进水初期 DO 传质深度大约为 100 ~ 200 μm , 而在反应末期, 模拟 DO 传质深度为 800 μm .

(2) 大尺寸颗粒内存在大面积缺氧区, 颗粒内部发生同时硝化反硝化, 且模拟好氧颗粒污泥反硝化能力随颗粒粒径的增加而增强. 当模拟颗粒粒径由 1.1 mm 增加到 2.5 mm 时, 总氮 (TN) 的去除率由不到 10% 增加到 91%.

(3) 模拟自养菌 (氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌) 主要分布在好氧颗粒污泥 DO 浓度高的外层, 模拟分布深度为 100 ~ 200 μm ; 异养菌分布在整个颗粒系统.

(4) 在不同曝气强度下好氧颗粒污泥具有相似生长特征, 曝气强度主要影响颗粒平衡粒径. 好氧颗粒污泥平衡粒径随水力剪切力的增强而减小. 当 k_{de} 由 $0.25 (\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ 逐渐增加到 $5 (\text{m}\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 模拟颗粒平衡粒径依次由 3.5 mm 左右减小到大约 1.8 mm.

参考文献:

- [1] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances [J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [2] De Kreuk M K, Kishida N, Van Loosdrecht M C M. Aerobic granular sludge-state of the art [J]. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(8-9): 75-81.
- [3] De Kreuk M K, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Simultaneous COD, nitrogen, and phosphate removal by aerobic granular sludge [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **90**(6): 761-769.
- [4] Yilmaz G, Lemaire R, Keller J, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal from nutrient-rich industrial wastewater using granular sludge [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, **100**(3): 529-541.
- [5] Kwok W K, Picioreanu C, Ong S L, *et al.* Influence of biomass production and detachment forces on biofilm structures in a biofilm airlift suspension reactor [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1998, **58**(4): 400-407.
- [6] Liu Y, Tay J H. The essential role of hydrodynamic shear force in the formation of biofilm and granular sludge [J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1653-1665.
- [7] Di Iaconi C, Ramadori R, Lopez A, *et al.* Influence of hydrodynamic shear forces on properties of granular biomass in a sequencing batch biofilter reactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **30**(2): 152-157.
- [8] 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.
- [9] Liu Y Q, Tay J H, Moy B Y P. Characteristics of aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor with variable aeration [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **71**(5): 761-766.
- [10] 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.
- [11] Tay J H, Pan S, He Y X, *et al.* Effect of organic loading rate on aerobic granulation. I: Reactor performance [J]. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 2004, **130**(10): 1094-1101.
- [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] Zheng Y M, Yu H Q, Liu S H, *et al.* Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1791-1800.
- [14] Wana J F, Bessière Y, Spérandio M. Alternating anoxic feast/aerobic famine condition for improving granular sludge formation in sequencing batch airlift reactor at reduced aeration rate [J]. *Water Research*, 2009, **43**(20): 5097-5108.
- [15] Chiu Z C, Chen M Y, Lee D J, *et al.* Diffusivity of oxygen in aerobic granules [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **94**(3): 505-513.
- [16] Sturm B S M, Irvine R L. Dissolved oxygen as a key parameter to aerobic granule formation [J]. *Water Science and Technology*, 2008, **58**(4): 781-787.
- [17] 刘宏波, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 有机负荷对颗粒化 SBR 反应器的影响研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1449-1453.
- [18] Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J, Eberl H, *et al.* Mathematical modelling of biofilm structures [J]. *Antonie van Leeuwenhoek*, 2002, **81**(1): 245-256.
- [19] Wanner O, Reichert P. Mathematical modeling of mixed-culture biofilms [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1996, **49**(2): 172-184.
- [20] Vázquez-Padín J R, Mosquera-Corral A, Campos J L, *et al.* Modelling aerobic granular SBR at variable COD/N ratios including accurate description of total solids concentration [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2010, **49**(2): 173-184.
- [21] Gujer W, Henze M, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 3 [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(1): 183-193.
- [22] De Kreuk M K, Picioreanu C, Hosseini M, *et al.* Kinetic model of a granular sludge SBR; influences on nutrient removal [J].

- Biotechnology and Bioengineering, 2007, **97**(4): 801-815.
- [23] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2D and ASM3 [M]. London: IWA Publishing, 2000. 103-120.
- [24] 卢珊, 季民, 王景峰, 等. 颗粒污泥 SBR 处理生活污水同步除磷脱氮的研究 [J]. 环境科学, 2007, **28**(8): 1687-1692.
- [25] Zhou X H, Qiu Y Q, Shi H C, *et al.* A new approach to quantify spatial distribution of biofilm kinetic parameters by in situ determination of oxygen uptake rate (OUR) [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **43**(3): 757-763.
- [26] Chiu Z C, Chen M Y, Lee D J, *et al.* Oxygen diffusion and consumption in active aerobic granules of heterogeneous structure [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **75**(3): 685-691.
- [27] 王景峰, 王暄, 季民, 等. A/OSBR 中同步硝化反硝化除磷颗粒污泥的富集 [J]. 中国给水排水, 2006, **22**(17): 100-104.
- [28] Vanloosdrecht M C M, Tjihuis L, Wijdieks A M S, *et al.* Population-distribution in aerobic biofilms on small suspended particles [J]. Water Science and Technology, 1995, **31**(1): 163-171.
- [29] Beun J J, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Aerobic granulation in a sequencing batch airlift reactor [J]. Water Research, 2002, **36**(3): 702-712.
- [30] Li Y, Liu Y. Diffusion of substrate and oxygen in aerobic granule [J]. Biochemical Engineering Journal, 2005, **27**(1): 45-52.
- [31] Li Y, Liu Y, Shen L, *et al.* DO diffusion profile in aerobic granule and its microbiological implications [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2008, **43**(4-5): 349-354.
- [32] Tjihuis L, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Dynamics of biofilm detachment in biofilm airlift suspension reactors [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1995, **45**(6): 481-487.
- [33] De Bivar Xavier J, Picioreanu C, Van Loosdrecht M C M. A general description of detachment for multidimensional modelling of biofilms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **91**(6): 651-669.
- [34] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Effects of aeration intensity on formation of phenol-fed aerobic granules and extracellular polymeric substances [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **77**(1): 175-182.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years | HE Ji-cheng (1) |
| Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station | WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8) |
| Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010 | ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13) |
| Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province | WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20) |
| Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert | DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26) |
| Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene | WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32) |
| Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring | DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37) |
| Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring | XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42) |
| Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan | PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48) |
| Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River | CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55) |
| Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill | MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64) |
| Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff | HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71) |
| Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing | ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76) |
| Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration | CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83) |
| Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂ | ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88) |
| Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron | FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94) |
| Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System | CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104) |
| Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province | SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110) |
| Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater | CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117) |
| Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon | XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124) |
| Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments | PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129) |
| Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments | LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135) |
| Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues | XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142) |
| Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons | LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147) |
| Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge | CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156) |
| <i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station | JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163) |
| Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil | SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169) |
| Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone | WANG Xiao-ling, YIN Jun, GAO Shang (175) |
| Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter | DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181) |
| Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System | LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191) |
| Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter | ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197) |
| Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane | CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203) |
| Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing | CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208) |
| Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme | YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216) |
| Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection | ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222) |
| Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i> | BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228) |
| Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i> | LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233) |
| Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks | LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239) |
| Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area | WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247) |
| Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk | LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253) |
| Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin | LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260) |
| Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China | XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266) |
| Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions | WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273) |
| Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology | FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280) |
| Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury | JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286) |
| Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source | LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293) |
| Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil | ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299) |
| Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE | MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305) |
| Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China | FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314) |
| Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation | ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323) |
| Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions | ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329) |

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 15, 2012

| | | | | |
|---------|---|------------------|----|---|
| 主 管 | 中国科学院 | Superintended | by | Chinese Academy of Sciences |
| 主 办 | 中国科学院生态环境研究中心 | Sponsored | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences |
| 协 办 | (以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院 | Co-Sponsored | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University |
| 主 编 | 欧阳自远 | Editor-in -Chief | | OUYANG Zi-yuan |
| 编 辑 | 《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn | Edited | by | The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版 | 科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717 | Published | by | Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂 | Printed | by | Beijing Bei Lin Printing House |
| 发 行 | 科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com | Distributed | by | Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com |
| 订 购 处 | 全国各地邮电局 | Domestic | | All Local Post Offices in China |
| 国外总发行 | 中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱) | Foreign | | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊