

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第3期

Vol.33 No.3

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

典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究	陈颖军,蔡伟伟,黄国培,李军,张干(673)
天山典型冰川区雪冰中碳质气溶胶浓度特征研究	王圣杰,张明军,王飞腾,李忠勤(679)
兰州市夏秋季颗粒物谱分布特征研究	赵素平,余晔,陈晋北,刘娜,何建军(687)
不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征	杨柳,吴焯,宋少洁,郝吉明(694)
南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析	王红磊,朱彬,沈利娟,康汉青,刁一伟(701)
西北干旱区降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 变化特征及其水汽输送	李小飞,张明军,李亚举,王圣杰,黄小燕,马潜,马雪宁(711)
海南东部河口和近岸海域总溶解态无机砷的分布及季节变化	曹秀红,任景玲,张桂玲,张金娥,杜金洲,朱德弟(720)
大辽河口痕量元素砷的河口混合行为	简慧敏,姚庆祯,于立霞,田琳(727)
渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价	徐亚岩,宋金明,李学刚,袁华茂,李宁(732)
青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析	李先国,邓伟,周晓,唐旭利,魏新运,王岩(741)
广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降	孔祥胜,祁士华,黄保健,张原,李杰(746)
上海宝山区城市土壤铅污染来源的同位素判别	董辰寅,张卫国,王冠,马鸿磊,刘圆,刘莹,叶雷平,俞立中(754)
溶质迁移模型在地下水有机污染源识别中的应用	王树芳,王丽亚,王晓红,林沛,刘久荣,辛宝东,贺国平(760)
地下水污染风险评价中特征污染物量化方法探讨	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮(771)
用于地下水回灌的再生水预处理工艺研究	高清端,张薛,赵璇,赵刚(777)
菲律宾蛤仔养殖对胶州湾沉积物-水界面生源要素迁移的影响	邓可,刘素美,张桂玲,陆小兰,张经(782)
南京市九乡河流域景观格局空间分异对河流水质的影响	胡和兵,刘红玉,郝敬峰,安静(794)
上海都市农业村域地表水非点源氮素的时空分异特征	王楠,毛亮,黄海波,张进忠,周培(802)
不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化	何小艳,赵洪涛,李叙勇,连宾,王小梅(810)
新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究	何丽君,马邕文,王金泉,李东亚,王艳(817)
改性膨润土应急截留液态有机物的性能及机制	李宇,刘贤君,张兴旺,雷乐成(825)
卵圆卡盾藻香港株过氧化氢产生的影响因素研究	江涛,吴霓,钟艳,江天久(832)
芽孢杆菌 B1 胞外活性物质对球形棕囊藻的溶藻特性研究	李蕾,赵玲,尹平河(838)
底泥对洋河水库微囊藻和鱼腥藻生长影响的研究	储昭升,张玉宝,金相灿,徐颖,杨红君(844)
新型无极准分子光源深度处理水相中含 N-杂环化合物	叶招莲,汪斌,路娟娟,李峰,张仁熙(849)
La/Ce 掺杂钛基二氧化铅电极的制备及电催化性能研究	郑辉,戴启洲,王家德,陈建孟(857)
DTT 对三苯基甲染料脱色的研究	潘涛,刘大伟,任随周,郭俊,孙国萍(866)
pH 及络合剂对亚铁活化 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ 氧化去除活性艳蓝的影响研究	张成,王金泉,马邕文,王艳,黄明智,兰明(871)
臭氧降解高浓度腐殖酸动力学	郑可,周少奇,杨梅梅(879)
采用体积信息熵表征颗粒污泥系统稳定性及其稳定机制	李志华,姬晓琴,李胜,谢磊,赵海龙,王晓昌(885)
活性污泥的理化性质与絮凝调理投药量的关系	李婷,王毅力,冯晶,徐萌(889)
不同颗粒龄的好氧颗粒污泥性能的研究	周曼,杨昌柱,濮文虹,罗应东,龚建宇(896)
颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响	李志华,曾金锋,李胜,姬晓琴,王晓昌(903)
氧化沟不同曝气模式对氮磷去除性能的优化与比较	郭昌梓,彭党聪,陈雪梅,王丹(910)
生物沥浸的酸化效应对城市污泥脱水性能的影响	朱海风,周立祥,王电站(916)
2 种不同生物接触氧化工艺性能差异的微生物生态研究	钱殷,全向春,裴元生,马景赞,陶锟(922)
微生物群落对土壤微生物呼吸速率及其温度敏感性的影响	范分良,黄平容,唐勇军,李兆君,梁永超(932)
干旱沙区人工固沙植被演变过程中土壤有机碳氮储量及其分布特征	贾晓红,李新荣,周玉燕,李元寿(938)
密云水库上游流域土壤有机碳和全氮密度影响因素研究	王淑芳,王效科,欧阳志云(946)
外加营养源作用下微生物黏结剂对土壤团聚体的影响	莫艳华,汤佳,张仁铎,李方舟(952)
低分子量腐殖酸改性蒙脱土对黄曲霉素的吸附作用	姚佳佳,康福星,高彦征(958)
液固比对土壤洗涤去除多环芳烃效果的影响	吴威,姜林,陈家军,彭胜(965)
基于 PPI 的土地利用优化研究	武晓峰,李婷(971)
若尔盖高原湿地藻类多样性研究	陈曦,刘如钢,王艳芬,张洪勋(979)
3 种杀真菌剂对 AM 真菌侵染和黄芩生长的影响	贺学礼,王平,马丽,孟静静(987)
崇明东滩夏季沉积物厌氧氨氧化菌群落结构与空间分布特征	郑艳玲,侯立军,陆敏,谢冰,刘敏,李勇,赵慧(992)
厌氧条件下 2,2',4,4'-四溴联苯醚的微生物降解	卢晓霞,陈超琪,张姝,欧阳,尹力,吴蔚(1000)
重金属对白腐菌降解十溴联苯醚的影响	熊士昌,尹华,彭辉,何宝燕,龙焰,叶锦韶,张娜,彭素芬(1008)
有机农药滴滴涕和毒死蜱生物降解机制的分子模拟研究	林玉珍,曾光明,张斌,陈明,蒋敏,张嘉超,鲁伦慧,刘利锋(1015)
高效木薯渣分解复合菌群 RXS 的构建及其发酵特性研究	何江,毛忠贵,张庆华,张建华,唐蕾,张宏建(1020)
四环素类抗生素污染畜禽粪便的厌氧消化特征	童子林,刘元璐,胡真虎,袁守军(1028)
上推流厌氧反应器连续干发酵猪粪产沼气试验研究	陈闯,邓良伟,信欣,郑丹,刘刈,孔垂雪(1033)
《环境科学》征稿简则(878) 《环境科学》征订启事(1007) 信息(759, 770, 870, 1027)	

颗粒粒径与数量对硝化与反硝化过程的影响

李志华¹, 曾金锋¹, 李胜², 姬晓琴¹, 王晓昌¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055; 2. 西安市污水处理有限责任公司, 西安 710025)

摘要: 以实验为基础, 建立了一个基于多底物的多种微生物生长、维持和衰减过程的好氧硝化颗粒 SBR 反应器一维动力学模型, 分析了颗粒粒径及数量对硝化、反硝化等过程的影响。研究发现, 在相同生物量条件下, 氨氮的消耗随颗粒的数量增加而增加, 表明氨氮的消耗主要与 NH_4^+ -N 和颗粒接触表面有关。同时, 系统中所产生的 NO_2^- -N 及 NO_3^- -N 与颗粒数量和粒径有密切关系, 而在 NH_4^+ -N 不足时才只与数量有关, 表明 DO 对颗粒的渗透决定 NO_2^- -N 及 NO_3^- -N 的产生。就反硝化过程而言, 当粒径 $> 1\,000\ \mu\text{m}$ 时反硝化会随粒径的增加而加强, 而小于该值时, 虽然反硝化也会发生但与颗粒粒径关系不大, 表明颗粒粒径 $> 1\,000\ \mu\text{m}$ 时粒径对 DO 的扩散限制才会明显从而加强反硝化过程。

关键词: 硝化; 粒径; 模型; 颗粒污泥; 反硝化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0903-07

Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification

LI Zhi-hua¹, ZENG Jin-feng¹, LI Sheng², JI Xiao-qin¹, WANG Xiao-chang¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources, Environment and Ecology, Ministry of Education, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Xi'an Wastewater Treatment Co. Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: Based on experimental results, a one dimension dynamic model was developed for describing the growth, maintenance and decay processes of microbes using multi substances, and consequently, the effect of size and number of aerobic granules on nitrification and denitrification were investigated. It was found that the consuming of ammonia nitrogen increased with the larger number of granules given the same biomass amount, indicating that the consumption of ammonia was dependent on the surface area of granules. The resulting amount of NO_2^- -N and NO_3^- -N was dependent not only on the amount but also on the diameter of granules, and the effect of the diameter became negligible only when the ammonia concentration was very low, suggesting the penetration depth of oxygen determines the production of NO_2^- -N and NO_3^- -N. Regarding on denitrification, for those granules with the diameter more than $1\,000\ \mu\text{m}$, the denitrification increased with the increase of diameter, however, for those ones less than $1\,000\ \mu\text{m}$ the effect of diameter became negligible, indicating that the limitation of oxygen diffusion in granules of big granules more than $1\,000\ \mu\text{m}$ could help the process of denitrification.

Key words: nitrification; diameter of granule; model; granular sludge; denitrification

好氧颗粒污泥自从 1991 年被提出后, 由于其能够形成集厌氧、缺氧、好氧于一体的特殊结构而得到广泛的研究。与传统活性污泥法相比, 好氧颗粒污泥由于结构密实、生物活性高而具有更好的沉降性能、更强的抗冲击负荷能力、更大的污泥负荷等优点, 而这些优点使得处理构筑物结构紧凑、占地面积小^[1]。目前, 好氧颗粒污泥已用于市政污水、工业废水等各种污水的处理^[2~4]。虽然在连续流里也能观察到颗粒形成^[5], 但好氧颗粒污泥的应用基本都是 SBR 反应器。而对于好氧颗粒污泥 SBR 反应器, 其各种溶解物质的出水浓度和很多因素有关, 如颗粒粒径、颗粒数量、微生物种类和数量、颗粒中微生物的空间分布等, 而且各种因素之间是密切相关、相互

影响的, 在实验条件下根本无法对各种因素进行单独研究, 此时数学模型作为研究复杂系统的重要工具, 能起到一些补充的作用, 完成实验无法完成的任务。De Kreuk 等^[6]在实验和数值模拟中观察到颗粒粒径对 N 和 P 的去除过程都有影响, 但其部分模拟结果和实验结果有较大误差, Vlaeminck 等^[7]通过实验证实了粒径对自养菌除氮的影响, Volcke 等^[8]通过数值模拟的方法分析了粒径对全自养硝化脱氮的

收稿日期: 2011-04-25; 修订日期: 2011-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078303); 陕西省青年科技新星项目(2010KJXX-07); 陕西高校省级重点实验室科研计划项目(09JS027); 长江学者和创新团队发展计划项目 PCSIRT(IRT0853)

作者简介: 李志华(1976~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向废水生物处理技术与理论, E-mail: lizhihua@gmail.com

影响,但没有进行实验验证.因此,本研究在实验数据的基础上辅以数学模型手段分析不同粒径颗粒对硝化和反硝化过程的影响.

1 材料与方法

实验结果来自于实验室硝化颗粒污泥 SBR 反应器,反应器的有效容积为 2 L,内径为 50 mm,反应器运行条件为进水 5 min,曝气 160 min,沉淀 10 min,出水 5 min.采用气泵经玻璃砂芯从反应器底部进行曝气,风速为 1 L·min⁻¹,溶解氧维持在 6~8 mg·L⁻¹.每周周期进出水为 1 L,保持水力停留时间为 6 h,反应器在温度为 25℃±1℃的水浴下进行.反应器进水为人工合成污水,配水水质为 (mg·L⁻¹): NaHCO₃ 525, KH₂PO₄ 43.9, NH₄Cl 229.3 (NH₄⁺-N 为 60), MgSO₄·7H₂O 90, CaCl₂·2H₂O 14,并按照 0.3 mL·L⁻¹的比例加入微量元素储备液,其组成如下 (mg·L⁻¹): FeCl₃·7H₂O 115, H₃BO₃ 0.15, CuSO₄·5H₂O 0.03, KI 0.18, MnCl₂·H₂O 0.12, Na₂MoO₄·2 H₂O 0.06, ZnSO₄·7H₂O 0.12, CoCl₂·6H₂O 0.15, EDTA 10.接种污泥来源为西安市北石桥污水净化中心的 DE 型氧化沟回流污泥.出水中氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂光度法测定,亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法,硝酸盐氮浓度(NO₃⁻-N)酚二磺酸光度法测定,其余均采用标准方法测定^[9].

2 模型的建立

2.1 模型假设

本模型以多底物多微生物类型的好氧硝化颗粒模型^[10]为基础,并结合本研究目的进行适当修改,以完成溶解性底物在颗粒中的扩散、微生物的生长以及相关的生物化学反应等过程的模型分析.本研究所建立的模型做如下假设:①所有颗粒是完全相

同的球型;②颗粒的数量是不变的;③扩散系数不随时间变化;④初始颗粒中的活性微生物是均匀分布的,即没有微生物浓度梯度;⑤反应器是完全混合的;⑥进水、沉淀和出水时反应器中不发生生化反应.

2.2 模型描述及求解

模型中包括 4 个颗粒性组分:3 个活性生物组分氨氧化细菌(AOB)X_{AOB}、硝化细菌(NO₂)X_{NOB}、异养菌 X_H 以及一个惰性颗粒性组分 X_I; 5 个溶解性组分:溶解氧 S_O、氨 S_{NH₄⁺}、亚硝酸盐 S_{NO₂⁻}、硝酸盐 S_{NO₃⁻} 以及溶解性有机碳源 S_S; 8 个过程用于描述各种物质之间的转化关系,各个过程表达式列于国际水协所提倡的同时也为 ASM 系列模型广泛使用的矩阵表达式中(表 1).模型基于以下机制:反应器中 NH₄⁺ 扩散到颗粒中,先由氨氧化细菌(AOB)氧化成 NO₂⁻,中间产物 NO₂⁻ 再由硝化细菌(NO₂)氧化成 NO₃⁻;虽然进水中没有有机碳源,但是微生物的衰减会产生溶解性微生物产物(SMP)^[11],这种产物可作为异养菌 X_H 生长的碳源.异养微生物在颗粒中很重要,它产生的胞外聚合物(EPS)用于维持颗粒的三维结构以及颗粒的稳定性^[12, 13].各个过程速率用 Monod 形式来表示,过程动力学矩阵和化学计量数矩阵见表 2 和表 3.

在颗粒中,溶解性组分一方面向颗粒内部扩散,一方面由于颗粒内部分布微生物的消耗而逐渐降低,其质量平衡方程表现为反应-扩散方程,在球形坐标中表示为:

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = D_i \left(\frac{\partial^2 S_i}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial S_i}{\partial r} \right) + r_i \tag{1}$$

式中, i 为溶解性组分,包括 S_O、S_{NH₄⁺}、S_{NO₂⁻}、S_{NO₃⁻}、S_S, r_i 为对应各溶解性组分的净转化速率,以各个过程中此溶解物质的过程速率和来表示,即:

$$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j \tag{2}$$

表 1 化学计量数矩阵
Table 1 Stoichiometric matrix

过程	溶解性组分/mg·L ⁻¹					颗粒性组分/mg·L ⁻¹				过程速率
	S _O	S _{NH₄⁺}	S _{NO₂⁻}	S _{NO₃⁻}	S _S	X _{AOB}	X _{NOB}	X _H	X _I	
AOB 的好氧生长	1-3.43/Y _{NH₄⁺}	-1/Y _{NH₄⁺} -i _{NBM}	-1/Y _{NH₄⁺}			1				ρ ₁
AOB 的维持	-3.43	-1	1							ρ ₂
AOB 的衰减		i _{NBM} -i _{NXI} F _{XI} -i _{NBM}			1-F _{XI}	-1			F _{XI}	ρ ₃
NOB 的好氧生长	1-1.14/Y _{NO₂⁻}		-1/Y _{NO₂⁻}	1/Y _{NO₂⁻}			1			ρ ₄
NOB 的维持	-1.14		-1	1						ρ ₅
NOB 的衰减		i _{NBM} -i _{NXI} F _{XI}			1-F _{XI}		-1		F _{XI}	ρ ₆
XH 的好氧生长	1-1/Y _H	-i _{NBM}			-1/Y _H			1		ρ ₇
XH 的衰减		i _{NBM} -i _{NXI} F _{XI}			1-F _{XI}			-1	F _{XI}	ρ ₈

表 2 过程速率

Table 2 Process rate		
序号	过程	过程速率
1	AOB 的好氧生长	$\mu_{\text{NH}_4^+} \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{K_{\text{NH}_4^+} + S_{\text{NH}_4^+}} \frac{S_0}{K_{\text{O},\text{NH}_4^+} + S_0} X_{\text{AOB}}$
2	AOB 的维持	$m_{\text{NH}_4^+} \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{K_{\text{NH}_4^+} + S_{\text{NH}_4^+}} \frac{S_0}{K_{\text{O},\text{NH}_4^+} + S_0} X_{\text{AOB}}$
3	AOB 的衰减	$b_{\text{NH}_4^+} \frac{K_{\text{NH}_4^+}}{K_{\text{NH}_4^+} + S_{\text{NH}_4^+}} X_{\text{AOB}}$
4	NOB 的好氧生长	$\mu_{\text{NO}_2^-} \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{K_{\text{NO}_2^-} + S_{\text{NO}_2^-}} \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{K_{\text{B},\text{NH}_4^+} + S_{\text{NH}_4^+}} \frac{S_0}{K_{\text{O},\text{NO}_2^-} + S_0} X_{\text{NOB}}$
5	NOB 的维持	$m_{\text{NO}_2^-} \frac{S_{\text{NO}_2^-}}{K_{\text{NO}_2^-} + S_{\text{NO}_2^-}} \frac{S_0}{K_{\text{O},\text{NO}_2^-} + S_0} X_{\text{NOB}}$
6	NOB 的衰减	$b_{\text{NO}_2^-} \frac{K_{\text{NO}_2^-}}{K_{\text{NO}_2^-} + S_{\text{NO}_2^-}} X_{\text{NOB}}$
7	XH 的好氧生长	$\mu_{\text{H}} \frac{S_{\text{S}}}{K_{\text{S}} + S_{\text{S}}} \frac{S_0}{K_{\text{O},\text{H}} + S_0} \frac{S_{\text{NH}_4^+}}{K_{\text{B},\text{NH}_4^+} + S_{\text{NH}_4^+}} X_{\text{H}}$
8	XH 的衰减	$b_{\text{H}} \frac{K_{\text{S}}}{K_{\text{S}} + S_{\text{S}}} X_{\text{H}}$

表 3 模型参数值及来源

Table 3 Parameter values and sources			
符号	含义	数值	文献
$Y_{\text{NH}_4^+}$	AOB 产率系数(COD/N)/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.21	[10]
$Y_{\text{NO}_2^-}$	NOB 产率系数(COD/N)/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.05	[10]
Y_{H}	X _H 产率系数(COD/COD)/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.67	[14]
F_{Xi}	生物体衰减 X _i 产量(N/COD)/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.08	[15]
i_{NBM}	生物体含氮量(N/COD)/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.07	[14]
i_{NXi}	X _i 含氮量(N/COD)/ $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.02	[15]
$\mu_{\text{NH}_4^+}$	AOB 最大比增长速率/ h^{-1}	0.09	[16]
$K_{\text{NH}_4^+}$	AOB 的氨氮亲和常数(以 N 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	9.1	[10]
$K_{\text{O},\text{NH}_4^+}$	AOB 的氧亲和常数(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.74	[17]
$m_{\text{NH}_4^+}$	AOB 的维持系数/ h^{-1}	0.015	[18]
$b_{\text{NH}_4^+}$	AOB 的衰减系数/ h^{-1}	0.012 5	[16]
$\mu_{\text{NO}_2^-}$	NOB 最大比增长速率/ h^{-1}	0.11	[16]
$K_{\text{NO}_2^-}$	NOB 的亚硝酸盐亲和常数(以 N 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	4.85	[10]
$K_{\text{O},\text{NO}_2^-}$	NOB 的氧亲和常数(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.75	[18]
$m_{\text{NO}_2^-}$	NOB 的维持系数/ h^{-1}	0.048	[18]
$b_{\text{NO}_2^-}$	NOB 的衰减系数/ h^{-1}	0.008 3	[16]
$K_{\text{b},\text{NH}_4^+}$	X _H 的氨亲和常数(以 N 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.07	[14]
μ_{H}	X _H 最大比增长速率/ h^{-1}	0.25	[14]
K_{S}	X _H 的 S _s 亲和常数(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	20.0	[14]
$K_{\text{O},\text{H}}$	X _H 的氧亲和常数(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.20	[14]
b_{H}	X _H 的衰减系数/ h^{-1}	0.026	[14]
D_{S}	S _s 的扩散系数/ $\text{dm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	0.000 576	[15]
$D_{\text{NH}_4^+}$	NH ₄ ⁺ -N 的扩散系数/ $\text{dm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	0.000 625	[15]
$D_{\text{NO}_2^-}$	NO ₂ ⁻ -N 的扩散系数/ $\text{dm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	0.000 583	[15]
$D_{\text{NO}_3^-}$	NH ₃ ⁻ -N 的扩散系数/ $\text{dm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	0.000 583	[15]
D_{O}	DO 的扩散系数/ $\text{dm}^2\cdot\text{h}^{-1}$	0.000 917	[15]

式中, j 表示过程速率, i 表示溶解性组分, v_{ij} 表示第 j 个过程的组分 i 的化学计量数, 例如若 i 表示 $S_{\text{NO}_2^-}$, 则:

$$r_{\text{NO}_2^-} = \sum_j v_{ij} \rho_j = (-1/Y_{\text{NH}_4^+}) \rho_1 + \rho_2 + (-1/Y_{\text{NO}_2^-}) \rho_4 + (-1) \rho_5 \quad (3)$$

方程的边界条件为:

$$r = 0, \quad \frac{\partial S_i}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$r = R, \quad S_i = S_{i,\text{bulk}} \quad (5)$$

式中, r 为距离颗粒中心的距离, R 为颗粒半径, $S_{i,\text{bulk}}$ 为溶解性组分 i 在主体溶液中的浓度. 写出 5 个溶解性组分的偏微分方程以及边界条件, 然后求解偏微分方程组. 由于此偏微分方程组较复杂, 无法得到解析解, 只能用数值的方法进行计算. 用于求解偏微分方程的方法有很多, 如有限差分法、有限元法、正交配置法等, 这里选用使用方便、精度比较高的正交配置法^[19]. 首先要将球体半径进行归一化, 即令 $x = r/R$, 因为正交配置法分配的配置点只能在 0 和 1 之间. 然后沿球体半径分配 N 个配置点, 即将球体离散成了 $N-1$ 个球壳. 假设在颗粒中心处为第一个配置点, 颗粒与主体溶液接触处为第 N 个配置点, 则溶解组分 i 在颗粒中的第 j 个配置点的一阶和二阶偏导数分别为:

$$\frac{\partial S_i}{\partial r} = \frac{1}{R} \frac{\partial S_i}{\partial x} = \frac{1}{R} \sum_{k=1}^N A_{j,k} S_{i,k} \quad (j = 2, 3, \dots, N-1) \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 S_i}{\partial r^2} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 S_i}{\partial x^2} = \frac{1}{R^2} \sum_{k=1}^N B_{j,k} S_{i,k} \quad (7)$$

为简化计算, 假设在某一很短时间间隔 Δt 内系统处于稳态, 则 $\partial S_i / \partial t = 0$, 将式 (6) 和 (7) 代入式 (1) 中, 得到:

$$D_i \left(\frac{1}{R^2} \sum_{k=1}^N B_{j,k} S_{i,k} + \frac{2}{x} \frac{1}{R^2} \sum_{k=1}^N A_{j,k} S_{i,k} \right) + r_i = 0 \quad (8)$$

在边界 $x=0$ 和 $x=1$ 处, 分别表示第一个和第 N 个配置点, 即 $j=1$ 和 $j=N$, 将式 (4) 和 (5) 转化为:

$$\sum_{k=1}^N A_{1,k} S_{i,k} = 0 \quad (9)$$

$$S_{i,N} = S_{i,\text{bulk}} \quad (10)$$

这样对于每一个溶解性组分 i , 都有 $S_{i,1}, S_{i,2}, \dots, S_{i,N-1}$ 等共 $N-1$ 个未知数, 同时也有 $N-1$ 个非线性代数方程. 虽然多种组分与各个过程速率 r_i 相关, 但是将所有的方程联立起来后未知数个数和方程数是相同的, 因此恰好可以求出各个配置点处的

浓度.

在主体溶液中, 溶解组分因为在颗粒中的反应和扩散而逐渐降低, 即:

$$\frac{dS_{i,\text{bulk}}}{dt} = r_{\text{all},i} \quad (11)$$

可以将这个过程从时间序列上视为一系列连续搅拌反应器^[20], 在 t 时刻, 溶解型组分 S_i 浓度为 $S_i(t)$, 经过时间间隔 Δt 后, 出水浓度为 $S_i(t + \Delta t)$, 则:

$$S_{i,\text{bulk}}(t + \Delta t) = S_{i,\text{bulk}}(t) + r_{\text{all},i}(t) \Delta t \quad (12)$$

其初始条件为 $t=0$ 时, $S_{i,\text{bulk}}(0) = S_{i,0}$, $S_{i,0}$ 为主体溶液中的初始浓度; 式中 $r_{\text{all},i}$ 表示溶解性组分 i 在所有颗粒中的总反应速率, 显然, 总反应速率和颗粒的数量有关. 虽然反应器中存在各种不同粒径的颗粒, 但是这里只取 3 种颗粒粒径作为代表进行分析, 因为过多的粒径不仅严重增加计算的复杂度而且不利于对系统的理解^[6]. 本研究取粒径分别为 500、1 000 和 2 000 μm 的颗粒作为代表, 并且 3 种颗粒的总体积相同 (即生物量相同). 各粒径颗粒的数量用下面的公式进行估算:

$$V_{\text{granule}} = \frac{V_R \cdot X_R}{\rho_{\text{granule}}} \quad (13)$$

$$\text{NG} = \frac{V_{\text{granule}}}{\frac{4}{3} \pi R_m^3} \quad (14)$$

式中, V_{granule} 为反应器中颗粒总体积 (L), V_R 为反应器的有效容积 (L), X_R 为反应器中微生物浓度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), ρ_{granule} 为颗粒密度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), R_m 为颗粒的平均半径 (dm), NG 为颗粒的估计值.

在知道颗粒数量的情况下, 用下式计算溶解性组分 i 的在反应器中的总反应速率 $r_{\text{all},i}$,

$$r_{\text{all},i} = \text{NG} \cdot r_{\text{avg},i} \quad (15)$$

式中, $r_{\text{avg},i}$ 为单个颗粒中溶解性组分 i 的平均反应速率, 计算表达式为:

$$r_{\text{avg},i} = R_m^3 \int_0^1 r_i \cdot 4\pi x^2 dx \quad (16)$$

这样, 用上面的式 (1) ~ (5) 可以得到各溶解性组分在颗粒中的浓度配置从而根据动力学参数矩阵计算出各组分在配置点处的反应速率, 再用式 (12) ~ (16) 可以计算出任意时刻主体溶液中的溶解性组分的浓度. 需要注意的是, 对于溶解氧, 在曝气阶段是不断通入空气的, 因此, 溶解氧在曝气阶段任意时刻的浓度用下式进行计算:

$$S_{\text{O},\text{bulk}}(t + \Delta t) = S_{\text{O},\text{bulk}}(t) + r_{\text{all},\text{O}}(t) \Delta t + k_L a [S_{\text{O},\text{sat}} - S_{\text{O},\text{bulk}}(t)] \Delta t \quad (17)$$

式中, $S_{O,bulk}$ 为主体溶液中的溶解氧浓度, $S_{O,sat}$ 为饱和溶解氧, 其余符号意义同上。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

为了验证模型的可靠性, 以实验操作条件如进水、曝气、沉淀和出水时间以及进水中所含各溶解性组分的浓度和化学计量数动力学常数等对模型进行初始化, 并运行模型直到系统达到稳态。达到稳态后, 让反应器运行一个周期, 保存输出结果, 并将模型中的模拟结果和反应器达到稳态后的实验数据进行比较, 相关实验数据包括 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 及 $NO_3^- -N$, 得到结果如图 1。

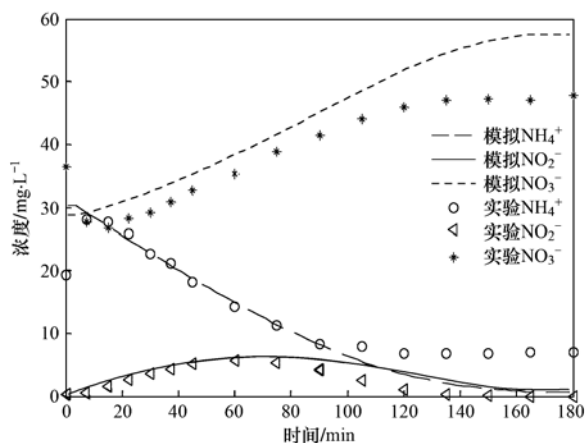


图 1 模拟结果和实验数据

Fig. 1 Simulation result and experimental data

可以看到, 系统达到稳态时, NH_4^+-N 在 AOB 的作用下基本完全转化为 $NO_2^- -N$ 及 $NO_3^- -N$ 。进水之后, 在 NH_4^+-N 浓度较高时, 被 AOB 在 DO 充足条件快速转化为 $NO_2^- -N$, 因此会出现短暂的 $NO_2^- -N$ 积累, 之后在 NOB 的作用下逐渐完全转化 $NO_3^- -N$ 。因为模型中并没有反硝化过程, 所以 $NO_3^- -N$ 是反应器中的最终产物, 浓度较高。从图 1 可以发现, 模拟结果除 $NO_2^- -N$ 和 $NO_3^- -N$ 外并没能精确地描述实验过程 NH_4^+-N 的情况, 而是实际氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率要低于实验数据, 其原因可能在于: ①模型中的化学计量系数和动力学常数全部来源于参考文献, 虽然这些化学计量系数和动力学参数在其他颗粒污泥模型或生物膜模型中被校准过, 但是这些系数和参数会在很大程度上依赖于培养环境、操作条件以及测量方法, 这些因素任何一个不同都会导致参数值不一样; ②模型中没有考虑反硝化过程, 而

实际上反应器中一直都是存在反硝化的^[21], 从长期运行来看, 反硝化作用去除总氮约 10% ~ 20%, 而周期中反硝化也能从总氮的降低中体现 (见图 2), 而这也影响模型中 $NO_3^- -N$ 的最终产量, 使其与实验数据不完全符合。从总的过程来看, 模型能较好地反映出各溶解性物质的变化趋势, 对于理解生物过程有一定的帮助。

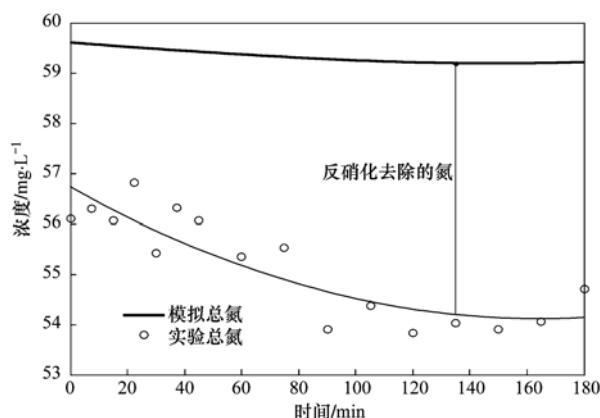


图 2 模型和反应器中总氮的变化

Fig. 2 Variation of total nitrogen of simulation and experimental results

3.2 不同粒径颗粒对硝化过程的影响

图 3 分别表示 3 种粒径的颗粒对于 NH_4^+-N 、 $NO_2^- -N$ 、 $NO_3^- -N$ 的变化所做的贡献, 正值表示产生这种物质, 负值则说明消耗这种物质。在图 3(a) 中, 刚开始 NH_4^+-N 浓度较大时各种粒径颗粒消耗 NH_4^+-N 都较多, 但粒径最大的颗粒 (2 000 μm) 消耗的最少, 粒径最小的颗粒 (500 μm) 消耗最多, 这说明 NH_4^+-N 的去除与颗粒数量或者说和颗粒与溶液的接触面积密切相关。可能在刚开始 NH_4^+-N 充足时, 溶解氧在大颗粒中的渗透深度较小, 而在 NH_4^+-N 几乎完全转化时溶解氧才能渗透整个颗粒, 但 3 种颗粒转化 NH_4^+-N 的比例在整个周期中几乎不变, 说明此处各种颗粒转化 NH_4^+-N 与氧渗透深度关系不大, 而是与颗粒数量有关, 颗粒数量越多, 转化的 NH_4^+-N 越多。在图 3(b) 中, 3 种粒径颗粒先是都产生 $NO_2^- -N$, 使得 $NO_2^- -N$ 积累, 随着 NH_4^+-N 被不断消耗, $NO_2^- -N$ 的生成速率逐渐减小, 同时 $NO_2^- -N$ 的消耗速率逐渐增加, 导致 $NO_2^- -N$ 最后被完全转换成最终产物 $NO_3^- -N$ 。在 80 min 左右时, $NO_2^- -N$ 积累量达到最大值, 之后会逐渐被消耗掉。从图 3(b) 中还可以发现, 粒径最小的颗粒 (500 μm) 不仅产生的 $NO_2^- -N$ 最多, 消耗的 $NO_2^- -N$ 也是最多的, 同时, 由产生到消

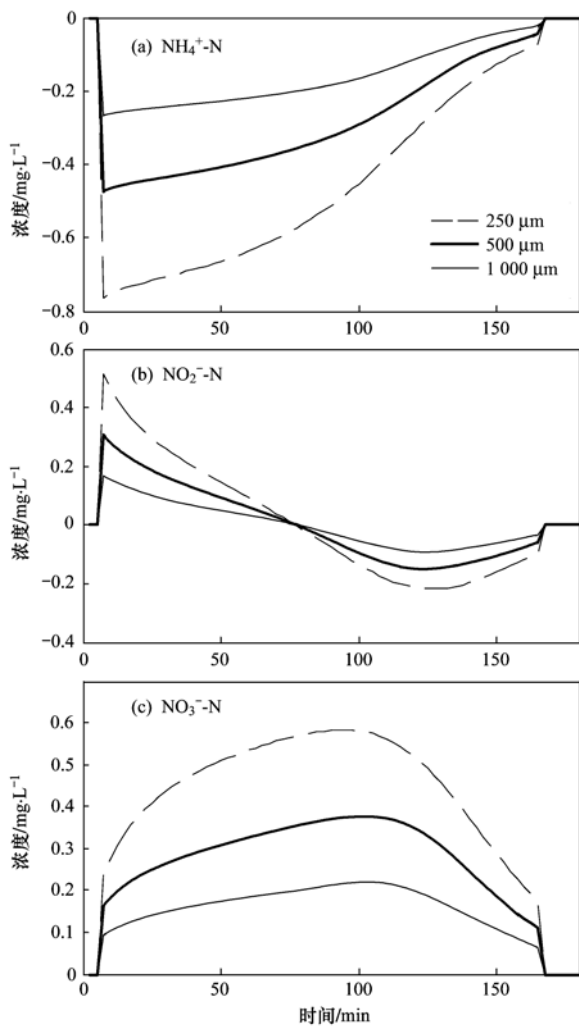


图3 不同粒径颗粒消耗(产生)的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

Fig. 3 Consumption (production) of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ of granules with different diameter

耗整个过程的转变也是最快的,这个现象进一步说明各种物质的变化与颗粒数量或者说和颗粒与溶液的接触面积密切相关.在 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累和消耗过程中,粒径越小,积累和消耗的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 越多,这显然和溶解氧的渗透深度有关,因为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的产生和消耗同时都需要溶解氧,而粒径较小的颗粒被溶解氧完全渗透的时间在整个周期中必定长于粒径较大的颗粒,而粒径较大的颗粒溶解氧的扩散限制更明显,溶解氧过低则影响 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的生成量,高则有助于将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,这也是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不足时 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 降低的主要原因.在 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 减少时(80 min后),溶解氧几乎能渗透所有的颗粒,此处的决定因素为颗粒数量,因此,各粒径颗粒去除的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 量与颗粒数量一致.据此,可以推定 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的变化在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 充

足时不仅和颗粒数量有关,而且和溶解氧的渗透深度有关,而在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 不足使得溶解氧完全渗透所有颗粒时,只与颗粒数量有关.从图3(c)中可以看到, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在整个过程中都会产生,并且粒径较小颗粒产生的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 最多,所有粒径颗粒产生的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的变化趋势一致.因为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是由 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 直接转化过来的,而且与DO有关,因此影响 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的因素也同时影响 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的产生,即颗粒数量和粒径都能影响 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的生成.

3.3 颗粒粒径对反硝化脱氮的影响

DO被认为是控制同步硝化反硝化(SND)的重要参数之一,因为在颗粒中DO的扩散将会被限制,导致颗粒中出现缺氧区(见图4),而这正是SND的必要条件.虽然模型中并不包含反硝化过程,但是从实验数据中仍然可以发现颗粒粒径与TN去除的关系.图5所示为反应器中颗粒在不同阶段的粒径以及TN的去除率,从中可以看到,随着培养时间的增加,颗粒粒径有逐渐增加的趋势.同时可以发现,在400 d之前,颗粒粒径变化与TN去除率之间的关系并不特别明显,而在400 d之后,随着颗粒粒径的增加,TN的去除率是增加的.这是因为在400 d前,颗粒粒径 $<1000\ \mu\text{m}$,而在400 d后粒径 $>1000\ \mu\text{m}$, $1000\ \mu\text{m}$ 即Liu等^[22]认为的对DO限制明显的颗粒粒径.在粒径 $<1000\ \mu\text{m}$ 时,系统中也存在SND作用,而且一直维持在10%左右,这是因为小颗粒中除了DO扩散限制产生DO浓度梯度导致SND外还存在尚不明确的因素^[23],这里TN的去除与粒径关系不大;而粒径 $>1000\ \mu\text{m}$ 时^[22],颗粒对DO的扩散限制才会明显,颗粒中出现缺氧区与好氧区共存,会加强SND,这时随颗粒粒径的增加对SND作用更

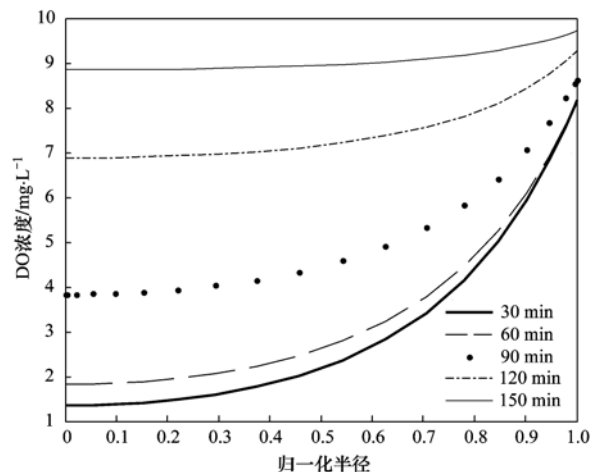


图4 颗粒中不同时刻的DO分布

Fig. 4 DO profiles in granules at different time

加明显,而这也是去除 TN 的主要途径。

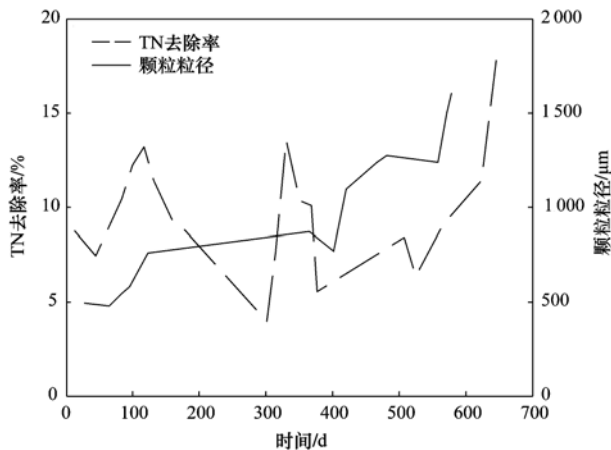


图5 不同粒径对应的 TN 去除率

Fig. 5 Relationship between diameter and TN removal

4 结论

(1) 建立了一个一维颗粒污泥动力学模型,模拟结果能较好地描述实验数据。

(2) 硝化过程中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 等各物质的变化与颗粒数量和粒径有很大的关系,颗粒数量越多、粒径越小转化的量越多,而在底物不足时只与数量有关。

(3) 当颗粒粒径 $> 1\,000\ \mu\text{m}$ 时, SND 作用随着颗粒粒径的增加而更加明显。

参考文献:

- [1] Liu X W, Yu H Q, Ni B J, *et al.* Characterization, modeling and application of aerobic granular sludge for wastewater treatment [J]. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 2009, **113**: 275-303.
- [2] 彭永臻, 吴蕾, 马勇, 等. 好氧颗粒污泥的形成机制、特性及应用研究进展[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 273-281.
- [3] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 449-473.
- [4] 卢姗, 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.
- [5] Kishida N, Kono A, Yamashita Y, *et al.* Formation of aerobic granular sludge in a continuous-flow reactor-control strategy for the selection of well-settling granular sludge[J]. *Journal of Water and Environment Technology*, 2010, **8**(3): 251-258.
- [6] 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.
- [7] Vlaeminck S E, Terada A, Smets B F, *et al.* Aggregate size and architecture determine microbial activity balance for one-stage partial nitrification and anammox[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(3): 900-909.
- [8] Volcke E, Picioreanu C, De Baets B, *et al.* Effect of granule size on autotrophic nitrogen removal in a granular sludge reactor [J]. *Environmental Technology*, 2010, **31**(11): 1271-1280.
- [9] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [10] Fang F, Ni B J, Li X Y, *et al.* Kinetic analysis on the two-step processes of AOB and NOB in aerobic nitrifying granules [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, **83**(6): 1159-1169.
- [11] Laspidou C S, Rittmann B E. A unified theory for extracellular polymeric substances, soluble microbial products, and active and inert biomass [J]. *Water Research*, 2002, **36**(11): 2711-2720.
- [12] Tsuneda S, Nagano T, Hoshino T, *et al.* Characterization of nitrifying granules produced in an aerobic upflow fluidized bed reactor[J]. *Water Research*, 2003, **37**(20): 4965-4973.
- [13] Shi X Y, Sheng G P, Li X Y, *et al.* Operation of a sequencing batch reactor for cultivating autotrophic nitrifying granules [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(9): 2960-2964.
- [14] Henze M. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3[R]. International Water Association, 2000. 21-22.
- [15] Ni B J, Chen Y P, Liu S Y, *et al.* Modeling a granule-based anaerobic ammonium oxidizing (ANAMMOX) process [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **103**(3): 490-499.
- [16] Jubany I, Carrera J, Lafuente J, *et al.* Start-up of a nitrification system with automatic control to treat highly concentrated ammonium wastewater: experimental results and modeling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, **144**(3): 407-419.
- [17] Guisasaola A, Jubany I, Baeza J A, *et al.* Respirometric estimation of the oxygen affinity constants for biological ammonium and nitrite oxidation [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2005, **80**(4): 388-396.
- [18] Moussa M S, Hooijmans C M, Lubberding H J, *et al.* Modelling nitrification, heterotrophic growth and predation in activated sludge [J]. *Water Research*, 2005, **39**(20): 5080-5098.
- [19] Picioreanu C, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Modelling the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor [J]. *Water Science and Technology*, 1997, **36**(1): 147-156.
- [20] Su K Z, Yu H Q. A generalized model for aerobic granule-based sequencing batch reactor. 1. Model development [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(15): 4703-4708.
- [21] 李志华, 郭强, 吴杰, 等. 自养菌污泥致密过程及其污水处理特性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 738-742.
- [22] Liu Y, Liu Y. Diffusion of substrate and oxygen in aerobic granule [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **27**(1): 45-52.
- [23] 王川, 聂会元, 左金龙, 等. 溶解氧和污泥粒径分布对城市污水 SND 影响 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, **32**(3): 145-148.

CONTENTS

Stable Carbon Isotope of Black Carbon from Typical Emission Sources in China	CHEN Ying-jun, CAI Wei-wei, HUANG Guo-peí, <i>et al.</i> (673)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Concentration in Snow and Ice of Glaciers in Tianshan Mountains	WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, WANG Fei-teng, <i>et al.</i> (679)
Size Distribution Properties of Atmospheric Aerosol Particles During Summer and Autumn in Lanzhou	ZHAO Su-ping, YU Ye, CHEN Jin-bei, <i>et al.</i> (687)
Particle Number Size Distribution near a Major Road with Different Traffic Conditions	YANG Liu, WU Ye, SONG Shao-jie, <i>et al.</i> (694)
Atmospheric Particle Formation Events in Nanjing During Summer 2010	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (701)
Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation and Moisture Transports over the Arid Region in Northwest China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, LI Ya-ju, <i>et al.</i> (711)
Distributions and Seasonal Variations of Total Dissolved Inorganic Arsenic in the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	CAO Xiu-hong, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (720)
Mixing Behavior of Arsenic in the Daliaohe Estuary	JIAN Hui-min, YAO Qing-zheng, YU Li-xia, <i>et al.</i> (727)
Variation Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of Bohai Bay	XU Ya-yan, SONG Jin-ming, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (732)
Distribution of PAHs in Surface Seawater of Qingdao Coast Area and Their Preliminary Apportionment	LI Xian-guo, DENG Wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (741)
Atmospheric Deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, HUANG Bao-jian, <i>et al.</i> (746)
Lead Isotope Signatures and Source Identification in Urban Soil of Baoshan District, Shanghai	DONG Chen-yin, ZHANG Wei-guo, WANG Guan, <i>et al.</i> (754)
Solute Transport Modeling Application in Groundwater Organic Contaminant Source Identification	WANG Shu-fang, WANG Li-ya, WANG Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Quantitative Method of Representative Contaminants in Groundwater Pollution Risk Assessment	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (771)
Study on the Advanced Pre-treatments of Reclaimed Water Used for Groundwater Recharge	GAO Yu-tuan, ZHANG Xue, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (777)
Influence of <i>Ruditapes philippinarum</i> Aquaculture on Benthic Fluxes of Biogenic Elements in Jiaozhou Bay	DENG Ke, LIU Su-mei, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (782)
Influence of Spatial Difference on Water Quality in Jiuxiang River Watershed, Nanjing	HU He-bing, LIU Hong-yu, HAO Jing-feng, <i>et al.</i> (794)
Temporal and Spatial Variation of Non-Point Source Nitrogen in Surface Water in Urban Agricultural Region of Shanghai	WANG Nan, MAO Liang, HUANG Hai-bo, <i>et al.</i> (802)
Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff	HE Xiao-yan, ZHAO Hong-tao, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (810)
Treatment Studies of Industrial Rainoff With a New Type of Constructed Wetland	HE Li-jun, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (817)
Emergent Retention of Organic Liquid by Modified Bentonites: Property and Mechanism	LI Yu, LIU Xian-jun, ZHANG Xing-wang, <i>et al.</i> (825)
Production of Peroxide Hydrogen in <i>Chattonella ovata</i> Hong Kong Strain	JIANG Tao, WU Ni, ZHONG Yan, <i>et al.</i> (832)
Characteristics Study of Extracellular Active Substance of <i>Bacillus</i> sp. B1 on <i>Phaeocystis globosa</i>	LI Qiang, ZHAO Ling, YIN Ping-he (838)
Effects of Sediment on the Growth of <i>Microcystis</i> and <i>Anabaena</i> in Yanghe Reservoir	CHU Zhao-sheng, ZHANG Yu-bao, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (844)
New-Type Electrodeless Excilamp for Advanced Treatment on Nitrogen-Heterocyclic Compounds (NHCs) in Aqueous Solution	YE Zhao-lian, WANG Bin, LU Juan-juan, <i>et al.</i> (849)
Preparation and Electro-catalytic Characterization on La/Ce Doped Ti-base Lead Dioxide Electrodes	ZHENG Hui, DAI Qi-zhou, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (857)
Study on Decolorization of Triphenylmethane Dyes by DTT	PAN Tao, LIU Da-wei, REN Sui-zhou, <i>et al.</i> (866)
Influences of pH and Complexing Agents on Degradation of Reactive Brilliant Blue KN-R by Ferrous Activated Persulfate	ZHANG Cheng, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (871)
Degradation Kinetics of Ozone Oxidation on High Concentration of Humic Substances	ZHENG Ke, ZHOU Shao-qi, YANG Mei-mei (879)
Index of Stability and Its Mechanisms of Aerobic Granular System Using Volume-based Information Entropy	LI Zhi-hua, JI Xiao-qin, LI Sheng, <i>et al.</i> (885)
Relationship Between Physicochemical Characteristics of Activated Sludge and Polymer Conditioning Dosage	LI Ting, WANG Yi-li, FENG Jing, <i>et al.</i> (889)
Research of Aerobic Granule Characteristics with Different Granule Age	ZHOU Man, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (896)
Effect of Size and Number of Aerobic Granules on Nitrification and Denitrification	LI Zhi-hua, ZENG Jin-feng, LI Sheng, <i>et al.</i> (903)
Optimization and Comparison of Nitrogen and Phosphorus Removal by Different Aeration Modes in Oxidation Ditch	GUO Chang-zi, PENG Dang-cong, CHENG Xue-mei, <i>et al.</i> (910)
Effect of Acidification on the Dewaterability of Sewage Sludge in Bioleaching	ZHU Hai-feng, ZHOU Li-xiang, WANG Dian-zhan (916)
Microbial Ecology Analysis of the Biofilm from Two Biological Contact Oxidation Processes with Different Performance	QIAN Yin, QUAN Xiang-chun, PEI Yuan-sheng, <i>et al.</i> (922)
Altered Microbial Communities Change Soil Respiration Rates and Their Temperature Sensitivity	FAN Fen-liang, HUANG Ping-rong, TANG Yong-jun, <i>et al.</i> (932)
Storages and Distributed Patterns of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen During the Succession of Artificial Sand-Binding Vegetation in Arid Desert Ecosystem	JIA Xiao-hong, LI Xin-rong, ZHOU Yu-yan, <i>et al.</i> (938)
Factors Controlling Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Densities in the Upstream Watershed of Miyun Reservoir, North China	WANG Shu-fang, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun (946)
Impact of Microbial Aggregating Agents on Soil Aggregate Stability Under Addition of Exogenous Nutrients	MO Yan-hua, TANG Jia, ZHANG Ren-duo, <i>et al.</i> (952)
Adsorption of Aflatoxin on Montmorillonite Modified by Low-Molecular-Weight Humic Acids	YAO Jia-jia, KANG Fu-xing, GAO Yan-zheng (958)
Influence of Operating Parameters on Surfactant-enhanced Washing to Remedy PAHs Contaminated Soil	WU Wei, JIANG Lin, CHEN Jia-jun, <i>et al.</i> (965)
Study on the Land Use Optimization Based on PPI	WU Xiao-feng, LI Ting (971)
Research on Algal Diversity in Zoige Alpine Wetland	CHEN Xi, LIU Ru-yin, WANG Yan-fen, <i>et al.</i> (979)
Effects of Three Fungicides on Arbuscular Mycorrhizal Fungal Infection and Growth of <i>Scutellaria baicalensis</i> Georgi	HE Xue-li, WANG Ping, MA Li, <i>et al.</i> (987)
Community Structure and Spatial Distribution of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria in the Sediments of Chongming Eastern Tidal Flat in Summer	ZHENG Yan-ling, HOU Li-jun, LU Min, <i>et al.</i> (992)
Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether Under Anaerobic Condition	LU Xiao-xia, CHEN Chao-qi, ZHANG Shu, <i>et al.</i> (1000)
Effect of Heavy Metals on Degradation of BDE-209 by White-rot Fungus	XIONG Shi-chang, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (1008)
Biodegradation Mechanism of DDT and Chlorpyrifos Using Molecular Simulation	LIN Yu-zhen, ZENG Guang-ming, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (1015)
Construction of a Microbial Consortium RXS with High Degradation Ability for Cassava Residues and Studies on Its Fermentative Characteristics	HE Jiang, MAO Zhong-gui, ZHANG Qing-hua, <i>et al.</i> (1020)
Anaerobic Digestion of Animal Manure Contaminated by Tetracyclines	TONG Zi-lin, LIU Yuan-lu, HU Zhen-hu, <i>et al.</i> (1028)
Continuous Dry Fermentation of Pig Manure Using Up Plug-Flow Type Anaerobic Reactor	CHEN Chuang, DENG Liang-wei, XIN Xin, <i>et al.</i> (1033)

《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3月15日 33卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 3 Mar. 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

国内外公开发行