

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的藜袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究

龙焙, 杨昌柱, 濮文虹*, 杨家宽*, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标

(华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 接种自行培养的活性污泥, 以模拟废水为基质, 采用连续进水、间歇出水及厌氧/好氧交替的运行模式, 尝试了在 SFBR 中进行好氧颗粒污泥的培养, 并研究了颗粒污泥的特性及反应器对污染物的去除效果。结果表明, 通过逐步缩短沉降时间, 28 d 时成功培养出好氧颗粒污泥, 所形成的好氧颗粒污泥呈黄色、形状不规则, 且粒径较小 (平均粒径 0.56 mm), 正常情况下的 SVI 保持在 $70 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下, EPS 在 59 d 时达到最大值 (以 MLVSS 计) $373.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 较培养初期增加了约 2.5 倍, 运行后期由于颗粒出现解体, 导致 EPS 急剧下降; 反应器在运行过程中未能保持较高的污泥量, 中后期 MLSS 始终在 $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 在 63 d 的运行时间里, 除异常波动外, 反应器对 COD 的去除率基本维持在 90% 左右, 正常情况下出水 COD 小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TIN 的去除效果波动较大, 去除率分别为 44.45% ~ 94.72% 及 43.87% ~ 93.13%, 反应器对 TP 的去除率在 44.50% ~ 97.40% 之间, 正常情况下 TP 去除率可维持在 60% 以上; 限于自动控制水平, 夜间长时间的好氧饥饿期容易造成丝状菌过度生长, 使得 AGS 在生长竞争中处于劣势, 最终导致了 AGS 的解体。

关键词: 序批连续式反应器; 好氧颗粒污泥; 培养; 特性; 解体

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1857-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.032

Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor

LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, YANG Jia-kuan, BAI Jun, WANG Jing, ZHOU Xuan-yue, JINAG Guo-sheng, LI Chun-yang, LIU Fu-biao

(College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Aerobic granular sludge was cultivated in the sequencing fed batch reactor, and granules' characteristic and reactor's performance to the pollutants were studied. The SFBR was operated under the conditions as: inoculated with activated sludge former self-cultivated, fed with simulated wastewater, and continuous feed/intermittent discharge and alternately anaerobic/aerobic operation mode. The results showed that through gradually decreasing the settling time, aerobic granular sludge was successfully cultivated in 28 days, which was yellow, irregular shape, and small particle size (the average particle size was 0.56 mm). Under normal circumstances, the SVI stayed under $70 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. EPS (as MLVSS) reached the maximum $373.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ on the 59 d, which increased about 2.5 times over the inoculums. However, EPS decreased sharply during the later period due to the disintegration of aerobic granular sludge. MLSS was always below $3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ during the middle and later periods in the reactor. During the 63 days' operation, the removal rate of COD by the reactor maintained at about 90% except the abnormal circumstances, and the effluent COD was less than $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. TIN and ammonia nitrogen's removal efficiency by the reactor fluctuated greatly, and the removal rates were 44.45% - 94.72% and 43.87% - 93.13% respectively. The removal rate of TP was between 44.50% - 97.40%, which could remain above 60% under normal circumstances. Limited to the automatic control level, AGS was disadvantage in the competition with filamentous bacteria that overgrew easily during the long time aerobic starvation period at night, which eventually led to the collapse of AGS.

Key words: sequencing fed batch reactor (SFBR); aerobic granular sludge (AGS); cultivation; characteristics; disintegration

好氧颗粒污泥^[1-3] (aerobic granular sludge, AGS) 是微生物在特定的环境下自发凝聚、增殖而形成的颗粒状生物聚合体, 它具有许多普通活性污泥难以比拟的优点, 如致密的结构、良好的沉降性能、多重生物功效 (有机物降解、脱氮、除磷等)、高耐毒性、相对较低的剩余污泥产量等。得益于这些优点, AGS 已成为废水处理领域的研究热点^[4]。迄今为止, AGS 的绝大部分研究成果都来自于间歇式运行反应器^[5-14], 如 SBR、SBAR 等。然而, 研究结果^[15] 表明, 长期运行的 AGS 反应器会出现不稳

定甚至解体现象, 这说明间歇式反应器并非是好氧颗粒化的最佳选择。

序批连续式反应器 (sequencing fed batch reactor, SFBR) 是近年来发展起来的一种新型反应器, 主要特征是连续进水, 反应完后一次性排水。目

收稿日期: 2013-08-25; 修订日期: 2013-12-17

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (2013TS071); 教育部科学技术研究项目 (113046A)

作者简介: 龙焙 (1986 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为废水处理技术与设备, E-mail: longbei1986@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: 15007173775@163.com, jkyang@mail.hust.edu.cn

前,在 SFBR 中利用活性污泥对废水进行处理的研究已见报道^[16~21],也有针对连续进水^[22]或分段进水^[23~25]对 SBR 中的 AGS 稳定性影响的报道,而有关 SFBR 中成功实现好氧颗粒化的研究鲜有报道.相比于 SBR,SFBR 运行灵活、控制简便,较容易建造、实施,若能实现好氧颗粒化及稳定运行无疑会增加 AGS 反应器的形式.因此,本研究尝试在 SFBR 中进行 AGS 的培养,并对 AGS 的特性进行研究,以期 AGS 技术的发展提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 试验装置及运行方式

1.1.1 试验装置

反应器总高度 2.3 m,内径 8.4 cm,有效容积 11.64 L(有效高度 2.1 m),排水口距底座高度 54 cm(换水率 74.3%).模拟污水由蠕动泵从反应器底部引入(进水口距底部高 4 cm),压缩空气由空压机提供,经硅胶管后由曝气砂头从反应器底部压入.试验装置见图 1 所示.

1.1.2 周期组成

反应器在 09:00~21:00 运行周期为 6 h,其余为 12 h 一周期,厌氧/好氧(A/O)交替运行,厌氧期不搅拌,除沉淀、排水外,反应器均为连续进水,当水位达到有效高度(2.1 m)时停止进水及曝气,沉淀 3~15 min 后排出上清液,反应器进入下一循环周期.培养过程中根据污泥的沉降性能逐渐减少沉淀时间.具体见表 1 所示.

1.1.3 其它运行参数

运行过程中根据反应器对污染物的去除效果而改变 COD、NH₄⁺-N、TP 的浓度,具体见表 2.

1.2 接种污泥

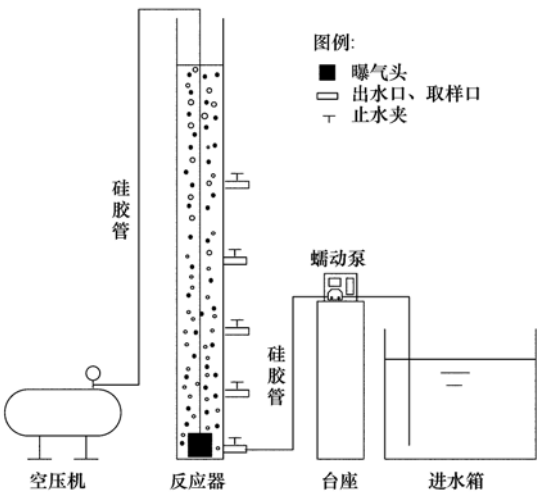


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device

接种 5 L 化粪池污水和 500 mL 序批式好氧颗粒污泥反应器(AGSBR)出水,连续曝气 1 d 后采用 SBR 运行模式(6 h·周期⁻¹,4 个周期·d⁻¹),COD 从 500 mg·L⁻¹逐渐增至 800 mg·L⁻¹,第 2 d 时反应器内即出现了细小的生物絮体,并夹杂着少量好氧颗粒污泥(SBR 中排出的解体颗粒).运行 8 d 后培养出沉降性能良好的活性污泥,颜色主要为黄色.反应器污泥浓度达到 2 558 mg·L⁻¹,SVI 30.11 mL·g⁻¹,MLVSS/MLSS 为 0.45.活性污泥的形成过程见图 2.

1.3 模拟污水

模拟污水成分及浓度见表 3,对应的 COD、TIN、TP 浓度为 1 000、50、10 mg·L⁻¹,微量元素添加量为 1 mL·L⁻¹模拟污水,根据反应器内污泥生长状况不断调整 C、N、P 的浓度配比,其它成分不变.

表 1 反应器周期组成

Table 1 Composition of one cycle of the reactor

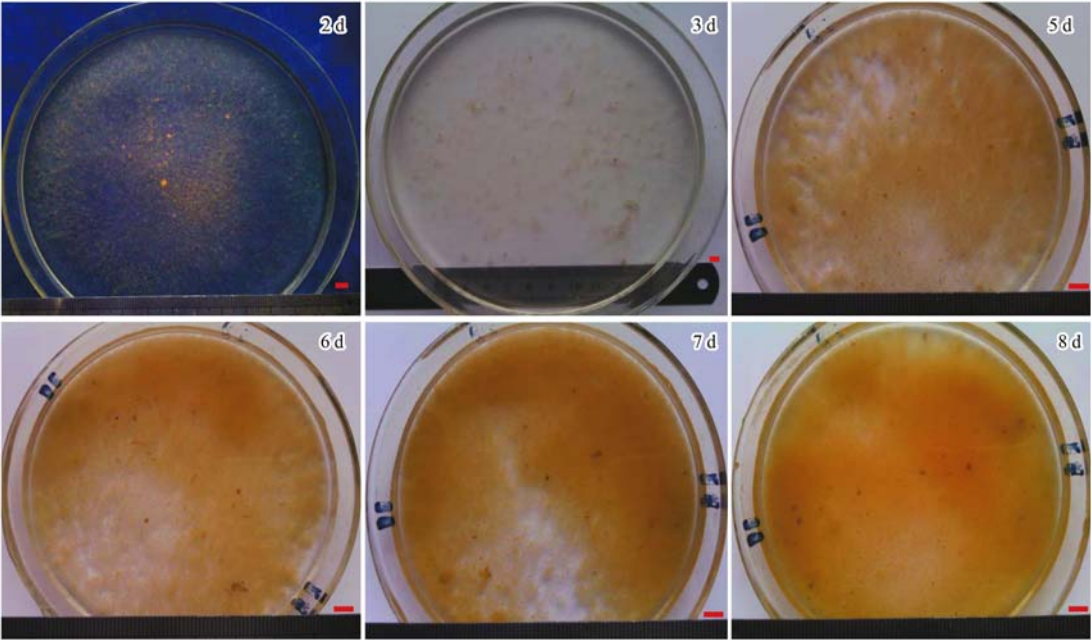
运行天数/d	时段	厌氧进水/min	好氧反应/min	沉淀/min	排水/min
1~5	09:00~21:00	80	243	15	2
	21:00~次日 09:00	80	623		
6~10	09:00~21:00	80	248	10	2
	21:00~次日 09:00	80	628		
11~15	09:00~21:00	80	250	8	2
	21:00~次日 09:00	80	630		
16~20	09:00~21:00	80	252	6	2
	21:00~次日 09:00	80	632		
21~25	09:00~21:00	80	254	4	2
	21:00~次日 09:00	80	634		
26~63	09:00~21:00	80	255	3	2
	21:00~次日 09:00	80	635		

表 2 反应器运行参数

Table 2 Operational parameters of the reactor

运行天数 /d	时段	流量 /L·h ⁻¹	进水浓度/mg·L ⁻¹			有机负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹	表观上升气速 /cm·s ⁻¹
			COD	NH ₄ ⁺ -N	TP		
1~13	09:00~21:00	1.39	1 000	50	10	2.20	1.2~2
	21:00~次日 09:00	0.69					
14~38 ¹⁾	09:00~21:00	1.39	1 000	60	10	2.20	1.2~2
	21:00~次日 09:00	0.69					
39~42	09:00~21:00	1.39	1 200	65	15	2.64	1.2~2
	21:00~次日 09:00	0.69					
43~53	09:00~21:00	1.39	1 400	70	15	3.08	1.2~2
	21:00~次日 09:00	0.69					
54~63	09:00~21:00	1.39	1 200	65	15	2.64	1.2~2
	21:00~次日 09:00	0.69					

1)32 d 实验室供电线路改造,反应器处于静置状态



标尺长度为 5 mm

图 2 活性污泥培养过程数码照片

Fig. 2 Digital photos of activated sludge's cultivation process

表 3 模拟污水组成

Table 3 Composition of simulated wastewater

常量元素组分	浓度 /mg·L ⁻¹	微量元素组分	浓度 /g·L ⁻¹
CH ₃ COONa	1 465.0	H ₃ BO ₃	0.05
NH ₄ Cl	191.07	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.05
KH ₂ PO ₄	43.87	CuCl ₂	0.03
CaCl ₂	150.0	MnSO ₄	0.05
FeSO ₄ ·7H ₂ O	30.0	AlCl ₃	0.05
MgSO ₄ ·7H ₂ O	33.75	ZnCl ₂	0.05
		NiCl ₂	0.05
		Na ₂ Mo ₇ O ₂₄ ·2H ₂ O	0.05

1.4 分析方法

COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、TP、电导率均采用国家标准分析方法测定^[26],NO₃⁻-N采用麝香草酚分光光度法, [TIN] = [NH₄⁺-N] + [NO₃⁻-N] + [NO₂⁻-N]; SV、SVI、MLSS、MLVSS 采用标准方法;颗粒污泥粒径分布采用标准筛筛分测定,标准筛孔径分别为:0.30、0.60、1.0、1.43、2.0、4.0 mm,测量经筛分后各粒径范围内污泥的 MLSS,计算其占总 MLSS 的质量分数后得到粒径分布情况(>0.3 mm 的视为颗粒,其所占质量分数称为颗粒化率),平均粒径从筛上累积质量分数曲线上查出,对应的累积

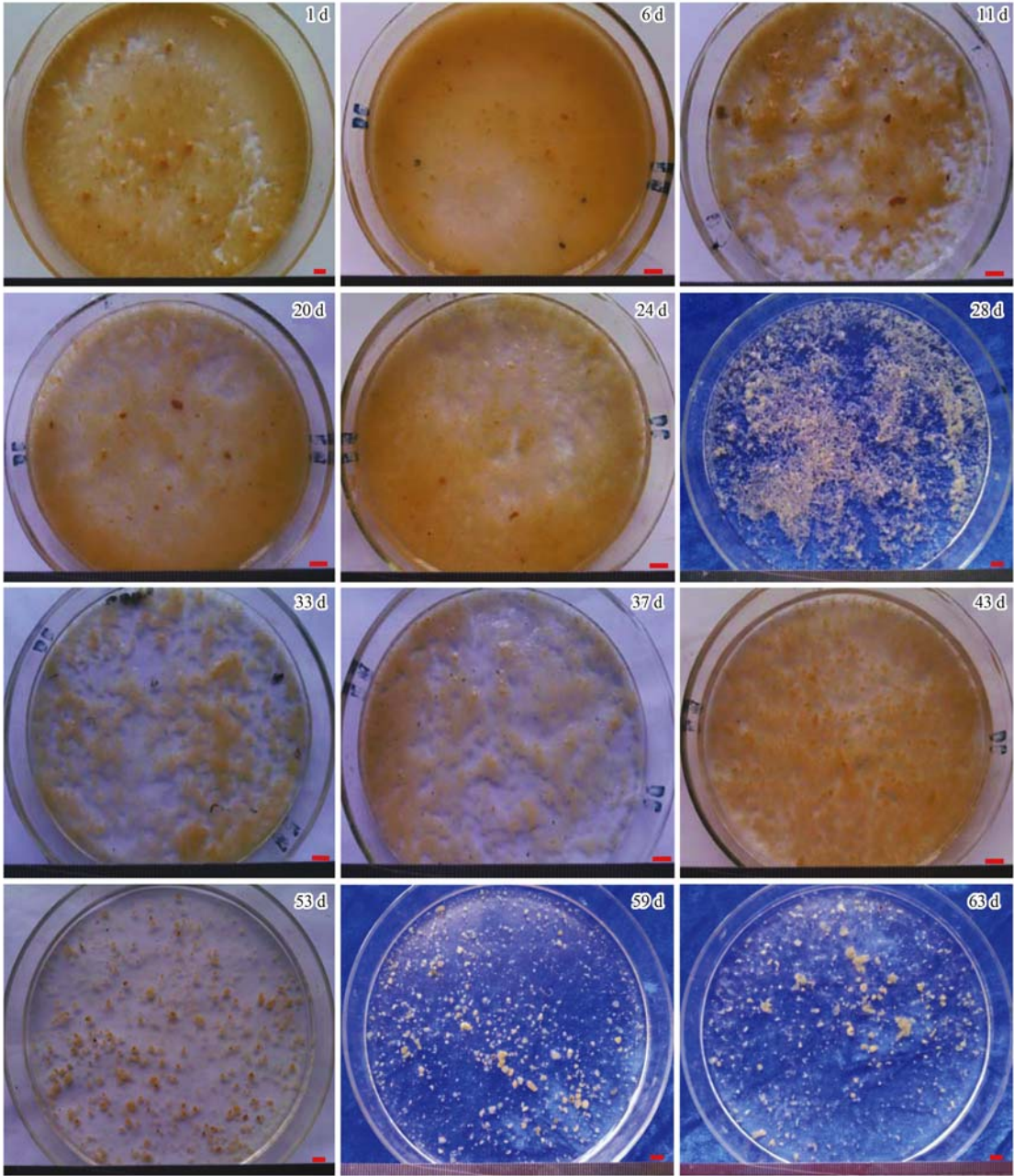
筛上、筛下污泥质量分数均为 50%；使用 Canon 数码相机记录颗粒形态。

胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)的提取方法为:将摇匀后的污泥样品 25 mL 放置于离心管中,在 4℃, 2 000 r·min⁻¹下离心 10 min,沉淀物溶解于磷酸盐缓冲液,放置于 80℃ 恒温水浴中加热 60 min,提取 EPS,然后在 10 000 r·min⁻¹下离心 30 min,上清液过滤后用于 EPS 成分分析^[27]。蛋白质测定采用考马斯亮蓝试剂法,多糖测定采用硫酸-苯酚法。

2 结果与讨论

2.1 污泥形态变化

培养过程中污泥的形态变化见图 3。观察发现:随着沉降时间的减小,松散的絮体污泥逐渐转变为较大的菌胶团,11 d 时几乎全部以大片菌胶团和细小颗粒形式存在,28 d 时 AGS 占绝对优势(颗粒化率为 86.12%),所形成的好氧颗粒污泥呈黄色、形状不规则,且粒径较小(平均粒径 0.56 mm)。此后,反应器内始终以 AGS 为主,但当改变运行条件时,



标尺长度为 5 mm

图 3 好氧颗粒污泥形态变化数码照片

Fig. 3 Digital photos of aerobic granular sludge’s morphology changes

污泥会出现短暂的不适应期,部分 AGS 会变得很疏松,出现絮状物. 43 ~ 53 d 内由于进水浓度高致使反应器内液体含盐量过大(测得混合液电导率为 $3.05 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$),液体比重的增加使得部分 AGS 悬浮在反应器上部难以下沉,造成污泥的大量流失,使得污泥负荷迅速增加,加之渗透压的增加使得微生物细胞出现不适情况,以致部分 AGS 出现解体,降低负荷后(54 ~ 63 d) AGS 形状变得更加不规则,且污泥颗粒颜色变浅.

2.2 污泥的理化特性

2.2.1 SVI

SVI 变化情况见图 4(a). 从中可知:正常情况下的污泥 SVI 保持在 $70 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下,但当运行条件改变时污泥的 SVI 会出现波动. 运行初期(1 ~ 4 d)由于污泥量较少、污泥无机成分较高,造成 SVI 较小;随着污泥量的增加,SVI 值趋于平缓. 第 16 d 时提高了氮负荷,污泥变得松散,沉降性能变差,反应器中混合液变得黏稠和浑浊,可能是异养菌难以承受氨氮突然增加造成的冲击,出现细胞破裂及死亡,导致大量污泥随出水排出反应器,SVI 急剧下降,随着污泥逐渐适应进水水质,SVI 值趋于稳定. 第 32 d 实验室停电、反应器处于静置状态,33 d 的 SVI 有所上升,随着微生物逐渐适应周围环境后 SVI 又逐渐降至 $80 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下. 43 d 后由于进水盐度较高,AGS 出现解体、沉降性能变差,54 d 降低进水

负荷后 SVI 值出现一定下降.

2.2.2 污泥浓度(MLSS)

MLSS 的变化情况见图 4(b). 从中可知,MLSS 整体呈下降趋势. 1 ~ 4 d 时 MLSS 有短暂的上升,随着沉降时间的缩短,沉降性能差的絮体污泥被排出反应器,MLSS 逐渐减小,14 d 时由于提高了 NH_4^+ -N 浓度、污泥出现短暂不适应而造成 MLSS 显著降低,待污泥适应新环境后 MLSS 基本稳定在 $2000 \sim 3000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间(18 ~ 31 d),42 d 以后由于反应器内高含盐量导致污泥难以下沉而大量流失,MLSS 持续下降最终低于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 反应器运行过程中未能保持较高的污泥量,一方面是当运行条件改变使微生物不适应造成污泥流失所致;另一方面是夜间连续进料使曝气阶段反应器内底物浓度较低、易造成丝状菌生长^[37~39],为维持 AGS 的稳定需采取较短的沉降时间及时排出絮体污泥,也造成了一定的污泥流失.

2.2.3 胞外聚合物(EPS)

EPS 含量及 PS/PN 分别见图 4(c)、图 4(d). 由图 4(c)可知:EPS 含量(以 MLVSS 计)处于波动状态,1 ~ 59 d 内呈上升趋势,59 d 时达到最大值 $373.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,较培养初期增加了约 2.5 倍,这与大量研究得出的 EPS 有利于细胞之间的自凝聚及 AGS 的稳定性维持^[28~30]是一致的,运行后期由于 AGS 出现解体,导致 EPS 急剧下降. 由图 4(d)可发

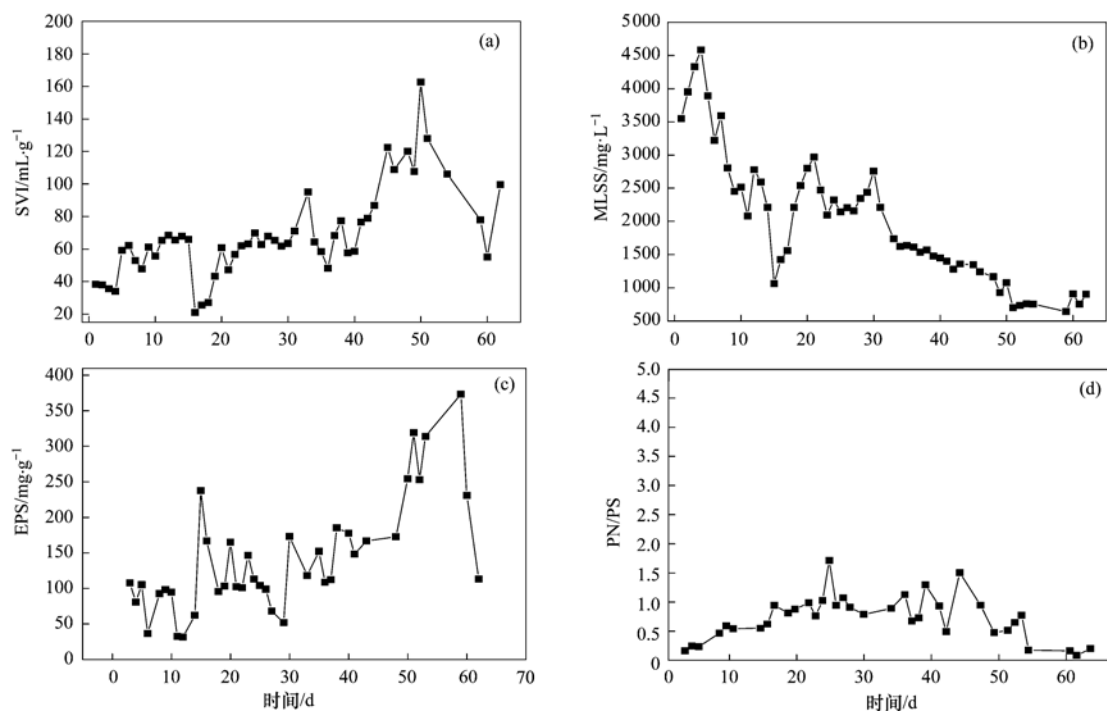


图 4 运行过程中 SVI、MLSS、EPS 含量及 PN/PS 变化情况

Fig. 4 Variation of SVI, MLSS, the amount of EPS and PN/PS during operation

现 PN/PS 在 1~16 d 逐渐增大,17~52 d 基本保持在 1 左右,53 d 以后迅速下降至 0.3 以下,表明蛋白质在 EPS 中的比例先增加、后趋于稳定,最后又急剧下降.研究表明:EPS 中蛋白质与多糖的组成对 AGS 的稳定性有显著影响^[29-31],但二者谁起决定作用还存在争议.本研究表明当 AGS 出现解体时蛋白质含量显著下降,说明 EPS 中蛋白质对 SFBR 中 AGS 的稳定性有重要影响.

2.2.4 粒径分布

反应器内污泥的粒径分布见图 5 所示.从中可知,随着逐渐缩短沉降时间,反应器内污泥的粒径逐渐增大,4、14、21、28 d 时对应的平均粒径分别为:0.19、0.43、0.54 及 0.56 mm.同时,粒径小于 0.3 mm 的污泥的比例逐渐减少,反应器的颗粒化率逐渐增大,可以看到污泥的颗粒化率由初期的 18.17% 上升到 86.12%,但 0.3~0.6 mm 内 AGS 始终占主导,这可能与 SFBR 中较低的底物传质梯度有关,粒径大的 AGS 内部难以得到基质而极易解体.随后由于污泥量减少及沉降性能变差,未进行粒径分析.

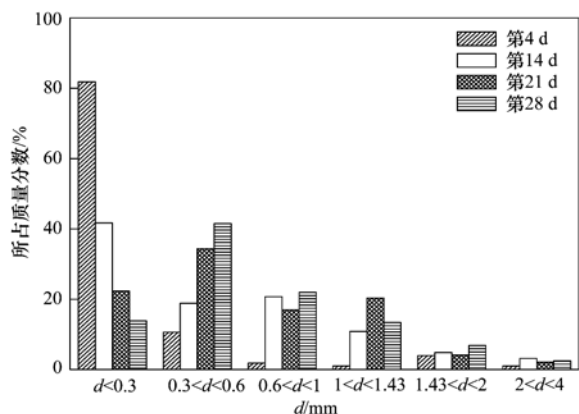


图 5 第 4 d、14 d、21 d、28 d 粒径分布

Fig. 5 The 4th, 14th, 21th and 28th days' particle size distribution

2.3 反应器对污染物的去除效果

2.3.1 COD 去除效果

反应器对 COD 的去除效果见图 6.从中可以看到,除异常波动外,反应器对 COD 的去除率基本维持在 90% 左右,正常情况下出水 COD 小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,表明连续进料下 AGS 对 COD 亦具有较好的去除效果,这主要得益于 AGS 致密的结构和较高的生物活性.

2.3.2 脱氮效果

各态氮的浓度变化及 TIN 去除率见图 7.可以看出,反应器对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TIN 的去除效果波动较大,

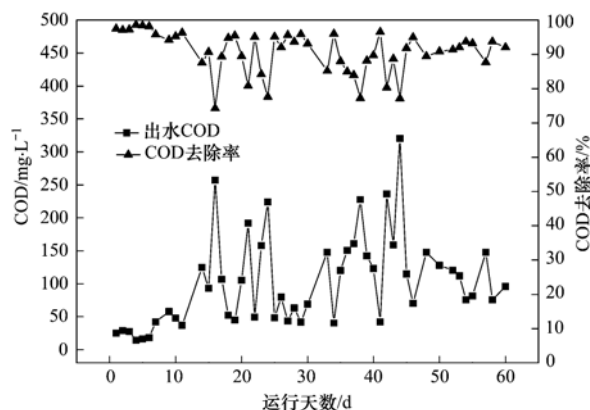


图 6 出水 COD 浓度及去除率

Fig. 6 Concentration of effluent COD and removal efficiency

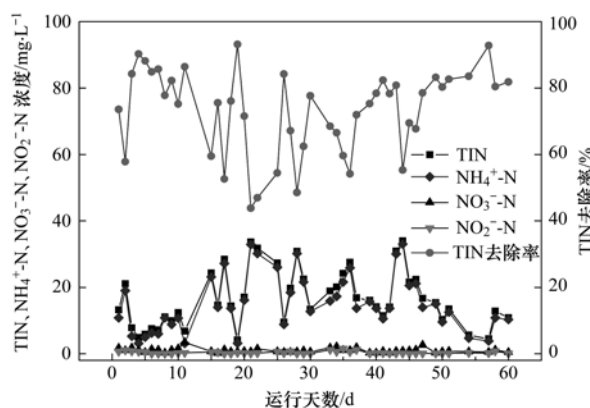


图 7 出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、TIN 浓度

Fig. 7 Concentration of effluent $\text{NH}_4^+ \text{-N}$, $\text{NO}_3^- \text{-N}$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ and TIN

去除率分别为 44.45%~94.72% 及 43.87%~93.13%.分析原因:一是改变氮负荷时会有短暂的不适应,此时的脱氮效率较差;二是连续进料使得部分 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 未被氧化即排出反应器.从图 7 中还可以看出,出水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度绝大部分时间均高于 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度,但也并未出现明显的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累,分析可能是 AGS 的内部分层结构发生了同步硝化反硝化作用,而连续进料为反硝化提供了所需的碳源.

2.3.3 TP 去除效果

反应器对 TP 的去除效果见图 8.从中可知,反应器对 TP 去除效果波动较大,去除率在 44.50%~97.40% 之间.分析原因:一是改变运行条件会有短暂的不适应,此时的除磷效果较差;二是连续进料使得部分 TP 未完全反应.除 14 d 突然提高氮负荷造成系统短暂不适应外,TP 去除率可维持在 60% 以上.

2.4 典型周期污染物降解规律

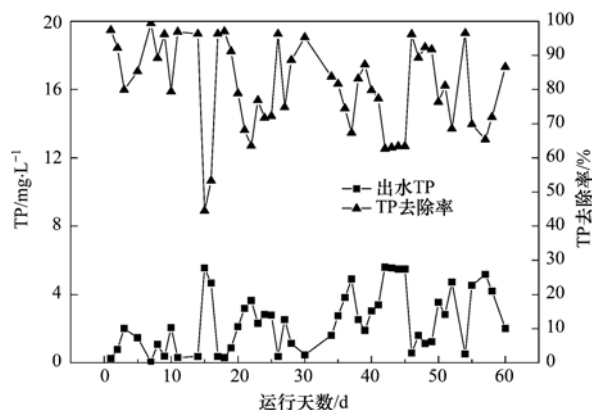


图8 出水 TP 浓度及去除率

Fig. 8 Concentration of effluent TP and removal efficiency

2.4.1 COD 周期降解规律

典型周期内 COD 的降解规律见图 9(a). 可以发现,由于厌氧期内未曝气、也未搅拌,使反应器中 COD 逐步升高,90 min 时达到 $321.95 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,开始曝气后积累的 COD 被 AGS 迅速吸附并降解,200 min 以后反应器内 COD 浓度趋于平稳并维持在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. SFBR 中厌氧/好氧交替及连续进料的运行模式使其流态在时间上具有一定的推流特征,可为生化反应提供较大的传质推动力,这被认为可有效抑制丝状菌过度生长^[37~39].

2.4.2 氮周期降解规律

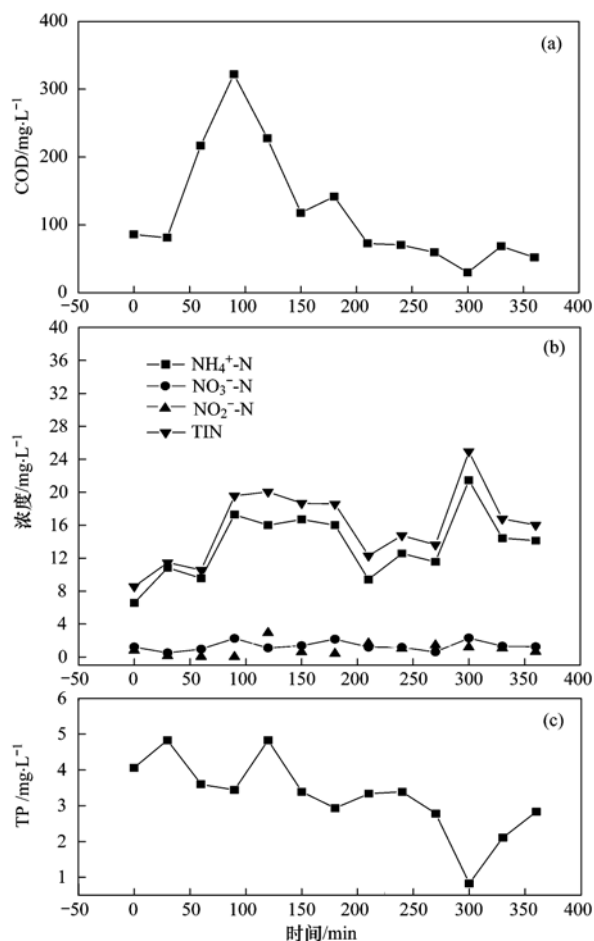
典型周期内氮的降解情况见图 9(b). 厌氧期内(0 ~ 80 min)由于连续进料且未搅拌, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TIN 的浓度逐渐升高,好氧期内二者均出现一定的波动,但波动幅度不大. 另外,硝氮、亚硝氮呈交替升高、降低情况. 分析原因包括:一是进水中的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 氧化不完全及混合不均匀使 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TIN 上下波动;二是发生氨氧化及硝化反应的同时,进水提供的碳源即可与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 发生反硝化,亦可与 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 发生反硝化,由于两种过程随机进行,使得 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度上下波动.

2.4.3 TP 周期降解规律

典型周期内 TP 的降解情况见图 9(c). TP 的浓度总体呈下降趋势,但变化幅度较小,基本维持在 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 虽然设置了 80 min 的厌氧期,但并未出现传统除磷机制中明显的厌氧释磷及好氧吸磷状况,厌氧段的长短对 TP 的去除效果及除磷机制尚需后续深入研究.

3 SFBR 中好氧颗粒化的机制探讨及稳定性分析

对于好氧颗粒化过程来说,选择压假说^[32,33]越



进水 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 及 TP 浓度分别为 $1\ 000$ 、 60 及 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

图9 典型周期 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 及 TP 降解规律Fig. 9 Degradation of COD, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and TP in typical cycles

来越受到学者们的认可. 选择压^[34]分为水力选择压和生物选择压,前者是通过控制反应器结构特性和水力条件等将性能差的污泥淘汰出反应体系,后者通过改变混合液中营养成分的负荷来使适应此负荷的微生物生存下来而不能适应的微生物逐步消退. 本试验主要是通过控制沉淀时间、水力剪切力、A/O 交替运行等水力选择压来促进 AGS 的形成. 主要表现在:①通过逐渐缩短反应器的沉淀时间,逐渐将沉降性能差的絮体污泥排出,而沉降性能好的菌胶团逐渐得到富集;②反应器采用较大的高径比(H/D 为 25)及较大的曝气量($0.24 \sim 0.40 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$),可为反应器内提供连续、均匀的水力剪切力($1.2 \sim 2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$),研究表明它们能刺激细胞 EPS 的分泌及疏水性的增加,促进细胞之间的自凝聚^[35,36];③A/O 交替运行方式使 SFBR 在前 80 min 内呈理想的推流流态,而好氧期内呈完全混合状态,相比于完全混合式反应器,这种模式可为生化反应

提供较大的传质推动力,使得菌胶团在同丝状菌的生长竞争中处于优势地位^[37~39],有利于 AGS 的形成。

通过逐步提高选择压,28 d 后在 SFBR 中成功培养出了 AGS,但 32 d 后反应器内污泥量持续下降,42 d 时反应器内出现 AGS 解体现象。除操作条件不当,如检修期静置、进水含盐量过高造成污泥流失及解体外,后期反应器内丝状菌过度繁殖,并在生长竞争中逐渐占优势是 AGS 解体的主要原因。主要表现在:通过提高进水浓度及 A/O 运行模式可在 SFBR 中创造较高的传质推动力,这在白天 12 h 内可一定程度上维持 AGS 的稳定性,但限于自动控制水平,夜间存在 635 min 的好氧反应期,长时间的好氧饥饿期不仅不利于 AGS 的稳定性维持^[40,41]、亦容易造成丝状菌生长^[37~39],使得 AGS 在生长竞争中逐渐处于劣势,为及时将沉降性能差的絮体污泥排出仍需维持较短的沉降时间(3 min),致使每天早上排水时较多污泥被排出,污泥的生长量难以补充污泥的流失量,最终导致了 AGS 的解体。为维持 SFBR 中 AGS 的稳定性,后续研究需提高反应器的自动控制水平,并将有机负荷、污泥负荷^[42]控制在合理范围内。

4 结论

(1)利用自行培养的活性污泥作为接种污泥,采用厌氧/好氧交替、逐渐缩短沉淀时间等策略(选择压法),28 d 后在 SFBR 中成功培养出 AGS。所形成的 AGS 呈黄色、形状不规则,且粒径较小。正常情况下的污泥 SVI 保持在 $70 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下,运行中后期出现污泥流失及解体,AGS 形状变得更加不规则,且颜色变浅。

(2)在 63 d 的运行时间里,除异常波动外,反应器对 COD 的去除率基本维持在 90% 左右,正常情况下出水 COD 小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,反应器对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 TN 的去除效果波动较大,去除率分别为 44.45% ~ 94.72% 及 43.87% ~ 93.13%,对 TP 的去除率在 44.50% ~ 97.40% 之间,正常情况下 TP 去除率可维持在 60% 以上,表明 AGS 对污染物具有较好地去除效果。

(3)反应器中未能维持较高的污泥浓度,后期出现污泥解体,主要是夜间长时间的好氧饥饿期容易造成丝状菌过度生长,使得 AGS 在生长竞争中处于劣势,较短的沉降时间使大量沉降性能差的絮体污泥被排出,最终导致了 AGS 的解体。

参考文献:

- [1] De Kreuk M K, Kishida N, Van Loosdrecht M C M. Aerobic granule sludge-state of the art [J]. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(8-9): 75-81.
- [2] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, **22**(7): 533-563.
- [3] Khan M Z, Mondal P K, Sabir S. Aerobic granulation for wastewater bioremediation: a review [J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2013, **91**(6): 1045-1058.
- [4] De Kreuk M K, Van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules with domestic sewage [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(6): 694-697.
- [5] Morgenroth E, Sherden T, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granular sludge in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1997, **31**(12): 3191-3194.
- [6] Beun J J, Hendriks A, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Aerobic granulation in a sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 1999, **33**(10): 2283-2290.
- [7] Dangcong P, Bernet N, Delgenes J P, *et al.* Aerobic granular sludge-a case report[J]. *Water Research*, 1999, **33**(3): 890-893.
- [8] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2001, **91**(1): 168-175.
- [9] Tay J H, Pan S, Han Y X, *et al.* Effect of organic loading rate on aerobic granulation: I Reactor performance [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, **130**(10): 1094-1101.
- [10] Yang S F, Tay J H, Liu Y. A novel granular sludge sequencing batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater [J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, **106**(1): 77-86.
- [11] Arrojo B, Mosquera-Corral A, Garrido J M, *et al.* Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors[J]. *Water Research*, 2004, **38**(14-15): 3389-3399.
- [12] Schwarzenbeck N, Erley R, Wilderer P A. Aerobic granular sludge in an SBR-system treating wastewater rich in particulate matter[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(11-12): 41-46.
- [13] Zheng Y M, Yu H Q, Sheng G P. Physical and chemical characteristics of granular activated sludge from a sequencing batch airlift reactor[J]. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(2): 645-650.
- [14] 朱亮,徐向阳,罗伟国,等. 废水生物处理好氧污泥颗粒化研究进展[J]. *环境科学*, 2007, **28**(11): 2657-2664.
- [15] Show K Y, Lee D J, Tay J H. Aerobic granulation: advances and challenges [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **167**(6): 1622-1640.
- [16] Shao Y Y, Szweczyk K W, Li W, *et al.* Wastewater treatment in a sequencing fed batch reactor[J]. *Biochemical Engineering & Equipment (Poland)*, 2005, **4**: 53-57.
- [17] 邵友元, Szweczyk K W, 李卫, 等. 采用序半连续反应器进行硝化和反硝化工艺的数学模拟[J]. *环境污染治理技术与设*

- 备, 2005, **6**(4): 32-35.
- [18] 邵友元, Szewczyk K W, 李卫, 等. 加料流率对 SFBR 工艺去除营养物的影响[J]. 湖北工业大学学报, 2006, **21**(4): 1-5.
- [19] 邵友元, Szewczyk K W, 李卫, 等. 微生物浓度对 SFBR 工艺去除营养物的影响[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(7): 1-3.
- [20] 邵友元, Szewczyk K W, 李卫, 等. SFBR 工艺顺序进行硝化和反硝化的动力学研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, **7**(6): 73-76.
- [21] 邵友元, Szewczyk K W, 李卫, 等. 基质初始浓度对 SFBR 工艺去除营养物的影响[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(8): 3-5.
- [22] 高景峰, 苏凯, 陈冉妮, 等. 连续进水对好氧颗粒污泥稳定维持的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(7): 1377-1383.
- [23] Chen F Y, Liu Y Q, Tay J H, *et al.* Operational strategies for nitrogen removal in granular sequencing batch reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **189**(1-2): 342-348.
- [24] Chen F Y, Liu Y Q, Tay J H, *et al.* Alternating anoxic/oxic condition combined with step-feeding mode for nitrogen removal in granular sequencing batch reactors (GSBRs) [J]. Separation and Purification Technology, 2013, **105**: 63-68.
- [25] Zhong C, Wang Y Q, Wang Y J, *et al.* High-rate nitrogen removal and its behavior of granular sequence batch reactor under step-feed operational strategy [J]. Bioresource Technology, 2013, **134**: 101-106.
- [26] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [27] 蔡春光, 刘军深, 蔡伟民. 胞外多聚物在好氧颗粒化中的作用机理[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(6): 623-626.
- [28] 张丽丽, 陈效, 陈建孟, 等. 胞外多聚物在好氧颗粒污泥形成中的作用机制[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 795-799.
- [29] Liu Y Q, Liu Y, Tay J H. The effects of extracellular polymeric substances on the formation and stability of biogranules [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2004, **65**(2): 143-148.
- [30] Mcswain B S, Irvine R L, Hausner M, *et al.* Composition and distribution of extracellular polymeric substances in aerobic flocs and granular sludge [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, **71**(2): 1051-1057.
- [31] Adav S S, Lee D J, Tay J H. Extracellular polymeric substances and structural stability of aerobic granule [J]. Water Research, 2008, **42**(6-7): 1644-1650.
- [32] Liu Y, Wang Z W, Qin L, *et al.* Selection pressure-driven aerobic granulation in a sequencing batch reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2005, **67**(1): 26-32.
- [33] Liu Y, Wang Z W, Tay J H. A unified theory for upscaling aerobic granular sludge sequencing batch reactor [J]. Biotechnology Advances, 2005, **23**(5): 335-344.
- [34] 山田常雄等编. 鄂永昌等译. 生物学词典[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 1028.
- [35] 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.
- [36] Gao D W, Liu L, Liang H. Influence of aeration intensity on mature aerobic granules in sequencing batch reactor [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, **97**(9): 4313-4319.
- [37] Liu Y, Liu Q S. Causes and control of filamentous growth in aerobic granular sludge sequencing batch reactors [J]. Biotechnology Advances, 2006, **24**(1): 115-127.
- [38] Chiesa S C, Irvine R L. Growth and control of filamentous microbes in activated sludge: an integrated hypothesis [J]. Water Research, 1985, **19**(4): 471-479.
- [39] Chudoba J. Control of activated sludge filamentous bulking-VI formulation of basic principle [J]. Water Research, 1985, **19**(8): 1017-1022.
- [40] Liu Y Q, Wu W W, Tay J H, *et al.* Starvation is not a prerequisite for the formation of aerobic granules [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **76**(1): 211-216.
- [41] Wu W Z, Li Y, Zhou J Q, *et al.* The influence of short-term starvation on aerobic granules [J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(12): 2373-2378.
- [42] 沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 颗粒污泥反应器运行中生物泡沫的形成与控制[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(21): 23-26.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-lu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seafood from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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