

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

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

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岫璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOSC _s)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯转化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复

张著¹, 高大文^{1,2*}, 袁向娟¹, 勾倩倩¹

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090)

摘要: 采用5个相同的序批式反应器(sequencing batch reactor, SBR)研究了不同碳、氮、磷比条件下好氧颗粒污泥形态、沉降性能和有机物去除情况,并根据SVI₃₀值分析了由营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀情况及其恢复方法。结果表明,当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为100/5.8/1.2时,颗粒污泥结构完整,颗粒密实,SVI₃₀在15~30 mL·g⁻¹之间波动,COD去除率可保持在90%以上,系统总体运行稳定,没有出现污泥膨胀。当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为100/3/0.6和100/1.9/0.4时,系统中的颗粒污泥出现解体现象,但是SVI₃₀值仍然低于35 mL·g⁻¹,没有发生丝状菌膨胀;在整个试验过程中系统COD去除率在85%以上。当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为100/0.5/0.1和没有投加任何氮磷物质时,系统SVI₃₀均达到150 mL·g⁻¹,污泥难以沉降,系统发生了丝状菌污泥膨胀。两系统COD去除率差别较大,前者COD去除率在试验后期保持在65%~80%之间,而后者COD去除率从试验前期一直降低,最后达到10%以下,系统完全崩溃。N、P营养物质缺乏引起的膨胀好氧颗粒污泥,通过补充充足营养物质运行48个周期后,2个系统膨胀污泥的沉降性能及有机物降解率完全恢复,但是污泥形态(除污泥颜色)恢复不明显。

关键词: 好氧颗粒污泥; 污泥膨胀; 碳氮磷比; SBR; 废水处理

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)09-3197-05

Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery

ZHANG Zhu¹, GAO Da-wen^{1,2}, YUAN Xiang-juan¹, GOU Qian-qian¹

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Under 5 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ ratios, the shape, settle ability and organic removal performance of aerobic granules were investigated in 5 identical SBRs. The performance of aerobic granules bulking and its recovery methods were also analysed based on SVI₃₀ value. The results indicated that when $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ was 100/5.8/1.2, the granules had integral and dense structures with the SVI₃₀ of 15~30 mL·g⁻¹ and COD removal of above 90%. The system operated stably without any bulking. When $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ was 100/3/0.6 and 100/1.9/0.4, although the granules disintegration was observed, SVI₃₀ was lower than 35 mL·g⁻¹ and the granules had no bulking, and high COD removal was keeping at above 85%. When $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ was 100/0.5/0.1 and 100/0/0, the SVI₃₀ in both systems reached 150 mL·g⁻¹, and the granules was hard to settle due to sludge bulking in both systems. There is a significant difference of COD removal rate in two systems. The former COD removal rate stayed at 65%-80% in late experiment, while the latter COD removal was quite low during the early operation and finally reduced to about 10% until the system broke down. Aerobic granule bulking due to the lack of N and P could be recovered by adding sufficient nutrient to the systems. After 48 cycles' operation, granules settle ability and organic removal were fully recovered, however there was no obvious recovery on granules morphology except for the color.

Key words: aerobic granular sludge; sludge bulking; $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$; SBR; wastewater treatment

好氧颗粒污泥因具有生物结构致密、沉降速度快,较高的生物浓度和容积负荷以及良好的脱氮除磷等优点,而成为近年来污水处理研究领域的研究热点^[1~4]。

污泥膨胀是活性污泥系统运行中经常出现的异常现象之一。污泥膨胀分为丝状菌膨胀和黏性膨胀,其中丝状菌膨胀较为普遍^[5~7]。当系统发生污泥膨胀时,污泥沉降性能变差,导致污泥流失,使得出水水质恶化,影响水处理厂的正常运行,严重时可使系统崩溃,造成重大经济损失^[8~10]。然而,目前研究者主要以絮状活性污泥为研究对象,研究污泥膨

胀的发生原因,机制及控制方法^[10~12]。虽然,近年来有学者研究发现,在好氧颗粒污泥培养过程中,低温、低pH、长污泥龄(sludge retention time, SRT)、高含盐量、溶解氧(DO)缺乏、低基质浓度、氮磷缺乏等均可导致颗粒污泥中丝状菌过度生长^[13~15],但有关好氧颗粒污泥形成后,在应用其处理废水时进水有机物和营养物质浓度对系统运行的影响研究还

收稿日期: 2011-11-21; 修订日期: 2012-03-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(21177033); 全国大学生创新实验项目(101022509)

作者简介: 张著(1988~),男,主要研究方向为水污染控制

* 通讯联系人, E-mail: dawengao@gmail.com

很少,尤其是由营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥丝状菌膨胀的研究就更少。

因此,本研究以成熟的好氧颗粒污泥为接种污泥,在一系列 SBR 反应器中,从污泥形态、沉降性能以及有机物去除效果等方面系统考察了不同碳、氮、磷比 $[m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})]$ 对好氧颗粒污泥系统的影响,并在此基础上分析了由营养物质缺乏引发的丝状菌膨胀情况和恢复方法,以期在实际工程中更好地应用好氧颗粒污泥提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

所用 SBR 反应器高 44 cm,直径 7 cm,有效容积 1L(图 1)。采用反应器底部 ACO-003 型电磁式空气泵微孔曝气,应用转子流量计调节曝气流量,曝气量为 $300 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。试验初期反应器每天运行 3 个周期,每个周期 8 h,包括进水 1 min,好氧曝气 209 min,沉淀 1 min,排水 0.5 min 和闲置。当颗粒污泥膨胀后,反应器沉降时间根据其膨胀程度在 1 ~ 120 min 范围内适当调整,而闲置时间则随沉淀时间的延长而相应缩短,以保持反应器每个周期的运行时间及每

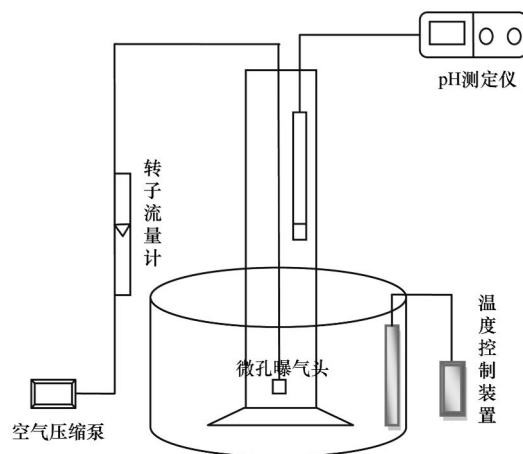


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

个周期中的其他流程时间保持不变。反应器温度控制在 $22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,进水 pH 值约为 7.0 ~ 8.0。

1.2 试验用水

本试验进水采用人工合成的模拟废水,以葡萄糖和 NH_4Cl 为主要组成,不同 SBR 反应器中基质组成及浓度见表 1。其中微量元素的组成参见文献 [16]。

表 1 试验配水组成

Table 1 Constitutes of synthetic wastewater

项目	R1	R2	R3	R4	R5
$m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$	100/5.8/1.2	100/3/0.6	100/1.9/0.4	100/0.5/0.1	100/0/0
$\text{COD}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	400 ~ 450	400 ~ 450	400 ~ 450	400 ~ 450	400 ~ 450
$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	21 ~ 26	12 ~ 14	7.5 ~ 9.5	2 ~ 3	0
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	4.5 ~ 6	2.5 ~ 3	1.2 ~ 2	0.3 ~ 0.6	0
$\text{Ca}^{2+}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	10	10	10	10	10
微量元素/ $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$	1	1	1	1	1

1.3 接种污泥

试验接种污泥为实验室培养成熟后的好氧颗粒污泥,污泥的 SVI_{30} 值和 COD 的去除率分别为 20 ~ $30 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 90% ~ 95%,反应器接种污泥浓度 (mixed liquid suspended solids, MLSS) 为 $5200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。

1.4 分析项目及方法

试验中 COD、 SVI_{30} 、MLSS 测定均按照国家环境保护总局颁发的标准方法进行分析^[17]。

2 结果与讨论

2.1 不同碳氮磷比条件下好氧颗粒污泥对 COD 的去除

整体上随着进水 N、P 浓度降低,系统 COD 去除率也随之降低,但是 R1 ~ R3 系统差别并不大,其

平均去除率分别为 94.18%、93.07% 和 91.94% (图 2)。而将进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 提高至

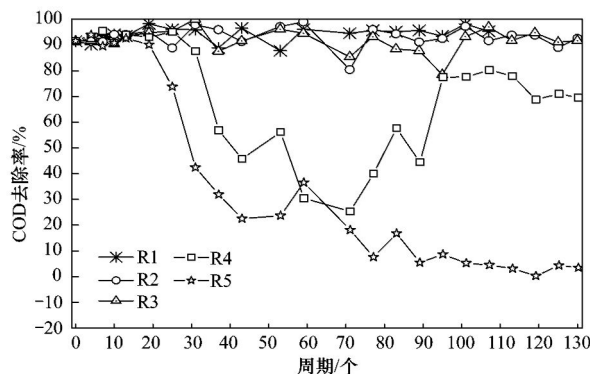


图 2 不同 C/N/P 比对好氧颗粒污泥 COD 去除率的影响

Fig. 2 Effects of different C/N/P in fluent on aerobic granules COD removal rate

100/0.5/0.1 的 R4 系统,第 30 周期时系统 COD 去除率突然下降,70 周期后又逐渐上升,最后稳定在 65%~80% 之间. 当进水不投加任何氮磷营养物质的极端情况下,R5 系统 COD 去除率从试验初期逐渐降低,试验末期达到 10% 以下,而且试验测得系统污泥浓度也降至 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,颗粒污泥系统已经完全崩溃. 由此可见,在正常碳氮磷比例条件下,一定程度地提高其比例不会影响颗粒污泥系统对有机物的降解效果,然而当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 超过 100/0.5/0.1 (R4) 后,氮磷营养物质的浓度影响了系统对 COD 的去除效果,并且对系统造成严重损伤.

2.2 不同碳氮磷比条件下好氧颗粒污泥的形态

在不同碳氮磷比条件下运行 130 周期后,系统

中颗粒污泥形态出现极大差别(图 3). 营养物质充足条件下的 R1 系统污泥结构完整、颗粒密实,与接种污泥相比基本上没有变化;营养物质稍缺乏的情况下,即进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为 100/3/0.6 和 100/1.9/0.4 时,R2、R3 系统颗粒出现解体现象,絮体状和颗粒状污泥混合组成系统污泥,但是污泥颜色仍为黄色;而 R4、R5 系统中进水营养物质极端缺乏,系统中出现白色或深褐色的颗粒污泥,而且颗粒粒径异常增大,表面长出肉眼可见的丝状菌. 可见,随营养物质缺乏程度增加,颗粒污泥的形态所受影响越严重;而且,轻微的营养物质缺乏不会造成丝状菌的过度生长,当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 达到 100/0.5/0.1 (R4) 时丝状菌才过度生长.

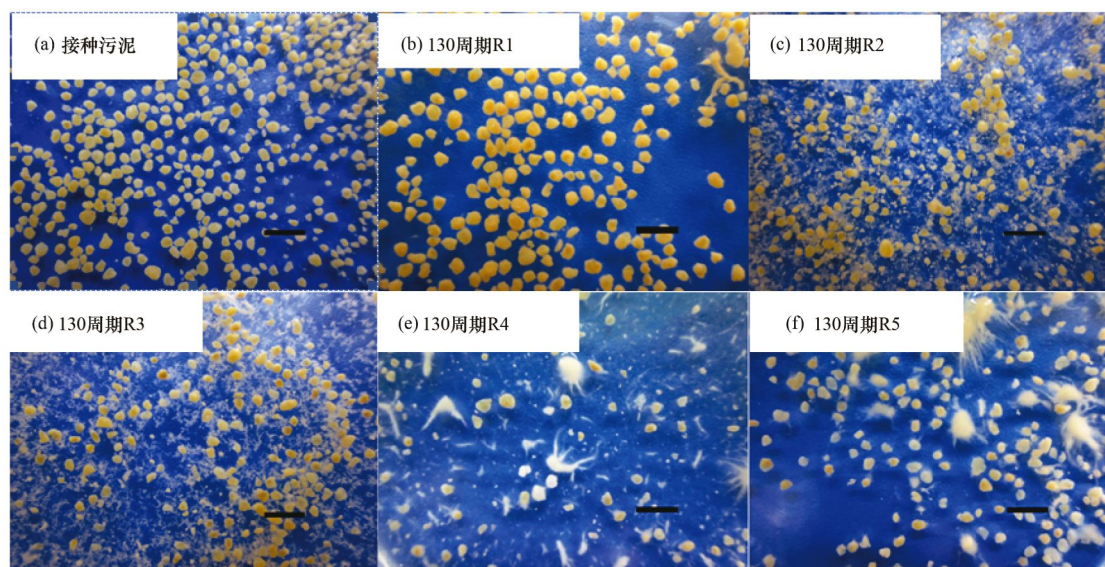


图 3 不同 C/N/P 比条件下颗粒污泥形态变化 (bar=5 mm)

Fig. 3 Changes of different C/N/P on aerobic granules shape (bar=5 mm)

N、P 营养物质是 EPS 中胞外蛋白质(PN)、DNA 和脂类的重要组成物质. 相关研究表明,蛋白质中的疏水组分有促进微生物间聚合的作用,微生物胞外蛋白分泌量的减少及某种蛋白质的消失也可能是好氧颗粒污泥解体的根本原因^[18-21]. 因此,当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 分别为 100/3/0.6 (R2) 和 100/1.9/0.4 (R3) 时,由于系统的 N、P 营养物质不足,导致污泥某种蛋白质分泌减少或消失,颗粒污泥发生了解体现象. 而当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为 100/0.5/0.1 (R4) 和进水没有投加营养物质时,颗粒污泥中丝状菌过度生长,形成空间骨架支撑污泥结构的完整,因此,颗粒没有解体.

2.3 不同碳氮磷比条件下好氧颗粒污泥的沉降性能

SVI_{30} 是目前比较常用的判断活性污泥膨胀的重要指标^[22]. 如图 4 所示,在进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 分别为 100/5.8/1.2 (R1)、100/3/0.6 (R2) 和 100/1.9/0.4 (R3) 的条件下运行 130 个周期的过程中,R1~R3 系统的污泥 SVI_{30} 维持在 $35\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下,沉降性能没有发生明显变化. 而进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为 100/0.5/0.1 (R4) 和进水未投加任何氮磷营养物质的 R4 和 R5 系统 SVI_{30} 发生了不同的变化. 前 30 个周期内两系统的 SVI_{30} 还能保持在 $15\sim35\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间波动,之后污泥 SVI_{30} 逐渐升高,试验结束时分别达到 $232\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $150\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,系统发生了颗粒污泥膨胀. 由此可见,营养物质缺乏程度较轻时不会引起颗粒污泥的膨胀;而

当 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 达到 100/0.5/0.1 (R4) 后,营养物质的极端缺乏引起了颗粒污泥膨胀,但是颗粒污泥膨胀程度与营养物质的缺乏程度不是成正比关系,进水中不投加营养物质反而制约了颗粒污泥膨胀的速度与程度。

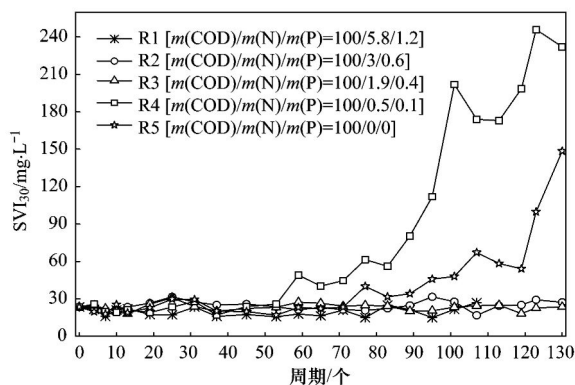


图4 不同 C/N/P 比对好氧颗粒污泥沉降性能的影响

Fig. 4 Effects of different C/N/P in fluent on aerobic granules settling property

Chudoba 等^[22] 根据不同种群微生物的生长动力学参数的不同提出了微生物选择性理论,该理论指出引起污泥膨胀的丝状菌的最大比增长速率 $\mu_{\max}$ 和饱和常数 K_s 比菌胶团小,因此在营养物质缺乏情况下丝状菌具有较高的增殖速率;而且根据 A/V 假说,丝状菌比表面积大,营养物质极度匮乏条件下,丝状菌可获得较多营养物质^[23]。此外,相关研究表明,丝状菌中的 *Sphaerotilus natans* (浮游分枝球衣菌)、*Thiothrix* (丝硫细菌)、*Beggiatoa* (贝氏硫细菌)等微生物细胞成分中 C/N/P 较菌胶团高,对营养物质需求较少^[24,25]。因此,在低浓度营养物质情况下,丝状菌在竞争中占据优势,逐渐成为优势菌种,从而引发颗粒污泥丝状菌膨胀。R5 系统在进水中没有投加任何氮、磷营养物质的情况下仍能发生丝状菌膨胀,笔者认为微生物在无营养物质可利用的情况下,自身无法正常新陈代谢,细胞大量死亡,释放出微量营养物质,而丝状菌以自身特殊结构,可以利用这部分微量营养物质生长繁殖。因此,试验后期出现丝状菌膨胀现象。

2.4 膨胀好氧颗粒污泥的恢复

到目前为止,在好氧颗粒污泥方面还没有形成系统的污泥膨胀控制策略,但是相关研究发现,在有机物及营养物质均充足情况下,污泥中菌胶团比增长速度较丝状菌快^[23],有利于与丝状菌的竞争。因此,本试验提高膨胀系统的进水营养物质比例,为颗粒中菌胶团提供充足营养物质,从而实现膨胀污泥

的恢复。

不同碳氮磷比例条件下引起的膨胀好氧颗粒污泥的恢复过程不尽相同(图5)。R4 系统 SVI_{30} 值的下降随试验的进行呈减缓的趋势,而 R5 系统恰好相反。试验经过 48 个周期的调控,2 个污泥膨胀系统 SVI_{30} 值均降低至 $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下,颗粒污泥沉降性能得到恢复,而且系统有机物降解率也基本达到 90% 以上,去除效果较好。

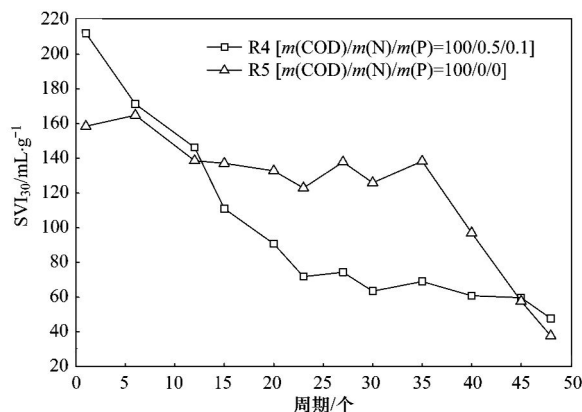


图5 添加足够营养物质对污泥膨胀的恢复

Fig. 5 Recovery of bulking by adding sufficient nutrients

然而,通过观察发现,虽然颗粒污泥系统中的白色、深褐色污泥恢复至正常的黄色或褐色,但是 R4、R5 系统中的颗粒形状依然不规则,粒径差异大而且 R4 系统中依然存在由粗大丝状菌缠绕的大粒径颗粒污泥。可见单纯地调节营养物质比例不仅恢复速度较慢,而且不能实现膨胀颗粒污泥的全面恢复,污泥仍存在再次膨胀的隐患,因而无法满足实际工程对膨胀污泥的控制要求。

3 结论

(1) 进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为 100/5.8/1.2 时,与接种污泥相比,颗粒污泥基本上没有发生变化;进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为 100/3/0.6 和 100/1.9/0.4 时,颗粒污泥发生解体现象,但是系统 COD 去除率和污泥沉降性能良好;然而,进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 为 100/0.5/0.1 和进水未投加氮磷营养物质时,系统污泥难以沉降, SVI_{30} 值分别达到 $232 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $150 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,颗粒表面长出明显的丝状菌, COD 去除率也受到影 响,特别是 R5 系统 COD 去除率降至 10% 左右。

(2) 当进水 $m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 比例高于 100/0.5/0.1 时,可以引发好氧颗粒污泥中丝状菌过度生长,导致系统发生丝状菌膨胀;当进水

$m(\text{COD})/m(\text{N})/m(\text{P})$ 低于 100/1.9/0.4 时, 系统不易发生丝状菌膨胀。

(3) 营养物质缺乏引起的膨胀颗粒污泥在投加充足营养物质并运行 48 个周期后污泥 SVI_{30} 恢复至 $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下, 但是此时系统的颗粒表面仍存在明显可见的丝状菌, 系统依然存在再次膨胀的隐患, 因此营养物质缺乏引起的膨胀颗粒污泥的恢复方法还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 李慧琴, 涂响, 孔云华, 等. 交变负荷调控法培养好氧颗粒污泥的试验研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 743-749.
- [2] Pijuan M, Werner U, Yuan Z G. Reducing the startup time of aerobic granular sludge reactors through seeding floccular sludge with crushed aerobic granules[J]. Water Research, 2011, **45**(16): 5075-5083.
- [3] Gao D W, Liu L, Liang H, *et al.* Aerobic granular sludge: characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2011, **31**(2): 137-152.
- [4] 邹雪, 孙飞云, 杨成永, 等. 利用好氧硝化颗粒污泥 SBR 处理分离尿液的研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(9): 1987-1992.
- [5] 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.
- [6] 高景峰, 陈冉妮, 苏凯, 等. 同步脱氮除磷好氧颗粒污泥形成与反应机制的研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 1021-1029.
- [7] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge-a critical review[J]. Water Research, 2004, **38**(4): 793-817.
- [8] 夏恩思, 周利, 李鹏, 等. 丝状菌污泥膨胀的微观研究方法进展[J]. 工业水处理, 2009, **29**(1): 10-12.
- [9] 丁峰, 彭永臻, 于德爽. pH 值对活性污泥沉降过程的影响[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, **33**(4): 39-42.
- [10] 王凤祥, 龙腾锐, 郭劲松. 活性污泥膨胀的影响因素及调控措施研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, **29**(1): 117-121.
- [11] 王凯军, 许晓鸣. 丝状菌污泥膨胀理论分析[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(3): 66-69.
- [12] Martins A M P, Heijnen J J, Van Loosdrecht M C M. Bulking sludge in biological nutrient removal systems[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, **86**(2): 125-135.
- [13] Zheng Y M, Yu H Q, Liu S J, *et al.* Formation and instability of aerobic granules under high organic loading conditions[J]. Chemosphere, 2006, **63**(10): 1791-1800.
- [14] 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.
- [15] De Kreuk M K, Pronk M, Van Loosdrecht M C M. Formation of aerobic granules and conversion processes in an aerobic granular sludge reactor at moderate and low temperatures[J]. Water Research, 2005, **39**(18): 4476-4484.
- [16] 高大文, 刘琳. 不同饥饿时间下稳态好氧颗粒污泥系统的特性和动力学分析[J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2011, **41**(1): 97-104.
- [17] 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, 2002.
- [18] Zheng Y M, Yu H Q. Determination of the pore size distribution and porosity of aerobic granules using size-exclusion chromatography[J]. Water Research, 2007, **41**(1): 39-46.
- [19] Zhang L L, Feng X X, Zhu N W, *et al.* Role of extracellular protein in the formation and stability of aerobic granules[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2007, **41**(5): 551-557.
- [20] 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.
- [21] 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**(5): 623-626.
- [22] Chudoba J, Grau P, Ottová V. Control of activated-sludge filamentous bulking-II. Selection of microorganisms by means of a selector[J]. Water Research, 1973, **7**(10): 1389-1398.
- [23] 王凯军. 活性污泥膨胀的机理与控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992. 7-17.
- [24] Kämpfer P, Weltin D, Hoffmeister D, *et al.* Growth requirements of filamentous bacteria isolated from bulking and scumming sludge[J]. Water Research, 1995, **29**(6): 1585-1588.
- [25] Madoni P. A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis[J]. Water Research, 1994, **28**(1): 67-75.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 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