

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

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

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂ 低温催化还原 NO 性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO₂ 吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫄,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu²⁺、Cd²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性

李志华¹, 吴军¹, 李胜², 谢磊³, 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; 3. 西安市水业运营有限公司南郊水厂, 西安 710054)

摘要: 对比分析了无厌氧搅拌的异养菌系统和有厌氧搅拌的除磷系统的颗粒污泥的粒径、密度、形态等特征, 得出后者较前者稳定。通过动力学参数分析发现, 颗粒污泥的稳定与微生物的代谢特征有一定的关系, 即慢速生长系统具有较好的颗粒稳定特征可能与能量维持代谢的比例较大有关。通过对比分析慢速生长系统不同粒径的微生物代谢特征, 发现用于表征非生长代谢相关的能量维持系数 m 和 $S_{\min}/\text{COD}_{\text{influent}}$ 与颗粒的稳定性具有密切的联系, 因而可以作为表征颗粒污泥稳定性的定量指标。本研究改变了长期以来通过观察污泥形态、粒径、密度等理化参数来定性描述颗粒稳定的技术体系, 从微生物能量代谢角度建立了定量描述颗粒污泥稳定的方法和指标。

关键词: 非生长能量代谢参数; 好氧颗粒污泥; 动力学参数; 稳定性; 能量代谢

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1913-05

Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters

LI Zhi-hua¹, WU Jun¹, LI Sheng², XIE Lei³, 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 Ltd., Xi'an 710025, China; 3. Southern Facility of Xi'an Water Operation Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Qualitative rather than quantitative method was available in the study of aerobic granular sludge. This work therefore investigated two systems, one was the conventional heterotrophic system without anaerobic mix period, the other was the phosphorous removal system with anaerobic period, and it was found that the latter was more stable from the point view of diameter, density and morphology. It was further found that the stability of granule was associated with the metabolic characteristics, i. e., the slow growth system showed more stability may be due to higher fraction of maintenance metabolic energy. In order to evidence that, different size of granule in the slow growth system was obtained for the metabolic character analysis. It was found that the maintenance coefficient m and the ratio of maintenance COD consumption ratio $S_{\min}/\text{COD}_{\text{influent}}$ was well correlated with the stability of granules. Consequently, it was proposed that these two parameters could be used for the quantitative description of the stability of granules. This study established a new method for the quantitative description of the stability of aerobic granules from the metabolic perspective, which improved the conventional qualitative methods in terms of morphology, diameter and density of granules.

Key words: nongrowth-related parameters; aerobic granule; kinetic; stability; energy metabolic

好氧颗粒污泥具有沉降性好、抗冲击负荷能力强、脱氮除磷效果好等优点, 已经成为一个新的研究热点, 并受到国内外学者和工程技术人员的广泛关注, 但维持颗粒污泥的长期稳定性一直是困扰好氧颗粒污泥研究者的一大难题^[1]。一般情况下, 好氧颗粒污泥形成后, 颗粒粒径会越来越来大, 最后颗粒破碎解体。影响颗粒污泥稳定性的因素有很多, 研究表明, 水力剪切力、进水负荷、沉淀时间、菌种和运行条件等都会对颗粒污泥稳定性有重要影响^[2-5]。在对颗粒污泥的稳定性分析研究中, 通常都是对污泥的密度、沉速、形态、强度等常规性指标进行定性分析, 而对于颗粒污泥稳定性的定量分析指标鲜见报道。

微生物从降解基质中得到的能量代谢关系如图 1 所示^[6]。在好氧颗粒污泥的研究中发现以硝化菌为代表的自养菌系统^[7]和以基质存储与消耗为典

型代谢模式的除磷系统^[8]往往具有较好的稳定性, 而单一的异养菌体系容易在颗粒形成后期发生丝状菌膨胀而导致颗粒的解体。因此创造慢速生长的微生物条件往往可以获得更好的颗粒污泥稳定环境。然而这些慢速生长系统如何描述微生物代谢特征与稳定性之间的关系尚缺少定量的表述。为此, 本研究拟从能量代谢的角度, 通过对比分析不同运行条件下的 SBR 反应器中的颗粒污泥和同一运行条件下不同粒径范围颗粒污泥与生长相关的动力学参数, 从能量代谢角度分析好氧颗粒污泥的稳定机制

收稿日期: 2011-08-04; 修订日期: 2011-11-09

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); 陕西省教育厅专项科研计划项目(11JK0764)

作者简介: 李志华(1976~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向污水生物处理理论与技术, E-mail: lizhuhua@gmail.com; lizhuhua@xauat.edu.cn

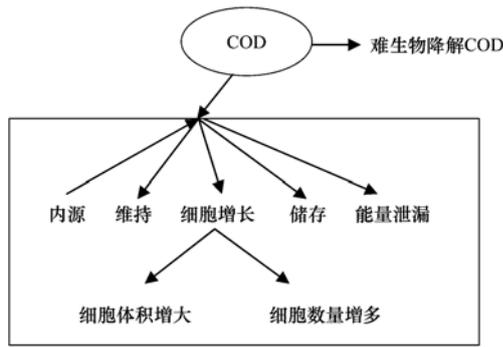


图 1 外界 COD 能量代谢途径

Fig. 1 Different flows of external COD in the organisms

及其定量描述方法.

1 材料与方法

1.1 实验方法及实验装置

为对比分析常规的无厌氧搅拌的异养菌系统 (R1) 和有厌氧搅拌的除磷系统 (R2) 的微生物代谢特征,反应器的运行条件如表 1 所示. R1 和 R2 的曝气量分别为 $1.2 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 对应的气体表面上升流速分别为 $10.2 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5.9 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. R2 厌氧搅拌浆转速为 $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 其中 R1 以乙酸钠和葡萄糖混合作为碳源, R2 为富集聚磷菌 PAO 以丙酸钠作为碳源. 进水基质成分如表 2. 两者的接种污泥均取自西安市邓家村污水处理厂 (A²/O 工艺) 二沉池回流至曝气池的污泥.

表 1 反应器运行周期/min

Table 1 Periods of sequencing operation/min

项目	进水	搅拌	曝气	沉淀	出水
R1	5	0	164	8	2
R2	4	90	139	4	2

表 2 模拟废水组成/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Components of the synthetic wastewater/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

基质名称	COD	NH ₄ Cl	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄ ·7H ₂ O	CaCl ₂ ·2H ₂ O
R1	600	229.3	43.9	90	14
R2	600	229.3	43.9	90	14

1.2 分析项目和测量方法

本研究所有动力学参数实验温度控制在 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, 其中最大比增长速率 μ_{H} 、内源衰减速率 b_{H} 、产率系数 Y_{H} 采用序批式呼吸计量法进行测量 (图 2); 半饱和系数 K_{S} 和维持系数 m 通过烧杯实验测量.

1.2.1 最大比增长速率 μ_{H} 测定^[9-15]

从反应器中取适量的好氧颗粒污泥, 连续曝气 24 h, 使污泥处于内源呼吸阶段, 然后用 PBS 缓冲液洗泥 3 次. 以乙酸钠为基质, 在测量装置中加入颗粒污泥和基质 (为使基质足够充分, 控制 F/M 为 1.5

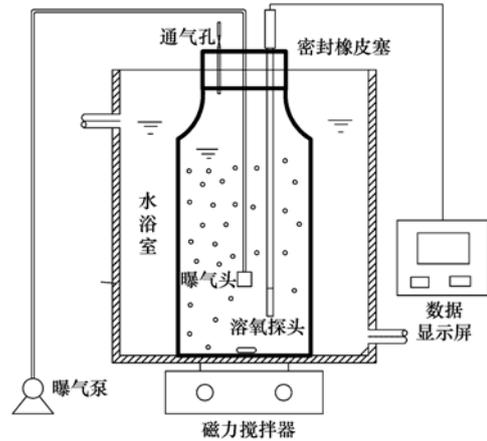


图 2 序批式呼吸测量装置示意

Fig. 2 Respirometric experiment setup

~2 左右). 实验中投加 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的烯丙基硫脲 (ATU) 抑制自氧菌活性, 而后连续数小时记录在密闭间歇反应器中耗氧速率 (OUR) 的变化. 实验结束后, 将 OUR 随时间的变化在半对数坐标上做图, 根据式 (1) 其斜率为 $\mu_{\text{H}} - b_{\text{H}}$, 在 b_{H} 已知时可得出 μ_{H} .

$$\ln \text{OUR}(t) = \ln \left[\frac{1 - Y_{\text{H}}}{Y_{\text{H}}} \mu_{\text{H}} + (1 - f_{\text{p}}) b_{\text{H}} \right] X_{\text{H}} + (\mu_{\text{H}} - b_{\text{H}}) t \quad (1)$$

式中, Y_{H} 为产率系数; μ_{H} 为最大增长速率; b_{H} 为内源衰减速率; f_{p} 为微生物中惰性颗粒比例 (取 ASM1 参考值为 0.08).

1.2.2 衰减速率 b_{H} 测定^[6,9-15]

首先从反应器中取适量污泥, 将污泥曝气 24 h, 使其处于内源呼吸阶段, 用 PBS 缓冲液洗泥 3 次, 然后将其加入到反应装置中, 投加 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ATU 抑制自氧菌活性, 连续曝气 2~3 d, 每天隔数小时测量耗氧速率. 实验结束后, 将 OUR 随时间的变化在半对数坐标上做图, 其斜率即为传统衰减系数 K_{d} , 然后根据式 (3), 求得 b_{H} .

$$\ln \text{OUR}(t) = \ln [(1 - f_{\text{p}}) b_{\text{H}} X_{\text{H}(0)}] - K_{\text{d}} t \quad (2)$$

$$b_{\text{H}} = \frac{K_{\text{d}}}{1 - Y_{\text{H}}(1 - f_{\text{I}})} \quad (3)$$

式中, Y_{H} 为产率系数; f_{p} 为微生物中惰性颗粒比例 (取 ASM1 参考值为 0.08).

1.2.3 产率系数 Y_{H} 测定^[6,9-15]

在序批式反应装置中投加一定量的处于内源呼吸的污泥和配置好的乙酸钠溶液, 其 F/M 控制为 0.05~0.1 左右, 投加 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 ATU 抑制硝化, 间歇测定 OUR 变化趋势, 然后根据式 (4) 得出 Y_{H} .

$$Y_{\text{H}} = \frac{\Delta \text{COD} - \int \text{OUR}(t) dt}{\Delta \text{COD}} \quad (4)$$

式中, ΔCOD 为反应期间被消耗的 COD ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $\int\text{OUR}(t)dt$ 为呼吸耗氧量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

1.2.4 半饱和系数 K_s 测定^[6,9~16]

在 6 个体积相同的烧杯中加入等量的好氧颗粒污泥, 为 6 个烧杯分别配备 6 个浓度梯度的底物基质, 然后曝气反应, 每隔 20 min 分别在 6 个烧杯中取样测量 COD, 可以得出不同底物浓度下的底物降解速率 ds/dt , 然后根据式(5)拟合得出 K_s 和 V_{\max} .

$$V = V_{\max} \frac{S}{S + K_s} \quad (5)$$

式中, V 为基质降解速率; V_{\max} 为最大基质降解速率; S 为基质浓度; K_s 为半饱和系数.

1.2.5 维持系数 m ^[6,17]测定

在 6 个体积相同的烧杯中分别加入有浓度梯度的好氧颗粒污泥, 为 6 个烧杯配备有相同浓度的底物基质, 然后曝气反应, 每隔 20 min 分别于 6 个烧杯中取样测量 COD, 可以得出不同污泥浓度下的底物降解速率 ds/dt , 然后根据式(7), 拟合得出维持系数 m .

$$\mu = \mu_H \frac{S}{S + K_s} \quad (6)$$

$$\frac{ds}{dt} = - \left(\frac{\mu}{Y} - m \right) X \quad (7)$$

式中, ds/dt 为基质降解速率; μ 为微生物增长速率; μ_H 为最大增长速率; S 为基准浓度; K_s 为半饱和系数; Y 为产率系数; X 为微生物量; m 为微生物维持系数.

1.2.6 比维持系数 a 和最低底物限制浓度 S_{\min}

根据式(8)和(9)拟合得出:

$$a = mY_H \quad (8)$$

$$S_{\min} = \frac{aK_s}{\mu_H - a} \quad (9)$$

式中, a 为比维持系数; m 为维持系数; Y_H 为产率系数; S_{\min} 为最低底物限制浓度; μ_H 为最大比增长速率; K_s 为半饱和系数.

2 结果与讨论

2.1 不同运行条件下反应器内的颗粒污泥稳定性状况

对比 R1 和 R2 的颗粒污泥形态, 如图 3 (a) ~ 3 (d), 在运行的第 11 d, R1 和 R2 基本都形成了颗粒污泥, 粒径在 100 ~ 200 μm , 到第 90 d 时, R1 和 R2 的颗粒污泥粒径都在增大, 然而 R1 中的颗粒污泥中出现了一些絮状物, 以丝状菌蓬松状结构为主, 是颗粒开始解体的前兆, R2 中的颗粒污泥虽粒径大小不一, 但颗粒污泥光滑密实, 未有丝状菌繁殖的迹象, 并且 R2 的密度也大于 R1, 如表 3, 表明厌氧阶段的除磷系统具有更好的颗粒稳定特征, 这与其它学者的研究结果一致^[18,19], 即在好氧颗粒污泥的培养过程中引入缺氧段或厌氧段有利于其稳定维持.

表 4 描述了 R1 与 R2 的颗粒污泥的动力学参数对比情况. 就微生物的生长特性而言, R2 混合液的比增长速率 μ_H 小于 R1 混合液, 进一步证实 R2 系统确实处于相对慢速的增长阶段. 就产率系数 Y_H

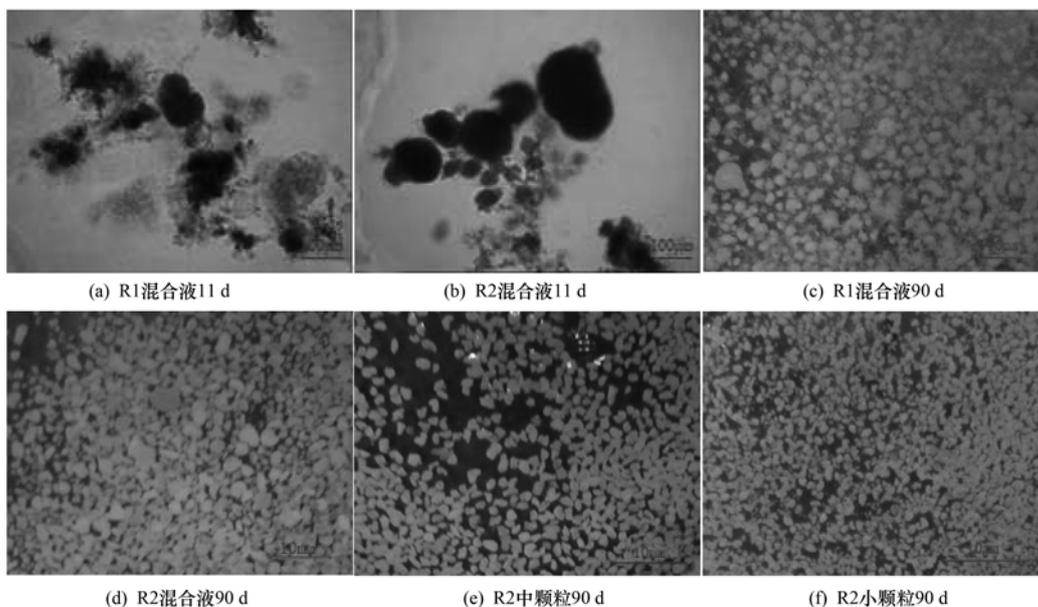


图 3 颗粒污泥形态对比

Fig. 3 Morphology of aerobic granules formed under different reactors

表 3 好氧颗粒污泥的物理特性

项目	直径/mm	密度/g·mL ⁻¹
R1 混合液	0 ~ 2.0	1.008 5 ~ 1.010 4
R2 混合液	0 ~ 2.2	1.009 7 ~ 1.015 5
R2 中颗粒	0.6 ~ 1.0	1.012 4 ~ 1.018 3
R2 小颗粒	0 ~ 0.6	1.006 7 ~ 1.016 3

表 4 R1 和 R2 颗粒污泥的动力学参数

类别	R1 混合液	R2 混合液
最大比增长速率 μ_H/h^{-1}	0.36	0.33
内源衰减系数 b_H/h^{-1}	0.13	0.11
产率系数 $Y_H/g \cdot g^{-1}$	0.7	0.67
半饱和系数 $K_S/mg \cdot L^{-1}$	167.2	283.1
底物最大降解速率 V_{max}/h^{-1}	0.19	0.37
维持系数 m/h^{-1}	0.04	0.06
比维持系数 a/h^{-1}	0.03	0.05
$S_{min}/COD_{inluent}/\%$	2.8	7.8

而言,R2 的颗粒污泥的产率系数 Y_H 小于 R1,表明外界底物被氧化用于细胞增长的比例低于 R1,换言之,慢速生长系统 R2 用于维持、存储等其他用于非生长相关途径的能量消耗高于 R1. 为此,引入能量维持系数 m 描述非生长相关代谢能量分配关系,所谓维持系数是指微生物维持自身正常生命活动和新陈代谢的能量消耗速率. 测试结果表明,R2 颗粒污泥的维持系数 m 大于 R1,由此可以看出,R2 颗粒污泥的能量代谢中更多的能量用于维持微生物的新陈代谢和适应环境的改变等因素来维持自身的稳定性. 由于非生长能耗分配的存在,因此即使系统微生物零增长时也需要消耗基质,这部分基质消耗用 S_{min} 表示,即系统最小的底物需求(可认为是基础代谢的能量需求). $S_{min}/COD_{inluent}$ 表示进水 COD 中用于维持基础代谢所需 COD 所占比例. 实验结果得出,R2 中有 7.8% 的进水 COD 是用于维持微生物的基础代谢,而 R1 只有 2.8%. 由此可以推断,慢速生长系统具有较好的颗粒稳定特征可能与能量维持代谢的比例较大有关.

2.2 慢速生长系统不同粒径的颗粒污泥稳定性状况

从图 4 可以看出,慢速生长系统 R2 大颗粒的体积分数占全部颗粒污泥体积的 84%,因此可以认为大颗粒基本上代表了整个系统颗粒的状态. 然而粒径不断增大也往往容易导致颗粒的解体,因此粒径往往与颗粒污泥的稳定具有密不可分的联系,为此对该系统的不同粒径的微生物动力学特征进行了测试分析,结果如表 5 所示.

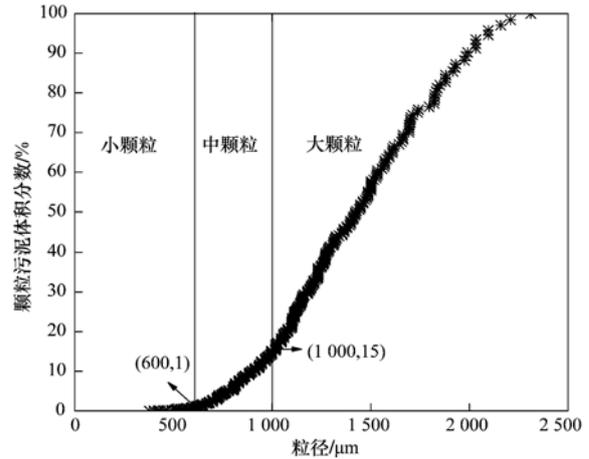


图 4 慢速生长系统颗粒污泥的粒径分布

Fig. 4 Size distribution of granules in a slow growth system

表 5 慢速生长系统不同粒径颗粒污泥的动力学参数

类别	R2 大颗粒	R2 中颗粒	R2 小颗粒
最大比增长速率 μ_H/h^{-1}	0.33	0.52	0.43
内源衰减系数 b_H/h^{-1}	0.11	0.1	0.09
产率系数 $Y_H/g \cdot g^{-1}$	0.67	0.73	0.77
半饱和系数 $K_S/mg \cdot L^{-1}$	283.1	121.5	40.8
底物最大降解速率 V_{max}/h^{-1}	0.37	0.15	0.20
维持系数 m/h^{-1}	0.06	0.07	0.04
比维持系数 a/h^{-1}	0.05	0.05	0.03
$S_{min}/COD_{inluent}/\%$	7.8	10.7	0.7

表 5 对比分析了慢速生长系统 R2 中 3 种不同粒径范围 (<0.6 mm、0.6 ~ 1 mm、>1 mm) 的颗粒污泥的动力学参数特征. 从实验结果可以看出,大颗粒具有较大的半饱和系数 K_S ,表明基质进入颗粒污泥内部阻力较大,进而使得颗粒污泥内部无法得到或不能获得足够的基质和溶氧,从而导致颗粒污泥的内部的微生物死亡,因此其内源衰减系数 b_H 也较大. 另一方面,大颗粒的产率系数 Y_H 也较低,可能是由两方面原因引起,一是其增殖速率较小,二是内源衰减系数 b_H 较大. 尽管以上参数表明,大颗粒较之小颗粒,其生物的活性表现欠佳,然而其底物最大降解速率却表现较大,这可能与其表面积较大有关,即颗粒表面的微生物处于较为活跃的状态. 颗粒表面与内部非平衡性增长在一定程度上会导致颗粒的不稳定. 从代谢能量分配来说,大颗粒的维持系数 m 和 $S_{min}/COD_{inluent}$ 均不高,表明其基础代谢较弱,代谢能耗主要用于生长相关的生命活动(如表面细胞的增殖和内部系统的衰亡). 同样,小颗粒能量维持系数 m 也偏低,其主要原因在于其污泥产率系数 Y_H

最高,能量主要用于生长,而且其半饱和系数 K_s 最小,基质和溶氧基本没有传质受阻,导致小颗粒从内部到外表面的急剧增长,因此小颗粒污泥在 SBR 体系中也是不稳定的.值得一提的是,中颗粒虽有最大的比增长速率但产率系数却不大,表明中颗粒的微生物的增长速度受到了控制.一方面,中颗粒的半饱和系数 K_s 为 $121.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对进水 COD 为 $600 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 来说,该 K_s 值处于适当水平.另一方面,中颗粒的维持系数 m 和 $S_{\min}/\text{COD}_{\text{influent}}$ 最大,表明中等尺寸颗粒的基础代谢能耗比较高.由以上分析不难看出,颗粒用于非生长相关的能耗比例越大,该颗粒的稳定特征越强,因此可以用能量维持系数或 $S_{\min}/\text{COD}_{\text{influent}}$ 来表示颗粒的稳定性.

3 结论

(1)通过对比分析常规的无厌氧搅拌的异养菌系统(R1)和有厌氧搅拌的除磷系统(R2)的颗粒污泥的粒径、密度、形态等特征,得出后者较前者稳定,而这种稳定与微生物的代谢特征有一定的关系,即慢速生长系统具有较好的颗粒稳定特征可能与能量维持代谢的比例较大有关.

(2)在表征颗粒污泥稳定性的动力学参数中,最大比增长速率 μ_H 和产率系数 Y_H 和半饱和系数 K_s 都不能单独地有规律地表征颗粒污泥的稳定性;用于表征非生长代谢相关的能量维持系数 m 和 $S_{\min}/\text{COD}_{\text{influent}}$ 与颗粒的稳定性具有密切的联系,因而可以作为表征颗粒污泥稳定性的定量指标.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Tay J H, Liu Q S, Lju Y. The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2001, **57**(1-2): 227-233.
- [3] 王芳, 杨风林, 张兴文, 等. 不同有机负荷下好氧颗粒污泥的特性 [J]. 中国给水排水, 2004, **20**(11): 46-48.
- [4] 王强, 陈坚, 堵国成. 选择压法培育好氧颗粒污泥的试验 [J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 99-104.
- [5] 李志华, 张婷, 吴杰, 等. 异养菌与自养菌对好氧颗粒污泥稳定性的影响 [J]. 土木建筑与环境工程, 2010, **32**(5): 76-81.
- [6] Petersen B. Calibration, identifiability and optimal experimental design of activated sludge models [D]. Belgium: University of Gent, 2000.
- [7] Shi X Y, Yu H Q, Sun Y J, *et al.* Characteristics of aerobic granules rich in autotrophic ammonium-oxidizing bacteria in a sequencing batch reactor [J]. Chemical Engineering Journal, 2009, **147**(2-3): 102-109.
- [8] McSwain B S, Irvine R L, Wilderer P A. The effect of intermittent feeding on aerobic granule structure [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(11-12): 19-25.
- [9] Vanrolleghem P A, Spanjers H, Petersen B, *et al.* Estimating (combinations of) Activated Sludge Model No. 1 parameters and components by respirometry [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(1): 195-214.
- [10] Novák L, Larrea L, Wanner J. Estimation of maximum specific growth rate of heterotrophic and autotrophic biomass; a combined technique of mathematical modelling and batch cultivations [J]. Water Science and Technology, 1994, **30**(11): 171-180.
- [11] Spanjers H, Vanrolleghem P. Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge [J]. Water Science and Technology, 1995, **31**(2): 105-114.
- [12] Brands E, Liebeskind M, Dohmann M. Parameters for dynamic simulation of wastewater treatment plants with high-rate and low-rate activated sludge tanks [J]. Water Science and Technology, 1994, **30**(4): 211-214.
- [13] 刘芳, 顾国维. ASM1 模型中主要动力学参数的测定方法 [J]. 中国给水排水, 2004, **20**(2): 37-40.
- [14] 孙培德, 宋英琪, 王如意. 活性污泥动力学模型及数值模拟导论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [15] 张亚雷, 李咏梅, 译. 活性污泥数学模型 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [16] Park J K, Wang J, Novotny G. Wastewater characterization for evaluation of biological phosphorus removal [R]. Wisconsin Department of Natural Resources, Research Report 174, 1997.
- [17] Pirt S J. Maintenance energy: a general model for energy-limited and energy-sufficient growth [J]. Archives of Microbiology, 1982, **133**(4): 300-302.
- [18] McSwain B S, Irvine R L, Wilderer P A. The effect of intermittent feeding on aerobic granule structure [J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(11-12): 19-25.
- [19] 张玉蓉. 导入厌氧反应期实现好氧颗粒污泥的稳定机理及工艺特性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 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