

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究	谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)
长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用	苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)
北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究	徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)
上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究	张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)
青岛市大气 PM _{2.5} 元素组成及来源研究	李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)
冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究	王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)
再悬浮装置在大气 PM _{2.5} 源谱分析中的应用	段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)
黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究	魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)
三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探	蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)
香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析	王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)
臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响	陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)
托木尔峰青冰滩 72 号冰川径流水化学特征初步研究	赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)
五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究	张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)
7 条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律	卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)
巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性	李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)
北运河系地表水近 10 年来水质变化及影响因素分析	郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)
东莞运河排涝对东江河网水质影响分析	孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)
北京平原区地下水污染源识别与危害性分级	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)
地下水曝气修复过程的三维数值模拟	李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)
垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究	邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)
新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究	高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)
营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响	齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)
水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究	傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)
酞酸酯在模拟海河苕草微宇宙中的消减和分布特征	迟杰,杨青(1570)
电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究	刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)
青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析	李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)
四溴双酚 A 的辐射降解研究	李杰,徐殿斗,徐刚,马玲玲,吴明红(1587)
污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究	王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)
高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响	李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)
城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成 NDMA 的影响因素研究	尚晓玲,李咏梅(1604)
利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究	沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)
好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性	王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓姣,竺建荣(1614)
活性污泥对病毒的生物吸附特性	周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)
阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律	邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)
两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征	李婷,孟昭福,张斌(1632)
表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响	张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)
南京市 4 个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析	葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)
焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能	陈春,李文英,吴静文,李静(1652)
Xanthobacter flavus DT8 降解二噁英的特性研究	金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)
未开发油气田地地表炔氧化菌空间定量分布	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)
矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究	赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)
长江中游干流及 22 条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险	李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)
典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险	吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)
闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究	陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)
三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价	王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)
典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险	邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许政英(1700)
密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价	高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,李宏兵(1707)
湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性	杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)
基于 GIS 的某训练场土壤重金属污染评价	刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)
土壤质地和湿度对 SVE 技术修复苯污染土壤的影响	刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)
蒙脱土、高岭土和针铁矿对 DNA 吸附与解吸特征	王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)
LNAPL 在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究	潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)
亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征	董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)
蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究	任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)
固定化微生物技术修复 PAHs 污染土壤的研究进展	钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)
《环境科学》征订启事(1483)	《环境科学》征稿简则(1620)
信息	(1490,1496,1586,1743)

好氧污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 的变化特性

王浩宇¹, 苏本生¹, 黄丹², 崔晓姣², 竺建荣^{1*}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 研究了在好氧颗粒污泥形成过程中 Zeta 电位、胞外多聚物的变化以及两者之间的关系。通过对污泥调控生长, 形成完全颗粒化的好氧污泥。在好氧颗粒形成过程中, 污泥的 Zeta 电位由接种时的 -19.1 mV 逐渐降至 -10.1 mV。完全颗粒化以后, 成熟后的好氧颗粒污泥 Zeta 电位稳定维持在 -10 mV 左右, 说明维持污泥较低的 Zeta 电位是好氧颗粒污泥形成的重要条件。颗粒化过程中污泥 EPS 中多糖含量基本不变, 蛋白含量增加明显, 从 13.65 mg·g⁻¹ 增加到 54.12 mg·g⁻¹, 蛋白/多糖比值从 0.67 增加到 3.31 ; 污泥的 Zeta 电位与蛋白/多糖的比值呈正相关, 相关系数为 0.849 , 这些结果说明蛋白质对降低污泥表面电位, 促进污泥聚集以及好氧颗粒污泥的形成生长等可能起着重要作用。

关键词: Zeta 电位; EPS; 好氧颗粒污泥; SBR; 蛋白质; 多糖

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1614-07

Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge

WANG Hao-yu¹, SU Ben-sheng¹, HUANG Dan², CUI Xiao-jiao², ZHU Jian-rong¹

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. State Key Laboratory of Water Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The profiles of Zeta potential and EPS, and their correlation were investigated for the aerobic sludge during granulation process. The complete aerobic granular particles were cultivated and grew by controlling operational conditions. During the granulation process, Zeta potential of sludge was decreased from -19.1 mV to -10.1 mV gradually. And it was maintained at a low level-about -10 mV in matured granules, which indicated a low Zeta potential of sludge is an important factor for the development of aerobic granulation of sludge. There was no big variation of polysaccharide in EPS during the granulation, but the protein of EPS was significantly increased, from 13.65 mg·g⁻¹ to 54.12 mg·g⁻¹. The protein/polysaccharide ratio was went up from 0.67 to 3.31 . There existed a good correlation between PN/PS ratio and Zeta potential, coefficient 0.849 . These results demonstrated the protein of EPS played a significant role on decrease of surface electronic potential, stimulating the growth of sludge aggregation and the formation the aerobic granular sludge.

Key words: Zeta potential; extracellular polymeric substances (EPS); aerobic granular sludge; SBR; protein; polysaccharide

在 SBR 中可以培养出性状良好的好氧颗粒污泥, 它具有良好的沉降性能, 污泥浓度高, 抗冲击负荷并且对氮磷有着良好的去除效果^[1~3], 目前已经成为研究的热点^[4]。好氧颗粒污泥的形成是一个微生物聚集的过程, 这个过程被认为是一个复杂的包含物理、化学、生物作用的复杂过程^[5,6]。一般来讲, 好氧颗粒是由微生物组成的细小颗粒, 微生物细胞均带有负电性, 这种带电特性可以用 Zeta 电位来表示。当具有相同负电性的污泥相互靠近到一定程度就会发生双电层的重叠, 产生静电斥力, 不利于污泥之间聚集^[7]。Zeta 电位越高, 粒子间的静电斥力也就越大, 因此 Zeta 电位对污泥的聚集有着重要影响。

胞外多聚物 (extracellular polymeric substances, EPS) 是分泌于细胞表面的大分子物质, 主要源于生物合成和分泌、细胞溶解和大分子水解等。好氧颗粒污泥的形成与微生物的新陈代谢有着密切的联系, 而 EPS 作为微生物代谢产物, 对污泥的 Zeta 电位也

有影响。通常认为 EPS 有利于微生物细胞凝聚^[8,9]。EPS 的有机组分可以改变细菌絮体的表面特性和污泥的物理化学特性, 进而促进细胞间的凝聚和结构稳定^[10,11]。目前的大多研究认为, EPS 可以与细菌细胞产生“架桥作用”, 从而使污泥之间聚集^[12,13]。但是关于 EPS 对污泥表面电位的影响, 人们还没有一个统一的结论^[14~16], 对于污泥的聚集性能的影响还有待进一步确定, 在好氧颗粒污泥形成过程中的确切作用还有待实验研究。

为了更好地探讨 SBR 运行过程中污泥颗粒化过程中 Zeta 电位与颗粒聚集生长的关系, Zeta 与 EPS 电位的相互联系, 本实验对好氧完整颗粒化过程中, 污泥的 Zeta 电位与 EPS 的变化规律, 以及两

收稿日期: 2011-04-02; 修订日期: 2011-11-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA06Z318)

作者简介: 王浩宇 (1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与治理工程, E-mail: wanghaoyu_1986@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zjrtshua@sohu.com

者之间的关系进行了研究。

1 材料与方法

1.1 实验装置运行控制和接种污泥

SBR 反应器由有机玻璃制成,反应器有效高度 140 cm,直径 10 cm,有效体积 10 L. 反应系统采用空压机供气,进水由液位控制器控制. 反应器各阶段的操作变换通过时间控制器(PLC)自动控制. 本实验采用的换水比为 65%,反应周期为 6 h,分别包括进水 3 min,静置厌氧 55 min,好氧 290 min,沉降 10 min,出水 2 min,反应在室温下运行. 实验装置如图 1 所示. 接种污泥取自高碑店污水处理厂,因为 SBR 系统包含厌氧和好氧 2 个反应阶段,故接种污泥为二沉池的回流污泥和消化污泥的混合,混合比例为 7:3.

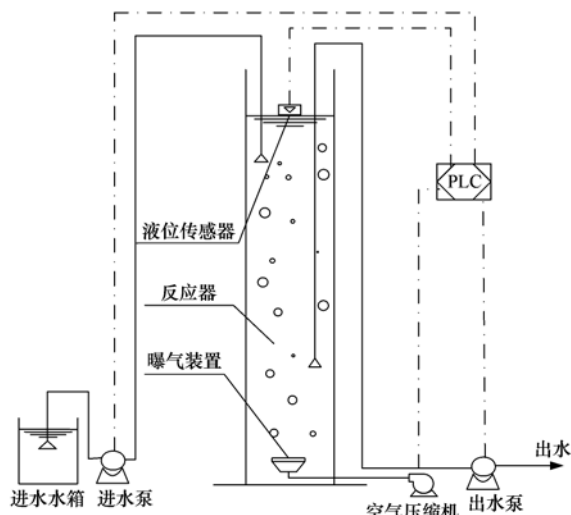


图 1 实验 SBR 系统工艺流程示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental SBR system

1.2 进水水质

实验采取人工模拟废水,进水中含有碳源、氮源、磷源等. 按照 $COD/TN/TP = 100/5/1$ 比例配水. 典型的进水组分为:葡萄糖 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、硫酸铵 $94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、磷酸二氢钾 $17.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、碳酸氢钠 $94 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、氯化钠 $64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、硫酸镁 $90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.3 测定项目及方法

(1) COD、MLSS、SVI 等采用标准方法测定^[17].

(2) 污泥平均粒径测定采用 Mastersizer 2000 (Malvern)测定. 使用 Olympus B41 光学显微镜和数码相机观察和记录污泥形态.

(3) 污泥的 Zeta 电位采用 Zetasizer Nano Z (Malvern)测定. 取反应器一个周期反应末段的混合液,在 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 5 min,弃上清液,用去离

子水配置浓度为 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的污泥混合液,将样品打入样品池,进行 3 次测定,测定结果取平均值.

(4) EPS 的提取和测定

根据 Sheng 等^[7]的报道,本实验采用热提取法提取好氧颗粒污泥中的 EPS. 取 30 mL 的反应器周期运行末段污泥混合液,在 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 10 min,弃掉上清液,将污泥在 $4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下匀浆 3 min 后,再重新悬浮于 30 mL 的磷酸盐缓冲溶液中. 随后将污泥溶液放置于 80°C 恒温水浴中加热 1 h. 然后在 $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 30 min,收集上清液,经 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤后待用. 多糖(PS)的测定采用蒽酮-硫酸法,蛋白(PN)的测定采用考马斯亮蓝法.

2 结果与分析

2.1 好氧颗粒污泥的培养和生长

在好氧颗粒污泥的培养中采用进料负荷作为主要运行控制参数,反应器运行状况如图 2 所示. 反应器运行 80 d 后污泥完全颗粒化,污泥的粒径与显微镜观察如图 3、4 所示.

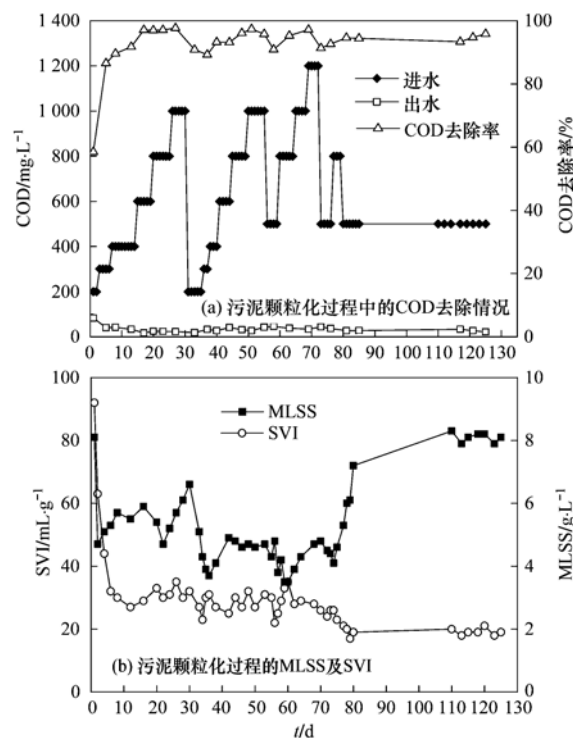


图 2 SBR 运行特性

Fig. 2 Operational properties of SBR system

由于初始反应器的接种污泥量较大,并且沉降性不佳,因此采用低负荷运行,以改善污泥的沉降性能,进水浓度保持在 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,接种污泥经过低负荷运行后,沉降性能大大改善. 运行 2 d 后污泥浓

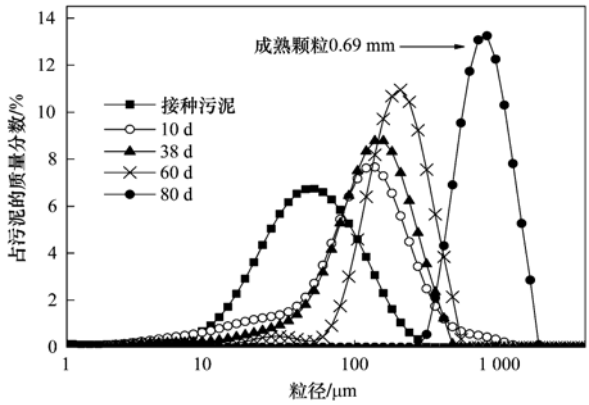
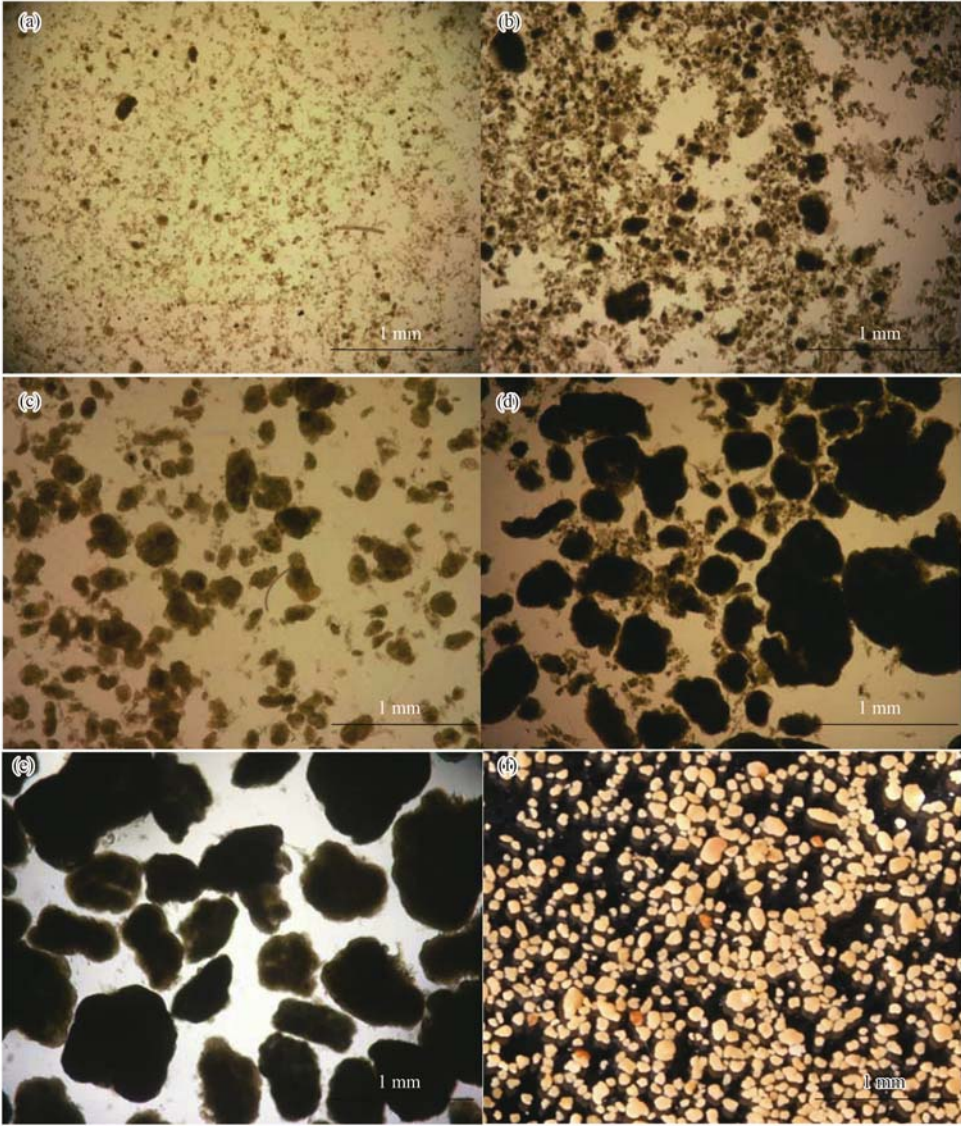


图 3 SBR 污泥粒径变化

Fig. 3 Profile of particle size of sludge in SBR system

度下降至 $4.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, SVI 同时也下降至 $45 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 反应器运行到 10 d 有小颗粒出现, 此时污泥的平均

粒径已由接种时 $87 \text{ } \mu\text{m}$ 增长到 $110 \text{ } \mu\text{m}$. 污泥性质得到初步的改善后, 逐步提高反应器进水浓度, 前 30 d 内进水 COD 浓度从 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 不断提至 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这段时间污泥浓度不断增长, 30 d 时污泥浓度已经增长到 $6.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 由于高负荷下运行, 虽然污泥浓度增长快, 但是污泥沉降性并不是很理想, 并且反应器内污泥颗粒化程度不高, 絮体污泥生长旺盛. 为减少絮体污泥的生长, 改善污泥沉降性能, 促进污泥聚集生长, 采取调控措施, 降低进水浓度至 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器进入低负荷运行阶段. 在低负荷运行的几天内, 污泥浓度有一定下降, 但是反应器内絮状污泥减少, 小颗粒不断出现, 由于受到强烈的富-贫营养的变化刺激, 污泥聚集趋势明显, 污泥粒径不断增大, 到第 38 d 时已经达到 $196 \text{ } \mu\text{m}$. 经过低



(a) 接种污泥; (b) 10 d; (c) 38 d; (d) 60 d; (e) 和 (f) 80 d

图 4 SBR 不同运行时间的污泥形态

Fig. 4 Morphology observation of sludge in SBR system

负荷阶段的运行,反应器内形成了大量的小颗粒,这也为后来颗粒污泥的形成提供了生长核. 随后为了使颗粒粒径不断增大,污泥浓度增高,同时减少反应器内絮体污泥的产生,又进行了几次负荷的升高和降低. 系统在运行到 60 d 时污泥粒径已经达到 296 μm ,并有较大污泥颗粒形成;系统运行到 80 d 时,系统实现完全颗粒化,颗粒化程度达到 100%,颗粒平均粒径达 698 μm . 最终形成的颗粒呈淡黄色,以圆形或椭圆形为主,结构密实,状态稳定,边界光滑,并有钟虫等原后生动物附着生长在颗粒表面,此时污泥浓度在 $7.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,SVI 为 $20 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右,出水 COD 浓度稳定在 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下. 系统运行到 125 d,颗粒稳定性良好,污泥浓度增长至 $8 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,对 COD 的去除效果稳定在 95% 以上.

2.2 污泥颗粒化过程中 Zeta 电位的变化

污泥颗粒化过程中 Zeta 电位的测定结果如图 5 所示. 在开始运行的前 40 d,污泥的 Zeta 电位略有波动,从开始的 -19.1 mV 下降到 -15.0 mV ,随后略升高到 -16.2 mV ,可能因为此阶段污泥第一次经历高低负荷的变化,污泥的生长状态不够稳定,电位有一定波动. 在后面的运行中,随着污泥颗粒化程度的提高,污泥性能不断改善,污泥的 Zeta 电位也不断降低,最终完全颗粒化的污泥 Zeta 电位为 -10.1 mV . 在 80 d 后污泥完成完全颗粒化的阶段,颗粒污泥的 Zeta 电位值仍然保持在 -10 mV ,之后在运行到 125 d 的时间内一直保持基本稳定.

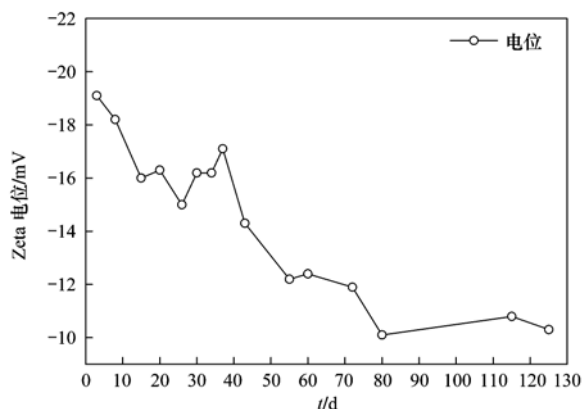


图 5 SBR 运行过程中污泥 Zeta 电位

Fig. 5 Profile of Zeta potential during SBR operation

2.3 反应器运行过程中 Zeta 电位与 EPS 变化之间的关系

从图 6 中可以看出,在整个好氧颗粒培养的整个过程中,随着污泥 Zeta 电位的不断降低,污泥胞外蛋白增长迅速,而胞外多糖基本保持在一个较为稳定的水平. 在开始运行的 30 d 内,随着负荷的提

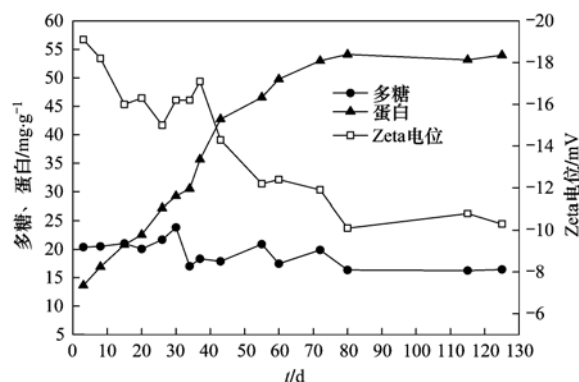


图 6 SBR 运行过程中污泥 Zeta 电位与 EPS 的变化

Fig. 6 Changes of EPS and Zeta potential during SBR operation

升,周期内营养物质供应不断提高,微生物分泌大量的胞外多聚物,胞外蛋白和胞外多糖同时增加. EPS 中多糖从起初的 $20.35 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,稍稍增加至 $23.83 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,蛋白则从 $13.65 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 明显增加至 $29.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 当降低系统进料浓度,进入低负荷阶段运行后,胞外多糖的含量出现了明显的下降,从 $23.83 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 降低到 $17.01 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,而污泥的胞外蛋白仍然保持增长,从 $29.23 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增长到 $30.55 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 在随后的几次降负荷阶段,胞外多糖浓度均有所下降,而蛋白则保持稳步增长的趋势. 在整个颗粒化过程中蛋白/多糖比值从开始的 0.67 增长到 3.31. 运行到 80 d 时,好氧颗粒污泥 EPS 中的蛋白已经增长到 $54.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,多糖则基本稳定并维持在 $16.35 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 颗粒成熟稳定后,多糖和蛋白的浓度相对趋于稳定.

在颗粒化过程中,污泥 Zeta 电位不断降低,EPS 中蛋白组分含量不断增加. 因此,实验也对 SBR 反应器中一个典型反应周期内污泥 Zeta 电位和 EPS 变化情况进行了研究,结果见图 7. COD 在运行 1.5 h 后基本降解完, EPS 的产生主要在富营养阶段. 从图 7 中看出多糖的增长要先于蛋白,在运行到 1 h 时, EPS 中多糖由 $23.39 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加到 25.55

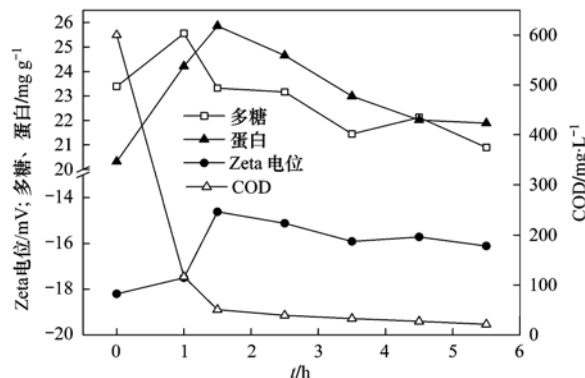


图 7 SBR 一个周期内 COD 和污泥 EPS 的变化

Fig. 7 Change of COD and EPS in one cycle in SBR system

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 随后逐渐减少至 $20.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. EPS 中蛋白含量在 1.5 h 达到最高, 由 $20.32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增长到 $25.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 随后逐渐降低至 $21.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. SBR 系统由于独特的运行方式, 在一个周期内, 微生物经历一个富-贫营养交替的过程. 在刚开始的进料阶段, 由于营养物质充足, 微生物除了将有机物用于自身代谢以外, 还将一部分营养物质以 EPS 的形式储存起来, 所以在一个周期的运行初期 EPS 含量有所增加. 随着有机质的降解, 反应器进入贫营养阶段. 当进水中的有机物被消耗殆尽, 外界碳源不足的时候, 微生物将一部分合成的 EPS 作为碳源降解, 所以使得胞外多糖和蛋白的含量随着运行时间的增加逐渐下降, 多糖和蛋白为污泥的生长和代谢提供碳源和能源.

在一个周期内污泥的 Zeta 电位变化情况与 EPS 在反应器内一个周期的变化有着极大的联系. 从图 7 可以看出, 运行至 1.5 h, 污泥的 Zeta 电位从周期初始阶段的 -18.2 mV 降低至 -15.1 mV , 此时污泥中 EPS 蛋白组分含量最多, 从 $20.32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加至 $25.85 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 随着反应进行, Zeta 电位后逐渐增高到 -16.1 mV , 污泥的蛋白含量也逐渐降低至 $21.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 说明污泥的 Zeta 电位与微生物生长代谢及 EPS 组分含量有着很大的关系.

EPS 做为微生物的代谢产物, 其组分中多糖和蛋白质含量对污泥 Zeta 电位的影响见图 8. 可以看出, 蛋白/多糖比值与 Zeta 电位呈正相关, 相关系数为 0.849. 即 EPS 中 $m(\text{蛋白})/m(\text{多糖})$ 越大, 污泥 Zeta 电位值越低, 说明污泥的 Zeta 电位与蛋白/多糖比值密切相关, 并且污泥 Zeta 电位的降低主要来自于 EPS 中蛋白组分的增加.

3 讨论

3.1 好氧颗粒污泥的生长与 Zeta 电位的关系

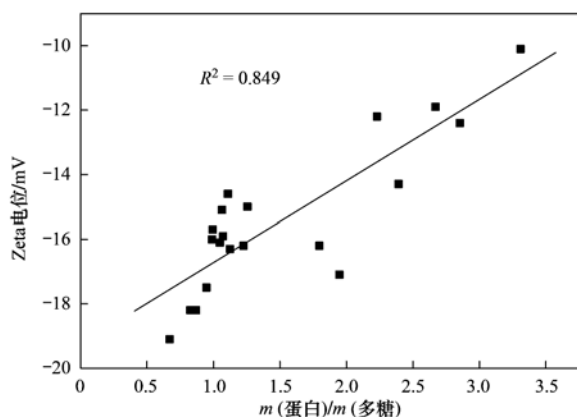


图 8 污泥的 Zeta 电位与蛋白/多糖之间的关系

Fig. 8 Correlation between Zeta potential and PN/PS

好氧颗粒污泥的形成是由细小的絮体污泥不断聚集生长并变成大颗粒的过程. 对于污泥及其所含的微生物来说, 一般认为, 在正常的运行生长条件下, 微生物表面一般带负电^[18]. 根据 DLVO 理论, 微生物细胞之间存在静电斥力, 当具有相同负电性的污泥粒子相互靠近到一定程度就会发生双电层的重叠, 产生静电斥力, 不利于污泥之间聚集. Zeta 电位指的是粒子双电层的电势差, 并且污泥表面电位越高, 则污泥间的静电斥力也越大. 所以 Zeta 电位对污泥的聚集以及颗粒的形成有着重要的作用. 一般絮体污泥的电位在 $-30 \sim -10 \text{ mV}$ 之间^[19]. 杨新萍等^[20]测定好氧颗粒污泥的 Zeta 电位在 $-12.5 \sim -14.1 \text{ mV}$. Song 等^[21]分别利用啤酒废水处理厂的污泥和城市污水厂的污泥接种培养出颗粒, 颗粒的电位分别为 -1.02 mV 和 -4.86 mV . Zhang 等^[22]发现形成颗粒后污泥电位为 -13.3 mV , 比接种时的 -32.4 mV 大大降低. 但是这些报道只是针对污泥或好氧颗粒的特定阶段, 而有关颗粒化过程中 Zeta 电位的系统考察尚不多见.

在本实验中, 对好氧颗粒的形成和完全颗粒化过程中的电位变化进行了较系统的测定分析. 在运行的前 35 d 里, 污泥电位有一定的波动, 在随后的运行阶段, 污泥电位出现稳步下降. 在颗粒化过程中污泥 Zeta 电位从接种时的 -19.1 mV 降至 -10.1 mV . Zeta 电位的降低可减少污泥间的静电斥力, 有利于污泥之间的聚集, 形成稳定的颗粒污泥. 这与颗粒稳定和聚集生长的基本理论是一致的. 在颗粒完全形成阶段及之后的运行期间, 污泥 Zeta 电位也基本保持在 -10 mV 左右的一个较低水平. 污泥电位不断降低并保持相对较低水平, 说明较低的 Zeta 电位有助于好氧颗粒污泥的形成和生长, 这也可能是形成颗粒污泥的重要条件.

3.2 好氧颗粒污泥的 Zeta 电位与 EPS 的关系

好氧颗粒的形成与污泥的微生物生长代谢密切相关, EPS 作为微生物代谢产物, 对污泥的 Zeta 电位也有影响. 一些研究认为, EPS 中胞外多糖是由于微生物细胞进行代谢合成的, 而蛋白等则是因为胞内聚合物分泌或者由于细胞溶解产生的^[23,24]. 胞外蛋白的含量增加可能是因为随着在低负荷下运行, 微生物细胞内源代谢, 细胞溶解, 并且为了维持细胞代谢, 降解存储在 EPS 中的多糖, 促使微生物分泌大量的酶蛋白物质, 从而使 EPS 中的胞外蛋白组分物质含量增加并导致蛋白质/多糖的比值增大. 本实验结果表明, 在整个颗粒化过程中, 多糖的含量一直

维持在较低的含量,而胞外蛋白的含量在不断增加. 污泥 Zeta 电位的降低主要来自于 EPS 中蛋白组分的增加,污泥 Zeta 电位降低与蛋白/多糖比值的增加呈正相关. 这些结果证实好氧颗粒化过程中 Zeta 电位与 EPS 紧密相关.

EPS 含量的增加可以在微生物间起到架桥的作用,促使微生物聚集. 此外,蛋白中的氨基带有正电荷,可以中和一些来自于羟基和磷酸根基团的负电荷,从而降低污泥的表面电位^[25],并且蛋白质还可以与水中的金属离子发生螯合或离子键作用,压缩双电层,降低细胞 Zeta 电位,有利于微生物细胞之间相互碰撞聚集^[7,22]. 一些学者在研究时也发现^[16,26],细胞表面的 EPS 可以降低其表面电荷密度,这进一步说明 EPS 中的蛋白可能通过降低细胞表面的负电性从而降低微生物细胞的 Zeta 电位,从而有利于微生物之间的聚集并形成颗粒. 在本实验中,随着污泥颗粒化过程的进行 EPS 含量增加,胞外蛋白含量增加明显,说明蛋白质组分确实对颗粒表面电荷特性起着很重要的作用. 但是, EPS 中蛋白质的确切组分及其作用,还有待今后更多的实验进行分析、提纯等方面的研究.

4 结论

(1) SBR 系统中好氧颗粒污泥的培养和生长过程中,污泥 Zeta 电位由接种时的 -19.1 mV 逐渐降低至 -10.1 mV ,呈现一个由高到低的下降. 成熟的颗粒基本稳定在较低的电位值约 -10 mV 左右,说明较低的 Zeta 电位是形成好氧颗粒污泥的重要条件.

(2) 颗粒化过程中,污泥中的 EPS 含量不断增加,多糖含量基本变化不大,但蛋白质含量增加明显, $m(\text{蛋白})/m(\text{多糖})$ 从 0.67 增加到 3.31,证实污泥的 Zeta 电位与蛋白/多糖的比值呈正相关.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 竺建荣, 刘纯新. 好氧颗粒活性污泥的培养及理化特性研究[J]. *环境科学*, 1999, **20**(2): 38-41.
- [4] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: Recent advances[J]. *Biotechnology Advances*, 2008, **26**(5): 411-423.
- [5] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. Aerobic granulation in sequential sludge blanket reactor[J]. *Water Science and Technology*, 2002, **146**(4): 13-18.
- [6] 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.
- [7] Sheng G P, Yu H Q, Li X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, **28**(6): 882-894.
- [8] 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.
- [9] Tay J H, Liu Q S, Liu Y. The role of cellular polysaccharides in the formation and stability of aerobic granules[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2001, **33**(3): 222-226.
- [10] 刘燕, 王越兴, 莫华娟, 等. 有机底物对活性污泥胞外聚合物的影响[J]. *环境化学*, 2004, **23**(3): 252-257.
- [11] 王永飞, 张捍民, 王新华, 等. 曝气量对 SBAR 中好氧颗粒污泥特性的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1598-1603.
- [12] Andreadakis A D. Physical and chemical properties of activated sludge floc[J]. *Water Research*, 1993, **27**(12): 1707-1714.
- [13] Schmidt J E E, Ahring B K. Extracellular polymers in granular sludge from different upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1994, **42**(2-3): 457-462.
- [14] Main F A, Jarman T R, Righelato R C. Biosynthesis of extrapolymeric substance by *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Journal of Bacteriology*, 1978, **134**(2): 418-422.
- [15] Forster C F. Factors involved in the settlement of activated sludge-I nutrients and surface polymers[J]. *Water Research*, 1985, **19**(10): 1259-1264.
- [16] Tsuneda S, Jung J, Hayashi H, *et al.* Influence of extracellular polymers on electrokinetic properties of heterotrophic bacterial cells examined by soft particle electrophoresis theory[J]. *Colloids Surface*, 2003, **29**(2-3): 181-188.
- [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] Rouxhet P G, Mozes N. Physical chemistry of the interaction between attached microorganism and their support[J]. *Water Science and Technology*, 1990, **22**: 1-16.
- [19] Horan N J, Eccles C R. Purification and characterization of extracellular polysaccharide from activated sludges[J]. *Water Research*, 1986, **20**(11): 1427-1432.
- [20] 杨新萍, 韩娇, 周立祥. Ca^{2+} 在好氧颗粒污泥形成中的作用[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1269-1273.
- [21] Song Z W, Pan Y J, Zhang K, *et al.* Effect of seed sludge on characteristics and microbial community of aerobic granular sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(9): 1312-1318.

- [22] 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.
- [23] Durmaz B, Sanin F D. Effect of carbon to nitrogen ratio on the composition of microbial extracellular polymers in activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(10): 221-229.
- [24] Mahmoud N, Zeeman G, Gijzen H, *et al.* Solids removal in upflow anaerobic reactors, a review[J]. *Bioresource Technology*, 2003, **90**(1): 1-9.
- [25] 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.
- [26] Wang Z P, Liu L L, Yao H, *et al.* Effects of extracellular polymeric substances on aerobic granulation in sequencing batch reactors[J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(10): 1728-1735.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过20字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于300字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用1,1.1,1.1.1的形式,左起顶格书写,3级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩2格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在3个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市2871信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail: hjks@rcees.ac.cn;网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorus in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DT8	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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

国内外公开发行人