

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的 COD 需求

李冬¹, 曹美忠¹, 郭跃洲¹, 梅宁¹, 李帅², 张杰^{1,2}

(1. 北京工业大学水质科学与水环境恢复工程北京市重点实验室, 北京 100124; 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: 本试验采用 SBR 反应器, 接种成熟的生物除磷颗粒, 通过分阶段改变进水中总磷 (TP) 和 COD 浓度, 研究了不同磷浓度条件下 COD 负荷对生物除磷颗粒系统的影响, 得出不同磷浓度下生物除磷颗粒系统具有良好性能所需最低 COD 浓度。结果表明, 进水 TP 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生物除磷颗粒系统维持良好性能所需最低 COD 浓度为 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TP 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 颗粒粒径和 SVI 分别为 $1020 \mu\text{m}$ 和 $36 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, PN 和 PS 含量 (以 MLSS 计) 分别为 $78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 较低, 颗粒具有较好的结构和性能。进水 TP 浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生物除磷颗粒系统良好除磷性能所需最低 COD 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TP 浓度在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 颗粒粒径和 SVI 分别为 $960 \mu\text{m}$ 和 $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, PN 和 PS 含量分别为 $75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, PN/PS 较低, 颗粒具有较好的结构和性能。整个运行过程中, COD 去除率在 83% 以上, 出水 COD 浓度在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。在不同磷浓度条件下, 随着进水 COD 浓度降低, 微生物分泌 PN 和 PS 含量均减少, PN/PS 增大, 颗粒粒径减小, SVI 增加, 颗粒的结构和性能恶化。

关键词: 生物除磷颗粒; COD 浓度; 去除率; 胞外聚合物; 颗粒粒径; PN/PS

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3247-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712198

COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations

LI Dong¹, CAO Mei-zhong¹, GUO Yue-zhou¹, MEI Ning¹, LI Shuai², ZHANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In this study, the effect of COD loading on a biological phosphorus removal granule system under different phosphorus concentrations was investigated by changing the concentration of total phosphorus (TP) and COD in the influent. The lowest concentration of COD for good performance of the biological phosphorus removal system under different phosphorus concentrations was obtained. The results show that when the concentration of TP was $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the influent, the lowest concentration of COD for good performance of the biological phosphorus removal system was $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The concentration of TP in the effluent was below $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; the particle size and SVI were $1020 \mu\text{m}$ and $36 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively; and the contents of PN and PS (by MLSS) were $78 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Furthermore, the PN/PS was lower and the granules had good structure and performance. When the concentration of TP was $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the influent, the lowest concentration of COD for good performance of the biological phosphorus removal system was $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The concentration of TP in the effluent was below $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; the particle size and SVI were respectively $960 \mu\text{m}$ and $35 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$; and the contents of PN and PS were $75 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Moreover, the PN/PS was lower and the granules had good structure and performance. The removal efficiency of COD was above 83% and the concentration of COD in the effluent was below $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ throughout the operational process. Under different the influent phosphorus concentrations, the contents of PN and PS decreased, PN/PS increased, particle size decreased, SVI increased, and the structure and performance of the biological phosphorus removal granules deteriorated as the COD concentration decreased.

Key words: biological phosphorus removal granules; COD concentration; removal efficiency; EPS; particle size; PN/PS

水体富营养化已经成为全球亟待解决的问题,而磷作为加速水体富营养化的关键因素之一,磷的高效去除是污水处理的主要任务之一^[1]。目前,强化生物除磷工艺以其能耗低、处理成本小、处理效率高等优点得到广泛应用^[2]。该工艺利用聚磷菌在厌氧/好氧交替运行条件下,厌氧向水中释放磷,好氧过量吸收水中的磷,然后通过排出一部分污泥的方式达到除磷的目的^[3,4]。但是,在传统的强化生物

除磷系统中,存在生物量低、易污泥膨胀以及二次释磷等缺点^[5]。颗粒污泥具有生物量高、沉淀性能好以及抗冲击能力强等优点^[6-9],越来越受到研究者的重视,且基于颗粒污泥的强化生物除磷工艺

收稿日期: 2017-12-24; 修订日期: 2018-01-10

基金项目: 北京市青年拔尖团队项目(2014000026833TD02)

作者简介: 李冬(1976~),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为水环境恢复理论及关键技术, E-mail: lidong2006@bjut.edu.cn

被认为是未来最有发展前景的除磷技术^[10, 11]。

近年来,关于进水 COD 负荷对生物除磷颗粒的影响研究有很多报道。Li 等^[12]通过改变进水中 COD 浓度,研究了 COD 负荷对生物除磷颗粒连续流系统的影响,结果表明,当 COD 浓度达到 400 mg·L⁻¹时,由于丝状菌的增殖而导致系统厌氧 COD 和总磷去除率明显降低以及颗粒沉淀能力的恶化。刘小英等^[13]以 SBR 中成熟的生物除磷颗粒污泥为研究对象,探讨进水 COD 浓度对系统稳定性的影响,当进水 COD 浓度由 300 mg·L⁻¹逐渐升高到 500 mg·L⁻¹时,磷去除率由 93% 降低到 88%;当进水 COD 浓度提高到 550 mg·L⁻¹时,磷去除率仅为 63%,此时反应器出水 SS 在 150 mg·L⁻¹以上,颗粒污泥周围丝状菌过度生长,而且菌丝粗壮,颗粒污泥解体。李冬等^[1]通过改变进水中 COD 浓度,在 SBR 中研究了 COD 负荷对生物除磷颗粒系统的影响,当 COD 浓度大于 500 mg·L⁻¹时,PAOs 的新陈代谢能力受到抑制,系统的性能恶化,丝状菌过量繁殖而导致污泥膨胀。生活污水中 COD 浓度经常会有波动,一般为 150~300 mg·L⁻¹。然而,以上所述生物除磷颗粒技术的研究,进水 COD 浓度均在 200 mg·L⁻¹以上,而进水 COD 浓度低于 200 mg·L⁻¹的研究却鲜有报道。因此,在 COD 浓度低于 200 mg·L⁻¹下,研究生物除磷颗粒系统所需最低 COD 浓度是十分必要的。同时,也有利于污水中多余的 COD 进行能源回收,避免能源浪费。

本试验在 SBR 中接种成熟生物除磷颗粒,通过分阶段改变进水总磷(TP)和 COD 浓度,测定系统中 TP 和 COD 的去除性能、颗粒的特性以及胞外聚合物(EPS)等参数的变化,探究不同磷浓度下生物除磷颗粒系统 COD 最低需求量,以期生物除磷颗粒实际应用及能源回收提供基础依据和参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行方式

试验采用由有机玻璃制成的 SBR 反应器,高 50 cm,内径 14 cm,有效容积 6 L。反应器垂直方向每隔 5 cm 设置取样口。反应器内底部装有直径为 8 cm 的曝气盘,通过气体流量计控制曝气强度。

反应器每天运行 4 个周期,每周运行 6 h: 6 min 进水,2 h 厌氧,3 h 好氧,3 min 沉淀,5 min 排水,剩余时间闲置。整个试验过程温度和 pH 均不作控制,水温 15~23℃,pH 为 7.0~8.0。换水比为 2/3,曝气强度为 0.6 L·min⁻¹,污泥浓度控制在

3 000 mg·L⁻¹左右。

1.2 接种污泥与试验用水

接种起始污泥浓度为 3 000 mg·L⁻¹左右的本实验室培养成熟的除磷颗粒污泥, COD 去除率为 85%~90%, TP 去除率 96%~99%。

试验采用自来水配制的人工合成废水,采用丙酸钠为碳源,磷酸二氢钾为磷源,进水 COD 浓度和 TP 浓度由试验阶段决定,其余主要水质指标如表 1 所示。

表 1 进水水质指标

Table 1 Characteristics of the influent	
成分	数值
(NH ₄) ₂ SO ₄	70.8 mg·L ⁻¹
CaCl ₂	30 mg·L ⁻¹
MgSO ₄	40 mg·L ⁻¹
pH	7.2~8.0
温度	15~25℃

1.3 试验参数

试验首先在 TP 浓度为 10 mg·L⁻¹ 条件下探究系统所需最低 COD 浓度;随后将 TP 浓度降低至 6 mg·L⁻¹,再探究系统所需最低 COD 浓度;最后进行系统性能恢复。具体试验阶段如表 2 所示。

表 2 试验参数

Table 2 Operational parameters		
运行阶段	基质浓度/mg·L ⁻¹	
	COD	TP
I (1~14 d)	200	10
II (15~50 d)	150	10
III (51~78 d)	175	10
IV (79~98 d)	175	6
V (99~126 d)	150	6
VI (127~162 d)	125	6
VII (163~205 d)	150	6

1.4 分析方法

COD 和 TP 的测定采用 5B-3B 型 COD 多参数快速测定仪, MLSS、MLVSS、SV₃₀、SVI 等指标均采用国家规定的标准方法^[14]。试验中 pH、DO 和温度的测定均采用 WTW-pH/Oxi 340i 便携式多参数测定仪。

颗粒粒径采用 Mastersize 2000 激光粒度仪测定。EPS 的提取步骤^[15]: 取 25 mL 泥水混合物, 8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min; 去掉上清液后加入 PBS 溶液(50 mmol·L⁻¹ 磷酸钠、150 mmol·L⁻¹ NaCl 及 pH=7) 稀释至原体积; 超声破碎 3 min; 然后 80℃ 水浴加热 30 min, 冷却后 8 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 取上清液测定蛋白质(PN)和多糖(PS), 剩余污泥

测定 MLSS. PN 采用考马斯亮蓝法; PS 采用苯酚硫酸法.

2 结果与讨论

2.1 不同条件下生物除磷颗粒的处理性能

2.1.1 TP 去除性能

图 1 为不同阶段系统中 TP 浓度及去除率的变化情况. 在阶段 I、II、III, 进水 TP 浓度都为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 在阶段 IV、V、VI、VII, 进水 TP 浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 阶段 I 为生物除磷颗粒的适应阶段, 进水 COD 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器运行 14 d, 主要是恢复系统中聚磷菌的活性, 以 TP 去除率达到 96% 以上为聚磷菌活性恢复成功的标志; 该阶段 TP 去除率达到 99%, 出水 TP 浓度在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 低于我国污水综合排放标准一级 A 标准 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 在阶段 II, 进水 COD 浓度为 150

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 去除率不断下降, 在 21 d 到达了最低, TP 去除率为 51%, 出水 TP 浓度达到了 $5.264 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 随后 TP 去除率不断上升, 最后稳定在 80%, 出水 TP 浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 出现这种现象的原因是: 由于进水中的 COD 浓度降低, 聚磷菌合成的聚 β -羟基链烷酸盐 (PHAs) 量降低, 导致聚磷菌中贮存的 PHAs 产生的能量不能满足吸收水中 TP 的能量, 从而限制 TP 的吸收^[16]. 在阶段 III, 进水 COD 浓度为 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由于 COD 浓度的提高, TP 去除率由 80% 大幅度上升至 97%, 同时, 出水 TP 浓度由 $2.081 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 由于进水中 COD 浓度升高, 聚磷菌合成的 PHAs 量升高, 聚磷菌中贮存的 PHAs 产生的能量能满足吸收水中 TP 的能量, 进而使 TP 得到很好地去除. 说明在阶段 II 中, 出水 TP 浓度的上升是由于碳源不足引起的.

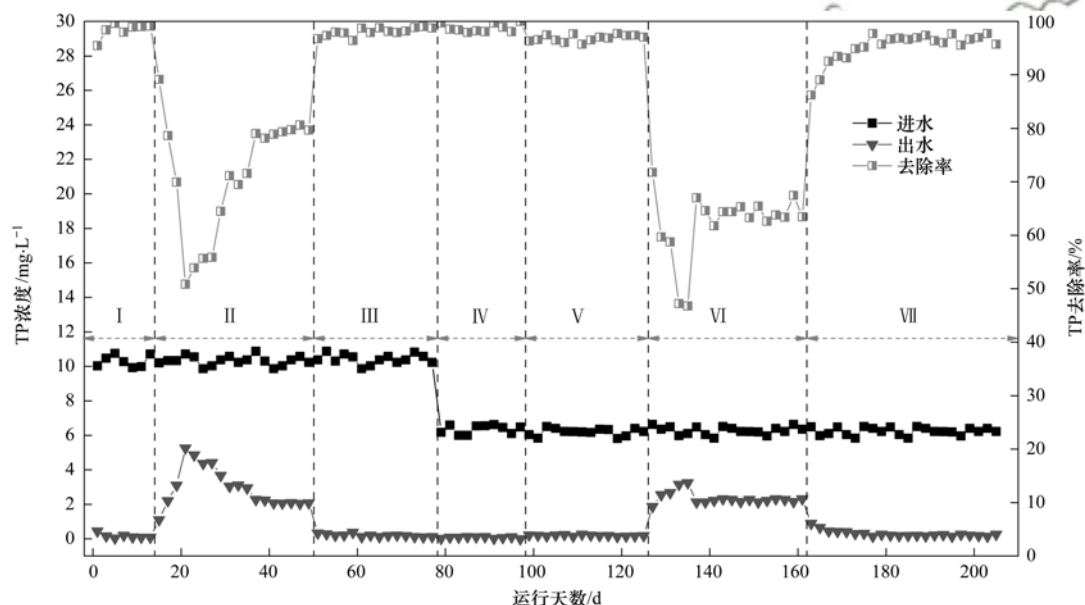


图 1 运行过程中 TP 浓度的变化

Fig. 1 Variation in TP concentration during the operational process

在阶段 IV, 进水 COD 浓度为 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 浓度降低至 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 去除率均在 98% 以上, 且出水 TP 浓度均在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 在阶段 V, 进水 COD 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 去除率略微下降, 在 95% ~ 98% 之间; 出水 TP 浓度也略微有所上升, 在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 在阶段 VI, 进水 COD 浓度降至 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经过 9 天运行, TP 去除率由 97% 大幅度下降到 47%, 出水 TP 浓度达到了 $3.251 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 随后 TP 去除率提高至 64%, 出水 TP 浓度稳定在 $2.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

在阶段 VII, 进水 COD 浓度调回 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此

阶段主要恢复系统的处理性能. 经过 5 d 的运行, 系统中 TP 去除率达到了 93%, 出水 TP 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 说明在阶段 V 中, 出水 TP 浓度的上升是由于碳源不足引起的; 随后, 随着运行时间的推移, TP 去除率略微有所提高, 在 95% 以上, 出水 TP 浓度在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 说明系统的处理性能得到了良好的恢复.

由以上分析可得, 进水 TP 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统维持良好的除磷性能所需最低 COD 浓度为 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 进水 TP 浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统维持良好的除磷性能所需最低 COD 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.1.2 COD 去除性能

在强化生物除磷系统中,聚磷菌通过在厌氧段将有机物转化为聚 β -羟基链烷酸盐(PHAs)贮存在细胞体内达到去除 COD 的目的^[17]. 图 2 为不同阶段系统中 COD 浓度及去除率的变化情况. 从中可以看出,在整个运行过程中,厌氧末期 COD 去除率与总去除率相近,厌氧末期 COD 去除率均

在 82% 以上,总去除率在 83% 以上,厌氧末期 COD 浓度与出水 COD 浓度相近,都在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,远低于我国污水综合排放标准一级 A 标准 ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 整个运行过程中,生物除磷颗粒系统具有良好的 COD 去除性能,也进一步说明在阶段 II、V 中,出水 TP 浓度上升是由于碳源不足而引起的.

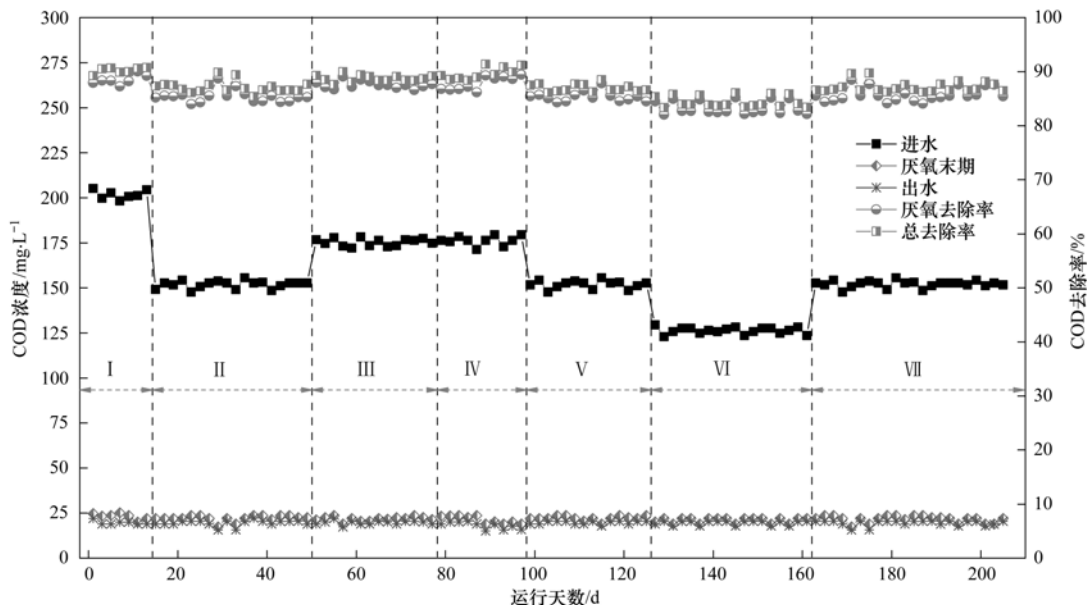


图 2 运行过程中 COD 浓度的变化

Fig. 2 Variation in COD concentration during the operational process

2.2 不同条件下生物除磷颗粒的特性

SVI、MLVSS/MLSS 和颗粒粒径通常被用作颗粒中微生物存活状态的指标. SVI 是表示污泥沉降性的一个重要特征,同时也是颗粒污泥在生物反应器中停留能力的指标,颗粒污泥的 SVI 值越低意味着颗粒污泥的沉降能力越好^[18, 19]; 通常,颗粒粒径越大意味着颗粒沉降速率越大. 因此,本试验通过测定平均粒径、SVI 和 MLVSS/MLSS,评估不同条件下系统中颗粒特性的变化.

如图 3 所示,在阶段 I, MLVSS/MLSS 在 0.86 左右,平均粒径和 SVI 分别稳定在 $1100 \mu\text{m}$ 和 $30 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,系统中生物除磷颗粒具有良好的沉降性能. 在阶段 II, MLVSS/MLSS 下降到 0.80 左右,平均粒径减小到 $990 \mu\text{m}$ 左右, SVI 升高到 $41 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,系统中生物除磷颗粒的沉降性能下降,可能是因为进水 COD 浓度降低而引起系统中微生物吸收的有机物量减少,部分颗粒解体为小颗粒,从而导致 MLVSS/MLSS 降低、平均粒径减小、SVI 升高. 在阶段 III, MLVSS/MLSS 上升到 0.84 左右,平均粒径略微增大,在 $1020 \mu\text{m}$ 左右, SVI 下降到

$36 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,系统中生物除磷颗粒的沉降性能得到一定的恢复. 说明进水 COD 浓度降低会导致 MLVSS/MLSS 降低、平均粒径减小、SVI 升高.

在阶段 IV,平均粒径略微增大, SVI 降低到 $30 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右,颗粒的沉降性能良好. 出现这种现象的原因可能是:进水中 TP 浓度降低,微生物除磷消耗有机物量减少,微生物用于自身生长和合成的有机物量增多. 在阶段 V、VI, MLVSS/MLSS 和平均粒径呈现不断减小的趋势,最后分别稳定在 0.78 和 $890 \mu\text{m}$; SVI 呈现不断上升的趋势,最后稳定在 $46 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$. 在阶段 VII,进水 COD 浓度调回 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,随着运行时间的推移,系统中 MLVSS/MLSS、平均粒径、SVI 逐渐恢复到 0.80、 $960 \mu\text{m}$ 、 $30 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$,与原来进水 COD 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时系统中颗粒的特性相近. 进一步说明进水 COD 浓度降低会导致 MLVSS/MLSS 降低、平均粒径减小、SVI 升高.

由以上分析可得,在不同进水 TP 浓度的条件下,随着进水 COD 浓度降低,系统中生物除磷颗粒的 MLVSS/MLSS、平均粒径呈现减小趋势,而 SVI

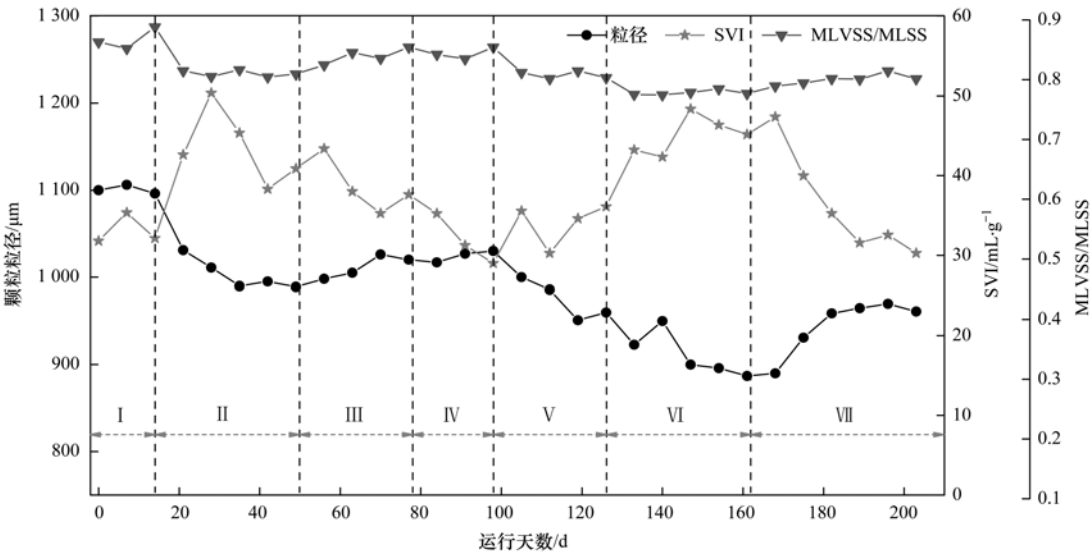


图3 运行过程中粒径、SVI 和 MLVSS/MLSS 的变化

Fig. 3 Variation in particle size, SVI, and MLVSS/MLSS during the operational process

呈现上升趋势,生物除磷颗粒的沉降性能恶化.

2.3 不同条件下 EPS 中 PN 和 PS 的变化

EPS 是由微生物分泌的胞外聚合物黏度物质,可以在微生物细胞表面形成一层保护膜,抵御恶劣环境的破坏;当碳源匮乏时,可以为细胞提供部分碳源和能量^[20,21]. PN 和 PS 是 EPS 的主要成分,且颗粒的特性与 PN/PS 值有关^[22,23]. 因此,本试验探讨了不同阶段 PN、PS 以及 PN/PS 的变化.

图 4 为整个运行过程中 EPS 含量的变化情况. 在进水 TP 浓度为 10 mg·L⁻¹ 的条件下,进水 COD 浓度由 200 mg·L⁻¹ 降低到 150 mg·L⁻¹, PN 和 PS 含量(以 MLSS 计)分别由 85 mg·g⁻¹ 减少到 73

mg·g⁻¹ 和由 44 mg·g⁻¹ 减少到 30 mg·g⁻¹; 随后,进水 COD 浓度升高到 175 mg·L⁻¹, PN 和 PS 含量分别增加到 78 mg·g⁻¹ 和 39 mg·g⁻¹. 当进水 TP 浓度降低到 6 mg·L⁻¹, PN 和 PS 含量都略微升高,分别为 80 mg·g⁻¹ 和 41 mg·g⁻¹. 在进水 TP 浓度为 6 mg·L⁻¹ 的条件下,进水 COD 浓度由 175 mg·L⁻¹ 降低到 150 mg·L⁻¹, PN 和 PS 含量分别由 80 mg·g⁻¹ 减少到 75 mg·g⁻¹ 和由 41 mg·g⁻¹ 减少到 35 mg·g⁻¹; 进水 COD 继续降低到 125 mg·L⁻¹, PN 和 PS 含量分别减少到 70 mg·g⁻¹ 和 27 mg·g⁻¹; 最后进水 COD 浓度增加到 150 mg·L⁻¹, PN 和 PS 含量分别增加到 75 mg·g⁻¹ 和 36 mg·g⁻¹. 随着进水 COD

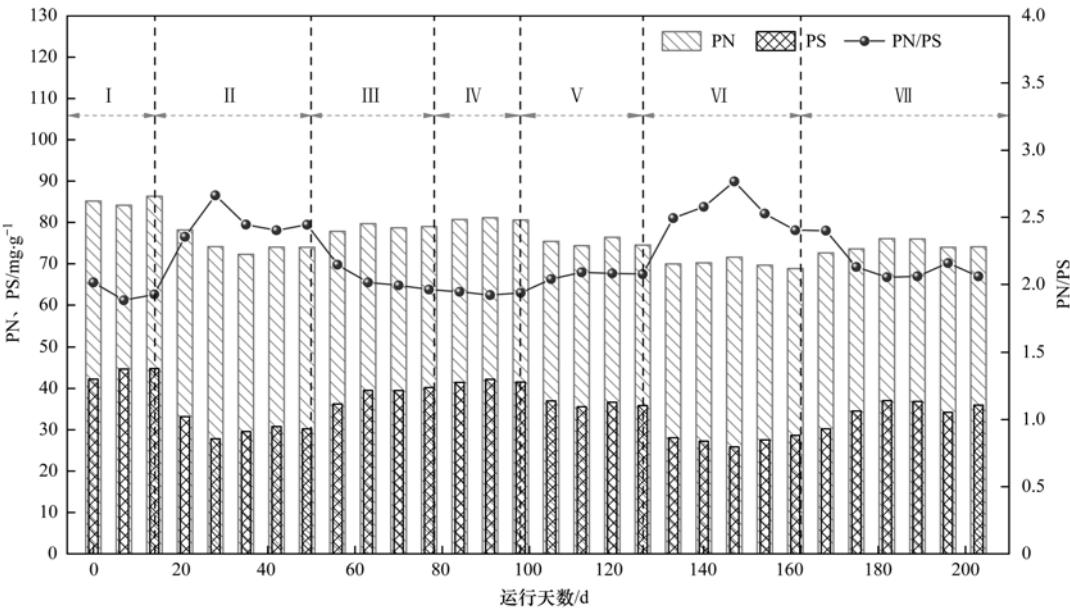


图4 运行过程中 PN、PS 及 PN/PS 的变化

Fig. 4 Variation in PN, PS, and PN/PS during the operational process

浓度降低, PN 和 PS 含量逐渐减少. 有研究表明, 较高的 PN 含量意味着颗粒稳定性较高^[24]; PS 可以作为细胞凝聚和黏附的介质, 进而维持细胞群的结构完整性^[25]. 本试验结果表明, 由于 COD 浓度降低, 抑制微生物分泌 EPS, 导致颗粒的稳定性降低.

从图 4 中明显看出, PN/PS 表现出与 PN、PS 含量变化相反的趋势. 在进水 TP 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下: 进水 COD 浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PN/PS 为 1.9; 进水 COD 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PN/PS 先增加到 2.7, 随后下降到 2.4; 进水 COD 浓度为 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PN/PS 为 2.0. 在进水 TP 浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下: 进水 COD 浓度由 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低到 $125 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PN/PS 由 1.9 上升到 2.5; 进水 COD 浓度调回 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, PN/PS 逐渐恢复到 2.0. 本试验中, 在不同进水 TP 浓度条件下, 随着进水 COD 浓度降低, PN/PS 增大, 导致颗粒粒径减小及 SVI 上升(图 3). 这些结果表明 PN/PS 较高的颗粒可能具有较差的结构和性能, 与已有的研究结果相符^[12, 18, 26].

3 结论

(1) 进水 TP 浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统维持良好的除磷性能所需最小 COD 浓度为 $175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TP 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 进水 TP 浓度为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统维持良好的除磷性能所需最小 COD 浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 TP 浓度在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

(2) 整个运行过程中, 生物除磷颗粒系统的厌氧末期 COD 去除率与总去除率相近, 且厌氧末期 COD 浓度与出水 COD 浓度相近, 都在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

(3) 在不同磷浓度条件下, 随着进水 COD 浓度降低, 微生物分泌 PN 和 PS 含量均减少, PN/PS 增大, 导致颗粒粒径减小及 SVI 上升, 颗粒的结构和性能恶化.

参考文献:

- [1] 李冬, 吕育锋, 张金库, 等. SBR 中曝气强度对除磷颗粒的影响[J]. 化工学报, 2015, **66**(12): 4994-5001.
Li D, Lü Y F, Zhang J K, *et al.* Influence of aeration intensity on phosphorus removal granules in SBR[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(12): 4994-5001.
- [2] Mielczarek A T, Nguyen H T T, Nielsen J L, *et al.* Population dynamics of bacteria involved in enhanced biological phosphorus removal in Danish wastewater treatment plants[J]. Water Research, 2013, **47**(4): 1529-1544.
- [3] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: from micro to macro scale[J]. Water Research, 2007, **41**(11): 2271-2300.
- [4] Zheng X L, Sun P D, Han J Y, *et al.* Inhibitory factors affecting the process of enhanced biological phosphorus removal (EBPR) - a mini-review[J]. Process Biochemistry, 2014, **49**(12): 2207-2213.
- [5] Li D, Lv Y F, Cao M Z, *et al.* Optimized hydraulic retention time for phosphorus and COD removal from synthetic domestic sewage with granules in a continuous-flow reactor[J]. Bioresource Technology, 2016, **216**: 1083-1087.
- [6] Adav S S, Lee D J, Show K Y, *et al.* Aerobic granular sludge: recent advances[J]. Biotechnology Advances, 2008, **26**(5): 411-423.
- [7] 吴昌永, 王然登, 彭永臻. 污水处理颗粒污泥技术原理与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [8] 张小玲, 刘珊, 陈旭. 有机负荷对除磷颗粒污泥的培养及特性的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2030-2035.
Zhang X L, Liu S, Chen X. Effects of organic loading rate on the cultivation and characteristic of granular sludge with phosphorus removal[J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 2030-2035.
- [9] Li D, Lv Y F, Zeng H P, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal using granules in continuous-flow reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **298**: 107-116.
- [10] Fang J, Su B, Sun P D, *et al.* Long-term effect of low concentration $\text{Cu}(\text{VI})$ on P removal in granule-based enhanced biological phosphorus removal (EBPR) system[J]. Chemosphere, 2015, **121**: 76-83.
- [11] Li D, Lv Y F, Zeng H P, *et al.* Effect of sludge retention time on continuous-flow system with enhanced biological phosphorus removal granules at different COD loading[J]. Bioresource Technology, 2016, **219**: 14-20.
- [12] Li D, Lv Y F, Zeng H P, *et al.* Long term operation of continuous-flow system with enhanced biological phosphorus removal granules at different COD loading[J]. Bioresource Technology, 2016, **216**: 761-767.
- [13] 刘小英, 姜应和, 郭超, 等. COD 对生物除磷颗粒污泥稳定性影响研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(4): 807-811.
Liu X Y, Jiang Y H, Guo C, *et al.* Influence of COD on phosphorus removal granular sludge stability[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(4): 807-811.
- [14] 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. 100-124.
- [15] Wang Z P, Liu L L, Yao J, *et al.* Effects of extracellular polymeric substances on aerobic granulation in sequencing batch reactors[J]. Chemosphere, 2006, **63**(10): 1728-1735.
- [16] Broughton A, Pratt S, Shilton A. Enhanced biological phosphorus removal for high-strength wastewater with a low r_{hCOD} : P ratio[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(5): 1236-1241.
- [17] 马斌, 彭永臻, 王淑莹, 等. 强化生物除磷系统中聚磷菌菌群特性[J]. 化工学报, 2010, **61**(5): 1282-1285.
Ma B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Characterization of polyphosphate-accumulating bacteria community structure in enhanced biological phosphorus removal reactor[J]. CIESC Journal, 2010, **61**(5): 1282-1285.
- [18] Yu S J, Sun P D, Zheng W, *et al.* The effect of COD loading on the granule-based enhanced biological phosphorus removal system

- and the recoverability[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **171**: 80-87.
- [19] Zheng X L, Sun P D, Lou J Q, *et al.* Inhibition of free ammonia to the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the recoverability [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**: 343-351.
- [20] Liu H, Fang H H P. Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) of sludges [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **95**(3): 249-256.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Zou J T, Li Y M, Zhang L L, *et al.* Understanding the impact of influent nitrogen concentration on granule size and microbial community in a granule-based enhanced biological phosphorus removal system[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **177**: 209-216.
- [24] Di Iaconi C, Ramadori R, Lopez A, *et al.* Influence of hydrodynamic shear forces on properties of granular biomass in a sequencing batch biofilter reactor[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **30**(2): 152-157.
- [25] Tay J H, Liu Q S, Liu 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.
- [26] Zheng X L, Sun P D, Lou J Q, *et al.* The long-term effect of nitrite on the granule-based enhanced biological phosphorus removal system and the reversibility [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **132**: 333-341.



CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)