

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

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(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌	(5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红	(5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉	(5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧	(5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东	(5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明	(5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲	(5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊	(5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波	(5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志	(5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平	(5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波	(5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标	(5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁	(5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄	(5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭	(5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天	(5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓	(5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博	(5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明	(5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰	(5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强	(5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏	(5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊	(5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐	(5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅	(5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫	(5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军	(5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学	(5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博	(5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清	(5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐	(5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军	(5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅	(5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹	(5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润	(5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳	(5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发	(5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源	(5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝	(5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强	(5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧	(5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正	(5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水	(5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠	(5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲	(5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水	(5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠	(5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田	(5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录		(5740)
《环境科学》征订启事(5343)		
《环境科学》征稿简则(5439)		
信息(5595, 5619, 5638)		

“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性

刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博*

(天津城建大学环境与市政工程学院, 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384)

摘要: 通过运行双室的异养-硫自养联合反应器(下部为异养区、上部为自养区), 去除高浓度高氯酸盐(ClO_4^-)废水. 考察不同进水碳氯比(C/Cl)和 ClO_4^- 浓度条件下, ClO_4^- 的降解特性及出水硫酸盐(SO_4^{2-})浓度. 结果表明, 通过调节进水C/Cl比由2~1, 反应器在36 d快速成功启动; 进水 ClO_4^- 浓度由 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提升至 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 微生物对高浓度 ClO_4^- 表现出良好的耐受性, ClO_4^- 的去除率始终稳定在95%以上; 通过调整C/Cl比至1.2, 可减少自养区 ClO_4^- 负荷, 使出水 SO_4^{2-} 浓度降至 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 此外, 本研究证实了细菌分泌的溶解性有机物中色氨酸和酪氨酸是造成自养区出水TOC升高的原因. 由于采用异养-硫自养联合工艺, 控制碳源的投加, 从而减少了异养区污泥的产量; 同时, 异养区产生碱度可以平衡自养区产生的酸度, 减少了自养过程中碱度的投加; 异养区产生碳酸盐也可以作为自养区的碳源, 实现了异养区和自养区功能上的“互补”.

关键词: 异养-硫自养; 高氯酸盐; 硫酸盐; 碱度; 生物量

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5558-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201804115

Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a “Heterotrophic Sulfur Autotrophic” Combination Process

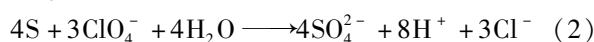
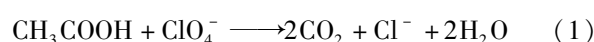
LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, ZHANG Chun-qing, LU Cai-cai, HAN Yi, LI Hai-bo, GUO Jian-bo*

(Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The heterotrophic-autotrophic reactor including two chambers, that is, the lower part of the heterotrophic zone and the upper part of the autotrophic zone, was used to remove highly concentrated perchlorate (ClO_4^-) wastewater. The reduction characteristics of ClO_4^- and the effluent sulfur (SO_4^{2-}) concentration were investigated using different influent ClO_4^- concentrations and C/Cl ratios. By adjusting the influent C/Cl ratio from 2 to 1, the reactor was started up successfully within 36 d. The microorganisms tolerated the high concentration of ClO_4^- ($250\text{--}400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) and the ClO_4^- removal efficiency was higher than 95%. By adjusting the C/Cl ratio to 1.2, the ClO_4^- load in the autotrophic zone was reduced and the SO_4^{2-} concentration in the effluent was controlled below $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The result show that tryptophan and tyrosine materials in soluble microbial products led to the TOC increase in the effluent of the autotrophic zone. The sludge yield was reduced because of heterotrophic and autotrophic processes. The alkalinity produced by the heterotrophic process was used as carbon source for the autotrophic process and to neutralize the acidity produced by the autotrophic process, representing the complementary function and avoiding the addition of alkalinity in the autotrophic process.

Key words: heterotrophic-sulfur autotrophic; perchlorate; sulfate; alkalinity; biomass

随着工业化的发展, 高氯酸盐(ClO_4^-)作为一种普遍存在的污染物被广泛关注. ClO_4^- 是一种无机小分子, 在水体环境中常以化合物的形式存在. 由于 ClO_4^- 的非挥发性和强稳定性的特点, 使得其很难被完全去除^[1]. 目前 ClO_4^- 的去除方法主要包括物化法^[2,3]和生物法^[4]. 其中生物法由于成本低廉, 安全经济有效等优点被广泛地研究^[5,6]. 生物法主要包括以有机物作为电子供体的异养生物还原法和以氢、硫、零价铁等无机物作为电子供体的自养生物还原法^[7,8]. 以乙酸作为电子供体的异养 ClO_4^- 生物还原和以硫作为电子供体的自养 ClO_4^- 生物还原的计量方程如式(1)和(2)所示^[9,10]:



根据方程式(1)可知微生物利用乙酸作为电子供体还原 ClO_4^- 是产生碱度的过程. 根据方程式(2)可知微生物可以利用硫单质与 ClO_4^- 产生硫酸盐(SO_4^{2-})和氯离子, 此过程是一个消耗碱度的过程. 异养 ClO_4^- 生物还原需要有机物作为碳源^[11]

收稿日期: 2018-04-15; 修订日期: 2018-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678387, 51708389); 天津市自然科学基金重点项目(17JCZDJC39300)

作者简介: 刘颖男(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理理论与技术, E-mail: lyn673800825@126.com

* 通信作者, E-mail: jianbguo@163.com

[如式(1)],同时存在碱度和污泥产量过多的问题^[12],这在高浓度 ClO_4^- 去除中,将成为尤为突出的问题. 自养 ClO_4^- 生物还原是以硫作为电子供体[如式(2)],无需外加碳源,可以有效地控制污泥产量^[13],但其处理 ClO_4^- 浓度较低,且在 ClO_4^- 去除过程中需要消耗大量的碱度并产生较高浓度的 SO_4^{2-} ^[14]. 因此,结合两种工艺的优缺点,将两种工艺结合可以有效地避免碳源的过量投加和污泥的过量产出,平衡出水碱度同时减少出水 SO_4^{2-} 浓度.

本实验结合了异养还原 ClO_4^- 的高效性及硫自养还原 ClO_4^- 的经济性的优点,开展了异养-硫自养去除 ClO_4^- 的研究. 通过调控进水 ClO_4^- 浓度与 C/Cl 值,考察了异养-硫自养反应器的启动方式,对运行过程中 ClO_4^- 去除效率、 SO_4^{2-} 产量及出水溶解性有机物、生物量变化方面进行分析,进一步考察其降解 ClO_4^- 的规律,以期为实际废水的应用提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用升流式固定床反应器,材质为有机玻璃,其内径为 10 cm,高度为 40 cm,体积为 4.8 L,实验装置如图 1 所示,中间有圆形透水孔板分隔成上下两个隔室,反应器下部为异养 ClO_4^- 还原室,体积为 2.8 L,内部接种污泥 1.5 L. 上部为硫自养 ClO_4^- 还原室,其内部装填有 2 L 硫和石英砂混合填料,硫和石英砂体积比例为 2:1,粒径均为 2~3 mm,孔隙率为 $(40 \pm 1.5)\%$,有效体积为 0.8 L.

1.2 接种污泥和废水水质特征

接种污泥取自于天津市某污水厂的二沉池回流污泥,经 2 h 沉淀后取 1.5 L 加入异养 ClO_4^- 还原室,接种污泥 VSS 为 $5.25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 硫自养 ClO_4^- 还原室不接种污泥,但是在运行过程中自养区会逐渐挂膜形成生物膜. 实验所用 ClO_4^- 废水采用自来水

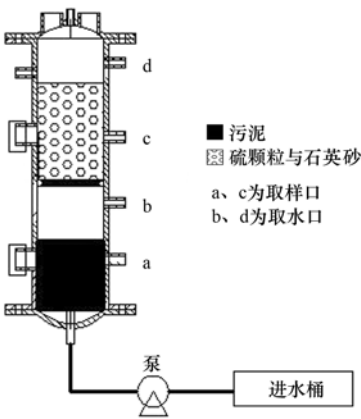


图 1 实验装置示意
Fig. 1 Schematic of the experiment apparatus

人工配置,其主要成分为: $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, $0.125 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; CH_3COONa , $0.08 \sim 0.39 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4Cl , $0.15 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{NaClO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $0.07 \sim 0.56 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; CaCl_2 , $0.01 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 微量元素的配方参考文献[15].

1.3 运行条件

反应器的运行分为 3 个时期包括:驯化期、浓度提升期、 SO_4^{2-} 控制期. 运行参数如表 1 所示,分为 6 个运行阶段共运行 121 d. 第 I~II 阶段为驯化期,其中 I 阶段为异养 ClO_4^- 还原室的驯化期,进水 C/Cl 为 2 ($\text{CH}_3\text{COO}^-/\text{ClO}_4^-$ 的摩尔比),第 II 阶段为硫自养 ClO_4^- 还原室的驯化期,进水 C/Cl 变为 1;第 III~V 阶段为浓度提升期, ClO_4^- 浓度由 $300 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提升至 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,每个阶段提升 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,考察反应器随着 ClO_4^- 浓度的提升,反应器的运行状况及出水指标的变化规律;第 VI 阶段为 SO_4^{2-} 控制期,调节 C/Cl 比为 1.2,以减少进入自养区的 ClO_4^- 浓度,进而控制 SO_4^{2-} 的出水浓度,使得反应器的出水 SO_4^{2-} 浓度低于国家饮用水标准的 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应器运行的每个阶段,均待 ClO_4^- 去除率连续 5 d 稳定在 95% 以上时,改变进水条件进入下一阶段.

表 1 运行参数
Table 1 Operation parameters

运行阶段	运行时间 /d	HRT /h	流量 / $\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}$	ClO_4^- 浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	C/Cl
I	0~18	9	400	50~150~250	2
II	19~53	9	400	250	1
III	54~66	9	400	300	1
IV	67~86	9	400	350	1
V	87~101	9	400	400	1
VI	102~121	9	400	400	1.2

1.4 分析方法

本实验中的每个周期定时检测各离子浓度、碱度等出水指标。 ClO_4^- 、 SO_4^{2-} 的检测采用离子色谱仪(美国戴安 ICS-1500)测定,所有样品分析前均经 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min , 然后经过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤。所用色谱柱为 AS20($4\text{ mm}\times 250\text{ mm}$) 和保护柱 AG20($4\text{ mm}\times 50\text{ mm}$), 采用梯度淋洗, 淋洗液为 KOH($0\sim 10\text{ min}$ 为 $15\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 淋洗, $10\sim 26\text{ min}$ 为 $40\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 淋洗), 淋洗液流速 $1.0\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 柱温为 30°C 。pH 使用梅特勒 ME20 进行测量, 碱度利用酸碱指示剂滴定法测定。TOC 测定采用 TOC 测定仪(日本岛津 TOC-VWP)。三维荧光检测采用三维荧光光度计, 进一步采用 Matlab 软件对三维荧光图进行平行因子的分析。生物量的测定采用重量法。

2 结果与讨论

2.1 反应器对高氯酸盐去除效能

ClO_4^- 的去除效果如图 2 所示。第 I 阶段, 为了加快异养 ClO_4^- 还原室(异养区)的驯化速度, 进水 C/Cl 为 2, ClO_4^- 的浓度由 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐步增至 $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。异养区出水 ClO_4^- 偶有检出, 表明 ClO_4^- 绝大部分是由异养反应去除, 此时碳源充足。运行至 18 d , ClO_4^- 的去除效果稳定在 95% 以上, 异养区驯化成功。第 II 阶段, 进水 C/Cl 降为 1 以启动自

养 ClO_4^- 还原室(自养区)。异养区出水 ClO_4^- 浓度提升至 $90\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 且在初期 $19\sim 24\text{ d}$ 时自养区和异养区的出水 ClO_4^- 浓度无差, 表明此时自养 ClO_4^- 还原的活性较差。自 25 d 开始, 自养区出水 ClO_4^- 浓度开始逐渐减少, 自养高氯酸盐还原菌的活性在不断增强, 运行至 36 d 时出水 ClO_4^- 浓度降至 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 反应器的 ClO_4^- 去除率达到 99%, 自养区驯化成功。第 III~V 阶段, ClO_4^- 的进水浓度由 $300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 增至 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 探究高浓度进水 ClO_4^- 条件下反应器运行状况。第 V 阶段提升至最大, 高氯酸盐浓度为 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 异养区 ClO_4^- 出水为 $(150\pm 20)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 自养区 ClO_4^- 出水基本为 0, 说明反应器运行稳定, 可以抵抗高负荷 ClO_4^- 的冲击。第 VI 阶段, 为了确保自养区 SO_4^{2-} 浓度在国家标准范围内, 改变 C/Cl 为 1.2, 异养区 ClO_4^- 的出水浓度降至 $(75\pm 20)\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 减少了自养区的负荷, 反应器 ClO_4^- 去除率保持在 95% 以上。结果表明, 反应器通过调节进水 C/Cl 比值的方式, 经 36 d 完成异养-硫自养联合反应器的启动, 并且在高浓度 ClO_4^- ($400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下去除效果始终稳定在 95% 以上, 相比于 Sahu 等^[16]运行的单独硫自养填充床反应器, 去除的 ClO_4^- 浓度为 $21.5\sim 22.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此法对高浓度 ClO_4^- 废水的去除更加有效稳定。

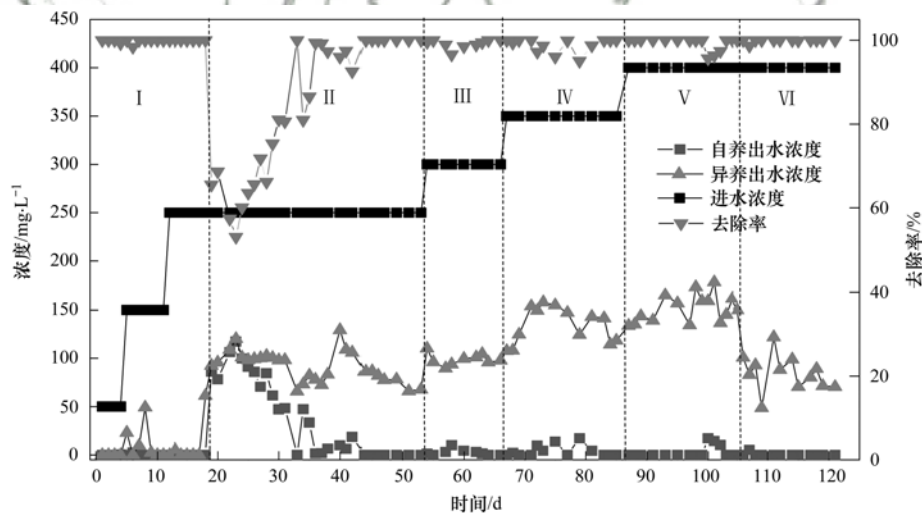


图 2 反应器运行过程中高氯酸盐的变化

Fig. 2 Perchlorate concentration variations during the operation of the reactor

2.2 硫酸盐浓度变化及调控方法研究

反应器中硫自养区在去除 ClO_4^- 的过程中会产生副产物 SO_4^{2-} 。针对出水 SO_4^{2-} 浓度变化分析如图 3 所示。第 I 阶段, 自养区的出水 SO_4^{2-} 逐渐地升

高, 此时自养区基本无 ClO_4^- 去除, 且出水中检测到 SO_4^{2-} 的产生, 这与万东锦等^[17]在缺少电子供体的条件下, 硫颗粒表面的歧化菌会发生硫歧化反应, 导致出水 SO_4^{2-} 浓度增高结果保持一致。第 II

阶段,调整 C/Cl 为 1,自养区处在驯化阶段,硫自养还原菌活性逐渐增加,使得反应生成 SO_4^{2-} 的浓度持续增加至 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 第Ⅲ~Ⅴ阶段,随着 ClO_4^- 进水浓度的增加,出水的 SO_4^{2-} 浓度增加至 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,但是出水 SO_4^{2-} 的浓度超过了国家饮用水标准的 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 因此,在第Ⅵ阶段调整 C/Cl 至 1.2,增加异养区去除 ClO_4^- 的能力,进而减少了自养区的负荷,以控制自养区的 SO_4^{2-} 出水浓度. 持续运行 19 d 后,出水 SO_4^{2-} 波动范围在 $(220 \pm 20) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

如图 3 所示,理论值(A)是根据方程式(2)计算得出的硫自养去除自养区进水 ClO_4^- 所产生的理论 SO_4^{2-} 浓度. 理论值(A)在整个运行阶段明显地

低于出水的 SO_4^{2-} 浓度,且随着进水 ClO_4^- 浓度的增加差值不断减小,表明硫歧化反应持续存在且高浓度的 ClO_4^- 抑制硫歧化作用,这与张超等^[18]关于增加进水 ClO_4^- 浓度及减少 HRT 都会提高硫利用率的研究结果一致. 理论值(B)是根据方程式(2)计算,进水 ClO_4^- 在单独进行硫自养反应时对应的 SO_4^{2-} 浓度. 理论值(B)比较出水 SO_4^{2-} 浓度一直较高,表明异养-硫自养联合去除 ClO_4^- 相比于单独的硫自养反应,很大程度上减少出水 SO_4^{2-} 浓度. 因此,异养-硫自养联合工艺相比于单独的异养工艺节省了碳源的投加,而相比单独的自养工艺可以有效地控制出水 SO_4^{2-} 浓度. 由此说明异养-硫自养结合去除 ClO_4^- 工艺具有经济性和安全性.

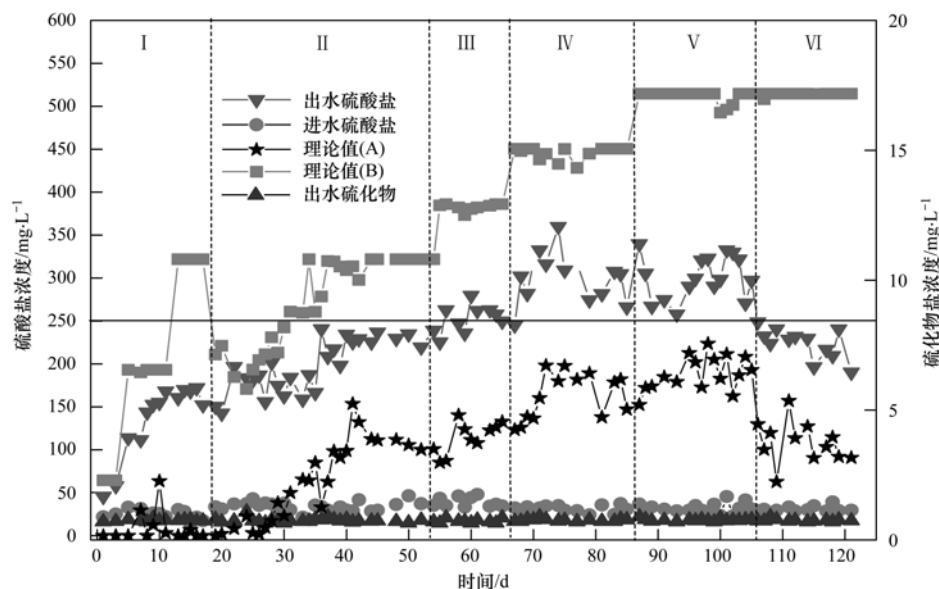


图 3 反应器运行过程中硫酸盐的变化

Fig. 3 Variations of the sulfate concentration during the operation of the reactor

2.3 溶解性有机物及三维荧光变化特性

在处理高浓度的 ClO_4^- 废水过程中,出水有机物的变化是一个需要关注的指标^[19]. 在浓度提升期,待每个阶段反应器运行稳定后取一定量的出水混匀,对其溶解性有机物进行测定分析,如图 4 所示. 其中,总碳(TC)为有机碳(TOC)与无机碳(IC)之和. 结果表明:①异养区与自养区的出水 TC 浓度都是增加的趋势,这是由于进水有机物的不断增加,使得出水的 TC 增加. ②异养区的 IC 浓度远高于自养区,这是由于异养 ClO_4^- 还原反应产生 CO_2 ,使得出水 IC 升高,而后 CO_2 进入自养区作为无机碳源被自养微生物所利用,使得自养区出水 IC 下降. ③自养区的 TOC 出水浓度高于异养区,且出水乙酸钠(TOC)浓度一直较低,可能是由于溶解性

有机物的影响^[20].

生物污水处理中溶解性的有机物(TOC)的主要成分是溶解性的微生物产物(SMP)^[21,22]. 根据董春

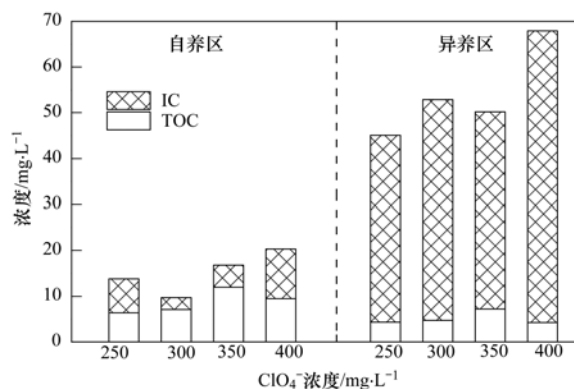


图 4 反应器出水有机物变化

Fig. 4 Variations of effluent organic matter in the reactors

娟等^[23]的研究结果,微生物的生长代谢、饥饿刺激以及环境中基质缺乏都会产生 SMP. 自养区出水 TOC 较高的原因可能是由于:异养区在有机物缺乏的情况下,饥饿刺激会分泌大量 SMP,但其分泌的 SMP 不会被异养微生物完全去除,继而剩余部分 SMP 进入自养区,自养微生物对这些 SMP 去除量较少,并且生长代谢也会分泌部分 SMP 从而使得出水 TOC 浓度进一步增高. 为了验证这个推测,进一步对不同时期的出水有机物种类做了三维荧光的测定. 如图 5 所示,自养区与异养区的荧光物质主要集中在 3 个区域(E_x/E_m , nm): 200 ~ 230/300 ~ 350、250 ~ 300/300 ~ 350、250 ~ 350/380 ~ 500,其

主要成分为酪氨酸物质、色氨酸类物质、富里酸类物质和水溶性腐殖酸^[24]. 由图 5 可以看出自养区色氨酸物质、酪氨酸物质的峰强度要高于异养区峰度. 进一步采用 Matlab 软件对三维荧光图进行平行因子的分析,分析结果如图 6 所示,发现异养区和自养区各阶段出水中富里酸和腐殖质类物质含量较低,蛋白类的酪氨酸和色氨酸含量较多. 4 种物质对应总含量均为自养区较高,且主要是由于酪氨酸类和色氨酸类物质的差距造成的. 其中,蛋白、多糖、腐殖质等物质是 SMP 的主要成分^[25],由此验证了细菌分泌 SMP 造成自养区出水 TOC 较异养区偏高的推测.

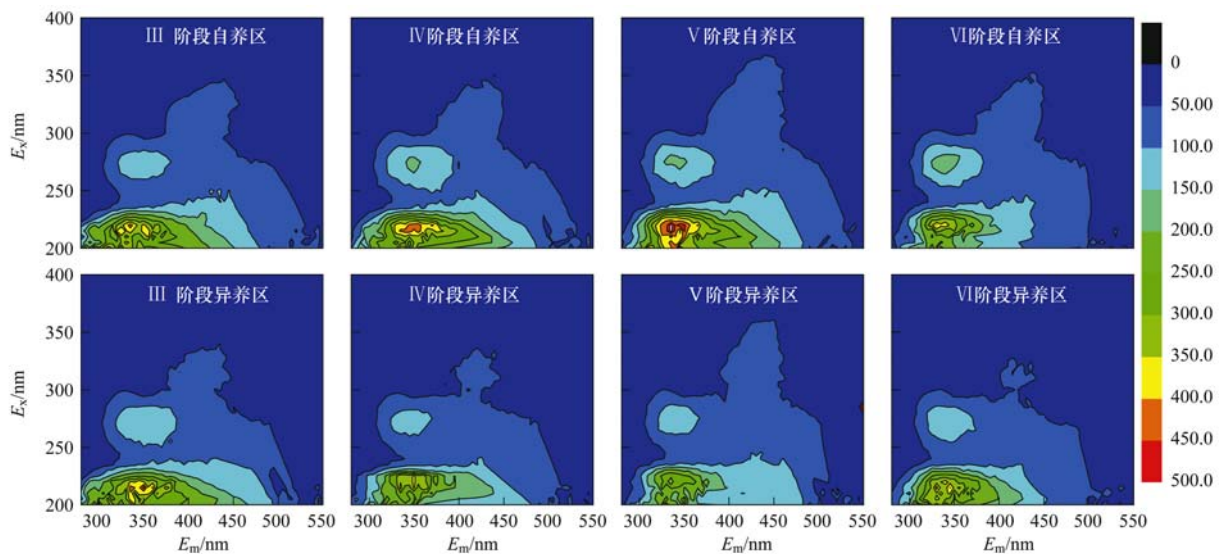


图 5 反应器三维荧光变化

Fig. 5 Variations of the 3-D fluorescence analysis in the reactors

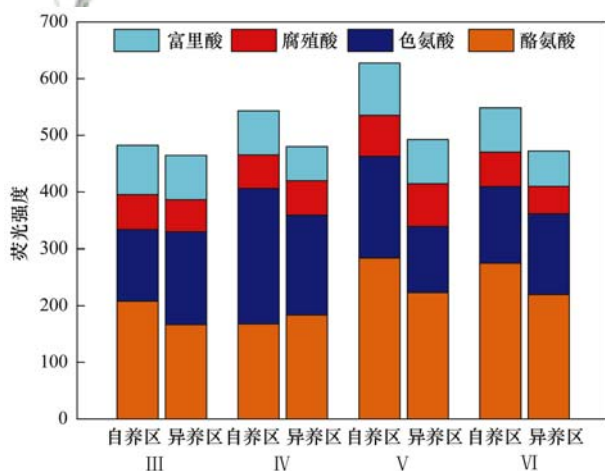


图 6 平行因子分析三维荧光图

Fig. 6 The 3-D fluorescence diagram of parallel factor analysis

2.4 碱度变化分析

在反应器去除 ClO_4^- 的过程中,碱度(以 CaCO_3 计)也随之变化,如图 7 所示. 本研究以 CH_3COONa

为电子供体,根据方程式(1)知,以醋酸盐为电子供体的异养 ClO_4^- 反应降解 1 mol ClO_4^- 需要消耗 1 mol H^+ ,从而产生碱度. 根据方程式(2)知,硫自

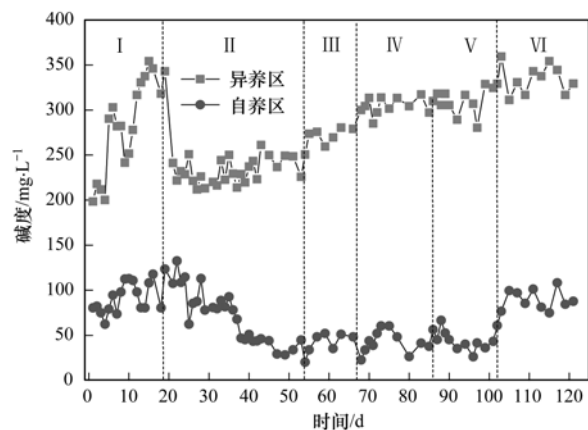


图 7 反应器运行过程中碱度的变化

Fig. 7 Alkalinity concentration variations during the operation of the reactor

养反应去除 1 mol ClO_4^- 需要消耗碱度, 产生 $8/3$ mol H^+ . 第 I 阶段, 进水 ClO_4^- 和有机物的浓度升高, 异养区的碱度随之升高; 自养区出水碱度相对异养区较小, 主要是由于硫歧化作用产生 H^+ , 消耗部分碱度. 第 II 阶段, 进水碳源降低, 异养区出水碱度降低. 此时, 自养区的碱度降低, 是由于自养区还原 ClO_4^- 的能力不断增强, 消耗了一部分异养区的碱度. 第 III ~ V 阶段, 进水有机物负荷增加, 异养区产碱能力增加. 自养区 ClO_4^- 还原菌的活性增加, 并且能够持续地消耗异养区的碱度, 使出水碱度稳定在 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 第 VI 阶段, 增加异养区碳源浓度, 自养区的 ClO_4^- 负荷降低造成消耗碱度能力降低, 使碱度上升, 最终出水碱度稳定在 $(80 \pm 10) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 运行期间, 反应器通过改变进水碳源浓度, 实现了对出水碱度的调控; 通过异养区和自养区功能上的“互补”, 避免了碳酸盐碱度的投加, 从而节省了运行成本.

2.5 生物量变化分析

对反应器自养区和异养区运行过程中的生物量的变化进行监测, 结果如图 8 所示. 异养区在运行初期至 13 d (第 I 阶段) 时, 反应器生物量 (VSS) 下降, 这主要是由于水流的冲刷和 ClO_4^- 废水的筛选造成细菌的流失, 使得 VSS 减少; 随后运行至 49 d (第 II 阶段), 由于 C/Cl 降为 1, 异养区碳源不足, 限制了微生物的增殖, 使得微生物量维持在比较稳定的状态, 并使得 SS 不断增加; 第 III ~ VI 阶段, 由于进水碳源的增加, 异养区生物量在缓慢提升, 最终 VSS 达到 $7.19 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 异养区在运行期间由于碳源的不足, 使得其生物量增速较慢, 污泥产量也相

应较少.

由于自养区没有进行污泥接种, 所以起初 VSS 为 0. 随后运行至 17 d (第 I 阶段), 由于异养区中的污泥随水流进入自养区被填料截留, 使得自养区 VSS 初步上升, 但由于其为异养区淘汰污泥活性较差, 使得 SS 值较高生物占比较少, 且其存在形态为污泥形态. 随后进入自养区启动阶段, 自养区 VSS 迅速增加, 且 SS 所占比重在不断减小. 运行至 120 d (第 VI 阶段), 自养区填料上生成许多黄褐色生物膜, 自养区 VSS 达到 $9.73 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, VSS 占比达到 69.8%, 生物膜增长较快, 使得自养区高氯酸盐还原菌保持较高的活性.

3 结论

(1) 在“异养-硫自养”组合工艺中, 通过控制进水 C/Cl 为 2 (碳源足量) 启动异养区, 随后, 降低进水 C/Cl 至 1 (碳源不足) 以启动硫自养区, 可以在 36 d 成功启动“异养-硫自养”组合工艺.

(2) 当 $\text{C/Cl} = 1.2$ 、 $\text{HRT} = 9 \text{ h}$ 时, “异养-硫自养”组合工艺的运行效果最佳. 此时, 反应器对 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的高浓度 ClO_4^- 去除效果始终稳定在 95% 以上, 并有效地控制出水 SO_4^{2-} 浓度低于国家标准的 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 反应器异养区产生的碱度可被自养区利用, 从而实现了功能上的“互补”, 避免了额外碱度的投加. 运行期间, 异养区生物量增速缓慢, 实现了污泥的减量化; 自养区生物挂膜效果较好, 并且有很强的处理性能.

参考文献:

- [1] Kucharzyk K H, Crawford R L, Paszczynski A J, *et al.* Maximizing microbial degradation of perchlorate using a genetic algorithm: media optimization [J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, **157**(1): 189-197.
- [2] 王红宇, 刘艳. 类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2585-2589.
Wang H Y, Liu Y. Adsorption of perchlorate by calcined Mg/Zn/Al layered double hydroxides [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2585-2589.
- [3] Hou P, Yan Z, Cannon F S, *et al.* Enhancement of perchlorate removal from groundwater by cationic granular activated carbon: effect of preparation protocol and surface properties [J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 756-763.
- [4] Sun J, Dai X H, Peng L, *et al.* A biofilm model for assessing perchlorate reduction in a methane-based membrane biofilm reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **327**: 555-563.
- [5] 陶华强, 邵冬海, 张超, 等. 硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**

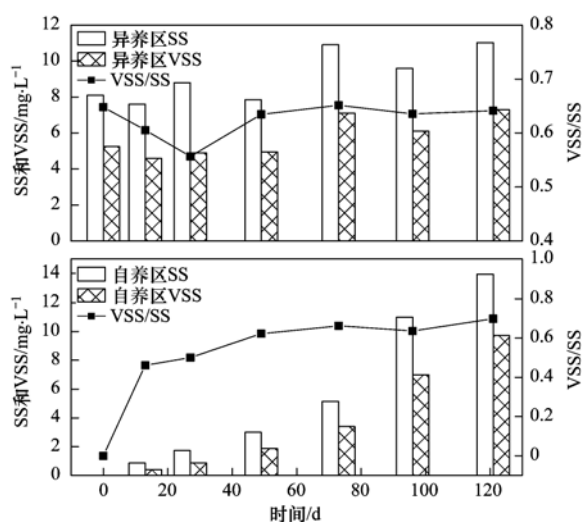


图 8 反应器运行过程中生物量的变化

Fig. 8 Biomass variations during the operation of the reactor

- (2): 811-818.
- Tao H Q, Shao D H, Zhang C, *et al.* Effect of sulfur to quartz sand ratios on the removal of high-concentration perchlorate in packed-bed reactors[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 811-818.
- [6] 王蕊, 刘菲, 陈楠, 等. 树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2704-2710.
- Wang R, Liu F, Chen N *et al.* Perchlorate removal from underground water by anaerobic biological reduction with Bark [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(7): 2704-2710.
- [7] Wang Z C, Gao M C, Zhang Y, *et al.* Perchlorate reduction by hydrogen autotrophic bacteria in a bioelectrochemical reactor[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, **142**: 10-16.
- [8] Ghosh A, Pakshirajan K, Ghosh P K. Perchlorate degradation using an indigenous microbial consortium predominantly *Burkholderia* sp. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **187**(1-3): 133-139.
- [9] Nor S J, Lee S H, Cho K S, *et al.* Microbial treatment of high-strength perchlorate wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 835-841.
- [10] Ju X M, Sierra-Alvarez R, Field J A, *et al.* Microbial perchlorate reduction with elemental sulfur and other inorganic electron donors[J]. *Chemosphere*, 2008, **71**(1): 114-122.
- [11] Ontiveros-Valencia A, Tang Y, Krajmalnik-Brown R, *et al.* Perchlorate reduction from a highly contaminated groundwater in the presence of sulfate-reducing bacteria in a hydrogen-fed biofilm [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2013, **110**(12): 3139-3147.
- [12] Brown J C, Snoeyink V L, Raskin L, *et al.* The sensitivity of fixed-bed biological perchlorate removal to changes in operating conditions and water quality characteristics[J]. *Water Research*, 2003, **37**(1): 206-214.
- [13] 谢杰, 杨志泉, 陈兵, 等. 硫自养菌降解还原高氯酸盐的优化控制研究[J]. *水处理技术*, 2012, **38**(6): 32-35, 39.
- Xie J, Yang Z Q, Chen B, *et al.* The optimal conditions study of perchlorate reduction by autotrophic bacteria using elemental sulfur[J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, **38**(6): 32-35, 39.
- [14] Ontiveros-Valencia A, Tang Y, Krajmalnik-Brown R, *et al.* Managing the interactions between sulfate-and perchlorate-reducing bacteria when using hydrogen-fed biofilms to treat a groundwater with a high perchlorate concentration [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 215-224.
- [15] 张媛媛, 郭延凯, 张超, 等. 非水溶性醌加速菌 GWF 生物还原高氯酸盐的研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 988-993.
- Zhang Y Y, Guo Y K, Zhang C, *et al.* Effect of non-dissolved Quinone on perchlorate reduction by strain GWF [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 988-993.
- [16] Sahu A K, Conneely T, Nüsslein K R, *et al.* Biological perchlorate reduction in packed bed reactors using elemental sulfur [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(12): 4466-4471.
- [17] 万东锦, 刘永德, 樊荣, 等. 硫自养填充床生物反应器去除水中的高氯酸盐[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(11): 5267-5272.
- Wan D J, Liu Y D, Fan R, *et al.* Sulfur-autotrophic reduction of perchlorate from aqueous solution using a packed bed reactor[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(11): 5267-5272.
- [18] 张超, 陶华强, 宋圆圆, 等. 硫自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 247-252.
- Zhang C, Tao H Q, Song Y Y, *et al.* Characteristics of perchlorate reduction and analysis of consortium structure in a sulfur-based reactor at a high perchlorate concentration [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 247-252.
- [19] 李祥, 马航, 黄勇, 等. 异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(7): 2646-2651.
- Li X, Ma H, Huang Y, *et al.* Characteristics of a combined heterotrophic and sulfur autotrophic denitrification technology for removal of high nitrate in water [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(7): 2646-2651.
- [20] Ucar D, Cokgor E U, Sahinkaya E, *et al.* Simultaneous nitrate and perchlorate removal from groundwater by heterotrophic-autotrophic sequential system [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, **116**: 83-90.
- [21] 金鹏康, 陈飞, 章佳昕, 等. 活性污泥胞外聚合物的分层组分及溶解性微生物代谢产物的特性[J]. *环境化学*, 2015, **34**(7): 1323-1328.
- Jin P K, Chen F, Zhang J X, *et al.* Characteristics of the stratification components of extracellular polymeric substances and soluble microbial products in activated sludge[J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(7): 1323-1328.
- [22] 杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 等. 好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 1325-1332.
- Yang D, Liu D F, Du L Q, *et al.* Characterization composition of soluble microbial products in an aerobic granular sludge system [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1325-1332.
- [23] 董春娟, 吕炳南. 污水生物处理中的溶解性微生物产物(SMP)[J]. *中国给水排水*, 2004, **20**(1): 22-25.
- Dong C J, Lü B N. Soluble microbial product (SMP) in biological treatment of wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2004, **20**(1): 22-25.
- [24] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [25] Zhang D Q, Zhou Y, Bugge T V, *et al.* Soluble microbial products (SMPs) in a sequencing batch reactor with novel cake filtration system[J]. *Chemosphere*, 2017, **184**: 1286-1297.

CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)