

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第4期

Vol.38 No.4

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

西宁近郊大气氮干湿沉降研究	许稳, 金鑫, 罗少辉, 冯兆忠, 张霖, 潘月鹏, 刘学军 (1279)
兰州春夏季 PM ₁₀ 碳组分昼夜变化特征与来源分析	马丽, 余晔, 王博, 赵素平, 李刚 (1289)
海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征	王璐, 刘子锐, 温天雪, 苗红妍, 王跃思 (1298)
2015年北京城区大气 PM _{2.5} 中 NH ₄ ⁺ 、NO ₃ ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 及前体气体的污染特征	丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 王焱, 张博韬, 石爱军, 杨懂艳, 常森 (1307)
北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险	齐丽, 任玥, 刘爱民, 黄业茹, 赵震, 王江, 李泓 (1317)
北京和保定地区大气细颗粒物中可培养细菌的种群特征	胡亚东, 马安周, 吕鹏翼, 张杨, 庄国强 (1327)
基于实时交通数据的南京市主次干道机动车排放特征分析	李笑语, 吴琳, 邹超, 张意, 毛洪钧, 荆博宇 (1340)
过渡金属掺杂对铜锡烧绿石催化碳烟燃烧性能的影响	李曦峰, 孙宇琦, 王仲鹏, 牟宗刚, 崔兆杰 (1348)
南水北调中线北京段水质状况分析	徐华山, 赵磊, 孙昊苏, 任玉芬, 丁涛, 常帅, 王海东, 李森, 果钊 (1357)
三峡前置库汉丰湖试运行年水文水质变化特征	杨兵, 何丙辉, 王德宝 (1366)
基于偏最小二乘模型的河流水质对土地利用的响应	李琳琳, 张依章, 唐常源, 郑磊, 孟伟, 卢少勇, 敦宇 (1376)
抚仙湖夏季热分层时期水温及水质分布特征	王琳杰, 余辉, 牛勇, 牛远, 张有林, 刘倩, 吉正元 (1384)
千岛湖溶解氧与浮游植物垂向分层特征及其影响因素	俞焰, 刘德富, 杨正健, 张佳磊, 徐雅倩, 刘晋高, 严广寒 (1393)
高通量测序技术研究辽河真核浮游藻类的群落结构特征	王靖淇, 王书平, 张远, 林佳宁, 高欣, 臧小苗, 赵茜 (1403)
三门湾近海有机污染对浮游细菌群落的影响	戴文芳, 郭永豪, 郁维娜, 熊金波 (1414)
沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化	金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 金漫彤, 李非里 (1423)
广州南沙红树林湿地水体和沉积物中有机氯农药的残留特征	丁洋, 黄焕芳, 李绘, 罗杰, 郑煌, 孙焰, 杨丹, 张原, 祁士华 (1431)
太湖西岸河网沉积物中重金属污染特征及风险评价	边博, 周燕, 张琴 (1442)
锁磷剂对杭州西湖底泥磷释放的控制效果	朱广伟, 李静, 朱梦圆, 龚志军, 许海, 杨桂军, 张运林, 秦伯强 (1451)
超滤处理东江水不可逆膜污染物的识别和活性炭对其吸附去除	杨海燕, 王灿, 鄢忠森, 李冬平, 赵焱, 瞿芳术, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1460)
UV/SPS 降解水中三氯生的效能及动力学	李青松, 李学艳, 姚宁波, 骆靖宇, 李国新, 陈国元, 高乃云 (1467)
真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素	韩慧丽, 王宏杰, 董文艺 (1477)
g-C ₃ N ₄ 协同光催化还原 Cr(VI) 及氧化磺基水杨酸	李莉莉, 陈翠柏, 兰华春, 刘菲, 安晓强 (1483)
锆改性硅藻土吸附水中磷的研究	范艺, 王哲, 赵连勤, 吴德意 (1490)
3 种常规消毒方法对磺胺类抗性基因削减效果的比较	郑吉, 周振超, 陈芳, 陈涛, 魏媛媛, 韩玥, 陈红 (1497)
典型生活污水处理工艺对雌激素效应的去除	张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1506)
SRT 对酵母-SBR 处理油脂废水稳定性的影响	吕文洲, 张树林, 乔宇祥, 刘英 (1513)
分散染料 neocron black (NB) 的生物降解特性	杨波, 丁凤友, 徐辉, 李方, 田晴, 马春燕 (1520)
多聚磷酸盐激酶基因在污水生物除磷中的功能	南亚萍, 周国标, 袁林江 (1529)
生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程	付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 王会芳 (1536)
厌氧氨氧化反应器脱氮性能及细菌群落多样性分析	曹雁, 王桐屿, 秦玉洁, 韩彬, 任君怡 (1544)
内环境调节层对厌氧生物反应器填埋场中氮转化的影响	何正坤, 宋博宇, 朱南文, 董军 (1551)
矿化垃圾中 Fe(III) 还原耦合 CH ₄ 厌氧去除特性	王立立, 何婷, 龙焰, 刘常宝 (1558)
应用铅同位素示踪研究泉州某林地垂直剖面土壤中重金属污染及来源解析	孙境蔚, 于瑞莲, 胡恭任, 苏光明, 王晓明 (1566)
畜禽粪便有机肥中重金属在土壤剖面中积累迁移特征及生物有效性差异	何梦媛, 董同喜, 茹淑华, 苏德纯 (1576)
山东省农田土壤多环芳烃的污染特征及源解析	葛蔚, 程琪琪, 柴超, 曾路生, 吴娟, 陈清华, 朱祥伟, 马东 (1587)
江汉平原典型土壤环境中有机磷农药的分布特征及影响因素	王建伟, 张彩香, 潘真真, 廖小平, 刘媛, 吕曲, 汤蜜 (1597)
基于生物有效性的农田土壤磷素组分特征及其影响因素分析	蔡观, 胡亚军, 王婷婷, 袁红朝, 王久荣, 李巧云, 葛体达, 吴金水 (1606)
秸秆还田对外源氮在土壤中转化及其微生物响应的影响	陈珊, 丁咸庆, 祝贞科, 王娟, 彭佩钦, 葛体达, 吴金水 (1613)
生物炭输入对城郊农业区农田地表反照率及土壤呼吸的影响	张阳阳, 胡学玉, 邹娟, 张迪, 陈威, 王向前, 陈窈君, 刘扬 (1622)
淹水水稻土消耗 N ₂ O 能力及机制	王玲, 邢肖毅, 秦红灵, 刘毅, 魏文学 (1633)
不同污水处理工艺非二氧化碳温室气体的释放	李惠娟, 彭党聪, 刘文博, 姚倩, 卓杨 (1640)
施用不同污泥堆肥品对土壤温室气体排放的影响	杨雨滢, 易建婷, 张成, 陈宏, 木志坚 (1647)
不同镉水平下纳米沸石对土壤 pH、CEC 及 Cd 形态的影响	迟苏琳, 徐卫红, 熊仕娟, 王卫中, 秦余丽, 赵婉伊, 张春来, 李彦华, 李桃, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1654)
不同作物对外源硒动态吸收、转运的差异及其机制	彭琴, 李哲, 梁东丽, 王梦柯, 郭璐 (1667)
褪黑素对水稻幼芽镍胁迫的缓解作用	刘仕翔, 黄益宗, 罗泽娇, 黄永春, 蒋航 (1675)
不同形态磺胺类药物在根-土界面的空间分布及毒性评价	金彩霞, 司晓薇, 王万峰, 王春峰, 王子英, 张琴文, 王婉 (1683)
三峡库区消落带沉积物对鱼体富集率的影响	孙松, 李楚娴, 张成, 王永敏, 王定勇 (1689)
重庆市居民头发重金属富集特征及相关性分析	何明靖, 李琦, 王登祥, 赵佳渊, 杨婷 (1697)
16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性	杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (1704)
石墨烯掺杂聚苯胺阳极提高微生物燃料电池性能	黄力华, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (1717)
美国污染场地清理的风险评估简介及政策制定	容跃 (1726)
《环境科学》征稿简则 (1505) 《环境科学》征订启事 (1682) 信息 (1339, 1459, 1612)	

真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 影响因素

韩慧丽, 王宏杰*, 董文艺

(哈尔滨工业大学深圳研究生院土木与环境工程学院, 深圳市水资源利用与环境污染控制重点实验室, 深圳 518055)

摘要: 通过试验, 考察了亚硫酸盐浓度、pH 值、全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS) 初始质量浓度及共存物质对真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 的影响。结果表明, 亚硫酸盐浓度的增加有利于提高活性物种水合电子的量, PFOS 降解率及脱氟率均随之提高, 亚硫酸盐浓度从 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PFOS 降解率及脱氟率分别从 45% 及 40% 提高至 97% 及 63%; 随着原水 pH 值的升高, 水合电子的生成量也随之增加, PFOS 的降解率及脱氟率均提高, 且脱氟率对 pH 值的变化更敏感; PFOS 初始质量浓度的提高降低了 PFOS 的降解率及脱氟率, 但 PFOS 的绝对降解量却大幅提高, 当 PFOS 初始质量浓度从 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PFOS 在 4 h 内的降解量提高了约 50 倍, 这主要是由于高污染物浓度条件下水合电子的利用率较高; Cl^- 或 HCO_3^- 的存在对 PFOS 降解率影响较小, 但对脱氟的影响较为明显, 在试验研究的浓度范围内, PFOS 脱氟率随 Cl^- 浓度的增加而提高, 随 HCO_3^- 浓度的增加呈现先升高后降低的规律; 腐殖酸的存在屏蔽了部分用于光化学反应的光, 而且可以捕获体系的活性物种, 从而降低了降解率及脱氟率。

关键词: 全氟辛烷磺酸(PFOS); 真空紫外-亚硫酸盐法; 水合电子; 影响因素; 光化学还原

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)04-1477-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201609204

Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV- SO_3^{2-}

HAN Hui-li, WANG Hong-jie*, DONG Wen-yi

(Shenzhen Key Laboratory of Water Resource Application and Environmental Pollution Control, School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The objective of this experiment was to investigate the influence of SO_3^{2-} dosage, pH value, initial perfluorooctane sulfonate (PFOS) concentration as well as coexisting substances on the degradation and defluorination of PFOS by VUV- SO_3^{2-} process. The results indicated that the increase of SO_3^{2-} dosage could lead to rise in the concentration of active species hydrated electron(e_{aq}^-) and thus enhance the degradation and defluorination of PFOS. As the concentration of SO_3^{2-} increased from $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ to $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, the degradation and defluorination rates of PFOS increased from 45% and 40% to 97% and 63%, respectively. The degradation and defluorination of PFOS were also enhanced with the increment of the solution pH values, and the defluorination was more sensitive to the pH values. In addition, more PFOS was degraded with the increase of initial PFOS mass concentration, although the degradation and defluorination rates of PFOS were reduced. When the initial PFOS mass concentration changed from $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the degradation amount of PFOS after four hrs increased by about 50 times, probably due to the higher utilization proportion of e_{aq}^- at high pollutants concentration. Last but not least, the influence of co-existing substances, Cl^- and HCO_3^- , on PFOS degradation could be neglected, whereas their effects on defluorination were observed. Defluorination of PFOS was enhanced with the increased Cl^- concentration, however, increased first and then decreased with the increment of HCO_3^- concentration. It was also found that the presence of humic acid(HA) lowered degradation as well as defluorination of PFOS owing to the blockage of effective UV light and trapping of active species for photochemical reaction.

Key words: perfluorooctane sulfonate(PFOS); VUV- SO_3^{2-} ; hydrated electron(e_{aq}^-); influencing factors; photochemical reduction

全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)是一类重要的全氟表面活性剂, 由于疏水疏油的优良特性, PFOS 及其衍生化合物被广泛用作纸张、照片、包装材料及纺织品等的表面涂料。同时, C—F 共价键的存在使得该物质能够耐受高温、高压等极端条件, 具有持久性和生物难降解性, 并可通过大气及海水等环境介质进行远距离迁移。目前, 该物质不仅存在于工业废水和生活污水^[1~3]中, 而且海水^[4]、人类血清^[5, 6]甚至南北极的各类生物体^[7]中均有不同浓度的 PFOS 检出。相关的毒理学研

究^[8~11]也表明, PFOS 具有神经毒性、免疫毒性、遗传毒性及内分泌干扰性等多种毒性效应。PFOS 分布的广泛性和毒性效应使得该物质具有造成全球污染的可能性, 因此, 相关的去除技术得到广泛关注。

高级还原技术是近年来兴起的水处理技术, 其原理是还原剂在某种活化方法的作用下产生更高活

收稿日期: 2016-09-26; 修订日期: 2016-11-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07206-006); 深圳市科技计划项目(CYJ20160318093930497)

作者简介: 韩慧丽(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为工业废水中污染物控制及毒性, E-mail: hhli1017@163.com

* 通信作者, E-mail: whj1533@qq.com

性的还原性物种从而降解目标污染物. 活化方法包括超声、电子束辐照、微波和紫外光等, 还原剂有连二亚硫酸盐、亚硫酸盐、碘化钾和亚铁离子等. 各种活化方法中, 光化学还原的途径成本较低, 反应条件易于调控, 得到众多研究者的青睐. 现有研究中, 已有采用光化学还原途径降解各类污染物的报道, 包括高氯酸盐^[12]、三氯乙烯^[13]、溴酸盐^[14]以及全氟化合物^[15]等. 光化学还原方式产生的还原性物种有氢原子 ($\text{H}\cdot$)、水合电子 (hydrated electron, e_{aq}^-) 及亚硫酸根自由基 ($\text{SO}_3^{\cdot-}$) 等. 其中, e_{aq}^- 的标准氧化还原电位为 -2.9 V , 是目前已知最强的还原剂, 其产生途径有紫外 (254 nm)-碘化钾法 (UV-KI)、紫外-亚硫酸盐法 (UV- SO_3^{2-})、碱性条件下真空紫外 (vacuum ultraviolet, VUV, 185 nm) 光解水以及真空紫外-亚硫酸盐法 (VUV- SO_3^{2-}) 等^[16-19], 且各种方法已经成功应用于全氟化合物的降解. 以 KI 作为还原介质时, 价格较高, 且降解过程中会生成对人体具有潜在危害的含碘中间产物, 应用前景较小; 而 SO_3^{2-} 是脱硫副产物, 来源丰富, 其产物硫酸盐也不会造成二次污染, 具有较好的研究意义. 张庚^[19]首次报道了采用 VUV- SO_3^{2-} 法降解全氟辛酸 (perfluorooctanoic acid, PFOA), 当 SO_3^{2-} 浓度为 $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 溶液初始 pH 值为 10 时, 12 h 降解反应后, $0.03\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 PFOA 降解率和脱氟率分别为 94.9% 和 51.9%.

虽然 PFOS 与 PFOA 同属全氟化合物的范畴, 在物理化学性质方面也较为相似, 但磺酸基团的存在使 PFOS 比 PFOA 更稳定. 真空紫外-亚硫酸盐法在 PFOA 的降解方面已有研究^[19], 但尚未见到降解 PFOS 的相关报道. 本文通过试验, 考察真空紫外-亚硫酸盐法降解 PFOS 的可行性, 主要研究 pH 值、亚硫酸盐浓度、PFOS 初始质量浓度及共存物质等因素对该方法降解 PFOS 效果的影响.

1 材料与方法

1.1 试剂

全氟辛酸磺酸-钾盐 (98%, 阿拉丁试剂有限公司, 中国)、总离子强度调节剂 (TISAB, WTW, 德国)、无水亚硫酸钠 (AR, 国药化学试剂有限公司, 中国) 等.

1.2 试验装置及过程

降解试验装置如图 1 所示.

PFOS 降解试验在如图 1 所示的密闭双层套管式反应器中进行, 溶液体积为 800 mL . 可以同时发

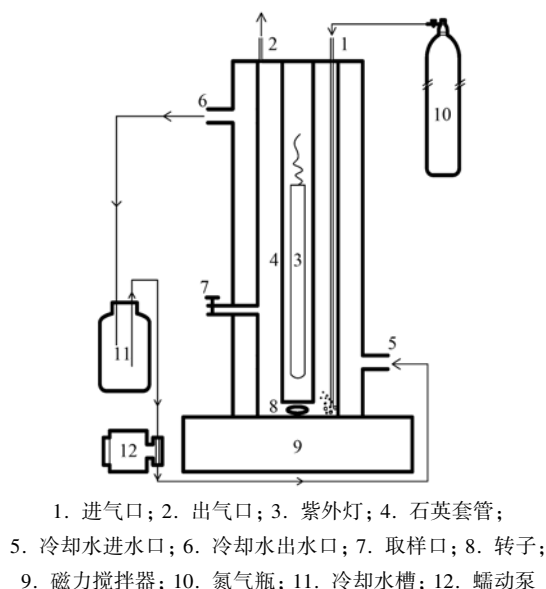


图 1 试验装置示意

Fig. 1 Experimental setup

射波长为 254 nm 和 185 nm 真空紫外光的 10 W 低压紫外灯 (VUV, GPH212T5L, 河北杨紫紫外线, 中国) 作为光源置于反应器中间, 并通过石英套管 4 与反应液隔开. 反应器外部设置冷却水套管, 在蠕动泵 12 (BT100-3J, 保定兰格, 中国) 的作用下, 冷却水不断从进水口 5 及出水口 6 进入或排出, 循环控制反应温度为 25°C . 氮气通过内置的进气口 1 持续不断地通入反应器中, 以控制反应气氛, 同时与磁力搅拌器 9 (IKA HS 7, 艾卡, 德国) 共同作用使反应液混合均匀, 气体流量为 $1.0\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

配制一定浓度的 PFOS 溶液, 置于磁力搅拌器上充分搅拌使其混合均匀, 加入亚硫酸盐并调节溶液的 pH 至某一预定值. 将溶液转移至反应器中, 预先通入氮气 30 min 后开启紫外灯进行 4 h 降解反应. 在预定的时间间隔内, 样品通过取样口 7 取出, 测定氟离子及 PFOS 浓度.

1.3 分析方法

PFOS 浓度采用超高效液相色谱-串联三重四级杆质谱仪 (UPLC-MS/MS, H-Class & XEVO TQD, Waters, 美国) 测定, 色谱条件如下: 色谱柱的型号为 Acquity UPLC BEH C18, 柱温 40°C ; 采用等度洗脱, 流动相乙腈/乙酸铵 (体积比) 为 75/25, 流速为 $0.3\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 进样量为 $1\text{ }\mu\text{L}$; 离子化在电喷雾电离源 (ESI 源) 的负离子模式下进行, 扫描模式为多反应监测 (NRM) 模式.

PFOS 降解率计算公式见式 (1).

$$\text{PFOS 降解率} = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, c_0 为 PFOS 初始质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; c_t 为反应 t 时刻 PFOS 的质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

氟离子浓度的检测采用氟离子选择电极 (PXSJ-216, 上海雷磁, 中国), 取 10 mL 样品于烧杯中, 加入等体积的 TISAB, 必要时调节溶液的 pH 值为 5 ~ 7, 混合均匀后测定. 试验中通过测定氟离子浓度并将其换算为脱氟率来评价光化学还原法降解 PFOS 的处理效果, 脱氟率的计算公式如式(2)所示:

$$\text{脱氟率}(\%) = \frac{c_{\text{F}^-}}{c_0 \times 17} \times 100 \quad (2)$$

式中, c_{F^-} 为氟离子浓度, $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; c_0 为 PFOS 溶液的初始浓度, $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; 17 为一个 PFOS 分子中含有 17 个氟原子.

2 结果与讨论

2.1 亚硫酸盐浓度的影响

在 PFOS 初始质量浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 初始 pH 值 10.0 ± 0.2 , 温度 25°C 的条件下, 考察 SO_3^{2-} 浓度分别为 0、1、2、5、10 和 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 PFOS 的降解及脱氟情况, 结果如图 2 所示.

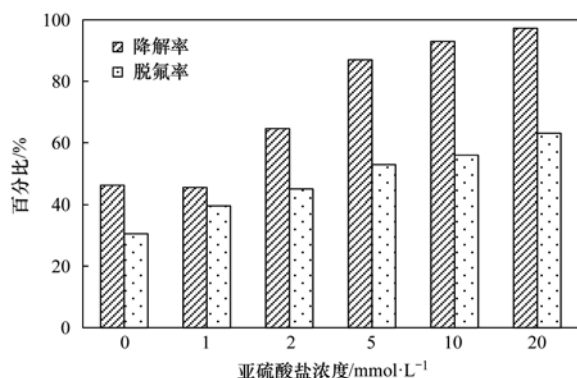


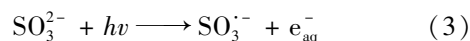
图 2 SO_3^{2-} 浓度对 PFOS 降解及脱氟的影响

Fig. 2 Influence of SO_3^{2-} dosage on PFOS degradation and defluorination

由图 2 可知, 随 SO_3^{2-} 浓度的增加, PFOS 的降解率和脱氟率均有较大的提升, 当 SO_3^{2-} 浓度从 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, PFOS 的降解率相似, 脱氟率略有增加, 进一步提高 SO_3^{2-} 浓度至 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应终点的 PFOS 降解率从 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 46.2% 提高至 97.3%, 脱氟率从 30.6% 提高至 63.2%.

在紫外光的作用下, SO_3^{2-} 光解产生 e_{aq}^- [见式(3)] 是 PFOS 降解及脱氟的主要原因^[20], 因此随 SO_3^{2-} 浓度的增加, e_{aq}^- 生成量相应提高, 从而增加了与 PFOS 分子有效反应的机会, PFOS 的降解率和脱

氟率均提高. 当 SO_3^{2-} 浓度为 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 由于 185 nm 真空紫外光具有很高的能量, 可能存在直接光解的作用, 而且碱性缺氧体系中真空紫外光解水也产生 e_{aq}^- , 从而在两方面因素的共同作用下降解 PFOS; 而溶液中存在 SO_3^{2-} 时, PFOS 的直接光解、真空紫外光解水产生 e_{aq}^- 以及 SO_3^{2-} 被紫外光解产生 e_{aq}^- 三方面的作用可能同时存在, 因此降解率和脱氟率均比较高.



2.2 pH 值的影响

在 PFOS 初始质量浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_3^{2-} 浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 25°C 的条件下, 用氨水 (1:1, 体积比) 或硫酸 ($0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 调节溶液的 pH 值分别为 6.0、7.0、8.0、9.0 和 10.0, 考察 PFOS 的降解及脱氟情况, 结果如图 3 所示.

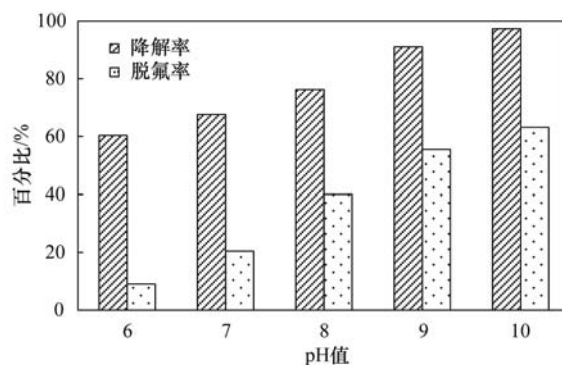
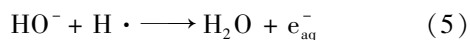
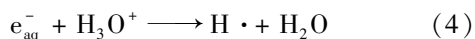


图 3 pH 值对 PFOS 降解及脱氟的影响

Fig. 3 Influence of pH value on PFOS degradation and defluorination

从图 3 中 PFOS 的降解率和脱氟率可以看出, 二者均随着 pH 值的升高而升高, 当 pH 值从 6.0 提高至 10.0 时, PFOS 降解率从 60.4% 提高至 97.3%, 脱氟率从 9.0% 提高至 63.8%. 有研究表明^[16, 21, 22], PFOS 降解率和脱氟率随 pH 值的变化主要受两方面因素的影响: 硫元素的存在形式及 e_{aq}^- 浓度的变化. 一方面, 硫在水体中的形态包括 SO_3^{2-} 、亚硫酸氢盐 (HSO_3^-) 以及亚硫酸 ($\text{H}_2\text{O} \cdot \text{SO}_2$), 溶液的 pH 值决定了 S 元素的存在形式, 随 pH 值的升高, SO_3^{2-} 的含量也随之增加. 在 pH 值大于 9.2 的环境中, 99% 以上的 S 元素以 SO_3^{2-} 的形式存在, 而 SO_3^{2-} 在紫外光照射条件下的光吸收最强^[21], 因此光解产生的 e_{aq}^- 量大大提高. 另一方面, 在酸性至中性条件下, 由于 H^+ 的存在, 产生的 e_{aq}^- 会被大量消耗而降低有效利用率 [见式(4)]; 而在 pH > 9 的碱性溶液中, HO^- 和溶液中光解产生的 $\text{H} \cdot$ 反

应生成 e_{aq}^- , 从而使得 e_{aq}^- 的量随 pH 值的升高而增加^[22] [见式(5)].



由图 3 可知, PFOS 脱氟率对 pH 值的变化更敏感, pH 值为 6.0 时, 反应 4 h 后的脱氟率仅为 9.0%, 而随 pH 值的升高脱氟率有明显上升趋势. 这一现象可能是由于在酸性条件下, 生成的 $H \cdot$ 及直接光解可以打开 PFOS 的 C—C 化合键而使得 PFOS 被降解, 但在酸性环境中 e_{aq}^- 的量较少, C—F 共价键不能被打开而使得脱氟率较低, 这一结论与文献 [17] 的报道相吻合.

2.3 PFOS 初始质量浓度的影响

在 SO_3^{2-} 浓度为 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 25°C , pH 值 10.0 ± 0.2 的条件下, 考察 PFOS 初始质量浓度分别为 1、5、20 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 PFOS 的降解及脱氟情况, 结果如图 4 所示.

由图 4 可知, 在其他条件一致的情况下, PFOS 的降解率及脱氟率均随 PFOS 初始质量浓度的升高而降低. 当 PFOS 初始质量浓度从 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应 4 h 后, 降解率从 99.8% 降低至 91.6%, 脱氟率从 92.8% 降低至 52.5%. 虽然 PFOS 初始质量浓度的增加不利于得到较高的降解率和脱氟率, 但 PFOS 的绝对降解量却从 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 0.798 mg 提高至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 38.93 mg, 提高了约 50 倍, 水合电子利用率提高增加了 PFOS 的降解量.

2.4 共存物质的影响

实际水体中, 经常会存在各种类型的共存物质, 包括一些共存离子和有机物等, 这些物质可能会与目标污染物质或降解体系中其他物质发生反应从而抑制或促进目标污染物的降解, 因此, 有必要考察共

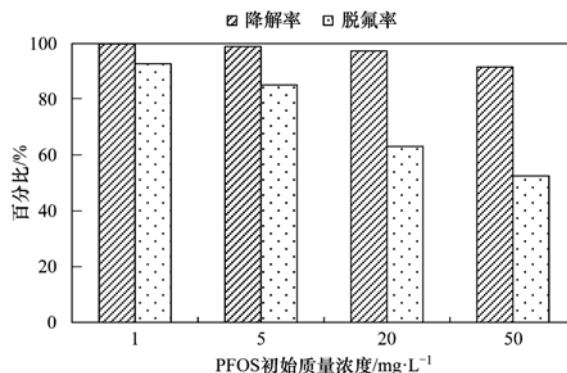


图 4 PFOS 初始质量浓度对 PFOS 降解及脱氟的影响

Fig. 4 Influence of initial PFOS mass concentration on PFOS degradation and defluorination

存物质存在时真空紫外-亚硫酸盐法对目标污染物的降解情况. 试验中选择了氯离子 (Cl^-) 及碳酸氢根离子 (HCO_3^-) 作为无机离子的代表, 腐殖酸 (humic acid, HA) 作为天然有机物的代表, 研究共存物质存在时 PFOS 的降解和脱氟规律.

2.4.1 无机离子

在 PFOS 初始质量浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_3^{2-} 浓度 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 25°C , pH 值 10.0 ± 0.2 的条件下, 考察无机离子存在时 PFOS 的降解及脱氟情况, Cl^- 及 HCO_3^- 的浓度分别为 0、0.1、0.2、0.5 和 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 结果如图 5 所示.

由图 5 可知, 在试验研究的浓度范围内, Cl^- 对 PFOS 的降解率影响不大, 脱氟率随离子浓度的增加而提高. Park 等^[23] 的研究表明, 碘离子在紫外光照条件下可以生成 e_{aq}^- 从而降解 PFOS. 氯离子与碘离子同属卤族元素, 因此在紫外光照条件下, 氯离子可能与碘离子经历相似的过程生成 e_{aq}^- ^[24], 体系中活性物种的量增加, PFOS 的脱氟率随之提高.

随 HCO_3^- 浓度的增加, PFOS 降解率略有降低, 而脱氟率呈现先增加后降低的规律. e_{aq}^- 是 PFOS 脱

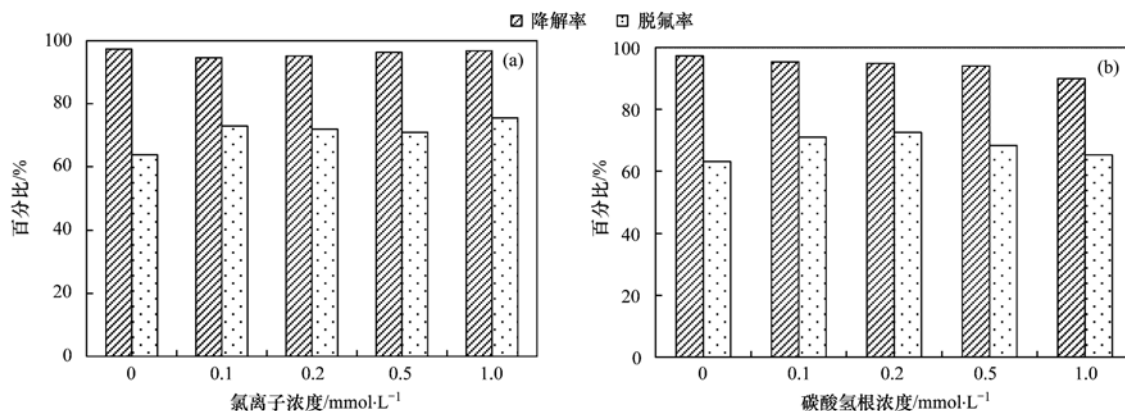
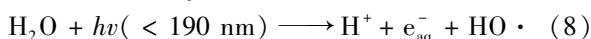
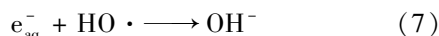
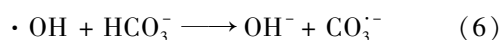


图 5 无机离子对 PFOS 降解及脱氟的影响

Fig. 5 Influence of inorganic ions on PFOS degradation and defluorination

氟降解的主要活性物种, HCO_3^- 主要是通过改变 e_{aq}^- 的浓度来影响 PFOS 的降解率和脱氟率, 可以分为以下 3 个方面: ① HCO_3^- 是自由基捕获剂^[25], 加入 HCO_3^- 后 $\text{HO}\cdot$ 被捕获, 减少了对 e_{aq}^- 的消耗[式(6)、(7)]; ②碱性溶液中, HCO_3^- 的电离大于水解, 产生 H^+ 使溶液的 pH 值略有降低, 而根据前文的研究, 低 pH 值不利于 e_{aq}^- 的形成. 低 HCO_3^- 浓度条件下, pH 值的变化较小, 碱性环境使得水解产生 $\text{HO}\cdot$ 的量较多[式(8)], HCO_3^- 对 $\text{HO}\cdot$ 的捕获提高了 e_{aq}^- 的浓度, 而随 HCO_3^- 浓度的增加, pH 值进一步下降, 同时 $\text{HO}\cdot$ 的生成量减少, e_{aq}^- 的浓度降低. ③ $\text{pH} = 10.0$ 左右时, 溶液中同时存在 HCO_3^- 与 CO_3^{2-} , 二者的浓度比接近 1:1, 可能发生如式(6)、(9)的反应^[26], 产生的 $\text{CO}_3^{\cdot -}$ 是亲电子物质, 可能会消耗 e_{aq}^- , 也可能直接与 PFOS 反应而抑制或促进 PFOS 的降解和脱氟. PFOS 在降解过程中会生成一系列全氟羧酸类中间产物, PFOS 比这些物质更稳定, e_{aq}^- 浓度的增加容易使中间产物进一步降解而提高脱氟率, 因此脱氟率对 e_{aq}^- 浓度的变化更敏感, 其与 e_{aq}^- 量随 HCO_3^- 浓度的变化表现出相同的规律, 而 PFOS 降解率则随 HCO_3^- 浓度的增加缓慢降低.



2.4.2 有机物

在 PFOS 初始质量浓度 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SO_3^{2-} 浓度 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 温度 25°C , pH 值 10.0 ± 0.2 的条件下, 考察腐殖酸质量浓度为 0、0.5、1.0、2.0 和 $5.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 PFOS 的降解及脱氟情况, 结果如图 6 所示, 腐殖酸质量浓度以 TOC 计.

随腐殖酸质量浓度的增加, PFOS 的降解率及脱氟率均表现出下降趋势, 与不加腐殖酸相比较, 腐殖酸质量浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 降解率从 97.3% 降低至 90.6%, 脱氟率从 63.8% 降低至 42.8%. 这可能是由于腐殖酸捕获了部分用于降解污染物的活性物种或屏蔽了有利于化学反应的光, 从而使降解率和脱氟率均下降^[19].

3 结论

(1) SO_3^{2-} 浓度的增加有利于提高真空紫外-亚硫酸盐法对 PFOS 的降解率和脱氟率. 当亚硫酸盐

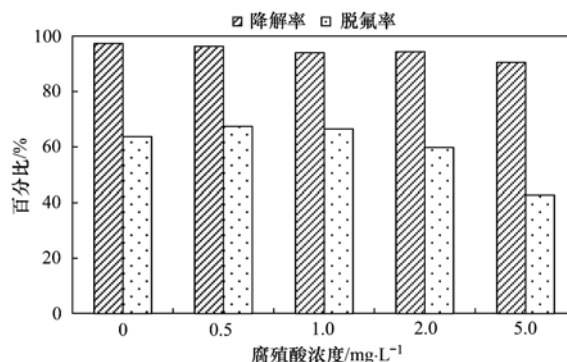


图 6 腐殖酸对 PFOS 降解及脱氟的影响

Fig. 6 Influence of HA on PFOS degradation and defluorination

浓度从 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加至 $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 反应终点的 PFOS 降解率从 45.5% 提高至 97.3%, 脱氟率从 39.7% 提高至 63.2%.

(2) 随 pH 值的升高, PFOS 降解率和脱氟率均提高, 脱氟率对 pH 值变化的敏感性表明水合电子是 PFOS 脱氟的关键因素.

(3) PFOS 初始质量浓度的增加降低了 PFOS 降解率和脱氟率, PFOS 的绝对降解量却大幅提高, 高质量浓度条件下更有利于污染物总量的削减.

(4) Cl^- 的存在对 PFOS 的降解率影响不大, 脱氟率随 Cl^- 浓度的增加而提高; HCO_3^- 存在时 PFOS 降解率略有降低, 脱氟率随 HCO_3^- 浓度的增加表现出先增加后降低的规律; 腐殖酸的存在屏蔽了部分用于光化学反应的光, 而且可以捕获体系的活性物种使得降解率和脱氟率均降低.

参考文献:

- [1] Murakami M, Imamura E, Shinohara H, *et al.* Occurrence and sources of perfluorinated surfactants in rivers in Japan [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (17): 6566-6572.
- [2] Lin A Y C, Panchangam S C, Ciou P S. High levels of perfluorochemicals in Taiwan's wastewater treatment plants and downstream rivers pose great risk to local aquatic ecosystems [J]. *Chemosphere*, 2010, **80** (10): 1167-1174.
- [3] Moody C A, Martin J W, Kwan W C, *et al.* Monitoring perfluorinated surfactants in biota and surface water samples following an accidental release of fire-fighting foam into etobicoke creek [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36** (4): 545-551.
- [4] 刘宝林, 张鸿, 谢刘伟, 等. 深圳近岸海域全氟化合物的污染特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36** (6): 2028-2037.
- [5] Liu B L, Zhang H, Xie L W, *et al.* Pollution characteristics of perfluorinated compounds in offshore marine area of Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (6): 2028-2037.
- [6] Olsen G W, Mair D C, Church T R, *et al.* Decline in perfluorooctanesulfonate and other polyfluoroalkyl chemicals in American Red Cross adult blood donors, 2000-2006 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (13): 4989-

- 4995.
- [6] Ji K, Kim S, Kho Y, *et al.* Serum concentrations of major perfluorinated compounds among the general population in Korea: dietary sources and potential impact on thyroid hormones[J]. *Environment International*, 2012, **45**(1): 78-85.
- [7] 武晓果, 谢周清. 南北极全氟化合物的含量、分布及迁移[J]. *极地研究*, 2009, **21**(3): 197-210.
Wu X G, Xie Z Q. The level, distribution and transportation of perfluorinated compounds in arctic and Antarctic[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2009, **21**(3): 197-210.
- [8] 秦若男. 全氟辛烷磺酸的遗传毒性研究[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2012. 43-48.
- [9] Corsini E, Luebke R W, Germolec D R, *et al.* Perfluorinated compounds: emerging POPs with potential immunotoxicity[J]. *Toxicology Letters*, 2014, **230**(2): 263-270.
- [10] Chang S C, Ehresman D J, Bjork J A, *et al.* Gestational and lactational exposure to potassium perfluorooctanesulfonate (K + PFOS) in rats: toxicokinetics, thyroid hormone status, and related gene expression[J]. *Reproductive Toxicology*, 2009, **27**(3-4): 387-399.
- [11] 程艳, 崔媛, 党志超, 等. 全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(6): 1865-1870.
Chen Y, Cui Y, Dang Z C, *et al.* Effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) exposure on vitellogenin mRNA level in zebrafish (*Brachydanio rerio*) [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(6): 1865-1870.
- [12] Vellanki B P, Batchelor B. Perchlorate reduction by the sulfite/ultraviolet light advanced reduction process [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**(8): 348-356.
- [13] Jung B, Farzaneh H, Khodarya A, *et al.* Photochemical degradation of trichloroethylene by sulfite-mediated UV irradiation [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2015, **3**(3): 2194-2202.
- [14] Jung B, Nicola R, Batchelor B, *et al.* Effect of low-and medium-pressure Hg UV irradiation on bromate removal in advanced reduction process [J]. *Chemosphere*, 2014, **117C**(1): 663-672.
- [15] Gu Y R, Dong W Y, Luo C, *et al.* Efficient reductive decomposition of perfluorooctanesulfonate in a high photon flux UV/sulfite system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(19): 10554-10561.
- [16] 宋洲. 紫外光化学氧化/还原处理全氟辛酸的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014. 103.
- [17] Qu Y, Zhang C J, Chen P, *et al.* Effect of initial solution pH on photo-induced reductive decomposition of perfluorooctanoic acid [J]. *Chemosphere*, 2014, **107**: 218-223.
- [18] Jin L, Zhang P Y. Photochemical decomposition of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in an anoxic alkaline solution by 185 nm vacuum ultraviolet [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **280**: 241-247.
- [19] 张庚. 真空紫外光致水合电子降解全氟辛酸及其影响因素的研究[D]. 上海: 同济大学, 2014. 57-67.
- [20] Song Z, Tang H Q, Wang N, *et al.* Reductive defluorination of perfluorooctanoic acid by hydrated electrons in a sulfite-mediated UV photochemical system [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **262**(22): 332-338.
- [21] Li X C, Ma J, Liu G F, *et al.* Efficient reductive dechlorination of monochloroacetic acid by sulfite/UV process [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(13): 7342-7349.
- [22] 金玲. 光化学降解水中全氟辛烷磺酸及其替代物的研究[D]. 北京: 清华大学, 2014. 74-91.
- [23] Park H, Vecitis C D, Cheng J, *et al.* Reductive defluorination of aqueous perfluorinated alkyl surfactants: effects of ionic headgroup and chain length [J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2009, **113**(4): 690-696.
- [24] 郭睿, 张超杰, 张庚, 等. 紫外光致氯生水合电子对全氟辛酸的降解[J]. *高等学校化学学报*, 2016, **37**(8): 1499-1508.
Guo R, Zhang C J, Zhang G, *et al.* Degradation of perfluorooctanoic acid by UV/chloride process [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2016, **37**(8): 1499-1508.
- [25] Sharma V K. Potassium ferrate(VI): an environmentally friendly oxidant [J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, **6**(2): 143-156.
- [26] Thi L A P, Do H T, Lee Y C, *et al.* Photochemical decomposition of perfluorooctanoic acids in aqueous carbonate solution with UV irradiation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **221**(4): 258-263.

CONTENTS

Dry and Bulk Nitrogen Deposition in Suburbs of Xining City	XU Wen, JIN Xin, LUO Shao-hui, <i>et al.</i> (1279)
Day-Night Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in PM ₁₀ During Spring and Summer of Lanzhou	MA Li, YU Ye, WANG Bo, <i>et al.</i> (1289)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions in Sanya, Hainan	WANG Lu, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1298)
Pollution Characteristics of NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ in PM _{2.5} and Their Precursor Gases During 2015 in an Urban Area of Beijing	DING Meng-meng, ZHOU Jian-nan, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1307)
Pollution Characteristics of PCDD/Fs in Ambient Air and Exposure Risk Assessment Around a Municipal Solid Waste Incinerator in Beijing	QI Li, REN Yue, LIU Ai-min, <i>et al.</i> (1317)
Community Characteristics of Cultivable Bacteria in Fine Particles (PM _{2.5}) of Beijing and Baoding	HU Ya-dong, MA An-zhou, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (1327)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Artery and Collector Roads in Nanjing Based on Real-time Traffic Data	LI Xiao-yu, WU Lin, ZOU Chao, <i>et al.</i> (1340)
Catalytic Combustion of Soot Particulates over Rare Earth Pyrochlore Oxides Doped with Transition Metals	LI Xi-feng, SUN Yu-qi, WANG Zhong-peng, <i>et al.</i> (1348)
Water Quality Analysis of Beijing Segment of South-to-North Water Diversion Middle Route Project	XU Hua-shan, ZHAO Lei, SUN Hao-su, <i>et al.</i> (1357)
Hanfeng Pre-reservoir Commissioning Time Variation Feature of the Hydrology and Water Quality in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (1366)
Modeling of Water Quality Response to Land-use Patterns in Taizi River Basin Based on Partial Least Squares	LI Lin-lin, ZHANG Yi-zhang, TANG Chang-yuan, <i>et al.</i> (1376)
Distribution Characteristics of Water Temperature and Water Quality of Fuxian Lake During Thermal Stratification Period in Summer	WANG Lin-jie, YU Hui, NIU Yong, <i>et al.</i> (1384)
Vertical Stratification Characteristics of Dissolved Oxygen and Phytoplankton in Thousand-Island Lake and Their Influencing Factors	YU Yan, LIU De-fu, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (1393)
Community Structure Characteristics of Eukaryotic Planktonic Algae in Liaoh River Through High-throughput Sequencing	WANG Jing-qi, WANG Shu-ping, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1403)
Effects of Coastal Organic Pollution on Bacterioplankton Community in Sanmen Bay	DAI Wen-fang, GUO Yong-hao, YU Wei-na, <i>et al.</i> (1414)
Nitrate Source Identification and Nitrification-denitrification at the Sediment-water Interface	JIN Zan-fang, GONG Jia-lin, SHI Yi-li, <i>et al.</i> (1423)
Residues of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Water and Sediments from Nansha Mangrove Wetland	DING Yang, HUANG Huan-fang, LI Hui, <i>et al.</i> (1431)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals from River Network Sediment in Western Area of Taihu Lake	BIAN Bo, ZHOU Yan, ZHANG Qin (1442)
Efficacy of Phoslock® on the Reduction of Sediment Phosphorus Release in West Lake, Hangzhou, China	ZHU Guang-wei, LI Jing, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (1451)
Identification and PAC Adsorption of Foulants Responsible for Irreversible Fouling During Ultrafiltration of Dongjiang River Water	YANG Hai-yan, WANG Can, YAN Zhong-sen, <i>et al.</i> (1460)
Efficiency and Kinetics of Triclosan Degradation in Aqueous Solution by UV/Sodium Persulfate	LI Qing-song, LI Xue-yan, YAO Ning-bo, <i>et al.</i> (1467)
Influencing Factors on the Degradation of PFOS Through VUV-SO ₃ ²⁻	HAN Hui-li, WANG Hong-jie, DONG Wen-yi (1477)
Simultaneous Photocatalytic Reduction of Cr(VI) and Oxidation of SSA by Carbon Nitride	LI Li-li, CHEN Cui-hai, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (1483)
Modification of Diatomite by Zirconium and Its Performance in Phosphate Removal from Water	FAN Yi, WANG Zhe, ZHAO Lian-qin, <i>et al.</i> (1490)
Reducing Effect of Three Disinfection Technologies for Sulfonamides Resistance Genes	ZHENG Ji, ZHOU Zhen-chao, CHEN Fang, <i>et al.</i> (1497)
Removal of Estrogenic Effect by Typical Domestic Wastewater Treatment Processes	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1506)
Effect of SRT on Stability of Yeast-SBR in Treating Oil-containing Wastewater	LÜ Wen-zhou, ZHANG Shu-lin, QIAO Yu-xiang, <i>et al.</i> (1513)
Degradation of the Disperse Dye Neocron Black(NB) by Biological Treatment	YANG Bo, DING Feng-you, XU Hui, <i>et al.</i> (1520)
Function of Polyphosphate Kinase Gene in Biological Phosphate Removal During the Wastewater Treatment Process	NAN Ya-ping, ZHOU Guo-biao, YUAN Lin-jiang (1529)
Short-cut Nitrification Recovery and Its Transformation into CANON Process in a Biofilm Reactor	FU Kun-ming, ZHOU Hou-tian, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (1536)
Nitrogen Removal Characteristics and Diversity of Microbial Community in ANAMMOX Reactor	CAO Yan, WANG Tong-yu, QIN Yu-jie, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Environment Adjustment Layers on Nitrogen Transformation in Anaerobic Bioreactor Landfills	HE Zheng-kun, SONG Bo-yu, ZHU Nan-wen, <i>et al.</i> (1551)
Characteristics of Anaerobic Methane Removal Coupled to Fe(III) Reduction in Aged Refuse	WANG Li-li, HE Ting, LONG Yan, <i>et al.</i> (1558)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Tracing Sources by Pb & Sr Isotope in the Soil Profile of Woodland in Quanzhou	SUN Jing-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1566)
Accumulation and Migration Characteristics in Soil Profiles and Bioavailability of Heavy Metals from Livestock Manure	HE Meng-yuan, DONG Tong-xi, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (1576)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soils from Shandong	GE Wei, CHENG Qi-qi, CHAI Chao, <i>et al.</i> (1587)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Organophosphorus Pesticides in Typical Soil Environment of Jiangnan Plain	WANG Jian-wei, ZHANG Cai-xiang, PAN Zhen-zhen, <i>et al.</i> (1597)
Characteristics and Influencing Factors of Biologically-based Phosphorus Fractions in the Farmland Soil	CAI Guan, HU Ya-jun, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Straw Application on the Dynamics of Exogenous Nitrogen and Microbial Activity in Paddy Soil	CHEN Shan, DING Xian-qing, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (1613)
Effects of Biochar on Surface Albedo and Soil Respiration in Suburban Agricultural Soil	ZHANG Yang-yang, HU Xue-yu, ZOU Juan, <i>et al.</i> (1622)
N ₂ O Consumption Ability of Submerged Paddy Soil and the Regulatory Mechanism	WANG Ling, XING Xiao-yi, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (1633)
Non-CO ₂ Greenhouse Gas Release from Different Biological Wastewater Treatment Processes	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, LIU Wen-bo, <i>et al.</i> (1640)
Effect of Application of Sewage Sludge Composts on Greenhouse Gas Emissions in Soil	YANG Yu-han, YI Jian-ting, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1647)
Effect of Nano Zeolites on pH, CEC in Soil and Cd Fractions in Plant and Soil at Different Cadmium Levels	CHI Sun-lin, XU Wei-hong, XIONG Shi-juan, <i>et al.</i> (1654)
Dynamic Differences of Uptake and Translocation of Exogenous Selenium by Different Crops and Its Mechanism	PENG Qin, LI Zhe, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (1667)
Alleviation Effects of Exogenous Melatonin on Ni Toxicity in Rice Seedlings	LIU Shi-xiang, HUANG Yi-zong, LUO Ze-jiao, <i>et al.</i> (1675)
Forms Distribution and Ecotoxicity of Three Forms of Sulfonamides in Root-Soil Interface of Maize	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Wan-feng, <i>et al.</i> (1683)
Effect of Sediments on Bioaccumulation of Mercury in Fish Body in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	SUN Song, LI Chu-xian, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (1689)
Bioaccumulation and Correlation of Heavy Metals in Human Hairs From Urban and Rural Areas of Chongqing	HE Ming-jing, LI Qi, WANG Deng-xiang, <i>et al.</i> (1697)
Microbial Community Structure and Diversity in Cellar Water by 16S rRNA High-throughput Sequencing	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (1704)
Performance Improvement of Microbial Fuel Cell with Polyaniline Doped Graphene Anode	HUANG Li-hua, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i> (1717)
Brief Introduction of Pollution Sites Remediation and Risk Assessment and Its Policy Making in United States	RONG Yue (1726)