

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄允秋 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究

马晓雁¹, 张泽华¹, 王红宇¹, 胡仕斐¹, 李青松²

(1. 浙江工业大学建筑工程学院, 杭州 310014; 2. 厦门理工学院水资源环境研究所, 厦门 361005)

摘要: 模拟高藻期碱性水源水, 采用高铁酸钾对水中以颤藻和二甲基三硫醚为代表的藻类及微量臭味污染物进行同步控制研究. 在高铁酸钾与聚合氯化铁(PFC)单独混凝对藻类的控制效果对比的基础上, 展开了高铁酸钾与高锰酸钾预氧化-PFC联用方法对藻类及臭味污染物的控制效果对比, 探讨了pH、预氧化时间和浊度等条件对控制效果的影响. 结果表明, PFC单独混凝除藻率最高为90.6%, 以Fe计的等量投加条件下, 高铁酸钾除藻效果较PFC混凝好, 除藻率可达92.4%. 高锰酸钾对PFC具有强化混凝效果, 可明显提高除藻率(94.5%). 高铁酸钾较高锰酸钾预氧化对二甲基三硫醚的去除效果理想, 且氧化时间大大缩短, 高铁酸钾氧化时间1 min可去除92.5%二甲基三硫醚, 高于高锰酸钾预氧化10 min后达到的去除率(74.6%).

关键词: 高藻水; 次生臭味污染; 二甲基三硫醚; 高铁酸钾; 混凝; 2-甲基异莰醇; 土臭素

中图分类号: TU99; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1767-06

Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate

MA Xiao-yan¹, ZHANG Ze-hua¹, WANG Hong-yu¹, HU Shi-fei¹, LI Qing-song²

(1. Architecture Engineering College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Water Resources and Environmental Institute, Xiamen University of Technology, Xiamen 361005, China)

Abstract: Co-removal of oscillatoria algae and its potential odorous metabolite dimethyl trisulfide (DMTS) in simulated algae-laden alkaline source water by potassium ferrate (K_2FeO_4) was investigated in contrast to potassium permanganate ($KMnO_4$) pre-oxidation followed by polyferric chloride (PFC) under varying conditions, including pH, initial oxidant dosage and turbidity. Based on the pre-comparison with PFC, the optimal dosage of PFC in the combined $KMnO_4$ pre-oxidation-PFC treatment was determined. Potassium ferrate resulted in 92.4% removal of algae, higher than PFC when the dosage was equivalent as measured by Fe and $KMnO_4$ showed obviously positive effect as a coagulation aid. Degradation of dimethyl trisulfide (92.5%) by potassium ferrate was better than the pre-oxidation of potassium permanganate (74.6%), and the treatment time was decreased from 10 min to 1 min.

Key words: algae; taste and odor; dimethyl trisulfide; potassium ferrate; coagulation; 2-MIB; geosmin

我国城市周边水源污染及其衍生的供水安全问题已成为亟待解决的难题. 水源水中周期性、突发性的藻类水华及以藻毒素、藻臭和藻类胞外分泌物为代表的次生物会严重干扰饮用水的净水过程和产水质量, 其中臭味次生物极易穿透水厂常规水处理工艺进入供水管网, 由于其嗅阈值多为 $ng \cdot L^{-1}$, 在水中即使含量很低也可被人们直接感知. 由臭味次生物激发的公众反馈最迅速, 引发的质疑和恐慌最普遍, 因此针对饮用水中频繁发生的藻致臭味污染的控制逐渐成为国内、外学者关注和研究的重点^[1-4]. 藻致臭味的检测和控制研究多集中于2-甲基异莰醇(2-MIB)、土臭素(geosmin)等, 近几年由于国内水污染事件中检出大量 β -环柠檬醛、硫醚等, 且推测此类臭味物质可能与藻类暴发有关, 因此相关研究逐渐兴起^[5,6]. 水中藻致臭味的控制方法多以氧化控制为主, 常见氧化剂氯、二氧化氯、臭

氧、高锰酸钾和高级氧化对藻致臭味均有一定程度的去除, 通常臭氧和高级氧化治嗅效果较好^[7-11]. 由于氧化工艺往往导致藻细胞破碎, 从而引发次生臭味污染物的二次释放^[12,13], 所以进行原水除嗅处理前需要先进行除藻处理, 大多数学者进行相关研究时, 往往将原水中藻类及与之相关的臭味污染物作为相对独立的目标进行有序控制和效果探讨.

本研究以藻及藻致臭味污染为控制目标, 拟利用高铁酸钾(K_2FeO_4)的氧化性及其产物的混凝性实现水中藻及其次生臭味污染物的同步去除. Park等^[14]探讨了Fe(VI)对2-MIB和geosmin的氧化控

收稿日期: 2012-06-14; 修订日期: 2012-10-15

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Q12E080063); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07421-002-06); 国家自然科学基金项目(51208468)

作者简介: 马晓雁(1978~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为饮用水中藻致臭味污染控制, E-mail: mayaner620@163.com

制效果,由于污染有机物结构的稳定性及氧化剂的选择性影响,去除率较低,在模拟水环境 pH 为 6~8 时均不超过 25%,研究未提及 Fe(VI) 对藻类的去除. 本研究选择了分子结构不同的典型臭味污染物二甲基三硫醚(DMTS)^[15]及蓝藻中常见的颤藻为控制对象,试验条件中 pH 为碱性,更接近实际高藻水源水环境条件. 此外,通过与单纯聚合氯化铁(PFC)混凝和高锰酸钾(KMnO₄)预氧化强化混凝比较,对 K₂FeO₄ 控藻和治臭效果进行了评价.

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

DMTS (纯度 ≥ 95%, 色谱纯, Tokoy Chemico Company, 日本), 正己烷(≥ 99%, 色谱纯, CNW, 德国), 氯化钠(≥ 99.5%, 分析纯, 南京化学试剂有限公司), PFC(B = 1.0, 自制), KMnO₄(≥ 99.5%, 分析纯, 南京化学试剂有限公司), K₂FeO₄(纯度 ≥ 50%, 自制), 纯水(18 MΩ·cm).

气相色谱仪(GC-2014, 岛津, 日本), 光学显微镜(XSP-2C, 光学仪器厂, 上海), 便携式浊度仪(2100P, 哈希, 美国), 便携式 pH 测定仪(SensION, 哈希, 美国).

1.2 模拟高藻水源水

试验所用的颤藻购自中国科学院武汉水生生物研究所, 采用 BG11 培养基培养. 试验时将颤藻水样用纯水稀释, 使水样中的颤藻细胞浓度含量在 10⁵ ~ 10⁶ 个·L⁻¹ 范围之内, DMTS 为标准品, 试验中调节其浓度为 555.3 ~ 600.0 μg·L⁻¹. 采用碳酸氢钠-碳酸钠缓冲液调节试验用水至所需 pH 值, 以高岭土配置原水浊度为 62 ~ 65 NTU, 各项水质指标见表 1.

表 1 模拟高藻水水质指标

Table 1 Water quality index of artificial water with algae of high concentration

颤藻 /个·L ⁻¹	DMTS /μg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	浊度/NTU	pH
6.4 × 10 ⁵	555.3 ~ 600.0	0.035	62 ~ 65	10.8

1.3 试验方法

(1) 调节模拟高藻水呈碱性, 投加一定量的 PFC(以 Fe 计), 250 r·min⁻¹ 快搅 1 min 后, 50 r·min⁻¹ 慢搅 10 min, 沉淀 30 min, 取上清液测定藻细胞浓度和臭味污染物的含量.

(2) 调节模拟高藻水呈碱性, 投加一定量的 KMnO₄, 以 100 r·min⁻¹ 接触氧化 10 min 后, 投加一定量的 PFC 进行混凝试验. 取上清液测定藻细胞浓

度和臭味污染物的含量.

(3) 调节模拟高藻水呈碱性, 投加一定量的 K₂FeO₄(以 Fe 计), 以 100 r·min⁻¹ 接触氧化 1 min 后, 250 r·min⁻¹ 快搅 1 min, 50 r·min⁻¹ 慢搅 10 min, 沉淀 30 min, 取上清液测定藻细胞浓度和臭味污染物的含量.

1.4 分析方法

1.4.1 微量 DMTS 检测方法

取 100 mL 待测水样, 置于 100 mL 容量瓶中, 操作过程中尽量使水样沿瓶壁流下, 以避免搅动造成的曝气影响. 根据试验需要加入 5% 经烘干后的 NaCl 固体, 然后加入 1 mL 正己烷试剂, 磁力搅拌器以 1 200 r·min⁻¹ 搅拌 10 min 后, 静置一定时间, 取上层正己烷溶液经 GC 进样分析, 测定目标臭味污染物含量. 色谱条件: 进样口温度 250℃, 无分流进样; 程序升温初始温度 50℃, 以 15℃·min⁻¹ 的速率升温至 150℃, 再以 30℃·min⁻¹ 速率升温至 240℃; FID 温度为 250℃; 载气流速为 1.5 mL·min⁻¹; 进样体积为 1 μL; DMTS 的保留时间为 3.419 min.

1.4.2 藻类计数方法

水样用鲁哥氏液进行固定后, 采用浮游植物计数框在光学显微镜下计数, 2 次计数取平均值, 平均偏差控制在 15% 以内.

2 结果与讨论

2.1 K₂FeO₄ 控制高藻水中藻类和藻臭

由图 1 可见, K₂FeO₄ 对藻类及藻臭均有良好的去除效果, 其中投加量对藻臭的去除率影响较大, 当投加量为 0.05 mmol·L⁻¹ 时, DMTS 的去除率仅为 44.5%, 增加到 0.20 mmol·L⁻¹ 时达到 92.5%, 之后投加量的增加对去除率的影响逐渐减弱, 最高为 93.3%. K₂FeO₄ 有极强的氧化性, 在酸性和碱性条件下其氧化势分别为 2.2V 和 0.7V^[16], 图 1 表明 K₂FeO₄ 可将 DMTS 氧化去除, 氧化去除效果较好. 当 K₂FeO₄ 投加量大于 0.2 mmol·L⁻¹ 后去除效果趋于平缓, 可能是相对于氧化反应而言, K₂FeO₄ 投加处于足量或过量范围, 0.2 mmol·L⁻¹ 为氧化控制的特征投加点. K₂FeO₄ 的 Ames 测试(沙门氏菌回复突变试验)显示 K₂FeO₄ 并不产生任何诱导有机体突变的副产物, 是一种“绿色友好”的氧化剂^[16,17].

K₂FeO₄ 对藻类去除效果稳定, 投加量为 0.05 mmol·L⁻¹ 即可获得 87.5% 的藻类去除效率, 随着投加量的增加, 去除效果略微增加, 但增幅不大, 最高

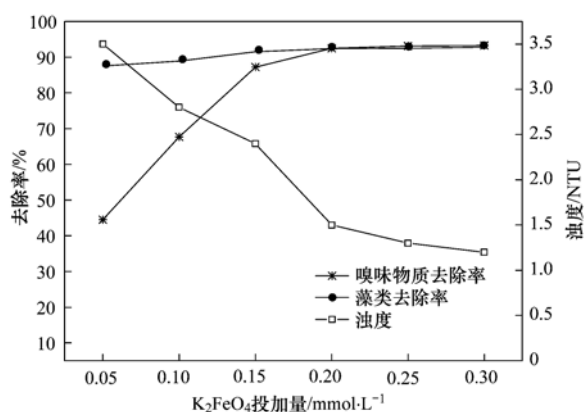
图1 K_2FeO_4 投加量对藻及藻臭去除效果的影响

Fig. 1 Removal of algae and its odor metabolites with different dosage of K_2FeO_4

去除率为 92.8%。 K_2FeO_4 的混凝作用主要依靠其还原产物 Fe^{3+} 形成的具有絮凝作用的 $Fe(OH)_3$, 吸附到藻细胞表面改变藻细胞表面属性, 增加其沉降性能, 使得藻类混凝去除^[18,19]。此外, 絮体可去除无机颗粒造成的浊度, 降低出水浊度。随投加量增加剩余浊度逐渐减小, K_2FeO_4 投加量 $0.30 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时剩余浊度为 1.5 NTU。

2.2 PFC 控制高藻水中藻类和藻臭

PFC 是一种具有多羟基氧化桥、高正电荷的聚合无机高分子絮凝剂^[18], 具有很好的电中和能力, 常用于水中藻类的混凝去除。图 2 探讨了 PFC 不同投加量情况下, 藻及藻臭的去除情况。由于 PFC 与 K_2FeO_4 还原产物同为铁源性混凝剂, 可进行与 PFC 等量投加试验, 通过检验藻类去除效果, 评价 K_2FeO_4 还原产物的混凝性。

由图 2 可见, PFC 混凝对藻类去除效果良好, 投加量为 $0.125 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时, 藻类去除率可达 85.3%, 随着 PFC 投加量的增多, 藻类去除率略有上升, 最高去除率可达 90.6%, 经过一段相对稳定的短暂区, 随着投加量继续增多, 去除率呈下降趋势。该现象主要由藻类表面电荷变化引起, 随着 PFC 的投加, 藻类表面带的负电荷会与 PFC 水解产生的 $Fe(III)$ 电中和, 使得藻体系脱稳被去除, 但当投加量继续升高时, 过量的 PFC 导致藻类等表面附着反电荷并重新稳定, 使得混凝效果变差^[20,21], 浊度的类似变化趋势也可表明混凝剂投加量拐点。单独 PFC 混凝对藻臭的去除甚微, 由于 DMTS 是一种小分子的硫醚类物质, 不易被吸附及混凝去除^[15,22], 单独的投加 PFC 对 DMTS 基本没有去除效果, 图 2 中表征的 27.2% 的去除率主要是由于混凝

过程中的搅拌等导致的臭味损失。从中可知, PFC 投加量为 $0.25 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时, 藻类去除率最高 90.6%, 剩余浊度 0.76 NTU。

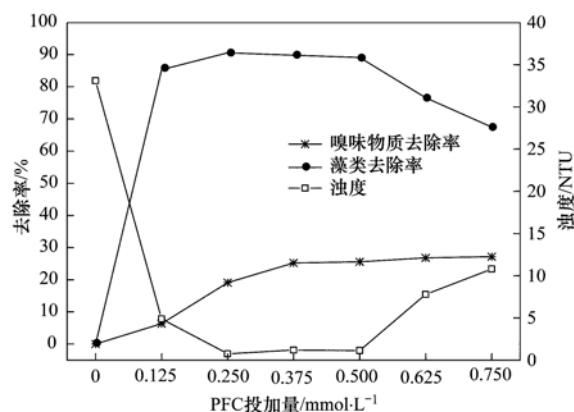


图2 不同投加量 PFC 对藻及藻臭去除效果

Fig. 2 Removal of algae and its odor metabolites with different dosage of PFC

2.3 $KMnO_4$ -PFC 联用控制高藻水中藻类和藻臭

图 3 为 PFC 投加量 $0.25 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$, $KMnO_4$ 投加量 $0.0125 \sim 0.0750 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时, 臭味和藻类等指标去除率情况。

由图 3 可见, $KMnO_4$ -PFC 联用方法对 DMTS 有较好的氧化去除效果, 去除率随投加量的增加而上升, 最高达 90.9%。 $KMnO_4$ 有较强的氧化性, 在酸性和碱性条件下其氧化势分别为 1.7 V 和 0.59 V, 可以氧化硫醇类物质^[23,24], 随着 $KMnO_4$ 投加量的增加, 藻臭的去除效果逐步提高, 未出现类似 K_2FeO_4 的氧化饱和点, 表明试验中 $KMnO_4$ 投加量仍属于不足的情况。

$KMnO_4$ -PFC 联用方法对藻类去除效果稳定, 去除率始终保持在 90% 以上, 最高可达 94.8%。与单

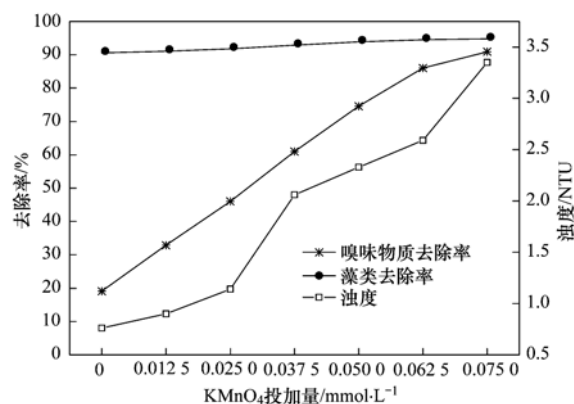
图3 $KMnO_4$ 投加量对藻及藻臭去除效果的影响

Fig. 3 Removal of algae and its odor metabolites with different dosage of $KMnO_4$

纯 PFC 相比,去除率增加了 4.2 个百分点. 有研究认为投加 KMnO_4 预氧化时^[25],藻体系的 Zeta 电位并不发生改变,但 KMnO_4 可能导致藻细胞释放胞外分泌物(EOM),EOM 协同 KMnO_4 的氧化产物 MnO_2 形成络合物覆盖在藻细胞表面改变藻细胞表面属性使后续的处理效果加强.

联用工艺中,随着 KMnO_4 投加量的不断增大,水中剩余浊度也不断上升,分析原因可能是由于过量的 KMnO_4 还原后的 MnO_2 等残存导致. 考虑到剩余浊度和过量 KMnO_4 引起水中色度的上升,试验中 KMnO_4 投加量不再增加.

2.4 K_2FeO_4 及 KMnO_4 -PFC 联用工艺除藻及藻嗅效果对比

由图 1~3 可知,藻类去除主要依靠混凝作用,单纯投加 $0.25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PFC 去除率为 90.6%, KMnO_4 -PFC 去除率为 94.8%, K_2FeO_4 除藻率为 92.4%, K_2FeO_4 比单纯 PFC 混凝的效果好,可见 K_2FeO_4 和藻类接触氧化的过程中会破坏藻细胞结构,同时一些细胞内和胞外分泌物被释放到水体中充当了助凝剂的作用,促进了混凝除藻效果. 3 种方法除藻效果的优劣顺序为 KMnO_4 -PFC > K_2FeO_4 > PFC,剩余浊度高低顺序为: KMnO_4 -PFC > K_2FeO_4 > PFC.

PFC 对 DMTS 基本没有去除效果, K_2FeO_4 的除嗅率 92.5%,远高于 KMnO_4 -PFC 的 74.6%. KMnO_4 投加量为 $0.05 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, K_2FeO_4 投加量为 $0.25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,为 KMnO_4 的 5 倍,此外 Fe(VI) 的氧化还原电位高于 Mn(VII) ,因此 K_2FeO_4 对 DMTS 的氧化效果要优于 KMnO_4 . 参见图 1 和图 3,对氧化剂同等量浓度条件下的除藻和除嗅效果进行对比,可见, KMnO_4 和 K_2FeO_4 投加量均为 $0.05 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,DMTS 的去除率分别为 74.6% 和 44.5%, KMnO_4 控制藻嗅效果好于 K_2FeO_4 . 天然高藻水由于藻类的大量生长,水体呈现碱性,pH 值上升至 10 以上, KMnO_4 和 K_2FeO_4 的氧化能力随 pH 值上升减弱,而 K_2FeO_4 在酸性条件下易分解在碱性条件下稳定的特性使得其氧化应用性反而有所提升^[23,26],这有利于其在高藻水中的应用.

2.5 K_2FeO_4 与 KMnO_4 -PFC 工艺除藻除嗅影响因素对比试验

由 2.1~2.3 节确定 K_2FeO_4 与 KMnO_4 -PFC 联用 2 种方法除藻及藻嗅的对比工艺条件, K_2FeO_4 投加量为 $0.25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, KMnO_4 -PFC 工艺中 PFC 投加量(以 Fe 计)为 $0.25 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, KMnO_4 投加量 $0.05 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

2.5.1 pH 值的影响

由图 4 可见,2 种方法对藻类都有良好的去除效果,且受 pH 影响甚微. KMnO_4 预氧化在不同 pH 值条件下对藻嗅去除效果稳定,维持在 70% 以上,最高达 75.2%. K_2FeO_4 对藻嗅去除受 pH 值影响较大,pH 为 5.24 时 DMTS 的去除率仅为 35.4%,pH 升高至 9.13 时藻嗅的去除率为 78.5%,当 pH 偏碱性时,高于同条件下 KMnO_4 预氧化的去除效果,这与碱性条件下 K_2FeO_4 分解缓慢且氧化还原电位高相符合^[16]. 同等原始浊度条件下, K_2FeO_4 处理后高藻水的浊度小于 KMnO_4 ,原因可能是由于 K_2FeO_4 还原产物转化为絮体参与混凝反应,较 PFC 的混凝效果好,此外, KMnO_4 还原产物 MnO_2 部分残存导致浊度升高.

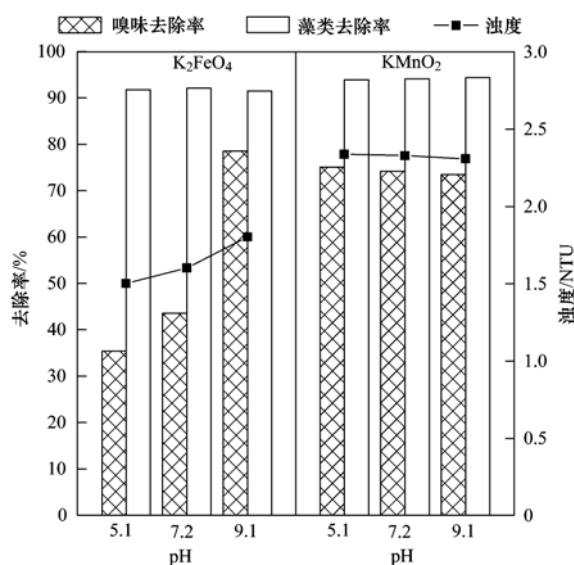


图 4 pH 对 2 种工艺除藻除嗅的影响

Fig. 4 Influence of pH value on the removal of algae and its odor metabolites by the two methods

2.5.2 预氧化时间的影响

由图 5 可见, K_2FeO_4 预氧化 1 min 除藻除嗅效果分别为 92.4% 和 92.5%,且出水浊度低,而 KMnO_4 预氧化 20 min 除藻除嗅效果仅为 94.5% 和 79.5%. 之前的研究表明 K_2FeO_4 氧化藻嗅主要依靠反应的前 30 s,此阶段藻嗅被迅速降解,而接触反应 60~600 s 时,反应速率降低,藻嗅去除效果不明显,整体反应符合三级反应动力学^[27]. K_2FeO_4 在时效性上高于 KMnO_4 预氧化法,达到同等除藻除嗅效果 K_2FeO_4 所需预氧化时间大大少于 KMnO_4 预氧化所需时间.

2.5.3 浊度的影响

由图 6 可见,浊度对 2 种方法的去除效果影响

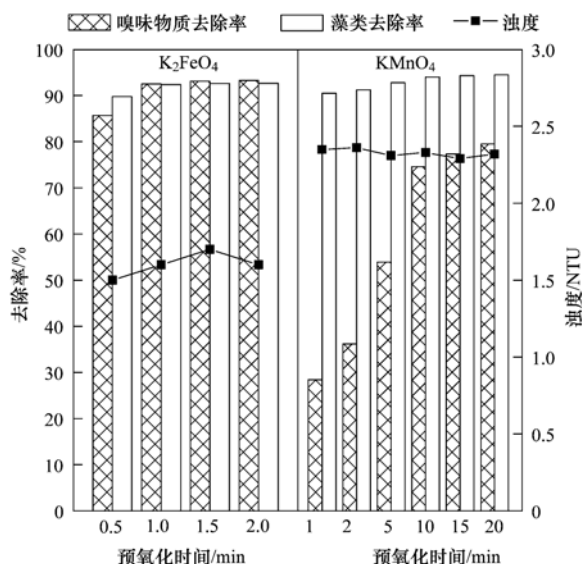


图5 预氧化时间对2种工艺除藻除藻的影响

Fig. 5 Influence of pre-oxidation time on the removal of algae and its odor metabolites by the two methods

微弱,高岭土表面呈现电负性类似于藻细胞^[18],对于藻类去除影响不大.在同等浊度条件下, K_2FeO_4 对藻类和藻臭的共去除效果显著高于 $KMnO_4$ 预氧化,同时剩余浊度低于同水平的 $KMnO_4$ 预氧化法.对比 $KMnO_4$ 预氧化法, K_2FeO_4 具有氧化速度快、负面影响小、剩余浊度低等优点.

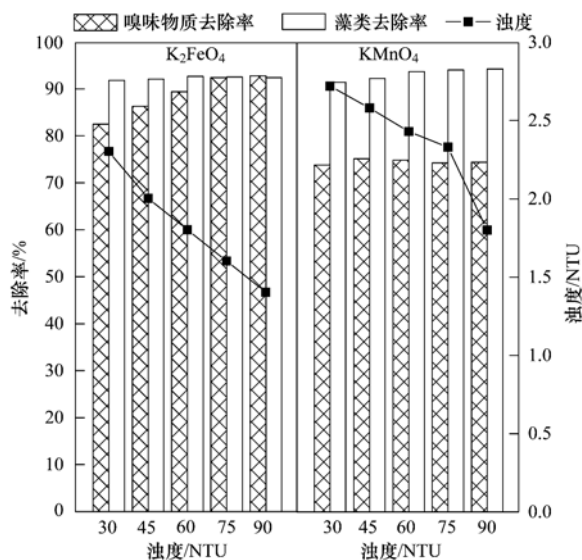


图6 浊度对2种工艺除藻除藻的影响

Fig. 6 Influence of turbidity of raw water on the removal of algae and its odor metabolites by the two methods

3 结论

(1) K_2FeO_4 的强氧化性及其水解后生成的 $Fe(OH)_3$ 胶体颗粒对于高藻水中的藻类及臭味物质二甲基三硫醚有良好的去除效果,对浊度也有一定

的控制效果.

(2) 与直接投加 PFC 混凝相比,在相同投加量的情况下, K_2FeO_4 除藻效果明显优于 PFC. 与 $KMnO_4$ -PFC 联用法相比, K_2FeO_4 除藻臭效果明显,除藻效果相差不大,但对剩余浊度的控制效果更好.

(3) 为同时获得藻及其相关臭味污染物的高效去除, K_2FeO_4 的投加量较大,尽管大部分铁离子将形成絮体参与沉降过程,但不可避免地仍有部分铁离子游离于水中,因此高铁酸钾除藻控臭的具体应用及其用于饮用水处理的安全性仍有待进一步探索.

参考文献:

- [1] Zhang X J, Chen C, Ding J Q, *et al.* The 2007 water crisis in Wuxi, China: analysis of the origin [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **182**(1-3): 130-135.
- [2] Owens P N, Walling D E. The phosphorus content of fluvial sediment in rural and industrialized river basins [J]. *Water Research*, 2002, **36**(3): 685-701.
- [3] Deng X W, Liang G D, Chen J, *et al.* Simultaneous determination of eight common odors in natural water body using automatic purge and trap coupled to gas chromatography with mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2011, **1218**(24): 3791-3798.
- [4] 马晓雁,高乃云,李青松,等.上海市饮用水中痕量土臭素和二甲基异冰片年变化规律及来源研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(4): 902-908.
- [5] 于建伟,李宗来,曹楠,等.无锡市饮用水臭味突发事件致嗅原因及潜在问题分析[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(11): 1771-1777.
- [6] 沈丽娟.富营养化水体异味物质分布形态及藻类厌氧代谢产物的研究[D].南京:南京理工大学,2010.
- [7] 张可佳,高乃云,黎雷.高锰酸钾氧化臭味物质 β -环柠檬醛的动力学[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, **42**(4): 1161-1166.
- [8] 陈忠林,齐飞,徐冰冰,等. γ - $2Al_2O_3$ 催化臭氧氧化水中臭味物质机理探讨[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 563-568.
- [9] 马军,李学艳,陈忠林,等.臭氧氧化分解饮用水中臭味物质 2-甲基异莰醇[J]. *环境科学*, 2006, **27**(12): 2484-2487.
- [10] Qi F, Chen Z L, Xu B B, *et al.* Degradation of 2-methylisoborneol in drinking water by bauxite catalyzed ozonation [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 2008, **57**(6): 427-434.
- [11] Kutschera K, Börnick H, Worch E. Photoinitiated oxidation of geosmin and 2-methylisoborneol by irradiation with 254 nm and 185 nm UV light [J]. *Water Research*, 2009, **43**(8): 2224-2232.
- [12] 葉俐伶. 臭氧對魚腥藻與柱胞藻細胞破壞及代謝物降解之研究[D]. 台南: 国立成功大学, 2008.
- [13] 邱宜亭. 高錳酸鉀對三種藍綠菌破壞及其代謝物釋出之研究[D]. 台南: 国立成功大学, 2008.
- [14] Park G, Yu M, Go J, *et al.* Comparison between ozone and

- ferrate in oxidising geosmin and 2-MIB in water [J]. *Water Science and Technology*, 2007, **55**(5): 117-125.
- [15] Franzmann P D, Heitz A, Zappia L R, *et al.* The formation of malodorous dimethyl oligosulphides in treated groundwater: the role of biofilms and potential precursors [J]. *Water Research*, 2001, **35**(7): 1730-1738.
- [16] Sharma V K. Potassium ferrate (VI): an environmentally friendly oxidant [J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, **6**(2): 143-156.
- [17] Deluca S J, Chao A C, Smallwood C Jr. Ames test of ferrate treated water [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1983, **109**(5): 1159-1167.
- [18] 施国建, 乔俊莲, 王国强, 等. 胞外分泌物和天然有机物对混凝的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 673-677.
- [19] Ma J, Liu W. Effectiveness and mechanism of potassium ferrate (VI) preoxidation for algae removal by coagulation [J]. *Water Research*, 2002, **36**(4): 871-878.
- [20] 王红宇, 赵华章, 栾兆坤, 等. 聚合氯化铁对浊度和腐殖酸的絮凝特性研究 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(3): 65-68.
- [21] 王红宇, 陈福泰, 王亚宜, 等. 聚合氯化铁与三氯化铁吸附电中和特征的比较研究 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(5): 60-67.
- [22] 李勇, 陈超, 张晓健, 等. 饮用水中典型致嗅物质去除技术研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3049-3053.
- [23] Damm J H, Hardacre C, Kalin R M, *et al.* Kinetics of the oxidation of methyl tert-butyl ether (MTBE) by potassium permanganate [J]. *Water Research*, 2002, **36**(14): 3638-3646.
- [24] 刘尧, 张晓健, 戴吉胜, 等. 高锰酸钾氧化水中乙硫醇的动力学研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1261-1265.
- [25] Chen J J, Yeh H H. The mechanisms of potassium permanganate on algae removal [J]. *Water Research*, 2005, **39**(18): 4420-4428.
- [26] Li C, Li X Z, Graham N, *et al.* The aqueous degradation of bisphenol A and steroid estrogens by ferrate [J]. *Water Research*, 2008, **42**(1-2): 109-120.
- [27] Hu S F, Ma X Y, Wang H Y, *et al.* Kinetics on oxidation of odor contaminant-dimethyl trisulfide by potassium ferrate in drinking water [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, **255-260**: 2987-2993.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行