

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM_{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 尹雪,陈家军,吕策 (733)

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫磺排放动态研究 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响

田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,长江水环境教育部重点实验室,同济大学环境科学与工程学院,上海 200092)

摘要:以取自上海市杨树浦水厂的长江原水为研究对象,对比分析了 3 种常见预氧化剂二氧化氯(ClO_2)、高锰酸钾(KMnO_4)及氯(Cl_2)预氧化对削减氯化和氯胺化消毒副产物(DBPs)生成潜能的效果情况.氯化培养实验结果表明,3种预氧化剂的处理对DBPs总量的去除效果均不显著,经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 作用后可分别削减8.4%、5.7%及3.9%,效果为 $\text{ClO}_2 > \text{Cl}_2 > \text{KMnO}_4$.对于长江原水使用氯化消毒时,采用 ClO_2 作为预氧化剂可取得对消毒副产物较好的去除效果.氯胺化培养实验结果表明,3种预氧化剂处理对长江原水氯胺化DBPs的生成潜能影响有较大差异,经 ClO_2 和 KMnO_4 作用后可分别削减18.1%及4.1%,而预氯化后则增高12.3%.对于长江原水使用氯胺化消毒时,采用 ClO_2 作为预氧化剂可取得对消毒副产物较为明显的去除效果.同时,应尽量避免使用预氯化后加氯胺化的组合,以防止在水处理过程中生成更多的DBPs而影响出水水质.

关键词:预氧化;长江原水;氯化;氯胺化;消毒副产物

中图分类号: X131.2; R123.6 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0605-06

Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water

TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, CHEN Ying-ying, ZHANG Tian-yang, ZHU He-zhen

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Key Laboratory of Yangtze Aquatic Environment, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Yangtze River raw water from Yangshupu Water Plant, Shanghai was studied in this paper for reduced formation potential of chlorination and chloramination disinfection by-products (DBPs) after pre-oxidation by three kinds of common pre-oxidants, which were potassium permanganate, chlorine and chlorine dioxide. Results of chlorination showed that removal effectiveness of all the selected oxidants on total chlorination DBPs was not significant, and the reduction percentages by ClO_2 , Cl_2 and KMnO_4 were 8.4%, 5.7% and 3.9%, respectively. The order of DBPs control effect was $\text{ClO}_2 > \text{Cl}_2 > \text{KMnO}_4$. As to Yangtze River raw water in case of chlorine disinfection, using ClO_2 as pre-oxidation agent showed relatively better effect on removal of DBPs. However, chloramination results demonstrated that impacts of the three preoxidants on DBPs formation potential were quite different, and the reduction percentages by ClO_2 and KMnO_4 were 18.1% and 4.1%, respectively, while pre-chlorination increased the potential by 12.3%. These results revealed that ClO_2 had the highest removal effectiveness, meanwhile pre-chlorination should be avoided due to its notable increase in DBPs formation.

Key words: pre-oxidation; Yangtze River raw water; chlorination; chloramination; disinfection by-products (DBPs)

近年来,由于水体中有机污染的问题越来越突出,化学预氧化被用来氧化降解水中部分有机污染物,削弱污染物对常规处理工艺的不利影响,为后续水处理工艺减轻负担,强化常规工艺的去除污染物效果,从而起到改善水质和减少DBPs生成量的作用^[1,2].针对不同的水质特征,选择合适的预氧化剂,是提高水处理工艺效果的关键,对实际的水处理工艺有深远的意义.常见的预氧化剂有氯(Cl_2)、二氧化氯(ClO_2)、高锰酸钾(KMnO_4)等. KMnO_4 预氧化应用于饮用水处理,可以去除气味、味道、颜色和溶解性铁锰离子^[3].高锰酸钾亦能够通过直接氧化细胞物质以及破坏细菌、真菌、病毒和藻类

必需的酶类,从而在水厂中起到防止并控制微生物生长的作用^[4]. ClO_2 能除去水中氰、酚、臭味,氧化效率比氯好,且其作用效果不受pH和水中氨的影响.由于二氧化氯预氧化原水时比氯最突出的优势是不产生较高浓度的THMs和HAAs且不生成氯代副产物,这使其在饮用水处理中逐渐获得应用^[5,6].预氯化目前被国内外水厂广泛用于抑制藻

收稿日期: 2013-04-28; 修订日期: 2013-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278352); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07404, 2012ZX07408001)

作者简介: 田富箱(1984~),男,博士研究生,主要研究方向为饮用水中消毒副产物生成与控制, E-mail: tianfuxiang2007@aliyun.com

类及细菌繁殖,氧化水中有机物等^[7]. 但当原水中有机污染物较多时,预氯化的消毒效果不仅会变差,还会增加多种三致性 DBPs 的生成^[8,9],从而给饮用水的安全带来威胁.

氯消毒和氯胺消毒是目前国内外绝大多数水厂采用的消毒方式. 但当水中存在污染性有机物时,氯消毒和氯胺消毒都会生成多种对人体有极大危害的卤代和非卤代有毒有害消毒副产物^[10]. 氯消毒所产生的副产物主要为挥发性物质,主要包括三卤甲烷 (THMs)、卤乙酸 (HAAs)、卤乙腈 (HANs)、卤化酮 (HKs)、醛 (CH) 等. 有研究发现,在氯消毒产生的 DBPs 中,THMs 约占总量的 20% 左右,HAAs 为 10% 左右,HANs 为 2% 左右^[11]. 对氯化消毒副产物的研究和各种副产物前体物氯化特性的研究是目前这一领域的研究热点之一. 氯胺氧化能力比氯稍弱,但其稳定性好于氯,所以氯胺对于控制微生物的再生长优于自由氯. 而且与氯消毒相比,氯胺消毒生成的 DBPs 明显减少,有资料显示 THMs 的生成量可减少 50% 左右^[12]. 氯胺在有机物含量高的水源水厂中获得广泛使用. 但是近年来,研究发现危害更大的含氮消毒副产物 (N-DBPs) 亚硝胺、卤代硝基甲烷 (HNMs) 和卤代乙腈 (HANs) 等在氯胺消毒过程中产生量远高于自由氯消毒^[13,14],而这些含氮消毒副产物的细胞毒性和遗传毒性都比常规消毒副产物 THMs 和 HAAs 要高出若干个数量级^[14].

建于 1883 年的杨树浦水厂是中国最早的现代化地表水厂,过去一直取用黄浦江原水,但原水的有机污染问题一直较为严重^[15,16],2011 年 4 月,青草沙水库建成通水,杨树浦水厂等取水源地从黄浦江改为长江. 为探索应用预氧化工艺对削减杨树浦水厂所用长江水源水生成 DBPs 的效果,本文以杨树浦水厂所取长江原水为研究对象,对比分析了 3 种常见预氧化剂——高锰酸钾、二氧化氯及氯预氧化剂削减氯化物和氯胺化 DBPs 生成潜能的效果,探讨了预氧化工艺与水质特点的适配性问题,以期能为长江原水预氧化工艺的选择提供理论和技术支持.

1 材料与方法

1.1 实验试剂、仪器与分析方法

实验中使用的硫酸、氢氧化钠、氢氧化钾、磷酸二氢钾、无水硫酸钠、硫代硫酸钠、高锰酸钾等试剂均为优级和分析纯试剂,购自国药集团化学试剂有限公司(上海). 次氯酸钠(有效氯浓度 52 g·L⁻¹左右)及氯化铵均为优级纯试剂,购自 Sigma-

Aldrich 公司. 所用有机溶剂甲基叔丁基醚 (MTBE) 等为色谱纯试剂,购自 J. T. Baker (USA). 实验配置的溶液均采用超纯水配置,超纯水来自 Milli-Q (Reference 型,美国 Millipore 公司)纯水机. 实验所用长江原水取自上海市杨树浦水厂,其主要水质指标如表 1 所示. 实验所用消毒副产物标准样品三卤甲烷混标 (THMs,包括三氯甲烷、三氯乙烷、四氯化碳、三氯乙烯、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、1,2-二溴乙烷、四氯乙烯、三溴甲烷和 1,2-二溴-3-氯丙烷 10 种物质),其它 N-DBPs 与 C-DBPs 混标 (主要含三氯乙腈、二氯乙腈、1,1-二氯丙酮、三氯硝基甲烷、1-溴-1-氯乙腈、1,1,1-三氯丙酮、二溴乙腈)均购自于美国 Sigma-Aldrich 公司.

实验中使用的二氧化氯溶液浓度为 0.3%,由购于 TwinOxide® (De Tongelreep, Netherlands) 的两种试剂先后加入 250 mL 超纯水中经混合而成,用棕色瓶密封避光冷藏. 该方法制成的二氧化氯纯度为 99.9% 以上且无副产物^[17]. 定时重新配置二氧化氯溶液并在使用前测定其浓度. 氯胺使用液每次均现配现用,氯氮比按 1:1.25 (摩尔比)配制^[18,19]. 氯、氯胺及二氧化氯均用 DPD 法准确检测浓度,以保证投加量的精确^[20]. 水样的氯化与氯胺化培养生成 DBPs 潜能实验均需在严格控温 25℃ 条件下的恒温生化培养箱内进行. 三卤甲烷 (THMs)、卤代酮 (HKs)、卤乙腈 (HANs) 及三氯硝基甲烷 (TCNM) 等挥发性消毒副产物均采用 GC-ECD 方法分析,实验水样中三卤甲烷测定采用 EPA502.1 方法,卤乙腈、卤代酮、三氯硝基甲烷等测定采用 EPA551.1 方法^[21]. 所用仪器为岛津 GC2010,采用 HP5 毛细管柱 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm, J&W) 作为分离柱.

表 1 长江原水相关水质参数

指标	DOC (以 C 计) /mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄ /cm ⁻¹	* SUVA ¹⁾ /L·(mg·m) ⁻¹	Br ⁻ /μg·L ⁻¹
测定值	2.3	0.045	1.95	183.1

1) * SUVA = 100 × UV₂₅₄/DOC

1.2 实验方法

1.2.1 原水水样的预氧化处理方法

实验采用二氧化氯 (ClO₂)、氯 (Cl₂) 及高锰酸钾 (KMnO₄) 作为预氧化剂对水样进行预处理. 预氧化处理前,先对二氧化氯及氯浓度进行标定以备用,高锰酸钾浓度为 0.05 mol·L⁻¹. 根据所需控制的预氧化剂初始投加浓度及水量计算预氧化剂投加量.

恒温 25℃ 下取定量未经 0.45 μm 过滤的长江原水 200 mL 于棕色瓶中, 分别定量加入预氧化剂(均为 1 mg·L⁻¹), 10 mmol·L⁻¹ 磷酸盐控制溶液 pH = 7.0, 同时开始计时. 采用磁力搅拌器控制转速, 先以 300 r·min⁻¹ 转速搅拌 30 min, 再以 80 r·min⁻¹ 转速搅拌 5 min. 实验完毕后加入过量 Na₂S₂O₃ 将剩余的预氧化剂淬灭. 之后用 0.45 μm 滤膜将预氧化后的水样进行过滤, 分别保存、备用.

1.2.2 消毒副产物生成潜能氯化及氯胺化培养方法

水样经过 0.45 μm 醋酸纤维膜过滤后, 取 50 mL 放入洗净的烧杯, 加氯(或氯胺)量根据各水样的水质参数值, 加氯量按公式(1)计算[加氯胺量按公式(2)计算]. 控制磷酸盐缓冲溶液的浓度达到 10 mmol·L⁻¹, 调节 pH 7 ± 0.01, 选用磷酸二氢钾-氢氧化钠缓冲溶液. 将以上水样装满 45 mL 安培瓶中, 并使用带有聚四氟乙烯垫片的盖子盖紧培养瓶, 培养瓶需保证无气泡, 使得反应生成后的挥发性 DBPs 均存在于水相中, 以防止其在打开瓶盖时逸出. 培养水样放置于黑暗环境的培养箱内, 温度控制为 25℃. 一般 7 d 后生成潜能反应结束, 向培养液中加入过量氯化铵将余氯淬灭.

$$\text{Cl}_2(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = 3 \times [\text{DOC}] + 8 \times [\text{NH}_4\text{-N}] + 5 \times [\text{NO}_2^-] + 10 \quad (1)$$

$$\text{NH}_4\text{Cl}(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}) = 3 \times [\text{DOC}] + 5 \times [\text{NO}_2\text{-N}] \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 不同预氧化剂对长江原水氯化 DBPs 生成潜能的影响

氯化培养未经预氧化处理及经 ClO₂、Cl₂ 及 KMnO₄ 预氧化后的长江原水 DBPs 生成潜能的变化规律如图 1~5 所示. 为表达方便, 图中 RWFP 均表示长江原水 DBPs 生成潜能情况, 图中的氧化剂表示相应氧化剂预处理后的 DBPs 生成潜能情况.

从图 1 可以看出, 氯化培养长江原水及经不同预氧化剂处理后的长江原水时, 可生成 4 种三卤甲烷, 分别是三氯甲烷(CF)、二氯一溴甲烷(DCBM)、二溴一氯甲烷(DBCM). 不同预氧化工艺处理对 THMs 生成潜能有不同程度的降低, 其中长江原水经氯化培养后 THMs 生成潜能为 267.8 μg·L⁻¹, 经 ClO₂、Cl₂ 及 KMnO₄ 预氧化作用的去除率分别为 9.34%、6.95% 及 4.00%. 可以看出, 采用合适的氧化剂对长江原水进行预氧化作用可以在一定程度上降低长江原水的 THMs 生成潜能, 但降低效果并不显著.

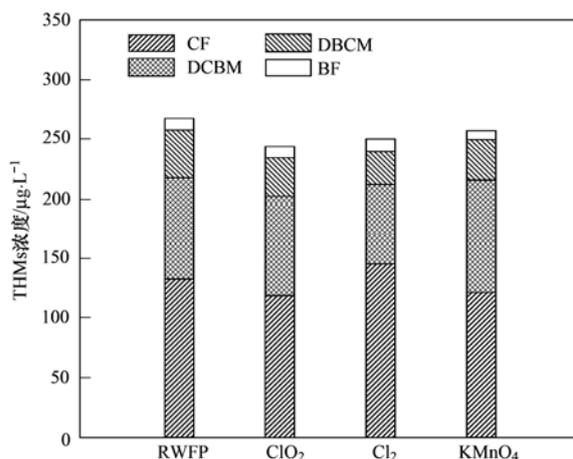


图 1 不同预氧化剂对长江原水氯化生成 THMs 的影响

Fig. 1 Formation of THMs from chlorination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

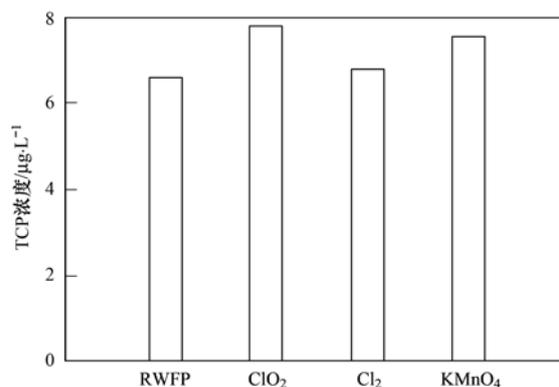


图 2 不同预氧化剂对长江原水氯化生成 HKs 的影响

Fig. 2 Formation of HKs from chlorination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

不显著.

如图 2 所示, 氯化培养时还检测到 1,1,1-TCP 的生成. 其中, 长江原水的 1,1,1-TCP 生成潜能为 6.60 μg·L⁻¹, 经 ClO₂、Cl₂ 及 KMnO₄ 预氧化作用后水样的 1,1,1-TCP 生成潜能分别为 7.79、6.79 及 7.55 μg·L⁻¹, 均出现略微上升. 可以看出, 本实验采用的预氧化剂对于长江原水的 1,1,1-TCP 生成潜能去除效果不佳, 均导致其生成量在一定程度上的升高.

图 3 为不同预氧化剂对其他 C-DBPs, 如三氯乙烷、四氯化碳及四氯乙烯生成潜能的影响情况. 从中可以看出, 经 ClO₂、Cl₂ 及 KMnO₄ 预氧化作用对三氯乙烷生成潜能去除率分别达到 81.53%、84.11% 及 87.06%, 但四氯乙烯生成潜能由原来的 3.41 μg·L⁻¹ 分别上升为 5.01、5.38 及 5.06 μg·L⁻¹; ClO₂ 及 Cl₂ 对四氯化碳生成量无明显影

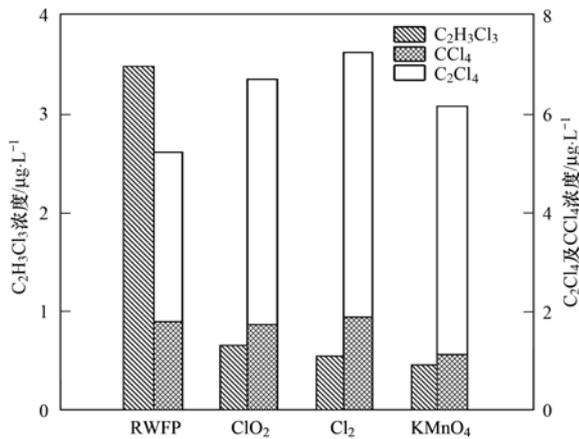


图3 不同预氧化剂对长江原水氯化生成其他 C-DBPs 的影响

Fig. 3 Formation of other C-DBPs from chlorination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

响,但 KMnO_4 作用后的水样四氯化碳生成量由原来的 $1.80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低为 $1.13 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 降幅为 37.43%。可以看出预氧化作用对于不同的消毒副产物有不同的作用效果,有时反而会导致其生成量的升高,应综合考虑作用效果,选择较优预氧化剂。

氯化培养未经预氧化处理及经不同预氧化剂处理后的长江原水的 N-DBPs 生成潜能如图 4 所示,为 DCAN 和 TCNM,且二者的生成量均较低,说明长江水中能生成这两种 N-DBPs 的含氮前体物相对较少,原水水质较好。同时可以看出,经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 的预氧化后,长江原水的 DCAN 出现显著降低,降幅分别达到 75.03%、80.90% 及 79.55%,而 TCNM 生成潜能则出现相反的趋势,分别由原来的 $2.54 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升为 4.41、6.41 及 $4.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此本实验所采用的预氧化剂对长江原水的 DCAN 生成潜能去除效果较为明显,但对 TCNM 去除效果不佳。

根据以上实验结果,氯化培养长江原水及不同预氧化工艺处理后长江原水对其 C-DBPs 及 N-DBPs 生成潜能总量的削减效果如图 5 所示。从中可以看出,经 ClO_2 预氧化作用后,长江原水 C-DBPs 生成潜能由 $283 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降为 $258 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,降幅为 8.86%,高于 Cl_2 的 6.80% 及 KMnO_4 的 4.17%; 但 N-DBPs 生成潜能却在经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 预氧化后出现不同程度的升高,尤其是预氯化导致其生成量增幅达 71.21%。

综合考虑两类 DBPs 的生成潜能总量,原水为 $286.96 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 作用后分别降低为 262.73、270.49 及 $275.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,降幅

分别为 8.44%、5.74% 及 3.86%, 3 种药剂的预氧化对 DBPs 总量的去除效果均不显著,削减效果顺序为 $\text{ClO}_2 > \text{Cl}_2 > \text{KMnO}_4$ 。由此可以看出,后续工艺使用氯化消毒时,采用 ClO_2 作为预氧化剂处理长江原水可取得相对较好的处理效果。

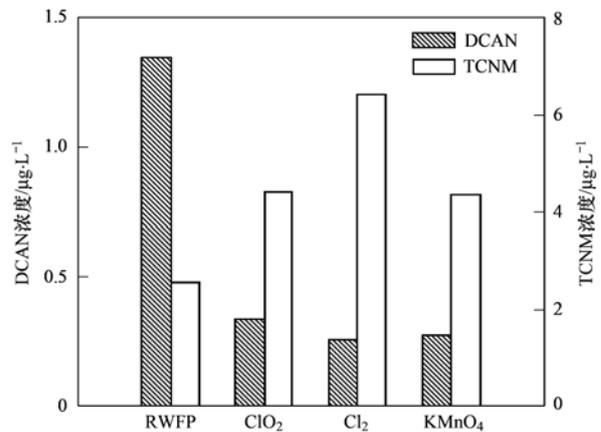


图4 不同预氧化剂对长江原水氯化生成 N-DBPs 的影响

Fig. 4 Formation of N-DBPs from chlorination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

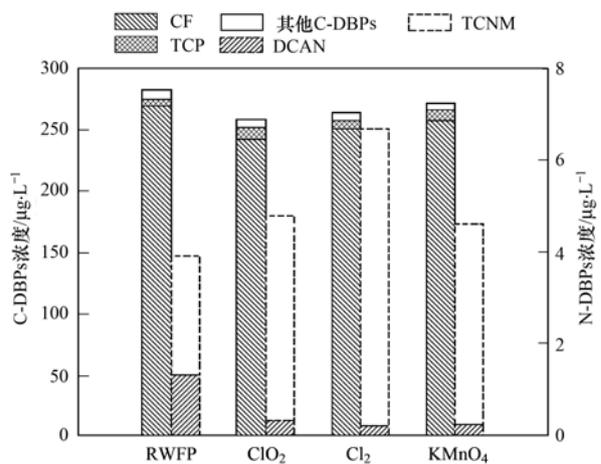


图5 不同预氧化剂对长江原水氯化生成 DBPs 总量影响

Fig. 5 Formation of DBPs from chlorination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

2.2 不同预氧化工艺对长江原水氯胺化生成 DBPs 的影响规律分析

氯胺化培养未经预氧化处理及经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 不同预氧化工艺处理后的长江原水时 DBPs 生成潜能如图 6~9 所示。

从图 6 可以看出,与氯化培养结果相似,氯胺化培养长江原水及经不同预氧化剂处理后的长江原水时,生成 4 种 THMs, 分别是 BF、CF、DCBM 和 DBCM。其中,长江原水氯胺化培养 THMs 生成潜能为 $45.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 预氧化作

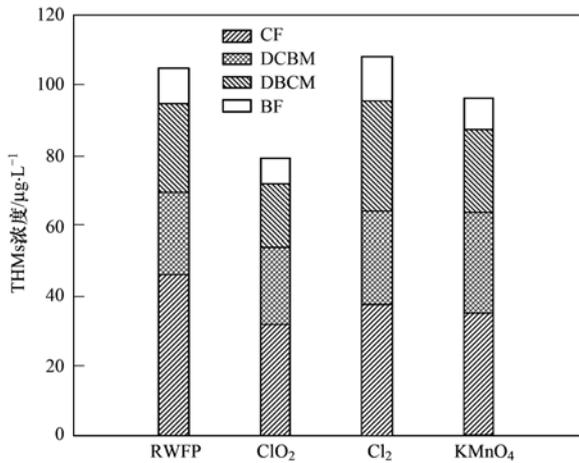


图 6 不同预氧化剂对长江原水氯胺化生成 THMs 影响

Fig. 6 Formation of THMs from chloramination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

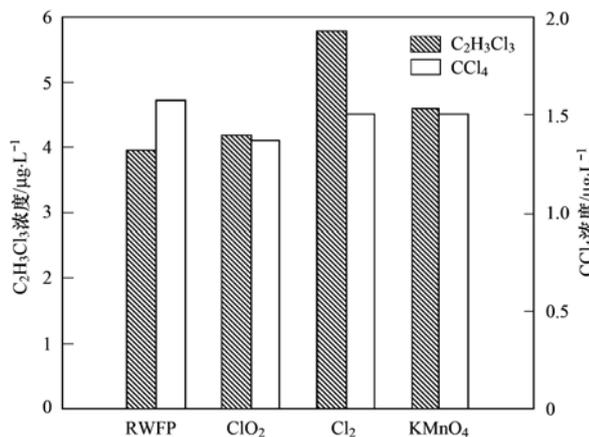


图 7 不同预氧化剂对长江原水氯胺化生成其他 C-DBPs 影响

Fig. 7 Formation of other C-DBPs from chloramination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

用后水样的 THMs 生成潜能均出现下降,分别为 31.75、37.53 及 34.95 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率分别为 30.77%、18.14% 及 23.77%,去除效果为 $\text{ClO}_2 > \text{KMnO}_4 > \text{Cl}_2$ 。可以看出,采用这 3 种药剂对长江原水进行预氧化后可以在一定程度上降低长江原水的 THMs 生成潜能,且预氧化后续处理为氯胺化时对 THMs 的削减效果大大优于后续处理为氯化时的情况(如图 1)。需要指出的是,氯胺化培养 4 组水样均未检测到 1,1,1-TCP,这与氯化培养明显不同。

图 7 为不同预氧化剂对其他常见 C-DBPs 如三氯乙烷及四氯化碳生成潜能的影响情况。从中可以看出,经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 预氧化对三氯乙烷及四氯化碳生成潜能削减效果均不显著,尤其是三氯乙烷生成潜能分别由 3.95 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升为 4.19、5.81 及 4.58 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这 3 种药剂的预氧化对三氯

乙烷及四氯化碳生成潜能没有去除效果。

氯化培养未经氧化处理及经不同预氧化剂处理后的长江原水的 N-DBPs 生成潜能如图 8 所示,为 DCAN 和 TCNM。可以看出,经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 的预氧化作用后,长江原水的 DCAN 生成潜能出现了不同的变化趋势,由原来的 1.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 分别变化为 0.9、4.1 及 1.1 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而 TCNM 生成潜能均出现增高的趋势,分别由原来的 1.7 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升为 7.4、7.5 及 5.2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这 3 种预氧化剂的处理对这两种 N-DBPs 的生成潜能不仅没有去除,甚至有大幅度的升高,增大了对饮用水安全的威胁。尤其是 Cl_2 作为预氧化剂会明显提高长江原水氯胺化生成含 N-DBPs 的潜能,在实际应用中不宜采用。

根据以上实验结果,氯胺化培养长江原水及经不同预氧化剂处理后的长江原水的 C-DBPs 及 N-DBPs 生成潜能总量如图 9 所示。从中可以看出,原

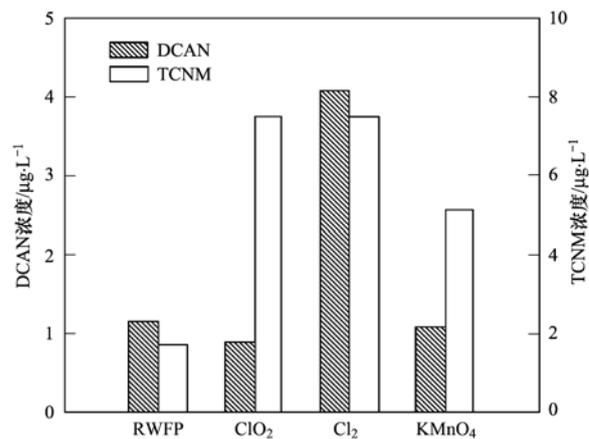


图 8 不同预氧化剂对长江原水氯胺化生成 N-DBPs 影响

Fig. 8 Formation of N-DBPs from chloramination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

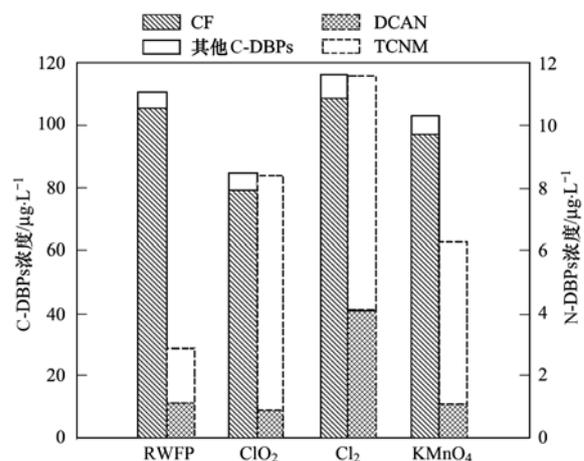


图 9 不同预氧化剂对长江原水氯胺化生成 DBPs 总量的影响

Fig. 9 Formation of DBPs from chloramination of raw water and pre-oxidized water from Yangtze River

水 C-DBPs 生成潜能为 $110.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 作用后, 分别变化为 84.6、115.1 及 $102.6 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, ClO_2 和 KMnO_4 对 C-DBPs 的去除率分别为 23.5% 及 7.2%, 但是用 Cl_2 作为预氧化剂反而会增加 C-DBPs 的生成潜能. 3 种预氧化剂对于 N-DBPs 的去除效果均不佳, 其中预氯化作用导致 DCAN 生成潜能大幅度增加, 值得特别注意.

综合两类 DBPs 总的生成潜能, 原水为 $113.4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 而经 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 作用后分别变为 92.9、127.4 及 $108.8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, ClO_2 和 KMnO_4 对总 DBPs 生成量的去除率分别为 18.1% 及 4.1%, 使用 Cl_2 作为预氧化剂时, 反而使 DBPs 生成量增高 12.3%, 不宜采用. 综合考虑, 后续工艺使用氯化消毒时, 采用 ClO_2 作为预氧化剂处理长江原水可取得相对较好的处理效果, 与此同时, 应尽量避免使用预氯化加氯胺消毒的组合, 以防止在水质处理过程中生成更多的 DBPs 影响出水水质.

3 结论

(1) 3 种预氧化剂 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 均可以在一定程度上降低长江原水氯化 DBPs 的生成潜能, 其削减效果为 $\text{ClO}_2 > \text{Cl}_2 > \text{KMnO}_4$. 对于长江原水使用氯化消毒时, 应优先采用 ClO_2 作为预氧化剂.

(2) 3 种预氧化剂 ClO_2 、 Cl_2 及 KMnO_4 对长江原水氯胺化 DBPs 的生成潜能削减效果差异较大, ClO_2 削减效果最佳, 而 KMnO_4 和 Cl_2 几乎没有削减效果, 尤其是预氯化反而会较高地增加氯胺化 DBPs 的生成潜能, 应避免使用.

参考文献:

- [1] Plummer J D, Edzwald J K. Effects of chlorine and ozone on algal cell properties and removal of algae by coagulation [J]. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 2002, **51**(6): 307-318.
- [2] Ma J, Liu W. Effectiveness and mechanism of potassium ferrate (VI) preoxidation for algae removal by coagulation [J]. *Water Research*, 2002, **36**(2): 871-878.
- [3] Bryant E A, Fulton G P, Budd G C. Disinfection alternatives for safe drinking water [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [4] Weber W J. Physicochemical processes for water quality control [M]. New York: Wiley Interscience, 1972.
- [5] Rav-Acha C. Transformation of aqueous pollutants by chlorine dioxide: reactions, mechanisms and products [A]. In: *Quality and Treatment of Drinking Water II* [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1998: 143-175.
- [6] Gallagher D L, Hoehn R C, Dietrich A M. Sources, occurrence, and control of chlorine dioxide by-product residuals in drinking water [M]. AWWAR, 1994.
- [7] 王丽花, 张晓健. 成都市饮用水中消毒副产物的变化研究 [J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(11): 8-11.
- [8] Reckhow D A, Singer P C, Malcolm R L. Chlorination of humic materials: byproduct formation and chemical interpretations [J]. *Environmental Science & Technology*, 1990, **24**(11): 1655-1664.
- [9] Singer P C. Humic substances as precursors for potentially harmful disinfection by-products [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(9): 25-30.
- [10] 葛飞, 杨天军. 饮用水中消毒副产物的形成机理与控制技术研究 [J]. *湖北化工*, 2001, **18**(6): 23-25.
- [11] 韩畅, 刘绍刚, 仇雁翎, 等. 饮用水消毒副产物分析及相关研究进展 [J]. *环境保护科学*, 2009, **35**(1): 12-16.
- [12] 肖锦晖, 肖惠贞. 饮用水消毒剂及其副产物对人体健康的影响 [J]. *中国消毒学杂志*, 2004, **21**(1): 63-66.
- [13] Krasner S W, Weinberg H S, Richardson S D, *et al.* Occurrence of a new generation of disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(23): 7175-7185.
- [14] 焦中志, 陈忠林, 陈杰等. 氯胺消毒对消毒副产物的控制研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, **37**(11): 1486-1488, 1495.
- [15] 张勇, 王云, 叶文虎. 上海市地表水水质近 20 年的变化 [J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(2): 247-251.
- [16] 乐林生, 鲍士荣, 康兰英, 等. 黄浦江上游原水水质特征与处理对策 [J]. *给水排水*, 2005, **31**(7): 26-31.
- [17] Ye T, Xu B, Lin Y L, *et al.* Formation of iodinated disinfection by-products during oxidation of iodide-containing water with potassium permanganate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **241-242**: 348-354.
- [18] Yang X, Shang C, Westerhoff P. Factors affecting formation of haloacetonitriles, halo ketones, chloropicrin and cyanogen halides during chloramination [J]. *Water Research*, 2007, **41**(6): 1193-1200.
- [19] Mitch W A, Sedlak D L. Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from dimethylamine during chlorination [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(4): 588-595.
- [20] APHA-AWWA/WEF. Standard methods for the examination of water and wastewater (20th ed.) [M]. Washington DC: American Public Health Association, 1998.
- [21] USEPA. Method 551. 1, Determination of chlorination disinfection by-products, chlorinated solvents, and halogenated pesticides/herbicides in drinking water by liquid-liquid extraction and gas chromatograph with electron-capture detection [S]. Washington, DC: Office of Research and Development, 1995.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of Pleurotus Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《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)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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