

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

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

序	郝郑平 (4503)
南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征	安俊琳, 朱彬, 李用宇 (4504)
天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析	翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 王亘, 翟友存 (4513)
南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析	杨辉, 朱彬, 高晋徽, 李用宇, 夏丽 (4519)
上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算	崔虎雄 (4529)
四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响	韩丽, 王幸锐, 何敏, 郭卫广 (4535)
武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策	黄碧捷 (4543)
北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究	段菁春, 彭艳春, 谭吉华, 郝吉明, 柴发合 (4552)
广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价	李雷, 李红, 王学中, 张新民, 温冲 (4558)
天津某家具城挥发性有机物健康风险评估	张银, 王秀艳, 高爽 (4565)
废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究	王浙明, 徐志荣, 叶红玉, 许明珠, 王晓星 (4571)
农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险	谭冰, 王铁宇, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (4577)
电子产品加工制造企业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征	崔如, 马永亮 (4585)
汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价	曾培源, 李建军, 廖东奇, 涂翔, 许玫英, 孙国萍 (4592)
载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价	陈小开, 程赫明, 罗会龙 (4599)
基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究	何万清, 聂磊, 田刚, 李靖, 邵霞, 王敏燕 (4605)
VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价	房增强, 甘平, 杨乐, 戴子瑜, 祁世鸿, 贾建丽, 何绪文 (4612)
挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征	甘平, 杨乐巍, 房增强, 郭淑倩, 于妍, 贾建丽 (4619)
土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究	杜平, 王世杰, 赵欢欢, 伍斌, 韩春媚, 房吉敦, 李慧颖, 细见正明, 李发生 (4627)
土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响	胡林, 邱兆富, 何龙, 宴颖, 吕树光, 隋倩, 林匡飞 (4635)
自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律	陈锡超, 罗茜, 陈虎, 魏孜, 王子健, 许科文 (4642)
杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价	陈峰, 徐建芬, 唐访良, 张明, 阮东德 (4649)
维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性	郭斌, 律国黎, 任爱玲, 杜昭, 邢志贤, 韩鹏, 高博, 刘淑娅 (4654)
新型生物滴滤填料性能评价	梅瑜, 成卓韦, 王家德, 活泼 (4661)
微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究	张超, 赵梦升, 张丽丽, 陈建孟 (4669)
BF 和 BTf 工艺去除 DCM 性能比较	潘维龙, 於建明, 成卓韦, 蔡文吉 (4675)
改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究	王家德, 郑亮巍, 朱润晔, 俞云锋 (4684)
转轮吸附法处理有机废气的研究	朱润晔, 郑亮巍, 毛玉波, 王家德 (4689)
活性炭吸附有机蒸气性能的研究	蔡道飞, 黄维秋, 王丹莉, 张琳, 杨光 (4694)
UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究	沙昊雷, 杨国靖, 夏静芬 (4701)
蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究	杜娟, 栾志强, 解强, 叶平伟, 李凯, 王喜芹 (4706)
内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析	吴宏章, 黄维秋, 杨光, 赵晨露, 王英霞, 蔡道飞 (4712)
基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究	李靖, 王敏燕, 张健, 何万清, 聂磊, 邵霞 (4718)
铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学	陈长伟, 于艳科, 陈进生, 何焜 (4724)
KrBr ⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体	赵洁, 刘玉海, 韦连梅, 叶招莲, 张善端 (4734)
异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究	颜鲁春, 刘杰民, 付慧婷, 孙媛, 林文辉 (4743)
挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究	江梅, 张国宁, 任春, 邹兰, 魏玉霞 (4747)
挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善	江梅, 张国宁, 邹兰, 魏玉霞, 张明慧 (4751)
我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究	王铁宇, 李奇锋, 吕永龙 (4756)
固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究	王强, 周刚, 钟琪, 赵金宝, 杨凯 (4764)
石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估	牟桂芹, 隋立华, 郭亚逢, 马传军, 杨文玉, 高阳 (4771)
植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展	谢军飞, 李延明 (4779)
基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究	刘昌新, 王宇飞, 郝郑平, 王铮 (4787)
《环境科学》第34卷(2013年)总目录	(4792)
《环境科学》征订启事 (4717) 《环境科学》征稿简则 (4742) 信息 (4528, 4626, 4693, 4700)	

自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律

陈锡超^{1,2}, 罗茜^{1*}, 陈虎³, 魏孜¹, 王子健¹, 许科文²

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 嘉兴市水文站, 嘉兴 314001; 3. 连云港市自来水有限责任公司, 连云港 222006)

摘要: 针对连云港市3个自来水厂不同的消毒处理工艺, 研究了常规和深度处理对原水中挥发性有机物(VOCs)的处理效果和工艺过程中VOCs的形成规律. 在所采集的水样中, 67种目标VOCs有3类共30种被检出, 其中羰基化合物、卤代烃和苯系物的检出浓度范围分别是0.04~61.27、0.02~35.61和0.07~2.33 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 研究表明, 常规氯消毒工艺能有效去除原水中的苯系物类化合物, 但会产生三卤甲烷(THMs)等消毒副产物; 臭氧-生物活性炭深度处理工艺能有效降低预氯化过程中THMs的生成量, 但会产生如羰基化合物等风险污染物. 管网中深度处理产生的羰基化合物在余氯作用下转化形成THMs. 管网水中检出的VOCs除巴豆醛的致癌风险在 $9.3 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-4}$ 之间, 略高于US EPA的控制阈值($10^{-6} \sim 10^{-4}$)外, 其他化合物的健康风险都处于较低水平.

关键词: 连云港; 挥发性有机物; 消毒副产物; 深度处理工艺; 常规处理工艺

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4642-07

Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes

CHEN Xi-chao^{1,2}, LUO Qian¹, CHEN Hu³, WEI Zi¹, WANG Zi-jian¹, XU Ke-wen²

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Hydrologic Station of Jiaying City, Jiaying 314001, China; 3. Lianyungang Water Supply Co., Ltd., Lianyugang 222006, China)

Abstract: A series of experiments were conducted to study the occurrence and distribution of volatile organic compounds (VOCs) in conventional and advanced drinking water treatment processes of 3 water treatment plants in Lianyungang City. Results showed that 30 compounds of 3 classes were detected from 67 kinds of VOCs in all the samples collected. The concentrations of carbonyl compounds, halogenated hydrocarbons and benzenes detected were in the ranges of 0.04- 61.27, 0.02- 35.61 and 0.07- 2.33 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Comparing the changes of different VOCs in three drinking water treatment plants, conventional chlorination process could effectively remove benzenes but meanwhile produced trihalomethanes (THMs). Additional advanced treatment ozonation-biological activated carbon process could decrease the formation of THMs during pre-chlorination but produced new risky contaminants like carbonyl compounds. The changes of VOCs in tap water were also investigated. It was found that carbonyl compounds produced by ozonation could be further transformed to THMs with residual chlorine. However, the health risks of all detected compounds in tap water were at a low level, except that the carcinogenic risk of crotonaldehydes ($9.3 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-4}$) was slightly higher than the US EPA threshold ($10^{-6} \sim 10^{-4}$).

Key words: Lianyungang City; VOCs; DBPs; advanced treatment process; conventional treatment process

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是饮用水中普遍检出的有毒有害污染物, 主要来源于工农业污水、有机溶剂、固体废物和石油化工等^[1,2]. 研究表明大部分VOCs具有致癌、致畸和致突变(三致)毒性效应及难闻的气味^[3~5]. 在饮用水消毒过程中产生的部分消毒副产物(disinfection by-products, DBPs)也具有VOCs性质. 氯化消毒具有高效和廉价等特点, 是目前国内外饮用水处理过程中普遍采用的消毒方式. 三卤甲烷(trihalomethanes, THMs)等卤代烃是氯化消毒产生的典型DBPs^[6], 其生成量和种类组成还会受到天然水中存在的 Br^- 浓度等多种因素的影响^[7,8]. 近年来采用的臭氧-生物活性炭(O_3 -BAC)深度处理工艺

能有效去除氯化DBPs的前驱物及改善难生物降解有机物的可生化性, 但是 O_3 在消毒过程中会产生羰基化合物等DBPs^[9,10]. 一些羰基化合物也具有三致效应并引起水体异味等问题^[5], 其中醛、酮类化合物本身又可成为多种卤代烃的前驱物^[6]. 因此, 研究饮用消毒过程中VOCs的存在种类和浓度变化规律是控制这些化合物的前提和基础.

连云港市属于国内典型的水源性缺水城市, 有

收稿日期: 2013-05-07; 修订日期: 2013-08-19

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(21007077); 国家自然科学基金重大项目(51290283); 水利部公益性行业科研专项(201201032)

作者简介: 陈锡超(1987~), 男, 硕士, 主要研究方向为水环境分析化学, E-mail: 06xichao@163.com

* 通讯联系人, E-mail: qianluo@rcees.ac.cn

机污染较重,城区的饮用水主要由海州水厂、茅口水厂和第三水厂供应^[11,12]。蔷薇河是目前唯一可以作为饮用水源的河流。为应对现有设施和工艺的老化及新《生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)》的实施,第三水厂扩建并增加了 O₃-BAC 深度处理工艺。但是,扩建和新增工艺对改善水厂出水水质是否有效?新的消毒工艺是否会生成新的风险污染物?管网水中的 VOCs 对人体健康是否存在风险?本研究对连云港市的水源地(蔷薇河)、3 个水厂的消毒工艺过程以及管网水中 VOCs 的存在状况进行了调查,探讨了 3 个水厂不同工艺过程以及管网中 VOCs 的变化规律,以期对连云港市水处理工艺改进提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

便携式多参数水质测定仪和便携式浊度仪(美国 HACH 公司); UV-1700 型分光光度仪(日本岛津公司); ICS1500 离子色谱仪(美国戴安公司); Fusion-TOC 分析仪(美国 Teledyne Tekmar 公司); 3100 型吹扫捕集装置(美国 Tekmar 公司); 固相微萃取装置及 2 cm ~ 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头(美国 Supleco 公司);

GC6890N/5975MSD 气相色谱质谱联用仪(美国安捷伦公司)。

54 种常规 VOCs(包括卤代烃、苯系物和卤代苯等)和 13 种羰基化合物标样以及内标化合物均购自 AccuStandard 公司; 衍生化试剂邻-(2,3,4,5,6-全氟苯基)羟基氨盐酸盐(PFBHA)购自于日本 TCI 东京化成工业株式会社; 甲醇为色谱纯,购自美国 Fisher 公司。实验用水取自 Millipore 的超纯水机(Millipore Corporation, MA, USA)。其他试剂均购自于国药集团化学试剂有限公司。

1.2 样品采集与保存

2012 年 6 月 19 ~ 21 日,对连云港市的饮用水源、水厂不同处理工艺和给水管网进行了水样采集,采样点分布如图 1 所示。其中蔷薇河是连云港城区集中供水水源地,淮沭新河和鲁兰河是蔷薇河的两条支流,其上游流经东海县,3 号是海州水厂的原水取水口,7 号是茅口水厂和第三水厂的原水取水口;海州水厂和茅口水厂是常规处理工艺,第三水厂在过滤和清水池之间增加了 O₃-BAC 深度处理工艺;海州水厂和第三水厂的输水管网从管网入口到管网末梢各分别采集 3 个点,由于茅口水厂和第三水厂仅一墙之隔,且清水池相互连通,因此没有采集茅口水厂的传输管网。

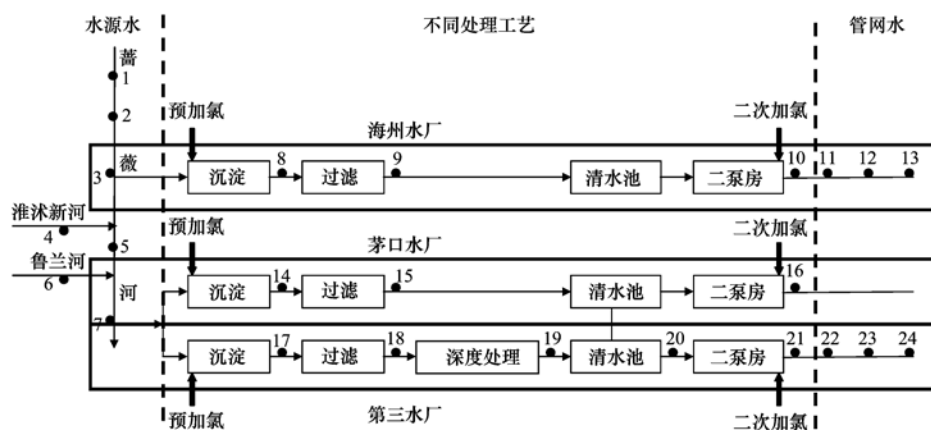


图 1 连云港市 3 个水厂的工艺过程及采样点分布示意

Fig. 1 Water treatment processes and sampling sites of 3 water plants in Lianyungang City

在每个采样点采满两个 40 mL 样品瓶至溢流,一个瓶中预先加入 25 mg 抗坏血酸作为止氯剂,现场同时加入 10 μL 5 mg·L⁻¹ 的内标氟苯和 50 μL 1:1 HCl(pH < 2),用于分析 54 种常规 VOCs; 另一个瓶中预先加入 50 mg CuSO₄·5H₂O 作为杀菌剂和 50 mg (NH₄)₂SO₄ 作为止氯剂,用于分析 13 种羰基化合物,采集后都于 4℃ 保存,14 d 内完成分析。此

外,在每个采样点另采集足量水样,用于无机阴离子(F⁻、Cl⁻、Br⁻、BrO₃⁻)、UV₂₅₄、溶解有机碳(DOC)和总氮(TN)分析。pH 和浊度分别使用 HACH 便携式多参数水质测定仪和 HACH 便携式浊度仪在现场进行了测定。由于海州水厂和茅口水厂的处理工艺基本相同,因此海州水厂的某些指标没有测定。

1.3 样品处理与分析

TN 用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法 (GB 11894-89) 测定. UV_{254} 用紫外分光光度计直接测定. 无

机阴离子经 $0.45\ \mu\text{m}$ 玻璃滤膜过滤后用离子色谱仪测定. DOC 经 $0.45\ \mu\text{m}$ 玻璃滤膜过滤后用 Fusion-TOC 分析仪测定. 以上基本水质参数列于表 1 中.

表 1 基本水质参数¹⁾

Table 1 Basic water quality parameters

采样点编号	pH	浊度 /NTU	F^- /mg·L ⁻¹	Cl^- /mg·L ⁻¹	Br^- /mg·L ⁻¹	BrO_3^- /μg·L ⁻¹	DOC /mg·L ⁻¹	UV_{254} /cm ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹
1	7.83	113.00	0.70	75.85	0.53	2.30	2.57	0.08	1.80
2	7.63	87.90	0.84	80.43	0.58	2.35	2.56	0.23	1.63
3	7.79	33.50	1.06	80.66	0.59	2.31	2.68	0.06	2.43
4	7.82	36.00	0.86	78.73	0.52	2.29	3.54	0.07	1.77
5	8.2	16.00	0.88	79.76	0.62	nd	4.33	0.10	1.55
6	8.44	37.10	0.80	124.53	0.60	nd	2.60	0.07	1.04
7	7.72	9.09	0.65	82.76	0.52	nd	1.96	0.07	1.15
8	—	—	0.92	90.73	0.54	nd	3.04	—	—
9	—	—	0.84	87.02	0.56	nd	2.41	—	—
10	—	—	0.89	92.88	0.61	nd	2.40	—	—
11	7.46	1.83	0.94	81.15	0.58	2.24	3.98	0.05	1.53
12	7.39	0.68	0.99	92.72	0.63	nd	3.05	0.05	1.67
13	7.44	0.74	0.90	91.23	0.63	nd	2.51	0.06	1.84
14	7.64	2.71	0.66	81.06	0.57	2.47	2.82	0.23	1.72
15	7.89	2.51	0.86	89.03	0.62	nd	2.36	0.06	1.13
16	7.71	0.98	0.74	90.30	0.60	nd	2.16	0.05	0.89
17	7.69	4.15	0.61	80.13	0.57	2.36	2.04	0.06	1.95
18	7.42	0.80	0.68	84.57	0.55	2.29	2.77	0.06	1.18
19	7.43	0.63	0.84	88.34	0.59	nd	1.80	0.03	1.07
20	7.42	0.99	0.83	85.97	0.56	nd	1.42	0.05	1.05
21	7.28	0.81	0.80	85.25	0.57	3.51	2.25	0.04	2.60
22	7.46	0.66	0.82	99.22	0.31	4.47	5.11	0.07	0.99
23	7.54	0.66	0.76	109.83	0.26	nd	1.78	0.03	1.04
24	7.51	1.51	0.60	84.72	0.56	nd	2.09	0.04	1.06

1) —表示未测定; nd 表示未检出

54 种常规 VOCs 样品用水样注射器准确吸取 25 mL 样品, 注入吹扫管中, 使用吹扫捕集装置进行前处理富集, 然后进入 GC/MS 分析. 色谱柱为 DB-624 (Agilent 30 m × 0.25 mm × 1.4 μm), 载气为氦气, 流速恒定为 0.7 mL·min⁻¹, 进样口 150℃, 不分流进样. 程序升温: 35℃ 保持 3 min, 10℃·min⁻¹ 升至 100℃, 5℃·min⁻¹ 升至 170℃ 保持 1 min. 质谱 EI 离子源温度 230℃, 四极杆温度 150℃, 传输线温度 280℃, 溶剂延迟时间设为 3 min. 标准曲线采用同样的方法进行分析.

13 种羰基化合物分析参考 US EPA Method 556 的衍生化方法, 取 10 mL 水样于 15 mL 固相微萃取小瓶中, 加入 100 mg 邻苯二甲酸氢钾、100 μL 15 mg·mL⁻¹ 当天新配的 PFBHA 水溶液和微型磁转子, 盖上带硅树脂/聚四氟乙烯隔膜的盖. 45℃ 水浴 1.5 h 后, 冷却至室温, 滴加两滴浓硫酸和 50 μL 10 mg·L⁻¹ 的 1,2-二溴丙烷作为内标, 振荡 5 min 后进行固相微萃取. 固相微萃取条件为 2 cm ~ 50/30

μm DVB/CAR/PDMS 萃取头在转子速率 900 r·min⁻¹, 室温条件下顶空萃取 40 min. 萃取结束后, 立即在 250℃ 的 GC 进样口解吸 5 min 进入 GC/MS 分析. 色谱柱为 DB-5MS (Agilent 30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 载气为氦气, 流速恒定为 1.0 mL·min⁻¹, 进样口 250℃, 不分流进样. 升温程序: 40℃ 保持 2 min, 30℃·min⁻¹ 升至 70℃, 10℃·min⁻¹ 升至 270℃ 保持 2 min. 质谱 EI 离子源温度 230℃, 四极杆温度 150℃, 传输线温度 280℃, 溶剂延迟时间设为 2.5 min. 由于羰基化合物的衍生化产物往往具有顺反两种异构体, 在色谱上表现为“双峰”, 在定量时应将顺反两种异构体加和. 标准曲线采用同样的方法进行分析.

健康风险评价方法及参数取值参见文献[13]. 对于该文献中未涉及的化合物, 反-1,2-二氯乙烯的 RfD 值为 0.020 mg·(kg·d)⁻¹, 1,1,2-三氯乙烷的 SF 值和 RfD 值分别为 0.057 kg·(d·mg)⁻¹ 和 0.004 mg·(kg·d)⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 连云港市饮用水中危害污染物的识别

连云港市饮用水中共有 30 种 VOCs 被检出,其中卤代烃 10 种(包括 3 种 THMs),苯系物 7 种和羰基化合物 13 种,其检出率、浓度水平和健康风险见表 2。检出的 30 种化合物中,被 US EPA 或中国列为优先控制污染物的有 10 种。3 类 VOCs 的检出率总体上表现为羰基化合物>卤代烃>苯系物。卤代烃和苯系物是水中普遍存在的有毒有害污染,其来源相当广泛,包括农药、工业污水、有机溶剂、石油化工和饮用水消毒等^[1, 14]。卤代烃化合物中反-1,2-二氯乙烯、顺-1,2-二氯乙烯和 2,2-二氯丙烷在连云港市的水源水、水处理工艺过程和管网水中都

有检出; THMs 在水源水中没有检出,在消毒过程中有较高检测浓度。而苯系物主要在水处理过程中检出。羰基化合物通常被认为是 O₃ 消毒过程中产生的 DBPs^[5,15],其在水源水和管网水中的存在水平和健康风险的研究甚少。在连云港的地表水和管网水中普遍检测到了这类化合物,在官厅水库地表水中也普遍检出^[13],说明羰基化合物在两处地表水水源中存在,但具体来源未确定。这类化合物除了甲醛和乙醛有限制标准以外,其他羰基化合物都还未被限定,相关的毒性数据也很少,但这类化合物对人体健康也具有潜在的危害^[5]。

羰基化合物、卤代烃和苯系物的检出浓度范围分别是 0.04 ~ 61.27、0.02 ~ 35.61 和 0.07 ~ 2.33 μg·L⁻¹。对于美国和中国相关水质标准中限定的化

表 2 检出的 VOCs 浓度水平及其健康风险¹⁾
Table 2 Concentration levels and health risks of VOCs detected

项目	化合物	检出率 /%	检出浓度范围 /μg·L ⁻¹	限值 /μg·L ⁻¹	致癌风险	非致癌风险
卤代烃	氯仿 ^{A,C}	58.33	0.34 ~ 16.31	60 ^a	3.5 × 10 ⁻⁷ ~ 1.7 × 10 ⁻⁵	1.1 × 10 ⁻³ ~ 5.4 × 10 ⁻²
	一溴二氯甲烷	50.00	0.14 ~ 35.61	60 ^a	2.9 × 10 ⁻⁷ ~ 7.4 × 10 ⁻⁵	2.3 × 10 ⁻⁴ ~ 5.9 × 10 ⁻²
	二溴一氯甲烷	50.00	0.13 ~ 6.87	100 ^a	3.6 × 10 ⁻⁷ ~ 1.9 × 10 ⁻⁵	2.2 × 10 ⁻⁴ ~ 1.1 × 10 ⁻²
	反-1,2-二氯乙烯 ^A	91.67	0.07 ~ 0.18	50 ^a	3.0 × 10 ⁻⁶ ~ 5.1 × 10 ⁻⁶	1.2 × 10 ⁻⁴ ~ 3.0 × 10 ⁻⁴
	顺-1,2-二氯乙烯	87.50	0.02 ~ 0.44			3.3 × 10 ⁻⁴ ~ 7.3 × 10 ⁻³
	2,2-二氯丙烷	58.33	0.05 ~ 0.73			
	1,1,2-三氯乙烷 ^{A,C}	16.67	1.59 ~ 2.66	5 ^b	3.8 × 10 ⁻⁸ ~ 3.8 × 10 ⁻⁸	1.3 × 10 ⁻² ~ 2.2 × 10 ⁻²
	1,1-二氯乙烷 ^A	4.17	0.20 ~ 0.20	5 ^b	6.1 × 10 ⁻⁷ ~ 6.1 × 10 ⁻⁷	3.3 × 10 ⁻⁵ ~ 3.3 × 10 ⁻⁵
	1,2-二氯乙烷 ^{A,C}	4.17	0.20 ~ 0.20		1.1 × 10 ⁻³ ~ 1.1 × 10 ⁻³	
	1,1,1,2-四氯乙烷	4.17	0.08 ~ 0.08		8.9 × 10 ⁻⁵ ~ 8.9 × 10 ⁻⁵	
苯系物	甲苯 ^{A,C}	8.33	0.76 ~ 0.77	700 ^a	9.9 × 10 ⁻⁸ ~ 1.9 × 10 ⁻⁷	3.2 × 10 ⁻⁴ ~ 3.2 × 10 ⁻⁴
	乙苯 ^{A,C}	12.50	0.27 ~ 0.51	300 ^a		9.0 × 10 ⁻⁵ ~ 1.7 × 10 ⁻⁴
	苯乙烯	8.33	1.73 ~ 2.33	20 ^a		2.9 × 10 ⁻⁴ ~ 3.9 × 10 ⁻⁴
	间二甲苯 ^C	20.83	0.07 ~ 2.02	500 ^a		1.2 × 10 ⁻⁵ ~ 3.4 × 10 ⁻⁴
	对二甲苯 ^C					
	邻二甲苯 ^C					
	叔丁基苯	8.33	0.09 ~ 0.11	900 ^a	6.7 × 10 ⁻⁵ ~ 9.8 × 10 ⁻⁴	1.9 × 10 ⁻⁴ ~ 1.0 × 10 ⁻²
羰基 化合物	甲醛	100.00	1.13 ~ 60.26			
	乙醛	95.24	0.42 ~ 58.20			
	丙醛	100.00	1.07 ~ 16.37			
	丁醛	52.38	0.04 ~ 8.93			
	巴豆醛	100.00	1.06 ~ 15.47			3.5 × 10 ⁻² ~ 5.2 × 10 ⁻¹
	戊醛	100.00	1.16 ~ 8.61			
	己醛	100.00	1.41 ~ 19.85			
	环己酮	100.00	0.49 ~ 7.81			3.3 × 10 ⁻⁶ ~ 5.2 × 10 ⁻⁵
	庚醛	100.00	0.49 ~ 43.78			
	辛醛	85.71	0.05 ~ 61.27			
	苯甲醛	95.24	0.11 ~ 41.04			
	壬醛	100.00	0.54 ~ 36.16			
	癸醛	100.00	0.44 ~ 33.51			

1) A 为美国优先控制污染物,C 为中国优先控制污染物; a 为《生活饮用水卫生标准(GB 5749-2006)》,b 为 US EPA maximum contaminant levels (MCLs),c 为《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》

合物,除了第三水厂出厂水中的乙醛浓度($58.20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)超过了我国《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》($50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)外,其他化合物浓度均未超标. 管网水中除了巴豆醛的致癌风险($9.3 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-4}$)高于 US EPA 对致癌物质的控制阈值($10^{-6} \sim 10^{-4}$)外,通常关心的卤代烃和苯系物的健康风险却均处于较低水平. 最近一些研究^[16~18]表明,巴豆醛是环境中普遍存在的一种有毒有害物质,主要来源于烟草、有机合成和精细化工领域,具有直接的致癌毒性. 因此,对改善连云港市的饮用水消毒工艺来说,相对于常规 VOCs(卤代烃和苯系物等),需要考虑羰基化合物的存在和变化.

2.2 连云港市饮用水消毒过程中 VOCs 的变化规律

2.2.1 卤代烃的变化规律

3 个水厂的工艺过程水和管网水中的 THMs 变化规律如图 2 所示. 茅口水厂中的原水在预加氯沉淀过程后(沉后,14 号) THMs 为未检出(nd),在过滤过程后(滤后,15 号) THMs 检出,原因是 THMs 的生成需要一定的反应接触时间^[19,20]. 二泵房过程后(出厂水,16 号) THMs 浓度变大,可能是反应接触时间增加的结果,也可能是二次加氯的结果^[12,21]. 在海州水厂的沉后水(8 号)中,THMs 虽有检出,但浓度相当低,也是在滤后水(9 号)中有明显的三氯甲烷(TCM)检测到,出厂水(10 号)中 THMs 浓度变大,与茅口水厂的存在和变化一致. 海州水厂管网

近(11 号)水样中 THMs 浓度达到最大值,在传输中基本保持稳定. 第三水厂深度处理过程后(19 号)水中开始有 TCM 检出,清水池过程(20 号)水中 TCM 浓度减少,而一溴二氯甲烷(BDCM)和二溴一氯甲烷(DBCM)浓度显著增加($\text{BDCM} > \text{DBCM}$). 海州水厂和第三水厂最先检测到的 THMs 都是 TCM,并且 3 个水厂中 THMs 的组成特点表现为 $\text{BDCM} > \text{TCM} > \text{DBCM}$,没有三溴甲烷(TBM)检出,说明氯化反应最初的产物是 TCM,逐步生成 BDCM 和 DBCM,TBM 的生成可能受到 Br^- 浓度的限制. 比较 3 个水厂的工艺过程还可以发现,第三水厂从深度处理过程到出厂水中的 THMs 浓度低于海州水厂和茅口水厂的出厂水. 林涛等^[22]认为是 O_3 -BAC 对有机物的去除导致 THMs 前驱物减少,这可以从 DOC 在相应工艺中的变化得到进一步证实. 与海州水厂类似,第三水厂出厂水和管网水中 THMs 浓度继续变大,所不同的是第三水厂管网远(24 号)水样中 THMs 浓度才达到最大值,有研究表明 O_3 处理产生的醛类也是 THMs 的前驱物, O_3 深度处理后二次加氯会增加 THMs 生成量^[23].

除 THMs 外的另外 3 种卤代烃,反-1,2-二氯乙烯、顺-1,2-二氯乙烯和 2,2-二氯丙烷,虽然检出率较高,但是浓度($0.02 \sim 0.73 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)较低,在整个过程中没有明显的变化规律,说明这 3 种化合物在连云港市的水源水中普遍存在,在工艺过程和管网

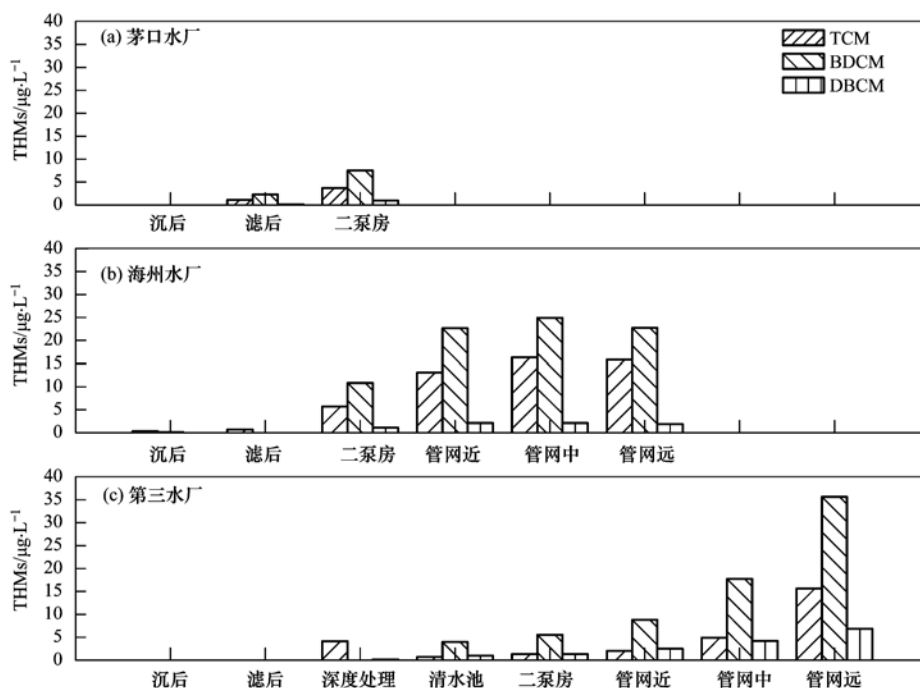


图 2 连云港市水处理过程及管网水中 THMs 变化规律

Fig. 2 Transformation of THMs in water treatment processes and tap water of Lianyungang City

中也基本保持不变. 1,1-二氯乙烷、1,2-二氯乙烷、1,1,2-三氯乙烷和 1,1,1,2-四氯乙烷由于检出率较低,具有一定的偶然性,不作讨论.

2.2.2 苯系物的变化规律

苯系物主要在茅口水厂的沉后水(14 号)、第三水厂的沉后水(17 号)和深度处理过程水(19 号)以及第三水厂的管网水(23、24 号)中有检出,其浓度水平列于表 3 中. 上游的海州水厂中没有检出苯系物,而在茅口水厂和第三水厂中有检出,很可能与东海县和海州工业区的部分化工企业有关^[11]. 但是在茅口水厂和第三水厂的原水中并没有检测到苯系物,而是在沉后水中检出,可以解释为苯系物的

$\lg K_{ow}$ (2.95 ~ 4.11) 较大,容易吸附在颗粒物上,在沉淀过程中由于预加氯、混凝剂和水力条件的影响被释放出来. 同时,由于苯系物的挥发性和疏水性,释放出来的苯系物在常规处理工艺中可以去除. 在第三水厂,尽管 DOC 浓度从滤后(2.77 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)到深度处理(1.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)过程中是降低的,但苯系物的浓度和种类却是增加的,可能是 O_3 氧化大分子 NOM 成小分子的过程中把吸附在上面的小分子苯系物给释放出来了. 苯系物在第三水厂管网中(23 号)再次检出,并且种类和浓度随输送距离而增加,可能主要来源于塑料管线材质溶出^[24].

表 3 检出的苯系物浓度¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Concentrations of benzenes detected/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

采样点	二甲苯	乙苯	甲苯	苯乙烯	叔丁基苯
茅口水厂沉后(14 号)	0.41	0.27	nd	nd	nd
第三水厂沉后(17 号)	0.08	nd	nd	nd	nd
第三水厂深度处理(19 号)	1.86	0.5	0.76	2.33	0.09
第三水厂管网中(23 号)	0.07	nd	nd	nd	nd
第三水厂管网远(24 号)	2.02	0.51	0.77	1.73	0.11

1) nd 表示未检出

2.2.3 羰基化合物的变化规律

13 种羰基化合物在第三水厂中的变化规律如图 3 所示. 前已述及,羰基化合物在水源水、常规水处理工艺过程和管网水都有检出,但是变化不大,在臭氧化过程后有大量生成. 与氯化 DBPs(THMs)一样,臭氧化 DBPs(羰基化合物)也需要一定的反应接触时间,所以深度处理过程中投加 O_3 后,在出厂水中才检测到 13 种羰基化合物浓度达到最大值,是地表水中浓度的 10 倍以上. 需要特别指出的是,第三水厂出厂水中的乙醛浓度(58.20 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)超过了《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》(50 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),而乙醛是已被证实的具有遗传毒性和致癌毒性的物质^[25],因此,在水厂运行中必须严格控制其在管网水中浓度过高. 与 THMs 变化规律不同的是羰基化合物在进入管网之前就迅速降到了地表水中的浓度水平. 有研究表明臭氧化过程中产生的醛类化合物也是 THMs 的前驱物^[23],在二次加氯后可能被转化为 THMs 等氯化 DBPs,也正好解释了第三水厂管网中 THMs 持续增加的原因. 从羰基化合物的组成特点来看,除了甲醛和乙醛(C1 ~ C2)是主要副产物^[26]以外,庚醛、辛醛、苯甲醛、壬醛和癸醛(C7 ~ C10)的产量也相当可观(图 3),而碳原子数处于中间的丙醛、丁醛、戊醛和己醛(C3 ~ C6)的产量反而较低. Cancho 等^[5]和 Bao 等^[15]在测定 O_3

处理后的水中羰基化合物时也得到类似的“V”形结果,但关于不同碳原子数的羰基化合物在臭氧化过程中的组成规律研究甚少,其原因尚不清楚.

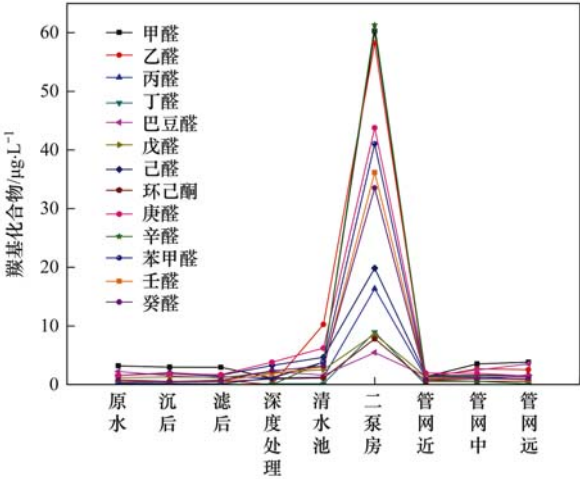


图 3 连云港第三水厂中羰基化合物的变化规律

Fig. 3 Transformation of carbonyl compounds in Disan water treatment plant of Lianyungang City

3 结论

(1)在连云港市的水源水、水处理工艺及管网水中共检出 30 种 VOCs,其中卤代烃 10 种,苯系物 7 种和羰基化合物 13 种,检出率总体上表现为羰基化合物 > 卤代烃 > 苯系物. 管网水中除了巴豆醛的

致癌风险($9.3 \times 10^{-5} \sim 2.2 \times 10^{-4}$)略高于 US EPA 的控制阈值($10^{-6} \sim 10^{-4}$)外,其他化合物的健康风险却处于较低水平. 因此,对改善连云港市的饮用水消毒工艺来说,相对于常规 VOCs(卤代烃和苯系物等),需要考虑羰基化合物的存在和变化.

(2)氯化 DBPs (THMs)在滤后水(如茅口水厂和海州水厂)或深度处理(第三水厂)过程水中开始有明显检出,二次加氯导致其在管网中继续生成. 臭氧化 DBPs(羰基化合物)在 O_3 深度处理后显著增加,在出厂水中达到最大值. 苯系物在常规工艺过程中可以去除,但是在管网中又有检出,其浓度水平随输送距离而增加. 因此,THMs 和苯系物是管网中需要关注的危害污染物.

(3)氯化反应的最初产物是 TCM,由于水中 Br^- 的存在,逐渐生成 BDCM 和 DBCM (BDCM > DBCM),但 TBM 的生成受到 Br^- 浓度的限制. 羰基化合物的组成规律是 C1 ~ C2 和 C7 ~ C10 的羰基化合物产量较高,而 C3 ~ C6 的羰基化合物产量较低,呈“V”形结构.

参考文献:

- [1] Niri V H, Bragg L, Pawliszyn J. Fast analysis of volatile organic compounds and disinfection by-products in drinking water using solid-phase microextraction-gas chromatography/time-of-flight mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, **1201**(2): 222-227.
- [2] Gofinopoulos S K, Lekkas T D, Nikolaou A D. Comparison of methods for determination of volatile organic compounds in drinking water [J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(3): 275-284.
- [3] 许秀艳,朱擎,谭丽,等. 水中挥发性有机物的分析方法综述[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3606-3612.
- [4] Fan C, Wang G S, Chen Y C, *et al.* Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in groundwater in Taiwan [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(7): 2165-2174.
- [5] Cancho B, Ventura F, Galceran M T. Determination of aldehydes in drinking water using pentafluorobenzylhydroxylamine derivatization and solid-phase microextraction [J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, **943**(1): 1-13.
- [6] 彭清涛,胡文祥,崔亮. 饮用水中卤代烃污染及其控制措施[J]. *现代仪器*, 2005, **11**(1): 16-18.
- [7] 梅红,丁国际,黄鑫,等. 含溴黄浦江水消毒过程中溴代三卤甲烷和卤乙酸的生成特性[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(10): 2162-2168.
- [8] 林立,孙卫玲,倪晋仁. 天然水中离子对消毒过程中挥发性卤代烃生成的影响[J]. *环境化学*, 2004, **23**(4): 413-419.
- [9] Milner R J, Shukairy H M, Summers R S. Disinfection by-product formation and control by ozonation and biotreatment [J]. *Journal-American Water Works Association*, 1992, **84**(11): 53-62.
- [10] 于宏兵,范伟民,王暖春,等. 超滤/臭氧/生物炭组合工艺预处理源水[J]. *中国给水排水*, 2003, **19**(8): 1-3.
- [11] 刘红,姜玲. 连云港市蔷薇河有机污染调查及对策[J]. *污染防治技术*, 2007, **20**(1): 31-33.
- [12] 刘晓琳,郑唯韩,韦霄,等. 江苏省某水厂含碳、含氮和碘系消毒副产物现况调查[J]. *中华预防医学杂志*, 2012, **46**(2): 133-138.
- [13] 陈锡超. 水中多种挥发性有机物的检测方法研究与应用 [D]. 北京:中国科学院生态环境研究中心,2013.
- [14] López S H, Gómez M J, Hernando M D, *et al.* Automated dynamic headspace followed by a comprehensive two-dimensional gas chromatography full scan time-of-flight mass spectrometry method for screening of volatile organic compounds (VOCs) in water [J]. *Analytical Methods*, 2013, **5**(5): 1165-1177.
- [15] Bao M, Pantani F, Griffini O, *et al.* Determination of carbonyl compounds in water by derivatization-solid-phase microextraction and gas chromatographic analysis [J]. *Journal of Chromatography A*, 1998, **809**(1-2): 75-87.
- [16] 唐洪,汤权,王坤,等. 工作场所中巴豆醛的气相色谱测定方法研究[J]. *中国卫生检验杂志*, 2005, **15**(5): 536-537.
- [17] Yang B C, Yang Z H, Pan X J, *et al.* Crotonaldehyde-exposed macrophages induce IL-8 release from airway epithelial cells through NF- κ B and AP-1 pathways [J]. *Toxicology Letters*, 2013, **219**(1): 26-34.
- [18] Huang D N, Wang X Y, Deng C H. Enrichment and determination of crotonaldehyde using magnetic multiwalled carbon nanotubes as an adsorbent and a matrix for matrix-assisted for laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry [J]. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2013, **27**(7): 847-850.
- [19] 严烈,徐斌,高乃云,等. 饮用水中典型氯化消毒副产物生成模型的研究进展[J]. *净水技术*, 2010, **29**(1): 16-22.
- [20] 楚文海,高乃云,赵世峨,等. 溶解性有机氮乙酰胺氯化生成饮用水 THMs 的影响因素研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1376-1380.
- [21] Rodriguez M J, Sérodes J B, Levallois P. Behavior of trihalomethanes and haloacetic acids in a drinking water distribution system [J]. *Water Research*, 2004, **38**(20): 4367-4382.
- [22] 林涛,陈卫,王磊磊. 臭氧-生物活性炭对南方河网典型污染物的去除特性[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1397-1401.
- [23] Williams M D, Pirbazari M. Membrane bioreactor process for removing biodegradable organic matter from water [J]. *Water Research*, 2007, **41**(17): 3880-3893.
- [24] Stern B R, Lagos G. Are there health risks from the migration of chemical substances from plastic pipes into drinking water? A review [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2008, **14**(4): 753-779.
- [25] Lachenmeier D W, Kanteres F, Rehm J. Carcinogenicity of acetaldehyde in alcoholic beverages: risk assessment outside ethanol metabolism [J]. *Addiction*, 2009, **104**(4): 533-550.
- [26] Tsai S, Chang C. Analysis of aldehydes in water by solid-phase microextraction with on-fiber derivatization [J]. *Journal of Chromatography A*, 2003, **1015**(1-2): 143-150.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr * Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《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12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 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

国内外公开发行人