

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

**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

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究 ..... 张小玲,夏祥鳌,车慧正,汤洁,唐宜西,孟伟,董璠 (2439)

北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究 ..... 姚波,周凌晔,刘钊,张根,夏玲君 (2449)

浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征 ..... 方双喜,周凌晔,栾天,马千里,王红阳 (2454)

南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 段卿,安俊琳,王红磊,缪青 (2460)

西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮污染特征比较 ..... 程玉婷,王格慧,孙涛,成春雷,孟静静,任艳芹,李建军 (2468)

沙尘天气对兰州市 PM<sub>10</sub> 中主要水溶性离子的影响 ..... 王芳,陈强,张文煜,郭勇涛,赵连彪 (2477)

上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究 ..... 梁宗敏,杜睿,杜鹏瑞,王亚玲,李梓铭 (2483)

重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量 ..... 彭玉龙,王永敏,覃蔡清,王定勇 (2490)

宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析 ..... 李璇,王雪松,刘中,吴梁,翁燕波,胡杰 (2497)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选 ..... 王海林,王俊慧,祝春蕾,聂磊,郝郑平 (2503)

氨水混合吸收剂脱除 CO<sub>2</sub> 实验研究 ..... 夏芝香,项群扬,周旭萍,方梦祥 (2508)

焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究 ..... 孙鹏程,李晓璐,成钢,陆勇,吴昌敏,罗锦洪 (2515)

2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 ..... 邢建伟,钱薇微,绳秀珍 (2520)

千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异 ..... 王明珠,张运林,施坤,高贇,刘刚,蒋浩 (2528)

千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析 ..... 殷燕,吴志旭,刘明亮,何剑波,虞左明 (2539)

太湖夏季水体中尿素的来源探析 ..... 韩晓霞,朱广伟,许海,Steven W. Wilhelm,秦伯强,李兆富 (2547)

鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征:以军山湖为例 ..... 刘霞,钱奎梅,谭国良,邢久生,李梅,陈宇炜 (2557)

不同营养湖泊沉积物中<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>和营养盐垂向分布特征及相关性分析 ..... 王小雷,杨浩,顾祝军,张明礼 (2565)

地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究 ..... 姜烈,何江涛,姜永海,刘菲 (2572)

预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究 ..... 陈雯婧,丛海兵,徐亚军,王巍,蒋新跃,刘玉娇 (2579)

类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附 ..... 王红宇,刘艳 (2585)

粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学 ..... 孙德帅,郑强强,张晓东,方龙 (2590)

SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd<sup>2+</sup> 的影响 ..... 王建涛,孟昭福,杨亚提,杨淑英,李彬,马麟莉,许绍娥 (2596)

老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响 ..... 唐伟,郭悦,吴景贵,黄兆琴,代静玉 (2604)

TiO<sub>2</sub> 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究 ..... 李明洁,喻泽斌,陈颖,王莉,刘晴,刘钰鑫,何丽丽 (2612)

荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用 ..... 朱江鹏,梅婷,彭云,葛思怡,李时银,王国祥 (2620)

改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究 ..... 马楠,田耀金,杨广平,谢鑫源 (2627)

催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨 ..... 王梦月,马鲁梅 (2633)

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)为反硝化固体碳源的脱氮特性研究 ..... 刘佳,沈志强,周岳溪,曹蓉,李元志 (2639)

某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解 ..... 青亮,黄锦琼,余小巍,张素坤,杨艳艳,任明忠,温玉龙 (2645)

嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究 ..... 卫丹,万梅,刘锐,王根荣,张汛达,文晓刚,赵远,陈吕军 (2650)

提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法 ..... 李晓玲,彭永臻,柴同志,朱建平,王淑莹 (2658)

滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价 ..... 郭雪,毕春娟,陈振楼,王薛平 (2664)

舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征 ..... 江敏,Le Huy Tuan,梅卫平,阮慧慧,吴昊 (2672)

青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析 ..... 谢婷,张淑娟,杨瑞强 (2680)

福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评估 ..... 黄焕芳,祁士华,瞿程凯,李绘,陈文文,张莉,胡婷,石燎 (2691)

不同功能区表层土壤中全氟化合物污染指纹及其来源解析 ..... 张鸿,赵亮,何龙,柴之芳,沈金灿,杨波 (2698)

桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素 ..... 李磊,任景玲,刘素美,蒋增杰,杜金洲,方建光 (2705)

引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价:以银川市兴庆区为例 ..... 王幼奇,白一茹,王建宇 (2714)

三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征 ..... 李楚娴,孙荣国,王定勇,赵铮,张金洋,马明,张成 (2721)

广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评估 ..... 何秀婷,王奇,聂湘平,杨永涛,程章 (2728)

青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价 ..... 张春荣,吴正龙,姚春卉,高宗军 (2736)

焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评估研究 ..... 伯鑫,王刚,温柔,赵春丽,吴铁,李时蓓 (2742)

Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响 ..... 王辉,谢鑫源 (2748)

3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应 ..... 李雅洁,崔益斌,蒋丽娟,窦静,李梅 (2755)

施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究 ..... 陈喆,铁柏清,雷鸣,刘孝利,叶长城,罗梅梅,毛懿德 (2762)

保护性耕作对后茬冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 潘莹,胡正华,吴杨周,孙银银,盛露,陈书涛,肖启涛 (2771)

渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系 ..... 贾曼莉,郭宏,李会科 (2777)

蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究 ..... 王宁,彭胜,陈家军 (2785)

铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究 ..... 牟姝君,李秀芬,任月萍,王新华 (2791)

连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征 ..... 赵晨阳,魏源送,葛振,钟佳,才兴,张媛丽,李洪枚 (2798)

冬季猪粪固体堆放过程中 NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>O 和 NO 排放特征研究 ..... 丁钢强,韩圣慧,袁玉玲,罗琳,王立刚,李虎,李萍 (2807)

填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究 ..... 黄友福,许心雅,范良鑫,方艺民 (2816)

渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究 ..... 王东梅,刘丹,刘庆梅,陶丽霞,刘颖 (2822)

中国铅流变化的定量分析 ..... 马兰,毛建素 (2829)

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展 ..... 赵志瑞,侯彦林 (2834)

《环境科学》征稿简则(2679) 《环境科学》征订启事(2735) 信息(2476,2556,2713,2770)

# 宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析

李璇<sup>1</sup>, 王雪松<sup>1\*</sup>, 刘中<sup>2</sup>, 吴梁<sup>3</sup>, 翁燕波<sup>4</sup>, 胡杰<sup>3</sup>

(1. 北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100871; 2. 宁波市环境保护科学研究设计院, 宁波 315012; 3. 宁波市环境保护局, 宁波 315012; 4. 宁波市环境监测中心, 宁波 315012)

**摘要:** 宁波是我国华东地区的重要工业城市, 也是长江三角洲南翼的经济中心. 近年来, 宁波工业活动的 VOC 排放及其对空气质量和人体健康的不利影响越来越受到关注. 通过收集宁波市各类 VOC 人为源的活动水平数据, 采用“自下而上”的估算方法, 建立了宁波地区 2010 年人为源 VOC 的排放清单, 并进一步分析了宁波市排放 VOC 的重点工业行业及其贡献大小. 研究表明, 宁波市 2010 年人为源的 VOC 排放总量为 17.6 万 t, 其中工业源、机动车排放源和居民源是宁波市人为排放 VOC 的主要来源, 分别占总排放量的 62.0%、17.2% 和 15.5%. 而在工业源中, 合成材料制造业、精炼石油产品制造业是宁波市两个重点 VOC 排放工业行业, 其排放量分别占宁波 VOC 总量的 18.6% 和 13.1%, 反映出石油化工企业对宁波市 VOC 排放的影响程度.

**关键词:** VOC; 排放清单; 工业行业; 贡献率; 宁波

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2497-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.07.009

## Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo

LI Xuan<sup>1</sup>, WANG Xue-song<sup>1</sup>, LIU Zhong<sup>2</sup>, WU Liang<sup>3</sup>, WENG Yan-bo<sup>4</sup>, HU Jie<sup>3</sup>

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Ningbo Environmental Protection Scientific Research and Design Institute, Ningbo 315012, China; 3. Ningbo Environmental Protection Bureau, Ningbo 315012, China; 4. Environment Monitoring Center of Ningbo, Ningbo 315012, China)

**Abstract:** Ningbo is an important industrial city in eastern China and is also the economic center in the south wing of the Yangtze River Delta (YRD). Recently, the VOC emissions from the local industrial activities and its effects on both the regional air quality and people's health were getting more and more attention. The anthropogenic VOC emission inventory of Ningbo in 2010 was established with collecting comprehensive activity data of anthropogenic sources. Furthermore, the industrial sectors were studied and the significant industries were identified with their contribution quantified. The result shows that the amount of anthropogenic VOC emission in Ningbo in 2010 is 176 kt. Industry, transportation and residential source are the most important VOC anthropogenic sources in Ningbo, which accounted for 62.0%, 17.2% and 15.5% respectively. Synthetic materials manufacturing and refined petroleum products manufacturing are the most important VOC emitting industries, which contributed 18.6% and 13.1% of the total VOC amount respectively, signifying the influence of these two industries to the VOC emissions in Ningbo.

**Key words:** volatile organic compounds (VOC); emission inventory; industry; contribution rate; Ningbo

挥发性有机物(VOC)是对流层臭氧和二次有机气溶胶生成的重要前体物<sup>[1~3]</sup>, 对人体具有一定的危害<sup>[4]</sup>. 因此, VOC 排放清单的建立对于研究 VOC 在我国大气复合污染中的作用以及大气污染控制对策具有重要的意义.

宁波市是我国华东地区的重要工业城市、长江三角洲南翼经济中心, 工业比重大是宁波市经济结构的重要特点. 观测研究表明, 宁波市苯系物的污染程度与北京、芝加哥等国内外城市相近<sup>[5]</sup>. 近年来, 随着宁波市大气灰霾和臭氧等污染问题凸显<sup>[6]</sup>, 对 VOC 源排放清单的研究, 尤其是工业 VOC 排放的影响愈发受到地方环保部门和市民重视.

针对我国的 VOC 排放清单已经开展了一些有益的研究<sup>[7~10]</sup>. 在长江三角洲地区, 工业源 VOC 占人为源排放总量的 30%~50%<sup>[8,11,12]</sup>. 目前, 国内 VOC 排放清单的研究多以省(直辖市)或重点地区为研究对象<sup>[7~15]</sup>, 针对具体城市, 且重点研究工业行业 VOC 排放的结果较少. 开展城市级别的 VOC 排放清单研究, 获得 VOC 污染来源和不同排放行业排放特征的详细认识, 有利于对 VOC 重点排放行业

收稿日期: 2013-11-04; 修订日期: 2014-02-19

基金项目: 宁波市环保科研计划项目

作者简介: 李璇(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域大气污染, E-mail: lixuan\_139@139.com

\* 通讯联系人, E-mail: xswang@pku.edu.cn

的识别和重点排放源的筛选,进而对 VOC 排放的控制以及优化产业布局提供支持.

本研究以 2010 年为基准年,“自下而上”地建立宁波市区县人为源 VOC 排放清单,同时分析 VOC 的来源及工业行业贡献,以期为宁波市实施 VOC 控制及重点工业行业 VOC 污染防治提供支持,同时也为其他城市的 VOC 排放清单研究及防控政策的制定提供参考依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 估算方法

根据污染源性质的不同,本研究将 VOC 人为源划分为工业源、居民源、机动车排放源、油气储运源和非道路移动源五大类,并根据不同的 VOC 排放过程,对各类污染源进行进一步的划分.

对于各类污染源的 VOC 排放量,本研究主要采用排放因子法进行估算:

$$E_i = \sum_j [ef_j \times A_{i,j} \times (1 - \eta_j)] \quad (1)$$

式中, $E$  代表 VOC 的排放量, $i$  表示地区, $j$  表示污染

源, $ef$  代表 VOC 的排放因子, $A$  代表污染源的活动水平,如燃料的消耗量、产品产量、溶剂使用量等, $\eta$  表示末端治理设施的污染物去除率.

对机动车的 VOC 排放量,估算方法如式(2)所示<sup>[14]</sup>:

$$E = \sum_{i,j,k} (ef_{j,k} \times VKT_{j,k} \times N_{i,j,k} + EF_{j,k} \times S_{j,k} \times N_{i,j,k} \times 365) \quad (2)$$

式中, $E$  表示 VOC 的排放量, $i, j, k$  分别表示估算的地区、机动车类型和燃料类型, $ef$  和  $EF$  分别代表机动车行驶和启动时的 VOC 排放因子, $VKT$  表示机动车的年均行驶里程, $S$  表示机动车平均日启动次数, $N$  代表机动车的保有量.

### 1.2 污染源排放因子与活动水平

#### 1.2.1 工业源

工业源主要是指国民经济行业分类中,第二产业中的产业活动单位,包括电力生产业、制造业等行业.工业源的 VOC 排放过程包括固定燃烧、工业工艺和溶剂使用这 3 种途径.表 1 列出了计算各类工业源 VOC 排放量时使用的排放因子,活动水平数

表 1 工业源 VOC 排放因子

Table 1 VOC emission factors of industrial sources

工业源	详细排放源	排放因子	单位	文献
固定燃烧源	电力生产业(燃煤)	0.15	kg·t <sup>-1</sup>	[15]
	电力生产业(燃油)	0.13	kg·t <sup>-1</sup>	[15]
	电力生产业(垃圾)	1.00	kg·t <sup>-1</sup>	[16]
	其他工业行业(燃煤)	0.15	kg·t <sup>-1</sup>	[15]
	其他工业行业(燃油)	0.13	kg·t <sup>-1</sup>	[15]
工业工艺源	酒的制造业(烈酒)	25.35	kg·t <sup>-1</sup>	[15]
	酒的制造业(啤酒)	0.44	kg·t <sup>-1</sup>	[15]
	食用植物油加工业	3.70	kg·t <sup>-1</sup>	[17]
	塑料制品业	0.50	kg·t <sup>-1</sup>	[18]
	合成材料制造业(合成纤维单(聚合)体)	9.90	kg·t <sup>-1</sup>	[18]
	合成材料制造业(合成橡胶)	7.17	kg·t <sup>-1</sup>	[18]
	合成纤维制造业(涤纶)	0.60	kg·t <sup>-1</sup>	[18]
	合成纤维制造业(氨纶)	50.00	kg·t <sup>-1</sup>	[18]
	合成纤维制造业(锦纶)	2.00	kg·t <sup>-1</sup>	[18]
	精炼石油产品制造业 <sup>1)</sup>	0.20	kg·t <sup>-1</sup> (以原油计)	[18]
	油墨制造业	75.00	kg·t <sup>-1</sup>	[19]
	涂料制造业	15.00	kg·t <sup>-1</sup>	[19]
	造纸业	2.00	kg·t <sup>-1</sup>	[20]
	黏土砖瓦及建筑砌块制造业	0.03	kg·t <sup>-1</sup>	[18]
	水泥制造业	0.01	kg·t <sup>-1</sup>	[17]
溶剂使用源	家用电力器具制造业(电冰箱制造)	0.15	kg·台 <sup>-1</sup>	[18]
	家用电力器具制造业(洗衣机制造)	0.11	kg·台 <sup>-1</sup>	[18]
	汽车制造业(乘用车制造)	16.80	kg·辆 <sup>-1</sup>	[18]
	汽车制造业(轻型卡车制造)	27.10	kg·辆 <sup>-1</sup>	[18]
	印刷业(包装印刷)	800.00	kg·t <sup>-1</sup> (以油墨计)	[19]
	印刷业(出版印刷)	420.00	kg·t <sup>-1</sup> (以油墨计)	[19]
	纺织业	98.00	kg·t <sup>-1</sup> (以助剂计)	[21]
	皮革鞣制加工业	196.00	kg·t <sup>-1</sup> (以药剂计)	[10]
	皮鞋制造业	0.02	kg·双 <sup>-1</sup> (以成品鞋计)	[19]
	其他工业行业(喷涂,油漆)	730.00	kg·t <sup>-1</sup>	[15]
其他工业行业(喷涂,非油漆涂料)	500.00	kg·t <sup>-1</sup>	[17]	

1) 对精炼石油产品制造业的 VOC 排放估算还参考了宁波市实际调研资料

据则主要包括各工业企业的燃料消耗量、产品产量、或溶剂使用量等。本研究收集、分析了宁波市 2010 年污染源普查和环境统计资料中上千家工业企业的污染排放信息,利用燃料消耗量、产品产量、技术类型及末端治理技术等相关信息,逐一计算各污染源的 VOC 排放量。

### 1.2.2 居民源

居民源主要包括民用燃烧和民用溶剂两类污染源。其中,民用燃烧源包括生物质燃烧和居民燃料燃烧。在估算居民燃料燃烧源的 VOC 排放量时,主要将居民生活使用的管道燃气、罐装燃气等燃料的消耗量用作活动水平数据。

生物质燃烧分为室内燃烧和露天燃烧两种方

式。生物质燃烧源的排放因子主要参考田贺忠等<sup>[22]</sup>的研究结果,活动水平数据主要使用农作物燃烧的干质量:

$$M_{\text{dry}} = P \times \alpha \times \beta \times EF_c \quad (3)$$

式中, $M_{\text{dry}}$ 表示农作物干质量, $P$ 代表农作物产量, $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $EF_c$ 分别表示农作物的谷草比、燃烧率和燃烧效率<sup>[22~24]</sup>。农作物的产量来自 2010 年宁波市统计年鉴数据。

居民溶剂使用指居民生活、建筑装修等活动中的溶剂使用过程,如家庭溶剂使用、干洗、建筑涂料使用、汽车维修等。表 2 列出了各类居民溶剂使用源的 VOC 排放因子,计算 VOC 排放量所使用的活动水平数据主要包括人口、溶剂使用量、产品产

表 2 居民溶剂使用源的 VOC 排放因子

Table 2 VOC emission factors of residential solvent use

污染源	排放因子	单位	文献
干洗	0.12	kg·(城市人口·a) <sup>-1</sup>	[18]
建筑涂料使用	2.09	kg·(人·a) <sup>-1</sup>	[18]
机动车维修	0.84	kg·(人·a) <sup>-1</sup>	[18]
家庭溶剂(城市)	0.50	kg·(人·a) <sup>-1</sup>	[19]
家庭溶剂(农村)	0.10	kg·(人·a) <sup>-1</sup>	[19]
谷物干燥	1.30	kg·t <sup>-1</sup> (以谷物计)	[25]
杀虫剂使用	95.00	%	[25]

量等信息。

### 1.2.3 机动车排放源

本研究将宁波市的机动车划分为乘用车、公交车、轻型货车和重型货车共 4 类车型。对于宁波市的摩托车,由于市区禁摩、电动车取代等因素,摩托车使用量极小,因此本研究没有进行摩托车的估算。机动车 VOC 排放因子采用本地化研究结果<sup>[26]</sup>,机动车保有量数据来自 2010 年宁波市统计年鉴。

### 1.2.4 油气储运源

油气储运源主要包括加油站、油品运输、油品及化学品存储过程中的逸散排放等。各类源的 VOC 排放因子见表 3。宁波市加油站的分布数据以及 2010 年各区县加油站汽油及柴油的销售量来自宁波市环保局提供的资料,油品储存和化学品储存的数据来自当地的调研结果。

表 3 油气储运源的 VOC 排放因子

Table 3 VOC emission factors of petrochemical storage and transportation

污染源	油品种类	排放因子	单位	文献
加油站	汽油	4.950	kg·t <sup>-1</sup>	[27]
	柴油	0.075	kg·t <sup>-1</sup>	[27]
油品运输	汽油	0.740	kg·t <sup>-1</sup>	[20]

### 1.2.5 非道路移动源

非道路移动源主要包括农用机械和工程机械使用过程中的 VOC 排放,排放量主要通过柴油的消耗量进行估算。

表 4 非道路移动源的 VOC 排放因子

Table 4 VOC emission factors of non-road mobile sources

污染源	排放因子	单位	文献
农业机械	7.45	kg·t <sup>-1</sup> (以柴油计)	[28]
工程机械	7.76	kg·t <sup>-1</sup> (以柴油计)	[28]

## 2 结果与讨论

### 2.1 宁波市 2010 年人为源 VOC 排放清单

宁波市 2010 年人为源 VOC 排放总量为 17.6 万 t。表 5 列出了宁波市各区县人为源 VOC 的排放量大小,可以看到,位于宁波东北部的北仑区和镇海区排放份额最大,分别占总排放量的 32.1% 和 16.7%,而位于城市核心地区、人口密集的老三区(海曙区、江东区和江北区)则排放量最低。如果考虑各区县的平均 VOC 排放强度,则海曙区、江东区和镇海区的排放强度较高。

### 2.2 各类 VOC 人为源的排放分担率

如图 1 所示,宁波市 2010 年人为源 VOC 最主

要的来源是工业源,排放量为 10.9 万 t,占排放总量的 62.0%,其中,固定燃料燃烧排放、工业工艺排放、溶剂使用排放分别占 VOC 排放总量的 3.9%、40.5% 和 17.7%。其次是机动车的 VOC 排放(3.0 万 t),占总排放量的 17.2%,接下来依次是居民源(2.7 万 t)、油气储运源(0.7 万 t)以及非道路移动源(0.2 万 t)。

表 5 宁波市 2010 年 VOC 人为源排放清单

地区	排放量/ $t \cdot a^{-1}$	平均排放强度/ $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$
海曙区	4 990	169.8
江东区	3 821	113.2
江北区	4 388	21.1
北仑区	56 456	94.2
镇海区	29 487	119.9
鄞州区	12 229	9.1
余姚市	10 690	7.1
慈溪市	17 528	12.9
奉化市	17 870	14.1
象山县	10 402	7.5
宁海县	8 273	4.5
全市	176 133	17.9

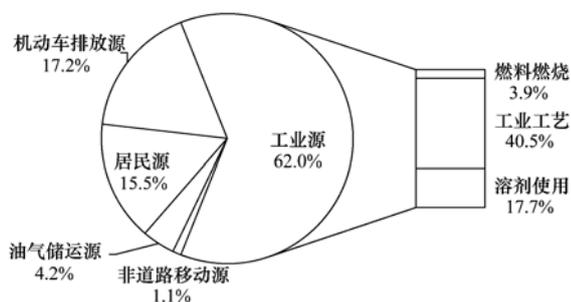


图 1 宁波市 2010 年各类 VOC 人为源的排放分担率

Fig. 1 Contributions to anthropogenic VOC emissions by source categories in Ningbo for the year 2010

图 2 是宁波市不同区县人为源 VOC 排放的构成情况。宁波市区的海曙、江东、江北、鄞州区,机动车排放源是当地 VOC 的首要来源(39.0% ~ 64.6%)。北仑区、镇海区和奉化市的工业源比重较高,分别占当地 VOC 总排放量的 91.3%、80.6% 和 71.6%,其中北仑区的化学原料及化学品制造业,镇海区的石油加工业,奉化市的酒类制造业是当地主要的 VOC 排放工业行业。工业源也是慈溪市、象山县和宁海县人为源 VOC 的主要来源(38.0% ~ 47.6%),金属制品业、金属船舶制造业和电力生产业分别是当地的主要 VOC 排放工业行业。余姚市的 VOC 主要来源是居民源(47.0%)。

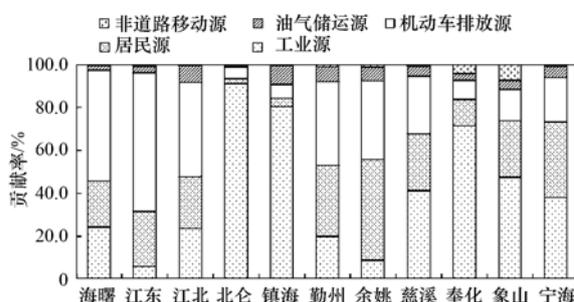


图 2 宁波市各区县人为源 VOC 的排放分担率

Fig. 2 Contributions to anthropogenic VOC emissions by source categories in each county of Ningbo

### 2.3 工业行业的排放贡献

工业源是宁波市最重要的人为 VOC 排放源,在北仑、镇海等区县,工业源的贡献均超过了当地 VOC 来源的 50%。根据《国民经济行业分类与代码》(GBT 4754-2002)中的行业划分,对宁波市各个工业排放源的 VOC 排放量分工业行业进行统计,表 6 列出了贡献排在前 10 位的工业行业及其排放量大小。化学原料及化学制品制造业中的合成材料制

表 6 宁波市 2010 年主要工业行业的 VOC 排放量

工业行业	具体行业	排放量/t	贡献率/%
化学原料及化学制品制造业	合成材料制造业	32 749	18.6
石油加工业	精炼石油产品的制造业	23 016	13.1
饮料制造业	酒的制造业	12 602	7.1
交通运输设备制造业	金属船舶制造业	7 190	4.1
电力、热力的生产和供应业	电力生产业	5 795	3.3
金属制品业	集装箱及金属包装容器制造业	5 524	3.1
金属制品业	结构性金属制品制造业	5 009	2.8
纺织业	棉、化纤纺织及印染精加工业	4 587	2.6
造纸及纸制品业	造纸业	3 017	1.7
交通运输设备制造业	汽车制造业	2 513	1.4
其他工业行业	其他工业行业	7 265	4.2
合计		109 269	62.0

造是宁波市 2010 年 VOC 排放量最高的行业, 排放量 3.2 万 t, 占 VOC 总量的 18.6%, 占工业源总排放的 30%。石油加工业中的精炼石油产品的制造位于第二位, 占 2010 年总排放量的 13.1%, 占工业源总排放的 21.1%。前两位工业行业的排放企业主要分布在镇海区和北仑区, 反映出作为宁波工业产业支柱的石油化工企业对 VOC 排放的重要影响。饮料制造业中酒的制造对 VOC 的排放贡献也应给予重视, 相关排放源主要分布于奉化市。电力生产排放的 VOC 占全市总量的 3.3%, 是重要的固定燃烧来源。金属船舶制造、集装箱及金属包装容器制造、结构性金属制品制造以及汽车制造业, 在其生产过程中消耗大量的涂料、油漆, 从而成为宁波市排在前十位的重要 VOC 工业来源。其他工业来源还包括化学品仓储、化学纤维制造业、家具制造业等行业, 共占总排放量的 4.2%。

#### 2.4 不确定性分析

清单的不确定性主要与排放因子和活动水平的不确定性有关。本研究采用评级的方法对排放因子和活动水平进行半定量的不确定性评估<sup>[18,29]</sup>。如表 7 所示, 评级 A 表示排放因子的获得基于多组研究数据, 或本地化水平较高。评级 E 表示排放因子来源较为单一, 可能不适用于所有该类源下的情景, 或本地化水平较低。评级由 A~E, 表示数据对该类源的适用性减弱, 来源可靠性减弱。在评级时认为采用国内及本地化排放因子的不确定性较低, 采用国外的研究结果则不确定性较高。研究中使用美国环保署空气污染物排放因子汇编 (AP42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors) 的排放因子, 则结合其原有评级进行评估。对于活动水平的评估, 污普数据的不确定性低于统计年鉴等数据。表 7 给出了各污染源不确定性评估结果。

表 7 宁波市 VOC 排放清单的不确定性评级

Table 7 Rating of the VOC emission inventory study

源类别	排放因子不确定性	活动水平不确定性
工业源	A~E	A~B
居民源	B~C	B~C
机动车排放源	A~B	B
油气储运源	B~C	B
非道路移动源	B~C	B

本研究建立宁波市 2010 年人为源 VOC 清单所用的排放因子和活动水平数据, 总体上能够反映出宁波市 VOC 污染源的排放状况, 据此计算获得的排放清单能够为宁波市 VOC 污染防治及工业行业污

染控制提供科学依据。对于工业源中部分行业的排放因子, 需在今后的研究中加强本地化, 从而进一步减少对工业源排放估算带来的不确定性影响。

### 3 结论

(1) 宁波市 2010 年人为源 VOC 排放总量为 17.6 万 t, 其中北仑区和镇海区排放总量最高, 分别占全市总量的 32.1% 和 16.7%, 排放强度较高的则是海曙区、江东区和镇海区。

(2) 工业源、机动车排放源、居民源是宁波市 VOC 的主要人为来源, 分别贡献宁波市人为源 VOC 总量的 62.0%、17.2% 和 15.5%。市区的 VOC 排放主要来自机动车排放, 而在北仑区、镇海区等区县, 工业源是当地的主要 VOC 来源。

(3) 合成材料制造和精炼石油产品的制造是宁波市重点 VOC 排放工业行业, 其排放贡献率分别为 18.6% 和 13.1%。此外, 酒的制造、金属船舶制造、电力生产、集装箱及金属包装容器制造等行业也是宁波市的主要 VOC 工业来源。

#### 参考文献:

- [1] Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter [J]. *Science*, 1997, **277**(5322): 116-119.
- [2] 王雪松, 李金龙. 人为源排放 VOC 对北京地区臭氧生成的贡献[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 501-505.
- [3] Tang G, Li X, Wang Y, et al. Surface ozone trend details and interpretations in Beijing, 2001-2006 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(22): 8813-8823.
- [4] U. S. Environmental Protection Agency. The Clean Air Act Amendments of 1990 [ER/OL]. <http://www.epa.gov/air/caa/>, 2006.
- [5] 朱丽波, 徐能斌, 应红梅, 等. 宁波市环境空气中 VOCs 污染状况及变化趋势分析[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(5): 24-28.
- [6] 宁波市环境监测中心. 宁波市环境质量报告书(2006~2010年)[R]. 宁波: 宁波市环境保护局, 2011. 61-100.
- [7] 刘金凤, 赵静, 李焱焱, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(6): 496-500.
- [8] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(23): 7297-7316.
- [9] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [10] Wei W, Wang S X, Hao J M, et al. Projection of anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emissions in China for the period 2010-2020 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(38): 6863-6871.

- [11] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1858-1871.
- [12] Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 39-50.
- [13] Su J H, Shao M, Lu S H, *et al.* Non-methane volatile organic compound emission inventories in Beijing during Olympic Games 2008 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(39): 7046-7052.
- [14] Zheng J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [15] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [16] 胡建林. 珠江三角洲污染源排放清单研究[D]. 北京: 北京大学, 2005. 35-36.
- [17] 赵斌, 马建中. 天津市大气污染源排放清单的建立[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(2): 368-375.
- [18] U. S. Environmental Protection Agency. AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources [EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/chie/ap42/>, 1995-1.
- [19] 余宇帆, 卢清, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(2): 195-201.
- [20] EMEP/EEA. Air pollutant emission inventory guidebook-2009 [EB/OL]. <http://www.eea.europa.eu/themes/air/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook/emep>, 2009-6-19.
- [21] 陈颖, 叶代启, 刘秀珍, 等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 48-55.
- [22] 田贺忠, 赵丹, 王艳. 中国生物质燃烧大气污染物排放清单[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(2): 349-357.
- [23] 董艳强, 陈长虹, 黄成, 等. 长江三角洲地区人为源氨排放清单及分布特征[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(8): 1611-1617.
- [24] He M, Zheng J Y, Yin S S, *et al.* Trends, temporal and spatial characteristics, and uncertainties in biomass burning emissions in the Pearl River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(24): 4051-4059.
- [25] EMEP/CORINAIR. Emission Inventory Guidebook-3rd edition October 2002 Update [EB/OL]. <http://www.eea.europa.eu/themes/air/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook/emep>, 2002-11-19.
- [26] 薛佳平. 宁波市机动车污染物排放清单的建立及防治对策研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 25-38.
- [27] 沈旻嘉, 郝吉明, 王丽涛. 中国加油站 VOC 排放污染现状及控制[J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1473-1478.
- [28] 张礼俊, 郑君瑜, 尹莎莎, 等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. 环境科学, 2010, **31**(4): 886-891.
- [29] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, **108**(D21): 8809.

## CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM <sub>2.5</sub> in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM <sub>10</sub> in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO <sub>2</sub> Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between <sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub> Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd <sup>2+</sup> onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO <sub>2</sub> Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaying	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-mei, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO <sub>2</sub> and N <sub>2</sub> O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu <sup>2+</sup> on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xin-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N <sub>2</sub> Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-ru, HOU Yan-lin	(2834)

# 《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7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 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