

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_{2.5} 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 PM₁₀ 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 CO₂ 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,高贲,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²¹⁰Pb_{ex}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 Cd²⁺ 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)

TiO₂ 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肺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,张讯达,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 CO₂ 和 N₂O 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 NH₃、N₂O 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)

包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选

王海林^{1,2}, 王俊慧¹, 祝春蕾³, 聂磊², 郝郑平^{1*}

(1. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2. 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是造成我国城市大气污染的主要因素之一, 包括包装印刷行业活动等在内的工业源是 VOCs 污染的重要来源. 工业源的治理技术众多, 如何选择合适的治理技术是面临的主要问题. 本文在包装印刷行业 VOCs 排放特点及现有治理技术的研究基础上, 针对包装印刷行业中典型的复合膜干复工艺 VOCs 排放与治理, 以层次分析法为模型, 构建该行业 VOCs 控制技术评估体系, 对包装印刷行业现有治理技术进行综合评估, 筛选出最佳可行控制技术, 为包装印刷行业 VOCs 减排控制提供了技术支持. 结果表明, 包括吸附回收和热力焚烧在内的 7 种技术, 其技术优先顺序为: 碳纤维吸脱附 > 颗粒炭吸脱附 > 直接燃烧 > 蓄热燃烧 > 催化燃烧 > 转轮浓缩燃烧 > 活性炭浓缩燃烧, 其中碳纤维吸脱附技术综合评估权重较高, 为最优控制技术.

关键词: 包装印刷; 挥发性有机物; 排放控制; 层次分析法; 技术评估

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2503-05 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.07.010

Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry

WANG Hai-lin^{1,2}, WANG Jun-hui¹, ZHU Chun-lei³, NIE Lei², HAO Zheng-ping¹

(1. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. National Urban Environmental Pollution Control Engineering Techniques Research Center, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 3. Civil and Environmental Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) play an important role in urban air pollution. Activities of industries including the packaging and printing industries are regarded as the major sources. How to select the suitable treating techniques is the major problem for emission control. In this article, based on the VOCs emission characteristics of the packaging and printing industry and the existing treatment technologies, using the analytic hierarchy process (AHP) model, an evaluation system for VOCs selection was established and all the technologies used for treatment were assessed. It showed that the priority selection was in the following order: Carbon Fiber Adsorption-Desorption > Granular Carbon Adsorption-Desorption > Thermal Combustion > Regenerative Combustion > Catalytic combustion > Rotary adsorption-concentration and combustion > Granular Carbon adsorption-concentration and combustion. Carbon Fiber Adsorption-Desorption was selected as the best available technology due to its highest weight among those technologies.

Key words: packaging and printing industry; volatile organic compounds (VOCs); emission control; analytic hierarchy process (AHP); technology assessment

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是指在 20℃ 条件下蒸气压大于或等于 0.01 kPa, 或者特定适用条件下具有相应挥发性的全部有机化合物的统称^[1]. VOCs 不仅对大气环境造成影响^[2~4], 还对人体健康产生潜在的危害^[5~7], 与二氧化硫、氮氧化物和颗粒物一起被列为重要的大气污染防治物^[8].

目前, VOCs 的防控有多种途径, 利用治理技术对源排放的 VOCs 进行直接处理是最为直接和有效的手段之一, 也是我国目前 VOCs 治理工作的重点之一. VOCs 治理技术整体而言可以分为回收技术和销毁技术, 前者包括活性炭吸脱附、溶剂吸收、冷凝法等回收技术, 后者包括燃烧法、等离子体、

生物法, 以及吸附浓缩-燃烧等组合技术. 每个技术都有自己的特点, 应用对象和应用范围不尽相同, 而 VOCs 工业源众多, 排放特点也截然不同, 这就为技术的选择带来了一定的困难. 以往的技术选择和推荐多偏重于技术治理设备的经济成本等因素, 选择缺乏科学性和综合性, 导致相当一部分治理效果并不理想.

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2014-02-08

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201309073); 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA063101); 中国科学院科技创新"交叉与合作团队项目"; 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX2-YW-JS402)

作者简介: 王海林 (1981~), 男, 博士, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: wanghailin@cee.cn

* 通讯联系人, E-mail: zpinghao@rcees.ac.cn

为正确选择治理技术,从而有效控制行业 VOCs 排放,有必要针对具体行业,进行现有治理技术的包括技术、经济和环境影 响在内的综合评估,推荐行业最佳可行技术. 包装印刷行业是目前挥发性有机污染物 VOCs 排放的重要来源,本研究将以包装印刷行业为例,建立技术评估指标体系,以层次分析法为数学模型分析包装印刷行业治理技术实际减排效果,进行现有治理技术综合评估,以期 为包装印刷行业 VOCs 减排控制提供技术支持.

1 材料与方 法

1.1 评估方 法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是美国运筹学家 Saaty 教授于 70 年代初期提出,在安全科学、环境科学等领域得到了广泛应用^[9]. 层次分析法将决策问题按总目标、各层子目标、评价准则直至具体的备选方案的顺序分解为不同的层次结构,然后用求解判断矩阵特征向量的办法,求得每一层次 的各元素对上一层次某元素的优先权重,最后再通过加权和的方法递归并各备择方案对总目标的最终权重,此最终权重最大者即为最优方案. 其基本步骤主要包括^[10]:①建立包括目标层、准则层、方案层这 3 个层次的层次结构模型. ②构造对比矩阵. ③计算单排序权向量并做一致性检验. ④计算结果输出. 根据总排序权向量表示的结果进行决策.

1.2 评估技术路线

由于行业 VOCs 排放情况不同,现有的 VOCs 治理技术也具有一定的适用范围和局限性. 因此,必须根据行业 VOCs 污染排放特征和具体污染物理化性质,来对技术进行初步的筛选,然后再收集相关技

术在行业的具体应用参数和利用层次模型进行综合分析,根据得分高低来推荐相应的治理技术,其流程包括以下主要步骤.

(1)获取行业排放背景资料 通过资料、文献调研或实地多次检测,获得包括排放环节、排放参数、排放浓度、污染组成等参数,调研并确认现 有所有可用的治理技术.

(2)技术初选与剔除 根据污染排放特征参数如风量、温度和污染物理化性质和技术适用对象、范围,进行初步判断,剔除不可行技术.

(3)剩余技术综合分析评估 利用层次因子法构建评估模型,建立权重评估机制,依技术、经济、环境三方面进行评估.

(4)最佳可行技术选择 根据得分(权重)高低,结合实际情况,来决定行业最佳实用技术.

2 结果与分析

2.1 行业 VOCs 排放背景综合研究

2.1.1 行业 VOCs 排放特征

目前全国包装印刷企业为 4.3 万余家,占印刷企业总数 40%~45%,工业生产总值超 1 500 亿元,占全国印刷工业总值的 33%左右,是整个印刷行业中比重最大、发展最快的一个部门. 其中纸类印刷约占 40%,塑料印刷 30%,金属印刷 25%. 其他类包装印刷约 5%. 企业主要分布在华东、华南、西南和大连、武汉等地区. 由于水性油墨色彩和光泽度等不如溶剂型油墨,因此大多数企业仍使用高 VOCs 含量的溶剂型油墨,仅有少数企业使用了低 VOCs 含量的水溶性和 UV 油墨. 不同印刷工艺/方式所使用的油墨和排放的 VOCs 如表 1 所示.

表 1 包装印刷过程中 VOCs 排放特性

Table 1 Characteristics of VOCs from the packaging and printing industry

工艺/印刷方式	所用油墨	排放 VOCs
平版印刷	轮转胶印油墨	高沸点石油类溶剂
	平张纸胶印油墨	几乎不排放
凹版印刷	出版凹印油墨	以甲苯为主体
	特殊凹印油墨	低沸点有机溶剂(甲苯、醋酸乙烯、MEK、IPA 等)
柔版印刷	水性柔印油墨	很少排放
	溶剂型柔印油墨	低沸点有机溶剂(醋酸乙烯、IPA 等)
孔版印刷(丝网印)	溶剂型丝印油墨	高沸点有机溶剂
	RC 型(UV/EB)丝印油墨	几乎不排放
其他(封帖印刷、制版、装订、上光等工艺)		很少排放

2.1.2 排放节点

以最为常见的塑料软包装印刷行业为例. 塑料包

装印刷泛指以塑料为基材的特种印刷工艺,工艺过程包括制板、吹塑、预处理、印刷、复合、分切、热封、

制袋等过程. 塑料包装印刷生产工艺如图 1 所示.

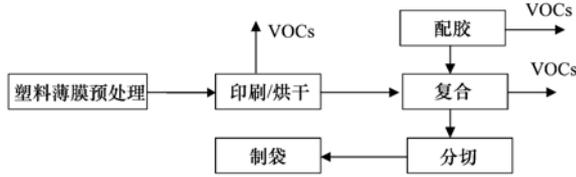


图 1 塑料包装印刷生产工艺流程

Fig. 1 Production processes of the plastic packaging and printing industry

印刷、烘干以及印后加工(复合)工序是产生 VOCs 的重要环节,印刷过程中使用的油墨含有有机溶剂,同时,使用的润版液也常用有机溶剂作为添加剂. 塑料薄膜印刷后,使用黏合剂复合的过程中,由于黏合剂使用了稀释剂(常用乙酸乙酯),会在复合和烘干过程中有 VOCs 排放. 其主要污染物是苯

表 2 包装印刷干复工艺废气排放特性

Table 2 Characteristics of VOCs emitted from the composite membrane process

排放源	排放风/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	操作时数/ $\text{h} \cdot \text{a}^{-1}$	VOCs 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
干复工艺生线	2 000 ~ 100 000	7 200	1 000 ~ 30 000(以醋酸乙酯为主,还含有醇类和微量苯系物)

由于排放废气中主要成分为乙酸乙酯,还含有少量的醇类,苯系物和酮类含量更低,并且在所有检测点检测时都能检测到,怀疑其来自附近的其它污染源. 因此,排放废气近似认为是乙酸乙酯.

目前用于干复机废气治理的现有 VOCs 治理技术主要有:水洗、冷凝、颗粒炭吸脱附回收、碳纤维吸脱附回收、活性炭浓缩燃烧、分子筛转轮浓缩燃烧、直接燃烧、蓄热燃烧、催化燃烧、生物滤池、生物滴滤塔、低温等离子体. 在此需要说明的是引风稀释和不采取任何措施不考虑作为治理技术.

(2) 技术的初步筛选与剔除

对不能满足干复工艺条件下废气治理的技术,进行初步的筛选与剔除,结果如表 3 所示.

因此,在对治理技术进行剔除后,去掉因为污染物本身物化性质和排放浓度、风量而不太合适的技术外,剩下的技术基本上是吸附回收技术、热力焚化技术和两者的组合技术.

(3) 利用 AHP 数学模型进行剩余技术的综合分析评价

根据 AHP 分析法计算步骤,根据已有的 VOCs 技术评估指标体系,首先构造 AHP 评价所需的层次结构模型,结果如图 2 所示.

借助于 1 ~ 9 标度参考专家赋值结果^[25],并结合数据收集对已有的评价指标构造判断矩阵. 为了

类化合物(苯、甲苯、二甲苯),酮类化合物(丙酮、异丙酮、甲乙酮),醇类化合物(异丙醇、丁醇)和脂类化合物(一般为乙酸乙酯)等.

2.1.3 治理技术发展调查研究

目前国内外的处理技术主要包括回收和降解技术^[11, 12]. 常见的回收技术主要有吸附^[13~15]、冷凝及膜分离等^[16, 17]. 常见的销毁技术主要有燃烧^[18~20]、等离子体^[21]、光催化降解^[22]和生物降解等^[23, 24].

2.2 技术评估

根据技术评估路线,本部分将给出包装印刷行业排放量显著的复合膜干复工艺的 VOCs 治理最佳可行技术筛选评估过程.

(1) 复合膜干复工艺排放与治理背景,排放特性如表 2 所示.

表 3 技术评估初步筛选结果

Table 3 Primary results of VOCs treatment technologies selection

处理技术	可行性	说明
水洗	×	乙酸乙酯、异丙醇水溶性差
冷凝	×	废气排放风量较大,冷凝效率低
颗粒炭吸脱附回收	✓	
碳纤维吸脱附回收	✓	
活性炭浓缩燃烧	✓	
分子筛转轮浓缩燃烧	✓	
直接燃烧	✓	
催化燃烧	✓	
蓄热燃烧	✓	
生物滤池	×	污染物浓度高、风量大
生物滴滤塔	×	污染物浓度高、风量大
低温等离子体	×	污染物浓度高

确定合理的权重值,需对每个判断矩阵进行一致性检验,下面以准则层(一级指标:技术层、经济层和环境影响,分别标记为 B_1 、 B_2 、 B_3)为例来说明构造判断矩阵(表 4).

经过计算,求得最大特征根 $\lambda_{\max} = 3.0649$,相

表 4 一级指标层判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of the first layer

	B_1	B_2	B_3
B_1	1	1/3	5
B_2	3	1	7
B_3	1/5	1/7	1

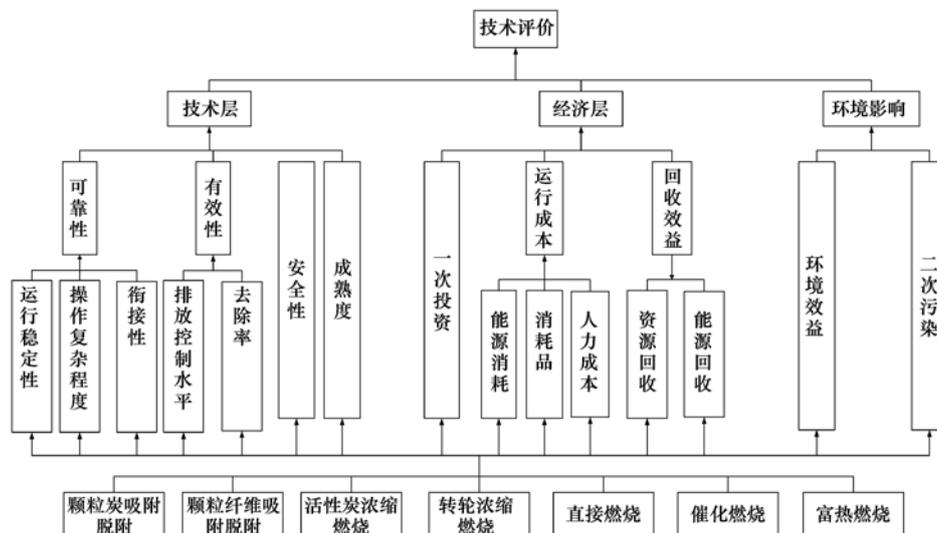


图2 AHP分析法层次结构模型

Fig. 2 Diagram of AHP model

应的特征向量 $W = (0.2790, 0.6491, 0.0719)$, 其中3个分量即为准则层B中3个元素 B_1 、 B_2 、 B_3 的权重值. 根据判断矩阵一致性指标公式可得:

$$C_i = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) = 0.0324$$

式中, n 为判断矩阵阶数.

查找随机一致性指标 R_i , 当 $n = 3$ 时, $R_i = 0.58$,

则一致性比率 $C_r = C_i / R_i = 0.055 < 0.1$, 由此可得该矩阵具有满意一致性, W 中的权重值可以应用.

同理, 对其他各层次因素依其重要性构造判断矩阵, 并检验其一致性, 最终确定其权值. 经计算, 技术综合评价层次结构模型中具体指标对目标层的权重见表5.

表5 治理技术所对应各个具体评价指标的权重

Table 5 Weights of individual assessment target in AHP model

项目	去除率	控制水平	稳定性	复杂度	衔接性	安全性	成熟度	一次投资	能源消耗	消耗品	人力成本	资源回收	能源回收	环境效益	二次污染
颗粒炭吸附脱附	0.03	0.02	0.05	0.13	0.16	0.04	0.05	0.43	0.18	0.31	0.16	0.28	0.03	0.28	0.03
碳纤维吸附脱附	0.06	0.06	0.13	0.10	0.19	0.31	0.12	0.09	0.13	0.06	0.16	0.49	0.03	0.49	0.06
活性炭浓缩燃烧	0.11	0.12	0.06	0.04	0.07	0.03	0.03	0.05	0.32	0.03	0.09	0.05	0.09	0.05	0.05
转轮浓缩燃烧	0.19	0.42	0.17	0.03	0.07	0.08	0.13	0.04	0.26	0.12	0.05	0.05	0.14	0.05	0.06
直接燃烧	0.22	0.17	0.31	0.44	0.36	0.32	0.39	0.24	0.02	0.30	0.27	0.05	0.03	0.05	0.44
催化燃烧	0.19	0.08	0.09	0.09	0.11	0.10	0.11	0.13	0.06	0.03	0.16	0.05	0.24	0.05	0.07
蓄热燃烧	0.21	0.14	0.18	0.18	0.04	0.12	0.16	0.02	0.03	0.15	0.09	0.05	0.43	0.05	0.29

根据已得到的指标权重, 计算各个待评价技术的总得分 (E_i), 计算公式如下:

$$E_i = \sum E_{ij} \times D_j$$

式中, E_{ij} 为在具体指标层 ($j = 1, 2, \dots, 20$) 影响下每种技术的权重, D_j 为指标层每个指标的权重, 最终结果如表6所示.

3 讨论

由表6可知, 包括吸附回收和热力焚烧在内的7种具体技术, 根据综合评价结果, 其权重优先顺序为: 碳纤维吸脱附 > 颗粒炭吸脱附 > 直接燃烧 > 蓄热燃烧 > 催化燃烧 > 转轮浓缩燃烧 > 活性炭浓缩燃

表6 治理技术综合评价结果

Table 6 Assessment results of VOCs treatment technologies

备选方案	权重	排序
颗粒炭吸附脱附	0.2142	2
碳纤维吸附脱附	0.2621	1
活性炭浓缩燃烧	0.0557	7
转轮浓缩燃烧	0.0794	6
直接燃烧	0.1925	3
催化燃烧	0.0917	5
蓄热燃烧	0.1043	4

烧. 碳纤维吸脱附技术由于碳纤维具有比表面积大 ($1300 \sim 1500 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)、资源回收效率高、污染轻等优点, 综合评估权重较高, 为最优控制技术, 但由于碳纤维价格昂贵, 以及运行阻力等因素, 导致其一

次投资和运行维护成本较高,因此,企业在预算资金不足的情况下,可考虑次优技术——颗粒炭吸脱附,其具有一次投资和运行成本较低等优点,但其存在一定的污染,需注意预防运行过程中可能的安全隐患。对于浓缩燃烧技术来说,虽然其在理论上可以应用于干复工艺废气治理,但由于该污染排放属于中等浓度排放,并且具有较高的回收价值,而浓缩燃烧技术主要针对的是低浓度、无回收价值的废气处理,并且成本较高,因此在干复工艺排放废气治理技术评估中得分最为靠后。此外,从各指标得分权重值可以看出,如果说只考虑污染物的去除,直接燃烧虽然其能耗最高,但综合考虑各方面因素,最为可行,颗粒炭吸脱附反而最差,研究分析表明技术评估可从各个因素出发考虑,并根据侧重点不同,而推荐不同的治理技术。

4 结论

本研究利用 AHP 层次分析模型,结合现有资料,对包装印刷行业挥发性有机物的排放治理技术进行了包括技术、经济和环境方面的综合评估分析,并根据评估结果,推断出活性炭纤维作为最佳实用技术。从实际应用角度出发,此结论较为合理。因此,在建立综合评估指标体系的基础上,结合技术资料收集和 AHP 模型,可为行业挥发性有机物的治理技术筛选提供有力的科学支撑。

参考文献:

- [1] DB11/501-2007. 北京市大气污染物综合排放标准[S].
- [2] Gauss M, Myhre G, Isaksen I S A, *et al.* Radiative forcing since preindustrial times due to ozone change in the troposphere and the lower stratosphere [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(3): 575-599.
- [3] Geng F H, Tie X X, XU J M, *et al.* Characterizations of ozone, NO_x, and VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(29): 6873-6883.
- [4] Zhang Y H, Su H, Zhong L J, *et al.* Regional ozone pollution and observation-based approach for analyzing ozone-precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6203-6218.
- [5] Jun S, Hiroyuki Y, Hiroshi Y, *et al.* Evaluation of human health risks from exposures to four air pollutants in the indoor and the outdoor environments in Tokushima, and communication of the outcomes to the local people [J]. *Journal of Risk Research*, 2007, **10**(6): 841-851.
- [6] Huss-marip J, Eberlein-koenig B, Darsow U, *et al.* Short term exposure to volatile organic compounds enhances atopy patch test reaction[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2004, **113**(2): S56-S57.
- [7] Park K H, Jo W K. Personal volatile organic compound (VOC) exposure of children attending elementary schools adjacent to industrial complex [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1303-1312.
- [8] 王海林, 张国宁, 聂磊, 等. 我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3462-3468.
- [9] 秦吉, 张翼鹏. 现代统计信息分析技术在安全工程方面的应用: 层次分析法原理[J]. *工业安全与防尘*, 1999, **18**(5): 44-48.
- [10] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. *中国安全科学学报*, 2008, **18**(5): 148-153.
- [11] 张云, 李彦锋. 环境中 VOCs 的污染现状及处理技术研究进展[J]. *化工环保*, 2009, **29**(5): 411-415.
- [12] Khan F I, Kr Ghoshal A. Removal of volatile organic compounds from polluted air [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, **13**(6): 527-545.
- [13] Gupta V K, Verma N. Removal of volatile organic compounds by cryogenic condensation followed by adsorption [J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, **57**(14): 2679-2696.
- [14] Lordgooei M, Carmichael K R, Kelly T W, *et al.* Activated carbon cloth adsorption-cryogenic system to recover toxic volatile organic compounds [J]. *Gas Separation & Purification*, 1996, **10**(2): 123-130.
- [15] Dwivedi P, Gaur V, Sharma A, *et al.* Comparative study of removal of volatile organic compounds by cryogenic condensation and adsorption by activated carbon fiber [J]. *Separation and Purification Technology*, 2004, **39**(1-2): 23-37.
- [16] 李婕, 羌宁. 活性炭吸附回收挥发性有机物的研究进展[J]. *化工环保*, 2008, **28**(1): 24-28.
- [17] Bhaumik D, Majumdar S, Sirkar K K. Pilot-plant and laboratory studies on vapor permeation removal of VOCs from waste gas using silicone-coated hollow fibers [J]. *Journal of Membrane Science*, 2000, **167**(1): 107-122.
- [18] Stulir R, Stehlik P, Oral J, *et al.* Fully integrated unit for thermal treatment of gas wastes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2001, **21**(13-14): 1383-1395.
- [19] Everaert K, Baeyens J. Catalytic combustion of volatile organic compounds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2004, **109**(1-3): 113-139.
- [20] Scir S, Minico S, Crisafulli C, *et al.* Catalytic combustion of volatile organic compounds on gold/cerium oxide catalysts [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2003, **40**(1): 43-49.
- [21] 王玉佳, 许德玄, 王海军, 等. 雾化电晕等离子体饮食油烟净化技术与装置[J]. *环境工程*, 2004, **22**(1): 40-42.
- [22] Dibble L A, Raupp G B. Fluidized-bed photocatalytic oxidation of trichloroethylene in contaminated air streams [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(3): 492-495.
- [23] Kennes C, Cox H H J, Doddema H J, *et al.* Design and performance of biofilters for the removal of alkylbenzene vapors [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1996, **66**(3): 300-304.
- [24] Burgess J E, Parsons S A, Stuetz R M. Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2001, **19**(1): 35-63.
- [25] 王海林, 郝郑平. 我国挥发性有机物控制技术评估[R]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2013. 59-64.

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 _{2.5} 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 ₁₀ 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 ₂ 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 ²¹⁰ Pb _{ex} 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 ²⁺ 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 ₂ 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-tuan, 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 ₂ and N ₂ 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 ²⁺ 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 ₃ , N ₂ 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 ₂ 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