

北京市家具制造业涂料应用过程挥发性有机物排放现状及未来趋势

薛鹏丽¹ 孙晓峰¹ 邵霞² 孙慧¹

(1.中国轻工业清洁生产中心,北京 100012;2.北京市环境保护科学研究院,北京 100037)

摘要 在调研北京市家具制造业涂料使用现状的基础上,采用排放因子法,分别自上而下计算北京市家具制造业挥发性有机物(VOCs)排放量,自下而上计算重点家具制造企业 VOCs 排放量,并采用情景分析法对未来北京市家具制造业 VOCs 排放情况进行预测。结果表明,2015 年北京市家具制造业 VOCs 排放量约为 1.37×10^4 t;重点企业 VOCs 排放量占比约 29.4%。通过优化涂料品质使其达到欧美发达国家 20 世纪末期平均水平,且要求新建企业安装废气末端治理设施,该行业 VOCs 排放量可控制在 1.15×10^4 t;进一步将涂料改进到欧美发达国家先进水平,且规模企业安装废气末端治理设施,该行业 VOCs 排放量可控制在 8.80×10^3 t。对比分析两种控制措施的减排效果,提升涂料品质是控制 VOCs 排放的最有效措施。

关键词 家具制造业 涂料 挥发性有机物 排放因子 情景分析

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.02.021

Estimation and forecast of volatile organic compounds emitted from paint uses in Beijing furniture industry XUE Pengli¹, SUN Xiaofeng¹, SHAO Xia², SUN Hui¹. (1.China Clean Production Center of Light Industry, Beijing 100012; 2.Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037)

Abstract: The emission factor method was used to estimate the up to down volatile organic compounds (VOCs) emissions of Beijing furniture industry and the down to up VOCs emissions of the main furniture enterprises based on the current paint consumptions of furniture industry in Beijing. Furthermore, the scenario analysis method was used to forecast the VOCs emissions of Beijing furniture industry in the future. The results indicated that the VOCs amount emitted from furniture industry paint use was 1.37×10^4 t in 2015, while the key enterprises VOCs emissions accounted for about 29.4%. Two control scenarios were developed to evaluate the potential of VOCs emission reduction. VOCs emissions from furniture industry might be controlled at 1.15×10^4 t through the improvement of paints quality to the medium level of that in developed countries in late 20th century and installation of waste gas treatment equipments in newly built factories. VOCs emissions could be further reduced to 8.80×10^3 t if the paint quality would be improved to the current advanced level of that in developed countries and all factories would install waste gas treatment equipments. Comparing and analyzing the emission reduction effect of two control measures, improvement of paint quality was the most effective measure.

Keywords: furniture industry; paint; volatile organic compounds; emission factor; scenario analysis

涂料中均含有一定比例的溶剂,这些溶剂在使用过程中均会有挥发性有机物(VOCs)的排放。VOCs 具有光化学活性,是 PM_{2.5} 和臭氧形成的重要前体物质。鉴于 VOCs 的大气活性和毒性,其污染防治成为我国新环境形势下改善大气环境质量的重要任务。污染源排放清单作为环境管理的基础信息数据库,是排放治理、污染减排等相关政策制定的重要依据。世界各国都把建立 VOCs 排放清单作为开展 VOCs 控制的首要任务。目前,我国学者多以全国或区域为研究对象,采用排放因子法对工业源 VOCs 排放量、空间分布特征等进行了研究^[1-5],其

活动水平数据均来源于国家层面的统计数据或相关规划计划^[6],在计算过程中鲜有考虑治理措施的影响,并且排放因子多数借鉴国外^[7-12],上述因素会造成排放量估算范围波动大,且具有较大不确定性。

为降低排放因子法的不确定性,本研究调查了北京市家具制造行业各类型涂料消费量、VOCs 含量及末端治理措施等,获得了本土化的活动水平和排放因子,采用自下而上与自上而下相结合的方法,获取了该类源较为准确的 VOCs 排放特征数据,改善了北京市家具制造业涂料应用过程 VOCs 排放清单的可靠性和准确性。此外,在对涂料使用量进行

第一作者:薛鹏丽,女,1982年生,博士,副研究员,主要从事环境标准、政策法规研究。

预测的基础上,利用情景分析法,计算不同政策控制措施下 VOCs 排放趋势,以期为其他行业 VOCs 排放计算及区域性复合型大气污染的形成机制研究提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 研究对象概况

据北京市家具协会统计,北京市具有喷漆工序的家具企业共 645 家。其中,木质家具制造企业 556 家,建筑用木料及木材组件加工企业 4 家,金属家具制造企业 24 家,其他企业 61 家。

1.2 数据来源

本研究中所使用的估算数据主要通过以下几种方式获得:(1)行业调研数据;(2)统计年鉴及统计信息网上公布的信息;(3)生产企业调研数据。

1.3 估算方法

采用排放因子法计算北京市家具制造业 VOCs 排放量,见式(1)。

$$E = P \times A \times ef \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: E 为 VOCs 的排放量, t/a; P 为产品产值, 万元/a, 来自于统计年鉴; A 为单位产值涂料消耗量, t/万元, 通过调研获取; ef 为该行业在涂料使用过程中 VOCs 排放因子, g/kg, 通过调研北京市家具制造业使用涂料的产品结构、产品 VOCs 含量以及该行业企业末端控制治理措施来估算获得。

通过调研获知北京市家具制造业大多数企业安装了活性炭的吸附装置来进行 VOCs 废气治理, 北京市家具制造业 VOCs 废气活性炭末端治理率约为 60%^[13]。

美国家具制造业 VOCs 排放因子为 400 kg/t^[14]、中国台湾家具制造业 VOCs 排放因子为 765 kg/t^[15]、欧盟家具制造业 VOCs 排放因子为 800 kg/t^[16]。但北京市尚缺乏家具制造业 VOCs 排放因子。因此,为获得本土化的 VOCs 排放因子用于计算并预测北京市家具制造业 VOCs 排放,本研究构建排放因子计算模型,如式(2)所示。

$$ef = \sum_i (C \times p_i) \times (1 - \sum_y f_y + \sum_y f_y \times (1 - \beta_y)) \quad (2)$$

式中: C 为某类型产品中 VOCs 的平均质量浓度, g/kg; s 为产品种类; p_s 为 s 类型产品的比例, %; y 为末端处理技术; f_y 为末端处理技术 y 的安装率, %; β_y 为末端处理技术 y 的去除率, %。

2 北京市家具制造业 VOCs 排放现状

2.1 自上而下的北京市家具制造业 VOCs 排放总量核算

根据相关研究及企业调研,北京市家具制造业涂料使用整体情况如表 1 所示。

根据北京市 2016 年工业统计数据,2015 年北京市家具制造业工业总产值为 143 亿元,依此推算 2015 年北京市家具制造业涂料消费量约为 2.86×10^4 t, 根据表 1 及式(1)计算得出北京市家具制造业 VOCs 排放量约为 1.37×10^4 t。

2.2 自下而上的北京市重点家具制造企业 VOCs 排放情况

本研究对北京市产值排名前十的家具制造业(约占北京市家具工业总产值的 30%)进行了实地调研,调研内容包括各类涂料的消费量、各类产品的比例、各种涂料的 VOCs 含量及末端处理设施的安装率、去除率,获得北京市家具制造企业本土化的排放活动水平和排放因子。北京市 10 家重点家具制造企业涂料消费量、产品结构及 VOCs 含量信息情况如表 2 所示。

根据式(2)计算各企业的 VOCs 排放因子及排放量,如表 3 所示。

由表 3 可知,北京市 10 家重点家具制造企业排放因子有显著差异,主要原因为使用溶剂类型的不同,10 家重点企业 VOCs 排放量约为 4.03×10^3 t, 占北京市家具制造业全部 VOCs 排放量的 29.4%。

3 北京市家具制造业 VOCs 情景趋势分析

3.1 情景预测模型

针对未来北京市家具制造业 VOCs 排放预测,从涂料品质优化(提高环保涂料使用比例和减少涂料 VOCs 含量)和末端废气治理两方面措施提出假设,设定无控情景、基准情景和政策情景,如表 4 所示。

表 1 北京市家具制造业涂料使用情况
Table 1 The paint use condition for Beijing furniture industry

项目	水性涂料		溶剂型涂料	
	使用比例/%	VOCs 质量分数 ¹⁾ /%	使用比例/%	VOCs 质量分数 ¹⁾ /%
数值	30	20~25	70	65~75

注:¹⁾ VOCs 质量分数以 VOCs 在涂料湿质量中的比例计,表 2 同。

表 2 北京市重点家具制造业生产概况
 Table 2 The general production situation of the main furniture industries in Beijing

企业编号	主要家具类型	涂料种类	VOCs 质量分数/%	使用比例/%	末端处理工艺
1	木质家具	醇酸树脂漆	43.2	30	活性炭吸附
2	木质家具	聚酯漆	40.8	45	活性炭吸附
3	其他家具	聚氨酯漆	84.0	50	活性炭吸附
4	竹、藤家具	聚氨酯漆	84.0	40	活性炭吸附
5	木质家具	聚酯漆	40.8	30	活性炭吸附
6	其他家具	丙烯酸漆	64.1	60	活性炭吸附
7	木质家具	天然树脂漆	24.6	45	活性炭吸附
8	木质家具	丙烯酸漆	64.1	35	活性炭吸附
9	木质家具	硝基漆	53.7	31	活性炭吸附
10	木质家具	硝基漆	53.7	45	活性炭吸附

表 3 北京市重点家具制造企业 VOCs 排放情况
 Table 3 The VOCs emission for the main furniture industries in Beijing

企业编号	涂料使用总量/t	排放因子/(g·kg ⁻¹)	VOCs 排放量/t
1	632.0	450.0	284.4
2	800.0	408.0	326.4
3	840.0	320.0	268.8
4	767.0	840.0	644.3
5	1 500.0	300.0	450.0
6	937.8	641.0	601.1
7	1 320.0	246.0	324.7
8	500.0	641.0	320.5
9	878.4	537.0	471.7
10	940.0	357.4	336.0

表 4 未来家具制造行业涂料应用过程 VOCs 排放的情景假设¹⁾
 Table 4 Scenarios for VOCs forecasts emitted from the furniture industries paint use in future

具体措施	无控情景	基准情景	政策情景
涂料品质优化	与现状相似	涂料中 VOCs 含量达到欧美发达国家 20 世纪末期平均水平	涂料中 VOCs 含量达到欧美发达国家先进水平
末端废气治理	无要求	新建企业(2015 年后建立)安装有机废气末端治理设施	规模企业安装有机废气末端治理措施

注:¹⁾基准情景和政策情景分别用于模拟 2020 年和 2025 年的 VOCs 减排情况。

未来家具制造行业涂料消耗量预测公式如式(3)所示:

$$A_m=Q_m\times\frac{A_{2015}}{Q_{2015}}\tag{3}$$

式中: A_m 为目标年份 m 的北京市家具制造业涂料消耗量,t; Q_m 为目标年份 m 的家具制造业产值,万元; m 为未来预测目标年份; A_{2015} 为 2015 年北京市家具制造业涂料消耗量,t; Q_{2015} 为 2015 年北京市家具制造业产值,万元。

Q_m 为北京市国内生产总值(GDP)与家具工业总产值的关联函数,由最小二乘法回归模型模拟。未来某年北京 GDP 由 Logistic 模型通过对近 30 年数据模拟获得。

假设家具制造业万元产值对应的涂料平均消耗量保持不变(20 kg/万元),2020 年,北京市家具制造业涂料消耗量为 3.19×10^4 t,2025 年,北京市家

具制造业涂料的消耗量为 5.04×10^4 t。

3.2 情景计算

3.2.1 无控情景

无控情景的预测结果显示:若以当前状况发展下去,北京市家具制造业涂料应用过程的 VOCs 排放量将会从 2015 年的 1.37×10^4 t 上升为 2020 年的 1.53×10^4 t,2025 年达到 2.42×10^4 t,年平均增长率分别为 2.2%、5.6%。

3.2.2 基准情景

在基准情景下,北京市家具制造业 VOCs 排放因子为 360 g/kg,2020 年北京市家具制造业涂料应用过程的 VOCs 排放量为 1.15×10^4 t,相对无控情景,VOCs 减排率约为 24.8%。

3.2.3 政策情景

在政策情景下,北京市家具制造业 VOCs 排放因子为 174 g/kg,2025 年北京市家具制造业涂料应

用过程 VOCs 排放量呈现下降趋势,排放量为 8.80×10^3 t, 相对无控情景, VOCs 减排率约为 63.6%。

3.2.4 控制措施减排对比

基准情景下,若只安装末端治理设施,到 2020 年, VOCs 的排放量为 1.21×10^4 t; 若只优化涂料品质, VOCs 的排放量为 1.19×10^4 t, 与无控情景相比, 减排率分别为 20.9%、22.2%。政策情景下, 优化涂料品质和安装末端治理设施带来的 VOCs 减排率分别为 55.0% 和 38.0%。因此, 从近期来看, 安装末端治理设施和优化涂料品质两种控制措施对北京市家具制造业 VOCs 减排贡献相当; 但从长远来看, 优化涂料品质是控制 VOCs 排放的最有效措施。

4 结 语

(1) 2015 年, 北京市家具制造业涂料使用过程 VOCs 排放量为 1.37×10^4 t; 北京市重点家具企业 VOCs 的排放量自下而上的计算结果为 4.03×10^3 t, 占北京市 VOCs 总排放量的 29.4%。自上而下区域层面 VOCs 估算与自下而上企业层面 VOCs 的计算数据可互为验证, 自上而下的计算有利于宏观层面及行业间的纵向比较, 而自下而上企业层面 VOCs 的统计计算则有助于企业行业 VOCs 减排对策的制定。

(2) 无控情景下, 北京市家具制造业 VOCs 排放量将呈现逐渐递增的趋势; 基准情景下, 2020 年 VOCs 排放量相比 2015 年稍有下降; 政策情景下, 由于提出了更为严格的产品优化措施, 并加大了工业涂料末端废气处理率, VOCs 排放量将控制在 9×10^3 t 内。

(3) 从近期来看, 安装末端治理措施和优化涂料品质两种控制措施对北京市家具制造业 VOCs 减排贡献相当; 但从长远来看, 优化涂料品质是控制 VOCs 排放的最有效措施。

参考文献:

- [1] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [2] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测 [J]. 环境科学, 2009, 30(10): 2809-2813.
- [3] 王海林, 聂磊, 李靖, 等. 重点行业挥发性有机物排放特征与评估分析 [J]. 科学通报, 2012, 57(19): 1739-1746.
- [4] 陈颖. 我国工业源 VOCs 行业排放特征及未来趋势研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [5] 聂磊, 李靖, 王敏燕, 等. 城市尺度 VOCs 污染源排放清单编制方法的构建 [J]. 中国环境科学, 2011, 31(增刊): 6-11.
- [6] 闫雨龙, 彭林. 山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 [J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4086-4093.
- [7] 栾志强, 郝郑平, 王喜芹. 工业固定源 VOCs 治理技术分析评估 [J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3476-3486.
- [8] 樊守彬, 聂磊, 李雪峰. 应用 EDMS 模型建立机场大气污染物排放清单 [J]. 安全与环境学报, 2010, 10(4): 93-96.
- [9] 刘金凤, 赵静, 李涵涵, 等. 我国人为源挥发性有机物排放清单的建立 [J]. 2008, 28(6): 496-500.
- [10] 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.
- [11] 吴建, 程文, 晁娜. 浙江人为源 VOCs 排放清单 [J]. 上海环境科学, 2015, 34(2): 60-66.
- [12] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 北京市 1990—2030 年加油站汽油 VOCs 排放清单 [J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 945-951.
- [13] 北京市环境保护局. 北京市 VOCs 污染治理技术筛选与评估 [R]. 北京: 北京市环境保护局, 2012.
- [14] 1999/13/EC. Directive on the limitation of emissions of volatile organic compounds due to the use of organic solvents in certain activities and installations [S].
- [15] 台湾环境保护署. 公私场所固定污染源申报空气污染防制费之挥发性有机物之行业制程排放系数、操作单元 (含设备组件) 排放系数、控制效率及其他计量规定 [R]. 中国台北: 台湾环境保护署, 2013.
- [16] CTTEPA. Strategy to improve air quality under the clean air for Europe [EB/OL]. [2018-01-22]. <http://www.citepa.org/forums/egtei/egter/index.htm>.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2018-02-22)

(上接第 215 页)

- [16] 朱庆云. ARIMA 模型在南京站月最高潮位预报中的应用 [J]. 人民长江, 2013, 44(增刊 1): 20-21.
- [17] 周银军, 金中武, 徐涛. 三峡水库库区上段水流特性分析 [J]. 水力发电学报, 2015, 34(6): 131-137.
- [18] 李锦秀, 廖文根, 黄真理. 三峡工程对库区水流水质影响预测 [J]. 水利水电技术, 2002, 33(10).
- [19] 吕怡兵, 宫正宇, 连军, 等. 长江三峡库区蓄水后水质状况分析 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 1-6.
- [20] 尹真真, 李璵. 三峡水库蓄水前后长江干流主要污染物浓度变化趋势分析研究 [J]. 环境科学与管理, 2014, 39(3): 42-45.
- [21] 刘兰玉, 蒋昌潭, 安贝贝, 等. 三峡水库 175 m 蓄水对长江重庆段水质的影响 [J]. 水资源保护, 2012, 28(2): 34-36.
- [22] NI J P, SHAO J A. The drivers of land use change in the migration area, Three Gorges Project, China: advances and prospects [J]. Journal of Earth Science, 2013, 24(1): 136-144.
- [23] 蔡庆华, 孙志禹. 三峡水库水环境与水生态研究的进展与展望 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(2): 169-177.
- [24] 杨乐, 张烨, 侯培强, 等. 三峡水库中下游水体氮磷时空变化与机制分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(6).
- [25] 幸梅, 张秀, 何秀清. 三峡水库 156 m 水位蓄水前后长江干流水质的变化 [J]. 三峡环境与生态, 2008, 1(3): 1-4.
- [26] 乔飞, 孟伟, 郑丙辉, 等. 长江流域污染负荷核算及来源分析 [J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 80-87.
- [27] 杨磊磊, 卢文喜, 黄鹤, 等. 改进内梅罗污染指数法和模糊综合法在水质评价中的应用 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 41-44.
- [28] 罗芳, 伍国荣, 王冲, 等. 内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用 [J]. 环境与可持续发展, 2016, 41(5): 87-89.

编辑: 黄 芳 (收稿日期: 2018-05-24)