

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

魏巍, 王书肖*, 郝吉明

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 基于各行业的涂料当前消费量和未来消费预测, 以及各行业使用涂料的挥发性有机物(VOC)含量, 建立了分省、分行业、分化学组分的排放清单模型, 获得 2005~2020 年中国涂料应用过程的 VOC 排放清单。结果表明, 2005 年, 我国涂料应用共排放 VOC 约 1 883 kt, 以苯系物、醇、酯、醚、酮 5 类化合物为主, 平均增量反应活性指标(以 O_3/VOC 计)约为 3.6 g/kg, 其中 31% 的 VOC 为有毒物质。如不加强控制, 到 2020 年该部门 VOC 排放量将激增至 5 673 kt; 因此, 国家应及时开展其排放控制行动。排放控制情景分析表明, 通过提高涂料产品品质达到发达国家上世纪末水平, 且要求新建规模企业安装有机废气末端处理设施, 2020 年该部门 VOC 排放量可控制在 3 519 kt; 通过进一步将建筑涂料和木器涂料改进到当前欧美发达国家先进水平, 且规模企业均安装有机废气末端处理设施, 2020 年该部门 VOC 排放量有可能控制在 2 243 kt。2 种控制情景下所排放 VOC 的化学毒性和大气氧化活性均得到了有效改善。

关键词: 涂料; 挥发性有机物; 排放; 情景分析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2809-07

Estimation and Forecast of Volatile Organic Compounds Emitted from Paint Uses in China

WEI Wei, WANG Shu-xiao, HAO Ji-ming

(Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the current consumptions and forecast consumptions of paints in China, using the volatile organic compounds (VOC) contents of paints calculated as emission factors, an emission inventory model was established to calculate provincial, sector-specific, and species-specific VOC emissions during 2005-2020. The results indicated that the VOC amount emitted from paint use was 1 883 kt in 2005, of which aromatics, alcohol compounds, ester compounds, ether compounds and ketone compounds were the main species. The maximum incremental reactivity (MIR, O_3/VOC) of VOC emitted in 2005 was about 3.6 g/kg, and the toxic VOC accounted for 31% of the total in weight. The VOC emissions would increase to 5 673 kt in 2020 if there were no further control policies and actions taken. Therefore, it is essential to implement the VOC emission control from paint uses as soon as possible. Two control scenarios were developed to evaluate the potential of VOC emission reductions. In 2020, VOC emissions from paint uses might be controlled at 3 519 kt through the improvement of paints quality to the level of that in developed countries in 1990s and installation of waste gas treatment equipments in newly-built factories. VOC emissions could be further reduced to 2 243 kt if the quality of decorative paint and wood paint would be improved to the current level of that in developed countries and all factories install waste gas treatment equipments. All these control measures also help to reduce the toxicity and atmospheric oxidation reactivity of VOC emissions.

Key words: paint; volatile organic compounds (VOC); emission; forecast

溶剂型涂料和水性涂料中均含有一定比例的溶剂, 这些溶剂在涂料施工过程中会全部挥发散逸出来, 形成挥发性有机物(VOC)排放, 一方面造成室内空气污染^[1,2], 另一方面与 NO_x 在光照作用下发生光化学反应, 导致对流层臭氧浓度和二次有机气溶胶浓度升高问题, 直接或间接地影响着人体健康^[3~5]。鉴于 VOC 对大气活性、毒性的作用, 其排放清单成为了近年来国内外的研究热点。众多学者^[6~9]针对我国历史人为活动产生 VOC 排放的研究结果显示: 2000~2005 年期间, 全国范围 VOC 排放总量约 16 500~21 000 kt, 估算结果的不确定性高

达 $\pm 110\%$; 其中, 涂料应用过程 VOC 的排放水平约 1 000~2 090 kt, 因我国涂料产品消费信息及产品 VOC 含量信息的缺失, 上述研究在计算过程主要参考了 AP-42、CORINAIR 等发达国家的 VOC 排放因子, 是导致 VOC 排放估算差异的重要原因。

综上所述, 目前涂料应用过程的 VOC 排放清单存在较大的不确定性。为提高排放清单的准确性, 本

收稿日期: 2008-11-26; 修订日期: 2009-02-09

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422201); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A309)

作者简介: 魏巍(1981~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染与控制, E-mail: w-wei-05@mails.thu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: shxwang@tsinghua.edu.cn

研究深入调查了各行业各类型涂料消费量、各种涂料的 VOC 含量信息,获得了本土化的活动水平和排放因子,建立了分省、分行业、分化学组分的 VOC 排放清单数据库,改善了涂料应用过程 VOC 排放清单的可靠性和准确性.此外,利用情景分析方法,对 2010~2020 年各地区、各行业的涂料消费水平进行了预测,针对重要排放部门制定了排放控制措施,计算了各种控制情景下的 VOC 排放趋势,以期为我国区域性复合型空气污染的 形成机制和制定 VOC 排放控制对策提供基础依据.

1 方法

1.1 排放清单模型

本文采用“排放因子”法计算涂料应用过程的 VOC 排放,见公式(1).

$$E_{p,j}=A_{p,j}\times ef_j\tag{1}$$

式中, E 为 VOC 排放量(t/a), p 为省份, j 为应用行业, A 为某省份某行业的涂料消耗量(kt/a), ef_j 为某行业用涂料的 VOC 排放因子(以 $VOC/paint$ 计, $g\cdot kg^{-1}$).其中,排放因子 ef_j 依据公式(2)计算得到.

$$ef_j=\sum_l(r_{j,l}\times C_{j,l})\times\left\{\left(1-\sum_yf_{j,y}\right)+\sum_y\left[f_{j,y}\times\left(1-\eta_{j,y}\right)\right]\right\}\tag{2}$$

表 1 近年来全国涂料产量、进出口量信息/ kt

Table 1 National information of product, exportation and importation for paint/ kt

年份	产量	建筑涂料	进口量	出口量	表观消费量
2003	2 415.1	898.2	253.3	122.8	2 545.6
2004	2 981.5	1 133.7	265.3	142.0	3 104.8
2005	3 825.0	1 335.1	237.1	157.0	3 905.1

表 2 2005 年我国大陆主要行业涂料消费量/ kt

Table 2 National consumption estimations of paint in main industries for year 2005/ kt

应用行业	涂料消费量 ¹⁾	分省分配指标及数据来源
建筑涂料	2 100	
内墙涂料	1 260	建筑竣工面积 ^[16]
其他	840	
汽车涂料	244	
制造涂料	190	汽车产量 ^[17]
修补涂料	54	汽车保有量 ^[16]
木器涂料	650 ^[14]	
装修木器	390 ^[18]	建筑竣工面积 ^[16]
木器家具	260 ^[18]	木器家具产量 ^[19]
防腐涂料	795	
船舶涂料	145 ^[15]	船舶产量 ^[16]
集装箱涂料	123	集装箱产量 ^[16]
其他防腐涂料	527	工业 GDP ^[16]
卷材涂料	80	卷材产量 ^[20]
其他工业涂料	801	工业 GDP ^[16]

1) 基于中国涂料信息中心数据^[21]、中国涂料工业协会相关专家评估、文献报道及市场调研

式中, ef 为排放因子, l 为溶剂产品的类型, r 为某类产品的比例($\%$), C 为某类型产品中 VOC 的平均含量, y 为各种末端处理技术, f 为各种末端处理技术的安装率($\%$), η 为各种末端处理技术的去除率($\%$).

1.2 活动水平

在我国现有的统计年鉴中,涂料消费量的信息严重缺失.鉴于涂料产品多为液态形式,不易长期储存,且大部分涂料的保质期为 1 a,本研究使用涂料的表观消费信息(即生产量加进口量减去出口量,没有包括库存因素)表达真实消费信息.表 1 给出了近年来我国大陆地区涂料产量^[10]及依据进出口量^[11]计算得到的表观消费量.其中,聚乙烯醇水玻璃涂料(即 106 涂料)和聚乙烯醇缩甲醛涂料(即 107 涂料)因品质低劣、耐水性、耐刷洗性和附着性不好,自本世纪初被各地方政府要求禁用或限用,而不被计入生产产量统计中.但其因价格低廉,目前我国建筑涂料应用领域仍占有一定的市场份额.因此,表 1 中的表观消费量要比表 2 中的真实消费量低约 700 kt .

基于涂料表观消费量,通过统计资料、市场报告和文献调研,获得其在主要应用行业全国消费水平^[12~15],再利用行业分省产量产值信息进行省域空间划分,得到涂料“分省-分行业”消费量,见表 2.

2010~2020 年我国各省份、各行业的涂料消费水平预测采用公式(3)计算,

$$A_{m,p}=\sum_j\left(Q_{m,n,j}\times\frac{A_{2005,n,j}}{Q_{2005,n,j}}\times R_{p,j}\right)\tag{3}$$

式中, A 为涂料消耗水平, m 为未来预测目标年份, p 为某省份, n 表示全国范围, j 代表行业分类, Q 为某行业的产品年产量或产值, $R_{p,j}$ 为近年来 j 行业 p 省份产量占全国总产量的平均比重($\%$).其中,未来某行业的年产量或产值 $Q_{m,n,j}$ 预测由公式(4)计算.

$$Q_{m,n,j}=f(Q,GDP)\tag{4}$$

式中,GDP 为国民生产总值, $f(Q,GDP)$ 为国民生产总值与某行业产量的关联函数,由经济学领域通用的最小二乘法回归模型模拟^[22,23].未来年份的 GDP 信息由 Logistic 模型通过对 30 a 历史数据的模拟获得,该方法被广泛应用于经济预测领域中^[24,25].

预测模拟结果见图 1, 至 2020 年我国涂料消费总量预计将会达到 13.2 Mt, 15 a 平均年增长率分别为 7.1%。

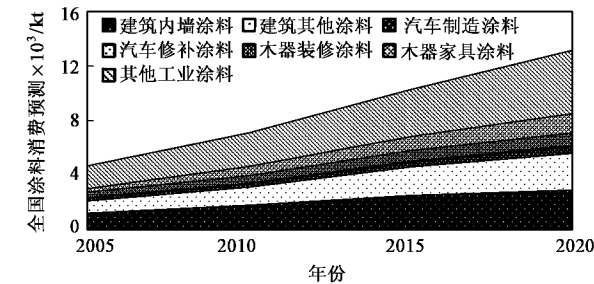


图 1 2010~2020 年我国主要行业涂料消费量预测
Fig.1 National consumption forecasts of paints in main industries for year 2010-2020

1.3 排放因子

涂料喷涂过程的 VOC 排放因子 ef_j 取决于 3 个因素: 产品结构、产品 VOC 含量及相关行业企业末端控制治理技术的应用。目前, 我国各行业企业针对有机废气的末端治理率几乎为 0; 因此在评估现状排放时, 可不计各行业 VOC 末端控制去处效果。

2005 年全国生产涂料中, 22% 为水性涂料^[26]、13% 为粉末涂料^[27], 其余均为溶剂型涂料。基于文献报道、市场调研、相关法规限值及实验室测试结果, 给出了各行业涂料的产品结构比例及产品 VOC 含量(见表 3)。其中, 建筑内墙涂料水性化达到 100%, 平均排放因子仅 180 g/kg; 木器涂料水性化率最低, 仅 0.5%, 其平均排放因子高达 640 g/kg; 水性

表 3 当前主要行业涂料应用的 VOC 排放因子
Table 3 Emission factors of VOC for main industries in recent years

用途	水性涂料		溶剂型涂料		排放因子 /g·kg ⁻¹
	比例/%	VOC 含量(以湿重计)/%	比例/%	VOC 含量(以湿重计)/%	
建筑内墙涂料	100 ^[26,28]	18 ^[29-31]	0 ^[26,28]	—	180
建筑其他涂料	12 ^[26,28]	30 ^[32]	88 ^[26,28]	62 ¹⁾	590
汽车制造涂料	38 ^{[13,33], 2)}	5 ^[13,33]	62 ^{[13,33], 2)}	55~75 ^[13,33]	470
汽车修补涂料	5 ²⁾	15 ²⁾	95 ²⁾	75 ²⁾	720
木器装修涂料	0.5 ^[14]	20~25 ^[34]	95 ^[14]	65~75 ^[35-37]	640
木器家具涂料					
防腐涂料	12.6 ^[26,38]	20~25 ^[34]	87.4 ^[26,38]	高固体分涂料, 固含量约 60%~80%; 传统溶剂涂料, 固含量约 40%~50% ³⁾	440 540
船舶与集装箱涂料					
其他防腐涂料					
卷材涂料	15 ²⁾	20~25 ^[34]	85 ²⁾	同防腐涂料	455
其他工业涂料	2.3	20~25 ^[34]	3.0	同防腐涂料	235

1) 溶剂型外墙涂料(GB 9757-88)标准中对干涂料的规定限值; 2) 市场调研数据; 3) 固指涂料干燥后残留在喷涂表面的固体含量成分含量, 涂料中的固含量越高, 则涂料应用过程中挥发的 VOC 越低

或高固含量溶剂型涂料占汽车、船舶、集装箱、卷材涂料的比例较高, 排放因子在 440~470 g/kg 范围内。

针对未来排放趋势预测, 本研究建立了 3 个情景, 主要从涂料产品优化和末端废气处理两方面措

施提出假设, 详见表 4。当前, 市场成熟的有机废气处理技术有: 活性炭吸附法、转轮吸附法、生物洗涤法、蓄热焚化法等, 然而仅局限于各种涂料的工业应用, 如汽车喷涂车间、木器家具喷涂车间等。

表 4 未来涂料应用过程 VOC 排放的情景假设
Table 4 Scenarios for VOC forecasts emitted from paint use in future

具体减排措施	无控情景Ⅰ	基准情景Ⅱ	政策情景Ⅲ
①产品优化(提高环保涂料结构比例和减少涂料 VOC 含量)	与现状相似	欧美发达国家上世纪末期平均水平 ^[32,39]	基于情景Ⅱ, 将建筑涂料和木器涂料改进到当前欧美发达国家先进水平 ^[40]
②末端治理	无要求	新建企业(2005 年后建立)安装有机废气末端治理设施	要求规模企业安装有机废气末端治理措施

2 结果与讨论

2.1 涂料应用过程 VOC 排放现状

2005 年我国大陆地区涂料应用过程向大气释放 VOC 约 1 882.6 kt, 其中建筑涂料贡献值最大, 占到 38.2%; 其次是木器涂料和防腐涂料, 分别占

22.1%和 22.2%.空间分布上,各省份的 VOC 排放量和第二产业国民生产总值之间有很强的关联,其线性相关系数达到了 0.88,详见图 2.其中,江苏、浙

江、广东、山东四省的年排放量均超过了 150 kt,四省之和为全国总排放量的 43.8%左右.

表 5 列出了本研究与其他文献结果的对比情

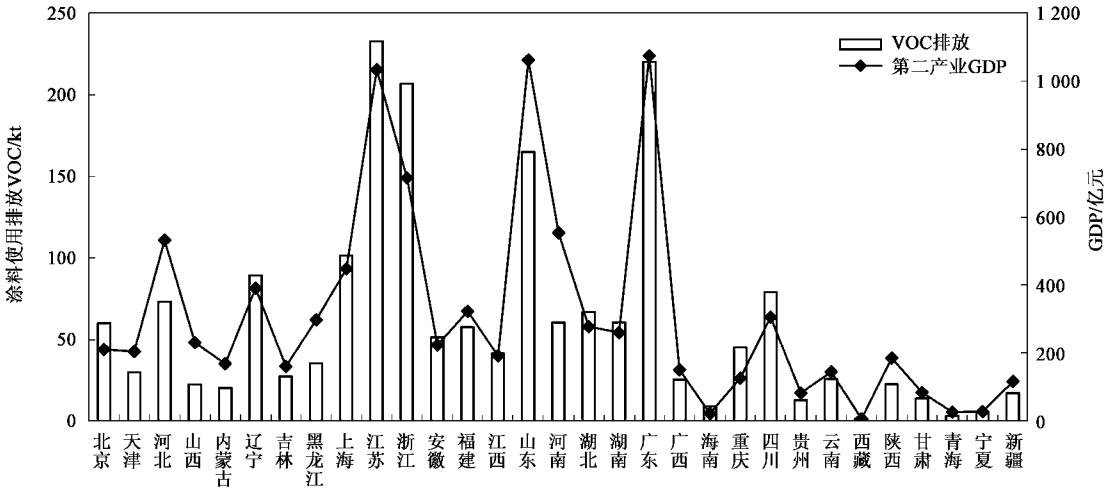


图 2 2005 年我国各地区涂料应用过程中 VOC 排放量
Fig.2 VOC emission estimations and industrial GDP for 31 provinces in year 2005

况.涂料应用过程 VOC 排放估算的差异主要来源于研究时间对象的不同和研究者所采用排放因子的不同.因相关信息的缺乏,文献大多直接采用国外发达国家涂料的 VOC 含量来计算我国的排放水平;本研究则鉴于当前我国与国外发达国家在涂料产品上的较大差异(如溶剂型涂料和水性涂料的比例,同类型

不同品牌涂料自身 VOC 含量等),综合整理了针对国内市场涂料的各类研究文献和法规标准,计算获得了各行业本土化的涂料 VOC 含量,从而降低了排放清单的不确定性.同时,以涂料消耗量来表达活动水平信息,又可有效避免因喷涂产品漏报、误报而直接引起的排放量计算损失问题.

表 5 未来涂料应用过程 VOC 排放的情景假设

Table 5 Scenarios for VOC forecasts emitted from paint use in future			
活动水平表现形式	排放因子来源	排放量/kt	文献
涂料消耗量	CORINAIR, 及研究者粗略估计	1 031	[6]
产品产量	AP-42	未列出涂料排放水平,含涂料在内的“溶剂使用部门”当年排放量为 2 150 kt	[8]
涂料消耗量	AP-42, CORINAIR, 及本土计算结果	2 090	[7]
产品产量或人口信息	AP-42	1 250	[9]
涂料消耗量	本土化计算获得的排放因子	1 883	本研究

各省份涂料应用过程 VOC 排放的行业构成也存在较大差异,如图 3 所示.江苏、浙江、湖南、重庆、四川等地区的建筑涂料贡献占到了排放量的 50%左右;北京、吉林、海南等地因汽车制造业发达,汽车制造涂料应用的排放贡献较高;此外,在广东省,木器涂料的 VOC 排放尤为突出,为第一大贡献源.

由于我国主要行业用涂料的溶剂化学组分信息缺失,本研究利用美国 EPA 发布的 SPECIES 专业数据库^[41],分析了涂料应用过程排放的 VOC 化学成分.结果表明:苯系物、醇、酯、醚、酮 5 类化合物是当前涂料应用排放 VOC 的主要成分,分别占到总量的 29%、19%、13%、10%和 11%.在这些化合物中,

31%为有毒有害物质,以甲苯和二甲苯为主.此外,本研究还利用增量反应活性指标(maximum incremental reactivity, MIR)^[42~44]评估了涂料应用排放 VOC 的大气反应活性,计算结果表明:2005 年我国涂料应用释放的 VOC 的平均增量(以 O₃/VOC 计,下同)反应活性约为 3.59 g/kg.

2.2 未来涂料应用过程 VOC 排放发展趋势

至 2020 年,全国涂料市场需求将增加 2.8 倍;但 3 种预测情景呈现出不同的 VOC 排放趋势,见图 4.

无控情景 I 的预测结果显示:若以当前现状发展下去,涂料应用带来的 VOC 年排放量将会从 2005

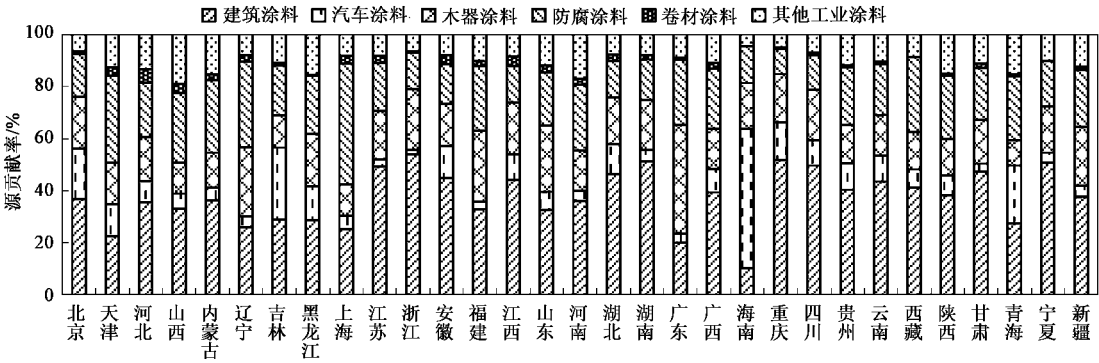


图 3 2005 年我国各地区主要行业对涂料应用释放 VOC 的贡献率

Fig.3 Contributions of main industries to VOC emissions among 31 provinces in year 2005

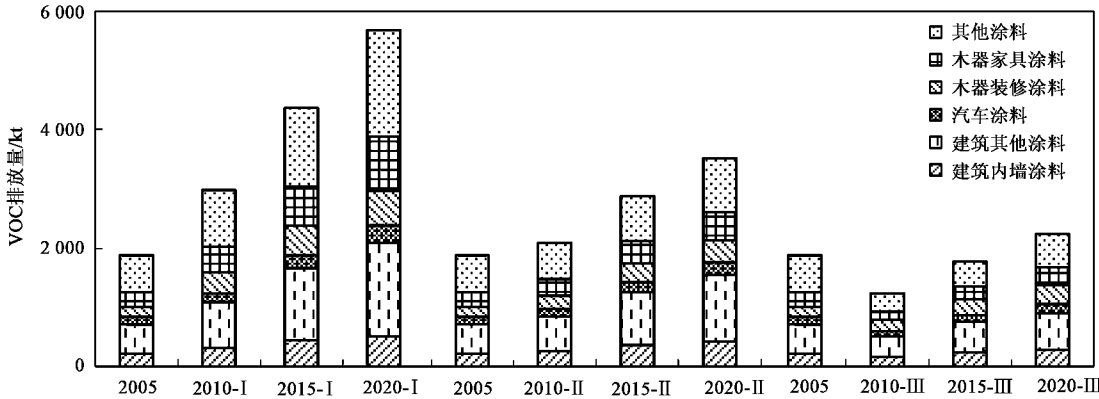


图 4 3 种情景下涂料应用过程 VOC 的未来趋势预测结果

Fig.4 VOC emission forecasts from paint use in three scenarios in future

年的1 882.6 kt, 迅速上升到 2020 年的5 672.7 kt, 年平均增长率为 7.6%。其中, 建筑涂料和木器涂料的排放量的增长最快, 其 2020 年排放量分别为 2005 年排放量的 3.2 倍和 3.6 倍。在基准情景 II 中, 涂料应用带来的 VOC 年排放量仍然呈现增长趋势, 但年平均增长率已下降到了 4.2%; 相对于情景 I, 其减排效果约为 30% ~ 38%。该情景下, 与装饰装修相关的建筑涂料和装修木器涂料排放比重逐年增加, 至 2020 年可占总排放量的 55%。其原因主要有 2 个, 一是涂料装修应用的流行趋势, 使得该类涂料市场需求迅猛增加^[45]; 二是其喷涂行为带来的有机废气难以集中处理处置。因此, 政策情景 III 针对建筑涂料和木器涂料, 提出更为严格的产品优化措施, 并加大了工业用涂料的末端废气处理率。预测结果表明: 在情景 III 提出的减排措施控制下, 未来 15 a 中, 涂料应用带来的 VOC 年排放量将被控制在 2 000 kt 左右。

进一步分析对比 2 种具体控制措施的减排效

果, 详见图 5。以 2020 年为例, 与情景 I 相比, 情景 II 和情景 III 的 VOC 减排量分别为 2 153 kt 和 3 430 kt; 其中, 具体措施 1 带来的减排量分别是 1 512 kt 和 2 208 kt, 为总减排量的 64% ~ 70%。由此本研究得出: 提升环保涂料结构比例及降低涂料 VOC 含量是控制 VOC 排放的最有效措施。

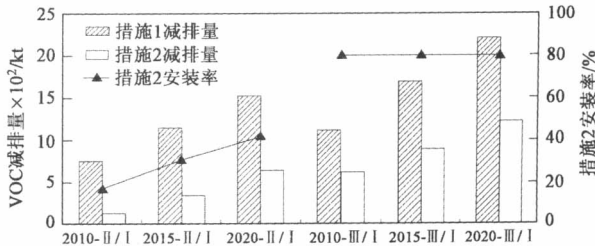


图 5 2 种措施在情景 II 和情景 III 中的减排量(相对与情景 I)

Fig.5 Reduction potentials by two control techniques in scenario II and scenario III

利用美国 EPA 发布的 SPECIES 专业数据库^[41],

分析了未来涂料应用过程排放 VOC 的化学成分,以了解所排 VOC 的毒性和大气反应活性,结果见图 6。在情景 I 和情景 II 中,有毒 VOC 的比例均随时间呈上升趋势,分别从 2005 年的 31% 上升到 2020 年的 36% 和 33%;而在情景 III 中,该比例则出现下降趋势,维持在 27% 左右。从 VOC 大气反应活性角度分析,情景 I 排放 VOC 的平均 MIR 值略微升高,至 2020 年该值约为 3.80 g/kg;情景 II 中,该值平稳地维持在 3.60 g/kg 左右附近;而在情景 III 中,该值呈略微下降趋势,至 2020 年可降低至 3.48 g/kg 左右。因此,情景 II 和情景 III 的减排措施不仅有效降低了涂料应用过程 VOC 的排放量,还改善了所排放 VOC 的化学成分,使其向低毒、低活性的方向发展。

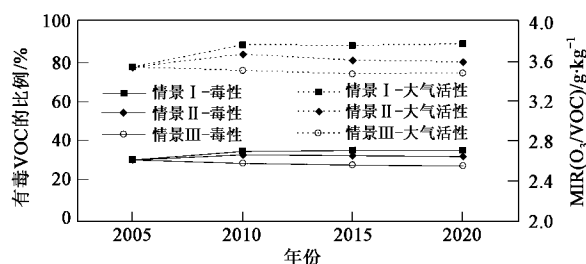


图 6 3 种情景下涂料应用排放 VOC 的毒性及大气活性特征

Fig.6 Toxicity and atmospheric reactivity of VOC emitted from paint use in three scenarios

3 结论

(1) 本研究建立了我国分省、分行业涂料消费数据库,计算了各行业用涂料的平均 VOC 含量,获得了本土化的 VOC 排放因子,从而有效降低了估算结果的不确定性。研究表明:2005 年,我国大陆地区涂料应用过程 VOC 的排放量约 1 882.6 kt,其中建筑涂料贡献值最大,占到 38.2%;其次是木器涂料 (22.1%) 和防腐涂料 (22.2%)。排放物种以苯系物、醇、酯、醚、酮 5 类化合物为主。

(2) 若各应用行业仍保持现有的涂料产品结构和品质,随着经济的继续增长,2020 年其 VOC 年排放量将会达到 5 673 kt,且所排 VOC 的毒性和大气反应活性有着加重的趋势。

(3) 若将各行业涂料产品品质改进到欧美发达国家上世纪末期平均水平,并要求新建企业安装废气末端治理设施,2020 年涂料应用的 VOC 年排放量约 3 519 kt,仍比 2005 年增长了 1 637 kt。在此基础上,若进一步将建筑涂料和木器涂料产品优化至当前欧美发达国家先进水平,并要求规模企业安装有

机废气末端治理设施,则 2020 年涂料应用带来的 VOC 年排放量将可能维持在现状水平。

(4) 优化涂料产品是 VOC 减排的有效措施,并可有效改善所排 VOC 的毒性和大气反应活性。

参考文献:

- [1] Gallagher M, Dalton P, Sitvarin L, *et al.* Sensory and analytical evaluations of paints with and without texanol [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **42**(1): 243-248.
- [2] Celebi U B, Vardar N. Investigation of VOC emissions from indoor and outdoor painting processes in shipyards [J]. *Atmos Environ*, 2008, **42**(22): 5685-5695.
- [3] 谢旻,王体健,江飞,等. NO_x 和 VOC 自然源排放及其对中国地区对流层光化学特性影响的数值模拟研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 32-40.
- [4] Wang L L, Thompson T, McDonald-Bulter E C, *et al.* Photochemical modeling of emissions trading of highly reactive volatile organic compounds in Houston, Texas [J]. *Environ Sci Technol*, 2007, **41**(7): 2103-2107.
- [5] Martins L D, Andrade M D F. Ozone formation potentials of volatile organic compounds and ozone sensitivity to their emission in the megacity of Sao Paulo, Brazil [J]. *Water Air Soil Pollut*, 2008, **195** (1-4): 201-213.
- [6] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, *et al.* Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. *Atmos Environ*, 2002, **36**(8): 1309-1322.
- [7] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmos Environ*, 2008, **42**(20): 4976-4988.
- [8] 刘金凤,赵静,李浩浩,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.
- [9] Bo Y, Cai H, Xie S D, *et al.* Spatial and temporal variation of emission inventories for historical anthropogenic NMVOCs in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2008, **8**(1): 11519-11566.
- [10] 中国轻工业联合会. 中国轻工业年鉴 2006[M]. 北京: 中国轻工业年鉴社, 2006.
- [11] 中国海关总署. 中国海关统计年鉴 2006[M]. 北京: 中国海关总署出版社, 2006.
- [12] 徐国强. 中国集装箱涂料市场的营销现状及开发[R]. 深圳: 海虹老人牌涂料有限公司, 2001.
- [13] EEA. EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook-2006 [R]. Copenhagen: European Environment Agency, 2006.
- [14] 曾晋. 中国木器涂料产业分析[R]. 北京: 中国商业报告库, 2003.
- [15] 汪国平. 造船业的发展对船舶涂料发展的期望[J]. *涂料工业*, 2006, **36**(2): 42-45.
- [16] 中国国家统计局. 中国统计年鉴 2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [17] 中国汽车工业协会. 中国汽车工业 2006[M]. 北京: 中国年鉴出版社, 2006.

- [18] 慧典市场研究报告网. 主要涂料产品发展趋势简析[EB/OL]. 2007-11-15, 2009-01-22. <http://www.hdcmr.com/article/jzqb/08/01/12338.html>.
- [19] 中国轻工业年鉴社. 中国轻工业年鉴 2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [20] 黄有为, 么云蔚. 卷材涂料市场现状及其应用[J]. 上海涂料, 2007, 46(8): 18-21.
- [21] 竺玉书. 我国涂料工业“十一五”发展思路[J]. 精细与专用化学品, 2007, 15(21): 1-6.
- [22] 叶若舟, 刘昱婷. 中国物流发展的现状和趋势[J]. 大连海事大学学报, 2007, 33(增刊): 141-144.
- [23] 尚红云. 2005 年中国税收收入预测模型比较[J]. 统计与信息论坛, 2008, 23(3): 27-31.
- [24] 卢向虎. Logistic 曲线模型在经济预测中的应用——以重庆市城镇居民收入预测为例[J]. 重庆商学院学报, 2002, (3): 29-33.
- [25] 余爱华, 宋丁全. Logistic 自记忆模型在国民经济预测中的应用[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 10-12.
- [26] 庾莉萍. 我国涂料市场发展现状及应解决的问题[J]. 现代涂料与涂装, 2006, (5): 31-38.
- [27] 刘泽曦, 庄爱玉. 逆境中求发展的中国粉末涂料行业[R]. 北京: 中国涂料工业协会年鉴, 2007. 27-31.
- [28] 伯文. 涂料市场和技术发展现状与趋势[J]. 精细化工原料及中间体, 2007, 11(01): 11-14.
- [29] GB 18582-2001, 室内装饰装修材料内墙涂料中有害物质限量[S].
- [30] 李晓红, 刘兴荣, 李万伟. 内墙涂料中挥发性有机物测定与评价[J]. 中国公共卫生, 2006, 22(4): 511-513.
- [31] 中国商业报告库. 中国建材行业质量报告[EB/OL]. 2006-03-06, 2009-01-22. <http://www.bjinfobank.com>.
- [32] EPA U S. Economic impact and regulatory flexibility analyses of the final architectural coatings [R]. Washington DC: 1998.
- [33] 咎丽娜, 舒武炳, 李芸芸. 汽车涂料的发展现状及方向[J]. 现代涂料与涂装, 2007, 10(6): 32-35.
- [34] HJ/T 201-2005, 环境标志产品技术要求: 水性涂料[S].
- [35] 曲波, 李雪飞, 张恒, 等. 3 种木器涂料中挥发性有机化合物含量的检测与分析[J]. 中国工业医学杂志, 2003, 16: 117-118.
- [36] 王锐兰, 江敏芳, 冯晓雷. 我国溶剂型木器涂料的发展现状[J]. 浙江工业大学学报, 2007, 35(5): 497-500.
- [37] GB 18581-2001, 室内装饰装修材料溶剂型木器漆涂料中有害物质限值[S].
- [38] 胡志鹏. 防腐涂料的现状与发展趋势[J]. 涂料涂装与电镀, 2004, 2(3): 12-16.
- [39] 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].
- [40] CITEPA. Strategy to improve air quality under the clean air for Europe [EB/OL]. 2008-09-01, 2009-01-22. <http://www.citepa.org/forums/egtei/egtei-index.htm>.
- [41] EPA U S. SPECIATE Version 4.0[EB/OL]. 2007-01-18, 2009-01-22. <http://www.epa.gov/ttn/chief/software/speciate/index.html>.
- [42] Yang Y J, Stockwell W R, Milford J B. Uncertainty in incremental reactivity of volatile organic compounds [J]. Environ Sci Technol, 1995, 29(5): 1336-1345.
- [43] Martien P T, Harley R A, Milford J B. Evaluation of incremental reactivity and its uncertainty in Southern California [J]. Environ Sci Technol, 2003, 37(8): 1598-1608.
- [44] Vizuet W, Kim B U, Jeffries H, *et al.* Modeling ozone formation from industrial emission events in Houston, Texas [J]. Atmos Environ, 2008, 42(33): 7641-7650.
- [45] 燕来荣. 我国建筑涂料市场的发展趋势分析[J]. 建筑, 2008, 10: 64-66.