环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2020

Vol.41 No.12

第41卷 第12期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第12期
2020年12月15日

目 次(卷终)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第12期 2020年12月
Vol.41, No.12 Dec., 2020

建筑胶黏剂使用 VOCs 排放系数与排放清单

梁小明[1], 孙西勃[2], 苏燕花[1], 黄礼海[3], 陈锋[3], 任璐[1], 卢清[1], 赖君怡[1], 陈朋龙[1], 陈来国[1*]
(1. 生态环境部华南环境科学研究所, 国家环境保护城市生态环境模拟与保护重点实验室, 广州 510655; 2. 广东省环境科学研究院, 广州 510045; 3. 连州市环境监测站, 清远 513400)

摘要: 建筑装饰是我国 VOCs 重要人为排放源之一,关于建筑胶黏剂 VOCs 排放相关研究极少. 本文以建筑胶黏剂为研究对象,通过实测获取各类建筑胶黏剂 VOCs 含量水平和排放系数,采用排放系数法,自上而下建立了我国 2013 ~ 2017 年建筑胶黏剂 VOCs 排放清单. 结果表明,建筑胶黏剂使用 VOCs 综合排放系数为 97 $kg \cdot t^{-1}$,其中溶剂型、水基型和本体型建筑胶黏剂的 VOCs 排放系数分别为 543、45 和 63 $kg \cdot t^{-1}$; 2013 ~ 2017 年我国建筑胶黏剂使用 VOCs 排放量分别为 16.5、18.1、18.8、20.1 和 21.9 万 t. 水基型、本体型和溶剂型建筑胶黏剂的 VOCs 排放量贡献分别为 25.5%、23.6% 和 50.9%; 2017 年山东、江苏、浙江、四川、广东、河南、云南和福建等 8 省贡献较大,排放量合计为 12.0 万 t,占全国建筑胶黏剂 VOCs 排放量的约 55%.

关键词: 建筑胶黏剂; 挥发性有机物(VOCs); 含量水平; 排放系数; 排放清单
中图分类号: X511 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)12-5345-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202004266

Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives

LIANG Xiao-ming[1], SUN Xi-bo[2], SU Yan-hua[1], HUANG Li-hai[3], CHEN Feng[3], REN Lu[1], LU Qing[1], LAI Jun-yi[1], CHEN Peng-long[1], CHEN Lai-guo[1*]
(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ecological Environment Simulation and Protection, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China; 3. Lianzhou Environmental Monitoring Station, Qingyuan 513400, China)

Abstract: Architectural decoration is an important anthropogenic emission source of VOCs in China, and there are few studies on the emission of VOCs from architectural adhesives. In this study, the VOCs content level and emission factors of various architectural adhesives were measured and then, a VOC emission inventory of architectural adhesives in China from 2013 to 2017 was established by a top-down emission factor method. Results showed that the comprehensive VOCs emission factor of architectural adhesives was 97.0 $kg \cdot t^{-1}$, of which 543 $kg \cdot t^{-1}$ was from solvent-based architectural adhesives, 45 $kg \cdot t^{-1}$ was from water-based architectural adhesives, and 63 $kg \cdot t^{-1}$ was from bulk architectural adhesives. The VOCs emissions from architectural adhesives were 165 kt, 181 kt, 188 kt, 201 kt, and 219 kt from 2013 to 2017 in China. The contribution of VOCs emission of various disparate architectural adhesives was 25.5%, 23.6%, and 50.9% for water-based, bulk, and solvent-based types, respectively. Shandong, Jiangsu, Zhejiang, Sichuan, Guangdong, Henan, Yunnan, and Fujian provinces contributed significant amounts, with a total emission of 120 kt in 2017, accounting for nearly 55% of the total VOCs emission for architectural adhesives.

Key words: architectural adhesives; volatile organic compounds (VOCs); content level; emission factor; emission inventory

近年来,我国高浓度近地面臭氧(O_3)和细颗粒物($PM_{2.5}$)污染频发[1~3]. 挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为近地面 O_3 和 $PM_{2.5}$ 形成的重要前体物[4~7],其排放源相关研究对于污染物减排及区域环境空气质量改善具有重要意义.

建筑装饰是我国人为源 VOCs 排放的重要来源之一[8,9]. 建筑涂料与胶黏剂是建筑装饰中使用的主要有机物料. 近年来,随着城镇化建设的推进,我国各类房屋建设及其相应的建筑涂料和胶黏剂需求越来越大. 其中,建筑涂料和建筑胶黏剂总产量从 2008 年 194 万 t 和 95 万 t 分别增加到 2017 年 630 万 t 和 226 万 t, 10 a 分别增长了 3.2 倍和 2.4 倍[10~12]. 目前,关于建筑涂料使用各类涂料 VOCs 含量水平、排放系数以及排放清单估算等已开展了一系列研究[13~16],但国内关于建筑胶黏剂 VOCs 排放相关研究几乎为空白. 建筑胶黏剂全国总产量虽相对建筑涂料少,但其单位质量或体积胶黏剂 VOCs 含量水平总体较建筑涂料高,其 VOCs 排放量和环境影响不容忽视.

本文以建筑胶黏剂为研究对象,通过实测获取各类建筑胶黏剂 VOCs 含量水平和排放系数,采用排放系数法,自上而下建立了我国 2013 ~ 2017 年建

收稿日期: 2020-04-30; **修订日期**: 2020-06-10
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212606); 国家环境保护专项(第二次全国污染源普查); 国家自然科学基金项目(41773130)
作者简介: 梁小明(1992 ~),女,博士, 助理研究员,主要研究方向为大气挥发性有机物的排放与控制对策, E-mail: liangxiaoming.scut@foxmail.com
* 通信作者,E-mail: chenlaiguo@scies.org

筑胶黏剂 VOCs 排放清单,以期为生活源 VOCs 减排及相关对策的制定提供技术支撑.

1 建筑胶黏剂使用情况

1.1 建筑胶黏剂分类

建筑胶黏剂用于建筑行业及相关领域,通过粘和作用,使被粘物结合在一起,承担着连接、密封、固定、防潮、防腐、阻尼、减震、耐磨、加固和防护等诸多功能[17].

1.1.1 按分散介质体系分类

按分散介质体系可分为溶剂型胶黏剂、水基型胶黏剂和本体型胶黏剂. 其中溶剂型胶黏剂包括氯丁橡胶胶黏剂、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(SBS)胶黏剂、聚氨酯胶黏剂、丙烯酸酯类胶黏剂和其他; 水基型胶黏剂包括聚乙酸乙烯酯类胶黏剂(白乳胶)、缩甲醛类胶黏剂、橡胶类胶黏剂、聚氨酯类胶黏剂、乙烯-乙酸乙烯共聚乳液(VAE)胶黏剂、丙烯酸酯类胶黏剂和其他; 本体型胶黏剂包括有机硅类(含 MS)胶黏剂、聚氨酯类胶黏剂、聚硫类胶黏剂和环氧类胶黏剂.

1.1.2 按用粘结强度和用途分类

按粘结强度总体可分为结构胶和非结构胶. 按用途分类,结构型包括建筑结构胶和幕墙结构胶,非结构型包括粘接性胶黏剂和密封胶. 结构型胶黏剂中,建筑结构胶主要有粘钢胶、植筋胶(锚固胶)、灌注胶和碳纤维加固胶等,幕墙结构胶主要有干挂胶和有机硅结构胶; 非结构型胶黏剂中,粘接性胶黏剂包括地板胶、地砖胶、壁纸胶、塑料管道胶、玻璃胶和石料胶等,密封胶主要有聚硫密封胶、丁基密封胶和有机硅密封胶等.

1.2 建筑胶黏剂市场情况

1.2.1 胶黏剂市场情况

我国是胶黏剂生产大国,胶黏剂年产量约占全球三分之一. 根据中国胶黏剂和胶黏带工业协会统计, 2017 年胶黏剂(脲醛胶、酚醛胶和三聚氰胺甲醛胶等三醛胶不计)产量达 796.2 万 t,比 2008 年 357 万 t 增加了 123%. 2008 ~ 2017 年胶黏剂行业产量及消费量情况如图 1 所示. 近十年,我国胶黏剂工业得到了迅速的发展,产量快速增长,应用领域不断扩展,生产工艺不断提高.

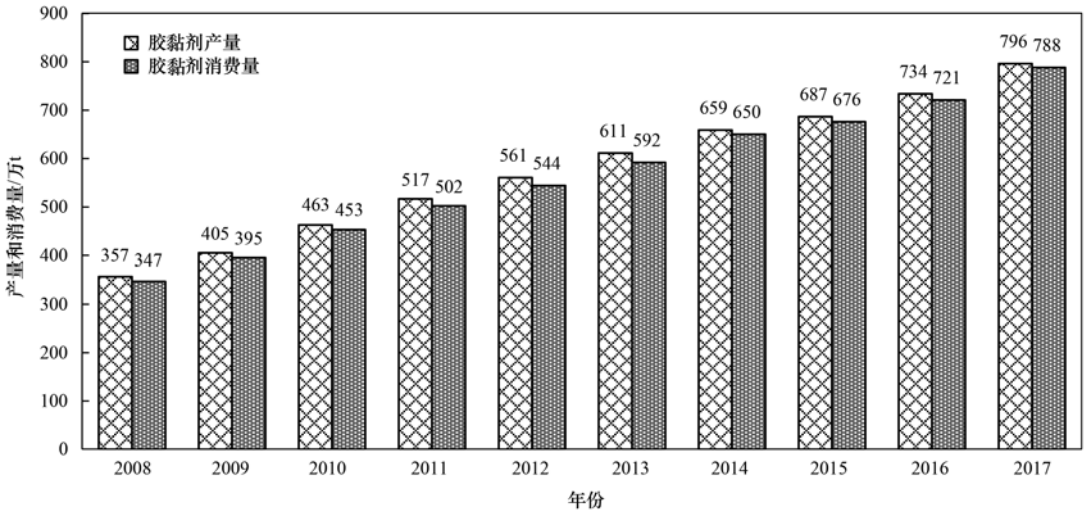


图 1 2008 ~ 2017 年我国胶黏剂产量和消费量情况

Fig. 1 Production and consumption of adhesives from 2008 to 2017 in China

1.2.2 建筑胶黏剂市场情况

胶黏剂应用于建筑/施工/装饰、包装与标签、木工和细木工制品、交通运输、纤维加工、纸加工及书本装订、装配作业/其他、制鞋和皮革、消费/自用九大领域. 根据中国胶黏剂和胶黏带工业协会数据, 2008 ~ 2017 年建筑/施工/装饰应用领域胶黏剂消耗量一直位居首位,占比约为 26% ~ 30%. 2017 年我国胶黏剂消费量为 788 万 t,建筑胶黏剂消费比例约为胶黏剂消费总量的 28.7% (226 万 t). 建筑胶黏剂中,按固化体系分类的各类胶黏剂市场以水基型和本体型胶黏剂为主,溶剂型胶黏剂相对较少,水基型、本体型和溶剂型胶黏剂的占比分别为 54.5%、36.4% 和 9.1%.

2 材料与方法

2.1 排放系数与排放清单

2.1.1 排放系数表达

建筑胶黏剂使用属于生活源溶剂使用源,其 VOCs 排放主要来自有机原辅物料的使用, 一般在开放空间施工,基本通过无组织排放,按当前控制水平,可认为无控制措施,假定所有 VOCs 一次性逸散到大气中. 因此, VOCs 排放系数表达为单位质量建

筑胶黏剂使用的 VOCs 排放量，即$kg \cdot t^{-1}$，以 VOCs/建筑胶黏剂计.

2.1.2　排放量计算

根据活动水平及产品测试估算建筑胶黏剂行业 VOCs 排放系数，其排放量通过排放系数法进行估算，其排放量核算公式如下：

$$E = A \times EF/1\,000$$

式中，E 为排放量，t；A 为活动水平，即建筑胶黏剂使用量，t；EF 为排放系数，即为$kg \cdot t^{-1}$.

目前仅能获取全国各类建筑胶黏剂消费总量，各省市消费量无相关部门掌握和对应统计来源. 本研究参考相关排放清单研究方法[18~21]，即以与建筑胶黏剂和涂料消耗量呈正相关性的省级房屋竣工面积为表征指标，将全国建筑胶黏剂消费总量或排放量进一步分配至各省（自治区、直辖市），获取对应的 VOCs 排放情况. 其中，2017 年各省房屋竣工面积数据来自文献[22].

2.2　样品采集与分析

为保证样品代表性，采集时遵循以下原则：选取全国性和地方性代表品牌，每个品牌选取不同档次与不同功能的样品；样品主要通过市场购买、施工现场采集和生产企业采集等 3 种方式进行. 其中，市场购买时，兼顾高档建材超市、建材批发市场与个人销售点；施工现场采集时，选取典型建筑工程和室内装修工程的胶黏剂；生产企业采集时，选取企业的主导产品. 研究共采集建筑胶黏剂样品 173 个，其中，溶剂型胶黏剂 73 个，包括氯丁橡胶胶黏剂 41 个、SBS 胶黏剂 12 个、聚氨酯类胶黏剂 12 个、丙烯酸类胶黏剂 8 个；水基型胶黏剂 68 个，包括聚乙酸乙烯酯类胶黏剂 40 个、缩甲醛类胶黏剂 18 个、聚氨酯类胶黏剂 10 个；本体型胶黏剂 32 个，包括有机硅类胶黏剂 18 个、聚氨酯类胶黏剂 14 个. 建筑胶黏剂 VOCs 含量按国标方法测试[18].

3　结果与讨论

3.1　我国建筑胶黏剂 VOCs 标准

目前国内涉建筑胶黏剂 VOCs 标准主要有三项国家强制性标准和京津冀地区联合发布的强制性地方标准[23~29]，分别为《胶粘剂挥发性有机化合物限量》（GB 33372-2020）、《建筑胶粘剂有害物质限量》（GB 30982-2014）、《室内装饰装修材料 胶粘剂中有害物质限量》（GB18583-2008）和《建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值标准》（DB11 3005-2017、DB12 3005-2017、DB13-3005-2017）. 此外，我国环境标志产品技术要求也对建筑胶粘剂 VOCs 的限值进行了要求，发布了《环境标志产品技术要求 胶粘剂》（HJ 2541-2016）. 国内建筑胶粘剂 VOCs 相关标准限量要求如表 1 所示.

上述标准和环境标志产品技术要求均将建筑胶黏剂按固化体系分为溶剂型、水基型和本体型这 3 类. 从各类胶黏剂 VOCs 含量总体来看，环境标志产品技术要求比国家和地方强制性标准 VOCs 限值均要严格. 随着人们健康环保意识的提高，新出台的 GB 33372-2020 国家标准不仅对建筑和室内装饰装修领域进行了细分，限值要求也更为严格. 京津冀地方强制性标准中，水基型和本体型胶黏剂 VOCs 限量与国家建筑胶黏剂 GB 30982-2014 要求基本一致，溶剂型胶黏剂 VOCs 含量稍有收严.

3.2　VOCs 含量水平与排放系数

3.2.1　溶剂型胶黏剂 VOCs 含量水平

溶剂型胶黏剂 VOCs 含量范围在 395 ~ 840 $g \cdot L^{-1}$（表 2），根据细分类别实测样本数和 VOCs 平均含量，加权平均获得溶剂型胶黏剂 VOCs 平均含量为 597 $g \cdot L^{-1}$. 其中，其他胶黏剂 VOCs 含量参考 GB 30982-2014 和 GB 18583-2008 限值平均值. 各细分类别溶剂型胶黏剂 VOCs 含量情况如表 2.

氯丁橡胶胶黏剂又称“万能胶”，主要应用于建筑装饰行业，可室温冷固化、强度建立迅速、初粘力很大和粘接强度较高，综合性能优良，能够粘接塑料、木材、纸品和玻璃等多种材料. 41 个氯丁橡胶胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 483 ~ 840 $g \cdot L^{-1}$，均值为 621 $g \cdot L^{-1}$. 其中 11 个样品（27%）超出 GB 30982-2014 设定的含量限值（680 $g \cdot L^{-1}$），6 个样品（15%）超出 GB 18583-2008 设定的含量限值（700 $g \cdot L^{-1}$）.

SBS 胶黏剂具有良好的初粘性、固化速度快、耐老化性能好、施工涂布顺利和不拉丝等特点. 在抗寒冷、耐高温、耐水和耐油等方面也有优异的性能. 特别适用于防火板、铝塑板和饰面板等家装材料的粘合. 12 个 SBS 胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 451 ~ 731 $g \cdot L^{-1}$，均值为 593 $g \cdot L^{-1}$. 其中 3 个样品（25%）超出 GB 30982-2014 和 GB 18583-2008 设定的含量限值（630 $g \cdot L^{-1}$和 650 $g \cdot L^{-1}$）.

聚氨酯类胶黏剂具有优良的耐低温、耐溶剂、耐老化、耐臭氧及耐细菌性能，在弹性橡胶地垫、硬质橡胶地砖和铺设塑胶跑道运动场、建筑用 PVC 材料粘接、夹心板生产以及建筑防水涂料中都有广泛应用. 12 个溶剂型聚氨酯类胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 395 ~ 691 $g \cdot L^{-1}$，均值为 550 $g \cdot L^{-1}$. 其中 1 个样品（8%）超出 GB 30982-2014 设定的含量限值（680 $g \cdot L^{-1}$）.

表 1 国内建筑胶黏剂相关标准 VOCs 含量限值情况

Table 1 Limit of VOCs content in related standards of architectural adhesives in China

项目	类型	限量值								
GB 33372-2020《胶粘剂挥发性有机化合物限量》1)	溶剂型 /g·L^{-1}	氯丁橡胶胶黏剂	SBS 胶黏剂	聚氨酯类胶黏剂	丙烯酸酯类胶黏剂	其他胶黏剂				
		650 600	550 500	500 400	510 510	500 450				
	水基型 /g·L^{-1}	聚乙酸乙烯酯类	聚乙烯醇类	橡胶类	聚氨酯类	VAE 乳液类	丙烯酸酯类	其他类		
		100 50	100 50	150 100	100 50	50 50	100 50	50 50		
	本体型 /g·kg^{-1}	有机硅类	MS 类	聚氨酯类	聚硫类	丙烯酸酯类	环氧树脂类	α-氨基丙烯酸类	热塑类	其他
		100 100	100 50	50 50	50 50	— —	100 50	20 20	50 50	50 50
GB 30982-2014《建筑胶粘剂有害物质限量》	溶剂型 /g·L^{-1}	氯丁橡胶胶黏剂	SBS 胶黏剂	聚氨酯类胶黏剂	丙烯酸酯类胶黏剂	其他胶黏剂				
		680	630	680	600	680				
	水基型 /g·L^{-1}	聚乙酸乙烯酯类	缩甲醛类	橡胶类	聚氨酯类	VAE 乳液类	丙烯酸酯类	其他类		
		100	150	150	100	100	100	150		
	本体型 /g·kg^{-1}	有机硅类(含 MS)	聚氨酯类	聚硫类	环氧类					
		100	50	50	50					
GB 18583-2008《室内装饰装修材料胶粘剂中有害物质限量》	溶剂型 /g·L^{-1}	氯丁橡胶胶黏剂	SBS 胶黏剂	聚氨酯类胶黏剂	其他胶黏剂					
		700	650	700	700					
	水基型 /g·L^{-1}	缩甲醛类胶黏剂	聚乙酸乙烯酯胶黏剂	橡胶类胶黏剂	聚氨酯类胶黏剂	其他胶黏剂				
		350	110	250	100	350				
	本体型 /g·L^{-1}	100(不分类)								
DB11 3005-2017 DB12 3005-2017 DB13 3005-2017《建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值标准》	溶剂型 /g·L^{-1}	SBS 胶黏剂	丙烯酸酯类胶黏剂	其他胶黏剂						
		600	550	650						
	水基型 /g·L^{-1}	聚乙酸乙烯酯类	缩甲醛类	橡胶类	聚氨酯类	VAE 乳液类	丙烯酸酯类	其他类		
		100	150	150	100	100	100	150		
	本体型 /g·kg^{-1}	有机硅类(含 MS)	聚氨酯类	聚硫类	环氧类					
		100	50	50	50					
HJ 2541-2016《环境标志产品技术要求胶粘剂》(建筑胶粘剂)	水基型 /g·L^{-1}	丙烯类	缩甲醛类	聚醋酸乙烯酯类	橡胶类	聚氨酯类	其他胶黏剂			
		40	40	40	40	40	40			
	溶剂型 /g·L^{-1}	环氧树脂类胶黏剂	橡胶类胶黏剂	聚氨酯类胶黏剂	其他胶黏剂					
		400	400	400	400					
	本体型 /g·L^{-1}	有机硅类(含 MS)	聚氨酯类	聚硫类	环氧类					
		40	40	40	40					

1)溶剂型、水基型和本体型两行对应限值依次为“建筑”和“室内装饰装修”应用领域

丙烯酸酯类胶黏剂是丙烯酸及其酯类的均聚物或共聚物.可室温固化,固化速度快,胶层强度高,具有优异的户外耐老化性和较好的耐水性,应用范围广泛,几乎所有的金属、非金属都能被丙烯酸胶黏剂粘接.8 个溶剂型丙烯酸酯类胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 412 ~ 775 g·L^{-1},均值为 539 g·L^{-1}.其中 1 个样品(8%)超出 GB 30982-2014 和 GB 18583-2008 设定的含量限值(600 g·L^{-1}和 700 g·L^{-1}).

3.2.2 水基型胶黏剂 VOCs 含量水平

水基型胶黏剂 VOCs 含量范围在 12 ~ 179 g·L^{-1}(表 2),根据细分类别实测样本数和 VOCs 平均含量,加权平均获得水基型胶黏剂 VOCs 平均含量为 68 g·L^{-1}.其中,丙烯酸酯类胶黏剂、橡胶类胶黏剂、VAE 乳液类胶黏剂和其他胶黏剂 VOCs 含量均参考 GB 30982-2014 和 GB 18583-2008 限值平均值.各细分类别溶剂型胶黏剂 VOCs 含量情况如表 2.

聚乙酸乙烯酯类胶黏剂是由醋酸乙烯单体经聚合反应而得到的一种热塑性胶,水基型聚乙酸乙烯酯胶黏剂又称白乳胶,广泛用于粘结墙纸、水泥增强剂、防水涂料、木材粘接剂.40 个水基型聚乙酸乙烯酯胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 9 ~ 84 g·L^{-1},均值为 43 g·L^{-1},均符合 GB 30982-2014 和 GB 18583-2008 的要求.

缩甲醛类胶黏剂主要为聚乙烯醇缩甲醛胶黏剂,是由聚乙烯醇水溶液与甲醛溶液在酸性催化剂存在下缩醛化反应而制得,俗称 107 胶,具有耐水性、稳定性等特点.18 个缩甲醛类胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 58 ~ 179 g·L^{-1},均值为 107 g·L^{-1},含量均符合 GB 18583-2008 设定的含量限值(350 g·L^{-1}),2 个样品(11%)超出 GB 30982-2014

设定的含量限值(150 $g \cdot L^{-1}$).

水基型聚氨酯类胶黏剂具有污染小、操作方便、残胶易清理等特点,适用于易被有机溶剂侵蚀的基材,且可用水溶性增稠剂和水进行调节. 10 个水基型聚氨酯类胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 12 ~63 $g \cdot L^{-1}$,均值为 37 $g \cdot L^{-1}$,均符合 GB 30982-2014 和 GB 18583-2008 的要求.

3.2.3　本体型胶黏剂 VOCs 含量水平

本体型胶黏剂 VOCs 含量范围在 11 ~ 195 $g \cdot kg^{-1}$(表2),根据细分类别实测样本数和 VOCs 平均含量,加权平均获取水基型胶黏剂 VOCs 平均含量为 63 $g \cdot kg^{-1}$. 其中,聚硫类胶黏剂、环氧类胶黏剂和其他胶黏剂 VOCs 含量均参考 GB 30982-2014 和 GB 18583-2008 限值平均值. 各细分类别溶剂型胶黏剂 VOCs 含量情况如表 2.

有机硅类(含 MS)胶黏剂是以有机硅树脂或硅橡胶弹性体为基本成膜物质的一类胶黏剂,包括树脂类和橡胶类两类,具有耐高低温、耐老化、良好的疏水性和透气性、低表面张力等特点. 18 个有机硅类胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 11 ~ 195 $g \cdot kg^{-1}$,均值为 74 $g \cdot kg^{-1}$. 其中 4 个样品(22%)超出 GB 18583-2008 和 GB 30982-2014 设定的含量限值(100 $g \cdot kg^{-1}$).

本体型聚氨酯类胶黏剂与水基型聚氨酯类胶黏剂类似,具有污染小、节省原料等特点. 14 个本体型聚氨酯类胶黏剂测试样品的 VOCs 含量范围为 18 ~ 87 $g \cdot kg^{-1}$,均值为 47 $g \cdot kg^{-1}$. VOCs 含量均符合 GB 18583-2008 设定的含量限值(100 $g \cdot kg^{-1}$), 5 个样品(36%)超出 GB 30982-2014 设定的含量限值(50 $g \cdot kg^{-1}$).

3.2.4　建筑胶黏剂 VOCs 排放系数

根据以上各类建筑胶黏剂的 VOCs 含量水平,结合其密度估算对应的排放系数. 溶剂型、水基型和本体型建筑胶黏剂的 VOCs 排放系数分别为 543、45 和 63 $kg \cdot t^{-1}$. 总体上,排放系数大小顺序依次为溶剂型 > 本体型 > 水基型. 按照建筑胶黏剂各类分散体系市场占比情况,权重建筑胶黏剂 VOCs 综合排放系数为 97 $kg \cdot t^{-1}$.

表 2　建筑胶黏剂 VOCs 含量实测情况

Table 2　Actual measurement of VOCs contents of architectural adhesives

胶黏剂类别	子类别	实测样本量	VOCs 含量范围	VOCs 平均含量	标准限值		VOCs 加权平均值
					GB 30982-2014	GB 18583-2008	
溶剂型胶黏剂 /$g \cdot L^{-1}$	氯丁橡胶胶黏剂	41	483 ~ 840	621	680	700	597
	SBS 胶黏剂	12	451 ~ 731	593	630	650	
	聚氨酯类胶黏剂	12	395 ~ 691	550	680	700	
	丙烯酸酯类胶黏剂	8	412 ~ 775	539	600	700	
	其他胶黏剂	/	/	690	680	700	
水基型胶黏剂 /$g \cdot L^{-1}$	聚乙酸乙烯酯类胶黏剂	40	9 ~ 84	43	100	110	68
	缩甲醛类	18	58 ~ 179	107	150	350	
	聚氨酯类胶黏剂	10	12 ~ 63	37	100	100	
	丙烯酸酯类胶黏剂	/	/	225	100	350	
	橡胶类	/	/	200	150	250	
	VAE 乳液类胶黏剂	/	/	225	100	350	
	其他胶黏剂	/	/	250	150	350	
本体型胶黏剂 /$g \cdot kg^{-1}$	有机硅类(含 MS)胶黏剂	18	11 ~ 195	74	100	100	63
	聚氨酯类胶黏剂	14	18 ~ 87	47	50	100	
	聚硫类胶黏剂	/	/	75	50	100	
	环氧类胶黏剂	/	/	75	50	100	
	其他胶黏剂	/	/	100	/	100	

3.3　建筑胶黏剂使用 VOCs 排放量

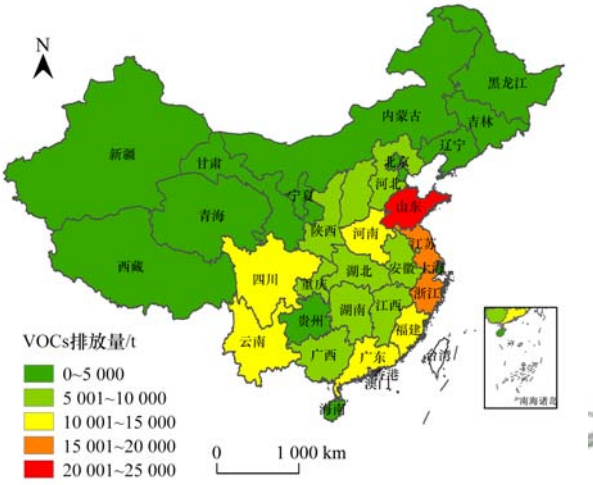
3.3.1　2013 ~ 2017 年建筑胶黏剂的 VOCs 排放量

假设近 5 年建筑胶黏剂各分散介质胶黏剂类别占比相近,根据我国建筑胶黏剂近 5 年消耗量情况,本文利用排放系数法估算了 2013 ~ 2017 年我国建筑胶黏剂使用 VOCs 排放量. 2013 ~ 2017 年建筑胶黏剂使用 VOCs 排放量随胶黏剂总产量及总消耗量的增加逐年增加,分别为 16.5、18.1、18.8、20.1 和 21.9 万 t. 水基型、本体型和溶剂型建筑胶黏剂 VOCs 排放量平均贡献分别为 25.5%、23.6% 和 50.9%. 其中溶剂型建筑胶黏剂市场占有率虽不到 10%,但因 VOCs 含量相对较高,导致其 VOCs 排放贡献最大; 而水基型和本体型建筑胶黏剂市场占有率虽相对较高,但因其 VOCs 含量相对较低,因此 VOCs 排放量贡献相对较小.

3.3.2　2017 年建筑胶黏剂的 VOCs 区域排放差异

根据 2017 年我国建筑胶黏剂使用的 VOCs 排放量,结合文献[22]中各地区全社会房屋竣工面积,建立了 2017 年全国建筑胶黏剂 VOCs 排放的空间分布(图 2). 山东、江苏、浙江、四川、广东、河南、

云南和福建等 8 省的 VOCs 排放量均超过 1 万 t,排放量合计为 12.0 万 t,占全国建筑胶黏剂 VOCs 排放量约 55%,该 8 省均为人口大省,房屋需求量相对较大. 其中,山东省排放量最大,超过 2 万 t,为 21 205 t,占全国建筑胶黏剂 VOCs 排放量约 10%;北京、宁夏、海南、青海和西藏 VOCs 排放量贡献相对较小,贡献比例均不到 1%. 其余 18 省份(自治区、直辖市)VOCs 排放量在2 207 ~ 9 986 t之间,贡献比例为 1% ~ 5%.



中国香港、澳门和台湾资料暂缺

图 2 2017 年我国建筑胶黏剂使用 VOCs 空间排放特征

Fig. 2 Spatial distribution of VOCs emissions from architectural adhesives in 2017 in China

3.3.3 不确定性分析

清单编制过程中,不确定性主要来自活动水平和排放系数两方面[30,31]. 活动水平方面,本研究采用宏观估算和自上而下分配法估算各省建筑胶黏剂使用 VOCs 排放量. 一方面,建筑胶黏剂消耗总量及不同分散体系建筑胶黏剂消耗量来自行业应用领域调研和估算结果,具有一定的不确定性. 同时,在估算 2013 ~ 2017 年 VOCs 排放清单时,研究假设近五年建筑胶黏剂各分散介质胶黏剂类别占比相近,给清单编制带来了一定的不确定性;另一方面,各省(自治区、直辖市)分配系数采用当年全社会房屋竣工面积进行表征,仅考虑了房屋新建过程建筑胶黏剂使用,分配系数难以考虑房屋翻新过程胶黏剂使用,是活动水平不确定的另一来源. 排放系数方面,本研究采用的排放系数来自较大量建筑胶黏剂样品实测结果,具有一定的代表性,但样品采集过程中,由于市场建筑胶黏剂生产厂家、品牌和功能等多而杂,实测样品难以全面覆盖,估算的排放系数具有一定的不确定性.

4 结论

(1)基于实测获取建筑胶黏剂使用的各级 VOCs 排放系数. 建筑胶黏剂使用 VOCs 综合排放系数为 97 $kg \cdot t^{-1}$,其中,溶剂型建筑胶黏剂 VOCs 排放系数为 543 $kg \cdot t^{-1}$,水基型建筑胶黏剂 VOCs 排放系数为 45 $kg \cdot t^{-1}$,本体型建筑胶黏剂 VOCs 排放系数为 63 $kg \cdot t^{-1}$.

(2)采用排放系数法估算 2013 ~ 2017 年我国建筑胶黏剂使用的 VOCs 排放量,分别为 16.5、18.1、18.8、20.1 和21.9 万 t. 水基型、本体型和溶剂型胶黏剂的排放量平均贡献分别为 25.5%、23.6% 和 50.9%.

(3)2017 年建筑胶黏剂使用 VOCs 排放量 21.9 万 t,山东、江苏、浙江、四川、广东、河南、云南和福建等 8 省的 VOCs 排放量均上万 t,排放量合计为 12.0 万 t,占全国建筑胶黏剂 VOCs 排放量约 55%.

参考文献:

[1] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al*. Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NOx in its production [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(1): 512-518.

[2] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al*. Elucidating severe urban haze formation in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, **111**(49): 17373-17378.

[3] Xue L K, Wang T, Gao J, *et al*. Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(23): 13175-13188.

[4] 郝吉明. 中国地球物理[C]. 北京: 中国地球物理学会. 2012. 102.
Hao J M. The Chinese geophysics [C]. Beijing Chinese: Geophysical Society, 2012. 102.

[5] Sun G J, Yao L, Jiao L, *et al*. Characterizing $PM_{2.5}$ pollution of a subtropical metropolitan area in China[J]. Atmospheric and Climate Sciences, 2013, **3**(1): 100-110.

[6] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al*. Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **71**: 389-398.

[7] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al*. VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(17): 8815-8832.

[8] Liang X M, Chen X F, Zhang J N, *et al*. Reactivity-based industrial volatile organic compounds emission inventory and its implications for ozone control strategies in China [J]. Atmospheric Environment, 2017, **162**: 115-126.

[9] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 845-854.
Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al*. Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 845-854.

[10] 林宣益. 2017 年建筑涂料分析和 2018 年展望——高质量发展[J]. 中国涂料, 2018, **33**(3): 40-46.
Lin X Y. Analysis of architectural coatings in 2017 and outlook of 2018-high-quality development[J]. China Coatings, 2018, **33**(3): 40-46.

[11] 林宣益. 2016 年建筑涂料现状和2017 年发展趋势[J]. 中国

涂料，2017，**32**(3)：27-30.
Lin X Y. Current situation of architectural coatings in 2016 and development trend in 2017[J]. China Coatings，2017，**32**(3)：27-30.

[12] 林宣益. 国内外建筑涂料现状和发展趋势[J]. 上海涂料，2011，**49**(2)：35-41.
Lin X Y. The present status and development trend of architectural coatings at home and abroad [J]. Shanghai Coatings，2011，**49**(2)：35-41.

[13] 高美平，邵霞，聂磊，等. 中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立[J]. 环境科学，2019，**40**(3)：1152-1162.
Gao M P，Shao X，Nie L，*et al*. Establishment of VOCs emissions factor and emissions inventory from using of architectural coatings in China [J]. Environmental Science，2019，**40**(3)：1152-1162.

[14] 邓子钰，高美平，王庆玮，等. 北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用[J]. 环境科学，2018，**39**(10)：4408-4413.
Deng Z Y，Gao M P，Wang Q W，*et al*. Research and application of the technical method for the compilation of VOCs emission inventories from architectural coatings in Beijing[J]. Environmental Science，2018，**39**(10)：4408-4413.

[15] 高美平，邓子钰，聂磊，等. 基于实测的建筑类涂料挥发性有机物(VOCs)含量水平及组分特征[J]. 环境科学，2018，**39**(10)：4414-4421.
Gao M P，Deng Z Y，Nie L. *et al*. Content levels and compositions characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emission from architectural coatings based on actual measurement[J]. Environmental Science，2018，**39**(10)：4414-4421.

[16] 曹鑫悦，吴辉，杨薇桦，等. 北京市场水性建筑涂料 VOCs 成分及含量分析[J]. 环境工程学报，2017，**11**(5)：3000-3008.
Cao X Y，Wu H，Yang W H，*et al*. VOCs composition and content analysis of waterborne architectural coatings in Beijing market[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering，2017，**11**(5)：3000-3008.

[17] 张玉龙，宫平. 建筑胶黏剂：制备·配方·应用[M]. 北京：化学工业出版社，2016.

[18] Wei W，Wang S X，Chatani S，*et al*. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment，2008，**42**(20)：4976-4988.

[19] 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.

[20] Qiu K Q，Yang L X，Lin J M，*et al*. Historical industrial emissions of non-methane volatile organic compounds in China for the period of 1980-2010[J]. Atmospheric Environment，2014，**86**：102-112.

[21] Zheng C H，Shen J L，Zhang Y X，*et al*. Quantitative assessment of industrial VOC emissions in China：Historical trend，spatial distribution，uncertainties，and projection [J]. Atmospheric Environment，2017，**150**：116-125.

[22] 国家统计局固定资产投资统计司. 中国固定资产投资统计年鉴 2018[M]. 北京：中国统计出版社，2018.

[23] GB 18583-2008，室内装饰装修材料 胶粘剂中有害物质限量[S].
GB 18583-2008，Indoor decorating and refurbishing materials-Limit of harmful substances of adhesives[S].

[24] GB 33372-2020，胶粘剂挥发性有机化合物限量[S].
GB 33372-2020，Limit of volatile organic compounds content in adhesive[S].

[25] GB 30982-2014，建筑胶粘剂有害物质限量[S].
GB 30982-2014，Limit of hazardous substances in construction adhesive[S].

[26] DB11/3005-2017，建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值标准[S].
DB11/3005-2017，Limit standards of volatile organic compounds of architectural coatings and adhesives[S].

[27] DB12/3005-2017，建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值标准[S].
DB12/3005-2017，Limit standards of volatile organic compounds of architectural coatings and adhesives[S].

[28] DB13/3005-2017，建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值标准[S].
DB13/3005-2017，Limit standards of volatile organic compounds of architectural coatings and adhesives[S].

[29] HJ 2541-2016，环境标志产品技术要求 胶粘剂[S].
HJ 2541-2016，Technical requirement for environmental labeling products adhesive[S].

[30] 魏巍，王书肖，郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学，2011，**32**(2)：305-312.
Wei W，Wang S X，Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China[J]. Environmental Science，2011，**32**(2)：305-312.

[31] 钟流举，郑君瑜，雷国强，等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. 环境科学研究，2007，**20**(4)：15-20.
Zhong L J，Zheng J Y，Louie P，*et al*. Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories：methodology and case study[J]. Research of Environmental Sciences，2007，**20**(4)：15-20.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 12
Environmental Science (monthly) Dec. 15, 2020

CONTENTS