



移动扫码阅读

章晶晓,吴遵义,陈林健,等.玉环市木制家具 VOCs 排放核定算法与优化[J].能源环境保护,2021,35(4): 103-108.

ZHANG Jingxiao, WU Zunyi, CHEN Linjian, et al. VOCs emission verification algorithm of wooden furniture in Yuhuan and optimization[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(4): 103-108.

玉环市木制家具 VOCs 排放核定算法与优化

章晶晓¹, 吴遵义¹, 陈林健¹, 王磊¹, 谢晓威¹, 郑义平², 李震巽²

(1.台州市生态环境局玉环分局,浙江台州 317600;2.浙江泰诚环境科技有限公司,浙江台州 318000)

摘要:以2019年11家典型木质家具企业为研究对象,分析玉环市木质家具行业生产特征,对比了物料衡算法、实测法及产排污系数法,优化了木质家具 VOCs 排放核定算法。结果表明,产排污系数法对本研究区域的针对性不足,实测法数据波动及相对误差较大,物料衡算法的针对性和准确性较好;在物料衡算法的基础上,根据原材料及废气治理情况可优化该核定算法并为玉环市木质家具 VOCs 排放量核定提供依据。

关键词:木质家具;VOCs;核定算法;优化

中图分类号:X32

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2021)04-0103-06

VOCs emission verification algorithm of wooden furniture in Yuhuan and optimization

ZHANG Jingxiao¹, WU Zunyi¹, CHEN Linjian¹, WANG Lei¹, XIE Xiaowei¹,
ZHENG Yiping², LI Zhenxun²

(1. Yuhuan Branch of Taizhou Ecological Environment Bureau, Taizhou 317600, China;

2. Zhejiang Taicheng Environmental Technology Co., Ltd., Taizhou 318000, China)

Abstract: Taking 11 typical wood furniture enterprises in 2019 as the research objects, the production characteristics of wooden furniture industry in Yuhuan city were analyzed. The material balance algorithm, the practical measurement method and the coefficient method of producing and emitting pollutants were compared. The verification algorithm of VOCs emission from wood furniture was optimized. The results show that the coefficient method of producing and emitting pollutants is not suitable for this study area. The data of the practical measurement method fluctuates greatly, and the relative error is large. The material balance algorithm has good pertinence and accuracy. Based on the material balance algorithm method, it can be optimized according to the raw material and waste gas treatment situation, and provide a reference for the verification of VOCs emissions from wooden furniture in Yuhuan City.

Key Words: Wooden furniture; VOCs; Verification algorithm; Optimization

0 引言

家具行业是玉环市重要的支柱行业之一,经过数十年的发展壮大,玉环市已成为华东地区最大的家具生产基地。与此同时,玉环市家具行业的 VOCs 排放也成为影响玉环大气环境质量的主要因素。

为推动区域污染治理和减排、改善区域环境质量,玉环市早在2010年就开始探索主要污染物排污权交易工作,利用排污权市场化激发排污企业在污染治理的内生动力,并取得初步成效。为进一步深化排污权交易试点工作,持续推动污染减排,2017年底玉环市申请省级排污权资产化试点并顺利获批,成为首批 VOCs 总量交易试点地

区。随着 VOCs 排污权交易量和家具行业治理水平的不断提升,家具行业 VOCs 排放量以及区域 VOCs 排污权总量不明晰等问题,在一定程度上限制了家具行业 VOCs 排污权交易工作的可持续发展。

为持续推进 VOCs 排污权资产化省级试点工作,科学核定玉环家具行业 VOCs 排放量,本次研究工作在调查玉环市家具行业原料使用及废气污染治理情况基础上,筛选 11 家典型木质家具企业开展 VOCs 废气监测,对比分析多种核算方法下

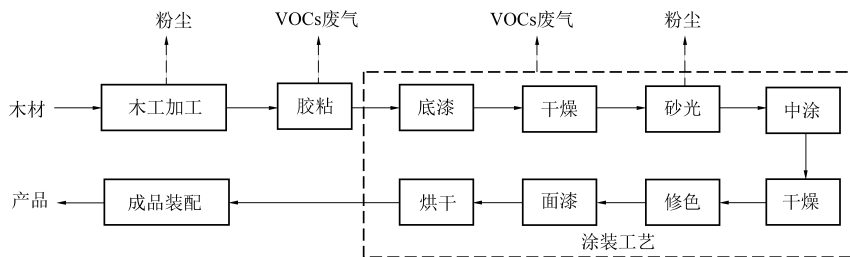


图 1 玉环市典型木制品生产工艺流程

Fig.1 Process flow chart of woodwork-making in Yuhuan

2 材料与方法

2.1 调查企业的选取

本研究对玉环市 11 家木制家具厂进行调查采样,涉及 VOCs 的原辅料主要包括胶粘剂、各种

的产排量优劣势,确定不同污染治理水平的最优 VOCs 排放核定算法。

1 玉环市家具行业概况

玉环市木质家具企业普遍规模较小,以手工生产为主。行业 VOCs 排放主要集中在涂装和胶粘工艺(如图 1),涂装工艺通常需要经历底涂、面涂两道工序,于密闭的喷涂车间进行,采用手工空气喷涂方式。

油漆以及相应的稀释剂和固化剂,上述原辅材料中所含 VOCs 成分复杂,包含酯类、酮类、苯类等物质,以苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、乙酸乙酯、乙酸丁酯等组分为主,调查企业基本情况如表 1。

表 1 调查企业基本情况

Table 1 Basic situation of the investigated enterprises

企业编号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#								
规模	中型				小型				微型										
末端治理方式	活性炭 吸附	活性炭 吸附	活性炭 吸附	活性炭 吸附	光催化+ 活性炭	光催化+ 活性炭	活性炭 吸附	光催化+ 活性炭	活性炭 吸附	活性炭 吸附	光催化+ 活性炭								
油漆/胶粘 剂用量/t	乳白胶 0.1	水性漆 26	油性漆 17	PU 漆 /	聚氨酯漆 /	固化剂 4	稀释剂 3	3	8	10	20	2.1	2.07	2	2.1	2.72	1	2.5	0.5
	14.2	42	2.3	30	9	0.344	6.63	11	2.274	0.7	1.15	8	2.213	23.8	15	2.506	0.7		

2.2 采样方法

按照《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157—1996)、《固定源废气监测技术规范》(HJ/T 397—2007)、《空气和废气监测分析方法》(第四版)等采样方法及技术规范的要求进行。

2.3 VOCs 监测方法与仪器

苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、乙酸丁酯及乙酸乙酯按照《固定污染源废气 挥发性有机物的测定 固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法》(HJ 734—2014)进行;非甲烷总烃按照《固定污染源废气 总

烃、甲烷和非甲烷总烃的测定 气相色谱法》(HJ 38—2017)进行。

气相色谱仪 GC-2018PLUS; 气相色谱仪 GC9790。

3 结果与讨论

3.1 行业数据分析

调查结果显示,玉环市的家具行业企业主要集中在楚门镇、清港镇、玉城街道、沙门镇和芦蒲镇。企业规模普遍偏小,其中微型企业占比 39%、小型企业占比 51%、中型企业占比 10%。

家具行业中涉及 VOCs 排放的企业有 98 家,其中仅使用水性漆的企业为 41 家,其余 57 家企业为油性漆和水性漆兼用或仅使用油性漆。根据统计,油性漆使用量为 973.149 吨,固化剂使用量为 167.316 吨,稀释剂使用量为 778.519 吨,水性漆使用量为 1 330.007 吨。在全市涂料的使用及选择上,油性漆占比 59%,水性漆占比 41%,可见油性漆使用占比略偏高,详见表 2。

表 2 家具行业含 VOCs 物料使用情况

Table 2 Usage of VOCs-containing materials in the furniture industry t

主要原辅料	区域用量	合计
涂料	973.149	
油性漆		1 918.984
固化剂	167.316	
稀释剂	778.519	
水性漆	1 330.007	1 330.007

表 3 家具行业有机废气处理情况

Table 3 VOCs treatment status of the furniture industry

序号	处理技术	企业数量/个	比例/%
1	吸附催化燃烧	3	3.06
2	低温等离子	2	2.04
3	光催化	45	45.92
4	活性炭吸附法	43	43.88
5	水喷淋	3	3.06
6	未处理	2	2.04

98 家企业的 VOCs 治理情况统计结果见表 3 所示。从中可知玉环市木质家具行业 VOCs 的配套治理设施安装普及率在 98% 左右。企业普遍采用活性炭吸附、光催化等工艺或者其组合工艺,且处理对象以喷漆、晾干废气为主。

3.2 监测数据分析

根据表 4 结果显示,苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、乙酸乙酯、乙酸丁酯和非甲烷总烃均有检测出,

表 4 治理设施进出口 VOCs 浓度监测情况

Table 4 Monitoring of VOCs concentration at import and export of treatment facilities

企业编号	采样点	苯浓度 $/(mg \cdot m^{-3})$	甲苯浓度 $/(mg \cdot m^{-3})$	二甲苯浓度 $/(mg \cdot m^{-3})$	苯乙烯浓度 $/(mg \cdot m^{-3})$	乙酸乙酯浓度 $/(mg \cdot m^{-3})$	乙酸丁酯浓度 $/(mg \cdot m^{-3})$	非甲烷总烃浓度 $/(mg \cdot m^{-3})$	废气量 $/(m^3 \cdot h^{-1})$	年生产时间 $/(h \cdot a^{-1})$	总特征 VOCs 量 $/(t \cdot a^{-1})$
1#	进口 1	0.001	0.142	5.060	1.000	5.540	2.460	42.100	8 573	2 288	1.104 4
	进口 2	0.001	1.250	2.240	0.064	7.440	2.080	29.100	11 306	2 288	1.091 0
	出口 1	0.001	0.240	0.647	0.047	1.060	0.680	3.160	27 995	2 288	0.373 7
	进口 3	0.001	3.220	6.620	0.788	25.800	6.140	36.100	8 288	2 288	1.491 8
	进口 4	0.001	6.070	8.890	1.060	44.200	5.850	35.900	11 210	2 288	2.615 4
	进口 5	0.001	6.260	9.070	0.922	39.400	5.100	34.600	8 762	2 288	1.911 6
	出口 2	0.001	1.540	2.860	0.136	3.910	0.770	4.550	36 780	2 288	1.158 5
3#	进口 1	0.031	0.876	10.500	0.031	0.012	0.010	27.500	9 230	2 800	1.006 9
	出口 1	0.030	0.505	0.533	0.030	0.012	0.010	4.760	8 470	2 800	0.139 5
7#	进口 1	0.015	0.113	2.580	0.001	3.532	1.865	5.007	3 5356	2 400	1.112 8
	出口 1	0.001	0.031	0.592	0.001	0.795	0.221	1.493	35 149	2 400	0.264 5
	进口 2	0.001	0.278	20.567	0.001	5.353	8.243	16.467	37 073	2 400	4.530 0
	出口 2	0.001	0.137	3.550	0.001	1.713	2.033	5.113	37 772	2 400	1.137 5
11#	进口 1	0.029	0.239	5.270	0.029	0.012	0.010	23.200	39 200	2 520	2.843 9
	出口 1	0.028	0.147	0.028	0.028	0.012	0.010	4.860	57 600	2 520	0.505 1
2#	进口 1	0.008	0.103	11.460	0.008	2.680	11.713	33.167	24 033.33	680	0.966 4
	出口 1	0.008	0.023	0.276	0.008	1.190	0.463	8.210	25666.67	680	0.177 7
	进口 2	0.008	0.141	10.827	0.008	2.787	10.417	52.333	26 666.67	680	1.387 5
	出口 2	0.008	0.032	0.195	0.008	0.893	0.410	16.533	26 366.67	680	0.324 2
5#	进口 1	0.001	0.487	11.200	0.001	18.100	15.20	40.600	34 810	2 100	6.257 0
	出口 1	0.001	0.267	5.170	0.001	2.970	4.270	6.610	34 448	2 100	1.395 0

续表

企业编号	采样点	苯浓度 /(mg·m ⁻³)	甲苯浓度 /(mg·m ⁻³)	二甲苯 浓度 /(mg·m ⁻³)	苯乙烯 浓度 /(mg·m ⁻³)	乙酸乙 酯浓度 /(mg·m ⁻³)	乙酸丁 酯浓度 /(mg·m ⁻³)	非甲烷 总烃浓度 /(mg·m ⁻³)	废气量 /(m ³ ·h ⁻¹)	年生产 时间 /(h·a ⁻¹)	总特征 VOCs 量 /(t·a ⁻¹)
6#	进口 1	0.002	8.373	12.560	4.693	24.433	0.509	63.467	16 978.667	2 400	4.646 8
	出口 1	0.069	1.040	1.560	2.165	0.498	0.133	0.447	16 648	2 400	0.276 1
10#	进口 1	0.001	48.867	85.667	0.001	2.890	17.500	25.000	36 786	2 000	12.888 2
	出口 1	0.001	2.430	3.857	0.001	2.890	2.790	6.580	40 344	2 000	1.496 7
	进口 2	0.001	28.757	39.637	0.001	0.197	7.763	22.500	27 400	2 000	5.533 4
	出口 2	0.001	2.007	3.163	0.001	0.057	0.993	5.060	30 041	2 000	0.641 3
4#	进口 1	/	/	15.200	/	80.533	49.100	61.100	33 025	2 400	16.322 3
	出口 1	/	/	3.473	/	18.267	11.903	12.833	31 217	2 400	3.482 1
8#	进口 1	0.001	37.767	15.833	0.001	61.933	9.393	47.867	20 266.667	1 200	4.202 3
	出口 1	0.001	9.547	4.000	0.001	16.467	2.473	6.330	19 866.667	1 200	1.001 0
	进口 2	0.001	2.360	10.700	0.001	0.025	18.933	22.967	17 400	1 200	2.209 0
	出口 2	0.001	0.573	2.580	0.001	0.025	5.450	4.363	19 255.667	1 200	0.600 0
9#	进口 1	0.008	5.720	65.767	36.193	9.150	22.427	48.367	28 733.333	2 000	10.782 5
	进口 2	0.008	7.897	177.667	0.490	0.517	168.333	79.867	14 366.667	2 000	13.785 2
	出口 1	0.008	0.795	2.237	0.847	2.223	2.910	18.400	40 100	2 000	2.423 6

同时根据特征 VOCs 进出口浓度、废气量及生产时间计算对应的削减量和处理效率,处理效率在 75.0%~94.1%之间。利用物料衡算法(实测法)计算的产生量及削减量可得到相应的排放量,排放量波动较大,甚至有负值等情况。

3.2 排放公式对比分析

本研究选取 11 家调查企业生产数据、实测数据同时采用物料衡算法(实测法)、物料衡算法(公式法)和产排污系数法 3 种核算方法进行计算对比分析产生量和排放量结果情况,3 种核算方法具体计算过程见公式(1)~(7)。

(1)物料衡算法(实测法)涉及以下公式:

$$E_{\text{涂装}} = E_{\text{产生}} - C_{\text{削减}} \quad (1)$$

$$E_{\text{产生}} = E_{\text{物料}} - W_{\text{废弃}} \quad (2)$$

$$C_{\text{削减}} = \sum D_{\text{去除},i} \quad (3)$$

$$D_{\text{去除},i} = (C_{\text{进口},i} - C_{\text{出口},i}) \times Q_i \times t_i \quad (4)$$

$E_{\text{涂装}}$:统计期内 VOCs 排放量,kg; $E_{\text{产生}}$:统计期内 VOCs 产生量,kg; $C_{\text{削减}}$:统计期内 VOCs 削减量,kg; $E_{\text{物料}}$:统计期内使用物料中 VOCs 量之和,kg; $W_{\text{废弃}}$:统计期内,废弃物中 VOCs 量之和,kg;废弃物包括但不限于废弃涂料、废弃稀释剂、废弃固化剂等;本废弃物不含漆渣,其 VOCs 量忽略不计; $D_{\text{去除},i}$:污染处理设施 i 的 VOCs 去除量,kg; $C_{\text{进口},i}$:污染处理设备 i 进口的 VOCs 排放浓度,kg·m⁻³; $C_{\text{出口},i}$:污染处理设备 i 出口的 VOCs 排

放浓度,kg·m⁻³; Q_i :污染处理设备 i 的烟气流, m³·h⁻¹; t_i :核算期生产时间,小时。

(2)物料衡算法(公式法)涉及以下公式:

$$E_{\text{涂装}} = E_{\text{产生}} - C_{\text{削减}} \quad \text{同(1)}$$

$$E_{\text{产生}} = E_{\text{物料}} - W_{\text{废弃}} \quad \text{同(2)}$$

$$C_{\text{削减}} = \sum C_{\text{削减},i} \quad (5)$$

$$C_{\text{削减},i} = \sum E_{\text{产生},j} \times 30\% \times \alpha \quad (6)$$

$E_{\text{产生},j}$:统计期内某排放环节 j 的 VOCs 产生量,kg,产生量是指通过集气设施收集并接入末端治理设备的相应环节 VOCs 产生量,未采用集气设施收集处理的产生量不计入; α :调整系数,见表 5。

表 5 调整系数 α 取值

Table 5 Value of adjustment factor α

采用的 VOCs 处理技术	α 值
燃烧法、催化燃烧法、吸附浓缩-燃烧/催化燃烧法	1.0
低温等离子法(介质阻挡放电)、水喷淋法	0.7
其他技术(非溶剂回收)	0.4

(3)产排污系数法涉及以下公式:

$$E_{\text{排}} = \sum [P_{\text{产}} \times M_i (1 - \eta_T \times k_T)] \quad (7)$$

$E_{\text{排}}$:污染物产生量,kg×10⁻³; $P_{\text{产}}$:核算环节某污染物对应的产污系数,g·kg⁻¹; M_i :核算环节 i 的原料总量,kg; η_T :核算环节 i 某污染物采用的末端治理技术的平均去除效率,%; k_T :核算环节 i 某污染物采用的末端治理设施的实际运行率,取值 1。

根据 3 种核算方法和排放量计算结果进行对比及分析:①产排污计算法所得 VOCs 排放量普遍比其他两种方法大,由于产排污系数法将 VOCs 废气产生及废弃量均考虑在产污系数里,VOCs 废气收集及处理情况均考虑在末端处理技术的处理效率里面,在全国企业基数下能够反映区域性的情况,但针对某个小区域企业不具备针对性;②物料衡算法(实测法)计算的排放量波动较大,数据存在过大或过小,甚至排放量为负值等情况,其原因主要由于实测法无法得知企业正常生产情况下车间有机废气的收集情况,因其无组织的排放量

而存在很大的不确定性,仅依据实测法中的监测数据计算存在相对较大的误差(削减量误差相对较大);③物料衡算法(公式法)为纯理论计算,但所得的 VOCs 产生量是通过实地考察并收集企业实际使用的油漆、固化剂等物料的溶剂含量计算得来,较产排污系数法更具有针对性;另外,物料衡算法(公式法)在削减量的核算时采用公式计算更有通用性和实操性。综上对比和分析,物料衡算法(公式法)更适用于玉环市家具行业 VOCs 排放量的核定。

表 6 3 种核算方法下的 11 家企业 VOCs 排放量

Table 6 VOC emissions of 11 companies using three verification algorithms

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9号	10#	11#
实测法排放量	7.25	0.778	14.187	7.307	10.374	12.372 4	6.696 6	-0.540 4	-20.191	22.3505	36.707
公式法排放量	12.26	2.321	13.255	17.732	13.412	14.828	9.632	4.395	1.863	34.352	34.364
产排污系数法排放量	17.634	4.448	17.641	41.54	28.825	34.882	4.0379	6.6218	2.603 8	36.861 2	44.091

本研究根据物料衡算法(公式法)计算得到的 11 组数据进行整合优化,得出玉环市家具行业 VOCs 排放量核算公式如下:

$$E_{\text{排}} = \sum_i (Q_{i,\text{油性}} + Q_{i,\text{水性}}/10) \times A \times (1 - 0.3\alpha)$$

式中: $E_{\text{排}}$: 玉环市全市 VOCs 排放量, $t \cdot a^{-1}$;

$Q_{i,\text{油性}}$: 玉环市 i 企业的油性漆年使用量, $t \cdot a^{-1}$;

$Q_{i,\text{水性}}$: 玉环市 i 企业的水性漆年使用量, $t \cdot a^{-1}$;

A : 产生系数, 0.459; α : 调整系数, 见表 5。

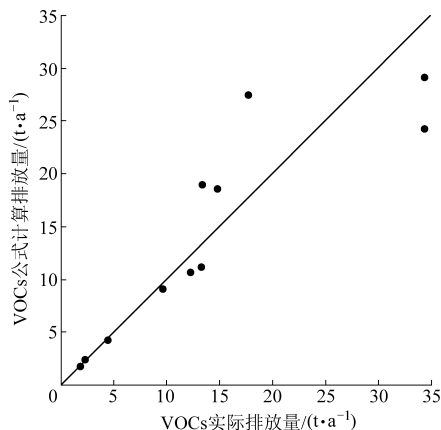


图 2 VOCs 公式计算值与实际值偏离度

Fig.2 The deviation between the calculated value and the actual value of VOCs

本研究对整合优化后的公式进行验证,根据 11 家企业涉及 VOCs 原辅料使用及废气治理情况,采用整合优化后的 VOCs 排放量核算公式进行计算,同时以物料衡算法(公式法)计算的数据作为 VOCs 实际排放量,通过对比 VOCs 公式计算

排放量和实际排放量数据,以图 2 表征整合优化后的 VOCs 排放量核算公式的精度情况。

4 结 论

结合玉环市木质家具行业现有原辅料和加工工艺,对物料衡算法(公式法)进行优化,优化的核定方法为 $E_{\text{排}} = \sum_i (Q_{i,\text{油性}} + Q_{i,\text{水性}}/10) \times A \times (1 - 0.3\alpha)$ (优化后的产生系数 $A=0.459$),更切合玉环市实际情况,可为玉环市木质家具 VOCs 排放量核定依据。

参考文献

- [1] 姚轶, 王浙明, 何志桥, 等. 浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 [J]. 环境科学, 2016, 37 (11): 4080-4085.
- [2] 余翔翔, 杨畅, 赵崇业, 等. 温州市木质家具行业 VOCs 排放特征及排放系数研究 [J]. 现代商贸工业, 2019 (24): 194-195.
- [3] 洪沁, 常宏宏. 家具涂装行业 VOCs 污染特征分析 [J]. 环境工程, 2017, 35 (5): 82-86.
- [4] 陆建海, 董事壁, 李文娟, 等. 浙江省工业涂装 VOCs 治理现状 [J]. 环境保护科学, 2018, 44 (1): 113-117.
- [5] 薛鹏丽, 孙晓峰, 邵霞, 等. 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 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41 (2): 236-239.
- [6] 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.
- [7] 江梅, 张国宁, 魏玉霞, 等. 工业挥发性有机物排放控制的有效途径研究 [J]. 环境科学, 2011, 32 (12): 3487-3490.

- [8] 谭赞华. 广东省木制家具行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究 [J]. 广东化工, 2012, 39 (225): 45-46+76.
- [9] 高宗江, 李成, 郑君瑜, 等. 工业源 VOCs 治理技术效果实测评估 [J]. 环境科学研究, 2015, 28 (6): 994-1000.
- [10] 高宗江. 典型工业涂装行业 VOCs 排放特征研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 19-30+46-48.
- [11] 浙江省环境保护厅. 关于印发《浙江省挥发性有机物污染整治方案》的通知 (浙环发 [2013] 54 号) [EB/OL]. (2013-11-4) [2020-12-20]. http://www.zjepb.gov.cn/root14/xxgk/zfwj/zhf/201311/t20131108_294090.html.
- [12] 浙江省环境保护厅. 关于印发《浙江省工业涂装工序挥发性有机物排放量计算暂行方法》的通知 (浙环发 [2017] 30 号) [EB/OL]. (2017-07-26) [2020-12-21]. http://sthjt.zj.gov.cn/art/2017/8/2/art_1229123328_13474496.html.
- [13] HJ/T 220—2005. 环境标志产品技术要求 粘合剂 [S].
- [14] HJ 2537—2014. 环境标志产品技术要求 水性涂料 [S].
- [15] HJ 571—2010. 环境标志产品技术要求 人造板及其制品 [S].
- [16] HJ/T 303—2006. 环境标志产品技术要求 家具 [S].
- [17] DB 33/2146—2018. 工业涂装工序大气污染物排放标准 [S].
- [18] 廖丹. 涂装行业的三废治理和清洁生产 [J]. 涂料涂装与电镀, 2011, 2 (2): 36-40.
- [19] 谢轶嵩, 杨峰, 刘春蕾. 南京市家具行业 VOCs 排放清单及特征 [J]. 工业技术, 2018 (18): 107-109.
- [20] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征 [J]. 环境科学, 2015, 36 (6): 1944-1951.
- [21] 王铁宇, 李奇锋, 吕永龙. 我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究 [J]. 环境科学, 2013, 34 (12): 4756-4763.
- [22] 苏伟健, 徐绮坤, 黎碧霞, 等. 工业源重点行业 VOCs 治理技术处理效果的研究 [J]. 环境工程, 2016, 34 (S1): 518-522.