

Characteristics of VOC Emission from Dyeing Waste Gas and Construction of Environmental Assessment Model

Xiaolang Su

Hangzhou Jintian Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 311200, China

Abstract

To achieve precise control of volatile organic compounds (VOC) emissions in the textile dyeing industry, this study systematically analyzed VOC emission characteristics across the entire production process using 120 sets of field data from three representative enterprises in the Yangtze River Delta region. The research identified key emission sources and dominant components in pretreatment, dyeing, and post-processing stages. A three-tiered environmental assessment model integrating source strength accounting, diffusion simulation, and risk evaluation was developed, incorporating process emission coefficients and meteorological correction factors to optimize model parameters. Case validation demonstrated that the model achieved a prediction error of $\leq 8.3\%$ for characteristic pollutants such as benzene series compounds and formaldehyde, representing a 12.6% improvement in accuracy over the traditional AERMOD model. The findings provide quantitative evidence for VOC control strategies and environmental assessment approvals in the dyeing industry, facilitating the industry's transition to "precision pollution control and scientific pollution management".

Keywords

dyeing waste gas; VOC; emission characteristics; EIA model; construction

印染废气中 VOC 排放特征及其环评模型构建

苏小浪

杭州金田工程设计咨询有限公司, 中国·浙江 杭州 311200

摘 要

为精准管控印染行业挥发性有机物 (VOC) 排放, 基于长三角3家典型印染企业120组实测数据, 系统分析印染全流程VOC排放特征, 识别前处理、染色、后整理工序的关键排放源与优势组分。本研究构建“源强核算-扩散模拟-风险评估”三级环评模型, 引入工序产排系数与气象修正因子优化模型参数。案例验证表明, 该模型对苯系物、甲醛等特征污染物的浓度预测误差 $\leq 8.3\%$, 较传统AERMOD模型提升12.6%的精准度。研究成果可为印染企业VOC治理与环评审批提供量化依据, 助力行业实现“精准治污、科学治污”。

关键词

印染废气; VOC; 排放特征; 环评模型; 构建

1 引言

化工行业作为国民经济的重要支柱产业, 在推动经济发展、促进社会进步等方面发挥着关键作用。近年来, 随着全球经济的持续增长以及工业化进程的加速推进, 化工行业呈现出蓬勃发展的态势, 其产品种类日益丰富, 应用领域也不断拓展, 广泛涵盖了工业、农业、国防、医疗等多个重要领域。然而, 化工行业在快速发展的同时, 也带来了严峻的环境污染问题, 其中挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, 简称 VOCs) 的排放尤为突出。VOC 是一类在常温下具有较高蒸气压、易挥发的有机化合物的统称, 其成分复杂多样。纺织印染行业是我国的传统优势产业和重要的

民生产业, 但同时也是挥发性有机物 (VOCs) 和恶臭污染物的主要工业排放源之一。在印染加工过程中, 特别是热定型、印花、涂层整理等高温或使用有机溶剂的工序, 会释放大量的含有苯系物、酯类、醛酮类等复杂成分的 VOCs。这些物质不仅直接参与大气光化学反应, 是臭氧 (O_3) 和二次有机气溶胶 (SOA) 的重要前体物, 也是引发厂界周边恶臭扰民、影响居民环境获得感的主要原因。因此, 深入解析印染废气 VOCs 的排放特征谱, 并构建与之匹配的、科学高效的环境影响评价模型, 是实现从源头削减到末端治理全过程精准管控的关键科学基础。本文旨在系统梳理印染行业 VOCs 排放特征研究成果, 探讨环评模型构建的核心技术与方法路径, 并结合管理实践提出对策建议, 以期为行业绿色转型和环境空气质量持续改善提供支撑^[1]。

【作者简介】苏小浪 (1985-), 女, 壮族, 中国广西崇左人, 硕士, 从事环境影响评价研究。

2 印染废气 VOC 排放特征实测分析

2.1 试验设计与监测方法

选取来自浙江绍兴(棉纺印染)、江苏苏州(化纤印染)、上海松江(混纺印染)的 3 家代表性企业,覆盖前处理(退浆、精炼)、染色(轧染、卷染)、后整理(热定型、涂层)各道工序,建成 15 个监测点位(见表 1),采用 GC-MS(安捷伦 7890B)对 VOC 组分加以测定,可检测的最低水平是 0.01mg/m³;凭借在线监测系统(CEMS)实时记录风量、温度等各项参数,监测周期选定为 2025 年 3-5 月,每日连续实施 12 小时监测(8: 从 00 起至 20:00)。

表 1 监测点位数据

企业类型	监测点位	监测指标	监测频率
棉纺印染	退浆车间排气口	VOC 总量、醛类	1 次/2h
	轧染机排气口	苯系物、酯类	1 次/2h
	热定型机排气口	多环芳烃、非甲烷总烃	1 次/30min
化纤/混纺印染	各工序排气口+厂界	同棉纺印染	同棉纺印染

2.2 排放特征分析

2.2.1 工序差异特征

各工序的 VOC 排放浓度跟组分呈现显著差异(见表 2),后整理工序乃是核心排放源,占到总排放量的 62.3%-71.5%,其中热定型机鉴于 180-220℃高温,引发助剂热解,VOC 浓度达到 180-450mg/m³ 这个区间,峰值超出国标所设限值 3 倍,染色工序以次排列,轧染机缘于活性染料固色剂出现分解,甲醛浓度最高升至 12mg/m³,比标准值超出 2.4 倍,前处理工序中是以碱性气溶胶夹带的低浓度 VOC 为主导,浓度就只有 80-120mg/m³。

表 2 各工序 VOC 排放浓度

工序	VOC 浓度范围 (mg/m ³)	优势组分(%)	排放量占比	主要排放时段
前处理	18-120	醇类(42%)、醛类(28%)	12.8%-15.2%	9-11 点
染色	120-250	甲醛(35%)、甲苯(22%)	16.2%-22.5%	13-17 点
后处理	180-450	烷烃(32%)、酯类(28%)、苯并(a)芘(8%)	62.3%-71.5%	10-19 点

2.2.2 组分与风险特征

实测找出 38 种 VOC 组分,按照危害程度可划分为三类:其一为致癌性的物质,主要源于印花胶浆以及热定型助剂,在混纺印染企业排放中的占比最高达到 12%;其二是光化学活性类物质,在长三角园区夏季出现臭氧超标的天数里,此类物质对结果的贡献率为 42%;其三是属于恶臭类的物质,就算浓度不高,投诉占比也超 90%。

不同面料类型导致组分差异:棉纺印染里醛类、醇

类占比 65%,为主要组成;化纤印染里酯类占比提升到 35%,混纺印染鉴于助剂种类繁多,苯系物含量比单一面料高出 2-3 倍。

2.2.3 时空波动特征

单日 VOC 浓度展现出“双峰分布”格局,分别到 10:10:00(热定型机开启)和 16:00(染色与后整理操作叠加)达到峰值,波动幅度处于 200% 到 300% 这个区间;夏季高温条件下,助剂挥发被加速,浓度跟冬季比起来高 40%-60%,厂界下风向 VOC 浓度跟其对应的上风向比高 3-5 倍,其中苯并(a)芘在离排气口 500 米处依旧超标 0.8 倍,应重点留意扩散隐患^[2]。

3 印染废气 VOC 环评模型构建

3.1 模型构建思路

针对印染废气“工序差异明显、组分繁杂、高温高湿”的特性构建起三级环评模型:一级是做源强核算的模块,结合实测的产排系数精准算出排放量;二级采用扩散模拟模块,把温度湿度修正因子引入以优化 AERMOD 模型;第三级就是风险评估模块,结合健康和生态风险阈值达成综合评价^[3]。

3.2 核心模块设计

3.2.1 源强核算模块

摒弃传统经验系数法,采用“实测系数+物料衡算”双维度核算,公式如(1):

$$Q_{总} = \sum_{i=1}^n (Q_{i,理论} \times K_i \times \eta_i) \tag{1}$$

其中, Q 为总 VOC 源强(kg/h), Q_i 为第 i 工序理论排放量(基于染料助剂用量计算), K 为实测产排系数(表 3), η 为治理设施去除率(默认取行业平均水平 75%)。

表 3 源强核算系数

工序	棉纺印染 K	化纤印染 K	混纺印染 K	系数置信区间
前处理	0.082	0.075	0.091	± 3.2%
染色	0.125	0.142	0.168	± 2.8%
后处理	0.213	0.235	0.267	± 1.9%

该方法相比传统核算,误差从 30% 降到了 5% 以内。如浙江某棉纺企业实施的后整理工序,经理论计算排放量达 12.5kg/h,经实测系数矫正后数值为 10.6kg/h,与在线监测值的偏差仅为 2.3%。

3.2.2 扩散模拟模块

以 AERMOD 模型为基础,针对印染废气高温(80-220℃)、高湿(相对湿度 60%-80%)特性,引入修正因子如(2):

$$C_{修正} = C_{AERMOD} \times (1 + 0.003T - 0.0015RH) \tag{2}$$

式中, C 为修正后浓度(mg/m³), T 为废气温度(℃), RH 为相对湿度(%)。通过上海松江企业验证,修正后模

型对非甲烷总烃的预测误差从 15.2% 降至 6.8%。

设置三种模拟工况：正常生产运行（VOC 浓度 200mg/m³）、排放达到最高值（450mg/m³）、开展应急减排措施（治理设施全负荷，浓度为每立方米 50mg），揭示不同工况阶段厂界及周边 5 公里之处的浓度分布^[4]。

健康风险采用终身超额致癌风险（ILCR）与非致癌风险商（HQ）评估，公式见（3）：

$$\begin{aligned} ILCR &= \frac{C \times IR \times ER \times ED}{BW \times AT} \times SF \\ HQ &= \frac{C \times IR \times ER \times ED}{BW \times AT \times RfC} \end{aligned} \quad (3)$$

C 意为预测浓度， IR 作为吸入速率， SF 即致癌斜率因子，参考浓度用 RfC 表示，把 $ILCR$ 超过 10 或者 HQ 超过 1 界定为高风险，应开展强化治理举措。

生态风险重点评估周边敏感点（以学校、居民区为例）的影响，按照《环境影响评价技术导则大气环境》（HJ2.2-2018）划定防护距离，就超标区域提出可优化工艺的建议^[5]。

4 模型验证与应用案例

4.1 案例介绍

选定浙江绍兴某家大型棉纺印染企业，持有 12 台定型机、8 条染色生产线，一年所生产的面料达 2000 万米，采取“旋风除尘 + 静电除油 + 活性炭吸附”的治理工艺，验证时间段定在 2025 年 5 月 1-15 日，同步采集模型的预测值跟实测值进行比较。

4.2 验证结果

4.2.1 源强核算准确性

企业全部的 VOC 理论排放量为 32.8kg/h，经模型核算结果为 29.6kg/h，跟在线监测得出的均值（28.9kg/h）相对误差为 2.4%，各工序进行核算的误差均 ≤ 5%，显著胜过传统的核算模式^[6]。

4.2.2 扩散与风险评估有效性

模型对厂界下风向甲醛浓度的预测值为 4.8mg/m³，实测测得的值为 4.5mg/m³，存在 6.7% 的误差；预测得出苯并(a)芘在 500m 处浓度为 0.0021 μg/m³，实际测量得出为 0.0023 μg/m³，产生 8.3% 的误差。风险评估呈现显示，企业现有工况状态下 ILCR 为 8.2 × 10，建议把后整理工序治

理设施升级成“沸石转轮 + CO 催化氧化”，升级之后模型预测 ILCR 降到 1.5 × 10，风险明显降低。

4.2.3 经济与环境效益

按照模型给出的治理方案，企业投资 600 万元开展设备升级，VOC 去除率从 75% 攀升至 98%，每年实现 VOC 减排 102 吨，添配余热回收系统之后，年度节省蒸汽费用 200 万元，投资实现回收仅用 3 年，实现环保与经济双成效^[7]。

5 结语

本研究的结果显示，印染废气 VOC 排放凸显出明显的工序区别，后整理工序在总排放量里的占比是 62.3%~71.5%；热定型机是核心要管控的对象；主要组分为烷烃和酯类，混纺印染企业的苯系物跟致癌物含量显著偏高。本研究搭建的“源强核算 - 扩散模拟 - 风险评估”三级环评模型，运用实测系数与温湿度做修正，让核算误差维持在 ≤ 5%，预测得到的误差 ≤ 8.3%，解决了传统模型精准度不达标（不够）的问题。案例核实表明，模型可精确判别高风险环节并给出优化方案，带动企业实现 VOC 高效治理及风险可控。

参考文献

- [1] 周俊晓,王磊,刘斐斐,等.卷烟厂 VOC 排放特征及减排技术应用[J].科技创新与应用,2024,14(26):164-168.
- [2] 宋钊,陆立群,陈晓婷.上海汽车制造业涂装废气中挥发性有机污染物排放特征与控制标准研究[J].化学世界,2017,58(02):76-80.
- [3] 敖丛杰,全纪龙,杨宏,等.兰州市西固工业园区挥发性有机化合物排放特征及对 $\rho(O_3)$ 数值模拟的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2025,61(04):533-539.
- [4] 钟卓璐,纪宇婧,黄皓旻,等.中原地区典型工业城市精细化工行业挥发性有机物排放特征及园区化研究[J].环境科学学报,2024,44(12):204-213.
- [5] 刘涛,沈振兴,何昆,等.典型汽修企业 VOCs 排放特征及对臭氧污染影响研究[J].环境科学学报,2024,44(10):103-110.
- [6] 康晴晴,张志,牛涌祥,等.VOC 废气生物法净化工艺微生物气溶胶排放特征及暴露风险研究进展[J].应用化工,2024,53(03):655-660.
- [7] 郭淑政,叶春翔,林伟立,等.高原城市拉萨典型 VOCs 排放源成分谱特征[J].环境科学,2024,45(04):2011-2018.