

安全与环境学报  
*Journal of Safety and Environment*  
ISSN 1009-6094, CN 11-4537/X

## 《安全与环境学报》网络首发论文

题目： 餐饮业 VOCs 减排路径研究—以北京市为例  
作者： 陆秋琴，肖晓  
DOI： 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1567  
收稿日期： 2025-09-04  
网络首发日期： 2025-12-18  
引用格式： 陆秋琴，肖晓. 餐饮业 VOCs 减排路径研究—以北京市为例[J/OL]. 安全与环境学报. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1567>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 餐饮业 VOCs 减排路径研究—以北京市为例

陆秋琴，肖 晓

(西安建筑科技大学管理学院，西安 710055)

**摘要：**本文研究以减少餐饮业 VOCs 排放量为目标，通过分析餐饮业 VOCs 排放存在的问题，综合考虑内外因素，假设了政策驱动、设备改进、数字化技术和绿色偏好 4 条减排路径。利用 Vensim 软件，建立系统动力学模型，以北京市为例，利用其数据进行检验后，确认模型可行，再对每条减排路径进行仿真模拟，并于基准情景对比。结果表明，4 条路径对北京市餐饮业 VOCs 减排均有正向影响，其中，设备改进减排路径影响最为显著，绿色偏好、政策驱动和数字化技术影响较弱。此外，结合了 4 条路径得到综合减排路径效果，进而得出以下结论：餐饮业 VOCs 减排时，优先考虑引进减排效率更高的净化设备，也可以将 4 条路径结合，从而达到减少排放量的目的。

**关键词：**环境工程学；餐饮业；系统动力学；VOCs 减排；建模与仿真

**中图分类号：**X51

DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2025.1567

## 0 引言

改革开放以来，随着人们生活水平的不断提高，餐饮业蓬勃发展，带来极大便利的同时，由于餐饮业多位于人口密集的区域，餐饮业油烟污染问题日趋严重<sup>[1]</sup>，已经成为我国城市群区域面临的主要环境问题之一<sup>[2]</sup>。

餐饮油烟是食品在高温烹饪和加工过程中挥发的油脂、有机物以及热氧化和热裂解产生的固液气三相混合物<sup>[3]</sup>，其中的气态油烟是一类成分和理化性质都十分复杂的复合污染物，含有大量颗粒物(如 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>)和挥发性有机物(Volatile organic compounds)即 VOCs<sup>[4]</sup>。大气污染物主要是 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub>，VOCs 是形成两者的重要前体物之一<sup>[5][6]</sup>，也是影响污染物浓度的直接因素之一<sup>[7]</sup>。此外，其中的某些成分具有刺激性气味，能够伤害人的呼吸道、肺部、皮肤等，且具有致畸性、致突变性<sup>[8]</sup>。所以，VOCs 减排对降低全国各区域 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度均有利<sup>[9]</sup>。

目前，国内外 VOCs 减排控制依靠严格的法规标准和智慧监管，通过数字技术进行智能监控。而 VOCs 治理技术正在从吸附、燃烧等单一技术转向组合技术，组合技术是未来餐饮行业油烟治理技术的发展方向<sup>[10]</sup>。另外，国内还推行集中治理模式，减少商家负担<sup>[11]</sup>。Whynot<sup>[12]</sup>在 1999 年制定了各类烹饪操作排放测定方法，评估控制技术，作为国外餐饮业 VOCs 减排首个系统性成果，其技术方案和法规框架成为全球标杆。国内减排模型侧重核算和模拟，多建立餐饮业 VOCs 排放清单模型<sup>[13]</sup>，利用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)模型模拟 VOC 时空分布，提出差异化减排策略<sup>[14]</sup>。国外减排通过高斯模型与流体动力学模型(Computational Fluid Dynamics, CFD)与耦合技术组合进行扩散模拟，Essamlali<sup>[15]</sup>等提出了一种在城市区域预测空气污染的新方法，开发了 PMForecast。另外，国内外都会通过长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)模型进行 VOCs 浓度预测<sup>[16][17]</sup>。

本文通过对餐饮业 VOCs 排放问题和减排动因进行分析，假设 4 条减排路径，构建反映餐饮业 VOCs 排放共性特征的系统动力学模型，以模拟餐饮业 VOCs 减排的动态演化过程，并对模型的合理性与有效性进行验证。最后，通过仿真模拟评估不同路径的实施效果，以为餐饮业 VOCs 减排路径提供实践参考。

## 1 餐饮 VOCs 排放问题和减排动因

### 1.1 餐饮 VOCs 排放问题

从餐饮业自身来看，餐饮 VOCs 的减排，主要依赖末端减排设备。数据显示，餐饮业规模普遍较小，分布散乱，经营情况不稳定，油烟成分复杂多变<sup>[18]</sup>。餐饮行业准入门槛低，部分经营者的法律意识淡薄，没有考虑油烟净化设备的开支，存在其安装的油烟净化设备与实际排量并不匹配，甚至不安装油烟净化设备的情况<sup>[19]</sup>。另外，多数餐饮单位为减少治理费用，过于注重经济效益，他们难以承担高效净化设备安装及维护成本，为降低成本，采用低效设备，或者即便选择了减排效率高的设备，但运行维护管理不规范，油烟净化设施和烟道清洗频率低，导致 VOCs 去除效率不理想。

从政策和管理层面来看，《大气污染防治法》对 VOCs 治理的行业覆盖不全，部分违法行为缺乏明确罚则，执法震慑力

---

收稿日期：2025-09-04

作者简介：陆秋琴，教授，博士，硕士生导师，从事资源系统优化研究；luqiuqin@foxmail.com。

有限,对于超标排放的单位没有任何处罚措施。对于无法负担高效减排设备的中小单位,没有提出补贴措施,间接导致 VOCs 排放量增加。此外,监管与执法能力不足,便携式 VOCs 检测仪配备率低,监测数据难以用于执法且缺乏统一执法标准,对餐饮单位没有统一的监管措施,部分餐饮单位未建立清洗维护台账或未保存记录,缺乏在线监测系统,无法实时掌握排放数据,难以评估治理效果。

“十三五”以来,我国 VOCs 治理工作快速推进,但随着同期我国经济的快速发展,VOCs 排放新增排放量也有较大增长,《生态环境统计年报》显示,近几年生活源 VOCs 排放量大约在 180 万 t。通过借鉴其他地区的餐饮源本地化核算方法,本文通过人口数计算得到餐饮业 VOCs 的产生量。如图 1 所示,可以看出,2014—2023 年,餐饮业 VOCs 产生量总体呈上升趋势,占生活源 VOCs 排放量的 20%左右,故餐饮业 VOCs 减排具有重要意义。

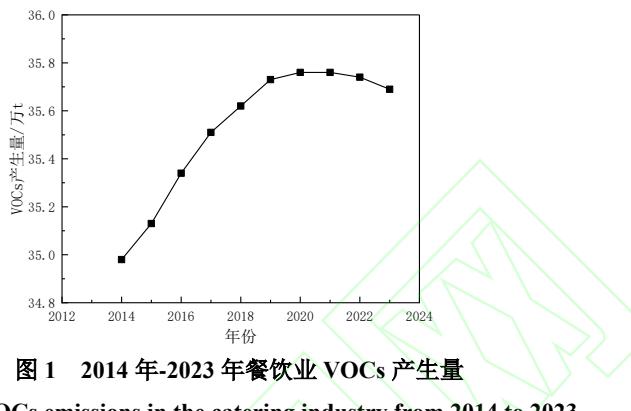


图 1 2014 年-2023 年餐饮业 VOCs 产生量

Fig.1 VOCs emissions in the catering industry from 2014 to 2023

## 1.2 减排动因

为了应对全球气候变化,履行国际责任,中国实施“双碳”目标,而随着“双碳”目标一步步稳步推进,强化 VOCs 减排与碳减排协同治理成为了关键环节。近年来,国家及地方政府密集出台 VOCs 管控政策,2023 年的《空气质量持续改善行动计划》明确将 VOCs 源头减排列为重点,推动行业向低污染工艺转型。“十四五”规划纲要明确提出要加快 VOCs 排放综合整治,VOCs 的科学有效减排是空气质量改善的关键,新形势下的蓝天保卫战迫切需要全面加强 VOCs 的综合治理。部分地区政策的细化与执法力度增强,提高了政策压力和成本负担。因此,为了适应政策的要求,降低运营成本,餐饮业必须减少 VOCs 的排放,加强环保意识,实现可持续发展,从而迎接政策压力带来的挑战。

此外,城市化进程的加速和工业化水平的提高,导致环境污染问题日益严重,公众健康与环境质量成为了当今社会普遍关注的两大议题。餐饮业主要集中在城市核心区、商业区、居民区等人口集中区域,餐饮油烟中含有大量的颗粒物和 VOCs,并且含有硫化物会产生异味。VOCs 作为餐饮业产生的重要的空气污染物之一,长期暴露在其中可引发呼吸系统疾病,排至室外的 VOCs 可以与氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 反应生成臭氧 ( $\text{O}_3$ ),形成光化学烟雾污染,餐饮单位产生的油烟污染成为居民环保投诉的热点和重点,加重了餐饮污染对区域环境质量及周边居民的影响程度。公众对清洁空气的诉求转化为对餐饮业减排的社会压力,而为了改善环境质量,避免公众健康受到影响,减少 VOCs 排放成为必然选择。

## 2 路径假设

根据餐饮业 VOCs 排放存在的问题和减排的必要性,在假设减排路径时,要结合行业的内外部环境来考虑—对内由于餐饮业的大小、类型不同,其所能负担的经济成本差别很大,对外要尽可能最大减少 VOCs 的排放。减排路径的设计目的是优先解决环境问题,同时尽可能减少成本投入,因此需要综合考虑多方面的因素,并结合具体情况进行科学地评估和决策。目前,多个地区已经出台餐饮业污染防治法规,见表 1。基于以上内容,本文按“外部政策-技术支撑-数字赋能-内部偏好”的由外到内逻辑,假设了政策驱动、减排设备技术进步、数字化进步和绿色偏好发展减排 4 条路径。

表 1 部分地区餐饮业污染物防治法规

Table 1 Partial Regional Regulations on Pollution Prevention and Control in the Catering Industry

防治法规	主要内容
《北京市餐饮业大气污染物排放标准》	VOCs 排放限值 $10 \text{ mg/m}^3$ , 2020 年起强制安装高效油烟净化设施; 鼓励大型餐饮单位安装在线监测设备, 实现与监管部门联网

《上海市餐饮服务项目大气污染物防治》	新建单位需安装油烟去除效率 $\geq 90\%$ 的净化设备，强制使用“餐饮单位油烟净化设施清洗维护台账记录申报”系统，定期上传清洗记录
《中华人民共和国大气污染防治法》	餐饮服务业经营者需安装油烟净化设施并保持正常使用，未安装或不正常使用油烟净化设施、超标排放的，处5000元以上5万元以下罚款
《广东省大气污染物防治条例》	县级以上政府需划定餐饮服务业集中经营区域，配套建设油烟集中处理设施

### (1) 政策驱动减排路径。

政策在餐饮业 VOCs 治理中发挥着强制性驱动力的作用，通过法律法规、标准规范和行政管理手段构建起 VOCs 减排的刚性框架。该路径下分为强制性政策、引导性政策和激励性政策 3 类。即通过设定更高的排放标准和环保要求，促使餐饮单位加大环保投入，采用更环保、更高效的净化设备，推动整个餐饮产业的绿色发展和可持续发展。而对于那些不愿意或未能安装必要的减排设施，或是减排效率低于规定标准的单位，政府依法予以罚款。同时，政府为餐饮单位进行一定的设备安装补贴，以减轻他们的经济负担，激励他们主动采取减排行动。例如上海德州小馆因违规排放罚款 2000 元后整改，VOCs 从  $12 \text{ mg/m}^3$  降至  $8 \text{ mg/m}^3$  以下，北京市出台设备补贴政策，部分餐饮单位设备投资成本降低 30%，VOCs 去除率达 92%。

### (2) 设备改进减排路径。

目前，在 VOCs“源头—过程—末端”综合治理过程中，对于餐饮业来说，最主要减排方式就是末端治理，即餐饮单位可以通过装备更为高效 VOCs 减排设备，提高 VOCs 的减排效率，这种方法最为简单直接。例如，苏州工业园区师惠坊商业街要求 35 家餐饮商户全部更换高效油烟净化设备，VOCs 关联异味投诉量下降 90% 以上。另外，我国餐饮业规模以小型为主，对于餐饮单位分布比较密集的区域，可以通过建立共享净化中心，集中管理多个餐饮单位的减排需求，为它们提供统一的减排设备和服务，例如长沙方圆荟购物中心打造“绿岛”集中净化项目，VOCs 从  $12 \text{ mg/m}^3$  降至  $7.2 \text{ mg/m}^3$ 。VOCs 净化设备的改进和共享净化中心的建立，可以改善餐饮单位以及集中区域空气质量，显著降低空气污染，提升公众健康。

### (3) 数字化技术减排路径。

在该路径下，利用先进的数字化技术，对 VOCs 的排放进行全过程监控。通过智能传感器与数据分析技术，实时监测油烟排放，并根据预设的标准自动调整设备的运行功率，以达到节能减排的目的。例如龙游县 1700 余家餐饮商户中，80% 为小型小吃店，政府引入第三方单位，免费为所有餐饮商户安装在线油烟监测设备，餐饮 VOCs（异味）相关投诉量降低 20% 以上。另外要求餐饮单位进行净化设施清洗维护台账记录申报，定期上传净化设备清洗记录。为了加强环保意识，开展数字化培训，教育餐饮业从业人员如何正确使用油烟处理设备，这样可以降低设备故障率，延长设备寿命。

### (4) 绿色偏好减排路径。

通过加强政策宣传，鼓励人们形成绿色消费的观念，增强公众环保意识，从而转变公众的绿色消费偏好，绿色消费偏好人群更易选择绿色餐厅进行消费，例如何锐超<sup>[20]</sup>提到环保意识强的消费者对标识产品的购买意愿比环保意识弱的一般消费者高 42%，这种消费偏好，推动餐饮单位向绿色转型；另外，环保意识的增强，对公众监督也有促进作用，进而减少了餐饮单位违规频率，减少 VOCs 的排放。在该路径下，公众在消费中践行环保责任并进行市场监督，从而使得市场需求倒逼餐饮单位升级减排设备，最终形成良性循环，为餐饮业 VOCs 治理注入持续的社会动力。

## 3 系统动力学模型构建

### 3.1 模型构建的目的

为了研究不同路径下餐饮业 VOCs 减排效果，本文采用了系统动力学构建模型。系统动力学是一门研究系统内部结构如何决定其动态行为的学科，使用数学方法来研究动态系统的性质和行为。不仅可以容纳精确的定量数据和难以量化的定性知识，模拟系统随时间的演化过程，从而预测政策或策略的长期、动态效果；还可以模拟不同策略情境的后果，帮助决策。通过系统动力学，构建餐饮业 VOCs 减排模型，模拟不同路径下餐饮业 VOCs 排放量，为餐饮业 VOCs 减排提供价值。

### 3.2 模型的主要变量

模型变量的选择应当是那些和本文研究问题相关性高的变量，排除无关的变量。本文所建立的系统动力学模型着重于研究各变量对 VOCs 排放量的影响。通过上文假设的 4 条减排路径确定每条路径影响 VOCs 排放量的主要因素，并根据主要因

素综合确定模型的各个变量。模型中的变量包括辅助变量、速率变量、状态变量及常量，其中，状态变量用以表征系统的当前状态，是构成决策行为的基础；速率变量代表状态变量的净变化率。在决策过程中，辅助变量作为速率变量与状态变量之间的中介，起着信息传递与转化的作用。其中主要变量见表 2。

表 2 模型主要变量

Table 2 Main variables of the model

减排路径	变量名称	度量内容	变量单位
政策驱动减排路径	罚款力度	超标排放罚款力度变动	无量纲
	公众监督	公众投诉	无量纲
	执法力度	相关单位执法力度	无量纲
	违规频率	餐饮单位违规排放频率	无量纲
设备改进减排路径	设备安装意愿	净化设备安装意愿变动	无量纲
	高效设备更新率	整体高效减排设备覆盖率	无量纲
	共享净化中心	共享净化中心覆盖率变动	无量纲
	减排效率提升	减排设备整体正常使用率	无量纲
数字化技术减排路径	数字化设备投资能力	餐饮单位投资能力变动	无量纲
	从业人员环保意识	从业人员环保意识变动	无量纲
	数字系统设备支持率	数字化系统设备的支持率变动	无量纲
	VOCs 排放监测	VOCs 排放监测系统覆盖率变动	无量纲
绿色偏好减排路径	教育水平	在校学生与常住人口比例	无量纲
	公众环保意识	公众环保意识	无量纲
	绿色消费偏好	消费者绿色偏好程度变化	无量纲
	绿色消费转化率	消费者选择环保餐厅的比例	无量纲
总路径	VOCs 年排放量	VOCs 排放量增减	t

### 3.3 路径因果关系图、SD 图和主要变量公式

#### 3.3.1 路径因果关系图和 SD 图

为清晰展现 4 条路径的动态交互关系，量化协同效应，通过 4 条路径之间相互关联的变量，本文研究利用 Vensim 软件，将 4 条减排路径串联起来，进行因果关系图和 SD 流图的绘制，例如通过短期总成本将数字化技术减排路径和设备改进减排路径连接；通过安装意愿连接政策驱动和设备改进减排路径，得到的餐饮业 VOCs 减排路径因果关系图和 SD 流图，见图 2~3。

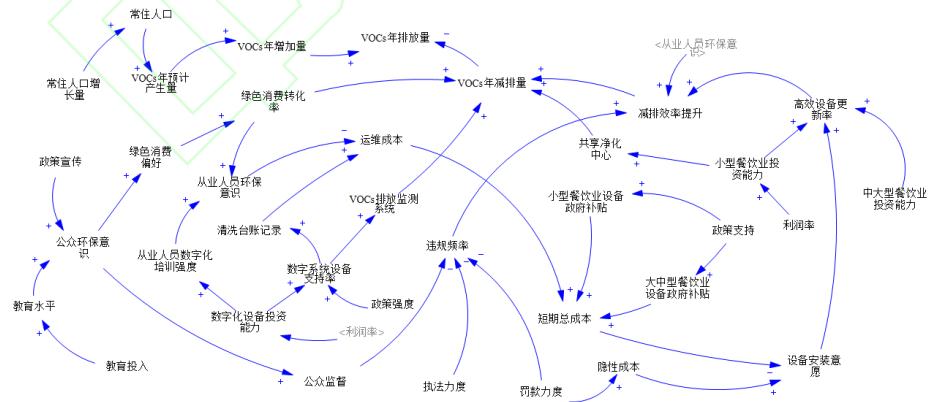


图 2 餐饮业 VOCs 减排路径因果图

Fig.2 Causal diagram of VOCs emission reduction paths in the catering industry

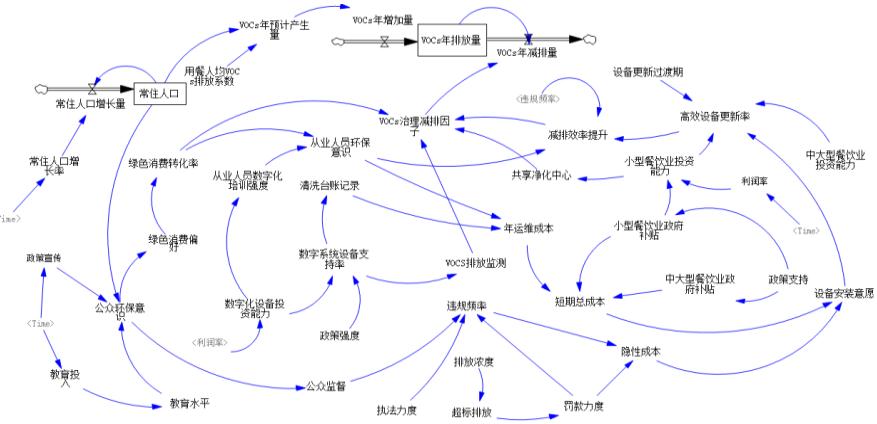


图 3 餐饮业 VOCs 减排路径 SD 图

Fig.3 SD diagram of VOCs emission reduction pathways in the catering industry

### 3.3.2 减排路径主要变量公式

分别根据各路径的结构、各变量间的因果关系等，建立模型主要变量公式，如表 3 所示。

表 3 减排路径主要变量公式

Table 3 Main variable formula for emission reduction pathway

减排路径	主要变量公式
政策驱动减排路径	$\text{罚款力度} = \text{IF THEN ELSE}(\text{超标排放} = 1, 1, 0)$ $\text{公众监督} = \text{公众环保意识} \times 0.5$ $\text{执法力度} = 0.236$ $\text{违规频率} = (1 - \text{公众监督} \times \text{执法力度} \times \text{罚款力度}) \times 0.02$
设备改进减排路径	$\text{设备安装意愿} = \text{IF THEN ELSE}((\text{隐性成本} - \text{短期成本}) > 0, 1, 0.8)$ $\text{高效设备更新率} = 1 - \text{MIN}(\text{小型餐饮业投资能力} \times 0.95 + \text{中大型餐饮业投资能力} \times 0.05) \times \text{设备安装意愿} \times \text{设备更新过渡期}, 1)$ $\text{共享净化中心} = \text{EXP}(-30 \times \text{小型餐饮业投资能力} \times 0.2)$ $\text{减排效率提升} = \text{从业人员环保意识} \times 0.2 + \text{高效设备更新率} \times 0.95 - \text{违规频率} \times 5$
数字化技术减排路径	$\text{数字化设备投资能力} = 1 / (1 + \text{EXP}(-2 \times \text{利润率}))$ $\text{从业人员环保意识} = \text{从业人员数字化培训强度} \times 0.1 + \text{绿色消费转化率} \times 0.3$ $\text{数字系统设备支持率} = \text{EXP}(-2 \times (\text{数字化设备投资能力} \times 0.8 + \text{政策强度} \times 0.3))$ $\text{VOCs 排放监测} = \text{EXP}(-2.3 \times \text{数字系统设备支持率}) \times 0.8$
绿色偏好减排路径	$\text{教育水平} = 70.069 \times \text{教育投入} + 300.4$ $\text{公众环保意识} = \text{IF THEN ELSE}(\text{教育水平} / \text{常住人口} > 0.1843, 0.8, 0.6) + \text{政策宣传} \times 0.25$ $\text{绿色消费偏好} = \text{公众环保意识} \times 0.42$ $\text{绿色消费转化率} = \text{消费者绿色偏好} \times 0.8$
总路径	$\text{VOCs 排放量} = \text{INTEG}(\text{VOCs 年增加量} - \text{VOCs 年减排量}, 6605)$

## 4 案例研究

### 4.1 案例选择

北京市作为我国首都，人口密集，餐饮分布广泛，污染源靠近居民区，对大气环境中 VOCs 和颗粒物等有重要的贡献，对城市局部大气质量及人体健康产生不利影响。北京市在 2018 年发布了《餐饮业大气污染物排放标准》，重新规定了餐饮服务单位 VOCs 的排放限值，明确了监测要求和分析测定方法，提出了净化设备的运行操作要求，从而全面控制餐饮业的大气污染排放，这些标准体系是“全国最全、限值全国最严”的。北京市具有强大的引领示范作用，选取北京市作为研究对象，不仅能服务于北京本地的大气环境质量改善和公众健康保护，更能为全国其他城市和地区提供可复制、可推广的经验、方法。

和技术体系，推动整个餐饮行业走向更加绿色、环保、可持续的发展道路。

## 4.2 数据来源和模型参数的确定

本文模型所使用的数据来源主要包括官方资料，相关文献等。例如教育投入、常住人口来源于《北京市统计年鉴》；VOCs 排放量、某些相关系数等来源于相关文献；排放限值、罚款力度、补贴等来源于《餐饮业大气污染物排放标准》，违规频率等通过相关新闻间接总结获得；执法力度等通过调查问卷的方式获得。SD 模型中的变量有常数变量、表函数变量等，参数的精度应与模型的目的相匹配。确定参数的方法主要通过以下几种：（1）对于各变量之间没有确定关系时用表函数建立方程；（2）直接用已知的常数表示或参考统计资料和历史经验；（3）在逻辑关系基础上通过数据分析建立数量关系。

## 4.3 模型检验

为了保证该模型的正确性和可信度，必须综合运用各种方法对其进行验证，其核心目的是通过逻辑、数学和经验上的测试，确保模型结构合理、参数有据、行为可靠，从而为其预期的应用目的建立可信度，最终支持有效的学习和决策。本文研究采取了稳定性检验和历史性检验。

### （1）稳定性检验。

本文通过对不同时间步长下，检验模型在数值积分上的稳定性。本文分别对模型在 DT 为 1、DT 为 0.5 和 DT 为 0.25 的情景下进行仿真，得到的 VOCs 排放量和常住人口检验结果见图 4。从仿真结果来看，关键指标的曲线波动幅度较小，故模型具有较高的稳定性，因此所建立的模型可以开展路径仿真。

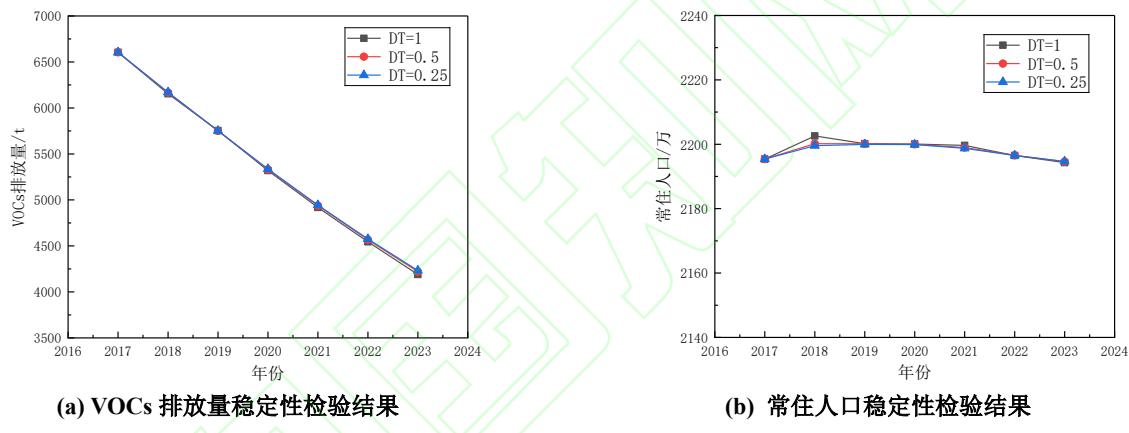


图 4 稳定性检验结果

Fig.4 Stability test results

### （2）历史性检验。

历史性检验是在利用历史数据估计参数后，将模型仿真模拟出的行为时间序列与实际系统观测到的历史行为时间序列进行比对，以判断模型是否能够充分重现历史行为模式的过程。当模型仿真输出与实际数据之间的偏差在  $\pm 10\%$ ，拟合模式能够很好地反应实际的问题，而在  $\pm 5\%$  的范围内，表明所构建的模型与现实情况具有较高的吻合度，且在逻辑上与现实相符合，VOCs 年排放量的历史性检验如图 5 所示，仿真数据与历史数据的误差均在 10% 以内，表明模型具备较高的可信度与准确

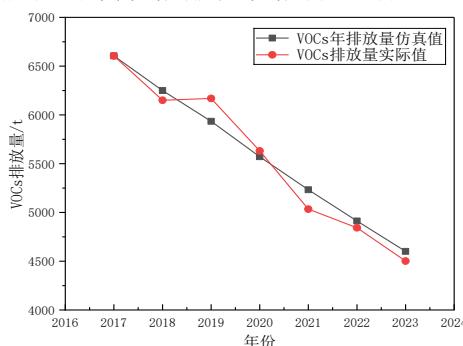


图 5 VOCs 年排放量误差

Fig.5 Annual VOC emissions error

#### 4.4 仿真结果与路径选择

将4条减排路径的主要变量分别上调10%左右，进行仿真分析，得到每条路径VOCs排放量的结果，与基准情景即未调整变量参数的情况进行比较，如图6所示，可以看出4条路径对VOCs减排均有正向影响，再将4条路径，综合路径和基准情景放在一起比较，结果表明，设备改进减排路径对北京市餐饮业VOCs的排放量影响最为显著，其他减排路径效果较弱。

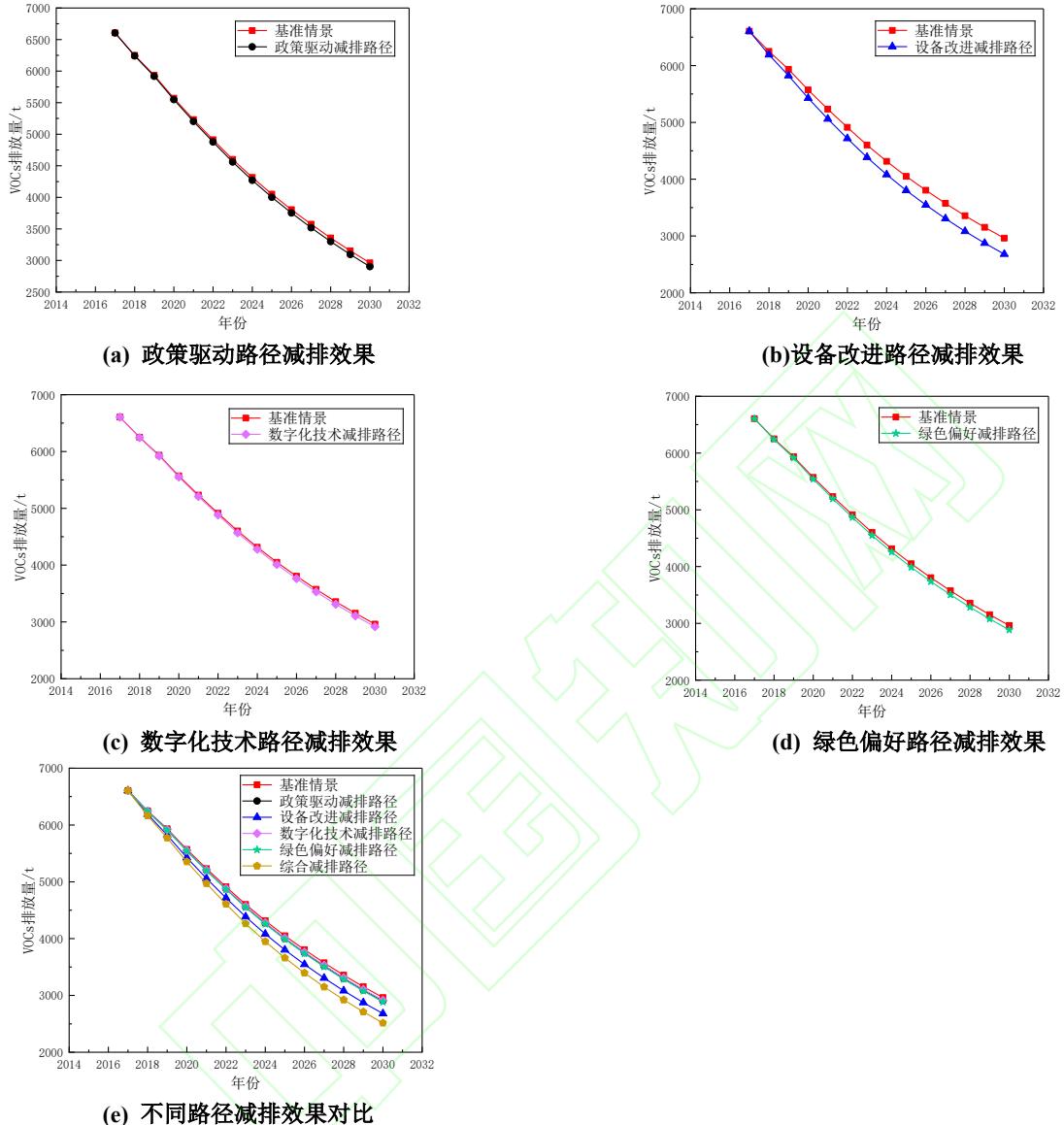


图6 各减排路径仿真结果

Fig.6 Simulation results of each emission reduction pathway

#### 4.5 建议

综上所述，以北京市餐饮业为例，在餐饮业VOCs减排过程中，可以优先考虑设备改进减排路径，即淘汰低效设备，选择效率更高的VOCs减排设备，密集区的小型餐饮业通过建立共享净化中心，这种集中处理的方式，不仅可以分摊成本，提高污染治理效率，也能够通过物联网实时监测排放浓度等，对小型餐饮业VOCs的减排有显著效果。其次，政策驱动减排路径效果较弱，可能是由于它需要和其他路径相结合使用，故可以在政策驱动下，多重路径并行。例如要求大型餐饮单位必须安装在线监测设备，小型餐饮业则选择便携式检测仪器；通过加大宣传力度，提高公众环保意识等。通过这种综合施策，餐饮业不仅能够满足政府的环保法规要求，还能保障顾客的健康权益，促进社会的整体和谐与可持续发展。

### 5 结 论

本文研究以餐饮业VOCs减排路径为研究对象，通过对餐饮业VOCs排放问题分析，假设了政策驱动、设备改进、数字

化技术和绿色偏好 4 条减排路径，通过系统动力学，借助 Vensim 软件，建立模型。根据北京市的数据进行路径仿真模拟分析结果，得出 4 种路径对 VOCs 减排都有正向影响，其中绿色偏好和设备改进减排路径相对来说影响更为显著，该研究结果可为餐饮业 VOCs 减排路径提供参考，有助于减少 VOCs 的排放量。

## 参考文献(References):

- [1] 张星, 钱振清, 张德峰, 等. 餐饮油烟排放特征与净化技术研究进展[J]. 环境工程, 2020, 38(1): 37–41, 20.
- ZHANG X, QIAN Z Q, ZHANG D F, et al. Research progress of cooking fume emission characteristics and purification technologies[J]. Environmental Engineering, 2020, 38(1): 37–41, 20.
- [2] 李洁. 南京市餐饮单位大气污染物排放清单构建的研究[J]. 科技风, 2020(19): 129, 133.
- LI J. Research on the construction of atmospheric pollutant emission inventory for catering units in Nanjing[J]. Science and Technology Review, 2020(19): 129, 133.
- [3] 张成援, 朱佳丽, 袁德财, 等. 餐饮行业油烟治理技术现状与进展[J]. 精细石油化工进展, 2025, 26(4): 52–58.
- ZHANG C Y, ZHU J L, YUAN D C, et al. Research status and prospects of cooking oil fumes control technology in the catering industry[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2025, 26(4): 52–58.
- [4] 胡伟, 莫凤, 徐丽. 简述餐饮油烟污染及其净化处理技术研究进展[J]. 当代化工研究, 2024(13): 24–26.
- HU W, MO F, XU L. Overview of research progress on catering oil fume pollution and its purification treatment technology[J]. Modern Chemical Research, 2022, 35(3): 611 – 620.
- [5] 张涵, 姜华, 高健, 等. PM<sub>2.5</sub> 与臭氧污染形成机制及协同防控思路[J]. 环境科学与研究, 2022, 35(3): 611–620.
- ZHANG H, JIANG H, GAO J, et al. Formation mechanism and management strategy of cooperative control of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub>[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(3): 611 – 620.
- [6] 李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 PM<sub>2.5</sub> 与臭氧污染协同控制策略研究[J]. 环境科学与研究, 2019, 32(10): 1763–1778.
- LI H, PENG L, BI F, etc. Strategy of coordinated control of PM(2.5) and ozone in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1763 – 1778.
- [7] DING D, XING J, WANG S X, et al. Optimization of a NO<sub>x</sub> and VOC cooperative control strategy based on clean air benefits[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(2): 739–749.
- [8] 董赵鑫, 丁点, 姜越琪, 等. PM<sub>2.5</sub> 和臭氧对前体物减排和气象变化的响应及其政策启示[J]. 环境科学与研究, 2023, 36(2): 223–236.
- DONG Z X, DING D, JIANG Y Q, et al. Responses of PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> to emission reduction and meteorology variation and their policy implications[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 56(2): 739 – 749.
- [9] 王杨. 大连市生活源挥发性有机物排放特征及管控建议[J]. 农业与技术, 2024, 44(8): 125–129.
- WANG Y. Characteristics and Control Suggestions of Volatile Organic Compound Emissions from Daily Life in Dalian City[J]. Agriculture and Technology, 2024, 44(8): 125 – 129.
- [10] 张楷, 马永亮, 徐康富. 饮食业油烟控制技术现状分析[J]. 重庆环境科学, 2003, (04): 55–58+6–42.
- ZHANG K, MA Y L, XU K F. Analysis of the current status of oil fume control technology in the Catering industry [J]. Chongqing Environmental Science, 2003, (04): 55–58 6–42.
- [11] 周尼娜. 城区餐饮油烟污染集中治理模式探讨—以双抛二里餐饮油烟污染治理为例[J]. 清洗世界, 2024, 40(12): 172–174.
- ZHOU N N. Discussion on the centralised management model of urban catering oil fume pollution: A case study of double-Pour erli catering oil fume pollution control [J]. Cleaning World, 2024, 40(12): 172 – 174.
- [12] Whynot, Jill, Gary Quinn, Pamela Perryman, et al. 1999. "Control of Fine Particulate (PM<sub>2.5</sub>) Emissions from Restaurant Operations." Journal of the Air & Waste Management Association 49 (9): 95–99.
- [13] LI Z, WANG S, LI S, et al. High-resolution emission inventory of full-volatility organic compounds from cooking in China during 2015–2021[J]. Earth System Science Data, 2023, 15(11): 5017–5037.
- [14] XIONG Y, DU K, HUANG Y. One-third of global population at cancer risk due to elevated volatile organic compounds levels[J]. npj Climate and Atmospheric Science, 2024, 7(1): 54.

- [15] ESSAMLALI I, NHAILA H, EL KHAILI M. Supervised machine learning approaches for predicting key pollutants and for the sustainable enhancement of urban air quality: a systematic review[J]. Sustainability, 2024, 16(3): 976.
- [16] ZHANG R, HE X, LIU J, et al. VOC transport in an occupied residence: measurements and predictions via deep learning[J]. Science of the Total Environment, 2023, 892: 164559.
- [17] GABRIEL M, AUER T. LSTM deep learning models for virtual sensing of indoor air pollutants: a feasible alternative to physical sensors[J]. Buildings, 2023, 13(7): 1684.
- [18] 李超仲,傅月,黄垒,等.餐饮油烟 VOCs 催化氧化技术研究进展[J]. 环境保护科学,2023, 49(6): 24–34.
- LI C Z, FU Y, HUANG L, and others. Research progress on catalytic oxidation technology of VOCs in cooking oil fumes[J]. Environmental Protection Science, 2023, 49(6): 24 – 34.
- [19] 彭颂, 赵玮, 王利杰. 城市餐饮油烟污染现状及对策浅析[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(12): 106–110.
- PENG S, ZHAO W, WANG L J. A brief analysis of the current situation and countermeasures of urban catering oil fume pollution[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2023, 43(12): 106 – 110.
- [20] 何锐超. 碳标识背景下消费者绿色消费意愿的影响因素研究[J]. 经营管理者, 2025(10): 82–83.
- HE R C. Research on the influencing factors of consumers' green consumption intention under the background of carbon labelling[J]. Business Manager, 2025(10): 82 – 83.

## **Research on VOCs Emission Reduction Pathways in the Food Service Industry: A Case Study of Beijing**

**Lu Qiuqin,Xiao Xiao**

(College of Management, Xi'an University of Architecture and Technology Xi'an 710055)

**Abstract:** With the booming development of China's economy, the market size of the catering industry has been continuously expanding. However, the volatile organic compounds (VOCs) generated by the catering industry have put enormous pressure on the ecological environment and public health. This study aims to reduce VOC emissions from the catering industry. By reviewing relevant literature, it briefly analyzes the problems in VOC emissions and the motivations for emission reduction in the catering sector. It combines local regulations on pollutant emissions from the catering industry and related theories, hypothesizing four emission reduction pathways: policy-driven, equipment improvement, digital technology, and green preference, and analyzes the operating mechanism of each pathway. Subsequently, based on system dynamics theory and using Vensim software, a system dynamics model was established to simulate the dynamic evolution process of VOC emission reduction in the catering industry and to quantify the implementation effects of different reduction pathways. Taking Beijing as an example, relevant data were used for stability and historical validation. Once the model was confirmed to be effective, simulation modeling was conducted, comparing the baseline scenario with the four reduction pathways. The study results show that all four pathways have a positive effect on VOC reduction in Beijing's catering industry, though the intensity and evolution trends vary significantly. Among them, the equipment improvement pathway has the most significant effect, while the green preference, policy-driven, and digital technology pathways have weaker effects. Additionally, when the four pathways are combined, a comprehensive reduction pathway was obtained and compared with the baseline scenario. Based on these findings, suggestions are offered for reducing VOC emissions in the catering industry: during the VOC reduction process, adhere to a governance approach of 'technology empowerment as the core, policy guidance as the guarantee, and multi-faceted collaboration as the pathway,' prioritizing equipment improvements and comprehensive multi-path measures to achieve continuous emission reductions and contribute to the improvement of urban air quality.

**Key words:** Environmental Engineering; Catering industry; System dynamics; VOCs reduction; Modeling and simulation