

综合车内 VOCs 气味及其健康危害 对乘员舒适性影响评价

何莉萍^{1,2†}, 彭梦蝶¹, 杨金¹, 辛宇航¹, 原江鑫¹, 李琦^{2,3}, 江楠^{2,3}, 刘龙镇¹, 刘丹凤^{2,3}

(1. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 车辆排放与节能重庆市重点实验室, 重庆 401122;

3. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘 要:针对评价车内挥发性有机化合物(Volatile Organic Compounds, VOCs)对乘员舒适性影响的方法未能综合考虑车内 VOCs 的气味和对健康危害性的问题,将汽车内部作为一个室内微环境体系,基于车内 VOCs 的天然本底质量浓度、国标限值以及检知嗅阈值,采用韦伯-费希纳定律,建立了综合考虑 VOCs 气味与健康危害的乘员舒适性评价方法.将变异系数法与三角模糊函数相结合,定量分析车内 VOCs 主要组分对乘员舒适性的影响权重以及乘员舒适性等级,提出一种基于评语集的定量分析来比较不同车型乘员舒适性的理论方法.应用上述评价方法与理论进行案例研究,结果表明,4 种车型中,第 4 种车型的乘员舒适性最佳.

关键词:评价方法;VOCs;气味;健康危害性;乘员舒适性;定量分析;变异系数法;三角模糊函数

中图分类号:U463.8;X51

文献标志码:A

Evaluation of Passengers' Comfort by Comprehensively Considering Effect of Odor and Health Hazard of VOCs in a Car

HE Liping^{1,2†}, PENG Mengdie¹, YANG Jin¹, XIN Yuhang¹, YUAN Jiangxin¹, LI Qi^{2,3},
JIANG Nan^{2,3}, LIU Longzhen¹, LIU Danfeng^{2,3}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Vehicle Emission and Economizing Energy, Chongqing 401122, China;

3. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: As the evaluation of passengers' comfort is not comprehensively considering the effect of the odor of Volatile Organic Compounds (VOCs) or health hazard of VOCs in a car in the present work, automobiles were taken as a kind of indoor micro-environmental system. The Weber-Fechner law was applied to establish an evaluation method of passengers' comfort by comprehensively considering both the odor and health hazard of VOCs in a car

* 收稿日期:2021-09-17

基金项目:车辆排放与节能重庆市重点实验室开放基金重点项目(PFJN-01), The Foundation of Chongqing Key Laboratory of Vehicle Emission and Economizing Energy(PFJN-01)

作者简介:何莉萍(1967—),女,四川成都人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail:lphe@hnu.edu.cn

based on the natural background concentration of typical VOCs compositions, national standards, and the olfactory threshold data. It was also the first time to quantitatively determine the influence weights of the typical VOCs compositions on passengers' comfort and passengers' comfort levels combined with the coefficient of variation method and triangular fuzzy theory. In addition, this paper proposed a method of quantitatively comparing passengers' comfort in different cars based on the comment set and carried out a case study using the above proposed evaluation method. The case study indicated that, among the four types of cars, the fourth car presented the highest passengers comfort level.

Key words: evaluation method; Volatile Organic Compounds (VOCs); odors; health hazard; passengers' comfort; quantitative analysis; coefficient of variation method; triangular fuzzy theory

在世界卫生组织发布的《2019 人类健康面临的十大威胁》中,空气污染问题位居榜首,而联合国环境规划署、联合国人居署和瑞典空气净化研究机构调查显示车内空气污染是室外空气污染的 15 倍^[1]. 汽车车内环境狭小、布置复杂,被视作一种特殊的室内微环境^[2]. 为此,国内外均制定了较严格的车内空气质量管控相关法规与标准. 例如:澳大利亚将室内空气质量评价标准作为了车内环境健康标准;日本颁布了《小轿车车内空气污染治理指南》;韩国发布了《新规制作汽车的室内空气质量标准》;欧盟主导制定出了 ISO 12219 系列车内空气质量标准^[3];我国颁发了《乘用车内空气质量评价指南》(GB/T 27630—2011)^[4]. 随着汽车保有量的增加,人们在车内度过的时间越来越长,数据显示,人们每天坐在车内的时间约为 115 min^[5]. 因此,车内微环境的空气质量以及由空气污染引起的车内乘员的健康及舒适性也备受世界各国环境组织、汽车生产制造商和消费者的关注^[6-7]. 车内乘员舒适性是身体因素、心理精神因素、环境因素等多种因素的综合反映. 其中,车内空气环境对乘员舒适性的影响很大,而车内 VOCs,包括醛类、酮类物质和烃类等多种物质,对车内空气环境和质量有重大影响^[8],并且它们散发的气味及其对乘员健康的危害是影响乘员舒适性的两个重要方面.

目前,各国学者针对车内 VOCs 的气味开展了大量研究. Li 等人^[9]利用韦伯-费希纳定律评价了车内气味,证明气味物质浓度与气味等级之间存在一定规律. Zhong 等人^[10]改进了车内 VOCs 气味评价中采样容器的尺寸,使车内气味评估结果更加准确. Prado 等人^[11]采用不同标准评估了车内气味并指出车内气味强度普遍较高且不受乘员喜欢. 在车内 VOCs 对乘员健康危害方面,Xing 等人^[12]研究了车内

材料排放的 VOCs 造成的污染特征并评估了 VOCs 组分的健康风险. Liang 等人^[13]测量了新车车舱内的 VOCs 浓度并确定了其主要来源以评估人类健康风险. 佟瑞鹏等人^[14]选取地铁、家庭轿车等 5 种交通工具,对暴露于 VOCs 的乘员进行了健康风险评价,结果表明家庭轿车的致癌风险较大. Gong 等人^[15]评估了地铁车厢乘员在新车、旧车等不同驾驶场景中暴露于 VOCs 的健康风险. 这些研究主要对车内 VOCs 的气味或健康危害性作出单方面的评价,然而,车内 VOCs 对乘员舒适性的影响不仅体现在 VOCs 气味对感官刺激及其引发的头晕、头痛、恶心等感官作用效果方面,还体现在 VOCs 组分对健康影响造成的致癌等非感官刺激作用方面. 因此,车内 VOCs 对乘员舒适性的影响是 VOCs 气味与健康危害的综合体现,单方面评价车内 VOCs 对乘员舒适性的影响是不全面的.

另外,乘员舒适性是一种模糊的概念,应用模糊数学的原理可以准确建立车内 VOCs 对乘员舒适性影响的评价模型. 张亚青等人^[16]利用模糊数学原理对不同的 VOCs 处理技术进行了定量分析评价,同时,该理论在室内空气质量以及车内 VOCs 污染等级等方面的评价中均有应用^[17-18].

鉴于此,本文首次同时考虑 VOCs 的气味性及其健康危害两个方面,建立基于综合车内 VOCs 气味及其健康危害的乘员舒适性影响评价方法. 此外,本文还将变异系数法与三角模糊函数相结合,对不同车型进行了乘员舒适性等级评价,并应用评语集理论方法,首次定量分析不同车型的乘员舒适性评价等级. 本研究旨在为车内 VOCs 的管控以及改善乘用车微环境空气质量提供理论依据,并为乘员舒适性评价体系提供更全面、更准确的评价理论方法.

1 理论与方法

1.1 模糊综合评价

1) 确定因素集、评价集,建立隶属度矩阵. 针对所评价的对象选择 m 个因素,构成因素集 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_m\}$; $u_1, u_2, \dots, u_m$ 为 m 个评价指标. 确定 n 个评价等级,构成评价集合 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$; $v_1, v_2, \dots, v_n$ 为 n 个评价等级.

在构建隶属度矩阵时,需要计算评价指标 u_i ($i=1, 2, \dots, m$) 关于评价等级 v_j ($j=1, 2, \dots, n$) 的隶属度 r_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$). 本文采用三角模糊函数计算评价指标 u_i 对 v_j 等级的隶属度,对于 v_1 评价等级,隶属度 r_{i1} 计算公式为:

$$r_{i1} = \begin{cases} 0, & C_i \geq v_{i2} \\ -\frac{C_i - v_{i2}}{v_{i2} - v_{i1}}, & v_{i1} < C_i < v_{i2} \\ 1, & C_i \leq v_{i1} \end{cases} \quad (1)$$

对于 v_j ($1 < j < n$) 评价等级,隶属度 r_{ij} 计算公式为:

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & C_i \leq v_{i(j-1)} \text{ 或 } C_i \geq v_{i(j+1)} \\ \frac{C_i - v_{i(j-1)}}{v_{ij} - v_{i(j-1)}}, & v_{i(j-1)} < C_i < v_{ij} \\ -\frac{C_i - v_{i(j+1)}}{v_{i(j+1)} - v_{ij}}, & v_{ij} \leq C_i < v_{i(j+1)} \end{cases} \quad (2)$$

对于 v_n 等级,隶属度 r_{in} 计算公式为:

$$r_{in} = \begin{cases} 0, & C_i \leq v_{i(n-1)} \\ \frac{C_i - v_{i(n-1)}}{v_{in} - v_{i(n-1)}}, & v_{i(n-1)} < C_i < v_{in} \\ 1, & C_i \geq v_{in} \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_i 为评价指标 u_i 的检测值; v_{ij} 是评价指标 u_i 对应 v_j 等级的评价标准限值. 评价指标 u_i 关于 $v_1 \sim v_n$ 等级的隶属度表示为 $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$, 最终构成隶属度矩阵 R :

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

2) 确定评价指标的权重向量. 模糊综合评价中各评价指标的权重向量为 $A=(w_1, w_2, \dots, w_n)$, 向量 A 决定了各评价指标在乘员舒适性评价中的重要性.

3) 模糊合成. 将所得权重向量 A 和隶属度矩阵 R 进行模糊合成,并对结果归一化,记为 $B=A \times R$. 归一化后的模糊向量用 $B=\{b_j\}_{1 \times n}$ ($j=1, 2, \dots, n$) 表示. 常用的合成算子一般包括 4 种^[19], 结合乘员舒适性评价要

求,最终选定的算子是 $M(\cdot, \oplus)$ 模型,公式如下:

$$b_j = \min\left(1, \sum_{i=1}^m w_i \times r_{ij}\right) \quad (4)$$

计算模糊向量 B 中 $\max(b_j)$ 对应的评价等级 v_j , 即为该评价对象的模糊综合评价结果.

1.2 变异系数法

变异系数法是一种客观赋权法,该方法在模糊综合评价中提供了定量分析的依据^[20]. 计算各评价指标对乘员舒适性影响的权重.

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (5)$$

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_{ij} - \bar{x}_i)^2$$

式中: $\bar{x}_i$ 为评价指标的均值; S_i^2 为评价指标的方差; a_{ij} 为每个评价指标的实测质量浓度; n 为检测车内 VOCs 各组分质量浓度的次数.

计算方差与均值的绝对值之间的商,用 v_i 表示:

$$v_i = \frac{S_i^2}{|\bar{x}_i|} \quad (6)$$

对式(6)进行归一化,可得每一个评价指标所对应的权重,用 w_i 表示:

$$w_i = \frac{v_i}{\sum v_i} \quad (7)$$

归一化后的结果即为所需的各指标对乘员舒适性的权重值,权重值构成了向量 $A = \{w_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$).

1.3 评语集

由模糊综合评价模型得到的乘员舒适性评价结果是按区间划分的等级,为了更精确地评价不同车型的乘员舒适性,本文采用分值的方式定量地反映多种车型的评价结果.

对每种车型进行 0~100 的评分,将 100 均分为 n 个区间,与 n 个等级相对应. 基于划分的 n 个分数区间,取每个区间的中值为评语集的计算分值,最终得到的评语集为:

$$N = \left\{ \frac{50}{n}, \frac{150}{n}, \dots, \frac{200n-100}{2n} \right\}$$

车内乘员舒适性越高,对应的计算分值越大.

2 车内 VOCs 对乘员舒适性影响评价

本文以某 4 种车型为评价对象,开展综合考虑 VOCs 气味及其健康危害对乘员舒适性评价方法的案例研究. 4 种车型的车内 VOCs 质量浓度来源于文

献[21],如表 1 所示.

表 1 不同车型车内 VOCs 质量浓度
Tab.1 VOCs concentrations in different cars

检测物质	VOCs 质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)			
	车型 1	车型 2	车型 3	车型 4
苯	7.50	24.60	12.00	6.30
甲苯	120.30	385.80	296.50	29.50
乙苯	47.80	3 023.80	38.30	12.60
二甲苯	47.80	18 416.80	103.80	19.70
苯乙烯	8.20	148.90	8.90	28.30
甲醛	11.40	34.70	65.00	62.40
乙醛	82.60	34.10	55.40	55.30

2.1 车内 VOCs 对乘员舒适性影响评价结果

2.1.1 确定评价指标

本文根据《乘用车内空气质量评价指南》(GB/T 27630—2011)确定的车内 VOCs 主要控制物质的危害进行了整理与对比分析^[22-24],如表 2 所示.由表 2 可知,车内 VOCs 对乘员舒适性的影响包含了感官刺激、化学毒性和致癌性等方面.

表 2 VOCs 主要组分对乘员的
感官刺激、化学毒性和致癌性

Tab.2 Sensory stimuli, chemotoxicity and carcinogenicity
of typical VOCs compositions to the passengers

污染物 种类	感官刺激	化学毒性	致癌性
苯	干燥、瘙痒、昏迷	中等毒性	致癌物
甲苯	头晕、头痛、皮炎	低毒性	对人类致癌性可疑
乙苯	头晕、头痛、视力模糊	低毒性	对人很可能致癌
二甲苯	头痛、眼花	中等毒性	对人类致癌性可疑
苯乙烯	头痛、恶心、乏力	低毒性	对人很可能致癌
甲醛	刺激、过敏	毒性较高	致癌物
乙醛	头痛、嗜睡	中等毒性	对人很可能致癌

大量实验数据显示,车内丙烯醛的质量浓度远远小于国标限值^[25-27].当车内温度升高时,丙烯醛相对于其他有害物质的质量浓度增幅较小^[28].因此,车内丙烯醛对乘员舒适性的影响相对其他 VOCs 组分可忽略不计.鉴于此,本文选择苯、甲苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯、甲醛、乙醛等 7 种物质作为评价指标开展车内 VOCs 对乘员舒适性影响评价,并用向量 U 表示.

$$U=\{u_1,u_2,u_3,u_4,u_5,u_6,u_7\}$$

元素 $u_1\sim u_7$ 分别表示苯、甲苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯、甲醛、乙醛.

2.1.2 确定评价乘员舒适性分级标准

考虑到舒适与不舒适是一种定性的模糊概念,且用舒适与不舒适两个等级不能准确地描述乘员舒适性,为了更准确地描述乘员舒适性^[29-31],本文将基于车内 VOCs 的乘员舒适性评价等级分为:最为接受、较为舒服、舒服、不舒服、很不适应 5 个等级.通过这 5 个等级可以很好地表达乘员舒适性,并用向量 V 表示:

$$V=\{v_1,v_2,v_3,v_4,v_5\}$$

式中: $v_1\sim v_5$ 依序代表最为接受、较为舒服、舒服、不舒服、很不适应.

《乘用车内空气质量评价指南》(GB/T 27630—2011)中 VOCs 限值的制定充分考虑了污染物的致癌性与毒性等健康危害.由此,当乘员健康危害小,且车内无异味、无感官刺激时,乘员舒适性处于“最为接受”的程度,故取 VOCs 主要组分的天然本底质量浓度为 v_1 等级对应的限值^[32],如表 3 所示.

表 3 典型 VOCs 组分的 v_1 等级质量浓度

Tab.3 Concentrations of typical
VOCs compositions at v_1 level

污染物种类	天然本底质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
苯	2.50
甲苯	12.00
乙苯	12.00
二甲苯	10.00
苯乙烯	3.50
甲醛	8.00
乙醛	8.50

当乘员遭受感官刺激或健康危害较大时,乘员舒适性达到了“很不适应”的程度.因此,本文将基于乘员健康风险的车内 VOCs 主要组分的国标限值及其检知嗅阈值^[33-36]以 4:3 的比例进行权重分配^[37],定义并获得了 v_5 等级对应的限值,如表 4 所示.

本文采用韦伯-费希纳定律将 VOCs 主要组分的 v_1 等级对应的限值 C_{i0} 至 v_5 等级对应的限值 C_{i5} 间等比地分为 5 个等级,任意相邻两级之间的舒适程度比率设定为^[38]:

$$\alpha_i=\left(\frac{C_{id}}{C_{i0}}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{8}$$

式中: α_i 为污染物 u_i 相邻两级标准的舒适程度比率; C_{i0} 为乘员舒适性为“最为接受”时的质量浓度; C_{id} 为乘员舒适性为“很不适应”时的质量浓度.由此计算出车内 VOCs 组分的分级标准如表 5 所示.

表 4 VOCs 主要组分的检知嗅阈值与国标限值
Tab.4 Olfactory threshold and national threshold of typical VOCs compositions

污染物种类	VOCs 的质量浓度/(mg·m ⁻³)		
	检知嗅阈值	国标限值	v ₅ 等级限值
苯	9.402	0.06	4.064
甲苯	0.911	1.00	0.962
乙苯	0.805	1.00	0.916
二甲苯	0.274	0.26	0.266
苯乙烯	0.163	1.00	0.641
甲醛	0.080	0.10	0.091
乙醛	0.302	0.20	0.244

表 5 VOCs 主要组分对乘员舒适性影响评价分级标准
Tab.5 Evaluation criteria of passengers' comfort effected by the typical VOCs compositions

污染物种类	VOCs 的质量浓度/(mg·m ⁻³)				
	最为接受 v ₁	较为舒服 v ₂	舒服 v ₃	不舒服 v ₄	很不适应 v ₅
苯	2.50	15.87	100.79	639.89	4 064.00
甲苯	12.00	35.91	107.43	321.44	962.00
乙苯	12.00	35.47	104.85	309.93	916.00
二甲苯	10.00	22.71	51.57	117.13	266.00
苯乙烯	3.50	12.88	47.37	174.27	641.00
甲醛	8.00	14.69	26.97	49.52	91.00
乙醛	8.50	19.67	45.55	105.44	244.00

2.1.3 模糊综合评价结果

本文基于表 5 所提出的 VOCs 主要组分对乘员舒适性影响评价分级标准,计算 VOCs 主要组分对评价等级的隶属度矩阵.以车型 1 为例,苯的质量浓度为 $C_1=7.50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$,该物质对于 v_1 等级的隶属度为:

$$r_{11} = \begin{cases} 0, & C_1 \geq 15.87 \\ -\frac{C_1 - 15.87}{15.87 - 2.50}, & 2.50 < C_1 < 15.87 \\ 1, & C_1 \leq 2.50 \end{cases} \quad (9)$$

得到 $r_{11}=0.63$.
对于 $v_2\sim v_4$ 级($2\leq j\leq 4$):

$$r_{1j} = \begin{cases} 0, & C_1 \leq v_{i(j-1)} \text{ 或 } C_1 \geq v_{i(j+1)} \\ \frac{C_1 - v_{1(j-1)}}{v_{1j} - v_{1(j-1)}}, & v_{i(j-1)} < C_1 < v_{ij} \\ -\frac{C_1 - v_{1(j+1)}}{v_{1(j+1)} - v_{1j}}, & v_{ij} \leq C_1 \leq v_{i(j+1)} \end{cases} \quad (10)$$

得到 r_{12} 、 r_{13} 、 r_{14} 分别为 0.37、0、0.
对于 v_5 级:

$$r_{15} = \begin{cases} 0, & C_i \leq 639.89 \\ \frac{C_1 - 639.89}{4\,064.00 - 639.89}, & 639.89 < C_i < 4\,064.00 \\ 1, & C_i \geq 4\,064.00 \end{cases} \quad (11)$$

得到 r_{15} 为 0.
苯关于 5 个评价等级对应的隶属度为 $r_1=(0.63, 0.37, 0, 0, 0)$.

同理,可以计算出其他 6 种污染物的隶属度,最终得到隶属度矩阵 R_1 :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.63 & 0.37 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.94 & 0.06 & 0 \\ 0 & 0.82 & 0.18 & 0 & 0 \\ 0 & 0.13 & 0.87 & 0 & 0 \\ 0.50 & 0.50 & 0 & 0 & 0 \\ 0.49 & 0.51 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.38 & 0.62 & 0 \end{bmatrix}$$

再依次计算车型 2~车型 4 的隶属度矩阵 R_2 、 R_3 、 R_4 分别为:

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.90 & 0.10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.90 & 0.10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.80 & 0 \\ 0 & 0 & 0.66 & 0.34 & 0 \\ 0 & 0.44 & 0.56 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.71 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.12 & 0.88 & 0 \\ 0 & 0.96 & 0.04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.20 & 0.80 & 0 \\ 0.42 & 0.58 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.63 & 0.37 \\ 0 & 0 & 0.84 & 0.16 & 0 \end{bmatrix}$$
$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.72 & 0.28 & 0 & 0 & 0 \\ 0.27 & 0.73 & 0 & 0 & 0 \\ 0.97 & 0.03 & 0 & 0 & 0 \\ 0.24 & 0.76 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.55 & 0.45 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.69 & 0.31 \\ 0 & 0 & 0.84 & 0.16 & 0 \end{bmatrix}$$

2.1.4 确定 VOCs 主要组分的权重向量

将表 1 中的数据代入公式(5)~公式(7),可以计算出各 VOCs 主要组分在车内对乘员舒适性影响评价中的权重值,从而构成权重向量 $A = (0.086\ 7, 0.101\ 8, 0.250\ 1, 0.257\ 9, 0.181\ 5, 0.076\ 3, 0.045\ 6)$. 权重向量 A 表明,各 VOCs 组分对乘员舒适性影响的重要程度为:二甲苯>乙苯>苯乙烯>甲苯>苯>甲醛>乙醛. 因此,在车内 VOCs 对乘员舒适性影响的评价中,二甲苯和乙苯的质量浓度与乘员舒适性的评价结果紧密相关.

2.1.5 车内乘员舒适性评价结果

利用公式(4)对权重向量 A 与隶属度矩阵 $R_i(i=1,2,3,4)$ 进行模糊合成,最终得到反映不同车型中 VOCs 对车内乘员舒适性的模糊向量 $B_i(i=1\sim4)$:

$$B_1 = (0.183, 0.400, 0.382, 0.034, 0)$$
$$B_2 = (0, 0.101, 0.091, 0.272, 0.536)$$
$$B_3 = (0.101, 0.407, 0.112, 0.351, 0.028)$$
$$B_4 = (0.410, 0.418, 0.085, 0.062, 0.025)$$

由模糊向量 B_i 可知,4 种车型的车内乘员舒适性评价结果如表 6 所示.

表 6 车内乘员舒适性评价结果

Tab.6 Evaluation results of passengers' comfort

车型	$\max(b_j)$	评价等级	评价结果
1	b_2	v_2	较为舒服
2	b_5	v_5	很不适应
3	b_2	v_2	较为舒服
4	b_2	v_2	较为舒服

根据本研究提出的综合车内 VOCs 气味与健康危害对乘员舒适性影响评价方法计算可知,车型 1、车型 3 和车型 4 的乘员舒适性等级为“较为舒服”,车型 2 的乘员舒适性等级为“很不适应”.

2.2 车内乘员舒适性的评语集评价结果

由表 6 可知,车型 1、车型 3 和车型 4 的乘员舒适性评价等级都为“较为舒服”. 因此,上述模糊综合评价定性结果不能比较属于同一舒适等级车型之间的优劣. 为此,本文首次采用评语集对 4 种车型的乘员舒适性进行评分,提出一种基于评语集的定量分析比较不同车型乘员舒适性的理论方法.

本文基于 5 个评价等级,应用评语集理论与方法,计算并获得了不同车型的评语集 $N=\{90, 70, 50, 30, 10\}$. 将模糊向量 B_i 与评语集 N 中对应的数值相乘,获得各车型乘员舒适性综合评分值(见表 7),依

照分值大小可以对各车型的乘员舒适性进行定量对比分析.

表 7 各车型乘员舒适性综合评分值

Tab.7 Comprehensive evaluation of passengers' comfort of different cars

车型	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	评分值
1	0.18	0.40	0.38	0.03	0.00	64.59
2	0.00	0.10	0.09	0.27	0.54	25.14
3	0.10	0.41	0.11	0.35	0.03	53.99
4	0.41	0.42	0.09	0.06	0.03	72.52

根据乘员舒适性等级,各车型的评分值排序为车型 4>车型 1>车型 3>车型 2,表明车型 4 的乘员舒适性最佳,车型 2 的乘员舒适性最差. 即便对于综合模糊评价中评价等级均为“较为舒服”的车型 1、车型 3 和车型 4,它们基于评语集的乘员舒适性综合评分值也存在较大差异.

3 结 论

本研究将汽车作为一个特殊的室内微环境体系,针对车内 VOCs 有害挥发性气体对于整车微环境的污染及其对车内空气质量的影响,综合考虑 VOCs 气味与健康危害性来评价 VOCs 对车内乘员舒适性的影响,结论如下:

1)本研究综合应用韦伯-费希纳定律、变异系数法与三角模糊函数,不仅首次分析建立了基于 VOCs 的气味及其健康危害两个方面的乘员舒适性的评价标准,还可定量计算出车内 VOCs 主要组分(评价指标)对乘员舒适性的权重因子. 计算结果表明,苯、甲苯、乙苯、二甲苯、苯乙烯、甲醛和乙醛的权重向量为 $A=(0.086\ 7, 0.101\ 8, 0.250\ 1, 0.257\ 9, 0.181\ 5, 0.076\ 3, 0.045\ 6)$. 权重向量 A 表明,各种 VOCs 组分对乘员舒适性影响的重要程度为:二甲苯>乙苯>苯乙烯>甲苯>苯>甲醛>乙醛.

2)本文提出的综合车内 VOCs 气味与健康危害对乘员舒适性影响评价方法可评价某一车型 VOCs 对乘员舒适性影响,研究结果指出,研究车型中车型 1、车型 3 和车型 4 的乘员舒适性等级为“较为舒服”,车型 2 的乘员舒适性等级为“很不适应”.

3)本研究提出的一种基于评语集的定量分析方法可定量对比分析和评价不同车型 VOCs 对乘员舒适性的影响. 采用该方法可知,不同车型之间的乘员

舒适评分值差异较大,各车型的乘员舒适性评分值排序为:车型4>车型1>车型3>车型2。即:车型4的乘员舒适性最佳,车型2的乘员舒适性最差。

总之,相比于以往评价车内VOCs对乘员舒适性影响仅单方面考虑车内VOCs的气味或健康危害性的问题,本研究所提出的评价方法能够更全面、更准确地评价不同车型车内VOCs对乘员舒适性的影响,可望为丰富和完善车内乘员舒适性评价体系提供新理论、新方法。

参考文献

- [1] 艾迪汽车. 车内这部分受污染程度,居然比车外严重15倍[EB/OL]. (2020-07-16) [2021-09-02]. <https://aikahao.xcar.com.cn/item/471677.html>.
Eddie Car. The pollution level inside the car was 15 times worse than that outside the car[EB/OL]. (2020-07-16) [2021-09-02]. <https://aikahao.xcar.com.cn/item/471677.html>. (In Chinese)
- [2] HADEI M, SHAHSAVANI A, HOPKE P K, *et al.* Comparative health risk assessment of in-vehicle exposure to formaldehyde and acetaldehyde for taxi drivers and passengers: effects of zone, fuel, refueling, vehicle's age and model[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 254: 112943.
- [3] 汽车测试网. 汽车车内空气检测的重要性[EB/OL]. (2018-08-20) [2021-09-02]. <https://www.auto-testing.net/news/show-98475.html>.
Car Test Network. The importance of air detection in cars[EB/OL]. (2018-08-20) [2021-09-02]. <https://www.auto-testing.net/news/show-98475.html>. (In Chinese)
- [4] 乘用车内空气质量评价指南:GB/T 27630—2011[S]. 北京:中国环境科学出版社,2012:1.
Guideline for air quality assessment of passenger car:GB/T 27630—2011[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2012: 1. (In Chinese)
- [5] FABER J, BRODZIK K. Air quality inside passenger cars[J]. *AIMS Environmental Science*, 2017, 4(1): 112–133.
- [6] ODEKANLE E L, FAKINLE B S, JIMODA L A, *et al.* In-vehicle and pedestrian exposure to carbon monoxide and volatile organic compounds in a mega city[J]. *Urban Climate*, 2017, 21: 173–182.
- [7] MORENO T, PACITTO A, FERNÁNDEZ A, *et al.* Vehicle interior air quality conditions when travelling by taxi[J]. *Environmental Research*, 2019, 172: 529–542.
- [8] XU B, CHEN X K, XIONG J Y. Air quality inside motor vehicles' cabins: a review[J]. *Indoor and Built Environment*, 2018, 27(4): 452–465.
- [9] LI C J, YAO Q, LIU Y L, *et al.* Application research on objective evaluation of vehicle interior odor based on weber-Fechner law[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 657(1): 012019.
- [10] ZHONG G L, ZHAO H Y, REN T Q, *et al.* Vehicle interior methods for evaluating the VOC and odor of materials[C]//International Conference on Application of Intelligent Systems in Multi-modal Information Analytics. Heidelberg: Springer, Cham, 2019: 1141–1151.
- [11] PRADO K S, STRANGL M, PEREIRA S R, *et al.* Odor characterization of post-consumer and recycled automotive polypropylene by different sensory evaluation methods and instrumental analysis[J]. *Waste Management*, 2020, 115: 36–46.
- [12] XING L Q, WANG L C, ZHANG R. Characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from interior materials in vehicles; a case study from Nanjing, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(15): 14789–14798.
- [13] LIANG B, YU X, MI H P, *et al.* Health risk assessment and source apportionment of VOCs inside new vehicle cabins: a case study from Chongqing, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, 10(5): 1677–1684.
- [14] 佟瑞鹏, 张磊. 不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评价[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 663–671.
TONG R P, ZHANG L. Health risk assessment of volatile organic compounds for different commuting modes[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 663–671. (In Chinese)
- [15] GONG Y, WEI Y J, CHENG J H, *et al.* Health risk assessment and personal exposure to Volatile Organic Compounds (VOCs) in metro carriages: a case study in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1432–1438.
- [16] 张亚青, 王相, 孟凡荣, 等. 基于熵权和层次分析法的VOCs处理技术综合评价[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(6): 2946–2955.
ZHANG Y Q, WANG X, MENG F R, *et al.* Comprehensive evaluation of VOCs processing technology based on entropy weight method and analytic hierarchy process[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(6): 2946–2955. (In Chinese)
- [17] DEBNATH J, MAJUMDER D, BISWAS A. Air quality assessment using weighted interval type-2 fuzzy inference system[J]. *Ecological Informatics*, 2018, 46: 133–146.
- [18] CAO S H, MING P P, ZHAO X. Fuzzy comprehensive evaluation of human thermal comfort in simulating natural wind environment[J]. *Building and Environment*, 2021, 188: 107447.
- [19] 李孜颖, 石振国. 面向大数据任务的调度方法[J]. *计算机应用*, 2020, 40(10): 2923–2928.
LI Z Y, SHI Z G. Scheduling method for big data tasks[J]. *Journal of Computer Applications*, 2020, 40(10): 2923–2928. (In Chinese)
- [20] 汪嘉杨, 翟庆伟, 郭倩, 等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1979–1987.
WANG J Y, ZHAI Q W, GUO Q, *et al.* Study on water environmental carrying capacity evaluation in Taihu Lake Basin[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1979–1987. (In Chinese)
- [21] 王焰孟, 胡俊艳, 李晓健. 基于主观评价对车内“五苯三醛”物质进行解析[J]. *天津科技*, 2018, 45(1): 42–44.
WANG Y M, HU J Y, LI X J. Analysis of air quality in passenger car based on odor evaluation[J]. *Tianjin Science & Technology*,

- 2018, 45(1):42–44. (In Chinese)
- [22] HU R Y, LIU G J, ZHANG H, *et al.* Levels, characteristics and health risk assessment of VOCs in different functional zones of He-fei [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 160: 301–307.
- [23] 陈丹, 张志娟, 高飞龙, 等. 珠江三角洲某炼油厂苯系物的健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(5): 1961–1970.
CHEN D, ZHANG Z J, GAO F L, *et al.* Study on health risk assessment of aromatic hydrocarbons from a typical oil refinery in Pearl River Delta, China [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(5): 1961–1970. (In Chinese)
- [24] 江楠, 游刚, 刘丹凤, 等. 车内空气中醛类与苯系物散发特性和健康效应[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(34): 433–439.
JIANG N, YOU G, LIU D F, *et al.* Study on emission characteristics and health effects of aldehydes and benzene series in cabin of vehicles [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(34): 433–439. (In Chinese)
- [25] 左金海. 车内挥发性有机物及醛类物质排放评价方式和控制措施[D]. 长沙: 湖南大学, 2014: 10–15.
ZUO J H. Evaluation methods and control measures of vehicle volatile organic compounds and aldehydes [D]. Changsha: Hunan University, 2014: 10–15. (In Chinese)
- [26] KIM K H, SZULEJKO J E, JO H J, *et al.* Measurements of major VOCs released into the closed cabin environment of different automobiles under various engine and ventilation scenarios [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 215: 340–346.
- [27] ZHANG Q J, WU L, FANG X Z, *et al.* Emission factors of volatile organic compounds (VOCs) based on the detailed vehicle classification in a tunnel study [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 878–886.
- [28] ZHU Z Y, LIU X F, XU S J. Research on the interior air quality and pollution control in new vehicles in China [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 804(4): 042080.
- [29] 赖森华, 陈春俊, 闫磊, 等. 基于层次分析法的地铁列车乘客综合舒适度评价体系 [J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(36): 296–301.
LAI S H, CHEN C J, YAN L, *et al.* Comprehensive comfort evaluation system of metro passenger based on analytic hierarchy process [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(36): 296–301. (In Chinese)
- [30] 刘剑, 任和. 基于层次分析法和指标评分标准的民用飞机客舱舒适性评价方法研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27(12): 254–258.
LIU J, REN H. Research on comfort evaluation method of civil aircraft cabin based on AHP theory and index evaluation standard [J]. *Computer Measurement & Control*, 2019, 27(12): 254–258. (In Chinese)
- [31] 刘敬, 余隋怀, 初建杰. 基于主客观综合赋权的民机客舱舒适性评价 [J]. *图学学报*, 2017, 38(2): 192–197.
LIU J, YU S H, CHU J J. The comfort evaluation in civil aircraft cabin based on objective and subjective weighting method [J]. *Journal of Graphics*, 2017, 38(2): 192–197. (In Chinese)
- [32] 聂险峰. 基于韦伯-费希纳定律的车内空气质量分级方法研究 [J]. *汽车工艺与材料*, 2019(6): 5–7.
NIE X F. Research on car interior air quality classification method based on Weber-Fechner law [J]. *Automobile Technology & Material*, 2019(6): 5–7. (In Chinese)
- [33] 石田力, 张伟霞, 陈小方, 等. 汽车制造企业恶臭来源及影响分析 [J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 557–566.
SHI T L, ZHANG W X, CHEN X F, *et al.* Stench sources and impact analysis in automobile making [J]. *Environmental Science*, 2018, 39(2): 557–566. (In Chinese)
- [34] 张曦, 孟海波, 刘文杰, 等. 蔬菜废弃物与畜禽粪便联合好氧发酵挥发性有机物排放特征 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 193–199.
ZHANG X, MENG H B, LIU W J, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds during vegetable residues and livestock manure combined aerobic fermentation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 193–199. (In Chinese)
- [35] 钟广亮, 赵海英, 靳长有, 等. 车内气味评价思路探讨 [J]. *汽车实用技术*, 2019(14): 149–152.
ZHONG G L, ZHAO H Y, JIN C Y, *et al.* Discussion on the idea of vehicle odor evaluation [J]. *Automobile Applied Technology*, 2019(14): 149–152. (In Chinese)
- [36] BRODZIK K, FABER J, GODA-KOPEK A, *et al.* Impact of multisource VOC emission on in-vehicle air quality: test chamber simulation [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 148: 012033.
- [37] 中国汽车健康指数. 中国汽车健康指数车内 VOC 与车内气味测试评价规程 [EB/OL]. (2018–03–30) [2021–09–02]. <http://c-ahi.caeri.com.cn/download/detail?type=1>.
China Automobile Health Index. China automobile health index vehicle VOC and vehicle odor testing and evaluation regulations [EB/OL]. (2018–03–30) [2021–09–02]. <https://c-ahi.caeri.com.cn/download/detail?type=1>. (In Chinese)
- [38] ROBERT W. Book review: colour vision physiology and psychophysics [J]. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 1985, 37(3): 499–501.