

家用车内空气质量动态变化研究

郝红,张广渊,张海龙,徐丽

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 探究家用车内空气污染物质量浓度变化及其影响因素,提出合理净化方法。**方法** 在不同通风方式、不同季节、不同路况及不同净化方式下对甲醛、VOC、CO₂ 的质量浓度进行测试。取人体坐姿呼吸高度 $z=0.75$ m 水平面作为典型断面,运用 CFD 对甲醛的分布情况进行数值模拟。**结果** 甲醛和 VOC 的质量浓度在夏季开启空调内循环时最高,分别为 0.112 mg/m^3 和 0.24 mg/m^3 ;过渡季最低,分别为 0.07 mg/m^3 和 0.15 mg/m^3 ;CO₂ 质量浓度在过渡季达到最高值 $9\ 780\text{ mg/m}^3$ 。所有污染物的质量浓度在开窗通风和空调外循环时低于其他通风模式。**结论** 甲醛在过渡季和开窗通风时分布最稀疏;开启空调外循环与内循环时分布相似,后排乘坐人员的位置更容易出现甲醛的堆积;更大送风速度与更低送风温度会有利于减小车内甲醛质量浓度。活性炭与车载净化器能够起到一定的净化效果。

关键词 家用汽车;甲醛;VOC;CFD;空气品质

中图分类号 TU023

文献标志码 A

Air Quality Dynamic Change and Purification in Household Car

HAO Hong, ZHANG Guangyuan, ZHANG Hailong, XU Li

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to explore pollutants in the car and their influencing factors, and to propose reasonable purification methods, the mass concentration of formaldehyde, VOC and CO₂ were tested under different ventilation modes, different seasons, different road conditions and different purification methods. The cross-section of human sitting breathing height $Z=0.75$ m is taken as a typical cross-section, and formaldehyde, which is more representative in concentration changes according to the test results, is selected to simulate its spatial distribution by CFD. When the internal circulation of the air conditioner is turned on in summer the concentrations of formaldehyde and VOC are highest which are 0.112 mg/m^3 and 0.24 mg/m^3 , and the lowest in the transition season, which are 0.07 mg/m^3 and 0.15 mg/m^3 . The CO₂ mass concentration

收稿日期:2021-12-02

基金项目:国家自然科学基金项目(52078308)

作者简介:郝红(1977—),女,副教授,博士,主要从事室内空气质量净化和除湿空调等方面研究。

reached the highest value of 9 780 mg/m³ in the transition season. The concentration of all pollutants is lower than other ventilation modes when ventilation by opening windows and the air conditioning external circulation. Formaldehyde is most sparsely distributed during the transition season and ventilation by opening windows;the external circulation and internal circulation of the air conditioner are similar in formaldehyde distribution,both of which formaldehyde accumulation are more prone in the position of the rear passengers;greater air supply speed and lower air supply temperature will it is beneficial to reduce the mass concentration of formaldehyde in the car. The use of activated carbon and vehicle-mounted purifier can achieve a certain purification effect.

Key words: family car; formaldehyde; VOC; CFD; air quality

人们的生活和工作越来越离不开汽车,人在车内的驻留时间越来越多。C. C. Chang等^[1]在美国北卡罗来纳州对小汽车在不同的驾驶状态及不同的外环境下进行污染物的测试中发现,城市道路环境下车内 VOC 浓度测量值是乡村道路的 10 倍以上。王晓格等^[2]在 4 个月内先后对 17 辆公交车、33 辆新车车内的 VOC 进行检测,50 辆汽车中只有 2 辆未超过《环境污染控制该规范》(GB 50325—2011)的甲醛限值。美国环保局(EPA)将汽车内污染归为“移动污染源”^[3]。室内甲醛对人主观感受影响较大^[4],中国室内装饰协会空气监测中心曾经对 200 多辆汽车进行车内空气检测实验,其中 90% 的汽车存在甲醛或者苯含量超标问题,且多数超标都在五六倍,实验显示新车车内空气污染超标较为严重^[5]。所谓“驾车综合征”也与这些污染物密切相关^[5-6],所以了解车内微环境的污染情况,并采取针对性措施才能保证人体健康^[7]。笔者在对家用车内空气品质进行动态监测的同时,运用 CFD 技术进行了污染物空间分布数值模拟,并提出合理的通风模式及净化手段。

1 动态监测

被监测车辆为排量为 1.6 L 的三厢自动挡小汽车,车龄 3 年,里程约 20 000 km。甲醛的测试仪器为美国的 Interscan 4160 型甲醛检测仪,其精度达亿分之一^[9]。CO₂、VOC 的测试仪器为美国 TSI 公司生产的手持式室

内空气品质监测仪,型号为 Q—TRAK INDOORAIR QUALITY MONITOR 7575。采样时,探头的布置模拟驾乘人员呼吸摄入污染物时的状态。测试路段:普通路段、拥挤路段。测试季节:夏季、冬季、过渡季。通风方式:开窗通风、空调内循环、空调外循环^[10]。净化方式为:活性炭吸附、车载净化器净化^[11]。每次测试的总时长为 20 min,分为 5 组,每组连续测试 4 min,仪器每 5 s 记录一个数据,取 4 min 内的平均值为数据的最终值。

根据我国《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)、《国家环境友好汽车实施方案》、《乘用车内空气质量评价指南》(GB/T 27630—2011)以及俄罗斯《驾驶室空气中污染物含量实验标准和方法》(P51206—2004),提出车内污染物动态质量浓度限值(见表 1)。

表 1 车内污染物质量浓度限值

Table 1 Dynamic recommended concentration limit for vehicle pollutants

for vehicle pollutants		mg/m ³
$\rho(\text{CO}_2)$	$\rho(\text{VOC})$	$\rho(\text{甲醛})$
3 930	0. 6	0. 12

2 测试结果

图 1 为夏季不同通风工况下的 CO₂ 质量浓度。CO₂ 质量浓度由高到低的排序为:活性炭+空调内循环、空调内循环、净化器+空调内循环、活性炭+空调外循环、空调外循环、净化器+空调外循环、开窗通风。开启空

调内循环时 CO_2 质量浓度达到 $9\,250\text{ mg/m}^3$, 远超建议标准值。开窗通风时 CO_2 的质量浓度最小, 稳定在 900 mg/m^3 。由于活性炭吸附能力有限且短时间内基本达到饱和, 在夏季日照下还会持续释放 CO_2 , 所以活性炭会加大 CO_2 质量浓度。净化器本身不会处理 CO_2 , 但使用净化器会加快车内空气流动, 还能促进车门窗缝隙处的气体交换速率, 故导致测试区域的 CO_2 质量浓度明显变小^[12-13]。当车内乘客较多时, 应避免使用空调内循环和活性炭吸附, 尽可能使用空调外循环或开窗通风^[14-15]。

(见图2)。虽然不同季节 CO_2 的质量浓度呈现趋近的姿态, 但过渡季时 CO_2 的质量浓度高达 $9\,780\text{ mg/m}^3$, 这是由于过渡季车内温度最低, CO_2 质量浓度会因有氧呼吸的剧烈而增多。当夏季温度高时车内 CO_2 质量浓度反而会减少。因此越是车内温度低的时候, 越应注意通风换气, 以减少 CO_2 质量浓度过高对人体造成的不适。

图3为在不同通风工况下 VOC 的质量浓度变化曲线, 其质量浓度由高到低的排序为: 空调内循环、空调内循环+活性炭、空调内循环+净化器、空调外循环、空调外循环+活性炭、空调外循环+净化器、开窗通风。由图3可知, 开窗通风时 VOC 的质量浓度最低, 保持在 0.11 mg/m^3 ; 空调内循环时车内 VOC 质量浓度明显高于外循环且质量浓度, 达到了 0.22 mg/m^3 ; 车载净化器的效果要好于活性炭, 空调内循环时使用车载净化器可使车内 VOC 质量浓度保持在 $0.12\sim 0.14\text{ mg/m}^3$, 空调外循环时使用车载净化器可使 VOC 质量浓度保持在 $0.07\sim 0.11\text{ mg/m}^3$ 。

图1 不同通风方式下 CO_2 质量浓度

Fig. 1 CO_2 mass concentration in different ventilation modes

图2 不同季节空调内循环时 CO_2 质量浓度

Fig. 2 CO_2 mass concentration in air conditioning circulation in different seasons

图3 不同通风方式下 VOC 质量浓度

Fig. 3 VOC mass concentration in different ventilation modes

图4为不同季节开启空调内循环时 VOC 质量浓度对比。由图可知, VOC 的质量浓度在夏季高于冬季, 冬季高于过渡季; 这是由于 VOC 散发量与车内温度成正比, 夏季车内温度最高, 冬季其次, 过渡季时不采取空调供暖, 车内温度最低。过渡季开启空调

内循环时 VOC 质量浓度在 0.15 mg/m^3 以下,夏季开启空调内循环时 VOC 质量浓度最高可达 0.24 mg/m^3 。开启空调外循环或开窗通风后,过渡季的 VOC 质量浓度会明显低于夏季和冬季,这是因为车内较低的温度和车外较大的风速增加了车内换气量,但此时对人员的吹风感过于强烈,所以应空调内外循环结合使用;夏季则尽量选择开窗通风与空调外循环结合使用;冬季空调外循环或内循环与车载净化器结合使用。

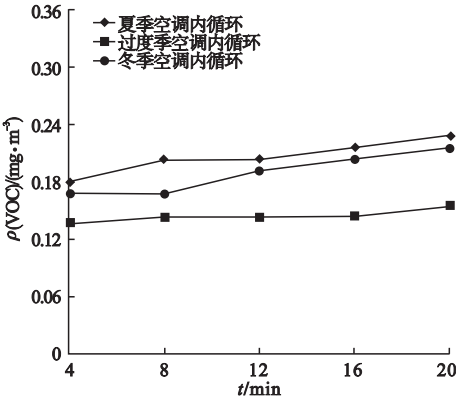


图4 不同季节空调内循环时 VOC 质量浓度
Fig. 4 VOC mass concentration of air conditioning in different seasons

图5为内饰(地毯,座椅表皮等)对车内 VOC 质量浓度的影响。有内饰时 VOC 的质量浓度可达 0.3 mg/m^3 以上,有无内饰时 VOC 的质量浓度最大差值为 0.11 mg/m^3 。

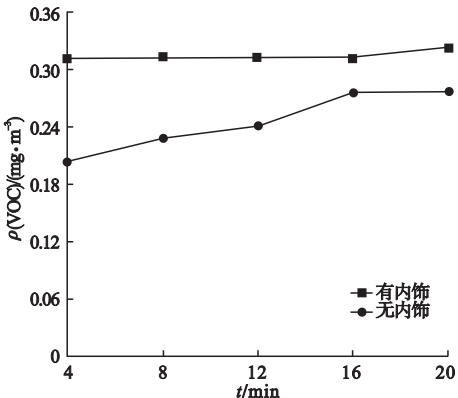


图5 车内有无内部装饰时 VOC 质量浓度
Fig. 5 VOC mass concentration with and without interior decoration

由此可见,车内有内饰时 VOC 质量浓度明显大于无内饰,内饰对车内的空气品质有着相当大的影响,所以应尽量减少内饰的布置。当使用新的座椅靠背、装饰套与地毯时,应尽量在室外放置一定时间,释放其污染物,并除菌净化处理。

图6为在普通路况时不同通风工况下车内的甲醛质量浓度。由于甲醛的计数方式是示数,稳定即读数,且数据繁多,所以采用箱线图进行表示,箱线图从上至下分别为最高值、上四分位、中位数、下四分位、最低值, IQR 表示四分位距离。由图6可知,开窗通风时车内甲醛质量浓度最低,20 min 内平均值保持在 $0.06\sim 0.07\text{ mg/m}^3$ 。空调内循环时车内甲醛质量浓度相对较大,最大值可达到 0.112 mg/m^3 。活性炭与车载净化器起到一定的净化作用,二者的净化效果差别不大。

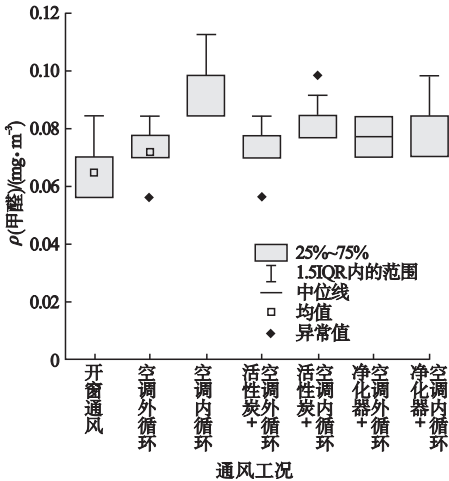


图6 普通路况下不同通风方式时甲醛质量浓度
Fig. 6 Formaldehyde mass concentration in different ventilation modes under common road conditions

图7为拥挤路况时不同通风工况下车内甲醛质量浓度,可以看出,拥挤路况时任何通风工况的甲醛质量浓度都比普通路况要高。由于夏季炎热与道路拥挤的原因,空调外循环的甲醛质量浓度要大于空调内循环,最大值达到 0.14 mg/m^3 ,超出建议的标准值,若长期处于这种环境会对人体造成一定的危

害。空调内循环结合车载净化器时甲醛质量浓度最小,平均值在 $0.07 \sim 0.08 \text{ mg/m}^3$,但也要定时通风换气。

3 CFD 数值模拟与分析

图 9 为被监测车辆的物理模型。该模型设有 9 个换气口。车前方 1 个进风口,车前方 2 个回风口,车后方 2 个出风口与 4 个车窗,其中假定前排 2 个车窗为进风口,后排 2 个车窗为出风口。

控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分质量守恒方程,控制方程及边界条件设定参见文献[16]。

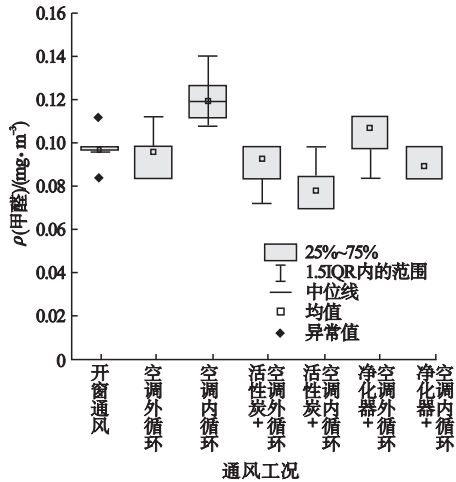


图 7 拥挤路况下不同通风方式时甲醛质量浓度
Fig. 7 Formaldehyde mass concentration in different ventilation modes in crowded road conditions

由于甲醛的散发与温度有关,分析不同季节普通路况下采用空调内循环时甲醛质量浓度情况(见图 8)。由图 8 可知,在夏季时,车内甲醛质量浓度最高值可达 0.112 mg/m^3 ,而过渡季甲醛质量浓度基本保持在 0.07 mg/m^3 以下。所以夏季应交替使用开窗通风与空调外循环,冬季开启空调内循环时可以结合车载净化器使用。

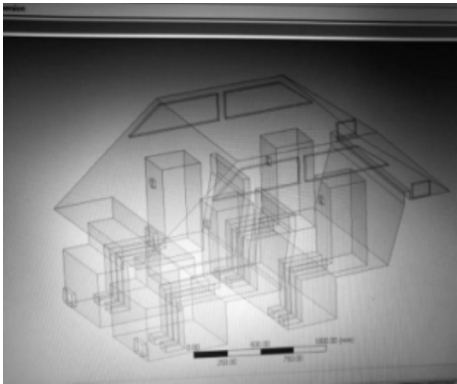


图 9 物理模型透视图
Fig. 9 Physical model perspective

图 10 为同种路段、同一季节、不同通风工况下甲醛在 $z=0.75 \text{ m}$ 水平面的分布。由图 10 可知,相同的条件下,开窗通风时车内甲醛质量分数最小,空调内循环与空调外循环时甲醛质量分数远大于开窗通风情况,且散布范围更大,对于副驾驶和与副驾驶后排乘客,在其口鼻附近的位置均出现了甲醛的堆积;空调内循环与外循环甲醛在空间分布相似,但外循环时甲醛分布更集中在后排靠窗的两侧位置。开窗通风时车内甲醛散布的面积相对较小,主要集中在中间区域以及副驾驶后排位置。所以后排可以适当增添空调出风口,同时后排添加车载净化器。

图 11 为同种路段、同种通风工况、不同季节时甲醛质量分数云图。由图 11 可知,此时甲醛在车内分布的整体差别不大,都是与进风口相对的座椅中间位置甲醛质量分数较

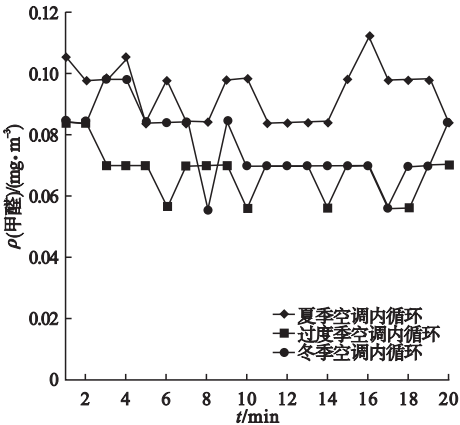


图 8 不同季节空调内循环时甲醛质量浓度
Fig. 8 Formaldehyde mass concentration in air conditioning in different seasons

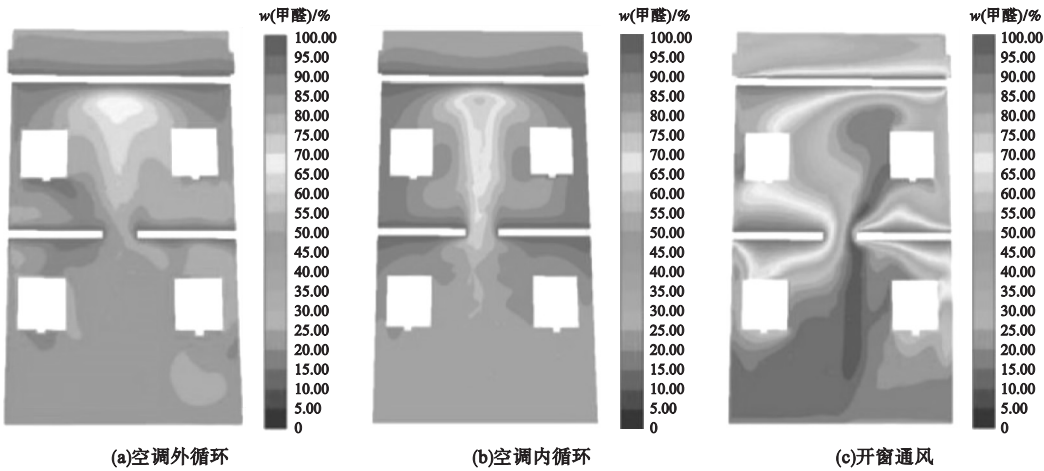


图 10 不同通风方式下甲醛分布云图

Fig. 10 Clouds of formaldehyde mass fraction in different draft type

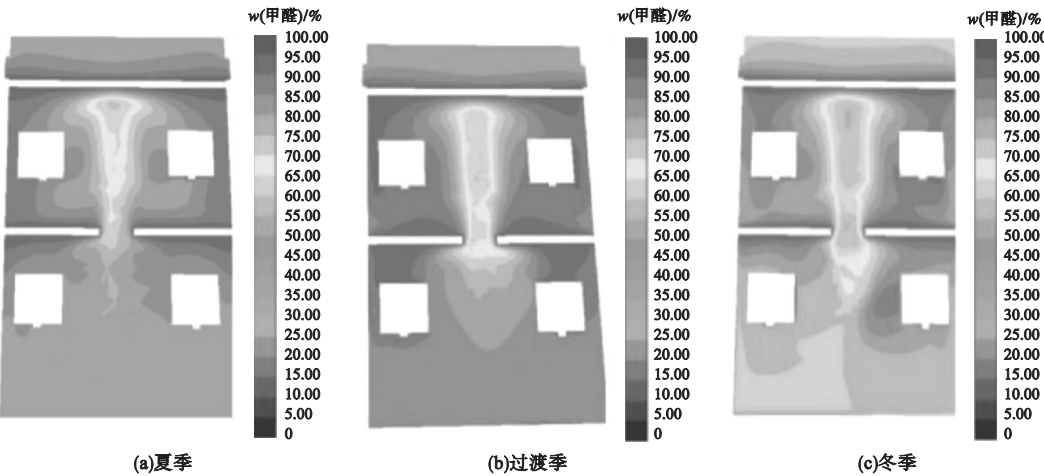


图 11 不同季节下甲醛分布云图

Fig. 11 Clouds of formaldehyde mass fraction in different seasons

小,后排座椅处甲醛质量分数较大。夏季后排两侧靠近窗户的位置容易出现甲醛的聚集。冬季在驾乘人员口鼻处容易形成甲醛的堆积,而过渡季仅在主驾驶后排位置容易形成甲醛堆积。因此,冬季应选择空调外循环通风,在后排位置加大空调送风口的使用频率,并结合车载净化器进行规律地空气净化,夏季应适当开启汽车后排与两侧的空调送风口以防甲醛过度堆积,过渡季若长时间使用空调内循环时,应对后排乘客附近处进行合适的空气净化。

图 12 为不同通风速度时甲醛质量分数

云图。可以看出改变通风速度时,甲醛在车内堆积的区域大体不变;空调送风口送风速度越大,其甲醛在空间内的分布越少,散布的面积也越小;相反送风速度越小,甲醛在车内的空间内的分布越多,散布的面积越大。

图 13 为不同送风温度时甲醛质量分数云图。当改变空调送风温度时,甲醛在空间内容易聚集的区域大体不变。送风温度越高甲醛在空间内的分布越多,散布区域面积越大。相反,送风温度越低,甲醛在空间内的分布越少,散布的面积也越小^[17-21]。

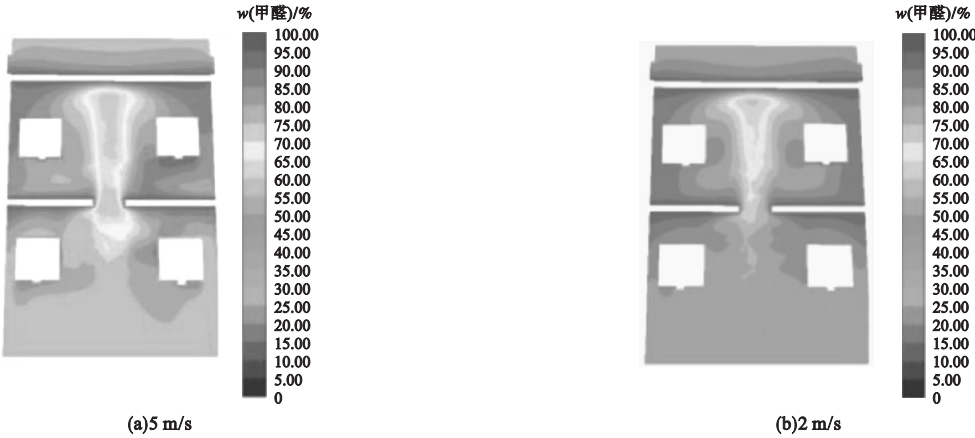


图 12 不同通风速度时甲醛分布云图

Fig. 12 Clouds of formaldehyde mass fraction at different ventilation speeds

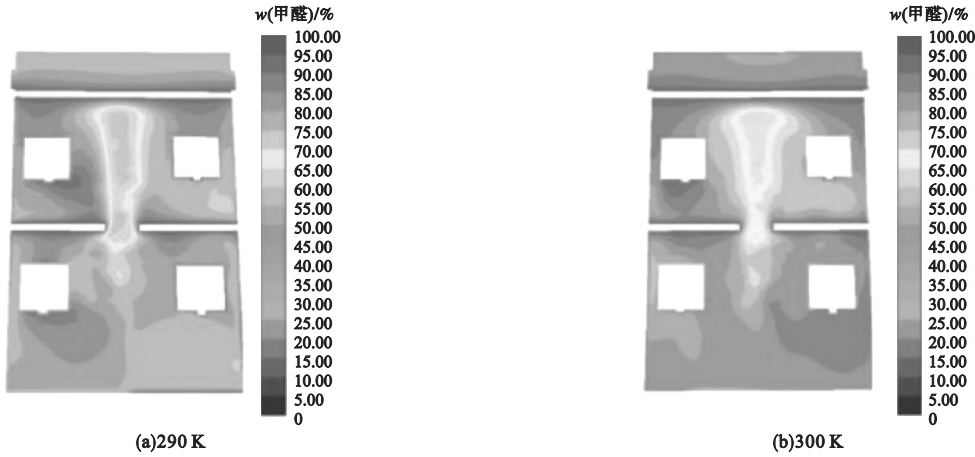


图 13 不同通风温度时甲醛分布云图

Fig. 13 Clouds of formaldehyde mass fraction at different ventilation temperatures

4 结 论

(1)车内的 CO₂ 质量浓度在过渡季最大,冬季其次,夏季最小。使用活性炭吸附 + 空调内循环时最大,开窗通风时最小。

(2)车内的甲醛与 VOC 质量浓度在普通路况下开启空调内循环时最大,开窗通风时最小。甲醛质量浓度在拥挤路况下空调外循环时最大。总体上,有内饰时大于无内饰,拥挤路况大于普通路况。

(3)甲醛在过渡季时空间内分布最为稀疏,主要集中在主驾驶后排位置。冬季车内甲醛则分布范围最广泛,驾乘人员呼吸处都有明显堆积。

(4)甲醛在开窗通风时车内分布最稀疏,仅在中部和靠后排的位置比较明显,外循环与内循环分布相似,散布面积较大,后排乘坐人员的位置更容易出现甲醛的堆积。

(5)送风温度越低,速度越大,甲醛散布的空间越小,散布的量越少。

参考文献

[1] CHANG C C, SPENGLER J D, SHELDON L. Driver exposure to volatile organic compounds, CO, ozone, and NO₂ under different driving conditions [J]. Environment science & technology, 1991, 25: 964 – 972.

[2] 王晓格,赵新建. 车内空气挥发性有机物的检测与限值建议[J]. 环境污染与防治, 2008, 30 (9): 97 – 99.

(WANG Xiaoge, ZHAO Xinjian. Volatile organic compounds detection and analysis in-car [J]. Environmental pollution and prevention, 2008,

- 30(9):97-99.)
- [3] 丁会芳. 道路环境下车舱内颗粒物分布特征及传递机理的研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
(DING Huifang. Study on distribution characteristics and transfer mechanism of particulate matter in vehicle cabin under road environment [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.)
- [4] 邹惠芬, 岳志安, 彭辉, 等. 控制室内甲醛和PM_{2.5}的新风净化系统优化设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 712-719.
(ZOU Huifen, YUE Zhian, PENG Hui, et al. Optimization design of fresh air purification system with formaldehyde and PM_{2.5} controled in purification room [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(4): 712-719.)
- [5] 毛光峰. 汽车车内污染及净化研究[J]. 淮北职业技术学院学报, 2018, 12(6): 115-116.
(MAO Guangfeng. Study on pollution and purification in car [J]. Journal of Huaibei professional and technical college, 2018, 12(6): 115-116.)
- [6] 方勇. 轿车内空气品质的灰色评价方法和控制策略[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
(FANG Yong. Grey evaluation method and control strategy of air quality in car [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005.)
- [7] 李成杰. 乘用车车内空气质量影响因素与评价模式研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
(LI Chengjie. Study on influencing factors and evaluation model of air quality in passenger car [D]. Jiaozuo: He' nan Polytechnic University, 2011.)
- [8] 刘鑫民. 车内污染物的分析评价及净化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
(LIU Xinmin. Analysis, evaluation and purification of pollutants in vehicles [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.)
- [9] 卢磊. 便携式室内甲醛气体检测仪研制[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
(LU Lei. Portable indoor formaldehyde gas detector [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.)
- [10] 舒敏. 轿车车内空气污染性及内饰皮革中甲醛测定方法的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
(SHU Min. Study on air pollution in car and determination of formaldehyde in interior leather [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.)
- [11] 王娟. 动态法测试空气净化器甲醛去除性能的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(1): 137-140.
(WANG Juan. Study on performance of air cleaner to remove formaldehyde by continuous mode [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2011, 5(1): 137-140.)
- [12] 喻娟. 车辆舱内通风模式优化[D]. 广州: 广州大学, 2012.
(YU Juan. Optimization of ventilation mode in vehicle cabin [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2012.)
- [13] 张丽丹, 王晓宁, 韩春英, 等. 活性炭吸附二氧化碳性能的研究[J]. 北京化工大学学报, 2007, 34(1): 76-80.
(ZHANG Lidan, WANG Xiaoning, HAN Chunying, et al. Properties of activated carbon for carbon dioxide adsorption [J]. Journal of Beijing university of chemical technology, 2007, 34(1): 76-80.)
- [14] 王巍程. 机房空调日常使用技巧[J]. 中国有线电视, 2014(2): 207-208.
(WANG Weicheng. Computer room air conditioning daily use skills [J]. China digital cable TV, 2014(2): 207-208.)
- [15] 曾雯. 不同污染源对车内污染物质量浓度的影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
(ZENG Wen. Study on the influence of different sources of pollution on vehicle concentration [D]. Changsha: Hunan University, 2014.)
- [16] 张海龙. 家用轿车内空气品质动态变化及净化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.
(ZHANG Hailong. Analysis of air quality dynamic change in household car [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [17] 谢小亮. 室外颗粒物对室内环境的影响及其控制方法[D]. 南京: 东南大学, 2016.
(XIE Xiaoliang. Influence of outdoor particulate matter on indoor environment and its control method [D]. Nanjing: Southeast China University, 2016.)
- [18] 陈婷. 数据机房精确送风方式的应用研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
(CHEN Ting. Study on the application of accurate air supply mode in data machine room [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014.)
- [19] 曹杰汛. 驻车通风温湿度控制的驾驶室内流场特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
(CAO Jiexun. Study on the characteristics of flow field in cab controlled by ventilation, temperature and humidity [D]. Changchun: Jilin University, 2017.)
- [20] 欧宏银. 办公建筑室内污染物质量浓度场数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
(OU Hongyin. Numerical simulation of indoor pollutant concentration field in office buildings [D]. Chongqing: University of Chongqing, 2013.)
- [21] 凌然. 如何看车内空气质量标准[J]. 汽车与社会, 2012(7): 75.
(LING Ran. How to look at air quality standards in cars [J]. Automobile and society, 2012(7): 75.)
- (责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰)