

大型拖拉机驾驶室 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 净化效果仿真分析

杨 晓^{1,2} 毛恩荣^{1,2} ZHANG Jianshun³ 宋正河^{1,2} 金晓萍^{1,2} 杜岳峰^{1,2}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 现代农业装备优化设计北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 雪城大学机械与计算机工程学院, 雪城 NY 13244)

摘要: 针对大型拖拉机在耕地时封闭驾驶室内可吸入颗粒物 PM₁₀ 质量浓度 (25 770 μg/m³) 超标的问题, 选取不同的空气净化方式 (内循环、外循环空调净化器和外置净化器), 对 PM 浓度微分方程进行了数值仿真分析, 仿真结果表明安装空气净化装置能明显降低驾驶室内可吸入颗粒物的浓度。首先应用质量守恒定律推导了 PM 浓度变化模型和空调净化模型, 随后采用美国 IAQx1.1-PM 软件进行了不同净化方式和不同净化率的仿真分析。仿真结果表明, 内循环和外循环方式的综合相对净化率分别为 92.78% 和 96.13%, 明显降低了驾驶室内 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度, 满足国际人体健康标准的要求; 而且外循环净化方式的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度能维持在 800 μg/m³ 以下, 净化效果最优。外置净化器平均净化率为 48%~66%, 虽然净化效果比较明显, 但不能满足国际人体健康标准的要求。各净化方式的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度变化曲线表明封闭驾驶室内的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度最后可以达到一个稳定值, 并且内循环和外循环的曲线 (约为 1 h) 先于外置净化器曲线达到稳定值。1 h 时采用外循环、内循环、外置净化器和无净化器时的人体累计 PM₁₀ 吸入量分别为 382、832、1 820、2 040 μg; 人体累计 PM_{2.5} 吸入量分别为 321、585、1 290、1 440 μg。人体累计 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 吸入量曲线均呈直线式增长, 并且未安装空气净化装置的人体 PM 累计吸入量曲线的增长率明显快于配有空气净化装置的驾驶室 (内外循环下的增长率最低)。驾驶室空调系统应采用将温度调节装置和空气净化器一体化的 HVAC 空调设计法。

关键词: 大型拖拉机; 封闭驾驶室; 可吸入颗粒物; 净化器; 累计吸入量; 仿真

中图分类号: S219.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298 (2018) 11-0365-07

Simulation of Cleaning Effect of PM₁₀ and PM_{2.5} in High-power Tractor Cab

YANG Xiao^{1,2} MAO Enrong^{1,2} ZHANG Jianshun³ SONG Zhenghe^{1,2} JIN Xiaoping^{1,2} DU Yuefeng^{1,2}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Beijing Key Laboratory of Optimized Design for Modern Agricultural Equipment, Beijing 100083, China
3. College of Engineering and Computer Science, Syracuse University, Syracuse NY 13244, USA)

Abstract: With the dramatically growing use of agricultural high-power tractors, comfort of cab is an important problem in China. Because of the indirect impact with low comfort of cab, the productivity is restricted. Health of tractor drivers was also undermined by low comfort of the cab. High-power tractors play an important role in tilling machine. The PM concentration in ambient air is very high (512 mg/m³). Foreign mainstream tractor comfortable cabs are enclosure cabs to protect PM into cabs. In the field research, enclosure cab can protest PM₁₀ and PM_{2.5} very well except tilling work. The PM₁₀ and PM_{2.5} concentration cannot reach the human healthy standard when tractor is tilling. The foreign research of PM cleaning system in tractor cab is at an initial stage and the research in Chins is empty. So, the PM research is meaningful. The concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} simulation was done based on collection data in other researches. Firstly, the concentration variety model and cleaning model were deduced according to the mass conservation theory. Then, the simulation was done under different cleaning methods (return, supply and free-standing filter) and cleaning efficiency (50%, 75% and 90%) by IAQx1.1-PM. The results showed that the relative cleaning efficiency of return and supply were 92.78% and

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-25
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0700101)
作者简介: 杨晓 (1989—), 男, 博士生, 主要从事农业机械人机工程研究, E-mail: nongdagogogo@cau.edu.cn
通信作者: 毛恩荣 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械设计、液压传动和自动控制研究, E-mail: gxy15@cau.edu.cn

96.13%, respectively. These two methods could reach the international human healthy standard. The PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations in supply method could be lower than $800\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Although the relative cleaning efficiency of free-standing filter was between 48% and 66%, the international human healthy standard still could not be reached. The curve of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations showed that supply method was the fastest to get stable statues (1 h). Finally, the human inhalation exposure was calculated. It was indicated that HVAC design method should be used in comfort cab. This method could save the volume of air conditioner volume and control the temperature and PM concentration.

Key words: high-power tractor; enclosure cab; inhalable particulates; filter; cumulative inhalation; simulation

0 引言

拖拉机在农田作业时,由于农具、土壤及作物的相互作用,会在封闭驾驶室周围产生大量的扬尘^[1-2],其中含有大量的可吸入颗粒物 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ ^[3-4]。ARSLAN 等^[5]测试了 9 种主流封闭驾驶室拖拉机在不同工况时的驾驶室内 PM_{10} 的含量,研究表明封闭驾驶室尽管在隔离其他农业作业时效果显著,但在隔离耕地($25\,770\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)、收获作业($29\,300\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)时产生的 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的效果达不到人体健康标准的要求。因部分驾驶员有吸烟习惯,使得驾驶员呼吸舒适性比较差,均产生咳嗽的情况,大大降低了驾驶员舒适性,间接影响了工作效率。

国外虽然早已在热舒适性方面进行了研究并形成一套热舒适性评价体系^[6-14],但是驾驶室大都采用封闭设计来阻止 PM 进入驾驶室内部,所以驾驶室内部 PM 运动及净化研究很少。国内在拖拉机驾驶室 PM 舒适性方面的研究还处于空白,所以进行驾驶室 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 浓度变化和净化方式的研究对我国大型拖拉机舒适型驾驶室具有一定应用意义。国内对可吸入颗粒物 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 在农业大尺度方面有一定研究基础,陈卫卫^[15]和赵鹏等^[16]测试了农耕时 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 含量比约为 3:5,李瑞敏^[4]和王颖钊^[17]测量了耕地时拖拉机周围产生的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 约为 5.12×10^5 、 $3\times 10^5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。MCBRIAN^[18]通过实验得到 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的一阶沉降速率常数 D_k 约为 0.3、0.2 h^{-1} 。

本文应用国内外文献中收集的 PM 研究基础性数据(如沉降系数和农耕时驾驶室及其周围 PM 含量),结合质量守恒定律推导驾驶室中 PM 浓度变化模型和空气净化模型,仿真拖拉机耕地时不同净化装置(独立净化器、自循环和外循环)对驾驶室 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的净化效果,并在此基础上进一步模拟驾驶员工作时累计吸入 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 量的

变化。

1 基于质量守恒定律的驾驶室 PM 浓度模型

1.1 驾驶室与室内 PM 浓度变化的相似性

可吸入颗粒物 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 在小尺度方面的研究主要集中于室内空气质量的研究,研究表明应用质量守恒定律能较处理好 PM 浓度变化问题。美国环保局在此基础上开发了 IAQx1.1 软件进行室内 PM 浓度模拟,并得到广泛应用^[19]。

由于 PM 浓度变化基本规律由质量守恒定律导出,并且不是在室内的假设条件下推导出的,而且方程中的各项均为 PM 本身的物理量,所以室内与驾驶室 PM 浓度模型相似度很高,只是驾驶室体积相比室内体积小很多,其余本征 PM 的参数数值相同。驾驶室空调系统和空气质量标准均从建筑物室内空气运动的研究引申而来,驾驶室相当于 PM 理论中的单室内区域,可应用 IAQx1.1-PM 软件进行仿真计算。

1.2 驾驶室 PM 浓度模型

当拖拉机在田间工作时,农具和车轮与土地相互作用后会造成拖拉机周围可吸入颗粒物浓度过高,如耕地时驾驶室周围 PM_{10} 质量浓度可达 $512\text{ mg}/\text{m}^3$ ^[13]。由于驾驶室密封性或空调滤网的问题,外界的可吸入颗粒物会进入驾驶室中,造成驾驶员舒适性严重下降^[10-11],影响了工作效率。

根据质量守恒定律可得出驾驶室内部某一种 PM_x 的运动方程为

$$V_i \frac{dC_i}{dt} = pQ_{0i}C_x + \sum_{j=0}^n (1 - E_f) Q_{ji}C_j - \sum_{j=0}^n Q_{ij}C_i + \sum_{k=1}^m (R_k - D_k V_i C_i) - C_i \sum_{l=1}^q Q_l (1 - f_l) \quad (1)$$

式中 n 、 i ——区域数量,0 代表外界,1 代表驾驶室,2 代表空气净化系统
 p ——区域的压强,Pa
 V_i ——区域 i 的体积, m^3
 C_i ——区域 i 的 PM 质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 t ——时间,h

Q_{0i} ——从室外流进驾驶室的某一种 PM 的流量, m^3/h
 C_x ——室外某一种 PM 的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 E_f ——净化器不同位置的空气净化率, %
 Q_{ji} ——区域 j 到 i ($j \neq i$) 的流量, m^3/h
 C_j ——区域 j 的 PM 浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 Q_{ij} ——区域 i 到 j ($j \neq i$) 的流量, m^3/h
 R_k ——驾驶室内第 k 个污染源释放 PM 的速率, $\mu\text{g}/\text{h}$
 D_k ——一阶沉降速率常数, h^{-1}
 Q_l ——流入立式空气净化器的流量, m^3/h
 f_l ——第 l 个立式空气净化器的空气净化率, %
 m ——区域 i 内污染源数量
 q ——区域 i 内独立空气净化器的数量

1.3 驾驶室空调净化模型

空调净化器的安装位置不同,造成净化模型不同。根据净化器安装位置的不同,净化方式可分为内循环(A处)和外循环(B处)两种,其特点均是向驾驶室输送从外界过滤的新鲜空气来净化驾驶室PM浓度,净化方程为

$$Q_{21} = \begin{cases} \frac{N - E_v R Q_{12} E_f C_i}{E_v (C_i - C_{01})} & (\text{A 处}) \\ \frac{N - E_v R Q_{12} E_f C_i}{E_v [C_i - (1 - E_f) C_{01}]} & (\text{B 处}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 E_v ——空调送风口滤网的空气净化率,采用IAQx1.1的默认值, %
 R ——流量循环系数
 C_{01} ——室外PM浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

驾驶室PM浓度变化分析见图1。若净化装置放置A处,则经过净化的一部分驾驶室回风与外界新风混合后从空调出风口流入驾驶室,其余回风排向外界;若净化装置放置B处,则一部分驾驶室回风与外界新风先混合后,再进入净化器过滤,最后从空调出风口流入驾驶室,其余回风排向外界。

图1若只采用外置独立式净化器,则不能将外界新鲜空气输送进驾驶室,PM净化效果较差。

1.4 PM沉降模型

PM沉降速率取决于PM的直径,一阶沉降模型采用LAI等^[20]研究的沉降模型,即式(1)中的第6项。

$$R_{ij} = D_{kj} V_i C_j \quad (3)$$

式中 R_{ij} ——区域 i 中的第 j 种 PM 的沉降速率, $\mu\text{g}/\text{h}$
 D_{kj} ——第 j 种 PM 的一阶沉降速率常数, h^{-1}

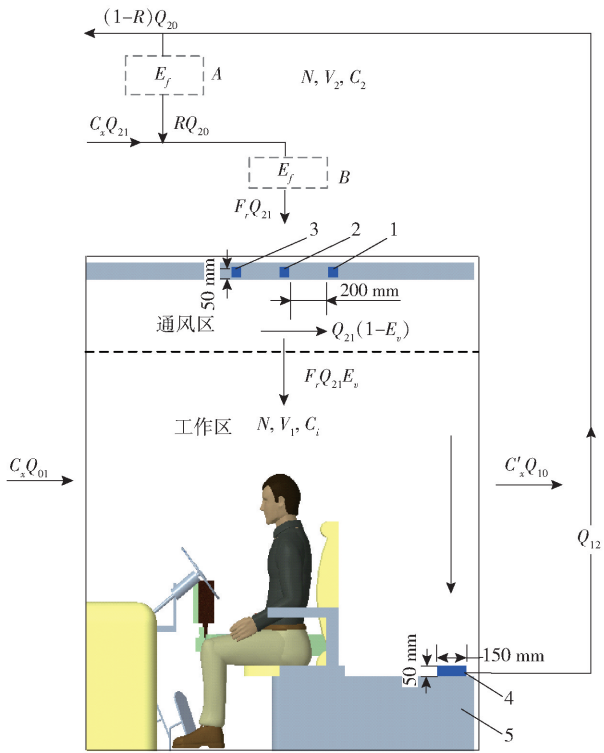


图1 驾驶室空调PM浓度净化分析
Fig.1 Analysis of PM concentration in cab with air conditioner

1,2,3. 空调出风口 4. 回风口 5. 储物箱

1.5 人体累计PM吸入量

采用简化计算的方法,取在有限时间段起止浓度的平均值作为此时间段的PM浓度,再乘以呼吸速率计算得到这个时间段内人体吸入的PM量,再把每个有限时间段累加,得到总时间段吸入人体的PM量。

$$I_x = R_B \sum_{i'=1}^{n'} \frac{(C_{u'} + C_{u'+1})(t_{i'+1} - t_{i'})}{2} \quad (4)$$

式中 I_x ——人体累计吸入PM量, μg
 R_B ——呼吸速率,取10 L/min
 n' ——分割的时间段数量
 $C_{u'}, C_{u'+1}$ ——第 i' 和第 $i' + 1$ 时刻PM质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

1.6 净化率

拖拉机工作时间取8 h。用此刻驾驶室内PM相对浓度表示PM净化效果,其值越大表明PM净化效果越好。

$$\eta = \frac{C_{x8h} - C_{08h}}{C_{08h}} \times 100\% \quad (5)$$

式中 η ——8 h 时驾驶室中 PM_x 浓度净化率, %
 C_{x8h} ——8 h 驾驶室中的 PM_x 质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
 C_{08h} ——无净化器8 h 驾驶室中 PM_x 质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

2 驾驶室PM₁₀和PM_{2.5}净化效果仿真

2.1 驾驶室仿真实验条件及参数设置

依据收集的资料,采用2 m×2 m×2.5 m的驾驶室设计,扣除仪表板操纵装置和储物箱等体积,取驾驶室 V_1 体积为6 m³。空调有3个间距200 mm的出风口和一个回风口。为了简化仿真,不考虑驾驶室内部污染源产生的PM。根据收集的资料,假设外界由于驾驶室密封不严产生流入驾驶室的PM流量为0.13 m³/h,流出的流量认为与其相等;外界PM₁₀和PM_{2.5}的质量浓度分别取 $5.12\times10^5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $3\times10^5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$;各个净化滤网采用相同材料,故净化率也相同。进风速率1 m/s,回风速率2 m/s,驾驶室内初始PM浓度均为0, D_{kPM10} 取 0.3 h^{-1} , $D_{kPM2.5}$ 取 0.2 h^{-1} , i 取1并且不考虑驾驶室中的污染源,其余参数取IAQx1.1-PM默认值。人体健康标准取国际职业安全与健康组织OSHA标准(PM₁₀质量浓度小于15 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、PM_{2.5}质量浓度小于5 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

2.2 仿真设计

为了对比不同净化方式和不同除尘率对驾驶室PM浓度的影响,设计的仿真如下:净化方式选择外置净化器和空调过滤,其空调的净化器安装位置分为A与B;外置独立净化器进流量分别为10、5 m³/h。净化器净化率均分别取50%、75%、90%。用IAQx1.1-PM进行仿真,总仿真时长为20 h,步长为0.1 h,拖拉机工作时间取8 h。

2.3 仿真结果

首先模拟无净化器时驾驶室中PM₁₀和PM_{2.5}的浓度,并依据文献中的调查数据检验模型是否合理。经检验,仿真的PM质量浓度与Selcuk的测量值相差480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,模型认为是合理的。

各个仿真结果见表1。可以看出,不同净化方式下,净化器净化率取75%时,净化效果较无净化器时明显提高且符合健康标准。取90%时净化效果最优,但较75%时的净化率提高不显著,故净化器净化率取75%时,既满足空气质量的要求又满足经济成本的要求。

表1 仿真结果
Tab.1 Results of simulation

净化效果指标	PM种类	无净化器	外置净化器(5 m ³ /h)			外置净化器(10 m ³ /h)			内循环			外循环		
			50%	75%	90%	50%	75%	90%	50%	75%	90%	50%	75%	90%
PM质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	PM _{2.5}	17 610	10 630	8 783	7 944	7 467	5 735	5 032	1 595	1 189	1 032	1 101	636.4	465.2
	PM ₁₀	25 290	15 270	12 610	11 410	10 720	8 237	7 228	2 292	1 708	1 482	1 448	764.6	499.6
净化率/%	PM _{2.5}	0	39.64	50.12	54.89	57.60	67.43	71.43	90.94	93.25	94.14	93.75	96.39	97.36
	PM ₁₀	0	39.62	50.14	54.88	57.61	67.43	71.42	90.94	93.25	94.14	94.27	96.98	98.02
净化率差值%	PM _{2.5}	0		10.48	4.77		9.83	4.00		2.31	0.89		2.64	0.97
	PM ₁₀	0		10.52	4.74		9.82	3.99		2.31	0.89		2.71	1.04
平均净化率/%	PM _{2.5}	0		48.22			65.49			92.78			95.83	
	PM ₁₀	0		48.21			65.49			92.77			96.43	
综合平均净化率		0		48.22			65.49			92.78			96.13	
8 h 累计吸入量/ μg	PM _{2.5}	58 700	40 300	24 700	32 000	30 400	24 200	21 600	7 420	5 580	4 860	5 130	2 990	2 160
	PM ₁₀	84 100	57 900	49 700	45 800	43 500	34 800	31 000	10 600	8 010	6 970	6 730	3 590	2 360

3 驾驶室PM净化仿真结果分析

根据表1仿真结果,驾驶室净化器净化率取75%,对此进行不同净化方式下的仿真数据分析。

3.1 不同净化方式下的PM浓度动态分析

图2为根据仿真数据拟合净化器净化率取75%时,驾驶室内PM₁₀和PM_{2.5}浓度在20 h内的变化指数曲线。由图2可见,各拟合曲线 R^2 均在0.99以上,符合式(1)中的微分方程。内循环和外循环的净化方式能较快(1 h)地使得驾驶室浓度达到恒定,而外置净化方式分别在7 h和9 h以后才能使得驾驶室PM浓度稳定。各净化方式下(内循环、外循环和外置净化方式)驾驶室PM₁₀质量浓度分别稳定

在1 709、765、8 240、12 663 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,PM_{2.5}质量浓度分别稳定在1 189、636、5 736、8 817 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。工作8 h的空调采用外循环时PM₁₀和PM_{2.5}净化率最高(96.13%),内循环比外循环略低(92.78%),但均符合人体健康标准。外置净化器5 m³/h净化效果最差(48.22%)。这是由于式(1)决定了驾驶室PM浓度最后趋于一个稳定值,即达到动态平衡状态。故应该采用外循环净化的方式,此法能有效降低驾驶室内PM浓度。

3.2 基于人体健康标准的不同净化方式下PM浓度仿真分析

人体健康标准取国际职业安全与健康组织OSHA标准(PM₁₀质量浓度小于15 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、PM_{2.5}

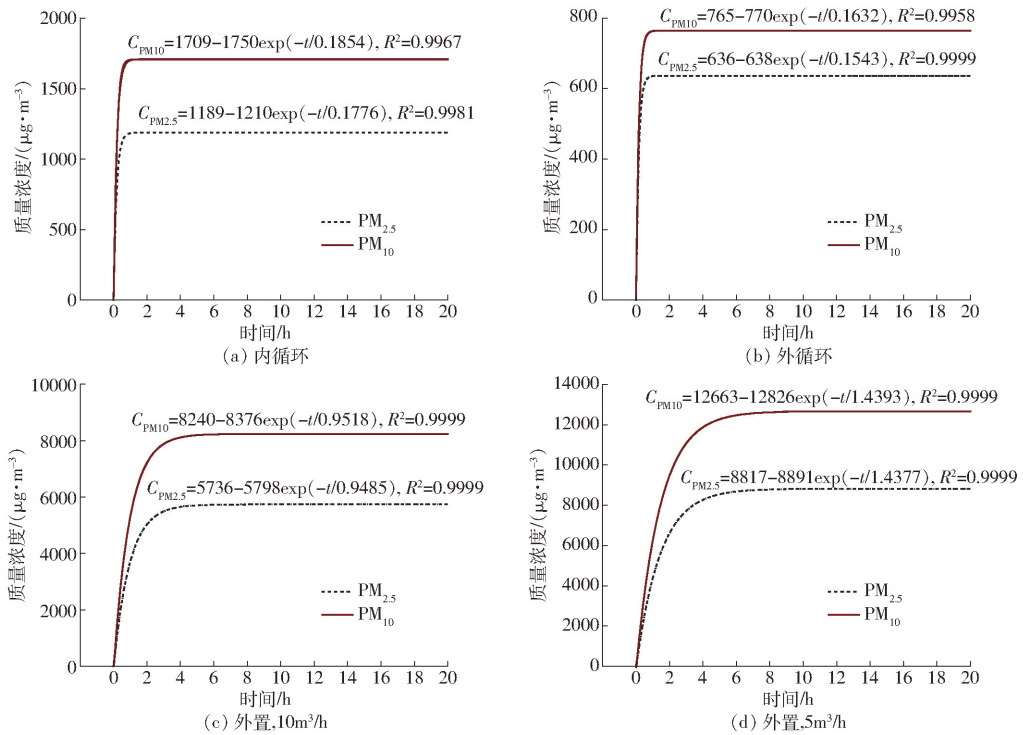


图 2 各净化方式下的 PM 质量浓度变化

Fig. 2 Changes of PM concentration under different cleaning methods

质量浓度小于5 000 μg/m³), 驾驶员工作时间取 8 h,各不同净化方式下 8 h 时的驾驶室 PM 含量见图 3,可知采用净化方式后,驾驶室 PM 浓度均显著降低,但是只有内循环和外循环的净化效果达到了国际人体健康标准。外循环净化器效果最优,此时驾驶室中 PM₁₀ 质量浓度为 636.4 μg/m³、PM_{2.5} 为 764.6 μg/m³。故驾驶室设计时应优先考虑外循环净化方式。这是由于外循环将外界新鲜空气过滤之后输送到驾驶室内,使得空气中 PM 被吹出工作区导致。

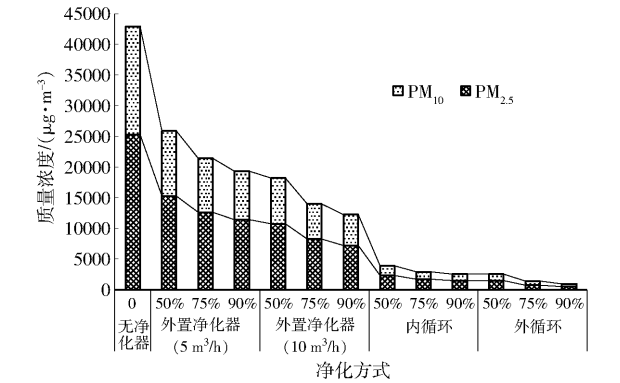


图 3 不同净化方式下驾驶室在 8 h 时的 PM 质量浓度

Fig. 3 PM concentration of cab under different cleaning methods after 8 h

3.3 不同净化方式下净化率差异分析

经过计算可得到不同净化方式下 8 h 的 PM 净化率差值和平均净化率。由表 1 可知,平均净化率由低到高分别为外置净化器、内循环和外循环。

这是因为外循环将外界新鲜空气过滤并输送至驾驶室,而且送风量的设置也可以比外置净化器的大。这也是目前空气净化的主流方式,能达到空气较理想的净化效果,仿真结果的综合平均净化率为 96.13%。从相同净化方式下的净化率差异可看出,净化率取 75% 时的净化效果最经济,净化率为 90% 时并不能显著提高净化率,这是因为滤网的净化能力造成的,但是目前对滤网的研究也有一定进展,等离子和负离子滤网对 PM 过滤效果可达 90% 以上^[21]。外置净化器净化效果最差,这是由于拖拉机耕地时产生的 PM 浓度过高,外置净化器由于没有从外界输送新鲜空气的能力,所以净化效果最差。

4 人体累计 PM 吸入量仿真分析

根据式(4)可得到在 20 h 中不同时刻人体累计 PM₁₀和 PM_{2.5}吸入量变化曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,人体累计 PM₁₀和 PM_{2.5}吸入量呈直线上升,无空气净化装置时,在 1 h 时人体累计 PM₁₀、PM_{2.5}吸入量可分别达 2 300、1 630 μg,并且 1 h 之后 PM 吸入量明显升高,严重危害了驾驶员身体健康。

配有净化装置(净化率 75%)时增长明显放慢。1 h 时采用外循环、内循环、外置净化器和无净化器时的人体累计 PM₁₀吸入量分别为 382、832、1 820、2 040 μg;人体累计 PM_{2.5}吸入量分别为 321、585、1 290、1 440 μg。内外循环的累计 PM 吸入量增长速

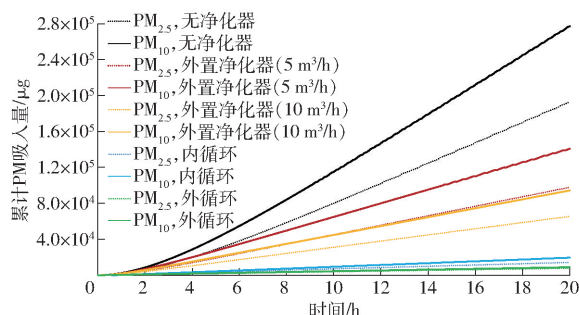


图4 人体累计PM吸入量动态曲线

Fig. 4 Inhaled mass of PM by drivers

度最慢,说明内外循环的净化方式可以有效确保驾驶员的身体健康,这是由于外界新鲜空气进入驾驶室后加快了PM向排风口的运动引起的。

通过上述分析可知,本次仿真参数设置及结果和文献[5,19]相似。净化装置可以与空调集成为现代空调系统 HAVC,使得空气净化与温度控制一体化,不仅不会明显增大空调体积还提高了驾驶室微环境舒适性。

5 结论

(1)仿真结果表明了室内空气 IAQ_{x1.1}-PM 软件应用于驾驶室的合理性和驾驶室配备空气净化装置的必要性。

(2)工作8h的空调采用外循环时PM₁₀和PM_{2.5}净化率最高(96.13%),内循环比外循环略低(92.78%),但均符合人体健康标准。外置净化器(5 m³/h)净化效果最差(48.22%)。

(3)净化器净化率取75%时,8h内的净化效果最经济,不同净化方式的净化率由高至低,PM_{2.5}为96.39%、93.25%、67.43%、50.12%;PM₁₀为96.98%、93.25%、67.43%、50.14%。

(4)1h时采用外循环、内循环、外置净化器和无净化器时的人体累计PM₁₀吸入量分别为382、832、1 820、2 040 μg;人体累计PM_{2.5}吸入量分别为321、585、1 290、1 440 μg。之后累计PM吸入量均呈直线式增长,但是内外循环时的增长率最低。

参 考 文 献

- 钟文杰,徐红梅,徐奥.基于CATIA的拖拉机驾驶室人机系统舒适性分析与评价[J].江苏大学学报(自然科学版),2017,38(1):47-51.
ZHONG Wenjie, XU Hongmei, XU Ao. Comfort analysis and evaluation of man-machine system in tractor cab based on CATIA[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2017, 38(1): 47-51. (in Chinese)
- 章倩,朱思洪.拖拉机驾驶室舒适性满意度情况调查研究[J].拖拉机与农用运输车,2009,36(5):3-5.
ZHANG Qian, ZHU Sihong. Investigation and research on satisfaction about tractor cab comfort[J]. Tractor and Farm Transporter, 2009, 36(5): 3-5. (in Chinese)
- 赖志强.半干旱区农田地表粉尘释放影响因素及应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2011.
LAI Zhiqiang. Study on the impact factors and applications of dust emission in semi-arid farmland areas[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese)
- 李瑞敏.东北地区农业源PM₁₀排放清单研究[D].长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2015.
LI Ruimin. Development of an agricultural PM₁₀ inventory for northeastern China[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- ARSLAN S, AYBEK A, EKERBIÇER H. Measurement of personal PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ exposures in tractor and combine operations and evaluation of health disturbances of operators[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2010, 16(2): 104-115.
- MOYER E S, HEITBRINK W A, JENSEN P A. Test for the integrity of environmental tractor cab filtration systems[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2005, 2(10): 516-523.
- BOHM M, BROWÉN A, NOREN O, et al. Evaluation of the thermal environment in tractor cabs[C]//International Conference on Environmental Ergonomics IV, 1990: 144-146.
- TURNQUIST P K, THOMAS J C. The subjective response of males to comfort under controlled tractor cab environment[J]. Transactions of the ASAE, 1976, 19(3): 402-404.
- RUŽIĆ D, ČASNJI F. Agricultural tractor cab characteristics relevant for microclimatic conditions[J]. Journal of Applied Engineering Science, 2011, 9(2): 323-330.
- GUPTA C P, ABBAS A, BHUTTA M S. Thermal comfort inside a tractor cab by evaporative cooling system[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(6): 1667-1675.
- LUNDSTRÖM D, NEVARANTA T, HANSON L, et al. Visualization of comfort and reach in cab environment[C]//40th Annual Conference of the Nordic Ergonomics Society, 2008.
- 金信琴,王大印.浅析工程机械驾驶室人机工程学发展现状及趋势[J].黑龙江科技信息,2013(7):104-118.
JIN Xinqin, WANG Dayin. The develop trend of engineering machinery cab with ergonomics[J]. Scientific and Technological Innovation, 2013(7): 104-118. (in Chinese)
- 郑艳玲.人机工程学在轿车驾驶室设计中的应用研究[D].长春:长春理工大学,2008.
ZHENG Yanling. The application study of man-machine engineering in sedan's cab[D]. Changchun: Changchun University of

- Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- 14 NILSSON H O, HOLMER I. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models[J]. *Indoor Air*, 2003, 13(1): 28–37.
- 15 陈卫卫. 农业土壤耕作大气颗粒物排放研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(7): 1225–1232.
CHEN Weiwei. Research progress in atmospheric particulate matter emissions from agricultural tillage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(7): 1225–1232. (in Chinese)
- 16 赵鹏, 朱彤, 梁宝生, 等. 北京郊区农田夏季大气颗粒物质量和离子成分谱分布特征[J]. *环境科学*, 2006(2): 193–199.
ZHAO Peng, ZHU Tong, LIANG Baosheng, et al. Characteristics of mass distributions of aerosol particle and its inorganic water-soluble ions in summer over a suburb farmland in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2006(2): 193–199. (in Chinese)
- 17 王颖钊. 西北半干旱区城郊农田地表粉尘释放模型的初步研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
WANG Yingzhao. Preliminary studies of dust emission model from farmland in northwest semiarid areas[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009. (in Chinese)
- 18 MCBRIAN J. Test methods to characterize particulate matter emissions and deposition rates in a research house[J]. *Air and Waste Management Association-Publications-Vip*, 2000, 98: 319–331.
- 19 GUO Z. Development of a windows-based indoor air quality simulation software package[J]. *Environmental Modelling and Software*, 2000, 15(4): 403–410.
- 20 LAI A C K, NAZAROFF W W. Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2011, 31(4): 463–476.
- 21 吴兆波, 郭强, 王金良, 等. 置换通风下不同风速对负离子净化 PM_{2.5} 的研究[J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(6): 37–41.
WU Zhaobo, GUO Qiang, WANG Jinliang, et al. Research on the effect of different air supply velocities on the negative ions purification for PM_{2.5} under displacement ventilation[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(6): 37–41. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 341 页)

- 13 张小栓, 孙格格, 杨林, 等. 葡萄冷链品质的时间-温度指示器模糊推理预测[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 315–321. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170837&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.037.
ZHANG Xiaoshuan, SUN Gege, YANG Lin, et al. Time-temperature indicator fuzzy reasoning prediction for grape cold chain quality sensing[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 315–321. (in Chinese)
- 14 ANBUKARASU P, SAUVAGEAU D, ELIAS A L. Time-temperature indicator based on enzymatic degradation of dye-loaded polyhydroxybutyrate[J]. *Biotechnology Journal*, 2017, 12(9): 1–9.
- 15 TAOUKIS P S, LABUZA T P. Time-temperature indicators (TTIs)[M]//AHVENAINEN R. *Novel food packaging techniques*. Cambridge, Woodhead Publishing Ltd., 2003: 103–126.
- 16 KIM K, KIM E, LEE S J. New enzymatic time-temperature integrator (TTI) that uses laccase[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 113(1): 118–123.
- 17 ZHENG Y, ZHANG W T, YI W, et al. Development and application of time-temperature indicators used on food during the cold chain logistics[J]. *Packaging Technology & Science*, 2013, 26(Sup. 1): 80–90.
- 18 LABUZA T P, SHAPERO M. Prediction of nutrient losses[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1978, 2(2): 91–99.
- 19 JAISWAL A K, ABU-GHANNAM N. Degradation kinetic modelling of color, texture, polyphenols and antioxidant capacity of York cabbage after microwave processing[J]. *Food Research International*, 2013, 53(1): 125–133.
- 20 KWOLEK W F, BOOKWALTER G N. Predicting storage stability from time-temperature data[J]. *Food Technology*, 1971, 25(10): 51–63.
- 21 MA C, XIAO X, ZHU Z, et al. Contour diagram-based evaluation on logistics stability of table grapes under variable temperature[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2016, 39(4): 391–399.