

# 基于实际大气颗粒物环境的口罩防护作用研究

姜玫婕<sup>1</sup> 张鹏<sup>2</sup> 宫继成<sup>1,†</sup>

1. 北京大学环境科学与工程学院环境健康系, 北京 100871; 2. 北京市劳动保护科学研究所, 北京 100054;

† 通信作者, E-mail: jicheng.gong@pku.edu.cn

**摘要** 选取5种口罩对北京市不同污染程度的真实环境中4种大气颗粒物的防护作用进行分析, 研究颗粒物粒径、口罩种类、吸气流速和环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度对口罩防护作用的影响。结果表明, 4种因素均对口罩防护作用具有显著影响。口罩的颗粒物防护作用呈现随颗粒物粒径增加而升高的趋势。4种KN95或KN90口罩对实际大气颗粒物的防护作用可以达到80%, 一次性医用外科口罩的防护作用远低于以上4种。气体流速也显著地影响口罩的防护作用, 可能是由于在不同流速下滤料性能和泄漏率的差异。环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度对不同口罩防护作用的影响较为复杂, 未呈现简单的相关性。

**关键词** 大气颗粒物; 口罩; 防护作用; 影响因素; 实际大气

## Study on Filtration Efficiency of Facemask for Atmospheric Particulate Matter in Real Environment

JIANG Meijie<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, GONG Jicheng<sup>1,†</sup>

1. Department of Environmental Health, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2. Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054; † Corresponding author, E-mail: jicheng.gong@pku.edu.cn

**Abstract** Five kinds of respirators were selected to analyze the protective performance of four kinds of atmospheric particulate matter in the real environment of Beijing with different pollution levels, and the effects of particle, respirator types, inspiratory flow rate and atmospheric PM<sub>2.5</sub> concentration on the protective performance of respirators were studied. The results showed that the four factors had significant effects on the protective performance of the facemasks. The particle protective performance of facemasks increased with the increase of particle size. The protective performance of four types of KN95 or KN90 facemasks for actual atmospheric particles could reach 80%, while the protective performance of disposable medical surgical facemasks was far lower than the above four types. The inspiratory flow also significantly affected the protective performance of the facemask, possibly due to the difference in filter material performance and leakage rate at different flow rates. The influence of atmospheric PM<sub>2.5</sub> concentration on the protective performance of different facemasks was complex and there was not a simple correlation.

**Key words** atmospheric particulate matter; facemasks; filtration efficiency; influencing factors; real environment

大气细颗粒物是最受关注的空气污染物之一。大量流行病学研究表明, 颗粒物暴露与多种不良健康结局存在关联, 如肺癌、慢性肺阻塞疾病、急性呼吸道炎症和哮喘等呼吸系统疾病, 缺血性心脏病和动脉粥样硬化等心脑血管系统疾病, 以及肥胖、糖尿病和代谢综合征等代谢性损伤。据2017年全

球疾病负担(Global Burden of Disease, GBD)研究估计, 暴露于空气动力学等效直径小于2.5 μm的颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)与约420万例过早死亡显著相关, 其中我国约110万例早亡与PM<sub>2.5</sub>暴露有关<sup>[1]</sup>。

目前, 中国环境大气中PM<sub>2.5</sub>浓度仍处在较高水平。2015—2019年, 我国PM<sub>2.5</sub>浓度年均值达到

42.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 北部地区年均值可达 58.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  [2]。因此, 在污染天气下, 公众采用防护措施(如佩戴口罩和开启空气净化器)来减少颗粒物暴露十分必要。在室外环境中, 佩戴口罩是最方便最经济的个体防护措施[3]。研究发现, 佩戴口罩会对血压和心率变异性等短期健康效应产生积极影响[4]。我国防雾霾口罩性能测试和评价是基于国家标准 GB 2626—2006/2019《呼吸防护用品——自吸过滤式防颗粒物呼吸器》和 GB/T32610—2016《日常防护型口罩技术规范》。尽管市售防雾霾口罩大多具有较高的实验室检测过滤效率, 但用于实际环境中时, 口罩的防护效果会受到各种环境因素干扰和佩戴者脸型及佩戴方式的影响, 难以达到实验室标准测试的最佳过滤效率。例如, Guan 等[5]在遵循 NIOSH 准则的实验室测试中发现, 所有 6 种类型的口罩均满足 N95 要求, 效率为 97.2%~99.4%, 但在过滤直径为 5.6~560 nm 的环境 PM 时, 最有效的口罩仅去除 75% 的颗粒, 而最差的一种口罩仅去除 48% 的颗粒。

近年来, 各种防雾霾口罩层出不穷, 口罩的颗粒物防护作用及其影响因素已成为研究热点[6-7]。现有研究通常采用搭建人头模型或招募志愿者佩戴口罩进行小规模实验, 主要关注口罩类型、颗粒物的粒径范围、空气污染程度、口罩的贴合程度、呼吸流量及频率等因素对口罩防护作用的影响[8-10], 为了解口罩的防护作用及其主要影响因素等提供了重要的实验依据。但是, 有关口罩实际防护作用的基础研究相对较少[6], 且多数研究在实验室条件下使用氯化钠、柴油排放物、石蜡油或标准聚苯乙烯乳胶球等模拟大气颗粒物进行测试[9,11]。当参照相关标准(如 GB 2626—2006/2019 和 GB/T32610—2016)规定的检测方法对口罩防护作用进行评价时, 由于没有考虑实际大气中其他影响因素, 实验室测试结果往往无法准确地反映口罩对实际大气中颗粒物的防护作用。在实际环境中, 口罩对各类颗粒的

防护作用不能一概而论, 首先是因为不同粒径颗粒以及不同性质颗粒物的穿透性能差别很大; 其次, 大气颗粒物是一种非常复杂的混合物, 具有很强的空间和时间变异性。因此, 根据不同的颗粒物粒径评估口罩的防护作用具有重要的科学意义。

基于上述背景, 本研究选取 5 种具有代表性的口罩作为研究对象, 在北京大学校园内实际大气环境中进行人头模型模拟实验, 旨在研究口罩类型、大气颗粒物粒径、吸气流速和大气环境  $\text{PM}_{2.5}$  浓度 4 个因素对口罩防护作用的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 测试口罩

本研究选择 5 种不同的口罩进行测试, 包括 4 种防雾霾畅销口罩和一种经常用于医疗机构和实验室的医用外科口罩, 详细信息列于表 1, 外观如图 1 所示。

### 1.2 实验仪器

主要仪器包括 Grimm 11D 便携式气溶胶粒径谱仪(德国 Grimm)、气泵(DOA-P504-BN, 美国嘉仕达无油隔膜真空泵)、质量流量计(DFC10-1/4-N2-30SLM-B01, 北京弗罗斯科技有限公司)和中国人头模型(GB2626-2019 中号头模, 北京市劳动保护科学研究所)。

### 1.3 测试方法

于冬季采暖期间(2020 年 12 月至 2021 年 3 月),

表 1 5 种口罩的详细信息  
Table 1 Details of five brands of facemasks

编号	口罩型号	设计	标准
A	3M 3200	有呼吸阀, 头戴式, 更换滤芯(3701CN)	KN95
B	3M 9501V+	有呼吸阀, 耳戴式	KN95
C	3M 9002	无呼吸阀, 头戴式	KN90
D	H910Plus	有呼吸阀, 耳戴式	KN95
E	一次性医用外科口罩	无呼吸阀, 耳戴式	—



图 1 实验用 5 种口罩

Fig. 1 Five brands of facemasks tested in this study

基于人头模型评估不同的空气质量情况下口罩对大气污染物的防护作用,  $PM_{2.5}$  浓度为  $8\sim 160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 实验装置如图 2 所示。本研究中, 颗粒物防护作用指当模拟口罩实际佩戴的状态和方式时, 口罩对颗粒物的去除率。测试条件如下: 口罩的装置离地面 1.5 m 高, 与人体呼吸道高度基本上吻合; 用微型气泵控制气流, 根据《中国人群暴露手册(成人卷)》中的中国城市人群轻微和轻度活动时的平均短期呼吸量 8 L/min 和 22 L/min, 通过质量流量计来设定气体流量。每次实验中使用的都是未开封的新口罩。实验前, 操作人员尽可能正确佩戴和压紧边缘, 保证口罩与面部贴合紧密, 确认口罩的贴合性良好。实验中, 两个提前相互校准过的 Grimm 便携式气溶胶粒径谱仪分别在口罩内、外同步测 4 种颗粒物( $PM_{10}$ ,  $PM_4$ ,  $PM_{2.5}$  和  $PM_1$ ) 的质量浓度。测量环境浓度的颗粒计数器的取样管放置在远离人头模型呼气口的位置, 防止气流干扰污染物测量。每次测量 30 分钟。每次实验开始前, 至少提前 30 分钟测量环境  $PM$  浓度, 待仪器示数稳定后进行测试。实验中实时监测环境湿度, 确保仪器运行稳定。在不同的  $PM_{2.5}$  浓度(8, 10, 11, 13, 14, 28, 42, 63, 74, 75, 117, 150 和  $160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 下共进行 13 天实验, 获得 520 次实验结果。

### 1.4 数据分析

本研究中, 口罩的颗粒物防护作用通过计算实际大气中口罩内外颗粒物质量浓度差得到, 计算公式为

$$\eta = (C_{\text{out}} - C_{\text{in}}) / C_{\text{out}} \times 100\%$$

式中,  $\eta$  表示口罩的颗粒物防护作用,  $C_{\text{out}}$  为环境大气中颗粒物质量浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $C_{\text{in}}$  为佩戴后口罩腔内颗粒物质量浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。对数据进行 Shapiro-Wilk

正态性检验, 数据结构均符合正态分布。使用多因素方差分析方法, 分别比较 5 种口罩、4 类颗粒物粒径、4 种污染天气以及吸气流速对防护作用的影响, 然后采用 S-N-K 法对各类因素不同水平的均值进行比较。运用 IBM<sup>TM</sup> SPSS Statistics 22 (SPSS Inc.) 进行数据分析。

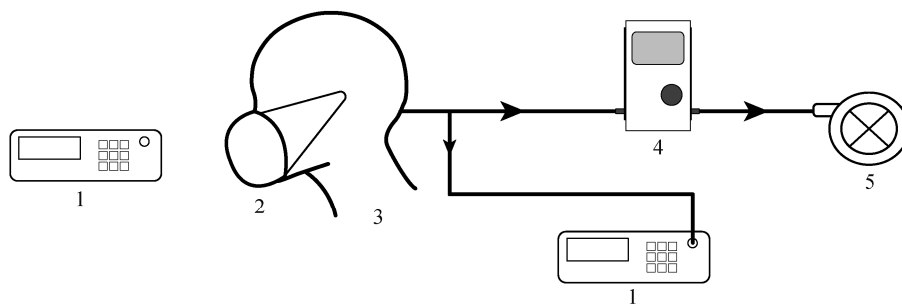
## 2 结果与讨论

### 2.1 各种口罩的防护作用

图 3 展示 5 种口罩对 4 类颗粒物在实际大气中的防护作用。可以看出, KN95 和 KN90 口罩都具有非常强的防护作用( $\geq 80\%$ ), 其中口罩 C 的防护作用最强, 对  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_4$  和  $PM_{10}$  的防护作用均值分别为 87.11%, 87.28%, 88.74% 和 90.78%。其次为口罩 B、口罩 D 和口罩 A。口罩 E (医用外科口罩) 对  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$  和  $PM_4$  的防护作用最弱, 均值在 60% 左右, 对  $PM_{10}$  的防护作用可以达到 72.13%。对于 4 类颗粒物, 颗粒物粒径大小与口罩防护作用正相关。

### 2.2 颗粒物粒径、口罩类型和吸气流速对口罩防护作用的影响

如表 2 所示, 对 4 种颗粒物  $PM_1$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_4$  和  $PM_{10}$  的防护作用均值分别为 78.22%, 79.10%, 81.46% 和 84.51%。多因素方差分析结果发现, 对所有口罩, 颗粒物粒径显著影响口罩的防护作用 ( $P < 0.05$ )。两两比较的结果显示,  $PM_{10}$  与  $PM_{2.5}$  和  $PM_1$  的去除率间均存在显著的差异 ( $P < 0.05$ ), 表明口罩的颗粒物防护作用受颗粒物粒径的影响, 且均表现出随着颗粒物粒径增加, 防护作用也随之增加的趋势。与刘博羽等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。Stevens 等<sup>[12]</sup>通过对不同防护类型口罩测试发现, 颗粒物粒径大于  $0.3\ \mu\text{m}$  时, 颗粒物粒径与口罩防护作用正相



1. Grimm 11D 便携式气溶胶粒径谱仪; 2. 口罩; 3. 人头模型; 4. 质量流量计; 5. 气泵

图 2 人头模型实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of model

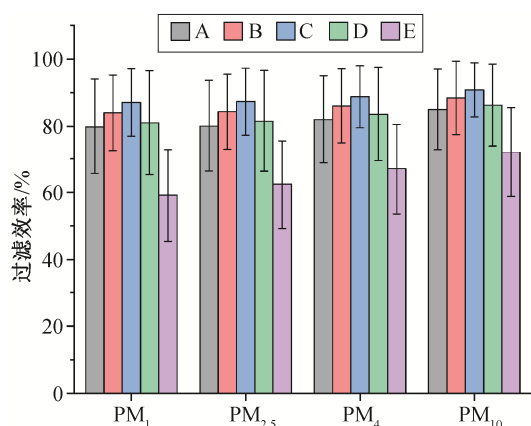


图3 不同口罩类型对不同颗粒物防护作用的比较  
Fig. 3 Comparison of filtration efficiency of different facemasks for different particulate matter

表2 防护作用的影响因素分析  
Table 2 Analysis of the influencing factors of filtration efficiency

影响因素	$\eta/\%$	$F$	$P$	
口罩类型	A	81.69±13.22	65.225	0.000
	B	85.68±11.07		
	C	88.48±9.34		
	D	83.05±14.24		
	E	65.21±14.09		
颗粒物粒径	PM <sub>1</sub>	78.22±16.25	4.145	0.007
	PM <sub>2.5</sub>	79.10±15.30		
	PM <sub>4</sub>	81.46±14.27		
	PM <sub>10</sub>	84.51±13.01		
呼气流速(L/min)	22	82.38±14.49	9.863	0.002
	8	79.26±15.20		
PM <sub>2.5</sub> 浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	1~35	83.52±11.91	8.120	0.000
	36~75	81.54±15.14		
	76~115	73.40±21.07		
	>115	78.37±15.09		

关。He等<sup>[13]</sup>发现颗粒物粒径越大,在口罩上被拦截的可能性越大,口罩对其去除率也越大。Gao等<sup>[14]</sup>也发现,气溶胶颗粒大小对口罩的防护作用有显著影响。造成这一结果可能的原因是较大粒径的颗粒物可能会被滤料更有效地截获,而且不太可能通过边缘泄漏而进入口罩腔内<sup>[15]</sup>。不同粒径颗粒物防护作用的差异与口罩的防护机理有关。口罩防护水平的主要影响因素之一是滤材的过滤效率。滤材捕集颗粒物的机理主要有5种:重力沉降作用、拦截作用、扩散捕集作用、惯性捕集作用和静电捕集作

用。粒径较大的颗粒物主要受惯性撞击和拦截作用影响,随着颗粒物粒径减小,这两种作用降低。扩散作用和静电作用对小颗粒物的影响大,颗粒物粒径越大,作用越弱。因此,对于粒径 $\leq 0.1\ \mu\text{m}$ 的超细颗粒物,依靠滤料的密集纤维网状结构的拦截作用效果不明显,布朗扩散捕集和静电原理是口罩截留这类颗粒物的主要作用机制。对于粒径在 $1\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒物,依靠滤料的密集纤维网状结构的拦截作用和惯性效应捕集效果明显,且粒径越大,捕集效果越好<sup>[16]</sup>。另一方面,不同颗粒物的边缘泄漏和滤料穿透率的差异可能引起防护作用的差异。边缘泄漏指污染物通过口罩边缘和脸部之间小间隙的泄漏,泄漏的程度取决于脸部大小和形状、面部毛发、口罩的设计和佩戴方式等因素,部件间的连接(如呼气阀及其与罩体的连接等)均有可能产生泄漏。Grinshpun等<sup>[9]</sup>研究了通过边缘渗漏以及穿过滤料两种途径,结果表明,通过被测口罩边缘泄漏的颗粒数量远远超过穿过滤料的颗粒数量,且随着PM粒径从 $0.03\ \mu\text{m}$ 增至 $1\ \mu\text{m}$ ,通过边缘泄漏率和滤料的穿透率均下降。Cherrie等<sup>[17]</sup>让志愿者分别佩戴4种口罩,在实验室内暴露于柴油废气中久坐和活动,持续监测口罩内外的炭黑浓度,发现每个口罩材料的平均渗漏率在 $0.26\%\sim 29\%$ 之间,只有一种口罩的平均泄漏率小于 $10\%$ 。一项针对火山灰的呼吸防护研究还发现,对受试者实际佩戴口罩进行总向内泄漏率(TIL)测试时,与具有类似过滤能力的其他材料制成的面罩相比,行业认证的N95或N99等效面罩的表现最佳<sup>[10]</sup>。

从5种口罩对4种颗粒物的防护作用平均值(图3)可以看出,除了一次性医用外科口罩外,其余4类口罩对4类颗粒物的防护作用均值均在 $80\%$ 以上。5种口罩对不同粒径颗粒物的防护作用也有显著差异,对于所有的颗粒物,平均防护作用由高到低排序为3M 9002, 3M 9501V+, H910Plus, 3M 3701CN和一次性医用外科口罩。一次性医用外科口罩对颗粒物的防护作用显著低于其余4种口罩( $P<0.05$ ),可能是滤材的差异性导致。实验中,符合国家GB 2626—2006/2019标准的KN95或KN90级别的A, B, C, D 4种口罩的滤材由多层无纺布、静电棉层和熔喷布等组成,能够有效地滤除空气中的颗粒物,防护作用均较强;一次性医用外科口罩的滤材层数较少,对颗粒物过滤效率相对较低。另一方面,可能是口罩产品的款式结构差异导致防护作用的差

异。在佩戴状态下,医用外科口罩与佩戴者面部之间的密合性(决定边缘泄漏率)较差,根据流体力学原理,气流优先流向阻力小处,当口罩与面部密合不好时,气流直接穿过这些缝隙而不通过滤材,导致颗粒物漏入或被吸入,即使滤材的过滤效率很高,口罩产品的整体防护水平依然很低<sup>[6]</sup>。A类口罩以橡胶材质为主,贴脸部分的适应性强,可以有效地防护鼻梁两侧和下巴,有效地阻拦小颗粒污染物进入。B、C和D类口罩均有可调节鼻夹,可以增强口罩与面部的密合性,边缘泄漏率减小,其中D类口罩的鼻夹条为内部可调节式,气密性相对较差。本研究结果其他探究不同类型口罩对颗粒物透过率影响研究的结果十分类似,如Cherrie等<sup>[17]</sup>研究9种口罩对PM<sub>2.5</sub>和黑碳的透过率,发现3M 9001和3M 9501有较好的去除效果。Bowen<sup>[18]</sup>也使用人头模型和NaCl气溶胶测试过滤效率,得到如下结果:某种防尘口罩为6%,头巾为11%,外科口罩为33%,N95口罩为90%。

我们发现,气体流速也显著影响口罩的防护作用,可以通过滤料性能和泄漏率变化来解释。Zou等<sup>[19]</sup>发现,在室外环境中,随着空气流量从12.5 L/min增加到30 L/min,大多数口罩对0.37~19.8 μm颗粒物的实际防护作用略有变化,其中N95-9010和N95-9042略有升高,N95-9031和外科口罩略有下降。这种差异可能是由于口罩的过滤材料不同所致,或者不合适的佩戴方式导致泄漏和颗粒穿透,从而降低防护作用。因此,调整口罩佩戴的贴合性在实现高保护性能中起着重要作用。有研究发现,虽然吸入流量的增加导致燃烧颗粒物以及NaCl颗粒的滤材穿透率增加,但可以通过在相对较高的呼吸速率下边缘泄漏的减少来解释总过滤效率的下降<sup>[14]</sup>。He等<sup>[20]</sup>发现,平均吸气流量增加与泄漏量的降低有关( $P < 0.05$ )。其他针对口罩性能的研究表明,随着呼吸流量的增加,内向渗漏减少<sup>[21-22]</sup>。一个可能的解释是,较高的平均吸气流量会产生较大的负压,从而将口罩拉向人头模型表面,减小泄漏边缘的空间<sup>[23]</sup>。当使用带有模拟柔软皮肤的人头模型测试时,这一现象尤其明显<sup>[20]</sup>。

### 2.3 PM<sub>2.5</sub> 污染程度对口罩防护作用的影响

根据《环境空气质量标准》(GB3095—2012)规定的24小时平均PM<sub>2.5</sub>浓度标准值(优:0~35 μg/m<sup>3</sup>;良:35~75 μg/m<sup>3</sup>;轻度污染:75~115 μg/m<sup>3</sup>;中度污染:115~150 μg/m<sup>3</sup>)对大气PM<sub>2.5</sub>浓度进行分层,探

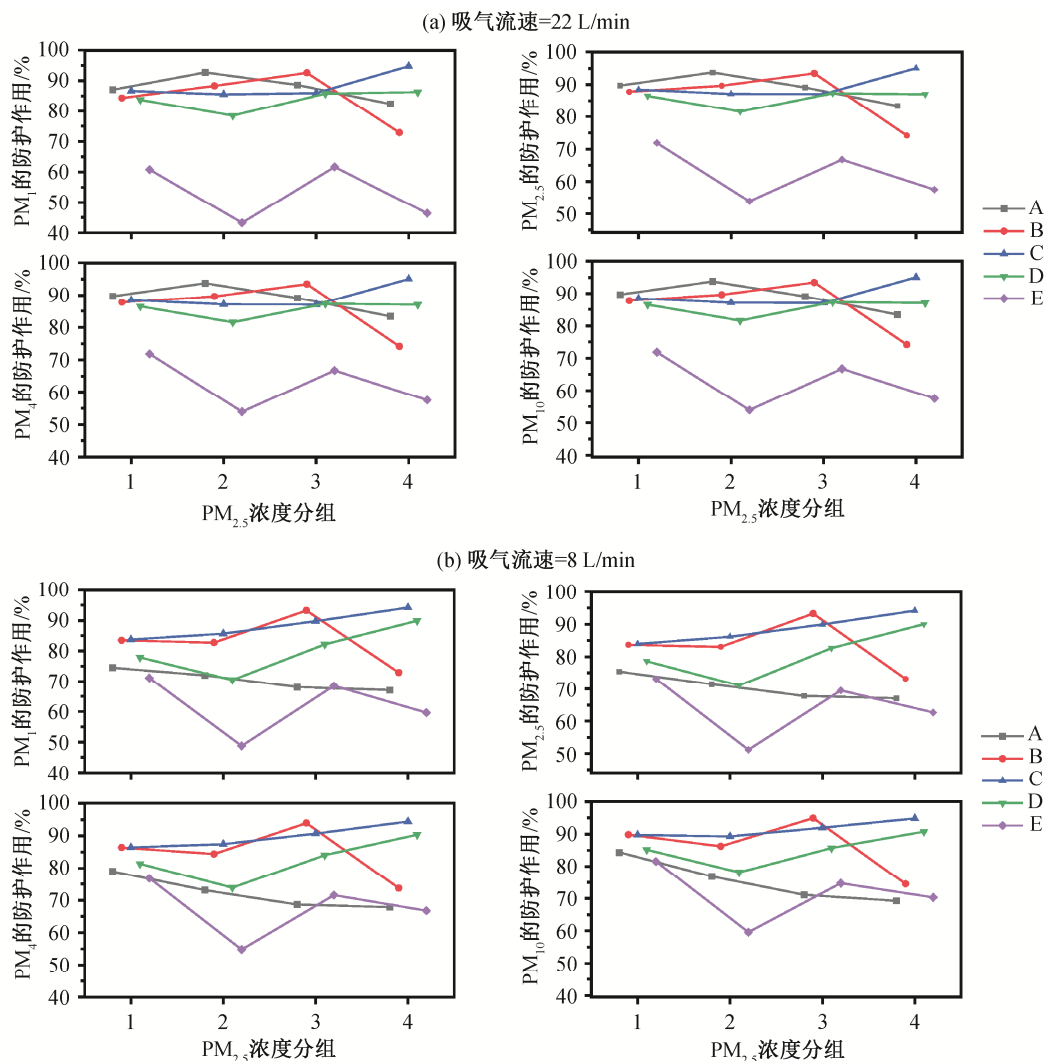
究不同大气PM<sub>2.5</sub>污染程度下口罩对各类颗粒物防护作用。根据多因素方差分析的结果(表2),大气PM<sub>2.5</sub>污染程度显著地影响口罩的防护作用。总体来看,当大气PM<sub>2.5</sub>浓度介于0~35 μg/m<sup>3</sup>之间时,口罩的平均防护作用最强,可达83.52%;在大气PM<sub>2.5</sub>浓度较高(76~115 μg/m<sup>3</sup>)时,口罩的平均防护作用降至73.40%。随着环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度增加,防护作用呈现先降低后增加的趋势,即呈V形。两两比较的结果显示,大气PM<sub>2.5</sub>浓度介于0~35 μg/m<sup>3</sup>之间时,口罩的平均防护作用与大气PM<sub>2.5</sub>浓度高于75 μg/m<sup>3</sup>时口罩的平均防护作用之间有显著差异( $P < 0.05$ )。

如图4所示,不同类型的口罩对环境大气中PM<sub>2.5</sub>浓度变化的响应存在差别。总体而言,口罩A、B、C和D的防护作用随环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度变化的幅度不大。其中,口罩B的防护作用随环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度升高而先升后降,在大气PM<sub>2.5</sub>浓度介于75~115 μg/m<sup>3</sup>之间时防护作用最强。与之不同,口罩C和D的防护作用随环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度升高而先降后升。口罩E防护作用变化较大,在大气PM<sub>2.5</sub>浓度介于75~115 μg/m<sup>3</sup>之间时防护作用最弱。Shen等<sup>[15]</sup>观察到类似的结果,口罩防护作用与环境PM<sub>2.5</sub>浓度的相关性呈倒V形,在环境PM<sub>2.5</sub>浓度约为70 μg/m<sup>3</sup>时,防护作用出现最高值。这是由于在大气环境PM<sub>2.5</sub>浓度相对较低(1~75 μg/m<sup>3</sup>)时,随着PM<sub>2.5</sub>暴露浓度升高,颗粒物通过口罩滤料和口罩侧面泄露点透过口罩,因而防护作用呈现下降趋势。当大气环境PM<sub>2.5</sub>质量浓度相对较高(>75 μg/m<sup>3</sup>)时,大量的粗颗粒物能够填堵口罩滤料的孔隙,颗粒物由于口罩的拦截和惯性效应被捕集,对口罩的穿透率降低,口罩的防护作用呈现上升趋势。本文结果与前人的研究结果相似。刘博羽等<sup>[6]</sup>发现KN95口罩和纱布口罩对0.3 μm颗粒物的过滤效率均与环境PM<sub>2.5</sub>质量浓度显著负相关,KN95口罩对粒径为1.0 μm和2.5 μm颗粒物的过滤效率与环境PM<sub>2.5</sub>浓度呈显著正相关。

目前针对实际大气气溶胶或实验室发生的气溶胶研究中,PM<sub>2.5</sub>浓度对口罩过滤率的实际影响尚不明确,本研究的结果显示其相互之间并没有简单的随PM<sub>2.5</sub>浓度升高防护作用随之升高或降低的关系。

## 3 结论

本研究基于实际大气,选取5种口罩,对4种大

图4 不同PM<sub>2.5</sub>浓度下口罩对各种颗粒物的防护作用Fig. 4 Relationship between facemasks and particle filtration efficiency under different PM<sub>2.5</sub> concentrations

气颗粒物的防护作用进行分析,并研究影响实际防护效果的因素,发现颗粒物粒径、口罩类型、流速和环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度对口罩防护作用具有显著影响。对不同的口罩类型的探究发现,4种KN95或KN90口罩对于实际大气颗粒物的防护作用可以达到80%,而一次性医用外科口罩的防护作用远低于以上4种。颗粒物粒径与口罩防护作用正相关,即随颗粒物粒径增加,口罩的防护作用也随之增加。气体流速也显著影响口罩的防护作用,可能是由于在不同流速下滤料性能和泄漏率的差异。环境大气PM<sub>2.5</sub>浓度对口罩防护作用的影响较为复杂,不存在简单的相关性。

本研究在实际环境下研究口罩真实的防护作

用,可以为人们正确选择和佩戴口罩以及后续健康风险评估提供科学参考。

### 参考文献

- [1] Murray C J L, Aravkin A Y, Zheng P, et al. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 2020, 396: 1223–1249
- [2] Guo P, Umarova A B, Luan Y. The spatiotemporal characteristics of the air pollutants in China from 2015 to 2019. *PLOS ONE*, 2020, 15(8): e0227469
- [3] Shi J, Lin Z, Chen R, et al. Cardiovascular benefits of wearing particulate-filtering respirators: a randomized

- crossover trial. *Environmental Health Perspectives*, 2017, 125(2): 175–180
- [4] Langrish J P, Li X, Wang S, et al. Reducing personal exposure to particulate air pollution improves cardiovascular health in patients with coronary heart disease. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(3): 367–372
- [5] Guan T, Hu S, Han Y, et al. The effects of facemasks on airway inflammation and endothelial dysfunction in healthy young adults: a double-blind, randomized, controlled crossover study. *Particle and Fibre Toxicology*, 2018, 15(1): 30
- [6] 刘博羽, 沈国锋, 陶澍. 基于呼吸实境模拟的口罩防护效果影响因素研究. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 786–794
- [7] Shen H, Liu B, Chen Y, et al. Individual and population level protection from particulate matter exposure by wearing facemasks. *Environment International*, 2021, 146: 106026
- [8] Mueller W, Horwell C J, Apsley A, et al. The effectiveness of respiratory protection worn by communities to protect from volcanic ash inhalation. Part I: Filtration efficiency tests. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2018, 221(6): 967–976
- [9] Grinshpun S A, Haruta H, Eninger R M, et al. Performance of an N95 filtering facepiece particulate respirator and a surgical mask during human breathing: two pathways for particle penetration. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2009, 6(10): 593–603
- [10] Steinle S, Sleuwenhoek A, Mueller W, et al. The effectiveness of respiratory protection worn by communities to protect from volcanic ash inhalation. Part II: Total inward leakage tests. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2018, 221(6): 977–984
- [11] Shakya K M, Rupakheti M, Aryal K, et al. Respiratory effects of high levels of particulate exposure in a cohort of traffic police in Kathmandu, Nepal. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 2016, 58(6): e218–e225
- [12] Stevens G A, Moyer E S. “Worst case” aerosol testing parameters: I. Sodium chloride and dioctyl phthalate aerosol filter efficiency as a function of particle size and flow rate. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1989, 50(5): 257–264
- [13] He X, Grinshpun S A, Reponen T, et al. Laboratory evaluation of the particle size effect on the performance of an elastomeric half-mask respirator against ultrafine combustion particles. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2013, 57(7): 884–897
- [14] Gao S, Kim J, Yermakov M, et al. Penetration of combustion aerosol particles through filters of NIOSH-certified filtering facepiece respirators (FFRs). *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2015, 12(10): 678–685
- [15] Shen H, Liu B, Chen Y, et al. Individual and population level protection from particulate matter exposure by wearing facemasks. *Environment International*, 2021, 146: 106026
- [16] 田军. 防 PM<sub>2.5</sub> 口罩现状及发展方向. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(5): 130–135
- [17] Cherrie J W, Apsley A, Cowie H, et al. Effectiveness of face masks used to protect Beijing residents against particulate air pollution. *Occupational and Environmental Medicine*, 2018, 75(6): 446–452
- [18] Bowen L E. Does that face mask really protect you?. *Applied Biosafety*, Sage Publishing, 2010, 15(2): 67–71
- [19] Zou Z, Yao M. Airflow resistance and bio-filtering performance of carbon nanotube filters and current facepiece respirators. *Journal of Aerosol Science*, 2015, 79: 61–71
- [20] He X, Reponen T, McKay R T, et al. Effect of particle size on the performance of an N95 filtering facepiece respirator and a surgical mask at various breathing conditions. *Aerosol Science and Technology*, 2013, 47(11): 1180–1187
- [21] Cho K J, Reponen T, McKay R, et al. Large particle penetration through N95 respirator filters and facepiece leaks with cyclic flow. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2010, 54(1): 68–77
- [22] Rengasamy S, Walbert G F, Newcomb W E, et al. Total inward leakage measurement of particulates for N95 filtering facepiece respirators — a comparison study. *The Annals of Occupational Hygiene*, Oxford Academic, 2014, 58(2): 206–216
- [23] Rengasamy S, Eimer B C. Total inward leakage of nanoparticles through filtering facepiece respirators. *The Annals of Occupational Hygiene*, 2011, 55(3): 253–263