

# 城市轨道交通空气质量监测技术及其健康效应研究进展

郑懿<sup>1</sup>, 李厚橙<sup>2</sup>, 杨军<sup>3</sup>, 蔡婧<sup>2</sup>

- 上海申通地铁集团有限公司技术中心环境节能研究部, 上海 201103
- 复旦大学公共卫生学院, 上海 200032
- 上海安合环境检测技术有限公司, 上海 201612

## 摘要:

随着城市化进程的加快,城市轨道交通系统已成为现代城市中最重要出行方式之一。城市轨道交通系统为封闭或半封闭环境,具有空气流通性较差且人流量大的特点。在秋冬季呼吸道感染性疾病高发期,公共场所的空气质量 and 病原微生物监测备受关注。本文详细介绍了城市轨道交通相关的空气污染因子及其来源,包括颗粒物和气态污染物等化学污染因子和微生物气溶胶等。同时基于识别到的城市轨道交通相关的空气污染因子,本文综述了城市轨道交通空气质量监测技术的研究进展,总结了化学污染因子和微生物气溶胶的监测技术。最后,对化学污染因子和微生物气溶胶的健康效应进行了总结,并针对城市轨道交通系统特点提出了监测和改良空气质量的建议。通过综述既往研究,开展城市轨道交通空气质量监测技术及其健康效应研究对城市轨道交通空气质量管理、城市建设与公共卫生具有重要的意义和价值。

**关键词:** 城市轨道交通系统; 空气质量; 健康效应; 地铁微生物; 颗粒物

**Study progress on monitoring technologies and health effects of air quality in urban rail transit**  
ZHENG Yi<sup>1</sup>, LI Houcheng<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>3</sup>, CAI Jing<sup>2</sup> (1. Environmental Energy Conservation Research Department, Technical Center, Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd, Shanghai 201103, China; 2. School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China; 3. Shanghai An-He Environmental Testing Technology Co., Ltd, Shanghai 201612, China)

## Abstract:

With the acceleration of urbanization, urban rail transit systems have become one of the most important modes of transportation in modern cities. Urban rail transit systems operate in enclosed or semi-enclosed environments, characterized by poor air circulation and high passenger flow. During the period of high incidence of respiratory infectious diseases in autumn and winter, air quality and pathogenic microorganism monitoring in public places have attracted much attention. This article provided a detailed introduction to air pollutants and their sources related to urban rail transit, including chemical pollutants, such as particulate matter and gaseous pollutants, and microbial aerosols. Based on identified air pollutants related to urban rail transit, this paper reviewed the research progress on air quality monitoring technologies for chemical pollution factors and microbial aerosols. Finally, a summary of the health effects of chemical pollutants and microbial aerosols was provided, along with suggestions for monitoring and improving air quality tailored to the characteristics of urban rail transit systems. Through a review of previous studies, carrying out research on air quality monitoring technologies and associated health effects related to urban rail transit is of great significance and values for air quality management, urban development, and public health.

**Keywords:** urban rail transit system; air quality; health effect; metro microorganisms; particulate matter



DOI 10.11836/JEOM23403

## 基金项目

上海申通地铁集团科研项目(JS-KY21R011-1)

## 作者简介

郑懿(1985-),男,硕士,高级工程师;  
E-mail: fdy0210@sina.com

## 通信作者

蔡婧, E-mail: jingcai@fudan.edu.cn

## 作者中包含编委会成员

无

伦理审批 不需要

利益冲突 无申报

收稿日期 2023-11-27

录用日期 2024-03-05

文章编号 2095-9982(2024)06-0713-08

中图分类号 R12

文献标志码 A

## 引用

郑懿, 李厚橙, 杨军, 等. 城市轨道交通空气质量监测技术及其健康效应研究进展 [J]. 环境与职业医学, 2024, 41(6): 713-720.

## 本文链接

[www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM23403](http://www.jeom.org/article/cn/10.11836/JEOM23403)

## Funding

This study was funded.

## Correspondence to

CAI Jing, E-mail: jingcai@fudan.edu.cn

## Editorial Board Members' authorship

No

Ethics approval Not required

Competing interests None declared

Received 2023-11-27

Accepted 2024-03-05

## To cite

ZHENG Yi, LI Houcheng, YANG Jun, et al. Study progress on monitoring technologies and health effects of air quality in urban rail transit [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2024, 41(6): 713-720.

## Link to this article

[www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM23403](http://www.jeom.org/article/en/10.11836/JEOM23403)

随着城市化进程的加快,现在我国有 65.7%的人口居住在城市地区<sup>[1]</sup>,城市轨道交通系统已成为现代城市中最重要出行方式之一,目前全世界已有超过 60 个国家开通了轨道交通系统,每天有超过 2 亿人搭乘地铁出行<sup>[2]</sup>。中国已有 57 个城市(包含港澳台)开通了地铁交通线路。城市轨道交通系统环境普遍

为封闭或半封闭环境,空气流通性较差,缺少阳光照射,容易滋生微生物,列车及各种设备运行过程中产生的废热又利于微生物生长。而对于客流量大的地铁车站,人群结构往往十分复杂且流动性大,安全社交距离难以保证,容易造成微生物的传播。秋冬季呼吸道感染性疾病以流感为主,此外还有鼻病毒、肺炎支原体、呼吸道合胞病毒、腺病毒等病原体引起感染,公共场所的空气质量 and 病原微生物监测备受关注。因此,明确地铁环境空气污染状况,对维护公众健康具有重要的公共卫生意义。

## 1 城市轨道交通相关的空气污染因子及来源

### 1.1 化学污染因子

地铁环境的化学污染因子主要来源于站内铁轨、车轮、制动片和受电弓等摩擦产生以及站外大气污染物的渗透<sup>[3]</sup>。Chan等<sup>[4]</sup>在一项评估香港城市轨道交通化学污染因子的调查发现,香港地铁观塘线、荃湾线和港岛线三条线路是主要在地下运行的地铁线路,虽然地铁环境与大气环境隔绝,但是地铁内的一氧化碳(carbon monoxide, CO)、氮氧化物(nitro oxide, NO<sub>x</sub>)、总碳氢化合物和臭氧(ozone, O<sub>3</sub>)等化学污染因子浓度都与地面上交通工具内的浓度相当。

**1.1.1 颗粒物** 颗粒物(particulate matter, PM)是城市轨道交通的主要化学污染因子。大量研究结果表明室内颗粒物污染主要源于室外大气<sup>[5]</sup>,但地铁隧道内颗粒物的污染最为严重且隧道和站台颗粒物浓度均高于室外环境,这是由于地铁运行机械磨损产生大量的颗粒物所致<sup>[6]</sup>。研究发现<sup>[7-9]</sup>,在上海轨道交通系统中观察到细颗粒物(fine particulate matter, PM<sub>2.5</sub>)浓度为 287 μg·m<sup>-3</sup>。此外,Kwon等<sup>[10]</sup>发现城市轨道交通系统的车站深度和列车发车频率是颗粒物浓度的决定因素。Chan等<sup>[11]</sup>发现城市轨道交通系统在晚高峰时段的颗粒物水平高于下午非高峰时段。Wang等<sup>[12]</sup>发现天津市轨道交通系统中,地铁站台 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于列车内的浓度,且高峰时段地铁列车内 PM<sub>2.5</sub> 的平均浓度为 151.43 μg·m<sup>-3</sup>。Kim等<sup>[13]</sup>对韩国首尔市轨道交通系统研究发现司机室和车厢 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于站台、休息区和售票处,车站站台上的 PM<sub>2.5</sub> 浓度均超过美国环境保护署的限值(PM<sub>2.5</sub> 限值为 35 μg·m<sup>-3</sup>),而车站售票处测量的 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低,符合该标准;此外,地下车站站台的平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著高于车站站台水平。

城市轨道交通的颗粒物化学组分也与大气中的

不同。Lu等<sup>[14]</sup>发现,上海轨道交通系统的 Fe、Mn、Cr、Cu、Sr、Ba 和 Pb 浓度均显著高于城市环境空气浓度,这意味着这些颗粒物的金属成分可能与地铁系统的运行有关。Qiao等<sup>[15]</sup>也发现,Fe 是城市轨道交通系统最丰富的金属元素,其次是 Ca、Al、Mg、Mn、Zn、Cu、Cr、Ni、Pb 和 Hg。Wang等<sup>[12]</sup>发现天津市轨道交通系统中,地铁站台 PM<sub>2.5</sub> 中浓度最高的金属元素为 Fe,含量为 17.55 μg·m<sup>-3</sup>。Goel等<sup>[16]</sup>在德里的城市轨道交通 PM<sub>2.5</sub> 暴露研究中发现,地铁中的 PM<sub>2.5</sub> 浓度比环境浓度高出约 20%,但仍低于大多数其他运输方式。

**1.1.2 气态污染物** 挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)也是城市轨道交通的主要化学污染因子之一。空气中 VOCs 可能通过呼吸吸入及皮肤接触对表皮和黏膜产生刺激性作用等急性毒性作用,并且进入人体后可能导致神经系统、生殖系统以及内脏损伤<sup>[17]</sup>。Gong等<sup>[18]</sup>发现,地铁车厢内 VOCs 的暴露水平在很大程度上取决于地铁列车的运行时间、乘客数量和驾驶条件。此外,Shiohara等<sup>[19]</sup>在墨西哥调查城市通勤者 VOCs 暴露水平,结果显示城市轨道交通系统的 VOCs 平均浓度低于汽车和公交车等其他出行方式。国内的团队也发现了相似的结果,Chan等<sup>[11]</sup>研究了广州乘客暴露于 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、CO 和 VOCs 等污染物的水平,结果发现地铁中的暴露水平明显低于公交和出租车的暴露水平。

### 1.2 微生物气溶胶

城市轨道交通系统中的微生物气溶胶主要来源于人体皮肤、消化道以及空气中含有的大量细菌、真核生物和病毒<sup>[20]</sup>。目前,我国城市轨道交通环境中微生物谱系的组成与结构研究较少,既往研究主要侧重于空气中的化学组成,对生物组成的识别非常有限。城市中人们与微生物的接触方式与农村地区明显不同<sup>[21]</sup>,城市轨道交通系统中丰富的颗粒物是空气微生物的良好载体,颗粒物携带的活性微生物种类繁多,已被《人间传染的病原微生物名录》登记在册的种类超过 300 种<sup>[22]</sup>。室内环境中的微生物会给公众带来重要健康危害,这些气溶胶中的病原微生物被认为是造成多种过敏性及传染性疾病的可能传染源<sup>[23]</sup>。

我国针对公共场所的现行空气微生物标准仅局限为细菌和真菌。张锐等发现重庆地铁车厢空气的平均细菌总数范围为 10.9~15.1 CFU·皿<sup>-1</sup><sup>[24]</sup>;王永星等<sup>[25]</sup>发现郑州地铁站厅空气的细菌和真菌总数范围分别为 430~1750、305~576 CFU·m<sup>-3</sup>,站台空气的细菌和真菌总数范围分别为 412~1885、325~528 CFU·m<sup>-3</sup>。随

着 2019 年新型冠状病毒感染大流行,人们对广泛微生物监测的需求急剧增加。城市轨道交通环境的微生物遗传图谱对于公共卫生政策制定、疫情风险评估具有重要意义。Triadó-Margarit 等<sup>[26]</sup>通过对巴塞罗那地铁系统气溶胶样本进行 16S rRNA 测序发现甲基杆菌属(*Methylobacterium*)为丰度最高的菌种;Walker 等<sup>[27]</sup>通过 16S rRNA 测序分析发现波士顿、纽约、萨克拉门托三个城市地铁表面样本的微生物群落结构具有显著差异;余韵等<sup>[28]</sup>通过对广州地铁车厢拉手、座椅和扶梯扶手擦拭样本进行 16S rRNA 测序分析发现微生物群落呈现明显的线路聚集特征。

此外,联合国建议发展中国家需要密切关注城市微生物和抗生素耐药基因的数据,预计到 2030 年,发展中国家抗生素类药物消费量将增长 67%<sup>[29]</sup>,人们对畜产品需求的变化和抗生素使用范围的扩大都可能改变城市的抗生素耐药性的现状<sup>[30]</sup>。Kang 等<sup>[31]</sup>通过对触摸过香港地铁车厢扶手的手部样本进行宏基因组测序分析,发现了抗生素耐药基因在地铁线路中传播的可能性。MetaSUB 项目则采用宏基因组的方法探究了全球 58 个城市公共交通表面样本中的微生物组成和抗生素耐药性图谱<sup>[32]</sup>。

## 2 城市轨道交通空气质量监测技术的研究进展

### 2.1 化学污染因子

滤膜采样法通常被用来间接测量大气中的颗粒物。滤膜采样法包括空气采样泵和滤膜等装置,通过稳定持续地吸附和过滤大气中的颗粒物,进而对滤膜进行称重,最终获得颗粒物浓度数据。此外,该方法适用于大气环境较为稳定时的颗粒物测量,其产生的测量误差难以避免。质量平衡法是另一种常用的大气颗粒物监测方法,原理是将质量流量标准差作为参考依据来确定颗粒物的质量浓度。但该方法只能测量颗粒物平均质量浓度,而无法获取最大值和最小值数据。其次,该方法成本较高且操作复杂<sup>[33]</sup>。

轨道交通中的化学污染因子还包括化学气体。光度法和恒电流库仑法是检测环境空气中二氧化氮的常用方法,这两种方法具有良好的抗干扰性和较好的准确性<sup>[34]</sup>。监测氮氧化物时,通常是利用固定点位排放监测系统,实时监测氮氧化物排放情况。此外,以下技术也常用于化学污染因子监测:气相色谱检测技术可以对不同气体进行快速、准确的测定;离子色谱通过各种离子间差别来测定不同气体的浓度;质谱分析

法适用于对大气中的各种化学污染因子进行准确、快速的测定;离子色谱-质谱法通过仪器设备和检测剂对空气中多种化学污染物进行准确、快速测定;火焰光度技术则是通过火焰光度检测器进行检测<sup>[33]</sup>。这些方法的应用可以提供多样及全面的化学污染因子监测,有助于监测者了解和掌握大气环境的污染状况。

### 2.2 微生物气溶胶

微生物气溶胶广泛存在于空气中,由于其成分复杂多样、难以无损分离微生物等原因,微生物气溶胶的分析鉴定一直是微生物气溶胶研究的重要内容。自十九世纪以来,多种微生物气溶胶检测方法问世,包括传统分离培养、酶联免疫反应、聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)、凝胶电泳、二代测序(next generation sequencing, NGS)等。随着研究技术的发展,检测方法的准确性和灵敏性逐渐提高,研究分析的主题从生理生化特征扩展至分子生物、功能基因,为研究生态和进化问题提供了更多机会。

传统分离培养方法操作简便,营养基质比例简单,培养温度固定,并能让检测者直观发现生理生化代谢特征,是微生物检验的常用方法。但其只能培养活微生物,难以检测空气中粒径较小的微生物。同时,该方法忽略了环境变化和微生物的相互作用,从原始环境到培养环境的偏差可能导致培养的物种数量仅占环境微生物总数的 0.1%~10%,这极大降低了空气微生物浓度检测的准确性<sup>[35]</sup>。

十九世纪九十年代后,酶联免疫反应、PCR、凝胶电泳等分子生物学技术日渐成熟,并被广泛应用于微生物多样性研究,也是目前最普遍、最常用的微生物多样性研究技术<sup>[36]</sup>。通过 PCR 扩增等技术,可对微生物群落结构进行快速检测和比较。酶联免疫反应具有反应迅速、低成本、仪器操作简单、高灵敏度和高特异性等优点。凝胶电泳则可以用较少的样品量达到清晰成像效果,且一次可检验多个样品,有利于细菌菌落的多样性动态观察。分子生物学方法打破了既往研究在形态学和生理生化研究技术的局限,支持更加全面的微生物多样性信息获取。

二十一世纪初,NGS 对数百万个 DNA 分子进行测序,改变了传统研究模式,加速了生物医学研究。微生物生态学和环研究学领域对微生物群落的多样性持续重点关注<sup>[20]</sup>,环境微生物群落的种群结构和多样性分析具有重要意义。群落结构组成对生态学功能起关键性作用,对环境微生物种群结构和多样性的分析可为群落结构优化、群落功能调整、新的重要微生物

功能分类群发现等提供有力依据<sup>[37]</sup>。Tang 等<sup>[38]</sup>基于 Illumina 测序对西藏不同苔藓植物相关细菌进行群落分析,发现所有样本中检测到的主要细菌为变形菌门、放线菌门、拟杆菌门等。Theron 等<sup>[39]</sup>基于 16S rRNA 序列分析技术,在不需要培养的情况下确定自然环境中的微生物多样性和群落结构特征。

此外,空气微生物在生物代谢中具有特定功能,随着高通量测序分析技术的发展,通过对样本进行测序,可以获取其物种组成信息,这些信息可以用来推测样本中功能基因的构成。进一步分析这些功能基因的差异,可以了解不同样本在功能特性上的差异。例如,研究发现微生物代谢紊乱可能是引起人类疾病(例如肥胖、2 型糖尿病、肝脂肪变性、肠道疾病等)的重要原因,而微生物代谢物可以调节代谢失调,从而预防微生物群失调引起的相关疾病<sup>[40]</sup>。

### 3 空气质量健康效应的研究进展

#### 3.1 化学污染因子

**3.1.1 呼吸系统** 化学污染因子对呼吸系统的影响机制非常复杂,短时间暴露于污染物可能会对口腔黏膜和呼吸道黏膜等产生刺激,引发不适;当污染物被吸入人体后,可能会渗透并沉积在呼吸道中,刺激气管和支气管并引起收缩,进而产生相应的呼吸系统疾病症状。作为一种复杂的常见病和多发病,呼吸系统疾病种类繁多,常见的有哮喘、气管炎、支气管炎、慢性阻塞性肺疾病、肺心病、肺结核和肺癌等。不同粒径的颗粒物对人体的健康危害也不同。空气动力学直径小于 10  $\mu\text{m}$  的颗粒物容易穿透声门下方,一般只能短距离移动并沉积在人体上呼吸道;空气动力学直径在 5  $\mu\text{m}$  到 10  $\mu\text{m}$  的颗粒物具有潜在的短距离和长距离传播能力;空气动力学直径小于 5  $\mu\text{m}$  的颗粒物可长距离移动,能够轻易穿透气道并沉降在呼吸道深处,并增加了罹患呼吸道感染等疾病的风险<sup>[41]</sup>。

不同种类化学污染因子对呼吸系统的影响存在一些差异。 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{O}_3$  等气态污染物被吸入到人体后,会损害呼吸系统屏障功能,加剧炎症反应以及增加气道反应性<sup>[42]</sup>,因此长时间接触气态污染物对哮喘及慢性阻塞性肺疾病患者发病及死亡的影响更为明显。此外,不同空气污染物的共同暴露对健康的影响往往具有协同效应,例如  $\text{SO}_2$  与  $\text{PM}_{2.5}$  在对人体健康的影响方面具有显著的协同效用<sup>[43]</sup>;  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  协同暴露会增加呼吸系统相关疾病(如支气管炎、哮喘病和肺气肿)的发病风险<sup>[44]</sup>。还有研究指出,即使浓

度较低,大气污染物与人群呼吸系统疾病的发病率间也存在着密切的联系<sup>[45]</sup>。

**3.1.2 心血管系统** 现有大量的流行病学证据已经证明,大气中的化学污染因子暴露能够显著影响心血管系统健康。空气污染尤其是  $\text{PM}_{2.5}$  污染是导致全球心血管疾病(cardiovascular disease, CVD)发生和死亡的最重要环境风险因素,且来自中国动脉硬化性心脏病风险预测研究的证据观察到暴露-反应关系曲线的斜率随环境  $\text{PM}_{2.5}$  暴露浓度升高而增加<sup>[46]</sup>。根据一篇系统综述结果, $\text{PM}_{2.5}$  的短期升高会使急性心血管事件发生的相对风险在几天内增加 1%~3%,且长期暴露会增加这一风险<sup>[47]</sup>。Liu 等<sup>[48]</sup>基于全球尺度时间序列研究发现, $\text{PM}_{2.5}$  导致心血管疾病死亡风险增加。目前研究主要集中于颗粒物与心血管疾病的影响,其他化学污染因子如气态污染物的相关研究证据仍然有限,未来需要更多前瞻性、大样本量或毒理学机制研究探索大气气态污染物与心血管疾病之间可能存在的关联。

**3.1.3 其他** 化学污染因子除了对呼吸系统和心血管系统方面的健康效应,对其他人体系统也同样有较为严重的影响。 $\text{SO}_2$  短期急性暴露可能导致眼睛、口腔黏膜等的刺激性症状,还可能通过皮肤和黏膜等途径进入人体,与水接触生成具有腐蚀性的亚硫酸或硫酸,从而对器官黏膜等造成危害。光化学烟雾可引起眼睛红肿、头痛等不良反应<sup>[49]</sup>。此外, $\text{PM}_{2.5}$  暴露也被认为和早产等不良出生结局相关<sup>[50]</sup>。

#### 3.2 微生物气溶胶

地铁环境空间较为密闭且人流密集,安全社交距离难以保证。秋冬季呼吸道感染性疾病以流感为主,此外还有鼻病毒、肺炎支原体、呼吸道合胞病毒、腺病毒等病原体引起感染。此外,暴露于微生物气溶胶和微生物毒素等过敏原也会引发过敏性疾病,因此,城市轨道交通环境的微生物气溶胶备受关注。

**3.2.1 哮喘** 人体肺部一般被认为是无菌的,但空气污染物和刺激物不断被人体吸入并刺激呼吸道。人体肺部不仅仅从空气中吸入生物体,从口腔和上呼吸道吸入的黏膜分泌物也可以进一步进入下呼吸道<sup>[51]</sup>。通常情况下,呼吸系统疾病是由气道炎症引起的,尤其是暴露于毒素、过敏原和促炎症药物时<sup>[52]</sup>。哮喘是一种常见的慢性炎症疾病,一般继发于可逆性支气管痉挛和黏液高分泌后的间歇性气短、咳嗽和哮鸣音。哥本哈根新生儿哮喘队列研究发现,早期微生物定植在新生儿体内会使罹患哮喘风险增加<sup>[53]</sup>。

除了呼吸道刺激外,细菌和霉菌的内毒素和葡聚

糖也可能会引起呼吸道炎症<sup>[54]</sup>。在革兰氏阴性细菌中的内毒素具有毒性作用的是脂多糖,具有很高的促炎特性<sup>[55]</sup>。内毒素由主要包括以下成分:核心链、O特异性多糖侧链(O-抗原)和脂质成分脂质A,负责毒性作用<sup>[56]</sup>。由于它们很容易与空气中的灰尘结合,人类经常暴露于内毒素<sup>[57]</sup>,且对内毒素的毒性反应取决于剂量、作用位置和途径。暴露于内毒素是肺扩散能力下降的原因,以及与各种症状和疾病有关,如发烧,颤抖,血白细胞增多,嗜中性气道炎症,关节痛,呼吸困难和胸闷,以及支气管阻塞<sup>[58]</sup>。

**3.2.2 慢性阻塞性肺病(chronic obstructive pulmonary disease, COPD)** COPD发病机制为肺部气流受限,其特征是不可逆的气道阻塞和进行性的呼吸道症状,主要临床表现为慢性咳嗽、咳痰、严重时可出现呼吸困难。COPD通常伴有其他呼吸道疾病,可进一步发展为肺心病和呼吸衰竭,能显著提高死亡率和发病率,并且是持续增长的主要死亡原因<sup>[59]</sup>。越来越多的证据表明,肺微生物群的生态失调与该疾病有关<sup>[60-62]</sup>。Sethi等<sup>[63]</sup>发现,与COPD有关的典型微生物包括肺炎链球菌、卡他莫拉菌、铜绿假单胞菌和流感嗜血杆菌等。与这一研究结果相似的是,Huang及其团队<sup>[64]</sup>用系统分类芯片技术鉴定了8位COPD患者急性发作时的微生物菌群,发现有75种主要菌群存在于所有患者中,并包括了大量潜在病原体,其中铜绿假单胞菌和肠杆菌属主要存在于采样期间插管时间长的患者中。

研究发现,肺微生物群通过与局部和全身免疫系统相互作用来调节免疫反应<sup>[65-66]</sup>。微生物群与环境中的非活颗粒抗原结合,被黏膜连续吸收后,经过树突状细胞和巨噬细胞处理,导致记忆细胞的形成或T和B效应细胞的激活<sup>[67]</sup>,因此,各种共生微生物影响先天免疫和适应性免疫。

**3.2.3 肺结核** 结核病是全世界关注的公共卫生问题。事实上,世界上三分之一的人口感染了结核分枝杆菌,每年有超过800万个新的结核病例发生<sup>[68]</sup>。2020年共有150万人死于结核病。在全球,结核病是第13大死因,也是仅次于COVID-19的第二大传染性杀手(超过艾滋病毒/艾滋病)。活动性肺结核的患者常表现为持续长时间的咳痰、甚至咯血,有的病人还会出现体重减轻、乏力、胸痛、发热和夜间盗汗等症状。一项荟萃分析研究报告称,与其他人群相比医护人员患结核病的平均年风险(95%CI: 2.43~3.51)是一般人群的三倍<sup>[69]</sup>。

结核分枝杆菌不仅仅损伤肺功能,与肿瘤的机制研究也引起了人们的兴趣。目前认为主要有以下机制,

肺结核导致的肺部慢性炎症可能造成支气管上皮细胞DNA的克隆。另一种可能的机制是横向基因转移,这是由于结核分枝杆菌是一种细胞内生物,细菌DNA可整合到支气管上皮细胞中,从而诱发肿瘤性转化<sup>[70]</sup>。

即使1995—2015年期间大约有85%(6600万例)患者得到微生物学治疗,然而一半的结核病幸存者仍存在肺损伤<sup>[71-72]</sup>,治愈后数年仍存在肺功能障碍<sup>[73-74]</sup>。例如南非的一项研究发现,68%有结核病史的患者在评估前16年内曾治疗过气流阻塞<sup>[75]</sup>。一项前瞻性研究的74名新诊断的结核病患者调查后发现,其中54%的患者在治疗后肺功能得到改善,其余的患者肺功能没有变化或恶化<sup>[76]</sup>。

**3.2.4 麻疹** 引起麻疹的病原体为麻疹病毒,这是一种具有高度传染性的急性发热疾病。麻疹疫苗被广泛使用前每年死亡人数多达200多万人,即使引进麻疹疫苗后每年仍然有10万以上人数死亡<sup>[77]</sup>。世界卫生组织公布了关于麻疹病例和估计死亡人数的年度报告,在2000年至2015年期间,全球报告的麻疹病例数量从853479例下降到254928例,下降了70%。呼吸道飞沫短距离传播是麻疹病毒主要的传播途径,但气溶胶传播也是可能的传播途径之一<sup>[78-79]</sup>。

麻疹主要症状为发热、咳嗽、鼻炎、结膜炎和全身性斑丘疹。发热后3~4d内会出现皮疹,营养不良的儿童甚至会出现深色皮疹<sup>[80]</sup>,在恢复过程中出现皮脂脱屑。麻疹的并发症可影响大多数器官系统,肺炎、哮喘和脑炎是常见的死亡原因,最常见于新生儿、婴幼儿、20岁以上的成年人、孕妇和免疫力低下或营养不良者,特别是缺乏维生素A的儿童<sup>[81]</sup>。呼吸道是常见的并发症部位,麻疹病毒肺炎为麻疹最常见并发症,是导致患者死亡的重要原因。此外,麻疹病毒肺炎易合并病毒或细菌病原体感染导致巨细胞肺炎<sup>[82-83]</sup>。

**3.2.5 新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)** 以严重急性呼吸系统综合征冠状病毒2(severe acute respiratory syndrome coronavirus 2, SARS-CoV-2)作为病原体的COVID-19已成为世界上一次重大的流行性传染病,引起了全世界的广泛关注,因此找出COVID-19的传播方式并控制其传播是刻不容缓的。Jiang等<sup>[84]</sup>分析了43名患者数据发现,不同集群病例的患者可能具有独特的流行病学特征。SARS-CoV-2可以通过病人的呼吸活动释放到环境空气中,并且可以长时间存在,易于长距离运输,气溶胶传播成为COVID-19传播不可或缺的因素。SARS-CoV-2 RNA可以在各种场所的气溶胶中检测到,包括隔离病

房、一般场所、室外、厕所、走廊和拥挤的公共场所。与这一结论相同的是, COVID-19 通过高空气传染率和高接触率以及病毒在表面的持久性<sup>[85-86]</sup>而快速传播。

大量研究表明 SARS-CoV-2 感染损伤肺功能。SARS-CoV-2 感染的最常见部位是上呼吸道和下呼吸道, 而肺部损害的严重程度与感染的严重程度密切相关<sup>[87-89]</sup>。该病毒对肺部的病理损伤作用主要有以下 3 种: 急性呼吸窘迫综合征(acute respiratory distress syndrome, ARDS)、弥漫性肺泡损伤(diffuse alveolar damage, DAD)以及弥漫性血栓性肺泡微血管闭塞和炎症介质相关的气道炎症<sup>[87, 89]</sup>。这些病理损伤可能最终导致肺泡氧合受损、低氧血症和酸中毒等。长时间且缺乏有效治疗的低氧饱和状态可能导致病人呼吸衰竭而死亡, 或产生永久性的肺部损伤<sup>[87, 90]</sup>。

SARS-CoV-2 感染不仅可以影响呼吸系统, 还可以对神经系统造成严重损害。研究表明<sup>[91]</sup>, SRAS-CoV-2 可以通过血源性和神经元途径进入神经系统, 并通过抑制细胞免疫, 促进炎症, 诱导神经元变性和凋亡、低氧血症以及血管紧张素转换酶 2(angiotensin converting enzyme 2, ACE2)的机制引起 COVID-19 患者的神经系统损害。

#### 4 结语

城市轨道交通系统的具有客流密集的特点。城市轨道交通系统的服务时间、列车通行频率、通风方式、列车内部材料、乘客数量和地铁站附近大气环境均是影响其空气质量的关键因素。一方面, 为了保障乘客出行安全, 应针对各城市轨道交通系统的特性, 开展地下车站空气质量和空气微生物相关研究, 在此基础上建立轨道交通地下车站的空气质量标准, 并进一步优化相应的监测要求、检测方法和管理要求, 进而为城市轨道交通系统空气污染和病原微生物相关的公共卫生风险评估、预测和预警提供有效的理论依据。另一方面, 为了降低城市轨道交通系统空气污染物的暴露水平, 应当提倡城市轨道交通系统安装列车屏蔽门和空气净化装置, 以改善地铁站内空气质量。

#### 参考文献

- [1] HUA W, WANG L, FANG X, et al. Urbanization and energy equity: an urban-rural gap perspective[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2023, 30(16): 46847-46868.
- [2] HWANG SH, PARK JB. Comparison of culturable airborne bacteria and related environmental factors at underground subway stations between 2006 and 2013[J]. *Atmos Environ*, 2014, 84: 289-293.
- [3] PARK D, LEE T, HWANG D, et al. Identification of the sources of PM<sub>10</sub> in a subway tunnel using positive matrix factorization[J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2014, 64(12): 1361-1368.
- [4] CHAN LY, CHAN CY, QIN Y. The effect of commuting microenvironment on commuter exposures to vehicular emission in Hong Kong[J]. *Atmos Environ*, 1999, 33(11): 1777-1787.
- [5] 陈紫光, 陈超, 曹国庆, 等. 空气净化器对室内细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)净化效果预测模型研究[J]. *建筑科学*, 2023, 39(2): 154-161.  
CHEN ZG, CHEN C, CAO GQ, et al. Study on the predicting model of purification effect of air cleaners for indoor PM<sub>2.5</sub>[J]. *Building Science*, 2023, 39(2): 154-161.
- [6] 王凯, 张霞, 张琳, 等. 某市地铁车站PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度的时空分布特征[J]. *环境与职业医学*, 2020, 37(9): 853-857.  
WANG K, ZHANG X, ZHANG L, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in metro stations in a city[J]. *Journal of Environmental Occupational Medicine*, 2020, 37(9): 853-857.
- [7] XU B, YU X, GU H, et al. Commuters' exposure to PM<sub>2.5</sub> and CO<sub>2</sub> in metro carriages of Shanghai metro system[J]. *Transp Res Part D Transp Environ*, 2016, 47: 162-170.
- [8] XU B, CUI P, XU H, et al. Commuter exposure to particle matter and carbon dioxide inside high-speed rail carriages[J]. *Transp Res Part D Transp Environ*, 2013, 20: 1-6.
- [9] QIAO T, XIU G, ZHENG Y, et al. Characterization of PM and microclimate in a Shanghai subway tunnel, China[J]. *Procedia Eng*, 2015, 102: 1226-1232.
- [10] KWON SB, JEONG W, PARK D, et al. A multivariate study for characterizing particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub>) in Seoul metropolitan subway stations, Korea[J]. *J Hazard Mater*, 2015, 297: 295-303.
- [11] CHAN LY, LAU WL, WANG XM, et al. Preliminary measurements of aromatic VOCs in public transportation modes in Guangzhou, China[J]. *Environ Int*, 2003, 29(4): 429-435.
- [12] WANG B, ZHU J, LIN Z. A theoretical framework for multiphysics modeling of methane fueled solid oxide fuel cell and analysis of low steam methane reforming kinetics[J]. *Appl Energy*, 2016, 176: 1-11.
- [13] KIM KY, KIM YS, ROH YM, et al. Spatial distribution of particulate matter (PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>) in Seoul Metropolitan Subway stations[J]. *J Hazard Mater*, 2008, 154(1/3): 440-443.
- [14] LU S, LIU D, ZHANG W, et al. Physico-chemical characterization of PM<sub>2.5</sub> in the microenvironment of Shanghai subway[J]. *Atmos Res*, 2015, 153: 543-552.
- [15] QIAO T, XIU G, ZHENG Y, et al. Preliminary investigation of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and its metal elemental composition in tunnels at a subway station in Shanghai, China[J]. *Transp Res Part D Transp Environ*, 2015, 41: 136-146.
- [16] GOEL R, GANI S, GUTTIKUNDA SK, et al. On-road PM<sub>2.5</sub> pollution exposure in multiple transport microenvironments in Delhi[J]. *Atmos Environ*, 2015, 123: 129-138.
- [17] 俞是聃, 莫秀娟. 空气中挥发性有机物的风险评价研究[J]. *化学工程与装备*, 2013(2): 190-192.  
YU SD, MO XJ. Risk assessment of volatile organic compounds in the air[J]. *Chem Eng Equip*, 2013(2): 190-192.
- [18] GONG Y, WEI Y, CHENG J, et al. Health risk assessment and personal exposure to Volatile Organic Compounds (VOCs) in metro carriages — A case study in Shanghai, China[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 574: 1432-1438.
- [19] SHIOHARA N, FERNÁNDEZ-BREMAUNTZ AA, BLANCO JIMÉNEZ S, et al. The commuters' exposure to volatile chemicals and carcinogenic risk in Mexico City[J]. *Atmos Environ*, 2005, 39(19): 3481-3489.
- [20] 严冉, 阚海东, 应圣洁, 等. 地铁空气中微生物的研究进展[J]. *环境与职业医学*

- 业医学, 2023, 40(4): 480-485.
- YAN R, KAN HD, YING SJ, et al. Research progress of microbes in subway air[J]. *J Environ Occup Med*, 2023, 40(4): 480-485.
- [21] NEIDERUD CJ. How urbanization affects the epidemiology of emerging infectious diseases[J]. *Infect Ecol Epidemiol*, 2015, 5(1): 27060.
- [22] 沈雁翎, 李厚橙, 李仕祯, 等. 气溶胶微生物健康风险研究进展[J]. *上海预防医学*, 2023, 35(3): 292-300.
- SHEN YL, LI HC, LI SZ, et al. Research progress on health risks of aerosol microorganisms[J]. *Shanghai J Prev Med*, 2023, 35(3): 292-300.
- [23] COOLEY JD, WONG WC, JUMPER CA, et al. Correlation between the prevalence of certain fungi and sick building syndrome[J]. *Occup Environ Med*, 1998, 55(9): 579-584.
- [24] 张锐, 凌瑜双, 陈奕文, 等. 重庆市地铁车厢空气微生物污染状况调查[J]. *环境与健康杂志*, 2015, 32(11): 1000-1002.
- ZHANG R, LING YS, CHEN YW, et al. Investigation of air microorganism pollution in metro carriages in Chongqing[J]. *J Environ Health*, 2015, 32(11): 1000-1002.
- [25] 王永星, 田好亮, 祝刚, 等. 郑州市地铁一号线微生物指标调查[J]. *环境卫生学杂志*, 2014, 4(4): 362-364.
- WANG YX, TIAN HL, ZHU G, et al. Investigation on biological contamination indicators in subway stations in Zhengzhou[J]. *J Environ Hyg*, 2014, 4(4): 362-364.
- [26] TRIADÓ-MARGARIT X, VEILLETTE M, DUCHAINE C, et al. Bioaerosols in the Barcelona subway system[J]. *Indoor Air*, 2017, 27(3): 564-575.
- [27] WALKER AR, GRIMES TL, DATTA S, et al. Unraveling bacterial fingerprints of city subways from microbiome 16S gene profiles[J]. *Biol Direct*, 2018, 13(1): 10.
- [28] 余韵, 郑钟黛西, 盛华芳, 等. 广州地铁环境微生物组分布规律及其潜在影响因素分析[J]. *现代医院*, 2020, 20(1): 103-106.
- YU Y, ZHENG ZD X, SHENG HF, et al. Distribution patterns and potential influencing factors of microbial communities in Guangzhou subway environment[J]. *Mod Hosp*, 2020, 20(1): 103-106.
- [29] United Nations. Political declaration of the high-level meeting of the general assembly on antimicrobial resistance[DB/OL]. [2023-09-26]. <https://digitallibrary.un.org/record/842813?ln=en>.
- [30] VAN BOECKEL TP, BROWER C, GILBERT M, et al. Global trends in antimicrobial use in food animals[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112(18): 5649-5654.
- [31] KANG K, NI Y, LI J, et al. The environmental exposures and inner- and intercity traffic flows of the metro system may contribute to the skin microbiome and resistome[J]. *Cell Rep*, 2018, 24(5): 1190-1202.e5.
- [32] The MetaSUB International Consortium. The metagenomics and Metadesign of the Subways and Urban Biomes (MetaSUB) international consortium inaugural meeting report[J]. *Microbiome*, 2016, 4(1): 24.
- [33] 文洁. 环境监测技术在大气污染治理中的应用研究[J]. *黑龙江环境通报*, 2023, 36(5): 163-165.
- WEN J. Research on the application of environmental monitoring technology in atmospheric pollution control[J]. *Heilongjiang Environ J*, 2023, 36(5): 163-165.
- [34] 焦健. 浅析环境监测技术在大气污染治理中的作用[J]. *资源节约与环保*, 2020, 35(9): 59-60.
- JIAO J. Analysis of the role of environmental monitoring technology in air pollution control[J]. *Resour Econom Environ Prot*, 2020, 35(9): 59-60.
- [35] PASQUARELLA C, ALBERTINI R, DALL'AGLIO P, et al. Air microbial sampling: the state of the art[J]. *Ig Sanita Pubbl*, 2008, 64(1): 79-120.
- [36] HUBAD B, LAPANJE A. The efficient method for simultaneous monitoring of the culturable as well as nonculturable airborne microorganisms[J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e82186.
- [37] 车玉伶, 王慧, 胡洪营, 等. 微生物群落结构和多样性解析技术研究进展[J]. *生态环境*, 2005(1): 127-133.
- CHE YL, WANG H, HU HY, et al. Research progresses on analytical technologies used in microbial community structure and diversity[J]. *Ecol Environ*, 2005(1): 127-133.
- [38] TANG JY, MA J, LI XD, et al. Illumina sequencing-based community analysis of bacteria associated with different bryophytes collected from Tibet, China[J]. *BMC Microbiol*, 2016, 16(1): 276.
- [39] THERON J, CLOETE TE. Molecular techniques for determining microbial diversity and community structure in natural environments[J]. *Crit Rev Microbiol*, 2000, 26(1): 57.
- [40] SITKIN SI, TKACHENKO EI, VAKHITOV TY. Metabolic dysbiosis of the gut microbiota and its biomarkers[J]. *Eksp Klin Gastroenterol*, 2016, 12(12): 6-29.
- [41] TELLIER R, LI Y, COWLING BJ, et al. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary[J]. *BMC Infect Dis*, 2019, 19(1): 101.
- [42] ZHANG F, ZHANG H, WU C, et al. Acute effects of ambient air pollution on clinic visits of college students for upper respiratory tract infection in Wuhan, China[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2021, 28(23): 29820-29830.
- [43] QIU H, TAN K, LONG F, et al. The burden of COPD morbidity attributable to the interaction between ambient air pollution and temperature in Chengdu, China[J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2018, 15(3): 492.
- [44] ZHANG Y, WANG SG, MA YX, et al. Association between ambient air pollution and hospital emergency admissions for respiratory and cardiovascular diseases in Beijing: a time series study[J]. *Biomed Environ Sci*, 2015, 28(5): 352-363.
- [45] 沈佳惠. 甘肃大气污染对呼吸系统疾病的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- SHEN J H. Study on effects of ambient air pollutants on health risk of respiratory diseases in Gansu[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [46] 曹寒, 李冰潇, 刘晓慧, 等. 大气污染对心血管和呼吸系统影响效应及机制的研究进展[J]. *中国循证心血管医学杂志*, 2022, 14(12): 1522-1526.
- CAO H, LI BX, LIU XH, et al. Research progress on influence and mechanism of air pollution on cardiovascular and respiratory systems[J]. *Chin J Evidence Bases Cardiovasc Med*, 2022, 14(12): 1522-1526.
- [47] RAJAGOPALAN S, AL-KINDI SG, BROOK RD. Air pollution and cardiovascular disease: JACC state-of-the-art review[J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72(17): 2054-2070.
- [48] LIU C, CHEN R, SERA F, et al. Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities[J]. *N Engl J Med*, 2019, 381(8): 705-715.
- [49] 张莹. 我国典型城市空气污染特征及其健康影响和预报研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016.
- ZHANG Y. Studies on air pollution and its health effects in the typical cities of China and their forecast[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [50] CAI J, ZHAO Y, KAN J, et al. Prenatal exposure to specific PM<sub>2.5</sub> chemical constituents and preterm birth in China: A nationwide cohort study[J]. *Environ Sci Technol*, 2020, 54(22): 14494-14501.
- [51] PERKINS SD, MAYFIELD J, FRASER V, et al. Potentially pathogenic bacteria in shower water and air of a stem cell transplant unit[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2009, 75(16): 5363-5372.
- [52] KIM KH, KABIR E, JAHAN SA. Airborne bioaerosols and their impact on human health[J]. *J Environ Sci*, 2018, 67: 23-35.
- [53] BISGAARD H, HERMANSEN MN, BUCHVALD F, et al. Childhood asthma after bacterial colonization of the airway in neonates[J]. *N Engl J Med*, 2007,

- 357(15): 1487-1495.
- [54] HOPPIN JA, UMBACH DM, LONG S, et al. Respiratory disease in United States farmers[J]. *Occup Environ Med*, 2014, 71(7): 484-491.
- [55] ARMSTRONG MT, RICKLES FR, ARMSTRONG PB. Capture of lipopolysaccharide (endotoxin) by the blood clot: a comparative study[J]. *PLoS One*, 2013, 8(11): e80192.
- [56] MARIK PE, CAREAU P. The role of anaerobes in patients with ventilator-associated pneumonia and aspiration pneumonia: a prospective study[J]. *Chest*, 1999, 115(1): 178-183.
- [57] FLANAGAN JL, BRODIE EL, WENG L, et al. Loss of bacterial diversity during antibiotic treatment of intubated patients colonized with *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *J Clin Microbiol*, 2007, 45(6): 1954-1962.
- [58] THILSING T, MADSEN AM, BASINAS I, et al. Dust, endotoxin, fungi, and bacteria exposure as determined by work task, season, and type of plant in a flower greenhouse[J]. *Ann Occup Hyg*, 2015, 59(2): 142-157.
- [59] NAIR AT. Bioaerosols in the landfill environment: an overview of microbial diversity and potential health hazards[J]. *Aerobiologia*, 2021, 37(2): 185-203.
- [60] HOGG JC, CHU F, UTOKAPARCH S, et al. The nature of small-airway obstruction in chronic obstructive pulmonary disease[J]. *N Engl J Med*, 2004, 350(26): 2645-2653.
- [61] LIU J, RAN Z, WANG F, et al. Role of pulmonary microorganisms in the development of chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Crit Rev Microbiol*, 2021, 47(1): 1-12.
- [62] MATHERS CD, LONCAR D. Projections of global mortality and burden of disease from 2002 to 2030[J]. *PLoS Med*, 2006, 3(11): e442.
- [63] SETHI S, MURPHY TF. Infection in the pathogenesis and course of chronic obstructive pulmonary disease[J]. *N Engl J Med*, 2008, 359(22): 2355-2365.
- [64] HUANG YJ, KIM E, COX MJ, et al. A persistent and diverse airway microbiota present during chronic obstructive pulmonary disease exacerbations[J]. *OMICS*, 2010, 14(1): 9-59.
- [65] BOYTON RJ, REYNOLDS CJ, QUIGLEY KJ, et al. Immune mechanisms and the impact of the disrupted lung microbiome in chronic bacterial lung infection and bronchiectasis[J]. *Clin Exp Immunol*, 2013, 171(2): 117-123.
- [66] MAMMEN MJ, SETHI S. COPD and the microbiome[J]. *Respirology*, 2016, 21(4): 590-599.
- [67] COSTA AN, COSTA FM D, CAMPOS SV, et al. The pulmonary microbiome: challenges of a new paradigm[J]. *J Bras Pneumol*, 2018, 44(5): 424-432.
- [68] TOUJANI S, BEN SALAH N, CHERIF J, et al. Primary infection and pulmonary tuberculosis[J]. *Rev Pneumol Clin*, 2015, 71(2/3): 73-82.
- [69] BAUSSANO I, NUNN P, WILLIAMS B, et al. Tuberculosis among health care workers[J]. *Emerging Infect Dis*, 2011, 17(3): 488-494.
- [70] MOLINA-ROMERO C, ARRIETA O, HERNÁNDEZ-PANDO R. Tuberculosis and lung cancer[J]. *Salud Publica Mex*, 2019, 61(3): 286-291.
- [71] MAGUIRE GP, ANSTEY NM, ARDIAN M, et al. Pulmonary tuberculosis, impaired lung function, disability and quality of life in a high-burden setting[J]. *Int J Tuberc Lung Dis*, 2009, 13(12): 1500-1506.
- [72] PASIPANODYA JG, MILLER TL, VECINO M, et al. Pulmonary impairment after tuberculosis[J]. *Chest*, 2007, 131(6): 1817-1824.
- [73] HNIZDO E, SINGH T, CHURCHYARD G. Chronic pulmonary function impairment caused by initial and recurrent pulmonary tuberculosis following treatment[J]. *Thorax*, 2000, 55(1): 32-38.
- [74] ROSS J, EHRlich RI, HNIZDO E, et al. Excess lung function decline in gold miners following pulmonary tuberculosis[J]. *Thorax*, 2010, 65(11): 1010-1015.
- [75] WILLCOX PA, FERGUSON AD. Chronic obstructive airways disease following treated pulmonary tuberculosis[J]. *Respir Med*, 1989, 83(3): 195-198.
- [76] PLIT ML, ANDERSON R, VAN RENSBURG CE, et al. Influence of antimicrobial chemotherapy on spirometric parameters and pro-inflammatory indices in severe pulmonary tuberculosis[J]. *Eur Respir J*, 1998, 12(2): 351-356.
- [77] MOSS WJ. Measles[J]. *Lancet*, 2017, 390(10111): 2490-2502.
- [78] HOPE K, BOYD R, CONATY S, et al. Measles transmission in health care waiting rooms: implications for public health response[J]. *Western Pac Surveill Response J*, 2012, 3(4): 33-38.
- [79] REMINGTON PL, HALL WN, DAVIS IH, et al. Airborne transmission of measles in a physician's office[J]. *JAMA*, 1985, 253(11): 1574-1577.
- [80] MORLEY D. Severe measles in the tropics. I[J]. *Br Med J*, 1969, 1(5639): 297-300.
- [81] STEVENS GA, BENNETT JE, HENNOCCQ Q, et al. Trends and mortality effects of vitamin A deficiency in children in 138 low-income and middle-income countries between 1991 and 2013: a pooled analysis of population-based surveys[J]. *Lancet Glob Health*, 2015, 3(9): e528-e536.
- [82] PERRY R T, HALSEY N A. The clinical significance of measles: a review[J]. *J Infect Dis*, 2004, 189 Suppl 1: S4-S16.
- [83] ENDERS JF, MCCARTHY K, MITUS A, et al. Isolation of measles virus at autopsy in cases of giant-cell pneumonia without rash[J]. *N Engl J Med*, 1959, 261(18): 875-881.
- [84] JIANG G, WANG C, SONG L, et al. Aerosol transmission, an indispensable route of COVID-19 spread: case study of a department-store cluster[J]. *Front Environ Sci Eng*, 2021, 15(3): 46.
- [85] OLDFIELD E, MALWAL SR. COVID-19 and other pandemics: how might they be prevented?[J]. *ACS Infect Dis*, 2020, 6(7): 1563-1566.
- [86] WANG F, KREAM RM, STEFANO GB. Long-term respiratory and neurological sequelae of COVID-19[J]. *Med Sci Monit*, 2020, 26: e928996.
- [87] CALABRESE F, PEZZUTO F, FORTAREZZA F, et al. Pulmonary pathology and COVID-19: lessons from autopsy. The experience of European Pulmonary Pathologists[J]. *Virchows Arch*, 2020, 477(3): 359-372.
- [88] SINGAL CM S, JAISWAL P, SETH P. SARS-CoV-2, more than a respiratory virus: its potential role in Neuropathogenesis[J]. *ACS Chem Neurosci*, 2020, 11(13): 1887-1899.
- [89] TIAN S, XIONG Y, LIU H, et al. Pathological study of the 2019 novel coronavirus disease (COVID-19) through postmortem core biopsies[J]. *Mod Pathol*, 2020, 33(6): 1007-1014.
- [90] XU Z, SHI L, WANG Y, et al. Pathological findings of COVID-19 associated with acute respiratory distress syndrome[J]. *Lancet Respir Med*, 2020, 8(4): 420-422.
- [91] 黄鹏, 唐黎, 任翼, 等. SARS-CoV-2对神经系统损害的研究进展[J]. 中南大学学报(医学版), 2020, 45(10): 1247-1254.
- HUANG P, TANG L, REN Y, et al. Research progress in nervous system damage caused by SARS-CoV-2[J]. *J Cent South Univ Med Sci*, 2020, 45(10): 1247-1254.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 陈姣)