# 环境空气中微生物气溶胶扩散模拟研究进展

董月红[1]　王成鑫[2,3]　薛晓达[4]　楚英豪[3*]　伯　鑫[5*]　傅静雯[1]　陈　珂[6]

(1. 清洁高效燃煤发电与污染控制国家重点实验室 国家能源集团科学技术研究院有限公司,南京 210046;
2. 生态环境部环境工程评估中心,北京 100012;3. 四川大学 建筑与环境学院,成都 610065;
4. 北京航空航天大学 经济管理学院,北京 100191;5. 北京化工大学 化学工程学院,北京 100029;
6. 四川川大生态环境技术有限公司, 成都 610065)

**摘要**:新冠疫情爆发以来,微生物的环境扩散传播及其健康影响引起社会公众的广泛关注。微生物主要以气溶胶为载体,在空气中进行传播。20 世纪 60 年代以来,国内外学者在微生物气溶胶的环境空气扩散模拟领域开展了大量研究工作。基于此,从室内和室外扩散 2 个角度,对基于计算流体力学发展而来的微生物气溶胶室内扩散模拟和基于空气质量模型发展而来的微生物气溶室外扩散模拟研究进行综述,分析了现有研究的建模方法、模型选用、研究内容以及不足之处,提出了微生物气溶胶扩散模拟的未来研究方向,以期为未来更加准确的微生物气溶胶扩散模拟研究提供借鉴与参考。

**关键词**:微生物气溶胶;数值模拟;计算流体力学;空气质量模型

## STUDIES REVIEW ON SIMULATION OF MICROBIAL AEROSOL DIFFUSION IN AMBIENT AIR

Dong Yuehong[1]　Wang Chengxin[2,3]　Xue Xiaoda[4]　Chu Yinghao[3*]　Bo Xin[5*]　Fu Jingwen[1]　Chen Ke[6]

(1. State Key Laboratory of Clean and Efficient Coal-fired Power Generation and Pollutant Control, State Power Environmental Protection Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210046, China; 2. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 3. School of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; 5. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 6. Sichuan Univ. Eco-technology Co., Ltd, Chengdu 610065, China)

**Abstract**: Since the outbreak of the new crown epidemic, the spread of microorganisms in the environment and their health effects on living organisms have attracted more and more attention from the public. Airborne transmission with aerosols as a carrier is an important way for microbial environmental transmission. Since the 1960s, scholars have carried out many researches in the field of microbial aerosol diffusion simulation of ambient air. Based on these studies, this article reviews the indoor diffusion simulation of microbial aerosols based on computational fluid dynamics and the outdoor diffusion simulation of microbial aerosols based on the development of air quality models from the perspectives of indoor and outdoor diffusion. The article discusses the existing research modeling methods, model selection, research content and shortcomings, And proposes the future research direction of microbial aerosol diffusion simulation, hoping to provide reference and reference for more accurate microbial aerosol diffusion simulation research in the future.

**Keywords**: microbial aerosol; numerical simulation; computational fluid dynamics; air quality model

收稿日期:2021-10-21

基金项目:清洁高效燃煤发电与污染控制国家重点实验室/国家能源火力发电节能减排与污染控制技术研发(实验)中心开放课题(D2020Y004-2);国家自然科学基金项目(72174125);中央高校基本科研业务费资助(buctrc202133)

第一作者:董月红,女,高级工程师,主要研究方向为电力科技与环保。

*通信作者:楚英豪,男,教授,主要研究方向为环境污染控制及资源化、环境材料。

伯鑫,男,教授,主要研究方向为大气污染控制技术与政策研究、环境科学。



中国知网 https://www.cnki.net

## 0 引 言

微生物在自然界的物质循环与能量循环中发挥重要作用,空气传播是微生物在环境中的重要传播方式,但致病微生物的传播扩散会对动植物及人体健康造成巨大影响[1]。2019 年 7—8 月,兰州生物制药厂布鲁氏菌泄漏,影响居民人数超过 10000 人[2];2019 年底,新冠疫情爆发并在极短的时间蔓延全球,截至 2021 年 10 月 15 日,全球累积确诊病例达到 239437517 例,约占全球总人口的 3.19%[3]。在新冠疫情的背景下,微生物的环境空气传播越发引起公众与学者的关注。

由于部分微生物不能以个体形式在空气中长时间存活,大气气溶胶成为微生物在环境空气中存活与传播的重要载体[4]。当微生物(细菌、真菌、支原体、病毒等)通过气溶胶化过程进入气溶胶体系,形成了微生物气溶胶(图 1)[5]。微生物气溶胶的产生途径可分为室内场所和室外场所产生。动物与人是室内气溶胶产生的重要源头,正常的呼吸作用、患病后的咳嗽等都会产生携带微生物的气溶胶;一些适温潮湿的设备内部或场所(如空调、厕所)也能产生微生物气溶胶[6-8]。室外微生物气溶胶的产生途径多样,污水处理厂、垃圾填埋场、养殖场、生物技术制药企业等都会产生微生物气溶胶并释放到大气环境中,生物恐怖袭击也会导致室外微生物气溶胶的产生[9-13]。因生物特性和所处环境不同,不同种类的微生物气溶胶在大气环境的存在状态与粒径分布存在差异,表 1 为我国部分城市环境空气中微生物粒径分布[14-20]。

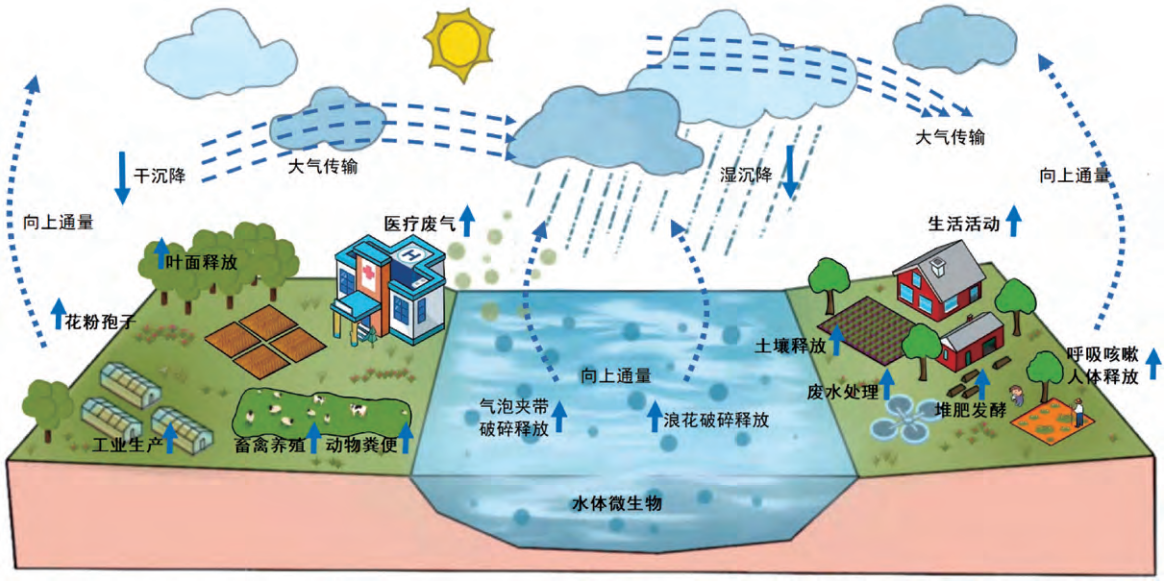



图 1 环境空气中微生物气溶胶的产生

**表 1 我国不同城市微生物颗粒粒径分布特征**

| 城市 | 真菌 | 细菌 | 放线菌 | 备注 |
|---|---|---|---|---|
| 北京 | ≈2.0 | ≈2.5 | ≈2.0 | 中值粒径,全年 |
| 兰州 | 3.88~4.12 | 4.62~4.79 | 2.75~3.3 | 中值粒径,春季 |
| 西安 | 1.72±1.00 | 2.13±1.36 | — | 粒径范围,晴天 |
| | 1.86±1.10 | 2.00±1.34 | — | 粒径范围,霾天 |
| 青岛 | ≈2.2 | ≈4.6 | — | 中值粒径,春季 |
| | ≈1.9 | ≈4.1 | — | 中值粒径,夏季 |
| 杭州 | ≈2.9 | ≈3.6 | — | 中值粒径,全年 |
| 广州 | 1.1~3.3 | 1.1~7.0 | — | 粒径范围,夏季 |
| 台北 | 1.96~3.4 | — | — | 中值粒径,夏季、冬季 |

利用数值模拟研究微生物气溶胶的空气传播特征是 20 世纪中后期出现的研究方法,一方面可以降低研究成本,同时能对微生物气溶胶扩散传播特征进行更加直观、全面的呈现[21]。因室内和室外环境的差异,微生物气溶胶室内和室外空气扩散模拟的模型方法存在差异。计算流体力学(CFD)是室内模拟的建模基础,利用 CFD 可以精细化建模的特性,能够对微生物气溶胶的产生-扩散-传播进行高精度还原,被学者们广泛使用;室外空气中的微生物扩散模拟主要以空气质量模型为基础,如高斯扩散模型、CALPUFF 模型等被应用于较大尺度的微生物气溶胶扩散模拟,但在一些小的室外尺度(如小区),CFD 方法依旧被使用。Xu 等、Ghosh 等、Fröhlich-Nowoisky 等[22-24]、Smets 等[4]和李彦鹏等[5]分别从检测与采样技术、来源与传输、生物健康与



中国知网 https://www.cnki.net

控制和雾霾污染天气下微生物气溶胶特性等方面综述微生物气溶胶领域的研究现状。当前研究综述文献,未全面系统地梳理微生物气溶胶在不同范围内扩散模拟的研究进展。本文从微生物气溶胶扩散的数值模拟出发,查阅国内外文献,对微生物气溶胶在室内和室外空气扩散模拟2个领域的研究进行总结,以期为更加准确的模拟微生物气溶胶扩散提供参考和借鉴。

## 1 室内空气中微生物气溶胶扩散模拟研究

室内环境是人类生产生活的主要场所,室内微生物气溶胶直接影响人群健康。王贝贝等[25]通过问卷调查分析了我国31省市居民的室内外活动时间分配特征,结果表明:我国居民每天的室内平均停留时间达到1200 min,而室外平均停留时间仅为221 min。叶琬等[26]研究发现北京密云地区农民的每日室内活动时间达17.58 h(年平均),并且冬季室内停留时间(>20 h)远超夏季停留时间(≈16 h)。因此,开展微生物气溶胶的室内扩散研究对评估微生物气溶胶的环境健康具有重要意义。

数值模拟是国内外学者研究微生物气溶胶、气体、颗粒物环境空气扩散特征的重要手段[27,28]。当前室内空气中微生物气溶胶扩散模拟研究中,CFD是主要工具之一,20世纪70年代开始被应用于室内空气流动研究[29]。利用CFD建模模拟微生物的室内扩散特征,关键在于选用合适的连续相湍流模型(空气)与离散相模型(微生物颗粒)来准确模拟真实的情景[30]。对于离散相的处理方法有Euler法和Lagrange法2种,Euler法将离散相视作“拟流体”,将连续相和离散相视作相互贯穿但总体积一致的连续介质,根据各相的守恒方程进行建模;Lagrange法以离散相颗粒为对象,可以在拉氏坐标系下计算颗粒物在连续相中的移动轨迹,被称为颗粒轨道模型[27,31-35]。在实际应用中,学者发现Euler法会带来较为严重的数值扩散,影响计算模拟的准确性[35-37],因此Lagrange法得到更加广泛的应用。Lagrange法的主要优点包括能够更准确地描述离散相与边界之间的相互作用等[27,32,33]。除CFD外,学者们也会在研究中自己开发新的室内空气扩散模型,或对原有模型进行简化、修改、完善,使之更符合实际情景[33,34,38]。

非典疫情之前,学者们对于微生物气溶胶的室内研究主要集中在微生物的室内传染可能性、传播方式等;2003年非典疫情爆发,室内微生物气溶胶扩散模拟迎来广泛关注[39-41]。赵彬等[42-44]将计算流体力学(CFD)与室内微生物颗粒物的研究结合,利用数值模拟方法,在人体飞沫传播数值模拟、不同通风方式数值模拟及微生物颗粒在相邻房间的扩散特征等领域开展了众多研究。李光熙等[45]利用CFD模型模拟了SARS病人咳嗽过程释放的飞沫在室内的动态传播过程,为SARS病毒预防提供了支撑。陈帆等,周涛等[46,47]分别则对非典病房气流分布特征和SARS病毒的空气动力学特性开展了相关研究。除SARS病毒外,也开展了人体释放的其他病原微生物的室内扩散研究。刘树森[35]以“理论计算+实验模拟+Fluent计算模拟”的方式,对人体口腔产生的微生物气溶胶在室内扩散活动进行研究,表明人体呼吸释放的微生物气溶胶,在室内的传播距离与室内环境因素、自身释放速度以及释放点尺寸有关;并且微生物气溶具有很好的气流跟随性,能随气流进行远距离传输。Villafruela等[48]通过CFD模型,模拟室内不同呼吸情景下,双源释放的微生物的空气传播,结果发现在呼吸源间隔距离较短的情况下,呼吸间的相互作用是空气交叉感染的关键因素,而对于呼吸源距离较长的情景,室内的一般气流条件对交叉感染的影响更大。因为实验条件的限制,上述研究中有的缺少实验验证,或仅使用普通颗粒物进行验证,因此上述研究的部分成果,在准确性上仍有待考证。

在后非典时代,随着空调、空气净化装置等设备使用的普及,基于通风系统的室内微生物气溶胶扩散模拟研究成为热点。Jennifer R. B.[49]利用CFD模拟了空气感染隔离室中,不同通风情境下病人呼吸释放的致病菌的扩散传播,发现在拥有通风系统的情况下,病人释放的病原体依旧存在意外暴露风险。何娟[32]、Qian等[38]、Villafruela等[52]、King等[51]、蔡志斌[34]基于计算流体力学,从通风送风形式、暴露风险、模型比较等角度出发,分别探讨了通风量、新风比、气流模式、空调开机、新风系统过滤方式等因素对室内微生物扩散特征、室内微生物浓度以及暴露风险的影响(图2)。李梦雪[31]模拟了医院呼吸科区域病人释放的微生物在室内传输特征,并从布局改变通风的角度,探讨了医院呼吸科门诊科室的合理布局方式。为空调行业、空气净化器行业的研发与室内疾病预防提供了重要的理论支撑。



中国知网 https://www.cnki.net

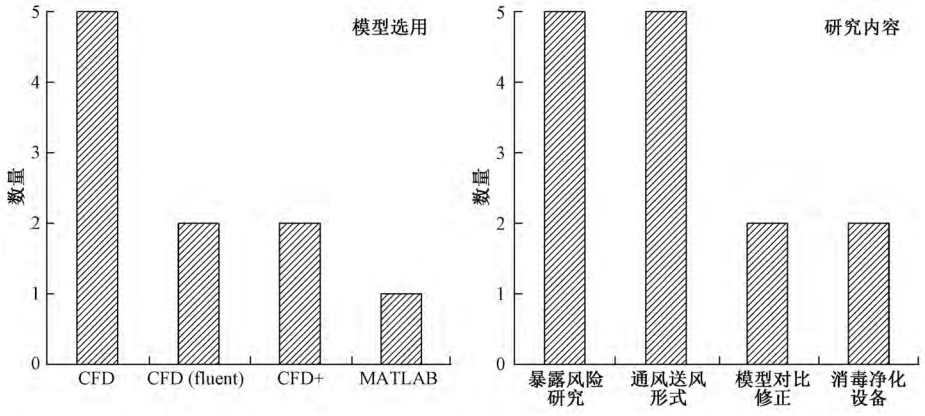



图 2　通风系统数值模拟研究模型选用与研究内容

2019 年底新冠疫情爆发,新冠病毒的扩散传播成为新的研究热点。新冠病毒传播途径为飞沫传播、接触传播、气溶胶传播等[54]。李玉国等[55]将室内环境中,近距离与远距离的空气传播归为新冠病毒的主要传播途径,并且近距离传播占主要。针对新冠病毒的室内扩散特征,近 2 年学者们利用数值模拟方法进行众多研究。Dhawan 等[56]利用 CFD 建立了估算新冠病毒短程传播与飞沫吸入风险的模型,并利用模型模拟多种情景下新冠患者对邻近暴露者的短程暴露风险,结果表明病毒载量、释放速率、停留时间、空气流速等均会对暴露风险造成影响。汪新智等[57]在新冠疫情爆发不久后,利用 ANSYS@ Fluent 简化模拟房间、电梯等密闭空间中携病毒飞沫的扩散过程;发现上下通风方式可有效抑制密闭空间空气扰动,利于飞沫快速排出。李玉国等[58]基于广州某餐馆新冠病毒聚集感染事件,通过实地试验和计算模拟方法,再现病毒传播情景,结果表明:感染分布与代表呼出的携带病毒的气溶胶远距离传播的传播模式一致,证实了新冠病毒空气传播的可能性。Yang 等[59]利用 CFD 建模,设置不同粒径下热人体释放液滴的情景,复原了湖南某公交巴士新冠传播过程,结果表明客车通风情况、车内相对湿度和初始释放液滴对车内液滴传输扩散具有显著影响。为确定新冠肺炎传播途径和建立科学的疫情防控办法提供了重要支持。

## 2　室外空气中微生物气溶胶扩散模拟研究

与室内环境的密闭、通风条件差相比,室外大气环境更加开放和易于空气的扩散流通,但在一些特定的场所和情况,室外空气中的微生物同样能导致人体或动植物患病,对生物健康造成影响,如污水处理厂、垃圾填埋场、养殖场等场所的释放或生物恐怖袭击等。针对室外环境中微生物气溶胶扩散、传输、分布特征,国内外学者基于空气质量模型进行了众多研究。本文查阅了 20 世纪 70 年代以来的众多文献,对室外空气中微生物气溶胶扩散模拟研究进展进行综述。

### 2.1　微生物气溶胶大气扩散模型

大气扩散模型从公式原理上可分为 Euler、Lagrange 和 Gauss 模型。Euler 模型主要基于对流扩散方程所构建,对流扩散方程将风和湍流中的粒子运动描述为式(1),该公式是对流体动力学中更复杂的 Navier-Stokes 的简化[60,61]。Gauss 公式是对流扩散方程进行众多假设简化后所得到的 1 个简化的解[式(2)][62],基于纯粹的高斯公式构建的扩散模型即为高斯模型(又称高斯烟羽模型),若将高斯公式嵌入 Lagrange 模型,则形成了高斯烟团模型。Euler 与 Lagrange 模型的一种耦合使用方法即为计算流体力学(CFD),它同时统筹 Euler 法和 Lagrange 法公式进行建模,对 Navier-Stokes 进行数值求解[21]。室外微生物气溶胶扩散模拟的常用模型见表 2,高斯烟羽模型和高斯烟团模型是微生物大气扩散模拟主要模型。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q - u\frac{\partial C}{\partial x} - v\frac{\partial C}{\partial y} - w\frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial t}\left[K_x\frac{\partial C}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial t}\left[K_y\frac{\partial C}{\partial y}\right] + \frac{\partial}{\partial t}\left[K_z\frac{\partial C}{\partial z}\right] \quad (1)$$

式中:公式左侧为离子局部浓度的时间变化;$Q$ 为释放速率,其后 3 项表示颗粒物在不同方向的平流传输;最后 3 项则表示粒子在不同方向上的湍流传输,$K$ 为涡流扩散系数。



中国知网　https://www.cnki.net

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi U\delta_y\delta_z}\cdot\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta_y}\right)^2\right]\cdot\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z-H}{\delta_z}\right)^2\right]\right\}+\left\{\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z+H}{\delta_z}\right)^2\right]\right\} \quad (2)$$

式中：$Q$，$H$，$U$ 分别为污染物的单位排放量、烟囱有效高度和烟囱出口处风速；$Y$，$Z$ 为源的水平和铅直坐标；$\delta_y$，$\delta_z$ 分别为水平和铅直方向的扩散参数。

**表 2　被应用于微生物气溶胶扩散模拟的空气质量模型**

| 模型名称 | 模型类型 | | | | | | 能否考虑沉降 | 能否粒径分级 | 开发者 | 文献 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 高斯烟羽 | 高斯烟团 | Euler 对流模型 | Lagrange 颗粒 | Lagrange 轨迹 | CFD | | | | |
| ADMS | √ | — | — | — | — | — | √ | √ | 剑桥环境研究公司等 | [63] |
| AERMOD | √ | — | — | — | — | — | √ | √ | 美国环保署、美国气象学会 | [64] |
| ALOHA | √ | — | — | — | — | — | — | — | 美国国家海洋和大气管理局 | [65] |
| GIADA | √ | — | — | — | — | — | U | U | 意大利环境保护署 | — |
| OPS-ST | √ | — | — | — | — | — | √ | √ | 荷兰国立公共卫生暨环境研究所 | [66] |
| CALPUFF | — | √ | — | — | — | — | √ | √ | 美国环保署 | [67] |
| DERMA | — | √ | — | — | — | — | √ | √ | 丹麦气象研究所 | [68] |
| HPAC | — | √ | — | — | — | — | U | U | 美国国防威胁压制局 | [69] |
| HYSPLIT | — | √ | — | √ | √ | | √ | √ | 美国国家海洋和大气管理局等 | [70] |
| ICAIR | — | √ | — | — | — | — | U | U | — | — |
| INPUFF | — | √ | — | — | — | — | √ | √ | 美国环保署 | [71] |
| MLCD | — | √ | — | — | — | — | √ | × | 阿尔伯塔大学、加拿大气象中心 | [72,73] |
| NAME | — | √ | — | √ | √ | — | √ | √ | 英国国家气象局 | [74,75] |
| OMEGA | — | √ | √ | √ | — | — | √ | √ | 美国国际科学应用公司大气物理中心 | [76] |
| RIMPUFF | — | √ | — | — | — | — | √ | √ | 丹麦 Risø 国家实验室 | [77] |
| DEREAM | — | — | √ | — | — | — | √ | √ | 马耳他大学 | [78] |
| SILAM | — | — | √ | √ | — | — | √ | √ | 芬兰国家技术研究中心、塔尔图大学等 | [79] |
| RegAQMS | — | — | √ | — | — | — | √ | √ | 南京大学 | [80] |
| LODI | — | — | — | √ | — | — | √ | √ | 美国能源部，加利福尼亚大学 | [81] |
| Fluent | — | — | — | — | — | √ | √ | √ | 美国 ANSYS 公司 | [82] |
| CFD | — | — | — | — | — | √ | √ | √ | — | [83] |

注：U 表示该栏信息未查询到相关信息

### 2.2　微生物气溶胶的室外大气扩散研究

研究者利用大气扩散模型对微生物气溶胶的大气环境扩散进行研究，包括口蹄疫病毒、禽流感病毒、炭疽杆菌、布鲁氏菌、嗜肺军团菌等。

#### 2.2.1　口蹄疫病毒

口蹄疫是一种由口蹄疫病毒引起的烈性传染病，可对牛、羊、猪等牲畜造成严重健康危害[84]，20 世纪 50—60 年代，英法等国爆发的口蹄疫疫情造成了近 3 亿英镑的损失，因此早期的微生物气溶胶扩散模拟主要是研究口蹄疫病毒的大气传播。Blackall 等[85]在 1981 年用简化高斯扩散模型并结合剂量响应函数计算农场周围的口蹄疫剂量，并得到预测剂量和观测剂量非常接近的结论。Gloster 等[86]比较了 CALPUFF、HYSPLIT、LODI 等 6 个大气扩散模型对扣题疫病毒大气扩散的模拟效果，发现 6 个模型虽然在预测结果上存在较小差异，但都可以用于模拟口蹄疫疫情爆发过程。Sanson 等[87]利用 NAME 模型重新分析了 1967—1968 年的英国口蹄疫疫情，认为空气传播是口蹄疫病毒扩散的重要途径，并且地形因素会显著影响生物气溶胶的扩散。王体健团队[88]也曾研究口蹄疫病毒的空气扩散问题，该团队将生物气溶胶生物学衰变等因子引入其开发的 RegAQMS 区域空气质量模型，使模型具有模拟生物气溶胶扩散的能力；并以口蹄疫病毒为例模拟分析了我国东南沿海口蹄疫病毒地面浓度和安全风险，发现在模拟范围内主要是低风险区和安全期，感染区面积不足 1%。Maragon 等、Kritana 等[89,90]利用不同大气扩散模型对口蹄疫病毒的大气扩散传播进行研究，但这些研究中仅有少部分进行定量分析，更多进行地理可视化呈现。

#### 2.2.2　禽流感病毒

禽流感病毒是流感病毒的重要变种，一种致病性极强 RNA 病毒，曾在澳大利亚、中国、荷兰等多国造成大流行。禽流感病毒不仅感染禽类，其部分分型也能导致猪、马等哺乳动物以及人类患病[91]。关于禽流感病毒的空气扩散研究相对较少，Ssematimba 等[92]基于高斯扩散公式，结合粉尘沉降公式，病原体



中国知网 https://www.cnki.net

衰变公式以及农场感染过程模型开发了农场微生物扩散模型;并利用模型评估了2003年荷兰高致病性禽流感病毒(HPAI)大流行的风媒传播贡献,结果显示,风媒途径在25 km范围以内的贡献率达到24%;该团队还利用对该模型进行风速、沉降速度、释放高度等因子的敏感性实验,发现这些因子改变在2 km的范围内影响较大。Seo和lee等[93-95]开展了多因素网络预测高致病性禽流感传播的研究,利用CFD和GIS模型建模模拟2008年韩国HAPI流行情景,预测了不同风况下病毒源场的扩散情况,分析了由39个农场传播到另一个农场的空气传播可能性。Zhao等[96]对美国2015年禽流感疫情中病毒的空气传播可能性进行研究,利用HYSPLIT模型对爱荷华州疫情养殖场进行后向轨迹计算,分析了模拟病毒浓度;发现该州大部分疫情发生可能是由州内或邻州受感染农场传递导致,并认为感染概率与农场内群、种群大小以及与邻近感染农场距离有关,对预防疫情提出了增加空气过滤以及减少种群数量的预防建议。

**2.2.3** 炭疽杆菌

炭疽杆菌是一种能引起人畜患病的强传染性细菌,传染途径多样,接触带有细菌的动物、土壤;食用加热不充分的病畜肉和吸入带病菌的空气都可能导致人体患病[97]。因其潜伏期短,致病致死性强,曾被用作生物恐怖袭击的生物战剂[98,99]。针对炭疽杆菌的大气扩散模拟研究多是基于恐怖袭击案件或假设恐袭情景进行。Meselson等[100]利用高斯烟羽模型模拟1979的苏联斯维尔德洛夫斯克发生的炭疽热流行事件,发现患病的人与牲畜集中的狭窄区域与事件发生期间某一天的主导风向平行,且位于某微生物军事设施下风向,认为军事设施炭疽杆菌泄漏是导致事件的原因,约40亿孢子被泄漏到环境中。由于炭疽杆菌的高危险性,学者们开发了针对炭疽杆菌的泄漏应急预案模型[101-103],这些模型多由扩散模块、剂量响应模块、疾病进展等多个子模块构成,研究表明从25 km到200 km都可能是病菌扩散的感染范围,部分研究认为在下风向200 km的感染风险高达65%。

除高斯扩散模型外,OMEGA、CALPUFF、CFD模型也被应用于炭疽杆菌的扩散模拟。Nicogossian等[104]利用OMEGA模型模拟了多种情境下在华盛顿特区地铁释放武器级炭疽杆菌孢子的大气扩散,结果表明在低湿度、高紫外辐射的夏季清晨释放,将对环境和健康产生最大影响。Isukapalli等[105]基于CALPUFF模型建立了从源到剂量的模块化应急响应系统,并应用与模拟假想的炭疽杆菌释放情景,比较了不同活动模式,释放模式对模拟结果的影响,认为模块化的系统可降低模拟过程的不确定性,提高模拟结果的准确性。刘健利用CFD方法,模拟了假设城市小区中炭疽杆菌短期释放的扩散情景,并评估扩散对不同年龄段人群的感染风险[106,107]。对于炭疽杆菌的大气扩散研究,如今已有系统的研究思路,包括污染源释放率的量化以及后续的微生物安全风险评估,但这些研究中多是假想情景开展,缺少对实际结果的验证。

**2.2.4** 嗜肺军团菌

军团菌是导致人类肺炎的重要致病细菌,嗜肺军团菌是导致军团菌肺炎患病概率最高的种属。吸入带病菌的空气、土壤颗粒以及饮用含菌的水都可能引起感染患病[108]。根据Walser等[109]的统计,2001—2012年,全球有12个国家爆发了19次大规模的军团菌感染,其中大部分与冷却塔有关;少有的嗜肺军团菌的大气扩散研究也是围绕冷却塔释放开展。针对2003年底法国加莱海峡爆发的社区军团菌疫情,Nguyen等[110]利用假设源强分析影响并否定其他来源的方法,肯定了导致疫情爆发的原因为冷却塔的释放,该团队在研究中发现假设源强的释放情景的扩散影响对实际的患病区域有着极好的覆盖,并认为嗜肺军团菌的大气扩散影响距离可能要远于原有报道,可影响距离排放源6 km的距离。此后,Nygård、Blatny、Fossum等[111-113]也采用了类似的方法来确定嗜肺军团菌的释放来源,但他们在模型的选用上分别选择了INPUFF、CFD模型(后两者),模拟的结果应用于支撑相关的空气微生物检测采样布点。此外,由于难以获取长时段准确三维气象场,在对2014年里斯本军团菌大爆发起因的研究中,Russo等[114]采用了AW法进行了疫情来源分析,该方法仅对当地的气象进行模拟,并对扩散条件进行分析,而不需进行具体的扩散模拟;该研究最终认为停滞和再循环的气象条件是导致里斯本疫情的重要原因[115]。

**2.2.5** 其他微生物

除上述微生物外,学者也研究了一些其他微生物气溶胶的室外空气扩散情景,但相关研究相对较少。1983年,Gloster[116]利用高斯烟羽模型分析了英国的2次新城疫疫情,对新城疫病毒的空气传播进行研究。20世纪后期,Gloster等、Casal等[117,118]利用高斯



中国知网 https://www.cnki.net

扩散公式与 ALOHA 模型研究了引起猪奥耶斯基氏病的伪狂犬病毒的空气传播,并证实了风速对病毒传播的的影响。Ignatius 等[119]利用 CFD 模型模拟 2003 年香港 Amoy Gardens 小区 SARS 病毒社区爆发的情景,结果表明在 SARS 病毒的空气传播对社区爆发起着重要作用。Liu 等[120]基于大涡数值模拟与拉格朗日-欧拉扩散模式构建了微生物扩散计算方法,研究了流感病毒的室内外扩散特征与暴露。2007—2010 年,荷兰爆发了迄今为止最大规模的由贝纳柯克斯体引起的 Q 热大流行,Sauter 等[121]与 Van 等[122]利用 OPS-ST 模型对此次流行中的 3 个区域进行研究,通过将不同情境下模拟病毒浓度与发病率数据进行关联分析发现,相较另外 2 个对照情景,基于大气扩散模型模拟的病毒浓度与发病率之间表现出最好的相关性。Douglas 等[123]对利用 ADMS 模型模拟开放堆肥过程的生物气溶胶扩散的输入参数开展了敏感性研究,结果显示预测暴露量与干湿沉降模块及排放特征参数的设置间呈现较高敏感性。袁文燕等[11]利用 CALPUFF 模型模拟疫苗厂布鲁氏菌泄漏的大气扩散,并结合人口数据进行潜在风险评估。新冠疫情后,针对室外人体呼出的携病毒飞沫的空气传播,Yang 等[124]利用 CFD 模型进行研究,分析了风速、距离等因素对飞沫扩散的影响,建议人在室外时不仅要保持 1.5 m 以上的距离,还要与盛行风向保持一定角度。值得一提的是,虽然刚研究模拟的室外情景,但其研究距离也仅在 5 m 以内。呼肠孤病毒、镰胞菌、拟球虫、小球虫等微生物的大气扩散,也有学者利用高斯扩散模型等模型开展研究[125-127]。

**2.2.6** 特殊场景的室外微生物扩散模拟研究

污水处理厂、垃圾填埋场是产生微生物气溶胶的重要场所,众多学者对污水处理厂微生物种类分布特征、生物气溶胶粒度特征、扩散特征进行研究。Sorber 等与 Teltsch 等[128,129]分别利用高斯烟羽对污水处理厂的大肠杆菌扩散进行模拟,在将模拟结果与检测结果进行相关性分析时,两者的研究都表现出极好的相关性,相关系数分别达到 0.72 与 0.93。Roest 等[130]测算了曝气器周边嗜常温菌的空气浓度作为源强,利用高斯烟羽模型并结合源强衰减曲线对嗜常温菌的扩散进行研究,得到可接受的低风险值在不同下风向距离的结论。Dungan[131]利用 AERMOD 模型模拟了污水处理厂多种微生物的扩散并计算空肠弯曲菌在下风向的最大暴露风险[131]。邱雄辉[132]也利用高斯模型对污水处理厂的微生物气溶胶扩散进行研究,并结合微生物失活的特性,提出了 1 套计算微生物气溶胶暴露风险的方法。关于垃圾填埋场含菌气体的研究较少,许鸿飞等[133]、张婧等[134]、王莹等等[135]对填埋厂微生物气溶胶浓度、粒径分布和环境空气逸散暴露风险等进行讨论,但没有对其大气扩散特征进行分析,尚未公开发表的关于基于大气扩散模型的填埋场微生物气溶胶扩散的研究。

移动交通工具同样可能成为微生物气溶胶的释放源,如运输动物或携带武器级炭疽杆菌的汽车。Seedorf 等[136]利用 OpenFOAM 模型(一款开源的 CFD 模型)模拟 80 km/h 速度下,动物运输车在被动通风和强制通风下的车内外空气流动情况,可视化分析了移动状态下车辆释放的微生物气溶胶的独特分布模式,认为由于运输车内外气团再循环,微生物气溶胶的释放与扩散变得极其复杂,更精细的计算需要通过提高计算系统运算能力才能达到。Nicogossian 等[104]利用 OMEGA 模型模拟地铁释放炭疽杆菌的情景,将模拟结果叠加 GIS 地图后发现,地铁系统释放的微生物气溶胶对基础设施的影响极小,更多是对通勤人员和公共交通运营产生影响,进而间接影响医疗系统。

**2.3** 小 结

相比于室内微生物为溶胶的扩散模拟主要围绕 CFD 模型展开,室外微生物气溶胶扩散模拟所采用的模型种类更多,主要有以下几个特点:

1)早期研究大部分基于高斯模式开展,但随着计算机科学的发展,模型种类越加繁多,准确性也在不断提高。

2)气象因子、释放强度、释放参数、微生物衰变、传播距离是影响室外空气中微生物气溶胶扩散与致病的重要因子,也是国内外研究的热点领域。

3)对于大范围的室外微生物气溶胶扩散研究,主要利用空气质量模型开展,小范围的室外微生物气溶胶扩散模拟则主要利用 CFD 方法建模研究;前者可用来宏观地呈现微生物气溶胶扩散的环境影响或最终疫情的起源,后者则能够模拟一些微观细节。

4)在模型参数的设置上,不同的研究对微生物扩散模拟进行了不同的参数简化,有的研究将微生物气溶胶颗粒视作无机粒子进行分析,也有学者将微生物的衰减、死亡等过程纳入建模过程,力求获得更加接近实际的模拟结果。

5)部分学者在微生物气溶胶扩散模拟的基础上



中国知网 https://www.cnki.net

结合微生物的暴露风险开展进一步研究,分析了微生物气溶胶扩散的环境健康风险,但暴露风险的计算方法存在差异。

## 3 结论与展望

随着微生物气溶胶相关理论的完善和计算机科学技术的进步,微生物气溶胶的环境空气扩散研究取得重大进展。室内扩散领域形成了以 CFD 模型为核心的计算模拟体系,可以精细化地模拟微生物气溶胶的室内扩散过程,为室内通风设计、医院科室布局、疫情防控等提供了科学支撑。室外空气扩散领域主要在空气质量模型的基础上继续发展,在无机粒子模拟的基础上引入微生物衰减、剂量反应、暴露参数等因子,力求更好地模拟实际的微生物扩散情景;室外空气扩散模型的发展,为疫情溯源、疫情防控、和生物恐怖应急响应等提供了新的解决方案。但这些研究也有不足之处,包括不同学者的参数设置不同、微生物的生物特性没有得到较好的模拟、定量分析较少等[24]。针对这些不足,后续研究可以从以下几个方向展开:

1)建模机制精细化。室内扩散模拟基于 CFD 可以精细建模的特点,应更多地将微生物气溶胶的生物特性纳入建模机制,考虑不同微生物的特性差异,寻求更加准确的微生物扩散建模机制。

2)定量分析与暴露风险机制。室外扩散模拟参数设置相对简单,从扩散浓度到健康风险的剂量-反应机制尚不健全,后续研究应在定量分析和定量评估微生物暴露风险方面继续探索。

3)模型评估与建模标准化。当前用于室外微生物空气扩散模型众多,参数设置不统一,对微生物气溶胶模拟的准确度存在较大差异,因此需要研究者通过实验-模拟对比的方式对众多模型进行对比分析,筛选具有应用前景的优势模型,并推进微生物建模标准化。

4)公共卫生应急响应。参考炭疽杆菌的生物恐怖应急处理机制,其他微生物的公共卫生事件响应系统也可以建立起来,以研究指导实际。

### 参考文献


[1] 何培新. 高级微生物学[M]. 北京:中国轻工业出版社,2017.

[2] .刘晓芳. 兰州兽研所布鲁氏菌抗体阳性事件属地善后处置工作新闻通气会召开[N]. 兰州日报,2020-12-04(3).

[3] World Health Organization. WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard[EB/OL]. [2021-10-18]. https://covid19.who.int/.

[4] SMETS W, MORETTI S, DENYS S, et al. Airborne bacteria in the atmosphere: Presence, purpose, and potential [J]. Atmospheric Environment, 2016, 139: 214-221.

[5] 李彦鹏,刘鹏霞,谢铮胜,等. 霾污染天气大气微生物气溶胶特性的研究进展[J]. 科学通报, 2018, 63(10): 940-953.

[6] CHEN X, KUMARI D, ACHAL V. A review on airborne microbes: the characteristics of sources, pathogenicity and geography[J]. Atmosphere, 2020, 11(9): 919.

[7] 李梦雪. 门诊呼吸科区域微生物污染物运动规律模拟研究[D]. 上海:东华大学,2019.

[8] KANG M, WEI J, YUAN J, et al. Probable evidence of fecal aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a high-rise building[J]. Annals of internal medicine, 2020, 173(12): 974-980.

[9] SINGH N K, SANGHVI G, YADAV M, et al. A state-of-the-art review on WWTP associated bioaerosols: Microbial diversity, potential emission stages, dispersion factors, and control strategies [J]. Journal of Hazardous Materials, 2020: 124686.

[10] 张婧,夏立江,杜文利,等. 垃圾填埋场微生物气溶胶粒径分布研究[J]. 环境工程学报,2009,3(9):1620-1624.

[11] 袁文燕, 王鹏, 伯鑫,等. 含菌气溶胶扩散对人群的潜在影响风险[J]. 中国环境科学, 2020,40(7):3173-3178.

[12] YANG X, YANG H, OU C, et al. Airborne transmission of pathogen-laden expiratory droplets in open outdoor space [J]. Science of The Total Environment, 2021, 773(6):145537.

[13] 刘健. 城市小区环境中生物剂气溶胶的扩散模拟方法研究[D]. 北京:中国人民解放军军事医学科学院,2012.

[14] 方治国,欧阳志云,胡利锋,等. 北京市三个功能区空气微生物中值直径及粒径分布特征[J]. 生态学报,2005(12):3220-3224.

[15] 赵炜,李杰,谢慧娜,等. 兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性[J]. 环境科学,2021,42(4):1668-1678.

[16] 路瑞,李婉欣,宋颖,等. 西安市不同天气下可培养微生物气溶胶浓度变化特征[J]. 环境科学研究,2017,30(7):1012-1019.

[17] 姚文冲,楼秀芹,方治国,等. 南方典型旅游城市空气微生物粒径分布特征[J]. 中国环境科学,2016,36(10):2938-2943.

[18] 宋志文,王琳,任杰,等. 青岛市区春、夏季生物气溶胶浓度分布及特征[J]. 青岛理工大学学报,2014,35(3):1-6,23.

[19] 宋超杰,谭启明,陈贤亮,等. 广州市夏季微生物气溶胶细菌谱和粒径分布特征[J]. 中国热带医学,2009,9(10):1974-1977.

[20] LIN W H, LI C S. Size characteristics of fungus allergens in the subtropical climate[J]. Aerosol Science and Technology, 1996, 25(2): 93-100.

[21] vAN LEUKEN J P G, SWART A N, HAVELAAR A H, et al. Atmospheric dispersion modelling of bioaerosols that are pathogenic to humans and livestock-A review to inform risk assessment studies [J]. Microbial Risk Analysis, 2016, 1: 19-39.

[22] XU Z, WU Y, SHEN F, et al. Bioaerosol science, technology, and engineering: past, present, and future[J]. Aerosol Science and Technology, 2011, 45(11): 1337-1349.

[23] GHOSH B, LAL H, SRIVASTAVA A. Review of bioaerosols in




中国知网 https://www.cnki.net

indoor environment with special reference to sampling, analysis and control mechanisms[J]. Environment international, 2015, 85: 254-272.

[24] FRÖHLICH-NOWOISKY J, KAMPF C J, WEBER B, et al. Bioaerosols in the Earth system: Climate, health, and ecosystem interactions[J]. Atmospheric Research, 2016, 182: 346-376.

[25] 王贝贝,王宗爽,赵秀阁,等.我国成人室内外活动时间研究[J].环境与健康杂志,2014,31(11):945-948.

[26] 叶琬,孟耀斌,籍裴希,等. 我国村镇农民的室内外活动时间及其环境健康风险评估[A]. 中国环境科学学会.2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集(第四卷)[C]//中国环境科学学会:中国环境科学学会,2017:7.

[27] 吴盼盼. 空调启动阶段室内微生物气溶胶传播的数值模拟研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.

[28] 伯鑫. 空气质量模型:技术、方法及案例研究[M]. 北京:中国环境出版社, 2018.

[29] 张磊成,果晓东,赵恩铎,等. 计算流体力学(CFD)发展简述[A]. 北京力学会.北京力学会第二十三届学术年会会议论文集[C]//北京力学会:北京力学会,2017:3.

[30] 陈小明. 空调室内生物气溶胶扩散分布的数值模拟[D]. 衡阳:南华大学,2011.

[31] 李梦雪. 门诊呼吸科区域微生物污染物运动规律模拟研究[D]. 上海:东华大学, 2019.

[32] 何娟. 空调系统生物颗粒传播过程及控制的 CFD 仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

[33] 方标. 不同送风形式下室内微生物传播的数值模拟[D]. 长沙:湖南大学, 2010.

[34] 蔡志斌. 新风系统对室内空气污染控制的性能研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2020.

[35] 刘树森. 口腔散发微生物气溶胶在室内传播和运动规律的研究[D]. 天津:天津大学,2007.

[36] HOLMBERG S, LI Y. Modelling of the indoor environment-particle dispersion and deposition[J]. Indoor air, 1998, 8(2): 113-122.

[37] LI K Q, GONG G C, TANG G F, et al. An improving particle model[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. 2005, 2: 2009-2013.

[38] QIAN H, LI Y, NIELSEN P V, et al. Spatial distribution of infection risk of SARS transmission in a hospital ward[J]. Building and Environment, 2009, 44(8): 1651-1658.

[39] 苏辉,耿世彬.微生物与室内空气品质[J].制冷空调与电力机械,2002(4):17-19,16.

[40] 周世宁,陈维田,邓柏澧.空调室内环境的气传微生物[J].环境科学学报,1997(4):113-116.

[41] 孙婷,刘凤娟.室内空气中微生物污染控制方法研究进展[J].环境生态学,2021,3(9):79-82,87.

[42] 赵彬,张颖,李先庭.生物颗粒在相邻房间运动的数值研究[J].暖通空调,2003(3):173-175.

[43] 赵彬,张昭,李先庭.室内人体飞沫传播的数值研究[J].暖通空调,2003(3):176-178.

[44] 赵彬,张昭,李先庭.室内不同通风方式下生物颗粒的分布比较[J].暖通空调,2003(3):179-182.

[45] 李光熙,陶文铨,孙晓娟.非典型肺炎病毒在空气中传播过程的初步数值模拟[J].西安交通大学学报,2003(7):764-766.

[46] 陈帆,张志刚,罗威德,等.多病床非典病房的气流分布研究[J].建筑热能通风空调,2004(1):21-33.

[47] 周涛,冯雅洁,王增辉.SARS 病毒微粒的空气动力特性理论分析研究[J].商丘职业技术学院学报,2003(6):28-30.

[48] VILLAFRUELA J M, OLMEDO I, SAN JOSÉJ F. Influence of human breathing modes on airborne cross infection risk[J]. Building and Environment, 2016, 106: 340-351.

[49] RICHMOND-BRYANT J. Transport of exhaled particulate matter in airborne infection isolation rooms[J]. Building and Environment, 2009, 44(1): 44-55.

[50] HE Q, NIU J, GAO N, et al. CFD study of exhaled droplet transmission between occupants under different ventilation strategies in a typical office room[J]. Building and Environment, 2011, 46(2): 397-408.

[51] KING M F, NOAKES C J, SLEIGH P A, et al. Bioaerosol deposition in single and two-bed hospital rooms: A numerical and experimental study[J]. Building and Environment, 2013, 59: 436-447.

[52] VILLAFRUELA J M, CASTRO F, SAN JOSÉ J F, et al. Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms[J]. Energy and Buildings, 2013, 57: 210-219.

[53] WU Y, NIU J. Assessment of mechanical exhaust in preventing vertical cross-household infections associated with single-sided ventilation[J]. Building and Environment, 2016, 105: 307-316.

[54] 国家卫生健康委办公厅. 关于印发新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第八版 修订版)的通知[EB/OL]. [2021-10-18]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-04/15/content_5599795.htm?_zbs_baidu_bk.

[55] 李玉国,程盼,钱华.新型冠状病毒的主要传播途径及其对室内环境设计的影响[J].科学通报,2021,66(增刊1):417-423.

[56] DHAWAN S, BISWAS P. Aerosol dynamics model for estimating the risk from short-range airborne transmission and inhalation of expiratory droplets of SARS-CoV-2[J]. Environmental Science & Technology, 2021.

[57] 汪新智, 任安星, 武永吉, 等. 基于欧拉-拉格朗日方法的携病毒飞沫扩散过程的数值模拟[J]. 自然杂志, 2020, 42(3): 239-248.

[58] LI Y, QIAN H, HANG J, et al. Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant[J]. Building and Environment, 2021, 196: 107788.

[59] YANG X, OU C, YANG H, et al. Transmission of pathogen-laden expiratory droplets in a coach bus[J]. Journal of hazardous materials, 2020, 397: 122609.

[60] KIM J, MOIN P. Application of a fractional-step method to incompressible Navier-Stokes equations[J]. Journal of computational physics, 1985, 59(2): 308-323.

[61] 王红梅. 对流扩散方程的特征有限元方法[D]. 济南:山东大



中国知网 https://www.cnki.net

学,2012.
[62] PASQUILL F, SMITH F B. Atmospheric diffusion[M]. New York, NY, USA: E. Horwood, 1983.
[63] CARRUTHERS D J, HOLROYD R J, HUNT J C R, et al. UK-ADMS: A new approach to modelling dispersion in the earth´s atmospheric boundary layer[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1994, 52: 139-153.
[64] 王海超,焦文玲,邹平华. AERMOD 大气扩散模型研究综述[J]. 环境科学与技术,2010,33(11):115-119.
[65] JONES R, LEHR W, SIMECEK-BEATTY D, et al. ALOHA ® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4. 4: Technical Documentation[J]. 2013.
[66] SAUTER F, vAN ZANTEN M, vAN DER SWALUW E, et al. The OPS-model[J]. Description of OPS, 2018, 4: 1-113.
[67] 伯鑫. CALPUFF 模型技术方法与应用[M]. 北京:中国环境出版社,2016.
[68] SøRENSEN J H, BAKLANOV A, HOE S. The Danish emergency response model of the atmosphere (DERMA)[J]. Journal of environmental radioactivity, 2007, 96(1/2/3): 122-129.
[69] BUCKLEY R. Use of the hazard prediction and assessment capability (HPAC) at the savannah river site[R]. Savannah River Site (United States). Funding organisation: US Department of Energy (United States), 2004.
[70] STEIN A F, DRAXLER R R, ROLPH G D, et al. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, 96 (12): 2059-2077.
[71] PETERSEN W B, LAVDAS L G. Inpuff 2.0—A multiple source Gaussian puff dispersion algorithm[J]. Users Guide. Research Triangle Park, NC: ASRL, US Environmental Protection Agency, 1986.
[72] D´AMOURS R, MALO A, FLESCH T, et al. The canadian meteorological centre's atmospheric transport and dispersion modelling suite[J]. Atmosphere-Ocean, 2015, 53(2): 176-199.
[73] FLESCH T K, WILSON J D, CRENNA B P. MLCD: a short-range atmospheric dispersion model for emergency response [J]. University of Alberta contract report to Environment Canada, 2002.
[74] Air Pollution Modeling and Its Application XXII[M]. Springer, 2014.
[75] MENEGUZ E, THOMSON D, WITHAM C, et al. Improved scheme for parametrization of convection in the Met Office´s Numerical Atmospheric-dispersion Modelling Environment (NAME)[C]//EGU General Assembly Conference Abstracts. 2015: 5542.
[76] BACON D P, AHMAD N N, BOYBEYI Z, et al. A dynamically adapting weather and dispersion model: the operational multiscale environment model with grid adaptivity (OMEGA)[J]. Monthly Weather Review, 2000, 128(7): 2044-2076.
[77] THYKIER-NIELSEN S, DEME S, MIKKELSEN T. Description of the atmospheric dispersion module RIMPUFF[J]. Riso National Laboratory, PO Box, 1999, 49.
[78] NICKOVIC S, KALLOS G, PAPADOPOULOS A, et al. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D16): 18113-18129.
[79] SOFIEV M, VIRA J, PRANK M, et al. An outlook of system for integrated modelling of atmospheric composition SILAM v. 5[M]. Air Pollution Modeling and its Application XXII. Springer, Dordrecht, 2014: 397-400.
[80] 王体健,李树,庄炳亮,等. 区域大气环境-化学-气候模拟[M]. 北京: 气象出版社, 2017.
[81] LEONE JR J M, NASSTROM J S, MADDIX D M, et al. Lagrangian operational dispersion integrator (LODI) user's guide [R]. Report UCRL-AM-212798, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 2005.
[82] MATSSON J E. An Introduction to ANSYS Fluent 2021[M]. SDC Publications, 2021.
[83] 阎超,于剑,徐晶磊,等. CFD 模拟方法的发展成就与展望[J]. 力学进展,2011,41(5):562-589.
[84] 李夏莹,郑鹭飞,张秀杰,等. 口蹄疫病毒研究进展[J]. 中国畜牧兽医,2015,42(7):1910-1916.
[85] BLACKALL R M, GLOSTER J. Forecasting the airborne spread of foot and mouth disease[J]. Weather, 1981, 36(6): 162-167.
[86] GLOSTER J, JONES A, REDINGTON A, et al. Airborne spread of foot-and-mouth disease-model intercomparison [J]. The Veterinary Journal, 2010, 183(3): 278-286.
[87] SANSON R L, GLOSTER J, BURGIN L. Reanalysis of the start of the UK 1967 to 1968 foot-and-mouth disease epidemic to calculate airborne transmission probabilities[J]. Veterinary Record, 2011, 169(13): 336-336.
[88] 刘丽, 王体健, 蒋自强, 等. 东南沿海生物气溶胶的扩散模拟研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(11): 2670-2683.
[89] MARAGON S, FACCHIN E, MOUTOU F, et al. The 1993 Italian foot-and-mouth disease epidemic: epidemiological features of the four outbreaks identified in Verona Province (Veneto region)[J]. The Veterinary Record, 1994, 135(3): 53-57.
[90] KRITANA P, TAEHYEUNG K, HYEONTAE K, et al. Atmospheric pathway: A possibility of continuous outbreaks of foot-and-mouth disease in South Korea in 2010-2011[J]. Computers and electronics in agriculture, 2014, 108: 95-104.
[91] 谭伟,徐倩,谢芝勋. 禽流感病毒研究概述[J]. 基因组学与应用生物学,2014,33(1):194-199.
[92] SSEMATIMBA A, HAGENAARS T J, dE JONG M C M. Modelling the wind-borne spread of highly pathogenic avian influenza virus between farms[J]. PLoS One, 2012, 7(2): e31114.
[93] SEO I H, LEE I B. CFD application for estimation of airborne spread of HPAI (highly pathogenic avian influenza)[C]//Ist International Symposium on CFD Applications in Agriculture 1008. 2012: 57-62.
[94] SEO I H, LEE I B, MOON O K, et al. Prediction of the spread of highly pathogenic avian influenza using a multifactor network: Part 1-Development and application of computational fluid dynamics



中国知网 https://www.cnki.net

simulations of airborne dispersion[J]. biosystems engineering, 2014, 121: 160-176.

[95] LEE H, SUH K, JUNG N, et al. Prediction of the spread of highly pathogenic avian influenza using a multifactor network: Part 2-Comprehensive network analysis with direct/indirect infection route [J]. Biosystems Engineering, 2014, 118: 115-127.

[96] ZHAO Y, RICHARDSON B, TAKLE E, et al. Airborne transmission may have played a role in the spread of 2015 highly pathogenic avian influenza outbreaks in the United States[J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 1-10.

[97] 何湘,黄留玉.炭疽杆菌致病性研究进展[J].微生物学通报, 2004(4):101-105.

[98] KEIM P, SMITH K L, KEYS C, et al. Molecular investigation of the aum shinrikyo anthrax release in kameido, Japan[J]. Journal of Clinical Microbiology, 2001, 39(12): 4566-4567.

[99] JERNIGAN D B, RAGHUNATHAN P L, BELL B P, et al. Investigation of bioterrorism-related anthrax, United States, 2001: epidemiologic findings[J]. Emerging infectious diseases, 2002, 8 (10): 1019.

[100] MESELSON M, GUILLEMIN J, HUGH-JONES M, et al. The sverdlovsk anthrax outbreak of 1979[J]. Science, 1994, 266 (5188): 1202-1208.

[101] STUART A L, WILKENING D A. Degradation of biological weapons agents in the environment: implications for terrorism response[J]. Environmental science & technology, 2005, 39 (8): 2736-2743.

[102] WEIN L M, CRAFT D L, KAPLAN E H. Emergency response to an anthrax attack[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2003, 100(7): 4346-4351.

[103] CRAFT D L, WEIN L M, WILKINS A H. Analyzing bioterror response logistics: the case of anthrax[J]. Management Science, 2005, 51(5): 679-694.

[104] NICOGOSSIAN A, SCHINTLER L A, BOYBEYI Z. Modeling urban atmospheric anthrax spores dispersion: Assessment of health impacts and policy implications[J]. World Medical & Health Policy, 2011, 3(3): 1-16.

[105] ISUKAPALLI S S, LIOY P J, GEORGOPOULOS P G. Mechanistic modeling of emergency events: Assessing the impact of hypothetical releases of anthrax[J]. Risk Analysis: An International Journal, 2008, 28(3): 723-740.

[106] 刘健. 城市小区环境中生物剂气溶胶的扩散模拟方法研究[D].北京:中国人民解放军军事医学科学院,2012.

[107] 刘健, 祖正虎, 许晴, 等. 城市小区环境生物剂气溶胶的扩散模拟研究[J]. 生物技术通讯, 2012, 23(3): 369-374.

[108] 刘洪亮,陈学敏.嗜肺军团菌的研究进展(一)[J].中国卫生工程学,2006(2):109-112.

[109] WALSER S M, GERSTNER D G, BRENNER B, et al. Assessing the environmental health relevance of cooling towers-a systematic review of legionellosis outbreaks[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2014, 217(2/3): 145-154.

[110] NHU NGUYEN T M, ILEF D, JARRAUD S, et al. A community-wide outbreak of legionnaires disease linked to industrial cooling towers—how far can contaminated aerosols spread?[J]. The Journal of Infectious Diseases, 2006, 193 (1): 102-111.

[111] NYGåRD K, WERNER-JOHANSEN Ø, RøNSEN S, et al. An outbreak of legionnaires disease caused by long - distance spread from an industrial air scrubber in Sarpsborg, Norway[J]. Clinical Infectious Diseases, 2008, 46(1): 61-69.

[112] BLATNY J M, FOSSUM H, HO J, et al. Dispersion of Legionella-containing aerosols from a biological treatment plant, Norway[J]. Front Biosci (Elite Ed), 2011, 1(3): 1300-1309.

[113] BLATNY J M, REIF B A P, SKOGAN G, et al. Tracking airborne Legionella and Legionella pneumophila at a biological treatment plant[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(19): 7360-7367.

[114] RUSSO A, GOUVEIA C M, SOARES P M M, et al. The unprecedented 2014 Legionnaires' disease outbreak in Portugal: atmospheric driving mechanisms[J]. International Journal of Biometeorology, 2018, 62(7): 1167-1179.

[115] FOSSUM H E, REIF B A P, TUTKUN M, et al. On the use of computational fluid dynamics to investigate aerosol dispersion in an industrial environment: a case study[J]. Boundary-layer Meteorology, 2012, 144(1): 21-40.

[116] GLOSTER J. Analysis of two outbreaks of Newcastle disease[J]. Agricultural Meteorology, 1983, 28(2): 177-189.

[117] GLOSTER J, DONALDSON A I, HOUGH M N. Analysis of a series of outbreaks of Aujeszky's disease in Yorkshire in 1981-82: the possibility of airborne disease spread[J]. The Veterinary Record, 1984, 114(10): 234-239.

[118] CASAL J, MORESO J M, PLANAS-CUCHí E, et al. Simulated airborne spread of Aujeszky's disease and foot-and-mouth disease [J]. Veterinary Record, 1997, 140(26): 672-676.

[119] YU I T S, LI Y, WONG T W, et al. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus[J]. New England Journal of Medicine, 2004, 350(17): 1731-1739.

[120] LIU W, YOU X Y. Transportation and risk analysis of influenza indoor and outdoor transportation and exposure risk analysis of influenza aerosol[J]. Indoor and Built Environment, 2012, 21 (5): 614-621.

[121] SAUTER F J, vAN P A, SWART A, et al. Airborne dispersion of Q fever: A modelling attempt with the OPS-model[J]. Rijksinstituut Voor Volksgezondheid En Milieu Rivm, 2012.

[122] VAN LEUKEN J P G, VAN DE KASSTEELE J, SAUTER F J, et al. Improved correlation of human Q fever incidence to modelled C. burnetii concentrations by means of an atmospheric dispersion model [J]. International Journal of Health Geographics, 2015, 14(1): 1-14.

[123] DOUGLAS P, TYRREL S F, KINNERSLEY R P, et al. Sensitivity of predicted bioaerosol exposure from open windrow composting facilities to ADMS dispersion model parameters[J].



中国知网 https://www.cnki.net

Journal of Environmental Management, 2016, 184: 448-455.
[124] YANG X, YANG H, OU C, et al. Airborne transmission of pathogen-laden expiratory droplets in open outdoor space [J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 145537.
[125] LIGHTHART B, MOHR A J. Estimating downwind concentrations of viable airborne microorganisms in dynamic atmospheric conditions [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1987, 53(7): 1580-1583.
[126] LIN B, ROSS S D, PRUSSIN II A J, et al. Seasonal associations and atmospheric transport distances of fungi in the genus Fusarium collected with unmanned aerial vehicles and ground-based sampling devices[J]. Atmospheric Environment, 2014, 94: 385-391.
[127] SPRIGG W A, NICKOVIC S, GALGIANI J N, et al. Regional dust storm modeling for health services: the case of valley fever [J]. Aeolian Research, 2014, 14: 53-73.
[128] SORBER C A, BAUSUM H T, SCHAUB S A, et al. A study of bacterial aerosols at a wastewater irrigation site [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1976: 2367-2379.
[129] TELTSCH B, SHUVAL H I, TADMOR J. Die-away kinetics of aerosolized bacteria from sprinkler application of wastewater[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1980, 39(6): 1191-1197.
[130] ROEST H I J, RUULS R C, TILBURG J J H C, et al. Molecular epidemiology of Coxiella burnetii from ruminants in Q fever outbreak, the Netherlands [J]. Emerging infectious diseases, 2011, 17(4): 668.
[131] DUNGAN R S. Estimation of infectious risks in residential populations exposed to airborne pathogens during center pivot irrigation of dairy wastewaters [J]. Environmental science & technology, 2014, 48(9): 5033-5042.
[132] 邱雄辉. 污水厂微生物气溶胶的逸散特征、传输特征及健康风险研究[D]. 西安:长安大学,2012.
[133] 许鸿飞, 刘婷, 李露, 等. 封场后垃圾填埋场的生物气溶胶浓度及粒径分布[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(12): 124-127.
[134] 张婧, 夏立江, 杜文利, 等. 垃圾填埋场微生物气溶胶粒径分布研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(9): 1620-1624.
[135] 王莹,韩云平,李琳. 卫生填埋场微生物气溶胶的逸散及潜在风险[J]. 微生物学通报,2020,47(1):222-233.
[136] SEEDORF J, SCHMIDT R G. The simulated air flow pattern around a moving animal transport vehicle as the basis for a prospective biosecurity risk assessment[J]. Heliyon, 2017, 3(8): e00358.

(上接第 429 页)

易造成密度计堵塞,导致密度计失去测量真实数据的意义,不能为运行人员及时提供调整参数的依据。故在再循环浆液主管路上安装不锈钢材质的节流孔板,开孔率为 50%,既可以提高孔板的耐磨损,又可以提高密度计区域的浆液流速,杜绝堵塞。

**2.2.3** 定期清理易堵塞的设备和管道

1)对石灰石旋流子定期清理。旋流子底流堵塞时,会造成溢流“跑粗”,石灰石细度不合格。

2)定期清理球磨机排渣口。排渣口的目的是将石灰石中的杂质进行外排,防止堵塞设备及管道。

3)定期冲洗浆液再循环泵。浆液再循环泵体堵塞后,出力下降,旋流器压力将不能调整至正常范围,从而影响石灰石浆液细度。

**2.2.4** 定期更换球磨机内衬板和提升条

衬板是用来保护球磨机筒体,使其免受钢球和石灰石直接冲击和摩擦。提升条在相邻 2 块衬板相接处用其压住,目的是提升石灰石的提升力,使石灰石达到 1 个较佳的提升效果,从而提高石灰石的研磨效率。然而,现有提升条中金属骨架与橡胶之间的结合不够牢固,长时间使用后会出现骨架与橡胶分离,衬板脱落想象,影响球磨机的使用寿命和石灰石的浆液品质。

**2.3** 从智能化调整上调控石灰石浆液细度

研究湿式制浆系统的智能控制系统,完成控制参数的自动调节,动态跟踪,改变现有人工调整的运行模式,提升制浆系统运行的自动化水平。通过湿式球磨机工作机理、运行工况,结合人工智能技术和定期化验结果,建立石灰石浆液细度测量模型,通过与过筛率定期化验的比较,对测量模型进行校验和修正,实现石灰石浆液细度实时在线监测,保证细度在合理范围。

## 3 结 论

湿式制浆系统中影响石灰石浆液细度的因素还有很多,包含称重给料机频繁堵塞造成下料不均匀、再循环浆液箱液位频繁调整等。由于石灰石浆液细度不能在线监测,造成运行调整始终存在滞后现象。所以,一方面必须加强化验监督,提升设备的自动化程度,及时调整运行参数;另一方面加强运行管理和提升设备治理,确保脱硫系统正常运行。

### 参考文献

[1] 史宏胜. 石灰石浆液细度对脱硫系统的影响[J]. 中国高新技术企业,2010(34):38.



中国知网 https://www.cnki.net