

▶ 前沿交叉研判



# 大气中病原微生物的监测和 预警前沿交叉研判研究报告

大气中病原微生物的监测和预警前沿交叉研判研究 项目组

国家自然科学基金委与中国科学院联合资助

2024

## 报告撰写组

组 长：黄建平

成 员：（以姓氏汉语拼音为序）

安太成	陈田木	黄存瑞	黄忠伟
胡淑娟	阚海东	李 江	李湫湫
连鑫博	罗 斌	施小明	田怀玉
王丹凤	王 睿	杨子峰	要茂盛
张北斗			

学术秘书：王丹凤 连鑫博

## 摘要

本报告主要围绕如下 4 个方面展开论述：（1）大气病原微生物和传染病监测预警研究的科学意义与战略价值，包括监测预警的学科体系、研究范式与战略地位；（2）病原微生物及传染病监测预警领域面临的关键科学问题；（3）病原微生物及传染病监测预警领域的国内外研究基础与条件，包括气候变化对大气中病原微生物的影响、大气中病原微生物的监测、传染病预测模型与系统及气候治理与生物安全的国家行动与对策等的研究；（4）我国在病原微生物及传染病监测预警领域的发展思路与政策建议。每一章的参考文献除了主要相关研究外，重点收录近 5 年的国内外最新文献，以便从事大气病原微生物和传染病监测预警教学、研究和生产一线的科技人员、研究生等参阅和了解国内外学术动态。

## **Abstract**

This report mainly focuses on the following four aspects: (1) The scientific significance and strategic value of monitoring and prediction of atmospheric pathogenic microorganisms and infectious diseases, including the disciplinary system, research paradigm and strategic position of monitoring and prediction; (2) Key scientific issues in the field of pathogenic microorganisms and infectious disease monitoring and prediction; (3) Domestic and foreign research basis and conditions in the field of pathogenic microorganisms and infectious diseases monitoring and prediction, including the impact of climate change on pathogenic microorganisms in the atmosphere, monitoring of pathogenic microorganisms in the atmosphere, prediction models and systems of infectious diseases, and national actions and countermeasures for climate governance and biosecurity; (4) The development ideas and policy recommendations in the field of pathogenic microorganisms and infectious diseases monitoring and prediction in our country. In addition to the major relevant research, the references of each chapter mainly include the latest domestic and foreign literatures in the past 5 years, so that scientific and technological personnel and graduate students involved in the teaching, research and production of atmospheric pathogenic microorganisms and infectious diseases monitoring and prediction can stay informed of and understand the domestic and foreign academic trends.

# I 目录

摘要 .....	I
Abstract .....	II
<b>第一章 科学意义与战略价值 .....</b>	<b>1</b>
第一节 监测预警的必要性与前瞻性 .....	1
第二节 各学科体系的科学意义与战略价值 .....	1
1. 公共卫生与传染病防控 .....	2
2. 环境监测与新发传染病 .....	2
3. 气候变化的健康效应与适应 .....	2
4. 生态安全建设与环境健康 .....	3
第三节 技术创新与发展 .....	3
1. 病原及传染病监测 .....	3
2. 病原及传染病预警 .....	4
3. 平台建设 .....	4
第四节 监测预警的战略定位 .....	5
1. 满足国家重大战略需求 .....	5
2. 推动国民经济与社会发展 .....	5
<b>第二章 关键科学问题 .....</b>	<b>7</b>
第一节 病原和传染病监测的关键科学问题 .....	7
第二节 传染病预警的关键科学问题 .....	7
<b>第三章 我国及国际的研究基础与条件 .....</b>	<b>8</b>
第一节 气候变化对大气中病原微生物的影响 .....	8
1. 大气中病原微生物与气象要素的关系 .....	8
2. 极端天气对大气中病原微生物的影响 .....	9
3. 气候变化对病原微生物特征的影响 .....	9
第二节 大气中病原微生物的监测 .....	10
1. 大气中病原微生物的种类及检测方法 .....	10
2. 生物气溶胶的监测 .....	11
3. 大气中病原微生物的监测现状 .....	11

第三节 传染病预测模型与系统 .....	12
1. 传染病动力学模型 .....	12
2. 传染病统计学模型 .....	13
3. 传染病的耦合预测系统 .....	14
第四节 气候治理与生物安全的国家行动与对策 .....	15
1. 气候治理政策 .....	15
2. 生物安全政策及应对策略 .....	15
3. 我国近期投入情况及最新举措 .....	16
<b>第四章 发展思路与政策建议 .....</b>	<b>18</b>
第一节 发展思路与发展方向 .....	18
1. 监测体系的优先发展方向与建议 .....	18
2. 预测体系的优先发展方向与建议 .....	19
第二节 资助体系与政策建议 .....	20
1. 加强基础问题研究 .....	20
2. 加强监测仪器研发及监测网建设 .....	21
3. 加强数据共享系统建设 .....	21
4. 加强监测预警平台建设 .....	22
5. 推进重大研究计划与成果转化 .....	23
6. 加强我国多部门合作和国际合作 .....	24
<b>参考文献 .....</b>	<b>26</b>

# 第一章 科学意义与战略价值

## 第一节 监测预警的必要性与前瞻性

新冠肺炎疫情暴发以来，公共健康问题受到了前所未有的关注。习近平总书记在 2020 年 9 月 11 日科学家座谈会上的重要讲话中明确提出，要“坚持面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求、面向人民生命健康”，科技抗疫成为重中之重。2020 年国家科改领导小组第 12 次专题会议暨第二次青藏科考领导小组第二次会议指出，要加强环境变化与疫情发生关系研究，研究全球变化与极端自然灾害和人类流行性疾病的发生是否存在联系，期望建立一个综合的科研体系，在对未来气候预测和预判的基础上，实现重大疫情、灾情等的精准预测和预判。大气中病原微生物和传染病的监测预警对于保护国民健康，促进经济发展等方面均有重大意义，是符合国家战略的重要课题。

气候变化正在为公共卫生带来不容忽视的挑战。随着全球气候变化、城市化进程的加快以及人类活动的日益频繁，大气中的病原微生物正在对人类健康和生态系统产生显著影响<sup>[1-6]</sup>。近年来，越来越多的研究表明，大气中的微生物群落不仅复杂多样，还与环境因素密切相关，这使得对大气病原微生物的监测与预警变得尤为重要<sup>[7-9]</sup>。全球气候变化增加了病原微生物传播的风险<sup>[10-12]</sup>。城市化导致的环境变化也在影响病原微生物的分布和传播。城市高人口密度区域成为各种病原微生物的温床，空气质量的下降和频繁的人类活动使得病原微生物经空气传播的风险加大<sup>[13]</sup>。对空气中病原微生物进行严密监测，及时发现病原体的变异、致病性增强以及可能的传播途径，是有效应对传染病疫情的关键<sup>[14]</sup>。

## 第二节 各学科体系的科学意义与战略价值

大气病原微生物监测涉及公共卫生、环境科学、大气科学以及生物学等多个学科。在战略层面，大气病原微生物监测的实现不仅依赖于科学技术的发展，还需要跨学科的合作与政策支持。政府和国际组织需要建立跨国界的病原微生物监测网络，以便更有效地应对全球健康威胁。单一国家的监测系统往往面临资源和数据分享的瓶颈，跨国合作能提高监测效率。通过共享数据，各国能够及时获得有关病原

微生物传播的最新信息，从而快速反应、协作应对。多学科的数据整合与模型构建对预测疫情趋势至关重要<sup>[15-17]</sup>。大气气溶胶监测与传染病预测模型结合，可以有效提高对疫情的敏感性判断，为快速响应提供科学支持。

## 1. 公共卫生与传染病防控

应对突发公共卫生事件，尤其是传染性疾病，已成为国家面临的重大挑战和战略需求。流行病学、大气科学和环境科学等多学科的深度交叉融合，引领了产业模式的变革，推动了技术的全面革新。大数据、云计算和人工智能等前沿信息技术的兴起，为传染病疫情的有效防控提供了新的技术手段。研发并优化病原微生物监测、检测及分析技术，建立多尺度嵌套全球微生物-气候-生态系统耦合预测系统，推进传染病防控技术逐步向“自动化、智能化、信息化、精准化”的目标迈进，促进实时、快速、精准且高效地主动防御措施的落地实施，从而彻底扭转人类在应对新发和突发传染病疫情时的被动局面。

## 2. 环境监测与新发传染病

在全球气候变化背景下，生态环境发生了重大变化，对大气中病原微生物进行监测和预警尤为重要。土地利用变化等人类活动导致病原微生物及其宿主动物栖息地碎片化，迫使他们的群落结构发生改变，在局部形成“共进化效应”，加速病原微生物多样性的演化进程，进而增加传染病的跨物种传播概率。气候变化也会导致动物栖息地环境改变，迫使动物迁徙，导致动物之间病原体溢出和传播到人体的机会增加，迫切需要对环境中病原微生物进行监测，尽早制定科学高效的预警方案和预防措施。

## 3. 气候变化的健康效应与适应

气候变化对人类健康产生广泛复杂且深远的影响，这种影响往往是滞后且非直接的，使得危害风险很容易被忽视。在引起传染病的病原微生物中，大约三分之二具有气候敏感性，气候变化驱动的地球环境改变打破了生态系统平衡，影响病原体及其中间宿主的存活、繁殖、传播及分布范围，从而加剧了新发传染病的风险，多种不利气象条件叠加所导致的复合影响，可能会加剧传染病的发病风险<sup>[18, 19]</sup>。

因此，对大气中病原微生物传播进行精准监测和预警是全面筑牢疫情防控安全防线、提高我国生物安全治理能力的核心科研内容。

## 4. 生态安全建设与环境健康

生态安全对保障人类健康、维护国家安全发挥着至关重要的作用。生态安全是维护生物安全和环境安全的重要保障。新冠疫情期间，国家从保护人民健康、保障国家安全、维护国家长治久安的高度，把生物安全纳入国家安全体系。气候变化背景下新发突发传染病疫情的暴发风险进一步强调了生态安全建设对防止传染病大流行、保障人类生命安全的重要作用。良好的生态安全为维护生物多样性、保护物种栖息地、防止病原体溢出等方面提供不可替代的屏障保护，有利于缓解人类活动扩张带来的生物安全威胁。因此，加强生态安全体系建设是保护环境健康、人类健康和生物安全的重要工程和战略举措。

### 第三节 技术创新与发展

传染病监测与预警是公共卫生领域不可或缺的一环，其核心目标在于通过高效收集与深入分析相关数据，实现疾病的早期预防与有效控制，从而阻断疾病的传播路径<sup>[20-22]</sup>。近年来，随着技术的迅猛发展，尤其是在大数据、人工智能和基因组学等领域，传染病监测预警技术的创新与发展呈现出显著进步趋势，这为公共卫生机构在防控措施制定方面提供了重要依据<sup>[23, 24]</sup>。传染病监测预警技术的创新与发展正处于快速演变之中。从大数据和人工智能到基因组学，各种新兴技术的结合不仅提升了监测的实时性与准确性，也为流行病的预测和应对提供了全新的视角。通过政策支持和行业协作，推动技术的实际应用，为全球公共卫生安全提供更为坚实的保障<sup>[16, 25-28]</sup>。

#### 1. 病原及传染病监测

随着分子生物学、生物信息学和医学检测技术的迅速发展，病原体监测在采集、感知以及分析阶段均取得显著突破。如自动化采样和微型采样技术、光电化学生物传感器、高通量核酸检测、单细胞抗体筛选、冷冻电镜断层成像、聚合酶链式反应技术（PCR）和脱氧核糖核酸（DNA）测序/标记技术等被广泛应用于病原体的快

速诊断和鉴定中，极大地提高了监测的效率和准确性<sup>[29, 30]</sup>。但由于空气中病原体浓度低、成分复杂，难以富集和快速分辨，大气中病原微生物的监测和预警仍是国内外面临的重大技术难题，有待进一步探索<sup>[31, 32]</sup>。气溶胶是病原体传播的重要途径，尤其在防控通过空气传播的疾病方面起着关键作用。生物气溶胶的监测技术主要分为离线检测和在线监测。离线方法常使用采样器进行采样，然后通过培养法、显微镜分析（如荧光显微镜、扫描电子显微镜）、分子生物学检测（如聚合酶链反应、DNA 标记）、免疫学检测等方法进行定性定量分析，但存在成本高、效率低和时效性差等突出问题<sup>[33, 34, 35]</sup>。而基于光电和芯片技术的在线检测技术，因其实时、高灵敏度、高分辨率的优点，成为生物气溶胶监测的重要选择之一。其中激光诱导荧光技术的应用最为广泛<sup>[36]</sup>，同样依据拉曼光谱的特征峰，也可以有效识别花粉和细菌等生物气溶胶<sup>[37]</sup>。生物三磷酸腺苷（ATP）自发荧光检测与微流控芯片的组合也是活性微生物检测研究的热点<sup>[38]</sup>。

## 2. 病原及传染病预警

对大气中病毒和微生物传播进行精准预警是全面筑牢疫情防控安全防线、提高我国生物安全治理能力的核心科研内容，为政府制定管控措施、合理分配医疗资源提供重要支撑<sup>[39-42]</sup>。在传染病预测领域，基于数据驱动模型日益成为研究热点。通过对大规模社会行为数据的实时分析，可以显著提高疫情预测的准确性<sup>[29, 43, 44]</sup>。将人工智能（AI）充分应用于预警系统、热点检测、流行病学追踪和预测以及资源分配<sup>[45]</sup>，通过流行病学模型、大气化学模型、大气扩散模型、气候模型、人口模型、交通模型和计算流体动力学模型（CFD）等协同耦合，能够模拟致病微生物气溶胶在环境中的传播和对人体健康的影响<sup>[46-49]</sup>。在技术革新方面，基因组测序技术和物联网的结合为病原体的追踪与预警提供了新的手段。实时监控病原体的基因组变异，有助于迅速识别和应对突发疫情。

## 3. 平台建设

传染病严重威胁人类健康和公共安全，亟需建立以病原微生物传播的监测、预警为核心的生物安全防控平台。世界卫生组织（WHO）与有关各方合作创建了 DengueNet，用于全球登革热的流行病学和病毒学监测<sup>[50]</sup>。已有国家建立了部分传

染病的监测预警平台，例如南半球流感疫苗有效性研究与监测网络（SHIVERS）、流感住院网络（FluSurv-NET）、美国新疫苗监测网络（NVSN）、国际战略性 HIV 临床试验网络（INSIGHT）等<sup>[51-53]</sup>。但针对大气病原微生物的专项监测平台仍然显得相对匮乏与不足。应对未来新发疫情，亟需发挥数学和信息科学的优势，积极应用信息化技术，及时提供预测预警信息，减少经济社会损失，积极推动数学和信息科学领域发展。亟需发挥公共卫生管理整合的优势，提高传染病预防水平，推进公共卫生管理科学化、系统化水平的提高。

## 第四节 监测预警的战略定位

### 1. 满足国家重大战略需求

习近平生态文明思想中指出，“环境就是民生”。近些年，我国政府发布了多个战略规划文件均涉及环境变化对健康风险影响的内容，例如：《国家适应气候变化战略 2035》指出，“到 2035 年，我国要针对气候变化及高温热浪等极端天气气候事件，开展健康影响研究，厘清极端天气气候事件的主要健康风险、脆弱地区和脆弱人群特征，建立适应策略、技术和措施等”。《健康中国 2030 规划纲要》提出，“加强重大传染病防控，完善传染病监测预警机制。”因此，加强重大传染病防控，对于维护国家安全、社会稳定和人民健康具有重要意义。

### 2. 推动国民经济与社会发展

《关于建立健全智慧化多点触发传染病监测预警体系的指导意见》指出，“以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻党的二十大和二十届二中、三中全会精神，践行总体国家安全观，坚持人民至上、生命至上，以推进健康中国建设、推动疾控事业高质量发展为契机，以发展新质生产力、数智赋能为动力，坚持问题导向、系统贯通和突出重点原则，建立健全智慧化多点触发传染病监测预警体系。到 2030 年，建成多点触发、反应快速、科学高效的传染病监测预警体系，新发突发传染病、群体性不明原因疾病、重点传染病监测预警的灵敏性、准确性明显提升，疫情早期发现、科学研判和及时预警能力达到国际先进水平”。精准的实时监测预警可以实现防疫关口前移，帮助制定有效政策，控制大型传染病的进一步

蔓延，对于维护社会稳定，减少经济损失意义重大。

## 第二章 关键科学问题

### 第一节 病原和传染病监测的关键科学问题

研究显示，多种病原微生物通过空气传播，对公众健康构成严重威胁。由于目前整体缺乏气候环境变化对病原微生物传播的研究和关注，亟需开展针对病原微生物气溶胶大气传播机制的系统性综合集成研究，全面厘清病原微生物气溶胶的识别、监测和大气中的传播机制，以及它们与宿主间的相互作用。因此，拟解决的具体关键科学问题有：

- (1) 如何研发病原微生物快速检测技术及在线传感器；
- (2) 如何开发大气微生物的标准化、业务化监测仪器；
- (3) 如何构建我国大气、水体（含冰川）微生物监测网络；
- (4) 如何建设我国大气、水体中病原微生物的环境监测数据库。

### 第二节 传染病预警的关键科学问题

有效的预测与预警机制不仅依赖于对病原体的及时监测，还需要对生态环境的深入理解。通过综合病原微生物监测网络数据库等多源数据，分析病原体生态适应机制、病原与宿主的相互作用，以及科学研究与公共卫生政策之间的联系，将为有效应对未来新发传染病的威胁提供重要保障。准确预测疫情是保障人民生命安全、政府制定防控措施、合理配置医疗资源和减少经济损失的重要科学依据。目前，传染病预警系统面临数据不足、模型精度不够及时效性低等极具挑战性的科学问题，主要关键科学问题有：

- (1) 如何揭示病原微生物与气候、健康和生态系统的相互作用；
- (2) 如何科学合理布局我国病原微生物监测系统，构建我国大气环境中病原微生物数据库；
- (3) 如何建立多尺度嵌套的全球病原微生物-气候-生态系统数值模型；
- (4) 如何量化全球/区域尺度病原微生物传播对人体健康风险及科学防控的影响。

## 第三章 我国及国际的研究基础与条件

传染病对人类文明进程和发展的影响巨大，人类一直在不断监测世界各地传染病的发生和发展<sup>[19, 11]</sup>。大气中的病原微生物与生物传播、公共卫生密切相关，了解和应对气候变化对大气中病原微生物的影响对于保护人类健康具有重要意义<sup>[54-56]</sup>。病原微生物通过环境（空气、水体）或食物侵入到动物或人体内，从而引发多种疾病，甚至暴发大面积的疫情，严重威胁动物和人类的生命，因此，对大气中的病原微生物进行监测具有重大意义<sup>[57, 58]</sup>。传染病预测模型被广泛应用于更好地了解传播机制和对传播影响最大的因素，在疫情发展趋势预测、科学防控指导与评估中持续发挥着重要的作用，为公共卫生管理者的决策与高效干预措施的实施提供了重要数据依据和理论支撑<sup>[44, 59]</sup>。

### 第一节 气候变化对大气中病原微生物的影响

#### 1. 大气中病原微生物与气象要素的关系

气候变化对大气中病原微生物的传播有显著影响。一方面，那些对外界环境抵抗力较弱的病原体，可能会因为严苛的气象条件而仅限于在特定区域内传播；另一方面，那些对环境抵抗力较强的传染病病原体，则可能在良好的传播条件下，导致其传播范围更广、强度更大。气温、湿度、气压、风速及降水量等气象因素与病原微生物的传播紧密相关<sup>[60-62]</sup>。

以诱发结核病的结核分枝杆菌为例，其传播与繁殖受到气象条件的显著影响。研究表明，肺结核的发病率存在季节性变化，受温度、湿度、风速和日照等气象因素影响较大<sup>[63-65]</sup>。湿度越大，水汽压越大，结核杆菌飞沫在空气中停留的时间越长，人群感染的概率越大<sup>[66]</sup>。许多呼吸道病毒引起的疾病都有明显的季节性，特定的气象条件、空气污染对呼吸道疾病有一定的诱发作用。日均气温、气压和相对湿度分别为 12.3℃~14.4℃、89.2kPa~89.6kPa 和 38.9%~44.1%时，较易发生 SARS 病毒导致的非典型肺炎的流行<sup>[67]</sup>。对于引起新冠大流行的 SARS-CoV-2 病毒，低温环境利于保持病毒活性，高温环境可抑制病毒活性，寒冷干燥的环境可能利于病毒气溶胶的存活和传播，强光照射加快病毒气溶胶的半衰期<sup>[68-71]</sup>。研究发现，低湿度

和低温条件下有助于流感病毒的传播，因而季节性流感的暴发常在冬季发生<sup>[72]</sup>。

## 2. 极端天气对大气中病原微生物的影响

气候变化增加了极端天气发生的频率与广度，如热浪、寒潮、干旱和洪涝等灾害频繁出现，从而对大气中的病原微生物产生影响。一方面极端天气条件可以改变大气中的物理和化学环境，从而影响病原微生物的生存和繁殖，气候条件的突变会影响微生物在大气中的活动，可能导致某些微生物群落的扩张或消失，从而改变微生物多样性。另一方面，极端天气事件还会影响大气污染物的传输与扩散，为病原体的传播提供有利条件<sup>[73]</sup>。

2003年北京、香港 SARS 暴发期间，冷空气前锋的暖湿、稳定空气，导致病毒在低空滞留、积蓄，从而加剧了 SARS 的传播<sup>[74]</sup>。美国加利福尼亚州正常天气年份流感的平均死亡率比厄尔尼诺发生年份高 3 倍，说明流感病毒的传播受到厄尔尼诺的影响<sup>[75]</sup>。暴雨导致空气湿度升高、周围环境潮湿，滋生霉菌和螨虫等致敏物质，使得哮喘加重<sup>[76]</sup>。

综上所述，极端天气可以改变大气中病原微生物的分布浓度，扩大传播范围，以及增强传染病的致病能力，这些影响进一步加剧了疾病的传播和流行，对全球公共卫生构成了严重挑战。

## 3. 气候变化对病原微生物特征的影响

气候变暖加速病原微生物的发育与繁殖速度，促使其分布范围向更高纬度与海拔扩展<sup>[77]</sup>。相对高温环境下，病原微生物的增殖和繁殖率提高，传播季节延长，导致疾病传播范围和速度增加<sup>[78]</sup>。同时，气候变化改变了病媒生物的适应性、分布范围和生命周期。气温升高促使蚊子更容易繁殖且生命周期缩短<sup>[79]</sup>，并改变其生活习性和迁移规律，使得登革热等疾病在地理分布上产生了扩散<sup>[80]</sup>。不断增加的地理运动以及人和动物宿主的接触病原体（尤其是病毒）将突破其寄生、感染的分布区域，并形成新发传染病的病原体<sup>[81-83]</sup>。对于那些具有跨物种传播能力并可能造成大流行的病毒，预计气候变化将会为这些病毒的出现和传播创造新的机会<sup>[22, 84, 85]</sup>。

## 第二节 大气中病原微生物的监测

### 1. 大气中病原微生物的种类及检测方法

大气中的病原微生物主要有细菌性、真菌性和病毒性三类。细菌是最常见的类型，占据了大气微生物总量的绝大部分，已知存在于大气中的细菌及放线菌有 1200 余种<sup>[86]</sup>。空气中的真菌种类更为丰富，多达 40000 多种。病毒性病原微生物如冠状病毒、流感病毒等，由于其不稳定性、不规则运动、可再生性以及多样的感染途径，使其在大气中的传播和存活情况相当复杂<sup>[87,88]</sup>。此外，由于大气中不同类型的病原微生物具有不同的结构和特点，其检测方法也不尽相同。

基于传统的采样方法，如使用过滤器、撞击器或冷凝器进行微生物采样，虽然可以通过培养并使用电子显微镜来计数和观察微生物的形态，但这些方法在操作便捷性、检测速度、可检测微生物种类和灵敏度等方面有一定的局限性<sup>[89]</sup>。生物化学方法测定微生物特异性酶或代谢物小分子来检测病原微生物。然而，寻找特异性的酶或代谢物往往耗时费力，且依赖复杂仪器，增加了检测成本和技术门槛<sup>[90]</sup>。酶联免疫吸附测定（ELISA）和免疫荧光技术等免疫学方法利用特异性抗原抗体反应进行检测，通过标记物（如荧光、酶）的引入，在显微镜下进行定性、定位或定量研究。该方法特异性强，灵敏度高，广泛应用于病原微生物检测，但对于含量非常低的目标蛋白或抗体，其检测灵敏度可能不足<sup>[91,92]</sup>。

常用的分子生物学检测方法包括：聚合酶链式反应（PCR）通过提取空气样本中的微生物 DNA 或 RNA，使用特异性引物进行扩增，可快速检测特定的病原微生物，具有高灵敏度、快速和特异性高的优点<sup>[93]</sup>；实时荧光定量 PCR（RT-qPCR）、微滴式数字 PCR（ddPCR）以及高通量基因测序技术还可进一步定量病原微生物含量，提高了检测的灵敏度和准确性，但在低流行环境下假阳性率较高，限制了其独立作为诊断依据的可靠性<sup>[94,95,96]</sup>。相比之下，血清学检测在疫苗开发、抗体流行水平监测和社区感染确认等方面发挥着不可替代的作用，但同样存在操作复杂、耗时较长等问题。在新冠疫情大流行的背景下，基于 CRISPR/Cas 系统的新型检测方法如 CRISPR/Cas12a-NER 等展现出了巨大的潜力。该方法不需要专用仪器，与 qPCR 检测一致性高，可在 45 分钟内检测出至少 10 个病毒基因拷贝<sup>[97]</sup>。

## 2. 生物气溶胶的监测

生物气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分，占大气颗粒物的 30%-80%，是病原微生物的重要载体。经空气传播的致病性生物气溶胶对人类健康构成严重威胁，例如新冠、流感和结核病等<sup>[98,99,39]</sup>。传统的生物气溶胶检测手段主要依赖于过滤、撞击和静电沉淀等采样技术，但这些方法在捕获微小生物气溶胶 ( $< 0.1\mu\text{m}$ ) 时，速率较低，精度较差，且资源消耗大。

随着近些年光电技术的迅速发展，基于荧光散射效应的 LIF 仪器不断升级更新，荧光激光雷达、WIBS 多波段生物气溶胶传感器、Rapid-E 实时颗粒物检测仪等在生物气溶胶检测领域被广泛应用，但受限于激发光源的不足、荧光光谱库的匮乏以及环境噪声的干扰等因素，LIF 仪器在识别气溶胶类型以及检测精度方面仍存在不足<sup>[100-103]</sup>。同样，基于拉曼散射效应的新型检测仪器，如显微共焦拉曼光谱仪、多波长消荧光拉曼光谱仪等，为检测单个病毒颗粒提供了新思路<sup>[104,105]</sup>。微流控芯片与生物 ATP 自发荧光技术结合，通过荧光素-荧光素酶反应发出的荧光强度，可定量生物气溶胶活性细胞的含量<sup>[106]</sup>。质谱分析以及激光诱导击穿光谱等技术也为生物气溶胶检测提供了重要技术支撑<sup>[107,108]</sup>。然而，在实际应用中，面对复杂多样的生物气溶胶类型，这些技术仍面临灵敏度、准确性、实时性、通量和操作复杂性的多重挑战。

新冠疫情的冲击迫使出现通量更高、检测速度更快、灵敏度更高的生物气溶胶监测仪器<sup>[45]</sup>。集成生物气溶胶到水溶胶的空气采样、微流控芯片、光散射、实时 PCR (qPCR) 和场效应硅纳米线传感器等创新技术的应用，为实时监测空气中的病毒提供了可能。此外，呼出气检测对于疾病的早期诊断具有巨大的潜力，如挥发性有机化合物 (VOCs)、微粒等多种生物标志物均可反映人体健康状况或疾病状态。为突破标志物低浓度水平、背景噪声干扰等呼出气富集技术瓶颈，使用纳米吸附材料或冷凝技术、新型质谱设备、人工智能技术等有望提高生物标志物捕获率和检测精度，这在呼吸道感染的诊断中展现出巨大潜力<sup>[109,110]</sup>。

## 3. 大气中病原微生物的监测现状

大气中微生物状况是大气环境综合因素的集中体现，是评价区域环境空气质

量的重要指标之一<sup>[14, 111]</sup>。然而，生物与非生物成分以及边缘微生物与非边缘微生物的区分，不同气候环境条件下细菌、真菌、病毒的致病机理研究，以及不同病毒-宿主-气候环境的影响机制研究仍面临巨大挑战<sup>[112]</sup>，如何推动这四个层次的研究，是病原微生物与传染病监测预警的重要前进指南。但目前大气监测关注的焦点仍然是理化性质的污染，如烟尘、粉尘、细颗粒物、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、光化学烟雾等，对大气微生物问题关注较少，新发和再发传染病的大流行，使得全面深入地开展大气微生物监测显得愈加重要。

目前，国内科研院所对于大气中的微生物进行了研究性监测，为大气微生物监测奠定了一定的理论基础。医疗卫生部门对于微生物研究仅局限于病人和医院室内环境。医药食品部门也仅限于食品、药品中微生物含量的检测。对于医疗机构以外的大气环境监测，主要依靠环境保护部门开展。然而，国家环保部门对于微生物的监测关注也相对较少，只提出对室内环境空气中细菌总数的检测方法和标准，对于大气环境中微生物监测还未涉及<sup>[113]</sup>。

### 第三节 传染病预测模型与系统

#### 1. 传染病动力学模型

传染病动力学模型通过假设参数和变量，以及它们之间的联系定量揭示传染病的主要特征，依托疫情暴发早期数据，纳入未来不确定性，帮助发现传染病传播机理，科学预测疫情流行趋势。1927年创建的传染病易感者-感染者-移出者（SIR）模型，至今仍在不断发展并被广泛地使用。在SIR模型的基础上增设潜伏期人群，形成易感者-潜伏者-感染者-移出者（SEIR）模型，以反映某些传染病在感染初期无症状但具有传染性的特征。

许多学者在传统模型的基础上进行了多次改进，引入了更多复杂的因素和机制，以更准确地模拟和预测传染病的传播趋势。例如环境与社会因素的融合，通过引入人类与环境之间非线性相互作用的仓室，扩展了SEIR模型的应用范围<sup>[114]</sup>。考虑隔离和住院群体，使模型更贴近新冠疫情的实际发展情况<sup>[115]</sup>。厦门大学陈田木团队通过建立VEFIAR传播动力学模型，考虑人口流动、疫苗衰减和接触模式等多种因素，预测感染峰值和规模，并量化传播能力；有团队研究流行病在中小城

市传播的风险，建立中国地级市的城市流行病危害指数<sup>[116-118]</sup>。传染病预测系统的构建不再局限于单一学科，而是越来越多地融合了大气科学、统计学、人工智能等多个领域的知识和技术。兰州大学黄建平团队开发的《新冠肺炎疫情全球预测系统》（GPCP），将大气科学中的统计-动力气候预测方法与传染病模型相结合，显著提高了预测的准确性<sup>[119]</sup>。为了更精准地指导区域疫情防控，构建针对特定区域的预测系统，广州国家实验室钟南山团队开发的《全球新冠疫情科学预测系统》，基于国内人口迁移数据和 COVID-19 流行病学数据，为区域疫情防控提供了有力支持<sup>[120, 121]</sup>。

当前，我国在开展传染病预测方面，仍然有很多不足，如时空特性的缺失、数据获取与处理的局限性、模型构建的复杂性等诸多挑战。建立完善的传染病疫情预测系统，对于政府制定有效的管控政策、合理调配医疗资源和保障人民生命安全有重要意义<sup>[122]</sup>。

## 2. 传染病统计学模型

统计模型依据疫情的历史数据进行建模。传统统计模型中的时间序列分析方法是传染病预测问题的常用方法。差分自回归移动平均模型（ARIMA）通过捕捉时间序列数据中的自相关性，能够较为准确地预测疫情的发展趋势。结合经验模态分解（EMD）、集合经验模态分解（EEMD）等方法，可以进一步提取疫情数据中的不同变化分量，提高预测精度。此外，马尔科夫链和贝叶斯模型等统计方法也因其能够模拟疫情传播的不确定性而备受青睐，为决策者提供了更全面的风险评估<sup>[123]</sup>。

随着电子健康记录、卫生报告系统等数字化医疗数据的普及，人工智能算法为传染病预测提供了新的可能。在传染病预测中，基于树的模型（如决策树、随机森林）、支持向量机（SVM）等机器学习算法已得到广泛应用。深度学习算法的崛起，尤其是循环神经网络（RNN）、长短时记忆网络（LSTM）和卷积神经网络（CNN），使研究者能够更好地捕捉时间序列和复杂数据之间的关系<sup>[119, 124, 125]</sup>。将机器学习用于疾病预测的关键挑战之一是高质量、大规模数据的可用性。传染病监测系统通常会收集各种因素的数据，包括报告病例的数量、疫情暴发的地点以及受感染者的统计特征。然而，这些数据往往不完整、有偏差或有噪声，会影响机器学习

模型的性能。此外，许多传染病的潜伏期很长，这意味着过去暴发的数据可能无法准确反映当前的情况。最后，复杂的机器学习模型在实现高准确率的预测时牺牲了模型的可解释性，这也是其应用于传染病预测中的一大弊端。

为了综合各种方法的优势或提高机器学习模型的可解释性，研究人员开发了混合模型和集成模型。混合模型如 ARIMA-LSTM 结合了时间序列分析方法和深度学习的优势，实现了对疫情趋势的精准预测。而集成模型则通过整合多个预测模型的结果，进一步提高了预测的准确性和稳定性。例如，集成模型（WOCLSA）集成了 ANN、CNN 和 LSTM 三种深度学习模型，并通过鲸鱼优化算法优化参数，显著提升了新冠疫情的预测效果<sup>[126]</sup>。

### 3. 传染病的耦合预测系统

面对诸如新冠疫情此类的大规模流行病，传统的传染病模型已难以满足预测和应对复杂疫情的需求。因此，模型的扩展与耦合成为了必然趋势。耦合预测系统通过整合社会行为、流动性模式、环境因素、社会经济状态、医疗资源、气候环境以及公共卫生政策等多方面因素，极大地提高了对传染病动态的预测准确性和科学性<sup>[127]</sup>。

近年来，传染病模型在融合不同影响因素以更精确模拟新冠传播方面取得了显著进展。研究人员开发了多种模型，融合人员流动数据的传染病模型、社区层面的模拟以及动态的人员流动网络。这些模型结合数据同化、机器学习和地理传播模式分析，能够更精确地模拟人员流动对疫情传播的影响。此外，一些研究还通过利用移动电话数据、交通流量统计等来量化人员流动，并将这些数据融入传染病模型中，以评估旅行限制、封锁措施和其他公共卫生干预的效果。随着数据科学和计算技术的不断进步，传染病模型正朝着更加复杂、多元化的方向发展。模型不再局限于单一学科领域，而是融合了流行病学、数据科学、社会科学和经济学等多个学科的知识与方法。数据驱动的研究方法成为主流，通过收集和分析大量实时数据来预测疫情的发展趋势。我国在这一领域展现出了显著优势，特别是在数据收集与处理、疫情传播追踪与分析方面取得了显著成果<sup>[26]</sup>。

## 第四节 气候治理与生物安全的国家行动与对策

### 1. 气候治理政策

我国是受全球气候变化影响的敏感区和脆弱区，也是极端天气气候事件发生最为频繁的国家之一。中国气象局气候变化中心发布的《中国气候变化蓝皮书（2019）》指出：中国极端天气气候事件趋多趋强，气候风险水平呈上升趋势。中国不断加强灾害风险评估和管理工作、强化适应气候变化的能力。2013年和2016年国家发展和改革委员会等分别制定并发布了《国家适应气候变化战略（发改气候〔2013〕2252号）》和《城市适应气候变化行动方案（发改气候〔2016〕245号）》，以推进中国城市地区适应气候变化的能力，提升典型城市适应气候变化的治理水平，促进社会经济的可持续发展。2022年，生态环境部发布了《国家适应气候变化战略2035（环气候〔2022〕41号）》，以积极应对气候变化国家战略，强化适应气候变化行动举措，有效防范气候变化不利影响和风险。2016年我国加入《巴黎协定》，并在第75届联合国大会期间做出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”承诺；党的二十大报告也提出“积极稳妥推进碳达峰碳中和”“推动绿色发展，促进人与自然和谐共生”，展现了中国应对气候变化的决心和政策的延续<sup>[128]</sup>。

### 2. 生物安全政策及应对策略

2004年，世界卫生组织、联合国粮农组织、各国疾控中心、美国地质调查局国家野生动物健康中心等机构的代表在美国发表了“‘同一世界，同一健康’曼哈顿原则”。“同一健康（One Health）”是一种跨学科、跨部门和跨地区协作的理念，旨在预防新发传染病，保障人类健康、动物健康和环境健康。在“One Health”概念的基础上，2020年提出了“同一生物安全（One Biosecurity）”，要利用跨学科的生物安全政策和研究方法，以一个综合的视角，解决许多超越卫生、农业和环境的传统边界的生物安全风险<sup>[129]</sup>。生物安全威胁的全球治理需要实施三个相互关联的举措，改进风险评估方法，超越国界观察外来入侵物种的风险；以国际卫生条例为模型的具体国际监管工具，执行对全世界生物安全威胁的主动监测和应对；建

立一个专门的、多边的生物安全公约，负责国际生物安全治理<sup>[130]</sup>。

党的十八大以来，我国“传统生物安全问题和新型生物安全风险相互叠加，境外生物威胁和内部生物风险交织并存，生物安全风险呈现出许多新特点”。2020年10月17日，十三届全国人大常委会第二十二次会议通过的《中华人民共和国生物安全法》，标志着我国生物安全领域有了基础性的法律保障。该法明确界定了生物安全的定义，即国家有效防范和应对危险生物因子及相关因素威胁，生物技术能够稳定健康发展，人民生命健康和生态系统相对处于没有危险和不受威胁的状态，为生物安全治理提供了根本遵循。

中国《生物安全法》中“生物安全”的定义，包含了生物安全的主体、客体、外部条件与防控策略等部分，其中，外部条件包括气候变化引发的生物危害、环境灾难等非人为因素<sup>[131]</sup>。气候变化引发的生物危害包括物种分布区改变、生物入侵风险升高、生物多样性丧失风险增加、生态系统改变和退化。目前，我国为应对气候变化采取的国家行动和策略中，有关生物安全治理的内容还不够完善，相关工作亟需加强。

### 3. 我国近期投入情况及最新举措

国家卫生健康委和国家疾控局建立了多渠道的监测预警体系，在哨点医院、发热门诊、重点场所、城市污水等渠道开展疫情的监测；积极推进“新发突发传染病防控”国家科技重大专项接续实施工作，推进国家重点研发计划“病原学与防疫技术体系研究”重点专项的实施，持续提升监测预警能力，建立健全应急处置机制，持续加大公共卫生投入，2023年安排重大传染病防控经费208.8亿元。国家疾控局组织开发国家传染病智能监测预警前置软件，以实现医疗机构传染病相关数据自动交换为目标，变“被动监测”为“被动监测”与“主动监测”相结合。目前，我国已建立法定传染病和突发公共卫生事件网络直报系统，覆盖全国8.4万家医疗卫生机构，突发公共卫生事件信息平均报告时间缩短到4小时以内，具备在72小时内检测300多种病原体的能力；建立了突发公共卫生事件风险评估制度，在全国建成4大类59支国家卫生应急队伍；针对新冠等呼吸道疾病，拓展形成了包括哨点医院、病毒变异、城市污水以及舆情监测在内的十个监测子系统，开展了急性呼吸道疾病多病原监测试点，并设置四类风险信号，科学研判监测结果，及时报告

和发布预警信息。

2018年，国家自然科学基金委持续推进科学基金系统性改革，其中，申请代码调整是优化学科布局改革的切入点。在战略研究类专项项目的支持下，工作组对大气科学学科申请代码和下设研究方向及关键词进行了优化调整。2019年，大气科学学科被列为自然科学基金委17个改革试点学科之一。经科学界充分调研和研讨，D0513（大气化学与大气环境）调整为D0506（大气化学）和D0514（大气环境与健康气象）。申请代码D0514（大气环境与健康气象）延伸了大气环境的知识链，针对空气污染、气候变化等环境问题的复杂性和综合性，以健康气象为着眼点，推动大气环境与其他学科的交叉，获得大气环境治理问题的综合认知，服务于环境—健康—经济协同可持续发展和全民大健康战略实施<sup>[132]</sup>。为应对2020年突发新冠疫情大流行，基金委支持了以D0514（大气环境与健康气象）为申请代码的专项项目：病毒气溶胶感染活性在大气传播过程中的演变规律（项目批准号：42041002），前瞻性的申请代码调整更好的推动交叉科学服务于国家重大需求<sup>[133]</sup>。通过明确资助导向、完善评审机制、加强跨学科合作和培养跨学科人才等措施的实施，进一步提升我国交叉科学的研究水平和创新能力，为国家经济社会发展提供有力支撑。

## 第四章 发展思路与政策建议

### 第一节 发展思路与发展方向

#### 1. 监测体系的优先发展方向与建议

病原微生物的气溶胶传播是导致疫情加剧的重要因素。通过对大气中病原微生物的监测，可以在病原体扩散到人群之前提供预警，从而实现对疫情的早期发现和控制。因此，应加快推进大气病原微生物的高精度实时监测技术研发，开展防疫前线阵地大气病原微生物的哨点监测，及早布局大气病原微生物实时监测网，第一时间发现传染源，形成主动监测、事前预防的常态化疫情防控新格局。未来可在以下方向优先开展研究：

（1）利用现有实时在线监测仪器，在我国重要入境口岸、大城市重点公共场所（如医院、车站/机场）进行试点，建设精准实时监测网，切实助力防疫关口前移。

（2）基于激光诱导荧光、表面增强拉曼等先进技术，结合人工智能算法，开发标准化、业务化的快速精准在线监测技术，研发大气病原微生物实时“报警器”；发挥激光遥感独特技术优势，研发探测范围广、时空分辨率高和可靠性强的全波段荧光激光雷达；为进一步加强防疫措施，将监测范围扩展到冰川、冻土等关键区域。

（3）基于最新研发的大气病原微生物实时监测仪和高分辨率荧光激光雷达，结合离线监测优势技术手段，建成国际一流的大范围实时立体监测网，精准快速感知突发疫情源头，显著提升我国重大突发传染病防控能力和生物安全风险防范能力；拓展国际视野，通过南南合作机制，在非洲等地区建立监测网，帮助发展中国家增强疫情监测和响应能力，助力全球疫情防控。

（4）强化对群体性不明原因疾病，聚集性不明原因肺炎、有流行病学关联的临床危重症病例和不明原因死亡等异常健康事件的病原学诊断及大气病原体重点监测，建立未知病原的检测技术，形成更敏感有效的监测预警网络，建成多点触发、反应快速、科学高效的新发突发传染病、群体性不明原因疾病、重点传染病监测平台。

（5）开放多部门合作，通过政府-企业-学术部门联合，建立国家级、省级病原

微生物监测网络，将疾控部门、医疗卫生机构、采供血机构、检验检测机构、出入境检验检疫机构、动物疫病防控机构、高等院校、科研院所等具有生物安全和病原检测资质的实验室纳入大气病原微生物监测网络布局。

(6) 开展全球尺度大气中病原微生物的重点区域监测，基于世界卫生组织及其他国际专业机构、重点关注国家和周边国家发布的传染病疫情信息，推动与周边国家开展跨境传染病及大气病原微生物联合监测，加强全球大气病原微生物监测，积极跟踪全球新发、突发传染病前沿发展趋势。

## 2. 预测体系的优先发展方向与建议

随着人工智能、大数据和基因组学等技术的发展，研究人员能够更准确地识别传染病的传播模式和变异，使得公共卫生决策部门能够更加灵活地应对不断变化的卫生挑战。传染病预测与预警的优先发展思路应从多个维度切入，重点强化数据收集与共享、应用尖端科技、推动多部门跨学科合作、加强全球多国多区域协作、提升医疗早诊能力、以及强化疫苗研发与分发。这些措施将帮助公共卫生系统更有效地应对新发、突发和常发传染病疫情，提升智能辅助决策能力，实现对已知和未知传染病的有效预防和控制，未来可在以下方向优先开展研究：

(1) 基于物联网、大数据、云计算、人工智能和模拟仿真等技术开发风险评估工具，通过多部门合作，政府-企业-学术部门联合从风险源、受体脆弱性、公共安全等多方面立体式开展大型数据库建设，运用数据融合技术，打通多源异构数据，研发公共健康数据互联互通与共享标准体系，结合大气病原微生物实时监测网络数据，建设病原实时预测预警系统可统一使用的国家级数据中心。

(2) 基于国家疾控局及各省级疾控部门构建的多维度监测预警指标和阈值及传染病异常信号触发核实标准，完善大气病原微生物异常信号触发核实标准，基于大气病原微生物监测网络布控，运用大数据、云计算、人工智能等技术手段，自动捕获传染病疫情异常信号，构建算法模型和知识图谱组成的多类别、多场景模型库，预测疫情趋势，提升智能辅助决策能力。

(3) 针对当前重大新发疫情预测预警的空间分辨率不足且预测精准度不高的现状，通过增加人口流动的空间扩散项将已有的传染病单点模型扩展至二维空间，结合传统优化反演算法和人工智能算法，建立人口流动的空间扩散系数参数化方

案，并结合已量化的疫情传播关键影响因素参数，形成空间复合参数化网格分布，建成“统计-动力”相结合的重大疫情的二维预测预警模型，实现我国二维高精度的重大疫情业务化逐日预报与季节预测。

(4) 调查梳理气候敏感疾病基本信息清单，构建气候敏感疾病风险预警系统，在建立完善的监测体系的基础上，开展基于环境气象数据与地理时空分布的病原微生物的规模流行病预报预测体系关键技术研究，开展鼠疫、登革热、疟疾、乙脑等媒介生物传染病、人兽共患病、新发传染病等疾病的发病预警。

(5) 强化对群体性不明原因疾病，聚集性不明原因肺炎、有流行病学关联的临床危重症病例和不明原因死亡等异常健康事件的模拟预测，研究生态变化、气候变化及人类活动对未知病原体传播的影响，深入了解其传播机制和生命周期，对未来未知新发传染病的暴发概率、活跃地区以及来源起源进行风险评估和预测预警。

(6) 亟需联合卫生健康、农业农村、林草、生态环境、海关、教育、民政等多部门协作，加强流行病学、大气科学、环境科学、应用数学和计算机科学等多学科交叉，实现多模式耦合的流行病预测预警，通过空间最优化模型和多目标决策方法，考虑人口分布、交通网络和医疗设施等因素，实现资源的合理配置和调度。

## 第二节 资助体系与政策建议

### 1. 加强基础问题研究

当前，国内外研究团队对大气微生物群的功能潜力了解甚少，尚不清楚各种影响因素的综合作用及其各自对病原体传播的影响权重，潜在动物宿主或媒介尚未得到全面鉴定，动物宿主与媒介所携带的病原微生物也缺乏系统筛选。

未来亟需加强大气病原微生物形成、来源解析、环境演变和传播机制的基础研究。基于观测和历史数据，建立气象和环境因子与病原微生物和气溶胶传播的统计关系，加强气候环境对病原微生物传播的关键影响因素的研究；揭示天气气候和大气环境对病原微生物繁殖、变异和传播的影响与机理，厘清气候、环境、社会、经济、健康、人体免疫等关键因素的影响贡献，阐明全球尺度不同气候区、发展中国家与发达国家地区气象要素和季节变化对生物气溶胶传播的机制；深入研究区域及全球尺度生物气溶胶的循环过程及传播规律，阐明病原微生物识别、表征、传输

和转化过程在气候、环境中的响应；阐明气候驱动的病原进化和跨物种传播机制，确定病原体在不同环境、时间、空间和种群中的分布和决定因素，探索病原在动物-人类环境中的时空动态分布和进化特征，揭示病原的传播能力和跨物种传播效率；利用质谱、光谱等分析技术、基因测序技术、分子生物学等交叉研究，对大气环境载体定量研究，重建新冠等重大疫情发生发展的时间序列，揭示其空间分布变迁特征、演化基本图景。

## 2. 加强监测仪器研发及监测网建设

目前，我国大气病原微生物的高精度监测技术不成熟，监测仪器存在捕获难、检测慢、识别差等技术瓶颈问题，未建立完善的监测网络，各环节严重依赖人工操作，步骤繁琐、耗时较长、成本较高，尚未实现环境样本从检测预处理到检测分析一站式自动化运行。亟需及早布局、建立大气病原微生物实时监测网，从被动防御向主动监测转变。

亟需加快推进大气病原微生物的实时监测技术研发，通过集成空气采样、微流控，以及高灵敏、可重复性高的生物传感技术等监测技术实现对大气中微生物与非生物成分、病原微生物与非病原微生物区分，并对病原微生物中细菌、真菌和病毒及其种类进行精确甄别，结合人工智能算法，开发标准化和业务化的快速监测技术和在线监测仪器，提升软硬件综合监测能力，降低监测成本，为大气病原微生物实时监测网的建设打好基础；对各省市区重点场所和口岸开展大气病原微生物的哨点监测，建立人、物、环境、重点场所一体化监测体系，实时监测分析大气病原微生物的传播情况，及时发现传染源，缩短传播窗口期，从社区到省，建立各级监测应急预案，形成主动监测、事前预防的卫生安全管理工作新格局，为我国进一步完善突发公共卫生事件应急管理体系赢得更多宝贵机遇和时间。

## 3. 加强数据共享系统建设

数据共享能够在不同机构和部门之间实现信息的快速传递，使得疫情信息能够迅速传达到决策机构和基层卫生服务机构，从而缩短响应时间，促进不同部门之间的合作与协调。然而，当前不同地区和部门的数据孤立现象严重，在数据收集和管理上缺乏统一标准，数据共享存在个人健康数据的隐私泄露，如何在保护个人隐

私的同时实现有效的数据共享亟需进一步探索。

亟需疾控部门会同有关卫生部门、军队健全传染病协同信息共享工作机制，制订信息共享清单，畅通信息通报渠道，集结多方力量，建立权威的国家级数据共享系统。加快推动多部门合作，通过政府-企业-学术部门联合，以疾控部门部署工作、项目牵头、人才培养交流等方案加快推进多部门之间的数据共享。建立我国完善的重大突发传染病生物样本库，研发公共健康数据互联互通与共享标准体系，建立以数据标准规范为基础，以数据接口为桥梁，开放式数据管理为依托的数据融合系统，为政府部门、医疗机构和科研单位提供数据服务。基于分级分类的数据管理系统，构建涵盖环境、媒介、自然宿主、人群和临床样本的传染病综合监测与数据库。整合和同步病原体数据资源，包括重大传染病病原基因组、转录组、宏基因组、宏转录组和蛋白质组等组学数据及其分析结果、基因与蛋白注释信息、病原体基本信息，对代表性的数据资源建立数据采集与数据质量控制的标准操作流程（SOP），实现传染病综合数据集成平台的持续自动更新。基于物联网、大数据、云计算、人工智能和模拟仿真等技术开发风险评估工具，从风险源、受体脆弱性，以及公共安全能力三个方面，立体式开展大型数据库建设。

#### 4. 加强监测预警平台建设

疫情预测预警已成为决策部门科学防控、降低疫情期间经济社会损失的重要手段。目前我国疫情预测团队分散，没有集中研究力量建立权威预警平台，自主研发的局地、区域和全球传染病传播预警模型囊括的自然、环境和社会影响因素较少，与疫情暴发的实际情况结合不足，尚未建立权威的国家级疫情预警平台。

未来亟需集中多领域研究力量，构建“流行病、环境、气象、气候、人口、交通、经济、社会”等多尺度耦合的精准预测系统；基于人工智能和生物学大数据操作系统，融合实时监测网数据信息，建立包含数据库-实时监测网-集成预测的动态显示系统，建设国家级新发疫情协同群智决策平台；面向重大突发性公共卫生事件的预防预警需求，模拟不同场景和不同措施下疫情的发展趋势，建立应对疫情的最优管控和解封方案，基于疫情预测防控数字孪生模型、多智能体系统、卫生经济学评估模型，以及仿真推演分析数据，研判疫情影响和合理配置卫生资源，对突发、新发传染病进行早期预警、态势预报、风险评估，及时发布预警信息，为政府和防

疫部门制定相关政策提供科学支撑。亟需加强人工智能技术在重大疾病早筛早诊、精准治疗、临床全场景智慧管理等方面的应用，开展临床数据智能化采集与治理、多模态数据融合关联模型、以及专用大模型预训练模型的构建和验证等研究；结合人工智能技术挖掘重大疾病发生、发展与转归的规律和机制，提升重大疾病的临床干预效率和全周期管理精准性。

此外，亟需关注气候环境变化对于新发传染病的影响，利用人工智能的方法和宏基因组方法，识别环境和动物中可能出现的病原，加强对未来未知突发传染病的预警体系研究。从人群脆弱性角度，识别气候变化的健康风险，明确气候与环境变化的单因素及其相互作用，以及影响人类健康的路径和致病机制，研究开发趋势健康风险预警和决策支持工具，构建大气环境变化近实时表征和短期预测技术体系，建立多尺度嵌套病原微生物-气候-生态系统耦合预测模型，实现疫情控制、社会经济活动、人为排放和大气成分变化的动态表征和预测，建立预警业务平台，每年定期发布系统性信息，内容包括因气候环境因素造成的死亡人数及超额死亡人数等相关数据。

## 5. 推进重大研究计划与成果转化

大气中病原微生物的监测和预警相互依赖，相互促进，对我国新发、突发重大疫情防控至关重要。大气病原微生物从多维度多途径对人类健康产生影响，首先通过皮肤粘膜、消化道和呼吸道等暴露途径，危害人类和动物健康，涉及学科包括环境生态学、环境卫生学、传染病学、流行病学等多学科，这些学科研究大气病原微生物与人为活动的关联，以及它们如何通过空气传播影响植物、动物和人体的健康，其次大气病原微生物可以通过大气沉降、降水等方式进入水体和冰川，影响水生生态系统的健康，以及冰川的融化速度和冰川生态系统的稳定性，涉及学科包括大气科学、地理科学、环境科学等多科学。因此，大气中病原微生物的监测和预警涉及多领域多学科，建议设立大气病原微生物监测预警相关重大研究计划，创建全国重点实验室或国家实验室，统筹推进大气中病原微生物监测技术、监测网建设以及监测预警平台建立的研发创新工作，加强联合研发和攻关、人才培养和基地建设，集中各方资源，提高研究效率，形成该领域的科学共同体，尽快取得更大的进展，产出为疫情监测预警服务的高水平科研成果，有效提高重大疫情早发现早预警能

力，进一步提升我国突发公共卫生事件应急管理能力。

2024年8月国家多部委联合发布《关于建立健全智慧化多点触发传染病监测预警体系的指导意见》，针对健全监测预警体制机制、开展多渠道传染病监测、推进监测预警信息平台建设、强化监测预警能力建设等全方面提出了具体目标和要求。为了进一步提升重大突发公共卫生事件的应急能力，建议整合有关工程，联合国家疾控部门、区域公共卫生中心、企业、高校及研究机构，从国家层面推动重大研究计划，加快科研机构助力省市级疾控部门智慧化多点触发传染病监测预警体系的建立，聚焦“监测→预测→预警→防控”任务链，促进研究成果的高效利用，推进对新发疫情的快速感知和提前预警，将防疫关口前移，切实做到疫情早发现、早控制，实现高效统筹常态化疫情防控和社会经济发展，以此显著提升我国重大突发传染病等生物安全风险的防范与应对能力。

## 6. 加强我国多部门合作和国际合作

推动大气病原微生物监测预警研究的跨部门合作和国际合作是应对气候变化和保护人类健康的关键。跨部门合作可以整合不同领域的理论基础和资源，而国际合作则可以借鉴其他国家的成功经验，共同应对全球性的挑战。

联合高等院校、医疗机构大气病原微生物领域专家学者开展气候敏感性疾病风险评估及重大疫情监测预警平台建设相关科学研究；组建跨学科健康气象科研团队，开展技术攻关，丰富和完善健康气象公共服务产品体系，发布疾病风险预报预警和生活健康指数产品，打造健康气象科技合作平台；制定和实施国家层面的政策和行动方案，确保健康气象服务的可持续发展，全力推进国家级大气病原微生物监测预警平台建设及各省市大气病原微生物监测预警工作部署。

此外，在全球化的背景下，疾病传播呈现出跨国界的特征，因此国际之间的数据共享至关重要，亟需共同应对全球性的健康威胁。未来，亟需加强联合攻关、人才培养和基地建设，从数据共享、监测预警技术、人才培养等方面加强多方位、多层次的国际合作，吸引更多的国际专家和资源，通过承办国际会议和参与国际标准化组织的修订工作，讨论大气病原微生物监测预警的先进经验和技能，提升国际影响力。建立常态化的国际仪器比对合作和技术支持，确保合作项目的持续性和稳定性，利用国际合作项目开展全球尺度大气中病原微生物的重点区域监测，推动大

气病原微生物监测网络布点，通过与周边国家合作开展跨境传染病联合监测，积极跟踪全球新发、突发传染病前沿发展趋势，为应对未来未知传染病提前做好准备，推动构建人类健康共同体。

## 参考文献

- [1] 安太成, 陈嘉鑫, 傅家谟, 等. 珠三角地区 pops 农药的污染现状及控制对策. 生态环境, 2005, 14: 6.
- [2] 黄建平, 张北斗, 王丹凤, 等. 21 世纪交叉学科的新方向:气候变化与重大疫情监测预警. 兰州大学学报:医学版, 2022, 48(11): 1-3.
- [3] 张淳, 王慧琳, 葛龙, 等. 气候变化背景下全球常见癌症环境影响因素范围研究进展. 2023,
- [4] 要茂盛. 香山科学会议点亮生物气溶胶研究. 科学通报, 2018, 63: 876-877.
- [5] 朱永官, 王兰, 卢昌熠, 等. “同一健康” 框架下的城市环境微生物及其优化设计. 风景园林, 2023, 30: 22-26.
- [6] 高福. 从动物到人——流感病毒的跨种传播. 生命世界, 2014, 12-17.
- [7] Jossieran L, Caillère N, Brun-Ney D, et al. Syndromic surveillance and heat wave morbidity: A pilot study based on emergency departments in france. BMC Medical Informatics and Decision Making, 2009, 9: 1-9.
- [8] Tian Z, Li S, Zhang J, et al. The characteristic of heat wave effects on coronary heart disease mortality in beijing, china: A time series study. PloS One, 2013, 8: e77321.
- [9] 李湉湉, 杜艳君, 莫杨, 等. 基于脆弱性的高温热浪人群健康风险评估研究进展. 环境与健康杂志, 2014, 31: 547-550.
- [10] Wu X, Lu Y, Zhou S, et al. Impact of climate change on human infectious diseases: Empirical evidence and human adaptation. Environment International, 2016, 86: 14-23
- [11] 黄存瑞, 刘起勇. Ippc ar6 报告解读:气候变化与人类健康. 气候变化研究进展, 2022, 18: 10.
- [12] Mora C, McKenzie T, Gaw IM, et al. Over half of known human pathogenic diseases can be aggravated by climate change. Nature Climate Change, 2022, 12: 869-875.
- [13] Sessitsch A, Wakelin S, Schloter M, et al. Microbiome interconnectedness throughout environments with major consequences for healthy people and a healthy planet. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2023, 87: e00212-00222.
- [14] Zhu T, Tang M, Gao M, et al. Recent progress in atmospheric chemistry research in

china: Establishing a theoretical framework for the “air pollution complex”. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40: 1339-1361.

[15] Li T, Luo J, Huang C. Urban epidemic hazard index for chinese cities: Why did small cities become epidemic hotspots? *arXiv preprint arXiv:210305189*, 2021.

[16] Huang J, Li L, Chen S, et al. Constructing an optimal prediction system for infectious disease. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 2024, 11: 4544-4551.

[17] Huang J, Zhang L, Chen B, et al. Development of the second version of global prediction system for epidemiological pandemic. *Fundamental Research*, 2024, 4: 516-526.

[18] 阚海东, 陈秉衡. 全球气候变化的健康效应. *北方环境*, 2001.

[19] 吴晓旭, 田怀玉, 周森, 等. 全球变化对人类传染病发生与传播的影响. *中国科学: 地球科学*, 2013, 1743-1759.

[20] Huang J, Zhang L, Liu X, et al. Global prediction system for COVID-19 pandemic. *Science Bulletin*, 2020, 65: 1884-1887.

[21] Liu K, Yao T, Pearce DA, et al. Bacteria in the lakes of the tibetan plateau and polar regions. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142248.

[22] Zhu G, Wang X, Yang T, et al. Air pollution could drive global dissemination of antibiotic resistance genes. *The ISME journal*, 2021, 15: 270-281.

[23] 黄建平, 陈斌. 人工智能技术在未来改进天气预报中的作用. 2024.

[24] Chen Y, Li N, Lourenço J, et al. Measuring the effects of COVID-19-related disruption on dengue transmission in southeast asia and latin america: A statistical modelling study. *The Lancet Infectious Diseases*, 2022, 22: 657-667.

[25] Shen J, Duan H, Zhang B, et al. Prevention and control of COVID-19 in public transportation: Experience from china. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115291.

[26] Yang L, Wang Z, Wang L, et al. Association of vaccination, international travel, public health and social measures with lineage dynamics of SARS-CoV-2. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, 120: e2305403120.

[27] Cao Q, Liu M, Li X, et al. Influencing factors in the simulation of airflow and particle transportation in aircraft cabins by cfd. *Building and environment*, 2022, 207: 108413.

- [28] Wang F, Zhang T, You R, et al. Evaluation of infection probability of COVID-19 in different types of airliner cabins. *Building and Environment*, 2023, 234: 110159.
- [29] Xing W, Liu Y, Wang H, et al. A high-throughput, multi-index isothermal amplification platform for rapid detection of 19 types of common respiratory viruses including SARS-CoV-2. *Engineering*, 2020, 6: 1130-1140.
- [30] Li S, Guo J, Gu Y, et al. Assessing airborne transmission risks in COVID-19 hospitals by systematically monitoring SARS-CoV-2 in the air. *Microbiology Spectrum*, 2023, 11: e01099-01023.
- [31] Li H, Xu M, An X, et al. High-risk args (hra) chip: A high-throughput qpcr-based array for assessment of high-risk args from the environment. *Water Research*, 2024, 262: 122106.
- [32] Li H, Hong Y, Gao M, et al. Distinct responses of airborne abundant and rare microbial communities to atmospheric changes associated with chinese new year. *iMeta*, 2023, 2: e140.
- [33] Huang Z, Yu X, Liu Q, et al. Bioaerosols in the atmosphere: A comprehensive review on detection methods, concentration and influencing factors. *Science of the Total Environment*, 2023, 168818.
- [34] 马雪征, 魏昭慧, 郑飞, 等. 生物气溶胶的采集和分析方法研究进展. *中国国境卫生检疫杂志*, 2022, 45(6): 516-520.
- [35] An T, Liang Z, Chen Z, et al. Recent progress in online detection methods of bioaerosols. *Fundamental Research*, 2023, 4(3): 442-454.
- [36] 朱鑫琦, 张佩, 王光辉, 等. 基于归一化本征荧光信号的气溶胶分类技术研究. *中国激光*, 2023, 50(13): 1310005.
- [37] Alali H, Ai Y, Pan Y, et al. Gorden Videen, Chuji Wang. A Collection of Molecular Fingerprints of Single Aerosol Particles in Air for Potential Identification and Detection Using Optical Trapping-Raman Spectroscopy. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 2022, 27(18): 5966.
- [38] Wang L, Qi W, Liu Y, et al. Recent Advances on Bioaerosol Collection and Detection in Microfluidic Chips. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(26): 9013-9022.

- [39]Luo K, Lei Z, Hai Z, et al. Transmission of SARS-CoV-2 in public transportation vehicles: A case study in hunan province, china. *Open Forum Infectious Diseases*, 2020, 7(10): ofaa430.
- [40]Dong Z, Ma J, Qiu J, et al. Airborne fine particles drive H1N1 viruses deep into the lower respiratory tract and distant organs. *Science Advances*, 2023, 9: eadf2165.
- [41]Huang J, Wang D, Zhu Y, et al. An overview for monitoring and prediction of pathogenic microorganisms in the atmosphere. *Fundamental research*, 2024, 4: 430-441.
- [42]Tang S, Mao Y, Jones RM, et al. Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control. *Environment International*, 2020, 144: 106039.
- [43]Tian H, Liu Y, Li Y, et al. An investigation of transmission control measures during the first 50 days of the COVID-19 epidemic in china. *Science*, 2020, 368: 638-642.
- [44]Yang Z, Zeng Z, Wang K, et al. Modified seir and ai prediction of the epidemics trend of COVID-19 in china under public health interventions. *Journal of Thoracic Disease*, 2020, 12: 165-174.
- [45]Brownstein JS, Rader B, Astley CM, et al. Advances in artificial intelligence for infectious-disease surveillance. *New England Journal of Medicine*, 2023, 388: 1597-1607.
- [46]Hu L, Ma Y, Pourfattah F, et al. Numerical study of cough droplet transmission in an indoor environment. *Physics of Fluids*, 2023, 35: 113315.
- [47]Pourfattah F, Wang L, Deng W, et al. Challenges in simulating and modeling the airborne virus transmission: A state-of-the-art review. *Physics of Fluids*, 2021, 33(10):101302.
- [48]Li Y, Qian H, Hang J, et al. Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Building and Environment*, 2021, 196: 107788.
- [49]Yang X, Yang H, Ou C, et al. Airborne transmission of pathogen-laden expiratory droplets in open outdoor space. *Science of The Total Environment*, 2021, 773: 145537.
- [50]Guzmân M, Kouri G, Díaz M, et al. Dengue, one of the great emerging health challenges of the 21st century. *Expert Review of Vaccines*, 2004, 3: 511-520.
- [51]Huang Q, Baker M, McArthur C, et al. Implementing hospital-based surveillance for severe acute respiratory infections caused by influenza and other respiratory pathogens in

- new zealand. *Western Pacific surveillance and response journal: WPSAR*, 2014, 5: 23.
- [52]Brammer L, Budd A, Cox N. Seasonal and pandemic influenza surveillance considerations for constructing multicomponent systems. *Influenza and Other Respiratory Viruses*, 2009, 3: 51-58.
- [53]Dwyer DE, Group IIS. Surveillance of illness associated with pandemic (H1N1) 2009 virus infection among adults using a global clinical site network approach: The insight flu 002 and flu 003 studies. *Vaccine*, 2011, 29: B56-B62.
- [54]Alcayna T, Fletcher I, Gibb R, et al. Climate-sensitive disease outbreaks in the aftermath of extreme climatic events: A scoping review. *One Earth*, 2022, 5: 336-350.
- [55]Thomas CD, Cameron A, Green RE, et al. Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427: 145-148.
- [56]秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展①. *地理科学进展*, 2014, 10.
- [57]Rajapaksha P, Elbourne A, Gangadoo S, et al. A review of methods for the detection of pathogenic microorganisms. *Analyst*, 2019, 144: 396-411.
- [58]郑云昊, 李菁, 陈灏轩, 等. 生物气溶胶的昨天、今天和明天. *科学通报*, 2018, 63: 878-894.
- [59]Zeng Z, Qu W, Liu R, et al. Real-time assessment of COVID-19 epidemic in guangdong province, china using mathematical models. *Journal of Thoracic Disease*, 2023, 15: 1517-1522.
- [60]Ma Y, Zhao Y, Liu J, et al. Effects of temperature variation and humidity on the death of COVID-19 in wuhan, china. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138226.
- [61]Liu J, Zhou J, Yao J, et al. Impact of meteorological factors on the COVID-19 transmission: A multi-city study in china. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138513.
- [62]Zheng B, Geng G, Ciais P, et al. Satellite-based estimates of decline and rebound in china's CO<sub>2</sub> emissions during COVID-19 pandemic. *Science Advances*, 2020, 6: eabd4998.
- [63]Xiao Y, He L, Chen Y, et al. The influence of meteorological factors on tuberculosis incidence in southwest china from 2006 to 2015. *Scientific Reports*, 2018, 8: 10053.

- [64]Smith GS, Schoenbach VJ, Richardson DB, et al. Particulate air pollution and susceptibility to the development of pulmonary tuberculosis disease in north carolina: An ecological study. *International Journal of Environmental Health Research*, 2014, 24: 103-112.
- [65]Yang X, Duan Q, Wang J, et al. Seasonal variation of newly notified pulmonary tuberculosis cases from 2004 to 2013 in wuhan, China. *PLoS One*, 2014, 9: e108369.
- [66]邓斌, 周志刚, 马泽舜, 等. 肺结核病与气象因素关系的 BP 神经网络模型研究. *国际医药卫生导报*, 2008, 14: 17-20.
- [67]蔡全才. 传染性非典型肺炎传播规律及其防制研究. 上海: 复旦大学, 2004.
- [68]Pöhlker ML, Pöhlker C, Krüger OO, et al. Respiratory aerosols and droplets in the transmission of infectious diseases. *Reviews of Modern Physics*, 2023, 95: 045001.
- [69]Dabisch P, Schuit M, Herzog A, et al. The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 2020, 55(2): 142-153.
- [70]Peng S, Li G, Lin Y, et al. Stability of SARS-CoV-2 in cold-chain transportation environments and the efficacy of disinfection measures. *Front Cell Infect Microbiol*, 2023, 13: 1170505.
- [71]孙伟, 胡晓东, 胡耀豪, 等. 大气环境对新型冠状病毒传播影响的研究进展. *科学通报*, 2022, 67: 2509-2521.
- [72]Mubareka S, Lowen AC, Steel J, et al. Transmission of influenza virus via aerosols and fomites in the guinea pig model. *The Journal of infectious diseases*, 2009, 199(6): 858-865.
- [73]Ni J, Zhao Y, Li B, et al. Investigation of the impact mechanisms and patterns of meteorological factors on air quality and atmospheric pollutant concentrations during extreme weather events in zhengzhou city, henan province. *Atmospheric Pollution Research*, 2023, 14: 101932.
- [74]张强, 叶殿秀, 杨贤为, 等. SARS 流行期高危气象指标的研究. *中国公共卫生*, 2004, 20: 647-648.
- [75]Choi KM, Christakos G, Wilson ML. El niño effects on influenza mortality risks in

- the state of california. *Public Health*, 2006, 120: 505-516.
- [76]Harun NS, Lachapelle P, Douglass J. Thunderstorm-triggered asthma: What we know so far. *Journal of Asthma and Allergy*, 2019, 12: 101-108.
- [77]Cavicchioli R, Ripple WJ, Timmis KN, et al. Scientists' warning to humanity: Microorganisms and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 2019, 17: 569-586.
- [78]Lafferty KD. The ecology of climate change and infectious diseases. *Ecology*, 2009, 90: 888-900.
- [79]Bayoh MN, Lindsay SW. Effect of temperature on the development of the aquatic stages of *Anopheles gambiae sensu stricto* (Diptera: Culicidae). *Bulletin of Entomological Research*, 2003, 93: 375-381.
- [80]Patz JA, Frumkin H, Holloway T, et al. Climate change: Challenges and opportunities for global health. *JAMA*, 2014, 312: 1565-1580.
- [81]杨娟, 赖圣杰, 余宏杰. 感染性疾病流行现状、防控挑战与应对. *中华疾病控制杂志*, 2017, 21: 647-649+674.
- [82]黄存瑞, 邓诗舟. 气候变化下的新发传染病风险. *山东大学学报(医学版)*, 2020, 58: 7-12.
- [83]刘金华, 孙洪磊, 高福. H3 亚型禽流感流行的潜在危害和防控建议. *科学通报*, 2024, 69: 1315-1319.
- [84]He Y, Liu W, Jia N, et al. Viral respiratory infections in a rapidly changing climate: The need to prepare for the next pandemic. *EBioMedicine*, 2023, 93: 104593.
- [85]Liu Y, Jiao N, Xu Zhong K, et al. Diversity and function of mountain and polar supraglacial DNA viruses. *Science Bulletin*, 2023, 68: 2418-2433.
- [86]李菁, 要茂盛. 空气介质中耐药细菌和耐药基因的研究进展. *中华预防医学杂志*, 2018, 52: 440-445.
- [87]Cáceres CJ, Rajao DS, Perez DR. Airborne transmission of avian origin h9n2 influenza A viruses in mammals. *Viruses*, 2021, 13: 1919.
- [88]Guzman MI. An overview of the effect of bioaerosol size in coronavirus disease 2019 transmission. *The International journal of health planning and management*, 2021, 36: 257-266.

- [89]Fennelly M, O'Connor DJ, Hellebust S, et al. Effectiveness of a plasma treatment device on microbial air quality in a hospital ward, monitored by culture. *Journal of Hospital Infection*, 2021, 108: 109-112.
- [90]Spiegelman D, Whissell G, Greer CW. A survey of the methods for the characterization of microbial consortia and communities. *Canadian Journal of Microbiology*, 2005, 51: 355-386.
- [91] Rocío A R , Jorge C C,Valeria V, et al. Development of an Enzyme-Linked Immunosorbent Assay (ELISA) as a tool to detect NS1 of dengue virus serotype 2 in female *Aedes aegypti* eggs for the surveillance of dengue fever transmission. *Heliyon*, 2024, 10(8): e29329.
- [92]章燕, 冯智田, 窦志勇, 等. 基于免疫学的微生物快速检测技术研究与应用现状. *中国卫生监督杂志*, 2020, 27: 253-256.
- [93]Green MR, Sambrook J. Screening colonies by polymerase chain reaction (pcr). *Cold Spring Harb Protoc*, 2019, 2019(6):pdb.prot095224.
- [94]Kubista M, Andrade JM, Bengtsson M, et al. The real-time polymerase chain reaction. *Molecular aspects of medicine*, 2006, 27: 95-125.
- [95]Pavšič J, Žel J, Milavec M. Digital pcr for direct quantification of viruses without DNA extraction. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 2016, 408: 67-75.
- [96] Bayle A, Marino P, Baffert S, et al. Cost of high-throughput sequencing (NGS) technologies: Literature review and insights. *Bulletin du cancer*, 2023, 111(2): 190-198.
- [97]Wang X, Zhong M, Liu Y, et al. Rapid and sensitive detection of COVID-19 using crispr/cas12a-based detection with naked eye readout, crispr/cas12a-ner. *Science Bulletin*, 2020, 65: 1436-1439.
- [98]Yao M, Zhang L, Ma J, et al. On airborne transmission and control of SARS-CoV-2. *Science of The Total Environment*, 2020, 731: 139178.
- [99]Ma J, Qi X, Chen H, et al. Coronavirus disease 2019 patients in earlier stages exhaled millions of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 per hour. *Clinical Infectious Diseases*, 2021, 72: e652-e654.
- [100] Wang Y , Huang Z , Zhou T, et al. Identification of fluorescent aerosol observed by

- a spectroscopic lidar over northwest China. *Optics express*, 2023, 31(13): 22157-22169.
- [101] Brdar S, Panić M, Matavulj P, et al. Explainable AI for unveiling deep learning pollen classification model based on fusion of scattered light patterns and fluorescence spectroscopy. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 3205.
- [102] Boldeanu M, Cucu H, Burileanu C, et al. Multi-Input Convolutional Neural Networks for Automatic Pollen Classification. *Applied Sciences*, 2021, 11(11707): 11707.
- [103] Markey E, Hourihane Clancy J, Martínez-Bracero M, et al. Spectroscopic detection of bioaerosols with the wibs-4+: Anthropogenic and meteorological impacts. *Science of The Total Environment*, 2024, 943: 173649.
- [104] Wang Y, Jiang S, Fu Q, et al. Unmasking Bacterial Identities: Exploiting Silver Nanoparticle ‘Masks’ for Enhanced Raman Scattering in the Rapid Discrimination of Diverse Bacterial Species and Antibiotic-Resistant Strains. *Analytical Chemistry*, 2024, 96(21): 8566-8575.
- [105] 赵迎, 李晓鹏, 崔飞鹏, et al. 多波长消荧光拉曼光谱仪的研制及应用研究. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(1): 86-92.
- [106] Park J W, Kim H R, Hwang J. Continuous and real-time bioaerosol monitoring by combined aerosol-to-hydrosol sampling and ATP bioluminescence assay. *Analytica Chimica Acta*, 2016, 941(0): 101-107.
- [107] Shu X, Li Y, Liang M, et al. Rapid lipid profiling of bacteria by online MALDI-TOF mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2012, 321: 71-76.
- [108] Ciniglia D, Migliorini F, Dondé R, et al. Loading effect of matrix compounds in aerosol LIBS measurements. *Spectrochimica Acta Part B*, 2023, 208(0): 106784.
- [109] Chen H, Qi X, Zhang L, et al. COVID-19 screening using breath-borne volatile organic compounds. *Journal of Breath Research*, 2021, 15: 047104.
- [110] 高纳, 彭方达, 何雅珍, 等. 基于热解吸-气相色谱质谱法测定呼出气中 27 种挥发性有机物浓度. *环境与职业医学*, 2024, 41(1): 96-102.
- [111] Yao Y, Chen X, Chen W, et al. Susceptibility of individuals with chronic obstructive pulmonary disease to respiratory inflammation associated with short-term exposure to ambient air pollution: A panel study in Beijing. *Science of The Total Environment*, 2021,

766: 142639.

[112] Ramírez A L, Hall-Mendelin S, Doggett T L, et al. Mosquito excreta: A sample type with many potential applications for the investigation of Ross River virus and West Nile virus ecology. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 2018, 12(8): e0006771.

[113] 陈锸, 万东, 褚可成, 等. 空气微生物污染的监测与研究进展. *中国环境监测*, 2014, 30: 171-178.

[114] Mwalili S, Kimathi M, Ojiambo V, et al. Seir model for COVID-19 dynamics incorporating the environment and social distancing. *BMC Research Notes*, 2020, 13: 352.

[115] He S, Peng Y, Sun K. Seir modeling of the COVID-19 and its dynamics. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 101: 1667-1680.

[116] Chen T, Rui J, Wang Q, et al. A mathematical model for simulating the phase-based transmissibility of a novel coronavirus. *Infectious Diseases of Poverty*, 2020, 9: 24.

[117] Zhao Z, Zhu Y, Xu J, et al. A five-compartment model of age-specific transmissibility of SARS-CoV-2. *Infectious Diseases of Poverty*, 2020, 9: 117.

[118] 陈田木, 赵泽宇, 芮佳, 等. 厦门市新型冠状病毒肺炎人群传播能力计算与防控措施效果的模拟评估. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59: 298-303.

[119] Zhang Y, Chen K, Weng Y, et al. An intelligent early warning system of analyzing twitter data using machine learning on COVID-19 surveillance in the us. *Expert Systems with Applications*, 2022, 198: 116882.

[120] Xu T, Cheng J, Yang Z, et al. COVID-19 focused series: Diagnosis and forecast of COVID-19. *Journal of Thoracic Disease*, 2023, 15: 1503-1505.

[121] Liang J, Wang Y, Lin Z, et al. Influenza and COVID-19 co-infection and vaccine effectiveness against severe cases: A mathematical modeling study. *Front Cell Infect Microbiol*, 2024, 14: 1347710.

[122] 王瑞雪, 王增淼, 田怀玉. 传染病数学模型在大型活动赛事新型冠状病毒肺炎传播风险模拟中的应用. *中华预防医学杂志*, 2022, 56(8): 1055-1061.

[123] 杜志成, 郝元涛, 魏永越, 等. 基于马尔科夫链蒙特卡罗模拟方法的 COVID-19 年龄别病死率估计. *中华流行病学杂志*, 2020, 11: 1777-1781.

- [124] Nguyen VH, Tuyet-Hanh TT, Mulhall J, et al. Deep learning models for forecasting dengue fever based on climate data in vietnam. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, 2022, 16: e0010509.
- [125] Kim J, Ahn I. Infectious disease outbreak prediction using media articles with machine learning models. *Scientific Reports*, 2021, 11: 4413.
- [126] Su X, Sun Y, Liu H, et al. An innovative ensemble model based on deep learning for predicting COVID-19 infection. *Scientific Reports*, 2023, 13: 12322.
- [127] 张娟娟, 吴谦惠, 余宏杰. 新冠肺炎的流行病学、传播动力学、疫苗和非药物性干预措施评价的研究进展. *中国科学基金*, 2022, 36: 660-671.
- [128] 汤维祺, 吴力波. *Ippc ar6 报告解读: 气候治理政策的新视角及对我国的启示*. *气候变化研究进展*, 2023, 19: 151-159.
- [129] Hulme PE. One biosecurity: A unified concept to integrate human, animal, plant, and environmental health. *Emerging topics in life sciences*, 2020, 4: 539-549.
- [130] Hulme PE. Advancing one biosecurity to address the pandemic risks of biological invasions. *Bioscience*, 2021, 71: 708-721.
- [131] 刘杰, 任小波, 姚远, 等. 我国生物安全问题的现状分析及对策. *中国科学院院刊*, 2016, 31: 389.
- [132] 刘哲, 丁爱军, 张人禾. 调整国家自然科学基金申请代码, 优化大气学科资助布局. *科学通报*, 2020, 65(12): 1068-1075.
- [133] 车慧正, 林金泰, 丁爱军, 等. 国家自然科学基金大气科学学科二级申请代码下设研究方向与关键词解读: D0514 大气环境与健康气象. *大气科学*, 2023, 47(1): 220-229.