

微生物安全产业发展策略研究

宋仲戡¹, 李曼¹, 胡梁斌², 王春明³, 鲁曦², 刘开辉²,
张丽佳³, 宇岩³, 吴清平¹

(1. 广东省科学院微生物研究所, 华南应用微生物国家重点实验室, 广东省微生物安全与健康重点实验室, 广州 510070; 2. 陕西科技大学食品与生物工程学院, 西安 710021;
3. 广东省科学院信息研究所, 广州 510070)

摘要: 微生物安全是新时期我国社会与经济健康发展的根本保障, 是国家粮食安全、公共卫生、社会稳定的重要支撑。本文梳理了我国微生物安全产业发展面临的问题, 结合微生物安全产业的政策环境, 分析了微生物安全产业的发展需求和现状; 在明晰微生物安全产业国内外发展格局的基础上, 综合归纳了制约我国致病微生物检测与控制技术创新及应用研发的瓶颈, 提出了构建我国微生物安全产业的发展规划。研究建议, 强化微生物安全创新研究平台建设; 构建微生物安全科学大数据库, 以人才建设驱动能力提升; 壮大微生物安全龙头企业, 以标准规范保障产业发展; 强化微生物安全领域的重大系统创新和工程技术研究, 探索出我国微生物安全产业的高质量发展路径。

关键词: 微生物安全; 微生物检测; 微生物诊断; 微生物防控; 核酸检测

中图分类号: Q939.97 **文献标识码:** A

Development Strategy of Microbial Safety Industry

Song Zhongjian¹, Li Man¹, Hu Liangbin², Wang Chunming³, Lu Xi²,
Liu Kaihui², Zhang Lijia³, Yu Yan³, Wu Qingping¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Safety and Health, State Key Laboratory of Applied Microbiology of Southern China, Institute of Microbiology, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China;
3. Institute of Information, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Microbial safety is crucial for China's social and economic development in the new era, and it is an important support for national food security, public health, and social stability. In this article, we analyze the development needs and current status of the microbial safety industry considering the policy environment in China. Subsequently, we clarify the domestic and global development patterns of the industry and summarize the challenges faced by the innovation and application of pathogenic microorganism detection and control technologies in China. Furthermore, we propose a development plan for building China's microbial safety industry. To explore a high-quality development path, China should build innovation platforms and a large scientific database regarding microbial safety, enhance personnel development for this industry, encourage leading enterprises to develop according to standards and regulations, and strengthen major system innovation and engineering technology research in the microbial safety field.

Keywords: microbial safety; microbial detection; microbial diagnosis; microbial prevention and control; nucleic acid detection

收稿日期: 2021-08-05; **修回日期:** 2021-09-16

通讯作者: 吴清平, 广东省科学院微生物研究所研究员, 中国工程院院士, 研究方向为微生物安全与健康; E-mail: wuqp203@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国微生物安全与健康产业发展战略研究”(2020-ZD-05)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

微生物安全是以病原微生物为对象,利用现代科学技术方法,对其在人类生活与健康、国家安全、经济社会、生态环境等方面已产生或潜在存在的各种危害和风险进行检测、诊断、防控(见图1)。微生物安全问题成为全世界、全人类面临的重大生存与发展威胁,对粮食安全、公共卫生、社会稳定构成严重影响。例如近20年来,严重急性呼吸综合征(SARS)病毒、埃博拉病毒、甲型H7N9禽流感病毒、新型冠状病毒(SARS-CoV-2)等接连出现,单增李斯特菌、致病性大肠杆菌、金黄色葡萄球菌等导致临床感染,具有致病性和耐药性的“超级细菌”不断涌现,这些都严重威胁着人类健康。

我国同样面临严峻复杂的微生物安全形势,新发、再发传染病威胁不容忽视。针对于此,国家加强微生物安全体系建设,制定《病原微生物实验室生物安全管理条例》《“十三五”生物技术创新专项规划》《“十三五”国家食品安全规划》《中华人民共和国生物安全法》《新型冠状病毒预防用疫苗研发技术指导原则(试行)》等一系列涉及微生物安全产业的政策、法律、规划;加快建设生物安全国家战略资源平台,建成中国科学院武汉国家生物安全实验室、国家昆明高等级生物安全灵长类动物实验中心、国家动物疫病防控高级别生物安全实验室等生物安全四级实验室,体现了微生物安全体系建设进展。

国际微生物安全产业快速发展,呈现出巨头主导的竞争格局,市场集中度较高,聚集了一批著名跨国企业。在我国,受制于生物医学、机电一体化应用水平相对落后,微生物安全产业发展比较缓慢,与国际先进水平存在差距。随着国家产业政策有所侧重,叠加新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情防控的推动效应,相关产业近期取得了较快增长。为加快构建微生物安全体系,应对重大新发突发传染病、动植物疫情、不明原因的生物安全事件,亟需强化重大创新研究,推进基础平台、人才队伍、科学大数据库建设。本文旨在开展微生物安全产业发展路径研究,以为行业创新发展和宏观管理提供基础参考。

二、微生物安全产业的发展需求

(一) 重大传染性疾病的迫切需求

病原微生物造成重大传染性疾病,发生频率和危险等级均较高。2002—2003年,涉及世界30多个国家和地区的SARS疫情,累计临床报告病例为8400多例[1]。2013年,甲型H7N9禽流感病毒流行造成经济损失约800亿元,给我国食品行业带来了极大的负面影响。非洲西部地区至今尚未完全从2014—2016年暴发的埃博拉病毒疫情中恢复过来,影响范围甚至扩散到了欧洲、北美洲[2]。自2018年非洲猪瘟在我国暴发后,我国销毁猪只约 1.2×10^6 头,直接经济损失较大[3]。在全球范围内仍在肆虐的COVID-19疫情,对人类发展、各国社会稳定影响深远,造成的经济损失难以估量[4]。

传染性疾病预防可有效防止病原微生物的传入和传出,早期预警可有效应对突发公共卫生事件,做到早识别、早防控,为降低患病率、死亡率提供基础保障。传染病监测系统获得良好发展后,将增强对传染病暴发的早期察觉能力、早期识别能力,提高公共卫生信息资源的共享质量。针对重大传染性疾病预防需求,微生物安全产业需加速研制体外诊断相关的仪器、设备、试剂等新产品,推动高特异性分子诊断、生物芯片等前沿技术的发展与应用。

(二) 保障食品安全的基础需求

食品受微生物污染可造成消费者食物中毒,微生物成为影响食品安全最重要的因素。食物中毒类型与不同区域人群的饮食习惯有着密切关系:美国居民多食肉、蛋、糕点类,葡萄球菌食物中毒最多;日本靠海,居民喜食生鱼片,副溶血性弧菌食物中毒最多;我国居民食用畜禽肉、禽蛋类较多,以沙门氏菌食物中毒最多。针对食源性疾病预防严重威胁人类健康的客观实际,微生物安全产业需增加微生物检测产品的供给量,合理增设食品安全检测机构以加强食品安全监管力度。

微生物安全研究有助于掌握食源性致病微生物的危害形成及遗传变异规律。高通量、高灵敏度的新检测技术与装备研发体系建立后,将推动我国食品安全检测、监测与风险预警、溯源及控制技术水平迈上新台阶。

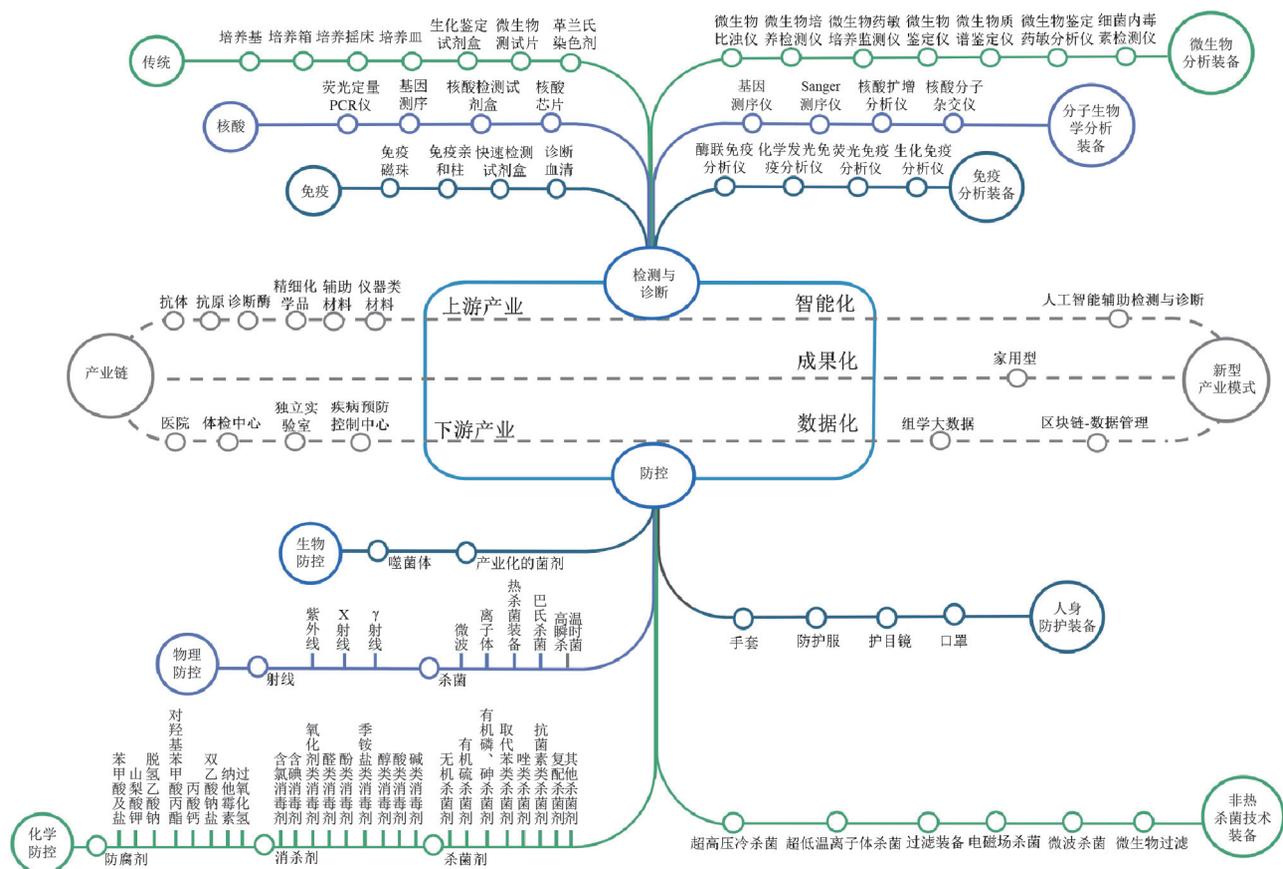


图 1 微生物安全产业的基本构成
注：PCR 表示聚合酶链式反应。

(三) 建立微生物防控体系的重大需求

在 COVID-19 疫情防控工作中，核酸检测仪器和生物安全三级、四级实验室成为世界病原微生物防控体系的关键支撑。我国亟需完善已有的微生物防控体系，研制更为先进的微生物防控装备及核心元器件，以有效应对突发性疾病的暴发、高致病性微生物的流入。

三、我国微生物安全产业的发展现状

(一) 微生物检测与诊断市场容量扩能、产业能力升级

微生物检测与诊断指运用微生物学理论与方法，从原液样本中进行取样，在体外无菌环境中进行扩大培养，鉴定或检验微生物的种类、数量、性质对人体健康的影响，辅助临床判断病人致病机理与用药科学性，测定食品质量情况。2017 年，世界微生物检测与诊断产业的市场规模约为 162 亿美元，

增速为 4.75%；自 COVID-19 疫情暴发以来，重大需求推动了产业规模的快速发展，2020 年全球 SARS-CoV-2 病毒检测费用超过 1000 亿美元。

1. 传统微生物检测与诊断进入成熟期

传统微生物检测与诊断通过病原学诊断、药物敏感性分析，为临床传染性疾病的预防、诊断、治疗、疗效观察等提供依据；可细分为菌种培养、鉴定、药敏试验，应用场景主要是感染科室常用菌种的鉴定及用药指导，如肺部感染、肠炎、阴道炎等场景下的菌群确定。该方向经过多年发展进入了成熟期，产业态势相对平缓。

传统微生物检测与诊断方向的发展主要表现在改进培养基，以研发新型的特异性显色培养基为代表。不同致病菌在代谢过程中能够产生特异性的酶，通过一定方式观察菌落的荧光/颜色，可一次性完成检测、计数、鉴定；显色培养基技术将传统的致病菌分离与生化反应鉴定结合起来，检测结果直观，成为微生物快速检测的主流技术。国内企业

和机构开发了常见食源性致病菌特异性的生化显色培养基，显著简化了检测与鉴定流程（所需时间从7~15 d 缩短为1~2 d）。

载体培养法以显色培养法为基础，近年来发展迅速；利用无毒的高分子材料作为培养基载体，将特定的培养基和显色物质附着在上面，通过微生物在培养基上面的生长特征、显色反应来鉴定微生物。国产微生物测试片系列产品，包括菌落总数、金黄色葡萄球菌、大肠杆菌/大肠菌群、酵母/霉菌、沙门氏菌等测试片，适用于 GB 4789 食品微生物学检验国家标准，检测灵敏度高、特异性强、结果准确，可在24~48 h 内完成检测。

2. 核酸检测与诊断形成完善的应用体系

核酸检测技术经过数十年的发展，整体较为成熟，为核酸检测产品及服务提供了关键支撑。核酸检测技术适用于对病原体感染的早期诊断，病原体的检测品类丰富。相较于传统的微生物检测，核酸PCR、新一代测序（NGS）检测平台均处于发展期；尽管NGS技术起步晚、价格贵、普及度低，但具有高通量、高精度、快速等突出优势，未来应用前景广阔 [5]。

COVID-19 疫情等感染性疾病的新发、再发，对微生物临床诊断的准确性、实效性提出了更高要求 [6]。目前，核酸检测试剂盒主要采用的是对 SARS-CoV-2 特征核糖核酸（RNA）序列进行逆转录 PCR 扩增反应，平均检测时间2~3 h，特异性强、灵敏度高，在疫情精准防控方面发挥了重要作用。2019 年我国核酸检测市场规模为106 亿元（约占全球的18%），增速超过15%，是全球最具潜力的市场。2020 年以来随着 COVID-19 疫情防控的需求而出现了爆发式增长。

也要注意，国内相关企业聚集在技术门槛低、研发投入低的试剂产品生产环节，核酸检测设备仍然依赖进口；亟需加大对核酸检测一体化设备的研发投入，快速增强检测设备的自给能力。一些企业基于早期的检测试剂研发业务，逐步拓展到 PCR 分析仪、基因测序仪等核酸检测设备的研发，国产一体化设备已有产品上市。

3. 微生物免疫学检测与诊断的规模化、集约化程度一般

免疫学检测与诊断指通过抗原与抗体相结合的特异性反应进行测定的方法，在微生物安全方向主

要是检测传染性疾病。微生物检测产品的消费需求来自食品安全检测、医学临床检验、血液筛查等。各类医学临床检验、食品安全检测是微生物检测及诊断产品的主要应用领域，包括数量庞大的医院、体检中心、独立实验室、疾病预防控制中心、计划生育指导站、食品企业、食品安全检测机构等。

在我国，免疫诊断是规模最大的体外诊断细分行业，将继续保持快速发展。虽然中低端诊断设备、诊断试剂方面的国产化进展良好，但高端免疫诊断市场仍由国际巨头企业主导，国产化程度不高。特别是在属于核心技术方向的免疫诊断原材料方面，诊断用配对抗体研发生产技术始终是制约国内企业取得突破的瓶颈环节。以免疫诊断最大的板块即化学发光市场为例，2017 年国产品牌的市场占有率仅为5%；大多数体外诊断试剂企业的生产规模较小、集约化程度较低，产品质量参差不齐、低水平重复生产现象较为突出。

4. 微生物检测与诊断装备技术水平稳步提升

科技进步带动了微生物检测技术的发展，新型、先进、简便的微生物检测技术不断出现，在逐步替代传统方法的同时，促使检测技术与标准的更新与完善。新型检测技术的出现，配套应用与器械的更替，人员业务水平的提升，共同推动了微生物检验事业的稳健发展。

微生物检测与诊断设备主要分为：检测必须装备，如生物传感器、显微镜、接种仪、培养基自动化分装系统等；微生物鉴定系统装备，如质谱检测系统装备、实时检测系统等；微生物脂肪酸分析（鉴定）系统。相关设备的国内生产商主要有郑州安图生物工程股份有限公司、湖南长沙天地人生物科技有限公司、山东鑫科生物科技股份有限公司。另外，中国科学院苏州生物医学工程技术研究所自主研发的三重四极杆质谱仪，在离子源、四极杆、射频电源、控制系统等多个核心技术方面获得突破，整机性能指标达到国内领先水平。

（二）微生物防控对人类健康和社会经济的重要性不断提高

流感病毒持续威胁人类健康，埃博拉病毒致人死亡的病例时有发生，这些都引发了国际社会的高度关注；SARS、COVID-19 疫情凸显了微生物防控的重要性。目前，微生物防控技术种类丰富多样、

手段相对齐全,按作用原理主要分为物理防控、化学防控、生物防控。

物理防控主要指医用口罩 [7]、防护服、无菌滤膜、红外测温仪、紫外发光二极管、护目镜等产品,通过加热、过滤、超高压、紫外线、微波、磁力、超声波 [8]、冷杀菌、X射线, γ 射线等物理方法去除物料内有害微生物的方法。我国在物理防控方面具有较强的实力,专利获取数量排名世界第一,产品制造体系持续升级。例如,在 COVID-19 疫情暴发后,国内的口罩产能迅速提升,产值从 2015 年全年的 60 多亿元增长到 2020 年上半年的 130 亿元。

化学防控主要指食品/化妆品防腐剂、消杀剂(氧化、酸碱、离子液体)、农用/兽用杀菌剂等。近年来,我国相关产能增长态势良好,基本满足了以 COVID-19 疫情防控为代表的社会需求;相关防腐剂企业在满足国内市场的同时,积极开发国际市场,出口的防腐剂在世界市场中占有重要份额。

生物防控主要指利用噬菌体、细菌、真菌和微生物代谢物等生物手段来消除或减少致病微生物的方法。我国在微生物防控理论研究方面与世界一流水平仍存在明显差距,亟需加大理论基础研究以保障技术追赶;当前亟需建设高通量噬菌体合成和编辑平台,开展耐药细菌的噬菌体临床试验,以期突破超级细菌临床感染的难题。

四、我国微生物安全产业发展面临的问题

(一) 具有自主知识产权的检测控制技术相对缺乏

大型跨国公司通常全面掌握了致病微生物检测与控制技术,以法国生物梅里埃公司、美国赛默飞世尔科技公司为代表。我国企业或研究机构在致病微生物检测与控制科技研发方面起步较晚,技术创新资源的传统积累较少,应用研究仍存在一定的不足;同时缺乏具有自主知识产权的检测与控制技术,如现有的检测靶标因缺乏自主知识产权而阻碍了分子检测新技术及新产品的研发与应用。

(二) 微生物安全专业技术人才不足

我国微生物安全方面的高水平科研人员数量不多,缺乏具有国际影响力的高水平科研团队与机构,尚未形成一流的微生物安全研究环境,相比国际微生物前沿创新差距明显。例如,微生物专业 A+ 学

科主要分布在清华大学、北京大学、上海交通大学等知名高校,但多数高校的微生物安全专业设置不足,专业人才培养路径、基础与应用研究培训流程等均待完善。根据 Web of Science 统计,全球从事微生物安全(含农业、畜禽安全)相关的人员约有 70 万人,其中从事人类病原微生物安全研究的约有 5 万人;我国相关研究人员数量的占比约为 10%(居世界第二位),但从事人类病原微生物安全研究的人员数量远低于美国、英国等发达国家。此外,国内相关企业的微生物安全专业技术人才使用不合理,复合型微生物安全人才稀缺,普遍存在工作压力大、人才易流失等现象。

(三) 微生物安全产业政策尚不完善

微生物检测的工作量繁重,检测样本的构成也比较复杂,对于检测结果的准确性要求很高;通过各种物品传播的病原微生物种类繁多,可能导致多种传染性疾病,也对检测技术提出了新要求。微生物安全涉及食品、医药、临床、化妆品、环境卫生、农业等诸多领域,加之微生物种类繁多,导致我国具体指向微生物安全的市场标准化体系尚不完善;微生物安全产业在市场层面缺乏健全、成熟的制度规范体系,需合理加强对微生物安全的市场监管与规范。此外,微生物安全技术创新或产品研发活动,可能触及生命科学的伦理道德,需加强必要的约束监管。

(四) 高等级生物安全实验室体系亟待补强

微生物安全与人类社会群体健康福祉有着密切关系,微生物安全技术研究和产品开发均需要高水平、高等级的实验室条件以及系统性、高质量的基础数据。国内专业开展微生物安全研究的机构有中国科学院武汉病毒研究所分子病毒学实验室、省部共建华南应用微生物国家重点实验室、军事医学科学院微生物流行病学研究所、病原微生物生物安全国家重点实验室等,但针对高致病性微生物安全防控目前仅有 3 个生物安全四级实验室 [9],不适应全面开展微生物安全研究的要求。

(五) 具有国际竞争力的大型企业数量极少,产业集聚程度不足

国际微生物检测市场发展成熟、集中度较高,

知名大型企业集聚。相比之下，国内企业在微生物检测与诊断方面基础薄弱、受重视程度不足，因而产业营收与利润率均不高；行业集中度偏低，缺乏具有国际竞争力的龙头企业，没有形成比较优势。北京博奥生物有限公司、厦门艾德生物医药科技股份有限公司、上海之江生物科技股份有限公司等代表性企业，在微生物安全领域的市场份额普遍较小，产品未能进入国内外高端市场。

五、我国微生物安全产业的发展构想

系统规划国家生物安全风险防控和治理体系，有助于促进微生物安全产业发展，全面提高国家生物安全治理能力。从发达国家经验看，微生物安全的研究积淀离不开先进的实验室条件、成熟的数据资源平台。微生物大数据时代已经到来，微生物及其基因资源数据呈现爆发式增长，微生物学研究逐渐从以数据为支撑向以数据为中心转变，因此海量数据的整理整合与开放共享变得至关重要 [10]。

我国微生物菌种资源丰富，为研究微生物安全科学、开发高新技术及产品提供了良好的基础条件；《中华人民共和国生物安全法》明确了生物安全风险防控基本制度，为国家生物安全风险防控与治理体系建设提供了依据。这些因素为微生物安全产业发展创造了良好的外部环境，提供了巨大的市场机遇。瞄准微生物安全产业高质量发展目标，需要研制世界一流的微生物检测防控产品和仪器设备，孕育一批具有国际竞争力的高新技术企业，建立国际化、高层次人才的集聚与培养高地，通过 15 年时间成长为万亿元规模的市场。

到 2025 年，基于国家生物安全顶层设计，串联组学核心要素，建成“病原微生物、农业微生物、工业微生物、人体微生物”一体化的微生物安全科学大数据库，完善入库数据标准、数据共享与数据融合新机制；建成多软硬件支撑、多运行环境、用户管理统一、支持生命科学与交叉学科应用软件运行的高性能计算平台，融入新型信息化技术（如人工智能、基因学习等），提供核酸序列比对、蛋白质结构预测、分子动力学模拟、基因组可视化等高性能科研计算服务；成立国家微生物安全信息中心，统筹实施微生物安全信息共享。

到 2030 年，建立微生物安全重大基础设施平台，围绕“环境-工业-食品-动物-人群-临床”全流程，完善“基础研究-应用基础研究-成果转化”全链条，形成国际先进的创新技术群；建立创新技术研发中心，开展生物芯片、微生物质谱鉴定、宏基因组测序等前沿研究，自主研制检测防控产品与仪器设备，突破国外企业的技术壁垒；按照实际需求扩建高等级生物安全实验室，支持新发突发传染病防控，拓展公共卫生防御体系能力，成为世界传染病防控基础与应用基础研究的重要技术力量。

到 2035 年，针对微生物菌种保藏、科学研究、产业转化三大主体功能，面向人口健康与医药、动物卫生、检验检疫、生态环境安全四大领域，围绕烈性、突发、外来、热带传染病病原体的监测预警、检测、消杀、防控、治疗五大环节的需求，按照“统筹布局、网络运行，应急优先、稳步推进，加强协调、科学管理”的原则，完成全国高级别生物安全实验室的整体布局优化；建设世界一流的微生物安全产业基地，在构建国家高级别生物安全实验室体系、微生物安全治理试验区的基础上，高质量建成微生物安全产业体系、微生物安全产业园区。

六、对策建议

（一）强化微生物安全创新研究平台建设

基于现有的微生物菌种资源条件，研究和运用比较基因组学、蛋白组学、代谢组学、现代生物信息学等技术，自主发展标准菌种库评价标准与检测靶标；研制高通量芯片检测技术和试剂盒，独立构建全自动微生物生理生化鉴定系统；建设具有国际先进水平的致病微生物快速检测技术平台。

建设高性能数据运算与生物信息分析平台，覆盖基因组学、转录组学、蛋白组学、代谢组学等微生物组学研究需求，具备复杂数据的挖掘能力；合理建设高等级生物安全实验室体系，具备开展高致病性病原微生物的研究能力；创建生物高新技术成果孵化基地，自主发展微生物安全的高新技术产品。

（二）构建微生物安全科学大数据库，以人才建设驱动能力提升

针对自主知识产权缺乏、核心试剂与产品依赖

进口等致病微生物检测靶标方面存在的问题,充分运用现有的基因组等数据信息、新型生物信息学方法,积极研制有关危害物检测与确证技术及产品;构建体现我国致病微生物特点的科学大数据库,为致病微生物的快速检测、有效溯源及危害控制提供新的契机。

以内生式人才培养为重点,加强微生物安全领域的创新科研团队建设;不断引进高层次的国际化人才,围绕微生物安全产业核心问题,集聚科研院所和企业的优势,带动微生物安全产业关键技术的全面突破并支持微生物安全产业的稳健发展。

(三) 设立“微生物安全重大创新专项”,突破关键技术瓶颈

瞄准产业国际前沿、立足国情和需求,科学论证“微生物安全重大创新专项”;找准微生物安全领域的重大系统创新、工程技术研究突破点,力争掌握一批具有自主知识产权的种质资源、核心关键技术与产品;发展微生物先进制造工具体系,以关键核心技术的创新突破与产业化,保障微生物安全产业的高质量和可持续发展。

(四) 壮大微生物安全龙头企业,以标准规范保障产业发展

以微生物资源科学大数据库为依托,建设微生物安全高新技术成果孵化平台,产生一批重大科研成果,尽快转化新型生物芯片、生物监测诊断等前沿技术并形成产品系列。支持微生物安全龙头企业发展壮大,提升产品体系的高端化水平,形成国际市场竞争力和知名度。推动形成微生物安全企业聚集示范区,发挥龙头企业的辐射带动作用。

微生物安全产业的健康发展离不开标准规范。针对不同病原物的核酸检测试剂,建议适时颁布相对应的技术审评政策、明确的申报注册指导标准,便于微生物企业在新产品研发、注册、申报阶段的规范化和标准化操作,降低企业申报成本并提高试剂注册申报的成功率。

参考文献

- [1] Enserink M, Vogel G. Deferring competition, global net closes in on SARS [J]. *Science*, 2003, 300(5617): 224–225.
- [2] 韩辉, 伍波, 宋亚京, 等. 2018年10月刚果民主共和国埃博拉出血热疫情风险评估 [J]. *口岸卫生控制*, 2018, 23(6): 10–15.
Han H, Wu B, Song Y J, et al. Risk assessment of ebola hemorrhagic fever in the Democratic Republic of Congo in October 2018 [J]. *Port Health Control*, 2018, 23(6): 10–15.
- [3] 徐伟楠, 刘芳何, 何忠伟. 中国非洲猪瘟疫情影响分析及其防控对策 [J]. *农业展望*, 2018, 14(12): 54–59.
Xu W N, Liu F H, He Z W. Impact of African swine fever epidemic in China and its prevention and control countermeasures [J]. *Agricultural Outlook*, 2018, 14(12): 54–59.
- [4] Wu F, Zhao S, Yu B, et al. A new coronavirus associated with human respiratory disease in China [J]. *Nature*, 2020, 579(7798): 265–269.
- [5] Chen L J, Liu W Y, Zhang Q, et al. RNA based mNGS approach identifies a novel human coronavirus from two individual pneumonia cases in 2019 Wuhan outbreak [J]. *Emerging Microbes & Infections*, 2020, 9(1): 313–319.
- [6] Ren L L, Wang Y M, Wu Z Q, et al. Identification of a novel coronavirus causing severe pneumonia in human: A descriptive study [J]. *Chinese Medical Journal*, 2020, 133(9): 1015–1024.
- [7] Sethi S, Kathuria M, Kaushik T. Face mask detection using deep learning: An approach to reduce risk of coronavirus spread [J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2021, 120: 1–12.
- [8] 樊丽华, 侯福荣, 马晓彬, 等. 超声波及其辅助灭菌技术在食品微生物安全控制中的应用 [J]. *中国食品学报*, 2020, 20(7): 326–336.
Fan L H, Hou F R, Ma X B, et al. The application of ultrasound and assistant sterilization technologies in food microbiological control: A review [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(7): 326–336.
- [9] 宋琪, 丁陈君, 陈方, 等. 国际生物安全四级实验室建设和实验室安全管理现状 [J]. *世界科技研究与发展*, 2021, 43(2): 169–181.
Song Q, Ding C J, Chen F, et al. Construction and development status of international biosafety level 4 laboratory and suggestions to China [J]. *World Sci-tech R & D*, 2021, 43(2): 169–181.
- [10] 刘双江, 施文元, 赵国屏. 中国微生物组计划: 机遇与挑战 [J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(3): 241–250.
Liu S J, Shi W Y, Zhao G P. China microbiome initiative: Opportunity and challenges [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(3): 241–250.