

## 专家述评

## 定量微生物风险评估发展方向共识

董庆利<sup>1</sup>,丁甜<sup>2</sup>,方婷<sup>3</sup>,李长城<sup>3</sup>,廖新浴<sup>2</sup>,刘阳泰<sup>1</sup>,施春雷<sup>4</sup>,汪雯<sup>5</sup>,王军<sup>6</sup>,王翔<sup>1</sup>,王宏勋<sup>7</sup>,王晔茹<sup>8</sup>,  
王彝白纳<sup>8</sup>,肖兴宁<sup>9</sup>,徐进<sup>8</sup>,张昭寰<sup>10</sup>,赵勇<sup>10</sup>

- (1. 上海理工大学,上海 200093;2. 浙江大学,浙江 杭州 310058;3. 福建农林大学,福建 福州 350002;  
4. 上海交通大学,上海 200240;5. 中国计量大学,浙江 杭州 310018;6. 广东海洋大学,广东 湛江  
524088;7. 武汉轻工大学,湖北 武汉 430023;8. 国家食品安全风险评估中心,北京 100022;  
9. 浙江省农业科学院,浙江 杭州 310021;10. 上海海洋大学,上海 201306)

**摘要:**近年来国内外食品安全定量微生物风险评估(QMRA)发展迅速。QMRA综合多学科理论知识和技术方法,定量评估暴露于病原微生物所产生的人类健康风险,并为风险管理和风险交流提供科学依据。QMRA经典框架包括危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述4个步骤,当前,抽样统计、预测微生物建模、微生物毒理、计算模拟、生物信息学等已成为研究热点,如何通过跨学科方法整合多源数据,提高评估结果的准确性和可靠性是QMRA发展的关键。未来,QMRA在数据、模型、算法等方面仍存在诸多技术难题,与人工智能、微生物多组学、生物信息学、合成生物学、系统生物学、计算生物学等领域的交叉融合是重点研究方向,以实现在食品安全和公共卫生领域发挥更大作用。

**关键词:**微生物风险评估;食品安全;预测模型;人工智能

**中图分类号:**R155 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-8456(2025)05-0407-05

**DOI:**10.13590/j.cjfh.2025.05.001

**Consensus on the directions for development in quantitative microbial risk assessment**

DONG Qingli<sup>1</sup>, DING Tian<sup>2</sup>, FANG Ting<sup>3</sup>, LI Changcheng<sup>3</sup>, LIAO Xinyu<sup>2</sup>, LIU Yangtai<sup>1</sup>, SHI Chunlei<sup>4</sup>,  
WANG Wen<sup>5</sup>, WANG Jun<sup>6</sup>, WANG Xiang<sup>1</sup>, WANG Hongxun<sup>7</sup>, WANG Yeru<sup>8</sup>, WANG Yibaina<sup>8</sup>,  
XIAO Xingning<sup>9</sup>, XU Jin<sup>8</sup>, ZHANG Zhaohuan<sup>10</sup>, ZHAO Yong<sup>10</sup>

- (1. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Zhejiang University, Zhejiang Hangzhou 310058, China; 3. Fujian Agriculture and Forestry University, Fujian Fuzhou 350002, China; 4. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 5. China Jiliang University, Zhejiang Hangzhou 310018, China; 6. Guangdong Ocean University, Guangdong Zhanjiang 524088, China; 7. Wuhan Polytechnic University, Hubei Wuhan 430023, China; 8. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100022, China; 9. Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Zhejiang Hangzhou 310021, China; 10. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In recent years, quantitative microbial risk assessment (QMRA) for food safety has developed rapidly both domestically and internationally. QMRA integrates multidisciplinary theoretical knowledge and technical methodologies to quantitatively assess the human health risks associated with exposure to pathogenic microorganisms and provides a scientific basis for risk management and risk communication. The classic framework of QMRA includes four steps: hazard identification, hazard characterization, exposure assessment, and risk characterization. Currently, research hotspots include sampling statistics, predictive microbiological modeling, microbial toxicology, computational simulation, and bioinformatics. The key to the development of QMRA lies in how to integrate multi-source data through interdisciplinary approaches to improve the accuracy and reliability of assessment results. In the future, QMRA still faces many technical challenges in terms of data, models, and algorithms. The interdisciplinary integration with other fields such as artificial intelligence, microbial multiomics, bioinformatics, synthetic biology, systems biology, and computational biology will be the focus of research directions, aiming to play a greater role in the fields of food safety and public health.

**Key words:** Microbial risk assessment; food safety; predictive models; artificial intelligence

随着人们对食品安全、饮用水安全和公共卫生的关注度不断提高,以及对“全健康”理念的日益重视,定量微生物风险评估(Quantitative microbiological risk assessment, QMRA)在全球范围内得到了越来越广泛的应用<sup>[1]</sup>。QMRA是一个跨学科领域,综合了微生物学、医学、流行病学、环境科学、统计学等多领域的知识和方法,运用风险评估的原理,通过对微生物的来源、特性、传播途径、暴露评估、剂量-反应关系及风险表征等方面的研究分析,对重要危害发生的可能性进行量化评估,并为风险管理和风险交流提供科学依据<sup>[2]</sup>。QMRA的经典框架通常包括4个关键步骤:危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述(图1),这些步骤相互关联,形成一个完整的循环,服务风险管理决策<sup>[3-4]</sup>。准确的QMRA可以帮助我们更好地量化微生物及其毒素暴露的可能性,从而针对潜在健康影响采取预防和控制措施,为政策制定提供支持,更有效地分配资源,提高应对新发突发危害和疾病预防能力<sup>[5]</sup>。

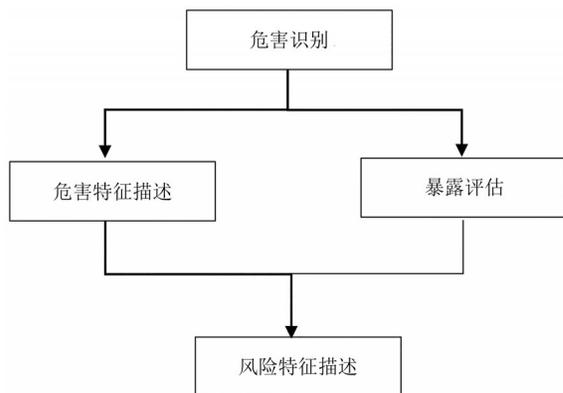


图1 QMRA四个关键步骤的经典框架

Figure 1 Classic framework of the four key steps in QMRA

## 1 当前研究重点

QMRA涵盖了众多的研究方法,这些方法旨在精确地量化和评估微生物所带来的风险。其中,当前研究重点是:

### 1.1 数据收集与整合

虽然现代技术使数据的收集更加便捷,但如何获取更准确、全面和实时的数据是一个重要挑战<sup>[6-7]</sup>。在QMRA研究中,监测数据的收集、整合和分析需要严格遵守相关的标准和规范,真实、准确、全面的数据可以构建可靠、有效的数学模型并用于预测风险水平,对提高食品安全和质量至关重要<sup>[8-9]</sup>。面对大多数数据有限的情况,引入抽样统计技术有助于研究者推测出更广泛的风险评估结果。

### 1.2 模型构建和优化

模型的构建和优化也是一个复杂的问题。当前的数学模型虽然能够模拟微生物的行为,但在面对复杂的食品加工过程和消费行为时,仍有很多不确定性<sup>[10-11]</sup>。因此,科学家们在数据分析和模型构建过程中,不仅要考虑微生物的生物学特性,还需要有效联合统计学、预测微生物学、毒理学和生物信息学等多个学科的方法<sup>[12-13]</sup>,以最大限度地降低评估过程中的不确定性,多学科的联合应用是当前QMRA研究的关键和重点<sup>[14]</sup>。

### 1.3 不确定性分析

在实际应用中,需要充分考虑生物异质性所导致的变异性,尽可能地减少信息缺失带来的不确定性,运用敏感性分析、蒙特卡罗模拟等方法来量化不确定性和变异性对风险评估结果的影响,以提高风险评估的准确性和可靠性<sup>[15]</sup>。

## 2 未来展望

尽管QMRA已经取得了显著进展,但其未来的发展仍面临许多关键技术难题。为了克服这些难题,QMRA需要与其他领域进行更深入的交叉融合。人工智能、微生物多组学、生物信息学、合成生物学、系统生物学和计算生物学等领域的发展为QMRA提供了新的机遇。

### 2.1 组学与大数据应用

微生物多组学与生物信息学的结合,能够从基因组、转录组、蛋白质组及代谢组等多个层面揭示病原微生物在不同环境中的特性、致病机制及其环境适应性,从而为风险评估提供更精准的多维度数据支持。近年来,全基因组测序(Whole genome sequencing, WGS)的广泛应用,使多组学研究能够捕捉微生物在基因和表型层面的动态演化,从而帮助量化病原菌在不同环境中的生长潜力及致病性。

尽管WGS技术在揭示病原微生物的基因组特征方面具有重要作用,但仅依赖WGS数据来预测致病性仍然面临诸多挑战。这主要是因为基因虽然存在,但并不意味着表达,其实际表达情况可能受到环境条件、基因调控网络及其他因素的影响而表现出显著差异。因此,基因型与表型的关系往往是动态且复杂的,仅凭单一基因组数据无法全面描述病原菌的行为及其环境耐受能力。为应对这一挑战,未来的研究需要通过多维度组学数据(包括转录组、蛋白质组及代谢组等)的深度整合,开发能够动态追踪病原菌在不同环境条件下基因调控与

代谢通路的变化模型。通过构建多层次整合模型,揭示微生物在不同食品基质和加工环境中的适应性进化策略,解析其生长潜力及传播风险,从而更精准地量化病原菌在食品链中的行为,为食品安全风险评估提供更加科学的依据。

## 2.2 人工智能算法引入

人工智能(Artificial intelligence, AI)技术在食品安全领域的引入,为高维度、多样化数据的处理提

供了强有力的支持。目前,食品行业监测工作积累了丰富的结构化数据(如生产流程、监测记录)和非结构化数据(如图片、文本、气象信息等),这些数据与食品安全风险紧密相关。通过深度学习和机器学习技术(图 2),AI 能够有效地从这些复杂的数据集中提取出潜在的模式和趋势,从而识别出影响食品安全的关键因素,并优化风险评估的精度。

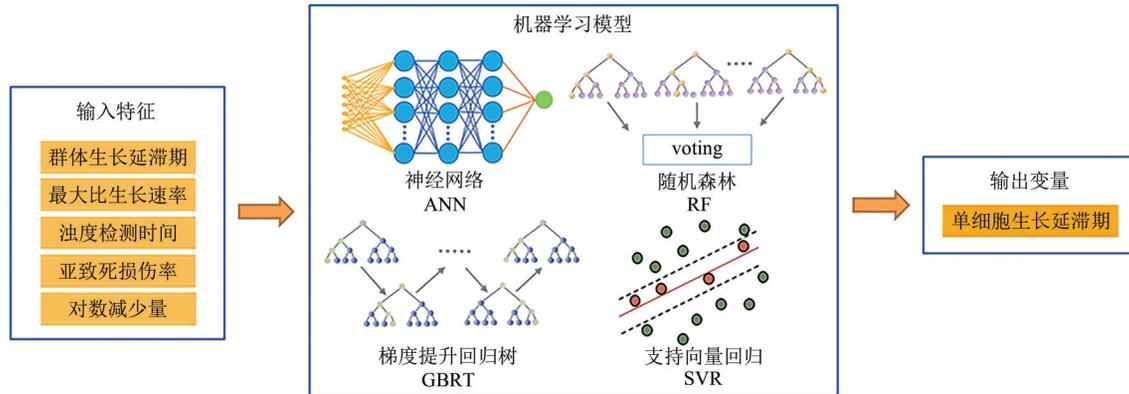


图2 代表性的机器学习模型

Figure 2 Typical machine learning models

然而,食品微生物安全数据大多来源于人工收集,存在数据量有限、数据碎片化、数据来源不客观、数据质量差等不利因素,得到的分析结果存在一定偏差。此外,QMRA模型的泛化能力不足,在新数据、新场景或新领域中的预测和处理能力存在局限性。因此,结合生成式AI改善微生物数据量不足的问题,同时使用现有的AI算法优化QMRA模型以满足不同地区、不同场景的需要,是未来QMRA工作的一个重要方向。

值得注意的是,现有的AI算法大多仅用于QMRA中的某一环节(如暴露评估),难以覆盖整个评估过程。因此,未来应侧重开发可以贯穿QMRA全流程的智能风险评估平台,将AI技术应用于危害识别、暴露评估、剂量-反应模型(Dose-response model, DRM)及风险特征描述的各个环节。要实现这一目标,需克服AI技术的复杂性,并进一步提升对高级算法、模型架构及数据处理技术的理解和应用能力。

## 2.3 DRM构建

DRM在QMRA中发挥着关键作用,主要用于量化表征剂量与感染、疾病或死亡概率之间的关系,是风险评估中的关键环节之一。当前,指数模型和贝塔-泊松模型是DRM中广泛应用的两种模型,常用于表征多数致病菌的剂量-反应关系。然而,随着微生物学数据的积累及风险评估需求的增加,传统DRM模型已难以满足复杂情境下的应用

需求。

现有的DRM模型大多依赖于流行病学研究、人类志愿者挑战试验及实验动物模型3种数据来源,而这些数据的局限性会导致模型在应用时存在较大不确定性。这主要是由于病原体、食品基质及个体差异等因素的复杂相互作用影响了暴露剂量与感染、疾病或死亡概率之间的关系。个体因接触食源性病原体而患病的风险,往往受到“传染病病因三角模型”中病原体特性、食品基质及个体易感性的共同作用。实际上,大多数现有的DRM模型仍基于有限的数据库构建,未能全面涵盖所有关键影响因素。因此,未来的DRM研究应聚焦于致病菌的毒力特征和人群易感性,结合国家和地区的致病菌流行病学数据,开发出考虑毒力、年龄和性别因素的精准DRM模型,以促进QMRA的完善和发展。

## 2.4 智能评估和预警系统研发

建立健全的风险评估与预警系统是风险分析基础研究落地应用的必经之路,是风险监管体系信息化建设的重要推手和形式,亦是普及发展风险评估技术方法的关键基础。近三十年来,各国学者面向本领域科研、监督、管理等实际工作需求,开发了大量用于预测、评估、预警食品微生物生态行为和健康风险的专用数据库或工具。这些工具涉及的主要功能通过进一步整合,逐步发展成为了重要的现代食品风险分析平台,例如,中国全民健康保障信息化系统、美国农业部农业风险管理系统(Agricultural

risk management system, ARMS)及食品药品监督管理局FDA-iRISK 2.0系统、欧盟食品与饲料快速预警系统(Rapid alert system for food and feed, RASFF)等,增强了全球范围食品安全事件的响应速度,提升了食品安全管理的效率。

随着物联网、大数据、AI、云计算等多学科技术的交叉融入,食品微生物评估和预警系统正朝着主动化、智能化、精准化的方向快速演进。一方面,风险检测监测和多模态信息处理能力的提升,将增强评估预警系统进行风险研判的时效性和确定性,有效减少常规食品微生物安全事件的发生,强化控制突发事件的反脆弱性;另一方面,算力规模和先进算法的迭代,也将赋予系统更高的容错和迁移能力,满足及时预警和应对新发微生物危害的重大需求。因此,未来亟需加快食品微生物智能风险评估和预警系统的研发工作,突破解决当前仍存在的定量数据不足、信息感知度不高、风险研判能力较弱、预警信息反馈不及时等问题,使之完成由“被动溯源评价”向“主动预警防控”的升级。

### 2.5 新兴学科交叉应用

随着学科交叉融合的深入发展,合成生物学和计算生物学等新兴领域在食品安全风险评估中展现出巨大的应用潜力。其中合成生物学汇集了生物学、基因组学、工程学和信息学等多种学科内容,运用系统生物学和工程学原理,以基因组和生化分子合成为基础,综合生物化学、生物物理和生物信息等技术,旨在设计、改造、重建生物分子、生物元件和生物分化过程,构建具有生命活性的生物元件、系统及人造细胞或生物体。合成生物学对食品加工和安全领域影响巨大,新型合成食品如植物肉、细胞培养肉,以及乳制品、饮料、调味料和添加剂等,属于未来食品范畴,需要开展风险评估和安全性评价,也为QMRA领域拓展和发展开辟了新方向。

传统的计算生物学是指开发和应用数据分析及理论的方法、数学建模和计算机仿真技术,并用于生物学研究,其计算平台、工具、算法等发展迅速。计算生物学的研究可以划分成两个部分或者两个阶段:一是数据挖掘和知识发现,从大量的实验数据中提取背后隐藏的模式,然后形成假设;二是建立数学模型,利用计算机模拟来检验各种假设。与以数据为基础的生物信息学不同,计算生物学以计算方法为核心,层次更高,以计算机的语言和数学的逻辑来构建、描述及模拟生物世界,这与QMRA基础的预测微生物学类似,都以发现数学规律为根本目标。随着合成生物学的基因设计能力与计算生物学的系统建模能力的发展,未来可为

QMRA领域提供更多可参考和借鉴的应用前景。

### 3 结论

QMRA在食品安全和公共卫生领域的应用前景广阔。随着技术的进步和跨学科合作的深入,QMRA将逐渐克服现有的技术难题,并在未来的食品安全风险管理中发挥更大的作用。未来,如何将QMRA与其他前沿科学技术相结合,探索新的评估方法和管理策略,将成为食品安全研究的一个重要课题。通过不断地创新和优化,QMRA有望在保障公众健康、提升食品安全水平方面,作出更大的贡献。

### 参考文献

- [1] HAMILTON K A, CIOL HARRISON J, MITCHELL J, et al. Research gaps and priorities for quantitative microbial risk assessment (QMRA)[J]. *Risk Analysis*, 2024, 5: 1-16.
- [2] DONG Q L, BARKER G C, GORRIS L G M, et al. Status and future of quantitative microbiological risk assessment in China[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 42(1): 70-80.
- [3] DOMÉNECH E, MARTORELL S. Review of the terminology, approaches, and formulations used in the guidelines on quantitative risk assessment of chemical hazards in food[J]. *Foods*, 2024, 13(5): 714.
- [4] POSSAS A, VALERO A, PÉREZ-RODRÍGUEZ F. New software solutions for microbiological food safety assessment and management [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2022, 44(2): 100814.
- [5] PANAGIOTOU C F, STEFAN C, PAPANASTASIOU P, et al. Quantitative microbial risk assessment (QMRA) for setting health-based performance targets during soil aquifer treatment [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(6): 14424-14438.
- [6] COLLINEAU L, BOERLIN P, CARSON C A, et al. Integrating whole-genome sequencing data into quantitative risk assessment of foodborne antimicrobial resistance: a review of opportunities and challenges[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2019, 10: 1107.
- [7] ADDISON-ATKINSON W, CHEN A S, MEMON F A, et al. Modelling urban sewer flooding and quantitative microbial risk assessment: A critical review[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 2022, 15(4): e12844.
- [8] BARANYI J, ROCKAYA M, ELLOUZE M. From Data to Models and Predictions in Food Microbiology [J]. *Current Opinion in Food Science*, 2024, 57(3): 101177.
- [9] LOPATKIN A J, COLLINS J J. Predictive biology: modelling, understanding and harnessing microbial complexity [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18(9): 507-520.
- [10] GAWLIKOWSKI J, TASSI C R N, ALI M, et al. A survey of uncertainty in deep neural networks [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2023, 56(Suppl 1): 1513-1589.
- [11] BRUL S, BASSETT J, COOK P, et al. 'Omics' technologies in quantitative microbial risk assessment [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2012, 27(1): 12-24.
- [12] GREENER J G, KANDATHIL S M, MOFFAT L, et al. A guide

- to machine learning for biologists[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2022, 23(1): 40-55
- [13] AMIN M T, KHAN F. Risk assessment in Industry 4.0 [M]// Methods in Chemical Process Safety. Elsevier, 2022, 6: 631-651.
- [14] CHOI S R, LEE M. Transformer architecture and attention mechanisms in genome data analysis: a comprehensive review[J]. Biology, 2023, 12(7): 1033.
- [15] DONALD M, MENGERSEN K, TOZE S, et al. Incorporating parameter uncertainty into quantitative microbial risk assessment (QMRA)[J]. Journal of Water and Health, 2011, 9(1): 10-26.

## 《中国食品卫生杂志》顾问及第五届编委会名单

顾问:陈君石、黄璐琦、江桂斌、李林、沈建忠、吴清平、Jianghong Meng(美国)、Patrick Wall(爱尔兰)、Samuel Godefroy(加拿大)、Gerald Moy(美国)、Paul Brent(澳大利亚)、Marta Hugas(比利时)、Yukikko Yamada(日本)、Tom Heilandt(德国)、Andreas Hensel(德国)、Christopher Elliott(英国)、Christine Nelleman(丹麦)

主任委员:李宁

副主任委员:王竹天、孙长颢、王涛、谢剑炜、应浩、丁钢强、张峰、张永慧

主编:吴永宁

编委(按姓氏笔画排序)

- |                        |                       |
|------------------------|-----------------------|
| 丁钢强(中国疾病预防控制中心营养与健康所)  | 应浩(中国科学院上海营养与健康所)     |
| 于洲(国家食品安全风险评估中心)       | 张丁(河南省疾病预防控制中心)       |
| 于维森(青岛市疾病预防控制中心)       | 张峰(中国检验检疫科学研究院)       |
| 马宁(国家食品安全风险评估中心)       | 张卫兵(南通市疾病预防控制中心)      |
| 马会来(中国疾病预防控制中心)        | 张立实(四川大学华西公共卫生学院)     |
| 马群飞(福建省疾病预防控制中心)       | 张永慧(广东省疾病预防控制中心)      |
| 王君(国家食品安全风险评估中心)       | 张旭东(国家卫生健康委员会医院管理研究所) |
| 王茵(浙江省医学科学院)           | 张剑峰(黑龙江省疾病预防控制中心)     |
| 王涛(浙江清华长三角研究院)         | 张朝晖(中国海关科学技术研究中心)     |
| 王硕(南开大学医学院)            | 张惠媛(中国海关科学技术研究中心)     |
| 王慧(上海交通大学公共卫生学院)       | 张遵真(四川大学华西公共卫生学院)     |
| 王永芳(国家卫生健康委员会卫生健康监督中心) | 陈波(湖南师范大学化学化工学院)      |
| 王竹天(国家食品安全风险评估中心)      | 陈颖(中国检验检疫科学研究院)       |
| 王松雪(国家粮食和物资储备局科学研究院)   | 陈卫东(广东省市场监督管理局)       |
| 王晓英(中国动物疫病预防控制中心)      | 邵兵(北京市疾病预防控制中心)       |
| 计融(国家食品安全风险评估中心)       | 武爱波(中国科学院上海营养与健康所)    |
| 邓小玲(广东省疾病预防控制中心)       | 赵舰(重庆市疾病预防控制中心)       |
| 卢江(国家食品安全风险评估中心)       | 赵云峰(国家食品安全风险评估中心)     |
| 匡华(江南大学食品学院)           | 赵贵明(中国检验检疫科学研究院)      |
| 朱心强(浙江大学医学院)           | 钟凯(科信食品与营养信息交流中心)     |
| 刘弘(上海市疾病预防控制中心)        | 姜毓君(东北农业大学食品学院)       |
| 刘长青(河北省疾病预防控制中心)       | 聂俊雄(常德市疾病预防控制中心)      |
| 刘成伟(江西省疾病预防控制中心)       | 贾旭东(国家食品安全风险评估中心)     |
| 刘兆平(国家食品安全风险评估中心)      | 徐娇(国家食品安全风险评估中心)      |
| 刘守钦(济南市疾病预防控制中心)       | 徐海滨(国家食品安全风险评估中心)     |
| 刘烈刚(华中科技大学公共卫生学院)      | 高志贤(军事科学院军事医学研究院)     |

(下转第462页)