

食源性致病菌耐药性检测及其对食品安全的影响分析

王安瑞

石嘴山市检验检测中心 宁夏 石嘴山 753000

摘要: 本文旨在系统阐述食源性致病菌耐药性检测的技术体系,深入剖析其对食品安全产生的多维度影响,并在此基础上探讨应对策略与未来展望。文章首先梳理了从传统培养法到现代分子生物学及免疫学方法的演进脉络,重点评述了各类技术的原理、优势与局限;其次,从治疗失效、疾病负担加重、食品链污染加剧及全球贸易受阻等层面,全面分析了耐药性对食品安全的深远影响;最后,结合“同一个健康”(One Health)理念,提出了涵盖源头管控、技术创新、法规完善与国际合作的综合性防控策略。研究表明,构建精准、高效、标准化的耐药性监测网络,并将其深度融入国家食品安全治理体系,是有效应对此类新型生物安全风险的关键所在。

关键词: 食源性致病菌; 抗生素耐药性; 耐药性检测; 食品安全

引言

食品安全关乎国计民生,其中食源性致病菌引发的疾病长期占据风险主导地位。近年来,其对抗生素的耐药性(AMR)问题日益严峻,成为全球公共卫生重大威胁。抗生素在畜牧养殖中的滥用及临床不合理使用,加速了耐药菌的产生与传播。这些耐药菌通过污染环境、农作物,并在食品全链条中存续,最终可能经食物进入人体,导致难治性感染,并促进耐药基因在社区扩散。世界卫生组织(WHO)已将AMR列为21世纪最大健康威胁之一,联合国粮农组织(FAO)强调食源性耐药菌是“同一个健康”框架下动物—环境—人类交叉的关键节点。因此,构建科学高效的耐药性检测体系,是评估风险、预警危机和制定精准防控策略的前提。本文聚焦“检测”与“影响”,系统梳理主流检测技术,剖析耐药性对食品安全的多维冲击,并提出整合性应对框架,以期对相关研究与实践提供参考。

1 食源性致病菌耐药性检测技术体系

食源性致病菌耐药性检测的目标在于准确、快速地判定目标菌株对特定抗生素的敏感或耐药状态,并尽可能地揭示其背后的分子机制。根据技术原理和发展历程,可将现有检测方法大致分为三大类:传统表型检测法、现代分子生物学方法以及新兴的快速检测技术。

1.1 传统表型检测法: 基石与局限

1.1.1 纸片扩散法(Kirby-Bauer法)

该方法操作简便、成本低廉。具体步骤是将待测菌液均匀涂布于琼脂平板上,然后贴上含有固定浓度抗生素的纸片。经过一定时间的培养后,测量纸片周

围形成的抑菌圈直径。根据国际标准(如美国临床和实验室标准协会CLSI或欧洲抗菌药物敏感性试验委员会EUCAST)提供的判读标准,即可将结果判定为敏感(S)、中介(I)或耐药(R)。其优点在于直观、易于标准化,但缺点是仅能提供定性或半定量的结果,且耗时较长(通常需要18-24小时),对于生长缓慢或苛养菌效果不佳。

1.1.2 肉汤/琼脂稀释法

此方法用于测定最低抑菌浓度(Minimum Inhibitory Concentration, MIC),即能够完全抑制细菌肉眼可见生长的最低药物浓度。通过在肉汤或琼脂培养基中制备一系列倍比稀释的抗生素浓度梯度,接种待测菌后培养,观察无细菌生长的最低药物浓度即为MIC值。MIC值能提供精确的定量数据,对于指导临床用药剂量具有重要价值^[1]。微量肉汤稀释法(Microbroth Dilution)因其通量高、试剂用量少,已成为自动化药敏系统的主流方法。然而,该方法操作相对繁琐,同样面临耗时长的问题,且对实验条件和人员操作要求较高。

1.1.3 E-test法

这是一种结合了稀释法和扩散法原理的商品化方法。它使用一条预置有连续指数梯度抗生素浓度的塑料试条,将其置于已接种细菌的琼脂平板上。培养后,抑菌椭圆环与试条相交处的刻度即为该菌株对该抗生素的MIC值。E-test法兼具了MIC测定的精确性和操作的便捷性,尤其适用于对特殊或罕见抗生素的药敏测试,但其成本较高,限制了大规模应用。

1.2 现代分子生物学方法: 精准与高效

1.2.1 聚合酶链式反应 (PCR) 及其衍生技术:

(1) 常规 PCR: 通过设计针对已知耐药基因 (如编码 β -内酰胺酶的 bla 基因家族、编码甲氧西林耐药的 mecA 基因、编码万古霉素耐药的 van 基因等) 的特异性引物, 扩增目标 DNA 片段。通过凝胶电泳检测扩增产物的存在与否, 即可判断样本中是否含有该耐药基因。此方法灵敏度高、特异性强, 但只能进行终点检测, 无法定量。(2) 实时荧光定量 PCR (qPCR): 在 PCR 反应体系中加入荧光染料或探针, 通过实时监测每个循环的荧光信号强度, 实现对目标 DNA 的定量分析。qPCR 不仅能定性检测耐药基因, 还能对其拷贝数进行精确定量, 从而间接反映耐药水平, 大大缩短了检测时间 (通常 1-2 小时内出结果)。(3) 多重 PCR (Multiplex PCR): 在同一反应体系中同时加入多对针对不同耐药基因的引物, 可一次性筛查多种耐药基因, 显著提高了检测效率, 特别适用于对多重耐药菌 (MDR) 的综合评估。

1.2.2 等温核酸扩增技术

与 PCR 需要精密的热循环仪不同, 等温扩增技术 (如 LAMP, RPA, NASBA 等) 能在恒定温度下完成核酸扩增, 对设备要求极低, 非常适合现场和基层应用。环介导等温扩增 (LAMP) 利用 4-6 条特异性引物识别靶序列的 6-8 个区域, 在恒温 (60-65°C) 条件下进行高效扩增, 产物可通过肉眼观察浊度或荧光变化进行判读。LAMP 技术以其操作简单、快速 (30-60 分钟)、灵敏度高而备受关注^[2]。近期研究已成功将其与水凝胶等材料结合, 开发出能对耐药基因进行绝对定量的数字 LAMP 技术, 进一步提升了其应用潜力。

1.2.3 基于 CRISPR/Cas 系统的检测技术

近年来, 源于细菌适应性免疫系统的 CRISPR/Cas 技术被革命性地应用于核酸检测。特别是 Cas12a 和 Cas13a 蛋白, 在识别并切割目标核酸后, 会激活其非特异性的“附带切割”活性, 可以切割体系中的报告分子, 产生可检测的信号 (如荧光)。将 CRISPR/Cas 系统与 RPA 或 LAMP 等预扩增技术联用, 可构建出“一锅法”检测平台, 实现对食源性致病菌及其耐药基因的高灵敏、高特异性、可视化检测。该技术被誉为下一代分子诊断的有力竞争者。

1.2.4 全基因组测序 (WGS)

作为最全面的分子分型工具, WGS 能够一次性获取细菌的全部遗传信息。通过对测序数据进行生物信息学分析, 不仅可以鉴定出所有已知的耐药基因, 还能发现

新的耐药突变位点, 并追溯耐药基因在质粒、转座子等可移动遗传元件上的位置, 从而精确解析耐药性的传播路径和进化关系。WGS 正逐渐成为国家级乃至全球性耐药监测网络的核心技术。

2 食源性致病菌耐药性对食品安全的影响机制

2.1 直接威胁公共健康, 削弱食源性疾病治疗效能

这是耐药性最直接、最致命的影响。当消费者因食用被耐药菌污染的食品而患病时, 常规的一线抗生素治疗方案可能完全失效。这不仅延长了患者的病程, 增加了痛苦, 更可能导致病情恶化, 甚至发展为败血症、多器官衰竭等危及生命的并发症。治疗失败迫使医生不得不转向使用二线、三线甚至最后防线的抗生素, 这些药物往往价格昂贵、副作用更大, 且其有效性也可能因耐药性的进一步发展而受到威胁。最终结果是, 原本可防可控的食源性疾病, 因耐药性的存在而演变为难以治愈的公共卫生危机, 极大地增加了医疗系统的负担和患者的死亡风险。

2.2 加剧食源性疾病的疾病负担与社会成本

耐药性导致的治疗困难直接转化为更高的疾病负担。患者住院时间延长、重症监护需求增加、后续康复成本上升, 这些都使得单个食源性疾病病例的社会经济成本呈几何级数增长^[3]。据世界银行估计, 若不采取有效行动, 到 2050 年, 耐药性每年可能导致全球 GDP 损失 1-3.8%, 其经济影响堪比 2008 年的全球金融危机。此外, 耐药性还会造成生产力损失, 因为患者及其照护者需要长时间脱离工作岗位。这种隐性的社会成本, 对国家整体经济发展构成了沉重压力。

2.3 污染食品供应链, 形成持久性风险源

食品链是耐药菌传播的关键通道。在养殖环节, 动物肠道内的耐药菌可通过粪便排泄, 污染养殖场环境、水源和饲料。在屠宰和加工过程中, 胴体交叉污染难以避免, 使得肉类、蛋类、奶制品等成为耐药菌的重要载体。即使经过烹饪, 虽然活菌被杀死, 但其携带的耐药基因 (ARGs) 仍可能以游离 DNA 的形式存在于食品中。这些 ARGs 有可能被人体肠道内的其他共生菌或致病菌通过水平基因转移 (HGT) 机制所摄取, 从而在人体内“就地”创造出新的耐药菌。这意味着, 食品不仅是耐药菌的传播媒介, 更可能成为耐药基因的“孵化器”和“交换市场”, 使得食品安全风险呈现出长期化和内生化的特征。

2.4 冲击国际贸易, 引发非关税壁垒

在全球化的今天, 食品安全标准已成为国际贸易的

重要规则。许多发达国家和地区已将食源性致病菌的耐药性水平纳入进口食品的检验检疫要求。例如,欧盟对进口肉类中特定耐药菌(如产ESBL的大肠杆菌、沙门氏菌)的检出有严格限制。一旦出口国的食品被检出高比例的耐药菌,不仅会导致整批货物被退回或销毁,造成巨大的经济损失,更可能引发进口国对该国整个食品行业的信任危机,导致长期的贸易禁令。这种由耐药性问题引发的“技术性贸易壁垒”,对发展中国家的农产品出口构成了严峻挑战。

2.5 侵蚀消费者信心,动摇食品安全体系根基

频发的耐药性相关食品安全事件,会严重损害消费者对食品供应体系的信任。当公众意识到即便是经过正规渠道购买的食物,也可能带来无法治愈的健康风险时,其消费行为将趋于保守和恐慌,进而影响整个食品产业的稳定发展^[4]。消费者信心的丧失,是对食品安全体系最根本的打击,其修复成本远高于技术和管理层面的投入。

3 应对策略与未来展望

食源性致病菌耐药性是一项复杂的系统性挑战,需以“同一个健康”理念统筹人类、动物与环境三方面协同治理。首先,应从源头减少抗生素滥用,包括在畜牧业中禁用抗生素促生长剂、严控预防性用药,并推广疫苗、益生菌等替代手段;同时加强临床合理用药管理,规范处方行为。其次,构建覆盖“人—动物—食品—环境”的一体化智能监测网络,统一采样、检测和数据标准,整合多源信息,借助大数据与AI实现耐药风险的早期预警。此外,加速检测技术创新,推动CRISPR、LAMP等现场快速检测技术在基层应用,并扩大全基因组测序(WGS)在国家级监测中的使用,建设共享的耐药基因数据库。最后,需完善相关法规,将耐药防控纳入国家食品安全与公共卫生体系,并深化国际合作,积极参与全球监测计划,共享数据与经验,共同应对这一

跨国界威胁。

4 结语

食源性致病菌耐药性是一场静默却深远的食品安全危机,通过削弱治疗效果、加重经济负担、污染供应链、影响国际贸易及损害公众信任,对食品安全体系造成系统性冲击。应对该挑战,不能仅靠末端检测与治疗,必须以“同一个健康”理念为指导,推动人、动物、食品与环境多领域的协同治理。理想防控体系应从源头严控抗生素使用,遏制耐药性产生;在过程中构建覆盖全链条的一体化智能监测网络,实现风险实时预警;在技术层面推广快速、便携、高通量的新型检测手段,提升基层和企业自主防控能力;在全球层面加强合作,共同阻断耐药性跨境传播。唯有统筹源头治理、过程监控、技术创新与国际合作,才能在后抗生素时代切实保障“舌尖上的安全”。

参考文献

- [1] 陶倩,张昭寰,刘静,等.全球食源性致病菌生物膜形成和抗生素耐药性的流行:一项系统评价和Meta分析[C]/中国食品科学技术学会.中国食品科学技术学会第十八届年会摘要集.上海海洋大学食品学院;上海海洋大学水产与生命学院;农业农村部(上海)水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室;上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心,2022:143-144.
- [2] 金姗姗,王义哲,赵喜红.食源性致病菌耐药性与成簇的规律间隔短回文重复序列系统关联性研究进展[J].食品安全质量检测学报,2020,11(24):9301-9307.
- [3] 孙露,李云,王少飞,等.生物被膜增强食源性致病菌耐药性和毒力的研究进展[J].食品科学,2025,46(08):363-371.
- [4] 黎梓怡,施春雷.泛基因组学在食源性致病菌检测及其耐药监测中的应用[J].食品安全质量检测学报,2022,13(14):4472-4478.