DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260225007
引用格式: 张鹏航, 黄梨煜, 刘玉竹, 等. 2021—2023 年北京市鲜禽肉中弯曲菌流行特征、耐药分析和定量风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(18): 309–316.
Zhang Penghang, Huang Liyu, Liu Yuzhu, et al. Epidemiological characteristics, antimicrobial resistance analysis and quantitative risk assessment of *Campylobacter* in fresh poultry meat in Beijing in 2021—2023 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(18): 309–316. (in Chinese with English abstract).

2021—2023 年北京市鲜禽肉中弯曲菌流行特征、耐药分析和定量风险评估

张鹏航[1,2], 黄梨煜[1,2], 刘玉竹[1,2], 王博文鑫[1,2], 郝 玲[1,2], 吴阳博[1,2], 马晓晨[1,2], 段佳丽[1,2], 张晓媛[1,2*]

(1. 北京市疾病预防控制中心, 北京 100013; 2. 食物中毒诊断溯源技术北京市重点实验室, 北京 100013)

摘 要: 目的 了解北京市鲜禽肉中弯曲菌的污染水平、耐药特征及其对消费者的健康风险, 评估其在食品安全领域的公共卫生意义。**方法** 2021—2023 年在北京市农贸市场和超市共采集 738 件鲜禽肉样品, 采用膜过滤法分离弯曲菌, 并利用飞行时间质谱进行鉴定。通过琼脂稀释法测定菌株对 11 种常用抗菌药物的最低抑菌浓度(minimum inhibitory concentrations, MICs), 分析其耐药特征。基于居民禽肉消费行为、弯曲菌污染数据及相关文献参数, 构建定量微生物风险评估模型, 估算人群感染风险, 并开展敏感度分析。**结果** 弯曲菌总检出率为 43.63%, 农贸市场样品检出率高于超市; 共分离获得 343 株弯曲菌。弯曲菌对氟喹诺酮类和四环素类药物耐药严重, 多重耐药率较高, 结肠弯曲菌的多重耐药率为 87.83%。风险评估结果显示, 北京市居民每次食用鲜禽肉感染弯曲菌的概率为 4.16×10^{-5}, 年感染病例数约为 72073 例, 其中多重耐药菌株占比较高。敏感度分析提示交叉污染行为(如不洗手、不更换案板)是主要风险因素。**结论** 北京市鲜禽肉中弯曲菌污染水平较高, 耐药问题较为突出。应加强禽肉供应链的微生物控制, 规范抗生素使用, 提升居民食品安全意识, 防控交叉污染, 以降低食源性疾病发生率。

关键词: 弯曲菌; 鲜禽肉; 耐药性; 定量风险评估; 交叉污染
中图分类号: R155.5+5 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)18–0309–08

Epidemiological characteristics, antimicrobial resistance analysis and quantitative risk assessment of *Campylobacter* in fresh poultry meat in Beijing in 2021—2023

ZHANG Peng-Hang[1,2], HUANG Li-Yu[1,2], LIU Yu-Zhu[1,2], WANG Bo-Wen-Xin[1,2], HAO Ling[1,2], WU Yang-Bo[1,2], MA Xiao-Chen[1,2], DUAN Jia-Li[1,2], ZHANG Xiao-Yuan[1,2*]

(1. *Beijing Centers for Disease Prevention and Control*, *Beijing* 100013, *China*; 2. *Beijing Key Laboratory of Diagnostic and Traceability Technologies for Food Poisoning*, *Beijing* 100013, *China*)

收稿日期: 2026-02-25
基金项目: 高层次公共卫生人才建设项目培养计划项目(学科骨干-01-027)
第一作者: 张鹏航(1990—), 男, 博士, 主管技师, 主要研究方向为动物源性食品安全。E-mail: 295619915@qq.com
***通信作者:** 张晓媛(1983—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为病原生物学。E-mail: zhangxiaoai_0922@163.com

ABSTRACT: Objective To investigate the contamination level, antimicrobial resistance patterns and health risks to consumers of *Campylobacter* in fresh poultry meat in Beijing, and evaluate its public health significance within the food safety context. **Methods** A total of 738 fresh poultry meat samples were collected from farmers' markets and supermarkets in Beijing between 2021 and 2023. *Campylobacter* was isolated using a membrane filtration-based method and identified by matrix-assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry. The minimum inhibitory concentrations (MICs) of 11 kinds of commonly used antimicrobial agents were determined using the agar dilution method, and the drug resistance characteristics were analyzed. Based on residents' poultry meat consumption behavior, *Campylobacter* contamination data and relevant literature parameters, a quantitative microbial risk assessment model was constructed to estimate the infection risk of the population and conduct sensitivity analysis. **Results** The overall isolation rate of *Campylobacter* was 43.63%, with a higher detection rate in samples collected from farmers' markets than those from supermarkets. A total of 343 *Campylobacter* strains were isolated in this study. Severe antimicrobial resistance to fluoroquinolones and tetracyclines, as well as a high multidrug resistance rate, were observed among the isolates. Specifically, the multidrug resistance rate of *Campylobacter coli* reached 87.83%. Risk assessment indicated that the probability of *Campylobacter* infection per consumption of fresh poultry meat among residents in Beijing was 4.16×10^{-5}, leading to approximately 72073 annual infection cases, with a considerable proportion attributed to multi-drug resistance strains. Sensitivity analysis identified cross-contamination behaviors, such as failure to wash hands or replace cutting boards, were major risk factors. **Conclusion** Fresh poultry meat in Beijing is heavily contaminated with *Campylobacter*, and antimicrobial resistance pose a prominent problem. It is necessary to strengthen microbial control throughout the poultry meat supply chain, standardize the application of antibiotics, raise residents' awareness of food safety, and prevent and control cross-contamination, so as to reduce the incidence of foodborne diseases.

KEY WORDS: *Campylobacter*; fresh poultry meat; antimicrobial resistance; quantitative risk assessment; cross-contamination

0 引 言

弯曲菌(*Campylobacter*)是当前全球范围内重要的食源性致病菌之一，其中最常见的是空肠弯曲菌(*Campylobacter jejuni*)和结肠弯曲菌(*Campylobacter coli*)[1]。人类感染弯曲菌后常表现为急性胃肠炎，症状包括腹泻、发热、呕吐等，严重者可引发格林-巴利综合征等并发症[2]。据研究估计，全球约 8.4%的腹泻病例由弯曲菌引起[3]，在欧盟和美国，弯曲菌病长期位居食源性疾病发病首位[4–9]，给公共卫生系统带来了显著负担。

弯曲菌广泛定殖于家禽、牛、羊、猪及宠物等多种动物的胃肠道中[10]，是典型的人畜共患病原体，其主要传播途径为粪-口途径，包括食用未经充分加热的动物源性食品(尤其是禽肉)、饮用受污染水源以及厨房加工过程中的交叉污染等[11–15]。禽肉作为弯曲菌的重要传播载体，在加工、贮藏及家庭烹饪过程中均存在潜在的污染与传播风险。近年来，随着畜禽养殖中抗生素的广泛使用，弯曲菌的耐药性问题日益严峻，尤其对氟喹诺酮类、大环内酯类和四环素类抗生素的耐药率持续升高[1,16–18]。研究表明，结肠弯曲菌的耐药谱更广，多重耐药率更高，对人群健康威胁更为严重[19]。同时，弯曲菌的致病风险不仅与污染水平和菌株特性有关，还与宿主免疫状态及暴露剂量密切相关。目前，风险评估中常用的剂量-反应模型包括指数模型、Beta-Poisson 模型和 Weibull-Gamma 模型，这些模型为评估不同暴露情境下的感染概率提供了理论基础[20–21]。

尽管近年来已有大量研究关注禽肉中弯曲菌的污染水平、耐药特征及其健康风险评估，不同研究从流行病学监测、抗菌药物耐药性分析以及定量微生物风险评估(quantitative microbial risk assessment, QMRA)等方面对弯曲菌风险进行了系统探讨[22–26]。然而，现有研究多基于不同数据来源或独立研究体系开展，缺乏在同一地区、同一实验条件下，基于连续监测数据对弯曲菌污染水平、耐药特征及暴露风险进行一体化分析的研究。此外，针对家庭加工过程中交叉污染行为对最终致病风险的定量贡献仍缺乏系统评估。

因此，本研究以北京市鲜禽肉为研究对象，在系统调查弯曲菌污染水平和耐药特征的基础上，进一步结合居民实际消费行为，构建定量风险评估模型，从零售环节延伸至家庭加工与消费环节，综合评估弯曲菌的传播与致病风险，旨在为本地区弯曲菌监测与风险管理提供科学依据与数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2021—2023 年，在北京地区的农贸市场和超市中采

集鲜禽肉。在农贸市场购买样品时, 每个摊位采集的样品不超过 3 件。将买到的样品放入灭菌密封袋中, 并记录样品信息, 立即低温(4~7 ℃)运至实验室开展分离检测。如当天未能及时检测, 将样品置于 4~7 ℃冷藏保存(包括冷冻样品)并于 24 h 内检测。居民禽肉消费量数据来源于北京市疾病预防控制中心 2022 年中国居民营养与健康状况监测工作, 人口数据采用 2022 年北京市统计年鉴。

弯曲菌培养检测试剂盒(肉类样本)、菌种低温保存液、弯曲菌琼脂稀释法最低抑菌浓度(minimum inhibitory concentrations, MIC)检测试剂盒、微需氧产气包(青岛中创汇科生物科技有限公司); 无菌均质袋(青岛海博生物技术有限公司); 哥伦比亚血平板、Karmali 平板(美国赛默飞世尔科技公司)。

1.2　仪器与设备

1300 Series A2 生物安全柜(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); DW-86L728 超低温冰箱(青岛海尔股份有限公司); MIR-280 细菌培养箱(日本 SANYO 公司); DensiCHEK Plus 麦氏比浊仪(法国 bioMérieux 公司); MALDI-TOF MS 基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱(德国 Bruker 公司); MilliQ Advantage A10 超纯水仪(美国 Millipore 公司); BagMixer 400 均质器(法国 Interscience 公司); Research Plus 移液器(德国 Eppendorf 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　弯曲菌分离培养

使用基于膜过滤法弯曲菌培养检测试剂盒分离弯曲菌。将食品样品与缓冲蛋白胨水混合, 放入均质器充分拍打 5 min, 体积较大的食品样品如整禽, 则用手充分揉搓 5 min。然后将 2 mL 缓冲蛋白胨水转移到试剂盒中提供的 4 mL 增菌液中, 增菌液的主要成分是改良的普雷斯顿肉汤。然后将增菌液在 42 ℃的微需氧环境(5% O_2、10% CO_2 和 85% N_2)中培养 48 h。将试剂盒提供的滤膜(孔径 0.45 μm)平铺到哥伦比亚血平板和 Karmali 平板上, 然后在滤膜上滴加 300 μL 的增菌液, 静止 45 min 后揭去滤膜, 将平板在微需氧环境中 42 ℃培养 48 h 后, 挑选出 5 个或更多类似弯曲菌的菌落(如果存在少于 5 个菌落, 则挑选所有菌落), 通过飞行时间质谱进行鉴定。

1.3.2　弯曲菌药敏实验

根据美国临床和实验室标准协会(Clinical and Laboratory Standards, CLSI)推荐的琼脂稀释法, 使用弯曲菌琼脂稀释法 MICs 检测试剂盒测定弯曲菌的 MIC, 检测的药物包括红霉素、阿奇霉素、萘啶酸、环丙沙星、庆大霉素、链霉素、氯霉素、氟苯尼考、四环素、泰利霉素和克林霉素。空肠弯曲菌 ATCC 33560 作为质控菌株。

用接种环挑取生长良好的质控菌株空肠弯曲菌 ATCC 33560 菌落 3~4 个, 悬浮于 3 mL 无菌稀释液中, 充分混匀。将待检菌悬液与质控菌悬液分别使用麦氏比浊仪测量菌液浓度达到 0.5 麦氏单位, 将 0.5 麦氏单位的菌悬液用无菌稀释液进行 10 倍稀释(取 100 μL 的 0.5 麦氏单位的菌液加到 900 μL 的生理盐水中, 充分混匀), 此时弯曲菌的浓度大约为 10^4 CFU/mL。将稀释好的待检菌液倒入无菌加样槽, 使用 8 道移液器将 3 μL 菌液点加到药敏培养板相应的琼脂上, 取 3 μL 的无菌稀释液加到对照孔作为无菌培养基对照, 盖上平板盖子, 将药敏板放入微需氧环境中, 42 °C 培养 24 h 或者 37 °C 培养 48 h, 取出药敏培养板, 肉眼观察药敏板上每个培养孔中弯曲菌的生长结果。首先观察药敏板对照列, 加无菌生理盐水的琼脂质控孔上无任何细菌生长, 质控菌株应按照质控要求生长。使用美国抗菌药物耐药性监测系统中的耐药性折点作为判定标准, 其中空肠弯曲菌的耐药折点值为: 红霉素(≥8 μg/mL)、阿奇霉素(≥0.5 μg/mL) 、萘啶酸(≥32 μg/mL)、环丙沙星(≥1 μg/mL)、庆大霉素(≥4 μg/mL)、链霉 (≥16 μg/mL)、氯霉素(≥32 μg/mL)、氟苯尼考(≥8 μg/mL)、四环素(≥2 μg/mL) 、泰利霉素(≥8 μg/mL)和克林霉素(≥8 μg/mL)。结肠弯曲菌的耐药折点值为: 红霉素(≥16 μg/mL)、阿奇霉素(≥1 μg/mL)、萘啶酸(≥32 μg/mL)、环丙沙星(≥1 μg/mL)、庆大霉素(≥4 μg/mL)、链霉素(≥16 μg/mL)、氯霉素(≥32 μg/mL)、氟苯尼考(≥8 μg/mL)、四环素(≥4 μg/mL)、泰利霉素(≥8 μg/mL)和克林霉素(≥2 μg/mL)。对 3 类及以上抗菌药物耐药定义为多重耐药。

1.3.3　评估方法与数据处理

采用风险评估软件@Risk 7 建立评估模型, 以概率分布函数表示变量的不确定值。模拟时采用拉丁超立方体抽样(Latin hypercubesampling, LHS)方法进行 10000 次蒙特卡洛模拟, 以表征参数不确定性在模型中的传播。构建从零售到消费过程弯曲菌污染水平的变化模型并对致病概率进行评估, 同时采用 Spearman 等级相关分析评价各模型参数与感染风险之间的相关性, 并使用 SPSS 21.0 软件计算相关系数及其显著性 P, 以识别影响风险的关键因素。

2　结果与分析

2.1　禽肉中弯曲菌污染水平

2021—2023 年共采集鲜禽肉 738 件。从 322 件样品中分离出弯曲菌, 总检出率为 43.63%。在超市中采集的样品检出率为 40.20% (244/607), 低于在农贸市场采集的样品 59.54% (78/131)。从时间上看, 2021 年检出率最高, 为 49.48% (144/291), 2023 年检出率最低, 为 39.15% (83/212)。第 4 季度检出率最高, 为 53.89% (97/180), 第 1 季度检出率最低, 为 35.95% (55/153), 详见表 1。

在禽肉中一共分离到结肠弯曲菌 189 株, 空肠弯曲菌 153 株, 海鸥弯曲菌(*Campylobacter lari*) 1 株, 在 322 个阳

性禽肉样本中, 共有 21 个样本被结肠弯曲菌和空肠弯曲菌混合污染。

表 1 北京市鲜禽肉弯曲菌污染情况
Table 1 Contamination situation of *Campylobacter* in fresh poultry meat in Beijing

类别		样品数量	阳性检出	检出率/%
采样地点	超市	607	244	40.20
	农贸市场	131	78	59.54
采样年份	2021 年	291	144	49.48
	2022 年	235	95	40.43
	2023 年	212	83	39.15
采样季度	第 1 季度	153	55	35.95
	第 2 季度	191	71	37.17
	第 3 季度	214	99	46.26
	第 4 季度	180	97	53.89
合计		738	322	43.63

2.2 禽肉中弯曲菌耐药性

整体来看, 弯曲菌对氟喹诺酮类和四环素耐药严重, 空肠弯曲菌对萘啶酸和环丙沙星的耐药率为 98.69%, 对四环素的耐药率为 96.08%, 其多重耐药率为 54.90% (84/153)(表 2)。结肠弯曲菌对萘啶酸, 环丙沙星和四环素的耐药率分别为 98.41%、100.00%和 95.24%。结肠弯曲菌对红霉素、阿奇霉素、泰利霉素、庆大霉素、链霉素和克林霉素的耐药率均超过 60%, 其整体耐药率较空肠弯曲菌高(表 2)。结肠弯曲菌的多重耐药情况同样令人担忧, 其多重耐药率为 87.83% (166/189), 并且有 38.10%的结肠弯曲菌菌株对所有种类的药物均耐药。此外, 分离到的 1 株海鸥弯曲菌对于各类药物均较为敏感, 其 MIC 为: 红霉素小于 0.5、阿奇霉素小于 0.5、萘啶酸 16、环丙沙星 8、庆大霉素 2、链霉素 4、氯霉素 2、氟苯尼考 1、四环素 1、泰利霉素 2、克林霉素小于 0.25。

2.3 暴露评估

2.3.1 北京市居民禽肉的消费量及频率

中国居民营养与健康状况监测结果显示, 北京市居民食用禽肉产品的消费比例为 79.65%, 平均消费频次为 99.28 次/年, 约为每周 2 次, 平均每次食用量为 103.25 g。

2.3.2 零售至烹饪过程中弯曲菌生长失活参数设置

零售环节采用 Beta 分布的形式描述禽肉中弯曲菌的污染率的不确定性。公式为 Beta(s+1,n-s+1), 其中 n 表示总样品数, s 表示阳性样品数, 即 Beta(323,417)。由于本市尚未积累足够的弯曲菌定量检测数据, 浓度参数参照北京市一项相关研究[27]。针对从零售环节购买后运输到家庭这个过程禽肉中弯曲菌的生长变化, 模型应该考虑诸多环境影响因素, 如温度、水分活度和 pH[26]。运输温度和运输时间根据北京市的另一项研究[28]。

表 2 鲜禽肉中弯曲菌药敏实验结果
Table 2 Antimicrobial susceptibility test results of *Campylobacter* in fresh poultry meat

抗生素	耐药菌株数(耐药率/%)		P	χ^2
	空肠弯曲菌	结肠弯曲菌		
红霉素	13 (8.50)	124 (65.61)	<0.0001	114.8565
阿奇霉素	14 (9.15)	133 (70.37)	<0.0001	129.3048
萘啶酸	151 (98.69)	186 (98.41)	1.0000	0.0461
环丙沙星	151 (98.69)	189 (100.00)	0.1994	2.4851
庆大霉素	30 (19.61)	140 (74.07)	<0.0001	100.3360
链霉素	18 (11.76)	130 (68.78)	<0.0001	111.9813
氯霉素	14 (9.15)	54 (28.57)	<0.0001	20.2419
氟苯尼考	66 (43.14)	80 (42.33)	0.9127	0.0227
四环素	147 (96.08)	180 (95.24)	0.7948	0.1424
泰利霉素	17 (11.11)	130 (68.78)	<0.0001	114.7511
克林霉素	34 (22.22)	124 (65.61)	<0.0001	64.0337
多重耐药	84 (54.90)	166 (87.83)	<0.0001	46.6231

同运输过程一样, 家庭储存同样需要考虑弯曲菌在不同温度、水分活度和 pH 下的生长情况。根据国内外专项调查结果[26,29], 禽肉保存时间和方式为 1~14 d 冷冻, 6~24 h 冷藏, 0~6 h 室温。同时在模型中设置–0.75%的相关系数, 以确保高温和较长储藏时间的组合无法实现(该情况下禽肉腐败不可食用)。在烹饪环节中, 较低的烹饪温度和较短的烹饪时间可能导致未烧熟煮透的禽肉中仍有活菌残留。一般而言根据国内的烹饪习惯无论是蒸、煮、烤、炒等, 禽肉中心温度均已超过 70 ℃, 合理烹饪均可杀灭所有弯曲菌。具体参数设置详见表 3。

2.3.3 弯曲菌交叉污染参数设置

交叉污染是生肉在处理和备餐阶段公认的危险因素。交叉污染过程模拟一般为 2 类参数: 交叉污染发生的可能性; 弯曲菌从生肉到熟肉的传递率。本研究参照 Xu 等[26]2023 年构建的鸡肉弯曲菌厨房内交叉污染模型, 结合本市调查结果, 分析生禽肉中弯曲菌通过交叉污染手和案板, 最终传递入口的可能性和菌量。具体参数设置详见表 3。

表 3　鲜禽肉中弯曲菌的定量风险评估模型参数

Table 3　Parameters for quantitative risk assessment model of *Campylobacter* in fresh poultry meat

参数	参数描述	值/模型公式	单位	参考文献
P0	零售环节禽肉中弯曲菌检出率	Beta (323,417)		本研究
N0	阳性样品中弯曲菌的污染水平	RiskCumul (0.7,2.767,{0.7,1.768,2.767},{0.1,0.5,0.9})	lg CFU/g	[27]
t_trans	运输时间	RiskPert (0.5,2,3)	h	[28]
Temp_t	运输温度	RiskPert (–9.3,16.6,38.3)	℃	[28]
t_home1	储藏时间 1	RiskUniform (0,6)	h	[30]
t_home2	储藏时间 2	RiskUniform (6,24)	h	[30]
t_home3	储藏时间 3	RiskUniform (24,336)	h	[30]
Temp_c	储藏温度	RiskPert (–9.3,16.6,38.3)	℃	[30]
P_AC	未烹饪完全的禽肉比例	RiskPert (0.01,0.02,0.05)		[30]
Time_Prot	烹饪过程细菌暴露的时间	RiskPert (0.5,1,1.5)	min	[30]
Temp_Pro	烹饪过程细菌暴露的温度	RiskPert (60,64,65)	℃	[30]
D_Prot	热失活参数 *D* 值	10^(–0.96-(Temp_Pro-70)/12.3)		本研究、[26]
LGR	弯曲菌的生长速率	$[0.04673\times\{Temp_t-(Temp_t-6)EXP(-2.026t_trans)-31.96\}]^2\times t_trans+[0.04673\times\{Temp_c-(Temp_c-6)EXP\{-2.026(t_home1+t_home2+t_home3)\}-31.96\}]^2\times(t_home1+t_home2+t_home3)$	lg CFU/g/h	本研究、[26]
N1	烹饪前弯曲菌的污染水平	IF (Temp_c<31.96,N0,N0+LGR)	lg CFU/g	[26]
N2	烹饪后弯曲菌的污染水平	MAX (N1-Time_Prot/D_Prot,–6)	lg CFU/g	[26]
p_WH	处理生禽肉后洗手的概率	RiskDiscrete ({0,1},{249,1})		[26]
t_CH	弯曲菌从生禽肉到手的传递率	RiskLognorm [0.15555,1.0547,RiskShift (0.00058696),RiskTruncate (0,1)]		[26]
t_HS	弯曲菌从手到熟肉的传递率	RiskLevy [–0.0003382,0.0019097,RiskTruncate (0,1)]		[6]
P_CB	处理生禽肉后更换案板或菜刀的概率	RiskBernoulli (0.014)		[26]
t_CB	弯曲菌从生禽肉到案板或菜刀的传递率	RiskLognorm [0.0064271,0.28575,RiskShift (0.00000124688), RiskTruncate (0,1)]		[26]
t_CS	弯曲菌从案板或菜刀到熟肉的传递率	RiskExpon [0.12217,RiskShift (–0.00041787), RiskTruncate (0,1)]		[26]
N3	交叉污染发生后的细菌量	(p_WH×t_CH×t_HS+p_CB×t_CB×t_CS)×N0	lg CFU/g	[30]
C	禽肉的每份消费量	RiskPert (30,103,500)	g	本研究
P_ill	每次消费禽肉导致弯曲菌感染的概率	$1-[1+C\times(N2+N3)/7.59)]^{-0.145}$		本研究、[30]

2.4　风险特征描述

2.4.1　疾病发生概率估计

用LHS方法, 通过10000次迭代算每次消费鲜禽肉感染弯曲菌风险的概率分布。结果显示, 本市居民每次食用鲜禽肉发生弯曲菌感染的概率为 4.16×10^{-5}。

将暴露评估数据与剂量-反应关系模型结合, 计算出生鲜禽肉中弯曲菌的发病风险。北京市人口为 2188.60 万人[31], 消费量调查结果显示, 北京市居民食用禽肉产品的消费比例为 79.65%, 则潜在的暴露人口为 1743.22 万人, 估算出发病率为329例/10万, 北京市每年因鲜禽肉感染弯曲菌而致病的人数预期为 72073 例, 其中结肠弯曲菌感染人数 42307 例, 多重耐药结肠弯曲菌感染人数 37158 例,

空肠弯曲菌感染人数 34249 例，多重耐药空肠弯曲菌感染人数 18803 例。

2.4.2 敏感度分析

敏感度分析是风险评估的重要组成部分用于分析评估模型中产生的各变量参数对于模型结果的影响，以获得降低风险的有效控制措施。通过运用 Spearman 等级相关分析，按照相关性排序生成的相关龙卷风图形，可表示哪个风险因素对输出结果变量的影响最大，相关系数在–1(完全负相关)和 1(完全正相关)之间。图 1 显示每份禽肉中弯曲菌致病概率与模型变量之间的 Spearman 等级相关分析。结果显示，处理生禽肉后更换案板或菜刀的概率和处理生禽肉后洗手的概率与致病风险的相关性较强，且二者的相关性均具有统计学意义(P<0.0001)。上述结果提示，交叉污染行为是鲜禽肉中弯曲菌致病风险的重要影响因素，其中规范洗手和及时更换案板或刀具是降低感染风险的关键控制措施。

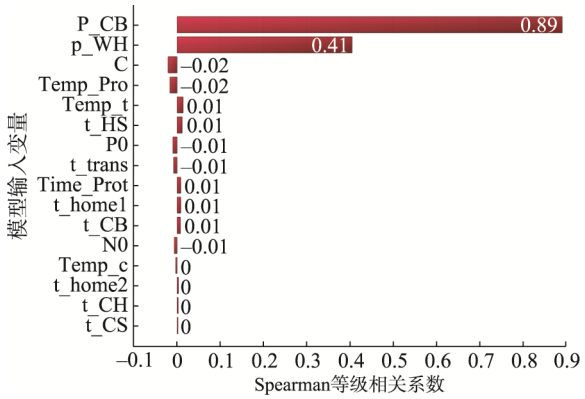


图 1 敏感度分析

Fig.1 Sensitive analysis

2.4.3 不确定性分析

在定量风险评估过程中，不确定性主要来源于模型参数选取、数据来源以及模型结构假设等方面。本研究中，部分关键参数(如弯曲菌初始污染水平、交叉污染概率及传递率等)来源于已发表文献，可能与本地区实际情况存在一定差异。此外，由于缺乏本地系统性定量数据，弯曲菌污染浓度采用文献数据进行替代，这也增加了模型结果的不确定性。

本研究采用蒙特卡洛模拟(10000 次迭代)对参数不确定性进行传播分析，使模型输出结果以概率分布形式呈现，从而在一定程度上反映了不确定性对风险估计的影响。同时，通过敏感度分析识别出对模型结果影响较大的关键参数(如洗手概率和更换案板或刀具的概率)，表明行为因素是影响风险的重要来源。

总体而言，本研究通过概率分布建模和模拟分析对不确定性进行了初步评估，但仍存在一定局限性。未来研究应结合本土化调查数据进一步优化参数设置，以提高风险评估结果的准确性和可靠性。

3 讨论与结论

本研究对北京市鲜禽肉中弯曲菌的污染情况进行了为期 3 年的持续监测，共采集 738 件样品分离弯曲菌。研究共分离到的 343 株弯曲菌中，包括了空肠弯曲菌、结肠弯曲菌和海鸥弯曲菌。对生鲜禽肉的分离率达到 43.63%，高于我国一些其他研究[32–33]，这可能与研究使用了滤膜过滤有关。进一步分析结果显示，农贸市场的分离率明显高于超市，这一现象可能与农贸市场环境的特点有关，其在分割，包装等环节容易造成交叉污染，且卫生管理水平相对较低，更容易受到外界污染源的影响[34]。之前有研究指出结肠弯曲菌已经取代了空肠弯曲菌成为禽肉中的优势菌种[35]，本研究在禽肉中分离的结肠弯曲菌数量超过空肠弯曲菌(189vs153)，进一步支持了结肠弯曲菌在禽肉中占比升高的趋势。此外，很多研究指出，冻禽肉中的弯曲菌分离率明显低于鲜禽肉[36]，因此，本研究只选择了鲜禽肉开展风险评估。

研究发现，弯曲菌对氟喹诺酮类和四环素表现出严重的耐药性。空肠弯曲菌对萘啶酸和环丙沙星的耐药率高达 98.69%，对四环素的耐药率为 96.08%，结肠弯曲菌则分别为 98.41%、100.00%和 95.24%。此外，结肠弯曲菌对红霉素、阿奇霉素、泰利霉素、庆大霉素、链霉素和克林霉素的耐药率均超过 60%，并且多重耐药情况十分严重，有 38.10%的菌株对全部 11 种药物均表现为耐药。值得注意的是，结肠弯曲菌对大环内酯类药物的耐药率在 65%左右，这虽然低于非洲地区[37–38]和我国部分地区的报道[39–42]，但是仍高于欧美地区的大部分研究[43–44]。并且，对氟苯尼考的耐药率也达到了 40%以上，提示家禽养殖环节中氟苯尼考的使用可能与耐药率升高相关。

通过构建基于禽肉消费行为和菌落动态变化的定量风险评估模型，本研究基于模型估算出北京市居民每次食用鲜禽肉感染弯曲菌的概率为 4.16×10^{-5}，对应年感染人数约为 72073 例，折合发病率为 329 例/10 万人，提示禽肉作为弯曲菌传播载体的潜在威胁不可忽视。值得关注的是，在所有致病病例中，多重耐药结肠弯曲菌引起的感染占比超过 50%，远高于多重耐药空肠弯曲菌[24]，凸显其对人群健康的影响更为严重。该模型结合了消费者消费频率、储存与烹饪条件、菌落生长失活规律等多个关键变量，有助于更真实地反映人群暴露风险。同时，本研究使用 Spearman 等级相关分析识别风险影响因素，为干预策略提供了科学依据。建议在今后的风险控制中，既要提升消费者对禽肉加工与处理环节的安全意识，也应加强对零售环节禽肉微生物质量的规范管理。

风险模型敏感度分析结果表明，鲜禽肉致病风险与交叉污染行为密切相关。特别是处理生肉后洗手和更换案板或菜刀的概率与最终致病风险呈显著负相关，表明这两个行为习惯是控制交叉污染、降低感染风险的关键因素。家庭厨房中处理生禽肉时，如未充分洗手或及时更换加工工具，易导致弯曲菌通过手、案板、刀具等介质迁移至熟食，从而造成“二次污染”[26]。因此，公众应提高对交叉污染风险的认识，培养良好的厨房卫生习惯，例如采用生熟分开、勤洗手、及时清洗工具等操作措施。建议相关部门持续加强食品安全教育宣传，提升居民在家庭加工环节中的食品安全防护能力，降低家庭加工环节中的交叉污染风险。

本研究系统调查了 2021—2023 年北京市鲜禽肉中弯曲菌的污染现状、耐药特征及其对居民健康的潜在风险。结果表明，鲜禽肉中弯曲菌污染率较高，尤其是农贸市场样品污染更为严重。分离菌株中结肠弯曲菌占比更高，耐药水平明显高于空肠弯曲菌，且多重耐药问题尤为突出。基于居民消费行为构建的定量风险评估模型显示，鲜禽肉中弯曲菌污染及耐药情况值得持续关注，交叉污染控制不当可能进一步增加传播风险。为此，建议在风险控制中重点针对关键影响因素开展干预措施：在家庭加工环节，应强化“生熟分开”操作规范，严格落实处理生禽肉后及时洗手、更换案板或刀具等具体措施，以降低交叉污染风险；在零售与加工环节，应加强禽肉分割、包装及储存过程中的卫生管理，减少环境交叉污染。同时，针对多重耐药结肠弯曲菌，应加强其在禽肉供应链中的监测力度，结合耐药特征开展重点预警与风险评估，并逐步推进养殖环节抗生素合理使用与替代策略，以降低耐药菌传播风险。

参考文献

[1] Shen Zhangqi, Wang Yang, Zhang Qijing, et al. Antimicrobial resistance in *Campylobacter* spp. [J]. Microbiology Spectrum, 2018, 6(2). DOI: 10.1128/microbiolspec.ARBA-0013-2017.

[2] Hughes R A C. Guillain-Barré syndrome: history, pathogenesis, treatment, and future directions [J]. European Journal of Neurology, 2024, 31(11): e16346.

[3] Connerton I F, Connerton P L. *Campylobacter* foodborne disease [M]. Foodborne diseases. Amsterdam: Elsevier, 2017: 209–221.

[4] Authority European Food Safety. The European Union summary report on antimicrobial resistance in zoonotic and indicator bacteria from humans, animals and food in 2018/2019 [J]. EFSA Journal, 2021, 19(4): e06490.

[5] Authority European Food Safety. The European Union summary report on antimicrobial resistance in zoonotic and indicator bacteria from humans, animals and food in 2015 [J]. EFSA Journal, 2017, 15(2): e4694.

[6] Authority European Food Safety. The European Union summary report on antimicrobial resistance in zoonotic and indicator bacteria from humans, animals and food in 2017/2018 [J]. EFSA Journal, 2020, 18(3): e6007.

[7] Authority European Food Safety. The European Union summary report on trends and sources of zoonoses, zoonotic agents and food-borne outbreaks in 2012 [J]. EFSA Journal, 2014, 12(2): 3547.

[8] EFSA European Food Safety Authority. The European Union summary report on antimicrobial resistance in zoonotic and indicator bacteria from humans, animals and food in 2021–2022 [J]. EFSA Journal, 2024, 22(2): e08583.

[9] Centers for Disease Control and Prevention. About *Campylobacter* infection [EB/OL]. (2024-05-15) [2025-02-02]. https://www.cdc.gov/campylobacter/about/index.html

[10] Wang J, Vaddu S, Bhumanapalli S, et al. A systematic review and meta-analysis of the sources of *Campylobacter* in poultry production (preharvest) and their relative contributions to the microbial risk of poultry meat [J]. Poultry Science, 2023, 102(10): 102905.

[11] Dearlove B L, Cody A J, Pascoe B, et al. Rapid host switching in generalist *Campylobacter strains* erodes the signal for tracing human infections [J]. The ISME Journal, 2016, 10(3): 721–729.

[12] Rosner B M, Schielke A, Didelot X, et al. A combined case-control and molecular source attribution study of human *Campylobacter* infections in Germany, 2011—2014 [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 5139.

[13] Same R G, Tamma P D. *Campylobacter* infections in children [J]. Pediatrics in Review, 2018, 39(11): 533–541.

[14] Pacholewicz E, Dame-Korevaar A, van der Most M, et al. *Campylobacter* presence on Dutch broiler farms and associated risk factors [J]. Poultry Science, 2024, 103(5): 103568.

[15] Westermarck E. Chronic diarrhea in dogs: what do we actually know about it? [J]. Topics in Companion Animal Medicine, 2016, 31(2): 78–84.

[16] Ruiz-Palacios G M. The health burden of *Campylobacter* infection and the impact of antimicrobial resistance: playing chicken [J]. Clinical Infectious Diseases, 2007, 44(5): 701–703.

[17] de Vries S P W, Vurayai M, Holmes M, et al. Phylogenetic analyses and antimicrobial resistance profiles of *Campylobacter* spp. from diarrhoeal patients and chickens in Botswana [J]. PLoS One, 2018, 13(3): e0194481.

[18] Reddy S, Zishiri O T. Detection and prevalence of antimicrobial resistance genes in *Campylobacter* spp. isolated from chickens and humans [J]. The Onderstepoort Journal of Veterinary Research, 2017, 84(1): e1–e6.

[19] Qin Xiaoxia, Wang Xin, Shen Zhangqi. The rise of antibiotic resistance in *Campylobacter* [J]. Current Opinion in Gastroenterology, 2023, 39(1): 9–15.

[20] Hamilton K A, Weir M H, Haas C N. Dose response models and a quantitative microbial risk assessment framework for the *Mycobacterium avium* complex that account for recent developments in molecular biology, taxonomy, and epidemiology [J]. Water Research, 2017, 109: 310–326.

[21] Chandrasekaran S, Jiang S C. A dose response model for *Staphylococcus aureus* [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 12542.

[22] Ssemanda J N, den Besten H M W, van Wagenberg C P A, et al. Quantitative assessment of food safety interventions for *Campylobacter* spp. and *Salmonella* spp. along the chicken meat supply chain in Burkina Faso and Ethiopia [J]. International Journal of Food Microbiology, 2024, 415: 110637.

[23] Johnson T J, Shank J M, Johnson J G. Current and potential treatments for reducing *Campylobacter* colonization in animal hosts and disease in humans [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 487.

[24] Zhang Penghang, Zhang Xiaoai, Liu Yuzhu, et al. Genomic insights into the increased occurrence of campylobacteriosis caused by antimicrobial-resistant *Campylobacter coli* [J]. mBio, 2022, 13(6):

e0283522.

[25] Tikhomirova A, McNabb E R, Petterlin L, et al. *Campylobacter jejuni* virulence factors: update on emerging issues and trends [J]. Journal of Biomedical Science, 2024, 31(1): 45.

[26] Xu Xinran, Rothrock M J J, Dev-Kumar G, et al. Assessing the risk of seasonal effects of *Campylobacter* contaminated broiler meat prepared in-home in the United States [J]. Foods, 2023, 12(13): 2559.

[27] 胡豫杰, 王晔茹, 李凤琴. 北京部分市售整鸡中沙门菌和弯曲菌协同定量污染研究[J]. 卫生研究, 2015, 44(1): 68–72, 76.
Hu Yujie, Wang Yeru, Li Fengqin. Study on simultaneous contamination of *Salmonella* and *Campylobacter* in retail chicken carcasses in Beijing [J]. Journal of Hygiene Research, 2015, 44(1): 68–72, 76.

[28] 贾华云, 王晔茹, 王彝白纳, 等. 零售生鲜猪肉中沙门菌污染对居民健康影响的初步定量风险评估[J]. 卫生研究, 2021, 50(4): 646–652, 664.
Jia Huayun, Wang Yeru, Wang Yibaina, et al. Preliminary quantitative risk assessment of the effect of *Salmonella* on human health in retail fresh pork [J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(4): 646–652, 664.

[29] 张黎, 朱江辉, 徐海滨, 等. 2015 年中国居民家庭厨房内生肉加工行为现况调查[J]. 实用预防医学, 2017, 24(3): 275–279, 290.
Zhang Li, Zhu Jianghui, Xu Haibin, et al. Raw meat processing behavior in household kitchens of residents in China, 2015: a cross-sectional study [J]. Practical Preventive Medicine, 2017, 24(3): 275–279, 290.

[30] 蔡华, 宋夏, 徐碧瑶, 等. 上海市禽肉中沙门菌流行特征、耐药分析和定量风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(5): 990–996.
Cai Hua, Song Xia, Xu Biyao, et al. Epidemic characteristics, drug-resistant analysis and quantitative risk assessment of *Salmonella* in poultry meat in Shanghai [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(5): 990–996.

[31] 北京市统计局. 北京市 2022 统计年鉴[EB/OL]. (2022-12-01) [2025-05-31]. http: //nj. tjj. beijing. gov. cn/nj/main/2022-tjnj/zk/indexch. htm
Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing statistical yearbook 2022 [EB/OL]. (2022-12-01) [2025-05-31]. http: //nj. tjj. beijing. gov. cn/nj/main/2022-tjnj/zk/indexch. htm

[32] Ma H, Su Y, Ma L, et al. Prevalence and characterization of *Campylobacter jejuni* isolated from retail chicken in Tianjin, China [J]. Journal of Food Protection, 2017, 80(6): 1032–1040.

[33] 余峰玲, 许艳平, 童晶, 等. 徐州市禽源弯曲菌的分离鉴定及耐药性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(18): 6628–6632.
Yu Fengling, Xu Yanping, Tong Jing, et al. Isolation, identification and drug resistance analysis of *Campylobacter* from poultry in Xuzhou [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(18): 6628–6632.

[34] 李颖, 梁昊, 王苗, 等. 北京市顺义区零售鸡胴体中弯曲菌分布与分子特征研究[J]. 中国食品卫生杂志, 2019, 31(4): 351–355.
Li Ying, Liang Hao, Wang Miao, et al. Contamination and molecular characteristics of *Campylobacter* spp. isolated from chicken carcasses in Shunyi, Beijing [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2019, 31(4): 351–355.

[35] Wang Yang, Dong Yanni, Deng Fengru, et al. Species shift and multidrug resistance of *Campylobacter* from chicken and swine, China, 2008—2014 [J]. The Journal of Antimicrobial Chemotherapy, 2016, 71(3): 666–669.

[36] Gonçalves-Tenório A, Silva B N, Rodrigues V, et al. Prevalence of pathogens in poultry meat: a meta-analysis of European published surveys [J]. Foods, 2018, 7(5): 69.

[37] Karama M, Kambuyi K, Cenci-Goga B T, et al. Occurrence and antimicrobial resistance profiles of *Campylobacter jejuni*, *Campylobacter coli* and *Campylobacter upsaliensis* in beef cattle on cow-calf operations in South Africa [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2020, 17(7): 440–446.

[38] Webale M K, Wanjala C, Guyah B, et al. Epidemiological patterns and antimicrobial resistance of bacterial diarrhea among children in Nairobi City, Kenya [J]. Gastroenterology and Hepatology from Bed to Bench, 2020, 13(3): 238–246.

[39] Li Beibei, Ma Licai, Li Yingli, et al. Antimicrobial resistance of *Campylobacter* species isolated from broilers in live bird markets in Shanghai, China [J]. Foodborne Pathogens and Disease, 2017, 14(2): 96–102.

[40] Tang Mengjun, Zhou Qian, Zhang Xiaoyan, et al. Antibiotic resistance profiles and molecular mechanisms of *Campylobacter* from chicken and pig in China [J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 592496.

[41] Ju Changyan, Zhang Maojun, Ma Yanping, et al. Genetic and antibiotic resistance characteristics of *Campylobacter jejuni* isolated from diarrheal patients, poultry and cattle in Shenzhen [J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2018, 31(8): 579–585.

[42] 王潇, 渠淑晴, 冯欢欢, 等. 鸡源结肠弯曲菌基因组和耐药特征分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(20): 149–158.
Wang Xiao, Qu Shuqing, Feng Huanhuan, et al. Analysis of the genome and drug resistance characteristics of *Campylobacter coli* from chicken sources [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 149–158.

[43] Jurinović L, Duvnjak S, Kompes G, et al. Occurrence of *Campylobacter jejuni* in gulls feeding on Zagreb rubbish tip, Croatia; their diversity and antimicrobial susceptibility in perspective with human and broiler isolates [J]. Pathogens, 2020, 9(9): 695.

[44] Varga C, Guerin M T, Brash M L, et al. Antimicrobial resistance in *Campylobacter jejuni* and *Campylobacter coli* isolated from small poultry flocks in Ontario, Canada: a two-year surveillance study [J]. PLoS One, 2019, 14(8): e0221429.

(责任编辑: 韩晓红 曹岱琳)