doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.037

基于层次分析-熵权法和莫兰指数的畜禽产品风险分析

王　欣[1]　朱晶滢[1]　邱景璇[1]　范　飞[1]　吴立颖[2]　葛　宇[2]
(1. 上海理工大学健康科学与工程学院，上海 200093；2. 上海市质量监督检验技术研究院，上海 201114)

摘要：在对 2016—2023 年的全国畜禽产品抽检数据风险描述的基础上，采用层次分析-熵权法进行了风险分级；并基于全局和局部莫兰指数进行了风险空间分布特征的分析。研究表明，其主要风险来源于兽药和非法添加物，禽类和猪肉类产品的整体风险较高，山东、河南、重庆等地的兽药残留较为突出，河南、湖南、重庆和贵州等地的非法添加物问题更为明显。恩诺沙星、氟苯尼考和氧氟沙星在全国范围内的综合风险最高；华东区域的兽药残留高风险污染物最为集中，山东出现的非法添加污染物种类最多；恩诺沙星、氯丙嗪、尼卡巴嗪及 4 种非法添加物的风险呈显著的空间聚集，恩诺沙星、多西环素等兽药残留及克伦特罗在特定地区呈“高-高”值聚集，应重点加强相关区域的风险防控。该研究结果可为我国畜禽产品的风险防控提供有益参考。

关键词：畜禽肉及其副产品；层次分析法；熵权法；莫兰指数；风险等级；空间分布
中图分类号：TS251.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)03-0387-13　　**OSID**：

Risk Analysis of Livestock and Poultry Products Based on Analytic Hierarchy Process – Entropy Weight Method and Moran's I

WANG Xin[1]　ZHU Jingying[1]　QIU Jingxuan[1]　FAN Fei[1]　WU Liying[2]　GE Yu[2]
(1. *School of Health Science and Engineering*, *University of Shanghai for Science and Technology*, *Shanghai* 200093, *China*
2. *Shanghai Institute of Quality Inspection and Technical Research*, *Shanghai* 201114, *China*)

Abstract: Based on spot check data of livestock and poultry products in China from 2016 to 2023, the risk characteristics of these products were evaluated by using descriptive statistical methods. A combined method of analytical hierarchy process and entropy weighting method was employed for risk ranking. Additionally, global Moran's I and local Moran's I were applied to investigate the spatial distribution characteristics of risk. The results provided a clear depiction of how risk levels varied across product types and regions. Specifically, the findings revealed that veterinary drugs and illegal additives were the primary sources of risk, and poultry and pork products exhibited a relatively high overall risk. Notably, regions such as Shandong, Henan, and Chongqing showed a prominent risk for residues of veterinary drugs, while problems related to illegal additives were particularly outstanding in Henan, Hunan, Chongqing, and Guizhou. Enrofloxacin, florfenicol, and ofloxacin posed the highest overall risk nationally. Moreover, high-risk veterinary drug residues were concentrated in East China, with Shandong reporting the highest diversity of illegal additives. The risks associated with enrofloxacin, chlorpromazine, nicarbazin, and four types of illegal additives demonstrated significant spatial clustering. Specific areas exhibited high-high clusters of veterinary drug residues such as enrofloxacin and doxycycline, as well as clenbuterol. Consequently, there was a need to strengthen risk prevention measures in these regions. The research result can provide valuable insights for the risk prevention and control of livestock and poultry products, serving as a reference for policymakers.

Key words: livestock and poultry meat and its edible by-products; analytic hierarchy process; entropy weight method; Moran's I; risk level; spatial distribution

收稿日期：2024-10-31　修回日期：2025-01-09
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFF1101104)
作者简介：王欣(1975—)，女，教授，博士，主要从事食品安全与追溯研究，E-mail：18918629281@126.com

0 引言

统计数据表明,2022 年全国肉类产量高达 9 328.4 万吨[1],其中,畜禽肉及其副产品占肉及肉制品的 80% 左右[2],是我国肉类生产和消费的主体。但伴随着肉类产量的提升,食品安全问题也逐渐凸显。由于养殖环节用药不规范、部分商家法律意识淡薄及监管力度不足,畜禽肉类农产品易出现药物残留、重金属超标及违法添加物等问题。

食品抽检是保障肉类产品质量安全的关键措施。通过抽检不仅可以及时发现问题产品,保障消费者安全,且通过对食品抽检数据的深入分析,还可以更全面地理解肉类产品的安全风险特征,为风险预警和监管提供依据[3-5]。

风险分级是一种对食品中众多危害因素进行科学排序的方法,通过建立评价指标体系和综合评价方法分析抽检数据,可以实现对食品风险因子的分类和排序,进而提升监管效率[6-7]。其中,指标权重的确定是食品安全风险分级的关键环节。常用的指标赋权分为主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法依赖于专家的经验和判断,具有较强的主观性,主要包括层次分析法(Analytic hierarchy process,AHP)和二项系数法。客观赋权法则依据数据本身的信息确定权重,避免了人为干预,主要方法有熵权法(Entropy weight method,EWM)和变异系数法[8]。然而,单一的赋权方法各有局限:主观赋权可能存在随机性,客观赋权在处理极端数据时可能无法准确反映其实际意义。因此,在计算风险权重时将主观权重与客观权重相结合,得到指标的综合加权,能够有效平衡这两者的优缺点[9-11]。

此外,有研究表明食品安全风险在空间分布上存在一定的聚集规律[5],研究污染物的空间分布特征对防范区域性、系统性的食品安全风险具有重要意义。空间自相关分析能够量化地理数据中变量的聚类或分散程度。作为一种常用的空间自相关度量方法,莫兰指数(Moran's I)能够揭示空间数据的聚集性及分布特征,为实施监管提供参考[12-14]。

综上所述,尽管综合加权法和空间相关性分析已在多类食品的安全风险评估中得到应用,但其在畜禽肉及其副产品的风险分析中仍鲜有涉及,因此,本文基于 2016—2023 年的全国畜禽肉及其副产品抽检不合格数据,采用 AHP-EWM 法对其进行风险分级,并通过空间分析法探讨其空间分布特征。

1 材料与方法

1.1 试验数据

通过网络爬虫从食安通、食品伙伴网以及 33 个市场监督管理局(国家、兵团及各省市自治区)网站收集 2016—2023 年的畜禽肉及其副产品抽检信息,以现行有效的 GB 31650—2019、GB 31650.1—2022 和 GB 2762—2022 为依据,对存在数据缺失、冗余及不规范信息的数据进行清洗处理后,共获得 2 462 条数据用于分析,处理后的数据主要包括以下内容:样品名称、产品类别、不合格项目及其分类、检测限值、检测结果及生产区域等信息。各区域不同类别畜禽产品的不合格数据信息如图 1 所示。

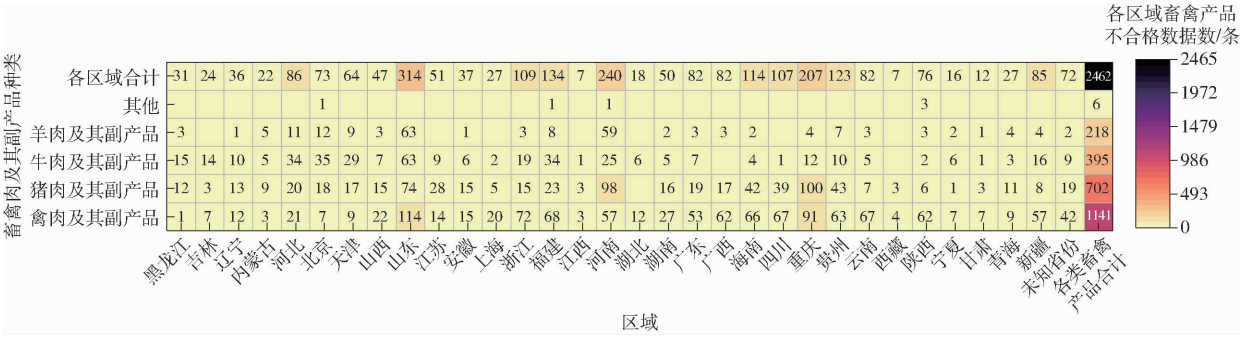

图 1 各区域不同类别畜禽肉及其副产品不合格数据信息

Fig. 1 Unqualified data of livestock and poultry meat and its edible by-products of different types in various regions

1.2 数据分析方法

1.2.1 指标选择

充分考虑影响污染物风险的统计指标,从危害发生的概率和危害的严重程度两个维度考虑[15],参考文献[16-18]选定年均发生频次、变异系数、相对风险值、危险商等 4 个指标计算风险值。

(1)年均发生频次

年均发生频次为某一污染物的检出条数与年数的比值,可反映某一污染物被检出不合格的频率。年均检出频次越高,风险值越大,公式为

$$A_f = \frac{n}{Y} \tag{1}$$

式中　A_f——某一污染物的年均发生频次

n——某一污染物的检出条数

Y——污染物数据分布的年数，本文所收集的数据分布于 2016—2023 年，取 8

(2)变异系数

变异系数与年均发生频次结合分析，可识别高频暴露或暴露水平不稳定的区域或样品[17]。变异系数计算公式为

$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(c_i - \bar{c})^2}}{\bar{c}} \tag{2}$$

式中　C_v——某一污染物的变异系数

c_i——某一污染物的第 i 条数据的检测值

$\bar{c}$——某一污染物检测值的平均值

(3)相对风险值

相对风险值为不合格数据检出值与限量的比值[16]，可反映某个污染物超标的严重程度。相对风险值越大，风险越大，其计算公式为

$$R_r = \frac{c_i}{L_i} \quad (L_i \neq 0) \tag{3}$$

式中　R_r——某一污染物的相对风险值，后续计算时取最大值

L_i——某一污染物第 i 条数据的检出限量

当污染物检出限量为 0($L_i = 0$)时，该公式不适用，对该污染物直接赋高风险[19]。

(4)危险商

危险商为每日暴露剂量与每日可接受剂量的比值[18,20]，可关联污染物的残留量与对人体健康的影响。危险商数值越大，风险越高，公式为

$$H_q = \frac{E_d}{A_d} \tag{4}$$

其中

$$E_d = \frac{c_i m}{b_w} \tag{5}$$

式中　E_d——某一污染物每日暴露剂量

m——生肉每日摄入量，参考中国统计年鉴中全国居民人均主要食品消费量，取 86.419 g/d

b_w——人均质量，取 60 kg

H_q——某一污染物的危险商，后续计算时取最大值

A_d——每日可接受剂量

镉、铅、总汞和总砷采用 JECFA 规定的暂定每周耐受摄入量和暂定每月耐受摄入量计算，铬采用中国营养学会规定的每日可耐受最高摄入量计算[21]。对于未规定每日允许摄入量的数据，不计算该污染物的危险商，对该污染物直接赋高风险。

1.2.2　AHP－EWM 组合权重模型的建立

1.2.2.1　层次分析法(AHP)

参考 KONG 等[22]的方法进行。利用 9 级缩放法对年均发生频次、变异系数、相对风险值、危险商 4 个指标两两比较，创建判断矩阵(表 1)；对判断矩阵进行标准化、计算指标权重后，对判断矩阵进行一致性测试，验证其合理性。

表 1　判断矩阵

Tab.1　Judgment matrix

指标	危险商	变异系数	相对风险值	年均发生频次
危险商	1	8	2	3
变异系数	1/8	1	1/3	1/4
相对风险值	1/2	3	1	3/5
年均发生频次	1/3	4	5/3	1

1.2.2.2　熵权法(EWM)

参考 SUN 等[23]的方法计算年均发生频次、变异系数、相对风险值、危险商 4 个指标的权重。建立评价指标矩阵，数据归一化后计算 4 个评价指标的信息熵、差异系数及指标权重。

1.2.2.3　AHP－EWM 混合加权

采用乘法组合法[24]进行 AHP 和 EWM 混合加权。组合权重指标 ω_j 计算式为

$$\omega_j = \frac{\alpha_j \beta_j}{\sum_{j=1}^{4} \alpha_j \beta_j} \tag{6}$$

式中　α_j——第 j 个指标 AHP 法求得的主观权重系数

β_j——第 j 个指标 EWM 法求得的客观权重系数

1.2.3　风险等级划分方法

利用 AHP－EWM 法得到的组合权重对评价指标进行线性加权，风险值计算公式为

$$R_s = \sum_{j=1}^{4} \omega_j x_j \tag{7}$$

式中　R_s——某一污染物的风险值

x_j——某一污染物评价指标 j 的标准化值

参照廖盛美等[7]的方法对得到的全国、各省市以及各类别畜禽肉及其副产品中污染物的风险值进行分级：[0，10% 分位数)为低风险，[10% 分位数，40% 分位数)为较低风险，[40% 分位数，70% 分位数)为中风险，[70% 分位数，90% 分位数)为较高风险，[90% 分位数，100% 分位数] 为高风险。

1.2.4　空间自相关分析

空间自相关分为全局空间自相关和局部空间自相关，以莫兰指数为评估指标[25]。

1.2.4.1　全局莫兰指数

全局莫兰指数(Global Moran's I)能够反映某

一污染物在整个研究区域内的空间关联度及其聚集模式,公式为

$$I=\frac{N\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}W_{kl}(x_k-\bar{x})(x_l-\bar{x})}{\left(\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=1}^{N}W_{kl}\right)\sum_{k=1}^{N}(x_k-\bar{x})^2} \tag{8}$$

式中 I——全局莫兰指数,范围为[-1,1]

N——全国省级行政区的数量

x_k、x_l——区域 k、区域 l 的某一污染物检出数量占该区域数据总量的比例

$\bar{x}$——某一污染物检出数量在 N 个区域占比的平均值

W_{kl}——空间权重[26],当区域 k 和区域 l 相邻时,$W_{kl}=1$,否则 $W_{kl}=0$

进行空间自相关的统计显著性检验[27],以 $P<0.05$ 表示差异具有统计学意义[28],计算式为

$$Z=\frac{1-E(I)}{\sqrt{\mathrm{Var}(I)}} \tag{9}$$

其中

$$E(I)=\frac{-1}{N-1} \tag{10}$$

式中 $E(I)$——I 的期望值

$\mathrm{Var}(I)$——I 的方差

Z——显著性水平检验指标

1.2.4.2 局部莫兰指数

局部莫兰指数(Local Moran's I),是全局莫兰指数的分解[29],侧重于某一污染物在局部区域内的高低值聚集特征,其计算公式为

$$I_i=\frac{x_k-\bar{x}}{S^2}\sum_{l=1}^{N}W_{kl}(x_l-\bar{x})\quad(k\neq l) \tag{11}$$

式中 I_i——局部莫兰指数

S^2——x_k或 x_l的方差

1.3 统计分析

以 Microsoft Excel 软件对抽检数据进行汇总,按照畜禽肉及其副产品类别、不合格项目、省市等不同维度分别进行统计分析,应用 Geoda 1.16 软件计算不合格项的全局莫兰指数和局部莫兰指数,采用 Origin 2024 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 畜禽肉及其副产品抽检不合格数据分析

2.1.1 全国畜禽肉及其副产品的危害特征

从不合格产品的种类来看,不合格禽肉及其副产品的占比最高,为 46.34%,其次是猪肉(28.51%)、牛肉(16.04%)和羊肉(8.85%),说明消费量大、流通广泛的禽类和猪肉类产品是食品安全问题的主要集中点。畜禽肉及其副产品中的主要污染物为兽药残留(53.67%)和非法添加物(41.91%),重金属污染和质量不达标问题相对较少,分别占 1.50% 和 2.92%,表明兽药使用和非法添加问题依然是肉类生产中的主要安全风险。图 2 为全国畜禽肉及其副产品的兽药残留不合格数据统计中排在前 10 的兽药残留,恩诺沙星是主要的污染物,共检出 426 条样本,占总不合格项的 16.81%;磺胺类药物次之(12.67%)。

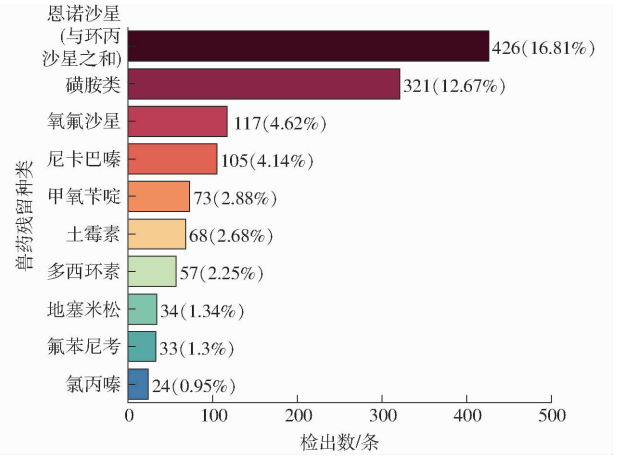

图 2 全国抽检不合格畜禽肉及其副产品中的兽药残留数据分析(前 10)

Fig. 2 Statistics on veterinary drug residues in unqualified livestock and poultry meat and its edible by-products nationwide (top 10)

作为广谱抗菌药物,恩诺沙星和磺胺类药物在畜禽养殖中被广泛使用,其残留问题与养殖过程中违规加药或未遵守休药期有直接关系。此外,在非法添加物方面,克伦特罗是最常见的问题,检出率高达 13.54%(343 条),其次为氯霉素(9.16%)、五氯酚酸钠(8.33%)、呋喃唑酮代谢物(5.29%)和呋喃西林代谢物(1.66%)。

2.1.2 各区域畜禽肉及其副产品的危害特征

不同区域的兽残数据(图 3)表明,兽药残留问题在多个省份普遍存在,尤其是磺胺类药物和恩诺沙星。山东、河南、重庆是兽药残留污染物数据最多的区域,其中,河南的兽药残留污染物数据主要集中在恩诺沙星和磺胺类药物,占比分别为 18.55% 和 13.71%;山东的兽药残留污染物主要为恩诺沙星(14.02%)、氧氟沙星(8.72%)和磺胺类药物(9.97%);重庆的污染物数据分布更为分散,恩诺沙星(12.56%)、磺胺类(8.84%)、尼卡巴嗪(11.16%)和甲醛(7.91%)数据的占比均较大。虽然江西、湖北、甘肃的不合格数据总数相对较少,但大部分不合格数据也集中在恩诺沙星与磺胺类污染物中。此外,天津的兽药残留不合格数据总数占比最小,说明该类风险较小。各地区的兽药残留风险

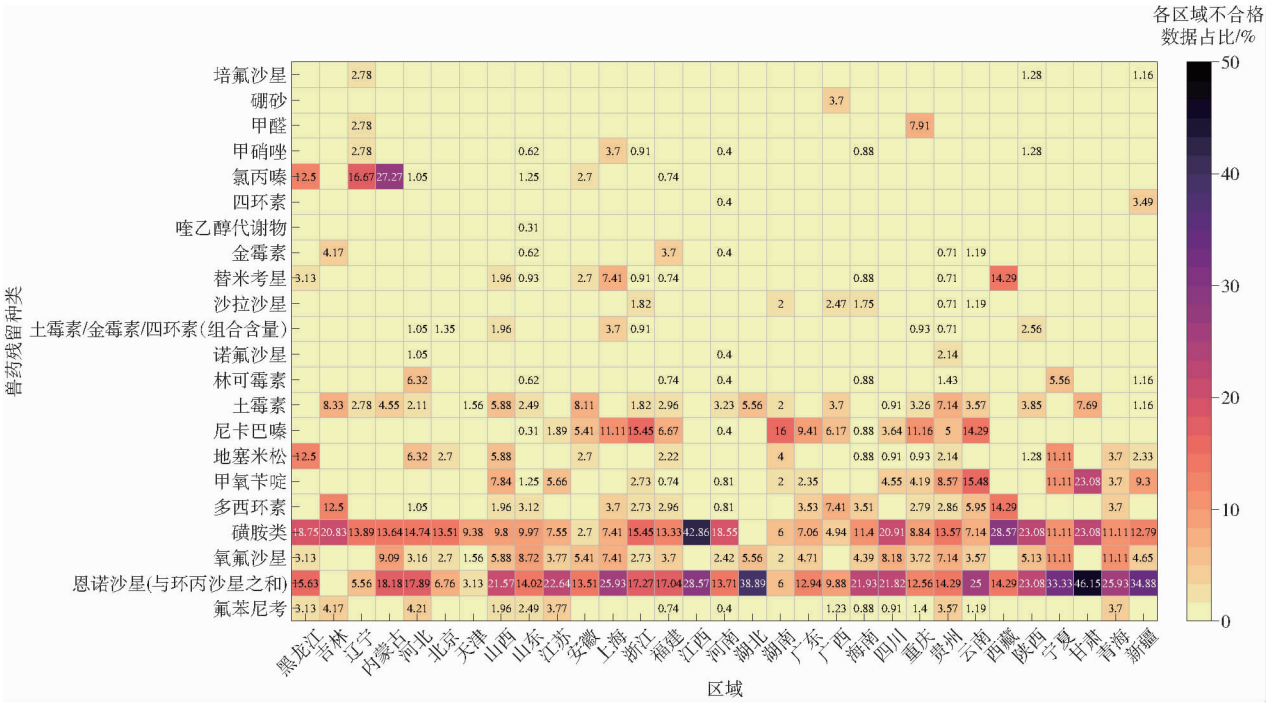

图 3　各区域畜禽肉及其副产品的兽药残留不合格占比分析

Fig. 3　Proportion of veterinary drug residues in unqualified livestock and poultry meat and its edible by-products in various regions

与其经济环境、监管力度和养殖模式相关。此外，随着每年食品安全政策和检测重点的调整，不同区域检测项目和不合格数据也有一定波动性。

在重金属污染方面，铬的检出率最低，总汞和铅次之，而总砷的检出率最高（图 4）。镉污染则主要集中在云南（2.38%）、贵州（2.86%）和青海（3.70%），可能与当地土壤和水源的地球化学异常有关。地理因素与畜禽产品中的重金属残留密切相关，环境污染可能对食品安全造成长期影响。此外，自 2018 年农业农村部发布公告禁止使用喹乙醇、氨苯胂酸等兽药后，总砷超标情况显著减少，显示了政策干预在控制污染方面的成效。

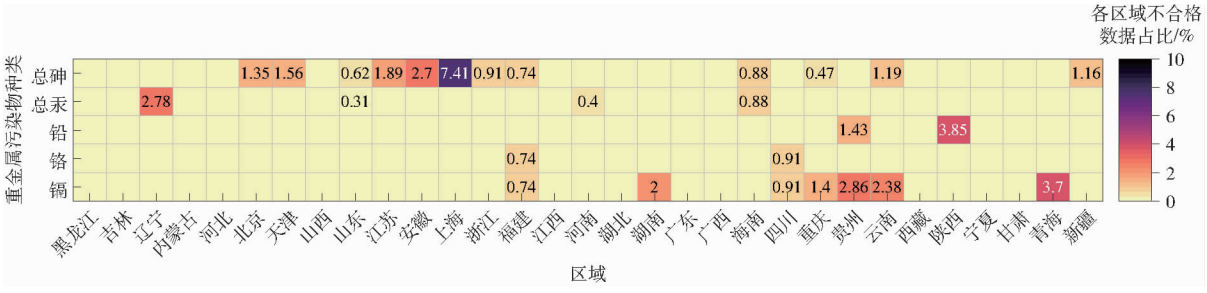

图 4　各区域畜禽肉及其副产品的重金属污染不合格占比分析

Fig. 4　Proportion of heavy metals in unqualified livestock and poultry meat and its edible by-products in various regions

非法添加物方面，除甘肃省未发现非法添加污染物数据外（图 5），其余区域均有非法添加物的检出，尤其是河南、湖南、重庆和贵州地区的非法添加物检出种类相对较多。氯霉素是检出区域最多的污染物，除少数区域（如甘肃、黑龙江等）外，其他区域均有检出。克伦特罗在多个区域的检出比例也较高，如吉林、北京、天津、湖北、山东和河南等地区的克伦特罗数据的占比均在 25% 以上。此外，五氯酚酸钠和呋喃唑酮代谢物也是出现较多的非法添加污染物，其中，呋喃唑酮代谢物在江西（14.29%）、新疆（13.95%）、河南（11.29%）和四川（10.91%）的占比较大；湖南（28.00%）、广东（21.18%）和海南（21.05%）的五氯酚酸钠超标占比也较大。

虽然质量指标仅 3 项，但从不达标的数据来看，含水率和挥发性盐基氮问题相对较多，动物源性成分不达标数据仅占少数。挥发性盐基氮超标分布在多个省份（广东、陕西、重庆、辽宁、河北、山东、江苏、安徽、福建、四川、新疆、宁夏），该指标与产品保存不当或产品新鲜度不足有关。含水率超标的现象集中在京津冀地区，可能与违规注水有关，该数据主要分布在 2016—2018 年，随着《生猪屠宰管理条例》的多次修订，水分超标问题已得到较好的控制，

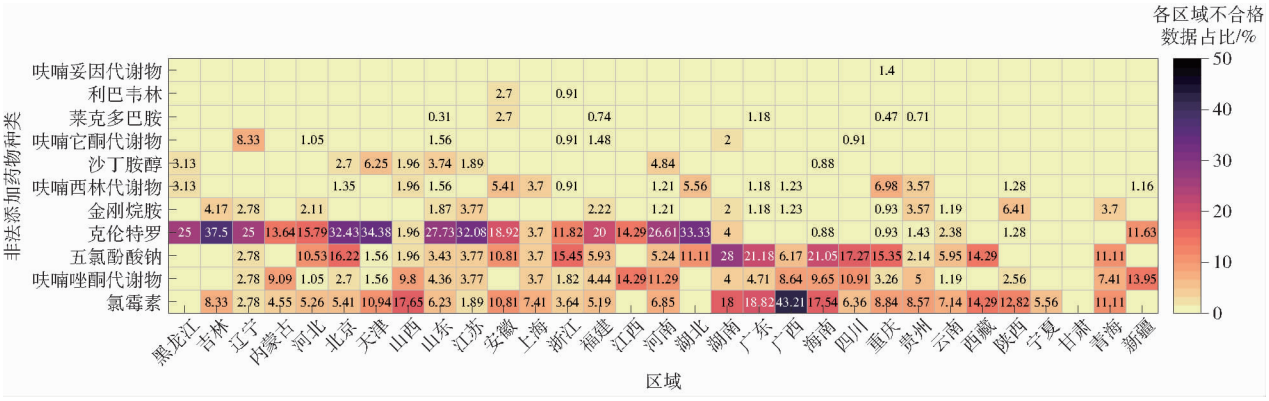

图 5 各区域畜禽肉及其副产品的非法添加不合格占比分析

Fig. 5 Proportion of illegal additives in unqualified livestock and poultry meat and its edible by-products in various regions

近年的检出数据明显减少。

从超标畜禽产品种类来看,禽肉和猪肉类产品的超标问题在多个地区广泛分布(图 6)。2022 年全国居民人均食品消费量数据表明,猪肉和禽类消费量远高于牛羊肉,这也与该类别的不合格数据的广泛分布相符。其中,15 个区域的禽肉及其副产品不合格数据占比超过 50%,上海(74.07%)、广西(75.61%)、云南(81.71%)和陕西(81.58%)的禽类产品数据占比甚至超过了 70%。对猪肉产品而言,不合格数据占比超过 40% 的区域有 8 个;黑龙江、吉林、北京和天津的牛肉产品的不合格数据占比均在 40% 以上;相比之下,羊肉及其副产品的不合格数据占比均小于 25%,但内蒙古(22.73%)、山东(20.06%)和河南(24.58%)的数据占比仍相对较高,这也与 2022 年的畜产品产量统计数据相符,以上 3 个地区的羊肉产量均相对较高。

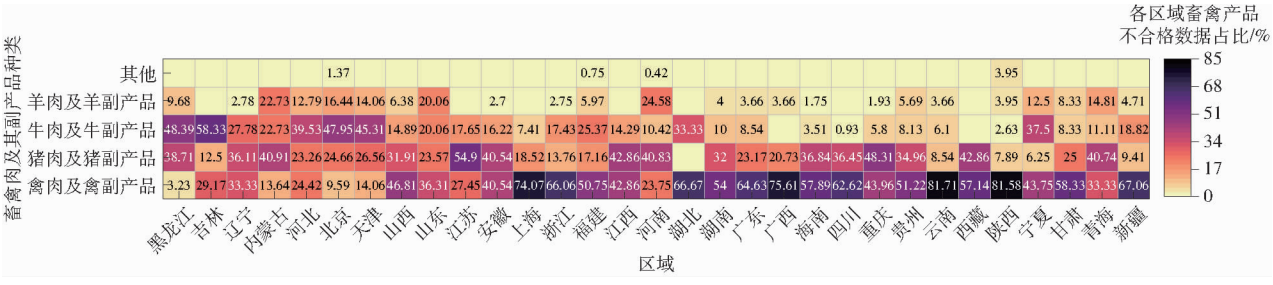

图 6 各区域不同类别畜禽肉及其副产品不合格占比分析

Fig. 6 Proportion of unqualified livestock and poultry meat and its edible by-products of different types in various regions

2.1.3 各类畜禽肉及其副产品的危害特征

各类畜禽肉及其副产品的兽药残留不合格数据分析(图 7)表明,牛羊肉产品中的兽药残留污染物检出种类相对较少,而猪肉和禽类产品中出现了较多种类的兽药残留污染物。其中,恩诺沙星是禽类产品中最主要的兽药残留(21.97%),其占比远超其他污染物,这可能与恩诺沙星是家禽养殖常用的抗生素有关[30]。同时,在猪肉、羊肉及其副产品中,恩诺沙星和磺胺类的占比也均最高;牛肉及其副产品中,磺胺类的占比最高(11.17%);其他类肉制品中包含了兔肉、驴肉、马肉等产品,这类产品中出现了较多的氧氟沙星(16.67%)污染。说明这些广谱抗菌药在养殖业中存在较为严重的滥用。翁史昱等[31]的研究也发现,恩诺沙星和磺胺类抗生素因其价格低廉、效果显著,常被养殖户频繁使用,尤其是在未严格遵守休药期的情况下,易导致兽药残留超标。

非法添加物的数据(图 8)表明,牛羊肉及其副产品中的克伦特罗超标数据占比最高,而氯霉素问题在禽肉及其副产品中也同样突出。值得注意的是,莱克多巴胺、克伦特罗、沙丁胺醇、特布他林等 β-兴奋剂,俗称“瘦肉精”,仅在畜类产品中被检出,尤其是牛、羊肉及其副产品中,占比高达 50.73% 和 46.15%。这类药物常被部分养殖者非法添加以提高牲畜的胴体瘦肉率。相较于禽肉,消费者对于牛羊肉和猪肉的瘦肉需求更高,这可能推动了这些畜类产品中的“瘦肉精”的违法滥用行为。

2.2 畜禽肉及其副产品中污染物的风险等级

2.2.1 全国畜禽肉及其副产品中污染物的风险等级

根据 AHP - EWM 混合加权法计算得到年均发生频次、变异系数、相对风险值、危险商的权重系数,对所有指标进行线性加权,计算得到各类污染物的风险值,并据此划分风险等级。

全国畜禽肉及其副产品中兽药残留的风险分级

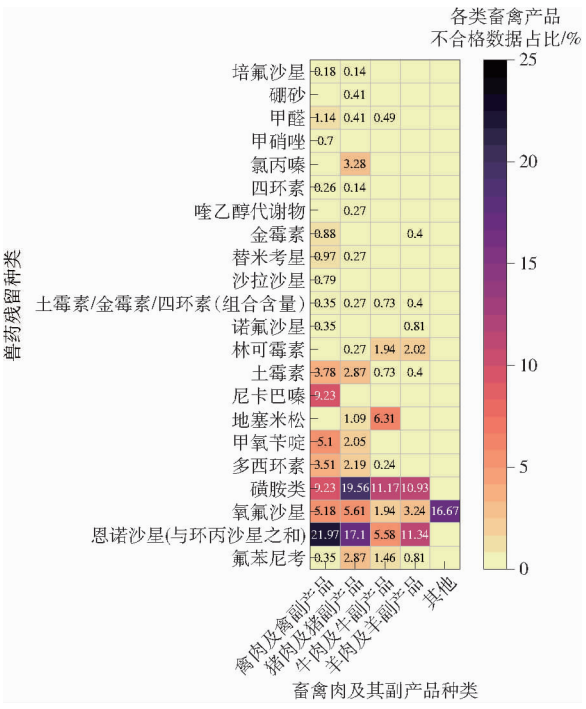

图 7　各类畜禽肉及其副产品的兽药残留不合格占比分析

Fig. 7　Proportion of veterinary drug residues in different types of unqualified livestock and poultry meat and its edible by-products

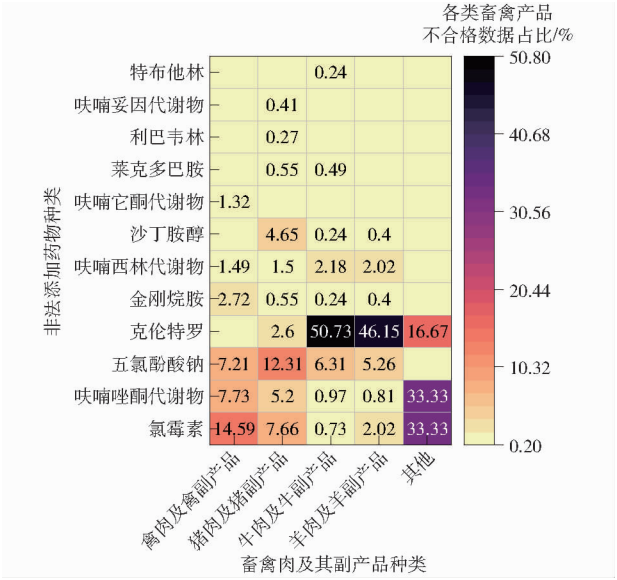

图 8　各类畜禽肉及其副产品的非法添加不合格占比分析

Fig. 8　Proportion of illegal additives in different types of unqualified livestock and poultry meat and its edible by-products

结果如图 9 所示，其中，恩诺沙星、氟苯尼考和氧氟沙星为高风险污染物，表明其在产品中检出的可能性较大，且综合风险最高。虽然氟苯尼考的检出量相对较少，但其风险等级依然较高，说明存在大量超出标准限值的数据。此外，不允许检出的污染物，如

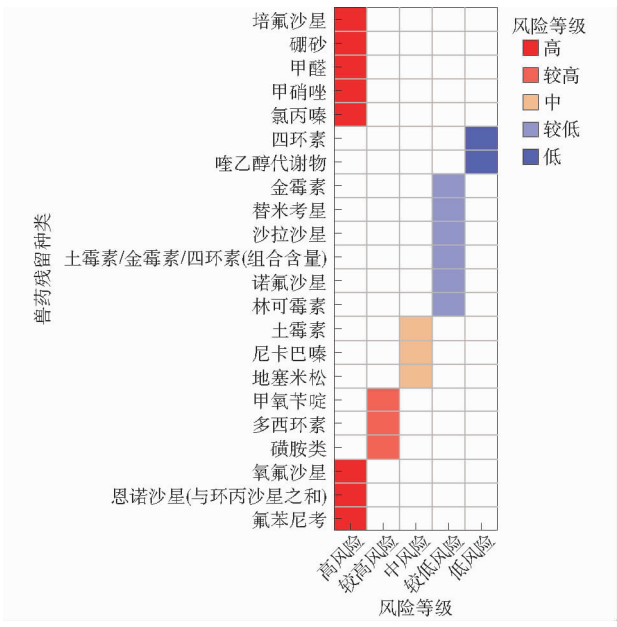

图 9　全国畜禽肉及其副产品的兽药残留污染物风险分级

Fig. 9　Risk ranking of veterinary drug residues in livestock and poultry meat and its edible by-products nationwide

氯丙嗪、甲硝唑、甲醛、硼砂和培氟沙星等一旦被检出，将直接违反食品安全标准，构成严重风险，因此也被评定为高风险。磺胺类、多西环素和甲氧苄啶等为较高风险，作为磺胺类药物的增效剂，甲氧苄啶常与磺胺类药物同时使用，因此具有相似的风险等级[32]。此外，考虑到禁用兽药可能通过食物链而对人体健康造成潜在风险，因此将氯霉素、克伦特罗、呋喃唑酮代谢物、五氯酚酸钠、金刚烷胺、呋喃西林代谢物、沙丁胺醇、呋喃它酮代谢物、莱克多巴胺、利巴韦林、呋喃妥因代谢物、特布他林共 12 种非法添加物也定义为高风险等级。

全国范围内重金属污染物的风险分级结果如图 10 所示，虽然镉的检出量较少，但由于相对风险值、危险商等指标的数值较高，因此被评定为较高风险。图 4 表明，铬仅在两个区域有检出，且数据占比很小，评定为低风险；铅、总汞和总砷均为中风险，这与数据检出结果相符（图 4），例如，总

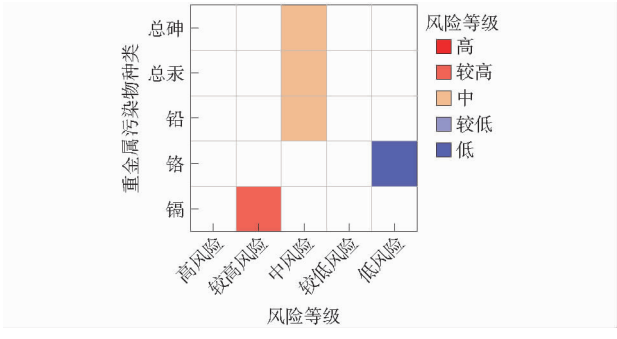

图 10　全国畜禽肉及其副产品的重金属污染物风险分级

Fig. 10　Risk ranking of heavy metals in livestock and poultry meat and its edible by-products nationwide

砷在多个区域均有检出,但整体检出值超出限量不多。

2.2.2 各区域畜禽肉及其副产品中污染物的风险等级

依据 AHP－EWM 法计算得到的各区域畜禽肉及其副产品污染物评价指标的组合权重对污染物评价指标值进行线性加权,得到各区域污染物的风险值,并依据结果划分风险等级,结果如图 11～13 所示。其中,甘肃、湖北、江西、辽宁、内蒙古、西藏的污染物种类少于 5 种,故未纳入分级分析,其他区域则基于检出物种类进行风险划分。

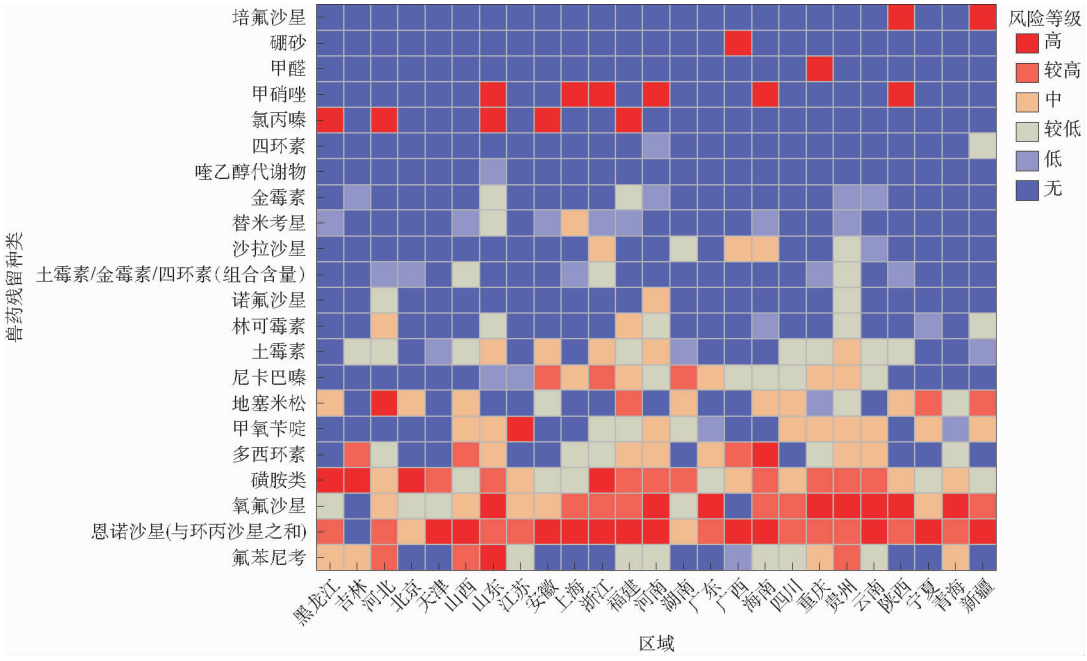

图 11 各区域畜禽肉及其副产品的兽药残留污染物风险分级

Fig. 11 Risk ranking of veterinary drug residues in livestock and poultry meat and its edible by-products in various regions

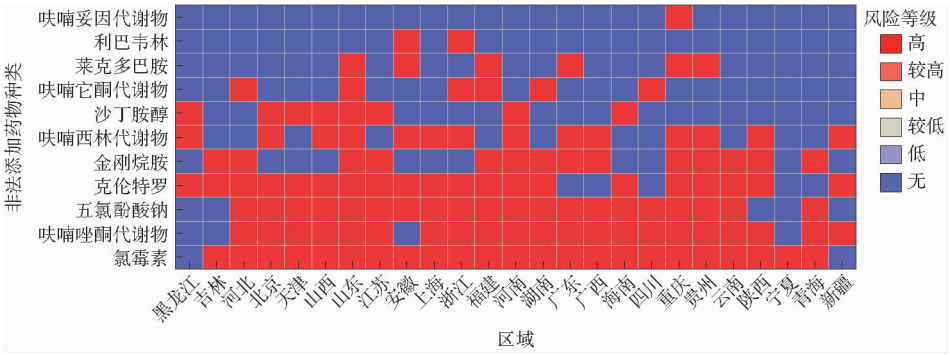

图 12 各区域畜禽肉及其副产品的非法添加污染物风险分级

Fig. 12 Risk ranking of illegal additives in livestock and poultry meat and its edible by-products in various regions

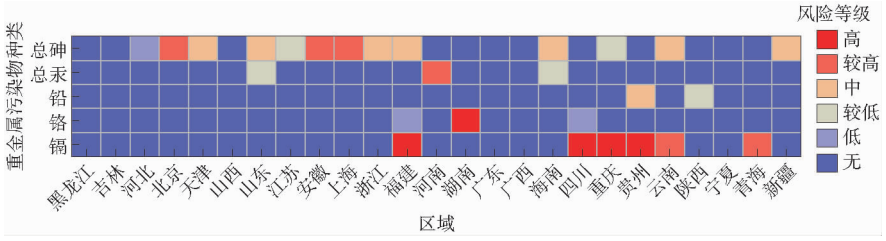

图 13 各区域畜禽肉及其副产品的重金属污染物风险分级

Fig. 13 Risk ranking of heavy metals in livestock and poultry meat and its edible by-products in various regions

不同区域的兽残风险分级结果(图 11)表明,华东区域是兽药残留高风险污染物最为集中的地区,其中山东、江苏、上海、安徽、浙江和福建共出现了 14 种高风险污染物;东北地区(黑龙江、吉林)的兽药残留种类较少,仅磺胺类、氯丙嗪表现为高风险。而恩诺沙星在天津、山西、安徽、上海等地均属于高

风险污染物，相比之下，磺胺类药物在大部分省市的风险等级和影响范围均低于恩诺沙星，这与全国层面磺胺类药物的风险分级结果一致。

虽然山东省的氟苯尼考检出量较小，但其在省内的风险等级依然较高，表明数据的离散程度大，部分结果显著超出限值。类似的情况还出现在河南、广东、云南等省份的氧氟沙星和天津的恩诺沙星数据中。虽然磺胺类药物在河南的检出量较大，但数据离散程度较小，故风险等级为较高。重庆市尼卡巴嗪的情况与此类似。

非法添加物的风险分析如图 12 所示，非法添加物为禁用物质，一旦检出直接赋高风险。克伦特罗、五氯酚酸钠、呋喃唑酮代谢物和氯霉素在 20 余个区域均有检出，整体风险较高。山东出现的非法添加污染物种类最多(9 种)，重庆次之；黑龙江、吉林、宁夏和新疆非法添加物的检出情况较少，这可能也与该地区食品抽检的数量较少有关。

图 13 为不同区域的重金属污染风险分级结果，其中，西南和华东地区是该类污染物检出最多的区域，而福建是检出重金属污染物种类最多的省份。总砷的检出范围最广，在 10 个地区都表现为中等及以上风险；铅和总汞的检出省份最少，镉在福建、重庆、贵州、四川属于高风险，是几种重金属污染物中出现高风险区域最多的污染物。

2.2.3　各类畜禽肉及其副产品中污染物的风险等级

由各类畜禽肉及其副产品污染物的组合权重结果计算各类畜禽产品中不同污染物的风险值，据此进行风险等级划分，结果如图 14 ~ 16 所示。

由各类畜禽肉兽药残留数据的风险分级可知(图 14)，猪肉、禽肉及其副产品的整体风险较高；恩诺沙星和氧氟沙星总体风险偏高；磺胺类在牛肉产品中表现为高风险。虽然氟苯尼考在猪肉及副产品中的检出量较少，但其风险等级高。此外，多西环素在禽类及副产品中也表现为高风险，变异系数大，部分样品的超标情况较严重。氯丙嗪、甲硝唑、甲醛、硼砂、培氟沙星不允许在畜禽产品中检出，为高风险污染物，主要分布在猪肉和禽肉产品中。

在重金属污染物方面(图 15)，镉在各类畜禽肉中的风险最高；总汞和总砷的整体风险相较铅更低。镉、铬及铅 3 种重金属在禽类产品中的风险相对较低。总体而言，重金属污染物的风险等级在不同类别的产品间存在显著差异，需特别关注镉的超标问题。

对于非法添加物(图 16)，各类畜禽肉及其副产品的整体风险状况相似，猪肉产品中高风险污染物最多；氯霉素、呋喃唑酮代谢物、五氯酚酸钠、金刚烷胺和呋喃西林代谢物在所有产品中均有检出，是广

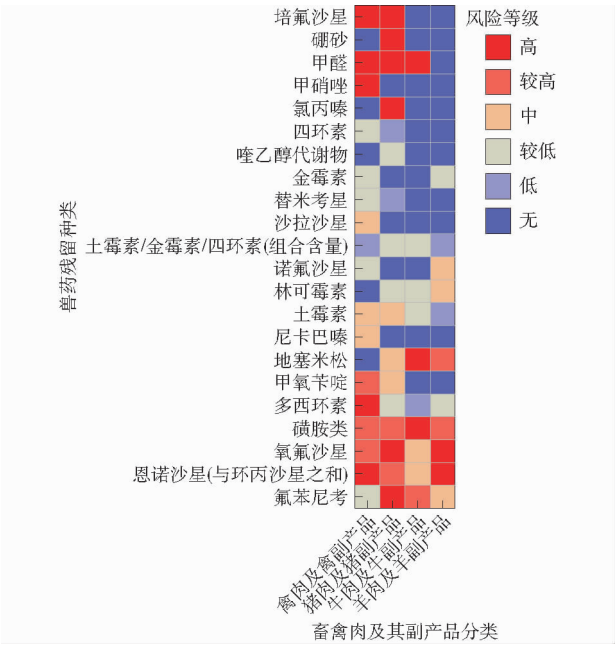

图 14　各类畜禽肉及其副产品的兽药残留污染物风险分级

Fig. 14　Risk ranking of veterinary drug residues in different types of livestock and poultry meat and its edible by-products

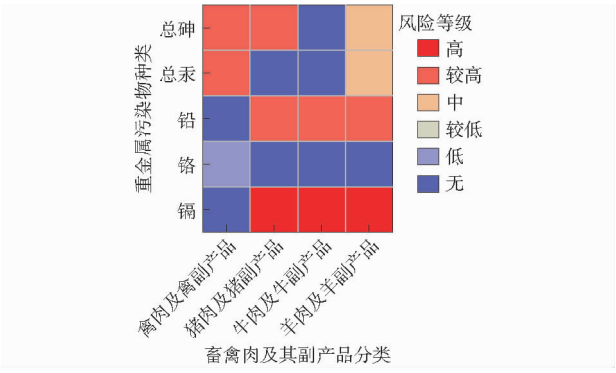

图 15　各类畜禽肉及其副产品的重金属污染物风险分级

Fig. 15　Risk ranking of heavy metals in different types of livestock and poultry meat and its edible by-products

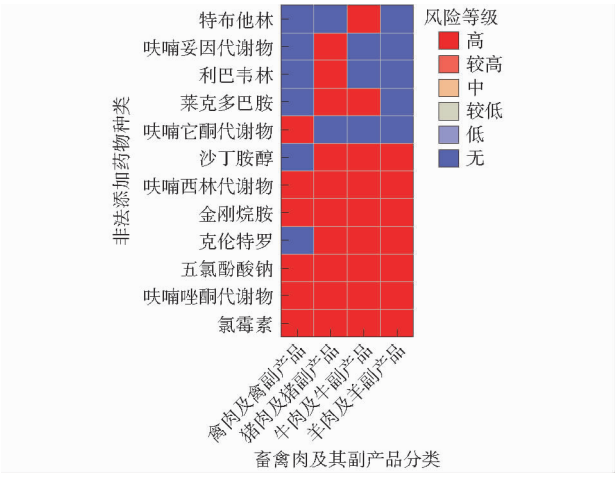

图 16　各类畜禽肉及其副产品的非法添加污染物风险分级

Fig. 16　Risk ranking of illegal additives in different types of livestock and poultry meat and its edible by-products

泛存在的几种污染物。瘦肉精类药物如克伦特罗、沙丁胺醇、莱克多巴胺等出现高风险的情况较多,特别是在畜肉中,瘦肉精类药物的风险防控尤为重要,需加强监管和监测。

2.3 畜禽肉及其副产品不合格数据空间分布特征

对 44 种不合格项的各区域检出数据进行整理,发现部分不合格项(如硼砂、喹乙醇代谢物等)仅在 1 个省份内检出,因此仅选择在多个省份有检出的 38 种不合格项进行空间自相关分析。使用全局和局部莫兰指数分析各区域不合格项的空间自相关性。

2.3.1 全局空间自相关分析

兽药残留的全局莫兰指数结果如表 2 所示,全局莫兰指数 $I>0$ 表明所研究区域存在空间正相关,研究对象的值呈聚集分布;$I<0$ 表明所研究区域存在空间负相关,研究对象的值呈离散分布;当 I 接近于 0 时,表示研究对象随机分布。当统计显著性检验指标 $|Z|>1.96$ 时,证明研究样本在 95% 的置信区间内存在空间自相关[33]。恩诺沙星、氯丙嗪和尼卡巴嗪的全局莫兰指数分别为 0.286 3、0.258 1、0.319 0,Z 值大于 1.96,表明这些污染物具有显著的空间正相关,即高风险地区往往位于彼此相邻的地区,表明该区域的兽药残留风险较为集中,提示这些区域应加强风险防控[34]。相较而言,其余 17 种污染物的全局莫兰指数 P 值均大于 0.05,表明其在地区间的空间分布呈随机状态,不具有空间聚集特征。对于这些污染物,各省市需根据自身的风险情况制定针对性的防控措施。

表 2 畜禽肉及其副产品兽药残留不合格的全局空间自相关分析

Tab. 2 Global spatial autocorrelation analysis of veterinary drug residues in livestock and poultry meat and its edible by-products

序号	污染物	全局莫兰指数	Z	P
1	氟苯尼考	-0.041 3	-0.011 0	0.474
2	恩诺沙星	0.286 3	2.563 4	0.010
3	氧氟沙星	-0.116 1	-0.723 2	0.239
4	磺胺类	-0.087 3	-0.465 1	0.339
5	多西环素	0.006 9	0.394 5	0.303
6	甲氧苄啶	0.167 1	1.783 0	0.058
7	地塞米松	-0.153 6	-1.057 0	0.117
8	尼卡巴嗪	0.319 0	3.007 6	0.010
9	土霉素	0.009 5	0.310 8	0.343
10	林可霉素	-0.124 5	-0.986 8	0.095
11	诺氟沙星	-0.078 9	-0.617 4	0.230
12	土霉素/金霉素/四环素(组合含量)	0.069 7	1.011 5	0.162
13	沙拉沙星	0.153 0	1.583 0	0.082
14	替米考星	-0.087 4	-0.659 2	0.229
15	金霉素	-0.085 5	-0.529 2	0.309
16	四环素	-0.029 4	0.194 7	0.394
17	氯丙嗪	0.258 1	2.944 5	0.024
18	甲硝唑	-0.000 4	0.280 9	0.308
19	甲醛	-0.041 5	-0.162 5	0.426
20	培氟沙星	-0.076 0	-0.515 0	0.374

非法添加物的全局莫兰指数结果如表 3 所示,五氯酚酸钠、克伦特罗、氯霉素和沙丁胺醇的全局莫兰指数分别为 0.215 3、0.491 1、0.184 6 和 0.206 0,且 Z 值大于 1.96,表明这些非法添加物在空间上存在显著的聚集性。相比之下,金刚烷胺不存在显著的空间相关性;呋喃唑酮代谢物(0.122)、呋喃西林代谢物(0.111)、莱克多巴胺(0.461)、利巴韦林(0.087)的 P 值均大于 0.05,其空间分布呈随机状态,无明显的空间自相关性。因此,对于这些非法添加物的防控,各省市应根据本地的具体情况制定相应的政策,而不必依赖区域聚集效应。

表 3 畜禽肉及其副产品中非法添加不合格的全局空间自相关分析

Tab. 3 Global spatial autocorrelation analysis of illegal additives in livestock and poultry meat and its edible by-products

序号	不合格项	全局莫兰指数	Z	P
1	氯霉素	0.184 6	2.098 5	0.031
2	呋喃唑酮代谢物	-0.166 9	-1.134 8	0.122
3	五氯酚酸钠	0.215 3	2.148 4	0.024
4	克伦特罗	0.491 1	4.334 8	0.001
5	金刚烷胺	-0.215 7	-1.588 6	0.047
6	呋喃西林代谢物	0.094 9	1.270 8	0.111
7	沙丁胺醇	0.206 0	2.142 7	0.030
8	呋喃它酮代谢物	-0.026 2	0.087 0	0.415
9	莱克多巴胺	-0.054 0	-0.287 5	0.461
10	利巴韦林	0.048 4	1.561 4	0.087

2.3.2 局部空间自相关分析

局部空间分布可分为“高-高”、“高-低”、“低-高”、“低-低”和“无显著”等 5 种类型[35]。其中,“高-高”聚集表示某地区的污染物占比较高,且周边地区的占比也较高;而“高-低”聚集则表示该地区的污染物占比较高,但周边地区的占比较低[36]。

兽药残留不合格数据的局部空间相关性分析(图 17)表明,土霉素/金霉素/四环素的组合含量不存在局部聚集现象,而恩诺沙星、多西环素、沙拉沙星、土霉素、氯丙嗪、尼卡巴嗪、甲氧苄啶则呈现出显著的“高-高”和“低-低”值聚集。其中,恩诺沙星在西北地区(如甘肃、青海、陕西、宁夏)表现出“高-高”值聚集现象,表明这些地区的恩诺沙星超标情

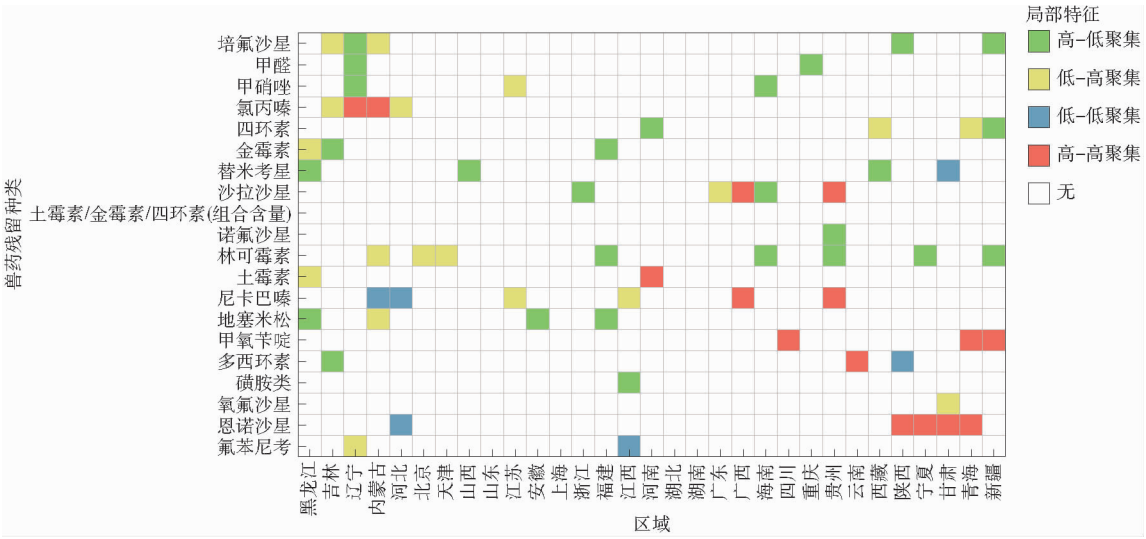

图 17　畜禽肉及其副产品中兽药残留不合格的局部空间自相关分析

Fig. 17　Local spatial autocorrelation analysis of veterinary drug residues in livestock and poultry meat and its edible by-products

况高于全国平均水平，形成了明显的“高-高”聚集。多西环素在云南呈现“高-高”聚集，甲氧苄啶在新疆、青海、四川也呈现类似的空间分布模式。对此，建议依据各区域的风险等级划定重点区域，加强该地区的兽药残留监管。

在非法添加物的空间分析中，呋喃唑酮代谢物、呋喃西林代谢物、克伦特罗、氯霉素也存在“高-高”和“低-低”值聚集现象（图 18）。特别是克伦特罗在东部和中部地区表现为“高-高”聚集，而西部地区则呈现出“低-低”聚集。说明东、中部地区的非法添加物问题更为突出，可能与这些地区更为发达的畜牧业、较高的市场需求以及不规范的监管有密切关系。相比之下，西部地区由于地理环境、生活方式和社会经济发展水平的差异，不合格数据较少。因此，应重点加强东部和中部地区对克伦特罗等非法添加物的风险监控和管理。

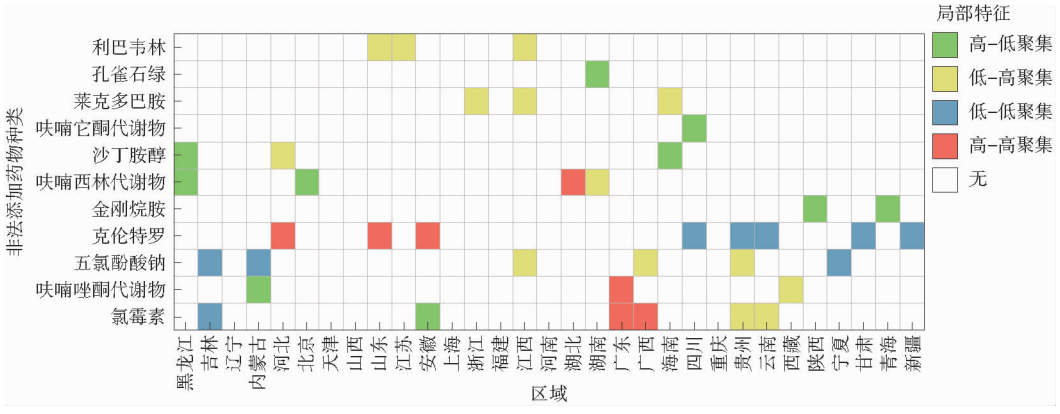

图 18　畜禽肉及其副产品中非法添加不合格的局部空间自相关分析

Fig. 18　Local spatial autocorrelation analysis of illegal additives in livestock and poultry meat and its edible by-products

3　结论

（1）兽药残留和非法添加物是畜禽产品中的主要污染来源，禽肉和猪肉类产品中的兽药残留更为突出。兽药残留污染主要集中在山东、河南和重庆等地区，非法添加物则在河南、湖南、重庆和贵州地区更为集中。

（2）风险分级表明，全国范围内氟苯尼考和氧氟沙星的综合风险最高；华东区域的兽药残留高风险污染物最集中，山东、重庆的非法添加物风险较高，西南地区重金属污染风险偏高；猪肉及禽肉产品的兽药残留风险整体较高，猪肉产品中非法添加物的风险最为突出，镉是各类畜禽肉中风险最高的重金属污染物。

（3）恩诺沙星、氯丙嗪、尼卡巴嗪及 4 种非法添加物的风险呈显著的空间正相关聚集；部分地区的恩诺沙星、多西环素等兽药残留及克伦特罗呈“高-高”值聚集，说明应重点加强相关区域该类风险因子的防控。

参 考 文 献

[1] 付凌晖,叶礼奇. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2023:398 – 399.

[2] 张德权,侯成立. 热鲜肉与冷却肉品质差异之管见[J]. 肉类研究,2020,34(5):83 – 90.
ZHANG Dequan, HOU Chengli. Humble opinion on the quality difference between hot meat and chilled meat[J]. Meat Research, 2020, 34(5): 83 – 90. (in Chinese)

[3] 刘绮琪,张维蔚,李燕,等. 2017—2021 年广州市市售鲜活淡水鱼禁用兽药检出情况分析[J]. 现代预防医学,2024,51(7):1314 – 1319.
LIU Qiqi, ZHANG Weiwei, LI Yan, et al. Analysis on the detection of banned veterinary drugs in freshwater fish sold in Guangzhou from 2017 to 2021[J]. Modern Preventive Medicine, 2024, 51(7):1314 – 1319. (in Chinese)

[4] 关心慧,郑君杰,方芳,等. 基于抽检数据的北京市鸡蛋安全状况分析与对策探析[J]. 中国畜牧杂志,2023,59(6):321 – 325.

[5] 陶莎,胡永康,时爽,等. 基于抽检数据的我国猪肉产品质量安全影响因素分析[J]. 农业机械学报,2021,52(增刊):489 – 495.
TAO Sha, HU Yongkang, SHI Shuang, et al. Analysis of factors influencing quality and safety of pork products from China based on national food spot check data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 489 – 495. (in Chinese)

[6] 王芳,孙晓红,陶光灿. 中国食品安全风险分级研究进展[J]. 食品科学,2021,42(21):271 – 277.
WANG Fang, SUN Xiaohong, TAO Guangcan. Progress in risk ranking for food safety in China[J]. Food Science, 2021, 42(21): 271 – 277. (in Chinese)

[7] 廖盛美,张清海,陶光灿,等. 基于风险分级技术的中国肉制品质量安全演化规律研究[J]. 食品工业科技,2024,45(17):232 – 240.
LIAO Shengmei, ZHANG Qinghai, TAO Guangcan, et al. Research on the evolutionary patterns of quality and safety of meat product in China based on risk ranking technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 232 – 240. (in Chinese)

[8] HAN Y, LIU J, LI J, et al. Novel risk assessment model of food quality and safety considering physical-chemical and pollutant indexes based on coefficient of variance integrating entropy weight[J]. Science of the Total Environment, 2023, 877: 162730.

[9] HAN H, LI X, GU X, et al. Urban rivers health assessment based on the concept of resilience using improved FCM – EWM – MABAC model[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: 110833.

[10] SONG H, LU B, YE C, et al. Fraud vulnerability quantitative assessment of Wuchang rice industrial chain in China based on AHP – EWM and ANN methods[J]. Food Research International, 2021, 140: 109805.

[11] 王现发,陈谊,孙悦红. 基于最优最劣和熵值法的肉制品中重金属污染程度综合评价模型[J]. 食品与机械,2021,37(4):80 – 86.
WANG Xianfa, CHEN Yi, SUN Yuehong. Comprehensive evaluation model of heavy metal pollution in meat products based on best-worst method and entropy method[J]. Food & Machinery, 2021, 37(4):80 – 86. (in Chinese)

[12] ZHU M, YU X, CHEN K, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of chemical oxygen demand emissions in China's wastewater: an analysis based on spatial autocorrelation and geodetector[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112308.

[13] 王芳. 特色食品智能化风险分级模型研究与应用[D]. 贵阳:贵州医科大学,2022.
WANG Fang. Research and application of intelligent risk ranking model for special food products— taking baijiu, tea and chilli in Guizhou Province for examples[D]. Guiyang:Guizhou Medical University, 2022. (in Chinese)

[14] LI S, HE J, SUN J, et al. Risk assessment and spatial analysis of paralytic shellfish toxin (PST) concentrations and acute dietary exposure of commercially available shellfish in coastal areas in China[J]. Food Control, 2024, 160: 110331.

[15] ZHOU P P, LIU Z P, ZHANG L, et al. Methodology and application for health risk classification of chemicals in foods based on risk matrix[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2014, 27(11): 912 – 916.

[16] 孙若文,赵思明,尤娟,等. 基于 4M1E 和 HACCP 的洁蛋全产业链安全控制系统设计与实现[J]. 中国食品学报,2022,22(10):438 – 449.
SUN Ruowen, ZHAO Siming, YOU Juan, et al. The design and implementation of the safety control system for the entire industrial chain of clean eggs based on 4M1E and HACCP[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(10):438 – 449. (in Chinese)

[17] 斗海峰,陈谊,武彩霞,等. 基于改进物元可拓模型的肉制品中化学污染物风险评估方法[J]. 食品科学,2023,44(11):1 – 8.
DOU Haifeng, CHEN Yi, WU Caixia, et al. A risk assessment method of chemical contaminants in meat products based on improved matter-element extension model[J]. Food Science, 2023, 44(11): 1 – 8. (in Chinese)

[18] TRIPATHY V, SHARMA K K, GUPTA R, et al. Simultaneous monitoring and dietary risk assessment of 386 pesticides in

market samples of black tea[J]. Food Chemistry, 2023, 420: 136103.

[19] 陈尚,周少君,邓小玲,等.食品中化学物危害风险分级研究进展[J].中国食品卫生杂志,2017,29(3):374 - 378.
CHEN Shang, ZHOU Shaojun, DENG Xiaoling, et al. Research progress on hazardous risk ranking of chemical substances in food[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2017, 29(3):374 - 378. (in Chinese)

[20] VAN ASSELT E D, HOBÉ R G, HOEK-VAN DEN HIL E F, et al. Risk ranking of chemical hazards in food and feed—a case study in cereals in the Netherlands[J]. Food Control, 2024, 157: 110188.

[21] 程加迁,王俊平.蔬菜水果重金属膳食暴露评估中风险权重的确定方法[J].食品科学,2018,39(1):47 - 52.
CHENG Jiaqian, WANG Junping. A method to determine risk weight in dietary exposure assessment to heavy metals in vegetables and fruits[J]. Food Science, 2018, 39(1): 47 - 52. (in Chinese)

[22] KONG M, YE X, LIU D, et al. Comprehensive evaluation of medical waste gasification low-carbon multi-generation system based on AHP - EWM - GFCE method[J]. Energy, 2024, 296: 131161.

[23] SUN L, LI B, YAO M, et al. Optimising water and nitrogen management for greenhouse tomatoes in Northeast China using EWM - TOPSIS - AISM model[J]. Agricultural Water Management, 2023, 290: 108579.

[24] 李航. 基于组合权重理想点法-数据库的隧洞岩爆预测方法研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.
LI Hang. Research on tunnel rockburst prediction method based on combination weight ideal point method-database[D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing), 2020. (in Chinese)

[25] QU Z, LI T, HOU X, et al. A structural depth network embedding stacking model based on Moran's index and seasonal trend for short-term solar irradiance prediction[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 308: 118397.

[26] HE W, ZHANG K, KONG Y, et al. Reduction pathways identification of agricultural water pollution in Hubei Province, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 153:110464.

[27] 李坤,张梦园,李逸伦,等.云南石林风景区石漠化自然恢复过程中植被覆盖度及空间格局演变[J].生态学杂志,2025,44(5):1626 - 1635.
LI Kun, ZHANG Mengyuan, LI Yilun, et al. Dynamics of fractional vegetation coverage and vegetation spatial pattern in natural restoration process of rocky desertification in Yunnan Shilin Geopark[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(5): 1626 - 1635. (in Chinese)

[28] 周广亚. 国内市售猪肉和食用植物油危害因素的风险评估研究[D].上海:上海大学,2021.
ZHOU Guangya. Risk assessment for hazard factors of pork and edible vegetable oil sold in China[D]. Shanghai:Shanghai University, 2021. (in Chinese)

[29] CAI J, KWAN M P. Detecting spatial flow outliers in the presence of spatial autocorrelation[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2022, 96: 101833.

[30] 沈亚芳.磁分离型纳米生物传感器用于家禽食源性致病菌和抗生素残留检测[D].杭州:浙江大学,2021.
SHEN Yafang. Magnetic separation-based nanobiosensors for detection of foodborne pathogen and antibiotic residues in poultry [D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2021. (in Chinese)

[31] 翁史昱,李清清,张欣如.2018—2020 年上海市畜禽肉及副产品和鲜蛋抽检情况分析及建议[J].中国食品卫生杂志,2023,35(4):559 - 563.
WENG Shiyu, LI Qingqing, ZHANG Xinru. Analysis and suggestion of sampling inspection of livestock, poultry meat and its by-products and fresh eggs in Shanghai from 2018 to 2020[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(4):559 - 563. (in Chinese)

[32] DAN A, YANG Y, DAI Y, et al. Removal and factors influencing removal of sulfonamides and trimethoprim from domestic sewage in constructed wetlands[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 363 - 370.

[33] GEDAMU W T, PLANK-WIEDENBECK U, WODAJO B T. A spatial autocorrelation analysis of road traffic crash by severity using Moran's I spatial statistics: a comparative study of Addis Ababa and Berlin cities[J]. Accident Analysis & Prevention, 2024, 200: 107535.

[34] WANG S, TIAN Q, CHEN X, et al. Study of the evolving relationship between tourism development and cultural heritage landmarks in the eight Chengyang scenic villages in China[J]. Ecological Indicators, 2024, 167: 112702.

[35] DENG Y, LING Z, JIANG W. Urban water bodies in China: spatial distribution patterns, temporal change characteristics, and relationship with economic development[J]. Ecological Indicators, 2023, 157: 111139.

[36] AI M, CHEN X, YU Q. Spatial correlation analysis between human disturbance intensity (HDI) and ecosystem services value (ESV) in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111555.