

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250508002

引用格式: 杨志敏, 李运, 薛华丽, 等. 市售动物性食品中农药残留分析及其风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 28–36.

YANG ZM, LI Y, XUE HL, *et al.* Analysis and risk assessment of pesticide residues in commercially animal-derived foods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 28–36. (in Chinese with English abstract).

市售动物性食品中农药残留分析及其风险评估

杨志敏¹, 李运¹, 薛华丽^{2*}, 李少斌³, 潘秀丽¹, 李坚¹, 吴福祥¹, 邵长春¹

[1. 兰州市食品药品检验检测研究院, 国家市场监督管理总局重点实验室(食品中农药兽药残留监控), 兰州 730050; 2. 甘肃农业大学理学院, 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学动物科学技术学院, 兰州 730070]

摘要: 目的 对市售动物性食品中的农药残留进行风险评估。**方法** 通过气相色谱-串联质谱法测定了460批动物性食品中146种农药, 采用食品安全指数(food safety index, IFS)法和膳食风险评估模型对动物性食品中检出的农药残留进行风险评估。**结果** 样品的整体检出率为48.9%, 共检出农药24种, 主要是杀虫剂, 以低中等毒性为主。检出样品中, 水产品类中的检出率最高, 其他依次为蛋类>畜肉类>禽肉类; 检出农药数量依次为水产品类>畜肉类>禽肉类>蛋类, 其中水产品中以氟铃脲、二甲戊灵、滴滴涕、乐果、氟乐灵、噻呋酰胺和甲萘威居多, 畜肉以二苯胺、灭线磷和啶酰菌胺, 禽类主要是啶酰菌胺, 蛋类以氟虫脲为主。IFS结果显示, 所有农药的平均安全指数(\overline{IFS})为0.000001~0.010021, 远小于1, 其在动物性食品中的整体安全状况是可接受的; 膳食风险评估结果显示, 4类动物性食品中各个检出农药的慢性膳食摄入风险(acceptable daily intake, %ADI)值均远小于100%, 危害商(hazard quotient, HQ)和危害指数(hazard index, HI)均远小于1, 其风险水平均在可接受范围内。**结论** 市售动物性食品存在农药残留现象, 虽然检出的农药残留总体风险较低, 均在可接受范围内, 但今后应将检出率高的样品和农药作为重点监管对象, 为动物性食品的安全提供保障。

关键词: 动物性食品; 农药残留; 食品安全指数; 膳食风险评估

Analysis and risk assessment of pesticide residues in commercially animal-derived foods

YANG Zhi-Min¹, LI Yun¹, XUE Hua-Li^{2*}, LI Shao-Bin³, PAN Xiu-Li¹, LI Jian¹,
WU Fu-Xiang¹, SHAO Chang-Chun¹

(1. Lanzhou Institute for Food and Drug Control, Key Laboratory of Pesticide and Veterinary Drug Monitoring, State Administration for Market Regulation, Lanzhou 730050, China; 2. College of Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT: Objective To assess the risks of pesticide residues of animal-derived foods in commercial market.

收稿日期: 2025-05-08

基金项目: 甘肃省市场监督管理局科技计划项目(SSCJG-SP-A202308); 兰州市青年科技人才创新项目(2023-QN-186, 2023-QN-180); 兰州市科技发展指导性计划项目(2023-ZD-234, 2024-9-227)

第一作者: 杨志敏(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为外源性污染物质的检测分析。E-mail: yzmljh@163.com

*通信作者: 薛华丽(1977—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为采后生物学与技术和食品质量与安全。E-mail: xuehuali77@sina.com

Methods The 146 kinds of pesticides were determined in 460 batches of animal foods by gas chromatography-tandem mass spectrometry. The risk of pesticide residues detected in animal foods was evaluated by food safety index (IFS) method and dietary risk assessment model. **Results** The overall detection rate of the sample was 48.9%, and a total of 24 kinds of pesticides were detected, primarily insecticides, with low and moderate toxicity being the main characteristic. Among the detected samples, the number of detected pesticides was the highest in aquatic products, followed by eggs, livestock meat and poultry meat. Among the detected pesticides, the largest number of pesticides were detected in aquatic products, followed by livestock meat, poultry meat and eggs. The pesticides in aquatic products were mostly hexaflumuron, pendimethalin, DDT, dimethoate, trifluralin, thifluzamide and carbaryl. While the livestock meat was mainly diphenylamine, ethoprophos and boscalid, the poultry was mainly boscalid, and the eggs were mainly fipronil. The results of IFS showed that the average safety index (\overline{IFS}) of all pesticides was 0.000001–0.010021, which was far less than 1. The overall safety status of all pesticides in animal foods was acceptable. The results of dietary risk assessment indicated that acceptable daily intake (%ADI) of each detected pesticide in the 4 types of animal-derived foods were far less than 100%, and the hazard quotient (HQ) and hazard index (HI) were far less than 1. The risk level of these pesticide residues of animal foods was within the acceptable range. **Conclusion** There are pesticide residues in animal-derived foods. Although the overall risk of pesticide residues detected in animal-derived foods is relatively low and within an acceptable range, however, samples and pesticides with high detection rates should be the focus of supervision to ensure the safety of animal-derived foods in the future.

KEY WORDS: animal-derived foods; pesticide residues; food safety index; dietary risk assessment

0 引言

动物性食品是人们日常饮食的重要组成部分。化学农药会通过饲料、饮水、消毒、杀虫害等途径传递、富集引入到动物性食品中,进而残留在动物性食品中。随着人们生活水平的提升,对动物性食品的需求增加,伴随其农药残留的问题成为了关注的焦点。目前报道的农药残留主要集中在蔬菜、水果和中药材等植物性食品中^[1-3],在动物性食品中的报道不多,主要集中在水产品中,经查阅文献,动物性食品中涉及残留的农药有有机磷^[4]、有机氯^[5-6]、拟除虫菊酯类^[7-8]、琥珀酸脱氢酶抑制剂^[9]及其他农药^[10]等,这不仅影响产品质量,还会导致人畜中毒,甚至引发食用者的患病风险。

风险评估是食品质量安全评价、标准制定和风险管理理论依据,全面系统地监测动物性食品中的农药残留,并评价其对人体健康带来的潜在安全风险是非常必要的。国内外针对植物性食品中农药残留风险评估^[11-12]和动物性食品中兽药残留风险评估^[13-14]的相关研究已有很多,但对动物性食品中农药残留风险评估的研究非常有限,多数是检测方法和检出情况的研究。目前食品中农药残留风险评估的方法主要有食品安全指数(food safety index, IFS)法^[15-16]、危害物风险系数法^[15-17]、点评估法^[18]、膳食暴露风险评估法^[19]、综合评估法^[20]等。

IFS法结合了食品中污染物的残留水平和居民膳食暴露量,以量化形式表达食品中污染物对人体健康的危害程度,目前IFS法在食品中污染物风险评估的应用较为广泛。覃东立等^[21]利用IFS法对东北地区稻田养殖的中华绒螯蟹中的9种农药进行了健康风险评价,发现所有农药的IFS和平均安全指数(\overline{IFS})均远小于1,均在安全水平范围内。点评估法是我国农药残留膳食暴露风险评估中较为经典的暴露评估模型,该模型较为简单,是将食品中的消费量和农药残留含量设为固定值进行暴露计算,适用于污染物的初步筛选研究。袁娜^[22]利用估计暴露量(estimated exposure dose, EED)法和风险商(risk quotient, RQ)对鲫鱼组织中的二甲戊灵进行膳食风险评估,结果显示所有鱼类中二甲戊灵的EED和RQ值均低于评价指标,二甲戊灵的慢性膳食暴露风险是可以接受的。危害指数(hazard index, HI)法是最常用的累积暴露风险的评估方式,已被运用在各类食品中污染物数据的评估中^[11-12,23],通常用于计算长期接触食品中污染物的情况。HUSSEIN等^[24]使用目标危害商(target hazard quotient, THQ)法和HI法对水产品可食用组织中有机氯农药残留进行健康风险评估,结果发现,所有受检样品中有机氯的危害商(hazard quotient, HQ)和HI均小于1,其累积暴露风险均是可接受的。

为了避免单一评估方法主观性和方法本身局限性对评估结果的影响,本研究采用IFS法和膳食风险评估模型对动物性食品中检出农药进行风险评估,明确动物性食品

中需要重点监控的样品品种和农药种类,为保障动物性食品的质量安全和人体健康提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

供试样品均为市售样品:畜肉类(猪肉、牛肉和羊肉)、禽肉类(鸡肉和鸭肉)、蛋类(鸡蛋)和水产品类(鱼肉、虾类、贝类)共 460 批。

146 种农药标准品(纯度 $\geq 95\%$,天津阿尔塔科技有限公司);QuEChERS EN-提取包、SPE EMR-Lipid 净化管(美国 Agilent 科技有限公司);乙酸乙酯、乙腈(色谱纯,德国 Merck 公司);丙酮(色谱纯,科密欧化学试剂有限公司)。

Agilent 7890B GC-7000D 气相色谱-串联质谱仪(美国 Agilent 科技有限公司);Milli-Q 超纯水机(美国 Millipore 公司);AUTO-EVA-60 全自动平行浓缩仪(睿科集团股份有限公司);5810R 高速低温离心机(德国 Eppendorf 公司);VORTEX-5 涡旋混匀器(海门其林贝尔公司)。

1.2 检测方法

参照杨志敏等^[25]方法测定 460 批动物性样品中 146 种农药残留量。样品测定时,通过与标准品的保留时间和离子丰度比比对进行定性分析,检测结果根据 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》判定,对于尚未制定最大残留限量值(maximum residue limit value, MRL)农药的检测结果暂不判定。

1.3 风险评估

1.3.1 食品安全指数法

采用 IFS 法对动物性食品中的 24 种农药残留进行评估。计算公式(1)~(3)如下:

污染物的摄入量按照公式(1)计算:

$$EDI_c = R_i \times F_i \times E_i \times P_i \quad (1)$$

式中: c 为检出农药; i 为动物性食品的种类; 每日估计摄入量(estimated daily intake, EDI_c)为农药的实际摄入量估算值; R_i 为动物性食品中农药的残留量, mg/kg; F_i 为动物性食品估计摄入量, g/(人·d)。参照《2024 中国统计年鉴》发布的甘肃地区城镇居民家庭人均主要食品消费量中的最新数据(2023 年)计算得到人均日消费量: 肉类为 78.1 g/(人·d), 其中猪肉为 49.9 g/(人·d), 牛肉和羊肉均为 8.8 g/(人·d), 禽肉为 15.6 g/(人·d), 鸡蛋为 30.7 g/(人·d), 水产品为 13.7 g/(人·d)。 E_i 为动物性食品的可食用部分因子, $E_i = 1$; P_i 为动物性食品的加工处理因子, $P_i = 1$ 。

污染物的 IFS 按照公式(2)计算:

$$IFS = (EDI_c \times f) / (SI_c \times bw) \quad (2)$$

式中: SI_c 为农药 c 的安全摄入量, 具体参照 GB 2763—2021 中每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)

值, mg/kg bw; bw 为成人平均体重, 依据《食品中化学物风险评估原则和方法》中成年人平均体重以 60 kg 计; f 为农药安全摄入量的校正因子, $f = 1$ 。

污染物的 IFS 平均值按照公式(3)计算:

$$\overline{IFS} = \frac{\sum_i^n IFS}{n} \quad (3)$$

式中: \overline{IFS} 为污染物的 IFS 平均值; n 为样品数量。IFS 评估模型以 IFS 值的平均值 \overline{IFS} 反映食品中农药残留的整体安全状态, 若 $\overline{IFS} \leq 1$ 表示检出农药对食品安全影响低, 在可接受范围内; 若 $\overline{IFS} > 1$ 表示检出农药对食品安全的影响超出了可接受的限度。

1.3.2 膳食摄入风险评估

膳食摄入风险评估是国际用来评价各农药膳食摄入风险的通用指标, 包括慢性和急性膳食摄入风险评估。动物性食品摄入量一般低于蔬菜、水果等植物性食品的摄入量, 农药残留量一般较低, 因此, 本研究仅对慢性膳食摄入进行风险评估。点评估法是常用的膳食摄入风险评估方法, 膳食暴露量(dietary exposure, EXP)是结合食物中的污染物残留值与膳食消费量数据通过统计学估计所得, 膳食暴露量的计算公式(4)如下:

$$EXP = (\bar{X} \times P) / bw \quad (4)$$

式中: EXP 为某种农药的膳食暴露量, mg/(kg d); \bar{X} 为某种农药残留的平均残留值, mg/kg; P 为某种食品中的消费量, kg, 参照全国居民人均主要食品消费量最新数据计算得到人均日消费量(单位: $\times 10^{-3}$ kg): 畜肉类为 109.0, 禽肉类为 33.97, 蛋类为 41.10, 水产品为 41.64。

慢性膳食摄入风险(acceptable daily intake, %ADI)以 ADI 值进行风险评估, 当 %ADI $\leq 100\%$ 时, 则风险可接受; 反之, 则风险不可接受。%ADI 计算公式(5)如下:

$$\%ADI = EXP \times 100 / ADI \quad (5)$$

1.3.3 累积风险评估

HQ 是各个目标农药的膳食暴露量 EXP 与 ADI 的比值。HI 法是用于评价农药残留的联合污染对人体健康所带来的风险, 是用于初步筛查污染物常用的累积暴露评估方法。HQ 和 HI 分别用公式(6)~(7)计算:

$$HQ = EXP / ADI \quad (6)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i \quad (7)$$

当 $HQ \leq 1$ 或 $HI \leq 1$ 时, 认为该种农药残留对人体的累积暴露风险是可接受的; 当 $HQ > 1$ 或 $HI > 1$ 时, 则该农药残留引入的风险是不可接受的。

1.4 数据处理

本研究采用 Agilent MassHunter 软件对目标化合物进行定性和定量分析, 实验数据采用 Excel 2011 软件进行统计分析并制表绘图, 实验次数为 3 次。

2 结果与分析

2.1 动物性食品中农药残留情况

2.1.1 动物性食品中农药检出情况

采用建立的方法对 460 批动物性食品(畜肉类 168 批、禽肉类 30 批、蛋类 49 批、水产品类 213 批)中的 146 种农药残留进行测定(表 1)。结果发现, 4 类样品中均有农药检出, 样品整体检出率 48.9%(共检出样品 225 批), 其中水产品类中的检出率(75.6%)最高, 其他样品检出率的顺序为蛋类(28.6%)>畜肉类(26.8%)>禽肉类(16.7%); 共检出农药 24 种(其中六六六、滴滴涕、氟虫腈均以残留物之和计), 其中水产品中检出农药种数(22 种)最多, 其他依次为畜肉类(11 种)>禽肉类(3 种)>蛋类(2 种); 在检出的农药中, 水产品中农药含量范围为 0.0001~17.1464 mg/kg, 其中以氟铃

脲、二甲戊灵、滴滴涕、乐果、氟乐灵、噻呋酰胺和甲萘威居多, 畜肉中的农药含量范围为 0.0001~0.0784 mg/kg, 主要是二苯胺、灭线磷和啶酰菌胺, 蛋类的农药含量范围为 0.0007~0.0069 mg/kg, 以氟虫腈为主, 禽肉类的农药含量范围为 0.0019~0.0036 mg/kg, 以啶酰菌胺为主。在 9 种不同的样品中, 水产品中检出率最高的是贝类(高达 97.3%), 其次为鱼肉类(81.2%); 畜肉中检出率高的是猪肉(40.2%); 禽肉中检出率高的是鸭肉(40.0%); 鸡蛋中主要检出农药为氟虫腈(28.6%); 从检出的农药数量来看, 受污染严重的主要是鱼肉、贝类和猪肉。综上可知, 动物性食品中农药残留污染较多的是水产品中的贝类和鱼肉、其次为猪肉和鸡蛋, 鸭肉的检出率虽然高, 但是可能与实验的样本量有关, 不能很准确地反映出其真实情况, 今后需要重点关注水产品中的农药残留。

表 1 动物性食品中农药残留检出率、检出农药种类和数量
Table 1 Detection rates, types and quantities of pesticides detected in animal-derived food

大类	样品大类(4 类)			样品品种(9 种)				
	样品 检出率/%	检出农 药数量	检出农药种类	品种	样品 检出率/%	检出农药 数量	检出农药种类	含量范围/(mg/kg)
畜肉类	26.8 (45/168)	11	氟铃脲、滴滴涕、啶酰菌胺、氟虫腈、二苯胺、灭线磷、增效醚、腐霉利、戊唑醇、六六六、联苯菊酯	猪肉	40.2 (39/97)	9	氟铃脲、4,4-滴滴涕、2,4-滴滴涕、4,4-滴滴涕、啶酰菌胺、氟虫腈、二苯胺、灭线磷、增效醚	0.0002~0.0784
				牛肉	10.5 (2/19)	2	氟铃脲、腐霉利	0.0013~0.0036
				羊肉	7.7 (4/52)	3	戊唑醇、 β -六六六、联苯菊酯	0.0001~0.0047
禽肉类	16.7 (5/30)	3	氟铃脲、啶酰菌胺、氟虫腈	鸡肉	12.0 (3/25)	3	氟铃脲、啶酰菌胺、氟虫腈	0.0026~0.0036
				鸭肉	40.0 (2/5)	2	氟铃脲、啶酰菌胺	0.0019~0.0021
蛋类	28.6 (14/49)	2	氟铃脲、氟虫腈	鸡蛋	28.6 (14/49)	2	氟铃脲、氟虫腈	0.0007~0.0069
水产品	75.6 (161/213)	22	氟铃脲、氟乐灵、莠去津、甲基异柳磷、二甲戊灵、滴滴涕、噻呋酰胺、磷酸三苯酯、啶酰菌胺、氰戊菊酯、氟虫腈、毒死蜱、虫螨腈、灭线磷、六六六、甲萘威、六氯苯、乐果、增效醚、二苯胺、噻呋酰胺、啉菌酯	鱼肉	81.2 (121/149)	25	氟铃脲、氟乐灵、莠去津、氟甲腈、甲基异柳磷、二甲戊灵、氟虫腈、4,4-滴滴涕、噻呋酰胺、2,4-滴滴涕、4,4-滴滴涕、磷酸三苯酯、啶酰菌胺、氰戊菊酯、氟虫腈、毒死蜱、虫螨腈、灭线磷、 β -六六六、 γ -六六六、甲萘威、六氯苯、乐果、4,4-滴滴涕、增效醚	0.0001~17.1464
				虾类	14.8 (4/27)	2	氟铃脲、甲萘威	0.0010~0.1086
				贝类	97.3 (36/37)	12	氟铃脲、氟乐灵、二甲戊灵、4,4-滴滴涕、噻呋酰胺、4,4-滴滴涕、磷酸三苯酯、甲萘威、乐果、4,4-滴滴涕、二苯胺、啉菌酯	0.0001~0.3508

注: 参照 GB 2763—2021, 滴滴涕以 4,4-滴滴涕、2,4-滴滴涕、4,4-滴滴涕、4,4-滴滴涕之和计; 氟虫腈以氟虫腈、氟甲腈、氟虫腈砒、氟虫腈硫醚之和计; 六六六以 α -六六六、 β -六六六、 γ -六六六、 δ -六六六之和计。

2.1.2 动物性食品中农药残留毒性、功能类别及其含量水平

由表 2 结果发现, 测定 460 批动物性样品中 146 种农药残留的总检测频次为 67160 次, 其中检出农药残留的频次为 409 次(检出频次总占比为 0.61%), 检出频次最高的农药是氟铃脲, 其次为滴滴涕、二甲戊灵、乐果, 其余农药的检出率均低于 5.4%。动物性食品中的检出农药的毒性以低、中毒为主, 占比 92.9%; 主要功能是杀虫剂(占比 64.3%), 其次为杀菌剂(17.9%); 检出农药的类别主要是有机氮类农药(42.9%), 其次为有机氯(25.0%)和有机磷(14.3%)。所有农药的平均含量范围为 0.0000~0.0646 mg/kg, 检出农药的平均残留水平为 0.0003~0.4805 mg/kg。参照 GB 2763—2021 中 MRL 值, 检出的农药中有 13 种农药在部分样品中有限量值规定, 其余农药均无限量规定。二甲戊灵主要在水产品中检出, 但在我国标准中尚无 MRL 规定, 参照日本规定的鱼肉中 MRL (0.3 mg/kg), 有 2 个样品超标, 其含量分别为 2.1698 mg/kg 和 17.1464 mg/kg; 氟铃脲在水产品的检出频次高, 其中个别样品的含量水平较高, 但目前我

国家标准暂无氟铃脲的限量规定; 鸡蛋中主要检出的农药为氟虫腈, 其中有 1 个样品含量为 0.0211 mg/kg, 超过了我国标准的 MRL 值(0.02 mg/kg); 其余农药均未超过限量标准, 或者无限量标准规定而无法判定是否超标。综合表 2 结果, 需加强鱼肉中二甲戊灵, 鸡蛋中氟虫腈等的监控, 加快制定鱼肉中氟铃脲的限量标准, 同时也要重点关注检出频次高的农药。

2.2 食品风险评估结果

2.2.1 食品安全指数法结果

根据《中国统计年鉴》中查到的 2023 年甘肃地区城镇居民家庭主要动物性食品人均日消费量分别计算得到 EDI_c, 参照 GB 2763—2021 中规定的 ADI 值, 其中磷酸三苯酯和六氯苯未规定 ADI 值, 氟虫腈、滴滴涕和六六六的农药残留以残留物之和表示, 通过计算得到每种农药的 IFS。表 3 结果显示, \overline{IFS} 的范围为 0.000001~0.010021, 远小于 1, 表明动物性食品中检测出的农药残留对人体健康所产生的风险在可接受范围内。

表 2 动物性食品中农药残留水平、毒性、功能及化合物类别
Table 2 Pesticide residue levels, toxicity, function and compound categories in animal-derived food

序号	检出农药	检出频次	检出率 /%	检测农药的含量 /(mg/kg)	平均含量 /(mg/kg)	毒性	功能	种类
1	氟铃脲	94	23.0	0.0001~6.4421	0.0646	低毒	杀虫剂	有机氮类
2	滴滴涕	50	12.2	0.0001~0.0401	0.0004	中毒	杀虫剂	有机氯
3	二甲戊灵	43	10.5	0.0010~17.1464	0.0449	中毒	除草剂	有机氮类
4	乐果	37	9.0	0.0001~0.0171	0.0002	中毒	杀虫剂	有机磷
5	二苯胺	22	5.4	0.0002~0.0509	0.0002	低毒	杀虫剂	有机氮类
6	甲萘威	21	5.1	0.0002~0.3191	0.0036	中毒	杀虫剂	氨基甲酸酯类
7	氟乐灵	20	4.9	0.0088~0.4535	0.0018	低毒	除草剂	有机氮类
8	噻呋酰胺	19	4.6	0.0026~0.0065	0.0002	低毒	杀菌剂	有机氮类
9	氟虫腈	19	4.6	0.0011~0.0211	0.0002	中毒	杀虫剂	有机氮类
10	啶酰菌胺	14	3.4	0.0019~0.0039	0.0001	低毒	杀菌剂	有机氮类
11	灭线磷	13	3.2	0.0003~0.0006	0.0000	剧毒	杀虫剂	有机磷
12	嘧菌酯	6	1.5	0.0020~0.0041	0.0000	低毒	杀菌剂	有机氮类
13	磷酸三苯酯	5	1.2	0.0002~0.0888	0.0003	低毒	增塑剂	有机磷
14	六六六	3	0.7	0.0001~0.0067	0.0000	中毒	杀虫剂	有机氯
15	戊唑醇	2	0.5	0.0047~0.0048	0.0000	中毒	杀菌剂	有机氮类
16	氰戊菊酯	2	0.5	0.0218~0.0248	0.0000	中毒	杀虫剂	拟除虫菊酯类
17	毒死蜱	2	0.5	0.0054~0.0065	0.0000	中毒	杀虫剂	有机磷
18	增效醚	2	0.5	0.0005~0.0012	0.0000	低毒	增效剂	其他
19	莠去津	1	0.2	0.0044	0.0000	低毒	除草剂	有机氮类
20	甲基异柳磷	1	0.2	0.0005	0.0000	高毒	杀虫剂	其他
21	腐霉利	1	0.2	0.0036	0.0000	低毒	杀菌剂	有机氮类
22	虫螨腈	1	0.2	0.0029	0.0000	中毒	杀虫剂	有机氮类
23	联苯菊酯	1	0.2	0.0003	0.0003	中毒	杀虫剂	拟除虫菊酯类
24	六氯苯	1	0.2	0.0006	0.0006	低毒	杀虫剂	有机氯

表 3 动物性食品中检出农药的安全指数
Table 3 Safety index of pesticides detected in animal-derived food

检出农药	ADI 值 (mg/kg bw)	EDI _c /μg	IFS (×10 ⁻³)	IFS (×10 ⁻³)	风险程度
氟铃脲	0.0200	0.0014~88.2565	0.0012~73.5471	3.636	可接受
滴滴涕	0.0100	0.0014~1.4768	0.0024~2.4613	0.126	可接受
二甲戊灵	0.1000	0.0139~234.9052	0.0023~39.1509	1.097	可接受
乐果	0.0020	0.0010~0.2344	0.0081~1.9536	0.303	可接受
二苯胺	0.0800	0.0080~0.6978	0.0017~0.1454	0.019	可接受
甲萘威	0.0080	0.0025~4.3714	0.0053~9.1071	2.254	可接受
氟乐灵	0.0250	0.1206~6.2124	0.0804~4.1416	0.380	可接受
噻呋酰胺	0.0140	0.0361~0.0897	0.0429~0.1067	0.071	可接受
氟虫腴	0.0002	0.0146~0.2891	1.2134~24.0946	10.021	可接受
啶酰菌胺	0.0400	0.0289~0.1947	0.0120~0.0811	0.044	可接受
灭线磷	0.0004	0.0044~0.0305	0.1835~1.2725	0.853	可接受
嘧菌酯	0.2000	0.0278~0.0566	0.0023~0.0047	0.003	可接受
磷酸三苯酯	—	0.0028~1.2165	—	—	—
戊唑醇	0.0300	0.0414~0.0416	0.0230~0.0231	0.023	可接受
氰戊菊酯	0.0200	0.2986~0.3394	0.2488~0.2829	0.266	可接受
毒死蜱	0.0100	0.0747~0.0892	0.1244~0.1487	0.137	可接受
六六六	0.0050	0.0009~0.0916	0.0029~0.3053	0.154	可接受
增效醚	0.2000	0.0167	0.0014	0.001	可接受
莠去津	0.0200	0.0597	0.0497	0.050	可接受
甲基异柳磷	0.0030	0.0062	0.0343	0.034	可接受
腐霉利	0.1000	0.0317	0.0053	0.005	可接受
虫螨腈	0.0300	0.0395	0.0219	0.022	可接受
联苯菊酯	0.0100	0.0039	0.0065	0.006	可接受
六氯苯	—	0.0088	—	—	—

注: —表示 GB 2763—2021 中未规定 ADI 值, 表 4 同。

2.2.2 膳食风险评估结果

目前对动物性食品中农药残留的膳食暴露风险评估的相关研究较为有限, 本研究以 4 类动物性食品中检出的农药为研究对象, 对其残留量进行膳食摄入风险评估和

HQ 评价(表 4)。结果显示, 畜肉、禽肉、鸡蛋和水产品中各个检出农药的%ADI 均远小于 100%, HQ 均远小于 1, 可见, 通过摄入动物性食品所残留的这些农药, 其风险水平均在可接受范围内。

表 4 动物性食品中检出农药的膳食风险评估
Table 4 Assessment of dietary risk of pesticides detected in animal-derived food

样品种类	农药名称	检出频次	\bar{X} /(mg/kg)	EXP /(mg/kg d)	%ADI	HQ	HI
畜肉	二苯胺	20	0.000964	1.752E-06	2.190E-03	2.190E-05	4.210E-02
	灭线磷	11	0.000468	8.499E-07	2.125E-01	2.125E-03	
	啶酰菌胺	6	0.003730	6.776E-06	1.694E-02	1.694E-04	
	氟铃脲	4	0.020761	3.772E-05	1.886E-01	1.886E-03	
	滴滴涕	3	0.029595	5.376E-05	5.376E-01	5.376E-03	
	戊唑醇	2	0.004720	8.574E-06	2.858E-02	2.858E-04	
	腐霉利	1	0.003607	6.552E-06	6.552E-03	6.552E-05	
	联苯菊酯	1	0.000283	5.134E-07	5.134E-03	5.134E-05	
	增效醚	1	0.000455	8.262E-07	4.131E-04	4.131E-06	
	氟虫腴	1	0.003532	6.416E-06	3.208E+00	3.208E-02	
	六六六	1	0.000098	1.784E-07	3.568E-03	3.568E-05	

表 4(续)

样品种类	农药名称	检出频次	\bar{X} /(mg/kg)	EXP /(mg/kg d)	%ADI	HQ	HI
禽肉	啉酰菌胺	3	0.002511	1.423E-06	3.558E-03	3.558E-05	9.796E-03
	氟铃脲	1	0.002561	1.451E-06	7.257E-03	7.257E-05	
	氟虫脞	1	0.003419	1.938E-06	9.688E-01	9.688E-03	
鸡蛋	氟虫脞	13	0.004239	2.904E-06	1.452E+00	1.452E-02	2.605E-02
	氟铃脲	1	0.336737	2.307E-04	1.153E+00	1.153E-02	
水产品	氟铃脲	88	0.000733	5.084E-07	2.542E-03	2.542E-05	3.918E-02
	滴滴涕	47	0.003419	2.371E-06	2.371E-02	2.371E-04	
	二甲戊灵	43	0.480535	3.332E-04	3.332E-01	3.332E-03	
	乐果	37	0.002656	1.841E-06	9.207E-02	9.207E-04	
	甲萘威	21	0.078963	5.475E-05	6.843E-01	6.843E-03	
	氟乐灵	20	0.041591	2.884E-05	1.153E-01	1.153E-03	
	噻呋酰胺	19	0.004365	3.027E-06	2.162E-02	2.162E-04	
	啉菌酯	6	0.002851	1.977E-06	9.885E-04	9.885E-06	
	啉酰菌胺	5	0.003683	2.554E-06	6.384E-03	6.384E-05	
	磷酸三苯酯	5	0.024489	1.698E-05	—	—	
	氟虫脞	4	0.006627	4.595E-06	2.297E+00	2.297E-02	
	二苯胺	2	0.037039	2.568E-05	3.210E-02	3.210E-04	
	灭线磷	2	0.000342	2.371E-07	5.926E-02	5.926E-04	
	氰戊菊酯	2	0.023284	1.614E-05	8.072E-02	8.072E-04	
	毒死蜱	2	0.005981	4.146E-06	4.146E-02	4.146E-04	
	六六六	2	0.006684	4.635E-06	9.269E-02	9.269E-04	
	增效醚	1	0.000839	5.814E-07	2.907E-04	2.907E-06	
	莠去津	1	0.004355	3.019E-06	1.510E-02	1.510E-04	
	甲基异柳磷	1	0.000450	3.121E-07	1.040E-02	1.040E-04	
	虫螨脞	1	0.002882	1.998E-06	6.661E-03	6.661E-05	
联苯菊酯	1	0.000283	1.959E-07	1.959E-03	1.959E-05		
六氯苯	1	0.000645	4.469E-07	—	—		

2.2.3 动物性食品中农药残留的 HI 结果

从图 1 可以看出, 4 类动物性食品的联合 HI 均远远小于 1, 这些农药的联合污染对人体的风险均处于安全水平范围内, 但是还应加强这些检出农药的监管, 为动物性食品的安全提供保障。

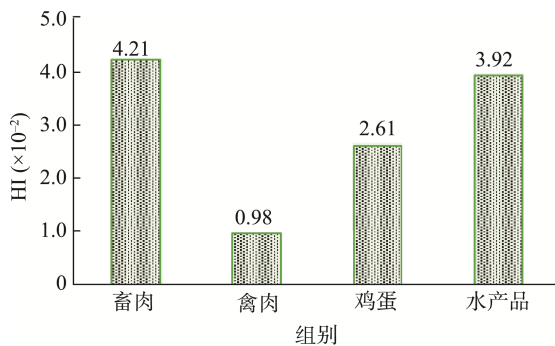


图 1 动物性食品中农药残留的 HI

Fig.1 HI of pesticide residues in animal-derived food

3 讨论

本研究检测的 4 类动物性样品中, 水产品中农药的检出率最高, 为 75.6%, 其中检出农药中有有机氯为 4,4-滴滴伊、2,4-滴滴涕、4,4-滴滴涕、4,4-滴滴滴、 β -六六六、 γ -六六六、六氯苯, 这与黄晓丽等^[26]报道的东北地区养殖淡水鱼中有机氯农药种类相似; 黄丽等^[27]在研究哈尔滨郊区池塘养殖鱼类中六六六和滴滴涕发现, 鱼类中主要以 γ -六六六为主, 其次为 α -六六六, 这与本研究中发现的 β -六六六和 γ -六六六不一致, 但是 HCH 最终以 4 种同分异构体加和计算, DDT 以 4,4-滴滴伊为主, 这与本研究一致。本研究中检出最多的农药为氟铃脲, 但是相关报道鲜见, 还有水产品中的二甲戊灵也是常检出农药, 这与袁娜^[22]、杨秋红等^[28]和彭汝林等^[29]报道的水产品中存在二甲戊灵残留的结果一致。彭汝林等^[29]在基围虾中检出异丙威, 本研究在鱼肉、虾类和贝类中均检出甲萘威, 这可能与养殖地区、

气候、鱼的种类以及养殖方式等有关。李蔚然^[30]对 7 种动物性食品中 43 种农药残留进行检测, 样品的整体检出率为 5.46%, 这与样品品种及样本量等因素有关; 鸡蛋中农药检出率为 20%, 与本研究中检出率 28.6%略有差异, 但是主要农药是氟虫腈和氟甲腈, 这与本研究的结果相一致。总之, 本研究对动物性食品中农药残留分析可为今后关于这方面的研究提供参考, 同时还需要着重关注水产品、鸡蛋等食品中的农药残留状况。

4 结 论

本研究对市售的 460 批动物性样品中 146 种农药残留进行检测分析, 结果发现, 4 类样品中均有农药检出, 样品检出率为 48.9%, 其中水产品中鱼肉和贝壳类样品中农药的检出率最高, 其次是畜肉中的猪肉、鸡蛋和鸭肉。共检出农药 24 种, 主要是杀虫剂, 毒性以低、中毒为主。检出频次高的农药是水产品中的氟铃脲、二甲戊灵、滴滴涕、乐果、甲萘威、氟乐灵和噻呋酰胺, 畜肉中的二苯胺和灭线磷, 鸡蛋中的氟虫腈, 部分农药没有国家标准的 MRL 规定而无法判定其是否超标。

采用 IFS 法和膳食风险评估模型对 460 批样品中检出农药的风险评估结果表明, 动物性食品中虽存在农药残留现象, 但是残留含量均处于较低水平, 风险评估的结果都在人体健康安全可接受范围内。尽管如此, 今后仍需相关部门重点关注水产品、猪肉和鸡蛋这些动物性食品中残留的农药状况, 加大抽检力度, 进行多维度的风险评价, 为限量标准的制定提供参考。

参 考 文 献

- [1] 杨志敏, 薛华丽, 李坚, 等. 分散固相萃取净化与气相色谱-串联质谱法同时测定蔬菜中 157 种农药残留[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(5): 304-313.
YANG ZM, XUE HL, LI J, *et al.* Determination of 157 pesticide residues in vegetables by using dispersive solid phase extraction purification coupled with gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(5): 304-313.
- [2] 杨志敏, 朱仁愿, 薛华丽, 等. 改良 QuEChERS-气相色谱质谱联用法测定金银花中农药残留[J]. 分析实验室, 2023, 42(1): 49-56.
YANG ZM, ZHU RY, XUE HL, *et al.* A modified QuEChERS-gas chromatography-mass spectrometry method for the determination of pesticide residues in *Lonicera japonica* Flos [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2023, 42(1): 49-56.
- [3] 杨志敏, 张文, 吴福祥, 等. 气相色谱-三重四极杆质谱动态多反应监测模式测定枸杞干果中 118 种农药残留[J]. 色谱, 2021, 39(6): 659-669.
YANG ZM, ZHANG W, WU FX, *et al.* Determination of 118 pesticide residues in dried wolfberry by gas chromatography-triple quadrupole mass spectrometry in dynamic multiple reaction monitoring mode [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2021, 39(6): 659-669.
- [4] 李华, 姜巧娟. 多壁碳纳米管-气相色谱检测猪、牛、羊肉中 11 种有机磷农药残留[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 174-178.
LI H, JIANG QJ. Determination of 11 organophosphorus pesticide residues in pigs, cattle and mutton by multiwall carbon nanotube gas chromatography [J]. Food Research and Development, 2019, 40(6): 174-178.
- [5] 吕冰, 陈达炜, 苗虹. 凝胶渗透色谱-固相萃取净化/气相色谱-串联质谱法测定动物性食品中 167 种农药残留[J]. 分析测试学报, 2015, 34(6): 639-645.
LV B, CHEN DW, MIAO H. Determination of 167 pesticide residues in animal-originated foodstuffs by combined purification of gel permeation chromatography and solid-phase extraction coupled with gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2015, 34(6): 639-645.
- [6] 杜娟, 吕冰, 朱盼, 等. 凝胶渗透色谱-固相萃取联合净化气相色谱-质谱联用法测定动物性食品中 30 种有机氯农药的残留量[J]. 色谱, 2013, 31(8): 739-746.
DU J, LV B, ZHU P, *et al.* Determination of 30 organochlorine pesticides in animal originated food products using combined purification by gel permeation chromatography and solid phase extraction coupled with gas chromatography mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2013, 31(8): 739-746.
- [7] 李洁, 鞠香, 王艳丽, 等. QuEChERS 在线凝胶渗透色谱净化-气相色谱-串联质谱法高通量筛查动物源性食品中的多农药残留[J]. 色谱, 2023, 41(7): 610-621.
LI J, JU X, WANG YL, *et al.* High-throughput screening of multi-pesticide residues in animal derived foods by QuEChERS-online gel permeation chromatography-gas chromatography tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2023, 41(7): 610-621.
- [8] 李婷婷, 张勋, 付瑶, 等. 气相色谱-串联质谱法同时测定可食用动物猪、牛和羊及淡水鱼中 12 种拟除虫菊酯类农药的残留量[J]. 化学试剂, 2017, 39(1): 41-45, 90.
LI TT, ZHANG X, FU Y, *et al.* Determination of 12 pyrethroid pesticides in livestock and freshwater fish of edible living animals by gas chromatography mass spectrometry [J]. Chemical Reagents, 2017, 39(1): 41-45, 90.
- [9] 李敏青, 陈姿竹, 李菊, 等. QuEChERS-高效液相色谱-串联质谱法同时测定动物源性食品中 21 种琥珀酸脱氢酶抑制剂类杀菌剂的残留量[J]. 分析科学学报, 2024, 40(5): 501-510.
LI MQ, CHEN ZZ, LI J, *et al.* QuEChERS high performance liquid chromatography Tandem mass spectrometry for determination of 21 succinate dehydrogenase inhibitor fungicides in animal foods [J]. Journal of Analytical Science, 2024, 40(5): 501-510.
- [10] 李萍. 动物源性食品中新型农药残留检测方法研究及初步膳食暴露评估[D]. 成都: 西华大学, 2024.
LI P. Study on new methods for the detection of pesticide residues in food of animal origin and preliminary dietary exposure assessment [D]. Chengdu: Xihua University, 2024.
- [11] 杨志敏, 许淑琴, 张文, 等. 甘肃枸杞中农药残留水平分析及风险评估[J]. 农产品质量与安全, 2019(5): 44-48.
YANG ZM, XU SQ, ZHANG W, *et al.* Analysis and risk assessment of pesticide residue levels in Goji Berry from gansu province [J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2019(5): 44-48.

- [12] 常巧英, 杨志敏, 白若镁, 等. GC/LC-Q/TOF MS 测定当归中农药残留及膳食风险评估[J]. 分析测试学报, 2024, 43(2): 292-300.
CHANG QY, YANG ZM, BAI RB, *et al.* Analysis and risk assessment of pesticide residues in *Angelica Sinensis* by GC/LC-Q/TOF MS [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2024, 43(2): 292-300.
- [13] 王佳琪, 李剑军, 皇金龙, 等. 呼伦贝尔地区畜肉兽药残留及膳食风险评估[J]. 当代畜禽养殖业, 2024, 44(6): 29-32.
WANG JQ, LI JJ, HUANG JL, *et al.* Assessment of animal and veterinary drug residues and dietary risks in Hulunbeier region [J]. Modern Animal Husbandry, 2024, 44(6): 29-32.
- [14] 曹爱巧, 韩银涛, 张玲, 等. 深圳市动物产品中喹诺酮类兽药累积风险评估[J]. 畜牧与兽医, 2024, 56(11): 57-62.
CAO AIQ, HAN YT, ZHANG L, *et al.* Cumulative risk assessment of quinolone veterinary drugs in animal products in Shenzhen [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2024, 56(11): 57-62.
- [15] 梁晓涵, 林敏, 万娜, 等. 基于食品安全指数法和危害物风险系数法评估海南芹菜的农药残留风险[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 112-121.
LIANG XH, LIN M, WAN N, *et al.* Risk assessment of pesticide residues in celery in Hainan based on food safety index and hazard risk coefficient method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 112-121.
- [16] 马新耀, 刘娇, 李伟, 等. 基于食品安全指数法和危害物风险系数法评估山西省韭菜中农药残留的风险[J]. 中国蔬菜, 2022(7): 92-97.
MA XY, LIU J, LI W, *et al.* Risk evaluation of pesticide residues in leeks in Shanxi Province based on food safety index and hazard risk coefficient method [J]. China Vegetables, 2022(7): 92-97.
- [17] JIANG Y, ZHUANG MQ, XIAO PR, *et al.* Pesticide residues and dietary risk assessment in radishes in Shandong [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(10): 4751-4760.
- [18] 吴晓丽, 赵毕, 齐小娟, 等. 食品中化学污染物风险评估方法研究进展[J]. 预防医学, 2020, 32(7): 682-685.
WU XL, ZHAO B, QI XJ, *et al.* Review on the risk assessment methods for chemical pollutants in food [J]. China Preventive Medicine Science, 2020, 32(7): 682-685.
- [19] 田耿智, 白新明, 刘晓庆, 等. 农药残留风险评估在蔬菜水果和食用菌监测中的应用研究[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 402-413.
TIAN GZ, BAI XM, LIU XQ, *et al.* Study on the application of a risk assessment method of pesticide residues in vegetables and fruits and edible fungus monitoring [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(2): 402-413.
- [20] 王建忠, 郭春景, 吴限鑫. 综合安全评估(FSA)法在芹菜农药残留安全评估中的应用[J]. 中国蔬菜, 2020(3): 61-66.
WANG JZ, GUO CJ, WU XX. Application of FSA in safety assessment of celery pesticide residue [J]. China Vegetables, 2020(3): 61-66.
- [21] 覃东立, 黄晓丽, 高磊, 等. 东北稻渔综合种养模式下中华绒螯蟹农药残留水平及健康风险评估[J]. 南方水产科学, 2018, 14(6): 89-98.
QIN DL, HUANG XL, GAO L, *et al.* Investigation and risk assessment of organochlorine and pyrethroid pesticide residues in cultured freshwater fish, Northeast China [J]. South China Fisheries Science, 2018, 14(6): 89-98.
- [22] 袁娜. 二甲戊灵在鲫鱼组织和养殖水体中的残留分布、代谢消减及膳食风险评估[D]. 锦州: 渤海大学, 2021.
YUAN N. Residual distribution, metabolism reduction and dietary risk assessment of pendimethalin in crucian carp tissues and aquaculture water [D]. Jinzhou: Bohai University, 2021.
- [23] MARICA ES, FEDERICA S, CHIARA C, *et al.* Monitoring of seven pesticide residues by LC-MS/MS in extra virgin olive oil samples and risk assessment for consumers [J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138498.
- [24] HUSSEIN MA, HAMMAD OS, THARWAT AE, *et al.* Health risk assessment of organochlorine pesticide residues in edible tissue of seafood [J]. Frontiers in Veterinary Science, 2022, 9: 1042956.
- [25] 杨志敏, 薛华丽, 潘秀丽, 等. 增强型脂质去除分散固相萃取净化-气相色谱-串联质谱法测定动物性食品中146种农药残留[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 114-121.
YANG ZM, XUE HL, PAN XL, *et al.* Determination of 146 kinds of pesticide residues in animal derived food by enhanced matrix removal-lipid dispersion solid phase extraction purification coupled with gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 114-121.
- [26] 黄晓丽, 高磊, 汤施展, 等. 东北地区养殖淡水鱼有机氯和拟除虫菊酯农药残留及健康风险评估[J]. 中国渔业质量与标准, 2022, 12(2): 1-9.
HUANG XL, GAO L, TANG SZ, *et al.* Investigation and risk assessment of organochlorine and pyrethroid pesticide residues in cultured freshwater fish, Northeast China [J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2022, 12(2): 1-9.
- [27] 黄丽, 高磊, 郝其睿, 等. 哈尔滨郊区池塘养殖鱼类六六六和滴滴涕残留特征及食用健康风险[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4867-4874.
HUANG L, GAO L, HAO QR, *et al.* Residues characteristics and edible health risks of hexachlorocyclohexane and dichlorodiphenyltrichloroethane in pond cultured fish in the suburbs of Harbin [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(15): 4867-4874.
- [28] 杨秋红, 刘欢, 邹谱心, 等. 高效液相色谱-三重四极杆质谱法测定克氏原螯虾中二甲戊灵残留[J]. 色谱, 2018, 36(6): 552-556.
YANG QH, LIU H, ZOU PX, *et al.* Determination of pendimethalin residues in *Procambarus clarkii* by high performance liquid chromatography-triple quadrupole mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Chromatography, 2018, 36(6): 552-556.
- [29] 彭汝林, 曾婷, 朱雨田, 等. QuEChERS 结合气相色谱-串联三重四极杆质谱快速测定水产品中100种农药残留[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 278-286.
PENG RL, ZENG T, ZHU YT, *et al.* Rapid determination of multiple pesticide residues in aquatic products by QuEChERS and gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(8): 278-286.
- [30] 李蔚然. 动物源性食品中农药最大残留限量标准再评估研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
LI WR. Chinese academy of agricultural sciences thesis [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2022.

(责任编辑: 安香玉 于梦娇)