DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260109008
**引用格式**: 代永霞, 田丽君. 2024 年内蒙古市售畜类肝脏和肾脏中微量元素监测及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 148–155.
Dai Yongxia, Tian Lijun. Monitoring of trace elements and health risk assessment of commercially available livestock liver and kidney products in Inner Mongolia in 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 148–155. (in Chinese with English abstract).

# 2024 年内蒙古市售畜类肝脏和肾脏中微量元素监测及健康风险评价

代永霞, 田丽君*
(赤峰市疾病预防控制中心, 赤峰 024000)

**摘 要: 目的** 了解内蒙古部分地区市售羊和猪的肝脏和肾脏微量元素含量并对其安全性进行评价。**方法** 在内蒙古部分地区的农贸市场和超市随机抽取羊和猪的肝脏和肾脏, 微波消解后用电感耦合等离子体质谱法测定铅、镉、总砷、总汞、钡、铜、锰、硒、铬和镍含量, 并进行统计分析, 结合单因子污染指数、靶标危害指数、致癌指数进行暴露风险评价。**结果** 肾脏和肝脏中锰、硒、铜和镉含量有显著性差异($P$<0.05); 羊肝和猪肝中铜、总砷、硒有显著性差异($P$<0.05); 羊肾与猪肾中 10 种元素含量无显著性差异($P$>0.05)。羊肝中铜污染指数、猪肝和猪肾中硒单因子污染指数大于 1, 达到重度污染水平; 猪肝、猪肾、羊肝的重金属内梅罗综合污染指数处于轻度污染水平; 羊肾的重金属内梅罗综合污染指数为 0.59, 处于安全等级内, 累计靶标危害系数和致癌系数均在安全范围内。**结论** 内蒙古地区羊和猪的肝肾中有害重金属元素整体水平较低, 只有 3 份样品中镉超标, 微量元素含量丰富, 但肝脏的铜、肾脏硒元素含量太高, 具有潜在食品安全风险, 需进一步明确污染源头,做好持续监测与风险评价。通过研究内蒙古地区羊和猪的肝脏和肾脏微量元素含量并对其安全性进行评价, 指导人们合理搭配膳食, 保证微量元素的合理摄入。

**关键词:** 微量元素; 微波消解; 电感耦合等离子体质谱法; 肝脏; 肾脏
**中图分类号:** R151.4+1 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)13–0148–08

## Monitoring of trace elements and health risk assessment of commercially available livestock liver and kidney in Inner Mongolia in 2024

DAI Yong-Xia, TIAN Li-Jun*
(*Chifeng Center for Disease Control and Prevention*, *Chifeng* 024000, *China*)

**ABSTRACT: Objective** To understand the content of trace elements in the livers and kidneys of sheep and pigs sold in some areas of Inner Mongolia and evaluate their safety. **Methods** Randomly selected the livers and kidneys of sheep and pigs from the marketplaces and supermarkets in some areas of Inner Mongolia. After microwave

**收稿日期:** 2026-01-09
**第一作者:** 代永霞(1976—), 女, 副主任技师, 主要研究方向为食品、水质、生物材料理化检验。E-mail: Dyx_760318@163.com
***通信作者:** 田丽君(1983—), 女, 硕士, 副主任医师, 主要研究方向为疾病预防和食品检测质量控制。E-mail: cfscdczkk@163.com

digestion, determined the content of lead, cadmium, total arsenic, total mercury, barium, copper, manganese, selenium, chromium and nickel using inductively coupled plasma mass spectrometry. Statistical analysis was conducted, exposure risk assessment was carried out in combination with single-factor pollution index, target hazard index and carcinogenicity index. **Results**　There were significant differences in the content of manganese, selenium, copper and cadmium in the kidneys and livers ($P$<0.05); there were significant differences in copper, total arsenic and selenium in sheep liver and pig liver ($P$<0.05); there were no significant differences in the content of 10 kinds of elements in sheep kidney and pig kidney ($P$>0.05). The copper pollution index in sheep liver, the single-factor pollution index of selenium in pig liver and pig kidney were greater than 1, reaching the severe pollution level; the comprehensive pollution index of heavy metals such as Nemerol in pig liver, pig kidney and sheep liver was at a slightly polluted level. The comprehensive pollution index of heavy metal Nemerol in sheep kidneys was 0.59, which was within the safety level. The cumulative target hazard coefficient and carcinogenicity coefficient were both within the safe range. **Conclusion**　The overall levels of harmful heavy metal elements in the liver and kidneys of sheep and pigs in the Inner Mongolia region are relatively low, with only 3 samples exceding the cadmium limit. cadmium. The content of trace elements is abundant, but the copper content in the liver and the selenium content in the kidneys are too high, posing potential food safety risks. Further identification of the pollution source is necessary, along with continuous monitoring and risk assessment. By studying the content of trace elements in the liver and kidneys of sheep and pigs in the Inner Mongolia region and evaluating their safety, this research aims to guide people in reasonable dietary combinations and ensure the reasonable intake of trace elements.

**KEY WORDS:** trace elements; microwave digestion; inductively coupled plasma mass spectrometry; liver; kidney

## 0　引　言

动物肝脏和肾脏具有丰富的蛋白质、维生素及钙、铁、锌、硒等矿物质, 是儿童、老年人、哺乳期妇女等人群重要的膳食补充剂。为提高动物的生长速度, 在饲料的生产过程中加入动物需要各种微量元素, 在畜禽体内尤其是肝脏和肾脏中蓄积, 人食用后转移到体内[1]。重金属积累到一定程度会对人体健康产生威胁, 主要影响人体的神经系统、肝肾、心血管系统、免疫系统, 甚至致癌[2−4]。铜(Cu)、锰(Mn)、镍(Ni)、硒(Se)、三价铬(Cr)是必需微量元素, 作为生命体不可或缺的营养物质, 对维持细胞功能、调节渗透压及酶活性等具有重要作用[5]。铜参与体内多种酶的代谢反应, 尤其在维持内分泌系统稳定方面发挥重要作用[6], 摄入过量的铜会引起胃肠道问题, 并伴有恶心、腹泻和呕吐症状[7]。锰可以调节血糖, 在骨骼生长中具有重要的作用[8], 锰缺乏会导致婴儿先天缺陷、骨生长受损等症状[9]; 过度摄入锰会使机体组织产生神经毒性, 从而患上帕金森病[10]。硒可提高抗氧化防御能力、免疫功能、甲状腺激素代谢和生殖功能方面发挥着重要作用[11], 摄过量可能引起头发和指甲脱落等硒中毒症状[12]。三价铬参与人体内糖脂代谢, 是必需微量元素, 与代谢综合征密切相关, 缺乏会引起肥胖, 甚至糖尿病等疾病, 超标则会引起人体内循环紊乱, 影响人体健康[13]。镍缺乏也会导致生长发育缓慢[14], 使体内多种酶的活性下降, 糖代谢紊乱[15], 当镍摄入量超过 250 mg/d 时, 可发生人体中毒[16]。钡是人体非必需营养元素, 但啮齿类动物长期研究证实, 钡暴露量与肾毒性有关, 摄入过量可引起低血钾、导致恶性心率失常[17]。当前, 国内研究畜类肝脏和肾脏微量元素文章检索显示近 5 年来内蒙古地区这类研究较少。本研究通过检测内蒙古部分地区猪和羊的肝和肾中的微量元素含量, 采用单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价法, 结合相关畜禽肝脏和肾脏限量标准对市售猪和羊的肝脏和肾脏中铅(Pb)、镉(Cd)、总砷(As)、总汞(Hg)、Cr、钡(Ba)、Cu、Mn、Ni、Se 等 10 种元素污染现状进行综合评价、为制定更完善的监管标准提供参考依据, 防范于未然, 对保障食品安全具有重要的意义。

## 1　材料与方法

### 1.1　样品采集

从内蒙古锡林郭勒盟、鄂尔多斯市、呼伦贝尔市、赤峰市、包头市农贸市场和超市采集畜肝和肾各 10 份, 采用四分法缩分后, 制成匀浆样品。

### 1.2　仪器与试剂

MARS Xpress 微波消解仪(美国 CEM 公司); AL204DU-IC 电子天平(精度 0.0001 g, 瑞士梅特勒-托利多仪器有限公司); 7900 电感耦合等离子质谱仪、5183-4688 多元素混合标准溶液、8500-6940-HG 汞标准物

质、5188-6525 混合内标溶液(质量浓度 100 μg/mL)(美国安捷伦科技有限公司); 硝酸[电子纯, 默克投资(中国)有限公司]。

### 1.3 样品测定

称取约 0.5 g 样品于微波消解管内, 加 8 mL 硝酸, 在微波消解仪中消解 50 min, 取出后赶酸至约 0.5 mL, 转移至 10 mL 容量瓶, 定容后用电感耦合等离子质谱仪测定 Pb、Cd、总 As、Cr、Cu、Ni、总 Hg、Mn、Se、Ba 的含量。

### 1.4 评价方法

#### 1.4.1 污染程度评价

肝脏和肾脏某一元素污染程度采用单因子污染指数法($P_i$), 内梅罗综合污染指数法($P_c$)评估多种有害因素的污染程度, 综合反映元素污染的整体状况[18], 按公式(1)和(2)分别计算。

$$P_i=\frac{C_i}{S_i} \tag{1}$$

式中: $P_i$ 为元素 $i$ 的单项污染指数; $C_i$ 为元素实测浓度, mg/kg; $S_i$ 为元素标准限量, mg/kg。

$$P_c=\sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2+P_{\max}^2}{2}} \tag{2}$$

式中: $P_c$ 为内梅罗综合污染指数; $P_{\text{ave}}$ 为单项污染指数的平均值; $P_{\max}$ 为单项污染指数的最大值。污染程度评价按 $P_i$ 和 $P_c$ 的数值进行分级, 见表 1。

**表 1 分级标准**

**Table 1 Grading criteria**

| $P_i$ | 等级 | $P_c$ | 等级 |
|---|---|---|---|
| $P_i\leqslant 0.2$ | 清洁 | $P_c\leqslant 0.7$ | 安全 |
| $0.2<P_i\leqslant 0.6$ | 轻微污染 | $0.7<P_c\leqslant 1.0$ | 警戒线 |
| $0.6<P_i\leqslant 1.0$ | 中度污染 | $1.0<P_c\leqslant 2.0$ | 轻度污染 |
| $P_i>1.0$ | 重度污染 | $2.0<P_c\leqslant 3.0$ | 中度污染 |
| | | $P_c>3.0$ | 重度污染 |

#### 1.4.2 重金属健康风险评价

(1)非致癌风险

采用靶标危害系数法来评价人体长期接触食物中污染物产生的潜在非致癌风险, 通过检测食物中污染物的含量来估算人体暴露的健康风险, 使用靶标危害系数(target hazard quotient, THQ)评价单一有害元素的非致癌风险, 以累计靶标危害系数(total target hazard quotient, TTHQ)来评价多种有害元素的综合非致癌风险, 按公式(3)和(4)分别计算。

$$\text{THQ}=\frac{C\times \text{EF}\times \text{ED}\times \text{IR}\times \text{CF}}{\text{RfD}_0\times \text{BW}\times \text{AT}} \tag{3}$$

$$\text{TTHQ}=\sum_{i=1}^{n}\text{THQ}_i \tag{4}$$

式中: $C$ 为元素含量, mg/kg; ED 为持续暴露时间, 采用人均预期寿命为 76 岁计算[19], $a$ 为 EF 为暴露频率, 365 d/a; CF 为单位转换因子, $10^{-3}$ kg/g; WB 为成人平均体重, 61.8 kg[20]; AT 为接触时间, 27740 d; $\text{RfD}_0$ 为经口暴露的参考剂量, mg/(kg • d), 见表 2; IR 为每日食品摄入量, 宋波等[26]曾假设居民猪肝和猪肾摄入量与猪肉摄入量的比值等于脏器系数, 据此推算我国居民消费猪肝和猪肾的量。畜肉的消费量依据《2024 年内蒙古统计年鉴》居民猪肉的年消费量 25.08 kg/人 • 年, 牛羊肉消费量 12.0 kg/人 • 年, 都按羊肉计算, 可计算出猪肉人均消费量为 68.71 g/人 • d, 羊肉消费量为 32.88 g/人 • d。猪肝和猪肾的脏器系数(%) (脏器系数=脏器重/体重×100%)平均值分别是 1.14 和 0.52[26], 羊肝和羊肾的脏器系数(%)平均值分别为 1.27 和 0.32[27], 可以推算出内蒙古居民猪肝、猪肾的消费量分别为 0.783 g/(人 • d)和 0.357 g/(人 • d), 羊肝、羊肾消费量分别为 0.418 g/(人 • d)和 0.105 g/(人 • d)。

公式(3)经简化为公式(5)。

$$\text{THQ}=\frac{C\times \text{IR}\times 10^{-3}}{\text{RfD}_0\times \text{BW}} \tag{5}$$

若 THQ 或 TTHQ<1.0, 说明有害元素的健康危害风险为可接受水平, 若 THQ 或 TTHQ>1.0 的不良反应阈值, 则表明有害元素对人体可造成非致癌风险。

**表 2 微量元素的经口暴露的参考剂量**

**Table 2 Reference dose for oral exposure of trace elements**

| 元素 | $\text{RfD}_0$/[mg/(kg • d)] | 元素 | $\text{RfD}_0$/[mg/(kg • d)] |
|---|---|---|---|
| Pb | 0.0035[21] | Cr | 0.003[22] |
| 总 As | 0.0003[21] | Se | 0.005[22] |
| 总 Hg | 0.0003[21] | Ni | 0.020[23] |
| Mn | 0.1400[22] | Cd | 0.001[24] |
| Ba | 0.2000[22] | Cu | 0.04[25] |

(2)致癌风险

有害元素 As 有致癌风险且终生累积, 评价致癌风险(carcinogenic risk, $R$)按公式(6)计算, 长期每日摄入剂量(chronic daily inta, CDI)按公式(7)计算。

$$R=\text{CDI}\times \text{SF}_0=\frac{C\times \text{EF}\times \text{IR}\times \text{CF}\times \text{SF}_0}{\text{BW}\times \text{AT}} \tag{6}$$

$$\text{CDI}=\frac{C\times \text{IR}}{\text{BW}\times 1000} \tag{7}$$

式中: CDI 为长期每日摄入剂量, mg/kg·d; $\text{SF}_0$ 为经口暴露致癌斜率因子; As 为 1.5 mg/(kg • d)。$R<1\times10^{-6}$ 为安全水平, 在 $1\times10^{-6}$~$1\times10^{-4}$ 范围内为可接受水平, $R>1\times10^{-4}$ 说明致癌风险超过可接受水平。目前仅有 As 元素被列为确定的经口摄入人类致癌物[28]。

### 1.5　数据处理

使用 SPSS 20.0 进行数据统计分析, 每个样品测定两次, 取平均值, 低于检出限的数据均用 1/2 检出限计。

## 2　结果与分析

### 2.1　肝脏和肾脏中元素含量

猪肝、羊肝与猪肾、羊肾中元素含量见表 3, 其中 Mn、Cu、Se、Cd、Ba 元素 100.0%检出, 肝脏中 Cr、Ni、总 As 检出率分别为 76.0%、52.0%、72.0%, 总 Hg 和 Pb 检出率为 20.0%; 肾脏中 Cr、Ni、总 As 检出率分别为 88.0%、64.0%、80.0%, 肾脏中总 Hg 检出率为 36.0%, Pb 检出率为 24.0%。肝脏中 Cu 的含量最高, 最高 1 份为 182.000 mg/kg, 肝脏中 Cu 和 Mn 检出量均值是肾脏的 6.0 倍和 2.0 倍, 肾脏中 Se 和 Cd 检出量均值是肝脏的 2.2 倍和 2.7 倍, 羊肝中 Cu 和总 As 检出量均值是猪肝的 4.0 倍和 2.7 倍, 猪肝中 Se 检出量均值是羊肝的 1.7 倍。

### 2.2　各元素在不同样品中含量的差异

用 SPSS 20.0 进行秩和检验(95%置信区间), 其检验结果见表 4。由表 4 可知 Mn、Cu、Se、Cd 在羊和猪的肝脏与肾脏中含量有显著性差异($P$<0.05); Cu、总 As、Se 在猪肝和羊肝中含量有显著性差异($P$<0.05); 10 种元素含量在羊肾和猪肾中没有显著性差异($P$>0.05)。

**表 3　羊和猪的肝脏和肾脏中各元素含量(mg/kg)**

**Table 3　Content of various elements in the livers and kidneys of sheep and pigs (mg/kg)**

| 元素 | 项目 | 羊肝($n$=22) | 猪肝($n$=28) | 肝脏 | 羊肾($n$=32) | 猪肾($n$=18) | 肾脏 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Cr | 平均值 | 0.180 | 0.159 | 0.168 | 0.299 | 0.240 | 0.278 |
| | 标准差 | 0.135 | 0.141 | 0.138 | 0.282 | 0.191 | 0.254 |
| | 中位值 | 0.186 | 0.149 | 0.184 | 0.234 | 0.219 | 0.231 |
| | 范围 | ND~0.448 | ND~0.443 | ND~0.448 | ND~0.795 | ND~0.608 | ND~0.795 |
| | 检出率/% | 81.8 | 71.4 | 76.0 | 87.5 | 88.9 | 88.0 |
| Mn | 平均值 | 3.370 | 2.795 | 3.048 | 1.335 | 1.870 | 1.528 |
| | 标准差 | 1.474 | 0.706 | 1.148 | 0.748 | 0.704 | 0.776 |
| | 中位值 | 3.840 | 2.982 | 3.141 | 0.899 | 1.760 | 1.232 |
| | 范围 | 0.699~5.721 | 0.977~3.950 | 0.699~5.721 | 0.719~3.413 | 1.061~3.543 | 0.719~3.543 |
| | 检出率/% | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| Ni | 平均值 | 0.096 | 0.162 | 0.133 | 0.234 | 0.124 | 0.195 |
| | 标准差 | 0.146 | 0.211 | 0.188 | 0.213 | 0.172 | 0.206 |
| | 中位值 | 0.005 | 0.074 | 0.005 | 0.110 | 0.005 | 0.105 |
| | 范围 | ND~0.502 | ND~0.738 | ND~0.738 | ND~0.638 | ND~0.472 | ND~0.638 |
| | 检出率/% | 45.5 | 57.1 | 52.0 | 75.0 | 44.4 | 64.0 |
| Cu | 平均值 | 58.367 | 14.546 | 33.828 | 4.588 | 7.441 | 5.615 |
| | 标准差 | 58.592 | 13.170 | 45.616 | 3.272 | 2.954 | 3.445 |
| | 中位值 | 34.412 | 10.075 | 13.102 | 3.181 | 6.890 | 3.672 |
| | 范围 | 2.532~182.000 | 3.223~58.720 | 2.532~182.000 | 2.090~13.500 | 2.270~11.200 | 2.090~13.500 |
| | 检出率/% | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 总 As | 平均值 | 0.022 | 0.008 | 0.014 | 0.030 | 0.027 | 0.029 |
| | 标准差 | 0.015 | 0.009 | 0.237 | 0.031 | 0.055 | 0.041 |
| | 中位值 | 0.018 | 0.002 | 0.011 | 0.012 | 0.004 | 0.010 |
| | 范围 | 0.006~0.061 | ND~0.035 | ND~0.061 | ND~—0.077 | ND~0.180 | ND~0.180 |
| | 检出率/% | 100.0 | 50.0 | 72.0 | 81.2 | 77.8 | 80.0 |
| Se | 平均值 | 0.401 | 0.674 | 0.554 | 0.784 | 2.011 | 1.226 |
| | 标准差 | 0.218 | 0.173 | 0.237 | 0.427 | 0.647 | 0.784 |
| | 中位值 | 0.344 | 0.629 | 0.561 | 0.658 | 2.121 | 1.082 |
| | 范围 | 0.073~0.737 | 0.497~1.181 | 0.073~1.181 | 0.126~1.551 | 0.449~2.721 | 0.126~2.721 |
| | 检出率/% | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| Cd | 平均值 | 0.143 | 0.080 | 0.108 | 0.404 | 0.105 | 0.296 |
| | 标准差 | 0.209 | 0.222 | 0.219 | 0.381 | 0.100 | 0.342 |
| | 中位值 | 0.078 | 0.017 | 0.021 | 0.146 | 0.083 | 0.119 |
| | 范围 | 0.007~0.754 | 0.005~0.881 | 0.007~0.881 | 0.017~1.331 | 0.005~0.317 | 0.005~1.331 |
| | 检出率/% | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |

表 3(续)

| 元素 | 项目 | 羊肝(*n*=22) | 猪肝(*n*=28) | 肝脏 | 羊肾(*n*=32) | 猪肾(*n*=18) | 肾脏 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ba | 平均值 | 0.214 | 0.227 | 0.221 | 0.354 | 0.225 | 0.308 |
| | 标准差 | 0.100 | 0.194 | 0.160 | 0.245 | 0.113 | 0.217 |
| | 中位值 | 0.192 | 0.158 | 0.192 | 0.294 | 0.247 | 0.291 |
| | 范围 | 0.090~0.425 | 0.025~0.554 | 0.025~0.554 | 0.021~0.981 | 0.034~0.354 | 0.021~0.981 |
| | 检出率/% | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 总 Hg | 平均值 | 0.003 | 0.002 | 0.002 | 0.005 | 0.007 | 0.006 |
| | 标准差 | 0.002 | 0.001 | 0.002 | 0.007 | 0.015 | 0.010 |
| | 中位值 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 | 0.002 | 0.001 |
| | 范围 | ND~0.009 | ND~0.005 | ND~0.009 | ND~0.030 | ND~0.049 | ND~0.049 |
| | 检出率/% | 27.3 | 14.3 | 20.0 | 43.8 | 22.2 | 36.0 |
| Pb | 平均值 | 0.019 | 0.007 | 0.012 | 0.017 | 0.009 | 0.014 |
| | 标准差 | 0.027 | 0.015 | 0.022 | 0.041 | 0.017 | 0.035 |
| | 中位值 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.0032 |
| | 范围 | ND~0.068 | ND~0.058 | ND~0.068 | ND~0.167 | ND~0.058 | ND~0.167 |
| | 检出率/% | 27.3 | 14.3 | 20.0 | 25.0 | 22.2 | 24.0 |

注: ND 代表未检出。

**表 4 秩和检验结果**

**Table 4 Results of rank sum test**

| 元素 | 肝脏与肾脏 | | 羊肝与猪肝 | | 羊肾与猪肾 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | *u* | *P* | *u* | *P* | *u* | *P* |
| Cr | 162.500 | 0.177 | 69.000 | 0.659 | 60.500 | 0.524 |
| Mn | 82.000 | 0.000 | 47.500 | 0.106 | 52.000 | 0.266 |
| Ni | 183.000 | 0.396 | 65.000 | 0.486 | 51.000 | 0.225 |
| Cu | 64.500 | 0.000 | 35.00 | 0.021 | 44.000 | 0.114 |
| 总 As | 206.500 | 0.815 | 26.000 | 0.005 | 66.500 | 0.765 |
| Se | 106.000 | 0.005 | 27.000 | 0.006 | 41.000 | 0.078 |
| Cd | 124.500 | 0.019 | 43.000 | 0.063 | 44.000 | 0.114 |
| Ba | 167.000 | 0.220 | 70.000 | 0.702 | 38.000 | 0.052 |
| 总 Hg | 184.00 | 0.310 | 67.000 | 0.433 | 47.000 | 0.098 |
| Pb | 214.500 | 0.973 | 65.000 | 0.347 | 70.500 | 0.892 |

注: *u* 代表 Mann-Whitney U 检验的核心统计量, *P* 代表显著性。

### 2.3 污染结果评价

目前国内对于畜禽肝脏和肾脏重金属限量标准, 仅规定了 Pb 元素的限量均为 0.5 mg/kg, 肾脏 Cd 限量为 1.0 mg/kg, 肝脏 Cd 的限量为 0.5 mg/kg。而其他元素国内暂无限量标准, 以国家风险评估中心拟定的畜禽动物肝脏中元素的参考限值为判定依据进行评价, Cr、Mn、Ni、Cu、总 As、Se、Ba、总 Hg 分别为 1.00、5.00、1.00、30.00、0.50、1.00、1.00、0.05 mg/kg。4 种样品中污染评价结果见表 5, 元素的 $P_i$ 平均值依次为: Se (1.498)>Cu (0.708)> Mn (0.470)>Ba (0.268)>Cd (0.239)>Cr (0.219)>Ni (0.137)>总 Hg (0.088)>总 As (0.043)>Pb (0.026)。Pb、总 As、总 Hg 的单因子污染指数均小于 0.2, 全部处于清洁水平; 猪肾、猪肝和羊肝中的 Ni, 猪肝和羊肝中 Cr, 羊肾中 Cu, 猪肾和猪肝中 Cd, 处于清洁水平。猪肾和羊肾中 Cr, 猪肾、羊肾和猪肝中 Mn, 羊肾中 Ni, 猪肾和猪肝中 Cu, 羊肝中 Se, 羊肾和羊肝中 Cd 和 Ba 单因子污染指数 $P_i$ ($0.2<P_i\leqslant 0.6$),达到轻微污染等级。在羊肝中 Cu 单因子污染指数为 1.946, 猪肝和猪肾中硒单因子污染指数为 2.011 和 2.795, 达到重度污染。用元素整体的内梅罗综合污染指数评价时, 猪肝综合污染指数为 2.00, 猪肾综合污染指数为 1.44, 羊肝综合污染指数为 1.40, 安全等级处于轻度污染水平, 羊肾综合污染指数为 0.59, 处于安全水平。

### 2.4 重金属污染健康风险评价结果

羊肝、猪肝、羊肾和猪肾中 Cr、Mn、Ni、Cu、总 As、Cd、总 Hg、Pb、Se、Ba 进行 THQ 评价, 由表 6 可知, THQ 全部小于 1, 不同样品中 10 种元素 TTHQ 也均小于 1, 表明食用猪肝、猪肾、羊肝和羊肾摄入的重金属均不会对人体健康造成风险。

对砷元素进行致癌风险评价, $R$ 均小于 $1\times10^{-6}$, 其结果见表 7, 由表 7 知猪肝、猪肾、羊肝和羊肾中 As 无致癌风险。

**表 5　各元素单因子污染指数 $P_i$ 和综合污染指数 $P_c$**
**Table 5　Single-factor pollution index $P_i$ and comprehensive pollution index $P_c$ of each element**

| 样品 | $P_i$ | | | | | | | | | | $P_c$ | 安全等级 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cr | Mn | Ni | Cu | 总 As | Se | Cd | Ba | 总 Hg | Pb | | |
| 猪肾 | 0.240 | 0.374 | 0.124 | 0.248 | 0.053 | 2.011 | 0.105 | 0.225 | 0.144 | 0.019 | 1.44 | 轻度污染 |
| 羊肾 | 0.299 | 0.267 | 0.218 | 0.155 | 0.060 | 0.784 | 0.404 | 0.354 | 0.110 | 0.034 | 0.59 | 安全 |
| 猪肝 | 0.158 | 0.559 | 0.162 | 0.485 | 0.016 | 2.795 | 0.161 | 0.277 | 0.040 | 0.014 | 2.00 | 轻度污染 |
| 羊肝 | 0.180 | 0.674 | 0.042 | 1.946 | 0.044 | 0.401 | 0.286 | 0.214 | 0.060 | 0.038 | 1.40 | 轻度污染 |
| 均值 | 0.219 | 0.470 | 0.137 | 0.708 | 0.043 | 1.498 | 0.239 | 0.268 | 0.088 | 0.026 | 1.36 | 轻度污染 |

**表 6　不同样品中各元素 THQ 和 TTHQ**
**Table 6　Concentrations of THQ and TTHQ of each element in different sample**

| 样品 | THQ | | | | | | | | | | TTHQ | 分险等级 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cr | Mn | Ni | Cu | 总 As | Se | Cd | Ba | 总 Hg | Pb | | |
| 羊肝 | 4.0E-04 | 1.6E-04 | 3.2E-05 | 9.9E-03 | 4.9E-04 | 5.4E-04 | 9.7E-04 | 7.2E-06 | 5.4E-05 | 3.7E-05 | 1.3E-02 | 可接受水平 |
| 猪肝 | 6.7E-04 | 2.5E-04 | 1.0E-04 | 4.6E-03 | 3.2E-04 | 1.7E-03 | 1.0E-03 | 1.4E-05 | 1.1E-04 | 2.3E-05 | 8.8E-03 | 可接受水平 |
| 羊肾 | 1.7E-04 | 1.6E-05 | 2.0E-05 | 2.0E-04 | 1.6E-04 | 1.1E-03 | 6.8E-04 | 1.2E-05 | 5.4E-05 | 9.2E-06 | 2.4E-03 | 可接受水平 |
| 猪肾 | 4.6E-04 | 7.7E-05 | 3.6E-05 | 1.1E-03 | 5.4E-04 | 6.8E-04 | 6.0E-04 | 1.9E-06 | 1.1E-04 | 1.4E-05 | 3.6E-03 | 可接受水平 |

**表 7　羊肝、猪肝、羊肾和猪肾中砷的致癌风险**
**Table 7　Carcinogenic risk of As in lamb liver, pig liver, lamb kidney and pig kidney**

| 样品 | CDI/(mg/kg • d) | 致癌风险 | 风险等级 |
|---|---|---|---|
| 羊肝 | $1.49\times10^{-7}$ | $2.23\times10^{-7}$ | 安全水平 |
| 猪肝 | $1.01\times10^{-7}$ | $1.52\times10^{-7}$ | 安全水平 |
| 羊肾 | $5.10\times10^{-8}$ | $7.65\times10^{-8}$ | 安全水平 |
| 猪肾 | $1.56\times10^{-7}$ | $2.34\times10^{-7}$ | 安全水平 |

## 3　讨论与结论

参照 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中有害重金属元素 Pb 和 Cd 限量, Pb 合格率 100.0%, 只有 3 份样品 Cd 超标, 合格率达到 97.0%, Cu、Mn、Se、Cr、Ni、Ba、总 As 和总 Hg 的限量参照国家风险评估中心拟定的畜禽动物肝脏中元素的参考限值, Cr、Ni、Ba、总 As、总 Hg 合格率为 100.0%。Cu 元素其平均检出值为 58.0 mg/kg, 高于其他元素, 可能因为高剂量 Cu 具有提升饲料利用率、促进仔猪增重、降低腹泻率、增强机体免疫力及抗断奶应激等作用,因此饲料里经常被人为添加高剂量Cu[29]。肝脏中Cu超出限量(30 mg/kg)样本6份, Se在肾脏中含量明显高于肝脏, 肾脏中 Se 含量超出(1 mg/kg)样本 14 份, 1 份猪肝中硒超出限量(1 mg/kg), 只有 1 份羊肝中锰超出限量(5 mg/kg)。经秩和检验肝脏 Cu、Mn、Se 和 Cd 含量存在差异($P$<0.05), 可能是肝脏与肾脏对 Cu、Mn、Se、Cd 元素的富集能力不同。Cu、As、Se 在羊肝和猪肝中含量有显著性差异($P$<0.05), 可能因为羊和猪的品种、养殖方式、生长环境、饲料类型等诸多因素的影响。猪肾和羊肾 10 种元素含量无显著性差异($P$>0.05), 可见猪肾和羊肾对监测的 10 种元素的富集能力无差异。

用元素整体的内梅罗综合污染指数评价, 猪肝、猪肾和羊肝处于轻度污染水平, 羊肾处于安全范围。但由于内梅罗指数法其评价结果极易受最大值影响, 且未考虑生物利用率, 因此该评价结果尚需完善。THQ、TTHQ 和 $R$ 都在安全区间内, 整体对人体健康不会造成风险。Cu、Mn、Se 检出浓度和检出率较高, Cu、Mn、Se 为必需微量元素, 对人体健康至关重要, 但浓度过高也会导致人体组织形态和代谢的非正常变化, 因此,饲料的生产一定要严格按照相关标准执行, 对饲料中的各类微量元素进行合理的添加[30], 投喂时准确掌握饲料用量, 屠宰处理时注意防止重金属污染。

## 参考文献

[1] 罗培林, 吴虹玥, 曾琳雅, 等. 城都地区猪肉和猪肝中重金属及部分微量元素检测[J]. 四川畜牧兽医, 2025(1): 15–17.
Luo Peilin, Wu Hongyue, Zeng Linya, et al. Detection of heavy metals and some trace elements in pork and pork liver from Chengdu Area [J]. Sichuan Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2025(1): 15–17.

[2] 施姜丹, 史科欣, 黄雨佳, 等. 中国大米和蔬菜重金属/类金属污染及健康风险[J]. 环境卫生学杂志, 2022, 12(7): 479–487.
Shi Jiangdan, Shi Kexin, Huang Yujia, et al. Heavy metal/elemental metal pollution and health risks of rice and vegetables in China [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2022, 12(7): 479–487.

[3] 王佳, 刘斌, 肖柏林, 等. 重庆城区市售蔬菜重金属污染评价与健康风险评估[J]. 生态环境学报, 2018, 27(5): 942–949.
Wang Jia, Liu Bin, Xiao Bolin, et al. Evaluation of heavy metal pollution

and health risk assessment of commercially available vegetables in Chongqing Urban Area [J]. Journal of Ecology and Environment, 2018, 27(5): 942–949.

[4] 任永强. 基于重金属超标的农产品食品安全管控路径[J]. 食品安全导刊, 2025, 451(14): 38–40, 50.
Ren Yongqiang. Path for food safety control of agricultural products based on excessive heavy metal content [J]. Journal of Food Safety Guide, 2025, 451(14): 38–40, 50.

[5] 刘浩, 郭海涛, 姬爱熙, 等. ICP-MS 法测定松花粉无机元素含量及安全性、健康风险评估[J]. 河北科技大学学报, 2025, 46(1): 67–76.
Liu Hao, GUO Haitao, JI Aixi, et al. Determination of inorganic element contents in pine pollen by ICP-MS and safety and health risk assessment [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2025, 46(1): 67–76.

[6] 郭云鹤, 丁爱中, 于艳新. 乐安河流域城市人群铜膳食暴露及健康风险[J]. 生态环境学报, 2017, 26(7): 1269–1274.
Guo Yunhe, Ding Aizhong, Yu Yanxin. Heath risk assessment of urban via dietary copper exposure in Le'an River Basin [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(7): 1269–1274.

[7] Ince M, Kaplan Ince O, Onal A. Exposure to copper and risk assessment for human health via consumption of alcoholic beverages [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(2): 510–519.

[8] Yoon M, Taylor M D, Clewell H J, et al. Modeling manganese kinetics for human health risk assessment [J]. Issues in Toxicology, 2015(22): 322–354.

[9] Rondanelli M, Faliva M A, Peroni G, et al. Essentiality of manganese for bone health: an overview and update [J]. Natural Product Communications, 2021, 16(5): 1934578X2110166.

[10] Kwakye G F, Paoliello M M B, Mukhopadhyay S, et al. Manganese-induced parkinsonism and parkinson's disease: shared and distinguishable features [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(7): 7519–7540.

[11] Marek K, Stanisław B. Current knowledge on the importance of selenium in food for living organisms: a review [J]. Molecules, 2016, 21(5): 2–16.

[12] 李娟, 谭洪涛, 周鸿, 等. 江西居民膳食中砷和硒暴露风险评估[J]. 现代预防医学, 2021, 48(13): 2355–2357, 2378.
Li Juan, Tan Hongtao, Zhou Hong, et al. Risk assessment of arsenic and selenium exposure in the diet of residents in Jiangxi Province [J]. Modern Preventive Medicine, 2021, 48(13): 2355–2357, 2378.

[13] 夏芷玥, 刘浩, 林志恒, 等. 人体头发中重金属元素铬含量的高光谱检测[J]. 红外, 2015, 36(7): 37–43.
Xia Zhiyue, Liu Hao, Lin Zhiheng, et al. Hyperspectral detection of chromium content in human hair [J]. Infrared, 2015, 36(7): 37–43.

[14] 蒋清桃, 周静, 王芹, 等. 镍对血糖代谢异常影响的研究进展[J]. 职业与健康, 2024, 12(40): 3297–3301.
Jiang Qingtao, Zhou Jing, Wang Qin, et al. Research progress on the impact of nickel on abnormal blood glucose etabolism [J]. Occupational and Health, 2024, 12(40): 3297–3301.

[15] 孙邈. 微量元素铬镍与人体健康[J]. 微量元素与健康研究, 2010, 27(6): 63–64.
Sun Miao. Trace elements chromium and nickel and human health [J]. Trace Elements and Health Research, 2010, 27(6): 63–64.

[16] 杨文英. 中国糖尿病的流行特点及变化趋势[J], 中国科学: 生命科学, 2018, 48(8): 812–819.
Yang Wenying. The epidemiological characteristics and trend of diabetes in China [J]. Science China: Life Sciences, 2018, 48(8): 812–819.

[17] 曾仕久, 林嘉敏, 李红艳, 等. 不同产地伸筋草中 4 种金属元素测定及初步风险评价[J]. 实验与分析, 2025, 3(3): 81–85.
Zeng Shijiu, Lin Jiamin, Li Hongyan, et al. Determination of four metal elements in stretching grass from different origins and preliminary risk assessment [J]. Experiment and Analysis, 2025, 3(3): 81–80.

[18] 刘冬妮, 陈贻钢, 黄圣南, 等. 海南省 17 种野菜重金属污染风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(16): 91–97.
Liu Dongni, Chen Yigang, Huang Shengnan, et al. Risk assessment of heavy metal pollution in 17 kinds of wild vegetables in Hainan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(16): 91–97.

[19] 刘俊丽, 马宝莹, 杨丹, 等. 山东省市售鲜蛋矿质元素分布特征及重金属膳食暴露风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 15(20): 140–148.
Liu Junli, Ma Baoying, Yang Dan, et al. Distribution characteristics of mineral elements in commercially available fresh eggs in Shandong Province and assessment of heavy metal dietary exposure risk [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 15(20): 140–148.

[20] 卫生和计划生育委员会. 中国居民营养与慢性病状况报告[EB/OL]. (2015-06-30) [2025-03-20]. http://www.nhfpc.gov.cn/zhuzhan/zcjd/20.
National Health and Family Planning Commission. Report on nutrition and chronic disease status of Chinese residents [EB/OL]. (2015-06-30) [2025-03-20]. http://www.nhfpc.gov.cn/zhuzhan/zcjd/20.

[21] 王北洪, 马智宏, 冯晓元, 等. 北京市蔬菜重金属含量及健康风险评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(7): 2736–2745.
Wang Beihong, Ma Zhihong, Feng Xiaoyuan, et al. Evaluation of heavy metal content and health risks in vegetables in Beijing [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2015, 6(7): 2736–2745.

[22] 连莹莹, 方彦飞, 韩永红, 等. 邯郸市谷物制品中 26 种金属多元素监测与健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(15): 157–166.
Lian Yingying, Fang Yanfei, Han Yonghong, et al. Monitoring of 26 metal elements in grain products from Handan City and health risk assessment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(15): 157–166.

[23] 王国玲, 陈芳芳, 王晓琳, 等. 山东省胶东半岛养殖刺参中金属元素含量水平分析及健康风险评估[J]. 水产学杂志, 2024, 37(3): 81–87.
Wang Guoling, Chen Fangfang, Wang Xiaolin, et al. Analysis of metal element contents in cultured sea cucumbers in Jiaodong Peninsula of

Shandong Province and health risk assessment [J]. Journal of Fisheries Science, 2024, 37(3): 81–87.

[24] 覃东立, 姜海峰, 黄晓丽, 等. 东北稻蟹中 18 种微量元素含量及健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 245–252.
Qin Dongli, Jiang Haifeng, Huang Xiaoli, *et al*. Content and health risk assessment of 18 trace elements in northeast rice-crab [J]. Journal of Agricultural Resources and Environmental Sciences, 2019, 36(2): 245–252.

[25] 姬茹婕, 刘文翰, 孙金奎, 等. 新疆五家渠地区葡萄酒中微量元素风险评估[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(8): 76–81.
Ji Rujie, Liu Wenhan, Sun Jinkui, et al. Risk assessment of trace elements in wine from Wujiaqu Area, Xinjiang [J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(8): 76–81.

[26] 宋波, 袁立竹. 猪肉、猪肝和猪肾中重金属含量及其健康风险评估综述[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32(2): 195–201.
Song Bo, Yuan Lizhu. Review on heavy metal contents in pork, pork liver and pork kidney and their health risks assessment [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2012, 32(2): 195–201.

[27] 肖育华, 詹纯列, 张修彦, 等. 舍饲状态下雷州山羊生长指标及脏器重量、脏器系数测定分析[J], 黑龙江畜牧兽医, 2014(5): 92–94.
Xiao Yuhua, Zhan Chunlie, Zhang Xiuyan, et al. Analysis of growth indicators and organ weights, organ coefficients of Leizhou goats under feeding in pens [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2014(5): 92–94.

[28] 张妮娜, 宋玥, 刘丽萍, 等. 4 种桃仁中 26 种元素含量分布特征及重金属健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(23): 296–304.
Zhang Nina, Song Yue, Liu Liping, et al. Distribution characteristics of 26 elements in four types of peach seeds and health risk assessment of heavy metals [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(23): 296–304.

[29] 侯睿, 邹春苗, 赵晶, 等. 黑龙江畜禽肝脏中铜元素含量监测及污染评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(13): 986–991.
Hou Rui, Zou Chunmiao, Zhao Jing, et al. Monitoring of copper element content in the livers of livestock and poultry in heilongjiang province and pollution evaluation [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(13): 986–991.

[30] 张冬. 饲料中微量元素添加过量的危害及其合理应用[J]. 畜禽养殖, 2020(7): 78.
Zhang Dong. Hazards of excessive addition of trace elements in feed and their rational application [J]. Poultry and Livestock Breeding, 2020(7): 78

(责任编辑: 曹岱琳　安香玉)