DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260601007
引用格式: 徐玥. 食品中残留污染物膳食风险评估研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 289–296.
Xu Yue. Recent advances in dietary risk assessment of contaminants in food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 289–296. (in Chinese with English abstract).

食品中残留污染物膳食风险评估研究进展

徐 玥[1,2*]

(1. 江南大学商学院, 无锡 214211; 2. 江南大学食品安全与国家战略治理实验室, 无锡 214211)

摘 要: 随着工业化进程加快和食品加工技术快速发展, 食品中化学污染物的来源更加多样, 暴露过程也更具隐匿性, 膳食风险评估因此成为保障食品安全和支撑风险管理的重要科学手段。本文系统综述了膳食风险评估的 4 个基本步骤, 即危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述。其中, 在暴露评估阶段, 重点比较了点评估、概率评估和生物标志物分析的适用范围及优缺点; 在风险特征描述阶段, 进一步明确了致癌风险与非致癌风险的主要定量评价指标。本文梳理了农药残留、有毒金属以及加工过程污染物等九类主要污染物的来源及我国现行监管标准体系。最后, 分析了当前研究中存在的膳食消费数据更新滞后、概率评估和累积风险评估应用不足等问题, 旨在为提升我国膳食风险评估精细化水平和完善食品安全限量标准提供参考。

关键词: 膳食风险评估; 暴露评估; 风险特征描述; 食品安全
中图分类号: TS207.5 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)17–0289–08

Recent advances in dietary risk assessment of contaminants in food

XU Yue[1,2*]

(1. *School of Business, Jiangnan University*, *Wuxi* 214211, *China*; 2. *Food Safety and National Strategy Governance Laboratory*, *Jiangnan University*, *Wuxi* 214211, *China*)

ABSTRACT: With the acceleration of industrialization and the rapid development of food processing technologies, the sources of chemical contaminants in food have become increasingly diverse, and exposure processes have become more concealed. Therefore, dietary risk assessment has become an important scientific approach for ensuring food safety and supporting risk management. This paper systematically reviewed the 4 basic steps of dietary risk assessment, namely hazard identification, hazard characterization, exposure assessment and risk characterization. In the exposure assessment stage, the application scope, advantages and limitations of point assessment, probabilistic assessment and biomarker analysis were compared in detail. In the risk characterization stage, the main quantitative evaluation indicators for carcinogenic and non-carcinogenic risks were further clarified. In addition, this paper summarized the sources of nine major categories of contaminants, including pesticide residues, toxic metals and processing-induced contaminants, as well as China's current regulatory standards system. Finally, it analyzed existing problems in current research, such as the delayed updating of dietary consumption data and the insufficient application of probabilistic assessment and cumulative risk assessment. This review aims to provide a reference for improving the refinement of dietary risk

收稿日期: 2026-06-01
基金项目: 江南大学青年基金项目(JUSRP202601041)
第一作者/*通信作者: 徐玥(1998—), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品安全管理。E-mail: xu_yue@jiangnan.edu.cn

assessment in China and enhancing food safety limit standards.

KEY WORDS: dietary risk assessment; exposure assessment; risk characterization; food safety

0 引 言

化学物质可通过农业生产投入品使用、工业污染排放、食品加工过程以及食品接触材料迁移等多种途径进入食物链, 进而通过膳食摄入对人体健康产生影响[1]。随着工业化和食品加工水平的提升, 食品中污染物呈现出来源多样化、暴露长期化及风险隐匿化的特征[2]。长期低剂量暴露可能导致慢性毒性效应甚至增加癌症发生风险, 因此, 对食品中化学污染物进行科学的膳食风险评估具有重要意义。膳食风险评估是食品安全风险分析体系的重要组成部分, 其核心在于定量评价人群通过膳食摄入某种化学物质的健康风险水平, 为风险管理决策提供科学依据[3–4]。

现有研究多聚焦于单一污染物膳食风险评估的某一环节, 针对危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述 4 个环节的系统性、完整性讨论仍显不足, 尤其缺乏对各环节之间逻辑联系及其在不同污染物评估中具体应用的综合梳理。基于此, 本文以膳食风险评估的完整流程为主线, 介绍各环节的基本内容和常用方法, 总结不同类型食品污染物的来源、风险特征及我国监管现状, 并分析当前研究在基础数据、评估方法和新兴风险应对等方面存在的问题, 以期为完善我国膳食风险评估体系和食品安全风险管理提供参考。

1 文献检索与筛选方法

本文于 2026 年 1 月系统检索中国知网、万方数据知识服务平台、维普中文期刊服务平台、Web of Science 和 PubMed 等中英文数据库。中文检索词包括“膳食暴露”“膳食风险评估”“暴露评估”“食品污染物”等; 英文检索词与中文检索词对应, 并根据不同污染物类别组合相应主题词进行检索, 例如“膳食暴露、农药残留”。文献检索时限为 2020 年 1 月至 2026 年 1 月; 对于膳食风险评估的经典方法、基础理论及具有重要影响的方法学文献, 则不受上述时间范围限制。

2 膳食风险评估

膳食风险评估是一个科学过程, 通常分为 4 个基本步骤——危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述[5]。

2.1 危害识别

危害识别是风险评估的第一步, 其核心任务是找出待评估化学物质可能对人体健康构成何种危害。例如, 国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)研究发现长期接触某种食品化学物质与癌症发病率升高存在关联, 该物质就会被识别为致癌危害[6]。

2.2 危害特征描述

危害特征描述又称剂量—反应评估, 旨在阐明暴露剂量与不良效应之间的关系。通常依据动物试验等毒理学证据确定未观察到有害作用剂量(no-observed-adverse-effect level, NOAEL)或基准剂量置信限下限(benchmark dose lower confidence limit, BMDL)等参考点, 再除以适当的不确定性因子, 推导每日允许摄入量(acceptable daily intake, ADI)、可耐受每日摄入量(tolerable daily intake, TDI)或急性参考剂量(acute reference dose, ARfD)等健康指导值[5]。对于具有蓄积性的污染物, 还可采用暂定每周耐受摄入量(provisional tolerable weekly intake, PTWI)或暂定每月耐受摄入量(provisional tolerable monthly intake, PTMI)。

需要指出的是, 毒理学基准并非一成不变, 而是随着毒理学研究和流行病学证据的积累不断动态调整。例如, 联合国粮农组织和世界卫生组织食品添加剂联合专家委员会(Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives, JECFA)曾于 1988 年提出铅和镉的 PTWI 分别为 25 μg/kg 和 7 μg/kg。然而, 随着后续研究表明在该暴露水平下仍可能对人体健康产生不利影响, JECFA 于 2010 年重新评估并取消了铅的 PTWI; 同时, 将镉的评价指标由 PTWI 调整为 PTMI, 并设定为 25 μg/kg[7]。

2.3 暴露评估

膳食暴露评估可分为急性膳食暴露评估和长期膳食暴露评估。急性暴露量计算公式为急性暴露量=Σ(C_i×F_i)/BW。式中, C_i 为目标日或目标餐次第 i 类食品中污染物浓度, F_i 为同一时间窗内该食品消费量, BW 为体重(body weight), kg[5,8–9]。长期暴露量一般以估计每日摄入量(estimated daily intake, EDI)来衡量, 其计算公式为 EDI=Σ(C_i×F_i)/BW, 其中, C_i 和 F_i 分别为第 i 类食品中污染物的代表性浓度和长期平均日消费量[5,8–9]。若评估的是间歇性或特定年限内的长期暴露, 则可采用平均日剂量(average daily dose, ADD)进行折算: ADD=Σ(C_i×F_i×EF×ED)/(BW×AT)。式中, F_i 为长期平均日消费量, EF 为年暴露频率, d/年), ED 为暴露年限, 年; AT 是用于分摊累计暴露量的时间长度, d[10]。

在膳食暴露量评估中, 通常将评估方法划分为点评估与概率评估两类。点评估方法以待评估物质含量、食物

消费量及体重等参数的平均值或代表值为基础, 通过构建单一暴露情景计算人群的膳食暴露水平[3,8,11]。该方法计算过程简单、数据需求较低, 因而在实际监管和初步风险筛查中得到广泛应用。

然而, 点评估依赖于有限的点值参数, 难以反映变量的分布特征及人群间差异, 且结果往往具有一定保守性, 容易受到膳食结构变化、调查时间不匹配等因素影响, 从而引入不确定性。相比之下, 概率评估方法通过引入关键变量的概率分布, 对膳食暴露过程中的不确定性和个体差异进行系统刻画[8,11]。其基本思路是基于食品中的某种物质含量数据和食物消费量数据构建数据库, 对各变量进行分布拟合, 并利用随机抽样方法(如 Monte Carlo 模拟)进行大量重复计算, 从而获得暴露量的概率分布而非单一估计值。朱凤等[12]通过概率评估计算深圳市居民晚期糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)膳食暴露的水平, 对比发现, 高暴露人群的暴露剂量比点估计值高[12]。

总体来看, 点评估方法适用于数据有限条件下的快速风险筛查, 而概率评估方法则更适用于精细化风险分析与政策制定。随着膳食调查数据与污染物监测数据的不断完善, 概率评估方法正逐渐成为该领域的重要发展方向。

另一种评估膳食暴露的方法是生物标志物分析, 即直接测量人体内的化学物质浓度[3,5]。通过检测血液、尿液等生物样本中化学物质或其代谢物的含量, 可以反映个体实际的内部暴露水平。例如, 血铅浓度可反映体内铅的蓄积情况, 尿中汞或农药代谢物水平则是相应物质的暴露量。生物标志物测量的最大优势在于, 它反映的是人体实际吸收的剂量, 但其局限在于无法区分具体暴露来源, 且部分指标仅反映短期暴露, 因而对长期膳食摄入水平的评估存在不确定性[13]。

2.4　风险特征描述

在风险特征描述中, 关于致癌风险和非致癌风险的评估方法存在明显差异。表 1 列出了风险特征描述中常用的指标和意义。对于致癌性化学物质, 不存在绝对零风险的暴露水平。CR 的一般表达式如(1)式所示, 其中, EDI 为日均暴露量, mg/(kg • d); CSF 为癌症斜率因子(cancer slope factor), kg • d/mg。另一种常用的 CR 评估方法是 MOE 方法, 其表达式如(2)所示。

对于除癌症以外的其他毒性效应, 通常采用阈值概念进行风险评估。即认为这类化学物质在某一剂量以下就不会产生有害效应。因此, 非致癌风险特征描述是将暴露水平与已制定的阈值进行比较。一般用 THQ 来表示, 如(3)所示, 当该比值大于等于 100%时, 表明可能存在健康风险。

3　现有研究中关注的膳食风险

在已有研究和相关文献分类的基础上, 本文结合污染物来源、危害属性、暴露路径等, 对膳食风险评估中关注的主要污染物进行归纳和梳理, 并将其概括为农药残留、兽药残留、有毒金属、真菌毒素、其他天然毒素、微生物、食品添加剂、食品加工过程污染物以及包装材料与环境污染物 9 类。表 2 系统梳理了这些主要污染物的来源及我国监管现状。总体来看, 我国已针对农药残留、兽药残留、有毒金属和真菌毒素等重点污染物建立了较为完善的强制性标准体系。例如, 农药残留和兽药残留分别通过

表 1　风险特征描述中常用的指标和意义

Table 1　Commonly used indicators and their meanings in risk characterization

分类	指标名称	计算公式	适用对象	判定标准	指标含义
致癌风险(carcinogenic risk, CR)	CR	$CR=1-e^{-(EDI\times CSF)}$ (1)	致癌物(如镉、黄曲霉毒素等)	CR<1.0×10^{-6}, CR 较低; CR 为 1.0×10^{-6}~1.0×10^{-4}, 具有一定致癌风险, 宜引起关注; CR>1.0×10^{-4}, 致癌风险较高, 宜重点关注	当 CR 为 1.0×10^{-6}, 表示每 100 万人中有 1 人可能罹患癌症
CR	暴露边界比(margin of exposure, MOE)	MOE=BMDL/EDI (2)	致癌物(如铅、砷等)	MOE 越大风险越低, MOE>10000 时, 风险较低	衡量暴露量与毒性参考点之间的安全距离
非致癌风险	风险商(target hazard quotient, THQ)	THQ=EDI/ADI (3)	阈值效应污染物(如农药、兽药、添加剂)	HQ≤1: 风险可接受; HQ>1: 风险较高	表征膳食暴露风险

注: 使用公式(1)计算所得 CR<0.01 时, 则使用 CR=EDI×CSF 计算[14], CSF 可优先查询美国环境保护署综合风险信息系统; BMDL、ADI 等可查询 JECFA、联合国粮食及农业组织/世界卫生组织农药残留联合专家会议、欧洲食品安全局(European Food Safety Authority, EFSA)及其开放食品毒理数据库。采用参数时应记录化学形态、关键效应、适用人群和版本日期[15-18]。

GB 2763 和 GB 31650 系列标准进行规范, 并普遍采用基于 ADI 的风险管理策略; 有毒金属及部分加工污染物则纳入 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》进行统一管理, 该标准规定了铅、镉、汞、砷、锡、镍、铬、

亚硝酸盐和硝酸盐、苯并[a]芘、N-二甲基亚硝胺、多氯联苯、3-氯-1,2-丙二醇这 12 种污染物的限量要求。同时，真菌毒素(GB 2761)、微生物污染(GB 29921 及 GB 31607 系列)以及食品添加剂(GB 2760)也已形成较为成熟的监管框架。

相比之下，对于食品加工过程污染物(如丙烯酰胺、杂环胺等)、包装材料迁移污染物(如邻苯二甲酸酯、双酚 A)，我国监管体系仍处于逐步完善阶段，部分物质尚缺乏系统性的限量标准，现有研究多参考国际组织(如 JECFA)提出的健康指导值。近年来，我国也在不断加强相关领域的风险监测与标准修订，例如对食品接触材料中高风险化学物质的管控日趋严重。总体而言，我国食品污染物监管呈现出“重点污染物标准体系较为完善、其他污染物逐步补充完善”的发展特征，但不同类别污染物之间仍存在监管深度与覆盖范围不均衡的问题，这也为后续膳食风险评估与政策优化提供了重要研究空间。

4 当前研究存在的主要问题与挑战

4.1 膳食消费数据与污染物监测数据的匹配性问题

膳食消费数据的时效性与代表性是影响暴露评估准

表 2 主要污染物分类、来源以及监管现状

Table 2 Classification, sources and current regulatory status of major pollutants

污染物分类	污染来源	我国监管现状
农药残留	食品中的农药污染主要源于农业生产中杀虫剂、除草剂和杀菌剂的使用[19–21]	2026 年 3 月 1 日起，我国正式实施 GB 2763—2026《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》，新标规定了 585 种农药共 10749 项限量指标；并采用基于 ADI 的风险管理策略
兽药残留	食品中的兽药残留主要源于畜牧业生产中抗生素、合成抗菌药、抗寄生虫药、镇定剂等兽药的大量使用。这些化学物质可通过动物肌肉、肝脏、肾脏、奶、蛋等动物源性食品直接进入人体，也可能通过动物饮用水、饲料添加剂或养殖环境中的残留间接进入食物链[22–24]	监管依据为 GB 31650—2019《食品安全国家标准 食品中兽药最大残留限量》及 GB 31650.1—2022《食品安全国家标准 食品中 41 种兽药最大残留限量》；并采用基于 ADI 的风险管理策略
有毒金属	食品中潜在有毒金属的污染源主要源于环境。农业中化肥、农药的施用可能导致金属迁移到土壤中，随后进入植物性食品。工业活动和环境污染导致汞和砷在食品中积累，特别是在海鲜中；而饲料和水污染是动物源性食品的重要来源[25–26]	监管依据为 GB 2762—2025《食品安全国家标准 食品中污染物限量》，规定了食品中铅、镉、汞、砷、锡、镍、铬的限量指标
真菌毒素	真菌毒素污染源于初级来源(如田间)和次级来源(包括收获后、储存和加工阶段)。初级污染发生在田间作物生长期，受高湿度、温度波动、昆虫损伤和农业操作不当等因素影响。次级污染发生在收获后，受干燥不充分、通风不足等储存条件的影响[27–28]	监管依据为 GB 2761—2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》，规定了食品中黄曲霉毒素 B_1、黄曲霉毒 M_1、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、展青霉素、赭曲霉毒素 A 及玉米赤霉烯酮的限量指标
其他天然毒素	海洋生物毒素是由有毒海洋生物分泌的一类具有奇特结构和高活性的特殊代谢成分，这些毒素经海洋贝类或鱼类体内蓄积后，可通过食物链进入人体，危害人类身体健康；一般认为，土豆中的茄碱等生物碱、有毒蘑菇毒素不在本研究讨论范围内[29]	2012 年国家食品安全评估中心启动了某些沿海城市常见海洋生物毒素的监测工作。2016 年再次启动该监测项目，2017—2019 年开展连续监测，了解海洋生物毒素污染状况及地域分布
微生物	食品中的微生物污染主要源于生产、加工、储存和运输过程中致病菌、霉菌、酵母等的侵染。这些微生物可通过原料、水源、加工设备、从业人员手部接触或空气传播进入食品，也可能通过不当的温度控制、包装破损或交叉污染在食品链中扩散[30–31]	监管依据包括 GB 29921—2021《食品安全国家标准 预包装食品中致病菌限量》及 GB 31607—2021《食品安全国家标准 散装即食食品中致病菌限量》，与化学污染物通常将膳食暴露量同 ADI 比较不同，定量微生物风险评估需要根据食品中病原体浓度与单次食用量估算摄入剂量，并采用指数模型、Beta-Poisson 模型等剂量—反应模型，将摄入剂量转换为感染或患病概率。风险结果通常表示为每份食品的患病概率、每人年患病概率或每 10 万人年预计病例数[32]
食品添加剂	食品中的食品添加剂主要源于食品工业生产中为延长保质期、改善感官品质和提升加工性能而有意添加的各类物质。这些化学物质可通过防腐剂、着色剂、甜味剂、增味剂和稳定剂等形式直接进入各类加工食品[33–34]	核心强制性标准为 GB 2760—2024《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》，规定了允许使用的添加剂品种、适用范围及最大使用量或残留量

表 2(续)

污染物分类	污染来源	我国监管现状
食品加工过程污染物	5-羟甲基糠醛(5-hydroxymethylfurfural, HMF)、杂环胺(heterocyclic amines, HCAs)、氯丙醇类和多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)在食品热加工、烹饪、生产或储存过程中广泛形成。HMF 主要出现在含糖食品经受高温处理或长时间储存时, 而丙烯酰胺则是在煎炸、烘烤和焙烤过程中通过美拉德反应生成的。HCAs 主要在肉类和鱼类等富含蛋白质的食品高温烹饪时形成。氯丙醇主要产生于精炼植物油、酱油及其他油脂类产品的加工过程中。PAHs 通常通过烟熏、烧烤和焙烤等方法产生[35–38]	监管依据包括 GB 2762—2025《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(含 3-氯-1,2-丙二醇、苯并[a]芘限量)及 GB 31664—2025《食品安全国家标准 食品中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯污染控制规范》
包装材料与环境污染物	多氯联苯(polychlorinated Biphenyls, PCBs)、二噁英(polychlorinated dibenzo-p-dioxins, PCDDs)、邻苯二甲酸酯(phthalate esters, PAEs)、全氟和多氟烷基物质(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)以及双酚 A (bisphenol A, BPA)主要通过环境污染和包装材料迁移进入食品。其中, PCBs 和 PCDDs 主要通过工业排放、燃烧过程以及受污染的土壤或水体转移到动物源性食品中; PAEs 则作为增塑剂从塑料材料中迁移进入食品。PFAS 因其在食品包装涂层中的应用以及在环境中的持久性而存在于食品中。而 BPA 则会从罐头食品的内壁涂层、塑料瓶以及奶瓶中迁移到食品和饮料中[39–43]	监管依据包括 GB 2762—2025 (含 PCBs 限量); 2025 年 7 月 3 日, 国家食品安全风险评估中心发布 GB 9685《食品安全国家标准 食品接触材料及制品用添加剂使用标准》的修订征求意见稿, 对高风险化学物质管控升级, 全面禁止多种 PAEs 类物质, 并收紧对双酚 A 的限量要求

确度的重要因素。部分研究所采用的膳食消费数据相较于污染物监测或风险评估时点滞后 1—3 年[44–45], 有些研究数据则滞后超过 3 年[46–48]。膳食消费数据更新不及时, 可能难以反映居民膳食结构和消费模式的动态变化, 进而造成暴露水平估计偏差。

此外, 现有研究采用的膳食消费数据来源并不统一, 部分研究参考《中国居民膳食指南》中的推荐摄入量[21], 部分采用统计年鉴中的食物消费数据[45]。不同数据来源在指标含义、调查方法、时间尺度和人群代表性等方面存在差异, 其中, 膳食指南提供的是推荐摄入量, 并不等同于居民实际消费量; 统计年鉴中的宏观数据也较难准确反映个体消费差异。已有研究表明, 我国居民膳食结构存在明显的区域差异[49], 因此, 全国性平均消费数据可能无法充分反映特定地区居民的真实膳食暴露水平。开展地区性膳食风险评估时, 建议优先采用与污染物监测时段相匹配的当地居民营养与健康监测数据[20]; 此类数据既能提高膳食消费信息的时效性, 又能较好反映目标地区居民的实际消费特征。在缺乏同期地区调查数据时, 可采用时间序列分析、消费趋势外推或情景分析等方法进行校正, 并明确报告数据来源、时间差异及其对评估结果可能造成的不确定性。

4.2　评估方法与评估对象的综合性不足

从方法学角度看, 膳食暴露评估可从参数处理方式和评估对象范围两个维度进行分类。在参数处理方式上, 可分为确定性评估(点评估)和概率评估。在评估对象范围上, 可进一步区分单一食物来源评估与多来源总暴露评估。前者主要计算目标化学污染物经某一种食物摄入所产生的暴露, 后者则综合考虑同一污染物经谷物、蔬菜、肉类、水产品等多种食物来源产生的总膳食暴露。若评估对象由单一污染物扩展为具有共同作用机制、共同毒性终点或相同靶器官的多种污染物, 则属于累积风险评估[3]。由此可见, 多来源总暴露评估关注“同一种污染物来自哪些食物”, 累积风险评估则关注“多种污染物是否产生共同或联合健康效应”。

从已有研究来看, 国内膳食风险评估仍以确定性点评估和单一食物来源评估为主, 概率评估、多来源总暴露评估及累积风险评估的应用相对较少, 现有累积风险研究主要集中于蔬菜中具有相似作用机制的有机磷农药[50]。因此, 有必要根据研究目的逐步推动概率评估、多来源总暴露评估与累积风险评估的结合, 以提高膳食风险评估的完整性和精细化水平。具体实施时, 在数据量和数据质量允许的条件下, 可采用 Monte Carlo 模拟对污染物浓度、食物消费量和体重等参数进行概率建模, 报告暴露量的均值、中位数及 P_{95}、P_{99} 等高分位结果[23,51], 并通过敏感性分析识别影响评估结果的关键参数。对于同一污染物的多来源暴露, 应纳入不同食物类别的污染水平和消费量, 避免仅依据单一食物来源低估总膳食暴露; 对于具有共同作用机制或共同毒性终点的多种污染物, 则可根据毒理学证据采用相对效力因子、危害指数或剂量相加等方法开展累积风险评估。同时, 应说明未检出值处理、分布拟合、变量相关性、模型迭代及收敛判定等关键假设, 并分别表征人群变异性和参数不确定性。

4.3 新型风险与复杂暴露情景的挑战

随着分析检测技术的发展和食品供应链日益复杂，传统风险评估的对象正逐步扩展至具有多来源、隐匿性等特征的新兴污染物。例如，三氟乙酸(trifluoroacetic acid, TFA)是 PFAS 中的一种超短链全氟烷基酸，具有较强的环境持久性和迁移性；已有研究在饮用水、谷物等植物性食品及酒类中检出 TFA，动物毒理学证据提示，TFA 可能影响发育、生殖及甲状腺激素水平[52]。2026 年 7 月，EFSA 将 TFA 的 ADI 由 0.05 mg/(kg • d)下调至 0.014 mg/(kg • d)[53]。我国一项针对 2025 年采集的 69 份市售预制肉类和水产菜肴的研究显示，TFA 在全部样品中均被检出，检出率为 100%[54]。

与此同时，食品添加剂监管项目也在持续调整。《食品安全监督抽检实施细则(2025 年版)》与 2024 年版相比，在食品添加剂抽检类别中增加了焦糖色、蜂蜡、红曲米、红曲红和红曲黄色素等细分类，其中焦糖色涉及 4-甲基咪唑、重金属等项目，红曲米涉及黄曲霉毒素 B_1、重金属及致病菌等项目。

除食品中的污染物及生产过程中使用的食品添加剂外，食品接触材料中化学物质向食品迁移所形成的间接膳食暴露，也已成为食品安全风险评估的重要内容[55]。此类风险评估应根据食品类型、接触面积、接触时间、温度及包装结构等实际接触情景开展暴露评估[56]。

5 结束语

膳食风险评估是连接污染监测、毒理学证据与食品安全风险管理的关键环节。本文围绕危害识别、危害特征描述、暴露评估和风险特征描述 4 个步骤，梳理了主要方法及其衔接关系，并归纳九类主要膳食风险对象的来源、暴露路径和我国监管现状。总体而言，我国传统污染物的标准与监测基础已较为系统，但不同类别在数据成熟度、方法应用和监管覆盖方面仍存在差异。

未来应提升膳食消费数据与污染监测数据在时间、地区和人群层面的匹配程度，建设持续更新的基础数据库；推进概率评估、多来源总暴露评估和累积风险评估的规范应用，加强不确定性及模型假设的透明报告；同时关注 PFAS、食品接触材料迁移物及新型加工与消费情景，完善从危害识别、暴露监测到风险表征的证据链。通过促进监测、评估、标准制定与风险管理协同，可进一步提高我国膳食风险评估的科学性、精细化和前瞻性，为食品安全标准制修订及风险管理提供可靠依据。

参考文献

[1] Bereda G. Toxicological impacts and mitigation strategies of food contaminants: a global perspective and comprehensive narrative review [J]. Current Research in Toxicology, 2025, 9: 100268.

[2] 吴林海. 食品安全风险: 引发因素、传导机制、演化特征及治理[J]. 江西社会科学, 2023, 43(9): 176–186.
Wu Linhai. Food safety risk: triggering factors, transmission mechanism, evolution characteristics and governance [J]. Jiangxi Social Sciences, 2023, 43(9): 176–186.

[3] Pekmezci H, Sipahi S, Başaran B. Health risk assessment of dietary chemical exposures: a comprehensive review [J]. Foods, 2025, 14(23): 4133.

[4] Zahir A, Ali Khan I, Nasim M, et al. Food process contaminants: formation, occurrence, risk assessment and mitigation strategies–a review [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2024, 41(10): 1242–1274.

[5] IPCS. Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food: Environmental Health Criteria 240 [EB/OL]. [2026-04-29]. https://inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc240_index.htm.

[6] Samet J M, Chiu W A, Cogliano V, et al. The IARC monographs: updated procedures for modern and transparent evidence synthesis in cancer hazard identification [J]. Journal of the National Cancer Institute, 2020, 112(1): 30–37.

[7] 梁晓聪, 王辛, 唐丽, 等. 2002—2018 年陕西省市售谷物中铅、镉、总汞和总砷污染状况及暴露评估[J]. 卫生研究, 2021, 50(5): 827–831, 836.
Liang Xiaocong, Wang Xin, Tang Li, et al. Pollution status and exposure assessment of lead, cadmium, total mercury and total arsenic in grains on sale from Shaanxi Province, 2002-2018 [J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(5): 827–831, 836.

[8] 王曦, 刘子琪, 康珊珊, 等. 农药残留膳食暴露评估模型研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 269–277.
Wang Xi, Liu Ziqi, Kang Shanshan, et al. Research progress on assessment models for dietary exposure to pesticide residues [J]. Food Science, 2023, 44(3): 269–277.

[9] 乔雄梧. 食品中农药残留膳食暴露评估若干问题探讨[J]. 农药学学报, 2020, 22(5): 727–733.
Qiao Xiongwu. Some considerations on dietary exposure assessment of pesticide residues in food [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2020, 22(5): 727–733.

[10] US EPA. Exposure assessment tools by routes: ingestion [EB/OL]. (2026-08-17) [2026-08-04]. https://www.epa.gov/expobox/exposure-assessment-tools-routes-ingestion.

[11] 乔雄梧. 食品中农药残留风险评估述评[J]. 农药学学报, 2023, 25(1): 12–22.
Qiao Xiongwu. A critical review of dietary risk assessment of pesticide residues in foods [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2023, 25(1): 12–22.

[12] 朱凤, 何建安, 肖文竹, 等. 2017 年深圳市居民晚期糖基化终末产物膳食暴露水平概率评估[J]. 卫生研究, 2020, 49(4): 613–616.
Zhu Feng, He Jian'an, Xiao Wenzhu, et al. Exposure level of advanced glycation end products in the diet of Shenzhen residents in 2017 [J]. Journal of Hygiene Research, 2020, 49(4): 613–616.

[13] Brouwer-Brolsma E M, Brennan L, Drevon C A, et al. Combining traditional dietary assessment methods with novel metabolomics techniques: present efforts by the Food Biomarker Alliance [J]. The Proceedings of the Nutrition Society, 2017, 76(4): 619–627.

[14] 刘宇, 王彩霞, 袁文婷, 等. 2012—2020 年陕西省食品中镉污染状况及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2022, 51(2): 308–312.
Liu Yu, Wang Caixia, Yuan Wenting, et al. Contamination status and

health risk assessment on the dietary exposure of cadmium in foods of Shaanxi Province from 2012 to 2020 [J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(2): 308–312.

[15] EFSA Scientific Committee, Benford D, Halldorsson T, et al. Guidance on uncertainty analysis in scientific assessments[J]. EFSA Journal, 2018, 16(1): e05123.

[16] US EPA. Integrated Risk Information System (IRIS) [DB/OL]. [2026-07-25]. https://iris.epa.gov/.

[17] Dorne J L, Richardson J, Kass G, et al. Editorial: OpenFoodTox: EFSA's open source toxicological database on chemical hazards in food and feed [J]. EFSA Journal, 2017, 15(1): e15011.

[18] WHO. Evaluations of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives [DB/OL]. [2026-07-25]. https://apps.who.int/food-additives-contaminants-jecfa-database/.

[19] 罗莎, 赵帅, 高春海, 等. 2016—2020 年天津市市售蔬菜中农药残留状况及膳食暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(6): 1238–1243.
Luo Sha, Zhao Shuai, Gao Chunhai, et al. Present situation and dietary exposure assessment of pesticide residues in vegetables sold in Tianjin from 2016 to 2020 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(6): 1238–1243.

[20] 郭延波, 张琰, 潘胜东. 2020—2022 年宁波市市售蔬菜中农药残留状况分析及膳食暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2025, 37(3): 269–277.
Guo Yanbo, Zhang Yan, Pan Shengdong. Analysis on pesticide residues in vegetables and dietary exposure assessment, Ningbo City from 2020 to 2022 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2025, 37(3): 269–277.

[21] 严清娜, 喻瑾, 何佩霖, 等. 2022—2023 年重庆市售蔬菜农药残留状况及膳食摄入风险评估[J]. 卫生研究, 2025, 54(2): 310–315, 325.
Yan Qingna, Yu Jin, He Peilin, et al. Pesticide residue status and dietary risk assessment of vegetables in Chongqing from 2022 to 2023 [J]. Journal of Hygiene Research, 2025, 54(2): 310–315, 325.

[22] 梁琼, 宋书锋, 李拥军, 等. 2022 年我国鸡蛋中 4 种抗球虫药物残留状况及暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2025, 37(1): 79–84.
Liang Qiong, Song Shufeng, Li Yongjun, et al. Residues and dietary exposure risk assessment of four anticoccidial drugs in eggs in China in 2022 [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2025, 37(1): 79–84.

[23] 张利锋, 翟志雷, 杨瑞春, 等. 2021—2024 年河南省市售淡水鱼兽药残留监测及暴露风险评估[J]. 现代预防医学, 2025, 52(15): 2755–2760.
Zhang Lifeng, Zhai Zhilei, Yang Ruichun, et al. Veterinary drug residue monitoring and exposure risk assessment of freshwater fishes on sale in Henan Province from 2021 to 2024 [J]. Modern Preventive Medicine, 2025, 52(15): 2755–2760.

[24] 刘峰, 马明阳, 李蕾, 等. 2016—2020 年宁夏市售鸡肉和鸡蛋中 23 种兽药残留及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2022, 51(3): 497–500, 508.
Liu Feng, Ma Mingyang, Li Lei, et al. Investigation and health risk assessment of veterinary drug residues in chickens and eggs sold in Ningxia from 2016 to 2020 [J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(3): 497–500, 508.

[25] 王艳敏, 熊丽, 李娟, 等. 2015—2019 年江西省市售婴幼儿谷类辅食中重金属污染状况及膳食暴露评估[J]. 卫生研究, 2024, 53(5): 805–810.
Wang Yanmin, Xiong Li, Li Juan, et al. Pollution status and dietary exposure assessment of heavy metal in commercially available cereal-based complementary foods for infants and toddlers in Jiangxi Province from 2015 to 2019 [J]. Journal of Hygiene Research, 2024, 53(5): 805–810.

[26] 刘冰, 王怡, 朱艳杰, 等. 膳食摄入水产品中重金属的风险评估[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 267–275.
Liu Bing, Wang Yi, Zhu Yanjie, et al. Risk assessment about the dietary intake of heavy metals in aquatic products [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 267–275.

[27] 邱丹萍, 罗宝章, 蔡华, 等. 2018—2023 年上海市 15 岁及以上居民膳食黄曲霉毒素暴露风险评估[J]. 卫生研究, 2024, 53(5): 797–804.
Qiu Danping, Luo Baozhang, Cai Hua, et al. Dietary exposure assessment of aflatoxins of residents in Shanghai residents aged 15 years and above from 2018 to 2023 [J]. Journal of Hygiene Research, 2024, 53(5): 797–804.

[28] 娄雨豪, 曹冬梅, 张东杰, 等. 不同贮藏条件及加工处理后大麦中脱氧雪腐镰刀菌烯醇膳食风险评估[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 132–139.
Lou Yuhao, Cao Dongmei, Zhang Dongjie, et al. Dietary risk assessment of deoxynivalenol in barley subjected to different storage conditions or processing treatments [J]. Food Science, 2023, 44(1): 132–139.

[29] 方兰云, 李继革, 姚浔平, 等. 2017—2019 年宁波市海产品中海洋生物毒素污染状况及膳食暴露评估[J]. 卫生研究, 2021, 50(2): 296–300.
Fang Lanyun, Li Jige, Yao Xunping, et al. Contamination status and the evaluation of dietary exposure of marine biotoxins in seafood in Ningbo City in 2017-2019 [J]. Journal of Hygiene Research, 2021, 50(2): 296–300.

[30] 何雪萍, 余华, 邹立扣, 等. 成都市进出口动物源食品安全风险监测及分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(4): 1327–1333.
He Xueping, Yu Hua, Zou Likou, et al. Monitoring and analysis on import and export animal: derived food safety risk in Chengdu city [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(4): 1327–1333.

[31] 李亚, 梁剑锋, 黄林杰, 等. 梧州霉豆腐渣中微生物群落多样性及食用安全性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(24): 9619–9626.
Li Ya, Liang Jianfeng, Huang Linjie, et al. Analysis of microbial community diversity and edible safety in Wuzhou moldy tofu residue [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(24): 9619–9626.

[32] FAO, WHO. Microbiological risk assessment—Guidance for food[R]. Microbiological Risk Assessment Series No. 36. Rome: FAO and WHO, 2021. https://doi.org/10.4060/cb5006en.

[33] 李晓贝, 赵晓燕, 刘海燕, 等. 基于蒙特卡罗模拟技术的食用菌中二氧化硫膳食暴露风险评估[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 298–304.
Li Xiaobei, Zhao Xiaoyan, Liu Haiyan, et al. Dietary exposure assessment of sulfur dioxide residue in edible fungi by Monte Carlo simulation [J]. Food Science, 2020, 41(12): 298–304.

[34] 王艳莉, 李成国, 郭宝福, 等. 南京市居民膳食中糖精钠暴露的理论风险评估[J]. 卫生研究, 2020, 49(6): 1008–1013.
Wang Yanli, Li Chengguo, Guo Baofu, et al. Theoretical risk assessment for dietary exposure to sodium saccharin among residents in Nanjing City [J]. Journal of Hygiene Research, 2020, 49(6): 1008–1013.

[35] 杨靓, 牟霄, 张崇淼. 食用植物油中苯并(a)芘的污染特征及城乡居民膳食暴露评估: 以汉中市为例[J]. 中国油脂, 2024, 49(6): 106–111.
Yang Liang, Mou Xiao, Zhang Chongmiao. Contamination characteristics of benzo(a)pyrene in edible vegetable oil and dietary exposure assessment for urban and rural residents: a case study of Hanzhong city [J]. China Oils and Fats, 2024, 49(6): 106–111.

[36] 宇盛好, 彭少杰. 上海市市售食用植物油中缩水甘油酯的污染水平和

膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 52–58.
Yu Shenghao, Peng Shaojie. Contamination level and dietary exposure assessment of glycidyl esters in edible vegetable oils sold in Shanghai [J]. Journal of Food Safety and Quality, 2025, 16(6): 52–58.

[37] 杨长晓, 周永杨. 四川省烧烤和煎炸肉中 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯的污染水平及慢性膳食暴露评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(4): 238–245.
Yang Changxiao, Zhou Yongyang. Contamination status and chronic dietary exposure assessment of 3-monochloropropanediol esters and glycidyl esters in grilled and fried meat in Sichuan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(4): 238–245.

[38] 万莉, 龙超, 向琴, 等. 4 种药食两用物质多环芳烃污染状况及膳食摄入健康风险评估[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 151–158.
Wan Li, Long Chao, Xiang Qin, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon contamination and health risk assessment of dietary intake of 4 kinds of medicinal and edible substances [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 151–158.

[39] 王惠荣, 蒋友胜, 周健, 等. 中国代表性地区典型动物源性食品指示性多氯联苯污染水平和人群膳食风险评估[J]. 中国公共卫生, 2022, 38(4): 444–448.
Wang Huirong, Jiang Yousheng, Zhou Jian, et al. Contamination and human health risk assessment of indicative polychlorinated biphenyls(PCBs)in meats and eggs in five provincial-level regions across China [J]. Chinese Journal of Public Health, 2022, 38(4): 444–448.

[40] 吴斌, 张高强, 蒋友胜, 等. 我国部分地区猪肉、猪肝二噁英污染状况与风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(2): 327–333.
Wu Bin, Zhang Gaoqiang, Jiang Yousheng, et al. Analysis and risk assessment of PCDD/Fs level in pork and pork liver from five areas of China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(2): 327–333.

[41] 张令军, 刘潇, 闻胜, 等. 2023 年中国十省水产品指示性多氯联苯污染特征及健康风险评估[J]. 卫生研究, 2025, 54(3): 520–526.
Zhang Lingjun, Liu Xiao, Wen Sheng, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of indicator polychlorinated biphenyls in aquatic products in 10 provinces of China [J]. Journal of Hygiene Research, 2025, 54(3): 520–526.

[42] 裴紫薇, 李玉白, 张小燕, 等. 我国居民指示性多氯联苯膳食暴露分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(5): 962–967.
Pei Ziwei, Li Yubai, Zhang Xiaoyan, et al. Exposure assessment of dietary intake for marker polychlorinated biphenyls in China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(5): 962–967.

[43] 樊景丽, 闻胜, 刘小方, 等. 中国部分地区猪肉中指示性多氯联苯污染水平和膳食暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2024, 36(1): 32–38.
Fan Jingli, Wen Sheng, Liu Xiaofang, et al. Contamination levels and dietary exposure risk assessment of indicator polychlorinated biphenyls in pork in some regions of China [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2024, 36(1): 32–38.

[44] 王锦铭, 刘萍, 王小娜, 等. 基于食品安全指数法和危害物风险系数法评估无锡市市售蔬菜农药残留风险特征[J]. 中国食品卫生杂志, 2025, 37(5): 454–462.
Wang Jinming, Liu Ping, Wang Xiaona, et al. Characteristics and risk assessment of pesticide residues in commercially available vegetables in Wuxi City based on the index of food safety method and hazard risk coefficient model [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2025, 37(5): 454–462.

[45] 马洁, 罗莎, 赵帅, 等. 2016—2022 年天津市市售猪肉、鸡肉中兽药残留监测结果分析及膳食暴露评估[J]. 现代预防医学, 2023, 50(15): 2848–2853.
Ma Jie, Luo Sha, Zhao Shuai, et al. Analysis of surveillance results and dietary exposure assessment of veteri-nary drug residues in pork and chicken sold in Tianjin from 2016 to 2022 [J]. Modern Preventive Medicine, 2023, 50(15): 2848–2853.

[46] 梁靖凯, 单美娜, 侯坤, 等. 内蒙古地区居民蔬菜中农药残留膳食暴露风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2022, 34(3): 444–450.
Liang Jingkai, Shan Meina, Hou Kun, et al. Risk assessment of dietary exposure to pesticide residues in vegetables of residents in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2022, 34(3): 444–450.

[47] [47] 方兰云, 潘胜东, 陆蓓蓓, 等. 2018—2020 年宁波市动物源性食品中喹诺酮和四环素类兽药残留污染状况及暴露评估[J]. 卫生研究, 2022, 51(1): 113–117.
Fang Lanyun, Pan Shengdong, Lu Beibei, et al. Contamination status and the health risk evaluation of dietary exposure of quinolone and tetracycline antibiotics in animal derived foods in Ningbo City from 2018 to 2020 [J]. Journal of Hygiene Research, 2022, 51(1): 113–117.

[48] 张旭晟, 宇盛好, 李亦奇, 等. 上海市市售 3 种鱼类中孔雀石绿和硝基呋喃化合物监测结果及膳食暴露评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2020, 32(1): 88–92.
Zhang Xusheng, Yu Shenghao, Li Yiqi, et al. Result analysis and dietary risk assessment on the risk monitoring data of malachite green and nitrofurans in three kinds of fish in Shanghai [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2020, 32(1): 88–92.

[49] 汪紫薇, 陈慧媛, 朱晓华. 中国居民膳食结构的区域差异及其健康效应[J]. 地理科学, 2023, 43(10): 1825–1836.
Wang Ziwei, Chen Huiyuan, Zhu Xiaohua. Regional differences and health effects of dietary pattern of Chinese residents [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(10): 1825–1836.

[50] 刘姝甜, 李贤宾, 梁慧芯, 等. 农药残留累积性膳食风险评估研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(6): 99–105.
Liu Shutian, Li Xianbin, Liang Huixin, et al. Research progress on cumulative dietary risk assessment of pesticide residues [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(6): 99–105.

[51] 王艳莉, 郭宝福, 祝白春, 等. 2013—2017 年江苏省动物性食品中硝基呋喃类代谢物膳食暴露分析[J]. 现代预防医学, 2020, 47(7): 1197–1201.
Wang Yanli, Guo Baofu, Zhu Baichun, et al. Nitrofuran metabolites in animal derived food and dietary reliability in Jiangsu Province, 2013-2017 [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(7): 1197–1201.

[52] Affricano A, Asteggiano A, Di Bernardo A, et al. Case study: targeted HPLC-MS/MS analysis of TFA and other USC-PFAS in beverages and waters from Italy and Asia [J]. Food Control, 2026, 181: 111779.

[53] European Food Safety Authority, Cavelier A, Coja T, et al. Scientific Report on consumer health-based guidance values for trifluoroacetic acid [J]. EFSA Journal, 2026, 24(7): e10227..

[54] Huang Dan, Wang Yuxin, Zhan Jing, et al. Occurrence and dietary exposure of legacy and emerging per- and polyfluoroalkyl substances in preprepared meat and aquatic dishes - China, 2025 [J]. China CDC Weekly, 2026, 8(24): 739–743.

[55] Muncke J, Andersson A M, Backhaus T, et al. Impacts of food contact chemicals on human health: a consensus statement [J]. Environmental Health, 2020, 19(1): 25.

[56] Muncke J, Backhaus T, Geueke B, et al. Scientific challenges in the risk assessment of food contact materials [J]. Environmental Health Perspectives, 2017, 125(9): 095001.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)