

文章编号: 1674-5566(2025)01-0223-14

DOI: 10.12024/jsou.20241104685

食品产业链中重金属异质性风险研究进展

刘海泉^{1,2,3}, 陈蒙蒙¹, 潘迎捷^{1,2,3}, 谢庆超^{1,3}, 赵勇^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 食品学院, 上海 201306; 2. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 3. 农业农村部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室, 上海 201306)

摘要: 重金属是一类典型的持久性污染物, 能通过呼吸、饮水以及食物链传递等多种途径进入生物体, 可在植物、动物、微生物和人类间进行循环; 同时伴随重金属的转移以及价态或形态的转化, 不同价态或形态的重金属可能存在显著的毒性差异而对生物体产生典型毒害作用。在食品生产中, 原料、加工以及人体消化代谢等过程均可能引起重金属的价态、形态以及总量发生变化, 从而显著影响其毒性的变化。目前, 针对食品中重金属的风险评估, 忽视了其形态或价态的改变所带来的风险。本文综述了重金属在食品产业链中因其转移与转化所引起的风险, 对科学评估重金属通过食物链进入人体的毒害具有重要意义, 尤其是重金属在转移与形态或价态转化过程中所产生的异质性危害, 旨在为科学评估食品中重金属污染提供理论指导。

关键词: 食品; 重金属; 异质性; 风险; 食品产业链

中图分类号: X 171.5 **文献标志码:** A

重金属是指密度超过 4.5 g/cm^3 的金属元素, 包括汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)和砷(As)等, 其在环境中广泛存在, 且具有难以降解、高毒性及生物蓄积性。同时, 能够通过食物链逐级富集, 一旦被人体摄入, 可能诱发多种异常生理反应。例如, 长期摄入镉元素会导致骨折、癌症、肾功能不全和高血压等^[1]。因此, 食品中重金属污染作为评价食品安全的重要因素之一, 已引起社会各界的广泛关注。

食品中重金属含量的高低直接影响其对人体健康的风险及风险程度。根据我国实行的GB2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[2], 不同类型的食品被赋予了严格的重金属限量值, 以降低健康风险。然而, 大多数食品在从生产、加工、包装、运输到最终消费的整个食品产业链过程中, 不仅可能发生重金属的富集, 而且可能因重金属价态或形态改变导致其毒性差异。在生产过程中, 食品原料往往会受周围自然环境及生产条件等多重因素的影响, 从而导致其中所含重金属发生转移或转化;

在食品加工阶段, 重金属会受加工条件、加工设备等因素影响, 特别是加工条件中烹饪温度会引起重金属形态或价态的转化; 在包装环节, 包装材料是影响食品中重金属的关键因素之一, 例如, 含有重金属的包装材料会引起食品中重金属含量升高; 在运输和消费环节, 虽然它们对重金属影响的可能性较低, 但是也不能完全忽略, 如运输过程中温度波动和湿度变化、消费者的储存方式和加热条件等都会对重金属产生影响。上述重金属的转移和转化过程是引起重金属异质性的主要原因。重金属异质性是一个复杂且广泛的概念, 它涵盖了重金属在环境中以多种价态以及有机与无机形态存在, 伴随着环境的变化, 重金属可能会发生价态、形态变化, 进而引起毒性的显著改变。此外, 重金属异质性还与生物组织中的富集异质性和转化异质性有关。如, 砷的形态和价态主要包括砷酸盐、亚砷酸盐、砷甜菜碱、砷胆碱和四甲基砷酸盐等, 这些不同价态和形态的砷化合物具有不同的毒性, 其中有机砷的毒性低于无机砷^[3]。在生物组

收稿日期: 2024-11-05 修回日期: 2024-12-19

基金项目: 上海市科技兴农技术创新项目(2024-02-08-00-12-F00038)

作者简介: 刘海泉(1980—), 男, 副教授, 研究方向为食品微生物。E-mail: hqliu@shou.edu.cn

通信作者: 赵勇, E-mail: yzhao@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

织中,重金属的富集程度存在显著差异称为富集异质性;转化异质性是指食品中重金属在烹饪加工和消化过程中,重金属之间(内)存在的价态或形态的转化^[4-7]。重金属的转化异质性通常通过氧化还原反应实现价态的变化,即价态的升高或降低;同时形态的转化包含了游离态与结合态或无机态与有机态间的转变。如中华绒螯蟹因其食用前大部分为整蟹加工处理,但研究表明因重金属的转移、转化,导致其特定食用部位的重金属发生了异质性变化,进而显著增加了对人体健康造成的潜在危害^[8]。目前,对食品及其他环境介质中重金属的健康风险评估,仍依据其总量来进行计算,结合异质性理论,不能准确评估重金属污染对人体健康所构成的风险^[9]。

近年来,随着经济社会的发展和居民生活水平的提高,人们对食品安全的关注度日益增加,在此背景下,国内外学术界和监管机构逐步建立了食品中重金属健康风险评估的框架。然而,现有的风险评估方法没有考虑重金属在食品产业链中的异质性,仅利用目标危害系数^[10](THQ)、目标致癌风险(TR)、单因子污染指数^[11](P_i)及生物可及性^[12]等指标对食品中重金属的含量开展风险评估时具有一定的局限性。因此,对食品产业链中的重金属进行风险评估时,需要考虑到重金属的转移及其在食品产业链中富集、加工、包装和运输过程中的形态或价态转化,强化重金属转移及转化风险评估将有助于从更全面的视角审视食品安全,以减轻人类健康的忧虑。

1 人体内重金属的来源

重金属元素在自然界中可通过空气、土壤和水体进行传递,常借此污染食品所依赖的自然资源,进而通过多种途径进入食品,最终借助食物链进入人体内。例如,砷元素作为一种存在于土壤和水中的类金属元素,植物性食品往往在吸收土壤和水体中的营养物质时,极易将砷元素吸收进入体内^[13]。食品中的汞元素主要源自食品原料生长过程中水体、大气、土壤等自然环境,及后续的食品加工、包装等人为环节^[14]。人类在食用含有重金属的植物性食品、动物性食品和食用微生物时,其中的重金属会沿着食

物链进入人体,并在体内传递和积累,此外,人类还能够通过呼吸、饮水及皮肤接触等方式摄入重金属。由于人体对重金属的代谢和排泄速度相对较慢,重金属容易在特定器官中积累,从而产生毒性作用。食品中重金属主要来源是空气、土壤和水体,并在不同生物间进行传递^[15],见图1。

重金属在由人体外向体内的传递过程中会参与多种反应,导致其转移和转化。在这些反应中,不同类型的重金属以各自特有的形态存在,从而展现出不同的毒性特征。如,铅常见的形态有烷基铅和苯基铅,通常烷基铅的毒性相比同类苯基铅要大,其中三乙基铅对人类的毒性最大,约是无机铅离子的10倍到100倍^[16];海产品中的砷元素主要以有机砷的形态存在,而有机砷的毒性显著低于无机砷^[17]。人体内重金属来源广泛且复杂,无论是空气、水,还是日常接触的生活用品等途径,都可能让重金属悄然潜入人体。然而,食品作为人类生存的基本物质来源,在整个重金属摄入体系中占据着极为关键的地位。这就不得不深入探究食品产业链中重金属的状况,因为食品产业链从原料生产、加工、包装、运输到消费的各个环节,均可能存在影响重金属含量与价态或形态变化的因素,而这些因素又与人体最终摄入的重金属息息相关,其呈现出的异质性更是值得深入剖析,以便全面理解食品与人体内重金属的微妙关系并寻找有效的应对之策。

2 食品产业链中重金属的异质性

2.1 食品原料对重金属的富集异质性

在食品产业链中,食品原料是研究重金属污染的重要基础。食品中含有七大营养素,包括蛋白质、脂质、碳水化合物、水、无机盐(矿物质)、维生素和膳食纤维。然而,不同种类食品原料中营养素的比重存在显著差异,即便是同类食品,其重金属的富集能力也会因来源于不同性别、部位及生长周期而表现出一定的异质性。针对食品中的蛋白质,其结构会影响与重金属结合,如金属硫蛋白中的半胱氨酸残基可结合镉、汞等特定重金属,且能作为酶的组成部分或辅助因子参与重金属氧化还原等转化反应;脂质可促进脂溶性重金属甲基汞等结合,促进其在生物体内富集,且可作为细胞膜的重要组成部分,调节细胞对重

金属的通透性和转运;碳水化合物在体内代谢产生的有机酸和代谢中间产物,如葡萄糖等,可与重金属形成络合物,改变重金属的溶解性和生物可利用性;无机盐(矿物质)与重金属竞争结合位点或转运蛋白,影响其富集能力;部分维生素具有抗氧化性,可减少重金属对生物体的氧化损伤,降低细胞对重金属的摄取和积累,作为辅酶或辅基参与体内生化反应,如维生素B族参与甲基化反应;膳食纤维具有较强的吸附能力,可吸附重金属离子,形成不溶性复合物。研究表明,不同食品原料对重金属富集存在差异性,其引起重金属含量不同,如表1所示。毕士川等^[18]在研究重金属镉(Cd)在不同水产品中的含量及污染状况评价时,发现甲壳类动物中蟹对镉的富集要强于虾,淡水贝类中的河蚬中Cd含量明显高于

其他淡水贝类品种;头足类产品Cd的污染最为严重。食品中重金属往往与其成分结合,呈现出多种形式,而非简单的无机盐。田月月^[19]在对水溶性大豆多糖体外结合重金属和胆汁酸盐进行研究时,发现水溶性大豆多糖(SSPS)的主要组成是膳食纤维,膳食纤维大多具有结合重金属的作用,原因是SSPS的分子结构中含有一定量的羟基和羧基,可与金属离子结合,进而形成络合物。研究^[20]表明,食品中含有的重金属在与食品的基本成分(如蛋白质)反应时,会表现出不同的结合位点和化学亲和力,形成不同的化合物。铜Cu(II)和铅Pb(II)与水稻清蛋白(RA)的结合属于硫键合机制,在此期间形成RA-Cu(II)复合物、RA-Pb(II)复合物,这归因于它与含硫氨基酸的专一结合能力^[21]。

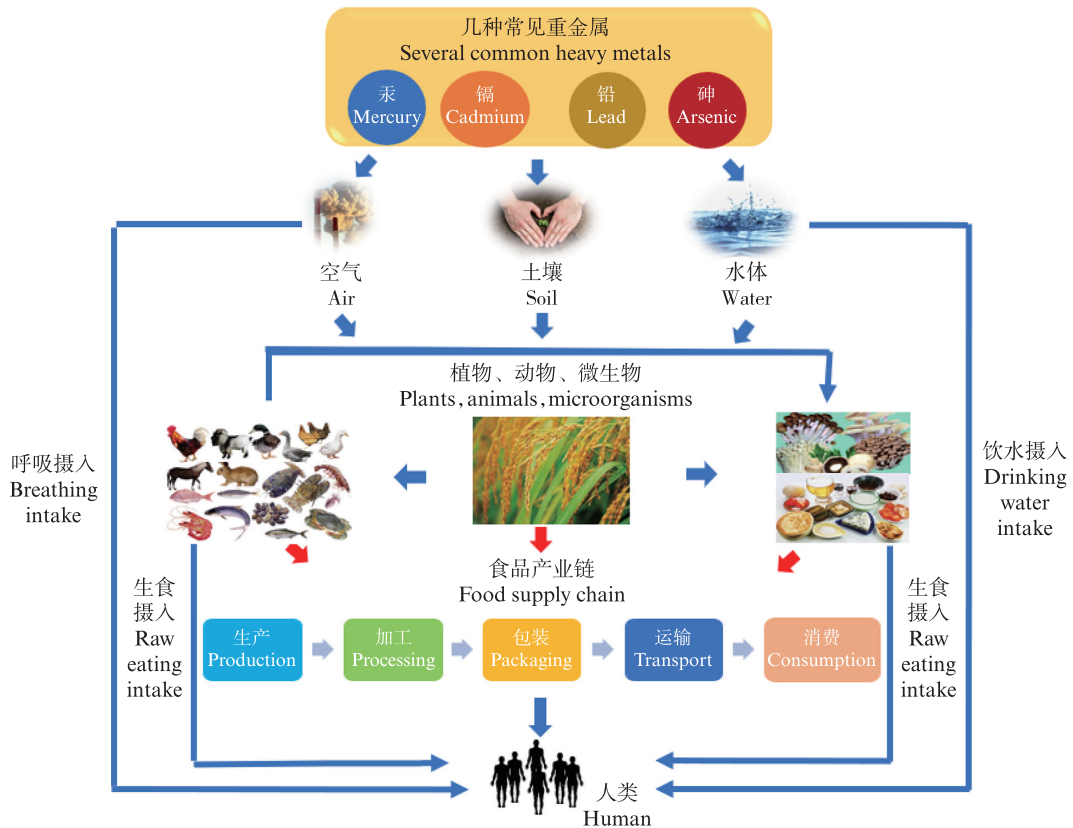


图1 重金属于自然界 - 食品产业链 - 人体迁移转化的综合示意图

Fig. 1 A comprehensive schematic diagram of the migration and transformation of heavy metals in nature-food industry chain-human body

同一类食品原料对不同种类重金属的累积能力存在显著差异,这意味着即便某种重金属的富集浓度未超过国家标准,也可能对人体健康造成威胁。食品中的重金属浓度差异可以显著影响健康风险。MORSHDY 等^[22]研究发现4种不

同类型的鱼体内,汞、镉、铅和砷的浓度存在一定差异,尽管这些鱼类的重金属含量低于国际标准,但长期食用仍可能对人体健康造成潜在危害。此外,研究表明,同一类食品原料不同部位或组织对重金属的富集也存在不可忽视的差异,

这种差异对人类健康产生了不利影响。如, FU 等^[23]测定了中国云南省 8 种野生食用菌中菌盖和菌柄的重金属含量, 结果显示, 不同部位的重金属浓度差异明显, 汞、镉和砷等重金属在野生食用蘑菇中的平均浓度已超过世界卫生组织 (WHO) 和中国的限量标准, 长期食用可能对人体健康构成风险。同样地, RA 等^[24]首次对韩国 11 种虾的不同部位进行重金属检测, 重金属在不

同部位含量各不相同, 镉元素在头部最突出, 总砷在肌肉中最高。除了水产品外, YANG 等^[25]研究表明, 玉米不同部位对重金属铅的累积和转运能力显著不同, 有机铅的毒性远超于无机铅, 不同部位所含不同形态的重金属显著影响生物体的生长和发育。对于不同种类食品原料更会因体内营养素不同而对重金属存在富集差异, 进而可能对人体健康构成风险。

表 1 不同食品原料中常见重金属的含量
Tab. 1 Content of common heavy metals in different food raw materials

食品原料 Raw-food material	汞 Mercury/(mg/kg)	镉 Cadmium/(mg/kg)	铅 Lead/(mg/kg)	砷 Arsenic/(mg/kg)	参考文献 References	
水产品 Aquatic product	鱼类 Fish	3.000	0.200	14.100	24.900	[26]
	贝类 Shellfish	0.126	0.156	0.186	0.226	[27]
	淡水蟹类 Freshwater crabs	0.016	0.243	0.059	0.937	[28]
	淡水虾类 Freshwater shrimps	0.050	0.005	0.011	0.195	[28]
食用菌 Edible mushrooms	野生型 Wild type	0.211	0.496	0.940	3.122	[29]
	栽培型 Cultivated type	0.042	0.167	0.173	0.313	[29]
植物 Plant	水稻 Rice	0.004	0.308	-	0.064	[30]
	菠菜 Spinach	0.013	0.420	0.280	0.040	[31]
	高粱 Sorghum	-	0.136	0.255	0.236	[32]
	烟草 Tobacco	1.940	0.570	0.370	0.160	[33]
畜禽肉类 Livestock and poultry meat	鸡肉 Chicken meat	-	<DL	0.005	0.004	[34]
	鸭肉 Duck meat	-	<DL	0.004	0.009	[34]
	鸽子肉 Pigeon meat	-	<DL	0.013	0.007	[34]
	牛肉 Beef	-	0.210	0.017	0.028	[34]
	羊肉 Mutton	-	<DL	0.008	0.003	[34]

注: -表示未检测, DL 表示检出限。

Notes: - indicates no detection, DL indicates the detection limit.

食品原料中不同组织或部位具有富集不同重金属的性质。这种特性可能导致重金属在食品原料中的含量发生变化, 从而引起重金属的富集异质性。尽管已有研究探讨了一些食品原料中重金属的浓度差异, 但关于其他尚未探究的食品原料领域, 营养素差异如何引发重金属富集异质性, 仍

有待科学研究予以解释。因此, 未来研究应重点关注各类食品中不同营养素对重金属富集的影响, 以期食品安全评估提供科学依据。

2.2 食品加工中重金属转移及转化异质性

食品加工是人们日常生活中不可或缺的重要组成部分, 也是食品产业链中的关键环节。根据

《中国居民膳食指南(2022)》及人们的饮食习惯,绝大多数食品消费前均经过加工过程。而食品中重金属的转移及转化常常受到加工过程中加工设备、条件、辅料等多种因素的影响(图2)。在食品加工环节,加工条件中的温度、pH、时间、压力等可能使重金属的形态及含量发生变化。其中以加工时温度条件为例,研究^[7]表明,在超过150℃的温度下,水产品中无毒的有机态砷甜菜碱(AsB)分解为有毒的四甲基砷离子(TMA⁺);经过200℃以上的烘烤处理后,紫菜中毒性较弱的二甲基砷酸、一甲基砷酸以及毒性较高的无机砷的含量均显著增加,当紫菜加热温度达到250℃时,在1h内,紫菜中的砷糖会完全降解,最终仅残留以砷酸盐和亚砷酸盐为主的无机砷和简单的有机砷^[35]。除了改变重金属的形态,加工温度也显著影响重金属的含量。研究^[36]发现,加工时通过升高温度可以显著降低扇贝内脏中的汞含量(降低59%),但同样的处理却引起挪威龙虾中汞含量显著增加;ZHAO等^[37]的研究显示,栉孔扇贝在蒸煮后肝脏中的镉含量有所下降。同样地,经过煮熟的大米中镉含量显著低于未煮熟的大米^[38]。然而,与新鲜鱼类相比,经过加工处理的鱼类铅含量显著增加^[39];加工后的小龙虾中镉含量增加,扇贝中铅含量也增加^[40-41]。不同食品在加工时所使用的设备会有所不同,如清洗设备、切割设备、烹饪设备等,这些不同设备的材料也可能存在差异。SHAMLOO等^[42]探究了各种常用炊具在烹饪食物过程中向食物释放重金属的情况,结果表明旧炊具相比于新炊具,在烹饪过程中重金属的释放会增加更多,以至于增加了人体因摄入这些重金属而患病的可能性。同时,食品在进行加工时,往往会在其中添加各种调味料,例如添加剂、佐料、水等,而这些调味料也存在改变重金属含量的可能性。BEHROUZI等^[43]研究指出使用醋酸和柠檬酸对大米进行预煮,可显著降低大米中所含铅浓度,其原因可能是重金属铅溶解到烹饪水中或者被酸所溶解,上述的醋酸和柠檬酸便是在大米加工过程中通过改变pH,引起的大米中重金属含量的变化。对于皮蛋,其传统加工工艺中使用到其他的辅料如泥、植物灰、纯碱、氧化铅(PbO)等,其中在传统的皮蛋制作流程中,氧化铅则被用作一种特定的食品添加剂,其主要目的是优化皮蛋的色泽并提升口感。

如陈孝雄^[44]研究表明,皮蛋在经过传统加工后,会因所使用的腌制液而增加重金属铅的浓度,而工业生产中采用的代铅法可能带来其他重金属含量的超标。对于铬元素,六价铬(Cr⁶⁺)具有较强的氧化性,在酸性环境下,如在腌制食品加工中,它可能会被一些还原性物质(如维生素C等)还原为三价铬(Cr³⁺)。反应式:Cr₂O₇²⁻+3C₃H₈O₆+8H⁺→2Cr³⁺+3C₆H₆O₆+7H₂O。三价铬的毒性相对六价铬要小,这种价态变化对食品的安全性有着重要的影响。此外,加工压力也是不可忽视的一种加工条件,其对食品中部分重金属的存在形式可能产生影响。以汞为例,在一些海鲜加工过程中,汞可能以有机汞(如甲基汞)和无机汞的形式存在。高压环境可能会改变海鲜内部的化学平衡,影响微生物的活动。一些微生物可以将无机汞转化为有机汞,而高压可能会抑制或促进这些微生物的转化过程。

在食品加工过程中,多种因素可能诱发重金属的迁移及转变,这一过程中若重金属的含量与形态发生变化,均可能对人类健康构成潜在威胁。尽管已有研究关注到温度对重金属转化与迁移的作用,但对于加工环节中除温度以外的其他诸多因素如何影响重金属含量及其转化的探究,目前仍显不足。因此,深入探究食品加工过程中其他各类因素对重金属含量及其形态变化的综合影响,显得尤为迫切和重要。

2.3 其他环节中重金属转移及转化异质性

食品产业链中除了原料生产、食品加工之外,还包括食品的包装、运输、消费等环节,特别是包装,其包装材料的组成可能会影响食品中重金属的转移,如使用金属包装的罐头水产品沙丁鱼会被金属外壳中的重金属镉元素影响,使沙丁鱼体内的镉浓度升高^[45]。同样地,运输环节作为食品产业链中的重要组成部分,其对重金属迁移的影响也不容忽视。在运输过程中,温度和湿度是两个重要的环境因素,它们可能对食品中重金属的转移及转化产生显著影响。此外,由于运输系统和物流管理系统在缩短食品运输距离方面效率不高,增加了有害物质如重金属沉积在食品上的可能性^[46]。在食品消费环节,若食品在不适宜的条件下保存时间过长,大概率会导致食品中的某些成分发生变化,包括重金属的形态或价态。目前,关于其他

环节中重金属转移及转化的研究仍然相对缺乏。为了更全面地了解包装、运输及消费环节

对食品中重金属迁移与转化的影响,后期有必要进行更为深入地研究。

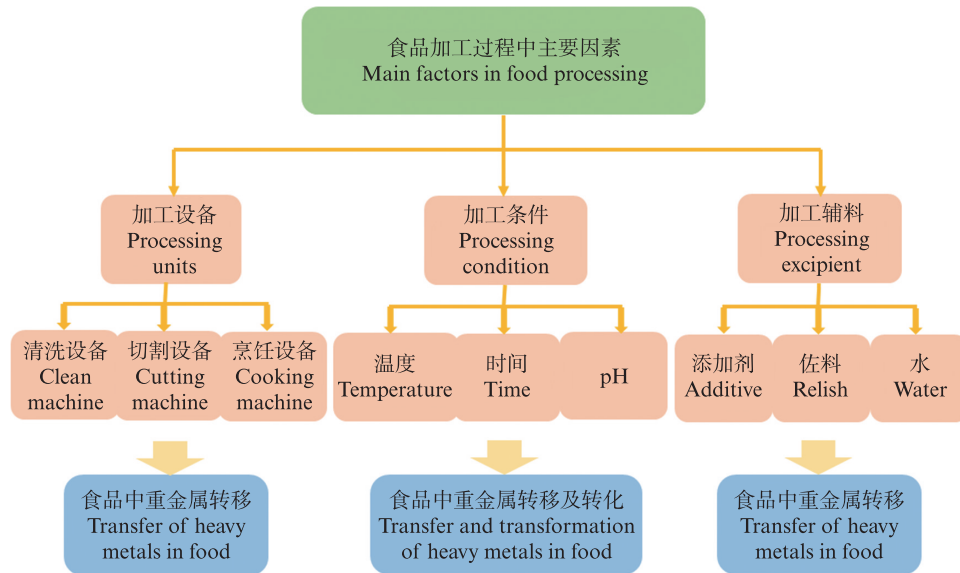


图2 食品加工过程中影响重金属转移及转化的主要因素

Fig. 2 The main factors affecting the transfer and transformation of heavy metals in food processing

3 人体内重金属的代谢

食物在经过口腔、食道、胃、小肠及大肠等消化后,其中的营养素被人体吸收,而代谢废物则通过排泄系统排出体外。重金属在人体内的代谢过程复杂且多样(图3)。在食品中,重金属的存在常常引发健康问题,这些重金属一旦进入人体,可能会与体内某些成分(如蛋白质、氨基酸及谷胱甘肽等)结合,或与阴离子结合生成沉淀,从而影响生理功能。已有研究^[47]表明,人体内生物大分子发生氧化变质是由金属离子与DNA及核蛋白的结合作用所引起的。在生理pH下,As(Ⅲ)与谷胱甘肽络合被认为三角锥体结构,即As(GS)₃;Pb(Ⅱ)具有协调行为的通用性质,同样可能会形成[Pb(GS)₃]复合物^[48]。无机砷在人体内代谢,五价砷与人体内的谷胱甘肽(GSH)反应生成三价砷,此时重金属便在消化过程中发生了氧化还原反应^[8]。吴迪等^[49]研究了镉元素在甲壳类水生生物中的赋存形态,镉随着食物链进入人体后,会对呼吸道产生刺激,并抑制呼吸链复合物辅酶(Nicotinamide adenine dinucleotide, NADH)递氢反应的表达,以此降低腺嘌呤核苷三磷酸(Adenosine triphosphate, ATP)的合成。

食品是人体摄入重金属的主要途径。在消

化吸收过程中,食物中的重金属可被肠道吸收,其吸收程度受到形态、肠道pH、肠道微生物以及不同个体的饮食结构等多种因素的影响,可能导致重金属发生迁移及转化,从而对人体的器官和组织造成潜在威胁。研究^[50]表明,胃肠道中肠道微生物在消化代谢过程中对重金属形态或价态的影响不容忽视。例如FU等^[51]发现,在肠道菌群的作用下,海藻中的砷酸盐可转化为一甲基砷酸盐和亚砷酸盐,其原因可能是肠道菌群的存在引起了砷元素发生了氧化还原反应。研究^[52]表明,肠道微生物最多可在21 h内将50%的无机砷转化为一甲基砷酸和二甲基砷酸。冯瑞雪等^[53]模拟消化研究表明,随着pH等条件的变化,肌肉中与蛋白质等大分子结合的复合态镉化合物会解离成镉离子。消化腺作为金属解毒的关键器官,在消化道中检测到了大量的无机汞和甲基汞,这突显了肠道菌群在膳食中汞的甲基化及去甲基化过程中的潜在影响^[54]。此外,人体肠道微生物能够通过生物吸附、生物累积和生物氧化还原等作用,改变各种重金属化合物的形态、价态及毒性,进而抑制其通过肠壁细胞散布至血液或其他组织,这一过程有助于促进宿主将重金属代谢排出体外,从而减少其对机体的潜在危害^[55]。除了肠道微生

物这一关键因素之外,人体内消化代谢环节其他因素,如肠道 pH 及不同个体的饮食结构也可能会对食品中重金属的迁移及转化产生影响,

但目前尚未有明确的结论,后期可深入研究这方面。人体代谢重金属的规律,是衡量食品中重金属风险评估维度的重要参照。

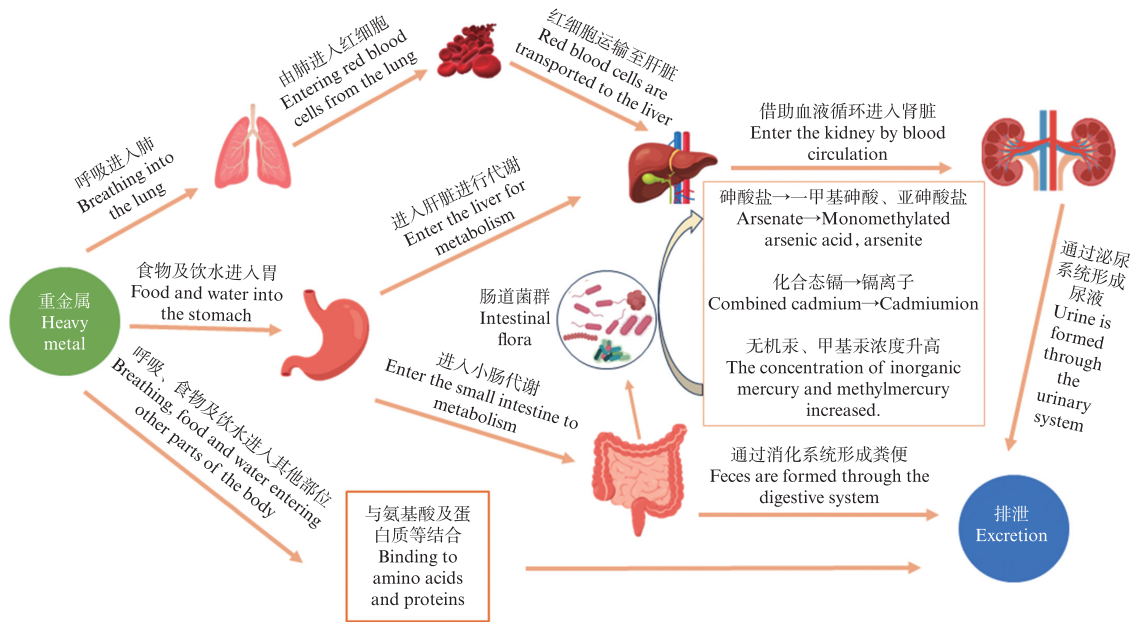


图3 重金属在机体内的代谢
Fig. 3 Metabolism of heavy metals in the body

4 食品中重金属风险评估

食品中重金属污染具有隐蔽性、长期性和不可逆性,严重危及人类健康。仅凭重金属含量开展风险评估是不足以全面评估的,因为不同形态的重金属其毒性差异很大,如表2所示。铅离子(Pb^{2+})可以通过鱼类的鳃和身体表面直接进入体内,对其生理、行为和生化功能产生广泛的毒性影响。与无机铅相比,四烷基铅更易被人体吸收并在体内累积,这种物质可能损害中枢和周围神经系统、免疫系统、心血管系统及肝脏和肾脏等器官^[56]。因此,对食品中重金属进行风险评估,不仅要关注重金属含量,还要重点考虑重金属转移、转化对风险评估产生的影响,以期全面地评估重金属异质性对人体健康的影响。目前仍可采用目标危害系数(Target hazard quotient, THQ)、食品安全指数法^[57-58](Index of food safety, IFS)、生物富集因子^[59](Bioconcentration factor, BCF)和生物可及性等对食品中重金属异质性开展风险评估。THQ作为一种综合风险指数,由食品重金属浓度和日常消费量决定,可用于食品产业链中不同阶段

重金属转移及转化异质性的研究,但是需要增加的是对食品产业链不同阶段食品中不同价态重金属浓度进行检测,它将污染物摄入量与标准参考剂量进行比较,常被用于重金属的非致癌风险评估(美国环保局 USEPA);IFS法通过测定或估计食品中危害物的含量,确定危害物的安全摄入量,并计算各危害物的摄入风险,最后对危害物的风险进行加权平均,得到综合评价,其是一种综合性的食品安全危害物暴露风险评估方法,此指标可用于食品产业链中消费环节的风险评估;BCF是为了指示食品积累金属的程度,是食品中重金属与土壤中重金属浓度的比值,可用于判断食品原料生产过程中重金属富集程度,因此可用于食品原料的生产阶段中重金属异质性的风险评估;在食品安全风险评估中,生物可及性(Bioaccessibility)用于评估食品中有毒物质的危害性,但需增加对消费阶段食品中重金属异质性(包括重金属的含量和价态或形态变化)进行检测,它是指食物在胃肠消化过程中即消费环节,营养素或污染物从食物基质中释放溶出并可以被人体吸收的百分比,将生物可及性因素纳入风险计算有助于更

全面地进行评估^[60]。

关于食品中重金属转移及转化异质性风险评估的研究,需重点关注食用人群和食品两个方面。一方面,研究主要针对不同食用人群进行风险评估,其中食用人群的年龄、性别和体重是影响风险评估结果的关键因素。据报道,对于同性别不同年龄段的人群,水产品中重金属引起的健康风险趋势表现为年龄越小,健康风险越大,儿童的重金属暴露水平明显高于成人,这种健康风险变化趋势常常不固定^[61]。研究^[60]表明在THQ的计算公式中体重位于分母上,低龄人群和女性群体会导致THQ^[7]的结果偏大,因此,这两部分人群食用含重金属的食品时会有更大风险,应注意避免过量食用重金属含量高的各种食品。YU等^[62]研究揭示了一个现象:随着人类年龄的增长,水产品的摄入量呈现上升趋势。中年居民(41-50岁)比年轻人(21-30岁)面临更大的风险,与男性相比,女性食用海鱼与贝类的比例更高,特别是海鱼和贝类比淡水鱼污染更严重,这些表明女性面临的健康风险更大。另一方面,对于食品而言,LAO等^[63]研究表明远洋蟹体内的镉和砷的THQ非致癌物值分别高达1.05和2.53,这两个值高于风险商阈值1,表明海水螃蟹存在镉和砷的潜在风险。研究表明,经过消化后的淡水蟹中无机砷的THQ小于1,这说明食用淡水蟹不构成显著的风险。YU等^[62]研究表明生贝类的镉浓度存在非致癌风险,当考虑到生物可及性时,其不会对健康构成风险。在风险评估中,重金属污染物的生物可及性是不可忽视的,考虑生物可及性可更加全面地进行风险评估。未来应针对孕妇、幼童和老年人等敏感人群,开展关于重金属异质性污染影响的研究。此外,还应对食品产业链中其他环节进行风险评估。总之,食品产业链中需高度关注重金属转移及转化差异所带来的风险,通过精准风险评估将有助于人们更科学、安全地选择食品。THQ的计算公式:

$$THQ = \frac{E_D \times F_{IR} \times E_F \times C}{R_{FD} \times W_{AB} \times T_A} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: E_D 为暴露持续时间(70年,近似于人类的平均寿命); F_{IR} 为每日摄食速率; E_F 为人群暴露频率(365天/年); C 为重金属的浓度,mg/kg; R_{FD} 为参考口服剂量,mg/(kg_{bw}·d); W_{AB} 为成年消费者的平均

体重(70 kg); T_A 为平均暴露时间(365天/年× E_D)。

$$IFS = \frac{EDI_C \times f}{SI_C \times m_b} \quad (2)$$

$$EDI_C = R \times F \times E \times P \quad (3)$$

式中: C 为某种危害物; EDI_C 为危害物 C 的实际摄入量估算值; R 为食品中危害物 C 的残留水平; F 为食品的估计摄入量; E 为食品的可食用部位因子; P 为食品的加工出来因子; SI_C 为安全摄入量,采用每日允许摄入量(ADI); m_b 为人体平均质量; f 为安全摄入量的校正因子。

$$BCF = \text{Bioconcentration (food) / concentration (medium)} \quad (4)$$

$$\text{Medium} = \text{soil or litter} \quad (5)$$

5 结论与展望

食品产业链中存在重金属的迁移及其转化的复杂现象,主要存在于原材料生产、加工处理、包装封存、运输配送等产业链环节,以及人体的消化代谢过程中。因此,评估食品中重金属污染时,需改变传统的单一关注食品中重金属总量的局限。重金属的形态或价态转化对其生物可利用性、毒性效应及健康风险具有决定性影响,要全面、准确地评估食品中重金属的污染状况,必须综合考虑重金属在食品产业链中的迁移、转化。

就食品安全问题而言,食品产业链中重金属的转移及转化异质性所带来的风险,目前尚未得到全面而清晰的评估,今后可从以下3个方面着手进行研究:(1)食品原材料,由于各原料之间的差异,导致其对重金属的富集程度不同,可深入探究同一类食品中所含有的营养素或各种组分对重金属富集异质性影响的作用机制;(2)加工过程,目前研究主要关注加工时温度条件使食品中重金属发生转移或转化,使得其毒性发生变化,关于温度引起的重金属转化的机制还未见报道,可深入研究加工过程中加工条件、设备、辅料等其他因素对重金属转化的机制;(3)除了原料生产、加工环节外,其他如包装、运输和消费环节同样可能对重金属含量产生影响。这些环节的管理和条件将直接影响食品中重金属的含量及其价态或形态转化。未来应对这些环节展开更为深入的研究,以全面评估其对食品中重金属转移和转化的影响,这将为保障食品安全、提升食品质量提供重要的信息支持。

表 2 食品中常见重金属形态及其毒性作用
 Tab. 2 Forms and toxic effects of common heavy metals in food

重金属元素 Heavy metal elements	化合物名称 Chemical name	易富集的食品 Food easily enriched with heavy metals	毒性作用 Toxic action	参考文献 References
砷 Arsenic	一甲基砷(MMA) Monomethylated arsenic acid (MMA)	鱼类、稻米 Fish, rice	毒性较弱,可直接排泄 The toxicity is weak and can be excreted directly.	
	二甲基砷(DMA) Dimethylated arsenic acid (DMA)	鱼类、贝类、稻米 Fish, shellfish, rice	毒性较弱,可引起巨核细胞死亡 The toxicity is weak and can cause megakaryocyte death.	
	砷甜菜碱(AsB) Arsenic betaine (AsB)	鱼类、贝类 Fish, shellfish	无毒,可直接排泄 Non-toxic, can be directly excreted	
	砷胆碱(AsC) Arsenic choline (AsC)	鱼类 Fish	无毒,易氧化为AsB,可分解为MMA和DMA Non-toxic, easily oxidized to AsB, and can be decomposed into MMA and DMA.	[4, 64-66]
	砷糖(AsS) Arsenic sugar(AsS)	海鲜鱼类 Seafood fish	人体内代谢为有毒的二甲基砷酸 Toxic dimethylarsinic acid is metabolized in human body.	
	砷脂 Arsenic grease	甲壳类、鱼类 Crustaceans, fish	脂溶性砷化合物,无毒 Fat-soluble arsenic compounds, non-toxic	
	砷酸盐(As ⁵⁺) Arsenate	贝类、稻米 Shellfish, rice	毒性高,可致癌 Highly toxic, carcinogenic	
	亚砷酸盐(As ³⁺) Arsenite	贝类、谷物 Shellfish, cereals	毒性强,可致畸 Highly toxic, teratogenic	
汞 Mercury	甲基汞(MeHg) Methylmercury (MeHg)	鱼类、蔬菜 Fish, vegetables	毒性较大 Great toxicity	
	乙基汞(EtHg) Ethyl mercury(EtHg)	鱼类、虾类、蟹类 Fish, shrimp, crabs	损害人体神经系统和心脏 Damage to the human nervous system and heart	
	有机汞 Organic mercury	—	易在肝肾富集,部分会进入脑组织中,使大脑皮层、小脑和末梢神经受损 It is easy to enrich in the liver and kidney, and some of it will enter the brain tissue, causing damage to the cerebral cortex, cerebellum and peripheral nerves	[4, 67-68]
	无机汞(Hg及其化合物) Inorganic mercury (Hg and its compounds)	植物性食品 Plant acid food	毒性较小,不易吸收 Toxicity is small, not easy to absorb	
	元素汞(Hg ⁰) Elemental mercury (Hg ⁰)	—	以汞蒸气形式到体内累积导致中毒 Accumulation in the form of mercury vapor into the body leads to poisoning	
镉 Cadmium	有机镉 Organic cadmium	贝类、稻米 Shellfish, rice	毒性微弱 Toxicity is weak	[69]
	无机镉 Inorganic cadmium	虾蛄 Shrimp	毒性较强 Stronger toxicities	
铅 Lead	三乙基铅 Triethyl lead	海水鱼类 Seawater fish	毒性强,诱导脑细胞凋亡 Strong toxicity, induce brain cell apoptosis	
	四乙基铅 Tetraethyl lead	—	神经毒物,严重损害神经 Nerve poison, serious damage to the nerves	[4, 70-71]
	无机铅 Inorganic lead	皮蛋类 Yolk eggs	毒性弱 Weak toxicity	

在食品产业链中,重金属的迁移及其转化所引发的异质性,可能构成了对人体健康的潜在风险。因此,采用更科学的方法来精确评估食品中重金属的形态及其含量显得尤为重要。在食品重金属污染物的研究中,除了对重金属的含量及其形态进行检测外,还应考虑科学手段来降低其对健康的风险。

作者声明本文无利益冲突

参考文献:

- [1] 林新校, 吴泽. 食品中重金属的健康风险评估研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(12): 225-233.
LIN X X, WU Z. Research progress on health risk assessment of heavy metals in food[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(12): 225-233.
- [2] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2762—2022 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 2762—2022 National food safety standard - limits of contaminants in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2022.
- [3] LIU X L, WANG Q, HE J, et al. Occurrence, speciation analysis and health risk assessment of arsenic in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) collected from China[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2020, 94: 103647.
- [4] 曹欢, 胡钰梅, 潘迎捷, 等. 水产品中重金属异质性导致的风险[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 161-173.
CAO H, HU Y M, PAN Y J, et al. Risk caused by heterogeneity of heavy metals in aquatic products[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, 16(6): 161-173.
- [5] ZHU J M, HONG K, SHEN X D, et al. A new method for evaluating the bioaccessibility of different foodborne forms of cadmium[J]. Toxicology Letters, 2020, 319: 31-39.
- [6] 王子衡. 中华绒螯蟹中重金属的分布特征调查及砷的食用安全风险研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
WANG Z H. Investigation on distribution characteristics of heavy metals in *Eriocheir sinensis* and research on edible safety risk assessment of arsenic[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [7] 曹欢. 烹饪方式对中华绒螯蟹中元素分布影响及砷的食用安全风险研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
CAO H. Effects of cooking on the distribution of elements in *Eriocheir sinensis* and the risk assessment of arsenic consumption[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022.
- [8] 曹欢, 潘迎捷, 赵勇, 等. 烹饪方式对中华绒螯蟹中常量元素、微量元素及重金属分布的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(2): 387-394.
CAO H, PAN Y J, ZHAO Y, et al. Influence of cooking methods on the distribution of major elements, micronutrients and heavy metals in Chinese mitten crab[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(2): 387-394.
- [9] MOGHADDAM V K, LATIFI P, DARRUDI R, et al. Heavy metal contaminated soil, water, and vegetables in northeastern Iran: potential health risk factors[J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 2022, 20(1): 65-77.
- [10] USEPA. Risk based concentration table [Z]. Philadelphia: United States Environmental Protection Agency, 2000.
- [11] YU H L, SHEN X F, CHEN H Y, et al. Analysis of heavy metal content in *Lentiniula edodes* and the main influencing factors[J]. Food Control, 2021, 130: 108198.
- [12] SHIM S M, FERRUZZI M G, KIM Y C, et al. Impact of phytochemical-rich foods on bioaccessibility of mercury from fish[J]. Food Chemistry, 2009, 112(1): 46-50.
- [13] 李俊生, 郭小瑞, 蔡峥. 谷物中重金属来源、检测技术及膳食风险研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(23): 141-147.
LI J S, GUO X R, QI Z. Advances in heavy metal sources, detection techniques and dietary risks in cereals[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(23): 141-147.
- [14] 董娜, 罗蓓超, 李伟航, 等. 液相色谱-蒸汽发生-原子荧光联用技术测定食品中砷、汞的形态[J]. 江苏调味副食品, 2023(4): 30-33.
DONG N, LUO X C, LI W H, et al. Determination of As and Hg in food by liquid chromatography-steam occurrence-atomic fluorescence technology[J]. Jiangsu Condiment and Subsidiary Food, 2023(4): 30-33.
- [15] 常璐, 黄娇芳, 董浩, 等. 合成生物学改造微生物及生物被膜用于重金属污染检测与修复[J]. 中国生物工程杂志, 2021, 41(1): 62-71.
CHANG L, HUANG J F, DONG H, et al. A review on bioremediation and detection of heavy metal pollution by synthetic biological engineered microorganisms and biofilms[J]. China Biotechnology, 2021, 41(1): 62-71.
- [16] 李杰, 陆庆, 易路遥, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法检测水产品中铅的形态[J]. 中国卫生检验杂志, 2017, 27(20): 2908-2910, 2931.

- LI J, LU Q, YI L Y, et al. Speciation detection of lead in aquatic products by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2017, 27(20): 2908-2910, 2931.
- [17] 付凤富, 孙颖, 王绪盛, 等. 水产品中砷形态分析研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(2): 341-349.
- FU F F, SUN Y, WANG X S, et al. Research progress on speciation analysis of arsenic in seafood[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(2): 341-349.
- [18] 毕士川, 于慧娟, 蔡友琼, 等. 重金属Cd在不同水产品中的含量及污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(4): 181-185.
- BI S C, YU H J, CAI Y Q, et al. Assessment on cadmium pollution of aquatic products in Shanghai's market[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(4): 181-185.
- [19] 田月月. 水溶性大豆多糖体外结合重金属和胆汁酸盐的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- TIAN Y Y. *In vitro* binding of heavy metals and bile salts by soybean soluble polysaccharides[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [20] AMYOT M, HUSSER E, ST-FORT K, et al. Effect of cooking temperature on metal concentrations and speciation in fish muscle and seal liver[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 262: 115184.
- [21] WANG R, WANG T T, DONG T T, et al. Structural interplay and macroscopic aggregation of rice albumins after binding with heavy metal ions [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105248.
- [22] MORSHDY A E M A, THARWAT A E, MAAROUF H, et al. Heavy metal contents in salted fish retailed in Egypt: dietary intakes and health risk assessment [J]. Open Veterinary Journal, 2023, 13(12): 1738-1743.
- [23] FU Z Q, LIU G, WANG L X. Assessment of potential human health risk of trace element in wild edible mushroom species collected from Yunnan Province, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(23): 29218-29227.
- [24] RA W J, YOO H J, KIM Y H, et al. Heavy metal concentration according to shrimp species and organ specificity: monitoring and human risk assessment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 197: 115761.
- [25] YANG N K, WANG H B, WANG H J, et al. Screening maize (*Zea mays* L.) varieties with low accumulation of cadmium, arsenic, and lead in edible parts but high accumulation in other parts: a field plot experiment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(25): 33583-33598.
- [26] SROY S, ARNAUD E, SERVENT A, et al. Nutritional benefits and heavy metal contents of freshwater fish species from Tonle Sap Lake with SAIN and LIM nutritional score [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021, 96: 103731.
- [27] OMERAGIC E, MARJANOVIC A, DJEDJIBEGOVIC J, et al. Arsenic, cadmium, mercury, and lead in date mussels from the Sarajevo fish market (Bosnia and Herzegovina): a preliminary study on the health risks [J]. Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences, 2020, 44(2): 435-442.
- [28] 陈晓敏, 陈韵, 梁智安, 等. 基于电感耦合等离子体质谱法对广州市售水产品中6种重金属的含量测定与污染评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 59-66.
- CHEN X M, CHEN Y, LIANG Z A, et al. Content determination and contamination assessment of 6 kinds of heavy metals in aquatic products sold in Guangzhou by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 59-66.
- [29] 梅婷, 周海泳. 常见野生食用菌重金属含量分析及安全评价[J]. 中国果菜, 2023, 43(12): 34-38.
- MEI T, ZHOU H Y. Analysis of contamination and safety assessment on heavy metals of common edible fungi [J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(12): 34-38.
- [30] 李瑞斌, 严洪. 不同安全利用措施对水稻重金属含量的影响[J]. 农技服务, 2023, 40(4): 8-10.
- LI R B, YAN H. Effects of different safety utilization measures on heavy metal content in rice [J]. Agricultural Technology Service, 2023, 40(4): 8-10.
- [31] 黑儿平, 上官宇先, 喻华, 等. 成都平原农田蔬菜重金属含量及污染评价[J]. 热带生物学报, 2023, 14(2): 145-152.
- HEI E P, SHANGGUAN Y X, YU H, et al. Heavy metal contents and pollution evaluation of farmland vegetables in Chengdu Plain [J]. Journal of Tropical Biology, 2023, 14(2): 145-152.
- [32] NGO H T T, HANG N T T, NGUYEN X C, et al. Toxic metals in rice among Asian countries: a review of occurrence and potential human health risks [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140479.
- [33] AL MUTAIRI M A, AL HERBISH H A, AL-AJMI R S, et al. Analyzing pesticides and metal (loid)s in imported tobacco to Saudi Arabia and risk assessment of inhalation exposure to certain metals [J]. Inhalation Toxicology, 2022, 34(3/4): 68-79.
- [34] 欧爱芬, 张挺, 梁兰兰, 等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定畜禽肉中9种重金属元素含量[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 282-288.
- OU A F, ZHANG T, LIANG L L, et al. Determination of nine heavy metal elements in livestock and poultry meat by ICP-MS [J]. Science and Technology of Food

- Industry, 2021, 42(7): 282-288.
- [35] 舒本胜, 翟毓秀, 刘俊荣, 等. 加工方式对海带和紫菜中砷及其形态的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(9): 166-170, 353.
- SHU B S, ZHAI Y X, LIU J R, et al. Effect of different processing methods on the arsenic and its form in kelp and *Porphyra* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(9): 166-170, 353.
- [36] LI J, DU H Y, PENG F J, et al. Evaluation of the effect of different cooking methods on the heavy metal levels in crayfish muscle [J]. Biological Trace Element Research, 2023, 201(8): 4103-4113.
- [37] ZHAO Y F, WU J F, KANG X M, et al. Bioaccessibility and transformation of cadmium in different tissues of Zhikong scallops (*Chlamys farreri*) during *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134285.
- [38] CHEN R, HU M M, CHENG N, et al. Prediction of the bioaccessibility and accumulation of cadmium in the soil-rice-human system based on optimized DGT and BCR coupled models [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 280: 116509.
- [39] CHRISTOPHE M K J, MARLÈNE Y T, FRANÇOIS N V J, et al. Assessment of cooking methods and freezing on the nutritional value and health risks of heavy metals in four fish species consumed in Douala, Cameroon [J]. Heliyon, 2024, 10(7): e28316.
- [40] 李静, 张梦圆, 彭方军, 等. 加工方式对小龙虾尾及加工液中重金属含量的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 182-189.
- LI J, ZHANG M Y, PENG F J, et al. Effects of cooking methods on heavy metal levels in crayfish tail and cooking juice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 182-189.
- [41] 张梅超, 冯立霞, 王楠. 加工方式对两种贝类中8种重金属元素生物可及性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(21): 7118-7124.
- ZHANG M C, FENG L X, WANG N. Effects of processing methods on bioaccessibility of 8 kinds of heavy metals in 2 kinds of shellfish [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(21): 7118-7124.
- [42] SHAMLOO E, NICKFAR F, MAHMOUDZADEH M, et al. Investigation of heavy metal release from variety cookware into food during cooking process [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2024, 104(19): 8085-8101.
- [43] BEHROUZI R, MARHAMATIZADEH M H, RAZAVILAR V, et al. Effects of the pre-cooking process using acetic acid and citric acid on lead concentration in rice [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(1): 545-551.
- [44] 陈孝雄. 皮蛋腌制液循环利用工艺的研究及生产线设计[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- CHEN X X. Studies on recycling process of pickling solution and product line design for preserved eggs [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [45] SAFTA M, LIMAM I, JEBALI R, et al. Monitoring of metals migration and identification of corrosion sources in canned tomatoes and sardines [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2022, 102(16): 4664-4677.
- [46] LEBELO K, MALEBO N, MOCHANE M J, et al. Chemical contamination pathways and the food safety implications along the various stages of food production: a review [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(11): 5795.
- [47] JAN A T, AZAM M, SIDDIQUI K, et al. Heavy metals and human health: mechanistic insight into toxicity and counter defense system of antioxidants [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2015, 16(12): 29592-29630.
- [48] NEUPANE K P, PECORARO V L. Pb-207 NMR spectroscopy reveals that Pb (II) coordinates with glutathione (GSH) and tris cysteine zinc finger proteins in a PbS₃ coordination environment [J]. Journal of Inorganic Biochemistry, 2011, 105(8): 1030-1034.
- [49] 吴迪, 王梦圆, 史永富, 等. 镉在甲壳类水生生物中的蓄积现状及赋存形态研究进展 [J]. 核农学报, 2023, 37(1): 128-139.
- WU D, WANG M Y, SHI Y F, et al. Research progress of cadmium accumulation and speciation in crustacean aquatic organisms [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(1): 128-139.
- [50] 韩晓杰, 徐美玲. LC-MS在食品加工过程中重金属污染物检测中的应用 [J]. 食品安全导刊, 2024(18): 134-136, 140.
- HAN X J, XU M L. Application of LC-MS in the detection of heavy metal pollutants in food processing [J]. China Food Safety Magazine, 2024(18): 134-136, 140.
- [51] FU Y Q, YIN N Y, CAI X L, et al. Arsenic speciation and bioaccessibility in raw and cooked seafood: influence of seafood species and gut microbiota [J]. Environmental Pollution, 2021, 280: 116958.
- [52] HALL L L, GEORGE S E, KOHAN M J, et al. *In vitro* methylation of inorganic arsenic in mouse intestinal cecum [J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 1997, 147(1): 101-109.
- [53] 冯瑞雪, 林洪, 隋建新, 等. 三疣梭子蟹经过蒸煮和模拟消化后镉的变化 [J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 7067-7073.
- FENG R X, LIN H, SUI J X, et al. Changes of cadmium

- in *Portunus trituberculatus* after cooking and simulated digestion[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(17): 7067-7073.
- [54] MINET A, METIAN M, TAYLOR A, et al. Bioaccumulation of inorganic and organic mercury in the cuttlefish *Sepia officinalis*: influence of ocean acidification and food type[J]. *Environmental Research*, 2022, 215: 114201.
- [55] 郑煜. 人体肠道微生物对蔬菜中镉生物可给性的影响及其对镉的作用机制研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- ZHENG Y. Effect of human gut microbes on bioaccessibility of Cd in vegetables and the mechanism of Cd-resisting and Cd-binding [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [56] MEHOUEL F, FOWLER S W. A mini-review of toxicokinetics and toxicity of heavy metals in marine and freshwater fish [J]. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 2022, 73(1): 3561-3570.
- [57] 李昆, 崔凌峰, 王莹莹. 浅析农产品质量安全风险评估方法[J]. *现代食品*, 2021(18): 28-30.
- LI K, CUI L F, WANG Y Y. Analysis on the risk assessment methods of agricultural product quality and safety[J]. *Modern Food*, 2021(18): 28-30.
- [58] 李太平, 刘静. 中国食品安全指数的初步测度[J]. *食品科学*, 2018, 39(19): 247-251.
- LI T P, LIU J. Preliminary measurement of food safety index in China [J]. *Food Science*, 2018, 39(19): 247-251.
- [59] PAJĄK M, GAŚCIOREK M, JASIK M, et al. Risk assessment of potential food chain threats from edible wild mushrooms collected in forest ecosystems with heavy metal pollution in Upper Silesia, Poland [J]. *Forests*, 2020, 11(12): 1240.
- [60] 莫晓, 冉茂霞, 史永富, 等. 三疣梭子蟹可食用组织中镉的蓄积现状、赋存形态及健康风险评估研究进展[J/OL]. *环境化学*, (2024-12-28). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20240710.0756.002.html>.
- MO X, RAN M X, SHI Y F, et al. Research progress on the accumulation situation, chemical speciation, and health risk assessment of cadmium in the edible tissue of *Portunus trituberculatus* [J/OL]. *Environmental Chemistry*, (2024-12-28). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20240710.0756.002.html>.
- [61] HE Y, FANG H Y, PAN X D, et al. Cadmium exposure in aquatic products and health risk classification assessment in residents of Zhejiang, China [J]. *Foods*, 2023, 12(16): 3094.
- [62] YU Y J, LIU L T, CHEN X C, et al. Brominated flame retardants and heavy metals in common aquatic products from the Pearl River Delta, South China: bioaccessibility assessment and human health implications [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 124036.
- [63] LAO Y M, QU C L, ZHANG B, et al. Development and validation of single-step microwave-assisted digestion method for determining heavy metals in aquatic products: health risk assessment [J]. *Food Chemistry*, 2023, 402: 134500.
- [64] JAKKIELSKA D, FRANKOWSKI M, ZIOŁA-FRANKOWSKA A. Speciation analysis of arsenic in honey using HPLC-ICP-MS and health risk assessment of water-soluble arsenic [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 471: 134364.
- [65] 钟映雄, 陈佳佳, 汪思钧, 等. 海产品中砷的形态及其毒性研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(23): 337-343.
- ZHONG Y X, CHEN J J, WANG S J, et al. Research progress of arsenic speciation and toxicity in seafood [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(23): 337-343.
- [66] 刘洋, 陈绍占, 刘丽萍, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法分析尿中6种砷形态[J]. *分析测试学报*, 2023, 42(2): 227-232.
- LIU Y, CHEN S Z, LIU L P, et al. Analysis of six arsenic speciations in urine by high performance liquid chromatography—inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2023, 42(2): 227-232.
- [67] 韦丽丽. 食品中汞与汞形态分析方法研究进展[J]. *职业与健康*, 2020, 36(9): 1291-1296.
- WEI L L. Research progress on analysis methods of mercury and mercury speciation in food [J]. *Occupation and Health*, 2020, 36(9): 1291-1296.
- [68] 丁宇, 周睿, 敬海泉, 等. 超声酸提取-液相色谱-原子荧光联用同时测定水生动植物中甲基汞和乙基汞[J]. *预防医学情报杂志*, 2023, 39(10): 1220-1224, 1229.
- DING Y, ZHOU R, JING H Q, et al. Determination levels of methylmercury and ethyl mercury in aquatic animals and plants by ultrasonic acid extraction liquid chromatography-atomic fluorescence morphometry [J]. *Journal of Preventive Medicine Information*, 2023, 39(10): 1220-1224, 1229.
- [69] 赵艳芳, 康绪明, 宁劲松, 等. 虾蛄可食组织中镉和砷的形态及分布特征[J]. *食品科学*, 2020, 41(8): 282-287.
- ZHAO Y F, KANG X M, NING J S, et al. Speciation and distribution characteristics of cadmium and arsenic in the edible tissues of *Oratosquilla oratoria* [J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 282-287.
- [70] 郭凤. HPLC-ICP-MS在海产品和环境水样中锡和铅形态分析的应用[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2023.
- GUO F. Speciation analysis of tin and lead in marine products and environmental waters by HPLC-ICP-MS [D]. Hangzhou: Hangzhou Normal University, 2023.
- [71] 杨超, 陶莉, 熊朋, 等. 水中四乙基铅的检测方法研究

进展[J]. 辽宁化工, 2024, 53(2): 281-283, 288.
YANG C, TAO L, XIONG P, et al. Research progress in

determination methods of tetraethyl lead in water [J].
Liaoning Chemical Industry, 2024, 53(2): 281-283, 288.

Research progress on heterogeneity risk of heavy metals in food industry chain

LIU Haiquan^{1,2,3}, CHEN Mengmeng¹, PAN Yingjie^{1,2,3}, XIE Qingchao^{1,3}, ZHAO Yong^{1,2,3}

(1. College of Food Sciences and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 3. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Product on Storage and Preservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: Heavy metal is a typical persistent pollutant, which can enter organisms through various ways such as respiration, drinking water and food chain transmission, and can be circulated among plants, animals, microorganisms and humans. At the same time, with the transfer of heavy metals and the transformation of valence or form, heavy metals with different valence or form may have significant toxicity differences and produce typical toxic effects on organisms. In food production, raw materials, processing, and human digestion and metabolism may cause changes in the valence, morphology, and total amount of heavy metals, thereby significantly affecting their toxicity. At present, in the risk assessment of heavy metals in food, the risks caused by changes in their morphology or valence are ignored. This paper reviews the risks caused by the transfer and transformation of heavy metals in the food industry chain, which is of great significance for the scientific assessment of the toxicity of heavy metals entering the human body through the food chain, especially the heterogeneous hazards of heavy metal in the process of transfer and speciation or valence transformation, in order to provide theoretical guidance for the scientific assessment of heavy metal pollution in food.

Key words: food; heavy metals; heterogeneity; risk; food supply chain