

烹饪对食物中持久性有机污染物含量和分布的影响

董姝君, 刘国瑞, 朱青青, 张宪, 郑明辉*

中国科学院生态环境研究中心, 环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085

* 联系人, E-mail: zhengmh@rcees.ac.cn

2013-11-18 收稿, 2014-01-26 接受, 2014-04-28 网络版发表

国家自然科学基金(21321004)和中国科学院院地合作项目(科技支黔)资助

摘要 持久性有机污染物(POPs)因具有高毒性而对人体健康造成威胁. 日常饮食尤其是动物性食物的摄入是人体摄入 POPs 的主要途径. 来源于各种生物体的食物原料, 除少数可以直接食用外, 大多数需要经过烹饪加工后才能食用, 而烹饪过程中发生的多种理化反应能够使食物中 POPs 的含量和分布发生改变. 本文简述了食物中 POPs 含量在烹饪前后的变化以及烹饪对食物中 POPs 分布影响的相关研究.

关键词

烹饪
农药
二噁英类
多氯联苯
多溴联苯醚
全氟类化合物

饮食是人类维持生命的基本条件. 人体在通过食物获取营养物质的同时, 一些有害物质也随之进入人体, 危害人体健康. 人体经食物摄入的有害物质主要包括食物中的天然毒素、食物加工过程中产生的有害物质以及进入食物链的环境污染物^[1,2].

作为典型的环境污染物, 持久性有机污染物(POPs)的污染及其对人体健康和生态环境的危害越来越被人们所认识. POPs 是指在环境中难降解、具有较高的脂溶性、可以通过长距离迁移, 并能够在食物链中富集放大的一类半挥发性且毒性极大的有机污染物. POPs 具有致癌性、致畸性、生殖毒性、神经毒性、内分泌毒性等毒性特征, 能够对生物体造成危害, 同时 POPs 难以被降解, 导致其危害具有一定的长期性. POPs 亲脂性的特点导致其易在动物脂肪中累积, 并能够通过食物链富集放大, 进而对人体健康造成威胁. 此外, POPs 还能够在大气环境中通过长距离迁移而在全球范围内普遍存在.

POPs 可通过多种环境介质(空气、水、生物体等)威胁人体健康. 日常饮食尤其是动物性食物的摄入是人体摄入 POPs 的最主要途径^[3,4]. 为了评估人体经饮食对 POPs 的摄入量, 目前已有大量研究针对不同

国家和地区多种食物原料中多种 POPs 的含量进行了报道^[5-11]. 这些研究主要针对未经过烹饪的食物原料, 而人体对食物的摄入往往需要先经过烹饪这一日常食物加工过程. 在烹饪过程中发生的复杂理化反应能够影响食物中 POPs 的含量和分布. 如果忽略了烹饪过程尤其是高温烹饪过程对食物中 POPs 的影响, 将会在评估人体对 POPs 经饮食摄入量时带来较大的不确定度^[12].

不同国家和地区所用食物原料、食物准备方式和烹饪方式的不同以及有害物种类的不同会导致烹饪对食物中有害物含量的影响也不同^[13]. 在较高的烹饪温度下, 食物中的 POPs 可能会挥发到空气中, 或转移到烹饪后的食物残液中^[14,15]. 食物中 POPs 在较高的烹饪温度下也可能发生分解, 进而改变食物中 POPs 同类物的分布特征^[16-18]. 一定条件下的高温烹饪过程中, 也可能存在 POPs 的生成^[16,17,19]. 本文在 Domingo^[13]研究的基础上, 归纳了近年来有关食物中艾氏剂、氯丹、滴滴涕(DDT)、狄氏剂、异狄氏剂、七氯、六氯苯(HCB)、毒杀芬、六六六(HCH)等农药类 POPs, 以及多氯代二苯并-对-二噁英(PCDDs)、多氯代二苯并呋喃(PCDFs)、多氯联苯(PCBs)、多溴联苯醚

引用格式: 董姝君, 刘国瑞, 朱青青, 等. 烹饪对食物中持久性有机污染物含量和分布的影响. 科学通报, 2014, 59: 1479-1486

Dong S J, Liu G R, Zhu Q Q, et al. Effects of cooking on the concentrations and distribution of persistent organic pollutants in foodstuffs (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2014, 59: 1479-1486, doi: 10.1360/972013-1269

(PBDEs)和全氟类化合物(PFCs)的含量在烹饪前后变化的研究,并就烹饪对食物中这些有害物分布特征、迁移和转化影响的相关研究进行了总结.

1 烹饪对食物中 POPs 含量的影响

目前关于食物中 POPs 的含量水平以及人体对 POPs 经饮食摄入量的研究大多针对未经过烹饪的食物原料.考虑到烹饪对食物中 POPs 含量的影响,近年来一些研究考察了不同烹饪方式对多种食物中 POPs 含量的影响,但主要针对肉类、鱼类等动物性食物中的 POPs,仅少量研究考察了烹饪过程对植物性食物中 POPs 含量的影响.

1.1 烹饪对食物中农药类 POPs 含量的影响

食物中的农药残留是长期以来备受关注的问题.

现有研究表明,日常的水洗、去皮等食物烹饪前的准备过程能够有效去除食物表面的农药残留,而随后的水煮、烤、炸等烹饪过程能够影响食物中艾氏剂、氯丹、DDT、狄氏剂、异狄氏剂、七氯、HCB、毒杀芬、HCH 等农药类 POPs 的含量.研究表明,食物烹饪前的处理过程以及烹饪过程能够使食物中残留的农药类 POPs 含量降低(表 1).

西班牙萨拉戈萨大学 Antonio 教授研究组^[20-25]在 20 世纪 90 年代发表了一系列文章报道了不同烹饪方式对肉类产品中 HCB, HCH, DDT 及其代谢物含量的影响.其研究结果表明,烧烤、烘烤和加压烹饪这 3 种烹饪方式对羊肉中 HCB 含量的影响相似,烹饪后的羊肉中 HCB 含量与烹饪前相比减少了约 18%^[23], HCH 总量减少了 13%~26%^[24], DDT 及其代谢物总量减少了 37%~56%^[25].在 80~82℃条件下加热 100 min

表 1 食物准备方式和烹饪方式对食物中农药类 POPs 含量的影响

食物种类	农药类 POPs	食物准备方式或烹饪方式	食物中农药类 POPs 含量在烹饪前后的变化	参考文献
猪肉	HCH	80~82℃加热 100 min	烹饪前后无显著变化	[20]
		加工成香肠后放置 1 个月	烹饪后 α -HCH 减少 25%, γ -HCH 减少 30%	
		加工成火腿	烹饪后 α -HCH 减少 37%, γ -HCH 减少 22%	
猪肉	<i>p,p'</i> -DDE	80~82℃加热 100 min; 加工成香肠后放置 1 个月; 加工成火腿	烹饪前后无显著变化	[21]
	HCH, <i>p,p'</i> -DDE	加工成火腿	烹饪前后无显著变化	[22]
羊肉	HCB		烹饪后减少约 18%	[23]
	HCH	烧烤、烘烤、加压烹饪	烹饪后减少 13%~26%	[24]
	DDT 及其代谢物		烹饪后减少 37%~56%	[25]
羊肉	DDT 及其代谢物、HCH	烘烤、水煮、加压蒸煮、微波烹饪	烹饪后总量下降,但 DDD 含量增加	[26]
鱼肉	DDT 混合物、异狄氏剂、HCB, 氯丹混合物、毒杀芬、七氯环氧化物	去鱼皮	烹饪后减少	[27~29]
		烧烤、油炸等	烹饪后减少	
鱼肉(斑点叉尾鲷)	狄氏剂、DDE	油炸、烘烤、烟熏	烹饪后狄氏剂减少 50%~65%, DDE 减少 50%~80%	[30]
鱼肉	DDT 及其代谢物	烘烤、油炸、烧烤、烟熏、微波烹饪	烹饪后减少 16%~55%	[31]
鱼肉(斑点叉尾鲷)	氯丹、毒杀芬	油炸、烘烤、烟熏	烹饪后减少	[32]
鱼肉(三文鱼)	氯丹、DDT	烘烤、水煮、油炸、微波烹饪	烹饪后减少	[33]
鱼肉(鳗鱼)	HCB、狄氏剂、异狄氏剂、DDT	油炸	烹饪后增加	[34]
		水煮	烹饪前后无显著变化	
马铃薯	HCB, DDT 及其代谢物	去皮	烹饪后减少	[35]
		油炸(薯条、薯片)	烹饪后减少	
肉类、鱼类、青豆、马铃薯、大米	HCB	油炸、烧烤、水煮	烹饪前后的不同食物中 HCB 含量无规律性变化,烹饪不能有效降低食物中 HCB 含量	[36]

后的猪肉中, α -HCH 和 γ -HCH 含量与烹饪前相比无显著变化; 猪肉加工成香肠放置 1 个月后, 其中 α -HCH 含量降低了 25%, γ -HCH 含量降低了 30%; 火腿加工过程则导致样品中 α -HCH 和 γ -HCH 含量分别降低了 37% 和 22%^[20]. 然而, 上述 3 种加工方式对样品中 p,p' -滴滴伊(p,p' -DDE)含量的影响并不显著^[21]. 该研究组^[22]随后发现, 肉制品中的发酵微生物能够使肠制品中 HCH 和 p,p' -DDE 含量分别降低 12.7% 和 17.7%, 而香肠加工过程对样品中 HCH 和 p,p' -DDE 含量影响并不显著. Wani 等人^[26]研究表明, 烘烤、水煮、加压蒸煮和微波烹饪能够降低羊肉中 DDT 和 HCH 以及二者代谢产物的总量, 但滴滴滴(DDD)含量有所增加. 烘烤后的羊肉中 DDT 和 HCH 以及二者代谢产物的总量显著降低; 经水煮、加压蒸煮和微波烹饪后的羊肉中 DDT 和 HCH 以及二者代谢产物的总量减少量略有下降, 且 3 种烹饪方式对羊肉中农药含量影响差别并不显著.

Zabik 等人^[27]在对鱼肉中农药含量进行检测时发现, 去皮鱼肉中农药含量是带皮鱼肉中的 50%; 烹饪过程能够显著降低去皮鱼肉和带皮鱼肉中农药的含量, 但烹饪后的去皮鱼肉中农药含量依然明显低于烹饪后的带皮鱼肉. 烧烤、油炸等烹饪方式能够显著降低鱼肉中 DDT 混合物、异狄氏剂、HCB、氯丹混合物、毒杀芬和七氯环氧化物的含量, 但不同烹饪方式对鱼肉中农药类 POPs 的影响差别并不显著^[27-29]. Khanna 等人^[30]考察了油炸、烘烤和烟熏 3 种烹饪方式对鱼肉(斑点叉尾鲷)中狄氏剂和 DDE 含量的影响. 与烹饪前相比, 烹饪后的鱼肉中狄氏剂含量降低了 50%~65%(基于干重), DDE 含量降低了 50%~80%. 烟熏后的鱼肉中 DDE 含量下降最多(82%). 与其他 2 种烹饪方式相比, 烘烤后的鱼肉中狄氏剂和 DDE 减少量最少, 均为 50%. Wilson 等人^[31]发现分别经过烘烤、油炸、烧烤、烟熏和微波烹饪的鱼肉中 DDT 及其代谢物总量下降了 16%~55%. Santerre 等人^[32]对比了烹饪(油炸、烘烤、烟熏)前后的鱼肉(斑点叉尾鲷)中氯丹和毒杀芬含量, 发现烹饪过程能够使鱼肉中水分含量减少 17%, 脂肪含量增加 28%~274%, 烹饪后的鱼肉中氯丹和毒杀芬含量均有所下降, 其中油炸过程能够显著降低鱼肉中氯丹和毒杀芬含量, 其次为烟熏和烘烤. Bayen 等人^[33]研究表明, 分别经过烘烤、水煮、油炸和微波烹饪后的鱼肉(三文鱼)中氯丹和 DDT 的含量与烹饪前相比有所下降, 其中烹饪后的去皮鱼肉中

氯丹和 DDT 减少量高于带皮鱼肉. de Boer 等人^[34]发现油炸后的鱼肉(鳗鱼)中 HCB、狄氏剂、异狄氏剂、DDT 等有机氯农药的含量升高, 但水煮过程对这些有害物的影响甚微. 该研究认为烹饪过程并不能使鳗鱼中的有害物含量降低到安全食用水平.

Soliman^[35]对马铃薯块茎以及马铃薯加工食品(炸薯条和薯片)中的农药残留含量进行了检测. 结果表明, 未经过加工的马铃薯中 HCB 和 p,p' -DDD 等农药含量高于炸薯条和薯片, 薯片中农药含量低于薯条, 而马铃薯皮中农药含量最高. 因此, 作者认为削皮、水洗以及随后的烹饪过程能够有效降低马铃薯块茎中的农药残留量.

Perelló 等人^[36]在研究常用烹饪方式(油炸、烧烤和水煮)对鱼类(沙丁鱼、鲑鱼和金枪鱼)、肉类(牛肉、猪肉、鸡肉和羊肉)、青豆、马铃薯和小米中 HCB 含量影响时发现, 烹饪后的沙丁鱼中 HCB 含量与烹饪前相比有所降低, 鲑鱼中 HCB 在烹饪后升高, 而金枪鱼中 HCB 含量在烹饪前后无显著变化. 烹饪后的肉类中 HCB 含量或升高、或不变, 其中烤制后的鸡肉中 HCB 增加量最为显著. 水煮前后的青豆和小米中 HCB 含量不变, 而油炸后的马铃薯中 HCB 含量明显升高. 该研究认为烹饪过程并不能有效降低食物中 HCB 含量.

1.2 烹饪对食物中 PCDD/Fs 和 PCBs 含量的影响

人体经食物对 PCDD/Fs 和 PCBs 的摄入量占人体对其摄入总量的 90% 以上, 而动物性食物是最主要的来源^[37,38]. 目前, 就烹饪对食物中 PCDD/Fs 和 PCBs 含量影响的研究主要针对动物性食物, 仅少量研究以植物性食物为研究对象. 对于动物性食物, 多数研究表明日常的水煮、煎炸、烧烤等烹饪方式能够降低其中 PCDD/Fs 和 PCBs 的含量; 烹饪前的水洗和削皮过程, 以及水煮的烹饪方式能够降低植物性食物中 PCDD/Fs 和 PCBs 的含量^[13]. 总体而言, 由于烹饪方式和食物种类的多样性, 不同烹饪方式对不同食物中 PCDD/Fs 和 PCBs 含量的影响也不相同.

近年来, Zheng 课题组^[16,17]研究表明高温烹饪后的牛肉中 PCDD/Fs 和类二噁英-PCBs(dl-PCBs)含量显著下降, 而烹饪所用调味品中可能含有的有机氯化物(氯丙醇或三氯蔗糖)则会导致烹饪后牛肉中 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 含量的增加. Lin 等人^[15]研究快餐店里烹饪(油炸)前后小鸡块、鸡块、薯条、鱼柳、苹

果派和鸡柳中 PCDD/Fs 含量时发现,油炸过程能够导致这些食物中 PCDD/Fs 含量的显著下降,油炸后的小鸡块、鸡块、薯条、鱼柳、苹果派和鸡柳中 PCDD/Fs 含量分别为油炸前的 84.0%, 87.1%, 48.9%, 42.8%, 86.5% 和 76.5%。Rawn 等人^[39]选取 18 种不同鱼或贝类的可食用部分,分别经烧烤、水煮和油炸后发现,鱼或贝类可食用部分中 PCDD/Fs 和 PCBs 的含量有所下降,但变化程度很小,PCDD/Fs 和 PCBs 的含量变化与烹饪的相关性较小(<15%)。

1.3 烹饪对食物中 PBDEs 和 PFCs 含量的影响

目前,关于食物中 PBDEs 和 PFCs 含量水平以及人体经饮食摄入 PBDEs 和 PFCs 的研究相对农药类 POPs, PCDD/Fs 和 PCBs 较少,且主要针对未经过烹饪的食物原料^[9-11,40-44]。在一些国家和地区,动物性食物尤其是水产品的摄入被认为是人体摄入 PBDEs 的主要途径^[9,43,45]。仅少量研究考察了烹饪对食物中 PBDEs 含量的影响^[33,36,46]。烹饪前后 PBDEs 含量的变化不仅与烹饪方式有关,也与食物的种类有关^[13]。

PFCs 可经食物链的累积及食品包装材料进入食物中,进而威胁消费者健康^[47-49]。关于烹饪对食物中 PFCs 含量影响的研究也较少。Del Gobbo 等人^[50]将购自加拿大市场的 18 种鱼类分别经烘烤、水煮和油炸,并对烹饪前后鱼肉中的全氟辛磺酰胺(PFOSAs)类化合物和全氟酸(PFAs)进行检测。结果表明,在 17 种烹饪前后的鱼类样品中检测到了全氟辛烷磺酸(PFOS),而只在扇贝中检测到了 PFOSAs。分别经过烘烤、水煮和油炸后的鱼肉中 PFAs 含量均有所下降,其中经过烘烤后的鱼肉中 PFAs 含量减少量最为显著,163 条件下烘烤 15 min 后的鱼肉样品中几乎检测不到 PFAs。Jogsten 等人^[51]考察了烹饪(烧烤或油炸)前后的牛肉、猪肉、鸡肉以及包装肉类、肝脏制品中 PFCs 的含量。结果表明,烹饪后的样品中 PFCs 含量变化并不具有规律性,不黏涂层厨具是否能够影响人体对 PFCs 的暴露尚不明确。

综上所述,对于动物性食物,由于不同国家和地区烹饪方式的差异,烹饪对食物中 POPs 含量的影响也不同,多数研究表明烹饪后的动物性食物中 POPs 与烹饪前相比有所下降;对于植物性食物,烹饪前的食物准备过程和烹饪过程能够显著降低植物性食物中 POPs 的含量。

2 烹饪对食物中 POPs 分布的影响

烹饪过程不仅能够影响食物中 POPs 含量,也能影响食物中 POPs 的分布、迁移和转化,甚至能够导致 POPs 的生成。POPs 具有亲脂性的特点,能够在动物脂肪中富集。食物中 POPs 含量在烹饪后的减少或许是因为高温烹饪条件下脂肪的减少,也可能是由于较高的烹饪温度导致 POPs 从食物中挥发^[14]。较高的烹饪温度还会导致食物中 POPs 的分解和转化。为了研究食物中 POPs 在烹饪中的分布、迁移和转化,对烹饪前后的食物、烹饪食物过程中产生的油烟,以及烹饪残留液中的 POPs 及其分解或转化产物进行了分析和检测。此外,参考 POPs 在热过程中的生成条件,食物原料和烹饪调味品中存在的含氯化合物还有可能引起高温烹饪过程中 POPs 的生成。

成玉等人^[52]在中国粤港地区气溶胶和餐厅尘烟中检测出了 6 种 DDT 及其代谢物、3 种 HCH, 七氯、狄氏剂和含酮异狄氏剂,浓度范围在 0.20~60.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。该研究发现,在靠近农田和果园的气溶胶及餐厅尘烟颗粒物中 4,4'-DDT 和 2,4'-DDT 浓度较高,说明大气环境中的 DDT 不仅来源于农药施撒过程和农田表层土壤,而且还来源于动物脂肪高温裂解的释放。Bayarri 等人^[25]发现烹饪过程能够改变羊肉中 DDT, DDD 和 DDE 的特征分布。烹饪前羊肉样品中 DDE 含量占 ΣDDTs 比例最高,约为 70%,其次为 DDT(约 30%);与烹饪前相比,烹饪后的羊肉中 DDT 含量占 ΣDDTs 比例降低,而 DDD 和 DDE 所占比例升高。Wani 等人^[26]研究表明,尽管烘烤、水煮等烹饪方式能够降低羊肉中 DDT 及其代谢物总量,但烹饪后的羊肉中 DDD 的含量增加。烹饪同样能够改变食物中 HCH 同类物的特征分布。Conchello 等人^[24]研究发现,烹饪前羊肉中 $\gamma\text{-HCH}$ 含量占 HCH($\alpha\text{-HCH}$, $\gamma\text{-HCH}$ 和 $\beta\text{-HCH}$)总量的比例最高(约 70%),而烹饪后羊肉中 $\gamma\text{-HCH}$ 所占比例下降为约 60%,而 $\alpha\text{-HCH}$ 和 $\beta\text{-HCH}$ 所占比例有所上升。

Zheng 课题组^[16,17,19]设计了能够同时对烹饪过程中产生的固相、液相和气相进行收集的模拟实际烹饪的实验装置,对烹饪过程中 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 的生成和分布进行了研究。Dong 等人^[16]和 Wu 等人^[17]以牛肉和植物油为食物基质进行烹饪实验时发现,牛肉中 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 含量在烹饪后明显降低,但在烹饪牛肉产生的油烟中检测到了 PCDD/Fs 和 dl-PCBs,而烹饪残留液中并未检测到 PCDD/Fs 和

dl-PCBs, 表明牛肉中的 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 在烹饪的加热过程中主要转移到气相中; 与烹饪前相比, 烹饪后的牛肉中 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 同类物的分布特征明显不同, 表明烹饪的加热过程能够改变牛肉中 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 同类物的分布特征. 此外, 烹饪所用调味品中可能含有的有机氯化物(氯丙醇或三氯蔗糖)能够导致烹饪中 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 的生成, 新生成的这些有害物质主要存在于烹饪产生的油烟中, 而烹饪中氯化钠的使用则未检测到明显的 PCDD/Fs 和 dl-PCBs 的生成. 当以植物油为食物基质分别与氯丙醇或三氯蔗糖进行加热时, 在 245 °C 加热条件下的气相中检测到了 PCDD/Fs, dl-PCBs 和多氯萘(PCNs)的生成, 而在 200 °C 时并未检测到 PCDD/Fs, dl-PCBs 和 PCNs, 表明温度是影响该条件下 PCDD/Fs, dl-PCBs 和 PCNs 生成的重要因素^[19]. Lin 等人^[15]发现烹饪过程能够改变食物中 PCDD/Fs 的特征分布, 油炸前食物中八氯代二噁英(OCDD)含量占 17 种 PCDD/Fs 毒性同类物总量的 22.3%~93.3%, 油炸后占 82.6%~91.8%; 在快餐店的油烟中检测到了 PCDD/Fs, 经估算得出快餐店的烟囱中 PCDD/Fs 的平均排放因子和排放速率分别为 208 pg/L 和 12400 pg/min.

德国的 Bendig 等人^[18,53,54]选取鱼肉和植物油为食物基质, 对 PBDEs 在烹饪中的迁移和转化进行了一系列的研究. 当以植物油为基质单独加热 PBDEs 时, 并未发现 PBDEs 的转化; BDE-209 与 *o,p'*-DDT 或 FeCl₃ 共同加热时均检测到了 Br₉Cl-DEs 的生成, BDE-47 与 FeCl₃ 共同加热时则在产物中检测到了 4'-Cl-BDE-17 和 2'-Cl-BDE-28, BDE-47 与 *o,p'*-DDT 共同加热时未发现明显的溴氯交换^[18]. 将添加了 BDE-209 和 BDE-47 的鱼肉进行烹饪时, 在烹饪后的鱼肉中检测到的主要产物为 Br₉DEs 和 Br₈DEs, Br₇DEs 和 Br₆DEs 也有少量存在, 但并未检测到 Br₅DEs 和 Br₄DEs, 以及 BDE-47 的转化产物^[53]. Bendig 等人^[54]在用能够收集烹饪油烟的小型实验装置对鱼肉中 PBDEs 在烹饪过程中的迁移进行研究时发现, 鱼肉

中具有半挥发性的 PBDEs 同类物能够挥发到空气中 (BDE-47<BDE-15), 而不易挥发的 BDE-209 则发生部分转化, 该实验结果与用家用微波炉烹饪的结果相似, 但在微波烹饪后的鱼肉中并未发现 BDE-209 的转化. 最近, Bendig 等人^[55]对厨房抽油烟机的油脂(*n*=15)中多种有害的多卤代有机物的含量进行了报道, 其总量为 0.2~18 μg/g 脂肪, 每个样品中所含目标物的指纹谱图均有所不同. 其中氯化石蜡是最普遍存在的有害物质, 其次为多种溴代阻燃剂, 有机氯农药及一些半挥发性的卤代天然产物也被检出. 该研究认为食物的烹饪过程也是环境中污染物的一个相关来源, 而厨房抽油烟机中的油脂可作为一种方便的基质来评估这些有害的多氯化化合物的污染情况.

总而言之, 食物中的 POPs 在高温烹饪过程中会存在分解、迁移和转化. 烹饪过程中存在的有机或无机的氯化物有可能会导致 POPs 的生成或转化. 因此, 为了减少人体在日常生活中对 POPs 的暴露, 应避免有机氯化物在高温烹饪中的使用, 同时在烹饪食物过程中保持良好通风.

3 小结

多数研究表明, 烹饪作为一种日常的食物加工方式, 能够降低食物中 POPs 的含量. 食物中的 POPs 在高温烹饪条件下能够转移到气相中, 同时也存在分解和转化, 而烹饪调味品或食品添加剂中的有机氯化物, 则有可能导致高温烹饪中 POPs 的生成. 由于不同国家和地区所用食物原料、食物准备方式和烹饪方式的不同, 会导致烹饪对食物中有害物质含量和分布的影响不同. 同时, 食物基质的复杂性, 也使得深入探讨食物中 POPs 在烹饪中的归趋成为挑战. 因此, 针对烹饪时间、温度、器皿等条件对食物中 POPs 含量和分布的影响, 以及食物中的 POPs 在实际烹饪中归趋的相关研究还亟待开展.

参考文献

- Williams P R, Hammit J K. Perceived risks of conventional and organic produce: Pesticides, pathogens, and natural toxins. *Risk Anal*, 2001, 21: 319-330
- Sjaastad A K, Jørgensen R B, Svendsen K. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), mutagenic aldehydes and particulate matter during pan frying of beefsteak. *Occup Environ Med*, 2010, 67: 228-232
- Zhou P, Zhao Y, Li J, et al. Dietary exposure to persistent organochlorine pesticides in 2007 Chinese total diet study. *Environ Int*, 2012, 42: 152-159

- 4 Karademir A, Kilavuz S A, Korucu M K, et al. Dietary exposure to PCDD/Fs through animal products in a highly polluted area in Turkey. *Hum Ecol Risk Assess*, 2013, 19: 341–353
- 5 Fromberg A, Granby K, Højgård A, et al. Estimation of dietary intake of PCB and organochlorine pesticides for children and adults. *Food Chem*, 2011, 125: 1179–1187
- 6 Darnerud P, Atuma S, Aune M, et al. Dietary intake estimations of organohalogen contaminants (dioxins, PCB, PBDE and chlorinated pesticides, eg DDT) based on Swedish market basket data. *Food Chem Toxicol*, 2006, 44: 1597–1606
- 7 Desalegn B, Takasuga T, Harada K H, et al. Historical trends in human dietary intakes of endosulfan and toxaphene in China, Korea and Japan. *Chemosphere*, 2011, 83: 1398–1405
- 8 Winald I, Vandevijvere S, Maleki M, et al. Dietary intake of PCDD/Fs and dioxin-like PCBs of the Belgian population. *Chemosphere*, 2010, 79: 334–340
- 9 Zhang L, Li J, Zhao Y, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and indicator polychlorinated biphenyls (PCBs) in foods from China: Levels, dietary intake, and risk assessment. *J Agric Food Chem*, 2013, 61: 6544–6551
- 10 Törnkvist A, Glynn A, Aune M, et al. PCDD/F, PCB, PBDE, HBCD and chlorinated pesticides in a Swedish market basket from 2005—levels and dietary intake estimations. *Chemosphere*, 2011, 83: 193–199
- 11 Domingo J L. Health risks of dietary exposure to perfluorinated compounds. *Environ Int*, 2012, 40: 187–195
- 12 Chen H L, Su H J, Hsu J F, et al. High variation of PCDDs, PCDFs, and dioxin-like PCBs ratio in cooked food from the first total diet survey in Taiwan. *Chemosphere*, 2008, 70: 673–681
- 13 Domingo J L. Influence of cooking processes on the concentrations of toxic metals and various organic environmental pollutants in food: A review of the published literature. *Crit Rev Food Sci*, 2010, 51: 29–37
- 14 Moya J, Garrahan K G, Poston T M, et al. Effects of cooking on levels of PCBs in the fillets of winter flounder. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1998, 60: 845–851
- 15 Lin Y C, Wu T Y, Chen Y M, et al. PCDD/F levels in the stacks and food of fast food restaurants. *Aerosol Air Qual Res*, 2011, 11: 437–447
- 16 Dong S, Wu J, Liu G, et al. Unintentionally produced dioxin-like polychlorinated biphenyls during cooking. *Food Control*, 2011, 22: 1797–1802
- 17 Wu J, Dong S, Liu G, et al. Cooking process: A new source of unintentionally produced dioxins? *J Agric Food Chem*, 2011, 59: 5444–5449
- 18 Bendig P, Blumenstein M, Vetter W. Heating of BDE-209 and BDE-47 in plant oil in presence of *o,p'*-DDT or iron(III) chloride can produce monochloro-polybromo diphenyl ethers. *Food Chem Toxicol*, 2012, 50: 1697–1703
- 19 Dong S, Liu G, Zhang B, et al. Formation of polychlorinated naphthalenes during the heating of cooking oil in the presence of high amounts of sucralose. *Food Control*, 2013, 31: 1–5
- 20 Ariño A, Herrera A, Conchello M, et al. Hexachlorocyclohexane residues in meat products after processing. *J Food Compos Anal*, 1993, 6: 55–61
- 21 Ariño A, Lazaro R, Conchello P, et al. The effect of commercial processing on incurred residues of DDE in meat products. *Food Addit Contam*, 1995, 12: 559–566
- 22 Bayarri S, Herrera A, Conchello M P, et al. Influence of meat processing and meat starter microorganisms on the degradation of organochlorine contaminants. *J Agric Food Chem*, 1998, 46: 3187–3193
- 23 Conchello M, Herrera A, Ariño A, et al. Effect of grilling, roasting, and cooking on the natural hexachlorobenzene content of ovine meat. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1993, 50: 828–833
- 24 Conchello M P, Herrera A, Arino A, et al. Effect of several kitchen treatments on hexachlorocyclohexane residues in ovine meat. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1993, 51: 612–618
- 25 Bayarri S, Conchello P, Arino A, et al. DDT, DDT metabolites, and other organochlorines as affected by thermal processing in three commercial cuts of lamb. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1994, 52: 554–559
- 26 Wani S A, Kowala B, Rao V K. Effect of cooking on the pesticide residues in goat tissues. *Indian J Small Rumin*, 2000, 6: 23–28
- 27 Zabik M E, Zabik M J, Booren A M, et al. Pesticides and total polychlorinated biphenyls in chinook salmon and carp harvested from the Great Lakes: Effects of skin-on and skin-off processing and selected cooking methods. *J Agric Food Chem*, 1995, 43: 993–1001
- 28 Zabik M E, Booren A, Zabik M J, et al. Pesticide residues, PCBs and PAHs in baked, charbroiled, salt boiled and smoked Great Lakes lake trout. *Food Chem*, 1996, 55: 231–239
- 29 Zabik M E, Zabik M J, Booren A M, et al. Pesticides and total polychlorinated biphenyls residues in raw and cooked walleye and white bass harvested from the Great Lakes. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1995, 54: 396–402
- 30 Khanna N, Santerre C R, Xu D, et al. Changes in dieldrin and *p,p'*-DDE residues following cooking of channel catfish. *J Food Protect*, 1997, 60: 300–304

- 31 Wilson N D, Shear N M, Paustenbach D J, et al. The effect of cooking practices on the concentration of DDT and PCB compounds in the edible tissue of fish. *J Expo Anal Environ Epidemiol*, 1998, 8: 423
- 32 Santerre C, Ingram R, Xu D, et al. Chlordane and toxaphene residues following cooking of treated channel catfish fillets. *J Food Protect*, 2000, 63: 763–767
- 33 Bayen S, Barlow P, Lee H K, et al. Effect of cooking on the loss of persistent organic pollutants from salmon. *J Toxicol Environ Health Part A*, 2005, 68: 253–265
- 34 de Boer J, Lammertse N, Koekkoek J, et al. PCB and organochlorine pesticide concentrations in eel increase after frying. *Chemosphere*, 2013, 90: 139–142
- 35 Soliman K M. Changes in concentration of pesticide residues in potatoes during washing and home preparation. *Food Chem Toxicol*, 2001, 39: 887–891
- 36 Perelló G, Martí-Cid R, Castell V, et al. Concentrations of polybrominated diphenyl ethers, hexachlorobenzene and polycyclic aromatic hydrocarbons in various foodstuffs before and after cooking. *Food Chem Toxicol*, 2009, 47: 709–715
- 37 Li J G, Wu Y N, Zhang L, et al. Dietary intake of polychlorinated dioxins, furans and dioxin-like polychlorinated biphenyls from foods of animal origin in China. *Food Addit Contam*, 2007, 24: 186–193
- 38 Kvaalem H E, Knutsen H K, Thomsen C, et al. Role of dietary patterns for dioxin and PCB exposure. *Mol Nutr Food Res*, 2009, 53: 1438–1451
- 39 Rawn D F, Breakell K, Verigin V, et al. Impacts of cooking technique on polychlorinated biphenyl and polychlorinated dioxins/furan concentrations in fish and fish products with intake estimates. *J Agric Food Chem*, 2013, 61: 989–997
- 40 Bocio A, Llobet J, Domingo J, et al. Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in foodstuffs: Human exposure through the diet. *J Agric Food Chem*, 2003, 51: 3191–3195
- 41 Kiviranta H, Ovaskainen M L, Vartiainen T. Market basket study on dietary intake of PCDD/Fs, PCBs, and PBDEs in Finland. *Environ Int*, 2004, 30: 923–932
- 42 Domingo J L, Martí-Cid R, Castell V, et al. Human exposure to PBDEs through the diet in Catalonia, Spain: Temporal trend: A review of recent literature on dietary PBDE intake. *Toxicol*, 2008, 248: 25–32
- 43 Chen M, Wong W, Choi K, et al. Dietary exposure of the Hong Kong adult population to polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Results of the first Hong Kong total diet study. *Food Addit Contam*, 2013, 30: 1780–1787
- 44 Picó Y, Farré M, Llorca M, et al. Perfluorinated compounds in food: A global perspective. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2011, 51: 605–625
- 45 Voorspoels S, Covaci A, Neels H, et al. Dietary PBDE intake: A market-basket study in Belgium. *Environ Int*, 2007, 33: 93–97
- 46 Schechter A, Pápke O, Tung K, et al. Changes in polybrominated diphenyl ether (PBDE) levels in cooked food. *Toxicol Environ Chem*, 2006, 88: 207–211
- 47 Vestergren R, Cousins I T, Trudel D, et al. Estimating the contribution of precursor compounds in consumer exposure to PFOS and PFOA. *Chemosphere*, 2008, 73: 1617–1624
- 48 Schechter A, Colacino J, Haffner D, et al. Perfluorinated compounds, polychlorinated biphenyls, and organochlorine pesticide contamination in composite food samples from Dallas, Texas, USA. *Environ Health Perspect*, 2010, 118: 796–802
- 49 Trier X, Granby K, Christensen J H. Polyfluorinated surfactants (PFS) in paper and board coatings for food packaging. *Environ Sci Pollut Res*, 2011, 18: 1108–1120
- 50 Del Gobbo L, Tittlemier S, Diamond M, et al. Cooking decreases observed perfluorinated compound concentrations in fish. *J Agric Food Chem*, 2008, 56: 7551–7559
- 51 Jogsten I E, Perelló G, Llebaria X, et al. Exposure to perfluorinated compounds in Catalonia, Spain, through consumption of various raw and cooked foodstuffs, including packaged food. *Food Chem Toxicol*, 2009, 47: 1577–1583
- 52 成玉, 盛国英, 邵波, 等. 气溶胶和餐厅烟尘中有机氯农药特征与来源. *中国环境科学*, 2000, 20: 18–22
- 53 Bendig P, Blumenstein M, Hägele F, et al. Hydrodebromination of decabromodiphenyl ether (BDE-209) in cooking experiments with salmon fillet. *J Agric Food Chem*, 2012, 60: 8521–8527
- 54 Bendig P, Hägele F, Blumenstein M, et al. Fate of polybrominated diphenyl ethers during cooking of fish in a new model cooking apparatus and a household microwave. *J Agric Food Chem*, 2013, 61: 6728–6733
- 55 Bendig P, Hägele F, Vetter W. Widespread occurrence of polyhalogenated compounds in fat from kitchen hoods. *Anal Bioanal Chem*, 2013, 405: 7485–7496

Effects of cooking on the concentrations and distribution of persistent organic pollutants in foodstuffs

DONG ShuJun, LIU GuoRui, ZHU QingQing, ZHANG Xian & ZHENG MingHui

State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Persistent organic compounds (POPs) are highly toxic compounds that are harmful to human health. Dietary intake is an essential pathway for human exposure to POPs, especially the consumption of animal products. However, most foodstuffs are consumed after being cooked. Various physical and chemical reactions happened during cooking processes could affect the concentrations and distribution of POPs in foodstuffs. In the present paper, we reviewed current published literatures about the influence of cooking processes on the concentrations and distribution of POPs in foodstuffs.

cooking processes, pesticides, PCDD/Fs, PCBs, PBDEs, PFCs

doi: 10.1360/972013-1269