



丁超, 乔雄梧, 齐艳丽, 郝变青, 秦曙, 马利平. 红枣中苯并[a]芘污染及其膳食风险评估[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 65-74.

DING Chao, QIAO Xiongwu, QI Yanli, HAO Bianqing, QIN Shu, MA Liping. Benzo[a]pyrene contamination in jujube dates and dietary risk assessment[J].

Journal of China Agricultural University, 2023, 28(12): 65-74.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.12.06

## 红枣中苯并[a]芘污染及其膳食风险评估

丁超 乔雄梧\* 齐艳丽 郝变青 秦曙 马利平

(山西农业大学 山西功能农产品检验检测中心/农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(太原), 太原 030031)

**摘要** 为明确我国红枣中苯并[a]芘的污染水平和膳食暴露风险, 对市场抽样调查的 100 个干制红枣样品进行检测, 采用非参数 Bootstrap 方法对干制红枣中苯并[a]芘的浓度进行估算, 结合中国 2 个代表性人群(成人和儿童)红枣膳食摄入量, 计算通过红枣消费造成的苯并[a]芘膳食平均暴露量和高端暴露量, 参考 FAO/WHO 食品添加剂联合专家委员会(JECFA)对苯并[a]芘致癌性起始点(Point of departure, 100  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d), 计算暴露限值(Margin of exposure, MOE), 得出膳食风险结论。同时, 进行实验室模拟新鲜红枣干燥试验, 明确红枣干制过程中苯并[a]芘的污染来源。结果表明: 干制红枣检测样品中苯并[a]芘质量分数的平均值为 2.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 、97.5 分位值为 7.30  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ; 通过红枣消费造成的苯并[a]芘膳食平均暴露量为 0.000 013  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d(成人)和 0.000 054  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d(儿童), 高端暴露量(97.5 分位值)为 0.000 152  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d(成人)和 0.000 535  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d(儿童); 暴露限值为 1 851 852~7 692 307(按苯并[a]芘质量分数和膳食消费量的平均值估算)和 186 916~657 895(按苯并[a]芘质量分数和膳食消费量的 97.5 分位值估算), 远超出 JECFA 推荐的 MOE>10 000 的安全边界。同时, 考虑到红枣的低膳食消费率(0.03%~0.25%), 红枣中苯并[a]芘污染属于低膳食暴露风险。通过实验室模拟新鲜红枣干燥试验证明煤火烘干干燥是造成红枣中苯并[a]芘浓度较高的重要原因。

**关键词** 红枣; 苯并[a]芘; 膳食风险评估; Bootstrap; 暴露限值; 不确定性

中图分类号 S609.2; R155.5

文章编号 1007-4333(2023)12-0065-10

文献标志码 A

## Benzo[a]pyrene contamination in jujube dates and dietary risk assessment

DING Chao, QIAO Xiongwu\*, QI Yanli, HAO Bianqing, QIN Shu, MA Liping

(Shanxi Center for Testing of Functional Agro-Products, Laboratory for Risk Assessment of Quality and Safety of Agro-Products (Taiyuan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract** To clarify the contamination level and dietary exposure risk of benzo[a]pyrene in dried jujube dates (*Ziziphus jujuba*) in China, 100 dried jujube samples were tested in a survey. The concentration distribution of benzo[a]pyrene in dried jujube dates was estimated by the non-parametric bootstrap resampling. Combined with the jujube dates consumption data of two representative Chinese populations (adults and children), dietary exposure of benzo[a]pyrene through eating jujube dates was calculated. Referring to the Joint Expert Committee of FAO/WHO on Food Additives(JECFA) for the point of departure of the carcinogenicity of benzo[a]pyrene the margin of exposure (MOE) was derived for resulting the conclusion of dietary risk of benzo[a]pyrene through consumption of jujube dates. At the same time, for identifying the source of benzo[a]pyrene contamination, an analog of drying process of fresh jujube dates was conducted under laboratory conditions. The results showed that: The mean of benzo[a]pyrene

收稿日期: 2023-05-21

基金项目: 国家农产品质量安全风险评估重大专项(2020;14205042); 山西省重点研发计划项目(2022ZDYF122); 山西省农业科学院农业科技创新研究课题项目(YCX2020207)

第一作者: 丁超(ORCID:0000-0003-1621-4700), 副研究员, 主要从事农产品质量安全研究, E-mail:dingchao0930@163.com

通讯作者: 乔雄梧(ORCID:0000-0001-7254-6887), 研究员, 主要从事农药残留及农产品质量安全研究, E-mail,qiaoxiongwu@126.com

concentration in jujube dates was 2.00  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , and the value at 97.5th percentile was 7.30  $\mu\text{g}/\text{kg}$ . Dietary exposure of benzo[a]pyrene by consumption of jujube dates at mean intake contributed to 0.000 013  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d for adults, and 0.000 054  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d for children, and at high intake (97.5th percentile), contributed to 0.000 152  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d for adults, and 0.000 535  $\mu\text{g}/\text{kg}$  bw. d for children. MOEs reached 1 851 852 – 7 692 307 at mean intake, and 186 916 – 657 895 at 97.5th percentile intake. This was much higher than the JECFA recommended MOE ( $> 10\ 000$ ). At the same time, considering the low proportion of jujube dates consumption in total diets (0.03% – 0.25%), the exposure of benzo[a]pyrene by consumption of jujube dates could be concluded as low concern of dietary risk for health of target populations. Through laboratory simulation of fresh jujube drying experiments, it has been proven that coal fire drying is an important reason for the high concentration of benzo[a]pyrene in jujube.

**Keywords** *Ziziphus jujuba*; benzo [a] pyrene; dietary risk assessment; Bootstrap; MOE; uncertainty

红枣(*Ziziphus jujuba* Mill.)是原产于我国的干果品种,广泛种植于我国各地,因其独特的营养价值而成为一种药食同源食品和营养补品。据国家统计局最新公开数据<sup>[1]</sup>,2015—2019年间我国红枣年平均产量为7 203 900 t,生产和消费呈增长趋势<sup>[2-3]</sup>。

目前我国的红枣加工基本以初加工为主,经过分选、晾晒、冲洗、烘干和包装等步骤,干制红枣即可上市销售。红枣的干燥有自然晒干和人工干制2种方法。人工干制法要经过烘烤,烘烤方法有电烘干和火烘干。不论哪种方法,烤房温度需达到60~70 $^{\circ}\text{C}$ ,并保持48 h,以便持续不断地蒸发水分。如果用煤火烘干,红枣在烘制过程中不可避免会受到多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)污染。尽管目前红枣加工产业规模越来越大,干制加工方式从自然晾干逐渐向电热烘干甚至向真空冷冻干燥过渡,但是,由于生产规模、生产方式及经济因素等限制,有相当部分的干燥仍然采用煤火烘干干燥。

关于红枣的食品安全问题,行业、消费者及研究人员大多关注其栽培过程中使用农药及农药残留影响<sup>[4-5]</sup>,而对栽培及产后加工过程中大气污染和污水灌溉等污染问题研究较少<sup>[6]</sup>,特别是煤火烘干导致红枣PAHs污染引起的红枣食品安全相关问题还未见报道。

尽管学术界和化学品安全风险管理部门对PAHs的致癌和遗传毒性早在20世纪70年代就做出定性结论<sup>[7]</sup>,但是,食品中污染PAHs引起健康风险的问题直到20世纪90年代初才引起国际食品法典和FAO/WHO食品添加剂联合专家委员会(JECFA)的关注<sup>[8]</sup>。食品加工污染与大气污染、职业污染一起成为PAHs引起健康风险关注的焦点<sup>[9-11]</sup>。PAHs包括一系列化合物,其中多数被国际癌症研究机构(International agency for research

on cancer, IARC)定性为致癌物质,特别是其中的苯并[a]芘(Benzo[a]pyrene, BaP)被划定为一类致癌物质,被作为标志物用于健康风险评估和食品中限量标准制定的代表性化合物<sup>[11-12]</sup>。

BaP的健康风险首先是其遗传毒性和致癌性,属于无阈值风险因子,一般采用低剂量外推和暴露限值(Margin of exposure, MOE)法进行膳食暴露风险评估。目前,MOE法是国际首选暴露风险评估方法<sup>[12-14]</sup>,也是本研究采用的暴露评估方法。该方法基于毒理学实验数据,以致癌性起始点(Point of departure, POD)作为参考值,比较POD与膳食暴露量的数量关系,得出膳食风险结论。在计算POD过程中,国际组织(如JECFA)和各国(如欧洲食品安全局(EFSA)和美国环保局(USEPA))基于同样的数据<sup>[15]</sup>,使用不同的基准剂量95%置信区间下限(Bench mark dose low, BMDL)估计模型得出不同的POD参考值。鉴于JECFA综合考虑全球相关因素推荐POD值,具有更好的代表性,因此成为本研究POD参考依据。

至今,国内外对苯并[a]芘在多种食物中的污染进行了膳食风险评估,制定了在(熏、烧、烤)肉食品、(熏、烤)水产品、奶油、油脂和多种谷物等食品中的限量值<sup>[16-17]</sup>。而对于我国的小宗特色食品如干制红枣中BaP污染状况及其对膳食健康风险的研究尚未见报道。

本研究拟就目前我国市场上销售的干制红枣中苯并[a]芘含量进行调查研究,辅以新鲜红枣不同干制方式的实验室模拟试验,采用概率评估方法估算市售红枣中苯并[a]芘含量水平,结合红枣膳食摄入量,评估其膳食暴露健康风险,分析其不确定性,旨在明确我国干制红枣中BaP污染状况和完善BaP膳食风险评估,并以此为依据,提出红枣中BaP限量值和减少污染的建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料(干制红枣)市场采集

研究人员先后从山西大同、太原、晋中、临汾、长治和吕梁 6 个市的大型超市和农贸市场共采集 100 个品牌的干制红枣,每个品牌 3 次重复(包装),每次重复约 500~1 000 g。采样点包括了当地 90% 以上的生活用品超市和当地主要农贸市场。采集到的红枣原产地为我国红枣主产区新疆、山西、山东、陕西、河南和宁夏等省(市、自治区),基本包括了人们日常食用品种,也代表了市场销售主流红枣品种和主要企业产品。经统计,所采集红枣涉及的加工企业、公司及合作社有 34 家,样品种类覆盖度占实际市售 80%~90%。

### 1.2 新鲜红枣干制模拟加工处理

将市场上采集到的新鲜红枣在实验室模拟条件下干燥,每处理取 1 000 g 鲜红枣,重复 3 次,使之达到市售干制红枣水分含量水平(25%左右)<sup>[18]</sup>。具体方法如下:

1) 室温干燥:于室内温度 20~23 °C 条件下自然晾干,5 d 后检测 BaP。

2) 烤箱烘干:电烘箱中 60 °C 烘烤 12 h,降温至室温,12 h 后再烘烤 12 h,再降至室温,12 h 后检测 BaP。

3) 煤火烘干:将枣样品置于煤火炉火源 30 cm 处,炙烤 48 h 后检测 BaP。

4) 冰箱保鲜:将新鲜红枣采回后直接放入 4 °C 冰箱,48 h 后检测 BaP。

### 1.3 红枣样品 BaP 检测

红枣样品预处理:每个样品称取约 200 g 红枣,在干净菜板上用小刀分别切开去核;枣肉用菜刀切至 1~2 mm 碎块,装在可封口的聚乙烯样品瓶中,置 -20 °C 冰柜中保存待处理。

本研究采用分散固相萃取(QuEChERS)快速提取和净化样品,使用 GC-MS/MS 方法检测 BaP。

#### 1.3.1 试验仪器和试剂

仪器:三重四级杆气质联用仪,配电子轰击源(7890B-7010B, Agilent, 美国);电子天平(TP6101/BS210S, 赛多利斯科学仪器北京有限公司);5424R 型离心机(Eppendorf, 德国);Talboys 945066 型多管涡旋混合仪(Troemner, 美国)。

试剂:苯并[a]芘标准品(200 μg/mL, 坛墨质检科技股份有限公司),乙腈(色谱纯,美国 Tedia 公

司),水(蒸馏水,广州屈臣氏视频饮料有限公司),提取盐包(内含 4 g 无水硫酸镁,1 g 氯化钠,1 g 柠檬酸钠,0.5 g 柠檬酸氢二钠,岛津技迹(上海)商贸有限公司),净化管(内含 200 mg 无水硫酸镁,30 mg N-丙基乙二胺固相吸附剂(PSA),岛津技迹(上海)商贸有限公司)。

#### 1.3.2 红枣样品前处理

1) 称取去核切碎的红枣样品 5.0 g 于 50 mL 离心管中;2) 加入 8.5 mL 水、10 mL 乙腈,2 500 r/min 涡旋 3 min;3) 加入 4 g 无水硫酸镁颗粒、1 g 氯化钠、1 g 柠檬酸钠、0.5 g 柠檬酸氢二钠,拧紧离心管盖后立刻振摇 1 min,然后 8 000 r/min 离心 5 min;4) 吸取 1.5 mL 乙腈提取液转移至预先装有 200 mg 无水硫酸镁和 30 mg N-丙基乙二胺固相吸附剂(PSA)的离心管中,盖紧后振摇 30 s,离心 1 min;5) 取 1 mL 上清液经 0.22 μm 滤膜过滤,装入进样瓶中,待检测。

#### 1.3.3 样品中 BaP 的检测

色谱条件:配 Agilent HP-5, 30 m×0.25 mm×0.25 μm 色谱柱。色谱柱温度 60 °C 持续 1 min,然后以 40 °C/min 升至 170 °C,再以 10 °C/min 升至 310 °C,保持 3 min;进样口温度 280 °C;载气为氦气,纯度≥99.999%,流速 1.5 mL/min。自动进样 1 μL,不分流进样,BaP 保留时间 16.89 min。

质谱条件:电子轰击源 70 eV,离子源温度 230 °C,传输线温度 280 °C,溶剂延迟 4 min;定量离子对为 252.1/250.1,定性离子对为 252.1/250.1 和 125/124.1,碰撞能量分别为 35 和 10 eV。

采用本试验方法,红枣中 BaP 在 1~100 μg/kg 水平的添加回收率达到 98%~103%,具体见表 1。方法检出限(Limit of detection, LOD)为 0.3 μg/kg,方法定量限(Limit of quantification, LOQ)为 1 μg/kg。检测结果小于 LOQ 定义为未检出(Not detected, ND)。

### 1.4 数据处理

#### 1.4.1 检测结果的计算及 ND 值赋值

若 3 个重复检测值均≥LOQ,则将同一干制红枣商品的 3 个重复(包装)检测值的结果取平均值代表一个样品的检测值;若 3 个重复检测值中最少有一个为 ND(<LOQ),根据 EFSA 方法给该样品赋值,共得到 100 个样品检测统计数据。根据 EFSA 食品安全不确定性评估推荐原则<sup>[19-20]</sup>,假定样品均受到不同程度 BaP 污染,在不影响数据评估质量的

表1 红枣中苯并[a]芘检测方法的添加回收率

Table 1 Methodological recoveries of detection of BaP fortified in jujube dates

BaP 添加水平/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) BaP levels of fortification	重复检测值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) Detected values	平均值/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) Mean	回收率/% Recovery
1.00	0.91, 0.98, 0.99, 0.99, 1.01	0.98	98
10.0	10.0, 9.8, 10.6	10.1	101
100	105, 94, 97, 109, 108	103	103

前提下,给 ND 样品赋值,便于后续统计处理。这样,低于定量限的检测数据的处理采用如下方法:若 3 个重复检测结果均为 ND 值,则给该样品赋值为  $1/2 \text{ LOQ}$ ,即  $0.5 \mu\text{g}/\text{kg}$ ;若其中有 2 个重复检测结果为 ND 值,则给该样品赋值为  $\text{LOQ}$ ,即  $1 \mu\text{g}/\text{kg}$ ;若其中只有 1 个重复检测结果为 ND 值,则按其余 2 个重复检测结果的平均值给该样品赋值。

#### 1.4.2 采用 Bootstrap 概率统计估算 BaP 浓度

采用 R 统计绘图平台<sup>[21]</sup>,对市场调研的 100 个样品的 BaP 检测统计数据编制描述性统计数据表;应用这 100 个检测统计数据做非参数 Bootstrap 再抽样分析,得到 1 000 次再抽样样本;根据这 1 000 个样本计算 Bootstrap 样本中 BaP 估算质量分数的平均数、中值、95、97.5 和 99 分位值及其置信限,用于下一步评估红枣中 BaP 膳食暴露健康风险及其不确定性。

#### 1.4.3 计算红枣中 BaP 的膳食暴露量

红枣的膳食摄入量数据来自 FAO/WHO 食品安全合作平台数据库中提供的中国数据统计<sup>[22]</sup>,因为并不是所有被调查人员都在每日膳食中包括红枣,该数据仅是调查期间食用红枣人员的概率统计结果。因此,推广到整个人群,本研究引入膳食消费率校正系数,得到红枣的校正膳食摄入量。计算公式如下:

$$\text{膳食消费率校正系数} = \text{食用人数} / \text{被调查人数} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{校正膳食摄入量}(\text{g}/\text{kg bw. d}) = \\ \text{膳食摄入量}(\text{g}/\text{kg bw. d}) \times \text{膳食消费率校正系数} \end{aligned} \quad (2)$$

根据以上步骤得到的红枣中 BaP 估算质量分数和红枣的校正膳食摄入量,计算中国成年人群(15~49 岁组,以下简称成人)和儿童人群(3~5 岁组,以下简称儿童)的每天每公斤体重红枣膳食在一般摄入(平均值)和高端摄入(97.5 分位值)水平上

的红枣 BaP 膳食暴露量。计算公式如下:

$$\begin{aligned} \text{膳食暴露量}(\mu\text{g}/\text{kg bw. d}) = \\ \text{估算 BaP 质量分数}(\mu\text{g}/\text{kg}) \times \\ \text{校正膳食摄入量}(\text{g}/\text{kg bw. d}) / 1\ 000 \end{aligned} \quad (3)$$

本研究采用的致癌性起始点是以每公斤体重每日剂量计算,因此,后续的相关参数均按体重折算到每公斤体重每日消费(摄入)量或暴露量计算。

#### 1.4.4 红枣 BaP 膳食暴露风险评估

评估遗传毒性和致癌性化合物,根据 JECFA<sup>[11]</sup>、EFSA<sup>[23]</sup>和 USEPA<sup>[13]</sup>推荐方法,采用暴露限值法,即根据 BaP 动物试验的剂量-响应关系确定基准剂量 95%置信区间下限为其致癌性起始点,根据 POD 与 BaP 膳食暴露量的比值得出暴露限值,评价暴露风险。

关于 POD 值,JECFA 推荐为  $100 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ ,EFSA 推荐为  $70 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ ,USEPA 推荐为  $71 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ 。本研究选择  $\text{POD} = 100 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$  计算 MOE,进行红枣中 BaP 膳食暴露风险评估。计算公式如下:

$$\text{MOE} = \text{POD} / \text{膳食暴露量} \quad (4)$$

式中:MOE 为暴露限值,无量纲;POD 为致癌性起始点, $\mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ 。

#### 1.4.5 红枣实验室干燥处理结果统计

采用 R 统计绘图平台<sup>[21]</sup>,对实验室红枣干燥 4 种不同处理的 3 次重复 BaP 检测数据做方差分析和处理间差异显著性检验,并做各处理检测结果的箱线图,用以分析 BaP 污染的原因。

## 2 结果与分析

### 2.1 干制红枣中 BaP 的浓度分布

经检测,100 个红枣样品中有 60 个样品检出 BaP 质量分数  $\geq \text{LOQ}$ 。按照本研究采用的给 ND 赋值的数据处理方法,100 个样品检测数据中,BaP 质量分数最小值为  $0.50 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,中值  $1.05 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,



平均值  $2.00 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 最大值  $9.80 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。样品的质量分数分布见表 2, 数据的分布情况可从表 2 经验累积密度函数得到反映, 98% (98 个数据) 的检测结果介于  $\text{ND}(<\text{LOQ}) \sim 8.0 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。

表 2 红枣中苯并[a]芘检测质量分数分布的统计学结果

Table 2 Descriptive statistics of distribution of BaP mass fraction in jujube dates

检测值范围/ $(\mu\text{g}/\text{kg})$ Range of measurements	出现频率/次 Frequency	经验累积密度 函数/% eCDF
$\geq 0.00 \sim 0.99$	40	40
$\geq 1.00 \sim 1.99$	25	65
$\geq 2.00 \sim 2.99$	2	67
$\geq 3.00 \sim 3.99$	19	86
$\geq 4.00 \sim 4.99$	7	93
$\geq 5.00 \sim 5.99$	2	95
$\geq 6.00 \sim 6.99$	2	97
$\geq 7.00 \sim 7.99$	1	98
$\geq 8.00 \sim 8.99$	0	98
$\geq 9.00 \sim 9.99$	2	100

## 2.2 BaP 浓度检测结果的 Bootstrap 概率统计

采用非参数 Bootstrap 再抽样技术对样本 BaP 质量分数进行统计处理, 经过 1 000 次再抽样, 得到这 1 000 个抽样样本的估值结果 (中值、平均值、95 分位值、97.5 分位值和 99 分位值) 及其标准差和 95% 置信限 (表 3)。按照膳食暴露风险评估惯例, 为了估计红枣中 BaP 对我国重要人群膳食暴露风险, 本研究采用非参数 Bootstrap 估算样本的平均值 ( $2.00 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 其 95% 置信限为  $1.68 \sim 2.34 \mu\text{g}/\text{kg}$ ) 用于一般摄入估计, 采用 97.5 分位值 ( $7.30 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 95% 置信限为  $5.73 \sim 9.61 \mu\text{g}/\text{kg}$ ) 用于高端摄入估计。

## 2.3 红枣中 BaP 的膳食暴露量

采用红枣中 BaP 质量分数估值数据 (表 3), 根据公式 (1) 和文献 [22] 数据计算膳食消费率校正系数; 根据公式 (2) 和 (3), 计算中国成人和儿童红枣膳食摄入的 BaP 暴露量 (表 4)。采用我国代表人群的红枣膳食消费量、膳食消费率、体重数据和红枣中 BaP

表 3 Bootstrap 再抽样估算红枣样本中 BaP 值

Table 3 Estimation of BaP in jujube dates through bootstrap reampling  $\mu\text{g}/\text{kg}$

分位值 Percentile	质量分数 均值 Mean of mass fraction	标准差 SD	95% 置信限 95% Confidential interval
中值 Median	1.05	0.13	1.00~1.30
平均值 Mean	2.00	0.20	1.68~2.34
95 分位值 P95	5.87	1.03	4.24~7.70
97.5 分位值 P97.5	7.30	1.32	5.37~9.61
99 分位值 P99	8.51	1.35	6.40~9.80

质量分数的 Bootstrap 估值, 得到评估我国消费者因红枣而带来的 BaP 膳食风险关键数据, 即按体重计算的 BaP 暴露量, 成人平均水平为  $0.000\ 013 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ , 97.5 分位值水平为  $0.000\ 152 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ ; 儿童平均水平为  $0.000\ 054 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ , 97.5 分位值水平为  $0.000\ 535 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ 。从数据比较可以看出, 因为体重与膳食量的关系, 儿童比成年人群的单位体重暴露量高。

## 2.4 红枣中 BaP 暴露的膳食风险评估

按照公式 (4), 根据成人和儿童红枣膳食中 BaP 各估值水平的膳食暴露量 (表 4), 采用  $\text{POD} = 100 \mu\text{g}/\text{kg bw. d}$  计算暴露限值 (表 5)。

本研究中成人和儿童膳食中 BaP 在红枣一般摄入 (平均值) 水平上的 MOE 为  $1\ 851\ 852 \sim 7\ 692\ 307$ , 在红枣高端摄入 (97.5 分位值) 水平上的 MOE 为  $186\ 916 \sim 657\ 895$ , 2 组人群一般摄入水平的 MOE 比高端摄入水平的 MOE 高出一个数量级。如果仅考虑红枣中的 BaP 暴露, 参考 EFSA 推荐, 判定 BaP 膳食暴露为低风险水平的 MOE 值应大于  $10\ 000$  [14], 而成人和儿童 2 个人群的 2 个暴露水平的 MOE 远大于  $10\ 000$ , 属于低膳食暴露风险。

根据 FAO/WHO 食品安全合作平台数据库中提供的中国膳食摄入数据 [22], 用每人每日膳食量和每公斤体重膳食量折算, 15~49 岁人群体重介于  $53.1 \sim 59.7 \text{ kg}$ , 3~5 岁儿童的体重介于  $17.1 \sim 19.1 \text{ kg}$ 。按照我国居民营养和健康监测报告 2010—2013 年数据 [24], 我国一般成年人群 (标准人) 每日膳食总量为  $1\ 273.7 \text{ g}$ , 红枣校正膳食摄入量按

表4 中国成人和儿童红枣膳食消费的 BaP 暴露量

Table 4 BaP exposure doses through consumption of jujube dates for Chinese adults and children

人群 Populations	估值水平 Estimation category	红枣中 BaP 质量 分数/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) Mass fraction of BaP in jujube dates	红枣摄入量 <sup>[22]</sup> / ( $\text{g}/\text{kg bw. d}$ ) Jujube dates consumption	膳食消费率 校正系数 <sup>[22]</sup> Calibrated consumption rate	校正红枣 摄入量/ ( $\text{g}/\text{kg bw. d}$ ) Calibrated jujube dates consumption	BaP 暴露量/ ( $\mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ ) BaP exposure
成人 Adults	平均值	2.00	0.788 7	0.008 3	0.006 55	0.000 013
	97.5 分位值	7.30	2.509 7		0.020 83	0.000 152
儿童 Children	平均值	2.00	2.402 4	0.011 2	0.026 91	0.000 054
	97.5 分位值	7.30	6.544 5		0.073 30	0.000 535

表5 中国成人和儿童红枣膳食中 BaP 暴露 MOE 值

Table 5 MOE contributed by dietary exposure of BaP in jujube dates for Chinese population of adults and children

人群 Populations	估值水平 Estimation category	致癌性起始点/ ( $\mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ ) Point of departure	BaP 暴露量/ ( $\mu\text{g}/\text{kg bw. d}$ ) BaP exposure	暴露限值 Margin of exposure
成人 Adults	平均值	100	0.000 013	7 692 307
	97.5 分位值		0.000 152	657 895
儿童 Children	平均值	100	0.000 054	1 851 852
	97.5 分位值		0.000 535	186 916

每人每日计算为 0.39~1.11 g, 约占膳食总量的 0.03%~0.09%; 4~6 岁儿童每日膳食总量为 559 g, 红枣校正膳食摄入量按每人每日计算为 0.46~1.40 g, 约占膳食总量的 0.08%~0.25%。2 个人群的合计红枣膳食占膳食总量的 0.03%~0.25%。可见红枣不是我国居民膳食的主要成分, 因此对 BaP 膳食暴露的贡献也相应较小。

## 2.5 实验室干燥处理模拟试验

实验室试验结果表明, 红枣中检出较高浓度 BaP 的主要原因是煤火烘干过程造成, 煤火烘干枣中 BaP 浓度极显著高于其他方式干燥红枣中 BaP 浓度。自然干燥和烤箱烘干处理的红枣中 BaP 浓度与鲜枣中 BaP 浓度没有显著差异, 不是红枣中较高 BaP 浓度的主要来源(表 6 和图 1)。从图 1 检测数据箱线图可以看出, 各处理的 BaP 浓度检测结果差异明显。与其他处理结果相比, 煤火烘干处理的

BaP 中位值(箱体中粗黑线)较大, 是其它处理的 16 倍以上; 箱线图上下四分位(箱体上下边)间距也大, 上、下边缘线(最大、最小值)间距也较大。反映了煤火烘干样品不单 BaP 检测浓度较高, 而且各重复间的差异较大。

本实验室模拟试验属于一种单因素(干燥方式)对比试验, 因此, 其 BaP 浓度水平不能直接与市场调查浓度水平结果相比较。

## 3 讨论

### 3.1 红枣中 BaP 污染水平估计的不确定性

根据样品检测结果, 采用概率评估方法对红枣中 BaP 质量分数进行估算, 不但能获得红枣中 BaP 质量分数较全面的代表值, 也可以估计其不确定性大小, 为风险决策管理提供更好的参考信息。本研究采用的非参数 Bootstrap 再抽样技术, 适用于难以

表 6 红枣实验室干燥加工试验结果

Table 6 BaP in jujube dates in samples of laboratory drying treatments

干燥处理 Drying treatments	BaP 质量分数/( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) BaP mass fraction			差异显著性 Level of significance
	重复测量值	平均值	标准差	
	Measured values	Mean	SD	
室温干燥 Room temperature	3.4, 5.2, 9.0	5.9	2.9	a
烤箱烤干 Electric oven	5.3, 5.6, 5.6	5.5	0.2	a
煤火烘干 Coal heating	97.6, 45.1, 128.3	90.3	42.1	b**
冰箱保鲜 Refrigerator	8.1, 4.0, 3.7	5.3	2.5	a

注：\*\*表示煤火烘干处理与其它处理间差异极显著( $P<0.01$ )。

Note: \*\* indicating extremely significant difference between treatment of coal heating and other treatments ( $P<0.01$ ).

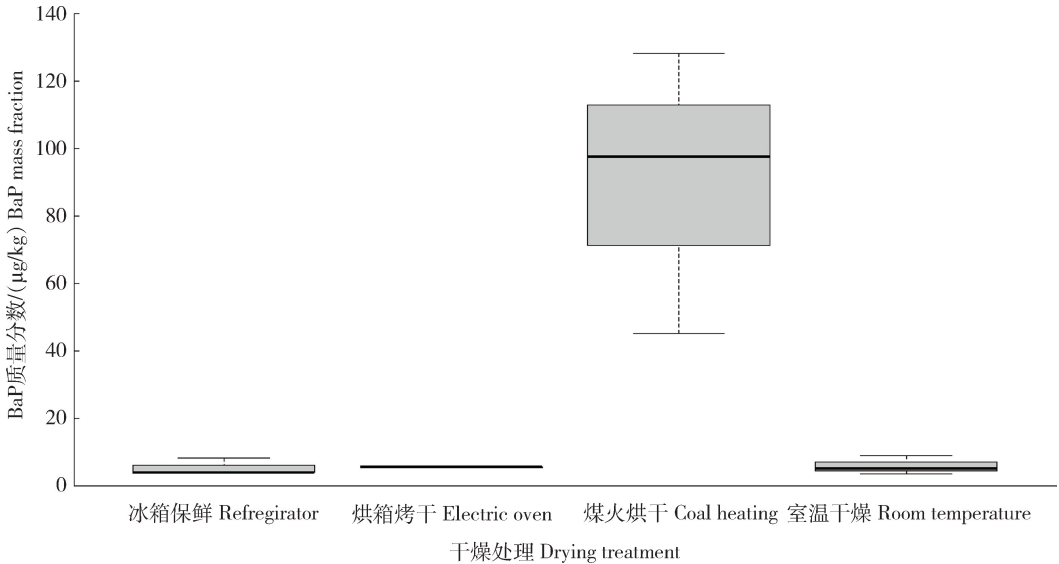


图 1 不同干燥处理红枣中 BaP 质量分数

Fig. 1 The distribution of BaP mass fraction by different drying treatments

进行基于分布的概率评估场合。与基于分布的概率评估比, Bootstrap 方法可靠性略差, 其估值范围局限于检测值范围。

红枣中 BaP 污染水平可能随产地、生产时间和生产方式有所变化。但是, 因为红枣生产比较集中, 主要产地分布在黄河流域和新疆, 生产厂家少并且比较明确, 产品又是国内广泛流通, 因此, 本研究采用的抽样方法和检测结果有较可靠的覆盖面和代表性。

按照 EFSA 推荐的处理监测结果中 ND 值的原则和假定样品均受到 BaP 不同程度污染的风险偏好, 把未检出 (ND,  $< \text{LOQ}$ ) 结果进行赋值处理, 在 ND 值少于 50% 的情况下 (本案例 40%), 不会影响

median 值。本研究给 3 个重复检测结果均为 ND 的样品赋值为  $1/2 \text{ LOQ}$ , 与  $\text{ND}=0$  赋值比, 其结果可能增大了 mean 值; 与  $\text{ND}=\text{LOQ}$  赋值比, 其结果可能缩小了 mean 值。但是, 因为膳食暴露评估主要关注检测结果分布的右侧 (高端), 这样对 ND 值的处理对监测结果的影响有限<sup>[19]</sup>。

本研究采用分散固相萃取快速提取、净化 (QuEChERS), GC/MS/MS 方法检测红枣中的 BaP, 结合干制红枣糖分多和次生代谢物质丰富的基质特征, 选择合适吸附剂, 既满足检测对样品净化、回收率和灵敏度技术要求, 同时也按照适用性 (Fitness for purpose) 原则简化了分析过程, 达到了国内 BaP 限量检测要求 ( $\text{LOQ}=1 \mu\text{g}/\text{kg}$ ) 和欧盟成

员国监测 BaP 相关应用实践的水平<sup>[25-26]</sup>。

### 3.2 膳食摄入数据

膳食摄入数据一直是我国进行食品安全风险评估的瓶颈,本研究采用 FAO/WHO 食品安全合作平台提供的膳食数据库<sup>[22]</sup>。这些数据用于长期膳食暴露评估,有中国人群红枣膳食摄入统计数据,可提供单一食品不同年龄、不同性别人群的主要分位值水平膳食量和被调查人员数量等基础数据,有利于进行缩小评估结果不确定性的进一步处置。受数据来源限制,本研究仅采用了成人组(15~49岁)和儿童组(3~5岁)2个人群的红枣摄入平均值和97.5分位值,这是进行膳食风险评估推荐最常用的代表性人群和膳食水平。

其他膳食数据还可能有按国家食品生产和人口计算的人均摄入数据。这也是 FAO 分国别进行膳食摄入统计的方法之一,不足之处是不能反映不同人群(性别、年龄和特殊人群等)间的差异,评估的不确定性较大。我国目前的居民营养调查数据<sup>[24]</sup>,其膳食数据仅按食品大类(如浅色蔬菜、深色蔬菜和水果)分组编制,没有细分到每个食品,变异性未知,更没有按数据分布计算分位值,与工业国家单一食品数据相比<sup>[27-28]</sup>,其不确定性和变异性大且不明确。

### 3.3 红枣中 BaP 污染与限量标准

目前我国尚未建立红枣中 BaP 限量标准,从膳食比例看红枣仅占我国各人群膳食的很小一部分。40个红枣样品检测 BaP 质量分数 $<1 \mu\text{g}/\text{kg}$ (LOQ),其余60个介于 $1\sim 9.8 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,97.5分位值 $<8 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,平均值为 $2 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,与现有食品安全国家标准 GB 2762—2022<sup>[16]</sup>规定的其它食品中 BaP 限量标准( $2\sim 10 \mu\text{g}/\text{kg}$ )接近。因此,建议制定红枣中 BaP 限量为 $8 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,用以控制膳食暴露量,以体现对污染物控制的合理达到的尽量低原则(As low as reasonably achievable, ALARA)。香港特区政府食物安全中心建议油脂中的 BaP 限量为 $5 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,依据之一就是监测油脂中 BaP 时,95%样品 BaP 质量分数低于 $5 \mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[29-30]</sup>。

从实验室模拟试验结果看,煤火烘干是 BaP 污染主要贡献者,所以应该限制或取消用煤火烘干法加工红枣。对于模拟试验中各处理内重复性的差异,不同干燥处理方式有不同的误差原因。如煤火烘干属于开放点源环境,是重复间检测结果差异大的重要原因;室温下干燥,开放时间,红枣个体间 BaP 变化幅度大;冰箱保存的鲜枣样品可能因为样

品均匀性差而导致重复间存在误差;而电烘箱烘干由于环境稳定,空间密闭,个体间吸附平衡较其它处理均匀,重复间变异最小;也不排除试验方法和操作中存在不精确的问题引起的重复间误差。但是,差异显著性统计分析结果表明,本模拟试验中煤火烘干是该试验红枣中较高 BaP 浓度的原因。

### 3.4 膳食风险评估悲观(Pessimistic)估计与乐观(Optimistic)估计

膳食暴露风险评估需要为不同的风险管理决策提供依据,EFSA 把农药残留的初级风险评估分为悲观估计和乐观估计。前者实际上就是把污染风险评估得严重一些,污染浓度和膳食摄入量采用尽可能高分位值和置信上限(如用97.5分位值代表高端摄入或暴露估计值);而后者则把风险评估较轻,采用较低的分位值和置信下限(如用 mean 代表一般摄入或暴露估计值)<sup>[20,31]</sup>。进行风险评估时,特别是在数据不完善情况下,还可能需经验判断(Expert judgment),决定数据取舍,以降低估计的不确定性。作为食品安全风险评估不可或缺的一环,评估结果的不确定性要尽最大限度明确并降低,以期风险管理决策提供更准确参考信息<sup>[32]</sup>。

本研究红枣中 BaP 膳食暴露评估采用2组数据,基于 mean 的评估代表一般暴露水平的评估,而基于97.5分位值的高端暴露评估属于保守评估,以供不同风险偏好决策参考。

### 3.5 红枣中 BaP 与其它 PAHs 的关系

目前,国际、国内选择 BaP 做为 PAHs 类化合物的标志物进行健康风险评价<sup>[11-12,16-17]</sup>,同时也关注 PAHs 类化合物的累积健康风险。比如 USEPA 对多种包括 BaP 在内的 PAHs 通过相对效力因子法(Relative potency factor, RPF)进行累积毒性评价<sup>[33-34]</sup>。可见有必要对红枣中 PAHs 的累积膳食暴露风险做进一步的研究。

## 4 结论

基于上述检测、计算和分析,本研究主要结论如下:

1)100个市售红枣样品中 BaP 质量分数 $\leq 9.8 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,其中有40个样品的 BaP 质量分数 $< \text{LOQ}$ ,经非参数 Bootstrap 统计估算,红枣中 BaP 质量分数中值为 $1.05 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,平均值 $2.00 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,97.5分位值为 $7.30 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,其不确定性用各质量分数值的95%置信限表征。



2) 采用暴露限值法进行基于 BaP 遗传毒性和致癌性的膳食风险评估, 红枣中 BaP 暴露的 MOE 值在 97.5 分位值可达 186 916(儿童)~657 895(成人), 远大于 JECFA 推荐的  $MOE > 10\ 000$  的安全边界, 同时, 考虑到红枣的低膳食消费率(0.03%~0.25%), 红枣中 BaP 污染属于低膳食暴露风险。

3) 红枣膳食风险评估的不确定性尚待完善。本研究初步分析了影响评估不确定性的样品代表性、毒理学参考值和膳食消费数据三类因素, 特别提及了我国不同人群的膳食数据需要细化到每一种食品, 包括明确熏制干燥等加工方式食品的膳食消费量。

4) 模拟新鲜红枣干燥试验结果显示, 煤火烘干是造成红枣中较高 BaP 浓度的重要原因, 需要在干制加工时加以控制。

## 参考文献 References

- [1] 国家统计局. 国家数据-农业-茶叶水果产量[EB/OL]. [2023-09-14]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>
- National Bureau of Statistics of China. National Data-Agriculture-Production of Tea and Fruits[EB/OL]. [2023-09-14]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01> (in Chinese)
- [2] 中国经济网. 红枣生产和消费概况[EB/OL]. [2022-12-08]. [http://finance.ce.cn/futures/qhgdbd/201904/26/t20190426\\_31947744.shtml](http://finance.ce.cn/futures/qhgdbd/201904/26/t20190426_31947744.shtml)
- Network of China Economics. A Brief Introduction of Production and Consumption of Jujube Dates[EB/OL]. [2022-12-08]. [http://finance.ce.cn/futures/qhgdbd/201904/26/t20190426\\_31947744.shtml](http://finance.ce.cn/futures/qhgdbd/201904/26/t20190426_31947744.shtml) (in Chinese)
- [3] 徐怀德, 雷宏杰, 李梅, 王军, 董晓博. 我国红枣产业发展现状[J]. 中国农村科技, 2022(4): 49-52
- Xu H D, Lei H J, Li M, Wang J, Dong X B. Development status of jujube industry in China[J]. *China Rural Science and Technology in Rural China*, 2022(4): 49-52 (in Chinese)
- [4] 马利平, 郝变青, 秦曙, 李彩虹, 乔雄梧. 山西红枣质量安全风险因子检测与分析[J]. 山西农业科学, 2020, 48(8): 1316-1320
- Ma L P, Hao B Q, Qin S, Li C H, Qiao X W. Detection and analysis of risk factors for quality and safety of jujube in Shanxi Province[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020, 48(8): 1316-1320 (in Chinese)
- [5] 张薇薇, 古丽斯坦. 阿不都拉, 贾秦岚, 王贤, 杨世英, 范盈盈, 何伟忠, 刘峰娟, 侯旭杰, 王成. 新疆不同品种红枣农药残留风险评估与排序[J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 262-270
- Zhang W W, Gulistan A, Jia Q L, Wang X, Yang S Y, Fan Y Y, He W Z, Liu F J, Hou X J, Wang C. Risk assessment and ranking of pesticide residues in different varieties of Xinjiang red jujube[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(9): 262-270 (in Chinese)
- [6] 崔阳, 郭利利, 张桂香, 李宏艳, 何秋生. 山西焦化污染区土壤和农产品中 PAHs 风险特征初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 72-79
- Cui Y, Guo L L, Zhang G X, Li H Y, He Q S. Human health risks of PAHs in soils and agricultural products in coking areas, Shanxi, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 72-79 (in Chinese)
- [7] International Agency for Research on Cancer (IARC). *IARC Monograph on the Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Man; Certain Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heterocyclic Compounds* [M]. Lyon: IARC, 1973
- [8] WHO. Evaluation of certain food additives and contaminants; 37<sup>th</sup> report of JECFA (WHO technical report series 806)[R]. Geneva: WHO, 1991
- [9] Alomirah H, Al-Zenki S, Al-Hooti S, Zaghoul S, Sawaya W, Ahmed N, Kannan K. Concentrations and dietary exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from grilled and smoked foods[J]. *Food Control*, 2011, 22(12): 2028-2035
- [10] International Agency for Research on Cancer (IARC). *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans; Some Non-Heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Some Related Exposures (Volume 92)* [M]. Lyon: IARC, 2010
- [11] Benford D, Agudo A, Carrington C, Hambrid T, van Leeuwen R, Rao M, Slob W, de Figueiredo Toledo M C, and Walke R. Polycyclic aromatic hydrocarbons[M]. In: *Safety Evaluation of Certain Contaminants in Food (WHO Food Additive Series 55/FAO Food and Nutrition Paper 82)*. Geneva: WHO, 2006: 563-744
- [12] International Agency for Research on Cancer (IARC). *Benzo[a]Pyrene* [M]. Lyon: IARC, 2012
- [13] U.S. Environmental Protection Agency. Toxicological Review of Benzo[a]Pyrene (CASRN 50-32-8) [EB/OL]. [2023-09-14]. [https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris\\_documents/documents/toxreviews/0136tr.pdf](https://cfpub.epa.gov/ncea/iris/iris_documents/documents/toxreviews/0136tr.pdf)
- [14] European Food Safety Authority (EFSA). Opinion of the scientific committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic [J]. *EFSA Journal*, 2005, 3(10): 282
- [15] Culp S J, Gaylor D W, Sheldon W G, Goldstein L S, Beland F A. A comparison of the tumors induced by coal tar and benzo[a]pyrene in a 2-year bioassay[J]. *Carcinogenesis*, 1998, 19(1): 117-124
- [16] 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
- GB 2762—2022. National food safety standard-Limits of contaminants in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022 (in Chinese)
- [17] Europe Commission. Commission regulation(EU) 2015/1125 of 10 July 2015 amending regulation (EC) No 1881/2006 as regards maximum levels for polycyclic aromatic hydrocarbons in katsubushi (dried bonito) and certain smoked Baltic herring[J]. *Official Journal of the European Union*, 2015, L184: 7-10
- [18] GB/T 5835—2009. 干制红枣[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
- GB/T 5835—2009. Dried chinese jujubes[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese)
- [19] European Food Safety Authority (EFSA). Management of left-censored data in dietary exposure assessment of chemical substances[J]. *EFSA Journal*, 2010, 8(3): 96
- [20] EFSA Panel on Plant Protection Products and their Residues (PPR). Guidance on the use of probabilistic methodology for modelling dietary exposure to pesticide residues[J]. *EFSA Journal*, 2012, 10(10): 2839
- [21] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing (Version 4.3.1)[Z]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023
- [22] WHO. Food Safety Collaborative Platform: Raw Data & Summary Statistics-Consumption Data [EB/OL]. [2023-09-14]. <https://apps.who.int/foscollab/Download/DownloadConso>
- [23] European Food Safety Authority (EFSA). Polycyclic aromatic hydrocarbons in food. Scientific opinion of the panel on contaminants in the food chain[J]. *EFSA Journal*, 2008, 6(8): 724
- [24] 赵丽云, 何宇纳. 中国居民营养与健康状况监测报告之一: 2010—2013 膳食与营养素摄入状况[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2018
- Zhao L Y, He Y N. *The Report No. 1 of the Monitoring of Nutrition and Health Status for Chinese Residents; Status of the Diets and Nutrients Intake in Years 2010 - 2013* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018 (in Chinese)
- [25] GB 5009.27—2016. 食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定[S]. 北

- 京: 中国标准出版社, 2017  
GB 5009. 27—2016. Determination of benzo (a) pyrene in foods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese)
- [26] Bratinova St, Karasek L, Buttinger G, Wenzl Th. Report on the 16<sup>th</sup> inter-laboratory comparison organised by the European Union reference laboratory for polycyclic aromatic hydrocarbons, EUR 27558 [R]. Brussel: Joint Research Centre of European Union, 2015
- [27] European Food Safety Authority (EFSA). Food Consumption Data, the EFSA Comprehensive European Food Consumption Database[EB/OL]. [2022-08-23]. <https://www.efsa.europa.eu/en/data-report/food-consumption-data>
- [28] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *Exposure Factors Handbook (EPA/600/R-09/052F, 2011 edition)* [M]. Washington, DC: National Center for Environmental Assessment, 2011
- [29] Hong Kong Centre for Food Safety (HK\_CFS). Legislative proposals on regulation of edible fats and oils and recycling of “Waste Cooking Oils” [R]. HKSAR: CFS, 2015
- [30] 香港特区政府. 2021年食物内有害物质(修订)规例[EB/OL]. [2023-09-14]. <https://www.gld.gov.hk/egazette/pdf/20212523/cs22021252386.pdf>  
The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. Harmful Substances in Food (Amendment) Regulation 2021[EB/OL]. [2023-09-14]. [https://www.elegislation.gov.hk/hk/2021/ln86!\\_en](https://www.elegislation.gov.hk/hk/2021/ln86!_en)
- [31] EFSA Scientific Committee, Benford D, Halldorsson T, Jeger M J, Knutsen H K, More S, Naegeli H, Noteborn H, Ockleford C, Ricci A, Rychen G, Schlatter J R, Silano V, Solecki R, Turck D, Younes M, Craig P, Hart A, Von Goetz N, Koutsoumanis K, Mortensen A, Ossendorp B, Martino L, Merten C, Mosbach-Schulz O, Hardy A. Guidance on uncertainty analysis in scientific assessments [J]. *EFSA Journal*, 2018, 16(1): 5123
- [32] FAO/WHO. Update of Chapter 6 Dietary Exposure Assessment for Chemicals in Food. In: *Principles and Methods for Risk Assessment of Chemicals in Food (EHC 240, 2<sup>nd</sup> edition)* [EB/OL]. [2023-09-07]. [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/food-safety/publications/chapter6-dietary-exposure.pdf?sfvrsn=26\\_d37b15\\_6](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/food-safety/publications/chapter6-dietary-exposure.pdf?sfvrsn=26_d37b15_6)
- [33] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Development of a Relative Potency Factor (RPF) Approach for Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Mixtures (Interagency Science Consultation Draft) [EB/OL]. [2023-09-14]. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=158302](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NCEA&dirEntryId=158302)
- [34] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Provisional Guidance for Quantitative Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons [EB/OL]. [2023-09-14]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=30002TUA.txt>

责任编辑: 董金波



**第一作者简介:** 丁超, 1982年9月出生,男,副研究员。2005年毕业于荷兰劳伦斯坦国际农学院,获理学学士学位,2009年获山西农业大学农业推广硕士学位。现任山西农业大学山西功能农产品检验检测中心副主任,主要从事生物技术与农产品质量安全研究工作。主持承担国家科技支撑计划子课题、国家重点研发计划课题、山西省重点研发课题、省留学人员资助项目、山西省农业科技成果转化和推广示范工程、山西省“三区”科技服务等项目7项。获山西省农村技术承包二等奖2项;认定国家级农作物品种1个、省级农作物品种4个;在省级以上刊物以第一作者发表学术论文5篇。



**通讯作者简介:** 乔雄梧,男,研究员。1982年毕业于山西农业大学本科,1987—1992年德国留学,先后获德国哥廷根奥古斯特大学农学工程师资格和吉森李比希大学农学博士学位。曾担任山西省农科院副院长及院长职务,现任农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(太原)主任。致力于农药残留和食品安全研究,主要从事食品/农产品中农药残留风险评估及残留限量标准制定研究。先后主持“十一五”国家科技支撑计划项目、国家863科技攻关项目、国家自然科学基金、山西省科技攻关等多项科研任务;参与制定《农药合理使用准则》国家标准42项,参与主持制定农业农村部标准《农药残留试验准则》。获得国家科技进步奖,国家技术监督局和山西省科技进步奖等多项奖励。学术兼职:任第一、第二届食品安全国家标准审评委员会农药残留分委员会副主任委员,农业农村部农药管理专家指导组副组长,国家农产品质量安全风险评估专家委员会委员,农业农村部农产品质量安全专家组成员,《农药学报》副主编等。