

农药残留加工因子及其在膳食暴露评估中的应用

李 安, 潘立刚*, 王纪华, 王 冬, 王北洪, 付海龙, 靳欣欣

(北京农业质量标准与检测技术研究中心, 北京 100097)

摘 要: 从初级农产品到入口的食品通常需要各种加工处理, 而加工过程会影响食品中的农药残留水平, 从而影响来源于初级农产品检测数据的风险评估结果的准确性, 因此在风险评估模型中纳入农药残留加工因子有助于真实反映农药残留膳食暴露风险。本文以常用的食品加工技术如清洗、去皮、烹调、榨汁、杀菌及其他相关技术为出发点, 综述了典型的加工方式对食品中农药残留的影响以及目前相应的加工因子在农药残留暴露评估中的应用情况, 为掌握食品中农药在加工过程中的残留动态、改进食品加工技术提供参考, 也为农药残留膳食暴露评估提供依据, 进而真实反映人群中农药残留的暴露风险。

关键词: 食品加工; 农药残留; 加工因子; 暴露评估

Processing factors of pesticide residues and their application in dietary exposure assessment

LI An, PAN Li-Gang*, WANG Ji-Hua, WANG Dong, WANG Bei-Hong, FU Hai-Long, JIN Xin-Xin

(Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, Beijing 100097, China)

ABSTRACT: There are all kinds of processing technologies to make primary agro-products become eaten food. The level of pesticide residues in food would be affected during food processing, thus the risk assessment results based on the testing data of the primary agro-products would be evaluated inaccurately. Therefore, processing factor in the risk assessment model helps to reflect the real level of the dietary exposure risk of pesticide residues. This paper was based on commonly used food processing technology such as washing, peeling, cooking, juice, cooking, sterilization and other processing technologies. The effects of these processing methods on pesticide residues in food and the corresponding processing factors in the application of exposure assessment were reviewed in this paper, in order to provide reference for the better understanding of the dynamic pesticide residues in food processing and the improvement of food processing technology, and reflect the dietary exposure assessment in our daily life.

KEY WORDS: food processing; pesticide residue; processing factor; exposure assessment

1 引 言

农药作为重要的农业生产资料, 在减少农作物

病、虫、草害方面发挥了巨大的作用。然而农药的大量使用也给生态环境、动植物以及人类健康造成了不可忽视的威胁。农药管理法规定申请农药登记时必须

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2013AA102302)

Fund: Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(2013AA102302)

*通讯作者: 潘立刚, 研究员, 主要研究方向为农药学。E-mail: panlg@nercita.org.cn

*Corresponding author: PAN Li-Gang, Researcher, Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, No.9, Shuguanghuayuan middle Road, Haidian District, Beijing 100097, China. E-mail: panlg@nercita.org.cn

提供最大残留限量、安全间隔期和在作物上的最终残留量等信息,但违规使用禁限用农药^[1]、或以数倍于推荐施药量对作物进行喷施^[2]、或没有达到安全采收期就进行采收等现象仍然存在,因而导致农药中毒事件频频发生,如2010年爆发的海南省“毒豇豆”事件^[3]不仅造成了恶劣的社会影响,而且部分含剧毒农药的蔬菜已流入市场,严重威胁着消费者的生命健康。

随着农药残留超标现象日益严重,开展农产品中农药残留风险评估成为当前关注的热点问题。农药残留风险评估是指通过测定农药的生物效应、毒理学、污染水平和膳食暴露量等数据,定性或定量描述农药残留对健康或生态的风险^[4]。风险评估包含危害识别、危害特征、暴露评估和风险描述4个环节,其中暴露评估是风险评估中的关键环节,由于各个国家或地区的农产品生产消费习惯和农药残留污染水平不同,建立适合本国或地区的暴露评估方法十分必要。农药残留暴露评估的残留水平数据主要来源于初级农产品的监测结果,而事实上从初级农产品到入口的食品通常会经过加工处理(如清洗、去皮、烹调 and 干燥等),这些加工方式会在不同程度上影响食品中的农药残留,若不考虑加工因素对农药残留的影响而直接进行膳食暴露评估,则会高估或低估农药残留的暴露风险。加工处理对农药残留的影响程度通常采用加工因子(processing factors, PF)来描述,将加工因子纳入暴露评估模型中,是国际上优化评估方法、提高评估结果准确性的通行做法^[5-7]。本文对农药残留加工因子的概念及类型,以及加工因子在暴露评估模型中的应用现状进行了综述。

2 农药残留加工因子概念

膳食暴露来源的食品主要包括两大类,一类是直接食用或经简单初加工(如清洗、鲜切)的农产品,如生鲜水果和某些蔬菜如西红柿、黄瓜等。另一类是加工食品,如果汁、罐头、菜肴、酒等。与初加工农产品相比,加工食品中的农药残留量可能会增加或降低,通常采用加工因子对农药残留量的浓缩或稀释程度进行定量描述。美国环境保护局(Environmental Protection Agency, EPA)于1996年对加工因子进行了明确定义,即加工后农产品中的农药残留量与初级农产品或原材料中农药残留量的比值^[8]。若加工因子小于1,则说明加工过程农药残留

水平降低,反之则表示残留水平升高。在实验室条件下研究加工因子时,应尽可能使实验室模拟的加工过程接近商业化加工过程,从而得到更具有实际应用价值的结果。加工因子的计算式如下:

$$PF = \frac{\text{加工食品中农药残留量}}{\text{初级农产品或原材料中农药残留量}}$$

3 典型加工因子

3.1 清洗因子

清洗是食品加工链的最初环节,清洗对食品表面各种农药残留具有不同程度的去除作用,其去除效果与农药的理化性质如辛醇/水分配系数(*n*-octanol-water-partitioning coefficient, *K_{ow}*)、极性、溶解度和蒸汽压有关。如除草剂西玛津的 *K_{ow}* 值明显低于敌草隆、特丁津、 α -硫丹和 β -硫丹等4种农药,因此其亲脂性差而水溶性好,清洗操作对西玛津的去除率高,清洗因子要低于其他4种农药^[9]。清洗加工因子不仅与农药的种类有关,还受清洗溶液的成分影响^[10]。次氯酸钠溶液、洗涤剂 and 自来水都是常用的果蔬洗液,研究^[11]表明3种洗液对甘蓝中毒死蜱的去除率从高到低依次为56.6%、23.0%和0.23%。农药的清洗因子还受其内吸性影响,内吸性农药容易深入组织内部,通过清洗难以去除,如比芬诺、四溴菊酯和吡蚜灵等3种内吸性较强的农药在番茄清洗时难以去除,其加工因子分别为1.1、0.9和1.2^[12]。

3.2 去皮因子

去皮操作是某些蔬菜、鲜食水果、果脯、罐头等食品的前处理加工方式。由于大部分农药渗透作用有限,且通常果蔬的表皮对异物入侵具有排斥作用,因此农药喷施后主要附着于食品的表面,如作物的外壳、蔬菜的外层叶片和水果的果皮,去壳削皮操作容易降低食品中的农药残留。研究^[13-16]表明,马铃薯、黄瓜和柿子等食品经去皮后,大部分有机磷和有机氯农药的残留量显著降低,加工因子均小于1。然而去皮操作对内吸性农药的降低效果不明显,Cengiz等^[17]研究发现,去皮能除去番茄中93%的克菌丹残留,但对内吸性农药腐霉利的去除率仅为77%。

3.3 榨汁因子

果蔬榨汁是常见的加工方式,由于工业榨汁系

统大多采用整果压榨,果蔬表皮的残留农药容易进入果汁中,因此总农药残留降低可能性较小,且农药在果汁中的残留水平受其溶解度和 K_{ow} 值影响。Rasmussen 等^[18]通过对毒死蜱等农药在苹果汁生产中的残留动态研究发现,在榨汁过程中毒死蜱等 13 种农药的残留水平下降了 93%~98%,而硫丹和对甲抑菌灵的降低水平较低,分别为 77%和 87%。相反,由于榨汁时去除了大量残渣,食品质量减小,农药的残留水平可能升高,如毛雪飞等^[19]研究橙汁压榨过程中百菌清、三氯杀螨醇和腐霉利等 16 种农药的残留变化发现,初榨果汁中有 11 种农药残留水平较原料果升高 1.2~3.4 倍。

3.4 烹饪因子

许多农产品在膳食前会进行烹饪处理,烹饪时间、烹饪温度、食品含水量以及食品的组织形态都会影响农药残留水平,如叶菜类与茎菜类农药在烹饪过程的去除效果差异明显。Ling 等^[11]研究发现甘蓝油炸后毒死蜱的去除率达 93.3%,而在大蒜和黄瓜中的去除率分别仅为 5.13%和 7.54%。烹饪方法对农药的去除率还受农药的蒸汽压、热稳定性、水解率和水溶性影响。Zhang 等^[20]研究表明,炒制能够清除甘蓝中 86.6%的毒死蜱、67.5%的 pp-DDT、84.7%的氯氰菊酯和 84.8%的百菌清,可见炒制对有机磷和拟除虫菊酯类农药的去除效果优于有机氯类农药,原因是有机氯农药对热相对稳定。

3.5 杀菌因子

杀菌方式可分为热杀菌和非热杀菌两大类,不同的杀菌方式去除农药的机理及效果不同。巴氏杀菌、超高温瞬时杀菌(ultra high temperature treated, UHT)、蒸汽杀菌以及微波杀菌等热杀菌技术,由于温度的升高容易使热敏性农药发生水解或散失,但对于热稳定性好的农药如氯氰菊酯、三唑磷、酰菌胺、苯醚甲环唑以及戊唑醇的去除效果不明显^[21]。非热杀菌主要是利用射线、压力以及氧化作用等对微生物产生影响来达到杀菌效果。这类杀菌方式对农药的化学结构有很大的影响,如辐照会使包括农药在内的有机化合物化学键断裂而导致其分解^[22]。Basfar 等^[23]等研究发现,土豆经 1 kGy 伽马射线辐照后,虫螨磷的浓度由 0.5 $\mu\text{g/mL}$ 降低至最大残留限量(maximum residue limits, MRLs)以下的 0.05 $\mu\text{g/mL}$ 。臭氧杀菌处理能够促进农药的水解作用,从而提高农药的去除

率。Kusvuran 等^[24]研究了臭氧杀菌对水果中农药残留的影响,对臭氧浓度和杀菌时间等条件进行优化后,三氯杀螨醇和毒死蜱的去除率分别达 98.6%和 94.2%。

3.6 其他加工因子

粉碎、腌制、干燥、发酵和油脂精炼等加工方式都会对食品中的农药残留造成不同程度的影响。对于残留在谷物表皮的农药,通过粉碎或碾磨处理可去除部分农药。粉碎过程不仅会使表皮的农药因为表皮剥离而去除,而且由于撞击和摩擦作用导致温度升高,也会促进某些热敏性农药的挥发或降解。Balnova 等^[25]研究发现,对甲基毒死蜱和甲基噻啉磷在面粉制备过程中的去除率均达 98%,且精加工程度越高,这两种农药的残留水平就越低。腌制食品是我国的传统加工食品,其特有的风味深受我国消费者的喜爱。腌制对食品中农药残留也有重要影响。武晓光等^[26]发现辣椒腌制过程中 7 种有机磷农药均发生了不同程度的消减,其消减程度与食盐浓度有关,且农药在辣椒和卤水中的分配比也受到食盐浓度的影响。干燥方式对农药残留的影响是多重的,一方面因为干燥过程造成水分蒸发和样品质量减小,因此农药残留浓度可能会增加。另一方面某些农药在干燥过程会加速挥发而被去除。家庭常用的干燥方法是直接风干,而食品工业中常见的干燥方法包括热风干燥、微波干燥、红外线干燥和冷冻干燥等。袁玉伟等^[27]研究发现,热烘干能去除甘蓝中 57%的氯氰菊酯和 48%的氰戊菊酯,且能去除菠菜中 61.2%的毒死蜱残留量。有学者研究了^[28]葡萄酒酿造过程中啞菌环胺和咯菌腈的残留动态,结果表明发酵过程两种杀菌剂的浓度随着发酵时间的延长而呈降低趋势。植物种子含有的农药残留在油脂生产的各个阶段会发生不同程度的降解, Miyahara 等^[29]研究了碱法提炼、脱色、脱臭等油脂加工工艺对大豆中敌敌畏、马拉硫磷、毒死蜱和克菌丹的影响,发现 4 种农药在油脂加工过程均有不同程度的去除,特别是在高温脱臭过程去除效果最明显。

4 加工因子在膳食暴露评估中的应用

4.1 暴露评估模型

农药残留膳食暴露评估通常是指对农产品或食品来源的农药残留可能摄入量的定量评价,即根据

农药残留水平和人群膳食特点估计某农药的膳食暴露值^[30]。膳食暴露评估是膳食安全性的重要评价指标,并为后续的风险分析提供大量信息和决策依据,因此是风险评估环节的关键步骤。目前常用的膳食暴露评估模型主要分为两大类,即确定性评估模型(deterministic model)和概率评估模型(probabilistic model)。无论是确定性评估还是概率评估,加工因子都是模型中的重要因子。

4.1.1 确定性评估模型

确定性评估也称为点评估(point estimate),是以点值的形式对人群的暴露参数作出的简单描述。确定性评估是将人群的食物消费量设为固定值,乘以固定的污染物浓度以及加工因子,并将所有食物来源的污染物暴露量进行累加后处除以人群的平均体重即为某污染物的人群膳食暴露量。FAO/WHO 建议采用高端消费量如食物消费量分布的 97.5%分位数和污染物的高端暴露值即食物中该污染物的最大残留量进行暴露评估^[31]。确定性评估方法忽略个体体重差异及个体消费量的不同,也不能体现消费食物中化学物浓度水平的差异,结果相对保守,尤其是当食物种类较多时,累加后的高估计值远远高于实际暴露量。确定性评估模型如下:

$$EXP = \sum_{k=1}^p \frac{x_{k,97.5} \times c_{k,max} \times PF_k}{\bar{w}}$$

式中 EXP 代表某种化学物的人群暴露量; $x_{k,97.5}$ 代表第 k 类食物消费量分布的 97.5%分位数; $c_{k,max}$ 代表第 k 类食物中某一化学物的最大残留量; p 是第 j 天中消费食物种类数目; PF_k 代表第 k 类食物的加工因子; \bar{w} 代表人群的平均体重。

4.1.2 概率评估模型

概率评估模型最初应用于环境污染危害暴露评估,目前已广泛应用到农产品食品中包括农药残留在内的化学污染物暴露评估。概率评估对所评价化学物在食品中存在概率与污染水平及相关水平的消费量进行模拟,因此需要足够的食品中化学物和食物消费量数据才具有实际意义。在实际应用中,食物消费量一般来源于膳食调查的 24 h 膳食回顾,而化学物浓度则一般来源于对市场上各类食品的常规监测,即以食物消费量和化学物浓度作为两个独立分布的总体,在获得两总体特定的分布特征和参数后,利用计算机模拟在两总体中进行随机抽样并配对相乘,

从而获得暴露值的概率分布,并计算一系列统计量作为目标人群的暴露估计值^[32]。概率评估模型如下:

$$EXP = \frac{\sum_{k=1}^p x_{ijk} \times c_{ijk} \times PF_k}{w_i}$$

式中 EXP 则为第 i 个个体在第 j 天中某种化学暴露量; x_{ijk} 是第 i 个个体在第 j 天摄入第 k 种食物的量; c_{ijk} 为第 i 个个体在第 j 天摄入第 k 种食物中的化学物残留浓度; w_i 是观察个体 i 的体重; p 是消费食物种类数目; PF_k 代表第 k 类食物的加工因子。

4.2 加工因子在暴露评估中的应用现状

目前欧美等国对加工因子的研究及其应用涉及广泛,EPA 于 1996 年发布的《关于加工食品或饲料中化学残留物测试》^[8]指导性文件中,详细阐述了食品经不同加工处理的理论加工系数计算方法,并已将加工因子应用于膳食暴露评估。德国联邦风险评估研究所(Federal Institute for Risk Assessment, BfR)在 2009 年发布的《农药残留加工因子汇编手册》^[33]中,包含了关于 FAO/WHO 农药残留专家联席会议(Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues, JMPR)和 EU 研究的粮食、蔬菜和水果 3 大类 56 种食品中 148 种农药的 1448 个加工因子,以及饲料中 115 种农药的 538 个加工因子,该手册已经在农产品中农药残留膳食暴露评估中得到了广泛的应用。现已开发的许多风险评估软件包含各类加工因子,如清洗、去皮、烘烤、水煮、榨油和酿酒等。Caldas 等^[34]利用欧盟开发的“随机化模拟危险性评价”软件评估了二硫代氨基甲酸盐在大米等 11 种加工农产品的膳食暴露风险,纳入加工因子后人群的二硫代氨基甲酸盐平均摄入量要降低 4 倍多。而葡萄生产葡萄干的干燥和浓缩过程,由于水分含量和葡萄质量降低而导致农药残留水平升高,因此,有学者^[35]研究证实纳入干燥因子和浓缩因子葡萄干中的啞菌酯残留量要比鲜葡萄中要高,风险指数增加。近年来,有学者^[36-38]研究了蔬菜、水果和谷物等食品中的农药残留加工因子,并结合膳食调查数据和污染物监测数据进行了农药残留膳食暴露评估。袁玉伟等^[39]利用点估计模型对我国居民对菠菜中毒死蜱的膳食暴露量研究表明,采用推荐剂量喷药 7 d 后,鲜食菠菜中毒死蜱摄入量为每日允许摄入量的(acceptable daily intake, ADI)的 14.1%,而引入脱水菠菜的加工因子后,毒死蜱摄入

量仅为ADI值的3.45%,风险指数明显降低。

5 结 语

食品从农田到餐桌的生产链会经过初加工或深加工等各个环节,而加工处理可能会增加或去除食品中残留的农药,因此纳入加工因子来校正入口食品中的农药残留值,有利于更为准确地评估农药膳食暴露量,进而以此为依据制定合理的农药残留限量标准。尽管有关农药残留加工因子的研究及其在膳食暴露评估中的应用已广泛开展,但在今后的研究中还需重点解决以下几方面问题:①加工因子的研究不应只局限于一些简单的单元操作工序上,如单一的清洗、烫漂和烹饪等,而应根据食品的商业化加工过程系统研究农药残留的加工因子;②我国食品加工行业具有多元化的特点,与其他国家存在明显差异,因此应当研究各类加工方法包括传统食品加工以及精细加工等过程农药残留的变化;③某些加工过程如高温烹饪、水煮及辐照等可能会导致农药发生代谢或降解而转化成其他产物,因此应重点关注这些加工过程农药转化产物的种类及其毒性;④应根据我国居民的饮食消费习惯建立完善的加工因子数据库,以便于科学准确地评估我国居民膳食中农药残留的暴露风险。

参考文献

- [1] 张宗美,柴勇,江学维,等.蔬菜有机磷和拟除虫菊酯类农药残留研究[J].食品科学,2008,29(3):426-428.
Zhang ZM, Chai Y, Jiang XW, *et al.* Study on organophosphorus and pyrethroid pesticides multi-residues in vegetables[J]. Food Sci, 2008, 29(3): 426-428.
- [2] 余以刚,卢志洪,朱珍,等.广州市售蔬菜有机磷农药残留情况调查分析[J].现代食品科技,2010,26(7):742-745.
Yu YG, Lu ZH, Zhu Z, *et al.* Investigation and analysis of organophosphorus pesticide residues in vegetables collected from Guangzhou[J]. Mod Food Sci Technol, 2010, 26(7): 742-745.
- [3] 金国藩,蒋士强,王静,等.从海南毒豇豆事件看农产品食品安全监管与农残检测[J].食品安全导刊,2010,4:23-25.
Jin GP, Jiang SQ, Wang J, *et al.* See agricultural product safety supervising and pesticide residue detecting from poisoning incident in Hainan cowpea[J]. China Food Safe, 2010, 4: 23-25.
- [4] 顾晓军,张志勇,田素芬.农药风险评估原理与方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2008:11.
Gu XJ, Zhang ZY, Tian SF. Principles and methods of pesticide risk assessment[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008: 11.
- [5] Iñigo-Nuñez S, Herreros MA, Encinas T, *et al.* Estimated daily intake of pesticides and xenoestrogenic exposure by fruit consumption in the female population from a Mediterranean country (Spain)[J]. Food Control, 2010, 21(4): 471-477.
- [6] Claeys WL, Schmit JF, Bragard C, *et al.* Exposure of several Belgian consumer groups to pesticide residues through fresh fruit and vegetable consumption[J]. Food Control, 2011, 22(3): 508-516.
- [7] Jensen BH, Petersen A, Christiansen S, *et al.* Probabilistic assessment of the cumulative dietary exposure of the population of Denmark to endocrine disrupting pesticides[J]. Food Chem Toxicol, 2013, 55: 113-120.
- [8] Residue Chemistry Test Guidelines OPPTS 860.1520 Processed Food/Feed[R]. EPA, 1996.
- [9] Guardia-Rubio M, Ayora-Cañada MJ, Ruiz-Medina A. Effect of washing on pesticide residues in olives[J]. J Food Sci, 2007, 72(2): 139-143.
- [10] 刘振华,王小伟,于瑞祥,等.洗涤方法对有机磷农药残留的影响[J].食品安全质量检测学报,2013,4(1):108-112.
Liu ZH, Wang XW, Yu RX, *et al.* Effects of different washing methods on pesticide organophosphorus residues[J]. J Food Safe Qual, 2013, 4(1): 108-112.
- [11] Ling Y, Wang H, Yong W, *et al.* The effects of washing and cooking on chlorpyrifos and its toxic metabolites in vegetables[J]. Food Control, 2011, 22(1): 54-58.
- [12] Boulaid M, Aguilera A, Camacho F, *et al.* Effect of household processing and unit-to-unit variability of pyrifenoxy, pyridaben, and tralomethrin residues in tomatoes[J]. J Agric Food Chem, 2005, 53(10): 4054-4058.
- [13] Soliman K. Changes in concentration of pesticide residues in potatoes during washing and home preparation[J]. Food Chem Toxicol, 2001, 39(8): 887-891.
- [14] Randhawa MA, Anjum FM, Ahmed A, *et al.* Field incurred chlorpyrifos and 3, 5, 6-trichloro-2-pyridinol residues in fresh and processed vegetables[J]. Food Chem, 2007, 103(3): 1016-1023.
- [15] Cengiz MF, Certel M, Gocmen H, *et al.* Residue contents of DDVP (dichlorvos) and diazinon applied on cucumbers grown in greenhouses and their reduction by duration of a pre-harvest interval and post-harvest culinary applications[J]. Food Chem, 2006, 98(1): 127-135.
- [16] Fernández-Cruz ML, Villarroya M, Llanos S, *et al.*

- Field-incurred fenitrothion residues in kakis: comparison of individual fruits, composite samples, and peeled and cooked fruits[J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(4): 860–863.
- [17] Cengiz MF, Certel M, Gocmen H, *et al.* Residue contents of captan and procymidone applied on tomatoes grown in greenhouses and their reduction by duration of a pre-harvest interval and post-harvest culinary applications[J]. *Food Chem*, 2007, 100(4): 1611–1619.
- [18] Rasmussen RR, Poulsen ME, Hansen HCB. Distribution of multiple pesticide residues in apple segments after home processing[J]. *Food Addit Contam*, 2003, 20(11): 1044–1063.
- [19] 毛雪飞, 焦必宁, 钱永忠, 等. 加工过程对水果及其制品中农药残留的影响[J]. *核农学报*, 2008, 22(1): 71–76.
- Mao XF, Jiao BN, Qian YZ, *et al.* Effects of processing treatment on pesticide residues in fruits and their products[J]. *J Nucl Agric Sci*, 2008, 22(1): 71–76.
- [20] Zhang ZY, Liu XJ, Hong XY. Effects of home preparation on pesticide residues in cabbage[J]. *Food Control*, 2007, 18(12): 1484–1487.
- [21] Bonnechere A, Hanot V, Jolie R, *et al.* Processing factors of several pesticides and degradation products in carrots by household and industrial processing[J]. *J Food Res*, 2012, 3(1): 68–83.
- [22] 张庆芳, 王锋, 哈益明. 毒死蜱和氯氰菊酯的辐射降解及产物特性研究[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(5): 1041–1049.
- Zhang QF, Wang F, Ha YM. Research on irradiation degradation and products characteristics of chlorpyrifos and cypermethrin[J]. *Sci Agr Sinica*, 2010, 43(5): 1041–1049.
- [23] Basfar AA, Mohamed KA, Al-Saqer OA. De-contamination of pesticide residues in food by ionizing radiation[J]. *Radiat Phys Chem*, 2012, 81(4): 473–478.
- [24] Kusvuran E, Yildirim D, Mavruk F, *et al.* Removal of chlorpyrifos ethyl, tetradifon and chlorothalonil pesticide residues from citrus by using ozone[J]. *J Hazard Mater*, 2012, 241: 287–300.
- [25] Balinova A, Mladenova R, Obretenchev D. Effect of grain storage and processing on chlorpyrifos-methyl and pirimiphos-methyl residues in post-harvest-treated wheat with regard to baby food safety requirements[J]. *Food Addit Contam*, 2006, 23(4): 391–397.
- [26] 武晓光, 徐珍珍, 刘毅华, 等. 7种有机磷农药在辣椒腌制加工中的残留行为[J]. *农药*, 2011, 50(8): 594–596.
- Wu XG, Xu ZZ, Liu YH, *et al.* Residual behavior of 7 organophosphorus pesticides in hot pepper during pickled processing[J]. *Agrochemicals*, 2011, 50(8): 594–596.
- [27] 袁玉伟, 张志恒, 叶志华. 加工操作对甘蓝中农药残留影响及其膳食暴露评估[J]. *中国食品学报*, 2009, 9(6): 175–181.
- Yuan YW, Zhang ZH, Ye ZH. Effects of processing on pesticide residues in cabbage and its dietary exposure assessment[J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2009, 9(6): 175–181.
- [28] Vaquero-Fernández L, Sáenz-Hernández A, Sanz-Asensio J, *et al.* Determination of cyprodinil and fludioxonil in the fermentative process of must by high-performance liquid chromatography-diode array detection[J]. *J Sci Food Agric*, 2008, 88(11): 1943–1948.
- [29] Miyahara M, Saito Y. Pesticide removal efficiencies of soybean oil refining processes[J]. *J Agric Food Chem*, 1993, 41(5): 731–734.
- [30] 王向未, 仇厚援, 张志恒, 等. 食品中膳食暴露评估模型研究进展[J]. *浙江农业学报*, 2012, 24(4): 733–738.
- Wang XW, Chou HY, Zhang ZH, *et al.* Diet exposure assessment methods in food[J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2012, 24(4): 733–738.
- [31] WHO/FAO. Guidelines for predicting dietary intake of pesticide residues(revised) [R]. 1997.
- [32] 刘元宝, 王灿楠, 吴永宁, 等. 膳食暴露定量评估模型及其变异性和不确定性研究[J]. *中国卫生统计*, 2008, 25(1): 7–9.
- Liu YB, Wang CN, Wu YN, *et al.* Quantitative model of dietary exposure assessment and analysis for the variability and uncertainty[J]. *Chin J Health Stat*, 2008, 25(1): 7–9.
- [33] BfR. BfR compilation of processing factors for pesticide residues (version2.0)[DB/OL]. [2009-07-01]. <http://www.bfr.bund.de/en/pesticides-579.html>.
- [34] Caldas ED, Tressou J, Boon PE. Dietary exposure of Brazilian consumers to dithiocarbamate pesticides-A probabilistic approach[J]. *Food Chem Toxicol*, 2006, 44(9): 1562–1571.
- [35] Lentza-Rizos C, Avramides EJ, Kokkinaki K. Residues of azoxystrobin from grapes to raisins[J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(1): 138–141.
- [36] 袁玉伟. 菠菜中常用农药残留动态及其限量研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- Yuan YW. Study on residues dynamics and maximum residue limits of pesticides applied in Spinach production[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [37] 李云成. 柑桔及其制品中农药残留加工因子的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- Li YC. Researches on processing factors for pesticide residues of citrus products and by-products[D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [38] 武晓光. 毒死蜱等有机磷杀虫剂在蔬菜和稻米食品加工过程

中的残留特性及其膳食风险初探[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

Wu XG. Preliminary Studies on risk assessment and residual characteristic of organophosphorus pesticides in vegetable and rice processing operation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.

- [39] 袁玉伟, 张志恒, 叶志华. 模拟加工对菠菜中农药残留量及膳食暴露评估的影响[J]. 农药学学报, 2011, 13(2): 186–191.

Yuan YW, Zhang ZH, Ye ZH. Effects of simulated processing on pesticide residues in spinach and its dietary exposure assessment[J]. Chin J Pestic Sci, 2011, 13(2): 186–191.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



李安, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。

E-mail: lionlian@126.com



潘立刚, 博士, 研究员, 主要研究方向为农药学。

E-mail: panlg@nrcita.org.cn