

# 果蔬加工过程农药残留行为研究及加工因子在风险评估中的应用

杨佳洁<sup>1,2</sup>, 李敏敏<sup>3</sup>, 肖欧丽<sup>1</sup>, 赵浩然<sup>1</sup>, 陈捷胤<sup>1,4</sup>,  
戴小枫<sup>1,4</sup>, 张民伟<sup>2\*</sup>, 孔志强<sup>1,4\*</sup>

(1. 中国农业科学院植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 北京 100193;  
2. 新疆大学生命科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046; 3. 中国农业科学院农产品加工研究所,  
北京 100193; 4. 中国农业科学院西部农业研究中心, 昌吉 831100)

**摘要:** 食品安全问题一直是社会关注的焦点, 而果蔬中农药残留是影响食品安全的重要因素之一。果蔬产品大部分需要经过加工处理, 残留在果蔬中的农药在加工过程中受到不同程度的影响, 如清洗、去皮等加工对于果蔬表面的非内吸性农药有显著的去除效果, 而热处理过程对某些农药存在蓄积作用, 在某些情况下也会加快分解或形成有毒的代谢产物。随着加工工艺水平不断提升, 新型的加工方式在果蔬加工过程中应用越来越广泛, 对农药残留影响也愈发复杂。因此, 本文对果蔬加工过程中农药残留行为影响进行系统综述, 并总结农药残留加工因子在膳食暴露评估中的应用, 以期对农药残留进行精准膳食风险评估和农药合理使用提供依据。

**关键词:** 水果; 蔬菜; 加工工艺; 农药残留; 膳食暴露评估

## Study on pesticide residue behavior during fruit and vegetable processing and application of processing factors in risk assessment

YANG Jia-Jie<sup>1,2</sup>, LI Min-Min<sup>3</sup>, XIAO Ou-Li<sup>1</sup>, ZHAO Hao-Ran<sup>1</sup>, CHEN Jie-Yin<sup>1,4</sup>,  
DAI Xiao-Feng<sup>1,4</sup>, ZHANG Min-Wei<sup>2\*</sup>, KONG Zhi-Qiang<sup>1,4\*</sup>

(1. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. College of Life Science & Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 4. Western Agricultural Research Center, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, China)

**ABSTRACT:** Pesticide residues in fruits and vegetables are one of the significant variables affecting food safety, which has always been a major concern for society. The majority of fruits and vegetables require processing. Processing has varied degrees of impact on pesticide residues in fruits and vegetables. For example, cleaning, peeling and other processing can significantly remove non-systemic pesticides on the surface of fruits and vegetables. However, heat treatment can accumulate some pesticides, and in some cases, it will accelerate the decomposition or

基金项目: 北京市科技新星项目(Z191100001119121)

Fund: Supported by the Beijing Nova Program of Science and Technology (Z191100001119121)

\*通信作者: 张民伟, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: zhang78089680@sina.com

孔志强, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农药残留与环境毒理。E-mail: kongzhiqiang@caas.cn

\*Corresponding author: ZHANG Min-Wei, Ph.D, Associate Professor, College of Life Science & Technology, Xinjiang University, No.666, Shengli Road, Xinjiang, Tianshan District, Urumqi 830046, China. E-mail: zhang78089680@sina.com

KONG Zhi-Qiang, Ph.D, Associate Professor, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, No.2, Yuanmingyuan West Road, Haidian District, Beijing 100193, China. E-mail: kongzhiqiang@caas.cn

form toxic metabolites. New processing techniques are being utilized in the processing of fruits and vegetables at an increasing rate, and as processing technology advances, their impacts on pesticide residues become more complex. Therefore, this paper systematically reviewed the effects of pesticide residue behavior during fruit and vegetable processing and summarized the application of pesticide residue processing factors in dietary exposure assessment, in order to provide the basis for accurate dietary risk assessment of pesticide residues and rational use of pesticides.

**KEY WORDS:** fruit; vegetable; processing technology; pesticide residues; dietary exposure assessment

## 0 引言

农药在农业生产和保障粮食安全中发挥了重要作用,然而,在农业生产过程中,农户为了防治病虫害,提高农作物的产量和品质,农药的使用越来越普遍,并存在滥用、乱用和使用更具持久性农药的现象。因此,在环境和农产品中普遍存在农药残留,对食品安全构成风险,造成了严重的环境问题并危害人体健康。研究表明,农药可导致内分泌、生殖、神经、呼吸和肾脏系统的遗传和表观遗传改变,导致癌症、生殖障碍、神经性疾病以及呼吸系统和肾脏疾病等<sup>[1-2]</sup>。水果、蔬菜等农产品在国际贸易中占比较高,因此对此类农产品中农药残留水平变化的评估受到农药残留专家联席会议(Joint Meeting of Pesticide Residues, JMPR)的重视。目前,农药残留水平低于最大残留限量(maximum residue limit, MRL)的农产品被认为其膳食摄入风险可接受<sup>[3]</sup>。不同加工过程对于各类农产品中农药残留的水平和性质也会产生变化<sup>[4]</sup>。常见的果蔬加工工艺包括清洗、去皮、发酵、热处理(蒸煮、煎炒、烘烤、油炸)、超声、臭氧等,在加工过程中部分农药可能会去除、挥发或降解等。大部分加工过程通常能减少食品中的农药残留水平,如清洗、去皮等为常见的处理方法<sup>[5]</sup>;但某些压榨、脱水处理等加工过程由于使食品中水分蒸发而造成农药残留水平升高<sup>[6]</sup>。

加工过程对于监测初级农产品中最终残留浓度是否超过 MRL 具有重要作用。加工因子(processing factors, PF)为加工农产品与初级农产品中的农药残留水平之比,若加工因子 $<1$ ,则表明加工后农药残留量降低,且数值越小,去除效果越好;反之,则表示农药残留水平升高<sup>[7]</sup>。农药残留量数据主要来源于初级农产品的监测结果。事实上,食品从初级农产品到食用食品,通常都经过加工(如清洗、去皮、蒸煮和烘干等)。食品加工的目的是改变受加工条件影响的食品营养、贮藏等质量特性,加工过程也影响食品中农药残留的水平和性质。如果不考虑加工因子对农药残留的影响,则会高估或者低估农药残留的暴露风险<sup>[3]</sup>。研究加工农产品中农药残留对于膳食暴露风险评估、明确农药残留安全风险、完善农药残留最大限量标准、引导消费者安全膳食具有重要作用<sup>[8]</sup>。

水果和蔬菜是维生素、矿物质、膳食纤维和植物化学

物质的重要来源。世界卫生组织(World Health Organization, WHO)建议每天摄入 400 g 果蔬以保持健康并预防癌症、糖尿病、肥胖和心脏病等疾病。农药的使用导致果蔬上存在农药残留,而通过饮食摄入农药比空气和饮用水等其他方式更为常见。因此,果蔬的食用是人类摄入农药的主要来源。本文总结了常见的水果、蔬菜等农产品加工过程中清洗、去皮、热处理、发酵、压榨以及新型加工技术等不同加工方法对农药残留行为的影响,以了解不同加工阶段的农药残留变化情况,从而为选择实用、环保、危害小的加工方式提供参考,为科学的膳食暴露评估提供依据,减少健康风险。

## 1 果蔬中农药残留种类及特点

农药残留是农药使用后残留于生物体、食品和环境中的微量农药,除农药本体外还包括有毒代谢物、降解物和杂质的总称。目前我国果蔬产品中农药残留主要分为有机磷类、有机氯类、拟除虫菊酯类和三唑类农药<sup>[9]</sup>。

### 1.1 有机磷类

有机磷类农药是一类常用的杀虫剂,多数为高毒或中等毒类,少数为低毒类,通过抑制人和动物的乙酰胆碱酯酶引起神经毒性<sup>[10]</sup>。目前在我国注册登记的有机磷类农药主要有:对硫磷、甲基对硫磷、二嗪农、甲胺磷、乐果、敌敌畏、马拉硫磷、毒死蜱、哒螨灵、敌百虫、丙溴磷等。有机磷类农药具有杀虫谱宽、价格低廉、种类多等优点,因此在果蔬产品种植的过程中广泛应用。

### 1.2 有机氯类

有机氯类农药是含氯原子的有机合成杀虫剂,有机氯农药脂溶性强,在食品加工过程简单的洗涤不能很好地去除有机磷农药残留,并可以通过生物链富集,容易在人体内蓄积,对人、畜产生慢性毒性<sup>[11]</sup>。因此,多种有机氯农药已被禁止使用。目前常用的有机氯类农药有:硫丹、滴滴涕、狄氏剂、三唑酮、百菌清等。有机氯类农药具有广谱、高效、价廉、急性毒性小等特点。

### 1.3 拟除虫菊酯类

拟除虫菊酯类是一类广谱杀菌剂,对昆虫的毒性比有机磷、有机氯类杀虫剂高 10~100 倍,在防治果蔬虫害方

面有较好的效果。因其毒性强, 在使用过程中用量小, 浓度低, 因此对人畜较为安全, 对环境污染小<sup>[12]</sup>。拟除虫菊酯类农药包括: 溴氰菊酯、氯氰菊酯、高效氯氰菊酯、氰戊菊酯、呋喃菊酯等。拟除虫菊酯类农药具有杀虫谱广、效果好、低残留、无蓄积作用等优点。

#### 1.4 三唑类

三唑类杀菌剂对子囊菌、担子菌、半知菌等多种病原真菌具有高活性, 其作用机理是影响甾醇类生物合成, 使菌体细胞膜功能受到破坏<sup>[13]</sup>。三唑类杀菌剂主要包括: 丙环唑、戊唑醇、三唑酮、三唑醇、苯醚甲环唑等。三唑类杀菌剂具有高效、持续时间长等优点。

## 2 加工工艺对农药残留影响

果蔬加工过程要经过多个步骤, 包括家庭和工业上从简单到复杂的加工过程, 以达到延长货架期、增强风味和保存营养价值的目的。这些过程通常可以起到减少农药残留的作用(表 1)。

### 2.1 清洗

清洗是家庭处理和工业生产中常用的一种方式, 不仅可以去除食物表面泥沙等杂物, 也有助于去除附着在农产品表面的农药<sup>[25]</sup>。清洗对农药残留的去除效果不仅受农药的溶解度、辛醇-水分配系数等物理和化学性质影响, 并且与洗涤方式、温度、洗涤剂种类、清洗时间等有关<sup>[26]</sup>。李凯等<sup>[27]</sup>研究面粉水和复合盐对苹果表面残留的有机磷农药去除率的影响, 随着洗涤时间的延长和浸泡液温度的升高, 有机磷农药的去除率高达 96% (PF=0.04)。因理化性质的差异, 清洗对不同农药的去除效果是不同的。ANDRADE 等<sup>[28]</sup>研究发现 10% NaHCO<sub>3</sub> 可以有效降低番茄中乐果残留, 而对于啉虫脒和腐霉利, 用 10% 的醋酸清洗

有更好的效果, 水洗对除虫脒去除率更高, 而对于氟虫腈, 3 种清洗方式都不能很好地去除, 由此可见不同农药在不同洗涤液中水溶性和内吸性的不同或农药发生化学分解产生了去除效果的差异。有研究发现使用氧化型洗涤剂更易去除果蔬中农药残留, WU 等<sup>[29]</sup>研究了不同洗涤方式对金橘、黄瓜和菠菜中 10 种农药去除率的影响, 清洗加工对拟除虫菊酯类农药的去除率最高, 对有机磷农药毒死蜱的去除率最低, 其中活性氧溶液因其碱性和可氧化性是去除所有农药最有效的处理方法。当洗涤时间超过 15 min 时, 碱性溶液具有更好的去除效果。如上所述, 通过洗涤可使农药残留量降低 35%~87%, 其降解程度取决于洗涤方式、农药的物理化学特性、果蔬种类等因素<sup>[30]</sup>。

### 2.2 去皮

农产品的表皮或壳具有抵挡异物入侵的作用, 可将大部分农药阻挡在表层上, 去皮很容易降低其残留。尤其是对于脂溶性较强的杀虫剂或杀菌剂其主要附着在水果和蔬菜表皮的蜡质层中, 在表皮中的渗透作用十分有限, 因此去皮操作可以显著降低农药残留<sup>[31-32]</sup>。阳辛凤等<sup>[25]</sup>研究发现去皮能完全去除番石榴中克百威、3-羟基克百威、啉虫脒、甲基硫菌灵、噻虫嗪、噻嗪酮、除虫脒、多菌灵、马拉硫磷和水胺硫磷, 而且对毒死蜱的去除率达到 98% (PF=0.02), 表明去皮处理后果肉中残留农药残留量显著降低甚至完全去除, 有效减少通过膳食所致的农药摄入量。去皮操作可以很好地去除附着在农产品表面的农药, 但是对于内吸性农药的去除效果并不理想。CENGIZ 等<sup>[33]</sup>比较了去皮对番茄中克菌丹和腐霉利的去除效果影响, 结果表明去皮可以去除 93% (PF=0.07) 的克菌丹残留, 但对腐霉利的去除效果仅为 77%, 产生这一差异的原因可能是腐霉利自身的内吸性使其部分进入番茄内部。陆文玉等<sup>[15]</sup>针对

表 1 农产品中加工过程中农药残留研究近况

Table 1 Recent research situations of pesticide residues in processing of agricultural products

| 加工对象            | 加工方法  | 农药名称                             | 农药残留去除率/% | 参考文献 |
|-----------------|-------|----------------------------------|-----------|------|
| 黄瓜              | 清洗    | 甲萘威                              | 62~87     | [14] |
| 茄子、黄瓜、青菜、生菜     | 去皮    | 氟氯氰菊酯、氯氰菊酯、氰戊菊酯、乐果               | 60~100    | [15] |
| 大米、青椒、生姜、菠菜、紫苏叶 | 烹调    | 啉虫脒、啉菌酯、仲丁威、噻唑膦、异稻瘟净、虱螨脒、丙环唑、肟菌酯 | 39~100    | [16] |
| 葡萄              | 发酵    | 啉菌酯、戊唑醇、苯醚甲环唑、吡唑醚菌酯、噻虫嗪          | 76~97     | [17] |
| 猕猴桃             | 榨汁    | 啉菌灵                              | 42~53     | [18] |
| 黄瓜              | 超声    | 甲胺磷、敌敌畏                          | 82        | [19] |
| 青椒              | 臭氧    | 马拉硫磷、阿维菌素                        | 85~100    | [20] |
| 圣女果             | 高压    | 毒死蜱                              | 75        | [21] |
| 茄子              | 辐照    | 二嗪农、毒死蜱、磷酸胺                      | 85~95     | [22] |
| 苹果汁             | 脉冲电场  | 甲胺磷、毒死蜱                          | 70        | [23] |
| 苹果、黄瓜           | 冷等离子体 | 二嗪农、毒死蜱                          | 87        | [24] |

这一现象进行了研究,发现去皮对黄瓜中脂溶性的氯氰菊酯、氟氯菊酯和氟戊菊酯的去除率为 100%,而同样的去皮实验对乐果的去除率为 54% (PF=0.46)。对于内吸性农药氟虫腈和啉菌环胺,去除西红柿的果皮导致其分别减少了 68% (PF=0.32)和 87% (PF=0.13)。内吸性农药在储存过程中向果肉、果核中转移,因此,去皮对内吸性农药的去除效果更低。

### 2.3 热处理

热处理是降低农药残留最有效的方法之一。在日常生活中常用的烹饪方法有蒸煮、煎炒、烘焙、油炸等,食品烹饪过程中温度、时间和水分的变化是导致农药含量变化的主要因素。蒸煮过程中,农药残留大多以蒸发和水解的方式减少,去除效果主要和农药的理化性质有关。HANAFI 等<sup>[34]</sup>研究发现秋葵果实经过蒸煮处理后啉虫脒的含量降低 90% (PF=0.10),其中蒸煮时间的改变对啉虫脒残留没有显著影响,而高压蒸煮对农药残留的去除率更高,这一现象可能是压力引起温度的升高从而导致蒸煮过程中农药的蒸发或水解。烘焙、油炸等加热过程中由于温度升高加速了农药的挥发和降解,能够有效降低食品中农药残留。YANG 等<sup>[16]</sup>对 33 种食品原料中 44 种农药残留进行了检测,在 9 个样本中检出啉虫脒等 8 种农药残留,进行清洗和煎炒处理后,其协同作用大幅减少了食品中农药残留水平。BONNECHÈRE 等<sup>[35]</sup>研究了家庭和工业加工对菠菜中农药残留的影响,对清洗、漂烫、微波、蒸煮和杀菌等工艺条件对啉酰菌胺、代森锰锌、异菌脲、霜霉威和溴氰菊酯的去除效果进行对比,漂烫的去除效果要优于水洗,微波对代森锰锌有较好的去除效果,但其余残留物没有明显减少,整体而言杀菌对降低农药残留效果最好,此外,还检测到了两种毒性高于母体化合物的降解产物 3,5-二氯苯胺和亚乙基硫脲。总的来说,通过热处理减少农药残留主要是由于蒸发和农药化学成分的热降解造成的,在热处理过程中产生的毒性更大的降解产物问题应当引起人们的注意。

### 2.4 发酵

果蔬发酵产品具有独特的口感、风味,由于发酵过程有微生物参与有机物分解,它的过程较为复杂,在这个处理过程中农药残留的降低主要是因为化学降解或生物降解。农药的理化特性不同,发酵对农药残留的影响也不同。郭璐瑶<sup>[17]</sup>通过葡萄酒加工过程验证了发酵过程中啉菌酯、戊唑醇、苯醚甲环唑、吡唑醚菌酯、噻虫嗪 5 种农药的残留变化,5 种农药在加工全过程中加工因子为 0.03~0.24,农药残留含量的降低可能是由于化学或生物降解,也可能与农药的化学性质有关。同时,果蔬中的农药残留也会对发酵过程产生影响。赵珊珊等<sup>[36]</sup>研究了不同酵母菌发酵对戊唑醇降解的影响,结果发现戊唑醇的降解率为

10%~23% (PF=0.77~0.90),同时发现残留在葡萄中的戊唑醇会影响酵母菌的正常生长代谢而造成葡萄酒风味的变化。由于发酵过程中产生的热量导致温度升高,也会促进部分农药的降解<sup>[37]</sup>。

### 2.5 榨汁

榨汁是果蔬汁制品的基本加工工序。果汁中农药的残留主要取决于农药的理化特性,水溶性好,脂溶性差的农药较易进入果蔬汁中,而脂溶性较强的农药则相反不易进入果蔬汁中。陈子锐等<sup>[38]</sup>对桃榨汁处理,噻唑锌、噻菌铜和噻森铜在果汁和果渣中去除率分别为 17%~24%和 54%~63%,可见脂溶性强的农药更多的残留在果渣中。但在一些果蔬汁制品中不进行果渣分离,反而会因为加工过程水分的蒸发而造成浓缩现象。王鸟<sup>[18]</sup>研究表明对猕猴桃去皮后榨汁处理能使哒螨灵残留减少 42%~53% (PF=0.47~0.58),但与去皮处理相比,哒螨灵的残留量增加,这是由于猕猴桃在榨汁过程中无法移除果渣,而水分在榨汁过程中蒸发产生浓缩效果。

## 3 新型加工技术对农药残留影响

常规的加工方式,如清洗、去皮可以减少一定的农药残留量,具体取决于农药自身的溶解度、辛醇-水分配系数等性质。虽然,蒸煮和烘焙等热处理会使农药热解,但高温和加工时间对果蔬的营养和感官特性产生了不同程度的不利影响。农药残留的消散还受生产和加工助剂的时间、温度、极性和 pH 的影响。因此,需要一些创新的加工技术来有效地保存果蔬的营养和感官品质,为了克服传统技术的缺点,开发出各种新兴的非热技术,包括超声波、臭氧、高压处理、辐照、脉冲电场和冷等离子体,都是新型和可靠的方法,能够有效去除农药残留(图 1)。这些技术对产品质量的不利影响较小,而且更环保。

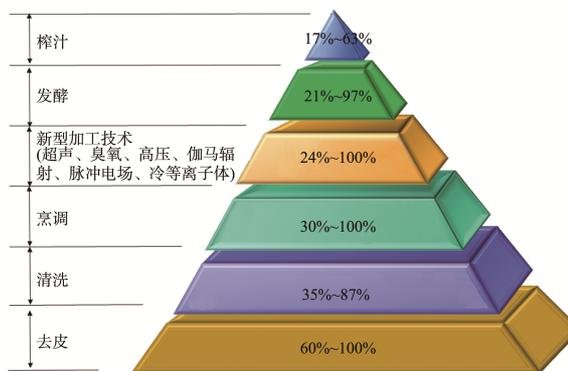


图 1 不同加工工艺对农产品中农药去除率  
Fig.1 Removal rates of pesticides in agricultural products by different processing techniques

### 3.1 超声波

超声波是应用于食品工业中新兴的环境友好型技术, 由于其超声波的空穴效应, 使液体介质中的微米气泡产生微小的内爆作用, 达到不依赖化学用品便能加速清洗作用。与传统工艺相比, 它具有加工时间短、效率高、并保持农产品的感官和营养品质等优点, 被应用于除去果蔬中农药残留, 影响去除效果的因素包括超声波的功率、振幅和频率<sup>[39]</sup>。通常与其他方法相结合提高去除效率, 例如, 超声与臭氧、次氯酸钠或过氧乙酸配合使用可作为一种有效地去除食品中农药残留的方法。ZHU 等<sup>[19]</sup>研究了超声处理对小白菜中百菌清、吡菌磷和多菌灵残留的去除效果, 3 种农药的去除率分别为 14%~75% (PF=0.25~0.86)、22%~46% (PF=0.54~0.78) 和 5%~24% (PF=0.76~0.95), 与水洗和洗涤剂等传统方法相比超声波处理可达到更好的去除效率且在一定范围内随超声功率的增加而提高。与单一的加工方式相比, 超声处理和不同的加工方式相结合对农药去除往往表现出更好的效果。LIANG 等<sup>[40]</sup>研究了超声和臭氧联合处理对两种有机磷农药甲胺磷和敌敌畏去除的影响, 去除率达到 82% (PF=0.18), 这种协同处理显示出比单一处理更高的去除效率。尽管超声技术在食品加工中有显著的清洗效果, 其也存在一些弊端。例如, 在新鲜果蔬的处理中由于含水量较高, 质地较脆, 在超声处理过程中往往会对水果和蔬菜的组织 and 细胞造成破坏<sup>[19]</sup>。由于低频超声波具有形成大尺寸空化气泡的能力, 且能引起较强的压力和较高的能量, 有时超声波处理会使温度大幅升高, 不利于果蔬的贮藏<sup>[41]</sup>。高强度的超声波处理较长时间, 会对加工食品产生不良影响, 降低食品的感官品质<sup>[42]</sup>。在生产中, 一些超声过程需要使用非常高频率的声波, 如果不采取安全预防措施, 可能会导致操作人员听力损失, 在工业中高效地产生足够强度的超声波也存在技术困难。

### 3.2 臭氧

臭氧在处理农药残留方面有很多优势, 如高广谱性、高效、易于操作、成本低廉等特点, 也能保护食品组织不被破坏<sup>[43]</sup>。臭氧是一种强氧化剂, 具有很强的氧化、杀菌功能, 通过切断农药分子的强极性键和氧化功能基团两种方式彻底改变农药的分子结构, 从而生成小分子物质或改变农药的性质, 达到解除农药的毒性, 降低农药残留含量的目的<sup>[44]</sup>。臭氧在降解为氧气的过程中不会产生二次污染物<sup>[45]</sup>, 因此利用臭氧降解果蔬中农药残留被认为是安全、有效且环保的处理技术。臭氧在空气中高度稳定性, 在水中不稳定, 会降解成无害的氧气, 不会留下残留物和污染物<sup>[44]</sup>。RODRIGUES 等<sup>[46]</sup>在饱和臭氧水洗涤、连续臭氧鼓泡洗涤与传统洗涤剂洗涤 3 种洗涤方式下对西红柿中啉菌酯、百菌清和苯醚甲环唑进行去除效果研究, 臭氧处理对农药去除效果方面, 连续鼓泡的臭氧洗涤效果比相同处理

时间的饱和臭氧水洗涤的农药降解率高 70%~90% (PF=0.10~0.30), 原因可能是臭氧在持续鼓泡过程中加强了对农药的氧化作用。臭氧处理和不同加工方式协同处理可以取得更高的效果, ÖZEN 等<sup>[20]</sup>通过臭氧和超声处理相结合的技术, 对青椒中马拉硫磷和阿维菌素的去除率达到 85%~100% (PF=0.00~0.15), 出现差异的原因可能是食品机制和农药理化性质的不同。总的来说, 臭氧处理能显著降低蔬菜和水果中的农药残留, 可作为一种安全良好的处理措施, 降低相关的健康危害风险。

### 3.3 高压处理

当农药受到很大压力时, 分子间的氢键会受到很大影响, 能够削弱不溶于水的农药碳链和食物极性分子之间的疏水相互作用。因此, 水分子中的氢原子为农药化合物打开空位, 形成无害的降解农药代谢物<sup>[47]</sup>。在高压过程中, 对食物施加超过 200 MPa 的压力会对其结构造成严重破坏, 从而增加农药通过破裂的外果皮向水果内部渗透。有研究发现高静水压处理可以有效减少疏水性农药。IIZUKA 等<sup>[21]</sup>利用高静水压处理可以减少圣女果中毒死蝉的含量, 最适条件为 75 MPa, 最大农药去除率为 75% (PF=0.25), 水洗的去除效率低于高静水压技术。IIZUKA 等<sup>[48]</sup>还从安全无害的角度出发, 在相对较低的压力下, 使用 10%乙醇介质进行静水压处理, 可以完全去除圣女果中的农药残留, 并且不会产生具有更大毒性的降解产物。高压处理作为一种安全的食品清洗过程, 可能在未来的食品安全生产中有更大的作用。

### 3.4 辐照

辐照是食品保存过程中常用的技术之一, 作为标志性的一种冷杀菌方式, 辐照在食品工业中已被用于去除农药残留和致病微生物等污染<sup>[49]</sup>。该技术的主要优点是可用于大量农产品中农药降解。然而, 其对农药降解的去除效率受到食品表面性质的影响。辐照处理通过电离辐射反应以及自由基和活性物质的氧化来降解农药, 使其化学键断裂<sup>[50]</sup>。张明慧<sup>[51]</sup>通过电子束辐照技术对草莓中异菌脲和腐霉利使用 4.0 kGy 的辐照剂量可以有效降低农药残留的危害, 异菌脲和腐霉利减少 80%~90% (PF=0.10~0.20); 研究还发现, 辐照处理对草莓的营养成分、新鲜度和使用价值影响较小。CHOWDHURY 等<sup>[22]</sup>对茄子做伽马辐射发现当使用 0.5 kGy 的辐射剂量时, 二嗪农、毒死蝉和磷酰胺减少 30%~48% (PF=0.52~0.70), 当辐射剂量增加到 1.0 kGy 时, 残留量可降低至 80%~95% (PF 为 0.09~0.10)。同时对几种不同的基质发现, 复杂的基质对辐照效果影响较大。另一方面, 虽然伽马辐照表现出了较好的农药去除效果, 但操作过程的可行性和消费者对辐照食品的可接受度还不确定。此外, 商品中用于辐照的包装材料应该慎重选择, 因为聚合物的自由基诱导反应可能会引发与食品的有毒相互作用。

### 3.5 脉冲电场

脉冲电场(pulsed electric field, PEF)是一种新型的非热食品杀菌技术。脉冲电场通过极性分子的旋转和振动以及通过羟基自由基的氧化来降解农药<sup>[52]</sup>,有助于保持食品的营养特性、颜色、质地和风味,处理时间短,但是该技术目前只能应用于液体食品,且投资成本较高。CHEN等<sup>[53]</sup>利用脉冲电场对苹果汁中农药残留的降解进行了初步研究。在 20 kV/cm 的电场中对甲胺磷和毒死蜱的降解有显著影响,与甲胺磷相比,脉冲电场处理对毒死蜱的降解更显著。脉冲电场的降解效率因农药类型的不同而有显著差异。ZHANG等<sup>[23]</sup>研究发现在 20 kV/cm 的脉冲电场强度下,苹果汁中二嗪农和乐果的降解率分别为 48%和 35% (PF 分别为 0.52 和 0.65)。经过脉冲电场处理时产生的羟基自由基与农药化合物发生反应产生降解。与工艺时间相比,电场强度和施加能量对葡萄酒中乙烯菌核利、噬霉胺、腐霉利和噬菌环胺的影响更为明显,随着脉冲个数和电场强度的增加,去除效率呈指数增长<sup>[54]</sup>。

### 3.6 冷等离子体

冷等离子体能够使酶失活、淀粉变性、表面去污、物理化学性质改良、延长保质期以及农药残留降解,已经成为食品工业上可行且环境友好的技术。冷等离子体技术去除果蔬中农药主要是将食品暴露在电离辐射中,产生的正负离子、活性物质、自由基与农药发生氧化反应导致农药降解<sup>[55]</sup>,由于对食品品质的影响小,其应用于各种热敏性食品的处理。冷等离子体最显著的优点是对水果、蔬菜、谷物等农产品中的农药、毒素、微生物有较高的降解。同时,它还有助于保持新鲜度、营养价值、质地和风味。PHAN等<sup>[56]</sup>使用冷等离子体对芒果进行处理,毒死蜱和氯氰菊酯的含量分别降低 74%和 63% (PF 分别为 0.26 和 0.37),且处理后芒果色泽和质地等各项指标没有明显差异。但是不同果蔬自身的特性和农药理化性质影响冷等离子体的去除效率。MOUSAVI等<sup>[24]</sup>对苹果和黄瓜中二嗪农和毒死蜱去除效果进行研究,苹果和黄瓜中二嗪农和毒死蜱的去除率分别为 87%、87%和 82%、33%,造成这一情况的原因可能是农药自身特性的区别和果皮厚薄的影响。在更深入地研究应用冷等离子体时,需要注意农药降解、质地、营养和品质的变化。

## 4 加工因子在膳食暴露评估中的应用

随着人们对农药残留问题的重视,果蔬中农药残留风险评估显得愈发重要。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。农药残留评估数据主要来自初级农产品的监测结果,检测值中包括了食物中不可食部分所含的污染物,且没有考虑烹调和加工处理过程对食物中农药残

留的影响<sup>[57]</sup>。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进行膳食暴露评估,则会高估或低估农药残留的暴露风险<sup>[10]</sup>。HUAN等<sup>[58]</sup>在评估豇豆膳食暴露风险时纳入豇豆烹饪加工因子,发现腐霉利、百菌清和氯虫苯甲酰胺等 8 种农药的风险指数显著降低。LIU等<sup>[30]</sup>采用点评估模型分析了香菇中多菌灵、腐霉利、联苯菊酯等 6 种农药的膳食暴露风险,结果表明新鲜香菇的风险指数为 0.29%~14.89%。纳入加工因子后,6 种农药的风险指数为 0.35%~42.43%,风险显著增加 2~5 倍。考虑到加工操作对农产品中农药残留水平的影响后,对于农药残留风险评估的准确性更高,安全性增强。联合国粮食及农业组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization, FAO/WHO)认为在考虑食品中的农药残留问题时应该考虑一个加工因子,将加工因子纳入暴露评估模型,可以优化评估方法,提高评估结果的准确性<sup>[59]</sup>。

由于每个国家或地区农产品生产的差异和农药污染程度的不同,有必要建立适合我国国情的评估方法。无论采用何种方法进行污染物的膳食暴露评估,忽视加工因素都会影响评估的准确性,无法真实反映食品安全现状,同时对食品安全相关标准、限量的制定都会造成不利影响。加工因子有助于更准确地评价农药膳食暴露量,并在此基础上制定合理的农药残留限量标准。虽然加工因子在膳食暴露评价中的应用研究已经广泛开展,但在今后的研究中仍需解决以下几个问题:(1) PF 的研究不应局限于单一的单元操作工序,而应从食品的商品化过程出发,对农药残留加工因子进行系统的研究。(2)食品加工业具有多元化的特点,地区差异明显,应研究传统加工和特殊加工农药残留的变化。(3)某些加工过程如高温烹饪、发酵及辐照等可能会导致农药发生代谢或降解而转化生成毒性更大的代谢物,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。

## 5 总结

随着人们安全意识水平的提高,对食品中农药残留问题日益关注。目前仍存在食品中剧毒、高毒农药的检出现象。清洗和去皮加工工艺可以显著降低绝大部分农药残留的风险,热处理、发酵等加工过程可以有效降低农药残留,但是也可能将农药降解为新的有毒化合物,榨汁可能因为加工工艺而发生浓缩;此外一些新的加工技术如臭氧、超声、辐照等对农药降解有更好的效果。但是,在农产品加工过程中农药残留行为研究也存在不足之处。首先,食品生产是一个复杂的过程,实际生产中的加工方式并不独立而是共同构成系统的加工工艺,应当重视实际中系统家庭制作或工业加工对农药残留行为研究,并将加工因子纳入膳食暴露风险评估。其次,传统技术与新型加工技术(如辐照和脉冲电场)的结合对食品中农药的降解往往有更

好的效果, 应优化农产品加工工艺, 以此得到高效、安全、可靠的新型加工技术。第三, 一些加工过程(如热处理和发酵)会产生新的有毒化合物, 应加强对降解产物的毒理学研究, 探究对人体的危害。最后, 开发快速、智能、可靠的农药多残留检测方法, 推动经济高效, 准确便捷的农药残留分析检测技术发展。在未来的研究中, 解决食品质量与安全之间的平衡问题仍是需要关注的重点。

## 参考文献

- [1] KALYABINA VP, ESIMBEKOVA EN, KOPYLOVA KV, *et al.* Pesticides: Formulants, distribution pathways and effects on human health-A review [J]. *Toxicol Rep*, 2021, 8: 1179–1192.
- [2] TUDI M, DANIEL RH, WANG L, *et al.* Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2021, 18(3): 1112.
- [3] 张峰祖, 李富根, 朴秀英. 国际食品法典加工农产品中农药最大残留限量现状分析[J]. *农药学报*, 2022, 24(1): 13–20.  
ZHANG FZ, LI FG, PIAO XY. An analysis of the current situation on Codex Alimentarius maximum residue limits for pesticides in processed commodities [J]. *Chin J Pest Sci*, 2022, 24(1): 13–20.
- [4] 孔志强. 农产品加工及储存过程中农药残留变化规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.  
KONG ZQ. Fate of pesticide residues in edible agricultural products by food processing and storage [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [5] 李凯龙, 郭利桃, 项伟, 等. 鲜切生菜加工过程对 5 种农药残留的影响 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(24): 231–236.  
LI KL, GUO LT, XIANG W, *et al.* Effects of processing on the disappearance of pesticide residues in fresh-cut lettuce [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(24): 231–236.
- [6] 孙红霞, 李晋栋, 李雅静, 等. 加工过程对农产品中农药残留的影响研究进展[J]. *食品工业*, 2020, 41(9): 269–273.  
SUN HX, LI JD, LI YJ, *et al.* Effect of processing treatments on pesticide residues in agricultural products [J]. *Food Ind*, 2020, 41(9): 269–273.
- [7] 康霞丽. 氟啶胺·阿维菌素悬浮剂在柑橘中的残留行为及其加工因子研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021.  
KANG XL. The residual behavior and processing factors of fluazinam-abamectin in citrus [D]. Chongqing: Southwest University, 2021.
- [8] 王迎鑫, 段锦森, 高庆超, 等. 加工过程对大米中农药残留作用的荟萃分析[J]. *农药学报*, 2022, 24(3): 621–629.  
WANG YX, DUAN JM, GAO QC, *et al.* Meta-analysis of food processing on pesticide residues in rice [J]. *Chin J Pest Sci*, 2022, 24(3): 621–629.
- [9] 谭青青. 蔬菜中农药残留的种类、危害及应对措施[J]. *山西农经*, 2017, (20): 60.  
TAN QQ. Types, hazards and countermeasures of pesticide residues in vegetables [J]. *Shanxi Agric Econ*, 2017, (20): 60.
- [10] 马宏, 吴宇, 陈晋莹, 等. 生物荧光酶抑制法快速定性测定粮食中有机磷类和氨基甲酸酯类农药残留 [J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(2): 167–174.  
MA H, WU Y, CHEN JY, *et al.* Rapid qualitative determination of organophosphorus and methylcarbamate pesticide residues in grain based on bioluminescence inhibition of enzyme [J]. *J Chin Cereals Oils Ass*, 2022, 37(2): 167–174.
- [11] 邵林, 刘晓云, 李福敏, 等. 多壁碳纳米管结合气相色谱-电子捕获检测法同时测定茶叶中 18 种有机氯类农药残留 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(20): 8136–8140.  
SHAO L, LIU XY, LI FM, *et al.* Simultaneous determination of 18 kinds of organochlorine pesticide residues in tea by multi walled carbon nanotubes combined with gas chromatograph-electron capture detection [J]. *J Food Saf Qual*, 2021, 12(20): 8136–8140.
- [12] 陈媛, 赖鲸慧, 张梦梅, 等. 拟除虫菊酯类农药在农产品中的污染现状及减除技术研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 285–292.  
CHEN Y, LAI JH, ZHANG MM, *et al.* Status of pyrethroid pesticide pollution in agricultural products and technologies for its removal: A review [J]. *Food Chem*, 2022, 43(9): 285–292.
- [13] 桑楠, 周萌萌, 库婷婷. 三唑类杀菌剂农药残留分析技术的发展现状 [J]. *山西大学学报*, 2021, 44(1): 125–133.  
SANG N, ZHOU MM, KU TT. Advanced on triazole fungicide pesticide residue analysis technology [J]. *J Shanxi Univ*, 2021, 44(1): 125–133.
- [14] 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.
- [15] 陆文玉, 吴敬忠, 张霆, 等. 蔬菜餐前处理与农药残留关系的研究 [J]. *上海农业学报*, 2011, 27(1): 124–128.  
LU WY, WU JZ, ZHANG T, *et al.* Study on the relationship between treatments of edible vegetables and pesticide residues [J]. *Shanghai J Agric*, 2011, 27(1): 124–128.
- [16] YANG A, PARK JH, EAMA AB, *et al.* Synergistic effect of washing and cooking on the removal of multi-classes of pesticides from various food samples [J]. *Food Control*, 2012, 28(1): 99–105.
- [17] 郭璐瑶. 5 种农药在葡萄酒发酵过程中与酵母微生物互作效应及其残留变化规律[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.  
GUO LY. The interaction effect of five pesticides with yeast microorganism and the fate of pesticide residues during wine fermentation [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [18] 王鸟. 猕猴桃上哒螨灵的消解动态, 风险评估及猕猴桃加工残留[D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.  
WANG N. Digestion dynamics, risk assessment and processing residues of pyridarin on kiwifruit [D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [19] ZHU Y, ZHANG T, XU D, *et al.* The removal of pesticide residues from pakchoi (*Brassica rape* L. ssp. *chinensis*) by ultrasonic treatment [J]. *Food Control*, 2019, 95: 176–180.
- [20] ÖZEN T, KOYUNCU MA, ERBAŞ D. Effect of ozone treatments on the removal of pesticide residues and postharvest quality in green pepper [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 58(3): 2186–2196.
- [21] IIZUKA T, MAEDA S, SHIMIZU A. Removal of pesticide residue in cherry tomato by hydrostatic pressure [J]. *J Food Eng*, 2013, 116(4):

- 796–800.
- [22] CHOWDHURY MA, JAHAN I, KARIM N, *et al.* Determination of carbamate and organophosphorus pesticides in vegetable samples and the efficiency of gamma-radiation in their removal [J]. *Biomed Res Int*, 2014. DOI: 10.1155/2014/145159
- [23] ZHANG Y, HOU Y, ZHANG Y, *et al.* Reduction of diazinon and dimethoate in apple juice by pulsed electric field treatment [J]. *J Sci Food Agric*, 2012, 92(4): 743–750.
- [24] MOUSAVI SM, IMANI S, DORRANIAN D, *et al.* Effect of cold plasma on degradation of organophosphorus pesticides used on some agricultural products [J]. *J Plant Prot Res*, 2016, 57: 25–35.
- [25] 阳辛凤, 李萍萍, 罗金辉, 等. UPLC/Q-TOF-MS/MS 法分析水洗与去皮对莲雾和番石榴果实农药残留的影响[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(5): 1006–1014.
- YANG XF, LI PP, LUO JH, *et al.* Analysis of the effects of washing and peeling on the pesticide residues in wax apple and guava by UPLC/Q-TOF-MS/MS [J]. *Chin J Trop Crop*, 2018, 39(5): 1006–1014.
- [26] YANG T, DOHERTY J, ZHAO B, *et al.* Effectiveness of commercial and homemade washing agents in removing pesticide residues on and in apples [J]. *J Agric Food Chem*, 2017, 65(44): 9744–9752.
- [27] 李凯, 白莉莉, 李琳, 等. 不同清洗方法对苹果表面农药残留的影响[J]. *食品安全导刊*, 2021, (9): 112–114, 117.
- LI K, BAI LL, LI L, *et al.* Effects of different cleaning methods on pesticide residues on apple surface [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2021, (9): 112–114, 117.
- [28] ANDRADE G, MONTEIRO S, FRANCISCO J, *et al.* Effects of types of washing and peeling in relation to pesticide residues in tomatoes [J]. *J Brazil Chem Soc*, 2015, 26(10): 1994–2002.
- [29] WU Y, AN Q, LI D, *et al.* Comparison of different home/commercial washing strategies for ten typical pesticide residue removal effects in kumquat, spinach and cucumber [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2019, 16(3): 472.
- [30] LIU T, PENG J, PAN LQ, *et al.* Effects of shiitakes household processing on the residues of six pesticides [J]. *J Food Process Pres*, 2020, 44(4): e14395.
- [31] 向嘉, 柴勇, 褚能明, 等. 五种加工方式对黄瓜中 10 种农药残留的去除效果[J]. *农药学报*, 2019, 21(3): 345–351.
- XIANG J, CHAI Y, CHU NM, *et al.* Removal efficiencies of ten pesticide residues from cucumber by five processing methods [J]. *Chin J Pest Sci*, 2019, 21(3): 345–351.
- [32] 郝莉花, 范莹莹, 李瑜, 等. 不同加工方式对果蔬中农药残留的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(10): 223–227.
- HAO LH, FAN YY, LI Y, *et al.* Effects of different processing methods on pesticide residues in fruit and vegetable [J]. *Food Ind*, 2021, 42(10): 223–227.
- [33] CENGIZ MF, CERTEL M, KARAKAS B, *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.
- [34] HANAFI A, ELSHESHETAWY HE, FAIED SF. Reduction of pesticides residues on okra fruits by different processing treatments [J]. *J Verb Leb*, 2016, 11(4): 337–343.
- [35] BONNECHÈRE A, HANOT V, JOLIE R, *et al.* Effect of household and industrial processing on levels of five pesticide residues and two degradation products in spinach [J]. *Food Control*, 2012, 25(1): 397–406.
- [36] 赵珊珊, 李敏敏, 李瑞理, 等. 戊唑醇对不同酿酒酵母模拟发酵过程中葡萄酒风味品质的影响[J]. *农药学报*, 2021, 23(4): 724–731.
- ZHAO SS, LI MM, LI RX, *et al.* Effect of residual tebuconazole on the flavor quality of different *saccharomyces cerevisiae* simulated fermentation process [J]. *Chin J Pest Sci*, 2021, 23(4): 724–731.
- [37] NAVARRO S, VELA N, NAVARRO G. Fate of triazole fungicide residues during malting, mashing and boiling stages of beer making [J]. *Food Chem*, 2011, 124(1): 278–284.
- [38] 陈子锐, 蒋文奇, 陈小龙, 等. 桃加工过程中 3 种噻二唑类农药残留动态[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(11): 3439–3444.
- CHEN ZR, JIANG WQ, CHEN XL, *et al.* Residue dynamics of 3 kinds of thiazidazole derived pesticides during the processing of *Prunus persica* L. [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(11): 3439–3444.
- [39] BHARGAVA N, MOR RS, KUMAR K, *et al.* Advances in application of ultrasound in food processing: A review [J]. *Ultrason Sonochem*, 2021, 70: 105293.
- [40] LIANG Y, WANG W, SHEN Y, *et al.* Effects of home preparation on organ phosphorus pesticide residues in raw cucumber [J]. *Food Chem*, 2012, 133(3): 636–640.
- [41] LEONG T, JULIANO P, KNOERZER K. Advances in ultrasonic and megasonic processing of foods [J]. *Food Eng Rev*, 2017, 9(3): 237–256.
- [42] MOTHIBE KJ, ZHANG M, NSOR-ATINDANA J, *et al.* Use of ultrasound pretreatment in drying of fruits: Drying rates, quality attributes, and shelf life extension [J]. *Dry Technol*, 2011, 29(14): 1611–1621.
- [43] 张美扬. 综述臭氧处理对食品中农药残留的影响[J]. *农业与技术*, 2020, 40(3): 42–43.
- ZHANG MY. A review of the effects of ozone treatment on pesticide residues in food [J]. *Agric Technol*, 2020, 40(3): 42–43.
- [44] 郭柏汝, 谢云飞, 于航, 等. 臭氧技术对果蔬农残去除效果的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(11): 383–390.
- GUO BR, XIE YF, YU H, *et al.* Progress in the removal of pesticide residues from fruits and vegetables by ozone technology [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(11): 383–390.
- [45] PANDISELVAM R, KAAVYA R, JAYANATH Y, *et al.* Ozone as a novel emerging technology for the dissipation of pesticide residues in foods—A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 97: 38–54.
- [46] RODRIGUES AAZ, QUEIROZ M, NEVES A, *et al.* Use of ozone and detergent for removal of pesticides and improving storage quality of tomato [J]. *Food Res Int*, 2019, 125: 108626.
- [47] SAVI GD, PIACENTINI KC, SCUSSEL VM. Reduction in residues of deltamethrin and fenitrothion on stored wheat grains by ozone gas [J]. *J Stored Prod Res*, 2015, 61: 65–69.
- [48] IIZUKA T, SHIMIZU A. Removal of pesticide residue from cherry

- tomatoes by hydrostatic pressure (Part 2) [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2014, 26: 34–39.
- [49] RANJITHA GTK, SHARANYAKANTH PS, RADHAKRISHNAN M. Non-thermal technologies: Solution for hazardous pesticides reduction in fruits and vegetables [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2022, 62: 1–18.
- [50] FELICIANO CP. High-dose irradiated food: Current progress, applications, and prospects [J]. *Radiat Phys Chem*, 2018, 144: 34–36.
- [51] 张明慧. 电子加速器辐照降解草莓中异菌脲和腐霉利残留的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- ZHANG MH. Degradation of iprodione and procymidone residue in strawberry based on electron accelerator irradiation [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [52] GAVAHIAN M, PALLARES N, KHAWLI F, *et al.* Recent advances in the application of innovative food processing technologies for mycotoxins and pesticide reduction in foods [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2020, 106: 209–218.
- [53] CHEN F, ZENG L, ZHANG Y, *et al.* Degradation behaviour of methamidophos and chlorpyrifos in apple juice treated with pulsed electric fields [J]. *Food Chem*, 2009, 112(4): 956–961.
- [54] DELSART C, FRANC C, GRIMI N, *et al.* Effects of pulsed electric fields on four residual fungicides in white wines [J]. *Med Food Environ Technol*, 2016. DOI: 10.1007/978-981-287-817-5\_27
- [55] 相启森, 董闪闪, 郑凯茜, 等. 大气压冷等离子体在食品农药残留和真菌毒素控制领域的应用研究进展[J]. *轻工学报*, 2020, 37(3): 1–9.
- XIANG QS, DONG SS, ZHENG KX, *et al.* Research progress of atmospheric cold plasma in the control of food pesticide residues and mycotoxins [J]. *J Light Ind*, 2020, 37(3): 1–9.
- [56] PHAN KTK, PHAN HT, BOONYAWAN D, *et al.* Non-thermal plasma for elimination of pesticide residues in mango [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2018, 48: 164–171.
- [57] SÓJKA M, MISZCZAK A, SIKORSKI P, *et al.* Pesticide residue levels in strawberry processing by-products that are rich in ellagitannins and an assessment of their dietary risk to consumers [J]. *NFS J*, 2015, 1: 31–37.
- [58] HUAN Z, XU Z, JIANG W, *et al.* Effect of Chinese traditional cooking on eight pesticides residue during cowpea processing [J]. *Food Chem*, 2015, 170(1): 118–122.
- [59] HASSANZADEH N, BAHRAMIFAR N, ESMAILI-SARI A. Residue content of carbaryl applied on greenhouse cucumbers and its reduction by duration of a pre-harvest interval and post-harvest household processing [J]. *J Sci Food Agric*, 2010, 90(13): 2249–2253.

(责任编辑: 张晓寒 韩晓红)

## 作者简介



杨佳洁, 硕士研究生, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: yangjiajiesss@163.com



张民伟, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: zhang78089680@sina.com



孔志强, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农药残留与环境毒理。

E-mail: kongzhiqiang@caas.cn