

# 虱螨脲在茶叶生长和加工过程中的残留特征

牛语萱, 谷婧妍, 王宁, 周杨, 杜雨涵, 李雪松, 张红艳\*

(中国农业大学理学院, 北京 100193)

**摘要:** 中国出口茶叶个别批次曾检出虱螨脲残留超标, 且现行国家标准尚未规定其限量值。为探明其在茶叶生长及加工中的残留特征与膳食风险, 于浙江省绍兴市开展规范农药残留田间试验。该研究采用改进的 QuEChERS 前处理方法结合高效液相色谱-串联质谱, 建立了虱螨脲在不同茶叶基质中的残留分析方法。结果表明, 在 0.005~2 mg L<sup>-1</sup> 范围内, 虱螨脲的质量浓度与峰面积呈良好线性关系 ( $R^2>0.99$ ); 在 0.05、0.5、5 mg kg<sup>-1</sup> 三个添加水平下, 虱螨脲在鲜茶叶、绿茶和红茶中的平均回收率为 76.46%~98.26%, 相对标准偏差为 1.33%~5.66%, 方法定量限均为 0.05 mg kg<sup>-1</sup>。虱螨脲在鲜茶叶中的消解行为最符合联合一级动力学模型 ( $R^2>0.99$ ), 半衰期为 7.21 d。从鲜茶加工为成茶, 虱螨脲呈现加工浓缩效应, 绿茶与红茶的总加工因子分别为 1.44~2.10 和 1.59~2.35; 经干重校正后, 杀青和干燥工序分别是绿茶和红茶加工中导致虱螨脲降解的关键环节, 单一工序降解率分别为 29.69% 和 35.95%。虱螨脲的慢性膳食风险商为 43.77%, 处于可接受水平。该研究为茶园中虱螨脲的合理使用提供了理论依据。

**关键词:** 虱螨脲; 茶叶; 残留; 加工因子; 风险评估

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.8.0933

## Residue Characteristics of Lufenuron during Tea Growth and Processing

NIU Yuxuan, GU Jingyan, WANG Ning, ZHOU Yang, DU Yuhan, LI Xuesong, ZHANG Hongyan\*

(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Some batches of exported Chinese tea have been found to contain lufenuron residues exceeding the permitted levels, whereas the current national standard lacks a maximum residue limit for this compound. To clarify the residue behavior and dietary risk during tea cultivation and processing, a field trial was performed in Shaoxing, Zhejiang Province. An analytical method for the determination of lufenuron residues in different tea matrices was established using a modified QuEChERS pretreatment method coupled with high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. Good linearity ( $R^2>0.99$ ) was achieved for lufenuron in the concentration range of 0.005~2 mg L<sup>-1</sup>. At three spiked levels of 0.05, 0.5, and 5 mg kg<sup>-1</sup>, the average recoveries of lufenuron in fresh tea leaves, green tea, and black tea were found to range from 76.46% to 98.26%, with relative standard deviations of 1.33%~5.66%, and the limit of quantification was determined as 0.05 mg kg<sup>-1</sup> for all matrices. The dissipation behavior of lufenuron in fresh tea leaves was best described by the combined first+first-order kinetics model ( $R^2>0.99$ ), with a half-life of 7.21 days. During the processing of fresh leaves into finished tea, a concentration effect of lufenuron was observed, with total processing factors of 1.44~2.10 for green tea and 1.59~2.35 for black tea. After dry-weight correction, the fixing and drying steps were identified as the key stages responsible for lufenuron degradation in green tea and black tea processing, respectively, with single-step degradation rates of 29.69% and 35.95%. The chronic dietary risk quotient of lufenuron was calculated as 43.77%, indicating an acceptable level. This study provides a theoretical basis for the rational use of lufenuron in tea plantations.

**Key words:** lufenuron; tea; residues; processing factor; risk assessment

中国是全球最主要的茶叶贸易国, 2025 年中国茶叶出口总量为 41.88 万吨, 出口总额达 15.46 亿美元<sup>[1]</sup>。然而, 茶树生长过程中极易遭受多种昆虫和真菌病原体的侵害, 是影响茶叶产量的重要因素<sup>[2]</sup>。农药在防治茶树病、虫和草害方面发挥着关键作用, 但其残留问题也备受关注<sup>[3,4]</sup>。

虱螨脲属于苯甲酰脲类化合物, 是一种几丁质合成抑制剂, 可用于防控多种咀嚼式、刺吸式口器害虫和植食性螨类<sup>[5]</sup>。在中国, 虱螨脲的登记作物有甘蓝、柑橘和菠菜等, 尚未在茶树上登记使用。但中国出口茶叶曾因个别批次检出虱螨脲残留超标, 相继被欧盟和韩国通报<sup>[6,7]</sup>。对于虱螨脲在茶叶中的限量标准, 欧盟依据 (EU) 2020/856

收稿日期: 2026-06-22; 修回日期: 2026-09-10; 接受日期: 2026-09-11

作者简介: 牛语萱 (2002-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农药分析与环境安全, E-mail: s20243102399@cau.edu.cn

通讯作者: 张红艳 (1970-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农药分析与环境安全, E-mail: hongyan@cau.edu.cn

号法规设定为  $0.05 \text{ mg kg}^{-1}$ <sup>[18]</sup>；美国因虱螨脲未获准在食用作物上登记，美国国家环境保护局未设立其在茶叶中的容忍限量，故美国食品药品监督管理局实施“零容忍”的管控；日本设定为  $10 \text{ mg kg}^{-1}$ <sup>[19]</sup>；韩国因未制定具体限量，执行  $0.01 \text{ mg kg}^{-1}$  的一律标准；中国在 GB/T 2763-2026《食品中农药最大残留限量》中尚未规定相应的限量值<sup>[10]</sup>，使得茶叶出口贸易存在潜在壁垒。

在防治效果方面，虱螨脲在常规施用浓度下对茶小卷叶蛾 (*Adoxophyes honmai*) 具有良好防效<sup>[11]</sup>，同时对刀角瓢虫 (*Serangium japonicum*) 成虫安全<sup>[12]</sup>，是一种能兼顾害虫防治与天敌保护的适宜药剂，在茶园综合治理中具有应用潜力。已有学者建立了虱螨脲在茶叶中的残留检测方法<sup>[13,14]</sup>，GB 23200.121-2026《植物源性食品中 352 种农药及其代谢物残留量的测定 液相色谱-质谱联用法》亦提供了相应方法<sup>[15]</sup>。然而关于虱螨脲在茶叶生长及加工过程中残留变化规律以及膳食风险评估的研究却鲜有报道。

农药在茶叶生长及加工过程中均会发生残留水平的变化，其降解行为受农药自身理化性质的显著影响<sup>[16,17]</sup>。生长过程中，农药在茶树鲜叶上的消解普遍符合一级动力学规律，降水、光照等环境因子在降解过程中发挥着重要作用<sup>[16]</sup>，且研究已进一步拓展至混合用药<sup>[18]</sup>、代谢产物<sup>[19]</sup>和手性对映体选择性降解<sup>[20]</sup>等方向。加工环节方面，各工序对农药残留的影响已有研究关注，加工过程兼具降解与脱水浓缩的双重效应<sup>[21,22]</sup>，整体降解率为 30%~60%<sup>[17]</sup>，但不同农药、工艺及茶类组合的数据有待系统整合。膳食风险评估方面，已由干茶残留总量的保守估算转向以茶汤实际浸出量为基准的精细化评估<sup>[19,22]</sup>。研究农药在茶叶加工过程中的降解规律，对于保障消费者的膳食摄入安全具有重要意义<sup>[23]</sup>。本研究探究了虱螨脲在鲜茶叶中的消解动态以及制茶工艺关键步骤的去除或浓缩效应，并基于茶叶中虱螨脲的最终残留水平开展了膳食风险评估，以期茶园合理用药及茶叶消费安全提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

10%虱螨脲悬浮剂，山东贵合生物科技有限公司；虱螨脲标准品（纯度 98.8%），上海市农药研究所有限公司；乙腈（色谱纯），北京迈瑞达科技有限公司；娃哈哈纯净水，杭州娃哈哈集团有限公司；甲酸（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；氯化钠（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；无水硫酸镁（分析纯），国药集团化学试剂有限公司；石墨化炭黑（Graphitizing of Carbon Black, GCB），青岛鸿谱生物科技有限公司。

LCMS-8045 高效液相色谱-串联质谱仪，日本岛津公司；JY2002 百分之一电子天平，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；JA2003 千分之一电子天平，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；AUW220D 十万分之一电子天平，日本岛津制作所；VORTEX-5 涡旋混合器，海门市其林贝尔仪器制造有限公司；MS200 多管涡旋混匀仪，杭州瑞诚仪器有限公司；TG16MW 台式高速离心机，湖南赫西仪器装备有限公司；TDL-40B 低速台式大容量离心机，上海安亭科学仪器厂；HR2100 搅拌机，珠海经济特区飞利浦家庭电器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 田间实验和茶叶加工

由于虱螨脲尚未在茶树上登记使用，无法依据其制剂标签直接确定用药参数。鉴于甘蓝为虱螨脲已登记的代表作物，相关用药参数明确且数据完备，因此本研究参考制剂标签所推荐的虱螨脲在甘蓝上的安全间隔期、施药次数和最大施药剂量，按照 NY/T 788-2018《农作物中农药残留试验准则》<sup>[24]</sup>设计试验方案，并于 2025 年 8 月在中国浙江省绍兴市（120.8 E，29.8 N）开展田间试验，供试茶树品种为铁观音 (*Camellia sinensis* cv. Tieguanyin)。试验期间对天气情况进行记录，其中最高气温 38℃，最低气温 24℃，试验期间均未降雨。试验点设置一个处理小区，一个对照小区，每个小区的面积约为 100 平方米，处理小区与对照小区之间设置缓冲区以避免交叉污染。施药过程中，采用 16 L 电动喷雾器进行叶面喷雾，处理小区以  $300 \text{ mL/hm}^2$  制剂量喷施一次 10%虱螨脲悬浮剂，每公顷用水量 750 L，对照小区喷施等量的清水。于施药后的第 2 h 和 1、3、5、7、10 d，分别采集不少于 5 kg 的鲜茶叶样品（一芽二、三叶）。采用随机法在不同茶树的上、中、下不同部位采样，各小区采集 2 个独立样品，采样点不少于 12 个。然而，本试验用药方案参照虱螨脲在甘蓝上的登记标签信息设定，未针对茶树植株特征调整，且仅限单一剂量、单次施药和无降雨环境，品种、地块及年度均缺乏多样性，故导致样本代表性有限。

将施药后第 1 天采集的鲜叶加工成绿茶和红茶，并收集每一加工步骤后的样品。其中绿茶加工工艺流程依次为：摊放 4 h，220 ℃杀青 4 min，揉捻 40 min，100 ℃干燥 40 min。红茶加工工艺流程依次为：萎凋 16 h，揉捻 50 min，35 ℃发酵 4 h，100 ℃干燥 40 min。所有实验样品混合均匀后，使用四分法取不少于 200 g 的样品两份（A、B 样），分别装入自封袋中，并贮藏于-18 ℃的冰箱中供后续分析。

1.2.2 茶叶中农药残留检测

1.2.2.1 仪器条件

虱螨脲质谱参数经针泵直接进样优化，选择响应最强、干扰最小的离子对用于定性定量分析；虱螨脲为非极性化合物，且梯度洗脱的分离度更好、灵敏度更高。据此，本研究采用的仪器条件如下所示。

液相色谱条件：采用 Athena C<sub>18</sub>-WP 色谱柱（50 mm×2.1 mm，3.0 μm）对目标化合物进行分离；柱温设置为 40 ℃；进样量为 2 μL；流动相为体积分数 0.1%甲酸水溶液（A）和乙腈（B），流量设置为 0.3 mL min<sup>-1</sup>，梯度洗脱程序见表 1。

质谱条件：扫描模式采用多反应监测模式（Multiple Reaction Monitoring, MRM），电喷雾离子源（Electron Spray Ionization, ESI），正离子扫描，离子源温度 300 ℃，脱溶剂管温度设置为 250 ℃，加热块温度设置为 400 ℃，雾化气流量设置为 3 L min<sup>-1</sup>，加热气流量设置为 10 L min<sup>-1</sup>，干燥气流量设置为 10 L min<sup>-1</sup>，目标化合物的质谱参数见表 2。

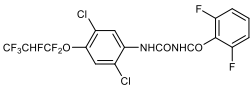
表 1 虱螨脲的梯度洗脱程序

Table 1 Gradient elution program for lufenuron

| Time/min | Mobile phase/%              |                 |
|----------|-----------------------------|-----------------|
|          | A: Water (0.1% Formic acid) | B: Acetonitrile |
| 0.10     | 90                          | 10              |
| 0.80     | 10                          | 90              |
| 3.00     | 10                          | 90              |
| 3.50     | 90                          | 10              |
| 5.00     | 90                          | 10              |

表 2 虱螨脲的质谱参数

Table 2 Mass spectrometry parameters for lufenuron

| Pesticide | Formula                                                                             | Qualitative and quantitative ion*/(m/z) | Dwell time /ms | Q1/V | Collision energy/eV | Q3/V |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|------|---------------------|------|
| 虱螨脲       |  | 511.00/158.05*                          | 100            | -26  | -19                 | -15  |
|           |                                                                                     | 511.00/141.05                           | 100            | -34  | -48                 | -24  |
|           |                                                                                     | 511.00/327.95                           | 100            | -26  | -18                 | -21  |

注：\*为定量离子对。

1.2.2.2 样品前处理

本实验室已建立其他农药在茶叶中的前处理方法<sup>[25]</sup>，鉴于 GCB 在去除叶绿素时可能吸附农药而影响回收率<sup>[26]</sup>，本研究在此基础上进一步优化了 GCB 用量，确定了虱螨脲的最佳净化条件。由于样品含水量不同，鲜茶叶、绿茶和红茶采取了不同的前处理方法。对于鲜茶叶，准确称取 5.00 g 匀浆的茶叶样品于 50 mL 离心管中，依次加入 5 mL 水、25 mL 乙腈和 3 g 氯化钠。对于绿茶和红茶，准确称取 2.00 g 粉碎的茶叶样品于 50 mL 离心管中，加入 5 mL 水、10 mL 乙腈和 3 g 氯化钠。将上述样品以 2 500 r min<sup>-1</sup> 涡旋 5 min 以提取目标化合物；随后，将样品以 3 800 r min<sup>-1</sup> 离心 5 min 使水相、有机相分离。移取 1 mL 鲜茶叶、绿茶或红茶样品上层有机相于装有 10 mg GCB 和 100 mg 无水硫酸镁的离心管中，涡旋 30 s 以去除杂质；之后将离心管以 10 000 r min<sup>-1</sup> 高速离心 1 min 使固液分离。将净化后的上清液通过 0.22 μm 有机滤膜过滤至自动进样器小瓶中，待高效液相色谱-串联质谱（High Performance Liquid Chromatography-tandem Mass Spectrometry, HPLC-MS/MS）测定。

1.2.3 方法确证

1.2.3.1 标准曲线与基质效应

使用乙腈配制虱螨脲标准储备溶液（1 000 mg L<sup>-1</sup>），并于低于-18 ℃的温度下保存。分别使用乙腈或鲜茶叶、绿茶、红茶的空白样品提取液梯度稀释虱螨脲标准储备溶液，配制成 0.005~2 mg L<sup>-1</sup> 6 个质量浓度的系列基质标准溶液。以待测物质量浓度为横坐标，对应峰面积为纵坐标，绘制标准曲线，得到线性回归方程。根据公式（1）计算基质效应（Matrix Effect，ME）。当 ME 在 ±20% 以内时，表示无明显基质效应，ME 大于+20%时，表示有明显的基质增强效应，ME 小于-20%时，表示有明显的基质抑制效应，当存在明显基质效应时，采用基质匹配标准曲线进行定量<sup>[27]</sup>。

$$ME = \left( \frac{A}{B} - 1 \right) \times 100\%$$
 (1)

式中：  
ME——基质效应；  
A——基质匹配标准曲线斜率；  
B——溶剂标准曲线斜率。

1.2.3.2 方法正确度与精密度

分别向鲜茶叶、绿茶和红茶空白基质中添加虱螨脲标准溶液，以制备添加浓度水平为 0.05、0.5、5 mg kg<sup>-1</sup> 的加标样品。添加后静置 30 min，按照 1.2.2.2 节方法进行样品前处理，每个添加水平重复 5 次，按 1.2.2.1 节条件测定，计算得到虱螨脲在不同样品基质中的回收率和相对标准偏差（Relative Standard Deviation，RSD）。

1.3 数据处理

1.3.1 虱螨脲在鲜茶中的消解半衰期

虱螨脲在鲜茶叶中的消解采用 Fantke 和 Juraske 总结的零级、一级、一又二分之一级、二级、一级根函数、一又二分之一级根函数、二级根函数和联合一级动力学模型拟合<sup>[28]</sup>。表 3 列出了所有的动力学模型、消解曲线方程和半衰期计算公式。

表 3 不同消解动力学方程及其半衰期方程

Table 3 Different dissipation kinetics equations and half-life equations

| Model         | Decline curve                                                                | Dissipation half-life                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 零级动力学         | $C = C_0 - kt$                                                               | $t_{1/2} = \frac{C_0}{2k}$                                                     |
| 一级动力学         | $C = C_0 \times e^{-kt}$                                                     | $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$                                                    |
| 一又二分之一级动力学    | $C = \left( \frac{1}{\sqrt{C_0}} + \frac{kt}{2} \right)^{-2}$                | $t_{1/2} = \frac{2 \times \sqrt{2} - 2}{\sqrt{C_0} \times k}$                  |
| 二级动力学         | $C = \frac{C_0}{1 + C_0 \times k \times t}$                                  | $t_{1/2} = \frac{1}{C_0 \times k}$                                             |
| 一级根函数动力学      | $C = C_0 \times e^{-k\sqrt{t}}$                                              | $t_{1/2} = \left( \frac{\ln 2}{k} \right)^2$                                   |
| 一又二分之一级根函数动力学 | $C = \left( \frac{1}{\sqrt{C_0}} + \frac{k \times \sqrt{t}}{2} \right)^{-2}$ | $t_{1/2} = \left( \frac{2 \times \sqrt{2} - 2}{\sqrt{C_0} \times k} \right)^2$ |
| 二级根函数         | $C = \frac{C_0}{1 + C_0 \times k \times \sqrt{t}}$                           | $t_{1/2} = \left( \frac{1}{C_0 \times k} \right)^2$                            |
| 联合一级动力学       | $C = C_1 \times e^{-k_1 t} + C_2 \times e^{-k_2 t}$                          | 最小二乘法数值拟合                                                                      |

注：t (d) 表示施药后的时间；C (mg kg<sup>-1</sup>) 为农药在时间 t 时的残留浓度；C<sub>0</sub> (mg kg<sup>-1</sup>) 为初始残留浓度；C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> (mg kg<sup>-1</sup>) 是通过一级过程 1 和 2 的初始残留浓度；k, k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> (d<sup>-1</sup>) 为农药的消解速率系数；t<sub>1/2</sub> (d) 为农药消解半衰期。

1.3.2 不同工序的加工因子计算

茶叶加工前后农药残留的变化用加工因子（Processing Factor，PF）来表示，其量化了加工过程对农药含量的影响。PF 使用公式（2）计算。PF>1 表明农产品在加工过程中农药残留增加，具有浓缩效应，PF<1 表示加工过

程中农药残留减少，具有稀释效应。

$$PF = \frac{R_2}{R_1} \tag{2}$$

式中：  
PF——加工因子；  
R<sub>2</sub>——处理后的农药残留量，mg kg<sup>-1</sup>；  
R<sub>1</sub>——上一步的农药残留量，mg kg<sup>-1</sup>。

1.3.3 膳食风险评估

根据《中国居民营养与健康状况调查报告》确定膳食结构和食品消费量，通过计算慢性风险商（Chronic Risk Quotient, RQ<sub>c</sub>）来评估长期膳食暴露风险。RQ<sub>c</sub>按公式（3）和公式（4）计算。RQ≤100%表明该农药对人体的风险可接受，而 RQ>100%表明该农药对人体的风险不可接受<sup>[29,30]</sup>。

$$NEDI = \frac{\sum (STMR_i \times F_i)}{BW} \tag{3}$$

$$RQ_c = \frac{NEDI}{ADI} \times 100\% \tag{4}$$

式中：  
NEDI（National Estimated Daily Intake）——国家估算每日摄入量，mg kg<sup>-1</sup> bw；  
STMR<sub>i</sub>（Supervised Trials Median Residue）——规范残留试验中值，mg kg<sup>-1</sup>；  
F<sub>i</sub>——一般人群某一食品的消费量，kg day<sup>-1</sup>，参照《中国居民营养与健康状况调查报告》确定，各类食品的具体取值见表 9；  
BW（Body Weight）——中国成年人平均体重，在本研究中取值为 63 kg；  
ADI（Acceptable Daily Intake）——每日允许摄入量，mg kg<sup>-1</sup> bw。

1.3.4 数据分析

采用 WPS Office（12.1.0.26375）进行数据统计分析，并利用其 Excel 组件的模拟运算中的单变量求解功能，基于联合一级动力学方程计算虱螨脲在鲜茶叶中的消解半衰期；图形绘制及消解曲线拟合则通过 OriginPro 2026b 完成。

2 结果与分析

2.1 基质效应与方法确证

如表 4 所示，在 0.005~2 mg L<sup>-1</sup> 浓度范围内，虱螨脲在溶剂、鲜茶叶、绿茶和红茶基质中的质量浓度与峰面积均呈现良好的线性相关性（R<sup>2</sup>>0.99）。虱螨脲在鲜茶叶、绿茶和红茶中的基质效应分别为-29.18%、-31.24%及-15.89%，表明虱螨脲在鲜茶叶和绿茶中有明显的基质抑制效应，而在红茶中基质效应并不明显。为消除基质对定量结果的影响，采用基质匹配标准溶液进行定量。

表 4 虱螨脲在鲜茶叶、绿茶、红茶中的线性方程、决定系数和基质效应

| Table 4 Linear equations, R <sup>2</sup> and ME of lufenuron in fresh tea leaves, green tea, and black tea |                            |                            |                |         |        |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------|---------|--------|--|
| Matrix                                                                                                     | Linear equation            |                            | R <sup>2</sup> |         | ME/%   |  |
|                                                                                                            | Solvent                    | Matrix                     | Solvent        | Matrix  |        |  |
| 鲜茶叶                                                                                                        | y=8 949 460.72x+200 203.69 | y=6 337 974.63x+160 126.94 | 0.999 3        | 0.997 4 | -29.18 |  |
| 绿茶                                                                                                         | y=2 424 874.97x+194 345.00 | y=1 667 301.83x+88 242.98  | 0.995 9        | 0.995 5 | -31.24 |  |
| 红茶                                                                                                         | y=2 424 874.97x+194 345.00 | y=2 039 628.80x+88 946.15  | 0.995 9        | 0.995 3 | -15.89 |  |

表 5 结果显示，虱螨脲在鲜茶叶、绿茶和红茶中的平均回收率在 76.46%~91.61%、80.81%~89.87%和 88.31%~98.26%之间，RSD 在 1.33%~2.10%、2.83%~5.66%和 3.46%~4.88%之间，满足 NY/T 788-2018《农作物中农药残留试验准则》中农药残留检测要求。本研究中，以最低添加浓度作为定量限（Limit of Quantitation, LOQ），则虱螨脲在鲜茶叶、绿茶和红茶中的 LOQ 均为 0.05 mg kg<sup>-1</sup>。

表 5 虱螨脲在鲜茶叶、绿茶、红茶中的平均回收率和相对标准偏差

Table 5 Mean recoveries and RSD of lufenuron in fresh tea leaves, green tea, and black tea (n=5)

| Matrix | Spiked level/(mg kg <sup>-1</sup> ) | Mean recovery/% | RSD/% |
|--------|-------------------------------------|-----------------|-------|
| 鲜茶叶    | 0.05                                | 76.46           | 2.10  |
|        | 0.5                                 | 91.61           | 1.82  |
|        | 5                                   | 89.93           | 1.33  |
| 绿茶     | 0.05                                | 80.81           | 3.00  |
|        | 0.5                                 | 89.87           | 5.66  |
|        | 5                                   | 88.89           | 2.83  |
| 红茶     | 0.05                                | 98.26           | 4.88  |
|        | 0.5                                 | 93.78           | 3.50  |
|        | 5                                   | 88.31           | 3.46  |

2.2 虱螨脲在鲜茶叶中的消解动态

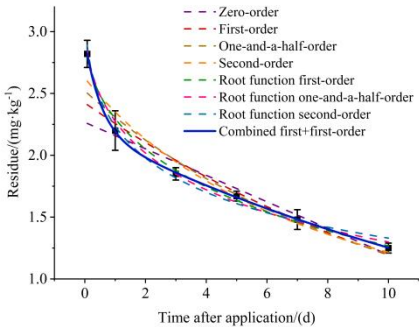


图 1 虱螨脲在鲜茶叶中的消解动力学拟合曲线

Fig.1 Fitted dissipation kinetics curve of lufenuron in fresh tea leaves

表 6 虱螨脲在鲜茶叶中的消解动力学拟合方程和半衰期

Table 6 Fitted dissipation kinetics equations and half-lives of lufenuron in fresh tea leaves

| Model         | Dissolution equation                                                        | R <sup>2</sup> | Half-life/d |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------|
| 零级动力学         | $C(t) = 2.27 - 0.11t$                                                       | 0.859 6        | 10.58       |
| 一级动力学         | $C(t) = 2.42 \times e^{-0.07t}$                                             | 0.912 0        | 9.79        |
| 一又二分之一级动力学    | $C(t) = \left( \frac{1}{\sqrt{2.52}} + \frac{0.06t}{2} \right)^{-2}$        | 0.938 0        | 9.23        |
| 二级动力学         | $C(t) = \frac{2.26}{1 + 0.12t}$                                             | 0.960 5        | 8.63        |
| 一级根函数动力学      | $C(t) = 3.02 \times e^{-0.27\sqrt{t}}$                                      | 0.992 9        | 6.36        |
| 一又二分之一级根函数动力学 | $C(t) = \left( \frac{1}{\sqrt{3.15}} + \frac{0.20\sqrt{t}}{2} \right)^{-2}$ | 0.986 1        | 5.53        |
| 二级根函数         | $C(t) = \frac{3.27}{1 + 0.14 \times \sqrt{t}}$                              | 0.970 5        | 4.72        |
| 联合一级动力学       | $C(t) = 0.73 \times e^{-1.86t} + 2.20 \times e^{-0.06t}$                    | 0.999 5        | 7.21        |

本研究利用不同动力学模型分析了虱螨脲在鲜茶叶中的消解动态，拟合结果及计算所得半衰期如图 1 和表 6 所示。结果表明，所有模型均可以对虱螨脲在鲜茶叶的消解进行较好的拟合，除零级动力学模型外，其他几种模型的决定系数均大于 0.90。虱螨脲在鲜茶叶中的消解行为最符合联合一级动力学模型（R<sup>2</sup>=0.999 5）。虱螨脲在鲜茶叶上的 0 d（2 h）初始浓度为 2.82 mg kg<sup>-1</sup>，施药 10 d 后，约 55.7%的虱螨脲发生降解。本研究中，联合一级动

力学方程计算得到的虱螨脲在鲜茶叶中的半衰期为 7.21 d, 略长于 Wang 等<sup>[31]</sup>报道的虱螨脲在甘蓝 (3.24~6.80 d) 上的半衰期以及 Feng 等<sup>[32]</sup>报道的虱螨脲在菠菜 (3.4~4.4 d) 上的半衰期, 但短于 Li 等<sup>[33]</sup>报道的虱螨脲在金桔上的半衰期 (9.12~12.60 d)。光解作用和生长稀释是影响茶树生长过程中农药残留的重要因素<sup>[34]</sup>。虱螨脲具有较强的化学稳定性, 农药越稳定, 生长稀释通常对其消解发挥作用越大<sup>[28]</sup>。甘蓝和菠菜因其生长迅速、生物量大, 其生长稀释效应比茶叶更为显著, 这可能导致了虱螨脲在甘蓝和菠菜中的半衰期要短于茶叶中的半衰期。而金桔表层的特殊蜡质结构与精油囊泡可能阻碍农药降解<sup>[35]</sup>, 故可能致使虱螨脲在金桔中的半衰期要长于茶叶中的半衰期。

降水条件对农药的消解具有重要影响, 双丙环虫酯在茶树上的消解半衰期雨季明显短于旱季<sup>[36]</sup>。本试验全程无降雨, 自然降水对叶面药剂的冲刷作用缺失, 其半衰期可能较有降雨条件下更长。施药剂量亦直接影响农药的初始沉积量, 烯啶虫胺和唑虫酰胺在茶叶中的残留量消解至限量标准以下所需时间均随施药浓度的增加而明显延长<sup>[37]</sup>。茶树品种间植株特征差异也可能影响农药的附着与消解速率, 如八氯二丙醚在不同茶树品种中的半衰期存在一定差异<sup>[38]</sup>。此外, 本研究仅于单一地块和年度开展田间试验, 不同地区及年际间气候差异亦可能对消解行为产生影响, 故虱螨脲在茶树上的消解规律尚需通过多剂量、多品种、多区域的系统试验加以验证。

## 2.3 虱螨脲在茶叶加工过程中的残留特征

本研究选用施药后第 1 天采收的鲜叶分别加工为绿茶和红茶, 并于每道工序后取样测定农药残留量。该时间点的选择基于此时鲜叶中农药初始残留量较高, 有利于观察各加工工序对残留的影响效应, 从而更清晰地呈现残留量在不同工艺环节中的变化规律。

### 2.3.1 虱螨脲在茶叶加工过程中的残留量和降解率

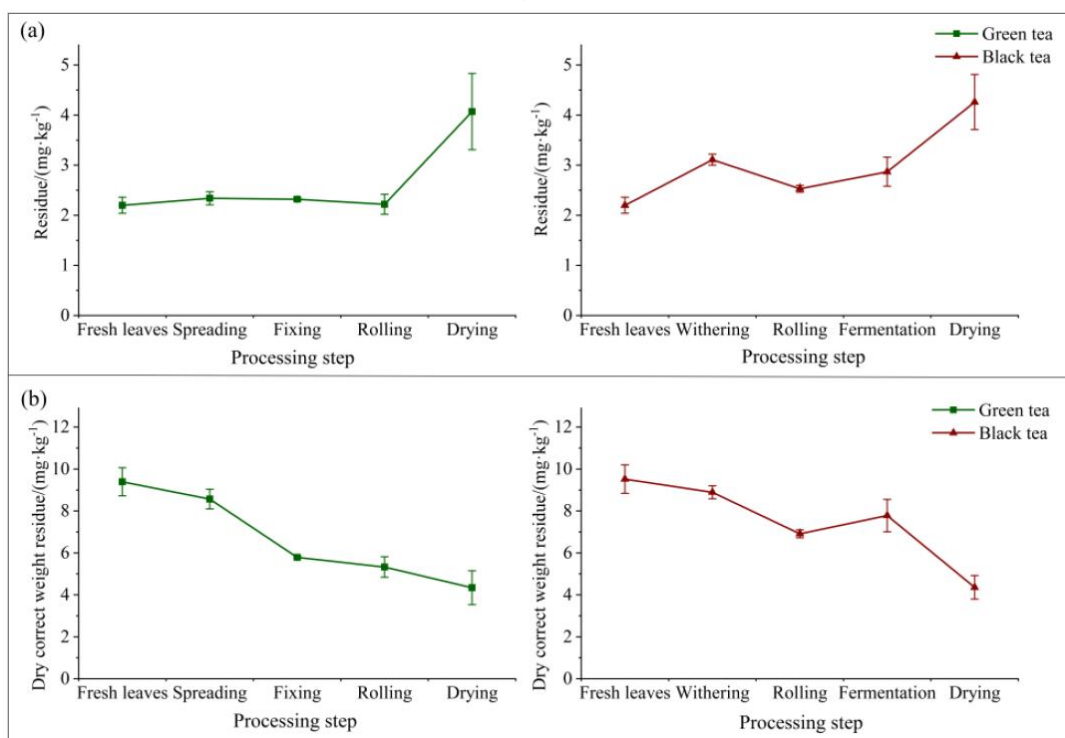


图 2 虱螨脲在绿茶和红茶不同加工工序下的残留量变化

Fig.2 Changes in residues of lufenuron during different processing steps of green tea and black tea

注: (a) 各工序样品的实测残留量 (以鲜重计); (b) 经干重校正后的残留量 (扣除水分影响)。

在茶叶加工过程中, 部分工序会导致样品水分流失, 从而引起农药残留水平相对上升<sup>[39]</sup>, 虱螨脲在绿茶和红茶加工过程中的残留变化趋势如图 2a 所示。结果显示, 成茶中的虱螨脲残留量均高于鲜茶叶, 其中绿茶和红茶分别上升至  $4.07 \text{ mg kg}^{-1}$  和  $4.26 \text{ mg kg}^{-1}$ 。具体而言, 在绿茶加工中, 摊放、杀青和揉捻工序处理后的虱螨脲残留量基本保持稳定, 而经过干燥工序后残留量明显增加 (由  $2.22 \text{ mg kg}^{-1}$  上升至  $4.07 \text{ mg kg}^{-1}$ )。在红茶加工过程中, 经过萎凋工序处理后的残留量略有上升 (由  $2.20 \text{ mg kg}^{-1}$  上升至  $3.11 \text{ mg kg}^{-1}$ ), 揉捻与发酵阶段残留量未见明显变化, 随后在干燥工序中残留量同样明显增加 (由  $2.87 \text{ mg kg}^{-1}$  上升至  $4.26 \text{ mg kg}^{-1}$ )。上述结果表明, 绿茶和红茶加工中

的萎凋工序会引起部分水分损失, 而干燥工序水分流失最为明显, 对虱螨脲产生加工浓缩效应, 是导致其残留量升高的关键步骤。

为消除因水分损失导致的样品鲜重降低、进而引起农药残留表观浓度升高的影响, 本研究对各加工工序的虱螨脲残留量进行了含水量校正, 获得了干重校正残留量。如图 2b 所示, 在绿茶和红茶加工过程中, 虱螨脲的干重校正残留量总体呈下降趋势。从鲜叶到成茶, 绿茶中虱螨脲的干重校正残留量由  $9.39 \text{ mg kg}^{-1}$  降至  $4.34 \text{ mg kg}^{-1}$ , 红茶中由  $9.52 \text{ mg kg}^{-1}$  降至  $4.36 \text{ mg kg}^{-1}$ 。就各加工工序而言, 绿茶加工过程中, 摊放和干燥工序后干重校正残留量略有下降, 揉捻工序变化不明显, 而在经过杀青工序后明显降低 (由  $8.57 \text{ mg kg}^{-1}$  下降至  $5.79 \text{ mg kg}^{-1}$ )。在红茶加工过程中, 经过萎凋和揉捻工序处理后的干重校正残留量略有减少, 发酵工序基本无变化, 干燥工序后则呈现明显降低 (由  $7.78 \text{ mg kg}^{-1}$  下降至  $4.36 \text{ mg kg}^{-1}$ )。

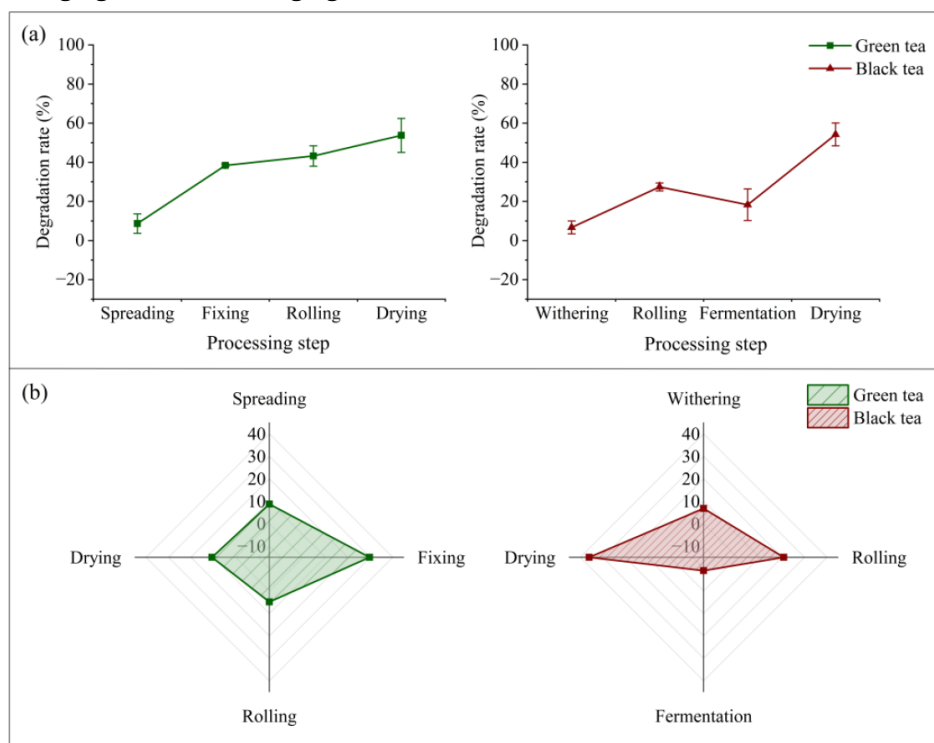


图 3 虱螨脲在绿茶和红茶加工过程中的降解情况

Fig.3 Degradation profile of lufenuron during the processing of green tea and black tea

注: (a) 加工各阶段虱螨脲降解率的连续变化情况; (b) 各单一加工工序对虱螨脲的降解率。

经干重校正后计算得出虱螨脲在各加工工序下的降解率, 如图 3a 所示。从鲜叶到成茶, 虱螨脲在绿茶和红茶加工过程中的总降解率分别为 53.77%和 54.26%。已有研究表明, 农药在茶叶加工过程中的降解速率与其理化性质密切相关, 蒸气压较高、热稳定性较差或水溶性较高的农药通常更易降解<sup>[34,40]</sup>。例如, 乐果在绿茶和红茶加工过程中的降解率分别达到 54.7%~55.3%和 69.1%~72.2%<sup>[41]</sup>, 而啮虫酰胺的降解率则为 3.5%~36.4%<sup>[42]</sup>。虱螨脲的蒸气压 ( $<4 \times 10^{-3} \text{ mPa}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) 和水溶性 ( $0.048 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $\text{pH } 7.7$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) 均显著低于乐果 ( $0.25 \text{ mPa}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ;  $39.8 \text{ g L}^{-1}$ ,  $\text{pH } 7$ ,  $25^\circ\text{C}$ ), 故其在茶叶加工过程中的降解率低于乐果。另一方面, 虱螨脲的蒸气压 ( $<4 \times 10^{-3} \text{ mPa}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ) 高于啮虫酰胺 ( $5 \times 10^{-4} \text{ mPa}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ), 且其热稳定性较啮虫酰胺差, 故降解率高于啮虫酰胺。

图 3b 展示了虱螨脲在茶叶加工过程中的单一工序降解率。结果表明, 红茶与绿茶的不同加工工序对该农药的降解影响存在差异。在绿茶加工过程中, 杀青工序对虱螨脲的降解影响最为明显, 单一工序降解率达到 29.69%; 其次是干燥工序; 而摊放和揉捻工序的影响则相对较小。在红茶加工过程中, 干燥工序的降解作用最为突出, 单一工序降解率达到 35.95%; 揉捻和萎凋工序次之; 发酵工序的影响则最小。由此可见, 杀青与干燥分别在绿茶和红茶的加工中对虱螨脲的降解起到了关键作用。这主要是由于虱螨脲在绿茶杀青工序中充分暴露于湿热环境, 从而加速其降解与挥发; 而在红茶的前期加工工序中降解缓慢, 后续干燥工序中, 物料持续处于高温干热环境, 从而显著促进其降解速率。

### 2.3.2 虱螨脲在茶叶各加工工序及全工艺中的加工因子

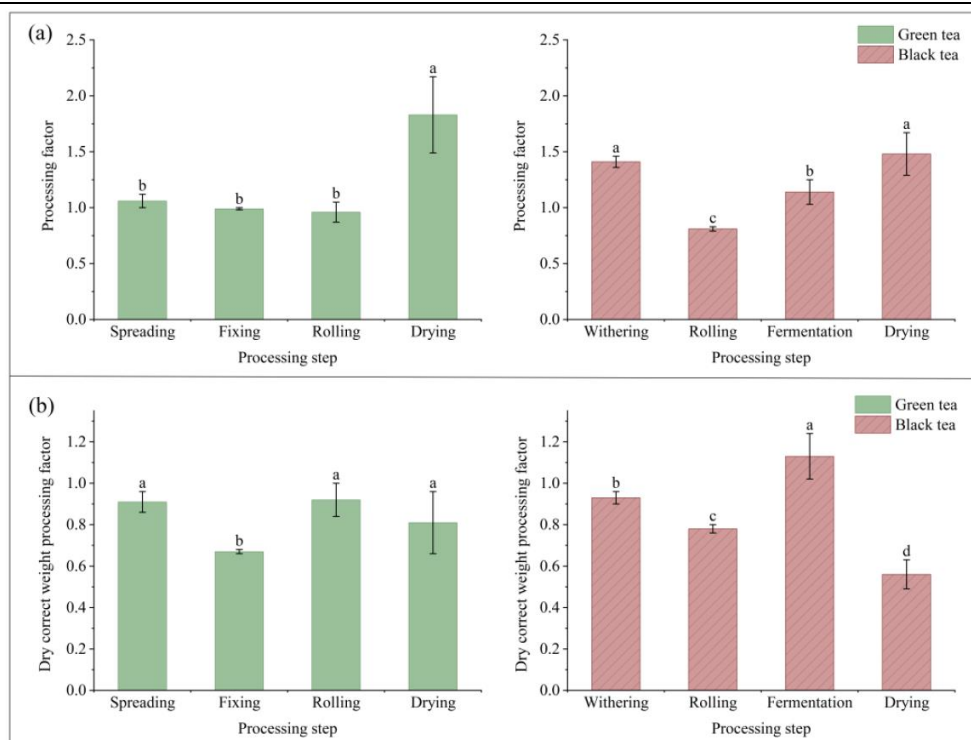


图4 虱螨脲在绿茶和红茶不同加工工序下的加工因子

Fig.4 Processing factors of lufenuron during different processing steps of green tea and black tea

注: (a) 各加工工序中虱螨脲的加工因子 (基于实测残留量计算); (b) 经干重校正后的加工因子 (扣除水分含量变化的影响)。

图中不同小写字母表示在  $P<0.05$  水平上具有显著差异。

基于虱螨脲在绿茶和红茶不同加工工序中的残留量, 计算各工序的加工因子, 结果如图 4a 所示。绿茶加工过程中, 摊放、杀青、揉捻工序的加工因子均接近 1, 干燥工序的加工因子为 1.83, 且干燥工序的加工因子与杀青、揉捻工序的加工因子之间存在显著差异; 红茶加工过程中, 揉捻、发酵工序的加工因子均接近 1, 萎凋工序的加工因子为 1.41, 干燥工序的加工因子为 1.48, 且萎凋和干燥工序的加工因子均与揉捻、发酵工序的加工因子存在显著差异。不同加工工序对虱螨脲残留量的影响程度排序为: 绿茶中干燥>摊放>杀青>揉捻; 红茶中干燥>萎凋>发酵>揉捻。该规律与 Li 等<sup>[43]</sup>研究的绿茶和红茶不同加工工序对吡丙醚残留量影响结果高度吻合, 进一步表明了干燥工序对不同种类农药残留量的影响均最为明显, 是茶叶加工过程中决定农药残留最终含量的关键环节。

经过干重校正残留量计算得到的各工序干重校正加工因子如图 4b 所示。绿茶加工过程中, 摊放、揉捻、干燥工序的干重校正加工因子均接近 1, 杀青工序的干重校正加工因子为 0.67, 且杀青工序的干重校正加工因子与摊放、揉捻、干燥工序的干重校正加工因子存在显著差异; 红茶加工过程中, 萎凋、揉捻、发酵工序的干重校正加工因子均接近 1, 干燥工序的干重校正加工因子为 0.56, 且干燥工序的干重校正加工因子与萎凋、揉捻、发酵工序的干重校正加工因子存在显著差异。不同加工工序对虱螨脲干重校正残留量的影响程度排序为: 绿茶中杀青>干燥>摊放>揉捻; 红茶中干燥>揉捻>萎凋>发酵。Wang 等<sup>[44]</sup>报道, 在绿茶和红茶加工中, 干燥工序均对啉虫酰胺干重校正残留量的降低影响最大。本研究中, 红茶加工同样以干燥工序的影响最大, 但绿茶加工中杀青工序的影响最为显著, 这与 Wang 等的结果有所不同。这一差异可能与二者的蒸气压有关: 啉虫酰胺的蒸气压低于虱螨脲, 因此在杀青过程中, 蒸发和共蒸馏作用对啉虫酰胺的降解影响较小, 而对虱螨脲的影响较大。

施药后第 0、1、3、5、7、10 天采集的鲜叶分别加工成绿茶和红茶, 其总加工因子范围分别为 1.44~2.10 和 1.59~2.35。红茶的总加工因子略高于绿茶, 但两者无显著差异。这一现象可能归因于红茶的最终含水量低于绿茶, 从而使得红茶加工过程中水分流失对虱螨脲产生的加工浓缩效应更为明显。经含水量折算后, 绿茶和红茶的干重校正总加工因子分别为 0.36~0.53 和 0.38~0.56。红茶的干重校正总加工因子略高于绿茶, 但两者间无显著差异。

表 7 虱螨脲在绿茶和红茶中的残留量、干重校正残留量、总加工因子和干重校正总加工因子

Table 7 Residue levels, dry corrected weight residue levels, total processing factors, and dry corrected weight total processing factors of lufenuron in green tea and black tea

| Harvesting interval /d | Residue level/(mg kg <sup>-1</sup> ) |           | Dry corrected weight residue level/(mg kg <sup>-1</sup> ) |           | Total processing factor |           | Dry corrected weight total processing factor |           |
|------------------------|--------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------|-----------|-------------------------|-----------|----------------------------------------------|-----------|
|                        | Green tea                            | Black tea | Green tea                                                 | Black tea | Green tea               | Black tea | Green tea                                    | Black tea |
| 0                      | 4.06                                 | 4.48      | 4.33                                                      | 4.58      | 1.44                    | 1.59      | 0.36                                         | 0.38      |
| 1                      | 4.07                                 | 4.26      | 4.34                                                      | 4.36      | 1.85                    | 1.93      | 0.46                                         | 0.46      |
| 3                      | 3.76                                 | 3.21      | 4.01                                                      | 3.28      | 2.03                    | 1.73      | 0.51                                         | 0.41      |
| 5                      | 3.35                                 | 3.82      | 3.57                                                      | 3.90      | 2.00                    | 2.28      | 0.50                                         | 0.54      |
| 7                      | 3.12                                 | 3.49      | 3.32                                                      | 3.57      | 2.10                    | 2.35      | 0.53                                         | 0.56      |
| 10                     | 2.29                                 | 2.75      | 2.45                                                      | 2.81      | 1.83                    | 2.19      | 0.46                                         | 0.52      |

2.4 残留水平和膳食摄入风险评估

因虱螨脲尚未在茶树登记，参照其在甘蓝上的登记安全间隔期（7 d），于施药后第 7 天采集鲜叶加工为绿茶和红茶，测得残留量范围为 2.58~3.81 mg kg<sup>-1</sup>，残留试验中值（STMR）为 3.41 mg kg<sup>-1</sup>。对比各主要贸易市场的最大残留限量（Maximum Residue Limit, MRL）要求（表 8），该残留水平虽远低于日本限量，但已超过欧盟、韩国的限量标准，亦无法满足美国“零容忍”的管控要求。欧盟对虱螨脲的限量（0.05 mg kg<sup>-1</sup>）系基于定量限（LOQ）设定的技术性准入“红线”，超标即可能触发欧盟食品和饲料快速预警系统（Rapid Alert System for Food and Feed, RASFF）通报；美国因未设立容忍限量，可定量检出即面临自动扣留，合规标准更为严苛。本研究成品茶中虱螨脲的实测残留量远超上述市场的准入限值，表明在该田间施药方案和采收间隔为 7 天的条件下生产的茶叶难以满足欧盟、美国及韩国的市场准入要求，面临一定的贸易合规风险。

表 8 主要贸易市场茶叶中虱螨脲最大残留限量对比

Table 8 Comparison of maximum residue limits for lufenuron in tea among major markets

| Country/Region | Regulatory basis        | MRL/(mg kg <sup>-1</sup> ) |                                | Regulatory logic            |
|----------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 中国             | GB 2763-2026            | 未规定                        |                                | 未制定虱螨脲在茶叶中的 MRL             |
| 欧盟             | (EU)2020/856            | 0.05                       |                                | 该限量基于 LOQ 设定，超标即触发 RASFF 通报 |
| 美国             | EPA 40 CFR Part 180+FDA | 无容忍限量                      | 无食用作物登记，未设立茶叶容忍限量，可定量检出即实施自动扣留 |                             |
| 日本             | 食品卫生法（肯定列表制度）           | 10                         |                                | 设具体残留限量                     |
| 韩国             | MFDS 肯定列表制度             | 0.01                       |                                | 未设具体 MRL，执行一律标准             |

注：EPA（U.S. Environmental Protection Agency），美国国家环境保护局；FDA（U.S. Food and Drug Administration），美国食品药品监督管理局；MFDS（Ministry of Food and Drug Safety），韩国食品医药品安全处。

为进一步明确该残留水平是否构成膳食健康风险，依据 GB 2763-2026 中虱螨脲的每日允许摄入量（ADI）为 0.02 mg kg<sup>-1</sup> bw，并基于虱螨脲登记使用情况、中国居民膳食结构及实测 STMR 值，开展了慢性膳食摄入风险评估，结果如表 9 所示。对于米面制品、蛋奶制品、畜禽类、鱼虾类、动物油、腌菜、坚果、糖及淀粉等品类，虱螨脲在中国的登记使用范围及 GB 2763-2026 的限量规定均未涵盖，故上述品类不构成膳食摄入风险。在限量值选用方面，优先采用中国制定的 MRL，当中国 MRL 值缺失时，本研究采用 STMR 或国际限量作为替代。总 NEDI 由各品类 NEDI 累加求得，经逐项校验，其加和值与表 9 所列合计值一致。基于此，虱螨脲对普通人群的 NEDI 为 0.008 754 mg kg<sup>-1</sup> bw，慢性膳食风险商为 43.77%，低于 100%，表明在采收间隔为 7 天的条件下，虱螨脲带来的膳食健康风险处于可接受水平。在膳食风险来源构成中，蔬菜类贡献最高，深色蔬菜与浅色蔬菜的风险贡献率分别占总 RQ 的 49.77%和 33.31%；而茶叶的贡献率仅为 7.42%，在各膳食来源中相对较低。

表 9 虱螨脲的慢性膳食摄入风险评估

Table 9 Chronic dietary intake risk assessment of lufenuron

| Classification | Daily intake ( $F_i$ )/kg | Reference limit/( $\text{mg kg}^{-1}$ ) | Limited source | NEDI/( $\text{mg kg}^{-1} \text{ bw}$ ) | RQ/%  | Contribution to total RQ/% |
|----------------|---------------------------|-----------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|-------|----------------------------|
| 米及其制品          | 0.239 9                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 面及其制品          | 0.138 5                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 其它谷类           | 0.023 3                   | 0.1                                     | 玉米, 中国         | 0.000037                                | 0.18  | 0.42                       |
| 薯类             | 0.049 5                   | 0.05                                    | 马铃薯, 中国        | 0.000 039                               | 0.20  | 0.45                       |
| 干豆类及其制品        | 0.016 0                   | 0.01                                    | 大豆, 中国         | 0.000 003                               | 0.01  | 0.03                       |
| 深色蔬菜           | 0.091 5                   | 3                                       | 韭菜, 中国         | 0.004 357                               | 21.79 | 49.77                      |
| 浅色蔬菜           | 0.183 7                   | 1                                       | 菜豆, 中国         | 0.002 916                               | 14.58 | 33.31                      |
| 腌菜             | 0.010 3                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 水果             | 0.045 7                   | 1                                       | 苹果, 中国         | 0.000 725                               | 3.63  | 8.29                       |
| 坚果             | 0.003 9                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 畜禽类            | 0.079 5                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 奶及其制品          | 0.026 3                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 蛋及其制品          | 0.023 6                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 鱼虾类            | 0.030 1                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 植物油            | 0.032 7                   | 0.05                                    | 棉籽, 中国         | 0.000 026                               | 0.13  | 0.30                       |
| 动物油            | 0.008 7                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 糖、淀粉           | 0.004 4                   | -                                       | -              | 0                                       | 0     | 0                          |
| 食盐             | 0.012 0                   | 3.41                                    | 茶叶, 残留中值       | 0.000 649                               | 3.25  | 7.42                       |
| 酱油             | 0.009 0                   | 0.01                                    | 大葱, 欧盟         | 0.000 001                               | 0.01  | 0.02                       |
| 合计             | 1.028 6                   |                                         |                | 0.008 754                               | 43.77 | 100                        |

注:  $F_i$  参照《中国居民营养与健康状况调查报告》确定; 虱螨脲在米及其制品、面及其制品、腌菜、坚果、畜禽类、奶及乳制品、蛋及蛋制品、鱼虾类、动物油、糖和淀粉等食品品类中尚无登记使用, 且 GB 2763-2026 亦未规定 MRL, 故不构成膳食摄入风险, 其参考限量值及来源以“-”表示, 相应 NEDI 及 RQ 记为 0。

3 结论

本文研究了虱螨脲在鲜茶叶中的消解动态及其在绿茶与红茶加工过程中的残留特征, 并开展了膳食风险评估。残留动态结果表明, 虱螨脲在鲜茶叶中的消解行为最符合联合一级动力学模型, 其半衰期为 7.21 d。在茶叶加工过程中, 虱螨脲的残留量整体呈上升趋势, 这主要归因于水分减少导致的浓缩效应。其中, 干燥工序是绿茶和红茶加工过程中导致虱螨脲残留量显著上升的关键环节。经含水量校正后发现, 杀青和干燥工序分别是绿茶和红茶加工过程中导致虱螨脲干重校正残留量降低的关键工序。施药后 7 d 采收的鲜叶加工为成品茶后, 虱螨脲残留量为 2.58~3.81  $\text{mg kg}^{-1}$ , 已超过欧盟、美国、韩国的限量标准。针对上述贸易合规风险, 种植环节应严格控制施药剂量与频次, 避免在茶树生长后期用药, 并将安全间隔期延长至 7 d 以上; 加工环节则应充分利用杀青和干燥工序对虱螨脲的降解作用, 通过优化温度、时间等工艺参数强化热处理环节的消减效果。总膳食风险评估结果显示, 虱螨脲在普通人群中的国家估算每日摄入量为 0.008 754  $\text{mg kg}^{-1} \text{ bw}$ , 占其每日允许摄入量 0.02  $\text{mg kg}^{-1} \text{ bw}$  的 43.77%, 表明虱螨脲的长期膳食摄入风险处于可接受范围。综上所述, 本研究对于指导茶叶生产中虱螨脲的合理使用、降低加工环节的残留风险具有重要意义。

参考文献

[1] 中国茶叶流通协会. 2025 年中国茶叶进出口情况简报 [EB/OL]. (2026-01-20)[2026-05-19]. <https://www.ctma.com.cn/chukoujianbao/83120.html>.

[2] BORAH P, BISWAS R. Impactful analytical schemes for assessing pesticides in tea: A comprehensive review [J]. Measurement, 2023, 221: 113505.

- [3] WU Y L, AN Q S, LI D, et al. Multi-residue analytical method development and risk assessment of 56 pesticides and their metabolites in tea by chromatography tandem mass spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131819.
- [4] SUN R, YANG W, LI Y, et al. Multi-residue analytical methods for pesticides in teas: a review [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(8): 1839-1858.
- [5] BLETSOU A A, HANAFI A H, DASENAKI M E, et al. Development of specific LC-ESI-MS/MS methods to determine bifenthrin, lufenuron, and iprodione residue levels in green beans, peas, and chili peppers under Egyptian field conditions [J]. Food Analytical Methods, 2012, 6(4): 1099-1112.
- [6] 潘瑛洁,王月圆,唐仕琴,等.国内外茶叶中农药最大残留限量标准比较分析[J].浙江农业科学,2025,66(4):1020-1024.
- [7] 杨方,刘少明.基于 RASFF 通报分析技术性贸易措施对商品茶出口贸易的影响[J].食品安全质量检测学报,2024,15(23):192-199.
- [8] European Commission. EU pesticides database - maximum residue levels: lufenuron [DB/OL]. [2026-08-14]. [https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/mrls/details?lg\\_code=EN&pest\\_res\\_id\\_list=329&product\\_id\\_list=](https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticides-database/start/screen/mrls/details?lg_code=EN&pest_res_id_list=329&product_id_list=).
- [9] JAPAN FOOD CHEMICAL RESEARCH FOUNDATION. Database of agricultural chemicals residue in foods - lufenuron [DB/OL]. [2026-08-14]. [https://db.ffcr.or.jp/front/pesticide\\_detail?id=79300](https://db.ffcr.or.jp/front/pesticide_detail?id=79300).
- [10] GB/T 2763-2026 食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量[S].
- [11] UCHIYAMA T, OZAWA A, YOO J. Susceptibility and resistance to diacylhydrazine analog insect growth regulator insecticides in the smaller tea tortrix, *Adoxophyes honmai* Yasuda (Lepidoptera: Tortricidae), collected in tea fields in Shizuoka Prefecture, Japan [J]. Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology, 2013, 57(2): 85-93.
- [12] OZAWA A, UCHIYAMA T. Effects of pesticides on adult ladybird beetle *Serangium japonicum* (Coleoptera: Coccinellidae), a potential predator of the tea spiny whitefly *Aleurocanthus camelliae* (Hemiptera: Aleyrodidae) [J]. Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology, 2016, 60(1): 45-49.
- [13] LIU C R, LIU X Y, MARRIOTT P J, et al. Magnetic solid-phase extraction of benzoylurea insecticides in tea samples with Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-hyperbranched polyester magnetic composite as sorbent [J]. Journal of Separation Science, 2019, 42(8): 1610-1619.
- [14] 张聪,王秀云,陈硕.茶叶中虱螨脲等 6 种农药残留量的检测及结果分析[J].市场监管与质量技术研究,2022,4:6-12.
- [15] GB 23200.121-2026 食品安全国家标准 植物源性食品中 352 种农药及其代谢物残留量的测定 液相色谱-质谱联用法[S].
- [16] LI C, ZHANG S, HAN C, et al. Acetamiprid in Rizhao green tea: Residue dynamics, degradation pathways, and ecological risks via integrated experimental and computational approaches [J]. Journal of Hazardous materials, 2025, 495: 138786.
- [17] MERHI A, TALEB R, ELARIDI J, et al. Analytical methods used to determine pesticide residues in tea: A systematic review [J]. Applied Food Research, 2022, 2(1): 100131.
- [18] WANG T, QIAN Y, WANG J, et al. Comparison of combined dissipation behaviors and dietary risk assessments of thiamethoxam, bifenthrin, dinotefuran, and their mixtures in tea [J]. Foods, 2024, 13(19): 3113.
- [19] LI H, ZHONG Q, WANG X, et al. The degradation and metabolism of chlorflazuron and flonicamid in tea: A risk assessment from tea garden to cup [J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142070.
- [20] LI H, HU Y, NING Y, et al. Enantioselective migration, degradation, and metabolism of pyriproxyfen and its metabolites from tea garden to cup [J]. Food Chemistry, 2026, 520: 149783.
- [21] MIAO S, WEI Y, PAN Y, et al. Detection methods, migration patterns, and health effects of pesticide residues in tea [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 2945-2976.
- [22] AHLUWALIA V, DAS P, KANRAR B, et al. Residue behavior, processing factor and dietary risk assessment of flupyradifurone and its metabolites during tea cultivation to consumption [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 143: 107600.
- [23] 钱可心,王新茹,张新忠,等.绿茶种植-加工-冲泡过程中溴虫氟苯双酰胺的残留特征[J].农药学学报,2025,27(2):257-266.
- [24] NY/T 788-2018 农作物中农药残留试验准则[S].
- [25] JING J, FENG X, ZHOU Y, et al. Dissipation and processing factors of emamectin benzoate and tolfenpyrad in tea (*Camellia Sinensis*) [J]. Food Science and Biotechnology, 2023, 17: 508-517.
- [26] 张媛媛,张卓,陈忠正,等.QuEChERS 方法在茶叶农药残留检测中的应用研究进展[J].食品安全质量检测学报,2014,5(9):2711-2716.
- [27] 李春勇,吕莹,金静,等.呋虫胺和啉虫酰胺在茶叶加工过程中的残留特征及膳食风险评估[J].食品科学,2025,46(1): 192-199.
- [28] FANTKE P, JURASKE R. Variability of pesticide dissipation half-lives in plants [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(8):

3548-3562.

- [29] QI P, LI Q, WANG J, et al. Dissipation dynamics of methomyl, phoxim, and pymetrozine during mulberry (*Morus alba* L.) leaves harvest, tea processing and brewing [J]. Food Chemistry, 2025, 480: 143899.
- [30] 任鹏程, 齐艳丽, 李春勇, 等. 以苯醚甲环唑和吡唑醚菌酯为例分析农药多残留联合膳食暴露风险评估方法[J]. 农药学报, 2025, 27(3): 390-399.
- [31] WANG X, HU S, MENG L, et al. Residue dissipation dynamics and dietary risk assessment of emamectin benzoate, chlorantraniliprole, chlorfenapyr, and lufenuron in cabbage [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(58): 121748-121758.
- [32] FENG Y, ZHANG G, ZHANG A, et al. Dissipation, residue, and dietary risk assessment of methoxyfenozide, chlorantraniliprole, indoxacarb, lufenuron, and chlorfenapyr in spinach using a modified QuEChERS method combined with a tandem mass spectrometry technique [J]. Agronomy, 2022, 12(12): 3173.
- [33] LI K, CHEN W, DENG P, et al. Dissipation, residues and risk assessment of lufenuron during kumquat growing and processing [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 112: 104643.
- [34] ZONGMAO C, HAIBIN W. Factors affecting residues of pesticides in tea [J]. Pesticide Science, 1988, 23(2): 109-118.
- [35] BESIL N, PÉREZ-PARADA A, BOLOGNA F, et al. Dissipation of selected insecticides and fungicides applied during pre-harvest on mandarin and orange trees in Uruguay [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 248: 34-40.
- [36] GUO M, SUN H, WANG X, et al. Residue behavior and risk assessment of afidopyropen and its metabolite M440I007 in tea [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134413.
- [37] 陈峰, 胡进锋, 王俊, 等. 烯啶虫胺和啮虫酰胺在茶叶和土壤中的残留动态及风险评估[J]. 福建农业学报, 2020, 35(3): 317-322.
- [38] 谭琳, 谭济才, 文国华. 八氯二丙醚在不同茶树品种上的残留消解研究[J]. 湖北农业科学, 2008, 47(12): 1499-1501.
- [39] GAO G, CHEN H, LIU P, et al. Residue pattern of polycyclic aromatic hydrocarbons during green tea manufacturing and their transfer rates during tea brewing [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2017, 34(6): 990-999.
- [40] PAN R, CHEN H, WANG C, et al. Enantioselective dissipation of acephate and its metabolite, methamidophos, during tea cultivation, manufacturing, and infusion [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(4): 1300-1308.
- [41] REIGOSA M, PAN R, CHEN H-P, et al. Dissipation pattern, processing factors, and safety evaluation for dimethoate and its metabolite (Omethoate) in tea (*Camellia Sinensis*) [J]. PLoS ONE, 2015, 10(9): 138309.
- [42] WANG X, ZHANG X, WANG Z, et al. Dissipation behavior and risk assessment of tolfenpyrad from tea bushes to consuming [J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150771.
- [43] LI H, ZHONG Q, WANG M, et al. Residue degradation, transfer and risk assessment of pyriproxyfen and its metabolites from tea garden to cup by ultra performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(10): 3983-3993.
- [44] WANG Z, LUO F, GUO M, et al. The metabolism and dissipation behavior of tolfenpyrad in tea: A comprehensive risk assessment from field to cup [J]. Science of the Total Environment, 2023, 877: 162876.