ODOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260114005
引用格式: 王佳蕙, 戚超, 徐永升, 等. 市售茶叶农药残留风险分布特征与茶类差异研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 49–57.
Wang Jiahui, Qi Chao, Xu Yongsheng, et al. Distribution characteristics of pesticide residue risks and differences among tea types in commercial tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 49–57. (in Chinese with English abstract).

市售茶叶农药残留风险分布特征与茶类差异研究

王佳蕙[1], 戚　超[2], 徐永升[2], 谭新东[1], 孟　慧[1], 刘少群[1*]

(1. 华南农业大学园艺学院, 广州　510642; 2. 深圳中检联茶叶检测有限公司, 深圳　518100)

摘　要: 目的　评估市售茶叶农药残留水平及其分布特征。**方法**　本研究依据 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》与 GB 2763.1—2022《食品安全国家标准 食品中 2,4-滴丁酸钠盐等 112 种农药最大残留限量》, 对随机采集的 132 份市售样品中 73 种农药残留进行检测分析, 并通过加标回收实验等质控措施保证数据准确性。**结果**　样品总体合格率为 99.24%, 仅 1 份乌龙茶中氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯残留超出限量; 农药总体检出率为 50.00%, 共检出 18 种农药。其中, 多菌灵(35.61%)、啶虫脒(28.79%)和联苯菊酯(16.67%)构成主要风险组合, 并呈现明显的茶类偏好性。进一步分析发现, 不同茶类间农药残留情况存在较为明显的差别, 乌龙茶(68.42%)与再加工茶(68.18%)的农药检出率及检出农药种类(分别为 11 种和 13 种)均明显高于其他茶类, 为风险相对较高的品类。**结论**　当前市售茶叶质量安全总体可控, 但农药使用较为普遍。仍需重点关注乌龙茶与再加工茶的农药残留风险, 加强对多菌灵等高检出率农药及氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯等禁限用农药的监管, 促进茶叶产业可持续发展。

关键词: 市售茶叶; 农药残留; 茶类差异; 风险评估; 质量安全; 残留分布
中图分类号: TS272.7; S481.8　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)16–0049–09

Distribution characteristics of pesticide residue risks and differences among tea types in commercial tea

WANG Jia-Hui[1], QI Chao[2], XU Yong-Sheng[2], TAN Xin-Dong[1], MENG Hui[1], LIU Shao-Qun[1*]

(1. *College of Horticulture*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*; 2. *Shenzhen Zhongjianlian Tea Testing Co*., *Ltd*., *Shenzhen* 518100, *China*)

ABSTRACT: Objective　To evaluate the pesticide residue levels and their distribution characteristics in commercial tea products. **Methods**　In this study, 73 kinds of pesticide residues were detected and analyzed in 132 randomly collected commercial tea samples, in accordance with the GB 2763—2021 *National food safety standard-Maximum residue limits for pesticides in food* and the GB 2763.1—2022 *National food safety standard-Maximum residue limits for 112 pesticides including sodium 2,4-dichlorophenoxyacetate*. Quality control measures such as spiked recovery experiments were adopted to ensure data accuracy. **Results**　The overall qualified rate of the samples was 99.24%, with only one oolong tea sample exceeding the maximum residue limits for fenvalerate and *S*-fenvalerate. The total pesticide

收稿日期: 2026-01-14
第一作者: 王佳蕙(2003—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为茶叶质量安全。E-mail: 415904626@qq.com
***通信作者:** 刘少群(1974—), 男, 研究员, 主要研究方向为茶叶质量检测与安全。E-mail: scauok@scau.edu.cn

detection rate was 50.00%, and 18 kinds of pesticides were detected in total. Among them, carbendazim (35.61%), acetamiprid (28.79%) and bifenthrin (16.67%) constituted the main risk combination, showing obvious tea-type preference. Further analysis revealed significant differences in pesticide residues among different tea categories. Oolong tea (68.42%) and reprocessed tea (68.18%) exhibited significantly higher pesticide detection rates and more detected pesticide species (11 kinds and 13 kinds, respectively) than other tea types, representing relatively high-risk categories. **Conclusion** The quality and safety of commercially available tea are generally controllable at present, but pesticide application is relatively common. It is still necessary to focus on the pesticide residue risks of oolong tea and reprocessed tea, strengthen the supervision of pesticides with high detection rates such as carbendazim, as well as restricted and banned pesticides like fenvalerate and *S*-fenvalerate, so as to promote the sustainable development of the tea industry.

KEY WORDS: commercial tea; pesticide residues; tea type differences; risk assessment; quality and safety; residue distribution

0 引 言

茶叶作为我国重要的传统农产品，其质量安全直接关系消费者健康与产业可持续发展。在茶园种植管理过程中，化学农药的合理施用是防控病虫害、保障茶树产量与品质、提升经济效益的重要手段[1]。但同时也可能导致茶青中残留多种农药，其残留水平在加工及存储过程中可能发生波动，对消费者健康构成潜在风险[2−4]。近年来，随着公众食品安全意识的提升，茶叶农药残留问题已成为社会关注焦点，其潜在健康风险直接影响茶叶市场消费信心[5−7]。

目前，我国市场监管部门已持续加大对茶叶产品的抽检力度并取得积极成效，国家及地方监测数据显示[8−11]，茶叶抽检合格率总体维持在较高水平。已有研究表明，不同茶类的生产方式与市场导向共同影响农药的使用频率及种类偏好，致使联苯菊酯、啶虫脒、吡虫啉、虫螨腈等药剂在成品茶中检出频率较高[12−15]，这与其广谱高效、持效期长、理化性质稳定易残留等特点，以及长期形成的用药惯性密切相关。此外，我国茶类丰富、产区分布广泛，不同茶类因原料特性、栽培模式和加工工艺的差异，其农药残留风险亦呈现明显区别：例如，乌龙茶[16]受特定种植环境与加工工艺影响，再加工茶[17−18]则因原料来源复杂、拼配环节多元，二者均可能导致农药残留的叠加或富集，因而被视为风险相对较高的茶类。

然而，现有监管数据多侧重于总体合格率的统计，对于农药残留的分布规律以及不同茶类间风险差异特征的系统性研究仍相对不足，难以满足茶叶质量安全精准管控的实际需求；尤其对高频残留农药的茶类偏好性及其“农药性质-茶类工艺”适配残留机制阐释不够深入，无法为不同茶类的差异化管控提供充分依据。

基于此，本研究采集 132 份市售茶叶样本，并依据 GB 2763—2021《食品安全国家标准 食品中农药最大残留限量》、GB 2763.1—2022《食品安全国家标准 食品中 2, 4-滴丁酸钠盐等 112 种农药最大残留限量》对 73 项农药残留项目进行了系统检测。通过比较不同茶类、不同农药的残留特征，旨在系统阐明农药残留分布规律与风险差异的核心驱动因素，并重点关注乌龙茶与再加工茶等风险较高的茶类，据此提出针对性的管控建议，为提升茶叶产业质量安全、保障消费者健康及促进行业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

通过商超、品牌专卖店、生产企业及茶叶批发市场等渠道随机采集样品 132 份，其中包括绿茶、红茶、黑茶、乌龙茶、白茶与再加工茶，产地主要来自云南、广东、福建等主要产茶区。

1.2 试剂与仪器

乙腈、甲苯、丙酮、二氯甲烷、正己烷、甲醇、异辛烷、乙酸(色谱纯，上海安谱实验科技股份有限公司)；混合标准品(质量浓度 100 μg/mL，货号 BePure-30719XA，批号 J3022922)(北京兰都凯博生物科技有限公司)；实验用水为市购屈臣氏蒸馏水。

Agilent 1290-6470 液相色谱-串联质谱仪、Agilent GC8890 气相色谱仪、Agilent ZORBAX Eclipse Plus C_{18} 液相色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.8 μm)、Agilent DB-5MS 气相色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(美国安捷伦科技有限公司)；微孔滤膜(有机相，13 mm×0.22 μm)(上海安谱试验科技股份有限公司)；Sigma 2-16 通用离心机(德国 Sigma 公司)；AL204 电子分析天平(精度 0.001 g)、IKA T25 高速匀浆机(德国 IKA 公司)。

1.3 检测指标

检验指标包含杀虫杀螨类农药、杀菌剂类、除草剂类，共计 73 种农药。

其中杀虫杀螨类农药 55 种，包含敌百虫、甲基对硫磷、氯唑磷、水胺硫磷、二溴磷等 22 种有机磷类；甲氰菊酯、氰

戊菊酯、氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯等 9 种拟除虫菊酯类; 噻虫嗪、呋虫胺、啶虫脒等 5 种新烟碱类; 格螨酯、环螨酯、哒螨灵等 9 种杀螨专用剂; 虫螨腈、氟虫脲、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、唑虫酰胺、丁醚脲、茚虫威等 10 种其他类型。

杀菌剂类农药 5 种: 百菌清、多菌灵、啶氧菌酯、吡唑醚菌酯、苯醚甲环唑。

除草剂类农药 13 种: 草甘膦、茅草枯、草铵膦、西玛津、莠去津、氯磺隆、草枯醚、氟除草醚、三氟硝草醚、草芽畏、氯酞酸、抑草蓬、灭草环。

1.4　检测方法及判定依据

73 项农药残留的检测方法及判定依据见表 1, 均以 GB 2763—2021、GB 2763.1—2022 作为判定依据。

1.5　质控方法

本次检测的 132 份样本, 其采样、检测与原始记录保存等均由深圳中检联茶叶检测有限公司严格按照质量管理体系的要求操作, 检测过程中采用每个样品都进行平行性实验, 每 20 个样品进行 1 次加标回收或 1 次带质控样的方式进行质量控制, 加标回收率控制在 80%~120%, 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)≤10%, 确保数据准确性与可靠性[15]。

1.6　指标分析

农药残留检出率与合格率分别按公式(1)和公式(2)计算。

$$农药残留检出率/\%=\frac{农药检出样品数}{样品总数}\times 100\% \quad (1)$$

$$农药残留合格率/\%=\frac{农药残留合格样品数}{样品总数}\times 100\% \quad (2)$$

式中: 农药检出样品数指检出农药的样品数量, 农药残留合格样品数指所有检测项目均符合限量要求的样品数量。

表 1　农药残留检测方法及判定依据

Table 1　Detection methods and judgment basis for pesticide residues

序号	检验项目	检验方法	判定依据
1	草甘膦	SN/T 1923—2007《进出口食品中草甘膦残留量的检测方法 液相色谱-质谱/质谱法》	GB 2763—2021 GB 2763.1—2022
2	草枯醚、草芽畏、氯酞酸、格螨酯、氟除草醚、烯虫炔酯、烯虫乙酯、环螨酯	SAG-FSL-TI-050《实验室内部自建检测方法》	
3	敌百虫、百菌清、甲基异柳磷	NY/T 761—2008《蔬菜和水果中有机磷、有机氯、拟除虫菊酯和氨基甲酸酯类农药多残留的测定》	
4	滴滴涕、六六六、硫丹	GB/T 5009.19—2008《食品中有机氯农药多组分残留量的测定》	
5	甲氰菊酯、噻嗪酮	GB/T 23376—2009《茶叶中农药多残留测定 气相色谱/质谱法》	
6	啶氧菌酯、氰戊菊酯、哒螨灵、氟氰戊菊酯、氯菊酯、氯氰菊酯和高效氯氰菊酯、氟氯氰菊酯和高效氟氯氰菊酯、甲基对硫磷、氯唑磷、水胺硫磷、喹螨醚、虫螨腈、氟虫脲	GB/T 23204—2008《茶叶中 519 种农药及相关化学品残留量的测定 气相色谱-质谱法》	
7	噻虫嗪、呋虫胺	GB/T 20770—2008《粮谷中 486 种农药及相关化学品残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	
8	多菌灵、啶虫脒、杀螟丹、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐、辛硫磷、唑虫酰胺、茅草枯、二溴磷、氯磺隆、庚烯磷	GB/T 20769—2008《食品安全国家标准 水果和蔬菜中 450 种农药及相关化学品残留量的测定 液相色谱-串联质谱法》	
9	噻螨酮、抑草蓬、灭草环、丙酯杀螨醇	GB 23200.8—2016《食品安全国家标准 水果和蔬菜中 500 种农药及相关化学品残留量的测定 气相色谱-质谱法》	
10	氧乐果、硫环磷、灭线磷、吡蚜酮、丁醚脲、甲萘威、醚菊酯、内吸磷、噻虫啉、茚虫威、吡唑醚菌酯、丁硫克百威、烯啶虫胺	GB 23200.13—2016《茶叶中 448 种农药及相关化学品残留量的测定 液相色谱-质谱法》	
11	乙酰甲胺磷、苯醚甲环唑、毒死蜱、丙溴磷、甲胺磷、甲拌磷、氯氟氰菊酯和高效氯氟氰菊酯、氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯、三氯杀螨醇、特丁硫磷、西玛津、乙螨唑、莠去津、乙酯杀螨醇、速灭磷、杀扑磷、杀虫畏、氯苯甲醚、甲氧滴滴涕、三氟硝草醚、乐果、克百威、灭多威、草铵膦	GB 23200.113—2018《食品安全国家标准 植物源性食品中 208 种农药及其代谢物残留量的测定 气相色谱-质谱联用法》	

1.7 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 与 GraphPad Prism 10.0.0 进行数据统计, 实验设置 3 次生物学重复, 分析不同茶类、不同农药种类的残留特征及差异。

2 结果与分析

2.1 茶叶农药残留总体状况

对收集的 132 个茶样中农药残留进行检验, 依据 GB 2763—2021 判定结果显示: 66 份样品检出农药残留, 总检出率为 50.00%; 合格样品 131 份, 总合格率 99.24%。表明当前市售茶叶质量安全总体可控, 但化学农药在生产中的应用仍较为普遍, 残留风险客观存在。

如表 2 所示, 本次检验的 132 份茶叶样品中, 共检出农药残留项目 18 个, 其中杀菌剂类 2 个, 杀虫杀螨类 15 个, 除草剂类 1 个。各农药检出率依次为: 杀菌剂类检出率(37.12%)>杀虫杀螨类(36.36%)>除草剂类(3.03%)。其中杀菌剂类以多菌灵、吡唑醚菌酯为主要检出品种; 杀虫杀螨类以啶虫脒、联苯菊酯等为高频检出农药; 除草剂类则仅检出草甘膦, 且检出率明显低于前两类农药, 这一特征反映出茶园农药使用主要以病虫害防控为主。

表 2 不同类别农药残留检出特征

Table 2 Characteristics of pesticide residue detection in different categories

农药种类	检验数/份	检出数/份	检出农药残留项目/个	检出率/%	主要检出农药
杀菌剂类	132	49	2	37.12	多菌灵、吡唑醚菌酯
杀虫杀螨类	132	48	15	36.36	啶虫脒、联苯菊酯、唑虫酰胺、噻虫啉、呋虫胺
除草剂类	132	4	1	3.03	草甘膦

2.2 不同茶类农药残留检出情况

不同茶类的农药残留检出率存在明显的差异。由表 3 数据可知, 乌龙茶(68.42%)与再加工茶(68.18%)的检出率相对最高, 依次高于白茶(56.25%)、红茶(52.94%)、绿茶(35.71%), 黑茶检出率最低(34.09%), 整体残留风险处于可控水平。

此外, 不同茶类检出的农药种类也呈现明显的差异, 具体依次为: 再加工茶(13 种)>乌龙茶(11 种)>红茶(10 种)>黑茶(8 种)>白茶(5 种)>绿茶(2 种)。

结合图 1 进一步分析不同茶类的残留特征: 相较于传统茶类, 再加工茶的农药检出种类与高频检出农药(检出率大于等于 15%)数量最多, 其中多菌灵、啶虫脒检出率达 100.00%, 复合残留风险相对突出; 乌龙茶的农药检出种类与检出率在传统茶类中最高, 其中联苯菊酯、氯戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯等脂溶性农药的检出尤为突出, 同时是本次检测中唯一存在不合格情况的茶类; 红茶与白茶的检出率及检出种类均处于中等水平, 且高频残留农药重合度较高, 核心残留集中于多菌灵、联苯菊酯与啶虫脒, 其中白茶多菌灵检出率达 100%, 红茶啶虫脒检出率达 77.78%; 黑茶与绿茶的残留风险相对较低, 二者检出率与检出种类均处于较低水平, 其核心残留多菌灵、啶虫脒是本次检测中风险最大的农药组合, 同时绿茶未检出联苯菊酯等脂溶性农药。

2.3 不同品种农药残留与风险评估

2.3.1 农药检出率与茶类分布特征

如图 2 所示, 18 种检出农药中, 多菌灵检出率最高(35.61%), 啶虫脒(28.79%)与联苯菊酯(16.67%)次之, 3 者构成检出频率最高的核心风险组合。这一结果与我国茶园农药应用现状高度吻合: 多菌灵、啶虫脒、联苯菊酯分别为杀菌剂、新烟碱类杀虫剂、拟除虫菊酯类杀虫剂的代表性品种, 因防控针对性强、适用场景广, 是茶园病虫害综合防治的常用药剂。

表 3 不同茶类的农药残留检出率与合格率对比

Table 3 Comparison of pesticide residue detection rate and pass rate among different tea types

茶类样品	样品数/份	检出样品数/份	检出率/%	合格数/份	检测合格率/%
乌龙茶	19	13	68.42	18	94.74
再加工茶	22	15	68.18	22	100.00
白茶	16	9	56.25	16	100.00
红茶	17	9	52.94	17	100.00
绿茶	14	5	35.71	14	100.00
黑茶	44	15	34.09	44	100.00
总体	132	66	50.00	131	99.24

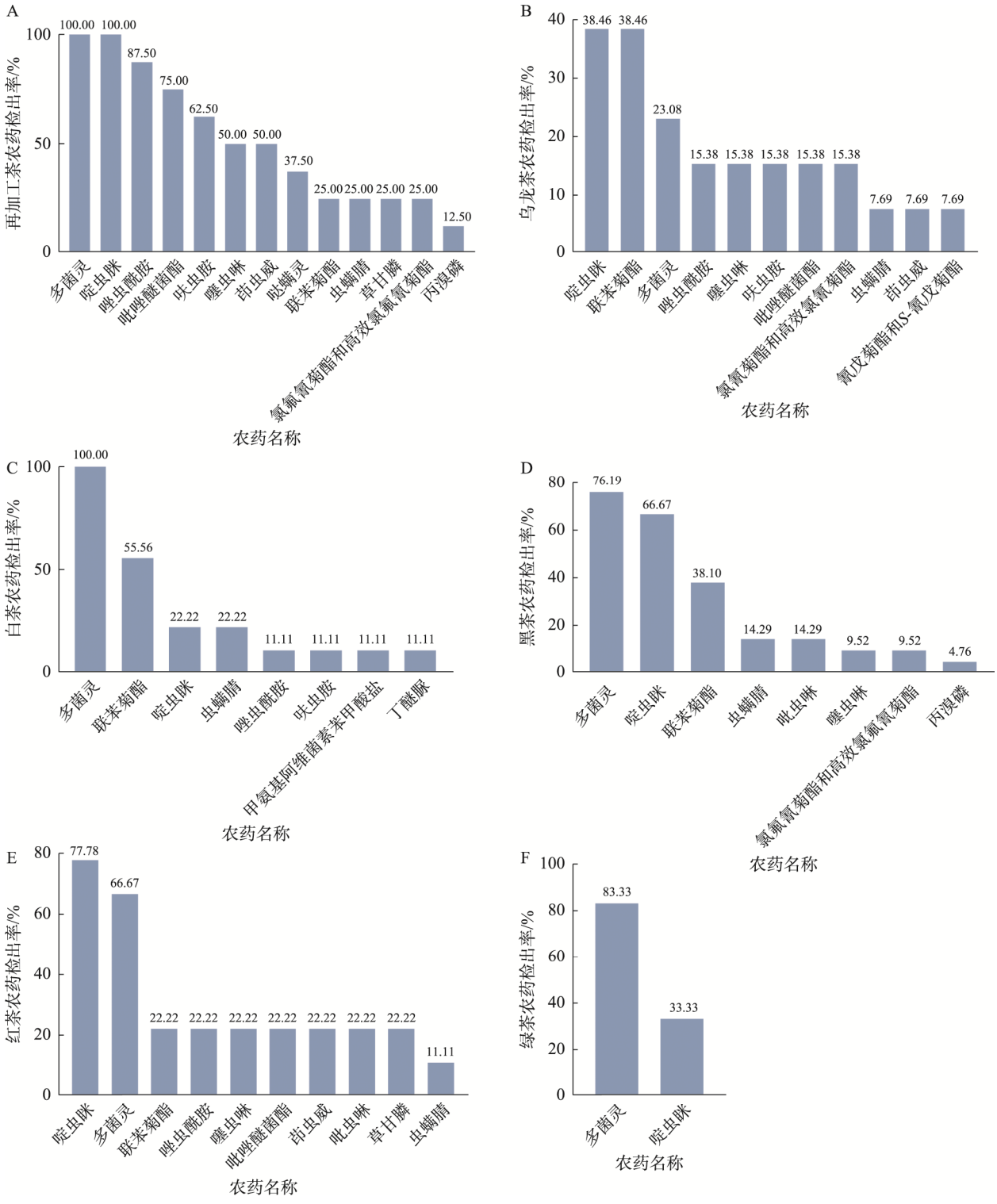


图 1　不同茶类农药残留状况

Fig.1　Pesticide residue profiles across different tea types

不同农药在各类茶叶中的分布呈现明显的茶类偏好性，多菌灵在所有茶类中均有检出，其中白茶与再加工茶检出率达 100%，绿茶(83.33%)、黑茶(76.19%)检出率较高，而在乌龙茶中检出率较低(23.08%)；啶虫脒在所有茶类中均有检出，整体检出率低于多菌灵，以再加工茶(100.00%)、红茶(77.78%)、黑茶(66.67%)检出率较高，是

防治刺吸式口器害虫的常用药剂；联苯菊酯在白茶(55.56%)、乌龙茶(38.46%)、黑茶(38.10%)、再加工茶(25.00%)及红茶(22.22%)中均有检出，总体检出频率较低。然而在绿茶中未检出，显示出明显的茶类分布差异。

2.3.2 高频农药残留水平与合规性评价

为进一步评估农药残留的风险水平，选取检出率较高(≥9%)及不符合最大残留限量(maximum residue level, MRL)的农药(多菌灵、啶虫脒、联苯菊酯、唑虫酰胺、氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯)，结合表 4 分析其残留特征与合规性。

研究发现，这些高频农药在再加工茶、乌龙茶、黑茶中检出数值也较高，且呈现出与茶类相关的特异性：(1)多菌灵和啶虫脒的高检出率与相对较高的检出值，残留范围分别为 0.000223~0.235000 mg/kg、0.000759~0.034200 mg/kg，均符合限量要求，且在再加工茶、乌龙茶中的检出值相对较高，这与其典型的“内吸性”密切相关；(2)联苯菊酯等拟除虫菊酯类农药作为“脂溶性物质”，其残留范围为 0.053000~0.34000 mg/kg，符合限量要求，在乌龙茶中的残留值较高(为 0.065000~0.340000 mg/kg)；(3)氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯为本研究检测中唯一不符合 MRL 的农药品类，该物质在茶叶中属禁用农药，不应被使用，但仍在乌龙茶中被检出(残留值 0.45 mg/kg，超标 4.5 倍)，构成核心安全隐患。

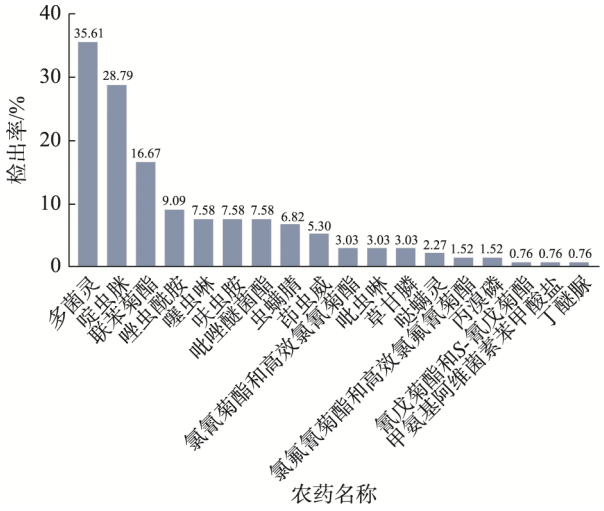


图 2 农药残留总检出率

Fig.2 Total detection rate of pesticide residues

表 4 高频检出及超标农药残留量分布与合规性评价(mg/kg)

Table 4 Distribution and compliance evaluation of high-frequency detected and excessive pesticide residues (mg/kg)

农药类型	检验项目	限量要求	整体残留范围	主要茶类检出值(残留值最高的前 2 类茶)	MRL 合规性
杀菌剂类	多菌灵	≤5	0.000223~0.235000	再加工茶(0.001120~0.235000)、乌龙茶(0.000482~0.024100)	符合
杀虫杀螨类	啶虫脒	≤10	0.000759~0.034200	乌龙茶(0.002560~0.034200)、再加工茶(0.002040~0.026000)	符合
	联苯菊酯	≤5	0.053000~0.340000	乌龙茶(0.065000~0.340000)、黑茶(0.053000~0.220000)	符合
	唑虫酰胺	≤50	0.016600~0.374000	再加工茶(0.016600~0.374000)、乌龙茶(0.042700~0.191000)	符合
	氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯	≤0.1	0.450000*	乌龙茶(0.450000*)	不符合

注：*表示农药残留检测不合格；除氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯外，其余农药皆符合 GB 2763—2021。

3 讨论与结论

市售茶叶质量安全状况总体可控，但农药残留检出率较高，化学农药的使用仍较为普遍。乌龙茶与再加工茶的农药检出率及检出农药种类显著高于其他茶类，构成重点风险品类。多菌灵、啶虫脒和联苯菊酯为高频检出农药，呈现明显的茶类偏好性。唯一超标项为乌龙茶中的氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯(超标 4.5 倍)，禁限用农药的违规使用是当前茶叶质量安全的主要风险源。

3.1 茶类残留差异的核心驱动机制

基于前述结果中不同茶类农药残留检出率的明显差异，其核心机制在于茶类自身特性、加工工艺与农药理化性质 3 者的协同作用。这一结论在既有研究中已得到证实，本研究将进一步细化：不仅验证揭示了乌龙茶与再加工茶高残留风险的普遍认知与差异化驱动机制，更厘清了不同茶类残留分布规律。

再加工茶的高残留风险与袁玉伟[18]、孙荷芝等[19]证实的“农药在窨制过程中从鲜花向茶坯转移”的现象相符，而多原料、多产地的拼配工艺可能使不同来源茶叶的农药残留发生迁移与叠加。此外，加工环节缺乏统一质控标准，进一步增加了残留富集的可能性，从而易形成再加工茶的复合残留风险。

乌龙茶中农药残留风险较高，这与陈宗懋[20]提出的“叶片吸附累积”特性相吻合。这主要源于两方面：(1)其叶

片具有蜡质层厚、角质化程度高的结构特性; (2)乌龙茶常采用“开面采”的采摘标准(多为一芽三、四叶), 此类成熟叶片更易于吸附和累积农药残留。

黑茶中较低的农药残留水平, 推测与以下两方面因素相关: (1)高温高湿的加工环境促进了部分挥发性农药物理散失[21]; (2)发酵体系中的优势菌群(如酵母菌、黑曲霉)通过分泌胞外酶对农药分子产生生物降解[22]。从而使成品茶中的农药残留得到明显控制。

绿茶与白茶的农药低残留特征, 推测与其市场定位、原料特性及加工工艺密切相关: 较高的市场价值激励生产者采取更精细的茶园管理与生态养护, 从源头控制农药使用; 其次, 绿茶嫩梢原料的生长稀释作用在一定程度上降低了鲜叶的农药初始沉积[23]; 此外, 相对简单的加工工艺(绿茶: 杀青-干燥/白茶: 萎凋-干燥), 减少了加工环节, 进一步降低了农药残留富集的风险。

3.2　高频风险农药的残留特性与适配性

多菌灵、啶虫脒、联苯菊酯 3 者构成当前检出频率最高的核心风险农药组合, 其残留分布呈现明显的茶类偏好性。本研究认为, 这一分布特征本质上是各类农药自身的核心理化性质、茶园实际防控需求与不同茶类特定原料及工艺 3 者相互适配的结果。

3.2.1　内吸性农药的残留特性

多菌灵[24]与啶虫脒[25]属于内吸性农药, 可通过叶面或根系吸收并在茶树体内传导, 因此常规加工工艺难以将其彻底去除, 在茶叶中检出较为普遍。由于该类农药在茶叶中分布相对均匀而非富集于表面, 故而残留量通常处于可控范围, 但其持久性与系统性残留仍需引起重视。

多菌灵的分布高度集中于白茶与再加工茶, 而在乌龙茶中检出率较低。推测这一特征与其“广谱杀菌、持效期长”的特性相关[24,26]: 白茶与再加工茶的原料、生产环节可能更依赖此类杀菌剂进行病害防控与原料保鲜, 而乌龙茶产区病虫害以小绿叶蝉等虫害为主, 客观上降低了杀菌剂的施用频率[27], 从而导致成品中多菌灵残留水平的茶类差异;

啶虫脒的分布高度集中于再加工茶, 在红茶与黑茶中亦有较高检出。推测这一特征与其内吸性强及特定的防治对象相关：作为主要针对半翅目刺吸式口器害虫（如小绿叶蝉、蚜虫）的杀虫剂[28–29], 啶虫脒的应用范围具有一定的选择性。同时, 啶虫脒内吸传导性强于多菌灵, 这是源于二者在迁移行为上的差异(前者被吸收后转移至未施药的嫩梢部位, 因而田间实际施药频次相对较低[30]; 而后者则主要沉积于喷药部位, 常需多次施用以维持防效[31]), 从而导致啶虫脒在成品茶中的整体检出率低于广谱性杀菌剂多菌灵。

3.2.2　脂溶性农药的的残留特性

联苯菊酯在白茶、黑茶、乌龙茶和红茶中均有检出, 但整体频率不高, 推测与其“非内吸性、半衰期短、易于降解”的特性相关[32–33], 因而在实际防治中的使用优先级低于啶虫脒等高效内吸型药剂。在乌龙茶中, 联苯菊酯的整体检出值较高, 推测是其强脂溶性与乌龙茶原料[34](叶片蜡质层较厚, 富含脂溶性物质)以及加工工艺(摇青破坏细胞结构, 促进农药内迁与结合)共同作用的结果。相比之下, 联苯菊酯在绿茶中未检出, 这一差异可能与其在不同茶类中的残留行为相关-吴光远等[35]研究表明联苯菊酯在绿茶上的平均残留半衰期远低于乌龙茶, 且绿茶原料的生长稀释效应更高[23], 可能导致其在成品中不易达到检出水平。

未来的监管应重点关注这些高检出率农药的规范使用, 依据上述“性质-工艺-残留”的适配关系, 实施精准化管控。同时, 引导茶园科学用药, 推广建立以农业、物理和生物防治为核心的绿色防控体系。

3.3　超标风险的成因与防控重点

本研究检测出唯一不符合 MRL 的农药为乌龙茶中的氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯(超标 4.5 倍), 与任春凤等[36]在闽南乌龙茶中检测到同类农药超标的现象一致, 共同揭示了部分产区在拟除虫菊酯使用中存在施药剂量偏高、安全间隔期执行不严的共性问题。该类农药脂溶性强、不易降解, 易在茶叶中累积超标, 从而对消费者的神经系统造成潜在危害[37–38], 属于茶园禁用农药。这提示未来监管工作应从“全面筛查”转向“产区用药行为靶向管控”, 同时强化茶产区此类违禁农药施用剂量与安全间隔期的监管。

值得关注的是再加工茶的潜在风险, 虽然未出现超标情况, 但 100%的多菌灵、啶虫脒检出率意味着其残留叠加风险相对较高。因此未来不仅关注单一农药是否超标, 更需重视复合暴露的累积效应, 并推动建立完善的原料溯源体系与加工环节统一质控标准。

基于以上研究, 建议未来监管工作应重点关注乌龙茶与再加工茶, 实施针对性的重点监控; 加强对多菌灵、啶虫脒、联苯菊酯等高检出率农药的规范使用指导, 推广科学用药方案; 严格监管氰戊菊酯和 *S*-氰戊菊酯等禁限用农药的施用, 加强安全用药宣传与培训。本研究基于有限样本揭示了风险分布特征, 未来可进一步扩大样本量, 并结合茶园种植实际, 深入探究农药残留的迁移转化规律, 为茶叶全产业链质量安全管控提供更精准的理论支持。

参考文献

[1] 朱翔, 戴智杰, 苏时鹏, 等. 福建典型茶区农户茶园生态化管理行为研究[J]. 资源开发与市场, 2023, 39(2): 148–155.
Zhu Xiang, Dai Zhijie, Su Shipeng, et al. Study on farmers' behaviors of ecological management of tea gardens in typical tea areas of Fujian Province [J]. Resource Development & Market, 2023, 39(2): 148–155.

[2] Wang Min, Ning Yating, Hu Yue, et al. Residue degradation and risk assessment of difenoconazole and its metabolite during tea growing,

processing and brewing by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry determination [J]. Foods, 2024, 13(7): 1123.

[3] 吴庆勇, 金鹏, 李红. 食品中有机氯农药残留超标危害与检测技术[J]. 食品安全导刊, 2023(17): 180–182.
Wu Qingyong, Jin Peng, Li Hong. Harm and detection technology of excessive organochlorine pesticide residues in food [J]. Journal of Food Safety Guide, 2023(17): 180–182.

[4] Petrović S, Leskovac A. Biopesticides and human health risks: a critical review [J]. Toxics, 2026, 14(3): 246.

[5] Shekhar C, Khosya R, Thakur K, et al. A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts [J]. Toxicology Reports, 2024, 13: 101840.

[6] 李颖. 26 款知名茶叶农残检测 12 款含禁用农药[J]. 中国质量万里行, 2016(11): 60–62.
Li Ying. 26 well-known tea pesticide residues were detected, and 12 of them contained banned pesticides [J]. China Quality Tours, 2016(11): 60–62.

[7] Chen Meiying, Huang Shouxian, Huang Guoxing, et al. Food safety governance information tool design in trust crisis-Analysis based on consumer trust perspective [J]. Heliyon, 2023, 9(5): e15866.

[8] 中国茶叶流通协会. 农业农村部发布上半年茶叶抽检合格率, 为 97.8%[J]. 茶业通报, 2018, 40(3): 109.
China Tea Marketing Association. The Ministry of Agriculture and Rural Affairs announced that the qualified rate of tea sampling in the first half of the year was 97.8% [J]. Journal of Tea Business, 2018, 40(3): 109.

[9] 党亚锋, 李婷, 孟怡璠, 等. 2018—2020 年陕西省汉中市茶叶产品质量安全分析[J]. 食品安全导刊, 2021(16): 28–31.
Dang Yafeng, Li Ting, Meng Yifan, et al. Analysis on quality and safety of tea products in Hanzhong City of Shaanxi Province from 2018 to 2020 [J]. Journal of Food Safety Guide, 2021(16): 28–31.

[10] 张印法, 刘婕, 刘静, 等. 河北省市售代用茶质量安全抽检结果分析[J]. 中国食品卫生杂志, 2023, 35(4): 555–558.
Zhang Yinfa, Liu Jie, Liu Jing, et al. Analysis on sampling inspection results of quality and safety of tea substitutes commercially available in Hebei Province [J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2023, 35(4): 555–558.

[11] 王微, 胡毅, 刘文锋. 2021—2023 年黔东南州茶叶农药残留情况及风险分析[J]. 茶叶学报, 2024, 65(4): 79–84.
Wang Wei, Hu Yi, Liu Wenfeng. Status and risk assessment on pesticide residues in teas of Qiandongnan prefecture, 2021—2023 [J]. Tea Science and Technology, 2024, 65(4): 79–84.

[12] Nimako C, Hirai A, Ichise T, et al. Neonicotinoid residues in commercial Japanese tea leaves produced by organic and conventional farming methods [J]. Toxicology Reports, 2021, 8: 1657–1664.

[13] 胡汉亮, 吴清莲, 张婧婧, 等. 福建省市售普洱茶中 71 种农药残留检测与分析[J]. 热带农业科学, 2024, 44(7): 86–93.
Hu Hanliang, Wu Qinglian, Zhang Jingjing, et al. Detection and analysis of 71 pesticide residues in Pu'er tea in Fujian Province [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2024, 44(7): 86–93.

[14] 雷凯, 王建国, 范赛, 等. 2024 年北京市通州区市售茶叶中农药残留调查与分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 64–71.
Lei Kai, Wang Jianguo, Fan Sai, et al. Investigation and analysis of pesticide residues in tea in Tongzhou District of Beijing in 2024 [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 64–71.

[15] 李明晖, 林丽容, 杨艳云, 等. 市售白茶中 50 种农药残留检测与分析[J]. 现代食品, 2023, 29(3): 160–164.
Li Minghui, Lin Lirong, Yang Yanyun, et al. Detection and analysis of 50 pesticide residues in commercial white tea [J]. Modern Food, 2023, 29(3): 160–164.

[16] 林金科, 李秀峰, 涂良剑, 等. 乌龙茶农药残留在加工过程中的降解[J]. 中国农学通报, 2007, 23(12): 113–117.
Lin Jinke, Li Xiufeng, Tu Liangjian, et al. The degradation of pesticide residue during oolong tea processing [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(12): 113–117.

[17] 戴中洋. 4 种拟除虫菊酯类杀虫剂在茉莉花上的消解转移规律以及膳食风险评估[D]. 长春: 吉林农业大学, 2024: 1–53.
Dai Zhongyang. Dissipation and transfer rule of four pyrethroid insecticides on jasmine and corresponding dietary risk assessment [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024: 1–53.

[18] 袁玉伟. 茉莉花茶窨制过程中农药残留的转移及其影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2002:1 27.
Yuan Yuwei. Study on the pesticide residue transferring from jasmine to tea-base and factors interrelated during scenting processes [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2002:1 27.

[19] 孙荷芝, 戴中洋, 马进森, 等. 苯醚甲环唑在茉莉花茶上的转移行为和摄入风险[J]. 食品科学, 2025, 46(7): 303–308.
Sun Hezhi, Dai Zhongyang, Ma Jinsen, et al. Transfer behavior of and dietary exposure risk to difenoconazole in jasmine scented tea [J]. Food Science, 2025, 46(7): 303–308.

[20] 陈宗懋. 乌龙茶和花茶中的农药残留问题[J]. 福建茶叶, 2000, 22(4): 2–4.
Chen Zongmao. Pesticide residues in oolong tea and scented tea [J]. Tea in Fujian, 2000, 22(4): 2–4.

[21] Petersen J H, Jensen K G. Pesticide residues in black tea [J]. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung, 1986, 182(6): 489–491.

[22] Chau S L, Zhao Aihua, Jia Wei, et al. Simultaneous determination of pesticide residues and mycotoxins in storage Pu-erh tea using ultra-high-performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry [J]. Molecules, 2023, 28(19): 6883.

[23] 夏会龙, 王运浩, 万海滨, 等. 茶树生长稀释在农药降解中的定量[J]. 茶叶科学, 1992, 12(1): 1–6.
Xia Huilong, Wang Yunhao, Wan Haibin, et al. Quantum of growth dilution by tea shoots in the degradation of pesticides on tea plant [J]. Journal of Tea Science, 1992, 12(1): 1–6.

[24] 严霞, 胡聪聪, 杨智远, 等. 基于 Au@4-ATP@Au 凸多面纳米颗粒的多菌灵表面增强拉曼散射检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(7): 1843–1851.
Yan Xia, Hu Congcong, Yang Zhiyuan, et al. SERS detection of carbendazim based on convex polyhedrons shaped Au@4-ATP@Au nanoparticle [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(7): 1843–1851.

[25] 王迪轩. 内吸性低毒杀虫剂啶虫脒[J]. 农业知识, 2019(14): 21–22.
Wang Dixuan. Acetamiprid, a systemic low toxic pesticide [J]. Agricultural Knowledge, 2019(14): 21–22.

[26] 王崇仁. 广谱杀菌剂: 多菌灵[J]. 新农业, 1982(5): 15–16.
Wang Chongren. Broad-spectrum bactericide-carbendazim [J]. New Agriculture, 1982(5): 15–16.

[27] Rongrong Zheng, Yanli Ma, Luxing Liu, et al. Synergistic improvement of production, economic return and sustainability in the tea industry through

ecological pest management [J]. Horticulturae, 2022, 8(12): 1155.

[28] 范雯雯, 肖灿, 刘海军, 等. 新烟碱类农药在植物系统中的迁移转化行为及生物学效应研究进展[J]. 农药学学报, 2026, 28(2): 197-215.
Fan Wenwen, Xiao Can, Liu Haijun, et al. Research progress on translocation, transformation, and biological effects of neonicotinoid pesticides in plant systems [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2026, 28(2): 197-215.

[29] Krishna M S, Reddy D Y R. Comparative efficacy of novel insecticide molecules against sucking pests in cotton [J]. Journal of Entomology and Zoology Studies, 2020, 8(5): 2288–2292.

[30] 徐元元, 沈敏东, 魏亦寒, 等. 新型杀虫剂对扶桑绵粉蚧的田间药效试验[J]. 林业世界, 2017(4): 89–93.
Xu Yuanyuan, Shen Mindong, Wei Yihan, et al. Field experiment on *Phenacoccus solenopsis* tinsley by new insecticides [J]. World Journal of Forestry, 2017(4): 89–93.

[31] 丁中, 刘峰, 慕立义. 应用电导仪测定番茄灰霉病菌对多菌灵抗药性的初步研究[J]. 农药学学报, 2003, 5(3): 94–96.
Ding Zhong, Liu Feng, Mu Liyi. A preliminary study on detecting resistance of *Botrytis cinerea* to carbendazim with conductometer [J]. Chinese Journal of Pesticide Science, 2003, 5(3): 94–96.

[32] Wang Tiancai, Qian Yongzhong, Wang Jieqiong, 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.

[33] Wang Peiying, Galhardi J A, Liu Lan, et al. Development of an LC-MS-based method to study the fate of nanoencapsulated pesticides in soils and strawberry plant [J]. Talanta, 2022, 239: 123093.

[34] Ng K W, Cao Zijun, Chen Hubiao, et al. Oolong tea: a critical review of processing methods, chemical composition, health effects, and risk [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 58(17): 2957–2980.

[35] 吴光远, 曾明森, 夏会龙, 等. 联苯菊酯茶园残留与使用安全性[J]. 福建农业学报, 2013, 28(4): 366–371.
Wu Guangyuan, Zeng Mingsen, Xia Huilong, et al. Security analysis of residual bifenthrin in tea plantation [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2013, 28(4): 366–371.

[36] 任春凤. 茶叶中农药残留的检测及调查分析[J]. 广州化工, 2022, 50(21): 158–164.
Ren Chunfeng. Study on detection of pesticides residue and metal pollutant in tea [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2022, 50(21): 158–164.

[37] Côté J, Bouchard M. Toxicokinetic model of the pyrethroid pesticide lambda-cyhalothrin, main exposure route and dose reconstruction predictions in agricultural workers [J]. PLoS One, 2024, 19(10): e0309803.

[38] 闫海燕. 氰戊菊酯对鲤抗氧化系统及组织毒理学影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011: 1–42.
Yan Haiyan. The study on the effect of fenvalerate on the antioxidant defense system and histopathology in carp [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011: 1–42.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)