环境昆虫学报　2025，47（5）：1670-1678
Journal of Environmental Entomology
http://hjkcxb.alljournals.net
doi:10.3969/j.issn.1674-0858.2025.05.31

徐玉辉，董建豪，夏国益，毛根林，路伟．茶皂素混配川楝素和印楝素对斜纹夜蛾拒食活性的增效作用［J］．环境昆虫学报，2025，47（5）：1670-1678．XU Yu-Hui, DONG Jian-Hao, XIA Guo-Yi, MAO Gen-Lin, LU Wei. Synergistic effect of tea saponin combined with toosendanin and azadirachtin on the antifeeding activity against *Spodoptera litura*［J］. *Journal of Environmental Entomology*，2025，47（5）：1670-1678.

茶皂素混配川楝素和印楝素对斜纹夜蛾拒食活性的增效作用

徐玉辉[1,2]，董建豪[1]，夏国益[1]，毛根林[2*]，路　伟[1,3*]
（1. 新疆农业大学农学院，棉花教育部工程研究中心，新疆维吾尔自治区高校农林有害生物监测与安全防控重点实验室，乌鲁木齐 830052；2. 广东省农业科学院果树研究所，农业农村部南亚热带果树生物学与遗传资源利用重点实验室，广东省热带亚热带果树研究重点实验室，广州 510640；3. 中国农业科学院西部农业研究中心，新疆昌吉 831100）

摘要： 为了研究茶皂素混配川楝素和印楝素2种植物源杀虫剂对斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* 拒食活性的增效作用，本试验采用叶片浸渍法测定了茶皂素、川楝素、印楝素以及茶皂素+川楝素和茶皂素+印楝素混配对斜纹夜蛾3龄幼虫的拒食率以及增效比。通过盆栽药效试验测定3种单剂及混配的茶皂素+川楝素、茶皂素+印楝素涂抹菜心叶片后，不同处理时间下斜纹夜蛾的拒食率变化。结果表明：茶皂素、川楝素、印楝素的拒食中浓度分别为64.02 μg/mL、29.90 μg/mL、3.98 μg/mL。茶皂素+川楝素在9：1~3：7的配比具有增效作用，配比为5：5时为最大增效比1.39，表现为相加作用；茶皂素+印楝素配比在9：1~1：9均具有增效作用，配比为8：2时增效比最大为1.87，表现为增效作用。茶皂素+川楝素（5：5）的最高拒食率是茶皂素的2.05倍，川楝素的1.21倍；茶皂素+印楝素（8：2）的最高拒食率是茶皂素的2.47倍。综上结果表明：茶皂素混配川楝素和印楝素后对两种植物源农药防治斜纹夜蛾具有增效作用，可为科学防控斜纹夜蛾、开发环境友好型增效剂提供科学依据。

关键词： 茶皂素；印楝素；川楝素；斜纹夜蛾；拒食活性
中图分类号： Q968.1　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1674-0858（2025）05-1670-09

Synergistic effect of tea saponin combined with toosendanin and azadirachtin on the antifeeding activity against *Spodoptera litura*

XU Yu-Hui[1,2], DONG Jian-Hao[1], XIA Guo-Yi[1], MAO Gen-Lin[2*], LU Wei[1,3*]（1. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Engineering Research Centre of Cotton, Ministry of Education, Key Laboratory of the Pest Monitoring and Safety Control of Crops and Forests of the Universities of the Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830052, China; 2. Institute of Pomology, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Biology and Utilization of Tropical Fruit Trees in South Asia, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Tropical and Subtropical Fruit Tree Research of Guangdong Province, Guangzhou 510640, China; 3. Western Agricultural Research Center of the Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changji 831100, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China）

Abstract: In order to study the synergistic effect of tea saponin mixed with toosendanin and azadirachtin (two plant-derived insecticides) on the antifeeding activity against *Spodoptera litura*, this experiment used leaf immersion method to determine the antifeeding rate and synergistic ratio of tea saponin, toosendanin,

基金项目：国家自然科学基金青年基金（32102225）；新疆维吾尔自治区重点研发专项（2022B02033-1）；新疆维吾尔自治区“天山英才”三农骨干人才计划（2023SNGGGCC032）；新疆农业大学大学生创新创业项目（dxscx2023002）
作者简介：徐玉辉，男，硕士研究生，研究方向为棉花害虫绿色防控，E-mail：1635181866@qq.com
*共同通讯作者 Author for correspondence：路伟，男，副教授，研究方向为棉花害虫绿色防控，E-mail：teerakon@sina.com；毛根林，男，助理研究员，研究方向为果树病虫害综合防控，E-mail：maogenlin@163.com
收稿日期 Received：2024-04-02；修回日期 Revision received：2024-05-26；接受日期 Accepted：2024-05-29

azadirachtin, and their combinations (tea saponin + toosendanin and tea saponin + azadirachtin) against third-instar larvae of *S. litura*. Through pot efficacy trials, the antifeeding rate changes of *S. litura* were determined under different treatment times after smearing the three single agents and the combinations (tea saponin + toosendanin, tea saponin + azadirachtin) to Chinese cabbage leaves. The results showed that the medium antifeeding concentrations of tea saponin, toosendanin, and azadirachtin were 64.02 μg/mL, 29.90 μg/mL, and 3.98 μg/mL, respectively. The combination of tea saponin and toosendanin exhibited synergistic effect at ratios ranging from 9∶1~3∶7, with a maximum synergistic ratio of 1.39 at a ratio of 5∶5, showing additive effect. The combination of tea saponin and azadirachtin showed synergistic effect at ratios ranging from 9∶1~1∶9, with a maximum synergistic ratio of 1.87 at a ratio of 8∶2, showing synergistic effect. The highest antifeeding rate of tea saponin + toosendanin (5∶5) was 2.05 times that of tea saponin alone and 1.21 times that of toosendanin alone; the highest antifeeding rate of tea saponin + azadirachtin (8∶2) was 2.47 times that of tea saponin alone. In summary, the results showed that tea saponin mixed with toosendanin and azadirachtin had synergistic effect on the control of *S. litura* by the two plant-derived pesticides, providing scientific basis for the scientific prevention and control of *S. litura* and the development of environmentally friendly synergists.

Key word: Tea saponins; azadirachtin; toosendanin; *Spodoptera litura*; antifeeding activity

斜纹夜蛾*Spodoptera litura*属鳞翅目夜蛾科，是一种世界性分布的广食性农业害虫（王志博和肖强，2021）。其食性很广，寄主植物共109科389多种，主要为害棉花、烟草、甜菜、番茄、辣椒、花生和十字花科的蔬菜等（刘迪等，2023；张文梅，2023）。斜纹夜蛾在一年中可以发生多代，产卵集中且量大，幼虫全株危害，会取食寄主的各组织器官，农作物受其危害十分严重，对农业生产造成了巨大的经济损失（石宝才等，2009）。

由于斜纹夜蛾发生的世代数多，发生量大和间歇性暴发成灾等特点，溴氰菊酯、毒死蜱、茚虫威和甲氧虫酰肼等化学农药依然是国内外最主要的防治措施（陈斌等，2008）。但长期大量使用杀虫剂，已经导致斜纹夜蛾对多种杀虫剂产生抗药性（桑松等，2013）。印楝素、鱼藤酮、雷公藤甲素等植物源农药具有对靶标生物高效，对人畜等非靶标生物安全，环境污染性小，易分解和不会破坏生态平衡等优点，已成为农药学研究的热点（梁赫等，2023）。印楝素从印楝树的种子中分离的四环三萜类化合物，对近乎所有的植物害虫如小菜蛾*Plutella xylostella*、红蜘蛛*Tetranychus cinnbarinus*、棉蚜*Aphis gossypii*、棉铃虫*Helicoverpa armigera*等都具有趋杀效果，但其只能从印楝种子中提取，导致价格昂贵，难以大规模推广应用（张帅等，2004）。川楝素是从川楝和苦楝中提取的四环三萜类化合物，对多种农业害虫具有一定的生物活性，但对鳞翅目害虫的药效不理想（张波等，2017）。茶皂素是从山茶科植物的种子（茶籽、茶叶籽）中提取的一类糖苷化合物，是一种天然的性能优异的非离子型表面活性剂。在洗涤、毛纺织、医药、日用化工等行业的生产中广泛应用（钟旭美等，2007）。通常作为湿润剂和悬浮剂在固体型农药中使用，在乳油型农药中则作为增效剂与展着剂，同时可以直接作为一种生物农药使用。然而单一使用茶皂素效率低、作用慢，因此与其他药物混配更能发挥其作用。

因此，本研究以斜纹夜蛾3龄幼虫为试验对象，研究茶皂素、川楝素和印楝素单剂及混配后对斜纹夜蛾幼虫的拒食活性，通过盆栽药效试验测定3种单剂及混配的茶皂素+川楝素、茶皂素+印楝素涂抹菜心叶片后，不同处理时间下斜纹夜蛾的拒食率变化，为科学绿色防控斜纹夜蛾提供新方法。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

斜纹夜蛾种群来自广东省农业科学院果树研究所的果树生理与果品研究室，经室内饲养多代，挑选大小一致、健康的3龄初期幼虫作为实验虫源。

1.2 仪器与药剂

供试仪器：SPX-250B-G型微电脑光照培养箱，上海博迅实业有限公司；MK30内置灯光摄影

棚，深圳神图腾科技有限公司。

供试药剂：茶皂素，纯度≥90%，购于湖南省汉清生物科技有限公司，其化学结构式如图1所示。川楝素，纯度≥98%，购于四川省维克奇生物科技有限公司。40%印楝素原粉，华南农业大学天然农药与化学生物学教育部重点实验室。二甲基亚砜（Dimethyl sulfoxide，DMSO）纯度≥99.8%，购于广州齐湘生物科技有限公司；Tween-80（A100442-0500）购于广州齐湘生物科技有限公司。

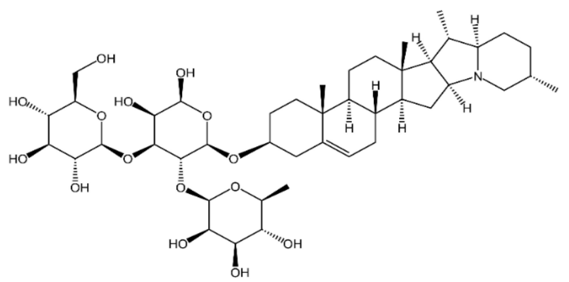

图1 茶皂素的化学结构式

Fig. 1 Chemical structural formula of tea saponin

1.3 试验方法

1.3.1 茶皂素、川楝素、印楝素对斜纹夜蛾的拒食活性

采用叶片浸渍法测定（张余杰等，2014）。具体操作：将茶皂素、川楝素和印楝素溶于二甲基亚砜中，配制为10 mg/mL的母液，再用0.1% Tween-80水溶液稀释成6.25、12.5、25、50和100 μg/mL 5个浓度。使用圆形打孔器在新鲜幼嫩的甘蓝上打取圆形叶碟（直径为1.3 cm），将叶碟放入不同浓度药液中浸渍8~10 s，取出放于干净的塑料板上，自然晾干后，放入圆形带盖饲养盒中，每盒4片，接入10头饥饿处理4 h的3龄初期幼虫，为1个重复，每个浓度设置3次重复。以0.1% Tween-80水溶液处理的叶碟为空白对照。将饲养盒放于温度26℃±1℃，相对湿度70%±10%，光周期L：D=16 h：8 h的恒温培养箱中。处理24 h后，向所有饲养盒中注满水，阻止幼虫继续取食。将斜纹夜蛾幼虫全部剔除，将被取食的叶碟平铺在玻璃板上，用相机在MK 30内置灯光摄影棚中拍照，同时放置一把长度为20 cm的刻度尺作为参照，记录剩余面积并计算非选择性拒食率。

1.3.2 茶皂素与川楝素、印楝素混配的增效配比定性筛选

混配比例按照Horsafall法设计（陈福良等，1997）。根据3种单剂的有效中浓度，配制出有效中浓度药液，再以对应的体积比分别混配。若拒食比率（实际拒食率/期望拒食率）＞1.05为增效作用；拒食比率介于1.05~1之间，为相加作用；若拒食比率＜1，则为拮抗作用。筛选出具有增效作用的配比。

1.3.3 茶皂素与川楝素、印楝素混配的增效配比定量筛选

以Wadley法进行定量筛选（韩丽娟，1994），先配制3种单剂的质量浓度梯度，再按相应的浓度梯度顺序将茶皂素分别与川楝素和印楝素按有增效作用的组合的体积比混合，得到增效比混剂的质量浓度梯度。计算处各单剂和混剂毒力回归方程 y=a+bx 和 r 值，得出拒食中浓度 AFC_{50} 值。根据Wadley公式计算复配剂的增效比。

期望拒食率=a×A（AFC_{50}拒食率）+b×B（AFC_{50}拒食率）

AFC_{50}（理论值）=（a+b）/（a/AFC_{50}A+b/AFC_{50}B）

增效比=AFC_{50}理论值/AFC_{50}实际值

式中A、B分别代表茶皂素与混配药剂2种药剂组分，a、b是两组分在混剂中所占含量的比值。根据增效比作出综合评价。当增效比大于1.5时为增效作用，介于0.5~1.5之间时为相加作用，小于0.5时为拮抗作用。

1.3.4 盆栽药效试验

在每个圆形花盆（直径为20 cm）中播种3粒菜心种子，在阳光充足的地方培养，当植株长出8片真叶时再进行后续试验，处理组及对照组各3盆，设置3次重复。处理组包括3种药物单剂拒食中浓度药液及按照增效配比的茶皂素+川楝素和茶皂素+印楝素2种混剂共5个处理，涂抹菜心叶片；对照组使用清水涂抹。于药后第1、3、5、7、9、11、13、15天分别摘取叶片打叶碟（直径为1.3 cm），按照每盒4片，每盒接入10头饥饿处理4 h的3龄初期幼虫，为1个重复，设置3次重复。当药后第1天对照组幼虫取食叶面积达到一半以上时停止实验（后续处理时间按照药后第1天执行），对剩余叶片拍照记录，测量剩余叶面积，计算非选择性拒食率，评价拒食活性。

1.4 数据的计算方法及统计分析

各处理的非选择性拒食率使用以下公式计算。使用Adobe Photoshop CC 2019按照对应实际1 cm

长度的像素值计算取食面积，使用DPS软件计算拒食中浓度AFC_{50}，使用IBM SPSS Statistics 26中的单因素方差分析进行统计分析。

害虫取食面积=4个叶碟总面积−剩余叶碟面积

非选择性拒食率（%）=（对照组取食面积−处理组取食面积）/对照组叶片取食面积×100

2 结果与分析

2.1 三种药剂单剂对斜纹夜蛾幼虫的拒食活性

茶皂素、川楝素、印楝素单剂对斜纹夜蛾3龄幼虫的拒食中浓度分别为64.02 μg/mL、29.90 μg/mL、3.98 μg/mL（表1）。印楝素的拒食活性最好，拒食中浓度仅为茶皂素的6.2%，相差16倍，川楝素次之，拒食中浓度是茶皂素的46.7%，相差2倍。6.25 μg/mL茶皂素处理的4片叶片被取食的面积几乎和对照叶片相同，无法辨认出完整的圆形，100 μg/mL处理的叶片可见较为模糊的圆形轮廓；川楝素仅在低浓度6.25 μg/mL处理下被取食叶片不为圆形，100 μg/mL处理下叶片可见完整圆形，被取食面积较少；印楝素处理的叶片均可见圆形轮廓，50 μg/mL处理的叶片仅1片取食较多，其余3片取食很少，100 μg/mL处理的叶片几乎未被取食。3种药剂的拒食活性都是浓度越高拒食活性越好（图2）。

表1 茶皂素、川楝素、印楝素单剂对斜纹夜蛾幼虫的拒食活性

Table 1 Antifeeding activity of tea saponin, toosendanin, and azadirachtin against the larvae of *Spodoptera litura*

药剂名称 Drug name	回归方程 Regression equation	拒食中浓度（μg /mL） AFC_{50}	95%置信区间 95% confidence interval	相关系数 Correlation coefficient	标准误差 Standard error
茶皂素 Tea saponin	Y=1.3623+2.0139x	64.02	17.62~232.66	0.9919	42.15
川楝素 Toosendanin	Y=1.0570+2.6722x	29.90	14.70~61.43	0.8344	10.96
印楝素 Azadirachtin	Y=4.1806+1.3668x	3.98	0.19~81.17	0.9780	6.12

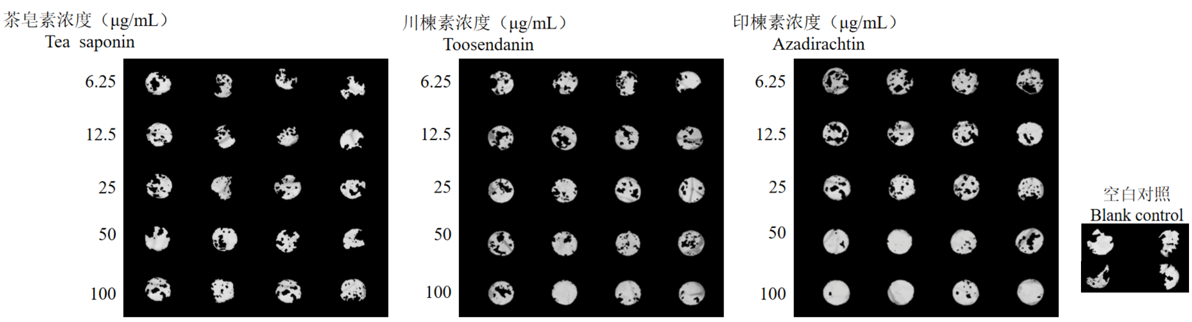

图2 茶皂素、川楝素、印楝素单剂对斜纹夜蛾3龄幼虫的拒食活性

Fig. 2 Antifeeding activity of tea saponin, toosendanin, and azadirachtin against third-instar larvae of *Spodoptera litura*

注：图中横排的4片叶片为一个浓度处理的叶片，竖列为不同浓度的处理。Note: Four horizontally arranged leaves in the figure represented leaves treated with one concentration, while the vertical columns represented leaves treated with different concentrations.

2.2 茶皂素与川楝素、印楝素混配的增效配比定性筛选

根据单剂拒食活性结果，茶皂素按照不同体积比分别与川楝素、印楝素混配，进行增效配比的定性筛选（表2和表3）。茶皂素+川楝素的配比中1∶9的混配比例拒食比率为0.92，小于1表现为拮抗作用；9∶1~3∶7的配比的拒食比率均大于1，表现为增效作用；2∶8配比的拒食比率为1.03为表现为相加作用；当茶皂素+川楝素配比5∶5时，拒食比率最大为1.27。茶皂素+印楝素所有配比都具有增效作用。当茶皂素+印楝素混配的配比为8∶2（体积比，下同）时，对斜纹夜蛾的拒食比率为最大为1.70，表现出增效作用。

表2 茶皂素与川楝素不同配比对斜纹夜蛾的拒食活性

Table 2 Antifeeding activity of tea saponin and toosendanin at different mixing ratios against *Spodoptera litura*

茶皂素+川楝素（AFC_{50}比率）Tea saponin+ Toosendanin	实际拒食率（%）Actual antifeeding rate	期望拒食率（%）Expected antifeeding rate	拒食比率 Antifeeding rate
10 : 0	48.10	48.10	1.00
9 : 1	52.29	49.04	1.07
8 : 2	54.95	49.98	1.10
7 : 3	56.40	50.92	1.11
6 : 4	58.22	51.86	1.12
5 : 5	67.31	52.80	1.27
4 : 6	57.73	53.74	1.07
3 : 7	57.56	54.68	1.05
2 : 8	57.48	55.62	1.03
1 : 9	52.01	56.56	0.92
0 : 10	57.50	57.50	1.00

表3 茶皂素与印楝素不同配比对斜纹夜蛾的拒食活性

Table 3 Antifeeding activity of tea saponin and azadirachtin at different mixing ratios against *Spodoptera litura*

茶皂素+印楝素 (AFC_{50}比率) Tea saponin+ Azadirachtin	实际拒食率（%）Actual antifeeding rate	期望拒食率（%）Expected antifeeding rate	拒食比率 Antifeeding rate
10 : 0	48.10	48.10	1.00
9 : 1	77.91	49.85	1.56
8 : 2	87.75	51.59	1.70
7 : 3	87.25	53.34	1.64
6 : 4	73.41	55.08	1.33
5 : 5	91.33	56.83	1.61
4 : 6	90.51	58.57	1.55
3 : 7	93.04	60.32	1.54
2 : 8	90.75	62.06	1.46
1 : 9	92.61	63.81	1.45
0 : 10	65.55	65.55	1.00

2.3 茶皂素与川楝素、印楝素混配的增效配比定量筛选结果

根据定性筛选结果，采用Wadley法测定茶皂素+川楝素、茶皂素+印楝素最佳增效配比对斜纹夜蛾的拒食活性，见表4。结果表明：茶皂素+川楝素配比为5：5时AFC_{50}值为29.45 μg/mL，增效比为1.39，表现为相加作用；茶皂素+印楝素配比为8：2时AFC_{50}值为8.51 μg/mL，对斜纹夜蛾具有较强的拒食作用，增效比为1.8，大于1.5，表现为显著增效作用。试验结果与Horsfall法定性筛选结果相符合。

表4 茶皂素与川楝素、印楝素混配的增效比

Table 4 Synergistics ratio of tea saponin mixed with toosendanin and azadirachtin

混配及配比 Mixing and proportioning	毒力回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient	拒食中浓度（μg /mL）AFC_{50}	增效比 Synergistics ratio
茶皂素+川楝素 Tea saponin+ Toosendanin 5 : 5	Y= 3.2722 X + 1.1761	0.9960	29.45	1.39
茶皂素+印楝素 Tea saponin+ Azadirachtin 8 : 2	Y= 3.4001 X + 1.7197	0.9971	8.51	1.87

2.4 盆栽药效试验

通过盆栽药效试验测定3种单剂及混配的茶皂素+川楝素、茶皂素+印楝素涂抹菜心叶片后，不同处理时间下斜纹夜蛾的拒食率变化。结果表明：单剂中印楝素具有最好的拒食活性，药后第3天拒食率最高为94.90%，于药后第5天拒食活性开始下降；川楝素次之，最高拒食率为53.58%，于药后第7天拒食活性开始下降；茶皂素的拒食活性显现较为缓慢，在第11天拒食率才达到31.57%。茶皂素+川楝素（5：5）的最高拒食率为64.80%，是茶皂素单剂的2.05倍，川楝素单剂的1.21倍，于药后第13天拒食活性开始下降。茶皂素+印楝素（8：2）的最高拒食率为77.95%，略低于印楝素单剂，是茶皂素单剂最高拒食率的2.47倍，于药后第9天拒食活性开始下降。

表5 盆栽药效试验结果

Table 5 Results of potted plant pharmacodynamic experiment

防效 Preventive effect		对照 Control	茶皂素 Tea saponin	川楝素 Toosendanin	印楝素 Azadirachtin	茶皂素+川楝素 Tea saponin + Toosendanin 5 : 5	茶皂素+印楝素 Tea saponin + Azadirachtin 8 : 2
第1天 Day 1	剩余面积(cm^2) Remaining area	1.48 ± 0.09 e	2.06 ± 0.06 d	2.39 ± 0.11 c	4.92 ± 0.15 a	2.46 ± 0.04 c	3.35 ± 0.08 b
	拒食率(%) Antifeeding rate		15.43 ± 1.67 e	24.28 ± 2.85 d	91.89 ± 4.04 a	26.24 ± 0.94 c	49.81 ± 2.24 b
第3天 Day 3	剩余面积(cm^2) Remaining area	2.23 ± 0.06 e	2.88 ± 0.08 d	3.40 ± 0.35 c	5.07 ± 0.04 a	3.22 ± 0.07 c	3.93 ± 0.07 b
	拒食率(%) Antifeeding rate		21.82 ± 2.77 d	39.13 ± 9.69 c	94.90 ± 1.37 a	33.19 ± 2.49 c	56.78 ± 2.46 b
第5天 Day 5	剩余面积(cm^2) Remaining area	3.02 ± 0.17 f	3.57 ± 0.05 e	4.20 ± 0.03 d	5.08 ± 0.09 a	3.95 ± 0.10 c	4.50 ± 0.11 b
	拒食率(%) Antifeeding rate		25.04 ± 2.43 e	53.58 ± 1.32 d	93.43 ± 4.16 a	42.29 ± 4.46 c	67.37 ± 5.03 b
第7天 Day 7	剩余面积(cm^2) Remaining area	2.97 ± 0.10 e	3.59 ± 0.10 d	4.07 ± 0.01 c	5.00 ± 0.05 a	4.17 ± 0.01 c	4.73 ± 0.08 b
	拒食率(%) Antifeeding rate		27.70 ± 4.39 d	48.90 ± 0.56 c	90.11 ± 2.09 a	53.16 ± 0.55 c	77.95 ± 3.69 b
第9天 Day 9	剩余面积(cm^2) Remaining area	3.30 ± 0.12 f	3.85 ± 0.04 e	4.19 ± 0.09 d	4.98 ± 0.02 a	4.46 ± 0.02 c	4.68 ± 0.04 b
	拒食率(%) Antifeeding rate		28.36 ± 2.20 e	46.13 ± 4.57 d	87.06 ± 1.30 a	60.08 ± 1.29 c	71.65 ± 2.12 b
第11天 Day 11	剩余面积(cm^2) Remaining area	2.38 ± 0.07 e	3.28 ± 0.09 d	3.45 ± 0.05 c	4.76 ± 0.02 a	4.22 ± 0.08 b	4.31 ± 0.11 b
	拒食率(%) Antifeeding rate		31.57 ± 3.19 d	37.67 ± 1.86 c	83.79 ± 0.16 a	64.80 ± 2.81 b	67.81 ± 3.73 b
第13天 Day 13	剩余面积(cm^2) Remaining area	3.46 ± 0.05 e	3.96 ± 4.11 d	4.36 ± 0.03 c	4.16 ± 0.39 a	4.49 ± 0.04 b	4.56 ± 0.03 a
	拒食率(%) Antifeeding rate		28.24 ± 7.31 d	37.10 ± 1.73 c	62.41 ± 13.75 a	51.01 ± 1.89 b	58.60 ± 2.03 a
第15天 Day 15	剩余面积(cm^2) Remaining area	2.79 ± 0.17 e	3.41 ± 0.05 d	3.64 ± 0.11 c	4.22 ± 0.02 a	3.83 ± 0.12 b	3.95 ± 0.01 b
	拒食率(%) Antifeeding rate		25.58 ± 1.94 d	34.71 ± 4.44 c	58.79 ± 0.68 a	42.81 ± 4.91 b	47.80 ± 0.24 b

注：表中数据为平均值±标准误差，数字后不同字母表示同一时间下不同处理间经单因素方差分析存在显著差异（$P < 0.05$）。Note: The data in the table was the mean ± standard error, and different letters following the number indicated significant differences ($P < 0.05$) in one-way ANOVA among different treatments at the same time.

3 结论与讨论

茶树是我国的重要经济作物之一，栽培面积大，产量高，各类茶产业蓬勃发展，同时也产生了很多价值低廉的茶粕，茶粕深加工和产品出路是一大难题，急需解决。茶粕中含有大量的茶皂素，因此开发利用好茶皂素，可以实现废弃物再利用，能够大大提升茶产业经济效益，满足可持续农业发展需求，对支持农业产业绿色发展，保护环境具有重要意义（赖鹏英等，2021）。

茶皂素可直接作为生物农药使用，其对害虫的作用方式主要体现在触杀、毒杀、拒食和忌避等方面，相关研究如下：30%茶皂素水溶液处理的叶片会使茶尺蠖 *Ectropis oblique hypulina* 活动减弱，最终死亡，处理96 h后校正死亡率能够达到74.08%（曾驰，2017）。4 000 mg/L的茶皂素对小菜蛾3龄幼虫趋避率可达48.57%，趋避作用明显（白艳，2011）。20%茶皂素处理6 h后，对甘薯小象甲 *Cylas formicarius* 的忌避取食率可达97.65%，忌避和拒食效果明显（潘如军，2020）。茶皂素作为一种非离子的表面活性剂，同样可以作为增效剂使用。其增效机制在于往农药中加入茶皂素能够改善药液的理化性质，提高药液乳化、悬浮、湿润等效果，降低药液的表面张力及接触角，对药膜的形成创造更有力的条件，提高药剂在靶标生物上的有效积累量，进而延长农药对虫体的作用时间，达到更好的防治效果。

将不同种类的农药进行合理混配是农药的重要使用方式之一。茶皂素与农药混配后使用，可以改善药液的理化性质，提高药剂在靶标生物上的有效积累量，从而达到更好的防治效果，可以极大的减少原药的用量，使毒性降低，减少环境污染，对延缓害虫抗性的发展具有很大的作用（吴耀军等，2002）。已有研究表明，茶皂素对多种杀虫剂具有增效作用：茶皂素和鱼藤酮以5∶1的比率混配后共毒系数高达327.26，对红脉穗螟 *Tirathaba rufivena* 3龄幼虫的毒杀作用十分显著，增效作用明显；其增效机制是混剂以不同的作用方式同时攻击虫体内不同的作用靶标，从而增强了防治效果（吕朝军等，2015）。以质量比为5∶100~30∶100茶皂素和吡虫啉混配使用防治苜蓿蚜 *Aphis craccivora* 时，均有增效作用，其中质量比为10∶100时增效作用最显著；其增效机制是茶皂素作为表面活性剂延长了吡虫啉在虫体表面的作用时间(许勇华等，2010)。以1∶3的比例混配茶皂素与杀虫单后增效最显著，对叶蝉 *Cicadellidae* 和粘虫 *Mythimna separata* 的增效系数分别为1.82和2.83；其增效可能原因是茶皂素具有乳化、分散、展着、湿润和溶解特性所致（欧晓明等，1995）。茶皂素与杀虫单、雷公藤乳油、鱼藤酮、哒螨灵混配均具有增效作用（宋应芳等，2022）。茶皂素对20%灭多威乳油杀灭菜青虫 *Pieris rapae* 增效可达6.33倍，对2.5%三氯氟氰菊酯杀灭菜缢管蚜 *Lipaphis erysimi pseudobrassicae* 增效14.83倍，对5%尼索朗杀灭桔全爪螨 *Panonychus citri* 卵增效61.8倍，对20%哒螨灵杀灭全爪螨增效18.67倍（胡绍海等，1998）。

本研究中川楝素的作用机制主要是导致昆虫中肠组织溃烂，神经传导紊乱，影响虫体消化、吸收的功能，印楝素的作用机制主要是强烈的拒食作用，而茶皂素可以抑制昆虫体内的解毒和消化等关键酶的活性，同时由于粘附性强，会堵塞昆虫体表的气门，使之窒息死亡（李晓东和赵善欢，1996；罗刚和全钰珠，1998；郝卫宁等，2010）。目前，关于茶皂素对农药的增效作用已有许多报道，茶皂素作为增效剂加入农药后，会影响药液的表面张力、接触角、沉积量等性质，从而有助于充分发挥药效（王小艺和黄炳球，1998）。本研究结果表明，茶皂素按照一定的比例与川楝素和印楝素混配使用，可以有效提高川楝素和印楝素对斜纹夜蛾的拒食活性，其增效机制可能与混剂能够实现以不同作用机制作用害虫靶标有关，也有可能是茶皂素作为增效剂能够增强药液的理化性质，延长作用时间。此外川楝素和印楝素提取难度高，价格远高于茶皂素，而茶皂素的主要来源茶粕是茶产业的废弃物，价值低。将茶皂素作为增效剂使用既能实现茶粕废物的再利用，同时在减少了药剂的用量同时达到了相同乃至更好的防治效果。因此本研究结果在斜纹夜蛾绿色科学防控中具有实际应用价值，对于绿色植物源农药发展，合理开发利用我国丰富的茶皂素资源，降低斜纹夜蛾的防控成本，具有显著的社会、生态和经济效益。

参考文献（References）

Bai Y. Sublethal Effect and Mechanism of Tea Saponin on *Plutella xylostella* (Linnaeus) [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry Univ-ersity, 2011. [白艳. 茶皂素对小菜蛾的亚致死效应及其机理 [D]. 福州: 福建农林大学, 2011]

Chen B, Zhou XM, Bai LY, *et al*. Research progress on the control of *Spodoptera litura* [J]. *Jiangxi Agricultural Journal*, 2008, 20 (3): 4. [陈斌, 周小毛, 柏连阳, 等. 斜纹夜蛾防治研究进展 [J]. 江西农业学报, 2008, 20 (3): 4]

Chen FL, Zheng PN, Wang Y. An experimental technique for indoor toxicity testing of pesticide mixtures [J]. *Pesticide Science and Management*, 1997, 18 (4): 2. [陈福良, 郑斐能, 王仪. 农药混配室内毒力测定的一种实验技术 [J]. 农药科学与管理, 1997, 18 (4): 2]

Han LJ. Pesticide Compounding and Compounding Pesticides [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1994. [韩丽娟. 1994. 农药复配与复配农药 [M]. 南京：江苏科学技术出版社, 1994]

Hao WN, Zeng Y, Hu MY, *et al*. Research progress on the application of tea saponin in the field of pesticides [J]. *Pesticides*, 2010, 49 (2): 90-93, 96. [郝卫宁, 曾勇, 胡美英, 等. 茶皂素在农药领域的应用研究进展 [J]. 农药, 2010, 49 (2): 90-93, 96]

Hu SH, Hu WJ, Hu WD, *et al*. Study on the synergistic effect of tea saponin in chemical pesticide emulsifiable concentrate [J]. *Chinese Agricultural Science*, 1998, 2: 30-35. [胡绍海, 胡卫军, 胡卫东, 等. 茶皂素在化学农药乳油剂中增效作用研究 [J]. 中国农业科学, 1998, 2: 30-35]

Lai PY, Xiao ZH, Li PW, *et al*. Current status of resource utilization and industrial development of *Camellia oleifera* [J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2021, 55 (1): 23-30. [赖鹏英, 肖志红, 李培旺, 等. 油茶资源利用及产业发展现状 [J]. 生物质化学工程, 2021, 55 (1): 23-30]

Li XD, Zhao SH. The toxicological mechanism of azadirachtin on insects [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 1996, 17 (1): 118-122. [李晓东, 赵善欢. 印楝素对昆虫的毒理作用机制 [J]. 华南农业大学学报, 1996, 17 (1): 118-122.]

Liang H, Shao XH, Qin ZX, *et al*. The effect of ketamine on the antifeedant activity and growth and development of *Helicoverpa armigera* (Hübner) [J]. *Plant Protection*, 2023, 49 (1): 89-95. [梁赫, 邵雪花, 秦子昕, 等. 宽缨酮对棉铃虫的拒食活性及生长发育的影响 [J]. 植物保护, 2023, 49 (1): 89-95]

Liu D, Shi QP, Zhou YN, *et al*. Toxicity and sublethal effects of imidacloprid on *Spodoptera litura* [J]. *Biohazard Science*, 2023, 46 (4): 45-451. [刘迪, 施秋萍, 周亚男, 等. 虫螨腈对斜纹夜蛾的毒力及亚致死效应研究 [J]. 生物灾害科学, 2023, 46 (4): 45-451]

Lu G, Quan YZ. Research progress in the pharmacology of toosendanin [J]. *West China Journal of Pharmacy*, 1998, 3 (3): 154-156. [罗刚, 全钰珠. 川楝素药理研究进展 [J]. 华西药学杂志, 1998, 3 (3): 154-156]

Lv CJ, Zhong BZ, Gou ZH, *et al*. The combined toxicity of fish vine ketone and tea saponin to betel nut *Tirathaba rufivena* (Walker) [J]. *Journal of Biosafety*, 2015, 24 (3): 241-243. [吕朝军, 钟宝珠, 苟志辉, 等. 鱼藤酮和茶皂素对槟榔红脉穗螟的联合毒力 [J]. 生物安全学报, 2015, 24 (3): 241-243]

Ou XM, Yu SY, Lin XM, *et al*. The synergistic effect of tea saponin on insecticides in Cicadellidae and *Mythimna separata* (Walker) [J]. *Pesticide*, 1995, 34 (12): 10-11. [欧晓明, 余淑英, 林雪梅, 等. 茶皂素在叶蝉和粘虫体内对杀虫单的增效作用 [J]. 农药, 1995, 34 (12): 10-11]

Pan RJ. Indoor Inhibitory Effect of Tea Saponin on *Cylas formicarius* and Field Control Effect Study [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. [潘如军. 茶皂素对甘薯小象甲的室内抑制作用测定及田间防效研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2020]

Sang S, Wang Z, Qi JW, *et al*. Research progress on drug resistance of *Spodoptera litura* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2013, 35 (6): 808-814. [桑松, 王政, 齐江卫, 等. 斜纹夜蛾抗药性研究进展 [J]. 环境昆虫学报, 2013, 35 (6): 808-814]

Shi BC, Lu H, Gong YJ, *et al*. Identification and control of *Spodoptera litura* [J]. *Chinese Vegetables*, 2009, 19: 18-19. [石宝才, 路虹, 宫亚军, 等. 斜纹夜蛾的识别与防治 [J]. 中国蔬菜, 2009, 19: 18-19]

Song YF, Hong HX, Li ZL, *et al*. Research progress on tea saponin control and its synergistic effect [J]. *Chinese Agricultural Bulletin*, 2022, 38 (31): 119-124. [宋应芳, 洪黄熙, 李卓丽, 等. 茶皂素控害及其增效作用研究进展 [J]. 中国农学通报, 2022, 38 (31): 119-124]

Tao X, Chen YP, Lu ZH, *et al*. The effects of elevated CO_2 concentration on the growth, development, and reproduction of *Spodoptera frugiperda* and *Spodoptera litura* [J]. *Journal of Environmental Entomology*, 2023, 45 (6): 1579-1586. [陶旋, 陈亚平, 鲁智慧, 等. CO_2浓度升高对草地贪夜蛾与斜纹夜蛾生长发育及繁殖的影响 [J]. 环境昆虫学报, 2023, 45 (6): 1579-1586]

Wang XY, Huang BQ. The synergistic mechanism of tea saponin on pesticides [J]. *Tea Science*, 1998, 18 (2): 134-138. [王小艺, 黄炳球. 茶皂素对农药的增效机理 [J]. 茶叶科学, 1998, 18 (2): 134-138]

Wang ZB, Xiao Q. The occurrence and control of tea tree *Spodoptera litura* [J]. *Chinese Teas*, 2021, 43 (11): 11-14. [王志博, 肖强. 茶树斜纹夜蛾的发生及防治 [J]. 中国茶叶, 2021, 43 (11): 11-14]

Wu YJ, Lu SZ, Xian ZH. Experimental and evaluation of the synergistic effect of tea saponin on high efficiency cypermethrin [J]. *Guangxi Forestry Science*, 2002, 31 (4): 170-171, 193. [吴耀军, 陆顺忠, 贤振华. 茶皂素对高效氯氰菊酯的增效作用试验及评价 [J]. 广西林业科学, 2002, 31 (4): 170-171, 193]

Xu YH, Dong DZ, Jiang YY. Study on the synergistic effect of tea saponin on imidacloprid [J]. *Journal of Huzhou Vocational and Technical College*, 2010, 8 (3): 6-8. [许勇华, 董德臻, 蒋炎阳. 茶皂素对吡虫啉的增效作用研究 [J]. 湖州职业技术学院学报, 2010, 8 (3): 6-8]

Zeng C. Research on the Use of Tea Saponin for the Prevention and

Control of *Ectropis oblique hypulina* Wehrli [D]. Wuhan: Hubei University, 2017. [曾驰. 茶皂素用于防治茶尺蠖的研究 [D]. 武汉: 湖北大学, 2017]

Zhang B, Yu CL, Yang DE, *et al*. A study on the combined effect of toosendanin and imidacloprid on *Aphis gossypii* Glover [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45 (20): 121-123. [张波, 郁春柳, 杨得恩, 等. 川楝素和吡虫啉对瓜蚜联合作用的研究 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (20): 121-123]

Zhang S, Zeng XN, Du LX, *et al*. Research progress on insecticidal active ingredients of six Meliaceae Juss. plants [J]. *Guangdong Agricultural Science*, 2004, 3: 33-35. [张帅, 曾鑫年, 杜利香, 等. 6种楝科植物杀虫活性成分的研究进展 [J]. 广东农业科学, 2004, 3: 33-35]

Zhang YJ, Qin XP, Zhou P, *et al*. The inhibitory effect of saponin from willow on the growth and development of *Helicoverpa armigera* (Hübner) [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42 (4): 103-105. [张余杰, 秦小萍, 周平, 等. 坡柳皂苷对棉铃虫生长发育的抑制作用 [J]. 江苏农业科学, 2014, 42 (4): 103-105]

Zhong XM, Zhang BG, Zhu J. Comprehensive utilization of *Camellia oleifera* seeds in China [J]. *Grain, Oil and Food Technology*, 2007, 15 (2): 34-36. [钟旭美, 张百刚, 朱杰. 我国油茶籽的综合利用 [J]. 粮油食品科技, 2007, 15 (2): 34-36]