

绿肥间作对苹果园害虫及天敌群落多样性的影响^{*}

谢晓丽^{1**} 孙振宇¹ 郭建国¹ 岳德成² 金社林^{1***}

(1. 甘肃省农业科学院植物保护研究所, 兰州 730070; 2. 平凉市农业科学院, 平凉 744000)

摘要 【目的】为明确间作白三叶 *Trifolium repens*、黑麦草 *Lolium perenne* 对苹果园害虫、天敌群落多样性的影响, 优化苹果园生态系统。【方法】于 2023 年 4–10 月采用马氏网对甘肃静宁县 3 种植模式的天敌及害虫进行诱集鉴定, 并开展生物群落多样性分析及聚类分析。【结果】苹果园间作白三叶、黑麦草害虫上升期较清耕果园推迟 15 d, 害虫种类较清耕分别减少了 16 科 12 种和 6 科 8 种, 发生总量分别较清耕下降 7.69% 和增加 29.98%, 苹果园内绣线菊蚜 *Aphis citricola* 由优势种降为常见种; 天敌种类分别较清耕果园增加 1 目 3 科 3 种和 2 目 4 科 4 种, 种群数量分别较清耕增加 113.94% 和 205.82%, 益害比峰值达 1.63 和 1.08, 显著高于清耕 ($P < 0.05$); 苹果园间作白三叶、黑麦草 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数显著高于清耕果园 ($P < 0.05$), Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数极显著高于清耕果园 ($P < 0.001$)。聚类分析表明, 间作白三叶、黑麦草改变了苹果园害虫及天敌群落的结构和组成。【结论】间作白三叶、黑麦草可有效降低苹果园优势害虫蚜虫的发生量, 显著提高天敌种类、种群数量及益害比, 生物多样性更高, 物种稳定性更强, 但间作黑麦草可能引起其它害虫种群数量的上升。

关键词 间作; 绿肥; 害虫; 天敌; 多样性

Effects of intercropping green manure on the diversity of pests and their natural enemies in apple orchards

XIE Xiao-Li^{1**} SUN Zhen-Yu¹ GUO Jian-Guo¹ YUE De-Cheng² JIN She-Lin^{1***}

(1. Institute of Plant Protection, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;

2. Pingliang Academy of Agricultural Sciences, Pingliang 744000, China)

Abstract [Aim] To clarify the effects of intercropping green manure on the diversity of pests and their natural enemies in apple orchards, and optimize the apple orchard ecosystem. [Methods] Two green manure crops, clover and ryegrass were intercropped with apple trees in Jingning County, Gansu Province. Orchard pests and their natural enemies were captured in Malaise nets from April to October 2023 to assess and compare community diversity of these orchards with that of a control, clean tillage orchard. [Results] The period during which pest numbers increased occurred 15 days later in intercropped orchards than the control orchard. Pest diversity was also lower in intercropped orchards, by 16 fewer families and 12 species, and 6 fewer families 8 species, respectively. Overall aphid abundance was 7.69% lower, but could be as much as 29.98% lower than the control. Although they remained common, *Aphis citricola* were no longer the dominant species in intercropped orchards. Intercropping increased natural enemy diversity by 4 species, 4 families, 2 orders, and by 3 species 3 families 1 orders, respectively, and the overall abundance of natural enemies increased by 113.94% and 205.82%, compared to the control. Peak benefit-harm ratio values were 1.63 and 1.08, respectively, significantly higher than those of the control orchard ($P < 0.05$). The Shannon-Wiener diversity index and Margalef richness index of intercropped orchards were significantly higher than those of the control ($P < 0.05$), and the Simpson diversity index and Pielou uniformity index were also significantly

*资助项目 Supported projects: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-22-G20); 甘肃省科学技术厅重点研发计划 (24YFNA002); 甘肃省农业科学院中青年基金 (2023GAAS32)

**第一作者 First author, E-mail: 403325389@qq.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: shelin_jin@gsagr.ac.cn

收稿日期 Received: 2024-08-26; 接受日期 Accepted: 2025-03-16

higher than those of the control ($P < 0.001$). Cluster analysis indicates that intercropping changed the structure and composition of the pest and natural enemy communities in apple orchards. **[Conclusion]** Intercropping clover and ryegrass can effectively reduce the incidence of pests in apple orchards, significantly increase the number of natural enemy species and the benefit-harm ratio, resulting in higher biodiversity and stronger species stability. Intercropping with ryegrass may, however, cause other pest populations to increase.

Key words intercropping; green manure; pests; natural enemies; diversity

我国是全世界苹果种植面积最大、产量最高的国家,苹果在我国果业发展中占有举足轻重的地位(李志霞等,2014)。甘肃因其独特的地理和气候条件,成为了适合种植苹果的优选地区,产量超400万吨,产值高达200亿元,“平凉金果”、“花牛苹果”更是国家地理标志保护产品(许馨天,2021)。长期以来,以清耕为主的栽培方式、片面追求高产、见虫就防的管理模式(Dalmaso *et al.*, 2023),使得果园生态环境单一,害虫的耐药性加剧,不仅严重影响了苹果的品质(Ashraf *et al.*, 2023),而且造成了生物多样性的急剧下降,严重影响苹果产业健康发展(Pretty *et al.*, 2018; Brunner *et al.*, 2024),亟需一种绿色环保的种植模式,优化生态环境,促进果园的健康可持续发展。

苹果园间作绿肥,因其利于水土保持、土壤改良,提高果品产量和质量(Pålsson *et al.*, 2020; 杨建利等, 2021; 于淑慧等, 2022),被作为果园生态建设的一种全新模式进行大力推广(曹卫东等, 2017; 樊志龙等, 2020)。然而,当前大部分研究集中于绿肥对土壤水肥及果品品质的影响,苹果园与不同绿肥植物配置模式下病虫害的科学评估成为绿肥推广面临的主要问题(江幸福等, 2018)。研究表明,间作怪麻 *Crotalaria juncea*、荞麦 *Fagopyrum esculentum*、绛三叶 *Trifolium incarnatum*、红三叶 *Trifolium pratense*、燕麦 *Avena sativa*、圆叶决明 *Chamaecrista rotundifolia* 等,有利于美国中西部农业区玉米、大豆田和中国南方茶园天敌种群数量的增加,提高害虫的生防效果(Bryan *et al.*, 2021; da Consolação Rosado *et al.*, 2021; 胡桂萍等, 2021; Harbach and Tylka, 2022),也有研究表明,间作绿肥可造成黑额光叶甲 *Smaragdina nigrifrons* 或其它新型害虫的暴发(高素红等, 2019; Le Gall

et al., 2022),绿肥干燥后的残留物或在冬季充当草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* 的庇护所(Leite *et al.*, 2022)。因此,筛选适合苹果园配置的绿肥植物显得尤为必要。本研究选用北方苹果园内常见的绿肥白三叶 *Trifolium repens* 和黑麦草 *Lolium perenne*,研究不同种植模式对苹果园害虫和天敌的群落结构、发生动态及果园生物多样性的影响,以期为果园绿肥的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验设置在甘肃省静宁县威戎镇梁马村静宁果品果树研究所苗木基地(35.42°N, 105.73°E),果园总面积13.3 hm²,主栽富士系列,密度1250株/hm²,树龄≥5年。行间条播白三叶和黑麦草,行距24 cm,白三叶播种量12 kg/hm²,黑麦草播种量18 kg/hm²。该果园果树的长势、管理措施基本一致,试验期间全年未使用化学药剂。

1.2 试验方法

试验共设3个处理,分别为苹果园行间种植白三叶、黑麦草和清耕(以下简称白三叶-苹果园、黑麦草-苹果园、清耕),采用随机区组设计,小区面积为600 m²(30 m×20 m),3次重复,共9个试验小区,各小区间隔60 m以上。每个处理在其中心位置安装1台马来氏网(购买单位:北京合力科创科技发展有限公司,型号:MSW,尺寸:1.8 m×1.0 m×1.6 m,材质:尼龙,网孔数:100目),集虫瓶中加80%分析纯酒精。于2023年4月8日起,每隔15 d左右更换和收取1次集虫瓶,换下的集虫瓶补满酒精、贴上标签带回室内鉴定,直至10月15日收取最后1次,

共计收取 12 次。采用外部形态鉴定法和分子生物学鉴定结合的方法进行鉴定。

1.3 数据分析

Excel 2007 汇总试验数据, 采用 DPS v14.10 邓肯氏新复极差法进行差异性分析; 以不同间作模式下苹果园害虫和天敌数量为样本, 构建矩阵, 以兰氏距离为聚类尺度, 进行系统聚类分析。以物种丰富度即个体数占比判定昆虫优势类群, $P_i \geq 0.10$ 为优势种, 常见种 $0.01 < P_i \leq 0.10$, 偶见种 $P_i < 0.01$ 。

群落多样性:

相对丰富度 (P_i) $P_i = N_i/N$;

Shannon-Wiener 多样性指数 (H') $H' = -\sum (P_i \times \ln P_i)$;

Simpson 优势度指数 (D) $D = 1/\sum (N_i/N)^2$;

Margalef 丰富度指数 (S) $R = (S - 1)/\ln N$ 。

群落稳定性:

Pielou 均匀度指数 (E) $E = H'/\ln N$;

稳定性指数 (I_1 、 I_2) $I_1 = S_n/S_p$, $I_2 = S/N$ 。

以上各式中, N_i 为每个物种的个体总数, N 为个体总数之和, S 为群落中物种数, S_n 为天敌物种数, S_p 为害虫物种数 (马克平, 1994)。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式下苹果园害虫群落结构及天敌功能团构成

经鉴定, 黑麦草-苹果园害虫隶属于 7 目 60 科 69 种, 白三叶-苹果园 7 目 50 科 65 种, 分别较清耕苹果园的 7 目 66 科 77 种降低了 6 科 8 种和 16 科 12 种。不同种植模式下苹果园内害虫的优势种、常见种有差异。清耕果园的害虫优势种为普通蚤蝇 *Megaselia halterata*、宽翅迟眼蕈蚊 *Bradysia latiala*、灰地种蝇 *Delia platura*、卷叶瘿蚊 *Dasineura pyri* 和绣线菊蚜 *Aphis citricola*, 黑麦草-苹果园害虫优势种没有绣线菊蚜, 白三叶-苹果园害虫优势种没有绣线菊蚜和灰地种蝇; 黑麦草-苹果园、白三叶-苹果园内绣线菊蚜降为常见种, 种群数量分别较清耕降低 65.32% 和 41.14%; 清耕果园害虫常见种为小绿叶蝉 *Empoasca flavescens*、横带红长蝽 *Lygaeus equestris*、蔷薇潜蝇 *Agromyza potentillae*、甘肃尖大蚊 *Tipula (Acutipula) gansuensis*、卷叶瘿蚊、广粪蚊

Coboldia fuscipes 和星斑蛾蚋 *Psychoda alternata*, 黑麦草-苹果园常见种较清耕果园新增绣线菊蚜、蔷薇瘿蜂 *Diplolepis rosae*、烟蓟马 *Thrips tabaci*, 但没有甘肃尖大蚊、横带红长蝽、卷叶瘿蚊, 白三叶-苹果园害虫常见种较清耕新增绣线菊蚜、烟蓟马、灰地种蝇、小菜蛾 *Plutella xylostella*、契棘日蝇 *Acantholera czernyi*、黑腹果蝇 *Drosophila melanogaster*、褐飞虱 *Nilaparvata lugens*, 但没有甘肃尖大蚊和卷叶瘿蚊 (图 1)。

经鉴定, 黑麦草-苹果园天敌隶属于 7 目 25 科 27 种, 白三叶-苹果园 6 目 24 科 26 种, 分别较清耕果园的 5 目 21 科 23 种增加 2 目 4 科 4 种和 1 目 3 科 3 种。对不同种植模式下苹果园天敌功能团按物种计算相对丰富度, 结果发现不同间作苹果园中天敌优势种、常见种、偶见种存在差异。清耕苹果园中, 天敌优势种包括广黑点瘤姬蜂 *Xanthopimpla punctata*、球绒茧蜂 *Apanteles glomeratus*、广大腿小蜂 *Brachymeria obscurata*, 常见种为凤蝶金小蜂 *Pteromalus puparum*、叶蝉柄翅小蜂 *Lymaenon longicrus*、北方钩土蜂 *Tiphia orealeensis*、管氏肿腿蜂 *Scleroderma guani*、短腹管蚜蝇 *Eristalis arbustorum*、饰额短须寄蝇 *Linnaemya compta*、中华银长足虻 *Amblypsilopus chinensis*、斜突平须舞虻 *Platypalpus obliquus* 和异色瓢虫 *Harmonia axyridis*, 偶见种为红尾蛛蜂 *Tachypompilus analis*、绿长背泥蜂 *Ampulex compressa*、松毛虫赤眼蜂 *Trichogramma dendrolimi matsumura*、金环胡蜂 *Vesa mandarinia*、斜尾头蝇 *Clistoabdominalis ruralis*、中华驼舞虻 *Hybos chinensis*、中华单羽食虫虻 *Cophinopoda chinensis*、中华草蛉 *Chrysoperla sinica*、全北褐蛉 *Hemerobius humuli*、利氏丽花萤 *Themus licenti* 和草间小黑蛛 *Hylyphantes graminicola*; 黑麦草-苹果园相较于清耕苹果园, 常见种新增巴氏新小绥螨 *Neoseiulus barkeri*, 偶见种新增金毛长腹土蜂 *Campsomeris prismatica*、显螺赢 *Eumenes rubronotatus*、中华虎甲 *Cicindela chinensis*、昧影细螳 *Ceriagrion fallax*, 但没有中华驼舞虻; 白三叶-苹果园相较于清耕果园, 常见种新增巴氏新小绥螨, 偶见种新增黑尾叶蝉双距螯蜂 *Gonatopus lucens*、苹果绵蚜蚜小蜂 *Aphelinus mali*, 但广黑点瘤姬蜂从优势种降为常见种, 异色瓢虫从常见种降为偶见种 (表 1)。

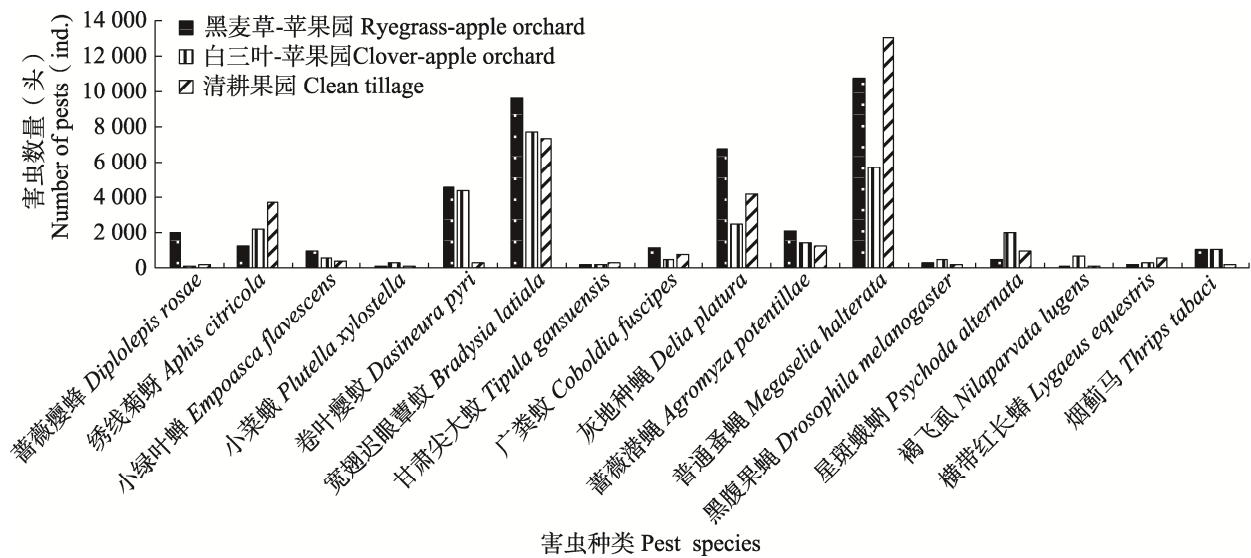


图1 不同种植模式下苹果园害虫优势种及常见种种群数量

Fig. 1 Number of dominant species and common species in apple orchards of different planting patterns

表1 不同种植模式下苹果园天敌群落构成

Table 1 Composition of natural enemy communities in apple orchards of different planting patterns

目 Order	科 Family	种 Species	黑麦草-苹果园 Ryegrass-apple orchard	白三叶-苹果园 Clover-apple orchard	清耕果园 Clean tillage
膜翅目 Hymenoptera	姬蜂科 Ichneumonidae	广黑点瘤姬蜂 <i>Xanthopimpla punctata</i>	D	C	D
	茧蜂科 Braconidae	球绒茧蜂 <i>Apanteles glomeratus</i>	D	D	D
	小蜂科 Chalcididae	广大腿小蜂 <i>Brachymeria obscurata</i>	D	D	D
		凤蝶金小蜂 <i>Pteromalus puparum</i>	C	C	C
	缨小蜂科 Thysanidae	叶蝉柄翅小蜂 <i>Lymaenon longicrus</i>	C	C	C
	钩土蜂科 Tiphidae	北方钩土蜂 <i>Tiphia oreolensis</i>	C	C	C
	蛛蜂科 Pompilidae	红尾蛛蜂 <i>Tachypompilus analis</i>	A	A	A
	泥蜂科 Sphecidae	绿长背泥蜂 <i>Ampulex compressa</i>	A	A	A
	土蜂科 Scoliidae	金毛长腹土蜂 <i>Campsomeris prismatica</i>	A	-	-
	赤眼蜂科 Trichogrammatidae	松毛虫赤眼蜂 <i>Trichogramma dendrolimi matsumura</i>	A	A	A
	胡蜂总科 Vespoidea	显螺赢 <i>Eumenes rubronotatus</i>	A	-	-
		金环胡蜂 <i>Vesa mandarinia</i>	A	A	A
	肿腿蜂科 Bethyidae	管氏肿腿蜂 <i>Scleroderma guani</i>	C	C	C
	螯蜂科 Dryinidae	黑尾叶蝉双距螯蜂 <i>Gonatopus lucens</i>	-	A	-
	蚜小蜂科 Aphelinidae	苹果绵蚜蚜小蜂 <i>Aphelinus mali</i>	-	A	-
双翅目 Diptera	食蚜蝇科 Syrphidae	短腹管蚜蝇 <i>Eristalis arbustorum</i>	C	C	C
	寄蝇科 Tachinidae	饰额短须寄蝇 <i>Linnaemya compta</i>	C	C	C
	头蝇科 Pipunculidae	斜尾头蝇 <i>Clistoabdominalis ruralis</i>	A	A	A

续表 1 (Table 1 continued)

目 Order	科 Family	种 Species	黑麦草-苹果园 Ryegrass-apple orchard	白三叶-苹果园 Clover-apple orchard	清耕果园 Clean tillage
双翅目 Diptera	长足虻科 Dolichopodidae	中华银长足虻 <i>Amblypsilopus chinensis</i>	C	C	C
	舞虻科 Empididae	斜突平须舞虻 <i>Platypalpus obliquus</i>	C	C	C
		中华驼舞虻 <i>Hybos chinensis</i>	-	A	A
	食虫虻科 Asilidae	中华单羽食虫虻 <i>Cophinopoda chinensis</i>	A	A	A
脉翅目 Diptera	草蛉科 Chrysopidae	中华草蛉 <i>Chrysoperla sinica</i>	A	A	A
	褐蛉科 Hemerobiidae	全北褐蛉 <i>Hemerobius humuli</i>	A	A	A
鞘翅目 Coleoptera	瓢虫科 Coccinellidae	异色瓢虫 <i>Harmonia axyridis</i>	A	A	C
	虎甲科 Cicindelidae	中华虎甲 <i>Cicindela chinensis</i>	A	-	-
	花萤科 Cantharidae	利氏丽花萤 <i>Themus licenti</i>	A	A	A
蜻蜓目 Odonata	细蟌科 Coenagrionidae	昧影细蟌 <i>Ceriagrion fallax</i>	A	-	-
蜘蛛目 Araneae	皿蛛科 Linyphiidae	草间小黑蛛 <i>Hylyphantes graminicola</i>	A	A	A
寄螨目 Parasitiformes	植绥螨科 Phytoseiidae	巴氏新小绥螨 <i>Neoseiulus barkeri</i>	C	C	-

D: 优势种; C: 常见种; A: 偶见种。
D: Dominant species; C: Common species; A: Accidental species.

2.2 不同种植模式下苹果园害虫及天敌种群的数量时序动态

不同种植模式下苹果园害虫种群时序变化见图 2。清耕果园害虫种群数量自 4 月 23 日起迅速上升, 分别于 5 月 24 日(4 668 头)、7 月 7 日(4 316 头)和 9 月 18 日(5 191 头)出现 3 次峰值, 其中 4 月 23 日($F = 161.99, P = 0.01 < 0.05$)、9 月 18 日($F = 12.23, P = 0.01 < 0.05$)清耕果园害虫种群数量显著高于黑麦草-苹果园和白三叶-苹果园, 5 月 9 日($F = 43.92, P < 0.001$)、5 月 24 日($F = 34.31, P < 0.001$)极显著高于黑麦草-苹果园和白三叶-苹果园; 黑麦草-苹果园的害虫种群数量上升期较清耕果园推迟 15 d, 自 5 月 9 日起持续升高, 至 8 月下旬一直呈高发态势, 全年有 3 次发生高峰期, 分别为 6 月 22 日(5 625 头)、7 月 23 日(8 122 头)和 8 月 19 日(6 042 头), 其中 6 月 9 日($F = 97.29, P < 0.001$)、6 月 22 日($F = 100.25, P < 0.001$)、

7 月 23 日($F = 325.76, P < 0.001$)害虫种群数量极显著高于白三叶-苹果园和清耕果园; 白三叶-苹果园的害虫上升期较清耕果园推迟 15 d, 且速度较为缓慢, 至 8 月 19 日才达到为害峰值(6 312 头)。黑麦草-苹果园全年害虫发生总量(46 568 头), 较清耕果园(35 828 头)增加了 29.98%, 白三叶-苹果园(33 074 头)较清耕减少 7.69%, 但三者全年发生总量无显著差异($F = 2.25, P = 0.13 > 0.05$)。

不同种植模式下果园天敌功能团种群时序变化见图 3。清耕果园天敌种群数量全年呈低位震荡, 仅在 5 月 9 日显著高于黑麦草-苹果园和白三叶-苹果园($F = 95.31, P < 0.05$); 黑麦草-苹果园天敌种群数量自 5 月 9 日起持续上升, 至 7 月 23 日达峰值(8 748 头), 6 月 22 日至 9 月 5 日期间, 黑麦草-苹果园天敌种群数量持续极显著高于白三叶-苹果园和清耕果园天敌种群数量($P < 0.001$); 白三叶-苹果园天敌种群数

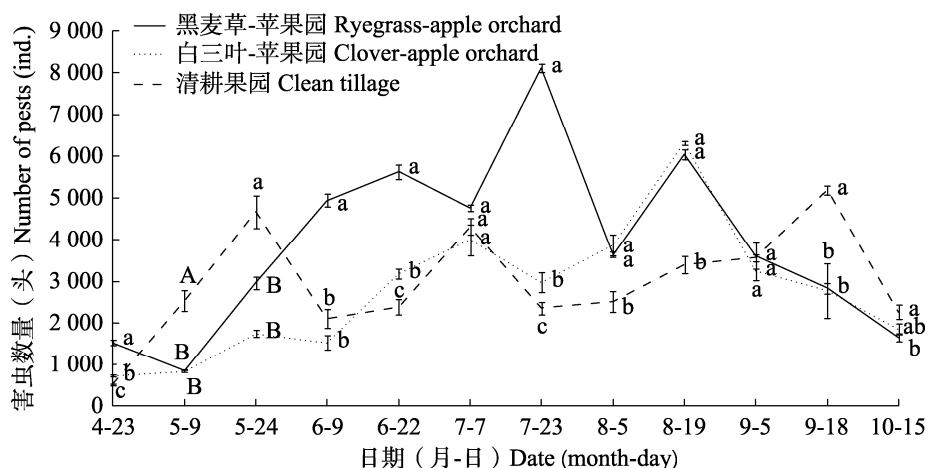


图2 3种植模式下苹果园害虫数量时序变化

Fig. 2 Temporal changes in the population of pests in apple orchards of three planting patterns

图中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, 邓肯氏新复极差法), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.001$, 邓肯氏新复极差法)。下图同。

Different lowercase letters above the broken line indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test), while different uppercase letters indicate extremely significant difference ($P < 0.001$, Duncan's multiple range test). The same below.

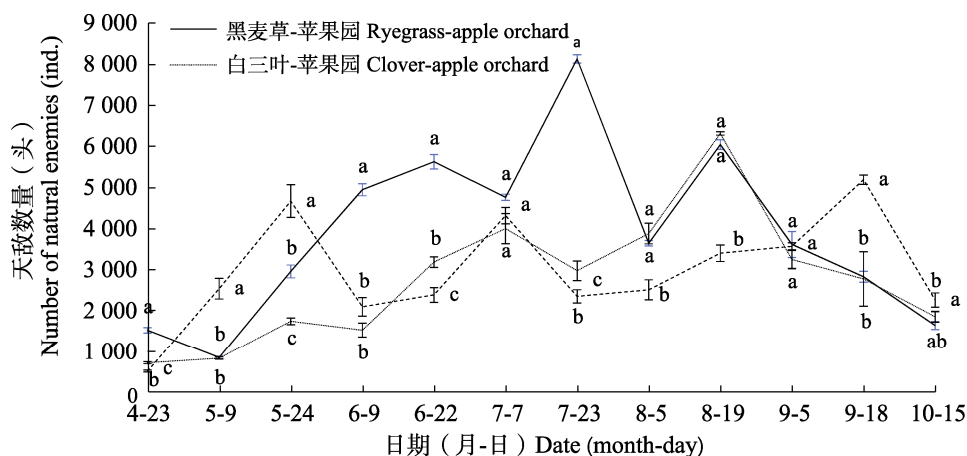


图3 3种植模式下苹果园天敌种群数量时序变化

Fig. 3 Temporal changes in the population of natural enemies in apple orchards of three planting patterns

量自4月23日起缓慢上升,至7月23日达峰值(4864头),较清耕有显著增加($F = 11.81$, $P = 0.03 < 0.05$)。黑麦草-苹果园全年天敌总量较清耕增加了205.82%,极显著高于清耕果园($F = 118.31$, $P < 0.001$);白三叶-苹果园全年天敌总量较清耕增加113.94%,极显著高于清耕果园($F = 68.72$, $P < 0.001$);黑麦草-苹果园全年天敌种群总量显著高于白三叶-苹果园($F = 16.97$, $P = 0.01 < 0.05$)。

2.3 间作绿肥对苹果园益害比的影响

不同种植模式下苹果园益害比变化趋势见图4。清耕果园益害比全年呈低位震荡,无显著峰值;黑麦草-苹果园益害比前期与清耕果园基本持平,在6月9日后快速上升,7月23日益害比峰值达1.08,之后略有下降,但持续高于同期清耕果园;白三叶-苹果园益害比高于同期清耕果园,7月23日峰值达1.63,极显著高于

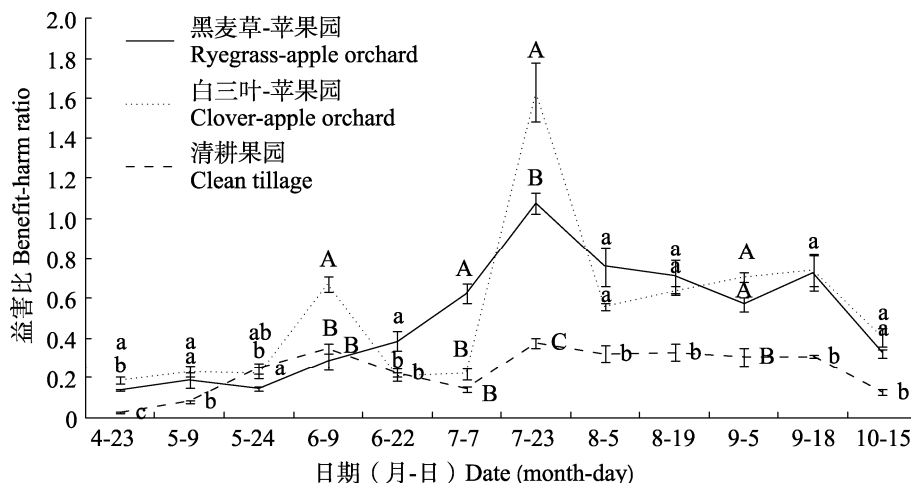


图 4 3 种植模式下苹果园益害比时序变化

Fig. 4 Variation of ratio of beneficial to harmful insect in apple orchards of three planting patterns

黑麦草-苹果园和清耕果园 ($F = 46.65$, $P < 0.001$)。差异性分析结果表明, 黑麦草-苹果园、白三叶-苹果园全年益害比显著高于清耕果园益害比 ($F = 3.55$, $P = 0.04 < 0.05$)。

2.4 间作绿肥对苹果园生物多样性及群落稳定性的影响

对不同种植模式进行多样性分析 (表 2), 结果表明白三叶-苹果园和黑麦草-苹果园的 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于清耕果园 ($F = 4.24$, $P = 0.02 < 0.05$), Simpson 优势度指数极显著高于清耕果园 ($F = 9.57$, $P < 0.001$), 表明白三叶-苹果园和黑麦草-苹果园种植模式下害虫群落和天敌功能团多样性更高; 白三叶-苹果园和黑麦草-苹果园的 Margalef 丰富度指数显著高于清耕果园 ($F = 4.06$, $P = 0.03 < 0.05$), 表明白三叶-苹果园和黑麦草-苹果园种植模式下物种更丰富。

群落稳定性分析结果表明 (表 2), 黑麦草-苹果园和白三叶-苹果园种植模式下的 Pielou 均匀度指数极显著高于清耕果园 ($F = 6.43$, $P < 0.001$), S_n/S_p 指数显著高于清耕果园种植模式 ($F = 11.20$, $P = 0.01 < 0.05$), S/N 稳定性指数与清耕果园种植模式差异不显著 ($F = 6.43$, $P = 0.69 > 0.05$), 但高于清耕种植模式, 表明黑麦草-苹果园和白三叶-苹果园种植模式下, 昆虫各功能及物种之间制约性更强, 群落稳定性更高。

对不同种植模式下天敌及害虫群落聚类分析表明 (图 5: A, B), 兰氏距离为 2.27 和 2.15 时, 苹果园种植模式分为两类, 一类是清耕果园, 一类是黑麦草-苹果园和白三叶-苹果园, 这也说明绿肥间作改变了苹果园害虫群落及天敌功能团的结构和组成。

3 结论与讨论

3.1 绿肥间作模式下的微生境重构对苹果园害虫的调控作用

不同的种植格局可以直接影响害虫的个体存活、物种多样性和种群波动, 对植食性害虫产生多层次调控效应 (江婷等, 2019)。结果表明, 黑麦草-苹果园和白三叶-苹果园害虫上升期较清耕延后 15 d, 且蚜虫种群数量分别较清耕降低 65.32% 和 41.14%, 蚜虫由清耕果园的优势种群降为常见种, 证明苹果园间作黑麦草和白三叶在时间生态位和空间生态位对害虫尤其是蚜虫形成双重遏制。苹果园间作白三叶害虫发生总量较清耕下降 7.69%, 展现出更为显著的防控效应, 这可能与白三叶的匍匐生长特性造成物理阻隔和其特异的化学挥发物干扰害虫的定位行为有关 (李磊, 2023)。间作黑麦草的防控效果则呈现复杂性, 优势种蚜虫数量大幅下降, 但害虫总量较清耕增加 29.98%, 这可能源于三维生态位重构, 即黑麦草兼具物理屏障效应与避护所功

表 2 3 种植模式下苹果园生物多样性和群落稳定性指数比较

Table 2 Comparison of species diversity and community stability indices in apple orchards under three planting patterns

种植模式 Planting patterns	多样性指数 Shannon-Wiener index	优势度指数 Simpson index	丰富度指数 Margalef index	均匀度指数 Pielou index	稳定性指数 S_n/S_p index	稳定性指数 S/N index
白三叶-苹果园 Clover-apple orchard	2.65 ± 0.09 a	0.89 ± 0.02 A	6.56 ± 0.26 a	0.34 ± 0.01 A	0.42 ± 0.01 a	0.016 ± 0.030 a
黑麦草-苹果园 Ryegrass-apple orchard	2.75 ± 0.06 a	0.90 ± 0.01 A	6.51 ± 0.19 a	0.33 ± 0.01 A	0.38 ± 0.01 a	0.014 ± 0.030 a
清耕果园 Clean tillage	2.38 ± 0.11 b	0.81 ± 0.03 B	5.44 ± 0.26 b	0.29 ± 0.01 B	0.30 ± 0.03 b	0.013 ± 0.001 a

表中数据为平均值 $\pm$ 标准误, 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, 邓肯氏新复极差法), 不同大写字母表示差异极显著 ($P < 0.001$, 邓肯氏新复极差法)。

Data in the table are mean $\pm$ SE, and followed by the different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$, Duncan's multiple range test), while different uppercase letters indicate extremely significant difference ($P < 0.001$, Duncan's multiple range test).

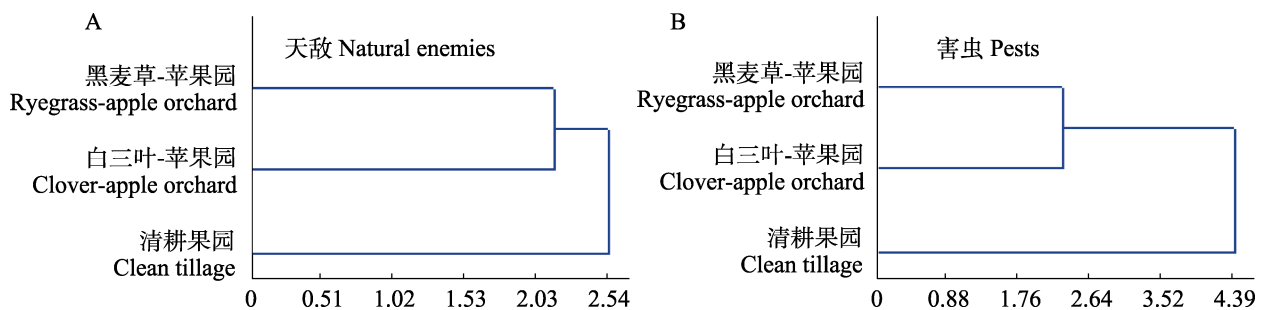


图 5 不同种植模式下天敌 (A) 及害虫种群聚类分析 (B)

Fig. 5 Species clustering analysis of natural enemies (A) and pests (B) of different planting patterns

能, 其冠层结构易形成“害虫-天敌”的空间解耦带, 同时作为替代寄主削弱天敌控害效能, 从而导致次要害虫数量上升 (Dawadi *et al.*, 2019), 这也验证了昆虫生境管理中的垂直结构假说, 即中间作物高度/密度超过临界值会引发非靶标效应 (Muasya *et al.*, 2024)。有报道表明, 新疆地区苹果园间作黑麦草, 由于其长势较高, 为各类害虫提供了良好的躲避空间, 对天敌的捕食造成了一定的干扰和阻碍 (封帆, 2022), 且黑麦草本身易滋生叶蝉、盲蝽、长蝽、跳甲、夜蛾等害虫 (张莉等, 2017), 本研究结果中黑麦草-苹果园内叶蝉、柔粘夜蛾、粘虫、盲蝽、跳甲等次要害虫数量均有较大幅度增加, 与上述报道基本一致。

3.2 间作绿肥对苹果园天敌功能团的强化作用

生态学多样性理论表明, 间作可增加生态系统中天敌的源, 增强天敌功能团的生物控害能力

(戈峰等, 2014; 段志龙等, 2022)。本研究表明, 白三叶-苹果园新增偶见种螯蜂和蚜小蜂, 且 2 种绿肥间作园内姬蜂、茧蜂、小蜂、缨小蜂、赤眼蜂、肿腿蜂等寄生蜂种群数量显著增加, 可能是其作为蜜源植物通过“植物-害虫-天敌”三营养级相互作用增强寄生性天敌的营养支撑 (Jaccard *et al.*, 2022)。绿肥间作苹果园内植绥螨以从属种稳定存在, 且新增偶见种虎甲、细螳, 而清耕园为偶见种或缺失, 天敌总量分别较清耕增加 113.94% 和 205.82%, 益害比峰值达 1.63 和 1.08, 说明间作白三叶和黑麦草增加天敌种群数量, 优化了天敌群落结构, 这可能与间作绿肥能够优化生境结构、营养级联供给 (时培建等, 2014; Tang *et al.*, 2014; 蔡志平等, 2020), 也与绿肥本身挥发物产生的“推-拉”综合效应有关 (Uefune *et al.*, 2017; 孙仲享等, 2019)。综上, 间作白三叶和黑麦草可以增加果园生态系统空间互补功能, 通过蜘蛛、虎甲等构建地面至

低空害虫防线,配合双翅目、蜻蜓目等冠层捕食性天敌和姬蜂、茧蜂等寄生链实现垂直阻断,从不同生态位遏制害虫发生,升级果园功能质量。有报道表明,果园间作黑麦草,高峰期草蛉、食蚜蝇、瓢虫种群数量是清耕的 1.3-1.5 倍,苹果园间作紫花苜蓿 *Medicago sativa* 食蚜蝇种群数量高峰期达 3.22 头/板,草蛉、瓢虫等天敌种群数量也有显著增加,人工生草园益害比是清耕的 22.88 倍(达先鹏, 2020; 李丽莉等, 2021; 李貌等, 2025), 本研究结果与上述报道一致。

3.3 间作绿肥对果园生物多样性的影响

绿肥间作可以增加果园生态系统的生物多样性,形成平衡稳定的生态系统(戈峰等, 2014)。本研究表明,白三叶-苹果园、黑麦草-苹果园 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于清耕,表明间作绿肥显著提升了苹果园生态系统的生物多样性,这可能与绿肥覆盖减少了土壤翻动,促进地表节肢动物和微生物的栖息与繁殖,进而提供了多样化的生态位和微生境有关(付兴飞等, 2024)。绿肥间作的 Margalef 丰富度指数显著高于清耕,表明间作绿肥对物种增加有促进作用,间作白三叶或黑麦草可能吸引更多伴生昆虫及其它生物(Saunders and Luck, 2018)。此外,间作绿肥果园的稳定性指数(S_n/S_p)显著优于清耕,说明间作绿肥可增强群落稳定性和资源均衡配置,提升生态系统的抗干扰能力。综合绿肥间作果园内群落多样性和稳定性各项指标,间作白三叶和黑麦草为害虫及天敌的生长繁殖提供了适宜的环境,能有效提高生物多样性,进而提高生态系统稳定性,形成“缓冲-过滤-增殖”三位一体效应。黑麦草-苹果园群落多样性和稳定性指数略低于白三叶-苹果园,可能是因为二者均可优化果园生物群落的多样性与稳定性,但白三叶的小气候综合效应优于黑麦草(李会科等, 2009)。

综上,间作白三叶、黑麦草可有效降低苹果园优势害虫蚜虫的发生量,显著提高天敌种类、种群数量及益害比,生物多样性更高,物种之间制约性更强,群落稳定性更好,但间作黑麦草可

能引起其它害虫种群数量的上升,果园间作绿肥应综合考虑绿肥潜在害虫与绿肥本身特性。

参考文献 (References)

- Ashraf M, Hassan S, Ahmad Dar S, 2023. Perceptions of pesticide use and health risks among apple growers in Kashmir Himalaya. *JSFA Reports*, 3(8): 397–404.
- Bryan CJ, Sipes SD, Arduser M, Kassim L, Gibson DJ, Scott DA, Gage KL, 2021. Efficacy of cover crops for pollinator habitat provision and weed suppression. *Environmental Entomology*, 50(1): 208–221.
- Brunner JF, Dunley JE, Doerr MD, Beers EH, 2024. Effect of pesticides on *Colpoclypeus florus* (Hymenoptera: Eulophidae) and *Trichogramma platneri* (Hymenoptera: Trichogrammatidae), parasitoids of leafrollers in Washington. *Journal of Economic Entomology*, 94(5): 1075–1084.
- Cao WD, Bao XG, Xu CX, Nie J, Gao YJ, Geng MJ, 2017. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 23(6): 1450–1461.
- [曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 聂军, 高亚军, 耿明建, 2017. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望. 植物营养与肥料学报, 23(6): 1450–1461.]
- Cai ZP, 2020. Effects of ecological regulation on spirea aphid (*Aphis spiraeicola*) and predatory natural enemies in apple orchards by three functional plants. Doctor dissertation. Shihezi: Shihezi University. [蔡志平, 2020. 三种功能植物对苹果园绣线菊蚜及其捕食性天敌的调控作用. 博士学位论文. 石河子: 石河子大学.]
- da Consolação Rosado M, de Araújo GJ, Pallini A, Venzon M, 2021. Cover crop intercropping increases biological control in coffee crops. *Biological Control*, 160: 104675.
- Da XP, 2020. Effects of intercropping green manure in apple orchards on occurrence dynamics and time niche of pests and natural enemies. Master dissertation. Alaer: Tarim university. [达先鹏, 2020. 苹果园间作绿肥对害虫和天敌发生动态及时间生态位的影响. 硕士学位论文. 阿拉尔: 塔里木大学.]
- Dalmaso G, Ioriatti C, Gualandri V, Zapponi L, Mazzoni V, Mori N, Baldessari M, 2023. *Orientus ishidae* (Hemiptera: Cicadellidae): Biology, direct damage and preliminary studies on apple proliferation infection in apple orchard. *Insects*, 14(3): 246.
- Dawadi S, Oliver JB, O'Neal P, Addesso KM, 2019. Management of flatheaded appletree borer (*Chrysobothris femorata* Olivier) in woody ornamental nursery production with a winter cover crop. *Pest Management Science*, 75(7): 1971–1978.

- Duan ZL, Wang CG, Wang H, Jiang XF, 2022. Diversity of functional insect groups in orchards planted with two different companion plant crops. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 59(2): 426–434. [段志龙, 王晨光, 王辉, 江幸福, 2022. 不同果园绿肥种植模式下昆虫功能团多样性分析. 应用昆虫学报, 59(2): 426–434.]
- Fan ZL, Chai Q, Cao WD, Yu AZ, Zhao C, Xie JH, Yin W, Hu FL, 2020. Ecosystem service function of green manure and its application in dryland agriculture of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 31(4): 1389–1402. [樊志龙, 柴强, 曹卫东, 于爱忠, 赵财, 谢军红, 殷文, 胡发龙, 2020. 绿肥在我国旱地农业生态系统中的服务功能及其应用. 应用生态学报, 31(4): 1389–1402.]
- Feng F, 2022. Effects of inter cropping grass on microenvironment, insect community and fruit quality in apple orchard. Master dissertation. Urumqi: Xinjiang Agricultural University. [封帆, 2022. 林下生草对苹果园小环境和昆虫群落及果实品质的影响. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆农业大学.]
- Fu XF, Hu FG, Li GP, Li YN, Huang JX, Li YQ, Yu HH, Yang Y, 2024. Effects of green manure on diversity of arthropod functional groups in coffee orchards. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 36(3): 54–60. [付兴飞, 胡发广, 李贵平, 李亚男, 黄家雄, 李亚麒, 喻好好, 杨畅, 2024. 绿肥植物对咖啡园节肢动物功能团多样性的影响. 江西农业学报, 36(3): 54–60.]
- Ge F, Ouyang F, Zhao ZH, 2014. Ecological management of insects based on ecological services at a landscape scale. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(3): 597–605. [戈峰, 欧阳芳, 赵紫华, 2014. 基于服务功能的昆虫生态调控理论. 应用昆虫学报, 51(3): 597–605.]
- Gao SH, Lu CK, Jia YX, Zhao CM, Cao X, 2019. A new pest in vineyard under grass management model: Study on the biological characteristics and control of *Smaragdina nigrifrons*. *Journal of Fruit Trees*, 36(9): 1185–1193. [高素红, 路常宽, 贾月霞, 赵春明, 曹璇, 2019. 酿酒葡萄园生草管理模式下新发害虫-黑额光叶甲的生物学特性及其防控. 果树学报, 36(9): 1185–1193.]
- Hu GP, Ye C, Cao HM, Wang YW, Cai X, Wang LX, Wang F, Zhang GB, 2021. Effects of intercropping on the population of *Empoasca onukii* Matsuda and its natural enemies guilds. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 42(6): 1770–1776. [胡桂萍, 叶川, 曹红妹, 王亚威, 蔡翔, 王礼献, 王丰, 张国彪, 2021. 茶园三种间作模式对小贯小绿叶蝉及其天敌功能团群落的影响. 热带作物学报, 42(6): 1770–1776.]
- Harbach CJ, Tylka GL, 2022. Assessing direct and residual effects of cover crops on the soybean cyst nematode, *Heterodera glycines*. *Plant Disease*, 106(5): 1486–1491.
- Jaccard C, Marguier NT, Arce CCM, Bruno P, Glauser G, Turlings TCJ, Benrey B, 2022. The effect of squash domestication on a belowground tritrophic interaction. *Plant-Environment Interactions*, 3(1): 28–39.
- Jiang T, Fu DM, Zhang WN, Zou Y, Xiao HJ, 2019. Regulating effect of agricultural landscape pattern on ecological pest control by natural enemies. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30(7): 2511–2520. [江婷, 付道猛, 张万娜, 邹怡, 肖海军, 2019. 农田景观格局对害虫天敌生态控害功能的调控作用. 应用生态学报, 30(7): 2511–2520.]
- Jiang XF, Liu YQ, Zhang L, Cheng YX, Song LL, 2018. Current status and development trends in the occurrence and control of insect pests in green manure crops. *Plant Protection*, 44(5): 61–68. [江幸福, 刘悦秋, 张蕾, 程云霞, 宋琳琳, 2018. 绿肥害虫发生与防控研究现状与发展趋势. 植物保护, 44(5): 61–68.]
- Le Gall M, Boucher M, Tooker JF, 2022. Planted-green cover crops in maize/soybean rotations confer stronger bottom-up than top-down control of slugs. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 334: 107980.
- Leite NA, Teatini BC, Mendes SM, da Silva AF, 2022. Effect of starvation and feeding on desiccated cover crops (*Urochloa* spp.), in different time periods, on the survival and biomass of *Spodoptera frugiperda*. *Crop Protection*, 153: 105888.
- Li HK, Mei LX, Gao H, 2009. Effect of grass planting on the microclimate of apple orchard in the dryland area of Loess Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 17(5): 615–620. [李会科, 梅立新, 高华, 2009. 黄土高原旱地苹果园生草对果园小气候的影响. 草地学报, 17(5): 615–620.]
- Li L, 2023. Effects of intercropping functional plants on arthropod community in a tea plantation. Master dissertation. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. [李磊, 2023. 间作功能植物对茶园节肢动物群落的影响. 硕士学位论文. 福州: 福建农林大学.]
- Li LL, Men XY, Guo WX, Qu CH, Cao HJ, Ding L, Zhu WJ, Qu ZL, Li Z, Lü SH, Song YY, Cui HY, 2021. Effects of grass-growing patterns on the population dynamics of natural enemies and management of *Aphis citricola* in apple orchards. *Chinese Journal of Biological Control*, 37(5): 885–891. [李丽莉, 门兴元, 郭文秀, 曲诚怀, 曹洪建, 丁荔, 朱文君, 曲在亮, 李卓, 吕素洪, 宋莹莹, 崔洪莹, 2021. 生草模式对苹果园天敌及其调控苹果绣线菊蚜作用的影响. 中国生物防治学报, 37(5): 885–891.]
- Li M, Chen SR, Huang GY, Gong ZB, Li C, Zhang JL, Chen GH, Li YG, Zhang XM, 2025. Population dynamics and temporal niche

- of main pests and natural enemies in apple orchards under different planting patterns. *Chinese Journal of Ecology*, 44(2): 471–481. [李貌, 陈思蓉, 黄国嫣, 龚占斌, 李超, 张金龙, 陈国华, 李云国, 张晓明, 2025. 不同种植模式下苹果园主要害虫和天敌种群动态及时间生态位. 生态学杂志, 44(2): 471–481.]
- Li ZX, Nie JY, Li J, Xu GF, Li HF, Yan Z, Wu YL, Kuang LX, 2014. Analysis and suggestions on the development of apple industry in China. *China Fruits*, 2014(5): 81–84. [李志霞, 聂继云, 李静, 徐国锋, 李海飞, 闫震, 毋永龙, 匡立学, 2014. 我国苹果产业发展分析与建议. 中国果树, 2014(5): 81–84.]
- Ma KP, 1994. Methods for measuring the diversity of biological communities: I α measurement methods of diversity. *Biodiversity Science*, 3(3): 38–43. [马克平, 1994. 生物群落多样性的测度方法: I α 多样性的测度方法(上). 生物多样性, 3(3): 38–43.]
- Muasya AM, Slingsby JA, Verboom GA, 2024. Preface to the special issue on African flora in a changing world: Integrating multiple dimensions of diversity. *Annals of Botany*, 133(5/6): 643–648.
- Pålsson J, Porcel M, Hansen MF, Offenberg J, Nardin T, Larcher R, Tassin M, 2020. Aphid-infested beans divert ant attendance from the rosy apple aphid in apple-bean intercropping. *Scientific Reports*, 10: 8209.
- Pretty J, Benton TG, Bharucha ZP, Dicks LV, Flora CB, Godfray HCJ, Goulson D, Hartley S, Lampkin N, Morris C, Pierzynski G, Vara Prasad PV, Reganold J, Rockström J, Smith P, Thorne P, Wratten S, 2018. Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8): 441–446.
- Saunders ME, Luck GW, 2018. Interaction effects between local flower richness and distance to natural woodland on pest and beneficial insects in apple orchards. *Agricultural and Forest Entomology*, 20(2): 279–287.
- Shi PJ, Hui C, Men XY, Zhao ZH, Ouyang F, Ge F, Jin XS, Cao HF, Li BL, 2014. Cascade effect of crop diversity on the diversity of pests and their natural enemies. *Science China (Life Sciences)*, 44(1): 75–84. [时培建, 惠苍, 门兴元, 赵紫华, 欧阳芳, 戈峰, 金显仕, 曹海锋, Li Bai Larry, 2014. 作物多样性对害虫及其天敌多样性的级联效应. 中国科学(生命科学), 44(1): 75–84.]
- Sun ZX, Song YY, Zeng RS, 2019. Advances in studies on intraspecific and interspecific relationships mediated by plant volatiles. *Journal of South China Agricultural University*, 40(5): 166–174. [孙仲亨, 宋圆圆, 曾任森, 2019. 植物挥发物介导的种内与种间关系研究进展. 华南农业大学学报, 40(5): 166–174.]
- Tang BZ, Xu L, Hou YM, 2014. Effects of rearing conditions on the parasitism of *Tetrastichus brontispae* on its pupal host *Octodonta nipae*. *BioControl*, 59(6): 647–657.
- Uefune M, Shiojiri K, Takabayashi J, 2017. Oviposition of diamondback moth *Plutella xylostella* females is affected by herbivore-induced plant volatiles that attract the larval parasitoid *Cotesia vestalis*. *Anthropod-Plant Interactions*, 11(2): 235–239.
- Xu XT, 2021. Analysis of government functions in the development of characteristic agriculture under the background of rural revitalization—a case study of the apple industry in Gansu Province. *Investment and Entrepreneurship*, 32(7): 81–83. [许馨天, 2021. 乡村振兴背景下特色农业发展中的政府职能探析—以甘肃苹果产业为例. 投资与创业, 32(7): 81–83.]
- Yang JL, Jia RH, Wang CL, Zhang Z, Wang XJ, Wang ZL, Zhao XN, Feng H, 2021. Effects of intercropping rape on soil moisture and quality of apple fruit in an apple orchard in the Loess Plateau. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 27(8): 1397–1406. [杨建利, 贾如浩, 王春丽, 张智, 王小军, 王周礼, 赵西宁, 冯浩, 2021. 黄土高原苹果园间作油菜对土壤水分与苹果品质的影响. 植物营养与肥料学报, 27(8): 1397–1406.]
- Yu SH, Zhu GL, Dong H, Mu XL, Shi GF, Zheng Z, Ren H, 2022. Effects of intercropping green manure and drip irrigation on soil fertility and apple fruit quality in apple orchards. *Chinese Journal of Soil Science*, 53(3): 640–647. [于淑慧, 朱国梁, 董浩, 牟小翎, 史桂芳, 郑铮, 任寒, 2022. 绿肥间作和滴灌对苹果园土壤肥力和果实品质的影响. 土壤通报, 53(3): 640–647.]
- Zhang L, Su S, Lv ZY, Zhou YF, Meng ZH, 2017. Insect species investigation of *Lolium perenne* artificial grassland in Guizhou Province. *Guizhou Agricultural Sciences*, 45(1): 59–61. [张莉, 苏生, 吕召云, 周玉峰, 孟泽洪, 2017. 贵州黑麦草人工草地害虫种类调查. 贵州农业科学, 2017, 45(1): 59–61.]