功能植物驱动的外来入侵害虫生态防控的理论与技术*

颜 越[1**] 戈 峰[2] 刘贾婧[3] 门兴元[2***]

（1. 山东农业生态与资源保护总站，济南 250100；2. 山东省农业科学院植物保护研究所，山东省农业有害生物绿色防控重点实验室，济南 250100；3. 中国农业大学，北京 100083）

摘 要 外来入侵害虫已成为威胁农业可持续发展的关键生物因子，其通过重构食物网结构、改变资源利用方式并打破生态过程的时空耦合，使农田生态防控由稳态调控系统转向非平衡动态系统。在此背景下，功能植物作为连接植物-害虫-天敌多营养级互作的关键节点，为外来入侵害虫的生态防控提供了新的调控路径。本文系统梳理了功能植物驱动生态防控的理论基础，揭示其通过资源供给、行为调控与食物网重构增强生态防控服务的机制。进一步提出，在入侵情境下，生态防控面临资源与功能匹配失效、时空过程失配及系统与管理约束等关键限制，导致调控效果呈现情境依赖性。基于此，构建了面向约束机制的功能植物驱动技术体系，强调通过功能性状导向筛选、多尺度空间配置及多机制协同，实现由局部干预向系统调控的转变。总之，功能植物驱动的生态防控为应对入侵害虫提供了重要途径，但其稳定应用仍依赖于机制解析与跨尺度整合。未来需发展面向非平衡动态系统的新理论与技术体系，以支撑农业绿色转型与生物安全。

关键词 功能植物；外来入侵害虫；生态防控；尺度失配；生态工程

The ecological control of alien invasive pests by functional plants

YAN Yue[1**] GE Feng[2] LIU Jia-Jing[3] MEN Xing-Yuan[2***]

(1. Shandong General Station of Agricultural Ecology and Resource Protection, Jinan 250100, China; 2. Shandong Key Laboratory for Green Prevention and Control of Agricultural Pests, Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; 3. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Invasive, alien, insect pests have become a major threat to agricultural sustainability. By restructuring food webs, altering resource utilization, and disrupting the spatiotemporal coupling of ecological processes, they drive agroecosystem pest regulation from a steady-state system toward a non-equilibrium dynamic system. Functional plants, acting as key nodes linking plant-herbivore-natural enemy interactions, provide a novel pathway for ecological pest control. This study systematically synthesizes the theoretical foundations of functional plant-driven ecological control, elucidating the underlying mechanisms, including resource provisioning, behavioral regulation, and food web restructuring, that enhance biological control services. Furthermore, we identify critical constraints under invasion scenarios, including resource-function mismatches, spatiotemporal mismatches, and system-and management-level limitations, which lead to strong context dependency in control outcomes. Based on these constraints, a functional plant-driven ecological control framework is proposed, emphasizing trait-based plant selection, multiscale spatial configuration, and multi-mechanism integration to shift from local interventions to system-level regulation. Overall, functional plant-driven ecological control represents a promising strategy for managing invasive pests. However, its stable implementation depends on deeper mechanistic understanding and cross-scale integration. Future research

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划重点专项（2017YFD0200400）；山东省农业重大技术协同推广计划（SDNYXTTG-2025-36）

**第一作者 First author，E-mail：yanyue@shandong.cn

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：menxy2000@hotmail.com

收稿日期 Received：2026-04-13；接受日期 Accepted：2026-06-02

should focus on developing new theoretical and technological frameworks tailored to non-eilibrium systems to support sustainable agriculture and biosecurity.

Key words　functional plants; invasive alien insect pests; ecological pest control; scale mismatch; ecological engineering

全球范围内害虫入侵呈现出明显的加剧趋势（Bertelsmeier *et al.*, 2025），入侵害虫通过改变物种组成、干扰营养级结构并重塑生态过程，正在深刻影响农田生态系统的运行机制（Ismail *et al.*, 2025）。外来入侵害虫进入新生态系统后往往打破原有共进化关系，导致天敌调控失效与食物网结构变化，从而显著增加暴发风险。在农业害虫管理中化学农药长期大量使用已引发一系列生态与环境问题，包括农田生态系统中生物多样性下降和生态系统服务功能削弱（Nchu, 2024）。近年来，基于生态过程调控的生态防控逐渐成为国际研究热点，这不仅能够减少化学农药使用，还可通过增强生态系统稳定性实现农业生产的长期可持续发展（Wyckhuys *et al.*, 2020; 戈峰等, 2025a）。然而，入侵害虫通过引发天敌释放效应、资源利用重构以及物候不同步，改变了生态防控赖以发挥作用的关键机制，从而使其从稳态调控系统转变为非平衡动态系统（Ismail *et al.*, 2025）。因此，如何在入侵情境下提升害虫生态防控的稳定性与有效性，已成为亟待解决的核心科学问题。

在众多生态防控策略中，功能植物驱动的害虫生态防控突显其独特优势。功能植物通过直接抑制害虫（如生物活性物质或寄主替代），以及间接增强天敌作用等机制，提升农田景观的生态控害功能（Dong *et al.*, 2026）。功能植物不仅是资源供给单元，更是调控生态过程的重要驱动因子。功能植物驱动的生态防控在应对外来入侵害虫时仍面临诸多挑战。一方面，入侵害虫可能直接利用功能植物提供的资源，从而削弱其调控效果；另一方面，入侵害虫的快速扩散能力可能突破生态服务区的空间限制，使局部调控难以在更大尺度上发挥作用。此外，高强度农业管理往往削弱景观尺度生物多样性的溢出效应，从而限制功能植物在生态防控中的潜在作用（Wyckhuys *et al.*, 2025）。这表明，单纯依赖常规的功能植物配置策略难以实现对入侵害虫的稳定控制。当前害虫生态防控逐渐从单一措施优化转向生态系统工程化调控，强调通过多尺度生态结构设计与功能植物配置来实现生态防控功能的系统性提升（门兴元和戈峰, 2025）。这不仅要求从机制层面理解功能植物-害虫-天敌之间的复杂相互作用，还需要在空间与时间尺度上实现调控过程的协同优化。而且，生态防控通过与农业可持续发展目标相结合，进而减少农药依赖，并提升生态系统服务功能，最终实现生态与经济效益的协同提升（Wyckhuys *et al.*, 2020; 戈峰等, 2025b）。

在全球范围害虫入侵加速的背景下，系统梳理功能植物驱动生态防控在外来入侵害虫情境下的理论基础与技术路径，具有重要的科学意义与实践价值。本文围绕入侵害虫-生态系统-调控机制-技术体系这一主线，重点分析外来入侵害虫对生态防控的影响路径，阐明功能植物在增强农田生态系统防御能力中的作用机制，构建面向入侵害虫的生态防控技术体系与应用模式，为外来入侵害虫的绿色防控提供理论和技术支撑。

1　外来入侵害虫的生态系统效应

外来入侵害虫对农业生产影响不仅体现在直接的作物危害，更深层次地表现为对生态系统结构、功能与稳定性的系统性扰动。近年来，国际生态学研究逐渐从种群层面影响转向生态系统过程重构，揭示了入侵害虫通过多途径改变食物网结构、生物多样性与生态系统服务，从而导致农田生态系统抗性与恢复力的持续下降（IPBES, 2023）。

1.1　天敌逃逸与食物网结构简化

天敌逃逸假说（Enemy release hypothesis）被认为是外来入侵害虫成功定殖与暴发的核心机制之一。入侵物种在新生境中往往缺乏原生天敌约束，使其种群迅速增长并占据优势生态位

（Keane and Crawley, 2002）。这一过程直接削弱了农田生态系统中的自上而下（Top-down）的调控机制，导致食物网由多营养级结构向简化结构转变。现代农业集约化，农田景观简化与农药干扰会进一步削弱天敌群落，使生物控害功能显著下降、害虫暴发（Bommarco, 2024; Wyckhuys *et al.*, 2025）。此外，生态系统功能受损后，需付出更高经济成本来替代生物防控作用，反映了食物网结构破坏的深远影响（Frank, 2024）。因此，入侵害虫不仅是增加一个物种，还通过打破原有的营养级关系，导致生态系统调控能力的系统性衰退。

1.2 生态位重构与生物多样性下降

外来入侵害虫通常具有较强的资源利用能力与生态适应能力，其入侵过程往往伴随着生态位重构与本地物种替代。入侵物种能够通过资源竞争、干扰竞争及化学调控等方式，改变本地物种的分布格局，从而导致生物多样性下降（Early *et al.*, 2016）。在农田生态系统中，这一过程往往表现为害虫优势种的形成与群落结构单一化。入侵物种能够通过生物同质化过程使生态系统在物种组成与功能上趋于单一，从而降低生态系统稳定性（Nunez-Mir and McCary, 2024）。生物多样性的下降不仅削弱了生态系统的结构复杂性，还降低了其提供生态系统服务的能力（Letourneau *et al.*, 2009; Dainese *et al.*, 2019）。因此，入侵害虫可通过生态位重构间接削弱农田生态系统的控害能力。

1.3 时空匹配失调与生态过程紊乱

近年来，时空匹配在生态系统稳定性中的关键作用越来越得到重视。外来害虫入侵往往打破原有的物候同步关系，导致害虫与天敌之间出现时间错配，从而削弱生物调控效应（Visser and Gienapp, 2019）。在农田系统中，害虫种群往往能更快地响应气候变化或资源波动，而天敌种群响应滞后，进而导致短期内害虫逃逸调控。在空间尺度上，半自然生境的减少会显著降低天敌扩散能力，从而削弱区域尺度的生物防控效果（Bianchi *et al.*, 2006）。农业景观破碎化与非作物生境减少，使天敌难以在空间上追踪害虫资源，进一步加剧调控失效（Tscharntke *et al.*, 2012）。因此，害虫入侵到农田生态系统后，不仅改变了系统中的物种组成，还扰动了天敌的时空动态与控害功能，从而导致生态过程紊乱。

1.4 生态系统功能退化与抗性下降

从生态系统层面，外来入侵害虫的综合效应最终表现为生态系统功能退化，如生物防控服务下降，导致农业对化学农药依赖增加；授粉、养分循环等关键生态过程受到干扰（Potts *et al.*, 2016）。更重要的是入侵过程显著降低了生态系统的抗性与恢复力。其中，抗性指系统抵御干扰的能力，而恢复力则指系统在干扰后恢复原有状态的能力。生物多样性下降与生态系统恢复力降低密切相关，而生态恢复措施可以显著提升系统应对扰动的能力（Selwyn *et al.*, 2025）。此外，农业集约化与入侵物种叠加效应，会进一步放大系统脆弱性。如农药使用不仅直接杀伤天敌，还会破坏植物-微生物共生关系，导致生态系统功能进一步下降（Edlinger *et al.*, 2022）。

外来入侵害虫通过天敌逃逸、生态位重构、时空错配和功能退化等多重路径，对农田生态系统产生系统性影响。其核心结果并非单一害虫种群增加，而是生态系统结构与功能失衡。因此，外来入侵害虫问题的本质，不是害虫控制问题，而是生态系统功能降低或抗性丧失问题。

2 入侵情境下生态防控的理论挑战

生态防控理论基于自上而下（Top-down）与自下而上（Bottom-up）调控[即上行效应和下行效应，两者通称为营养级联效应（Trophic cascading effects）]的耦合，强调通过增强天敌作用与优化植物资源配置，实现对害虫种群的稳定抑制（Costamagna *et al.*, 2007; Han *et al.*, 2022）。然而，该理论的重要前提是农业生态系统中物种关系已通过长期共进化形成相对稳定的结构。在外来入侵害虫情境下，这一前提被系统性打破，从而对生态防控构成多维挑战。

第一，入侵害虫通过天敌释放效应削弱自上

而下的调控。由于缺乏专一性天敌，其种群可迅速扩张（Ismail *et al*., 2025），并导致捕食与寄生压力下降，进而引发食物网简化与系统稳定性降低（Sánchez-Bayo and Wyckhuys, 2019）。第二，入侵过程重塑资源利用结构，扰动自下而上的调控机制。生态防控通常依赖花蜜、花粉等资源维持天敌种群，但其效果取决于资源与不同营养级生物的匹配关系（Wyckhuys *et al.*, 2025）。广食性入侵害虫可直接利用这些资源，形成资源反向利用，从而削弱调控效应。第三，时间失配进一步降低调控稳定性。生态防控依赖害虫与天敌的时间同步，而入侵害虫往往具有不同发育节律与气候适应性，其与天敌活动期的不匹配将直接削弱其控制效率。第四，空间尺度失配加剧调控不稳定性。入侵害虫通常具备更强扩散能力，其种群动态受景观乃至区域尺度过程驱动，而传统生态防控多集中于田间尺度，导致局部措施难以维持长期效果（Tscharntke *et al*., 2012）。第五，生态防控在入侵系统中的预测能力显著受限。自然生物防控效果具有高度情境依赖性，难以通过统一模型准确预测（Alexandridis *et al.*, 2021），而入侵害虫种群动态常表现为非线性波动与突发性暴发，使基于稳态假设的理论难以适用。

总之，外来入侵害虫通过削弱天敌调控、重构资源利用、打破时间同步与改变空间扩散过程等，使生态防控由稳态调控系统转变为非平衡动态系统。因此，亟需发展外来害虫入侵情境下新型生态防控理论，以解释其机制失配与调控不稳定性。

3　功能植物驱动生态防控的理论基础

随着农业绿色转型，生态防控正由单一生物防治手段，转向以生态系统过程调控为核心的综合策略。功能植物（Functional plants）作为连接作物与非作物生境的关键媒介，逐渐成为驱动生态防控的重要载体（Dong *et al.*, 2026）。近年来，从生物防治、生态工程到生物多样性-生态系统服务（Biodiversity and ecosystem services，BES）理论，多学科研究共同构建了功能植物驱动生态防控的系统性理论基础。

3.1　从生物防治到生态工程

传统生物防治以引入或释放天敌为核心，主要依赖种群生态学原理，但在复杂农田系统中常表现出稳定性不足与环境依赖性强等局限。学术界逐步认识到单一物种调控难以维持长期控害效果，进而推动理论向生态工程转型。生态工程强调通过优化生境结构与生态过程，增强系统内在调控能力（Bommarco, 2024）。功能植物通过提供资源与栖息地，促进天敌种群维持，实现持续性控害（Gurr *et al.*, 2017; Dong *et al.*, 2026）。这标志着生态防控由物种层面干预向系统层面设计的范式升级。

3.2　生物多样性-生态系统服务理论

生态系统服务理论（即 BES 理论）为功能植物驱动生态防控提供了关键机制解释。大量研究表明，生物多样性提升能显著增强生物防控服务功能（Dainese *et al.*, 2019）。植物多样性通过提高天敌多样性与稳定性，增强食物网复杂度，从而抑制害虫并提升产量（Wan *et al.*, 2026）。同时，不同功能群之间的协同作用是维持生态系统稳定性的核心（Loreau *et al.*, 2001）。功能植物通过引入功能多样性，增强系统冗余性与抗干扰能力，从而降低害虫暴发风险。

3.3　资源支持理论与 SNAP 框架

资源支持理论是功能植物发挥作用的核心机制之一。而 SNAP 框架（Shelter, nectar, alternative prey, pollen）系统阐释了非作物植物对天敌的支持路径（Gurr *et al.*, 2017）；其中，花蜜与花粉提高天敌存活与繁殖，庇护提供越冬与避敌空间，替代寄主或猎物维持种群稳定等。资源补充还可显著增强天敌定殖能力并延长其停留时间，从而提升控害效率（Landis *et al.*, 2000）。此外，植物营养状态与次生代谢物等也会调节害虫-天敌互作（Zeng, 2024）。如植物化学物质可通过间接防御吸引天敌（Endara *et al.*, 2023）。因此，功能植物不仅提供资源，还通过化学信号调控生态过程。

3.4 植物性状与多营养级互作

近年来，研究正从物种多样性转向功能性状驱动。植物花期、结构及化学成分等性状，直接影响其对害虫与天敌的调控能力（Tscharntke *et al.*, 2012; Colazza *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2025）。栽培作物在长期驯化过程中往往丧失部分防御性状，而功能植物通常保留丰富的防御与资源供给特征，在多营养级互作中发挥关键作用。多营养级互作理论强调植物-害虫-天敌构成复杂网络，其稳定性取决于互作强度与多样性（Yang *et al.*, 2021; Srednick and Swearer, 2024）。功能植物通过增强网络连接度，提高系统稳定性与调控能力。

3.5 景观生态与生态强化理论

生态强化强调以生态过程替代化学投入，实现农业可持续发展（Tittonell, 2014）。功能植物不仅作用于田间尺度，还通过影响景观结构提升区域尺度控害能力。景观复杂性与生物防控服务显著正相关（Tscharntke *et al.*, 2012），且景观与田间措施的协同是实现稳定控害的关键（Blitzer *et al.*, 2012; Dainese *et al.*, 2019）。同时，多物种互作（如蚜虫与蚂蚁）可能削弱防控效果（Herrera *et al.*, 2025），表明生态强化需综合考虑资源供给与生物网络。因此，功能植物驱动的生态防控本质上是一个跨尺度调控过程。

3.6 生态系统工程与功能植物生态服务区

生态系统工程理论强调生物通过改变环境结构影响生态过程（Wu *et al.*, 2025）。功能植物可视为农田生态系统中的工程单元，通过重构资源分布与空间结构等驱动生态过程优化。戈峰等（2025a）提出了农田生态服务区的概念，强调通过生态编辑与生态工程技术，依托非作物生境构建以生态岛-廊道为基本单元的农田生态服务区，整合形成区域生态服务网络，促进非作物生境与农田有机融合。该体系可将农田生态服务区视为生态防控基础设施，由功能植物配置、半自然生境与景观结构共同构成的调控体系，其核心在于通过结构性设计恢复生态系统抗性与生态调控功能。

功能植物驱动生态防控的理论基础可归纳为三方面：由生物防治迈向生态工程；以生物多样性与资源支持为核心驱动力；由田间措施拓展至景观尺度调控。本质上，功能植物通过调控资源供给、行为响应与多营养级互作，优化食物网结构，进而实现农田生态系统抗性的重建与稳定控害。

4 功能植物驱动生态防控的约束机制

尽管功能植物通过资源供给与生境调控在生态防控中展现出重要潜力，但其在外来入侵害虫情境下的防控效果往往表现出不稳定性。这表明，功能植物驱动的生态防控在外来入侵害虫防控时受到多重机制约束，其本质在于功能植物调控过程与入侵害虫生态特性之间的系统性失配。

4.1 资源与功能匹配失效

功能植物通过提供花蜜、花粉等资源支持天敌种群，是实现生物防控的重要途径。然而，在入侵情境下，这种资源供给可能被广食性害虫直接利用，形成资源反向利用，从而削弱调控效果（Gurr *et al.*, 2017）。此外，功能植物吸引的天敌类型未必与目标入侵害虫具有有效的功能匹配。研究表明，通用型天敌虽可提高群落丰度，但其对特定入侵害虫的控制效率有限（Krey *et al.*, 2021）。同时，食物网中同域捕食现象亦可能降低整体控害效率（Cloyd, 2020）。因此，资源供给与天敌功能之间的不匹配，是限制功能植物发挥作用的关键瓶颈。

4.2 时空过程失配

功能植物驱动的生态防控依赖害虫、天敌与植物之间的时空协同，但在入侵系统中这一过程常被打破。从时间维度看，天敌种群的建立与响应通常滞后于害虫种群增长，导致在害虫暴发初期形成调控滞后窗口（Hoddle, 2024）。入侵害虫往往具有更高繁殖率与环境适应性，其与功能植物花期及天敌活动期的不匹配会进一步削弱调控效率（Grevstad *et al.*, 2022）。从空间维度看，

功能植物多通过田间或农田尺度配置发挥作用，而入侵害虫扩散常由景观甚至区域尺度驱动，使局部调控难以及时响应其种群动态（Tscharntke *et al.*, 2012；Karp *et al.*, 2018）。这种尺度失配导致功能植物的调控效应难以在更大时空范围内持续发挥。

4.3　系统与管理约束

功能植物驱动的生态防控还受到农业管理与社会经济因素的系统性制约。首先，景观复杂性与半自然生境是维持天敌种群的重要基础，而农业集约化导致的景观简化会显著削弱功能植物的生态服务功能（Dainese *et al.*, 2019）。其次，农药使用与高强度耕作等措施会破坏天敌栖息环境，抵消功能植物所带来的正向作用（Sánchez-Bayo and Wyckhuys, 2019）。在制度层面，生态防控技术推广依赖政策支持与专业服务体系，而其长期性与间接收益特征等则限制了农户的采纳意愿（Nchu, 2024）。

功能植物驱动生态防控的主要约束可归结为资源与功能匹配失效、时空过程失配以及系统与管理约束三大机制。这些约束共同作用，使生态防控从潜在高效策略转变为受限调控系统。因此，未来需通过优化功能植物配置、强化天敌功能匹配及改善景观与管理条件，实现由局部干预向系统调控的转变，从而提升其在外来入侵害虫治理中的稳定性与有效性。

5　功能植物驱动的生态防控技术体系

在外来入侵害虫压力加剧背景下，单一生态措施难以实现稳定控害，亟需构建面向约束机制的功能植物驱动技术体系。该体系以解决资源与功能匹配失效、时空过程失配及系统与管理约束为核心，通过物种选择、空间配置与多机制集成，实现由局部干预向系统调控转变。

5.1　定向筛选功能植物提升资源与功能匹配

针对资源反向利用与天敌不匹配问题，功能植物筛选应由经验导向转向功能性状驱动。重点选择既能高效支持天敌，又不利于入侵害虫利用的植物类型。同时，根据目标害虫类型匹配功能植物所吸引的天敌类群，强化选择性资源供给，避免通用型天敌低效控制的问题（Wyckhuys *et al.*, 2020）。此外，应综合考虑植物挥发物、花结构及营养特性，通过行为调控与资源供给协同提升控害效果（Turlings and Erb, 2018）。

5.2　时序优化缓解调控滞后

针对天敌响应滞后的时间失配，需通过功能植物的时序配置实现连续资源供给。例如，构建功能植物连续花期体系，确保在害虫发生前后均有稳定资源支持天敌种群，从而缩短调控滞后窗口（Gurr *et al.*, 2017; Dong *et al.*, 2026）。在入侵害虫暴发初期，可结合早期功能植物配置或辅助释放天敌，提前建立调控压力。此外，需根据气候变化背景优化植物物候与天敌活动期的匹配关系，以提升系统响应速度（Kharouba and Wolkovich, 2020）。

5.3　多尺度配置缓解空间与尺度失配

针对入侵害虫跨尺度扩散特性，功能植物配置需由田间尺度拓展至景观尺度。田间层面，通过功能植物带、间作等构建生态服务区，提升天敌定殖能力；农田与景观层面，则需结合半自然生境与生态廊道建设，增强天敌扩散与持续输入（Dainese *et al.*, 2019; 戈峰等, 2025b; 门兴元和戈峰, 2025）。景观复杂性显著增强生物防控服务（Karp *et al.*, 2018），而功能植物网络可作为连接局部与区域调控的关键节点，从而在一定程度上缓解尺度失配问题（Tscharntke *et al.*, 2012）。同时，在入侵路径与边界区域定向配置功能植物，也可实现扩散阻断-生物增强的协同调控。

5.4　多机制集成提升系统稳定性

功能植物驱动的生态防控本质上是多机制协同系统。通过整合资源支持、行为干扰与天敌增强等机制，可显著提升调控稳定性（Turlings and Erb, 2018）。例如，植物挥发物吸引天敌并干扰害虫定位，而资源供给维持天敌种群，两者协

同增强控害效果。同时，应将功能植物与天敌释放、生物农药等措施结合，构建多层次防控体系，以降低单一措施失效风险(Wyckhuys *et al.*, 2020)。该策略对于应对高繁殖、高扩散的入侵害虫尤为关键。

5.5 管理与制度协同：降低系统约束

针对农业管理与制度约束，需通过优化农田管理与政策支持提升技术可行性。应减少农药干扰并优化耕作方式，以保护功能植物与天敌群落（ Sánchez-Bayo and Wyckhuys, 2019 ），还要通过政策激励与技术服务体系建设，提高农户对生态防控的采纳意愿（ Nchu, 2024 ）。此外，应加强非靶标风险评估与监测，确保功能植物配置与天敌调控的生态安全。

功能植物驱动的生态防控技术体系可概括为以功能匹配为基础、以时空优化为路径、以多机制集成为核心，并通过管理与制度协同实现稳定运行。在外来入侵害虫情境下，该体系通过针对性缓解关键约束机制，推动生态防控由受限调控向稳定调控转变，为农业绿色发展与生物安全提供可行路径。

6 总结与展望

在全球变化与生物入侵加剧的背景下，外来入侵害虫正深刻重塑农业生态系统结构与功能。本文系统梳理了功能植物驱动生态防控的理论基础、约束机制与技术路径，表明入侵害虫通过改变食物网结构、资源利用方式及生态过程的时空耦合，使生态防控由稳态调控系统转向非平衡动态系统。这一转变揭示了生态防控在入侵情境下的局限性，也凸显了构建新型调控的必要性。

功能植物作为连接植物-害虫-天敌多营养级互作的关键节点，可通过优化资源供给与空间结构显著提升生物防控能力。然而，其调控效果仍受资源与功能匹配失效、时空过程失配及系统约束等多重机制限制，表现出显著情境依赖性。因此，生态防控亟需由单一机制优化转向多机制协同与跨尺度整合。未来研究应重点推动三方面：（ 1 ）在理论层面，构建面向入侵情境的生态防控新框架，整合多营养级互作、空间扩散与环境变化过程，提升对非平衡动态系统的解释与预测能力；（ 2 ）在技术层面，发展以功能植物为核心的生态工程策略，通过功能性状导向筛选与多尺度空间配置，缓解关键约束机制，实现由局部干预向系统调控转变；（ 3 ）在方法与应用层面，融合大数据、遥感与生态模型，提升决策支持能力，并通过政策与管理协同推动生态防控规模化应用。

功能植物驱动的生态防控为应对外来入侵害虫提供了重要路径，但其稳定实施依赖于机制解析、尺度整合与技术创新的协同推进。未来，需要将功能植物生态服务区作为基础农业设施并融入农业系统设计，有望实现农业生产与生态安全的协同提升。

参考文献 (References)

Alexandridis N, Marion G, Chaplin-Kramer R, Dainese M, Ekroos J, Grab H, Jonsson M, Karp DS, Meyer C, O'Rourke ME, Pontarp M, Poveda K, Seppelt R, Smith HG, Martin EA, Clough Y, 2021. Models of natural pest control: Towards predictions across agricultural landscapes. *Biological Control*, 163: 104761.

Bertelsmeier C, Bonnamour A, Garnas JR, Liu T, Perreault R, Ollier S, 2025. Temporal dynamics and global flows of insect invasions in an era of globalization. *Nature Reviews Biodiversity*, 1(2): 90–103.

Bianchi FJJA, Booij CJH, Tscharntke T, 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B*: *Biological Sciences*, 273(1595): 1715–1727.

Blitzer EJ, Dormann CF, Holzschuh A, Klein AM, Rand TA, Tscharntke T, 2012. Spillover of functionally important organisms between managed and natural habitats. *Agriculture*, *Ecosystems and Environment*, 146(1): 34–43.

Bommarco R, 2024. Ecological redesign of crop ecosystems for reliable crop protection. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(6): 51.

Colazza S, Peri E, Cusumano A, 2023. Chemical ecology of floral resources in conservation biological control. *Annual Review of Entomology*, 68: 13–29.

Costamagna AC, Landis DA, Difonzo CD, 2007. Suppression of

soybean aphid by generalist predators results in a trophic cascade in soybeans. *Ecological Applications*, 17(2): 441–451.

Cloyd RA, 2020. How effective is conservation biological control in regulating insect pest populations in organic crop production systems? *Insects*, 11(11): 744.

Dainese M, Martin EA, Aizen MA, Albrecht M, Bartomeus I, Bommarco R, Carvalheiro LG, Chaplin-Kramer R, Gagic V, Garibaldi LA, Ghazoul J, Grab H, Jonsson M, Karp DS, Kennedy CM, Kleijn D, Kremen C, Landis DA, Letourneau DK, Marini L, Poveda K, Rader R, Smith HG, Tscharntke T, Andersson GKS, Badenhausser I, Baensch S, Bezerra ADM, Bianchi FJJA, Boreux V, Bretagnolle V, Caballero-Lopez B, Cavigliasso P, Ćetković A, Chacoff NP, Classen A, Cusser S, da Silva E Silva FD, de Groot GA, Dudenhöffer JH, Ekroos J, Fijen T, Franck P, Freitas BM, Garratt MPD, Gratton C, Hipólito J, Holzschuh A, Hunt L, Iverson AL, Jha S, Keasar T, Kim TN, Kishinevsky M, Klatt BK, Klein AM, Krewenka KM, Krishnan S, Larsen AE, Lavigne C, Liere H, Maas B, Mallinger RE, Martinez Pachon E, Martínez-Salinas A, Meehan TD, Mitchell MGE, Molina GAR, Nesper M, Nilsson L, O'Rourke ME, Peters MK, Plećaš M, Potts SG, Ramos DL, Rosenheim JA, Rundlöf M, Rusch A, Sáez A, Scheper J, Schleuning M, Schmack JM, Sciligo AR, Seymour C, Stanley DA, Stewart R, Stout JC, Sutter L, Takada MB, Taki H, Tamburini G, Tschumi M, Viana BF, Westphal C, Willcox BK, Wratten SD, Yoshioka A, Zaragoza-Trello C, Zhang W, Zou Y, Steffan-Dewenter I, 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5(10): eaax0121.

Dong Z, Yang Q, Wyckhuys KAG, Ouyang F, Gurr GM, Han P, González-Chang M, van der Werf W, Men X, Ge F, 2026. Use of functional plants to enhance pest biological control in farming landscapes: Progress and prospects. *Entomologia Generalis*, 46(1): 21–37.

Early R, Bradley BA, Dukes JS, Lawler JJ, Olden JD, Blumenthal DM, Gonzalez P, Grosholz ED, Ibañez I, Miller LP, Sorte CJ, Tatem AJ, 2016. Global threats from invasive alien species in the twenty-first century and national response capacities. *Nature Communications*, 7: 12485.

Edlinger A, Garland G, Hartman K, Banerjee S, Degrune F, García-Palacios P, Hallin S, Valzano-Held A, Herzog C, Jansa J, Kost E, Maestre FT, Pescador DS, Philippot L, Rillig MC, Romdhane S, Saghaï A, Spor A, Frossard E, van der Heijden MGA, 2022. Agricultural management and pesticide use reduce the functioning of beneficial plant symbionts. *Nature Ecology and Evolution*, 6(8): 1145–1154.

Endara M, Forrister DL, Coley PD, 2023. The evolutionary ecology of plant chemical defenses: From molecules to communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 54: 107–127.

Frank EG, 2024. The economic impacts of ecosystem disruptions: Costs from substituting biological pest control.*Science*, 385 (6713): eadg0344.

Ge F, Men XY, Ju Q, Yu K, Zhang XR, Li Z, Liang XY, Zhang YJ, 2025a. Construction principles, methods, and practical applications of agroecological service stations. *Acta Ecologica Sinica*, 45(24): 12518–12526. [戈峰, 门兴元, 鞠倩, 于凯, 张兴瑞, 李卓, 梁潇以, 张玉娇, 2025a. 农田生态服务区构建原理、方法及应用. 生态学报, 45(24): 12518–12526.]

Ge F, Men X, Li Z, Ju Q, Zang X, Liang X, 2025b. Main achievements and prospects in the ecological regulation and management of pests in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(3): 549–558. [戈峰, 门兴元, 李卓, 张兴瑞, 梁潇以, 2025b. 中国害虫生态防控的成就、技术突破与未来展望. 应用昆虫学报, 62(3): 549–558.]

Grevstad FS, Wepprich T, Barker B, Coop LB, Shaw R, Bourchier RS, 2022. Combining photoperiod and thermal responses to predict phenological mismatch for introduced insects. *Ecological Applications*, 32(3): e2557.

Gurr GM, Wratten SD, Landis DA, You M, 2017. Habitat management to suppress pest populations: Progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, 62: 91–109.

Han P, Lavoir AV, Rodriguez-Saona C, Desneux N, 2022. Bottom-up forces in agroecosystems and their potential impact on arthropod pest management. *Annual Review of Entomology*, 67: 239–260.

Herrera SL, Badra Z, Hansen MF, Shankarkumar AC, Kleman I, Tasin M, Dekker T, 2025. Ecological intensification for biocontrol of aphids requires severing myrmecophily. *Journal of Pest Science*, 98(3): 1485–1496.

Hoddle MS, 2024. A new paradigm: Proactive biological control of invasive insect pests. *BioControl*, 69(3): 321–334.

Hu W, Ni K, Zhu Y, Liu S, Shao X, Yu Z, Wang L, Zhang R, Duan M, Xu W, 2025. Plant-driven effects of wildflower strips on natural enemy biodiversity and pest suppression in an agricultural landscape in Hangzhou, China. *Agronomy*, 15(6): 1286.

IPBES, 2023. Summary for policymakers of the thematic assessment report on invasive alien species and their control of the intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services// Roy HE, Pauchard A, Stoett P, Renard

Truong T, Bacher S, Galil BS, Hulme PE, Ikeda T, Sankaran KV, McGeoch MA, Meyerson LA, Nuñez MA, Ordonez A, Rahlao SJ, Schwindt E, Seebens H, Sheppard AW, Vandvik V (eds.). IPBES Secretariat, Bonn, Germany. https://doi.org/10.5281/zenodo. 7430692.

Ismail M, Rodriguez-Saona C, Arpaia S, Costi E, 2025. Latest research advances in biology, ecology, and integrated pest management of invasive insects. *Frontiers in Agronomy*, 7: 1621134.

Karp DS, Chaplin-Kramer R, Meehan TD, Martin EA, DeClerck F, Grab H, Gratton C, Hunt L, Larsen AE, Martínez-Salinas A, O'Rourke ME, Rusch A, Poveda K, Jonsson M, Rosenheim JA, Schellhorn NA, Tscharntke T, Wratten SD, Zhang W, Iverson AL, Adler LS, Albrecht M, Alignier A, Angelella GM, Anjum MZ, Avelino J, Batáry P, Baveco JM, Bianchi FJJA, Birkhofer K, Bohnenblust EW, Bommarco R, Brewer MJ, Caballero-López B, Carrière Y, Carvalheiro LG, Cayuela L, Centrella M, Ćetković A, Henri DC, Chabert A, Costamagna AC, De la Mora A, de Kraker J, Desneux N, Diehl E, Diekötter T, Dormann CF, Eckberg JO, Entling MH, Fiedler D, Franck P, Frank van Veen FJ, Frank T, Gagic V, Garratt MPD, Getachew A, Gonthier DJ, Goodell PB, Graziosi I, Groves RL, Gurr GM, Hajian-Forooshani Z, Heimpel GE, Herrmann JD, Huseth AS, Inclán DJ, Ingrao AJ, Iv P, Jacot K, Johnson GA, Jones L, Kaiser M, Kaser JM, Keasar T, Kim TN, Kishinevsky M, Landis DA, Lavandero B, Lavigne C, Le Ralec A, Lemessa D, Letourneau DK, Liere H, Lu Y, Lubin Y, Luttermoser T, Maas B, Mace K, Madeira F, Mader V, Cortesero AM, Marini L, Martinez E, Martinson HM, Menozzi P, Mitchell MGE, Miyashita T, Molina GAR, Molina-Montenegro MA, O'Neal ME, Opatovsky I, Ortiz-Martinez S, Nash M, Östman Ö, Ouin A, Pak D, Paredes D, Parsa S, Parry H, Perez-Alvarez R, Perović DJ, Peterson JA, Petit S, Philpott SM, Plantegenest M, Plećaš M, Pluess T, Pons X, Potts SG, Pywell RF, Ragsdale DW, Rand TA, Raymond L, Ricci B, Sargent C, Sarthou JP, Saulais J, Schäckermann J, Schmidt NP, Schneider G, Schüepp C, Sivakoff FS, Smith HG, Stack Whitney K, Stutz S, Szendrei Z, Takada MB, Taki H, Tamburini G, Thomson LJ, Tricault Y, Tsafack N, Tschumi M, Valantin-Morison M, Van Trinh M, van der Werf W, Vierling KT, Werling BP, Wickens JB, Wickens VJ, Woodcock BA, Wyckhuys K, Xiao H, Yasuda M, Yoshioka A, Zou Y, 2018. Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(33): E7863–E7870.

Keane RM, Crawley MJ, 2002. Exotic plant invasions and enemy release hypothesis. *Trends in Ecology and Evolution*, 17(4): 164–170.

Kharouba HM, Wolkovich EM, 2020. Disconnects between ecological theory and data in phenological mismatch research. *Nature Climate Change*, 10(5): 406–415.

Krey KL, Smith OM, Chapman EG, Crossley MS, Crowder DW, Fu Z, Harwood JD, Jensen AS, Lynch CA, Snyder GB, Snyder WE, 2021. Prey and predator biodiversity mediate aphid consumption by generalists. *Biological Control*, 160: 104650.

Landis DA, Wratten SD, Gurr GM, 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45: 175–201.

Letourneau DK, Jedlicka JA, Bothwell SG, Moreno CR, 2009. Effects of natural enemy biodiversity on the suppression of arthropod herbivores in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40: 573–592.

Loreau M, Naeem S, Inchausti P, Bengtsson J, Grime JP, Hector A, Hooper DU, Huston MA, Raffaelli D, Schmid B, Tilman D, Wardle DA, 2001. Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges. *Science*, 294(5543): 804–808.

Men XY, Ge F, 2025. Approaches and applications of ecological pest management through farmland landscape optimization. *Plant Protection*, 51(5): 257–266, 355. [门兴元, 戈峰, 2025. 基于农田景观的害虫生态防控方法与实践. 植物保护, 51(5): 257–266, 355.]

Nchu F, 2024. Sustainable biological control of pests: The way forward. *Applied Sciences*, 14(7): 2669.

Nunez-Mir GC, McCary MA, 2024. Invasive plants and their root traits are linked to the homogenization of soil microbial communities across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(44): e2418632121.

Potts SG, Imperatriz-Fonseca V, Ngo HT, Aizen MA, Biesmeijer JC, Breeze TD, Dicks LV, Garibaldi LA, Hill R, Settele J, Vanbergen AJ, 2016. Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632): 220–229.

Sánchez-Bayo F, Wyckhuys KAG, 2019. Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232: 8–27.

Selwyn M, Lázaro-González A, Lloret F, Rey Benayas JM, Hampe A, Brotons L, Pino J, Espelta JM, 2025. Quantifying the impacts of rewilding on ecosystem resilience to disturbances: A global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 375: 124360.

Srednick G, Swearer SE, 2024. Understanding diversity-synchrony-stability relationships in multitrophic communities. *Nature Ecology and Evolution*, 8(8): 1088–1097.

Tittonell P, 2014. Ecological intensification of agriculture: Sustainable by nature. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8: 53–61.

Tscharntke T, Tylianakis JM, Rand TA, Didham RK, Fahrig L, Batáry P, Bengtsson J, Clough Y, Crist TO, Dormann CF, Ewers RM, Fründ J, Holt RD, Holzschuh A, Klein AM, Kleijn D, Kremen C, Landis DA, Laurance W, Lindenmayer D, Scherber C, Sodhi N, Steffan-Dewenter I, Thies C, van der Putten WH, Westphal C, 2012. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes-eight hypotheses. *Biological Reviews*, 87(3): 661–685.

Turlings TCJ, Erb M, 2018. Tritrophic interactions mediated by herbivore-induced plant volatiles: Mechanisms, ecological relevance, and application potential. *Annual Review of Entomology*, 63: 433–452.

Visser ME, Gienapp P, 2019. Evolutionary and demographic consequences of phenological mismatches. *Nature Ecology and Evolution*, 3(6): 879–885.

Wan NF, Wang YQ, Fu L, Liu J, Woodcock BA, Hu YQ, Eskelinen A, Hector A, Loreau M, Hautier Y, Bardgett RD, Kardol P, Zuppinger-Dingley D, Fraser LH, Bullock JM, Nakagawa S, Shen S, Xin F, Shi DP, Li Z, Zhou J, Scherber C, 2026. Global evidence that plant diversity suppresses pests and promotes plant performance and crop production. *Nature Ecology and Evolution*, 10(2): 293–307.

Wu D, Du E, Eisenhauer N, Mathieu J, Chu C, 2025. Global engineering effects of soil invertebrates on ecosystem functions. *Nature*, 640(7632): 120–129.

Wyckhuys KAG, Lu Y, Zhou W, Cock MJW, Naranjo SE, Fereti A, Williams FE, Furlong MJ, 2020. Ecological pest control and agricultural growth in Asia-Pacific economies. *Nature Ecology and Evolution*, 4(11): 1522–1530.

Wyckhuys KAG, Bushley K, Gratton C, Gurr GM, Pozsgai G, Tscharntke T, Wanger TC, Lu Y, Elkahky M, 2025. Restoring functional farmland biodiversity for biological pest control. *Trends in Plant Science*, 30(11): 1097–1110.

Yang F, Liu B, Zhu Y, Wyckhuys KAG, van der Werf W, Lu Y, 2021. Species diversity and food web structure jointly shape natural biological control in agricultural landscapes. *Communications Biology*, 4(1): 1157.

Zeng M, 2024. The mutual effect of nutrients on plant-herbivore interactions. *Plant Ecology*, 225(6): 1035–1045.