冬闲期功能植物调控地下害虫的生态机制与应用展望*

鞠 倩[1**] 曲明静[1] 于 凯[2] 邵敏淇[3] 马雯倩[3] 李 晓[1] 张 群[3]

（1. 山东省花生研究所，国家花生工程技术研究中心，青岛 266100；2. 烟台市农业技术推广中心，烟台 264001；
3. 南京农业大学生命科学学院，作物遗传与种质创新国家重点实验室，南京 210095）

摘 要 冬闲期是轮作体系中长期被忽视的生态管理窗口。地下害虫类群复杂，普遍具有为害隐蔽、监测困难和补救防治效果有限等特点，其种群建立与土壤环境、地表捕食者以及作物季节转换过程密切相关。本文以地下害虫为对象构建理论框架，并以花生田蛴螬为典型案例进行讨论。近年来，功能植物在土壤培肥、生物多样性维持和天敌保护方面受到关注，但其在地下害虫生态防控中的作用机制仍缺乏系统阐述。本文围绕冬闲期功能植物介导地下害虫调控的研究进展，梳理功能植物生长、覆盖与翻压对地表天敌维持、根系-土壤互作、微生物群落、代谢物组成及地下害虫种群动态的影响，提出“天敌维持路径-土壤重构路径”双路径协同调控框架。该框架认为，冬闲期功能植物一方面可通过改善地表微环境和提供越冬庇护维持步甲、蜘蛛等捕食性天敌种群连续性；另一方面，其生长阶段的根系-土壤互作与翌春翻压后的残体输入共同重构土壤理化、微生物和代谢环境，从而影响地下害虫的行为选择、生长发育和存活。在此框架下，本文进一步以蛇床 *Cnidium monnieri*-花生 *Arachis hypogaea* 体系防控蛴螬（White grubs）为例，讨论冬闲期功能植物连接土壤健康、天敌保护与地下害虫绿色防控的应用潜力。总体来看，冬闲期功能植物为地下害虫生态防控提供了新的研究思路，但该框架仍需通过跨季节长期定位试验、多组学分析及因果验证进一步完善。

关键词 冬闲田；覆盖作物；蛴螬；天敌维持；土壤重构

Using winter fallow functional plants for the ecological control of belowground pests: A dual-pathway framework of natural enemy maintenance and soil restructuring

JU Qian[1**] QU Ming-Jing[1] YU Kai[2] SHAO Min-Qi[3]
MA Wen-Qian[3] LI Xiao[1] ZHANG Qun[3]

(1. National Engineering Technology Research Center for Peanut, Shandong Peanut Research Institute, Qingdao 266100, China; 2. Yantai Agricultural Technology Extension Center, Yantai 264001, China; 3. State Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement, College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract The winter fallow period is an ecological management window that has long been overlooked in crop rotation systems. Belowground pests are diverse, difficult to monitor and control, and the damage they inflict on crops is generally concealed. The establishment of belowground pest populations is closely associated with soil conditions, ground-dwelling predators and seasonal crop transitions. In recent years, the role of functional plants in soil fertility improvement, biodiversity maintenance and the conservation of the natural enemies of plant pests, has received increased recognition, however, the mechanisms through which these plants exert ecological control on belowground pests remains poorly understood. This review summarizes how functional plant growth, cover and residue incorporation, affect natural enemy abundance, root-soil

*资助项目 Supported projects：国家重点研发计划重点专项（2024YFD1400800）；山东省农业科学院农业科技创新工程国际科技合作专项（CXGC2025H11）；国家花生产业技术体系（CARS-13）

**第一作者和通讯作者 First author and corresponding author，E-mail：juq2022@163.com

收稿日期 Received：2026-06-23；接受日期 Accepted：2026-08-07

interactions, microbial communities, metabolite composition and belowground pest population dynamics, and proposes a dual-pathway framework comprised of a natural enemy maintenance pathway and a soil restructuring pathway. In this framework, winter fallow functional plants may maintain ground-dwelling predators by improving near-ground microhabitats and providing overwintering shelters, while root-soil interactions during plant growth and residue inputs after spring incorporation jointly restructure soil physicochemical, microbial and metabolic environments, thereby influencing pest behaviour, development and survival. Using the *Cnidium monnieri*-peanut (*Arachis hypogaea*)-white grub system as an example, we discuss the potential of winter fallow functional plants to improve soil health, natural enemy conservation and the ecological control of belowground pests. Overall, winter fallow functional plants have promising potential for belowground pest management, but this framework still needs to be further improved through long-term cross-seasonal field experiments, multi-omics analyses and causal validation.

Key words winter fallow fields; cover crops; white grubs; natural enemy maintenance; soil restructuring

地下害虫是我国多种旱作作物生产中的重要限制因素。地下害虫并不是单一类群，而是指在土壤中或近地表隐蔽环境中完成取食、发育或为害过程的一类害虫。生产上常见类群包括蛴螬、金针虫、地老虎、蝼蛄、根蛆、根象甲幼虫以及部分地下取食的鳞翅目和双翅目幼虫等。它们取食作物根系、地下茎、块茎、鳞茎、种子、幼苗基部或地下结实器官，可造成缺苗断垄、根系受损、植株早衰、产量下降和商品品质降低。与地上害虫相比，地下害虫具有发生隐蔽、空间分布斑块性强、监测取样破坏性大以及防治适期难以把握等特点。一旦田间出现明显为害症状，往往已经错过最佳防治窗口，传统化学药剂也难以充分到达为害部位（巩中军等, 2026; 谢明惠等, 2026）。因此，如何从害虫种群建立的早期过程入手，构建稳定、低风险、可持续的生态防控体系，是地下害虫治理中的关键问题。

长期以来，害虫生态防控研究多集中在作物生长季，对作物收获后至后茬作物播种前的冬闲阶段关注不足。然而，冬闲期并非农田生态过程的空档期。在轮作体系中，冬季地表覆盖、土壤扰动、残体输入和越冬生境变化，会影响翌春土壤微环境、地表节肢动物群落、病原微生物背景以及后茬作物生长环境（Shikano *et al*., 2017; Muhammad *et al*., 2021; Guo *et al*., 2025; Hu *et al*., 2025）。对于地下害虫而言，其卵、低龄幼虫和成虫产卵选择均与土壤环境和生境结构密切相关，冬闲期生态过程可能成为影响来年种群发生风险的重要起点。

功能植物是冬闲田生态管理的重要载体。已有覆盖作物（Cover crops）研究表明，作物间隙种植并覆盖地表的植物可改善土壤结构、减少养分淋失、增加有机质输入并提升农田生物多样性（Wallander *et al*., 2021; Vendig *et al*., 2023）。在害虫生态防控背景下，这类植物的作用已由单纯覆盖和培肥，进一步拓展到天敌保护、生境连续性维持和病虫害调控等方面。因此本文采用“功能植物（Functional plants）”这一概念（Dong *et al*., 2026），强调冬闲期植物在天敌保护和害虫生态防控中的多重作用。

目前，功能植物在土壤培肥、养分循环和生物多样性维持方面的作用已有较多研究，但其对地下害虫的调控机制仍缺乏系统阐述。功能植物是否能够通过冬季生境维持作用增强地表捕食性天敌的跨季节连续性？冬闲期生长阶段的根系活动、根系分泌物和根际微生物互作，以及翌春翻压后的残体输入，如何共同改变地下害虫适生环境？这些过程如何在时间尺度上衔接，并共同影响地下害虫种群建立，仍需要进一步整合和验证。

鉴于地下害虫类群多样，且不同类群在生活史、为害部位和土壤活动深度上存在差异，本文首先从地下害虫生态防控的一般机制出发，提出冬闲期功能植物调控地下害虫的双路径协同框架，即天敌维持路径和土壤重构路径。该框架既强调冬闲期地表生境对捕食性天敌种群延续和控害功能的支撑作用，也重视冬闲期功能植物生长阶段的根系-土壤互作及翌春翻压后残体输入对地下害虫行为、生长发育和种群建立的调节作用。本文进一步以蛇床-花生体系防控蛴螬为典

型案例，讨论冬闲期功能植物在地下害虫生态防控中的应用潜力、生态权衡和未来研究方向。

1　冬闲期功能植物的生态服务功能及其害虫防控潜力

1.1 从覆盖作物到功能植物

覆盖作物通常指在主作物生长间隙种植、以土壤覆盖和生态服务为主要目的的植物类型，包括豆科、禾本科、十字花科以及多种花卉或非传统作物（Wallander *et al*., 2021）。在传统农学研究中，覆盖作物主要服务于减少土壤裸露、控制水土流失、降低养分淋失、增加有机质输入和改善土壤结构等目标。随着农田生态系统服务理念的发展，覆盖作物的功能逐渐由土壤保护型措施拓展为兼具养分循环、生境构建、生物多样性维持和有害生物调控等多重作用的生态管理措施（Quintarelli *et al*., 2022; Van Eerd *et al*., 2023）。一些冬闲期植物除覆盖地表和培肥土壤外，还可通过提供替代资源、庇护空间和越冬场所，维持捕食性天敌和寄生性天敌种群（Ganser *et al*., 2019; Triquet *et al*., 2022）；其根系分泌物和翻压残体还可改变土壤理化性质、微生物群落和代谢物组成（Muhammad *et al*., 2021; Seitz *et al*., 2024; Van Eerd *et al*., 2023），进而影响害虫适生环境。因此，本文将冬闲期具有土壤保护、生境维持和害虫调控潜力的植物统称为功能植物，以突出其在土壤-生境-天敌-害虫连续过程中的综合生态功能。

然而，需要注意的是，功能植物并不等同于单一正向生态服务措施。不同植物种类、生物量、覆盖时长、翻压时期和田间管理方式，会导致不同的生态效应。合理筛选和管理功能植物，是其发挥地下害虫生态防控作用的前提；若选择或管理不当，也会为部分害虫、替代寄主或病原菌提供越冬场所，或在春季翻压时扰动地表天敌生境。因此，从覆盖作物到功能植物的概念拓展，不仅意味着功能目标的增加，也要求对其生态权衡和应用边界进行系统评估。

1.2　功能植物与农田害虫生态防控

生态防控是基于生态系统服务功能的害虫调控策略及技术（戈峰等, 2025a）。其中，农田生境管理是生态防控的重要组成部分，其基本原理是通过提供替代食物、庇护场所、越冬空间和微气候缓冲，提高天敌种群的存活率和控害效率（Landis *et al*., 2000; 张兵和肖海军, 2025）。花带、草带、间作和覆盖植物等措施均可在不同程度上增加天敌丰度和多样性。对于地上害虫而言，功能植物通过花粉、花蜜、替代猎物和栖息空间增强瓢虫、草蛉、食蚜蝇、小花蝽、寄生蜂等天敌的生态功能，相关证据相对丰富。

相比之下，功能植物对地下害虫的影响更为复杂。一方面，部分植物可能通过改变土壤环境、根系分泌物或残体分解产物影响地下害虫的取食、趋避和发育（Johnson and Gregory, 2006; Erb and Lu, 2013; Frew *et al*., 2016）；另一方面，地表捕食者如步甲（Carabidae）和蜘蛛（Araneae）可捕食地下害虫的卵、幼虫或迁移至土表的个体，从而在地上-地下界面形成控害作用（Landis *et al*., 2000; Juen and Traugott, 2007）。此外，功能植物还可能改变成虫产卵场所选择或土壤湿度条件，间接影响地下害虫种群建立（Ward and Rogers, 2007; Frew *et al*., 2016）。正因如此，地下害虫防控不能仅从害虫-作物二元关系理解，而应纳入土壤、生境、天敌和季节转换过程。

2　地下害虫发生特点与冬闲期生态过程的关系

2.1　地下害虫为害的隐蔽性与防控难点

地下害虫的发生通常受土壤类型、含水量、有机质、耕作方式、前茬作物、残体输入、成虫产卵选择和天敌群落等多因素共同影响，空间分布往往呈明显斑块性（Frew *et al*., 2016）。常规调查需要挖土取样或破坏植株，劳动强度高、代表性受限，也难以实现连续动态监测。现有防控措施防效常受土壤条件和害虫虫龄影响，且存在用药位置不精准、生态风险较高或难以长期稳定控害等问题（巩中军等, 2026）。因此，地下害虫绿色防控需要从单一药剂防治转向生态调控、种群压低、精准干预相结合的综合治理模式。

在众多地下害虫中，蛴螬（White grub）作

为金龟甲类幼虫，长期生活于土壤中，可取食花生、马铃薯、玉米、小麦等作物的根、块茎、果针或荚果，导致缺苗断垄、品质下降和产量损失（鞠倩等, 2014）。蛴螬是花生等地下结实作物上的典型代表。其幼虫取食花生果针、根系和荚果，可导致荚果破损、霉变、商品性下降和减产。本文后文以蛴螬作为案例，是因为其兼具地下害虫的共性特征和花生生产中的突出危害，适合用于说明冬闲期功能植物如何通过地表天敌维持和土壤生态重构影响地下害虫种群建立。但从理论框架上看，相关机制并不限于蛴螬，也可为其他地下害虫生态防控研究提供参考。

2.2 冬闲期是地下害虫种群形成的关键窗口

地下害虫种群的形成并非始于作物受害时，而是与前茬收获后土壤环境、成虫活动、越冬虫态和翌春作物建植过程连续相关。地下害虫的越冬虫态和越冬深度因类群而异，许多种类可在土壤中以幼虫、若虫、蛹或成虫等虫态越冬，并随土壤温度和湿度变化发生垂直迁移。以蛴螬和金针虫为例，二者常以幼虫在土壤中越冬，冬季向较深土层移动，翌春随地温回升再上移至根际或浅土层取食（Villani and Wright, 1990; Frew *et al*., 2016）。在冬闲或低覆盖条件下，土壤温湿度波动加剧，地表天敌缺少越冬庇护，农田食物网连接减弱；而功能植物覆盖可增强地表和土壤生境连续性，有利于捕食性天敌维持，并通过根系活动和残体输入影响土壤微生物及化学环境（Ganser *et al*., 2019; Triquet *et al*., 2022）。因此，闲期功能植物对地下害虫的影响在植物生长阶段即通过根系-土壤-害虫互作逐步发生。功能植物根系生长可改变土壤孔隙结构、含水量、有机碳输入和根际养分环境（Van Eerd *et al*., 2023; Seitz *et al*., 2024），影响越冬虫体的空间分布、存活状态和翌春活动位置（Villani and Wright, 1990; Frew *et al*., 2016）；根系分泌物和根际微生物代谢物还可形成特定化学背景，参与根食性昆虫的寄主定位、趋避和取食行为（Johnson and Gregory, 2006; Johnson and Nielsen, 2012; Erb and Lu, 2013）。

从生态防控角度看，将冬闲期纳入地下害虫治理框架具有重要意义。传统防控通常针对作物生长期害虫密度或为害症状，而冬闲期生态管理则可能在害虫种群建立前改变其生态基础条件，实现前移防控关口。这种思路特别适用于花生等地下结实作物，因为其受害部位在土壤中，一旦形成荚果为害，后期补救空间有限。

3 冬闲期生境维持与地表天敌跨季节控害

3.1 功能植物覆盖对地表捕食性天敌的支持作用

步甲（Carabidae）、蜘蛛（Araneae）等地表捕食者是农田生态系统中重要的广食性天敌（Juen and Traugott, 2007; 周红章等, 2014）。它们活动于土表及浅层土壤，能够捕食多种害虫卵、幼虫、蛹和小型节肢动物。冬闲期功能植物通过增加地表结构复杂性、降低温湿度剧烈波动、提供隐蔽场所和替代猎物，有助于提高地表捕食者越冬存活和早春活动水平。相反，冬季裸露、频繁翻耕或生境破碎化可能降低地表天敌种群连续性，使其在后茬作物害虫发生初期难以及时发挥控害作用（Ganser *et al*., 2019; Triquet *et al*., 2022）。

然而，需要指出的是，地表捕食者对地下害虫的调控具有明确的空间边界，并不意味着其能够直接捕食深层地下个体。其作用主要发生在“地上-地下”界面：一是捕食分布于浅表土层或地表附近的卵和低龄幼虫，通过压低早期虫口，间接减少后期进入土壤并造成根系、块茎或荚果为害的个体数量；二是地下害虫因降雨、土壤湿度变化、耕作扰动或取食迁移，或受到功能植物根系分泌物、残体分解产物等化学背景影响而进入浅土层或土表时，地表捕食者可对其发挥捕食作用。因此，天敌维持路径更适合解释地下害虫种群建立早期和浅层活动阶段的调控作用，而对长期处于深层土壤中的高龄幼虫，其直接控制作用有限，需要与土壤理化性质、微生物群落和代谢物变化等土壤重构路径共同作用。

3.2 地表捕食性天敌对地下害虫的控害功能评价

近年来，肠道内容物分子检测为揭示地表捕

食者与地下害虫之间的营养联系提供了重要工具（Juen and Traugott, 2005）。通过设计目标害虫特异性引物，采用 PCR 或 qPCR 检测捕食者体内猎物 DNA，可以获得捕食发生的直接证据；通过宏条形码或猎物谱分析，还可解析捕食者的取食范围和食物网结构（Alberdi *et al*., 2019）。对于地下害虫而言，尤其是蛴螬等生活隐蔽、田间捕食过程难以直接观察的类群，分子方法有助于回答哪些天敌实际捕食了蛴螬、捕食强度是否随功能植物处理改变、捕食作用是否与田间虫口密度下降相关等关键问题（Juen and Traugott, 2007）。

由于猎物 DNA 检出受消化速率、捕食者种类、环境温度、猎物体型和取样时间影响，阳性检出并不等同于长期控害效应（King *et al*., 2008; von Berg *et al*., 2008）。因此，应将分子检测与田间地下害虫种群密度、作物受害程度、产量损失或产量收益以及天敌群落动态相结合，构建从捕食发生到种群降低再到产量受益的连续证据链。在花生蛴螬等具体体系中，则可进一步将分子捕食证据与蛴螬密度、荚果受害指数和花生产量等指标进行关联分析，以验证捕食作用是否真正转化为田间控害和增产效应。

4　功能植物生长与翻压驱动的土壤重构及地下害虫响应

土壤重构并非只发生于功能植物翻压之后，而是在冬闲期植物生长阶段即已启动。功能植物根系在土壤中持续生长，可通过根系分泌物释放和根际微生物招募，改变土壤孔隙结构、含水量、养分有效性、微生物群落和代谢物组成（Salem *et al*., 2022; Seitz *et al*., 2024）。翌春翻压进一步通过根系和地上部残体输入，强化有机质补充、微生物重组和代谢物释放，进而影响地下害虫适生环境。

4.1　根系生长与残体输入对土壤理化环境及地下害虫适生性的影响

在冬闲期生长阶段，功能植物根系可通过根际碳输入等改善土壤孔隙结构、水分保持和养分有效性；根系分泌物还可激活根际微生物活动，改变氮磷钾等养分转化过程（Erb and Lu, 2013; Seitz *et al*., 2024）。翌春翻压后，根系和地上部残体进一步进入土壤，通过有机质输入和残体分解影响土壤有机碳、pH、含水量及团聚体结构等理化性质（Fu *et al*., 2021; Van Eerd *et al*., 2023）。这种效应的强度和方向受功能植物种类、根系性状、残体碳氮比、生物量、终止时期及土壤水分条件等因素共同影响（Yousefi *et al*., 2024; Brito *et al*., 2025）。

功能植物翻压也存在生态权衡。对于地下害虫而言，土壤理化环境不仅影响其存活和发育，也影响其取食、迁移和寄主定位行为（Villani and Wright, 1990; Erb and Lu, 2013）。适宜的土壤湿度和有机质条件可能促进部分地下害虫活动和存活，但这种效应具有明显的类群和环境依赖性。因此，功能植物翻压对地下害虫的作用并非简单的有利或不利，而取决于植物种类、残体输入量、土壤背景、害虫种类和天敌群落之间的综合关系。与此同时，翻压虽有助于功能植物残体进入土壤并启动土壤重构过程，但也会破坏地表覆盖结构和近地表微环境，扰动步甲、蜘蛛等地表捕食性天敌及其庇护场所。因此，田间应用中应结合后茬播种期、土壤墒情、功能植物生物量、地下害虫活动期和天敌发生动态，优化翻压时期、翻压深度和残体处理方式，以兼顾土壤重构效应和天敌生境维持。

4.2　土壤微生物重组对地下害虫的潜在调控作用

土壤微生物是连接功能植物生长、残体输入与地下害虫响应的重要中介。功能植物根系活动、根系分泌物和翻压残体分解可改变细菌、真菌群落结构，进而影响土壤病原压力、营养循环和化学信号环境（Muhammad *et al*., 2021; Seitz *et al*., 2024）。其中，绿僵菌 *Metarhizium* spp.等昆虫病原真菌能够侵染多种地下害虫，并可在土壤和根际环境中长期存活（St Leger and Wang, 2020）；部分链霉菌 *Streptomyces* spp. 和沙雷氏菌 *Serratia* spp.等微生物具有几丁质降解或昆虫抑制潜力，可通过影响昆虫表皮、肠道或共生微生物而改变地下害虫存活（Tao *et al*., 2022; van der

Meij *et al*., 2025）。

需要指出的是，微生物丰度变化与害虫抑制之间并不必然构成因果关系。某一功能类群相对丰度升高，可能只是残体分解过程的伴随现象。需结合分离培养、功能基因检测、病原性验证、灭菌土回接试验或相关网络分析等方法，进一步证明其在地下害虫调控中的作用。未来还需要从群落描述进一步走向功能验证，明确哪些微生物类群或功能基因真正参与了害虫抑制。

4.3 土壤代谢物变化对地下害虫行为及生理的影响

植物根系分泌物和残体分解产物可形成复杂的土壤代谢物背景，包括挥发性有机物、酚酸、香豆素类、萜类、有机酸和脂类等（Salem *et al*., 2022）。这些物质可能被地下害虫感知，介导寄主定位、趋避、取食和发育响应；对于根食性昆虫而言，根际半化学物质等信号在寄主定位与选择中具有重要作用（Johnson and Gregory, 2006; Johnson and Nielsen, 2012）。同时，一些植物源次生代谢物还具有毒杀、拒食、抑菌或调节昆虫发育的作用（Isman, 2006）。功能植物翻压后，土壤代谢物组成随时间快速变化（Fu *et al*., 2021），其生态效应呈现明显的时效性和剂量依赖性，部分化合物在较高浓度下可表现出毒杀、拒食或趋避作用，而在较低浓度下则可能作为化学线索影响害虫取食或寄主定位。因此，功能植物翻压后的代谢物效应不宜简单理解为单向抑制作用，而应结合残体输入量、分解阶段和土壤中有效浓度变化进行判断。

代谢组学为解析此类过程提供了新的技术路径。通过非靶向代谢组筛选与处理、时间和害虫响应相关的差异代谢物，再结合行为选择、生长发育和存活试验，可逐步锁定潜在活性物质。但非靶向代谢组存在注释不完全、假阳性较多和因果验证不足等问题（Zhou *et al*., 2022）。因此，关键代谢物筛选后仍需通过标准品验证、剂量反应试验和土壤微宇宙实验（Soil microcosm experiment）进一步确认其生态功能。

5 天敌维持-土壤重构双路径协同调控框架

基于以上研究进展，本文提出冬闲期功能植物调控地下害虫的双路径协同框架（表 1）。第一条路径为天敌维持路径：冬闲期功能植物通

表 1 冬闲期功能植物调控地下害虫的双路径框架

Table 1 Dual-pathway framework of winter fallow functional plants for belowground pest regulation

路径 Pathway	主要过程 Main processes	关键指标 Key indicators
天敌维持路径 Natural enemy maintenance pathway	冬闲期覆盖改善地表微环境，提供越冬庇护和替代资源，维持步甲、蜘蛛等捕食者种群连续性 Winter cover improves the near-ground microenvironment, provides overwintering shelter and alternative resources, and maintains populations of ground-dwelling predators such as carabids and spiders	覆盖度、地表温湿度、天敌密度、多样性、捕食检出率、猎物谱结构等 Vegetation cover, ground temperature and humidity, predator density and diversity, predation detection rate and prey spectrum structure
土壤重构路径 Soil restructuring pathway	根际作用和翻压残体输入改变土壤理化性质、微生物群落和代谢物组成，影响地下害虫适生环境 Rhizosphere processes and incorporated residues alter soil physicochemical properties, microbial communities and metabolites, thereby modifying belowground pest suitability	有机质、pH、养分、细菌/真菌群落（16S/ITS）、昆虫病原真菌、几丁质降解菌、差异代谢物、害虫存活和增重等 Organic matter, pH, nutrients, 16S/ITS communities, entomopathogenic fungi, chitin-degrading microbes, differential metabolites, pest survival and weight gain
双路径协同 Dual-pathway synergy	天敌维持和土壤重构在冬闲期至后茬作物生长季连续衔接，共同影响害虫种群、作物受害和产量 Natural enemy maintenance and soil restructuring are connected from winter fallow to the following crop season, jointly affecting pest populations, crop damage and yield	地下害虫密度、作物受害指数、产量、结构方程模型路径系数、年际稳定性等 Belowground pest density, crop damage index, yield, structural equation model path coefficients and interannual stability

些天敌在翌春和后茬作物生长季继续存在，并对地下害虫卵、低龄幼虫或浅表层个体形成捕食压力。第二条路径为土壤重构路径：功能植物生长阶段的根系活动、根际分泌和翌春翻压后的残体输入共同改变土壤理化性质、微生物群落和代谢物组成，进而影响地下害虫的行为选择、生长发育、存活和种群建立。

两条路径并非相互独立，而是在时间和空间尺度上发生耦合。冬闲期植物覆盖既为天敌提供庇护，也通过根系生长改变土壤条件、根际微生物和化学信号；翌春翻压既输入残体并强化土壤重构，也短期改变地表生境和天敌活动。土壤微生物和代谢物变化可通过影响害虫暴露程度、健康状态和活动行为，进一步改变其被捕食风险；地表天敌对害虫种群的降低又会反馈影响土壤食物网结构。因而，冬闲期功能植物的控害作用应被视为跨季节、多层级、多过程耦合的生态调控结果。

6　蛇床-花生体系对地下害虫生态防控的启示与展望

蛇床 *Cnidium monnieri* 是近年来应用较多的生态防控功能植物（戈峰等, 2025b）。已有研究表明，蛇床可为农田天敌提供花粉、花蜜或替代资源，在花生、小麦、棉花和果园等作物田中具有增加捕食性天敌、抑制害虫发生的潜力（Jiang *et al*., 2025; Ju *et al*., 2025）。进一步研究发现蛇床提取物对多种植物病原真菌具有显著抑制作用，并表现出良好的杀菌活性（王婷婷等, 2025）；同时，对部分害虫具有明显的毒杀活性和持续拒食效应，导致其发育历期延长和繁殖下降（Dong *et al*., 2025）；这一结果表明蛇床含有具有明确生物活性的次生代谢物，可能是土壤路径中潜在化学生态调控因子。

蛴螬作为花生生产中最主要的地下害虫之一，其种群建立过程对土壤环境变化较为敏感（Frew *et al*., 2016）。因此，在花生-小麦-玉米轮作生产体系中，冬闲期种植蛇床并于翌春压青，具有较好的理论契合性和研究启示意义。首先，蛇床可在冬闲阶段形成一定地表覆盖，为地表捕食者提供越冬庇护和栖息空间；其次，蛇床根系在生长阶段即可通过根系分泌物、根际碳输入和微生物招募影响土壤生态过程；再次，春季压青可将其根系和地上部生物量输入表层土壤，进一步影响土壤理化性质、微生物群落和代谢环境。由于花生荚果位于土壤中，蛴螬为害又与土壤环境密切相关，该体系适合作为探索冬闲期生境维持-根系土壤互作-春季残体输入-后茬地下害虫响应连续过程的典型对象。

笔者团队的初步田间验证表明，冬闲期种植蛇床及翌春压青措施表现出较稳定的蛴螬抑制和花生增产效果。与此同时，蛇床压青改变了后茬花生田土壤环境，其中有机质和全碳积累幅度较大，并表现出较强的 pH 缓冲作用；微生物群落方面，压青处理下绿僵菌等潜在昆虫病原真菌的相对丰度升高，并伴随部分潜在植物病原真菌相对丰度下降。在天敌维持路径上，压青处理提高了花生田蜘蛛类地表捕食者的种群密度；肠道内容物高通量测序结果显示，星豹蛛具有较广的猎物谱，并在高压青量处理样本中检出鳃金龟属相关序列，为蜘蛛参与蛴螬相关类群捕食提供了分子证据。此外，压青土壤非靶向代谢组结果中检出香豆素类等植物源次生代谢物，为蛇床压青通过土壤化学背景影响地下害虫适生性提供了候选依据。上述初步结果表明，冬种蛇床及压青措施通过土壤理化性质改善、微生物群落重组和天敌功能维持等过程，共同参与花生田蛴螬生态调控；其关键因果链条仍需进一步验证。

需要注意的是，蛇床案例不宜被简单理解为单一植物的经验措施，而应上升为功能植物筛选和冬闲田生态管理的一般问题。不同地区可根据气候、土壤、轮作制度和主要地下害虫种类筛选适宜功能植物，并优化播种密度、覆盖时长、翻压时期和残体输入量。未来还应关注功能植物对后茬作物出苗、病害、杂草、天敌和非靶标生物的综合影响，避免因单一目标优化而造成新的生态风险。

7 展望

7.1 加强跨季节连续监测

地下害虫生态防控研究需要突破单一作物季和单一调查节点的限制。从前茬收获、冬闲期功能植物生长、根系-土壤互作、春季翻压、后茬播种、害虫发生高峰至作物收获开展连续监测，记录地表微环境、天敌群落、根际过程、土壤理化性质、微生物和代谢物动态，以及害虫种群和作物受害过程。只有在时间尺度上形成连续证据，才能判断冬闲期措施是否真正影响后茬作物季害虫发生。

7.2 构建直接证据与因果验证体系

目前许多研究停留在功能植物处理与害虫密度变化的相关层面，缺乏明确机制证据。未来应结合天敌肠道分子检测、猎物谱分析、天敌排除试验、灭菌土回接、关键微生物分离和代谢物功能验证，构建从生态现象到作用机制的因果链条。特别是对于地下害虫，应重视虫龄、土层、土壤含水量和取样时间对结果的影响。

7.3 加强多组学数据与田间生态效应融合

微生物组和代谢组技术为揭示土壤生态过程提供了丰富数据，但如果缺少田间害虫种群和作物受害指标，其应用价值有限。未来应将组学数据与地下害虫种群密度、作物受害指数及产量、天敌捕食强度等变量进行整合，识别关键驱动因子，并通过独立试验验证模型推断。

7.4 建立区域适配和技术评价体系

冬闲期功能植物技术能否推广，不仅取决于生态控害效果，还受到区域气候、土壤类型、轮作制度、害虫优势种、农事安排和生产成本等因素制约。不同区域适宜的功能植物不同，同一植物在不同生态区的越冬能力、生物量积累、翻压适期和后茬作物适配性也可能存在差异。因此，未来应开展多区域、多作物和多年定位验证，明确适宜植物种类、播种量、覆盖时长、翻压时期和残体输入量，避免将单一区域经验直接推广。同时，应将经济成本、农户接受度和生态风险纳入技术评价体系。功能植物应用涉及种子、播种、管理、刈割或翻压等成本，也可能影响后茬播种时间，并存在为部分害虫、杂草或病原菌提供越冬场所的风险。因此，后续研究应结合成本-收益分析、农户意愿调查和风险监测，建立植物筛选-田间管理-效益评价一体化流程，形成兼顾生态效益、经济可行性和田间可操作性的区域化应用模式。

冬闲期是农田生态系统中承上启下的关键阶段，也是地下害虫绿色防控中尚未充分开发的调控窗口。功能植物覆盖、生长和翻压不仅具有土壤培肥和生态服务功能，还可通过维持地表捕食性天敌、促进根系-土壤互作和重构土壤生态过程，影响地下害虫种群建立和作物为害风险。本文提出的天敌维持-土壤重构双路径协同框架，为理解冬闲田生态管理与地下害虫防控之间的关系提供了新的思路。以蛇床-花生蛴螬体系为代表，将有助于推动冬闲田由传统意义上的生产空档转变为生态防控地下害虫的重要功能阶段，为作物绿色生产和生态产品建设提供理论与技术支撑。

参考文献 (References)

Alberdi A, Aizpurua O, Bohmann K, Gopalakrishnan S, Lynggaard C, Nielsen M, Gilbert MTP, 2019. Promises and pitfalls of using high-throughput sequencing for diet analysis. *Molecular Ecology Resources*, 19(2): 327–348.

Brito C, Martins S, Saraiva F, Roque J, Arrobas M, Rodrigues M, Correia C, 2025. Biomass and nutrient release dynamics of decomposing rolling down legume cover crops in a steep-sloped Mediterranean vineyard. *Frontiers in Agronomy*, 7: 1604142.

Dong F, Men J, Ding Z, Li T, Chang S, Yuan Y, Ge F, 2025. Formulation of ethyl cellulose nanoparticles encapsulated with osthole provides long-lasting plant protection against a major pest mite. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(6): 8987–8999.

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

Erb M, Lu J, 2013. Soil abiotic factors influence interactions

between belowground herbivores and plant roots. *Journal of Experimental Botany*, 64(5): 1295–1303.

Frew A, Barnett K, Nielsen UN, Riegler M, Johnson SN, 2016. Belowground ecology of scarabs feeding on grass roots: Current knowledge and future directions for management in Australasia. *Frontiers in Plant Science*, 7: 321.

Fu B, Chen L, Huang H, Qu P, Wei Z, 2021. Impacts of crop residues on soil health: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 33(1): 164–173.

Ganser D, Knop E, Albrecht M, 2019. Sown wildflower strips as overwintering habitat for arthropods: Effective measure or ecological trap? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 275: 123–131.

Ge F, Men XY, Li Z, Ju Q, Zhang XR, Liang XY, 2025a. Achievements, technical breakthroughs and future prospects of ecological pest control in China. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(3): 549–558. [戈峰, 门兴元, 李卓, 鞠倩, 张兴瑞, 梁潇以, 2025a. 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.]

Ge F, Liang XY, Zhang XR, Li Z, Ju Q, Ouyang F, Yang QF, Cai ZP, Su WW, Han GD, 2025b. Ecological pest control function and application of the functional plant *Cnidium monnieri*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 62(3): 559–566. [戈峰, 梁潇以, 张兴瑞, 李卓, 鞠倩, 欧阳芳, 杨泉峰, 蔡志平, 苏文雯, 韩国栋, 2025b. 功能植物蛇床草生态控害作用及其应用. 应用昆虫学报, 62(3): 559–566.]

Gong ZJ, Li HL, Xu YW, Zhang J, Wu YQ, Miao J, 2026. Field control efficacy of four insecticides against white grubs. *Tianjin Agricultural Sciences*, 32(3): 58–62. [巩中军, 李慧玲, 徐永伟, 张晶, 武予清, 苗进, 2026. 四种杀虫剂防治蛴螬的田间防治效果评价. 天津农业科学, 32(3): 58–62.]

Guo D, Liu Z, Raaijmakers JM, Xu Y, Yang J, Erb M, Zhang J, Zhu YG, Xu J, Hu L, 2025. Linalool-triggered plant-soil feedback drives defense adaptation in dense maize plantings. *Science*, 389(6761): eadv6675.

Hu L, Zhang K, Xu Y, Zheng X, Waterman JM, Ouyang X, Wu Z, Shen Z, He Y, Ma B, Robert CAM, Raaijmakers JM, Ye M, Erb M, Xu J, 2025. Herbivory-induced green leaf volatiles increase plant performance through jasmonate-dependent plant-soil feedbacks. *Nature Plants*, 11(5): 1001–1017.

Isman MB, 2006. Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review of Entomology*, 51: 45–66.

Jiang X, Zhao L, Sergers A, Chang C, Zhang X, Ju Q, Ge F, 2025. Herbivore-induced plant volatiles (HIPVs) from companion plant could enhance predator recruitment and biocontrol of cereal aphids. *Entomologia Generalis*, 45(4): 1067–1077.

Johnson SN, Gregory PJ, 2006. Chemically-mediated host-plant location and selection by root-feeding insects. *Physiological Entomology*, 31(1): 1–13.

Johnson SN, Nielsen UN, 2012. Foraging in the dark: Chemically mediated host plant location by belowground insect herbivores. *Journal of Chemical Ecology*, 38(6): 604–614.

Ju Q, Li X, Jiang XJ, Zhao ZQ, Jiang YL, Qu MJ, 2014. Behavioral responses of three scarab beetles to host plants. *Plant Protection*, 40(4): 76–79. [鞠倩, 李晓, 姜晓静, 赵志强, 姜玉兰, 曲明静, 2014. 3 种金龟甲对寄主植物的行为反应研究. 植物保护, 40(4): 76–79.]

Ju Q, Wei X, Berthon K, Zhang Q, Ma W, Qu M, Ge F, Dicks LV, 2025. Flower strips increase natural pest control of peanut aphids, thereby enhancing crop yield. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 388: 109659.

Juen A, Traugott M, 2005. Detecting predation and scavenging by DNA gut-content analysis: A case study using a soil insect predator-prey system. *Oecologia*, 142(3): 344–352.

Juen A, Traugott M, 2007. Revealing species-specific trophic links in soil food webs: Molecular identification of scarab predators. *Molecular Ecology*, 16(7): 1545–1557.

King RA, Read DS, Traugott M, Symondson WOC, 2008. Molecular analysis of predation: A review of best practice for DNA-based approaches. *Molecular Ecology*, 17(4): 947–963.

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.

Muhammad I, Wang J, Sainju UM, Zhang S, Zhao F, Khan A, 2021. Cover cropping enhances soil microbial biomass and affects microbial community structure: A meta-analysis. *Geoderma*, 381: 114696.

Quintarelli V, Radicetti E, Allevato E, Stazi SR, Haider G, Abideen Z, Bibi S, Jamal A, Mancinelli R, 2022. Cover crops for sustainable cropping systems: A review. *Agriculture*, 12(12): 2076.

Salem MA, Wang JY, Al-Babili S, 2022. Metabolomics of plant root exudates: From sample preparation to data analysis. *Frontiers in Plant Science*, 13: 1062982.

Seitz VA, McGivern BB, Borton MA, Chaparro JM, Schipanski ME, Prenni JE, Wrighton KC, 2024. Cover crop root exudates impact soil microbiome functional trajectories in agricultural soils. *Microbiome*, 12(1): 183.

Shikano I, Rosa C, Tan CW, Felton GW, 2017. Tritrophic interactions: Microbe-mediated plant effects on insect herbivores. *Annual Review*

of Phytopathology, 55: 313–331.

St Leger RJ, Wang JB, 2020. *Metarhizium*: Jack of all trades, master of many. *Open Biology*, 10(12): 200307.

Tao A, Wang T, Pang F, Zheng X, Ayra-Pardo C, Huang S, Xu R, Liu F, Li J, Wei Y, Wang Z, Niu Q, Li D, 2022. Characterization of a novel chitinolytic *Serratia marcescens* strain TC-1 with broad insecticidal spectrum. *AMB Express*, 12(1): 100.

Triquet C, Roume A, Tolon V, Wezel A, Ferrer A, 2022. Undestroyed winter cover crop strip in maize fields supports ground-dwelling arthropods and predation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326: 107783.

van der Meij A, Tyrrell H, Sokolowski DJ, Shepherdson EMF, Elliot MA, Nodwell JR, 2025. *Streptomyces venezuelae* uses secreted chitinases and a designated ABC transporter to support the competitive saprophytic catabolism of chitin. *PLoS Biology*, 23(8): e3003292.

Van Eerd LL, Chahal I, Peng Y, Awrey JC, 2023. Influence of cover crops at the four spheres: A review of ecosystem services, potential barriers, and future directions for North America. *Science of the Total Environment*, 858: 159990.

Vendig I, Guzman A, De La Cerda G, Esquivel K, Mayer AC, Ponisio L, Bowles TM, 2023. Quantifying direct yield benefits of soil carbon increases from cover cropping. *Nature Sustainability*, 6(9): 1125–1134.

Villani MG, Wright RJ, 1990. Environmental influences on soil macroarthropod behavior in agricultural systems. *Annual Review of Entomology*, 35: 249–269.

von Berg K, Traugott M, Symondson WOC, Scheu S, 2008. The effects of temperature on detection of prey DNA in two species of carabid beetle. *Bulletin of Entomological Research*, 98(3): 263–269.

Wallander S, Smith D, Bowman M, Claassen R, 2021. Cover crop trends, programs, and practices in the United States. *USDA Economic Research Service, Economic Information Bulletin*, 222: 1–39.

Wang TT, Dong F, Liang XY, Li Z, Ge LQ, Ge F, 2025. Effects of 2% osthole soluble concentrate on major wheat diseases and insect pests and predatory natural enemies. *Journal of Plant Protection*, 52(2): 501–509. [王婷婷, 董芳, 梁潇以, 李卓, 戈林泉, 戈峰, 2025. 2%蛇床子素可溶液剂对小麦主要病虫害及捕食性天敌的影响. 植物保护学报, 52(2): 501–509.]

Ward AL, Rogers DJ, 2007. Oviposition response of scarabaeids: Does "mother knows best" about rainfall variability and soil moisture? *Physiological Entomology*, 32(4): 357–366.

Xie MH, Zhong YZ, Lin LL, Zhang GL, Ni WL, Chen HL, 2026. Laboratory toxicity bioassay and field efficacy evaluation of insecticides against white grubs. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2026005. [谢明惠, 钟永志, 林璐璐, 张光玲, 倪皖莉, 陈浩梁, 2026. 蛴螬防治药剂的室内毒力测定与田间药效评价. 中国油料作物学报, https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2026005.]

Yousefi M, Dray A, Ghazoul J, 2024. Assessing the effectiveness of cover crops on ecosystem services: A review of the benefits, challenges, and trade-offs. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 22(1): 2335106.

Zhang B, Xiao HJ, 2025. Application of farmland landscape pattern in ecological pest regulation. *Plant Protection*, 51(5): 267–278. [张兵, 肖海军, 2025. 农田景观格局在害虫生态调控中的应用. 植物保护, 51(5): 267–278.]

Zhou HZ, Yu XD, Luo TH, Li XY, Wang FY, Li DE, Zhou YLZ, Zhao CY, 2014. Sampling techniques for soil carabid and rove beetles. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 51(5): 1367–1375. [周红章, 于晓东, 罗天宏, 李晓燕, 王凤艳, 李德娥, 周毓灵子, 赵彩云, 2014. 土壤步甲和隐翅虫的采集与田间调查取样技术. 应用昆虫学报, 51(5): 1367–1375.]

Zhou Z, Luo M, Zhang H, Yin Y, Cai Y, Zhu ZJ, 2022. Metabolite annotation from knowns to unknowns through knowledge-guided multi-layer metabolic networking. *Nature Communications*, 13: 6656.