

薛文凤, 程赛赛, 胡锋, 刘满强. 生态集约化提升农田土壤多功能性的研究进展[J]. 土壤学报, 2025,

XUE Wenfeng, CHENG Saisai, HU Feng, LIU Manqiang. Ecological Intensification Enhance Soil Multifunctionality: A Review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,

# 生态集约化提升农田土壤多功能性的研究进展\*

薛文凤<sup>1,2</sup>, 程赛赛<sup>2</sup>, 胡锋<sup>1</sup>, 刘满强<sup>1,2†</sup>

(1. 南京农业大学资源与环境科学学院土壤生态实验室, 南京 211800; 2. 兰州大学草地微生物中心, 草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室, 草地农业科技学院, 兰州 730000)

**摘要:** 在全球粮食需求持续增长与气候变化加剧的双重压力下, 人类比以往任何时候都更加依赖土壤所提供的多种生态功能。然而, 传统集约化农业过度追求粮食产量, 长期“重种轻养”, 导致生物多样性丧失、土壤退化及环境污染等一系列生态问题。生态集约化农业以“基于自然的解决方案”为核心, 强调生产与生态功能的协调发展, 旨在以最小的环境代价提升土壤多功能性, 推动农业向绿色生产模式转型。本文系统阐述了生态集约化提升土壤多功能性的内在机制, 并解析了典型管理措施(保护性耕作、多样化种植、有机物料施用及有益生物介入)对土壤多功能性的调控路径。基于研究现状总结了当前面临的主要挑战, 包括土壤多功能性评价体系尚不完善, 功能协同与权衡关系研究不足, 以及对多措施协同作用机制认识有限, 并提出应对策略。最后, 本文展望了未来的研究方向, 强调需在时空维度上构建动态化、多尺度的土壤多功能性研究框架; 深化机制解析, 推动理论与方法创新; 推进多措并举和“因地制宜、因时制宜”的区域适应性管理策略。通过科学研究与实践应用的相互促进, 生态集约化有望实现农业生产与生态功能的双重提升, 为农业可持续发展提供坚实支撑。

**关键词:** 生态集约化; 基于自然解决方案; 覆盖作物; 生物多样性; 土壤多功能性; 功能权衡

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

## Ecological Intensification Enhance Soil Multifunctionality: A Review

XUE Wenfeng<sup>1,2</sup>, CHENG Saisai<sup>2</sup>, HU Feng<sup>1</sup>, LIU Manqiang<sup>1,2†</sup>

(1. Soil Ecology Lab, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 211800, China; 2. Centre for Grassland Microbiome, State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-Ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** With the exacerbation of global food demand and climate change, there is an urgent need for agricultural systems to deliver multiple ecosystem functions and services. However, conventional agriculture, with its emphasis on yield maximization, has often exacerbated ecological issues such as biodiversity loss, soil degradation, and environmental pollution. Ecological intensification, grounded in nature-based solutions, aims to harmonize agricultural production with ecosystem functioning while enhancing soil multifunctionality at minimal environmental cost, thereby driving the transition of agricultural systems toward more sustainable production models. This review synthesizes the mechanisms through which ecological intensification enhances soil multifunctionality and elucidates the regulatory pathways of key management practices, including conservation tillage, diversified cropping, organic amendments, and the inoculation of beneficial organisms. Furthermore, we identified the

\* 国家重点研发计划项目(2021YFD1700202, 2022YFD1500203)和国家自然科学基金项目(42177286)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (Nos. 2021YFD1700202, 2022YFD1500203) and the National Natural Science Foundation of China (No. 42177286)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liumq@njau.edu.cn

作者简介: 薛文凤(1993—), 女, 山东临沂人, 博士, 主要从事土壤生态学研究。E-mail: wenfengchangyong@163.com

收稿日期: 2025-05-04; 收到修改稿日期: 2025-07-18; 网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-18

http://pedologica.issas.ac.cn

major challenges, including the absence of a comprehensive evaluation framework for soil multifunctionality, limited understanding of trade-offs and synergies among functions, and insufficient insights into the mechanisms underlying the synergistic effects of multiple practices, and proposed targeted solutions to address these gaps. Finally, this review outlines future research priorities, emphasizing the need to establish dynamic, multi-scale research frameworks of soil multifunctionality that incorporate spatial and temporal dimensions; to deepen mechanistic understanding through theoretical and methodological innovation; and to promote regionally adaptive, context-specific management strategies through the integration of multiple ecological practices. By bridging scientific research and practical application, ecological intensification offers significant potential to simultaneously enhance agricultural productivity and ecosystem services, thereby supporting the long-term sustainability of agricultural systems.

**Key words:** Ecological intensification; Nature-based solutions; Cover crops; Biodiversity; Soil multifunctionality; Trade-offs

传统集约化农业作为应对全球粮食需求增长的主要策略,因过度依赖化学品和机械投入,导致土壤生物多样性丧失、功能退化及环境污染等诸多问题<sup>[1]</sup>。同时,气候变化的加剧进一步放大了其负面效应,进而削弱生态系统的抵抗力与恢复力<sup>[2-4]</sup>。面对人类活动与气候变化的双重压力,以恢复生物多样性为核心、提供多种生态系统功能与缓解气候变化为目标的“基于自然的解决方案”(Nature-based solutions)逐步受到重视。在此背景下,农业系统亟需结合生物-环境互作的生态学原理,发展兼顾生产与生态服务的可持续农业<sup>[5]</sup>。

生态集约化(Ecological intensification)作为一种依赖自然过程、以可持续性为理念基础的农业模式<sup>[6]</sup>,被视为应对传统集约化农业生态代价和可持续性挑战的重要路径。相较于有机农业、保护性农业和再生农业等模式,生态集约化以生物多样性为核心驱动力<sup>[7]</sup>,通过整合多种生态过程与农业实践,致力于构建生产与生态功能之间的动态平衡,而非追求单一功能目标的最大化<sup>[8]</sup>。作为一种“基于自然的解决方案”,生态集约化强调将生物多样性对生态系统功能的调控整合于农田生态系统<sup>[5, 9-10]</sup>,突破传统集约化农业“高投入—高产出”的线性发展模式,转向以生物互作驱动、土壤多种功能协同提升为导向的发展路径<sup>[11]</sup>,从而协同提升农业生态系统的多重功能与服务能力。

土壤作为陆地生态系统的核心载体,不仅是农业生产的物质基础,更是支撑多种生态系统功能与服务的关键介质。土壤多功能性(Soil multifunctionality)通常被定义为土壤同时提供多种生态系统功能与服务的能力<sup>[12]</sup>,包括养分循环、气候调节与碳固持、生物多样性维持和病虫害防治等,是衡量土壤健康的关键指标之一<sup>[13]</sup>。在生态集约化框架下,土壤多功能性不仅作为核心评价指标,更能反映农业管理措施的综合生态效应:其多维评价体系有助于量化生态集约化实现“生产—生态”协同目标的程度;同时,通过揭示不同功能间的协同与权衡关系,为优化农业管理措施提供理论依据<sup>[14]</sup>。尽管生态集约化在提升土壤多功能性方面展现出巨大潜力,当前研究仍存在不足。一方面,生态集约化通过生物多样性调控提升土壤多功能性的理论框架尚不完善,缺乏系统性的解析;另一方面,典型管理措施(如保护性耕作、多样化种植、有机物料施用及有益生物介入)对土壤多功能性的协同促进效应及其内在生物驱动机制仍有待深入探讨。为此,本文旨在阐明生态集约化提升农田土壤多功能性的内在机制,解析典型管理措施对土壤多功能性的调控路径,并展望未来研究方向,为农业生产与生态功能的协调发展提供理论支撑和实践参考。

## 1 生态集约化提升农田土壤多功能性的作用机制

在农田生态系统中,土壤多功能性的提升依赖于生态过程的协同运行,而生物多样性正是驱动这一过程的核心机制。生态集约化农业遵循强化生物调控、优化资源利用、减少环境胁迫与增强系统韧性的原则<sup>[7]</sup>,在保障粮食产能的同时,以最小的环境代价全面提升土壤多功能性(图1)。

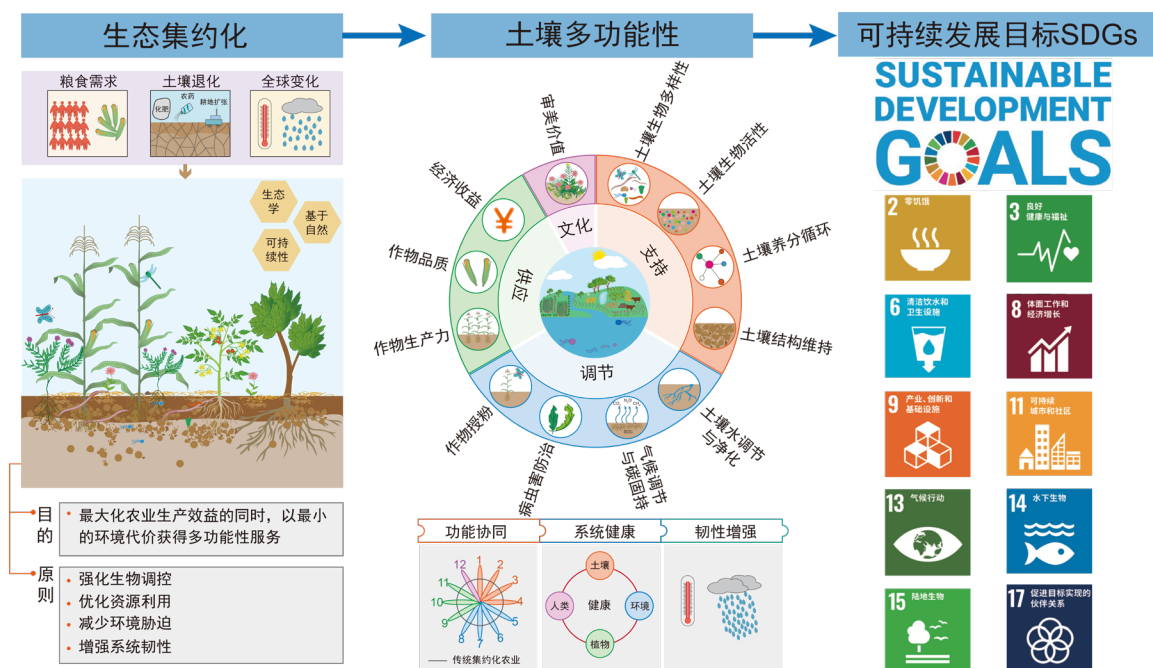


图 1 生态集约化通过提升土壤多功能性促进农业可持续发展的概念框架 (可持续发展目标 SDGs 图标改编自 United Nations<sup>[15]</sup>)

Fig. 1 Conceptual framework of ecological intensification for delivering sustainable development through enhanced soil multifunctionality (SDGs icons modified from United Nations<sup>[15]</sup>)

### 1.1 生物多样性与土壤多功能性

生物多样性通过塑造土壤生物群落结构、调节物种间相互作用等途径, 直接或间接驱动生态系统过程, 是提升土壤功能的“引擎”<sup>[16-18]</sup>。其中, 物种多样性作为研究最为广泛的多样性维度, 高物种多样性的群落通常较物种贫乏的群落维持更高水平的生态功能, 且随着考虑功能数量的增加, 生物多样性与土壤多功能性的正相关关系更为紧密<sup>[19-21]</sup>。这一关系主要归因于物种间的互补效应 (complementarity effect) 和选择效应 (selection effect)<sup>[22]</sup>。互补效应通过物种间功能的互补性 (如生态位分化、资源利用策略差异) 及时空异步性, 优化资源利用效率, 增强整体生态系统功能; 而选择效应则确保高多样性群落更可能包含主导关键生态过程的物种<sup>[16-23]</sup>。尽管随着物种多样性的增加, 功能冗余可能导致生物多样性与土壤多功能性的关系趋于饱和<sup>[19]</sup>, 但其“保险效应” (insurance effect) 可缓冲环境变化 (特别是极端气候事件) 引发的功能波动<sup>[24-25]</sup>, 从而增强土壤多功能性的稳定性。

近年来, 功能多样性 (即功能性状多样性) 在调控土壤多功能性中的重要性日益凸显。相比物种多样性, 功能多样性更直接反映物种在生态系统中的功能性状差异, 能够通过差异化的资源分配与利用策略提升土壤多功能性。相关研究表明, 生物个体在应对环境变化过程中展现的生理、形态及行为性状, 不仅决定其适应能力, 还通过影响群落结构和相互作用间接调控生态过程<sup>[26-27]</sup>。功能多样性的提升不仅通过互补效应增强生态系统功能的互补性, 还通过选择效应推动高功能性物种的主导作用, 从而协同促进土壤多功能性<sup>[28]</sup>。例如, 在森林生态系统中, 植物“功能混搭”带来的功能性状多样性增加, 被证明是实现固碳与提升生产力双赢的重要途径<sup>[29]</sup>。尽管大量证据表明功能多样性, 而非物种多样性, 是与土壤多功能性最直接相关的生物多样性维度, 但当前研究主要集中于植物与微生物群落, 对原生动、线虫等土壤动物群落的功能多样性及其对土壤多功能性的影响仍缺乏系统性的认识与探索。

### 1.2 生物相互作用与土壤多功能性

生物多样性对土壤多功能性的影响不仅取决于单一物种或营养级的作用, 更依赖于多营养级生物之间复杂的相互作用<sup>[30]</sup>, 如地上一地下互作、共生关系与营养级联效应等, 通过优化资源利用与生态位分化, 从而增强土壤功能的多样性及稳定性。例如, 豆科植物与根瘤菌共生可通过生物固氮

提升土壤氮素有效性<sup>[31]</sup>；同时，植物根系分泌物与凋落物的持续输入不仅有助于重塑土壤生物群落结构，还通过植物—土壤反馈机制调节关键生态过程<sup>[32]</sup>，最终提升土壤多功能性。尽管大量研究聚焦于单一营养级多样性的生态效应<sup>[33]</sup>，但越来越多的证据表明，跨营养级生物多样性及其相互作用（如植物—土壤微生物—土壤动物）是支撑高水平土壤多功能性的关键机制<sup>[34-35]</sup>。例如，在草原和森林生态系统中，植物多样性均通过促进多营养级生物多样性提升土壤多功能性，且这种跨营养级的多样性效应普遍强于单一营养级的作用<sup>[33]</sup>。在该过程中，初级生产者通过资源供给与生境塑造等“自下而上”（bottom-up）作用，直接影响土壤生物群落的结构和功能<sup>[36]</sup>；而捕食性土壤动物等高营养级生物则通过“自上而下”（top-down）效应调控初级消费者，并通过级联效应调节微生物群落，以增强微生物代谢活性和养分周转效率<sup>[37]</sup>。

值得注意的是，上下行效应并非孤立存在，而是通过复杂的生态网络形成协同作用机制。例如，植物—丛枝菌根真菌—细菌连续体通过跨界营养交换协同促进土壤养分循环，体现了多营养级互作在维持土壤多功能性中的关键作用<sup>[38]</sup>。此外，能量流动是连接多营养级生物多样性与土壤多功能性的核心纽带：高效的能量流动有助于提升有机质分解与养分周转效率，增强土壤多功能性；反之，能量分配失衡（如捕食者缺失导致的初级消费者爆发，或分解者群落受损引发的分解功能退化）则会削弱特定功能<sup>[39]</sup>，降低系统的稳定性。因此，将能量流动纳入多营养级系统的功能量化框架，有望为深入解析生物多样性与土壤多功能性关系提供理论支撑。然而，该领域仍面临多重挑战：首先，准确量化营养级间的能量流动及其对土壤多功能性的影响存在方法学瓶颈；其次，这些机制在不同生态系统中的适用性和普遍性仍待验证；最后，跨营养级互作与能量流动的协同效应对土壤多功能性及其稳定性的长期影响尚缺乏系统研究。破解这些难题，不仅有助于深化对土壤多功能性维持机制的认识，更将为生物多样性保护与可持续土壤管理提供坚实的理论基础。

### 1.3 生物多样性与土壤多功能性关系的环境背景依赖性

生物多样性与土壤多功能性的关系具有显著的环境背景依赖性，尤其在半自然或人为管理的农田生态系统中，气候条件及土壤性质等关键环境因子在调节二者相互作用中发挥着重要作用<sup>[40-42]</sup>。气候变化可通过改变物种地理分布<sup>[43]</sup>、重塑种群丰度格局<sup>[44]</sup>，甚至削弱群落的系统发育多样性<sup>[45]</sup>，显著影响生物多样性及其对土壤多功能性的调控能力。同时，气候变化还通过改变环境过滤机制与种间互作模式（如竞争、捕食或共生），重构多营养级生物多样性<sup>[46]</sup>及其互作网络<sup>[47-48]</sup>，最终导致土壤生物群落功能紊乱，降低系统稳定性与抵抗力<sup>[49]</sup>。

土壤性质主要通过调控资源有效性与生境异质性，影响生物多样性对土壤多功能性的贡献及其对环境变化的响应。例如，土壤 pH 被认为是影响生物群落结构与多功能性的关键因子，不仅直接塑造土壤生物的生境条件，还通过调节养分有效性与土壤酶活性间接影响食物网结构与功能。已有研究证明，养分富集诱导的土壤酸化是调控土壤生物多样性与多功能性关系的主要驱动因素，且土壤 pH 的效应会沿着营养级级联上升，进而影响土壤多功能性<sup>[50]</sup>。此外，土壤 pH 还影响微生物系统发育谱系与关键功能基因的表达模式，从而改变微生物主导的生态过程<sup>[51]</sup>。除土壤 pH 外，土壤孔隙度、质地及团聚体稳定性等物理性质能够通过调节水分渗透、气体扩散与养分迁移等过程，直接塑造生物群落的组成与功能。例如，黏质土壤凭借较高的保水性和阳离子交换能力更有利于维持微生物多样性与代谢活性；而砂质土壤则因水分流失快、养分保持能力弱，通常更依赖外源有机质的输入以维持生态功能<sup>[52]</sup>。综上所述，生物多样性对土壤多功能性的作用机制受气候条件与土壤性质的双重调控，这种环境背景依赖性不仅决定了土壤生态系统在不同情境下的功能表现与稳定性，还深刻影响其对气候变化的响应能力与适应性。因此，揭示关键环境因子如何调控生物多样性与土壤多功能性关系，对于实现精准化的生态农业管理和提升系统抗逆性具有重要意义。

## 2 生态集约化管理措施对土壤多功能性的调控路径

### 2.1 保护性耕作

作为生态集约化农业中替代传统耕作的重要措施（图2），保护性耕作通过减少机械扰动并增加地表覆盖，显著促进土壤生物多样性及群落稳定性，优化土壤食物网结构，进而增强土壤多功能性。相较于传统耕作，保护性耕作有效减少对土壤结构与微生境的破坏<sup>[51]</sup>，为土壤生物群落提供更稳定的栖息环境，有助于维持生物多样性及其功能。植物残体的持续积累能够为土壤微生物和动物提供丰富的食物资源<sup>[53]</sup>，不仅促进有机质周转与养分循环，还通过改变土壤微环境以选择性地富集特定功能类群。例如，免耕措施可显著提升胞外多糖和脂多糖产生菌的丰度<sup>[54]</sup>，通过其代谢产物的黏结作用有助于促进土壤团聚体的形成与稳定<sup>[55]</sup>，改善土壤结构与持水能力，从而协同提升土壤多功能性。

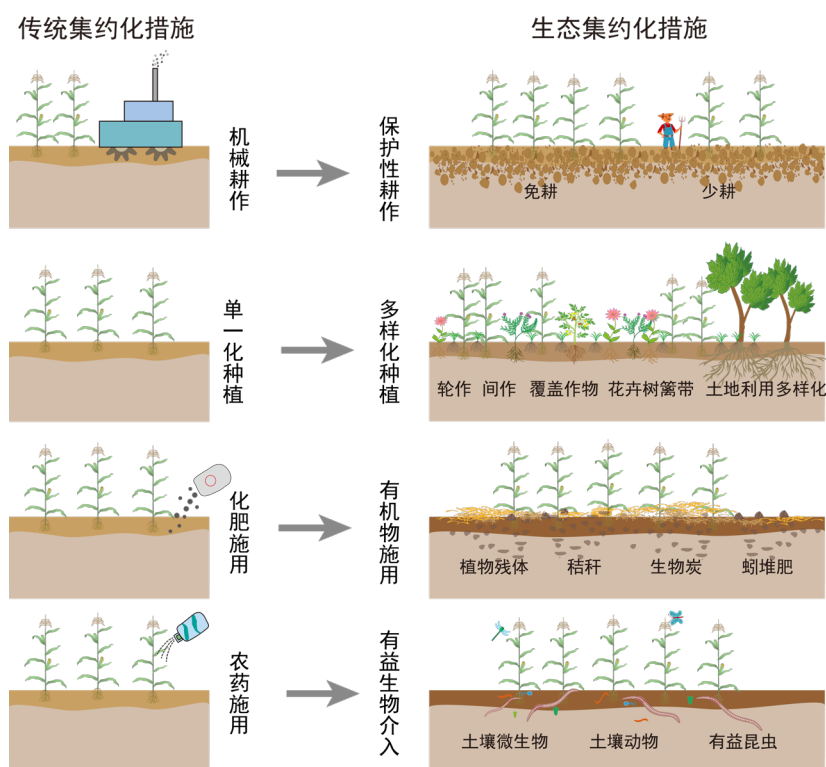


图2 生态集约化与传统集约化农业管理措施对比

Fig. 2 Comparison of management practices between ecological intensification and conventional agriculture

此外，保护性耕作对土壤多功能性的提升还得益于其对土壤食物网结构的调节。其典型特征是促使土壤生物群落由快速周转的细菌能流通道为主，逐步转向以慢速周转的真菌能流通道为主<sup>[56-57]</sup>，有助于增强土壤碳的固持能力。同时，有研究表明，保护性耕作可通过改变弹尾虫群落的功能组成，使其偏向于感官发达的表栖型物种，从而增强土壤系统对极端降水等气候事件的响应能力<sup>[58]</sup>。近期的荟萃分析进一步证实，保护性耕作在提升土壤多功能性方面展现出巨大潜力，且随着管理年限的延长，不仅可有效降低微生物代谢熵以减少  $\text{CO}_2$  排放<sup>[59]</sup>，还可通过增强甲烷氧化菌的活性降低  $\text{CH}_4$  排放<sup>[60]</sup>。然而，保护性耕作的生态效益仍受土壤类型和气候条件等多种因素制约，且在实施初期可能伴随短期产量下降的风险<sup>[61-62]</sup>。为缓解这一现象，可通过优化作物品种选择、精细化的养分与灌溉管理，以及与其他生态集约化措施（如覆盖作物、多样化轮作）联合应用，在提升土壤多功能性的同时<sup>[11]</sup>，实现生态效益与作物生产力的协同增益<sup>[62]</sup>。此外，适当的政策激励与配套技术服务将有助于降低转型期的经济风险，推动保护性耕作的推广与应用。

## 2.2 多样化种植

在生态集约化农业系统中，多样化种植通过在时间和/或空间尺度上增加植物多样性，驱动地下生物群落的重建与功能优化，进而提升土壤多功能性<sup>[63-64]</sup>。这种“地上一地下协同机制”主要表现为：植物多样性驱动的冠层资源利用优化、根系性状间的互补效应、凋落物输入的多样化，以及由此引发的多营养级生物互作网络的构建，最终实现生物多样性、土壤养分循环、气候调节与作物



生产力等多重功能的协同提升。在具体实践中, 多样化种植可划分为农田内部(如多样化轮作、间套作和覆盖作物)、农田周边(如花卉带与树篱带的建立)以及景观尺度(土地利用多样化)等多个层级。

轮作和间套作通过在时间或空间尺度上增加主作物的种类或生长周期<sup>[65]</sup>, 提升农田植物多样性; 覆盖作物则作为一种生态补偿措施, 在主作物生长期和(或)收获期种植非经济作物, 以在时空尺度上填补土壤裸露间隙<sup>[66-67]</sup>, 达到提升土壤多功能性的目的<sup>[68]</sup>。多样化种植不仅通过优化冠层结构提高地上部光合效率<sup>[69]</sup>, 还依托根系性状差异与凋落物输入的多样化, 促进地下生物群落的重建与功能优化<sup>[70]</sup>。以玉米—大豆间作系统为例, 玉米的高冠层与大豆的矮冠层形成地上部生态位分化, 增强光能利用效率; 其深根系与浅根系的垂直互补则优化水分与养分的分层利用<sup>[71]</sup>。多样化的根系构型及植物残体为土壤生物提供丰富的食物资源与微生境<sup>[72]</sup>, 显著增加多营养级生物多样性及食物网结构复杂性, 并通过反馈回路和级联效应驱动土壤生态功能的协同演化<sup>[73]</sup>。例如, 深根性覆盖作物(如菊苣、苜蓿)不仅通过根系的穿透作用改善土壤结构, 其死后根系形成的生物孔隙亦为多营养级生物提供迁移通道与栖息场所<sup>[70]</sup>。此外, 自上而下的能量流与自下而上的养分流将“植物—根系—根际—土壤生物”整合为功能协同的“根际生命共同体”系统<sup>[73]</sup>。最新研究表明, 与覆盖作物系统发育相关的功能性核心微生物具备支撑土壤氮循环功能的潜力<sup>[26]</sup>; 同时, 覆盖作物与土壤微生物的生态策略协同调控土壤碳氮循环功能, 促进土壤有机碳固持并提升主作物产量<sup>[74]</sup>。值得注意的是, 多样化种植对土壤多功能性的提升高度依赖于植物种类、基因型及功能性状的差异。例如, 具有高比根长的获取型覆盖作物有助于富集食细菌线虫, 促进养分周转和作物产量; 而保守型覆盖作物则通过增加土壤食物网结构复杂性提升土壤健康<sup>[75]</sup>。因此, 基于功能性状互补的混播策略, 通过提高种间互补与异步性<sup>[76]</sup>, 有望在提升农业生产的同时改善生态功能, 为土壤多功能性优化提供可行路径。然而, 多样化种植在实践中可能增加机械化操作难度及灌溉等田间管理的复杂性, 并带来额外的经济成本。为此, 可通过合理设计作物组合(如搭配不同株高的物种以适应机械作业), 采用条播起垄等方式优化灌溉管理, 提高田间管理效率, 降低实施成本, 提升管理措施的操作性与可行性。

除了农田内部的作物多样化, 农田周边花卉带或树篱的建立也是增加生物多样性并通过“溢出效应”(spillover effects)提升农田土壤多功能性的重要措施。研究表明, 花卉带和树篱可为传粉昆虫与天敌昆虫提供额外的栖息地和食物资源, 增强授粉服务与病虫害防控<sup>[77-78]</sup>, 在减少农药使用的同时提升作物产量与经济效益<sup>[79]</sup>。若定期对花卉带或树篱进行刈割或翻压, 还可促进大量有机物回归土壤, 增加土壤有机碳储量<sup>[80]</sup>。此外, 这类非农作物栖息地的植被覆盖及绿色边际还有助于拦截农田中淋失的养分, 降低水体污染风险。

在更大尺度上, 景观层级的土地利用多样化(如农林复合业)可提升资源配置效率, 增强土壤生物 $\beta$ 多样性<sup>[81]</sup>, 降低生物均质化风险, 进而提升土壤多功能性及其稳定性。农林复合业将林业与农业相结合, 通过提升植被多样性与景观异质性, 为土壤生物群落提供多样化的栖息地与资源, 是保护生物多样性并强化生态系统服务的重要途径<sup>[82]</sup>。其中, 多年生植被依托其发达的根系和持续的凋落物输入, 有效促进土壤有机质积累与养分循环等关键生态过程<sup>[83-84]</sup>。

### 2.3 有机物施用

有机物施用通过碳源供给、生物激活、土壤理化性质改善等多维协同机制, 系统性地提升土壤多功能性。研究表明, 植物残体或秸秆等有机物料可为土壤生物提供稳定而持续的碳源, 显著提升其多样性与代谢活性, 并通过激发效应与续埋效应之间的动态平衡, 实现土壤有机碳的动态更新和积累<sup>[85-86]</sup>。同时, 微生物代谢过程中释放的胞外多糖、有机酸等次生代谢产物可促进土壤团聚体形成, 从而增强有机碳物理保护和土壤结构稳定性。通过改善土壤孔隙度和通气性, 有机物施用还可为植物根系与土壤生物构建更适宜的生境, 增强生物相互作用与能量流动, 进一步提升土壤多功能性。值得注意的是, 有机物料的多功能效益在很大程度上依赖于其分解性状(如碳氮比, 木质素含量)<sup>[87]</sup>。易分解的有机物料能够快速激活细菌群落, 通过细菌主导的能流通道提高养分转化效率;

而难分解的有机物料则倾向于促进真菌能流通道，有助于提升土壤有机碳积累与生态系统的稳定性。

在各类有机物料中，生物质炭和蚓堆肥因其独特的理化性质，在提升土壤多功能性方面展现出显著潜力。生物质炭具备高碳含量、丰富的孔隙结构和较大的比表面积，能够有效固持土壤碳<sup>[88]</sup>、改善土壤结构，并通过阳离子吸附保留养分，从而提升土壤多功能性<sup>[89-90]</sup>。尤其在酸性土壤中，生物质炭能够显著提高土壤 pH，缓解酸化问题<sup>[91]</sup>。此外，生物质炭既可直接作为碳源，也可通过改善土壤理化性质间接调控土壤生物多样性和群落结构。研究发现，生物质炭与减量化肥配合施用能够显著增加土壤线虫数量<sup>[91]</sup>，并通过增加土壤线虫食物网的能流均匀性来提升土壤多功能性<sup>[92]</sup>。相比之下，富含生物活性物质和有益微生物的蚓堆肥，可在短期内快速激活土壤生物活性，并通过增加食物网结构复杂性及生物互作，进一步提升土壤多功能性<sup>[93]</sup>。同时，蚓堆肥中富含的植物养分和微量元素可持续满足作物生长需求<sup>[94]</sup>，所富含的植物激素类物质亦能直接促进作物生理代谢，提升作物产量与品质。尽管部分研究指出，蚓堆肥中大量易分解有机碳可能加剧微生物呼吸与反硝化过程，导致 CO<sub>2</sub>和 N<sub>2</sub>O 排放增加，但也有证据证实，其多孔结构和微生物群落调控能力可有效减少养分淋失与温室气体排放<sup>[94]</sup>，体现其环境协同效益。

## 2.4 有益生物介入

有益生物介入是指通过向土壤中定向引入具有特定功能的微生物或土壤动物，精准调控关键生态过程，从而提升土壤多功能性。例如，接种链霉菌、假单胞菌及木霉菌等功能性微生物，可同时促进植物生长并诱导植物抗性<sup>[95]</sup>，实现生产力提升与病害防治的协同效应。除了微生物接种，近年来土壤动物的引入也逐渐受到重视。研究表明，昆虫病原线虫接种能够靶向侵染食根害虫，显著抑制病虫害，同时避免对非靶标昆虫的威胁<sup>[96]</sup>。此外，部分线虫还可作为移动载体，将有益微生物输送至植物根际，从而抑制植物病原物的生长并增强植物抗病能力<sup>[96-97]</sup>。蚯蚓作为典型的“生态系统工程师”，可通过取食植物腐烂根系并排泄释放矿质养分和植物激素，直接促进作物生长；其“生物扰动”和“消化”活动（如砂囊碎化和肠道过滤）可显著改变土壤水分、pH 和团聚体结构等理化性质，进而调控土壤生物群落以提升土壤多功能性。已有研究证明，接入蚯蚓能够改变土壤群落功能组成，使其朝着细菌能流通道的群落发展，并加强土壤微生物与微动物的多营养级互作，提升土壤多功能性<sup>[98]</sup>。同时，通过直接引种或土壤转移法接入蚯蚓，不仅能够增强植物激素的合成与信号传导，提升作物抗病性与免疫反应能力<sup>[99-100]</sup>，还可改善根际环境，促进根瘤菌定殖与根瘤形成<sup>[101]</sup>，并通过提高磷素有效性，缓解植物的磷限制<sup>[102]</sup>。这些作用共同推动植物—微生物—土壤动物互作网络的构建<sup>[103]</sup>，实现养分的高效循环与利用。尽管有益生物介入在提升土壤多功能性方面成效显著，但其效果受环境条件、物种选择及管理策略等多种因素的影响<sup>[104]</sup>，并易受到非预期气候变化的干扰，甚至存在功能衰退、生态位漂移或对本地群落造成不可逆影响的潜在风险。因此，未来研究需进一步聚焦于有益生物的环境适应能力、功能持续性与生态安全性评估，以实现其在提升土壤健康与农业可持续性中的长期正向效益。

## 3 当前研究的挑战及对策

当前，生态集约化作为实现农业可持续发展的核心路径，已成为推动国际农业绿色转型的关键。例如，欧盟的 DiverIMPACTS 计划推动多功能土地利用和生态管理理念在政策与实践中的深度融合，强调通过生态措施的系统集成与区域适应性配置，实现农业生产力与生态系统服务的协同提升。相关研究在功能识别、综合评价和多措施协同机制等方面不断取得进展，逐步建立起多功能协同管理的理论基础与实践框架<sup>[105-107]</sup>。

在我国，“藏粮于地、藏粮于技”“山水林田湖草沙一体化保护与修复”以及“碳达峰碳中和”等国家方针的推进，为生态集约化发展提供了坚实的政策支撑。部分区域围绕绿色防控、有机替代、保护性耕作与黑土地保护等措施积极探索，在土壤健康管理及生态功能提升方面取得阶段性成果，相关技术与评价框架初见雏形<sup>[13-14]</sup>。然而，当前我国在生态集约化推进过程中仍面临三大关键挑战：

其一，土壤多功能性评价体系尚不完善，功能类型划分与指标体系构建缺乏统一标准；其二，对多功能之间的协同与权衡关系认识不足，难以支撑多目标导向的农业管理；其三，多措施协同机制研究相对薄弱，尚缺乏适应不同区域环境条件的整合优化路径。这些理论与方法上的瓶颈制约了生态集约化措施在更大范围内的集成与推广。针对上述挑战，以下将从评价体系构建、功能关系解析和多措施协同优化三个维度，探讨当前研究的进展与未来发展方向。

### 3.1 土壤多功能性评价指标的确定与优化

土壤多功能性评价涉及对多种生态系统功能与服务的识别、量化与整合，关键在于科学选择评价方法、合理界定功能类型，并构建优化的指标体系<sup>[108]</sup>。当前常用的评价方法主要包括单功能法、平均值法、单阈值法和多阈值法<sup>[109]</sup>。单功能法适用于特定功能的定量分析，但难以反映系统整体功能特征；平均值法应用广泛、计算简单，但易受单一功能极值的影响<sup>[110]</sup>。阈值法则通过设定一个或多个阈值，较好地捕捉多功能系统的临界性与多样性特征。其中，单阈值法往往仅体现功能达标数量，缺乏统一标准；多阈值法虽更具直观性，但多停留于现象描述，难以支撑机制层面的探讨。鉴于不同方法各有优劣，需结合研究目标与数据特性灵活选用或整合多种评价方法，以提升结果的科学性和全面性。

在功能类型设定方面，当前研究仍存在主观性与片面性的问题，尤其在农业系统中，易偏重于生产功能，而忽视支持、调节及文化服务等其他功能。针对该不足，我们构建并优化了一套涵盖四类生态系统服务的土壤多功能性评价框架（图3），囊括十二大核心功能：支持服务（土壤生物多样性、生物活性、养分循环、结构维持）、调节服务（土壤水调节与净化、气候调节与碳固持、病虫害防治、作物授粉）、供应服务（作物生产力、作物品质、经济收益）和文化服务（审美价值）。同时，基于科学性、可操作性、可比性和适应性四大原则，系统梳理现有文献，构建功能评价指标库，并筛选出代表性强、适用性高的核心指标，用于农田生态系统土壤多功能性的综合评估，为农业可持续管理提供科学支撑。





图3 农业系统土壤多功能性评价指标体系的构建与优化

Fig. 3 Construction and optimization of the soil multifunctionality evaluation framework for agricultural systems

### 3.2 综合考虑功能之间的相互关系，平衡生产与生态功能

土壤生态系统各功能之间存在复杂的相互作用，既存在协同促进，也包含权衡制约<sup>[111]</sup>。当前多数研究主要聚焦于土壤多功能性的整体评价，缺乏对功能间相互关系的系统解析。在农业生产实践中，生产功能与生态功能之间的权衡尤为突出<sup>[108]</sup>，如高产目标驱动下的传统集约化管理往往导致土壤有机质下降、生物多样性丧失等生态功能退化<sup>[109, 112]</sup>。生态集约化的本质特征在于功能结构的优化配置，而非功能的简单叠加。通过科学管理土壤健康，可在保障生态功能的同时提升作物产量，实现生产功能与生态功能的协同提升。例如，改善土壤结构有助于提升土壤水分保持和养分循环，同时增强土壤碳固持，不仅优化生态功能，也为作物生长提供更优环境，实现多种功能的协同增益。未来研究应突破单一功能视角，转向基于功能网络的系统性分析，重点关注不同管理措施在时空维度协同提升多种功能的作用机制，构建以“协同最大化、权衡最小化”为目标的多功能优化路径，推动农业生产与生态功能的深度融合与协调发展。

### 3.3 生态集约化的多措施协同机制研究

当前生态集约化的研究多侧重于单一管理措施的效果评估，缺乏对多措施协同机制的系统解析<sup>[10]</sup>。然而，在实际农业管理中，单一措施往往难以兼顾多种生态功能<sup>[113]</sup>，甚至可能加剧功能间的权衡。例如，保护性耕作虽能提升多种生态功能，但在实践初期常伴随产量下降的风险。此外，现有研究在多措施组合应用的理论框架、交互机制与适应性路径方面仍不完善。由于协同效应在实践中难以稳定发挥，制约了以多功能目标为导向的管理优化策略的推广。尤其是在时间与空间尺度的动态调控方面，当前研究缺乏系统性监测与机制识别，难以支撑“因时因地”优化管理组合的实际需求。因此，未来亟须深化对多种生态集约化措施联动机制的系统研究，推动理论认知与实践创新的深度融合。为实现多功能协同目标，生态集约化研究需从“措施叠加”走向“系统整合与协同配置”，在明确农田生态系统基本功能需求（如保障作物产量）的基础上，构建以功能互补为原则的管理组合方案。例如，在旱作地区，结合少耕、豆科间作与有机物还田，有望在水分受限条件下兼顾养分高效利用与提升作物产量。未来需进一步识别关键措施的协同路径，探索以功能互补为导向的组合规则，以支持多功能目标下的农业管理优化。

## 4 展望

在全球气候变化与资源约束日益加剧的背景下，生态集约化正成为农业可持续发展的重要路径，在提升土壤多功能性、保障粮食安全与增强生态系统韧性等方面发挥着核心作用。为进一步挖掘生态集约化的潜力，未来研究可从以下几个方面拓展与深化：

1) 在时空维度上构建动态化、多尺度的土壤多功能性研究框架。当前土壤多功能性研究多聚焦于静态指标和特定时空尺度的评估，未来应构建过程导向、跨尺度融合的研究框架，系统揭示生态集约化措施在不同时间尺度（短期响应与长期积累效应）与空间尺度（地块-区域-全球）的作用机制。在时间维度上，重点解析生态集约化措施的累积效应、滞后响应及其随时间的动态演变规律，推动研究从传统的“单一功能提升”向“系统功能优化”的转变；在空间维度上，应超越传统生产与生态功能的界定，拓展至包括文化服务在内的更广泛生态系统服务范畴<sup>[108]</sup>。结合遥感技术、地统计方法与过程模型，有望实现对土壤功能变化的高精度模拟与长期预测，从而为动态化、精准化管理提供科学支撑。

2) 深化机制解析，推动理论与方法创新。面对土壤生态过程的高度复杂性，亟须深化理论框架构建与作用机制解析。未来研究应充分结合生态学理论与方法，如基于功能性状的方法<sup>[114-115]</sup>，并整合地上一地下互作视角，系统解析不同生态集约化措施通过生物多样性途径调控土壤多功能性的机制。同时，聚焦不同生物类群（微生物、无脊椎动物、植物根系）在生态功能提升中的互作关

系<sup>[46]</sup>, 从群落组成扩展至功能性状层面, 识别驱动关键过程(如养分循环、碳固持、病害抑制等)的核心功能生物群。此外, 应加强土壤生物互作网络的构建与动态模拟, 从多营养级角度揭示功能协同与权衡的内在机制, 为生物驱动型管理策略提供理论支撑。结合组学技术、多因子控制实验与生态系统建模等手段, 对生态集约化措施作用机制进行多维度解析, 推动基于机制理解的精准化农业实践。

3) 推进多措并举和“因地制宜、因时制宜”的区域适应性管理策略。单一措施难以满足农田生态系统多功能协同的需求, 未来研究应以“系统整合”为导向, 探索多种生态集约化措施在不同情境下的协同路径。不同生态集约化措施间存在显著的交互效应与适应性差异, 需综合土壤类型、作物种类、种植制度与气候背景等关键因子, 遵循“因地制宜、因时制宜”的动态管理原则, 构建具备环境适配性与功能导向性的管理组合<sup>[116]</sup>。建议通过长期定位试验、多因子交互设计与大数据驱动模型, 识别关键措施组合与最优耦合路径。同时, 应加强政策、社会与经济因素的集成研究, 提升系统策略在实践层面的可行性与可推广性。

总体而言, 生态集约化的未来发展不仅依赖于机制深化与理论创新, 更需强调多学科交叉、系统研究与实践转化的协同推进。通过整合生态过程机制、多功能协同模型与适应性管理工具, 有望全面提升农业系统的适应性、弹性与生态服务供给能力, 为农业绿色转型与全球可持续发展目标的实现提供坚实支撑。

## 参考文献 (References)

- [1] Abdo A I, Sun D L, Shi Z J, et al. Conventional agriculture increases global warming while decreasing system sustainability[J]. *Nature Climate Change*, 2024, 15(1): 110-117.
- [2] Yang Y, Tilman D, Jin Z N, et al. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture[J]. *Science*, 2024, 385(6713): eadn3747.
- [3] Rezaei E E, Webber H, Asseng S, et al. Climate change impacts on crop yields[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(12): 831-846.
- [4] Lesk C, Anderson W, Rigden A, et al. Compound heat and moisture extreme impacts on global crop yields under climate change[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(12): 872-889.
- [5] Bommarco R, Kleijn D, Potts S G. Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2013, 28(4): 230-238.
- [6] Tittone P. Ecological intensification of agriculture—Sustainable by nature[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2014, 8: 53-61.
- [7] Garibaldi L A, Pérez-Méndez N, Garratt M P D, et al. Policies for ecological intensification of crop production[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(4): 282-286.
- [8] Gong S X, Hodgson J A, Tschamke T, et al. Biodiversity and yield trade-offs for organic farming[J]. *Ecology Letters*, 2022, 25(7): 1699-1710.
- [9] Jhariya M K, Meena R S, Banerjee A. Ecological intensification of natural resources for sustainable agriculture[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2021.
- [10] MacLaren C, Mead A, van Balen D, et al. Long-term evidence for ecological intensification as a pathway to sustainable agriculture[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(9): 770-779.
- [11] van Rijssel S Q, Koorneef G J, Veen G F C, et al. Conventional and organic farms with more intensive management have lower soil functionality[J]. *Science*, 2025, 388(6745): 410-415.
- [12] Manning P, van der Plas F, Soliveres S, et al. Redefining ecosystem multifunctionality[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(3): 427-436.
- [13] Zhang J Z, Wang G Z, Li Y Z, et al. Re-thinking the establishment of the farmland soil health assessment system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61(4): 879-891. [张江周, 王光州, 李奕赞, 等. 农田土壤健康评价体系构建的若干思考[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 879-891.]
- [14] Li Y Z, Zhang J Z, Jia J Y, et al. Research progresses on farmland soil ecosystem multifunctionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1177-1189. [李奕赞, 张江周, 贾金玉, 等. 农田土壤生态系统多功能性研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59(5): 1177-1189.]
- [15] United Nations. Transforming our world: The 2030 Agenda for sustainable development[EB/OL]. (2015-09-25)[2025-07-10]. <https://sdgs.un.org>.
- [16] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2014, 45: 471-493.
- [17] Allen W J, Bufford J L, Barnes A D, et al. A network perspective for sustainable agroecosystems[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8): 769-780.
- [18] Cavicchioli R, Ripple W J, Timmis K N, et al. Scientists' warning to humanity: Microorganisms and climate change[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2019, 17(9): 569-586.
- [19] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality[J]. *Nature*, 2007, 448(7150): 188-190.
- [20] Isbell F, Calcagno V, Hector A, et al. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services[J]. *Nature*, 2011, 477(7363): 199-202.
- [21] Schuldt A, Assmann T, Brezzi M, et al. Biodiversity across trophic levels drives multifunctionality in highly diverse forests[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2989.
- [22] Chen C, Xiao W Y, Chen H Y H. Meta-analysis reveals global variations in plant diversity effects on productivity[J]. *Nature*, 2025, 638(8050): 435-440.
- [23] Gamfeldt L, Roger F. Revisiting the biodiversity–ecosystem multifunctionality relationship[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 168.
- [24] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, et al. Biodiversity and ecosystem functioning: Current knowledge and future challenges[J]. *Science*,

2001, 294(5543): 804-808.

- [25] Hector A, Hautier Y, Saner P, et al. General stabilizing effects of plant diversity on grassland productivity through population asynchrony and overyielding[J]. *Ecology*, 2010, 91(8): 2213-2220.
- [26] Cheng S S, Gong X, Xue W F, et al. Evolutionarily conserved core microbiota as an extended trait in nitrogen acquisition strategy of herbaceous species[J]. *New Phytologist*, 2024, 244(4): 1570-1584.
- [27] Zhang C Z, Wright I J, Nielsen U N, et al. Linking nematodes and ecosystem function: A trait-based framework[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2024, 39(7): 644-653.
- [28] Gross N, Le Bagousse-Pinguet Y, Liancourt P, et al. Functional trait diversity maximizes ecosystem multifunctionality[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1: 132.
- [29] Bongers F J, Schmid B, Bruelheide H, et al. Functional diversity effects on productivity increase with age in a forest biodiversity experiment[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5(12): 1594-1603.
- [30] Liu Y, Yang Y H, Deng Y, et al. Long-term ammonium nitrate addition strengthens soil microbial cross-trophic interactions in a Tibetan alpine steppe[J]. *Ecology*, 2025, 106(3): e70057.
- [31] Kuypers M M M, Marchant H K, Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(5): 263-276.
- [32] Jing J Y, Cong W F, Bezemer T M. Legacies at work: Plant-soil-microbiome interactions underpinning agricultural sustainability[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8): 781-792.
- [33] Li Y, Schuldt A, Ebeling A, et al. Plant diversity enhances ecosystem multifunctionality *via* multitrophic diversity[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2024, 8(11): 2037-2047.
- [34] Li Y, Liu X J. Multitrophic biodiversity and terrestrial ecosystem multifunctionality: Advances and perspectives[J]. *Scientia Sinica: Vitae*, 2024, 54(4): 739-750. [李逸, 刘晓娟. 多营养级生物多样性与陆地生态系统多功能性: 研究现状与展望[J]. *中国科学: 生命科学*, 2024, 54(4): 739-750.]
- [35] Luo Y H, Cadotte M W, Liu J, et al. Multitrophic diversity and biotic associations influence subalpine forest ecosystem multifunctionality[J]. *Ecology*, 2022, 103(9): e3745.
- [36] Trivedi P, Leach J E, Tringe S G, et al. Plant-microbiome interactions: From community assembly to plant health[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18(11): 607-621.
- [37] Morrissey E M, Kane J, Tripathi B M, et al. Carbon acquisition ecological strategies to connect soil microbial biodiversity and carbon cycling[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2023, 177: 108893.
- [38] Duan S L, Feng G, Limpens E, et al. Cross-Kingdom nutrient exchange in the plant-arbuscular mycorrhizal fungus-bacterium continuum[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 22(12): 773-790.
- [39] Barnes A D, Jochum M, Lefcheck J S, et al. Energy flux: The link between multitrophic biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2018, 33(3): 186-197.
- [40] Allan E, Manning P, Alt F, et al. Land use intensification alters ecosystem multifunctionality *via* loss of biodiversity and changes to functional composition[J]. *Ecology Letters*, 2015, 18(8): 834-843.
- [41] Hu A, Wang J J, Sun H, et al. Mountain biodiversity and ecosystem functions: Interplay between geology and contemporary environments[J]. *The ISME Journal*, 2020, 14(4): 931-944.
- [42] Jaureguiberry P, Titeux N, Wiemers M, et al. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss[J]. *Science Advances*, 2022, 8(45): eabm9982.
- [43] Pecl G T, Araújo M B, Bell J D, et al. Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being[J]. *Science*, 2017, 355(6332): eaai9214.
- [44] Fei S L, Desprez J M, Potter K M, et al. Divergence of species responses to climate change[J]. *Science Advances*, 2017, 3(5): e1603055.
- [45] Li D J, Miller J E D, Harrison S. Climate drives loss of phylogenetic diversity in a grassland community[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(40): 19989-19994.
- [46] Wu L W, Zhang Y, Guo X, et al. Reduction of microbial diversity in grassland soil is driven by long-term climate warming[J]. *Nature Microbiology*, 2022, 7(7): 1054-1062.
- [47] Urban M C. Climate change extinctions[J]. *Science*, 2024, 386(6726): 1123-1128.
- [48] Pereira H M, Martins I S, Rosa I M D, et al. Global trends and scenarios for terrestrial biodiversity and ecosystem services from 1900 to 2050[J]. *Science*, 2024, 384(6694): 458-465.
- [49] Knight C G, Nicolitch O, Griffiths R I, et al. Soil microbiomes show consistent and predictable responses to extreme events[J]. *Nature*, 2024, 636(8043): 690-696.
- [50] Hu Z K, Delgado-Baquerizo M, Fanin N, et al. Nutrient-induced acidification modulates soil biodiversity-function relationships[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 2858.
- [51] Hartmann M, Six J. Soil structure and microbiome functions in agroecosystems[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 4(1): 4-18.
- [52] Guerra C A, Berdugo M, Eldridge D J, et al. Global hotspots for soil nature conservation[J]. *Nature*, 2022, 610(7933): 693-698.
- [53] Liu Y L, Song L H, Wu D H, et al. No tillage increases soil microarthropod (Acari and Collembola) abundance at the global scale[J]. *Soil Ecology Letters*, 2023, 6(2): 230208.
- [54] Cania B, Vestergaard G, Suhadolc M, et al. Site-specific conditions change the response of bacterial producers of soil structure-stabilizing agents such as exopolysaccharides and lipopolysaccharides to tillage intensity[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 568.
- [55] Costa O Y A, Raaijmakers J M, Kuramae E E. Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1636.
- [56] Degrun F, Theodorakopoulos N, Colinet G, et al. Temporal dynamics of soil microbial communities below the seedbed under two contrasting tillage regimes[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017, 8: 1127.
- [57] Srour A Y, Ammar H A, Subedi A, et al. Microbial communities associated with long-term tillage and fertility treatments in a corn-soybean cropping system[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2020, 11: 1363.
- [58] Yu D Y, Yao J, Chen X Y, et al. Ecological intensification alters the trait-based responses of soil microarthropods to extreme precipitation in agroecosystem[J]. *Geoderma*, 2022, 422: 115956.
- [59] Liu H Y, Liang Y Q, Liu J J, et al. Long-term no-tillage enhanced soil multifunctionality and reduced microbial metabolic entropy[J]. *Applied Soil Ecology*, 2025, 206: 105876.
- [60] Abdalla M, Osborne B, Lanigan G, et al. Conservation tillage systems: A review of its consequences for greenhouse gas emissions[J]. *Soil Use and Management*, 2013, 29(2): 199-209.
- [61] Van den Putte A, Govers G, Diels J, et al. Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields under conservation agriculture[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(3): 231-241.
- [62] Pittelkow C M, Liang X Q, Linquist B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of conservation agriculture[J]. *Nature*, 2014, 517(7534): 365-368.

- [63] Tschamtké T, Grass I, Wanger T C, et al. Beyond organic farming—harnessing biodiversity-friendly landscapes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2021, 36(10): 919-930.
- [64] Wan N F, Dainese M, Wang Y Q, et al. Cascading social-ecological benefits of biodiversity for agriculture[J]. *Current Biology*, 2024, 34(12): R587-R603.
- [65] Yu R P, Yang H, Xing Y, et al. Belowground processes and sustainability in agroecosystems with intercropping[J]. *Plant and Soil*, 2022, 476(1): 263-288.
- [66] Griffiths M, Delory B M, Jawahir V, et al. Optimisation of root traits to provide enhanced ecosystem services in agricultural systems: A focus on cover crops[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2022, 45(3): 751-770.
- [67] Cao W D, Bao X G, Xu C X, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(6): 1450-1461. [曹卫东, 包兴国, 徐昌旭, 等. 中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1450-1461.]
- [68] Lamichhane J R, Alletto L. Ecosystem services of cover crops: A research roadmap[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8): 758-768.
- [69] Li C J, Hoffland E, Kuyper T W, et al. Syndromes of production in intercropping impact yield gains[J]. *Nature Plants*, 2020, 6(6): 653-660.
- [70] Hallett P D, Marin M, Bending G D, et al. Building soil sustainability from root–soil interface traits[J]. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(7): 688-698.
- [71] Zhang G Z, Yang H, Zhang W P, et al. Interspecific interactions between crops influence soil functional groups and networks in a maize/soybean intercropping system[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 355: 108595.
- [72] Bardgett R D, Mommer L, De Vries F T. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(12): 692-699.
- [73] Li C J, Lambers H, Jing J Y, et al. Belowground cascading biotic interactions trigger crop diversity benefits[J]. *Trends in Plant Science*, 2024, 29(11): 1191-1202.
- [74] Cheng S S, Xue W F, Gong X, et al. Reconciling plant and microbial ecological strategies to elucidate cover crop effects on soil carbon and nitrogen cycling[J]. *Journal of Ecology*, 2024, 112(12): 2901-2916.
- [75] Zhang C Z, Xue W F, Xue J R, et al. Leveraging functional traits of cover crops to coordinate crop productivity and soil health[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2022, 59(10): 2627-2641.
- [76] Rahman M K U, Saati-Santamaria Z, García-Fraile P. Intercropping of non-leguminous crops improves soil biochemistry and crop productivity: A meta-analysis[J]. *New Phytologist*, 2025, 246(3): 961-971.
- [77] Albrecht M, Kleijn D, Williams N M, et al. The effectiveness of flower strips and hedgerows on pest control, pollination services and crop yield: A quantitative synthesis[J]. *Ecology Letters*, 2020, 23(10): 1488-1498.
- [78] Marshall E J P, Moonen A C. Field margins in northern Europe: Their functions and interactions with agriculture[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 89(1/2): 5-21.
- [79] Gurr G M, Lu Z X, Zheng X S, et al. Multi-country evidence that crop diversification promotes ecological intensification of agriculture[J]. *Nature Plants*, 2016, 2: 16014.
- [80] Harbo L S, Schulz G, Heinemann H, et al. Flower strips as a carbon sequestration measure in temperate croplands[J]. *Plant and Soil*, 2023, 482(1): 647-663.
- [81] Martínez-Núñez C, Martínez-Prentice R, García-Navas V. Land-use diversity predicts regional bird taxonomic and functional richness worldwide[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 1320.
- [82] Gross C D, Bork E W, Carlyle C N, et al. Agroforestry perennials reduce nitrous oxide emissions and their live and dead trees increase ecosystem carbon storage[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(20): 5956-5972.
- [83] Kuipers K J J, Sim S, Hilbers J P, et al. Land use diversification may mitigate on-site land use impacts on mammal populations and assemblages[J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(22): 6234-6247.
- [84] Parr C L, Beest M T, Stevens N. Conflation of reforestation with restoration is widespread[J]. *Science*, 2024, 383(6684): 698-701.
- [85] Mo F, Yang D Y, Wang X K, et al. Nutrient limitation of soil organic carbon stocks under straw return[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2024, 192: 109360.
- [86] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2: 17105.
- [87] Chaves B, Redin M, Giacomini S J, et al. The combination of residue quality, residue placement and soil mineral N content drives C and N dynamics by modifying N availability to microbial decomposers[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2021, 163: 108434.
- [88] Weng Z H, van Zwieten L, Singh B P, et al. Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(5): 371-376.
- [89] Bo X M, Zhang Z W, Wang J Y, et al. Benefits and limitations of biochar for climate-smart agriculture: A review and case study from China[J]. *Biochar*, 2023, 5(1): 77.
- [90] Qian H Y, Zhu X C, Huang S, et al. Greenhouse gas emissions and mitigation in rice agriculture[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(10): 716-732.
- [91] Cheng L Z, Zhu B J, Cheng Y H, et al. Effects of biochar on red soil nematode community characteristics under chemical fertilizer reduction[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(3): 836-846. [程刘竹, 朱柏菁, 成艳红, 等. 生物质炭与化肥减量配施对红壤线虫群落特征的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(3): 836-846.]
- [92] Zhu B J, Wan B B, Liu T, et al. Biochar enhances multifunctionality by increasing the uniformity of energy flow through a soil nematode food web[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2023, 183: 109056.
- [93] Zhu B J, Whalen J K, Wu J T, et al. Soil food web structure coordinated by soil omnivores sustains soil multifunctionality in moderate vermicompost amended fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2024, 192: 109391.
- [94] Chatterjee R, Debnath A, Mishra S. Vermicompost and soil health[M]//Giri B, Varma A. *Soil health*. Cham, Switzerland: Springer, 2020: 69-88.
- [95] Mo Y N, Guo S, Ou Y N, et al. Effects of protists and *Trichoderma* co-inoculation on cucumber growth and soil microbial communities[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2023, 46(2): 297-305. [莫雅旎, 郭赛, 欧燕楠, 等. 联合接种原生动物和木霉对黄瓜生长及土壤微生物区系的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2023, 46(2): 297-305.]
- [96] Li G, Liu T, Whalen J K, et al. Nematodes: An overlooked tiny engineer of plant health[J]. *Trends in Plant Science*, 2024, 29(1): 52-63.
- [97] Wolfarth F, Schrader S, Oldenburg E, et al. Nematode–collembolan-interaction promotes the degradation of *Fusarium* biomass and deoxynivalenol according to soil texture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 57: 903-910.
- [98] Liu T, Chen X Y, Gong X, et al. Earthworms coordinate soil biota to improve multiple ecosystem functions[J]. *Current Biology*, 2019, 29(20): 3420-3429.e5.
- [99] Blouin M, Zuily-Fodil Y, Pham-Thi A T, et al. Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, inducing plant tolerance to parasites[J]. *Ecology Letters*, 2005, 8(2): 202-208.

土壤学报  
Acta Pedologica Sinica

- [100] Fonte S J, Hsieh M, Mueller N D. Earthworms contribute significantly to global food production[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5713.
- [101] Kim Y N, Robinson B, Lee K A, et al. Interactions between earthworm burrowing, growth of a leguminous shrub and nitrogen cycling in a former agricultural soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 110: 79-87.
- [102] Lv M R, Shao Y H, Lin Y B, et al. Plants modify the effects of earthworms on the soil microbial community and its activity in a subtropical ecosystem[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 103: 446-451.
- [103] Zhang W X, Shen Z F, Shao Y H, et al. Soil biota and sustainable agriculture: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(10): 3183-3206. [张卫信, 申智锋, 邵元虎, 等. 土壤生物与可持续农业研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3183-3206.]
- [104] Compant S, Cassan F, Kostić T, et al. Harnessing the plant microbiome for sustainable crop production[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2024, 23(1): 9-23.
- [105] Reyers B, Selig E R. Global targets that reveal the social-ecological interdependencies of sustainable development[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(8): 1011-1019.
- [106] Niinemets Ü, Zobel M. Ecological intensification index: Reducing global footprint of agriculture[J]. *Trends in Plant Science*, 2025, 30(4): 373-381.
- [107] Scherzinger F, Schädler M, Reitz T, et al. Sustainable land management enhances ecological and economic multifunctionality under ambient and future climate[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 4930.
- [108] Garland G, Banerjee S, Edlinger A, et al. A closer look at the functions behind ecosystem multifunctionality: A review[J]. *Journal of Ecology*, 2021, 109(2): 600-613.
- [109] Byrnes J E K, Gamfeldt L, Isbell F, et al. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: Challenges and solutions[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(2): 111-124.
- [110] Jing X, He J S. Relationship between biodiversity, ecosystem multifunctionality and multiserviceability: Literature overview and research advances[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(10):1094-1111. [井新, 贺金生. 生物多样性与生态系统多功能性和多服务性的关系: 回顾与展望[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1094-1111.]
- [111] Wu L L, Sun C G, Fan F L. Multi-criteria framework for identifying the trade-offs and synergies relationship of ecosystem services based on ecosystem services bundles[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109453.
- [112] Meyer S T, Ptačnik R, Hillebrand H, et al. Biodiversity-multifunctionality relationships depend on identity and number of measured functions[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 2(1): 44-49.
- [113] Xie W, Zhu A F, Ali T, et al. Crop switching can enhance environmental sustainability and farmer incomes in China[J]. *Nature*, 2023, 616(7956): 300-305.
- [114] Le Provost G, Badenhauer I, Le Bagousse-Pinguet Y, et al. Land-use history impacts functional diversity across multiple trophic groups[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(3): 1573-1579.
- [115] Wood S A, Karp D S, DeClerck F, et al. Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2015, 30(9): 531-539.
- [116] Zhao S X, Schmidt S, Gao H J, et al. A precision compost strategy aligning composts and application methods with target crops and growth environments can increase global food production[J]. *Nature Food*, 2022, 3(9): 741-752.

(责任编辑: 卢萍)