

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2025.06.007 CSTR:32310.14.stbcbx.2025.06.007

张一帆,徐昊文,吴洋洋,等.绿肥驱动中国西北旱区土壤改良的作用效果及多维机制进展与展望[J].水土保持学报,2025,39(6):27-40,48.

ZHANG Yifan, XU Haowen, WU Yangyang, et al. Progress and prospects of role and multidimensional mechanisms of green manure in driving soil improvement in arid regions of Northwest China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):27-40,48.

## 绿肥驱动中国西北旱区土壤改良的作用效果及 多维机制进展与展望

张一帆<sup>1</sup>, 徐昊文<sup>1</sup>, 吴洋洋<sup>1</sup>, 孙岩颖<sup>1</sup>, 黄亚浩<sup>1</sup>, 贾振江<sup>1</sup>, 李王成<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021;  
3. 省部共建西北土地退化与生态恢复国家重点实验室, 银川 750021; 4. 宁夏回族自治区黄河水联网数字治水  
重点实验室, 银川 750021)

**摘要:** [目的] 系统梳理、总结和分析绿肥作物在中国西北地区土壤改良方面的应用现状及其作用机制, 以为旱区农业可持续发展和生态环境保护提供理论依据和实践指导。[方法] 以绿肥作物的种植与应用为切入点, 系统总结其在西北旱区的常见类型、种植模式与利用方式等, 全面综述绿肥的生长凋亡对土壤物理、化学及生物特性的影响效应与调控机制。[结果] 绿肥作物能够通过吸收土壤深层以及主作物未能利用的各类养分富集于自身, 并经翻压还田等方式将其活化、固定于耕层; 根系的生物作用改善土壤团聚结构, 并显著提升水、气、热传导特性; 土壤物理结构与养分环境的优化则进一步提升微生物多样性与酶活性。总体而言, 绿肥通过自身生命活动与土壤生态系统的协同互作, 综合改良土壤物理、化学与生物性质, 共同驱动土壤健康发展。[结论] 未来的相关研究可拓展和深化以下4个方面: 1) 深入揭示绿肥调控土壤微生境的生态功能、时空动态及其分子机制; 2) 定量分析绿肥作物对农田生态系统的作用效果及其遗留效应; 3) 加快推进绿肥种植技术的区域适应性技术体系构建与规模化应用; 4) 建立完善绿肥经济与政策体系的系统性框架。

**关键词:** 绿肥种植; 土壤改良; 土壤健康; 中国西北旱区

中图分类号: S551; S553 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2025)06-0027-14

### Progress and Prospects of Role and Multidimensional Mechanisms of Green Manure in Driving Soil Improvement in Arid Regions of Northwest China

ZHANG Yifan<sup>1</sup>, XU Haowen<sup>1</sup>, WU Yangyang<sup>1</sup>, SUN Yanying<sup>1</sup>,  
HUANG Yahao<sup>1</sup>, JIA Zhenjiang<sup>1</sup>, LI Wangcheng<sup>1,2,3,4</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Regions, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China;  
3. State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China;  
4. Key Laboratory of the Internet of Water and Digital Water Governance of the Yellow River in Ningxia, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** [Objective] To systematically review, summarize, and analyze the application status and functional mechanisms of green manure crops for soil improvement in Northwest China, aiming to provide a theoretical basis and practical guidance for sustainable agricultural development and ecological protection in arid regions. [Methods] Focusing on the planting and application of green manure crops, the common types, planting patterns, and utilization methods in the arid regions of Northwest China are systematically summarized. The effects and regulatory mechanisms of green manure growth and senescence on soil physical, chemical, and biological

收稿日期: 2025-04-09 修回日期: 2025-04-24 录用日期: 2025-05-28 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-07-24  
资助项目: 国家自然科学基金项目 (52169010); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1900600); 宁夏自然科学基金重点项目 (2021AAC02008);  
宁夏重点研发计划项目 (2019BEH03010); 清华大学-宁夏银川水联网数字治水联合研究院项目 (sklhse-2023-Iow013); 宁夏高等学校一流学科建设项目 (NXYLXK2021A03)

第一作者: 张一帆 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zhangyifanaa00@163.com

通信作者: 李王成 (1974—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail: liwangcheng@126.com

http://stbcbx.alljournal.com.cn

properties are comprehensively reviewed. [Results] Green manure crops can absorb and concentrate various nutrients from deep soil layers and those not utilized by the main crops. Subsequently, these nutrients in the plow layer are activated and fixed through incorporation into the soil. The biological functions of the root systems improve the soil aggregate structure and significantly enhance the conductivity of water, air, and heat. The optimization of soil physical structure and nutrient environment further enhances microbial diversity and enzyme activity. Overall, green manure interacts synergistically with the soil ecosystem through its life processes to comprehensively improve the physical, chemical, and biological properties of the soil, thereby driving the development of soil health. [Conclusion] Future research can be expanded and deepened in the following four aspects: 1) Revealing the ecological functions, spatiotemporal dynamics, and molecular mechanisms of green manure in regulating soil microhabitats; 2) Quantitatively analyzing the effects of green manure crops on farmland ecosystems and their residual impacts; 3) Accelerating the construction and large-scale application of regionally adaptive technical systems for green manure planting; 4) Establishing a systematic framework for improving the economy and policy systems of green manure.

**Keywords:** green manure planting; soil improvement; soil health; arid regions of Northwest China

**Received:** 2025-04-09

**Revised:** 2025-04-24

**Accepted:** 2025-05-28

**Online**(www.cnki.net): 2025-07-24

土地是民生之本,发展之基。西北旱区约占我国国土面积的 25%,现有耕地面积约占国土总面积的 8%<sup>[1]</sup>,是未来国家保障耕地安全与粮食安全的重要区域之一。然而,由于水土资源匹配极度失衡、植被覆盖率低及不当利用等多种诱因,导致西北旱区土地面临着水土流失严重、有机质含量低、供肥保肥性能差和生态缓冲能力不足等一系列问题<sup>[2]</sup>。农业农村部 2019 年全国耕地质量等级公报<sup>[3]</sup>显示,全国耕地按质量等级由高到低依次划分为一至十等,西北旱区评价为四至六等的中低产耕地面积为  $4.2 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占该区耕地总面积的 54.55%,七至十等的低产耕地面积为  $1.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,占该区耕地总面积的 23.08%。此外,由于日益增长的人地矛盾以及粮食需求,我国年化肥施用量在过去多年中一直居于世界首位,占全球 35%,相当于美国和印度的总和,但利用率不足 1/3<sup>[4]</sup>。但是,依靠施用化肥只能短暂提升作物产量与质量,过量施用化肥不仅会给土壤结构及有机质带来损害,造成土壤板结及退化,还会加剧土壤面源污染,使得农业内源性污染严重,最终危及农产品质量和百姓健康。现有施肥模式凸显了我国粮食增产压力大、耕地基础地力低、清洁肥源利用不足、施肥技术落后等问题。为扭转此被动局面,当前亟须采取积极举措,科学施肥。

在此背景下,绿肥作为重要的有机肥源、饲草来源以及生态友好的土壤改良措施,在西北干旱地区展现出显著的潜力和重要性<sup>[5]</sup>。绿肥,是指利用季节或空间闲置土地种植,并翻压回田或利用根茬耕入土作为肥料,用以丰富土壤有机质(soil organic

matter, SOM)和氮(N)、磷(P)、钾(K)等有效养分,提高农业生产的重要作物<sup>[6]</sup>。目前,学者们针对种植或翻压绿肥作物对土壤理化性质<sup>[7]</sup>、微生物群落<sup>[8]</sup>及农田产量<sup>[9]</sup>等方面的影响已开展大量理论与试验研究。然而,对于绿肥作物改良西北旱区低产土壤的系统总结和梳理仍十分有限。鉴于此,本文结合现有研究成果和实践经验,旨在系统论述绿肥作物在西北旱区低产土壤改良中的应用,从物理、化学、生物 3 个角度全面揭示绿肥驱动土壤健康的作用与机制,并针对性提出其未来发展方向与研究重点,以期旱区农业健康可持续发展及生态环境保护提供参考和启迪。

## 1 绿肥作物在西北旱区土壤改良中的应用现状

### 1.1 西北旱区不同区域土地低产原因及绿肥作物的应用模式

西北旱区位于我国生态脆弱区与农牧交错带,受干旱、盐碱等恶劣生境以及长期粗放耕作模式的影响,其土壤物理、化学及生物性质都发生了不同程度的恶化,存在有机质匮乏、养分循环效率低、孔隙结构恶化、水土流失严重、盐渍化程度加剧等一系列退化问题<sup>[2]</sup>。杨玉婷<sup>[10]</sup>在西北地区 32 029 个土壤采样点对土壤有机质含量的统计分析结果表明,西北地区耕地 SOM 平均质量分数为 14.463 g/kg,依据全国第二次土壤普查有机质分级表结果<sup>[11]</sup>表明,属于 IV 级(中下等水平),且该区域土壤有机质分布具有空间变异特征,在宁夏及新疆的部分地区,土壤有机质质量分数不足 6 g/kg,处于 VI 级标准(极度匮乏)。

由于资源约束,西北旱区农业发展本就面临诸多挑战,土地退化进一步威胁了当地粮食安全及农业可持续发展。为更好地应对耕地面临的严峻挑战,以实现因地制宜的精准施策,《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》<sup>[12]</sup>将西北旱区划为适度发展区,强调要以水资源高效利用、草畜平衡为核心,突出生态屏障、特色产区、稳农增收三大功能,大力发展旱作节水农业、草食畜牧业、循环农业和生态农业,加强中低产田改造和盐碱地治理,实现生产、生活、生态互利共赢。

广义上来讲,绿肥是指可以通过直接翻压入土或其他间接方式,利用其生长过程产生的全部或部分鲜体作为肥料的青嫩绿色植物体<sup>[6]</sup>。从定义可见,绿肥对土壤的改良作用是通过其自身的生命活动,在农业生产过程中完成的。因此,不同于传统肥料,绿肥具有天然、有机、健康和高效等明显特点,其不仅能够作为农业种植结构中养地的积极因素,有效缓解西北旱区耕地退化问题;还能够成为农牧结合的纽带,促进区域畜牧业协同发展。“粮肥轮作”制度<sup>[6,13]</sup>是充分发挥绿肥纽带功能的重要手段,其定义为:在同一块土地上,按照预定的顺序在一定年限内轮换种植不同的粮食作物与绿肥作物。在粮肥轮作体系中,若轮作植物包含牧草,特别是豆科与禾本科牧草混播的情况下,不仅能够提高土壤肥力,显著改善土壤健康状况,还可以获得大量优质饲料,用于牲畜养殖。在此基础上,再将绿肥根茬和畜粪还田,即可形成“种植-养殖-还田”的良性循环,从而推动农业

与畜牧业的全面协同发展<sup>[14]</sup>。除轮作外,目前常见的绿肥种植模式还有间(套)作和复种。间(套)作是指在同一块土地上,在同一(不同)播种期,成行或带状间隔地种植粮食作物和绿肥作物<sup>[15]</sup>。复种是指在同一块土地上,在一个年度或一个年周期内,分不同生育季节,种植1茬以上的粮食作物和绿肥作物<sup>[16]</sup>。这种种植方式主要是使后茬作物在前茬作物收获后的时间内生长,按照前、后茬作物的不同可分为粮肥复种和肥粮复种。

西北地区地域辽阔,不同地理位置的土地低产原因及常见作物各不相同<sup>[17]</sup>。绿肥在耕作制度中的配置必须依据种植区的气候条件、土壤肥力及状况、主作物生长特点等客观因素来规划及实施<sup>[18]</sup>,故不同地区常见绿肥种植模式和类型也存在差异(表1)。按照种植和生长季节可将绿肥划分为一年生绿肥和多年生绿肥<sup>[6]</sup>,其中,一年生绿肥又称为短期绿肥,包括春季绿肥、夏季绿肥、秋季绿肥及冬季绿肥。一年生绿肥要在一个生长季节内完成播种到翻压整个生命周期,多年生绿肥则是指生命周期超过2a的绿肥作物,一次种植后可连续生长、刈割、利用多年。除生长周期和种植频率外,二者在其他多个方面也存在区别<sup>[19-20]</sup>。一年生绿肥根系较浅,仅能一次利用,但肥效发挥迅速,适用于短期轮作及间套作;多年生绿肥前期需投入较多时间和资金用于管理,但其根系深广,能够多次刈割利用,适用于长期改善土壤修复。同一种绿肥作物在不同地区可以在不同的季节栽培利用,也可以适用于不同的种植模式<sup>[21]</sup>。

表1 西北不同区域土地及绿肥种植状况<sup>[6,15-16,20,22-23]</sup>

Table 1 Land and green manure planting conditions in different regions of Northwest China<sup>[6,15-16,20,22-23]</sup>

地区	低产原因	常见农作物	绿肥种植模式	绿肥类型
内蒙古及长城沿线	水土流失、降水季节分配不均	春小麦、谷子、玉米、胡麻、苜蓿、大豆、高粱等	粮草(肥)轮作	多年生春夏绿肥
黄土高原	水土流失、旱涝频发、有机肥源不足	马铃薯、小麦、玉米、谷子、高粱、糜子、胡麻等	粮草(肥)轮作	多年生春夏绿肥
青海东部低山	水土流失、肥力低下、灌溉水源缺乏	小麦、马铃薯、糜子、胡麻等	粮肥(草)轮作	一年生春夏绿肥
柴达木高寒灌区	干旱、风沙、盐碱、霜冻	春小麦、杂粮、油菜等	粮肥轮作	一年生夏绿肥
天山北麓	干旱、冻害、蒸发强烈、肥力低下	小麦、玉米、糜子、荞麦、棉花、甜菜等	粮草轮作	多年生绿肥
河套土默川	盐碱、蒸发强烈、水土流失、肥力低下	春小麦、玉米、高粱、谷子、糜子、马铃薯、苜蓿、甜菜、向日葵等	麦肥复种、间套作	一年生夏秋绿肥
河西走廊青东灌区	盐碱、蒸发强烈、土壤板结、肥力低下	春小麦等	麦草(肥)复种、间套种	一年生夏秋绿肥
新疆	盐碱、蒸发强烈、肥力低下	棉花、小麦、玉米、烟草、胡麻、水稻等	粮棉肥复种、间套作	一年生夏绿肥

## 1.2 西北旱区绿肥作物常见品种及应用现状

自上世纪五十年代中后期至今,我国绿肥生产

利用研究经历了繁荣、萧条和恢复3个阶段<sup>[18]</sup>。五十年代是绿肥科研工作的起步阶段,1957年制定的《全

国农业发展纲要》<sup>[24]</sup>中指出:“要因地制宜发展多种绿肥作物”;二十世纪九十年代到本世纪初,随着化肥利用的兴起,绿肥应用迅速滑至谷底<sup>[25]</sup>;2007年后,长期滥用化肥的弊端逐步显现,绿肥的生产利用研究又逐渐恢复<sup>[18]</sup>。《全国农业可持续发展规划(2015—2035年)》<sup>[12]</sup>及《到2025年化肥减量化行动方案》<sup>[26]</sup>中都明确指出,要推进实施化肥多元代替行动,优化调整种养结构,大力发展绿肥种植,在促进

种养循环、农牧结合和农林结合的同时,采取自然覆盖、刈割覆盖或翻压还田等方式,增加土壤有机物质投入,构建养分健康循环通道。在全国绿肥试验网<sup>[27]</sup>和“绿肥作物生产与利用技术集成研究及示范”项目的推动和帮助下<sup>[18]</sup>,西北旱区开展了一系列国内外绿肥引种试验,研究筛选出一批地方优良品种,包括紫云英、毛苕子、草木樨、豌豆、苜蓿和黑麦草等(表2)。

表2 西北地区常见绿肥种类<sup>[6,15-16,20,22-23,25,27]</sup>

Table 2 Common types of green manure in Northwest China<sup>[6,15-16,20,22-23,25,27]</sup>

科名	属名	种名
豆科 (Fabaceae)	巢菜( <i>Vicia</i> )	毛叶苕子( <i>Vicia villosa</i> Roth.)、箭筈豌豆( <i>Vicia sativa</i> L.)、 光叶苕子( <i>Vicia villosa</i> Roth var. <i>glabrescens</i> )、蚕豆( <i>Vicia faba</i> L.)
	苜蓿( <i>Medicago</i> )	紫花苜蓿( <i>Medicago sativa</i> L.)、野苜蓿( <i>Medicago falcata</i> L.)
	黄芪( <i>Astragalus</i> )	沙打旺( <i>Astragalus adsurgens</i> Pall.)、紫云英( <i>Astragalus sinicus</i> L.)
	草木樨( <i>Melilotus</i> )	白花草木樨( <i>Melilotus albus</i> Medik.)、黄花草木樨[ <i>Melilotus officinalis</i> (L.) Pall.]、 印度草木樨[ <i>Melilotus indicus</i> (L.) All.]
	猪屎豆 ( <i>Crotalaria</i> )	怪麻( <i>Crotalaria juncea</i> L.)
	小冠花( <i>Coronilla</i> )	小冠花( <i>Coronilla varia</i> L.)
	田菁( <i>Sesbania</i> )	田菁[ <i>Sesbania cannabina</i> (Retz.) Poir.]、 多刺田菁[ <i>Sesbania bispinosa</i> (Jacq.) W. F. Wight]
	槐( <i>Sophora</i> )	苦豆子( <i>Sophora alopecuroides</i> L.)、狼牙刺[ <i>Sophora davidii</i> (Franch.) Skeels]
	葫芦巴 ( <i>Trigonella</i> )	香豆子( <i>Trigonella foenum-graecum</i> L.)
	红豆草 ( <i>Onobrychis</i> )	红豆草( <i>Onobrychis viciifolia</i> Scop.)
十字花科 (Brassicaceae)	芸苔( <i>Brassica</i> )	云芥( <i>Brassica juncea</i> L.)、北方小油菜( <i>Brassica campestris</i> L.)
	萝卜( <i>Raphanus</i> )	肥田萝卜( <i>Raphanus sativus</i> L. var. <i>oleiferus</i> Metzg.)
	诸葛菜 ( <i>Orychophragmus</i> )	二月兰[ <i>Orychophragmus violaceus</i> (L.) O.E. Schulz]
禾本科 (Poaceae)	高粱( <i>Sorghum</i> )	高丹草[ <i>Sorghum × drummondii</i> (Nees ex Steud.) Millsp. & Chase]、 高粱[ <i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench]
	赖草( <i>Leymus</i> )	羊草[ <i>Leymus chinensis</i> (Trin.) Tzvelev]
	大麦( <i>Hordeum</i> )	大麦( <i>Hordeum vulgare</i> L.)
	黑麦草( <i>Lolium</i> )	黑麦草( <i>Lolium perenne</i> L.)
菊科 (Asteraceae)	肿柄菊( <i>Tithonia</i> )	小葵籽( <i>Tithonia diversifolia</i> A.Gray)
苋科 (Amaranthaceae)	苋( <i>Amaranthus</i> )	苋菜( <i>Amaranthus tricolor</i> L.)
马桑科 (Coriariaceae)	马桑( <i>Coriaria</i> )	马桑( <i>Coriaria sinica</i> Maxim.)
蒺藜科 (Zygophyllaceae)	骆驼蓬( <i>Peganum</i> )	骆驼蓬( <i>Peganum harmala</i> L.)

近年来,在政策和现实需求的双重推动下,绿肥作物的利用成为了推进科学施肥的新手段,主要包括翻压绿肥、沤制和饲用3种方式<sup>[6]</sup>。翻压绿肥是指在绿肥生长的适宜时期,就地将绿肥鲜体翻压入土使其腐解矿化,以达到为当季作物或下茬作物提供

营养物质、为土壤输入SOM、促进腐殖质(humus, HS)更新与积累、进而同时提高主作物产量及土壤肥力的目的<sup>[28]</sup>。沤制绿肥一般是刈割1/3左右鲜草,将其掺到秸秆、圈肥、杂草、肥泥和其他废弃物中,堆沤在肥池中作为后续基肥<sup>[13]</sup>。饲用是指在适宜时段对

绿肥进行割青以作为饲料,再用剩余根茬部分和畜粪肥田<sup>[6]</sup>。不论是哪种利用方式,都要以综合产生最大效益且不影响主作物生长为原则。

目前绿肥作物在西北旱区的应用取得了显著的增产提质效果。马佳玉等<sup>[29]</sup>通过Meta分析发现,相较于休耕,种植绿肥作物使粮食作物的产量平均显著提高12.2%;尚永盼<sup>[30]</sup>在甘肃河西走廊通过试验证明,玉米与箭筈豌豆轮作能够使玉米增产24.9%~25.7%;张刁亮等<sup>[31]</sup>在河西灌区通过试验证实,在减量灌水处理下,间作箭筈豌豆可通过改善玉米株高、茎粗、穗位高、穗长、穗粗及穗行数来保产提质;张殿

凯等<sup>[32]</sup>在春小麦与毛叶苕子轮作在较试验区传统N肥施用量减少15%的处理下,仍能够使春小麦增产16.7%~18.4%;张冬玲等<sup>[33]</sup>在西北绿洲灌区通过绿肥还田结合减量施氮显著提高小麦籽粒产量,且降低麦田 $N_2O$ 排放量和排放强度。

## 2 绿肥驱动土壤健康的作用机制

绿肥作为一种生态友好的土壤改良策略,其核心机制在于利用自身生命活动与土壤系统的动态互作,综合改良土壤物理、化学及生物性质,并通过各个特性间的协同效应,整体驱动土壤健康(图1)。

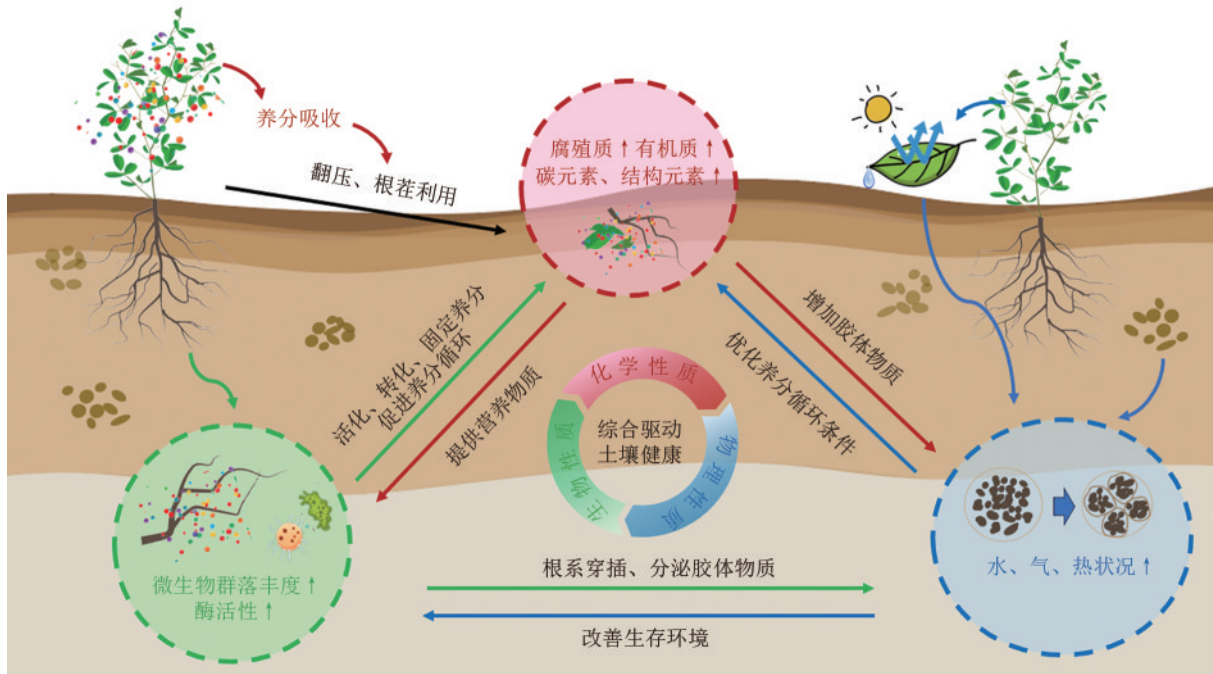


图1 绿肥综合驱动土壤健康

Fig. 1 Integrated mechanisms of green manure in driving soil health improvement

### 2.1 土壤物理性质

绿肥作物在其生长和凋亡过程中,通过直接和间接的双重作用来驱动土壤物理性质的改善。直接作用主要表现为持续活跃的根系通过生物耕作改善土壤结构,进而影响其水、气、热等物理性质<sup>[34-35]</sup>;间接作用则是利用绿肥生长过程中释放的胶结物质及鲜体翻压腐解后释放的SOM及HS等来促进土壤团聚体的形成<sup>[36]</sup>。改良后的土壤为后续土壤化学性质调节及作物、微生物和酶生存提供了更优的环境,从而形成持续的良性互馈机制<sup>[37]</sup>。

绿肥作物大都生长有丰富的根系,在其整个生长过程中,根系保持着高度活跃的代谢作用,伴随着持续的生长和衰亡。绿肥通过生物耕作<sup>[34]</sup>改善土壤物理性质的具体方式是指利用根系穿插打破板结的土壤层,并在腐解后形成大量生物孔隙,从而有效改善土壤结构,提升土壤水、气、热的传导能力,并为后

茬作物根系生长提供低阻力、高水平养分及氧气的通道<sup>[38]</sup>。此外,根系缠绕、网络固结和根土黏结作用可增强土壤的内聚力,有效固定土壤颗粒,进而改善土壤的抗风蚀水蚀性和抗剪强度等力学性质<sup>[35]</sup>;根系释放的胶结物质,能够促进土壤团聚结构的形成<sup>[36]</sup>。现有大量研究能够证明,绿肥对土壤物理性质的改善作用,主要包括优化孔隙结构、促进水分运移、降低容重、提升土壤团聚体数量及稳定性等方面。例如,KAUTZ等<sup>[39]</sup>研究发现,种植菊苣、苜蓿能够使土壤中2~5 mm孔隙增加;CHEN等<sup>[40]</sup>也证实,芸苔属绿肥作物的生长增加了生物孔隙,使土壤深层的水分在后期生长季节更容易被主作物根系利用;油菜和紫花苜蓿的种植利用使0~20 cm土层土壤体积质量分别降低6.82%和6.51%,使土壤总孔隙度分别提高3.39%和3.24%<sup>[41]</sup>;不同品种绿肥覆盖使土壤>2 mm粒径大团聚体分别提高10.7%、6.6%、11.1%和

9.3%,团聚体平均重量直径提高 1.1~1.3 倍<sup>[42]</sup>;豆科绿肥显著增加团聚体稳定性(平均重量直径、几何平均直径)<sup>[43]</sup>。

绿肥翻压及根系凋亡为土壤输入大量有机物质,易分解部分迅速分解为 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)、速效磷(available phosphorus, AP)及速效钾(available potassium, AK)等矿物质,不易分解的木质素等部分逐步转化为 HS 积累在土壤中<sup>[44]</sup>。HS 作为 SOM 主要和最重要的组成部分,占比高达 75%<sup>[36]</sup>,且具有良好的胶体性质,能够促进土壤中微团聚体和团聚体的形成,使土壤结构疏松、体积质量降低、孔隙度增加,提高土壤保水、保温和通气能力<sup>[37]</sup>。刘婷等<sup>[45]</sup>通过毛叶苕子还田使土壤团聚体含量提高 18.25%~35.8%;秦文利等<sup>[46]</sup>在翻压毛叶苕子的过程中也发现,其能够显著增加 0~30 cm 土层 > 2 mm 粒径团聚体质量占比;祁琛等<sup>[47]</sup>发现,连续 3 a 复播绿肥使 0~10、10~20、20~30 cm 土层 > 2 mm 粒径土壤团聚体分别提高 42.21%~70.73%, 3.63%~39.11%, 1.20%~19.21%;此外,HS 在土壤中通常带负电,所以还具有阳离子极化作用,这一作用能够显著提高土壤团聚体的稳定性<sup>[48]</sup>。

2023 年度全国水土流失动态监测结果显示,全国水土流失面积高达 262.76 万 km<sup>2</sup><sup>[49]</sup>。土壤结构的改善能有效提高土体稳定性及保水性,从而减缓水土流失速率<sup>[50]</sup>。除此之外,绿肥株丛密集,茎叶繁茂,具有良好的覆盖地面效果,能够有效减少径流量及蒸发量,抑制水土流失<sup>[51]</sup>。已有研究<sup>[52]</sup>表明,植被地上生物量每提高 1 kg/m<sup>2</sup>,将使植被覆盖区表层土壤的含水率上升 6%;相较于粮食作物,种植绿肥作物紫花苜蓿能够使地表径流量降低 56.16%(2012—2014 年单作玉米 9 907 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>>间作 21 829 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>>单作苜蓿 15 471 m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)<sup>[53]</sup>。

## 2.2 土壤化学性质

绿肥作物的生长和凋亡,以及因此产生的土壤物理、生物性质的改变能够促进土壤各类养分(SOM、碳元素、矿质元素)的活化<sup>[54-55]</sup>、转化<sup>[55-56]</sup>和固定<sup>[57]</sup>以及在农田生态系统的循环再生<sup>[58]</sup>,同时还能够调控土壤盐分<sup>[59]</sup>,最终系统性提升土壤的综合质量<sup>[60]</sup>。

已有研究<sup>[61]</sup>发现,作物根系的范围和发育程度决定了植物可利用的土壤体积和养分数量,绿肥发达的根系能够吸收深层土壤中残留以及主作物未能吸收利用的 N、P、K 等养分,使其聚集在根、茎、叶中,起到富集土壤养分的作用<sup>[62]</sup>。例如,哈丽代·热合木江等<sup>[63]</sup>研究发现,不同品种苜蓿干草中 P 含量为 0.17%~0.70%;李云鹤<sup>[64]</sup>通过调查发现苜蓿中 Ca、

Mg、P、K 等元素含量丰富。豆科绿肥还能够通过与根瘤菌的共生关系,将空气中的游离氮(N<sub>2</sub>)转化为农作物可吸收的氮素养分(NH<sub>3</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)<sup>[56]</sup>。例如,豆科黄芪属的绿肥作物紫云英,通过生物固氮在盛花期时能够为植株提供约 59%~85%的氮素<sup>[65]</sup>。将富集养分后的绿肥鲜体翻压,不仅能够快速补充耕层养分,还能够推动土壤养分循环<sup>[58]</sup>。其原因是,绿肥固定的养分又重新以速效态和新鲜 SOM 的形式回归耕层,速效养分能够快速被后茬作物吸收利用,新鲜 SOM 的快速腐烂可以产生激发效应,引起稳定 HS 的分解及土壤肥力的活化,进而使土壤环境得到更新<sup>[66]</sup>。而且, SOM 作为陆地生态系统中最大的活性碳库以及营养组分的主要赋存载体,其含量与转化速率也能够反映土壤中有有机碳(soil organic carbon, SOC)和营养元素的动态变化<sup>[67]</sup>。

除提升自身元素含量外,绿肥还能够提升土壤养分含量及有效性。SOC 与黏土的比率能够有效反映土壤结构状况,在瑞士和英国,已确定 SOC:黏土比率的阈值,以表征土壤结构非常好(>1:8)及退化(<1:13)<sup>[68]</sup>。以往研究<sup>[69]</sup>证实绿肥的种植与利用能够提升土壤碳库储量,促进 SOC 组分的周转,进而提升碳循环效率;绿肥对土壤总有机碳(total organic carbon, TOC)、溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)、矿物结合有机碳(mineral-associated organic carbon, MAOC)、易氧化有机碳(readily oxidizable carbon, ROC)含量的提升作用<sup>[42,70]</sup>;且土壤 SOC 含量与绿肥种植年限呈极显著的线性关系<sup>[71]</sup>;土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、DOC 含量随着绿肥种植时间的延长而明显提高<sup>[72]</sup>。绿肥影响土壤碳元素的主要因素包括物理因素和生物因素,物理因素是指土壤团粒结构,生物因素是指土壤酶活性及微生物相关指标。就物理因素而言, SOC 通常与土壤孔隙、持水能力和养分可利用性呈正相关<sup>[73]</sup>,这是因为土壤中的大团聚体(>2 mm)是土壤 TOC 及其组分的主要载体<sup>[42]</sup>;可以为 SOC 提供物理保护<sup>[74]</sup>,具有较高的贡献率<sup>[47]</sup>;且能够促进土壤中密度较轻的轻组有机碳(light fraction organic carbon, LFOC)向 POC 转化<sup>[57]</sup>,进而提高 SOC 稳定性。现有研究成果表明,相较于物理因素,生物因素在 SOC 积累中起到了主导作用<sup>[75]</sup>。绿肥的利用能够有效提升和 C 循环相关酶的活性<sup>[76]</sup>,且由于其低 C/N 的特性,能够在很大程度上激活土壤微生物<sup>[70]</sup>;新鲜有机碳的输入会加速或抑制原生土壤 SOC 的矿化,这一现象被称为“启动效应”(priming effect, PE),

PE能够改变土壤SOM微生物矿化的程度和方向<sup>[77]</sup>。微生物主要通过呼吸及糖酵解(embden-mey-erhof-parnas, EMP)、己糖磷酸(hexose monophosphate pathway, HMP)、恩特纳-杜多罗夫(entner-doudoroff, ED)、斯蒂克兰反应等多种途径实现碳释放;通过卡尔文循环(calvin cycle, CC)等途径固定碳;通过微生物碳泵(microbial carbon pump, MCP)和矿物碳泵(mineral carbon pump, MnCP)促进碳循环,进而实现持续的碳周转<sup>[78]</sup>。微生物代谢及死亡后的残留物质被称为微生物坏死量碳(microbial necromass carbon, MNC),已有研究<sup>[79]</sup>证明,MNC对土壤SOC的贡献率高达26%~49%。

对于矿质营养元素来说,除增加含量外,绿肥还能够起到提高有效性的作用。例如,张雯琦等<sup>[55]</sup>证实,相较于休耕,种植翻压紫云英使土壤全氮(total nitrogen, TN)、AP和AK含量分别提高3.41%、29.50%和8.22%;YANG等<sup>[80]</sup>发现,在干旱地区典型低肥农田中轮作或与玉米间作绿肥可以有效增加表层土壤中的TN和全磷(total phosphorus, TP);张建伟<sup>[81]</sup>通过种植利用毛叶苕子显著提高了土壤中P的有效性;张婧旻等<sup>[82]</sup>也得到了相似的结论,绿肥处理使土壤AP的含量提升184.76%。绿肥对养分的活化过程主要是通过释放根系分泌物等方式来实现的。例如,油菜能够释放甲酸、丙二酸和乳酸等有机酸提高K的有效性<sup>[83]</sup>;黑麦豆通过分泌草酸和柠檬酸,降低根际pH,活化土壤有效锌(Zn),提高Zn吸收能力<sup>[84]</sup>;紫云英利用根系分泌物中草酸等有机酸的螯合作用活化难溶性P<sup>[85]</sup>。

截至2024年,我国盐渍化土壤面积已达 $1.12 \times 10^9 \text{ hm}^2$ <sup>[86]</sup>。西北旱区由于干旱少雨、蒸发强烈的气候特征,成为了盐碱地的主要分布区域<sup>[87]</sup>。诸多研究表明,绿肥作物能够调控土壤水盐,在盐碱地治理方面具有极大的潜力。例如,盐碱土种植3a苜蓿后,1m深的土层中,总盐量降低30%,氯盐量降低70%<sup>[88]</sup>;卞建民等<sup>[89]</sup>通过大田实验发现,草木樨种植区6—10月土壤全盐量降低50.88%,pH降低0.3,未种植区土壤全盐量增加44.03%;油菜还田使土壤含盐量平均降低20.76%<sup>[90]</sup>;多年生绿肥残体覆盖使土壤 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等主要盐分阳离子含量显著降低,且土壤电导率(electrical conductivity, EC)与阳离子含量呈显著的负相关关系( $p < 0.01$ )<sup>[91]</sup>,植被覆盖度与土壤盐含量间相关性极强<sup>[92]</sup>。绿肥作物对土壤盐分的调控作用,主要通过以下3个方面:其一,是提高土壤的通透性,加强淋盐过程,减少土壤表层盐分积聚<sup>[34]</sup>;其二,是吸收盐分离子<sup>[83]</sup>,释放有

机酸中和土壤碱性<sup>[93]</sup>,增加阳离子交换量促进对 $\text{Na}^+$ 置换<sup>[91]</sup>;其三,是增加地面覆盖度,降低土壤表层温度和水分蒸发,抑制耕层返盐<sup>[94]</sup>。值得注意的是,绿肥覆盖还能减少养分的挥发和淋溶作用,保证养分能够长期稳定地留存在土壤中,参与养分循环<sup>[95]</sup>。

### 2.3 土壤生物性质

微生物群落丰度和酶活性能够反映土壤物理化学和生物特性的变化,在物质循环和能量转化中发挥着重要作用,是衡量土壤质量和土壤综合肥力水平的重要指标,且对外加因素引起的变化比较敏感,很容易受到土壤环境的影响<sup>[37]</sup>。长期种植利用绿肥改变了土壤结构及养分状况,这势必会影响微生物和酶相关指标。

绿肥的种植和翻压为土壤微生物提供了持续的碳源和氮源,这能够有效提升微生物丰度和活性<sup>[96]</sup>。诸多研究表明,土壤根系生物量和SOM、TN、全碳(total carbon, TC)含量的增加有助于提高微生物生物量、线虫丰度和P含量<sup>[97]</sup>;种植及翻压绿肥使土壤细菌、放线菌和总菌数量均呈现增加趋势<sup>[98]</sup>;ELFSTRAND等<sup>[99]</sup>连续47a种植绿肥发现,与对照组相比,绿肥处理下土壤细菌、真菌和总微生物的生物量通常较高;全球尺度Meta分析证实<sup>[100]</sup>,种植绿肥较休闲处理土壤微生物丰度、活性和多样性分别提高27%、22%和2.5%。与营养物质一样,土壤结构对微生物也存在显著影响。例如,土壤结构与土壤呼吸和酶活性呈强负相关,这表明土壤结构质量较差时微生物活性下降<sup>[101]</sup>;土壤体积质量对根际土壤微生物活性及含量存在极显著的主效应<sup>[102]</sup>;土壤团聚体大小也能够影响微生物的数量、分布及活性<sup>[103]</sup>。除整体增加土壤微生物数量及活性外,绿肥作物还能够影响某些特定微生物。豆科绿肥能够增加促进碳循环细菌群落的丰度并改变其时空异质性<sup>[104]</sup>;绿肥覆盖通过提高丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)丰度和定植作用,有效减少了N损失并促进了作物对N的吸收<sup>[105]</sup>;黑麦草可以通过抑制产乙酸甲烷菌和产氢甲烷菌的群落丰度来减少 $\text{CH}_4$ 排放<sup>[106]</sup>;紫云英能够通过抑制氢氧化细菌来降低土壤硝化潜力,进而提升N的利用率<sup>[107]</sup>。

土壤酶最重要的来源是微生物代谢及分解<sup>[108]</sup>,因此,微生物群落丰度和活性的提升必然会作用于土壤酶的含量及活性。郭继勋等<sup>[109]</sup>发现,土壤脲酶、磷酸酶和纤维素酶的活性随土壤微生物量的增加不断提升,且它们的变化基本同步;冯慧琳等<sup>[110]</sup>在研究生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响时发现,土

壤细菌  $\alpha$  多样性 (Shannon 指数、Chao1 指数) 与土壤中性磷酸酶、蔗糖酶和脲酶活性呈现正相关关系, 与过氧化氢酶活性存在着极强的正相关关系, 土壤细菌  $\beta$  多样性 (NMDS1 指数、NMDS2 指数) 与过氧化氢酶活性呈现正相关关系, 与中性磷酸酶活性呈现负相关关系 ( $p < 0.05$ )。

目前, 已有大量研究能够证实绿肥作物对于提高土壤酶含量及活性的作用。如, 绿肥处理下蛋白酶、磷酸酶和芳基硫酸酯酶的活性通常高于对照组<sup>[111]</sup>; 紫云英轮作与翻压使土壤脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性最高分别增加 56.52%、33.17%、172.66% 和 85.71%<sup>[112]</sup>; 箭筈豌豆、红豆草、湖南稷子及黑麦草间作都提升了土壤过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶、纤维素酶、蔗糖酶和淀粉酶活性<sup>[113]</sup>; 土壤中性蛋白酶、蔗糖酶活性随着绿肥生长时间的延长而明显提高, 其中 10~20 cm 土层的酶活性增幅格外明显<sup>[72]</sup>。绿肥作物能够产生土壤酶主要是由于根系的生长活动以及对外界环境胁迫的响应。根系生长过程中会向外部生长分泌胞外酶、酸性磷酸酶等多种土壤酶<sup>[114]</sup>, 这些酶的活性能够将土壤中资源的可用性、微生物群落结构和养分周转联系起来<sup>[98]</sup>; 在 P 胁迫下豆科绿肥的簇根能够有效释放磷酸酶, 丰富的根毛能够提高磷酸酶活性, 以此来提高 P 和 K 的有效性及其循环效率<sup>[115]</sup>。此外, 根系分泌物中还包含大量营养和能源物质, 这也是根际微生物数量及活性远超非根际区域的原因<sup>[116]</sup>。

### 3 未来展望

综上所述, 绿肥具有绿色、有机的特性使其能够在生长衰亡的过程中, 通过与土壤系统的动态互动, 综合改良土壤物理、化学和生物学性质, 并利用各性质间的协同作用系统调控土壤健康状况。现阶段, 诸多学者围绕绿肥作物对土壤改良效果及增产提质增效展开了系统研究, 并取得了丰硕成果, 证明了绿肥作物在低产土壤改良中的巨大潜力。但仍存在局限, 如部分关键机制不清楚、长期综合效益不明确等, 为充分发挥绿肥效能, 今后的理论与技术研究应强化拓展以下 4 个方面:

1) 绿肥效益发挥的途径与机制。当前的大多数研究主要聚焦绿肥所带来的直观效益, 忽略了效益形成的多维度驱动机制。鉴于此, 后续研究应关注绿肥作用的内在机制, 如: 绿肥-土壤-微生物互动中碳氮磷循环的协同增效机制, 绿肥驱动土壤碳库封存效率增加的具体过程, 以及碳容量增加后对农田生态系统功能产生长期提升作用的内在机制等。

这种深层机制解析可为优化绿肥利用模式提供理论支撑, 进而实现土壤改良与作物提质增效的协同目标。

2) 绿肥对生态系统各单元作用的定量分析。目前的相关研究往往只关注绿肥对农田生态系统某单一功能的影响, 而绿肥功能的发挥本质上是作为农田生态系统中的一部分参与、影响生物地球化学循环过程, 涵盖了多因素、多方面耦合的复杂过程。后续研究应倾向于各单元的叠加、互作和协同作用机制对整体驱动土壤健康进程的响应关系及相对贡献值。如, 根系分泌物介导的养分活化与土壤菌群重构之间的动态关联, 绿肥驱动土壤健康进程中各生态单元的响应阈值与权重贡献等。

3) 绿肥技术的标准化推广及规模化应用。当前绿肥种植利用模式单一, 且尚未形成系统、标准的管理模式, 制约了绿肥作物的大规模推广及应用。未来需着力推进绿肥与现代农艺、科学技术的协同创新体系构建, 借助农机农艺融合、数字决策支持等技术方法, 建立能够深度挖掘、利用绿肥效益的标准化模式。如建立绿肥效益指标体系及预测模型, 推进绿肥培肥与供肥技术更新; 定向选育适应性强、功能多样且高产的优质绿肥品种; 研发自动化、智能化的绿肥耕作与翻压机械, 助力高产高效栽培体系构建等。

4) 绿肥经济可行性分析和政策支持体系。从农户和国家层面探寻推动绿肥发展的驱动因素, 提高农户自发性和积极性的同时, 为政府决策提供参考, 助力绿肥技术的推广及农业可持续发展。如构建绿肥经济、生态效益预测模型; 因地制宜开展绿肥产业的集约化发展, 打造涵盖种植、养殖、观光等环节的一体化产业链等。

#### 参考文献:

- [1] 陈亚宁, 李忠勤, 徐建华, 等. 中国西北干旱区水资源与生态环境变化及保护建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 385-393.  
CHEN Y N, LI Z Q, XU J H, et al. Changes and protection suggestions in water resources and ecological environment in arid region of northwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 385-393.
- [2] 王丹月. 西北地区土地退化现状及其防治对策[J]. 大众标准化, 2021(23): 215-216.  
WANG D Y. Present situation of land degradation in northwest China and its control countermeasures [J]. Popular Standardization, 2021(23): 215-216.
- [3] 农业农村部. 2019年全国耕地质量等级情况公报[EB/OL].

- (2025-05-06)[2025-03-31].[https://www.moa.gov.cn/nybgb/2020/202004/202005/t20200506\\_6343095.htm](https://www.moa.gov.cn/nybgb/2020/202004/202005/t20200506_6343095.htm). Ministry of Agriculture and Rural Affairs. 2019 National Cultivated Land Quality Grade Status Bulletin[EB/OL]. (2020-05-06)[2025-03-31].[https://www.moa.gov.cn/nybgb/2020/202004/202005/t20200506\\_6343095.htm](https://www.moa.gov.cn/nybgb/2020/202004/202005/t20200506_6343095.htm).
- [4] 中国政府网.肥越用越多地越吃越馋—我国化肥使用量占全球三成凸显“肥”之烦恼[EB/OL].(2015-03-17)[2025-03-31].[https://www.gov.cn/xinwen/2015-03/17/content\\_2835486.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2015-03/17/content_2835486.htm). The Chinese Government Website. The more fertilizer used, the more the land craves — China's fertilizer consumption accounts for 30% of global total, highlighting the 'burden of excess'[EB/OL].(2015-03-17)[2025-03-31].[https://www.gov.cn/xinwen/2015-03/17/content\\_2835486.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2015-03/17/content_2835486.htm).
- [5] 曹卫东,高嵩涓.到2025年中国绿肥发展策略[J].中国农业资源与区划,2023,44(12):1-9. CAO W D, GAO S J. Chinese green manure development strategy by 2025[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2023, 44(12): 1-9.
- [6] 焦彬.中国绿肥[M].北京:农业出版社,1986. JIAO B. China Green Manure [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [7] ONURCAN Ö, SÁNCHEZ-NAVARRO V, ZORNOZA R, et al. Long-term adoption of reduced tillage and green manure improves soil physicochemical properties and increases the abundance of beneficial bacteria in a Mediterranean rainfed almond orchard [J]. Geoderma, 2023, 429: e116218.
- [8] LEBLANC N. Green manures alter taxonomic and functional characteristics of soil bacterial communities [J]. Microbial Ecology, 2023, 85(2): 684-697.
- [9] ZHANG J L, NIE J, CAO W D, et al. Long-term green manuring to substitute partial chemical fertilizer simultaneously improving crop productivity and soil quality in a double-rice cropping system [J]. European Journal of Agronomy, 2023, 142: e126641.
- [10] 杨玉婷.西北地区耕地土壤有机质空间分布特征分析[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019. YANG Y T. Analysis of spatial distribution characteristics of soil organic matter in cultivated land in northwest China[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2019.
- [11] 施建平,宋歌.中国土种数据库—基于第二次土壤普查的全国性土壤数据集[J].中国科学数据,2016(2):1-12. SHI J P, SONG G. Soil Type Database of China: A nationwide soil dataset based on the Second National Soil Survey[J]. China Scientific Data, 2016(2): 1-12.
- [12] 中国政府网.《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》[EB/OL].(2015-05-28)[2025-03-31].[https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/28/content\\_2869902.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/28/content_2869902.htm). The Chinese Government Website. 《National Agricultural Sustainable Development Plan (2015-2030)》[EB/OL].(2015-05-28)[2025-03-31].[https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/28/content\\_2869902.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2015-05/28/content_2869902.htm).
- [13] 赵秋.北方低产土壤实用绿肥作物栽培与利用[M].天津:天津科技翻译出版有限公司,2010. ZHAO Q. Cultivation and utilization of practical green manure crops in low-yield soil in northern China [M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Translation Publishing Co., Ltd., 2010.
- [14] 宋莉,廖万有,王焯军,等.旱地作物间作绿肥研究进展[J].作物杂志,2017(6):7-11. SONG L, LIAO W Y, WANG Y J, et al. Research progress in intercropping upland crops with green manure [J]. Crops, 2017(6): 7-11.
- [15] WU Y, GONG W, YANG F, et al. Dynamic of recovery growth of intercropped soybean after maize harvest in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. Food and Energy Security, 2021, 11(1): e350.
- [16] 白璐,蒋福祯,曹卫东,等.麦后复种绿肥对土壤有机碳及其固持特征的影响[J].干旱地区农业研究,2021, 39(4):148-154. BAI L, JIANG F Z, CAO W D, et al. Effects of multiple cropping of green manure after wheat on soil organic carbon and its sequestration characteristics [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(4): 148-154.
- [17] 陈万旭,李江风,曾杰,等.中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J].地理研究,2019, 38(9):2173-2187. CHEN W X, LI J F, ZENG J, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China [J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173-2187.
- [18] 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. 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.
- [19] WANG H, ZHONG L, LIU J, et al. Systematic analysis of the effects of different green manure crop rotations on soil nutrient dynamics and bacterial community structure in the Taihu Lake Region, Jiangsu [J]. Agriculture, 2024, 14(7): e1017.
- [20] 唐红琴,李忠义,曾成城,等.不同绿肥种类和还田量对柑橘园土壤养分的动态影响[J].江苏农业科学,2021,

- 49(16):214-219.
- TANG H Q, LI Z Y, ZENG C C, et al. Dynamic impact of different green manure types and returning amounts on soil nutrients in citrus orchard [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, 49(16):214-219.
- [21] HAN S J, ZHAO J F, LIU Y, et al. Effects of green manure planting mode on the quality of Korla fragrant pears (*Pyrus sinkiangensis* Yu)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13:e1027595.
- [22] 杨叶华, 张松, 王帅, 等. 中国不同区域常见绿肥产量和养分含量特征及替代氮肥潜力评估[J]. *草业学报*, 2020, 29(6):39-55.
- YANG Y H, ZHANG S, WANG S, et al. Yield and nutrient concentration in common green manure crops and assessment of potential for nitrogen replacement in different regions of China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(6):39-55.
- [23] 张绚, 马燕燕, 王芳, 等. 西北地区土地生态适宜性评价与牧草适应性研究[J]. *草业科学*, 2025, 42(2):455-466.
- ZHANG X, MA Y Y, WANG F, et al. Study on the coupling of land ecological suitability and forage grass distribution in northwest China [J]. *Pratacultural Science*, 2025, 42(2):455-466.
- [24] 全国人民代表大会常务委员会. 《1956年到1967年全国农业发展纲要\_全文》[EB/OL]. (1960-04-11)[2025-04-02]. [http://www.law-lib.com/law/law\\_view.asp?id=94818](http://www.law-lib.com/law/law_view.asp?id=94818).
- The National People's Congress. 《The National Outline for Agricultural Development from 1956 to 1967\_Full Text》[EB/OL]. (1960-04-11)[2025-04-02]. [http://www.law-lib.com/law/law\\_view.asp?id=94818](http://www.law-lib.com/law/law_view.asp?id=94818).
- [25] 李子双, 廉晓娟, 王薇, 等. 我国绿肥的研究进展[J]. *草业科学*, 2013, 30(7):1135-1140.
- LI Z S, LIAN X J, WANG W, et al. Research progress of green manure in China [J]. *Pratacultural Science*, 2013, 30(7):1135-1140.
- [26] 农业农村部. 农业农村部关于印发《到2025年化肥减量行动方案》和《到2025年化学农药减量行动方案》的通知[EB/OL]. (2022-11-18)[2025-04-05]. [https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201\\_6416398.htm](https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201_6416398.htm).
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Official Announcement by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs: 《Release of the 2025 Fertilizer Use Reduction Action Plan》 and 《2025 Chemical Pesticide Use Reduction Action Plan》[EB/OL]. (2022-11-18)[2025-04-05]. [https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201\\_6416398.htm](https://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/202212/t20221201_6416398.htm).
- [27] 陈礼智, 王隽英, 张淑珍, 等. 绿肥在持续农业中的地位和作用. 全国绿肥试验网的发展及其成就[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1992.1-7.
- CHEN L Z, WANG J Y, ZHANG S Z, et al. Green manure on sustainable agriculture. The development and achievement of Chinese National Network of Green Manure [M]. Shenyang: Press of Liaoning University, 1992.1-7.
- [28] 曹卫东, 周国朋, 高嵩涓. 绿肥内源驱动土壤健康的作用与机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(7):1274-1283.
- CAO W D, ZHOU G P, GAO S J. Effects and mechanisms of green manure on endogenous improving soil health [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(7):1274-1283.
- [29] 马佳玉, 王涛, 刘小利, 等. 覆盖作物对我国粮食作物的产量效应及影响因素的Meta分析[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(10):1871-1880.
- MA J Y, WANG T, LIU X L, et al. Meta-analysis of yield effects and influencing factors of cover crops on main grain crops in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(10):1871-1880.
- [30] 尚永盼, 于爱忠, 王玉珑, 等. 绿洲灌区绿肥还田利用方式对玉米干物质积累、分配及产量的影响[J]. *作物学报*, 2024, 50(3):686-694.
- SHANG Y P, YU A Z, WANG Y L, et al. Effects of green manure application methods on dry matter accumulation, distribution, and yield of maize in oasis irrigation area [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(3):686-694.
- [31] 张刁亮, 柴强, 殷文, 等. 干旱灌区减量灌水下玉米农艺性状、产量及水肥利用效率对间作绿肥的响应[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(5):85-96.
- ZHANG D L, CHAI Q, YIN W, et al. Response of maize agronomic traits, yield, water and fertilizer use efficiency to intercropping green manure under reduced irrigation levels in arid irrigation areas [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(5):85-96.
- [32] 张殿凯, 李盼, 范虹, 等. 西北灌区复种绿肥及减氮条件下春小麦产量及水分利用特征[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(11):2189-2201.
- ZHANG D K, LI P, FAN H, et al. Soil water use characteristics of spring wheat with Multiple-Cropping green manure and nitrogen reduction in northwest irrigated areas [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(11):2189-2201.
- [33] 张冬玲, 于爱忠, 吕汉强, 等. 绿肥还田结合减量施氮对绿洲灌区麦田 N<sub>2</sub>O 排放和小麦产量的影响[J]. *作物学报*, 2025, 51(4):1005-1021.
- ZHANG D L, YU A Z, LYU H Q, et al. Effects of green manure incorporation and nitrogen reduction on N<sub>2</sub>O emissions and wheat yield in oasis irrigated areas [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025, 51(4):1005-1021.
- [34] ZHANG Z B, PENG X H. Bio-tillage: A new perspective

- tive for sustainable agriculture [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206: e104844.
- [35] 熊寿德, 段青松, 方雪峰, 等. 三江并流区水电站消落带适生草本植物根系固土能力[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 7210-7221.
- XIONG S D, DUAN Q S, FANG X F, et al. Soil-fixing capacity of suitable herbaceous plant roots in the water-level-fluctuating zone of hydropower station in the Three Parallel Rivers [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17): 7210-7221.
- [36] TAN W B, ZHAO X Y, DANG Q L, et al. Microbially reducible extent of solid-phase humic substances is governed by their physico-chemical protection in soils: Evidence from electrochemical measurements [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: e134683.
- [37] BAI N, LV W, CHU X, et al. Comparison of soil microbial community and physicochemical properties between rice-fallow and rice-bean (green manure) rotation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2022, 86(3): 593-603.
- [38] XIAO T, LI P, FEI W B, et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: e167524.
- [39] KAUTZ T, LÜSEBRINK M, PÄTZOLD S, et al. Contribution of anecic earthworms to biopore formation during cultivation of perennial ley crops [J]. *Pedobiologia*, 2014, 57(1): 47-52.
- [40] CHEN G H, WEIL R R. Penetration of cover crop roots through compacted soils [J]. *Plant and Soil*, 2010, 331(1): 31-43.
- [41] 且天真. 不同绿肥翻压还田对土壤理化性状及高粱产量的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023.
- QIE T Z. Effects of different green manures on soil physicochemical properties and sorghum yield [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023.
- [42] 闫桂菴, 董文斌, 李忠义, 等. 绿肥覆盖对果园土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(12): 3427-3434.
- YAN G W, DONG W B, LI Z Y, et al. Effects of green manure mulching on soil aggregates and organic carbon fractions in orchards [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(12): 3427-3434.
- [43] 薛欣欣, 王文斌, 茶正早, 等. 不同绿肥覆盖对幼龄橡胶园土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J/OL]. *环境科学*, 1-13 [2025-04-05]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202409244>.
- XUE X X, WANG W B, CHA Z Z, et al. Effects of different green manure covering on soil organic carbon and size distribution of aggregates in a Young Rubber Plantation [J/OL]. *Environmental Science*, 1-13 [2025-04-05]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxk.202409244>.
- [44] DANTAS E F, DE FREITAS A D S, DE ROSÁLIAE S S C E, et al. Decomposition and nutrient release of green manure biomass in a passion fruit orchard in the Brazilian semiarid region [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(9): e1131.
- [45] 刘婷, 宋明丹, 韩梅, 等. 青海东部农业区麦秆和绿肥还田下的土壤团聚体特征[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(23): 256-263.
- LIU T, SONG M D, HAN M, et al. Soil aggregate characteristics under wheat stalk and green manure return in eastern Qinghai agricultural area [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(23): 256-263.
- [46] 秦文利, 张静, 肖广敏, 等. 绿肥部分替代化肥氮对土壤物理性状的影响[J]. *草业学报*, 2025, 34(6): 27-45.
- QIN W L, ZHANG J, XIAO G M, et al. Effects of partial replacement of chemical nitrogen fertilizers with green manure on soil physical properties and maize (*Zea mays*) yield [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(6): 27-45.
- [47] 祁琛, 吴林甲, 闫秋艳, 等. 夏闲期复播绿肥对旱地麦田土壤团聚体碳氮含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 304-312.
- QI C, WU L J, YAN Q Y, et al. Effects of green manure application on soil organic carbon and nitrogen content among aggregates fractions in dryland wheat fields [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 304-312.
- [48] HUANG X R, LI H, LI S, et al. Role of cationic polarization in humus-increased soil aggregate stability [J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(3): 341-350.
- [49] 中华人民共和国水利部. 2023年中国水土保持公报[EB/OL]. (2024-03-31) [2025-04-06]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329\\_1708287.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329_1708287.html).
- Ministry of Water Resources the People's Republic of China. *China Soil and Water Conservation Bulletin 2023* [EB/OL]. (2024-03-31) [2025-04-06]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329\\_1708287.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329_1708287.html).
- [50] GUO L J, LIU R M, MEN C, et al. Multiscale spatio-temporal characteristics of landscape patterns, hotspots, and influencing factors for soil erosion [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: e146474.
- [51] MEYER N, BERGEZ J E, CONSTANTIN J, et al. Cover crops reduce drainage but not always soil water content due to interactions between rainfall distribution and management [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 231: e105998.
- [52] FAN D X, JIA G D, WANG Y Y, et al. The effectiveness of mulching practices on water erosion control: A global meta-analysis [J]. *Geoderma*, 2023, 438: e116643.

- [53] 王学春,王红妮,李巍,等.川西北丘陵坡耕地苜蓿玉米间作田土壤水分与作物产量规律研究[J].湖南师范大学自然科学学报,2016,39(6):9-14.  
WANG X C, WANG H N, LI W, et al. Research on soil water and crop yield of alfalfa-maize intercropping system at slope land in the hilly regions of Sichuan Province[J].Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2016, 39(6):9-14.
- [54] WANG B, HUANG X H, CHEN J F, et al. Intercropping with green manure regulates microbial community structure and improves tea quality by changing soil available nutrients under organic management[J].Land Degradation & Development, 2025, 36(4): 1384-1397.
- [55] 张雯琦,金思成,刘智文,等.4种豆科绿肥养分含量及其对土壤培肥效应分析[J].南京农业大学学报,2024, 47(5):891-897.  
ZHANG W Q, JIN S C, LIU Z W, et al. Nutrient content of four different Leguminous green manure and its effect on soil fertility improvement potential[J].Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(5): 891-897.
- [56] YANG J, LAN L Y, JIN Y, et al. Mechanisms underlying legume-rhizobium symbioses[J].Journal of Integrative Plant Biology, 2022, 64(2):244-267.
- [57] ZHANG Z H, NIE J, LIANG H, et al. The effects of co-utilizing green manure and rice straw on soil aggregates and soil carbon stability in a paddy soil in Southern China[J].Journal of Integrative Agriculture, 2023, 22(5): 1529-1545.
- [58] PERALTA-ANTONIO N, WATTHIER M, SILVA SANTOS R H. Green manure and mineral fertilizer in sequential cropping: Effect on dry matter, yield, accumulation and recovery efficiency of nutrients[J].Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2021, 52(4):322-337.
- [59] 肖弘扬,温国昌,林启美,等.冬春季植被残体覆盖对内蒙古河套地区盐碱土盐分的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):23-26, 123.  
XIAO H Y, WEN G C, LIN Q M, et al. Effects of winter and spring plant residue mulching on saline soil salt in Hetao Inner Mongolia[J].Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 23-26, 123.
- [60] ANSARI M A, BABU S, CHOUDHARY J, et al. Soil quality restoration and yield stabilization in acidic soils of northeastern Himalayas: Five years impact of green manuring and crop residue management[J].Frontiers in Environmental Science, 2022, 10:e940349.
- [61] MANDAL U K, SINGH G, VICTOR U S, et al. Green manuring: Its effect on soil properties and crop growth under rice-wheat cropping system[J].European Journal of Agronomy, 2003, 19(2):225-237.
- [62] KUCERIK J, BRTNICKY M, MUSTAFA A, et al. Utilization of diversified cover crops as green manure-enhanced soil organic carbon, nutrient transformation, microbial activity, and maize growth[J].Agronomy, 2024, 14(9):e2001.
- [63] 哈丽代·热合木江,王加亭,郭江鹏,等.盐碱地苜蓿饲料特性及在牛羊饲料中的应用[J].草业科学,2025,42(3): 795-810.  
HALIDAI R H M J, WANG J T, GUO J P, et al. Study on the characteristics of saline-alkali land alfalfa and its utilization in the diet of ruminants[J].Pratacultural Science, 2025, 42(3):795-810.
- [64] 李云鹤.宁夏地区土壤和苜蓿中营养成分及相关性的研究[D].银川:宁夏大学,2022.  
LI Y H. Study on nutrient components and their correlation in alfalfa and soil in Ningxia[D].Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [65] YANG L, NIE J, XU C X, et al. Biological nitrogen fixation of Chinese Milk Vetch (*Astragalus sinicus* L.) as affected by exogenous carbon and nitrogen input[J].Symbiosis, 2021, 85(1):69-77.
- [66] 朱祖祥.从绿肥的起爆效应探讨它的肥效机制及其在施用上的若干问题[J].浙江农业科学,1963,4(3): 104-109.  
ZHU Z X. Discussion on the fertilizer efficiency mechanism of green manure and some problems in its application from its initiation effect[J].Journal of Agricultural Science, 1963, 4(3):104-109.
- [67] XU P D, WU J, WANG H, et al. Long-term partial substitution of chemical fertilizer with green manure regulated organic matter mineralization in paddy soil dominantly by modulating organic carbon quality[J].Plant and Soil, 2021, 468(1):459-473.
- [68] SAUZET O, JOHANNES A, DELUZ C, et al. The organic carbon-to-clay ratio as an indicator of soil structure vulnerability, a metric focused on the condition of soil structure[J].Soil Use and Management, 2024, 40(2): e13060.
- [69] SHAO S B, LI Z W, ZHU Y Q, et al. Green manure (*Ophiopogon japonicus*) cover promotes tea plant growth by regulating soil carbon cycling[J].Frontiers in Microbiology, 2024, 15:e1439267.
- [70] 鲁泽让,陈佳钰,李智贤,等.冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响[J].环境科学,2024, 45(4):2363-2372.  
LU Z R, CHEN J Y, LI Z X, et al. Effects of winter green manure mulching on soil aggregates, organic carbon, and AMF diversity[J].Environmental Science, 2024, 45(4):2363-2372.
- [71] 张雪梅,付利波,尹梅,等.翻压绿肥及配施氮肥对土壤有机碳含量和玉米产量的影响[J].江苏农业科学,

- 2025,53(3):265-271.
- ZHANG X M, FU L B, YIN M, et al. Effects of green manure and nitrogen fertilizer on soil organic carbon content and maize yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025,53(3):265-271.
- [72] 刘冲,洪立洲,郁凯,等.江苏沿海滩涂绿肥种植模式对土壤水稳性团聚体及有机碳含量的影响[J].*江苏农业科学*,2023,51(12):180-186.
- LIU C, HONG L Z, YU K, et al. Effects of green fertilizer planting patterns on soil water stability aggregates and organic carbon content in Jiangsu coastal beaches [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023,51(12):180-186.
- [73] LI P, KONG D N, ZHANG H J, et al. Different regulation of soil structure and resource chemistry under animal-and plant-derived organic fertilizers changed soil bacterial communities [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 165: e104020.
- [74] KUNMALA P, JINDALUANG W, DARUNSON-TAYA T, et al. Distribution of organic carbon fractions in soil aggregates and their contribution to soil aggregate formation of paddy soils [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2023, 54(10):1350-1367.
- [75] TANG Q, LI W, DAI W, et al. Patterns and determinants of microbial-and plant-derived carbon contributions to soil organic carbon in tea plantation chronosequence [J]. *Plant and Soil*, 2024, 505:811-825.
- [76] LI P, JIA L, CHEN Q Q, et al. Adaptive evaluation for agricultural sustainability of different fertilizer management options for a green manure-maize rotation system: Impacts on crop yield, soil biochemical properties and organic carbon fractions [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: e168170.
- [77] XU Q, YAO Z Y, CHEN Y P, et al. Priming and balance of soil organic carbon differ with additive C:N ratios and long-term green manuring [J]. *Applied Soil Ecology*, 2024, 201: e105495.
- [78] WU H W, CUI H L, FU C X, et al. Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 909: e168627.
- [79] ZHAO Z, QIN Y, WU Y, et al. Microbial necromass carbon drives soil organic carbon accumulation during long-term vegetation succession [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2025, 62(4): 932-944.
- [80] YANG R, SONG S J, CHEN S Y, et al. Adaptive evaluation of green manure rotation for a low fertility farmland system: Impacts on crop yield, soil nutrients, and soil microbial community [J]. *Catena*, 2023, 222: e106873.
- [81] 张建伟.绿肥翻压促进果园土壤磷素活化周转的特征及机理[D].重庆:西南大学,2022.
- ZHANG J W. The characteristics and mechanism of green manure on promoting soil phosphorus mobilization and turnover in the orchard [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [82] 张婧旻,李彩兰,薛欣欣,等.豆科绿肥对幼龄胶园土壤养分及叶片氮含量的影响及作用路径分析[J].*热带作物学报*,2025,46(6):1354-1362.
- ZHANG J M, LI C L, XUE X X, et al. Influence of soil nutrients and leaf nitrogen content in young rubber plantations intercropped with different leguminous green manures: A pathway analysis [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2025, 46(6):1354-1362.
- [83] XU Q W, FU H, ZHU B, et al. Potassium improves drought stress tolerance in plants by affecting root morphology, root exudates and microbial diversity [J]. *Metabolites*, 2021, 11(3): e131.
- [84] 李欣雨,刘函亦,薛少琪,等.几种绿肥的根系分泌物对土壤锌的活化效应[J].*中国土壤与肥料*,2022(1):81-89.
- LI X Y, LIU H Y, XUE S Q, et al. Zinc mobilization effect by root exudates of different green manure [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(1):81-89.
- [85] 吕帅磊,常单娜,周国朋,等.江西红壤绿肥季施用磷矿粉的磷素效应[J].*草业学报*,2024,33(11):149-160.
- LU S L, CHANG D N, ZHOU G P, et al. The phosphorus effect of applying phosphate rock powder during the green manure season in red soil of Jiangxi Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(11):149-160.
- [86] ZHOU M G, LI Y H. Digital mapping and scenario prediction of soil salinity in coastal lands based on multi-source data combined with machine learning algorithms [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(14): e2681.
- [87] 胡炎,杨帆,杨宁,等.盐碱地资源分析及利用研究展望[J].*土壤通报*,2023,54(2):489-494.
- HU Y, YANG F, YANG N, et al. Analysis and prospects of saline-alkali land in China from the perspective of utilization [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2023, 54(2):489-494.
- [88] FAN W Q, DONG J Q, NIE Y D, et al. Alfalfa plant age (3 to 8 years) affects soil physicochemical properties and rhizosphere microbial communities in saline - alkaline soil [J]. *Agronomy*, 2023, 13(12): e2977.
- [89] 卞建民,刘彩虹,杨占梅,等.种植黄花草木樨对盐碱地土壤水、盐状况的影响[J].*吉林农业大学学报*,2012, 34(2):176-179,183.
- BIAN J M, LIU C H, YANG Z M, et al. Influence of planting melilotus officinalis (MO) on water and salt in saline-alkali soil [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2012, 34(2):176-179,183.
- [90] 李庆凯,迟宝杰,王鹤翔,等.盐碱地冬油菜压青还田对土壤理化性质及花生产量的影响[J].*中国油料作物学*

- 报, 2024, 46(3):604-612.
- LI Q K, CHI B J, WANG H X, et al. Effect of winter rapeseed returning as green manure in saline alkali soil on soil physicochemical properties and peanut yield[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2024, 46(3):604-612.
- [91] 彭晓莉, 吴旺泽, 沈娟, 等. 城市绿化带植被覆盖度对盐碱地土壤盐分的调节植物研究[J]. 2022, 42(1):62-70.
- PENG X, WU W, SHEN J, et al. Regulation of soil salinity by vegetation coverage in urban greenbelt saline-alkali land [J]. Bulletin of Botanical Research, 2022, 42(1):62-70.
- [92] LI R S, GAO Q Q, MAO L P, et al. Molecular mechanism of saline-alkali stress tolerance in the green manure crop *Sophora alopecuroides* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2023, 210:e105321.
- [93] YU C X, WANG G M, LIU X L, et al. Effect of Sesbania and Triticale rotation on plant characteristics and soil quality in coastal saline-alkaline land: A two-year field experiment[J]. BioResources, 2023, 18(4):7109-7123.
- [94] JAVED N, IJAZ S S, HUSSAIN Q, et al. Potential of modified reduced tillage with cover/green manure crop for climate change mitigation in a smallholder rainfed farming system[J]. Sustainability, 2024, 16(11):e4781.
- [95] SINGH R K, CHAUDHARY R S, SOMASUNDARAM J, et al. Soil and nutrients losses under different crop covers in vertisols of Central India [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(2):609-620.
- [96] LI Y B, ZHU Q, ZHANG Y, et al. Impact of winter cover crops on total and microbial carbon and nitrogen in black soil[J]. Agronomy, 2024, 14(3):e603.
- [97] 沈晓琳, 王丽丽, 汪洋, 等. 保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(03):361-370.
- SHEN X L, WANG L L, WANG Y, et al. Progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates, microbes, and nematode communities[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(3):361-370.
- [98] KHAN M I, GWON H S, ALAM M A, et al. Short term effects of different green manure amendments on the composition of main microbial groups and microbial activity of a submerged rice cropping system[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147:e103400.
- [99] ELFSTRAND S, HEDLUND K, MÅRTENSSON A. Soil enzyme activities, microbial community composition and function after 47 years of continuous green manuring [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 35(3):610-621.
- [100] KIM N, ZABALOY M C, GUAN K Y, et al. Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 142:e107701.
- [101] CUI J F, HOLDEN N M. The relationship between soil microbial activity and microbial biomass, soil structure and grassland management[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146:32-38.
- [102] 王群, 尹飞, 郝四平, 等. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(6):3096-3104.
- WANG Q, YIN F, HAO S P, et al. Effects of subsoil bulk density on rhizospheric soil microbial population, microbial biomass carbon and nitrogen of corn (*Zea mays* L.) field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6):3096-3104.
- [103] 胡宇. 不同大小土壤团聚体中微生物群落的分布[D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- HU Y. Distribution of microbial communities in soil aggregates of different sizes [D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [104] DO RÊGO BARROS F M, FRACETTO F J C, LIRA M A J, et al. Spatial and seasonal responses of diazotrophs and ammonium-oxidizing bacteria to legume-based silvopastoral systems [J]. Applied Soil Ecology, 2021, 158:e103797.
- [105] LYU H Q, YU A Z, CHAI Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi mediate soil N dynamics, mitigating N<sub>2</sub>O emissions and N-leaching while promoting crop N uptake in green manure systems[J]. Science of the Total Environment, 2024, 957:e177592.
- [106] RAHEEM A, WANG T S, HUANG J, et al. Leguminous green manure mitigates methane emissions in paddy field by regulating acetoclastic and hydrogenotrophic methanogens[J]. European Journal of Soil Biology, 2022, 108:e103380.
- [107] GAO S J, ZHOU G P, REES R M, et al. Green manuring inhibits nitrification in a typical paddy soil by changing the contributions of ammonia-oxidizing Archaea and bacteria[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 156:e103698.
- [108] 余婷, 田野. 森林生态系统凋落物多样性对分解过程和土壤微生物特性影响研究进展[J]. 生态科学, 2020, 39(1):213-223.
- SHE T, TIAN Y. Effects of litter diversity on decomposition process and soil microbial characteristics in forest ecosystems[J]. Ecological Science, 2020, 39(1):213-223.
- [109] 郭继勋, 姜世成, 林海俊, 等. 不同草原植被碱化草甸土的酶活性[J]. 应用生态学报, 1997, 8(4):412-416.
- GUO J X, JIANG S C, LIN H J, et al. Enzymic activity of alkaline meadow soil with different grassland vegetations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1997, 8(4):412-416.

(下转第 48 页)