



郑洪兵, 苏荣九, 纪东铭, 梅楠, 李春荣, 刘明, 高健, 石森, 于中雨, 于颖, 徐婷婷, 王海枫, 由文佳, 宁慧萍, 高野, 张尧, 徐盛, 王易祥, 史宏伟. 东北黑土地合理耕层构造理论、技术与实践[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(12): 89-98.

ZHENG Hongbing, SU Rongjiu, JI Dongming, MEI Nan, LI Chunrong, LIU Ming, GAO Jian, SHI Miao, YU Zhongyu, Yu Ying, XU Tingting, WANG Haifeng, YOU Wenjia, NING Huiping, GAO Ye, ZHANG Yao, XU Sheng, WANG Yixiang, SHI Hongwei. Theories, technologies, and practices of optimal tillage-layer structure in the black soils of Northeast China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 89-98.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.08

## 东北黑土地合理耕层构造理论、技术与实践

郑洪兵<sup>1</sup> 苏荣九<sup>1</sup> 纪东铭<sup>2</sup> 梅楠<sup>1</sup> 李春荣<sup>3</sup> 刘明<sup>4</sup> 高健<sup>1</sup> 石森<sup>1</sup>  
于中雨<sup>1</sup> 于颖<sup>1</sup> 徐婷婷<sup>1</sup> 王海枫<sup>1</sup> 由文佳<sup>1</sup> 宁慧萍<sup>1</sup> 高野<sup>1</sup>  
张尧<sup>1</sup> 徐盛<sup>1</sup> 王易祥<sup>1</sup> 史宏伟<sup>5</sup>

- (1. 吉林农业大学 农学院, 长春 130118;  
2. 四平市农业技术推广总站, 吉林 四平 136599;  
3. 吉林农业大学 工程技术学院, 长春 130118;  
4. 吉林农业科技学院 农学院, 吉林 吉林 132101;  
5. 吉林省农业技术推广总站, 长春 130062)

**摘要** 为保障国家粮食安全并破解黑土地保护与产能协同提升的关键难题, 针对东北黑土地面临的耕层变薄、有机质下降、结构硬化等制约农业可持续发展的突出问题, 本研究系统梳理了东北黑土地合理耕层构造的内涵与特征, 从调控土壤物理性质、化学性质、微生物结构及功能、动物多样性、作物生长发育及产量等多维度阐述了合理耕层构造的生态功能, 总结了适用于不同区域的合理耕层构建技术模式, 并介绍了配套农机装备。在此基础上, 提出了未来应以保障国家粮食安全为核心, 以黑土地可持续利用为目标, 推动农机农艺深度融合, 构建轻简高效、区域适配的耕作技术体系, 为实现黑土地保护与农业高质量发展提供理论依据和技术支撑。

**关键词** 黑土地; 耕作制度; 耕层构造; 土壤退化; 土壤健康

中图分类号 S152.7; Q945.11

文章编号 1007-4333(2025)12-0089-10

文献标志码 A

## Theories, technologies, and practices of optimal tillage-layer structure in the black soils of Northeast China

ZHENG Hongbing<sup>1</sup>, SU Rongjiu<sup>1</sup>, JI Dongming<sup>2</sup>, MEI Nan<sup>1</sup>, LI Chunrong<sup>3</sup>, LIU Ming<sup>4</sup>,  
GAO Jian<sup>1</sup>, SHI Miao<sup>1</sup>, YU Zhongyu<sup>1</sup>, Yu Ying<sup>1</sup>, XU Tingting<sup>1</sup>, WANG Haifeng<sup>1</sup>,  
YOU Wenjia<sup>1</sup>, NING Huiping<sup>1</sup>, GAO Ye<sup>1</sup>, ZHANG Yao<sup>1</sup>, XU Sheng<sup>1</sup>,  
WANG Yixiang<sup>1</sup>, SHI Hongwei<sup>5</sup>

- (1. College of Agriculture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;  
2. Siping Agricultural Technology Extension Station, Siping 136599, China;  
3. College of Engineering and Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;  
4. College of Agronomy, Jilin Agricultural Science and Technology College, Jilin 132101, China;  
5. Jilin Provincial Agricultural Technology Extension Station, Changchun 130062, China)

**Abstract** To ensure national food security and address the critical challenge of simultaneously protecting black soils and increasing their productivity, this study focuses on the prominent issues constraining sustainable agricultural development in Northeast China including the thinning of the cultivated layer, declining soil organic

收稿日期: 2025-07-23

基金项目: 吉林农业大学高层次人才项目(202020581); 吉林省科技发展计划项目(20220302008NC); 国家自然科学基金项目(31501248); 国家重点研发计划课题(2016YFD03002)。

第一作者: 郑洪兵(ORCID:0000-0002-2870-3467), 教授, 主要从事黑土地耕作制度原理与设计研究, E-mail: hongbingzheng@126.com

matter, and structural hardening. This study systematically reviews the concept and characteristics of rational cultivated layer structure for the black soils of this region. It elaborates on the ecological functions of this rational structure from multiple dimensions, including the regulation of soil physical and chemical properties, microbial community structure and function, faunal diversity, and crop growth, development, and yield. Furthermore, the study summarizes the technical models adaptable to different regions for constructing rational cultivated layer, adaptable to different regions, and introduces the corresponding agricultural machinery. Accordingly, the study proposes future efforts should center on the core objective of ensuring national food security and aim at sustainable black soil utilization, promote deep integration of agricultural machinery and agronomy, and establish a simplified, high-efficiency, and regionally-adapted cultivation technology system. This study provides a theoretical basis and technical support for achieving both the conservation of black soil and high-quality agricultural development.

**Keywords** black soil; farming system; tillage layer structure; soil degradation; soil health

黑土是温带半湿润季风气候、草原化草甸植被下育成的土壤<sup>[1]</sup>,具有深厚的黑色腐殖质层,有机质含量较高<sup>[2-3]</sup>。黑土地是指以黑色或暗黑色腐殖质表土层为标志的土地<sup>[4]</sup>,是一种性状好、肥力高、适宜农耕的优质土地<sup>[5]</sup>。黑土地是地球上珍贵的土壤资源,是大自然赋予人类的宝贵财富<sup>[6]</sup>,以生产力极强和肥力极高而著称,主要分布在密西西比河流域、乌克兰大平原、潘帕斯草原和我国东北地区<sup>[7]</sup>。东北黑土地主要分布在黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东四盟<sup>[8]</sup>,黑土分布区面积 $1.0867 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ,耕地面积 $3.58 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[9]</sup>,其粮食产量占全国的1/4,是我国最重要的粮食生产基地,被誉为保障我国粮食安全的“压舱石”和“稳压器”<sup>[10]</sup>。

黑土地是东北地区提升为国家粮食安全战略地位的重要基础<sup>[4]</sup>。但传统耕作连续多年高强度利用,使得黑土地普遍面临“变薄”“变瘦”“变硬”等质量退化问题(图1)<sup>[11]</sup>。近40年来黑土地出现明显的

用养失调和土壤退化现象<sup>[12]</sup>。当前黑土有机质已不足开垦初期的50%,且仍以年平均0.5%的速率下降<sup>[13]</sup>。东北黑土区存在显著的表层土壤流失问题,其年流失厚度为0.3~1.0 cm,该退化过程持续推进,截至2003年,区域内黑土层平均厚度已从开垦前的50~60 cm衰减至20~30 cm<sup>[14]</sup>。汪景宽等<sup>[15]</sup>研究表明,1980—2000年黑龙江省中部地区土壤pH、有机质和速效钾平均含量均显著降低。东北黑土地平均耕层厚度仅为13.7 cm,比全国平均耕层厚度低2.8 cm,更远低于美国35.0 cm厚度的土壤耕层<sup>[16]</sup>。由于土壤侵蚀和长期高强度重用轻养等,导致土壤耕层变薄、有机质含量降低、土壤酸化、结构变差、功能退化,黑土“变薄、变瘦、变硬”现象突出<sup>[14]</sup>,严重影响区域粮食生产和社会经济发展<sup>[12]</sup>。如何使黑土地粮仓高效、可持续地为国家粮食安全提供保障作用,是当前亟待解决的科学问题<sup>[13]</sup>。

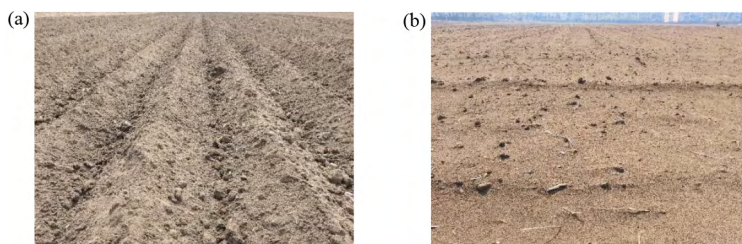


图1 传统垄作(a)和翻地(b)的田间实景图

Fig. 1 Field pictures of traditional ridge tillage (a) and moldboard plowing (b)

2020年7月22日,习近平总书记在吉林考察时作出重要指示:“要采取有效措施切实把黑土地这个‘耕地中的大熊猫’保护好、利用好,使之永远造福人民”<sup>[17]</sup>。总书记的重要指示为吉林扛稳维护国家粮食安全重任、守护好“黑土粮仓”指明了方向<sup>[9]</sup>。

2021年4月,中国科学院打响“黑土粮仓”科技会战的第一枪,协同吉林省、黑龙江省和辽宁省签署协议,启动实施“黑土地保护与利用科技创新工程(黑土粮仓)”战略性先导科技专项(A类)<sup>[18]</sup>。理论与实践表明,保护性耕作是提升黑土地力和实现

黑土资源保护性利用的重要保障<sup>[19]</sup>。“梨树模式”融合免耕、覆盖和轮作的优点,研发出多种适合不同地区的技术,降低风蚀、水蚀,在增加土壤有机质方面技术效果显著<sup>[20]</sup>。黑龙江省积极打造黑土地保护利用的“龙江模式”,实现耕地保护与耕地产能提升的双重目标。韩晓增等<sup>[21]</sup>通过在海伦市连续6年试验表明,采用玉米-大豆和玉米-玉米大豆轮作技术模式,土壤有机质提高2.4 g/kg以上,肥沃耕层达30 cm以上。构建合理耕层构造是实现土地保护和产能协升的重要途径<sup>[22-23]</sup>。《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》<sup>[24]</sup>中明确指出开展保护性耕作技术创新是遏制黑土地退化和肥力下降的有效技术途径。构建合理耕层构造结合秸秆还田配施氮肥有效改善土壤理化性状,进而提高春玉米产量<sup>[25]</sup>。同样,秸秆深翻还田和深松浅翻秸秆还田对土壤碳固持和玉米产量提升具有较好的作用<sup>[26]</sup>。杨建君等<sup>[27]</sup>研究表明,深松结合秸秆还田是将黑土大、中孔隙度调节为理想状态的有效技术措施。卢倩倩等<sup>[28]</sup>研究表明,季节性冻融和深松整地对多次积累压实土壤结构及微团聚体稳定性的恢复均可产生积极作用。虚实并存耕作技术解决了封冻期逼近造成的耕作期限短的矛盾<sup>[29]</sup>。改中耕为深松、改灭茬为留茬、改垄作为平作的“三改”耕作制有效解决黑土退化的技术难题<sup>[30]</sup>。可见,构建合理的耕

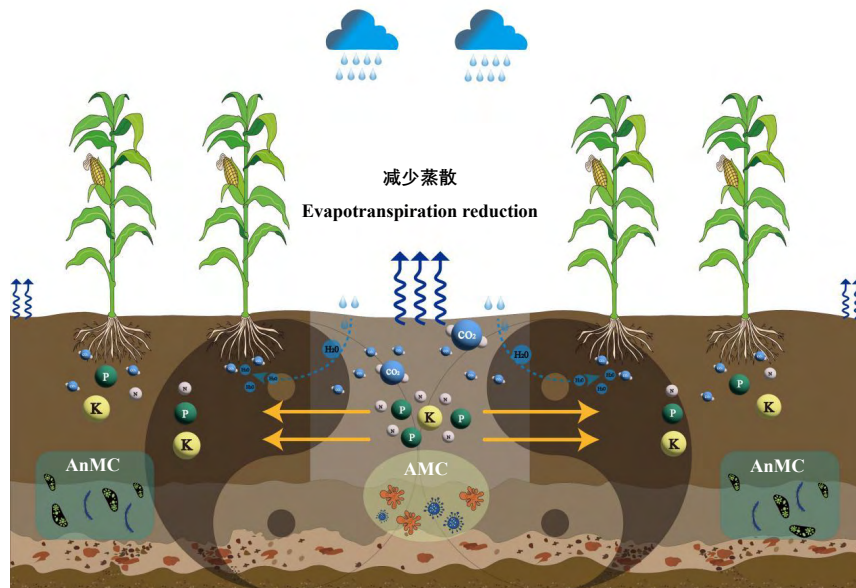
层构造对土壤物理性质、化学性质、微生物及作物生长和产量均具有重要的影响。

东北黑土地是我国非常宝贵且重要的自然资源,系统总结黑土地相关研究成果,对于进一步遏制黑土退化和制定黑土地保护策略具有重要理论与实践意义。本研究在查阅大量文献的基础上,结合国内外最新研究成果,深入分析和系统总结,明确合理耕层构造的基本概念,阐明合理耕层构造的生态功能,总结国内外关于合理耕层构造及耕作技术的研究进展,归纳助力黑土地保护的合理耕作技术模式,结合技术模式简要梳理配套农机装备,旨在为促进保护黑土地合理耕作技术的发展方向提供参考依据。

## 1 合理耕层构造与特点

### 1.1 合理耕层构造

耕层构造是由耕层土壤及其覆盖物所组成,是人类耕作加工后形成的犁底层、内部结构、表面形态及覆盖物的总称。在土壤管理过程中,通过机具镇压、深松等措施进行耕层构造改造,创建虚实并存的耕层构造,最大限度地协调耕层中水、肥、气、热状况,增加微生物丰度和土壤动物数量,积累和保存腐殖质,培肥土壤提升地力,创建适宜的耕层环境(图2)。核心目的是为作物提供良好的土壤环境,更好地促进耕层中矿质化作用,加速养分释放,



AMC:好氧微生物群落;AnMC:厌氧微生物群落。

AMC: Aerobic microbial community; AnMC: Anaerobic microbial community.

图2 东北黑土农田合理耕层构造原理图

Fig. 2 Principle map of the optimal tillage layer structure for black soil in Northeast China

让作物“吃饱、喝足、住好”，最大限度地保持耕作后效，降低耕作成本，为建立合理的土壤耕作制度提供重要理论依据。

## 1.2 合理耕层构造特点

合理的耕层构造归纳具有五大生态功能特点：调控土壤物理性质，改善土壤紧实性，调节土壤孔隙度，提高土壤蓄水保墒能力；优化土壤化学性质，增加土壤保肥供肥能力，提升土壤有机质含量；增加土壤中微生物丰度，促进土壤微生物数量的增加，增强土壤微生物的多元功能性；丰富土壤动物多样性，增加蚯蚓等大型动物的数量，发挥其活土的生态功能优势；创造良好的土壤环境，为作物根系生长提供良好的空间，促进地上部的生长发育，为创造高产奠定良好的基础。因此，合理耕层构造具有调控土壤物理性质，增加土壤养分，优化土壤微生物的结构与功能，增加土壤中动物数量，促进作物生长发育并提高产量的功能。

## 2 合理耕层构造生态功能

构建合理耕层构造是黑土地保护与国家粮食安全保障的重要途径，通过系统优化土壤物理、化学和生物环境，为作物生长发育创造适宜的耕层环境条件，促进作物根系生长发育从而提升产量。主要表现在以下5个方面。

### 2.1 调控土壤物理性质

土壤物理性质（如水分、容重、孔隙度和固—液—气三相比例）直接影响土壤水、肥、气、热协调能力，进而决定作物根系生长和产量形成<sup>[31]</sup>。合理耕层构造是通过改变土壤结构，显著调控土壤物理指标来完成的<sup>[32-33]</sup>。其中，翻耕后形成的全虚耕层构造具有短期内降低土壤容重，增加大孔隙比例，提高水分入渗率等优势，但会破坏团聚体稳定性，进一步导致三相比例失衡，气相占比短期增加，液相占比下降<sup>[34-36]</sup>。免耕后形成的全实耕层构造会减少土壤扰动，使表层容重降低，但底层容重可能增加，孔隙度降低，三相比例中固相占比提高，同时秸秆覆盖可提高表层土壤含水量<sup>[37-38]</sup>。深松后形成的虚实并存耕层构造是指在不翻转土层的情况下打破犁底层，使20—40 cm土层容重降低，总孔隙度增加，显著改善三相比例（特别是液相占比提高），同时提高深层储水量<sup>[39-40]</sup>。总体而言，翻耕后形成的全虚耕层构造短期内可改善通气性但长期破坏土

壤结构，免耕后形成的全实耕层构造能够减少水分蒸发，但可能加重底层压实，深松后形成的虚实并存耕层构造则能协调耕层整体结构，是改善土壤物理性质的优化选择。

### 2.2 调控土壤化学性质

土壤化学性质是决定土壤肥力和作物生产力的关键因素，直接影响养分有效性、微生物活性和作物产量形成<sup>[41]</sup>。合理耕层构造构建过程中通过改变土壤环境，显著影响土壤化学性质的动态变化<sup>[42]</sup>。其中翻耕后形成的全虚耕层构造促进土壤有机质矿化，短期内提高速效氮、磷、钾含量，但长期会导致有机质含量下降，并可能因土壤扰动加剧酸化，使pH值降低<sup>[43-45]</sup>。免耕后形成的全实耕层构造有利于表层（0—10 cm）土壤有机质积累，并能维持较稳定的pH值，但其下层（10—30 cm）土壤速效养分含量可能降低<sup>[46-47]</sup>。深松后形成的虚实并存耕层构造可提高20—40 cm土层全量氮、磷、钾有效性，且不会显著改变土壤pH值。综合来看，翻耕全虚耕层构造促进养分短期释放但不利于长期保持，免耕全实耕层构造有利于表层养分积累但可能限制下层养分利用，而深松虚实并存耕层构造则能较好地协调不同土层的养分分布。

### 2.3 调控土壤微生物结构及功能

土壤微生物结构及功能是维持土壤生态系统健康的核心要素，其群落组成和代谢活性直接影响有机质分解、养分循环和作物产量形成<sup>[48-50]</sup>。合理耕层构造构建过程中通过改变土壤微环境，显著调控微生物群落结构与功能特征<sup>[51]</sup>。翻耕全虚耕层构造改变土壤细菌 $\alpha$ 多样性、群落和功能组成<sup>[52]</sup>。免耕全实耕层构造使放线菌门（*Actinobacteria*）细菌丰度提高，丛枝菌根真菌（AMF）生物量增加，促进几丁质酶活性和固氮菌丰度<sup>[53]</sup>。同时，微生物量碳提高，功能冗余度增加。深松虚实并存耕层构造使变形菌门（*Proteobacteria*）丰度上升，担子菌门（*Basidiomycota*）真菌比例提高，显著增强解磷菌活性和硝化细菌丰度，且维持较高的微生物量碳和群落稳定性<sup>[49]</sup>。总体而言，翻耕全虚耕层构造促进微生物快速周转但降低多样性，免耕全实耕层构造增强微生物生态功能但可能限制深层活性，而深松虚实并存耕层构造则能平衡不同土层的微生物结构与功能。

### 2.4 调控土壤动物多样性

土壤动物多样性是维持土壤生态系统功能的

核心要素,通过调控有机质分解、养分循环和土壤结构形成等过程直接影响作物产量稳定性<sup>[54]</sup>。合理耕层构造构建过程中通过改变土壤物理、化学环境和食物资源,显著影响土壤动物群落的组成与多样性<sup>[48]</sup>。其中翻耕全虚耕层构造导致大型土壤动物(如蚯蚓)数量减少,中型土壤动物(如弹尾虫)表层多样性下降,小型土壤动物(如跳虫科、水龟甲科、线蚓科等)中植物寄生类群比例增加<sup>[55]</sup>。免耕全实耕层构造显著提高大型土壤动物(特别是蚯蚓)生物量<sup>[56]</sup>,促进中型土壤动物(如甲螨)物种丰富度增加<sup>[57]</sup>,并增强小型土壤动物(如蚁甲科、蝇科、蚁科等)的个体密度和多样性<sup>[58]</sup>。深松虚实并存耕层构造使大型土壤动物(如鞘翅目幼虫)垂直分布均匀性提高,维持中型土壤动物(如蜘蛛类)群落稳定性,同时使小型土壤动物(如原生动物的营养级结构比翻耕系统复杂<sup>[55]</sup>。总体而言,翻耕全虚耕层构造显著降低土壤动物多营养级多样性,免耕全实耕层构造促进表层动物群落发展但可能限制深层动物多样性,而深松虚实并存耕层构造则在维持耕作层整体动物多样性方面表现出最优平衡。

### 2.5 调控作物生长发育及产量

良好的作物生长发育过程是产量形成的物质基础,其通过协调“根—土—肥—水”的系统关系直接影响产量构成要素的协同表达<sup>[59]</sup>。合理耕层构造构建过程通过改变土壤环境,系统调控作物生长发育的关键环节及产量形成过程<sup>[33]</sup>。翻耕全虚耕层构造短期内促进0—20 cm土层根系分布,提高苗期速效养分吸收率,但导致深层( $\geq 30$  cm)根系生物量减少<sup>[60]</sup>,水分利用效率降低,在产量形成方面主要表现为年际产量变异系数较大,其作用机制主要依赖物理扰动带来的短期土壤环境改良<sup>[61]</sup>。免耕全实耕层构造使表层根系密度增加,磷吸收效率提高,水分利用效率提升,产量形成方面主要表现为干旱年份比翻耕增产,其机制是通过维持土壤结构稳定性促进资源利用效率<sup>[62]</sup>。深松虚实并存耕层构造显著改善20—50 cm土层根系分布,均衡提高全生育期养分吸收量,增强土壤储水能力,实现产量及土壤健康的协同提升,年际产量变异系数较低,作用机制体现为“耕层扩容—养分增效—水分调控”三位一体的系统性优化<sup>[63]</sup>。总体而言,翻耕全虚耕层构造、免耕全实耕层构造和深松虚实并存耕层构造分别代表了“短期刺激型”“资源节约型”

和“系统协调型”3种产量形成路径,其中深松在平衡作物生长发育各环节方面表现出最优的综合效应。

## 3 构建合理耕层构造的实践应用

### 3.1 宽窄行留茬深松耕作技术模式

宽窄行留茬深松耕作技术模式(图3(a))适于东北湿润和半湿润区,该模式将传统均匀垄(60~65 cm行距)通过耕作改制改造成宽行(80~90 cm)、窄行(不低于40 cm)耕种模式,适宜种植密植品种,宽窄行种植密度可较均匀垄增加20%~25%。秋季玉米机械收获时留高茬40~45 cm,其余秸秆直接带出田外,春季免耕直接播种镇压形成紧实苗带,同时玉米苗期(6月中下旬)结合补肥进行深松30~35 cm形成虚部,形成虚实相间的合理耕层构造。该模式动土范围小,保墒效果好,解决了春旱保苗的问题,土壤蓄水保墒能力提高10%以上。

### 3.2 条耕秸秆还田深松耕作技术模式

条耕秸秆还田深松耕作技术模式(图3(b))适于东北坡耕地耕层浅薄、水蚀严重地区,该模式秋季玉米收获后,将秸秆粉碎为 $\leq 20$  cm小段覆盖地表,秋季或春季采用条耕机进行秸秆归行整地,条耕作业宽度为40~50 cm,深度为5~10 cm。春季播种带直接免耕播种、镇压,形成紧实的种床,同时玉米苗期(6月中下旬)结合补肥进行深松30~35 cm,形成虚实并存的合理耕层构造,各生育期土壤含水量较常规耕作增加11.5%~14.7%,土壤贮水量提高9.2%~21.9%,蒸发量减少15.3%~24.5%。通过秸秆覆盖降低径流速度,深松蓄水减少径流量,截流降速和深松蓄水相结合,可使水蚀量降低75%~85%。

### 3.3 均匀垄免耕深松耕作技术模式

均匀垄免耕深松耕作技术模式(图3(c))适于东北干旱和半干旱地区,该模式采取60~65 cm垄距种植,秋季玉米机械收获留茬高度30~45 cm,其余地上部直接带出田外。春季直接在原垄免耕播种镇压,玉米苗期(6月中下旬)结合追肥深松覆土培垄,通过免耕压实播种和深松作业形成虚实并存的耕层构造。该模式动土范围小,保墒效果好,使土壤含水量增幅为0.9%~2.2%,保苗率提高11.3%~14.6%,增产效果明显,其增幅为11.7%~12.2%。

### 3.4 垄作秸秆覆盖还田深松技术模式

垄作秸秆覆盖还田深松技术模式(图3(d))适于东北干旱和半干旱地区,该模式采取60~65 cm垄距种植,秋季玉米机械收获后,秸秆直接粉碎还田,秸秆还田长度为5~10 cm,春季直接免耕播种

苗带镇压,同时在玉米苗期(6月中下旬)结合追肥进行深松30~35 cm形成虚部。形成的耕作技术模式动土范围小,保墒效果好,使土壤蒸发减少约40.0%,耗水量减少15.0%,水分利用效率提高10.0%,产量增幅为8.3%~11.5%。



(a) 宽窄行留茬深松耕作技术模式  
(a) Wide-narrow row stubble-retaining deep loosening cultivation technology model



(b) 条耕秸秆还田深松耕作技术模式  
(b) Strip-till straw incorporation and deep loosening cultivation technology model



(c) 均匀垄免耕深松耕作技术模式  
(c) Uniform ridge no-till deep tillage technology model



(d) 垄作秸秆覆盖还田深松技术模式  
(d) Deep ploughing technology model for ridge-based straw mulching and return to fields

图3 东北黑土地合理耕层构造耕作技术模式

Fig. 3 Technology models for optimal tillage layer structure of black soil in Northeast China

## 4 构建合理耕层构造配套农机装备

### 4.1 镇压器

镇压器是用于压实土壤,平整地表的机械。通常由重型辊筒或压轮组成,用于播种后或耕作后对土壤进行物理压实,通过重型滚筒或压轮作业消除播种后耕层中过量孔隙,适度压实碎土使表层土紧实,形成播种带紧实的耕层结构。镇压器分为轻型和重型2种,一般西部干旱区或播种后土壤含水量较低时采用重型镇压器,中部和东部湿润区或播种后土壤含水量较高时采用轻型镇压器。

### 4.2 条耕机

条耕机是一种实现“局部耕作、行间免耕”的整地机具,在作物种植行(条带)进行精准旋耕、灭茬、镇压、深松土壤、同步施肥等作业,同时保留行间未耕作区域的秸秆或覆盖物。条耕机核心结构包括机架、开沟部件、旋耕刀轴、覆土镇压装置等。其作业效果为通过局部带状耕作,耕作带内分层碎土形成上虚下实的耕层构造,未耕区秸秆覆盖形成有机质富集带,协同改善耕层物理性状。条耕机属于少免耕机具的一种,一般适用于东北干旱和半干旱地区耕作整地,以及东部地区耕层浅薄,不适合深翻整地的区域。

### 4.3 播种机

播种机是一种将种子按预设行距、深度和密度精准播入土壤的农业机械,功能包括开沟、投种、覆土和镇压。主要由种箱、排种器、开沟装置、覆土镇压机构、传动系统及智能监控系统构成。通过精确控制播种深度与间距,让种子在适宜耕层深度入土,其开沟、覆土装置可分层扰动土壤,打破板结层,形成上松下实的耕层结构。播种机还包括免耕播种机,与普通播种机的区别在于在不翻耕土壤的情况下,直接将种子和肥料投放到耕层特定的位置,主要由排种器、肥料排放器、铲刀、镇压器、传动系统及智能监控系统等部件组成,免耕播种机主要用于西部干旱地区以及条耕后的苗床播种。

### 4.4 深松机

深松机是通过非翻转式作业方式,利用高强度深松铲(齿)对土壤进行深松,打破土壤犁底层,改善深层土壤结构的农业机械。其核心部件包括机架、深松铲(凿形、箭形或曲面铲)、限深轮及动力连接装置。深松机是优化耕层构造的关键机具,深松铲可穿透 30~50 cm 土层,重构土壤剖面结构,建立“虚实并存”的耕层构造。深松机使用范围较广,对于干旱区深松蓄水保墒以及低温冷凉区苗期深松放寒均有明显效果。

## 5 未来发展方向

### 5.1 以保障国家粮食安全为核心任务,构建轻简高效的耕作技术

土壤合理耕层构造是实现“藏粮于地、藏粮于技”战略的重要手段,也是实现发展农业转型、绿色生产的重要措施,关系国家粮食安全与耕地可持续发展。合理耕层构造直接影响农产品产量和质量,关系国家粮食安全,创造健康理想的耕层构造是提高土壤生产力的重要调控途径。

### 5.2 以黑土地可持续利用为首要目标,构建科学有效的耕作制度

合理的耕层构造是土壤可持续利用、作物优质高产和农业生态良性循环的基础保障。黑土地可持续利用最关键的特征就是保持较高的土壤肥力,秸秆还田能够增加土壤中的有机质和养分,改善土壤结构,使土壤更加疏松,孔隙度提高,有助于提升微生物的活性,增强土壤的保水保肥能力,是构建合理耕层构造的关键措施。

### 5.3 以农机农艺结合为关键核心,构建完善合理的耕作体系

东北黑土区气候、作物、地貌、土壤、种植制度等存在较大差异,应结合区域的土壤耕作自然条件及人文、历史等因素,因地制宜,实行合理的耕作措施,农机与农艺相结合,加快新型农机和智能农机的研究与应用,提高东北黑土区农田整地机械化的应用水平,在实践中不断完善合理耕作技术体系,构建具有区域特色的合理耕层构造,提高土地综合生产力。

## 参考文献 References

- [1] 吉林省土壤肥料总站. 吉林土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998  
Jilin Provincial Soil and Fertilizer Station. *Jilin Soils*[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1998 (in Chinese)
- [2] 段兴武, 赵振, 刘刚. 东北典型黑土区土壤理化性质的变化特征[J]. 土壤通报, 2012, 43(3): 529-534  
Duan X W, Zhao Z, Liu G. The variations of soil physico-chemical properties since the second national soil survey in the northeast typical black soil regions [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, 43(3): 529-534 (in Chinese)
- [3] 赵兰坡, 王鸿斌, 刘会青, 王艳玲, 刘淑霞, 王宇. 松辽平原玉米带黑土肥力退化机理研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 79-84  
Zhao L P, Wang H B, Liu H Q, Wang Y L, Liu S X, Wang Y. Mechanism of fertility degradation of black soil in corn belt of Songliao plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1): 79-84 (in Chinese)
- [4] 韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 206-212  
Han X Z, Zou W X. Effects and suggestions of black soil protection and soil fertility increase in Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 206-212 (in Chinese)
- [5] 中国科学院. 东北黑土地白皮书(2020)[R]. 哈尔滨: 中国科学院, 2021  
Chinese Academy of Sciences. White paper on the black soil in Northeast China (2020)[R]. Harbin: Chinese Academy of Sciences, 2021(in Chinese)
- [6] 王志刚. 充分发挥科技创新在保护利用黑土地中的关键支撑作用[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1127-1132  
Wang Z G. Give full play to vital role of scientific and technological innovation in supporting protection and utilization of black soil[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1127-1132 (in Chinese)
- [7] 张悦, 赵东阁, 王心圆, 汪莹, 刘家睿, 闫永生. 东北黑土地的形成、现状与演化趋势: 东北黑土地的前世今生[J]. 黑龙江国土资源, 2024, 22(6): 34-42  
Zhang Y, Zhao D G, Wang X Y, Wang Y, Liu J R, Yan Y S. The formation process, current situation, and evolutionary trend of black soil in Northeast China: The past and present lives of the black soil in Northeast China[J]. *Heilongjiang Land and Resources*, 2024, 22(6): 34-42 (in Chinese)
- [8] 韩晓增, 李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学, 2018, 38(7): 1032-1041  
Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7): 1032-1041 (in Chinese)
- [9] 姜明, 文亚, 孙命, 王屹晟, 曾艳, 韩永滨, 李秀军, 武海涛, 李禄军, 徐尚起. 用好养好黑土地的科技战略思考与实施路径: 中国科学院“黑土粮仓”战略性先导科技专项的总体思路与实施方案[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10):

- 1146-1154  
Jiang M, Wen Y, Sun M, Wang H S, Zeng Y, Han Y B, Li X J, Wu H T, Li L J, Xu S Q. Thinking and implementation approach of science and technology strategy of well raising black soil: Overall idea and implementation planning of strategy priority research program of Chinese academy of sciences on black soil conservation and utilization[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1146-1154 (in Chinese)
- [10] 梁爱珍, 李禄军, 祝惠. 科技创新推进黑土地保护与利用, 齐力维护国家粮食安全: 用好养好黑土地的对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 557-564  
Liang A Z, Li L J, Zhu H. Protection and utilization of black land and making concerted and unremitting efforts for safeguarding food security promoted by sci-tech innovation: Countermeasures in conservation and rational utilization of black land[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(5): 557-564 (in Chinese)
- [11] 杜国明, 姚鑫, 臧雷振. 东北黑土区耕作制度演变及其影响因素[J]. 中国生态农业学报: 中英文, 2025, 33(4): 646-655  
Du G M, Yao X, Zang L Z. Evolution of farming system and its influencing factors in the black soil region of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(4): 646-655 (in Chinese)
- [12] 廖晓勇, 姚启星, 万小铭, 王介勇, 李泽红. 黑土粮仓全域定制模式的理论基础与技术路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1634-1649  
Liao X Y, Yao Q X, Wan X M, Wang J Y, Li Z H. Theoretical basis and technical path of the regional all-for-one customization model of black soil granary[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(7): 1634-1649 (in Chinese)
- [13] 沈慧. 破解东北黑土地保护利用难题[N]. 经济日报, 2021-07-26(9)  
Shen H Tackling conservation-utilization dilemmas of northeast China's black soil[N]. *Economic Daily*, 2021-07-26(9) (in Chinese)
- [14] 刘丙友. 典型黑土区土壤退化及可持续利用问题探讨[J]. 中国水土保持, 2003(12): 28-29  
Liu B Y. Approach to issues of soil deterioration and sustainable utilization of typical chernozem region[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(12): 28-29 (in Chinese)
- [15] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 魏丹, 迟凤琴. 20年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007(1): 19-24  
Wang J K, Li S Y, Zhang X D, Wei D, Chi F Q. Spatial and temporal variability of soil quality in typical black soil area in Northeast China in 20 years[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2007(1): 19-24 (in Chinese)
- [16] 李少昆, 王崇桃. 玉米高产潜力途径[M]. 北京: 科学出版社, 2010.  
Li S K, Wang C T. *Approaches to Unlocking the High-yield Potential of Maize*[M]. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [17] 新华网. 习近平在吉林考察时强调 坚持新发展理念深入实施东北振兴战略 加快推动新时代吉林全面振兴全方位振兴 [EB/OL]. [2025-07-15]. [https://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-07/24/c\\_1126281973.htm](https://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-07/24/c_1126281973.htm)  
Xinhuanet. Emphasizing Adhering to the New Development Concept and Further Implementing the Northeast Revitalization Strategy to Accelerate Comprehensive Revitalization of Jilin in the New Era[EB/OL]. [2025-07-15]. [https://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-07/24/c\\_1126281973.htm](https://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-07/24/c_1126281973.htm) (in Chinese)
- [18] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1203-1215  
Ao M, Zhang X D, Guan Y X. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10): 1203-1215 (in Chinese)
- [19] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 张士秀, 黄丹丹, 杨学明, 张晓平, 李秀军, 田春杰, McLaughlin Neil B, 相洋. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1325-1335  
Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, Zhang S X, Huang D D, Yang X M, Zhang X P, Li X J, Tian C J, McLaughlin N B, Xiang Y. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8): 1325-1335 (in Chinese)
- [20] 杨秋意, 陶怡然. 吉林梨树: 保护黑土地夯实发展之基[J]. 中国农村科技, 2025(1): 42-45  
Yang Q Y, Tao Y R. Lishu, Jilin: Protecting black land and consolidating the foundation of development[J]. *China Rural Science & Technology*, 2025(1): 42-45 (in Chinese)
- [21] 韩晓增, 邹文秀, 严君, 陆欣春, 陈旭, 马云桥, 郭玉华. 黑龙江省打造黑土地保护利用的“龙江模式”[J]. 中国农村科技, 2021(4): 25-27  
Han X Z, Zou W X, Yan J, Lu X C, Chen X, Ma Y Q, Guo Y H. Heilongjiang Province builds “Longjiang mode” of black land protection and utilization[J]. *China Rural Science & Technology*, 2021(4): 25-27 (in Chinese)
- [22] 陈阜, 赵明. 作物栽培与耕作学科发展[J]. 农学学报, 2018, 8(1): 50-54  
Chen F, Zhao M. Developments of the crop cultivation and farming system in China[J]. *Journal of Agriculture*, 2018, 8(1): 50-54 (in Chinese)
- [23] 孙占祥. 东北地区旱地农业研究进展与发展对策[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(10): 4-11  
Sun Z X. Research progress and development counter measures on dryland agriculture in northeast China [J]. *Journal of Cold-Arid Agriculture Sciences*, 2022, 1(10): 4-11 (in Chinese)
- [24] 农业部, 国家发展改革委, 财政部, 国土资源部, 环境保护部, 水利部. 关于印发《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030年)》的通知[EB/OL]. [2025-07-15] [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201706/t20170623\\_5725947.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201706/t20170623_5725947.htm)  
Ministry of Agriculture, National Development and Reform Commission, Ministry of Finance, Ministry of Land and Resources, Ministry of Environmental Protection, Ministry of Water Resources. Notice concerning the issuance of the Northeast black soil conservation plan outline (2017-2030) [EB/OL]. [2025-07-15]. [http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201706/t20170623\\_5725947.htm](http://www.moa.gov.cn/govpublic/ZZYGLS/201706/t20170623_5725947.htm) (in Chinese)
- [25] 白伟, 安景文, 张立祯, 逢焕成, 孙占祥, 牛世伟, 蔡倩. 秸秆还田配施氮肥改善土壤理化性状提高春玉米产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 168-176  
Bai W, An J W, Zhang L Z, Pang H C, Sun Z X, Niu S W, Cai Q. Improving of soil physical and chemical properties and increasing spring maize yield by straw turnover plus nitrogen fertilizer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(15): 168-176 (in Chinese)
- [26] 刘雅杰, 张天娇, 张向前, 路战远, 刘战勇, 程玉臣, 武迪, 李金龙. 秸秆还田下耕作方式对黑土活性有机碳组分及碳库管理指数的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(17): 3408-3423  
Liu Y J, Zhang T J, Zhang X Q, Lu Z Y, Liu Z Y, Cheng Y C, Wu D, Li J L. Effects of tillage methods under straw returning on the labile organic carbon fractions and carbon pool management index in black soil farmland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(17): 3408-3423 (in Chinese)
- [27] 杨建君, 盖浩, 张梦璇, 蔡育蓉, 王力艳, 王立刚. 深松结合秸秆还田对黑土孔隙结构的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(5): 892-906  
Yang J J, Gai H, Zhang M X, Cai Y R, Wang L Y, Wang L G. Effect of subsoiling combined with straw returning measure on pore structure of black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(5): 892-906 (in Chinese)
- [28] 卢倩倩. 冻融与深松整地对压实黑土结构恢复的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017  
Lu Q Q. Effect of seasonal freezing-thawing and subsoiling preparation on the recovery of compacted black soil [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017 (in Chinese)

- [29] 左淑珍, 迟仁立. 虚实并存耕作技术在东北三江平原的推广应用[J]. 农村机械化, 1999(2): 35  
Zuo S Z, Chi R L. Application of virtual-real tillage technology in Sanjiang Plain of Northeast China[J]. *Rural Mechanization*, 1999(2): 35 (in Chinese)
- [30] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 郑洪兵, 李伟堂, 冯艳春. 东北黑土区玉米保护性耕作技术模式研究[J]. 玉米科学, 2007(6): 86-88  
Liu W R, Zheng J Y, Luo Y, Zheng H B, Li W T, Feng Y C. Study on technique model of conservative tillage in maize in northeast of China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2007(6): 86-88 (in Chinese)
- [31] 李奕赞, 张江周, 贾吉玉, 樊帆, 张福锁, 张俊伶. 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  
Li Y Z, Zhang J Z, Jia J Y, Fan F, Zhang F S, Zhang J L. Research progresses on farmland soil ecosystem multifunctionality[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59(5): 1177-1189 (in Chinese)
- [32] Rehman S U, Ijaz S S, Din A M U, Al Dosary M A, Ansar M, Fatima S, Siddiq A, Ashraf M N, Haider I, Junaid M B, Raza M A, Yang H S. Combined effects of reduced tillage and strip intercropping on soil carbon sequestration in semi-arid environment[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2025, 25(2): 3124-3139
- [33] 王立春, 马虹, 郑金玉. 东北春玉米耕地合理耕层构造研究[J]. 玉米科学, 2008(4): 13-17  
Wang L C, Ma H, Zheng J Y. Research on rational plough layer construction of spring maize soil in Northeast China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008(4): 13-17 (in Chinese)
- [34] 蔡红光, 梁尧, 刘慧涛, 刘剑钊, 秦裕波, 刘方明, 袁静超, 张洪喜, 任军, 王立春. 东北地区玉米秸秆全量深翻还田耕种技术研究[J]. 玉米科学, 2019, 27(5): 123-129  
Cai H G, Liang Y, Liu H T, Liu J Z, Qin Y B, Liu F M, Yuan J C, Zhang H X, Ren J, Wang L C. Research on full Maize straw returning with deep ploughing mode in the Northeast China[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2019, 27(5): 123-129 (in Chinese)
- [35] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 周虎, 洪亮, 王永玖, 李录久, 彭新华. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1370-1380  
Wang Y K, Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, Hong L, Wang Y J, Li L J, Peng X H. Effect of tillage practices on soil physical properties and maize growth in shajiang black soil (vertisol)[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6): 1370-1380 (in Chinese)
- [36] 槐圣昌. 耕作方式与秸秆还田对东北黑土物理性质和玉米根系生长的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020  
Huai S C. Effects of tillage methods and straw returning on physical properties of Northeast black soil and maize root growth [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese)
- [37] 于洪久, 王根林, 段衍, 刘峥宇, 时妍, 刘洋漫, 王伟, 邱广伟, 孙磊, 李玉梅. 耕作与秸秆还田深度变化对不同土层团聚体稳定性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(1): 1-7  
Yu H J, Wang G L, Duan Y, Liu Z Y, Shi Y, Liu F M, Wang W, Qiu G W, Sun L, Li Y M. Effects of different tillage and straw returning depths on soil aggregate stability of different soil layers[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(1): 1-7 (in Chinese)
- [38] 郑洪兵, 罗洋, 隋鹏祥, 李瑞平, 王浩, 任英, 袁野, 周思琪, 田圣陶, 刘武仁, 郑金玉. 秸秆还田对东北黑土水分特征及物理性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 226-236  
Zheng H B, Luo Y, Sui P X, Li R P, Wang H, Ren Y, Yuan Y, Zhou S Q, Tian S T, Liu W R, Zheng J Y. Effects of straw returning on soil water characteristics and physical properties of black soil in Northeast China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(1): 226-236 (in Chinese)
- [39] 朱荣昱, 赵蒙杰, 姚云凤, 李艳红, 李向东, 刘兆新. 秸秆还田方式与播种深度对夏直播花生土壤物理性状与出苗特性的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(8): 2106-2121  
Zhu R Y, Zhao M J, Yao Y F, Li Y H, Li X D, Liu Z X. Effects of straw returning methods and sowing depth on soil physical properties and emergence characteristics of summer peanut[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2024, 50(8): 2106-2121 (in Chinese)
- [40] Wang Y X, Chen S P, Zhang D X, Yang L, Cui T, Jing H R, Li Y H. Effects of subsoiling depth, period interval and combined tillage practice on soil properties and yield in the Huang-Huai-Hai Plain, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2020, 19(6): 1596-1608
- [41] 李立娟, 崔彦宏, 李琦, 薛庆林, 赵明. 条深旋耕作方式对早春玉米产量性能的影响[J]. 作物杂志, 2011(5): 96-99  
Li L J, Cui Y H, Li Q, Xue Q L, Zhao M. Advances in cultivation techniques of high nitrogen use efficiency in japonica rice[J]. *Crops*, 2011(5): 96-99 (in Chinese)
- [42] Szczepanek M, Błaszczak K, Piekarczyk M. The spatial distribution of nutrients in the soil, their uptake by plants, and green bean (*Phaseolus vulgaris* L.) yield under the strip-tillage system[J]. *Agronomy*, 2025, 15(2): 382
- [43] Hernández T D B, Slater B K, Corbalán R T, Shaffer J M. Assessment of long-term tillage practices on physical properties of two Ohio soils[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 186: 270-279
- [44] Liu X, Peng C, Zhang W J, Li S Y, An T T, Xu Y D, Ge Z, Xie N H, Wang J K. Subsoiling tillage with straw incorporation improves soil microbial community characteristics in the whole cultivated layers: A one-year study [J]. *Soil & Tillage Research*, 2022, 215: 105188
- [45] Huang T T, Yang N, Lu C, Qin X L, Siddique H M K. Soil organic carbon, total nitrogen, available nutrients, and yield under different straw returning methods[J]. *Soil & Tillage Research*, 2021, 214: 105171
- [46] Al-Kaisi M, Licht M A. Effect of strip tillage on corn nitrogen uptake and residual soil nitrate accumulation compared with no-tillage and chisel plow [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(4): 1164-1171
- [47] Haque M A, Jahiruddin M, Bell R W. Early sowing of wheat with minimum tillage on wet soils increases yield potential and phosphorus fertilizer requirements on the coastal ecosystem[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2025, 25(1): 1047-1058
- [48] 刘宇航, 王滨, 鄢麒宝, 孙新, 高强, 冯国忠. 黑土区玉米农田跳虫和螨群落特征对耕作和氮肥施用的响应[J]. 土壤通报, 2024, 55(3): 736-745  
Liu Y H, Wang B, Yan Q B, Sun X, Gao Q, Feng G Z. Response of community characteristics of Collembola and mite in maize farmland to soil tillage and nitrogen application in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(3): 736-745 (in Chinese)
- [49] 刘定辉, 舒丽, 陈强, 陈尚洪, 陈红琳, 朱钟麟. 秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(2): 158-162  
Liu D H, Shu L, Chen Q, Chen S H, Chen H L, Zhu Z L. Effects of straw mulching and little- or zero-tillage on microbial diversity and biomass C and N of alluvial soil in Chengdu Plain, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2011, 17(2): 158-162 (in Chinese)
- [50] 朱永官, 彭静静, 韦中, 沈其荣, 张福锁. 土壤微生物组与土壤健康[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(1): 1-11  
Zhu Y G, Peng J J, Wei Z, Shen Q R, Zhang F S. Linking the soil microbiome to soil health[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2021, 51(1): 1-11 (in Chinese)

- [51] 刘玉琳. 保护性耕作对土壤跳虫多样性和肠道微生物的影响[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2024  
Liu Y L. Effects of conservation tillage on soil springtail biodiversity and gut microbiota[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS), 2024 (in Chinese)
- [52] 朱寒松. 模拟翻耕扰动对黑土有机碳和微生物学性质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022  
Zhu H S. Effects of simulated tillage disturbance on soil organic carbon and microbiological properties of mollisol soil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022 (in Chinese)
- [53] Kovács A B, Juhász E K, Béni Á, Kincses I, Tállai M, Sándor Z, Kútai J, Rátonyi T, Kremper R. Changes in microbial community and activity of chernozem soil under different management systems in a long-term field experiment in Hungary[J]. *Agronomy*, 2024, 14(4): 745
- [54] 季方芳, 何其全, 田婷, 张青. 不同地区耕地轮作休耕模式与生态效应的研究进展[J]. 江西农业学报, 2025, 37(1): 99-108  
Ji F F, He Q Q, Tian T, Zhang Q. Research progress in fallow patterns and ecological effects of cultivated land rotation in different regions[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2025, 37(1): 99-108 (in Chinese)
- [55] 战丽莉, 许艳丽, 张兴义, 潘凤娟, 裴希超, 刘振宇. 耕作方式对中小型土壤动物多样性影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(9): 2371-2377  
Zhan L L, Xu Y L, Zhang X Y, Pan F J, Pei X C, Liu Z Y. Effects of tillage mode on the diversity of soil meso- and micro-fauna[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(9): 2371-2377 (in Chinese)
- [56] 熊丽军, 马莉, 刘美泽, 李亦男. 免耕条件下蚯蚓对农田水分及土壤物理性质的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(16): 77-81  
Xiong L J, Ma L, Liu M Z, Li Y N. Effect of earthworms on soil moisture changes and physical properties in agricultural fields under no-tillage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(16): 77-81 (in Chinese)
- [57] 蒋云峰, 李安琪, 刘俊男, 严婷, 窦笑萌, 王海萌. 免耕玉米秸秆还田频率与还田量对中型土壤动物群落的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(6): 234-243  
Jiang Y F, Li A Q, Liu J N, Yan T, Dou X M, Wang H M. Effects of maize straw mulching frequency and amount on soil mesofauna in a no-tillage system [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(6): 234-243 (in Chinese)
- [58] 马南, 钱瑞雪, 杨慧敏, 陈智文, 蒋云峰. 免耕留茬耕作对中小型土壤动物群落的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(5): 825-831  
Ma N, Qian R X, Yang H M, Chen Z W, Jiang Y F. Effects of no tillage and stubble mulch on soil meso-microfauna communities[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2018, 30(5): 825-831 (in Chinese)
- [59] 马立婷, 王洋, 田平, 杨斌, 隋鹏祥, 有德宝, 梅楠, 安俊朋, 张文可, 齐华. 耕作方式与玉米根系功能及其保护酶活性关系研究[J]. 玉米科学, 2017, 25(3): 59-64  
Ma L T, Wang F, Tian P, Yang B, Sui P X, You D B, Mei N, An J P, Zhang W K, Qi H. Relationship between tillage patterns and the function and protective enzyme activity of root in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2017, 25(3): 59-64 (in Chinese)
- [60] Ren L D, Nest T V, Ruyschaert G, D'Hose T, Cornelis W M. Short-term effects of cover crops and tillage methods on soil physical properties and maize growth in a sandy loam soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 192: 76-86
- [61] Nicholakis S A, Frame W H, Reiter M S, Stewart R D. Multi-year soil response to conservation management in the Virginia Coastal Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2025, 245: 106303
- [62] 周永杰, 谢军红, 李玲玲, 王林林, 罗珠珠, 王进斌. 长期少免耕与氮肥减量对全膜双垄沟播玉米产量及碳排放的调控作用[J]. 中国农业科学, 2021, 54(23): 5054-5067  
Zhou Y J, Xie J H, Li L L, Wang L L, Luo Z Z, Wang J B. Effects of long-term reduce/zero tillage and nitrogen fertilizer reducing on maize yield and soil carbon emission under fully plastic mulched ridge-furrow planting system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(23): 5054-5067 (in Chinese)
- [63] Wang C L, Ai S Z, Chen Q, Li J Y, Ding J H, Yang F. Effect of strip tillage widths on soil moisture, soil temperature and soil structure in northeast China[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2024, 12: 1404971

责任编辑: 申青苗



第一作者简介: 郑洪兵, 农学博士, 教授, 博士生导师。吉林农业大学高层次人才, 吉林省高层次农业领军人才, 美国 Michigan State University 国家公派访问学者, 国际土壤与耕作研究组织 (ISTRO) 成员, 国家自然科学基金评审专家, 教育部学位论文评审专家, 中国耕作学会理事, 吉林省耕作学会副秘书长, 吉林省保护性耕作专家组专家, 《干旱地区农业研究》编委, 同时兼任 *Soil & Tillage Research* 等 10 余个国际知名刊物审稿专家。先后主持、参加国家及省部级科研项目 30 余项, 制定吉林省地方标准 3 项, 获批专利 9 项, 发表 SCI 等论文 80 余篇, 编写教材、学术著作 8 部, 获国家及省部级科技奖励 14 项。