



高健, 纪东铭, 李春荣, 梅楠, 刘明, 苏荣九, 于颖, 于中雨, 徐盛, 王海枫, 徐婷婷, 由文佳, 高野, 张尧, 王易祥, 石森, 郑洪兵. 合理耕层构造对东北黑土农田土壤结构及有机碳含量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(12): 99-111.

GAO Jian, JI Dongming, LI Chunrong, MEI Nan, LIU Ming, SU Rongjiu, YU Ying, YU Zhongyu, XU Sheng, WANG Haifeng, XU Tingting, YOU Wenjia, GAO Ye, ZHANG Yao, WANG Yixiang, SHI Miao, ZHENG Hongbing. Effects of optimal tillage structure on soil structure and organic carbon in farmland of northeastern black soil[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(12): 99-111.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.09

## 合理耕层构造对东北黑土农田土壤结构及有机碳含量的影响

高健<sup>1</sup> 纪东铭<sup>2</sup> 李春荣<sup>3</sup> 梅楠<sup>1</sup> 刘明<sup>4</sup> 苏荣九<sup>1</sup> 于颖<sup>1</sup> 于中雨<sup>1</sup>  
徐盛<sup>1</sup> 王海枫<sup>1</sup> 徐婷婷<sup>1</sup> 由文佳<sup>1</sup> 高野<sup>1</sup> 张尧<sup>1</sup>  
王易祥<sup>1</sup> 石森<sup>1</sup> 郑洪兵<sup>1\*</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 136000;

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 132101)

**摘要** 为解决东北黑土长期重用轻养导致的结构恶化和有机碳流失问题,明确合理耕层构造(OT)对黑土理化性质及有机碳的调控效应,在吉林农业大学试验田设置OT与传统翻耕(PT)2个处理,测定土壤容重、孔隙度、团聚体稳定性及土壤有机碳质量分数(SOC),结合方差分析、冗余分析(RDA)及随机森林模型等方法解析合理耕层构造的土壤结构及SOC质量分数变化。结果表明:与PT相比,OT能够改善土壤结构,0~10 cm土层容重降低5.45%、孔隙度优化至56.24%,>0.250 mm团聚体比例、团聚体重量平均直径(MWD)、几何平均直径(GMD)分别提高18.89%、51.22%和68.42%,不稳定团聚体指数( $E_{LT}$ )降低64.5%;OT处理显著提升0~10、10~20和20~30 cm SOC质量分数( $P<0.05$ ),分别较PT提高48.07%、15.31%和10.74%。冗余分析结果显示,土壤容重、孔隙度、含水量及团聚体稳定性(MWD、GMD、>0.250 mm团聚体比例)是影响SOC的关键因子;随机森林模型结果表明,土壤深度、含水量及团聚体稳定性对SOC贡献显著,且团聚体稳定性可减少有机碳矿化损失。综上,合理耕层构造通过优化土壤三相比、降低容重与紧实度、增强团聚体稳定性,为有机碳固定创造适宜物理环境,是提升土壤固碳能力、改善黑土质量的有效措施,可为东北黑土地保护与可持续利用提供理论支撑。

**关键词** 合理耕层构造; 团聚体稳定性; 固碳; 黑土地保护

中图分类号 S153.6

文章编号 1007-4333(2025)12-0099-13

文献标志码 A

## Effects of optimal tillage structure on soil structure and organic carbon in farmland of northeastern black soil

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

(1. Faculty of Agronomy Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. Siping Agricultural Extension Station, Siping 136000, China;

3. College of Engineering Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

4. Jilin Agricultural Science and Technology University, Jilin 132101, China)

收稿日期: 2025-07-30

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);国家重点研发计划项目(2016YFD03002)

第一作者: 高健(ORCID: 0009-0004-3699-7815), 讲师, 主要从事耕作制度与土壤养分有效性关系研究, E-mail: gaojian\_0216@163.com

通讯作者: 郑洪兵(ORCID: 0000-0002-2870-3467), 教授, 主要从事耕作制度原理与设计研究, E-mail: hongbingzheng@126.com

**Abstract** To address the issues of structural degradation and organic carbon loss resulting from long-term intensive use and inadequate maintenance of Northeast black soil, this study aims to clarify the regulatory effects of optimal tillage (OT) on the physicochemical properties of black soil and organic carbon. Two treatments of OT and conventional tillage (PT) were set up in the experimental field of Jilin Agricultural University. Soil bulk density, porosity, aggregate stability, and soil organic carbon (SOC) content were measured, and the soil structure and SOC mass fraction changes of reasonable plow layer structure were analyzed using methods such as variance analysis, redundancy analysis (RDA) and random forest model. The results revealed that, compared to PT, the OT treatment can improve soil structure, with a 5.45% reduction in bulk density and an optimized porosity of 56.24% in the 0-10 cm soil layer. Additionally, the proportion of aggregates larger than 0.250 mm, mean weight diameter (MWD), and geometric mean diameter (GMD) increased by 18.89%, 51.22%, and 68.42%, respectively. The unstable aggregate index ( $E_{LT}$ ) decreased by 64.5%. The OT treatment significantly enhanced the SOC content at 0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30 cm soil depths ( $P < 0.05$ ), with increases of 48.07%, 15.31%, and 10.74% compared to PT, respectively. RDA indicated that soil bulk density, porosity, moisture content, and aggregate stability (MWD, GMD, proportion of aggregates greater than 0.250 mm) were key factors influencing SOC. The results of the random forest model further demonstrated that soil depth, moisture content, and aggregate stability significantly contributed to SOC, with aggregate stability mitigating organic carbon mineralization losses. In summary, the implementation of appropriate tillage structures optimizes soil properties, reduces bulk density and compaction, and enhances aggregate stability, thereby creating a suitable physical environment for organic carbon sequestration. This represents an effective measure for enhancing the carbon storage capacity and improving the quality of black soil, providing theoretical support for the protection and sustainable utilization of black soil Northeast China.

**Keywords** optimal tillage; soil aggregate stability; carbon storage; black soil protection

东北黑土区是中国最重要的商品粮基地,耕地面积约占全国总面积的21.5%,粮食产量占全国的23%,是国家粮食安全的“压舱石”<sup>[1]</sup>。然而,长期以来以传统翻耕(PT)和旋耕为主的耕作模式,重用轻养,已导致黑土生态功能严重退化,突出表现为“变瘦、变薄、变硬”<sup>[2]</sup>。这种退化直接表现为土壤结构破坏和有机碳(SOC)流失,严重威胁了黑土地的“耕地大熊猫”地位和国家粮食安全<sup>[3-4]</sup>。因此,探索可持续的耕作方式,扭转黑土退化趋势,尤其是恢复土壤结构和提升有机碳库,已是迫在眉睫的重大课题。

土壤结构,即土壤固相颗粒和团聚体的空间排列方式,是土壤肥力的物质基础,直接决定着土壤的水、肥、气、热协调能力<sup>[5]</sup>。在PT处理下,犁铧的机械破碎和高强度翻转直接破坏了土壤原有的团聚体结构<sup>[6]</sup>。同时,年复一年的耕作易在犁底下形成坚实、紧密的“犁底层”。这导致该层土壤容重显著增加,可达 $1.5\sim 1.7\text{ g/cm}^3$ ,总孔隙度降低,严重阻碍了根系下扎和水分渗透<sup>[7]</sup>。这种物理结构的恶化,直接加剧了土壤有机碳的流失<sup>[8]</sup>。SOC是土壤有机质的核心组分,其长期稳定积累,根本上依赖于团聚体提供的物理保护<sup>[9]</sup>。传统翻耕模式的双重

破坏性在于:一方面,它破坏了团聚体的“庇护所”,使有机碳暴露;另一方面,剧烈翻动土壤导致SOC被微生物加速矿化分解<sup>[6]</sup>。针对此问题,以免耕、深松为代表的保护性耕作措施被广泛应用。免耕和秸秆还田可通过增加碳输入和减少扰动,显著提高 $>0.250\text{ mm}$ 粒级团聚体含量<sup>[10]</sup>。深松则能有效打破犁底层,将容重降低 $0.1\sim 0.2\text{ g/cm}^3$ <sup>[11]</sup>。然而,这些单一措施往往难以兼顾所有问题,如长期免耕可能导致表层紧实度增加、春季地温低,而常规深松则扰动较大。

为系统性克服上述挑战,一种集成了宽窄行种植、条带深松、秸秆覆盖和苗带清理等技术的合理耕层构造(OT)体系被提出<sup>[12-13]</sup>。该体系旨在创建一种“虚实并存”、结构优良的耕层环境。其理论优势在于,它并非只针对单一问题,而是试图协同优化土壤物理环境,既通过条带深松打破犁底层、降低耕层容重与紧实度,又通过免耕覆盖保护表层土壤、提升团聚体稳定性,如重量平均直径(MWD)、几何平均直径(GMD),并最终协调土壤三相比<sup>[6]</sup>。

尽管已有研究证实了免耕和深松等单一措施对黑土结构和SOC的改良效果,但针对OT这一集成技术体系对黑土土壤结构和有机碳库的协同调

控机制及其背后的物理保护机理尚不明确。因此,本研究拟通过对比 OT 和 PT 处理对黑土农田土壤物理性质、团聚体结构及有机碳含量的影响,旨在揭示其作用机制,为黑土的保护和可持续利用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

本研究于吉林农业大学试验地(125°23' E, 43°48' N)开展试验(图 1)。试验区属于北温带大陆性半湿润季风气候,生长季降雨量约 300~400 mm,平均气温 6~8 °C,年积温 2 980 °C 左右,无霜期 145~160 d。试验地土壤类型为黑土,0~20 cm 土壤有机质含量 23.35 g/kg、全氮 1.31 g/kg、速效磷 53.25 mg/kg 和速效钾 149.15 mg/kg,pH 为 6.3。

### 1.2 试验设计

试验采用随机区组排列,设置传统翻耕(PT)和合理耕层构造(OT)2 种处理,3 次重复。供试玉米品种为‘远科 105WG’,种植密度 7.5 万株/hm<sup>2</sup>。试验于 2024 年 5 月 10 日使用免耕

精量播种机双行播种,同年 10 月 5 日收获。田间肥料施用总量为纯 N 220 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 kg/hm<sup>2</sup> 和 K<sub>2</sub>O 100 kg/hm<sup>2</sup>,其他田间管理均为当地常规管理。2 种处理的具体耕作措施如下:PT 处理采用栅栏式五铧犁将玉米秸秆深翻还田 25~35 cm,翻耕后重耙 1 次,并于玉米拔节期中耕(图 2(a))。OT 处理则采用 90 cm 宽行(深松带)与 40 cm 窄行(苗带)的配置(图 2(b)):春播前,利用条耕机进行秸秆归行并条耕出平整的窄行苗带种床;随后,免耕播种机在条耕带(即上年宽行位置)上同步完成播种与施底肥;玉米拔节期时,再对宽行区域深松 25 cm;秋季机械收获后,全部秸秆粉碎并覆盖地表。

### 1.3 土壤样品采集及分析

在玉米收获后,分别在 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 和 50~60 cm 深度采集土壤样品。每个小区采用 5 点采样法采集土壤样品<sup>[14]</sup>,将土样去除石块、根系和土壤动物等杂质,混合后形成一个复合样品。土壤样品采集后立即装入密封袋,带回实验室进行分析。

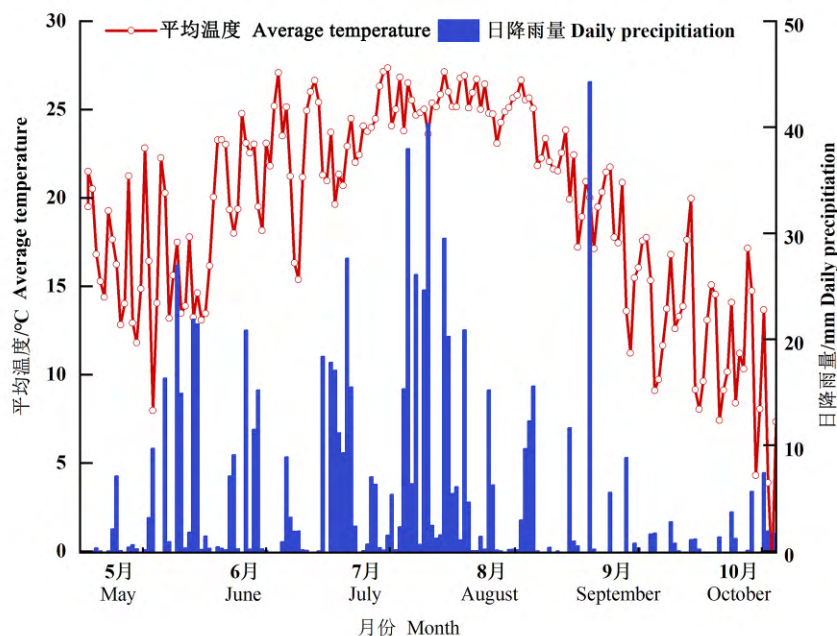


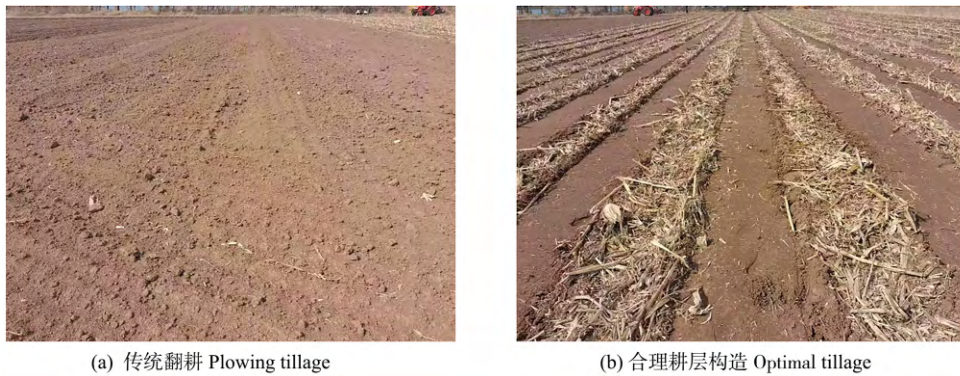
图 1 试验地日平均气温和日降水量

Fig. 1 Daily precipitation and temperature in experimental site

### 1.4 测定指标及方法

土壤有机碳含量采用重铬酸钾容量法进行测定<sup>[15]</sup>。使用 SC-900 土壤硬度仪(Spectrum

Technologies, Inc., USA)测定 0~45 cm 土层土壤紧实度(kg/cm<sup>2</sup>),采用环刀法测定土壤容重和土壤孔隙度。利用 DIK1150 三相仪(北京海富



(a) 传统翻耕 Plowing tillage

(b) 合理耕层构造 Optimal tillage

图2 不同耕作方式处理

Fig. 2 Different farming methods in experimental site

达科技有限公司)测定土壤三相,基于土壤三相数据,计算土壤三相比、三相比偏离值( $R$ )、广

义土壤结构指数(GSSI)和土壤三相结构距离(STPSD)<sup>[16]</sup>。

$$R = \sqrt{0.4 \times (X - 50)^2 + (Y - 25)^2 + 0.6 \times (Z - 25)^2} \quad (1)$$

$$GSSI = [(X_s - 25)X_L X_G]^{0.4769} \quad (2)$$

$$STPSD = \sqrt{(X_s - 50)^2 + (X_s - 50)(X_L - 50) + (X_L - 50)^2} \quad (3)$$

式中: $X$ 为土壤固体容积, $g/cm^3$ ;  $Y$ 为土壤液体容积, $g/cm^3$ ;  $Z$ 为土壤气体容积, $g/cm^3$ 。0.4为土壤固相数据所占有的权重;0.6为土壤气相数据所占有的权重。 $X_s$ 为固相体积百分比( $>0$ ),%;  $X_L$ 为液相体积百分比( $>0$ ),%;  $X_G$ 为气相体积百分比( $>0$ ),%。 $R$ 为所测土壤样品三相比与适宜状态下土壤三相比在空间距离上的差值, $R$ 值越小,土壤结构越接近理想状态。GSSI为广义土壤结构指数,0.4769为理想三相比比例体积百分比及最大值得出的参数;STPSD作为综合指标,可定量表达土壤三相结构偏离理想状态的趋势,其值越接近0,表明土壤结构越理想<sup>[17]</sup>。

### 1.5 统计分析

所有数据均采用SPSS 22.0软件进行方差分析(ANOVA)和多重比较,显著性检验用Duncan法进行( $P < 0.05$ )。使用Origin进行绘图。土壤有机碳与土壤物理性质之间的相关性分析采用Pearson相关系数,冗余分析(RDA)用于分析土壤物理性质、团聚体结构与有机碳含量之间的关系,基于土壤物理因子的土壤有机碳预测采用R version 4.3.2中的random forest软件包进行分析。

## 2 结果与分析

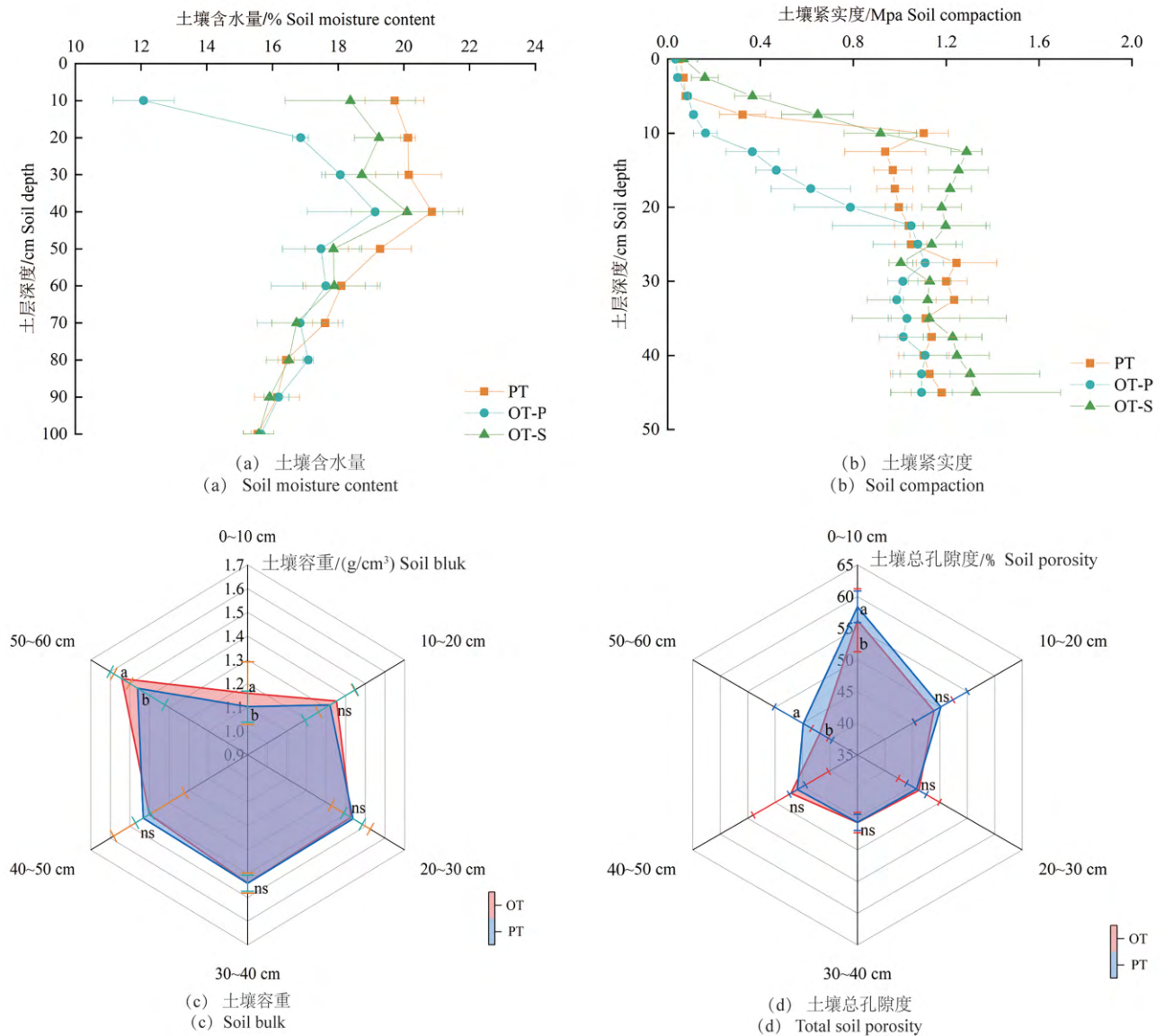
### 2.1 不同耕作方式对土壤物理性质的影响

与PT处理相比,合理耕层的苗带(OT-P)、休

闲带(OT-S)均减少土壤含水量和土壤紧实度(图3(a)和(b))。不同土层深度,土壤水分含量随着土层加深呈先增加后降低的趋势(图3(a))。0~40 cm土层,所有处理土壤含水量均随土层深度的增加而增加;40~60 cm土层所有处理土壤含水量随土层深度的增加呈现降低趋势。不同土层间,土壤紧实度在0~30 cm土层逐渐增加,后随着土层的加深趋于稳定(图3(b))。不同处理在不同土层间变化趋势存在显著差异。0~22.5 cm土层,土壤紧实度苗带显著高于PT处理( $P < 0.05$ ),休闲带低于PT处理。22.5~45 cm土层的2个处理间差异不显著。与传统耕作相比,合理耕层处理显著提高了0~10以及50~60 cm土层的土壤容重,显著降低该土层中的土壤孔隙度(图3(c)和(d), $P < 0.05$ )。0~10 cm土层中,合理耕层的土壤容重比传统耕作处理高5.45%,孔隙度比传统耕作处理低3.65%。50~60 cm土层中,合理耕层的土壤容重比传统耕作处理高2.27%;合理耕层处理的孔隙度比传统耕作处理低2.51%,在10~40 cm土层中不同处理间容重和孔隙度变化差异不显著。

### 2.2 耕作方式对土壤结构的影响

耕作方式、土层深度及其两者的交互作用均对土壤固相、液相和气相产生了显著影响(图4)。2种处理在不同土层表现出明显差异(表1)。在表层(0~20 cm),OT处理主要扮演了“保水”角



小写字母表示在 0.05 水平上差异显著, ns 表示差异不显著。

Lowercase letters indicate significant differences at the 0.05 probability level, ns represent no significant differences ( $P>0.05$ ).

图 3 不同处理下土壤物理性质变化

Fig. 3 Effects of different treatments on soil physical properties

色,显著提高了土壤含水量。具体表现为,0~10 cm 土层,OT 处理的固相占比较 PT 处理显著降低了约 9.6% ( $P<0.05$ ),而液相占比则显著高出约 19.0%;10~20 cm 土层,OT 处理的固相占比较 PT 仍显著偏低,液相占比则继续显著高出约 11.5% ( $P<0.05$ ),同时其广义土壤结构指数也显著提升了约 9.5%。在犁底层(20~40 cm),OT 处理发挥了“破坚、增孔、调气”的核心作用,通过降低土壤固相比例,显著增加了土壤的气相含量,并同时提升了液相含量。在 20~

30 cm 土层,OT 处理的固相占比较 PT 显著降低 ( $P<0.05$ ),气相占比显著高于 PT,增幅达 73% 以上;此层 GSSI 显著高于 PT 约 16.1%,且结构距离显著优于 PT,降低了约 16.2%。该趋势在 30~40 cm 深度延续,OT 处理的固相占比较 PT 显著降低了约 11.6%,并伴随着液相与气相占比分别显著高于 PT 约 4.9% 和 64.7% ( $P<0.05$ )。在 40~50 cm 土层,这种结构优化的效应依然存在。尽管三相组成的差异不再显著,但 OT 处理的 STPSD 仍显著低于 PT 约 11.3%。50~60 cm

深层,趋势发生反转,OT处理的固相占比转为显著高于PT约3.3%,气相占比则显著低于PT约

24.6%,同时OT的STPSD转为显著高于PT约9.7%。

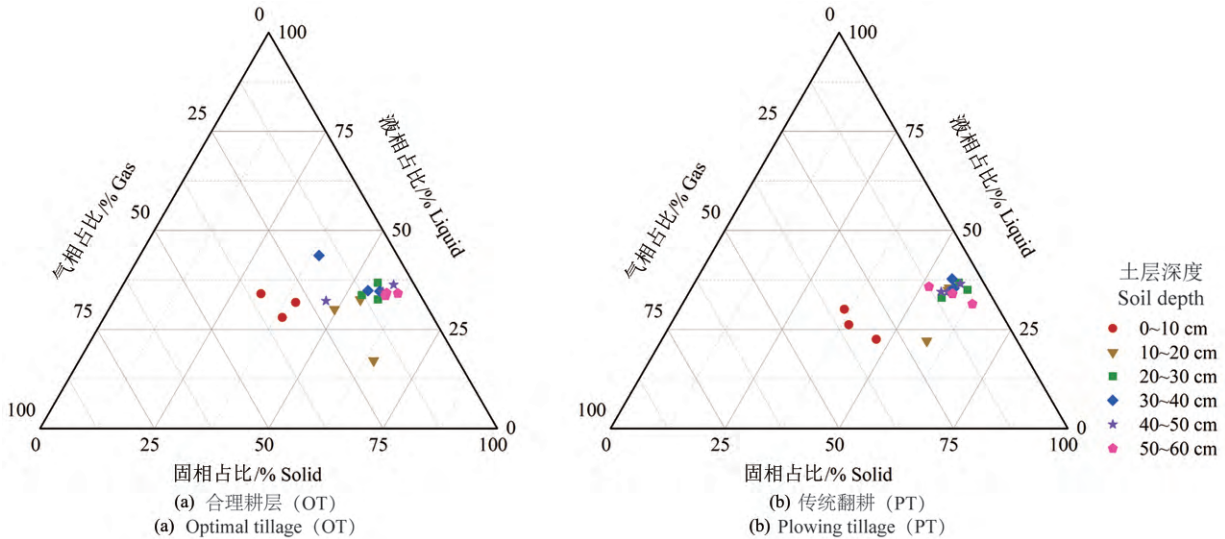


图4 不同深度下土壤三相的变化情况

Fig. 4 Effect of different treatments on soil three phase.

表1 不同处理对土壤三相比的影响

Table 1 Effect of different treatments on soil three phrase ratio

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	固:液:气 Solid:Liquid:Gas	R	广义土壤结构指数 Generalized soil structure index	结构距离 Soil three-phase structural distance
0~10	传统翻耕	1.00:0.65:0.81	9.34±3.54a	91.59±6.36a	9.17±3.82a
	合理耕层	1.00:0.85:0.87	12.02±4.00a	84.93±12.67a	11.63±3.96a
10~20	传统翻耕	1.00:0.54:0.21	12.88±6.95a	84.96±3.97b	11.05±5.95a
	合理耕层	1.00:0.48:0.31	10.33±3.67a	93.03±4.59a	9.08±3.92a
20~30	传统翻耕	1.00:0.60:0.12	17.90±3.45a	70.91±3.11b	15.65±1.11a
	合理耕层	1.00:0.62:0.18	15.35±2.60a	82.34±6.84a	13.12±2.20b
30~40	传统翻耕	1.00:0.63:0.13	18.02±1.52a	74.15±4.09b	15.44±1.06a
	合理耕层	1.00:0.75:0.24	17.48±3.03a	82.04±3.57a	14.42±1.16b
40~50	传统翻耕	1.00:0.62:0.15	17.02±2.49a	76.39±9.89a	14.64±2.27a
	合理耕层	1.00:0.63:0.21	15.16±6.36a	78.18±18.10a	12.99±1.02b
50~60	传统翻耕	1.00:0.59:0.15	16.60±2.06a	76.68±3.69a	14.61±2.88a
	合理耕层	1.00:0.57:0.11	17.95±1.40a	70.52±2.21b	16.03±1.40a

注:同列数据不同字母表示差异显著(P<0.05),相同字母表示差异不显著(P>0.05)。下同。

Note: Within the same column, different letters represent significant differences (P<0.05), while the same letters represent no significant differences (P>0.05). The same below.

### 2.3 合理耕层构造对团聚体及稳定性的影响

不同耕作方式处理对土壤团聚体质量分数存在显著影响(图5)。与PT处理相比,OT处理的土

壤粒径分布更加均匀,粒径<0.053 mm的团聚体比例较低,仅为2.6%~6.0%。在0~10 cm土层深度,OT处理的粒径<0.250 mm的团聚体比例为

2.7%，比 PT 处理低 12.3%；粒径 0.250~2.000 mm 的团聚体比例为 11.6%，比 PT 处理高 15.2%；

粒径 >0.250 mm 的团聚体比例为 85.7%，比 PT 处理高 10.1%。

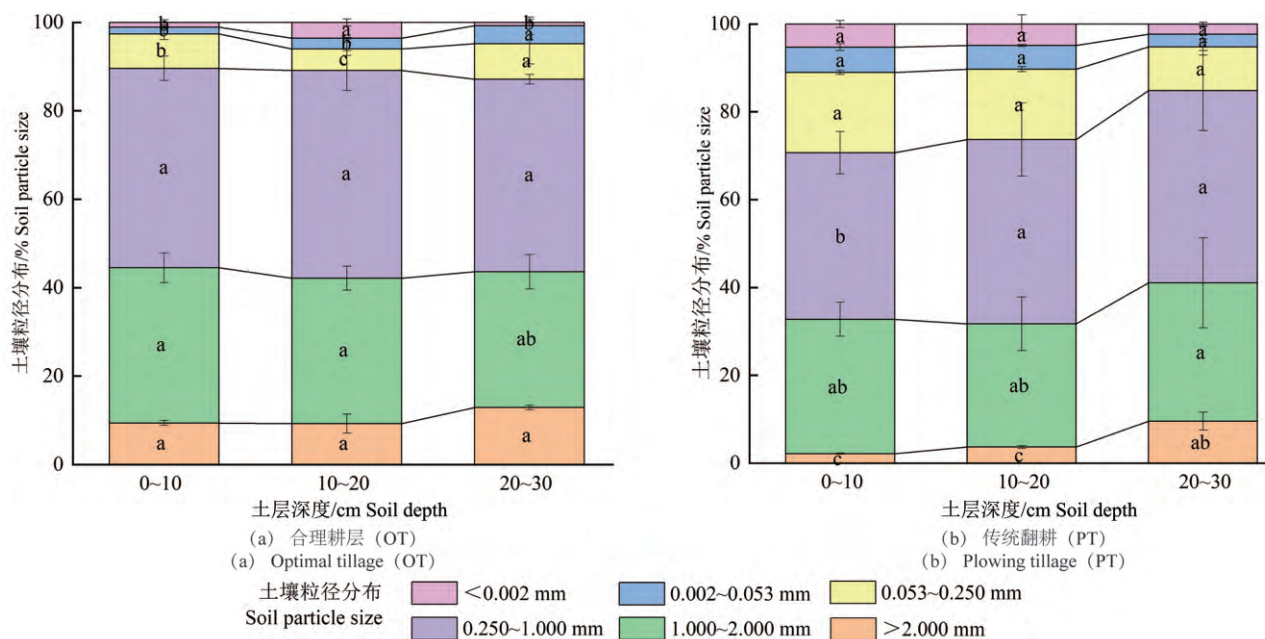


图 5 不同处理下土壤团聚体质量分数情况

Fig. 5 Effect of different treatments on soil particle size

在 0~30 cm 土层, OT 处理显著提升了土壤团聚体的稳定性(表 2)。这种改良效应在 0~10 cm 土层最为显著( $P < 0.05$ )。与 PT 处理相比, OT 处理的重量平均直径(MWD)和几何平均直径(GMD)分别显著提高了 51.2% 和 68.4%；>0.250 mm 的大团聚体比例( $R_{0.25}$ )也显著增加了 26.7%，而不稳定团聚体指数( $E_{LT}$ )则相应的显著降低了 64.5%。在 10~20 cm 土层, OT 处理的优点得以延续。其 MWD、GMD 和  $R_{0.25}$  相较 PT 处理仍分别显著高出

39.1%、28.8% 和 20.9%， $E_{LT}$  也显著降低了 58.6% ( $P < 0.05$ )，表明 OT 对土壤结构的优化效果已渗透至耕层中部。进入 20~30 cm 土层, OT 处理的 MWD 和 GMD 仍较 PT 处理显著高出 11.8% 和 10.7%，同时  $E_{LT}$  也显著降低了 15.1% ( $P < 0.05$ )，表明 OT 处理对犁底层团聚体稳定性的积极影响。总体来看, OT 处理在 0~30 cm 各土层均表现出更高的 MWD、GMD 和  $R_{0.25}$ ，以及更低的  $E_{LT}$  和 D 值，说明 OT 处理能有效增强土壤结构稳定性。

表 2 不同处理下土壤团聚体结构稳定性

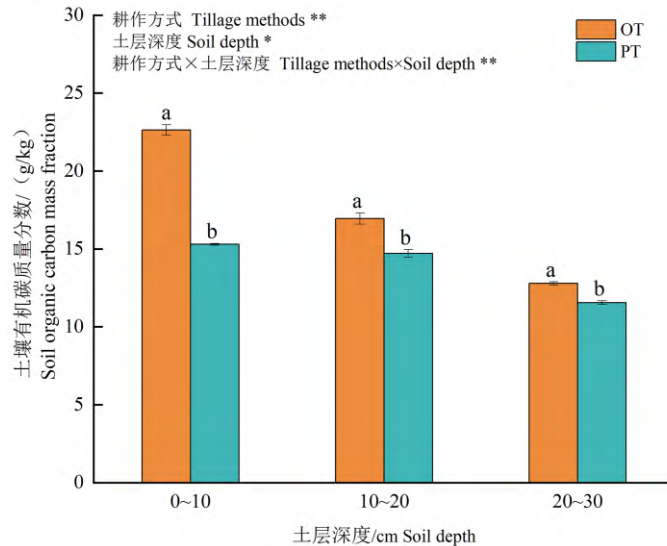
Table 2 Effect of different treatments on soil structure stability

土层深度/cm Soil depth	处理 Treatment	重量平均直径 Mean weight diameter	几何平均直径 Geometric mean diameter	>0.250 mm 团聚体 Aggregate larger 0.250 mm	不稳定团聚体指数 Unstable aggregate index	团聚体分形维数 Fractal dimension
0~10	传统翻耕	0.82±0.03c	0.57±0.03b	70.71±1.35b	29.29±1.34c	2.93±0.02a
	合理耕层	1.24±0.05a	0.96±0.06a	89.60±1.23a	10.40±1.23a	2.58±0.06b
10~20	传统翻耕	0.87±0.04c	0.59±0.04b	73.71±2.47c	26.29±2.47a	2.88±0.04a
	合理耕层	1.21±0.11a	0.76±0.04a	89.10±0.64a	10.90±0.65c	2.74±0.02b
20~30	传统翻耕	1.19±0.18ab	0.84±0.13ab	84.84±3.18ab	15.16±3.18bc	2.70±0.03b
	合理耕层	1.33±0.03a	0.93±0.08a	87.13±3.50a	12.87±3.50c	2.52±0.17c

## 2.4 合理耕层构造对黑土有机碳质量分数的影响

不同耕作方式、土层深度及其交互作用对SOC质量分数存在显著影响(图6)。与PT相比,OT处理显著提高了土壤有机碳含量。不同土层深度下,SOC质量分数随着土层的加深逐渐降低。不同耕作方式在不同土层深度间也表现出

明显差异。在0~10 cm土层深度,OT处理的SOC质量分数为22.64 g/kg,比PT处理高48.1%;10~20 cm深度,OT处理的SOC质量分数为16.95 g/kg,比PT处理高15.3%;在20~30 cm深度,OT处理的SOC质量分数为12.79 g/kg,比PT处理高10.7%。



\*和\*\*分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。

\* and \*\* indicate significant differences at the 0.05 and 0.01 probability level, respectively.

图6 不同耕作方式和土层深度对土壤有机碳质量分数的影响

Fig. 6 Effect of different tillage methods and soil layer depth on soil organic carbon content

## 2.5 土壤有机碳与物理性质及团聚体稳定性之间的关系

相关性分析结果表明土壤有机碳质量分数与土壤容重、孔隙度、团聚体结构稳定性等物理性质之间存在显著相关(图7(a)和(b))。在OT处理下,SOC含量与土壤容重呈极显著负相关( $r=-0.76$ ,  $P<0.01$ ),与孔隙度呈极显著正相关( $r=0.76$ ,  $P<0.01$ ),与MWD呈极显著负相关( $r=-0.78$ ,  $P<0.01$ )。在PT处理下,SOC质量分数与土壤容重呈极显著负相关( $r=-0.77$ ,  $P<0.01$ ),与孔隙度呈极显著正相关( $r=0.77$ ,  $P<0.01$ ),但与MWD的相关性较弱( $r=0.57$ ,  $P>0.05$ )。这表明OT处理能够通过改善土壤物理性质和团聚体结构,促进土壤有机碳的积累。

通过对土壤物理性状与土壤结构间的冗余分析表明(图7(c)),土壤物理性质(容重、孔隙度、含水量)和团聚体结构稳定性(MWD、GMD、 $R_{0.25}$ )是影响土壤有机碳质量分数的主要因素。OT处理能

够更有效地通过改善土壤物理和结构特性,促进土壤有机碳的固定和保存。

在本研究中,随机森林分析被用来评估土壤物理性质和团聚体结构指标对土壤有机碳含量的综合影响(图7(d)),通过随机森林分析中各个指标SOC含量的贡献度,以均方误差(MSE)的增加百分比表示。结果表明,土壤深度、土壤含水量、土壤团聚体结构稳定性指标对SOC质量分数有显著影响。

## 3 讨论与结论

### 3.1 耕作方式对土壤物理性质及有机碳的影响

土壤物理结构是土壤功能的物质基础,而犁底层是限制黑土生产力的关键障碍<sup>[18]</sup>。本研究,传统翻耕虽然也进行了秸秆还田(深翻25~35 cm),但其耕作方式涉及犁铧的反复机械碾压和镇压,导致其在20~30 cm犁底层结构严重恶化。PT处理在该层固相占比高达58.08%,气相占比仅为6.99%,土壤处于高度密实和通气不良的状态。相

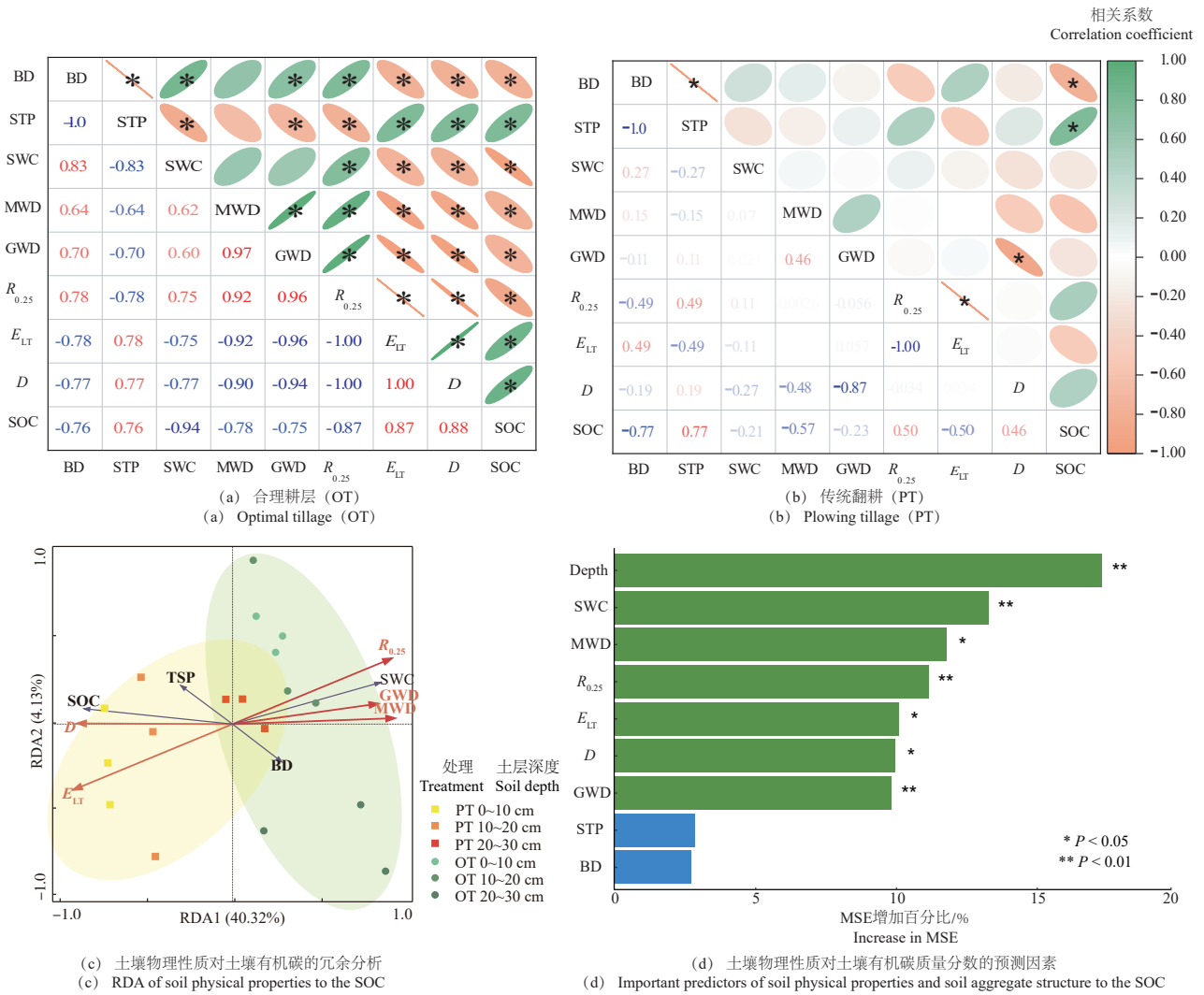


图 7 土壤物理性状对 SOC 的贡献  
Fig. 7 The contribution of soil physical properties to SOC

比之下,合理耕层构造中的条带深松环节(在 90 cm 宽行深松 25 cm)精准地打破了这一坚实层。其效果在 20~30 cm 土层尤为显著:气相占比显著提高至 12.14%,增幅高达 73.7%;同时,GSSI 从 70.91 提高到 82.34,STPSD 从 15.65 降低到 13.12,这组数据定量地证明了 OT 处理使犁底层的土壤三相结构显著摆脱了失衡状态,更接近理想的“土-水-气”三相比。同时,本研究表明,合理耕作措施能够显著提高土壤团聚体的重量平均直径和几何平均直径,同时增加了 >0.250 mm 的团聚体比例,降低了

不稳定团聚体指数。稳定的团聚体结构不仅降低了有机碳的矿化率,还提供了物理保护,从而延长了有机碳在土壤中的停留时间<sup>[19]</sup>。合理耕层处理中的条带深松不仅是机械破坚,它还结合了宽窄行种植。该模式为根系创造了“虚实并存”的环境,引导根系向疏松、通气良好、养分富集的宽行(深松带)拓展<sup>[12-13]</sup>,实现了“机械破坚+生物造孔+免耕护孔”的协同效应。深松打破犁底层建立土壤水库,旋耕碎土既平整土壤表面又接纳秋雨备翌年春用,同时又切断了土壤表层毛细管避免了土壤深层

水分蒸发,为作物生长创造了一个良好的耕层结构<sup>[12-13]</sup>;其优势在于能够显著降低土壤容重,提高孔隙度和含水量,优化土壤三相比<sup>[13,20-21]</sup>。宽窄行种植后植株地上及根系生物量变多<sup>[22]</sup>,秸秆还田量变多,根系的碳投入也变多,经过长期种植转化为土壤有机碳的组成部分<sup>[23]</sup>,改善土壤结构。

众多研究表明,合理耕层处理也是提升东北黑土有机碳的有效方式<sup>[12]</sup>。本研究表明,合理耕层构造能通过降低土壤容重,增加土壤孔隙度,有效提升土壤有机碳含量。此外,也有研究表明宽窄行交替种植条带深松处理显著降低0~20 cm土壤容重,增加非毛管孔隙度<sup>[24]</sup>改善了土壤通气性和保水性,增加微生物的活动,其活性的提升促进了有机碳的固定。合理耕层构造可改善作物根际土壤透气性,而根际透气性的提升不仅能促进根系生长(如增加根系生物量、延长根系寿命),还能为根系分泌有机物质(如根际分泌物、残根)提供更优的释放与留存环境。根系来源的有机物质作为土壤有机碳的重要输入源,其总量增加进一步为有机碳固定提供充足底物,形成“根际环境优化-根系生长增强-有机碳输入增加-有机碳固定强化”的正向循环。本研究表明合理耕层构造能够改善作物根际土壤透气性,优化土壤环境,有利于根系生长和有机物质的输入,间接促进了有机碳的固定。

### 3.2 耕作方式对土壤团聚体及稳定性的影响

本研究表明 OT 处理使 0~10 cm 表层的 MWD 提高了 51.2%, GMD 提高了 68.4%, 同时  $E_{LT}$  大幅降低了 64.5%; PT 处理下的表层土壤结构则极其不稳定, MWD 仅为 0.82,  $E_{LT}$  高达 29.29%。有研究发现,免耕、间隔深松和深翻均显著提高了黑土耕层和亚耕层 >0.250 mm 粒级团聚体含量以及土壤结构稳定性<sup>[25]</sup>。在这些耕作方式下,免耕和间隔深松增加了超大团聚体的稳定性,翻耕促进了 0.250~2.000 mm 粒级团聚体含量的增加。这种显著差异的根源在于 OT 处理的秸秆还田方式(覆盖)与 PT 处理(翻耕)对于土壤扰动原理不同。PT 处理的“秸秆翻埋”将高 C:N 的秸秆置于厌氧或半厌氧的犁底层(20~30 cm 层气相仅 6.99%),分解缓慢,且对表层团聚体的构建贡献甚微<sup>[25]</sup>。更重要的是,PT 处理的翻耕本身就是一种高强度的物理扰动,使团聚体不断被破坏和重组。相反,OT 处理的“秸秆覆盖”结合“免

耕”为表层土壤的好氧微生物(特别是真菌)和土壤动物<sup>[26-27]</sup>提供了“食料+生境+保护”的有利条件<sup>[18]</sup>。真菌在分解木质纤维素时会产生大量菌丝和胞外多糖,这些是构建大团聚体最强效的“生物胶水”<sup>[19]</sup>。此外,OT 处理中的条带深松还可能克服了长期单一免耕导致的表层压实现象<sup>[12-13]</sup>,通过改善局部通气性,进一步优化了表层生境<sup>[28-29]</sup>。通过“秸秆覆盖(输入)+免耕(保护)+深松(破压实)”的集成协同效应,达到了本研究中团聚体稳定性的叠加提升(MWD+51.2%),其效果远优于任何采用翻耕或旋耕的单一还田措施。

### 3.3 耕作方式下土壤有机碳与土壤物理性质的协同效应

本研究中,OT 处理使 0~10 cm 表层 SOC 含量显著提高了 48.1%, 10~20 和 20~30 cm 土层也分别提高了 15.3% 和 10.7%。若是单纯的秸秆还田若配合翻耕(如本研究的 PT),其碳输入会被剧烈的物理扰动和氧化矿化所抵消<sup>[5]</sup>;单纯的免耕虽能保护 SOC,但若无秸秆输入和深松破除压实,其固碳潜力也相对有限。因此,OT 处理实现了三重固碳协同:1)持续的碳输入(秸秆覆盖):秸秆覆盖在地表,为表层土壤提供了持续的有机物料来源<sup>[9]</sup>;2)高效的物理保护(免耕效应):免耕体系通过构建稳定的大团聚体,为新鲜有机质提供了高效的物理包裹,使其免受微生物和酶的快速分解<sup>[24]</sup>;3)深层环境优化(深松效应):条带深松优化了犁底层物理结构,这不仅促进了深层根系碳输入,还可能通过改善土壤水分和空气条件<sup>[30]</sup>,提高了微生物的碳利用效率(Carbon use efficiency, CUE),即微生物将更多碳转化为稳定的微生物残体,而非呼吸为  $CO_2$ 。因此,OT 处理的固碳效应是“高输入”“高保护”“高效率”的集成结果,这解释了其固碳增幅为何优于许多单一措施。

东北地区水热变异性大,春旱和夏雨频发。在 PT 处理的翻耕模式下,土壤裸露,SWC 剧烈波动(春季蒸发剧烈,夏季易结皮径流),这种“干-湿”胁迫严重抑制了微生物活性<sup>[3]</sup>。而在 OT 处理的秸秆覆盖模式下,覆盖层起到了关键的水热缓冲作用<sup>[12-13]</sup>。它在春季减少蒸发(保墒),在夏季减缓雨滴击打(护结构、促入渗)。本研究中,OT 处理在 0~10 cm 液相比 PT 处理高出 19.0% 也证实了其优越的保水能力。这种由秸秆覆盖创造的“持续稳定

的 SWC”, 是维持微生物(特别是真菌)活性、促进其分泌“胶结剂”并形成稳定团聚体(高 MWD)的先决条件<sup>[31-32]</sup>。

本研究的 RDA 和随机森林模型进一步揭示了 OT 处理下固碳的核心驱动因子: SWC 和 MWD, 但这一结果并非只包含 SWC 和 MWD 这 2 个独立因子, 而是揭示了一个紧密耦合的、由 OT 处理耕作模式驱动的调控机制。在该机制中, OT 处理的秸秆覆盖措施首先通过缓冲外界环境波动, 实现了土壤含水量的持续稳定; 这种稳定的水热条件是促进微生物(特别是真菌)活性、增强其分泌“生物胶结剂”的先决条件; 进而, 生物胶结作用的强化显著提升了团聚体的重量平均直径; 最终, 稳定的大团聚体通过物理包裹作用<sup>[33-35]</sup>实现了对土壤有机碳的高效保护<sup>[36]</sup>。因此, SWC 的稳定可被视为启动这一“水分-生物-物理”正反馈循环的关键起始点<sup>[32,35,37]</sup>。

## 参考文献 References

- [1] 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)
- [2] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341-1358  
Han X Z, Zou W X. Research perspectives and footprint of utilization and protection of black soil in Northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(6): 1341-1358 (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 王文俊, 梁爱珍, 张延, 陈学文, 黄丹丹. 黑土区保护性耕作土壤有机碳动态的模型模拟研究[J]. 中国农业科学, 2024, 57(10): 1943-1960  
Wang W J, Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, Huang D D. Model simulation research of soil organic carbon dynamics of long-term conservation tillage in black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(10): 1943-1960 (in Chinese)
- [5] Wang B W, Zhao X L, Wang X, Zhang Z X, Yi L, Hu S G. Spatial and temporal variability of soil erosion in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2015[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(6): 370
- [6] 郭孟洁, 李建业, 李健宇, 齐佳睿, 张兴义. 实施 16 年保护性耕作下黑土土壤结构功能变化特征[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 108-118  
Guo M J, Li J Y, Li J Y, Qi J R, Zhang X Y. Changes of soil structure and function after 16-year conservation tillage in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(22): 108-118 (in Chinese)
- [7] 王帅. 提升黑土地质量的保护性耕作技术模式[J]. 农业工程技术, 2023, 43(28): 67-68  
Wang S. Conservation tillage technology model to improve the quality of black land[J]. *Applied Engineering Technology*, 2023, 43(28): 67-68 (in Chinese)
- [8] Pöhlitz J, Rücknagel J, Koblenz B, Schlter S, Vogel H J, Christen O. Computed tomography and soil physical measurements of compaction behaviour under strip tillage, mulch tillage and no tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 205-216
- [9] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 王志强. 秸秆还田阻控黑土侵蚀机理及效应[J]. 土壤与作物, 2022, 11(2): 115-128  
Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, Wang Z Q. Mechanisms and benefits of straw return in mitigating black soil erosion[J]. *Soils and Crops*, 2022, 11(2): 115-128 (in Chinese)
- [10] Mayer S, Wiesmeier M, Sakamoto E, Hübner R, Cardinael R, Kühnel A, Kögel-Knabner I. Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 323: 107689
- [11] 白伟, 孙占祥, 郑家明, 郝卫平, 刘勤, 刘洋, 冯良山, 蔡倩. 虚实并存耕层提高春玉米产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 81-90  
Bai W, Sun Z X, Zheng J M, Hao W P, Liu Q, Liu Y, Feng L S, Cai Q. Furrow loose and ridge compaction plough layer improves spring maize yield and water use efficiency [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21): 81-90 (in Chinese)
- [12] 迟仁立, 左淑珍. 耕层土壤虚实并存效应及其应用技术(一)[J]. 现代化农业, 1988(8): 2-3  
Chi R L, Zuo S Z. Co-existence effect of excess and deficiency in topsoil and its application technology (I)[J]. *Modernizing Agriculture*, 1988(8): 2-3 (in Chinese)
- [13] 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, 16(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, 16(4): 13-17 (in Chinese)
- [14] 张赛, 王龙昌, 黄召存, 赵琳璐, 杜娟, 贾会娟. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 226-231, 252  
Zhang S, Wang L C, Huang Z C, Zhao L L, Du J, Jia H J. Effects of conservation tillage on active soil organic carbon composition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 226-231, 252 (in Chinese)
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Bao S D. *Soil Agricultural Chemical Analysis*[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000
- [16] 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)
- [17] 王恩焄, 赵雨森, 陈祥伟. 基于土壤三相的广义土壤结构的量化表达[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2067-2072
- Wang E H, Zhao Y S, Chen X W. Quantification of generalized soil structure based on soil three phases[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2067-2072 (in Chinese)
- [18] 顾嘉诚, 王家平, 张增成, 蒋贵菊, 李鲁华, 程志博. 耕作方式对土壤团聚体稳定性、土壤质量和玉米产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2025, 41(17): 78-87
- Gu J C, Wang J P, Zhang Z C, Jiang G J, Li L H, Cheng Z B. Effect of tillage practices on soil aggregate stability, soil quality and maize yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2025, 41(17): 78-87 (in Chinese)
- [19] 赵珊珊, 王百群. 长期不同土地管理与施肥策略对土壤有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J/OL]. *植物营养与肥料学报*, 1-14[2025-06-28]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3996.S.20250828.0953.002>
- Zhao S S, Wang B Q. Effects of long-term land management and fertilization strategies on soil organic carbon fractions and aggregate stability[J/OL]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1-14[2025-06-28]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3996.S.20250828.0953.002> (in Chinese)
- [20] 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: 1164-1171
- [21] 刘武仁, 边少锋, 郑金玉, 刘凤成, 冯艳春, 杨双, 张丽华, 朱晓丽, 何志, 李勇, 裴攸, 曹雨, 高德全. 玉米宽窄行种植的土壤环境变化研究[J]. *玉米科学*, 2002(4): 52-55
- Liu W R, Bian S F, Zheng J Y, Liu F C, Feng Y C, Yang S, Zhang L H, Zhu Z L, He Z, Li Y, Pei Y, Cao Y, Gao D Q. Study on the changes to soil environment in maize planted in narrow/wide form[J]. *Maize Science*, 2002(4): 52-55 (in Chinese)
- [22] 刘朝巍, 谢瑞芝, 张恩和, 刘武仁, 李少昆. 玉米宽窄行交替休闲种植根系分布规律研究[J]. *玉米科学*, 2009, 17(2): 120-123
- Liu C W, Xie R Z, Zhang E H, Liu W R, Li S K. Study on root distribution of maize with planting technique in wide/narrow row alternation[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, 17(2): 120-123 (in Chinese)
- [23] Poeplau C, Don A, Schneider F. Roots are key to increasing the mean residence time of organic carbon entering temperate agricultural soils[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(19): 4921-4934
- [24] Tian J, Dungait J A J, Hou R X, Deng Y, Hartley I P, Yang Y F, Kuzyakov Y, Zhang F S, Cotrufo M F, Zhou J Z. Microbially mediated mechanisms underlie soil carbon accrual by conservation agriculture under decade-long warming[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 377
- [25] 隋鹏祥, 罗洋, 郑洪兵, 李瑞平, 王浩, 袁野, 郑金玉, 刘武仁. 长期耕作对农田黑土团聚体和有机碳稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1853-1861
- Sui P X, Luo Y, Zheng H B, Li R P, Wang H, Yuan Y, Zheng J Y, Liu W R. Effects of long-term tillage practices on the stability of soil aggregates and organic carbon in black soil farmland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(7): 1853-1861 (in Chinese)
- [26] 周思琪, 罗洋, 隋鹏祥, 王浩, 任英, 郑洪兵, 李瑞平, 赵宇, 袁野, 田圣陶, 傅民杰, 郑金玉, 刘武仁. 长期宽窄行交替种植条带深松对农田黑土理化特性和玉米产量的影响[J]. *玉米科学*, 2024, 32(9): 70-77
- Zhou S Q, Luo Y, Sui P X, Wang H, Ren Y, Zheng H B, Li R P, Zhao Y, Yuan Y, Tian S T, Fu M J, Zheng J Y, Liu W R. Effects of long-term wide-narrow row alternative planting with strip subsoiling tillage on physicochemical properties and maize yield in farmland black soil [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2024, 32(9): 70-77 (in Chinese)
- [27] 卢宪菊, 李子忠, 段雯晓, 夏盛. 宽窄行种植对东北风沙土区玉米水分利用及产量的影响[J]. *土壤通报*, 2014, 45(4): 939-946
- Lu X J, Li Z Z, Duan W X, Xia S. Yield and water use of maize with narrow-wide row planting in aeolian sandy soil of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(4): 939-946 (in Chinese)
- [28] Wang Y H, Pang J W, Zhang M J, Tian Z H, Wei T, Jia Z K, Ren X L, Zhang P. Is adding biochar be better than crop straw for improving soil aggregates stability and organic carbon contents in film mulched fields in semiarid regions: Evidence of 5-year field experiment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 338: 117711
- [29] 白懿杭, 侯赛赛, 赵玉璞, 张瑞芳, 张爱军, 李旭光, 王鑫鑫. 农田土壤有机碳积累和团聚体稳定过程及其相互作用关系[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(7): 208-220
- Bai Y H, Hou S S, Zhao Y P, Zhang R F, Zhang A J, Li X G, Wang X X. Soil organic carbon accumulation and aggregate stabilization processes and their interactions[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(7): 208-220 (in Chinese)
- [30] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103
- [31] 侯海鹏, 丁在松, 马玮, 李从锋, 赵明. 条带深松耕作方式对密植夏玉米产量性能的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 23(6): 71-75, 83
- Hou H P, Ding Z S, Ma W, Li C F, Zhao M. Effect of strip sub-soiling tillage system on summer maize yield performance in high planting density [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(6): 71-75, 83 (in Chinese)
- [32] 周正虎, 刘琳, 侯磊. 土壤有机碳的稳定和形成: 机制和模型[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(10): 11-22
- Zhou Z H, Liu L, Hou L. Soil organic carbon stabilization and formation: Mechanism and model [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(10): 11-22 (in Chinese)
- [33] Neeraj, Malviya S, Pallavi K N, Deori C, Kumar K, Ishaq T, Gouthami D, Gourkhede D P H, Kashyap M, Das S. The impact of conservation agriculture on soil carbon sequestration and climate mitigation: A comprehensive review [J]. *International Journal of Research in Agronomy*, 2025, 8(1): 151-158
- [34] 李景, 吴会军, 武雪萍, 蔡典雄, 姚宇卿, 吕军杰, 郑凯, 刘志平. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 378-386
- Li J, Wu H J, Wu X P, Cai D X, Yao Y Q, Lu J J, Zheng K, Liu Z P. Impact

- of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 378-386 (in Chinese)
- [35] 周莺, 杨雅丽, 张阳, 郑甜甜, 吕付泽, 解宏图, 李向祎. 免耕不同秸秆覆盖量对土壤有机碳库和碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2025, 56(3): 745-754  
Zhou Y, Yang Y L, Zhang Y, Zheng T T, Lyu F Z, Xie H T, Li X Y. Effects of different amounts of straw mulching with No-tillage on soil organic carbon pool and carbon management index[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(3): 745-754 (in Chinese)
- [36] 王新兵, 侯海鹏, 周宝元, 孙雪芳, 马玮, 赵明. 条带深松对不同密度玉米群体根系空间分布的调节效应[J]. *作物学报*, 2014, 40(12): 2136-2148  
Wang X B, Hou H P, Zhou B Y, Sun X F, Ma W, Zhao M. Effect of strip subsoiling on population root spatial distribution of maize under different planting densities[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(12): 2136-2148 (in Chinese)
- [37] 袁玉玉, 王洋, 崔政武, 徐光辉, 王楠, 徐林浩. 黑土区不同耕作方式对土壤有机碳及其组分的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(7): 3183-3191  
Yuan Y Y, Wang Y, Cui Z W, Xu G H, Wang N, Xu L H. The effect of different tillage methods on soil organic carbon and its components in the black soil area of Northeast China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(7): 3183-3191 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



**第一作者简介:** 高健, 博士, 讲师, 硕士生导师。主要从事耕作制度与土壤养分有效性、生物炭与土壤改良等相关研究。



**通讯作者简介:** 郑洪兵, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事耕作制度原理与设计、资源高效型农作制度等方面的研究。先后主持国家自然科学基金等国家及省部级项目 30 余项, 获得国家及省部级科技奖励 14 项, 制定吉林省地方标准 3 项, 获批专利 9 项, 在国内外期刊发表 SCI 等论文 80 余篇, 编写出版教材、学术著作 8 部。