

鲁中山地耕作深度对土壤理化性质与 碳储量的剖面分异影响

梁如蒙¹, 许婷婷², 李孟宸³, 张长志¹, 张巧¹, 董智³, 陈新闻³

(1.肥城市水利局, 山东 泰安 271600; 2.肥城市行政审批服务局,

山东 泰安 271600; 3.山东农业大学 林学院/泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018)

摘要: [目的] 针对鲁中山地丘陵土石山区耕作土壤退化与碳汇功能弱化问题, 探究不同耕作深度对土壤理化性质及碳储量的调控机制, 为区域耕地可持续经营提供理论依据。[方法] 通过田间试验设置 4 种耕作深度 (RT15: 15 cm; RT25: 25 cm; DT35: 35 cm; DT40: 40 cm), 结合结构方程模型解析土壤关键理化性质、根系生物量与碳储量的互作路径。[结果] DT35 和 DT40 较常规耕作显著改善 25—40 cm 土壤结构, 容重降低 10.68%~11.96%, 团聚体稳定性 (平均重量直径) 提升 37.37%~39.29%, 细根生物量增加 94.71%~115.24%。DT35 和 DT40 处理显著提升各土层有机碳、全氮及全磷含量, 且显著缓解了土壤养分的垂直衰减效应。结构方程模型揭示碳储量提升的剖面分异影响: 表层 (0—15 cm) 以根系驱动团聚体间接固碳为主, 深层 (15—40 cm) 依赖“容重—养分”级联效应。DT35 与 DT40 各指标无显著差异, 且差异随土层深度增加而缩小, 确立 35 cm 为最优耕作深度。[结论] 深松至 35 cm 通过打破犁底层、提高养分特征, 显著提升土石山区土壤质量与固碳潜力, 但需重视区域磷限制, 建议深层耕作时实施有机无机配施, 提升深层磷有效性, 整体增强土壤养分特征和土壤碳储量。

关键词: 耕作深度; 土壤团聚体; 土壤碳储量; 结构方程模型; 鲁中山地

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0096-08

Effects of tillage depth on profile differentiation of soil physicochemical properties and carbon storage in central mountainous region of Shandong

Liang Rumeng¹, Xu Tingting², Li Mengchen³, Zhang Changzhi¹, Zhang Qiao¹, Dong Zhi³, Chen Xinchuang³

(1.Feicheng Water Resources Bureau, Tai'an, Shandong 271600, China;

2.Feicheng Administrative Examination and Approval Service Bureau, Tai'an, Shandong 271600, China; 3.Taishan

Forest Ecosystem Research Station, College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China)

Abstract: [Objective] This study aims to address the issues of soil degradation and weakened carbon sink function in the cultivated soils of the hilly rocky area of the mountainous region of Central Shandong. It investigates the regulatory mechanisms of different tillage depths on soil physicochemical properties and carbon storage, and provides a theoretical basis for the sustainable management of regional farmland. [Methods] Field experiments were conducted with four tillage depth treatments (RT15: 15 cm; RT25: 25 cm; DT35: 35 cm; DT40: 40 cm). Structural equation modeling was employed to analyze the interaction pathways among key soil physicochemical properties, root biomass, and carbon storage. [Results] Compared to conventional tillage, DT35 and DT40 significantly improved soil structure at 25—40 cm depth: bulk density decreased by 10.68%~11.96%, aggregate

收稿日期: 2025-07-07

修回日期: 2025-08-06

接受日期: 2025-08-20

资助项目: 山东省自然科学基金青年项目 (ZR2022QC210, ZR2023QD156); 山东省高校优秀青年创新团队 (2024KJG043)。

第一作者: 梁如蒙 (1988—), 男, 山东泰安人, 高级工程师, 学士, 主要从事水土保持与流域治理。E-mail: lrm7800@163.com

通信作者: 陈新闻 (1992—), 男, 山东菏泽人, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事区域生态评价与修复。E-mail: xinchuang_chen@sdau.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

stability (mean weight diameter) increased by 37.37%~39.29%, and fine root biomass rose by 94.71%~115.24%. The DT35 and DT40 treatments significantly increased the contents of soil organic carbon, total nitrogen, and total phosphorus in all soil layers and significantly mitigated the vertical attenuation of soil nutrients. Structural equation modeling revealed the profile-differentiated effects underlying the increase in carbon storage: the surface layer (0—15 cm) was mainly driven by root-mediated indirect carbon sequestration via aggregates, while the subsurface layer (15—40 cm) depended on a “bulk density-nutrient” cascade effect. No significant differences were observed in the various indicators between DT35 and DT40, and the difference decreased with increasing soil depth, establishing 35 cm as the optimal tillage depth. [Conclusion] Deep tillage to 35 cm enhances soil quality and carbon sequestration potential in rocky mountainous areas by breaking the plow pan and improving nutrient characteristics. However, regional phosphorus limitation must be emphasized. It is recommended to implement combined organic and inorganic fertilization during deep tillage to improve deep-layer phosphorus availability, thereby holistically enhancing soil nutrient characteristics and soil carbon storage.

Keywords: tillage depth; soil aggregate; soil carbon storage; structural equation modeling; central mountainous region of Shandong

土壤是陆地生态系统物质循环和能量流动的核心载体,且作为最大的陆地碳汇,对于土壤的可持续管理直接关系到全球碳平衡^[1]。在农业生态系统中,土壤碳库的稳定性深刻影响作物产量和系统可持续性^[2]。传统耕作通过机械扰动短期改善耕层结构,但长期单一耕作深度易导致土壤容重增加、孔隙度下降及有机质矿化加速,引发土壤板结、养分流失与碳库衰减,制约粮食产能和可持续性水平^[3-4]。在鲁中山地丘陵区等土石山区,花岗岩母质发育的土壤兼具土层浅薄、质地粗糙、抗蚀性弱等特征,不合理耕作加剧水土流失与深层碳库退化,威胁区域生态安全^[5-6]。但鲁中山地丘陵区又普遍存在耕作的需求,亟需结合区域特征,构建合理有效可持续的耕作措施。

近年来保护性耕作如免耕虽短期内提升0—5 cm 土层有机碳含量,但导致5—20 cm 土层有机碳降低,且长期施用免耕会导致深层土壤容重居高,不利于养分向下层运输,影响作物根系生长发育和土壤养分吸收,降低作物产量^[7]。免耕对深层土壤理化性质的改善有限,尤其在土壤贫瘠的土石山区,碳主要集中于表层且以易矿化组分为主,稳定性低,难以形成有效碳汇功能^[8]。相比之下,深松耕作可通过破除犁底层深度阈值,改善土壤通透性和结构连通性,有效促进根系深入与有机质向下迁移,从而增强深层土壤的生态功能,提升对水分与养分的调控能力,并显著增强碳汇潜力^[9-10]。红壤坡耕地翻耕30 cm 可显著降低容重,提高饱和含水量和孔隙度,同时降低土壤紧实度,增强水分入渗与根系深扎能力^[10]。深松促进华北农田土壤有机质向深层迁移,30—50 cm 土层碳储量增幅达11.0%~13.1%^[11],且适宜的耕作深度通过对土壤的有效机械扰动,将表层滞留的有机质均匀混合至

土层中,使耕层土壤质量得到优化,促进作物对养分的吸收利用,从而使作物产量得到进一步提升^[12]。目前,相关研究多集中于耕作对土壤理化性质的影响,但对其在复杂环境梯度下作用机制的系统认识仍显不足^[13]。当前研究存在两大盲区:一是深松深度阈值不明确,过度深松可能破坏土壤结构却无益于碳汇增益,而浅耕(<20 cm)无法有效打破犁底层。研究表明,黏质土区深松阈值约30 cm,而沙土区需35 cm^[10,14],目前针对鲁中山地丘陵土石山区的深松阈值仍不明确;二是不同深度土层的碳调控机制不明晰,耕作深度通过改变土壤剖面物理化学特征和生物活动,如何差异化驱动土壤表层与深层碳固存尚待解析。

鲁中山地丘陵区作为典型的土石山区,土壤以花岗岩风化物为主,质地粗糙且保水保肥能力较差,生态系统较为脆弱^[15]。该区域长期采用浅耕方式,导致耕层浅薄,粮食产量降低^[16]。此外,土壤结构的脆弱和水分下渗不畅加剧了地表径流和碳氮流失,进一步削弱了可持续性。在此背景下,研究不同深度的耕作对于优化土壤结构、增强土壤养分与碳汇功能具有重要意义,尤其是此区域深松耕作是否存在优化深度阈值,该阈值下如何通过物理生物互作提升土壤碳储量。综上,针对鲁中山地丘陵区特殊的地质背景与生态脆弱性,系统研究耕作深度对土壤剖面理化性质及碳储量的分异影响,旨在为土石山区农业可持续经营提供创新性解决方案。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河流域山东省肥城市红岭—桃花源小流域(116°47′48.49″—116°52′36.62″E,36°15′8.60″—

36°18′7.70″N),属于暖温带大陆性季风气候,多年平均降雨量 649.7 mm,年平均气温 12.6 °C,年平均风速 2.3 m/s。土壤类别主要为褐土,土层平均厚度约 1.1 m,平均容重 1.3 g/cm³,平均总孔隙度 49.0%,项目区土壤有机质含量 1.18%,主要由 56.23% 的砂砾、39.46% 的粉土和 4.31% 的黏土组成。植被属暖温带落叶阔叶林区,天然植被呈间断分布,主要由黄草 (*Dendrobium hancockii* Rolfe) 和黄背草 [*Themeda japonica* (Willd.) Tanaka] 等为优势种。主要农作物为玉米 (*Zea mays* L.) 和小麦 (*Triticum aestivum* L.)。经果林主要树种有桃 [*Prunus persica* (L.) Batsch]、核桃 (*Juglans regia* L.)、板栗 (*Castanea mollissima* Blume)、樱桃 (*Prunus avium* L.) 为主。

1.2 试验设计

在研究区采用随机区组设计,开展 4 种耕作深度研究:旋耕至 15 cm 深 (RT15)、旋耕至 25 cm 深 (RT25)、深松至 35 cm (DT35) 和 40 cm (DT40),于 2021 年 10 月 7 日冬小麦种植前耕作,每个地块大小约 30 m×12 m。每年的农作物均为冬小麦和夏玉米。各地块除耕作深度不一样外,其余施肥管理方式均近似统一,无其他人为差异化处理。

1.3 土壤取样与测定

于 2024 年 10 月选择连续晴朗天气,在研究区开展采样。每种耕作处理设置 3 个独立地块作为生物学重复(地块间距约 40 m),共计 12 个地块。在每个地块内,以中心点为基准,按东西南北中方向随机布设 5 个采样样方 (1 m×1 m),样方间距≥5 m;每个样方内按“S 形”采样选取 5 个采样点,分层采集 0—10 cm, 10—15 cm, 15—25 cm, 25—35 cm, 35—40 cm 土层土壤;同一样方内同层土样混合均匀过 2 mm 筛去除石砾,自然风干后测定有机碳、全氮和全磷含量。有机碳、全氮采用碳氮元素分析仪测定;全磷经 H₂SO₄-HClO₄ 消解后,通过钼锑抗比色法结合紫外—可见分光光度法测定。各个土层利用环刀法测定土壤容重,土壤重量含水率。利用直径为 5.1 cm 的土钻钻取不同深度土层土样,将土样过 2 mm 筛后清洗获取根系生物量,65 °C 烘干至恒重,称重计算根系生物量。利用直径为 65 mm、高度为 120 mm 的聚氯乙烯管在每个处理的 5 个深度采集原状土,每个处理重复三次,采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体,计算平均重量直径 (Mean Weight Diameter, MWD)、几何平均直径 (Geometric Mean Diameter, GMD)^[17]。

1.4 数据处理与分析

利用 R 语言处理分析数据,方差分析采用双因素方差分析和最小显著极差法进行多重比较 ($\alpha=0.05$)。

利用 R 语言“plspm”程序包计算结构方程参数(标准化路径系数、路径显著性);采用 Origin 2024 软件作图。

各土层碳储量计算公式如下^[18]:

$$\text{SOC} = (1 - \theta) \times C \times \text{BD} \times H / 10 \quad (1)$$

式中: SOC 为碳储量 (t/hm²); θ 为粒径大于 2 mm 的土壤颗粒体积分比,本研究中为 0; C 为土壤有机碳浓度 (g/kg); BD 为容重 (g/cm³); H 为土层深度 (cm)。

2 结果与分析

2.1 不同耕作深度下土壤关键物理特性与水稳性团聚体

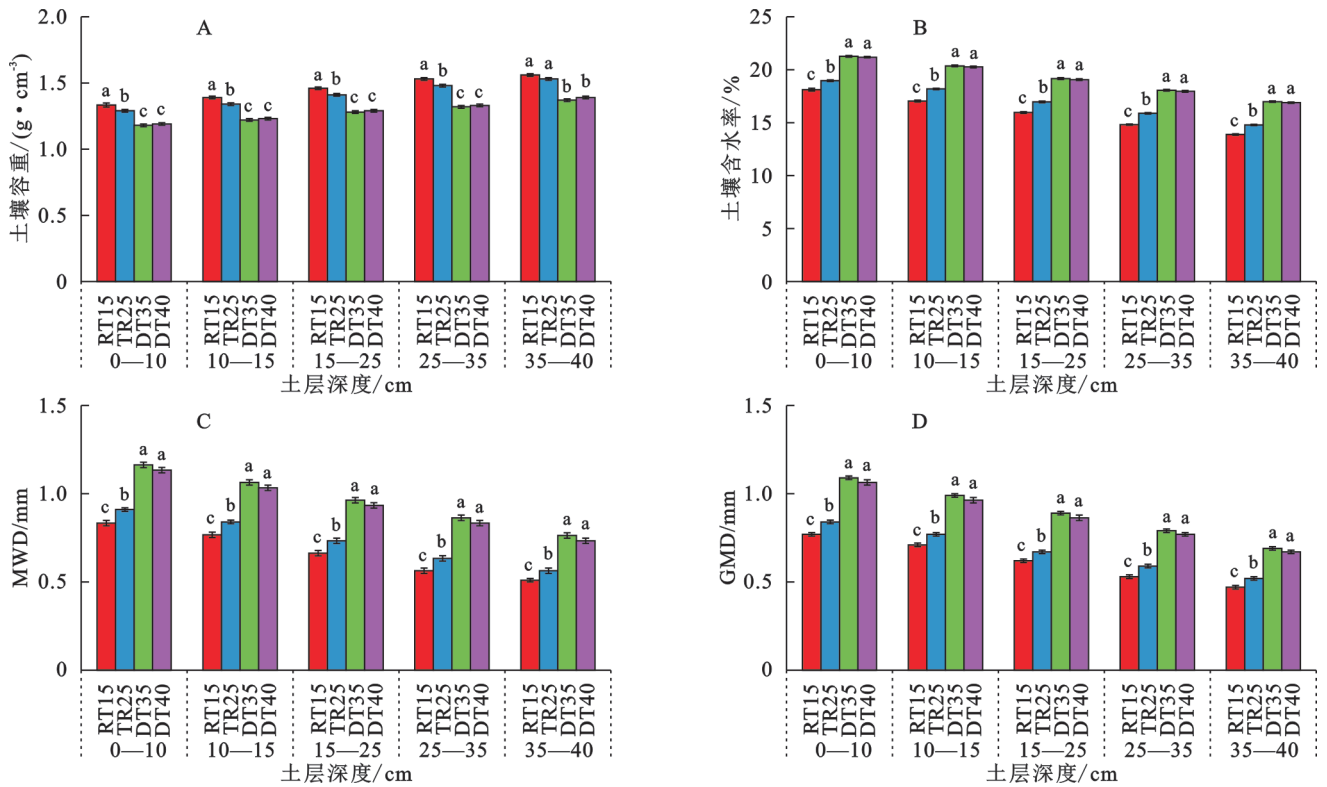
DT35 与 DT40 较 RT15, RT25 显著优化了土壤物理结构并提升团聚体稳定性 ($p < 0.05$), DT35 与 DT40 处理在同一土层中的差异均未达显著水平 ($p > 0.05$) (图 1)。在同一土层中, DT35 处理使 0—10 cm 土层容重较 RT15 降低 11.3%, 35—40 cm 深层容重降低 12.2%; 含水量在 0—10 cm 提高 17.3%, 35—40 cm 提高 22.3%; 团聚体稳定性指标的提升尤为显著, 0—10 cm MWD 增加 39.8%, GMD 增加 39.8%, 35—40 cm MWD 增加 49.0%, GMD 增加 46.8%。在剖面分布上, 深松显著弱化了土壤性质的垂直异质性。RT15 容重随深度剧增 17.3%, 而 DT35 增幅降至 16.1%, 且 25—35 cm 容重差扩大至 15.9%。水分与团聚体的垂直衰减同样被抑制, RT15 含水量从表层至深层下降 23.4%, 而 DT35 仅降 20.1%; MWD 在 RT15 中降幅达 38.6%, DT35 降幅为 34.5%, 且在 35—40 cm 深层仍维持 49.7% 的 MWD 优势。这表明深松耕作对深层土壤结构的改良效果具有持续性, 突破了传统耕作仅改善表层土壤的局限。在同一土层中, DT35 与 DT40 处理的差异均未达显著水平, 尤其在 25—40 cm 深层土壤, 表明当深松深度超过 35 cm 后, 继续增加耕作强度对土壤结构的改善效果, 尤其深层土壤趋于平缓。

2.2 不同耕作深度下土壤养分特征与碳储量

深松显著提升土壤碳氮磷含量及细根生物量 ($p < 0.05$), 且效应随土层加深愈加显著 (图 2, 3)。在同土层对比中, DT35 处理使 0—10 cm 土层细根生物量提高 43.3%, 有机碳提升 53.7%, 全氮增加 51.1%, 全磷提高 43.9%; 在 35—40 cm 深层, DT35 的细根生物量达 RT15 的 2.5 倍, 有机碳、全氮和全磷分别提升 75.6%, 73.4% 和 62.5%, 表明深松有效促进了作物根系向深层延伸, 驱动养分富集。DT35 碳储量为 (54.8±1.6) t/hm², 较 RT15 提升 45.5%, 较 RT25 提升 28.9%, 但 DT35 与 DT40 处理间无显著差异 ($p > 0.05$)。RT25 较 RT15 碳储量提升 12.8%, 但仅为 DT35 的 77.6%, 反映常规耕作对碳固定的低效性。在剖面分

布趋势上,深松显著缓解了养分与根系的垂直衰减。RT15 细根生物量从 0—10 cm 至 35—40 cm 下降 80.1%,有机碳衰减 35.8%;而 DT35 细根生物量降幅

仅 65.3%,有机碳降幅 26.7%。25—40 cm 的改善尤为突出,25—35 cm 层 DT35 全氮较 RT15 高 68.6%,35—40 cm 层全磷较 RT15 高 62.5%。



注:小写字母表示不同处理差异显著($p < 0.05$),MWD 平均重量直径,GMD 几何平均直径,下同。

图 1 不同耕作深度下土壤关键物理特性与水稳性团聚体

Fig.1 Key soil physical properties and water-stable aggregates at different tillage depths

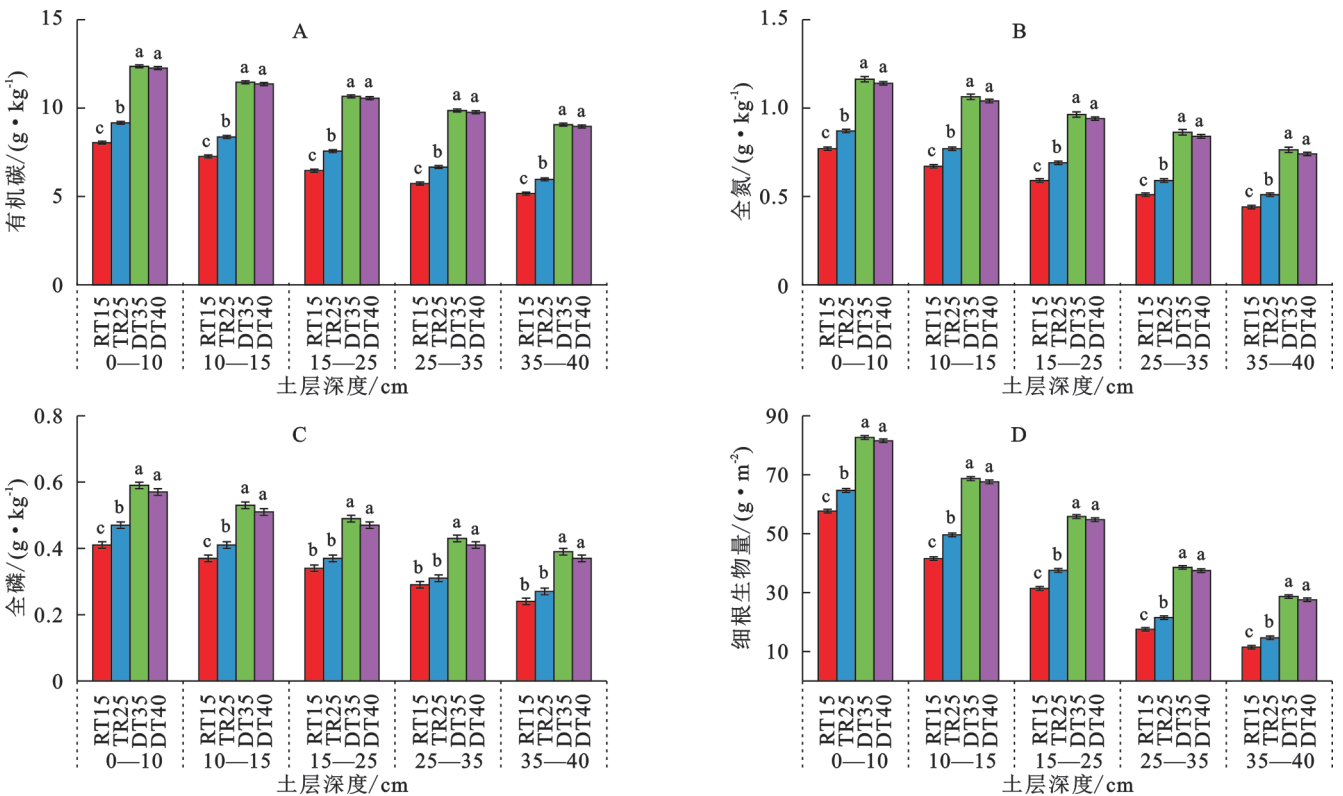


图 2 不同耕作深度下土壤养分特征

Fig. 2 Soil nutrient characteristics at different tillage depths

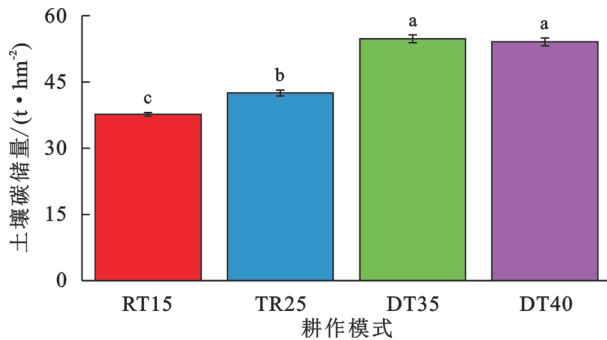


图 3 不同耕作深度下土壤养分特征

Fig. 3 Soil carbon storage at different tillage depths

2.3 不同耕作深度土壤碳储量的影响效应

结构方程模型分析表明,表层土(0—15 cm)和深层土(15—40 cm)中所有预测变量对土壤碳储量变化的解释力较强($R^2 > 0.95$, $GOF > 0.9$),表征所有预测变量共同解释了土壤碳储量的变化特征(图4)。耕作深度通过根系生物量和容重的间接作用调控碳储量,但其效应在表层土和深层土存在明显差异。表层土耕作深度的增加直接显著增加根系生物量(路径系数 0.81, $p < 0.05$),并显著降低土壤容重(-0.36 , $p < 0.05$),但未显著影响含水率和团聚体稳定性($p > 0.05$)。耕作深度主要通过根系生物量促进团聚体稳定性(0.12, $p < 0.05$),增强土壤养分特征(0.57, $p < 0.05$),间接增强土壤碳储量,形成显著级联效应(0.26, $p < 0.05$)。深层土耕作深度的增加对各指标影响与表层土一致。但土壤养分对碳储量的直接促进效应更强(0.64, $p < 0.05$),贡献碳增量的 61%,且团聚体稳定性(-0.41 , $p < 0.05$)和含水率(-0.34 , $p < 0.05$)直接抑制碳积累。容重降低显著缓解对土壤养分的抑制(-0.70 , $p < 0.01$),进而通过养分特征直接促进碳积累,此路径贡献碳增益的 35%。团聚体虽直接抑制碳储量,但通过缓解容重负效应产生净正贡献(间接效应 0.21),而深松对团聚体无显著影响($p > 0.05$),表明其核心作用从物理保护转向间接调控。

3 讨论

在鲁中土石山区,不同的耕作深度对土壤物理性质的影响在不同土层深度具有明显差异性,研究表明深松耕作降低了土壤容重、增加孔隙度、增强土壤团聚体的稳定性。深松耕作通过机械扰动直接作用于深层土壤,破坏了原先的犁底层,显著增加大孔隙比例^[19],促进了根系的生长和密集,加速了土壤水分入渗与气体交换。深层土壤通透性的增强进一步促进微生物活动与有机质向下迁移,驱动大团聚体的形成与胶结,提升了土壤团聚体的稳定性^[20]。相比之下,浅层耕作导致在 15 cm 土层下方形成犁底

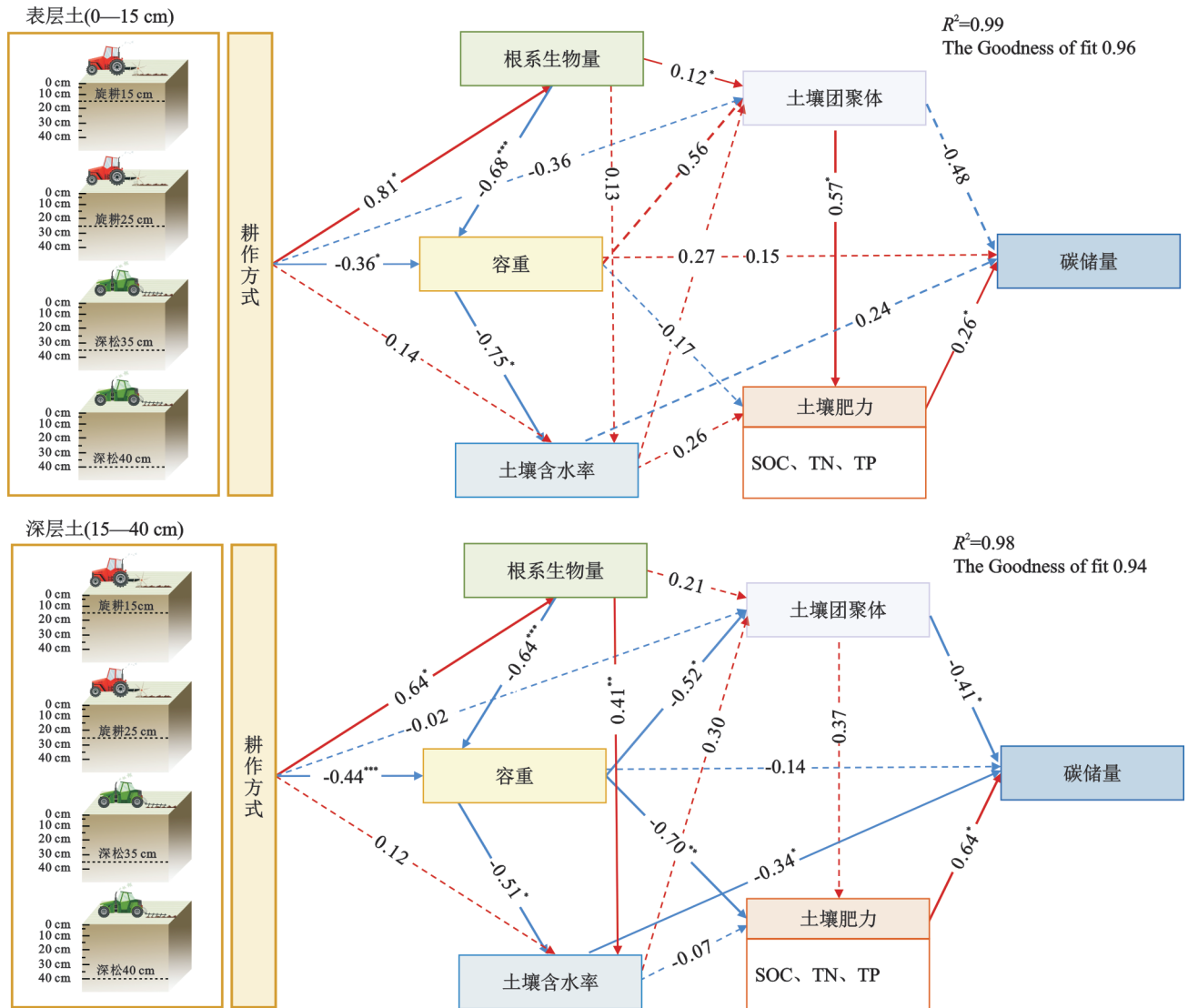
层,限制了深层土壤的改良效果^[21]。且 > 25 cm 土壤长期受压实影响,深松则通过机械扰动释放母质层潜在孔隙空间,容重降幅随深度增加而扩大^[22]。且本研究表明深松对于 15—40 cm 深层土壤的改良效果优于 0—15 cm 的表层土壤,尤其在 35—40 cm 土层。这主要是因为母质层穿透限制,花岗岩风化物在 > 35 cm 深度形成高硬度层,使 DT40 与 DT35 容重无显著差异;且根系生理饱和,作物根系在 35—40 cm 延伸趋缓,细根生物量增幅变小,导致 DT35 与 DT40 物理指标无显著差异,明确 35 cm 为深松阈值。

深松增加了深层土壤中碳、氮和磷等土壤养分的含量,显著缓解了土壤养分的垂直衰减。RT15 处理下有机碳从 0—10 cm 至 35—40 cm 降低 35.8%,而 DT35 处理下有机碳仅降低 26.7%,且 25—40 cm 土层总磷含量较 RT15 提高 62.5%~70.8%。这主要是由于深松降低容重并提升孔隙连通性,增强水分入渗和气体扩散,促进微生物活性与根系分泌物向下迁移,激活深层土壤中结合态磷,缓解北方土石山区的磷限制^[13]。根系延伸与微生物活动协同驱动有机质矿化与固存,提升深层土壤养分特征,进而影响碳储量^[23]。值得注意的是,表土虽团聚体稳定性提升,但花岗岩粗质地土壤胶结物质匮乏,团聚体对碳的直接保护较弱^[13]。深松显著提升土壤碳储量,且响应效率存在耕作阈值。RT15 到 RT25 的碳储量仅提升 12.8%,DT35 碳储量较 RT25 提升高达 77.6%,反映深耕模式下碳固定效率的高效性。DT35 与 DT40 碳储量无显著差异,且差异随深度增加而缩小,表明在鲁中土石山区深耕 35 cm 是碳汇效率的生物学阈值,与华北平原深松 40 cm 后效益饱和的结论一致^[24]。

结构方程模型进一步揭示土壤碳储量调控机制的土层分异,15—40 cm 土层通过提高根系生物量、降低容重并提升孔隙连通性,直接增强水分入渗和根系延伸,间接提高碳储量^[25]。且土壤养分有效性提升促进微生物碳利用效率,强化碳固存。含水率与碳储量呈现显著负效应,可能与深松促进水分下渗导致溶解性有机碳淋失有关,这与黄土高原增雨研究中活性碳组分增加但稳定性降低的现象一致^[26]。土壤团聚体与碳储量的负效应可能是由于深松扰动破坏大团聚体稳定性。0—15 cm 土层则是根系生物量通过机械缠绕和分泌物胶结土壤颗粒,促进土壤团聚体形成,增强土壤养分特征间接增加碳储量^[27]。然而团聚体对碳储量的直接效应不显著,可能因表土团聚体保护的有机碳易受耕作扰动和氧化分解的影响^[28]。尽管深松耕作显著提高了表层土

壤含水量,但频繁干湿交替可能破坏团聚体稳定性,削弱水分对有机碳的物理保护作用,反映表层碳保护更依赖物理覆盖而非水分调控^[29]。因此针对鲁中

土石山区耕作要在表层强化秸秆覆盖或免耕以保护团聚体,深层通过 35 cm 深松打破犁底层并激活磷库,结合有机无机配施提升碳固存与生产力。



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。

图 4 耕作深度对表层土和深层土土壤关键理化性质对碳储量影响的结构方程模型
Fig. 4 Structural equation models of effect of tillage depth effects on carbon storage via key physicochemical properties in surface and subsurface layers

4 结论

本研究在鲁中山地丘陵典型土石山区采用田间试验,系统研究了不同耕作深度对土壤理化性质和碳储量的影响。深松耕作显著优化土壤结构与碳汇功能,DT35处理较RT15在0—40 cm剖面均显著改善土壤物理性质,其中0—10 cm土层容重降低11.3%、MWD提升39.8%,35—40 cm深层容重降低12.2%、MWD提升49.0%,且显著缓剖面异质性。深松驱动深层养分富集与碳固持,DT35使35—40 cm深层土壤有机碳提升75.6%、全氮增加73.4%,细根生物量达RT15的2.5倍,并降低碳衰减率,全

剖面碳储量达54.77 t/hm²,较RT15提升45.5%。表层土壤碳积累主要依赖根系降低容重,提升团聚体稳定性,增强土壤养分的生物物理路径。深层土则以土壤养分直接主导,深松耕作通过增强根系活动、显著降低土壤整体容重,解除养分特征抑制,促进碳积累。DT35与DT40各指标均无显著差异,且差异随深度增加而缩小,表明在鲁中土石山区35 cm是深松的优化深度。日常管理中表层土壤建议结合秸秆覆盖增强表层团聚体稳定性,提升土壤碳储量。在深层耕作时可实施有机无机肥配施,通过提升深层磷活化效率,整体增强土壤养分特征和碳固持能力。

参考文献(References):

- [1] Lal R, Bouma J, Brevik E, et al. Soils and sustainable development goals of the United Nations: an International Union of Soil Sciences perspective[J]. *Geoderma Regional*, 2021,25:e00398.
- [2] Carceles Rodríguez B, Durán-Zuazo V H, Soriano Rodríguez M, et al. Conservation agriculture as a sustainable system for soil health: a review[J]. *Soil Systems*, 2022,6(4):87.
- [3] Sae-Tun O, Bodner G, Rosinger C, et al. Fungal biomass and microbial necromass facilitate soil carbon sequestration and aggregate stability under different soil tillage intensities[J]. *Applied Soil Ecology*, 2022,179:104599.
- [4] 刘水苗,关小康,刘长硕,等.适宜耕作模式提高黄淮海平原冬小麦产量并改善土壤水肥状况[J].*农业工程学报*,2023,39(18):82-91.
Liu S M, Guan X K, Liu C S, et al. Appropriate tillage regime for the improvement of winter wheat yield, soil water, and nutrients condition in Huanghuaihai Plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023,39(18):82-91.
- [5] 刘晓华,刘潘伟,胡续礼,等.江淮丘陵区土壤侵蚀分布与环境因子的关系[J].*水土保持通报*,2018,38(1):281-286.
Liu X H, Liu P W, Hu X L, et al. Relationships between soil erosion distribution and environmental factors in Jianghuai hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018,38(1):281-286.
- [6] 赵莹,陈吟,屈丽琴,等.北方土石山区土地利用及水土流失时空变化[J].*中国水土保持*,2025(4):43-49.
Zhao Y, Chen Y, Qu L Q, et al. Spatiotemporal changes in land use and soil erosion and water loss in the earth-rocky mountainous area of northern China[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2025(4):43-49.
- [7] Lv L G, Gao Z B, Liao K H, et al. Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023,225:105527.
- [8] 李清,苗淑杰,乔云发.基于耕作指数评价东北风沙土肥沃耕层构建周期效果[J].*中国农学通报*,2023,39(5):109-115.
Li Q, Miao S J, Qiao Y F. Evaluating fertile topsoil construction in aeolian-sandy soil in Northeast China based on tillage index[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023,39(5):109-115.
- [9] Wang S B, Liu Z, Obalum S E, et al. Effects of subsoiling depth on soil aggregate stability and carbon storage in a clay-loam soil[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023,23(3):3302-3312.
- [10] 蒲境,史东梅,娄义宝,等.不同耕作深度对红壤坡耕地耕层土壤特性的影响[J].*水土保持学报*,2019,33(5):8-14.
Pu J, Shi D M, Lou Y B, et al. Effect of different tillage depth on soil properties of ploughing layer in slope cultivated land of red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(5):8-14.
- [11] 魏燕华,赵鑫,翟云龙,等.耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J].*农业工程学报*,2013,29(17):87-95.
Wei Y H, Zhao X, Zhai Y L, et al. Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013,29(17):87-95.
- [12] 尚书旗,张茜雅,王东伟,等.耕作深度与种植密度对滨海盐碱地花生光合特性及产量的影响[J].*农业工程学报*,2025,41(12):86-94.
Shang S Q, Zhang X Y, Wang D W, et al. Effects of tillage depth and planting density on the photosynthetic characteristics and yield of peanut in coastal saline alkaline land[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025,41(12):86-94.
- [13] 刘雅杰,白东星,张向前,等.耕作方式对大兴安岭南麓黑土农田土壤物理特性及有机碳储量的影响[J].*土壤通报*,2025,56(2):409-419.
Liu Y J, Bai D X, Zhang X Q, et al. Effects of tillage methods on soil physical characteristics and organic carbon storage in soil farmland at the southern foot of the daxing' an mountains[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025,56(2):409-419.
- [14] Zhou H X, Wei Y C, Wang M M, et al. Enhancing whole-profile soil organic carbon predictions in croplands through a depth-resolved modelling approach[J]. *Soil & Environmental Health*, 2025,3(3):100156.
- [15] 李涛,于蕾,万广华,等.近30年山东省耕地土壤pH时空变化特征及影响因素[J].*土壤学报*,2021,58(1):180-190.
Li T, Yu L, Wan G H, et al. Spatio-temporal variation of farmland soil pH and associated affecting factors in the past 30 years of Shandong Province, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021,58(1):180-190.
- [16] 朱长伟,陈琛,牛润芝,等.不同轮耕模式对豫北农田土壤固碳及碳库管理指数的影响[J].*中国生态农业学报*,2022,30(4):671-682.
Zhu C W, Chen C, Niu R Z, et al. Effects of tillage rotation modes on soil carbon sequestration and carbon pool management index of farmland in northern Henan[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022,30(4):671-682.
- [17] 王艺颖,陈新闯,董智,等.希拉穆仁草原不同放牧强度对植被群落特征和土壤团聚体的影响[J].*水土保持学报*,2024,38(3):121-129,139.
Wang Y Y, Chen X C, Dong Z, et al. Effects of different grazing intensities on vegetation community characteristics and soil aggregates in Xilamuren grassland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(3):121-129,139.
- [18] 许婷婷,董智,郭建英,等.放牧对内蒙古典型草原植物群落特征与土壤有机碳的影响[J].*草地学报*,2022,30

- (9):2273-2279.
- Xu T T, Dong Z, Guo J Y, et al. Effects of grazing on plant community and soil organic carbon in the typical steppe of Inner Mongolia, China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022,30(9):2273-2279.
- [19] 李晓丽,王成宝,杨思存,等.深松深度对灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响[J].*中国土壤与肥料*,2021(3):9-17.
- Li X L, Wang C B, Yang S C, et al. Effects of subsoiling tillage depth on soil aggregate distribution and stability of irrigated sierozem farmland in Gansu Yellow River irrigation area, Northwest China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(3):9-17.
- [20] Shao J Y, Liu L, Cui J C, et al. Enhancing the coupling coordination of soil-crop systems by optimising soil properties and crop production *via* subsoiling [J]. *Soil and Tillage Research*, 2025,248:106438.
- [21] Liebhard G, Toth M, Stumpp C, et al. Developing topsoil structure through conservation management to protect subsoil from compaction [J]. *Soil and Tillage Research*, 2025,253:106669.
- [22] Li J W, Chen L, Zhang C Z, et al. Combining rotary and deep tillage increases crop yields by improving the soil physical structure and accumulating organic carbon of subsoil [J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 244: 106252.
- [23] 田慎重,王瑜,张玉凤,等.旋耕转深松和秸秆还田增加农田土壤团聚体碳库[J].*农业工程学报*,2017,33(24):133-140.
- Tian S Z, Wang Y, Zhang Y F, et al. Residue returning with subsoiling replacing rotary tillage improving aggregate and associated carbon [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (24):133-140.
- [24] Teng J L, Hou R X, Dungait J A J, et al. Conservation agriculture improves soil health and sustains crop yields after long-term warming [J]. *Nature Communications*, 2024,15:8785.
- [25] 何进宇,石伟业,刘飞杨,等.粉垄耕作深度对旱区土壤关键物理性质的影响[J].*干旱地区农业研究*,2023,41(3):195-201,228.
- He J Y, Shi W Y, Liu F Y, et al. Effects of Fenlong cultivation on soil key physical properties in arid areas [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41 (3):195-201,228.
- [26] 王兴,钟泽坤,王佳懿,等.黄土高原撂荒草地土壤碳库对两年增温增雨的响应[J].*土壤学报*,2023,60(2):523-534.
- Wang X, Zhong Z K, Wang J Y, et al. Responses of soil carbon pool of abandoned grassland on the Loess Plateau to two-years warming and increased precipitation [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023,60(2):523-534.
- [27] Zheng J Y, Zhao J S, Shi Z H, et al. Soil aggregates are key factors that regulate erosion-related carbon loss in *Citrus* orchards of Southern China: bare land *vs.* grass-covered land [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021,309:107254.
- [28] Xiao S S, Ye Y Y, Xiao D, et al. Effects of tillage on soil N availability, aggregate size, and microbial biomass in a subtropical karst region [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019,192:187-195.
- [29] 王兴,钟泽坤,张欣怡,等.长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系[J].*环境科学*,2020,41(5):2416-2424.
- Wang X, Zhong Z K, Zhang X Y, et al. Relationship between the composition of soil aggregates and the distribution of organic carbon under long-term abandoned restoration [J]. *Environmental Science*, 2020, 41 (5) : 2416-2424.
- [26] 雷晨雨,王猛,田瑞杰,等.不同退化程度赤桉人工林土壤生态功能变化对比[J].*东北林业大学学报*,2022,50(12):72-77.
- Lei C Y, Wang M, Tian R J, et al. Changes of soil ecological function in *Eucalyptus camaldulensis* plantations with different degrees of degradation [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022,50(12):72-77.
- [27] Chen J, Cui H Y, Jia B, et al. Soil sampling depth matters in assessing the impact of shrubification on soil organic carbon storage in grazed alpine meadows [J]. *Geoderma*, 2022,426:116119.
- [28] Zeng W J, Wang Z D, Chen X Y, et al. Nitrogen deficiency accelerates soil organic carbon decomposition in temperate degraded grasslands [J]. *Science of the Total Environment*, 2023,881:163424.
- [29] 李仲牧,聂恺宏,田登娟,等.中国沙棘早衰人工林不同构件碳氮磷生态化学计量特征[J].*林业资源管理*,2023(4):62-70.
- Li Z M, Nie K H, Tian D J, et al. Ecological stoichiometry characteristics of C, N and P of different components in premature aging plantation forests of *Hippophae rhamnoides* ssp. *sinensis* [J]. *Forest and Grassland Resources Research*, 2023(4):62-70.
- [30] Cai A D, Feng W T, Zhang W J, et al. Climate, soil texture, and soil types affect the contributions of fine-fraction-stabilized carbon to total soil organic carbon in different land uses across China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016,172:2-9.

(上接第95页)