DOI: 10.11766/trxb202504290200 **CSTR: 32215.14.trxb202504290200**

张延，张瑞民，张鹏程，李宏旭，逄焕成. 秸秆颗粒输入通过提升沙质土壤有机碳组分促进土壤碳氮协同固持[J]. 土壤学报，2026，ZHANG Yan, ZHANG Ruimin, ZHANG Pengcheng, LI Hongxu, PANG Huancheng. Pelletized Straw Input Promoted Soil Carbon and Nitrogen Sequestration by Enhancing Organic Carbon Fraction in Sandy Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

秸秆颗粒输入通过提升沙质土壤有机碳组分促进土壤碳氮协同固持*

张 延[1]，张瑞民[2]，张鹏程[2]，李宏旭[2]，逄焕成[1†]

（1. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室/中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京 100081；2. 内蒙古自治区阿鲁科尔沁旗自然资源局，内蒙古阿鲁科尔沁 025550）

摘 要：针对科尔沁沙地沙质土壤有机碳库贫瘠化及水肥保持效能低下等问题，通过室内培养试验探究了秸秆颗粒化技术的改良机制。试验设置对照 CK（不添加秸秆颗粒，0 t·hm^{-2}）、PS75（秸秆颗粒添加量为 75 t·hm^{-2}）和 PS150（秸秆颗粒添加量为 150 t·hm^{-2}）3 个秸秆颗粒添加量处理，以及 1 年和连续 2 年的施用年限处理。结果表明，秸秆颗粒添加使土壤有机碳和全氮含量显著提升 217.52%～749.15%和 197.78%～679.25%（P<0.05）。秸秆颗粒添加显著增加颗粒态有机碳、矿物结合态有机碳和易氧化有机碳含量（P<0.05），且颗粒态、矿物结合态有机碳和易氧化有机碳与总有机碳呈极显著正相关（P<0.01），其中 PS150 处理连续施用 2 年使颗粒态有机碳占比显著提高 31.81%（P<0.05）。秸秆颗粒添加显著降低土壤容重，改善持水能力与孔隙度。冗余分析表明，矿物结合态有机碳是影响土壤碳氮固持的关键主导因子。路径分析结果进一步说明，秸秆颗粒添加通过调控矿物结合态有机碳含量促进碳氮积累（P<0.05），同时该措施通过显著降低土壤容重有效改善了土壤持水性能（P<0.05）。秸秆颗粒化技术可提升沙地土壤有机碳组分含量，促进碳氮协同固持，并改善土壤物理性质。

关键词：沙质土壤；秸秆颗粒；土壤有机碳；矿物结合态有机碳；土壤全氮

中图分类号：S158 **文献标志码：**A

Pelletized Straw Input Promoted Soil Carbon and Nitrogen Sequestration by Enhancing Organic Carbon Fraction in Sandy Soil

ZHANG Yan[1], ZHANG Ruimin[2], ZHANG Pengcheng[2], LI Hongxu[2], PANG Huancheng[1†]

(1. *National Key Laboratory of High-Efficient Utilization of Cropland in Arid and Semi-Arid Northern Regions, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*; 2. *Natural Resources Bureau of Ar Horqin Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, Ar Horqin, Inner Mongolia* 025550, *China*)

Abstract:【Objective】To combat the depletion of organic carbon and poor water-fertilizer retention in the Horqin Sandy Land, this study examines the mechanisms by which pelletized straw incorporation enhances soil organic carbon and its active fractions.【Method】Through a controlled incubation experiment, the study established treatments with different application rates of pelletized straw: a control with no straw addition (CK), 75t·hm^{-2} pelletized straw (PS75), and 150 t·hm^{-2} pelletized straw (PS150). Additionally, the experiment included duration treatments consisting of single-year

* 国家重点研发计划项目（2023YFD1902902）、国家自然科学基金项目（32172126）、国家重点研发计划项目（2022YFD1500304）和中国农业科学院创新工程项目（CAAS-ZDRW202202）共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2023YFD1902902); the National Natural Science Foundation of China (No.32172126); the National Key Research and Development Program of China (No.2022YFD1500304), and the Agricultural Science and Technology Innovation Program of Chinese Academy of Agricultural Sciences (No.CAAS-ZDRW202202)

† 通讯作者 Corresponding author，E-mail：panghuancheng@caas.cn

作者简介：张 延（1995—），男，内蒙古赤峰人，博士研究生，主要研究方向为农业生态学。E-mail: 2934135679@qq.com

收稿日期：2025-04-29；收到修改稿日期：；网络首发日期（www.cnki.net）：

application and two consecutive years of application.【Result】 Compared to the CK treatment, pelletized straw application significantly increased soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents by 217.52%～749.15% and 197.78%～679.25%, respectively. With increasing application rates and duration of pelletized straw incorporation, the carbon and nitrogen retention capacity of sandy soil was significantly enhanced. Application of pelletized straw consistently elevated the C/N ratio of the sandy soil, with the most significant increase observed in the PS150-1a treatment ($P<0.05$). Also, the addition of pelletized straw significantly enhanced particulate organic carbon (POC), mineral-associated organic carbon (MAOC), and labile organic carbon (LOC) contents ($P<0.05$). The contents of POC, MAOC, and LOC increased significantly with higher application rates of pelletized straw and longer amendment duration. Moreover, POC, LOC, and MAOC all showed highly significant positive correlations with total SOC content ($P<0.01$). Notably, the 150 $t\cdot hm^{-2}$ pelletized straw treatment with two consecutive years of application significantly increased the proportion of POC to total SOC by 31.81% ($P<0.05$), suggesting a preferential accumulation of this active carbon fraction. Nevertheless, pelletized straw application significantly reduced bulk density while improving water-holding capacity and porosity in sandy soil. The study found a statistically significant positive correlation ($P<0.01$) between the water-holding capacity of sandy soil and the duration of pelletized straw application. Moreover, the improved water retention in sandy soils resulted from synergistic physical adsorption and chemically mediated retention from pelletized straw decomposition. According to redundancy analysis, soil physicochemical properties explained 98.90% of the variability in SOC, TN, and C/N. Besides, MAOC was the primary driver, highlighting mineral association as a fundamental mechanism for soil carbon and nitrogen stabilization. Partial least squares path modeling demonstrated that the cumulative addition of pelletized straw directly promoted SOC sequestration by significantly increasing the contents of both LOC and MAOC ($P<0.01$). The model further confirmed the dominant role of MAOC in SOC stabilization, highlighting the importance of mineral protection mechanisms for carbon retention in sandy soils. The accumulation of SOC significantly increased TN content ($P<0.01$), indicating a coupled carbon and nitrogen sequestration effect in the sandy soil. Furthermore, increasing the application rate of pelletized straw significantly reduced soil bulk density and enhanced water holding capacity ($P<0.01$). In summary, the study demonstrated that SOC fractions served as the key mediator for carbon-nitrogen coupled stabilization in sandy soils. The establishment of this regulatory mechanism provides a theoretical foundation for carbon sequestration management in arid sandy soils.【Conclusion】The study demonstrates that pelletized straw incorporation effectively enhances sandy SOC fractions, promotes carbon-nitrogen synergistic sequestration, and improves soil physical properties, with the optimal effects achieved at 150 $t\cdot hm^{-2}$ with two consecutive years of application.

Keywords: Sandy soil; Pelletized straw; Soil organic carbon; Mineral-associated organic carbon; Soil total nitrogen

在全球气候变化背景下，土壤碳固存已被《联合国气候变化框架公约》确认为实现“碳中和”的重要途径[1]。作为陆地生态系统重要碳库，耕地土壤有机碳（SOC）储量占比超过 10%[2]，其固碳潜力对减缓大气二氧化碳（CO_2）浓度上升和维持粮食安全具有双重意义[1]。研究表明，SOC 提升不仅能改善土壤结构和持水能力[3]，SOC 组分中颗粒态有机碳（POC）作为周转期为 5～20 年的活性碳库，在连接新鲜残体与稳定腐殖质碳库中起关键作用[4]；矿物结合态有机碳（MAOC）通过有机-矿物相互作用形成长期稳定碳库[5]；而土壤易氧化有机碳（LOC）调控 SOC 的动态固持[6]。因此，深入解析 SOC 各组分间的相互作用机制及其调控因素，对于阐明土壤碳库动态变化过程及评估其气候反馈效应具有重要科学意义。

秸秆还田是提升 SOC 含量的有效措施，其效应受土壤类型和施用方式调控[7-8]。秸秆还田量和还田持续时间共同调控 SOC 的累积动态。从还田量来看，秸秆还田可显著增加黑土和棕壤中 POC 含量，且 POC 累积量与还田量呈正相关[9]。单施秸秆可使 LOC 含量显著提升 28.0%[10]。然而，在华北潮土和黑土中，当秸秆还田量超过特定阈值后，SOC 的增幅趋于稳定[11-12]，这可能与黏粒矿物表面吸附位点饱和导致的碳饱和效应有关[13]。从时间尺度分析，秸秆还田对 SOC 的累积效应随还田年限延长而增强，短期内（≤3 年）即可显著提升 SOC 含量，且中长期仍维持稳定固碳效益[14]。然而，在我国非北方地区长期秸秆还田可能引起 SOC 累积速率显著降低[15]。研究秸秆还田量及年限对 SOC 动态的影响，对于优化区域秸秆管理策略和提升土壤固碳潜力具有重要科学意义。

秸秆颗粒化处理通过粉碎、挤压和造粒工艺破坏秸秆原始结构及角质层，显著提升其分解效率与养分释放速率[16]。在东北黑土区的长期试验表明，高量秸秆颗粒还田（75$t\cdot hm^{-2}$）较常规秸秆还田更能显著提高 SOC 含量，并维持碳氮化学计量平衡[17]。该技术不仅优化了秸秆碳的固持效率，还可能通过增强有机质矿化与腐殖化过程，提高 SOC 累积的阈值，为农田土壤培肥提供了高效可行的秸秆还田新策略。

我国沙化耕地面积达 398.54 万 hm^2[18]，其土壤质量提升面临严峻挑战。以科尔沁沙地为例，受

气候变化与人类活动双重胁迫，该地区呈现 SOC 贫瘠、结构稳定性差等典型沙质土壤障碍特征[19]，即使采用节水灌溉技术仍存在水肥利用效率低、固碳潜力受限等问题。秸秆颗粒化还田在黑土和潮土区已证实具有快速固碳与增产效应[17,20]，但其在沙质土壤中的适用性及固碳机制尚不明确。鉴于此，基于前期发现 75 t·hm^{-2} 秸秆颗粒可显著提升黑土与潮土有机碳的研究成果，针对沙质土壤有机碳极低的特点，本研究通过室内控制试验设置 2%（模拟大田 75 t·hm^{-2}）和 4%（模拟大田 150t·hm^{-2}）两个梯度秸秆颗粒添加处理，突破当地常规秸秆还田量（3.75 t·hm^{-2}）的限制。设置 150 t·hm^{-2} 的高量处理旨在通过超常规施用量探究沙质 SOC 的快速提升潜力。试验旨在系统研究秸秆颗粒对沙质土壤的 SOC 的提升效应，为沙质土壤的高效改良提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古赤峰市阿鲁科尔沁旗巴拉奇如德苏木的科尔沁沙地，海拔高度为 350～450 m。该区域属温带半干旱大陆性季风气候区，春季气温回升迅速。降水集中于 7 月上旬至 8 月上旬，此阶段适宜作物生长，区域内主要农作物为玉米。该地区气候干旱且多风，年平均气温为 5.5℃，多年平均降水量为 300～400 mm，而年均蒸发量为 2 000 mm 以上。光热资源丰富，无霜期 140～150 d，≥10℃积温为 3 000～3 200℃，年日照时数为 2 700～3 100 h。土壤类型为沙质土壤，属漏水漏肥型耕地，沙质土壤土层厚度 20 cm，土壤有机质 3.83 g·kg^{-1}，全氮（TN）0.26 g·kg^{-1}，容重 1.69 g·cm^{-3}，采用膜下滴灌的灌溉方式。

1.2 供试土壤与试验设计

供试土壤采自科尔沁沙地 0~20 cm 耕层土壤。试验采用高 45 cm，内径 25 cm，底部有孔的塑料盆，铺穿孔塑料膜，再在其上铺设塑料纱网。将过 2 mm 筛的风干土与秸秆颗粒均匀混合使二者充分混匀。试验采用每月一次的灌溉频率，以模拟大田水分管理条件，每次灌溉均达到饱和持水量状态。试验共分为三个处理：（1）CK，秸秆颗粒不添加处理（相当于大田试验 0t·hm^{-2}）；（2）PS75，秸秆颗粒添加 2%处理（相当于大田试验 75 t·hm^{-2}）；（3）PS150，秸秆颗粒添加 4%处理（相当于大田试验 150t·hm^{-2}）。在此基础上，设置秸秆颗粒加入年限处理，分为秸秆颗粒加入 1 年与连续加入 2 年，每个处理 3 次重复。试验用玉米秸秆颗粒是利用本研究组自主研制的专利技术装备“牵引式秸秆捡拾颗粒制作一体机”在田间制作而成，即通过牵引式秸秆捡拾颗粒制作一体机，一次性将长、粗、硬的秸秆经过机械切碎、揉丝为短、细、软的秸秆碎末，再经挤压成型工艺制成直径约 9 mm、堆积密度为 254.09 kg·m^{-3} 的致密颗粒，最终体积压缩至原秸秆的 1/20。

1.3 测定指标和方法

土培 360 d 时采用环刀从容器中取土，将全土样品研磨过 0.25 mm 筛，用稀盐酸去除无机碳后，使用元素分析仪 (VarioISOPOTE Cube-Isoprime, Elementar 公司，德国)测定 SOC 含量。土壤 POC 和 MAOC 含量的测定采用六偏磷酸钠分散法[21]。取 20.00 g 风干土样，经 0.5%六偏磷酸钠溶液振荡分散后，通过 0.053 mm 湿筛分离 POM 和 MAOM 组分。各组分洗涤、烘干、研磨后，用重铬酸钾氧化法[22]测定有机碳含量。全氮（TN）含量采用凯氏定氮法测定[22]。LOC 含量采用高锰酸钾氧化法[23]测定。土壤容重（BD）和持水量（WC）采用环刀法测定。基于测定数据，通过以下公式计算土壤孔隙特征参数：

$$\text{土壤总孔隙度（soil total porosity，\%）} = (1-BD/\rho)\times 100 \quad (1)$$

式中，BD 为土壤容重（g·cm^{-3}）；ρ 为土壤密度（供试土壤密度为 2.65 g·cm^{-3}）。

土壤毛管孔隙度（soil capillary porosity，%）=WC×BD （2）

式中，WC 为田间持水量（%）；BD 为土壤容重（g·cm^{-3}）。

土壤物理指标测定方法及计算均参考《土壤物理性质测定法》[24]。

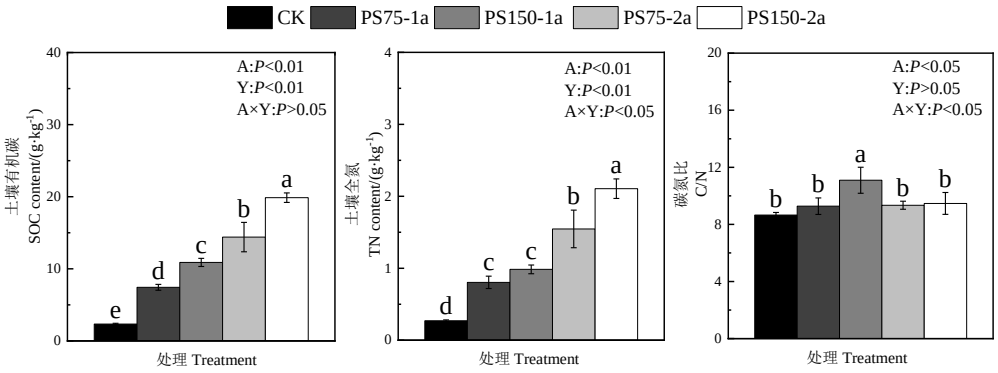
1.4 数据处理

本研究运用 SPSS21.0 软件计算 Pearson 相关系数，以评估变量间的线性相关性。通过方差分析（ANOVA）结合 Tukey 事后（HSD）检验，在 95%置信水平下对处理间的平均值进行分离，判断差异是否显著。当 F 统计值较大且概率（P<0.05）时，认定处理间存在显著差异。利用 Excel2019 和 SPSS21.0 软件进行一般性的数据整理与分析工作。线性回归分析及可视化图表采用 GraphPad Prism 10 软件绘制。采用 Canoco5.0 软件开展冗余分析（RDA)。偏最小二乘路径模型（PLSPM）借助 SmartPLS4.0 软件进行分析，并通过拟合优度（GoF）检验其可靠性。图表中所呈现的数据均以平均值±标准差的形式表示。在 GraphPad Prism10、Origin 9.1 和 PowerPoint 中完成制图。

2 结 果

2.1 秸秆颗粒添加对沙质土壤有机碳、全氮和碳氮比的影响

由图 1 可知，秸秆颗粒添加显著增加了沙质土壤 SOC 和 TN 含量，提升幅度分别为 217.52%~749.15%、197.78%~679.25%。随着添加量和添加年限的增加，沙质土壤的碳氮固持能力增强，其中 SOC 主要受添加量或年限的独立作用影响（P>0.05），表明 SOC 稳定性较高；而 TN 则显著受二者交互作用影响（P<0.05），反映出氮素矿化和固定对环境波动（如水分）更为敏感。秸秆颗粒添加均增加了沙质土壤的碳氮比（C/N），其中 PS150-1a 处理 C/N 提升显著（P<0.05），原因可能是单次添加高量秸秆颗粒有效氮被消耗致使碳的固持效率高，矿质氮的生物固定作用升强，最终 C/N 显著升高（P<0.05）。



注：CK：不添加秸秆颗粒；PS75-1a：单年添加 2%秸秆颗粒；PS150-1a：单年添加 4%秸秆颗粒；PS75-2a：连续两年添加 2%秸秆颗粒；PS150-2a：连续两年添加 4%秸秆颗粒；A：秸秆颗粒还田量；Y：秸秆颗粒还田年限；A×Y：秸秆颗粒还田量与还田年限的交互效应。图柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。下同。Note: CK: No pelletized straw amendment; PS75-1a: Single application of pelletized straw at 2%；PS150-1a：Single application of pelletized straw at 4%；PS75-2a: Pelletized straw applied at 2% for two consecutive years；PS150-2a: Pelletized straw applied at 4% for two consecutive years；A: Amount of pelletized straw incorporation; Y: Years of pelletized straw application; and A×Y: Interaction between amount and duration of pelletized straw application. Different lowercase letters in the column represent significant differences between treatments (P<0.05). Same below.

图 1 不同处理对沙质土壤有机碳、全氮和碳氮比的影响

Fig. 1 The effects of different treatments on organic carbon, total nitrogen, and carbon nitrogen ratio in sandy soil

2.2 秸秆颗粒添加对沙质土壤颗粒态有机碳和矿物结合态有机碳的影响

如表 1 可知，秸秆颗粒的添加显著提升了沙质土壤中 POC、MAOC 的含量（$P<0.05$），且随添加量和年限的增加显著提高（$P<0.05$）。PS150-2a 处理 POC/SOC 最高，增幅达 31.81%（$P<0.05$）。说明秸秆颗粒的分解形成了更多的颗粒态有机碳，促进了 SOC 的积累。线性回归分析结果显示（图 2），POC 与 SOC 含量之间呈极显著正相关关系（$P<0.0001$），表明 POC 的积累对沙质土壤碳固持有明显促进作用。同时，MAOC 与 SOC 含量也呈极显著正相关（$P<0.0001$），表明沙质土壤中有机碳的固持过程与有机碳-矿物结合机制密切相关。

表 1 不同处理对沙质土壤有机碳组分的影响

Table 1 Effects of different treatments on organic carbon components in sandy soil

处理 Treatment	颗粒态有机碳 POC/ (g·kg^{-1})	矿物结合态有机碳 MAOC / (g·kg^{-1})	易氧化有机碳 LOC/ (g·kg^{-1})	POC/SOC (%)
CK	0.41±0.03e	1.93±0.08e	1.25±0.28d	17.51±0.82b
PS75-1a	1.46±0.18d	5.97±0.27d	1.57±0.22d	19.58±1.63b
PS150-1a	2.07±0.18c	8.82±0.68c	2.80±0.33c	19.09±2.39b
PS75-2a	2.58±0.23b	11.82±1.84b	3.94±1.02b	18.03±1.57b
PS150-2a	4.59±0.39a	15.28±0.28a	5.34±0.46a	23.08±1.21a

注：表中不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）。Note: Different lowercase letters in the table represent significant differences between treatments.

2.3 秸秆颗粒添加对沙质土壤易氧化有机碳的影响

由表 1 所示，秸秆颗粒的添加提升了土壤 LOC 含量（$P<0.05$），LOC 含量随添加量和年限的增加显著提高。如图 2，LOC 与 SOC 含量呈极显著正相关（$P<0.01$），表明 LOC 的积累能够有效促进沙质土壤 SOC 的固持。

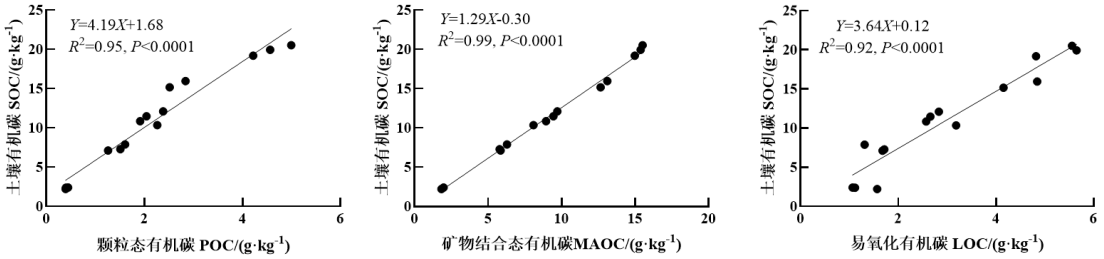


图 2 土壤有机碳与颗粒态有机碳（POC）、矿物结合态有机碳(MAOC)和易氧化有机碳(LOC)的相关性

Fig. 2 Correlation analysis between soil organic carbon and particulate organic carbon, mineral-associated organic carbon, and labile organic carbon

2.4 沙质土壤理化特性对土壤碳氮协同固持的影响

如图 3 所示，秸秆颗粒的添加显著降低了沙质土壤的容重（BD），并显著增加了沙质土壤的持水量（WC）、总孔隙度（TP）和毛管孔隙度（CP）。沙质土壤持水量与颗粒施用年限呈显著正相关性（$P<0.01$）。这表明沙质土壤持水性能的改善机制具有双重性，一方面源于秸秆颗粒添加引起的土壤孔隙结构优化，另一方面则与秸秆腐解过程中形成的腐殖质通过增强土壤悬着水保持能力而产生的生化改良效应密切相关。

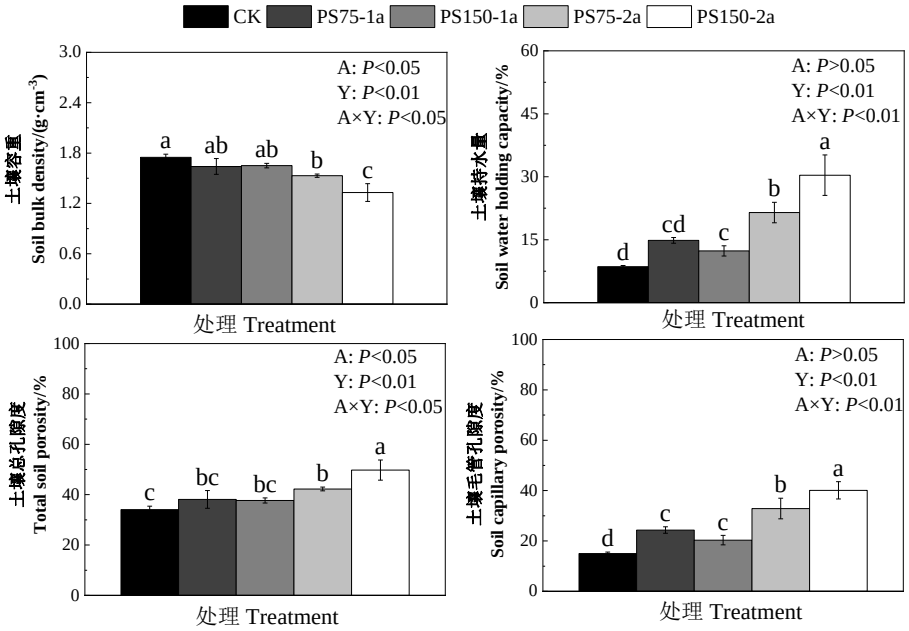


图 3 不同处理对沙质土壤物理性质的影响

Fig. 3 The effects of different treatments on the physical properties of sandy soil

RDA 分析结果表明（图 4），土壤理化性质对 SOC、TN 及 C/N 变异的总体解释率为 98.90%。其中，MAOC 和 CP 被识别为显著影响因子（P< 0.05），其独立解释率分别为 97.30%和 0.80%。MAOC 作为主导驱动因子，对 SOC、TN 及 C/N 的变异表现出最强的解释力，表明矿物保护机制在调控土壤碳氮稳定性方面发挥重要作用。

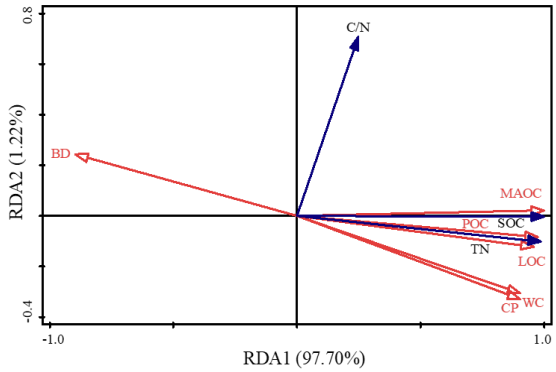
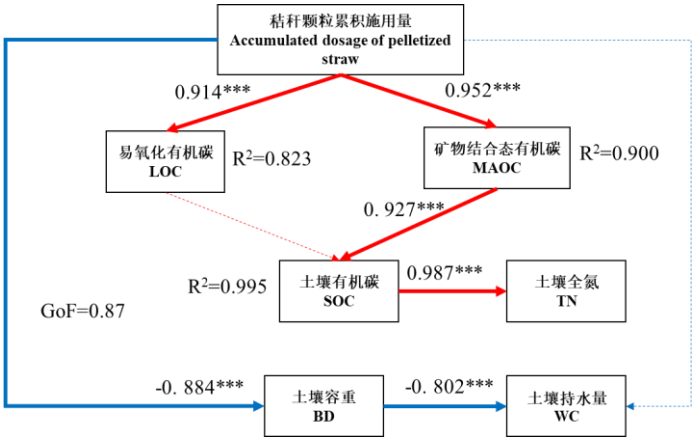


图 4 沙质土壤碳氮固持与土壤物理和化学性质的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of sandy soil carbon and nitrogen sequestration in relation to soil physicochemical properties

PLS-PM 分析结果表明（图 5），秸秆颗粒的累积添加量与 MAOC 及 LOC 含量呈极显著正相关（P<0.01），表明秸秆颗粒输入通过同时提高土壤活性碳组分（LOC）和稳定态碳组分（MAOC）的含量，促进了土壤有机碳的积累。进一步分析表明，MAOC 对 SOC 具有显著正向贡献（P<0.01），证实了矿物结合态有机质在沙质土壤有机碳固持中的作用。研究还发现，SOC 的积累显著提升土壤全氮含量（P<0.01），表明了沙质土壤碳氮耦合固持效应；随着秸秆颗粒添加量的增加，土壤容重显著降低（P<0.01），同时土壤持水能力显著增强（P<0.01）。



注：箭头线上的值表示标准化路径系数，红色箭头表示正相关，蓝色箭头表示负相关。实线表示有显著性差异，虚线表示无显著性差异。箭头的宽度和路径系数的大小呈正相关。Note: The values on the arrow line represent standardized path coefficients, the red arrow represents positive correlation, and the blue arrow represents negative correlation. The solid line indicates significant differences, and the dashed line indicates no significant difference. The width of the arrow is positively correlated with the magnitude of the path coefficient.

图 5 沙质土壤有机碳固持与理化性质的偏最小二乘路径模型

Fig. 5 Partial least squares path model for organic carbon sequestration and physicochemical properties in sandy soils

3 讨 论

3.1 秸秆颗粒添加对沙质土壤碳氮含量及其化学计量特征的影响

SOC 是评估土壤肥力和质量的核心因素。研究表明，秸秆还田量和 SOC 含量呈显著正相关[25-26]，但是以往的研究秸秆的输入量均小于 15t·hm^{-2} [27]。本研究结果表明，沙质土壤因其固有的漏水漏肥特性导致 SOC 含量处于极低水平。当秸秆还田量由 75t·hm^{-2} 提升至 150t·hm^{-2} 时，SOC 含量显著增加（P<0.05），说明沙质土壤有机碳库尚未达到碳饱和状态，需要持续输入大量外源有机碳以改善其贫瘠的肥力状况；研究发现当秸秆输入量达到一定阈值时，SOC 和全氮的提升取决于秸秆的腐解速率[28-29]，将秸秆颗粒化处理可有效促进秸秆腐解进程，加速秸秆碳向 SOC 的转化。相较于传统秸秆还田方式，秸秆颗粒还田通过机械挤压作用破坏秸秆表面的疏水性蜡质层，促进秸秆与土壤矿物的结合。有研究表明，秸秆颗粒还田可使东北黑土的全碳和全氮含量较传统方式分别提升 8%~31%和 11%~32%[17]。本研究发现，在有机碳本底值较低的沙质土壤中，秸秆颗粒还田对 SOC 和全氮的改良效果更为突出。这一结果验证了秸秆颗粒还田在贫瘠土壤中的碳氮固存潜力。此外，本研究结果还表明，尽管连续多年输入高量颗粒化秸秆，但土壤碳氮比未呈现显著升高趋势。这一现象说明颗粒化秸秆在腐解过程中释放出大量氮素，为后续秸秆腐解提供了充足的氮源保障，有效避免了因氮素限制而导致的土壤有机碳积累受阻问题[30]。

3.2 秸秆颗粒添加对沙质土壤有机碳组分的影响

本研究选取颗粒态、矿物结合态和易氧化态有机碳，结合物理分组和化学氧化方法，分析其物理保护和化学稳定性差异，以揭示不同组分对有机碳周转的影响。活性有机碳主要由新鲜有机质向腐殖质转化过程中的中间代谢产物组成，周转速率快，是表征土壤碳库变化的重要指标。研究发现，随着秸秆颗粒添加量和添加年限的增加，土壤颗粒态有机碳和易氧化有机碳呈增加趋势，这表明新鲜植物残体矿化分解提高了土壤有机碳库的活性，增加了土壤颗粒态有机碳和易氧化有机碳含量。本研究结果表明，PS150-2a 处理显著提高了颗粒有机碳（POC）占总有机碳的比例（P<0.05）。这一发现与以往研究相吻合，POC 主要由新鲜植物凋落物贡献[31]，是植物源有机碳进入土壤后的主要初始存在形式[32]。本研究发现，在沙质土壤中新鲜秸秆颗粒输入能够优先增加活性碳库中的 POC 组分，

从而显著促进短期碳固持效应。沙质土壤中 POC/SOC 比例在 17.51%~23.08%的分布特征揭示了其固碳过程的阶段性规律。在植物残体输入初期，土壤碳库主要通过增加颗粒有机碳含量来启动碳积累；随着时间延长，矿物结合态有机碳（MAOC）逐渐通过矿物保护机制成为碳长期固存的主要途径。

本研究结果表明，矿物结合态有机碳（MAOC）含量与土壤有机碳固存量之间存在显著的线性正相关关系。供试沙质土壤中 MAOC 含量介于 1.93~15.28 $g \cdot kg^{-1}$ 之间，处于相对较高水平，表明 MAOC 是沙质土壤有机碳固存的重要组分。已有研究指出，黏粉粒主要通过促进植物源碳的输入以推动 MAOC 的积累[33]。本研究中，秸秆颗粒添加后沙质土壤 MAOC 的含量显著提升，表明外源有机物输入可通过促进矿物-有机复合体的形成，增强对碳的物理化学保护作用。相关研究进一步证实，MAOC 在维持土壤有机碳稳定性方面具有重要作用[34]，其主要机制源于矿物表面对有机物的特异性吸附与结合，从而有效减缓有机碳的降解[35]。

3.3 秸秆颗粒添加对沙质土壤碳氮协同固持效应的影响

本研究通过添加秸秆颗粒显著降低了土壤容重，这主要归因于秸秆材料本身疏松多孔、密度较低的物理特性，从而减少了单位体积土壤的质量[36]。在 PS150-2a 处理中观察到土壤持水量达到最高，表明秸秆颗粒不仅具备物理吸水能力，其在分解过程中形成的有机质也含有大量亲水基团，进一步增强了土壤对水分的吸附能力[37]。同时，秸秆颗粒添加显著提高了土壤总孔隙度和毛管孔隙度，说明随着秸秆腐解的推进，所产生的有机物质与沙粒结合形成稳定且疏松的团粒结构，从而优化了土壤孔隙状况[38]。沙质土壤容重的降低与水分条件的改善，为秸秆源碳向土壤有机碳的转化提供了必要的物理空间和水分环境[39]，有利于增强土壤碳氮的固存潜力。同时，土壤总孔隙度和毛管孔隙度的增加也为有机碳和氮素的物理固存与稳定创造了关键的微环境[40]。

为了系统识别影响沙质土壤碳氮固存的关键驱动因子，本研究采用多元统计方法进行了综合分析。冗余分析结果证实，矿物结合态有机碳是影响土壤有机碳、全氮及碳氮比变异的关键主导因子。该现象主要源于沙质土壤独特的物理结构特性，高比例沙粒提供了大量矿物表面，促使输入有机碳易于形成稳定的矿物结合态有机碳（MAOC）；同时，细颗粒和黏粒含量有限，限制了颗粒态有机碳（POC）的生成与积累。上述因素共同导致沙质土壤有机碳主要赋存于矿物结合态。该分布特征与有机质-矿物复合体的多种稳定机制有关，包括物理吸附、化学键合[41]及微孔封闭[42]等，这些过程共同增强了有机碳在沙质土壤中的持久性。基于偏最小二乘路径模型的分析结果，本研究揭示了秸秆颗粒添加对沙质土壤碳氮协同固持的促进机制。秸秆颗粒输入可显著促进矿物结合态有机碳（MAOC）的形成，进而增强土壤固碳能力。由于沙质土壤具有细颗粒含量低、本底有机碳匮乏的特点，其矿物表面吸附位点相对充足，短期内远未达到碳吸附饱和状态[13]，因此秸秆颗粒腐解产生的有机物质可被矿物组分有效吸附[43]，进而形成矿物结合态有机碳（MAOC）。土壤有机碳与全氮含量之间呈极显著正相关，说明有机碳的积累有效促进了氮素的协同固持。综上，秸秆颗粒添加通过调控有机碳组分转化，尤其是促进 MAOC 形成，是沙质土壤碳氮协同提升的关键途径。

4 结 论

秸秆颗粒添加对沙质土壤的改良效应显著，具体表现为土壤有机碳与全氮含量显著提高，其中颗粒态有机碳、矿物结合态有机碳及易氧化有机碳组分均呈增加趋势，且颗粒态有机碳在总有机碳中的分配比例也有所提高。与此同时，秸秆颗粒的添加有效降低了土壤容重并增强了持水能力。进一步分析表明，土壤碳氮固持能力的提升主要与矿物结合态有机碳含量的增加以及毛管孔隙度的改善密切相关，其中矿物结合态有机碳是调控有机碳固持的关键因子。因此，秸秆颗粒输入通过显著提高矿物结合态有机碳含量，有效促进了土壤碳氮的协同固持。综上所述，在科尔沁沙地施加秸秆颗粒可同步实现沙质土壤肥力提升和物理结构优化，为沙质土壤生态修复提供了一种基于有机质调

控的协同改良策略。

参考文献（References）

[1] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions[J]. Nature Sustainability, 2020, 3(5): 391-398.

[2] Sha Z Y, Bai Y F, Li R R, et al. The global carbon sink potential of terrestrial vegetation can be increased substantially by optimal land management[J]. Communications Earth & Environment, 2022, 3: 8.

[3] Esmaeelnejad L, Shorafa M, Gorji M, et al. Impacts of woody biochar particle size on porosity and hydraulic conductivity of biochar-soil mixtures: An incubation study[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(14): 1710-1718.

[4] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777-783.

[5] Angst G, Mueller K E, Castellano M J, et al. Unlocking complex soil systems as carbon sinks: Multi-pool management as the key[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2967.

[6] He N B, Gao J, Sun N, et al. Effects of fertilization on soil readily oxidizable carbon of croplands in China: A meta-analysis[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2024(5): 8-16. [何宁波，高静，孙楠，等. 施肥对我国农田土壤易氧化有机碳影响的整合分析[J]. 中国土壤与肥料, 2024(5): 8-16.]

[7] Liang Y, Al-Kaisi M, Yuan J C, et al. Effect of chemical fertilizer and straw-derived organic amendments on continuous maize yield, soil carbon sequestration and soil quality in a Chinese Mollisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2021, 314: 107403.

[8] Sun Y Y, Dou J G, Liu F M, et al. Effects of straw return methods on organic carbon fractions in soil aggregates of saline-alkaline dryland[J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(4): 1144-1151. [孙云云，窦金刚，刘方明，等. 秸秆还田方式对盐碱旱田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 生态学杂志, 2025, 44(4): 1144-1151.]

[9] Li T J, Zhang N Y, Shen W Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil aggregate stability and its driving factors in black soil and brown soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(19): 3835-3847. [李天娇，张乃于，申文艳，等. 长期施肥对黑土和棕壤团聚体稳定性的影响及驱动因素[J]. 中国农业科学, 2024, 57(19): 3835-3847.]

[10] Li W H, Chen H N, Nan X X, et al. Effects of cropping system of *Lycium barbarum* L.and cover crops on soil labile organic carbon pool in an arid region of Ningxia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(5): 1324-1332. [李文慧，陈浩楠，南雄雄，等. 宁夏旱区枸杞/覆盖作物种植体系对土壤活性有机碳库的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(5): 1324-1332.]

[11] Liu X T, Cao C Y, Dang H K, et al. Changes in soil organic carbon under long-term straw incorporation in fluvo-aquic soil of the North China Plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2025, 43(1): 132-138. [刘学彤，曹彩云，党红凯，等. 华北平原长期秸秆还田潮土土壤有机碳变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(1): 132-138.]

[12] Lu Y F, Xie Z L, Gao Y, et al. Effects of short-term warming and amounts of residue return on soil organic carbon in black soils of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9805-9814. [芦怡芳，谢忠雷，高燕，等. 短期增温与秸秆还田量对东北黑土有机碳组分的协同影响[J]. 生态学报, 2024, 44(21): 9805-9814.]

[13] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.

[14] Tang P F, Han B B, Wang J M, et al. Effects of cotton straw returning on the soil organic carbon and organic carbon mineralization dynamics[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 127-133. [唐鹏飞，韩兵兵，王佳敏，等. 棉秆还田不同年限对土壤有机碳及其矿化特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 127-133.]

[15] Ji Y K, Yan L, Zhu J F, et al. Response of soil organic carbon to maize stovers returning to in farmland diverse main maize-producing areas based on meta-analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(12): 95-106. [纪妍可，焉莉，朱健菲，等. 基于 Meta 分析的不同玉米主产区土壤有机碳含量对秸秆还田的响应[J]. 农业工程学报, 2025, 41(12): 95-106.]

[16] Wang J, Zhang L, Pang H C, et al. Returning granulated straw for accelerating decomposition rate and improving soil fertility[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(6): 177-183. [王婧, 张莉, 逄焕成, 等. 秸秆颗粒化还田加速腐解速率提高培肥效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 177-183.]

[17] Wang X Q, Lü G Y, Zhang Y, et al. Annual burying of straw after pelletizing: A novel and feasible way to improve soil fertility and productivity in Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 230: 105699.

[18] Zan G S, Wang C P, Li F, et al. Key data results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification[J]. Forest Resources Management, 2023(1): 1-7. [昝国盛, 王翠萍, 李锋, 等. 第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. 林业资源管理, 2023(1): 1-7.]

[19] Yang X, Xu L Y, Xia L L, et al. Differences in soil carbon sequestration effects of long-term carbonization straw return on soil in acidic red soil areas in Southern China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,62(5)：1435-1448. [杨馨, 徐灵颖, 夏龙龙, 等. 南方酸性红壤区长期秸秆炭化还田的土壤固碳效应差异[J]. 土壤学报, 2025,62(5) :1435-1448.]

[20] Zhang L, Wang J, Pang H C, et al. Effect of granulated straw incorporation on soil nutrient and grain yield of winter wheat[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(12): 1770-1778. [张莉, 王婧, 逄焕成, 等. 秸秆颗粒还田对土壤养分和冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1770-1778.]

[21] Clark J D, Plante A F, Johnson A H. Soil organic matter quality in chronosequences of secondary northern hardwood forests in western new England[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(2): 684-693.

[22] Bao S D. Soil agro-chemical analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]

[23] Culman S W, Snapp S S, Freeman M A, et al. Permanganate oxidizable carbon reflects a processed soil fraction that is sensitive to management[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76(2): 494-504.

[24] Laboratory of Soil Physics, Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978. [中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978.]

[25] Sheng M, Li J Y, Lei W Y, et al. Characteristics of active carbon fractions and fertility index of black soil under different soil tillage and straw returning amount[J]. Soils and Crops, 2025, 14(1): 53-63. [盛明, 李佳垚, 雷琬莹, 等. 耕作方式与秸秆还田量对黑土有机碳组分和肥力指数的影响[J]. 土壤与作物, 2025, 14(1): 53-63.]

[26] Cui H X, Luo Y L, Chen J, et al. Straw return strategies to improve soil properties and crop productivity in a winter wheat-summer maize cropping system[J]. European Journal of Agronomy, 2022, 133: 126436.

[27] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112391.

[28] Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility[M]//Sustainable Agriculture Volume 2. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011: 761-786.

[29] Wang H Y, Wu J Q, Li G, et al. Changes in soil carbon fractions and enzyme activities under different vegetation types of the northern Loess Plateau[J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(21): 12211-12223.

[30] Zhang X F, Zheng S M, Xia Y H, et al. Responses of soil organic carbon fractions to land use types in hilly red soil regions, China[J]. Environmental Science, 2020, 41(3): 1466-1473. [章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 等. 红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1466-1473.]

[31] Ma H L, Chen C C, Yin Y F, et al. Experimental study on carbon mineralization of different sizes particle in forest soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(5): 1247-1259. [马红亮, 陈灿灿, 尹云锋, 等. 森林土壤不同粒径颗粒的碳矿化研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1247-1259.]

[32] Zhou Y, Li Y Y, Li N, et al. Contribution of soil microbial necromass carbon to soil organic carbon in grassland under precipitation change and its influencing factors in Loess Hilly Region, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(9): 2592-2598. [周玥, 李娅芸, 李娜, 等. 黄土丘陵区降水变化下草地土壤微生物残体碳对土壤有机

碳组分的贡献及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2592-2598.]
[33] Whalen E D, Grandy A S, Sokol N W, et al. Clarifying the evidence for microbial- and plant-derived soil organic matter, and the path toward a more quantitative understanding[J]. Global Change Biology, 2022, 28(24): 7167-7185.
[34] Georgiou K, Jackson R B, Vindušková O, et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J]. Nature Communications, 2022, 13: 3797.
[35] Mosier S, Apfelbaum S, Byck P, et al. Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112409.
[36] Jia R F, Cong R H, Xu Z Y, et al. Meta analysis of straw returning technology to improve soil physicochemical properties and increase the yield of main cereal and oil crop[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(4): 80-89. [贾瑞峰, 丛日环, 徐志宇, 等. 秸秆还田技术改善土壤理化性质提高作物产量的 Meta 分析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 80-89.]
[37] Zhang Q, Chen C, Chen X M, et al. Effects of different depths of straw returning to field on soil physical properties and profile changes of yellow brown soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(2): 308-314. [张奇, 陈粲, 陈效民, 等. 不同秸秆还田深度对黄棕壤土壤物理性质及其剖面变化的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 308-314.]
[38] Tang Y Y, Tang X, Zhao J R. Impact of long-term fertilization based on meta-analysis on stability of soil aggregates in Chinese farmland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2025, 41(9): 117-124. [汤营营, 唐贤, 赵建荣. 基于 Meta 分析的长期施肥对中国农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国农学通报, 2025, 41(9): 117-124.]
[39] Li X Y, Li J, Bi R X, et al. Effects of corn straw concentrated deep returning on soil CO_2 emission in dry land[J]. Soils, 2024, 56(5): 1027-1033. [李晓宇, 李金, 毕润学, 等. 玉米秸秆集中深还田对旱地土壤 CO_2 排放特征的影响[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1027-1033.]
[40] Mu Q, Xia S Y, Li Q Y, et al. Effects of different straw returning forms on shrinkage characteristics of typical lime concretion black soil[J]. Soils, 2024, 56(5): 1084-1090. [穆青, 夏淑媛, 李庆阳, 等. 不同秸秆还田方式对典型砂姜黑土收缩特征的影响[J]. 土壤, 2024, 56(5): 1084-1090.]
[41] Sokol N W, Whalen E D, Jilling A, et al. Global distribution, formation and fate of mineral-associated soil organic matter under a changing climate: A trait-based perspective[J]. Functional Ecology, 2022, 36(6): 1411-1429.
[42] Xue Z J, Li X Y, Jiao L, et al. Advance in the formation and stabilization mechanisms of soil mineral-associated organic carbon[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 12-23. [薛志婧, 李霄云, 焦磊, 等. 土壤矿质结合态有机碳形成及稳定机制的研究进展[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 12-23.]
[43] Mao H R, Cotrufo M F, Hart S C, et al. Dual role of silt and clay in the formation and accrual of stabilized soil organic carbon[J]. Soil Biology ＆ Biochemistry, 2024, 192: 109390.

（责任编辑：檀满枝）