

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.038

CSTR:32310.14.stbxb.2026.02.038

杨森多, 卢宝怡, 陈丽佳, 等. 耕作措施对吉林省坡耕地玉米土壤团聚体腐殖质分布的影响[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 70-82, 92.

YANG Miaoduo, LU Baoyi, CHEN Lijia, et al. Effects of tillage practices on humus distribution of soil aggregates in sloping maize fields of Jilin Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 70-82, 92.

耕作措施对吉林省坡耕地玉米土壤 团聚体腐殖质分布的影响

杨森多^{1,2}, 卢宝怡², 陈丽佳², 陈硕², 韩颀², 孙海航², 王帅²

(1. 吉林农业大学农学院, 长春 130118; 2. 吉林农业科技学院农学院, 吉林 吉林 132101)

摘要: [目的] 为研究不同耕作措施对吉林省中部湿润区坡耕地玉米田土壤团聚体各粒级腐殖质分布与品质的影响, 为优化区域耕作制度、土壤肥力提升提供理论支撑。 [方法] 以舒兰市典型坡耕地玉米田土壤为研究对象, 以常规耕作(CT)为对照, 设置秸秆全量覆盖还田免耕(NT)与秸秆全量还田条带旋耕(ST) 2种保护性耕作模式, 每种模式配套5个子处理(NT1/ST1, 传统免耕/条耕; NT2/ST2; NT1/ST1+减肥+微生物制剂 I; NT3/ST3; NT2/ST2+秸秆促腐(微生物制剂 II); NT4/ST4; NT3/ST3+增密5%; NT5/ST5; NT3/ST3+增密10%), 采用三维荧光光谱、腐殖质组成修改法及主成分分析, 研究大团聚体(>2 mm)、中团聚体(0.25~2 mm)、小团聚体(0.053~0.25 mm)和微团聚体(<0.053 mm)中溶解性有机质(DOM)荧光特征及腐殖质组分在各粒级团聚体中的分布规律。 [结果] 1) 所有处理下各粒级团聚体DOM的荧光指数(FI)均 ≥ 1.9 , 以微生物源为主且受陆源输入影响小; 自生源指数(BIX)为0.6~1.0, DOM生物可利用性较高; NT5处理各粒级DOM腐殖化指数(HIX)均<4, 腐殖化程度最弱, ST5处理在微团聚体中HIX>10, 腐殖化程度最强; 2) ST5处理在各粒级中可提取腐殖酸(HE)、胡敏酸(HA)腐殖化作用最突出; 免耕模式内, NT2处理在大团聚体中HA碳含量(C_{HA})及HA与富里酸(FA)碳含量之比(C_{HA}/C_{FA})最高; 除ST5外, 胡敏素(HM)均在大团聚体中富集; ST3处理在大、中及微团聚体中HA色调系数($\Delta \log K$)较低, NT5处理在小团聚体中HA $\Delta \log K$ 较低, 二者HA分子芳香化程度均较高; NT3与ST3处理在微团聚体中铁结合与黏粒结合HM比值(HM_i/HM_c)较高, 铁氧化物主导HM固定且HM分子结构简单; NT5与CT处理在微团聚体中活性胡敏素占比($(HM_i+HM_c)/HM$)较高, 土壤活性碳比例增加、碳稳定性下降; 3) 主成分分析显示, ST5处理在所有粒级团聚体中的综合表现优于其他处理, NT5处理在各粒级中均处于劣势。 [结论] 秸秆全量还田条带旋耕结合减肥+微生物制剂 I、秸秆促腐及10%增密(ST5处理)是改善该区域坡耕地土壤团聚体腐殖质品质、提升土壤碳库稳定性的最优耕作措施, 对指导该区玉米可持续生产具有重要意义。

关键词: 玉米; 保护性耕作; 土壤团聚体; 腐殖质组分; 溶解性有机质

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0070-13

Effects of Tillage Practices on Humus Distribution of Soil Aggregates in Sloping Maize Fields of Jilin Province

YANG Miaoduo^{1,2}, LU Baoyi², CHEN Lijia², CHEN Shuo², HAN Qi², SUN Haihang², WANG Shuai²

(1. College of Agriculture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. College of Agriculture, Jilin Agricultural Science and Technology College, Jilin, Jilin 132101, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of different tillage practices on the distribution and quality of humus within various soil aggregate size fractions in sloped maize fields of the humid central region of Jilin Province. The findings were intended to provide a theoretical basis for optimizing regional tillage systems and

收稿日期: 2025-10-20

修回日期: 2025-11-06

录用日期: 2025-11-14

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-19

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1501100)

第一作者: 杨森多(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事玉米高产高效栽培领域研究。E-mail: 15500301367@163.com

通信作者: 王帅(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤生物及环境化学研究。E-mail: wangshuai@jlnku.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

enhancing soil fertility sustainability. **[Methods]** Conventional tillage (CT) served as the control, while two conservation tillage systems were established in a typical sloped maize field in Shulan City: no-tillage with full straw mulching (NT) and strip rotary tillage with full straw mulching (ST). Each tillage system included five sub-treatments: NT1/ST1 (traditional no-tillage/strip tillage), NT2/ST2 (NT1/ST1 with reduced fertilizer input plus microbial agent I), NT3/ST3 (NT2/ST2 supplemented with microbial agent II to accelerate straw decomposition), NT4/ST4 (NT3/ST3 with 5% increased soil compaction), and NT5/ST5 (NT3/ST3 with 10% increased soil compaction). Three-dimensional fluorescence spectroscopy, humus composition, and principal component analysis (PCA) were employed to characterize the fluorescence properties of dissolved organic matter (DOM) and the distribution patterns of humus components across four aggregate size fractions: large aggregates (>2 mm), medium aggregates (0.25~2 mm), small aggregates (0.053~0.25 mm), and microaggregates (<0.053 mm). **[Results]** 1) The fluorescence index (FI) of DOM in all aggregate fractions and under all treatments was ≥ 1.9 , indicating a predominantly microbial origin with negligible influence from terrestrial inputs. The autochthonous contribution (BIX) ranged from 0.6 to 1.0, suggesting relatively high DOM bioavailability. In the NT5 treatment, the humification index (HIX) across all aggregate fractions was < 4 , corresponding to the lowest humification degree; in contrast, the HIX of microaggregates in ST5 exceeded 10, representing the highest humification level. 2) Among all treatments, ST5 exhibited the most significant humification, with significantly higher contents of humic-extracted acid (HE) and humic acid (HA). Under no-tillage conditions, NT2 showed the highest HA carbon content (C_{HA}) and C_{HA}/C_{FA} ratio (HA carbon/fulvic acid carbon) in large aggregates. Except for ST5, humin (HM) was primarily enriched in large aggregates. ST3 resulted in lower HA color coefficients ($\Delta \log K$) in large, medium, and microaggregates, while NT5 reduced $\Delta \log K$ in small aggregates-both phenomena indicating higher aromaticity of HA molecules. In NT3 and ST3, the ratio of iron-bound to clay-particle-bound HM (HM_i/HM_c) was elevated in microaggregates, suggesting that iron oxides dominated HM stabilization and that HM had a simpler molecular structure. Following NT5 and CT treatments, the proportion of active humin [$(HM_i+HM_c)/HM$] increased in microaggregates, indicating enhanced labile C content and reduced C pool stability. PCA results demonstrated that ST5 exhibited the best overall performance across all aggregate fractions, whereas NT5 performed the poorest. **[Conclusion]** For sloping farmlands in this region, the optimal tillage practice to improve humus quality and enhance soil C pool stability-which was critical for guiding sustainable maize production-was the integrated approach of full straw return, strip rotary tillage, reduced fertilizer application, combined use of microbial agents I and II, and a 10% increase in soil compaction (i.e., the ST5 treatment).

Keywords: maize; conservation tillage; soil aggregate; humus fraction; dissolved organic matter

Received: 2025-10-20

Revised: 2025-11-06

Accepted: 2025-11-14

Online(www.cnki.net): 2025-12-19

粮食安全是我国农业高质量发展的基石与国家战略稳定的核心支撑。玉米作为三大主粮之一,其产能稳定直接关系国家粮食供给安全^[1]。我国玉米主产区坡耕地面积约 3.83×10^7 hm^2 , 占全国耕地总面积的 28%, 是玉米生产的重要空间载体;但传统陡坡开垦与顺坡耕作导致水土流失量占全国的 6.7%, 既削弱土壤抗蚀抗冲性、制约土地生产力,又破坏坡耕地的水土保持功能,成为农业可持续发展的关键瓶颈^[2]。目前,坡耕地玉米田耕作调控是农业生态学与土壤学的核心研究方向,秸秆全量覆盖还田免耕

(no-tillage with full straw mulching and returning, NT)、秸秆全量覆盖还田条带旋耕(strip rotary tillage with full straw returning, ST)与常规耕作(conventional tillage, CT)是 3 类典型模式^[3]。我国东北部玉米产区传统 CT 以秸秆离田焚烧后旋耕/犁耕为主,加速土壤有机质(soil organic matter, SOM)矿化且因有机碳输入不足导致土壤肥力衰退,最终破坏农田生态系统的水土保持功能^[4]。相比之下,NT、ST 等保护性耕作通过减少土壤扰动、留存作物残茬等方式,能显著提升 SOM 含量、优化土壤团粒结构,进而增

强土壤保水保肥能力^[5]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其形成与稳定性不仅决定腐殖质组分的分布特征及转化效率^[6],还直接影响土壤抗侵蚀能力,是维系坡耕地农田生态系统物质循环、能量流动及生产力可持续性的关键载体^[7]。

围绕耕作措施对土壤溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)、腐殖质组分及团聚体系统的调控机制,国内外已有大量研究。MAN等^[8]基于37 a长期定位试验发现,NT、ST可显著促进DOM积累并增强其化学稳定性,CT频繁扰动土壤,加速DOM微生物分解,提升其淋失风险,且坡耕地中差异更突出,进而改变腐殖质组分分布;XU等^[9]进一步揭示,团聚体可调控DOM分子结构特性与腐殖质空间分布,但其对腐殖质固持的调控效应仍需深入解析;FENG等^[10]通过34 a田间试验验证,耕作措施与施肥管理的协同作用可重塑团聚体结构稳定性,最终影响不同粒级团聚体中腐殖质组分的分配格局。在耕作措施对腐殖质分解与分布的具体效应上,NIU等^[11]研究指出,NT通过降低土壤通气性与微生物活性来减缓腐殖质分解;ST能优化土壤孔隙与水热条件以改善腐殖质在各粒级团聚体中的分布均匀性,CT则破坏团聚体对腐殖质的物理保护,尤其使 >2 mm大团聚体中腐殖质含量大幅下降;JORDON等^[12]研究发现,NT虽利于有机质留存,但因分解速率低,未充分转化的原始有机质易富集于 <0.053 mm微团聚体中,导致土壤整体腐殖化程度偏低。针对腐殖质关键组分胡敏酸(humic acid, HA),TANG等^[13]研究提出,改变团聚体结构可影响HA在不同粒级的分配比例,调节土壤理化性质可改变HA合成效率,且 $0.25\sim 2$ mm粒级中HA对耕作响应最敏感,可作为评估耕作效应的指示指标;MACKAY等^[14]研究进一步证实,NT下 $0.25\sim 2$ mm粒级的HA含量显著高于CT;NDZELU等^[7]研究强调, <0.053 mm微团聚体因表面吸附位点丰富,是SOM与HA的重要固持载体,其在坡耕地的抗冲刷能力直接决定HA的留存效率。施肥与秸秆管理作为耕作系统的重要组成部分,也深刻影响腐殖质动态;GAO等^[15]研究发现,长期养分输入可改变土壤碳储存总量与分配比例,进而影响HA分子结构及色调系数 $\Delta\log K$,且该效应在 >2 mm粒级中更突出;MONDAL等^[16]与HOU等^[17]、PAYE等^[18]均研究指出,NT通过减少土壤扰动促进团聚体稳定,可显著提升 >2 mm团聚体HA含量,ST与CT的差异主要源于土壤扰动引发的HA分布偏移,其在坡耕地的适用性仍需验证。在腐殖质结合形态调控方面,AL-WAZZAN等^[19]研究发现,

NT、ST可通过降低团聚体破坏风险,有效保护黏粒结合胡敏素(clay-bound humin, HM_c),提升 <0.053 mm粒级 HM_c 含量;REN等^[20]则指出,保护性耕作配施有机肥可进一步促进铁结合胡敏素(iron-bound humin, HM_i)积累;URAMOTO等^[21]与JI等^[22]研究表明,NT可促进 >2 mm大团聚体形成,秸秆还田则通过提升溶解性有机碳浓度加速自身分解,进而促进大团聚体形成并提升各粒级稳定腐殖质含量;XIANG等^[23]针对东北黑土的研究显示,秸秆覆盖配施磷肥可促进磷素活化,进而加速SOM微生物分解,改变HA与富里酸(fulvic acid, FA)的生成比例;LIU等^[24]研究发现,CT因提升土壤通气性与微生物活性,加速有机质分解,直接降低 C_{HA}/C_{FA} 比值,而坡耕地因存在径流导致的养分流失,其 C_{HA}/C_{FA} 平衡机制可能与平作区存在差异。

现有研究多集中于NT、ST对土壤团聚体组成及腐殖质组分的调控,但对不同粒级团聚体中腐殖质组分分布规律研究较少,更缺乏耕作-秸秆-施肥-密度组合技术的系统研究,尤其是微生物菌剂可优化微生物群落结构,加速秸秆腐解与有机碳转化,为腐殖质合成提供充足前体物质^[3,24],此科学假设尚有待验证。本研究以吉林省中部坡耕地玉米田为研究对象,以CT为对照,解析NT、ST及配套组合技术对团聚体结构与腐殖质分布的调控效应。试验设置5组配套技术处理:1)当地农民传统种植(NT1/ST1,基础密度6.5万株/hm²);2)减肥增效(NT2/ST2;减施10%N、30%P、10%K);3)减肥增效+秸秆促腐(NT3/ST3);4)减肥增效+秸秆促腐+增密5%(NT4/ST4);5)减肥增效+秸秆促腐+增密10%(NT5/ST5)。测定各粒级团聚体(>2 mm、 $0.25\sim 2$ mm、 $0.053\sim 0.25$ mm和 <0.053 mm)中可提取腐殖酸碳含量(C_{HE})、胡敏酸碳含量(C_{HA})、胡敏素碳含量(C_{HM}),以及 C_{HA}/C_{FA} 、 HM_i/HM_c 、 $(HM_i+HM_c)/HM$ 比值与HA $\Delta\log K$;同步分析DOM的荧光指数(fluorescence index, FI)、自生源指数(autochthonous contribution, BIX)、腐殖化指数(humification index, HIX),结合主成分分析(PCA)揭示耕作-技术组合的综合调控机制,旨在为坡耕地玉米田耕作制度优化、水土流失防控提供理论支撑,同时为吉林省东部黑土坡耕地生态保育与农业绿色可持续发展提供技术参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试玉米品种选用中熟杂交种HA9306,由吉林鸿祥农业集团鸿祥种业有限公司提供。该品种生育期约125~130 d,株型紧凑,抗倒伏能力较强,适宜吉

林省东部坡耕地积温条件($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 2 600~2 800 $^{\circ}\text{C}$),且当地玉米主产区种植面积较广,具有较强的区域代表性。复混肥料由吉林吉丹利农业有限公司生产,总养分质量分数 $\geq 50\%$ (N-P₂O₅-K₂O=25-10-15),颗粒粒径 2~4 mm,水溶性养分占比 $\geq 85\%$ 。农业微生物制剂(I)购于中化现代农业(吉林)有限公司,有效功能菌株为枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)与黏液芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*),二者比例为 1:1;每克制剂有效活菌数 $\geq 5.0\times 10^8$ CFU,兼具解磷固氮(可活化土壤难溶性磷素 20%~30%)与促生抗逆(提高根系活力 15%~20%)功能,载体为风化煤基腐殖酸(质量分数 $\geq 15\%$),经活化处理后能提升腐殖酸有效性与菌剂兼容性,呈粉末状,作为种肥使用。微生物制剂(II,商品名“太隆农浩康”)由内蒙古农浩康农业生物技术有限公司提供,主要有效成分为放线菌与酵母菌(活菌数 $\geq 2.0\times 10^8$ CFU/g),辅以纤维素酶(活性 ≥ 50 U/g),核心功能为加速秸秆腐解(可缩短秸秆腐解周期 25%~30%),调节土壤微生物群落结构,作为秸秆促腐剂使用。

1.2 试验设计

1.2.1 试验地点与基础条件 田间试验于 2024 年 4—10 月在吉林省舒兰市天德乡王忠成家庭农场(44°30'58"N,126°42'16"E)开展。该区域属温带大陆性季风气候,年平均气温 4.3 $^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 680~720 mm(主要集中于 6—8 月,占全年降水量的 65%~70%),无霜期 135~140 d,试验期内 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温 2 750 $^{\circ}\text{C}$,符合玉米中熟品种生长需求。

供试土壤类型为白浆土(属于半水成土纲),耕层厚度 18~22 cm,试验前测定其基础理化性质:SOM 质量分数 18.56 g/kg,pH 6.42,全氮 1.02 g/kg,速效磷 12.35 mg/kg,速效钾 118.6 mg/kg;地块坡度为 6°~8°(属于缓坡耕地,符合东北地区坡耕地玉米种植典型坡度范围),前茬作物为玉米,种植历史超过 10 a,土壤利用方式与肥力水平具有区域坡耕地代表性。

1.2.2 试验处理设置 基于耕作模式-配套技术措施协同,设置 3 种核心耕作模式:常规耕作(CT,对照)、免耕(NT)、条带旋耕(ST),其中 NT 与 ST 分别配套 5 组梯度技术处理(聚焦减肥增效、秸秆促腐和种植密度调控),所有处理均设置 3 个田间重复小区,小区面积为 30 m²(5 m \times 6 m),小区间设置 0.5 m 宽隔离行,防止水肥串流。具体耕作操作规范与处理参数为:

1) 耕作模式操作流程

免耕(NT):秋季玉米成熟后,用约翰迪尔 C120 联合收获机收获果穗,同步将秸秆粉碎至 ≤ 25 cm(粉碎均匀度 $\geq 90\%$),平铺地表(覆盖厚度 8~10 cm);次年春季播种前 1~2 d,用东方红 1LZ-2.5 型秸秆归行机将播种带秸秆归集至休闲带(归行宽度 40 cm,匹配后续窄行播种带)。待 5 cm 深度土壤温度连续 3 d 稳定 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (当地通常为 5 月 5~8 日),用马斯奇奥 MT-4 免耕播种机播种,一次性完成开沟(深度 5~6 cm)、播种、侧深施肥(距种子 8~10 cm)、覆土(厚度 3~4 cm)与镇压,种植模式为宽窄行(窄行 40 cm,宽行 80 cm)。

条带旋耕(ST):秋季收获与秸秆粉碎、平铺操作同 NT;播前 1 周,先用秸秆归行机将播种带秸秆归集至休闲带,再用雷沃 M704 拖拉机配套条耕机对播种带进行条耕,条耕宽度 40~50 cm(与窄行播种带重合),耕作深度 8~10 cm(仅扰动播种带土壤,休闲带保持原状),打破犁底层且不破坏秸秆覆盖层;春季播种、种植行距与 NT 一致,玉米苗期(6 叶期,约 6 月中旬)对宽行深松,深度 25~30 cm,增强土壤通透性与蓄水能力。

常规耕作(CT):秋季收获后人工收集秸秆就地焚烧(彻底度 $\geq 95\%$);翌年 4 月下旬,用东方红 LX904 拖拉机配套三铧犁翻耕(耕作深度 18~20 cm),翻耕后用圆盘耙耙平;播种前 1 d,结合起垄(垄高 15~18 cm,垄距 65 cm,等行距种植)一次性基施肥料,用常规播种机播种(深度 5~6 cm),无苗期深松作业。

2) 配套技术措施

NT 与 ST 模式下 5 组配套技术措施围绕“传统种植、减肥、促腐、增密”梯度设计,CT 仅设常规耕作处理,具体处理编码与措施参数见表 1。

表 1 不同耕作模式及配套技术措施处理编码与具体措施

Table 1 Codes and specific measures of different tillage practices and supporting technical treatments

耕作模式	传统种植	NT1/ST1+减肥+微生物制剂 I	NT2/ST2+秸秆促腐(微生物制剂 II)	NT3/ST3+增密 5%	NT3/ST3+增密 10%
免耕(NT)	NT1	NT2	NT3	NT4	NT5
条带旋耕(ST)	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5
常规耕作(CT)	CT	—	—	—	—

注:CT 为对照:秸秆焚烧,基肥为复混肥 1 000 kg/hm²+微生物制剂 I 50 kg/hm²,等行距种植(65 cm),密度 6.5 $\times 10^4$ 株/hm²;NT/ST 模式下秸秆均粉碎后覆盖(NT 全田覆盖,ST 仅休闲带覆盖、播种带条耕深埋),CT 模式下秸秆焚烧;NT2/ST2~NT5/ST5 模式下基肥为复混肥 400 kg/hm²+硫酸锌 30 kg/hm²+微生物制剂 I 400 kg/hm²,7 月中旬追施尿素 150 kg/hm²,氯化钾 100 kg/hm²。

NT1/ST1:传统免耕/条耕模式,种植密度 6.5×10^4 株/hm²(株距27 cm,匹配宽窄行/等行距),基肥用量同CT(复混肥1 000 kg/hm²+微生物制剂I 50 kg/hm²),不追肥,秸秆管理与CT差异(NT1/ST1为覆盖,CT为焚烧)。

NT2/ST2:NT1/ST1+减肥+微生物制剂I,在NT1/ST1基础上减少化肥施用:基肥改为复混肥400 kg/hm²+硫酸锌30 kg/hm²+微生物制剂I 400 kg/hm²,7月中旬追施尿素150 kg/hm²、氯化钾100 kg/hm²,减肥比例(减N 32.4%,减P₂O₅ 60%、减K₂O 20%)依据当地3414田间肥效试验计算的化肥利用率和土壤养分水平确定,在不增加农资成本投入的前提下,通过微生物制剂I提升养分利用效率。

NT3/ST3:NT2/ST2+秸秆促腐(微生物制剂II),在NT2/ST2基础上增施微生物制剂II(20 kg/hm²),于秸秆平铺后均匀撒施,加速秸秆腐解与有机碳归还。

NT4/ST4:NT3/ST3+增密5%,在NT3/ST3基础上调整种植密度至 6.83×10^4 株/hm²(株距缩短至25.6 cm)。

NT5/ST5:NT3/ST3+增密10%,在NT3/ST3基础上调整种植密度至 7.15×10^4 株/hm²(株距缩短至24.3 cm)。

1.3 测试指标与方法

1.3.1 土壤团聚体组成测定 土壤样品采集于玉米收获期(10月上旬),用五点取样法采集各小区0~20 cm耕层土壤,去除动植物残体后自然风干。采用湿筛法把土壤团聚体分成4个粒级:大团聚体(>2 mm)、中团聚体(0.25~2 mm)、小团聚体(0.053~0.25 mm)和微团聚体(<0.053 mm)。将100 g的风干土壤样本放入2 mm的筛子中,并在过筛前用5 mL的去离子水慢慢浸泡5 min,然后将样品放入F-SE200型土壤团粒分析仪(湖南卡斯试验仪器有限公司)由3个串联的筛子(2、0.25、0.053 mm)组成的振动器水箱中,在5 min内垂直振荡50次(3 cm)。筛分后,留在每个筛子中的粒级被冲入单独的烧杯中,留在桶中的粒级(<0.053 mm)沉淀24 h。第2 d,将各粒级烘干并留存备用。

1.3.2 土壤溶解性有机质(DOM)提取与荧光特性测定 取湿筛分离后的各粒级团聚体样品,研磨过筛后称5.00 g于100 mL离心管中。液土比10:1放入SHZ-88型恒温水浴振荡器(金坛市医疗仪器厂),提取后用TDL-5-A型离心机(上海安亭科学仪器厂)离心,取上清液通过0.45 μm微孔滤膜抽滤,滤液即为DOM提取液,转移至棕色试剂瓶中进行荧光测定。采用F-7000型荧光分光光度计(日立公司,日

本)测定DOM荧光光谱,设置测定参数:以蒸馏水为空白对照,基于荧光光谱数据计算3个关键荧光指标。FI: $E_x=370$ nm时, $E_m=450$ nm与 $E_m=500$ nm处的荧光强度比值;BIX: $E_x=310$ nm时, $E_m=380$ nm与 $E_m=430$ nm处的荧光强度比值;HIX: $E_x=254$ nm时, $E_m=435\sim 480$ nm的积分值与 $E_m=300\sim 345$ nm的积分值比值。

1.3.3 土壤腐殖质组分测定 采用腐殖质组成修改法提取和分离腐殖质各组分。首先,加入蒸馏水分离土壤和水溶物(WSS)后(70 ± 2)°C恒温振荡,用0.1 mol/L NaOH+Na₄P₂O₇混合液提取1 h,提取冷却离心过滤洗涤,即为可提取腐殖酸(humic-extracted acid, HE)溶液,提取液进行酸沉降,分离HA和FA;HE和HA的碳质量分数(分别记为C_{HE}和C_{HA})均采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定,其中C_{FA}=C_{HE}-C_{HA},经提取后剩余的不溶残渣为HM。采用Pallo修改法将HM进行分组,先用0.5 mol/L H₂SO₄溶解后用0.2 mol/L NaOH提取出HM_i,测定其碳质量分数C_{HMi}。加入1 mol/L HF-HCl混合液后用0.2 mol/L NaOH提取出HM_c,测定碳质量分数C_{HMc}。剩余残渣为不溶性胡敏素(insoluble humin, HM_r),测定碳质量分数C_{HMr};总胡敏素碳质量分数C_{HM}=C_{HMi}+C_{HMc}+C_{HMr},HM_i/HM_c和(HM_i+HM_c)/HM比值分别依据C_{HMi}/C_{HMc}和(C_{HMi}+C_{HMc})/C_{HM}计算。HA Δlog K的测定:取HA溶液,采用TU-1900型紫外可见分光光度计(北京普肯耶通用仪器有限公司)测定400、600 nm处波长的吸光度,计算Δlog K:Δlog K=lg(A₄₀₀)-lg(A₆₀₀)。

1.4 统计分析

所有测定数据均为“3个田间重复小区×3次实验室平行测定”的平均值,Excel 2021软件处理基础数据,以标准差(SD)表示离散程度(图表中误差棒)。Origin Pro 2021软件绘团聚体质量百分比、腐殖质组分质量分数等图;用Python 3.13.7(Jupyter Lab)软件绘制腐殖质组分与DOM荧光指数的相关性热图及网络图;SPSS 20.0软件进行统计分析,对不同处理指标进行单因素方差分析(ANOVA),Duncan新复极差法多重比较($p < 0.05$);主成分分析(PCA)提取关键影响因素,PCA前对数据做Z-score标准化以统一量纲。

2 结果与分析

2.1 不同耕作措施对土壤团聚体DOM荧光特征的影响

DOM的三维荧光光谱(3D-EEM)中,FI≥1.9为微生物代谢产物为主,1.4~1.9为植物残体分解与微生物代谢混合源,FI≤1.4为植物源;BIX<0.6为陆

源输入为主,0.6~0.8为微生物与人类活动共同贡献,0.8~1.0为高微生物活性与生物可利用性;HIX<4为低腐殖化程度,HIX>10为高腐殖化程度^[25]。

由表 2 可知,所有处理下各粒级团聚体 FI 值均为 1.90~2.26,且 ≥ 1.9 ,粒级间无统计学显著差异。其中 NT5 在各粒级中 FI 值最高(>2 mm 为 2.17,0.25~2 mm 为 2.26,0.053~0.25 mm 为 2.24,<0.053 mm 为 2.07);ST5 与 CT 的 FI 值相对较低,尤其是<0.053 mm 粒级为 1.90;BIX 值整体为 0.62~0.93。

NT5 在 ≥ 0.25 mm 粒级(>2 mm 为 0.82,0.25~2 mm 为 0.93)与<0.053 mm 粒级(0.72)中 BIX 值均为同粒级最高,且 0.25~2 mm 粒级 BIX>0.8;而 ST1 与 ST5 在<0.053 mm 粒级中 BIX 值最低(均为 0.62)。HIX 值粒级分异与处理效应最为显著($p<0.05$)。NT5 各粒级中 HIX 值均低于其他处理(0.38~3.77),且<4.00;ST4 与 ST5 在<0.053 mm 粒级中 HIX 值最高(10.46、10.71),且>10.00,显著高于同粒级其他处理;CT 在各粒级 HIX 值为 2.12~3.89。

表 2 不同耕作措施对土壤团聚体中 DOM 荧光特征的影响

Table 2 Effects of different tillage practices on the fluorescence characteristics of DOM in soil aggregates

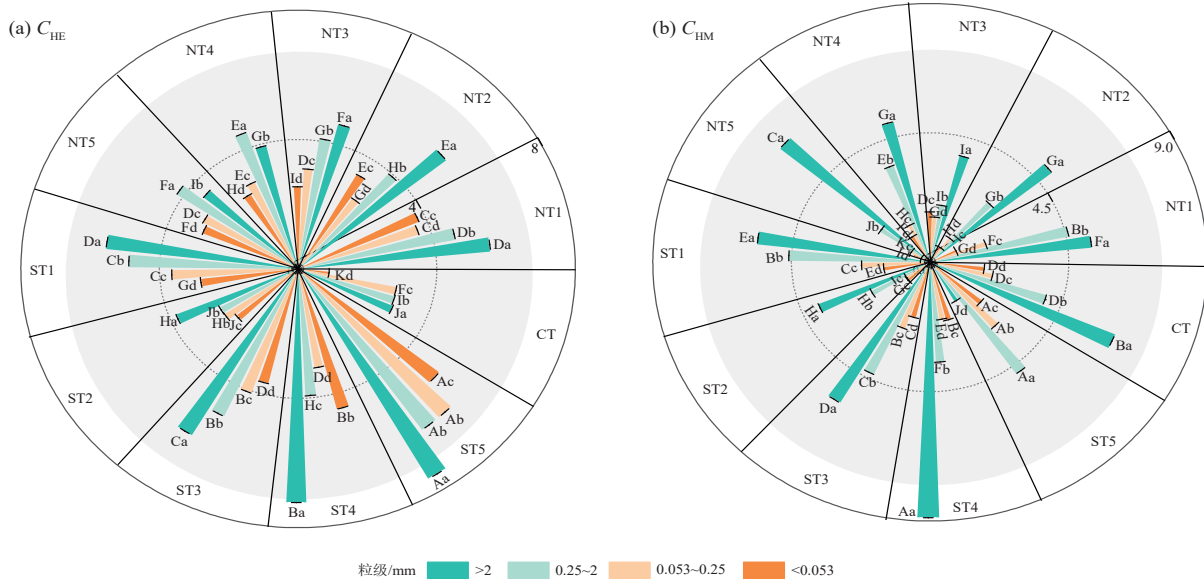
指标	处理	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	
荧光指数 (fluorescence index, FI)	NT1	2.07±0.01Fb	2.11±0.01Ga	2.13±0Ca	1.96±0.01Cc	
	NT2	2.15±0.01Ba	2.13±0.01Eb	2.14±0Cab	1.99±0.01Bc	
	NT3	2.11±0.01Ec	2.15±0.01DEa	2.13±0.01Cb	1.97±0.01Cd	
	NT4	2.15±0.01Ba	2.14±0.01Ea	2.04±0.01Eb	1.90±0.01Fc	
	NT5	2.17±0.01Ac	2.26±0.01Aa	2.24±0Ab	2.07±0.01Ad	
	ST1	2.16±0.01ABa	2.13±0.01EFb	2.13±0Cb	1.91±0.01EFc	
	ST2	2.10±0.01Ec	2.22±0.01Ba	2.17±0.01Bb	2.00±0.01Bd	
	ST3	2.13±0.01CDb	2.18±0.01CDa	2.18±0.01Ba	1.97±0.01Cc	
	ST4	2.16±0.01ABa	2.16±0.01Da	2.13±0.01Cb	1.93±0.01Cc	
	ST5	2.08±0.01Fa	2.04±0.01Hb	2.01±0.01Fc	1.90±0.01Fd	
	CT	2.13±0.01CDa	2.00±0.01Ic	2.06±0.01Db	1.92±0.01CDd	
	自生源指数 (autochthonous contribution, BIX)	NT1	0.75±0Db	0.77±0.01EFb	0.82±0.01Ca	0.65±0.01Cc
		NT2	0.72±0Eb	0.79±0CDb	0.79±0.01Da	0.65±0Cc
		NT3	0.72±0Eb	0.78±0DEb	0.79±0.01Da	0.68±0.01Bc
		NT4	0.77±0Ca	0.78±0DEa	0.73±0.01Eb	0.65±0Cc
NT5		0.82±0.01Ac	0.93±0.01Ac	0.89±0.01Bb	0.72±0Ad	
ST1		0.76±0.01CDa	0.76±0Fa	0.73±0.01Eb	0.62±0Dc	
ST2		0.76±0.01CDb	0.76±0.01Fb	0.92±0.01Aa	0.68±0Bc	
ST3		0.73±0Ec	0.78±0.01DEc	0.80±0.01Da	0.67±0Bd	
ST4		0.80±0.01Ba	0.81±0Ba	0.80±0.01Da	0.64±0.01Cb	
ST5		0.73±0.01Ea	0.73±0.01Ga	0.69±0.01Fb	0.62±0Dc	
CT	0.80±0.01Ba	0.80±0.01BCa	0.69±0Fb	0.67±0.01Bb		
腐殖化指数 (humification index, HIX)	NT1	5.25±0.01Cb	4.83±0.01Dd	5.04±0.01Ec	8.92±0.01Ca	
	NT2	5.77±0.01Bb	4.93±0.01Cd	5.28±0.01Cc	7.25±0.01Fa	
	NT3	6.62±0.01Aa	4.54±0.01Gc	4.55±0.01Hc	5.66±0.01Gb	
	NT4	4.92±0.01Eb	4.80±0.01Ed	4.89±0.01Gc	5.52±0.01Ha	
	NT5	0.38±0.01Kd	2.09±0.01Jc	3.12±0.01Kb	3.77±0.01Ka	
	ST1	4.10±0.03Ga	4.78±0.01Fb	4.95±0.01Fc	8.24±0.01Dd	
	ST2	4.23±0.01Fb	4.06±0.01Hc	3.95±0.01Id	4.88±0.01Ia	
	ST3	5.09±0.01Db	4.53±0.01Ga	6.01±0.01Bc	7.97±0.01Ed	
	ST4	3.80±0.01Id	5.12±0.01Bc	5.25±0.01Db	10.46±0.01Ba	
	ST5	3.58±0.01Jd	5.80±0.01Ac	6.07±0.01Ab	10.71±0.01Aa	
CT	3.89±0.01Ha	2.12±0.01Id	3.23±0.01Jc	3.88±0.01Jb		

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示相同耕作措施下不同粒级团聚体 DOM 荧光特征存在显著差异($p<0.05$);同列不同大写字母表示相同粒级团聚体中不同耕作措施下 DOM 荧光特征存在显著差异($p<0.05$);NT1/ST1 为传统免耕/条耕,NT2/ST2 为 NT1/ST1+减肥+微生物制剂 I,NT3/ST3 为 NT2/ST2+秸秆促腐(微生物制剂 II),NT4/ST4 为 NT3/ST3+增密 5%,NT5/ST5 为 NT3/ST3+增密 10%。下同。

2.2 不同耕作措施对土壤团聚体 C_{HE} 与 C_{HM} 的影响

HE是腐殖化核心产物, C_{HE} 直接表征有机质向稳定腐殖质的转化效率^[26];HM是SOM中最稳定组分,占土壤有机碳的50%~80%, C_{HM} 越高,土壤团聚体稳定性、保水保肥能力越强^[27]。

由图1a可知,NT1、NT2、ST4的 C_{HE} 随粒级减小先降后升,NT1在>2 mm粒级最高(5.57 g/kg), <0.053 mm粒级回升至3.78 g/kg;NT3、ST1~ST3、ST5及CT的 C_{HE} 随粒级减小持续降低,ST5各粒级 C_{HE} 均最高(>2 mm为7.49 g/kg,0.25~2 mm为6.12 g/kg,0.053~0.25 mm为6.12 g/kg,<0.053 mm为5.16 g/kg),显著高于同粒级其他处理。CT在<0.053 mm粒级中 C_{HE} 最低(0.89 g/kg),仅为ST5的17.2%。



注:图中不同小写字母表示相同耕作措施下不同粒级团聚体间存在显著差异($p < 0.05$);不同大写字母表示同一粒级团聚体中不同耕作措施间 C_{HE} 或 C_{HM} 质量分数存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

图1 不同耕作措施下土壤团聚体中 C_{HE} 与 C_{HM} 质量分数

Fig. 1 C_{HE} and C_{HM} contents in soil aggregates under different tillage practices

2.3 不同耕作措施对土壤团聚体 C_{HA} 与 $HA \Delta \log K$ 的影响

HA是腐殖质中稳定性最强的组分, C_{HA} 越高,土壤腐殖化程度与养分保持能力越强^[6]; $HA \Delta \log K$ 反映HA分子结构复杂性, $\Delta \log K$ 越低,HA分子芳香度越高,共轭结构越丰富,腐殖质稳定性越强^[28]。

由图2a可知,NT2、NT5、ST1、ST4、ST5的 C_{HA} 随粒级减小呈先降后升,其中ST5在>2 mm粒级达到峰值(2.41 g/kg), <0.053 mm粒级回升至1.87 g/kg;NT1、NT3及CT的 C_{HA} 随粒级减小呈递减趋势,其中CT在各粒级中 C_{HA} 较低(>2 mm:0.92 g/kg, <0.053 mm:0.31 g/kg);NT4、ST3的 C_{HA} 随粒级减小呈先升后降,在0.25~2 mm粒级达到峰值(分别为1.03、1.07 g/kg)。各处理间比较可知,ST5在各粒级中 C_{HA} 均显著高于其他处理;而ST2在各粒级中 C_{HA}

由图1b可知, C_{HM} 粒级分布整体以>2 mm粒级富集为主要特征,具体趋势可分为3类:1) NT3、ST4的 C_{HM} 随粒级减小呈先降低后升高趋势,其中NT3在>2 mm粒级 C_{HM} 最高(3.83 g/kg), <0.053 mm微团聚体回升至1.75 g/kg;2) NT1、NT2、NT4、NT5、ST1~ST3及CT的 C_{HM} 随粒级减小递减趋势;3) 仅ST5的 C_{HM} 随粒级减小呈先升高后降低趋势,在0.25~2 mm中团聚体达到峰值(4.78 g/kg),且该处理在中、小和微团聚体粒级的 C_{HM} 均为所有处理最高。

值得注意的是,ST5改变 C_{HM} 均在>2 mm大团聚体中富集分布特征,促进HM向中小粒级团聚体迁移,对提升坡耕地土壤整体碳固持能力具有重要意义。

均最低(0.07~0.21 g/kg),仅为ST5的4%~43%。由图2b可知, $HA \Delta \log K$ 的粒级分异显著,所有处理均表现为>2 mm粒级 $\Delta \log K$ 最高(0.60~0.69);而中、小粒级与微团聚体中 $\Delta \log K$ 较低(0.54~0.65)。各处理间比较可知,NT5在大、中和微(0.61~0.69)团聚体的 $\Delta \log K$ 均为同粒级最高;而该处理在小粒级 $\Delta \log K$ 最低(0.56);CT在各粒级中 $\Delta \log K$ (0.57~0.60)整体高于ST5。

2.4 不同耕作措施对土壤团聚体 C_{HA}/C_{FA} 的影响

C_{HA}/C_{FA} 是表征腐殖化程度的核心指标,比值越高,有机质向稳定HA的转化效率越高,腐殖质越稳定;比值越低,有机质以活性FA为主,腐殖化程度低^[29]。GAO等^[15]通过33 a长期试验证实,FA可通过凝聚作用转化为HA,而耕作措施可通过调控微生物活性改变这一转化进程。

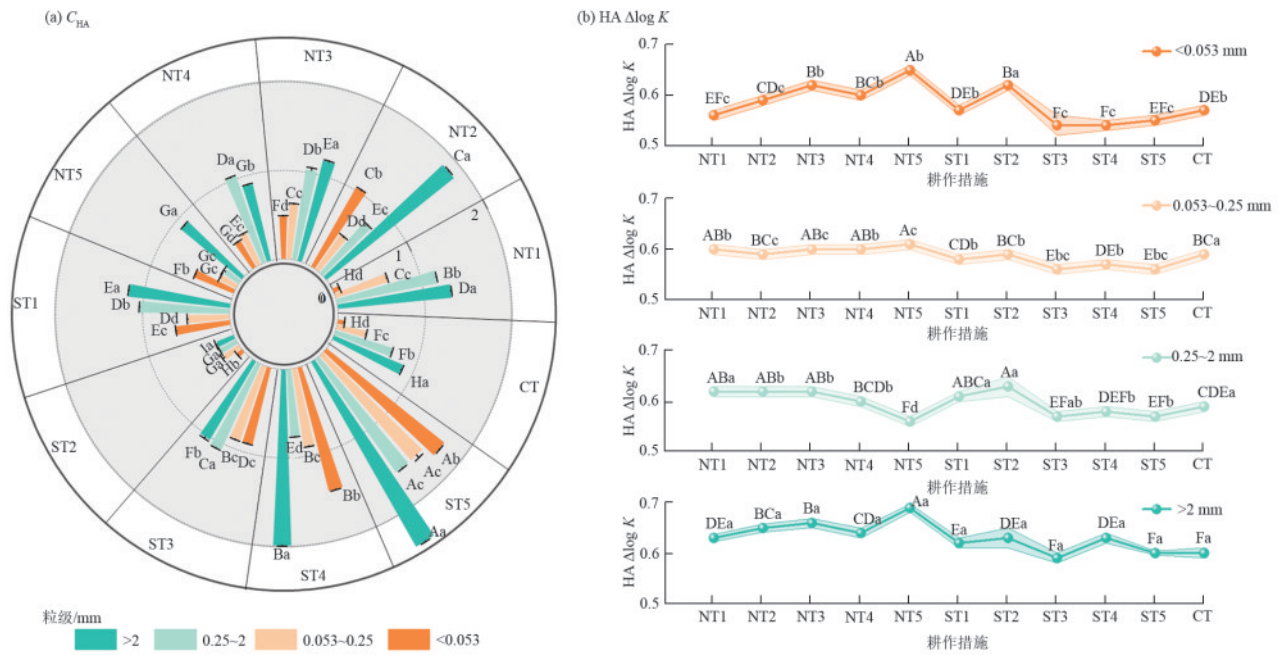


图 2 不同耕作措施下土壤团聚体中 C_{HA} 质量分数及 $HA \Delta \log K$

Fig. 2 C_{HA} and $HA \Delta \log K$ contents in soil aggregates under different tillage practices

由图 3 可知,不同耕作处理下 C_{HA}/C_{FA} 的粒度分布具体可分为 4 类,NT2、NT5、ST1、ST4、ST5 的 C_{HA}/C_{FA} 随粒度减小呈先降后升,其中 ST5 在 >2 mm 粒度为 0.47, 0.25~2 mm 粒度降至最低 (0.35), <0.053 mm 粒度达到峰值 (0.50); NT3、NT4 及 CT 的 C_{HA}/C_{FA} 随粒度减小持续降低,其中 CT 在 <0.053 mm 粒度最低 (0.09), 仅为 ST5 的 18%; NT1、ST2 的 C_{HA}/C_{FA} 随粒度减小呈先升后降,在 0.25~2 mm 粒度达到峰值 (分别为 1.32、0.89); 仅 ST3 的 C_{HA}/C_{FA} 随粒度减小呈递增趋势,且 <0.053 mm 粒度最高 (0.32)。

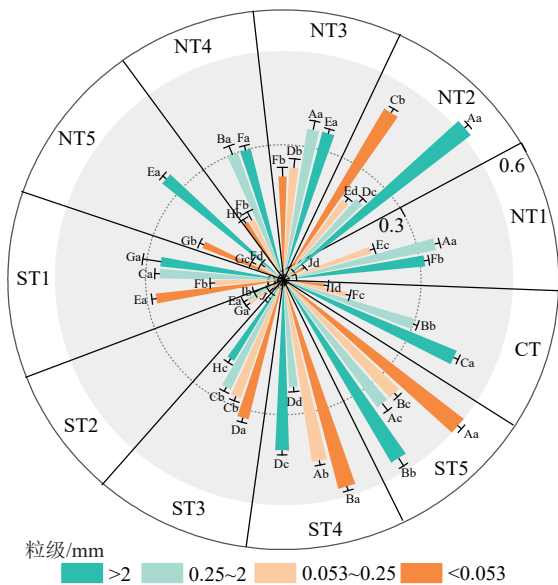


图 3 不同耕作措施下土壤团聚体中 C_{HA}/C_{FA}

Fig. 3 C_{HA}/C_{FA} ratio in soil aggregates under different tillage practices

2.5 不同耕作措施对土壤团聚体 HM_i/HM_c 与 $(HM_i+HM_c)/HM$ 的影响

HM_i 分子结构较简单, HM_c 因与黏粒矿物的静电吸附和配位交换作用结构较复杂, HM_i/HM_c 升高表明, HM 以简单结构为主和铁氧化物对 HM 的固定占主导; $(HM_i+HM_c)/HM$ 升高意味着活性碳比例增加, 土壤碳稳定性下降, 比值降低则表明更多碳被固定为 HM_r , 碳库更持久^[30]。

由图 4a 可知, ST3 在中、小和微团聚体 (3.55~3.93) 的比值均为同粒度最高, 且显著高于其他处理; 而 NT5 在 <0.053 mm 粒度中比值最低 (0.18), 仅为 ST3 的 4.6%。值得注意的是, ST3 与 NT3 在 <0.053 mm 粒度中 HM_i/HM_c 比值 (分别为 3.93、3.67) 均显著高于 CT (1.58)。

由图 4b 可知, $(HM_i+HM_c)/HM$ 比值的粒度分异显著。各处理间对比显示, 在 <0.053 mm 粒度中, NT5 与 CT 的比值最高 (0.84); ST4 该粒度比值 (0.62~0.74) 虽为 ST 系列最高, 但仍低于 NT5 与 CT。

2.6 土壤团聚体腐殖质指标的相关性与主成分分析

通过 PCA 解析不同粒度团聚体中腐殖质指标的关键调控因子, 累计方差贡献率可反映主成分对指标变异的解释能力 (累计贡献率 $>50\%$ 即具有统计学意义)^[31]。由图 5 和表 3 可知, 不同粒度 PCA 结果存在显著差异, 具体为 >2 mm 大团聚体中 PC1 (HM 组分分布差异, 载荷指标: HM_i/HM_c 、 $(HM_i+HM_c)/HM$) 与 PC2 (腐殖质含量与微生物活性, 载荷指标: C_{HE} 、 C_{HA} 、 FD) 的累计方差贡献率可解释 53.6% 的指标变异。

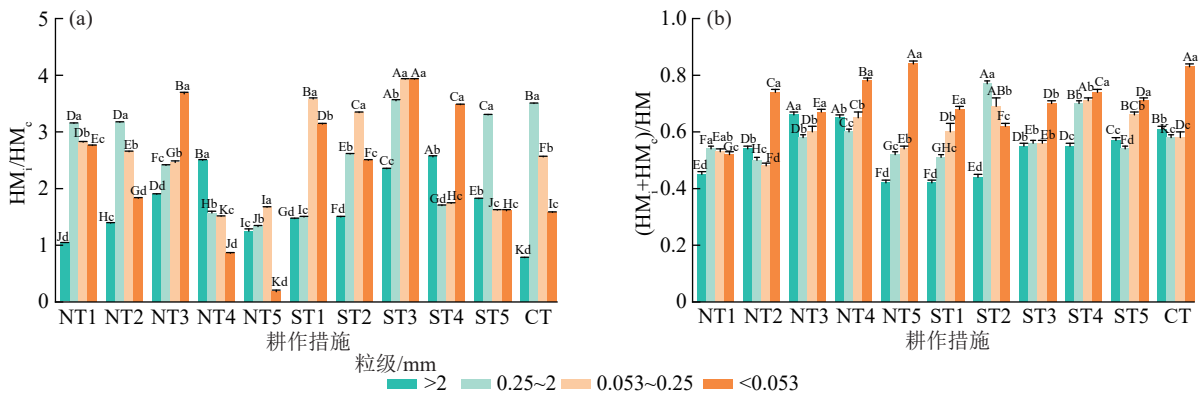


图 4 不同耕作措施下土壤团聚体中 HM_i/HM_c 及 $(HM_i+HM_c)/HM$

Fig. 4 HM_i/HM_c and $(HM_i+HM_c)/HM$ ratios in soil aggregates under different tillage practices

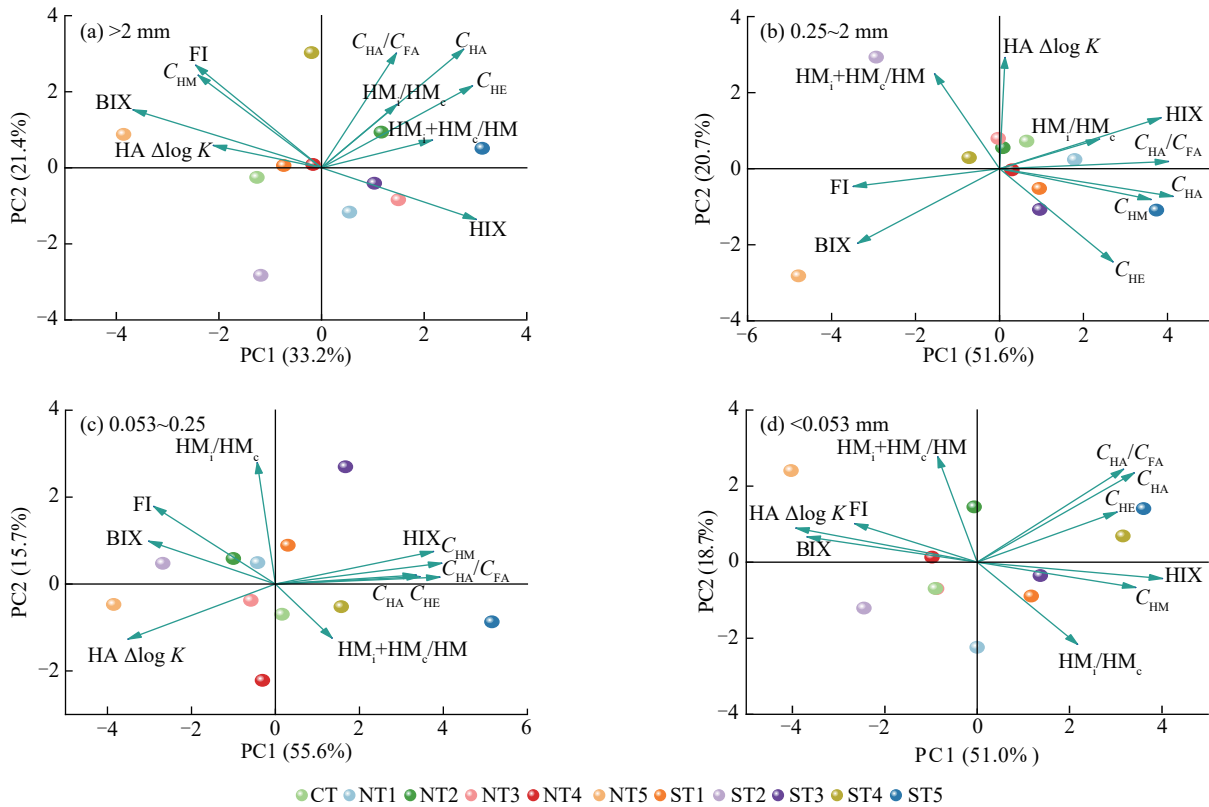


图 5 不同耕作措施下土壤团聚体腐殖质相关指标的主成分分析 (PCA)

Fig. 5 PCA of humus-related indicators in soil aggregates under different tillage practices

ST5 与 NT2 在 PCA 图中更靠近 HM_i/HM_c 、 $(HM_i+HM_c)/HM$ 及 C_{HE} 指标箭头方向; 0.25~2 mm 中团聚体中, PC1(腐殖质质量分数, 载荷指标: C_{HM} 、 C_{HA}) 与 PC2(DOM 活性, 载荷指标: FI、BIX) 的累计方差贡献率 > 70% (72.3%)。ST5 靠近 C_{HM} 、 C_{HA} 指标箭头方向; NT5 则与 FI、BIX 指标关联更显著; 0.053~0.25 mm 小团聚体中, PC1(腐殖化程度, 载荷指标: C_{HE} 、 C_{HA} 、 C_{HA}/C_{FA}) 与 PC2(DOM 活性, 载荷指标: FI、BIX) 的累计方差贡献率 > 70% (71.3%)。ST5 靠近 C_{HE} 、 C_{HA} 、 $(HM_i+HM_c)/HM$ 及 C_{HA}/C_{FA} 指标箭头方向; NT5 仍与 FI、BIX 指标紧密关联; < 0.053 mm 微团聚体: PC1(腐殖质质量分数, 载荷指标: C_{HE} 、 C_{HA}) 与 PC2(HM 稳定性, 载荷指标: $(HM_i+HM_c)/HM$) 的累

计方差贡献率 > 65% (69.7%)。ST5 在 PCA 图中靠近 C_{HE} 、 C_{HA} 指标箭头方向。

由表 3 可知, ST5 在所有粒级中均排名第 1, 而 NT5 在所有粒级中均排名最差。

图 6 为 (CT、NT1、ST1) 3 种耕作模式与腐殖质指标关联强度 ($|r| \geq 0.3$ 为显著相关): CT 与 BIX ($r=0.80$)、 $(HM_i+HM_c)/HM$ ($r=0.85$) 呈较强正相关, 与 C_{HE} ($r=-0.94$)、 HM_i/HM_c ($r=-0.82$) 呈极强负相关; NT1 与 FI ($r=0.98$) 呈极强正相关, 与 C_{HM} ($r=-0.96$)、 $HA \Delta \log K$ ($r=-1.00$)、 $(HM_i+HM_c)/HM$ ($r=-0.88$) 呈极强负相关; ST1 与 C_{HA} ($r=1.00$)、 C_{HA}/C_{FA} ($r=0.97$) 呈极强正相关, 与 BIX ($r=-0.92$)、HIX ($r=-0.94$) 呈极强负相关。

表 3 不同耕作措施下土壤团聚体腐殖质相关指标主成分分析的综合排名

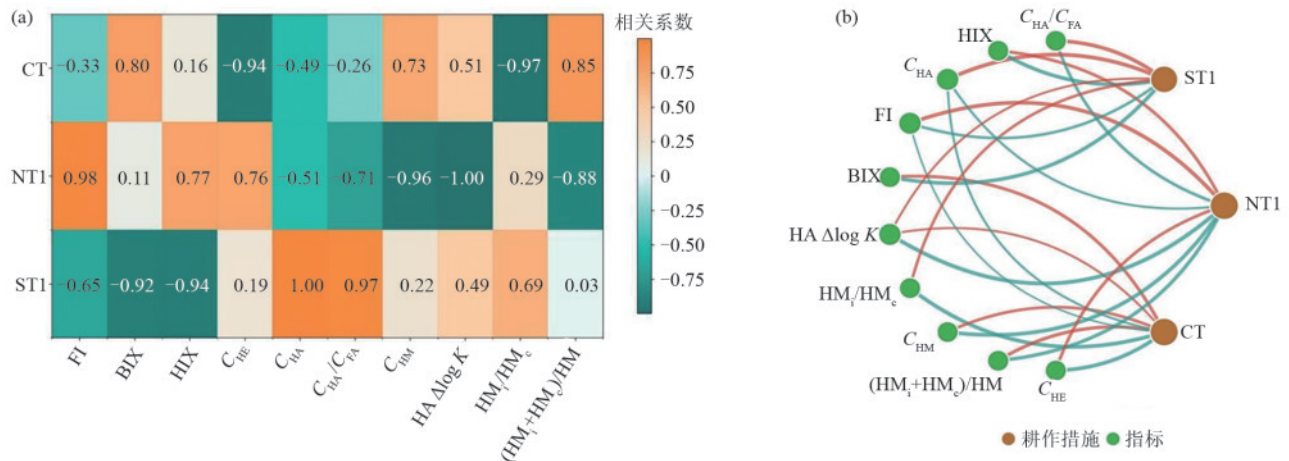
Table 3 Comprehensive ranking of humus-related indicators in soil aggregates under different tillage practices based on PCA

大团聚体 (>2 mm)	中团聚体 (0.25~2 mm)	小团聚体 (0.053~0.25 mm)	微团聚体 (<0.053 mm)
NT1	7	NT1	2
NT2	2	NT2	7
NT3	3	NT3	6
NT4	5	NT4	5
NT5	11	NT5	11
ST1	9	ST1	3
ST2	10	ST2	10
ST3	4	ST3	4
ST4	6	ST4	8
ST5	1	ST5	1
CT	8	CT	9

3 讨论

3.1 不同耕作措施对团聚体各粒级 DOM 组分的影响

耕作措施涵盖核心耕作模式(CT/NT/ST)与配套技术(微生物菌剂施用、减肥、秸秆促腐、增密)的协同组合,后续相关探讨均在上述界定中展开。DOM 荧光特征差异是耕作措施调控团聚体微环境等改变 DOM 来源与腐殖化进程的结果^[31]。所有耕作处理下各粒级团聚体 DOM 的 FI 值均为 1.90~2.26,且 ≥ 1.9 ,表明坡耕地玉米田 DOM 普遍以微生物代谢产物为主,陆源贡献小,秸秆还田为微生物提供充足易降解碳源,促进微生物代谢,生成较高 FI 值^[9]。微生物制剂 I 和 II 分别提供养分,促进秸秆腐解,协同提升 DOM 的腐殖化程度。NT5 通过秸秆促腐补充碳源及增密提升根系分泌物,促进微生物代谢增强自生源 DOM 生成^[32]。与此相对应,NT5 因为微生物优先分解易降解有机组分,同时免耕减少陆源腐殖质输入,导致 DOM 腐殖化程度降低,进一步印证该处理下 DOM 呈微生物主导、鲜碳循环活跃、腐殖化进程减缓的特征^[33]。



注:图中节点表示耕作模式与腐殖质相关指标;连线表示 Pearson 相关关系; $r \geq 0.3$ 的显著相关($p < 0.05$);橙色连线表示正相关,青色连线表示负相关;颜色深浅与线条粗细均反映相关系数绝对值大小,值越大,颜色越深,线条越粗。

图 6 <0.053 mm 粒级土壤团聚体中腐殖质相关指标与典型耕作模式的 Pearson 相关性分析

Fig. 6 PCA between humus-related indicators and typical tillage practices in soil aggregates of the <0.053 mm particle size fraction

在<0.053 mm 粒级中,ST4 与 ST5 条耕措施可提升微团聚体 DOM 腐殖化程度与碳稳定性。因秸秆促腐技术、增密 5%(ST4)与 10%(ST5)及条耕的宽窄行配置改善土壤通气条件,形成有机碳输入和微生物转化及团聚体物理保护的协同循环^[34]。CT 因秸秆焚烧碳源输入不足,DOM 腐殖化进程受阻。

3.2 不同耕作措施对团聚体各粒级 HE 及 HM 分布特征的影响

C_{HE} 随粒径减小呈先降后升趋势,源于大团聚体通过物理包裹作用保护 HE,且秸秆残体为 HE 合成提供

充足碳源,胶结作用进一步促进 HE 留存;小团聚体因缺乏强物理保护机制与碳源补充,HE 易被微生物分解;而微团聚体依靠秸秆还田碳输入与微生物活动促进 HE 生成,同时碳浓缩效应提升 HE 富集度^[26]。随粒径减小呈现持续降低趋势中 ST5 在各粒级中 C_{HE} 均为最高。其机制在于条耕局部扰动避免大团聚体结构破坏,减少碳源流失;秸秆促腐加速有机碳归还,为 HE 合成提供充足前体;增密 10% 提升根系分泌物输入,增强微生物腐殖化活性,最终实现各粒级 HE 高效积累^[24,26]。而 CT 在<0.053 mm 粒级中 C_{HE} 仅为 ST5 的

17.2% 因频繁翻耕破坏团聚体物理结构,既降低团聚体对 HE 的固持能力,又加速 HE 矿化分解,且微团聚体有机碳结构脆弱,HE 易淋失^[32]。微生物制剂 I 的风化煤基腐殖酸载体与制剂 II 的放线菌、酵母菌协同作用,通过腐殖酸吸附使 HE 与 HM 免遭快速分解,同时通过微生物催化增强有机碳使其向稳定腐殖质转化,尤其在促进大团聚体中 HE 的积累更具优势。

C_{HM} 的粒级分布整体以大团聚体 (>2 mm) 富集为主要特征。随粒径减小呈现先降后升的变化,因小团聚体秸秆分解速率快, HM 消耗量大于生成量,而微团聚体黏粒质量分数高,对 HM 的吸附固定作用增强,抵消分解损失^[27],反映 2 种处理下土壤难分解有机质积累较少,有机质转化流失较快。随粒径减小呈递减因大团聚体无额外干预,最大程度保留团聚体结构完整性,稳定碳源供给并保护 HM 不被分解流失^[26];随粒径减小呈现先升后降中 ST5 增密 10% 使作物根系量增加;条耕的局部扰动既比免耕更利于秸秆粉碎与土壤融合,又比 CT 减少碳流失;减肥措施平衡微生物活性,避免过量氮素抑制 HM 合成^[7]。同时,中团聚体对 HM 的物理保护作用显著促进 HM 积累,表明 ST5 可改变 HM 大团聚体富集的分布特征,促进 HM 向中小粒级迁移,对提升坡耕地整体碳固持能力具有重要意义。

3.3 不同耕作措施对团聚体各粒级 HA 分布特征及 HA $\Delta \log K$ 的影响

C_{HA} 随粒径减小呈先降后升变化中 ST5 因秸秆促腐提供大量优质碳源,为 HA 合成提供充足前体;增密 10% 优化土壤微环境,促进腐殖化微生物富集,可加速有机质向 HA 转化^[35]。随粒径减小呈递减中 CT 处理秸秆焚烧导致碳源匮乏,翻耕破坏团聚体物理保护,HA 易被分解或淋失;NT1 无额外碳源输入,大团聚体 HA 消耗后难以补充,中小粒级因碳源不足,HA 合成受限^[13]。随粒径减小呈先升后降趋势,因中团聚体孔隙结构适配微生物活动,NT4 增密 5% 与 ST3 中秸秆促腐共同为中团聚体提供碳源,促进 HA 合成,而微团聚体因黏粒吸附过强,HA 提取效率降低^[33]。值得注意的是,ST2 处理在各粒级中 C_{HA} 均最低,因减肥导致土壤氮素不足,抑制微生物腐殖化酶活性,HA 合成底物缺乏,反映减肥和促腐协同是提升 HA 积累的关键^[15,35]。

所有处理的 HA $\Delta \log K$ 均呈 >2 mm 粒级最高,中小粒级与微团聚体较低的共性规律,表明大团聚体中 HA 分子结构简单,芳香度低,中小粒级与微团聚体 HA 稳定性更强,与大团聚体作为新鲜有机碳临时储存库,容纳大量未充分腐解的秸秆及根系残体,

其转化形成的 HA 分子结构尚未充分缩合与其直接相关^[28]。NT5 在大、中和微团聚体粒级 $\Delta \log K$ 均为同粒级最高,表明其 HA 分子结构简单,稳定性弱,与该处理输入大量新鲜有机碳,抑制 HA 分子缩合有关^[36];但 NT5 在小团聚体 (0.25~2 mm) 粒级中 $\Delta \log K$ 最低,推测小团聚体的孔隙环境既利于有机碳充分腐解,又避免新鲜有机碳过度输入,为 HA 分子缩合与腐殖化提供适宜条件^[18]。CT 处理各粒级 HA $\Delta \log K$ 整体高于 ST5 处理,表明 CT 的 HA 稳定性弱于优化条耕处理,进一步印证 ST5 对 HA 分子结构的优化作用。

3.4 不同耕作措施对团聚体各粒级 C_{HA}/C_{FA} 的影响

C_{HA}/C_{FA} 随粒径减小呈先降后升趋势,ST5 因高密措施可促进微团聚体中 FA 向 HA 转化,其机制是微团聚体黏粒质量分数高,借静电吸附与配位交换固定 HA 减少 HA 淋失,且秸秆促腐提供的前体物质加速 FA 向 HA 的凝聚反应^[15,33]。呈递减变化的 CT 源于频繁翻耕破坏团聚体结构,秸秆焚烧致碳源不足,HA 合成底物匮乏,同时翻耕加剧 FA 淋失,使有机质以活性 FA 为主,腐殖化进程受阻^[29];NT3、NT4 虽有秸秆促腐或增密措施,但缺乏 ST5 增密 10% 措施,微团聚体碳输入量不足,HA 合成受限,故 C_{HA}/C_{FA} 随粒级减小降低^[24]。呈先升高后降低趋势的 NT1,峰值因小团聚体是碳周转枢纽,微生物活性适中,既促进 FA 转化为 HA,又避免 HA 过度分解;ST2 峰值低,则因减肥导致微生物活性不足,FA 向 HA 转化效率低^[23]。呈递增变化中的 ST3 可显著提升微团聚体腐殖化程度,因促腐剂加速秸秆分解,产生大量 HA 合成前体物质,且微团聚体稳定的微环境促进微生物催化 FA 凝聚为 HA,黏粒吸附作用增强 HA 留存^[24,33]。

3.5 不同耕作措施对团聚体各粒级 HM 组分分布特征的影响

HM_i/HM_c 比值中 ST3 因秸秆促腐产生的有机酸与 DOM 活化土壤铁氧化物,增加 HM_i 结合位点,有机配体占据黏粒吸附位点抑制 HM_c 积累,使 HM_i 占比升高,铁氧化物 HM 固定占主导^[30]。ST3 与 NT3 在微团聚体中的比值均高于 CT 处理,表明秸秆促腐可改变可溶性 HM 的转化方向,微生物制剂 I 和 II 可降解秸秆产生的有机配体则调控黏粒吸附位点影响 HM_i 、 HM_c 积累。NT5 因黏粒矿物吸附 HM 增强且黏粒质量分数高,增密 10% 提升的根系分泌物促进黏粒表面电荷以增强 HM_c 的吸附,同时抑制铁氧化物活化减少 HM_i ,促进 HM_i 向 HM_c 转化^[7,30]。NT1 和 ST2 在大团聚体中 HM 易随粗颗粒流失;微团聚体虽黏粒质量分数高,但 NT1 无额外碳源、ST2 养分不足 HM 合成量少且吸附位点未充分利用,比值偏低^[34]。

(HM_i+HM_c)/ HM 比值中 NT5 在 <0.053 mm 粒级中 (HM_i+HM_c)/ HM 比值最高,因增密 10% 导致根系竞争养分,抑制微生物催化 HM_i 、 HM_c 向 HM_r 转化,黏粒吸附的可溶性 HM 难以形成稳定 HM_r ,稳定性下降^[30]。CT 因翻耕破坏团聚体结构;秸秆焚烧导致 HM_r 合成前体不足,可溶性 HM 占比升高,碳稳定性弱^[32]。ST 在 <0.053 mm 中 HM_r 占比高,促进大团聚体形成减少可溶性 HM ^[23],符合 HM_r 占比越高稳定性越强的规律。

3.6 不同耕作措施对团聚体各粒级腐殖质组分分布特征的主成分分析及微团聚体相关性分析

大团聚体 (>2 mm) 中 PC1 显示腐殖质特征受 HM 组分、腐殖质含量及微生物活性调控。ST5 保护团聚体结构完整性,秸秆促腐提供合成前体,增密 10% 提升根系碳源与微生物活性,促进 DOM 聚合为 HE,协同效应显著^[37]。NT2 因缺乏促腐与增密措施,调控效应弱;中团聚体 (0.25 mm~2 mm) 中 PC1、PC2 指向腐殖质含量与 DOM 活性调控。ST5 孔隙适配微生物,碳源与根系分泌物优化碳氮比,代谢产物胶结团聚体保护 HM 与 HA ,形成正向循环^[18]。NT5 免耕通气性差,根系竞争养分,微生物产生新鲜 DOM (高 FI、BIX) 却缺乏关键腐殖化酶,难聚合为稳定腐殖质^[8],排名 11;小团聚体 (0.053~0.25 mm) 中 PC1、PC2 指向腐殖化程度与 DOM 活性有关。ST5 减肥比氮抑制微生物腐殖化活性,同时促腐提升 C_{HA}/C_{FA} ,增强腐殖化程度^[38]。NT5 高活性 DOM 被黏粒吸附难,转化 C_{HA}/C_{FA} 低,排名 11;微团聚体 (<0.053 mm) 中 PC1、PC2 指向腐殖质含量与 HM 稳定性。ST5 秸秆促腐产生芳香族化合物增密调节 pH,增强黏粒吸附能力^[7]。CT 提升 DOM 微生物贡献度却降低腐殖质含量与 HM 转化,故排名 10。

通过 <0.053 mm 微团聚体相关性分析,CT 虽然提升了微团聚体 DOM 的微生物贡献度,但显著降低 C_{HE} 含量和可溶性 HM 转化效率。相反,NT1 虽然显著提升 DOM 的微生物源贡献,但抑制 HM 积累与 HA 分子稳定性,ST1 可显著提升微团聚体 C_{HA} 含量与腐殖化程度,但降低 DOM 的微生物活性与腐殖化稳定性。综合 PCA 排名 ST5 条耕+减肥+促腐+增密 10% 的组合措施对坡耕地玉米田土壤团聚体腐殖质系统的综合调控效果最优;NT5 处理在所有粒级中均排名第 11 (最差),反映免耕高密措施虽提升 DOM 活性,但不利于腐殖质积累与稳定;CT 处理各粒级整体排名 8~10,进一步印证保护性耕作在提升土壤腐殖质含量与稳定性方面的优势。

4 结论

1) 不同耕作措施下,所有处理 DOM 均以微生物代谢源 (自生源) 为主。免耕结合减肥、促腐和增密 10% (NT5) 可显著提升各粒级 DOM 的 FI、BIX 值,降低 HIX 值,强化微生物源 DOM 生成与生物可利用性;条耕+减肥+促腐+增密 5% (ST4) 及增密 10% (ST5) 则显著提升 <0.053 mm 粒级 DOM 腐殖化程度;CT (常规耕作) 因秸秆焚烧导致 DOM 微生物活性与腐殖化程度均较低。

2) 条耕+减肥+促腐+增密 10% (ST5) 在各粒级中 C_{HE} 及 C_{HA} 均为最高,同时可改变大团聚体 HM 富集特征,使其向中小粒级迁移。

3) 条耕+减肥+秸秆促腐 (ST3) ≤ 0.25 mm 粒级下 HM_i/HM_c 最高,抑制 HM_i 向 HM_c 转化;免耕结合减肥、促腐和增密 10% (NT5) 在 <0.053 mm 粒级下 HM_i/HM_r 最低,促进 HM_i 向 HM_c 转化;免耕+减肥+促腐+增密 10% (NT5) 和 CT 在 <0.053 mm 微团聚体粒级下 (HM_i+HM_c)/ HM 比值最高。

4) 主成分分析表明,条耕+减肥+促腐+增密 10% (ST5) 在所有粒级团聚体腐殖质指标综合排名中均为第 1,其组合措施可协同提升 C_{HE} 和 C_{HA} 、优化 HM 组分分布,增强碳稳定性。在此过程中,微生物制剂 I 可提升养分利用效率并减少减肥引发的养分限制;微生物制剂 II 加速秸秆腐解为腐殖质合成提供前体物质;相反,免耕+减肥+促腐+增密 10% (NT5) 排名最差。

参考文献:

- [1] WANG S H, WU H X, LI J J, et al. Assessment of the effect of the main grain-producing areas policy on China's food security[J]. *Foods*, 2024, 13(5): e654.
- [2] SHI C, QU L Q, ZHANG Q W, et al. A systematic review on comprehensive sloping farmland utilization based on a perspective of scientometrics analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 244: e106564.
- [3] GATEA A A, SHIHMANI L S S, FERNÁNDEZ-GÁLVEZ J, et al. Optimizing sustainable agriculture: A comprehensive review of agronomic practices and their impacts on soil attributes [J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 364: e121487.
- [4] CHOWANIAK M, GŁĄB T, KLIMA K, et al. Effect of tillage and crop management on runoff, soil erosion and organic carbon loss[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(4): 581-593.
- [5] MANHAS S S, SIDHU A S, BRAR K S. Conservation tillage for soil management and crop production [M]// *Sustainable Agriculture Reviews: Volume 17*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 61-87.

- [6] WEBER J, JAMROZ E, KOCOWICZ A, et al. Isolation of the humin fraction from soil: preliminary comments [Z]. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2020, 3: 23.
- [7] NDZELU B S, DOU S, ZHANG X W, et al. Tillage effects on humus composition and humic acid structural characteristics in soil aggregate-size fractions [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: e105090.
- [8] MAN M L, WAGNER-RIDDLE C, DUNFIELD K E, et al. Long-term crop rotation and different tillage practices alter soil organic matter composition and degradation [J]. Soil and Tillage Research, 2021, 209: e104960.
- [9] XU P D, ZHU J, WANG H, et al. Regulation of soil aggregate size under different fertilizations on dissolved organic matter, cellobiose hydrolyzing microbial community and their roles in organic matter mineralization [J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: e142595.
- [10] FENG H L, HAN X Z, BISWAS A, et al. Long-term organic material application enhances black soil productivity by improving aggregate stability and dissolved organic matter dynamics [J]. Field Crops Research, 2025, 328: e109946.
- [11] NIU X G, ZHANG S L, ZHANG C B, et al. Key factors influencing the spatial distribution of soil organic carbon and its fractions in Mollisols [J]. Catena, 2024, 247: e108522.
- [12] JORDON M W, SMITH P. Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: A framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, demonstrated in north-west Europe [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 222: e105428.
- [13] TANG H M, XIAO X P, LI C, et al. Impact of tillage practices on soil aggregation and humic substances under double-cropping paddy field [J]. Agronomy Journal, 2020, 112(1): 624-632.
- [14] MACKAY J E, BERNHARDT L T, SMITH R G, et al. Tillage and pesticide seed treatments have distinct effects on soil microbial diversity and function [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2023, 176: e108860.
- [15] GAO J C, WANG L C, LUO J F, et al. Long-term fertilizer application induces changes in carbon storage and distribution, and the consequent color of black soil [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(1): 905-913.
- [16] MONDAL S, NAIK S K, HARIS A A, et al. Effect of conservation tillage and rice-based cropping systems on soil aggregation characteristics and carbon dynamics in Eastern Indo-Gangetic Plain [J]. Paddy and Water Environment, 2020, 18(3): 573-586.
- [17] HOU R X, GONG H R, OUYANG Z, et al. Fast labile carbon and litter exhaustion under no-tillage after 5-year soil warming [J]. Catena, 2023, 231: e107337.
- [18] PAYE W S, THAPA V R, GHIMIRE R. Limited impacts of occasional tillage on dry aggregate size distribution and soil carbon and nitrogen fractions in semi-arid drylands [J]. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(1): 96-106.
- [19] AL-WAZZAN F A, MUHAMMAD S A. Effects of conservation and conventional tillage on some soil hydraulic properties [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 1060(1): e012002.
- [20] REN L J, YANG H, LI J, et al. Organic fertilizer enhances soil aggregate stability by altering greenhouse soil content of iron oxide and organic carbon [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2025, 24(1): 306-321.
- [21] URAMOTO T, SAKODA M, GUO Y, et al. No-tillage effects on the soil nitrogen-cycling prokaryotic community inhabiting soil aggregates in upland fields [J]. Applied Soil Ecology, 2025, 213: e106232.
- [22] JI X F, JIANG J, WANG Y G, et al. Small straw addition enhances straw decomposition and carbon stabilized in soil aggregates over time [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 238: e106022.
- [23] XIANG X L, CHEN S H, YANG H K, et al. Effects of straw mulching and phosphorus application on forms and availability of soil phosphorus in hilly dryland of Sichuan, China [J]. The Journal of Applied Ecology, 2022, 33(12): 3337-3344.
- [24] LIU Y D, ZHANG K, ZHANG H, et al. Humic acid and phosphorus fractions transformation regulated by carbon-based materials in composting steered its potential for phosphorus mobilization in soil [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325: e116553.
- [25] 刘涛. 长期围垦稻田土壤团聚体中碳铁组分的变化特征及其潜在机制 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024.
- LIU T. Changing characteristics of carbon and iron components in soil aggregates in long-term reclaimed rice fields and their potential mechanisms [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024.
- [26] CHEN S H, GAO Y M, MA X M, et al. Temporal responses of DOM molecular characteristics to conversion from dryland to paddy field: Insights from soil aggregate size fractionation [J]. Environmental Technology and Innovation, 2025, 39: e104314.
- [27] GERKE J. The central role of soil organic matter in soil fertility and carbon storage [J]. Soil Systems, 2022, 6(2): e33.
- [28] WU A M, YOU C M, YIN R, et al. Forest gaps slow the humification process of fir (*Abies faxoniana* Rehder & E.H. Wilson) twig litter during eight years of decomposition in an alpine forest [J]. Forests, 2023, 14(5): e868.
- [29] WU H, ZHU X Z, TANG C J, et al. Variation of humic carbon and microbial communities in bauxite residue following co-application of straw and phosphogypsum [J]. Journal of Central South University, 2024, 31(2): 460-476.