DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.024 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.024
罗振洪, 王松, 张钰, 等. 粉垄耕作对稻田土壤团聚体稳定性及其化学计量特征的影响评估[J]. 水土保持研究,2026,33(6):75-82,92.
Luo Zhenhong, Wang Song, Zhang Yu, et al. Evaluation of effects of smash-ridging tillage on stability and stoichiometric characteristics of soil aggregates in paddy fields[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):75-82,92.

粉垄耕作对稻田土壤团聚体稳定性及其化学计量特征的影响评估

罗振洪[1], 王 松[1], 张 钰[1], 甘 磊[1,2], 黄金生[3], 张红霞[1], 黄太庆[3], 韦本辉[4]
(1.桂林理工大学 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006;
2.桂林理工大学 流域保护与绿色发展广西高校工程研究中心, 广西 桂林 541006;
3.广西农业科学院 农业资源与环境研究所, 南宁 530007; 4.广西农业科学院 经济作物研究所, 南宁 530007)

摘 要:[**目的**]探究传统耕作与粉垄耕作对稻田土壤团聚体稳定性及其化学计量特征的影响,以期为稻田生态系统的耕作优化与土壤质量提升提供理论依据。[**方法**]以广西典型稻田土壤为研究对象,设置传统耕作(CK)和粉垄耕作(FL)两种处理,采集0—15 cm表层原状土样,测定土壤基本理化性质。采用湿筛法分离4个粒径(>2 mm,0.25~2 mm,0.053~0.25 mm和<0.053 mm)土壤水稳性团聚体,分析了团聚体分布特征及其稳定性指标(平均重量直径MWD、几何平均直径GMD、分形维数D)。测定了全土及各粒级团聚体中有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量比(C:N:P)。[**结果**]与CK处理相比,FL处理下土壤大团聚体(>0.25 mm)比例增加了16.05%,MWD和GMD分别提高了32%和40.91%,但分形维数D降低了1.44%。FL处理下全土中SOC含量提高了14.85%,TN含量提高了10.9%,TP含量降低了8%,并且在大团聚体中SOC和TN含量增幅明显。化学计量特征方面,FL处理下全土C:P和N:P比值分别降低了42.15%和44.18%,但在大团聚体中C:P和N:P比值均显著提高。皮尔逊相关性分析结果显示:团聚体稳定性指标与SOC,TN,TP等养分因子呈显著或极显著正相关,而与C:P及N:P比值呈显著或极显著负相关。[**结论**]粉垄耕作可有效促进稻田土壤大团聚体形成,增强团聚体稳定性,提高土壤养分含量,并优化碳、氮、磷在不同粒级团聚体中的分布与化学计量关系。研究明确了团聚体稳定性是联结耕作措施与土壤养分循环的关键纽带。综上,粉垄耕作是一种有利于改善土壤结构的耕作方式,适宜在南方稻田生态系统中推广应用。

关键词:粉垄耕作; 团聚体稳定性; 土壤养分; 化学计量特征; 稻田土壤
中图分类号:S152.3; S153 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0075-08

Evaluation of effects of smash-ridging tillage on stability and stoichiometric characteristics of soil aggregates in paddy fields

Luo Zhenhong[1], Wang Song[1], Zhang Yu[1], Gan Lei[1,2], Huang Jinsheng[3],
Zhang Hongxia[1], Huang Taiqing[3], Wei Benhui[4]
(1.*Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi* 541006, *China*; 2.*University Engineering Research Center of Watershed Protection and Green Development, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi* 541006, *China*; 3.*Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning* 530007, *China*; 4.*Institute of Economic Crops, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning* 530007, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study investigates the effects of traditional tillage and smash-ridging tillage on soil aggregate stability and its stoichiometric characteristics in paddy soil, thereby providing a theoretical basis for optimizing tillage practices and enhancing soil quality in paddy ecosystems. [**Methods**] Typical paddy soil from

收稿日期:2025-12-09 **修回日期:**2025-12-31 **接受日期:**2026-01-09
资助项目:国家自然科学基金(42067002,42267040);广西科技计划项目(桂科AD25069074)
第一作者:罗振洪(2001—),男,湖南娄底人,硕士研究生,研究方向为土壤结构及土壤养分。E-mail:glutlzh@163.com
通信作者:甘磊(1983—),男,湖南岳阳人,博士,教授,主要从事土壤结构及土壤水热耦合运移研究。E-mail:allen_gl2006@163.com

Guangxi was used as the study subject, and two treatments—traditional tillage (CK) and smash-ridging tillage (FL)—were established. Undisturbed soil samples were collected from the surface layer (0—15 cm) to determine the basic soil physicochemical properties. Soil water-stable aggregates were separated into four particle size fractions (> 2 mm, 0.25～2 mm, 0.053～0.25 mm, and <0.053 mm) using the wet sieving method, and their distribution characteristics and stability indicators (mean weight diameter, MWD; geometric mean diameter, GMD; fractal dimension, *D*) were analyzed. The contents of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP) were determined in bulk soil and aggregates of different particle size fractions, along with their stoichiometric ratios (C: N: P). [**Results**] Compared with the CK treatment, the FL treatment increased the proportion of macroaggregate (> 0.25 mm) by 16.05%, and increased MWD and GMD by 32% and 40.91%, respectively, while decreasing *D* by 1.44%. Under the FL treatment, SOC and TN contents in the bulk soil increased by 14.85% and 10.9%, respectively, but TP content was reduced by 8%, and the increments of SOC and TN were particularly evident in the macroaggregates. In terms of stoichiometric characteristics, the FL treatment reduced the C:P and N:P ratios in bulk soil by 42.15% and 44.18%, respectively, but significantly increased the C:P and N:P ratios in macroaggregates. Pearson correlation analysis showed that aggregate stability indicators were significantly or highly significantly positively correlated with nutrient factors such as SOC, TN, and TP, while they were significantly or highly significantly negatively correlated with the C:P and N:P ratios. [**Conclusion**] Smash-ridging tillage effectively promotes the formation of macroaggregates in paddy soil, enhances aggregate stability, increases soil nutrient contents, and optimizes the distribution and stoichiometric ratios of carbon, nitrogen, and phosphorus across different aggregate fractions. The study demonstrates that aggregate stability is a key link connecting tillage practices and soil nutrient cycling. In conclusion, smash-ridging tillage is a tillage practice that improves soil structure suitable for promotion and application in paddy ecosystems of southern China.

Keywords: smash-ridging tillage; aggregate stability; soil nutrients; stoichiometric characteristics; paddy soil

土壤团聚体作为土壤结构稳定性、养分循环及生态功能的核心单元,其稳定性对于维持土壤肥力与农田可持续生产力至关重要[1-2]。不同粒径团聚体显著影响其养分保持能力、供应潜力及周转速率,从而决定土壤肥力。化学计量学是从元素比例的角度出发来研究生态过程中化学元素的平衡关系,其中主要强调碳(C)、氮(N)和磷(P)3种主要组成元素的关系[3]。从化学计量学角度解析团聚体内C、N、P的循环过程及其相互作用,有助于揭示土壤内部养分限制格局与元素平衡机制。耕作方式对土壤的影响具有双重作用,适度改良耕作措施能增强团聚体稳定性,促进有机质积累[4];而频繁翻耕则破坏土壤结构,加速有机质流失,影响土壤生态系统的平衡和稳定[5]。如何在保障作物产量的同时改善土壤结构、提升土壤生态质量,已成为当前农田管理领域亟待解决的关键问题。

已有相关研究表明[6],耕作方式是影响土壤团聚体形成与稳定性的关键因素。传统耕作方式因耕作扰动土壤,使耕层土壤结构破坏严重,导致土壤团聚体数量减少、孔隙性降低及有机质损失,进而影响土壤碳氮磷等关键元素的储存与循环[7]。相较而言,耕作措施的改良则能有效提高团聚体稳定性,并促进土壤养分的固存。有研究表明,深松耕+秸秆还田显著增加了水稳定性宏观团聚体的质量百分比,提高了土壤全氮含量,提升了农田土壤肥力[8]。此外,免耕可显著提高土壤中有机碳含量,增强大团聚体中有机碳的积累,包括颗粒有机碳和溶解性有机碳等活性碳组分。同时,免耕和少耕不仅有助于优化团聚体的粒径分布,还提高了宏观团聚体中有机碳的赋存比例,从而改善土壤结构[9]。还有学者研究指出,秸秆覆盖免耕能提高土壤中全磷和有效磷的含量,对改善土壤理化性质具有积极作用。值得注意的是,团聚体不仅是耕作方式作用下的响应指标,更是调控土壤养分分布和化学计量特征的重要载体。不同耕作制度通过改变团聚体的粒径组成及其稳定性,进而影响碳、氮、磷在不同粒级团聚体中的分配格局及其化学计量关系。有学者研究发现,深松和免耕措施维持了土壤化学计量特征的平衡[10]。然而,还有学者研究指出,与传统翻耕相比,免耕提高宏观团聚体中有机碳和全氮含量的同时,却伴随C:N和C:P比值的降低,这表明微生物介导的养分转化与矿化过程增强。这些差异性结果表明,耕作方式通过团聚体尺度调控土壤养分赋存与化学计量特征的机制仍存在不确定性,有必要在不同团聚体粒级尺度上进一步系统解析其内在联系。

广西作为我国重要的水稻生产地区,其多样化的耕作措施显著影响着水稻的生长和产量,因此选择合理的耕作方式对农业经济水平的提升显得尤为重要。粉垄耕作作为一种改良耕作方式,在南方农业生产中已有一定范围的应用,已有研究证明其可改善耕层通透性并提高作物产量[11],但针对南方稻田生态系统中粉垄耕作如何调节团聚体稳定性及其C:N:P化学计量特征的作用机制的研究相对匮乏。因此,本研究以广西典型稻田为对象,比较粉垄耕作(FL)与传统耕作(CK)两种耕作方式下的土壤团聚体分布特征及其稳定性指标(平均重量直径MWD、几何平均直径GMD、分形维数D),并测定全土及各粒级团聚体中有机碳(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)含量及其化学计量比,揭示粉垄耕作调控土壤结构和养分循环的作用机理,以期为南方稻田生态系统的耕作优化与土壤质量提升提供理论依据和实践参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区域位于广西壮族自治区贵港市港南区新塘镇新和村(22°59′N,109°36′E),以丘陵地形为主。气候属于亚热带湿润季风气候,年平均气温为22 ℃,年平均降雨量为1 453 mm,年平均日照时数为1 658.4 h,夏季较长,冬季较短。土壤类型以红壤为主,具有中厚层、排水性良好及肥力中等特征,区内盛产水稻、玉米等作物。

1.2　试验设计及土壤样品采集

试验设置粉垄耕作(FL)与传统耕作(CK)两种处理,耕作深度依据当地常规设定为20 cm。两种处理设置于同一连续稻田内,土壤类型、地形条件、种植历史以及施肥、灌溉等管理措施保持一致,除耕作方式外其余因素不变。采用随机区组设计,每种耕作方式设置3个独立重复采样点。各重复点在同一处理区内随机布设,水平间距约为10 m,以减少相互的影响。不同耕作处理通过田间垄沟进行物理分隔,间距约为0.5 m,以避免耕作操作和水分养分的横向迁移对对方处理造成影响。

本研究于2023年12月采集土壤样品。基于对土壤团聚体及养分影响的相关研究,选择0—15 cm表层土壤作为分析土层,因此为保证结果的可比性,本研究选取0—15 cm表层土壤作为分析对象,该土层是水稻根系和有机物输入最为集中的区域,也是耕作扰动影响最为直接、团聚体结构和养分变化最为敏感的土层。每个采样点开挖约50 cm×50 cm×50 cm的土壤剖面,采用100 cm^3环刀采集土样,设置3个重复,主要用于测定土壤容重。另采集约1.5 kg混合土样用于团聚体分级及SOC,TN和TP的测定。

1.3　土壤样品分析

采用烘干法测定土壤容重,马尔文激光粒度仪测定土壤质地,重铬酸钾外加热法测定全土及各粒级土壤团聚体有机碳含量,凯氏定氮法测定土壤全氮含量,碱熔-钼锑抗比色法测定全磷含量,碱浸提培养-容量法测定水解性氮含量,碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量。

将土样置于通风处自然风干,去除土壤中的根系、石头等杂物后,采用Elliott[12]描述的湿筛法分离>2 mm,0.25～2 mm,0.053～0.25 mm和<0.053 mm 4个粒径的土壤水稳性团聚体。湿筛法得到的上述不同粒径的土壤团聚体,烘干后称重,计算土壤各粒级团聚体质量,平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)、几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)、水稳性大团聚体含量($WSA_{>0.25}$)和分形维数(D)。计算公式如下:

$$MWD=\sum_{i=1}^{n}W_i X_i \tag{1}$$

$$GMD=\exp\left(\sum_{i=1}^{n}W_i \ln X_i\right) \tag{2}$$

$$WSA_{>0.25}=\frac{M_{>0.25}}{M_t}\times 100\% \tag{3}$$

$$D=3-\frac{\lg\left(\frac{M_{i<X_i}}{M_t}\right)}{\lg\left(\frac{X_i}{X_{max}}\right)} \tag{4}$$

式中:W_i为土壤各粒径团聚体的质量百分数(%);X_i为土壤各粒径的平均直径(mm),在数值上等于两级筛孔的平均值;X_{max}为团聚体的最大直径(mm);$M_{i<Xi}$为粒径小于X_i的团聚体质量(g);M_t为团聚体总质量(g);$M_{>0.25}$为湿筛大于0.25 mm的水稳性团聚体含量(%)。

1.4　数据处理

利用Microsoft Excel 2019进行试验数据处理。土壤各指标的分布差异采用SPSS 26.0进行独立样本t检验分析,在5% 显著性水平下进行最小显著差异检验。以Origin 2024制图。使用皮尔逊相关分析法研究土壤团聚体稳定性与土壤理化性质及化学计量特征之间的相关性。

2　结果与分析

2.1　土壤基本理化性质

由表1可知,FL处理下土壤容重较CK处理降低8.33%,但无显著差异($p>0.05$)。两种处理下土壤

质地组成差异不大，CK处理的黏粒和粉粒含量分别比FL处理高6.51%和3.48%，而砂粒含量较FL处理仅降低5.43%。两种处理下的水解氮和有效磷含量差异显著，FL处理下的水解氮含量较CK处理下显著提高16.61%（$p<0.05$），有效磷含量显著提高107.82%（$p<0.05$）。

表1 不同处理下土壤理化性质

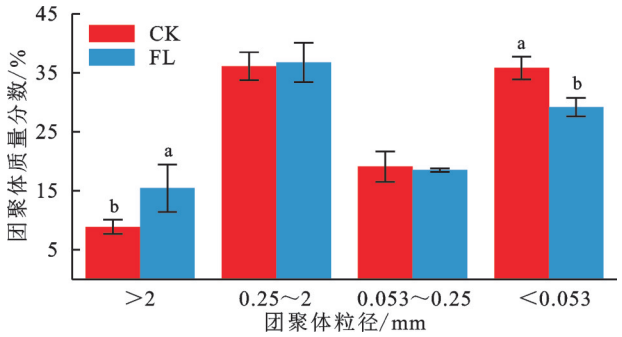
Table 1 Physicochemical properties of soil under different treatments

处理	容重/(g·cm^{-3})	黏粒含量/%	粉粒含量/%	砂粒含量/%	水解氮/(mg·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})
CK	1.32±0.08	7.2±1.23	56.27±1.47	36.54±0.58	177.16±5.6b	14.45±1.55b
FL	1.21±0.03	6.76±1.29	54.38±0.64	38.64±2.06	206.58±3.42a	30.03±1.56a

注：同列不同小写字母表示不同处理间差异显著（$p<0.05$），下同。

2.2 土壤团聚体分布及稳定性

如图1所示，两种耕作方式下的土壤以0.25～2 mm粒级团聚体为主导粒级，其质量分数范围为36.15%～36.81%，其中FL处理略高于CK处理，但差异不显著（$p>0.05$）。在>2 mm粒级中，FL处理的团聚体质量分数较CK处理显著增加73.9%（$p<0.05$）。相反，在0.053～0.25 mm和<0.053 mm粒级中，CK处理的团聚体质量分数均高于FL处理，且在<0.053 mm粒级中差异显著，CK处理较FL处理提高22.72%（$p<0.05$）。



注：不同小写字母表示不同处理间差异显著（$p<0.05$），下同。

图1 不同处理下各粒级团聚体组成比例

Fig. 1 Composition proportions of soil aggregates at different particle size fractions under different treatments

由表2可知，FL处理显著提高土壤团聚体稳定性（$p<0.05$）。与CK处理相比，FL处理下的平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）和水稳性大团聚体含量（$WSA_{>0.25}$）分别提高32%，40.91%和16.8%（$p<0.05$），而分形维数D显著降低1.44%（$p<0.05$）。总体来看，FL处理促进大粒级团聚体的形成，优化土壤团聚体结构，表现出更高的土壤结构稳定性。

表2 不同处理下土壤团聚体评价参数

Table 2 Evaluation parameters of soil aggregates under different treatments

处理	MWD/mm	GMD/mm	$WSA_{>0.25}$/%	D
CK	0.75±0.04b	0.22±0.02b	44.75±2.92b	2.78±0.01a
FL	0.99±0.03a	0.31±0.01a	52.27±1.64a	2.74±0.01b

2.3 土壤团聚体碳、氮、磷含量

两种耕作方式下全土以及各粒径团聚体中的土壤碳（SOC）、氮（TN）、磷（TP）含量有所差异（图2）。由图2A可知，全土的SOC，TN，TP含量均差异显著，与CK处理相比，FL处理的SOC含量显著提高14.85%（$p<0.05$），TN含量显著提高10.9%（$p<0.05$），而TP含量降低了8%（$p<0.05$）。两种耕作方式对不同粒级团聚体中的SOC，TN，TP含量的影响有所不同。与CK处理相比，FL处理下的>2 mm粒级团聚体中的SOC含量和TN含量分别显著提高33.03%和28.76%（$p<0.05$），而TP含量显著降低44.7%（$p<0.05$）。0.25～2 mm粒级团聚体中的TN含量FL处理较CK处理显著提高23.86%（$p<0.05$）。0.053～0.25 mm粒级团聚体中的SOC，TN，TP含量FL处理均显著高于CK处理（$p<0.05$），分别提高35.01%，19.62%和33.04%。<0.053 mm粒级团聚体中的TN和TP含量FL处理较CK处理分别显著提高12.77%和14.01%（$p<0.05$）。整体上，FL处理显著提高全土及>0.25 mm粒级团聚体中SOC和TN含量，而在<0.25 mm团聚体中提升幅度相对较小，表明FL处理下养分主要富集于大团聚体。

2.4 土壤团聚体化学计量特征

两种耕作方式下全土及各粒径团聚体化学计量特征如图3所示。就全土而言，C:N比值无显著差异（$p>0.05$），但CK处理下的C:P和N:P比值分别比FL处理提高72.85%和79.14%（$p<0.05$）。两种耕作方式下各粒径团聚体C:N比值没有显著差异（$p>0.05$）。相比之下，FL处理显著提高大团聚体（>0.25 mm）中C:P和N:P比值，在>2 mm和0.25～2 mm粒级中，比值提升幅度介于77.98%～140.09%（$p<0.05$）。与此趋势不同，在0.053～0.25 mm粒级中，CK处理下的N:P比值显著高于FL处理，提高10.86%（$p<0.05$）；而FL处理下的C:P比值虽略高于CK处理，但差异不显著。在<0.053 mm粒级团聚体中，两处理间的C:P和N:P比值均无显著差异（$p>0.05$）。总体而言，FL处理显著提升大团聚体中的C:P和N:P比值，表明该耕作方式可能影响大团聚体内部的磷限制，改变不同粒径团聚体中碳、氮、磷化学计量特征的平衡。

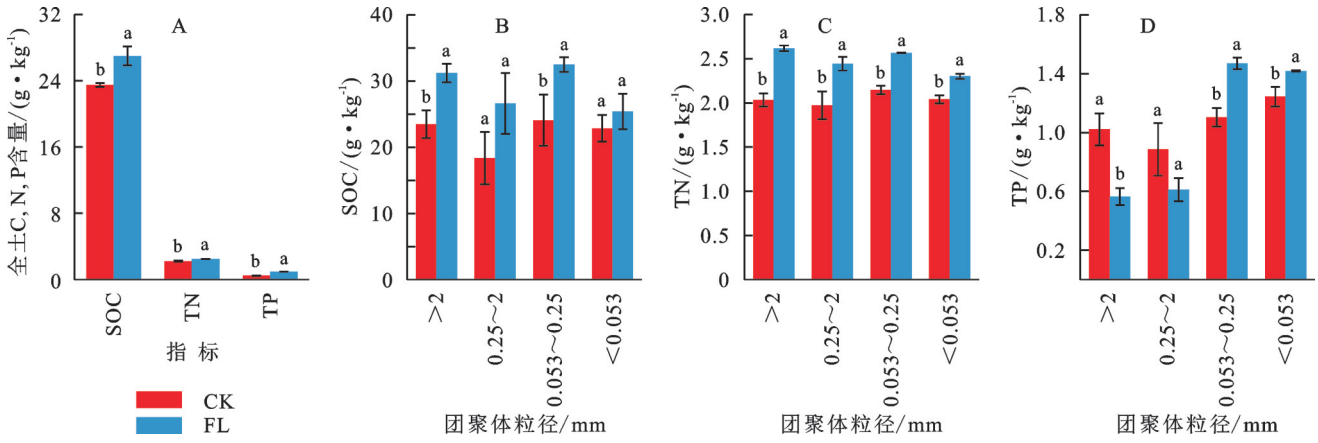


图 2　不同处理下各粒级土壤团聚体 SOC,TN,TP 含量

Fig. 2　Contents of SOC, TN, and TP in soil aggregates of different particle size fractions under different treatments

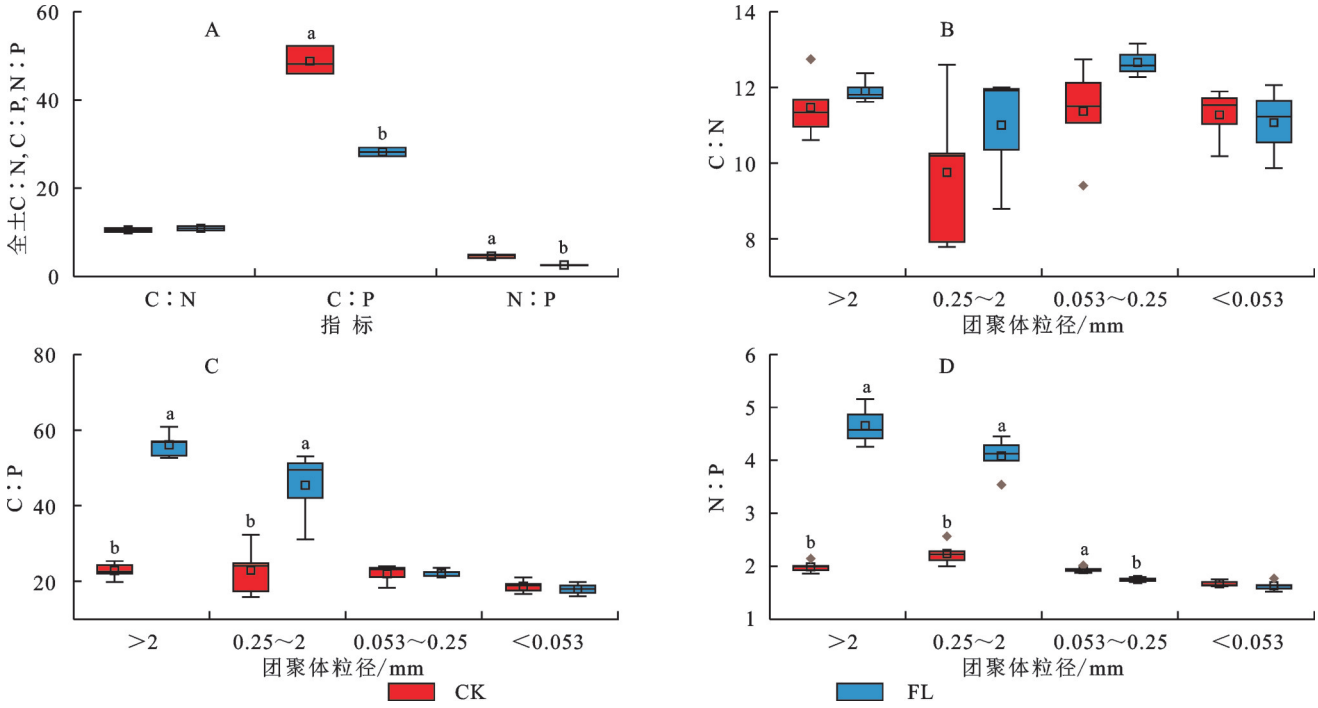


图 3　不同处理下各粒级土壤团聚体 C,N,P 化学计量特征

Fig. 3　Stoichiometric characteristics of C, N, and P in soil aggregates of different particle size fractions under different treatments

2.5　土壤团聚体稳定性与土壤理化性质及化学计量特征的关系

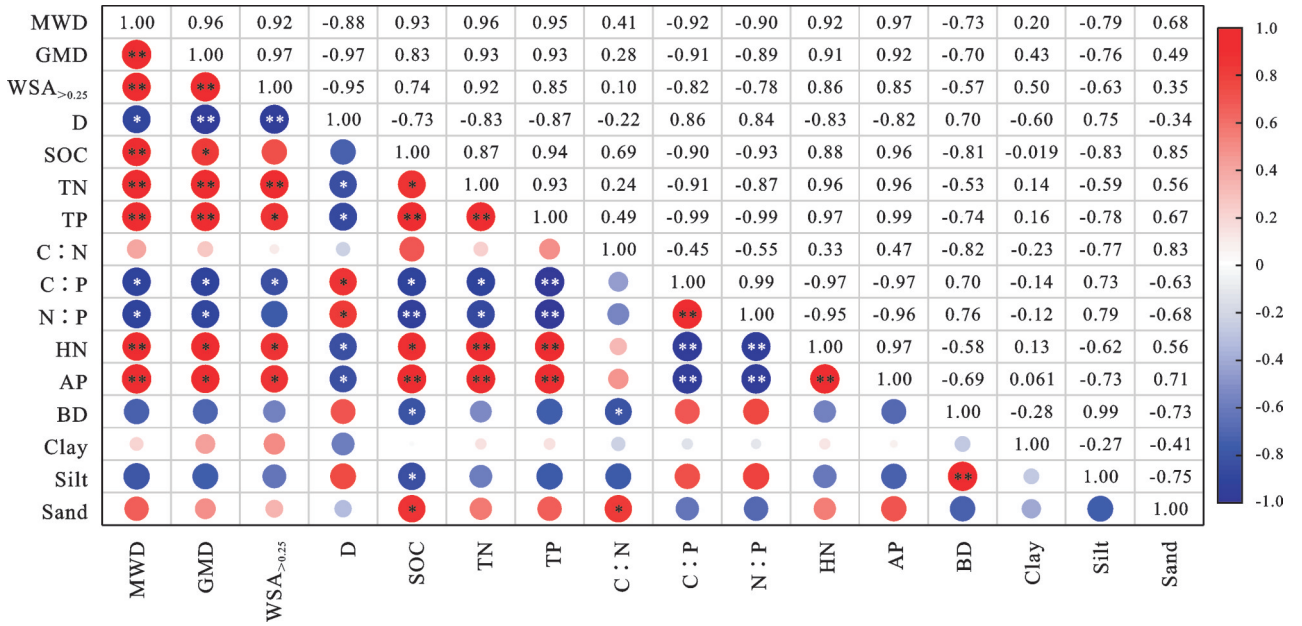
由图 4 可知,土壤团聚体稳定性指标(MWD,GMD,$WSA_{>0.25}$和 D)与土壤理化性质及化学计量特征之间存在密切相关性。MWD 和 GMD 均与 SOC,TN,TP,HN 和 AP 呈显著或极显著正相关($p<0.05$ 或 $p<0.01$),而与 D,C∶P 和 N∶P 呈显著或极显著负相关($p<0.05$ 或 $p<0.01$)。$WSA_{>0.25}$亦与 TN,TP,HN 和 AP 呈显著或极显著正相关($p<0.05$ 或 $p<0.01$),而 D 与这些养分指标呈显著负相关($p<0.05$),与 C∶P 和 N∶P 呈显著正相关($p<0.05$)。养分组分间的关系显示,SOC 和 TN 均与 C∶P 和 N∶P 呈显著或极显著负相关($p<0.05$ 或 $p<0.01$),且 SOC 与土壤容重和粉粒含量呈显著负相关($p<0.05$)。此外,C∶P 和 N∶P 与 HN 和 AP 呈极显著负相关($p<0.01$)。

3　讨　论

3.1　不同耕作方式对土壤团聚体稳定性的影响

团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性和粒径分布能影响各种类型土壤的土质结构整体性和土壤肥力状况,而耕作方式对土壤团聚体的形成有较大影响。相关研究表明,土壤团聚体可分为宏观团聚体(>0.25 mm)和微观团聚体(<0.25 mm),而宏观团聚体是土壤中最好的团粒结构,其含量越高,说明土壤团聚体的稳定性越好[13]。本研究结果显示,粉垄耕作(FL)较传统耕作(CK)可显著提高稻田

>0.25 mm团聚体含量，这表明粉垄耕作更有利于>0.25 mm团聚体的形成，它能够减少农田中宏观团聚体周转，降低对土壤的干扰，改善土壤物理环境，促进微团聚体中的有机碳形成闭蓄态，进而使微团聚体中保存更多的有机碳，最终形成更多的大团聚体。有研究指出，相较于传统耕作而言，粉垄耕作能降低土壤容重[14]，在本研究也得到了相似的结论。需要指出的是，尽管土壤容重在两种耕作处理间存在差异，但其与团聚体稳定性指标未表现出显著相关关系，说明容重并非直接调控团聚体稳定性的主导因素，而更可能反映耕作方式对土壤物理结构的综合影响。在传统耕作下，频繁的机械扰动对土壤结构具有强烈破坏作用，不利于宏观团聚体的形成与维持，从而使CK处理下的微观团聚体比例相对较高[15]。团聚体粒径组成及其相对比例的变化，会直接体现在MWD，GMD和$WSA_{>0.25}$等团聚体稳定性指标上，从而表征土壤团聚体结构稳定性的差异。已有研究表明，MWD和GMD的升高及D值的降低均表明团聚体结构由细碎向稳定转变，表征土壤结构稳定性和抗侵蚀能力增强[16]。这与本研究中FL处理显著提高MWD，GMD并降低D值的结果较为一致，进一步暗示粉垄耕作能有效改善土壤结构、提升其稳定性和抗侵蚀能力。有学者在对中国黄土高原干旱地区的保护性耕作试验中发现，MWD和GMD与水稳性大团聚体含量（$WSA_{>0.25}$）呈显著正相关[17]，这在本研究中也能得出类似结论（图4），进一步说明土壤团聚体粒径分布特征对团聚体稳定性具有关键指示作用。



注：MWD，GMD，$WSA_{>0.25}$，D，SOC，TN，TP，HN，AP和BD分别代表平均重量直径、几何平均直径、水稳性大团聚体含量、分形维数、有机碳、全氮、全磷、水解氮、有效磷和土壤容重。*和**分别表示$p<0.05$和$p<0.01$的显著相关性。

图4 土壤团聚体稳定性与土壤理化性质及化学计量参数的相关性矩阵

Fig. 4 Correlation matrix of soil aggregate stability with soil physicochemical properties and stoichiometric parameters

3.2 不同耕作方式对土壤团聚体碳、氮、磷含量的影响

碳、氮和磷是植物生长必需的元素，直接影响作物生长和土壤养分循环。土壤养分含量受耕作方式双重作用的影响，不同耕作方式既可能促进也可能抑制土壤的养分保持、吸收能力[18]。薄国栋等[19]在粉垄耕作对植烟土壤理化性质的研究中发现，与传统耕作相比，粉垄耕作能够提高土壤养分含量。这与本研究结果类似，粉垄耕作（FL）显著提高稻田全土中有机碳（SOC），全氮（TN）和全磷（TP）含量。究其原因主要是粉垄耕作在实施过程中使土壤团粒结构数量显著增多，孔隙度大幅提升，这使得土壤的通透性能得到极大强化，从而为土壤养分状况的改善营造极为有利的环境条件[20]。需要注意的是，SOC和TN的积累主要来源于地上植物残体、根系输入及其还田过程，而土壤孔隙度和通透性等物理性质的改善并非SOC和TN的直接来源，而是通过影响植物来源有机物的保存、转化和物理保护过程，在一定程度上间接调控其积累。

有研究指出，不同粒径团聚体对SOC，TN有不同的保护效果，>0.25 mm团聚体是固持和矿化碳的主要库，表层土壤大部分SOC，TN存储于>0.25 mm团聚体中[21]。这与本研究中FL处理所得结果相似，>0.25 mm团聚体呈现出较高的土壤SOC和TN含量。这是由于粉垄耕作提高稻田>0.25 mm团聚体含量，大团聚体能够将新输入的和原有的有机碳和氮物理性地隔离和化学性地稳定起来，从而实现土

壤碳氮的固存[22]。然而,在CK处理下,<0.25 mm团聚体却表现出更高的SOC和TN含量,究其原因是传统耕作下<0.25 mm团聚体成为优势粒级,其可以通过强烈的配体交换和多价阳离子桥连作用增强对有机物的吸附,从而保留SOC和TN[23]。本研究中,TP含量与SOC和TN含量呈现相反的趋势,这可能是传统耕作能使Fe,Al氧化物等矿物颗粒均匀分散于大团聚体内,导致施入的P被包裹并暂时固定于其中,而粉垄耕作下大团聚体中因有机质胶结占据主导,矿物暴露少,能促使P素向微团聚体中迁移[24]。

3.3　不同耕作方式对土壤团聚体化学计量特征的影响

碳、氮、磷的化学计量比(C:N:P)是揭示土壤生态系统中元素循环平衡和限制性养分状态的重要指标,其变化指示土壤养分供给与有机质分解过程的差异[25]。不同耕作方式通过改变土壤团聚体组成,进而影响有机质积累与元素分配特征[26]。已有研究指出,稻田生态系统中C:N比值相对稳定,而C:P与N:P比值对管理措施与土壤环境变化更为敏感,更能表征养分循环过程的响应特征[27]。这与本研究结果较为一致,全土C:N比值在不同耕作方式间无显著差异,而C:P和N:P比值在粉垄耕作(FL)处理中显著低于传统耕作(CK)。粉垄耕作导致C:P和N:P比值降低,说明该耕作方式可能通过改善土壤结构、提高通气性与含水性、增强微生物活性等途径,促进有机磷矿化和土壤有效磷供应,从而加速磷素在土壤中的积累与循环转化[28]。这表明粉垄耕作能够提高磷素利用效率并优化土壤养分化学计量特征,对维持农田生态系统养分平衡具有积极作用。

本研究结果显示,在>0.25 mm大团聚体中,FL处理的C:P与N:P比值显著高于CK处理,说明粉垄耕作促进大团聚体中碳氮元素的富集,同时相对抑制磷的积累。这与Zhong等[29]的研究相符,其研究指出,大团聚体中有机碳和氮在物理保护与微生物稳定作用下更易富集,而磷的矿化与再分配速率较慢,从而导致C:P和N:P比值升高。另一方面,在<0.25 mm微团聚体中,两种处理的C:P与N:P值差异不大,表明微团聚体中的C,N,P处于较稳定的平衡状态,受耕作扰动影响较小。由此可见,本研究结果验证C,N,P化学计量特征在团聚体尺度上存在显著的粒径依赖性。相关性分析进一步支持这一结果(图4)。MWD,GMD等团聚体稳定性指标与C:P,N:P呈显著负相关,而与SOC,TN,TP呈正相关,说明粉垄耕作通过增强团聚体稳定性促进有机质积累,并间接优化C,N,P化学计量特征。总体而言,较高的团聚体稳定性既有利于有机碳与氮的固持,也通过微生物与矿物作用推动磷在团聚体粒级间的再分配,从而改善土壤养分循环效率[30]。

4　结 论

本研究结果表明,相较于传统耕作,粉垄耕作能增加稻田中>0.25 mm水稳性大团聚体含量,提高平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),并降低分形维数(D),有效促进宏观团聚体的形成与稳定。粉垄耕作下全土有机碳(SOC)、全氮(TN)和全磷(TP)含量整体提高,尤其是大团聚体中SOC,TN含量显著增加,促进碳、氮养分的固存,同时改变不同粒径团聚体中TP的分布格局,促进磷素在团聚体尺度上的再分配。粉垄耕作显著降低全土C:P和N:P比值,而在大团聚体内则提高相应化学计量比,说明其对不同粒级团聚体间的养分化学计量关系具有重塑作用。团聚体稳定性与土壤养分及化学计量特征密切相关,是影响土壤养分分布与化学计量平衡的关键控制因素。综上,在不改变常规施肥和灌溉制度的前提下,粉垄耕作可显著改良稻田土壤结构与养分状况,是适宜南方区域推广应用的耕作模式。

参考文献(References):

[1] 刘亚龙,王萍,汪景宽.土壤团聚体的形成和稳定机制:研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):627-643.
Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: progress and prospect[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(3):627-643.

[2] Vogel H J, Balseiro-Romero M, Kravchenko A, et al. A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions[J]. European Journal of Soil Science, 2022,73(1): e13152.

[3] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000,3(6):540-550.

[4] Hu R W, Liu Y J, Chen T, et al. Responses of soil aggregates, organic carbon, and crop yield to short-term intermittent deep tillage in Southern China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,298:126767.

[5] Weidhuner A, Hanauer A, Krausz R, et al. Tillage impacts on soil aggregation and aggregate-associated carbon and nitrogen after 49 years[J]. Soil and Tillage Research, 2021,208:104878.

[6] Li Y, Li Z, Cui S, et al. Residue retention and minimum tillage improve physical environment of the soil in croplands: a global meta-analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2019,194:104292.

[7] 徐子斌,樊丽华,李雷,等.不同耕作方式对黑土团聚体及其有机碳分布特征的影响[J].吉林农业大学学报,

2024,46(5):769-776.
Xu Z B, Fan L H, Li L, et al. Effects of different tillage methods on distribution characteristics of black soil aggregates and their organic carbon[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2024,46(5):769-776.

[8] 王威雁,沈鹏飞,张侯平,等.长期保护性耕作下土壤团聚体全氮与氮功能微生物关系研究[J].土壤学报,2024,61(6):1653-1667.
Wang W Y, Shen P F, Zhang H P, et al. Study on the relationship between total nitrogen and nitrogen functional microorganisms in soil aggregates under long-term conservation tillage[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024,61(6):1653-1667.

[9] Shen X L, Wang L L, Yang Q C, et al. Dynamics of soil organic carbon and labile carbon fractions in soil aggregates affected by different tillage managements[J]. Sustainability, 2021,13(3):1541.

[10] Ren Z J, Han X J, Feng H X, et al. Long-term conservation tillage improves soil stoichiometry balance and crop productivity based on a 17-year experiment in a semi-arid area of northern China[J]. Science of the Total Environment, 2024,908:168283.

[11] 周灵芝,韦本辉,甘秀芹,等.粉垄栽培对甘蔗生长和产量的影响[J].安徽农业科学,2017,45(9):29-31.
Zhou L Z, Wei B H, Gan X Q, et al. Effects of smash-ridging cultivation on the growth and yield of sugarcane[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(9):29-31.

[12] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.

[13] Pu Y L, Lang S X, Wang A B, et al. Distribution and functional groups of soil aggregate-associated organic carbon along a marsh degradation gradient on the Zoige Plateau, China[J]. Catena, 2022,209:105811.

[14] 王松,张硕,张钰,等.不同耕作方式对广西蔗田土壤生物性和非生物性孔隙结构的影响[J].南方农业学报,2024,55(9):2613-2622.
Wang S, Zhang S, Zhang Y, et al. Effects of different tillage practices of soil biopores and nonbiopores structures in sugarcane field soils of Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2024,55(9):2613-2622.

[15] Eden M, Bachmann J, Cavalaris C, et al. Soil structure of a clay loam as affected by long-term tillage and residue management[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204:104734.

[16] Zhou M, Xiao Y, Zhang X Y, et al. Warming-dominated climate change impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in Mollisols[J]. Geoderma, 2023,438:116618.

[17] Deng Z Z, Huang M J, Zhang W P, et al. Effects of five years conservation tillage for hedging against drought, stabilizing maize yield, and improving soil environment in the drylands of northern China[J]. PloS One, 2023,18(3): e0282359.

[18] Cengiz A, Çakilli H, Ateş Ö, et al. Effects of different tillage techniques on soil enzymes and organic carbon in semi-arid conditions[J]. Chemistry and Ecology, 2025, 41(9):1151-1161.

[19] 薄国栋,胡希好,王树键,等.粉垄耕作对植烟土壤理化性质及团聚体特征的影响[J].安徽农业科学,2024,52(13):136-139,221.
Bo G D, Hu X H, Wang S J, et al. Effect of Smash-Ridging technology on soil physicochemical properties and aggregates characteristics of flue-cured tobacco field[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(13):136-139,221.

[20] Xu C, Liu W L, Li J M, et al. Dynamic change of soil aggregate stability and infiltration properties during crop growth under four tillage measures in Mollisols region of Northeast China[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12:1357467.

[21] 陈晓芬,刘明,江春玉,等.红壤性水稻土不同粒级团聚体有机碳矿化及其温度敏感性[J].土壤学报,2019,56(5):1118-1127.
Chen X F, Liu M, Jiang C Y, et al. Mineralization of soil organic carbon and its sensitivity to temperature in soil aggregates, relative to particle size in red paddy soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019,56(5):1118-1127.

[22] Qin X, Kong W B, Peng Z, et al. Temporal dynamics and environmental controls of carbon and nitrogen stabilization in soil aggregates during afforestation on the Loess Plateau[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2026,212:110020.

[23] Song K, Zheng X Q, Lv W G, et al. Effects of tillage and straw return on water-stable aggregates, carbon stabilization and crop yield in an estuarine alluvial soil[J]. Scientific Reports, 2019,9:4586.

[24] 谭文峰,许运,史志华,等.胶结物质驱动的土壤团聚体形成过程与稳定机制[J].土壤学报,2023,60(5):1297-1308.
Tan W F, Xu Y, Shi Z H, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(5):1297-1308.

[25] 高子滢,王海燕,张亦凡.土壤碳氮磷化学计量特征及其驱动因素[J].浙江农林大学学报,2025,42(3):645-656.
Gao Z Y, Wang H Y, Zhang Y F. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics and driving factors: a review[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2025,42(3):645—656.

(下转第92页)