

引用格式:

方映涵, 李双龙, 翟金磊, 曾茜倩, 聂江文, 蒋梦蝶, 刘冬, 刘章勇, 金涛. 硅藻土对稻田土壤团聚体组成及其碳氮储量的影响[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(2): 366-375.

FANG Y H, LI S L, ZHAI J L, ZENG Q Q, NIE J W, JIANG M D, LIU D, LIU Z Y, JIN T. Effects of diatomite on soil aggregate composition and carbon and nitrogen storage in paddy soil[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(2): 366-375.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.1735

CSTR: 32240.14.1000.0275.2024.1735



硅藻土对稻田土壤团聚体组成及其碳氮储量的影响

方映涵¹, 李双龙², 翟金磊¹, 曾茜倩¹, 聂江文¹, 蒋梦蝶¹, 刘冬³,
刘章勇¹, 金涛^{1*}

(1. 长江大学农学院, 湖北荆州 434025; 2. 远安县农业技术推广中心, 湖北宜昌 444200; 3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640)

摘要: 探究硅藻土对稻田土壤团聚体分布、稳定性及碳氮含量的影响, 可为稻田施肥管理和碳氮固持提供理论依据。本研究于 2021 年在湖北省荆州市开展田间试验, 分析了 4 种施肥处理不施硅藻土和氮肥 (CK)、常规化肥 (NPK)、单施硅藻土 (Si) 和常规化肥与硅藻土配施 (NPKSi) 对 0~20 cm 耕层土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响。结果表明, 与 CK 相比, NPK 和 NPKSi 处理显著增加了 > 0.25 mm 团聚体的比例, 分别提高了 2.66% 和 8.28%, 同时显著减少了粉黏粒 (< 0.053 mm 粒径团聚体) 的比例, 分别下降了 14.99% 和 22.50%。平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 表现出 Si < CK < NPK < NPKSi 的趋势。与 CK 处理相比, NPK 和 NPKSi 处理显著提高了土壤有机碳含量和储量, 增幅分别为 10.60% 和 17.67%、8.84% 和 14.42%; 而 Si 处理则未显示显著差异。NPKSi 处理显著提高了土壤全氮含量和储量, 优于其他处理。与 CK 相比, NPK 和 NPKSi 处理增加了不同粒径团聚体中的有机碳和全氮含量, 而 Si 处理则略有下降。此外, NPK 和 NPKSi 处理下, 超大团聚体 (> 2 mm 粒径团聚体) 的有机碳和全氮贡献率最高, 分别为 30.91% 和 36.71%、32.81% 和 38.99%。因此, 硅藻土与氮肥配施显著提高了大团聚体的比例, 增强了团聚体稳定性, 提升了有机碳和全氮的贡献率, 从而有效增加了稻田土壤的碳氮储量。

关键词: 水稻土; 硅藻土; 团聚体稳定性; 有机碳; 全氮

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2025) 02-0366-10

Effects of diatomite on soil aggregate composition and carbon and nitrogen storage in paddy soil

FANG Yinghan¹, LI Shuanglong², ZHAI Jinlei¹, ZENG Qianqian¹, NIE Jiangwen¹, JIANG Mengdie¹,
LIU Dong³, LIU Zhangyong¹, JIN Tao¹

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China; 2. Agricultural Technology Extension Centre of Yuanan, Yichang, Hubei 444200, China; 3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: The effects of diatomite on the distribution, stability, and carbon and nitrogen content of soil aggregates in paddy fields were investigated to provide a theoretical foundation for optimizing fertilization practices and improving carbon and nitrogen sequestration. A field experiment was conducted in 2021 in Jingzhou City, Hubei Province, to analyze the impacts of four fertilization treatments: no application of diatomite or nitrogen fertilizer (CK), conventional chemical fertilizer (NPK), diatomite application alone (Si), and the combined application of chemical fertilizer and diatomite (NPKSi) on the composition of soil aggregates and the distribution of carbon and nitrogen within the 0–20 cm tillage layer. Results indicated that, compared with CK, NPK and NPKSi treatments significantly increased the proportion of >0.25 mm aggregates by 2.66% and 8.28%, respectively, while reducing the proportion of silt and clay particles (<0.053 mm aggregates) by 14.99% and 22.50%, respectively. The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) followed the order: Si < CK < NPK < NPKSi. NPK and NPKSi treatments significantly enhanced soil organic carbon (SOC) content and stock, with increases of 10.60% and 17.67%, and 8.84% and 14.42%, respectively, compared to CK, whereas the Si treatment showed no significant difference. Additionally, the NPKSi treatment markedly improved soil total nitrogen (TN) content and stock, outperforming all other treatments.

收稿日期 Received: 2024-10-17; 接受日期 Accepted: 2025-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42377287)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (42377287).

* 通信作者 Corresponding author (jintao165@126.com)

Across different aggregate sizes, NPK and NPKSi treatments increased organic carbon and total nitrogen content, whereas the Si treatment caused a slight decrease. Super aggregates (>2 mm) under NPK and NPKSi treatments contributed the most to organic carbon and total nitrogen, with contribution rates of 30.91% and 36.71%, and 32.81% and 38.99%, respectively. In conclusion, the combined application of diatomite and nitrogen fertilizer significantly increased the proportion of large aggregates, improved aggregate stability, and enhanced the contribution rates of organic carbon and total nitrogen, thereby effectively boosting carbon and nitrogen storage in paddy soils.

Keywords : paddy soil; diatomite; aggregate stability; organic carbon; total nitrogen

中国是全球水稻种植大国,产量位列世界第一,对全球粮食供应具有关键作用^[1]。施肥是保障水稻高产和稳产的必要措施,但以往不合理的施肥方式对农田土壤质量产生了负面影响,削弱了土壤团聚体结构的稳定性,进而导致碳氮元素的流失^[2-3]。因此,优化施肥策略以增强农田土壤团聚体的稳定性和碳氮固持能力,是实现农田系统可持续生产的关键。这不仅对提升农田生态系统健康水平至关重要,也有助于保障农业生产力的长期稳定。

硅是植物的有益元素,施用硅肥能够有效提高水稻的千粒重、结实率及产量,同时增强其抗倒伏能力^[4-5]。硅藻土是由硅藻壳体沉积形成的生化矿物沉积物^[6],其主要成分为无定形二氧化硅^[7],因此被视为一种优质硅肥。硅藻土不仅能为水稻提供所需硅元素,其表面含有多种黏土矿物及丰富的硅羟基,这赋予其优异的吸附性能与表面活性^[8]。这些特性使硅藻土能够有效吸附土壤中的铵态氮,提高氮肥利用效率^[9]。此外,硅藻土独特的多孔结构使其成为微生物菌肥的优质载体,为微生物提供理想的生存微环境,施入土壤后可促进微生物的生长繁殖^[10],增强土壤微生物代谢活性和碳源代谢多样性,从而改善土壤肥力^[11]。作为土壤改良剂,硅藻土还能够优化土壤结构并促进团粒化。例如,Aksaka等^[12]研究表明,硅藻土作为土体改良剂可显著改善土壤理化性质,并增强其保水能力。璩继立和赵冬雪^[13]研究指出,施用硅藻土能有效提高>0.25 mm粒径团聚体的比例,同时降低<0.25 mm粒径团聚体的比例。此外,硅藻土可促进水稳性团聚体的形成,增加矿物结合态有机质的积累,从而对土壤有机碳的累积产生显著影响^[14]。

尽管已有大量研究探讨了硅藻土在农业生产中的应用效果,但针对其对稻田土壤团聚体内有机碳和氮素固持的影响仍缺乏系统研究。基于此,本研究以长江冲积物形成的潜育型水稻土为研究对象,探讨添加硅藻土对稻田土壤中不同粒径团聚体的含量、稳定性指标,以及团聚体内有机碳和全氮含量变化的影响。研究旨在为提高土壤肥力和生产力提供理论依据,同时进一步阐明硅藻土促进土壤碳氮固持的机制。明确硅藻土对土壤碳氮固持的作用机

制,不仅能够为科学制定土壤管理策略提供重要数据支持,还将有助于促进水稻的持续健康生长,提高稻田产出效率。这对于推动农业可持续发展、保障粮食安全及提升农业生态效益具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验始于2021年,地点位于湖北省荆州市荆州区梅槐镇(30°24'N, 112°01'E),属亚热带季风气候区,四季分明。年均气温16℃,年积温为5 000~5 350℃,年降雨量为1 100~1 300 mm,年日照时数1 800~2 100 h,无霜期253 d。供试土壤为长江冲积物形成的潜育型水稻土,基本理化性质为:pH值6.97,全氮2.1 g/kg,全磷0.65 g/kg,全钾16.53 g/kg,有机质42.41 g/kg。

1.2 试验设计与样品采集

试验设置4个处理:1)不施硅藻土和氮肥(CK);2)常规化肥(NPK);3)单施硅藻土(Si);4)常规化肥与硅藻土配施(NPKSi)。每处理4次重复,采用随机区组设计。施肥量如下:氮肥(尿素,含N 46%)180 kg/hm²,磷肥(过磷酸钙,含P₂O₅ 12%)75 kg/hm²,钾肥(氯化钾,含K₂O 60%)105 kg/hm²,硅藻土150 kg/hm²(由中国科学院广州地球化学研究所提供,养分组成见表1)。硅藻土与磷肥作为基肥一次性施入土壤;氮肥和钾肥分别按6:4和5:5比例分基肥和分蘖肥两次施用。

试验田块采用宽60 cm、高30 cm的塑料薄膜覆盖,田埂分为16个小区,每个小区面积为13.75 m×10.25 m。供试水稻品种为荃优532,4月底育秧,5月底移栽,9月中旬收获。灌溉方式为单排单灌管理,除烤田期和收获前一周外,田间始终保持3~5 cm水层深度。杂草及病虫害防治按照当地常规管理措施进行。

2023年水稻收获后,采用5点采样法从每个小区0~20 cm土层采集土壤样品,每处理总计采集1 kg样品。采集后,样品装入硬质保鲜盒,防止运输过程中结构破坏。样品自然风干后,将土块掰成小于1 cm的小块,剔除杂质并通过8 mm筛。风干后样品保存备用。同时,使用环刀法采集每个小区的土

表 1 硅藻土养分含量
Table 1 Diatomite nutrient content

组成 /%	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	烧失量
硅藻土	62.50	15.30	4.60	0.50	0.69	1.20	0.30	0.02	0.20	0.10	14.55

壤容重样品。

1.3 测定项目与方法：

1.3.1 土壤团聚体测定 土壤团聚体采用干湿筛结合法进行测定^[15]。具体方法如下：称取定量风干土样，利用电动振筛仪通过套筛（孔径分别为 2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm）对土样进行筛分，记录不同粒径干筛团聚体的质量。根据干筛结果计算各粒径团聚体百分比，并配制 30 g 的混合风干土样。随后采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体含量^[16]。湿筛操作如下：1) 将筛网按照孔径（2 mm、0.25 mm 和 0.053 mm）自上而下依次排列并固定在震荡架上；2) 将 30 g 混合土样置于顶层筛网上；3) 向筛桶内注入足够的纯水，浸没土样，并让其浸泡 5 min 以充分湿润；4) 设置湿筛仪振荡频率为 30 次/min，振幅为 8 cm，进行 30 min 垂直振荡，同时确保筛网上缘始终浸没在水中。振荡结束后，将团聚体分为四个粒径范围：超大团聚体（> 2 mm）、大团聚体（0.25~2 mm）、微团聚体（0.053~0.25 mm）和粉黏粒（< 0.053 mm）^[17]，记录各粒径范围团聚体的重量。

1.3.2 有机碳、全氮含量的测定 分别从全土和不同粒径水稳性团聚体样品中各取 1 g，磨细至能通过 0.15 mm 筛网。随后，利用 Costech ECS4010 土壤元素分析仪测定样品中的有机碳和全氮含量。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 团聚体稳定性及其碳氮贡献率的计算 土壤团聚体的稳定性通过平均重量直径（MWD）、几何平均直径（GMD）以及粒径 > 0.25 mm 团聚体含量（ $R_{0.25}$ ）这三个指标来表征^[18]，分别采用以下公式计算：

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i \times w_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \ln(\bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{T>0.25}}{M_T} \quad (3)$$

各粒径团聚体有机碳（全氮）贡献率（ P ）计算公式为^[19]：

$$P = \lambda_i \times w_i / w \times 100\% \quad (4)$$

式中： n 为湿筛后团聚体粒径划分的组数 4； \bar{x}_i 为

第 i 级团聚体的平均粒径 /mm； w_i 为第 i 级团聚体的百分含量 /%； $M_{T>0.25}$ 为 > 0.25 mm 团聚体含量总和； M_T 为各粒径团聚体的总含量； w 为各粒径团聚体有机碳（全氮）含量 /（g/kg）； w_i 为各粒径团聚体有机碳（全氮）含量的总和； λ_i 为第 i 级团聚体有机碳（全氮）含量 /（g/kg）。

1.4.2 土壤有机碳、全氮储量 土壤有机碳、全氮储量计算公式^[20]：

$$SOC_{ST} = SOC \times BD \times H \quad (5)$$

$$TN_{ST} = TN \times BD \times H \quad (6)$$

式中： SOC_{ST} 和 TN_{ST} 为土壤有机碳和全氮储量 /（kg/m²）； SOC 为土壤有机碳含量 /（g/kg）； TN 为土壤全氮含量 /（g/kg）； BD 为土壤容重 /（kg/m³）； H 表示土层深度 /m。

1.4.3 数据分析处理 试验数据计算使用 Microsoft Excel 2019 完成，数据分析采用 SPSS 18.0 软件。不同施肥处理间的显著性差异通过单因素方差分析和 Duncan 检验法比较；为明确土壤有机碳和全氮含量及储量的主要影响粒径，进一步采用多元逐步回归方程进行分析。

2 结果与分析

2.1 硅藻土对土壤团聚体分布及稳定性的影响

不同施肥处理对土壤团聚体粒径分布具有显著影响（图 1）。NPKSi 处理以超大团聚体为主，占比 35.74%，而 CK、NPK 和 Si 处理则以大团聚体为主，占比为 31.03%~36.73%。与 CK 处理相比，NPK 和 NPKSi 处理显著增加了超大团聚体的含量，分别提升了 12.63% 和 32.32%，其中 NPKSi 处理的增幅最大；然而，Si 处理却显著降低了超大团聚体的含量，降幅为 11.92%（ $P < 0.05$ ）。此外，NPK 和 NPKSi 处理的大团聚体含量较 CK 处理分别显著下降了 5.11% 和 10.45%，而 Si 处理的大团聚体含量则显著增加了 6.00%（ $P < 0.05$ ）。对于微团聚体含量，NPK 处理表现最高，较 CK 处理显著增加了 8.83%（ $P < 0.05$ ）；但 Si 和 NPKSi 处理的微团聚体含量与 CK 处理差异不显著（ $P < 0.05$ ）。NPKSi 处理显著降低了粉黏粒含量，其值显著低于其他处理（ $P < 0.05$ ），而 Si 处理的粉黏粒含量略有增加。

MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 在不同处理间的变化趋势一致 (表 2)。与 CK 处理相比, NPK 和 NPKSi 处理显著提升了 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$, 其中 NPKSi 处理的增幅最大。具体而言, NPK 处理下 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 的增幅分别为 5.21%、11.90% 和 2.66%; 而 NPKSi 处理下三项指标的增幅分别为 13.54%、26.19% 和 8.28% ($P < 0.05$)。相比之下, Si 处理显著降低了 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$, 分别较 CK 处理

下降 4.17%、4.76% 和 1.86% ($P < 0.05$)。

相关性分析显示, 超大团聚体含量与 MWD、GMD 和 $R_{0.25}$ 之间存在极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 而大团聚体和粉黏粒含量与上述三项指标均存在极显著负相关 ($P < 0.01$) (表 3)。

2.2 硅藻土对土壤有机碳和全氮含量、储量的影响

不同处理下土壤有机碳含量的排序依次为: NPKSi > NPK > CK > Si (图 2)。与 CK 处理相比,

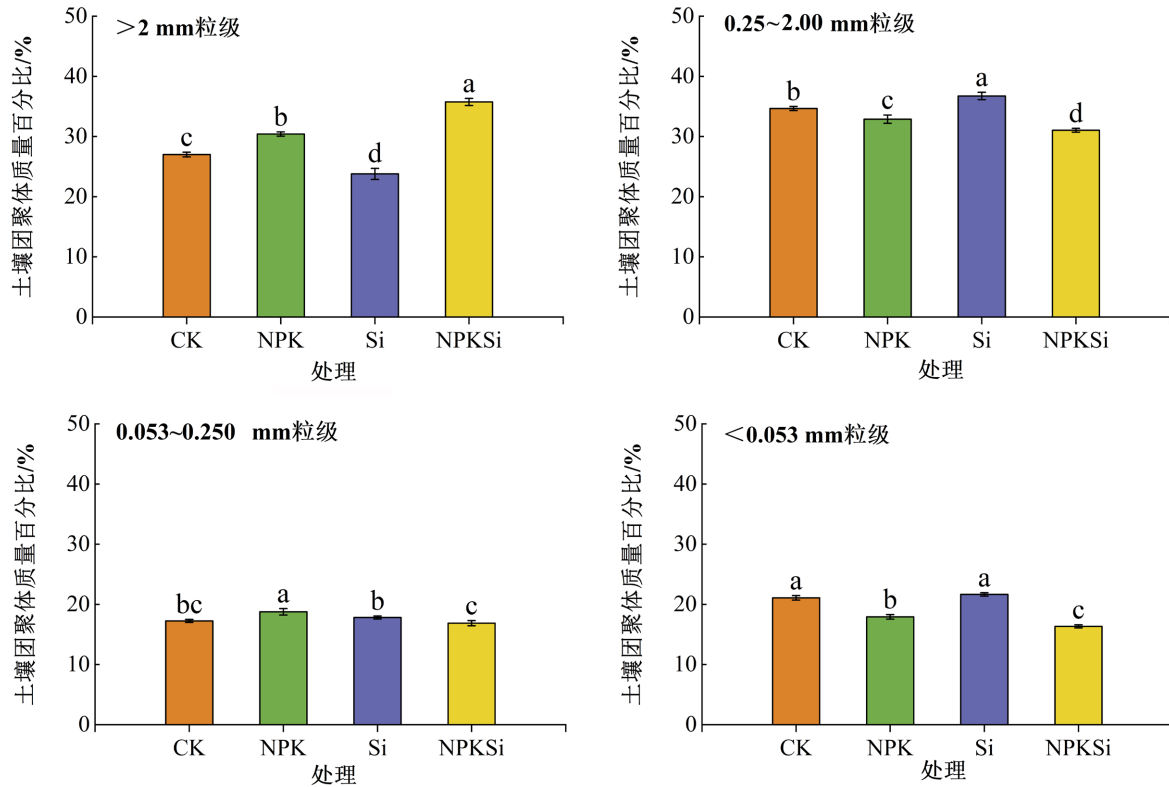


图 1 硅藻土对土壤团聚体分布的影响

Fig. 1 Effect of diatomite on soil aggregate distribution

注: 不同字母表示相同粒径范围不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。

表 2 不同处理下土壤团聚体稳定性指标

Table 2 Soil aggregate stability index under different treatments

处理	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$
CK	0.96±0.005c	0.42±0.004c	61.67±0.15c
NPK	1.01±0.011b	0.47±0.012b	63.31±0.88b
Si	0.92±0.012d	0.40±0.007d	60.52±0.37d
NPKSi	1.09±0.008a	0.53±0.005a	66.78±0.27a

注: 同一列中不同英文字母为不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 土壤团聚体粒径组成与其结构稳定性的相关关系

Table 3 Correlation between particle size composition and structural stability of soil aggregates

团聚体粒径	MWD	GMD	$R_{0.25}$
> 2.00 mm	0.998**	0.989**	0.982**
0.25~2.00 mm	-0.960**	-0.942**	-0.919**
0.053~0.250 mm	-0.318	-0.278	-0.382
< 0.053 mm	-0.960**	-0.975**	-0.946**

注: * 表示显著性水平为 0.05 ($P < 0.05$), ** 表示显著性水平为 0.01 ($P < 0.01$)。下表同。

Si 处理土壤有机碳含量降低了 3.53% ($P > 0.05$)；而 NPK 和 NPKSi 处理下，土壤有机碳含量分别提高了 10.60% 和 17.67%，两者均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。此外，不同处理土壤全氮含量排序与有机碳一致。相较于 CK 处理，Si 处理使土壤全氮含量下降了 1.96% ($P < 0.05$)；而 NPK 和 NPKSi 处理土壤全氮含量分别提高了 9.80% 和 23.53%，其中 NPKSi 处理的增幅达到显著差异 ($P < 0.05$)。

不同处理对土壤有机碳和全氮储量的影响呈现出不同的趋势 (图 3)。与 CK 处理相比，Si 处理使土壤有机碳储量降低了 1.64%，但差异不显著；而 NPK 和 NPKSi 处理分别使土壤有机碳储量显著增加了 8.84% 和 14.42% ($P < 0.05$)。在土壤全氮储量方面，所有处理的土壤全氮含量较 CK 处理均有所增加，其中 Si 和 NPK 处理的土壤全氮含量分别

提高了 0.05% 和 8.12%，但差异不显著；NPKSi 处理的土壤全氮含量增幅最大，达到 20.18%，差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 硅藻土对不同粒径土壤团聚体中有机碳和全氮含量及其贡献率的影响

在相同处理条件下，不同粒径的土壤团聚体有机碳含量呈现出明显的差异：大团聚体有机碳含量最高，其次是超大团聚体和微团聚体，粉黏粒有机碳含量最低 (图 4)。进一步分析不同处理条件下相同粒径团聚体的有机碳含量变化结果表明，与 CK 处理相比，NPK 和 NPKSi 处理显著提高了各粒径团聚体的有机碳含量 ($P < 0.05$)，具体增幅为：超大团聚体中分别增加 7.41% 和 15.56%，大团聚体中分别增加 9.22% 和 14.68%，微团聚体中分别增加 7.29% 和 17.41%，粉黏粒中分别增加 12.98% 和

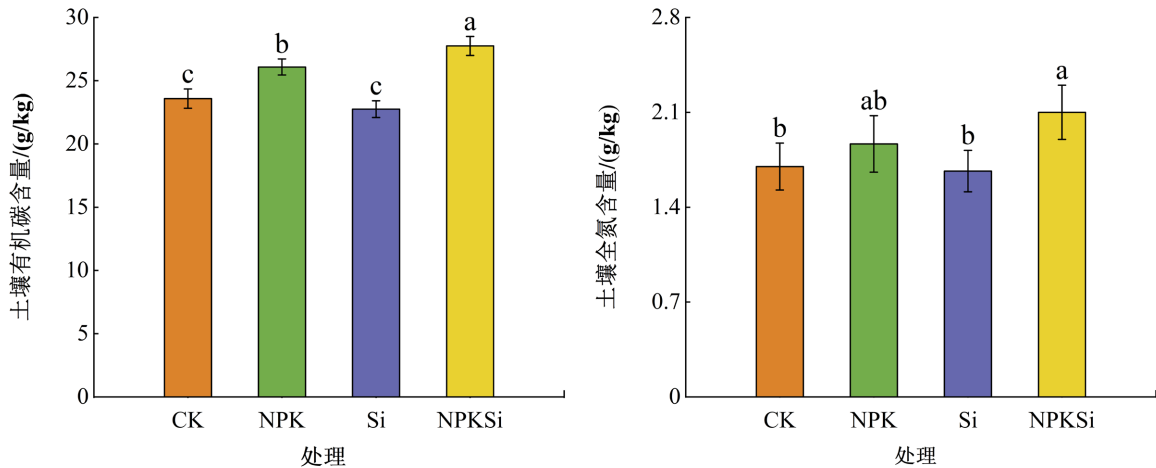


图 2 不同处理土壤耕层有机碳、全氮含量

Fig. 2 Organic carbon and total nitrogen content of soil tillage in different treatments

注：不同字母表示不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。

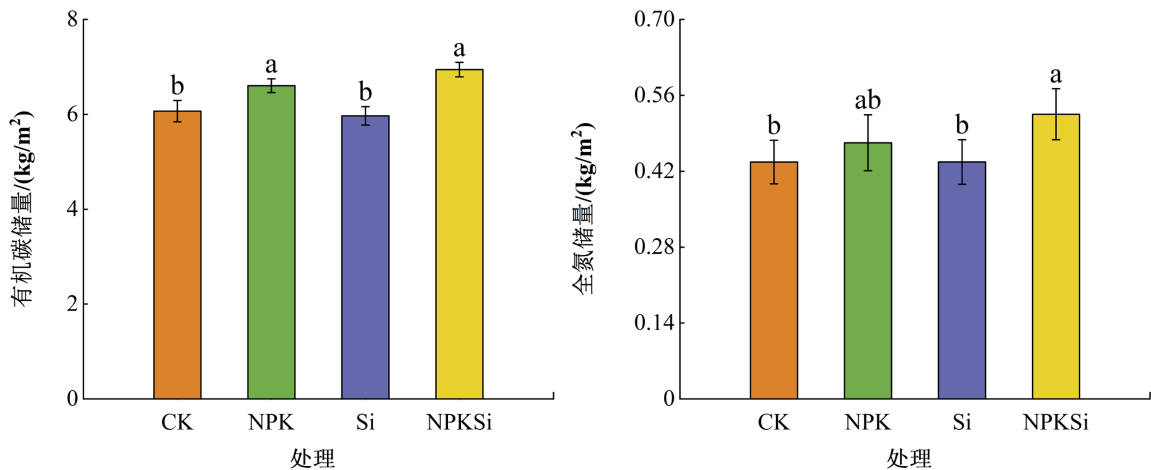


图 3 不同处理土壤耕层有机碳、全氮储量

Fig. 3 Organic carbon and total nitrogen storage in soil tillage layer of different treatments

注：不同字母表示不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。

14.23%。其中，NPKSi 处理对各粒径团聚体有机碳含量的提升效果优于 NPK 处理。相反，Si 处理下各粒径团聚体的有机碳含量较 CK 处理均有所下降，且在大团聚体中这一变化达到了显著差异 ($P < 0.05$)。

在相同处理条件下，不同粒径土壤团聚体的全氮含量也存在明显差异：大团聚体的全氮含量最高，其次是超大团聚体和微团聚体，粉黏粒的全氮含量最低（图 4）。进一步分析不同处理条件下相同粒径团聚体的全氮含量变化结果显示，与 CK 处理相比，NPKSi 处理显著提高了超大团聚体和大团聚体的全氮含量，增幅分别为 19.64% 和 23.21% ($P < 0.05$)。相比之下，NPK 和 Si 处理在各粒径团聚体中未表现出显著差异 ($P < 0.05$)。

不同粒径土壤团聚体有机碳的贡献率也存在差异。超大团聚体的有机碳贡献率为 24.86%~36.72%，大团聚体的有机碳贡献率为 34.35%~40.71%，微团聚体的有机碳贡献率为 16.11%~17.43%，粉黏粒的有机碳贡献率为 12.82%~17.49%（图 5）。进一步分析发现，与 CK 处理相比，NPK 和 NPKSi 处理显著提升了超大团聚体的有机碳贡献率，增幅分别为 10.60% 和 31.40% ($P < 0.05$)。此外，NPK 和 NPKSi 处理均显著降低了粉黏粒的有机碳贡献率，降幅分别为 12.20% 和 23.78% ($P < 0.05$)。相较而言，Si 处理对大团聚体的有机碳贡献率提升效果最佳，但对其他粒径团聚体的影响有限。微团聚体的有机碳贡献率在 Si 和 NPKSi 处理下与 CK 处理无

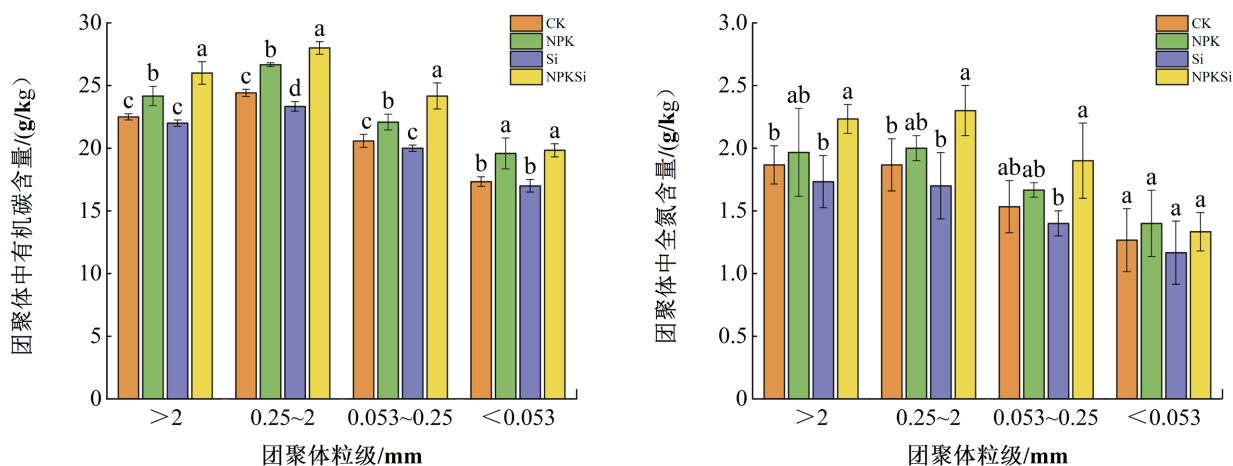


图 4 不同处理土壤各粒径团聚体中有机碳和全氮含量

Fig. 4 Organic carbon and total nitrogen content in soil aggregates of different particle sizes under various treatments
注：不同字母表示相同粒径范围不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

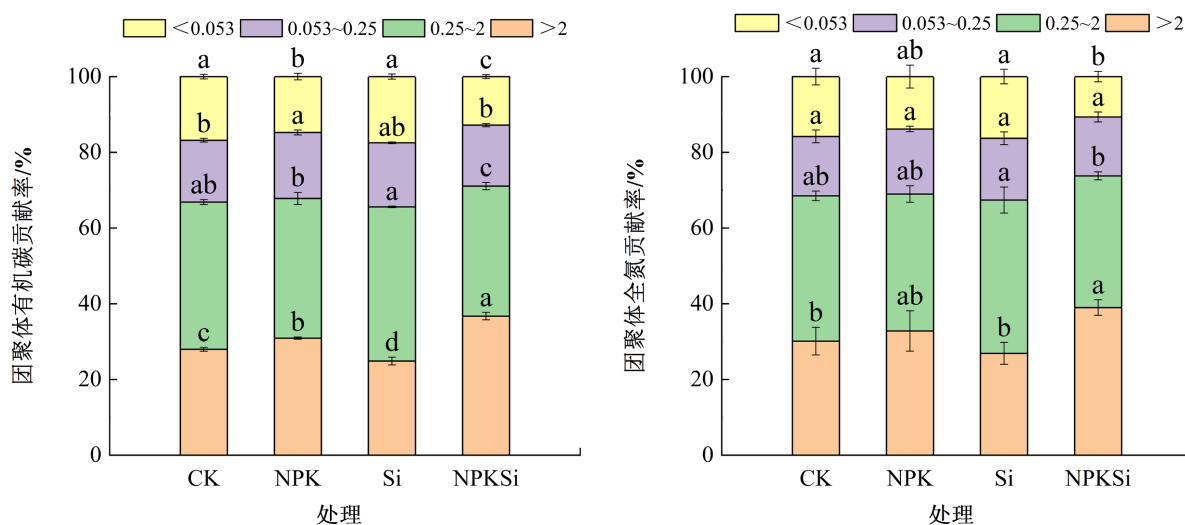


图 5 不同处理土壤各粒径团聚体中有机碳和全氮贡献率

Fig. 5 Contribution rates of organic carbon and total nitrogen in soil aggregates of different particle sizes under various treatments

注：不同字母表示相同粒径范围不同处理间的差异显著 ($P < 0.05$)。

显著差异。

不同粒径土壤团聚体全氮的贡献率差异较大。超大团聚体的全氮贡献率为 26.87%~38.99%，大团聚体的全氮贡献率为 34.79%~40.51%，微团聚体的全氮贡献率为 15.56%~17.19%，粉黏粒的全氮贡献率为 10.66%~16.30% (图 5)。所有处理下，全氮的贡献率均表现出 > 0.25 mm 粒径团聚体高于 < 0.25 mm 粒径团聚体。进一步分析表明，与 CK 处理相比，NPK 和 NPkSi 处理提高了超大团聚体的全氮贡献率，增幅分别为 8.99% 和 29.52%；同时，这两种处理显著降低了粉黏粒的全氮贡献率，降幅分别

为 12.39% 和 32.53%，其中 NPkSi 处理的变化达到显著水平 ($P < 0.05$)。此外，Si 处理对大团聚体的全氮贡献率提升效果最佳，但对其他粒径团聚体的影响相对有限。各处理对微团聚体的全氮贡献率未表现出显著差异 ($P < 0.05$)。

土壤有机碳及储量、全氮含量及储量与团聚体有机碳氮含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$) (表 4)。土壤有机碳含量和有机碳储量与超大团聚体和大团聚体的有机碳含量呈正相关，而与微团聚体和粉黏粒的有机碳含量呈负相关。土壤全氮含量和全氮储量同样与超大团聚体和大团聚体全氮含量呈正相

表 4 土壤有机碳和全氮含量及储量与团聚体粒径相应指标的逐步回归方程

Table 4 Stepwise regression equation of soil organic carbon and total nitrogen content and reserves and corresponding indicators of aggregate particle size

项目	回归方程	决定系数
有机碳	$C = 0.451C_1 + 0.839C_2 - 0.094C_3 - 0.081C_4 + 0.452$	0.979**
有机碳储量	$C = 0.142C_1 + 0.121C_2 - 0.027C_3 - 0.001C_4 + 0.222$	0.919**
全氮	$N = 0.091N_1 + 0.877N_2 - 0.099N_3 - 0.245N_4 + 0.409$	0.816**
全氮储量	$N = 0.003N_1 + 0.231N_2 - 0.033N_3 - 0.060N_4 + 0.174$	0.756**

注：C₁ 为超大团聚体有机碳含量，C₂ 为大团聚体有机碳含量，C₃ 为微团聚体有机碳含量，C₄ 为粉黏粒有机碳含量，N₁ 为超大团聚体全氮含量，N₂ 为大团聚体全氮含量，N₃ 为微团聚体全氮含量，N₄ 为粉黏粒全氮含量。

关，而与微团聚体和粉黏粒全氮含量呈负相关。

3 讨论

3.1 硅藻土对土壤团聚体分布及稳定性的影响

在土壤中，> 0.25 mm 的团聚体被认为是较优的土壤结构，其数量直接影响土壤的保水、保肥能力及固碳能力。因此，通过测定 > 0.25 mm 团聚体的含量，可以有效评估土壤的结构优势^[21]。本研究表明，常规化肥的施用能够显著提高 > 0.25 mm 团聚体的含量，并降低粉黏粒的比例 (图 1)，同时提升团聚体的稳定性 (表 2)，其中常规化肥与硅藻土配施的效果最为显著。这主要是因为施用化肥不仅能显著提高作物产量，还能促进地下生物量的增加，加速根系更新和周转，从而增加土壤中的有机碳含量^[22]。有机碳可以直接或间接地充当土壤团聚体的胶结物质，有助于微团聚体和粉黏粒的结合，形成更大的团聚体，从而提高土壤中 > 0.25 mm 团聚体的含量^[23]。

常规化肥与硅藻土配施处理效果更佳，原因在于硅藻土的施用不仅为水稻提供了有效硅，同时改善并活化土壤中大量元素的营养状况，促进植物对营养的吸收^[24]，进而提升作物的生物量^[9]，并增加土壤的碳输入。此外，硅藻土由硅藻蛋白石和附着于表面的细小层状硅酸盐矿物等组成，呈片层状结构，具有较大的比表面积。它可以作为土壤中的无

机胶体与土壤中的有机质结合，促进大团聚体的生成，同时有效防止团聚体内部有机质的分解，从而进一步提升土壤团聚体的稳定性^[25-26]。然而，在单独施用硅藻土的处理中，土壤中 < 0.25 mm 粒径团聚体有所增加 (图 1)，且该处理下团聚体的稳定性显著低于其他处理 (表 2)。这一结果与刘新梅等^[27]施用改良剂一年后土壤大团聚体含量及团聚体稳定性降低的结果一致。其可能原因在于硅藻土具有较高的孔隙率和良好的持水性，为土壤微生物提供了适宜的生存环境^[10]，进而促进了微生物的生长和繁殖。土壤中的大量有机质被微生物利用和分解，影响了其数量和质量，最终导致大团聚体分解为微团聚体，土壤团聚体的稳定性降低^[28-29]。

总的来说，常规化肥与硅藻土配施处理对土壤结构具有一定的改良作用，有助于稳定土壤中的大粒径团聚体，而单独施用硅藻土则表现出一定的局限性。因此，硅藻土可能需要与其他土壤改良剂或管理措施相结合，才能达到更好的土壤结构改善效果。

3.2 硅藻土对有机碳、全氮及贡献率的影响

3.2.1 硅藻土对有机碳含量的影响 在土壤养分循环中，有机碳含量发挥着重要作用^[30]。本研究结果表明，常规化肥处理、常规化肥与硅藻土配施处理均能显著提高土壤有机碳含量 (图 2)。这主要是因为长期施肥促进了作物产量的提升，从而促使更多的

作物残茬和根系分泌物返回土壤, 这些物质在微生物的分解作用下间接增加土壤碳素投入^[31]。进一步分析发现, 与常规化肥处理相比, 常规化肥与硅藻土配施处理的土壤有机碳含量增幅更大(图2), 这可能归因于硅藻土的性质。硅藻土是自然界常见的黏土矿物, 黏土矿物对有机物料具有较强的吸附能力, 能够通过物理吸附和化学结合作用提高土壤有机碳含量^[32]。土壤团聚体是土壤有机碳的重要储存场所^[33], 研究土壤团聚体的粒径分布特征, 对于揭示土壤有机碳的分布规律至关重要。本试验结果表明, 大团聚体中有机碳含量最高(图4), 这与Song等^[34]、赵哲萱等^[35]的研究成果相符。这一现象的主要原因是大粒径团聚体具有较大表面积, 能够通过配位体交换和阳离子桥作用更有效地吸附有机物质, 从而使该粒径团聚体的有机碳含量显著高于其他粒径^[36]。

3.2.2 硅藻土对全氮含量的影响 氮素是植物生长的必需营养元素, 其在土壤中的含量直接影响土壤的生产能力^[37]。本试验中, 不同处理下的土壤全氮含量与有机碳含量变化趋势一致, 常规化肥与硅藻土配施处理能够提高土壤全氮含量(图2)。硅藻土作为肥料控释剂的功能进一步被验证, 因为该处理中硅藻土能够减缓氮素的释放速度, 从而提高氮肥的利用效率^[38]。这不仅有助于持续供应土壤中的氮素, 还能有效减少氮素流失。本试验结果还显示, > 0.25 mm 团聚体全氮含量高于 < 0.25 mm 团聚体全氮含量(图4), 与吴嘉俊等^[39]的研究结果一致, 原因在于水稳性较强的大团聚体对土壤氮素具有更高的富集和保护作用, 能够有效减少氮素的流失, 进而提高土壤的氮素储存能力。上述现象不仅表明大团聚体在土壤肥力维持中的重要性, 还揭示了其在碳素、氮素保护与养分循环中的关键作用。因此, 利用硅藻土改良土壤和提高肥料利用效率, 有助于实现绿色农业和可持续发展目标。

3.2.3 硅藻土对有机碳、全氮贡献率的影响 团聚体的有机碳贡献率(或全氮贡献率)受到该粒径团聚体的有机碳(全氮)含量及其粒径团聚体在整体土壤中的含量的共同影响。本研究结果显示, 在所有处理条件下, 大团聚体的有机碳贡献率显著高于其他粒径团聚体(图5)。这一结果与赵哲萱^[35]等人研究的结论一致, 进一步验证了大团聚体在土壤碳库中的重要地位。该现象主要归因于长期施肥显著增加了土壤中大团聚体的比例, 并显著提高了其内部有机碳含量^[40], 从而增强了大团聚体在土壤有机碳中的贡献率。此外, 本试验进一步发现, 单施硅

藻土处理下, 大团聚体的有机碳和全氮贡献率均显著高于其他处理。原因可能在于硅藻土通过优化土壤物理结构, 促进了大团聚体的形成, 使得该处理大团聚体的比例显著高于其他处理(图1)。综上所述, 本研究验证了大团聚体在土壤碳氮库中的关键作用, 进一步揭示了硅藻土在提高土壤大团聚体比例及其有机碳、全氮贡献率方面的显著效果。

3.2.4 硅藻土对有机碳、全氮储量的影响 不同施肥处理对土壤有机碳和全氮储量的影响略有差异(图3)。单施硅藻土处理与不施硅藻土和氮肥处理间土壤有机碳和全氮储量差异显著, 这一现象可能是由于土壤物理和化学性质对碳结合及氮固定能力的不同影响所致。此外, 本试验中常规化肥与硅藻土配施处理土壤有机碳、全氮储量高于其他处理(图3), 这主要源于两方面: 首先, 研究指出外源有机碳和氮的主要固持载体是团聚体, 尤其是大团聚体^[41], 本试验中该处理大团聚体数量高于其他处理, 因此增加了土壤有机碳、全氮储量。其次, 硅藻土作为肥料载体, 不仅能够改善肥料的物理性状, 还可以调控肥料中养分的释放速率, 从而减少肥料在土壤中的养分流失^[42], 最终促进土壤有机碳和全氮的积累。这表明, 通过硅藻土与氮肥的协同施用, 可以显著改善土壤养分的固持和利用效率。

4 结论

1) 单独施用硅藻土对土壤碳氮储量的提升效果有限, 而常规化肥与硅藻土配施处理能够显著增加水稻土中的有机碳和全氮储量, 同时 > 0.25 mm 大团聚体的比例和稳定性提高, 粉黏粒的比例则减少。

2) 常规化肥与硅藻土配施处理提升了超大团聚体中有机碳和全氮的贡献率, 降低了粉黏粒中有机碳和全氮的贡献率, 表明其通过增加 > 0.25 mm 团聚体的碳氮含量, 有效提升了土壤的有机碳和全氮储量。

3) 常规化肥与硅藻土配施不仅改善了水稻土的团聚体结构, 还增强了土壤对碳氮的固持能力。这对于维持土壤结构稳定性、提高土壤肥力及农田生产力具有重要意义。

参考文献:

- [1] 徐春春, 纪龙, 陈中督, 等. 中国水稻生产、市场与进出口贸易的回顾与展望[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 17-21.
XU C C, JI L, CHEN Z D, et al. Historical review and prospect of China's rice production, market and import and export trade[J]. China Rice, 2021, 27(4): 17-21.
- [2] 韩潇杰, 任志杰, 李双静, 等. 不同施氮量对土壤团聚体碳氮含

- 量及小麦产量的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(9): 1766-1778.
- HAN X J, REN Z J, LI S J, et al. Effects of different nitrogen application rates on carbon and nitrogen content of soil aggregates and wheat yield[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024, 57(9): 1766-1778.
- [3] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(3): 759-768.
- WANG L, LI J, LI J, et al. Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 759-768.
- [4] 毛颖盈, 王飞军, 曹亚波, 等. 不同硅肥品种在水稻上的应用效果[J]. 浙江农业科学, 2016, 57(5): 639, 641.
- MAO Y Y, WANG F J, CAO Y B, et al. Application effect of different silicon fertilizer varieties on rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2016, 57(5): 639, 641.
- [5] 郭振宇, 索常凯, 蒲敏, 等. 硅提高旱稻生理功能和耐盐性的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(12): 2282-2298.
- GUO Z Y, SUO C K, PU M, et al. Mechanism of silicon application on improving physiological function and tolerance to selenium of upland rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(12): 2282-2298.
- [6] 张玉洁. 基于响应曲面法的纤维改性沥青混合料研究[J]. 合成纤维, 2023, 52(5): 89-93.
- ZHANG Y J. Study on fiber modified asphalt mixture based on response surface method[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2023, 52(5): 89-93.
- [7] 栾成昊. 醚后碳四非选择性齐聚固体磷酸催化剂的制备及催化性能研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024
- LUAN C H. Preparation and catalytic performance of solid phosphoric acid catalyst for non-selective oligomerization of C4 after etherification[D]. Yantai: Yantai University, 2024.
- [8] 苏杨. 基于提高持水能力的硅藻土改性及改良土壤持水性能的初步研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
- SU Y. Preliminary research on modified diatomite to improve the water holding capacity of the soil[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2013.
- [9] 曾茜倩. 硅藻土对水稻产量和氮肥利用率的影响[D]. 荆州: 长江大学, 2024
- ZENG Q Q. Effects of diatomite on rice yield and nitrogen use efficiency[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2024
- [10] 张育新, 丁杰航, 鄢文磊, 等. 硅藻土基硅肥的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(4): 85-93.
- ZHANG Y X, DING J H, YAN W L, et al. Recent advances of diatomite-based silicon fertilizer[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(4): 85-93.
- [11] 于涵, 王晓萍, 吴姝菊. 纳米硅藻页岩对水稻土壤微生物功能多样性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(5): 217-221.
- YU H, WANG X P, WU S J. Influence of nano diatom shale on microbial functional diversity in paddy soils[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(5): 217-221.
- [12] AKSAKAL E L, ANGIN I, OZTAS T. Effects of diatomite on soil physical properties[J]. *Catena*, 2012, 88(1): 1-5.
- [13] 璩继立, 赵冬雪. 硅藻土对上海潮土和黄泥土耕作性能改良的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 202-206.
- QU J L, ZHAO D X. Experiment on improvement of farming property of Shanghai calcareous soil and yellow soil by diatomite[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(6): 202-206.
- [14] 吕晓菡, 章明奎, 严建立. 黏土矿物改良剂对新垦砂壤质耕地土壤有机碳积累的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(12): 48-52.
- LÜ X H, ZHANG M K, YAN J L. Effects of clay mineral amendments on soil organic carbon accumulation in newly reclaimed sandy loam farmland[J]. *Journal of Agriculture*, 2021, 11(12): 48-52.
- [15] 江春玉, 刘萍, 刘明, 等. 不同肥力红壤水稻土根际团聚体组成和碳氮分布动态[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 138-149.
- JIANG C Y, LIU P, LIU M, et al. Dynamics of aggregates composition and C, N distribution in rhizosphere of rice plants in red paddy soils different in soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1): 138-149.
- [16] 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.
- [17] 宋佳, 黄晶, 高菊生, 等. 冬种绿肥和秸秆还田对双季稻区土壤团聚体和有机质官能团的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(2): 564-570.
- SONG J, HUANG J, GAO J S, et al. Effects of green manure planted in winter and straw returning on soil aggregates and organic matter functional groups in double cropping rice area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 564-570.
- [18] MAZURAK A P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates[J]. *Soil Science*, 69(2): 135-148.
- [19] CHENG Y T, XU G C, WANG X K, et al. Contribution of soil aggregate particle size to organic carbon and the effect of land use on its distribution in a typical small watershed on Loess Plateau, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110988.
- [20] YAN Z J, ZHOU J, YANG L, et al. Diversified cropping systems benefit soil carbon and nitrogen stocks by increasing aggregate stability: Results of three fractionation methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 824: 153878.
- [21] 王鸿斌, 王洪英, 徐金荣, 等. 不同耕作方式对黑土结构性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2005, (6): 658-662, 674.
- WANG H B, WANG H Y, XU J R, et al. Effect of different tillages on soil construction properties of black soil[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2005, (6): 658-662, 674.
- [22] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 基于 Meta-Analysis 研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995-3004.
- CAI A D, ZHANG W J, YANG P P, et al. Effect degree of fertilization practices on soil organic carbon and fraction of croplands in China: based on meta-analysis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(15): 2995-3004.
- [23] ZHANG X K, WU X, ZHANG S X, et al. Organic amendment effects on aggregate-associated organic C, microbial biomass C and glomalin in agricultural soils[J]. *Catena*, 2014, 123: 188-194.
- [24] 贺月, 彭福田, 肖元松, 等. 不同施硅处理对桃幼树土壤肥力与生长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 172-181.
- HE Y, PENG F T, XIAO Y S, et al. Effects of different silicon

- application treatments on soil fertility and growth of peach sapling[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(6): 172-181.
- [25] MEDINA J, MONREAL C, BAREA J M, et al. Crop residue stabilization and application to agricultural and degraded soils: a review[J]. *Waste Management*, 2015, 42: 41-54.
- [26] LI S Y, GU X, ZHUANG J, et al. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 199-206.
- [27] 刘新梅, 樊文华, 张昊, 等. 改良剂对矿区复垦土壤机械稳定性团聚体及有机碳的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(4): 970-977.
- LIU X M, FAN W H, ZHANG H, et al. Effects of amendments on mechanical stability aggregates and organic carbon in reclaimed soil[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2021, 27(4): 970-977.
- [28] 侯晓娜, 李慧, 朱刘兵, 等. 生物炭与秸秆添加对砂姜黑土团聚体组成和有机碳分布的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 705-712.
- HOU X N, LI H, ZHU L B, et al. Effects of biochar and straw additions on lime concretion black soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(4): 705-712.
- [29] ZHANG Q Q, SONG Y F, WU Z, et al. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118435.
- [30] 裴志福, 红梅, 兴安, 等. 秸秆还田条件下盐渍土团聚体中有机碳化学结构特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(12): 4401-4410.
- PEI Z F, HONG M, XING A, et al. Chemical structure characteristics of organic carbon in saline soil aggregates under straw returning condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(12): 4401-4410.
- [31] LOU Y L, XU M G, WANG W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113(1): 70-73.
- [32] 干方群, 周健民, 王火焰, 等. 不同改性黏土矿物吸附净化磷污染水体的性能比较[J]. *土壤通报*, 2010, 41(1): 43-46.
- GAN F Q, ZHOU J M, WANG H Y, et al. Phosphate adsorption capabilities of modified clay minerals in phosphate-contaminated water[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(1): 43-46.
- [33] 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. *环境科学*, 2015, 36(3): 1045-1052.
- QIU X L, ZONG L G, LIU Y F, et al. Effects of different cultivation patterns on soil aggregates and organic carbon fractions[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(3): 1045-1052.
- [34] SONG K, ZHENG X Q, LÜ 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(1): 4586.
- [35] 赵哲萱, 冉成, 孟祥宇, 等. 秸秆还田对苏打盐碱稻区土壤团聚体分布及有机碳含量的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2023, 45(5): 582-591.
- ZHAO Z X, RAN C, MENG X Y, et al. Effects of straw returning on distribution of soil aggregates and content of organic carbon in saline-sodic rice areas[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2023, 45(5): 582-591.
- [36] ZHAO Y C, WANG M Y, HU S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4045-4050.
- [37] 向艳文, 郑圣先, 廖育林, 等. 长期施肥对红壤水稻土水稳性团聚体有机碳、氮分布与储量的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2415-2424.
- XIANG Y W, ZHENG S X, LIAO Y L, et al. Effects of long-term fertilization on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of red paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(7): 2415-2424.
- [38] 郑梦霄, 冯亮, 翟学一, 等. 不同增效氮肥的制备及缓释性能研究[J]. *应用化工*, 2024, 53(5): 1063-1066.
- ZHENG M X, FENG L, ZHAI X Y, et al. Study on preparation and slow release properties of different synergistic nitrogen fertilizers[J]. *Applied Chemical Industry*, 2024, 53(5): 1063-1066.
- [39] 吴嘉俊, 童文彬, 江建锋, 等. 水稻秸秆炭施用对水稻土团聚体稳定性及其碳氮分布的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(3): 457-468.
- WU J J, TONG W B, JIANG J F, et al. Application of rice straw biochar increases soil aggregate stability and carbon and nitrogen distribution in paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(3): 457-468.
- [40] 樊红柱, 秦鱼生, 陈庆瑞, 等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1473-1480.
- FAN H Z, QIN Y S, CHEN Q R, et al. Distribution and stability of soil aggregates and carbon sequestration in purple paddy soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1473-1480.
- [41] 徐虎, 张敬业, 蔡岸冬, 等. 外源有机物料碳氮在红壤团聚体中的残留特征[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(23): 4660-4668.
- XU H, ZHANG J Y, CAI A D, et al. Retention characteristic of carbon and nitrogen from amendments in different size aggregates of red soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4660-4668.
- [42] 张秀兰, 栗印环, 王晓晶, 等. 硅藻土对肥料的控释作用研究[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2014, 27(2): 255-258.
- ZHANG X L, LI Y H, WANG X J, et al. Features of controlled release of diatomite-coated compound fertilizers[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2014, 27(2): 255-258.