

有机肥配施改良剂对酸性水稻土团聚体特征及水稻产量的影响

王洋^{1,2}, 罗博³, 孟佳奥¹, 代文才¹

(1.西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2.重庆市江津区

乡村发展服务中心, 重庆 402260; 3.重庆市江津区农业技术推广中心, 重庆 402260)

摘要: [目的] 分析单施改良剂和有机肥配施改良剂对酸性水稻土团聚体分布特征和水稻产量的影响, 为酸性水稻土修复和提高水稻产量提供科学依据。[方法] 以酸性水稻土为研究对象, 设置了对照(CK)、钙镁磷肥(T₁)、碳酸钙粉(T₂)、钙镁硅类调理剂(T₃)、有机肥+钙镁磷肥(T₄)、有机肥+碳酸钙粉(T₅)、有机肥+钙镁硅类调理剂(T₆)共7个处理。比较不同处理下土壤的团聚体分布特征、团聚体的稳定性以及水稻产量。[结果] ①整体上, T₁—T₆处理的土壤pH值和土壤养分指标较CK均呈上升趋势, 但未达显著水平; T₅处理的pH值提升至最高, 达4.8, 较CK的提升了0.4个单位, T₁有效磷含量为最高值9.74 mg/kg, 较CK提升了152%。②T₁—T₆处理风干性土壤团聚体中>5 mm粒级的含量显著高于CK处理, 其中T₅处理效果最显著, 较CK增幅为6.37%。③T₄—T₆处理土壤风干性团聚体和水稳性团聚体的平均重量直径(MWD), 几何重量直径(GMD), >0.25 mm团聚体含量(R_{0.25})较CK处理显著提高, 分别提升7.51%~8.61%, 26.0%~28.6%, 6.29%~6.50%, 分形维数D显著降低。④T₁—T₆处理水稻产量显著高于CK处理, T₅处理水稻产量增幅最大, 为17.46%。[结论] 有机肥配施钙镁磷肥、碳酸钙粉和钙镁硅类调理剂可显著提高土壤结构稳定性和水稻产量, 以有机肥配施碳酸钙粉处理效果最佳。

关键词: 有机肥; 酸性土壤改良; 团聚体; 水稻产量; 分形维数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0045-08

中图分类号: S156.92

文献参数: 王洋, 罗博, 孟佳奥, 等. 有机肥配施改良剂对酸性水稻土团聚体特征及水稻产量的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 45-52. Wang Yang, Luo Bo, Meng Jiaao, et al. Effects of combined application of organic fertilizer and amendments on aggregate characteristics and rice yield of acidic paddy soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 45-52. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.037; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.037.

Effects of combined application of organic fertilizer and amendments on aggregate characteristics and rice yield of acidic paddy soil

Wang Yang^{1,2}, Luo Bo³, Meng Jiaao¹, Dai Wencai¹

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2.Chongqing Jiangjin District Rural Development Service Center, Chongqing 402260, China;

3.Chongqing Jiangjin District Agricultural Technology Extension Center, Chongqing 402260, China)

Abstract: [Objective] The effects of single amendment application and combined application of organic fertilizer with amendments on the distribution characteristics of soil aggregates and rice yield of acidic paddy soil were analyzed, in order to provide a scientific basis for the amelioration of acidic paddy soil and the improvement of rice yield. [Methods] Acidic paddy soil was selected as the research object. Seven treatments were set up: control (CK); calcium magnesium phosphate fertilizer (T₁), calcium carbonate powder (T₂), calcium magnesium silicate conditioner (T₃), organic fertilizer+calcium magnesium phosphate fertilizer (T₄), organic fertilizer+calcium carbonate powder (T₅), and organic fertilizer+calcium magnesium silicate conditioner (T₆). The soil

收稿日期: 2025-05-06

修回日期: 2025-07-02

采用日期: 2025-07-04

资助项目: 中央高校基本科研业务费专项“升温和多环芳烃对土壤动物的联合效应及其解毒机制”(SWU-KR22026)

第一作者: 王洋(1983—), 男(土家族), 湖北省宜昌市人, 本科, 高级农艺师, 主要从事酸化土壤改良研究。Email: 81840068@qq.com。

通信作者: 代文才(1992—), 男(汉族), 重庆市人, 博士, 讲师, 主要从事酸化土壤改良研究。Email: wencai@swu.edu.cn。

aggregate distribution characteristics, aggregate stability, and rice yield under different treatments were compared. [Results] ① Overall, the soil pH value and soil nutrient indicators of T_1 — T_6 showed an increasing trend compared with CK, but not reaching statistical significance. Among them, T_5 showed the highest pH value at 4.8, an increase of 0.4 units over CK. Additionally, T_1 recorded the highest available phosphorus content at 9.74 mg/kg, representing a 152% increase compared to CK. ② The content of >5 mm aggregates in air-dried soil aggregates of T_1 — T_6 was significantly higher than in CK, with T_5 treatment showing the most pronounced effect, an increase of 6.37% compared to CK. ③ The mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and >0.25 mm aggregate content ($R_{0.25}$) of air-dried and water-stable aggregates in T_4 — T_6 were significantly higher than in CK, increasing by 7.51%—8.61%, 26.0%—28.6%, and 6.29%—6.50%, respectively. And the fractal dimension D significantly decreased. ④ Rice yield under T_1 — T_6 treatments was significantly higher than that of CK, with the T_5 treatment showing the highest increase of 17.46%. [Conclusion] The combined application of organic fertilizer with calcium magnesium phosphate fertilizer, calcium carbonate powder, and calcium magnesium silicate conditioner significantly improves soil structural stability and rice yield, with the organic fertilizer+calcium carbonate powder treatment (T_5) demonstrating the optimal effect.

Keywords: organic fertilizer; acidic soil amelioration; aggregates; rice yield; fractal dimension

土壤酸化是在自然和人为条件下,土壤pH值持续降低、交换性酸不断增加的过程,是土壤退化的主要表现之一^[1]。近年来,由于过量施用化肥、灌溉方式不当等人为因素,土壤酸化速率加快,农田土壤平均pH值降低了0.5个单位^[2],严重影响了土壤质量和农业生产。其中,酸性水稻土作为我国重要的耕作土壤类型,其酸化问题尤为突出,在长江中下游等主要稻作区已造成显著产量损失^[3]。土壤酸化会引发一系列负面效应,首先,导致土壤中的盐基离子(K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 等)大量流失,造成土壤养分失衡;其次,提高重金属离子在土壤中的有效性,增加农产品安全风险^[4];再者,破坏土壤水稳性团聚体结构,造成土壤板结等不良影响。此外,对于酸性水稻土,铝毒和锰毒是限制水稻生长的关键因素,特别是在长期淹水条件下,还原态锰的积累会加剧对根系的毒害作用^[5]。因此,改良酸化土壤,对改善土壤质量、保障国家粮食安全具有十分重要的意义。

已有研究^[6-7]表明,施用石灰、钙镁磷肥等碱性物质及有机肥是改良酸化土壤的有效手段。钙镁磷肥既能提高土壤pH值,又可提高土壤中的磷及盐基离子含量。碳酸钙能显著提高土壤pH值、土壤阳离子交换量^[8]。N. S. Aye等^[9]研究表明土壤中施入石灰,不仅提高土壤pH值,还能增加土壤团聚体的稳定性。有机物质富含碱性物质,不仅能中和土壤酸度、提高土壤酸碱缓冲能力,而且能络合土壤中的铝离子,其疏松多孔的特性,对改良土壤结构及团聚体的形成也起到促进作用。李越等^[10]研究表明,有机肥配施化肥能显著提升土壤团聚体的稳定性。

酸化土壤中施用碱性物质可提高作物产量。杨

小敏等^[11]的研究表明,施用碱性物料如石灰、钙镁磷肥和酸性土壤改良剂显著提高了土壤pH值并使水稻产量增加了8.31%~19.4%。在不同氮素水平下,尿素配施碳酸钙,使油菜产量较对照处理提高了1.1%~8.8%,使玉米产量较仅施尿素处理提高了8.8%^[12]。在水稻-油菜轮作系统中连续施入酸性土壤改良剂后,油菜产量显著提高了约40%^[13]。

目前对酸化土壤改良的研究集中在单一改良剂(如石灰)的施用,然而,长期施用石灰会造成土壤板结和养分不平衡等问题^[14]。将石灰等无机碱性物质与有机肥配合施用,能维持土壤团聚体和肥力的长期稳定性,展现出比单一改良剂更优的可持续改良潜力,并可以解决单一改良剂施用存在的问题,但其施用技术有待进一步研究^[14]。相比单一改良剂,有机肥配施改良剂通过有机-无机协同效应,在快速中和土壤酸度的同时改善土壤结构和养分平衡,能显著提升改良效果。孟庆英等^[15]的研究表明,有机肥配施石灰不仅显著提高了土壤有机质含量,使大豆产量提高13.07%。有机肥配施钙镁磷肥也能显著提高蕉柑产量^[16]。然而,利用有机肥配施改良剂对酸化水稻土的团聚体特征及水稻产量的影响尚不清楚。因此,本文以酸性水稻土为研究对象,探讨有机肥配施改良剂对酸性水稻土团聚体组成、稳定性以及水稻产量的影响,以期缓解酸化水稻土的酸化程度,改善土壤物理结构、提高水稻产量提供科学依据。并通过提升土壤碳汇潜力助力农业低碳转型,响应国家“碳达峰、碳中和”战略目标,契合提升耕地质量、推动绿色施肥与可持续土壤管理的政策要求。

1 材料与方 法

1.1 研究区概 况

试验地位于重庆市江津区石蟆镇正林村(28°57'54"N, 105°56'15"E), 平均海拔305 m。试验地属于亚热带季风湿润气候, 年均温度为17.5℃, 年均降雨量为1 100 mm, 年平均日照时数1 400 h, 无霜期年平均350 d。

供试土壤为侏罗纪沙溪庙组紫色泥岩发育经水耕熟化而形成的紫色水稻土。供试土壤的基本理化性质:pH值为4.2, 有机质含量为25.8 g/kg, 全氮

含量为1.71 g/kg, 全磷含量0.235 g/kg, 全钾含量18.3 g/kg。

1.2 试验设计

(1) 共设置7个处理。对照即不添加改良剂和有机肥(CK)、钙镁磷肥(T₁)、碳酸钙粉(T₂)、钙镁硅类调理剂(T₃)、有机肥+钙镁磷肥(T₄)、有机肥+碳酸钙粉(T₅)、有机肥+钙镁硅类调理剂(T₆)。每个处理设置3个重复, 采用随机区组排列在21个5 m×4 m的小区内, 各个小区的田间管理与常规施肥处理一致。各试验处理的基肥施用情况详见表1。所有肥料均表面撒施, 施肥处理采用“等氮、等磷、等钾”原则。

表1 不同试验处理的基肥施用情况

Table 1 Basal fertilizer application under different treatments

单位: kg/hm²

处理	尿素	磷酸二铵	氯化钾	钙镁磷肥	碳酸钙粉	钙镁硅类调理剂	有机肥
CK	160	107	75.00	0	0	0	0
T ₁	195	0	75.00	375	0	0	0
T ₂	160	107	75.00	0	1 500	0	0
T ₃	160	107	75.00	0	0	1 500	0
T ₄	180	0	62.50	375	0	0	3 000
T ₅	147	98	68.75	0	1 500	0	3 000
T ₆	147	98	68.75	0	0	1 500	3 000

(2) 供试材料。供试肥料均为市售尿素(N 46%)、磷酸二铵(P₂O₅42%, N 15%)、氯化钾(K₂O 60%)、钙镁磷肥(P₂O₅12%)、钙镁硅类调理剂(CaO ≥33.0%, MgO ≥5.0%, SiO₂ ≥28.0%)和有机肥(有机质 ≥30%, N, P₂O₅, K₂O 分别为0.5%, 0.25%, 0.25%), 水稻品种为晶两优534。

1.3 样品采集与分析

于2024年8月下旬水稻收获时, 测定每个小区内水稻产量。采集每个小区0—20 cm的表层土壤样品, 在各小区内按照梅花形采样法采集5个点, 在去除土壤中砾及植物残体后, 将5点土壤样品采用四分法混匀成一个样品, 约2 kg带回实验室, 共采集21个土样。在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动, 以免破坏团聚体。室内风干土样, 当土壤含水量降低到塑限时, 在室内沿自然结构将其掰成约1 cm的小块, 同时去除水稻根系等杂质后备用。

水稻产量及土壤基本理化性质测定^[17]: 水稻产量采用称量法测定; 土壤pH值采用电位法测定(水土比2.5:1); 交换性酸采用KCl(1 mol/L)交换, 中和滴定法测定; 交换性钾、钠、钙、镁采用醋酸铵(1 mol/L)浸提, 原子吸收分光光度法测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定; 土壤有效磷采用NaHCO₃(pH=8.5, 浓度为

0.5 mol/L)浸提-钼蓝比色法测定; 土壤速效钾醋酸铵(pH 7.0, 1 mol/L)浸提-火焰光度计法测定。

土壤团聚体测定^[18]: 风干性团聚体和水稳性团聚体分别采用沙维诺夫干筛法和湿筛法分离出>5 mm, 2~5 mm, 1~2 mm, 0.5~1 mm, 0.25~0.5 mm, <0.25 mm的团聚体。

1.4 数据处理与统计分析

土壤团聚体第*i*粒级团聚体所占的比例(*W_i*)、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、>0.25 mm团聚体含量(*R_{0.25}*)、破坏率(PAD)和分形维数(*D*)的计算公式^[19]为

$$W_i = \frac{w_i}{\sum w_i} \times 100\% \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (3)$$

$$R_{0.25} = 1 - \frac{w_i < 0.25}{\sum w_i} \quad (4)$$

$$PAD = \frac{DR_{0.25} - WR_{0.25}}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (5)$$

$$\frac{M_{r < \bar{x}_i}}{w_i} = \left[\frac{\bar{x}_i}{x_{max}} \right]^{3-D} \quad (6)$$

式中:*w_i*为第*i*级团聚体的质量(g); $\sum w_i$ 为各级团聚体的总质量(g); *n*为粒径分组的组数; \bar{x}_i 为*i*粒级分

组团聚体的平均直径; $w_i < 0.25$ 为粒径 < 0.25 (mm) 团聚体的质量 (g); $DR_{0.25}$ 为风干性团聚体 > 0.25 (mm) 粒级的质量分数; $WR_{0.25}$ 为水稳性团聚体 > 0.25 (mm) 粒级的质量分数; $M_{r < x_i}$ 为粒径 $< x_i$ 的团聚体的质量 (g); x_{max} 为团聚体的最大粒径 (mm)。

所有图表和数据均采用 Excel 2016 软件进行整理绘制。

采用 R 4.2.1 进行统计分析。不同处理间显著性差异采用单因素方差分析 (one-way ANOVA), Tukey HSD 验证方法; 添加有机肥效果的显著性差异采用 T 检验分析。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对土壤酸化指标及基本理化性质的影响

从表 2—3 可以看出, 在酸性水稻土中施用不同改良剂后, 各处理的土壤酸化指标和基本理化性质无显著性差异。对于土壤 pH 值而言, T_2, T_4, T_5 和 T_6 较 CK 分别提高了 7.1%, 4.8%, 14.3% 和 2.4%, 但未达显著水平 ($p > 0.05$)。对于土壤有机质、碱解氮和有效磷, T_4, T_5 和 T_6 较 CK 均有增加的趋势, 但差异不显著 ($p > 0.05$)。

表 2 不同处理下土壤的酸化指标

Table 2 Soil acidification indicators under different treatments

处理	pH 值	交换性酸/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性钾/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性钠/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性钙/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性镁/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	4.2±0.08 ^A	13.3±1.64 ^A	0.231±0.01 ^A	0.210±0.04 ^A	23.1±1.01 ^A	3.14±0.07 ^A
T_1	4.2±0.05 ^{Aa}	13.2±1.42 ^{Aa}	0.231±0.01 ^{Aa}	0.188±0.04 ^{Aa}	25.6±1.98 ^{Aa}	3.36±0.17 ^{Aa}
T_2	4.5±0.33 ^{Aa}	10.9±2.37 ^{Aa}	0.226±0.01 ^{Aa}	0.217±0.03 ^{Aa}	31.8±3.83 ^{Aa}	3.26±0.03 ^{Aa}
T_3	4.2±0.08 ^{Aa}	12.8±0.65 ^{Aa}	0.201±0.02 ^{Aa}	0.196±0.06 ^{Aa}	24.4±1.18 ^{Aa}	3.21±0.05 ^{Aa}
T_4	4.4±0.05 ^{Aa}	11.7±1.18 ^{Aa}	0.231±0.03 ^{Aa}	0.196±0.07 ^{Aa}	29.8±1.91 ^{Aa}	3.18±0.04 ^{Aa}
T_5	4.8±0.58 ^{Aa}	11.0±1.81 ^{Aa}	0.242±0.03 ^{Aa}	0.167±0.04 ^{Aa}	33.3±7.74 ^{Aa}	3.23±0.13 ^{Aa}
T_6	4.3±0.05 ^{Aa}	12.6±0.16 ^{Aa}	0.205±0.01 ^{Aa}	0.188±0.07 ^{Aa}	24.3±1.08 ^{Aa}	3.12±0.11 ^{Aa}

注: ①表中数据为平均值±标准差 ($n=3$)。②CK 为对照; T_1 为钙镁磷肥; T_2 为碳酸钙粉; T_3 为钙镁硅类调理剂; T_4 为有机肥+钙镁磷肥; T_5 为有机肥+碳酸钙粉; T_6 为有机肥+钙镁硅类调理剂。③同一列不同大写字母表示不同处理间的显著性差异 ($p < 0.05$); 同一列不同小写字母表示单施改良剂处理和有机肥配施改良剂处理的显著性差异 ($p < 0.05$)。下同。

表 3 不同处理下土壤有机质及速效养分含量

Table 3 Soil organic matter and available nutrient contents under different treatments

处理	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	25.8±0.96 ^A	146±30.20 ^A	3.87±0.27 ^A	72.3±3.39 ^A
T_1	27.5±1.28 ^{Aa}	125±7.01 ^{Aa}	9.74±5.97 ^{Aa}	69.7±1.88 ^{Aa}
T_2	28.2±1.13 ^{Aa}	135±12.50 ^{Aa}	3.87±0.27 ^{Aa}	67.7±0.47 ^{Aa}
T_3	27.7±1.15 ^{Aa}	153±9.61 ^{Aa}	5.35±2.64 ^{Aa}	59.7±3.29 ^{Aa}
T_4	29.8±3.28 ^{Aa}	152±8.86 ^{Aa}	5.29±0.48 ^{Aa}	70.3±5.73 ^{Aa}
T_5	27.6±1.08 ^{Aa}	157±14.90 ^{Aa}	5.54±0.87 ^{Aa}	68.0±7.07 ^{Aa}
T_6	26.6±3.48 ^{Aa}	149±25.30 ^{Aa}	5.68±1.32 ^{Aa}	68.3±6.84 ^{Aa}

2.2 不同改良剂对土壤团聚体组成的影响

从表 4 可以看出, 各处理土壤风干性团聚体 > 5 mm 粒级含量介于 68.09%~74.46%, 施用改良剂后, 各处理该粒级团聚体含量较 CK 处理提高了 2.58%~9.35%。具体地, T_1, T_2 和 T_3 处理较 CK 相比, 该粒级团聚体含量存在上升的趋势, 但增幅未达显著性水平 ($p > 0.05$); T_4, T_5 和 T_6 处理较 CK 相比, 分别显著增加了 8.25%, 9.35% 和 8.18% ($p < 0.05$);

有机肥配施改良剂的 T_4 和 T_5 处理该粒级含量分别显著高于单施改良剂的处理 T_1 和 T_2 处理土壤风干性团聚体 > 5 mm 粒级含量。相反地, 各处理风干性土壤团聚体 < 0.25 mm 粒级含量均低于 CK 处理, 各处理团聚体该粒级含量与 CK 处理的差异性和 > 5 mm 粒级含量基本一致 (T_3 除外), 即有机肥配施改良剂能显著降低风干性土壤团聚体 < 0.25 mm 含量 ($p < 0.05$)。

从表 5 可以看出, 各处理土壤水稳性团聚体各粒级含量无显著性差异 (< 0.25 mm 粒级除外) ($p > 0.05$)。有机肥配施改良剂处理 (T_4, T_5 和 T_6) 土壤水稳性团聚体 < 0.25 mm 粒级含量显著低于 CK 处理 ($p < 0.05$), 分别较 CK 处理低了 15.79%, 15.59% 和 18.66%。

2.3 不同改良剂对土壤团聚体稳定性的影响

从表 6 可以看出, 单施改良剂处理 (T_1, T_2 和 T_3) MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 较 CK 处理无显著性差异 ($p > 0.05$); 有机肥配施改良剂处理 (T_4, T_5 和 T_6) MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 显著高于 CK 处理 ($p < 0.05$), 分别是 CK 处理的 1.075~1.086 倍, 1.259~1.286 倍, 1.062~1.065 倍。有机肥配施改良剂处理 (T_4 和 T_5) MWD,

GMD和 $R_{0.25}$ 分别显著高于单施改良剂处理(T_1 和 T_2)($p<0.05$), T_6 和 T_3 处理土壤团聚体的MWD,GMD和 $R_{0.25}$ 无显著性差异($p>0.05$)。 T_4 处理MWD,GMD和 $R_{0.25}$ 较 T_1 处理分别增加了5.36%,17.8%和4.32%, T_5 处理MWD,GMD和 $R_{0.25}$ 较 T_2 处理分别增加了5.51%,18.9%和4.95%。

表4 不同处理下土壤风干性团聚体的分布特征

Table 4 Distribution characteristics of air-dried soil aggregates under different treatments

处理	不同粒径土壤风干性团聚体百分含量/%					
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
CK	68.09±1.02 ^A	6.84±1.50 ^A	4.31±0.70 ^A	2.79±0.25 ^A	2.88±0.68 ^A	15.09±1.38 ^A
T_1	69.85±1.06 ^{Aa}	6.64±0.65 ^{Aa}	4.38±0.55 ^{Aa}	3.22±0.75 ^{Aa}	2.42±0.84 ^{Aa}	13.49±1.03 ^{Aa}
T_2	70.32±1.59 ^{Aa}	6.66±0.72 ^{Aa}	4.54±0.51 ^{Aa}	2.46±0.52 ^{Aa}	2.17±0.04 ^{Aa}	13.85±0.66 ^{Aa}
T_3	71.29±1.48 ^{Aa}	6.71±0.26 ^{Aa}	3.67±0.92 ^{Aa}	4.18±0.29 ^{Aa}	2.07±0.28 ^{Aa}	12.08±0.80 ^{Ba}
T_4	73.71±0.47 ^{Bb}	7.41±0.80 ^{Aa}	4.13±0.46 ^{Aa}	2.71±0.22 ^{Aa}	2.29±0.29 ^{Aa}	9.75±0.51 ^{Bb}
T_5	74.46±0.42 ^{Bb}	7.05±0.81 ^{Aa}	3.97±0.73 ^{Aa}	2.82±0.36 ^{Aa}	2.13±0.18 ^{Aa}	9.57±0.54 ^{Bb}
T_6	73.66±0.85 ^{Ba}	6.72±0.24 ^{Aa}	4.73±0.28 ^{Aa}	2.91±0.09 ^{Aa}	2.28±0.28 ^{Aa}	9.70±0.33 ^{Ba}

表5 不同处理下土壤水稳性团聚体的分布特征

Table 5 Distribution characteristics of water-stable soil aggregates under different treatments

处理	土壤水稳性团聚体百分含量/%					
	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
CK	53.17±0.54 ^A	2.70±0.45 ^A	5.62±0.39 ^A	6.85±0.47 ^A	6.59±1.93 ^A	25.07±1.21 ^A
T_1	54.02±0.92 ^{Aa}	2.82±0.29 ^{Aa}	5.83±0.28 ^{Aa}	6.63±1.37 ^{Aa}	6.55±1.63 ^{Aa}	24.15±1.86 ^{Aa}
T_2	53.60±1.90 ^{Aa}	3.11±0.40 ^{Aa}	6.65±1.15 ^{Aa}	7.90±0.83 ^{Aa}	6.17±0.72 ^{Aa}	22.57±0.82 ^{Aa}
T_3	55.27±1.32 ^{Aa}	3.08±0.35 ^{Aa}	5.86±1.10 ^{Aa}	8.41±1.30 ^{Aa}	5.59±0.56 ^{Aa}	21.79±0.71 ^{Aa}
T_4	56.26±0.38 ^{Aa}	2.78±0.12 ^{Aa}	5.26±1.25 ^{Aa}	9.18±1.91 ^{Aa}	5.41±0.89 ^{Aa}	21.11±0.72 ^{Ba}
T_5	55.56±0.96 ^{Aa}	3.00±0.24 ^{Aa}	6.10±0.59 ^{Aa}	8.74±2.33 ^{Aa}	5.44±0.88 ^{Aa}	21.16±1.24 ^{Ba}
T_6	55.59±0.78 ^{Aa}	2.62±0.18 ^{Aa}	7.11±0.21 ^{Aa}	9.42±1.42 ^{Aa}	4.87±0.69 ^{Aa}	20.39±0.07 ^{Ba}

表6 不同处理下土壤团聚体稳定性特征

Table 6 Stability characteristics of soil aggregates under different treatments

处理	风干性团聚体			水稳性团聚体			PAD/%
	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm	$R_{0.25}/\%$	
CK	5.46±0.02 ^A	3.08±0.10 ^A	84.91±1.38 ^A	4.27±0.04 ^A	1.69±0.03 ^A	74.93±1.21 ^A	11.72±2.21 ^A
T_1	5.59±0.08 ^{Aa}	3.31±0.15 ^{Aa}	86.51±1.03 ^{Aa}	4.34±0.06 ^{Aa}	1.75±0.01 ^{Aa}	75.86±1.86 ^{Aa}	12.29±2.84 ^{Aa}
T_2	5.62±0.11 ^{Aa}	3.33±0.15 ^{Aa}	86.16±0.66 ^{Aa}	4.34±0.11 ^{Ba}	1.81±0.05 ^{Ba}	77.43±0.82 ^{Aa}	10.13±0.95 ^{Aa}
T_3	5.69±0.11 ^{Aa}	3.50±0.17 ^{Aa}	87.92±0.80 ^{Aa}	4.45±0.09 ^{Ba}	1.90±0.04 ^{Ba}	78.21±0.71 ^{Aa}	11.05±0.55 ^{Aa}
T_4	5.89±0.01 ^{Bb}	3.90±0.04 ^{Bb}	90.25±0.51 ^{Bb}	4.51±0.03 ^{Ba}	1.96±0.03 ^{Bb}	78.89±0.72 ^{Ba}	12.58±1.28 ^{Aa}
T_5	5.93±0.05 ^{Bb}	3.96±0.12 ^{Bb}	90.43±0.54 ^{Bb}	4.48±0.07 ^{Ba}	1.94±0.02 ^{Bb}	78.84±1.24 ^{Ba}	12.82±1.17 ^{Aa}
T_6	5.87±0.05 ^{Ba}	3.88±0.08 ^{Ba}	90.30±0.33 ^{Ba}	4.48±0.05 ^{Ba}	1.98±0.03 ^{Ba}	79.61±0.07 ^{Ba}	11.83±0.31 ^{Aa}

注:MWD为平均质量直径;GMD为几何平均直径; $R_{0.25}$ 为>0.25 mm团聚体含量;PAD为破坏率。

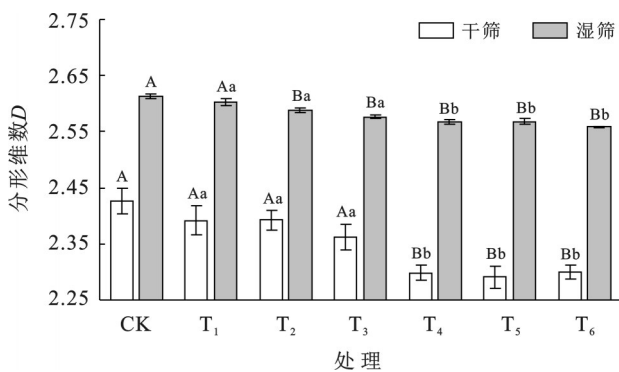
针对水稳性土壤团聚体MWD而言,各处理MWD的值较CK处理表现为显著增加(T_1 处理除外)($p<0.05$),单施改良剂处理的土壤水稳性团聚体MWD与有机肥配施改良剂处理表现为无显著差异($p>0.05$)。

除 T 处理外,各处理(T_2 — T_6)土壤水稳性团聚体GMD值较CK处理显著增加($p<0.05$);有机肥配

施改良剂处理(T_4 和 T_5)显著高于单施改良剂处理(T_1 和 T_2)($p<0.05$);有机肥配施改良剂处理的 $R_{0.25}$ 显著高于CK处理($p<0.05$), T_4 , T_5 和 T_6 较CK处理分别增加了5.28%,5.22%和6.24%。各处理土壤团聚体PAD差异性不显著($p>0.05$)。

从图1可知,施用不同改良剂后,各处理土壤风干性团聚体分形维数介于2.291~2.393, T_5 处理最

低;仅施用改良剂处理 T_1 , T_2 和 T_3 的分形维数较 CK 处理分别降低了 1.40%, 1.38% 和 2.64%, 但差异性不显著 ($p > 0.05$); 有机肥配施改良剂处理 T_4 , T_5 和 T_6 的分形维数较 CK 处理分别显著降低了 5.27%, 5.57% 和 5.18% ($p < 0.05$); 有机肥配施改良剂处理 T_4 , T_5 和 T_6 的土壤风干性团聚体分形维数显著低于其对应仅施用改良剂处理 T_1 , T_2 和 T_3 , 分别降低了 0.09, 0.10, 0.06 ($p < 0.05$)。从图 1 可知, 各处理土壤水稳性团聚体分形维数介于 2.559~2.614。相较于 CK 处理, T_2 , T_3 , T_4 , T_5 和 T_6 处理土壤水稳性团聚体分形维数分别显著降低了 0.976%, 1.463%, 1.770%, 1.747% 和 2.114% ($p < 0.05$), 而 T_1 处理和 CK 处理土壤水稳性团聚体分形维数无显著性差异; 类似地, 有机肥配施改良剂处理 T_4 , T_5 和 T_6 的土壤水稳性团聚体分形维数显著低于其对应仅施用改良剂处理 T_1 , T_2 和 T_3 , 分别降低了 1.34%, 0.78% 和 0.66% ($p < 0.05$)。表明有机肥配施改良剂对团聚体结构稳定性的改善效果优于单一改良剂处理, 这一结果与风干性团聚体分形维数变化趋势一致。



注: 图中数据为平均值±标准差 ($n=3$)。

图 1 不同处理下土壤团聚体分形维数
Fig. 1 Fractal dimension of soil aggregates under different treatments

2.4 不同改良剂对水稻产量的影响

由图 2 可知, 施用改良剂的各处理, 水稻产量均显著高于 CK 处理 ($p < 0.05$), 产量提高了 8.09%~17.46%; 有机肥配施改良剂处理 T_4 和 T_5 水稻产量显著高于与其对应的单施改良剂处理 T_1 和 T_2 处理 ($p < 0.05$), 分别显著增加了 5.1% 和 5.79%; T_6 较 T_3 处理水稻产量增加了 2.33%, 但未达到显著水平 ($p > 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同改良剂对土壤团聚体组成及稳定性的影响

土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 其组成特征和稳定性是评价土壤物理性状的重要指标, 有研

究表明有机肥施用会提升土壤团聚结构^[20]。有机肥富含大量有机质和腐殖酸类物质, 能显著提高改良剂中钙镁离子的活性与缓释性, 延长其在土壤中的有效期, 减少养分淋失。同时, 有机质是团聚体形成的主要胶结剂, 且其中碳源物质可以供土壤生物分解利用, 并提高土壤生物活性, 进一步促进大粒径团聚体的形成^[21-22]。本研究的结果表明, 单施用钙镁磷肥、碳酸钙粉和钙镁硅类调理剂后, 其风干性团聚体 > 5 mm 粒级含量较对照无差异, 这与王秀斌等^[23]的研究结果相似, 单一施用钙镁磷肥对团聚体形成的贡献微小。而有机肥配施钙镁磷肥、碳酸钙粉和钙镁硅类调理剂后, 显著提高了风干性团聚体该粒级的含量。这与刘亚军等^[24]的研究结果相似, 他们的研究发现生物有机肥配施钙镁硅类调理剂显著提高了土壤 > 2.000 mm 和 0.251~2.000 mm 粒级的含量, 即增加了大团聚体含量, 这有利于增加土壤的结构稳定性。

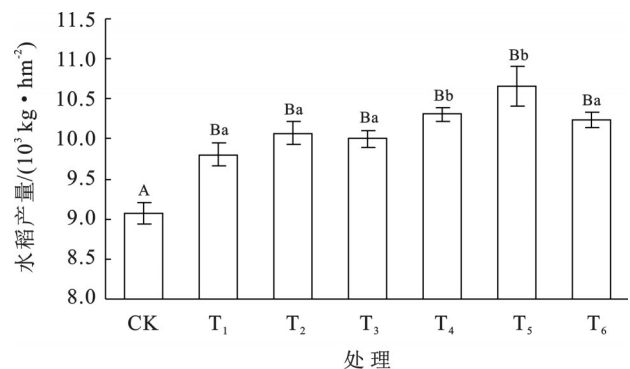


图 2 不同处理下的水稻产量

Fig. 2 Rice yield under different treatments

MWD 和 GMD 是评价土壤结构体优劣的重要指标, 其值越大, 表明土壤结构越稳定, 抗蚀能力越强。 $R_{0.25}$ 和 PAD 也是评价团聚体稳定的重要指标。本研究结果表明, 有机肥配施改良剂处理的风干性团聚体和水稳性团聚体的 MWD, GMD 和 $R_{0.25}$ 显著高于对照和单施改良剂处理, 这与刘亚军等^[24]、石艳香等^[25]和王飞等^[26]的研究结果类似。PAD 能够反映土壤结构体的抗蚀性, 其值越小, 表明团聚体的抗蚀性越高。土壤中的黏粒含量与腐殖质含量是影响 PAD 的两个主导因子, 土壤团聚体 PAD 数值越高, 土壤有机质含量越低, 二者呈现出显著的此消彼长趋势^[27-28]。本研究结果表明各处理土壤团聚体 PAD 无显著性差异, 这与李越等^[10]和王秀斌等^[23]的研究结果不一致。可能是本研究各处理土壤中有机质含量无显著性差异导致的, 具体原因还需要进一步探究。

土壤分形维数 D 是体现土壤结构几何形状的参数, D 值越小, 表明土壤结构稳定性越强^[28]。本研究

表明,仅施用改良剂处理风干性团聚体分形维数和对照处理无差异,有机肥配施改良剂显著降低其分形维数;水稳性团聚体分形维数和风干性团聚体分形维数表现的规律相似。此外,有机肥配施改良剂处理土壤团聚体分形维数显著低于对应单施改良剂处理。单施钙镁硅调理剂对土壤分形维数的影响与刘亚军等^[24]人的研究结果类似。施用有机肥能显著降低土壤团聚体分形维数,增加土壤结构稳定性,这与李越等^[10]的研究结果一致。这是由于施用有机肥,促进了土壤中的大团聚体的形成,从而导致团聚体分形维数降低,团聚体稳定性增强。

3.2 不同改良剂对水稻产量的影响

土壤是作物赖以生存的基础环境,土壤理化性质影响作物生长及其产量。土壤团聚体的数量和稳定性直接影响土壤肥力和通透性等功能,进而影响作物生长。此外,稳定团聚体形成“多级孔隙系统”(大孔隙通气,小孔隙保水),协调土壤通气性与持水性,避免积水或干旱胁迫。团聚体稳定的土壤通气孔隙度可达30%以上,根系呼吸和扩展更顺畅。此外,减少雨滴冲击和机械耕作导致的土壤结构破坏,维持疏松状态,降低根系生长阻力,使得作物生长更加旺盛^[29]。团聚体内部微环境为微生物提供栖息地,加速有机质分解和养分转化(如氮的矿化)。稳定结构减少养分淋溶损失(如磷、钾随水流失),提高养分有效性^[30]。本研究结果表明,改良剂处理显著增产,且有机肥配施钙镁磷肥、碳酸钙粉处理其水稻产量显著高于单施对应的改良剂处理,以有机肥配施碳酸钙粉增产幅度最大(17.4%)。在本研究中,各处理施用改良剂后,其土壤pH值、有机质等养分指标均有略微上升,但未达到显著水平。但各处理土壤团聚体的数量和稳定性较对照处理均有显著性提高,进而导致水稻增产。这与大多数研究结果一致^[11,13,23]。

4 结论

(1) 钙镁磷肥、碳酸钙粉、钙镁硅类调理剂配施有机肥能显著提高土壤风干性团聚体中 >5 mm 粒级含量。

(2) 有机肥配施改良剂能提高土壤团聚体的稳定性,具体表现为有机肥配施钙镁磷肥、碳酸钙粉和钙镁硅类调理剂显著提高土壤风干性团聚体和水稳性团聚体的GMD, MWD, $R_{0.25}$ 值,显著降低 D 值。

(3) 单施钙镁磷肥、碳酸钙粉、钙镁硅类调理剂和配施有机肥能提高酸化水稻土土壤肥力,改善土壤物理结构,使水稻增产8.09%~17.46%,有机肥配施碳酸钙粉处理水稻增产最高。

(4) 综合来看,有机肥配施钙镁磷肥、碳酸钙粉和钙镁硅类调理剂能提高土壤肥力和改善土壤结构,是改良酸化水稻土和提升产量的有效途径,以有机肥配施碳酸钙粉效果最佳,产量较对照处理提升17.46%。

参考文献(References)

- [1] van Breemen N, Driscoll C T, Mulder J. Acidic deposition and internal proton sources in acidification of soils and waters [J]. *Nature*, 1984,307(5952):599-604.
- [2] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010,327(5968):1008-1010.
- [3] 吴艳,柳开楼,张景云,等.增施大豆豆粕及豆粕炭对酸性水稻土的改良效果及对水稻产量的影响[J].*作物杂志*,2023(3):200-204.
Wu Yan, Liu Kailou, Zhang Jingyun, et al. Improvement effects of soybean meal and its biochar on acid paddy soil and yield of rice [J]. *Crops*, 2023(3):200-204.
- [4] 王浩,章明奎.有机质积累和酸化对污染土壤重金属释放潜力的影响[J].*土壤通报*,2009,40(3):538-541.
Wang Hao, Zhang Mingkui. Effects of organic matter accumulation and acidification on release potential of heavy metals from polluted soils [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009,40(3):538-541.
- [5] Yang Zhong bao, You Jiang feng, Xu Mu yun, et al. Interaction between aluminum toxicity and manganese toxicity in soybean (*Glycine max*) [J]. *Plant and Soil*, 2009,319(1):277-289.
- [6] 马桥,陈镔,赵颖玥,等.钙镁磷肥-碳酸钾-石灰配施对稻米镉积累的影响[J].*土壤通报*,2024,55(3):819-829.
Ma Qiao, Chen Bin, Zhao Yingyue, et al. Effect of combined application of calcium magnesium phosphate-potassium carbonate-lime on cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024,55(3):819-829.
- [7] 周武先,何银生,朱盈徽,等.生石灰和钙镁磷肥对酸化川党参土壤的改良效果[J].*应用生态学报*,2019,30(9):3224-3232.
Zhou Wuxian, He Yinsheng, Zhu Yinghui, et al. Improvement effects of quicklime and calcium magnesium phosphate fertilizer on acidified soil cultivating *Codonopsis Tangshen* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019,30(9):3224-3232.
- [8] 王梅.钙-蒙脱石和石灰对两种酸性土壤的改良研究[D].重庆:西南大学,2018.
Wang Mei. Improvement of two acidic soils by calcium-montmorillonite and lime [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [9] Aye N S, Sale P W G, Tang Caixian. The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate sta-

- bility in low-input acid soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(5):697-709.
- [10] 李越,徐曼,谢永红,等.不同改良剂对酸性紫色土团聚体和有机碳的影响[J].*环境科学*,2024,45(2):974-982.
Li Yue, Xu Man, Xie Yonghong, et al. Effects of different modifiers on aggregates and organic carbon in acidic purple soil [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(2): 974-982.
- [11] 杨小敏,司华,高鹏,等.不同改良剂对元胡-水稻轮作酸化土壤改良效果研究[J].*中国农学通报*,2022,38(17):98-102.
Yang Xiaomin, Si Hua, Gao Peng, et al. Improvement effect of different ameliorants on acidified soil of rhizoma corydalis-rice rotation [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(17):98-102.
- [12] 杨瑞超.氮钙肥配施对土壤养分及油菜玉米品质产量的影响[D].山西 太谷:山西农业大学,2016.
Yang Ruichao. Effect of nitrogen calcium fertilizer on soil nutrients yield and quality of rape and maize [D]. Taigu, Shanxi: Shanxi Agricultural University, 2016.
- [13] 汪榕.酸性土壤改良剂在水稻-油菜轮作上的应用效果[D].湖北 武汉:华中农业大学,2014.
Wang Rong. Effect of acid soil ameliorants on rice-rape rotation [D]. Wuhan, Hubei: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [14] 徐仁扣,李九玉,周世伟,等.我国农田土壤酸化调控的科学问题与技术措施[J].*中国科学院院刊*,2018,33(2):160-167.
Xu Renkou, Li Jiuyu, Zhou Shiwei, et al. Scientific issues and controlling strategies of soil acidification of croplands in China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2):160-167.
- [15] 孟庆英,韩旭东,张春峰,等.白浆土施有机肥及石灰对土壤酶活性与大豆产量的影响[J].*中国土壤与肥料*, 2017(3):56-60.
Meng Qingying, Han Xudong, Zhang Chunfeng, et al. Effects of organic fertilizer and lime application on soil enzyme and soybean yield in planosol [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(3):56-60.
- [16] 赖多,匡石滋,肖维强,等.有机无机配施减量化肥对蕉柑产量、品质及土壤养分的影响[J].*广东农业科学*, 2021,48(6):23-29.
Lai Duo, Kuang Shizi, Xiao Weiqiang, et al. Effects of organic-inorganic mixed fertilizers substituting chemical fertilizer on citrus reticulata tankan fruit yield, quality and soil nutrients [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2021, 48(6):23-29.
- [17] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008:26-171.
Yang Jianhong, Wang Chenglin, Dai Henglin. *Soil Agrochemical Analysis and Environmental Monitoring* [M]. Beijing: China Land Press, 2008:26-171.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(1):123-130.
- [19] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].*科学通报*,1993,38(20):1896-1899.
Yang Peiling, Luo Yuanpei, Shi Yuanchun. Fractal characteristics of soil characterized by weight distribution of particle size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20):1896-1899.
- [20] Zhang Yi, Li Peng, Liu Xiaojun, et al. Changes in soil aggregate fractions, stability, and associated organic carbon and nitrogen in different land use types in the Loess Plateau, China [J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): 3963.
- [21] 廖超林,黎丽娜,谢丽华,等.增减施有机肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及胶结物的影响[J].*土壤学报*, 2021,58(4):978-988.
Liao Chaolin, Li Lina, Xie Lihua, et al. Effect of increased or decreased application of organic manure on aggregates stability and soil cement in red paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(4):978-988.
- [22] 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 Wenfeng, Xu Yun, Shi Zhihua, et al. The formation process and stabilization mechanism of soil aggregates driven by binding materials [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(5):1297-1308.
- [23] 王秀斌,唐栓虎,荣勤雷,等.不同措施改良反酸田及水稻产量效果[J].*植物营养与肥料学报*,2015,21(2): 404-412.
Wang Xiubin, Tang Shuanhu, Rong Qinlei, et al. Effects of different ameliorant measures on the chemical and physical properties of soil in acid sulfate paddy field and rice yield [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2):404-412.
- [24] 刘亚军,胡启国,王文静,等.生物有机肥以及钙镁硅型土壤调理剂对甘薯连作田土壤团聚体稳定性及有机碳含量的影响[J].*江苏农业学报*,2025,41(1):51-60.
Liu Yajun, Hu Qiguo, Wang Wenjing, et al. Effects of bio-organic fertilizer and calcium magnesium silicon soil conditioner on soil aggregate stability and organic carbon content in sweet potato continuous cropping field [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 41(1): 51-60.