DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.005 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.005
徐春雨, 陈佳村, 熊赵江, 等. 施肥方式对华南稻田土壤团聚体水稳性与分形特征的影响[J]. 水土保持研究,2026,33(6):93-100,110.
Xu Chunyu, Chen Jiacun, Xiong Zhaojiang, et al. Effects of fertilization methods on water stability and fractal characteristics of soil aggregates in paddy fields of South China[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):93-100,110.

施肥方式对华南稻田土壤团聚体水稳性与分形特征的影响

徐春雨[1,2], 陈佳村[1], 熊赵江[1,2], 黄 斌[3], 蒙朝辉[2], 王成超[1], 张淑娟[1]
(1.佛山大学 建筑与规划学院, 广东 佛山 528000;
2.佛山大学 环境与化工学院, 广东 佛山 528000; 3.广东省科学院 生态环境与土壤研究所, 广州 510650)

摘 要:[目的]明确不同施肥方式对稻田土壤团聚体稳定性的调控作用,为优化稻田施肥管理模式、改善土壤结构、提升土壤抗蚀能力提供科学依据。[方法]以华南农业大学增城科研基地水稻田为研究对象,采集了不施肥(CK)、推荐施肥(NPK)、不施磷肥(NK)、不施氮肥(PK)、有机肥(OF)5种施肥方式下稻田表层(0—20 cm)和下层(20—40 cm)的原状土,采用湿筛法分析了土壤团聚体的水稳性与分形特征。[结果](1)>0.25 mm水稳性团聚体含量以OF处理最高(表层69.27%、下层67.32%),显著高于NPK处理(表层61.67%、下层61.57%)和CK处理(表层60.52%、下层58.30%),其机制在于有机肥输入新鲜有机质并形成腐殖质,通过官能团与土壤黏粒结合,增强团聚体胶结作用,NPK处理因未能持续补充有机质,导致团聚体稳定性下降,而不施氮(PK)或不施磷(NK)等养分不平衡处理,因缺乏关键养分导致团聚体形成受限;(2)OF处理的表层团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)较NPK处理分别提高13.7%和22.6%,且各处理表层团聚体稳定性均显著优于下层($p<0.05$);(3)分形维数(D)与团聚体稳定性呈极显著负相关($r=-0.82$,$p<0.01$);(4)土壤有机质含量与>0.25 mm团聚体含量、MWD均呈极显著正相关(r分别为0.82,0.79,$p<0.01$),是影响团聚体稳定性的关键因子。[结论]施肥,特别是有机肥施用,能通过提升土壤有机质含量,促进大团聚体形成,增强团聚体水稳性,从而显著改善华南红壤稻田土壤的结构稳定性和抗蚀能力。

关键词:红壤; 施肥方式; 土壤团聚体; 分形维数; 水稳性
中图分类号:S156.2; S152.4+81 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0093-08

Effects of fertilization methods on water stability and fractal characteristics of soil aggregates in paddy fields of South China

Xu Chunyu[1,2], Chen Jiacun[1], Xiong Zhaojiang[1,2], Huang Bin[3],
Meng Zhaohui[2], Wang Chengchao[1], Zhang Shujuan[1]
(1.*School of Architecture and Planning, Foshan University, Foshan, Guangdong* 528000, *China*;
2.*School of Environment and Chemical Engineering, Foshan University, Foshan, Guangdong* 528000, *China*;
3.*Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou* 510650, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to clarify the regulatory effects of different fertilization methods on soil aggregate stability in paddy fields, thereby providing a scientific basis for optimizing fertilization management practices, improving soil structure, and enhancing soil erosion resistance. [**Methods**] The paddy fields at the Zengcheng research base of South China Agricultural University were selected as the study area. Undisturbed soil samples from the surface layer (0—20 cm) and the subsurface layer (20—40 cm) of the paddy fields were collected under five fertilization treatments: no fertilization (CK), recommended fertilization (NPK), no

收稿日期:2026-01-13 **修回日期:**2026-02-24 **接受日期:**2026-03-09
资助项目:国家自然科学基金(42207385;42171248)
第一作者:徐春雨(2001—),男,河南信阳人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与土壤结构。E-mail:xuchunyu@fosu.edu.cn
通信作者:张淑娟(1989—),女,山东菏泽人,博士,讲师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:sjzhang@fosu.edu.cn

phosphorus fertilizer (NK), no nitrogen fertilizer (PK), and organic fertilizer (OF). The water stability and fractal characteristics of soil aggregates were analyzed using the wet sieving method. [**Results**] (1) The content of >0.25 mm water-stable aggregates was highest in the OF treatment (69.27% in the surface layer and 67.32% in the subsurface layer), significantly higher than that in the NPK treatment (61.67% in the surface layer and 61.57% in the subsurface layer) and the CK treatment (60.52% in the surface layer and 58.30% in the subsurface layer). The mechanism lay in the input of fresh organic matter from organic fertilizer and the formation of humus, binding to soil clay particles through functional groups, thereby enhancing aggregate cohesion. The NPK treatment, due to insufficient continuous organic matter supplementation, resulted in reduced aggregate stability. Meanwhile, nutrient-deficient treatments without nitrogen (PK) or without phosphorus (NK) exhibited limited aggregate formation due to key nutrient deficiencies. (2) The mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of surface aggregates in the OF treatment increased by 13.7% and 22.6%, respectively, compared to the NPK treatment. Moreover, the stability of surface aggregates in all treatments was significantly superior to that of subsurface aggregates ($p<0.05$). (3) Fractal dimension (D) showed an extremely significant negative correlation with aggregate stability ($r=-0.82$, $p<0.01$). (4) Soil organic matter content exhibited an extremely significant positive correlation with both the content of >0.25 mm aggregates and MWD (r values were 0.82 and 0.79, respectively, $p<0.01$), serving as a critical factor influencing aggregate stability. [**Conclusion**] Fertilization, particularly organic fertilizer application, can enhance soil organic matter content, promote large-aggregate formation, and improve aggregate water stability, thereby significantly improving the structural stability and erosion resistance of paddy soils in the red soil region of South China.

Keywords: red soil; fertilization methods; soil aggregate; fractal dimension; water stability

土壤团聚体是由矿物颗粒与有机胶结物质相互作用形成的多孔结构单元,是土壤结构的核心组成部分,其数量与稳定性直接决定土壤理化性质与生态功能。作为土壤养分储存的载体和微生物活动的微环境,团聚体不仅调控土壤孔隙度、保水性与通气性,而且其水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量影响土壤抗蚀能力[1]。团聚体的形成是物理、化学和生物过程共同作用的结果,其稳定性受到自然因素和人为措施的共同影响[2]。在农业管理措施中,施肥方式通过改变土壤养分供给与有机质水平,对团聚体结构产生显著影响,成为调控土壤质量的重要途径[3]。Soinne等[4]指出,添加有机肥能够改变土壤性质,增加土壤团聚体的稳定性,减少胶体物质的分散,进而减少农田土壤侵蚀。Lehmann等[5]发现,有机肥通过改善土壤容重、土壤持水量等土壤理化性质影响土壤微生物丰度,为微生物的生长提供条件,同时改善微生物栖息地环境。一些针对红壤的试验结果指出,单施有机肥能提高土壤团聚体尤其是大团聚体(>0.25 mm)的数量,对改善红壤物理性状有着积极的作用。

华南红壤区作为中国重要的农业生产区域,其土壤成土作用强烈,质地黏重且有机质含量较低,团聚体稳定性较差,加之长期集约化种植导致的土壤酸化与结构退化,进一步加剧了团聚体破坏风险[6]。20世纪90年代以来,国内外学者对施入有机肥的研究一直在进行,其中Tripathy等[7]只是研究了单施有机肥方式下不同大小团聚体土壤有机碳的含量,而当前针对该区域5种施肥方式(CK,NPK,NK,PK,OF)下稻田土壤团聚体稳定性与分形特征的系统研究相对较少,这使得施肥方式对团聚体的影响更为敏感。因此,深入探究不同施肥处理对华南红壤团聚体形成与稳定的作用机制,对于优化施肥模式、改善土壤结构、提升抗蚀能力具有重要的理论与实践意义。基于此,本文以华南农业大学增城科研基地的水稻田为研究对象,采用湿筛法研究不同施肥方式下土壤团聚体组成,分析施肥对团聚体稳定性与分形特征的影响,以期为华南红壤区土壤改良提供科学依据[8]。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省广州市增城区华南农业大学增城教学科研基地(113.29°—114.00°E, 23.05°—23.37°N)(图1)。该基地位于典型红壤区,属亚热带湿润季风气候,长夏无冬,高温多雨,降雨充沛、热量丰富,年平均气温为22.8 ℃,年降水量2 138 mm。土壤为酸性红壤,pH值5.83,有机质含量15.5 g/kg,全氮含量1.2 g/kg,全磷含量0.6 g/kg,全钾含量4.14 g/kg,有效磷19.47 mg/kg。

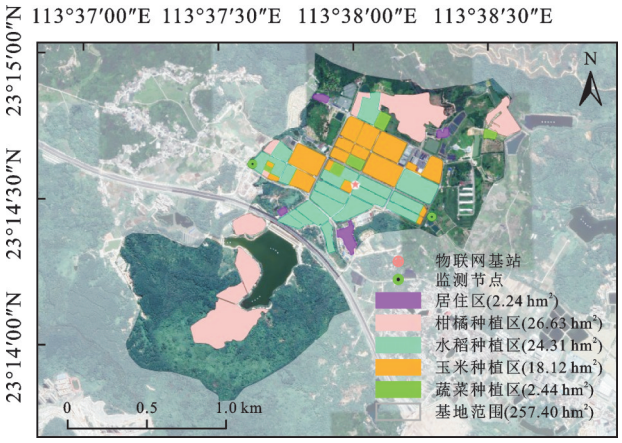


图 1　研究区域布置

Fig. 1　Layout map of study area

1.2　试验设计

1.2.1　小区设计　试验小区于 2019 年 4 月建立并开始监测,设置 5 种施肥处理,分别为不施肥(CK)、推荐施肥(NPK)、不施磷肥(NP)、不施氮肥(PK)、有机肥(OF),每种处理 3 个重复,共有 15 个监测小区。每个监测小区面积均为 35 m^2(长 7 m,宽 5 m),相邻监测小区之间采用混凝土预制件分隔,以防串水串肥,监测小区具体处理见表 1。

1.2.2　样品采集　2025 年 7 月 14 日在水稻收割完成后进行土壤样品采集,在每个小区内采集表层 0—20 cm 与下层 20—40 cm 原状土壤样品,每个土层采集 2 块大小为 10 cm×10 cm×10 cm 的原状土块,共采集 36 个原状土样用于团聚体组成分析;同时每个处理使用直径 5 cm、高 5 cm 的标准环刀采集土壤容重样品,用于土壤容重测定。

1.2.3　样品测定　将原状土块带回实验室后,沿自然裂痕剥成直径 1～2 cm 的小土块,剔除粗根系(>2 mm)与小石块,置于通风处自然风干(温度 25 ℃,相对湿度 60%),风干后过 5 mm 筛网备用。土壤团聚体组成采用湿筛法测定,具体操作如下:称取 50 g 风干土样,置于一套孔径自上而下分别为 2,1,0.5,0.25,0.1 mm 的套筛顶部。将套筛缓慢浸入水中浸泡 10 min,使土壤充分湿润。然后以 30 次/min 的频率上下振荡 15 min,模拟雨水或灌溉对土壤的分散作用。振荡结束后,将各级筛网上的团聚体分别收集至铝盒中,于 105 ℃烘箱中烘干至恒重(约 8 h),称重计算各粒级团聚体质量占比。

表 1　施肥处理方式

Table 1　Fertilization treatments

处理名称	处理编号	处理方式
不施肥	CK	不施用任何肥料
推荐施肥常规灌溉	NPK	尿素 22.39 g/m^2;过磷酸钙 27.92 g/m^2;氯化钾 12.67 g/m^2;N,K 分基肥(30%)、追肥(40%)、二次追肥(30%);P 作基肥一次施用
不施磷肥	NK	N,K 施用量同 NPK,不施磷肥
不施氮肥	PK	P,K 施用量同 NPK,不施氮肥
有机肥	OF	发酵鸡粪等氮替代 15% 尿素

为了进行样品的相关性分析,需要对样品进行有机质的测定,利用总有机碳分析仪测定土壤的有机质,具体操作如下:将得到的原装土样称取 50 g,用球研磨仪将土块碾碎,过 100 目(0.15 mm)筛,将样品装入密封袋或玻璃瓶中,贴好标签于阴凉干燥处保存。随后精确称取 10～100 mg 的均质土壤样品于专用陶瓷或石英样品舟中,向样品中滴加过量(2～3 ml)的稀盐酸,确保完全覆盖样品。观察到气泡产生并静置至少 4～6 h,确保反应完全,无气泡产生。最后将样品舟转移至 60～70 ℃的烘箱中,烘干至恒重,以去除残留的酸和水分,烘干后的样品利用总有机碳分析仪进行测定。

1.3　指标计算

根据湿筛法测定的水稳性团聚体组成结果,计算不同粒径团聚体的质量占比(w_i)、平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)、几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)、团聚体破坏率(Percent Aggregate Destruction, PAD)、>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$),公式如下所示。

$$w_i = \frac{M_i}{M} \times 100\% \tag{1}$$

$$\mathrm{MWD} = \sum_{i=1}^{n} w_i \times d_i \tag{2}$$

$$\mathrm{GMD} = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \times \ln d_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right) \tag{3}$$

$$D = 3 - \frac{\lg\left[w(\delta < d_i)/M\right]}{\lg(d_i/d_{\max})} \tag{4}$$

$$\mathrm{PAD} = \frac{\overline{X} - \overline{Y}}{\overline{X}} \times 100\% \tag{5}$$

$$R_{0.25} = \frac{W_{0.25}}{M} \times 100\% \tag{6}$$

式中:w_i 为第 i 级团聚体质量占团聚体总量的百分比(%);M_i 为第 i 粒级团聚体的质量;M 为团聚体总质

量(g);d_i为第i级粒径的平均粒径(mm),通常用该粒级上下筛孔径的几何平均值;$w(\delta<d_i)$为粒径小于d_i的团聚体累积质量(g);d_{max}为最大团聚体粒径(mm);D为所求的分形维数;PAD为团聚体破坏率(%),表示团聚体的稳定性;$\overline{X}$为某一粒级团聚体的干筛平均含量;$\overline{Y}$为同一粒级团聚体的湿筛平均含量;$W_{0.25}$为大于0.25 mm粒级团聚体质量(g)。

1.4 数据处理与统计分析

运用Microsoft Excel 2020进行数据整理与图形绘制。采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析(Analysis of Variance, ANOVA),并用Duncan's新复极差法进行多重比较($p<0.05$)。利用Pearson方法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对土壤团聚体组成的影响

表层土壤(0—20 cm)团聚体分布特征见表2。在>2 mm粒级,OF处理含量最高(1.23%),显著高于NPK处理(0.44%)和CK处理(0.65%)($p<0.05$)。NK处理(1.10%)也显著高于NPK处理。在1~2 mm粒级,OF处理含量最高(11.61%),NK处理次之(10.01%),NPK处理(8.99%)显著高于CK处理(7.11%)。在0.5~1 mm和0.25~0.5 mm粒级,各处理间差异模式不同,但总体以NK和OF处理的大中粒级占比较高。在<0.1 mm微团聚体粒级,NPK处理含量最高(16.05%),CK处理次之(15.98%),而OF,NK和PK处理则显著较低($p<0.05$)。

表2 表层土壤(0—20 cm)团粒组成占比

Table 2 Proportions of aggregate composition in surface soil (0—20 cm) %

处理编号	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.1~0.25 mm	<0.1 mm
CK	0.65±0.40c	7.11±0.99d	21.26±0.09e	31.50±5.00c	23.50±4.38b	15.98±8.64b
NPK	0.44±0.29d	8.99±3.25c	23.32±1.06c	28.92±1.30e	22.28±5.05d	16.05±1.47a
NK	1.10±0.39a	10.01±2.89b	29.35±4.75a	28.81±0.57e	21.25±4.19e	9.48±0.53c
PK	0.31±0.20e	6.97±2.84e	26.19±2.97b	34.16±2.22a	23.44±7.72b	8.93±4.97d
OF	1.23±0.93a	11.61±1.79a	22.96±3.04d	29.53±1.77d	23.05±1.59c	11.62±4.48c

注:表中数值为(平均值±标准差,$n=3$);同列不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$),下同。

下层土壤(20—40 cm)团聚体组成(表3)与表层有相似趋势,但大团聚体(>2 mm,1~2 mm)含量普遍低于表层,而小粒径团聚体(如<0.1 mm)占比有升高趋势。OF处理在下层土壤中仍保持较高的大团聚体含量。在1~2mm和>2mm粒级中,OF处理含量分别为6.94%和0.94%。

表3 下层土壤(20—40 cm)团粒组成占比

Table 3 Proportions of aggregate composition in subsurface soil (20—40 cm) %

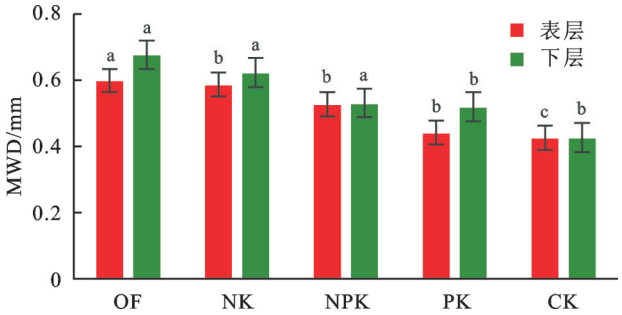
处理编号	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.1~0.25 mm	<0.1 mm
CK	2.37±0.40c	11.89±0.99d	21.05±0.09e	30.08±5.00c	25.61±4.38b	9.00±8.64b
NPK	1.09±0.29d	8.46±3.25c	24.45±1.06c	33.33±1.30e	22.86±5.05d	9.81±1.47a
NK	1.01±0.39a	7.31±2.89b	21.23±4.75a	32.03±0.57e	24.79±4.19e	13.63±0.53c
PK	0.73±0.20e	5.8±2.84e	22.73±2.97b	28.54±2.22a	24.32±7.72b	17.88±4.97d
OF	0.91±0.93a	6.94±1.79a	23.29±3.04d	27.15±1.77d	26.58±1.59c	15.13±4.48c

2.2 不同施肥处理对土壤团粒稳定性的影响

2.2.1 平均重量直径(MWD)变化特征 MWD是反映团粒稳定性的核心指标,不同施肥处理的MWD差异显著(图2)[9]。表层土壤中,OF处理MWD最高,显著高于NPK处理($p<0.05$);NK处理次之;PK,CK二者无显著差异($p>0.05$)。下层土壤中,OF处理MWD仍最高,显著高于NPK处理的($p<0.05$);NK,PK处理分别为0.623,0.52 mm,与CK处理存在显著差异($p>0.05$)。这表明施用有机肥能够提高土壤的平均重量直径(MWD),主要是因为有机肥直接为土壤输入大量新鲜的有机质,这是形成团聚体的物质基础,同时有机质分解后产生的腐殖质(胡敏酸等)带有负电荷,可以与带正电荷的土壤黏粒和钙离子(Ca^{2+})结合,形成极其稳定的微团聚体,土壤结构较好不易被雨水冲散,能够有效地减少水土流失[10]。而单施化肥和不施肥则会显著降低土壤的MWD,主要是因为化肥为高浓度盐分,在土壤中会不断消耗土壤中的有机质,导致酸化和盐渍化,破坏微生物群落平衡,最终会使土壤胶体分散,破坏团聚体结构,导致土壤的侵蚀状况加剧[11]。

从土层差异来看,不同施肥处理下,平均重量直径(MWD)随土层的变化趋势不同。总体来看5种处

理的表层土壤的平均重量直径(MWD)要低于下层,主要是因为人为的耕作方式对表层土壤产生的影响导致表层土壤MWD明显降低,团聚体稳定性下降;但是有机肥(OF)处理显示下层MWD升高,稳定性增强;NPK,NK和CK处理变化较小,稳定性较为均匀。这种变化可能与施肥类型对土壤有机质、微生物活动及团聚体形成的影响有关[12]。例如,有机肥(OF)可能促进深层土壤团聚化,而缺乏氮或磷的施肥可能导致下层土壤结构恶化[13]。



注:图中数值为(平均值±标准差,n=3),其中小写字母用于表示显著性水平p<0.05的差异,下图同。

图 2　不同施肥处理土壤表层和下层的 MWD

Fig. 2　MWD of surface and subsurface soil under different fertilization treatments

2.2.2　几何平均直径(GMD)变化特征　除MWD外,GMD也是评价团聚体稳定性的重要指标,不同施肥处理的GMD差异显著(图3)。表层土壤中,OF处理GMD最高(0.489 mm),显著高于NPK处理的0.341 mm(p<0.05);CK,NK,PK显著差异较小(p>0.05)。下层土壤中,OF处理GMD最高(0.418 mm),显著高于NPK处理;CK,NK,PK分别为0.317,0.39,0.27 mm,显著差异较小(p>0.05)

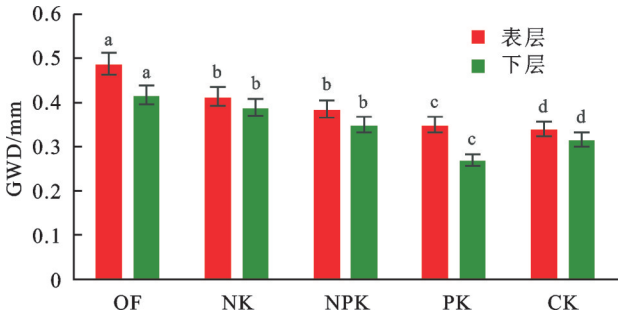


图 3　不同处理下土壤表层和下层的团聚体 GMD

Fig. 3　GMD of aggregates in surface and subsurface soil under different treatments

综合MWD和GMD结果可知,OF处理的团粒稳定性最优,NK处理次之,PK,CK处理最差,这与团粒组成分析结果一致,表明有机肥输入可显著提升华南红壤的团粒稳定性[14]。

2.2.3　分形维数　分形维数(D)综合反映团聚体粒径分布的均一性与结构复杂性,D值越低表明大团聚体占比越高,结构越稳定。由表4可知,不同施肥处理对土壤分形维数影响显著(p<0.05)。在表层和下层土壤中,OF处理的D值均最低,CK处理的D值最高。所有处理下层土壤的D值均略高于表层,表明下层团聚体结构整体低于表层。表层土壤(0—20 cm)中,OF处理的分形维数最低(1.16),显著低于其他处理(p<0.05),表明其团聚体粒径分布最为均匀,大团聚体占比最高,结构最优。NK处理次之(1.19)。CK处理的分形维数最高(1.23),且与PK处理(1.22)无显著差异,但显著高于NK(1.19)处理,表明单施化肥或不施肥(CK)会导致土壤分形维数升高,使得团聚体结构向小粒径化、复杂化发展,稳定性降低。下层土壤(20—40 cm)表现出与表层相似的趋势,OF处理的分形维数依然保持最低(1.18),不施肥(CK)处理最高(1.25)。所有处理的下层土壤分形维数均略高于表层,说明下层土壤的团聚体整体结构稳定性低于表层,这与MWD,GMD及$R_{0.25}$等指标在不同土层的差异规律一致。

表 4　不同施肥处理土壤分形维数

Table 4　Fractal dimensions of soil under different fertilization treatments

处理编号	表层分形维数	下层分形维数
CK	1.23±0.02a	1.25±0.03a
NPK	1.21±0.03c	1.24±0.02c
NK	1.19±0.02d	1.22±0.02d
PK	1.22±0.02ab	1.24±0.02bc
OF	1.16±0.02e	1.18±0.02e

2.3　不同施肥处理对土壤抗蚀性相关指标的影响

2.3.1　>0.25 mm水稳性团聚体含量　>0.25 mm水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)直接反映土壤抗蚀性。OF处理的$R_{0.25}$值在表层和下层均最高(表层69.27%,下层67.32%),显著高于其他处理。CK处理的$R_{0.25}$值最低。所有处理下层土壤的$R_{0.25}$值均略低于表层。

团聚体破坏率(Percentage of Aggregate Destruction, PAD)与$R_{0.25}$的变化趋势相反。如图4所示,OF处理的PAD值最低(表层30.73%,下层32.68%),表明其团聚体在水中的稳定性最强。CK处理的PAD值最高(表层39.48%,下层41.70%)。NPK处理的PAD值也处于较高水平。

2.3.2　团聚体破坏率(PAD)分析　团聚体破坏率与$R_{0.25}$呈显著负相关,不同施肥处理的PAD差异显著(图4)。表层土壤中,OF处理PAD最低(30.73%),显著低于其他处理(p<0.05),PK处理次之(32.36%);CK处理最高为39.48%,主要是因为长期不施肥导致土壤有机质含量下降和微生物活动减弱,使得团聚体形成受阻,进而使得土壤结构恶化,导致土壤抗蚀

性较差。而NPK处理仅次于CK，为38.33%，主要是因为在长期使用化肥过程中导致下层土壤酸化或养分失衡，加剧了团聚体破坏。下层土壤中，OF处理PAD最低（32.68%），显著低于NPK处理的38.43%和不施肥处理（CK）的41.70%（$p<0.05$）；综上所述，有机肥处理（OF）的团聚体破坏率（PAD）最低，表明其能显著增强土壤团聚体水稳性，有效提升土壤抗蚀性。相比之下，不施肥（CK）或养分不平衡的施肥处理（如PK）会导致土壤结构退化，尤其是下层土壤的团聚体破坏更为严重，因此在农业生产过程中合理配施有机肥是改善土壤结构和减少土壤侵蚀的重要措施。

2.4 团粒特征与土壤性质的相关性分析

Pearson相关性分析表明（表5），团聚体稳定性指标（MWD，GMD）与抗蚀性指标$R_{0.25}$呈极显著正相关，与PAD呈极显著负相关。土壤有机碳含量与MWD，GMD，$R_{0.25}$均呈极显著正相关，与PAD呈极显著负相关。土壤容重与MWD，GMD，$R_{0.25}$呈显著或极显著负相关，与PAD呈正相关。分形维数D与MWD，GMD，$R_{0.25}$呈极显著负相关，与PAD呈极显著正相关。

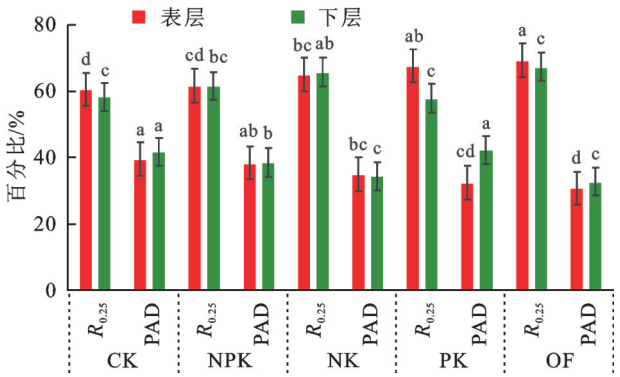


图4 不同施肥处理土壤抗蚀性指标

Fig. 4 Soil erosion resistance indicators under different fertilization treatments

表5 团粒特征与抗蚀性指标的Pearson相关系数（n=42）

Table 5 Pearson correlation coefficients between aggregate characteristics and erosion resistance indicators (n=42)

指标	MWD	GMD	TOC	土壤容重	$R_{0.25}$	PAD	分形维数
MWD	1	0.92**	0.79**	−0.68**	0.81**	−0.79**	−0.85**
GMD	0.92**	1	0.76**	−0.65**	0.78**	−0.76**	−0.82**
TOC	0.79**	0.76**	1	−0.71**	0.77**	−0.75**	−0.80**
土壤容重	−0.68**	−0.65**	−0.71**	1	−0.69**	0.67**	0.72**
$R_{0.25}$	0.81**	0.78**	0.77**	−0.69**	1	−0.98**	−0.83**
PAD	−0.79**	−0.76**	−0.75**	0.67**	−0.98**	1	0.81**
分形维数	−0.85**	−0.82**	−0.80**	0.72**	−0.83**	0.81**	1

注：**表示$p<0.01$，显著相关。

3 讨 论

3.1 施肥方式影响团聚体组成与稳定性机制

本研究表明，有机肥（OF）处理在改善华南红壤团聚体组成和提升稳定性方面效果最为显著。其根本机制在于有机肥为土壤直接输入了大量新鲜有机物料。这些有机物在分解过程中，一方面通过微生物转化形成腐殖质（如胡敏酸、富里酸），其带有的多种官能团（如羧基、酚羟基）能与土壤黏粒矿物表面的多价阳离子（如Ca^{2+}，Fe^{3+}，Al^{3+}）形成稳定的有机-无机复合体，构成团聚体的核心；另一方面，有机质为土壤微生物提供了丰富的碳源和能源，刺激微生物活性，促进其分泌多糖、脂类等黏性胞外聚合物，这些生物胶结物质进一步将微团聚体胶结成为稳定的大团聚体（>0.25 mm），这与蒋雪洋[15]和王攀宇[16]等的研究结论一致。本研究进一步量化了OF处理在华南红壤稻田中对>2 mm和1～2 mm大团聚体提升的具体幅度。

相比之下，长期单施化肥（NPK）虽然提供了无机养分，但未能持续补充土壤有机碳库，甚至可能因促进微生物矿化作用而加速原有有机质的消耗[17-18]。此外，化肥（尤其是酸性肥料）的连续施用可能加剧红壤固有的酸化问题，导致铝、氢离子等分散性离子活性增加，破坏团聚体结构，这解释了NPK处理中<0.1 mm微团聚体含量较高、MWD和GMD较低的现象[19]。

3.2 红壤特性与有机肥改良效应的关系

华南红壤具有酸性强、铁铝氧化物丰富、质地黏重但初始有机质含量低的特点[20]。这些特性使得其团聚体整体稳定性差。有机肥的改良效应在该类土壤中尤为突出，原因在于：第一，有机肥的输入直接、快速地提升土壤有机质水平，弥补了红壤有机质缺乏的核心短板[21]。第二，有机肥分解产生的腐殖酸等能与红壤中丰富的铁、铝氧化物结合，形成非常稳定的络合物，显著增强团聚体的化学稳定性[22]。第三，有机质改善了土壤pH值和养分状况，促进了土壤动物和微生物的活动，生物团聚作用得以加强[23-24]。第四，有机质降低了黏重红壤的容重，改善了孔隙结构，有利于根系

伸展和水分渗透,从而进一步稳定了土壤结构[25]。

3.3　分形维数作为土壤结构评价指标的意义

本研究将分形维数(D)引入施肥效应的评价体系。结果显示,D值与MWD,GMD,$R_{0.25}$等传统稳定性指标呈高度负相关,且对施肥处理的响应敏感[26]。较低的D值(如OF处理)意味着团聚体粒径分布更集中,大团聚体占主导,结构更简单稳定;较高的D值(如CK处理)则意味着粒径分布范围广,小团聚体和微团聚体占比高,结构复杂但不稳定。因此,分形维数作为一个综合性指标,能够从整体上定量表征土壤结构的优劣,与传统指标互为补充,为土壤结构研究提供了新的视角[27-28]。

3.4　土层差异的成因

本研究发现,所有施肥处理下,表层土壤的团聚体稳定性(MWD,GMD,$R_{0.25}$)均优于下层,分形维数低于下层。这主要归因于:(1)耕作扰动。表层土壤受到翻耕、耙平等农事操作的直接物理扰动,虽然短期可能破坏大团聚体,但长期看,耕作结合施肥(尤其是有机肥)促进了有机质在耕层的混合与积累,刺激了表层微生物活性,有利于团聚体的再形成[29]。而下层土壤受扰动少,有机质输入主要依赖淋溶和植物根系下扎,更新慢,导致团聚化进程缓慢。(2)有机质分布。有机肥和作物残茬主要归还于表层,使得表层有机质含量通常高于下层,这是团聚体稳定性差异的物质基础[30]。(3)根系活动。水稻根系主要分布于耕层,根际沉积物(根分泌物、脱落细胞)和根系的物理穿插作用对表层团聚体形成贡献显著。下层土壤这些作用较弱。

4　结 论

(1)施肥方式显著影响华南红壤稻田土壤团聚体结构。有机肥(OF)处理效果最佳,能显著提高>0.25 mm水稳性团聚体含量(表层达69.27%,下层达67.32%),提升平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD),并降低分形维数,从而优化团聚体粒径分布,增强结构稳定性。

(2)土壤有机质含量是调控团聚体稳定性的关键因子,与各稳定性指标均呈极显著正相关。有机肥主要通过持续增加土壤有机质,促进有机-无机复合体形成和微生物介导的生物胶结作用,从而构建稳定的大团聚体。

(3)与有机肥相比,单施化肥(NPK)或不平衡施肥(PK)对团聚体结构的改善作 用有限;由于有机质投入不足、养分比例失衡,会造成大团聚体占比降低、微团聚体占比升高,进而土壤 团聚体稳定性下降。

(4)分形维数可作为综合评价土壤团聚体结构的有效指标,其与稳定性指标间的显著相关性验证了其在反映土壤结构优劣方面的价值。

(5)表层土壤的团聚体稳定性普遍优于下层,主要受耕作管理、有机质分布和根系活动的共同影响。

综上,在华南红壤稻田区,增施有机肥是改善土壤团聚体结构、增强土壤水稳性和抗蚀能力的有效农艺措施。建议在该区域农业生产中推广有机无机肥配施模式,以实现土壤地力的持续提升和农业生态的健康发展。

参考文献(References):

[1] 任立军,李金,邹洪涛,等.生物有机肥配施化肥对设施土壤养分含量及团聚体分布的影响[J].土壤,2023,55(4):756-763.
Ren L J, Li J, Zou H T, et al. Effect of bio-organic fertilizer combined with chemical fertilizer on nutrient contents and soil aggregate distribution in greenhouse Soil [J]. Soil, 2023,55(4):756-763.

[2] 吴雪里慧,魏亚伟,马澜桐,等.辽西北半干旱区不同林型土壤团聚体与有机碳的关系[J].沈阳农业大学学报,2020,51(6):641-648.
Wu X L H, Wei Y W, Ma L T, et al. Relationship between soil aggregates and organic carbon in different forest types in the semi-arid areas of northwestern Liaoning [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020,51(6):641-648.

[3] Du J X, Liu K L, Huang J, et al. Organic carbon distribution and soil aggregate stability in response to long-term phosphorus addition in different land-use types[J]. Soil and Tillage Research, 2022,215:105195.

[4] Soinne H, Hovi J, Tammeorg P, et al. Effect of biochar on phosphorus sorption and clay soil aggregate stability [J]. Geoderma, 2014,219/220:162-167.

[5] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, et al. Biochar effects on soil biota: a review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011,43(9):1812-1836.

[6] 李文文,王工作,韩芬,等.施肥方式对陇东黄土丘陵沟壑区玉米田土壤团聚体分布及有机碳的影响[J].黑龙江农业科学,2025(5):50-58,66.
Li W W, Wang G Z, Han F, et al. Effects of fertilization methods on soil aggregate distribution and organic carbon in maize fields in loess hilly-gully region of eastern Gansu Province[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2025(5):50-58,66.

[7] Tripathy R, Singh A K. Effect of water and nitrogen management on aggregate size and carbon enrichment of soil in rice-wheat cropping system[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2004,167(2):216-228.

[8] 袁德玲,张玉龙,唐首锋,等.不同灌溉方式对保护地土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持学报,2009,23(3):125-128,134.
Yuan D L, Zhang Y L, Tang S F, et al. Effect on soil water-stable aggregates of different irrigation methods in protected field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009,23(3):125-128,134.

[9] Vogel C, Mueller C W, Höschen C, et al. Submicron structures provide preferential spots for carbon and nitrogen sequestration in soils[J]. Nature Communications, 2014,5:2947.

[10] 谢钧宇,曹寒冰,孟会生,等.不同施肥措施及施肥年限下土壤团聚体的大小分布及其稳定性[J].水土保持报,2020,34(3):274-281,290.
Xie J Y, Cao H B, Meng H S, et al. Effects of different fertilization regimes and fertilization ages on size distribution and stability of soil aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):274-281,290.

[11] 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(20):1896-1899.
Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Fractal characteristics of soil characterized by particle size weight distribution[J]. Science Bulletin, 1993(20):1896-1899.

[12] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management[J]. Plant and Soil, 1984,76(1):319-337.

[13] 赵红,袁培民,吕贻忠,等.施用有机肥对土壤团聚体稳定性的影响[J].土壤,2011,43(2):306-311.
Zhao H, Yuan P M, Lü Y Z, et al. Effects of organic manure application on stability of soil aggregates[J]. Soil, 2011,43(2):306-311.

[14] Angers D A, Recous S, Aita C. Fate of carbon and nitrogen in water-stable aggregates during decomposition of ^{13}C ^{15}N-labelled wheat straw in situ[J]. European Journal of Soil Science, 1997,48(2):295-300.

[15] 蒋雪洋,张前前,沈浩杰,等.生物质炭对稻田土壤团聚体稳定性和微生物群落的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1564-1573.
Jiang X Y, Zhang Q Q, Shen H J, et al. Effects of biochar on soil aggregate stability and microbial community in paddy field[J]. Acta Soilologica Sinica, 2021,58(6):1564-1573.

[16] 王攀宇,王勇,陈玉蓝,等.炭基有机肥对植烟红壤团聚体组成及稳定性的影响[J].农学学报,2025,15(8):53-58.
Wang P Y, Wang Y, Chen Y L, et al. Effects of carbon-based organic fertilizer on composition and stability of aggregate in tobacco-growing red soil[J]. Acta Agrarum Sinicae, 2025,15(8):53-58.

[17] Apesteguía M, Virto I, Orcaray L, et al. Effect of the conversion to irrigation of semiarid Mediterranean dryland agrosecoystems on soil carbon dynamics and soil aggregation[J]. Arid Land Research and Management, 2015,29(4):399-414.

[18] García-Orenes F, Cerdà A, Mataix-Solera J, et al. Effects of agricultural management on surface soil properties and soil: water losses in eastern Spain[J]. Soil and Tillage Research, 2009,106(1):117-123.

[19] Bachmann J, Goebel M O, Woche S K. Small-scale contact angle mapping on undisturbed soil surfaces[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2013, 61(1):3-8.

[20] 毛霞丽,陆扣萍,何丽芝,等.长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J].土壤学报,2015,52(4):828-838.
Mao X L, Lu K P, He L Z, et al. Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil[J]. Acta Soil Science, 2015,52(4):828-838.

[21] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.
Luo X H, Wang Z F, Lu C, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates[J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3816-3824.

[22] 陈泽清,杨光,吴际,等.黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤团聚体及有机碳的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(2):77-88.
Chen Z Q, Yang G, Wu J, et al. Effects of vegetation types on soil aggregates and organic carbon in loess hills and gullies[J]. China Soil and Water Conservation Science,2025,23(2):77-88.

[23] 武均,蔡立群,张仁陟,等.不同耕作措施对旱作农田土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J].中国生态农业学报,2018,26(3):329-337.
Wu J, Cai L Q, Zhang R Z, et al. Effect of tillage practices on soil water-stable aggregate stability in dry farmlands in the Loess Plateau, Central Gansu Province[J]. China Journal of Ecological Agriculture, 2018,26(3):329-337.

[24] 程鹏,高抒,李徐生.激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J].沉积学报,2001,19(3):449-455.
Cheng P, Gao S, Li X S. Revaluation of a wide range laser particle size analyses and comparison with pipette and sieving methods[J]. Journal of Sedimentology, 2001,19(3):449-455.

[25] 范稚莲,石圣杰,周文亮,等.碳基有机肥对烟草生长和土壤性状的影响[J].浙江农业科学,2020,61(4):692-694.
Fan Z L, Shi S J, Zhou W L, et al. Effects of different carbon-based organic fertilizers on tobacco and soil nutrients[J]. Zhejiang Agricultural Science, 2020, 61(4): 692-694.

(下转第110页)