

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.04.026

伍海兵, 马想, 梁晶. 厨余垃圾沼渣堆肥与化学改良剂对城市搬迁地土壤团聚体形成的影响. 土壤, 2023, 55(4): 911–917.

厨余垃圾沼渣堆肥与化学改良剂对城市搬迁地土壤团聚体形成的影响^①

伍海兵^{1,2}, 马想^{1,2}, 梁晶^{1,2*}

(1 上海市园林科学规划研究院, 上海 200232; 2 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232)

摘要: 为改善城市土壤团粒结构, 以上海典型搬迁地土壤为研究对象, 通过室外培养试验, 研究了不同用量厨余垃圾沼渣堆肥和化学改良剂分别单施以及混施对土壤水稳定性团聚体、团粒结构形成的影响。结果表明: 20%、30% 沼渣堆肥单施处理可显著增加搬迁地土壤 0.5 ~ 1.0、1.0 ~ 2.0 mm 粒径大团聚体以及 0.106 ~ 0.25 mm 粒径微团聚体质量分数($P < 0.05$), 而显著降低 <0.106 mm 粒径微团聚体质量分数($P < 0.05$)。化学改良剂 β -环糊精单施处理可显著增加土壤微团聚体总量($P < 0.05$); 3 kg/m³ 用量硫酸钙、氧化铁单施处理均可显著促进土壤大团聚体的形成($P < 0.05$)。沼渣堆肥和化学改良剂混施处理较单施处理显著增加土壤 >2.0、0.25 ~ 0.5 mm 粒径大团聚体质量分数($P < 0.05$), 而降低 <0.106 mm 粒径微团聚体质量分数($P < 0.05$)。在沼渣堆肥处理中, 以 20% 沼渣堆肥添加量对土壤团粒结构改良效果最佳; 在化学改良剂处理中, 以 3 kg/m³ 硫酸钙处理对土壤团粒结构改良效果最佳, 其次是 3 kg/m³ 氧化铁处理。WG₂₀+SM_{mix} 处理(20%沼渣堆肥+化学改良剂混施)对搬迁地土壤团粒结构改良效果最佳, 团粒结构达 19.03%, 较 CK(对照组)、SM_{mix}(化学改良剂混施)、WG₂₀(20%沼渣堆肥)处理分别提高了 94.0%、73.5% 和 26.0%。

关键词: 厨余垃圾沼渣堆肥; 化学改良剂; 团聚体; 团粒结构; 搬迁地

中图分类号: S152.7; S152.5 文献标志码: A

Effects of Food Waste Biogas Residue Composting and Chemical Amendments on the Formation of Soil Aggregates in Urban Relocation Sites

WU Haibing^{1,2}, MA Xiang^{1,2}, LIANG Jing^{1,2*}

(1 Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China; 2 Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai 200232, China)

Abstract: In order to improve aggregate structure of urban soil, the effects of single application of food waste biogas residue composting (BRC), chemical amendment (CA) and mixed application of BRC and CA on the formation of soil water-stable aggregates and their structures were studied in a typical relocation site in Shanghai by outdoor cultivation experiments. The results showed that 20% and 30% BRC significantly increased large aggregates of 0.5–1.0 mm and 1.0–2.0 mm diameters and micro-aggregates of 0.106–0.25 mm diameter in relocation site ($P < 0.05$), while significantly decreased micro-aggregates of <0.106 mm diameter ($P < 0.05$). β -cyclodextrin increased the total amount of micro-aggregates significantly ($P < 0.05$). 3 kg/m³ calcium sulfate and ferric oxide significantly promoted the formation of large aggregates ($P < 0.05$). The combined application of BRC and CA significantly increased large aggregates of >2.0 mm and 0.25–0.5 mm diameters ($P < 0.05$), but decreased micro-aggregates of <0.106 mm diameter compared with the single application of BRC or CA ($P < 0.05$). On the improvement of aggregate structure, 20% BRC had the best effect in BRC treatments, while 3 kg/m³ calcium sulfate had the best effect in CA treatments, followed by 3 kg/m³ iron oxide, while WG₂₀+SM_{mix} (20% BRC+1 kg/m³ of β -cyclodextrin, calcium sulfate and iron oxide, respectively) had the best effect in the combined BRC and CA treatments, whose aggregate structure reached 19.03%, increased by 94.0%, 73.5% and 26.0% respectively compared with CK (100% soil), SM_{mix} (1 kg/m³ of β -cyclodextrin, calcium sulfate and iron oxide, respectively) and WG₂₀ (20% BRC).

Key words: Food waste biogas residue composting; Chemical amendment; Aggregate; Aggregate structure; Relocation site

①基金项目: 上海市科委科技创新行动计划科技支撑碳达峰碳中和专项(21DZ1209403) 资助。

* 通讯作者(liangjing336@163.com)

作者简介: 伍海兵(1986—), 男, 安徽芜湖人, 硕士, 高级工程师, 主要从事废弃物资源化利用和城市土壤研究。E-mail: wuhaibing22@163.com

随着社会经济和城市化进程的快速发展,人们对人居环境和城市生态要求越来越高。城市绿地作为城市生态系统的重要组成部分,是唯一有生命的基础设施,对维持良好的城市生态环境和可持续发展具有重要作用^[1-2]。近年来,城市绿化建设在国内得到迅速的发展,但由于土地资源紧张,越来越多的绿化需在工业企业、城中村等搬迁地上开展建设,如李晓策等^[3]研究表明当前上海中心城区已规未建绿地中搬迁地占比达到 76%。然而搬迁地可能受到原生产和生活活动等的长期影响^[4-5],土壤质量退化严重,如土壤紧实、板结、结构差等^[6],尤其土壤团聚体的破坏制约了搬迁地绿化建设质量。

土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元,主要靠凝聚、无机物质的粘结、有机物质的胶结以及有机-矿质复合体等作用形成^[7-9],合理的土壤团聚体比例通过调节土壤水、肥、气、热等因素来影响土壤肥力的释放。土壤团聚体的大小、数量及排列方式是决定土壤肥力、通气能力、抗蚀性和固碳能力的重要因素^[10],是土壤结构和肥力的重要评价指标。目前对土壤团聚体的研究,一方面多集中在农业或林业土壤上,较少对拟建绿化搬迁地土壤进行研究^[11];另一方面,采用的改良材料多为农林业废弃物,较少研究厨余垃圾对土壤团聚体的影响。如,Zhao 等^[12]研究发现,添加有机物料玉米、小麦秸秆,可显著提高玉米-小麦复种系统土壤大团聚体的质量分数;朱秋丽等^[13]利用石膏、贝壳、生物质炭和炉渣等废弃物施入稻田,土壤大团聚体分别增加了 12.8%、32.7%、12.1% 和 19.7%,且均提高了土壤团聚体稳定性;刘景海等^[14]研究北京林地土壤团聚体表明,覆盖园林废弃物能够增加北京延庆县的杜仲林、桧柏林、槭树林和油松林下不同深度土壤

的大团聚体数量和水稳性大团聚体数量,改善土壤结构。城市搬迁地土壤受人为活动、工程修复的强烈影响,土壤团粒结构含量低,结构体破坏率高,团聚体稳定性差^[11],是搬迁地园林绿化的主要障碍因素之一。厨余垃圾是指易腐烂的、含有机质的生活垃圾,又称湿垃圾^[15]。据统计,2020 年我国厨余垃圾占比为 38%,产量高达 1.4×10^8 t^[16]。厨余垃圾极易腐烂变质,若处置不当,不仅占用大量的土地资源,还可能会严重影响市容并污染环境,危及居民身体健康。如何对厨余垃圾进行合理的资源化利用是当前减轻环境负担的一项挑战。为此,本研究采用厨余垃圾沼渣堆肥、化学改良剂等材料,研究其单施、混施对搬迁地土壤团聚体数量、团粒结构形成的影响,以为改善城市搬迁地土壤团粒结构、促进厨余垃圾资源化利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自上海市浦东新区三林镇遗留搬迁地(121°27' E ~ 121°30'E, 31°7'N ~ 31°8'N),该区域原有城中村、工业企业厂房等,据规划要求拟建成公共绿地。将采集的土壤自然风干,去除石块、石砾、根系等,过 10 mm 筛备用,土壤基本性质见表 1。供试厨余垃圾沼渣堆肥(简称“沼渣堆肥”)为厨余垃圾沼渣(由上海老港生物能源再利用中心提供)好氧发酵腐熟,自然风干,过 2 mm 筛备用。沼渣堆肥 pH 为 8.26,有机质含量为 443 g/kg,发芽指数为 85%。供试化学改良剂:氧化铁为红棕色粉末,纯度 $\geq 99.99\%$;硫酸钙为白色微带灰色固体,纯度 $\geq 97.0\%$; β -环糊精为白色至类白色结晶性固体,纯度 $\geq 98\%$ 。3 种改良剂均从国药集团化学试剂有限公司采购。

表 1 搬迁地土壤基本理化性质

土壤来源	大团聚体(%)				微团聚体(%)		团粒结构(%)	质地	pH	有机质(g/kg)
	>2.0 mm	1~2.0 mm	0.5~1.0 mm	0.25~0.5 mm	0.106~0.25 mm	<0.106 mm				
三林镇	1.11 ± 0.25	0.86 ± 0.11	1.05 ± 0.17	2.23 ± 0.25	6.64 ± 0.31	88.11 ± 1.12	5.25 ± 0.53	粉(砂)质	9.21 ± 0.12	8.04 ± 1.12
搬迁地								黏壤土		

1.2 试验设计

将供试搬迁地土壤、沼渣堆肥、化学改良剂按表 2 中的用量进行配比,共设置 12 个处理,每个处理 3 个重复。将每个处理的供试材料混匀后,装入长×宽×高为 135 cm × 45 cm × 40 cm 的花盆中,浇水至土壤含水率保持在田间持水量的 60%~70%,放至上

海市园林科学规划研究院试验地室外培养 6 个月后,每个花盆重复取 3 个原状土样混合为 1 个土壤样品,并通过四分法保留至 1 kg 备用。

1.3 试验方法

土壤水稳性团聚体采用湿筛法,通过 DIK-2012 土壤团粒分析仪进行测定^[17]。具体为:将备用土样

表2 试验处理

处理	原土 (%, V/V)	沼渣堆肥 (%, V/V)	β -环糊精 (kg/m ³)	硫酸钙 (kg/m ³)	氧化铁 (kg/m ³)
CK(对照)	100	-	-	-	-
WG ₁₀	90	10	-	-	-
WG ₂₀	80	20	-	-	-
WG ₃₀	70	30	-	-	-
SM _{1β}	100	-	1	-	-
SM _{3β}	100	-	3	-	-
SM _{1Ca}	100	-	-	1	-
SM _{3Ca}	100	-	-	3	-
SM _{1Fe}	100	-	-	-	1
SM _{3Fe}	100	-	-	-	3
SM _{mix}	100	-	1	1	1
WG ₂₀ ⁺	80	20	1	1	1
SM _{mix}					

中大的土块按其结构轻轻剥开至约 10 mm; 自然风干后, 取过 10 mm 筛风干土 50 g 左右放至烧杯中; 添加蒸馏水完全淹没, 放置 24 h 后放入土壤团粒分析仪中, 进行上下振荡 30 min; 然后分别洗出孔径 2、1、0.5、0.25 和 0.106 mm 筛中土壤至烧杯中, 放入 105℃ 烘箱中烘干称重, 分别得到 >2、1~2、0.5~1.0、0.25~0.5、0.106~0.25 和 <0.106 mm 各级土壤水稳性团聚体质量, 计算各级水稳性团聚体质量占土样总质量的百分比。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 软件进行作图; 利用 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 LSD 法进行方差分

析和多重比较($\alpha=0.05$)。图和表中数据为平均值 \pm 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同改良剂对搬迁地土壤水稳性团聚体形成的影响

2.1.1 沼渣堆肥对搬迁地土壤水稳性团聚体形成的影响 良好的土壤水稳性团聚体结构, 有利于增强土壤的抗侵蚀能力, 提高土壤肥力质量^[18]。由表 3 可知, 沼渣堆肥添加量对搬迁地土壤各粒径水稳性团聚体影响不同, 在大团聚体(≥ 0.25 mm)中, WG₁₀ 处理各粒径大团聚体质量分数与 CK 处理均无显著差异; WG₂₀ 处理 1~2 和 0.5~1 mm 粒径大团聚体质量分数均显著高于 CK 处理($P<0.05$), 较 CK 处理分别提高了 115.6% 和 355.8%; WG₃₀ 处理 1~2、0.5~1 和 0.25~0.5 mm 粒径大团聚体质量分数均显著高于 CK 处理($P<0.05$), 较 CK 处理分别提高了 72.0%、97.3% 和 61.2%。在微团聚体(<0.25 mm)中, WG₁₀ 处理各粒径微团聚体质量分数较 CK 处理均无显著差异, 而 WG₂₀ 和 WG₃₀ 处理 0.106~0.25 mm 粒径微团聚体数量均显著高于 CK 处理($P<0.05$), 较 CK 处理分别提高了 145.9% 和 178.2%, 但 WG₂₀ 和 WG₃₀ 处理 <0.106 mm 粒径微团聚体质量分数均显著低于 CK 处理($P<0.05$), 较 CK 处理分别降低了 14.0% 和 12.4%。由此可见, WG₁₀ 处理对土壤各粒径团聚体质量分数影响不明显, 而 WG₂₀ 和 WG₃₀ 处理可明显提高 0.5~1、1~2 mm 粒径大团聚体以及 0.106~0.25 mm 粒径微团聚体质量分数。

表3 沼渣堆肥对搬迁地土壤水稳性团聚体形成的影响

处理	大团聚体质量分数(%)				微团聚体质量分数(%)	
	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.106~0.25 mm	<0.106 mm
CK	4.34 \pm 0.96 a	0.93 \pm 0.18 c	1.47 \pm 0.29 c	3.07 \pm 0.48 b	4.58 \pm 0.24 b	85.61 \pm 0.19 a
WG ₁₀	3.34 \pm 0.95 a	1.12 \pm 0.24 bc	1.38 \pm 0.38 c	2.93 \pm 0.11 b	5.23 \pm 0.14 b	86.00 \pm 0.41 a
WG ₂₀	3.53 \pm 1.31 a	2.00 \pm 0.47 a	6.70 \pm 1.22 a	2.86 \pm 0.79 b	11.26 \pm 1.79 a	73.64 \pm 1.38 b
WG ₃₀	2.80 \pm 0.58 a	1.60 \pm 0.08 ab	2.90 \pm 0.11 b	4.95 \pm 1.39 a	12.74 \pm 4.84 a	75.00 \pm 6.84 b

注: 表中同列不同小写字母表示同一粒径不同处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平, 下同。

2.1.2 化学改良剂对搬迁地土壤水稳性团聚体形成的影响 不同化学改良剂对土壤各粒径水稳性团聚体影响不同(表 4)。在大团聚体中, β -环糊精处理(SM_{1 β} 和 SM_{3 β})和硫酸钙处理(SM_{1Ca} 和 SM_{3Ca})>2 mm 粒径大团聚体质量分数均低于 CK 处理, 但前者差异显著($P<0.05$), 后者差异不显著; 而氧化铁处理及其混合处理(SM_{1Fe}、SM_{3Fe} 和 SM_{mix})均高于 CK 处理, 但差异不显著; 另外, SM_{1 β} 与 SM_{3 β} 、SM_{1Ca} 与 SM_{3Ca}、

SM_{1Fe} 与 SM_{3Fe} 处理间差异不显著($P>0.05$)。各化学改良剂处理对 1~2 mm 粒径大团聚体质量分数均较 CK 处理有所提高, 其中 SM_{3Fe} 处理较 CK 处理显著提高了 62.4%($P<0.05$), 而其他处理较 CK 处理差异不明显; 另外, 对于相同化学改良剂不同用量处理, 1 kg/m³ 和 3 kg/m³ 处理间差异不显著($P>0.05$)。各化学改良剂均可增加 0.5~1 mm 粒径大团聚体占比, 其中 SM_{1 β} 处理增加显著($P<0.05$), 较 CK 处理增加了

表 4 化学改良剂对搬迁地土壤水稳性团聚体形成的影响

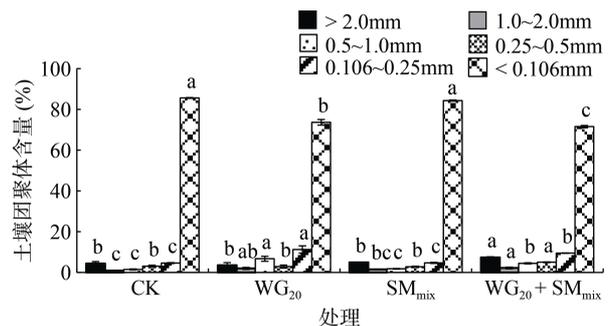
处理	大团聚体质量分数(%)				微团聚体质量分数(%)	
	>2 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.106~0.25 mm	<0.106 mm
CK	4.34 ± 0.96 ab	0.93 ± 0.18 bc	1.47 ± 0.29 b	3.07 ± 0.48 bcd	4.58 ± 0.24 e	85.61 ± 0.19 a
SM _{1β}	1.37 ± 0.13 c	0.93 ± 0.03 c	2.53 ± 0.21 a	5.33 ± 0.13 a	26.12 ± 0.23 a	63.73 ± 0.34 e
SM _{3β}	1.23 ± 0.20 c	1.03 ± 0.30 abc	1.90 ± 0.37 b	3.20 ± 0.59 bcd	6.90 ± 0.63 de	85.73 ± 0.58 a
SM _{1Ca}	3.24 ± 0.28 b	1.48 ± 0.10 abc	1.95 ± 0.24 b	3.92 ± 0.63 b	6.38 ± 0.32 e	83.03 ± 0.24 ab
SM _{3Ca}	3.59 ± 0.27 b	1.44 ± 0.47 abc	1.98 ± 0.40 b	9.72 ± 0.21 a	18.63 ± 0.16 b	64.65 ± 0.58 d
SM _{1Fe}	4.47 ± 0.67 ab	1.23 ± 0.51 abc	1.63 ± 0.05 b	2.53 ± 0.34 d	10.02 ± 0.78 cd	80.12 ± 0.14 b
SM _{3Fe}	5.63 ± 1.71 a	1.51 ± 0.45 a	1.97 ± 0.47 b	3.77 ± 1.39 bc	13.23 ± 5.27 c	73.89 ± 5.87 c
SM _{mix}	4.91 ± 0.22 a	1.49 ± 0.17 ab	1.77 ± 0.18 b	2.81 ± 0.24 cd	4.71 ± 0.29 e	84.32 ± 0.31 a

72.1%，而其他处理较 CK 处理差异不明显；相同化学改良剂不同添加量处理间仅 SM_{1β} 显著高于 SM_{3β} ($P<0.05$)，其他处理差异不明显。SM_{3Ca} 与 SM_{1β} 处理 0.25 ~ 0.5 mm 粒径大团聚体质量分数较 CK 处理显著提高 ($P<0.05$)，分别增加了 217.6% 和 73.6%，而其他处理与 CK 处理相比，差异不显著；SM_{3Ca} 处理较 SM_{1Ca} 处理、SM_{3Fe} 处理较 SM_{1Fe} 处理可显著增加 0.25 ~ 0.5 mm 粒径大团聚体比例 ($P<0.05$)，而 SM_{3β} 处理较 SM_{1β} 处理显著降低 ($P<0.05$)。

在微团聚体中，与 CK 处理相比，各化学改良剂处理对 0.106 ~ 0.25 mm 粒径微团聚体质量分数有提高趋势，其中 SM_{1β}、SM_{3Ca}、SM_{3Fe} 及 SM_{1Fe} 处理达到了显著水平 ($P<0.05$)，分别提高了 470.3%、306.8%、188.9% 及 118.8%。不同处理中 SM_{1β}、SM_{3Ca}、SM_{3Fe} 及 SM_{1Fe} 处理 <0.106 mm 粒径微团聚体质量分数较 CK 处理显著降低 ($P<0.05$)，降幅分别为 25.6%、24.5%、13.7% 及 6.4%；而对于相同化学改良剂不同添加量处理，SM_{3β} 较 SM_{1β}、SM_{3Ca} 较 SM_{1Ca}、SM_{3Fe} 较 SM_{1Fe} 其 <0.106 mm 粒径微团聚体质量分数显著降低 ($P<0.05$)，而 SM_{3β} 较 SM_{1β} 其显著增加 ($P<0.05$)。

2.1.3 沼渣堆肥与化学改良剂混施对搬迁地土壤水稳性团聚体形成的影响 沼渣堆肥与化学改良剂混施较沼渣堆肥、化学改良剂单施对搬迁地土壤各粒径水稳性团聚体影响不同(图 1)。在大团聚体中，混施处理(WG₂₀+ SM_{mix})>2.0 mm 粒径大团聚体质量分数较 WG₂₀、SM_{mix} 和 CK 处理均显著提高 ($P<0.05$)，分别提高了 108.8%、69.8% 和 50.1%；其 1~2 mm 粒径大团聚体质量分数较 CK 和 SM_{mix} 处理均显著提高 ($P<0.05$)，分别提高了 135.5% 和 47.0%；其 0.5~1 mm 粒径大团聚体质量分数较 CK 和 SM_{mix} 处理均显著提高 ($P<0.05$)，分别提高了 202.0% 和 151.0%，而较 WG₂₀ 处理显著降低 ($P<0.05$)，降低了 33.7%；其 0.25~0.5 mm 粒径大团聚体较 SM_{mix}、WG₂₀、CK 处

理均显著提高 ($P<0.05$)，分别提高了 78.0%、75.5%、63.5%。在微团聚体中，WG₂₀ + SM_{mix} 处理 0.106 ~ 0.25 mm 粒径微团聚体质量分数较 CK 和 SM_{mix} 处理显著提高 ($P<0.05$)，分别提高了 106.3% 和 100.6%，而较 WG₂₀ 处理显著降低 ($P<0.05$)，降低了 16.1%；其 <0.106 mm 粒径微团聚体较 CK、SM_{mix}、WG₂₀ 处理显著降低 ($P<0.05$)，分别降低了 16.5%、15.2%、2.9%。



(柱图上方不同小写字母表示不同处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平，下同)

图 1 沼渣堆肥和化学改良剂混施对搬迁地土壤水稳性团聚体形成的影响

2.2 不同改良剂对搬迁地土壤团粒结构形成的影响

2.2.1 沼渣堆肥对搬迁地土壤团粒结构形成的影响

团粒结构是由若干土壤单粒黏结在一起形成团聚体的一种土壤结构，是土壤最理想的结构。一般将 ≥ 0.25 mm 粒径团聚体称为土壤团粒结构，其是维持土壤结构稳定的基础，含量越高，土壤结构越稳定^[19]。沼渣堆肥添加量对搬迁地土壤团粒结构具有一定影响，其中，WG₂₀ 处理土壤团粒结构含量最高(图 2)，达 15.1%，其次是 WG₃₀ 处理，达 12.25%，均较 CK 处理提升显著 ($P<0.05$)，分别提高了 53.9% 和 24.9%，而 WG₁₀ 处理对搬迁地土壤团粒结构影响不明显 ($P>0.05$)。

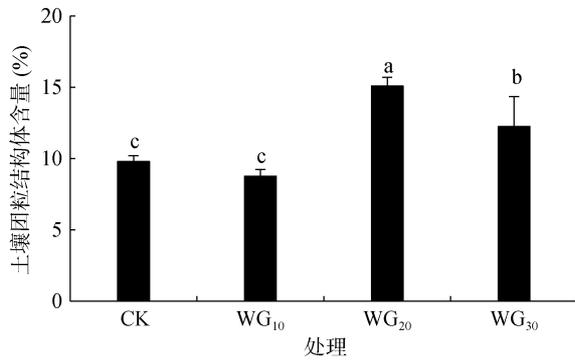


图2 沼渣堆肥对搬迁地土壤团聚结构形成的影响

2.2.2 化学改良剂对搬迁地土壤团聚结构形成的影响 不同化学改良剂对搬迁地土壤团聚结构具有一定影响(图3), 其中 SM_{3Ca} 处理改良效果最佳, 显著高于 CK 处理($P<0.05$), 较 CK 处理增加了 70.6%, 其次是 SM_{3Fe} 处理, 较 CK 处理增加了 31.3%; 同一改良剂不同添加量处理对土壤团聚结构影响明显, 其中 SM_{3Ca} 较 SM_{1Ca}、SM_{3Fe} 较 SM_{1Fe} 土壤团聚结构分别显著增加了 58.0% 和 30.6% ($P<0.05$), 而 SM_{3β} 较 SM_{1β} 土壤团聚结构反而显著降低了 27.4% ($P<0.05$); SM_{mix} 处理较 SM_{3Fe}、SM_{3Ca} 处理土壤团聚结构显著降低, 较 SM_{3β} 处理显著提高, 而较 CK 处理提高了 11.8%, 但差异不明显。由此可见, 3 种化学改良剂混施对土壤团聚结构改良效果不显著, 主要是由于 β-环糊精降低了土壤团聚结构的形成。

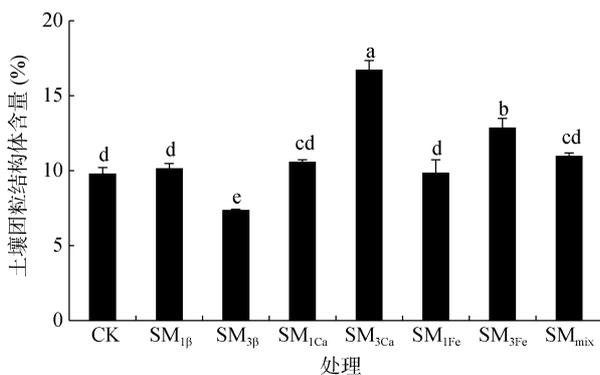


图3 化学改良剂对搬迁地土壤团聚结构形成的影响

2.2.3 沼渣堆肥与化学改良剂混施对搬迁地土壤团聚结构形成的影响 沼渣堆肥和化学改良剂混施较沼渣堆肥、化学改良剂单施对搬迁地土壤团聚结构形成影响明显(图4), 混施处理(WG₂₀+ SM_{mix})搬迁地土壤团聚结构含量最高, 达 19.03%, 显著高于 CK、SM_{mix} 和 WG₂₀ 处理($P<0.05$), 分别增加了 94.0%、73.5% 和 26.0%。由此可见, 沼渣堆肥与化学改良剂混施对搬迁地土壤团聚结构的改良效果明显优于沼

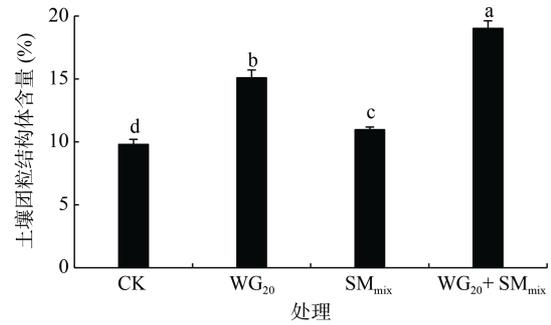


图4 沼渣堆肥和化学改良剂混施对搬迁地土壤团聚结构形成的影响

渣堆肥、化学改良剂单施处理。

3 讨论

搬迁地作为当前城市绿化建设的主要土地资源, 其土壤质量尤其土壤物理结构是决定绿化成败的关键所在。伍海兵^[20]研究表明, 土壤物理特性差是导致城市绿地中植物长势不佳或死亡的主要原因。土壤水稳性团聚体的粒径分布不仅反映土壤结构的稳定性^[21], 还影响土壤容重、孔隙度、含水量等多种物理特性^[22], 也是衡量土壤质量是否发生退化的重要指标^[23]。土壤水稳性团聚体是土粒通过各种自然作用形成的抗水力分散的结构单位^[24], 与土壤抗侵蚀性有着密切关系^[25]。本研究中, 沼渣堆肥、β-环糊精、硫酸钙和氧化铁等一种材料单施或几种材料混施对土壤水稳性团聚体质量分数影响明显, 10% 沼渣堆肥处理对土壤各粒径水稳性团聚体质量分数影响不明显, 20% 和 30% 沼渣堆肥处理可显著降低 <0.106 mm 粒径微团聚体质量分数($P<0.05$), 而提升 0.106 ~ 0.25 mm 粒径微团聚体和 1 ~ 2、0.5 ~ 1 mm 粒径大团聚体质量分数($P<0.05$)。这一方面可能是由于沼渣堆肥含有丰富的碳, 外源碳的施用可有效促进土壤微团聚体向大团聚体转化, 与 Puttaso 等^[26]的研究结果类似; 另一方面可能是由于沼渣堆肥降低了搬迁地土壤 pH, 促进了有机物质和矿物颗粒间的胶结^[27]。本研究表明, 3 种化学改良剂处理对土壤大团聚体、微团聚体形成的影响不同, 其中 β-环糊精处理可显著促进土壤微团聚体总量的形成, 而降低土壤大团聚体含量, 这与谢国雄等^[28]研究结果不一致, 可能是由于 β-环糊精主要可促进粉砂或砂质土壤大团聚体形成, 对于上海搬迁地黏质土壤改良效果不明显, 也可能 β-环糊精改善土壤团聚体需要长期效应。本研究表明, 1 kg/m³ 硫酸钙以及 1 kg/m³ 氧化铁处理均可促进土壤微团聚体形成大团聚体, 但效果不明

显, 而 3 kg/m^3 硫酸钙以及 3 kg/m^3 氧化铁处理可显著促进大团聚体的形成。其中, 硫酸钙处理主要促进 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 粒径大团聚体形成, 这可能由于硫酸钙能明显降低土壤 $\text{pH}^{[29]}$, 从而促进 $<0.25 \text{ mm}$ 粒径微团聚体向大团聚体转化; 同时钙离子本身具有一定的胶结作用, 能够提高微团聚体间的黏结性, 从而促进大团聚体的形成^[30]。氧化铁处理显著降低 $<0.106 \text{ mm}$ 粒径微团聚体质量分数, 增加 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径大团聚体质量分数, 这可能是由于氧化铁在土壤中可形成各种形态的铁氧化物, 一方面铁氧化物在土壤溶液中充当絮凝剂将微团聚体结合在一起形成大团聚体, 如 Zhao 等^[31]研究发现铁氧化物可改善土壤团聚体粒径分布, 提升大团聚体结构含量; 另一方面铁氧化物较粉砂粒和砂粒细小, 少量铁氧化物的吸附可显著增加粉砂粒/砂粒的表面积, 促进较大矿物颗粒和有机物质之间的相互作用^[32], 有利于土壤颗粒的相互团聚, 从而促进大团聚体的形成。沼渣堆肥和化学改良剂混施较单施对土壤团聚体改善明显, 尤其是显著增加了 >2.0 、 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 粒径大团聚体质量分数, 而降低了 $<0.106 \text{ mm}$ 粒径微团聚体质量分数, 这可能是由于沼渣堆肥分解的腐殖质、多糖等有机化合物, 在硫酸钙、氧化铁的协同作用下, 通过吸附、包裹、黏结、凝聚和复合等作用, 使微团体更易胶结为大团聚体。

本研究发现, 不同处理对土壤团粒结构改良明显, 沼渣堆肥处理中, 以 20% 沼渣堆肥添加量对土壤团粒结构改良效果最佳, 这主要是由于沼渣堆肥分解产生的多糖、脂肪等都是土壤胶结剂, 促进土壤团粒结构体的形成^[33], 这与张志毅等^[34]研究结果类似; 而添加 10% 沼渣堆肥处理, 可能是由于沼渣堆肥分解产生的多糖、脂肪等土壤胶结剂含量少, 故对团粒结构的形成作用效果不明显。化学改良材料中, 硫酸钙对土壤团粒结构改良效果最佳, 其次是氧化铁, 且 3 kg/m^3 处理显著优于 1 kg/m^3 处理, 这可能是由于 Ca^{2+} 置换 Na^+ 、 K^+ 后被土壤颗粒吸附, 削弱了 Na^+ 、 K^+ 对土壤颗粒及团聚体的分散作用, 从促进了土壤团粒结构的形成^[35], 而铁氧化物拥有较大的比表面积^[36], 在土壤颗粒团聚过程中, 能够与不同大小的土壤颗粒通过吸附作用形成粒径较大的团粒结构^[37]。沼渣堆肥和化学改良剂混施处理较其单施处理对土壤团粒结构的提升效果显著 ($P < 0.05$), 这是由于一方面沼渣堆肥增加了搬迁地土壤有机质含量, 其分解产生的腐殖质、多糖等有机化合物以及硫酸钙、氧化铁产生的金属阳离子均具有吸附、黏结能力;

另一方面沼渣堆肥分解产生的多种有机化合物可与铁、钙等金属阳离子、氧化物等形成有机矿物复合体, 其作为土壤团粒结构形成的重要胶结物质^[38], 从而促进了搬迁地土壤中的微团聚体向团粒结构胶结和转化。

4 结论

1) 在搬迁地, 10% 沼渣堆肥处理对土壤各粒径团聚体影响不明显, 20%、30% 沼渣堆肥处理显著增加土壤 $0.5 \sim 1$ 、 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径大团聚体以及 $0.106 \sim 0.25 \text{ mm}$ 粒径微团聚体质量分数 ($P < 0.05$), 而显著降低土壤 $<0.106 \text{ mm}$ 粒径微团聚体质量分数 ($P < 0.05$)。β-环糊精处理可显著增加土壤微团聚体总量, 而降低大团聚体质量分数; 3 kg/m^3 硫酸钙处理可显著增加土壤 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 粒径大团聚体质量分数 ($P < 0.05$), 3 kg/m^3 氧化铁处理可显著降低土壤 $<0.106 \text{ mm}$ 粒径微团聚体质量分数, 增加 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 粒径大团聚体质量分数。沼渣堆肥与化学改良剂混施较单施对土壤水稳性团聚体形成具有促进作用, 尤其是显著增加了 >2.0 、 $0.25 \sim 0.5 \text{ mm}$ 粒径大团聚体质量分数, 而降低了 $<0.106 \text{ mm}$ 粒径微团聚体质量分数 ($P < 0.05$)。

2) 沼渣堆肥单施处理中, 20% 沼渣堆肥对搬迁地土壤团粒结构改良效果最佳; 化学改良剂单施处理中, 3 kg/m^3 硫酸钙对搬迁地土壤团粒结构改良效果最佳, 其次是 3 kg/m^3 氧化铁处理。而沼渣堆肥与化学改良剂混施 ($\text{WG}_{20} + \text{SM}_{\text{mix}}$) 对搬迁地土壤团粒体改良效果最佳, 团粒结构达 19.03%, 较 CK、 SM_{mix} 、 WG_{20} 处理分别增加了 94.0%、73.5% 和 26.0%。

参考文献:

- [1] 宋晨晨, 刘时彦, 赵娟娟, 等. 基于功能特征的城市植物群落生态功能评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 703–714.
- [2] 卢瑛, 甘海华, 史正军, 等. 深圳城市绿地土壤肥力质量评价及管理对策[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 153–156.
- [3] 李晓策, 郑思俊, 张浪. 上海城市困难立地识别及分布特征[J]. 园林, 2021, 38(2): 7–12.
- [4] 屠德刚, 冯涛, 杨国栋, 等. 机械厂遗留场地重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境工程, 2022, 40(4): 217–223.
- [5] 易超, 李紫惠. 上海某城中村改造地块土壤污染状况初步调查与分析[J]. 化工管理, 2021(15): 50–51.
- [6] 梁晶, 伍海兵, 张浪. 城市典型搬迁地土壤质量特征及绿化障碍因子研究[J]. 中国园林, 2021, 37(12): 38–42.
- [7] Emerson W W. A classification of soil aggregates based on their coherence in water[J]. Soil Research, 1967, 5(1): 47.
- [8] Greenland D J. Mechanism of interaction between clays

- and defined organic compounds[J]. *Soils and Fertilizers*, 1961, 28: 415–425.
- [9] Edwards A P, Bremner J M. Dispersion of soil particles by sonic vibration₁[J]. *Journal of Soil Science*, 1967, 18(1): 47–63.
- [10] 张海欧, 解建仓, 南海鹏, 等. 冻融交替对复配土壤团聚体结构和有机质的交互作用[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 273–278.
- [11] 梁晶, 伍海兵, 张浪. 上海市搬迁地土壤团聚体的分布特征[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 59–66.
- [12] Zhao H L, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178–186.
- [13] 朱秋丽, 曾冬萍, 王纯, 等. 废弃物施加对福州平原稻田土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(8): 3000–3008.
- [14] 刘景海, 张萍, 吴春水, 等. 园林废弃物覆盖对北京市林地土壤养分和团聚体的影响[J]. *中国水土保持*, 2016(6): 54–58, 77.
- [15] 刘晓兰. 干式厌氧发酵处理厨余垃圾的工况分析[J]. *节能与环保*, 2022(5): 44–46.
- [16] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 生活垃圾分类标志: GB/T 19095—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [17] 白怡婧, 刘彦伶, 李渝, 等. 长期不同轮作模式对黄壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 161–167.
- [18] Shinjo H, Fujita H, Gintzburger G, et al. Soil aggregate stability under different landscapes and vegetation types in a semiarid area in northeastern Syria[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(1): 229–240.
- [19] 庄正, 张芸, 张颖, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤团聚体分布特征及其稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 183–188.
- [20] 伍海兵. 上海中心城区典型绿地土壤物理性质特征研究[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 155–161.
- [21] 胡阳, 邓艳, 蒋忠诚, 等. 典型岩溶山区植被恢复对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(1): 61–67.
- [22] 邹鑫, 陈春峰, 刘文杰. 西双版纳橡胶种植对土壤团聚体及理化性质的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(3): 597–605.
- [23] Tang F K, Cui M, Lu Q, et al. Effects of vegetation restoration on the aggregate stability and distribution of aggregate-associated organic carbon in a typical Karst gorge region[J]. *Solid Earth*, 2016, 7(1): 141–151.
- [24] 徐香菇, 汪景宽. 土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J]. *土壤通报*, 2017, 48(6): 1523–1529.
- [25] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 129–135.
- [26] Puttaso A, Vityakon P, Rasche F, et al. Does organic residue quality influence carbon retention in a tropical sandy soil?[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(3): 1001–1011.
- [27] Nguetnkam J P, Dultz S. Soil degradation in Central North Cameroon: Water-dispersible clay in relation to surface charge in Oxisol A and B horizons[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 113(1): 38–47.
- [28] 谢国雄, 季淑枫, 孔樟良, 等. 改良剂对粉砂质涂地土壤水稳定性团聚体形成和养分供应能力的影响[J]. *农学学报*, 2015, 5(1): 46–50.
- [29] 高惠敏, 王相平, 屈忠义, 等. 脱硫石膏与有机物料配施对河套灌区土壤改良及向日葵生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(8): 85–92.
- [30] Chan K Y, Conyers M K, Scott B J. Improved structural stability of an acidic hardsetting soil attributable to lime application[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2007, 38(15/16): 2163–2175.
- [31] Zhao Q A, Poulson S R, Obrist D, et al. Iron-bound organic carbon in forest soils: Quantification and characterization[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(16): 4777–4788.
- [32] Kleber M, Sollins P, Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: Self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 9–24.
- [33] 郝翔翔, 杨春葆, 苑亚茹, 等. 连续秸秆还田对黑土团聚体中有机碳含量及土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(35): 263–269.
- [34] 张志毅, 熊桂云, 吴茂前, 等. 有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(3): 405–412.
- [35] 朱经伟, 张云贵, 李志宏, 等. 不同土壤改良剂对整治烟田土壤团聚体组成的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2018, 41(2): 341–348.
- [36] Eusterhues K, Rumpel C, Kögel-Knabner I. Organo-mineral associations in sandy acid forest soils: Importance of specific surface area, iron oxides and micropores[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56(6): 753–763.
- [37] Regelink I C, Stoof C R, Rousseva S, et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties[J]. *Geoderma*, 2015, 247/248: 24–37.
- [38] 魏朝富, 谢德体, 李保国. 土壤有机无机复合体的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(2): 221–227.