

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.05.026

伍海兵, 何小丽, 梁晶. 厨余垃圾沼渣堆肥施用对城市搬迁地土壤质量的影响. 土壤, 2024, 56(5): 1137–1143.

厨余垃圾沼渣堆肥施用对城市搬迁地土壤质量的影响^①

伍海兵^{1,2}, 何小丽^{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: 以上海典型搬迁地土壤为研究对象, 研究了厨余垃圾沼渣堆肥、化学改良剂(β -环糊精、硫酸钙和氧化铁)单施以及混施对土壤物理性质、化学性质的影响, 并对各处理土壤质量进行了综合评价, 以探究最佳土壤改良配方。结果表明: 沼渣堆肥能显著降低土壤容重, 提高土壤毛管孔隙度、总孔隙度、饱和持水量、田间持水量和入渗率等物理性质($P<0.05$); 显著降低土壤 pH, 提高土壤电导率和有机质、水解性氮、有效磷和速效钾含量等化学性质; 随着沼渣堆肥施加量的增加, 其对土壤理化性质的改良效果越显著($P<0.05$), 其中, 20% 沼渣堆肥+3 kg/m³ 化学改良剂混施改良效果显著优于单施 20% 沼渣堆肥、单施 3 kg/m³ 化学改良剂($P<0.05$)。土壤质量评价综合得分大小关系为: 30% 沼渣堆肥处理> 20% 沼渣堆肥+3 kg/m³ 化学改良剂处理> 20% 沼渣堆肥处理>10% 沼渣堆肥处理> 3 kg/m³ 化学改良剂处理>对照, 各改良配方对搬迁地土壤质量均有改良作用, 其中 30% 沼渣堆肥改良效果最佳。

关键词: 厨余垃圾沼渣堆肥; 搬迁地; 土壤质量; 主成分分析

中图分类号: S152.7; S152.5 文献标志码: A

Effect of Food Waste Biogas Residue Composting on Soil Quality in Urban Relocation Site

WU Haibing^{1,2}, HE Xiaoli^{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: Taking the typical relocated site soil in Shanghai as the research object, the effects of single and mixed application of food waste biogas residue composting and chemical conditioner (Beta-cyclodextrin, Calcium sulphate, Iron(III) oxide) on soil physical and chemical properties were studied, and the soil quality of each treatment was evaluated comprehensively in order to explore the best soil improvement formula. The results showed that biogas residue composting significantly reduced soil bulk density, improved soil capillary porosity, total porosity, saturated water capacity, field water capacity, infiltration rate and other physical properties ($P<0.05$), significantly reduced soil pH, improved soil electrical conductivity, organic matter, hydrolytic nitrogen, available phosphorus and available potassium. With the increase of the application amount of biogas residue composting, the improvement effects on soil physical and chemical properties were more significant ($P<0.05$), and the improvement effect of combined application of 20% biogas residue composting and 3 kg/m³ chemical conditioner was significantly better than that of 20% biogas residue composting alone and 3 kg/m³ chemical conditioner alone ($P<0.05$). Compared with CK (without biogas residue composting and chemical conditioner), other treatments all promoted soil quality, and the comprehensive score of soil quality evaluation was as follows: 30% biogas residue composting treatment > 20% biogas residue composting and 3 kg/m³ chemical conditioner treatment > 20% biogas residue composting treatment > 10% biogas residue composting treatment > 3 kg/m³ chemical conditioner treatment, therefore, 30% biogas residue composting is recommended for application due to its best effects in soil improvement.

Key words: Food waste biogas residue composting; Relocation site; Soil quality; Principal component analysis

①基金项目: 上海绿化和市容管理局科技攻关项目(G230201)和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

随着城市化进程和社会经济的快速发展,全面增加城市绿化面积,构建“多层次、成网络、功能复合”的城市生态网络框架体系,已成为我国城市生态文明建设的重点。但目前特大城市园林绿化建设与土地资源紧缺矛盾日趋突显^[1],越来越多绿化建设在城市搬迁地上,如上海中心城区已规划而未建绿地中有 76% 为搬迁地^[2]。然而搬迁地受到原生产、生活活动影响,土壤质量退化严重,如存在土壤容重大、压实严重、孔隙度低、持水能力弱、有机质低等障碍因子^[3],直接制约了搬迁地绿化建设的发展。伍海兵等^[4]研究上海搬迁地土壤质量表明,近 60% 搬迁地土壤质量属于“差”等级,直接影响植物正常生长,导致城市绿化景观和生态功能不能充分发挥现象普遍^[5]。土壤作为植物生长的基础和载体,其质量优劣直接决定城市园林绿化建设成败。

另外,随着我国人民生活水平的提高,生活垃圾产量与日俱增。在生活垃圾组成中,厨余垃圾(又称湿垃圾)占比为 40% 左右,厨余垃圾已成为城市生活垃圾的重要组成部分。厨余垃圾极易腐烂变质,若处置不当,严重影响市容并污染环境,同时造成资源的浪费。厨余垃圾含有丰富的营养元素和有机质,合理施用对土壤具有改善作用。近年来,虽然许多学者开展了厨余垃圾改良土壤的相关研究,但对城市搬迁地土壤改良的研究报道较少,更缺乏厨余垃圾对搬迁地土壤质量改良的综合评价。如,张晓花等^[6]研究表明,厨余垃圾堆肥可显著提高烤烟土壤的 pH 和有机碳、碱解氮、有效磷含量,以及脲酶、酸性磷酸酶、荧光素二乙酸水解酶活性;韦茜佳等^[7]研究表明,污泥中添加厨余垃圾能够有效改善物料的理化性质,并促进蚯蚓生长,形成的蚯蚓肥能有效提高土壤有机质、氮磷钾含量,低施加量能促进植物生长,施加比例增加到 40% 时则对植物生长产生抑制作用;董倩倩等^[8]发现,施用厨余垃圾堆肥可显著提高土壤肥力,提高枇杷的生物学性状与产量,改善果实品质;梁晶等^[9]发现,氨基酸、木醋液配施 20% 厨余垃圾堆肥对土壤物理性质改良和植物生长促进作用最佳。

基于以上,本研究采用厨余垃圾沼渣堆肥,并配施 β -环糊精、硫酸钙和氧化铁等常用化学改良剂,研究不同厨余垃圾沼渣堆肥添加量单施及其与化学改良剂混施对搬迁地土壤理化性质的影响,并对土壤质量进行综合评价,以为城市搬迁地土壤质量提升、厨余垃圾在园林绿化中资源化利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自上海浦东新区三林镇城中村、工业企业厂房等拆迁搬迁地(121°27' E ~121°30' E, 31°7' N ~31°8' N)。根据城市规划需求,该区域居民、工厂等搬出,遗留下土壤破坏严重的搬迁地,后期拟建成公共绿地。供试土壤 pH 为 9.21,电导率(EC)为 0.13 mS/cm,有机质含量为 8.04 g/kg,土壤水解性氮、速效钾和有效磷含量分别为 15.21、163.22 和 7.82 mg/kg。供试厨余垃圾沼渣堆肥(简称“沼渣堆肥”)由厨余垃圾经过厌氧发酵工艺形成沼渣,再经过 90 d 的好氧发酵堆肥形成,其有机质含量为 443 g/kg,发芽指数为 85%,砷(2.65 mg/kg)、汞(0.73 mg/kg)、铅(31.0 mg/kg)、镉(1.13 mg/kg)、铬(24 mg/kg)、铜(55.0 mg/kg)、锌(173 mg/kg)、镍(7.96 mg/kg)等重金属总量均符合标准 GB/T 33891—2017《绿化用有机基质》^[10] I 级限值要求。供试化学改良剂(β -环糊精,纯度 $\geq 98\%$;硫酸钙,纯度 $\geq 97.0\%$;氧化铁,纯度 $\geq 99.99\%$),均从国药集团化学试剂有限公司采购。

1.2 试验设计

将采集的供试搬迁地土壤中的大土块按其结构轻轻剥至直径 10 mm 左右,挑出石块、石砾及明显的有机物质(如大的根系),自然风干,过 10 mm 孔径筛;沼渣堆肥自然风干,过 2 mm 孔径筛。将过筛的土壤与沼渣堆肥、化学改良剂按表 1 进行配比,设置 5 组不同处理和对照组(CK),每个处理设置 3 个重复,将每组配比土壤与沼渣堆肥混合均匀后,装入长 \times 宽 \times 高为 135 cm \times 45 cm \times 40 cm 的花盆中,浇水至土壤含水率保持在田间持水量的 65% 左右,放置于上海市园林科学规划研究院试验地培养 6 个月后,采用环刀取原状土用于土壤物理性质的测定,每个处理每个重复采集 3 个环刀样;每个处理采集 3 个混合样用于土壤化学性质的测定。

表 1 不同处理土壤设置

处理	物料体积比
CK	100% 土壤
T1	土壤:沼渣堆肥=9:1
T2	土壤:沼渣堆肥=8:2
T3	土壤:沼渣堆肥=7:3
T4	土壤:沼渣堆肥=8:2+3 kg/m ³ 化学改良剂(1 kg/m ³ β -环糊精+1 kg/m ³ 硫酸钙+1 kg/m ³ 氧化铁)
T5	100% 土壤+3 kg/m ³ 化学改良剂(1 kg/m ³ β -环糊精+1 kg/m ³ 硫酸钙+1 kg/m ³ 氧化铁)

1.3 测定项目与方法

土壤容重、饱和持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度采用环刀法测定；土壤入渗率采用双环刀法测定；土壤 pH 采用电位法测定；土壤电导率(EC)采用电导法测定；土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定；土壤水解性氮采用碱解扩散法测定；土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提法测定；土壤速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。详细测定方法参考《森林土壤分析方法》^[11]。

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 软件进行统计分析，其中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($\alpha=0.05$)，采用主成分分析对土壤质量进行综合评价。图和表中数据为平均值±标准差。

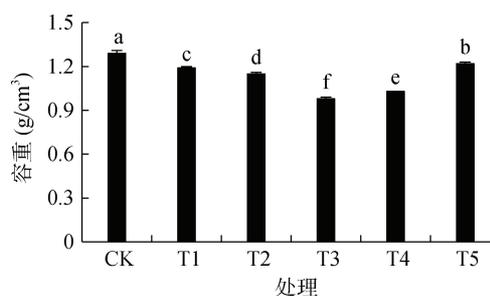
2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤物理性质的影响

2.1.1 土壤容重 不同处理降低土壤容重效果显著(图 1)，其中，T3 处理土壤容重最小，仅为 0.98 g/cm^3 ，较 CK 处理降低了 24.0%；其次是 T4 处理，为 1.03 g/cm^3 ，较 CK 处理降低了 20.2%；各处理中，T5 处理较其他处理对土壤容重降低相对较小，较 CK 处理降低了 5.4%；各处理土壤容重大小关系为 $\text{CK} > \text{T5} > \text{T1} > \text{T2} > \text{T4} > \text{T3}$ ，且各处理间差异均达到了显著水平($P < 0.05$)。由 T1、T2、T3 处理土壤容重逐渐降低可知，沼渣堆肥可显著降低土壤容重，这与徐秋桐等^[12]研究结果一致；由 T4 处理土壤容重显著低于 T2、T5 处理可知($P < 0.05$)，化学改良剂能显著降低土壤容重($P < 0.05$)，这与谢国雄等^[13]、伍海兵等^[14]研究表明 β -环糊精、硫酸钙能显著改善土壤容重的结果类似。

2.1.2 土壤孔隙度 不同处理对土壤孔隙度有一定影响(表 2)，其中 T3 处理土壤非毛管孔隙度最大，为 3.50%，较 CK 处理增加了 14.4%，其次是 CK 处

理，而 T4 处理最小，为 2.41%；各处理土壤非毛管孔隙度大小关系为 $\text{T3} > \text{CK} > \text{T5} > \text{T2} > \text{T1} > \text{T4}$ ，且 T3 处理显著高于其他各处理($P < 0.05$)，而其他各处理间差异不显著。由 CK、T1、T2、T3 处理可知，10%、20% 沼渣堆肥对土壤非毛管孔隙度的改良效果不明显，这与伍海兵等^[15]研究绿化植物废弃物等有机材料改良土壤孔隙度的结果类似，而 30% 沼渣堆肥添加量则提升效果显著($P < 0.05$)。此外，各改良处理土壤毛管孔隙度较 CK 处理均显著提升($P < 0.05$)，其中 T4 处理土壤毛管孔隙度最大，为 58.55%，较 CK 处理提升了 19.1%；其次是 T3 处理，为 55.38%，较 CK 处理提升了 12.6%；各处理土壤毛管孔隙度大小关系为 $\text{T4} > \text{T3} > \text{T2} > \text{T1} > \text{T5} > \text{CK}$ 。由 CK、T1、T2、T3 处理可知，随着沼渣堆肥用量的增加，其对土壤毛管孔隙度提升效果愈加显著；对比分析 T2、T4、T5 处理结果表明，20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施对土壤毛管孔隙度的提升效果显著优于单施 20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂($P < 0.05$)。不同处理对土壤总孔隙度的提升效果与毛管孔隙度类似，各处理土壤总孔隙度大小关系为 $\text{T4} > \text{T3} > \text{T2} > \text{T1} > \text{T5} > \text{CK}$ ，随着沼渣堆肥的增加，其对土壤总孔隙度提升效果显著。综上，虽然沼渣堆肥低量添加(10%、20%)以及化学改良剂单施对土壤非毛管孔隙度的提升效果不明显，但可有效提升毛管孔隙度和总孔隙度，而沼渣堆肥高量添加(30%)较 CK 处理显著提升了土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总孔隙度($P < 0.05$)。



(柱图上方不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)，下同)

图 1 不同处理对土壤容重的影响

表 2 不同处理对土壤孔隙度的影响

孔隙度	CK	T1	T2	T3	T4	T5
非毛管孔隙度(%)	$3.06 \pm 0.76 \text{ b}$	$2.59 \pm 0.12 \text{ b}$	$2.63 \pm 0.48 \text{ b}$	$3.50 \pm 0.60 \text{ a}$	$2.41 \pm 0.07 \text{ b}$	$2.67 \pm 0.25 \text{ b}$
毛管孔隙度(%)	$49.18 \pm 2.37 \text{ d}$	$53.34 \pm 0.57 \text{ c}$	$53.46 \pm 0.34 \text{ bc}$	$55.38 \pm 1.17 \text{ b}$	$58.55 \pm 0.18 \text{ a}$	$52.51 \pm 0.24 \text{ c}$
总孔隙度(%)	$52.23 \pm 2.70 \text{ c}$	$55.93 \pm 0.62 \text{ b}$	$56.09 \pm 0.33 \text{ b}$	$58.89 \pm 0.81 \text{ a}$	$60.96 \pm 0.12 \text{ a}$	$55.17 \pm 0.28 \text{ b}$

注：表中同行不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)，下同。

2.1.3 土壤持水量 不同处理对土壤持水能力提升效果显著(图 2)，其中，T3 处理土壤饱和持水量最

大，为 600.4 g/kg ，较 CK 处理提升了 48.3%；其次是 T4 处理，为 593.8 g/kg ，较 CK 处理提升了 48.3%；

T5 处理相对较小, 较 CK 提升了 12.0%; 各处理土壤饱和和持水量大小关系为 T3>T4>T2>T1>T5>CK, 且除了 T1 和 T5 处理之间差异不明显, 其他各处理间差异均达到了显著水平($P<0.05$)。由 T1、T2、T3 处理土壤饱和和水量逐渐增加可知, 随着沼渣堆肥的增加, 显著提升了土壤饱和和持水量($P<0.05$); 由 T4 处理土壤饱和和水量显著高于 T2、T5 处理可知, 20% 沼渣堆肥和化学改良混施对土壤饱和和持水量的提升效果显著优于单施 20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂($P<0.05$)。不同处理对土壤田间持水量的提升效果与饱和和持水量类似, 各处理土壤田间持水量大小关系为 T4>T3>T2>T1>T5>CK, 且除 T1 和 T5 处理、T3 和 T4 处理之间差异不显著外, 各处理间差异均达到了显著水平($P<0.05$), 这与肖洋等^[16]利用沼渣提升农田土壤饱和和持水量和田间持水量的结果类似。

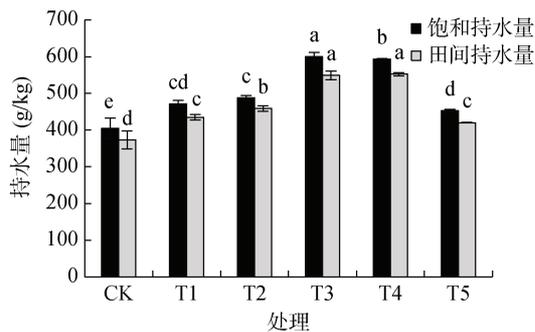


图 2 不同处理对土壤持水量的影响

2.1.4 土壤入渗率 不同处理对土壤入渗率有一定影响(图 3), 其中, T3 处理土壤入渗率最大, 为 103.64 mm/h, 较 CK 处理提升了 36.1 倍, 其次是 T4 处理, 为 76.95 mm/h, 较 CK 处理提升了 26.6 倍; 各处理土壤入渗率大小关系为 T3>T4>T2>T5>T1>CK, T3、T4 处理与其他各处理之间差异显著($P<0.05$)。由 CK、T1、T2、T3 处理土壤入渗率可知, 随着沼渣堆肥的增加, 其对土壤入渗率提升效果愈加显著; 对比分析 T2、T4、T5 处理土壤入渗率可知, 20% 沼渣堆肥和化学改良混施对土壤入渗率的提升效果显著优于单施 20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂($P<0.05$)。

2.2 不同处理对土壤化学性质的影响

2.2.1 土壤 pH 不同处理对土壤 pH 有一定影响(图 4), 其中 T1、T4、T5 处理土壤 pH 较小, 均为 8.87, 较 CK 处理降低了 3.2%, 其次是 T2、T3 处理, 均为 8.95, 较 CK 处理降低了 2.3%; 各处理土壤 pH 大小关系为 T4=T5=T1<T3=T2<CK, 且各改良处理土壤 pH 较 CK 处理均显著降低($P<0.05$)。由 CK、T1、

T2、T3 处理土壤 pH 可知, 沼渣堆肥可显著降低土壤 pH, 且 10% 沼渣堆肥处理改良效果优于 20%、30% 沼渣堆肥处理。

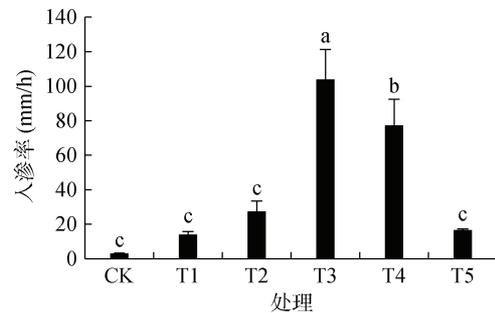


图 3 不同处理对土壤入渗率的影响

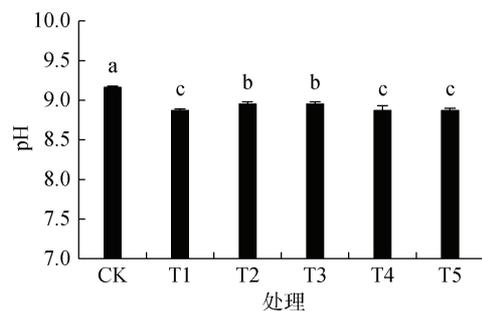


图 4 不同处理对土壤 pH 的影响

2.2.2 土壤 EC 不同处理对土壤 EC 提升效果显著(图 5), 其中, T3 处理土壤 EC 值最大, 为 0.561 mS/cm, 较 CK 处理提升了 321.8%; 其次是 T4 处理, 为 0.303 mS/cm, 较 CK 处理提升了 127.8%; 各处理土壤 EC 值大小关系为 T3>T4>T1>T5>T2>CK, 且各处理间差异均达到了显著水平($P<0.05$)。由 CK、T1、T2、T3 处理土壤 EC 值可知, 随着沼渣堆肥添加量的增加, EC 值有增加趋势; 对比 CK、T5 处理土壤 EC 值可知, 化学改良剂对提升土壤 EC 值有显著作用($P<0.05$)。

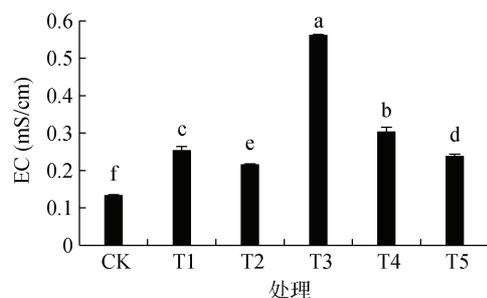


图 5 不同处理对土壤 EC 的影响

2.2.3 土壤有机质 不同处理提升土壤有机质含量作用显著(图 6), 其中, T3 处理土壤有机质含量最高, 为 31.88 g/kg, 较 CK 处理提升了 297.0%; 其次

是 T4 处理,为 27.62 g/kg,较 CK 处理提升了 244.0%; T5 处理与其他处理相比对土壤有机质提升作用相对较小,较 CK 处理提升了 16.7%; 各处理土壤有机质含量高低关系为 T3>T4>T2>T1>T5>CK,且各处理间差异均达到了显著水平($P<0.05$)。由 CK、T1、T2、T3 处理土壤有机质含量可知,随着沼渣堆肥添加量的增加,其对土壤有机质含量增加愈加显著,这与张春英等^[17]研究结果一致;对比 CK、T2、T4、T5 处理土壤有机质含量可知,20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施效果显著优于单施 20%沼渣堆肥、单施化学改良剂($P<0.05$)。

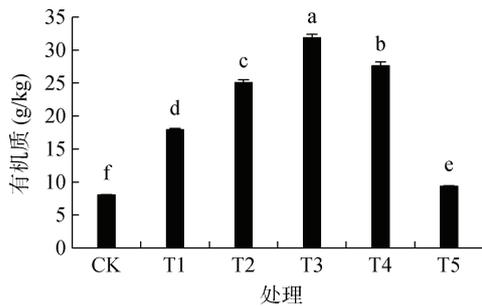


图 6 不同处理对土壤有机质的影响

2.2.4 土壤速效养分 不同处理对土壤速效养分含量影响明显(表 3),其中, T2 处理土壤水解性氮含

量最高,为 64.43 mg/kg,较 CK 处理提升了 320.3%; 其次是 T3 处理,为 62.62 mg/kg,较 CK 处理提升了 308.5%; 各处理土壤水解性氮含量高低关系为 T2>T3>T4>T1>T5>CK。由 CK、T1、T2、T3 处理土壤水解性氮含量可知,沼渣堆肥可显著提升土壤水解性氮含量($P<0.05$);分析 CK、T2、T4、T5 处理土壤水解性氮含量可知,20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施效果显著优于单施化学改良剂($P<0.05$),但与单施 20% 沼渣堆肥间差异不显著($P>0.05$)。不同处理对土壤速效钾、有效磷含量影响显著,其中 T3 处理土壤速效钾、有效磷含量最高,分别为 866.42、34.30 mg/kg,较 CK 处理增加了 423.8%、331.4%; 其次是 T4 处理,较 CK 处理增加了 406.9%、285.3%; T5 处理与其他处理相比对土壤速效钾、有效磷含量提升相对较小,较 CK 处理分别提升了 19.7%、40.5%; 各处理土壤速效钾、有效磷含量高低关系均为 T3>T4>T2>T1>T5>CK,且各处理间差异均达到显著水平($P<0.05$)。由 CK、T1、T2、T3 处理土壤速效钾、有效磷含量可知,随着沼渣堆肥的增加,土壤速效钾、有效磷含量均显著增加($P<0.05$),这与张春英等^[17]的研究结果类似;对比 CK、T2、T4、T5 处理可知,20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施效果显著优于单施 20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂($P<0.05$)。

表 3 不同处理对土壤速效养分的影响

速效养分	CK	T1	T2	T3	T4	T5
水解性氮(mg/kg)	15.33±1.07 c	27.00±1.62 b	64.43±6.91 a	62.62±0.73 a	59.13±3.65 a	20.04±2.68 c
速效钾(mg/kg)	165.40±2.28 f	481.16±6.29 d	707.97±1.64 c	866.42±1.15 a	838.40±2.43 b	197.93±1.63 e
有效磷(mg/kg)	7.95±0.97 f	13.01±0.34 d	20.93±1.69 c	34.30±1.70 a	30.63±0.27 b	11.17±0.67 e

2.3 不同处理土壤质量综合评价

为了综合评价不同处理对土壤质量的影响,将容重、饱和持水量、田间持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、入渗率、pH、EC、有机质、水解性氮、速效钾和有效磷 13 项指标分别设为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 、 X_9 、 X_{10} 、 X_{11} 、 X_{12} 和 X_{13} ,对该 13 项理化指标进行主成分分析,结果显示,提取出的 2 个主成分(表 4)累积方差贡献率为 92.02%,特征值分别为 10.07、1.90。

利用主成分成分矩阵和主成分载荷矩阵解释计算各主成分得分权重和得分系数,并将原始数据进行标准化(Z_{Xi} , $i=1, 2, \dots, 13$),得出 2 个主成分方程:
 $F_1 = -0.3139Z_{X1} + 0.3124Z_{X2} + 0.3130Z_{X3} + 0.0438Z_{X4} + 0.2859Z_{X5} + 0.2991Z_{X6} + 0.2982Z_{X7} - 0.1557 Z_{X8} + 0.2585Z_{X9} + 0.3004Z_{X10} + 0.2764Z_{X11} + 0.2997Z_{X12} + 0.3105Z_{X13}$;
 $F_2 = -0.0508Z_{X1} + 0.0073Z_{X2} - 0.0232Z_{X3} +$

$0.7043Z_{X4} - 0.2810Z_{X5} - 0.1953Z_{X6} + 0.1880Z_{X7} + 0.4995Z_{X8} + 0.2955Z_{X9} + 0.0472Z_{X10} + 0.0073Z_{X11} - 0.0131Z_{X12} + 0.0958Z_{X13}$ 。在土壤质量评价中,指标权重的确定至关重要,直接影响评价结果的准确性和可靠性,是土壤质量评价的一个关键问题,特征值在某种意义上也可看作反映各主成分影响度大小的指标^[18]。为此,本研究将每个主成分所对应的特征值占所提取主成分特征值总和的比例作为权重,计算得到主成分综合得分方程: $F = 0.8414F_1 + 0.1586F_2$,不同处理土壤质量综合得分如表 5 所示,得分大小关系为: T3>T4>T2>T1>T5>CK,即 T3 处理土壤质量最好,其次是 T4 处理,而 CK 处理土壤质量最差。由此可见,沼渣堆肥、化学改良剂对土壤质量均有改善作用,且 30% 沼渣堆肥处理最佳,20% 沼渣堆肥和 3 kg/m³ 化学改良剂混施处理对土壤质量改良作用优于单施 20% 沼渣堆肥、单施 3 kg/m³ 化学改良剂处理。

表 4 土壤成分矩阵、特征向量及贡献率

统计指标	主成分 1	主成分 2
容重	-0.996	-0.070
饱和持水量	0.991	0.010
田间持水量	0.993	-0.032
非毛管孔隙度	0.139	0.970
毛管孔隙度	0.907	-0.387
总孔隙度	0.949	-0.269
入渗率	0.946	0.259
pH	-0.494	0.688
EC	0.820	0.407
有机质	0.953	0.065
水解性氮	0.877	0.010
速效钾	0.951	-0.018
有效磷	0.985	0.132
特征值	10.07	1.90
贡献率 (%)	77.43	14.59
累积贡献率 (%)	77.43	92.02

表 5 不同处理土壤质量综合评价统计结果

处理	主成分 F_1	主成分 F_2	综合得分 F	排名
CK	-4.21	1.4	-3.32	6
T1	-1.12	-0.91	-1.09	4
T2	0.21	-0.4	0.11	3
T3	3.94	2.02	3.64	1
T4	3.34	-1.38	2.59	2
T5	-2.15	-0.73	-1.93	5

3 讨论

搬迁地作为当前特大城市绿化建设的主要土地资源之一,由于其土壤质量差,用于城市绿化建设往往受限。梁晶等^[3]研究表明,搬迁地土壤物理、化学性质是其绿化障碍的主要因子,制约了搬迁地绿化建设。本研究表明,沼渣堆肥、化学改良剂对搬迁地土壤物理性质影响明显,主要表现在沼渣堆肥对土壤容重降低效果显著,且随着沼渣堆肥添加量的增加,其效果越佳,这主要是由于沼渣堆肥物理结构松散,质地轻,低于土壤密度^[19],且沼渣堆肥能有效减缓雨水对土壤的击打和自然沉降。不同施加量沼渣堆肥均显著提升土壤毛管孔隙度和总孔隙度($P<0.05$),10%、20% 沼渣堆肥对土壤非毛管孔隙度改善不明显,而30% 沼渣堆肥对土壤非毛管孔隙度提升显著,这主要与沼渣堆肥本身非毛管孔隙度低而总孔隙度和毛管孔隙度高直接相关^[20]。沼渣堆肥对土壤持水能力提升显著,随着沼渣堆肥添加量增加,土壤饱和持水量、田间持水量均显著提高($P<0.05$),这主要是由于沼渣堆肥毛管孔隙度和总孔隙度高,土壤孔隙中可蓄积的水分多^[21],从而有效提升了土壤持水能力。10%、

20% 沼渣堆肥对土壤入渗率有所提升,但效果不显著,而30% 沼渣堆肥对土壤入渗率提升效果显著($P<0.05$),这主要受土壤孔隙影响,孔隙度直接影响土壤入渗^[22]。20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施对土壤各物理性质的改善作用显著优于单施20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂,这主要是由于沼渣堆肥和化学改良剂混施对土壤团聚体的改良作用优于单一改良材料^[23],而团聚体直接影响土壤孔隙、入渗、持水能力等物理性质^[24-25]。

沼渣堆肥、化学改良剂对土壤化学性质影响明显,主要表现在沼渣堆肥、化学改良剂均对土壤 pH 降低效果显著($P<0.05$),尤其是化学改良剂降低效果最显著。这可能是由于化学改良剂中的硫酸钙与土壤中的钠离子进行置换,可形成酸性离子^[26],且沼渣堆肥富含腐殖酸,含有大量酚羟基、羧基,能电离出氢离子^[27],从而降低土壤 pH。沼渣堆肥、化学改良剂对土壤 EC 值提升显著($P<0.05$),随着沼渣堆肥的增加而有增加趋势,这主要是由于沼渣堆肥自身含有的盐分离子较高所致^[28],而化学改良剂增加了土壤中的可溶性离子,从而增加了土壤 EC 值。沼渣堆肥对土壤有机质含量提升显著($P<0.05$),且随着沼渣堆肥的增加显著增加,原因是沼渣堆肥自身有机质含量丰富;沼渣堆肥对土壤水解性氮、速效钾、有效磷含量增加显著($P<0.05$),主要是因为沼渣堆肥中富含氮、磷、钾元素^[29]。20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施对土壤有机质、速效钾、有效磷含量的增加显著高于单施20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂,这主要是沼渣堆肥富含有机质和腐殖酸类物质,而化学改良剂能够改善土壤物理结构,二者共同促进土壤生物活动^[30]代谢产生有机物质,并将土壤总养分转化成速效养分。

基于主成分分析的搬迁地土壤质量改良效果综合评价表明,沼渣堆肥、化学改良剂对土壤质量均有改良作用,随着沼渣堆肥用量的增加,其对土壤质量的改良效果越好,30% 沼渣堆肥处理土壤质量最佳,这主要是由于沼渣堆肥不仅改善了土壤物理性质,而且也改善了土壤化学性质;另外20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施对土壤质量改良效果优于单施20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂,这可能是由于化学改良剂 β -环糊精、氧化铁、硫酸钙均对土壤团粒结构有很好的改良作用^[31-33],改善了土壤的水、肥、气、热平衡,并与沼渣堆肥共同作用,对土壤容重、孔隙度、持水量和入渗率等物理性质改良效果更加明显。

4 结论

1)厨余垃圾沼渣堆肥能显著改善搬迁地土壤理化性质,主要表现为显著降低土壤容重,提高土壤毛管孔隙度、总孔隙度、饱和持水量、田间持水量和入渗率等物理性质,显著降低土壤 pH,提高土壤 EC、有机质、水解性氮、有效磷和速效钾等化学性质,且随着沼渣堆肥施加量增加,其对土壤理化性质改良效果越显著。整体而言,各处理中 30% 沼渣堆肥对土壤理化性质改良效果最好,20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施土壤理化性改良效果优于单施 20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂。

2)基于主成分分析的搬迁地土壤质量改良效果综合评价表明,各处理对搬迁地土壤质量均有改良作用,其中 30% 沼渣堆肥对土壤质量改良最佳,20% 沼渣堆肥和化学改良剂混施对土壤质量改良作用优于单施 20% 沼渣堆肥、单施化学改良剂。

参考文献:

- [1] 殷明,杨博,郑思俊. 人工型城市困难立地的园林绿化利用动态趋势研究——以上海市主城区为例[J]. 园林, 2021, 38(2): 13-18.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 伍海兵,何小丽,梁晶. 园林绿化用搬迁地土壤肥力综合评价[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 1076-1081.
- [5] 李丽雅,丁蕴铮,侯晓丽,等. 城市土壤特性与绿化树生长势衰弱关系研究[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2006, 38(3): 124-127.
- [6] 张晓花,王克勤,宋娅丽,等. 厨余垃圾堆肥对烤烟土壤酶活性和细菌群落结构的影响[J]. 土壤, 2023, 55(2): 321-330.
- [7] 韦茜佳,周若昕,李娜英,等. 生活污泥-厨余-存量垃圾多元物料蚯蚓堆肥工艺及应用环境风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(10): 1354-1364.
- [8] 董倩倩,林永锋,俞仕福,等. 厨余堆肥对枇杷产量品质及土壤性质的影响[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(11): 2211-2215.
- [9] 梁晶,张青青,张浪. 氨基酸、木醋液与湿垃圾堆肥配施对搬迁地土壤物理性质的影响[J]. 上海农业学报, 2022, 38(3): 54-59.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 绿化用有机基质: GB/T 33891—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 张万儒. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [12] 徐秋桐,孔樟良,章明奎. 不同有机废弃物改良新垦耕地的综合效果评价[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 567-576.
- [13] 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.
- [14] 伍海兵,方海兰,彭红玲,等. 不同配比改良材料对典型城市绿地土壤物理性质的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4): 703-709.
- [15] 伍海兵,方海兰,李爱平. 常用绿地土壤改良材料对土壤水分入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 317-323, 330.
- [16] 肖洋,田里,路运才,等. 沼液和沼渣及化肥配施对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 78-81.
- [17] 张春英,罗玉兰,田龚,等. 厨余垃圾堆肥对鸡冠花及土壤性质的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(10): 119-123.
- [18] 李金涛,李守岭,王晓媛,等. 胶园间作土壤养分及土壤肥力的综合评价[J]. 江西农业学报, 2020, 32(9): 73-79.
- [19] 刘丽雪,陈海涛,韩永俊. 沼渣物理特性及沼渣纤维化学成分测定与分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 277-280.
- [20] 周静,史向远,王保平,等. 几种有机物料与市售草炭基质理化性状比较分析[J]. 北方园艺, 2016(5): 186-190.
- [21] 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.
- [22] 陈露,张海林,易军,等. 水耕历史对稻田-田埂过渡区土壤物理性质与水-氮分布的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 409-423.
- [23] 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[J]. 土壤, 2023, 55(4): 911-917.
- [24] Letey J. Relationship between soil physical properties and crop production[M]//Stewart B A, ed. Advances in Soil Science. New York, NY: Springer New York, 1958: 277-294.
- [25] 蒋腊梅,白桂芬,吕光辉,等. 不同管理模式对干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 15-21, 39.
- [26] 陈炳铭,冯文婷,王玉刚,等. 脱硫石膏在碱土改良中的无机固碳作用[J]. 土壤学报, 2024, 61(1): 247-257.
- [27] 茹铁军,王家盛. 腐植酸与腐植酸肥料的发展[J]. 磷肥与复肥, 2007, 22(4): 51-53.
- [28] 马换梅,高波,郑苇,等. 餐厨垃圾厌氧消化残余物土壤利用现状调研分析[J]. 中国沼气, 2021, 39(3): 27-34.
- [29] Knoop C, Dornack C, Raab T. Nutrient and heavy metal accumulation in municipal organic waste from separate collection during anaerobic digestion in a two-stage laboratory biogas plant[J]. Bioresource Technology, 2017, 239: 437-446.
- [30] 张茜. 沼肥的利用现状及前景分析[J]. 广东化工, 2018, 45(18): 161-162, 149.
- [31] 严建立,章明奎,王道泽. 不同调理剂改良低丘新垦耕地土壤物理性状的效果[J]. 中国农学通报, 2021, 37(2): 67-73.
- [32] 何群,陈家坊,许祖谔. 土壤中氧化铁的转化及其对土壤结构的影响[J]. 土壤学报, 1981, 18(4): 326-334.
- [33] 杜雅仙,黄菊莹,康扬眉,等. 脱硫石膏与结构改良剂配合施用对龟裂碱土理化性状和水稻生长的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(5): 46-51, 57.