

上海市搬迁地土壤团聚体的分布特征

梁晶^{1,2}, 伍海兵^{1,2}, 张浪^{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: [目的] 分析城市典型搬迁地土壤团聚体的分布特征, 为搬迁地土壤绿化种植提供技术支撑。[方法] 以上海市城中村和工业企业两种典型搬迁地土壤为研究对象, 采集 27 个典型搬迁地土样, 采用干筛和湿筛法分别测定搬迁地土壤非水稳性团聚体和水稳性团聚体, 分析了上海搬迁地土壤团聚体分布特性, 通过单因素方差法分析了不同搬迁地土壤团聚体的差异性, 并对土壤团聚体与土壤基本理化性质进行了相关性分析。[结果] 上海搬迁地土壤非水稳性团聚体以粒径 ≥ 2.0 mm 的大团聚体为主, 所占比例达 64.9%; 土壤水稳性团聚体以粒径 < 0.106 mm 的微团聚体为主, 所占比例高达 73.4%; 土壤团聚体破坏率大, 为 79.8%。城中村搬迁地土壤非水稳性团粒结构体(粒径 ≥ 0.25 mm)显著高于工业企业搬迁地($p < 0.05$), 但水稳性团粒结构体差异不明显; 工业企业搬迁地土壤团聚体破坏率显著高于城中村搬迁地($p < 0.05$)。土壤团聚体破坏率与土壤容重呈极显著正相关性, 与土壤田间持水量、总孔隙度及有机质则呈极显著负相关性($p < 0.01$)。[结论] 上海市搬迁地土壤团粒结构体差, 团聚体破坏率高, 但城中村土壤团粒结构体及稳定性优于工业企业搬迁地。搬迁地土壤团聚体破坏率主要受土壤容重、田间持水量、总孔隙度及有机质等因子影响。

关键词: 搬迁地; 土壤团聚体; 分布特征; 相关性分析; 上海市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)02-0059-08

中图分类号: S152.7, S152.5

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.02.009; Liang Jing, Wu Haibing, Zhang Lang. Distribution characteristics of soil aggregates in urban relocation sites of Shanghai City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 59-66.

Distribution Characteristics of Soil Aggregates in Urban Relocation Sites of Shanghai City

Liang Jing^{1,2}, Wu Haibing^{1,2}, Zhang Lang^{1,2}

(1. Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Shanghai 200232, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Site, Shanghai 200232, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of soil aggregates in typical relocation sites of Shanghai City were analyzed in order to provide technical support for soil afforestation in relocation sites. [Methods] Taking the soils of two typical relocation sites at urban villages and industrial enterprises as the research objects, 27 soil samples of typical relocation sites were collected, and dry-sieving and wet-sieving methods were used to determine soil non-water stable aggregates and water stable aggregates, respectively. And the distribution characteristics of soil aggregates in relocation sites were analyzed through single-factor analysis of variance. The differences of soil aggregates in different relocation sites were analyzed, and the correlations between soil aggregates and the basic physical and chemical properties of soil were analyzed. [Results] The soil non-water stable aggregates were mainly large aggregates with particle size ≥ 2.0 mm, accounting for 64.9%. Soil water-stable aggregates were dominated by micro-aggregates with particle size < 0.106 mm, accounting for 73.4%. The destruction rate of soil aggregates was 79.8%. Soil non-water stable aggregates

收稿日期: 2021-08-25

修回日期: 2021-10-26

资助项目: 上海市绿化和市容管理局科技攻关项目“湿垃圾处置固态残余物资源化利用途径研究”(G200202); 上海市绿化和市容管理局科技攻关项目“城市污染土壤生态修复关键技术研发与集成应用”(G190202)

第一作者: 梁晶(1981—), 女(汉族), 山西省长治市人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事城市土壤质量评价、修复及有机废弃物再利用研究。Email: liangjing336@163.com。

通讯作者: 张浪(1964—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事风景园林规划设计、科研和专业管理研究。Email: 1132467518@qq.com。

(particle size ≥ 0.25 mm) in the relocation site of urban village were significantly higher than that in the relocation site of industrial enterprises ($p < 0.05$), but there was no significant difference in water-stable aggregates. The soil aggregate damage rate of industrial enterprises was significantly higher than that in the relocation sites of urban villages ($p < 0.05$). The soil aggregate damage rate was significantly positively correlated with soil bulk density, while significantly negatively correlated with soil field capacity, total porosity and organic matter ($p < 0.01$). [Conclusion] The overall soil aggregate structure in the relocation site of the Shanghai City is poor, and the soil aggregate damage rate is high, but the soil aggregate structure and stability of the urban village is better than that of the industrial enterprises. The soil aggregate damage rate is mainly affected by soil bulk density, field capacity, total porosity and organic matter.

Keywords: relocation sites; soil aggregates; distribution characteristics; correlation analysis; Shanghai City

随着城市的快速发展,人们对城市生态环境要求的提升,导致园林绿化作为城市发展规划的重要组成部分,是唯一有生命的基础设施,也是生态环境建设的重要内容之一,园林绿化质量直接影响到城市文明和生态环境建设的质量和水平^[1]。近年来,绿化建设在我国得到前所未有的发展,尤其是上海,如《上海市生态空间专项规划(2018—2035年)》中提出,到2035年上海的生态用地占陆域面积的比重不低于60%,森林覆盖率提升至23%左右,人均公园绿地面积实现13 m²以上^[2]。然而,上海城市土地资源日趋紧张,要实现该目标,土地置换开发已成为城市土地可持续利用的重要手段^[3],原有高污染的化工区、高能耗的企业以及城中村等逐步从城市中心区搬迁,越来越多的城市园林绿化需在搬迁地、建(构)筑物外立面等“城市困难立地”上开展建设^[4-5],当前上海中心城区已规未建绿地中工业企业、城中村等困难立地所占比例达到76%,其中工业企业搬迁地等一类城市困难立地所占比例达35%,城中村搬迁地等二类城市困难立地所占比例达50%^[6]。但搬迁地土壤常常受到不同程度的退化,如土壤物理性质恶化、土壤生物活性破坏、土壤营养物质流失等,严重影响了植物的生长,尤其是土壤团聚体的破坏,阻碍大团聚体的再次形成,加剧土壤质量的退化,直接阻碍搬迁地园林绿化的建设。土壤团聚体作为土壤结构的基本组成单元,不仅综合土壤中各种不同形状、大小、孔隙度和水稳性的团聚体,而且是土壤中养分的载体和微生物的生存环境^[7-8]。土壤团聚体数量多少和质量好坏在一定程度上反映土壤质量水平,也是土壤保水、保肥的基础,直接影响着土壤水肥库作用持续性^[9],良好的土壤团聚体可使土壤表面形成蒸发界面,降低土壤地表径流和土壤营养流失,为植物生长提供良好的生长条件^[10]。目前对土壤团聚体的研究多集中在农业或林业土壤上,如王浩田等^[11]开展了皖南地区不同年限烟—稻轮作的土壤团聚体组成研究,白娜玲等^[12]进行了不同施肥方式对土壤团聚体分布影响的研究,喻

国军等^[13]研究了造林对土壤团聚体稳定性的影响;对于城市土壤,学者们更多关注的是其土壤养分、污染特征、修复技术等研究^[14-17],对城市土壤团聚体的相关研究较少,少量报道也是针对已种植植物的绿化土壤团聚体分布特征^[18],鲜有报道城市搬迁地土壤团聚体分布特征规律的相关研究。城市搬迁地土壤受人活动的强烈影响,除自然土壤物质外还包含大量的人为物质,如建筑垃圾、生活垃圾、工业废弃物和污染物,部分土壤含石块和砾石高达80%以上^[19],各种侵入体进入城市土壤中与自然土壤混合在一起,而且在大规模的建设中,土壤经过长期、无序地挖掘、搬运、混合,形成无层次和无规律的土体结构,往往改变土壤原有的特性^[20]。为此,本研究以上海市城中村搬迁地和工业企业搬迁地等典型城市困难立地为研究对象,对上海市搬迁地土壤团聚体特征进行研究,分析搬迁地土壤团聚体组成、分布规律及稳定性,并通过搬迁地土壤团聚体与土壤基本理化性质的相关关系,探讨搬迁地土壤团粒结构的分布特征,以期为搬迁地土壤团粒结构改善提供数据支撑,为城市困难立地园林绿化的建设提供技术支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

上海市地处东经120°52′至122°12′,北纬30°40′至31°53′,属亚热带季风性气候,年均气温17.6℃,年均日照1886 h,年均降雨量1173 mm。上海位于长江入海口、太湖流域东缘,是长江三角洲冲积平原的一部分。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集与处理 本研究主要选取了10个较典型的城中村和工业企业搬迁地样地为研究对象,其中,选取了5个城中村搬迁地样地,设置了13个样点;选取了5个工业企业搬迁地样地,设置了14个样点,总共设置了27个较具代表性的样点(表1),于2019年11月,分别采集各搬迁地表层0—30 cm原

状土(不破坏土壤结构),每个样点的土壤样品均采用“S形法”由 8 个取样点的样品混合组成,并采用四分法保留 2 kg 左右样品带回实验室(运输的过程中,减少对土样的扰动),将原状土壤沿自然裂缝剥离至 1 cm 左右,将土样平摊在阴凉干燥处,风干后剔除土样中的石块和腐殖质残留物,取出 500 g 左右土进行土壤团聚体分析。同时,每个样点用 100 cm³ 的环刀进行现场取样并带回实验室,每个样点 5 组重复,用于土壤容重、田间持水量和总孔隙度的测定。

表 1 土壤采样点分布情况

样地编号	样地位置	样地类型	样点数/个
Y ₁	浦东新区	工业企业搬迁地	4
Y ₂	浦东新区	城中村搬迁地	3
Y ₃	普陀区	城中村搬迁地	2
Y ₄	普陀区	工业企业搬迁地	2
Y ₅	普陀区	城中村搬迁地	2
Y ₆	普陀区	工业企业搬迁地	2
Y ₇	嘉定区	城中村搬迁地	3
Y ₈	嘉定区	工业企业搬迁地	2
Y ₉	青浦区	工业企业搬迁地	4
Y ₁₀	青浦区	城中村搬迁地	3

1.2.2 测定方法 土壤非水稳性团聚体采用干筛法进行测定^[21]。取风干土使其通过一套直径 20 cm,孔径由上到下顺序为 2,1,0.5,0.25 和 0.106 mm 的筛组,筛组上方带盖防止振动洒落,下方有底盒收集 <0.106 mm 粒级土样。手动筛分分别得到 >2 mm, 1~2 mm, 0.5~1.0 mm, 0.25~0.5 mm, 0.106~0.25 mm 和 <0.106 mm 的各级土壤团粒,最后将各级筛网上的土样分别收集称重,计算出各级干筛团聚体重量占土样总重量的百分比。土壤水稳性团聚体采用 DIK-2012 土壤团粒分析仪进行测定^[22],具体为:取过 10 mm 孔径筛子的风干土 50 g 左右,放入到烧杯中,添加蒸馏水直到完全淹没,并放置 24 h,放入到

DIK-2012 土壤团粒分析仪中,进行上下振荡 30 min,然后分别洗出孔径 2,1,0.5,0.25,0.106 mm 筛中土壤至烧杯中,放入 105 °C 烘箱中烘干,分别得到 >2, 1~2, 0.5~1.0, 0.25~0.5, 0.106~0.25 和 <0.106 mm 各级水稳性土壤团粒重量,计算出各级水稳性团聚体重量占土样总重量的百分比。此外土壤容重、总孔隙度和田间持水量采用环刀法,土壤 pH 值采用电位法测定(水土比 2.5:1),土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法,土壤水解性氮采用碱解—扩散法,土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提—比色,土壤速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法。详细测定方法参考《森林土壤分析方法》测定^[21]。

1.2.3 数据分析 试验所得数据采用 Excel 2007 软件进行作图,利用 SPSS 17.0 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($\alpha = 0.05$),用 Pearson 法对土壤基本理化性质和土壤团粒组成进行相关分析。图中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 搬迁地土壤团粒组成分布特征

2.1.1 土壤非水稳性团聚体分布特征 上海搬迁地土壤非水稳性团聚体分布详见表 2。从表 2 可知,土壤非水稳性团聚体各粒径含量大小顺序为:(≥ 2 mm) > (1~2 mm) > (0.5~1.0 mm) > (0.25~0.5 mm),其中以 ≥ 2 mm 非水稳性团聚体含量最多,所占比例达 64.9%,0.25~0.5 mm 非水稳性团聚体含量最小,所占比例为 4.80%。搬迁地土壤非水稳性微团聚体(<0.25 mm)分布较少,仅为 8.70%,在微团聚体中以粒径 <0.106 mm 占的比例相对较高,比例为 5.95%。由此可见,搬迁地土壤非水稳性团聚体主要以团粒结构体为主,所占比例高达 91.3%,这可能与上海本底土壤质地偏黏有关^[23],土壤容易结块,较易形成一定的团粒结构。

表 2 搬迁地土壤非水稳性和水稳性团聚体分布及组成($n=27$)

团聚体类型	≥ 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/%	≥ 0.25 mm/%	<0.25 mm/%	团聚体 破坏率/%
土壤非水稳性团聚体	64.9±18.0	13.6±5.83	7.93±4.61	4.80±3.30	2.72±2.09	5.95±5.49	91.3±6.61	8.70±6.61	79.8±17.4
土壤水稳性团聚体	6.10±7.65	2.80±2.83	3.46±2.95	5.76±3.97	8.42±4.78	73.4±17.5	18.2±15.2	81.8±15.2	

注:团聚体破坏率=(土壤非水稳性团聚体(≥ 0.25 mm) - 土壤水稳性团聚体(≥ 0.25 mm))/土壤非水稳性团聚体(≥ 0.25 mm)×100%

2.1.2 土壤水稳性团聚体分布特征 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],其稳定性在一定程度上是反映土壤结构的稳定性,与土壤的抗侵蚀能力以及环境质量有着密

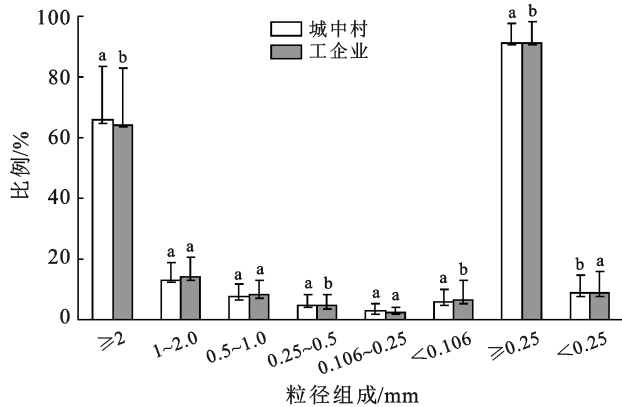
切的关系^[25],也是评价判断土壤质量是否发生退化的重要指标^[26]。从表 2 上海搬迁地土壤水稳性团聚体分布可以得知,与土壤非水稳性团聚体分布特征不同,土壤水稳性团聚体各粒径含量大小顺序为:(≥ 2 mm) >

(0.25~0.5 mm) > (0.5~1.0 mm) > (1~2 mm), 其中以 ≥ 2 mm 水稳性团聚体含量相对最多, 占比为 6.10%, 1~2 mm 水稳性团聚体含量最小, 所占比例为 2.80%。搬迁地土壤水稳性微团聚体 (<0.25 mm) 分布较多, 主要以 <0.106 mm 粒径的水稳性微团聚体为主, 所占比例高达 73.4%。由此可见, 搬迁地土壤水稳性团聚体主要以非团粒结构体为主, 所占比例高达 81.8%, 而团粒结构体仅为 18.2%, 土壤团粒结构较差。

2.1.3 土壤团粒结构稳定性 土壤团粒结构的稳定性直接影响着土壤水分的运输和存储、土壤通气性和土壤侵蚀等^[27-28]。一般用土壤团聚体破坏率反映土壤团粒结构的稳定性, 即团聚体破坏率愈小, 土壤团粒结构的稳定性越好, 土壤质量越佳。从表 2 可以发现, 上海搬迁地土壤团聚体破坏率较大, 高达 79.8%, 即搬迁地土壤团粒结构稳定性差。由此可见, 上海搬迁地土壤团粒结构不稳定, 主要以非稳定团粒结构组成, 在外界作用下, 极易遭到破坏。

2.2 不同类型搬迁地土壤团粒组成分布特征

2.2.1 不同类型搬迁地土壤非水稳性团聚体 不同的土地利用方式对团聚体含量、不同粒径团聚体组成分布等存在重要影响^[29], 不同类型搬迁地土壤非水稳性团聚体存在一定差异(图 1)。其中城中村搬迁地土壤粒径 ≥ 2 mm 和 0.25~0.5 mm 的大团聚体含量显著高于工业企业搬迁地 ($p < 0.05$), 而土壤粒径 <0.106 mm 的微团聚体含量显著低于工业企业搬迁地 ($p < 0.05$), 而城中村搬迁地和工业企业搬迁地土壤其他粒径差异不明显 ($p > 0.05$)。另外, 城中村搬迁地土壤团粒结构体 (≥ 0.25 mm) 显著高于工业企业搬迁地 ($p < 0.05$)。



注: 图中同一粒径上的不同小写字母表示不同搬迁地土壤差异显著 ($p < 0.05$)。下同

图 1 不同类型搬迁地土壤非水稳性团聚体

2.2.2 不同类型搬迁地土壤水稳性团聚体 不同类型搬迁地土壤水稳性团聚体也存在一定差异(图 2),

其中城中村搬迁地土壤粒径为 0.106~0.25 mm 的微团聚体含量显著低于工业企业搬迁地 ($p < 0.05$), 而城中村和工业企业搬迁地土壤中其他粒径分布差异不显著 ($p > 0.05$)。另外, 虽然城中村搬迁地土壤团粒结构体 (≥ 0.25 mm) 与工业企业搬迁地 ($p > 0.05$) 差异不显著, 但城中村搬迁地土壤团粒结构体高于工业企业搬迁地, 高出比例达 38.9%。

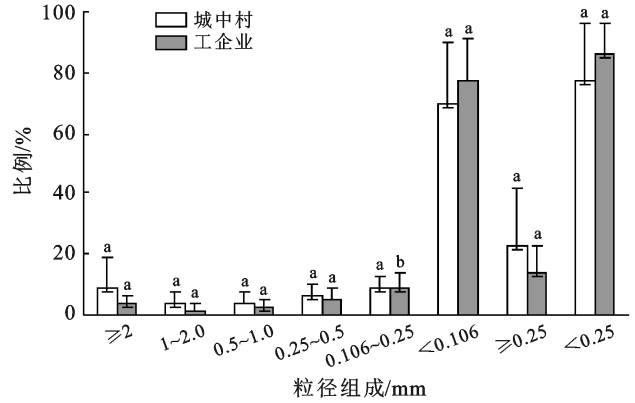


图 2 不同类型搬迁地土壤水稳性团聚体

2.2.3 不同类型搬迁地土壤团粒结构稳定性 图 3 表示不同类型搬迁地土壤团聚体破坏率。从图 3 可以发现, 工业企业搬迁地土壤团聚体破坏率高于城中村搬迁地, 高出 13.9%, 差异达到了显著水平 ($p < 0.05$)。由此可见, 城中村搬迁地土壤团粒结构稳定性优于工业企业搬迁地, 即说明城中村搬迁地土壤质量优于工业企业搬迁地。

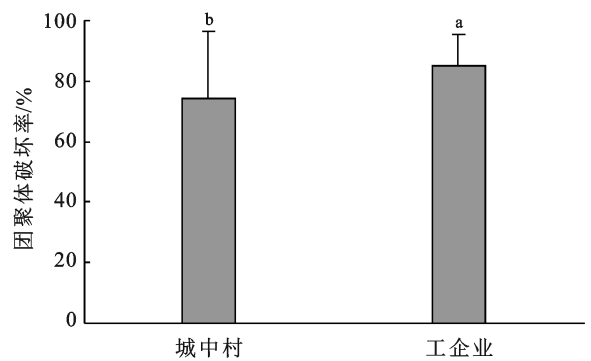


图 3 不同类型搬迁地土壤团聚体破坏率

2.3 搬迁地土壤团粒组成与基本理化性质相关性分析

通常土壤团粒结构的形成与土壤有机质、容重等土壤理化性质有关。从表 3 土壤团粒组成与土壤基本理化性质的相关性可以看出, 搬迁地土壤非水稳性团聚体与土壤理化性质具有一定相关性, 主要表现在大团聚体中粒径 ≥ 2 mm, 0.5~1.0 mm, 0.25~0.5 mm 与土壤 pH 值显著相关 ($p < 0.05$), 而微团聚体中粒

径 0.106~0.25 mm 与土壤容重、田间持水量、总孔隙度及 pH 值均显著相关 ($p < 0.05$), 尤其是与容重和田间持水量达到了极显著相关 ($p < 0.01$)。另外, 土壤团粒结构体 (≥ 0.25 mm) 与 pH 具有显著相关性 ($p < 0.05$)。

土壤水稳性团聚体与土壤理化性质具有一定相关性(表 3), 其中粒径 ≥ 2 mm 的大团聚体与田间持水量、容重及总孔隙度均达到了极显著相关性 ($p < 0.01$); 粒径 1~2 mm 的团聚体与容重、田间持水量及总孔隙度达到了极显著相关性 ($p < 0.01$), 与有机质达到了显著相关性水平 ($p < 0.05$); 粒径 0.5~1.0 mm 的团聚体与有机质、容重、田间持水量及总孔隙度具有极显著相关性 ($p < 0.01$), 与水解氮达到了显著相关性 ($p < 0.05$);

粒径 0.25~0.5 mm 团聚体与有机质、有效磷及水解氮具有极显著相关性 ($p < 0.01$), 与总孔隙度具有显著相关性 ($p < 0.05$)。而粒径 0.106~0.25 mm 的微团聚体与有机质达到了极显著相关水平 ($p < 0.01$); 粒径 < 0.106 mm 的微团聚体与容重、有机质、田间持水量及总孔隙度具有极显著相关性 ($p < 0.01$)。另外, 土壤团粒结构体 (≥ 0.25 mm) 与容重、田间持水量、总孔隙度及有机质也均达到了极显著相关水平 ($p < 0.01$), 这与章明奎等研究结果相一致^[30]。由此可见搬迁地土壤水稳性团聚体更易影响土壤理化性质。土壤团聚体破坏率与土壤容重达到了极显著正相关性水平 ($p < 0.01$), 与土壤田间持水量、有机质及总孔隙度则具有极显著负相关性 ($p < 0.01$)。

表 3 土壤团粒组成与基本理化性质相关性分析

项 目	容重	田间持水量	总孔隙度	pH 值	有机质	水解氮	有效磷	速效钾	
非水稳性团粒组成	≥ 2 mm	0.365	-0.323	-0.360	-0.405*	-0.196	0.190	0.243	0.001
	1~2.0 mm	-0.255	0.203	0.233	0.310	0.257	-0.087	-0.172	-0.088
	0.5~1.0 mm	-0.316	0.271	0.291	0.425*	0.281	-0.130	-0.195	0.066
	0.25~0.5 mm	-0.348	0.298	0.282	0.449*	0.350	-0.087	-0.144	0.051
	0.106~0.25 mm	-0.603**	0.541**	0.480*	0.460*	0.337	-0.091	-0.198	0.247
	< 0.106 mm	-0.221	0.232	0.334	0.198	-0.204	-0.333	-0.289	-0.091
	≥ 0.25 mm	0.375	-0.364	-0.430*	-0.311	0.063	0.306	0.303	-0.003
水稳性团粒组成	< 0.25 mm	-0.375	0.364	0.430*	0.311	-0.063	-0.306	-0.303	0.003
	≥ 2 mm	-0.762**	0.807**	0.579**	0.303	0.226	0.030	0.095	0.366
	1~2.0 mm	-0.770**	0.765**	0.574**	0.289	0.482*	0.226	0.161	0.283
	0.5~1.0 mm	-0.654**	0.595**	0.499**	0.234	0.737**	0.438*	0.346	0.132
	0.25~0.5 mm	-0.361	0.295	0.381*	0.158	0.806**	0.590**	0.596**	-0.005
	0.106~0.25 mm	0.029	-0.084	-0.042	0.193	0.546**	0.294	0.285	-0.112
	< 0.106 mm	0.639**	-0.619**	-0.503**	-0.306	-0.630**	-0.336	-0.337	-0.196
≥ 0.25 mm	-0.746**	0.739**	0.593**	0.292	0.555**	0.295	0.299	0.261	
< 0.25 mm	0.746**	-0.739**	-0.593**	-0.292	-0.555**	-0.295	-0.299	-0.261	
团聚体破坏率	0.768**	-0.764**	-0.610**	-0.310	-0.532**	-0.258	-0.252	-0.267	

注: “*”表示相关性达到了显著水平 ($p < 0.05$); “**”表示相关性达到了极显著水平 ($p < 0.01$)

3 讨论

城市搬迁地作为当前大中城市进行绿地景观建设的主要土地空间资源, 其土壤理化性质尤其是土壤物理结构对植物生长至关重要, 有研究表明公园绿地中, 95% 的树木死亡是由于土壤物理性质退化导致的^[31]。土壤团聚体的粒径分布不仅反映土壤结构状况^[32], 且影响着土壤的通气性、渗透性等, 是评价土壤结构的重要指标^[33-34]。研究土壤团聚体的组成、分布规律及稳定性对城市搬迁地绿化景观营建具有作用。团聚体通过稳定土壤的结构而降低其水土流失, 从而起到水土保持作用。一般将 ≥ 0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体。它是维持土壤结构稳定的基础,

其含量越高, 土壤结构的稳定性越大^[35]。土壤中不同粒级大小团聚体所占比例, 可表明团聚体的机械稳定性。本研究采用干筛和湿筛法所得上海搬迁地土壤团聚体组成分布差异较为明显, 干筛法反映的是原状土中非水稳性团聚体的总体状况, 而湿筛法所反映的是土壤中水稳性团聚体的分布状况, 经过湿筛土壤非水稳定性团聚体易经过水的冲刷而破碎成小的微团聚体。上海市搬迁地土壤非水稳性团聚体主要以粒径 ≥ 2.0 mm 的大团聚体为主, 微团聚体含量较少, 土壤团粒结构体含量较高 (≥ 0.25 mm), 高达 91.3%, 这可能由于上海市本底土壤质地偏黏^[36], 土壤中的微团聚体在自然状态下容易粘结在一起, 形成大团聚体。然而土壤水稳性团聚体主要以粒径 < 0.106 mm

的微团聚体为主,所占比例高达 73.4%,土壤团粒结构体含量较低,仅为 18.2%,与一般人工林地土壤水稳性团粒体达 62%以上^[37]及农田土壤达 49%以上^[38]差距较大,城市搬迁地土壤结构整体较差。搬迁地土壤团聚体破坏率大,高达 79.8%,土壤团粒结构稳定性较差,形成的团粒结构体易受到外力作用遭到破坏,影响土壤团粒结构的稳定性因素众多,如土地利用方式、植被覆盖、管理措施、气候条件等均会影响土壤团粒结构的稳定性^[39-40],而上海搬迁地土壤结构稳定差可能主要是由于土地利用方式及人为活动干扰强而加剧了土壤团聚体的破坏,致使土壤团粒结构体不稳定,破坏率大。

对城市分布较广泛的城中村和工业企业搬迁地土壤非水稳性团聚体进行分析得知,不同类型搬迁地土壤非水稳性团聚体组成中,城中村和工业企业搬迁地土壤粒径 ≥ 2 mm 团聚体含量最高,均超过了 60%,由此可见, ≥ 2 mm 团聚体在不同搬迁地土壤非水稳性团粒中占主导地位。不同类型搬迁地土壤非水稳性团聚体存在一定差异性,其中城中村搬迁地土壤非水稳性大团聚体优于工业企业搬迁地,土壤团粒结构体也显著优于工业企业搬迁地($p < 0.05$),这可能是由于城中村含有部分菜园地、农田、果园、绿化等,经过长期的耕作、培肥等人为活动以及种植的植物根系对土壤的挤压、穿插和分割作用,促进土壤中的微团聚体向大团聚体转化,致使土壤团粒结构体增加,方薇、王冰等研究结果也说明植被对土壤团粒结构的形成效果明显^[41-42],而工业企业搬迁地和生产运营过程中对土壤可能存在一定的破坏,加剧了土壤的侵蚀,一方面破坏了土壤原有的团聚体,另一方面阻碍了大团聚体的形成,Tisdall 等^[43]研究表明,人为扰动优先破坏大团聚体,进而形成粒径更小的团聚体,而工业企业搬迁地人为扰动要强于城中村,其大团聚体更容易遭到破坏,形成小的团聚体。因此,对不同类型搬迁地可针对性地进行分类利用,以满足植物生长和不同景观营造需求。

不同类型搬迁地土壤水稳性团聚体组成中,城中村和工业企业搬迁地土壤粒径 < 106 mm 团聚体含量最高,均超过了 60%,由此可见, < 106 mm 的微团聚体在不同搬迁地土壤水稳性团粒中占主导地位,而城中村和工业企业搬迁地土壤水稳性团粒结构含量均较低,分别为 22.71%和 13.86%,由此可见城中村和工业企业搬迁地土壤质量退化严重。城中村搬迁地土壤水稳性团粒结构优于工业企业搬迁地土壤,但差异不显著($p > 0.05$)。工业企业搬迁地土壤团聚体破坏率明显高于城中村搬迁地,高出 13.9%,且两者差异达到了显

著水平($p < 0.05$),这可能是由于城中村搬迁地中部分样地受植物的影响所致,植物根系的穿插,使土壤疏松,形成较多孔隙,改善了土壤水分和通气状况^[44],加之根系分泌物、残体等对土壤颗粒的胶结作用,促使团粒结构的形成^[45],从而提升了其土壤团粒结构,并增加了土壤团粒结构的稳定性,这与胡阳等研究结果一致^[46]。

搬迁地土壤非水稳性团聚体和水稳性团聚体与土壤理化性质存在一定相关性,其中土壤非水稳性团聚体中的粒径 ≥ 2 mm 与土壤 pH 值达到了显著负相关性($p < 0.05$),粒径 0.25~0.5 mm 和粒径 0.5~1.0 mm 与土壤 pH 值达到了显著正相关性($p < 0.05$),而与土壤有机质相关性不显著($p > 0.05$),这可能是由于城市搬迁地土壤受人为了干扰较大,对土壤 pH 值的影响大,且城市土壤有机质含量低,故土壤非水稳性团聚体中的大团聚体受 pH 值影响较大。搬迁地土壤水稳性团聚体与土壤理化性质相关性较强,主要表现在土壤水稳性团粒结构体与土壤容重、田间持水量、总孔隙度及有机质均达到了极显著相关性($p < 0.01$),这与刘金福、梁士楚等研究林地土壤团粒结构结果一致^[47-48]。由此可见搬迁地土壤水稳性团聚体更易影响其土壤自身特性影响,土壤团粒结构体的变化会直接影响土壤理化性质。土壤团聚体破坏率与土壤容重达到了极显著正相关性水平($p < 0.01$),与土壤田间持水量、有机质及总孔隙度则具有极显著负相关性($p < 0.01$),这主要由于土壤容重影响土壤的紧实,容重越大,土壤压实严重,土壤的通气性和持水能力弱,直接影响土壤的水肥气热;而土壤有机质分子上的羟基、羧基、酰胺基等功能基团可联结矿物质颗粒形成和稳定土壤结构^[49],同时有机质为土壤微生物提供碳源,微生物分解有机质产生的有机复合物可促进土壤水稳性团粒结构体的形成^[50];土壤孔隙的增加可减少团聚体内蓄闭气体的压力,从而降低了消散引起的破碎,提高团聚体的稳定性^[51]。由此可见,搬迁地土壤团粒结构体的稳定性受土壤理化影响,可通过降低土壤容重,提升土壤田间持水量、总孔隙度及有机质等措施来降低土壤团聚体破坏率,从而提高土壤团粒结构体的稳定性,提升搬迁地土壤质量,以满足城市园林绿化建设。

4 结论

上海市搬迁地土壤非水稳性团聚体主要以粒径 ≥ 2.0 mm 的大团聚体为主,土壤团粒结构体含量较高(≥ 0.25 mm),高达 91.3%;土壤水稳性团聚体主要以粒径 < 0.106 mm 的微团聚体为主,所占比例高

达73.4%,土壤团粒结构体含量较低,仅为18.2%。搬迁地土壤团聚体破坏率大,土壤团粒结构稳定性较差。城中村搬迁地土壤非水稳性大团聚体优于工业企业搬迁地,土壤团粒结构体也显著优于工业企业搬迁地($p < 0.05$)。不同类型搬迁地土壤水稳性团粒结构体差异不明显($p > 0.05$),但城中村搬迁地土壤优于工业企业搬迁地土壤;工业企业搬迁地土壤团聚体破坏率显著高于城中村搬迁地($p < 0.05$),高出13.9%,故上海市搬迁地土壤团粒结构体差,团聚体破坏率高,土壤团粒结构体稳定性较差,城中村土壤团粒结构体及稳定性优于工业企业搬迁地。搬迁地土壤非水稳性团聚体对土壤理化性质影响较小,而搬迁地土壤水稳性团聚体与土壤理化性质相关性较强。搬迁地土壤团聚体破坏率主要受土壤容重、田间持水量、总孔隙度及有机质等因子影响。

[参 考 文 献]

- [1] 王雁.我国城市绿化理念探索的回顾与发展趋势[J].浙江林学院学报,2003,20(3):91-96.
- [2] 上海市绿化和市容管理局,上海市规划和自然资源局.上海市生态空间专项规划(2018-2035)(公示)[EB/OL].
http://lhsr.sh.gov.cn/gggs/20200413/0039-01241CC9-626B-41B7-B769-7D87B98C03B0.html,2020-04.
- [3] 赵沁娜.城市土地置换过程中土壤污染研究进展评述[J].土壤,2009,41(3):350-355.
- [4] 张浪.城市困难立地概念及其分类辨析[J].上海建设科技,2020(3):107-109.
- [5] 张浪,韩继刚,伍海兵,等.关于园林绿化快速成景配生土的思考[J].土壤通报,2017,48(5):1264-1267.
- [6] 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.
- [7] Yin Yan, Liang Chenghua, Pei Zhongjian.. Effect of greenhouse soil management on soil aggregation and organic matter in Northeast China [J]. Catena, 2015,133: 412-419.
- [8] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between(micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004,79(1):7-31.
- [9] Lützw M V, Kögel-Knabner I, Ekschmitt K, et al. Stabilization of organic matter in temperate soils: Mechanisms and their relevance under different soil conditions review [J]. European Journal of Soil Science, 2006,57(4):426-445.
- [10] Horn R, Smucker A. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils [J]. Soil and Tillage Research, 2005,82(1):5-14.
- [11] 王浩田,姜超强,蒋瑀霁,等.皖南沿江平原不同年限烟一稻轮作土壤团聚体组成与烤烟产质量的关系[J].土壤,2020,52(5):1057-1067.
- [12] 白娜玲,吕卫光,李双喜,等.施肥方式对稻麦轮作土壤团聚体分布的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):88-93,100.
- [13] 喻国军,谢晓尧.喀斯特地区造林对土壤团聚体稳定性及微生物碳代谢活性的影响[J].水土保持研究,2020,27(6):21-27,36.
- [14] 张宏伟,魏忠义,王秋兵.沈阳城市土壤全钾和碱解氮的空间变异性[J].应用生态学报,2008,19(7):1517-1521.
- [15] 罗帅,马新月,王东,等.重庆市场地土壤污染特征分析及行业来源识别[J].生态环境学报,2020,29(4):810-818.
- [16] 黄财德,甄华杨,岳士忠,等.养殖场搬迁后场地土壤污染评价及农用建议[J].环境科学与技术,2019,42(S1):222-226.
- [17] 李书鹏,焦文涛,李鸿炫,等.燃气热脱附技术修复有机污染场地研究与应用进展[J].环境工程学报,2019,13(9):2037-2048.
- [18] 张文婷,王子邦.不同种植年限城市绿化土壤团聚体及有机碳分布特征[J].天津师范大学学报(自然科学版),2021,41(4):61-67.
- [19] Jim Y. Physical and chemical properties of Hong Kong roadside soil in relation to urban tree growth [J]. Urban Ecosystems, 1998,2:171-181.
- [20] 卢瑛,龚子同,张甘霖,等.城市土壤的特性及其管理[J].土壤与环境,2002,11(2):206-209.
- [21] 张万儒.森林土壤分析方法[M].北京:中国标准出版社,1999.
- [22] 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.
- [23] 方海兰,陈玲,黄懿珍,等.上海新建绿地的土壤质量现状和对策[J].林业科学,2007,43(S1):89-94.
- [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] Tang Fukai, Cui Ming, Lu Qi, 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(3):2213-2242.
- [27] Zhang Bin, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China [J]. Geoderma, 2001,99(1):123-145.
- [28] An Shaoshan, Huang Yimei, Zheng Fenli. Evaluation

- of soil microbial indices along a revegetation chronosequence in grassland soils on the Loess Plateau, Northwest China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(3): 286-292.
- [29] 张会慧, 王世标, 王均睿, 等. 三江平原湿地不同利用方式对土壤理化性质及团聚体组成的影响[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(6): 1679-1687.
- [30] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 等. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997, 34(4): 359-366.
- [31] 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.
- [32] 李强, 李志伟, 王全, 等. 云南陆良植烟土壤粒径分布及其分形维数空间变异研究[J]. *山地学报*, 2017, 35(1): 23-31.
- [33] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对于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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 侯传庆. *上海土壤*[M]. 上海: 上海科技出版社, 1992.
- [37] 林立文, 邓羽松, 王金悦, 等. 南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3647-3656.
- [38] 安娜娜, 马琨, 王明国, 等. 玉米秸秆还田对土壤团聚体组成及其碳氮分布的影响[J]. *西北农业学报*, 2020, 29(5): 766-775.
- [39] 谢均强. 紫色土坡地团聚体稳定性特征及对侵蚀过程的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- [40] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 等. 裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 8-14.
- [41] 方薇. 植被恢复对滇东喀斯特坡地土壤团聚体稳定性的影响[D]. 云南 昆明: 云南师范大学, 2021.
- [42] 王冰, 周扬, 张秋良. 兴安落叶松林龄对土壤团聚体分布及其有机碳含量的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(6): 1618-1628.
- [43] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils [J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [44] 王库. 植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J]. *环境科学学报*, 2001, 10(3): 250-252.
- [45] 邢菊香, 郭建英, 赵杏花, 等. 黄土丘陵区退耕还林后土壤物理性质恢复特征的研究: 以陕西省吴起县为例[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2010, 31(1): 41-46.
- [46] 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.
- [47] 刘金福, 洪伟, 吴承祯. 中亚热带几种珍贵树种林分土壤团粒结构的分维特征[J]. *生态学报*, 2002, 22(2): 197-205.
- [48] 梁士楚, 王伯荪. 广西英罗港红树林区木榄群落土壤粒径分布的分形特征[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(1): 17-22.
- [49] 尚应妮, 胡斐南, 赵世伟, 等. 不同胶结物质对黄绵土团聚体形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 204-208, 239.
- [50] Brady N, Weil R. *土壤学与生活*[M]. 李保国, 徐建明, 译. 北京: 科学出版社, 2019.
- [51] Papadopoulos A, Bird N R A, Whitmore A P, et al. Investigating the effects of organic and conventional management on soil aggregate stability using X-ray computed tomography [J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(3): 360-368.

(上接第 58 页)

- [19] 王颂宇, 梁晓红, 付婷婷, 等. 高粱与花生和大豆间作对其生物量及产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(9): 1071-1075.
- [20] Andersen M K, Hauggaard-Nielsen H, Jensen W E S. Competitive dynamics in two-and three-component intercrops [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2007, 44(3): 545-551.
- [21] 骆宗诗, 向成华, 章路, 等. 花椒林细根空间分布特征及椒草种间地下竞争[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(2): 86-91.
- [22] 丁怡飞, 曹永庆, 姚小华, 等. 油茶—鼠茅草复合系统细根空间分布及地下竞争[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(4): 981-986.
- [23] 王晗生. 黄土塬区旱作果园的复合经营范式[J]. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(5): 408-418.