

引用格式:

杜田甜, 李素艳, 王艳春, 孙向阳, 丁熙, 范志辉, 郑燚. 园林绿化废弃物覆盖对城市绿地土壤结构的改良效果[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(6): 88–95.

DU T T, LI S Y, WANG Y C, SUN X Y, DING X, FAN Z H, ZHENG Y. Improvement effect of green waste mulching on soil structure in urban green space[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(6): 88–95.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



园林绿化废弃物覆盖对城市绿地土壤结构的改良效果

杜田甜¹, 李素艳¹, 王艳春², 孙向阳¹, 丁熙², 范志辉¹, 郑燚^{2,3*}

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京市园林绿化科学研究院, 北京 100102; 3. 北京市植物园管理处, 北京 100093)

摘要: 以园林绿化废弃物(以下简称绿废)为材料、北京市典型绿地土壤为研究对象, 设置CK(未覆盖)、BL(木片+枯枝落叶覆盖)、SC(木片+半腐熟绿废堆肥覆盖)、MC(木片+腐熟绿废堆肥覆盖)等4种处理, 分析绿废覆盖对城市绿地土壤团聚体和有机碳的影响。结果表明: 经绿废覆盖处理18个月后, 城市绿地土壤大团聚体($<2\sim0.25\text{ mm}$)质量分数(30.77%~40.10%)、团聚体平均质量直径(0.42~0.51 mm)、几何平均直径(0.18~0.23 mm)均显著提高, 分形维数(2.64~2.68)显著降低, 土壤结构稳定性增强, 土壤大团聚体有机碳质量分数及对土壤总有机碳贡献率显著提高, MC处理的改良效果最明显; 土壤容重及有机碳、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾质量分数对土壤团聚体形成及其有机碳质量分数有重要影响。综上, 绿废覆盖可改善城市绿地土壤理化性质, 促进土壤中大团聚体形成, 提高大团聚体有机碳含量及贡献率, 有效改善土壤结构, 提升其稳定性。在本研究条件下, 木片+腐熟绿废堆肥覆盖的方案最优。

关键词: 园林绿化废弃物; 城市绿地土壤; 土壤结构; 土壤团聚体; 有机碳

中图分类号: S714.6; X705

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)06-0088-08

Improvement effect of green waste mulching on soil structure in urban green space

DU Tiantian¹, LI Suyan¹, WANG Yanchun², SUN Xiangyang¹, DING Xi², FAN Zhihui¹, ZHENG Yi^{2,3*}

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing 100102, China; 3. Management Office, Beijing Botanical Garden, Beijing 100093, China)

Abstract: Using green waste as the material and typical urban green space soil in Beijing as the research object, four treatments were applied: CK(no mulching), BL(wood chips+litterfall mulching), SC(wood chips+semi-decomposed green waste compost mulching), and MC(wood chips+decomposed green waste compost mulching). The effects of green waste mulching on soil aggregates and organic carbon in urban green spaces were then assessed. The results showed that after 18-month green waste mulching, the mass fraction of soil macroaggregates($<2\sim0.25\text{ mm}$)(30.77%~40.10%), the mean weight diameter of aggregates(0.42-0.51 mm), and the geometric mean diameter(0.18-0.23 mm) increased significantly, while the fractal dimension(2.64-2.68) decreased significantly, indicating that soil structural stability increased. The mass fraction of organic carbon in soil macroaggregates and its contribution rate to total soil organic carbon increased significantly. Among all treatments, the MC treatment showed the most significant improvement effect. The mass fractions of soil bulk density, soil organic carbon, total nitrogen, alkaline-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium exerted significant effects on the formation of soil aggregates and the mass fraction of soil organic carbon. In conclusion, green waste mulching improved the physicochemical properties of urban green

收稿日期: 2024-10-19

修回日期: 2025-03-11

基金项目: 北京市园林绿化局项目(2019-KJC-02-13)

作者简介: 杜田甜(1999—), 女, 湖南常德人, 博士研究生, 主要从事园林绿化废弃物应用研究, dttright@163.com; *通信作者, 郑燚, 博士, 讲师, 主要从事土壤生态、园林绿化废弃物应用研究, 1254572802@qq.com

space soil, promoted the formation of soil macroaggregates, increased the organic carbon content and its contribution rate of macroaggregates, thereby enhanced soil structure and its stability. Under the conditions of this study, the mulching scheme of wood chips combined with decomposed green waste compost showed the greatest overall effectiveness.

Keywords: green waste; urban green space soil; soil structure; soil aggregates; organic carbon

土壤团聚体是土壤结构的核心组分,其数量与粒径分布直接关联着结构稳定性,同时还能调控水肥保蓄、养分循环及微生物活性等关键过程^[1-4];土壤有机碳既是全球碳循环的重要环节,也是衡量土壤肥力与健康的核心指标,而团聚体作为有机碳的稳定储存场所,与有机碳存在“存储-胶结”的互馈关系,共同影响土壤理化性状^[5-6]。城市绿地土壤因为强烈的人为扰动和机械压实,团粒结构严重破坏,土壤结构逐渐以片状和块状为主,通气和透水性差,养分和其他物质循环能力减弱,空间异质性高,土壤性质逐渐恶化^[7-8]。

有机覆盖已被广泛应用于农林领域以改善土壤结构,提高土壤养分含量。有研究^[9-10]表明,有机覆盖通过抑制杂草生长、促进丛枝菌根真菌等微生物活动,使土壤中的持久黏合剂即球囊霉素相关土壤蛋白含量增加,能使不同粒径团聚体转变为更稳定的团聚体;并且由于球囊霉素难溶于水、难分解的特性,其能有效贮存土壤碳,故能提高土壤团聚体有机碳含量。相关研究表明,生草覆盖能促进土壤水稳定性大团聚体的形成,提高团聚体的固碳能力^[11];秸秆覆盖通过提高大团聚体有机碳含量从而促进表层土壤有机碳的积累^[12]。

园林绿化废弃物(以下简称绿废)作为一种有机覆盖材料,产生于城市绿化,具有总量大、处理难等特点,基于资源化利用的概念,现已广泛应用于城市绿化中,但多注重其景观效应及滞尘、保温、保水等物理效应^[13-14],且目前对于城市绿地土壤的研究多注重土壤理化性质、肥力、污染状况的调查及评价^[15],而对于土壤结构、质量改良的研究较少。基于城市绿地土壤结构恶化、质量下降的现状,笔

者选取城市绿地圆明园遗址公园为研究地点,以其裸露土壤为研究对象,对其进行绿废分层式覆盖(上层主要为绿废粉碎成的木片,起到美观及防止下层覆盖物损失的作用),下层为经处理后的常见绿废产品,起到补充肥力、改良土壤的作用,探究绿废覆盖对于城市绿地土壤团聚体及其有机碳的影响,以为改善城市绿地土壤结构、提高城市绿地土壤质量提供依据。

1 研究区概况

试验地设于北京市海淀区圆明园遗址公园东侧绿地($40^{\circ}01'07''N$, $116^{\circ}19'28''E$),总面积约为1 200 m²,属温带季风气候,年均温度为11.3 °C,年降水量为590~630 mm,无霜期为211 d。植被主要为洋白蜡(*Fraxinus pennsylvanica*)、白皮松(*Pinus bungeana*)、五角枫(*Acer mono*)及灌丛等。供试土壤为潮土,基本理化性质如下:土壤容重为1.54 g/cm³,含水率为15.14%,总孔隙度为34.18%,毛管孔隙度为24.07%,pH为8.03,电导率(EC)为260 μS/cm,有机碳、全氮质量分数分别为10.37、0.91 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾质量分数分别为117.05、1.46、184.68 mg/kg。

2 材料与方法

2.1 材料

供试覆盖材料分为上下2层:上层为染色木片(直径3~6 cm);下层分别为枯枝落叶、半腐熟绿废堆肥(腐熟30 d)和腐熟绿废堆肥(腐熟60 d)。堆肥产品经好氧发酵制成,种子发芽率均达到无害化标准(>78%)^[16],覆盖材料具体理化性质列于表1。

表1 覆盖材料理化性质

Table 1 The physicochemical properties of the mulching material

覆盖材料	pH	EC/ (mS·cm ⁻¹)	有机碳质量分数/ (g·kg ⁻¹)	全氮质量分数/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	有效磷质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾质量分数/ (g·kg ⁻¹)	种子 发芽率/%
木片	—	—	559.33	10.85	—	—	—	—
枯枝落叶	6.43	1.22	482.25	9.94	430.23	116.90	0.55	—
半腐熟堆肥	8.42	1.73	323.09	11.52	683.97	135.55	1.39	78.52
腐熟堆肥	8.04	1.58	298.35	12.84	733.73	138.43	2.46	84.90

2.2 试验设计与样品采集

2019年11月开展试验,共设4种处理:未覆盖(CK)、木片+枯枝落叶(BL)、木片+半腐熟绿废堆肥(SC)、木片+腐熟绿废堆肥(MC)。覆盖总厚度为5 cm,上、下层各2.5 cm。为保证铺设厚度一致,上层木片按3 000 g/m²(厚度为2.5 cm),下层枯枝落叶按2 500 g/m²(厚度为2.5 cm),堆肥按2 000 g/m²(厚度为2.5 cm)进行铺设。木片的作用主要为环境美化以及防止下层覆盖物移动损失。试验采用随机区组设计,每处理3次重复,共12个小区,单小区面积约50 m²。

于2021年5月进行样品采集。在每个小区内随机选取3个采样点,清除表面覆盖物后,先用环刀法采集原状土,用于测定土壤容重;再分层采集深度为0~10 cm和>10~20 cm土样,经风干、去除杂物后,分别过孔径为2、0.25 mm的筛备用。

2.3 测定指标及方法

参照文献[17~18],采用pH计、电导率仪分别测定覆盖材料及土样的pH、EC;采用重铬酸钾容量法-稀释热法测定土壤有机碳质量分数;采用浓H₂SO₄消煮-凯氏定氮法测定土壤全氮质量分数;采用碱解扩散法测定土壤碱解氮质量分数;采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定土壤有效磷质量分数;采用NH₄OAc-火焰光度计法测定土壤速效钾质量分数。

采用湿筛法^[19~21]测定土壤水稳定性团聚体的组成,分别计算<2~0.25 mm、<0.25~0.053 mm和<0.053 mm这3个粒级组分的质量占比。参照文献[22],选取并计算平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)

和分形维数(D)作为土壤团聚体稳定性的评价指标,同时计算各粒级团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率。

2.4 数据统计分析

运用Microsoft Excel 2019、SPSS 22.0进行表制作及数据分析,采用LSD法进行多重比较,及采用Pearson法进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同覆盖处理对城市绿地土壤团聚体组成特征的影响

4种不同处理下土壤团聚体组成特征如表2所示。从表2可知,供试土壤(CK)以微团聚体(粒径<0.25 mm)为主,占团聚体总量的73.04%~74.19%。在0~10 cm土层中,与CK相比,覆盖处理显著提高了大团聚体(粒径为<2~0.25 mm)的占比,其中,MC中大团聚体占比达40.10%,且显著高于BL中的;3种覆盖处理中粒径为<0.25~0.053 mm团聚体占比显著降低;MC中粒径<0.053 mm团聚体占比显著降低。在>10~20 cm土层中,3种覆盖处理中大团聚体占比显著高于CK的;粒径为<0.25~0.053 mm团聚体占比在4种处理间的差异均无统计学意义;与CK相比,3种覆盖处理均显著降低了粒径<0.053 mm团聚体占比;3种粒径团聚体占比在3种覆盖处理间的差异均无统计学意义。这说明绿废覆盖显著影响了土壤团聚体的组成,尤其在0~10 cm土层中,MC处理对大团聚体的形成有促进作用;而在>10~20 cm土层中,各种覆盖处理对不同粒径团聚体的影响较为一致。

表2 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体的组成特征

Table 2 Composition characteristics of aggregates in urban green space soil under different mulching treatments

土层深度/cm	处理	团聚体占比/%		
		<2~0.25 mm	<0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0~10	CK	(25.81±2.78)c	(47.03±2.84)a	(27.16±1.82)a
	BL	(31.84±3.49)b	(41.28±2.31)b	(26.88±1.73)a
	SC	(34.53±1.30)ab	(40.08±1.41)b	(25.39±0.60)ab
	MC	(40.10±3.79)a	(36.35±3.25)b	(23.55±3.53)b
>10~20	CK	(26.96±2.14)b	(47.52±0.79)	(25.52±1.59)a
	BL	(30.77±2.78)a	(47.32±2.31)	(21.91±1.84)b
	SC	(31.78±1.69)a	(46.74±1.35)	(21.48±1.30)b
	MC	(31.74±2.16)a	(45.67±1.09)	(22.59±1.48)b

注:同列不同字母表示同一土层深度内不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.2 不同覆盖处理对城市绿地土壤团聚体稳定性特征的影响

土壤团聚体稳定性特征值如表3所示。由表3可知, MWD与GMD的变化规律基本一致。在0~10 cm土层中, MC、SC、BL、CK的MWD与GMD均依次减小, 其中, MC的MWD显著高于BL和CK的, GMD显著高于其他3种处理的; BL和SC的MWD显著高

于CK的, 且SC的GMD也显著高于CK的; SC和MC处理的D均显著低于CK的, 且MC的D显著低于BL的。在>10~20 cm土层中, 3种覆盖处理的MWD与GMD均显著高于CK的; 3种覆盖处理的D均显著低于CK的。这表明覆盖处理显著提高了土壤团聚体的稳定性, 尤其是在0~10 cm土层中, MC处理表现出最佳的稳定性特征。

表3 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体的稳定性特征

Table 3 Stability characteristics of aggregates in urban green space soil under different mulching treatments

土层深度/cm	处理	MWD/mm	GMD/mm	D
0~10	CK	(0.37±0.04)c	(0.16±0.01)c	(2.70±0.01)a
	BL	(0.43±0.11)b	(0.18±0.02)bc	(2.68±0.03)ab
	SC	(0.46±0.01)ab	(0.19±0.03)b	(2.67±0.10)bc
	MC	(0.51±0.13)a	(0.23±0.08)a	(2.64±0.04)c
>10~20	CK	(0.38±0.02)b	(0.17±0.01)b	(2.68±0.04)a
	BL	(0.42±0.03)a	(0.19±0.02)a	(2.64±0.06)b
	SC	(0.43±0.09)a	(0.20±0.05)a	(2.64±0.03)b
	MC	(0.43±0.02)a	(0.19±0.04)a	(2.65±0.02)b

注: 同列不同字母表示同一土层深度内不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.3 不同覆盖处理对城市绿地土壤团聚体有机碳分布特征的影响

从表4可知, 在0~10 cm土层中, 与CK相比, BL、SC、MC处理的大团聚体有机碳质量分数分别显著增加了23.89%、27.27%、38.48%, 其中, MC的大团聚体有机碳质量分数显著高于BL和SC的; SC、BL、MC、CK处理的粒径为<0.25~0.053 mm团聚体的有机碳质量分数依次减小, 其中, SC的显

著高于其他处理的, BL的显著高于MC和CK的; 粒径<0.053 mm团聚体有机碳质量分数在4种处理间的差异均无统计学意义。在>10~20 cm土层中, 与CK相比, 3种覆盖处理均显著提高了大团聚体有机碳质量分数, 其中, MC的显著高于SC的; MC中粒径为<0.25~0.053 mm团聚体有机碳质量分数显著高于其他3种处理的。这说明绿废覆盖显著提高了大团聚体有机碳质量分数。

表4 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体有机碳质量分数

Table 4 Organic carbon mass fractions of aggregates in urban green space soil under different mulching treatments

土层深度/cm	处理	有机碳质量分数/(g·kg ⁻¹)		
		<2~0.25 mm	<0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0~10	CK	(4.73±0.06)c	(4.71±0.14)c	(3.42±0.10)
	BL	(5.86±0.24)b	(5.64±0.31)b	(3.43±0.25)
	SC	(6.02±0.15)b	(6.24±0.11)a	(3.73±0.15)
	MC	(6.55±0.05)a	(4.82±0.19)c	(3.29±0.14)
>10~20	CK	(3.57±0.04)c	(3.98±0.22)b	(2.89±0.21)
	BL	(4.88±0.16)ab	(3.95±0.13)b	(2.80±0.09)
	SC	(4.62±0.23)b	(3.75±0.18)b	(2.66±0.06)
	MC	(5.21±0.22)a	(4.68±0.07)a	(2.88±0.25)

注: 同列不同字母表示同一土层深度内不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.4 不同覆盖处理对城市绿地土壤团聚体有机碳贡献率特征的影响

从表5可知,供试土壤(CK)团聚体有机碳主要来源于微团聚体(粒径<0.25 mm),其贡献率为63.21%~65.78%。经覆盖后,在0~10 cm土层中,MC中大团聚体有机碳贡献率(44.69%)显著高于CK

的(36.62%); MC中粒径为<0.25~0.053 mm团聚体有机碳贡献率显著低于其他3种处理的; SC、MC中粒径<0.053 mm团聚体有机碳贡献率显著低于CK的。在>10~20 cm土层中,3种覆盖处理中大团聚体有机碳贡献率均显著高于CK的,粒径<0.053 mm团聚体有机碳贡献率显著低于CK的,各粒径团聚体有机碳贡献率在3种覆盖处理间的差异均无统计学意义。

表5 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体有机碳贡献率

Table 5 Organic carbon contribution rates of aggregates in urban green space soil under different mulching treatments

土层深度/cm	处理	有机碳贡献率/%		
		<2~0.25 mm	<0.25~0.053 mm	<0.053 mm
0~10	CK	(36.79±0.50)b	(36.62±1.09)a	(26.59±0.79)a
	BL	(39.26±1.58)b	(37.76±2.06)a	(22.98±3.03)ab
	SC	(37.65±1.04)b	(39.00±0.75)a	(23.35±1.04)b
	MC	(44.69±0.34)a	(32.86±1.28)b	(22.45±0.94)b
>10~20	CK	(34.22±0.38)b	(38.13±2.17)	(27.65±2.09)a
	BL	(41.98±1.38)a	(33.94±1.08)	(24.08±0.79)b
	SC	(41.89±2.06)a	(33.99±1.61)	(24.12±0.55)b
	MC	(40.79±1.93)a	(36.69±1.65)	(22.52±2.14)b

注: 同列不同字母表示同一土层深度内不同处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

3.5 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体占比及其有机碳质量分数的影响因素

由表6可知,各粒径团聚体占比间均存在显著相关关系,大团聚体占比与2种粒径微团聚体占比均呈极显著负相关,2种粒径微团聚体占比间呈显著正相关。土壤团聚体稳定性特征值之间也存在显

著相关关系,其中,MWD与GMD呈极显著正相关,而D与MWD、GMD均呈极显著负相关。大团聚体占比与MWD、GMD均呈极显著正相关,与D呈极显著负相关;而2种粒径微团聚体占比均与MWD、GMD呈极显著负相关,恰好与大团聚体的相反,且粒径<0.053 mm团聚体占比与D呈极显著正相关。

表6 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体占比与稳定性指标间的相关性

Table 6 Correlation between the proportions of aggregates and stability indices of urban green space soil under different mulching treatments

指标	相关系数				
	<2~0.25 mm 团聚体占比	<0.25~0.053 mm 团聚体占比	<0.053 mm 团聚体占比	MWD	GMD
<0.25~0.053 mm团聚体占比	-0.868**				
<0.053 mm团聚体占比	-0.838**	0.457*			
MWD	0.999**	-0.849**	-0.858**		
GMD	0.975**	-0.767**	-0.904**	0.980**	
D	-0.686**	0.262	0.942**	-0.710**	-0.767**

注: **表示相关性达到极显著水平($P<0.01$); *表示相关性达到显著水平($P<0.05$)。

从表7可知,大团聚体有机碳质量分数与大团聚体占比、MWD、GMD呈极显著正相关,与粒径为<0.25~0.053 mm团聚体占比、粒径<0.053 mm团聚体占比、D呈极显著负相关,与其他粒径团聚体

有机碳质量分数相比,大团聚体有机碳质量分数与团聚体特征值间的相关程度最高;粒径为<0.25~0.053 mm团聚体有机碳质量分数与大团聚体占比、MWD、GMD值呈极显著正相关,与粒径为<0.25~

0.053 mm、<0.053 mm团聚体占比呈极显著负相关；<0.25~0.053 mm团聚体占比呈极显著负相关。粒径<0.053 mm团聚体有机碳质量分数只与粒径为

表7 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体有机碳质量分数与团聚体特征值间的相关性

Table 7 Correlation between the mass fractions of organic carbon in aggregates and their characteristic values in urban green space soil under different mulching treatments

指标	相关系数					
	<2~0.25 mm 团聚体占比	<0.25~0.053 mm 团聚体占比	<0.053 mm 团聚体占比	MWD	GMD	D
<2~0.25 mm团聚体有机碳质量分数	0.917**	-0.866**	-0.691**	0.911**	0.882**	-0.546**
<0.25~0.053 mm团聚体有机碳质量分数	0.664**	-0.786**	-0.326	0.648**	0.534**	-0.227
<0.053 mm团聚体有机碳质量分数	0.396	-0.642**	-0.004	0.374	0.251	0.082

注：**表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)。

从表8可知，土壤容重(BD)，pH及碱解氮(AHN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、全氮(TN)、有机碳(SOC)质量分数对大团聚体占比的影响，与其对粒径为<0.25~0.053 mm团聚体占比的影响恰好相反；粒径<0.053 mm团聚体占比与BD呈显著正相关，而与其他土壤理化性质则呈负相关，其中，与AK质量分数呈极显著负相关。MWD、GMD与土壤理化性质的相关性较为一致，与BD呈显著负相关，

与AHN、AK、TN、SOC质量分数则均呈极显著正相关；而D与土壤各理化性质的相关性恰好与MWD、GMD的相反，与BD呈正相关，与其他的土壤理化性质呈负相关，其中，与AK质量分数呈显著负相关。不同粒径团聚体有机碳质量分数与土壤理化性质的相关性较为一致，均与BD呈显著负相关，与土壤AHN、AK、TN、SOC质量分数呈极显著正相关。

表8 不同覆盖处理下城市绿地土壤团聚体占比及稳定性指标与土壤理化性质的相关性

Table 8 Correlation between the proportions and stability indices of aggregates and physicochemical properties of urban green space soil under different mulching treatments

指标	相关系数						
	土壤容重	pH	碱解氮 质量分数	有效磷 质量分数	速效钾 质量分数	全氮 质量分数	有机碳 质量分数
<2~0.25 mm团聚体占比	-0.574**	-0.148	0.711**	0.383	0.807**	0.640**	0.689**
<0.25~0.053 mm团聚体占比	0.557**	0.467*	-0.825**	-0.450*	-0.841**	-0.753**	-0.811**
<0.053 mm团聚体占比	0.416*	-0.249	-0.366	-0.193	-0.521**	-0.32	-0.342
MWD	-0.569**	-0.123	0.695**	0.374	0.796**	0.625**	0.672**
GMD	-0.494*	-0.048	0.606**	0.379	0.745**	0.516**	0.565**
D	0.410*	-0.375	-0.237	-0.036	-0.423*	-0.174	-0.17
<2~0.25 mm团聚体有机碳质量分数	-0.555**	-0.314	0.777**	0.395	0.858**	0.655**	0.724**
<0.25~0.053 mm团聚体有机碳质量分数	-0.581**	-0.393	0.704**	0.103	0.841**	0.663**	0.657**
<0.053 mm团聚体有机碳质量分数	-0.457*	-0.650**	0.804**	0.138	0.582**	0.766**	0.678**

注：**表示相关性达到极显著水平($P<0.01$)；*表示相关性达到显著水平($P<0.05$)。

4 讨论

水稳定性大团聚体(粒径>0.25 mm)是土壤中最理想的结构形态，其含量在一定程度上反映了土壤结构和土壤质量的优劣，含量越高，土壤的抗侵蚀能力和稳定性就越好^[23~24]。团聚体MWD、GMD及D可以反映土壤团聚体的稳定性，MWD和GMD越大，

D越小，表示土壤团聚体的稳定性越好^[25]。本研究发现，采取覆盖措施显著提高了表层土壤(0~10 cm)中大团聚体(粒径为<2~0.25 mm)占比、MWD和GMD，同时显著降低了D；此外，堆肥腐熟状态越好，土壤中大团聚体占比、MWD、GMD越大，D越小，其中，MC的这4个指标均达到极值。这主要有以下2个原因：首先，实施覆盖显著缓解了人为

活动和机械作业对土壤的干扰与压实效应，同时，有效减少了雨水对表层土壤的直接冲刷和侵蚀作用，从而大幅度降低了自然环境和人为活动对土壤团聚体完整性的潜在破坏，提高了土壤团聚体的稳定性；其次，SC、MC处理的土壤大团聚体占比及结构稳定性均优于BL处理的。这是由于覆盖物下层的堆肥增加了土壤中外源有机物的直接输入，且随堆肥堆置时间的增加，堆肥逐渐达到基本腐熟状态，相比于枯枝落叶(BL)，堆肥更为稳定且容易矿化，能释放更多的养分^[26-27]。这一过程刺激了土壤中的生物活动，提高了土壤的生物活性，增强了植物根系及丛枝菌根真菌等微生物的代谢活动，使球囊霉素、菌丝等稳定的团聚体胶结物质增多，促使微团聚体黏聚结成大团聚体，进一步稳定了土壤结构^[28-31]。对于底层土壤(>10~20 cm)，覆盖处理后，大团聚体占比、MWD、GMD也均显著大于CK的，这表明覆盖措施能有效增加土壤中良好结构体的占比，提高土壤的稳定性。底层土壤中不同覆盖处理之间的差异无统计学意义，可能是由于在底层土壤中，新鲜有机物直接输入大幅减少，根系和生物活动显著减弱，以及覆盖的影响不够显著和覆盖时间较短等。

本研究还发现，城市绿地土壤有机碳主要赋存于微团聚体(粒径<0.25 mm)中，表现为该粒级组分的有机碳质量分数高，且对土壤总有机碳的贡献率占据主导地位。覆盖措施显著提高了土壤中大团聚体的有机碳质量分数，其中MC处理的效果最明显；但对于粒径<0.053 mm团聚体的有机碳质量分数并没有显著影响。这可能有以下原因：首先，覆盖措施降低了土壤的入渗率，并减少地表径流，减缓了土壤团聚体中有机碳的矿化^[32]；其次，覆盖措施增加了土壤中的有机胶结物质，使微团聚体逐渐聚结成大团聚体，从而导致大团聚体中有机碳质量分数的增加，大团聚体的通气及水热条件优于微团聚体的，更适于生产球囊霉素的丛枝菌根真菌等微生物生长，故大团聚体有机碳质量分数明显增加，虽然BL、SC的下层覆盖物有机碳质量分数及覆盖量均高于MC的，但MC的下层腐熟堆肥更易被土壤微生物分解利用，故其覆盖效果最优^[25,33-34]。此外，研究^[25,35]表明，新鲜有机碳会优先富集在大团聚体

中；而微团聚体具备较强的物理包被作用，其内部的有机碳多是腐熟程度高、性质稳定的惰性成分，这类有机碳的转化利用周期较长，难以被植物与微生物快速分解吸收，因此，绿废覆盖能提升土壤中大团聚体里“易被利用的有机碳”的质量分数，为土壤补充了充足的活性营养与可利用碳源，这对改善土壤结构、促进植物生长都有积极意义。

相关性分析结果显示，大团聚体占比、MWD、GMD及不同粒径团聚体有机碳质量分数均与土壤容重呈显著或极显著负相关。这主要是因为土壤容重的增加导致孔隙度减小，进而降低了土壤的保水持水性能，使土壤物理环境条件恶化，不利于根系和微生物的活动，从而降低土壤的生物活性^[36-37]，并且不利于团聚体的形成。然而，经过堆肥处理的覆盖物，具有蓬松的质地和较高的孔隙度，从而减小了土壤容重。这使得根系能够穿插伸长，改善了土壤的物理性质，并且有利于团聚体的形成^[38]。土壤团聚体的各项特征值与土壤有机碳之间的相关性分析结果表明，土壤有机碳对于土壤团聚体的形成具有重要意义。有机碳的输入为土壤中的生物活动提供了稳定的碳源，促进了各种生物的新陈代谢过程，同时为团聚体的形成提供了多糖、菌丝、根系等有机胶结物质^[39-40]，从而增加了土壤团聚体的占比，提高了土壤结构的稳定性。绿废经过堆肥处理后，将大量营养物质输入土壤，提高了土壤中的全氮、碱解氮、速效钾等养分含量。此外，堆肥中的有机酸也能够活化土壤中难溶性养分，这些养分通过供给植物和微生物等活动能源的方式，增加了植物凋落物的生成量与根系分泌物的分泌量，进而推动了土壤有机碳的积累，并最终影响了土壤团聚体的形成。

5 结论

本研究中，城市绿地土壤以微团聚体(粒径<0.25 mm)为主，大团聚体(粒径为<2~0.25 mm)占比较小，经绿废覆盖后，大团聚体占比、MWD、GMD显著增加，D显著减小，表层(0~10 cm)土壤中，木片+腐熟绿废堆肥覆盖的土壤团聚体稳定性最高；城市绿地土壤大团聚体有机碳贡献率较低，经绿废覆盖后，土壤中大团聚体有机碳质量分数及贡献率

显著提高,木片+腐熟绿废堆肥覆盖效果最为明显;土壤团聚体各特征值指标与多数土壤理化性质指标显著相关,BD、SOC、TN、AHN、AP、AK等对于改善土壤结构、提高土壤稳定性有重要影响。综上可知,绿废覆盖能有效改善城市绿地土壤理化性质,为土壤团聚体的形成提供有利条件,其中,木片+腐熟绿废堆肥覆盖方案对于改善城市绿地土壤结构的效果最好。

参考文献:

- [1] 樊容源,叶绍明,张钱春,等. 杉木纯林及其混交林土壤团聚体活性有机碳组分特征[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(6): 20–28, 37.
- [2] BELMONTE S A, CELI L, STAHEL R J, et al. Effect of long-term soil management on the mutual interaction among soil organic matter, microbial activity and aggregate stability in a vineyard[J]. Pedosphere, 2018, 28(2): 288–298.
- [3] 马佳鑫,夏栋,艾尚进,等. 植被混凝土边坡土壤团聚体的稳定性与可蚀性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(6): 702–707.
- [4] 王小沁,陈玉雯,孙辉,等. 川西高山树线交错带海拔梯度上土壤有机碳稳定性特征[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(1): 1–7, 36.
- [5] 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.
- [6] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618–623.
- [7] 周伟,王文杰,何兴元,等. 哈尔滨城市绿地土壤肥力及其空间特征[J]. 林业科学, 2018, 54(9): 9–17.
- [8] 秦娟,许克福. 我国城市绿地土壤质量研究综述与展望[J]. 生态科学, 2018, 37(1): 200–210.
- [9] HONTORIA C, GARCÍA-GONZÁLEZ I, QUEMADA M, et al. The cover crop determines the AMF community composition in soil and in roots of maize after a ten-year continuous crop rotation[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 913–922.
- [10] 李法喜,段廷玉. 土壤干扰、秸秆覆盖及AM真菌对蒺藜苜蓿生长及土壤水稳定性团聚体的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(7): 1310–1318.
- [11] 陈曦,王改玲,刘焕焕,等. 生草覆盖对枣园土壤水稳定性团聚体中两种有机碳组成的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(2): 424–431.
- [12] 梁尧,蔡红光,杨丽,等. 玉米秸秆覆盖与深翻两种还田方式对黑土有机碳固持的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 133–140.
- [13] 郑燚,李素艳,孙向阳,等. 园林废弃物制树穴覆盖板的应用性能[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(1): 117–124.
- [14] 侯世星,李维,孙玉红,等. 覆盖生态木屑对城市公园土壤温湿度的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(16): 96–100.
- [15] 李婧,李素艳,孙向阳,等. 北京市朝阳区(五环内)绿地土壤重金属分布特征及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(3): 311–317.
- [16] 黄光群,黄晶,张阳,等. 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 177–182.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] 殷泽欣,张璐,白一帆. 园林绿化废弃物堆肥替代泥炭用于波斯菊的栽培[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(5): 1045–1051.
- [19] ZHOU W, SUN X Y, LI S Y, et al. Effects of organic mulching on soil aggregate stability and aggregate binding agents in an urban forest in Beijing, China[J]. Journal of Forestry Research, 2022, 33(3): 1083–1094.
- [20] 程晓月,许宏刚,朱亚灵,等. 兰州市中心城区道路绿地土壤pH和养分特征[J]. 草业科学, 2021, 38(3): 468–479.
- [21] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099–2103.
- [22] 王冰,张鹏杰,张秋良. 不同林型兴安落叶松林土壤团聚体及其有机碳特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 15–24.
- [23] 张彧行,翁白莎,严登华. 基于文献可视化分析的土壤团聚体研究进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(4): 429–438.
- [24] 周君丽,张家洋,田淑婷,等. 豫东南不同林分类型林地土壤碳氮含量与团聚体组成[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(4): 74–81.
- [25] 刘亚龙,王萍,汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 627–643.
- [26] 李桥. 园林废弃物堆肥对绿地土壤的改良研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [27] 胡自航,赵霞,董晓芸,等. 污泥与园林废弃物混合堆肥施用量对林地土壤重金属质量分数及微生物活性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(1): 31–37.
- [28] 李丽君. 长期施用堆肥对曲周农田土壤健康影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

(下转第123页)

- officinale* confers neuroprotection against hypoxic-ischemic brain damage in neonatal rats[J]. *Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 2020, 36(1): 43–53.
- [11] 韩宏, 刘文洁, 陈芳, 等. 铁皮石斛多糖对缺氧/复氧诱导星形胶质细胞AMPK/ULK1通路相关自噬的影响[J]. *中国现代应用药学*, 2021, 38(17): 2110–2115.
- [12] 沈鸿涛, 刘雪, 吴婷婷, 等. 铁皮石斛多糖对神经细胞凋亡抑制作用的研究[J]. *安徽医科大学学报*, 2020, 55(8): 1214–1220.
- [13] 李利娟, 刘文涛, 罗欢欢, 等. 菟丝子总黄酮对小鼠睾丸间质细胞凋亡相关蛋白Bax、Bcl-2和caspase-3的影响[J]. *解放军医学院学报*: 2022, 43(2): 199–204.
- [14] 谷亚龙, 张新东, 金保方. Nur77在不同发育阶段小鼠睾丸的表达及其功能[J]. *中国男科学杂志*, 2015, 29(4): 9–13.
- [15] MARTIN L J, TREMBLAY J J. Nuclear receptors in Leydig cell gene expression and function[J]. *Biology of Reproduction*, 2010, 83(1): 3–14.
- [16] JEYASURIA P, IKEDA Y, JAMIN S P, et al. Cell-specific knockout of steroidogenic factor 1 reveals its essential roles in gonadal function[J]. *Molecular Endocrinology*, 2004, 18(7): 1610–1619.
- [17] 孙佳音, 应锋, 韩晓冬. 睾丸间质细胞中睾酮合成酶及蛋白表达的调控因子[J]. *生殖与避孕*, 2009, 29(1): 42–47.
- [18] SCHIMMER B P, CORDOVA M, CHENG H, et al. Global profiles of gene expression induced by adrenocorticotropin in Y1 mouse adrenal cells[J]. *Endocrinology*, 2006, 147(5): 2357–2367.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 罗维

(上接第95页)

- [29] 王伟鹏, 张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10): 68–74.
- [30] 甘佳伟, 韩晓增, 邹文秀. 球囊霉素及其在土壤生态系统中的作用[J]. *土壤与作物*, 2022, 11(1): 41–53.
- [31] 吴梦瑶, 陈林, 庞丹波, 等. 贺兰山不同海拔植被下土壤团聚体分布及其稳定性研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 210–216.
- [32] ZHANG Z L, KAYE J P, BRADLEY B A, et al. Cover crop functional types differentially alter the content and composition of soil organic carbon in particulate and mineral-associated fractions[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(19): 5831–5848.
- [33] ZHANG X, SHEN S W, XUE S Q, et al. Long-term tillage and cropping systems affect soil organic carbon components and mineralization in aggregates in semiarid regions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 231: 105742.
- [34] 王国禧, 王萍, 刘亚龙, 等. 球囊霉素在土壤团聚体中的分布特征及影响因素的Meta分析[J]. *土壤学报*, 2024, 61(4): 1147–1155.
- [35] 吕奕彤, 于爱忠, 吕汉强, 等. 绿洲灌区玉米农田土壤团聚体组成及其稳定性对绿肥还田方式的响应[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(7): 1194–1204.
- [36] 李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 等. 生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3388–3396.
- [37] 焦锦堂, 孙万仓, 方彦, 等. 冬油菜覆盖对土壤理化性状及微生物的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(6): 128–139.
- [38] STANEK-TARKOWSKA J, CZYZ E A, PASTUSZCZAK M, et al. The impact of using different doses of biomass ash on some physical properties of podzolic soil under the cultivation of winter oilseed rape[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(11): 6693.
- [39] 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 等. 冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(4): 2363–2372.
- [40] 冯浩亮, 韩晓增, 陆欣春, 等. 有机培肥影响土壤团聚体形成与稳定的研究进展[J]. *土壤与作物*, 2023, 12(4): 393–400.

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳正