

园林废弃物资源化处理对人工林土壤养分及微生物碳源利用的影响

闫芳彬¹, 郑景明¹, 官殷婷², 赵一臣², 张家琦²

(1. 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083; 2. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714)

摘要: 【目的】园林废弃物经资源化处理利用是人工林土壤培肥和增强碳汇功能的有效途径。研究园林废弃物不同资源化方式对人工林土壤化学性质和微生物群落功能的影响, 可为园林废弃物的高效利用提供科学依据。【方法】在北京市房山区金叶榆 *Ulmus pumila* ‘Jinye’ 人工林下开展试验, 设置粉碎物、堆肥、生物质炭等 3 种园林废弃物资源化物料和 1、2、4 kg·m⁻² 3 个基于碳当量的施用量, 采用 Biolog-ECO 微平板法测定土壤微生物代谢强度, 分析了不同物料和施用量对土壤 pH、养分质量分数、微生物碳源利用程度和功能多样性指数的影响。【结果】① 3 种物料均提高了土壤有机碳和硝态氮质量分数, 粉碎物和堆肥处理显著降低了弱碱性土壤的 pH, 对铵态氮和有效磷质量分数影响不大; 生物质炭处理则提高了土壤 pH, 降低了铵态氮和有效磷质量分数; ② 土壤微生物对碳源利用程度和微生物群落功能多样性从大到小依次为粉碎物、堆肥、生物质炭; ③ 在 6 类碳源中, 糖类、羧酸类和氨基酸类是区分碳源微生物对 3 种物料利用的主要碳源种类; 3 种物料均促进了土壤微生物对酚酸碳源的利用, 降低了对氨基酸碳源的利用, 粉碎物和堆肥处理下微生物对氨基酸、聚合物等碳源利用强于生物质炭处理, 且生物质炭处理下微生物对糖类利用最强; ④ 不同施用量对土壤微生物碳源利用的影响差异不显著, 随施用量增大微生物群落功能多样性有增加趋势。【结论】园林废弃物粉碎物、堆肥及生物质炭均能在一定程度上改善人工林土壤质量, 其中, 粉碎物和堆肥处理对降低弱碱性土壤 pH、增加土壤肥力及提高土壤微生物群落功能多样性的效果优于生物质炭。图 3 表 4 参 33

关键词: 园林废弃物; 粉碎物; 堆肥; 生物质炭; Biolog-ECO; 微生物碳源利用

中图分类号: S724

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2023)05-1045-09

Effects of garden waste reuse treatments on soil nutrients and microbial carbon source utilization in plantation soil

YAN Fangbin¹, ZHENG Jingming¹, GONG Yinting², ZHAO Yichen², ZHANG Jiaqi²

(1. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Academy of Forest Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: [Objective] Resource utilization of garden waste is an effective way to improve soil fertility and enhance carbon sink function of plantations. Study on the effects of different reuse treatments of garden waste on soil chemical properties and microbial community in the plantation soil can provide scientific basis for efficient utilization of garden waste. [Method] Experiments were carried out in an *Ulmus pumila* ‘Jinye’ plantation, in Fangshan District, Beijing City. Experimentation including three types of garden wastes products, crushed material, compost and biochar, and 1, 2 and 4 kg·m⁻² carbon-based amounts were set up. Biolog-ECO microplate method combined with conventional soil chemical properties measurement were conducted in order to analyze the effects of different materials of garden waste and their application amounts on soil pH, nutrient content, microbial carbon source utilization and functional diversity indices of soil microbial community.

收稿日期: 2022-09-28; 修回日期: 2023-04-12

基金项目: 国家林业和草原局林草调查规划设计院自主研发项目 (LC-6-01)

作者简介: 闫芳彬 (0009-0008-9658-9417), 从事土壤生态研究。E-mail: yanfangbin@bjfu.edu.cn。通信作者: 郑景明 (0000-0002-8517-9999), 副教授, 从事恢复生态与森林生态研究。E-mail: zhengjm@bjfu.edu.cn

[**Result**] (1) All three types of organic materials increased the content of soil organic carbon and nitrate nitrogen while crushed material and compost significantly reduced the pH value of weakly alkaline soil, with little impact on the content of ammonium nitrogen and available phosphorus. Meanwhile, biochar increased the soil pH value and decreased the content of ammonium nitrogen and available phosphorus; (2) The microbial utilization of carbon sources and the functional diversity of microbial community are as follows: crushed material > compost > biochar. (3) Among the six types of carbon sources, carbohydrate, carboxylic acids and amino acid carbon source were the main carbon sources used by microorganisms, which could distinguish the three treatments of garden waste. The three organic materials all promoted the microbial utilization of phenolic acid carbon source and reduced the utilization of amino acid carbon source. The utilization of amino acid, polymer and other carbon sources by carbon-oriented microorganisms in treatment of crushed materials and compost were stronger than that of biochar while the microbial utilization of carbohydrate carbon source in biochar is the strongest among the three treatments; (4) The effect of application amounts on soil microbial carbon source utilization was not significant, and functional diversity of microbial community increased with the increase of application amounts. [**Conclusion**] Garden waste could be used to improve the soil quality of plantation by three types of treatments. Compared to biochar, crushed material and compost were more effective in reducing the pH of weakly alkaline soil, increasing soil fertility, and improving the functional diversity of soil microbial community. [Ch, 3 fig. 4 tab. 33 ref.]

Key words: garden waste; crushed materials; compost; biochar; Biolog-ECO; microbial utilization of carbon sources

土壤固碳减排是应对全球气候变化的重要措施之一。随着城市园林绿化面积不断扩大,植物自然凋落或经人工修剪所产生的园林废弃物数量激增^[1]。传统处置方式填埋和焚烧不仅会造成环境污染而且会导致生态系统物质循环和能量流动的终断,园林废弃物的合理资源化方式及还田增碳效果受到广泛关注^[2]。园林废弃物具有再生周期短、可生物降解、环境友好等优点。将园林废弃物资源化后添加到土壤中可促进土壤培肥,提高土壤固碳功能,对农林业可持续发展和土壤碳增汇具有重要意义^[3-4]。

园林废弃物资源化处理方式包括粉碎、堆肥、热解碳化制备生物质炭等,这些资源化产品施入土壤后会对土壤理化性质及土壤微生物代谢活性等造成不同的影响。粉碎是最简单的园林废弃物资源化处理方式,粉碎后的有机物料与土壤混合可以加速园林废弃物分解,具有改善土壤物理性质、提高土壤养分质量分数和增加微生物群落代谢活性的功能^[5-7],然而分解过程需要较长的时间。园林废弃物通过堆肥过程得到的产品属于有机肥,堆肥物料施入土壤后通过微生物对有机质的分解、养分的转化等作用,提高土壤中毛管孔隙度、土壤阳离子交换量及酶活性,促进土壤有机碳、有机氮与土壤团聚体的结合,增加土壤养分质量分数,有效降低碱性土壤 pH^[8-10],减少氧化亚氮(N₂O)和甲烷(CH₄)的排放,增强土壤碳汇功能^[11]。生物质炭是近年来新兴的园林废弃物资源化方式,具有含碳量丰富、多孔性、吸附能力强、容重小、稳定性强等特点,可以钝化土壤中的有害物质,增加土壤有机碳质量分数和碳固存,但其生物可利用性极低,会降低土壤微生物对碳源的利用和功能多样性指数。有研究表明:生物质炭施入土壤后的积极效果在 4 a 后才表现出来^[12-14]。

目前,对于园林废弃物单一资源化方式对土壤影响的相关研究比较多,而不同资源化方式的比较研究较少。本研究采用林地施肥试验,比较园林废弃物不同资源化方式和施用量对土壤养分质量分数及碳源微生物功能多样性的影响,旨在为优化园林废弃物资源化利用方式和人工林土壤培肥固碳提供理论依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究区域概况

样地位于北京市房山区张庄村公园(39°74'N, 116°08'E),该区为暖温带半湿润大陆季风气候,年平

均气温为 11.6 ℃，年平均降水量为 602.5 mm，林分为金叶榆 *Ulmus pumila* ‘Jinye’ 人工林，属于 2018 年北京市平原造林示范区，土壤为冲积性砂质壤土，蓄水保肥能力较差，土壤主要理化性质为：全氮 0.41 g·kg⁻¹、全磷 0.45 g·kg⁻¹、有机碳 5.41 g·kg⁻¹、硝态氮 (NO₃⁻-N) 1.40 mg·kg⁻¹、铵态氮 (NH₄⁺-N) 0.72 mg·kg⁻¹、有效磷 0.08 mg·kg⁻¹、pH 8.41、容重 1.45 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

供试物料为园林废弃物 3 种不同资源化处理方式的产品，由北京市京圃园生物工程有限公司提供，包括粉碎物 (GW1)、堆肥 (GW2) 和生物质炭 (GW3)。3 种产品性质如表 1 所示。

表 1 园林废弃物 3 种资源化处理产品的肥力相关指标

Table 1 Fertility related indexes of three treatment methods of garden waste

供试物料	pH	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	有机碳/(g·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)
GW1	-	2.85	0.54	60.22	-	1.62	3.83
GW2	8.41	5.13	1.33	34.66	22.10	1.10	2.58
GW3	9.21	1.13	1.29	53.54	3.78	0.21	4.79

说明：-表示无法测定。

2021 年 6 月选择地势平坦、植被分布均匀、土壤异质性小的金叶榆人工林作为研究样地，并设立标牌进行隔离保护。采用随机区组设计，3 种有机物料的施用量设置为 1、2、4 kg·m⁻² 碳当量^[2]，分别标记为 T1~T3，设置不施任何物料作为对照 (ck)，共 10 个处理，每个处理 3 个重复，林地内每个样方面积固定为 10 m²，各样方之间设 2 m 隔离带。施用物料方式为撒施后再用旋耕机将物料与 20 cm 深度土壤混合。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集与保存 2021 年 12 月，在每个样方内随机选取 5 个点，去除土壤表层凋落物，采集 0~20 cm 表层土壤样品，清除石砾、植物残体根系等杂物，充分混匀形成一个混合土壤样品，装入无菌塑封袋中 4 ℃ 低温保存，将土壤样品过 2 mm 筛，一部分土壤放入 4 ℃ 冰箱保存，1 周内进行 Biolog-ECO 分析，另外一部分室温风干用于土壤化学性质分析。

1.3.2 土壤化学性质测定 土壤 pH 测定采用电位法，土水质量比为 1.0:2.5；有机碳采用重铬酸钾氧化外加热法；铵态氮采用靛酚蓝比色法；硝态氮采用重氮耦合分光光度法；有效磷采用钼锑抗比色法^[15]。

1.3.3 Biolog-ECO 法及微生物功能多样性计算 土壤碳源微生物群落特征采用 Biolog-ECO 微平板法分析，该方法是研究土壤微生物群落总体活性和微生物代谢功能多样性的有力方法^[16]。具体实验步骤参考文献 [17]。将接种好的 Biolog-ECO 板盖好盖子，放入 25 ℃ 的培养箱中培养 216 h。每隔 24 h 用酶标仪在 590 nm 下测定各孔的吸光度^[18]，换算为土壤微生物对 6 类 31 种碳源 (包括 10 种糖类、7 种羧酸类、6 种氨基酸类、4 种聚合物类、2 种胺类和 2 种酚酸类) 的平均颜色变化率 (AWCD)，AWCD 越大，表明微生物对该碳源利用强度越强。采用 168 h 测定的数据分析土壤微生物群落对这 6 类碳源的利用特征，计算 Simpson 优势度指数、Shannon 多样性指数和 McIntosh 均匀度指数，表示土壤微生物群落的功能多样性^[19]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 25.0 对数据进行双因素方差分析 (two-way ANOVA)，检验资源化方式与施用量及其交互作用对土壤化学性质、微生物碳源利用及功能多样性影响的差异显著性，采用 LSD 法进行多重比较。采用 R 4.1.1 的 “FactoMineR” 和 “Factoextra” 包对 168 h 土壤微生物利用单一碳源的特性进行主成分分析。采用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤化学性质的影响

由表 2 可见：与 ck 相比，施用园林废弃物不同资源化物料极显著降低了土壤 pH ($P < 0.001$)，其中 GW1 和 GW2 处理显著低于 GW3 处理 ($P < 0.05$)。随施用量增加，GW1 和 GW2 处理下土壤 pH 极显著

降低 ($P<0.001$), GW1-T3 处理下土壤 pH 较 ck 处理降低最为明显 (降幅为 6.78%), 且不同物料和不同施用量间存在极显著交互作用 ($P<0.001$)。

与 ck 相比, 施用 3 种物料土壤有机碳质量分数均极显著提高 ($P<0.001$), 且 GW3 处理土壤有机碳质量分数显著高于 GW1 和 GW2 ($P<0.05$)。随施用量增加, GW2 和 GW3 处理有机碳质量分数极显著提高 ($P<0.001$), GW3-T2 土壤有机碳提升效果最显著, 较 ck 升高了 386.94%。不同资源化处理方式和不同施用量对土壤有机碳质量分数有极显著交互作用 ($P<0.001$)。

土壤铵态氮、硝态氮和有效磷对不同有机物料和施用量的响应略有不同。施入不同有机物料后, 土壤中硝态氮质量分数提高了 19.63%~343.93%, 且各处理间差异不显著。随施用量增加, 各处理下的土壤硝态氮质量分数显著增加 ($P<0.01$)。施入 GW1 和 GW2 后, 土壤铵态氮质量分数无显著变化, 但施用 GW3 后, 土壤铵态氮质量分数显著降低 ($P<0.01$), 且 GW3-T1 效果最显著, 较 ck 降低了 54.72%。随施用量增加, GW1 处理下的土壤铵态氮质量分数无显著变化, GW2 和 GW3 处理下的土壤铵态氮质量分数显著降低 ($P<0.01$)。不同资源化方式和不同施用量对土壤铵态氮质量分数交互作用显著 ($P<0.05$)。不同有机物料和施用量处理对土壤有效磷质量分数的影响均不显著。

表 2 不同处理对土壤 pH 和养分质量分数的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil pH and nutrient contents

处理	pH	土壤有机碳/(g·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	有效磷/(mg·kg ⁻¹)
ck	8.41±0.18 Aa	7.35±2.22 Cc	1.07±0.18 Ab	0.53±0.06 Aa	0.27±0.38 Aa
GW1-T1	8.02±0.03 Bb	9.56±0.80 Bc	1.28±0.25 Ab	0.46±0.63 Aa	0.13±0.06 Aa
GW1-T2	7.89±0.06 Bb	10.60±0.39 Bc	1.60±0.95 Ab	0.49±0.06 Aa	0.17±0.06 Aa
GW1-T3	7.84±0.08 Bb	11.08±0.52 Bc	4.23±0.99 Aa	0.58±0.11 Aa	0.17±0.06 Aa
GW2-T1	7.99±0.07 Bb	13.30±0.17 Bbc	2.47±0.35 Aab	0.46±0.08 Aab	0.47±0.27 Aa
GW2-T2	8.09±0.14 Bb	14.74±1.81 Bab	4.53±0.51 Aa	0.33±0.02 Bb	0.21±0.19 Aa
GW2-T3	7.94±0.16 Bb	26.76±0.35 ABa	3.10±1.56 Aab	0.46±0.02 Aab	0.40±0.37 Aa
GW3-T1	8.18±0.08 Bb	14.00±1.02 Bb	2.13±1.39 Ab	0.24±0.04 Bb	0.05±0.04 Aa
GW3-T2	8.42±0.06 Aa	35.79±1.11 Aa	3.02±0.47 Aab	0.41±0.13 ABc	0.04±0.02 Aa
GW3-T3	8.52±0.14 Aa	29.44±1.02 Aa	4.75±3.29 Aa	0.38±0.03 Bc	0.07±0.04 Aa
物料	27.618***	22.106***	0.751ns	8.265**	2.868 ns
F 施用量	15.716***	23.366***	6.959**	6.293**	0.447 ns
交互作用	5.913***	6.806***	1.440 ns	2.826*	0.551 ns

说明: 数值为均值±标准差; 多重比较中, 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 大写字母用于园林废弃物不同资源化方式间比较, 小写字母用于不同施用量间比较; 双因素方差分析中, *, **, ***分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$, ns 表示差异不显著。

2.2 不同处理对土壤微生物碳源利用程度的影响

随培养时间的延长, 不同处理下的土壤微生物对 31 种碳源的综合利用逐渐增强 (图 1)。在培养 0~24 h 内, 不同处理的平均颜色变化率小于 0.1, 土壤微生物对碳源利用能力较低, 活性较弱; 在 24~168 h 进入迅速增长阶段, 微生物活性旺盛; 168 h 后持续缓慢地升高。从培养稳定 168 h 时间点来看, GW1 和 GW2 处理的土壤微生物代谢活性明显高于 GW3, 不同施用量的平均颜色变化率差异不显著。

2.3 不同处理对土壤微生物群落功能多样性的影响

由表 3 可见: 施用 GW1 和 GW2, 土壤微生物群落功能多样性指数与 ck 均差异不显著; 施用 GW3 则显著降低了土壤微生物群落 Simpson 优势度指数和 McIntosh 均匀度指数 ($P<0.05$), 对土壤 Shannon 丰富度指数无显著影响。不同施用量对土壤微生物多样性指数影响不显著 ($P>0.05$), 但随施用量增加, 3 种功能多样性指数均呈增加趋势。

2.4 不同处理对土壤微生物碳源利用的影响

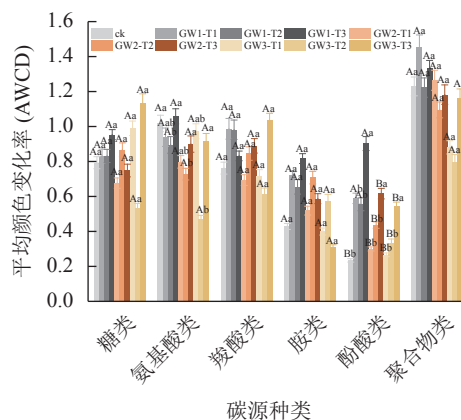
由图 2 可见: 在 6 类碳源中, 聚合物类是土壤微生物主要利用的碳源种类, 糖类、氨基酸类和羧酸类次之, 酚酸类和胺类利用最少。与 ck 相比, 施用 3 种物料均增加了土壤微生物对酚酸类碳源的利用

效率，其中 GW1 处理显著高于 GW2 和 GW3 ($P < 0.05$)，随施用量的增加，酚酸类碳源利用率显著增加 ($P < 0.05$)。但施用物料显著降低了土壤微生物对氨基酸类碳源的利用效率 ($P < 0.05$)。不同物料和施用量处理下土壤微生物对其他 4 类碳源利用差异均不显著，相对而言，GW1 和 GW2 处理对聚合物类、羧酸类、胺类碳源利用能力较高，GW3 对糖类碳源利用能力较高。

2.5 不同碳源对土壤微生物群落碳代谢的贡献

土壤微生物利用单一碳源特性的主成分分析 (图 3) 表明：前 5 个主成分的累积方差贡献率达 81.7%，其中第 1 主成分 (PC1) 贡献率为 30.2%，第 2 主成分 (PC2) 的贡献率为 18.8%，选取 PC1 和 PC2 分析土壤微生物碳源利用情况。就不同有机物料而言，在 PC1 轴上，GW1 分布在正方向，ck 分布在负方向，GW2 和 GW3 在正负方向上各有分布；在 PC2 轴上，ck 和 GW1 分布在 PC2 的正方向，GW2 分布在 PC2 的负方向，GW3 在正负方向上各有分布。就不同施肥量而言，在 PC1 轴上，T3 分布在正方向，ck 分布在负方向，T1 和 T2 在正负方向上各有分布；在 PC2 轴上各施用量分散不明显。整体而言，不同处理下的土壤微生物群落分异较大，离散程度从小到大依次为 GW1、GW2、GW3。

在此基础上进一步分析了 31 种碳源在 PC1、PC2 上的载荷值，载荷值越高表示对应碳源对主成分的影响越显著。由表 4 可见：对 PC1 贡献较大的碳源 ($|r| > 0.5$) 有 17 种，主要包括糖类 6 种、羧酸类 6 种、氨基酸类 3 种和酚酸类 2 种。对 PC2 贡献较大的有 8 种，主要包括氨基酸类 3 种、聚合物类



不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，大写字母用于园林废弃物不同资源化方式间比较，小写字母用于不同施用量间比较。

图 2 3 种处理下土壤微生物群落对 6 类碳源的利用程度

Figure 2 Utilization of 6 types of carbon sources by soil microbial community under three treatments

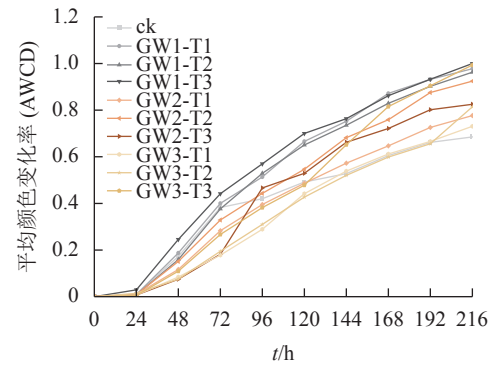


图 1 不同处理下土壤微生物群落平均颜色变化率随培养时间的变化

Figure 1 Change of microbial AWCD against incubation time for different treatments

表 3 土壤微生物群落功能多样性指数

Table 3 Functional diversity indices for soil microbial community			
处理	Simpson 优势度指数	Shannon 丰富度指数	McIntosh 均匀度指数
ck	0.94±0.02 Aa	2.99±0.23 Aa	5.65±0.67 Aa
GW1-T1	0.95±0.01 Aa	3.06±0.17 Aa	5.92±1.47 Aa
GW1-T2	0.95±0.01 Aa	3.10±0.11 Aa	5.80±0.94 Aa
GW1-T3	0.95±0.01 Aa	3.13±0.17 Aa	6.04±1.50 Aa
GW2-T1	0.94±0.01 Aa	2.95±0.16 Aa	5.08±0.54 ABa
GW2-T2	0.95±0.01 Aa	3.09±0.07 Aa	5.40±0.93 ABa
GW2-T3	0.95±0.01 Aa	3.12±0.09 Aa	5.36±0.68 ABa
GW3-T1	0.94±0.01 Ba	2.76±0.09 Aa	3.56±0.40 Ba
GW3-T2	0.94±0.03 Ba	2.74±0.37 Aa	3.91±1.26 Ba
GW3-T3	0.95±0.01 Ba	3.10±0.12 Aa	5.81±0.08 Ba

说明：数值为均值±标准差；多重比较中，同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)，大写字母用于园林废弃物不同资源化方式间比较，小写字母用于不同施用量间比较。

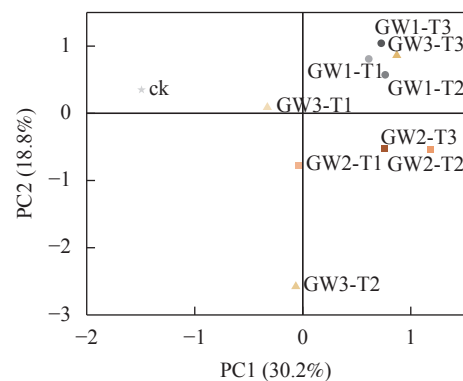


图 3 土壤微生物群落功能多样性的主成分分析

Figure 3 PCA of functional diversity of soil microbial community

表4 不同碳源在PC1和PC2上的载荷值

Table 4 Loading values of different carbon sources on PC1 and PC2

碳源		PC1	PC2	碳源		PC1	PC2
聚合物类	吐温 80		0.574	氨基酸类	L-精氨酸		0.764
	肝糖		0.565		L-天门冬酰胺	-0.553	0.643
酚酸类	2-羟基苯甲酸	0.605			L-苯丙氨酸	0.750	
	4-羟基苯甲酸	0.716			L-丝氨酸	-0.793	
胺类	腐胺		-0.909		甘氨酸-L-谷氨酸		0.575
	丙酮酸甲酯	0.844		α -D-乳糖	0.714		
羧酸类	D-葡萄糖胺酸	0.723		β -甲基-D-葡萄糖苷	-0.840		
	D-半乳糖醛酸	-0.506	0.782	i-赤藓糖醇		0.772	
	γ -羟丁酸	0.503		D-甘露醇	0.742		
	α -丁酮酸	0.574		N-乙酰-D-葡萄糖氨	0.872		
	D-苹果酸	0.833		D, L- α -磷酸甘油	0.617		
				D-半乳糖酸 γ -内酯	-0.611		

说明：表中列出了载荷值的绝对值 $|r| > 0.5$ 的碳源。

2种, 胺类、羧酸类和糖类各1种。对PC1和PC2起主要作用的是糖类、羧酸类和氨基酸类, 在主成分分离中具有主要贡献。

3 讨论

3.1 不同处理对土壤化学性质的影响

本研究发现：与施用粉碎物和堆肥相比, 生物质炭可以显著降低土壤pH。这是由于园林废弃物经粉碎施入土壤和堆肥腐熟后会被微生物分解产生酸类物质(包括有机酸及腐殖酸等), 与土壤中的碱性物质发生中和反应, 进而降低土壤pH^[20]。而生物质炭(pH 9.21)本身呈碱性, 且含有大量羧基, 可以交换降低土壤氢离子及交换性铝离子水平, 使土壤pH升高。施用生物质炭无法降低碱性土壤pH, 但有利于酸性土壤的改良^[21]。

虽然园林废弃物3种不同资源化处理方式均可提高人工林土壤有机碳质量分数, 但生物质炭对提高土壤有机碳质量分数作用最显著。园林废弃物及其堆肥产品本身富含有机物质, 施入土壤后增加了土壤有机碳含量, 且土壤微生物进一步促进了园林废弃物分解更多的有机碳^[22]。同时微生物不易把生物质炭中结构稳定性强的多碳芳香族分解掉, 可使碳在土壤中长期封存^[23-24]。因此, 生物质炭施入土壤后可显著提高土壤有机碳质量分数。

施用3种物料均会降低土壤铵态氮质量分数, 增加硝态氮质量分数。这可能是因为施用粉碎物和堆肥会增加微生物对土壤无机氮的固持作用, 使其转化为微生物氮, 抑制土壤氨化作用, 降低土壤铵态氮质量分数。由于土壤中铵态氮与硝态氮质量分数总是“此消彼长”, 随物料施用量的增加, 硝化细菌等微生物数量及种类增加, 提升了土壤硝化作用, 将铵态氮转化为硝态氮。但是生物质炭降低土壤铵态氮的机制可能有所不同, 生物质炭施用能够提高土壤pH, 进而可以调控土壤碳氮比影响氮素的有效性, 影响铵态氮质量分数^[25-27]。

3.2 不同处理对土壤微生物群落功能多样性的影响

本研究结果表明：施用粉碎物和堆肥能够增加土壤微生物的碳源利用能力, 而生物质炭则显著降低了土壤微生物群落对碳源的利用。园林废弃物经粉碎和堆肥施入土壤后, 随其分解会增加土壤微生物量碳等活性有机碳组分^[28], 提高蔗糖酶、磷酸酶等土壤酶的活性^[29]或通过携带部分外源菌群增加土壤微生物的数量和种类, 促进微生物群落对所测试碳源底物的利用。施用生物质炭会降低土壤微生物群落功能多样性的可能原因包括：①土壤中无机氮、磷相对缺乏且碳氮比高, 生物质炭难以降解, 微生物分解

慢,不能长期提供土壤微生物易利用的碳源物质,导致微生物多样性低下。有研究表明:有效养分过高或过低都会对土壤微生物产生不利影响^[14,29]。②生物质炭能够吸附保护酶促反应结合位点,抑制酶促反应,降低酶活性^[30]。③生物质炭中含有重金属、乙烯、高盐类物质和多环芳烃等对微生物有害的物质,抑制了微生物生长^[31]。本研究中施加生物质炭导致土壤铵态氮和有效磷水平的降低,从而降低微生物功能多样性,支持了第一种解释,然而其内在机制还需要进一步探讨。

施用 3 种物料均降低了土壤微生物对氨基酸碳源的利用,增加了对酚酸类碳源的利用,这可能是由于土壤中有效养分不均衡所致。有研究表明:长期施氮肥会增加土壤中的好气性固氮菌、氨化细菌、亚硝化细菌和反硝化细菌等氮素功能菌群的数量,提高了氨基酸碳源的利用^[32]。本研究中仅施入了园林废弃物而没有添加氮、磷、钾等无机肥料,可能由于有效养分不均衡限制了利用氨基酸类的微生物功能类群的生长;此外,物料中可能含有的重金属等污染物,也会改变以酚酸类为碳源的土壤微生物活性。

本研究中不同资源化处理方式下土壤微生物对碳源的利用模式具有明显的差异,糖类和羧酸类是区分粉碎物、堆肥和生物质炭的敏感碳源,氨基酸类是区分粉碎物和堆肥的敏感碳源。在糖类和羧酸类碳源中, α -D-乳糖、D-甘露醇、N-乙酰-D 葡萄糖氨、D, L- α -磷酸甘油和丙酮酸甲酯、D-苹果酸、 γ -羟丁酸、 α -丁酮酸、D-葡萄糖胺在 PC1 上为正值,粉碎物和堆肥位于 PC1 正轴,表明粉碎物和堆肥提高了土壤微生物对这 4 种糖类和 5 种羧酸类碳源的利用。如有研究表明:施入凋落物会显著提高土壤微生物对糖类和羧酸类碳源的利用^[33]。在氨基酸类碳源中,L-精氨酸、L-酰胺和甘氨酸-L-谷氨酸在 PC2 轴上为正值,表明粉碎物提高了土壤微生物对这 3 种氨基酸类碳源的利用,所以粉碎物和堆肥高效利用的碳源种类明显多于生物质炭,这与土壤微生物对碳源的利用程度和微生物群落功能多样性结果也一致。

4 结论

施用园林废弃物粉碎物和堆肥会降低弱碱性土壤 pH,施用生物质炭可以大幅提升土壤有机碳的质量分数,降低铵态氮的有效性。3 种物料能通过改变土壤化学性质而影响土壤微生物碳源利用和功能多样性。粉碎物和堆肥提高了土壤微生物群落功能多样性指数,生物质炭显著降低了土壤微生物群落的优势度和均匀度。施用粉碎物、堆肥和生物质炭均降低了土壤微生物对氨基酸碳源的利用,增加了对酚酸碳源的利用。生物质炭处理下微生物对糖类利用率最高,除糖类外,粉碎物和堆肥处理下土壤微生物对氨基酸、聚合物等 5 类碳源的利用率均高于生物质炭处理。糖类和羧酸类是区分粉碎物、堆肥与生物质炭的主要碳源种类,氨基酸类是区分粉碎物和堆肥的主要碳源种类。不同施用量对微生物群落碳源利用和功能多样性影响差异相对较小,随施用量增大微生物群落功能多样性增大趋势不明显。

5 参考文献

- [1] 陈浩天,张地方,张宝莉,等. 园林废弃物不同处理方式的环境影响及其产物还田效应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 239 - 244.
CHEN Haotian, ZHANG Difang, ZHANG Baoli, *et al.* Environmental impacts and returning effects of garden wastes under different disposal methods [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(21): 239 - 244.
- [2] D'HOSE T, DEBODE J, DE TENDER C, *et al.* Has compost with biochar applied during the process added value over biochar or compost for increasing soil quality in an arable cropping system? [J/OL]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 156: 103706 [2022-09-20]. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103706.
- [3] 罗玉叶,邱龙霞,龙军,等. 不同秸秆还田率情境下的亚热带水田土壤的“碳汇”贡献模拟研究[J/OL]. 土壤学报, 2022 [2022-09-20]. doi: 10.11766/trxb202112280700.
LUO Yuyue, QIU Longxia, LONG Jun, *et al.* Research on the carbon sink contribution of subtropical paddy field soil under different straw return rates [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022 [2022-09-20]. doi: 10.11766/trxb202112280700.
- [4] 方精云. 碳中和的生态学透视[J]. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1173 - 1176.
FANG Jingyun. Ecological perspectives of carbon neutrality [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(11): 1173 - 1176.
- [5] 程曼. 黄土丘陵区典型植物枯落物分解对土壤有机碳、氮转化及微生物多样性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学,

- 2015.
- CHENG Man. *Effects of Litter Decomposition on Soil Carbon, Nitrogen, and Soil Microbial Community Structure on the Loess Plateau, China* [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.
- [6] 尹欢宇. 剩余物处理对华北落叶松人工林土壤质量和生长的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- YIN Huanyu. *Effects of Residue Treatment on Growth and Soil Quality of Larix principis-rupprechtii Plantation* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [7] 王利彦, 周国娜, 朱新玉, 等. 凋落物对土壤有机碳与微生物功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2709 – 2718.
- WANG Liyan, ZHOU Guona, ZHU Xinyu, *et al.* Effects of litter on soil organic carbon and microbial functional diversity [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(7): 2709 – 2718.
- [8] 连鹏, 范周周, 郭东鑫, 等. 城市污泥与园林废弃物混合堆肥施用对林地土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(7): 2842 – 2848.
- LIAN Peng, FAN Zhouzhou, GUO Dongchu, *et al.* Effects of mixed composting of municipal sludge and garden waste on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in forest land [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(7): 2842 – 2848.
- [9] REMIGIO P, THOMAS Z L, SABINE H, *et al.* Composting modifies the patterns of incorporation of OC and N from plant residues into soil aggregates [J]. *Geoderma*, 2019, 353: 415 – 422.
- [10] 司莉青, 陈利民, 郑景明, 等. 城市污泥与园林废弃物堆肥混合添加对土壤改良的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(1): 1 – 9.
- SI Liqing, CHEN Limin, ZHENG Jingming, *et al.* Effect of mixed sewage sludge and garden waste composts on potting soil amendment [J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(1): 1 – 9.
- [11] NG E L, PATTI A F, ROSE M T, *et al.* Does the chemical nature of soil carbon drive the structure and functioning of soil microbial communities? [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 70: 54 – 61.
- [12] JONES D L, ROUSK J, EDWARDS-JONES G, *et al.* Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 45: 113 – 124.
- [13] 武爱莲, 丁玉川, 焦晓燕, 等. 玉米秸秆生物炭对褐土微生物功能多样性及细菌群落的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 736 – 743.
- WU Ailian, DING Yuchuan, JIAO Xiaoyan, *et al.* Effect of corn-stalk biochar on soil microbial functional diversity and bacterial community in cinnamon soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(6): 736 – 743.
- [14] 侯建勋, 张水梅, 袁静超, 等. 玉米秸秆源有机物料对黑土养分有效性与酶活性的提升效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 610 – 618.
- HOU Jianxun, ZHANG Shumei, YUAN Jingchao, *et al.* Effects of maize straw-derived organic materials on improving soil nutrient availability and enzyme activities in a Mollisol [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(4): 610 – 618.
- [15] 田雅楠, 王红旗. Biolog法在环境微生物功能多样性研究中的应用[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(3): 50 – 57.
- TIAN Ya'nan, WANG Hongqi. Application of biolog to study of environmental microbial function diversity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(3): 50 – 57.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- LU Rukun. *Methods for Agricultural Chemical Analysis of Soil* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 林先贵. 土壤微生物研究原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- LIN Xiangui. *Principles and Methods of Soil Microbiology Research* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [18] 祝英, 王治业, 彭轶楠, 等. 有机肥替代部分化肥对土壤肥力和微生物特征的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1161 – 1167.
- ZHU Ying, WANG Zhiye, PENG Yi'nan, *et al.* Changes of soil nutrients and microbial communities under the condition of organic fertilizers replacing part of chemical fertilizers [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1161 – 1167.
- [19] 王晶晶, 樊伟, 崔珺, 等. 氮磷添加对亚热带常绿阔叶林土壤微生物群落特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8361 – 8373.
- WANG Jingjing, FAN Wei, CUI Jun, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community

- characteristics in a subtropical evergreen broadleaved forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(24): 8361 – 8373.
- [20] 杜田甜, 孙向阳, 李素艳, 等. 园林绿化废弃物覆盖对城市绿地土壤肥力影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, **43**(10): 110 – 117.
DU Tiantian, SUN Xiangyang, LI Suyan, *et al.* Effects of landscaping waste mulching on soil fertility of urban green space [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, **43**(10): 110 – 117.
- [21] SHI Renyong, HONG Zhineng, LI Jiuyu, *et al.* Peanut straw biochar increases the resistance of two Ultisols derived from different parent materials to acidification: a mechanism study [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, **210**: 171 – 179.
- [22] LIU Chang, LU Meng, CUI Jun, *et al.* Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis. [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(5): 1366 – 1381.
- [23] 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 等. 生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2298 – 2303.
ZHANG Ting, WANG Xudong, PANG Mengwen, *et al.* Impacts of biochar and straw application on soil organic carbon transformation [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2298 – 2303.
- [24] SINGH B P, COWIE A L. Long-term influence of biochar on native organic carbon mineralisation in a low-carbon clayey soil. [J/OL]. *Scientific Reports*, 2014, **4**(1): 3687[2022-09-20]. doi: 10.1038/srep03687.
- [25] 李明, 李忠佩, 刘明, 等. 不同秸秆生物炭对红壤性水稻土养分及微生物群落结构的影响[J]. 中国农业科学, 2015, **48**(7): 1361 – 1369.
LI Ming, LI Zhongpei, LIU Ming, *et al.* Effects of different straw biochar on nutrient and microbial community structure of a red paddy soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, **48**(7): 1361 – 1369.
- [26] 张登晓, 周惠民, 潘根兴, 等. 城市园林废弃物生物质炭对小白菜生长、硝酸盐含量及氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2014, **20**(6): 1569 – 1576.
ZHANG Dengxiao, ZHOU Huimin, PAN Genxing, *et al.* Effect of municipal green waste biochar addition on the growth, nitrate content and nitrogen use efficiency of greenhouse pakchoi [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(6): 1569 – 1576.
- [27] MAESTRINI B, HERRMANN A M, NANNIPIERI P, *et al.* Ryegrass-derived pyrogenic organic matter changes organic carbon and nitrogen mineralization in a temperate forest soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **69**: 291 – 301.
- [28] 冯小杰, 刘国梁, 张伟, 等. 园林绿化废弃物堆肥对土壤有机碳组分影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, **43**(7): 120 – 127.
FENG Xiaojie, LIU Guoliang, ZHANG Wei, *et al.* Effects of green waste compost on soil organic carbon fractions [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, **43**(7): 120 – 127.
- [29] 何甜甜, 王静, 符云鹏, 等. 等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物生物量碳氮的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 450 – 458.
HE Tiantian, WANG Jing, FU Yunpeng, *et al.* Effects of adding straw and biochar with equal carbon content on soil respiration and microbial biomass carbon and nitrogen [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 450 – 458.
- [30] 丁艳丽, 刘杰, 王莹莹. 生物炭对农田土壤微生物生态的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(11): 3311 – 3317.
DING Yanli, LIU Jie, WANG Yingying. Effects of biochar on microbial ecology in agriculture soil: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(11): 3311 – 3317.
- [31] 何秀峰, 赵丰云, 于坤, 等. 生物炭对葡萄幼苗根际土壤养分、酶活性及微生物多样性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(6): 19 – 26.
HE Xiufeng, ZHAO Fengyun, YU Kun, *et al.* Effect of biochar on nutrient, enzyme activities and microbial diversity of rhizosphere soil of grape seedlings [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6): 19 – 26.
- [32] 张淑红, 高巍, 张恩平, 等. 长期定位施氮对连作番茄土壤可培养微生物数量的影响[J]. 土壤通报, 2012, **43**(1): 60 – 65.
ZHANG Shuhong, GAO Wei, ZHANG Enping, *et al.* Effect of long-term nitrogen application on culturable microorganisms quantity of tomato continuous cropping [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2012, **43**(1): 60 – 65.
- [33] 李秋梅, 黎胜杰, 王欣雨, 等. 改变碳输入对沂蒙山区典型次生林土壤微生物碳源代谢功能的影响[J]. 生态学报, 2021, **41**(10): 4110 – 4119.
LI Qiumei, LI Shengjie, WANG Xinli, *et al.* Influences of changing carbon inputs on soil microbial carbon metabolism in natural secondary forests in Yimeng mountainous area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(10): 4110 – 4119.