

园林绿化废弃物堆肥配施化肥对土壤腐殖质碳组分的影响

刘国梁¹, 吴伟², 李素艳^{1*}, 孙向阳¹, 岳宗伟¹, 魏宇光¹

(1. 北京林业大学林学院, 北京 100083; 2. 北京市潮白河管理处, 北京 101300)

摘要:以大田试验为依托, 探究堆肥配施化肥对土壤腐殖质碳组分含量及主要养分的影响, 明确园林绿化废弃物堆肥对土壤的培肥效果, 为改良施肥方案、提升土壤质量提供科学依据。试验共设置 6 个处理, 分别为不施肥、100% 化肥、25% 堆肥 + 75% 化肥、50% 堆肥 + 50% 化肥、75% 堆肥 + 25% 化肥、100% 堆肥。测定施肥 150、500 d 后土壤总有机碳、腐殖质碳组分含量及基本化学性质。结果表明: 堆肥配施化肥能有效提升土壤胡敏酸/富里酸、胡敏酸/腐殖酸值, 降低碳氮比, 加深腐殖化程度; 短期内单施化肥对土壤腐殖质碳组分的积累无显著效果, 与单施化肥相比, 堆肥配施化肥均使土壤总有机碳、水溶性有机碳、胡敏酸碳、富里酸碳、胡敏素碳含量有所提高, 其提高幅度分别为 1%~14%、10%~24%、5%~29%、3%~16%、1%~19%; 等氮施肥条件下, 施肥 150 和 500 d 后不同比例堆肥化肥配施有效提升了土壤速效养分, 降低了土壤 pH, 与单施化肥相比, 堆肥配施化肥使土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量有所提高, 提高幅度分别为 3%~48%、1%~15%、9%~22%, 其中 50% 堆肥 + 50% 化肥处理对主要养分的提升效果最佳。上述结果表明, 堆肥化肥配施可有效提升土壤有机碳数量, 对土壤腐殖质碳组分影响显著; 50% 堆肥 + 50% 化肥处理既能促进土壤腐殖质的形成, 又有利于主要养分的提升, 是值得推荐的施肥方式。

关键词: 有机无机肥配施; 梨园; 园林绿化废弃物堆肥; 腐殖质碳组分; 养分动态

目前, 大部分农业地区在生产过程中存在长期依赖化肥投入以获得作物较高产量, 导致土壤酸化板结、有机质逐年降低等土壤退化问题。合理减少化肥的施用并配施适量有机肥能有效改善土壤理化性质、培肥地力, 对土壤生态环境质量及作物生产力均有积极的作用。园林绿化废弃物主要指城市绿地或郊区林地中自然凋落或养护过程中所产生的废弃修剪物, 通过堆肥技术可以将园林绿化废弃物转变为安全、稳定的有机物料, 使资源有效利用^[1]。园林绿化废弃物堆肥用途广泛, 不仅可以优化土壤结构, 还可以为动物、微生物提供较好的生存环境, 且堆肥在分解过程中能释放营养元素, 为苗木提供养分基础^[2-3], 可以作为一类有机肥和土壤改良剂施入土壤, 提升土壤养分含量。

土壤肥力状况与其有机碳含量十分相关, 腐殖质碳是土壤有机碳存在的主要类型, 占土壤有机碳总含量的 50%~75%, 土壤腐殖质形态及组分与土

壤有机碳固持、土壤理化性质等紧密联系, 且具有吸收、交换养分等多种功能, 对改善土壤团粒结构、提高及维持土壤肥力具有重要作用^[4]。孙莹等^[5]研究发现有机肥替代化肥可显著提升土壤有机碳含量, 改善土壤腐殖质组分并促进有机质在土壤中腐殖化程度, 从而较好地维持和提高土壤肥力, 提升作物品质和产量; Doane 等^[6]研究表明有机无机肥配施增加了胡敏酸碳含量, 且在腐殖质碳组分中胡敏酸碳含量显著高于胡敏素碳和富里酸碳含量。

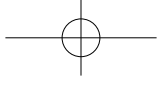
施肥不仅影响土壤有机碳组分含量, 也会影响有机碳结构。俄胜哲等^[7]研究发现施用有机肥对土壤腐殖质结合形态具有显著影响, 进而影响土壤有机碳含量; 王旭东等^[8]研究发现施用有机肥可以提高胡敏酸碳的活化程度, 使胡敏酸分子趋于年轻化, 而施用化肥则只能增加土壤有机质羧基含量; 冯小杰等^[9]研究发现土壤腐殖质含量受施肥影响较大, 堆肥中含有大量的腐殖质, 施用堆肥可影响土壤腐殖质碳的形成和转化, 且腐殖质碳含量与碱解氮、有效磷和速效钾呈正相关关系。以上研究表明, 不同比例有机肥配施化肥对土壤腐殖质碳组分的影响存在较大差异, 且不同施肥年限及施肥

收稿日期: 2024-03-11; 录用日期: 2024-04-01

基金项目: 北京市园林绿化局推广项目 (2019-KJC-02-13)。

作者简介: 刘国梁 (1997-), 在读博士研究生, 主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: 632836256@qq.com。

通讯作者: 李素艳, E-mail: lisuyan@bjfu.edu.cn。



种类对土壤碳结构及腐殖质碳组分影响不同,明确施肥后土壤腐殖质碳组分及主要养分含量对提升土壤质量具有重要意义。

近年来,许多学者从不同施肥方式、施肥水平、肥料种类等方面对有机无机肥配施进行了大量的研究,而在园林绿化废弃物堆肥作为有机肥料添加条件下对施肥后不同时期土壤腐殖质碳组分变化及养分持续性的研究较少。为了满足实际生产需要,探究园林废弃物堆肥施用效果,通过田间试验,研究堆肥对土壤腐殖质碳组分的影响,为合理施肥、提升土壤质量及可持续生产提供科学参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地点位于北京市通州区永乐店镇(116°48'38" E, 39°40'53" N),属大陆性季风气候区,受冬、夏季风影响,形成春季干旱多风、夏季炎热多雨、秋季天高气爽、冬季寒冷干燥的气候特征。年平均温度 11.3℃,降水 620 mm 左右。研究区果园土壤质地为砂质壤土,肥力中等,土壤基本理化性质: pH 8.1、有机质 21.8 g·kg⁻¹、全氮 2.5 g·kg⁻¹、碱解氮 58.8 mg·kg⁻¹、有效磷 56.9 mg·kg⁻¹、速效钾 271.6 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验共设 6 个处理:不施肥(CK)、100% 化肥(T1)、25% 堆肥+75% 化肥(T2)、50% 堆肥+50% 化肥(T3)、75% 堆肥+25% 化肥(T4)、100% 堆肥(T5)。所施氮肥为尿素(N 46.4%)、磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、钾肥为氯化钾(K₂O 60%),有机肥为园林绿化废弃物堆肥(N 15.52 g·kg⁻¹, P₂O₅ 2.25 g·kg⁻¹, K₂O 7.14 g·kg⁻¹,有机质≥30%);选用 6 年生库尔勒香梨为试验材料,施肥量根据研究区土壤养分状况并结合果园施肥经验制定,配施处理以等氮量为基准,在等氮量替代条件下,用园林绿化废弃物堆肥与氮肥配合施用,堆肥带入的磷、钾使用磷肥、钾肥折算补充,确保各处理氮、磷、钾施用量完全相等;化肥施肥总量以 1 kg·株⁻¹(尿素 0.3 kg,过磷酸钙 0.3 kg,氯化钾 0.4 kg)为基准,不同配施方案下每株梨树施入氮磷钾的总量分别为 N 0.139 kg、P₂O₅ 0.036 kg、K₂O 0.240 kg;供试肥料和具体施肥量见表 1。每个处理设置 10 株梨树,即 10 个重复,株行距为

2 m×2 m,小区面积为 4 m²,每个小区 1 株,随机区组排列,共计 60 个小区。选取 60 株长势一致、无病虫害的梨树进行编号并挂标签作为研究对象;为避免边缘效应影响,小区之间设置隔离行;灌溉、杀虫、除草等同常规管理。于 2020 年 3 月 17 日进行施肥处理,采用环状施肥法进行施肥,即以梨树为中心,于梨树树冠垂直投影外缘处挖半径约为 1 m、宽和深均为 20~30 cm 的环状沟,将尿素、过磷酸钙、氯化钾和堆肥混合均匀后施入环状沟内,此后不再施用任何肥料。

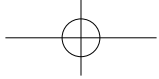
表 1 试验各处理的施肥量 (kg·株⁻¹)

处理	化肥			园林绿化 废弃物堆肥
	尿素	过磷酸钙	氯化钾	
CK	0.000	0.000	0.000	0.00
T1	0.300	0.300	0.400	0.00
T2	0.225	0.258	0.373	2.24
T3	0.150	0.216	0.347	4.48
T4	0.075	0.174	0.320	6.72
T5	0.000	0.132	0.293	8.96

1.3 测定指标及方法

土壤采集:分别于 2020 年 8 月 20 日及 2021 年 8 月 5 日进行土样采集,每个小区采用土钻在环状沟附近采集深度为 0~40 cm 的 5 点混合土壤样品,每个处理重复 3 次;采集的土样经自然风干、过筛,用于测定土壤主要速效养分及腐殖质碳组分。

土壤化学性质: pH 使用电位法测定(水:土=2.5:1);土壤有机碳采用重铬酸钾和浓硫酸氧化-硫酸亚铁滴定法测定;称取土样加入浓硫酸和混合催化剂,在 180~380℃ 条件下消煮 2 h(溶液呈乳白色),然后采用全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮;土壤碱解氮采用 1.2 mol·L⁻¹ 氢氧化钠处理,标准硫酸溶液滴定;土壤有效磷采用 0.5 mol·L⁻¹ 碳酸氢钠提取,用钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用 1 mol·L⁻¹ 乙酸铵提取,用火焰光度计测定^[10]。称取过 0.25 mm 筛的风干土,加入蒸馏水(土:水=1:10) 70℃ 振荡提取 1 h,离心,过滤,滤液为水溶性碳,使用总有机碳分析仪进行测定。腐殖质碳组分有富里酸碳、胡敏酸碳和胡敏素碳,采用腐殖质组分修改法提取,使用总有机碳分析仪进行测定^[11]。



1.4 数据处理

利用 Excel 2019 和 DPS 9.5 数据处理系统对所获数据进行整理分析并绘制图表。

2 结果与分析

2.1 施肥 150、500 d 土壤总有机碳、水溶性有机碳含量

由图 1(A) 可知, 不同配施方案下, 施肥 150 d 后土壤总有机碳含量出现显著变化, 各施肥处理总有机碳含量随着施用堆肥配施比例升高整体呈上升趋势, 总有机碳含量表现为 $T4 > T5 > T3 > T2 > T1 > CK$, 等氮施肥条件下, 堆肥配施化肥处理总有机碳含量较单施化肥 ($T1$) 提高了 1%~14%; 施肥 500 d 后, 除 $T5$ 外, 其他施肥处理土壤总有机碳含量都出现下降, 总有机碳含量表现为 $T5 > T4 > T3 > T2 > T1 > CK$,

范围是 $14.70 \sim 19.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由图 1(B) 可知, 施肥 150 d 后, 与单施化肥相比, 配施堆肥的 $T2 \sim T5$ 处理不同程度地增加了土壤水溶性有机碳的含量, 增幅 15%~19%, 水溶性有机碳含量表现为 $T5 > T4 > T3 > T2 > CK > T1$; 施肥 500 d 后, $T3$ 、 $T4$ 、 $T5$ 水溶性有机碳含量较 150 d 分别提高了 7%、12%、9%, 水溶性有机碳含量表现为 $T5 > T4 > T3 > T2 > T1 > CK$, 最大值 $T5$ 处理 ($0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较不施肥提高了 1.3 倍。

总体上, 随着堆肥施用比例增大, $T1 \sim T5$ 处理土壤总有机碳与水溶性有机碳含量整体呈明显上升趋势, 在施肥 150 d 后土壤总有机碳最大值出现在 $T4$ 处理, 而在施肥 500 d 后总有机碳最大值出现在施用堆肥最多的 $T5$ 处理; 不施肥处理总有机碳与水溶性有机碳在施肥 150 与 500 d 后无明显变化。

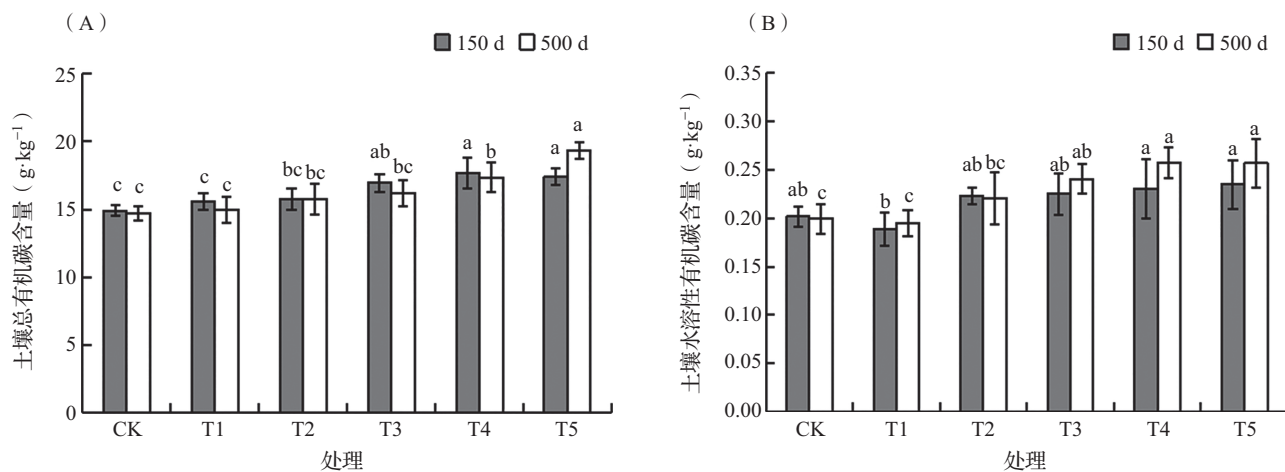


图 1 不同施肥处理 150、500 d 土壤总有机碳、水溶性有机碳含量

注: 柱上不同小写字母表示相同时期不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.2 施肥 150、500 d 土壤腐殖质碳组分含量

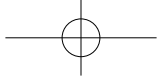
不同比例配施堆肥后, 土壤腐殖质碳组分含量在 150、500 d 均出现显著差异, 施用堆肥的处理腐殖质碳组分含量均高于不施肥和单施化肥的处理 (图 2)。

由图 2(A) 可知, 施肥 150 d 后, $T1 \sim T5$ 处理土壤腐殖质碳含量随着施用堆肥比例升高整体呈上升趋势, 腐殖质碳含量表现为 $T4 > T5 > T3 > T2 > CK > T1$, 施肥后各处理腐殖质碳变化趋势与土壤总有机碳含量相似; 相较于施肥 150 d, 施肥 500 d 后腐殖质碳最大值变为 $T5$ 处理, $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 处理土壤腐殖质碳含量出现下降, 腐殖质碳含量表现为 $T5 > T4 > T3 > T2 > T1 > CK$, 范围是 $8.81 \sim 11.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,

占总有机碳含量的 60%~64%。

由图 2(B) 可知, 施肥 150 d 后, 施用堆肥处理土壤富里酸碳含量较不施肥均显著提升, 各施肥处理富里酸碳含量为 $3.68 \sim 4.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 占腐殖质碳组分的 36%~41%, 富里酸碳含量表现为 $T3 > T5 > T4 > T2 > T1 > CK$; 施肥 500 d 后, 富里酸碳含量较 150 d 均有所降低, 降低幅度为 1%~6%, 各处理富里酸碳范围是 $3.45 \sim 4.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其含量表现与 150 d 一致, 为 $T3 > T5 > T4 > T2 > T1 > CK$, 最大值 $T3$ 处理为不施肥处理的 1.2 倍。

由图 2(C) 可知, 施肥 150 d 后, 土壤胡敏酸碳最大值出现在 $T4$ 处理, 为 $6.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是最小值单施化肥处理的 1.34 倍, 胡敏酸碳含量表现为



T4>T5>T3>T2>CK>T1; 施肥 500 d 后各施肥处理胡敏酸碳变化显著, 施用堆肥的处理胡敏酸碳含量均高于不施肥或单施化肥处理, T1~T5 处理胡敏酸碳含量范围是 5.35~7.41 g·kg⁻¹, 占腐殖质碳的 61%~64%, 胡敏酸碳含量表现为 T5>T4>T3>T2>T1>CK。

由图 2 (D) 可知, 施肥 150 d 后, 施用堆肥

的处理土壤胡敏素碳含量虽有少量提升, 但各处理间无显著差异 ($P>0.05$), 胡敏素碳含量表现为 T5>T4>T3>T2>CK>T1, 范围是 5.54~6.59 g·kg⁻¹; 施肥 500 d 后, T5 处理胡敏素碳含量较其他处理有显著提升, 为 7.79 g·kg⁻¹, 是不施肥处理的 1.36 倍, 胡敏素碳含量表现为 T5>T4>T3>T2>CK>T1。

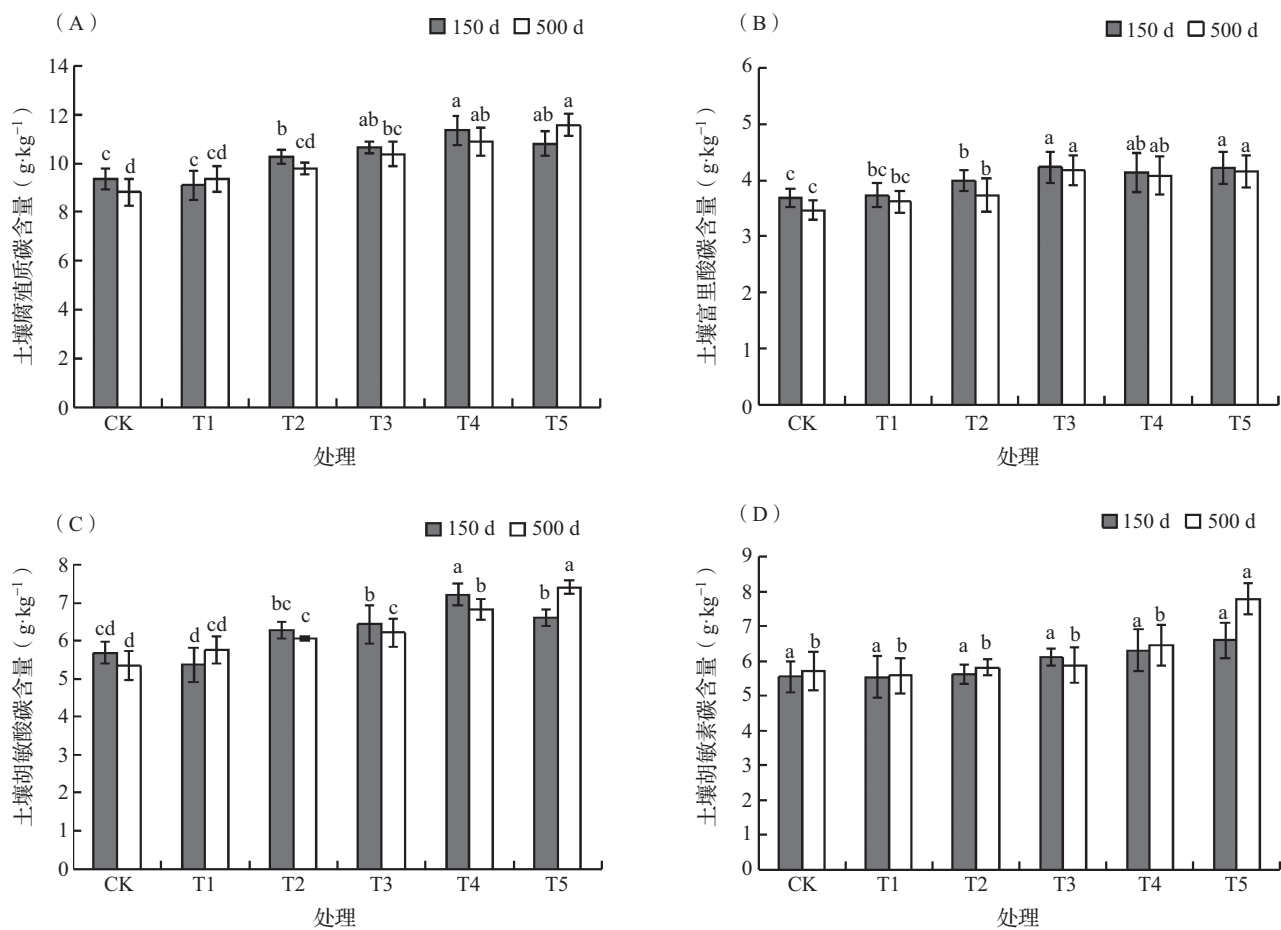


图 2 不同施肥处理 150、500 d 土壤腐殖质碳组分含量

2.3 施肥 150、500 d 土壤胡敏酸/富里酸、胡敏酸/腐殖酸值

由图 3 (A) 可知, 施肥 150 d 后, 不同处理间土壤胡敏酸/富里酸 (HA/FA) 出现显著差异 ($P<0.05$), 最大值 T4 处理较不施肥和单施化肥分别显著提升了 13.6% 和 21.5%, 各处理 HA/FA 范围是 1.44~1.75, 表现为 T4>T2>T5>CK>T3>T1; 施肥 500 d 后, HA/FA 最大值变为 T5 处理, 较最小值 T3 处理提升了 20.1%, 各处理 HA/FA 范围是 1.49~1.79, 表现为 T5>T4>T2>T1>CK>T3。

由图 3 (B) 可知, 施肥 150 d 后, 不同处理

间胡敏酸/腐殖酸 (PQ) 值相近, 但仍存在显著差异 ($P<0.05$), 最大值 T4 较 T1 处理显著提升了 7.8%, 各处理 PQ 值范围是 0.59~0.64, 表现为 T4>T5>T2>CK>T3>T1; 施肥 500 d 后, PQ 最大值变为 T5 处理, 较最小值 T3 处理提升了 6.7%, 各处理 PQ 值范围是 0.60~0.64, 表现为 T5>T4>T2>T1>CK>T3。

在施肥 150 d 后, HA/FA 与 PQ 最大值均为 T4 处理, 而施肥 500 d 后, 最大值变为 T5 处理, 这种变化与腐殖质碳与胡敏酸碳相似, 与单施化肥或不施肥相比, 施用堆肥显著提升了土壤 HA/FA 与 PQ 值。

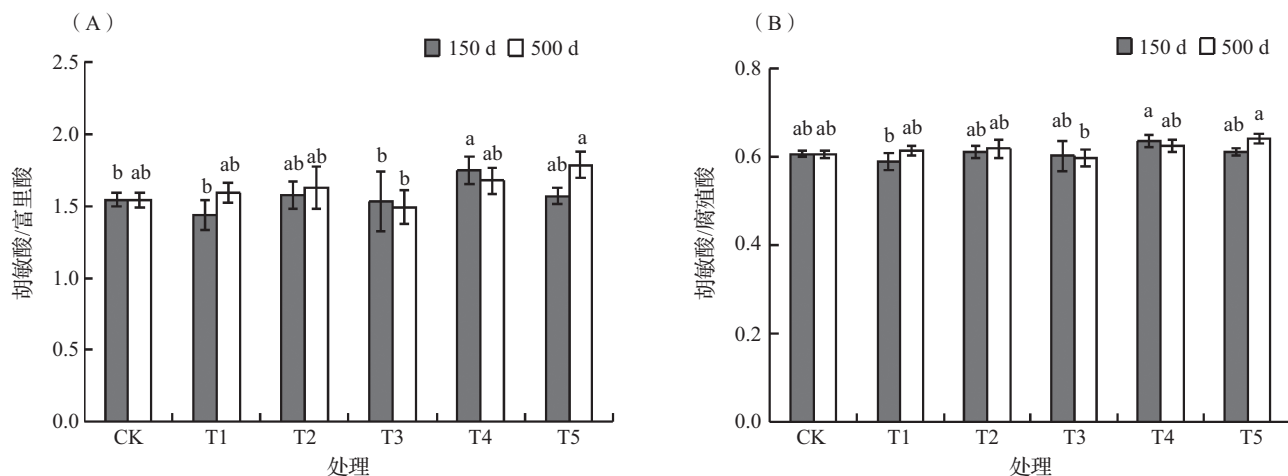


图3 不同施肥处理 150、500 d 土壤胡敏酸 / 富里酸、胡敏酸 / 腐殖酸值

2.4 施肥 150、500 d 土壤全氮、碳氮比

由图 4 (A) 可知, 等氮施肥条件下, 不同配施处理在施肥 150 与 500 d 后均有效提升了土壤全氮含量。施肥 150 d 后, 土壤全氮最大值出现在 T3 处理, 较不施肥处理显著提升了 15%, 全氮含量表现为 T3>T4>T2>T1>T5>CK; 施肥 500 d 后, 所有处理土壤全氮含量均有不同程度降低, 其中, T5 处理降低幅度最小, CK 降低幅度最大, 较 150 d 降低 14.9%, T3 处理仍为全氮最大值 ($1.87 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

全氮含量变化表现为 T3>T4>T2>T5>T1>CK。

由图 4 (B) 可知, 堆肥与化肥的施用比例对碳氮比具有显著影响。施肥 150 d 后, T2 处理碳氮比较其他处理出现显著降低, 最大值为 T5 处理 (9.51), 各处理碳氮比范围是 8.12~9.51, 碳氮比表现为 T5>T4>CK>T3>T1>T2; 施肥 500 d 后, 由于全氮含量的降低, 所有处理碳氮比均有一定程度上升, 最大值仍为 T5 处理 (10.71), 各处理碳氮比范围是 8.86~10.71, 碳氮比表现为 T5>CK>T4>T1>T2>T3。

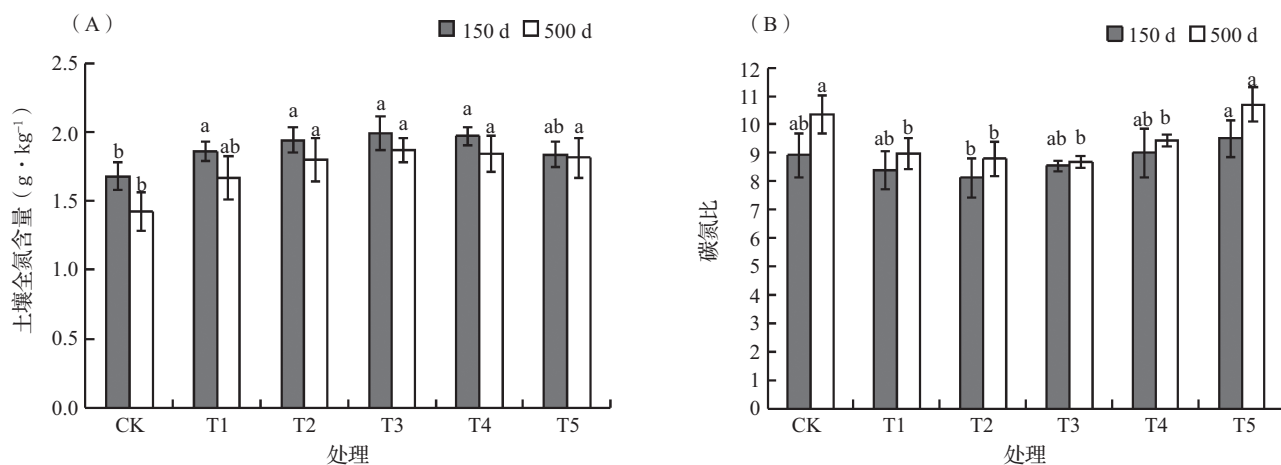


图4 不同施肥处理 150、500 d 土壤全氮、碳氮比

2.5 施肥 150、500 d 土壤基本化学性质

由表 2 可知, 施肥 150 d 后, 土壤 pH 表现出显著差异, 配施化肥的处理一定程度酸化土壤, T3 处理较不施肥处理 pH 显著降低了 4.6%, 各处理 pH 范围是 7.52~7.88; 施肥 500 d 后, 各施肥处理 pH 均有不同程度提高, 其中 T3 处理 pH 提升幅度最大, 较施肥 150 d 后提升了 4.0%, 各处理 pH

表现为 T5>T1>T4>CK>T3>T2。

施肥 150 d 后, 相较于不施肥, 各施肥处理土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量均有显著提升。化肥的施用对土壤碱解氮含量的提升具有显著作用, 施肥 150 d 后, 高比例配施化肥的 T1、T2、T3 处理较 CK 分别提升了 33%、37%、48%, 各处理碱解氮含量表现为 T3>T2>T1>T4>T5>CK; 施

肥 500 d 后，土壤碱解氮含量均有不同程度降低，最大值仍是 T3 处理，配施化肥的处理碱解氮含量降低幅度较大，各处理碱解氮含量表现为 T3>T4>T5>T2>T1>CK；施肥 150 d 后，各处理土壤有效磷含量提升幅度相近，单施化肥和单施堆肥较不施肥均提升了 21%，最大值 T3 处理较其他处理提升显著，是 CK 的 1.39 倍；施肥 500 d 后，各处理有效磷含量较 150 d 下降了 11%~19%，T3、T4、T5 处理较不施肥提升显著，各处理有效磷含量表现为 T3>T4>T2>T5>T1>CK。施肥 150 d 后，各施

肥处理土壤速效钾含量较不施肥均有显著提升，提升幅度为 15%~31%，各处理速效钾含量表现为 T3>T4>T2>T5>T1>CK。施肥 500 d 后，土壤速效钾含量大幅降低，较施肥 150 d 降低了 11%~25%，各处理速效钾含量表现为 T3>T5>T4>T2>T1>CK。

化肥在施肥 150 d 内对速效养分的提升效果显著，相较于施肥 150 d，单施堆肥的处理在施肥 500 d 后体现出较强的保肥能力，T3 处理对土壤各速效养分的提升体现出最佳效果。

表 2 不同施肥处理 150、500 d 土壤基本化学性质

施肥天数 (d)	处理	pH	碱解氮 (mg·kg ⁻¹)	有效磷 (mg·kg ⁻¹)	速效钾 (mg·kg ⁻¹)
150	CK	7.88±0.08a	60.12±3.36d	54.77±2.80c	230.4±15d
	T1	7.69±0.11bc	80.21±7.02bc	66.03±4.12b	272.3±12c
	T2	7.56±0.11cd	82.65±3.12ab	66.74±1.83b	297.0±8b
	T3	7.52±0.09d	88.68±5.24a	75.87±2.86a	333.5±8a
	T4	7.60±0.06cd	79.19±5.59bc	70.10±2.10b	299.9±11b
	T5	7.78±0.09ab	74.01±2.25c	66.10±3.91b	273.2±10c
500	CK	7.84±0.12b	48.31±2.62d	48.58±6.60b	184.6±19c
	T1	7.88±0.12b	61.06±4.16c	55.75±4.50ab	205.0±13bc
	T2	7.73±0.08b	65.72±4.18bc	56.92±5.10a	233.0±20ab
	T3	7.82±0.11b	76.13±4.97a	61.54±4.30a	268.1±22a
	T4	7.87±0.11b	72.13±5.45ab	57.79±2.70a	242.2±15a
	T5	8.02±0.07a	66.67±5.28bc	53.99±2.50ab	243.8±28a

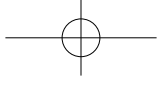
注：同列不同小写字母表示相同时期不同处理间差异显著（P<0.05）。

3 讨论

3.1 堆肥配施化肥 150、500 d 对土壤总有机碳和水溶性有机碳的影响

施肥是提高土壤肥力、保证作物养分供应、提高作物生产力的重要手段，园林绿化废弃物堆肥富含有机碳，与化肥配施能为土壤提供速效养分和有机碳含量，长久维持土壤养分^[12]。土壤有机碳是土壤碳库的重要组成部分，是评价土壤质量的重要指标，其组成和结构变化直接影响土壤性质与肥力的改变^[13]。土壤有机质含量的动态变化是由系统输入和输出量的相对大小决定的，郝小雨等^[14]研究表明不同施肥处理年均碳输入量和土壤固碳速率呈显著的线性正相关关系；但同样有相关研究表明，相较于单施有机肥，有机肥适量配施化肥更

能促进土壤有机碳的积累^[15]；谭炳昌等^[16]利用 Meta 分析的研究结果得出长期施用化肥处理的表层土壤有机碳含量较不施肥处理显著提高。本研究施肥 150 d 内，T4 处理对土壤有机碳含量的提升最为显著，可能是因为在此时期的处理，土壤各方面协调性优于其他处理，更利于作物生长，作物根系和落叶等残留增加，因此土壤有机碳含量最高。施肥 500 d 内土壤有机碳含量会随时间延长而逐渐降低，这与微生物消耗有机碳释放大量养分供给植物吸收利用有关^[9]。在施肥 500 d 后，T5 处理对土壤总有机碳的提升最大，由此可见，化肥与堆肥配施对土壤有机碳的积累及动态变化的影响是一个漫长复杂的过程，且有机碳含量的增加主要依赖于有机肥的输入，施肥数量、种类、年限及环境背景都是影响有机碳含量积累的因素。



有机肥对土壤碳库的提升作用,除了有机肥直接的补充之外,还可能与形成的土壤有机碳库组分及功能有关。配施堆肥的处理提高了土壤中可溶性有机碳的含量,原因主要是堆肥中本身就含有大量的有机碳。相较施肥 150 d,施肥 500 d 后土壤水溶性有机碳含量与总有机碳表现不同,施用堆肥的处理土壤水溶性有机碳含量随着施肥时间延长反而有增加的趋势,这可能与堆肥的施入提供了大量的有机碳刺激了微生物活动,产生大量碳水化合物有关^[17]。由于不同施肥处理下形成的土壤有机碳库形态不同,尤其是施用有机肥芳香族碳的增加,直接影响到其矿化与腐殖化功能,进而影响其周转与固存^[18]。

3.2 堆肥配施化肥 150、500 d 对土壤腐殖质碳组分及其特性的影响

土壤腐殖质是土壤的重要组成部分,对土壤的物理、化学和生物学性质以及土壤肥力有着极为重要的影响,因此一直是国内外学者研究的热点^[19],腐殖质碳是土壤有机碳主要组分部分,其通过配体与质子化表面羟基交换吸附形成金属-有机-矿物涂层与矿物表面紧密结合,构成了较稳定的土壤碳库^[20]。本研究中不同配施处理在施肥 150 与 500 d 后土壤腐殖质碳含量的变化趋势与总有机碳十分相似,随着堆肥施用量增大,土壤腐殖质碳含量也随之增大,说明短期内土壤腐殖质的积累主要依赖于外源有机物的输入。HA/FA 和 PQ 值是评价土壤腐殖质品质的重要指标,也能反映土壤的熟化程度及肥力状态,其值越大说明胡敏酸含量越高,品质越好。施肥 150 d 后,HA/FA 最大值出现在 T4 处理,说明短期内堆肥适量配施化肥更有利于胡敏酸的积累,进一步加深土壤腐殖化程度;施肥 500 d 后,随着化肥的消耗及堆肥的分解,各施肥处理土壤 PQ 值差异减小,说明施肥 500 d 后土壤各腐殖酸组分含量及腐殖化程度逐渐趋于稳定。

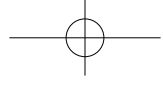
碳氮比可以反映土壤腐殖质的腐殖化程度,其值越高,腐殖化程度越低。研究表明,随着堆肥的投入,土壤碳氮比表现为先下降后上升,T2 处理土壤碳氮比最低,微生物活性提高,化肥与少量堆肥的施入加速了土壤原有碳和新鲜有机碳的分解矿化,导致土壤有机碳含量提升与单施化肥处理相近;较施肥 150 d,施肥 500 d 后各处理碳氮比均有一定程度增加,且单施堆肥及不施肥处理碳氮比在 500 d 后上升幅度最大,这主要是因为土壤中氮的

消耗与流失速率大于碳,同时堆肥的施用有效增大了碳的比例。

本试验施肥 500 d 内单施化肥处理对土壤富里酸碳、胡敏酸碳、胡敏素碳含量均无显著影响。李阳等^[21]研究结果表明长期单施化肥土壤腐殖质含量下降,游离态胡敏酸类型向较高类型转化,腐殖化程度升高,腐殖质质量下降。高纪超等^[22]、樊红柱等^[23]基于 30 年的定位施肥试验表明,长期施用化肥也能促进土壤有机碳累积。骆坤等^[24]认为单施化肥是否促进土壤有机碳累积与试验前原始土壤的有机碳水平关系密切,当试验前土壤有机碳低于最低平衡点时,施用化肥能够增加土壤有机碳。化肥与堆肥配施处理,每年施入的有机肥使得土壤中形成的年轻腐殖质多,不仅有利于土壤腐殖质的更新和活化,而且有利于胡敏酸的积累和土壤腐殖质品质的提高。有机肥促进土壤中活性较高的富里酸和胡敏酸组分的形成,活性较高的腐殖质增多,易于土壤矿化,有利于土壤结构改善、土壤肥力及土壤固碳功能提高^[25]。

3.3 堆肥配施化肥 150、500 d 对土壤基本理化性质的影响

堆肥配施化肥将化肥速效性和有机肥长效性相结合,不仅能有效培肥土壤,还能提高肥效,改善土壤环境,提高土壤肥力^[9]。堆肥对土壤肥力的影响主要是通过改变土壤环境实现的,堆肥能够改善土壤结构,提升土壤养分有效性及持续性。吕真真等^[26]研究表明,与单施化肥相比,有机无机肥配施可有效增加土壤养分含量,改善土壤物理性质,缓解土壤酸化,提高土壤微生物数量。本研究结果表明,化肥配施堆肥在施肥 150 d 内可显著提升土壤速效养分,其中 T3 处理对碱解氮、有效磷、速效钾的提升效果最明显,施肥 500 d 后,各处理土壤养分含量均有一定程度下降,但施肥较不施肥处理速效养分仍有显著提升。堆肥的施用显著增加了碱解氮、有效磷和速效钾含量,且随着堆肥施用比例的增加,碱解氮、有效磷和速效钾均有先增加后减少的趋势,这与朱利霞等^[27]的研究结果一致。堆肥本身含有一定的速效养分,这也在一定程度上增加土壤速效养分含量。同时堆肥与化肥的施用为土壤微生物提供充足的能源,利于土壤中微生物的生长和繁殖,进而促进微生物介导的土壤中难溶性养分转化为速效养分^[28]。微生物活性的提高也促使其分解有机质,并产生大量的有机酸进一



步酸化土壤,本研究所有施肥处理 pH 较不施肥均出现不同程度下降,这主要是因为试验地为碱性土壤,配施采用的堆肥 pH 虽呈弱碱性,但仍低于试验地土壤 pH,堆肥与化肥的施用会进一步酸化土壤,这与唐奇志等^[29]研究结果一致;随着堆肥施用量的增加,土壤 pH 先降低后逐渐升高,堆肥的施用有效减缓了土壤 pH 的下降程度,这主要与化肥施用量的减少有关,土壤中 NH_4^+ 发生硝化反应生成的 H^+ 是导致土壤 pH 下降的主因之一,含铵类化学肥料(如二铵、尿素等)是一种有效的硝化反应原料,能够显著促进硝化反应的进行^[15],且过磷酸钙等酸性肥料中含有大量游离酸,这也是导致 pH 降低的原因之一。

4 结论

堆肥配施化肥及单施堆肥均可使土壤总有机碳及腐殖质碳组分含量增加,堆肥配施化肥能有效提升土壤 HA/FA、PQ 值,降低土壤碳氮比,加深土壤腐殖化程度;短期内单施化肥对土壤腐殖质碳组分的积累无显著效果,施用堆肥可有效提升土壤水溶性有机碳含量。

等氮施肥条件下,施肥 150 和 500 d 后不同比例堆肥化肥配施均可有效培肥土壤,且能一定程度降低土壤 pH,缓解土壤酸碱度,减缓土壤速效养分流失;施肥 500 d 内,50% 堆肥 +50% 化肥的配施比例对土壤养分含量提升效果最佳。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 蔡琳琳,李素艳,康跃,等. 沸石、膨润土和过磷酸钙对蚯蚓堆肥园林绿化废弃物腐熟效果的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28(2): 299-309.
- [3] 郝丹,张璐,孙向阳,等. 金盏菊栽培中园林废弃物堆肥与牛粪替代泥炭的效果分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(8): 1556-1564.
- [4] 刘瑶,焦泽彬,谭波,等. 川西亚高山森林凋落物去除对土壤腐殖质动态的影响[J]. 植物生态学报, 2022, 46(3): 330-339.
- [5] 孙莹,侯玮,迟美静,等. 氮肥与有机肥配施对设施土壤腐殖质组分的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 940-952.
- [6] Doane T A, Devêvre O C, Horwath W R. Short-term soil carbon dynamics of humic fractions in low-input and organic cropping systems[J]. Geoderma, 2003, 114: 319-331.
- [7] 俄胜哲,时小娟,车宗贤,等. 有机物料对灌漠土结合态腐殖质及其组分的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1436-1448.
- [8] 王旭东,张一平,吕家珑,等. 不同施肥条件对土壤有机质及胡敏酸特性的影响[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 75-81.
- [9] 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.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 窦森,于水强,张晋京. 不同 CO_2 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 458-466.
- [12] 刘国梁,李素艳,孙向阳,等. 有机无机肥配施对梨园土壤肥力及果实品质的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 181-186.
- [13] 邓倩,马娟娟,孙西欢,等. 生物质炭对农田土壤腐殖质的影响——Meta 分析[J]. 土壤, 2024, 56(1): 42-48.
- [14] 郝小雨,马星竹,周宝库,等. 长期不同施肥措施下黑土有机碳的固存效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 316-321.
- [15] 田胜营,潘明泉,吕秀敏,等. 有机无机肥配施对土壤性质和小麦生长、养分吸收利用的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(23): 102-107.
- [16] 谭炳昌,樊剑波,何园球. 长期施用化肥对我国南方水田表土有机碳含量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 96-103.
- [17] Yan Y, Liu M D, Yang D, et al. Effect of different rice-crab coculture modes on soil carbohydrates[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(3): 641-647.
- [18] 王飞,李清华,林诚,等. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1447-1454.
- [19] 张久明,匡恩俊,刘亦丹,等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1534-1540.
- [20] Navarrete I A, Tsutsuki K, Navarrete R A. Humus composition and the structural characteristics of humic substances in soils under different land uses in Leyte, Philippines[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2010, 56: 289-296.
- [21] 李阳,王继红. 长期施肥土壤腐殖质变化及其与土壤酸度变化的关系[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(1): 114-119.
- [22] 高纪超,李强,朱平,等. 长期化肥有机替代对黑土颜色及腐殖物质的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(4): 313-318.
- [23] 樊红柱,陈琨,陈庆瑞,等. 长期定位施肥 31 年后紫色水稻土碳、氮含量及储量变化[J]. 西南农业学报, 2018, 31(7): 1425-1431.
- [24] 骆坤,胡荣桂,张文菊,等. 黑土有机碳、氮及其活性对长

- 期施肥的响应 [J]. 环境科学, 2013, 34 (2): 676-684.
- [25] 林瑛, 何洁雯, 陈星峰, 等. 烟秆炭和有机肥配施对土壤主要养分及腐殖物质的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2023 (3): 24-32.
- [26] 吕真真, 吴向东, 侯红乾, 等. 有机-无机肥配施比例对双季稻田土壤质量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23 (4): 904-913.
- [27] 朱利霞, 曹萌萌, 桑成琛, 等. 生物有机肥替代化肥对玉米土壤肥力及酶活性的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2022, 40 (1): 67-72.
- [28] 李小萌, 陈效民, 曲成闯, 等. 生物有机肥与减量配施化肥对连作黄瓜养分利用率及产量的影响 [J]. 水土保持学报, 2020, 34 (2): 309-317.
- [29] 唐奇志, 汪帆, 时金泽, 等. 有机肥部分替代氮肥的盐碱土壤改良与水稻增产效应研究 [J]. 土壤, 2024, 56 (1): 97-102.

Effect of green plant waste compost combined with chemical fertilizer on carbon composition of soil humus

LIU Guo-liang¹, WU Wei², LI Su-yan^{1*}, SUN Xiang-yang¹, YUE Zong-wei¹, WEI Yu-guang¹ (1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Beijing Chaobai River Administration Office, Beijing 101300)

Abstract: Based on the field experiment, the effects of combining compost with chemical fertilizers on the content of soil humic substances carbon fractions and main nutrients were investigated, aiming to clarify the fertilizing effect of green plant waste compost on soil and provide a scientific basis for improving fertilization strategies and enhancing soil quality. Six treatments were set up: no fertilization, 100% chemical fertilizer, 25% compost+75% chemical fertilizer, 50% compost+50% chemical fertilizer, 75% compost+25% chemical fertilizer, and 100% compost. Soil total organic carbon, humic substance carbon fractions, and basic chemical properties were measured after 150 and 500 days of fertilization. The results indicated that combining compost with chemical fertilizer effectively increased the ratios of humic acid to fulvic acid and humic acid to humin, decreased the carbon to nitrogen ratio, and enhanced the degree of humification. In the short term, applying chemical fertilizer alone did not significantly affect the accumulation of soil humic substance carbon fractions. Compared to applying chemical fertilizer alone, combining compost with chemical fertilizer increased the content of total organic carbon, water-soluble organic carbon, humic acid carbon, fulvic acid carbon, and humin carbon in soil by 1%-14%, 10%-24%, 5%-29%, 3%-16%, and 1%-19%, respectively. Under equal nitrogen fertilization conditions, combining compost with chemical fertilizer effectively enhanced soil available nutrients and reduced soil pH after 150 and 500 days. This combination increased the content of alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium in soil by 3%-48%, 1%-15%, and 9%-22%, respectively, with the 50% compost + 50% chemical fertilizer treatment showing the best effect on nutrient enhancement. These results suggested that combining compost with chemical fertilizer effectively increased the quantity of soil organic carbon and significantly impacted soil humic substance carbon fractions. The 50% compost + 50% chemical fertilizer treatment not only promoted the formation of soil humus but also facilitated the enhancement of main nutrients, making it a recommended fertilization method.

Key words: organic and inorganic fertilizer application; pear orchard; green plant waste compost; humus carbon components; nutrient dynamics