林分结构对北京城区森林土壤表层有机碳含量的显著影响*

李 阳 Syed Mushtaq Hussain Shah 马冰倩 谢仁天 徐宇沛 郭嘉欣
肖 倩 张新娜 徐程扬

北京林业大学城市林业研究中心 森林培育与保护教育部重点实验室 林木资源高效生产国家重点实验室 北京 100083

摘要：【目的】森林结构与物种组成的调整对土壤有机碳含量的影响日益受到更多关注，然而，在局地尺度上城市森林结构对土壤表层有机碳的影响尚不清晰，本研究旨在揭示城市森林结构对土壤有机碳的影响机制，为高碳汇城市森林经营技术的优化提供依据。【方法】对北京市六环内的“米”样带林分进行广覆盖的抽样调查，选取林分物理结构、树种组成 10 个指标及对应土壤样本，采用主成分分析构建城市森林物理结构复杂度（PSC）和物种组成复杂度（SCC）分析林分结构复杂性对表层土壤有机碳含量（SOC）的影响。【结果】林分物理结构（$P<0.001$）和木本植物物种组成结构（$P<0.05$）单一指标均与 SOC 显著相关，物理结构指标（如树高多样性、胸径多样性、平均胸径、平均树高、林分断面积）对 SOC 变化的解释力为 15.9%~29.9%，PSC 对 SOC 的解释力为 39.1%，而物种多样性指数以及 SCC 对 SOC 变化解释力最高（6.8%）。【结论】物理结构是引起北京市城市森林表层 SOC 变化的主要生物驱动力，物种多样性仅起到一定的辅助作用，木本植物丰富度较低是物种多样性对 SOC 解释力较弱的原因之一。因此，提高城市森林的物理结构复杂度是科学建设高碳汇效率城市森林的重要措施。

关键词：表层土壤有机碳；城市森林；林分结构复杂度；物种组成结构；林分物理结构
DOI：10.12169/zgcsly.2025.06.08.0001

Pronounced Effects of Stand Structure on Topsoil Organic Carbon Content in Beijing's Urban Forests

Li Yang Syed Mushtaq Hussain Shah Ma Bingqian Xie Rentian Xu Yupei
Guo Jiaxin Xiao Qian Zhang Xinna Xu Chengyang

(Research Center for Urban Forestry. Beijing Forestry University; Key Laboratory of Ministry of Education for Forest Silviculture and Conservation; State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing 100083, China)

Abstract：【Objective】The adjustments of forest structure and species composition influence soil organic carbon content, which has attracted increasing attention. However, the influence of urban forest structure on topsoil organic carbon at the local scale remains unclear. This study aims to elucidate the mechanisms through which urban forest structure affects soil organic carbon, thereby providing a basis for optimizing high-carbon-sink urban forest management. 【Method】Sampled plots inventory is conducted along “米”

收稿日期：2025-06-08
* 基金项目：北京林业大学“5·5 工程”科研创新团队项目（BLRC2023B06）；北京市朝阳区项目（CYSF-1904）
第一作者：李阳（1999-），女，硕士生，研究方向为城市森林生态系统服务功能评价。E-mail：liyang896643@163.com
通信作者：徐程扬（1964-），男，博士，教授，研究方向为城市森林构建与经营、城市森林生态系统服务功能评价。E-mail：cyxu@bjfu.edu.cn

shape transects within the sixth-ring road in Beijing, and 10 indicators related to stand physical structure and tree species composition are selected, along with corresponding soil samples. The physical structural complexity (PSC) and species composition complexity (SCC) of urban forest stand are constructed by using principal component analysis to analyze the effects of stand structural complexity on topsoil content of organic carbon.【Result】 Single indicators of stand physical structure ($P<0.001$) and woody species composition ($P<0.05$) are significantly correlated with topsoil carbon content. The indicators related to stand physical structure (e. g., tree height diversity, diameter at breast height diversity, mean diameter at breast height, mean tree height, stand basal area) explain 15.9% - 29.9% of the variance in topsoil carbon content, and PSC explains 39.1% of the variance. Species compositional diversity and SCC have the maximal explanation of topsoil carbon content variation (6.8%).【Conclusion】 Stand physical structure is the main biotic driver to the variation of topsoil carbon content in urban forests in Beijing, while species diversity only takes the auxiliary role. Lower woody species richness is one of the possible reasons for the weak explanation of species diversity on topsoil content of carbon. Therefore improving physical structural complexity is an important strategy to establish urban forests with high carbon sequestration efficiency.

Keywords: topsoil organic carbon; urban forest; stand structural complexity; species composition structure ; physical stand structure

全球 70% 的温室气体是从城市中排放的，2010—2050 年，全球平均每年因城市扩张而导致的碳损失速度达 9.3 ~ 12.9 Tg C yr^{-1}[1-2]。因此，降低温室气体排放、提高城市生态系统碳汇是降低城市对全球碳损失贡献的必要途径，而保护和发展城市绿色基础设施则是增加城市生态系统碳汇、缓解气候变化的有效途径[3]。由于土壤碳最高可占到城市碳储量的 64%[4]，但表层和深层土壤碳储量仅为矿物学容量的 42% 和 21%[5]，因此，进一步提高土壤碳储量、维持与提高土壤有机碳的稳定性，对提高城市生态系统碳汇能力至关重要，而增加城市植被是提高城市生态系统碳储量的有效途径[6]。我国城市化进程已进入后期阶段，城市更新成为建设重点，但城市绿色空间增量有限，当前核心任务是通过优化森林结构提升生态系统服务功能与质量，进而增强碳汇能力。然而，城市森林结构与土壤碳汇的机理关系尚不明确，制约了高碳汇森林的建设。

尽管目前通过遥感技术在大尺度上的城市绿地与土壤碳之间的关系开展了大量研究[7]，并在局地尺度上的城市绿地类型[8-9]、基于树种组成的城市森林类型[10-12]、沿城乡梯度变化的森林[13-14]等对土壤有机碳的影响方面也有大量报道。然而，迄今为止，基于局地尺度的城市森林林分结构与土壤有机碳的关系鲜见报道。森林和林分结构复杂性、森林生物多样性对土壤有机碳具有显著影响[15-18]，且结构复杂性对土壤有机碳的影响远大于植物物种多样性[18]。那么，林分结构相对单一、木本植物物种组成相对较低的城市森林土壤有机碳的变化是否也符合同样的规律，目前尚缺乏系统研究。所以，开展城市森林林分结构对土壤有机碳作用机制研究，是构建高碳汇城市森林的关键科学基础。

本研究以北京市六环以内的城市森林为对象，基于多样性调查及分析，探索城市森林物理结构和物种组成结构与土壤表层有机碳含量之间的关系，并提出以下假设：1）对于木本植物多样性较低的人工城市森林，林分物理结构是土壤表层有机碳含量变化的主要影响因素；2）木本植物多样性对人工城市森林土壤表层有机碳含量变化具有辅助作用。研究旨在为揭示城市森林结构对土壤有机碳的影响机制提供参考，并为高碳汇城市森林经营技术的优化提供依据。

1 研究区概况

北京市地处华北平原北部，由西部和北部的太行山、东北部的燕山三面环绕，东南部是向渤海倾斜的平原。该地属暖温带半湿润季风气候，夏季高温多雨，冬季寒冷干燥，春、秋短促。自然植被类型为暖温带落叶阔叶林。核心研究地段

为建成区的六环以内范围，以人工植被为主，样地调查记录的乔木有 85 种，主要包括毛白杨（*Populus tomentosa*）、国槐（*Styphnolobium japonicum*）、洋白蜡（*Fraxinus pennsylvanica*）、银杏（*Ginkgo biloba*）、圆柏（*Juniperus chinensis*）、油松（*Pinus tabuliformis*）、旱柳（*Salix matsudana*）等。

2　研究方法

2.1　样地调查与土壤取样

鉴于典型地块抽样中森林类型覆盖面不够宽多的情况，为避免由此造成林分结构与土壤有机碳关系的人为偏差，本研究以北京市六环内区域为对象，以市中心作为原点，按照 2 km×2 km 确定地理网格点；再以原点为中心，按照“米”字设置扇形样带状，选取落入扇形样带内的地理网格点作为抽样地点。为了避免样带与南北、东西两条中轴线道路重叠，对样带做了轻微旋转。最终选取落入样带内 146 块面积为 30 m×30 m 的样地（图 1）。



图 1　北京市六环以内城区城市森林调查样点分布

在样地内，记录胸径（DBH）≥4 cm 树木的树高、胸径、枝高、冠幅、健康状况、生长状况等。按照五点取样法在每个样地使用直径为 5 cm 的土钻采集土样，采样深度为 0～15 cm。为了降低样地内土壤空间异质性对土壤有机碳含量带来的影响，将 5 个取样点的土钻样品充分混合，去除石块、根系等，然后取总量不少于 500 g 的土壤作为后续测试分析样品。对于行道树地块，随机选择相邻的 5 株树，利用土钻在植苗穴部位采集 15 cm 深表层混合土，同上述方法获取待试土样。将土样装入自封袋中，带回实验室在阴凉干燥处风干，然后用 2 mm 孔径的筛网去除动植物残体和小石砾、根系等，再过 100 目土壤筛，获得最终用于化学分析的土样。

2.2　林分物种组成结构和物理结构及其表达

以 Margalef 指数（D_M）、Shannon-Wiener 指数（H′）、Simpson 指数（D）、Pielou 均匀度（E）和 Berger-Parker 优势度（D_{BP}）作为物种组成结构指标，以林分断面积（G）、胸径多样性（H'_{DBH}）、平均胸径（$\overline{DBH}$）、树高多样性（H'_h）和平均树高（$\bar{h}$）作为物理结构指标。参照余轩等[19]的群落生物多样性计算方法，参照 Ali 等[20]方法计算胸径和树高组成多样性。具体指数计算公式如下：

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} P_i \ln P_i \tag{1}$$

$$D_M = (S-1)/\ln N \tag{2}$$

$$E = H/\ln S \tag{3}$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S} P_i^2 \tag{4}$$

$$D_{BP} = N_{\max}/N \tag{5}$$

$$G = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}\right) \Big/ A \tag{6}$$

$$\overline{DBH} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i \tag{7}$$

$$H'_{DBH} = -\sum_{k=1}^{m}\left[\frac{N_k}{N_{total}} \cdot \ln\left(\frac{N_k}{N_{total}}\right)\right] \tag{8}$$

$$H'_h = -\sum_{l=1}^{t}\left[\frac{M_l}{M_{total}} \cdot \ln\left(\frac{M_l}{M_{total}}\right)\right] \tag{9}$$

$$\bar{h} = \left(\sum_{j=1}^{n} \bar{h_j} \cdot G_j\right) \Big/ \left(\sum_{j=1}^{n} G_j\right) \tag{10}$$

公式（1）～（7）中：S 为总物种数量；N 为总个体数量；p_i 为第 i 个种在全体物种中的重要性比例；N_{max} 为数量最多优势种个体数量；ln 为自然对数；n 为树木数量；A 为样地面积（单位为 m^2）；d_i 是第 i 株树的胸径。在公式（8）～（10）中：N_k 是第 k 个胸径等级区间内的树木个体数；N_{total} 是所有区间内树木的总个体数；m 为

胸径等级的数量，胸径等级划分是将所有树木的胸径大小范围，从低到高按照 2 cm 等距离分段；M_l是第 l 个树高等级区间内的树木个体数；M_{total}是所有等级区间内树木的总个体数；t 为树高等级的数量，树高等级划分是将所有树木的胸径大小范围，从低到高按照 2 m 等距离分段；$\overline{h_j}$是第 j 径阶树木的平均树高；$\bar{h}$ 为平均树高；G_j为第 j 径阶树木胸高断面积；n 为径阶数量[21]。

2.3 土壤有机碳含量测定

采用重铬酸钾容量法（稀释热法）测定土壤有机碳含量（SOC）[22]。

2.4 数据分析

使用 EXCEL2016 建立数据库，并进行简单计算。使用 SPSS25.0 做相关性分析、主成分分析、回归分析，相关性分析采用 Person 法，采用 Origin2021 绘图。

3 结果与分析

3.1 城市森林林分结构复杂度

总体上，北京市城区的城市森林地块间林分结构指标变化较大，总体结构呈现出复杂变化（图 2）。在林分物种组成结构中，Simpson 指数（D）、Margalef 指数（D_M）和 Shannon-Wiener 指数（H′）在样地间的变异系数分别达 100.29%、87.47%和 69.13%，Pielou 均匀度（E）、Berger-Parker 优势度（D_{BP}）在样地间的变异系数分别为 54.25%和 37.59%。在林分物理结构中，林分断面积（G）在各样地间的变异系数达 90.94%，胸径组成多样性（H'_{DBH}）、平均胸径（$\overline{DBH}$）、树高组成多样性（H'_h）、平均树高（$\bar{h}$）的样间变异系数分别为 30.58%、48.6%、43.68%和 37.54%。

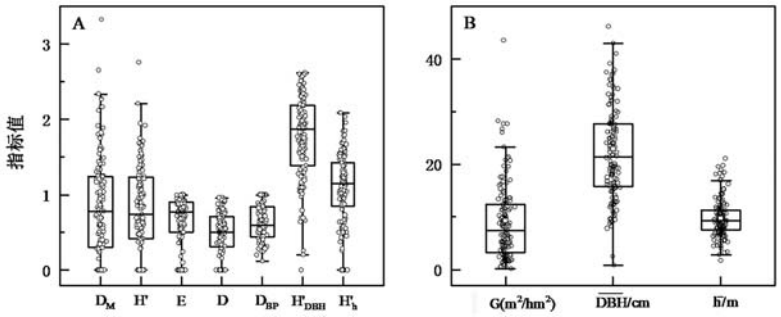


图 2 北京市城市森林林分结构总体复杂度

3.2 林分结构指标对土壤有机碳的影响

SOC 随着林分的物理结构指标值的提高均极显著提高（$P<0.001$），单一指标对 SOC 方差的解释率为 15.9%～29.9%（图 3F～J）。尽管 SOC 随着物种组成结构指标值的变化趋势也达到了显著（$P<0.05$）或非常显著（$P<0.01$）水平，但后者对 SOC 变化的解释力仅有 2.7%～6.8%（图 3A～E）。

3.3 结构复杂度对土壤有机碳的综合影响

主成分分析表明（图 4），G、H'_{DBH}、$\overline{DBH}$、H'_h、$\bar{h}$ 对因子轴 1 有较大的贡献，将其定义林分物理结构复杂度（简写为 PSC）；H′、E、D_M、D_{BP}在因子轴 2 的荷载值较高，将其定义为物种组成复杂度（简写为 SCC）。也就是说，城市森林的物理结构复杂度和木本植物组成结构复杂度在很大程度上对表层 SOC 有共同影响，PSC 对 SOC 变化的贡献率为 44.5%，SCC 的贡献率为 26.9%，即物理结构指标对 SOC 变化的贡献率更大，这进一步证实了林分物理结构对 SOC 的影响较林分物种组成结构更强。

林分物理结构复杂度（PSC）与物种组成复杂度（SCC）对 SOC 变化的综合效应表明，PSC 可解释 SOC 变化的 39.1%（图 5B），而 SCC 则只解释 SOC 变化的 1.5%（图 5A）。但二者仅解释 SOC 变异的 40.6%，即城市森林土壤表层 SOC 的在较大程度上受城市森林以外的因素影响，如环境、人类活动等。

3.4 林分结构的相关性及其对生物量的影响

所调查的城市森林生物量随着每公顷胸高断面积、平均胸径、平均树高的提高显著增加（图 6），即树木个体较大的林分土壤有机质含量更高。且地上生物量高于地下生物量。

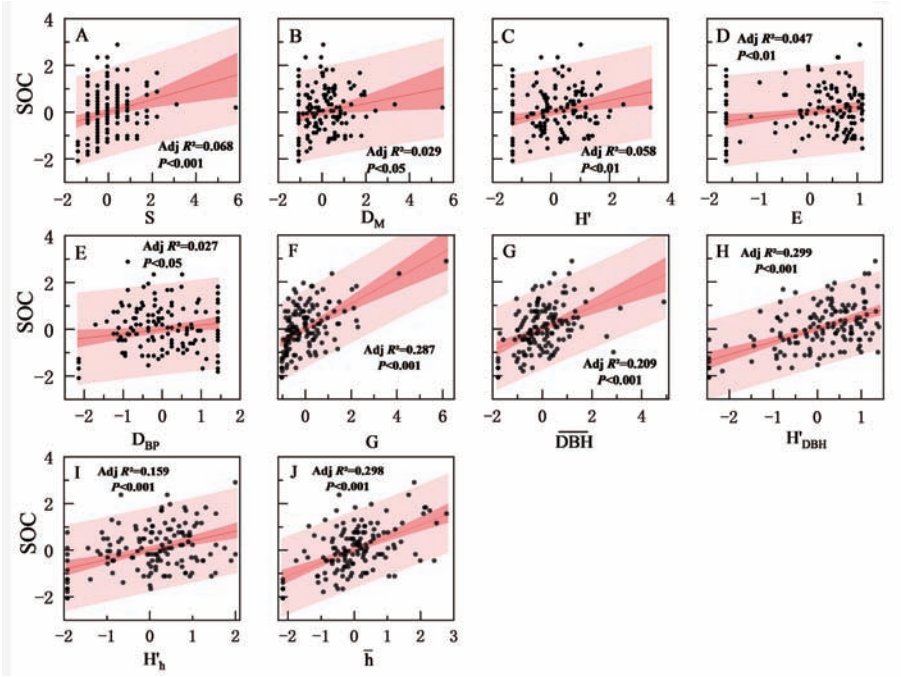


图 3　林分结构指标与 SOC 的关系

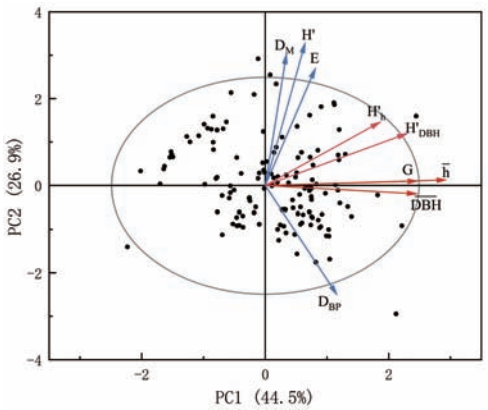


图 4　林分多样性指标的 PCA 因子载荷

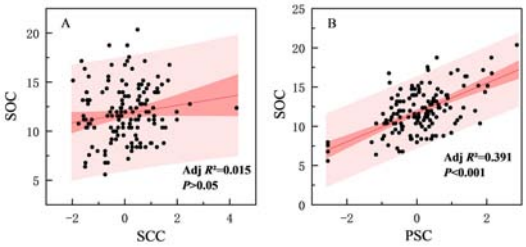
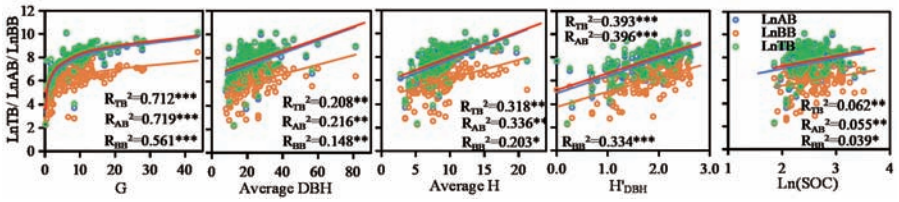


图 5　林分物理结构复杂度（PSC）和物种组成复杂度（SCC）对 SOC 的影响



注：1）TB、AB、BB 分别为总生物量、地上生物量、地下生物量；2）红色、蓝色、橙色线条分别是总生物量、地上生物量、地下生物量变化趋势线；3）*、**、*** 分别代表显著（P<0.05）、非常显著（P<0.01）、极其显著（P<0.001）。

图 6　物理结构指标、土壤有机碳与林分生物量间的关系

除了公园和居民区个别景观外，所调查的城市森林木本植物多样性总体不高，乔木树种样地平均为 2.4 种，灌木树种样地平均只有 1.6 种，多数样地的木本植物数量在 5 种以下（图 7），仅为乔木树种的样地数量比例达到了 59.6%。林分物理结构指标与物种组成指标间有较显著的相关性（图 8），尤其 H'_{DBH}、H'_h 与 S、D_M、H′、E 的正相关关系更为显著。因为大多数城市森林都是通过人工种植建立的，因此胸径和树高多样性的变化可能由同一林地中不同树种所引起。

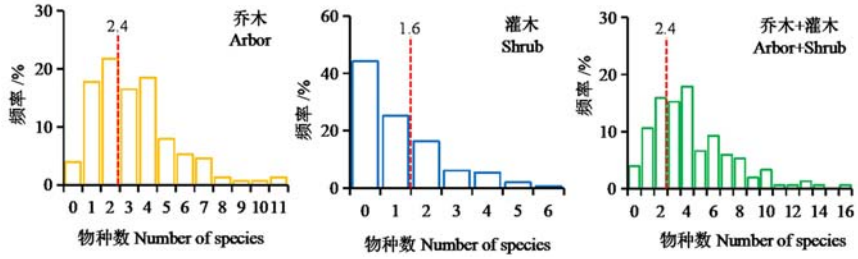


图 7 乔木、灌木和木本植物种在样地中的分布

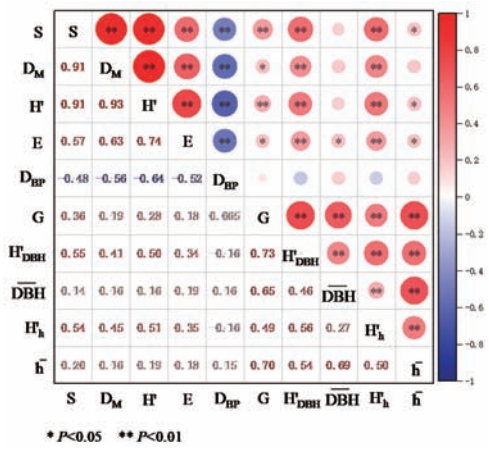


图 8 林分物理结构指标与物种组成指标间的 Pearson 相关关系

4 讨论

4.1 林分物理结构对城市森林土壤有机碳的影响

大量研究表明，森林的物理结构是土壤有机碳的主要影响因素[18,23]，其主要影响途径是：林分物理结构决定着森林的生物量[18]、根系及根系分泌物向土壤的输入强度[24-25]，而根系分泌物则与根际微生物及其残体向土壤的碳输入密切相关[26]。本研究的结果基本符合该规律。研究发现，单一林分物理结构指标最高能够解释 SOC 变化的近 30%（图 3），物理结构复杂度则仅可解释 SOC 变化的近 40%（图 5B），而生物多样性对 SOC 的贡献微乎其微（图 5A）。这与前人的研究结果类似，即土壤有机碳随着森林的林分结构复杂度提高而提高[23]。

物理结构对土壤表层有机碳含量有显著正影响，其原因主要包括：1）所调查的城市森林生物量随着物理结构（林分断面积、平均胸径、平均树高）的提高显著增加（图 6），即树木个体较大的林分土壤有机碳含量更高，这与 Xu 等[11]的研究结果一致。在城市森林中，树木个体较大意味着森林建立的时间较长，而林分发育时间是城市森林土壤有机碳积累的重要影响因素之一[27]。2）由于人工营造的城市森林多为单层、同龄、中低密度林，同种个体间大小分化较小，胸径和树高组成多样性越高意味着树种组成越丰富，该类森林的根系生物量通常较高（图 6），尤其是细根生物量密度较高[28]，高产量的吸收根因其周转速率快、根际沉降量大[24]、与微生物相互作用程度强而成为土壤有机碳较高变化的主要驱动力[29-30]。但是，土壤有机碳变化与运输根、支撑根等非吸收功能根系关系不大[28]，图 6 也佐证了该观点，即根系生物量随着物理结构指标的增大显著、极显著提高，但根系生物量与土壤表层有机碳含量间的关系很弱，尽管二者关系达到了显著水平（$P<0.05$）。实质上，根系对有机碳的作用主要发生在 10 cm 深度以下的土壤中[11]。此外，北京市的城市森林管理集约程度较高，绝大多数凋落物被收集起来，而非就地还林，物理结构与物种组成通过凋落物归还对土壤有机碳的影响较小。

4.2 多样性对物种丰富度较低的城市森林土壤有机碳的影响

物种组成多样性与 SOC 之间在统计学上均有显著或极显著正相关关系，但各多样性指数（图 2）以及物种复杂度（图 3）对土壤有机碳变化的解释程度很低，也就是说树种多样性对土壤有机碳积累的贡献较少。一般来说，植物多样性（如物种丰富度、Shannon-Wiener 指数）通常与土壤有机碳密切相关[6,16,17,31]，具体表现为土壤有机碳含量[17]和碳储量[31]随着植物物种多样性增加而提高，但其主要影响途径是生物多样性对植被生产力产生正影响并由此提高了凋落物[6,17]、地下生物量[15,32]和土壤微生物[16]向土壤的输入量。植物多样性对土壤有机碳有时会起反作用，主要是

由于多样性指数较高的森林，凋落物的 C/N 较低[33]，土壤微生物多样性较高，因而在一定程度上刺激有机碳分解[26]，尤其是颗粒有机碳和矿质有机碳的分解[34]。除了公园和居民区个别景观外，所调查的城市森林木本植物多样性总体不高，这种高度简化的群落结构导致物种多样性丧失生态功能载体，进而削弱其对土壤有机碳的调控能力。只有物种组成丰富的城市森林，植物多样性对土壤有机碳才会有显著的贡献[35]。因此，对物种多样性总体比较低的城市森林，木本植物多样性对土壤有机碳的作用是十分有限的。

此外，林分物理结构指标与物种组成指标间较强烈的相关关系（图 8），可能是由于北京市城市森林灌木组成较简单（图 7），生物多样性和物理结构的复杂度主要取决于乔木层的树种组成，这也符合其他学者得出的物理结构决定生物多样性[36-37]的结果。因此，生物多样性对土壤有机碳的贡献通常是通过物理结构间接影响的[6]。

4.3 论文研究中的不确定性

尽管大量结果证明，林分物理结构和生物多样性是影响土壤有机碳的重要因素，尤其是植物多样性、土壤微生物对城市森林土壤有机碳的影响比非生物环境更加重要[16]。但是，影响土壤有机碳的因素非常复杂，我们研究结果中林分物理结构、乔木多样性对 SOC 变化的解释力不到 40%（图 5），SOC 变化的更多原因可能与林下灌草植被[16]、根系及分泌物[25]、凋落物归还[26]、土壤理化性质[6]、微生物[38]、树种组成[11]等的影响有关，同时，也与城市森林的演替史（即土地利用变化和森林形成年龄）[27]、城市植被建设过程的土壤干扰[39]、经营活动（如灌溉、除草、施肥等）[13]以及热环境[26]等有关。这些因素在本研究没有重点考虑，也是今后研究中应进一步关注的问题。

5 结论

北京市城市森林土壤表层有机碳含量（SOC）主要受林分物理结构驱动。物理结构复杂度（PSC）对 SOC 变化有显著促进作用，解释力达 39.1%；SOC 随单一物理结构指标的提升也显著提升。尽管物种组成多样性指数对 SOC 在统计学上也有显著影响，但其解释力较低，物种组成复杂度（SCC）影响不显著。因此，物理结构是影响 SOC 的主导因子，木本植物物种多样性对物种丰富度不高的人工城市森林 SOC 仅有较弱的辅助作用。对于林分结构较简单的城市森林，在局地尺度上通过调整林分结构途径提升土壤有机碳含量提供更多科学参考与理论支撑，也为构建高碳汇城市森林提供科学基础。由于本文的局限性，未来的研究可以纳入更多的环境因素，在其他地区开展类似研究，丰富城市森林局地尺度上林分结构与土壤有机碳关系的研究，并总结出普适性理论，为创新和集成城市森林生态系统服务质量精准提升提供技术支撑。

参考文献

[1] ZHAO D, CAI J, XU Y M, et al. Carbon sinks in urban public green spaces under carbon neutrality: a bibliometric analysis and systematic literature review [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 86: 128037.

[2] LIU X P, WANG S J, WU P J, et al. Impacts of urban expansion on terrestrial carbon storage in China[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(12): 6834-6844.

[3] JIANG Y F, SUN Y C, LIU Y Q, et al. Exploring the correlation between waterbodies, green space morphology, and carbon dioxide concentration distributions in an urban waterfront green space: a simulation study based on the carbon cycle[J]. Sustainable Cities and Society, 2023, 98: 104831.

[4] CHURKINA G, BROWN D G, KEOLEIAN G. Carbon stored in human settlements: the conterminous United States [J]. Global Change Biology, 2010, 16(1): 135-143.

[5] GEORGIOU K, JACKSON R B, VINDUŠKOVÁ O, et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J]. Nature Communications, 2022, 13: 3797.

[6] ZHANG Z R, GAO X X, ZHANG S B, et al. Urban development enhances soil organic carbon storage through increasing urban vegetation[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 312: 114922.

[7] GUO H B, DU E Z, TERRER C, et al. Global distribution of surface soil organic carbon in urban greenspaces [J]. Nature Communications, 2024, 15: 806.

[8] DU J F, YU M X, CONG Y G, et al. Soil organic carbon storage in urban green space and its influencing factors: a case study of the 0-20 cm soil layer in Guangzhou City[J]. Land, 2022, 11(9): 1484.

[9] 傅裕，王建. 南充市城市绿地表层土壤有机碳、氮密度分布特征[J]. 中国土壤与肥料，2022(7)：206-214.

[10] 陈步峰，潘永军，史欣，等. 广州市典型森林土壤有机碳密度及储量生态特征[J]. 东北林业大学学报，2010，38(4)：59-61，65.

[11]XU X H,SUN Z K,HAO Z Z,et al.Effects of urban forest types and traits on soil organic carbon stock in Beijing[J].Forests,2021,12(4):394.

[12]张青青,张桂莲,伍海兵,等.城市森林土壤有机碳密度及影响因子变化研究[J].生态科学,2022,41(2):204-210.

[13]CHIEN S C,KRUMINS J A.Natural versus urban global soil organic carbon stocks:a meta-analysis[J].Science of The Total Environment,2022,807:150999.

[14]田越韩,郭泓伯,高晓飞,等.北京森林表土碳组分城郊梯度变化及其影响因素[J].地理学报,2024,79(1):206-217.

[15]CHEN S P,WANG W T,XU W T,et al.Plant diversity enhances productivity and soil carbon storage[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2018,115(16):4027-4032.

[16]SCHITTKO C,ONANDIA G,BERNARD-VERDIER M,et al.Biodiversity maintains soil multifunctionality and soil organic carbon in novel urban ecosystems[J].Journal of Ecology,2022,110(4):916-934.

[17]SPOHN M,BAGCHI S,BIEDERMAN L A,et al.The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate[J].Nature Communications,2023,14:6624.

[18]WANG T,DONG L B,LIU Z G.Stand structure is more important for forest productivity stability than tree,understory plant and soil biota species diversity[J].Frontiers in Forests and Global Change,2024,7:1354508.

[19]余轩,王兴,吴婷,等.荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系[J].生态学报,2021,41(21):8516-8524.

[20]ALI A,YAN E R,CHEN H Y H,et al.Stand structural diversity rather than species diversity enhances aboveground carbon storage in secondary subtropical forests in Eastern China[J].Biogeosciences,2016,13(16):4627-4635.

[21]孟宪宇.测树学[M].北京:中国林业出版社,2006.

[22]鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[23]YANG B,MA R H,ZHAI J,et al.Stand spatial structure is more important than species diversity in enhancing the carbon sink of fragile natural secondary forest[J].Ecological Indicators,2024,158:111449.

[24]SOKOL N W,KUEBBING S E,KARLSEN-AYALA E,et al.Evidence for the primacy of living root inputs,not root or shoot litter,in forming soil organic carbon[J].New Phytologist,2019,221(1):233-246.

[25]DIJKSTRA F A,ZHU B,CHENG W X.Root effects on soil organic carbon:a double-edged sword[J].New Phytologist,2021,230(1):60-65.

[26]FENG J G,HE K Y,ZHANG Q F,et al.Changes in plant inputs alter soil carbon and microbial communities in forest ecosystems[J].Global Change Biology,2022,28(10):3426-3440.

[27]XU X H,WANG C,SUN Z K,et al.How do urban forests with different land use histories influence soil organiccarbon?[J].Urban Forestry & Urban Greening,2023,83:127918.

[28]WEI L,ZHANG S S,LI J B,et al.Absorptive rather than transport root decomposition drives soil carbon sequestration:a case study of Platycladus orientalis and Quercus variabilis[J].Geoderma,2022,428:116186.

[29]NIU Y L,LI Y,LOU M X,et al.Microbial transformation mechanisms of particulate organic carbon to mineral-associated organic carbon at the chemical molecular level:highlighting the effects of ambient temperature and soil moisture[J].Soil Biology and Biochemistry,2024,195:109454.

[30]DELGADO-BAQUERIZO M,GARCÍA-PALACIOS P,BRADFORD M A,et al.Biogenic factors explain soil carbon in paired urban and natural ecosystems worldwide[J].Nature Climate Change,2023,13(5):450-455.

[31]CHEN X L,TAYLOR A R,REICH P B,et al.Tree diversity increases decadal forest soilcarbon and nitrogen accrual[J].Nature,2023,618(7963):94-101.

[32]DAWUD S M,RAULUND-RASMUSSEN K,DOMISCH T,et al.Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks,C/N ratio,andpH?[J].Ecosystems,2016,19(4):645-660.

[33]LI Y,LIU X J,XU W B,et al.Effects of diversity,climate and litter on soil organic carbon storage in subtropical forests[J].Forest Ecology and Management,2020,476:118479.

[34]FENG W T,LIANG J Y,HALE L E,et al.Enhanced decomposition of stable soil organic carbon and microbial catabolic potentials by long-term field warming[J].Global Change Biology,2017,23(11):4765-4776.

[35]PARVIN N,ABU SAYEED K M,JAMAN M S,et al.Plant diversity enhances soil organic carbon content in mixed stands more than single stands in the urban vegetation of Dhaka,Bangladesh[J].Ecological Frontiers,2025,45(2):316-327.

[36]GAO T,HEDBLOM M,EMILSSON T,et al.The role of forest stand structure as biodiversity indicator[J].Forest Ecology and Management,2014,330:82-93.

[37]WALTER J A,STOVALL A E L,ATKINS J W.Vegetation structural complexity and biodiversity in the great smoky mountains[J].Ecosphere,2021,12(3):e03390.

[38]ZHANG X Y,CHEN X M,LIU M Y,et al.Coupled changes in soil organic carbon fractions and microbial community composition in urban and suburban forests[J].Scientific Reports,2020,10:15933.

[39]BAE J,RYU Y.Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park[J].Landscape and Urban Planning,2015,136:57-67.