

doi: 10.12097/gbc.2023.09.011

武汉市森林公园常见植物根际土壤微生物量碳分布及其影响因素

钟言钰, 罗协, 李思悦*

ZHONG Yanyu, LUO Xie, LI Siyue*

武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 湖北 武汉 430205

School of Environmental Ecology and Biological Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China

摘要:【研究目的】土壤微生物生物量碳是土壤有机质中最活跃的组分, 研究植物根际土壤微生物量碳对认识土壤碳汇及土壤肥力具有重要意义。【研究方法】以武汉市马鞍山森林公园为研究对象, 选择4种不同植物类型(乔木、小乔木、灌木、草本)随机设置33个采样点, 研究不同植物群落根际土壤微生物量碳分布特征的主要驱动因子。【研究结果】①土壤微生物量碳在不同植物群落根际间存在显著差异, 根际土壤微生物量碳的波动范围为270.76~908.44 mg/kg。②土壤微生物量碳与土壤有机碳($r=0.662, p<0.01$)、无机氮($r=0.510, p<0.01$)、碳磷比($r=0.519, p<0.01$)、铵态氮($r=0.355, p<0.01$)和硝态氮($r=0.485, p<0.01$)显著正相关, 而与土壤速效磷($r=-0.134, p<0.05$)显著负相关。③不同植物群落根际间的土壤微生物生物量碳的变化范围为1%~4%, 其中黑足鳞毛蕨植物群落的根际最高, 桂花植物群落根际最弱。④土壤有机碳、碳磷比和无机碳是影响土壤微生物生物量碳的主要因子, 而碳氮比(36.36%, $p<0.01$)和有机碳(24.42%, $p<0.05$)是决定土壤微生物生物量碳含量的关键。【结论】土壤碳氮比和有机碳是土壤微生物量碳的主要影响因子。不同植物根际土壤中微生物生物量碳间存在显著差异, 相比之下黑足鳞毛蕨的根际土壤微生物固碳能力最高。

关键词: 土壤微生物量碳; 土壤养分; 化学计量比; 植物根系; 森林公园; 影响因素; 武汉

创新点: 城市森林有益于缓解城市生态问题, 研究环境因子对土壤微生物生物量碳的调控机理有助于土壤碳累积能力, 研究结果对城市森林公园碳汇管理和城市可持续发展具有重要的意义。

中图分类号: P595; S714.3 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)01-0150-08

Zhong Y Y, Luo X, Li S Y. Distribution and influencing factors of soil microbial carbon in plant rhizosphere in a Forest Park, Wuhan. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(1): 150-157

Abstract: [Objective] Soil microbial biomass carbon is the most active component of soil organic matter. Studying the microbial biomass carbon in the rhizosphere soil is of great significance. [Methods] The study took Ma'an Forest Park in Wuhan City as the research object, and four different plant types (trees, small trees, shrubs, and herbs) were selected to randomly set up 33 sampling points to study the main drivers of the distribution characteristics of rhizosphere soil microbial mass carbon in different plant communities. [Results] ① Soil microbial biomass carbon was significantly different in the plant rhizosphere of different plant communities. The fluctuation range of soil microbial biomass carbon in the plant rhizosphere was 270.76 ~ 908.44 mg/kg. ② Soil microbial biomass carbon was significantly and positively correlated with soil organic carbon ($r = 0.662, p < 0.01$), inorganic nitrogen ($r = 0.510, p < 0.01$), carbon-to-phosphorus ratio ($r = 0.519, p < 0.01$), ammonium nitrogen ($r = 0.355, p < 0.01$), and nitrate nitrogen ($r = 0.485, p < 0.01$), while it was significantly and negatively correlated with soil quick-acting phosphorus ($r = -0.134, p < 0.05$). ③ The variation of

收稿日期: 2023-09-08; 修订日期: 2024-03-18

资助项目: 武汉工程大学研究生教育创新基金项目《武汉市森林公园土壤微生物生物量碳分布及其影响因素研究》(编号: CX2022550) 和武汉工程大学高层次人才启动项目 (编号: 21QD02)

作者简介: 钟言钰 (1999-), 女, 在读硕士生, 从事土壤微生物量碳研究。E-mail: zhongyy06006@163.com

* 通信作者: 李思悦 (1978-), 男, 博士, 教授, 从事流域生态学与生源要素生物地球化学循环研究。E-mail: syli2006@163.com

soil microbial biomass entropy carbon in the rhizosphere of different plant communities ranged from 1% to 4%, among which the rhizosphere of the *Dryopteris fuscipes* C. Chr. was the highest, and that of the *osmanthus* sp was the lowest. ④ Soil organic carbon, carbon to phosphorus ratio and inorganic carbon were the main factors affecting soil microbial biomass carbon, while carbon to nitrogen ratio (36.36%, $p < 0.01$) and organic carbon (24.42%, $p < 0.05$) were the key determinants of entropic carbon content of soil microbial biomass. [Conclusion] Soil carbon to nitrogen ratio and organic carbon were the main influencing factors of soil microbial biomass entropy carbon. There were significant differences between the soil microbial biomass carbon in the inter-root soils of different plants, compared to the *Dryopteris fuscipes* C. Chr, which had the highest inter-root soil microbial carbon sequestration capacity.

Key words: soil microbial mass carbon; forest soil; stoichiometric ratio; plant rhizosphere; forest park; impact factor; Wuhan

Highlights: Urban forests play a crucial role in mitigating ecological issues within metropolitan areas. Investigating the regulatory mechanisms of environmental factors on soil microbial biomass carbon is instrumental in enhancing the capacity for soil carbon accumulation. The outcomes of such research are of significant importance for the management of carbon sinks in urban forest parks and for promoting sustainable urban development.

土壤微生物生物量碳(Microbial Biomass Carbon, MBC)是土壤活性碳的一部分,其含量占土壤有机碳含量的 0.5%~13%(Taylor et al., 1999),是指示土壤肥力变化的重要生物指标之一,也是衡量土壤受到非生物因素影响的一个重要指标(黎荣彬等, 2008)。土壤微生物生物量碳对土壤质量的灵敏反应被广泛用作人类活动或气候变化影响下土壤质量,以及生态系统健康状况的评价,并且其在全球碳循环和能量流动中的重要作用是土壤微生物学研究的热点(管海英等, 2015)。开展土壤微生物生物量碳的研究,有助于提升对全球环境变化背景下土壤碳循环的认识(刘爽等, 2010)。不同植物根系发达程度的差异性,导致土壤肥力供应水平与 C 元素循环过程不一致,最终使土壤微生物量存在差异。尤业明等(2016)研究表明,暖温带森林土壤微生物生物量与根系输入、温度、水分之间存在显著的影响关系。丁令智等(2019)认为,寒温带森林土壤 MBC 与有机碳关系较密切。土壤的温湿度、理化性质、根系输入量、凋落物等环境因子都是影响土壤 MBC 的关键因素。此外还有冻融循环(高珊等, 2018)、土壤深度(施福军等, 2018; Sun et al., 2020)和季节动态变化(Li et al., 2019)。研究环境因子对土壤微生物生物量碳的调控机理,进而增加土壤微生物生物量碳的碳累积能力,在固碳减排的背景下具有重要的现实意义。

城市森林在城市可持续发展中发挥了重要的生态功能。武汉市拥有丰富森林资源,其植物区系属于常绿落叶混交林,森林面积达 17920 km²,森林蓄积量在 840.87 m³(武汉市园林和林业局, 2022)。本

文以武汉马鞍山森林公园中 4 种主要类型植物为研究对象,研究植物根际的土壤微生物生物量碳的分布差异及其影响因素,对了解城市森林土壤质量及该地区碳循环过程具有重要意义,为提高城市森林土壤管理提供科学依据。

1 研究区概况

武汉马鞍山森林公园(北纬 30°30'~30°32'、东经 114°25'~114°27')位于武汉东湖吹笛风景区,主峰海拔 136.0 m,植被类型主要为常绿落叶阔叶混交林。土壤以黄棕壤为主,质地均匀,持水力好。森林覆盖率达 80%。园内共有 17 座山峰,最高海拔为 136.0 m。由北至南的三环线将马鞍山分为东、西 2 个部分,东部区域面积 713.3 hm² 为待建状态,西部区域面积 511.3 hm² 为已建成开放状态。

2 研究方法

2.1 样品采集

2021 年秋季(9—10 月)进行样品采集(图 1)。在马鞍山森林公园选取区域代表性强且植被类型相对单一、人为干扰相对较小的森林公园区域内随机设置 33 个样地,包括 4 种植物类型:乔木(香樟 *Cinnamomum camphora* (L.) Presl., 马尾松 *Pinus massoniana* Lamb. 和柏木 *Cupressus funebris* Endl.), 小乔木(杉松 *Abies holophylla* Maxim.、桂花 *Osmanthus* sp. 和广玉兰 *Magnolia grandiflora* Linn), 灌木(野鸦椿 *Euscaphis japonica* (Thunb.) Kanitz、莢蒾 *Viburnum dilatatum* Thunb. 和海桐 *Pittosporum tobira*), 以及草本(野青茅 *Deyeuxia arundinacea* (L.)

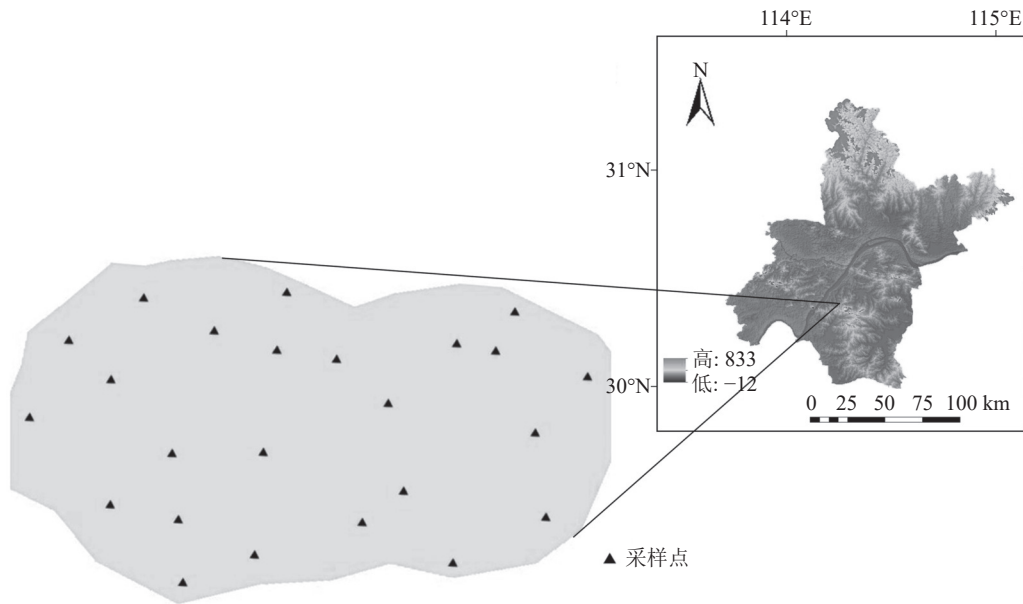


图1 马鞍山森林公园研究区采样图

Fig. 1 Sampling map of Ma'an Forest Park

Beauv.和黑足鳞毛蕨 *Dryopteris fuscipes* C. Chr.)。每个样地设置一个 20 m×20 m 样方,样方内采用 5 点法收集植物周边 0~10 cm 深的土样于容器中混匀,剔除石块、根系、凋落物等,过 2 mm 土壤筛后将样品一分为二,一部分低温保存带回实验室,置于 -20℃ 冰箱保存,用于测定土壤微生物生物量碳含量;另一部分用塑封袋装好、常温带回实验室,自然风干、粉碎、过筛 (0.25 mm) 后,用于测定其他土壤理化性质。

2.2 土壤指标测定

土壤理化指标按土壤农化分析与环境检测中的方法进行测定(杨剑虹等, 2008)。速效磷(AP)含量(土水比 1 : 20)测定采用钼锑抗比色法测定;土壤有机碳(SOC)含量用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 外加热法测定;pH 值采用(土水比 1 : 2.5)电位法测定。铵态氮含量和硝态氮含量(土水比 1:10)采用流动分析仪(Skalar San++, 荷兰)测定,无机氮(SIN)=铵态氮+硝态氮。

土壤 MBC 含量用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定(Brookes et al., 1982, 1985; Vance et al., 1987)。将经过熏蒸和未熏蒸的新鲜土壤(土水比 1 : 4)分别用 0.5 mol/L 的 K_2SO_4 溶液浸提,使用 TOC 仪(耶拿 multi N/C 2100, 德国)测定浸提液的有机碳质量分数。利用下述公式求土壤微生物生物量碳含量(MBC, 单位 mg/g):

$$\text{MBC} = (E_C - E_{C_0}) \cdot \text{TOC 稀释倍数} \cdot \text{原水土比} / 0.45$$

式中: E_C 和 E_{C_0} 分别为熏蒸和未熏蒸土样的浸提液中碳含量(mg/L); 0.45 为校正系数。

土壤微生物量熵是评价土壤的重要指标之一,其计算公式为(陈闽昆等, 2019):

$$q\text{MBC} = (\text{MBC}/\text{SOC}) \cdot 100\%$$

式中: $q\text{MBC}$ 为土壤微生物量熵; MBC 为土壤微生物生物量碳; SOC 为土壤有机碳。

2.3 数据分析方法

先用 Excel 2016 版对所有实验数据进行初步整理,再通过 IBM SPSS 和 Origin 2021 对数据进行分析与制图。处理平均数采用最小显著数测验法,显著性差异设定为 $p < 0.05$ 。利用 Pearson 相关系数和层次分割法分析评价土壤 MBC 与各土壤因子之间的关系。

3 结果与分析

3.1 土壤微生物生物量碳含量 (MBC) 特征

乔木土壤 MBC 为 403.02 ~ 908.44 mg/kg, 小乔木土壤 MBC 为 270.76 ~ 565.60 mg/kg, 灌木土壤 MBC 为 625.69 ~ 681.51 mg/kg 和草本土壤 MBC 为 412.18 ~ 514.49 mg/kg(表 1)。不同植物群落之间的根际土壤 MBC 含量存在显著性差异(图 2)。根际土壤 MBC 变化范围为 270.76 ~ 908.44 mg/kg, 表现为香樟群落的根际土壤 MBC 含量最大, 桂花群落

表 1 马鞍山森林土壤理化指标

Table 1 Soil physicochemical indexes of Ma'an Forest Park

物种	有机碳/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	无机氮/(mg·kg ⁻¹)	pH值	MBC/(mg·kg ⁻¹)
乔木							
香樟	46.02±4.67a	35.34±1.54c	15.33±1.77a	9.00±1.36a	24.33±1.70a	4.49±0.11c	908.44±163.16a
马尾松	24.21±3.23bc	49.38±3.17b	7.20±0.41c	5.83±0.62bc	13.03±0.36b	4.56±0.08bc	601.69±93.09ab
柏木	23.26±4.10bc	31.82±3.87c	12.53±1.61ab	6.4±1.56ab	18.93±3.07ab	4.78±0.03ab	403.02±112.73b
小乔木							
杉松	23.14±1.47bc	50.72±1.88b	13.23±1.36ab	7.87±1.32ab	21.1±2.26ab	4.83±0.13ab	565.60±54.31ab
桂花	20.23±2.69bc	96.90±4.24a	9.7±0.63bc	1.07±0.39bc	10.77±1.03bc	4.56±0.12bc	270.76±77.03b
广玉兰	12.37±1.37c	103.16±2.61a	10.77±1.14bc	0.67±0.11c	11.43±1.03bc	4.91±0.06a	392.62±86.02b
灌木							
野鸦椿	31.16±0.76ab	91.66±5.73a	8.70±1.09bc	6.93±1.32a	15.63±0.33b	4.49±0.04bc	676.44±48.12ab
荚蒾	35.51±3.20a	99.21±3.19a	17.90±2.98a	7.20±2.15a	25.10±5.08a	4.38±0.09c	625.69±31.55ab
海桐	30.90±3.70ab	84.25±4.17a	8.33±1.08bc	9.07±1.28a	17.90±1.43ab	4.38±0.11c	681.51±29.41ab
草本							
野青茅	23.54±2.95bc	40.55±1.14bc	10.6±0.71bc	9.17±3.31a	19.77±4.02ab	4.79±0.08ab	412.18±98.78b
黑足鳞毛蕨	22.07±3.65bc	51.45±7.93b	12.17±2.21ab	8.63±2.84a	20.80±4.93ab	4.66±0.03ab	514.49±90.73ab

注: 不同小写字母代表差异显著($p < 0.05$)

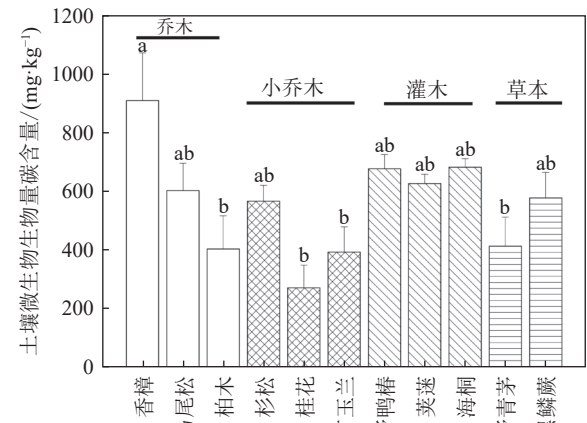


图 2 马鞍山森林不同植物群落的土壤微生物生物量碳含量 (不同小写字母代表差异显著($p < 0.05$)). 黑鳞蕨: 黑足鳞毛蕨)

Fig. 2 Soil microbial biomass carbon content in different species communities in Ma'an forest

的根际土壤 MBC 含量最小。

3.2 土壤养分含量变化与养分化学计量比

不同植物的根际土壤理化性质存在显著性差异(表 1)。土壤 SOC 含量为 12.37 ~ 46.02 g/kg, 乔木(香樟)和灌木(荚蒾)群落根际的 SOC 含量显著高于草本和小乔木群落; 土壤 AP 为 31.82 ~ 103.16 mg/kg, 表现为小乔木(桂花和广玉兰)和灌木(荚蒾和野鸦椿)群落根际土壤 AP 含量最高, 显著高于乔木和草本群落; 土壤 NH_4^+-N 为 7.20 ~ 15.33 mg/kg, 其中乔

木(香樟)群落根际土壤中 NH_4^+-N 的含量最高; 土壤 NO_3^--N 为 0.67 ~ 9.17 mg/kg, 小乔木(广玉兰和桂花)群落根际土壤的 NO_3^--N 含量显著低于其他植物群落; 土壤 SIN 为 10.77 ~ 25.10 mg/kg, 表现为灌木(荚蒾)和乔木(香樟)群落根际土壤最高, 并显著高于其他植物群落根际; 土壤 pH 介于 4.38 ~ 4.91 之间, 表明马鞍山为酸性土壤。

不同植物根际土壤的养分化学计量比有显著性差异(表 2)。碳磷比(C : P)、碳氮比(C : N)和氮磷比(N : P)分别为 121.23 ~ 1311.10, 1112.92 ~ 1998.98 和 0.17 ~ 0.75。土壤 C : N 表现为灌木(野鸦椿)最高, 小乔木(杉松和广玉兰)最低, C : P 和 N : P 值均表现为乔木(香樟和柏木)最高, 灌木(野鸦椿)和小乔木(广玉兰)最低。

3.3 土壤微生物生物量熵碳特征

根际土壤微生物生物量熵碳($q\text{MBC}$)的变化范围为 0.01~0.04(1% ~ 4%)(图 3)。其中桂花根际的 $q\text{MBC}$ 含量最低, 黑足鳞毛蕨根际的含量最高。

3.4 土壤微生物生物量碳与环境因子的相关性分析

MBC 与 SOC、SIN、C : P、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 显著正相关($0.47 < r < 0.62, p < 0.05$), 与 AP 显著负相关($r = -0.41; p < 0.05$)(图 4)。

土壤 SOC 与 MBC、C : P、N : P、SIN 呈极显著正相关关系($p < 0.01$), 与土壤 AP 呈显著负相关关

表 2 马鞍山森林土壤养分化学计量比

Table 2 Stoichiometric ratio of soil nutrient content in Ma'an forest

物种	C : P	C : N	N : P
乔木			
香樟	1311.10±183.87a	1879.87±60.54a	0.75±0.04a
马尾松	522.72±79.36bc	1841.26±204.50a	0.45±0.04bc
柏木	791.97±99.28b	1271.08±177.38ab	0.74±0.07a
小乔木			
杉松	453.25±42.37cd	1112.92±50.02b	0.49±0.04bc
桂花	214.75±25.18e	1883.67±222.85a	0.24±0.01d
广玉兰	121.23±11.92e	1114.99±183.82b	0.20±0.004d
灌木			
野鸭椿	343.53±21.11de	1998.98±88.47a	0.17±0.01d
莢蒾	376.94±64.68de	1675.95±44.77a	0.26±0.06d
海桐	375.57±61.26de	1718.27±12.12a	0.22±0.03d
草本			
野青茅	569.11±73.79bc	1283.25±209.05ab	0.57±0.03b
黑足鳞毛蕨	358.95±48.25de	1118.38±304.52b	0.39±0.06c

注: 不同小写字母代表差异显著($p < 0.05$)

系($p < 0.05$), 与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、C : N 呈显著正相关关系($p < 0.05$)。土壤 AP 与 SIN、 NO_3^--N 、C : P、N : P 呈极显著负相关关系($p < 0.01$), 与

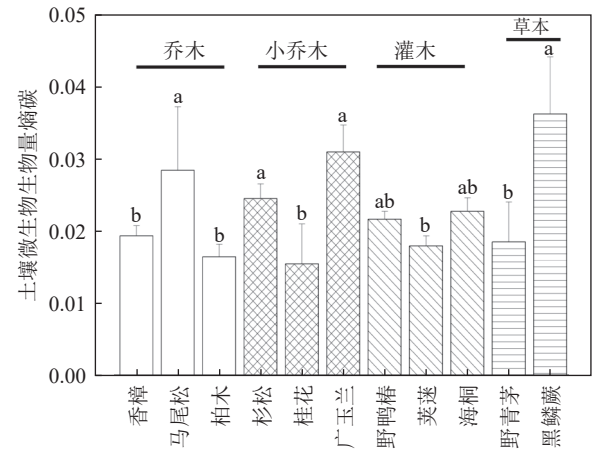


图 3 马鞍山森林公园土壤微生物生物量熵碳

Fig. 3 Soil Microbial Biomass Entropy Carbon in Ma'an Forest Park

注: 不同小写字母代表差异显著($p < 0.05$)。黑鳞蕨: 黑足鳞毛蕨

MBC、SOC 呈显著负相关关系($p < 0.05$)。土壤 SIN 与 MBC、SOC、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、C : P、N : P、AP 呈极显著正相关关系($p < 0.01$)。此外, 植物类型仅与 AP 显著正相关, 而土壤养分指标都与土壤 pH 无相关关系。

3.5 森林土壤微生物生物量熵碳与土壤理化性质的单一变量解释率

层次分割法(rdacca.hp)(Lai et al., 2022)分析的土壤 qMBC 的各因子解释率见图 5。各因子的重要

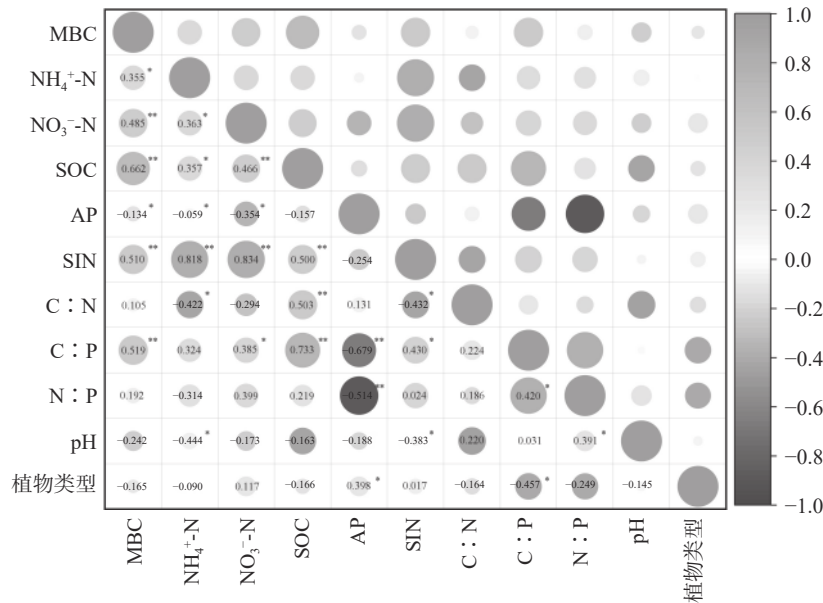


图 4 马鞍山森林公园土壤因子的相关性热图

(*表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著, **表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著)

Fig. 4 Correlation heat map of Soil Factors in the Ma'an Forest Park

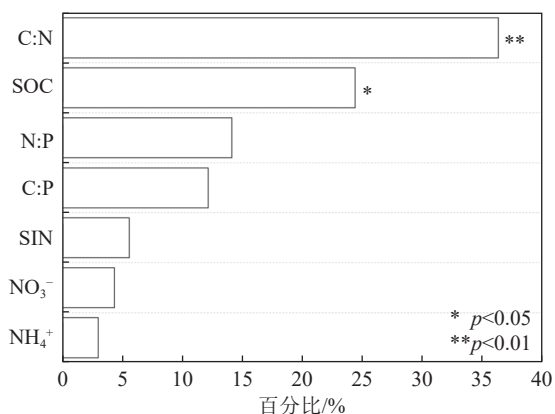


图 5 土壤因子的单一解释率

Fig. 5 Single interpretation rate of soil factors

性按解释率大小排序为: C : N(36.36%, $p < 0.01$) > SOC(24.42%, $p < 0.05$) > N : P(14.13%) > C : P(12.17%) > SIN(5.58%) > NO₃⁻-N(4.36%) > NH₄⁺-N(3.01%), 其中只有 C : N 和 SOC 的显著水平小于 0.05, 因此土壤 q MBC 的主要驱动因子为 C : N 和 SOC。

4 讨 论

4.1 植物类型对土壤微生物生物量碳含量的影响

研究发现, 不同植物类型间的表层土壤碳含量及其养分含量差异显著, 与已有的研究结果相似(陈小花等, 2021)。马鞍山森林土壤 MBC 含量(270.76 ~ 908.44 mg/kg)略低于全球森林土壤水平(347 ~ 971 mg/kg), 主要源于研究区域、物种组成及土壤微生物种群结构的变化(胡宗达等, 2012)。对广州鼎湖山生物保护区森林 SOC 储存机制的研究发现, 生长在相同土壤类型上的针叶林和阔叶林之间的 SOC 储量存在显著差异, 表明森林树种组成的变化对土壤碳储存量有长期影响(Su et al., 2021)。研究支持植物类型在储存土壤有机碳方面的重要性。本次研究进一步发现, 乔木(香樟)和灌木(野鸦椿、荚蒾、海桐)群落的 SOC 与 MBC 含量显著高于小乔木群落, 其主要原因一方面可能与其凋落物含量和根系分泌物较高有关(李雅等, 2023), 另一方面源于根际土壤微生物的活性、群落结构和功能差异(马彩霞等, 2019)。

4.2 土壤环境因子对土壤微生物生物量碳含量的影响

土壤微生物量对土壤环境因子的变化极敏感, 常受到植物类型、土壤养分等因素的影响(Bhople et al., 2019)。有研究表明, pH 和 SOC、TN 和 TP 含量对土壤 MBC 含量的影响程度各异(Monika et al.,

2021; Gao et al., 2022), 研究发现温带森林土壤 MBC 含量与土壤 SOC 呈显著正相关关系, 张雅茜等(2019)在长沙县大山冲林场的研究也证实了土壤 SOC 含量是土壤 MBC 的直接影响因素, 这些结果与本次研究结果一致。这也证实, 土壤的理化性质对土壤 MBC 积累具有重要的调控作用。然而, 王全成等(2021)在浙江省衢州市古田山国家级自然保护区的研究中发现, 土壤 MBC 与土壤 AP 呈显著正相关, 则与本文结果相反, 可能是因为: ①研究区域、物种组成及土壤微生物种群结构的差异导致的; ②微生物代谢过程中会释放一些有机酸和化合物与速效磷结合, 形成难以被植物利用的磷酸盐, 所以随着土壤 MBC 含量的增加土壤 AP 含量降低, 二者呈负相关关系。通常情况, 土壤 pH 是影响土壤 MBC 的主要因素, 而研究发现土壤 MBC 与 pH 之间无显著关系, 这可能与土壤类型和土壤微生物活性差异不显著(张海燕等, 2005), 导致 pH 对土壤 MBC 的影响不大, 后续需要设计不同土壤类型和土壤微生物活性差异显著的控制试验进行验证。

土壤中的 N 元素 90% 以上为有机氮, 无机氮只占 5%, 但是能直接供植物利用的只有无机氮, 有机氮必须经过微生物矿化, 转换成无机氮后才能被植物所利用。土壤 SIN 含量的高低主要受矿化作用和植物吸收作用, 其主要成分是 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N, 本文中土壤 SIN 与 MBC、C : P、SOC、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、AP 呈极显著相关关系, 说明土壤 SIN 对土壤 MBC 具有一定的影响。虽然本次研究中马鞍山森林土壤的 SIN 值为 19.07 ~ 26.51 mg/kg, 显著低于全国土壤碱解氮的平均水平(60 ~ 90 mg/kg)(全国土壤普查办公室等, 1979), 但是土壤 SIN 仍是影响土壤 MBC 的重要驱动因子之一, 这是因为 N 元素是微生物生长的重要营养元素, 当土壤中含氮量很低时, 这种效应可能会更加显著(程谊等, 2012)。

土壤碳氮磷化学计量比是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标(王绍强等, 2008)。磷的有效性是由土壤有机质的分解速率决定的, 较低的 C : P 是磷有效性较高的一个指标。研究表明, C : P 和 N : P 值均为香樟群落根际最高, 广玉兰群落根际最低; C : N 值表现为桂花群落根际最高, 杉松群落根际最低。不同植物群落根际间 C : N、C : P 和 N : P 比之间存在显著差异, 说明土壤养分受植被类型、凋落物质量及其分解速率的影响。本

次研究中土壤 C : N 平均比值约为 1 : 1, 小于稳态的 C : N 比(25 : 1)(青焯等, 2015), 因此该区域土壤的碳固潜力很大。

土壤 $qMBC$ 表征土壤微生物量对土壤营养库的贡献率, 比值越大说明土壤微生物固碳能力越强, 土壤养分的有效性越高。 $qMBC$ 主要受控于有机质的数量和质量(Xu et al., 2007)。本次研究中, $qMBC$ (1%~4%)与一般土壤微生物的 $qMBC$ (1%~3%)变化范围相符(Liu et al., 2023), 说明研究区域植物群落地下根系分泌物和地表枯落物供给微生物活动所需能量充足, 达到全球营养供给的平均水平。总体而言, $qMBC$ 随着植物的改变而变化, 在黑足鳞毛蕨、广玉兰和马尾松中最高, 而桂花中最低。这表明, 黑足鳞毛蕨、广玉兰和马尾松群落仍处于有机碳积累阶段, 而桂花群落处于养分利用效率最高的阶段。层级分割分析发现, 碳氮比和有机碳是 $qMBC$ 含量的重要影响因素, 表明碳源利用效率的高低是决定土壤 $qMBC$ 的关键因素。

5 结 论

(1) 马鞍山森林公园土壤 MBC 含量为 270.76 ~ 908.44 mg/kg, 香樟群落的根际土壤 MBC 含量最大, 桂花群落的根际土壤 MBC 含量最小。

(2) 土壤 MBC 与土壤 SOC、SIN、C : P 呈极显著正相关。

(3) 马鞍山主要的 8 种植物群落中黑足鳞毛蕨的根际土壤微生物固碳能力最高, 层次分析表明土壤 $qMBC$ 的主要驱动因子为 C : N 和 SOC。

因此, 合理种植植物种类可提高城市森林土壤碳汇, 对改善城市生态问题具有积极效应。但本次仅研究了生长旺季不同植物类型下土壤微生物生物量碳含量及其影响因素, 后续需进一步比较不同季节及年际间土壤微生物生物量碳氮的变化特征及其影响机制。

References

- Bhople P, Djukic I, Keiblinger K, et al. 2019. Variations in soil and microbial biomass C, N and fungal biomass ergosterol along elevation and depth gradients in Alpine ecosystems[J]. *Geoderma*, 345: 93–103.
- Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6): 837–842.
- Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. 1982. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 14(4): 319–329.
- Chen M K, Wang S J, Chen W Q, et al. 2019. Effects of ant nesting on soil microbial biomass carbon and quotient in tropical forest of Xishuangbanna[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 30: 2973–2982 (in Chinese with English abstract).
- Chen X H, Chen Z Z, Lei J R, et al. 2021. Soil microbial biomass carbon, nitrogen and nutrient characteristics of different plant communities in Dongzhai Port[J]. *Forest Resources Management*, (6): 97–104 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y, Zhang J B, Cai Z C. 2012. A research progress on biotic and abiotic inorganic N immobilization in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 49(5): 1030–1036 (in Chinese with English abstract).
- Ding L Z, Man X L, Xiao R H, et al. 2019. Dynamics of soil microbial biomass carbon and nitrogen in the soil of rhizosphere during growing season in the cold temperate forests[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(7): 178–186 (in Chinese with English abstract).
- Gao D, Bai E, Wang S, et al. 2022. Three-dimensional mapping of carbon, nitrogen, and phosphorus in soil microbial biomass and their stoichiometry at the global scale[J]. *Global Change Biology*, 28(22): 1–13.
- Gao S, Yin H, Fu M J, et al. 2018. Effects of freeze-thaw cycles on soil microbial biomass carbon, nitrogen, and nitrogen mineralization in three types of forest in the temperate zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 38(21): 7859–7869 (in Chinese with English abstract).
- Guan H Y, Wang Q, Zhao X, et al. 2015. Seasonal patterns of soil microbial biomass C and impacting factors in two typical arid desert vegetation regions[J]. *Arid Land Geography*, 38(1): 67–74 (in Chinese with English abstract).
- Hu Z D, Liu S R, Shi Z M, et al. 2012. Variations of soil nitrogen and microbial biomass carbon and Nitrogen of *Quercus aquifolioides* forest at different attitudes in Balangshan, Sichuan[J]. *Forest Research*, 25(3): 261–268 (in Chinese with English abstract).
- Lai J, Zou Y, Zhang J, et al. 2022. Generalizing hierarchical and variation partitioning in multiple regression and canonical analyses using the rdacca. hp R package[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 13: 782–788.
- Li P, Muledeer T, Tian D, et al. 2019. Seasonal dynamics of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry across global forest ecosystems[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 43(6): 532–542.
- Li R B. 2008. Review of research advances of soil microbial biomass carbon[J]. *Forestry and Environmental Science*, 24: 65–68 (in Chinese with English abstract).
- Li Y, Lu J. 2023. Factors influencing soil carbon and the impact of litter on soil carbon storage[J]. *Agriculture and technology*, 43(4): 52–55 (in Chinese with English abstract).
- Liu C, Tian J, Cheng K, et al. 2023. Topsoil microbial biomass carbon pool and the microbial quotient under distinct land-use types across China: A data synthesis[J]. *Soil Science and Environment*, 2(5): 1–10.
- Liu S. 2010. Temporal and spatial variations of microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest soils[D]. Master Thesis of Northeast Forestry University (in Chinese with English abstract).
- Ma C X, Li H J, Zhen H F, et al. 2019. Responses of soil active carbon and nitrogen to short-term warming in alpine treeline of west Sichuan,

- China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 30(3): 718–726 (in Chinese with English abstract).
- Monika R, Kusum A, Ayyanadar A. 2021. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a temperate forest ecosystem of Uttarakhand, India[J]. Tropical Ecology, 62(3): 377–385.
- Office of the National Soil Census. 1979. Interim technical regulations for the Second National Soil Survey[M]. China Agriculture Press: 1–79 (in Chinese).
- Qing Y, Sun F D, Li Y, et al. 2015. Analysis of soil carbon, nitrogen and phosphorus in degraded alpine wetland, Zoige, southwest China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 24(3): 38–47 (in Chinese with English abstract).
- Shi F J, Huang Z Y, Li T, et al. 2018. Vertical changes of the soil microbial biomass and the correlation analysis in Parashorea chinensis natural forest[J]. Forestry and Environmental Science, 34: 72–76 (in Chinese with English abstract).
- Su F, Xu S, Sayer E J, et al. 2021. Distinct storage mechanisms of soil organic carbon in coniferous forest and evergreen broadleaf forest in tropical China[J]. Journal of Environmental Management, 295: 113142.
- Sun T, Wang Y, Hui D, et al. 2020. Soil properties rather than climate and ecosystem type control the vertical variations of soil organic carbon, microbial carbon, and microbial quotient[J]. Soil Biology and Biochemistry, 32: 106147.
- Taylor L A, Arthur M A, Yanai R D. 1999. Forest floor microbial biomass across a northern hardwood successional sequence[J]. Soil Biology and Biochemistry, 31(3): 431–439.
- Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology and Biochemistry, 19(6): 703–707.
- Wang Q C, Zhen Y, Song G, et al. 2021. Impacts of simulated nitrogen and phosphorus depositions on soil microbial biomass and soil nutrients along two secondary succession stages in a subtropical forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 41(15): 6245–6256 (in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, Yu G R. 2008. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(8): 3938–3945 (in Chinese with English abstract).
- Wuhan Municipal Landscape Gardens and Forestry Bureau, Annual Report on Greening of Wuhan City in 2021[EB/OL]. (2022–03–17). [2022–12–07]. http://ylj.wuhan.gov.cn/zwgk/zwxxgkzl_12298/tjxx/lhgb_12361/202203/120220317_1941383.shtml (in Chinese).
- Xu X, Han L, Wang Y, et al. 2007. Influence of vegetation types and soil properties on microbial biomass carbon and metabolic quotients in temperate volcanic and tropical forest soils[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 253: 430–440.
- Yang J H, Wang C L, Dai H L. 2008. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring[M]. Beijing: China Land Publishing House (in Chinese).
- You Y M, Wang J, Huang X M, et al. 2016. Responses of soil microbial biomass, community structure and soil enzyme to below-ground carbon change in the warm-temperate forest ecosystem[J]. Guihaia, 36(7): 837–847 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H Y. 2005. A study on the relationship between black soil microbiomass and soil fertility[D]. Master Thesis of Shenyang Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Fang X, Xian Y N, et al. 2019. Characteristics of soil microbial biomass carbon, nitrogen, phosphorus and enzyme activity in four subtropical forests, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 39(14): 5326–5338 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈闯昆, 王邵军, 陈武强, 等. 2019. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳及氮的影响[J]. 应用生态学报, 30: 2973–2982.
- 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 2021. 东寨港不同植物群落土壤微生物量碳氮及养分特征[J]. 林业资源管理, (6): 97–104.
- 程谊, 张金波, 蔡祖聪. 2012. 土壤中无机氮的微生物同化和非生物固定作用研究进展[J]. 土壤学报, 49(5): 1030–1036.
- 丁令智, 满秀玲, 肖瑞哈, 等. 2019. 寒温带森林根际土壤微生物量碳氮含量生长季内动态变化[J]. 林业科学, 55(7): 178–186.
- 高珊, 伊航, 傅民杰, 等. 2018. 冻融循环对温带3种林型下土壤微生物量碳、氮和氮矿化的影响[J]. 生态学报, 38(21): 7859–7869.
- 管海英, 王权, 赵鑫, 等. 2015. 两种典型荒漠植被区土壤微生物量碳的季节变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 38(1): 67–74.
- 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等. 2012. 川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征[J]. 林业科学研究, 25(3): 261–268.
- 黎荣彬. 2008. 土壤微生物生物量碳研究进展[J]. 林业与环境科学, 24: 65–68.
- 李雅, 卢杰. 2023. 土壤碳的影响因素及凋落物对土壤碳储量的影响[J]. 农业与技术, 43(4): 52–55.
- 刘爽. 2010. 五种温带森林土壤微生物生物量碳和氮的时空变化[D]. 东北林业大学硕士学位论文.
- 马彩霞, 李洪杰, 郑海峰, 等. 2019. 川西高山林线土壤活性碳、氮对短期增温的响应[J]. 应用生态学报, 30(3): 718–726.
- 青烨, 孙飞达, 李勇, 等. 2015. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析[J]. 草业学报, 24(3): 38–47.
- 全国土壤普查办公室. 1979. 全国第二次土壤普查暂行技术规程[M]. 农业出版社出版: 1–79.
- 施福军, 黄则月, 李婷, 等. 2018. 望天树天然林土壤微生物生物量碳氮垂直分布及相关性分析[J]. 林业与环境科学, 34: 72–76.
- 王全成, 郑勇, 宋鸽, 等. 2021. 亚热带次级森林演替过程中模拟氮磷沉降对土壤微生物生物量及土壤养分的影响[J]. 生态学报, 41(15): 6245–6256.
- 王绍强, 于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 28(8): 3938–3945.
- 武汉市园林和林业局. 2021年武汉市绿化状况公报[EB/OL]. (2022–03–17). [2022–12–07]. http://ylj.wuhan.gov.cn/zwgk/zwxxgkzl_12298/tjxx/lhgb_12361/202203/120220317_1941383.shtml.
- 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 2008. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社.
- 尤业明, 王娟, 黄雪蔓, 等. 2016. 暖温带森林土壤微生物量、群落结构和活性对植物地下碳源的响应[J]. 广西植物, 36(7): 837–847.
- 张海燕. 2005. 有关黑土微生物量与土壤肥力关系的研究[D]. 沈阳农业大学硕士学位论文.
- 张雅茜, 方晞, 洗应男, 等. 2019. 亚热带区4种林地土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性特征[J]. 生态学报, 39(14): 5326–5338.