

# 亚热带森林公园土壤微生物量碳分布的影响因素研究

钟言钰, 罗 协, 李思悦\*

武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2023年10月29日; 录用日期: 2023年11月29日; 发布日期: 2023年12月8日

## 摘 要

研究以武汉市八分山、青龙山、马鞍山、磨山和九峰山森林公园为对象, 研究土壤微生物量碳的分布特征及其土壤环境影响因子。在每座山选择8种主要树种, 共设置120个采样点, 于2021年9月至11月进行土壤样品采集, 采用抖落法采集根际土壤样品。结果显示: (1) 八分山( $57.42\sim 502.22\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、青龙山( $148.59\sim 563.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )、马鞍山( $270.76\sim 908.44\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和磨山( $137.45\sim 654.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )不同植物群落土壤微生物量碳间差异显著, 九峰山( $224.18\sim 595.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )不同植物土壤微生物量碳间无显著差异。(2) 青龙山土壤微生物量碳与铵态氮( $r = 0.462, p < 0.05$ )呈显著正相关; 马鞍山土壤微生物量碳与有机碳( $r = 0.648, p < 0.01$ )、硝态氮( $r = 0.434, p < 0.05$ )、铵态氮( $r = 0.474, p < 0.05$ )、无机氮( $r = 0.532, p < 0.01$ )、C:P ( $r = 0.560, p < 0.01$ )和N:P ( $r = 0.420, p < 0.05$ )呈显著正相关; 九峰山土壤微生物量碳与铵态氮( $r = 0.578, p < 0.01$ )、无机氮( $r = 0.573, p < 0.01$ )、C:P ( $r = 0.551, p < 0.01$ )和N:P ( $r = 0.465, p < 0.05$ )呈显著正相关; 八分山和磨山土壤微生物量碳均与环境因子无显著差异。(3) 五座森林公园的土壤微生物量碳范围在1%~4%。层次分割法表明土壤微生物量碳的关键驱动因子为有机碳。

## 关键词

土壤碳库, 森林土壤, 城市森林公园, 养分化学计量比, 驱动因素

# Distribution and Influencing Factors of Soil Micro Biomass Carbon in Subtropical Forest Parks

Yanyu Zhong, Xie Luo, Siyue Li\*

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

\*通讯作者。

文章引用: 钟言钰, 罗协, 李思悦. 亚热带森林公园土壤微生物量碳分布的影响因素研究[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(6): 1237-1246. DOI: 10.12677/aep.2023.136148

## Abstract

To analyze the distribution characteristics and influencing factors of soil microbial biomass carbon, the study was conducted in the forest parks of Bafen Mountain, Qinglong Mountain, Maanshan Mountain, Mashan Mountain and Jiufeng Mountain in Wuhan City, and eight major constituent tree species were selected for each mountain, with a total of 120 sampling points, and soil samples were collected from September to November 2021, and rhizosphere soil samples were collected by the shaking drop method. The results showed that: (1) There was no significant differences in soil microbiomass carbon among different plant communities in Bafen Mountain (57.42~502.22 mg·kg<sup>-1</sup>), Qinglong Mountain(148.59~563.78 mg·kg<sup>-1</sup>), Ma'anshan Mountain (270.76~908.44 mg·kg<sup>-1</sup>), and Mashan Mountain (137.45 ~ 654.81 mg·kg<sup>-1</sup>) showed significant differences among soil microbial biomass carbon of different plant communities, and Jiu Feng Shan (224.18~595.56 mg·kg<sup>-1</sup>) showed non-significant differences among soil microbial biomass carbon of different plants. (2) There was a significant positive correlation between soil microbial biomass carbon and ammonium nitrogen ( $r = 0.462, p < 0.05$ ) in Qinglong, and a significant positive correlation between soil microbial biomass carbon and soil organic carbon ( $r = 0.648, p < 0.01$ ), nitrate nitrogen ( $r = 0.434, p < 0.05$ ), ammonium nitrogen ( $r = 0.474, p < 0.05$ ), inorganic nitrogen ( $r = 0.532, p < 0.01$ ), C:P ( $r = 0.560, p < 0.01$ ) and N:P ( $r = 0.420, p < 0.05$ ) were significantly positively correlated; soil microbial biomass carbon in Jiufeng was significantly positively correlated with soil ammonium nitrogen ( $r = 0.578, p < 0.01$ ), inorganic nitrogen ( $r = 0.573, p < 0.01$ ), C:P ( $r = 0.551, p < 0.01$ ) and N:P ( $r = 0.465, p < 0.05$ ) were significantly positively correlated; neither Bafen nor Moshan soil microbial biomass carbon was significantly related to environmental factors. (3) Soil microbiomass entropy carbon in the five forest parks ranged from 1% to 4%. Hierarchical partitioning was further used to derive that the driving factor of soil microbial biomass carbon was soil organic carbon.

## Keywords

Soil Carbon Pool, Forest Soil, City Urban Park, Stoichiometric Ratio of Nutrient, Driving Factor

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

森林生态系统具有巨大的固碳潜力。森林植被存储着全球植被总碳储量的 86%，森林土壤存储着全球土壤总储存量的 73% [1]。土壤微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)是土壤微生物生物量主要的组成，不仅对土壤有机质和养分有重要作用，还是一个直接调控土壤养分影响植被生长的重要活性养分库，因此，土壤 MBC 是土壤肥力变化的重要指标之一[2] [3]。研究表明，不同树种凋落量及根系分泌物 [4]、土壤深度[5]、季节变化[6]等会影响土壤 MBC 的差异。城市森林是城市生态系统的重要组成部分，在城市可持续发展中发挥巨大的生态功能，如净化空气，改善城市“热岛”问题等[7]，也是区域碳库的关键组成。

武汉市森林面积 179.2 万亩，森林蓄积量 840.87 m<sup>3</sup> [8]。但是武汉市森林公园土壤微生物量碳特征研

究较为缺乏,多数研究以湖北省主要森林类型的土壤理化性质及质量为主[9][10]。因此,还需研究森林土壤 MBC 与土壤碳库之间的关系,土壤与植物之间的机制,探讨城市森林的生态作用,研究土壤碳汇潜力。论文以武汉市的八分山、青龙山、马鞍山、磨山和九峰山森林公园为对象,探究森林公园不同植物根际土壤微生物生物量碳的分布特征及其影响因素,为了解城市森林公园土壤碳汇变化规律,揭示土壤碳汇形成机制提供科学依据。

## 2. 研究区概况

武汉市(113°41'~115°05'E, 29°58'~31°22'N)位于湖北省,属亚热带季风性湿润气候区,日照充足,热量丰富,雨热同季,降雨集中等特点。年降雨量为 1205 hm,活动积温在 5000~5300℃,年无霜期达 240 天。植物区系属中亚热带常绿阔叶林与落叶阔叶林混交林。土壤以红黄壤、棕壤、黄褐土为主,母岩多为砂岩,存在零星石灰岩。八分山森林公园(114°01'~114°35'E, 29°58'~30°32'N)位于武汉江夏区纸坊街,海拔 272.3 m,森林覆盖率达 96%;青龙山森林公园(113°50'~114°22'E, 30°33'~30°17'N)位于江夏区纸坊街,森林覆盖率达 95%以上;马鞍山森林公园(114°25'~114°27'E, 30°30'~30°32'N)位于武汉东湖吹笛风景区,森林覆盖率达 80%;磨山森林公园(114°40'~114°43'E, 30°54'~30°56'N)位于东湖磨山西峰景区;九峰森林公园(114°29'~114°30'E, 30°30'~30°31'N)位于武汉市洪山区,海拔高度 51.2~202 m,森林覆盖率达 85%以上。

## 3. 研究方法

### 3.1. 样品采集

于 2021 年 9~11 月在八分山、青龙山、马鞍山、磨山和九峰山森林公园选取代表性强、植被类型相对单一以及人为干扰相对较小的森林样带,每座山设置 24 个样点,共 120 个样点(图 1)。剔除石块、根系、凋落物、动植物残体等,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;另一部分自然风干、粉碎、过筛(0.25 mm)后,用于测定土壤理化性质。

### 3.2. 土壤指标测定

土壤 MBC 采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法测定[11][12][13],将经过氯仿熏蒸和未熏蒸的新鲜土壤用 0.5 mol·L<sup>-1</sup>的 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液浸提,再用 TOC 仪(耶拿 multi N/C 2100,德国)测定。土壤理化性质按土壤农化分析与环境检测中的方法进行测定[14]。速效磷(AP)采用钼锑抗比色法测定;有机碳(SOC)采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 外加热法测定;铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)与硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)采用流动分析仪法(Skalar San++,荷兰);pH 值采用 1:2.5 水土比电位法;土壤微生物量碳(qMBC)为土壤 MBC 与 SOC 比[15]。

### 3.3. 数据分析方法

利用 IBM SPSS Statistics 26 软件对不同样地的土壤 MBC、去、qMBC、SOC、AP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SIN 等土壤指标进行方差分析(One-Way ANOVON)检验土壤指标间的差异显著性,平均数比较采用最小显著数测验法,显著水平均为 0.05。皮尔森相关性分析确定土壤 MBC 与 SOC、AP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、SIN、C:P、C:N、N:P 间的相关性。为克服确定权重的主观性,提供指标赋权的一致性,通过 R 语言包(rdacca.hp)分析不同植物根际土壤 MBC 的驱动因子。用 Origin 2021 软件制图。

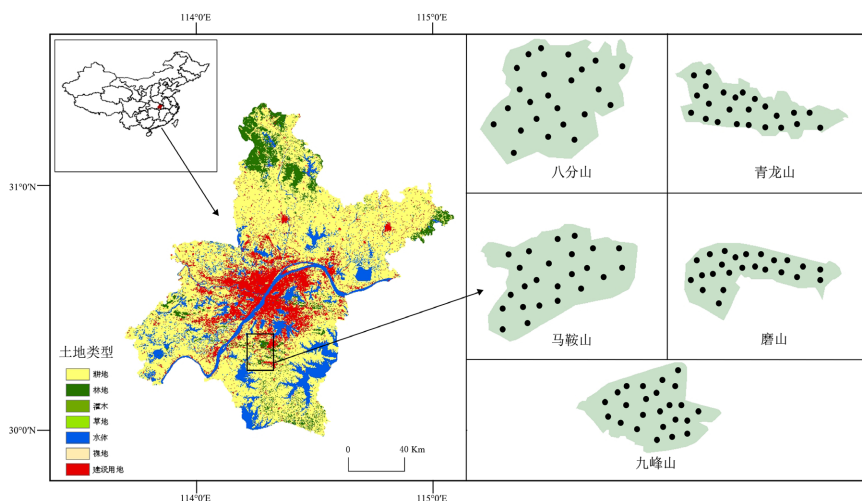
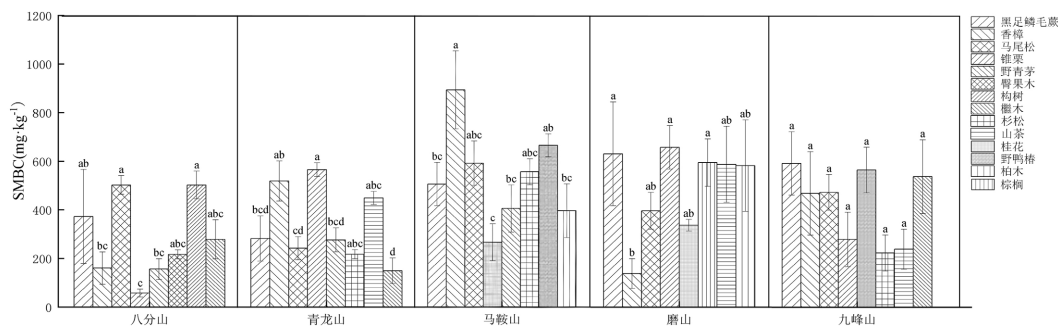


Figure 1. Sampling map of the Wuhan forest parks  
图 1. 武汉市森林公园采样图

## 4. 结果与分析

### 4.1. 土壤微生物生物量碳含量特征

不同植物群落土壤 MBC 存在显著性差异(图 2)。八分山土壤 MBC 为  $57.42 \pm 16.29$  (锥栗)~ $502.22 \pm 57.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (构树、马尾松)。青龙山土壤 MBC 为  $148.59 \pm 52.65$  (榿木)~ $563.78 \pm 28.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (锥栗)。马鞍山土壤 MBC 为  $270.76 \pm 77.03$  (桂花)~ $908.44 \pm 163.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (香樟), 群落土壤 MBC 含量最高。磨山土壤 MBC 为  $137.45 \pm 61.03$  (香樟)~ $654.81 \pm 89.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (锥栗)。九峰山土壤 MBC 为  $224.18 \pm 74.84$  (杉松)~ $595.56 \pm 131.51 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (黑足鳞毛蕨), 不同植物群落之间差异不显著。



注: 不同小写字母代表差异显著( $p < 0.05$ )。

Figure 2. Carbon content of microbial biomass in rhizosphere soil in the Wuhan forest parks  
图 2. 武汉市森林公园植物根际土壤微生物量碳含量

### 4.2. 土壤养分含量与化学计量比特征

不同植物根际土壤理化性质间均存在显著差异(表 1)。八分山、青龙山、马鞍山、磨山和九峰山根际土壤有机碳(SOC)含量范围分别为  $18.88 \pm 0.55$  (构树)~ $36.14 \pm 3.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (野青茅)、 $10.47 \pm 2.23$  (香樟)~ $27.58 \pm 2.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (锥栗)、 $18.77 \pm 1.81$  (黑足鳞毛蕨)~ $46.02 \pm 4.69 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (香樟)、 $17.31 \pm 1.55$  (马尾松)~ $29.40 \pm 2.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (香樟)和  $11.74 \pm 2.16$  (山茶)~ $31.13 \pm 2.56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (野鸭椿); 速效磷(AP)分别为  $10.4 \pm$

1.88(野青茅)~46.59 ± 3.19 g·kg<sup>-1</sup> (构树)、73.73 ± 13.11 (杉松)~32.18 ± 5.28 g·kg<sup>-1</sup> (槲木)、31.82 ± 3.87 (柏木)~96.90 ± 4.24 g·kg<sup>-1</sup> (桂花)、25.40 ± 1.82 (黑足鳞毛蕨)~99.90 ± 1.84 g·kg<sup>-1</sup> (桂花)和 19.97 ± 0.31 (槲木)~106.54 ± 17.53 g·kg<sup>-1</sup> (杉松); 铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)分别为 6.27 ± 0.99 (马尾松)~14.53 ± 3.73 g·kg<sup>-1</sup> (野青茅)、5.17 ± 0.39 (槲木)~8.53 ± 1.44 g·kg<sup>-1</sup> (黑足鳞毛蕨)、7.20 ± 0.41 (马尾松)~15.33 ± 1.77 g·kg<sup>-1</sup> (香樟)、4.10 ± 1.02 (马尾松)~9.33 ± 1.26 g·kg<sup>-1</sup> (桂花)和 3.67 ± 0.14 (山茶)~9.73 ± 0.75 g·kg<sup>-1</sup> (马尾松); 硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)分别为 2.93 ± 1.63 (香樟)~8.73 ± 3.98 g·kg<sup>-1</sup> (构树)、1.60 ± 0.61(香樟)~11.65 ± 0.35 g·kg<sup>-1</sup> (锥栗)、1.07 ± 0.39 (桂花)~9.17 ± 3.31 g·kg<sup>-1</sup> (野青茅)、3.17 ± 0.96 (山茶)~16.80 ± 5.77 g·kg<sup>-1</sup> (锥栗)和 3.47 ± 1.26 (马尾松)~6.83 ± 1.46 g·kg<sup>-1</sup> (槲木); 无机氮(SIN)分别为 12.07 ± 1.12 (臀果木)~22.43 ± 7.05 g·kg<sup>-1</sup> (野青茅)、7.07 ± 0.72 (香樟)~18.85 ± 0.35 g·kg<sup>-1</sup> (锥栗)、10.77 ± 1.03 (桂花)~24.33 ± 1.70 g·kg<sup>-1</sup> (香樟)、9.73 ± 1.20 (山茶)~22.47 ± 5.44 g·kg<sup>-1</sup> (锥栗)和 8.27 ± 0.71 (锥栗)~14.10 ± 2.26 g·kg<sup>-1</sup> (槲木)。

土壤 pH 范围介于 4.19~5.74 之间, 五座森林公园植物根际土壤为酸性。

**Table 1.** Physical and chemical indexes of plant rhizosphere soil in Wuhan forest parks

**表 1.** 武汉市森林公园植物根际土壤理化指标

物种 Species	SOC/g·kg <sup>-1</sup>	AP/mg·kg <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·kg <sup>-1</sup>	SIN/mg·kg <sup>-1</sup>	pH	
八 分 山	黑足鳞毛蕨	25.10 ± 6.23ab	11.09 ± 3.22c	8.10 ± 1.13abc	8.27 ± 3.60a	16.37 ± 4.73a	4.29 ± 0.05c
	香樟	26.91 ± 3.71ab	22.34 ± 2.29b	9.97 ± 0.69abc	2.93 ± 1.63a	12.90 ± 1.23a	5.17 ± 0.23ab
	马尾松	22.46 ± 4.73ab	17.93 ± 1.94bc	6.27 ± 0.99c	6.23 ± 0.71a	12.50 ± 1.68a	4.89 ± 0.03bc
	锥栗	28.13 ± 2.76ab	16.41 ± 1.39bc	12.63 ± 2.70abc	6.13 ± 1.36a	18.77 ± 3.49a	4.42 ± 0.07bc
	野青茅	36.14 ± 3.69a	10.47 ± 1.88c	14.53 ± 3.73a	7.90 ± 3.72a	22.43 ± 7.05a	4.47 ± 0.04bc
	臀果木	28.22 ± 3.13ab	41.70 ± 3.19a	6.90 ± 0.66bc	5.17 ± 0.72a	12.07 ± 1.12a	4.27 ± 0.02c
	构树	18.88 ± 0.55b	46.59 ± 3.19a	13.30 ± 2.68ab	8.73 ± 3.98a	22.03 ± 4.92a	5.83 ± 0.58a
	槲木	19.27 ± 2.19b	26.42 ± 4.55b	6.27 ± 0.36c	6.20 ± 0.79a	12.47 ± 0.60a	4.30 ± 0.04c
青 龙 山	黑足鳞毛蕨	18.48 ± 2.83ab	47.97 ± 7.00abc	8.53 ± 1.44a	5.37 ± 2.03abc	13.90 ± 3.34abc	4.63 ± 0.07ab
	香樟	10.47 ± 2.23b	71.89 ± 5.34a	5.47 ± 1.09ab	1.60 ± 0.61c	7.07 ± 0.72c	5.50 ± 0.09ab
	马尾松	22.02 ± 3.30a	57.30 ± 6.96abc	5.80 ± 0.05ab	5.35 ± 0.40abc	11.15 ± 0.35abc	4.55 ± 0.00b
	锥栗	27.58 ± 2.74a	62.70 ± 4.17ab	7.20 ± 0.71ab	11.65 ± 0.35a	18.85 ± 0.35a	4.40 ± 0.01b
	野青茅	18.91 ± 2.05ab	55.90 ± 9.74abc	6.73 ± 0.64ab	7.63 ± 4.53abc	14.37 ± 4.51abc	5.74 ± 0.84a
	杉松	12.47 ± 2.47b	73.73 ± 13.11a	5.70 ± 1.09ab	2.50 ± 1.11c	8.20 ± 1.47bc	4.54 ± 0.16b
	山茶	19.01 ± 0.25ab	39.34 ± 1.04bc	6.40 ± 0.00ab	4.15 ± 1.39bc	10.55 ± 1.39bc	4.38 ± 0.02b
	槲木	19.01 ± 1.74ab	32.18 ± 5.28c	5.17 ± 0.39b	10.60 ± 0.97ab	15.77 ± 1.36ab	4.46 ± 0.05b
马 鞍 山	黑足鳞毛蕨	18.77 ± 1.81c	51.45 ± 7.93b	12.17 ± 2.21ab	8.63 ± 2.84a	20.80 ± 4.93ab	4.66 ± 0.03ab
	香樟	46.02 ± 4.69a	35.34 ± 1.54cd	15.33 ± 1.77a	9.00 ± 1.36a	24.33 ± 1.70a	4.49 ± 0.11b
	马尾松	24.21 ± 3.23bc	49.38 ± 3.17bc	7.20 ± 0.41c	5.83 ± 0.62ab	13.03 ± 0.36b	4.56 ± 0.08ab
	桂花	20.23 ± 2.68bc	96.90 ± 4.24a	9.70 ± 0.63bc	1.07 ± 0.39b	10.77 ± 1.03b	4.56 ± 0.12ab
	野青茅	23.54 ± 2.95bc	40.55 ± 1.14bcd	10.60 ± 0.71abc	9.17 ± 3.31a	19.77 ± 4.02ab	4.79 ± 0.08ab
	杉松	23.14 ± 1.47bc	50.72 ± 1.88b	13.23 ± 1.36ab	7.87 ± 1.32ab	21.10 ± 2.26ab	4.83 ± 0.13a
	野鸭椿	31.16 ± 0.76b	91.66 ± 5.73a	8.70 ± 1.09bc	6.93 ± 1.32ab	15.63 ± 0.33ab	4.49 ± 0.04b
	柏木	23.26 ± 4.10bc	31.82 ± 3.87d	12.53 ± 1.61ab	6.40 ± 1.56ab	18.63 ± 3.07ab	4.78 ± 0.03ab



Continued

	黑足鳞毛蕨	28.12 ± 1.10a	25.40 ± 1.82e	6.63 ± 0.64ab	15.00 ± 1.28ab	21.63 ± 1.89a	4.27 ± 0.03c
	香樟	29.40 ± 2.36a	32.07 ± 1.41cde	7.33 ± 0.67ab	10.23 ± 0.64abc	17.57 ± 1.14ab	4.76 ± 0.04b
	马尾松	17.31 ± 1.55a	26.25 ± 1.68de	4.10 ± 1.02b	5.83 ± 2.00c	9.93 ± 1.35b	4.59 ± 0.09bc
磨山	锥栗	24.37 ± 1.21a	33.67 ± 2.24cde	5.67 ± 0.51ab	16.80 ± 5.77a	22.47 ± 5.44a	4.52 ± 0.12bc
	桂花	24.95 ± 4.68a	99.90 ± 1.84a	9.33 ± 1.26a	4.97 ± 0.27c	14.30 ± 1.02ab	5.25 ± 0.18a
	棕榈	26.81 ± 6.00a	84.45 ± 0.72b	7.20 ± 1.06ab	6.67 ± 1.87bc	13.87 ± 2.13ab	4.60 ± 0.03bc
	山茶	21.01 ± 2.38a	37.68 ± 3.35c	6.57 ± 0.24ab	3.17 ± 0.96c	9.73 ± 1.20b	4.87 ± 0.18ab
	柏木	19.43 ± 4.37a	35.78 ± 5.84cd	7.37 ± 1.90ab	10.57 ± 2.74abc	17.93 ± 3.12ab	4.61 ± 0.06bc
	黑足鳞毛蕨	20.35 ± 4.30ab	26.10 ± 0.69b	7.73 ± 1.01ab	5.17 ± 1.47a	12.90 ± 2.34ab	4.90 ± 0.38a
	香樟	15.59 ± 3.52ab	22.88 ± 1.22b	5.57 ± 1.51bc	4.43 ± 0.79a	10.00 ± 1.25ab	4.45 ± 0.06ab
	马尾松	15.64 ± 2.42ab	29.80 ± 2.17b	9.73 ± 0.75a	3.47 ± 1.26a	13.20 ± 0.56ab	4.39 ± 0.12ab
九峰山	锥栗	15.20 ± 2.13ab	24.24 ± 2.39b	3.80 ± 0.56c	4.47 ± 1.26a	8.27 ± 0.71b	4.19 ± 0.06b
	野鸭椿	31.13 ± 2.56a	104.62 ± 9.19a	4.27 ± 0.38c	6.03 ± 1.32a	10.30 ± 1.64ab	4.40 ± 0.02ab
	杉松	25.24 ± 9.98ab	106.54 ± 17.53a	5.53 ± 0.28bc	6.10 ± 1.98a	11.63 ± 1.79ab	4.73 ± 0.15ab
	山茶	11.74 ± 2.16b	35.54 ± 4.97b	3.67 ± 0.14c	6.30 ± 0.57a	9.97 ± 0.72ab	4.35 ± 0.02ab
	榿木	21.89 ± 4.41ab	19.97 ± 0.31b	7.27 ± 1.17ab	6.83 ± 1.46a	14.10 ± 2.26a	4.42 ± 0.06ab

注：不同小写字母代表差异显著( $p < 0.05$ )。

不同植物根际的土壤养分的化学计量比均存在显著差异(表 2)。八分山、青龙山、马鞍山、磨山和九峰山根际土壤 C:P 范围分别为 412.30 ± 35.36 (构树)~4400.52 ± 2619.53 (黑足鳞毛蕨)、155.74 ± 46.38 (香樟)~686.67 ± 196.25 (榿木)、206.89 ± 21.89(桂花)~1320.75 ± 180.49 (香樟)、250.43 ± 48.25 (桂花)~1131.57 ± 113.97 (黑足鳞毛蕨)和 236.93 ± 103.39 (杉松)~1093.53 ± 217.99 (榿木); C:N 分别为 1105.61 ± 371.85 (构树)~2325.96 ± 70.94 (臀果木)、1219.60 ± 117.58 (榿木)~1982.62 ± 302.33 (马尾松)、1112.92 ± 50.02 (杉松)~1998.98 ± 88.47 (野鸭椿)、1143.16 ± 222.52 (柏木)~2300.88 ± 414.27 (山茶)和 1157.31 ± 173.45 (山茶)~3497.00 ± 996.02 (野鸭椿); N:P 分别为 0.30 ± 0.04 (臀果木)~2.95 ± 1.82 (黑足鳞毛蕨)、0.10 ± 0.02 (香樟)~0.57 ± 0.17 (榿木)、0.11 ± 0.01(桂花)~0.70 ± 0.07 (香樟)、0.14 ± 0.01(桂花)~0.88 ± 0.13 (黑足鳞毛蕨)和 0.10 ± 0.02 (野鸭椿)~0.71 ± 0.12(榿木)。

Table 2. Stoichiometric ratio of soil nutrients in rhizosphere of plants in the Wuhan forest parks

表 2. 武汉市森林公园植物根际土壤养分含量的化学计量比

	物种	八分山	物种	青龙山	物种	马鞍山	物种	磨山	物种	九峰
C: P	黑足鳞毛蕨	4400.52 ± 2619.53a	黑足鳞毛蕨	431.32 ± 107.53ab	黑足鳞毛蕨	377.72 ± 40.61cd	黑足鳞毛蕨	1131.57 ± 113.97a	黑足鳞毛蕨	794.23 ± 189.37ab
	香樟	1205.52 ± 110.97ab	香樟	155.74 ± 46.38b	香樟	1320.75 ± 180.49a	香樟	925.93 ± 93.84ab	香樟	682.32 ± 152.26abc
	马尾松	1343.33 ± 397.00ab	马尾松	394.10 ± 54.97ab	马尾松	507.83 ± 91.36bbcd	马尾松	667.88 ± 76.06bc	马尾松	550.10 ± 125.84bc
	锥栗	1707.56 ± 44.83ab	锥栗	448.66 ± 57.76ab	桂花	206.89 ± 21.89d	锥栗	730.10 ± 44.15b	锥栗	620.71 ± 32.27bc
	野青茅	4189.26 ± 1374.77a	野青茅	379.40 ± 82.42ab	野青茅	582.21 ± 73.37bc	桂花	250.43 ± 48.25d	野鸭椿	301.20 ± 22.85c
	臀果木	693.14 ± 104.90ab	杉松	203.15 ± 75.97b	杉松	460.85 ± 43.27bcd	棕榈	318.53 ± 73.32cd	杉松	236.93 ± 103.39c
	构树	412.30 ± 35.36b	山茶	483.67 ± 7.02ab	野鸭椿	343.53 ± 21.11cd	山茶	572.45 ± 90.57bcd	山茶	322.66 ± 20.54c
	榿木	775.01 ± 130.54ab	榿木	686.67 ± 196.25a	柏木	717.49 ± 38.57b	柏木	595.76 ± 179.09bcd	榿木	1093.53 ± 217.99c

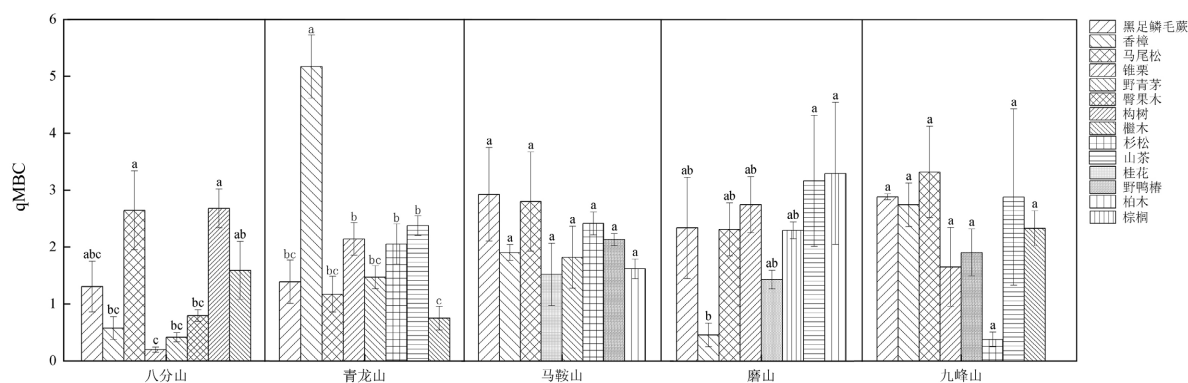
Continued

C: N	黑足鳞毛蕨	1614.33 ± 121.06a	黑足鳞毛蕨	1443.97 ± 203.14a	黑足鳞毛蕨	1118.38 ± 304.52b	黑足鳞毛蕨	1318.17 ± 70.00b	黑足鳞毛蕨	1578.26 ± 194.30ab
	香樟	2206.36 ± 501.86a	香樟	1456.57 ± 197.65a	香樟	1879.87 ± 60.54a	香樟	1674.00 ± 79.25ab	香樟	1558.01 ± 245.83b
	马尾松	1773.07 ± 208.22a	马尾松	1982.62 ± 302.33a	马尾松	1841.26 ± 204.50ab	马尾松	1885.22 ± 373.35ab	马尾松	1189.49 ± 185.58b
	锥栗	1603.88 ± 250.52a	锥栗	1470.52 ± 169.33a	桂花	1883.67 ± 222.85a	锥栗	1222.03 ± 190.84b	锥栗	1920.79 ± 409.88ab
	野青茅	2095.72 ± 593.57a	野青茅	1797.52 ± 540.48a	野青茅	1283.25 ± 209.05ab	桂花	1715.49 ± 222.64ab	野鸭椿	3497.00 ± 996.02a
	臀果木	2325.96 ± 70.94a	杉松	1603.71 ± 322.25a	杉松	1112.92 ± 50.02b	棕榈	1880.42 ± 147.91ab	杉松	2422.80 ± 1120.39ab
	构树	1105.61 ± 371.85a	山茶	1893.57 ± 234.21a	野鸭椿	1998.98 ± 88.47a	山茶	2300.88 ± 414.27a	山茶	1157.31 ± 173.45b
	槲木	1578.16 ± 245.30a	槲木	1219.60 ± 117.58a	柏木	1271.08 ± 177.38ab	柏木	1143.16 ± 222.52b	槲木	1522.57 ± 173.66b
	黑足鳞毛蕨	2.95 ± 1.82a	黑足鳞毛蕨	0.35 ± 0.13ab	黑足鳞毛蕨	0.43 ± 0.13abc	黑足鳞毛蕨	0.88 ± 0.13a	黑足鳞毛蕨	0.50 ± 0.11ab
	香樟	0.61 ± 0.11ab	香樟	0.10 ± 0.02b	香樟	0.70 ± 0.07a	香樟	0.56 ± 0.06abc	香樟	0.45 ± 0.07ab
N: P	马尾松	0.72 ± 0.13ab	马尾松	0.21 ± 0.03b	马尾松	0.27 ± 0.02bcd	马尾松	0.39 ± 0.07bcd	马尾松	0.45 ± 0.03ab
	锥栗	1.15 ± 0.20ab	锥栗	0.31 ± 0.02ab	桂花	0.11 ± 0.01d	锥栗	0.67 ± 0.16ab	锥栗	0.35 ± 0.05bc
	野青茅	2.19 ± 0.52ab	野青茅	0.24 ± 0.03b	野青茅	0.48 ± 0.09ab	桂花	0.14 ± 0.01d	野鸭椿	0.10 ± 0.02c
	臀果木	0.30 ± 0.04b	杉松	0.12 ± 0.02b	杉松	0.42 ± 0.06abc	棕榈	0.16 ± 0.03d	杉松	0.12 ± 0.03c
	构树	0.47 ± 0.10b	山茶	0.27 ± 0.03b	野鸭椿	0.17 ± 0.01cd	山茶	0.27 ± 0.05cd	山茶	0.29 ± 0.03bc
	槲木	0.51 ± 0.07ab	槲木	0.57 ± 0.17b	柏木	0.60 ± 0.08a	柏木	0.57 ± 0.15abc	槲木	0.71 ± 0.12a

注：不同小写字母代表差异显著(p &lt; 0.05)。

### 4.3. 土壤微生物生物量熵碳变化特征

不同植物根际土壤微生物生物量熵碳(qMBC)的变化范围介于 1%~4% (图 3)。其中青龙山香樟群落的 qMBC 值最高，八分山锥栗群落 qMBC 值最低。



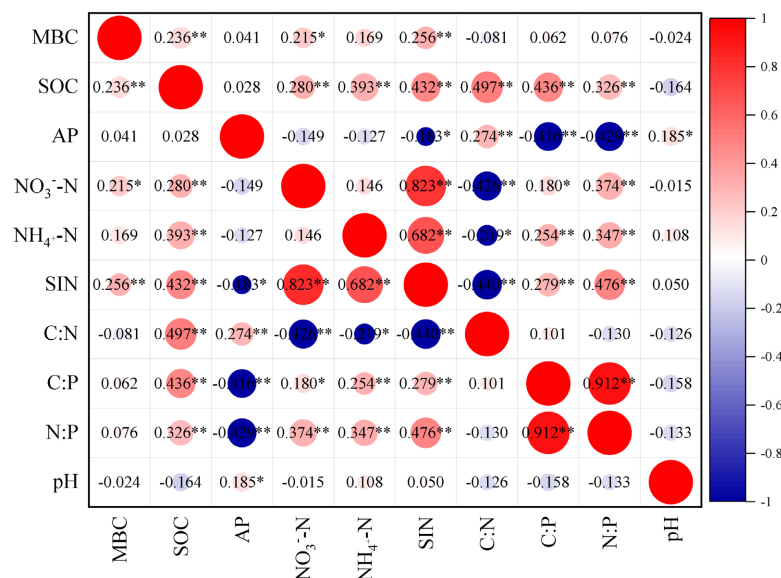
注：不同小写字母代表差异显著(p &lt; 0.05)。

Figure 3. Entropy carbon of plant rhizosphere soil microbial biomass in Wuhan forest park

图 3. 武汉市森林公园植物根际土壤微生物生物量熵碳

### 4.4. 土壤 MBC 与土壤环境的相关性

土壤 MBC 与土壤环境之间的相关关系见图 4。土壤 MBC 与 SOC、土壤无机氮(SIN)呈极显著正相关，与  $\text{NO}_3^--\text{N}$  呈显著正相关；SOC 与  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{H}$ 、SIN、C:N、C:P、N:P 呈极显著正相关。



\*.在 0.05 级别(双尾), 相关性显著。\*\*.在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

Figure 4. Correlation heatmap of soil factors in plant rhizosphere in the Wuhan forest park  
图 4. 武汉市森林公园植物根际土壤因子的相关性热图

#### 4.5. 土壤理化性质对土壤 MBC 的单一变量解释率

采用层次分割法(rdacca.hp)分析土壤 MBC 的各因子解释率(图 5), 只有 SOC 的 p 值小于 0.05, 所以土壤 MBC 的关键驱动因子是 SOC。土壤因子 AP、C:P、N:P 和 pH 贡献程度较低, 解释率为负值。

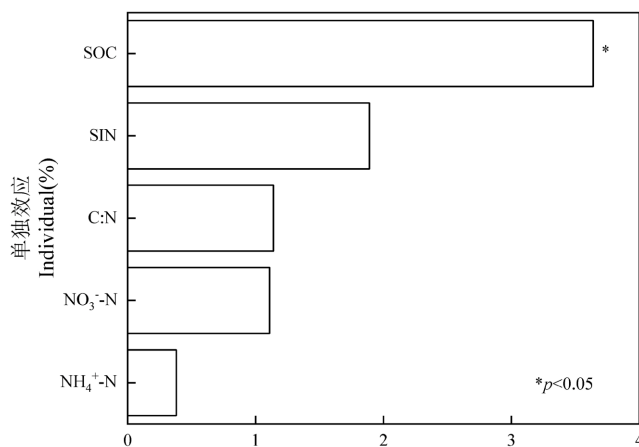


Figure 5. Individual explanatory rate of soil factors  
图 5. 土壤因子的单一解释率

### 5. 讨论

#### 5.1. 土壤 MBC 的分布特征

植物通过凋落物和根际分泌物向土壤微生物提供营养, 土壤微生物通过转化有机物供植物利用[16]。因此, 和贾国梅等[17]研究类似, 不同植物群落间根际土壤 MBC 间具有显著差异。本研究中森林公园土壤 MBC 均低于全球土壤 MBC 水平(347~971 mg·kg<sup>-1</sup>) [18]。我们进一步发现乔木类植物群落的根际土壤



MBC 最高, 例如八分山马尾松(乔木)和锥栗(大乔木)、青龙山锥栗(大乔木)、马鞍山香樟(大乔木)、磨山锥栗(大乔木)群落 MBC 含量最高(图 2)。

土壤 qMBC 是土壤微生物量碳对土壤营养库的贡献率[19], 表征有机碳积累或损失, 土壤 MBC 与 SOC 的比值越大说明土壤微生物固碳能力越强, 有机碳积累越多[20]。本研究发现: 森林公园 qMBC 值在 1%~4%, 与平均土壤 qMBC (1%~3%)相符[16], 大的变化范围表明研究区域具有较高的固碳潜力。不同森林公园中不同树种的 qMBC 值表明(图 3)草本、乔木和灌木类植物群落处于有机碳积累阶段, 固碳潜力较强。植被类型不同, 植被表层土壤的凋落物及植被根系分泌物存在差异, 土壤微生物的结构和多样性存在差异。

## 5.2. 土壤 MBC 与土壤因子之间的相关关系

已有研究表明微生物残体是 SOC 的重要来源, 微生物残体对 SOC 的平均贡献约为 35%, 并且微生物途径对 SOC 的积累与土层的深度呈正相关, 但在森林表层土壤(0~20 cm)中, SOC 积累的主导因素为植物途径[21]。周莎等[22]研究发现不同纬度森林土壤 MBC 与 SOC 呈极显著正相关, 李万年等[20]研究证实 SOC 是影响土壤 MBC 的主要因子, 这与本文研究结果一致。土壤无机氮( $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N)是植物吸收利用的主要氮素。赵高山等[23]研究发现土壤 MBC 与碱解氮呈极显著正相关, 与本文结果一致。张雅茜等[24]对亚热带丘陵区大山冲林场研究发现土壤 MBC 与 AP 呈极显著正相关, 这与本文研究结果不一致, 这可能是因为土壤 MBC 与 AP 之间关系受许多外在因素的影响, 比如土壤 pH、植物量等。土壤 pH 均与土壤 MBC 无显著相关关系, 这可能与土壤类型和土壤微生物活性差异等因素有关[25]。

土壤 C:P、C:N、N:P 化学计量比能够表征植物生长及土壤养分利用情况。本研究区域的 C:P 和 C:N 值均高于我国土壤 C:P(12)和 C:N(61) [26], 说明土壤有机质积累速率高于分解速率, 养分净固持能力加强。N:P 值低于中国土壤 N:P 平均值 9.3 [26], 说明研究区域土壤氮限制严重[27]。

## 6. 结论

(1) 八分山、青龙山、马鞍山、磨山和九峰山森林公园土壤 MBC 分别为 57.42~502.22  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、148.59~563.78  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、270.76~908.44  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、137.45~654.81  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、224.18~595.56  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2) 土壤 MBC 与 SOC、土壤无机氮(SIN)呈极显著正相关, 与  $\text{NO}_3^-$ -N 呈显著正相关。其中 SOC 是影响土壤 MBC 的主要驱动因子。

(3) 土壤 qMBC 值为 1%~4%, 研究区固碳潜力较高。

研究加入土壤 MBC 与碳汇之间的联系, 能更加全面的对亚热带城市森林土壤碳汇分布及潜力进行分析。后续研究需要进一步加强高固碳能力树种的固碳驱动因素及固碳潜力核算, 为区域森林生态系统碳增汇提升提供科学依据。

## 基金项目

武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2022550), 武汉工程大学高层次人才启动项目(21QD02)。

## 参考文献

- [1] 王薇菡, 虞依娜, 谢嘉淇, 等. 中国南亚热带不同造林模式碳汇林土壤碳、氮、磷的积累及化学计量特征[J]. 生态学报, 2023, 43(5): 1793-1803.
- [2] Van Bruggen, A.H.C. and Semenov, A.M. (2000) In Search of Biological Indicators for Soil Health and Disease Suppression. *Applied Soil Ecology*, **15**, 13-24. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00068-8)
- [3] 姜培坤, 徐秋芳, 俞益武. 土壤微生物量碳作为林地土壤肥力指标[J]. 浙江林学院学报, 2002, 19(1): 17-19.

- [4] 宿少锋, 王小燕, 林之盼, 等. 热带地区 6 种植被类型土壤微生物功能多样性特征[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(3): 505-514.
- [5] 陈新月, 姚晓东, 曾文静, 等. 北方农牧交错带草地土壤微生物量碳空间格局及驱动因素[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(2): 250-260.
- [6] 王琴, 李菊, 孙辉. 海拔梯度上西南亚高山-高山土壤微生物生物量碳季节动态[J]. 四川农业大学学报, 2013, 31(4): 386-392.
- [7] 黄伟伟, 杨勇, 陈丰农. 杭州校园中不同植被对 PM<sub>2.5</sub> 的吸附能力[J]. 环境科学研究, 2018, 31(7): 1233-1240.
- [8] 武汉市园林和林业局. 2021 年武汉市绿化状况公报[EB/OL]. [http://ylj.wuhan.gov.cn/zwgk/zwxgkzl\\_12298/tjxx/lhgb\\_12361/202203/t20220317\\_1941383.shtml](http://ylj.wuhan.gov.cn/zwgk/zwxgkzl_12298/tjxx/lhgb_12361/202203/t20220317_1941383.shtml), 2022-03-17.
- [9] 王晓荣, 胡文杰, 庞宏东, 等. 湖北省主要森林类型土壤理化性质及土壤质量[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 156-166.
- [10] 尹忠春, 施河丽, 向必坤, 等. 湖北宣恩烟区植烟土壤 pH 状况及与其他土壤指标的关系[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(S2): 129-135, 139.
- [11] Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G. and Jenkinson, D.S. (1985) Chloroform Fumigation and the Release of Soil Nitrogen: A Rapid Direct Extraction Method to Measure Microbial Biomass Nitrogen in Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **17**, 837-842. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(85\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-0717(85)90144-0)
- [12] Brookes, P.C., Powlson, D.S. and Jenkinson, D.S. (1982) Measurement of Microbial Biomass Phosphorus in Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **14**, 319-329. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(82\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0038-0717(82)90001-3)
- [13] Vance, E.D., Brookes, P.C. and Jenkinson, D.S. (1987) An Extraction Method for Measuring Soil Microbial Biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, **19**, 703-707. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6)
- [14] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [15] 陈闽昆, 王邵军, 陈武强, 等. 蚂蚁筑巢对西双版纳热带森林土壤微生物生物量碳及熵的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(9): 2973-2982.
- [16] 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 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, 2021(6): 97-104.
- [17] 贾国梅, 何立, 程虎, 等. 三峡库区不同植被土壤微生物量碳氮磷生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 23-27.
- [18] 胡宗达, 刘世荣, 史作民, 等. 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, 2012, 25(3): 261-268.
- [19] 易桂田, 王晓丽, 刘占锋, 等. 亚热带地区不同人工林配置下土壤微生物量碳及微生物熵的年际动态[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 224-231.
- [20] 李万年, 黄则月, 赵春梅, 等. 望天树人工幼林土壤微生物量碳氮及养分特征[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(12): 51-62.
- [21] Wang, B.R., An, S.S., Liang, C., *et al.* (2021) Microbial Necromass as the Source of Soil Organic Carbon in Global Ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, **162**, Article ID: 108422. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108422>
- [22] 周莎, 马寰菲, 王洁莹, 等. 我国森林土壤微生物生物量碳的纬度分布特征及影响因子[J]. 林业科学, 2022, 58(2): 49-57.
- [23] 赵高山, 司艳娥, 孔都斯·帕尔哈提, 等. 中天山北麓不同草地类型微生物量及理化性质垂直地带性特征[J]. 西南农业学报, 2023, 36(6): 1206-1215.
- [24] 张雅茜, 方晞, 冼应男, 等. 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, 2019, 39(14): 5326-5338.
- [25] 张海燕. 有关黑土微生物量与土壤肥力关系的研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2005.
- [26] Tian, H.Q., Cheng, G.S., Zhang, C., *et al.* (2010) Pattern and Variation of C:N:P Ratios in China's Soils: A Synthesis of Observational Data. *Biogeochemistry*, **98**, 139-151. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9382-0>
- [27] 黄郡, 范泽宁. 土壤碳氮磷生态化学计量特征及影响因素概述[J]. 现代农业研究, 2020, 49(1): 73-76.