

许 慧, BUI Van Thang, 范洪旺, 等. 城市和郊区麻栎林土壤有机碳组分及管理指数变化特征[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(2): 369-376.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.02.010

城市和郊区麻栎林土壤有机碳组分及管理指数变化特征

许 慧, BUI Van Thang, 范洪旺, 许克福, 陶 晓, 徐小牛
(安徽农业大学林学与园林学院, 安徽 合肥 230036)

摘要: 为了解城郊差异背景下森林土壤有机碳及其组分、碳库管理指数差异, 揭示城郊差异对森林土壤活性有机碳含量及其稳定性的影响机制, 于 2017 年 7 月至 2018 年 3 月对安徽省合肥市城市蜀山国家森林公园与郊区紫蓬山国家森林公园麻栎 (*Quercus acutissima*) 林土壤进行分季节采样, 系统比较城市和郊区森林土壤总有机碳 (SOC) 含量及活性有机碳组分 [易氧化碳 (EOC)、颗粒有机碳 (POC)] 含量、全氮 (TN) 含量季节动态特征及碳库管理指数变化特征。结果显示, 城区森林土壤 SOC、TN、EOC、POC 含量明显高于郊区森林土壤, 且 0~10 cm 土层含量显著大于 10~20 cm 土层 ($P<0.05$), 在 0~10 cm 土层, 城市森林土壤 SOC、TN 含量分别是郊区的 1.67、1.45 倍, 10~20 cm 土层城市森林土壤 SOC、TN 含量分别是郊区的 1.95、1.68 倍。EOC 占 SOC 的比例表现为郊区大于城市, POC 占 SOC 的比例表现为城市大于郊区; 蜀山森林土壤 EOC、POC 含量有显著的季节变化 ($P<0.05$), 表现为夏季高, 春秋低; 土层深度及季节的交互作用对 EOC、POC 含量无显著影响; 土壤 TN、SOC 和 EOC、POC 含量两两之间呈极显著 ($P<0.001$) 相关; 与城市森林相比, 郊区土壤碳氮比 (C/N) 较低; 城市森林土壤碳库活度 (A) 低于郊区, 土壤碳库指数 (CPI) 高于郊区。在本研究区域, 城市森林土壤储存了较多的碳, 碳库相对稳定, 具有较强的固碳潜力。

关键词: 城市化; 麻栎林; 土壤有机碳; 颗粒有机碳; 易氧化碳; 碳库管理指数

中图分类号: S714 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2022)02-0369-08

Variation characteristics of soil organic carbon composition and management index of *Quercus acutissima* forests in urban and suburban areas

XU Hui, BUI Van Thang, FAN Hong-wang, XU Ke-fu, TAO Xiao, XU Xiao-niu
(School of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: To understand the differences of soil organic carbon and related components, carbon pool management indices of forests under different backgrounds of urban and suburban, and to reveal the influence of urban-suburban differences on the content and stability of soil active organic carbon in the forests, soil samples of *Quercus acutissima* forests were collected seasonally from July 2017 to March 2018 in Shushan National Forest Park (urban) and Zipengshan National Forest Park (suburban) in Hefei City of Anhui province. The seasonal dynamic characteristics of soil organic carbon (SOC) content and active organic carbon components containing easily oxidized carbon (EOC) and particulate organic carbon (POC) were systematically compared, and variation characteristics of total nitrogen (TN) content and carbon pool management index (CMI) between the two sites were also compared. The results showed that, contents of SOC, TN, EOC and POC in soils of urban forest were obviously higher than in suburban forest, and the contents in 0–10 cm soil layer were significantly higher than in 10–20 cm soil layer ($P<0.05$). In

0–10 cm soil layer, SOC and TN contents in urban forest soil were 1.67 times and 1.45 times of those in suburban forest soil respectively, while in 10–20 cm soil layer, SOC and TN contents were 1.95 times and 1.68 times of those in suburban forest soil respectively. The ratio of EOC to

收稿日期: 2021-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31700631, 31070588)

作者简介: 许 慧 (1996–), 女, 安徽芜湖人, 博士研究生, 主要从事森林培育研究。 (E-mail) 1281178265@qq.com

通讯作者: 徐小牛, (E-mail) xnxu2007@ahau.edu.cn

SOC was higher in suburban forest soil than in urban forest soil, and the ratio of POC to SOC was higher in urban forest soil than in suburb forest soil. The contents of EOC and POC showed significant seasonal variation in the soil of Shushan National Forest Park ($P < 0.05$), which were higher in summer and lower in spring and autumn. The interaction of soil depth and season had no significant effect on EOC and POC contents. There existed extremely significant relationships between TN content, SOC content and EOC content, POC content ($P < 0.001$). The ratio of C to N (C/N) in suburban forest soil was lower compared with that in urban forest soil. The activity of soil carbon pool (A) was lower in urban forest than in suburban forest, while the index of soil carbon pool (CPI) was higher in urban forest than in suburban forest. In the areas studied in the research, the soil of the urban forest can store more carbon, and its carbon pool is relatively stable, which shows strong carbon sequestration potential.

Key words: urbanization; *Quercus acutissima* forest; soil organic carbon; particulate organic carbon; easily oxidized carbon; carbon pool management index

土壤碳(C)、氮(N)含量是维持土壤生产力的重要指标^[1]。土壤有机碳是土壤碳库中最主要的部分,依据其稳定性差异,可分为活性、惰性有机碳,引起碳库变化的主要原因是土壤有机质含量的变化,其中活性碳组分对环境变化最为敏感^[2]。土壤易氧化碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)是主要的活性有机碳。EOC 是土壤有机碳中极易被氧化的碳,是土壤养分的潜在来源^[3]; POC 指土壤中与沙粒(粒径大于 53 μm)结合的一部分腐殖化程度相对较低的活性有机碳,是动植物残体向土壤腐殖质转化的中间产物^[4]。了解土壤有机碳组分特征对评估森林土壤碳汇潜力具有重要意义。Lefroy 等^[5]提出的土壤碳库管理指数能反映各种土地利用或管理措施引起的土壤质量下降或更新的程度。土壤碳氮比(C/N)可以表征土壤碳、氮矿化作用,可作为评估土壤质量的指标^[6]。土壤总有机碳(SOC)的周转和积累决定了土壤碳储量,可为深入研究城郊空间变异对森林土壤碳循环过程和固碳潜力的影响提供重要信息^[7]。

随着城市化的发展,城市及其周边的生物环境受到重大的影响^[8]。与郊区相比,城市绿地和森林土壤碳储量更容易受到土壤温度、水分及养分、人为活动、环境污染等因素影响^[9-10]。城市森林是一种特殊生态界面,能减弱城市化带来的负面影响^[11]。McDonnell 等^[12]利用环境梯度研究森林生态系统对城市化的响应,并提出城乡土地利用梯度的新概念,用来描述环境变化(主要是土地利用方式变化)对森林生态系统的影响。城乡梯度下,时间与空间尺度上都会有潜在的环境因素,直接或间接影响到森林生态系统。张雪莹等^[13]对比珠江三角洲城市和郊区森林土壤有机碳含量差异,结果显示城市化降低了森林土壤有机碳含量。丁明军等^[14]研究结果

显示,城市土壤有机碳含量较高。Koerner 等^[15]在美国亚利桑那州凤凰城的城乡梯度研究中也发现了类似的结果。谢天等^[16]对国内外研究结果进行了综合分析,得出城市化显著提高了土壤碳储量的结论。因此在城市化背景下,关于土壤有机碳稳定性变化及固碳潜力仍待进一步研究。

本研究在不同季节对安徽省合肥市城市蜀山国家森林公园和郊区紫蓬山国家森林公园内麻栎(*Quercus acutissima*)人工林进行调查,测定并分析土壤总有机碳、易氧化碳、颗粒有机碳、全氮含量变化特征,对比城市和郊区森林土壤碳库管理指数变化,旨在揭示城郊差异对森林土壤活性有机碳含量及其稳定性的影响机制,为城郊森林土壤可持续经营及土壤碳循环提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 样地选择

经过实地调查,选定安徽省合肥市($117^{\circ}11' \sim 117^{\circ}22'E, 31^{\circ}48' \sim 31^{\circ}58'N$)蜀山国家森林公园和肥西县紫蓬山国家森林公园,选取林龄相近、地形、林分结构相似的麻栎纯林设置研究样地,样地基本情况见表 1。土壤类型均为黄棕壤,0~20 cm 土层土壤基本理化指标见表 2。研究地属于亚热带湿润季风气候,蜀山国家森林公园距合肥市中心 10 km,年平均气温 15.7 $^{\circ}\text{C}$,年降水量 1 000 mm,土壤年平均温度 18.1 $^{\circ}\text{C}$,植被主要为常绿阔叶落叶混交林,优势树种为麻栎、马尾松(*Pinus massoniana*)和枫香(*Liquidambar formosana*)。公园附近有较多的工业园、居住小区,人流量大,目前的活动以游憩观赏、休闲健身、缅怀先烈为主,是一个娱乐功能较强的森林公园。紫蓬山国家森林公园距离合肥 35 km,年平

均气温为 15.7 ℃, 年均降水量 1 000 mm, 土壤年平均温度 17.8 ℃, 植被主要为针阔混交林和阔叶纯林, 优势树种为麻栎、小叶栎 (*Quercus chenii*)、马尾松, 城市化进程低, 人口密度低, 人流量较低, 是合肥市具有代表性的森林生态区和旅游之地。

1.2 样地设置与样品采集

试验于 2017 年 7 月–2018 年 3 月进行, 分别在大蜀山和紫蓬山森林公园设置 3 个 20 m×20 m 的重复样地, 每个样地内设置 4 个小样方 (1 m×1 m), 采取多点混合取样法分 0~10 cm 和 10~20 cm 2 个土层采样, 筛除石砾、植物残体及其他杂物, 共采集 144 份土样, 测定土壤理化指标及有机碳、全氮、易氧化碳、颗粒有机碳含量。每隔 3 个月采样 1 次, 因连续低温降雪 2018 年 1 月份未取样。

表 1 麻栎林样地基本情况

Table 1 Basic information of sampling plots in *Quercus acutissima* forests

样地	海拔 (m)	坡度 (°)	平均树高 (m)	平均胸径 (m)	郁闭度
城市	120	12.26	19.7±6.76	22.54±11.97	0.65
郊区	158	17.51	14.9±1.28	33.86±8.08	0.69

1.3 样品测定

土壤含水量 (SWC) 采用烘干法测定, 电导率 (EC) 采用 Extech II 型电导仪测定, pH 值 (H₂O) 采用 pH 计测定。土壤全氮 (TN) 和土壤总有机碳 (SOC) 含量采用元素分析仪 (EA 3000, Vector, Italy) 测定。易氧化碳 (EOC) 含量采用 KMnO₄ 氧化法测定^[17]; 将风干土样过 100 目筛, 取 2 g 装入离心管内, 加入 25 ml KMnO₄ (333 mmol/L) 溶液, 振荡 1 h (250 r/min), 空白样同时进行相应操作, 离心 5 min (2 500 r/min), 取离心后的上清液进行稀释, 在分光光度计上比色 (565 nm)。颗粒有机碳 (POC) 含

量的测定^[18]: 将土壤样品过 2 mm 钢筛后取 10 g 于白色塑料瓶内, 加入 30 ml 六偏磷酸钠溶液 (5 g/L), 振荡 15 h, 放在 0.053 mm 钢筛内用超纯水反复冲洗直至滤液澄清, 收集筛中土样至玻璃皿中, 放在烘箱中烘干后用元素分析仪进行测定。

1.4 数据处理与分析

土壤碳库管理指数相关计算公式^[19] (参考土壤为紫蓬山森林土壤): 碳库活度 (A) = 土壤活性有机碳含量/土壤非活性有机碳含量; 碳库活度指数 (AI) = 样品碳库活度 (A)/参考土壤碳库活度; 碳库指数 (CPI) = 样品总有机碳含量/参考土壤总有机碳含量; 碳库管理指数 (CPMI) = 碳库指数 (CPI) × 碳库活度指数 (AI) × 活度 (A)。活性有机碳含量以 EOC 含量计算, 以 SOC 和 EOC 含量之差计算非活性有机碳含量。

用 Excel 2016 对数据进行统计, 采用 R 统计软件对数据进行检验, 进行双因素方差分析 (Two way-ANOVA) 和 Tukey 多重比较, 使用 Pearson 相关分析来检验土壤活性有机碳组分和土壤各指标之间的关系。

2 结果与分析

2.1 城市和郊区森林土壤 SOC、TN 含量及 C/N 变化特征

城市森林土壤 SOC 含量变化范围为 12.69~40.67 g/kg, 郊区森林土壤 SOC 变化范围为 5.69~32.26 g/kg, 城市森林土壤 SOC 含量、TN 含量、C/N 均显著高于郊区。在 0~10 cm 土层中城市森林土壤 SOC、TN 含量及 C/N 分别是郊区的 1.67、1.45、1.15 倍, 在 10~20 cm 土层中城市土壤 SOC、TN 含量及 C/N 分别是郊区的 1.95、1.68、1.17 倍 (表 2)。且城市和郊区森林土壤 SOC 含量、TN 含量、C/N 在土层间有显著差异, 随土层深度增加呈降低的趋势。

表 2 试验林土壤的基本理化指标

Table 2 Basic physical and chemical properties of soils in experimental forests

土层 (cm)	样地	土壤有机碳 (SOC) 含量 (g/kg)	全氮 (TN) 含量 (g/kg)	碳氮比 (C/N)	全磷 (TP) 含量 (g/kg)	酸碱度 pH (H ₂ O)	电导率 (EC) (S/m)	土壤含水率 (%)
0~10	城市	25.31±0.4Aa	1.76±0.03Aa	14.44±0.18Aa	0.42±0.04A	4.74±0.07	1.11±0.06A	26.74±1.54A
	郊区	15.13±0.51Ba	1.21±0.05Ba	12.52±0.14Ba	0.19±0.01B	4.66±0.09	0.75±0.04Ba	20.31±1.73B
10~20	城市	22.05±0.64Ab	1.61±0.04Ab	13.72±0.22Ab	0.38±0.04A	4.87±0.08	1.10±0.05A	29.07±1.86A
	郊区	11.28±1.61Bb	0.96±0.04Bb	11.72±0.28Bb	0.18±0.01B	4.78±0.11	0.64±0.02Bb	21.10±1.23B

不同大写字母表示同一土层不同区域间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一区域不同土层间差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 城市和郊区森林土壤活性有机碳含量及季节动态变化

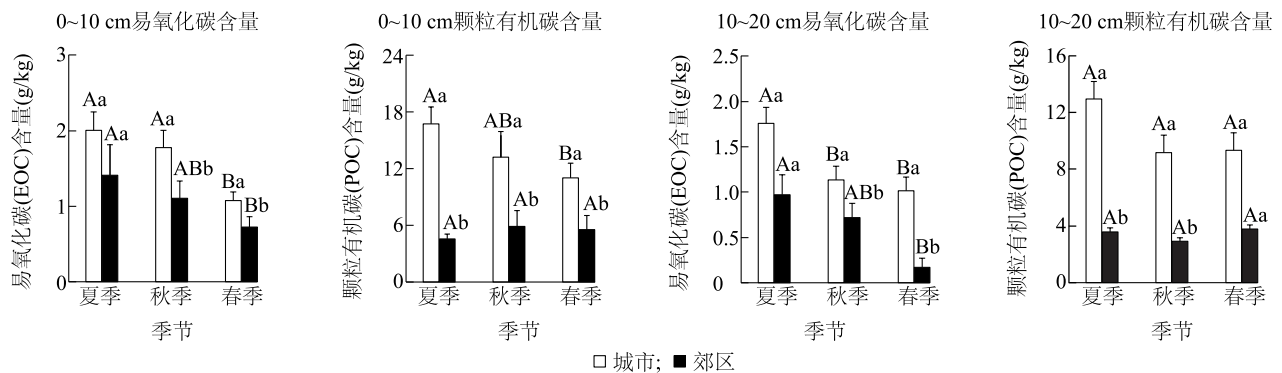
城市森林土壤 EOC 含量显著高于郊区,城市森林土壤 EOC 含量变化范围为 0.78~2.43 g/kg,郊区森林土壤 EOC 含量变化范围为 0.29~2.20 g/kg,月平均含量均表现为夏季高,春秋低。城市和郊区森林土壤 EOC 含量在不同土层间有显著差异(表 3),随土层深度增加呈降低的趋势,且秋季和春季森林土壤 EOC 含量均表现为城市显著高于郊区(图 1)。城市和郊区森林土壤 EOC 含量在季节上均有显著差异(表 3)。具体表现为在 0~10 cm 土层,城市森林夏季和秋季土壤 EOC 含量显著高于春季,郊区森林夏季土壤 EOC 含量显著高于春季;在 10~20 cm 土层,城市森林夏季土壤 EOC 含量显著高于春季和秋季,郊区森林夏季土壤 EOC 含量显著高于春季(图 1)。城市森林土壤 2 个土层 EOC 占 SOC 含量

的比例分别为 6.42%、5.89%,低于郊区森林土壤 EOC 占 SOC 的比例(7.15%、6.25%)(表 4)。

表 3 季节和土层对城市和郊区森林土壤易氧化碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)含量影响的方差分析

Table 3 Variance analysis on the effects of season and soil layer on easily oxidized carbon (EOC) and particulate organic carbon (POC) contents in urban and suburban forest soils

样地	因素	自由度	POC 含量		EOC 含量	
			F 值	P 值	F 值	P 值
城市	土层	1	7.283	0.011	11.176	0.002
	季节	2	5.823	0.007	25.735	0
	土层×季节	2	0.402	0.672	3.196	0.055
郊区	土层	1	6.954	0.013	10.023	0
	季节	2	0.226	0.799	8.877	0
	土层×季节	2	0.671	0.518	0.132	0.877



不同大写字母表示同一区域不同季节间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示同一季节不同区域间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 城市和郊区森林土壤 0~20 cm 土层有机碳组分的季节动态变化

Fig.1 Seasonal changes of organic carbon components in 0-20 cm soil layer of urban and suburban forests

表 4 城市和郊区不同土层森林土壤易氧化碳(EOC)占土壤总有机碳(SOC)、颗粒有机碳(POC)占 SOC 的比例

Table 4 Ratios of easily oxidized carbon (EOC) to soil organic carbon (SOC) and particulate organic carbon to SOC of different soil layers in urban and suburban forests

样地	土层 (cm)	EOC 占 SOC 的比例 (%)	POC 占 SOC 的比例 (%)
城市	0~10	6.42	53.97
	10~20	5.89	46.50
郊区	0~10	7.15	34.97
	10~20	6.25	28.98

城市森林土壤 POC 含量显著高于郊区森林土

壤,城市森林土壤 POC 含量变化范围为 4.38~20.45 g/kg,郊区森林土壤 POC 含量变化范围为 1.26~9.16 g/kg,月平均含量均表现为夏季高,春秋低。城市和郊区森林土壤 POC 含量在土层上有显著差异(表 3),随土层深度增加呈降低的趋势。3 个季节土壤 POC 含量均表现为城市森林土壤显著高于郊区森林土壤;城市森林土壤 POC 含量在季节上有显著差异,具体表现为 0~10 cm 土层夏季显著高于春季(图 1),郊区森林土壤的 POC 含量在不同季节间差异不显著(表 3)。城市森林土壤 2 个土层 POC 占 SOC 的比例分别为 53.97%、46.50%,高于郊区森林土 POC 占 SOC 的比例(34.97%、28.98%)(表 4)。

2.3 城乡梯度下森林土壤 SOC 含量及其活性组分和 TN、C/N 的耦合关系

相关性分析结果(表 5)表明,土壤 SOC、EOC、POC 含量两两之间呈极显著正相关关系 ($P<$

0.001),TN 含量与 SOC、EOC、POC 含量之间呈极显著正相关关系 ($P<0.001$),C/N 和 SOC、EOC、POC 含量之间呈极显著正相关关系 ($P<0.001$),pH 值与 SOC、EOC、POC 含量呈正相关关系。

表 5 城市和郊区森林土壤有机碳含量与土壤性质的 Pearson 相关分析

Table 5 Pearson correlation analysis of soil organic carbon content and soil properties in urban and suburban forests

项目	全氮 (TN)	土壤有机碳 (SOC)	全磷 (TP)	易氧化碳 (EOC)	颗粒有机碳 (POC)	土壤含水率 (SWC)	酸碱度 (pH)	电导率 (EC)	碳氮比 (C/N)
TN	1.000	0.969 ***	0.693 ***	0.661 ***	0.801 ***	0.277 *	0.181	0.696 ***	0.669 ***
SOC		1.000	0.638 **	0.655 ***	0.855 ***	0.256 *	0.091	0.719 ***	0.825 ***
TP			1.000	0.357 **	0.379 **	0.254 *	0.532 ***	0.665 **	0.358 **
EOC				1.000	0.592 ***	-0.148	0.164	0.388 ***	0.496 ***
POC					1.000	0.256 *	0.031	0.746 ***	0.746 ***
SWC						1.000	-0.006	0.159	0.159
pH							1.000	0.279 *	-0.087
EC								1.000	0.581 ***
C/N									1.000

* 表示在 0.05 水平上显著相关,** 表示在 0.01 水平上显著相关,*** 表示在 0.001 水平上显著相关。

2.4 城市和郊区森林土壤碳库活度和碳库管理指数的变化

如表 6 所示,城市森林土壤碳库活度(A)和碳库活度指数(AI)均低于郊区,而碳库指数(CPI)和土壤碳库管理指数(CPMI)显著高于郊区。具体表

现为,在0~10 cm 土层城市森林土壤 CPI、CPMI 比郊区分别提高了 67.00%、47.01%,在10~20 cm 土层城市森林土壤 AI、CPMI 比郊区分别提高了 95.00%、82.06%。

表 6 城市和郊区森林土壤碳库管理指数

Table 6 Management indices of soil carbon pool in urban and suburban forests

土层(cm)	样地	碳库活度(A)	碳库活度指数(AI)	碳库指数(CPI)	碳库管理指数(CPMI)
0~10	城市	0.07a	0.88a	1.67a	147.01a
	郊区	0.08a	1.00a	1.00b	100.00b
10~20	城市	0.06a	0.93a	1.95a	182.06a
	郊区	0.07a	1.00a	1.00b	100.00b

同一土层不同区域间标有不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 城市和郊区森林土壤 SOC 及 TN、C/N 变化特征

本研究中城市和郊区森林土壤 SOC 含量呈现明显空间差异,表现为城市大于郊区。相比于郊区森林,城市森林通常会受到外源碳的输入和一系列的人为干扰等因素的影响,土壤温度和水分是影响微生物活性的重要因子。在本研究样地,城市森林土壤温度和含水率高于郊区,高温高湿的土壤环境

能提高微生物活性,加快动植物残体的分解,植物根系分泌物增多,促进凋落物分解,从而提高土壤中活性有机碳含量^[20-21]。本研究中城市森林土壤 TN 含量显著高于郊区,TN 对土壤碳的输出、输入以及森林生态系统的碳循环与积累过程具有重要作用^[22-23],氮的输入可提高土壤碳固持能力,减少土壤异养呼吸,增加土壤碳汇^[24]。城市森林土壤氮丰富,而外源氮的输入可增加土壤氮素的有效性,提高凋落物、细根产量,进而增加了碳的来源,而在氮源充足的条件下,微生物会优先利用易分解、新增的底

物,产生负激发效应,从而抑制有机质的分解^[25]。土壤 C/N 可作为土壤碳氮矿化能力的标志,其比值低有利于微生物分解,与有机质的分解成反比^[26]。郊区森林土壤 C/N 显著低于城市,较低的 C/N 比暗示土壤有机质消耗快,有机碳含量低,氮的矿化速率快,土壤碳氮“汇”能力减弱。

3.2 城市和郊区森林土壤 EOC、POC 动态变化特征

土壤 EOC、POC 含量是土壤有机质含量动态变化的敏感性指标^[27]。EOC 是土壤中极易被氧化的碳,EOC/SOC 值可反映土壤稳定性,其值越大,表明土壤碳活性越大,稳定性越差;POC 是土壤有机碳中非保护部分,POC/SOC 值可反映土壤团聚体的稳定性,其值越高,表明土壤团聚体越稳定^[28]。本研究中城市森林土壤 EOC 含量高于郊区,但郊区森林土壤 EOC 占 SOC 的比例高于城市,说明城市森林土壤较郊区森林土壤储存了更多的碳且稳定性高。城市森林 0~10 cm、10~20 cm 土层 EOC 占 SOC 的比例分别为 6.42%、5.89%,低于郝江勃等^[29]对亚热带常绿阔叶林土壤的研究结果,而郊区森林土壤的相关数据比较接近,可能是人为干扰导致城市森林土壤理化性质发生改变,降低了土壤其他形态的碳向 EOC 转化的速率。城市森林土壤 POC 含量和 POC 占 SOC 的比例均高于郊区,表明城市森林土壤团聚体稳定性高。

土壤有机碳主要来源于凋落物和细根^[30-32],各种污染物的沉降、热岛效应、植被类型、土壤理化指标、植物凋落物、土壤微生物活动等都直接或间接影响着森林土壤有机碳含量的季节变化差异^[33-34]。城市和郊区森林土壤 EOC、POC 月平均含量表现为夏季高,春秋低,可能原因是夏季植物生长旺盛,根系周转速率较快,高质量的有机物输入及温暖湿润的水热条件促进了微生物代谢,加快了凋落物的分解速率和根系分泌物的积累,增加了不稳定碳库^[35-36],秋冬季节,降雨减少,温度降低,植物生长停滞,根系分泌物也随之减少^[37],同时,树木叶内养分回流保存,凋落物质量降低,特别是氮磷养分含量下降^[38],微生物活性降低,枯枝落叶分解速度变得缓慢,不利于活性有机碳的积累^[39]。

表层土壤 POC、EOC 含量均比下层土壤高,可能原因是植物凋落物、土壤微生物、动物残体通常在表层土聚集、分解,由于土壤生物的扰动及降雨淋溶等影响而向土壤下层移动,土壤容重也会随着土层

增加而增大,土壤透气性变差,POC、EOC 向下层土壤转移减少,从而导致表层土壤碳含量升高^[40]。土壤 SOC 含量和 POC、EOC 含量两两呈正相关,说明 SOC 含量影响着活性组分含量,与大部分研究结果一致^[41]。TN 含量与 EOC、POC 含量呈极显著正相关,这可能与土壤氮的转化以及微生物利用有关,说明 TN 是影响土壤活性有机碳的重要因子。

3.3 城市和郊区土壤碳库管理指数特征

土壤碳库活度(A)反映碳库活跃程度,其值越大则表明土壤有机碳越易被分解^[42]。城市森林土壤碳库活度小于郊区土壤,说明城市森林土壤中的有机碳不易分解,有利于土壤有机碳的积累,原因可能是在城市化进程中,人类活动、土地利用方式的改变、城市污染等因素导致土壤活性有机碳更新速率下降。城市土壤碳库指数(CPI)显著大于郊区,表明城市森林土壤碳储量较高,陶晓等^[43]通过分析研究亦得出同样的结论。本研究中城市森林土壤碳库管理指数(CPMI)显著大于郊区,原因可能是碳的输入提高了土壤有机碳含量,整体上提高了土壤碳库管理指数,说明研究区城市森林土壤具有较强的土壤碳固持能力。

4 结论

通过比较城市和郊区森林土壤活性碳库季节动态变化及管理指数的差异,发现土壤活性有机碳组分季节变化大体一致,为夏季高,春秋低。城市森林土壤有机碳及活性组分、全氮含量显著高于郊区森林土壤($P<0.05$),EOC 占 SOC 的比例表现为郊区大于城市,POC 占 SOC 的比例表现为城市大于郊区,说明城市森林土壤具有更多的碳,有机碳周转速率慢,稳定性强,有利于土壤碳积累。城市森林土壤 C/N 小于郊区,说明城市森林土壤矿化作用较弱,暗示城市森林土壤固碳能力强。土壤有机碳组分含量和土壤有机碳含量呈极显著正相关关系($P<0.001$),说明活性组分含量依赖于土壤有机碳含量。TN 含量与 EOC、POC 含量呈极显著正相关关系($P<0.001$),说明 TN 含量是影响土壤活性有机碳含量的重要因子。城市森林土壤碳库活度指数(AI)小于郊区森林土壤,碳库管理指数(CPMI)表现为城市森林土壤大于郊区森林土壤,说明城市化降低了土壤有机碳的分解速率,外源碳的输入提高了总有机碳含量,城市森林具有较强的固碳潜力。

参考文献:

- [1] 周国逸,熊 鑫. 土壤有机碳形成机制的探索历程[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(5): 481-490.
- [2] KALISZ B, LACHACE A, GLAZEWSKI R, et al. Labile organic carbon fractions after amendment of sandy soil with municipal sewage sludge and compost[J]. Journal of Elementology, 2017, 22(3): 785-797.
- [3] 何 伟,王 会,韩 飞,等. 长期施用有机肥显著提升潮土有机碳组分[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 425-434.
- [4] 杨丽韞,罗天祥,吴松涛. 长白山原始阔叶红松林不同演替阶段地下生物量与碳、氮贮量的比较[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1195-1199.
- [5] LEFROY R D B, BLAIR G J, STRONG W M. Changes in soil organic matter with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance[J]. Plant and Soil, 1993, 155/156(1): 399-402.
- [6] 金宝石,闫鸿远,王维奇,等. 互花米草入侵下湿地土壤碳氮磷变化及化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1541-1549.
- [7] GUO Q, ZHU G, CHEN T, et al. Spatial variation and environmental assessment of soil organic carbon isotopes for tracing sources in a typical contaminated site[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, 175: 11-17.
- [8] CARROLL R, REYNOLDS J K, WRIGHT I A. Geochemical signature of urbanisation in Blue Mountains upland swamps[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 699: 134393.1-134393.12.
- [9] 李 虹,冯仲科,唐秀美,等. 区位因素对绿地降低热岛效应的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 316-322.
- [10] ZHAO Y G, ZHANG G L, ZEP H, et al. Establishing a spatial grouping base for surface soil properties along urban-rural gradient—A case study in Nanjing, China[J]. Catena, 2007, 69(1): 74-81.
- [11] 方 文. 基于不同空间尺度的重庆都市圈城市森林生态网络与群落特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [12] MCDONNELL M J, PICKETT S T A. The study of ecosystem structure and function along urban-rural gradients: an unexploited opportunity for ecology[J]. Ecology, 1990, 71(4): 1232-1237.
- [13] 张雪莹,陈小梅,危 晖,等. 城市化对珠江三角洲存留常绿阔叶林土壤有机碳组分及其碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 184-190.
- [14] 丁明军,王 敏,张 华. 南昌快速城市化过程对环境多介质有机碳含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2307-2314.
- [15] KOERNER B A, KLOPATEK J M. Carbon fluxes and nitrogen availability along an urban-rural gradient in a desert landscape[J]. Urban Ecosystems, 2010, 13(1): 1-21.
- [16] 谢 天,侯 鹰,陈卫平. 城市化对土壤生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 33-43.
- [17] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [18] FRANZLUEBBERS A J, ARSHAD M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(5): 1382-1386.
- [19] BLAIR G J, LEFROY R D B, LISLE L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems [J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [20] 张云云. 模拟气候变暖对高寒泥炭湿地碳稳定性的影响及机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [21] GOMEZ E J, DELGADO J A, GONZALEZ J M. Environmental factors affect the response of microbial extracellular enzyme activity in soils when determined as a function of water availability and temperature[J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(18): 1-11.
- [22] MUDGE P L, SCHIPPER L A, BAISDEN W T, et al. Changes in soil C, N and $\delta^{15}\text{N}$ along three forest-pasture chronosequences in New Zealand[J]. Soil Research, 2014, 52(1): 27-37.
- [23] 程淑兰,方华军,徐 梦,等. 氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8285-8295.
- [24] JANSSENS I A, DIELEMAN W, LUYSSAERT S. Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition[J]. Nature Geoscience, 2010, 3(5): 315-322.
- [25] BLAGODATSKAYA E V, BLAGODATSKAY S A, ANDERSON T H, et al. Priming effects of Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 37(1/2): 95-105.
- [26] 谢国雄,楼旭平,阮弋飞,等. 浙江省农田土壤碳氮比特征及影响因素分析[J]. 江西农业学报, 2020, 32(2): 51-55.
- [27] 张 哲,王邵军,李霁航,等. 土壤易氧化有机碳对西双版纳热带森林群落演替的响应[J]. 生态学报, 2019, 39(17): 6257-6263.
- [28] 牟 凌,张 丽,陈子豪,等. 四川盆地西缘4种人工林土壤有机碳组分特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3): 121-126, 133.
- [29] 郝江勃,乔 枫,蔡子良. 亚热带常绿阔叶林土壤活性有机碳组分季节动态特征[J]. 生态环境学报, 2019, 28(2): 245-251.
- [30] 魏 强. 亚热带典型森林凋落物输入对土壤有机碳累积和稳定性影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [31] 马 南,陈智文,张 清. 不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(3): 53-57.
- [32] 陈仕林,蒙炎成,胡钧铭,等. 秸秆覆盖对粉垄蔗田土壤有机碳及 CO_2 排放的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(2): 307-316.
- [33] POUYAT R, GROFFMAN P, YESILONIS I. Soil carbon pools and fluxes in urban ecosystems [J]. Environmental Pollution,

- 2002, 116: S107-S118.
- [34] WALKER X J, MACK M C, JOHNSTONE J F. Stable carbon isotope analysis reveals widespread drought stress in boreal black spruce forests[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(8): 3102-3113.
- [35] 池鑫晨, 宋超, 朱向涛, 等. 毛竹入侵常绿阔叶林对土壤活性有机碳氮的动态影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2263-2272.
- [36] 郑裕雄, 曹际玲, 杨智杰, 等. 米槠天然林和桔园土壤微生物群落结构的季节性变化[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(10): 1991-1998.
- [37] 辜翔, 张仕吉, 项文化, 等. 中亚热带 4 种森林类型土壤活性有机碳的季节动态特征[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(10): 1064-1076.
- [38] XU X N, ENOKI T, HIRATA E, et al. Pattern and chemical composition of fine litterfall in a subtropical forest in northern Okinawa Island, Japan [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2003, 4(3): 229-237.
- [39] JING G, Bo W, GUIBIN W, et al. Vertical and seasonal variations of soil carbon pools in ginkgo agroforestry systems in eastern China [J]. *Catena*, 2018, 171: 450-459.
- [40] TEWKSBURY C E, MIEGROET H V. Soil organic carbon dynamics along a climatic gradient in a southern Appalachian spruce-fir forest[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2007, 37(7): 1161-1172.
- [41] 滕臻, 曹小青, 孙孟瑶, 等. 不同生态恢复模式对巢湖湖滨湿地土壤活性碳库及其管理指数的影响[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(4): 752-760.
- [42] 闫丽娟, 李广, 吴江琪, 等. 黄土高原 4 种典型植被对土壤活性有机碳及土壤碳库的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5546-5554.
- [43] 陶晓, 俞元春, 张云彬, 等. 城市森林土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(1): 88-96.

(责任编辑:张震林)