DOI: 10.20103/j.stxb.202311102438

樊子豪,崔鸿侠,沈琛琛,陈吉臻,肖文发,刘常富,黄志霖.神农架林区天然次生林土壤有机碳分布及影响因素.生态学报,2024,44(16):7130-7139.

Fan Z H, Cui H X, Shen C C, Chen J Z, Xiao W F, Liu C F, Huang Z L.Distribution and influencing factors of soil organic carbon in natural secondary forests of Shennongjia Forestry District.Acta Ecologica Sinica,2024,44(16):7130-7139.

神农架林区天然次生林土壤有机碳分布及影响因素

樊子豪[1],崔鸿侠[2,3],沈琛琛[1],陈吉臻[1],肖文发[1,4],刘常富[1,4],黄志霖[1,4,*]

1 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所,国家林业和草原局森林生态环境重点实验室,北京 100091

2 湖北省林业科学研究院,武汉 430075

3 湖北神农架森林生态系统国家定位观测研究站,神农架 442421

4 南京林业大学南方现代林业协同创新中心,南京 210037

摘要:神农架林区气候、土壤类型和森林具有明显海拔梯度分布特征,且存在大量植被组成丰富、林分结构复杂的天然次生林。以天然次生林为研究对象,通过系统样地调查、逐步回归和结构方程模型(SEM)揭示天然次生林土壤有机碳分布特征,探索土壤有机碳含量与气候、海拔、土壤和林分结构之间的多变量关系。研究结果表明:在 1200—2500 m 海拔区间,土壤有机碳含量随海拔升高而增加,土壤有机碳平均含量表现为 17.45 g/kg(1200—1600 m)< 21.56 g/kg(1600—2000 m)<27.37 g/kg(2000—2500 m)。在 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 深度土层土壤有机碳随土层加深而逐步降低,平均含量分别为 30.5 g/kg、21.7 g/kg 和 13.73 g/kg,且各土层之间差异显著($P<0.05$);海拔、土壤密度、pH 和树种多样性(TSD)在各土层与土壤有机碳含量存在显著相关性。海拔梯度变化通过影响土壤密度和 pH 间接影响土壤有机碳含量,在各土层具有一致性;20—40 cm、40—60 cm 土层,树种多样性变化影响土壤密度间提升进土壤有机碳含量。树种多样性对土壤有机碳含量的正向影响强烈依赖于土壤深度,深层(40—60 cm)土壤有机碳含量对树种多样性更为敏感。天然次生林维持较高的树种多样性有助于提升森林土壤碳汇能力,本研究结果为亚热带天然次生林的森林经营与生态管理提供理论依据。

关键词:土壤有机碳含量;天然次生林;分布特征;树种多样性;神农架林区

Distribution and influencing factors of soil organic carbon in natural secondary forests of Shennongjia Forestry District

FAN Zihao[1], CUI Hongxia[2,3], SHEN Chenchen[1], CHEN Jizhen[1], XIAO Wenfa[1,4], LIU Changfu[1,4], HUANG Zhilin[1,4,*]

1 *Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing* 100091, *China*

2 *Hubei Academy of Forest, Wuhan* 430075, *China*

3 *Hubei Shennongjia Forestry Ecosysten Research Station, Shennongjia* 442421, *China*

4 *Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing* 210037, *China*

Abstract: The Shennongjia Forestry District has been widely concerned with species diversity, with a large number of natural forests of rich species types and significant differences in vegetation types along the altitudinal gradient. This study focused on understanding the distribution characteristics of soil organic carbon content in natural secondary forests in the Shennongjia Forestry District. Using stepwise regression and structural equation modeling (SEM), we explored the multivariate relationships between soil organic carbon content and climate, elevation, soil properties, and stand structure.

基金项目:神农架国家公园本底资源综合调查研究项目(SNJNP2023010);神农架金丝猴保育生物学湖北省重点实验室开放课题基金(SNJGKL2023010)

收稿日期:2023-11-10; **网络出版日期**:2024-06-18

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hzlin66@caf.ac.cn

The soil organic carbon content was closely related to altitude, with significantly higher content at high altitudes compared to low altitudes. The average soil organic carbon content in the three altitudinal ranges was 27.37 g/kg (2000—2500 m), 21.56 g/kg (1600—2000 m), and 17.45 g/kg (1200—1600 m), respectively. The soil organic carbon content in the 0—20 cm, 20—40 cm, and 40—60 cm soil layers was 30.5 g/kg, 21.7 g/kg, and 13.73 g/kg, respectively. The contents decreased gradually with increasing soil depth, and there were significant differences among different soil layers ($P<0.05$). Altitude, soil bulk, pH, and tree species diversity all showed a strong linear relationship with soil organic carbon content in all soil layers. Altitude indirectly affected soil organic carbon content by regulating soil bulk and pH, and this relationship remained consistent across all soil layers. The tree species diversity in the 20—40 cm and 40—60 cm soil layers indirectly contributed to soil organic carbon content by regulating soil bulk. The positive effect of tree species diversity on soil organic carbon content was strongly dependent on soil depth, especially in the deep soil layer (40—60 cm). Maintaining high tree species diversity can promote the carbon sink capacity of forest soils.

Key Words: soil organic carbon; natural secondary forest; distribution characteristics; tree species diversity; Shennongjia Forestry District

土壤有机碳对维持土壤肥力和调节气候变化至关重要[1],其所储存的碳是植物活体中的三倍[2]。土壤碳固存可以抵消大气中二氧化碳增加,在缓解气候的正反馈方面起着重要作用[3]。土壤有机碳含量变化缓慢,空间异质性大,过程复杂,其微小变化可对生态系统碳循环产生影响。森林生态系统是陆地生态系统的主体也是最大的碳库,正确认识森林土壤有机碳含量变化及其影响因素是陆地碳循环研究的基础,也是碳中和研究的重要组成部分。

近期多项研究表明气候、地形、土壤属性和植被因素在不同区域、尺度上共同对森林土壤有机碳含量产生影响[4—5]。森林土壤有机碳分布受多个相关过程影响以及植物-土壤互馈所控制[6]。气候与地形通过影响植被类型、生产方式和凋落物的分解过程改变土壤碳的输入[7],在较大时间和空间尺度上驱动森林土壤有机碳分布。林分因子可以改变地上和地下生态位分化,使光、水和养分的利用效率发生变化[8],影响土壤有机碳的获取和损失[9],土壤属性差异通过微生物活性、有机碳矿化影响土壤有机碳的累积,在区域尺度发挥更重要的作用[10—11]。森林生态系统在具有海拔梯度格局时会出现规律性的气候变化,通过影响植被类型和成土过程进一步控制土壤有机碳含量和周转[12]。近期研究表明武夷山土壤碳分布随海拔升高呈非线性增长,受到气候、植被特征和土壤属性的综合影响[13]。坦桑尼亚森林保护区土壤有机碳随海拔升高而降低,植物多样性与土壤有机碳含量呈正相关[14]。山地热带森林研究表明土壤碳储量随海拔升高而增加,土壤性质和土壤形成过程与海拔的关系共同影响土壤有机碳储量[15]。土壤有机碳与环境因子之间的关系和相互作用是一个复杂多维的过程,现有研究结果仍存在很大的不确定性[16—19],反映了森林生态系统在空间尺度、环境背景等方面的作用[16,20],需要综合考虑林分与非生物环境因子相互作用的框架去探讨森林碳汇功能多元驱动机制。神农架林区以物种多样性丰富受到广泛关注,其存在大量类型丰富的天然林且随海拔梯度变化存在显著的植被类型差异,区域天然林土壤有机碳随海拔梯度[21]、土层深度的变化有着明显的规律[22],与森林类型、结构与生长也呈现不同程度的相关性[22—24]。一系列研究反映了森林土壤有机碳分异以及影响因子的复杂性。研究尝试引入结构方程模型深入研究土壤有机碳与环境驱动因子的协同关系与作用途径。

研究选取亚热带神农架林区天然次生林为研究对象,揭示次生林土壤有机碳分布特征以及对环境因子的响应,关注林分结构及树种多样性与有机碳含量的关系,全面了解土壤表层、有机层和矿物质层等不同层次土壤有机碳含量的变化规律与驱动因子,为次生林固碳增汇潜力提升提供依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究地区为神农架林区(110°03′05″—110°33′50″E,31°21′20″—31°36′20″N),位于华中地区湖北省西北

部,总面积 3253 km^2,森林覆盖率高达 86%,海拔多在 800—3000 m,气候属亚热带季风气候。神农架林区降水量丰沛,多年年平均降水量为 1170 mm,年平均气温 11.0—12.2℃,无霜期约为 200 d,相对湿度为 75%,平均年蒸发量 500—800 mm,全年日照时数 1900h。神农架林区森林土壤类型主要以黄棕壤、黄壤为主。

神农架林区植被垂直谱完整,从低海拔至高海拔,森林类型逐渐由常绿阔叶林、落叶阔叶林向针阔混交、常绿针叶林过渡。常绿阔叶混交林带垂直分布在 900—1500 m,主要建群类型为壳斗科(Fagaceae)的水青冈属(*Fagus*)和栎属(*Quercus*)、桦木科(Betulaceae Gray)的鹅耳枥属(*Carpinus*),混交树种为樟科(Lauraceae)的楠木属(*Phoebe*)、樟属(*Cinnamomum*)等。落叶阔叶林主要分布在 1500—2000 m,分布面积最广,主要树种为锐齿槲栎(*Quercus aliena var.acutiserrata*)、华山松(*Pinus armandii*)和红桦(*Betula albosinensis*)等。巴山冷杉(*Abies fargesii*)是 2000—2600 m 植被带的主要建群种,现存大片的原始天然林。

1.2 样地设置与调查

神农架林区天然林类型主要以次生林为主,经原始林皆伐后而形成的天然更新林。基于神农架林区森林资源二类清查数据,选择常绿落叶阔叶林、针叶落叶阔叶林和暗针叶林三种典型的次生林类型。阔叶林树种主要为锐齿槲栎、雷公鹅耳枥(*Carpinus viminea*)、四照花(*Cornus kousa subsp. chinensis*)、米心水青冈(*Fagus engleriana*)、短柄枹栎(*Quercus serrata Murray var. brevipetiolata*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、青榨槭(*Acer davidii subsp*)、椴树(*Tilia tuan*)、板栗(*Castanea mollissima*)、野核桃(*Juglans cathayensis var. formosana*)等 59 种;针阔混交林树种主要为华山松、雷公鹅耳枥、锐齿槲栎、四照花、红桦、米心水青冈、华中山楂(*Crataegus wilsonii*)、栓皮栎、紫枝柳(*Salix heterochroma*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等 36 种;暗针叶树种主要为巴山冷杉、红桦、五尖槭(*Acer maximowiczii*)、紫枝柳、华山松、山杨(*Populus davidiana*)、漆树、华中山楂等 20 种。共设置 42 块 20 m×20 m 的样地。记录样地内海拔、坡度、坡向,调查记录乔木层树种组成,单株胸径大于5 cm 的树木胸径、树高、株数等,样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本信息

Table 1 Main features of sampling sites

森林类型 Forest type	阔叶林 Broad-leaved forest	针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	暗针叶林 Dark coniferous forests
优势树种 Dominant tree specie	锐齿槲栎、短柄枹栎、栓皮栎	华山松、红桦	巴山冷杉
海拔 Elevation/m	1196—2206	1889—2313	1722—2495
坡度 Slope/(°)	3.44—36.49	18.78—44.69	6.23—26.59
树高 Tree height/m	13.1±2.4	11.9±1.8	13.7±2.5
胸径 Diameter at breast height/cm	11.6±2.7	10.97±1.6	11.9±1.9
林分密度 Tree density/(株/hm^2)	1253±451	1366±599	1547±677
物种丰富度 species richness	7±3	7±2	5±2
土壤类型 Soil type	黄壤、黄棕壤	黄壤、黄棕壤	黄棕壤、暗棕壤
样地 Plots	26	6	10

在每个样地内,将林地表面凋落物、草本和腐殖质清除,按 S 型线布设五个土壤采样点,采用机械取样法采集多个土壤深度(0—10、10—20、20—40、40—60 cm)的样品,将 5 个采样点同一层的土样混合均匀。将混合的土壤样品在室外风干,用于测定土壤理化性质。利用等面积二次样条法[25]得到 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土壤属性数据。年平均温度(MAT)、年平均降水量(MAP)从 ERA5 月平均数据集中提取[26]。样地中土壤属性、林分特征、地形与气候因子基本情况见表 2。

1.3 土壤样品分析

各样地风干土壤样本保存带回实验室进行土壤理化性质分析测定。土壤样品过 2 mm 筛,使用 pH 计在 1∶2.5(风干土壤:去离子水)的悬浮液中测量土壤 pH 值,并使用重铬酸钾氧化外加热法测定土壤有机碳含量。

采用环刀(100 cm^3)取样,计算样品重量来测定土壤密度(BD)[27]。

表 2　环境因子描述统计特征

Table 2　Descriptive statistics of each factors of environmental

类别 Category		相关因子 Variable	单位 Unit	平均值 Mean	标准差 SD	偏度 Skewness
林分特征		均匀度	/	0.66	0.15	−0.90
Stand characteristics		多样性指数	/	0.99	0.56	−0.15
		物种丰富度	/	6	3	0.69
		林分密度	株/hm^2	1343	583	0.58
		平均树高	m	13.18	2.63	0.15
		胸径	cm	11.33	2.49	1.20
气候 Climate		年均气温	℃/a	11.14	0.49	0.93
		年均降水	Mm/a	1132.46	24.59	−1.93
地形 Topography		海拔	m	1769.38	423.27	−0.69
		坡度	(°)	21.56	7.94	0.01
土壤性质 Soil properties	0—20 cm	土壤密度	g/cm^3	0.96	0.19	0.40
		pH	/	5.60	0.41	−0.37
	20—40 cm	土壤密度	g/cm^3	1.07	0.21	−0.02
		pH	/	5.58	0.40	−0.42
	40—60 cm	土壤密度	g/cm^3	1.16	0.20	−0.35
		pH	/	5.62	0.37	−0.62

1.4　乔木树种多样性

本研究选用物种丰富度、Shannon 多样性指数和均匀度指数 3 个常用指数测定森林乔木层树种多样性(Tree species diversity,TSD),具体方法如下[28]。

物种丰富度(S):

$$S = \text{出现在样方内的乔木树种数} \tag{1}$$

Shannon 多样性指数(H')

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \tag{2}$$

其中,P_i 表示一个样方中植物物种 i 的相对丰度。P_i 的计算公式如下:$P_i = n_i/N$,其中 n_i 表示物种 i 的个体数,N 分别表示一个特定样方中所有植物物种的个体总数。

Pielou 均匀度指数(E_H)

$$E_H = \frac{H'}{\ln S} \tag{3}$$

其中,S 代表一个特定样方中的物种丰富度,H' 代表一个样方中 Shannon 指数

1.5　数据处理与统计分析

应用多元逐步回归模型对多重共线性因子进行选择和剔除;采用一般线性模型评估了相关因子与土壤有机碳含量之间关系,并应用结构方程模型(SEM)分析其对天然次生林土壤有机碳含量的直接和间接影响。模型检验使用卡方检验(P>0.05)、比较拟合指数(CFI>0.90)、标准化均方根残差(SRMR<0.08)、赤池信息准则(AIC)[29]。对于偏度大于 1 的因子(表 2),采用对数转化(LN),对于偏度小于 1 的因子采用幂指数转化(EXP)来获得近正态分布的数据。构建结构方程模型(SEM)前所有数值采用 z-score 进行标准化。所有统计分析使用 R.4.3 软件,数据分析采用“ggplot2”、“Car”、“lavaan”包。

2 结果与分析

2.1 天然次生林土壤有机碳分布特征

神农架林区天然次生林不同海拔高度下 0—60 cm 土层 SOC 分布如图 1 所示。在 1200—2500 m 海拔范围土壤有机碳含量随海拔升高逐渐增加。在海拔 1200—1600 m 处 SOC 变化范围为 4.66—27.86 g/kg,均值为 17.45 g/kg。在海拔 1600—2000 m 处 SOC 变化范围为 11.89—40.98 g/kg,均值为 21.56 g/kg。在海拔 2000—2500 m 处 SOC 变化范围为 15.87—52.14 g/kg,均值为 27.37 g/kg。海拔 2000—2500 m 处土壤有机碳含量显著大于 1200—1600 m。

神农架林区天然次生林不同森林类型下 0—60 cm 土层 SOC 分布差异不显著(图 1)。0—60 cm 土层下,阔叶林下 SOC 变化范围为 4.68—40.98 g/kg,均值为 20.48 g/kg;针阔混交林下 SOC 变化范围为 15.87—31.65 g/kg,均值为 24.58 g/kg;暗针叶林下 SOC 变化范围为 17.09—52.14 g/kg,均值为 27.26 g/kg。

神农架林区天然次生林不同土层 SOC 的垂直分布如图 1 所示。0—20 cm 土层 SOC 变化范围为 6.55—72.57 g/kg,均值为 30.5 g/kg(表 1),在所有土层中最高。20—40 cm 土层 SOC 变化范围为 4.03—58.01 g/kg,均值为 21.7 g/kg。40—60 cm 土层 SOC 变化范围为 2.24—43.61 g/kg,均值为 13.73 g/kg,在所有土层中含量最低。在三个土层中,SOC 随土层深度增加而降低,且差异显著。

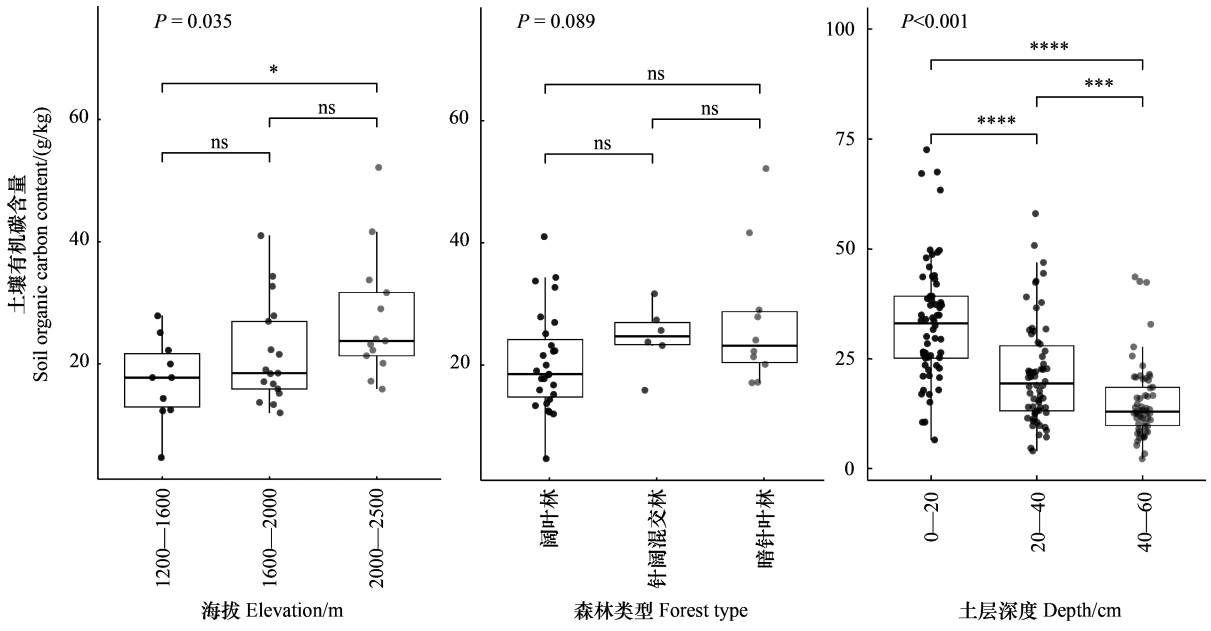

图 1 神农架林区土壤有机碳含量分布特征

Fig.1 Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Content in Shennongjia forestry district

ns 代表差异不显著;*、**、***、****分别指 0.05、0.01、0.001 和 0.0001 水平上的差异显著

2.2 天然次生林不同深度土层土壤有机碳影响因素分析

神农架林区土壤有机碳含量分布在海拔梯度和土层深度上存在显著的分异特征,使用多元逐步回归分析进一步探讨各环境因子对各土层土壤有机碳含量的影响(表 2)。结果表明气候和地形(海拔)、土壤性质(土壤密度、土壤 pH)和林分特征(Pielou 均匀度指数)的综合影响解释了不同土层土壤有机碳含量变化 42%—45%(表 3)。在 0—60 cm 土层,土壤有机碳含量与土壤密度(P< 0.001,图 2)呈线性负相关,随海拔上升呈线性正相关(P<0.01,图 2)。海拔和土壤密度变化与土壤有机碳含量线性关系显著,但随着土壤深度的增加,土壤密度对土壤有机碳的影响逐渐增加,海拔对土壤有机碳的影响逐渐降低。土壤有机碳含量随 pH 的增加而降低,但整体并不显著(P>0.05,图2),土壤有机碳与pH的关系可能受到多个因子共同影响。0—20、20—

表 3　环境因子与土壤有机碳含量的多元逐步回归分析

Table 3　Summary of stepwise regression analysis

项目 Item		主要影响因子 Major affecting factor	回归方程 Regression equation	显著性 Significance	R^2
土壤有机碳	0—20 cm	海拔、土壤密度、pH	Y=0.342ELE+0.397pH−0.496BD	< 0.001	0.454
Soil organic carbon	20—40 cm	海拔、土壤密度、pH	Y=0.418ELE+0.281pH−0.442BD	< 0.001	0.441
	40—60 cm	Pielou 均匀度指数、海拔、土壤密度、pH	Y=0.265E+0.339 ELE−0.633BD+0.377pH	< 0.001	0.423

ELE:海拔 Elevation; BD:土壤密度 Soil bulk density; E:Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index

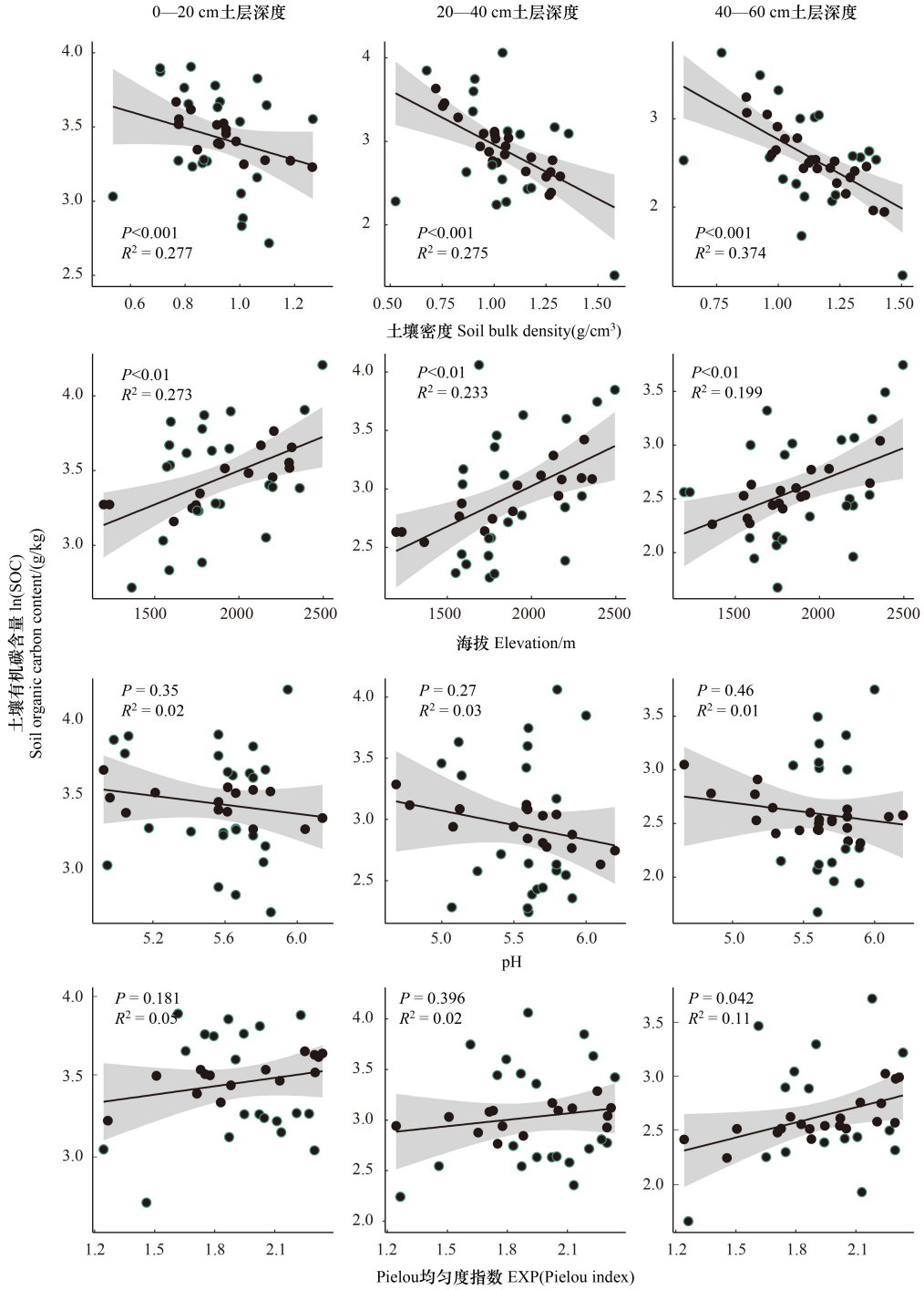

图 2　土壤有机碳碳含量与相关因子的关系

Fig.2　Relationship between environment variables and soil carbon content in the 0—60 cm layer with linear fits

灰色阴影区域代表 95%的置信区间;EXP 指数据使用幂指函数转化以获得近正态分布

40 cm土层土壤有机碳含量对树种多样性(Pielou 均匀度指数)并无显著线性关系(图 2,$P>0.05$),而在 40—60 cm土层则随树种多样性的提高而增加(图 2,$P< 0.05$)。总体来看,神农架林区天然次生林表层和深层土壤有机碳含量主控因素不同,表层土壤有机碳含量的变化主要受到气候、地形和土壤性质的作用,深层土壤有机碳含量受到气候、地形、土壤性质和林分结构的综合影响。

2.3 天然次生林土壤有机碳分布的关键影响因素

在多元逐步回归分析的基础上排除对土壤有机碳含量影响不显著的因子,保留 Pielou 均匀度指数表征林分因子即树种多样性(TSD),保留海拔、土壤 pH 和土壤密度来表征气候、地形、土壤即非生物环境因子对土壤有机碳含量的综合影响,并构建不同土壤深度土层有机碳含量的主控因子结构方程模型,结果如图 3 所示。不同土层卡方自由度比值分别为 3.32,2.38,2.11,均小于 5;SRMR 值分别为 0.09,0.06,0.06,均小于 0.1;GFI、CFI 值均大于 0.9,说明模型构建良好,可有效揭示各驱动因子的效应路径。

利用结构方程模型(SEM),相关因子分别解释了 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 土层土壤有机碳含量变化的 45.9%、48.4%和 65.6%(图 3)。在三个土层,海拔、土壤密度和 pH 值对土壤有机碳含量均直接产生显著影响($P<0.01$)。海拔通过影响 pH、土壤密度对土壤有机碳含量产生正向效应。20—40 cm 土层,树种多样性通过对土壤密度调节间接对土壤有机碳含量产生正向效应,但直接效应不显著;在 40—60 cm 土层,树种多样性既对土壤有机碳含量直接产生正向效应,也通过改变土壤密度间接促进土壤有机碳含量的增加,标准化系数为 0.265。

3 讨论

3.1 天然次生林土壤有机碳含量分布

神农架林区天然次生林土壤有机碳含量随土层加深和海拔高度降低而显著下降。土壤有机碳的主要来源是地表凋落物和地下根系输入,其分布和土壤深度紧密相关,通常呈指数递减的趋势[3]。神农架林区天然次生林土壤有机碳含量随海拔的升高而增加。海拔的升高伴随气温的下降和降水的增加[30],直接影响森林土壤层湿度和温度环境条件,降低土壤动物、微生物活性[31]和林地凋落物、地被物的分解[32],改变土壤有机碳的积累状态[33]。随着土壤深度逐渐增加,海拔对土壤有机碳的影响也逐渐降低(图 3),深层矿物质土层微生物活性和生物量远小于表层土壤[34],土壤深层碳的动态变化可能比表层土壤更加缓慢[35]。

在结构方程模型中,海拔对土壤密度、pH 产生显著负向效应间接影响土壤有机碳含量(图 3)。土壤密度受成土过程、气候、生物作用[36],可能受不同海拔土壤和植被类型控制,成土因素和植被特征变化可能产生土壤质地和团聚体组成的差异影响土壤有机碳含量和碳组分,例如土壤中低砂粒、高黏粒含量可以增加土壤碳的稳定性,提高土壤碳累积[37]。神农架林区高海拔地区降水量较大,相关研究表明土壤 pH 和气候关系密切,通常与降水量呈负相关[15]。前人通过对农业土壤的长期实验揭示了土壤 pH 的变化可以影响土壤微生物活性和土壤碳循环速率,与植物初级净生产力变化间接相关[38]。在神农架林区,温暖、干燥和低海拔地区接近中性土壤 pH 环境为微生物对有机质的分解提供了有利条件,在寒冷、潮湿和高海拔地区高酸度土壤可以抑制微生物活性,并加速溶解有机碳向下层淋溶,增加土壤有机碳的含量和累积[39]。

3.2 树种多样性增加影响深层土壤有机碳富集

神农架林区在海拔梯度上有明显的森林类型变化,天然次生林树种丰富度较高,海拔梯度变化对天然次生林的树种多样性的影响并不显著。树种多样性对土壤有机碳含量影响具有显著的土层深度分异,在 0—20、20—40 cm 土层并没有表现出显著相关性,但与深层土壤有机碳含量存在正相关(图 2)[6]。通常较高的树种多样性通过增加凋落物输入量,提高微生物群落多样性与底物利用效率,增加凋落物分解产生的土壤有机碳含量[16]。而前人研究表明比起凋落物输入的量,凋落物质量对土壤有机碳含量贡献更大,较高质量的凋落物的不稳定组分会更优先被微生物所利用,而在多样性较高的生态系统中低质量凋落物比例越高,底物利用效率相对越低,微生物源有机碳也相应降低[40],而林木功能性状重叠的群落也会降低生态位互补的有效

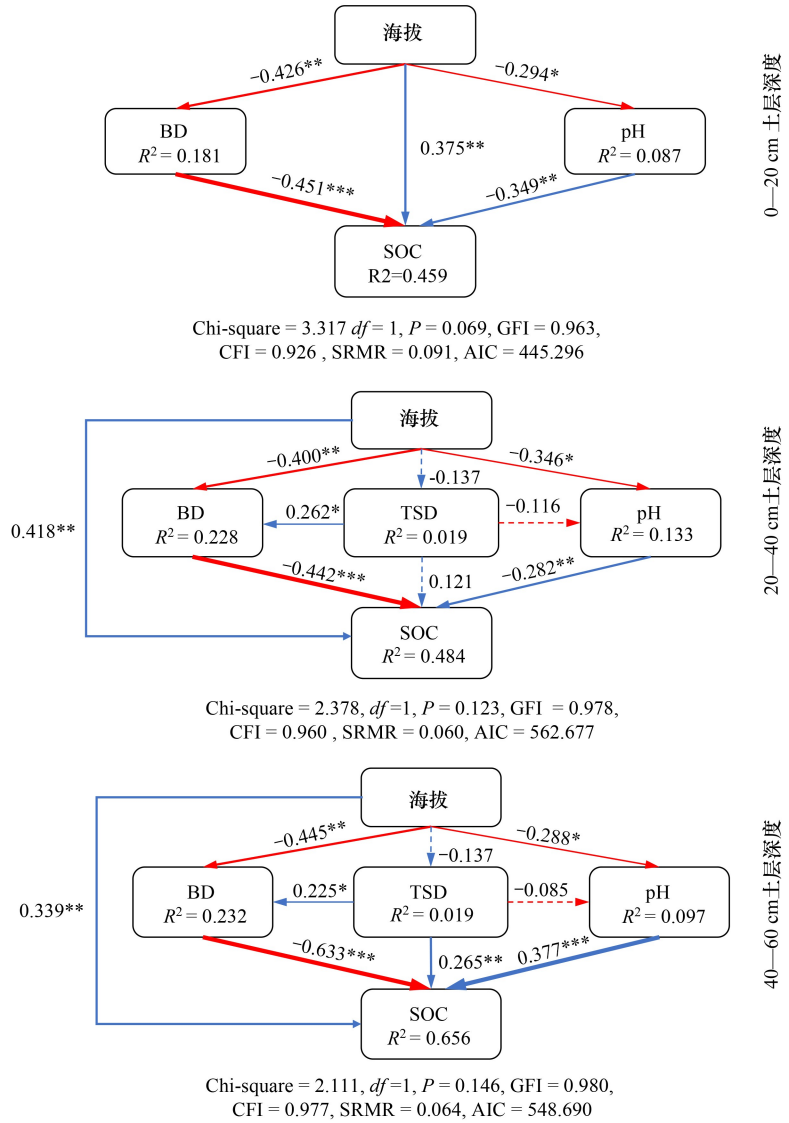

图 3　环境因子对土壤有机碳含量的直接和间接影响

Fig.3　Structural equation modelling shows the connections of the selected environmental variables and soil carbon content (SOC) **in Shennongjia forestry district**

红色箭头表示负相关(P<0.05),蓝色箭头表示正相关,虚线代表相关性不显著;*、**、*** 分别指 0.05、0.01 和 0.001 水平上的显著差异;选取卡方(Chi-square)、自由度(df)、比较拟合指数(CFI)、拟合度指数(GFI)、标准化均方根残差(SRMR)以及赤池信息准则(AIC)进行评估;BD:土壤密度 Soil bulk density;TSD:树种多样性 Tree species diversity;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon

性,减少土壤碳的输入[41],表层土壤有机碳含量随着树种多样性的增加变化并不显著。由于地表碳输入较少可以渗透到矿质土层,树种多样性对有机碳的增加可能主要源于根系[42],不同林分根系分布存在差异[43],可能与地下生态位互补有关[44],丰富的树种组成主要通过促进根周转率和根沉积来促进土壤碳的积累[45]。此结果也揭示了树种多样性对深层土壤碳的贡献大于表层活性碳库[16],更高的树种多样性森林也拥有更高稳定碳的比例[46]。森林树种多样性的经营和管理可能对土壤碳固存和其他关键生态系统服务功能产生重大影响,仍需要进一步加强对其过程以及驱动机制的综合研究。

4　结论

天然次生林土壤有机碳分布在海拔和土层深度均表现出明显的分布特征。土壤有机碳含量随土层深度

增加,呈现显著的表聚现象;高海拔区域土壤有机碳含量较高,低海拔区域土壤有机碳含量相对较低。环境因子与土壤有机碳含量存在密切联系,海拔通过影响土壤密度和 pH 作用于土壤有机碳含量,而树种多样性在较深土层(40—60 cm)对土壤有机碳含量起到促进作用。天然次生林可以通过维持较高水平树种多样性提高森林土壤碳固存能力。

参考文献(References):

[1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.

[2] Carvalhais N, Forkel M, Khomik M, Bellarby J, Jung M, Migliavacca M, Mu M, Saatchi S, Santoro M, Thurner M, Weber U, Ahrens B, Beer C, Cescatti A, Randerson J T, Reichstein M. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems. Nature, 2014, 514: 213-217.

[3] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423.

[4] 郑智超, 满浩然, 臧淑英, 刘超, 董星丰. 大兴安岭呼玛河流域多年冻土区森林土壤有机碳和有效氮分布特征及影响因素. 冰川冻土, 2023, 45(1): 222-232.

[5] Andreetta A, Chelli S, Bonifacio E, Canullo R, Cecchini G, Carnicelli S. Environmental and pedological factors influencing organic carbon storage in Italian forest soils. Geoderma Regional, 2023, 32: e00605.

[6] Dawud S M, Raulund-Rasmussen K, Domisch T, Finér L, Jaroszewicz B, Vesterdal L. Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks, C/N ratio, and pH? Ecosystems, 2016, 19(4): 645-660.

[7] Chen Y, Han M G, Yuan X, Hou Y H, Qin W K, Zhou H K, Zhao X Q, Klein J A, Zhu B. Warming has a minor effect on surface soil organic carbon in alpine meadow ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. Global Change Biology, 2022, 28(4): 1618-1629.

[8] Forrester D I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process. Forest Ecology and Management, 2014, 312: 282-292.

[9] Chen X L, Chen H Y H, Searle E B, Chen C, Reich P B. Negative to positive shifts in diversity effects on soil nitrogen over time. Nature Sustainability, 2021, 4: 225-232.

[10] He M Z, Tang L, Li C Y, Ren J X, Zhang L B, Li X R. Dynamics of soil organic carbon and nitrogen and their relations to hydrothermal variability in dryland. Journal of Environmental Management, 2022, 319: 115751.

[11] Shen C C, Xiao W F, Chen J Z, Hua L, Huang Z L. Climate-sensitive spatial variability of soil organic carbon in multiple forests, Central China. Global Ecology and Conservation, 2023, 46: e02555.

[12] Du B M, Kang H Z, Pumpanen J, Zhu P H, Yin S, Zou Q, Wang Z, Kong F Q, Liu C J. Soil organic carbon stock and chemical composition along an altitude gradient in the Lushan Mountain, subtropical China. Ecological Research, 2014, 29(3): 433-439.

[13] 熊小玲, 任寅榜, 吕茂奎, 李晓杰, 聂阳意, 谢锦升. 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征. 水土保持研究, 2022, 29(4): 83-88.

[14] Mauki D, Richard U, Kilonzo M. Influence of elevation gradient and plant species composition on soil organic carbon in Mount Rungwe Forest Reserve, Tanzania. Environmental and Sustainability Indicators, 2023, 19: 100291.

[15] Dieleman W I J, Venter M, Ramachandra A, Krockenberger A K, Bird M I. Soil carbon stocks vary predictably with altitude in tropical forests: implications for soil carbon storage. Geoderma, 2013, 204/205: 59-67.

[16] Chen X L, Chen H Y H, Chen C, Ma Z L, Searle E B, Yu Z P, Huang Z Q. Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: a global meta-analysis. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2020, 95(1): 167-183.

[17] Yuan Z X, Guan Q W, Chen X L, Zou P J, Gu Y Q, Wu Q, Niu Y Y, Ofori Meshack A. Tree diversity increases soil C and N stocks of secondary forests in subtropical China. Catena, 2023, 222: 106812.

[18] Ivan K, Tatiana C. Modeling of forest communities′ spatial structure at the regional level through remote sensing and field sampling: constraints and solutions. Forests, 2020, 11(10): 1088.

[19] Seidl R, Spies T A, Peterson D L, Stephens S L, Hicke J A. Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. The Journal of Applied Ecology, 2016, 53(1): 120-129.

[20] Taylor A R, Gao B L, Chen H Y H. The effect of species diversity on tree growth varies during forest succession in the boreal forest of central Canada. Forest Ecology and Management, 2020, 455: 117641.

[21] 卢慧, 丛静, 薛亚东, 杨敬元, 陈克龙, 李迪强, 张于光. 海拔对神农架表层土壤活性有机碳含量的影响. 林业科学, 2014, 50(8): 162-167.

[22] 崔鸿侠, 肖文发, 黄志霖, 曾立雄, 潘磊, 庞宏东. 神农架 3 种针叶林土壤碳储量比较. 东北林业大学学报, 2014, 42(3): 69-72.
[23] 张于光, 宿秀江, 王敏, 丛静, 卢慧, 刘敏超. 不同天然落叶阔叶林的土壤有机碳和微生物结构特征. 土壤通报, 2014, 45(3): 625-629.
[24] 崔鸿侠, 肖文发, 潘磊, 黄志霖, 王晓荣, 庞宏东. 神农架巴山冷杉林土壤碳储量特征. 林业科学, 2012, 48(11): 107-111.
[25] Malone B P, McBratney A B, Minasny B, Laslett G M. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. Geoderma, 2009, 154(1/2): 138-152.
[26] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Biavati G, Horányi A, Muñoz Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Rozum I, Schepers D, Simmons A, Soci C, Dee D, Thépaut J N. ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store, 2019, 10: 252-266.
[27] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
[28] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13: 131-144.
[29] Grace J B, Anderson T M, Olff H, Scheiner S M. On the specification of structural equation models for ecological systems. Ecological Monographs, 2010, 80(1): 67-87.
[30] 韩有志, 王政权. 森林更新与空间异质性. 应用生态学报, 2002, 13(5): 615-619.
[31] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
[32] 曾立雄, 雷蕾, 王晓荣, 朱建华, 肖文发, 刘贤德, 敬文茂. 海拔梯度对祁连山青海云杉林乔木层和土壤层碳密度的影响. 生态学报, 2018, 38(20): 7168-7177.
[33] Michalzik B, Kalbitz K, Park J H, Solinger S, Matzner E. Fluxes and concentrations of dissolved organic carbon and nitrogen – a synthesis for temperate forests. Biogeochemistry, 2001, 52(2): 173-205.
[34] Durán J, Morse J L, Rodríguez A, Campbell J L, Christenson L M, Driscoll C T, Fahey T J, Fisk M C, Mitchell M J, Templer P H, Groffman P M. Differential sensitivity to climate change of C and N cycling processes across soil horizons in a northern hardwood forest. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 107: 77-84.
[35] Balesdent J, Basile-Doelsch I, Chadoeuf J, Cornu S, Derrien D, Fekiacova Z, Hatté C. Atmosphere – soil carbon transfer as a function of soil depth. Nature, 2018, 559: 599-602.
[36] Harbo L S, Olesen J E, Liang Z, Christensen B T, Elsgaard L. Estimating organic carbon stocks of mineral soils in Denmark: impact of bulk density and content of rock fragments. Geoderma Regional, 2022, 30: e00560.
[37] Chen S L, Hong H L, Huang X Y, Fang Q, Yin K, Wang C W, Zhang Y M, Cheng L L, Algeo T J. The role of organo-clay associations in limiting organic matter decay: insights from the Dajiuhu peat soil, central China. Geoderma, 2018, 320: 149-160.
[38] Kemmitt S, Wright D, Goulding K, Jones D. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 898-911.
[39] Daniels W L. The Nature and Properties of Soils, 15th EditionRa$_y$ R.Weil and Nyle C.Brady. Pearson Press, Upper Saddle River NJ, 2017.1086 p. $164.80. ISBN-10: 0-13-325448-8; ISBN-13: 978-0-13-325448-8. Also available as eText for $67.99. Soil Science Society of America Journal, 2016, 80(5): 1428.
[40] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, Denef K, Paul E. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? Global Change Biology, 2013, 19(4): 988-995.
[41] Hu M Y, Zou B Z, Huang Z Q, Wang S R, Su X P, Ding X X, Zheng G C, Chen H Y H. Fine root biomass and necromass dynamics of Chinese fir plantations and natural secondary forests in subtropical China. Forest Ecology and Management, 2021, 496: 119413.
[42] Jia S X, Liu X F, Lin W S, Li X J, Yang L M, Sun S Y, Hui D F, Guo J F, Zou X M, Yang Y S. Tree roots exert greater influence on soil microbial necromass carbon than above-ground litter in subtropical natural and plantation forests. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 173: 108811.
[43] Lwila A S, Mund M, Ammer C, Glatthorn J. Site conditions more than species identity drive fine root biomass, morphology and spatial distribution in temperate pure and mixed forests. Forest Ecology and Management, 2021, 499: 119581.
[44] Xu Y J, Zhang Y, Yang J, Lu Z Y. Influence of tree functional diversity and stand environment on fine root biomass and necromass in four types of evergreen broad-leaved forests. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00832.
[45] Lange M, Eisenhauer N, Sierra C A, Bessler H, Engels C, Griffiths R I, Mellado-Vázquez P G, Malik A A, Roy J, Scheu S, Steinbeiss S, Thomson B C, Trumbore S E, Gleixner G. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. Nature Communications, 2015, 6: 6707.
[46] Sokol N W, Kuebbing S E, Karlsen-Ayala E, Bradford M A. Evidence for the primacy of living root inputs, not root or shoot litter, in forming soil organic carbon. The New Phytologist, 2019, 221(1): 233-246.