

苏北低山丘陵区典型森林土壤碳库质量分析

彭光煜*, 唐雨淇, 于法展#, 陈子熙, 林结丰, 李 亚

江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州

收稿日期: 2024年3月12日; 录用日期: 2024年3月28日; 发布日期: 2024年4月11日

摘 要

研究森林土壤不同土层SOC、ASOC含量和SOC D可以为土壤碳库质量的量化分析评价提供参考。以苏北低山丘陵区不同森林类型土壤为研究对象, 对其SOC、ASOC含量和SOC D的变化特征进行系统分析。结果表明: (1) 不同森林类型SOC、ASOC含量和SOC D均随土层深度呈递减趋势, 并且SOC含量下降的幅度明显大于ASOC。(2) 弃荒裸地除外, 针叶林SOC、ASOC含量高于其他森林类型, 而针叶林SOC D低于其他森林类型。(3) 6种森林类型ASOC/TOC(%)均小于对照的弃荒裸地, 而6种森林类型CPMI(%)均高于对照的弃荒裸地, 针叶林CPMI(%)大于其他森林类型, 针叶林的固碳潜力较强。(4) 不同森林类型能够维护森林土壤碳库质量的稳定性, 加强地表凋落物的科学管理, 可以提高该地区森林土壤碳库的赋存能力。

关键词

森林类型, 土壤有机碳, 碳库质量, 低山丘陵区

Analysis on the Quality of Forest Soil Carbon Pools in the Low Mountainous and Hilly Areas of Northern Jiangsu Province

Guangyu Peng*, Yuqi Tang, Fazhan Yu#, Zixi Chen, Jiefeng Lin, Ya Li

School of Geography, Geomatics, and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou Jiangsu

Received: Mar. 12th, 2024; accepted: Mar. 28th, 2024; published: Apr. 11th, 2024

Abstract

The study of SOC, ASOC content and SOC D in different soil layers of forest soils can provide a ref-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 彭光煜, 唐雨淇, 于法展, 陈子熙, 林结丰, 李亚. 苏北低山丘陵区典型森林土壤碳库质量分析[J]. 土壤科学, 2024, 12(2): 46-52. DOI: 10.12677/hjss.2024.122006

erence for quantitative analysis and evaluation of the quality of soil carbon pools. Different forest types of soils in the low mountainous and hilly areas of northern Jiangsu Province were used as research objects to systematically analyze the characteristics of changes in SOC, ASOC content and SOCD. The results showed that: (1) SOC, ASOC content and SOCD of different forest types showed a decreasing trend with soil depth, and the magnitude of SOC content decrease was significantly larger than that of ASOC. (2) Except for abandoned bare land, SOC and ASOC content of coniferous forests were higher than that of other forest types, while SOCD of coniferous forests was lower than that of other forest types. (3) ASOC/TOC(%) of all six forest types were smaller than that of the control abandoned bare land, while CPMI(%) of all six forest types were higher than that of the control abandoned bare land, and CPMI(%) of coniferous forests was larger than that of other forest types, and the carbon sequestration potential of coniferous forests was stronger. (4) Different forest types can maintain the stability of the quality of forest soil carbon pools, and strengthening the scientific management of surface apoptosis can improve the capacity of forest soil carbon pools in the region.

Keywords

Forest Types, Soil Organic Carbon, Carbon Pool Quality, Low Mountain and Hilly Areas

Copyright © 2024 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

森林土壤碳库是陆地碳库的重要组成部分, 在全球碳循环中发挥着重要作用, 它的变化是导致全球气候变化的重要原因[1]。土壤有机碳(SOC)的积累与分解影响着森林土壤碳库的质量变化, 直接或间接影响陆地生物碳库和全球碳平衡[2]。引起土壤碳库的质量变化主要是活性有机碳(ASOC), 它能够在土壤全碳变化之前反映出土壤管理措施以及周围环境引起的微小变化, 由于受地形地貌、气候、植被覆盖类型以及人类活动等多种因素的影响, ASOC在不同区域、不同植被类型上存在差异[3] [4] [5]。土壤碳库管理指数(CPMI)可以表征土壤碳库质量的动态变化过程, 它能够直观反映出外界因素对土壤碳库质量的影响效果。森林土壤碳库质量的变化与 SOC、ASOC 以及 CPMI 关系密切, 对其周围气候变化以及人类活动较为敏感, 因此, 近年来成为土壤碳库研究的重要热点内容[6] [7] [8] [9]。

目前国内外对森林土壤碳库的研究主要集中在碳储量、分布特征、区域差异、影响因子等方面[10]-[15], 对于不同森林类型土壤碳库质量特征的研究还有待进一步加强。苏北低山丘陵区的典型性森林类型主要分布于江苏省的东北部和西北部, 前者主要为连云港近郊的锦屏山、云台山等, 后者主要为徐州附近的泉山、云龙山、大洞山、马陵山等。以苏北低山丘陵区典型森林土壤为研究对象, 系统研究不同森林类型 SOC、土壤有机碳密度(SOCD)和碳库质量变化特征, 旨在揭示不同森林类型对土壤碳库质量的影响, 为森林土壤碳库的动态演变以及碳库质量的精准评价提供科学参考。

2. 研究区域概况

研究区域的地理坐标为 33°43'N~35°07'N, 116°22'E~119°48'E, 为江苏省东北部和西北部的低山丘陵地带, 属于暖温带季风气候, 受东南季风影响较大。年均温 13.1℃~14.3℃, 1月平均气温-1.2℃~0.0℃, 7月平均气温 26.3℃~27.0℃, 极端最高气温 40.6℃, 极端最低气温-22.6℃; 年降水量 847.9~958.9 mm,

其中雨季降水量占全年的 56%，且季节分配不均。该地区典型性森林植被[16]包括 2 个植被型、5 个群系组、11 个群系(表 1)。其中，赤松林、黑松林和侧柏林多为纯林，物种多样性很低，其林下灌木层和草本层不甚发育，生长缓慢，病虫害较严重，以上 3 种针叶林是目前该低山丘陵区主要森林类型；刺槐林则常为纯林，系人工林，分布较为广泛；栎类林和杂木林是该地区的地带性森林类型，由于人类长期破坏，现存面积很小，多零星分布。其区域土壤主要为粗骨褐土和淋溶褐土 2 个亚类，其中粗骨褐土成土母质系石灰岩残坡积物，其土层浅薄，岩屑或砾石含量较高，集中出现在山体中上部；淋溶褐土由第四纪黄土发育而成，其土层深厚，主要分布在山麓地带。

Table 1. Typical forest vegetation in the low mountain and hilly areas of northern Jiangsu Province [16]

表 1. 苏北低山丘陵区典型性森林植被[16]

植被型(2)	群系组(5)	群系(11)	
常绿针叶林	温性松林	赤松(<i>Pinus densiflora</i>)林 黑松(<i>Pinus thunbergii</i>)林	
	侧柏林	侧柏(<i>Platycladus orientalis</i>)林	
落叶阔叶林	栎类林	麻栎(<i>Quercus acutissima</i>)林 栓皮栎(<i>Quercus variabilis</i>)林	
	杂木林	梧桐(<i>Firmiana simplex</i>)、小叶朴(<i>Celtis bungeana</i>)林 枫香(<i>Liquidambar formosana</i>)、黄连木(<i>Pistacia chinensis</i>)林 黄连木(<i>Pistacia chinensis</i>)、黄檀(<i>Dalbergia hupeana</i>)林 黄檀(<i>Dalbergia hupeana</i>)、盐肤木(<i>Rhus chinensis</i>)林 青檀(<i>Pteroceltis tatarinowii</i>)、南京椴(<i>Tilia miqueliana</i>)林	
		刺槐林	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)林

3. 样地设置与研究方法

3.1. 样地设置

在研究区域选取 6 块代表性森林类型样区和 1 块对照的弃荒裸地进行土样采集，样区一般选择在森林类型区内核心部位的成熟林地。每块森林类型区内均设 3 个重复样方，不同森林类型的样地面积设定：阔叶林取为 50 m × 40 m，针叶林为 25 m × 20 m。每块森林类型样区内土壤采样时设 3 个重复，每个重复的土样按 5 点混合法采集，每个样点共采集 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层的混合样。土样采集及地上概况调查的时间为 2022 年 8 月。采样的同时，系统调查地上植被的覆盖状况以及地形、地貌等周边环境条件状况。苏北低山丘陵区样地基本概况调查见表 2。

Table 2. Basic overview of sample land in low mountain and hilly areas of northern Jiangsu Province

表 2. 苏北低山丘陵区样地基本概况

样地编号	森林类型	土壤类型	坡向	盖度	郁闭度	样地来源
S1	赤松林	粗骨褐土	SE	60%	0.6~0.8	锦屏山
S2	黑松林	粗骨褐土	NW	10%	0.6	云龙山
S3	侧柏林	粗骨褐土	SW	60%	0.3~0.6	泉山
S4	栎类林	粗骨褐土	NE	30%~50%	0.6~0.8	云台山
S5	杂木林	淋溶褐土	NW	20%~40%	0.6~0.7	云台山
S6	刺槐林	粗骨褐土	SE	20%	0.5~0.7	马陵山
S7	弃荒裸地	淋溶褐土	NW	—	—	大洞山

3.2. 研究方法

土样经风干、挑拣后过 60 目筛, 以备实验测试。石砾体积的测算采用排水法; 土壤容重的测定采用环刀法; 有机质的测定采用重铬酸钾氧化外加热法; ASOC 及其组分在岛津-TOC 有机碳分析仪上测定。综上所述分析指标的具体测定方法参照《土壤农业化学分析方法》[17]和《土壤微生物生物量测定方法及其应用》[18]。

SOCD 是指单位面积一定深度的土层中 SOC 的质量。SOCD 的计算公式为:

$$\text{SOCD} = \sum_{i=1}^n C_i \times D_i \times E_i (1 - G_i) / 100 \quad (1)$$

公式(1)中: SOCD 为整个土壤剖面的 SOCD ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); n 为整个土壤剖面的土层数目; C_i 为 i 土层 SOC 含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 其值为土壤有机质含量乘以 Bemmelen 系数 0.58 换算得到; D_i 为 i 土层土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); E_i 为 i 层土层厚度 (cm); G_i 为直径大于 2 mm 的砾石所占的体积百分比 (%)。

根据相关文献[8]可知, 影响森林土壤碳库质量的指标主要有碳库指数(CPI)、碳库活度指数(AI)、碳库活度(A)和碳库管理指数(CPMI)。选取弃荒裸地为参照土壤, 不同森林类型 CPI、AI、A 和 CPMI 相关计算公式为:

$$\text{CPI} = \text{样品 TOC 含量} / \text{参照土壤 TOC 含量} \quad (2)$$

$$\text{A} = \text{ASOC 含量} / (\text{TOC} - \text{ASOC}) \text{ 含量} \quad (3)$$

$$\text{AI} = \text{样品土壤 A} / \text{参照土壤 A} \quad (4)$$

$$\text{CPMI} (\%) = \text{CPI} \times \text{AI} \times 100 \quad (5)$$

公式(2)和(3)中样品土壤总有机碳(TOC)为 SOC 含量。所有测试土样实验数据的统计和分析在 Excel 2010 和 SPSS 24.0 下完成, 其中采用 SPSS 24.0 软件进行森林 SOC、ASOC、SOCD 和 CPMI(%)相关数据的描述性统计、方差及其相关性分析。

4. 结果与分析

4.1. 不同森林类型 SOC 特征分析

用 SOC 和 ASOC 含量来指示森林土壤的活力水平, 可以综合评价其土壤碳库的质量水平[8]。不同森林类型土壤不同土层 SOC 含量、ASOC 含量的差异特征见表 3 和表 4。

Table 3. Differential characteristics of SOC content in different soil layers of different forest types ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

表 3. 不同森林类型土壤不同土层 SOC 含量的差异特征($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

样地编号	土层/cm			
	0~20	20~40	40~60	0~60
S1	31.27 ± 18.02 ^{ac}	19.38 ± 11.34 ^a	8.24 ± 1.39 ^b	21.04 ± 15.22 ^a
S2	29.81 ± 7.55 ^a	16.41 ± 7.18 ^a	6.95 ± 4.45 ^a	18.83 ± 9.71 ^a
S3	34.62 ± 19.23 ^{ab}	21.53 ± 12.57 ^{bc}	9.87 ± 2.24 ^a	23.56 ± 8.51 ^{ab}
S4	21.90 ± 14.81 ^a	10.76 ± 5.28 ^{ac}	3.14 ± 0.81 ^{ac}	12.48 ± 10.11 ^{ac}
S5	25.46 ± 10.79 ^a	14.29 ± 10.33 ^a	5.25 ± 3.92 ^a	16.04 ± 4.87 ^a
S6	23.78 ± 15.14 ^a	12.33 ± 2.91 ^a	4.98 ± 0.72 ^a	14.87 ± 7.25 ^a
S7	17.04 ± 9.80 ^b	7.18 ± 3.01 ^{ab}	2.31 ± 1.50 ^{ab}	9.66 ± 3.46 ^b

注: 同列数字后不同小写字母表示 $p < 0.05$ 水平差异显著。以下同。

Table 4. Differential characteristics of ASOC content in different soil layers of different forest types ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
表 4. 不同森林类型土壤不同土层 ASOC 含量的差异特征($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

样地编号	土层/cm			
	0~20	20~40	40~60	0~60
S1	2.04 ± 0.61^a	1.68 ± 0.45^{ac}	1.18 ± 0.07^{ac}	1.54 ± 0.16^a
S2	2.12 ± 1.03^{ab}	1.73 ± 0.79^a	1.09 ± 0.04^a	1.61 ± 0.83^a
S3	2.39 ± 0.85^{bc}	1.94 ± 0.08^b	1.35 ± 0.03^c	1.88 ± 0.06^{ab}
S4	1.42 ± 0.34^{ac}	1.01 ± 0.53^a	0.62 ± 0.14^a	1.15 ± 0.34^a
S5	1.80 ± 0.27^a	1.24 ± 0.14^a	0.71 ± 0.01^a	1.32 ± 0.29^{bc}
S6	1.63 ± 0.92^a	1.19 ± 0.68^a	0.87 ± 0.19^{bc}	1.46 ± 0.13^a
S7	1.21 ± 0.86^b	0.94 ± 0.22^{ac}	0.66 ± 0.12^a	1.07 ± 0.01^{ab}

由表 3、表 4 可知：不同森林类型 SOC 和 ASOC 含量均大于弃荒裸地，两者含量均随着土层的加深而减小，表现出明显的表层富集性特征，这与前人的研究结论一致[19] [20] [21]。SOC 的表层富集性特征可能源于表层凋落物的输入、土壤毛管作用力以及根系吸水力的驱使。但是，表层 SOC 的稳定性极易受集中降水和人类活动的扰动，容易引起表层土水土流失，从而导致 SOC 储量减少。尽管 SOC 和 ASOC 含量在土壤剖面上(土层加深)均表现为下降，但是 SOC 含量下降的幅度明显大于 ASOC。造成的原因是 ASOC 含量所占比例较小，SOC 含量主要取决于土体内水分对 SOC 的运移状况，不同的水热条件对土壤的下渗作用主要影响了 SOC 的淋溶和累积。森林植被的凋落物主要影响了表层土壤的总 SOC 含量，使表层土壤的总 SOC 含量明显提高，虽然 ASOC 含量也有所提高，但主要增加了总 SOC 中的非活性 SOC 的含量，非活性 SOC 在表层有更多的残留，而 ASOC 更趋于向下层土壤迁移。邵月红等[2] (2005)对 SOC 的分解特征的研究结果也支持这一现象。大量分解非常缓慢的非活性 SOC 在表层富集，使得表层土壤固定碳作用得到很大地发挥，减缓了 CO_2 由土壤向大气的释放，对维持森林土壤的碳汇功能具有重要意义。

4.2. 不同森林类型 SOCD 比较分析

SOCD 是评价土壤碳分布的重要指标之一，根据土壤容重和 SOC 含量计算 SOCD (公式(1))可以得出不同森林类型土壤不同土层 SOCD 的比较见表 5。由表 5 可知，不同森林类型土壤不同土层 SOCD 的对比表明，SOCD 均随土层深度呈递减趋势。整个土层(0~60 cm)不同森林类型 SOCD 比较，弃荒裸地(S7)除外，针叶林(S1、S2 和 S3) SOCD 低于其他森林类型。这是由于针叶林的针状凋落物表层的角质层物质腐烂和进入土壤较慢，从而影响了林下土壤微生物活性，造成针叶林 SOCD 较低。另外，不同的森林类型可能具有不同的林下微气候环境和根际微环境，林下微气候环境和根际微环境影响着土壤微生物活动，同时也具有不同的根分泌物的输入，影响着土壤本身呼吸作用的碳输出。已有研究表明[1] [15]，森林凋落物的分解输入和土壤本身呼吸作用的输出的大小和二者的对比关系很大程度上决定了土壤有机碳库的大小和赋存状态，进而造成不同森林类型间 SOCD 的一定差异。

Table 5. Comparison of SOCD in different soil layers of different forest types ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
表 5. 不同森林类型土壤不同土层 SOCD 的比较($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)

样地编号	土层/cm			
	0~20	20~40	40~60	0~60
S1	3.06 ± 1.07^a	2.51 ± 4.02^a	1.94 ± 0.07^a	7.17 ± 2.70^{ab}
S2	2.81 ± 3.24^{ac}	2.25 ± 0.72^a	1.73 ± 1.19^a	6.56 ± 3.21^a

续表

S3	3.35 ± 0.76^a	2.79 ± 1.33^{ab}	2.18 ± 0.66^{ac}	8.04 ± 5.41^a
S4	4.87 ± 2.27^{ab}	4.24 ± 1.48^a	3.46 ± 2.35^a	8.31 ± 1.85^{ac}
S5	5.13 ± 1.98^a	4.41 ± 2.65^a	3.63 ± 1.08^a	9.28 ± 6.27^a
S6	5.52 ± 4.26^a	4.69 ± 0.76^{ab}	3.77 ± 0.89^{ab}	9.96 ± 4.52^a
S7	2.19 ± 1.54^b	1.75 ± 1.26^{ac}	1.23 ± 1.17^c	5.53 ± 2.45^{bc}

4.3. 不同森林类型碳库质量的变化分析

ASOC/TOC(%)能够说明森林 SOC 活性的强弱,亦可表明森林土壤碳库的稳定性状,其数值越大说明土体 SOC 越容易被土壤微生物吸收分解,其土壤碳库的稳定性越差,反之越强[8]。根据 SOC 和 ASOC 含量以及计算公式(2)、(3)、(4)、(5)可以得到不同森林类型碳库质量变化特征各数值(表 6)。由表 6 比较可知:赤松林(S1)ASOC/TOC(%)最小(7.32),弃荒裸地(S7)最大(11.08)。由于赤松林长势较差,其地上部分受人为干扰较严重,导致其林下土壤微生物活性较低,其土壤碳库较稳定;而弃荒裸地 SOC 的分解转化速率较快,其土壤碳活性最大,其稳定性较差。另外,6种森林类型 ASOC/TOC(%)均小于对照的弃荒裸地,说明不同森林类型能够提高林下土壤碳库的稳定性。CPMI(%)作为量化森林土壤碳库动态的重要指标,可以说明森林土壤所处的管理状态,其数值越大说明森林土壤处于良性的管理状态,其固碳潜力和碳库质量增强,反之减弱[8]。由表 6 比较得出:针叶林(S1、S2 和 S3)CPMI(%)大于其他森林类型;以上 6 种森林类型均高于对照的弃荒裸地。这表明针叶林的固碳潜力较强,其土壤碳库质量保持较好状态;不同森林类型有较高的固碳潜力,对该 CPMI(%)的提高有不同程度的促进作用。总之,不同森林类型 SOC 的积累量大于分解量,其土壤碳库质量整体呈增加趋势,森林植被类型对维持陆地碳库稳定有重要作用。

Table 6. Variation characteristics of carbon pool quality in different forest types
表 6. 不同森林类型碳库质量的变化特征

样地编号	SOC /g·kg ⁻¹	ASOC /g·kg ⁻¹	ASOC/TOC /%	CPI	A	AI	CPMI /%
S1	21.04	1.54	7.32	2.18	0.0790	0.6340	138.21
S2	18.83	1.61	8.55	1.95	0.0935	0.7504	146.33
S3	23.56	1.88	7.98	2.44	0.0867	0.6958	169.78
S4	12.48	1.15	9.21	1.29	0.1015	0.8146	105.08
S5	16.04	1.32	8.23	1.66	0.0897	0.7199	119.50
S6	14.87	1.46	9.82	1.54	0.1089	0.8740	134.60
S7	9.66	1.07	11.08	1.00	0.1246	1.0000	100.00

注: 采样土层厚度为 0~60 cm。

5. 结论

(1) 苏北低山丘陵区不同森林类型 SOC 具有明显的表层富集性特征,具体表现为 SOC、ASOC 含量和 SOCD 均随土层深度呈递减趋势,并且 SOC 含量下降的幅度明显大于 ASOC。在测定 SOC 和 ASOC 过程中,由于取样环境以及测定方法的不同,会对表层富集这一实验结果造成差异。

(2) 弃荒裸地除外,针叶林 SOC、ASOC 含量高于其他森林类型,而针叶林 SOCD 低于其他森林类

型。森林类型的不同决定了凋落物回归量以及 SOC 的输入, 因此加强地表凋落物的科学管理, 对于保持和提高该地区森林土壤碳库的赋存能力具有重要意义。

(3) 6 种森林类型 ASOC/TOC(%)均小于对照的弃荒裸地, 而 6 种森林类型 CPMI(%)均高于对照的弃荒裸地, 针叶林 CPMI(%)大于其他森林类型。针叶林的固碳潜力较强, 不同森林类型对于维护森林土壤碳库质量的稳定具有重要作用。

基金项目

江苏师范大学创新训练项目(XSJCX13015); 江苏省大学生实践创新训练项目(202210320139Y)。

参考文献

- [1] 周纯亮. 中亚热带四种森林土壤有机碳库特征初步研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [2] 邵月红, 潘剑君, 孙波. 不同森林植被下土壤有机碳的分解特征及碳库研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 24-28.
- [3] 侯赛赛, 白懿杭, 王灿, 等. 土壤有机碳及其活性组分研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(13): 24-33.
- [4] 蔡太义, 黄耀威, 黄会娟, 等. 不同年限免耕秸秆覆盖对土壤活性有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1962-1968.
- [5] 郭亮娜, 李江荣, 张波, 等. 森林土壤有机碳的影响因子及其研究进展[J]. 湖南生态科学学报, 2023, 10(3): 85-91.
- [6] 滕秋梅, 沈育伊, 徐广平, 等. 桂北喀斯特山区不同植被类型土壤碳库管理指数的变化特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(2): 422-433.
- [7] 文月荣. 不同植被恢复模式下煤矿排土场土壤碳库管理指数与土壤酶活性研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2016.
- [8] 于法展, 张忠启, 陈龙乾, 等. 庐山不同森林植被类型土壤碳库管理指数评价[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(3): 470-475.
- [9] 张穗粒, 盛茂银, 王霖娇, 等. 西南喀斯特长期植被修复对土壤有机碳组分的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8476-8492.
- [10] 张宇婧. 火干扰下大兴安岭森林土壤有机碳含量估算——以呼中区为例[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 江西师范大学, 2019.
- [11] 覃祚玉, 罗星乐, 杨家强, 等. 桂西北不同林龄秃杉人工林土壤碳氮储量[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(10): 80-85.
- [12] 张富荣. 子午岭植被恢复中凋落物分解对土壤有机碳的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [13] 郭璐璐, 李安迪, 商宏莉, 等. 川西贡嘎山不同森林生态系统土壤有机碳垂直分布与组成特征[J]. 中国农业气象, 2018, 39(10): 636-643.
- [14] 弓文艳, 陈丽华, 郑学良. 基于不同林分类型下土壤碳氮储量垂直分布[J]. 水土保持学报, 2019, 33(1): 152-157, 164.
- [15] 刘玉林. 植被恢复对土壤有机碳固存及其周转速度的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020.
- [16] 阎传海. 安徽省萧县皇藏峪自然保护区评价研究[J]. 农村生态环境, 1997, 13(4): 13-16.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006.
- [19] 徐明岗, 于荣, 王伯仁. 长期不同施肥下土壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.
- [20] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 889-893.
- [21] 王纪杰. 桉树人工林土壤质量变化特征[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2011.