

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.019

朱浩宇, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山 5 种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征. 土壤, 2021, 53(2): 354–360.

缙云山 5 种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征^①

朱浩宇, 王子芳*, 陆畅, 陈仕奇, 王富华, 吕盛, 高明

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘要: 为揭示重庆市缙云山不同植被下土壤活性有机碳及碳库分配特征, 以该地区 5 种植被类型: 阔叶林、针叶林、混交林、竹林和荒草地为研究对象, 分析不同植被类型下各土层土壤有机碳(SOC)、微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(ROC)含量及其土壤碳库的变化特征。结果表明: SOC 和各活性有机碳组分含量及分配比例受植被类型和土层深度的明显影响。SOC 的平均含量在 0~100 cm 土层表现为竹林(16.74 g/kg)>阔叶林(12.62 g/kg)>草地(11.14 g/kg)>混交林(8.16 g/kg)>针叶林(5.98 g/kg), 并随土层深度的增加而减小。竹林和阔叶林的土壤 MBC 和 ROC 含量均明显高于混交林和针叶林, 且在各植被剖面上均表现出垂直递减的规律, 表聚效应明显。除草地外, 4 种植被的土壤碳库管理指数随土层深度的增加而减小, 均表现为表层(0~20 cm)最高。不同植被类型间, 竹林的 DOC 分配比例在各土壤层次均最小, 整个土壤剖面均值仅为 0.1%。由相关性分析可知, MBC、ROC、SOC 含量和土壤 SOC 储量有着极其显著的相关性。因此, 土壤 MBC 和 ROC 可以作为衡量缙云山森林不同植被类型下土壤有机碳库变化的敏感性指标。

关键词: 缙云山; 植被类型; 活性有机碳; 土壤碳库

中图分类号: S151.9 **文献标志码:** A

Variation Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pools Under Five Vegetation Types in Jinyun Mountain

ZHU Haoyu, WANG Zifang*, LU Chang, CHEN Shiqi, WANG Fuhua, LÜ Sheng, GAO Ming
(College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to reveal the characteristics of soil active organic carbon and carbon pool allocation under different vegetations in Jinyun Mountain in Chongqing, broad-leaved forest, coniferous forest, mixed forest, bamboo forest and wild grassland were taken as research objects. The contents of soil organic carbon (SOC), microbial biomass carbon (MBC), dissolved organic carbon (DOC) and easily oxidized organic carbon (ROC) in each soil layer within 0–100 cm were measured, and the changing characteristics of soil organic carbon storages (SOCS) were also studied and compared. The results showed that the content and distribution ratio of SOC and active organic carbon components were significantly affected by vegetation type and soil depth. The average content of SOC in 0–100 cm soil layer was in order of bamboo forest (16.74 g/kg) > broad leaved forest (12.62 g/kg) > grassland (11.14 g/kg) > mixed forest (8.16 g/kg) > coniferous forest (5.98 g/kg), and decreased with increasing soil depth under all vegetation types. The contents of MBC and ROC in bamboo and broad-leaved forests were significantly higher than those in mixed and coniferous forests, and both declined with the increasing soil depth under all vegetation types, showing the significant surface aggregation effect. Except for grassland, soil carbon pool management indexes under other 4 vegetation types decreased with increasing soil depth, and were the highest in the surface layers (0–20 cm soil layer). Among different vegetation types, the proportion of DOC in bamboo forest was the smallest in each soil layer, with an average value of 0.1% for the whole soil profile. The correlation analysis showed there were extremely significant correlation between MBC, ROC, SOC and SOCS. Therefore, MBC and ROC can be used as an important indicator to evaluate the dynamic changes of soil carbon pool in the study area.

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800101)资助。

* 通讯作者(zifangw@126.com)

作者简介: 朱浩宇(1993—), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 研究方向为土壤环境与质量。E-mail: 953744027@qq.com

Key words: Jinyun Mountain; Vegetation types; Active organic carbon; Soil carbon pool

土壤活性有机碳是土壤有机碳(SOC)的活性部分,它在土壤中具有周转速率快、稳定性差、有效性较高等特点^[1]。土壤活性有机碳的表征指标包括微生物生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(ROC),虽然活性有机碳占 SOC 总量的比例很小,但对土壤微环境变化的响应更为灵敏,更能反映土壤碳库的变化情况^[2]。土壤碳库的变化主要是由土壤活性有机碳的变化引起的^[3],土壤活性有机碳含量的高低会影响土壤微生物的活性,从而影响土壤的固碳能力,并引起全球气候的变化^[4]。近年来,国内外学者针对土壤活性有机碳开展了大量研究,主要集中于不同植被类型^[4-7],不同土地利用方式^[8-9],施肥措施、生态恢复等^[10-12]行为对土壤活性有机碳的影响。

森林生态系统是陆地生态系统中重要的自然生态系统,在维护区域生态环境,调控全球气候变化中发挥着重要作用^[13]。森林土壤碳库是森林生态系统碳库的主体,约占全球土壤碳库的 70%^[14],其细微的变化都会影响全球碳循环和气候变化。森林土壤碳库的变化与土壤中的活性有机碳组分密不可分,通过研究不同森林土壤活性有机碳的分布及变化特征,对了解森林土壤固碳能力、进行森林管理工作具有重要意义。

缙云山国家森林公园保护区位于我国西南亚热带地区,是当地重要的森林生态系统。李睿等^[15]研究了不同土地利用方式对缙云山土壤团聚体中活性有机碳分布的影响,发现在 0~60 cm 土层中,各粒级团聚体中活性有机碳在林地和撂荒地中的含量均高于果园和坡耕地。祁心等^[16]研究发现,在缙云山不同土地利用方式中,撂荒地中的 DOC 含量最高。前人在缙云山地区开展的土壤活性有机碳研究主要集中

于土地利用方式上,而对缙云山不同植被类型下土壤活性有机碳的研究还鲜有报道。因此,本文以缙云山 5 种植被类型为研究对象,分析了不同植被类型下 0~100 cm 土层 SOC 及活性有机碳的分布特征,以期揭示不同植被类型下土壤活性有机碳的变化规律,并为亚热带地区及缙云山自然保护区植被恢复与碳库保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

缙云山保护区横跨重庆市沙坪坝、璧山、北碚 3 个行政区(106°15'~106°26' E, 29°43'~29°53' N),海拔高度 200~953 m,属于典型亚热带季风气候,年平均气温约 13.5 °C,年降雨量约 1 145 mm,年蒸发量约 778.3 mm。土壤类型为山地酸性黄壤^[17]。区域内主要植被类型包括亚热带常绿阔叶林、针-阔混交林、灌木林、竹林及亚热带灌草丛,属典型的亚热带森林生态系统,详细植被参见文献^[18]。

1.2 样品采集与测定

选取缙云山常绿阔叶林(简称,阔叶林)、针叶林、针-阔混交林(简称,混交林)、竹林和荒草地 5 种植被类型,每种植被类型布置 3 个采样区,在每个采样区随机设置 3 个采样点,利用剖面取样法在各个样点的 0~20、20~40、40~60 及 60~100 cm 土层深度分别进行取样,按照层次将各采样区的 3 个采样点土样进行混合,用 4 分法取足够土样,土壤采样方法与吕盛^[19]采用的一致。去除土样中的杂质,风干研磨后过 0.25 mm 筛,测定土壤 MBC、DOC 和 ROC。采样点信息见表 1,研究区所在位置及采样点的空间位置见图 1。

表 1 采样点信息
Table 1 Information of sampling sites

植被类型	海拔(m)	坡向	郁闭度	起源	地理坐标
荒草地	380~388	西北	0.09	天然	106°23'15.71"~106°23'15.92" E, 29°49'19.55"~29°49'20.46" N
竹林	579~589	西北	0.84	天然	106°23'15.01"~106°23'16.11" E, 29°49'44.03"~N29°49'45.01" N
针叶林	425~459	西北	0.81	天然	106°23'22.05"~106°23'28.16" E, 29°49'38.07"~N29°49'38.42" N
阔叶林	835~880	西北	0.89	天然	106°23'50.09"~106°23'51.06" E, 29°49'52.42"~N29°49'54.31" N
混交林	648~690	西北	0.91	天然	106°23'53.04"~106°23'54.44" E, 29°50'31.82"~N29°50'33.06" N

SOC 采用 K_2CrO_7 外加热法测定^[20]; ROC 采用高锰酸钾氧化比色法测定; MBC 采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 浸提法测定;采用振荡浸提,上清液过 0.45 μm 滤膜后,使用 Multi N/C 2100 分析仪(耶拿,德国)测定 DOC

含量^[21]。

1.3 数据处理与分析

本研究以撂荒 15 a 的荒草地作为参照土壤,不同植被土壤碳库管理指数计算如下^[19]:

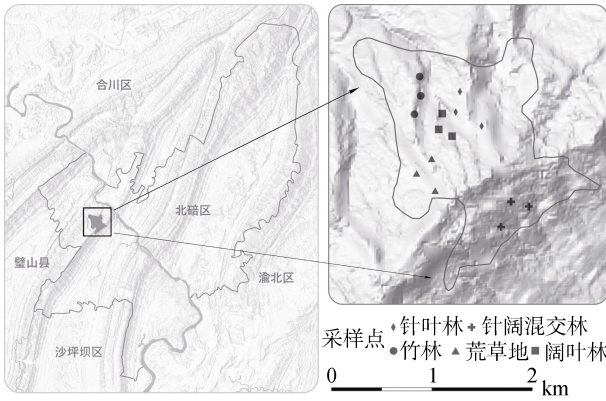


图 1 研究区所在位置及采样点的空间位置图
Fig. 1 Locations of study area and sampling sites

- NL=SOC-ROC (1)#
- L=ROC/NL (2)#
- LI=L/L₀ (3)#
- CPI=SOC/SOC₀ (4)#
- CMI(%)=CPI×LI×100 (5)

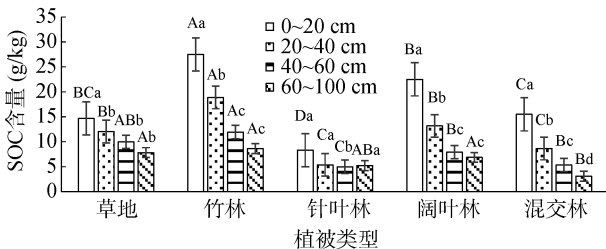
式中：SOC 为土壤有机碳含量；ROC 为易氧化有机碳含量；NL 为非活性有机碳含量；L 为碳库活性；LI 为碳库活度指数；L₀ 为参照土壤的碳库活度；SOC₀ 为参照土壤的有机碳含量；CPI 为碳库指数；CMI 为碳库管理指数。

文中采用 SPSS 23.0 软件进行数据的统计分析，采用 Excle 软件进行作图。处理间差异显著性检验采用 LSD 法，显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤有机碳的分布特征

由图 2 可知，SOC 含量在不同植被类型下大部分存在表层富集现象，并随土层深度的增加而垂直下降。除针叶林外，其他 4 种植被类型在 0~40 cm 土层 SOC 含量均显著高于其他各土层 ($P<0.05$)。除 60~100 cm 土层外，5 种植被类型的 SOC 含量在其他各土层差异显著，其中竹林土壤 SOC 含量最高，针叶



(不同大写字母表示同一土层深度不同植被类型间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一植被类型不同土层深度间差异显著 ($P<0.05$), 下同)

图 2 不同植被类型下 SOC 的分布特征

Fig. 2 Profile distribution of SOC contents under different vegetation types

林最低；在整个土壤剖面上，竹林和阔叶林的 SOC 含量相对较高，为 16.74 g/kg 和 12.62 g/kg，分别是针叶林的 2.8 倍和 2.11 倍。

2.2 不同植被类型下土壤活性有机碳的分布特征

2.2.1 不同植被类型下土壤 MBC 的分布特征 由图 3 可知，各植被类型下土壤 MBC 含量均呈现垂直向下逐渐减少的趋势，在 0~20 cm 土层达到最高值。在 0~40 cm 土层中，不同植被类型间的 MBC 含量差异显著 ($P<0.05$)，阔叶林的含量最高，针叶林的含量最低；MBC 在 0~100 cm 土层的平均含量大小趋势为：阔叶林(182.19 mg/kg)>竹林(166.87 mg/kg)>混交林(129.23 mg/kg)>草地(102.25 mg/kg)>针叶林(54.95 mg/kg)；与 SOC 含量变化不同的是，阔叶林(182.19 mg/kg)的 MBC 含量要高于竹林(166.87 mg/kg)。

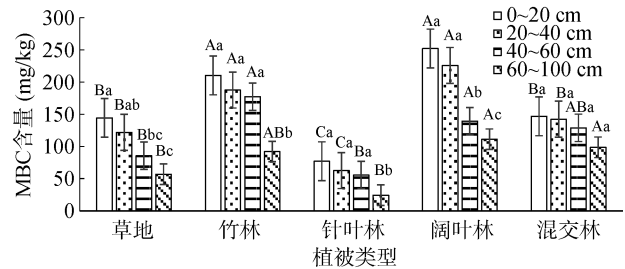


图 3 不同植被类型下土壤 MBC 分布特征
Fig. 3 Profile distribution of MBC contents under different vegetation types

2.2.2 不同植被类型下土壤 DOC 的分布特征 由图 4 可知，在 0~20 cm 土层，各植被类型下的 DOC 含量均显著高于其他各土层 ($P<0.05$)，表现出明显的表聚效应。相较 0~20 cm 土层，5 种植被类型在其他土层的 DOC 含量随土层深度增加的降幅变化范围分别为：16.08%~74.78%、72.80%~83.06%、65.76%~87.17%、65.18%~83.21%、73.72%~90.30%；在各植被类型间，DOC 含量并没有表现出显著的差异性 ($P<0.05$)。DOC 在 0~20 cm 土层含量大小依次为：草地(141.98 mg/kg)>阔叶林(59.36 mg/kg)>混交林(49.70 mg/kg)>竹林(46.63 mg/kg)>针叶林(40.59 mg/kg)。DOC 含量的剖面分布中，草地各土层显著高于其他植被 ($P<0.05$)。

2.2.3 不同植被类型下土壤 ROC 的分布特征 不同植被类型下土壤 ROC 分布如图 5 所示，在 0~20 cm 土层 ROC 平均含量为 3.80 mg/kg，与其他土层存在显著差异，表明 ROC 存在表层聚集现象；其中，竹林的 ROC 含量最高，为 5.09 mg/kg，显著高于其他植被。ROC 在整个土壤剖面的平均含量从大到小依次为：竹林(2.65 mg/kg)>阔叶林(2.31 mg/kg)>草地

(1.99 mg/kg) > 混交林(1.93 mg/kg) > 针叶林(1.72 mg/kg)。

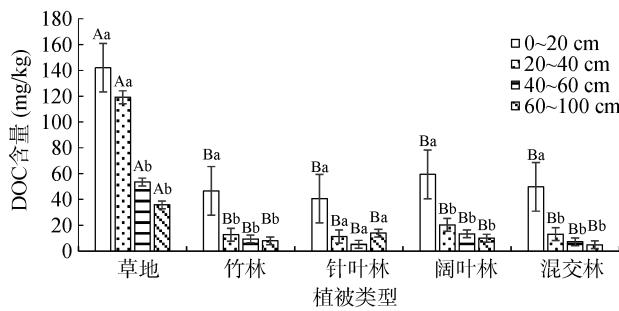


图 4 不同植被下土壤 DOC 分布特征

Fig. 4 Profile distribution of DOC contents under different vegetation types

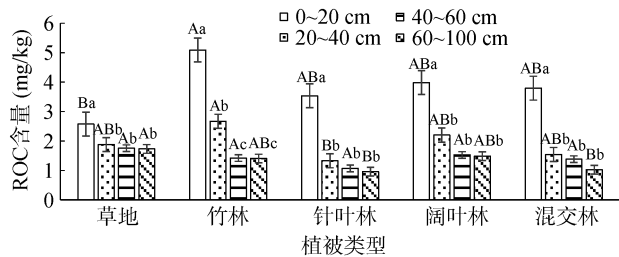


图 5 不同植被类型下土壤 ROC 分布特征

Fig. 5 Profile distribution of ROC contents under different vegetation types

2.2.4 不同植被类型下土壤活性有机碳的分布特征 土壤活性有机碳的分配比例反映土壤碳库的活性特征。从表 2 可以看出，土壤的 MBC/SOC 比值变化范围为 0.46% ~ 2.66%。在整个土壤剖面上，0 ~ 20 cm 土层的 MBC/SOC 比值要低于其他土层。在各植被类型间，MBC/SOC 平均值变化顺序为混交林(2.03%) > 阔叶林(1.38%) > 竹林(1.05%) > 针叶林(0.96%) > 草地(0.86%)。在整个土壤剖面中，DOC/SOC 比值变化范围为 0.08% ~ 0.97%，且 0 ~ 20 cm 土层比例最大。各植被间，DOC/SOC 比值的变化顺序为：草地(0.72%) > 针叶林(0.26%) > 混交林(0.23%) > 阔叶林(0.18%) > 竹林(0.10%)。土壤 ROC/SOC 比值要明显高于 MBC/SOC 比值和 DOC/SOC 比值，其变化范围为 11.92% ~ 42.46%。在 0 ~ 20 cm 土层，各植被的 ROC/SOC 比值明显高于其他土层，且针叶林最高，为 42.46%，分别是草地、竹林、阔叶林、混交林的 2.42 倍、2.29 倍、2.40 倍、1.74 倍。在各植被类型间，ROC/SOC 平均值的变化顺序为：针叶林(26.73%) > 混交林(24.52%) > 阔叶林(18.85%) > 草地(15.71%) > 竹林(15.23%)。

表 2 土壤活性有机碳占 SOC 的比例(%)

Table 2 Proportions of soil active organic carbon to SOC

指标	土层(cm)	草地	竹林	针叶林	阔叶林	混交林
MBC/SOC	0 ~ 20	0.99 ± 0.15 Aa	0.77 ± 0.06 Ab	0.95 ± 0.17 Aab	0.72 ± 0.42 Aa	0.62 ± 0.38 Ab
	20 ~ 40	1.05 ± 0.26 ABab	1.07 ± 0.18 Bb	1.20 ± 0.01 Aba	1.92 ± 1.01 Aa	2.19 ± 0.19 ABab
	40 ~ 60	0.86 ± 0.34 Aab	1.50 ± 0.14 Aa	0.46 ± 0.3 Ab	1.77 ± 0.82 Aa	2.66 ± 0.11 Aab
	60 ~ 100	0.54 ± 0.21 Ba	0.86 ± 0.21 Bab	1.21 ± 0.54 Ba	1.12 ± 0.08 Ba	2.66 ± 0.59 Aa
DOC/SOC	0 ~ 20	0.97 ± 0.27 Aa	0.15 ± 0.05 Ba	0.48 ± 0.03 Ba	0.27 ± 0.15 Ba	0.35 ± 0.2 Ba
	20 ~ 40	0.92 ± 0.2 Aa	0.08 ± 0.04 Bb	0.22 ± 0.06 ABb	0.15 ± 0.01 Ba	0.27 ± 0.03 ABa
	40 ~ 60	0.52 ± 0.01 Aa	0.08 ± 0.06 Bb	0.10 ± 0.03 Bb	0.16 ± 0.04 Ba	0.15 ± 0.15 Ba
	60 ~ 100	0.46 ± 0.14 Aa	0.09 ± 0.08 Bb	0.24 ± 0.09 Bb	0.15 ± 0.12 Ba	0.15 ± 0.08 Ba
ROC/SOC	0 ~ 20	17.52 ± 4.71 Ba	18.51 ± 3.07 Ba	42.46 ± 1.46 Aa	17.70 ± 5.47 Ba	24.45 ± 7.6 Ba
	20 ~ 40	15.62 ± 1.39 Aa	14.14 ± 9.24 Aa	24.72 ± 10.3 Aa	16.72 ± 0.92 Aa	17.82 ± 6.37 Aa
	40 ~ 60	17.59 ± 3.95 Aa	11.92 ± 0.67 Aa	21.41 ± 7.07 Aa	19.32 ± 0.22 Aa	25.86 ± 12.36 Aa
	60 ~ 100	12.11 ± 3.13 Aa	16.34 ± 4.04 Aa	18.34 ± 4.65 Aa	21.65 ± 5.55 Aa	29.95 ± 13.58 Aa

注：表中同列不同小写字母表示同一植被不同土层深度间差异显著(P<0.05)，同行不同大写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著(P<0.05)；下同。

2.3 不同植被类型下土壤碳库的变化特征

2.3.1 土壤碳库管理指数变化 通过计算缙云山 5 种植被类型土壤碳库管理指数(表 3)发现，除草地外，其他 4 种植被土壤碳库管理指数均随土壤深度的增加而减少，且 0 ~ 20 cm 土层碳库管理指数明显高于其他土层。在同一土层中，不同植被类型间土壤碳库管理指数也存在显著性差异(P<0.05)。除草地外，

4 种植被类型在 0 ~ 20 cm 土层的土壤碳库管理指数均大于 100，其中竹林土壤碳库指数最高(200.18)；在 20 ~ 40 cm 土层中，竹林土壤碳库指数最高(139.58)，是土壤碳库指数最低的针叶林的 1.76 倍；在 40 ~ 100 cm 土层，4 种植被类型土壤碳库管理指数均小于草地。总体上，5 种植被类型土壤碳库指数和 SOC 含量分布特征相同，且表层土壤最高。

表 3 土壤碳库管理指数变化
Table 3 Changes in soil carbon bank management index

土层(cm)	草地	竹林	针叶林	阔叶林	混交林
0~20	100 Ba	200.18 ± 23.67 Aa	196.91 ± 30.12 Aa	155.22 ± 20.69 Aa	160.94 ± 13.26 Aa
20~40	100 BCa	139.58 ± 20.58 Aa	79.24 ± 13.3 Cb	118.72 ± 20.0 ABa,	84.35 ± 4.51 Cb
40~60	100 Aa	75.85 ± 8.74 Bb	63.87 ± 3.62 Bb	88.95 ± 10.49 Ab	87.62 ± 6.57 Ab
60~100	100 Aa	75.72 ± 5.23 Bb	52.78 ± 4.51 Cb	85.36 ± 11.57 ABb,	68.75 ± 3.54 BCb

2.3.2 SOC 储量分布 由图 6 所示可知, 在 0~100 cm 土层 SOC 储量主要富集在土壤表层。在 0~20 cm 土层, 竹林 SOC 储量表现为最高(57 t/hm²), 显著高于针叶林和混交林; 在 20~40 cm 土层, 竹林 SOC 储量同样为最高 (43.52 t/hm²), 针叶林为最低(17.22 t/hm²); 在 40~60 cm 土层, 竹林 SOC 储量仍最高, 为 34.8 t/hm²; 在 60~100 cm 土层, 草地 SOC 储量最高(50.71 t/hm²), 混交林为最低(19.09 t/hm²)。总体而言, 在整个土壤剖面中(0~100 cm 土层), 竹林 SOC 储量最高, 而针叶林最低。在 0~60 cm 土层 SOC 储量表现为随着土壤深度增加而减少, 但在 60~100 cm 土层中表现为增加趋势。

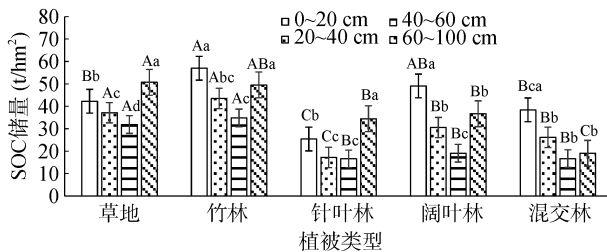


图 6 不同植被类型下 SOC 储量分布特征
Fig. 6 SOC storages under different vegetation types

2.4 不同植被类型下土壤活性有机碳与有机碳的相关性

由表 4 SOC 及其活性组分之间的相关性可知, MBC 含量与 SOC 含量之间呈极显著相关, 与 ROC 含量也表现为极显著相关($P < 0.01$); 而 DOC、SOC 含量和 SOC 储量之间未表现出显著的相关性; ROC、SOC 含量和 SOC 储量之间有着极其显著的相关关系($P < 0.01$)。

表 4 SOC 及其组分间的相关性

	MBC	DOC	ROC	SOC	SOC 储量
MBC	1	0.18	0.599**	0.787**	0.374
DOC		1	0.398	0.412	0.384
ROC			1	0.866**	0.569**
SOC				1	0.718**
SOC 储量					1

注: ** 表示在 $P < 0.01$ 水平(双尾)相关性显著。

3 讨论

3.1 不同植被类型下土壤有机碳和活性有机碳分布特征

SOC 含量受地表植被类型的直接影响, 不同植被类型下调落物的数量、组成及其分解行为不同, 导致 SOC 含量的不同^[20]。本研究中, 缙云山 5 种植被类型下, 竹林和阔叶林的 SOC 含量较高, 且有研究显示针叶林 SOC 含量一般要低于阔叶林^[22], 与本研究结果一致。针叶林 SOC 含量相对较低是因为针叶林的植物物种较为单一, 地表凋落物少, 生物归还量有限, 而阔叶林和竹林地表凋落物丰富, 有更加充足的外源有机物料输入, 因此 SOC 含量更高^[23]。5 种植被类型下 SOC 含量总体随着土层深度的增加而垂直递减, 这是由于下层土壤更加密实, 阻挡 SOC 向下迁移, 并且植物根系在深层土壤中的密度变小, 微生物代谢活动减弱, 所以表层 SOC 含量更高^[24]。

MBC 是整个土壤生态系统中养分和能量循环的关键因子和驱动力。本研究中, MBC 与 SOC 含量存在极显著相关($P < 0.01$), 与前人的研究结果吻合^[25]。在 0~100 cm 土层, MBC 含量随着土层加深而减少, 因为随着土层加深, 土壤更为密实, 水热条件变差不利于土壤微生物的生存^[24]。在 5 种植被中, 针叶林 MBC 含量表现最低, 这是由于本研究的针叶林以杉木林为主, 陈龙池和汪思龙^[26]通过对杉木根系分泌物化感作用的研究发现, 杉木连栽会提高根系分泌物的浓度, 产生的化感作用会抑制土壤中微生物的活性, 阻碍微生物对凋落物的降解利用; 而阔叶林的地表凋落物中含有亲水性和易变的低分子化合物, 更容易被土壤微生物分解利用。与 SOC 不同的是, 在 0~40 cm 土层竹林 MBC 含量低于阔叶林, 这主要因为阔叶林较竹林郁闭度高, 且林下植被层和凋落物层丰富, 可以提供更适宜微生物代谢活动的水热条件^[27]。

本研究中, 5 种植被类型下的 DOC 含量表现出明显的表层富集现象, 与肖好燕等^[28]对亚热带 4 种典型林分的研究结果相似, 这是由于矿质土壤对

DOC 的吸附作用和深层土壤自身的紧密性,使得 DOC 富集在表层^[29]。植被类型会影响 DOC 含量,在本研究中整个土壤剖面上,草地 DOC 含量最高。祁心等^[16]研究发现,草地 DOC 含量显著高于其他 3 种(阔叶林、果园和坡耕地)土地利用类型,这和本研究结果相同,主要由于研究区草本植物多为一年生植物,生长代谢周期短,对土壤的有机质注入周期短。

ROC 含量受植被凋落物、根系分泌物及其分布情况的影响^[30]。本研究中,除草地外,0~20 cm 土层 ROC 含量要显著高于其他土层,与张仕吉等^[31]研究结果一致,这主要因为随着土层深度的增加,导致外源碳输入的减少和微生物代谢活动的减弱^[24]。由相关性分析可知,ROC 含量分别与 SOC 含量及储量存在极其显著相关($P<0.01$),说明 ROC 能够敏感地反映土壤有机碳库的动态变化。

3.2 不同植被类型下土壤活性有机碳分配比例的差异

土壤活性有机碳分配比例对揭示土壤碳库储量变化具有重要的作用^[2]。不同的土层深度、植被类型不仅会影响土壤 MBC、DOC、ROC 和 SOC 含量,也会改变土壤活性有机碳分配比例。本研究中,MBC/SOC 比值(微生物熵值)下层土壤略高于上层的特征,与王风芹等^[32]研究结果吻合,说明下层土壤微生物固定的碳更多,可提供更多的潜在营养源。本研究表明,整个土层中混交林的 MBC/SOC 比值表现最高,主要由于混交林存在复杂的植被构成,为微生物生存提供较好的水热条件^[24]。

DOC/SOC 比值是表征土壤碳活性的较好指标。本研究结果表明,5 种植被类型的土壤 DOC/SOC 比值整体呈现随着土壤厚度增加而降低的趋势,这可能是因为本试验点选取的土壤类型属于矿质土,其较多的矿物质成分对 DOC 具有一定的吸附性能,阻碍了 DOC 向下层土壤迁移^[19,29]。通过分析 5 种植被下 DOC/SOC 比值可知,草地表现为最高,这主要因为与草地相比,其他 4 种森林植被的土壤剖面 DOC 来源较少,主要包含少量富啡酸、分子量偏小的有机酸和碳水化合物^[32]。

土壤 ROC 含量与活性有机碳含量有着极显著相关性($P<0.01$),ROC 占 SOC 比例越高,养分循环速率越快,越有利活性 SOC 的积累^[33]。本研究中,在 0~100 cm 土层,ROC/SOC 比值大小表现为:针叶林>混交林>阔叶林>草地>竹林,说明针叶林 SOC 活性较高,而竹林 SOC 稳定性较好,竹林和阔叶森林植被更有利于 SOC 的固定。

3.3 不同植被类型下土壤碳库的变化特征

碳库管理指数可以衡量外界因素变化对 SOC 质量的影响程度^[10]。李玮等^[34]通过对低山丘陵区退耕茶园的研究,发现不同土层深度和不同种植年限的植被均影响着土壤碳库管理指数,其随着土层深度的增加而降低。本研究中,除草地外,其他 4 种植被的土壤碳库管理指数均呈现随着土层的加深而降低的趋势,与李玮等^[34]研究结果一致。有研究发现,碳库管理指数能反映土壤活性有机碳的周转速率,其数值越大,表明土壤肥力越高,更能促进植物的生长发育^[35]。本研究中,竹林和阔叶林的碳库管理指数偏高,较其他植被更有利于 SOC 的储存;此外,5 种植被类型下 SOC 储量均表现为随土层加深而减少的趋势,与 SOC 含量分布规律一致。

4 结论

缙云山 5 种植被类型下 0~100 cm 土层的 SOC 平均含量变化范围为 5.98~16.74 g/kg,在剖面上均表现出明显的垂直递减规律。竹林的 SOC 平均含量最高,针叶林最低。竹林和阔叶林的 MBC 和 ROC 含量总体上高于混交林和针叶林,受森林类型的显著影响。DOC 含量存在明显的表聚效应,不受森林类型的显著影响。缙云山 5 种植被类型下,竹林和阔叶林的 ROC、DOC 分配比例相对较低,更有利于 SOC 的积累,在今后的缙云山林区保护工作中应进一步加强对这两种森林类型的保护,稳定土壤碳库。

参考文献:

- [1] Zhao F Z, Kang D, Han X H, et al. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415-422.
- [2] Xu X F, Thornton P E, Post W M. A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2013, 22(6): 737-749.
- [3] Liang B C, MacKenzie A F, Schnitzer M, et al. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, 26(2): 88-94.
- [4] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155-176.
- [5] 李玲,肖和艾,苏以荣,等.土地利用对亚热带红壤区典型景观单元土壤溶解有机碳含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 122-128.

- [6] 肖焯, 黄志刚, 武海涛, 等. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7625–7623.
- [7] 崔东, 肖治国, 赵玉, 等. 不同土地利用类型对伊犁地区土壤活性有机碳库和碳库管理指数的影响[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 61–67.
- [8] 张晓东, 李忠, 张峰. 新疆艾比湖地区不同土地利用类型土壤养分及活性有机碳组分研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 55–62.
- [9] 武琳, 黄尚书, 叶川, 等. 土地利用方式对江西红壤旱地碳库管理指数的影响[J]. 土壤, 2017, 49(6): 1275–1279.
- [10] 蒲玉琳, 叶春, 张世熔, 等. 若尔盖沙化草地不同生态恢复模式土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. 生态学报, 2017, 37(2): 367–377.
- [11] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 657–669.
- [12] 贺美, 王迎春, 王立刚, 等. 深松施肥对黑土活性有机碳组分及酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 446–456.
- [13] 胡雪寒, 刘娟, 姜培坤, 等. 亚热带森林转换对不同粒径土壤有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1485–1493.
- [14] 杨添, 戴伟, 安晓娟, 等. 天然林土壤有机碳及矿化特征研究[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1105–1110.
- [15] 李睿, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3429–3437.
- [16] 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3816–3824.
- [17] 陈仕奇, 吕盛, 高明, 等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 953–960.
- [18] 郭平, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆缙云山典型林分土壤抗冲性的最佳土壤结构指标研究[J]. 土壤, 2014, 46(1): 111–118.
- [19] 吕盛. 缙云山不同林分土壤有机碳剖面分布及矿化特征研究[D]. 西南大学, 2018.
- [20] 刘楠, 韩进斌, 赵建儒, 等. 五台山高山林线典型植被土壤有机碳特征[J]. 土壤, 2019, 51(5): 970–978.
- [21] 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.
- [22] 王富华, 吕盛, 黄容, 等. 缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J]. 环境科学, 2019, 40(3): 1504–1511.
- [23] 朱丽琴, 黄荣珍, 段洪浪, 等. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 249–257.
- [24] 张威, 章高森, 刘光琇, 等. 腾格里沙漠东南缘可培养微生物群落数量与结构特征[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 567–577.
- [25] 范志平, 王琼, 李法云. 辽东山地不同森林类型土壤有机碳季节动态及其驱动因子[J]. 生态学杂志, 2018, 37(11): 45–55.
- [26] 陈龙池, 汪思龙. 杉木根系分泌物化感作用研究[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 393–398.
- [27] 王莹燕, 王子芳, 黄容, 等. 缙云山不同森林植被下土壤微生物群落结构特征研究[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1210–1220.
- [28] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带典型林分对表层和深层土壤可溶性有机碳、氮的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1031–1038.
- [29] Kaiser K, Zech W. Competitive sorption of Dissolved organic matter fractions to soils and related mineral phases[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 64–69.
- [30] 徐明岗, 于荣, 孙小凤, 等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459–465.
- [31] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 中亚热带土地利用方式对土壤易氧化有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 911–919.
- [32] 王凤芹, 田丽青, 宋安东, 等. 华北刺槐林与自然恢复植被土壤微生物量碳、氮含量四季动态[J]. 林业科学, 2015, 51(3): 16–24.
- [33] 朱志建, 姜培昆, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 523–526.
- [34] 李玮, 郑子成, 李廷轩, 等. 退耕植茶对川西低山丘陵区土壤有机碳库的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1642–1651.
- [35] 袁喆, 罗承德, 李贤伟, 等. 间伐强度对川西亚高山人工云杉林土壤易氧化碳及碳库管理指数的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 127–131.