

DOI: 10.5846/stxb201307181913

李平, 范川, 李凤汀, 李贤伟, 张健, 黄明莉. 川中丘陵区柏木低效林改造模式植物多样性对土壤有机碳的影响. 生态学报, 2015, 35(8): 2667-2675.
Li P, Fan C, Li F T, Li X W, Zhang J, Huang M L. Effects of plant diversity on soil organic carbon under different reconstructing patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris* in the hilly region of central Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2667-2675.

川中丘陵区柏木低效林改造模式植物多样性对土壤有机碳的影响

李 平, 李凤汀, 范 川*, 李贤伟, 张 健, 黄明莉

四川农业大学林学院, 长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 雅安 625014

摘要:以川中丘陵区柏木低效林改造 10a 后的 4 种模式: 纯杂交竹模式 (*Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis daii*) (CZ)、柏木 (*Cupressus funebris* Endl.) + 桉木 (*Alnus cremastogyne* Burk.) + 杂交竹模式 (BZQ)、柏木 + 麻栎 (*Quercus acutissima* Carruth) 模式 (BL)、柏木 + 杂交竹模式 (BZ) 为研究对象, 纯柏 (CB) 为对照, 对土壤有机碳含量、碳密度和土壤活性有机碳 (土壤易氧化碳、水溶性碳和微生物量碳) 含量及植物多样性进行了研究。结果表明: (1) 随着土层深度的增加, 土壤有机碳含量、碳密度及其组分均下降, 其中土壤有机碳含量下降幅度最大, 易氧化碳含量下降幅度最小; 0—10 cm 土壤有机碳密度占整个取样剖面的 45.7%—64.4%, 具有明显的表聚性。 (2) 不同模式 0—40 cm 土层土壤有机碳含量、碳密度和土壤易氧化碳、水溶性碳和微生物量碳含量均为 BZQ > BZ > CB > BL > CZ, 差异均达到显著水平 ($P < 0.05$)。几种模式中, BZQ 与 CB 相比, 土壤有机碳含量、碳密度、土壤易氧化碳、水溶性碳和微生物量碳含量增幅分别为 37.8%、33.5%、36.6%、52.5% 和 23.2%, 表明 BZQ 模式在提高土壤有机碳方面作用最明显。 (3) 植物 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数大致表现为 BZQ > BZ > CB > BL > CZ; 相关分析表明, 土壤有机碳、碳密度、易氧化碳、水溶性碳和微生物量碳与灌木层和草本层的植物多样性指数均呈显著正相关, 而与乔木层植物多样性不相关。

关键词: 柏木; 低效林; 改造模式; 土壤有机碳; 植物多样性

Effects of plant diversity on soil organic carbon under different reconstructing patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris* in the hilly region of central Sichuan

LI Ping, LI Fengting, FAN Chuan*, LI Xianwei, ZHANG Jian, HUANG Mingli

College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in Upper Reaches of Yangtze River in Sichuan Province, Ya'an 625014, China

Abstract: The soil organic carbon (SOC) pool is an important component of global carbon stock, It could play a huge impact on global terrestrial carbon cycling, eco-system construction and material recycling due to its slight changes. Plant diversity could influence the temperature, humidity, microorganisms and litter of forest floor, and then affect the reserves of SOC. The hilly region in central Sichuan province is a critical part of ecological barriers in the upper reaches of the Yangtze River, and the low efficiency stands of *Cupressus funebris* grow in these areas are the main forest types. Our objectives were (1) to explore the characteristics of SOC in the low efficiency stands of *Cupressus funebris* which have been reconstructed for 10 years, (2) to quantify the relationships between SOC and plant diversity of the tree layers, the shrub layers and the herb

基金项目: 国家“十二五”科技支撑项目 (2011BAC09B05); 国家林业局中央财政林业科技推广示范 (2010TK55); 四川省科技支撑计划 (2010NZ0049) 共同资助

收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2014-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fanchuan01@163.com

layers. The planting patterns of *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis daii* (CZ), *Cupressus funebris* Endl. + *Bambusa pervariabilis* × *Alnus cremastogyne* Burk. + *Alnus cremastogyne* Burk. (BZQ), *Cupressus funebris* Endl. + *Quercus acutissima* Carruth (BL), *Cupressus funebris* Endl. + *Bambusa pervariabilis* × *Dendrocalamopsis daii* (BZ) were reconstructed in 2002. CZ pattern was reconstructed on the planting spacing of 4 m × 4 m after clear cutting, and the other patterns were reconstructed by interplanting after intermediate cutting. In 2012, 3 sample plots were set in each pattern to study SOC content, SOC density, easily-oxidized carbon (EOC), water-soluble organic carbon (WSOC), soil microbial biomass carbon (SMBC) and plant diversity. The results were found as follows: (1) The contents of SOC and its components were decreased with increasing soil depth, with the maximal drop of SOC and the minimum drop of EOC; SOC density in topsoil (0—10 cm) accounted for 45.7% to 64.4% of the whole sampling profile, exhibiting obvious surface accumulation. (2) SOC content, SOC density, EOC, WSOC and SMBC content in 0—40 cm were in the order of BZQ > BZ > CB > BL > CZ, with significant differences ($P < 0.05$). Compared with CB, the increase rates of SOC content, SOC density, EOC, WSOC and SMBC content were 37.8%, 33.5%, 36.6%, 52.5% and 23.2%, respectively, and BZQ revealed the most obvious effect on SOC. (3) The index of species dominance, species diversity, species evenness and species richness were roughly arranged as BZQ > BZ > CB > BL > CZ. There were significant positive correlation between SOC content, SOC density, EOC, WSOC and SMBC content and the plant diversity of shrub and herbaceous layers, while the correlation were not significant between SOC and its components and the plant diversity of tree layer. It indicated that the effects of the diversity of herbaceous and shrub layers on SOC were more obvious than those of the other tree layers. The most obvious influence on the improvement of SOC content was BZQ pattern, and thus this pattern was proposed to promote. Due to the vegetational transformation in the studied region is still in its initial stage, vegetation succession will continue and in a unstable state, therefore, it will be more meaningful to provide a theoretical basis for the transformation of low efficiency stands of *Cupressus funebris*.

Key Words: *Cupressus funebris* Endl.; low efficiency stands; improvement patterns; soil organic carbon; plant diversity

森林植被碳汇和土壤碳汇是降低大气 CO₂ 浓度的两个重要机制, 森林土壤有机碳 SOC 占全球 SOC 的 70%, 其微小变化都可能对大气 CO₂ 浓度产生巨大影响^[1]。同时 SOC 也是评价土壤质量的重要指标, 能表征森林的生态功能^[2]。通过增加森林面积、提高森林质量来增加碳汇从而降低大气 CO₂ 浓度是一项非常有效的措施^[3-4]。SOC 主要包括土壤易氧化碳 EOC、水溶性碳 WSOC、微生物量碳 SMBC、轻组有机碳 LFOC 和颗粒有机碳 POC 等组分^[5], 并且受到诸多因素的影响, 主要有植被类型^[6-8]、土壤类型和层次^[9-10]、土壤温湿度^[11-13]和微生物^[14]等。由于 SOC 的影响因素复杂, 并且各因素间相互制约, 目前国内外对 SOC 的研究仍显不足。不同植被类型及其多样性不仅影响凋落物的质和量^[15-16], 而且影响 SOC 积累速率^[17]。关于植被类型对凋落物的影响已有较多研究, 但是对 SOC 的影响目前研究较少, 而且不同学者的研究结果之间也存在很大差异。森林植被由乔木、灌木、草本 3 个层次构成, 不同层次在整个生态系统中的功能不同, 在植被演替过程中, SOC 有何变化以及各层次对 SOC 的具体影响机制, 目前相关的研究报道还比较缺乏。柏木林是四川盆地丘陵区的主要森林类型, 同时也是主要的低产低效林分, 其作为长江上游生态屏障, 在水土保持、改善生态环境等方面具有重要作用, 因此这一类林分的改造对生态效益和木材产量的提高都具有十分重要的意义。本文以柏木低效林改造 10a 后的不同改造模式为研究对象, 通过分析 SOC 分布特征, 以期揭示造林初期乔木、灌木、草本多样性对 SOC 的影响机制, 丰富植物多样性对 SOC 影响的研究, 同时也为柏木低效林改造提供理论依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

试验样地位于德阳市旌阳区 (104°15′—104°35′E, 31°1′—31°19′N)。该地区气候属中亚热带湿润型气候

区,常年平均气温 16.0 ℃,最高气温 36.5 ℃,最低气温-6.7 ℃。年平均日照时数 1215.4 h,年平均降雨量 893.4 mm,其中夏降雨量达 536 mm,占年平均降雨量的 60%。无霜期长达 276 d,以紫色土为主。2002 年(改造前),试验地柏木平均胸径为 5 cm,平均高度为 6 m,郁闭度为 0.7,整个林分的生境质量较差,树种单一,林下植被稀少,生物多样性低,灌木层以铁仔(*Myrsine africana*)、合欢(*Albizia julibrissin*)为主,草本层主要有苔草(*Cladopus chinensis*)、鸭跖草(*Commelina communis*)等,土壤类型为紫色土,厚度 30—40 cm,林地土壤侵蚀严重。于 2002 年在旌阳水库旁选择纯杂交竹模式(CZ)、柏木(*Cupressus funebris*) + 桉木(*Alnus cremastogyne*) + 杂交竹模式(BZQ)、柏木 + 麻栎(*Quercus acutissima*)模式(BL)、柏木 + 杂交竹模式(BZ)4 种模式对柏木低效林进行改造,其中 CZ 模式为皆伐后按照 4 m×4 m 造林,其余 3 种模式通过抚育间伐、林地清理和挖穴补植后进行封育管理。2012 年 10 月在改造区内选择立地条件基本一致,海拔在 550—580 m 的林分。每个模式布设 3 个面积为 20 m×20 m 的样地,作为固定样地,并以柏木纯林(CB)为对照。样地基本情况见表 1。

表 1 试验地植被概况

Table 1 Vegetation characteristics of experimental plots

模式 Pattern	主要乔木 Species	平均树高 Average height/m	平均胸径 Average DBH/cm	郁闭度 Crown density	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	林下主要植物 Main plant species
CZ	杂交竹	4.83	3.08	0.6	10	西北	紫金牛(<i>Ardisia japonica</i>), 南蛇藤(<i>Celastrus orbiculatus</i>), 葎草(<i>Humulus scandens</i>)
BZQ	柏木	9.27	9.91	0.7	12	西南	合欢(<i>Albizia julibrissin</i>), 苔草(<i>Cladopus chinensis</i>), 蕨类(<i>Pteridium aquilinum</i>)
	杂交竹	5.23	2.26				
	桉木	8.63	8.45				
CB	柏木	8.39	7.49	0.8	13	西	铁仔(<i>Myrsine africana</i>), 苔草(<i>Cladopus chinensis</i>)
BL	柏木	8.11	7.18	0.8	14	西北	铁仔, 苔草(<i>Cladopus chinensis</i>), 鸭跖草(<i>Commelina communis</i>)
	麻栎	5.68	4.12				
BZ	柏木	9.67	9.45	0.8	13	西南	铁仔(<i>Myrsine africana</i>), 苔草(<i>Cladopus chinensis</i>)
	杂交竹	9.04	4.51				

CZ: 纯杂交竹模式; BZQ: 柏木 + 杂交竹 + 桉木模式; CB: 柏木纯林模式; BL: 柏木 + 麻栎模式; BZ: 柏木 + 杂交竹模式

1.2 研究方法

2012 年 10 月,在每个样地内的四角和中心分别设置 5 个 4 m×4 m 和 1 m×1 m 的固定小样方来调查灌木植物和草本植物,并记录样方内物种的种类、频度、均高和盖度;4 个 10 m×10 m 样方,记录全部乔木树种($H>3$ m)的生长情况(植物种数、个体数、高度、胸径和盖度等)并进行统计,物种多样性常采用 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数来评价,各指标的计算公式为:

$$(1) \text{Shannon-Wiener 多样性指数} \quad H = - \sum P_i \ln(P_i)$$

$$(2) \text{Simpson 优势度指数} \quad P = 1 - \sum (P_i)^2 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, s)$$

$$(3) \text{Pielou 均匀度指数} \quad J = (- \sum P_i \ln(P_i)) / \ln(S)$$

$$(4) \text{丰富度指数} \quad R = (S - 1) / \ln(N)$$

式中, S 为群落中的总物种数; N 为群落中全部种的总个体数; N_i 为各个物种的个体数, $P_i = N_i/N$ [18]。

同时每个样地内采用“S”形设置 3 个采样点,每点按 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm 土层取土样,将 3 个点采集到的同一土层土样混合作为一个样品放入灭菌后的塑料袋中带回室内,运输过程用冰袋保持土样在 0—4 ℃。用“环刀法”分别在不同土层采集土样,测定各样地不同土层的土壤密度,用于 SOC 密度的计算。土样带回实验室后分成两份,一份过 2 mm 筛后贮藏于 4℃ 的冰箱内,用于测定 SMBC 和 WSOC,另一份土样

自然风干后,用于测定 SOC 和 EOC。SOC 采用重铬酸钾氧化-外加热法测定^[19];SMBC 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 提取法测定^[20];WSOC 采用蒸馏水提取法,所得有机碳利用 TOC 仪直接测定^[21];EOC 采用 0.333 mol/L 的高锰酸钾氧化法测定^[22];土壤剖面各土层 SOC 密度 = SOC 含量(g/kg) × 土壤 密度(g/cm³) × 采样深度(cm) × (1-石砾含量)/10 (若石砾含量低于 10%,可以忽略不计)^[23]。

1.3 统计分析

应用 Excel 2003 和 SPSS 20.0 对实验数据进行整理和分析。实验数据采用 SPSS 20.0 软件中 P-P 图示法检验呈正态分布,柏木低效林不同改造模式同一土层 SOC 及碳密度、土壤活性有机碳组分间的差异显著性采用单因素方差分析(one-way ANOVA),采用 Pearson 法分析 SOC 及其组分之间和植物多样性与 SOC 及其组分之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 柏木低效林不同改造模式 SOC 含量

如图 1 所示,柏木低效林不同改造模式 SOC 含量均随土层深度的增加而减少,不同模式减少程度不一,每种模式 0—10 cm 土层的 SOC 含量均显著高于其他两层,与 0—10 cm 土层的 SOC 含量相比,10—20 cm 土层的 SOC 含量平均下降 57.6%,20—40 cm 土层的 SOC 含量平均下降 70.1%,表明柏木低效林不同改造模式对 SOC 在剖面上的垂直分布影响不同。比较不同模式同一土层土壤可以发现,0—10 cm 和 10—20 cm 土层 SOC 含量 BZQ 模式和 BZ 模式高于对照(CB 模式),而 BL 模式和 CZ 模式低于 CB 模式,且差异达到显著水平($P < 0.05$);20—40 cm 土层 SOC 含量为 BZQ > BL > BZ > CZ > CB,BZQ 模式和 BL 模式以及 CZ 模式和 CB 模式之间差异不显著,其中不同土层 SOC 含量 BZQ 模式均大于其他模式。总体来看,0—40 cm 土层 SOC 含量大小为 BZQ > BZ > CB > BL > CZ,其中 BZQ 模式 SOC 含量最高,为 48.5 g/kg;CZ 模式 SOC 含量最低,为 24.4 g/kg。表明柏木低效林改造模式中 BZQ 对 SOC 的提高效果最佳;CZ 最差,比 CB 还低。

2.2 柏木低效林不同改造模式 SOC 密度

SOC 密度能够更真实、准确地反映一定土壤深度有机碳储量大小,其含量大小主要取决于土壤密度、SOC 和土壤石砾的含量。如图 2 所示,柏木低效林不同改造模式 SOC 密度差异较大,与 SOC 含量的分布情况相似,均是随着土层深度的增加而减少,与 0—10 cm 土层的 SOC 密度相比,10—20 cm 土层的 SOC 密度平均下降 54.9%,20—40 cm 土层的 SOC 密度平均下降 67.1%;0—10 cm 土层 SOC 密度占整个取样剖面(0—40 cm) SOC 密度的 45.7%—64.4%;10—20 cm 土层 SOC 密度占整个取样剖面 SOC 密度的 18.7%—28.3%;20—40 cm 土层 SOC 密度占整个取样剖面 SOC 密度的 11.7%—25.8%;由此可知,柏木低效林经过不同改造后 SOC 储量主要集中在表层(0—10 cm),具有明显的表聚性。总体来看,0—40 cm 土层 SOC 储量为 BZQ > BZ > CB > BL > CZ,且差异达到显著水平($P < 0.05$),相比 CB 模式,BZQ 模式和 BZ 模式 SOC 密度分别提高了 35.5%和 16.3%,而 BL 模式和 CZ 模式 SOC 密度分别降低了 14.8%和 24.1%。各模式 SOC 密度与 SOC 含量分布结果相似。

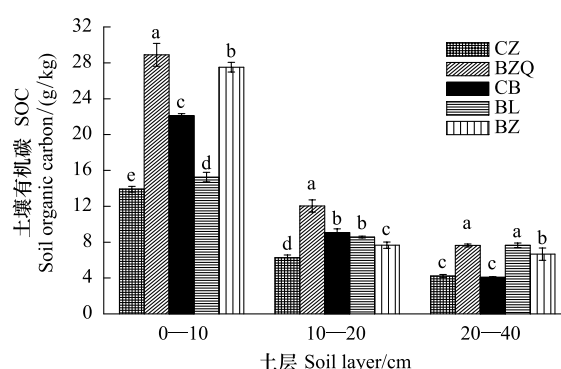


图 1 柏木低效林不同改造模式土壤剖面 SOC 含量

Fig.1 The SOC content of soil profile under different reconstructing patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris*

不同小写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著 ($P < 0.05$); CZ: 纯杂交竹模式; BZQ: 柏木+杂交竹+桉木模式; CB: 柏木纯林模式; BL: 柏木+麻栎模式; BZ: 柏木+杂交竹模式

2.3 柏木低效林不同改造模式土壤活性有机碳

由表 2 可知,在 0—10 cm 土层,BZQ 模式和 BZ 模式 EOC、WSOC、SMBC 含量分别比 CB 模式增加 59.3%、45.5%、27.4%和 26.4%、32.1%、11.6%;BL 模式和 CZ 模式 EOC、WSOC、SMBC 含量分别比 CB 模式降低 4.5%、21.2%、16.2%和 21.7%、11.3%、41.3%。在 10—20 cm 土层,BZQ 模式和 BZ 模式 EOC、WSOC、SMBC 含量分别比 CB 模式增加 28.3%、47.5%、38.8%和 13.4%、19.7%、11.1%;BL 模式和 CZ 模式 EOC、WSOC、SMBC 含量分别比 CB 模式降低 5.6%、5.2%、18.5%和 15.4%、11.7%、57.3%;在 20—40 cm 土层,BZQ 模式和 BZ 模式 EOC、WSOC 含量分别比 CB 模式增加 12.7%、78.5%和 8.6%、31.5%,而 BZQ 模式、BZ 模式、BL 模式和 CZ 模式 SMBC 含量比对照分别降低了 11.3%、16.2%、49.5%和 67.3%。总体来看,0—40 cm 土层的 EOC、WSOC、SMBC 含量均为 BZQ>BZ>CB>BL>CZ,且差异达到显著水平($P<0.05$)。

综上所述,柏木低效林不同改造模式 EOC、WSOC 和 SMBC 含量的剖面分布与 SOC 含量的剖面分布情况相似,均是随着土层深度的增加而减少,与 0—10 cm 土层的 EOC、WSOC 和 SMBC 含量相比,10—20 cm 土层的 EOC、WSOC 和 SMBC 含量分别平均下降 27.4%、39.2%和 54.1%;20—40 cm 土层的 EOC、WSOC 和 SMBC 含量分别平均下降 43.3%、50.2%和 76.3%。综合 SOC 含量和 SOC 密度来看,SOC 含量递减的幅度最大,EOC 含量递减的幅度最小。0—40 cm 土层的 EOC、WSOC 和 SMBC 含量均为 BZQ>BZ>CB>BL>CZ,且差异达到显著水平($P<0.05$)。其中 BZQ 模式与 CB 模式相比,SOC 含量、SOC 密度、EOC、WSOC 和 SMBC 含量增幅分别为 37.8%、33.5%、36.6%、52.5%和 23.2%,表明 BZQ 模式在提高 SOC 方面作用最明显。

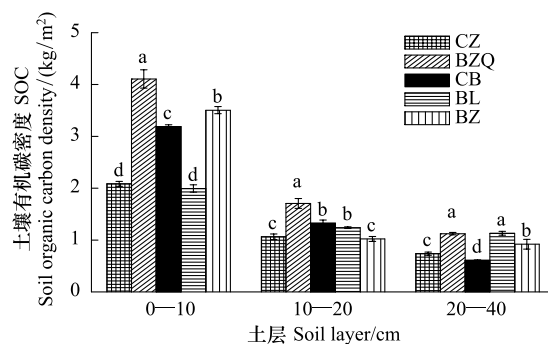


图 2 柏木低效林不同改造模式土壤剖面 SOC 密度

Fig.2 The SOC density of soil profile under different reconstructing patterns in low efficiency stands of *Cupressus funebris*

不同小写字母表示同一土层不同植被类型间差异显著 ($P<0.05$)

表 2 柏木低效林不同改造模式土壤活性有机碳含量 ($n=135$)

Table 2 The soil active organic carbon content under different *C. funebris* reconstructing patterns ($n=135$)

活性有机碳 labile carbon	土层 Soil layer/cm	CZ	BZQ	CB	BL	BZ
土壤易氧化碳/(g/kg)	0—10	2.06±0.07d	4.13±0.16a	2.59±0.1c	2.49±0.1c	3.27±0.07b
EOC(easily-oxidized carbon)	10—20	1.7±0.02d	2.54±0.11a	1.99±0.05c	1.89±0.05c	2.24±0.03b
	20—40	1.3±0.04c	1.82±0.09a	1.63±0.02b	1.51±0.02b	1.76±0.06a
土壤水溶性有机碳/(mg/kg)	0—10	27.18±1.1d	44.23±1.42a	30.54±0.88c	24.15±1.06e	40.31±1.58b
WSOC(water-soluble organic carbon)	10—20	16.18±0.62c	26.99±1.22a	18.33±0.75c	17.33±0.78c	21.87±1.46b
	20—40	13.69±1.24c	23.16±1.48a	13.03±0.54c	14.53±0.8c	17.04±0.68b
土壤微生物量碳/(mg/kg)	0—10	296.4±7.49e	647.9±6.21a	508.52±12.04c	426.42±9.77d	567.74±15.57b
SMBC(soil microbial biomass carbon)	10—20	103.06±5.43e	337.64±10.18a	244.58±6.41c	199.35±5.91d	271.41±7.76b
	20—40	54.37±2.3d	148.65±6.94b	167.6±6.2a	84.39±4.07c	140.39±4.8b

同行中不同小写字母表示同一土层不同模式间差异显著 ($P<0.05$)

2.4 柏木低效林不同改造模式植物多样性

从表 3 中可以看出,各模式 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数均大致表现为灌木层>草本层>乔木层;比较不同模式同一林层,灌木层和草本层 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数均表现为 BZQ>BZ>CB>BL>CZ;乔木层 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数为 BZQ>BZ>BL>CZ>CB。表明柏木低效林不同改造模式群落演替差异比较大,群落演替主要集中在灌木层和草本层,并且灌木层植物多于草本层植物。

表 3 柏木低效林不同改造模式植物多样性

Table 3 The plant diversity under different reconstructing patters in low efficiency stands of *Cuprressus funebris*

多样性指数 Diversity index	林层 Main forest	CZ	BZQ	CB	BL	BZ
<i>H</i>	乔木	0.11±0.01c	1.09±0.05a	0d	0.89±0.04b	0.91±0.04b
Shannon-Wiener 多样性指数	灌木	1.07±0.06c	1.91±0.07a	1.5±0.07b	1.15±0.05c	1.61±0.07b
Shannon-Wiener diversity index	草本	1.01±0.04e	1.77±0.08a	1.31±0.05c	1.22±0.05d	1.44±0.06b
<i>P</i>	乔木	0.05±0.01c	0.66±0.04a	0d	0.52±0.03b	0.53±0.03b
Simpson 优势度指数	灌木	0.51±0.04d	0.82±0.06a	0.71±0.06b	0.62±0.05c	0.72±0.05b
Simpson dominance index	草本	0.56±0.04c	0.85±0.06a	0.69±0.06b	0.66±0.05b	0.72±0.06b
<i>J</i>	乔木	0.17±0.01d	0.99±0.08a	0e	0.71±0.05c	0.86±0.05b
Pielou 均匀度指数	灌木	0.6±0.03d	0.92±0.05a	0.72±0.04c	0.64±0.04d	0.83±0.05b
Pielou evenness index	草本	0.63±0.03b	0.85±0.06a	0.81±0.05a	0.66±0.04b	0.82±0.06a
<i>R</i>	乔木	0.27±0.02b	0.48±0.03a	0c	0.43±0.02a	0.46±0.03a
丰富度指数	灌木	1.32±0.08d	2.82±0.15a	1.78±0.12b	1.2±0.07e	1.55±0.08c
Richness index	草本	0.73±0.04d	1.65±0.08a	1.17±0.05b	0.98±0.05c	1.21±0.06b

同行中不同小写字母表示同一林层不同模式间差异显著 ($P<0.05$)

2.5 柏木低效林不同改造模式 SOC 与植物多样性的相关性分析

由表 4 可知, SOC 含量、SOC 密度、EOC、WSOC 和 SMBC 含量与灌木层和草本层的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均达到显著正相关 ($P<0.05$) 或者极显著正相关 ($P<0.01$); 灌木层的物种丰富度指数和乔木层的各植物多样性指数对 SOC 及其组分影响均不显著 ($P>0.05$)。由此表明, 灌木层和草本层对 SOC 的影响明显大于乔木层。

表 4 柏木低效林不同改造模式 SOC 及其组分与植物多样性的相关系数

Table 4 The correlation coefficients between SOC, its fractions and plant diversity under different reconstructing patters in low efficiency stands of *Cuprressus funebris*

林层 Main forest	指标 Index	SOC 密度 土壤有机碳密度 Soil organic carbon density	SOC 土壤有机碳 Soil organic carbon	EOC 土壤易氧化碳 Easily-oxidized carbon	WSOC 土壤水溶性碳 Water-soluble organic carbon	SMBC 土壤微生物量碳 Soil microbial biomass carbon
乔木层 Tree layer	<i>H</i>	0.578	0.682	0.764	0.655	0.548
	<i>P</i>	0.601	0.703	0.783	0.674	0.571
	<i>J</i>	0.555	0.656	0.744	0.648	0.51
	<i>R</i>	0.328	0.426	0.531	0.521	0.225
灌木层 Shrub layer	<i>H</i>	0.983 **	0.968 **	0.932 *	0.929 *	0.957 *
	<i>P</i>	0.947 *	0.985 **	0.950 *	0.871 *	0.995 **
	<i>J</i>	0.974 **	0.986 **	0.968 **	0.973 **	0.935 *
	<i>R</i>	0.739	0.839	0.844	0.872	0.789
草本层 Herbal layer	<i>H</i>	0.990 **	0.986 **	0.990 **	0.938 *	0.944 *
	<i>P</i>	0.971 **	0.989 **	0.967 **	0.885 *	0.991 **
	<i>J</i>	0.965 **	0.943 *	0.904 *	0.839 *	0.975 **
	<i>R</i>	0.989 **	0.973 **	0.975 **	0.909 *	0.947 *

* 表示达到 $P<0.05$ 显著水平, ** 表示达到 $P<0.01$ 极显著水平; H、P、J 和 R 分别表示香农-维纳指数 (Shannon-Wiener index), 辛普森指数 (Simpson index), 均匀度指数 (Pielou index) 和丰富度指数 (Richness index)

3 讨论

3.1 植被类型对土壤有机碳的影响

由于树种光合作用和适应环境能力的不同, 使其在初级生产力、凋落物量及分解速率、有机碳分配和根系分泌物等方面产生差异, 导致森林生态系统在土壤碳汇或碳源方面产生不同影响^[24]。大量研究表明凋落物

是 SOC 的主要来源。凋落物由易分解成分(糖类、淀粉、脂肪等)和难分解成分(木质素、多酚等)组成,其分解一方面能增加土壤碳源,改变土壤理化性质;另一方面能增加土壤中微生物的数量,改变土壤微生物群落特征,从而改变 SOC 含量^[25]。凋落物主要通过质和量来影响 SOC,其化学性质如氮素、木质素/N 和 C/N 等决定了其分解速率。固氮树种比非固氮树种更能提高土壤碳汇功能^[26],比如桉木林下 SOC 高于杉木林^[27]。张圣喜等^[28]认为凋落物的木质素/N 和 C/N 低有利于更多的微生物生长,从而加快凋落物的分解速率。凋落物的量主要受植被类型、物种组成和环境气候等因素影响。张新平等^[29]研究认为,针阔混交林凋落物量显著高于针叶林。植被的变化常常引起 SOC 含量的变化,但是变化情况不一。Mann 等^[6]对美洲热带地区森林转变为农田后的研究表明 SOC 含量下降 20%—50%。Post 等^[7]认为森林转变为牧草地后 SOC 含量无明显变化。然而 Conant 等^[8]对林地转化为草地后的研究发现 SOC 含量显著增加。本研究中,柏木低效林不同改造模式 SOC 含量差异显著,0—40 cm 土层 SOC 含量为 BZQ>BZ>CB>BL>CZ。BZQ 模式 SOC 含量最大,说明该模式固碳能力高于其他模式。这是因为,一方面 BZQ 模式根的密集程度和数量均高于其他模式^[14],因此根系的周转能为土壤提供更多的养分输入;另一方面,BZQ 模式植物多样性更加丰富,其凋落物量可能比其他模式多,也进一步增加了 SOC 的输入量。SOC 密度以土壤体积为计算基础,排除了面积因素的影响,能够有效地评价和衡量森林的土壤碳储量。本研究中,柏木低效林不同改造模式 SOC 密度差异显著,与 SOC 含量的分布情况相似,0—40 cm 土层 SOC 储量为 BZQ>BZ>CB>BL>CZ。各模式 0—40 cm 土层 SOC 密度介于 3.9—6.8 kg/m²之间,表层(0—10 cm)SOC 密度占整个取样剖面的 45.7%—64.4%,表明 SOC 主要集中在表层,具明显的表聚性,这与前人的研究结果一致^[9-10],这可能是因为凋落物和微生物积聚在土壤表层,同时使得细根向表层聚集有关。

3.2 不同改造模式土壤有机碳组分

土壤活性有机碳组分与 SOC 含量的比例总体上不高,但能很好地指示土壤肥力及土壤碳贮量的变化;其比例越高,说明土壤有机碳库活性越大,稳定性越差^[30]。不同土壤活性有机碳组分在概念和测定方法上有一定重叠,单一的指标很难表征 SOC,因此,在研究 SOC 特征时,需要综合分析。EOC 主要来源于植被凋落物、微生物、土壤腐殖质和根系分泌物,稳定性差,易氧化和矿化,能更好地反映土壤质量和土壤肥力的变化情况,并且与土壤理化性质关系密切^[31]。WSOC 主要来源于有机质的淋溶和分解,其含量大小与凋落物的数量和分解速率有直接关系^[32]。SMBC 一方面来源于 SOC,另一方面来源于微生物,主要受光照、通气和植被类型等的影响,可以在相对较短的时间内反映或预示土壤的变化^[33]。温度和湿度是影响土壤活性有机碳的两个重要环境因子。随着温度和湿度的上升,土壤微生物活性增加,加速了土壤有机质的分解,从而有利于土壤活性有机碳的积累^[11]。周焱等^[12]对武夷山不同海拔土壤水溶性有机碳的含量特征研究表明土壤湿度与 WSOC 含量显著正相关。漆良华等^[13]研究表明温度和湿度的增加,导致 WSOC 含量下降,SMBC 含量上升。本研究中,不同改造模式 EOC、WSOC 和 SMBC 含量的剖面分布与 SOC 含量的分布情况相似,均是随着土层深度的增加而减少,这与一些研究结果一致^[9,11-12]。这是因为土壤活性有机碳来源于 SOC,其含量变化很大程度上取决于 SOC 含量的变化。不同改造模式 0—40 cm 土层的 EOC 含量为 BZQ>BZ>CB>BL>CZ,且差异达到显著水平($P<0.05$),表明改造后 BZQ 模式和 BZ 模式的土壤质量和肥力均有所提高,但 BL 模式和 CZ 模式的土壤质量和肥力却下降了。这可能是因为,一方面,EOC 与 SOC 关系密切,SOC 含量高的林分 EOC 含量也高;另一方面,各改造模式凋落物归还量不同,从而导致凋落物对土壤养分的补给存在一定差异。SMBC 与微生物的种类和数量关系密切;WSOC 含量主要取决于 SOC 含量和土壤黏粒的吸附作用,且 WSOC 和 SMBC 有较好的正相关关系^[34]。Yano 等^[35]发现森林中约有 12.1%—40.3%的 WSOC 被微生物直接利用和吸收。各改造模式 0—40 cm 土层 SMBC 和 WSOC 含量均为 BZQ>BZ>CB>BL>CZ,且差异显著($P<0.05$)。这与范川等^[14]对该地区微生物的研究中 BZQ 模式的微生物数量最高的结果吻合。这可能是因为,较高的植物多样性,能为土壤微生物的繁殖和活动创造更加有利的条件;同时,随着植被盖度的增加,土壤温度和湿度的变化也有利于 WSOC 和 SMBC 的积累。

3.3 植物多样性对土壤有机碳的影响

物种多样性通过改变碳输入和输出从而影响 SOC。自然界中存 2 种稳定性碳同位素(^{13}C 和 ^{12}C),不同光合途径对 ^{13}C 的选择和排斥不同,大气 CO_2 在进入植物体过程中发生了碳同位素的分馏^[36]。草本植物(C_4 光合途径)比多数灌木、乔木(C_3 光合途径)能够利用更多的 ^{13}C ,因此有机碳含量更高^[37]。田大伦等^[9]的研究也显示草本层碳含量>灌木层。植被演替过程中,随着植物物种多样性的增加,群落的稳定性逐渐增强,群落生产力逐渐提高,但演替过程中所形成的植被种类及分布情况有所差异^[38]。物种多样性对于植被有机碳和 SOC 的分配差异影响较大,目前关于植物多样性是否能提高 SOC 含量还没有一致结论。Vesterdal 等^[39]认为植物多样性变化常常引起地上部分碳储量的变化,而对于 SOC 的影响还存在不确定性。Guckland 等^[40]研究显示植物多样性与植被有机碳含量呈负相关,而与 0—30 cm SOC 呈正相关。崔鸿侠等^[10]研究表明灌木层和草本层物种多样性与土壤碳储量呈显著负相关。植物多样性的变化能导致温度和湿度的变化,从而改变土壤微生物群落以及土壤动物群落,进一步影响凋落物的分解、根系生物量和根系周转速率^[41-42]。本研究中,植物 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数大致表现为 $\text{BZQ} > \text{BZ} > \text{CB} > \text{BL} > \text{CZ}$,并且灌木层植物多于草本层植物。SOC 含量、SOC 密度、EOC、SMBC 和 WSOC 含量与灌木层和草本层的 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数均达到显著正相关或者极显著正相关,而乔木层植物多样性与 SOC 及其组分相关性均不显著,表明灌木层和草本层对 SOC 的影响明显大于乔木层。这可能是由于处于改造的初期,其他树种进入形成乔木需要较长的时间,因而对 SOC 的影响还不明显,但随着时间的推移,或许结论会有所差异;另外灌木层和草本层对环境非常敏感,从表 3 可以看出各模式间灌木层和草本层植物丰富度差异显著;可能是灌木层和草本层植物凋落物周转、养分归还等因素引起的。近年来,关于植物多样性对 SOC 影响的研究不断增多,但可能与群落本身以及试验地气候等环境条件的不同有关导致研究的结论差异较大,因此植物多样性和 SOC 的关系还需进一步研究。

4 结论

柏木低效林不同改造模式中 SOC 及其组分均是随着土层深度的增加而减少,其中 SOC 含量递减的幅度最大,EOC 含量递减的幅度最小;表层(0—10 cm)SOC 密度占整个取样剖面的 45.7%—64.4%,具有明显的表聚性。不同模式 0—40 cm 土层 SOC 含量、SOC 密度和 EOC、WSOC 和 SMBC 含量均为 $\text{BZQ} > \text{BZ} > \text{CB} > \text{BL} > \text{CZ}$,差异均达到显著水平($P < 0.05$)。几种模式中,BZQ 模式在提高 SOC 方面作用最明显。植物 Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Pielou 均匀度指数和丰富度指数大致表现为 $\text{BZQ} > \text{BZ} > \text{CB} > \text{BL} > \text{CZ}$;SOC、SOC 密度、EOC、SMBC 和 WSOC 与灌木层和草本层的多样性指数均呈显著正相关,而乔木层植物多样性与 SOC 及其组分相关性均不显著,表明草本层和灌木层多样性对 SOC 的影响大于乔木层。由于凋落物分解和根系分泌物是 SOC 的主要来源,因此很有必要进一步研究柏木低效林不同改造模式凋落物量以及根系生物量及其周转;此外,该区域尚处于改造初期,随着时间的增长,植被演替还将继续,追踪该区域植物多样性的变化,将会更加有效的为柏木低效林改造提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Janzen H H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2004, 104(3): 399-417.
- [2] Blair G J, Lefroy R D, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [3] Wander M M, Traina S J, Stinner B R, Peters S E. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(4): 1130-1139.
- [4] Jackson R B, Banner J L, Jobbágy E G, Pockman W T, Wall D H. Ecosystem carbon loss with woody plant invasion of grasslands. *Nature*, 2002, 418(6898): 623-626.
- [5] 沈宏,曹志洪,胡正义. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32-38.
- [6] Mann L K. Changes in soil carbon storage after cultivation. *Soil Science*, 1986, 142(5): 279-288.
- [7] Post W M, Kwon W M. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317-327.

- [8] Conant R T, Paustian K, Elliott E T. Grass land management and conversion to grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 2001, 11(2): 343-355.
- [9] 田大伦, 王新凯, 闫文德, 宁晓波, 王光军. 喀斯特地区不同植被恢复模式幼林生态系统碳储量及其空间分布. *林业科学*, 2011, 47(9): 7-14.
- [10] 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.
- [11] Kirschbaum M U F. Will changes in soil organic carbon act as a positive or negative feedback on global warming?. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 21-51.
- [12] 周焱, 徐宪根, 阮宏华, 汪家社, 方燕鸿, 吴焰玉, 徐自坤. 武夷山不同海拔土壤水溶性有机碳的含量特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(4): 48-52.
- [13] 漆良华, 范少辉, 杜满义, 岳祥华, 艾文胜, 孟勇, 杨明. 湘中丘陵区毛竹纯林、毛竹-杉木混交林土壤有机碳垂直分布与季节动态. *林业科学*, 2013, 49(3): 17-24.
- [14] 范川, 李贤伟, 张健, 李凤汀, 龙家黎. 柏木低效林不同改造模式土壤抗冲性能. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 76-81.
- [15] 卢立华, 蔡道雄, 贾宏炎, 何日明. 南亚热带 7 种林分凋落叶养分含量的年动态变化. *林业科学*, 2009, 45(4): 1-6.
- [16] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较. *生态学报*, 2006, 26(2): 373-382.
- [17] Abril A, Bucher E H. Overgrazing and soil carbon dynamics in the Western Chaco of Argentina. *Applied Soil Ecology*, 2001, 16(3): 243-249.
- [18] 李凤, 黄荣珍, 樊后保, 肖龙, 李燕燕, 廖迎春. 退化第四纪红粘土重建森林恢复 27 年后群落多样性及稳定性研究. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 189-192.
- [19] 林大仪. 土壤学实验指导. 北京: 中国林业出版社, 2004: 42-168.
- [20] 谢正苗, 卡里德, 黄昌勇, 俞劲炎. 镉铅锌污染对红壤中微生物生物量碳氮磷的影响. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1): 69-74.
- [21] 姜培坤, 周国模, 徐秋芳. 雷竹高效栽培措施对土壤碳库的影响. *林业科学*, 2002, 38(6): 6-11.
- [22] 马明东, 李强, 罗承德, 刘跃进. 卧龙亚高山主要森林植被类型土壤碳汇研究. *水土保持学报*, 2009, 23(2): 127-131.
- [23] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 71-90.
- [24] Oostra S, Majdi H, Olsson M. Impact of tree species on soil carbon stocks and soil acidity in southern Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2006, 21(5): 364-371.
- [25] 宋媛, 赵溪竹, 毛子军, 孙涛, 侯玲玲. 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性. *生态学报*, 2013, 33(2): 443-453.
- [26] Johnson D W. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 64(1/2): 83-120.
- [27] Lavery J M, Comeau P G, Prescott C E. The influence of red alder patches on light, litter fall, and soil nutrients in adjacent conifer stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34(1): 56-64.
- [28] 张圣喜, 陈法霖, 郑华. 土壤微生物群落结构对中亚热带三种典型阔叶树种凋落物分解过程的响应. *生态学报*, 2011, 31(11): 3020-3026.
- [29] 张新平, 王襄平, 朱彪, 宗占江, 彭长辉, 方精云. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1031-1040.
- [30] 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. *Crop and Pasture Science*, 1995, 46(7): 1459-1466.
- [31] Batjes N H, Sombroek W G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. *Global Change Biology*, 1997, 3(2): 161-173.
- [32] Hagedom F, Kaiser R, Feyen H. Effects of redox conditions and flow processes on the mobility of dissolved organic carbon and nitrogen in a forest soil. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29: 288-297.
- [33] 徐秋芳, 姜培坤, 沈琪. 灌木林与阔叶林土壤有机碳库的比较研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(2): 18-22.
- [34] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 宫渊波, 冉华. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化. *生态学报*, 2008, 28(6): 2536-2545.
- [35] Yano Y, McDowell W H, Kinner N. Quantification of biodegradable dissolved organic carbon in soil solution with flow through bioreactors. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(6): 1556-1564.
- [36] James R E, Buchmann N, Lawrence B F. Carbon isotope ratios in below-ground carbon cycle processes. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 412-422.
- [37] Moreira M Z, Sternberg L S L, Nepstad D C. Vertical patterns of soil water up take by plants in a primary forest and an abandoned pasture in the eastern Amazon: Anisotropic approach. *Plant and Soil*, 2000, 22(2): 95-107.
- [38] Lehman C L, Tilman D. Biodiversity, stability, and productivity in competitive communities. *The American Naturalist*, 2000, 156(5): 534-532.
- [39] Vesterdal L, Clarke N, Sigurdsson B D. Do tree species influence soil carbon stocks in temperate and boreal forests? *Forest Ecology and Management*, 2013, 3(9): 4-18.
- [40] Guckland A, Jacob M, Flessa H, Thomas F M, Leuschner C. Acidity, nutrient stocks, and organic-matter content in soils of a temperate deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2009, 172(4): 500-511.
- [41] Högberg P, Nordgren A, Buchmann N, Taylor A F S, Ekblad A, Högberg M N, Nyberg G, Ottosson-Löfvenius M, Read D J. Large-scale forest girdling shows that current photo synthesis drives soil respiration. *Nature*, 2001, 411: 789-792.
- [42] Costa M H, Foley J A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 2000, 13(1): 18-34.