

南方红壤丘陵区水土保持林对枯落物和土壤养分的影响

曹 智,文仕知,何功秀*,周 沁,及 利,杨丽丽

(中南林业科技大学 林学院,湖南 长沙 410000)

摘 要:探究不同水土保持林土壤有机碳及土壤养分变化,为水土保持林的营造提供科学依据。以湖南省金洞林场 15 年生杉木-闽楠混交林、闽楠纯林、杉木纯林为研究对象,测定不同季节土壤有机碳、土壤及凋落物养分含量,分析不同林分组成和季节对土壤有机碳的影响。结果表明,林分组成和季节对土壤有机碳含量存在显著影响,土壤有机碳主要受全 N、全 P、可溶性有机碳、可溶性有机 N 的影响。不同林分下,土壤养分和凋落物养分存在显著差异,杉木-闽楠混交林土壤和凋落物养分显著高于杉木纯林、闽楠纯林,其土壤有机碳、全 N、全 P 比杉木纯林高 35.07%~52.63%,凋落物矿质元素含量比闽楠纯林高 25.35%~45.16%。季节因子对土壤养分的影响高于凋落物养分,季节因子对凋落物矿质元素无显著影响。林分组成对土壤有机碳的影响主要通过改变土壤理化性质,特别是 N 素含量来影响土壤有机碳;季节因子对土壤有机碳的影响通过改变水热条件及凋落物分解速率,从而影响土壤有机碳的输入、输出。研究结果对南方红壤地区水土保持林的营造具有一定的参考意义。

关键词:水土保持林;混交林;闽楠;杉木;土壤有机碳

中图分类号:S714.7

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0154-08

Effects of Soil and Water Conservation Forest on Litter and Soil Nutrients in Red Hilly Region of Southern China

CAO Zhi, WEN Shi-zhi, HE Gong-xiu*, ZHOU Qin, JI Li, YANG Li-li

(College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410001, Hunan, China)

Abstract: The objective of this study was to unravel the variations of the organic carbon and nutrients in the soils of different water conservation forests to provide a scientific basis for the establishment and management of soil and water conservation forests. Fifteen-year-old *Cunninghamia lanceolata*-*Phoebe bournei* mixed forest, pure *P. bournei*, and *C. lanceolata* forests in Jindong Forest Farm of Hunan Province were taken as the research objects. The soil organic carbon, soil and litter nutrient contents in different seasons were determined, and the effects of different planting patterns and seasons on soil organic carbon were analyzed. The results showed that both planting pattern and season had significant effects on soil organic carbon content. Soil organic carbon was mainly affected by total nitrogen, total phosphorus, soluble organic carbon and dissolved organic nitrogen. There were significant differences in soil nutrients and litter nutrients under different planting patterns. The soil and litter nutrients of mixed forest were significantly higher than those of pure forests, the soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus of the mixed forests were 35.07% to 52.63% higher than those of pure forests, and the content of mineral elements in litters were 25.35% to 45.16% higher. Season had a stronger influence on soil nutrients than litters, and no significant effect on litter mineral elements. Soil organic carbon was mainly affected by planting pattern via

收稿日期:2022-11-12 修回日期:2022-12-22

基金项目:国家重点研发计划课题(2021YFD2201303-02);湖南省林业科技创新基金项目(XLKT202202)。

第一作者:曹 智。研究方向:水土保持。E-mail:onlyjiangxin@csuft.edu.cn

* 通信作者:何功秀,博士,副教授。研究方向:水土保持。E-mail:hegongxiu@163.com

changing the soil physical and chemical properties, especially nitrogen content. Season had an effect on soil organic carbon by changing hydrothermal conditions and litter decomposition rate, which affects the input and output of soil organic carbon. The study has reference values on the afforestation of soil and water conservation forests in red soil region of southern China.

Key words: soil and water conservation forest; mixed forest; *Phoebe bournei*; *Cunninghamia lanceolata*; soil organic carbon

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC), 是土壤含C有机物质的总和, 主要由糖类、木质素、黑碳及腐殖质组成^[1-3]。是土壤养分的重要组成部分, 而且参与团聚体的形成, 对土壤抗蚀能力有很大的影响^[4-5]。水热条件及地上植被是影响土壤有机碳含量的主要因素, 两者分别通过作用有机碳的输入和输出来影响土壤有机碳含量^[6-9]。因此, 探寻土壤有机碳变化与季节和植被的响应, 对于维持土壤质量有着重要意义。

南方红壤区降雨集中, 地形复杂, 是我国水土流失的重点区域^[10]。高强度的土壤侵蚀, 导致土壤养分流失、地力下降, 严重影响了正常的生产生活^[11]。地上植被是影响水土流失的主要因素, 因此营造水土保持林是改善土壤质量、降低水土流失的主要手段。陈洋等^[12]的研究表明, 植被类型能够明显影响水土流失, 乔木林的水土保持作用显著优于其他植被类型; 肖好燕等^[13]在武夷山的研究中, 发现不同林分对土壤有机碳、土壤可溶性组分存在显著影响, 阔叶林更有利于土壤肥力的恢复。孙欧文等^[14]的研究表明, 针阔混交林及阔叶纯林的林分持水能力相对高于针叶纯林, 各林种之间土壤容重、孔隙度等指标并无显著差异。Adam等^[15]研究发现, 混交林虽然具有诸多优点, 但林分管理较为复杂, 有较强的不确定性和风险性。因此关于混交林配置的研究一直以来都是学术界的热点问题。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)具有生长快、性能好、经济价值高等特点, 是我国南方主要的造林树种, 总人工林中杉木林面积占比超过60%, 由于多代连栽和经营管理不善, 杉木人工林导致土壤养分含量下降^[16]。闽楠(*Phoebe bournei*)作为樟科常绿树种、国家Ⅱ级重点保护植物, 是我国南方特有珍贵用材树种^[17]。经研究发现, 杉阔混交林比杉木纯林有更高的土壤有机碳含量及养分储量, 一般混交树种主要为火力楠(*Michelia macclurei*)、木荷(*Schima superba*)、红锥(*Castanopsis hystrix*)^[18-20]等, 关于杉木与闽楠混交林的研究较少, 且主要集中于混交后植物生理的变化, 如叶的功能性状、光合特性、林分化学计量比^[20-21]等, 针对杉木-闽楠混交林的土壤养分含量的研究相对不足。因此, 选取湖南

省永州金洞林场的杉木-闽楠混交林、闽楠纯林、杉木纯林作为研究对象, 探究不同季节水土保持林土壤养分及凋落物养分的变化, 分析不同林分组成对于土壤有机碳的影响, 为红壤地区水土保持工作的开展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省永州市金洞林场(26°14'28"N, 112°8'15"E), 属于亚热带季风湿润气候, 年均降水量1 600~1 900 mm, 年均日照1 529.9 h, 年均气温16.3~17.7℃, 无霜期275 d。试验林地于2004年种植杉木、闽楠纯林, 苗木为1年生裸根苗, 初植密度为2 200株·hm⁻², 2005年对杉木、闽楠进行间伐, 并在部分杉木纯林中补植2年生闽楠苗木。林地内主要灌木树种为盐肤木(*Rhus chinensis*)、野桐(*Mallotus tenuifolius*)、喜树(*Camptotheca acuminata*)等; 主要草本植物为小红菊(*Dendranthema charetii*)、蒲公英(*Taraxacm mongolicum*)等。研究区成土母质以砂岩、页岩、碳质板岩为主, 土壤为第四纪红色壤土。

1.2 试验设计

2018年1月, 在该林场分别选择坡度、坡向、海拔、土壤和地形等立地因子相似的3种林分的人工林试验样地, 分别为闽楠纯林、杉木纯林和杉木-闽楠混交林, 林龄均为15 a, 均已郁闭。其中混交林中杉木与闽楠树种比例为5:5。每个林分组成成分上坡、中坡和下坡各设置3块20 m×20 m的标准地, 共9块标准地(表1)。

分别于2018年的1月(冬季)、4月(春季)、7月(夏季)、11月(秋季)进行土壤和凋落物样品的采集。

凋落物样品的采集与处理: 在标准地内按“S”形设置5个1 m×1 m样方, 用皮尺界定, 按未分解层和半分解层收集凋落物, 并称湿重, 带回试验室后, 60℃烘干, 称量干重。粉碎、研磨过筛(0.149 mm), 用于测定凋落物养分的含量。

土壤样品的采集与处理: 在每块标准地内按照“S”形选取5个代表性的样点, 去除地表凋落物, 按

表 1 样地基本概况

Table 1 Basic situation of the sample sites

样地	海拔/m	坡向	坡度/ (°)	密度/ (株·hm ⁻²)	平均 胸径/cm	平均 树高/m	pH	土壤含水率/ (g·kg ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)
杉木-闽楠混交林	163	南	23	850	13.71 10.12	9.94 7.71	4.05	18.93	1.55
闽楠纯林	230	东南	16	850	14.76	9.23	4.12	17.14	1.43
杉木纯林	190	南	27	850	11.02	7.39	4.02	17.71	1.35

照不同土层深度(0~10、10~20 cm 和 20~30 cm)采集土壤样品,每个点取 3 个重复,所用样品装于自封袋放入 4 ℃ 泡沫箱中立即运回实验室。将部分分层土样在荫底处进行自然风干,样品完全风干后,研磨过筛(0.149 mm),用于测定土壤养分含量。环刀所取土壤用于测定土壤的容重、持水量等物理性质。

1.3 测定指标

根据土壤农化分析^[22],称取 10 g 鲜土放置于铝盒中,在 105 ℃ 下烘干至恒重,计算土壤含水量;土壤容重采用环刀法测定;土壤 pH 用 pH 仪测定;土壤有机碳(SOC)和凋落物全 C(TC)采用重铬酸钾-浓硫酸高温外热法测定;全 N(TN)采用凯氏定氮法测定;Avio 500ICP(Thermo Fisher Scientific, 美国)测定全 P、全 K、全 Ca、全 Mg 的含量。可溶性有机碳(DOC)使用提取液中总有机碳(TOC)含量表示,总有机碳(TOC)的测定采用外加加热重铬酸钾氧化法,使用紫外分光光度计(UV-120-02, Shimadzu)测定吸光值;可溶性有机 N(DON)采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法。可溶性有机 P(DOP)采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 和 IBM SPSS 23.0 软件处理数据。采用单因素(one-way ANOVA)和双因素方差分析(two-way ANOVA)检验不同处理间的差异显著性(LSD, $\alpha=0.05$)。采用 Canoco 5.0 将土壤有机碳与土壤养分指标进行冗余分析(RDA),并进行 Mantel 检验计算各因子对土壤有机碳变异的解释程度。所有数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 不同林分组成的土壤理化性质

林分组成对土壤可溶性有机 P 和全 K 在各林分间无显著差异,其余养分指标存在显著影响(表 2)。在 0~10 cm,杉木-闽楠混交林与闽楠纯林土壤有机质含量分别为 27.19 g·kg⁻¹ 和 25.83 g·kg⁻¹,比杉木纯林分别高 35.10% 和 28.33%;杉木纯林土壤全 N 含量为 1.18 g·kg⁻¹,比杉木-闽楠混交林与闽楠纯林分别低 39.83% 和 49.15%;杉

木-闽楠混交林土壤全 P 含量与杉木纯林无显著差异,且两者都显著低于闽楠纯林($P<0.05$)。不同土层间的土壤有机碳、全 N、可溶性有机碳、可溶性有机 N 存在显著差异,其他养分指标在各土层间差异不显著。

2.2 不同林分组成的凋落物养分特征

不同林分组成之间的凋落物全 C、全 K、全 Ca、全 Mg 无显著差异,其他养分指标均受到林分组成的显著影响(表 3)。在未分解层,不同林分间凋落物全 C 存在显著差异,杉木纯林凋落物全 C 含量最高为 488.87 g·kg⁻¹,比杉木-闽楠混交林高 11.95%;凋落物全 N 无显著差异;在半分解层,杉木纯林凋落物全 N 含量最低为 5.88 g·kg⁻¹,比杉木-闽楠混交林低 54.25%。在各分解层,杉木-闽楠混交林凋落物全 P、可溶性有机 P 显著低于闽楠纯林。

2.3 不同林分组成土壤与凋落物养分的季节响应

季节和林分组成的交互作用对土壤全 K 无显著影响,对其他土壤养分指标均存在显著影响(表 4)。林分组成对土壤有机碳、土壤 K、可溶性有机 P 无显著影响,对其他养分指标存在显著性影响($P<0.05$);季节因子仅对土壤 K、土壤可溶性有机碳、土壤可溶性有机 P 存在显著性影响($P<0.05$),对其他养分元素不存在显著影响。林分组成和季节因子的单一作用不会对土壤有机碳产生显著影响,但会对土壤可溶性有机碳产生显著影响。

林分组成和季节的交互作用对凋落物全 C、全 N、可溶性有机 N 存在显著影响,对其他养分指标均无显著影响(表 5)。林分组成对凋落物总 C 及其矿物质元素无显著影响,对其他养分指标存在显著性影响($P<0.05$);季节更替对凋落物所测所有养分指标均存在显著影响($P<0.05$)。

2.4 土壤有机碳与土壤环境、凋落物特征相关关系分析

将土壤有机碳和土壤可溶性有机组分作为响应变量,将土壤环境因子与凋落物养分因子作为解释变量进行冗余分析并进行 Mantel 检验(图 1)。0~10 cm 土层对土壤有机碳的总体变异解释度最高,第 1 排序轴解释度为 36.72%,第 2 排序轴解释度为

11.07%,20~30 cm 土层对总体变异解释度最低,且落物各层次均与土壤有机碳呈正相关,可溶性有机 P 低于凋落物层;半分解层对总体变异解释度高于未分在 0~10 cm 土层表现为正相关;全 C 在未分解层与土壤有机碳呈负相关,半分解层呈正相关。

表 2 不同林分土壤理化性质

Table 2 Seasonal dynamics of soil physicochemical properties in different forest stands						
林分	土层/cm	土壤有机质/ (g·kg ⁻¹)	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	全 K/ (g·kg ⁻¹)	全 Ca/ (mg·kg ⁻¹)
杉木闽楠混交林	0~10	27.19±1.19Aa	1.65±0.21Aa	0.29±0.06Ab	0.86±0.10Aa	138.6±39.94Aa
	10~20	19.47±3.17Ba	1.19±0.27Ba	0.24±0.15Aa	0.89±0.06Aa	109.53±81.33Ab
	20~30	16.85±2.8Ca	1.01±0.23Ba	0.22±0.16Aa	0.90±0.11Aa	108.7±61.83Ab
闽楠纯林	0~10	25.83±2.27Aa	1.76±0.1Aa	0.68±0.13Aa	0.87±0.21Aa	204.56±86.63Aa
	10~20	19.19±0.8Ba	1.21±0.25Ba	0.42±0.26Ba	0.88±0.17Aa	197.78±84.9Aa
	20~30	16.53±0.87Ca	1.08±0.24Ba	0.41±0.27Ba	0.92±0.14Aa	198.06±92.04Aa
杉木纯林	0~10	20.13±1.57Ab	1.18±0.11Ab	0.19±0.04Ac	0.92±0.12Aa	166.92±125.96Aa
	10~20	19.88±4.27Aa	1.22±0.27Aa	0.36±0.25Aa	0.84±0.12Aa	135.68±26.44Ab
	20~30	16.78±3.80Ba	1.04±0.17Ba	0.34±0.28Aa	0.88±0.08Aa	152.33±53.32Aa
F	ST	7.05***	8.24***	16.52***	0.05 ^{ns}	9.9***
	SL	79.92***	47.39***	1.00 ^{ns}	0.51 ^{ns}	0.81 ^{ns}
林分	土层/cm	全 Mg/ (g·kg ⁻¹)	可溶性 C/ (g·kg ⁻¹)	可溶性 N/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性 P/ (mg·kg ⁻¹)	
杉木闽楠混交林	0~10	1.75±0.19Aa	225.02±8.42Aa	85.93±6.77Aa	3.43±3.19Aa	
	10~20	1.64±0.34Aa	215.15±8.32Ba	72.39±11.38Ba	3.74±2.48Aa	
	20~30	1.53±0.35Aa	206.9±10.37Ca	67.05±11.45Ba	4.00±1.75Aa	
闽楠纯林	0~10	1.87±0.21Aa	223.92±10.22Aa	85.75±8.24Aa	3.57±2.72Aa	
	10~20	1.63±0.37Aa	207.14±10.39Bb	73.57±13.87Ba	2.76±1.52Aa	
	20~30	1.70±0.45Aa	183.23±23.78Cb	65.32±18.95Ba	2.14±1.53Ab	
杉木纯林	0~10	1.18±0.20Bb	218.86±7.03Aa	66.82±9.75Ab	3.58±2.4Aa	
	10~20	1.59±0.33Aa	209.62±7.3Bab	66.84±9.2Aa	2.56±1.95Aa	
	20~30	1.59±0.36Aa	197.68±11.18Ca	58.32±12.26Aa	3.18±1.94Aab	
F	ST	6.91***	7.92***	10.43***	1.54 ^{ns}	
	SL	0.03 ^{ns}	46.1***	16.42***	0.52 ^{ns}	

注:ST. 林分组成;SL. 土层;不同大写字母表示同一林分不同土层间的差异性,不同小写字母表示同一土层不同林分间的差异性($P<0.05$);ns 表示 $P>0.05$;*** 表示 $P<0.001$ 。下同。

表 3 不同林分凋落物理化性质

Table 3 Seasonal dynamics of physical properties of litter in different forest stands						
林分	分解层	全 C/ (g·kg ⁻¹)	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	全 K/ (g·kg ⁻¹)	全 Ca/ (mg·kg ⁻¹)
杉木闽楠混交林	未分解	430.44±48.83b	11.7±1.47a	5.39±0.44b	16.10±11.65ab	53.61±28.91a
	半分解	274.89±70.7b	9.07±2.24b	4.25±0.83b	41.31±20.06a	34.86±21.83a
闽楠纯林	未分解	402.46±67.66b	13.01±1.83a	7.13±1.91a	12.05±7.32b	58.56±33.08a
	半分解	329.62±63.35a	11.06±1.77a	5.56±1.32a	27.5±17.16a	12.02±8.81b
杉木纯林	未分解	488.87±40.06a	12.08±1.51a	6.11±1.31ab	21.34±12.59a	38.51±21.83a
	半分解	170.36±39.08c	5.88±1.24c	4.90±1.43ab	31.42±17.38a	17.89±11.15b
F	ST	2.56 ^{ns}	19.18***	8.33***	2.29 ^{ns}	3.01 ^{ns}
	DL	101.15***	44.40***	15.58***	21.78***	25.87***
林分	分解层	全 Mg/ (g·kg ⁻¹)	可溶性 C/ (g·kg ⁻¹)	可溶性 N/ (mg·kg ⁻¹)	可溶性 P/ (mg·kg ⁻¹)	
杉木闽楠混交林	未分解	4.18±2.00a	1.59±0.22a	847.68±88.29a	5.89±1.05b	
	半分解	2.68±1.10a	0.81±0.17a	611.29±169.61a	1.72±0.61b	
闽楠纯林	未分解	5.28±2.17a	1.04±0.47b	833.82±140.71a	9.29±4.06a	
	半分解	2.59±0.65a	0.71±0.42a	706.45±107.24a	5.19±2.96a	
杉木纯林	未分解	4.27±1.32a	1.74±0.18a	715.79±148.78b	7.74±4.64ab	
	半分解	2.34±0.85a	0.57±0.30a	445.15±214.92b	5.71±4.00a	
F	ST	1.26 ^{ns}	7.43***	10.54***	7.71***	
	DL	34.75***	71.53***	27.57***	16.72***	

表 4 林分和季节对土壤养分影响的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA on the effects of stands and seasons on soil nutrients

因子	SOC/ (g · kg ⁻¹)	TN/ (g · kg ⁻¹)	TP/ (g · kg ⁻¹)	K/ (g · kg ⁻¹)	Ca/ (mg · kg ⁻¹)	Mg/ (g · kg ⁻¹)	DOC/ (g · kg ⁻¹)	DON/ (mg · kg ⁻¹)	DOP/ (mg · kg ⁻¹)
ST	2.92 ^{ns}	4.87 ^{**}	27.54 ^{***}	0.05 ^{ns}	11.58 ^{***}	9.19 ^{***}	4.87 ^{**}	10.74 ^{***}	1.83 ^{ns}
S	1.32 ^{ns}	1.38 ^{ns}	0.99 ^{ns}	3.67 [*]	2.18 ^{ns}	0.74 ^{ns}	2.75 [*]	2.58 ^{ns}	4.08 ^{**}
ST&S	3.73 ^{***}	5.66 ^{***}	16.92 ^{***}	1.80 ^{ns}	2.63 ^{***}	9.82 ^{***}	3.60 ^{***}	6.32 ^{***}	2.33 ^{***}

注: S. 季节; * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。下同。

表 5 林分组成和季节对凋落物养分影响的双因素方差分析

Table 5 Two-way ANOVA on the effects of stands and seasons on litter nutrients

因子	TC	TN	TP	K	Ca	Mg	DOC	DON	DOP
ST	2.56 ^{ns}	19.18 ^{***}	8.33 ^{**}	2.29 ^{ns}	3.01 ^{ns}	1.26 ^{ns}	7.43 ^{**}	10.54 ^{***}	7.71 ^{**}
S	187.86 ^{***}	79.77 ^{***}	18.49 ^{***}	22.94 ^{***}	28.70 ^{***}	35.03 ^{***}	104.63 ^{***}	35.46 ^{***}	19.84 ^{***}
ST&S	29.44 ^{***}	10.69 ^{***}	0.20 ^{ns}	1.57 ^{ns}	2.82 ^{ns}	1.02 ^{ns}	10.77 ^{***}	1.48 ^{ns}	0.82 ^{ns}

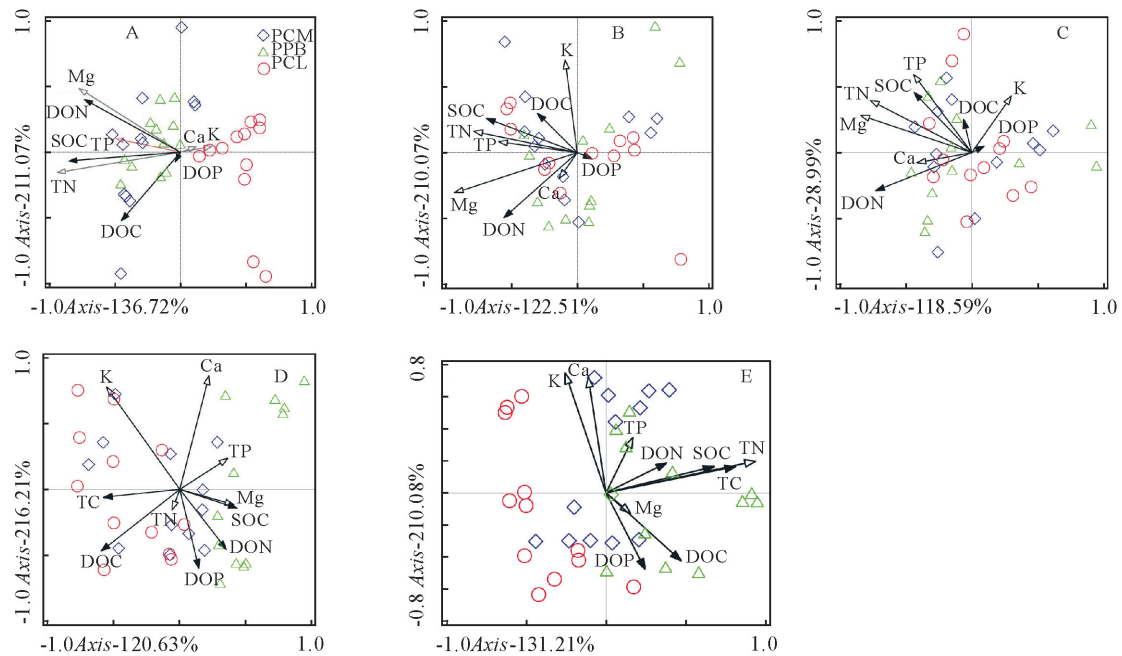
g · kg⁻¹

Fig. 1 Redundancy analysis of soil organic matter and soluble organic components with nutrient factors

图 1 土壤有机碳和可溶性有机组分与养分因子的冗余分析

Fig. 1 Redundancy analysis of soil organic matter and soluble organic components with nutrient factors

土壤可溶性有机碳、凋落物半分解层可溶性有机碳与土壤有机碳呈显著正相关,凋落物未分解层全 K、全 Ca 与土壤有机碳呈显著负相关(表 6)。可溶性有机 P 仅在凋落物未分解层与土壤有机碳呈显著正相关,全 N、全 P、全 Mg 在各土层均与土壤有机碳呈正相关;总体上,土壤有机碳受可溶性有机碳、全 N、全 Mg 的影响较大。

3 讨论

不同林分组成的森林因在树种、群落结构等方面的差异,形成了不同的凋落物性质和养分条件,这些显著影响了土壤养分含量。本研究表明,土壤和凋落物养分在林分模式和季节的交互作用下存在显

著差异,这与大多数研究一致^[23]。不同林分模式由于生理特征的差异,导致凋落物和土壤微生物群落不同,影响了土壤养分的含量^[24]。在本研究中,不同林分模式的土壤养分含量为:杉木-闽楠混交林>闽楠纯林>杉木纯林,表明混交的栽植方式能够有效改善土壤养分,同黄永珍等^[25]研究结果一致。凋落物作为土壤养分的主要来源之一,直接影响土壤中养分元素的含量^[26]。对比纯林,混交林中不同种类的凋落物混合产生协同效应,使分解的物理环境发生了改变,同时混合凋落物比单一凋落物养分更为丰富,通过淋溶作用进行养分周转时,解除了单一凋落物对微生物分解活动的养分限制,加速了凋落物的分解。此外,凋落物的 C/N 也是影响凋落物

表 6 土壤有机碳与养分因子的相关系数

Table 6 Correlation coefficient between soil organic matter and nutrient factors

养分因子	土层/cm			分解层	
	0~10	10~20	20~30	未分解	半分解
可溶性有机碳/(g·kg ⁻¹)	0.409 [*]	0.433 ^{**}	0.499 ^{**}	0.069	0.436 ^{**}
可溶性有机 N/(mg·kg ⁻¹)	0.530 ^{**}	0.171	0.146	0.492 ^{**}	0.461 ^{**}
可溶性有机 P/(mg·kg ⁻¹)	0.089	0.093	-0.019	0.449 ^{**}	-0.249
全 C/(g·kg ⁻¹)	—	—	—	-0.04	0.729 ^{**}
全 N/(g·kg ⁻¹)	0.819 ^{**}	0.635 ^{**}	0.547 ^{**}	-0.041	0.682 ^{**}
全 P/(g·kg ⁻¹)	0.390 [*]	0.529 ^{**}	0.552 ^{**}	0.208	0.153
全 K/(g·kg ⁻¹)	-0.074	0.242	0.108	-0.538 ^{**}	-0.053
全 Ca/(mg·kg ⁻¹)	-0.091	0.115	0.263	-0.697 ^{**}	0.057
全 Mg/(g·kg ⁻¹)	0.660 ^{**}	0.578 ^{**}	0.556 ^{**}	0.417 [*]	0.157

分解的重要因素,C/N 越低其凋落物质量越高。相比闽楠凋落物,杉木凋落物质量较低,分解缓慢,因此养分释放较为缓慢,导致土壤养分含量下降;混交林中质量差异明显的凋落物混合时,会促进真菌群落的养分吸收,高质量凋落物促进其低质量凋落物的分解,从而加速整体的分解速率,提高了土壤养分的含量^[27]。3 种林分组成土壤养分含量随土层加深递减,均表现出表聚效应,是由于在没有干扰的条件下,凋落物中的养分通过土壤微生物群落的生化作用和异化作用,完成养分的释放和转移,但该反应主要发生在表层土壤中^[28],因此土壤养分随土壤深度的增加呈下降趋势。

3 种林分组成的土壤和凋落物养分均受到季节变化的显著影响,土壤与凋落物养分随季节的变化并不一致,季节因素对土壤养分的影响较大。季节因素主要通过改变水热条件,来影响土壤养分含量,总体上,闽楠纯林和杉木纯林对季节的响应相反,杉木-闽楠混交林与闽楠纯林变化相似。水热条件是影响凋落物分解的重要因素之一,研究区属亚热带季风气候,雨季降雨集中,会产生强烈的淋溶作用,加速凋落物养分释放^[27],从而降低了凋落物层的养分含量。此外,有研究表明亚热带地区植被凋落物表现出明显的节律性,阔叶落叶林一般为雨季的初级和末期,而针叶林则一般在 6 月出现凋落物高峰期^[27]。这也是导致凋落物养分受季节影响的重要原因之一。

土壤有机碳主要来源于植被地上部分的凋落物及其地下部分细根的残余物,植被类型的变化会影响到土壤有机碳的输入。本研究表明,不同林分组成的土壤有机碳确实存在显著差异,全 N、可溶性有机碳及全 Mg 对土壤有机碳存在显著影响,符合 Lu 等^[29]的研究结果。土壤 N 含量与凋落物中 N 素的含量息息相关,凋落物中的 N 含量转而又会影响凋

落物分解的速率。相比阔叶林,针叶林凋落物起始 C/N 一般较高,不利于微生物生理活动的代谢需求,需要吸收外界土壤中的 N 素来完成分解活动,导致针叶林土壤 N 含量下降^[23],这与本研究结果相同。而且,N 素与微生物的活性显著相关,土壤的 N 素下降导致微生物活性下降,致使土壤有机碳含量减少^[30]。闽楠细根生长旺盛,表层土壤中细根与微生物交互活动频繁,能进一步促进凋落物的分解,发达的浅层根系使土层疏松,也有利于有机碳的存储。本研究中,季节对土壤有机碳的影响主要通过水热条件的变化来影响土壤及凋落物养分,这与王园博等^[23]研究结果一致。此外,有研究表明,季节因子会影响到土壤酶活性和微生物活性,改变土壤有机碳的矿化进程,改变土壤有机碳的输入、输出^[8,31]。

4 结 论

林分组成对季节因子对土壤和凋落物养分均存在显著影响,杉木-闽楠混交林土壤和凋落物养分显著高于杉木纯林、闽楠纯林,其土壤有机碳、全 N、全 P 比杉木纯林高 35.07%~52.63%,凋落物矿质元素含量比闽楠纯林高 25.35%~45.16%。林分因子主要通过改变凋落物养分的输入来影响土壤养分,季节因子主要通过 C、N 及可溶性有机组分的影响来调控土壤养分。林分组成和季节因子均会对土壤有机碳产生显著影响,主要通过影响土壤 N 素的含量来影响土壤有机碳的含量。

参考文献:

[1] MARIN-SPIOTTA E, SILVER W L, SWANSTON C W, *et al.* Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15 (6):1584-1597.

[2] 武天云, JEFF J S, 李凤民, 等. 土壤有机质概念和分组技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(4):717-722.

- WU T Y, JEFF J S, LI F M *et al.* Concepts and relative analytical techniques of soil organic matter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(4): 717-722. (in Chinese)
- [3] 徐嘉晖, 孙颖, 高雷, 等. 土壤有机碳稳定性影响因素的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(2): 222-230.
- XU J H, SUN Y, GAO L, *et al.* A review of the factors influencing soil organic carbon stability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 222-230. (in Chinese)
- [4] ONDRASEK G, BAKIĆ BEGIĆ H, ZOVKO M, *et al.* Biogeochemistry of soil organic matter in agroecosystems & environmental implications[J]. Science of The Total Environment, 2019, 658: 1559-1573.
- [5] WU C W, ZHENG Y, YANG H, *et al.* Effects of different particle sizes on the spectral prediction of soil organic matter[J]. Catena, 2021, 196: 104933.
- [6] CONANT R T, RYAN M G, ÅGREN G I, *et al.* Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward[J]. Global Change Biology, 2011, 17(11): 3392-3404.
- [7] VON L M, KÖGEL K I. Temperature sensitivity of soil organic matter decomposition—what do we know[J]. Biology and Fertility of Soils, 2009, 46(1): 1-15.
- [8] JEREMY P, VINCENT E J J, MILLS R T E, *et al.* Seasonality alters drivers of soil enzyme activity in subalpine grassland soil undergoing climate change[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 124: 266-274.
- [9] VANCAMPENHOUT K, DE VOS B, WOUTERS K, *et al.* Determinants of soil organic matter chemistry in maritime temperate forest ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2): 220-233.
- [10] 廖凯涛, 胡建民, 宋月君, 等. 南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 36-42, 50.
- LIAO K T, HU J M, SONG Y J, *et al.* Effects of vegetation landscape patterns on runoff and sediment in red soil hilly region of southern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 36-42, 50. (in Chinese)
- [11] 王培俊, 刘旗, 孙煌, 等. 南方红壤水土流失区生态系统服务价值时空变化研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 219-228.
- WANG P J, LIU Q, SUN H, *et al.* Temporal and spatial variation of ecosystem service values in red soil erosion areas in south China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 219-228. (in Chinese)
- [12] 陈洋, 张海东, 于东升, 等. 南方红壤区植被结构类型与降雨模式对林下水土流失的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 150-157.
- CHUN Y, ZHANG H D, YU D S, *et al.* Effects of vegetation structure types and rainfall patterns on soil and water loss of understory vegetation in red soil areas of south China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(5): 150-157. (in Chinese)
- [13] 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.
- XIAO H Y, LIU B, YU Z P, *et al.* Effects of forest types on soil dissolved organic carbon and nitrogen in surface and deep layers in subtropical region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4): 1031-1038. (in Chinese)
- [14] 孙欧文, 蔡建国, 吴家森, 等. 浙江省典型森林类型枯落物及林下土壤水文特性[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 118-123.
- SUN O W, CAI J G, WU J S, *et al.* Hydrological characteristics of litter and forest soil of typical forest types in Zhejiang Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 118-123. (in Chinese)
- [15] FELTON A, NILSSON U, SONESSON J, *et al.* Replacing monocultures with mixed-species stands: Ecosystem service implications of two production forest alternatives in Sweden [J]. Ambio, 2016, 45(S2): 124-139.
- [16] 康希睿, 李晓刚, 张涵丹, 等. 不同混交措施下杉木人工林群落稳定性特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 2912-2920.
- KANG X R, LI X G, ZHANG H D, *et al.* Community stability characteristics of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different mixing measures[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(9): 2912-2920. (in Chinese)
- [17] 刘宝, 吴文峰, 何盛强, 等. 不同林龄闽楠林土壤呼吸与碳储量研究[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(4): 431-438.
- LIU B, WU W F, HE S Q, *et al.* Study on the soil respiration and carbon reserve in different age stands of *Phoebe bournei* [J]. Journal of Forest and Environment, 2018, 38(4): 431-438. (in Chinese)
- [18] 杨贤均, 邓云叶, 段林东. 三种不同林分的保护水土功能分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2): 177-182.
- YANG X J, DENG Y Y, DUAN L D. Analysis on soil and water protection functions of three types of stands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(2): 177-182. (in Chinese)
- [19] 唐学君, 肖舜祯, 王伟峰, 等. 中亚热带典型杉阔混交林碳储量分配特征[J]. 地域研究与开发, 2019, 38(4): 111-114, 121.
- TANG X J, XIAO S Z, WANG W F, *et al.* Carbon storage and its allocation characteristics of typical chinese fir and broad-leaved mixed forests in mid-subtropical areas[J]. Areal Research and Development, 2019, 38(4): 111-114, 121. (in Chinese)
- [20] 刘涛, 王家妍, 李万年, 等. 杉木×观光木异龄复层混交对林木生长及土壤理化性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 125-130.
- LIU T, WANG J Y, LI W N, *et al.* Growth and soil physico-chemical properties in the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum* in different aged and multi-layer forests[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 125-130. (in Chinese)
- [21] 孙嘉伟, 罗丽莹, 李淑英, 等. 闽楠叶片功能性状及表型可塑性对其与杉木混交响应[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2855-2866.
- SUN J W, LUO L Y, LI S Y, *et al.* Response of *Phoebe bournei* leaf functional traits and phenotypic plasticity to its mixture with the Chinese fir[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(7): 2855-2866. (in Chinese)
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [23] 王园博, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黑河中游湿地不同植物群落土壤

- 有机碳分布及影响因素[J]. 草业科学, 2020, 37(5): 833-844.
- WANG Y B, ZHAO R F, ZHANG L H, *et al.* Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe river wetland[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(5): 833-844. (in Chinese)
- [24] MAN M, PIERSON D, CHIU R, *et al.* Twenty years of litter manipulation reveals that above-ground litter quantity and quality controls soil organic matter molecular composition [J]. Biogeochemistry, 2022, 159(3): 393-411.
- [25] 黄永珍, 王晟强, 叶绍明. 杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2857-2865.
- HUANG Y Z, WANG J Q, YE S M. Effects of *Cunninghamia lanceolata* stand types on the changes of aggregate-related organic carbon and nutrients in surface soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 2857-2865. (in Chinese)
- [26] 熊勇, 许光勤, 吴兰. 混合凋落物分解非加和性效应研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(9): 56-60, 120.
- XIONG Y, XU G Q, WU L. Progress on non-additive effects of mixed litter decomposition[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(9): 56-60, 120. (in Chinese)
- [27] 林开敏, 章志琴, 叶发茂, 等. 杉木人工林下杉木、楠木和木荷叶凋落物分解特征及营养元素含量变化的动态分析[J]. 植物资源与环境学报, 2010, 19(2): 34-39.
- LIN K M, ZHANG Z Q, YE F M, *et al.* Dynamic analysis of decomposition characteristics and content change of nutrient elements of leaf litter of *Cunninghamia lanceolata*, *Phoebe bournei* and *Schima superba* under *C. lanceolata* artificial forest[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2010, 19(2): 34-39. (in Chinese)
- [28] PAUL E A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 98: 109-126.
- [29] LU M, ZHOU X H, LUO Y Q, *et al.* Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: a meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 140(1/2): 234-244.
- [30] COTRUFO M F, HADDIX M L, KROEGER M E, *et al.* The role of plant input physical-chemical properties, and microbial and soil chemical diversity on the formation of particulate and mineral-associated organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 168: 108648.
- [31] 杜璨, 耿增超. 秦岭 2 种林分土壤性质的季节性变化对细菌群落多样性和组成的影响[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(1): 54-61.
- DU C, GENG Z C. Effects of seasonal changes of soil properties on soil bacterial diversity and community structure of two forest types in Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(1): 54-61. (in Chinese)
-
- (上接第 131 页)
- [18] 刘丽, 张立, 蔡靖, 等. 干旱胁迫及复水后 84K 杨栓塞修复及其他水力学特性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(7): 22-30.
- LIU L, ZHANG L, CAI J, *et al.* Hydraulic characteristics and embolism repair of *Populus alba* × *P. glandulosa* after drought stress and rehydration[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(7): 22-30. (in Chinese)
- [19] 徐瑞. 干旱胁迫下尾巨桉生长受限于死亡的生理机制[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [20] 李吉跃. 植物耐旱性及其机理[J]. 北京林业大学学报, 1991, 18(3): 92-100.
- LI J Y. Mechanisms of drought tolerance in plants[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1991, 18(3): 92-100. (in Chinese)
- [21] 李继文, 王进鑫, 张慕黎, 等. 干旱及复水对刺槐叶水势的影响[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 33-36.
- LI J W, WANG J X, ZHANG M L, *et al.* Effect of drought and rewater on leaf water potential of *Robinia pseudoacacia* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 33-36. (in Chinese)
- [22] 王飞, 郭树江, 韩福贵, 等. 民勤荒漠植物叶片水分吸收性状研究[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1256-1263.
- WANG F, GUO S J, HAN F G, *et al.* Study on leaf water uptake traits of desert plants in Minqin[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1256-1263. (in Chinese)
- [23] 金思雨, 彭祚登. 刺槐和油松干旱胁迫响应研究进展[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4): 79-91.
- JIN S Y, PENG Z D. Research progress on drought stress on *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 79-91. (in Chinese)
- [24] NORTH G B, NOBLE P S. Hydraulic conductivity of concentric root tissues of agave deserti engelm. under wet and drying conditions[J]. New Phytologist, 1995, 130(1): 47-57.
- [25] VANDELEUR R, NIEMIETZ C, TIBBROOK J, *et al.* Roles of aquaporins in root responses to irrigation[J]. Plant and Soil, 2005, 274(1-2): 141-161.
- [26] TYREE M T, ZIMMERMANN M H. Xylem structure and the ascent of sap[M]. 2nd ed. Berlin: Springer, 2002.
- [27] 徐茜, 陈亚宁, 胡杨茎木质部解剖结构与水力特性对于干旱胁迫处理的响应[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(8): 1059-1065.
- XU Q, CHEN Y N. Response of anatomy and hydraulic characteristics of xylem stem of *Populus euphratica* to drought stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(8): 1059-1065. (in Chinese)
- [28] 叶功富, 郑天汉, 杨细明, 等. 水分胁迫下木麻黄光合作用和水分利用效率的研究[J]. 防护林科技, 2000(Supp. 1): 160-163.
- YE G F, ZHENG T H, YANG X M, *et al.* Studies on the photosynthesis and water use efficiency of *Casuarina* species under the condition of water stress[J]. Protection Forest Science and Technology, 2000(Supp. 1): 160-163. (in Chinese)