

黄土高原中西部人工针叶林浅层土壤 有机碳积累及影响因素

王一佩¹, 孙美美², 程然然³, 关晋宏³, 李国庆³, 杜盛^{1,3}

(1.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:林地浅层土壤是凋落物有机质向土壤碳库输移的关键层,对于土壤有机碳积累具有表征作用。为了探究黄土高原中西部 3 种人工针叶林土壤固碳功能,基于野外调查获取的样地信息和对凋落物、土壤的采样分析,研究了林分条件、凋落物成分以及环境因子对浅层土壤有机碳积累的影响。结果表明:在研究区域内,林龄与浅层土壤碳密度呈现极显著相关关系;年平均温度对于浅层土壤碳密度无明显影响;在海拔高于 2 000 m 的样地之间,海拔高度与浅层土壤碳密度呈现极显著正相关关系,而低于 2 000 m 时不存在这种相关关系;各样地年平均降雨量与浅层土壤碳密度呈现正相关关系,凋落物碳氮比与浅层土壤碳密度呈极显著的负相关关系。运用随机森林法对各影响因子的重要性进行分析排序可知,凋落物成分、气候因子、海拔以及林龄对于全部样地浅层土壤碳密度变异的总解释率为 66.2%,其中凋落物碳氮比是影响黄土高原中西部人工针叶林浅层土壤碳积累的主导因子。

关键词:黄土高原; 人工针叶林; 土壤有机碳; 影响因素

中图分类号:S718.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0030-07

Accumulation of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Coniferous Plantations in the Midwestern Loess Plateau

WANG Yipei¹, SUN Meimei², CHENG Ranran³, GUAN Jinhong³, LI Guoqing³, DU Sheng^{1,3}

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.State Key Laboratory of Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The shallow soil of forest land is the key layer for the transport of litter organic matter to soil carbon pool, which is indicative of soil organic carbon accumulation. In order to explore the soil carbon sequestration function of three kinds of coniferous plantations in the midwestern Loess Plateau, the effects of stand conditions, litter composition and environmental factors on the accumulation of organic carbon in shallow soils were studied based on the sample land information obtained from field investigation and the sample analysis of litter and soils. The results show that, the age of the forest and the carbon density of the shallow soil have the very significant correlation in this study area; the annual average temperature has no significant effect on the carbon density of the shallow soil; in various areas above 2 000 m above sea level, there is an extremely significant positive correlation between altitude and the carbon density of shallow soil, while there is no such correlation when the altitude is less than 2 000 m; there is the positive correlation between the average annual rainfall of various areas and the carbon density of shallow soil, and there is the very significant negative correlation between the ratio of carbon to nitrogen of litter and the carbon density of shallow soil. According to the results from the random forest approach to sort the importance of each influence factor on soil carbon density function, the total explanatory rate of the those factors to the carbon density of shallow soil changes is 66.2%, among which the ratio of carbon to nitrogen of litter is the dominant factor on carbon accumulation in shallow soil.

收稿日期:2019-12-16

修回日期:2019-12-25

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目“中国森林生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”(XDA05050202)

第一作者:王一佩(1994—),女,陕西省安康市人,在读硕士研究生,主要研究方向为森林生态、流域生态与管理。E-mail:wangyipei8176@163.com

通信作者:杜盛(1965—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士,研究员,主要研究方向为森林生态、流域生态与管理。E-mail:shengdu@ms.iswc.ac.cn

Keywords: middle and western Loess Plateau; plantation; soil organic carbon; influencing factor

利用陆地生态系统固碳,是减缓大气 CO₂ 浓度升高最为经济可行的途径,在全球气候变化背景下受到广泛关注。森林是陆地生态系统最大的生态碳库,贡献了地上碳库的近 80% 和地下碳库的 40%,其中森林土壤碳储量约为植被的 3.39 倍^[1]。研究森林土壤对有机碳的积累效应及其影响因素对于探明森林固碳的潜力和机制,合理制定森林经营规划具有重要的理论和实践意义。

森林土壤有机碳库的变化受积累的时间、森林类型以及气候、立地等环境因子的综合影响。林地浅层土壤是凋落物有机质向土壤碳库输移的关键层,对于土壤有机碳积累具有表征作用。林地表面的枯枝落叶是土壤有机碳积累的主要来源,在浅层土壤内还分布着大量的微生物和植物细根^[2-3],通过分解残体和分泌有机物质向土壤中输送有机碳^[4]。目前关于土壤有机碳储量及垂直分布情况已有大量研究报道。基于全球尺度的研究显示,在深度为 20 cm 的浅层土壤中,有机碳储量约为 1 m 深度的 48.5%^[5]。对中国不同森林类型土壤碳密度的研究结果也表明表层土壤中有有机碳密度最大,随土层深度的增加逐渐降低^[6-9],浅层土壤的有机碳密度基本反映了生态系统碳固存能力。而相较于深层土壤,表层土壤与植被、大气直接接触的条件使其成为受人为及自然因素干扰最大的区域,易受外界干扰而导致其中储存的有机碳发生动态变化,因此浅层土壤碳密度的动态变化及其影响因素也成为土壤碳库研究的重点内容。相关研究结果显示,区域尺度上的浅层土壤碳储量变化受到环境因子,特别是海拔、降水量和温度的影响较多^[10-13]。

黄土高原地区生态环境脆弱,植被覆盖度低,水土流失严重。国家实施“退耕还林”等多项生态工程以来,人工林面积大幅度增加,发挥了水土保持等生态效益。随着全球气候变化的加剧,对森林生态系统固碳功能的关注度日益增加,大面积人工林通过凋落物分解向土壤输送并积累有机碳,固碳潜力巨大,在减缓大气 CO₂ 浓度升高方面也具有突出贡献。目前关于黄土高原人工林土壤固碳影响因素的研究主要集中在地形、土壤类型、林龄等方面,对于综合环境因子和凋落物特征的关注还较少。本研究以黄土高原中西部 3 种针叶树人工林为对象,通过分析林分因子、气候因子、凋落物成分对浅层土壤碳密度的综合影响,探究土壤有机碳积累的机制及主要影响因素,以期探明人工林土壤固碳机制,提高人工林碳汇功能提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于黄土高原中西部地区的 7 个区域,行

政区分别隶属于甘肃省临夏州康乐县、天水市麦积区、陇南市两当县、定西市的安定区、渭源县、漳县以及兰州市永登县,地理范围为 102°36′—106°35′E, 33°30′—37°07′N,年均气温最低为 4.19℃,最高为 9.59℃,平均年降雨量范围为 434~667 mm,属于半干旱和半湿润区,海拔高度变化范围为 1 399~2 646 m,土壤类型以褐土、壤土为主。所选取样地为油松、落叶松、华山松和云杉等针叶树人工纯林,乔木层树种单一,林下灌丛和草本生长稀疏,灌木主要有忍冬(*Lonicera japonica*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、山梅花(*Philadelphus incanus*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*),草本植物以苔草(*Carex tristachya*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)居多。

2 研究方法

2.1 样地设置

本试验是基于中国科学院战略先导专项构建全国森林生态系统固碳研究数据库的组成部分。根据气候条件变化梯度,在上述 7 个研究区设置 23 块典型林分的标准样地,样地具体位置的确定充分考虑其树种的典型性、林分结构的均一性和分布的连续性。设置时利用 GPS 确定位置,记录样地经纬度、海拔高度和立地特征,并调查林龄、林分密度等林分条件。标准样地面积原则上设置为 20 m×50 m,但因地形破碎等实际情况的限制,部分样地面积设置为 20 m×30 m。各标准样地基本信息见表 1。

2.2 样品采集与测定

土壤容重测定采用环刀法,分别在 0—10 cm 和 10—20 cm 中部采集原状土,带回实验室用于测定土壤容重。用内径为 4 cm 的土钻采集 0—10 cm 和 10—20 cm 用于测定土壤有机碳含量的土壤样品。每个样地内设置 3 个重复采样点,将等层土样混合均匀后取 200 g 装袋,带回实验室自然风干,研磨后过 2 mm 筛,大于 2 mm 的砾石单独挑出进行称重,再用四分法取部分样品再次研磨后全部过 0.25 mm 筛后装袋,用重铬酸钾—硫酸氧化外加热法测定土壤有机碳含量。

枯落物现存量调查采用样方收获法,在每个样地内设置 3 个 1 m×1 m 的样方,收集地表枯落物,装袋后带回实验室,烘干后称重并取部分样品研磨,过 0.25 mm 筛后测定全碳、全氮含量。枯落物碳含量的测定采用重铬酸钾—硫酸氧化外加热法,氮含量测定采用凯氏定氮法。

2.3 土壤碳密度计算

本研究中采用如下公式分别计算 0—10 cm 和

10—20 cm 的土壤碳密度：
$$S_i = C_i \times D_i \times E_i \times (1 - G_i)$$
式中： S_i 为第 i 层土壤碳密度； C_i 为第 i 层土壤有机碳含量 (g/kg)； D_i 为第 i 层土壤容重 (g/cm^3)； E_i 为该土层土壤厚度 (cm)； G_i 为直径 >2 mm 的砾石所占体积的百分比。

表 1 样地基本情况

年均 降雨量/mm	地区	地理位置	年均 气温/℃	海拔/m	优势种	平均 胸径/cm	林龄/a	郁闭度/ %
<500	兰州	104°2′51″E, 35°46′29″N	7.21	2362	油松	11.49	40	50
		104°2′51″E, 35°46′31″N	7.21	2360	油松	13.05	40	50
		104°2′50″E, 35°46′32″N	7.21	2357	油松	19.89	40	40
	定西	104°53′44″E, 35°30′06″N	7.51	2242	油松	7.95	27	98
		104°30′29″E, 35°44′26″N	7.51	2035	油松	6.93	30	70
		104°30′35″E, 35°44′24″N	7.51	2059	油松	7.57	30	60
	定西	103°59′06″E, 34°58′54″N	4.19	2540	落叶松	13.21	24	90
		103°59′10″E, 34°58′57″N	4.19	2589	落叶松	13.9	25	87
		104°9′27″E 34°41′08″N	5.53	2640	云杉	6.63	27	72
500~600	临夏	104°9′25″E, 34°41′00″N	5.53	2646	云杉	7.95	27	90
		103°25′25″E, 35°15′35″N	4.64	2446	油松	19.75	40	80
		103°25′25″E, 35°15′31″N	4.64	2483	油松	18.73	41	80
	天水	106°27′56″E, 34°12′15″N	9.59	1778	落叶松	10.21	17	50
		106°21′26″E, 34°19′55″N	9.59	1561	落叶松	9.19	19	80
		106°21′05″E, 34°20′09″N	9.59	1581	落叶松	8.67	15	70
	陇南	106°31′42″E, 34°7′40″N	9.97	1399	油松	24.59	50	70
		106°30′53″E, 34°7′46″N	9.97	1437	油松	16.12	45	70
		106°30′26″E, 34°7′39″N	9.97	1468	华山松	12.84	40	70
		106°33′25″E, 34°7′47″N	9.97	1495	油松	16.25	55	75
		106°33′21″E, 34°8′06″N	9.97	1538	油松	11.26	19	70
		106°28′33″E, 34°11′39″N	9.59	1705	落叶松	12.38	20	68
>600	陇南	106°28′33″E, 34°11′33″N	9.59	1696	油松	16.65	40	75
		106°28′50″E, 34°11′25″N	9.59	1687	落叶松	12.03	20	78

本文的浅层土壤碳密度即为 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤碳密度之和。

2.4 数据处理

野外调查和室内试验所得数据均经 Office Excel 整理后,在 SPSS 21.0 中采用 Pearson 法对各影响因子和土壤碳密度进行相关性分析,采用单因素方差分析检验不同龄级人工针叶林浅层土壤碳密度之间的差异性,用 R 软件中的随机森林法(Random Forest)进行影响土壤碳密度的多因子重要度分析,采用 Sig-maplot12.5 进行制图。

3 结果与分析

3.1 林分因子对试验林地浅层土壤有机碳密度的影响

本研究中样地所处位置分布于温带半干旱和半湿润区域(表 1),降雨量跨度较大,缩小降雨量梯度范围有利于提高分析林分因子影响的准确度。为此,我们选取两个降雨量梯度且存在林龄变异的样地

对林龄的影响进行相关性分析。图 1A 为 573 mm 至 603 mm 降雨量区间(变幅 30 mm)内林龄与浅层土壤碳密度之间的关系,图 1B 为 424 mm 至 434 mm 降雨量区间(变幅 10 mm)内林龄与浅层土壤碳密度之间的关系,由图可知两个降雨区间内的林龄与浅层碳密度之间皆表现为极显著的正相关关系($p=0.006\ 7$; $p=0.003$)。

3.2 气候因子与海拔对人工针叶林浅层土壤碳密度的影响

通过对年降雨量和年平均气温两个主要气候因子与林地浅层土壤有机碳密度的关系进行分析发现(图 2),随人工针叶林所在地年平均降雨量的增加,林地浅层土壤有机碳密度也呈现显著的增加趋势($p<0.05$, $R^2=0.1952$)。林地浅层土壤有机碳密度与各样地年平均气温之间无明显相关关系。本研究中人工针叶林样地的海拔高度范围为 1 399~2 646 m,由于在较高海拔地带海拔因子对水热等环境因子会产

生较强烈的再分配作用,而在低海拔地区通常主要受地带性气候因子的影响,本研究把样地分为海拔 2 000 m 以下和 2 000 m 以上两组进行分析。当样地海拔低于 2 000 m 时,浅层土壤碳密度与海拔高度无相关

关系,说明更多地受到其他因素的影响;当样地海拔高度高于 2 000 m 时,人工针叶林浅层土壤碳密度随着海拔高度的增加而增大(图 2),两者之间的正相关关系达到了极显著水平($p<0.01, R^2=0.893\ 4$)。

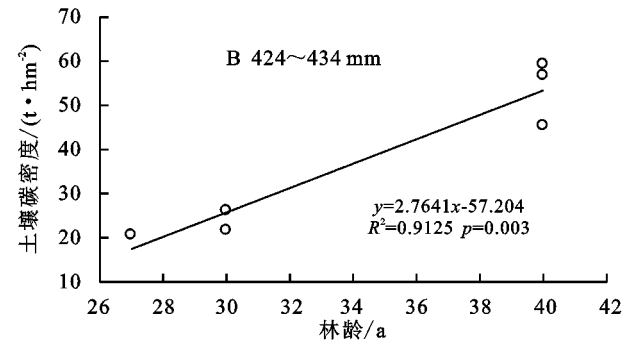
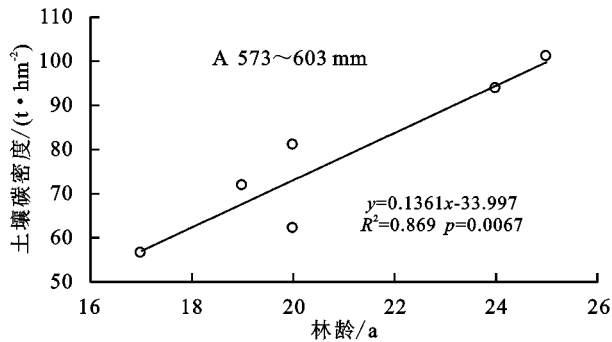


图 1 人工针叶林浅层土壤有机碳密度与林龄的关系

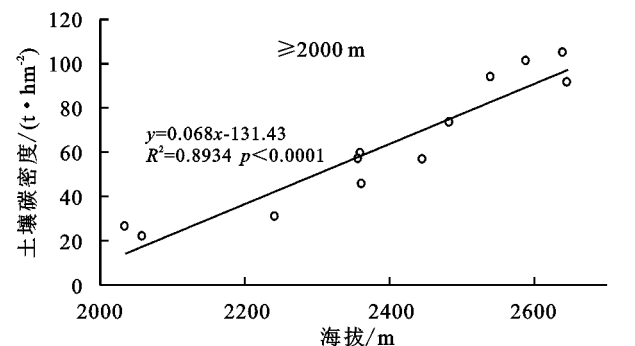
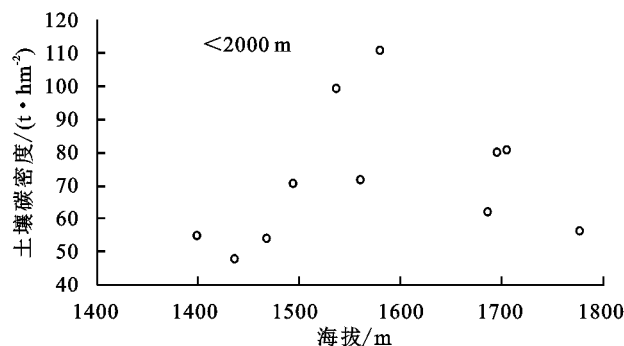
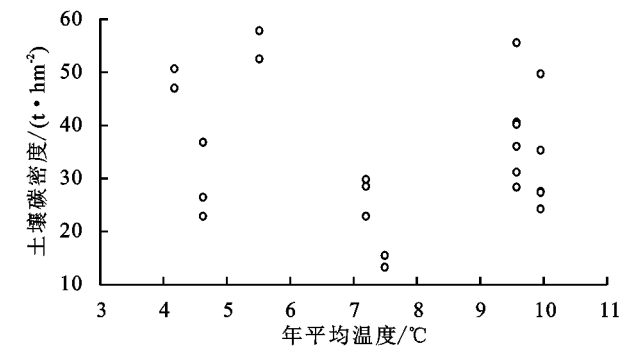
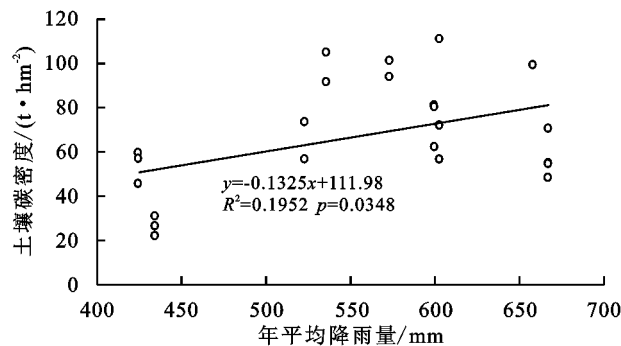


图 2 人工针叶林浅层土壤有机碳密度与年平均降雨量、年平均气温及海拔高度的关系

3.3 凋落物成分对林地浅层土壤有机碳密度的影响

从图 3 可看出,林地浅层土壤有机碳密度随凋落物全碳含量呈现负相关的变化趋势($p<0.01, R^2=0.4079$),而与凋落物全氮含量之间呈现正相关关系($p<0.01, R^2=0.4056$)。相关关系均达到极显著水平。人工针叶林浅层土壤有机碳密度与凋落物 C/N 呈现极显著的负相关关系($p<0.01, R^2=0.6301$),相关系数高于浅层土壤有机碳密度分别与凋落物全碳和全氮含量的相关系数,说明凋落物 C/N 对于凋落物成分影响土壤有机碳积累具有更高的解释度。

3.4 影响林地浅层土壤有机碳密度的多因子综合分析

为了进一步分析上述各因子对林地土壤有机碳积累的影响程度,采用随机森林模型对各影响因子进行相对重要性排序(图 4)。结果表明,以上影响因子对土壤有机碳

密度变化的总解释率为 66.2%,重要性从高往低排序依次为:凋落物碳氮比>海拔>凋落物碳含量>年均降雨量>林龄>年均温>凋落物全氮含量,凋落物 C/N 成为浅层土壤碳密度变化的主导因子,解释率达到 15.75%。鉴于凋落物 C/N 已经包含了凋落物 C、N 含量信息,因此海拔和年降雨量是继凋落物 C/N 之后的重要影响因子。

4 讨论

4.1 影响林地浅层土壤碳密度和土壤有机碳积累的内外因素及机制

森林土壤有机碳主要来源于地上枯落物、生物残体的分解、地下细根分泌、以及细根周转过程中产生的有机质,这些过程很大程度上受到环境因素的影响^[14-15]。环境因子包括多个方面,但基本上都是通过改变土壤中

的生物和非生物小环境影响有机碳的周转过程,本研究所探讨的气候因子和海拔都可以影响土壤水热条件从而间接影响凋落物分解和有机碳的积累。此外,环境因子还可通过影响生态系统生产力从而影响凋落物产量,也间接影响土壤的有机碳输入。

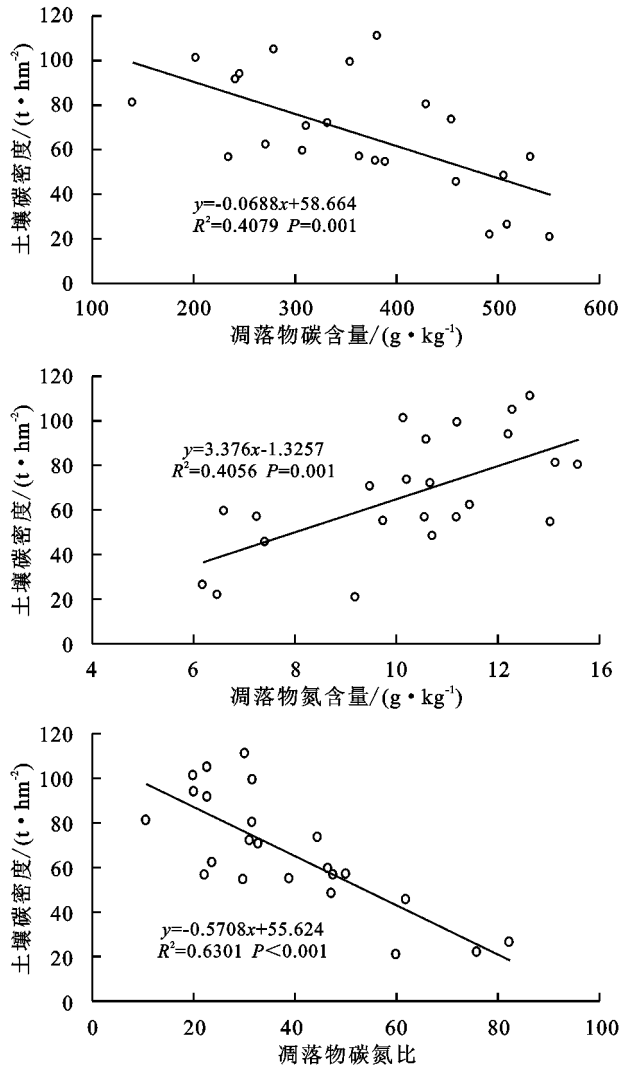


图3 人工针叶林浅层土壤有机碳密度与凋落物碳、氮含量及凋落物碳氮比的关系

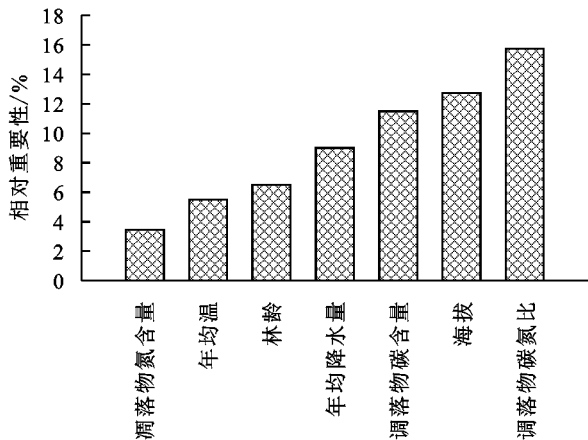


图4 基于森林随机模型的浅层土壤碳密度影响因子相对重要性排序

Mehta 等^[16]研究指出年平均降雨量是影响森林碳储量变化的主导因素,降雨量的改变会导致土壤含水量发生变化,进而影响植被生长以及土壤中微生物活性,最终在一定程度上对森林土壤碳积累产生影响^[14]。特别是在干旱半干旱地区,其特殊的生境条件使得降雨量成为影响森林土壤碳汇功能的主要限制因子。孙美美等对黄土高原地区油松人工林的研究指出降雨量的增加有利于人工油松林的生长,并有助于其碳积累量的提高^[17],李茜等^[18]对陕西省森林生态系统固碳影响因子的研究结果显示年均降雨量与土壤有机碳密度之间存在良好的正向线性相关关系,这都与本研究结果相符。

温度也是影响土壤碳密度的一个重要因素,温度变化会促进或抑制土壤微生物的活性,不仅影响凋落物和细根分解对土壤有机碳的输入,同时也影响土壤呼吸从而影响土壤有机碳分解和排放,对碳积累造成影响。许多研究结果都表明有机碳积累与温度之间存在负相关关系,认为土壤中碳在低温条件下更易积累^[19-21]。但是,从温度影响凋落物分解的角度分析,高温更能促进凋落物的分解,增加土壤中有机碳的输入^[22-23],因此,温度对土壤有机碳积累的影响较为复杂,不一定成为主导因子。在本研究中,年平均温度与浅层土壤碳密度之间并无显著相关关系,分析原因可能是由于研究区域温度梯度变化还不够大,使其不能成为限制浅层土壤碳密度变化的关键性因素,致使其对土壤碳密度的影响因受到其他因子的干扰而未体现出来。

海拔梯度的变化伴随着水热及光照条件的改变,它作为环境因素的综合反映,会成为导致林地土壤有机碳变异的主导因子^[11,24]。随着海拔升高,温度降低,使得土壤中微生物的活动受到抑制或减弱,有机碳矿化速率减缓,易积累而不易分解,最终导致土壤有机碳密度增大。在本研究中,当海拔高度上升到 2 000 m 以后,两者之间呈现出极显著的正相关关系。在海拔高度低于 2 000 m 的区域,浅层土壤碳密度与海拔高度之间无相关关系,说明在较低海拔区域多因素交互影响,使海拔对碳密度的影响未呈现明显的规律性,而当海拔高度到达 2 000 m 后,低温抑制土壤有机碳排放的作用开始显现,使得土壤有机碳密度随着海拔高度的升呈现增多的趋势。

影响林地土壤碳密度和土壤有机碳积累的林分因子可包括森林类型、林龄和林分结构组成等因素,这些因素大多通过影响林分生产力从而影响凋落物、根系等向土壤的有机碳输入,本研究只涉及 4 个针叶树种的人工纯林,因此未对林分因子进行深入分析。就林龄而言,作为影响土壤碳密度的重要因子,其变

化通常也会引起地上植被、林内郁闭度、林分密度等条件的改变,通常认为林木的生长会使土壤碳储量呈现出逐渐增多的趋势^[19,25-27],这与本研究的试验结果相符,而不同深度的土层对林龄干扰的反应程度有所差别,土壤中的碳会通过淋溶等物理作用向下积累在深层土壤中,使其贮碳量随时间缓慢逐渐增多,并呈现相对稳定的状态,而浅层土壤同植被有直接接触,受到外界环境因素的影响较大,使得林龄对土壤碳密度的干扰被削弱,这也可能是造成林龄在多因子分析中的重要度位于环境因子之后的主要原因。

4.2 黄土高原中西部地区人工针叶林土壤有机碳积累的主导影响因子

本研究中林地浅层土壤碳密度与凋落物碳含量、C/N 呈现极显著的负相关关系,与氮含量呈极显著的正相关,而且与 C/N 的相关系数最大($p < 0.000\ 1$),显示凋落物 C/N 对于林地土壤有机碳积累具有重要影响。综合分析也表明,凋落物 C/N 在诸多影响因素中的重要度为首位(图 3)。鉴于凋落物 C/N 已经包含了凋落物 C、N 含量信息,在去除凋落物 C、N 含量因子之后重要度排前 3 位的因子为凋落物 C/N、海拔和降雨量。而海拔的影响也只有在 $\geq 2\ 000\ \text{m}$ 才表现出来,因此,凋落物 C/N 和降雨量成为影响土壤有机碳积累最为重要的两个因素,说明该地区人工针叶林土壤有机碳积累主要受碳的输入过程影响,凋落物 C/N 可作为凋落物质量的重要表征,这与 Zhou 等^[28]的结论一致。

凋落物作为连接植物和土壤的重要环节,参与了森林生态系统的物质循环和能量流动^[25],在分解过程中向土壤中输送有机质,其数量、质量及分解程度都对土壤有机碳含量有直接影响^[26],是土壤中有有机碳的主要来源。凋落物向土壤输送有机质的过程除了受到降水、温度等外界因素的影响外,与其自身的初始化学组成密切相关^[31-32],陈法霖等^[33-35]通过研究森林凋落物初始化学组成与其分解效率之间的关系得出凋落物分解常数 K 与凋落物碳浓度之间存在极显著负相关关系,与氮浓度之间存在显著正相关关系。王晓峰等^[36]对杉木凋落物添加的研究显示,新增凋落物会改变原有有机碳的周转速率,当支持微生物活动的碳源得到满足后,凋落物中的氮作为主要的营养元素,其浓度直接限制其分解速率,氮含量越高,微生物活动越剧烈,凋落物分解加快,向浅层土壤中输送大量有机质。

C/N 作为凋落物碳含量和氮含量之间数量关系的综合表现,是衡量凋落物质量的主要因素^[37],其数值代表了有机物质无机化的程度^[38],能够反映凋落物分解速

度的快慢,尤其在分解初期,凋落物的分解速率大约有 80% 是由 C/N 决定的^[39]。C/N 值越小,代表凋落物中的氮越易释放到土壤中为微生物的生命活动提供营养物质,促进其活性,加速了凋落物的分解过程,增加土壤中碳的输入量,使得浅层土壤碳密度增大。本研究结果与许多相关研究结果相符^[32-34,39-40]。

5 结论

(1) 本研究表明,在研究区域内,年降雨量与人工针叶林土壤碳密度间有显著正相关关系;林龄、凋落物氮含量与人工针叶林土壤碳密度间有极显著正相关关系;海拔高度到达 $2\ 000\ \text{m}$ 时,人工针叶林土壤碳密度与海拔高度间呈极显著正相关关系;林内凋落物碳含量、凋落物碳氮比与人工针叶林土壤碳密度间有显著负相关关系,年平均温度对人工针叶林土壤碳密度无明显影响。

(2) 人工针叶林浅层土壤积累碳的能力受到多种因素的共同影响,在本研究区域内,林内凋落物质量是土壤碳积累的主要影响因素,其次为海拔和年降雨条件,综合分析后建议黄土高原区实施人工造林以及森林管理时应充分考虑当地水热条件,并可适当人工施加氮肥,关注林内植被向土壤中输入有机碳的能力,选择合适的阔叶树种与针叶林混交,有助于提高林内凋落物质量,增加有机碳的输入,改善人工林的碳汇功能。

参考文献:

- [1] 王新闯,齐光,于大炮,等.吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布[J].应用生态学报,2011,22(8):2013-2020.
- [2] 冯雪瑾,张志华,杨喜田,等.太行山低山丘陵区人工林表层土壤有机碳和全氮分布特征[J].应用生态学报,2019,30(2):511-517.
- [3] 贺亮,苏映泉,季志平,等.黄土高原丘陵区刺槐、油松人工林的碳储量及其分布特征研究[J].西北林学院学报,2007,22(4):49-53.
- [4] 阿米娜木·艾力,常顺利,张毓涛,等.天山云杉森林土壤有机碳沿海拔的分布规律及其影响因素[J].生态学报,2014,34(7):1626-1634.
- [5] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000,10:423-436.
- [6] 杨晓梅,程积民,孟蕾,等.不同林地土壤有机碳储量及垂直分布特征[J].中国农学通报,2010,26(9):132-135.
- [7] 王艳丽,字洪标,程瑞希,等.青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J].生态学报,2019,39(11):4097-4104.
- [8] Song B L, Yan M J, Hou H, et al. Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semiarid region of the Loess Plateau[J]. Catena, 2016,143:

- 159-166.
- [9] Yang Y, Mohammad A, Feng J, et al. Storage, patterns and environmental controls of soil organic carbon in China. *Biogeochemistry*, 2007, 84: 131-141.
 - [10] 何志斌, 赵文智, 刘鹤, 等. 祁连山青海云杉林斑表层土壤有机碳特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2572-2577.
 - [11] 卢慧, 丛静, 薛亚东, 等. 海拔对神农架表层土壤活性有机碳含量的影响[J]. *林业科学*, 2014, 50(8): 163-167.
 - [12] Zhang Y Q, Liu J B, Jia X, et al. Soil organic carbon accretion in arid and semiarid area after Afforestation: a Meta-Analysis[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, 22(2): 611-620.
 - [13] Woldelessie M, Van Miegroet H, Gruselle M C, et al. Storage and stability of soil organic carbon in Aspen and Conifer Forest soils of Northern Utah[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(6): 2230-2240.
 - [14] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 688-699.
 - [15] 张伟, 李鹏, 马田田, 等. 黄土高原典型流域“自然—人工”植被对土壤表层碳分布的影响[J]. *西安理工大学学报*, 2017, 23(4): 443-449.
 - [16] Mehta N, Pandrya N R, Thomas V O, et al. Impact of rainfall gradient on aboveground biomass and soil organic carbon dynamics of forest covers in Gujarat, India[J]. *Ecological Research*, 2014, 29(6): 1053-1063.
 - [17] 孙美美, 关晋宏, 吴春荣, 等. 黄土高原西部 3 个降水量梯度近成熟油松人工林碳库特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(8): 2665-2672.
 - [18] 李茜, 王芳, 曹扬, 等. 陕西省森林土壤固碳特征及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2017, 41(9): 953-963.
 - [19] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 2052-2077.
 - [20] Wynn J G, Bird M I, Vellen L, et al. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic and biotic controls[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20: GB1007. doi: 10.1029/2005GB002576.
 - [21] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10: 423-436.
 - [22] 宋新章, 江洪, 马元丹, 等. 中国东部气候带凋落物分解特征—气候和基质质量的综合影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(10): 5220-5226.
 - [23] 黄锦学, 黄李梅, 林智超, 等. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2010, 5(3): 57-63.
 - [24] 牛春梅, 关晋宏, 程然然, 等. 黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子[J]. *生态学报*, 2017, 37(15): 5049-5058.
 - [25] Martin J L, Gower S T, Plaut J, et al. Carbon pools in arboreal mixed wood logging chronosequence[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11: 1883-1894.
 - [26] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. *植物生态学报*, 2004, 28(5): 657-664.
 - [27] Luan J, Liu S, Zhu X, et al. Soil carbon stocks and fluxes in a warm-temperate oak chronosequence in China[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347: 243-253.
 - [28] Zhou G Y, Xu S, Ciais P, et al. Climate and litter C/N ratio constrain soil organic carbon accumulation[J]. *National Science Review*, 2019, 6(4): 746-757. Doi: 10.1093/nsr/nwz045.
 - [29] Sun O J, Campbell J, Law B E, et al. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest USA[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10: 1470-1481.
 - [30] 任悦, 高广磊, 丁国栋, 等. 沙地樟子松人工林叶片—枯落物—土壤有机碳含量特征[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 40(7): 36-44.
 - [31] Singh K P, Singh P K, Tripathi S K. Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29: 371-378.
 - [32] Tateno R, Tokuchi N, Yamanaka N, et al. Comparison of litterfall production and leaf litter decomposition between an exotic black locust plantation and an indigenous oak forest near Yan'an on the Loess Plateau China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241: 84-90.
 - [33] 陈法霖, 江波, 张凯, 等. 退化红壤丘陵区森林凋落物初始化学组成与分解速率的关系[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 565-570.
 - [34] 潘萍, 赵芳, 欧阳勋志, 等. 马尾松林两种林下植被土壤碳氮特征及其与凋落物质量的关系[J]. *生态学报*, 2018, 38(11): 3988-3997.
 - [35] 卢同平, 张文翔, 牛洁, 等. 西双版纳不同森林类型凋落叶与土壤碳氮变化研究[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(8): 1526-1533.
 - [36] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9): 2393-2398.
 - [37] 曾锋, 邱治军, 许秀玉. 森林凋落物分解研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(1): 239-243.
 - [38] 于明坚, 陈启常, 李铭红, 等. 青冈常绿阔叶林死地被层和土壤性质特征的研究[J]. *林业科学*, 1996, 32(2): 103-110.
 - [39] 郭培培, 江洪, 余树全, 等. 亚热带 6 种针叶和阔叶树种凋落叶分解比较[J]. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(5): 655-659.
 - [40] 裴蓓, 高国荣. 凋落物分解对森林土壤碳库影响的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(26): 58-64.