碳效应研究

人工造林对冀北林草交错带土壤碳密度的影响

王晓蕊，贾彦龙，许中旗，杨晨阳，崔红娜，黄晴晴
（河北农业大学 林学院，河北 保定 071000）

摘　要：［目的］探究人工造林对冀北林草交错带土壤有机碳密度（SOCD）的影响，为提升该地区陆地生态系统碳汇功能提供科学依据。［方法］以御道口地区的樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）和华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）人工林为研究对象，以未造林地为对照，分析人工林与未造林地（按生物量由高到低分为未造林地Ⅰ、未造林地Ⅱ和未造林地Ⅲ共 3 种类型）之间、不同人工林之间土壤有机碳含量（SOC）和碳密度（SOCD）的差异。［结果］①御道口地区未造林地土壤有机碳含量在 2.54 ～60.57 g/kg，与植被生物量呈明显的正相关关系（$p<0.001$）。②相同林龄（16～20 a）华北落叶松人工林和樟子松人工林各土层土壤有机碳含量均明显高于未造林地Ⅱ和未造林地Ⅲ，低于未造林地Ⅰ（$p<0.05$），同时，华北落叶松人工林又明显高于樟子松人工林，且在 0—10 cm 土层有显著差异（$p<0.05$）。③土壤有机碳密度（0—60 cm）由高到低依次为：未造林地Ⅰ（127.56 t/hm^2）＞16～20 a 华北落叶松人工林（105.26 t/hm^2）＞16～20 a 樟子松人工林（75.52 t/hm^2）＞未造林地Ⅱ（56.06 t/hm^2）＞未造林地Ⅲ（31.78 t/hm^2），除樟子松人工林与未造林地Ⅱ之间没有显著差异外（$p>0.05$），其他类型之间均存在显著差异（$p<0.05$）。④华北落叶松人工林土壤有机碳密度随林龄的增加而增加，不同林龄华北落叶松人工林土壤有机碳密度（0—60 cm）分别为 105.26 t/hm^2（16～20 a），112.29 t/hm^2（21～25 a）和 159.73 t/hm^2（26～30 a）；樟子松人工林则随着林龄的增加呈先下降后上升趋势，不同林龄樟子松人工林土壤有机碳密度（0—60 cm）分别为 79.38 t/hm^2（6～10 a），54.24 t/hm^2（11～15 a），75.52 t/hm^2（16～20 a）和 82.24 t/hm^2（＞20 a）。［结论］人工造林对土壤有机碳含量和碳密度的影响与初始条件和造林树种有关，在御道口地区，使用华北落叶松和樟子松在土壤有机碳含量较低地段进行造林能显著提高土壤有机碳含量和碳密度，华北落叶松较樟子松的提高效果更为显著。

关键词：人工林；土壤有机碳含量；土壤有机碳密度；华北落叶松；樟子松
文献标识码：A　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0208-07　　**中图分类号：**S153.6，S725.7

文献参数：王晓蕊，贾彦龙，许中旗，等.人工造林对冀北林草交错带土壤碳密度的影响[J].水土保持通报，2025，45(1)：208-214. Wang Xiaorui，Jia Yanlong，Xu Zhongqi，et al. Effects of afforestation on soil organic carbon density in forest-steppe ecotone of Northern Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45(1)：208-214. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.022；CSTR：32312.14.stbctb.2025.01.022.

Effects of afforestation on soil organic carbon density in forest-steppe ecotone of Northern Hebei Province

Wang Xiaorui，Jia Yanlong，Xu Zhongqi，Yang Chenyang，Cui Hongna，Huang Qingqing
（*College of Forestry*，*Hebei Agricultural University*，*Baoding*，*Hebei* 071000，*China*）

Abstract：［Objective］The effect of afforestation on soil organic carbon density（SOCD）was studied to provide a scientific basis for improving the carbon sink of terrestrial ecosystems in the forest-steppe ecotone of Northern Hebei Province.［Methods］Scotch pines（*Pinus Sylvestris* var. *mongolica*）and larch（*Larix principis-rupprechtii*）plantations were selected as the research subjects in the Yudaokou area located in a forest-steppe ecotone. Unforested lands（including unforested land Ⅰ with high biomass，unforested land Ⅱ with medium biomass，and unforested land Ⅲ with low biomass）served as controls. The soil organic carbon（SOC）content and soil organic carbon density（SOCD）of different terrestrial ecosystems were studied.［Results］① The SOC content of unforested lands in Yudaokou area ranging from 2.54 to 60.57 g/kg were

收稿日期：2024-06-15　　**修回日期：**2024-10-21　　**采用日期：**2024-10-22
资助项目：河北省科学技术研究与发展计划项目“燕山北部山地典型森林生态系统碳汇功能及其对森林经营措施的响应”（10236728）；国家重点研发计划项目“水热变化对典型人工林不同林龄期木质部生长的影响”（2019YFF0303203）
第一作者：王晓蕊（1999—），女（汉族），河北省邯郸市人，硕士研究生，研究方向为森林生态学。Email：1223614057@qq.com。
通信作者：许中旗（1971—），男（汉族），河北省饶阳县人，博士，教授，主要从事森林生态学、恢复生态学方面的研究。Email：xzq7110@163.com。

positively correlated with the vegetation biomass. ② At the same age (16—20 years), the SOC content in the *L. principis-rupprechtii* and *P. Sylvestris* var. *mongolica* plantations was significantly higher than that in unforested land Ⅱ and unforested land Ⅲ and lower than that in unforested land Ⅰ ($p<0.05$), and the SOC content in the *L. principis-rupprechtii* plantations was higher than that in the *P. Sylvestris* var. *mongolica* plantations, with a significant difference observed in the 0—10 cm soil layer ($p<0.05$). ③ The order of SOCD (0—60 cm) from high to low was unforested land Ⅰ (127.56 t/hm^2)>*L. principis-rupprechtii* plantation(105.26 t/hm^2)>*P. Sylvestris* var. *mongolica* plantation (75.52 t/hm^2)> unforested land Ⅱ (56.06 t/hm^2)> unforested land Ⅲ (31.78 t/hm^2), and there were significant differences between the vegetation types ($p<0.05$) except that between *P. Sylvestris* var. *mongolica* plantations and unforested land Ⅱ ($p>0.05$). ④ The SOCD of 0—60 cm in the *L. principis-rupprechtii* plantations increased with the increase of the ages in all soil layer, and they were 105.26 t/hm^2(16～20 a), 112.29 t/hm^2(21～25 a) and 159.73 t/hm^2(26～30 a), respectively; the SOCD of the *P. Sylvestris* var. *mongolica* plantations decreased first and then increased with the increase of the ages, and the SOCD of 0—60 cm soil depth was 79.38 t/hm^2(6～10 a), 54.24 t/hm^2(11～15 a), 75.52 t/hm^2(16～20 a) and 82.24 t/hm^2(>20 a), respectively. [Conclusion] The effect of afforestation on SOC content and storage depends on the initial conditions of forested land and the tree species; in Yudaokou area, afforestation using *L. principis-rupprechtii* and *P. Sylvestris* var. *mongolica* pine in places with lower SOC content can increase SOCD, and *L. principis-rupprechtii* can increase SOCD more than *P. Sylvestris* var. *mongolica*.

Keywords: plantation; soil organic carbon content; soil organic carbon density (SOCD); *Larix principis-rupprechtii*; *Pinus sylvestris* var. *mongolica*

由大气 CO_2浓度上升导致的全球气候变暖威胁着人类的生存和发展[1]。陆地生态系统具有重要的碳汇作用,其中,土壤是储量最大的碳库,其微小变化就会对大气 CO_2浓度产生巨大影响[2]。与地上生物碳库相比,土壤碳库受各种干扰影响更小,周转速率更慢,具有更高的稳定性[3-4]。人工造林可以显著影响土壤有机碳密度,人工造林能够通过地上和地下凋落物的分解将碳转移至土壤,最后转化成稳定的土壤有机质,是一种有效的固碳途径[5]。因此,有关人工造林对土壤碳密度影响的研究日益增多,但已有研究[6-8]的结论不尽相同。多数研究[9-11]认为,人工造林后土壤碳密度会有明显增加,但也有研究[12-13]发现,人工造林导致了土壤碳密度的下降。同时,也有研究认为,造林只是改变了碳在不同土壤空间的重新分配,对碳密度并无明显影响[14-15]。已有研究产生不同结论的原因,可能与研究地域的生态条件、植被状况、造林树种等因素有关,它们影响着土壤的初始条件、林下凋落物的数量和质量以及分解速率,从而对土壤有机碳密度产生影响[16-18]。明确不同条件下人工造林对土壤有机碳密度的影响,对于通过人工造林提升陆地生态系统的碳汇功能具有重要意义。

河北省御道口牧场地处内蒙古高原与冀北山地的交汇带,与浑善达克沙地接壤,为典型的森林草原过渡带[19-20]。自 1999 年以来,河北省实施了“再造 3 个塞罕坝工程”,御道口地区进行了大规模人工造林,使得该地区的森林覆被率明显增加。但是人工林营造对该地区的土壤有机碳密度有何影响,不同造林树种之间是否有明显差异,这些问题都尚不清楚。为此,本研究以御道口牧场的人工林为研究对象,以未造林地为对照,研究人工造林对土壤有机碳含量及碳密度的影响,为科学认识造林活动对土壤有机碳的影响以及合理营造碳汇林提供科学依据。

1　研究地概况

研究地点位于河北省承德市围场满族蒙古族自治县御道口牧场管理区,地处北纬 40°23′—42°36′,东经 116°57′—117°01′。御道口牧场南部与御道口乡毗邻,北部、东部与塞罕坝机械林场相连,属于高原(坝上)丘陵地带,地势东高西低,海拔高度在 1 180～1 730 m。气候为寒温带大陆性季风型高原气候,多年平均气温 −0.9 ℃,极端最低气温 −42.9 ℃,极端最高气温 33 ℃,低温天数为 150 d,无霜期年平均 73 d,年平均降水量 461.2 mm。土壤以风沙土为主,约占总面积的 65%,其次为灰色森林土,占总面积的 20%,其余为沼泽土、草甸土,土层厚度在 10—150 cm。该地区为森林草原过渡带,植被类型以为草原为主。该地区植物种类丰富,有 50 多个科,400 多种,优势种有羊草(*Leymus chinensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、无芒雀麦(*Bromus inermis*)和冰草(*Agropyro cristatum*)等。为了构筑京津生态屏障、改善区域环境,河

北省 1999 年启动实施了“再造 3 个塞罕坝林场”项目。在该项目下，御道口牧场进行了大规模的人工造林，主要造林树种为樟子松和华北落叶松[17]。

2 研究方法

2.1 野外调查及取样

2022 年 7 月于御道口牧场管理区，在进行充分踏查的基础上，选取坡度、海拔等立地条件相似的樟子松人工林和华北落叶松人工林，各设置调查样地 32 块，样地面积 400 m^2。同时，在未进行人工造林的地段设置面积为 400 m^2 的对照样地 30 块，各样地概况如表 1 所示。在每一样地进行植被调查和取样。在人工林样地，对乔木层进行每木检尺，调查树高、胸径、林分密度等指标，对于草本层则按照对角线取样法设置 1 m×1 m 的样方 3 个，调查地上、地下生物量。在对照样地中，调查植物地上、地下生物量等指标。因对照样地植被状况变化较大，将其分为 3 组，未造林地Ⅰ，植被状况最好，其平均生物量约为 10.28 t/hm^2；未造林地Ⅱ，植被状况中等，平均生物量约为 7.66 t/hm^2；未造林地Ⅲ，植被状况较差，平均生物量约为 4.89 t/hm^2。因调查样地中几乎没有灌木分布，因此未进行灌木调查。在调查样地内，利用对角线法选取 3 个点挖取土壤剖面，使用环刀分别在 0—10 cm，10—30 cm，30—60 cm 这 3 个土层进行取样，测定土壤容重；同时分层采集土壤样品，装入布袋中，用于土壤分析，共取得土壤样品 282 个。

表 1 研究样地概况

Table 1 Overview of sample plots at study area

样地类型	林龄/a	胸径/cm	树高/m	林分密度/(株·hm^{-2})	生物量/(t·hm^{-2})
华北落叶松人工林	16～20	8.30～13.73	5.48～10.22	1 550～4 000	113.67
华北落叶松人工林	21～25	9.80～14.61	7.36～9.88	2 150～3 825	121.00
华北落叶松人工林	26～30	11.65～14.87	10.56～11.88	1 625～3 375	168.79
樟子松人工林	6～10	2.61～4.85	0.73～3.30	1 447～3 500	17.88
樟子松人工林	11～15	10.24～14.74	5.52～7.17	1 333～4 167	88.42
樟子松人工林	16～20	10.26～14.28	5.61～8.48	1 125～3 889	88.56
樟子松人工林	＞20	11.01～14.43	6.19～9.83	1 867～3 278	89.32
未造林地Ⅰ	—	—	—	—	10.28
未造林地Ⅱ	—	—	—	—	7.66
未造林地Ⅲ	—	—	—	—	4.89

2.2 室内分析

将取回的土壤样品进行阴干、过筛等处理之后，采用重铬酸钾浓硫酸外加热法测定土壤有机碳含量。

2.3 土壤有机碳密度的计算方法

计算土壤有机碳密度(SOCD)：

$$S_i = C_i \cdot D_i \cdot E_i \times 0.1 \quad (1)$$

式中：S_i 表示第 i 层土壤碳密度(t/hm^2)；C_i 表示第 i 层土壤有机碳含量(g/kg)；D_i 表示第 i 层土壤容重(g/cm^3)；E_i 表示第 i 层土层厚度(cm)。

2.4 数据统计

使用 Microsoft Excel 2021 进行数据统计和制图，使用 IBM SPSS Statistics 25 的单因素方差分析和事后比较邓肯法进行组与组之间的均值比较、显著性分析和相关性分析。

3 结果与分析

3.1 未造林地土壤碳含量与植被生物量的相关关系

由图 1 可以看出，未造林地土壤有机碳含量(0—60 cm)与植被生物量呈显著正相关关系($p<0.001$)。未造林地的草本生物量在 1.37～17.79 t/hm^2，有机碳含量在 2.54～60.57 t/hm^2。土壤有机碳含量与生物量具有显著正相关关系，说明植被状况对土壤有机碳具有明显影响，同时，可通过地表植被状况来评估土壤有机碳含量的大小。未造林地以草本植物为主，土壤有机碳主要来自草本植物地上及地下部分有机碳的输入，草本植被发育越好，其地上地下生物量越高，由地上凋落物和地下根系输入到土壤的有机碳就越多。

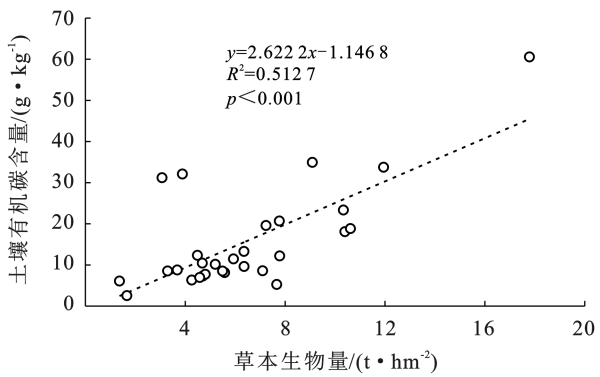
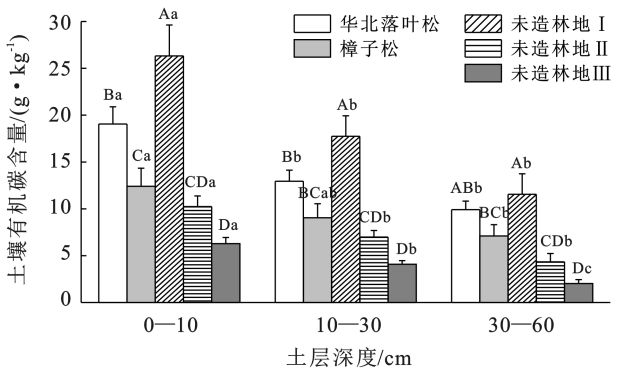


图 1 未造林地土壤碳含量与草本生物量的相关关系

Fig.1 Correlation between soil carbon content and herb biomass in unforested land

3.2　人工造林对土壤有机碳含量及碳密度的影响

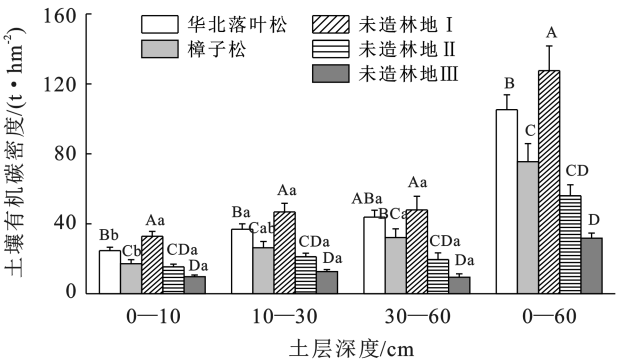
16～20 a 华北落叶松人工林和樟子松人工林 3 个土层土壤有机碳含量均明显高于未造林地Ⅱ和未造林地Ⅲ,但明显低于未造林地Ⅰ($p<0.05$),华北落叶松人工林的土壤有机碳含量又高于樟子松人工林,且在 0—10 cm 土层上差异显著($p<0.05$)(图 2)。各土层土壤有机碳密度均表现为:未造林地Ⅰ>华北落叶松人工林>樟子松人工林>未造林地Ⅱ>未造林地Ⅲ,各处理间差异显著($p<0.05$),0—60 cm 土层土壤有机碳密度分别为 127.56,105.26,75.52,56.06和 31.78 t/hm^2(图 3)。



注:不同大写字母表示不同类型间同一土层土壤有机碳含量差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一类型不同土层深度土壤有机碳含量差异显著($p<0.05$)。

图 2　林龄 16～20 a 的不同人工林与未造林地土壤有机碳含量比较

Fig.2　Comparison of soil organic carbon content among different afforestation types aged 16—20 years and unforested lands



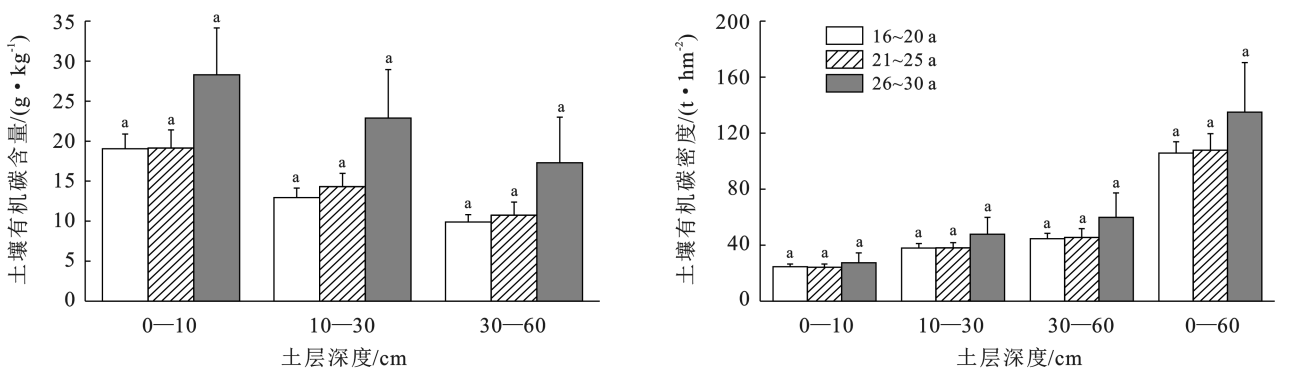
注:不同大写字母表示不同处理间同一土层深度土壤有机碳密度差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一处理间不同土层深度土壤有机碳密度差异显著($p<0.05$)。

图 3　林龄 16～20 a 的不同人工林与未造林地土壤有机碳密度比较

Fig.3　Comparison of soil organic carbon density among different afforestation types aged 16—20 years and unforested lands

3.3　林龄对土壤有机碳密度的影响

华北落叶松人工林各土层有机碳含量和碳密度均随林分年龄的增加而增加,16～20 a,21～25 a 和 26～30 a 华北落叶松人工林 0—60 cm 的土壤有机碳密度分别为 105.26,112.29 和 159.73 t/hm^2(图 4)。与华北落叶松人工林不同,樟子松人工林的土壤有机碳含量和碳密度均随年龄的增加表现为先下降后增加的趋势,6～10 a,11～15 a,16～20 a 和>20 a 樟子松人工林 0—60 cm 土壤有机碳密度分别为 79.38,54.24,75.52 和 82.24 t/hm^2(图 5)。



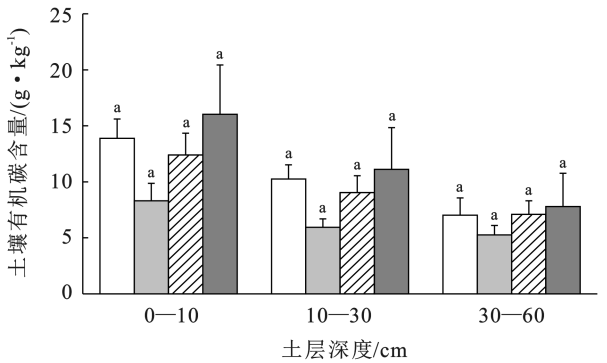
注:不同字母表示不同林龄同一土层深度的土壤有机碳含量和碳密度差异显著($p<0.05$)。下同。

图 4　不同林龄华北落叶松人工林土壤有机碳含量和碳密度

Fig.4　Soil organic carbon content and soil carbon density of *Larix principis-rupprechtii* plantations at different ages

3.4　造林地和未造林地的土壤有机碳垂直分布特征

人工林和未造林地土壤有机碳含量均随土层深度的增加而降低,且表层(0—10 cm)土壤有机碳含量显著高于 10—30 cm 和 30—60 cm 土层的有机碳含量($p<0.05$)。2 种人工林和 3 种未造林地 0—30 cm 土壤有机碳密度占到了 0—60 cm 总量的 57%～70%,而 30—60 cm 只占总量的 30%～43%(表 2)。同时,人工林与未造林地土壤有机碳积累量在垂直方向上的分配也有所不同,华北落叶松人工林和樟子松人工林 30—60 cm 土壤有机碳占比均为 42%,未造林地该土层的占比则分别为 29%,35%和 37%,这说明,林地深层土壤有机碳所占比例较未造林高,这是由于林木的根系深度更大,能够将更多的碳转移至深层土壤。



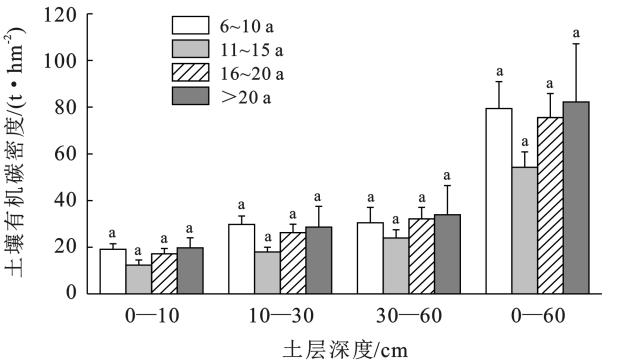


图 5 不同林龄樟子松人工林土壤有机碳含量和碳密度

Fig.5 Soil organic carbon content and soil carbon density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations at different ages

表 2 不同造林类型土壤有机碳含量和碳密度的垂直分布

Table 2 Vertical distribution of soil organic carbon content of different afforestation types

类 型	土层深度/cm	有机碳含量/(g·kg⁻¹)	有机碳密度/(t·hm⁻²)	比例/%
华北落叶松人工林	0—10	19.05±1.84[a]	24.64±1.96[b]	23
	10—30	12.95±1.17[b]	36.84±3.14[a]	35
	30—60	9.91±0.91[b]	43.78±3.98[a]	42
樟子松人工林	0—10	12.41±1.93[a]	17.13±2.33[b]	23
	10—30	9.05±1.50[ab]	26.26±3.59[ab]	35
	30—60	7.11±1.20[b]	32.14±4.95[a]	42
未造林地Ⅰ	0—10	26.33±3.29[a]	32.83±2.80[a]	26
	10—30	17.75±2.18[b]	46.81±4.91[a]	37
	30—60	11.55±2.19[b]	47.93±7.79[a]	37
未造林地Ⅱ	0—10	10.24±1.13[a]	15.39±1.53[a]	27
	10—30	6.99±0.70[b]	21.18±2.01[a]	38
	30—60	4.34±0.89[b]	19.50±3.86[a]	35
未造林地Ⅲ	0—10	6.28±0.66[a]	9.73±0.98[a]	31
	10—30	4.09±0.38[b]	12.64±1.16[a]	40
	30—60	2.02±0.43[c]	9.41±1.97[a]	29

注:同一列中不同小写字母表示不同深度土壤有机碳含量和碳密度差异显著($p<0.05$)。

4 讨 论

4.1 造林对土壤有机碳含量和碳密度的影响

本研究以御道口林草交错区的樟子松人工林和华北落叶松人工林为研究对象,以未造林地为对照,研究了人工造林对土壤有机碳的影响。研究发现,华北落叶松和樟子松两种人工林的土壤有机碳含量和碳密度明显高于植被状况中等的未造林地Ⅱ和植被状况较差的未造林地Ⅲ,但明显低于植被状况较好的未造林地Ⅰ。这说明人工造林对土壤有机碳的影响与初始条件有关,当未造林地初始土壤的有机碳含量和碳密度较低时,人工造林将会提高土壤有机碳含量和碳密度;当未造林地的初始土壤有机碳含量和碳密度较高时,人工造林在短期内不能提高土壤有机碳含量和碳密度,甚至会导致其下降。这与 Hong 等[18]的研究结论一致,他们研究发现,植树造林对土壤有机碳密度的影响取决于土壤本底,在土壤有机碳丰富区域,造林会降低土壤有机碳密度,而在土壤本底有机碳较少区域,造林则会增加土壤碳密度。另外一些研究[19-20]也表明,土壤有机碳变化与初始土壤有机碳密度呈负相关,土壤有机碳贫乏的土壤更容易获得或储存土壤有机碳,而富含有机碳的土壤则表现出较弱的收益或较强的损失。造林导致土壤有机碳下降的原因包括:①造林活动所产生的土壤扰动促进了土壤有机碳的分解;②造林后有机质的输入可能导致激发效应,土壤有机碳含量越高,激发效应越显著,从而导致有机碳的损失,土壤有机碳含量越低,激发效应越弱,碳损失越少[21-23]。同时,本研究中,华北落叶松和樟子松人工林目前还处于中幼龄阶段,随着林分年龄的增加,两种人工林的土壤有机碳含量和碳密度还将继续增加,是否能够达到,甚至超过未造林地Ⅰ的水平,尚需要进一步研究。因此,在实施以增加碳汇为目标的造林项目时,应考虑当地的自然植被条件,在自然植被较好、土壤具有较高碳密度的地段应慎重开展人工造林,而应选择植被状况较差、土壤碳含量及碳密度较低的地段进行造林。

4.2 造林树种对土壤有机碳密度的影响

本研究发现,尽管樟子松人工林和华北落叶松人工林土壤有机碳含量和碳密度均高于未造林地Ⅱ和未造林地Ⅲ,但二者之间具有明显差异,华北落叶松人工林明显高于樟子松人工林。姜玲玲[24]对比了塞罕坝地区不同林分类型土壤有机碳的差异,发现华北落叶松、云杉人工林的土壤有机碳明显高于樟子松人工林,且其组成也有明显差异。大兴安岭火烧地不同恢复方式下森林土壤有机碳含量也因树种的不同而有明显差异,表现为杨桦林最高,兴安落叶松人工林

次之,樟子松人工林最低[25]。不同人工林土壤有机碳存在明显差异,主要是由于各树种地上地下凋落物产量、功能性状以及周转率的不同导致其向土壤进行的碳输出存在差异[26]。16～20 a 生的樟子松人工林的凋落物积累量和华北落叶松人工林的凋落物积累量分别为 9.65 和 14.54 t/hm^2,7 a 生华北落叶松林林木 0—20 cm 深土层根系生物量为 165.94 g,同林龄的樟子松则只有 80.65 g[27],这说明无论是地上凋落物的积累量还是地下根系生物量,华北落叶松都明显高于樟子松,从而导致樟子松人工林土壤有机碳密度明显低于华北落叶松人工林。

4.3　林龄对土壤有机碳密度的影响

本研究中,两种人工林土壤有机碳含量和碳密度随年龄的增加表现出了不同的变化趋势。华北落叶松人工林随年龄的增加呈现逐渐增加的趋势,而樟子松人工林则表现出先下降后增加的趋势。在巴西的 Belo Oriente 地区,草地营造桉树人工林后第 13 a 时土壤有机碳密度达到最低,而在 33 a 后又显著高于原草地[28];湖北省太子山国家森林公园的马尾松人工林的土壤有机碳也出现了先下降后上升的趋势,由 6 a 生时的 15.35 g/kg 下降为 13 a 生时的 13.22 g/kg,29 a 生时则升高至 18.28 g/kg[29];地处淮河流域黄泛平原风沙区的杨树人工林的土壤有机碳含量从 3 a 到 10 a 也呈现出先下降后上升的趋势[30]。造林后土壤有机碳出现先下降后增加的趋势,其原因在于,在造林的初期,造林活动对土壤的扰动导致了土壤有机碳的损失,同时,由于此时生物量较小,林木通过地表凋落物和根系向土壤输送的有机碳较少,随着林木的生长,其通过凋落物或者根系向土壤转移的有机碳逐渐增加,使得土壤有机碳逐渐增加。

5　结 论

(1) 人工造林对土壤有机碳含量和碳密度的影响与初始条件有关,当未造林地的初始土壤有机碳含量和碳密度较高时,人工造林在短期内不能提高土壤有机碳含量和碳密度,甚至会造成土壤有机碳含量和碳密度的下降;当未造林地的初始土壤有机碳含量和碳密度较低时,人工造林将会使土壤有机碳含量和碳密度升高。

(2) 不同类型人工林土壤有机碳含量和碳密度存在明显差异,华北落叶松人工林的土壤有机碳密度大于樟子松人工林,华北落叶松人工林提升土壤有机碳密度的效果优于樟子松人工林。

(3) 华北落叶松人工林和樟子松人工林土壤有机碳含量和碳密度随年龄的增长变化趋势不同,华北落叶松在各个土层均随林分年龄的增加而增加,樟子松人工林则呈现先下降后上升的趋势。

(4) 通过人工造林来增加碳汇需考虑造林地的初始条件,在自然植被较好、具有较高土壤碳密度的地段不宜进行人工造林,而应选择植被状况较差、土壤碳密度较低的地段进行造林,同时,应选择适宜造林树种。

参考文献(References)

[1] Gómez Martín E, Máñez Costa M, Egerer S, et al. Assessing the long-term effectiveness of nature-based solutions under different climate change scenarios [J]. Science of the Total Environment, 2021,794:148515.

[2] 刘延惠,王彦辉,于澎涛,等.六盘山南部华北落叶松人工林土壤有机碳含量[J].林业科学,2012,48(12):1-9.
Liu Yanhui, Wang Yanhui, Yu Pengtao, et al. Soil organic carbon contents of *Larix principis-rupprechtii* plantations in the southern part of Liupan Mountains [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012,48(12):1-9.

[3] Thuille A, Buchmann N, Schulze E D. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy [J]. Tree Physiology, 2000,20(13):849-857.

[4] Fang Jingyun, Chen Ahping, Peng Changhui, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001,292(5525):2320-2322.

[5] 史军,刘纪远,高志强,等.造林对土壤碳密度影响的研究[J].生态学杂志,2005,24(4):410-416.
Shi Jun, Liu Jiyuan, Gao Zhiqiang, et al. A review on the influence of afforestation on soil carbon storage [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(4):410-416.

[6] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. Global Change Biology, 2000,6(3):317-327.

[7] Zhou Xiaohe, Li Jia, Zhao Yunfei, et al. Effect of time since afforestation on soil organic carbon stock and turnover rate [J]. Sustainability, 2022,14(16):10403.

[8] Liu Xiang, Yang Tao, Wang Quan, et al. Dynamics of soil carbon and nitrogen stocks after afforestation in arid and semi-arid regions: A meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2018,618:1658-1664.

[9] 刘玉林,朱广宇,邓蕾,等.黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响[J].应用生态学报,2018,29(7):2163-2172.
Liu Yulin, Zhu Guangyu, Deng Lei, et al. Effects of natural vegetation restoration and afforestation on soil carbon and nitrogen storage in the Loess Plateau, China

[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(7): 2163-2172.

[10] Kumar R, Pande V C, Bhardwaj A K, et al. Long-term impacts of afforestation on biomass production, carbon stock, and climate resilience in a degraded semi-arid ravine ecosystem of India [J]. Ecological Engineering, 2022,177:106559.

[11] Chen Longfei, He Zhibin, Zhu Xi, et al. Impacts of afforestation on plant diversity, soil properties, and soil organic carbon storage in a semi-arid grassland of Northwestern China [J]. CATENA, 2016,147:300-307.

[12] Thuille A, Schulze E D. Carbon dynamics in successional and afforested spruce stands in Thuringia and the Alps [J]. Global Change Biology, 2006,12(2): 325-342.

[13] Laclau P. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in Northwest Patagonia [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1/2/3):317-333.

[14] Specht A, West P W. Estimation of biomass and sequestered carbon on farm forest plantations in Northern New South Wales, Australia [J]. Biomass and Bioenergy, 2003,25(4):363-379.

[15] Groenendijk F M, Condron L M, Rijkse W C. Effects of afforestation on organic carbon, nitrogen and sulfur concentrations in New Zealand hill country soils [J]. Geoderma, 2002,108(1/2):91-100.

[16] Quideau S A, Chadwick O A, Trumbore S E, et al. Vegetation control on soil organic matter dynamics [J]. Organic Geochemistry, 2001,32(2):247-252.

[17] 牛庆花,彭博,陆贵巧,等.河北省坝上地区牧场防护林的防风效能研究[J].水土保持通报,2018,38(4):114-117.
Niu Qinghua, Peng Bo, Lu Guiqiao, et al. Windbreak efficiency of pasture shelterbelt in Bashang area of Hebei Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):114-117.

[18] Hong Songbai, Yin Guodong, Piao Shilong, et al. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation [J]. Nature Sustainability, 2020,3:694-700.

[19] Slessarev E W, Mayer A, Kelly C, et al. Initial soil organic carbon stocks govern changes in soil carbon: Reality or artifact? [J]. Global Change Biology, 2023, 29(5):1239-1247.

[20] Deng Lei, Zhu Guangyu, Tang Zhuangsheng, et al. Global patterns of the effects of land-use changes on soil carbon stocks [J]. Global Ecology and Conservation, 2016,5:127-138.

[21] Xu Lin, Zhang Jiguang, Hu Peilei, et al. Bedrock outcrops weakly promote rather than inhibit soil carbon sequestration after vegetation restoration [J]. Science of the Total Environment, 2023,858:159470.

[22] Kuzyakov Y. Priming effects: Interactions between living and dead organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010,42(9):1363-1371.

[23] Kuzyakov Y, Friedel J K, Stahr K. Review of mechanisms and quantification of priming effects [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000,32(11/12):1485-1498.

[24] 姜玲玲.塞罕坝地区人工林土壤有机碳及其组分的差异[D].河北 保定:河北农业大学,2020.
Jiang Ling. Differences of soil organic carbon and its components in plantations in Saihanba area [D]. Baoding, Hebei: Hebei Agricultural University, 2020.

[25] 李红运,辛颖,赵雨森.火烧迹地不同恢复方式土壤有机碳分布特征[J].应用生态学报,2016,27(9):2747-2753.
Li Hongyun, Xin Ying, Zhao Yusen. Distribution characteristics of soil organic carbon of burned area under different restorations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(9):2747-2753.

[36] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, et al. Change in soil carbon following afforestation [J]. Forest Ecology and Management, 2002,168(1/2/3):241-257.

[27] 侯海潮,丁丽,许中旗,等.燕山北部山地典型造林树种幼树根系分布特征[J].林业资源管理,2018(4):10-16.
Hou Haichao, Ding Li, Xu Zhongqi, et al. Root distribution of young trees of typical species in the northern region of Yanshan Mountains [J]. Forest Resources Management, 2018(4):10-16.

[28] Lima A M N, Silva I R, Neves J C L, et al. Soil organic carbon dynamics following afforestation of degraded pastures with *Eucalyptus* in Southeastern Brazil [J]. Forest Ecology and Management, 2006,235(1/2/3): 219-231.

[29] 胡建文,刘常富,勾蒙蒙,等.林龄对马尾松人工林微生物残体碳积累的影响机制[J].应用生态学报,2024,35(1):153-160.
Hu Jianwen, Liu Changfu, Gou Mengmeng, et al. Influencing mechanism of stand age to the accumulation of microbial residue carbon in the *Pinus massoniana* plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024,35(1):153-160.

[30] 潘嘉琛,刘超,董智,等.黄泛沙地不同林龄杨树人工林土壤团聚体及有机碳特征[J].水土保持研究,2022,29(3):25-30.
Pan Jiachen, Liu Chao, Dong Zhi, et al. Distribution characteristics of soil aggregates and soil organic carbon in populus artificial forest with different forest ages in Yellow River flood plain [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(3):25-30.