

黄河三角洲不同经济林土壤有机碳分布特征及改良土壤效应

芦月¹, 杨静², 李仕辉¹, 刘文静¹, 徐海东¹, 高芳磊¹, 赵西梅¹, 夏江宝^{1†}

(1. 山东航空学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东滨州, 256603; 2. 东营市湿地城市建设推进中心, 山东东营, 257000)

摘要:【目的】为探究黄河三角洲不同经济林土壤有机碳分布特征、碳汇潜能以及改良土壤能力, 明确经济林对土壤有机碳、土壤结构和肥力的影响规律。【方法】选取黄河三角洲典型经济林树种沾化冬枣(ZJ)、油桃(PN)、鸭梨(PB)、油桃+鸭梨混交林(PNPB)作为研究对象, 以白杨(PA)农田防护林作为对照, 采集0~20 cm和20~40 cm土层的土壤样品, 测定土壤有机碳、水分物理和速效养分指标。【结果】1) 全剖面土壤有机碳含量和密度分别介于3.85~10.76 g/kg和0.97~3.00 g/kg之间, 均为单一林分经济林>PNPB>PA, 经济林比白杨林增加50.05%; 土壤蓄水性能为PNPB>PA>单一林分经济林; PB土壤速效养分含量最高, PA最低。2) 土壤有机碳、蓄水性能和养分含量为0~20 cm土层>20~40 cm。3) 土壤有机碳含量和密度与土壤含水量、涵养降水量、速效磷和速效钾含量呈极显著正相关($P<0.01$), 与有效涵养量和pH呈极显著负相关($P<0.01$)。【结论】土壤有机碳潜能最好, 其次是PN; PNPB土壤蓄水性能最好, 其次是单一林分; PB土壤养分含量最高, 其次是ZJ; PB和PNPB是提升土壤碳汇潜能和改良土壤效果较好的栽植模式, 研究结果可为黄河三角洲地区经济林土壤碳汇研究和改良土壤效应提供一定参考。

关键词: 土壤有机碳; 土壤养分; 土壤改良; 经济林; 黄河三角洲

中图分类号: S714.6 **文献标识码:** A

Distribution characteristics of soil organic carbon and soil improvement effects of different economic forests in the Yellow River Delta

LU Yue¹, YANG Jing², LI Shihui¹, LIU Wenjing¹, XU Haidong¹, GAO Fanglei¹, ZHAO Ximei¹, XI A Jiangbao^{1†}

(1. Shandong University of Aeronautics, Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou, Shandong, China, 256603; 2. Dongying Wetland City Construction Promotion Center, Dongying, Shandong, China, 257000)

Abstract: 【Objective】 This study explores the soil organic carbon (SOC) distribution characteristics and soil C sink potential of different types of economic forests in the Yellow River Delta, as well as improving soil capacity, thereby clarifying the influence of economic forests on SOC, soil structure and fertility. 【Method】 Typical economic forest tree species (i.e. Ziziphus jujuba, Prunus persica var. nectarina, Pyrus bretschneideri and P. persica var. nectarina + P. bretschneideri) in the Yellow River Delta were selected as the research objects, and Populus alba farmland shelterbelt was selected as the control. Soil samples from the 0-20 cm and 20-40 cm soil layers of different treatments were collected to measure SOC, moisture physical and available nutrient indicators. 【Result】 1) The mean values of SOC content and density in the whole profile ranged from 3.85 g/kg to 10.76 g/kg and 0.97 g/kg to 3.00 g/kg. Among them, a single stand economic forest > P. persica var. nectarina + P. bretschneideri > P. alba, and the economic forest increased by 50.05 % compared with P. alba. The soil water-holding capacity is shown as follows: P. persica var. nectarina + P. bretschneideri > P. alba > single stand economic forest; the content of soil available nutrient in P. bretschneideri soil was the highest, and P. alba was the lowest. 2) The SOC content and density and soil water-holding capacity and available nutrient contents in the 0-20 cm soil layer are exceeded that of 20-40 cm. 3) SOC content and density were significantly positively correlated with soil water content, storage rainfall, available phosphorus and available potassium content, and significantly negatively correlated with effective storage capacity

and pH. 【Conclusion】 This study has found that SOC storage in *P. bretschneideri* is the best, followed by *P. persica* var. *nectarina*; *P. persica* var. *nectarina* + *P. bretschneideri* has the best soil water storage performance, followed by single stand; *P. bretschneideri* has the best effect on improving soil nutrients, followed by *Z. jujuba*; *P. bretschneideri* and *P. persica* var. *nectarina* + *P. bretschneideri* are the planting modes with good soil C sink potential and soil improvement effect in this area. This result can provide a certain degree of reference for study on soil C sink and soil quality improvement of economic forests in the Yellow River Delta region.

Keywords: soil organic carbon; soil nutrient; soil improvement; economic forest; Yellow River Delta

土壤是陆地生态系统重要的碳储存库, 其碳储备量是大气的 2 倍, 植被的 3 倍^[1]。土壤有机碳主要来源于各类植物凋落物、死亡植物体及根系^[2], 是土壤肥力的重要组成部分, 为植物生长提供所需养分^[3]。在全球“碳达峰碳中和”备受关注的背景下, 开展区域内经济林土壤有机碳分布特征与土壤改良效应研究, 对探明不同经济林的土壤碳储量及碳汇潜能具有重要意义。

黄河三角洲地区分布着多条黄河故道, 在沉积作用下新生陆地不断扩张。该区域存在不同的林分类型^[4], 经济林茂密的枝叶能有效阻挡风沙侵袭, 保护农田土壤质量; 长期积累的落叶、枝条等有机物质可作为有机肥料, 通过分解转化, 增加土壤有机质含量进而提高土壤肥力^[5-6]。由于黄河故道区土壤表层大部分是沙质土壤, 土壤贫瘠、土壤结构脆弱, 易受到风、沙、水、旱等自然灾害的威胁, 导致植物生长较差、土壤储水和保水能力下降, 生物多样性偏低^[7-8]。因此, 选择具有一定生态功能又能增加经济效益的林分类型尤为重要。

目前大多数土壤有机碳的研究主要集中在气候变化及不同林分类型对土壤有机碳的影响^[6-8], 在黄河三角洲区域主要对不同盐渍化程度的滨海盐渍土、不同植物群落和不同混交林的土壤有机碳特征及其影响因素开展研究^[5,9-10], 对该区域规模化种植的经济林土壤有机碳特征及土壤改良效应研究较少, 从改良土壤、固碳增汇的角度筛选经济林树种及其栽植模式存在一定困难。因此, 本研究以黄河三角洲区域沾化冬枣 (*Ziziphus jujuba*)、油桃 (*Prunus persica* var. *nectarina*)、鸭梨 (*Pyrus bretschneideri*)、油桃+鸭梨混交林 (*P. persica* var. *nectarina* + *P. bretschneideri*) 作为研究对象, 以农田防护林白杨 (*Populus alba*) 作为对照, 分析各林分土壤有机碳、水分物理和速效养分等指标, 明确不同经济林土壤有机碳分布特征, 探讨不同经济林土壤有机碳与水分物理、速效养分之间的相关关系。为筛选具有一定固碳能力和土壤改良效应的经济林树种及其栽植模式提供参考和理论依据。

1 研究区概况

研究区位于黄河三角洲山东省滨州市沾化区下洼镇经济林种植基地 (117°54'07"~117°54'18" E, 37°41'17"~37°41'55" N)。该区属于黄河冲积平原, 地势西南高, 东北低; 属暖温带半湿润大陆性季风气候区。主要气候特点是四季分明, 冷热季和干湿季明显。年平均气温为 12.8℃, ≥10℃积温在 4323.5℃之间, 年平均蒸发量 1852.2 mm, 年平均降水量 509.9 mm, 年平均无霜期 221 d, 年平均风速 2.6 m/s, 全年主导风向为南风, 大风日数为 9.1 d, 汛期为 6~9 月, 风季为 3~5 月。土壤类型以滨海潮土为主, 主要植被类型以暖温带落叶阔叶林为主。

2 材料与方法

2.1 样地设置与样品采集

在研究区内, 选取沾化冬枣 (ZJ)、油桃 (PN)、鸭梨 (PB)、油桃+鸭梨混交林 (PNPB) 4 种不同经济林, 以白杨 (PA) 农田防护林作为对照。每种林分类型选取 3 个 20 m×20 m 样地 (表 1), 每个样地按照 S 型选取 5 个采样点作为一个混合样品, 采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤。土壤样品风干、研磨、过 20 目和 100 目筛后, 保留备用。

表 1 不同林分的形态特征

Tab. 1 Morphological characteristics of different forests

林分类型	平均树高	平均（根）胸径	林龄	株行距	郁闭度	林下植被盖度
Forest types	Average	Average (root)	Forest	Distance	Canopy	Understory
	height/m	diameter at breast	age/a	between		vegetation
		height/cm		plants/m*m		coverage
沾化冬枣	1.8	4.0	7	1.0×0.5	0.95	0.73
<i>Ziziphus jujuba</i>						
油桃	2.0	3.5	6	1.5×1.0	0.65	0.83
<i>Prunus persica</i>						
var. <i>nectarina</i>						
鸭梨	2.5	4.2	7	2.0×2.0	0.61	0.76
<i>Pyrus</i>						
<i>bretschneideri</i>						
油桃+鸭梨混交	2.2	3.8	6	2.0×1.5	0.60	0.64
林						
<i>P. persica</i> var.						
<i>nectarina</i> + <i>P.</i>						
<i>bretschneideri</i>						
白杨	4.8	8.4	6	2.0×3.0	0.57	0.85
<i>Populus alba</i>						

2.2 土壤样品测定

土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定。土壤有机碳密度计算参考杨亦恂等方法^[3]，公式如下：

$$SOCDi = SOCi \times BDi \times Di$$

式中：SOCDi 和 SOCi 分别代表第 i 层土壤有机碳密度（kg/m²）和土壤有机碳含量（g/kg）；BDi 为第 i 层的土壤容重（g/cm³）；Di 为第 i 层的土层厚度，本研究均为 20 cm。土壤容重和孔隙度等水分物理指标采用环刀浸水法测定；土壤速效氮采用比色法测定；土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定；土壤速效钾采用 NH₄Ac 浸提-火焰光度法测定。

2.3 数据处理

使用 Excel 2021 数据处理，Origin 2018 绘图，采用 SPSS 27.0 对数据进行单因素方差分析（one-way ANOVA），邓肯（Duncan）法进行差异显著性检验（P<0.05），采用皮尔逊（Pearson）完成相关性分析。

3 结果与分析

3.1 不同林分类型土壤有机碳分布特征

由图 1 可知，同一土层不同林分土壤有机碳含量和密度差异显著（P<0.05）。在 0~20 cm 土层，土壤有机碳含量和密度分别介于 6.73~10.76 g/kg 和 1.88~3.00 kg/m² 之间，均为 PB 最高，分别比 PA 增加 59.74%和 58.98%。在 20~40 cm 土层，土壤有机碳含量和密度分别介于 3.85~7.89 g/kg 和 0.97~2.40 kg/m² 之间，ZJ、PN、PB 均显著高于 PA（P<0.05），分别是 PA 的 2.05 倍、1.82 倍、1.63 倍和 2.26 倍、2.05 倍、1.64 倍。在全剖面上，土壤有机碳含量均值表现为 PB>PN>ZJ>PNPB>PA，分别比 PA 增加 60.95%、5

3.86%、42.64%和 30.37%；土壤有机碳密度均值表现为 $PN > PB > ZJ > PNPB > PA$ ，分别比 PA 增加 61.25%、60.93%、54.48%和 18.04%。

除 ZJ 外，其余经济林土壤有机碳含量和密度均为 $0\sim20\text{ cm} > 20\sim40\text{ cm}$ ； PB 、 $PNPB$ 、 PA 的 $20\sim40\text{ cm}$ 土壤有机碳含量和密度显著低于 $0\sim20\text{ cm}$ ($P < 0.05$)，分别降低 41.61%、54.80%、42.81%和 41.72%、61.14%、43.63%。

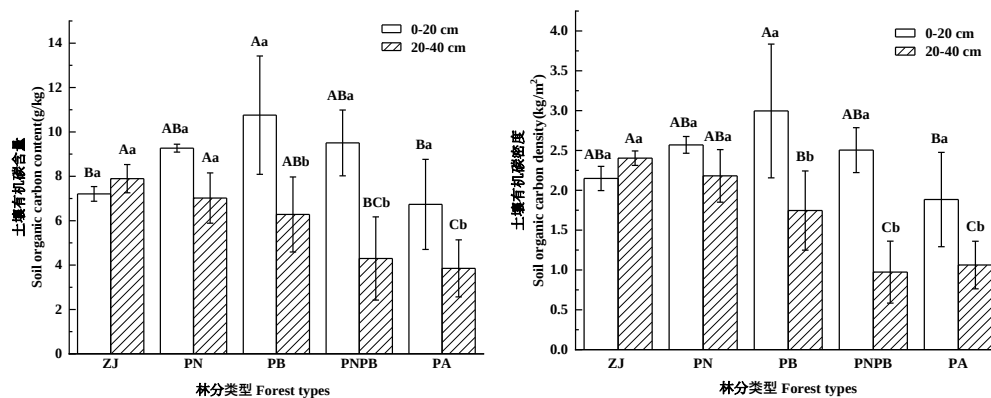


图1 不同林分类型土壤有机碳含量和密度

Fig.1 Soil organic carbon content and density of different forest types

注：不同大写字母代表同一土层不同林分之间各项指标差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母代表同一林分不同土层之间各项指标差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Notes: Different uppercase letters represent significant differences in various indicators between different stands in the same soil layer ($P < 0.05$), and different lowercase letters represent significant differences in various indicators between different soil layers in the same stand ($P < 0.05$). The same below.

3.2 不同林分类型土壤水分物理特征

3.2.1 土壤容重与孔隙度

由图2可知，同一土层不同单一林分间土壤容重差异不显著 ($P > 0.05$)。在 $0\sim20\text{ cm}$ 和 $20\sim40\text{ cm}$ 土层，土壤容重分别介于 $1.33\sim1.49\text{ g/cm}^3$ 和 $1.16\sim1.56\text{ g/cm}^3$ 之间，均为 $PNPB$ 最低。在全剖面上，土壤容重均值表现为 $PN > ZJ > PA > PB > PNPB$ 。

除 $PNPB$ 外，其余林分土壤容重均为 $20\sim40\text{ cm} > 0\sim20\text{ cm}$ ；同一林分不同土层间土壤容重差异不显著 ($P > 0.05$)。

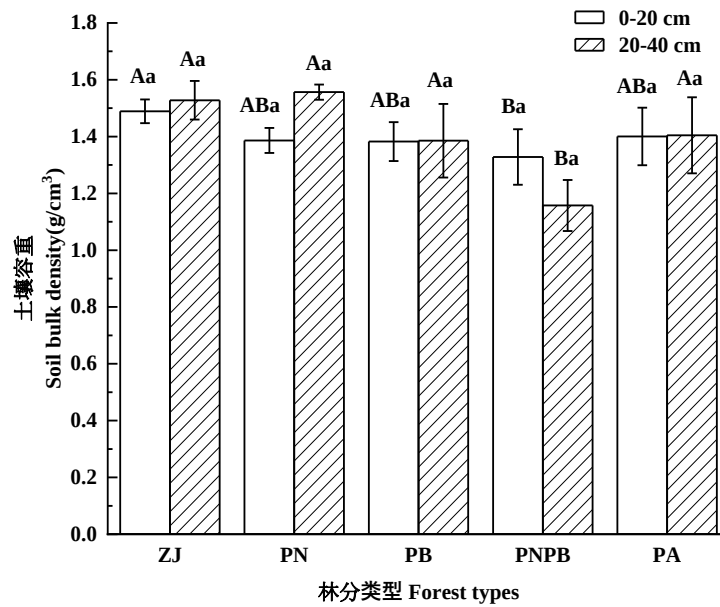


图2 不同林分类型土壤容重

Fig.2 Soil bulk density of different forest types

由图3可知,同一土层不同经济林间土壤孔隙度差异不显著($P>0.05$)。在0~20 cm土层,土壤总孔隙度和孔隙比分别介于36.93%~44.24%和0.59~0.80之间,PA孔隙度最高。在20~40 cm土层,土壤总孔隙度和孔隙比分别介于34.83%~51.72%和0.53~1.33之间,PA孔隙度最高。在全剖面上,土壤孔隙度均值表现为 $PA>PN>PB>PNPB>ZJ$ 。

除PN和PA外,其余林分土壤孔隙度均为0~20 cm>20~40 cm;同一林分不同土层间孔隙度差异不显著($P>0.05$)。

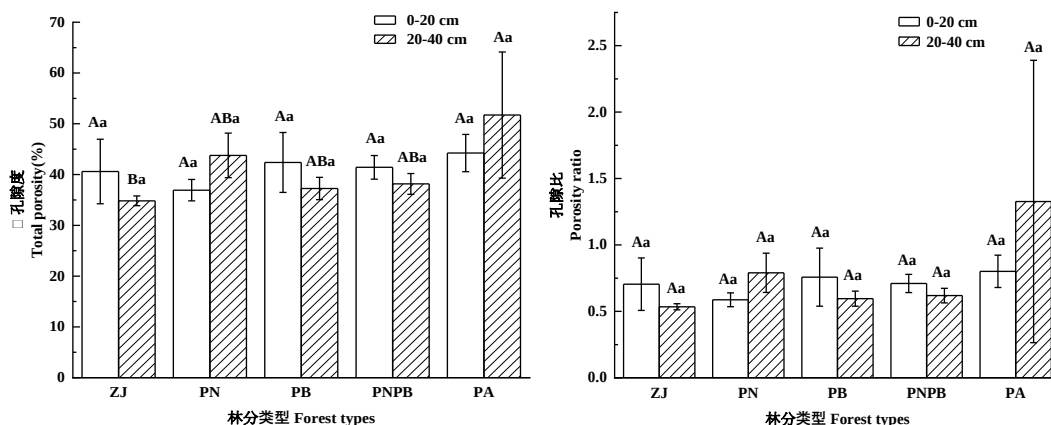


图3 不同林分类型总孔隙度和孔隙比

Fig.3 Total porosity and porosity ratio of different forest types

3.2.2 土壤含水量与蓄水性能

由图4可知,同一土层不同林分间土壤含水量差异显著($P<0.05$)。在0~20 cm和20~40 cm土层,

土壤含水量分别介于 38.10~70.68 mm 和 38.76~72.53 mm 之间, 均为 PB 最高, 分别是 PA 的 1.85 倍和 1.87 倍。在全剖面上, 土壤含水量均值表现为 $PB > ZJ > PN > PNPB > PA$, 分别比 PA 增加 86.32%、40.88%、39.06%和 29.64%。

除 ZJ 和 PNPB 外, 其余林分土壤含水量均为 20~40 cm > 0~20 cm; ZJ 的 0~20 cm 土壤含水量显著高于 20~40 cm, 增加 16.81%, PN 的 20~40 cm 土壤含水量显著高于 0~20 cm, 增加 9.86%。

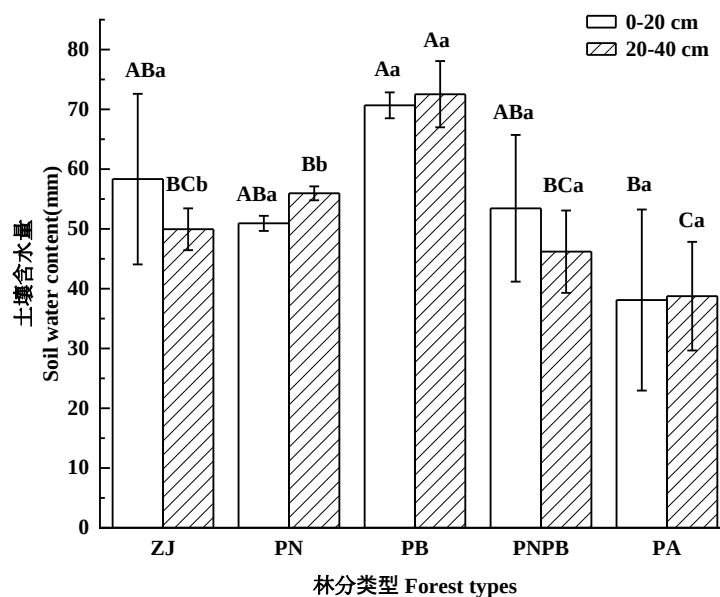


图4 不同林分类型土壤含水量

Fig.4 Soil water content of different forest types

由图 5 可知, 同一土层不同林分间土壤蓄水性能差异显著 ($P < 0.05$)。在 0~20 cm 土层, PB 土壤蓄水性能显著低于 PNPB 和 PA ($P < 0.05$); 涵蓄降水量和有效涵蓄量分别介于 16.24~44.97 mm 和 12.21~38.56 mm 之间。在 20~40 cm 土层, 单一林分土壤蓄水性能显著低于 PNPB, 且 PN、ZJ、PB 显著低于 PA ($P < 0.05$); 涵蓄降水量和有效涵蓄量分别介于 12.53~93.99 mm 和 11.69~91.97 mm 之间。在全剖面上, 土壤蓄水性能表现为 $PNPB > PA > PN > ZJ > PB$ 。

单一林分经济林土壤蓄水性能均为 0~20 cm > 20~40 cm; PN 和 PNPB 土壤蓄水性能在不同土层间差异显著 ($P < 0.05$), 其余林分不同土层间差异不显著 ($P > 0.05$)。

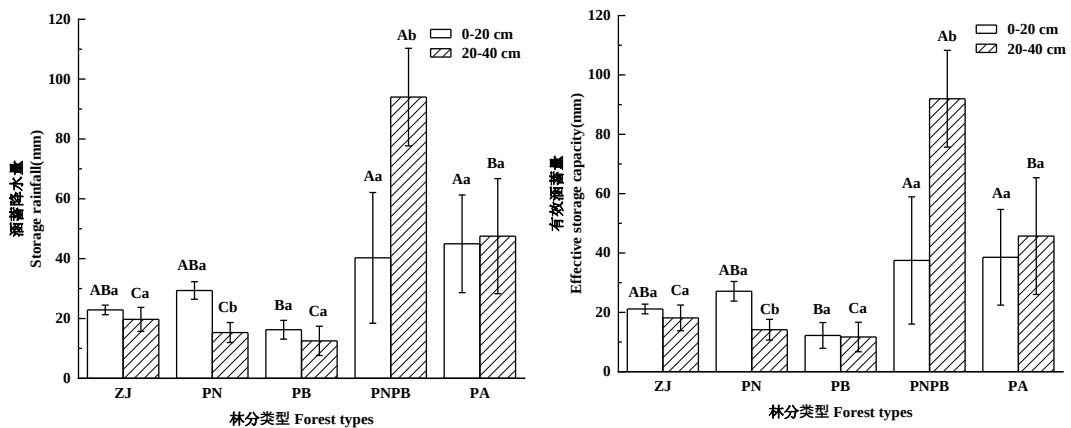


图 5 不同林分类型土壤涵蓄降水量和有效涵蓄量

Fig.5 Soil storage rainfall and effective storage capacity of different forest types

3.3 不同林分类型土壤养分特征

3.3.1 土壤速效氮

由图 6 可知, 同一土层不同单一林分间土壤速效氮含量差异不显著 ($P>0.05$), 但显著低于 PNPB ($P<0.05$)。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 土壤铵态氮含量分别介于 2.02~27.06 mg/kg 和 2.38~20.01 mg/kg 之间, 均为 PNPB 最高; 硝态氮含量分别介于 5.12~30.63 mg/kg 和 2.20~14.99 mg/kg 之间, 均为 PNPB 最低。在全剖面上, 土壤铵态氮含量均值表现为 $PNPB>PA>PB>ZJ>PN$; 土壤硝态氮含量均值表现为 $ZJ>PA>PB>PN>PNPB$ 。

除 ZJ 和 PN 外, 其余林分土壤铵态氮含量均为 0~20 cm>20~40 cm; 除 PB 外, 其余林分土壤硝态氮含量均为 0~20 cm>20~40 cm。PNPB 土壤铵态氮含量在不同土层间差异显著 ($P<0.05$), 0~20 cm 是 20~40 cm 的 1.81 倍; 同一林分不同土层间土壤硝态氮含量差异不显著 ($P>0.05$)。

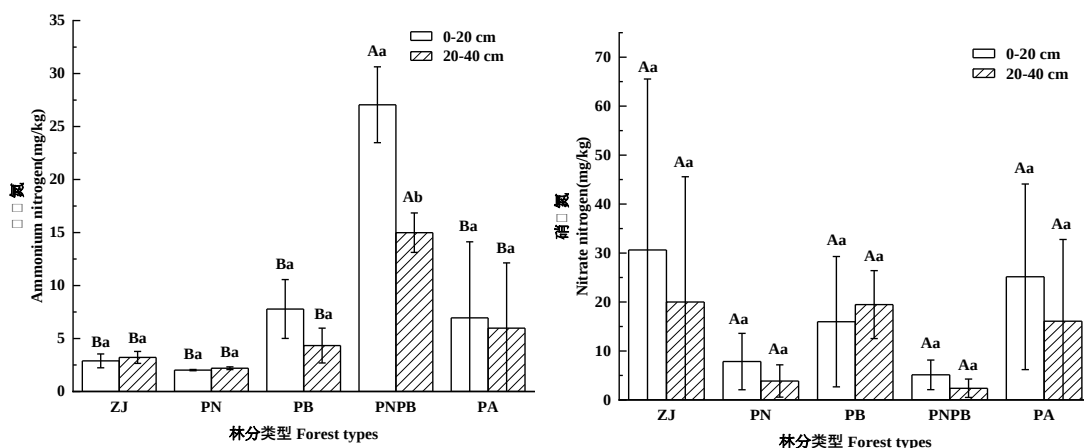


图 6 不同林分类型土壤铵态氮和硝态氮

Fig.6 Soil ammonium nitrogen and nitrate nitrogen of different forest types

3.3.2 土壤速效磷

由图 7 可知, 同一土层中 PB 土壤速效磷含量显著高于其他林分 ($P<0.05$), 且其他林分间差异不显著 ($P>0.05$)。在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层, 土壤速效磷含量分解介于 5.92~97.50 mg/kg 和 4.34~28.53

mg/kg 之间。在全剖面上, 土壤速效磷含量均值表现为 $PB > PNPB > PA > PN > ZJ$, PB 是 PA 的 7.14 倍。

同一林分不同土层土壤速效磷含量均为 $0\sim20\text{ cm} > 20\sim40\text{ cm}$; PN 、 PB 、 $PNPB$ 、 PA 的 $0\sim20\text{ cm}$ 速效磷含量分别是 $20\sim40\text{ cm}$ 的 1.79、3.42、3.02 和 2.56 倍。

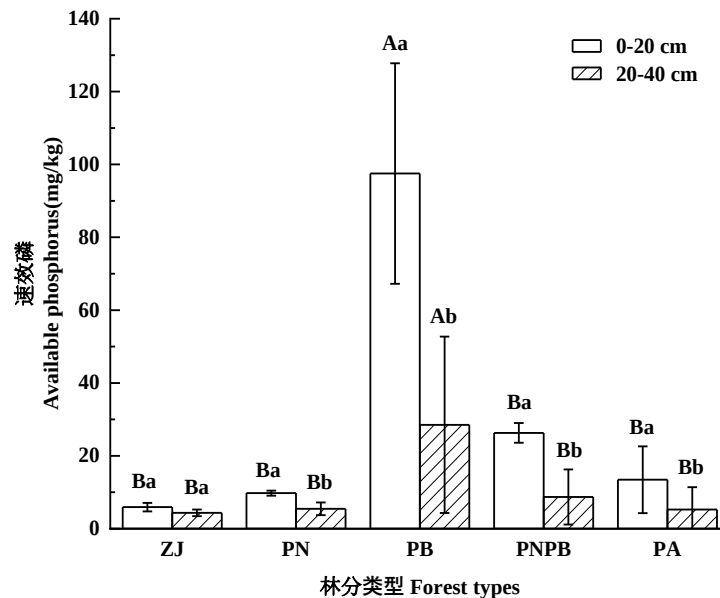


图 7 不同林分类型土壤速效磷

Fig.7 Soil available phosphorus of different forest types

3.3.3 土壤速效钾

由图 8 可知, 同一土层不同林分间土壤速效钾含量差异显著 ($P < 0.05$)。在 $0\sim20\text{ cm}$ 和 $20\sim40\text{ cm}$ 土层, 土壤速效钾含量分别介于 $88.83\sim277.40\text{ mg/kg}$ 和 $37.67\sim196.33\text{ mg/kg}$ 之间, 均为 ZJ 、 PN 、 PB 土壤速效钾含量显著高于 $PNPB$ 和 PA ($P < 0.05$), 分别是 PA 的 2.44、2.81、3.12 倍和 3.68、2.32、3.39 倍。在全剖面上, 土壤速效钾含量均值表现为 $PB > ZJ > PN > PNPB > PA$, 分别是 PA 的 3.30 倍、2.90 倍、2.63 倍和 1.02 倍。

同一林分不同土层土壤速效钾含量均为 $0\sim20\text{ cm} > 20\sim40\text{ cm}$; PN 、 $PNPB$ 、 PA 的 $0\sim20\text{ cm}$ 速效钾含量分别是 $20\sim40\text{ cm}$ 的 2.01、2.84 和 1.66 倍。

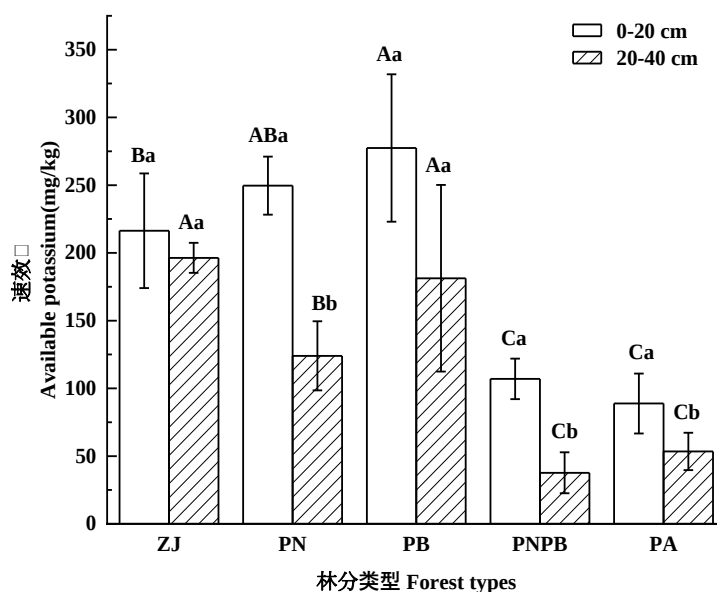


图8 不同林分类型土壤速效钾

Fig.8 Soil available potassium of different forest types

3.4 不同林分类型土壤有机碳与理化因子的相关性分析

由表2可知,土壤有机碳含量和密度与土壤容重、孔隙度和速效氮含量相关性不显著 ($P>0.05$),与土壤含水量、涵养降水量、速效磷含量和速效钾含量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$),与有效涵养量和pH值呈极显著负相关关系 ($P<0.01$),土壤有机碳密度与含量呈极显著正相关关系 ($P<0.01$)。

表2 土壤有机碳与理化因子的相关分析

Tab. 2 Correlation analysis of soil organic carbon and physical and chemical factors

	SBD	TPO	PR	SWC	SR	ESC	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	AP	AK	pH	SOC	SOCD
SBD	1												
TPO	-0.128	1											
PR	-0.135	0.905**	1										
SWC	0.225	-0.285*	-0.190	1									
SR	-0.734**	0.311*	0.270*	-0.698**	1								
ESC	-0.706**	0.310*	0.279*	-0.694**	0.963**	1							
NH ₄ ⁺ -N	-0.485**	0.240	0.214	-0.096	0.400**	0.411**	1						
NO ₃ ⁻ -N	0.011	0.038	0.137	-0.261	0.027	0.041	-0.115	1					
AP	-0.107	-0.122	-0.120	0.511**	-0.310*	-0.332*	0.089	-0.064	1				
AK	0.166	-0.329*	-0.271	0.625**	-0.581**	-0.577**	-0.13	-0.020	0.569**	1			
pH	-0.216	0.093	0.135	-0.342*	0.440*	0.479**	0.122	-0.038	-0.455**	-0.547**	1		
SOC	-0.020	-0.234	-0.250	0.446**	-0.382**	-0.415**	0.185	-0.030	0.550**	0.765**	-0.552**	1	
SOCD	0.176	-0.249	-0.262	0.475**	-0.500**	-0.525**	0.086	-0.022	0.507**	0.778**	-0.583**	0.977**	1

注: SBD: 土壤容重 Soil bulk density; TPO: 总孔隙度 Total porosity; PR: 孔隙比 Porosity ratio; SWC: 土壤含水量 Soil water content; SR: 涵养降水量 Storage rainfall; ESC: 有效涵养量 Effective storage capacity; AP: 速效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; SOCD: 土壤有机碳密度 Soil organic carbon density; *为 $P<0.05$; **为 $P<0.01$ 。

4 讨论

4.1 不同林分类型土壤有机碳含量和密度分布特征

土壤有机碳是表征土壤质量的重要指标,对土壤演变有重要意义^[1-3,6]。本研究发现经济林土壤有机碳含量和密度高于农田防护林,李丛笑发现盐地碱蓬、芦苇和桤柳等植物群落可提高土壤有机碳含量^[9],王东丽发现不同植被类型的土壤有机碳含量均值表现为乔木林地>灌木林地>草地>新排土^[11],这与本研究结果一致。经济林具有更丰富的地表凋落物,促进了土壤微生物数量及根系分泌物含量,在一定程度上提高了土壤有机碳含量和密度^[8-10,12]。乔木类经济林产生的凋落物含有蛋白质、纤维素、木质素等多种有机质,在分解转化过程中促进土壤微生物的生长和代谢,从而提高土壤活性和养分循环速率,增强土壤固碳能力^[11-13]。

在垂直方向上,土壤有机碳含量和密度表现为0~20 cm>20~40 cm。孙冬晓、高瑞等发现土壤有机碳储量随土层深度的增加呈现出逐渐降低的变化趋势,且不同植被类型碳储量不同^[2,12],这与本研究结果一致。表土层是植物凋落物和有机物质分解的主要活动区域,植物凋落物经过分解逐渐转化成有机质,并释放有机碳;而深土层往往比较封闭,与外界物质交换少,因而有机碳在表层含量要高于深层^[12]。冬枣林的有机碳含量表现为表层低于下层,这可能是淋溶作用的结果^[2]。

4.2 不同林分类型土壤水分物理和速效养分特征

土壤容重和孔隙度是描述土壤固体颗粒和孔隙之间填充程度的指标,反映土壤孔隙结构的紧密程度^[14]。本研究选取的5种林分土壤容重和孔隙比差异均不显著,可能是因为不同经济林土壤经历了相似的压实过程,减小了孔隙度差异;但混交林土壤容重均低于其他林分,表明混交林栽植模式在一定程度上对土壤物理结构的改良效果较好。除PN和PA外,其余林分土壤孔隙比均为0~20 cm>20~40 cm,表明0~20 cm土层的土壤透水性、通气性和持水能力好于20~40 cm土层^[15],这与张佐源发现底层土壤总孔隙度和连通性显著低于耕作层是一致的^[16]。

土壤含水量是掌握作物对水需求情况的重要指标,有效涵蓄量是指土壤在一定范围内可用于植物生长的水分量,其同时受毛管孔隙度和前期土壤水分的影响^[15]。本研究中单一林分经济林的土壤蓄水性能显著低于混交林,徐雅洁发现相较于纯林,混交林更能改善土壤水分物理性质^[17]。可能是因为混交林林分组成复杂,多样的树种结构有助于改善土壤结构,促进土壤水分的渗透和储存能力^[10,17];在有效水分供给方面,混交林根系结构互相交错,形成更为复杂的立体根系空间,有利于土壤水分的高效利用^[17]。

土壤速效养分是植物生长必须的营养元素,与土壤有机碳含量和密度关系密切^[18]。本研究中不同林分速效氮含量无显著差异($P>0.05$),说明速效氮可能不是影响土壤有机碳含量的主导因素;PB速效磷和速效钾含量均显著高于其他林分($P<0.05$),且土壤有机碳含量和密度同样高于其他林分,说明速效磷和速效钾对土壤有机碳含量和密度具有显著影响。适量的磷、钾等元素能促进植物根系对碳的吸收效率,从而

显著提升农业区土壤有机碳含量和密度^[18]。

5 结论

从土壤碳汇潜能来看,经济林比白杨防护林土壤有机碳含量和密度增加 50.05%,鸭梨固碳能力最强,其次是油桃,沾化冬枣较差;除沾化冬枣外各林分均符合土壤表聚的一般规律。从土壤水分物理特征来看,油桃+鸭梨混交林土壤蓄水性能最好,其次是白杨,油桃较差;除油桃+鸭梨混交林外各林分土壤容重均随土层深度增加而增加,土壤通气透水性和持水能力随土层深度增加而降低。从土壤养分含量来看,鸭梨土壤速效养分含量最高,其次是沾化冬枣,油桃较低,均随土层深度增加而降低。在黄河三角洲区域提升土壤碳汇潜能和土壤改良时,可优先考虑鸭梨和油桃+鸭梨混交林栽植模式。

参考文献

- 宋瑞朋,杨起帆,郑智恒,等. 2022. 3 种林下植被类型对杉木人工林土壤有机碳及其组分特征的影响[J]. 生态环境学报, 31(12): 2283-2291.
- SONG Ruipeng, YANG Qifan, ZHENG Zhiheng, et al. 2022. Effects of three understory vegetation types on soil organic carbon and its components in *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 31(12): 2283-2291.
- 孙冬晓,康剑,张中瑞. 2022. 东江中下游流域森林土壤有机碳空间分布特征研究[J]. 林业与环境科学, 38(4): 38-42.
- SUN Dongxiao, KANG Jian, ZHANG Zhongrui. 2022. Spatial distribution characteristics of forest soil organic carbon in middle and lower reaches of Dongjiang River Basin[J]. Forestry and Environmental Science, 38(4): 38-42.
- 杨亦恂,姜晓旭,李名升,等. 2022. 三江平原土壤有机碳含量及其密度的空间变异特征分析[J]. 土壤通报, 53(6): 1313-1319.
- YANG Yixun, JIANG Xiaoxu, LI Mingsheng, et al. 2022. Spatial variability of soil organic carbon content and density in the Sanjiang Plain[J]. Chinese Journal of Soil Science, 53(6): 1313-1319.
- 刘盛林,丁效东,郑东峰,等. 2021. 黄河三角洲盐渍化荒地种植植物对土壤改良、磷形态转化及有效性的影响[J]. 水土保持学报, 35(1): 278-284+293.
- LIU Shenglin, DING Xiaodong, ZHENG Dongfeng, et al. 2021. Effect of different plants plantation on amelioration of uncultivated saline wasteland, soils phosphorus fraction and availability in the Yellow River Delta[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 35(1): 278-284+293.
- 于淼,郭雪莲,栗云召,等. 2024. 黄河口咸淡水交互作用对芦苇湿地土壤有机碳空间分异的影响[J]. 应用生态学报, 35(2): 415-423.
- YU Miao, GUO Xuelian, LI Yunzhao, et al. 2024. Effects of fresh-salt water interaction on spatial variations of soil organic carbon in reed wetland of Yellow River Estuary[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 35(2): 415-423.
- Xu Hongwei, Qu Qing, Chen Yanhua, et al. 2021. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after cropland abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 196.
- 李一凡,毋亭,姚园,等. 2024. 气候变化与作物物候响应对福建省耕地土壤有机碳的影响[J/OL]. 环境科学, 1-19. <http://doi.org/10.13227/j.hjcx.202309159>.
- LI Yifan, WU Ting, YAO Yuan, et al. 2024. Effect of climate changes and crop phenological responses on soil organic carbon of cultivated land in Fujian Province[J/OL]. Environmental Science, 1-19. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202309159>.
- 朱美菲,程金花,师雪淇,等. 2023. 三峡库区典型人工防护林林分结构与固碳特征[J]. 中国水土保持科学, 21(3): 119-127.
- ZHU Meifei, CHENG Jinhua, SHI Xueqi, et al. 2023. Characteristics of forest structure and carbon sequestration of t

typical artificial shelterbelts in Three Gorges Reservoir Area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 21(3): 119-127.

李丛笑, 张彦, 覃茜瑾, 等. 2024. 黄河三角洲不同植物群落土壤有机碳特征及其影响因子[J/OL]. 环境科学, 1-13. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202308141>.

LI Congxiao, ZHANG Yan, QIN Xijin, et al. 2024. Characteristics of soil organic carbon and its influencing factors of different plant communities in the Yellow River Delta[J/OL]. Environmental Science, 1-13. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202308141>.

陈印平, 夏江宝, 曹建波, 等. 2013. 黄河三角洲盐碱地不同混交林土壤可溶性有机碳氮的研究[J]. 水土保持通报, 33(5): 87-91+104.

CHEN Yinping, XIA Jiangbao, CAO Jianbo, et al. 2013. Dissolved organic carbon and nitrogen in different mixed forest stands in saline land of Yellow River Delta[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 33(5): 87-91+104.

王东丽, 于百和, 赵晓亮, 等. 2024. 风沙黄土区排土场不同植被类型下土壤生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 31(1): 61-69.

Wang Dongli, Yu Baihe, Zhao Xiaoliang, et al. 2024. Soil ecological stoichiometric characteristics under different vegetation types of open-pit dump in sandy loess region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 31(1): 61-69.

高瑞, 王祎珂, 艾宁, 等. 2021. 陕北特色经济林深层土壤有机碳特征及影响因素[J]. 森林与环境学报, 41(5): 464-470.

GAO Rui, WANG Yike, AI Ning, et al. 2021. Characteristics and influencing factors of deep soil organic carbon in characteristic economic forest in Northern Shaanxi[J]. Journal of Forest and Environment, 41(5): 464-470.

Mohammad Ajami, Ahmad Heidari, Farhad Khormali, et al. 2016. Environmental factors controlling soil organic carbon storage in loess soils of a subhumid region, northern Iran[J]. Geoderma, 281: 1-10.

汪璇, 杜树汉, 邓利梅, 等. 2023. 土壤不同孔隙度对川西典型植被系统水源涵养的影响[J]. 中国水土保持科学, 21(1): 19-28. WANG Xuan, DU Shuhan, DENG Limei, et al. 2023. Effects of different soil porosity on the water conservation of typical vegetation system in western Sichuan[J]. Science of Soil and Water Conservation, 21(1): 19-28.

夏江宝, 曲志远, 朱玮, 等. 2005. 鲁中山区不同人工林土壤水分特征[J]. 中国水土保持科学, 3(3): 45-50.

XIA Jiangbao, QU Zhiyuan, ZHU Wei, et al. 2005. Soil water characteristics of different artificial forest in mountainous area in the middle of Shandong province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 3(3): 45-50.

张佐源, 夏彬, 郝旺林, 等. 2023. 黄土高原坝地土层状土壤剖面孔隙分布特征[J]. 水土保持学报, 37(6): 83-90.

ZHANG Zuoyuan, XIA Bin, HAO Wanglin, et al. 2023. Pore distribution characteristics of layered soil profile in dam land of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 37(6): 83-90.

徐雅洁, 郭月峰, 姚云峰, 等. 2021. 不同林分配置对土壤水分物理性质的影响[J]. 四川农业大学学报, 39(3): 370-377.

XU Yajie, GUO Yuefeng, YAO Yunfeng, et al. 2021. Effect of different forest-stand configuration on soil-moisture physical properties[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 39(3): 370-377.

白小芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 2015. 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学, 13(6): 68-75.

BAI Xiaofang, XU Fuli, WANG Weiling, et al. 2015. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 13(6): 68-75.