

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.021.

张兹箕, 王启鑫, 赵振宇, 等. 鲁中南地区不同经济林种植模式的改良土壤效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 102-111.

Zhang Ziji, Wang Qixin, Zhao Zhenyu, et al. Soil Improvement Effect of Different Economic Forest Planting Modes in South-central Shandong Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 102-111.

鲁中南地区不同经济林种植模式的改良土壤效应

张兹箕^{1,2}, 王启鑫^{1,2}, 赵振宇³, 芦月¹, 刘文静¹, 高芳磊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. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 271018; 3. 宁阳县自然资源和规划局, 山东 宁阳 271400)

摘要: [目的] 探明鲁中南地区不同经济林种植模式对土壤水分物理性质和土壤养分的影响规律, 为该区域水土保持经济林种植模式筛选和栽植管理提供依据。[方法] 选取鲁中南地区临沂市蒙阴县孟良崮小流域的桃树纯林 (*Amygdalus persica* L.) (TS)、山楂纯林 (*Crataegus pinnatifida* Bunge) (SZ)、苹果+樱桃混交林 (*Malus pumila* Mill. + *Prunus pseudocerasus* (Lindl.) G. Don) (PY)、板栗+花椒混交林 (*Castanea mollissima* Blume + *Zanthoxylum bungeanum* Maxim.) (BH) 4 种经济林种植模式为研究对象, 以荒草地 (CK) 作为对照, 测定分析土壤容重、孔隙度和蓄水量等水分物理指标, 以及土壤有机碳、全氮、全磷和速效养分等养分指标, 采用主成分分析和模糊数学隶属函数法综合评价其改良土壤效应。[结果] (1) 经济林种植可提高土壤孔隙度和蓄水性能。与 CK 相比, 4 种经济林种植模式可降低土壤容重 7.3%~22.1%, 提高土壤毛管孔隙度 14.2%~42.0%, 提高土壤最大贮水量 16.5%~43.8%。土壤持水性能表现为 TS>PY>BH>SZ>CK。除 PY 外, 其他经济林种植模式均可有效增加土壤涵养量与蓄涵降水量, 表现为 BH>TS>SZ>CK。经济林种植对 0—20 cm 土层涵养降水量与有效涵养量提高效果更明显, 与 0—20 cm 土层相比, 20—40 cm 土层孔隙度与最大贮水量均有下降, TS 变化幅度最小。(2) 经济林种植可提高土壤有机碳和速效养分。与 CK 相比, 4 种经济林种植模式可提高土壤有机碳 6.9%~270.4%, 表现为 TS>PY>BH>SZ>CK; 土壤全氮和全磷含量表现为 TS>PY>BH>SZ>CK。经济林种植对 0—20 cm 土层养分含量提高效果更明显, 与 0—20 cm 土层相比, 20—40 cm 土层养分含量均有下降。(3) 反映经济林种植模式改良土壤效应的指标可归纳为 3 类, 一是土壤毛管持水特征和养分特征, 二是土壤蓄水特征, 三是土壤非毛管持水特征。[结论] 不同经济林种植模式的土壤改良效应综合评价为桃树>板栗+花椒混交林>苹果+樱桃混交林>山楂纯林>荒草地。与荒草地相比, 经济林种植可显著改善土壤水分物理特性, 提高土壤养分性能, 但随种植模式的不同其改良土壤效应差异较大。在鲁中南干旱瘠薄山地桃树纯林种植模式对土壤改良效应最好, 其次为板栗+花椒混交林, 山楂纯林相对较差。

关键词: 土壤水分物理; 土壤有机碳; 土壤养分; 经济林; 土壤改良

中图分类号: S714.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0102-10

Soil Improvement Effect of Different Economic Forest Planting Modes in South-central Shandong Province

Zhang Ziji^{1,2}, Wang Qixin^{1,2}, Zhao Zhenyu³, Lu Yue¹, Liu Wenjing¹, Gao Fanglei¹, Xia Jiangbao¹

(1. Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Shandong University of Aeronautics, Binzhou, Shandong, 256603, China; 2. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; 3. Ningyang Natural Resources and Planning Bureau, Ningyang, Shandong 271400, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the effects of different economic forest planting modes on soil water physical properties and soil nutrients in central and southern Shandong, and to provide a basis for screening and planting management of soil and water conservation economic forest planting modes in

收稿日期: 2023-09-21

修回日期: 2023-11-14

资助项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (YDZX2022101); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目 (2023TSG0044); 泰山学者人才工程项目 (TSQN201909152)

第一作者: 张兹箕 (2000—), 女, 辽宁丹东人, 硕士研究生, 从事林业生态学研究。E-mail: ziqizhang1002@163.com

通信作者: 夏江宝 (1978—), 男, 山东潍坊人, 博士, 教授, 主要从事植被恢复与生态修复方面的研究。E-mail: xiajb@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

this area. [Methods] Four kinds of economic forest planting modes in Menglianggu small watershed of Mengyin County, Linyi City, were selected as the research objects, including *A. persica* (TS), *C. pinnatifida* (SZ), *M. pumila* + *P. pseudocerasus* (PY), and *C. mollissima* + *Z. bungeanum* (BH), with wasteland (CK) as the control. The water physical indexes such as soil bulk density, porosity and water storage capacity, and the nutrient indexes such as soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and available nutrients were measured and analyzed. The soil improvement effect was comprehensively evaluated by principal component analysis and fuzzy mathematics membership function method. [Results] (1) Economic forest planting could improve soil porosity and water storage performance. Compared with CK, the four economic forest planting patterns could reduce soil bulk density by 7.3%~22.1%, increase capillary porosity by 14.2%~42.0%, and increase soil maximum water storage by 16.5%~43.8%. The soil water holding capacity decreased in the order: TS>PY>BH>SZ>CK. In addition to PY, other economic forest planting patterns could effectively increase soil storage and storage precipitation, showing BH>TS>SZ>CK. The effect of economic forest planting on the storage precipitation and effective storage capacity of 0—20 cm soil layer was more obvious. Compared with 0—20 cm soil layer, the porosity and maximum water storage capacity of 20—40 cm soil layer decreased, and the change range of TS was the smallest. (2) Economic forest planting could improve soil organic carbon and available nutrients. Compared with CK, the four economic forest planting patterns could increase soil organic carbon by 6.9%~270.4%, which was expressed as TS>PY>BH>SZ>CK; the contents of total nitrogen and total phosphorus in soil decreased in the order: TS>PY>BH>SZ>CK. The effect of economic forest planting on the nutrient content of 0—20 cm soil layer was more obvious. Compared with 0—20 cm soil layer, the nutrient content of 20—40 cm soil layer decreased. (3) The indicators reflecting the soil improvement effect of economic forest planting modes could be summarized into three categories. The first was soil capillary water holding characteristics and nutrient characteristics, the second was soil water storage characteristics, and the third was soil non-capillary water holding characteristics. [Conclusion] The comprehensive evaluation of soil improvement effect of different economic forest planting modes is: *A. persica*>*C. mollissima* + *Z. bungeanum*>*M. pumila* + *P. pseudocerasus*>*C. pinnatifida*>wasteland. Compared with grassland, economic forest planting can significantly improve the physical properties of soil moisture and improve soil nutrient performance, but the soil improvement effect varies greatly with different planting modes. In the arid and barren mountainous areas of central and southern Shandong, the planting mode of *A. persica* has the best effect on soil improvement, followed by *C. mollissima* + *Z. bungeanum*, and *C. pinnatifida* is relatively poor.

Keywords: soil moisture physics; soil organic carbon; soil nutrients; economic forest; soil improvement

土壤是水分贮存的主要场所,林地土壤持水能力和蓄水性能是反映森林植被保持水分和涵养水源能力的重要特征之一^[1]。土壤容重、孔隙度等土壤水分物理性质是水土保持功能评价的重要指标,对防治水土流失具有重要意义。土壤有机碳和速效养分等作为衡量土壤肥力和质量的重要指标^[2],明确其变化规律是适宜植被恢复模式筛选的重要基础和必要前提。

近年来,国内外学者对不同自然和人工植被类型下的土壤理化性质开展了较多研究^[3],但涉及经济林植被种植模式的较少。良好的植被恢复模式能有效改善土壤结构、孔隙度、透气性及有机质含量等理化特征,对土壤水分物理性质与土壤养分状况影响较

大^[4]。具有良好结构、体积密度、孔隙度和导水性的土壤可以使土壤剖面中水分和养分的移动性和稳定性提高,从而为植被生长提供良好的水肥条件^[5]。不同植被类型对土壤性质的影响存在差异,尤其随着树种组成及植被恢复模式的变化,土壤理化性质会呈现不同的变化规律^[6]。不同经济林种植模式对土壤持水性能与贮水能力影响显著,山东省泰安市黄前东小流域板栗林和核桃林改良土壤作用及持蓄水分作用明显^[7],营造不同类型人工林有助于改善土壤水分物理状况。在河套平原中部西柳沟水土流失严重区域,不同造林树种纯林与混交林配置的土壤容重、孔隙度和土壤含水量差异显著^[8],能够显著降低土壤容重,

增加土壤总孔隙度和土壤含水量。土壤容重和孔隙度等水分物理指标与土壤贮水量和渗透能力关系密切^[9],与土壤有机质、氮、磷、钾等养分含量有直接或间接关系^[10]。除植被类型的直接影响外,土层深度的差异也会影响植被生长对土壤性质的改良,不同植被类型对不同土层土壤理化特征的影响差异显著,通常表层土对植被类型的差异响应比深层土更加敏感^[11]。因此,同时考虑不同植被类型及其土层深度的变化对准确评估土壤改良效应意义较大。

山东省鲁中南山区立地条件较差,山地坡度陡,土层浅薄,岩石裸露,土壤蓄水保土性能差,生态环境比较脆弱,是全国水土流失严重的地区之一。土壤侵蚀导致土壤表层有机物减少、土壤养分损失、孔隙度降低和体积密度增加,这些都会导致森林生态系统功能减弱^[12]。经济林种植是鲁中南地区坡耕地水土保持生态修复的主要措施,但目前对该区域不同经济林种植模式改良土壤理化特征的研究较少,尚不清晰类似区域适宜的经济林种植模式,在一定程度上限制了鲁中南地区水土保持生态建设中经济林的栽植管理。鉴于此,本研究以桃树纯林(*Amygdalus persica* L.)、山楂纯林(*Crataegus pinnatifida* Bunge)、苹果+樱桃混交林(*Malus pumila* Mill.+*Prunus pseudocerasus* (Lindl.) G. Don)、板栗+花椒混交林(*Castanea mollissima* Blume+*Zanthoxylum bungeanum* maxim.) 4 种经济林种植模式为研究对象,以荒草地为对照,测定土壤容重、孔隙度、贮水量等水分物理指标,以及有机碳、全磷、全氮、速效养分等化学指标,对鲁中南地区现有不同经济林种植模式的土壤理化特征进行对比分析,以掌握不同经济林种植模式的土壤改良效应,为鲁中南地区以及北方石质山区水土保持生态建设中的坡耕地植被恢复措施提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地设置在山东省临沂市蒙阴县孟良崮小流域,暖温带季风大陆型气候,四季分明,雨量充沛,气候温和。海拔 210.9 m,地面坡度 3°~25°,岩石为片麻岩,土壤类型为棕壤。多年平均气温 13.5℃,年平均无霜期 215 d,多年平均降水 849 mm,年平均径流深 350 mm,年平均风速为 2.6 m/s,年平均气温为 13.8℃。植被属温带落叶阔叶林,人工林主栽树种有黑松(*Pinus thunbergii*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、赤松(*Pinus densiflora*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和杨树(*Populus tomentosa*)等,林分类型为水源涵养林,提

高了山区抗旱能力,抑制山洪,减少了水土流失。经济林主要以桃树(*Prunus persica*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)、樱桃(*Prunus pseudocerasus*)、苹果(*Malus pumila*)、板栗(*Castanea mollissima*)、花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)等为主。

1.2 试验材料

2022 年 6 月中旬在研究区内选取有代表性的 4 种不同经济林种植模式为研究对象,并以荒草地作为对照(CK)。按不同经济林种植模式的坡度、坡向、坡位等因子,每种经济林种植模式选 3 个标准样地,每个标准地规格 20 m×20 m。所选 4 种经济林种植模式,坡向均为阳坡,坡位为山坡中部,分别为桃树纯林(TS)、山楂纯林(SZ)、苹果+樱桃混交林(PY)、板栗+花椒混交林(BH)。其中混交林为行间混交。试验区经济林的造林时间及管理措施相同,树龄 5 a。

1.3 土壤样品采集及测定方法

在各标准地内,按“S”型布设 5 个土壤样品采样点,分 0—20 cm 和 20—40 cm 深度进行土壤样品采集,所采集相同土层的样品作为一个混合样品。土壤理化指标的测定方法如下。

(1) 环刀浸水法测定土壤容重和孔隙度等指标;烘干法测定土壤重量含水量。

(2) 毛管最大贮水量、非毛管最大贮水量、土壤最大贮水量等土壤贮水性能指标计算公式如下:

$$W_{t1}=10000P_{t1}h$$

$$W_{c1}=10000P_{c1}h$$

$$W_{nc1}=10000P_{nc1}h$$

式中: P_{t1} 为总孔隙度(%); W_{t1} 为土壤最大贮水量(t/hm²); P_{c1} 为毛管孔隙度(%); W_{c1} 为毛管最大贮水量(t/hm²); P_{nc1} 为非毛管孔隙度(%); W_{nc1} 为非毛管最大贮水量(t/hm²); h 为土层厚度(m)。

(3) 土壤涵蓄降水量与有效涵蓄量等土壤蓄水指标^[13],计算公式如下:

$$W_{t2}=1000P_{t2}h$$

$$W_{c2}=1000P_{c2}h$$

$$W_1=\theta \cdot \rho_b \cdot h_1$$

$$P_T=W_{t2}-W_1$$

$$P_C=W_{c2}-W_1$$

式中: P_T 为涵蓄降水量(mm); P_C 为有效涵蓄量(mm); W_{t2} 为饱和贮水量(mm); P_{t2} 为总孔隙度(%); P_{c2} 为毛管孔隙度(%); W_{c2} 为毛管最大贮水量(mm); h 为土层厚度(m); W_1 为土壤含水量(mm); θ 为重量含水量(%); ρ_b 为土壤容重(g/cm³); h_1 为土壤厚度(mm)。

(4) pH 采用 pH 计(水土比 5:1)测定;全氮采用浓硫酸消煮后用凯氏定氮仪测定;铵态氮采用

KCL 溶液提取 MgO 蒸馏法测定;硝态氮采用比色法测定;全磷采用钼锑钨比色法测定;有效磷采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑钨比色法测定;有机碳采用重铬酸钾氧化—分光光度法测定;速效钾采用 NH₄ Ac 浸提—火焰光度法测定。

1.4 数据处理

数据分析处理与图表制作采用 Excel 2016, SPSS 26.0 和 Origin 2017 进行。土壤理化指标采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验(α=0.05),相关性采用 Pearson 相关分析,并进行主成分分析。

为定量比较不同经济林种植模式的土壤改良效应,采用模糊数学隶属函数法进行综合评价,计算公式如下^[14]:

如果指标与改良土壤效应呈正相关:

$$X_{(u)} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

如果指标与改良土壤效应呈负相关:

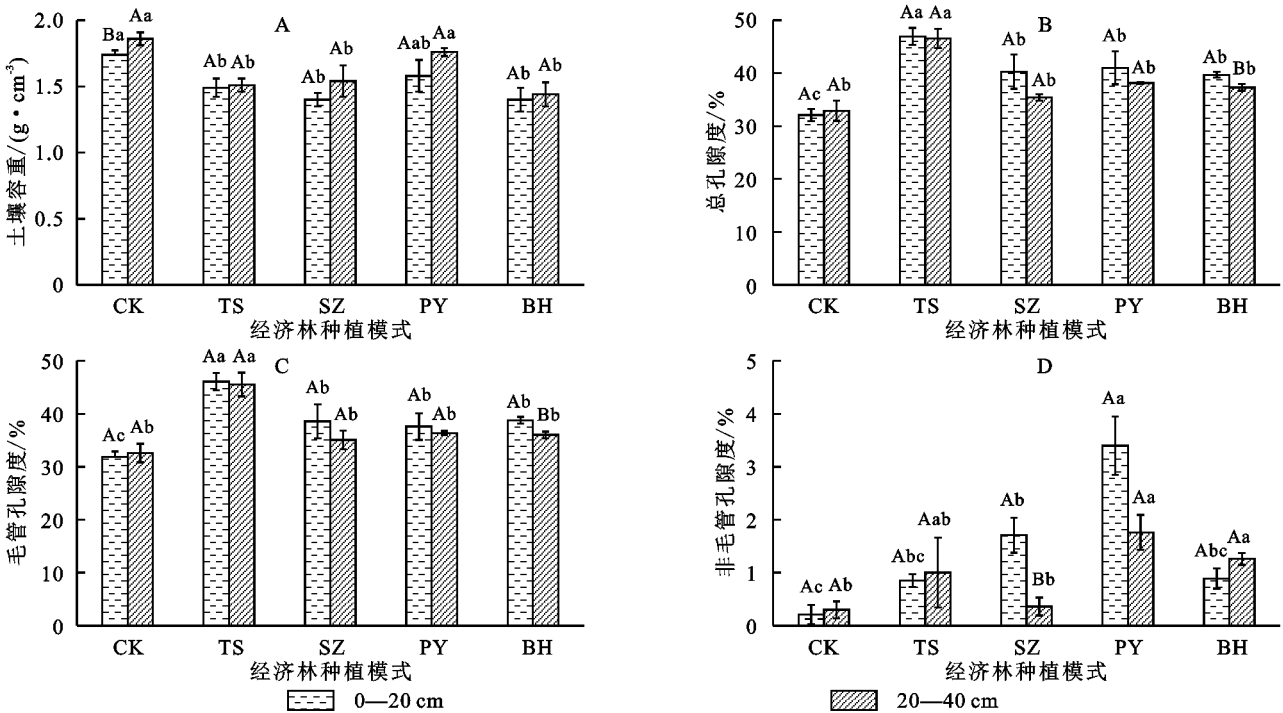
$$X_{(u)} = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

式中: X_(u) 为隶属函数值; X_i 为各植被模式某测试指标的平均值; X_{min} 和 X_{max} 分别为不同经济林种植模式中某测试指标的最小值和最大值。

2 结果与分析

2.1 不同经济林种植模式土壤容重和孔隙度

由图 1A 可知,与 CK 相比,0—40 cm 土层不同经济林种植模式土壤容重均呈下降趋势,图 1B,C,D 可知土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均有升高。



注:不同大写字母所标表示不同土层相同经济林种植模式在 0.05 水平上差异显著;不同小写字母所标表示同一土层不同经济林种植模式在 0.05 水平上差异显著,下同。

图 1 不同经济林种植模式的土壤容重与孔隙度

Fig. 1 Soil bulk density and porosity of different economic forest planting modes

0—40 cm 土层各经济林种植模式土壤容重大小依次为 BH<TS<SZ<PY<CK,与 CK 相比分别降低 21.0%,18.6%,18.1%,7.3%(图 1A)。垂直变化来看,不同经济林种植模式土壤容重表现为 20—40 cm 大于 0—20 cm,但不同土层土壤容重无显著差异(p>0.05)。不同经济林种植模式 0—20 cm,20—40 cm 土层土壤容重除 PY 与 CK 差异不显著外(p>0.05),其他经济林种植模式土壤容重均与 CK 差异显著(p<0.05)。0—20 cm 土层各经济林种植模式土壤容重大小依次为 BH<SZ<TS<PY<CK,20—40 cm 土层土壤容重大小依次为 TS<BH<SZ<PY<CK。土壤孔隙度方面,0—40 cm

土层各经济林种植模式土壤总孔隙度大小依次为 TS>PY>BH>SZ>CK,分别比 CK 增加 43.8%,21.7%,18.4%,16.5%。0—40 cm 各经济林种植模式土层毛管孔隙度大小依次为 TS>BH>PY>SZ>CK,分别比 CK 增加 42.0%,16.0%,14.7%,14.2%(图 1B)。垂直变化来看,除 BH 外,相同经济林种植模式不同土层土壤总孔隙度、毛管孔隙度均无显著差异(p>0.05)。0—20 cm 土层不同经济林种植模式土壤总孔隙度、毛管孔隙度与 CK 相比均差异显著(p<0.05);20—40 cm 土层,土壤总孔隙度、毛管孔隙度仅 TS 与 CK 差异显著(p<0.05)。0—20 cm 土层毛管孔隙度大小依次为 TS>

BH>SZ>PY>CK, 20—40 cm 土层毛管孔隙度大小依次为 TS>PY>BH>SZ>CK。总体上不同经济林种植模式土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均表现为 20—40 cm 小于 0—20 cm。

表 1 不同经济林种植模式的土壤持水蓄水特征值

Table 1 Soil water holding and water storage characteristic values of different economic forest planting modes

处理	土层深度/cm	毛管最大贮水量/ (t·hm ⁻²)	非毛管最大贮水量/ (t·hm ⁻²)	土壤最大贮水量/ (t·hm ⁻²)	土壤含水量/ mm	涵养降水量/ mm	有效涵养量/ mm
CK	0—20	638.13±19.80 ^{Ac}	4.20±3.68 ^{Ac}	642.33±22.94 ^{Ac}	32.16±3.26 ^{Ac}	32.07±5.53 ^{Aa}	31.65±5.24 ^{Aa}
	20—40	652.21±34.89 ^{Ab}	6.00±3.19 ^{Ab}	658.21±38.03 ^{Ac}	36.23±1.18 ^{Ac}	29.59±4.98 ^{Aa}	28.99±4.67 ^{Aa}
TS	0—20	921.59±32.97 ^{Aa}	16.93±2.35 ^{Abc}	938.52±32.68 ^{Aa}	62.32±4.85 ^{Aa}	31.53±2.61 ^{Aa}	29.84±2.38 ^{Aa}
	20—40	911.03±44.77 ^{Aa}	20.07±13.27 ^{Aab}	931.09±36.36 ^{Aa}	59.06±6.91 ^{Aa}	34.05±5.93 ^{Aa}	32.04±4.87 ^{Aa}
SZ	0—20	771.86±55.55 ^{Ab}	17.73±6.58 ^{Ab}	806.06±61.93 ^{Ab}	37.55±2.73 ^{Bbc}	43.05±8.60 ^{Aa}	39.63±8.00 ^{Aa}
	20—40	701.52±55.61 ^{Ab}	8.53±2.96 ^{Bb}	708.79±57.77 ^{Abc}	48.46±4.47 ^{Ab}	22.42±8.21 ^{Aab}	21.69±8.13 ^{Aab}
PY	0—20	752.47±50.35 ^{Ab}	67.93±21.05 ^{Aa}	820.41±62.32 ^{Ab}	45.02±8.69 ^{Ab}	37.02±6.52 ^{Aa}	30.23±5.06 ^{Aa}
	20—40	727.61±8.31 ^{Ab}	35.2±6.52 ^{Aa}	762.81±2.24 ^{Ab}	59.70±3.20 ^{Aa}	16.58±3.36 ^{Bb}	13.06±4.01 ^{Bb}
BH	0—20	776.24±12.25 ^{Ab}	17.73±6.05 ^{Abc}	793.97±17.33 ^{Ab}	40.21±2.74 ^{Abc}	39.19±2.75 ^{Aa}	37.41±2.90 ^{Aa}
	20—40	721.04±12.55 ^{Bb}	25.27±2.13 ^{Aa}	746.30±12.13 ^{Bb}	39.62±2.81 ^{Abc}	35.01±2.88 ^{Aa}	32.48±3.09 ^{Aa}

注:不同大写字母所标表示不同土层相同经济林种植模式在 0.05 水平上差异显著;不同小写字母所标表示同一土层不同经济林种植模式在 0.05 水平上差异显著。

0—40 cm 土层各经济林种植模式土壤最大贮水量大小均依次为 TS>PY>BH>SZ>CK,与 CK 相比分别增加 43.8%,21.7%,18.4%,16.5%,毛管最大贮水量大小均依次为 TS>BH>PY>SZ>CK,与 CK 相比分别增加 42.0%,16.0%,14.7%,14.2%。从垂直变化来看,除 BH 外,相同经济林种植模式不同土层下土壤最大贮水量、毛管最大贮水量无显著差异($p>0.05$)。0—20 cm 土壤最大贮水量、毛管最大贮水量与 CK 均差异显著($p<0.05$)。20—40 cm 土壤最大贮水量 TS,SZ,PY 与 CK 差异显著($p<0.05$),毛管最大贮水量仅 TS 与 CK 差异显著($p<0.05$)。0—20 cm 土层毛管最大贮水量大小依次为 TS>BH>SZ>PY>CK,20—40 cm 土层毛管最大贮水量大小依次为 TS>PY>BH>SZ>CK。总体上不同经济林种植模式土壤最大贮水量、毛管最大贮水量、非毛管最大贮水量均表现为 20—40 cm 土层小于 0—20 cm 土层。

与 CK 相比,0—40 cm 土层各经济林种植模式土壤涵养降水量、有效涵养量除 PY 下降外均有上升。0—40 cm 土层除 PY 外,各经济林种植模式土壤涵养降水量、有效涵养量大小均依次为 BH>TS>SZ>CK,涵养降水量分别比 CK 增加 20.0%,6.3%,6.2%,有效涵养量分别比 CK 增加 15.0%,2.0%,1.1%。从垂直变化来看,相同经济林种植模式不同土层下涵养降水量、有效涵养量仅 PY 差异显著($p<0.05$),0—20 cm 和 20—40 cm 土壤涵养降水量、有效涵养量除 PY 外与 CK 无显著差异($p>0.05$)。总体来看不同经济林种植模式土壤涵养降水量、有效涵

2.2 不同经济林种植模式土壤持水蓄水特征

由表 1 可以看出,与 CK 相比,0—40 cm 土层不同经济林种植模式土壤最大贮水量、毛管最大贮水量、非毛管最大贮水量和土壤含水量均呈上升趋势。

蓄量表现为 20—40 cm 土层低于 0—20 cm 土层。

2.3 不同经济林种植模式土壤有机碳及氮磷养分特征

由图 2 可知,与 CK 相比,0—40 cm 土层不同经济林种植模式土壤有机碳、全磷、全氮含量均有上升。

0—40 cm 土层土壤有机碳含量大小依次为 TS>PY>BH>SZ>CK,与 CK 相比分别增加 270.4%,81.5%,67.1%,6.9%。从垂直变化来看,相同经济林种植模式不同土层下 TS,PY 有机碳含量差异显著($p<0.05$);除 SZ 外,其他不同经济林种植模式 0—20 cm 和 20—40 cm 土层有机碳含量与 CK 相比均差异显著($p<0.05$),且 0—20 cm 土层有机碳含量均高于 20—40 cm 土层。

0—40 cm 土层土壤全磷含量大小依次为 TS>PY>BH>SZ>CK,与 CK 相比分别增加 250.4%,113.6%,86.6%,14.8%。土壤全氮含量大小依次为 TS>BH>PY>CK>SZ,TS,BH,PY 分别比 CK 增加 275.7%,58.8%,53.4%。从垂直变化来看,相同经济林种植模式不同土层 TS 全磷、全氮含量差异显著($p<0.05$)。除 SZ 外,其他不同经济林种植模式在不同土层全磷、全氮含量与 CK 相比均差异显著($p<0.05$)。0—20 cm 土层土壤全磷、全氮含量均高于 20—40 cm 土层。

2.4 不同经济林种植模式土壤速效养分特征

由图 3 可知,与 CK 相比,0—40 cm 土层不同经济林种植模式土壤速效养分含量均有上升。0—40 cm 土层土壤有效磷含量大小依次为 TS>PY>BH>SZ>CK,与 CK 相比分别增加 397.7%,319.8%,9.4%,6.7%;铵态氮含量大小依次为 PY>TS>SZ>BH>CK,与

CK 相比分别增加 349.7%, 249.5%, 216.6%, 31.5%; 硝态氮含量大小依次为 $SZ > TS > BH >$

$PY > CK$, 与 CK 相比分别增加 1067.0%, 872.6%, 330.4%, 30.0%。

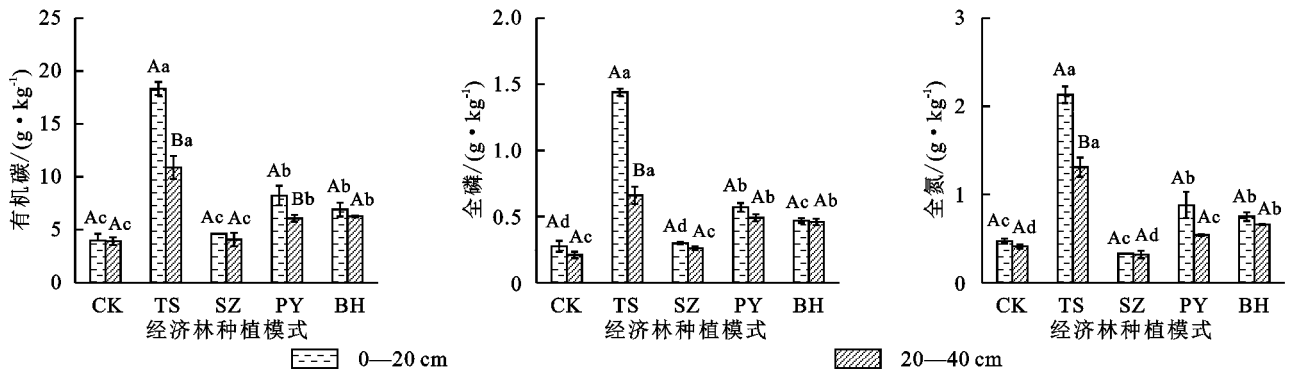


图2 不同经济林种植模式土壤有机碳及氮磷养分特征

Fig. 2 Soil organic carbon, nitrogen and phosphorus nutrients in different economic forest planting modes

从垂直变化来看,相同经济林种植模式不同土层下,土壤速效养分含量差异多不显著。不同经济林种植模式下,0—20 cm 和 20—40 cm 土层 TS, PY 有效磷含量均与 CK 差异显著 ($p < 0.05$), TS, PY, BH 速

效钾含量均与 CK 差异显著 ($p < 0.05$), TS, SZ, PY 铵态氮含量均与 CK 差异显著 ($p < 0.05$)。在 0—20 cm 土层 TS, SZ 硝态氮含量与 CK 差异显著 ($p < 0.05$), 在 20—40 cm 土层无显著差异 ($p > 0.05$)。

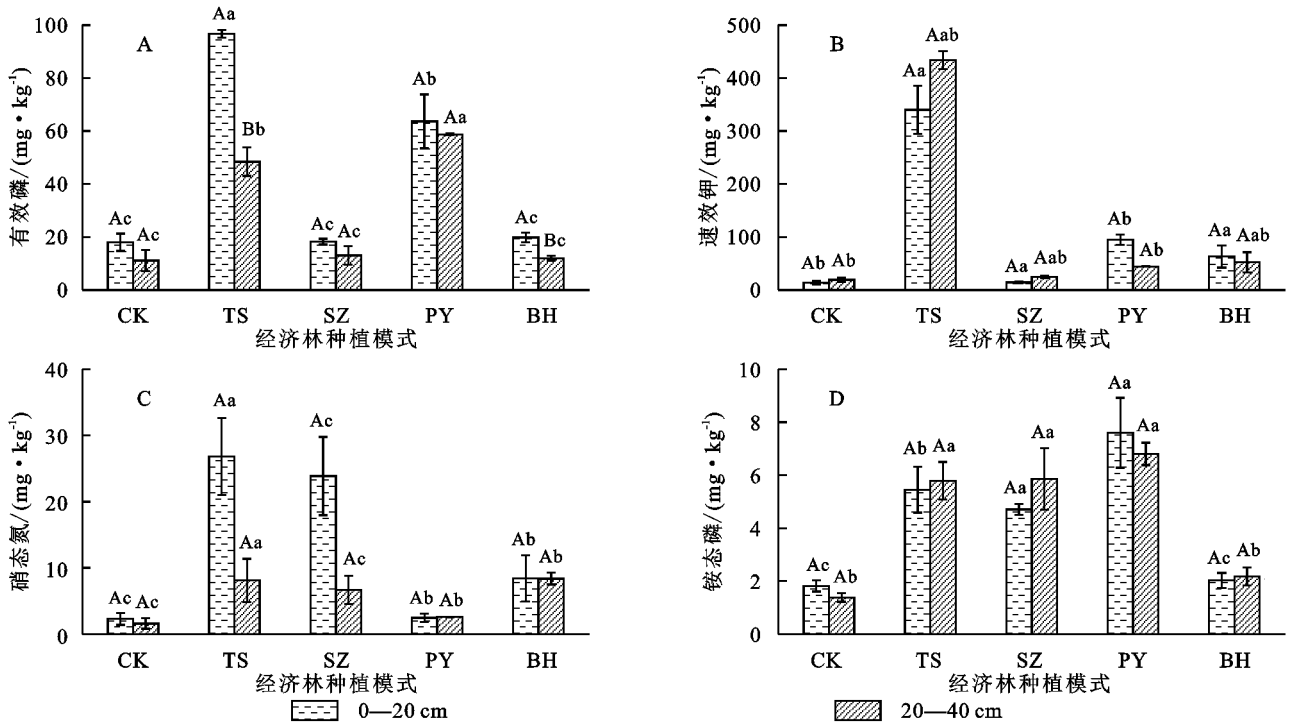


图3 不同经济林种植模式土壤速效养分特征

Fig. 3 Soil available nutrient characteristics of different economic forest planting modes

2.5 不同经济林种植模式改良土壤效应因子的主成分分析

由表2可知,前3个主成分的累计贡献率为83.71%,能够反映测试指标的大部分信息,因此取前3个符合综合数值分析要求的主成分。第1主成分的贡献率为50.82%,是最大主分量,其中因子负荷量较大的有总孔隙度、毛管孔隙度、最大贮水量、毛管最大贮水量、有机碳、全磷、全氮、速效钾,可描述为土壤有效孔隙性和土壤养分指标;第2主成分的贡献率为

17.98%,其中因子负荷量较大的有涵蓄降水量、有效涵蓄量,可描述为土壤涵蓄降水量。第3主成分较大的为土壤非毛管孔隙度和非毛管最大贮水量,可描述为土壤非毛管孔隙度。

2.6 不同经济林种植模式改良土壤效应的综合评价

依据主成分分析结果,选用因子荷载值较大的11个指标用来评价不同经济林种植模式的改良土壤效应,分别为土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、土壤最大贮水量、毛管最大贮水量、涵蓄降水量、有效涵蓄

量、全磷、全氮、有机碳、速效钾。由主要因子的隶属函数综合值可知(表 3),不同经济林种植模式改良土壤效应的综合评价为 TS>BH>PY>SZ>CK,与 CK 相比,分别增加 615.3%,263.9%,181.3%,148.9%。

表 2 土壤主成分分析的因子负荷量及贡献率

Table 2 Factor loading and contribution rate of soil principal component analysis

因子	主成分			
	1	2	3	4
土壤容重	-0.448	-0.64	-0.12	0.234
总孔隙度	0.958	0.118	0.12	-0.055
毛管孔隙度	0.952	0.141	-0.061	-0.092
非毛管孔隙度	0.291	-0.08	0.917	0.167
最大贮水量	0.958	0.118	0.12	-0.055
毛管最大贮水量	0.952	0.141	-0.061	-0.092
非毛管最大贮水量	0.291	-0.08	0.917	0.167
土壤含水量	0.707	-0.617	-0.181	-0.111
涵养降水量	0.206	0.885	0.355	0.074
有效涵蓄量	0.149	0.942	0.163	0.039
有机碳	0.928	-0.067	-0.189	0.146
全磷	0.934	-0.111	-0.119	0.169
全氮	0.888	-0.054	-0.261	0.197
有效磷	0.822	-0.409	0.106	0.129
铵态氮	0.503	-0.533	0.516	-0.271
硝态氮	0.419	0.215	-0.166	-0.788
速效钾	0.911	-0.035	-0.283	0.119
pH	0.333	0.422	-0.513	0.391
贡献率/%	50.82	17.98	14.91	6.220
累计贡献率/%	50.82	68.80	83.71	89.930

表 3 不同经济林种植模式主要指标的隶属函数值

Table 3 Membership function values of main indexes of different economic forest planting modes

指标	CK	TS	SZ	PY	BH
总孔隙度	0.00	1.00	0.38	0.50	0.42
毛管孔隙度	0.00	1.00	0.34	0.35	0.38
非毛管孔隙度	0.00	0.29	0.34	1.00	0.35
最大贮水量	0.00	1.00	0.38	0.50	0.42
毛管最大贮水量	0.00	1.00	0.34	0.35	0.38
涵养降水量	0.53	0.79	0.78	0.00	1.00
有效涵蓄量	0.77	0.82	0.80	0.00	1.00
全磷	0.00	1.00	0.06	0.45	0.35
全氮	0.09	1.00	0.00	0.26	0.28
有机碳	0.00	1.00	0.03	0.30	0.25
速效钾	0.00	1.00	0.02	0.18	0.20
综合值	1.38	9.90	3.44	3.89	5.04

3 讨论

3.1 不同经济林种植模式的土壤蓄水保土效应

沂蒙山区地处淮河流域的东北部,是山东省土壤侵蚀较为严重的地区,应采取退耕还林还草等植被恢复措施^[15]。研究表明,经济林作为一种主要林分类型,对土壤的改良效应存在一定规律,不同经济林种植模式的土壤理化性质存在较大差异。不同经济林种植模式的选择对减少地表径流、涵养水源、保持水土、荒草地改良等具有重要意义。森林土壤持水、蓄水能力受土壤孔隙度等的影响较大,同时也受到其他土壤理化性质的影响^[16],土壤容重与孔隙度是反映土壤物理性质的重要参数,影响着土壤蓄水特征,是决定森林土壤水源涵养的重要指标,土壤容重越小,土壤孔隙度越大,土壤通气性越好,对水分渗透与保持更有利^[17]。毛管孔隙度越大,土壤中有效贮存容量越大,可供树木根系利用的有效水分比例越大,有利于降水下渗,从而减少地表径流。不同经济林种植模式中,桃树纯林降低荒草地土壤容重、增加土壤孔隙度效果较强,其次为苹果+樱桃混交林、板栗+花椒混交林、山楂纯林。不同经济林种植模式可降低土壤容重在 7.3%~21%,增加土壤孔隙度在 16.5%~43.8%。福建省沙县不同林分类型下生物量、地被物生物量、凋落物现存量,对提高土壤入渗能力、增强土壤抗蚀性、涵养水源均有影响^[18]。不同经济林种植模式林内小环境、凋落物数量及分解速率不同,从而影响土壤孔隙度^[19]。桃树纯林生长较好,植物根系较发达,地下细根越多对毛管孔隙度形成越有利,同时根系对土壤产生机械力,可以改善土壤结构和孔隙度^[20]。富丽等^[21]研究表明陇东黄土高原苹果经济林能显著提高水土保持功能,与凋落物蓄积量、根系挤压等有一定相关性。板栗林对土壤水文特性具有一定影响,可以改善土壤理化性质、经济林生态系统功能,促进生态系统良性发展^[22]。可见,经济林林下植被生长、凋落物及根系均可对土壤孔隙结构产生影响,对土壤孔隙改良有一定效果,与本文研究结果相符。

土壤贮水量反映林地土壤的涵养潜力,影响土壤养分的存在形式和运移状况,对林木生长影响较大^[23]。不同经济林种植模式可增加土壤毛管最大贮水量在 14.2%~42.0%。从土壤蓄水能力看,有效涵蓄量高有利于减少地表径流,减少降水的无效损失和表土流失。北方土石山区经济林地能改善荒地土壤结构,具有良好的土壤水文生态功能^[22],与本文研究

结果相符。不同经济林种植模式下 20—40 cm 土层土壤贮水量及涵蓄量均小于 0—20 cm 土层,表明表层土持水蓄水能力更强,这可能与表层土生化过程活跃和根系较多有关^[24]。

综合土壤孔隙度、涵养水源、贮水能力和土壤水分有效性来看,桃树纯林最好,其次为板栗+花椒混交林。而山楂纯林和苹果+樱桃混交林相对较差。

3.2 不同经济林种植模式的土壤养分积累

关于林分结构对土壤养分含量的探讨,对揭示影响土壤养分含量的主导因子、制定改善土壤养分含量的森林结构优化措施有重要意义^[4]。4 种不同经济林种植模式的土壤养分指标均显著优于荒草地;相同经济林种植模式不同土层间养分的积累也存在差异。根系吸收养分再通过凋落物的分解作用等形式将养分回归地表,植被类型不同是造成土壤养分差异的主要因素^[10]。随着土壤孔隙度、毛管孔隙度、土壤最大贮水量、毛管最大贮水量、土壤含水量等土壤蓄水保土特征指标提高,土壤有机碳及氮磷养分呈增加趋势,土壤孔隙度、贮水量等水分物理指标与土壤有机碳等指标呈显著正相关($p < 0.05$)。

不同经济林种植模式土壤养分含量大小排序为:桃树纯林>苹果+樱桃混交林>板栗+花椒混交林>山楂纯林>荒草地。不同经济林种植模式可增加土壤全磷含量在 14.8%~250.4%,其中桃树纯林与荒草地差异最显著,这与桃树纯林凋落物分解较快,有机质分解产生的全磷逐渐积累有关。杨淑琪等^[25]研究表明,开远市土地退化严重地区,桃树种植对于土壤有机碳、全磷等养分积累有明显改良作用,与本文研究结果类似。土壤有机碳对土壤肥力状况起关键作用,不同林分类型的碳积累速率对土壤碳库会产生重要影响,通过合理的森林管理,可以在一定程度上控制土壤有机碳固存^[26]。

土壤有机碳与全氮、全磷呈极显著正相关($p < 0.05$),王金贵等^[27]研究表明青海不同类型草甸土壤有机碳与全氮、全磷呈极显著正相关关系。不同经济林种植模式可显著增加有机碳含量在 6.9%~270.4%。刘晓民等^[28]研究表明樟子松林、山桃林、沙棘山杏混交林对土壤总有机碳提升幅度较大,而凋落物较多的林分类型的固碳增汇能力也较强。桃树的根系一般都比较发达,且表层凋落物较多,有机物输入量更大,提高土壤肥力水平明显^[20]。板栗+花椒混交林模式的集约经营强度更大,更易于降低土壤有机质含量,进一步导致土壤养分及其有效性的下降,黄晓露等^[29]

研究表明板栗林土壤养分及其有效性受土壤有机碳含量影响明显。不同经济林种植模式下 0—20 cm 土层有机碳及氮磷养分含量高于 20—40 cm 土层,且桃树纯林不同土层间差异显著,曹裕等^[11]研究结果表明陕西洛川旱塬不同林龄苹果林表层土壤养分含量均高于下层土壤,可能因为土壤中有有机碳的来源主要是地表凋落物和植物根系,而凋落物集中在表层土壤,且在表层土微生物及生化反应活跃,在凋落物分解过程中产生的有机碳进入表层土中。张鹤等^[30]研究结果表明黄土—砒砂岩交界带人工植被恢复对荒地土壤养分改善较好。不同经济林种植模式下桃树纯林与荒草地相比土壤有效磷、速效钾、硝态氮含量增加最多,苹果+樱桃混交林与荒草地相比土壤铵态氮含量增加最多。从改善土壤养分的角度来看,营造桃树纯林最好,其次为苹果+樱桃混交林、板栗+花椒混交林,而山楂纯林较差。

4 结论

与荒草地相比,鲁中南地区临沂市蒙阴县孟良崮小流域不同经济林种植模式可显著影响土壤容重和孔隙度、土壤蓄水特征和养分特征等,具有良好水土保持效益。从土壤蓄水保土效应来看,桃树纯林较好,其次为板栗+花椒混交林,桃树纯林、苹果+樱桃混交林、山楂纯林、板栗+花椒混交林均可降低荒草地土壤容重、增加土壤孔隙度和土壤贮水量,且除土壤容重外,20—40 cm 土层持水蓄水效应低于 0—20 cm 土层;从土壤养分含量来看,桃树纯林较好,其次为苹果+樱桃混交林、板栗+花椒混交林,不同经济林种植模式与荒草地相比均有提高,可增加土壤有机碳、全磷、全氮、速效养分等含量,且 20—40 cm 土层养分含量多小于 0—20 cm 土层。综合来看,经济林改良荒草地营造桃树纯林效果最好,其次是板栗+花椒混交林。

参考文献(References):

- [1] 夏江宝,曲志远,朱玮,等.鲁中山区不同人工林土壤水分特征[J].中国水土保持科学,2005,3(3):45-50.
Xia J B, Qu Z Y, Zhu W, et al. Soil water characteristics of different artificial forest in mountainous area in the middle of Shandong Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2005,3(3):45-50.
- [2] 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 S Q, Ye S M. Effects of *Cunninghamia lanceolata* stand types on the changes of aggregate

- gate-related organic carbon and nutrients in surface soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 2857-2865.
- [3] Shao G D, Ai J J, Sun Q W, et al. Soil quality assessment under different forest types in the Mount Tai, central Eastern China[J]. Ecological Indicators, 2020, 115: 106439.
- [4] 王森浩, 朱怡静, 王玉芳, 等. 西沙群岛主要岛屿不同植被类型对土壤理化性质的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2019, 27(4): 383-390.
- Wang S H, Zhu Y J, Wang Y F, et al. Effect of vegetation types on soil physicochemical property in East Island and Yongxing Island of Xisha Islands[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2019, 27(4): 383-390.
- [5] Toková L, Igaz D, Horák J, et al. Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam haplic luvisol [J]. Agronomy, 2020, 10(7): 1005.
- [6] 罗维成, 赵文智, 孙程鹏, 等. 科尔沁沙地樟子松 (*Pinus sylvestris*) 人工固沙林演变过程中物种多样性和土壤水分特征[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 126-132.
- Luo W C, Zhao W Z, Sun C P, et al. Changes in species composition, diversity and soil water content of *Pinus sylvestris* artificial sand-fixation forest along an afforestation successional gradient in Horqin [J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 126-132.
- [7] 陈赫男, 苗晓靖, 程传民, 等. 泰安市黄前东小流域经济林改良土壤效果研究[J]. 中国水土保持, 2009(3): 37-38.
- Chen H N, Miao X J, Cheng C M, et al. Effect of soil improvement through planting economic trees of Huangqiandong small watershed of Taian city [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(3): 37-38.
- [8] 徐雅洁, 郭月峰, 姚云峰, 等. 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, 2021, 39(3): 370-377.
- Xu Y J, Guo Y F, Yao Y F, et al. Effect of different forest-stand configuration on soil-moisture physical properties [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2021, 39(3): 370-377.
- [9] 梁世兴, 王娅茹, 曹航, 等. 冀西北不同林分类型土壤贮水与入渗特征[J]. 林业与生态科学, 2022, 37(3): 246-250.
- Liang S X, Wang Y R, Cao H, et al. Characteristics of soil water storage and infiltration in different forest types in northwest Hebei Province [J]. Forestry and Ecological Sciences, 2022, 37(3): 246-250.
- [10] 兰道云, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 189-196.
- Lan D Y, Bi H X, Zhao D Y, et al. Evaluation on soil conservation function of *Pinus tabulaeformis* plantation with different densities in the loess area of western Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 189-196.
- [11] 曹裕, 居玛汗·卡斯木, 范鹏, 等. 陕西洛川旱塬苹果园地深层土壤水分和养分特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(2): 388-396.
- Cao Y, Jumahan K, Fan P, et al. Moisture and nutrient characteristics of deep layer soil in apple orchards on the Luochuan highland of Shaanxi, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(2): 388-396.
- [12] Lee K L, Ong K H, King P J H, et al. Stand productivity, carbon content, and soil nutrients in different standages of *Acacia mangium* in Sarawak, Malaysia [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2015, 39(1): 154-161.
- [13] 夏江宝, 许景伟, 李传荣, 等. 黄河三角洲退化刺槐林地的土壤水分生态特征[J]. 水土保持通报, 2010, 30(6): 75-80.
- Xia J B, Xu J W, Li C R, et al. Ecological characteristics of soil moisture in degraded *Robinia pseudoacacia* plantation in Yellow River Delta area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(6): 75-80.
- [14] 夏江宝, 刘玉亭, 朱金方, 等. 黄河三角洲莱州湾柽柳低效次生林质效等级评价[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1551-1558.
- Xia J B, Liu Y T, Zhu J F, et al. Quality level assessment of lowly efficient *Tamarix chinensis* secondary shrubs in Laizhou Bay of Yellow River Delta [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1551-1558.
- [15] 马骞, 于兴修, 刘前进, 等. 沂蒙山区土壤侵蚀空间分布及其影响因素动态变化[J]. 中国农业科学, 2010, 43(22): 4652-4662.
- Ma Q, Yu X X, Liu Q J, et al. Research on dynamic change of soil erosion distribution and its controlling factors in Yimeng Mountainous area of China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(22): 4652-4662.
- [16] 丛日亮, 黄进, 张金池, 等. 苏南丘陵区主要林分类型土壤抗蚀性分析[J]. 生态环境学报, 2010, 19(8): 1862-1867.
- Cong R L, Huang J, Zhang J C, et al. Analysis of soil anti-erodibility of main forest types in the south hilly region of Jiangsu Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(8): 1862-1867.
- [17] 云慧雅, 毕华兴, 王珊珊, 等. 不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J]. 水土保持学报,

- 2021,35(6):183-189.
- Yun H Y, Bi H X, Wang S S, et al. Soil physical and chemical characteristics of different forest types and their effects on soil infiltration process[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(6):183-189.
- [18] 洪宜聪.杉木闽粤栲混交林分特征与水土保持功能研究[J].江苏林业科技,2016,43(5):18-24.
- Hong Y C. Study on the characteristics and function of soil and water conservation of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis fissa* mixed forest[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology, 2016,43(5):18-24.
- [19] 蒲嘉霖,刘亮.亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J].水土保持研究,2019,26(6):165-170.
- Pu J L, Liu L. Hydrology functions and decomposition characteristics of litter in subtropical forest [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019,26(6):165-170.
- [20] 史利江,高杉,姚晓军,等.晋西北黄土丘陵区不同植被恢复下的土壤碳氮累积特征[J].生态环境学报,2021,30(9):1787-1796.
- Shi L J, Gao S, Yao X J, et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen accumulation under different vegetation restoration in the loess hilly region of northwest Shanxi Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021,30(9):1787-1796.
- [21] 富丽,赵锦梅,李永宁,等.陇东黄土高原不同林龄苹果林地枯落物及土壤的水文效应[J].水土保持通报,2018,38(5):40-45.
- Fu L, Zhao J M, Li Y N, et al. Hydrological effects of litters and soil in apple tree plantation at different stand ages of Longdong Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):40-45.
- [22] 柳京安,高鹏,高军侠,等.鲁中南山地干果经济林土壤水文生态特征[J].中国水土保持科学,2007,5(1):84-87,92.
- Liu J A, Gao P, Gao J X, et al. Eco-hydrological characteristics of soil of economic dry fruits forest in hilly area of central south of Shandong Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007,5(1):84-87,92.
- [23] 赵芳,李雪云,赖国桢,等.飞播马尾松林不同林下植被类型枯落物及土壤水文效应[J].中国水土保持科学,2016,14(4):26-33.
- Zhao F, Li X Y, Lai G Z, et al. Hydrological effects of forest litters and soil in different types of understory vegetation in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016,14(4):26-33.
- [24] 张方博,侯玉雪,敖园园,等.土壤紧实胁迫下根系-土壤的相互作用[J].植物营养与肥料学报,2021,27(3):531-543.
- Zhang F B, Hou Y X, Ao Y Y, et al. Root-soil interaction under soil compaction [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021,27(3):531-543.
- [25] 杨淑琪,唐芬,杨桦,等.滇南地区桃树种植模式对土壤有机碳组分及碳库管理指数的影响[J].生态学报,2023,43(1):290-303.
- Yang S Q, Tang F, Yang H, et al. Effects of peach tree planting patterns on soil organic carbon fractions and carbon pool management index in southern Yunnan [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(1):290-303.
- [26] Liu T R, Peng D L, Tan Z J, et al. Effects of stand density on soil respiration and labile organic carbon in different aged *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. Ecological Processes, 2021,10(1):44.
- [27] 王金贵,李希来,李宗仁,等.青海超净区高寒草甸土壤有机碳及养分分布特征[J].生态环境学报,2018,27(2):232-238.
- Wang J G, Li X L, Li Z R, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and nutrients in alpine meadow soils in a super clean area, Qinghai Province [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018,27(2):232-238.
- [28] 刘晓民,白嘉骏,杨耀天.不同林分类型对鄂尔多斯市圪秋沟流域土壤碳库及稳定性的影响[J].水土保持通报,2022,42(5):360-367,397.
- Liu X M, Bai J J, Yang Y T. Effects of different stand types on soil carbon pools and stability at Geguogou watershed in Ordos City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(5):360-367,397.
- [29] 黄晓露,戴勤,梁文汇,等.桂西北板栗园区土壤养分含量分析及评价[J].西南农业学报,2022,35(12):2827-2835.
- Huang X L, Dai Q, Liang W H, et al. Analysis and evaluation of soil nutrient content in chestnut orchards in Northwest Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022,35(12):2827-2835.
- [30] 张鹤,费洪岩,韩凤朋,等.植被恢复和覆土厚度对砒砂岩区土壤水分及养分的影响[J].水土保持通报,2022,42(2):98-106.
- Zhang H, Fei H Y, Han F P, et al. Effects of vegetation restoration and soil thickness on soil moisture and nutrient in feldspathic sandstone area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(2):98-106.