



胶东丘陵地区不同林分类型改良土壤效应研究

王启鑫 杨静 赵振宇 刘文静 芦月 高芳磊 夏江宝

Study on Soil Improvement Effect of Different Stand Types in Jiaodong Hilly Area

Wang Qixin, Yang Jing, Zhao Zhenyu, Liu Wenjing, Lu Yue, Gao Fanglei, Xia Jiangbao

引用本文:

王启鑫, 杨静, 赵振宇, 刘文静, 芦月, 高芳磊, 夏江宝. 胶东丘陵地区不同林分类型改良土壤效应研究[J]. 西南林业大学学报, 2025, 45(2):87–95. doi: 10.11929/j.swfu.202401046

Wang Qixin, Yang Jing, Zhao Zhenyu, Liu Wenjing, Lu Yue, Gao Fanglei, Xia Jiangbao. Study on Soil Improvement Effect of Different Stand Types in Jiaodong Hilly Area[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2025, 45(2):87–95. doi: 10.11929/j.swfu.202401046

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202401046>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

昆明市海口林场栎类林分枯落物层及土壤层水源涵养功能的研究

Study on Water Conservation Function of Litter Layer and Soil Layer of Oak Stand in Haikou Forest Farm of Kunming
西南林业大学学报. 2021, 41(4): 136–143 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202001008>

竹节水平沟对红壤坡面土壤水分的影响

The Effect of Soil Moisture in Red Soil Slope by Bamboo-type Contour Trench
西南林业大学学报. 2020, 40(6): 73–79 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201912040>

蚯蚓活动对秦岭天然林林地土壤养分的影响

Effects of Earthworm Activities on Soil Nutrients in Forest Lands of the Qinling Mountains
西南林业大学学报. 2020, 40(5): 100–107 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201907030>

带状抚育间伐对辽东落叶松人工林生长及部分土壤养分指标的影响

Effect of Strip Tending Thinning on the Growth and Some Soil Nutrient Indexes of Larch Plantation in Eastern Liaoning Province
西南林业大学学报. 2021, 41(4): 11–17 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202003005>

北京4种典型林分水质效应分析

Analysis of Water Quality Effect of 4 Typical Forests Stands in Beijing
西南林业大学学报. 2023, 43(2): 133–146 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202107072>

滇东北4种类型箬竹林分土壤碳氮磷生态化学计量特征研究

Ecological Stoichiometry of Soil C, N and P in 4 Different Types of *Qiongzhueta tumidinoda* Forests in Northeast Yunnan
西南林业大学学报. 2023, 43(3): 111–119 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202203054>

胶东丘陵地区不同林分类型改良土壤效应研究

王启鑫^{1,2} 杨静³ 赵振宇⁴ 刘文静¹ 芦月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. 东营湿地城市建设推进中心, 山东 东营 257000; 4. 宁阳县自然资源和规划局, 山东 泰安 271400)

摘要: 选取胶东半岛昆嵛山森林公园缓冲区的刺槐+白杨+麻栎混交林(CBM)、油松+柞树混交林(YZ)、板栗经济林(BL)、黑松防护林(HS)4种不同林分类型作为研究对象,以裸地(CK)作为对照,分析土壤容重、孔隙度和蓄水量等10个土壤物理指标,土壤有机碳、全氮、全磷和速效养分等8个养分指标,采用主成分分析法和模糊数学隶属函数法综合评价不同林分对土壤的改良效应。结果表明:4种林分类型对土壤水分物理特征和养分特征均有改良效应,降低土壤容重,增强土壤蓄水能力,提高土壤肥力;不同林分类型对0~20 cm土层的改良效果优于20~40 cm土层,阔叶混交林对土壤的改良效果优于纯林;综合改良效果以刺槐+白杨+麻栎混交林最好,其次是黑松林和油松+柞树混交林,板栗林改良效果相对较差。为减少研究区水土流失,提高土壤涵养水分能力,增加土壤养分积累,应选择多树种混交方式进行栽植。

关键词: 土壤; 水分; 养分; 林分类型; 胶东半岛

中图分类号: S157.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2025)02-0087-09

引文格式: 王启鑫, 杨静, 赵振宇, 等. 胶东丘陵地区不同林分类型改良土壤效应研究 [J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2025, 45(2): 87-95. Wang Q X, Yang J, Zhao Z Y, et al. Study on Soil Improvement Effect of Different Stand Types in Jiaodong Hilly Area[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2025, 45(2): 87-95. DOI: 10.11929/j.swfu.202401046



Study on Soil Improvement Effect of Different Stand Types in Jiaodong Hilly Area

Wang Qixin^{1,2}, Yang Jing³, Zhao Zhenyu⁴, Liu Wenjing¹, Lu Yue¹, Gao Fanglei¹, Xia Jiangbao¹

(1. Shandong University of Aeronautics, Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou Shandong 256603, China; 2. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian Shandong 271018, China; 3. Dongying Wetland City Construction Promotion Center, Dongying Shandong 257000, China; 4. Ningyang Natural Resources and Planning Bureau, Taian Shandong 271400, China)

Abstract: Take the bare land as a control, 4 forest types including mixed forest of *Robinia pseudoacacia*, *Populus tomentosa* and *Quercus acutissima*, mixed forest of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus mongolica*, cash forest of *Castanea mollissima*, shelter forest of *Pinus thunbergii* were selected in this research. Ten soil physical indexes such as soil bulk density, porosity and water storage capacity, 8 nutrient indexes such as soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and available nutrients were measured and analyzed. Comprehensive evaluation of soil improvement effects of different forest types by principal component analysis and fuzzy mathematics membership function method. The results show that 4 forest types have improvement effects on soil physical and chemical characteristics, such as reducing bulk density, increasing water storage capacity of soil, and improving

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-06-04

基金项目: 泰山学者人才工程项目(TSQN201909152)资助; 山东高速鸿林工程技术有限公司黄河流域(下游)石灰岩露采矿区植被恢复与生态修复关键技术研究项目(SDGSHL209)资助。

第1作者: 王启鑫(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 林业生态学。Email: qixinwang2212@163.com。

通信作者: 夏江宝(1978—), 男, 博士, 教授。研究方向: 植被恢复与生态修复。Email: xiajb@163.com。

the nutrient content of soil. The improvement effect of different forest types on 0–20cm soil layer was better than that of 20–40cm soil layer, and the soil improvement effect of broad-leaved mixed forest was better than that of pure forest. The best comprehensive improvement effect of 4 forest types is the mixed forest of *R. pseudoacacia*, *P. tomentosa* and *Q. acutissima*, followed by shelter forest of *P. thunbergii*, mixed forest of *P. tabuliformis* and *Q. mongolica*, and cash forest of *C. mollissima* is relatively poor. In order to reduce soil erosion in the research area, improve water storage capacity of soil and increase nutrient accumulation, it is necessary to choose the mixed planting of multiple tree species.

Key words: soil; water; nutrient; stand type; Jiaodong Peninsula

土壤有机碳及氮、磷、钾、硫等营养元素通过水土流失,是导致生态环境退化的主要方式之一^[1-3]。造林种草是水土保持、改善生态环境的重要方法^[4]。适地适树是造林种草的基本原则,而对不同植被类型改良土壤效应进行综合评价,则有利于筛选出最优植被类型组合,从而指导解决生产实践中的问题。

植被恢复可对土壤容重和孔隙度^[4]、渗透性^[5]、土壤含水量^[6]、团聚体稳定性^[7]、有机质^[8]、养分含量^[9]、微生物群落结构^[10]等产生影响,同时直接或间接影响植物光合作用、蒸腾作用、土壤养分存在状态和迁移速度、微生物活动、土壤酶种类及活性,从而综合作用于植物生长发育^[11-12]。李品荣等^[13]对滇东南石漠化山地12种不同退耕还林模式研究发现,植树造林后土壤物理性状有很大改善,土壤抗蚀性和储水性增强,土壤养分提高,土壤吸收保存养分离子能力增强;赵欣宇^[14]对武川县不同林分类型土壤理化性质研究发现,柠条(*Caragana intermedia*)与沙棘(*Hippophae rhamnoides*)混交林可显著提升土壤非毛管孔隙度,降低土壤容重,提高土壤碱解氮含量;袁在翔等^[15]对紫金山马尾松(*Pinus massoniana*) + 栎树(*Quercus acutissima*)混交林、马尾松 + 枫香(*Liquidambar formosana*)混交林等林分类型研究发现,混交林土壤pH和土壤密度较低,含水率和粉粒比例较高;韩紫璇等^[7]对宁乡市坝塘镇林场5个不同栎类混交模式研究发现,栎类与杉木(*Cunninghamia lanceolata*)混交后,林地土壤养分得到改善,尤其是土壤有机质,并且随土壤层次加深,土壤养分含量逐渐降低;马亚峰等^[16]发现不同林分类型对不同土层理化性质和土壤养分的影响差异显著,表层土壤响应敏感,改良效果较好。因此,选择合理的林分密度或合适的混交树种可以改善土壤结构、提高生物产量^[17-18]。

昆崙山国家森林公园作为胶东丘陵地形的典型代表,其边缘缓冲区是以棕壤土为主的砂质土壤,夹杂大量砾石,山坡陡峭,土层浅薄,自身涵养水源能力较差,再加上人为砍伐和保护力度不够等原因使植被覆盖率降低,导致固土蓄水能力下降,水土流失现象严重,是国内治理土壤侵蚀重点区域。本研究选择昆崙山国家森林公园缓冲区刺槐(*Robinia pseudoacacia*) + 白杨(*Populus tomentosa*) + 麻栎(*Quercus acutissima*)混交林、油松(*Pinus tabuliformis*) + 柞树(*Quercus mongolica*)混交林、板栗(*Castanea mollissima*)经济林、黑松(*Pinus thunbergii*)防护林4种不同林分类型为研究对象,以裸地作为对照,探讨不同林分类型的土壤水分物理性质及土壤养分特征的变化规律,结合主成分分析法和模糊数学隶属函数法进行综合评价,筛选出针对研究区土壤的最优植被类型组合,旨在为胶东半岛丘陵地区水土保持生态建设中的坡耕地植被恢复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

昆崙山森林公园(121°37'00"~121°51'00"E, 37°12'20"~37°18'50"N)位于胶东半岛丘陵区,濒临黄海,属于山地丘陵地形,总面积15416.5 hm²,核心区6486.0 hm²,缓冲区4481.0 hm²^[19]。属于暖温带湿润季风气候,年平均气温12.0~12.9℃,极端高温约38℃,年降水量633.1~809.2 mm,降雨多集中在夏季,易形成暴雨^[20],是水土流失较为严重的地区。实施植树造林以及后期的封山育林等措施,植被覆盖面积逐步恢复,水土保持能力逐渐恢复。现有植被主要有黑松、油松、麻栎、白杨、刺槐、板栗、柞树等树种。

1.2 研究对象

2022年6月在昆崙山国家森林公园缓冲区选取具有代表性的4种不同林分类型作为研究对象,选

择相邻裸地作为对照 (CK)。在坡度、坡向、坡位、海拔、林分密度等立地因子一致条件下, 每种林分类型选取 3 个标准样地, 规格为 20 m × 20 m。4 种林分类型的样地均选择在山坡阳面、坡中位置 (表 1)。4 种林分类型分别为刺槐 + 白杨 + 麻栎混交林 (CBM)、油松 + 柞树混交林

(YZ)、板栗经济林 (BL)、黑松防护林 (HS)。所选林分的造林时间和管理措施相同, 树龄均为 8~10 a。所有林分在造林后的前 3 a 以松土除草为主, 天气干旱时视情况集中浇灌, 一旦出现病虫害及时喷洒药剂; 在 8~10 a 按“强枝弱剪, 弱枝强剪”原则修剪林间长势弱和重叠的枝干。

表 1 不同林分类型的基本信息

Table 1 Basic information of different stand types

林分类型	林龄/a	林分密度/(株·hm ⁻²)	胸径/cm	树高/m	海拔/m	坡度/(°)	坡向/(°)
CBM	9.0	1200	14	4.9	22.7	15	41
YZ	9.0	1100	15	4.0	81.1	30	158
HS	10.0	1500	12	4.8	10.0	12	4
BL	8.0	780	18	5.6	51.1	26	315

1.3 样品采集

在每个标准样地中, 按照“S”型方法布设 5 个土壤采样点取样作为一个混合样品, 分别在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层进行土壤样品采集。

土壤容重、孔隙度、重量含水量等指标用环刀浸水法^[21]测定, 土壤最大贮水量、毛管最大贮水量、非毛管最大贮水量等土壤蓄水能力计算公式如下^[22]:

$$W_t = 10000 \times P_t \times h \quad (1)$$

$$W_c = 10000 \times P_c \times h \quad (2)$$

$$W_{nc} = 10000 \times P_{nc} \times h \quad (3)$$

式中: W_t 为土壤最大贮水量, P_t 为土壤总孔隙度; W_c 为毛管最大贮水量, P_c 为土壤毛管孔隙度, W_{nc} 为非毛管最大贮水量, P_{nc} 为非毛管孔隙度, h 为土层厚度。

土壤涵蓄降水量和有效涵蓄量计算公式为^[23]:

$$M_h = M_b - M_w \quad (4)$$

$$M_x = M_m - M_w \quad (5)$$

式中: M_h 为土壤涵蓄降水量, M_b 为饱和蓄水量, M_w 为土壤含水量, M_x 为土壤有效涵蓄量, M_m 为毛管蓄水量。

土壤全碳、全氮采用元素分析仪 (Euro Vector 公司, 意大利) 测定; 全磷采用钼锑抗比色法测定; 铵态氮和硝态氮采用 AA3 连续流动分析仪 (Norderstedt, 德国) 测定; 有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定; 有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化-容量法测定; 速效钾采用 NH₄Ac 浸提-火焰光度法测定; pH 采用 pH 计 (水土比 5:1) 测定。

1.4 数据处理

使用 Excel 2019、IBM SPSS Statistics 26.0 和

Origin 2022 进行数据分析处理和图表制作。在定量描述不同林分类型的土壤改良效应方面, 采用模糊数学隶属函数法^[24]进行综合评价, 公式如下^[24]:

如果指标与改良土壤效应呈正相关:

$$X_{(u)} = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (6)$$

如果指标与改良土壤效应呈负相关:

$$X_{(u)} = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (7)$$

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} 分别为不同植被模式中某测试指标的最小值和最大值。

2 结果与分析

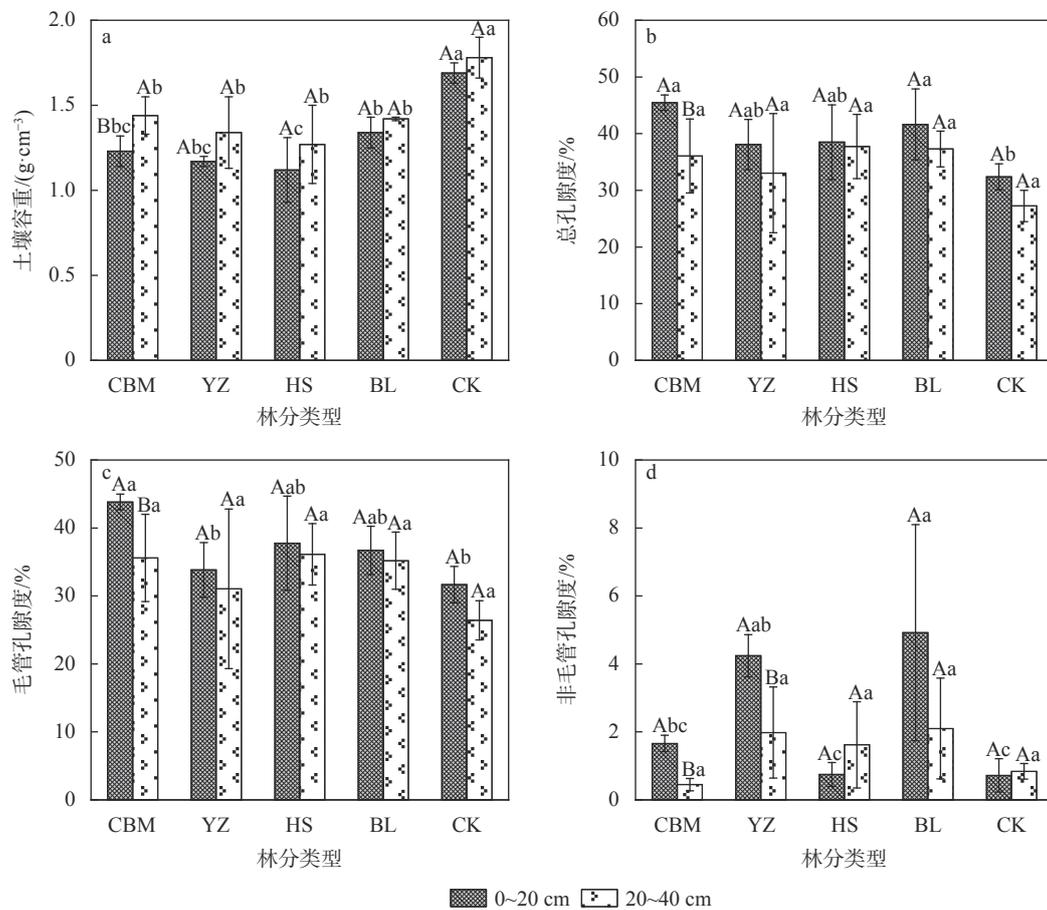
2.1 不同林分类型的土壤容重和孔隙度

与 CK 相比, 不同林分类型的 0~40 cm 土壤容重呈下降趋势, 土壤总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度均有所增加 (图 1)。

不同林分类型 0~40 cm 的土壤容重分别比 CK 降低 31.1% (HS)、27.7% (YZ)、23.1% (CBM)、20.5% (BL)。0~20 cm 和 20~40 cm 土层的土壤容重均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 而不同林分类型之间土壤容重差异不显著。0~40 cm 不同林分类型的土壤总孔隙度分别比 CK 增加 36.7% (CBM)、32.4% (BL)、27.9% (HS)、19.3% (YZ), 毛管孔隙度分别比 CK 增加 36.8% (CBM)、27.2% (HS)、23.8% (BL)、11.7% (YZ)。0~20 cm 土层, CBM 的总孔隙度和毛管孔隙度均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 分别比 CK 增加 54.2%、52.4%; 非毛管孔隙度 YZ、BL 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 分别是 CK 的 5.9 倍和 6.8 倍。20~40 cm 土层, 不同林分类型

的孔隙度均差异不显著。从土壤层次来看,土壤容重表现为0~20 cm 小于20~40 cm 土层;CBM 的土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度和YZ 的

非毛管孔隙度表现为2 土层差异显著 ($P < 0.05$), 其余林分类型均差异不显著。不同林分类型土壤孔隙度均表现为20~40 cm 低于0~20 cm 土层。



不同大写字母表示相同林分类型不同土层差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同土层不同林分类型差异显著 ($P < 0.05$)。

图1 不同林分类型的土壤容重与孔隙度

Fig. 1 Bulk density and porosity of soil of different stand types

2.2 不同林分类型的土壤蓄水特征

与CK相比,0~40 cm 土层不同林分类型土壤最大贮水量、毛管最大贮水量和非毛管最大贮水量均增加(表2)。

0~40 cm 土层最大贮水量依次为CBM > BL > HS > YZ > CK, 毛管最大贮水量依次为CBM > HS > BL > YZ > CK。0~40 cm 土层重量含水量CBM和HS分别比CK高26.5%和26.9%, YZ和BL分别比CK低29.0%和38.2%。0~20 cm 不同林分类型土壤最大贮水量CBM、BL与CK差异显著 ($P < 0.05$), 毛管最大贮水量CBM与CK差异显著 ($P < 0.05$); 20~40 cm 土层不同林分类型土壤贮水量与CK差异不显著。

0~40 cm 土层不同林分类型土壤涵养降水量

和有效涵养量均为BL > YZ > CBM > HS > CK, 涵养降水量分别是CK的5.6倍、4.7倍、3.4倍和3.2倍, 有效涵养量分别是CK的5.8倍、4.9倍、3.8倍和3.6倍。0~20 cm 土层不同林分类型土壤涵养降水量和有效涵养量均与CK差异显著 ($P < 0.05$), 20~40 cm 土壤涵养降水量和有效涵养量仅YZ、BL与CK差异显著 ($P < 0.05$)。从土壤层次来看,同一林分类型中,CBM土壤最大贮水量、毛管最大贮水量和非毛管最大贮水量在0~20 cm 和20~40 cm 土层间差异显著 ($P < 0.05$), YZ非毛管最大贮水量差异显著 ($P < 0.05$), 其余均差异不显著;同一林分类型的土壤涵养降水量和有效涵养量在不同土层间均差异不显著。综合分析,不同林分类型土壤最大贮水

量、毛管最大贮水量、非毛管最大贮水量、涵蓄 20~40 cm 土层 (表 2)。降水量和有效涵蓄量均表现为 0~20 cm 大于

表 2 不同林分类型的土壤蓄水特征

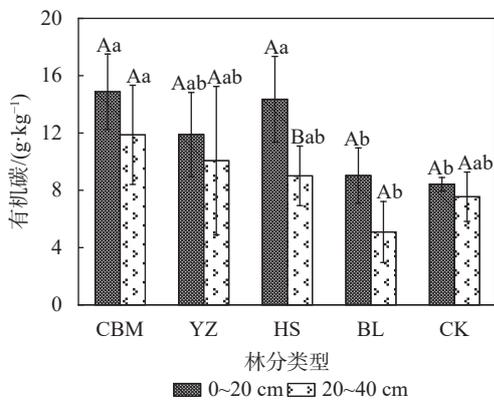
Table 2 Water storage characteristics of soil of different stand types

林分类型	土层/ cm	重量含水量/ %	土壤最大贮水量/ (t·hm ⁻²)	毛管最大贮水量/ (t·hm ⁻²)	非毛管最大贮水量/ (t·hm ⁻²)	涵蓄降水量/ mm	有效涵蓄量/ mm
CBM	0~20	17.70 ± 3.48 ^{Aa}	909.50 ± 27.34 ^{Aa}	876.37 ± 23.27 ^{Aa}	33.13 ± 4.81 ^{Abc}	47.47 ± 10.48 ^{Ab}	44.16 ± 10.43 ^{Aa}
	20~40	18.77 ± 1.64 ^{Aa}	721.03 ± 130.45 ^{Ba}	712.03 ± 128.35 ^{Ba}	9.00 ± 3.56 ^{Ba}	18.14 ± 7.87 ^{Bc}	17.24 ± 7.74 ^{Bbc}
YZ	0~20	11.36 ± 1.34 ^{Ab}	761.50 ± 88.55 ^{Ab}	676.63 ± 80.64 ^{Ab}	84.87 ± 12.41 ^{Ab}	49.66 ± 11.06 ^{Ab}	41.17 ± 10.04 ^{Aa}
	20~40	9.12 ± 1.78 ^{Ab}	660.66 ± 210.07 ^{Aa}	620.99 ± 234.63 ^{Aa}	39.67 ± 26.77 ^{Ba}	41.99 ± 19.72 ^{Ab}	38.02 ± 22.04 ^{Ab}
HS	0~20	17.56 ± 4.76 ^{Aa}	770.08 ± 131.40 ^{Ab}	755.08 ± 138.45 ^{Ab}	15.00 ± 7.07 ^{Ac}	36.87 ± 3.68 ^{Ab}	35.37 ± 3.18 ^{Aa}
	20~40	19.03 ± 4.64 ^{Aa}	754.83 ± 113.41 ^{Aa}	722.43 ± 90.26 ^{Aa}	32.40 ± 25.41 ^{Aa}	25.98 ± 7.74 ^{Abc}	22.74 ± 10.03 ^{Abc}
BL	0~20	9.06 ± 2.49 ^{Ab}	832.57 ± 125.00 ^{Aa}	734.17 ± 70.94 ^{Ab}	98.40 ± 53.50 ^{Aa}	58.86 ± 13.22 ^{Aa}	49.02 ± 7.12 ^{Aa}
	20~40	8.76 ± 1.14 ^{Ab}	745.92 ± 62.92 ^{Aa}	703.85 ± 84.20 ^{Aa}	42.07 ± 32.58 ^{Aa}	49.77 ± 9.55 ^{Aa}	45.56 ± 10.64 ^{Aa}
CK	0~20	13.68 ± 3.54 ^{Ab}	647.83 ± 45.70 ^{Ab}	633.43 ± 53.35 ^{Ab}	14.40 ± 9.70 ^{Ac}	12.89 ± 1.75 ^{Ac}	11.45 ± 2.19 ^{Ab}
	20~40	15.15 ± 1.32 ^{Aa}	544.83 ± 65.40 ^{Aa}	528.03 ± 57.54 ^{Aa}	16.80 ± 4.57 ^{Aa}	6.51 ± 5.70 ^{Ac}	4.83 ± 4.36 ^{Bc}

注：不同大写字母表示相同林分类型不同土层差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示相同土层不同林分类型差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同林分类型的土壤有机碳

除 BL 之外，其余林分类型 0~40 cm 土层有机碳含量均比 CK 有所增加 (图 2)。



不同大写字母表示相同林分类型不同土层差异显著 ($P < 0.05$)，不同小写字母表示相同土层不同林分类型差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 不同林分类型的土壤有机碳

Fig. 2 Soil organic carbon of different stand types

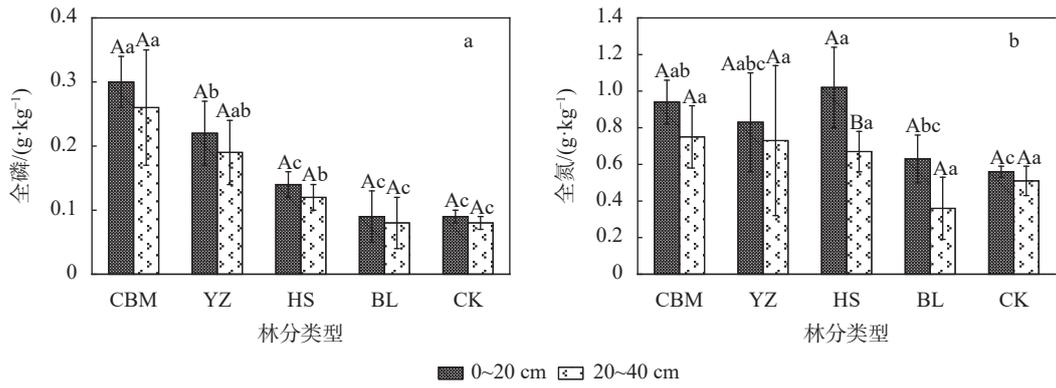
0~40 cm 土层有机碳分别比 CK 增加 67.5% (CBM)、46.3% (HS)、37.5% (YZ)，BL 比 CK 降低 11.6%。0~20 cm 土层有机碳 CBM、HS 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)，其余林分类型均差异不显著。除 CBM 之外，其余林分类型 20~40 cm 土层有机碳与 CK 均差异不显著。从土

壤层次来看，同一林分类型，仅 HS 土壤有机碳 0~20 cm 土层和 20~40 cm 土层间差异显著 ($P < 0.05$)，其余林分类型均差异不显著；不同林分类型 0~20 cm 土层有机碳含量均高于 20~40 cm 土层。

2.4 不同林分类型的土壤全氮全磷

除 BL 之外，其余林分类型 0~40 cm 土层全磷、全氮含量均比 CK 有所增加 (图 3)。

0~40 cm 土层不同林分类型土壤全磷含量依次为 CBM > YZ > HS > CK = BL，分别比 CK 增加 229.4%、141.2%、52.9%。0~20 cm 土层全磷 CBM、YZ 和 CK 差异显著 ($P < 0.05$)，20~40 cm 土层全磷 CBM、YZ、HS 均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。0~40 cm 土层全氮含量依次为 CBM = HS > YZ > CK > BL，分别比 CK 增加 57.9%、45.8%，BL 比 CK 降低 7.5%。0~20 cm 土层全氮 CBM、HS 与 CK 均差异显著 ($P < 0.05$)，20~40 cm 土层不同林分类型全氮均差异不显著。从土壤层次来看，同一林分类型，0~20 cm 和 20~40 cm 土层的全磷、全氮，仅 HS 的全氮差异显著 ($P < 0.05$)。综合分析，不同林分类型土壤全磷、全氮含量均表现为 0~20 cm 高于 20~40 cm 土层。



不同大写字母表示相同林分类型不同土层差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同土层不同林分类型差异显著 ($P < 0.05$)。

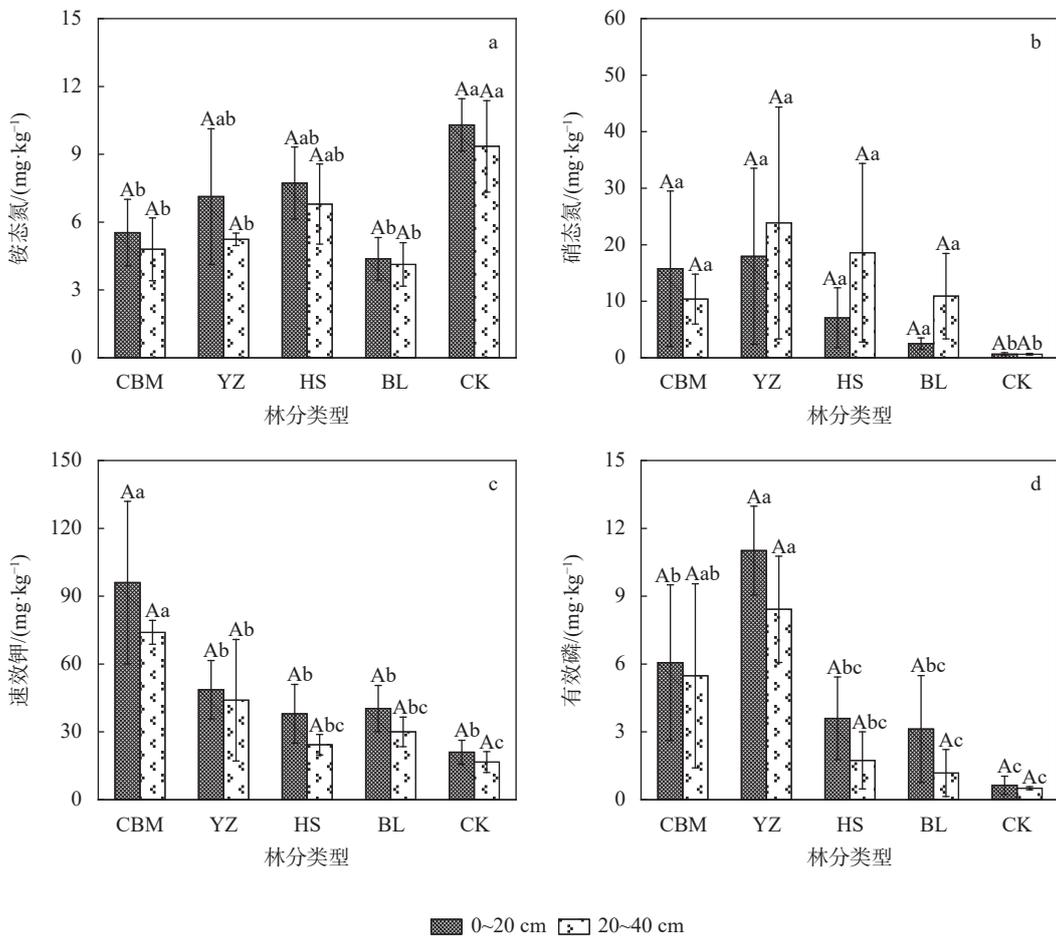
图3 不同林分类型的土壤全氮全磷

Fig. 3 Total nitrogen and phosphorus of soil of different stand types

2.5 不同林分类型的土壤速效养分

与CK相比, 不同林分类型土壤硝态氮、速

效钾、有效磷含量均有不同程度增加, 土壤铵态氮含量均有所降低 (图4)。



不同大写字母表示相同林分类型不同土层差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同土层不同林分类型差异显著 ($P < 0.05$)。

图4 不同林分类型的土壤速效养分

Fig. 4 Available nutrients of soil of different stand types

0~40 cm 土层铵态氮含量分别比CK降低 (HS), 硝态氮分别是CK的20.1倍 (CBM)、56.7% (BL)、47.4% (CBM)、37.0% (YZ)、26.1% 32.2倍 (YZ)、19.7倍 (HS)、10.3倍 (BL)。

0~20 cm 土层铵态氮 CBM、BL 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 20~40 cm 土层 YZ 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$); 不同林分类型的土壤硝态氮差异不显著。

0~40 cm 土层速效钾含量分别比 CK 增加 351.3% (CBM)、146.0% (YZ)、86.7% (BL)、65.5% (HS), 0~20 cm 土层速效钾仅 CBM 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), 20~40 cm 土层速效钾 CBM、YZ 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。0~40 cm 土层有效磷含量分别是 CK 的 16.9 倍 (YZ)、10.0 倍 (CBM)、4.6 倍 (HS)、3.7 倍 (BL), 0~20 cm 和 20~40 cm 土层有效磷 CBM、YZ 均与 CK 差异显著 ($P < 0.05$)。同一林分类型 0~20 cm 和 20~40 cm 土层间铵态氮、硝态氮、速效钾、有效磷均差异不显著。综合分析, 不同林分类型铵态氮、速效钾和有效磷含量均表现为 0~20 cm 高于 20~40 cm 土层, 除 CBM 之外, 其余林分类型硝态氮含量均表现为 0~20 cm 低于 20~40 cm 土层。

2.6 不同林分类型土壤理化因子主成分分析

不同林分类型的土壤理化指标差异很大, 而且不同理化指标间存在相互作用。对改良土壤效应指标进行主成分分析, 得到 4 个主成分, 前 3 个累计贡献率达 80.452%, 能反映不同林分土壤改良效应的大部分信息, 因此将前 3 主成分进行综合数值分析。第 1 主成分的贡献率最大, 达 41.881%, 因子负荷量较大的指标有土壤总孔隙度、最大贮水量、有效涵蓄量、涵蓄降水量、全磷、速效钾、有机碳、硝态氮, 可描述为土壤持水特征和养分特征。第 2 主成分的贡献率为 24.699%, 主要负荷因子是重量含水量和 pH, 可描述为土壤湿度和酸碱度。第 3 主成分的贡献率为 13.872%, 主要负荷因子是毛管孔隙度和毛管最大贮水量, 可描述为土壤有效孔隙性 (表 3)。

2.7 不同林分类型土壤改良效应综合评价

根据主成分分析结果, 选择载荷值较大的 12 个指标进行隶属函数分析, 指标分别为土壤总孔隙度、毛管孔隙度、最大贮水量、毛管最大贮水量、涵蓄降水量、有效涵蓄量、全磷、速效钾、有机碳、pH、硝态氮、重量含水量。根据主成分因子的隶属函数综合值 (表 4), 不同林分类型改良土壤效应综合评价为 $CBM > HS > YZ > BL > CK$ 。可见, 刺槐 + 白杨 + 麻栎混交林在改良土壤理化性质方面效果最好, 其次是黑松林和油松 + 柞树混交林, 板栗林较差。

表 3 土壤改良效应主成分分析的因子负荷量及贡献率

Table 3 Factor load and contribution rate of principal component analysis of soil improvement effect

因子	主成分			
	1	2	3	4
土壤容重	-0.720	0.228	0.220	0.426
毛管孔隙度	0.802	0.221	0.528	-0.143
总孔隙度	0.855	-0.019	0.496	-0.015
非毛管孔隙度	0.287	-0.747	-0.028	0.396
重量含水量	0.182	0.859	0.301	-0.107
最大贮水量	0.855	-0.019	0.496	-0.015
毛管最大贮水量	0.802	0.221	0.528	-0.143
非毛管最大贮水量	0.287	-0.747	-0.028	0.396
涵蓄降水量	0.675	-0.717	0.039	-0.066
有效涵蓄量	0.698	-0.639	0.050	-0.166
全磷	0.676	0.442	-0.391	0.232
铵态氮	-0.714	0.402	-0.003	-0.270
硝态氮	0.622	0.035	-0.573	-0.089
有效磷	0.575	-0.076	-0.648	-0.059
速效钾	0.768	0.379	-0.191	0.383
有机碳	0.652	0.598	-0.370	0.001
pH	0.094	0.648	0.217	0.665
全氮	0.652	0.483	-0.427	-0.158
贡献率/%	41.881	24.699	13.872	7.403
累计贡献率/%	41.881	66.580	80.452	87.855

表 4 不同林分类型土壤主要指标的隶属函数值

Table 4 Membership function values of main soil indexes of different stand types

指标	CBM	YZ	HS	BL	CK
毛管孔隙度	1.00	0.32	0.74	0.65	0.00
总孔隙度	1.00	0.52	0.76	0.88	0.00
最大贮水量	1.00	0.52	0.76	0.88	0.00
毛管最大贮水量	1.00	0.32	0.74	0.65	0.00
涵蓄降水量	0.52	0.81	0.49	1.00	0.00
有效涵蓄量	0.58	0.80	0.53	1.00	0.00
全磷	1.00	0.64	0.24	0.02	0.00
速效钾	1.00	0.42	0.19	0.25	0.00
有机碳	1.00	0.62	0.73	0.00	0.15
pH	1.00	0.00	0.06	0.14	0.50
硝态氮	0.61	1.00	0.60	0.30	0.00
重量含水量	0.99	0.14	1.00	0.00	0.59
综合值	10.70	6.11	6.84	5.76	1.24

3 结论与讨论

3.1 不同林分类型的土壤蓄水保土效应

不同林分类型可导致树木根系活动、凋落物储量等方面均存在一定差异, 造成不同林地土壤物理性质存在差异^[25]。本研究表明, 不同林分类型

型对土壤水分物理性质有不同程度的改良效应,并存在一定规律,可提高土壤蓄水保土能力,减少地表径流导致的土壤侵蚀。

土壤容重对土壤透气性、入渗性能、持水能力、溶质迁移特征以及土壤抗侵蚀能力都有重要影响^[26],是反映土壤质量、林地生产力和土壤压实度的重要指标^[27]。本研究发现,不同林分类型均对林下土壤有不同程度改良效应,与裸地相比,不同林分类型可降低土壤容重 20.5%~31.4%,增加土壤总孔隙度 19.3%~36.7%。赵欣宇^[14]研究发现阴山北麓武川县油松、柠条、沙棘等树种组成的混交林和纯林均能降低土壤容重,混交林改良效果比纯林好,与本研究结果一致。Zhao 等^[28]研究发现黑松林表层土壤容重低于 20~40 cm 土层,可能与土壤表层腐殖质堆积,枯落物分解形成的腐殖质层有较大关系,也可能与坡地土层浅薄,下层粗砂质土有关;王延军^[29]发现塞罕坝机械林场华北落叶松组成的混交林相比纯林能降低土壤孔隙度约 7.82%。可见,胶东地区不同林分类型在改善土壤孔隙度方面效果显著。

土壤蓄水功能与土壤孔隙度、土壤容重等各项指标有着密切关系^[23],土壤孔隙度高,土壤容重低,土壤相对疏松,水分蓄积量就较大。本研究也发现,与裸地相比,不同林分类型均能增加土壤最大贮水量,且 0~20 cm 最大贮水量高于 20~40 cm 土层,以刺槐+白杨+麻栎混交林贮水量最大,其次是油松+柞树混交林、黑松林和板栗林;土壤涵蓄降水量和有效涵蓄量均不同程度增加,黑松林潜在蓄水性能最强,其次是油松+柞树混交林。郭钰等^[30]对山西吉县蔡家川小流域人工油松林、刺槐林及油松×刺槐混交林等林分类型研究发现,与纯林相比,混交林的根系生物量及其土壤养分、水分含量更高,与本研究结果一致。综合土壤孔隙度、贮水能力和土壤水分有效性等方面来看,刺槐+白杨+麻栎混交林改良水分物理效应最好,油松+柞树混交林、黑松林、板栗林较好。林下土壤蓄水量不仅与土壤孔隙度和土壤容重有关,与土壤厚度也有关系^[31],薄土层下面就是岩石层,降雨量较大的情况,会造成严重的土壤侵蚀。

3.2 不同林分类型的土壤养分积累

土壤作为森林生态系统中的重要组成部分,保证了林分内能量和物质的交换,是森林生产力的一个重要指标^[32]。土壤养分含量直接影响森林

生长及林分质量,是林木生长的重要物质基础^[33]。本研究表明,4种林分类型对土壤养分积累均有增加;不同林分类型间土壤养分存在一定差异,混交林对土壤养分改良效果优于纯林。任奕炜等^[34]对黑松纯林、黑松+刺槐混交林、黑松+麻栎混交林等沿海防护林研究发现,不同林分类型对土壤有机碳、全氮等养分指标均有显著影响;Wapongnungsang 等^[35]发现混交林比纯林具有较高生物量的原因与碳氮含量及含水率高有关。此外,林下枯落物堆积也会分解转化为有机质、氮素及其他养分,从而增加土壤养分,促进根系生长^[36]。

本研究中,不同林分类型土壤全氮、全磷、硝态氮、有效磷、速效钾、有机碳的变化规律相似,表现为混交林土壤养分含量高于纯林,裸地的土壤养分含量最低,与赵欣宇^[14]对内蒙古武川县柠条和沙棘混交的研究结果一致。本研究中,不同土层间土壤养分,除硝态氮外,其余均表现为 0~20 cm 高于 20~40 cm 土层。赵金洋等^[37]对在阴山北麓林柠条林、樟子松林、油松×樟子松混交林等 7 种林分类型土壤养分含量的研究发现,0~10 cm 土层有机质、碱解氮等养分之指标显著高于其他土层,可见林分生长对土壤表层的改良效果更好。

[参 考 文 献]

- [1] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].*土壤学报*,2020,57(5):1117-1127.
- [2] 袁红,胡宁,黄运湘,等.西南岩溶坡地土壤流失的养分含量响应特征研究[J].*安徽农业科学*,2012,40(12):7313-7314,7318.
- [3] Zhao J, Feng X M, Deng L, et al. Quantifying the effects of vegetation restorations on the soil erosion export and nutrient loss on the Loess Plateau [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 573126.
- [4] 陈敏全,王克勤.坡耕地不同水土保持措施对径流泥沙与土壤碳库的影响[J].*广东农业科学*,2015,42(6):124-129.
- [5] 朱红球,谢振华,李红.衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复模式对土壤渗透性的影响[J].*中国农学通报*,2013,29(22):73-77.
- [6] 苏丽,葛磊,夏江宝,等.黄河三角洲滨海滩涂不同微地形改造的盐地碱蓬恢复效应评价[J].*农业工程学报*,2021,37(10):82-90.
- [7] 韩紫璇,房静静,武雪萍,等.长期秸秆配施化肥下土

- 壤团聚体碳氮分布、微生物量与小麦产量的协同效应 [J]. *中国农业科学*, 2023, 56(8): 1503–1514.
- [8] 张卓, 张进虎, 袁杰, 等. 祁连山南坡地区土壤有机质含量及赋存特征研究 [J]. *干旱环境监测*, 2023, 37(2): 59–67.
- [9] 廖科, 刘振华, 童方平, 等. 不同混交比例对栎类混交林生长和土壤养分的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2023, 43(9): 80–88.
- [10] 卞莹莹, 张志敏, 付镇, 等. 荒漠草原区不同植被恢复模式土壤微生物菌落分布特征及其与土壤理化性质的相关性 [J]. *草地学报*, 2021, 29(4): 655–663.
- [11] 高风, 文仕知, 韦铄星, 等. 桂西北石漠化区不同植被恢复类型对土壤理化性质、酶活与真菌群落多样性的影响 [J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(10): 2425–2435.
- [12] 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.
- [13] 李品荣, 陈强, 常恩福, 等. 滇东南石漠化山地不同退耕还林模式土壤地力变化初探 [J]. *水土保持研究*, 2008, 15(1): 65–68.
- [14] 赵欣宇. 武川县不同林分类型土壤理化性质研究 [J]. *内蒙古科技与经济*, 2023(3): 94–97.
- [15] 袁在翔, 关庆伟, 李俊杰, 等. 不同植被恢复模式对紫金山森林土壤理化性质的影响 [J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(1): 52–57.
- [16] 马亚峰, 侯银, 张焕朝. 杨树不同林分密度和林分结构对土壤理化性质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(22): 131–136.
- [17] Wang N, Bi H X, Peng R D, et al. Disparities in soil and water conservation functions among different forest types and implications for afforestation on the Loess Plateau [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110935.
- [18] 赵恩辉, 吴磊, 赵生华. 黄河三角洲不同植被类型土壤水源涵养功能综合评价 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6): 255–263.
- [19] 王俊, 张楚翘, 李建伟. 山东昆嵛山国家级自然保护区资源现状与价值分析 [J]. *绿色科技*, 2023, 25(9): 191–195.
- [20] 邢先双, 杜子龙, 孟庆平, 等. 胶东半岛省级重点预防区水土流失动态变化特征研究 [J]. *中国水土保持*, 2019, 449(8): 43–45.
- [21] 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.
- [22] 郭宇嘉, 牛庆花, 陆贵巧, 等. 承德市第三乡林场不同林分类型枯落物和土壤的持水特性 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 38–44.
- [23] 夏江宝, 顾祝军, 周峰, 等. 红壤丘陵区不同植被类型土壤颗粒分形与水分物理特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2012, 10(5): 9–15.
- [24] 孙佳, 夏江宝, 苏丽, 等. 黄河三角洲盐碱地不同植被模式的土壤改良效应 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1323–1332.
- [25] 张静, 贾洪文, 李远航, 等. 青海大通县典型林分的枯落物和土壤蓄水能力评价 [J]. *中国水土保持科学* (中英文), 2022, 20(2): 106–114.
- [26] 杨士凯, 周运超, 黄磊, 等. 杉木成熟林土壤容重空间变异特征 [J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(1): 30–38.
- [27] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils [J]. *Geoderma*, 2011, 163(1/2): 74–82.
- [28] Zhao Y G, Li Y Y, Wang J, et al. Buried straw layer plus plastic mulching reduces soil salinity and increases sunflower yield in saline soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 155: 363–370.
- [29] 王延军. 华北落叶松不同类型林分内植物多样性及土壤持水能力比较 [J]. *内蒙古林业调查设计*, 2023, 46(1): 93–98.
- [30] 郭钰, 姚佳峰, 董媛, 等. 油松和刺槐纯林及混交林根系分布特征 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 2881–2888.
- [31] 李国升, 金鑫, 林晓坤. 落叶松人工林与刺龙牙不同栽培模式对林下植被和土壤特性的影响 [J]. *林业科技通讯*, 2021, 581(5): 59–61.
- [32] Xie S Y, Wang J. Soil ecosystem degradation of karst regions in southwestern China [J]. *Asian Agricultural Research*, 2012, 4(9): 60–63.
- [33] 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 等. 广西主要森林土壤有机碳空间分布及其影响因素 [J]. *植物生态学报*, 2016, 40(4): 282–291.
- [34] 任奕炜, 钟小瑛, 衣华鹏, 等. 不同林分类型对叶功能性状、林下物种多样性及土壤养分的影响 [J]. *林业科学研究*, 2023, 36(2): 161–168.
- [35] Wapongnangsang, Tripathi S K. Fine root growth and soil nutrient dynamics during shifting cultivation in tropical semi-evergreen forests of northeast India [J]. *Journal of Environmental Biology*, 2019, 40(1): 45–52.
- [36] 孙悦, 徐兴良, Yakov K. 根际激发效应的发生机制及其生态重要性 [J]. *植物生态学报*, 2014, 38(1): 62–75.
- [37] 赵金洋, 秦富仓, 李龙, 等. 阴山北麓人工林土壤养分变化特征 [J]. *现代园艺*, 2023, 46(3): 60–62.

(责任编辑 刘永梅)