

共和盆地东缘不同林龄青杨人工林细根生物量和形态特征

杨向东^{1,2}, 邓磊^{1,2*}

(1. 青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016; 2. 国家林业和草原局青海贵南荒漠生态系统国家定位观测研究站, 青海 贵南 813100)

摘要:以青海共和盆地东缘 5、10、15、20、25 年生青杨人工林为研究对象,采用根钻取土芯法收集细根,分析 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 各土层深度细根生物量、生物量密度、比根长、比表面积、根表面积密度和根长密度的差异。结果表明,20 年生青杨人工林以 5~7 cm 径级(65.63%)、3~4 m 高度级(34.38%)乔木占比最大,且均显著高于其他 4 个林龄的林分;青杨人工林生物量密度主要分布在 0~60 cm 土层,占细根总量的 73.20%~76.92%,其数值随林龄增大呈增大趋势;随着不同林龄的增加,0~60 cm 土层根表面积密度和根长密度占总量的 80.42%和 76.71%,60~80 cm 的土层占 8.79%和 10.27%,80~100 cm 的土层占 10.78%和 13.01%;青杨人工林生物量密度、比根长、比表面积、根表面积密度和根长密度均随林龄的增大而增大;通过 RDA 分析表明土壤钾离子、土壤含水量和林龄与根长密度、根表面积密度、比表面积呈显著正相关,与土壤 pH、硝酸根离子呈负相关。研究认为,青杨人工林根系随林龄的增大逐渐向深层发展,不同林龄青杨人工林细根分布的差异表明群落地下分配模式不同,需要在今后研究中深入探索分配差异的机理;青杨人工林发育 20 a 后,可进行合理抚育,促进细根发育,最大程度发挥其生态效益。

关键词:青杨人工林;恢复年限;细根分布;形态特征

中图分类号:S718.42

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)02-0008-09

Fine Root Biomass and Morphological Characteristics in *Populus cathayana* Plantations at Different Ages Along the Eastern Margin of the Gonghe Basin

YANG Xiang-dong^{1,2}, DENG Lei^{1,2*}

(1. College of Agriculture and Forestry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China; 2. Qinghai Guinan Desert Ecosystem Positioning Observation and Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Guinan 813100, Qinghai, China)

Abstract: Five-, 10-, 15-, 20-, and 25-year-old *P. cathayana* plantations in the east edge of Gonghe Basin in Qinghai Province were used as the research objects to examine the fine root biomass and morphological characteristics. The soil coring method was used to collected fine roots. Relative data were measured, such as fine root biomass, biomass density, specific root length, specific surface area, root surface area density, and root length density at different soil depths of 0–20, 20–40, 60–80, and 80–100 cm, from which the differences were analyzed. The results showed that the arbors of 5–7 cm diameter class (65.63%) and 3–4 m height class (34.38%) figured most prominently in the 20-year-old *P. cathayana* plantation, and they were greatly higher than those of the other four stands. The biomass density of *P. cathayana* plantation mainly distributed in the 0–60 cm soil layer, accounting for 73.20%–76.92% of the total fine roots, and its value went up with the forest ages. With the increase of forest ages, the root surface area density and root length density in 0–60 cm soil layer accounted for 80.42% and 76.71% of the total, 60–80 cm soil

收稿日期:2022-07-15 修回日期:2022-09-16

基金项目:青海省自然科学基金(2020-ZJ-945Q);青海省重点研发与转化计划(2022-NK-168);中央财政林业科技推广项目(青〔2022〕TG01号)。

第一作者:杨向东。研究方向:高寒地区森林生态恢复肌理。E-mail:1982856015@qq.com

* 通信作者:邓磊,副研究员,硕士生导师。研究方向:高寒地区森林生态恢复肌理。E-mail:pebbledeng@sina.com

layer for 8.79% and 10.27%, 80–100 cm soil layer for 10.78% and 13.01%. The biomass density, specific root length, specific surface area, root surface area density and root length density of *P. cathayana* plantation increased with forest age. Redundancy analysis (RDA) showed that soil potassium ion, soil water content and forest age were positively correlated with root length density, root surface area density and specific surface area, but negatively correlated with soil pH and nitrate ion. The study indicates that the root system of *P. cathayana* plantations will gradually grow to the deep layer with the forest ages. The difference of fine root distribution in *P. cathayana* plantations with different ages implies that the patterns of community underground distribution are different. Researchers must further explore the mechanism of distribution differences in future. After 20 years of growth, the *P. cathayana* plantations can be moderately tended to promote the growth of fine roots and maximize its ecological benefits.

Key words: *P. cathayana* plantation; restoration age limit; fine root distribution; morphological characteristics

细根(直径 ≤ 2.0 mm)作为林木最活跃的功能器官,是林木吸收水分和养分的主要来源,其吸收水分和养分的表面积大且生理活性强,在保持水土、改善土壤结构和促进养分循环等方面发挥着重要作用^[1-3]。细根的形态特征和生物量是认识林地地下根系分布规律、生长发育和死亡的重要基本信息^[4-5]。林木可通过调整细根的生物量和形态特征来适应种间竞争,从而对林木生长发育和群落动态结构的组成产生一定的影响^[6]。因此,研究细根的生物量及形态特征对认识林木生长发育、养分循环和地下生态过程具有重要意义。

青杨(*Populus cathayana*)是青藏高原东北部共和盆地植被的建群种,是该地区水源涵养、固沙植被优选的主要乡土树种^[7-10],其细根的分布特点能体现对周围环境的适应性和对资源的获得。目前,国内有关细根的研究多从细根活力、化学形状、结构和土壤微生物等方面进行探讨^[11-14]。近几年来,不同地区有关细根形态特征分布及生物量的相关研究也越来越多,如李浩等^[15]对黄土丘陵区人工林细根分布特征研究;张咪等^[16]对黄土高原刺槐人工林细根形态特征及生物量的研究;王凯等^[17]对科尔沁沙地东南部樟子松人工林细根分布特征研究,但关于高寒地区不同林龄人工林群落细根特征及生物量方面研究较少。

共和盆地东缘是高寒地区土地沙化的典型地区之一,以流动沙丘为主。因特殊的环境条件,以及过度的放牧,导致土壤沙化严重。但随着植被恢复年限的增加,使当地小气候得到了改善^[18-19]。调查发现该区在植被恢复过程中,种间资源分配不均,导致个体生长不良和人工群落更新缓慢等问题。本研究以共和盆地东缘贵南县黄沙头青杨人工林为对象,对细根形态特征及生物量的对比分析,其目的是深入探究细根分布特征及生物量的动态变化,以期为

高寒地区林木细根生长规律的认识提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究在国家林草局青海贵南荒漠生态系统定位观测研究站荒漠化综合治理试验区青海省贵南县黄沙头进行。试验区地理位置 $35^{\circ}30'13''$ — $35^{\circ}59'42''$ N, $101^{\circ}03'59''$ — $101^{\circ}06'17''$ E, 海拔 3 200~3 400 m, 年平均气温 2.3°C , 年平均降水量 430 mm, 年平均蒸发量为 1 400 mm; 气温低, 日照长, 辐射强, 降水集中, 雨热同季, 但降水不足, 蒸发量大, 属于高寒半干旱草原地区。本区为共和盆地东缘沙地向东南移动的最活跃地段, 以青杨(*P. cathayana*)作为该区域的建群种。造林前期, 首先进行 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 麦草沙障设置, 采用平均胸径为 3 cm, 平均高度为 200 cm 的苗木, 大穴深埋造林, 土壤类型均以风沙土为主。青杨样地概况见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 本研究在 2021 年 7—8 月进行, 在研究区内丘间低地选择生长较好的 5 个造林年份 2017、2012、2007、2002 年和 1997 年, 对应林龄分别为 5、10、15、20 a 和 25 a 青杨人工林, 各林龄布设固定样地 3 块, 相邻样地间隔 300 m 以上, 样地大小为 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$, 共布设样地 15 块。样地无人为干预且处于封禁状态。

1.2.2 样品采集 在每块样地中, 选择 5 棵平均木作为重复(每个林龄 15 棵), 以平均木为中心, 在距离 20~80 cm 进行取样。取样前去除样地内地表的枯落物及杂物, 采用根钻法(内径 9 cm \times 高度 20 cm)进行取样, 分层(由上往下每隔 20 cm 为 1 层)采集土芯中的根系, 直至采集 100 cm, 共计 375 个。同时, 土壤样品的采集依据根系取样法, 采用分层取样的方法利用土钻(内径 5 cm \times 高度 20 cm)依次在

取样地内分别在 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 土层采集土芯,各土层分别取 3 个土芯作为重复,将采集的细根和土壤样品用密封袋装好,带回实验室进行细根形态指标及土壤理化性质的测定。

1.2.3 细根样品处理 将细根样品放入孔径 0.2 mm 的筛子中,用清水浸洗后,除去表面的沙土和植物残渣,利用手持放大镜依据青杨根系外形、气味和颜色的不同辨别并挑选,然后用游标卡尺分选出直径≤2 mm 的活死根,并用去离子水清洗 3 遍后,拿吸水纸吸干水分后在 4 ℃ 下进行保存。用 Epson v850 pro 数码扫描仪对不同林龄、不同深度的根系进行预处理,将其图像存储到电脑中,并用 WinRHIZO 植物根系影像分析系统进行相应的分析,通过对所分离的细根进行形态指标测定,得到了细根的根长 RL(m)和细根表面积 RSA(m²),然后将

各龄级取得的细根分别装入信封内,放入 85 ℃ 烘箱烘至恒质量 R_B (g),并依据土壤取样体积 V (m³),通过算法细根生物量密度 R_{BD} (g · m⁻³) = R_B/V 、根长密度 R_{LD} (m · m⁻³) = R_L/V 、根表面积密度 S_{AD} (m² · m⁻³) = R_{SA}/V 、比根长 S_{RL} (m · g⁻¹) = R_L/R_B 、比表面积 S_{SA} (cm² · g⁻¹) = R_{SA}/R_B ,依次得到 R_{BD} 、 R_{LD} 、 S_{AD} 、 S_{RL} 和 S_{SA} ^[20]。

1.2.4 土壤水分养分的测定 土壤水分含量采用 HD2+pico IPH(T3)水分测量仪按每 20 cm 为一层,在测定日前后 2~3 d 无降雨天气下进行集中测定,间隔 1 周测定 1 次,测定深度为 100 cm,总计测定 60 次;土壤 pH 测定采用 Soilstik 土壤 pH 计测定;K⁺、Na⁺、Ca²⁺、NO₃⁻测定采用 LAQUA Twin 系列离子测量仪测定,将取样土壤以水:土按 5:1 比例振荡 2 min 后,待静止 5 min 后,用 2 mL 针管吸取上清液进行测定。

表 1 样地概况

Table 1 General information of sample plots

| 项目 | | 林龄/a | | | | |
|--------|-----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 生态因子 | 纬度 | 35°33'20" | 35°35'45" | 35°30'25" | 35°31'30" | 35°30'14" |
| | 经度 | 101°3'20" | 101°4'13" | 101°5'50" | 101°3'35" | 101°5'15" |
| | 海拔/m | 3360 | 3347 | 3342 | 3336 | 3334 |
| | 坡向 | 阳坡 | 阳坡 | 阳坡 | 阳坡 | 阳坡 |
| | 坡度/(°) | 5 | 3 | 5 | 6 | 4 |
| 林分基本情况 | 林分密度/hm ⁻² | 805±36e | 775±52d | 750±63c | 717±46b | 625±25a |
| | 平均胸径/cm | 2.03±0.13c | 3.33±0.19c | 4.94±0.08c | 7.79±0.09b | 8.26±0.47a |
| | 平均高度/m | 0.92±0.03d | 1.06±0.09d | 1.40±0.05c | 2.91±0.08b | 3.75±0.31a |
| | 平均冠幅/m ² | 0.64×0.68c | 0.95×0.93c | 1.64×1.68b | 2.18×2.06a | 2.94×2.69a |
| | 郁闭度 | 0.10±0.03b | 0.14±0.06b | 0.24±0.04b | 0.44±0.05a | 0.43±0.03a |

注:同行不同小写字母表示林龄间差异显著(P<0.05)。

1.2.5 数据分析 利用 Excel 2007 对数据进行整理并计算平均值和标准差等,用 Origin 2019 绘制相应的细根指标及土壤理化性质图形;用 SPSS 26.0 对不同恢复年限细根 RBD 和各形态指标进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并结合 Duncan 检验各参数之间的差异性;用 Canoco 5.0 软件进行 RDA 分析。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质

5 个不同林龄青杨人工林样地土壤的理化性质不同(图 1),随着林龄的增加,土壤含水量、钾离子、钠离子和钙离子整体呈增加趋势,其土壤 pH 值和硝酸根离子呈减小趋势,恢复年限在 15~20 a,土壤的 pH、含水量、K⁺、NO₃⁻、Na⁺和 Ca²⁺的含量显著高于其他年限(P<0.05)。林分土壤 pH、K⁺、

NO₃⁻、Na⁺和 Ca²⁺随土深度增加而降低,土壤含水量整体趋势为随土深度的加深而减小,其 5、10、15 a 中 0~20 cm 土层显著小于其他土层(P<0.05)。

2.2 青杨种群动态结构特征

5 个不同林龄青杨人工林表现出一定的径级结构差异性(图 2)。青杨人工林 20 年生的乔木分布在 7 个径级,其他 4 个人工林的乔木依次分布在 6 (10、25 a)、5(15 a)和 3(5 a)个径级,且人工林恢复到 20 a 的径级呈现左偏正态分布。5 个林龄的青杨人工林径级分别分布在 0~2 cm(5 a)、1~3 cm (10 a)、3~5 cm(15 a)、5~7 cm(20 a)和 6~8 cm (25 a),占样地乔木总株数的 93.94%、65.63%、77.42%、65.63%和 66.67%。

5 个不同林龄青杨人工林乔木的高度级结构总体呈右偏正态分布(图 3),林龄 5 年生乔木在 0~1 m 高度级范围内占比最大(71.88%);10 年生乔木

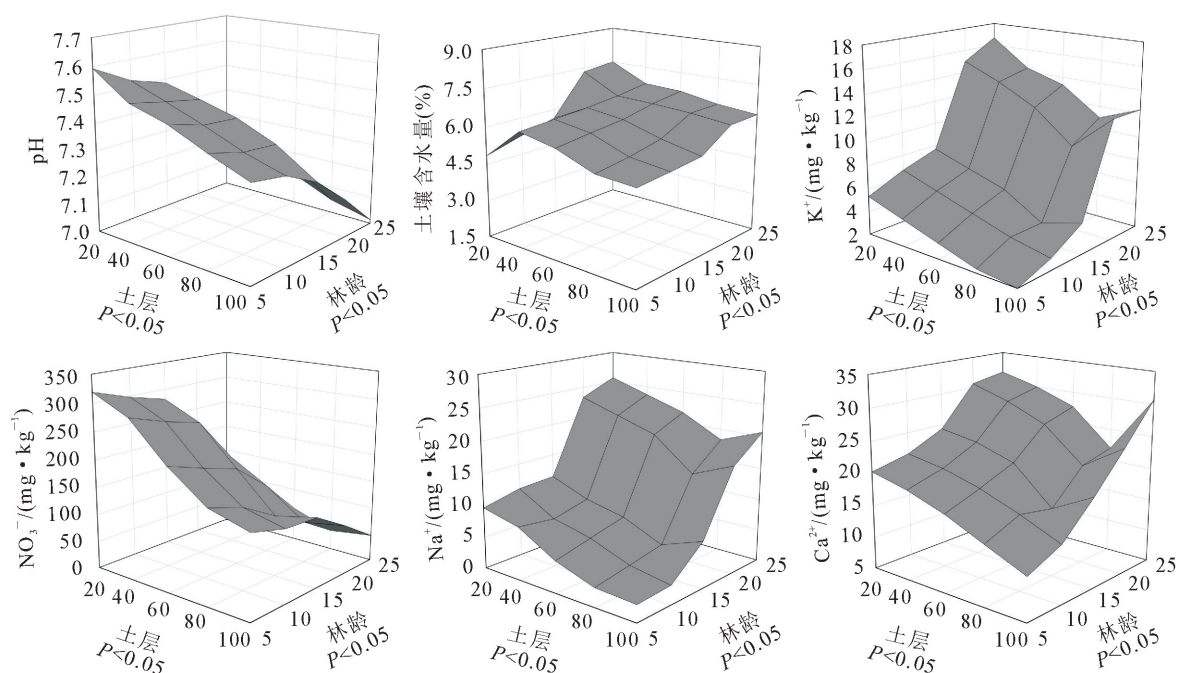


图1 土壤理化性质

Fig. 1 Soil physical and chemical properties

在1~2 m高度级为主(53.13%),此外3~4 m高度级仅占6.25%;15年生的乔木在2~3 m高度级为主(41.94%),在3~4 m高度级占22.58%。20年生和25年生的乔木均在3~5 m高度级范围内占比最大,分别达53.13%和70.37%,20年生的乔木3~4 m高度级占比最大(34.38%)。从乔木高度级结构看,20年生的乔木数量在3~4 m高度级明显多于其他4个林龄且生长高度最佳。

2.3 青杨细根生物量密度

不同林龄的青杨人工林中,总细根RBD差异显著($P < 0.05$,图4)。RBD随林龄的增大而增大,其中25年生的细根总RBD最大,分别是5、10、15 a和20 a总RBD的3.14、2.45、1.87倍和1.11倍。同一土层不同林龄间RBD为25 a > 20 a > 15 a > 10 a > 5 a,15~20 a活根RBD显著增加($P < 0.05$),20~25 a死根RBD显著增多($P < 0.05$),当植被恢复20~25 a时,活根RBD增量(110.93%) < 死根RBD增量(114.09%)。随着恢复年限的增大,各个土层的总细根RBD逐渐增大。

在土层垂直结构上,随着土层深度的增加,5种林龄细根RBD在0~60 cm和60~80 cm土层均呈下降趋势,其20年生、25年生80~100 cm土层增多,5个土层之间均差异显著($P < 0.05$)。从图4看出,青杨人工林总细根RBD主要集中在0~60 cm土层,占0~100 cm土层总量的76.92%(5 a)、75.57%(10 a)、76.66%(15 a)、74.16%(20 a)和73.20%(25 a);其中80~100 cm土层中5年生、15

年生青杨细根RBD最小,分别占细根RBD总量的10.17%、11.10%和12.28%,20年生、25年生青杨人工林地下RBD最小是60~80 cm土层中最小,RBD分别占总量的12.42%和12.16%。青杨细根RBD受到生境变化制约的不同,且随着林龄的增大,青杨人工林细根根系有不断向土壤深层延伸的趋势。

2.4 青杨细根形态特征

不同林龄的青杨人工林细根形态随林龄的增大而增大,其中林龄(15 a)向成熟林(20 a)的细根指标增长率最大,具有显著差异($P < 0.05$),RLD、SAD、SRL和SSA均表现为25 a > 20 a > 15 a > 10 a > 5 a(图5)。

不同林龄的青杨人工林细根RLD和SAD随土层深度的加深而减小,随着恢复年限的增大,土壤中细根RLD和SAD逐步增多,综合分析认为RLD和SAD主要分布于0~60 cm土层,其余依次分布于60~100 cm土层,其中RLD和SAD在0~60 cm土层约占80.42%和76.71%,60~80 cm的土层约占8.79%和10.27%,80~100 cm的土层约占10.78%和13.01%,表明青杨人工林的根系大量分布在浅中层土壤,具有垂直性分布规律;其比根长和比表面积各土层数值无垂直性规律,但各土层之间差异显著($P < 0.05$)(图5)。细根形态指标表现出一定林龄和土层的差异性。在0~80 cm土层,林龄20 a和25 a细根RLD和SAD与林龄5、10、15 a显著差异,5、15 a及20、25 a差异不显著($P < 0.05$);

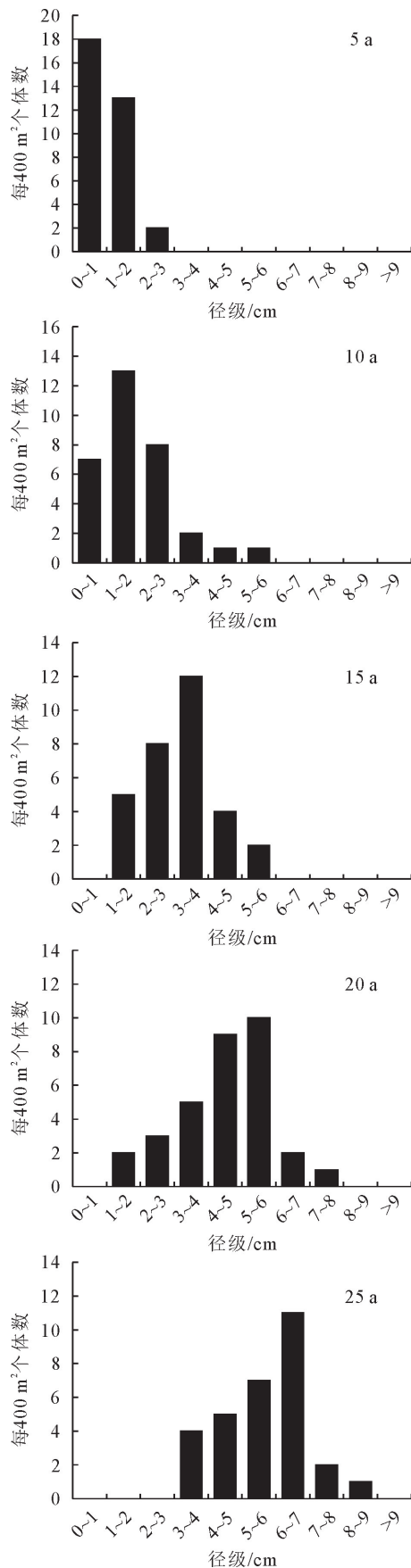


图2 不同林龄青杨人工林的乔木径级结构

Fig. 2 Tree diameter grade structure of *P. cathayana* plantations of different forest ages

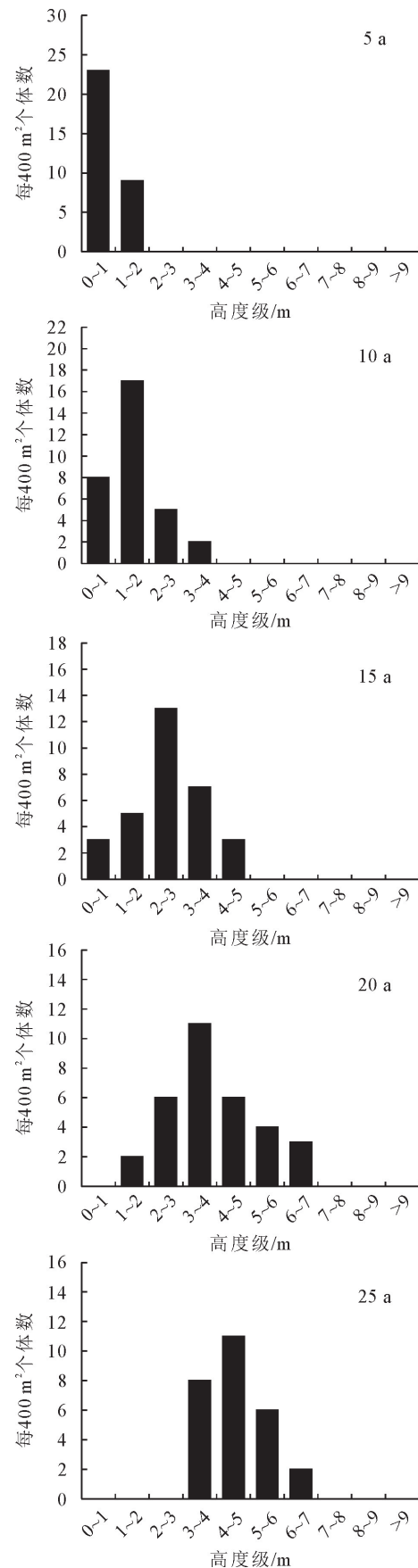
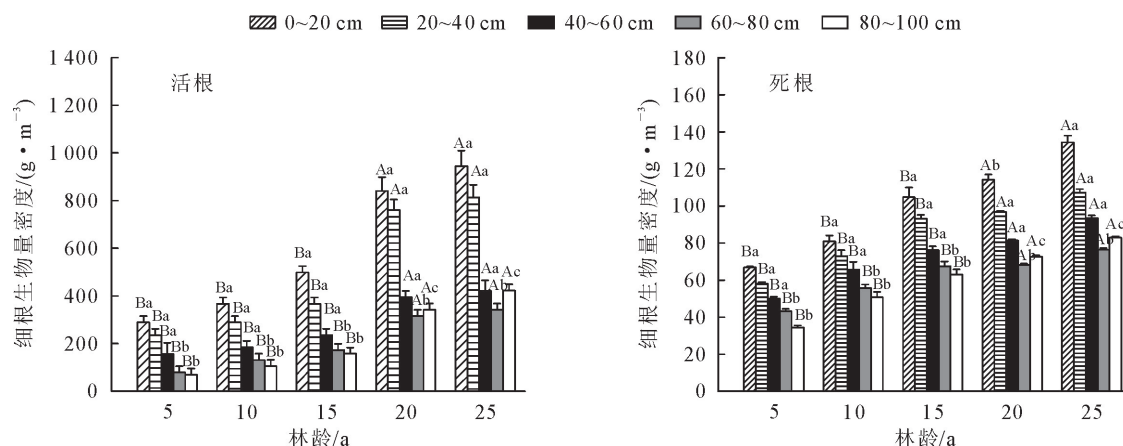


图3 不同林龄青杨人工林的高度级结构

Fig. 3 Height-level structure of *P. cathayana* poplar plantations of different forest ages



注:不同大写字母表示相同土层不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$);不同小写字母表示相同林龄不同土层间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 4 不同林龄青杨人工林细根地下生物量密度的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of fine roots biomass density in *P. cathayana* plantations of different forest ages

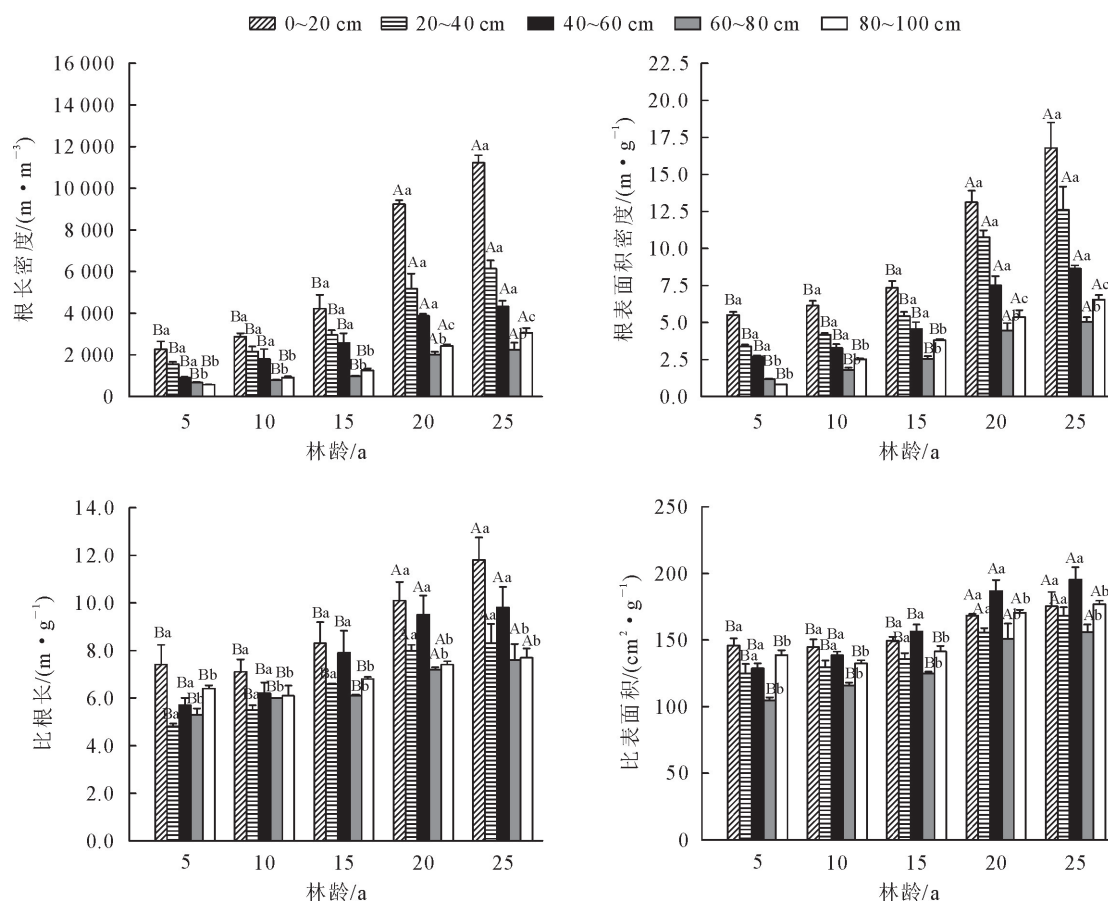


图 5 不同林龄青杨细根形态特征

Fig. 5 Fine root morphology of *P. cathayana* at different ages

在 80~100 cm 土层, 5 个林龄的细根形态指标在 15、20 a 差异显著 ($P < 0.05$), 变化趋势最大。0~100 cm 土层青杨人工林细根形态指标均表现出一定的差异性, 随林龄的增大, 青杨细根形态指标在 20、25 a 时增长趋势逐渐减缓。

2.5 青杨细根指标与环境因子关系

通过对不同林龄青杨人工林细根 RBD、形态指标和周围环境因子进行冗余分析 (RDA), 对变量的

解释率为 96.95%, 前 2 轴的解释率为 94.17% 和 2.78% (图 6)。其中, 对第 1 主分量贡献较高的环境因子包括土壤含水量 (矢量值 0.882 8)、钙离子 (0.939 1)、钠离子 (0.957 9)、硝酸根离子 (-0.917 6)、土壤 pH (-0.944 7)、林分密度 (-0.896 3) 和林龄 (0.966 3); 对第 2 主分量贡献值较高的环境因子包括郁闭度 (0.033 9) 和平均高度 (-0.086 7)。通过 RDA 双序轴的第 1 轴线可以

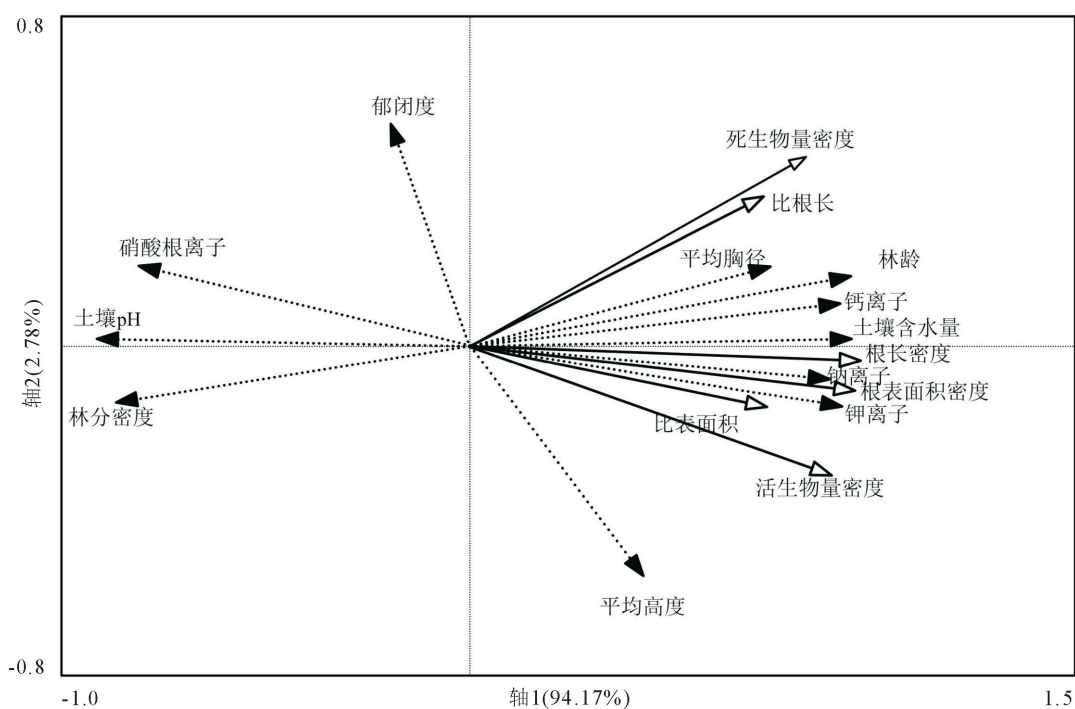


图6 不同林龄青杨人工林细根指标与环境因子冗余分析双序

Fig. 6 Double sequence diagram of redundancy analysis of fine root index and environmental factors of

P. cathayana poplar plantations of different ages

看出,钾离子、钙离子、钠离子、土壤含水量和林龄与RLD、SAD、RBD、SRL和SSA的矢量方向一致,具有正相关;与土壤pH、林分密度和硝酸根离子具有负相关。

3 结论与讨论

细根生物量密度受生境和林龄的共同影响^[21-22]。不同林龄青杨人工林细根RBD表现出随林龄的增大而增大,随土层深度的加深而减小,这与于洋等^[23]对不同年龄乌柳人工林细根特征研究结果相似。通常来讲,随土层深度的加深,土壤养分逐渐降低,以及土壤的稳定性发生空间上的差异等都会对细根造成影响,细根生物量密度也就随之呈减少趋势^[24]。同时相关研究表明,在干旱地区,水分是植物生长的主要限制性因子,在生境恶劣的沙地,常年高蒸发低降雨,导致在植被恢复期土壤缺水较大,水分决定了植物根系的分布特征^[25]。细根大量分布在浅中层土壤中,有利于植物在干旱区对定量降雨的充分吸收和利用^[26]。细根生物量密度在垂直空间上有显著变化特征,青杨人工林的细根生物量密度主要集中分布在0~60 cm的土壤中,占总量的73.20%~76.92%,其活死根生物量密度随土层的加深而减少,但20、25 a时,80~100 cm深层土壤中,细根生物量密度逐渐开始增大。这与张立恒等^[27]对高寒沙地不同林龄锦鸡儿人工林细根特征

研究结果相似。其原因可能是该区属高寒地区,常年气候干旱、高蒸发和高辐射,水分和养分资源都极其匮乏;稀少的季节性降雨容易被浅层细根第一时间大量吸收,土壤下渗水分随之减少,导致0~60 cm土层的土壤含水量相对较高,且该层土壤养分含量也相对较高,促进了细根不断向资源富集层聚集,有利于对营养资源的有效利用和吸收。

细根形态是细根功能形状和植物吸收养分及水分的重要指标,反映细根对地下环境的适应性策略^[28]。本研究表明,不同林龄青杨人工林的RLD、SAD、SRL和SSA均随林龄的增大而增大,其植被恢复速生期细根指标变化最大;根长密度和根表面积密度主要分布于0~60 cm土层,其比根长和比表面积随土层变化无明显的垂直分布规律。这与胡慧等^[29]和张立恒等^[30]对岷江栽培树种和中间锦鸡儿人工林细根特征研究结论相似。随着恢复年限的增大,比根长相继增大,促使青杨细根具有更大的吸收比表面积,从而促进细根吸收土壤养分和水分的效率更大;青杨细根为了得到充足水分的营养吸收,细根通过形态的可塑性改变单位根长密度和根表面积密度来提升吸收率,更好地适应当地的严酷环境;15年生和20年生属中林龄和成熟林,此速生期,植被郁闭度增大,此时植物光合作用将更多光合产物和养分分配到地下部分,促进了细根养分的吸收利用和周转,导致青杨地上和地下之间能量流动变大,使

得细根指标在植被恢复速生期最大。研究发现,青杨人工林的细根 RLD 和 SAD 大量分布于 0~60 cm 土层,这与其所处的土壤条件有很大关系。共和盆地东缘为高寒、降水量少和蒸发量大的干旱区,土壤含水量严重不足,土壤表层极易受到季节降水的影响,使其土壤水分含量增加,进而影响其他相邻土层。另外,植物自身具有感知土壤养分和水分梯度的能力,其土壤属流动沙土,土壤孔隙度深层较浅层大,在营养成分的驱动下青杨人工林细根在土壤养分和水分相对充足及孔隙度较大的 0~60 cm 土层大量聚集。因此水分和养分决定了青杨人工林细根 RLD 和 SAD 主要集中分布于 0~60 cm 土层。众多研究表明,细根 SRL 和 SSA 的分布随土壤深度加深而减少^[20,31-33]。但青杨人工林细根 SRL 和 SSA 土层间均无明显的垂直分布规律。其原因是 SRL 是根长与生物量的比值,受到更多因素的影响,变化复杂,如根长与生物量一方发生变化,则 SRL 发生变化;从生态学意义来看,SRL 反映细根的收益与支出的关系。植物通过细根形态可塑性进而增强根系对生境变化的适应性,在林分密度、林地郁闭度、土壤含水量和 pH 等环境因子差异较大的情况下,仍能满足植物生长所需的营养供给,这是高寒地区植物适应严酷生境运用的一种高效率获取土壤资源的策略。

不同林龄青杨样地土壤特征的差异和气候能够解释青杨细根形态的差异。青杨细根 RLD、SAD、SSA 和土壤含水量、钾离子含量、林龄呈较高的正相关,而随着林龄的增大土壤中钾离子的含量和土壤含水量能够提高细根 RLD、SAD 和 SSA(图 6)。说明不同青杨人工林根系的生长和形态构成受环境的影响。有研究表明,高寒地区植物土壤养分速效钾的提高及较高土壤含水量有利于细根生长的促进作用^[34-35];在对青杨人工林细根生长与环境因子分析中,发现钾离子含量和土壤含水量对细根贡献率较高^[36];土壤养分钾离子含量是影响青杨人工林细根生长的主要土壤因子^[37];这与本研究结果相似。

研究表明,随着青杨人工林恢复年限的增大,青杨人工林细根的 RBD、RLD、SAD、SRL 和 SSA 均呈增大趋势。林分细根 RBD、RLD、SAD 主要集中于 0~60 cm 土层,其 SRL 和 SSA 无垂直性分布规律,5、10、15、20、25 年生的青杨人工林根系随林龄的增大逐渐向深层发展,且林分结构单一,林地空间利用效率低,通过林分调查可知,青杨人工林到 20 a 后,生长发育迟缓,处于衰退期,无持续发育能力。未来该区域人工建植中,应尽量避免青杨为建群种,现有青杨林应加以抚育措施,最大程度发挥其生态效益。

参考文献:

- [1] 贺曰林,李广德,席本野,等. 2 年生毛白杨细根生长、分布及形态特征对滴灌水氮耦合的响应[J]. 北京林业大学学报,2022,44(4):1-11.
HE Y L, LI G D, XI B Y, et al. Coupling effects of drip irrigation and nitrogen fertigation on fine root growth, distribution and morphological characters of 2-year-old *Populus tomentosa* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(4): 1-11. (in Chinese)
- [2] 王文全,王世绩,刘雅荣,等. 粉煤灰复田立地上杨、柳、榆、刺槐根系的分布和生长特点[J]. 林业科学,1994(1):25-33.
WANG W Q, WANG S J, LIU Y R, et al. Distribution and growth characteristics of the root systems of poplar, willow, elm and locust on site of renewed land by fine ash of coal[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1994(1): 25-33. (in Chinese)
- [3] LEPPÄLAMMI-KUJANSUO J, ARO L, SALEMAA M, et al. Fine root longevity and carbon input into soil from below- and aboveground litter in climatically contrasting forests. Forest Ecology and Management, 2014, 326: 79-90.
- [4] 巫志龙,周成军,周新年,等. 采伐强度对杉阔混交人工林细根生物量及形态特征影响[J]. 林业科学研究,2021,34(4):128-133.
WU Z L, ZHOU C J, ZHOU X N, et al. Effects of harvesting intensity on fine root biomass and morphological characteristics of mixed plantations of *Cunninghamia lanceolata* and broad-leaved trees[J]. Forest Research, 2021, 34(4): 128-133. (in Chinese)
- [5] 席本野. 杨树根系形态、分布、动态特征及其吸水特性[J]. 北京林业大学学报,2019,41(12):37-49.
XI B Y. Morphology, distribution, dynamic characteristics of poplar roots and its water uptake habits[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 37-49. (in Chinese)
- [6] Ifo SA, Koubouana F, Nganga D, et al. Fine roots dynamics in a tropical moist forest: case of two forest groves in the Congo Basin. Baltic Forestry, 2015, 21: 204-211.
- [7] 燕辉,刘广全,李红生. 青杨人工林根系生物量、表面积和根长密度变化[J]. 应用生态学报,2010,21(11):2763-2768.
YAN H, LIU G Q, LI H S. Changes of root biomass, root surface area, and root length density in a *Populus cathayana* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(11): 2763-2768. (in Chinese)
- [8] 何海燕,许国辉,马国强,等. 青海东部主要造林树种的水分生理研究[J]. 西北林学院学报,2003(2):9-12.
HE H Y, XU G H, MA G Q, et al. Studies on water physiology of main afforestation tree in East Qinghai[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2003(2): 9-12. (in Chinese)
- [9] 曹德美,张亚红,成星奇,等. 青杨不同种群叶片表型性状的遗传变异[J]. 林业科学,2021,57(8):56-67.
CAO D M, ZHANG Y H, CHENG X Q, et al. Genetic variation of leaf phenotypic traits in different populations of *Populus cathayana*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(8): 56-67. (in Chinese)
- [10] 张雪,王冬梅,温文杰,等. 青藏高原-黄土高原过渡带人工林土壤生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学(中英文),

- 2020,18(6):81-89.
- ZHANG X, WANG D M, WEN W J, *et al.* Ecological stoichiometric characteristics of plantation soil in the Tibetan Plateau-Loess Plateau transition zone[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 81-89. (in Chinese)
- [11] 李永涛, 王霞, 周健, 等. 基于林龄的黄河三角洲白蜡人工林细根分布与活力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(1): 171-177.
- LI Y T, WANG X, ZHOU J, *et al.* Fine root distribution and activity of *Fraxinus velutina* plantations based on the forest stand age in the Yellow River Delta[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(1): 171-177. (in Chinese)
- [12] 任浩, 高国强, 马耀远, 等. 不同年龄红松根系氮素吸收及其与根形态和化学性状的关系[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(10): 65-72.
- REN H, GAO G Q, MA Y Y, *et al.* Root nitrogen uptake and its relationship with root morphological and chemical traits in *Pinus koraiensis* at different ages[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(10): 65-72. (in Chinese)
- [13] 刘艳艳, 林晗, 巢林, 等. 不同林龄南方红豆杉人工林细根结构及 C 和 N 含量比较与相关性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(3): 8-14.
- LIU Y Y, LIN H, CHAO L, *et al.* Comparison on structure and C and N contents of fine root and their correlation analysis of *Taxus chinensis* var. *mairei* plantation with different stand ages[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2014, 23(3): 8-14. (in Chinese)
- [14] WANG Y, ZHONG Q L, XU C B, *et al.* Effect of adding a combination of nitrogen and phosphorus on fine root morphology and soil microbes of *Machilus pauhoi* seedling[J]. Mathematics of Operations Research, 2018, 43(2).
- [15] 李浩, 胡婵娟, 赵荣钦, 等. 黄土丘陵区典型人工林的根系分布特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1420-1428.
- LI H, HU C J, ZHAO R Q, *et al.* Root distribution characteristics of three typical plantations in a Loess Hills region[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5): 1420-1428. (in Chinese)
- [16] 张咪, 刘永峰, 贾艳梅, 等. 黄土高原刺槐细根形态特征和生物量研究[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 22-27.
- ZHANG M, LIU Y F, JIA Y M, *et al.* Fine Root morphology and biomass *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau[J]. Journal of northwest forestry university, 2019, 34(2): 22-27. (in Chinese)
- [17] 王凯, 宋立宁, 吕林有, 等. 不同林龄沙地樟子松人工林细根垂直分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(3): 1-4.
- WANG K, SONG L N, LÜ L Y, *et al.* Fine root vertical distribution characters of different aged *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy land[J]. Journal of northeast forestry university, 2014, 42(3): 1-4. (in Chinese)
- [18] 朱雅娟, 薛海霞. 共和盆地两种柳树的根系分布差异[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 172-176.
- ZHU Y J, XUE H X. Root distribution difference of two *Salix* shrubs in Gonghe basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(8): 172-176. (in Chinese)
- [19] 于洋, 贾志清, 朱雅娟, 等. 高寒沙地植被恢复区乌柳人工防护林对土壤的影响[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 9-15.
- YU Y, JIA Z Q, ZHU Y J, *et al.* Effects of *Salix cheilophila* plantation on the improving of soil properties in vegetation restoration area of high-cold sandy land[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(11): 9-15. (in Chinese)
- [20] 尤健健, 张文辉, 邓磊, 等. 间伐对黄龙山油松中龄林细根空间分布和形态特征的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 3065-3073.
- YOU J J, ZHANG W H, DENG L, *et al.* Effects of thinning intensity on fine root biomass and morphological characteristics of middle-aged *Pinus tabulaeformis* plantations in the Huanglong Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 3065-3073. (in Chinese)
- [21] 刘丽颖, 贾志清, 朱雅娟, 等. 青海共和盆地不同林龄乌柳林的水分利用策略[J]. 林业科学研究, 2012, 25(5): 597-603.
- LIU L Y, JIA Z Q, ZHU Y J, *et al.* Water use strategy of *Salix cheilophila* stands with different ages in Gonghe basin, Qinghai Province[J]. Forest Research, 2012, 25(5): 597-603. (in Chinese)
- [22] 冯莉莉, 贾志清, 刘涛, 等. 高寒沙区几种典型固沙植物细根生物量及周转速率比较[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 120-125, 130.
- FENG L L, JIA Z Q, LIU T, *et al.* Comparative study on fine roots productivity and turnover rates of several typical sand-fixation plants in alpine sandy land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 120-125, 130. (in Chinese)
- [23] 于洋, 贾志清, 朱雅娟, 等. 高寒沙地乌柳(*Salix cheilophila*)林根系分布特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(1): 67-74.
- [24] 张立恒, 李清雪, 王学全, 等. 高寒沙区中间锦鸡儿人工林细根动态及其周转[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 212-219.
- [25] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 等. 2 种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 166-171.
- [26] 何永涛, 石培礼, 张宪洲, 等. 拉萨河谷杨树人工林细根的生产力及其周转[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2877-2883.
- HE Y T, SHI P L, ZHANG X Z, *et al.* Fine root production and turnover of poplar plantation in the Lhasa river valley, Tibet autonomous region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2877-2883. (in Chinese)
- [27] 张立恒, 王学全, 贾志清, 等. 高寒沙地不同林龄中间锦鸡儿人工林根系分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(11): 163-168.
- ZHANG L H, WANG X Q, JIA Z Q, *et al.* Root distribution characteristics of *Caragana intermedia* plantations at different ages in alpine sandy land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(11): 163-168. (in Chinese)
- [28] SCHIPPERS P, OLFF H. Biomass partitioning, architecture and turnover of six herbaceous species from habitats with different nutrient supply[J]. Plant Ecology, 2000, 149: 219-231.
- [29] 胡慧, 包维楷, 李芳兰. 岷江上游 4 个栽培树种细根功能性状垂直分布的差异性[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1): 46-56.
- HU H, BAO W K, LI F L. Differential vertical distribution of functional traits of fine roots of four cultivated tree species in the upper reaches of minjiang river[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(1): 46-56. (in Chinese)

- [J]. 防护林科技, 1992(2):14-20.
- [14] 朱廷曜, 关德新, 吴家兵, 等. 论林带防风效应结构参数及其应用[J]. 林业科学, 2004, 40(4):9-15.
ZHU T J, GUAN D X, WU J B, *et al.* Structure parameters of wind protection of shelterbelts and their application[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(4):9-15. (in Chinese)
- [15] 凌裕泉, 屈建军, 金炯. 稀疏天然植被对输沙量的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1):12-18.
LING Y Q, QU J J, JIN J. Influence of sparse natural vegetation on sand-transporting quantity[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(1):12-18. (in Chinese)
- [16] 饶良懿, 朱金兆. 防护林空间配置研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(2):102-106.
- [17] 王多泽, 袁宏波, 郭春秀, 等. 仿真固沙灌木林与塑料网方格沙障防风固沙效能比较[J]. 防护林科技, 2014(11):6-10.
- [18] 张莹花, 康才周, 刘世增, 等. 沙地云杉(*Picea mongolica*)农田防护林带不同配置模式的防风效果[J]. 中国沙漠, 2017, 37(5):859-866.
ZHANG Y H, KANG C Z, LIU S Z, *et al.* Windbreak effect of picea mongolica farmland shelterbelt with different configuration[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(5):859-866. (in Chinese)
- [19] 胡凤荣, 王永木. 农田防护林垂直防护效益研究[J]. 内蒙古林业科技, 1997(4):37-39.
- [20] 孙涛, 王继和, 满多清, 等. 仿真固沙灌木防风积沙效应的风洞模拟研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6):49-55.
SUN T, WANG J H, MAN D Q, *et al.* Simulation effect of preventing wind and combating sand of simulated sand-fixing shrub in wind tunnel testing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6):49-55. (in Chinese)
- [21] 钟卫, 刘涌江, 杨涛. 3种沙障防风固沙效益比较的风洞实验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6):6-13.
ZHONG W, LIU Y J, YANG T. Wind tunnel test study on effect contrast of wind-breaking and sand-fixing of three sand-barriers [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6):6-13. (in Chinese)
- [22] 杨文斌, 赵爱国, 王晶莹, 等. 低覆盖度沙蒿群丛的水平配置结构与防风固沙效果研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1):108-112.
YANG W B, ZHAO A G, WANG J Y, *et al.* Allocation of artemisia halodendron association with low coverage and their sand-fixing and wind-preventing effects[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(1):108-112. (in Chinese)
- [23] 李亚琦, 马瑞, 刘虎俊, 等. 3种配置防护林防风效能的风洞模拟实验[J]. 防护林科技, 2020, 198(3):1-4.
- [24] 李占君, 刘运伟, 王洪学, 等. 基于 Plackett-Burman 和 Box-Behnken 设计优化超声诱导防风种子发芽方法[J]. 森林工程, 2022, 38(1):76-85.
- [25] 刘虎俊, 袁宏波, 王多泽, 等. 两种不同配置灌木林防风固沙效益[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):63-68.
LIU H J, YUAN H B, WANG D Z, *et al.* Benefits of windbreak and sand fixation from two kinds of shrubs[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):63-68. (in Chinese)
- [26] 吕仁猛, 丁国栋, 郝玉光, 等. 旷野风速对林网内风速分布及防风效能的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2):105-110.
- [27] 王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 民勤县绿洲边缘固沙林防风蚀效应研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4):64-70.
WANG Y W, LUO L, ZHANG F, *et al.* Windbreak effect of sand-fixation forest on the edge of oasis in Minqin [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4):64-70. (in Chinese)

(上接第16页)

- [30] 张立恒, 李清雪, 王学全, 等. 高寒沙地中间锦鸡儿人工林根系分布及林下土壤特性研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(4):840-846.
ZHANG L H, LI Q X, WANG X Q, *et al.* Root distribution and soil properties under *Caragana intermedia* plantations in alpine sandy land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(4):840-846. (in Chinese)
- [31] 安慧, 韦兰英, 刘勇, 等. 黄土丘陵区油松人工林和白桦天然林细根垂直分布及其与土壤养分的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2007(4):611-619.
AN H, WEI L Y, LIU Y, *et al.* Distribution characters of fine root of artificial *Pinus tabulaeformis* and natural *Betula platyphylla* forests and their relation to soil nutrients in Hilly Loess Regions[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007(4):611-619. (in Chinese)
- [32] 孙楠, 张怡春, 赵眉芳. 长白落叶松人工林根系生物量及其垂直分布特征[J]. 森林工程, 2021, 37(6):17-24, 67.
- [33] 朱万才, 吴瑶, 李亚洲, 等. 不同保留密度对落叶松水曲柳混交林的影响[J]. 森林工程, 2021, 37(2):50-56, 94.
- [34] 高国雄, 李得庆, 贾俊姝, 等. 退耕还林不同配置模式对土壤养分的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2007(5):104-107.
GAO G X, LI D Q, JIA J S, *et al.* Research on soil fertility of different species arrangement models in converted farmland land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007(5):104-107. (in Chinese)
- [35] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的分层结构特征及土壤理化性质[J]. 林业科学, 2018, 54(10):20-30.
FENG Y M, LI Y, CAO X W, *et al.* Characteristics of stand structure and soil physicochemical properties of artificial young *Picea asperata* plantation with different densities in Southern Gansu[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(10):20-30. (in Chinese)
- [36] 王国梁, 周东. 黄土丘陵区退耕地先锋群落演替过程中细根特征的变化[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2):356-364.
WANG G L, ZHOU D. Fine root characteristic changes of pioneer community with plant succession in abandoned croplands in the Loess Gully Region China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(2):356-364. (in Chinese)
- [37] 闫小莉, 戴腾飞, 贾黎明, 等. 欧美 108 杨细根形态及垂直分布对水氮耦合措施的响应[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8):825-837.
YAN X L, DAI T F, JIA L M, *et al.* Responses of the fine root morphology and vertical distribution of *Populus × euramericana* 'Guariento' to the coupled effect of water and nitrogen [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(8):825-837. (in Chinese)