

不同苗龄云南松苗木平茬根系形态特征分析

成思丽^{1,2}, 王丹^{1,2}, 贺斌³, 胡兆柳^{1,2}, 陈林^{1,2},
唐军荣^{1,2}, 陈诗^{1,2}, 许玉兰^{1,2}, 蔡年辉^{1,2}

(1. 西南林业大学 西南山地森林资源保育与利用教育部重点实验室, 云南昆明 650224; 2. 西南林业大学 西南地区生物多样性保育国家林业和草原局重点实验室, 云南昆明 650224; 3. 云南交通职业技术学院, 云南昆明 650500)

摘要: 【目的】分析云南松 *Pinus yunnanensis* 不同苗龄平茬后苗木根系形态特征, 为选择适宜平茬苗龄提供依据。

【方法】以 6、10、14、18、30 月龄的云南松苗木为材料, 统一留茬高度 (5 cm) 进行平茬, 分别在平茬后 60、120、180、240、300、360、420、480 d 测定苗木根系形态特征及生物量, 分析云南松不同苗龄苗木平茬后的根系构型。

【结果】不同苗龄平茬对云南松苗木根系形态特征有显著影响 ($P < 0.05$)。在平茬后 480 d 时, 6 月龄平茬的苗木根平均直径 (0.825 mm)、根体积 (4.435 cm³) 比 30 月龄平茬的苗木根平均直径 (1.302 mm)、根体积 (16.282 cm³) 小, 但总根长较大; 6~30 月龄平茬苗木的比根长整体呈降低趋势, 且 6 月龄平茬苗木根比表面积、根组织密度、根细度均显著大于其余苗龄平茬的苗木 ($P < 0.05$), 且表现为随着苗龄增加而减小的生长趋势。根平均直径、根体积与根生物量的生长速率没有显著差异, 总根长、根表面积与根生物量之间表现为随着苗龄增大生长速率逐渐降低的趋势。【结论】苗龄较小的苗木构建了更细更密集的根系, 有利于对水分和养分的吸收利用; 苗龄为 6 个月的苗木平茬效果较好。图 2 表 5 参 40

关键词: 云南松; 苗龄; 平茬; 根系形态

中图分类号: S723; S791.257

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2024)02-0322-11

Analysis of root morphological characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings at different stump-ages

CHENG Sili^{1,2}, WANG Dan^{1,2}, HE Bin³, HU Zhaoliu^{1,2}, CHEN Lin^{1,2},
TANG Junrong^{1,2}, CHEN Shi^{1,2}, XU Yulan^{1,2}, CAI Nianhui^{1,2}

(1. Key Laboratory for Forest Resources Conservation and Utilization in the Southwest Mountains of China, Ministry of Education, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Key Laboratory of Biodiversity Conservation in Southwest China, National Forestry and Grassland Administration, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 3. Yunnan Communications Vocational and Technical College, Kunming 650500 Yunnan, China)

Abstract: [Objective] This study aims to analyze root morphological characteristics of *Pinus yunnanensis* seedlings after stumping at different ages, and to provide evidence for selecting suitable stump-age. [method] Taking *P. yunnanensis* seedlings aged 6, 10, 14, 18 and 30 months as materials, all seedlings were pruned to a uniform height of 5 cm. The root morphology and biomass were measured at 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420,

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-12-01

基金项目: 云南省农业联合专项重点项目 (202301BD070001-152); 云南省农业联合专项面上项目 (202301BD070001-035); 云南省万人计划青年拔尖人才项目 (YNWR-QNBJ-2019-075); 国家自然科学基金资助项目 (32360381); 云南省研究生导师团队建设项目 (2022-97)

作者简介: 成思丽 (ORCID: 0009-0008-7567-5906), 从事森林培育学研究。E-mail: cs113708654904@163.com。通信作者: 贺斌 (ORCID: 0009-0006-8120-5228), 讲师, 从事森林生态学研究。E-mail: 272131861@qq.com。蔡年辉 (ORCID: 0000-0001-5489-2815), 副教授, 博士, 从事森林培育学研究。E-mail: caianhui@sohu.com

and 480 d after stumping, and the root structure of different seedling ages of *P. yunnanensis* after stumping was analyzed. [Result] Stumping at different seedling ages significantly affected the root morphological characteristics of *P. yunnanensis* seedlings ($P < 0.05$). At 480 days after stumping, the seedlings stumped at 6 months had smaller average root diameter (0.825 mm) and root volume (4.435 cm³) compared with those stumped at 30 months, which had an average root diameter of 1.302 mm and root volume of 16.282 cm³, but the total root length was larger. The specific root length for 6 to 30-month-old stumped seedlings showed a decreasing tendency, and the root specific surface area, root tissue density, and root fineness of the seedlings stumped at 6 months were significantly greater than those of the seedlings stumped at other ages ($P < 0.05$), showing a decreasing trend with increasing seedling age. There was no significant difference in the growth rate of average root diameter, root volume, and root biomass, while total root length, root surface area, and root biomass showed a trend of decreasing growth rate with increasing seedling age. [Conclusion] Younger seedlings build finer and denser root systems, which is conducive to the absorption and utilization of water and nutrients. The seedlings aged 6 months showed the best effect of stumping. [Ch, 2 fig. 5 tab. 40 ref.]

Key words: *Pinus yunnanensis*; seedling age; stumping; root morphology

根系是连接植物地上部分与土壤的纽带，是植物与土壤进行物质运移置换的关键工具^[1]。资源分配假说认为：萌生更新能力取决于母树地上器官和地下器官的资源储存，地上部分损失后，根系的资源储存量对树木萌生具有重要意义^[2]。根系的资源储存不仅受根系内在生理特性的影响，同时也会因外部条件的改变而受到影响，除了土壤、气候条件外，平茬也会对其产生影响。平茬是将苗木地上部分的枝条按照一定高度全部截去，以刺激根系及萌生枝生长而采取的一项重要技术措施，它能够更好地促进植株生长^[3]。植株地上部分被破坏后，地上叶面积大幅度减少，使光和同化产物向根系的分配减少，从而导致植株根冠比失衡，使植株在此时进行补偿性生长^[4]。研究表明：平茬处理使柠条 *Caragana korshinskii* 的根系和根量明显增加，可有效提高根系活力^[5]。

云南松 *Pinus yunnanensis* 为常绿针叶乔木，生长迅速，树干通直，且耐干旱瘠薄^[6]，广泛分布于 23°00'~29°00'N，98°30'~106°00'E 的中国西南地区，是西南地区乡土造林的主要树种^[7]。云南松不仅可以保持水土、防风固沙，还用于树脂、造纸、烤胶和医疗等领域，在生态建设和经济建设方面具有重要作用^[8-9]。然而，80% 的云南松人工林是同龄纯林，林分稳定性较差、质量低劣，且生物多样性低^[10]。人为砍优留劣、毁林开荒，以及生物入侵、病虫害等自然因素的影响^[11]，使大部分云南松林出现不同程度的退化，优良基因资源减少，出现低矮、弯曲、扭曲等不良个体^[12]。云南松多为种子繁殖，会导致基因重组，母株遗传性状发生变异。因此，对云南松进行遗传改良从而培育优良苗木的工作迫在眉睫^[13]。无性繁殖可以挑选优良的种质资源进行，既能缩短苗木出圃时间，又能较好地保持亲本性状^[14]。针叶树种属于较难扦插生根的树种，对云南松进行扦插繁殖需要获得大量优质幼化的穗条。平茬可以有效去除顶端优势，促进休眠芽和不定芽的萌蘖，使植物产生较多的新生萌蘖枝条，从而为云南松扦插繁殖提供优良幼态化的穗条。平茬后影响云南松萌蘖的因素较多，但对根系的探讨较少。有研究发现：平茬可以促进云南松根系的生长发育，且不同平茬高度和不同平茬季节都会对云南松的根系产生影响^[15-16]，然而不同平茬苗龄对云南松根系形态变化的研究未见报道。鉴于此，本研究对云南松不同苗龄的苗木进行平茬，分析不同苗龄苗木根系生长随时间的动态变化，探究云南松苗木根系生长对不同苗龄平茬的响应规律，以期对云南松适宜平茬苗龄的确定提供依据。

1 研究地区与方法

1.1 研究地概况

研究地设置在云南省昆明市西南林业大学苗圃 (25°04'00"N，102°45'41"E)。该地海拔约 1 945 m，年平均气温为 14.7 ℃，绝对最高气温为 32.5 ℃，绝对最低气温为 -9.0 ℃。降水集中在 5—10 月，月最大降水量为 208.3 mm，日最大降水量为 153.3 mm，年平均相对湿度为 68%，年降水量为 700.0~1 100.0

mm。年均日照时数为 2 445.6 h，年均蒸发量为 1 856.4 mm。基质为红土与腐质土(体积比为 1:2)，土壤为酸性低磷土壤。苗木盆统一采用红黑双色苗圃塑料软花盆，口径、底径、高分别为 24、16、20 cm。

1.2 种子采集与处理

于 2017 年 12 月在弥渡云南松无性系种子园健壮母树上采集结实多、籽粒饱满的当年生成熟球果。将球果做好标记带回实验室风干，待球果开裂后取出发育良好的种子。先用体积分数为 0.5% 高锰酸钾溶液消毒 0.5 h，取出用清水冲洗后于 50 ℃ 温水中浸泡 24 h。分别于 2018 年 1 月 20 日(平茬时为 30 月龄，记为 M_{30})，2019 年 1 月 20 日(18 月龄， M_{18})，2019 年 5 月 20 日(14 月龄， M_{14})，2019 年 9 月 20 日(10 月龄， M_{10})，2020 年 1 月 20 日(6 月龄， M_6)播种育苗，株行距为 5 cm×10 cm。将育苗盆整齐摆放在苗床上，有 5 个苗龄的苗木，3 个重复，共 15 个小区，每个小区育苗 48 株，总计 720 株。地面铺设地膜。

1.3 苗木平茬处理

种子播种后根据天气情况于 9:00 前或 17:00 后浇水，并定期除草。在 2020 年 7 月 20 日对不同苗龄的苗木进行平茬，统一留茬高度 5 cm，得到不同苗龄的平茬苗木，即 M_6 (6 月龄)、 M_{10} (10 月龄)、 M_{14} (14 月龄)、 M_{18} (18 月龄)、 M_{30} (30 月龄)。在平茬之前对苗木进行 1 次摸底调查，主要标记苗木的分枝数，并对苗木的枝条(侧枝)用绑扎带圈记，以此区分新旧萌条。平茬后在切口处涂抹油漆，以防水分流失和病虫害侵入。

1.4 根系指标测定

平茬后每隔 60 d(即分别在平茬后 60、120、180、240、300、360、420、480 d)采集 1 次云南松苗木，测定根系形态，即从 2020 年 9 月开始，从每个重复试验组中随机选择 3 株苗木，重复 3 次，一直持续至 2021 年 11 月，共计 8 次测定。将苗木整株挖出，用直尺测量样株的萌条长，精确到 0.1 cm，用游标卡尺测量萌条基径，精确到 0.01 mm，并将萌条取下，统计其数量。将样株分为地上部分和地下部分，地上部分作其他分析用。地下部分去除根系中附着的土壤和杂质，然后将根系放在透明塑料袋中用清水清洗干净，再用根系扫描仪进行根系扫描。扫描后用 WinRHIZO 分析软件获得总根长、根表面积、根平均直径、根总体积等根系形态指标。然后放入温度为 80 ℃ 烘箱烘干，用精度为 0.001 g 的电子天平称量至恒量，即为根生物量。通过获得的根系形态指标和生物量指标，计算出比根长(总根长/根生物量)、根比表面积(根表面积/根生物量)、根组织密度为(根生物量/根体积)、根细度(总根长/根体积)等根系构型指标^[17]。

1.5 数据分析

应用 SPSS 26.0 进行单因素完全方差分析，用 Duncan 法进行显著性检验($\alpha=0.05$)。云南松生物量的异速生长关系用方程 $y=ax^b$ 来描述^[18]，线性转化为： $\lg y=\lg a+b\lg x$ 。其中： y 与 x 为根系形态特征(根平均直径、总根长、根体积、根表面积)与根生物量； a 为性状关系的截距； b 为异速生长指数，即线性关系的斜率，并把斜率 b 与 1 进行差异显著性比较，斜率 b 与 1 无显著差异时，为等速生长；斜率 b 与 1 有显著差异时，为异速生长^[19]。此外，还对不同苗龄苗木间的斜率 b 进行多重比较，若不同苗龄间的斜率 b 差异显著，则表明异速生长轨迹发生改变，有表型可塑性。异速生长方程的计算及方差分析均由统计软件 R 中的 Smatr 包完成^[20]。

2 结果与分析

2.1 不同苗龄平茬苗木的根系形态

2.1.1 不同苗龄苗木根平均直径与总根长的比较 由图 1A 可知：除 M_{30} 和 M_{14} 外，不同苗龄平茬苗木的根平均直径随时间推移变化趋势一致，平茬后 60~120 与 240~300 d 时呈现下降趋势，其余时间呈现增长趋势，可能与所属的季节有关。除平茬后 240 d 外， M_{18} 和 M_{30} 的根平均直径均大于其余平茬苗龄，平茬后 240 d 时 M_{10} 的根平均直径较大。在平茬后 480 d 时， M_6 的根平均直径为 0.825 mm， M_{30} 的根平均直径为 1.302 mm。从整体来看， M_{30} 的根平均直径一直有较好的长势，且根平均直径表现为随着苗龄增大而增大的生长趋势。

由图 1B 可知：不同苗龄平茬苗木的总根长随时间推移变化趋势总体一致。除 M_6 外，其余平茬苗

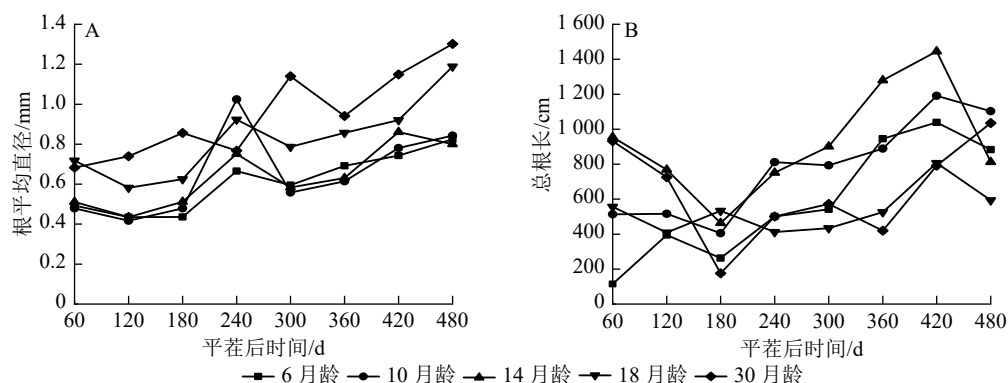


图 1 云南松不同苗龄平茬苗木根平均直径与总根长随时间变化的规律

Figure 1 Variation of average root diameter and total root length with time in different seedling ages of *P. yunnanensis* stumping seedlings

龄苗木表现为总根长在平茬后 60~180 d 时降低, 180~420 d 总根长又呈增加的趋势, M₆ 和 M₁₀ 的总根长在平茬后 180 d 前较短, 随后增长变快。总体来看, 总根长表现为随着苗龄增加先增加后减小的生长趋势, M₆ 和 M₁₀ 的初始总根长较短, 随着时间推移总根长生长快, M₁₈ 和 M₃₀ 的初始总根长较长, 随着时间推移总根长生长慢。

2.1.2 不同苗龄苗木根体积与根表面积的比较 由图 2A 可知: 不同苗龄平茬苗木的根体积随时间推移变化趋势总体一致。在平茬后 60~180 d 时根体积有所减小, 随着时间的推移根体积有所增加。平茬后 420 d 时, M₃₀ 的根体积增加变快, M₁₄ 下降趋势明显。在平茬后 360 d 时, M₃₀ 的根体积呈现增长加快的趋势, 在平茬后 60、120、420 和 480 d 时均是 M₃₀ 的根体积大于其余苗龄。M₆ 的根体积总体小于其余平茬苗龄。在 480 d 时, M₆ 的根平均体积为 4.435 cm³, M₃₀ 的根平均体积为 16.282 cm³。从整体来看, M₃₀ 的根体积一有较好的长势, 且根体积表现为随着苗龄增大而增大的生长趋势。

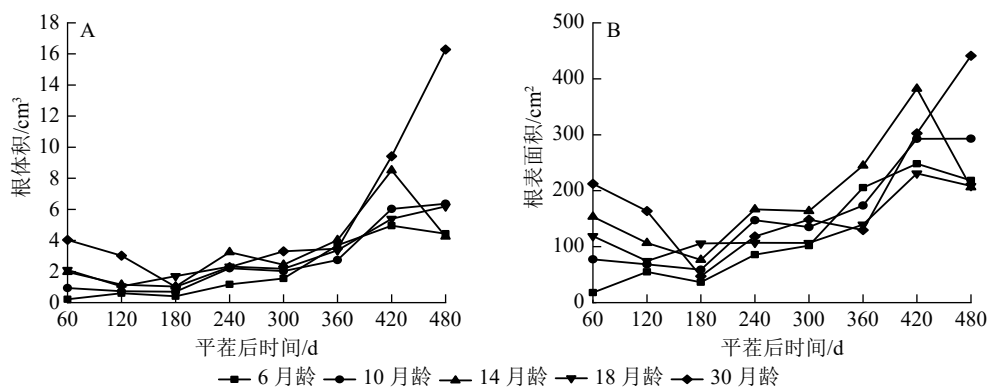


图 2 云南松不同苗龄平茬苗木根体积与根表面积随时间变化的规律

Figure 2 Variation of root volume and surface area of *P. yunnanensis* stumping seedlings with time under different seedling ages

由图 2B 可知: 不同苗龄平茬苗木的根表面积随时间推移总体呈现先降低后增加的趋势。除 M₁₈ 外, 其余苗龄平茬苗木在平茬后 180 d 以前的根表面积有所减小, 随着时间的推移逐渐增加。在平茬后 60、120、480 d 时均是 M₃₀ 的根表面积大于其余苗龄。在平茬后 180 d 时, M₁₈ 的根表面积最大, 平茬后 240~420 d 时, M₁₄ 的根表面积最大。在平茬后 60、120、180、240 d 时, 均是 M₆ 的根表面积最小, 平茬后 360 d 时, M₃₀ 的根表面积最小。

2.2 不同苗龄平茬苗木的根系构型

2.2.1 不同苗龄平茬苗木比根长的变化 从表 1 可见: 除平茬后 300 和 480 d 外, 从 M₆ 到 M₃₀ 的比根长随苗龄逐渐减小, 在平茬后 300 d 时, M₆、M₁₀ 的比根长以及平茬后 360~480 d 时 M₆、M₁₀ 和 M₁₄ 的比根长均显著大于其余苗龄的比根长 ($P < 0.05$), 且苗龄间比根长差异不显著。从整体来看, M₆ 的比根长一直有较好的长势, 且比根长表现为随着苗龄增加而减小的生长趋势, 随时间推移, M₆、M₁₀、M₁₄ 之间比根长的差异有所减小。

表1 云南松不同苗龄平茬苗木比根长随时间变化的规律

Table 1 Variation of specific root length of *P. yunnanensis* stumping seedlings with time under different seedling ages

平茬后时间/d	不同苗龄苗木的比根长/(cm·g ⁻¹)				
	M ₆	M ₁₀	M ₁₄	M ₁₈	M ₃₀
60	2 365.007±901.510 a	1 556.480±559.489 b	1 209.910±737.060 b	332.793±167.766 c	241.239±71.996 c
120	1 457.954±588.839 a	1 028.822±393.701 b	687.435±182.464 c	263.379±81.094 d	286.997±289.058 d
180	768.183±202.630 a	579.952±269.778 b	371.361±86.468 c	262.487±79.542 c	83.081±7.998 d
240	1 039.679±318.141 a	746.030±364.945 ab	727.551±293.785 b	403.004±288.571 c	383.563±272.744 c
300	773.558±197.134 a	958.900±407.788 a	608.661±533.015 b	278.183±160.656 ab	633.522±718.033 ab
360	960.036±667.643 a	726.070±186.374 a	718.169±207.428 a	271.822±70.555 b	164.293±50.870 b
420	560.087±139.406 a	535.467±211.748 a	507.365±217.268 a	273.619±96.297 b	107.175±42.225 c
480	315.741±108.602 a	298.487±49.132 a	322.064±117.352 a	146.113±75.098 b	65.156±26.157 c

说明：表中数据为平均值±标准差。同行不同字母表示不同苗龄间差异显著 ($P<0.05$)。M₆. 6月龄, M₁₀. 10月龄, M₁₄. 14月龄, M₁₈. 18月龄, M₃₀. 30月龄。

2.2.2 不同苗龄平茬苗木根比表面积的变化 从表2可见：在平茬后 60、120 d 时，M₆ 的根比表面积显著大于其余苗龄平茬苗木 ($P<0.05$)。平茬后 180 d 时，M₆ 和 M₁₀ 的根比表面积显著大于其余苗龄平茬苗木 ($P<0.05$)。平茬后 240~480 d 时，M₆、M₁₀、M₁₄ 之间没有显著差异。从整体来看，M₆ 的根比表面积一直有较好的长势，且根比表面积表现为随着苗龄增加而减小的生长趋势。随时间推移，M₆、M₁₀、M₁₄ 的根比表面积差异有所减小。

表2 云南松不同苗龄平茬苗木根比表面积随时间变化的规律

Table 2 Variation of root specific surface area with time in different seedling ages of *P. yunnanensis* stumping seedlings

平茬后时间/d	不同苗龄苗木的根比表面积/(cm ² ·g ⁻¹)				
	M ₆	M ₁₀	M ₁₄	M ₁₈	M ₃₀
60	358.667±123.753 a	233.679±89.001 b	192.197±107.299 b	69.791±26.223 c	52.336±11.692 c
120	204.351±96.262 a	134.660±53.384 b	93.906±21.808 bc	48.066±13.609 c	61.294±62.338 c
180	102.509±19.989 a	85.335±34.989 a	60.312±12.081 b	50.937±12.274 b	22.352±2.215 c
240	178.156±52.767 a	131.689±40.644 ab	159.044±67.559 ab	108.013±79.274 b	96.030±76.120 b
300	141.127±27.398 a	151.574±28.577 a	109.724±90.765 a	70.337±51.065 a	181.006±220.073 a
360	244.148±245.367 a	142.160±39.705 ab	140.305±29.155 ab	75.244±15.495 b	49.566±15.183 b
420	130.657±27.856 a	130.527±52.918 a	134.490±51.033 a	78.937±26.838 b	37.461±9.030 c
480	80.196±21.316 a	79.214±15.089 a	80.978±24.451 a	51.823±19.919 b	26.740±6.611 c

说明：表中数据为平均值±标准差。同行不同字母表示不同苗龄间差异显著 ($P<0.05$)。M₆. 6月龄, M₁₀. 10月龄, M₁₄. 14月龄, M₁₈. 18月龄, M₃₀. 30月龄。

2.2.3 不同苗龄平茬苗木根组织密度的变化 从表3可见：M₆ 的根组织密度始终显著大于其余苗龄平茬苗木 ($P<0.05$)。在平茬后 60~360 d 时，M₁₄、M₁₈ 和 M₃₀ 的根组织密度没有显著差异。在平茬后 420 和 480 d 时，M₁₈ 和 M₃₀ 的根组织密度显著小于其余苗龄 ($P<0.05$)。从整体来看，M₆ 的根组织密度一直有较好的长势，且根组织密度表现为随着苗龄增大而减小的生长趋势。

2.2.4 不同苗龄平茬苗木根细度的变化 从表4可见：除平茬后 180、240 和 360 d 外，M₆、M₁₀、M₁₄ 的根细度显著大于其余苗龄 ($P<0.05$)，且 3 个苗龄间没有显著差异。平茬后 180、240 d 时，M₆ 和 M₁₀ 的根细度显著大于其余苗龄 ($P<0.05$)。从整体来看，M₆ 的根细度一直有较好的长势，且根细度表现为随着苗龄增加而减小的生长趋势。随时间推移，M₆、M₁₀、M₁₄ 的根细度差异有所减小。

2.3 不同苗龄平茬苗木根系性状与根生物量的异速生长关系

不同苗龄苗木平茬后 480 d，即平茬后萌条生长了 16 个月是本试验观测的最后时期，其萌条与采穗圃培育萌条的时长一致，这时的有效萌条可以采集进行扦插繁殖。研究分析此时苗木各个构件的发育情况，可以更好地了解平茬苗木的生长机制，为培育高质量萌条提供系统的研究思路。根系性状与根生物

表 3 云南松不同苗龄平茬苗木根组织密度随时间变化的规律

Table 3 Variation of root tissue density with time in different seedling ages of *P. yunnanensis* stumping seedlings

平茬后时间/d	不同苗龄苗木的根组织密度/(g·cm ⁻³)				
	M ₆	M ₁₀	M ₁₄	M ₁₈	M ₃₀
60	2 365.007±901.510 a	778.240±279.744 b	403.303±245.687 bc	83.198±41.942 c	48.248±14.399 c
120	1 457.954±588.839 a	514.411±196.851 b	229.145±60.821 c	65.845±20.274 c	57.399±57.812 c
180	768.183±202.630 a	289.976±134.889 b	123.787±28.823 c	65.622±19.886 c	16.616±1.600 c
240	1 039.679±318.141 a	373.015±182.472 b	242.517±97.928 c	100.751±72.143 c	76.713±54.549 c
300	773.558±197.134 a	479.450±203.894 b	202.887±177.672 c	69.546±40.164 c	126.704±143.607 c
360	960.036±667.643 a	363.035±93.187 b	239.390±69.143 bc	67.955±17.639 bc	32.859±10.174 c
420	560.087±139.406 a	267.733±105.874 b	169.122±72.423 c	68.405±24.074 d	21.435±8.445 d
480	315.741±108.602 a	149.244±24.566 b	107.355±39.117 b	36.528±18.775 c	13.031±5.231 c

说明: 表中数据为平均值±标准差。同行不同字母表示不同苗龄间差异显著 ($P<0.05$)。M₆. 6 月龄, M₁₀. 10 月龄, M₁₄. 14 月龄, M₁₈. 18 月龄, M₃₀. 30 月龄。

表 4 云南松不同苗龄平茬苗木根细度随时间变化的规律

Table 4 Variation of root fineness with time in different seedling ages of *P. yunnanensis* stumping seedlings

平茬后时间/d	不同苗龄苗木的根细度/(cm·cm ⁻³)				
	M ₆	M ₁₀	M ₁₄	M ₁₈	M ₃₀
60	538.715±101.953 a	562.057±67.385 a	490.254±65.533 a	268.159±92.403 b	262.565±79.300 b
120	676.732±94.517 a	755.165±148.466 a	677.849±89.121 a	390.075±62.240 b	255.400±87.933 c
180	738.766±337.287 a	580.688±154.127 ab	328.577±68.932 bc	173.682±0.949 cd	475.307±103.989 d
240	432.975±92.777 a	380.991±123.399 a	261.408±110.540 b	178.308±58.188 b	221.305±50.541 b
300	376.687±96.275 a	441.787±186.435 a	357.782±64.583 a	221.037±76.707 b	231.492±153.209 b
360	257.560±80.470 b	329.895±39.174 a	308.735±76.841 ab	151.382±24.112 c	133.709±21.509 c
420	224.318±56.612 a	210.484±57.907 a	175.682±56.774 ab	149.549±24.835 b	97.803±30.956 c
480	190.122±48.450 a	180.684±39.987 a	191.692±30.004 a	92.608±27.830 b	68.164±26.017 b

说明: 表中数据为平均值±标准差。同行不同字母表示不同苗龄间差异显著 ($P<0.05$)。M₆. 6 月龄, M₁₀. 10 月龄, M₁₄. 14 月龄, M₁₈. 18 月龄, M₃₀. 30 月龄。

量间呈不同的异速生长关系 (表 5)。不同苗龄平茬苗木的根平均直径、根体积与根生物量的异速生长指数没有显著差异, 并出现了共同斜率, 分别为: $-0.403 0$ 、 $0.982 0$, 异速生长轨迹未发生改变。从总根长与根生物量间的异速生长关系来看, M₃₀ 的斜率是负数, 为负增长, 总根长生长速率小于根生物量的生长速率; M₁₄、M₁₈ 的斜率为与 1.0 无显著差异的等速生长关系; M₆、M₁₀ 为显著大于 1.0 的异速生长关系 ($P<0.05$), 即 M₆、M₁₀ 的总根长大于根生物量的生长速率。从根表面积与根生物量间的异速生长关系来看, M₃₀ 的斜率为显著小于 1.0 的异速生长关系 ($P<0.05$); M₆、M₁₄ 和 M₁₈ 的斜率为与 1.0 无显著差异的等速生长关系; M₁₀ 为显著大于 1.0 的异速生长关系 ($P<0.05$), 即 M₁₀ 的根表面积大于根生物量的生长速率。

3 讨论

根系形态是衡量植物生产力的重要因素, 在维持根系的功能中起重要作用, 根系的形态及分布会影响其对土壤养分、水分的吸收, 同时土壤条件的变化也会反过来影响根系的形态特性^[21]。不同平茬时期对苗木有不同的影响, 但苗木构件中的针叶和侧根会保持较大的生长速率, 不受平茬季节的影响^[15]。不同苗龄平茬处理对苗木根平均直径、总根长、根体积、根表面积有显著影响。本研究表明: 不同苗龄平茬苗木根平均直径、根体积表现为随着苗龄增大而增大的趋势, 不同苗龄平茬苗木总根长表现为 M₆ 和 M₁₀ 随着时间推移生长加快, M₁₈ 和 M₃₀ 随着时间推移生长减慢。在本研究中不同平茬苗龄苗木的根系

表5 云南松不同苗龄平茬苗木根系性状与根生物量的异速生长

Table 5 Allometric growth of root traits and root biomass of *P. yunnanensis* stumping seedlings under different seedling ages

性状	苗龄	R^2	P	斜率	F	$P_{-1.0}$	类型
根平均直径-根生物量	M ₆	0.736	0.006	-0.442 6 a	18.732	0.005	异速生长
	M ₁₀	0.077	0.505	0.311 9 a	13.615	0.010	异速生长
	M ₁₄	0.078	0.466	0.187 7 a	50.171	0.000	异速生长
	M ₁₈	0.053	0.551	-0.414 4 a	7.381	0.030	异速生长
	M ₃₀	0.661	0.008	0.501 8 a	11.460	0.012	异速生长
总根长-根生物量	M ₆	0.750	0.005	1.676 6 a	7.009	0.038	异速生长
	M ₁₀	0.910	0.000	1.349 1 a	6.179	0.047	异速生长
	M ₁₄	0.551	0.022	1.063 0 a	0.058	0.816	等速生长
	M ₁₈	0.310	0.120	1.182 5 a	0.288	0.608	等速生长
	M ₃₀	0.675	0.007	-0.478 9 b	13.942	0.007	异速生长
根体积-根生物量	M ₆	0.549	0.035	1.028 6 a	0.011	0.922	等速生长
	M ₁₀	0.834	0.002	1.647 7 a	9.803	0.020	异速生长
	M ₁₄	0.737	0.003	1.006 8 a	0.001	0.973	等速生长
	M ₁₈	0.594	0.015	0.742 1 a	1.579	0.249	等速生长
	M ₃₀	0.671	0.007	0.718 8 a	2.405	0.165	等速生长
根表面积-根生物量	M ₆	0.683	0.011	1.318 8 a	1.486	0.269	等速生长
	M ₁₀	0.892	0.000	1.460 3 a	8.390	0.027	异速生长
	M ₁₄	0.659	0.008	1.016 6 a	0.006	0.943	等速生长
	M ₁₈	0.460	0.045	0.878 3 a	0.219	0.654	等速生长
	M ₃₀	0.850	0.000	0.105 0 b	136.978	0.000	异速生长

说明：根平均直径、根体积与根生物量的共同斜率分别为-0.403 0、0.982 0；总根长、根表面积与根生物量无共同斜率。 $P_{-1.0}$ 表示斜率与理论值 1.0 的差异显著性；斜率中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。M₆ 6 月龄，M₁₀ 10 月龄，M₁₄ 14 月龄，M₁₈ 18 月龄，M₃₀ 30 月龄。

生长均发生了改变，但因苗龄不同，苗木所采用的生长策略不同。总根长、根体积以及根表面积在平茬后 60~180 和 420 d 后有所下降，这可能是由于此期间正好为秋冬季。有研究表明：随着冬季的到来，植物以及根系进入休眠期，活力下降^[22]，大部分生命较短、直径较小的根，可能会因为地下水分、温度以及碳分配的降低而减小甚至消亡^[23]。从平茬后 300 d (5 月) 开始，是不同苗龄平茬苗木的总根长生长关系产生显著变化的转折点。此时正值初夏，天气炎热，苗龄较小的苗木需要大量的水分供给。水分胁迫本身会使根系直径变小，根长增加，从而提高根系对养分的吸收速率，保证苗木在资源贫瘠的环境中也能保持正常生长发育^[24]。这与沙柳 *Salix psammophila*、骆驼刺 *Alhagi sparsifolia* 在干旱条件下增加根系长度，占有大面积的土壤来获取水分，适应胁迫环境的结果相同^[25-26]。相对于苗龄较小的苗木，较大苗龄的苗木更需要根的支撑，保证植物稳定生长。根系直径变粗可以提高根系对轴向阻力的克服能力^[27]。其原因可能是机械阻力改变了根尖细胞的生长，影响了根系淀粉的沉淀，从而诱发生长素流动和分配的变化。根系阻抗还会引起根系生长深度的变化，总根长也会随之变短^[28]。

不同苗龄平茬苗木根系构型随时间推移有显著性差异，比根长与根系的吸收面积和资源获取率成正比^[29]。根比表面积与养分利用效率成正比，根组织密度是反映根功能情况的特征之一，因为其和根的生理活动紧密相连^[30]。根细度是总根长与根体积的比值，其值变化可反映根的粗细。有研究表明：根系越细越有利于植物对土壤中营养元素的吸收^[31]。本研究中 M₆ 的比根长、根比表面积、根组织密度、根细度均保持较好的长势，且表现为随着苗龄增加而减小的生长趋势。随时间推移，M₆、M₁₀、M₁₄ 除了根组织密度外的其余指标差异均有所减小，表明不同苗龄苗木平茬后所采取的生态策略不同。相对于苗龄较大的苗木，苗龄较小的苗木以较大的比根长采取了低投资高收益的生态策略，苗龄较小的苗木构建了更细、更密集根系，这有利于增加根系分布的深度和广度，从而提高对土壤养分的获取能力和利用效

率^[17]。对黄土高原子午岭辽东栎 *Quercus wutaishanica* 不同年龄幼苗根系构型的研究表明: 随年龄的增加, 不仅粗根比例逐渐增加, 根系内外连接数量也在增加, 说明根系的固着作用随苗龄的增加而加强^[32]。这与本研究结果一致, 随着平茬苗龄的增加, 根系皮层组织退化, 维管束逐渐发达, 木质化程度高, 代谢慢, 养分吸收速率低, 逐渐提高了运输和储藏功能。所以在本研究中苗龄较小的 M_6 长势最好, 既能为地上部分提供资源又能促进地下部分与地上部分的良性循环。

形态性状是植物长期与环境相互作用、逐渐适应形成的^[33], 其中根系的形态变化最为显著^[34]。根平均直径、根体积与根生物量在不同苗龄平茬苗木间出现了共同斜率, 即苗木间异速生长轨迹没有发生变化。表明不同苗龄平茬后, 苗木根平均直径、根体积与根生物量的生长速率没有显著差异, 呈现趋同进化趋势, 异速生长关系较为稳定^[35]。总根长、根表面积与根生物量之间没有共同斜率, 且 M_{30} 显著小于其他苗木, 表明不同苗龄平茬对苗木根系的生长速率影响不同, 随着苗龄增大, 总根长、根表面积的生长速率呈逐渐降低的趋势。 M_6 、 M_{10} 与 M_{30} 的总根长以及 M_{10} 与 M_{30} 的根表面积的异速生长关系发生了显著性差异, 具有可塑性。植物根系在受到胁迫后, 会采取改变代谢途径, 重新分配能量物质, 改变根系形态等措施来响应外界胁迫^[36]。较长的根系能扩大植物吸收水分与养分的范围, 能较好地适应外界环境^[37]。根系表面积能够反映出根系在土壤空间中的生长状况, 进而推断出根系的吸收、代谢及固结土壤能力^[38]。经济型谱认为: 在资源充足的环境下, 植物会选择竞争型生长策略。对杨树 *Populus* 的研究表明: 年龄较小的苗木为满足快速生长和对水分养分的需要, 会加大根生物量的分配比例, 促进构建根系生长^[39], 这与本研究结果一致。苗龄较小的苗木以较大的总根长、根表面积生长速率来最大限度地获取养分资源, 实现资源的有效利用。植物体内的水流阻力随年龄和个体大小的增加而加强, 从而阻碍了水分和养分的运输^[40]。因此苗龄大的苗木选择保守型生长策略, 降低总根长、根表面积生长速率, 以增加自身的耐受力 and 持久性。虽然不同苗龄平茬苗木的根系形态生长速率不同, 但苗木均需要对其投入代谢成本, 两者相比苗龄较大的苗木对地下部分投入的成本更高, 促进了根系生长。而庞大的根系消耗了大量的水分、养分, 减少了对地上部分的能量物质输送, 不利于地上部分的生长。因此在平茬苗木生长发育过程中应注意对土壤养分、水分的检测, 高效利用水肥资源。

4 结论

平茬对云南松不同苗龄苗木根系形态、根系构型生长特征以及苗木构件的异速生长规律产生了影响。根系形态指标与根系构型指标表明平茬苗龄较小的苗木构建了更细、更密集的根系。异速生长指标表明: 随着平茬苗龄增加, 总根长、根表面积与根生物量生长速率呈逐渐降低的趋势。综上所述, 平茬苗龄较小的苗木根系对资源的获取和利用效率更高。在本研究的 5 个平茬苗龄中, 以 6 月龄平茬苗木的根系生长状况较好, 平茬效果较好。

5 参考文献

- [1] 谢明明, 郭素娟, 宋影, 等. 板栗细根的空间分布格局及季节动态[J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 60–67.
XIE Mingming, GUO Sujuan, SONG Ying, et al. Spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots of *Castanea mollissima* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2018, 35(1): 60–67.
- [2] 朱万泽, 王金锡, 罗成荣, 等. 森林萌生更新研究进展[J]. 林业科学, 2007, 43(9): 74–82.
ZHU Wanze, WANG Jinxi, LUO Chengrong, et al. Progresses of studies on forest sprout regeneration [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(9): 74–82.
- [3] 李甜江, 李允菲, 田涛, 等. 中国沙棘平茬萌蘖种群的密度动态及其调节规律[J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(5): 713–719.
LI Tianjiang, LI Yunfei, TIAN Tao, et al. Density dynamics with model adjustments for stump sprouts of *Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2011, 28(5): 713–719.
- [4] 刘晓宇. 不同留茬高度对砒砂岩区沙棘根系构型及土壤物理性质的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
LIU Xiaoyu. *Effects of Different Stubble Heights on Root Architecture and Soil Physical Properties of Hippophae rhamnoides in the Pisha sandstone Area* [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.

- [5] 郑士光, 贾黎明, 庞琪伟, 等. 平茬对柠条林地根系数量和分布的影响[J]. 北京林业大学学报, 2010, **32**(3): 64 – 69.
ZHENG Shiguang, JIA Liming, PANG Qiwei, *et al.* Stumping effects on number and distribution of roots of *Caragana microphylla* Lam. plantations [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, **32**(3): 64 – 69.
- [6] 戴开结, 何方, 沈有信, 等. 云南松研究综述[J]. 中南林学院学报, 2006, **26**(2): 138 – 142.
DAI Kaijie, HE Fang, SHEN Youxin, *et al.* Advances in the research on *Pinus yunnanensis* forest [J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, **26**(2): 138 – 142.
- [7] 邓喜庆, 皇宝林, 温庆忠, 等. 云南松林在云南的分布研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2013, **35**(6): 843 – 848.
DENG Xiqing, HUANG Baolin, WEN Qingzhong, *et al.* A research on the distribution of *Pinus yunnanensis* forest in Yunnan Province [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2013, **35**(6): 843 – 848.
- [8] 喻景深. 滇中云南松天然林模拟经营与经营技术研究[D]. 昆明: 西南林学院, 2009.
YU Jingshen. *Study on Simulation and Technology of the Management of Pinus yunnanensis Natural Forest in Central Area of Yunnan Province* [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2009.
- [9] 汤浩藩, 许彦红, 艾建林. 云南省森林植被碳储量和碳密度及其空间分布格局[J]. 林业资源管理, 2019(5): 37 – 43.
TANG Haofan, XU Yanhong, AI Jianlin. Carbon storage and carbon density of forest vegetation and their spatial distribution pattern in Yunnan Province [J]. *Forest Resources Management*, 2019(5): 37 – 43.
- [10] 蔡年辉, 李根前, 陆元昌. 云南松纯林近自然化改造的探讨[J]. 西北林学院学报, 2006, **21**(4): 85 – 88.
CAI Nianhui, LI Genqian, LU Yuanchang. Discuss on the approaching-nature forestry management of *Pinus yunnanensis* pure forests [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, **21**(4): 85 – 88.
- [11] 杨永祥, 孟广涛, 方向京, 等. 云南松在采伐迹地上更新成林过程的研究[J]. 云南林业科技, 2003(4): 12 – 18.
YANG Yongxiang, MENG Guangtao, FANG Xiangjing, *et al.* A study of generation progress of *Pinus yunnanensis* on cut-over area [J]. *Yunnan Forestry Science and Technology*, 2003(4): 12 – 18.
- [12] 许玉兰. 云南松天然群体遗传变异研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
XU Yulan. *Genetic Variation of Natural Population in Pinus yunnanensis Franch.* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [13] 步兆东, 李树民, 田福军. 针叶树苗木质量与造林成活生长关系的研究[J]. 林业科技通讯, 2000(9): 16 – 18.
BU Zhaodong, LI Shumin, TIAN Fujun. A study on the relationship between the quality of coniferous seedlings and the survival and growth of afforestation [J]. *Forestry Science and Technology*, 2000(9): 16 – 18.
- [14] 钱家连, 李迎超, 许慧慧, 等. 不同年龄栓皮栎嫩枝扦插生根及解剖学分析和酶活性变化[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(1): 107 – 114.
QIAN Jialian, LI Yingchao, XU Huihui, *et al.* Rooting, anatomical analysis and changes of enzyme activity of softwood cuttings of *Quercus variabilis* at different ages [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(1): 107 – 114.
- [15] 王丹, 李熙颜, 颜廷雨, 等. 不同季节平茬对云南松生物量分配与异速生长的影响[J]. 西南农业学报, 2023, **36**(1): 47 – 52.
WANG Dan, LI Xiyan, YAN Tingyu, *et al.* Effect of flat in different seasons on biomass allocation and allometric growth of *Pinus yunnanensis* [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2023, **36**(1): 47 – 52.
- [16] 蔡年辉, 唐军荣, 李亚麒, 等. 云南松苗木根系可塑性对平茬高度的响应[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, **44**(6): 1305 – 1313.
CAI Nianhui, TANG Junrong, LI Yaqi, *et al.* Response of root plasticity of *Pinus yunnanensis* seedlings to stumping height [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Science Edition)*, 2022, **44**(6): 1305 – 1313.
- [17] 王艺霖, 周玫, 李苹, 等. 根系形态可塑性决定黄栌幼苗在瘠薄土壤中的适应对策[J]. 北京林业大学学报, 2017, **39**(6): 60 – 69.
WANG Yilin, ZHOU Mei, LI Ping, *et al.* Root morphological plasticity determining the adaptive strategies of *Cotinus coggygria* seedlings in barren soil environment [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, **39**(6): 60 – 69.
- [18] 陈甲瑞, 王小兰. 藏东南高山松异速生长关系的海拔差异性[J]. 湖南农业科学, 2021(2): 29 – 32.
CHEN Jiarui, WANG Xiaolan. Altitude differences of allometric growth relationship of *Pinus densata* in Southeast Tibet [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(2): 29 – 32.
- [19] WARTON D I, WRIGHT I J, FALSTER D S, *et al.* Bivariate line-fitting methods for allometry [J]. *Biological Reviews*,

- 2006, **81**(2): 259 – 291.
- [20] WARTON D I, DUURSMA R A, FALSTER D S, *et al.* SMATR 3-an R package for estimation and inference about allometric lines [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, **3**(2): 257 – 259.
- [21] 蔡年辉, 唐军荣, 李亚麒, 等. 植物生长调节剂对云南松苗木根系形态的影响[J]. 河南农业大学学报, 2022, **56**(3): 381 – 391.
- CAI Nianhui, TANG Junrong, LI Yaqi, *et al.* Effects of plant growth regulators on root morphology of *Pinus yunnanensis* seedlings [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2022, **56**(3): 381 – 391.
- [22] 石祖梁, 杨四军, 张传辉, 等. 氮肥运筹对稻茬小麦土壤硝态氮含量、根系生长及氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(5): 118 – 122.
- SHI Zuliang, YANG Sijun, ZHANG Chuanhui, *et al.* Effect of nitrogen application on soil nitrate nitrogen content, root growth and nitrogen utilization of winter wheat in rice-wheat rotation [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(5): 118 – 122.
- [23] 李盼盼. 杨树人工林细根的空间分布特征及其季节动态[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- LI Panpan. *Fine Root Distribution Patterns and Seasonal Dynamics of Poplar Plantation* [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.
- [24] 刘海. 柏木细根形态的季节动态及其对土壤环境变化的响应[D]. 成都: 四川农业大学, 2020.
- LIU Hai. *Seasonal Dynamics of Fine Root Morphology of Cupressus funebris and Its Response to Soil Environment Change* [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2020.
- [25] 刘健, 贺晓, 包海龙, 等. 毛乌素沙地沙柳细根分布规律及与土壤水分分布的关系[J]. 中国沙漠, 2010, **30**(6): 1362 – 1366.
- LIU Jian, HE Xiao, BAO Hailong, *et al.* Distribution of fine roots of *Salix psammophila* and its relationship with soil moisture in Mu Us Sandland [J]. *Journal of Desert Research*, 2010, **30**(6): 1362 – 1366.
- [26] 张晓蕾, 曾凡江, 刘波, 等. 塔干沙漠南缘骆驼刺幼苗根系生长和分布对不同灌溉量的响应[J]. 中国沙漠, 2011, **31**(6): 1459 – 1466.
- ZHANG Xiaolei, ZENG Fanjiang, LIU Bo, *et al.* Effects of irrigation on root growth and distribution of the seedlings of *Alhagi sparsifolia* Shap. in the Taklimakan Desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, **31**(6): 1459 – 1466.
- [27] 金可默. 作物根系对土壤异质性养分和机械阻力的响应及其调控机制研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- JIN Kemo. *Root Responses to Heterogeneous Nutrient Distribution and Soil Mechanical Impedance and Management Strategy* [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [28] CLARK L J, PRICE A H, STEELE K A, *et al.* Evidence from near-isogenic lines that root penetration increases with root diameter and bending stiffness in rice [J]. *Functional Plant Biology*, 2008, **35**(11): 1163 – 1171.
- [29] 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 Hao, GAO Guoqiang, MA Yaoyuan, *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.
- [30] BAUHUS J, KHANNA P K, MENDEN N. Aboveground and belowground interactions in mixed plantations of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii* [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, **30**(12): 1886 – 1894.
- [31] 陈磊, 王盛锋, 刘荣乐, 等. 不同磷供应水平下小麦根系形态及根际过程的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(2): 324 – 331.
- CHEN Lei, WANG Shengfeng, LIU Rongle, *et al.* Changes of root morphology and rhizosphere processes of wheat under different phosphate supply [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, **18**(2): 324 – 331.
- [32] 夏菲. 黄土高原子午岭辽东栎幼苗根系形态结构特征的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012.
- XIA Fei. *A Study on the Root Morphological and Structural Characteristics of Quercus wutaishanica Seedlings in the Ziwuling Mountains of the Loess Plateau* [D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2012.
- [33] 覃桂丽, 玉舒中. 降香黄檀根系性状对石灰岩石砾的适应响应[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, **43**(3): 24 – 32.
- QIN Guili, YU Shuzhong. Adaptive response of root characteristics of *Dalbergia odorifera* to limestone gravel [J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Science)*, 2023, **43**(3): 24 – 32.

- [34] 马维玲, 石培礼, 李文华, 等. 青藏高原高寒草甸植株性状和生物量分配的海拔梯度变异[J]. *中国科学: 生命科学*, 2010, **40**(6): 533 – 543.
MA Weiling, SHI Peili, LI Wenhua, *et al.* The change of individual plant traits and biomass allocation in alpine meadow with elevation variation on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2010, **40**(6): 533 – 543.
- [35] LIU Fulai, ANDERSEN M N, JENSEN C R. Root signal controls pod growth in drought-stressed soybean during the critical, abortion-sensitive phase of pod development [J]. *Field Crops Research*, 2004, **85**(2/3): 159 – 166.
- [36] 姚彩艳, 汪晓丽, 盛海君, 等. NaCl和PEG胁迫对玉米幼苗根系生长的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2007, **28**(4): 42 – 46.
YAO Caiyan, WANG Xiaoli, SHENG Haijun, *et al.* Effects of osmotic stress caused by NaCl or polyethylene glycol on root growth of maize at seedling stage [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2007, **28**(4): 42 – 46.
- [37] 杨敏, 汪季, 高君亮, 等. 植物生长延缓剂对盆栽柠条根系形态的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2011, **32**(2): 300 – 304.
YANG Min, WANG Ji, GAO Junliang, *et al.* Effects of plant growth retardants on root morphology of potted *Caragana* [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2011, **32**(2): 300 – 304.
- [38] 陈晓娜, 高永, 赵纳祺, 等. 羊柴根系对毛乌素盐碱状况的适应性评价[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2017, **45**(8): 89 – 94.
CHEN Xiaona, GAO Yong, ZHAO Naqi, *et al.* Adaptation evaluation of saline-alkali condition on roots of *Hedysarum laeve* in Mu Us sandy land [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2017, **45**(8): 89 – 94.
- [39] 闫美芳, 张新时, 周广胜, 等. 不同树龄杨树人工林的根系呼吸季节动态[J]. *生态学报*, 2010, **30**(13): 3449 – 3456.
YAN Meifang, ZHANG Xinshi, ZHOU Guangsheng, *et al.* Seasonal dynamics of root respiration in poplar plantations at different developmental stages [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(13): 3449 – 3456.
- [40] BOND B J. Age-related changes in photosynthesis of woody plants [J]. *Trends in Plant Science*, 2000, **5**(8): 349 – 353.