

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第7期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.07.012

论文标题： 大青山不同林龄、密度油松人工林细根生物量及其与土壤养分的关系

作　　者： 李雪慧，何炎红，白宇阳，等

收稿日期： 2025-07-10

引文格式： 李雪慧,何炎红,白宇阳,等.大青山不同林龄、密度油松人工林细根生物量及其与土壤养分的关系[J].中南林业科技大学学报,2026,46(7):121-132.

Li X H, He Y H, Bai Y Y, et al. Relationship between fine root biomass and soil nutrients in *Pinus tabulaeformis* plantations with different stand ages and densities in Daqing mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):121-132.

相关论文推荐

Recommended articles

2个径级油松细根对土壤水分条件和草本根系竞争的季节性响应

Seasonal responses of *Pinus tabulaeformis* fine roots of two diameter classes to soil water content and herb root competition

林下植被对胡桃楸人工林细根生物量和形态特征的影响

Effects of understory vegetation on the fine root biomass and morphological characteristics in *Juglans mandshurica* plantation

紫椴幼树叶片和细根生理与解剖性状对平茬高度的响应

Responses of physiological and anatomical traits of leaves and fine roots to stumping height of *Tilia amurensis*

小兴安岭次生林细根及枯落物分解影响因素的预测及对不同抚育间伐强度的响应

Prediction of factors affecting fine root and litter decomposition of secondary forests in Lesser Khingan and their responses to different thinning intensities

江南油杉细根生物量空间分布及其对土壤水分的响应

Spatial structure of fine root biomass and its response to soil moisture of *Keteleeria cyclolepis* Flous

黔中地区马尾松针阔混交林细根性状空间变异特征

Spatial variation of root functional traits of *Pinus massoniana* mixed forest in central Guizhou

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.07.012
http: //qks.csuft.edu.cn

大青山不同林龄、密度油松人工林细根生物量及其与土壤养分的关系

李雪慧[1]，何炎红[1]，白宇阳[1]，张海东[2]，梁鸿鉴[1]，谢智财[1]
（1. 内蒙古农业大学，内蒙古 呼和浩特 010019；2. 内蒙古自治区林业科学研究院，内蒙古 呼和浩特 010010）

摘　要：【目的】明晰林龄、密度与细根、土壤养分的关系，为大青山区油松人工林的科学经营与管理提供理论依据。【方法】设置 8 种不同林龄、密度（幼龄林中密度、幼龄林高密度、中龄林低密度、中龄林中密度、中龄林高密度、成熟林低密度、成熟林中密度、成熟林高密度）的油松 *Pinus tabulaeformis* 人工林样地 24 块。采用根钻法，分 2 层（0 ～ 20、20 ～ 30 cm）采集细根样品及土壤样品，揭示不同林龄、密度下细根生物量、形态特征及其与土壤养分的关系。【结果】细根生物量、根长密度、根表面积密度皆集中在 0 ～ 20 cm 土层。在幼龄林随着密度的增加，细根表现出增长的趋势；在中龄林至成熟林，随着密度增加，细根表现为先增后降的趋势；细根总生物量、根长密度、根表面积密度皆在中龄林中密度达到最大值，分别为 411.60 g/m^2、830.87 m/m^2、224.05 m^2/m^3。土壤有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效磷含量与细根生物量、根长密度、根表面积密度呈正相关，而与细根比根长、比表面积呈负相关。【结论】对大青山油松人工林进行科学经营管理时，结合林龄与密度的协同影响，幼龄林阶段宜采用高密度种植模式，中龄林及成熟林阶段宜采用中密度种植模式，更有利于促进林木生长发育。

关键词：油松；细根生物量；林龄；林分密度；细根形态；土壤养分
中图分类号：S718.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)07-0121-12

Relationship between fine root biomass and soil nutrients in *Pinus tabulaeformis* plantations with different stand ages and densities in Daqing mountain

Li Xuehui[1], He Yanhong[1], Bai Yuyang[1], Zhang Haidong[2], Liang Hongjian[1], Xie Zhicai[1]

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Autonomous Region Forestry Science and Technology Research Institute, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract:【Objective】The fine root biomass and morphological characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantation with different forest age and density in Daqing mountain of Hohhot City, Inner Mongolia were studied, and the relationship between forest age and density and fine roots and soil nutrients was clarified, so as to provide a theoretical basis for the scientific management of *Pinus tabulaeformis* plantation in Daqing mountain area.【Method】Twenty-four plots of *Pinus tabuliformis* plantations were established, comprising eight treatment types with different stand age classes and densities: young stands with medium density, young stands with high density, middle-aged stands with low density, middle-aged stands with medium density, middle-aged stands with high density, mature stands with low density, mature stands with medium density, and mature stands with high density. The root coring method was employed to collect fine root and soil samples from two depth layers (0-20 cm and 20-30 cm), investigating fine root biomass, morphological characteristics, and their relationships with soil nutrients under different stand ages and densities.【Result】The fine root biomass, root length density and root surface area density were concentrated in the 0-20 cm layer. In young forests, with the increase of density, fine roots showed an increasing trend. From middle-aged forest to mature forest, the fine roots showed a trend of increasing first and then decreasing with the increase of density. The total biomass, root length density and root surface area density of fine roots reached the maximum of 411.60 g/m^2, 830.87 m/m^2 and 224.05 m^2/m^3 at medium density in middle-aged forest. Soil organic matter, total nitrogen, total carbon, available nitrogen and available phosphorus content were positively correlated with fine root biomass, root length density and root surface

收稿日期（Received）：2025-07-10　　**修订日期**（Revised）：2025-09-16
基金项目：内蒙古自治区自然科学基金项目（2023LHMS03011）；内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目专题（2024JBGS0003-3-1）。
第一作者：李雪慧（lxh20001126@163.com），硕士研究生。　　**通信作者：**何炎红（hyh20012008@imau.edu.cn），教授，博士。
引文格式：李雪慧 , 何炎红 , 白宇阳 , 等 . 大青山不同林龄、密度油松人工林细根生物量及其与土壤养分的关系 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(7):121-132.
Li X H, He Y H, Bai Y Y, et al. Relationship between fine root biomass and soil nutrients in *Pinus tabulaeformis* plantations with different stand ages and densities in Daqing mountain[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(7):121-132.

area density, but negatively correlated with fine root specific root length and specific surface area.【Conclusion】In the scientific management of *Pinus tabulaeformis* plantation in Daqing mountain, combined with the synergistic effect of forest age and density, high-density planting mode should be adopted in the young forest stage, and medium-density planting mode should be adopted in the middle-aged forest and mature forest stage, which is more conducive to promoting the growth and development of trees.

Keywords: *Pinus tabuliformis*; fine root biomass; stand age; stand density; fine root morphology; soil nutrients

植物根系是陆地生态系统的重要组成部分，维持着整个森林生态系统的养分平衡 [1]。植物通过根系从土壤中吸收水分，同时也通过根系本身的腐烂以及根系分泌物向土壤输入有机碳，因此根系是影响水循环和碳循环的重要因素 [2]。植物根系分为粗根和细根，其中细根（直径不大于 2 mm）是森林生态系统根系的重要组成部分 [3]。在全球范围内，高达 1/3 的陆地净初级生产力被分配给细根 [4]，而细根每年对土壤有机碳库的贡献率高达 25% ～ 80%[5]，在物质循环、能量流动中有非常重要的作用 [6]。

在森林生态系统中，林分密度影响着林木个体的生长和发育过程 [7-8]，细根生物量及形态特征也受其影响。关于林分密度对细根生物量的影响，目前研究结论存在较大争议：部分研究表明细根生物量随林分密度增加而显著增多 [9]；另有研究得出相反的减少结论 [10]；还有研究发现二者无显著相关关系 [11]。在细根形态特征方面，有研究发现林分密度与细根形态指标呈正相关关系 [12]，也有研究发现细根形态指标随着密度增大而减小 [13-14]。此外，林龄也同样影响着林木细根 [15]。细根生物量方面，有学者发现随着林龄的增长细根生物量出现先增加后减少的趋势 [16]，也有学者发现细根生物量会随着林龄的增长而增大 [17]，还有学者发现细根生物量随林龄增长无显著变化 [18]。在细根形态特征方面，有研究表明随着林龄的增加细根形态指标呈现先增大后减小的趋势 [15]，也有研究表明随着林龄增长细根形态指标出现减小的趋势 [19]。

大青山是内蒙古中部重要水源涵养地与生态屏障，对改善黄河及华北生态、防治水土流失意义重大。油松 *Pinus tabuliformis* 根系发育良好，抗旱能力强，具有较强适应性。作为大青山地区建群种之一，油松在水土保持、水源涵养及改良土壤等方面作用显著 [20]。在国内已有众多针对不同区域油松细根生物量及形态的研究 [21-22]，但受研究区域的局限性，关于内蒙古大青山油松林细根的研究较少，且多为林龄或密度等单一因素对油松细根的影响。为此，本研究以大青山油松人工林为对象，结合林龄与密度探讨二者与油松细根形态和生物量的关系，以期为大青山区油松人工林的科学经营与管理提供数据支撑。

1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区呼和浩特市大青山（40°34′ ～ 41°14′N，109°47′ ～ 112°17′E），东起呼和浩特大黑河上游谷地，西至包头昆都仑河，海拔 1 800 ～ 2 000 m，主峰大青山海拔 2 338 m。年均气温 2 ℃，无霜期较短，约为 100 d。全年平均降水日数 72 d，且主要集中在 6—9 月，占全年降水日数的 57%；其中 7—8 月降水日数最多，占全年的 31%。年平均降雪日数 22.2 d，年最多降雪日数 42.2 d。土壤类型以山地栗钙土、山地典型棕褐土、山地淋溶褐土、山地草甸草原土为主。植被主要为次生白桦 *Betula platyphylla*、山杨 *Populus davidiana*、油松、华北落叶松 *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*、山杏 *Prunus sibirica*、虎榛子 *Ostryopsis davidiana*、绣线菊 *Spiraea salicifolia*、珍珠梅 *Sorbaria sorbifolia*、线叶菊 *Filifolium sibiricum*、千里香 *Murraya paniculata* 等。

2 研究方法

2.1 样地设置及取样处理

通过前期对研究区的踏查，于 2024 年 3—4 月在大青山雅玛图森林公园内选择了 8 种林分结构（幼龄林中密度、幼龄林高密度、中龄林低密度、中龄林中密度、中龄林高密度、成熟林低密度、成熟林中密度、成熟林高密度）样地各 3 块，共 24 块，样地大小 20 m×20 m。每块样地选择 5 棵样树。样地具体概况见表 1。采用土钻法（土钻直径 *d* 为 5 cm）垂直方向分 2 层取样（0 ～ 20、20 ～ 30 cm）。采用钻具采集土样后，将其装入对应编号的自封袋中；按相同方法额外采集 2 层指定深度土层的土壤样品，分装至已编号的小自封袋。随后，将所有土样放入冷藏箱低温保鲜，统一带回实验室开展进一步处理与分析。

表 1　样地基本信息
Table 1　Basic information of sample plots

类型编码 Type code	林分结构类型 Stand structure type	平均林龄 Average stand age /a	林分密度 Stand density /(株·hm^{-2})	海拔 Altitude /m	坡向 Aspect	纬度 Latitude（N）	经度 Longitude（E）
YZ	幼龄林中密度	16	2 603±29	1 184.8	阳坡	40°55′53″	111°55′59″
YG	幼龄林高密度	18	3 406±45	1 174.0	阳坡	40°55′53″	111°55′59″
ZD	中龄林低密度	23	1 692±27	1 214.0	阳坡	40°56′25″	111°55′51″
ZZ	中龄林中密度	21	2 540±22	1 224.8	阳坡	40°56′23″	111°56′12″
ZG	中龄林高密度	21	3 332±27	1 237.1	阳坡	40°56′32″	111°55′59″
CD	成熟林低密度	41	1 678±19	1 225.2	阳坡	40°56′15″	111°56′09″
CZ	成熟林中密度	41	2 544±13	1 244.2	阳坡	40°56′24″	111°56′03″
CG	成熟林高密度	41	3 334±20	1 252.5	阳坡	40°56′25″	111°55′56″

2.2　样品处理及测定

2.2.1　细根处理及测定

将带回实验室的样品过 2 mm 孔径筛，筛选出所有根系后用清水洗净并放入大培养皿；随后用镊子和游标卡尺（精度为 0.01 mm）等工具小心挑出直径不大于 2.0 mm 的油松细根，并根据细根的颜色、外形、弹性及根皮与中柱分离的难易程度，鉴别挑出活根 [23]。

将处理好的活根放入透明托盘中，用扫描仪（Expression 10000XL）扫描根系形态，然后用根系图像分析软件（Win RHIZO PRO 2022）获得根系的总长度（L，单位：m）、平均直径（d_r，单位：cm）、总表面积（S，单位：cm^2）等数据。扫描完成后，将细根样品置于 80 ℃烘箱烘干至恒定质量，用电子天平（精确度 0.001 g）称量细根干质量（m，单位：g）。根据参考文献 [23]，计算细根的生物量（y，单位：g/m^2）、比根长（L_{SR}，单位：m/g）、比表面积（S_{RA}，单位：cm^2/g）、根长密度（ρ_L，单位：m/m^2）、根表面积密度（ρ_S，单位：m^2/m^3）。

2.2.2　土样处理及测定

将带回实验室的土样挑出全部根系、石块、枯落物、动植物残体后研磨，过 2 mm 孔径筛，之后将筛分完的土样在室温下风干、保存。对于额外取回的土样及时采用烘干法测定土壤含水率。对风干后的土样进行化学性质测定：使用元素分析仪（VARIOMacro，德国 Elementar）测定土壤全 C 和全 N 含量；使用连续流动分析仪（AA3，德国 Bran+Luebbe），以钼锑抗比色法测定土壤全 P 含量 [24]；分别采用重铬酸钾法、钼锑抗混合显色剂法、扩散吸收法测定土壤有机质、速效磷和碱解氮含量 [25]。

2.3　数据分析

采用 Excel 2021 软件对原始数据进行初步整理计算。运用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），并结合 Duncan 多重比较法，检验不同林分结构下油松细根形态、生物量和土壤养分指标的差异性。通过多因素方差分析，探究林龄、密度及土层深度对油松细根形态特征的影响。借助通径分析，明确土壤养分与细根生物量的内在关系。利用 Origin 2021 软件完成根系形态指标的可视化制图，并开展土壤养分与细根形态的相关性分析。

3　结果与分析

3.1　林龄、密度与油松细根的关系

3.1.1　林龄、密度与油松细根的生物量分析

由表 2 可知，不同林龄、密度下细根总生物量存在差异。在低密度下，细根生物量随着林龄的增长显著升高。在中密度下，不同林龄间的细根总生物量存在差异，具体表现为：中龄林及成熟林细根总生物量显著高于幼龄林，其中 ZZ 细根总生物量最大，为 411.60 g/m^2；0 ～ 20 cm 土层细根生物量随着林龄的增长表现出显著的先升高后降低趋势，20 ～ 30 cm 土层细根生物量则是成熟林显著高于中龄林，幼龄林与中龄林、成熟林无显著差异。在高密度下，不同林龄间的细根总生物量存在差异，具体表现为：幼龄林及中龄林细根总生物量显著高于成熟林，其中 ZG 细根总生物量最大，为 318.29 g/m^2。

由表 2 可知，幼龄林内，随着林分密度的增加，0 ～ 20 cm 层细根生物量显著升高，20 ～ 30 cm 层细根生物量显著降低。中龄林及成熟林内，细根总生物量及 0 ～ 20 cm 层细根生物量随着密度的增加表现出显著的先升高后降低趋势；20 ～ 30 cm 层细根生物量在中龄林中无显著差异，在成熟林中密度细根生物量显著高于高密度，低密度与中、高密度无显著差异。

表 2　林分结构对细根生物量的影响 †

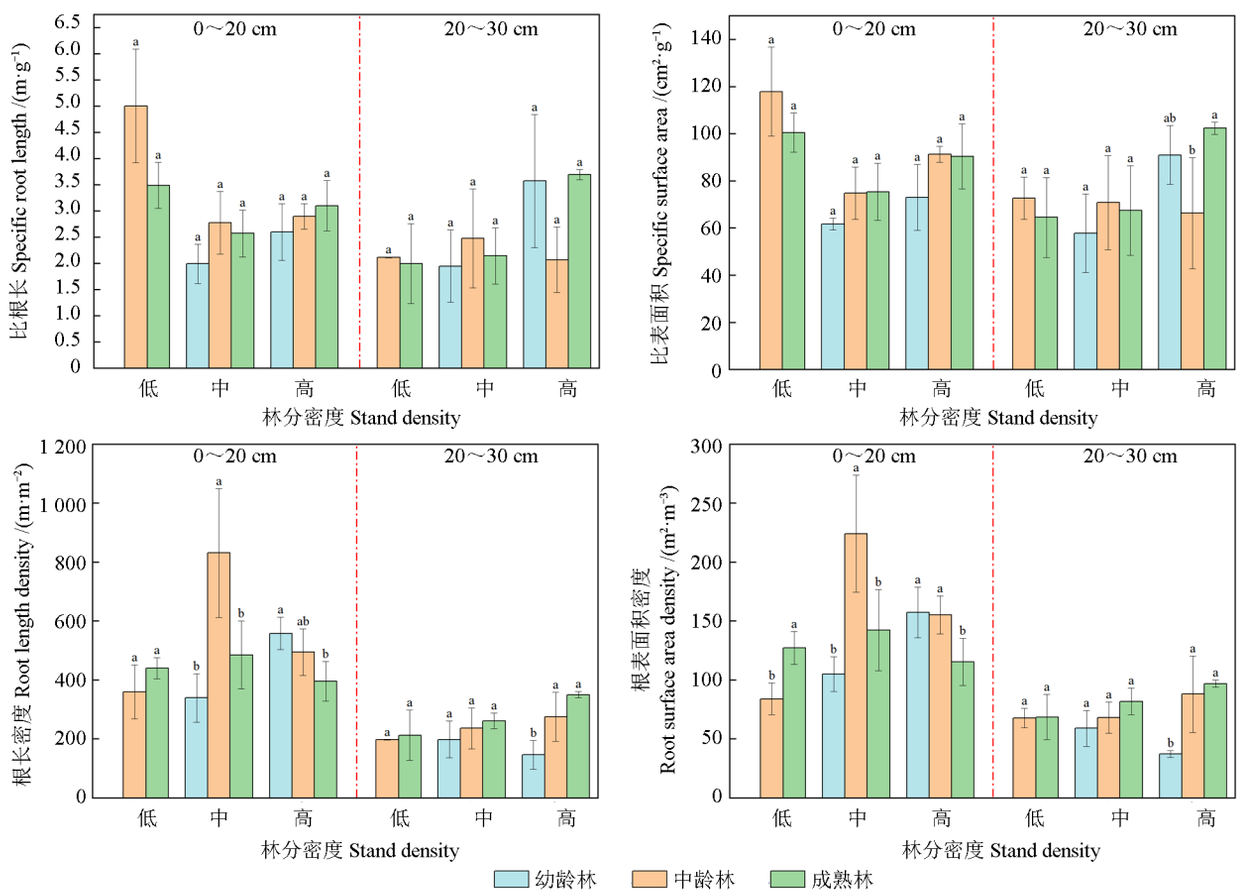
Table 2　Effects of stand structure on fine root biomass　　g/m²

类型编码 Type code	林分结构类型 Stand structure type	细根生物量 Biomass of fine root		
		0 ～ 20 cm	20 ～ 30 cm	总计 Total
YZ	幼龄林中密度	176.10±7.16 Cb	102.54±5.35 ABa	278.64±12.47 Ba
YG	幼龄林高密度	254.40±3.60 Aa	41.25±4.07 Bb	295.65±7.58 Aa
ZD	中龄林低密度	74.14±12.13 Bc	93.20±0.00 Ba	167.35±12.13 Bc
ZZ	中龄林中密度	313.14±40.29 Aa	98.46±14.35 Ba	411.60±53.57 Aa
ZG	中龄林高密度	180.44±11.18 Bb	137.85±38.95 Aa	318.29±46.37 Ab
CD	成熟林低密度	130.15±10.15 Ab	106.10±4.62 Aab	236.25±12.92 Ab
CZ	成熟林中密度	229.75±14.68 Ba	128.96±19.76 Aa	358.71±33.44 Aa
CG	成熟林高密度	127.15±3.86 Cb	94.73±5.29 Ab	221.88±9.13 Bb

† 不同大写字母表示同一密度不同林龄间差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一林龄不同密度间差异显著（$P < 0.05$）。
Different uppercase letters indicate that the same density has a significant difference between different forest ages ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicate that the same forest age has a significant difference between different densities ($P < 0.05$).

3.1.2　林龄、密度与油松细根的形态分析

由图 1 可知，比根长在同一林分密度不同林龄间差异不显著。比表面积在高密度 20 ～ 30 cm 层不同林龄间存在差异，具体表现为成熟林显著高于中龄林，幼龄林与中龄林、成熟林无显著差异。根长密度及根表面积密度方面，0 ～ 20 cm 层中密度随着林龄的增长表现出显著的先升高后降低趋势；0 ～ 20 cm 层高密度不同林龄间存在差异，具体表现出幼龄林显著高于成熟林，幼龄林与中龄林无显著差异。根表面积密度方面，0 ～ 20 cm 层低密度随着林龄增长而显著升高；20 ～ 30 cm 层高密度不同林龄间存在差异，具体表现出中龄林及成熟林显著高于幼龄林，中龄林与成熟林无显著差异。

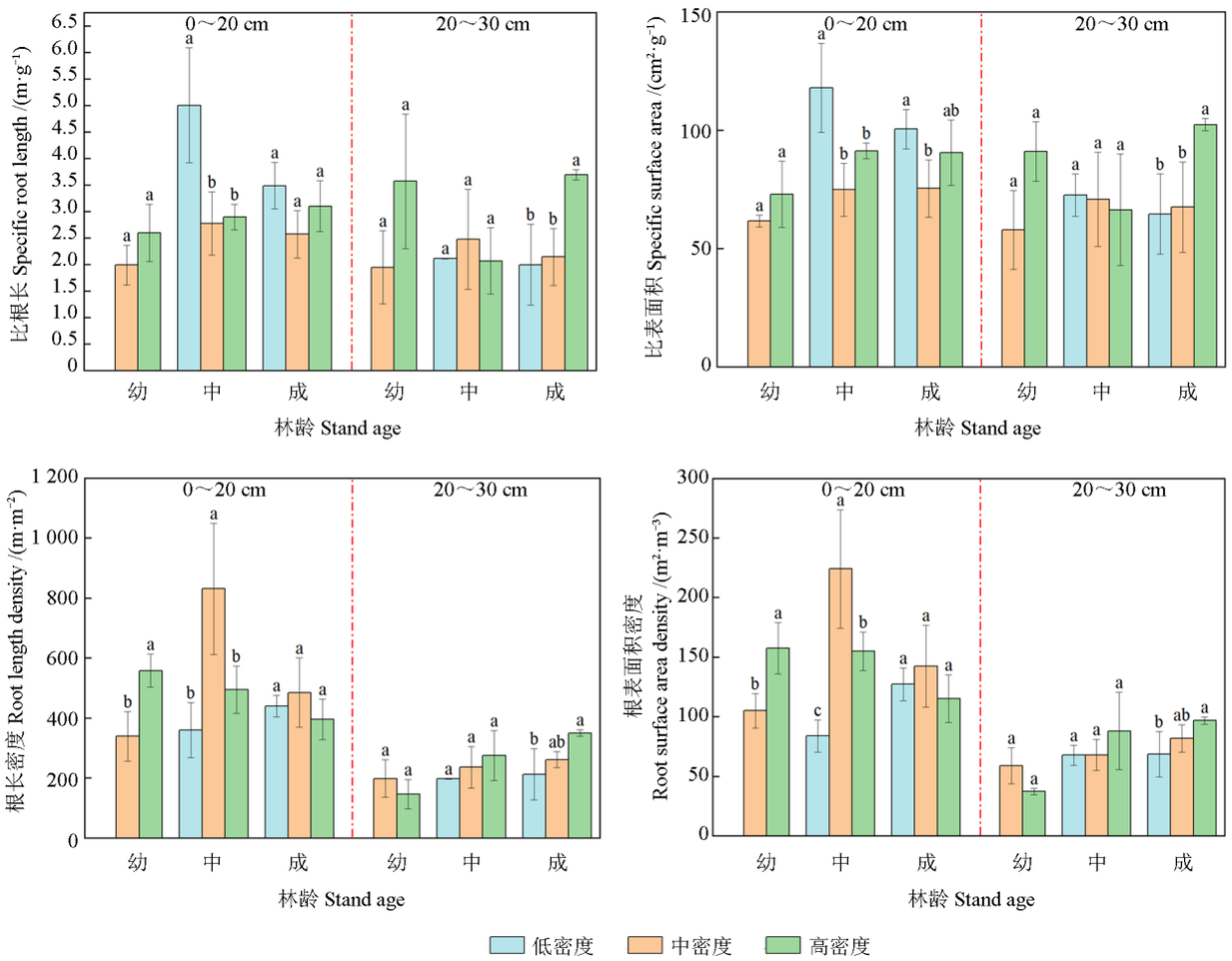


不同小写字母表示同密度同土层不同林龄间差异显著（$P < 0.05$）。
Different lowercase letters indicate significant differences among different stand ages under the same density and within the same soil layer ($P < 0.05$).

图 1　不同林龄下油松细根形态变化

Fig. 1　Changes in fine root morphology of *P. tabuliformis* under different ages

由图 2 可知，比根长及比表面积方面，在中龄林 0 ～ 20 cm 层不同密度间存在差异，具体表现为低密度显著高于中、高密度；在成熟林 20 ～ 30 cm 层不同密度间存在差异，具体表现为高密度显著高于低、中密度；在成熟林 0 ～ 20 cm 层不同密度间的比表面积存在差异，具体表现为低密度显著高于中密度，高密度与低、中密度无显著差异。在 0 ～ 20 cm 土层，幼龄林的根长密度、根表面积密度随着密度的增加显著升高，中龄林的根长密度、根表面积密度随着密度的增加表现出显著的先升高后降低趋势；在成熟林 20 ～ 30 cm 层不同密度间的根长密度、根表面积密度存在差异，具体表现为高密度显著高于低密度，中密度与低、高密度无显著差异。



不同小写字母表示同土层同林龄不同密度间差异显著（$P < 0.05$）。
Different lowercase letters indicate significant differences among different densities at the same stand age and within the same soil layer ($P < 0.05$).

图 2　不同密度下油松细根形态变化
Fig. 2　Morphological changes of fine roots of *P. tabuliformis* under different densities

3.1.3　林龄、密度、土层与油松细根形态指标的方差分析

由表 3 可知，林龄的单独作用对根长密度及根表面积密度有极显著影响。密度、土层深度单独作用对比根长、比表面积、根长密度、根表面积密度有极显著影响。林龄与密度的交互作用对比根长有显著影响，对根长密度、根表面积密度有极显著影响。林龄与土层深度的交互作用仅对根长密度有显著影响。密度与土层深度的交互作用对比根长、比表面积有极显著影响，对根表面积密度有显著影响。林龄、密度及土层深度的交互作用对根长密度、根表面积密度有极显著影响。

3.2　林龄、密度与土壤理化性质的关系

3.2.1　林龄、密度与土壤的水分分析

由表 4 可知，同林分结构中不同土层间土壤含水率差异显著，且随着土层深度的增加而下降。在幼龄林和中龄林中，土壤含水率皆随着密度的升高而升高；在成熟林中，土壤含水率随着密度的升高呈现先升高后降低的趋势。在 0 ～ 20 cm 土层，同一密度下土壤含水率随着林龄的增长而升高。

表 3 林龄、密度、土层对油松细根形态指标影响的方差分析（*F* 值）†

Table 3 Variance analysis of the effects of stand age, density and soil layer on fine root morphological indexes of *P. tabuliformis* (*F* value)

形态指标 Morphological index	*F* 值 *F* value						
	林龄 Forest age	密度 Stand density	土层深度 Soil depth	林龄 × 密度 Age×density	林龄 × 土层深度 Age×Soil depth	密度 × 土层深度 Density×Soil depth	林龄 × 密度 × 土层深度 Age×Density×Soil depth
比根长 Specific root length	0.366	6.455**	10.11**	4.320*	3.259	9.490**	1.147
比表面积 Specific root surface area	1.639	8.659**	9.055**	2.485	1.989	6.126**	1.491
根长密度 Root length density	7.143**	7.331**	98.108**	5.388**	3.935*	2.143	10.086**
根表面积密度 Root surface area density	9.566**	10.600**	109.883**	4.877**	2.921	4.014*	12.344**

† × 代表交互作用；* 代表 $P < 0.05$；** 代表 $P < 0.01$。× represents the interaction effect; * represents $P < 0.05$; ** represents $P < 0.01$.

表 4 不同林龄、密度下土壤含水率 †

Table 4 Soil moisture content under different forest ages and densities %

土层 Soil layer /cm	土壤含水率 Soil moisture content							
	YZ	YG	ZD	ZZ	ZG	CD	CZ	CG
0 ～ 20	4.71±0.39 a	5.79±0.80 a	10.27±0.80 a	10.69±1.29 a	13.68±3.40 a	11.97±2.28 a	15.13±1.63 a	14.25±2.31 a
20 ～ 30	3.80±0.60 b	5.87±0.87 b	9.47±0.89 b	10.15±0.94 b	12.93±3.31 b	9.24±1.96 b	12.56±1.49 b	11.82±1.43 b

† 不同小写字母表示同列数据差异显著（$P < 0.05$）。Different lowercase letters indicate significant differences in data within the same column ($P < 0.05$).

3.2.2 林龄、密度与土壤的养分分析

由表 5 可知，在低密度下，随着林龄的增长 0 ～ 30 cm 层土壤有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效磷含量均显著升高。在中密度下，不同林龄间的土壤养分含量存在差异，具体表现为：在 0 ～ 20 cm 层，有机质、全氮、全碳、碱解氮含量随林龄增长呈现先升高后降低的趋势，速效磷含量则是幼龄林显著高于中龄、成熟林，全磷含量在成熟林时显著高于幼龄、中龄林；在 20 ～ 30 cm 层，幼龄林的有机质、全氮、碱解氮、速效磷含量显著高于中龄、成熟林；随林龄增长，全碳含量则表现出显著先升高后降低趋势，而全磷含量则显著上升。在高密度下，除全氮含量外，同层不同林龄间土壤养分含量存在差异，具体表现为：在 0 ～ 20 cm 层，有机质、碱解氮含量随着林龄的增长显著升高，全碳、全磷含量在幼龄林时显著低于中龄、成熟林，速效磷含量在成熟林时显著高于幼龄、中龄林；在 20 ～ 30 cm 层，随着林龄的增长有机质、全磷、碱解氮含量显著升高，全碳含量呈现先升高后降低的趋势，速效磷含量呈现先降低后升高的趋势。

由表 5 可知，在幼龄林内，随着密度的增加同层土壤有机质、全碳、碱解氮、速效磷含量均显著降低，20 ～ 30 cm 层全氮含量显著降低。在中龄林内，除 0 ～ 20 cm 层全氮含量外，不同密度间的土壤养分存在差异，具体表现为：在 0 ～ 20 cm 层，有机质、全碳、碱解氮含量呈现先升高后降低的趋势，全磷含量呈现先降低后升高的趋势，速效磷含量在低密度时显著低于中、高密度；在 20 ～ 30 cm 层，有机质含量在低密度时显著高于中密度，全氮含量在高密度时显著低于中、低密度，全碳含量随密度增加呈现先升高后降低的趋势，全磷含量在低密度时显著低于中、高密度，碱解氮含量在低密度时显著高于中、高密度，速效磷含量在中密度时显著高于低密度。在成熟林内，不同密度土壤养分含量存在差异，具体表现为：在 0 ～ 20 cm 层，有机质、全氮、全碳含量在低密度时显著高于中、高密度，全磷含量随着密度的增加显著升高，碱解氮、速效磷含量随着密度的增加呈现先降低后升高的趋势；在 20 ～ 30 cm 层，有机质、碱解氮含量呈现先降低后升高的趋势，全氮、全碳含量在低密度时显著高于高密度，全磷、速效磷含量则在高密度时显著高于低密度。

3.2.3 细根形态特征与土壤养分的相关性和通径分析

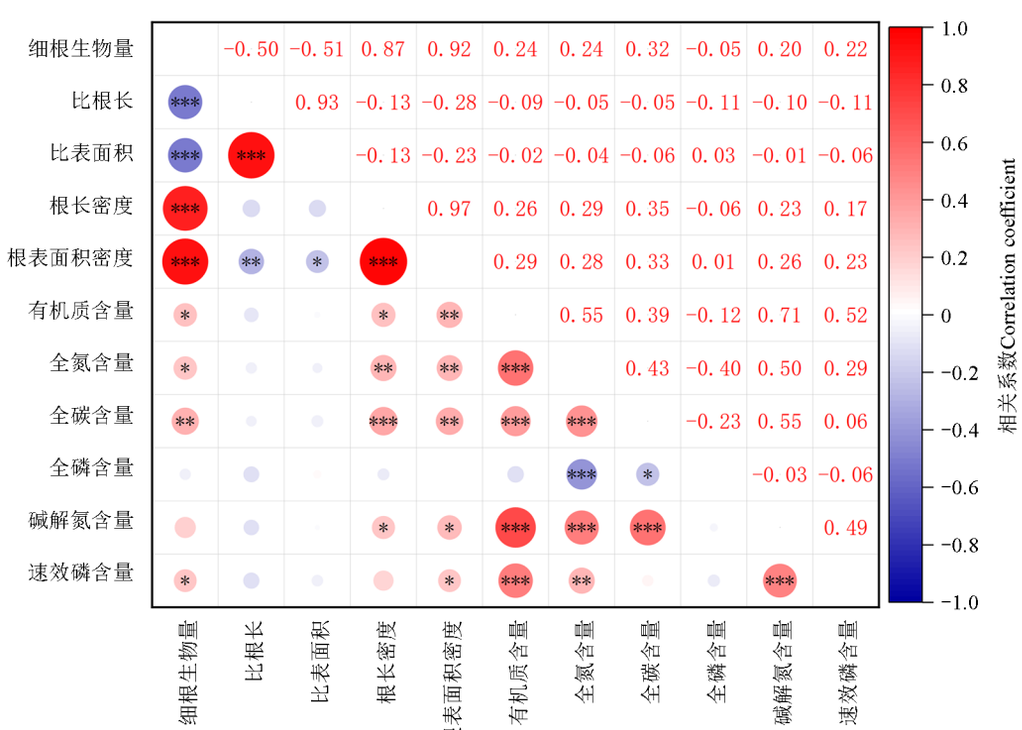
由图 3 可知，细根生物量、根长密度、根表面积密度与 0 ～ 30 cm 土壤层中有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效磷含量呈正相关。细根生物量与有机质、全氮、速效磷含量呈显著正相关（*r* 值分别为 0.24、0.24、0.22），与全碳含量呈极显著正相关（*r* 值为 0.32）。根长密度与有机质、碱解氮含量呈显著正相关（*r* 值分别为 0.26、0.23），与全氮含量呈极显著正相关（*r* 值为 0.29），与全碳含量呈极显著正相关（*r* 值为 0.35）。根表面积密度与全磷含量呈正相关，与碱解氮、速效磷含量呈显著正相关（*r* 值分别为 0.26、0.23），与有机质、全氮、全碳含量呈极显著正相关（*r* 值分别为 0.29、0.28、0.33）。全磷含量与细根生物量、

表 5　不同林分结构下土壤养分 †

Table 5　Soil nutrients under different stand structures

类型编码 Type code	土层 Soil layer /cm	有机质含量 Organic content /(g·kg^{-1})	全氮含量 Total nitrogen content /(g·kg^{-1})	全碳含量 Full carbon content /(g·kg^{-1})	全磷含量 Total phosphorus content /(g·kg^{-1})	碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen content /(μg·g^{-1})	速效磷含量 Rapidly available phosphorus content /(μg·g^{-1})
YZ	0 ～ 20	16.26±2.00 Ba	1.38±0.19 Aa	11.58±0.66 Ba	0.82±0.04 Ba	66.89±7.91 Ba	29.60±3.62 Aa
	20 ～ 30	17.55±1.89 Aa	1.55±0.22 Aa	12.52±2.00 Ba	0.83±0.06 Ca	68.44±7.65 Aa	23.80±2.57 Aa
YG	0 ～ 20	4.78±1.34 Cb	1.32±0.26 Aa	9.77±0.78 Bb	0.76±0.09 Ba	45.89±6.17 Cb	20.83±2.14 Bb
	20 ～ 30	7.21±1.18 Cb	1.00±0.13 Ab	7.47±0.73 Bb	0.81±0.22 Ca	39.67±6.06 Cb	16.85±3.98 Ab
ZD	0 ～ 20	11.09±2.08 Bc	1.32±0.16 Ba	13.53±0.92 Bb	0.97±0.05 Ab	71.56±9.76 Bb	15.90±2.79 Bb
	20 ～ 30	9.92±1.81 Ba	1.28±0.18 Ba	10.78±1.14 Bb	0.95±0.07 Ab	62.22±7.38 Ba	11.95±1.28 Bb
ZZ	0 ～ 20	18.15±0.98 Aa	1.52±0.12 Aa	29.65±2.46 Aa	0.83±0.13 Bc	94.89±14.05 Aa	20.78±3.22 Ba
	20 ～ 30	7.55±1.64 Bb	1.18±0.15 Ba	27.90±3.28 Aa	1.20±0.27 Ba	52.22±6.65 Bb	14.40±1.90 Ba
ZG	0 ～ 20	15.07±1.37 Bb	1.33±0.22 Aa	13.17±1.82 Ab	1.42±0.11 Aa	66.11±13.61 Bb	19.60±3.72 Ba
	20 ～ 30	8.73±1.87 Bab	0.97±0.10 Ab	9.07±1.93 Ab	1.35±0.15 Ba	47.33±7.63 Bb	13.18±1.92 Bab
CD	0 ～ 20	24.06±3.08 Aa	1.65±0.27 Aa	21.12±1.97 Aa	1.03±0.25 Ac	117.44±21.80 Aa	25.77±4.40 Aa
	20 ～ 30	14.69±2.45 Aa	1.32±0.26 Aa	15.23±2.80 Aa	1.05±0.22 Ab	77.67±11.32 Aa	13.34±1.34 Ab
CZ	0 ～ 20	15.68±1.55 Bb	1.15±0.19 Bb	10.82±0.51 Bb	1.30±0.11 Ab	60.44±6.95 Bc	20.78±2.46 Bb
	20 ～ 30	7.34±1.28 Bc	1.07±0.23 Bab	6.05±0.92 Cb	1.49±0.30 Aa	46.00±5.85 Bc	14.16±1.71 Bb
CG	0 ～ 20	17.78±3.66 Ab	1.22±0.17 Ab	11.88±1.67 Ab	1.51±0.16 Aa	76.22±9.55 Ab	29.50±4.46 Aa
	20 ～ 30	11.73±1.36 Ab	0.95±0.21 Ab	7.37±0.87 Bb	1.67±0.14 Aa	56.78±6.50 Ab	16.83±2.25 Aa

† 不同大写字母表示同一密度不同林龄间差异显著，不同小写字母表示同一林龄不同密度间差异显著（$P < 0.05$）。
Different uppercase letters indicate that the same density has a significant difference between different forest ages, and different lowercase letters indicate that the same forest age has a significant difference between different densities ($P < 0.05$).



*. $P < 0.05$; **. $P < 0.01$; ***. $P < 0.001$.

图 3　细根形态特征与土壤理化性质的相关性分析

Fig. 3　Correlation analysis of morphological characteristics of fine roots and physical and chemical properties of soil

比根长、根长密度呈负相关，与比表面积呈正相关。比根长、比表面积与有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效磷含量呈负相关。

通过土壤养分对细根生物量的通径分析（表 6），可以看出土壤有机质、全氮、全碳、全磷、碱解氮、速效磷含量对细根生物量的直接和间接效应。总通径系数由大到小依次为全碳、有机质、全氮、速效磷、碱解氮、全磷含量，其中全磷含

量表现为负效应。直接通径系数绝对值由大到小依次为全碳、碱解氮、速效磷、全氮、全磷、有机质含量，其中全碳、速效磷、全氮、全磷、有机质含量为正效应，碱解氮含量为负效应。间接通径系数绝对值由大到小依次为碱解氮、全磷、有机质、全氮、全碳、速效磷含量，其中碱解氮、有机质、全氮含量为正效应，全磷、全碳、速效磷含量为负效应。

表 6 土壤养分对细根生物量的通径分析
Table 6 Path analysis of soil nutrients on fine root biomass

因子 Factor	总通径系数 Sum of path coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient（→ y）	间接通径系数 Indirect path coefficient						
			总和 Sum（→ X → y）	→ X_1 → y	→ X_2 → y	→ X_3 → y	→ X_4 → y	→ X_5 → y	→ X_6 → y
有机质含量 Organic content（X_1）	0.241	0.094	0.147		0.066	0.152	−0.012	−0.193	0.134
全氮含量 Total nitrogen content（X_2）	0.237	0.121	0.116	0.052		0.167	−0.042	−0.137	0.076
全碳含量 Full carbon content（X_3）	0.318	0.390	−0.072	0.037	0.052		−0.025	−0.150	0.014
全磷含量 Total phosphorus content（X_4）	−0.055	0.105	−0.160	−0.011	−0.049	−0.091		0.007	−0.016
碱解氮含量 Alkali-hydrolyzable nitrogen content（X_5）	0.196	−0.272	0.468	0.067	0.061	0.215	−0.003		0.128
速效磷含量 Rapidly available phosphorus content（X_6）	0.224	0.259	−0.035	0.049	0.036	0.021	−0.007	−0.134	

4 讨 论

4.1 林龄、密度、土层深度与油松细根的关系

4.1.1 对细根数量特征的影响

林龄、密度影响林木个体的生长发育，以及林分的生物量和生产力 [7]，而细根作为树木养分吸收和水分运输的重要器官，其养分和水分吸收直接影响着生态系统的能量流动和物质循环 [26]。本研究表明，中密度下，随着林龄的增长，0 ～ 20 cm 土层细根生物量、根长密度、根表面积密度皆表现出先增加后降低的趋势，与已有研究结果一致 [15-16]。出现该现象的原因是幼龄林树木处于快速生长时期，会将较多的光合产物分配到根系生长上，促使细根大量生长，以扩大根系的吸收面积，更好地从土壤中摄取养分和水分；到中龄林阶段，树木仍保持着一定的生长活力，仍持续生长和积累生物量；进入成熟林阶段，树木生长趋于稳定，树冠竞争加剧，养分需求转向地上部分，导致根系生长投入减少 [27]。低密度下，随着林龄的增长，0 ～ 20 cm 土层细根生物量、根长密度、根表面积密度呈上升趋势，归因于林地空间充足、竞争强度较弱，生物量随着林龄增长而积累。高密度下，随着林龄的增长，0 ～ 20 cm 土层细根生物量、根长密度、根表面积密度呈下降趋势，与王琪 [28] 的研究结论一致，主要是高密度林分土壤养分消耗速率高于再生速率，细根资源获取效率下降。

本研究发现，幼龄林阶段，随着密度增加，0 ～ 20 cm 土层细根生物量、根长密度、根表面积密度显著增加，与鲜李虹等 [13] 对 5 年生毛白杨 *Populus tomentosa* 人工林的研究结果一致。这是由于幼龄林根系尚未充分扩展，个体间地下竞争微弱，密度增加可直接提升群体资源获取能力；中龄林及成熟林阶段，随着密度增加，0 ～ 20 cm 土层细根生物量、根长密度、根表面积密度呈先增加后降低的趋势，与卫朝阳等 [21] 对晋西黄土区油松人工林的研究结果一致，其原因在于低密度阶段土壤空间和光照充裕，密度增加促进细根增长，达到临界密度后，地下空间饱和、竞争超载，导致根系发展减缓 [29]。

4.1.2 对细根分布的影响

本研究发现，在 8 种不同林龄、密度下，细根生物量、根长密度、根表面积密度皆集中于 0 ～ 20 cm 土层，并随土层深度增加呈递减趋势，这与黄林等 [30] 对不同森林类型的研究结果相似。细根生物量、根长密度、根表面积密度与水分、养分吸收直接相关 [31]。土壤养分（如有机质、速效氮）多集中于 0 ～ 20 cm 表层 [32]，且细根分布与土壤水分呈显著正相关 [33]，而深层土壤含水率显著下降 [34]，因此细根多富集于浅层以实现资源捕获效率最大化，在深层分布则较为稀疏。

本研究发现，细根比根长、比表面积与细根生物量、根长密度、根表面积密度呈负相关；林分密度及林龄与密度的交互作用显著影响比根长、

根长密度和根表面积密度。林龄与密度协同调控细根形态特征：幼龄林在低密度下细根倾向于伸长生长，而中成熟林则呈先增后降的趋势。这一规律的核心机制为：幼龄林在低竞争环境中，细根受资源拓殖主导的正效应影响[35]；中龄林至成熟林的低密度阶段呈现资源协同增效[19]，达到临界密度后，竞争抑制与空间限制导致细根生长衰退[36]。此外，林龄、密度及土层的交互作用显著影响根长密度与根表面积密度：高密度下，0 ～ 20 cm 土层根长密度、根表面积密度随林龄显著下降，20 ～ 30 cm 土层则显著升高，与王凯等[37]（樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 人工林）、匡冬姣[16]（杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林）的研究结果一致。这是由于高密度林分表层土壤资源竞争激烈，植物为应对压力，通过增加深层细根分布获取相对稳定的资源。

4.2　不同林龄、密度、土壤养分与油松细根的关系

4.2.1　林龄、密度对土壤养分的影响

林龄和林分密度通过调控植被生长特性、凋落物输入及土壤微环境，显著影响土壤养分含量。本研究表明，林分在低、高密度时，土壤有机质、全磷、碱解氮含量随林龄增长而升高；中密度时，0 ～ 20 cm 土层全碳、碱解氮含量随林龄呈先增后降趋势。这一现象是由于低密度林分林冠透光率高，凋落物输入量随林龄稳定增加且分解速率快，持续提升土壤有机质、全磷、碱解氮含量；高密度林分幼龄至中龄阶段地下竞争消耗养分，成熟期乔木凋落物大量堆积形成物理覆盖层，虽减缓分解但减少养分淋失，呈现有机质“滞后累积”[38]；中密度林分郁闭度适中，乔木凋落物产量高且灌草层凋落物多样性丰富，促进全碳、碱解氮快速累积[39]，成熟林阶段凋落物来源单一化且木质素含量升高，分解速率降低。从林龄维度上来看，幼龄林随着密度增加，土壤有机质、全碳、碱解氮含量下降；中龄林随密度增加土壤全碳、碱解氮含量呈先增后降趋势，这是由于中龄林为资源利用效率最优窗口期，凋落物输入与微生物代谢在适度郁闭下达成平衡，而幼龄林生长竞争使高密度成为养分循环的负向约束。

4.2.2　土壤养分与细根特征的相关性

土壤养分对细根形态分布有着直接影响[40]。本研究表明，细根生物量、根长密度、根表面积密度与土壤有机质、全氮、全碳含量呈显著正相关，与卫朝阳等[21]研究结果一致。0 ～ 20 cm 中密度土层中，土壤有机质、全氮、全碳含量随林龄的增长表现为先增后降，与细根的变化规律一致。这可能是由于土壤有机质和全氮（尤其是表层）为细根生长提供关键养分，植物通过增加生物量、根长密度和根表面积密度构建高吸收效率的根系网络以捕获更多资源[41]。细根比根长、比表面积与土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷含量呈负相关，这可能由于有机质富集的表层土壤团粒结构松散，促进磷、氮吸附，而深层土壤因团粒结构紧密导致养分有效性下降，植物在表层养分富集区通过缩短根长集中吸收，减少对深层低效区域的资源投入[42]。通径分析与相关性分析显示，全碳、全氮含量对细根生物量有明显的正向影响，与谷利茶等[43]关于土壤碳、氮影响细根形态的研究相契合，但其具体作用机制仍需进一步探讨。

5　结　论

1）8 种不同林龄、密度下细根生物量、根长密度、根表面积密度主要集中在 0 ～ 20 cm 土层。幼龄林，随着林分密度的增加，细根表现出伸长生长的趋势；中龄林至成熟林，随着林分密度的增加，细根表现为先增后降的趋势。细根生物量、根长密度、根表面积密度最大值皆出现在中龄林中密度时。2）细根生物量、根长密度、根表面积密度与土壤有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效磷含量呈正相关，细根比根长、比表面积与土壤有机质、全氮、全碳、碱解氮、速效磷含量呈负相关。土壤全氮、全碳含量对细根影响最为显著。3）今后对大青山油松人工林进行科学经营管理时，需结合林龄与密度的协同影响，优化种植模式：幼龄林阶段宜采用高密度种植模式，中龄林及成熟林阶段宜采用中密度种植模式，该经营策略更有利于促进林木生长发育。

参考文献：

[1] 刘思琪 , 满秀玲 , 张頔 , 等 . 多年冻土区非生长季主要乔木树种根系分解及养分释放特征 [J]. 东北林业大学学报 ,2022,50(3):42-50.
Liu S Q, Man X L, Zhang D, et al. Root decomposition and nutrient release characteristics of main tree species in non-growing season in permafrost region[J]. Journal of Northeast Forestry University,2022,50(3):42-50.

[2] Guy A L, Hardy S P, Mamet S D, et al. *Salix arctica* changes root distribution and nutrient uptake in response to subsurface nutrients in high arctic deserts[J]. Ecology,2017,98(8):2158-2169.

[3] Bo H J, Wen C Y, Song L J, et al. Fine-root responses of *Populus*

tomentosa forests to stand density[J]. Forests,2018,9:562.

[4] Jackson R B, Mooney H A, Schulze E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,1997,94:7362-7366.

[5] 王娜 , 程瑞梅 , 肖文发 , 等 . 三峡库区马尾松细根分解及其养分释放 [J]. 林业科学研究 ,2017,30(1):18-24.
Wang N, Cheng R M, Xiao W F, et al. Fine root decomposition and nutrient release of *Pinus massoniana* in the Three Gorges reservoir area[J]. Forest Research,2017,30(1):18-24.

[6] 王力 , 吴福金 , 邓文鑫 , 等 . 马尾松混交林细根生物量研究 [J]. 安徽农业大学学报 ,2013,40(2):225-232.
Wang L, Wu F J, Deng W X, et al. Biomass and nutrient of fine-root in masson pine mixed forest[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2013,40(2):225-232.

[7] Hendricks J J, Aber J D, Nadelhoffer K J, et al. Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems[J]. Ecosystems,2000,3:57-69.

[8] 谷加存 , 肖立娟 , 马振东 , 等 . 造林密度对水曲柳人工林地上生长和细根生物量的影响 [J]. 生态学杂志 ,2017,36(11):3008-3016.
Gu J C, Xiao L J, Ma Z D, et al. Effect of planting density on the aboveground growth and fine root biomass in *Fraxinus mandschurica* Rupr. plantation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017,36(11):3008-3016.

[9] Zeng W X, Xiang W H, Zhou B, et al. Positive tree diversity effect on fine root biomass: via density dependence rather than spatial root partitioning[J]. Oikos,2021,130:1-14.

[10] 谢玲芝 . 密度对水曲柳人工林细根生物量、生产和空间分布的影响 [D]. 哈尔滨 : 东北林业大学 ,2015:10.
Xie L Z. Effect of stand density on fine root biomass, production, and spatial distribution in *Fraxinus mandschurica* plantation[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2015:10.

[11] 邵森 . 择伐对太岳山油松林表层细根生物量和土壤养分含量的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版),2017,46(6):654-658.
Shao S. Effect of selective logging on the surface fine root biomass and soil nutrient of *Pinus tabulaeformis* plantation in Taiyue mountain[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2017,46(6):654-658.

[12] 程小琴 . 山西太岳山油松人工林土壤碳特征对林分密度调控响应的研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2014:76.
Cheng X Q. Response of soil carbon characteristics to tree density in *Pinus tabulaeformis* plantations in Mt. Taiyue, Shanxi, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2014:76.

[13] 鲜李虹 , 刘勇 , 常笑超 , 等 . 不同密度毛白杨人工林细根空间分布特征 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2022,42(8):48-58.
Xian L H, Liu Y, Chang X C, et al. Spatial distribution of the fine roots in *Populus tomentosa* plantation under different densities[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022,42(8):48-58.

[14] 贾亚运 , 何宗明 , 周丽丽 , 等 . 造林密度对杉木幼林生长及空间利用的影响 [J]. 生态学杂志 ,2016,35(5):1177-1181.
Jia Y Y, He Z M, Zhou L L, et al. Effects of planting densities on the growth and space utilization of young *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Chinese Journal of Ecology,2016,35(5): 1177-1181.

[15] 谭春霞 , 刘广芳 , 王梦瑶 , 等 . 黄河三角洲不同林龄刺槐细根形态的时空动态 [J]. 东北林业大学学报 ,2023,51(7):51-60,67.
Tan C X, Liu G F, Wang M Y, et al. Spatial and temporal dynamics of fine root morphology of *Robinia pseudoacaciaat* different stand ages in the Yellow River delta[J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(7):51-60,67.

[16] 匡冬姣 . 不同年龄杉木人工林细根结构特征与生产力研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2015:15-19.
Kuang D J. Production and morphological characteristics of fine roots in three Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations at different stand ages[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2015:15-19.

[17] 王静波 , 于水强 , 郝倩葳 , 等 . 不同林龄亚热带次生林细根生物量和形态分布差异 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2021,49(3):38-46.
Wang J B, Yu S Q, Hao Q W, et al. Distribution differences of fine root biomass and morphology in subtropical secondary forest at different forest ages[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2021,49(3):38-46.

[18] 郑高超 , 苏香萍 , 王思荣 , 等 . 不同林龄杉木人工林细根生物量的变化特征分析 [J]. 福建农业科技 ,2023,54(7):41-47.
Zheng G C, Su X P, Wang S R, et al. Analysis of the variation characteristics of fine root biomass in *Cunninghamia lanceolata* plantation forest of different stand ages[J]. Fujian Agricultural Science and Technology,2023,54(7):41-47.

[19] 聂坤 , 徐明 , 文春玉 , 等 . 黔中地区不同林龄马尾松群落细根功能性状及其异速生长关系 [J]. 西北林学院学报 ,2022,37(6):10-17,174.
Nie K, Xu M, Wen C Y, et al. Fine root functional traits and its allometric growth relationship of *Pinus massoniana* forests between different stand ages in central Guizhou[J]. Journal of Northwest Forestry University,2022,37(6):10-17,174.

[20] Ghorbani M, Sohrabi H, Sadati S E, et al. Productivity and dynamics of pure and mixed-species plantations of *Populous deltoids* Bartr. ex Marsh and *Alnus subcordata* C. A. Mey[J].

Forest Ecology and Management,2018,409:890-898.

[21] 卫朝阳 , 张建军 , 赖宗锐 , 等 . 晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响 [J]. 北京林业大学学报 ,2024,46(10):22-32.
Wei Z Y, Zhang J J, Lai Z R, et al. Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University,2024,46(10):22-32.

[22] 夏娟 , 孙旭东 , 王娜 , 等 . 岷江上游干旱河谷地区油松和岷江柏细根生物量和根长密度 [J]. 植物研究 ,2024,44(2):259-266.
Xia J, Sun X D, Wang N, et al. Fine root biomass and root length density of *Pinus tabulaeformis* and *Cupressus chengiana* plantations in the arid valleys of the upper Minjiang river[J]. Bulletin of Botanical Research,2024,44(2):259-266.

[23] 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.

[24] 张盛晰 . 栽植模式和接种 AMF 对砒砂岩区土壤微生境构建和灌木生长的影响 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2024:15-16.
Zhang S X. Effects of planting patterns and AMF inoculation on soil microhabitat construction and shrub growth in Pisha sandstone area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2024:15-16.

[25] 鲍士旦 . 土壤农化分析 [M].3 版 . 北京 : 中国农业出版社 ,2000:30-33,56,81-83.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press,2000:30-33,56,81-83.

[26] 洪梓明 , 邢亚娟 , 闫国永 , 等 . 长白山白桦山杨次生林细根形态特征和解剖结构对氮沉降的响应 [J]. 生态学报 ,2020,40(2):608-620.
Hong Z M, Xing Y J, Yan G Y, et al. Response of fine root morphology and anatomical structure of *Betula platyphylla* and *Populus davidiana* natural secondary forest to nitrogen deposition in Changbai mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(2):608-620.

[27] Krasowski M J, Lavigne M B, Szuter M A, et al. Age-related changes in survival and turnover rates of balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) fine roots[J]. Tree Physiology, 2018,38(6):865-876.

[28] 王琪 . 密度和配置对杨树人工林细根碳水化合物、养分含量和生物量的影响 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2019:35.
Wang Q. Effects of density and configuration on fine root carbohydrate, nutrient content and biomass of poplar plantation[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2019:35.

[29] 黄晶晶 , 井家林 , 曹德昌 , 等 . 不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型 [J]. 生态学报 ,2013,33(14):4331-4342.
Huang J J, Jing J L, Cao D C, et al. Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(14):4331-4342.

[30] 黄林 , 王峰 , 周立江 , 等 . 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系 [J]. 生态学报 ,2012,32(19):6110-6119.
Huang L, Wang F, Zhou L J, et al. Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(19):6110-6119.

[31] 梅莉 . 水曲柳细根空间分布和季节动态与土壤养分的关系 [D]. 哈尔滨 : 东北林业大学 ,2004:44.
Mei L. Fine root distribution and seasonal patterns of Manchurian ash plantation in relation to soil nutrients availability[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2004:44.

[32] 韦兰英 , 上官周平 . 黄土高原子午岭天然柴松林细根垂直分布特征 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版),2007,35(7):69-74.
Wei L Y, Shangguan Z P. Vertical distribution of the fine root of the natural *Pinus tabulaeformis* f. *shekannesis* forest in Ziwuling Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2007,35(7):69-74.

[33] 何应会 , 蒋燚 , 黄荣林 , 等 . 江南油杉细根生物量空间分布及其对土壤水分的响应 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(1):151-158.
He Y H, Jiang Y, Huang R L, et al. Spatial structure of fine root biomass and its response to soil moisture of *Keteleeria cyclolepis* Flous[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(1):151-158.

[34] 李爱琴 , 张莎莎 , 王会荣 , 等 . 杉木成熟林细根形态与功能特征的海拔梯度变异特点 [J]. 生态学报 ,2020,40(2):719-727.
Li A Q, Zhang S S, Wang H R, et al. Fine root morphological characteristics and its functions in mature Chinese fir plantations along an elevation gradient in Dabie mountains[J]. Acta Ecologica Sinica,2020,40(2):719-727.

[35] 詹龙飞 . 不同密度和配置杨树人工林细根空间分布及碳氮含量 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2019:29.
Zhan L F. Spatial distribution of fine root biomass and morphplogical characteristics of poplar plantations with different density and configuration[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019:29.

[36] 王静波 . 不同恢复阶段亚热带常绿阔叶次生林细根生长特性研究 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2020:19-20.

Wang J B. Research of fine root growth characteristics in secondary subtropical evergreen broad-leaved forest with different restoration stages[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2020: 19-20.

[37] 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, Lyu 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.

[38] 冯慧芳 , 余明 , 薛立 . 外源性氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报 ,2020,40(14):4894-4902.
Feng H F, Yu M, Xue L. Effects of nitrogen and phosphorus additions on soil enzyme activities in *Acacia auriculiformis* stands under different planting densities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(14):4894-4902.

[39] 陈婧 . 吉兰泰人工梭梭林下土壤养分和机械组成的时空分布规律 [D]. 呼和浩特 : 内蒙古农业大学 ,2019:45-46.
Chen J. Spatial and temporal distribution of soil nutrient and mechanical composition of *Haloxylon ammodendron* in Jilantai[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University,2019:45-46.

[40] 郭灵辉 , 王道杰 , 张云红 , 等 . 蒋家沟新银合欢人工林土壤养分分布及其与细根的关系 [J]. 中国水土保持 ,2010(12):46-49.
Guo L H, Wang D J, Zhang Y H, et al. Distribution of soil nutrient and relationship with thin root of *Leucaena leucocephala* plantation in Jiangjia gully[J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(12):46-49.

[41] 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.
Guo Y, Yao J F, Dong Y, et al. Root distribution characteristics of monoculture and mixture of *Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2023,34(11):2881-2888.

[42] Jackson R B, Moore L A, Hoffmann W A, et al. Ecosystem rooting depth determined with caves and DNA[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,1999,96:11387-11392.

[43] 谷利茶 , 王国梁 , 景航 , 等 . 氮添加对油松不同径级细根分解及其养分释放的影响 [J]. 应用生态学报 ,2017,28(9):2771-2777.
Gu L C, Wang G L, Jing H, et al. Response of decomposition and nutrient release in different diameter fine roots of *Pinus tabuliformis* plantation to N addition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(9):2771-2777.

[本文编校：张雨朦]

（上接第 21 页）

[28] Kruger L M, Midgley J J, Cowling R M. Resprouters vs reseeders in South African forest trees; a model based on forest canopy height[J]. Functional Ecology,1997,11:101-105.

[29] Zimmerman J K, Everham Ⅲ E M, Waide R B, et al. Responses of tree species to hurricane winds in subtropical wet forest in Puerto Rico: implications for tropical tree life histories[J]. Journal of Ecology,1994,82:911-922.

[30] Hiroki S, Ichino K. Comparison of growth habits under various light conditions between two climax species, *Castanopsis sieboldii* and *Castanopsis cuspidata*, with special reference to their shade tolerance[J]. Ecological Research,1998,13:65-72.

[31] Vázquez-Veloso A, Ruano I, Bravo F. Trade-offs and management strategies for ecosystem services in mixed Scots pine and Maritime pine forests[J]. European Journal of Forest Research,2025,144:893-907.

[本文编校：张雨朦]