北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响

卫朝阳 张建军 赖宗锐 胡亚伟 赵炯昌 唐鹏 王思淇

Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China

Wei Zhaoyang, Zhang Jianjun, Lai Zongrui, Hu Yawei, Zhao Jiongchang, Tang Peng, Wang Siqi

引用本文:
卫朝阳, 张建军, 赖宗锐, 胡亚伟, 赵炯昌, 唐鹏, 王思淇. 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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230282
Wei Zhaoyang, Zhang Jianjun, Lai Zongrui, Hu Yawei, Zhao Jiongchang, Tang Peng, Wang Siqi. 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. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230282

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230282

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水平空间配置对南林–95杨人工林主要细根性状的影响

Effects of horizontal spatial allocation on main fine root characters of *Populus* × *euramericana* cv. ‘Nanlin–95’ plantations

北京林业大学学报, 2019, 41(10): 11–19. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190011

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

Coupling effects of drip irrigation and nitrogen fertigation on fine root growth, distribution and morphological characters of 2–year–old *Populus tomentosa* plantations

北京林业大学学报, 2022, 44(4): 1–11. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200413

水肥耦合对毛白杨林分土壤氮、细根分布及生物量的影响

Effects of water and fertilizer coupling on soil nitrogen, fine root distribution and biomass of *Populus tomentosa*

北京林业大学学报, 2020, 42(1): 75–83. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190222

宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨小麦复合系统的细根分布及形态特征

Fine root spatial distribution and morphology of triploid *Populus tomentosa*–wheat agroforestry system under wide– and narrow–row spacing planting schemes

北京林业大学学报, 2021, 43(10): 73–80. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200420

兴安落叶松和白桦细根形态对环境变化的响应

Response of fine root morphology of *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla* to environmental changes

北京林业大学学报, 2019, 41(6): 15–23. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180396

长期氮添加对阔叶红松林细根形态、解剖结构和化学组分的影响

Effects of long–term nitrogen addition on fine root morphological, anatomical structure and stoichiometry of broadleaved Korean pine forest

北京林业大学学报, 2022, 44(11): 31–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210212

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230282

晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响

卫朝阳[1] 张建军[1,2,3] 赖宗锐[1] 胡亚伟[1] 赵炯昌[1] 唐 鹏[1] 王思淇[1]

(1. 北京林业大学水土保持学院，山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083；2. 北京林业大学水土保持国家林业局重点实验室，北京 100083；3. 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心，北京 100083)

摘要:【目的】探究不同林分密度、坡度和坡向条件下油松人工林细根(≤ 2 mm)生物量和细根形态的垂直分布规律，为晋西黄土区植被管理和生态建设评价提供依据。**【方法】**以油松人工林为研究对象，选择不同林分密度 M1(< 2 000 株/hm^2)、M2(2 000 ~ 3 000 株/hm^2)、M3(3 000 ~ 4 000 株/hm^2)、M4(4 000 ~ 5 000 株/hm^2)、M5(> 5 000 株/hm^2)，不同坡度(≤ 20°、20° ~ 30°、30° ~ 40°)和坡向(阴坡和阳坡)的样地，采用根钻法分层获取 0 ~ 100 cm 土层中的细根，对细根生物量密度、根长密度、组织密度、比根长和比表面积的垂直分布特征及其影响因素进行研究。**【结果】**(1)0 ~ 100 cm 土层的细根生物量密度随林分密度增大呈单峰变化趋势(M4 密度条件下达到最大值 606.19 g/m^3)，不同坡度和坡向条件下细根生物量密度及其垂直分布没有明显变化趋势。细根生物量密度随土层深度增加呈显著递减趋势(P < 0.05)，主要集中在 0 ~ 20 cm 土层中，占比 38% 以上。(2)随着林分密度增加，0 ~ 100 cm 土层的细根根长密度呈单峰变化趋势(M4 密度下达到最高值 3 639.73 m/m^2)，比根长和比表面积呈先减小后增加的趋势(在 M4 密度下达到最低值：比根长 601 cm/g，比表面积 101.09 cm^2/g)。坡度和坡向对细根形态及其垂直分布的影响均不显著。垂直方向上，各林分密度 0 ~ 40 cm 土层的细根根长密度占比均在 60% 以上。在 0~20 cm 土层，比根长和比表面积随林分密度的增加先减少后增加(P < 0.05)。(3)相关性分析显示，林分密度和土层深度对细根生物量密度和细根形态有显著影响。细根生物量密度和根长密度与林分密度、土壤全碳、全氮以及有机碳显著正相关，与土壤深度和 C∶N 显著负相关。比根长、比表面积与林分密度和土壤有机碳显著负相关，与土壤深度显著正相关(P < 0.05)。**【结论】**林分密度是油松人工林细根特征的关键调控因子，可通过林分管理措施来调整人工林林分密度以及细根生存策略，以此提高油松人工林应对环境胁迫的适应性，为半干旱区人工林可持续经营提供理论支持。

关键词：油松人工林；细根生物量；细根形态特征；垂直分布；影响因素

中图分类号：S718.5 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)10−0022−11

引文格式：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 Zhaoyang, Zhang Jianjun, Lai Zongrui, 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.

Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China

Wei Zhaoyang[1] Zhang Jianjun[1,2,3] Lai Zongrui[1] Hu Yawei[1]
Zhao Jiongchang[1] Tang Peng[1] Wang Siqi[1]

(1. School of Soil and Water Conservation, Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station (CNERN), Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. State Forestry Administration Key Laboratory of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

收稿日期: 2023−10−22 **修回日期:** 2024−09−29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF130040103)。

第一作者: 卫朝阳。主要研究方向：林业生态工程。Email：weizhaoyang4512@163.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学水土保持学院。

责任作者: 张建军，博士，教授。主要研究方向：水土保持与森林水文研究。Email：zhangjianjun@bjfu.edu.cn 地址：同上。

本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] This paper explores the vertical distribution of fine root biomass (≤ 2 mm) and fine root morphology of *P. tabuliformis* plantations under different stand densities, slopes and aspects, so as to provide a basis for vegetation management and ecological construction evaluation in the loess region of western Shanxi Province of northern China. [**Method**] We investigated the vertical distribution and influencing factors of fine root characteristics, including fine root biomass density, length density, tissue density, specific root length and specific surface area in 0−100 cm soil layer of *P. tabuliformis* under five stand densities (M1(< 2 000 tree/ha), M2(2 000−3 000 tree/ha), M3(3 000−4 000 tree/ha), M4(4 000−5 000 tree/ha), M5(> 5 000 tree/ha)), three slopes (≤ 20°, 20°−30°, 30°−40°) and two aspects (shady slope and sunny slope). [**Result**] (1) The fine root biomass density in 0−100 cm soil layer exhibited a unimodal pattern with the increase in stand density, reaching its peak at 606.19 g/m^3 with M4 density. The slope and aspect showed no significant impact on fine root biomass density. The density of fine root biomass decreased significantly with the increase of soil depth (P < 0.05), mainly concentrated in 0−20 cm soil layer, accounting for more than 38%. (2) With the increase of stand density, the fine root length density of 0−100 cm soil layer showed a unimodal pattern (the maximum value with 3 639.73 m/ m^2 at M4 density), and the specific root length and specific surface area showed a trend of decreasing first and then increasing (the minimum values with 601 cm/g and 101.09 cm^2/g, respectively). While slope and aspect had no significant effects on the morphology and vertical distribution of fine roots. In the vertical direction, the ratio of fine root length density in 0−40 cm soil layer of each stand density was more than 60%. The specific root length and specific surface area of the 0-20 cm soil layer initially decreased and then increased as stand density increased(P<0.05). (3) Correlation analysis showed that stand density and soil depth significantly influenced fine root biomass density and morphology. Fine root biomass density and root length density were significantly positively correlated with stand density, soil total carbon, total nitrogen and organic carbon, significantly negatively correlated with soil depth and C∶N. Specific root length and specific surface area were significantly negatively correlated with stand density and soil organic carbon, and significantly positively correlated with soil depth (P < 0.05). [**Conclusion**] Stand density is a key regulatory factor for fine root characteristics of *P. tabuliformis* plantations. Stand management measures can be used to adjust stand density and fine root survival strategies, so as to improve the adaptability of *P. tabuliformis* plantations to cope with environmental stress, and provide theoretical support for sustainable management of artificial forest in semi-arid regions.

Key words: *Pinus tabuliformis* plantation; fine root biomass; morphological characteristics of fine roots; vertical distribution; influencing factors

根系是植物连接地上部分和土壤的桥梁，而细根（直径 ≤ 2 mm）作为植物根系吸收水分和养分的主要器官，具有资源消耗少、表面积大、吸收水分养分的效率高等特点，担负着物质循环和能量流动的重要功能，是森林生态系统最重要的组成部分[1]。研究表明，植物应对环境胁迫的能力在很大程度上取决于细根，且细根会随着环境的变化而改变其生存策略[2]。细根生物量能够反映植物对地上地下部分资源分配的策略，是细根重要的生理指标[3]。细根的形态特征能衡量植物获取土壤中水分、养分的能力及策略[4]，这些细根性状在很大程度上反映了植物应对环境胁迫时的适应性[5]。

林分密度、土壤养分、地形是影响细根性状（生物量、细根形态）的主要因素[6]，其中林分密度是控制林分和细根生长的关键因素[7]。张艳杰等[8]对马尾松（*Pinus massoniana*）人工林细根生物量的研究表明，林分密度与细根生物量密度之间存在负相关关系，但有研究认为油松（*Pinus tabuliformis*）细根生物量密度随林分密度增大而增大[9]。在细根形态方面，有研究指出侧柏（*Platycladus orientalis*）人工林的细根形态与林分密度呈正相关关系[10]，而对杨树（*Populus* spp.）人工林的研究表明，细根形态随林分密度增加而递减[11]。可见，在细根生物量和形态方面不同的研究人员针对不同树种所取得的研究结论并不一致。土壤养分对细根形状的影响方面，有研究表明土壤养分状况决定根生物量和形态的垂直分布[12]，而坡度和坡向等立地因子对乔木细根形状的研究相对较少[13]。因此，研究林分密度和立地条件对细根性状及其垂直分布的影响，对科学评价林木对水土资源的利用效率及树木的适宜性，充分发挥

水土保持林地的生态服务功能具有重要意义。

黄土高原水土流失严重，生态环境脆弱，油松因其根系发达，耐干旱，适应性强的特点，在退耕还林工程中被广泛栽植[14]。细根生物量密度和形态是反映林木吸收和利用水土资源的关键指标[15]。现有在黄土高原开展的油松根系研究大多集中在林分特征、土壤性质对根系垂直分布的影响方面[16-17]，在细根性状方面的研究多侧重于生物量或细根形态，而针对细根生物量密度和细根形态开展多因素综合评价的研究相对较少。为此，本研究以晋西黄土区的油松人工林为对象，采用根钻法采集细根，测定细根生物量密度和形态的垂直分布特征，并分析这些特征与林分密度和立地条件的关系，以期为黄土高原水土保持植物的选择和水土保持植被生态服务功能的科学评价提供依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于山西省吉县蔡家川流域(110°39′45″～110°47′45″ E，36°14′27″～36°18′23″ N)。该流域为黄河的三级支流，东西走向长约 14 km，面积 38 km^2，海拔 900～1 513 m，地貌类型为黄土梁状丘陵沟壑(图 1)。属暖温带大陆性季风气候，年均气温 10 ℃，≥ 10 ℃ 的积温 3 358 ℃·d，最高气温 38.1 ℃，最低气温−20.4 ℃，无霜期约 170 d，多年平均日照时长 2 565.8 h。年均降水量 575.9 mm，降雨季节分配不均匀，70% 左右的降雨集中在 6—9 月份，且年际变化较大。上游植被覆盖类型主要是由白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、丁香(*Syringa oblate*)、辽东栎(*Quercus wutaishanica*)等组成的次生林，中游主要是刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松、侧柏(*Platycladus orientalis*)组成的人工林，下游为荒草地和农地。灌木树种主要有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)和黄刺玫(*Rosa xanthina*)等。

1.2 样地设置与调查

2022 年 7—9 月，在山西省临汾市吉县蔡家川流域，选择生长状况良好、土壤类型基本一致、林龄相近的油松人工林为研究对象，选取 3 个相距 4 km 左右的地点为样地，设置 5 个不同林分密度的样地 44 个。调查所有样地的坡度、坡向、海拔等信息，并对样地内的所有的油松进行每木检尺，记录树高、胸径等。各样地林分密度：M1(< 2 000 株/hm^2)，M2(2 000～3 000 株/hm^2)，M3(3 000～4 000 株/hm^2)、M4(4 000～5 000 株/hm^2)和 M5(> 5 000 株/hm^2)，坡度分为 3 个坡度类型：低坡度(≤ 20°)、中坡度(20°～30°)和高坡度(30°～40°)，坡向分为阴坡和阳坡。样地基本信息参见表 1。

1.3 样品采集

1.3.1 根系取样

在每个样地对角线上选择 5 个取样点，每个样点去除地表枯落物后，使用内径为 65 mm 的根钻在不同深度上进行采样。采样深度为 100 cm，每 20 cm 为一层，每个样点共取 5 层。将 5 个样点相同土层的 5 个土芯样品混合，放入自封袋内带回，在室内用水清洗根表面附着的土壤和杂质，装入自封袋内编号冷冻保存。共获取细根样品 220 份。

细根处理与测量：将冷冻保存的根系解冻后，用镊子挑出根系直径 ≤ 2 mm 的细根并使用滤纸吸除根系表面水分，将细根平铺在根系扫描仪(EPSON V850 Pro)上，扫描出细根图片，然后用根系分析系统(WinRhizo)获得每个样地各层细根的形态参数(包括根长、根表面积和根体积)。最后将根系样品置于 70 ℃ 的烘箱中烘干至恒质量。

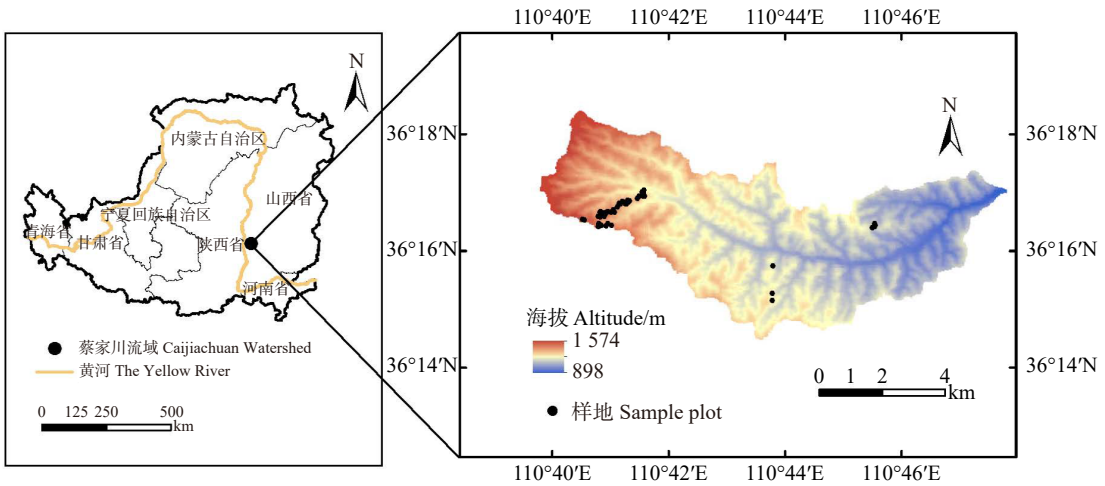


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

表 1　样地基本信息

Tab. 1　Basic information of sample plots

样地编号 Sample plot No.	海拔 Elevation/m	林分密度/（株·hm^{-2}） Stand density/（plant·ha^{-1}）	林分密度类型 Type of stand density	坡度 Slope/(°)	坡度类型 Type of slope	坡向 Aspect	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean DBH/cm
1	1 174.0	700	M1	25	MS	PA	8.58 ± 0.90 defg	15.74 ± 1.77 a
2	1 063.0	1 025	M1	28	MS	PA	7.52 ± 0.86 efg	14.13 ± 1.72 ab
3	1 170.0	1 100	M1	34	HS	NA	8.72 ± 0.96 defg	15.26 ± 2.35 ab
4	1 183.0	1 125	M1	39	HS	NA	8.34 ± 0.98 defg	14.55 ± 2.52 ab
5	1 176.0	1 250	M1	30	MS	PA	8.22 ± 1.07 efg	14.04 ± 2.08 ab
6	1 350.0	1 866	M1	38	HS	NA	8.87 ± 1.32 def	13.65 ± 3.23 ab
7	1 171.0	1 875	M1	27	MS	PA	9.79 ± 1.38 abcd	12.75 ± 4.28 ab
8	1 366.8	1 875	M1	28	MS	NA	11.15 ± 2.16 a	15.30 ± 4.30 a
9	1 343.8	2 075	M2	30	MS	NA	9.06 ± 1.91 de	13.77 ± 4.10 ab
10	1 196.0	2 100	M2	30	MS	NA	7.84 ± 1.88 efg	11.76 ± 3.67 bcd
11	1 075.0	2 150	M2	0	LS	PA	8.67 ± 2.17 defg	10.73 ± 4.56 bcd
12	1 403.0	2 175	M2	18	LS	PA	9.50 ± 1.98 bcd	14.37 ± 4.12 ab
13	1 339.8	2 875	M2	34	HS	PA	6.44 ± 1.54 g	9.03 ± 3.79 de
14	1 336.2	2 900	M2	38	HS	PA	6.55 ± 2.59 g	9.74 ± 5.36 cde
15	1 358.0	2 900	M2	26	MS	NA	10.28 ± 1.23 abc	12.70 ± 3.16 abc
16	1 336.5	2 975	M2	30	MS	NA	10.16 ± 1.76 abc	11.92 ± 4.24 bc
17	1 333.1	3 000	M3	0	LS	PA	7.37 ± 1.35 fg	10.94 ± 3.54 bcd
18	1 368.4	3 000	M3	20	LS	NA	8.88 ± 1.83 de	10.83 ± 4.15 bcd
19	1 374.2	3 000	M3	30	MS	PA	8.16 ± 1.68 efg	10.69 ± 3.39 bcd
20	1 284.2	3 200	M3	25	MS	NA	7.95 ± 1.69 efg	10.58 ± 3.84 bcd
21	1 370.3	3 288	M3	0	LS	PA	10.13 ± 1.79 abc	11.90 ± 3.44 bc
22	1 350.0	3 400	M3	24	HS	NA	6.88 ± 2.23 fg	9.94 ± 4.56 bcde
23	1 270.0	3 500	M3	40	HS	PA	6.15 ± 1.71 g	8.33 ± 4.66 de
24	1 227.0	3 550	M3	33	HS	NA	10.43 ± 1.81 ab	11.52 ± 3.59 bcd
25	1 215.0	3 600	M3	16	LS	NA	9.72 ± 1.74 bcd	10.68 ± 3.97 bcd
26	1 304.0	3 600	M3	16	LS	NA	7.93 ± 1.45 efg	10.99 ± 3.71 bcd
27	1 275.2	3 650	M3	27	MS	NA	8.25 ± 1.59 efg	10.42 ± 3.66 bcd
28	1 301.3	3 700	M3	30	MS	NA	7.84 ± 2.07 efg	9.72 ± 4.35 cde
29	1 394.6	3 821	M3	28	LS	NA	7.28 ± 1.69 fg	9.83 ± 3.65 bcde
30	1 240.0	4 000	M4	26	MS	PA	7.01 ± 1.31 fg	10.81 ± 2.56 bcd
31	1 198.8	4 000	M4	31	HS	PA	6.10 ± 1.86 g	8.84 ± 3.27 de
32	1 325.0	4 025	M4	21	MS	NA	10.31 ± 1.79 abc	11.00 ± 3.72 bcd
33	1 355.7	4 050	M4	23	MS	NA	7.41 ± 1.92 fg	9.10 ± 4.59 de
34	1 344.0	4 088	M4	10	LS	NA	8.98 ± 2.20 de	11.37 ± 4.01 bcd
35	1 357.0	4 100	M4	20	LS	PA	8.15 ± 1.66 efg	9.48 ± 3.91 cde
36	1 279.0	4 200	M4	22	MS	NA	8.27 ± 1.47 efg	10.64 ± 3.36 bcd
37	1 365.7	4 425	M4	30	MS	PA	6.76 ± 1.61 g	8.84 ± 3.20 de
38	1 252.0	4 475	M4	36	HS	PA	10.12 ± 1.99 abc	10.67 ± 3.73 bcd
39	1 339.7	4 500	M4	38	LS	NA	7.03 ± 1.51 fg	10.11 ± 3.63 bcd
40	1 277.3	5 050	M5	20	LS	NA	9.39 ± 1.64 cd	10.19 ± 3.72 bcd
41	1 333.6	5 250	M5	25	MS	NA	8.26 ± 2.58 efg	8.56 ± 4.35 de
42	1 307.0	5 550	M5	25	MS	PA	8.82 ± 2.09 def	8.86 ± 3.72 de
43	1 273.0	5 900	M5	24	MS	PA	6.36 ± 1.56 g	7.09 ± 3.62 e
44	1 277.1	5 900	M5	0	LS	PA	7.22 ± 1.54 fg	7.73 ± 3.78 de

注：不同小写字母表示样地间差异显著（$P < 0.05$）。M1 ~ M5分别表示林分密度 < 2 000 株/hm^2、2 000 ~ 3 000 株/hm^2，3 000 ~ 4 000 株/hm^2、4 000 ~ 5 000 株/hm^{2}和 > 5 000株/hm^2。LS、MS、HS分别表示低坡度、中坡度和高坡度。NA、PA分别表示阴坡和阳坡。下同。Notes: different lowercase letters indicate significant differences between the sample plots ($P < 0.05$). M1 to M5 represent 5 density types: < 2 000 tree/ha, 2 000 to 3 000 tree/ha, 3 000 to 4 000 tree/ha, 4 000 to 5 000 tree/ha, and > 5 000 tree/ha, respectively. LS, MS and HS indicate low, medium and high slope, respectively. NA and PA represent negative and positive aspect, respectively. The same below.

$$F_{RBD}=B_{FR}/V_Z \quad (1)$$

$$F_{RLD}=L/A_Z \quad (2)$$

$$F_{RTD}=B_{FR}/V_{FR} \quad (3)$$

$$S_{RL}=L/B_{FR} \quad (4)$$

$$S_{SA}=A_S/B_{FR} \quad (5)$$

式中：F_{RBD} 为细根生物量密度（g/cm^3），F_{RLD} 为细根根长密度（cm/cm^2），F_{RTD} 为细根根组织密度（g/cm^3），

S_{RL} 为比根长(cm/g)，S_{SA} 为比表面积(cm^2/g)，B_{FR} 为细根生物量(g)，L 为细根根长(cm)，A_S 为细根表面积(cm^2)，V_{FR} 为细根体积(cm^3)，A_Z 为根钻的横截面积(cm^2)，V_Z 为根钻所钻取的土芯体积(cm^3)。

1.3.2 土壤样品

在每个样地内挖取 100 cm 深的剖面，以 20 cm 一层进行土壤样品采集，分层做好标记带回。将获取的土壤样品放置在室温条件下自然风干，去除石砾和根系等杂物后进行研磨，过 2 mm 筛后装入自封袋内保存，用于测定土壤中的元素含量。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理，用 Shapiro-Wilk 检验和 Levene 检验对数据进行正态性检验、方差齐性检验和残差检验，用 R 语言 4.2.3 软件对数据进行统计分析和可视化，用单因素方差分析和双因素方差分析研究林分密度、坡度、坡向以及它们与土层深度的交互作用对细根生物量密度和细根形态的影响。采用最小显著差数法检验不同林分条件和不同土层间各指标的差异。利用 Pearson 相关性分析方法计算不同林分条件、土壤性质与细根性状之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 细根生物量密度及其垂直分布

根据表 2 可知，林分密度、土层及其交互作用对油松 F_{RBD} 均有极显著影响($P < 0.01$)。0 ~ 100 cm 土层油松人工林的平均 F_{RBD} 为 538.73 g/m^3。从图 2a 可知，随着林分密度的增加，0 ~ 100 cm 土层的 F_{RBD} 呈先增加后减少的趋势，林分密度为 4 000 ~ 5 000 株/hm^2 时 F_{RBD} 最大(606.19 g/m^3)，当林分密度低于 2 000 株/hm^2 时 F_{RBD} 最小(393.03 g/m^3)。M3 和 M4 林分密度下的 F_{RBD} 显著高于 M1($P < 0.05$)。由图 2b、c 可知，不同坡度和不同坡向条件下，0 ~ 100 cm 土层中 F_{RBD} 无显著差异($P > 0.05$)。

在垂直方向上，不同林分密度、坡度和坡向条件下 F_{RBD} 在整体上均呈现随深度的增加而减少的趋势(图 2)。在不同林分密度下，0 ~ 20 cm 土层 F_{RBD} 最大(平均 1 145.82 g/m^3)，平均占比为 43.74%。各林分密度下 0 ~ 20 cm 土层中的 F_{RBD} 由大到小依次为 M4(1 468.02 g/m^3)、M3(1 326.99 g/m^3)、M5(1 215.08 g/m^3)、M2(994.98 g/m^3)、M1(834.92 g/m^3)，分别占各林分密度 F_{RBD} 总量的 48.59%、45.07%、44.24%、38.77% 和 42.49%。由图 2a 可见，0 ~ 60 cm 土层的 F_{RBD} 均随着林分密度的增加呈先增大后减小的趋势。不同林分密度条件下 F_{RBD} 之间的差异随着土层的加深逐渐减少。不同密度 F_{RBD} 仅在 0 ~ 20 cm 土层中有显著差异($P < 0.05$)。由图 2b、c 可见，在各土层中，不同坡度和坡向间的 F_{RBD} 差异均不显著($P > 0.05$)。

2.2 细根形态特征

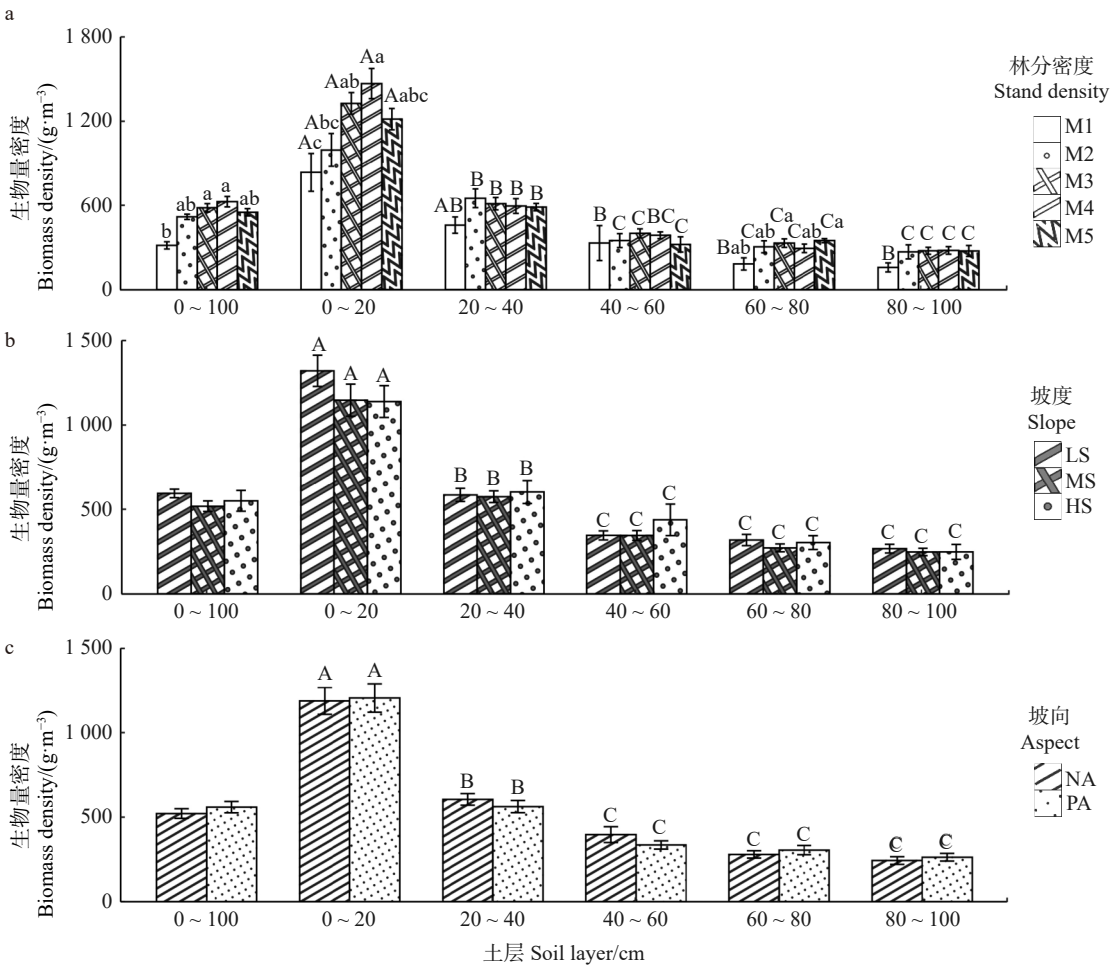
由表 2 可知，林分密度对 F_{RLD}、S_{RL} 和 S_{SA} 有显著影响($P < 0.05$)。从图 3 可以看出，随着林分密度的增加，F_{RLD} 呈现出先增加后减小的趋势，但不同密度间差异不显著。F_{RTD} 随林分密度增加变化不显著。S_{RL} 和 S_{SA} 随着林分密度增加先减小后增大，但仅有 S_{RL} 在不同林分密度间差异显著($P < 0.05$)。由图 4 和图 5 可知，不同坡度和坡向条件下 0 ~ 100 cm 土层中细根形态之间均没有显著差异($P > 0.05$)。

由图 3、图 4 和图 5 可知，在垂直方向上，各细根形态特征随土层加深呈现出不同的趋势。不同林分密度、坡度和坡向的细根根长密度随土层的加深

表 2 林分特征和土层对细根性状的影响

Tab. 2 Effects of stand characteristics and soil layers on fine root traits

影响因素 Influencing factor	生物量密度 Biomass density (F_{RBD})	根长密度 Root length density (F_{RLD})	组织密度 Tissue density (F_{RTD})	比根长 Specific root length (S_{RL})	比表面积 Specific surface area (S_{SA})
土层 Soil layer	< 0.001	< 0.001	0.496	< 0.001	< 0.001
林分密度 Stand density	< 0.001	< 0.001	0.556	0.029	0.011
坡度 Slope	0.409	0.065	0.096	0.202	0.540
坡向 Aspect	0.643	0.846	0.469	0.572	0.586
林分密度 × 坡度 Stand density × slope	0.576	0.334	0.595	0.224	0.164
林分密度 × 坡向 Stand density × aspect	0.347	0.596	0.549	0.039	0.038
林分密度 × 土层 Stand density × soil layer	< 0.001	0.724	0.813	0.326	0.374
坡度 × 土层 Slope × soil layer	0.986	0.697	0.811	0.990	0.984
坡向 × 土层 Aspect × soil layer	0.797	0.905	0.718	0.759	0.764



不同小写字母代表不同林分条件间差异性显著（$P < 0.05$），不同大写字母代表不同土层间差异性显著（$P < 0.05$）。Different lowercase letters represent significant differences between varied stand conditions ($P < 0.05$), and different uppercase letters represent significant differences between varied soil layers ($P < 0.05$).

图 2　不同林分条件下细根生物量密度及垂直分布规律

Fig. 2　Fine root biomass density and vertical distribution rules under different stand conditions

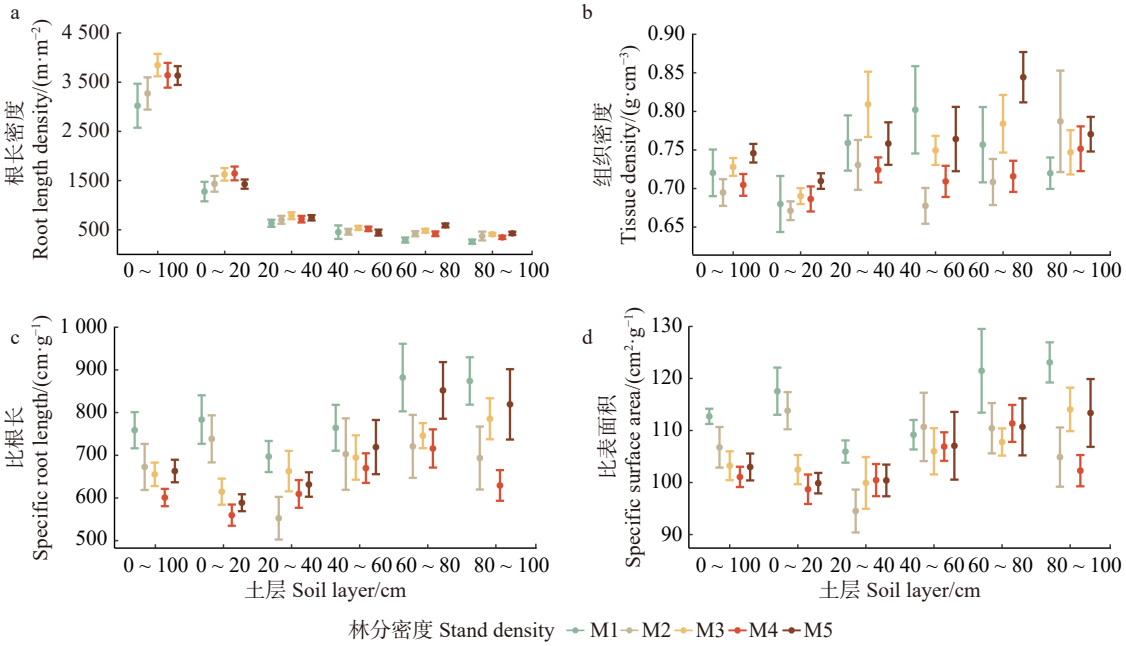


图 3　不同林分密度下细根形态的垂直分布

Fig. 3　Vertical distribution of fine root morphology under different stand densities

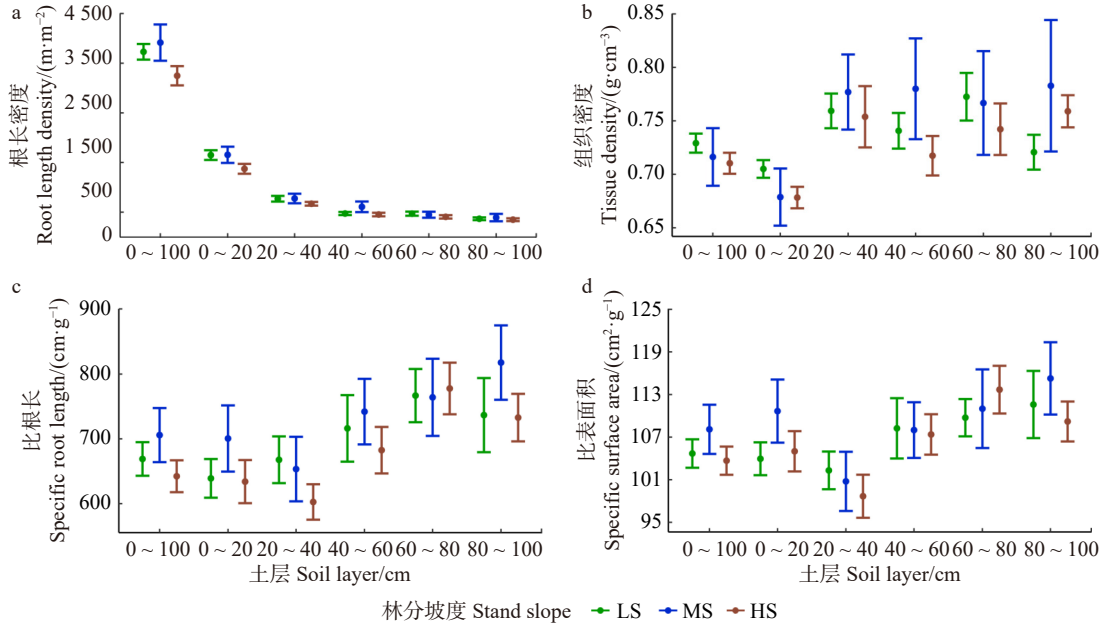


图 4 不同坡度下细根形态的垂直分布

Fig. 4 Vertical distribution of fine root morphology under different slopes

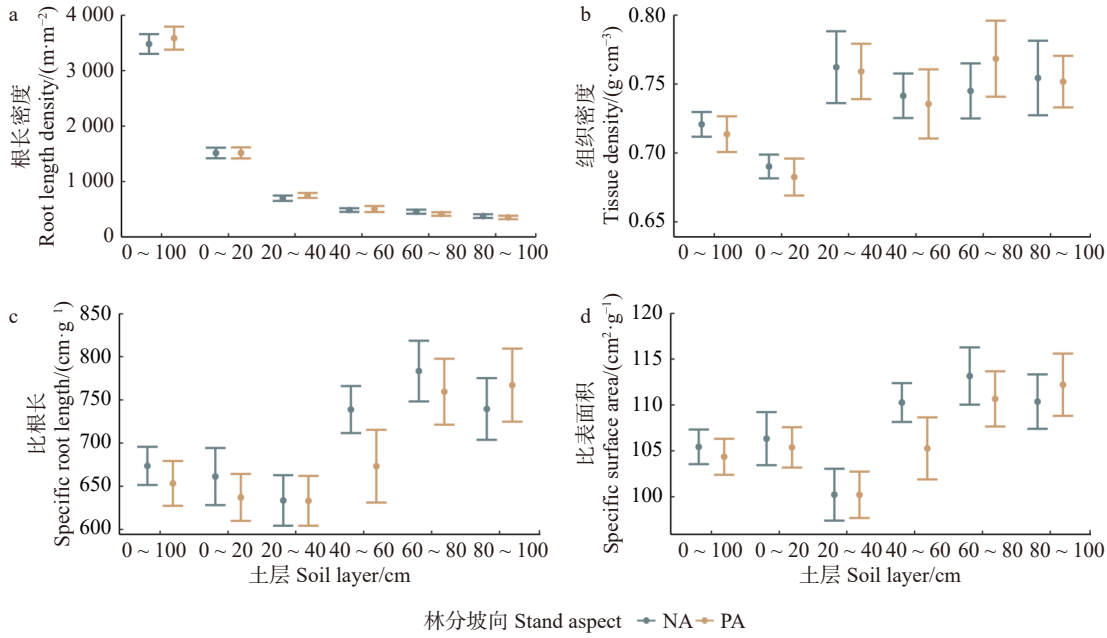


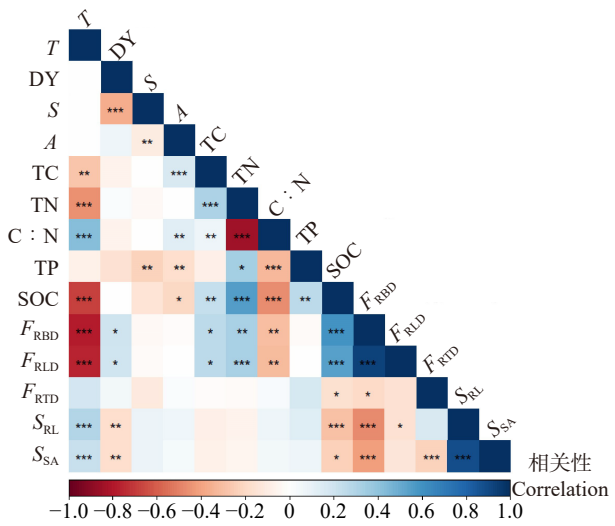
图 5 不同坡向条件下细根形态的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of fine root morphology under different aspects

均呈现递减趋势。各林分密度下 0 ~ 40 cm 土层的细根根长密度占所有土层的 60% 以上。在 0 ~ 20 cm 土层中，F_{RLD} 随林分密度增加呈现先增加后减小的趋势，60 ~ 80 cm 土层中 F_{RLD} 则呈显著递增的趋势（$P < 0.05$）。各土层中不同坡度、坡向间的 F_{RLD} 并没有显示出显著差异（$P > 0.05$）。S_{RL} 和 S_{SA} 仅在 0 ~ 20 cm 土层中表现出随林分密度增加呈先减小后增加的趋势（$P < 0.05$）。比根长在 M4、M5 条件下，随着土壤深度的增加呈现出先增后减的趋势。各土层以及不同坡度和坡向条件下的 S_{RL} 和 S_{SA} 均没有显著差异（$P > 0.05$）。

2.3 细根特征与林分特征和土壤性质的相关性分析

由图 6 可知，油松人工林 F_{RBD}、F_{RLD} 与土层深度、土壤 C∶N 呈显著负相关关系（$P < 0.01$），与林分密度、土壤全氮、土壤全碳和土壤有机碳呈显著正相关（$P < 0.05$）。而油松细根的 S_{RL} 和 S_{SA} 与土层深度呈显著正相关（$P < 0.01$），与林分密度和土壤有机碳呈显著负相关（$P < 0.05$），F_{RTD} 仅与土壤有机碳呈显著负相关关系（$P < 0.05$）。林分坡度、坡向以及土壤全磷与细根生物量密度和形态均没有显著相关性



*、**和***分别表示细根性状指标与影响因素在 $P < 0.05$、$P < 0.01$ 和 $P < 0.001$ 水平上显著相关。*T*.土层；DY.林分密度；*S*.林分坡度；*A*.林分坡向；TC.土壤全碳；TN.土壤全氮；C∶N.土壤碳氮比；TP.土壤全磷；SOC.土壤有机碳。*, ** and *** indicate fine root traits are significantly correlated with influencing factors at $P < 0.05$, $P < 0.01$ and $P < 0.001$ levels, respectively. *T*, soil layer; DY, stand density; *S*, stand slope; *A*, stand aspect; TC, soil total carbon; TN, soil total nitrogen; C∶N, soil carbon to nitrogen ratio; TP, soil total phosphorus; SOC, soil organic carbon.

图 6　细根特征与林分特征和土壤性质的相关性

Fig. 6　Correlations of fine root characteristics with stand characteristics and soil properties

（$P > 0.05$）。由图 7 和图 8 可知，在 0 ~ 100 cm 土层中，F_{RBD}、F_{RLD}、S_{RL} 和 S_{SA} 均与林分密度呈现显著非线性相关关系（$P < 0.05$），细根组织密度与林分密度没有显著相关性（$P > 0.05$）。坡度与细根生物量密度和细根形态均没有显著相关性（$P > 0.05$）。

3　讨　　论

3.1　林分密度与立地条件对细根生物量密度及其垂直分布的影响

林木的细根生物量密度与林分密度、树种特性及土层深度等密切相关[18]。油松的林分状况受环境因素影响显著，尤其对林分密度比较敏感[19]。林分密度的变化会影响林分郁闭程度、环境条件和生长状况，从而显著影响林木生产力[20]。本研究结果显示，油松细根生物量密度与林分密度呈正相关（图 6），随着林分密度的增大，油松总细根生物量密度显著提高，在林分密度达到 4 000 ~ 5 000 株/hm^2 时达到峰值，这与贾亚运等[21]对针叶林细根生物量密度的研究结果相似。这一现象可能是因为林分密度增加时，单位面积林木数量提高，导致单位面积上细根总量也相应增加。此外，随林分密度提高，单株林木可获取的资源减少，因此林木需要分配更多生物量到细根，以确保土壤资源的有效获取[7,22]。但在林分密度超过 5 000 株/hm^2 时，细根生物量密度出现显著减少，这可能是高林分密度导致单个林木生长空间显著减少，林木间竞争剧烈，影响到了根系的生长[21]。

以往对根系垂直分布的研究结果显示，细根生物量密度会在垂直方向上呈显著递减的趋势[23]。本研究结果表明，不同林分密度、坡度和坡向条件下油

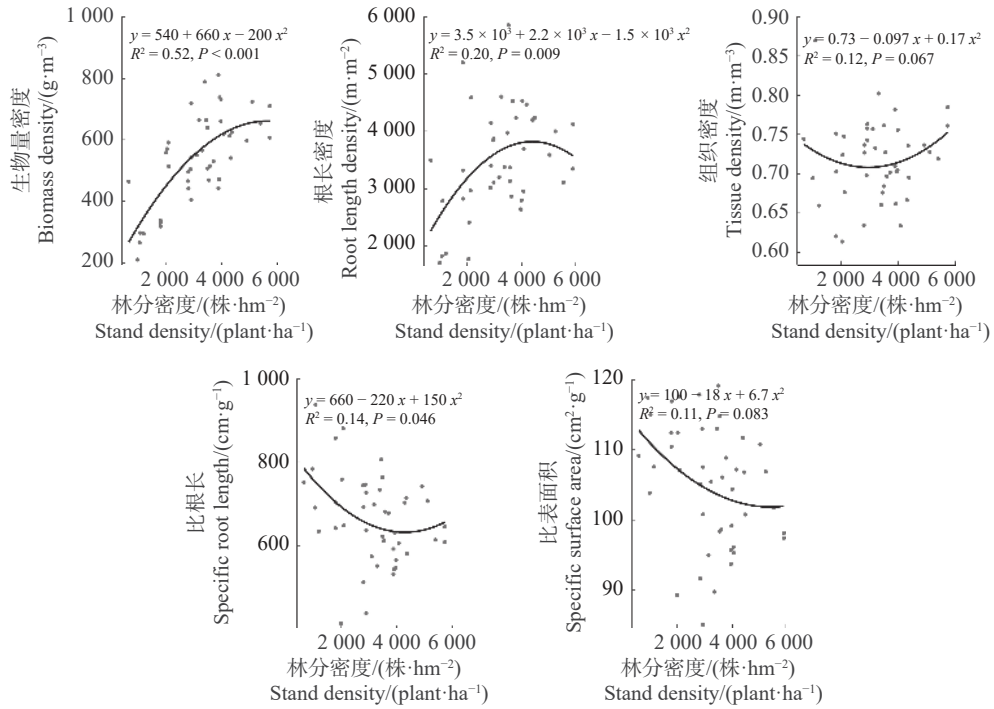


图 7　0 ~ 100 cm 土层细根特征与林分密度相关性

Fig. 7　Correlations between fine root characteristics and stand density in 0−100 cm soil layer

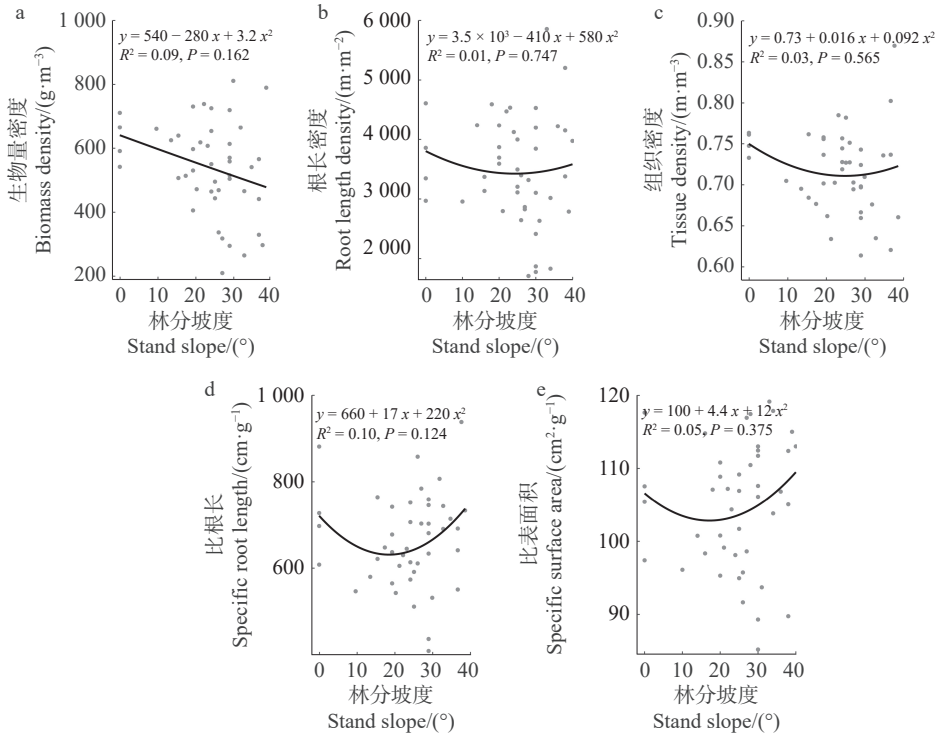


图 8 0 ~ 100 cm 土层细根特征与坡度相关性

Fig. 8 Correlations between fine root characteristics and slope in 0−100 cm soil layer

松细根生物量密度与均土层深度呈显著负相关。油松细根集中在 0 ~ 20 cm 的表层(38.77% ~ 48.59%),这与 Zhou 等[24]对人工林细根生物量密度的垂直分布研究结果一致。0 ~ 40 cm 土层中,细根生物量密度随着林分密度的增加而先增大后减少,呈现出单峰变化趋势。当深度超过 40 cm时,林分密度对细根生物量密度的影响逐渐减弱。这可能是因为在表层土壤中,微生物对凋落物的分解和矿化作用提供了大量的养分,从而改善了土壤水分和养分状况。因此,较高的细根生物量密度有助于资源的吸收与利用[25]。随着土层的加深,林木自身特性和土壤条件的限制,导致深层的细根生物量密度显著减少[12]。在不同坡度和坡向条件下,细根生物量密度及垂直分布特征没有明显差异。这表明在本研究区域,坡度小于 40°与不同坡向对细根生物量密度及其垂直分布影响不显著,这一结果与胡宇美等[26]在黄土高原地区关于地下生物量影响因素的研究结论相似。

3.2 林分密度与立地条件对细根形态及其垂直分布的影响

细根形态是细根功能性状的表现形式,反映了细根从土壤中获取水分养分的能力及对环境条件的适应策略[4]。本研究表明,林分密度显著影响细根形态,而坡度和坡向对细根形态的影响并不显著。具体来说,细根根长密度随林分密度的变化与细根生物量密度一致,而比根长与比表面积随林分密度增大先减少后增加,不同林分密度下的根组织密度没有明显的差异。在林分密度条件较低时,单个林木可获取的资源比高密度条件下更丰富,因此林木生长出较高的比根长和比表面积的细根,以提高根系的养分吸收效率[24]。

在垂直方向上,0 ~ 40 cm 土层的油松人工林具有较高的细根根长密度,且随着土层加深显著减少(图 3),这与安慧等[27]对细根形态垂直分布的研究结果一致。较高的根长密度有助于提高土壤资源的吸收效率。然而,在深层土壤中,由于林木自身特征和土壤性质的影响,细根分配会显著减少[28]。较高的比根长和比表面积通常具有较高的水分和资源吸收速率,这表明,林分密度增加后,林木间资源竞争加剧,细根的资源获取策略逐渐转向深层的土壤资源[2]。不同土层中,比根长和比表面积仅在 0 ~ 20 cm 土层表现出随林分密度的增加而减少的趋势,这可能是由于表层土壤水分养分资源丰富,林木通过改变 0 ~ 20 cm 土层细根的资源吸收效率来适应林分密度的改变。在各土层中,坡度和坡向对细根形态的影响均不显著。

3.3 细根性状的影响因素

在森林生态系统中,枯枝落叶在表层被微生物分解后,会向土壤中释放大量养分,从而改善表层的水分和养分条件,为林木细根向表层聚集提供了有利条件[29]。本研究发现,细根生物量密度和根长密度与土壤有机碳、全碳、全氮呈现显著正相关关系,与土壤 C∶N 呈显著负相关关系,这与其他学者对针

叶林土壤性质与细根特征关系的研究结果相似[27]。土壤有机碳与比根长、比表面积呈现显著负相关关系，而土壤全磷与细根性状的相关性较弱。这与燕辉等[30]研究土壤磷与人工林细根垂直分布时得到的结果一致。这些说明，油松人工林细根性状与土壤碳、氮的垂直分布格局密切相关，土壤中较高的碳、氮含量能给林木根系提供更多的养分，是促进根系生长的重要因素[17]。有研究显示，细根生物量密度变化是土壤资源可用性的一个重要指标。在干旱环境中，树木往往是通过增加细根生物量来提高根系表面积和土壤资源吸收效率[31]。林分密度的提高会加剧林木间的竞争，影响资源在地上和地下的分配，改变细根性状和土壤资源的垂直分布，促使林木增加细根生物量来提高细根吸收效率。因此，控制林分密度的大小可以显著影响细根的生长发育，从而影响林地土壤生态系统资源的吸收和利用。

4　结　　论

随林分密度增加，油松人工林细根生物量密度和根长密度先增加后减小，比根长和比表面积呈先减后增的趋势。在垂直方向上，细根生物量密度和根长密度均随土壤深度的增加显著递减。细根生物量密度、比根长和比表面积仅在 0 ~ 20 cm 土层受林分密度的影响显著。在林分密度超过 4 000 株/hm^2 时，比根长和比表面积在垂直方向上呈先增后减的趋势。不同土层和不同林分密度条件下，细根组织密度没有显著差异。坡度和坡向对细根生物量密度和细根形态及其垂直分布均没有显著影响。林分密度、土壤深度、土壤全碳、土壤全氮、土壤 C∶N 和土壤有机碳与细根生物量密度和根长密度显著相关，细根比根长和比表面积仅与林分密度、土壤深度和土壤有机碳显著相关。晋西黄土区油松人工林细根性状及其垂直分布主要受林分密度主导。

参　考　文　献

[1] 李石一宁, 熊德成, 姚晓东, 等. 常绿阔叶林中壳斗科树种细根形态与养分含量的序级变化特征 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(5): 833−840.
Li S Y N, Xiong D C, Yao X D, et al. Morphology and nutrient contents of fine roots from different orders in Fagaceae species in an evergreen broad-leaved forest[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(5): 833−840.

[2] Zou S, Li D, Di N, et al. Stand development modifies effects of soil water availability on poplar fine-root traits: evidence from a six-year experiment[J]. Plant and Soil, 2022, 480(1−2): 165−184.

[3] 孙龙, 胡春雨, 胡同欣. 计划火烧对红松人工林细根生物量的影响 [J]. 生态学杂志, 2024, 43(2): 362−371.
Sun L, Hu C Y, Hu T X. Effect of prescribed burning on fine root biomass of *Pinus koraiensis* plantation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(2): 362−371.

[4] 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 J, He X, Bao H L, 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.

[5] 任杰, 赵成章, 赵夏纬, 等. 金塔绿洲荒漠交错带沙蓬根系分形特征 [J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5298−5305.
Ren J, Zhao C Z, Zhao X W, et al. Fractal characteristics of *Agriophyllum squarrosum* roots in desert-oasis ecotone in Jinta County, Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5298−5305.

[6] Culmsee H, Leuschner C, Moser G, et al. Forest aboveground biomass along an elevational transect in Sulawesi, Indonesia, and the role of Fagaceae in tropical montane rain forests[J]. Journal of Biogeography, 2010, 37(5): 960−974.

[7] 王琪, 于水强, 王维枫, 等. 不同密度和植株配置形状的杨树人工林细根生物量特征研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44(1): 179−185.
Wang Q, Yu S Q, Wang W F, et al. Characteristics of fine-root biomass in poplar plantations with different planting densities and spacing configurations[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 44(1): 179−185.

[8] 张艳杰, 温佐吾. 不同造林密度马尾松人工林的根系生物量 [J]. 林业科学, 2011, 47(3): 75−81.
Zhang Y J, Wen Z W. Root biomass of *Pinus massoniana* plantations under different planting densities[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(3): 75−81.

[9] 贾全全, 罗春旺, 刘琪璟, 等. 不同林分密度油松人工林生物量分配模式 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2015, 39(6): 87−92.
Jia Q Q, Luo C W, Liu Q J, et al. Biomass allocation in relation to stand density in *Pinus tabuliformis* plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 39(6): 87−92.

[10] 徐程扬, 张华, 贾忠奎, 等. 林分密度和立地类型对北京山区侧柏人工林根系的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 95−99.
Xu C Y, Zhang H, Jia Z K, et al. Effects of stand density and site types on root characteristics of *Platycladus orientalis* plantations in Beijing mountainous area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(4): 95−99.

[11] 詹龙飞, 于水强, 王维枫, 等. 水平空间配置对南林-95 杨人工林主要细根性状的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(10): 11−19.
Zhan L F, Yu S Q, Wang W F, et al. Effects of horizontal spatial allocation on main fine root characters of *Populus* × *euramericana* cv. 'Nanlin-95' plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(10): 11−19.

[12] 祝乐, 许晨阳, 耿增超, 等. 秦岭 3 种天然林细根分布特征及其与土壤理化性质的关系 [J]. 林业科学, 2020, 56(2): 24−31.
Zhu L, Xu C Y, Geng Z C, et al. Characterization of fine roots distribution in three natural forests of Qinling Mountains and their relations with soil physical and chemical properties[J]. Scientia Silvologica, 2020, 56(2): 24−31.

[13] 王诗楠, 张卓栋, 韩玥, 等. 河北坝上地区不同坡向植物根系分

布特征研究 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 152−157.
Wang S N, Zhang Z D, Han Y, et al. Research on root distribution characteristics of vegetation on different slope aspects in Bashang Region of Hebei Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2): 152−157.

[14] 朱昊阳, 李洪宇, 王晓蕾, 等. 黄土高原油松冠层气孔导度和蒸腾变化特征与模拟 [J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9130−9142.
Zhu H Y, Li H Y, Wang X L, et al. Characteristics and modeling of canopy stomatal conductance and transpiration of *Pinus tabuliformis* on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9130−9142.

[15] 荐圣淇, 赵传燕, 方书敏, 等. 陇中黄土高原主要造林树种细根生物量分布 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 1905−1911.
Jian S Q, Zhao C Y, Fang S M, et al. Distribution of fine root biomass of main planting tree species in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(7): 1905−1911.

[16] 张帆, 陈建文, 王孟本. 幼龄柠条细根的空间分布和季节动态 [J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5484−5493.
Zhang F, Chen J W, Wang M B. The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young *Caragana korshinskii* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5484−5493.

[17] 李帅锋, 贾呈鑫卓, 杨利华, 等. 林分密度对思茅松人工林根系生物量空间分布的影响 [J]. 西北植物学报, 2017, 37(11): 2265−2272.
Li S F, Jia C X Z, Yang L H, et al. The effect of stand density on the spatial distribution of root biomass of *Pinus kesiya* var. *langbianensis* plantation[J]. Acta Botanica Sinica of Northwest China, 2017, 37(11): 2265−2272.

[18] 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.

[19] 戴银月, 孙平生, 康迪, 等. 黄土丘陵区人工林细根生物量及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(8): 2229−2236.
Dai Y Y, Sun P S, Kang D, et al. Fine root biomass of artificial forests in loess hilly region and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(8): 2229−2236.

[20] 肖义发, 欧光龙, 胥辉. 林木细根生物量分布及其动态研究综述 [J]. 林业调查规划, 2013, 38(1): 34−38, 57.
Xiao Y F, Ou G L, Xu H. Tree fine root biomass distribution and its dynamic research[J]. Forestry Investigation and Planning, 2013, 38(1): 34−38, 57.

[21] 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.

[22] 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 and Technology, 2022, 42(8): 48−58.

[23] 王凯, 宋立宁, 吕林有, 等. 科尔沁沙地主要造林树种细根生物量垂直分布特征 [J]. 植物研究, 2014, 34(6): 824−828.
Wang K, Song L N, Lü L Y, et al. Fine root biomass vertical distribution character of main afforestation tree species in Horqin Sandy Land[J]. Bulletin of Botanical Research, 2014, 34(6): 824−828.

[24] Zhou Z, Shang G Z. Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1−2): 119−129.

[25] 杨向东, 邓磊. 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 [J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 8−16, 131.
Yang X D, Deng L. Fine root biomass and morphological characteristics in *Populus cathayana* plantations at different ages along the eastern margin of the Gonghe Basin[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2023, 38(2): 8−16, 131.

[26] 胡宇美, 马理辉, 李蕊, 等. 黄土高原地区森林生态系统地下生物量影响因素 [J]. 生态学报, 2021, 41(21): 8643−8653.
Hu Y M, Ma L H, Li R, et al. Factor analysis of underground biomass in forest ecosystem on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(21): 8643−8653.

[27] 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, 13(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]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2007, 13(4): 611−619.

[28] Geng Q, Ma X, Fu X, et al. Effects of stand age and inter-annual precipitation variability on fine root biomass in poplar plantations in the eastern coastal China[J]. Forest Ecology and Management, 2022, 505: 119883[2021−11−27]. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119883.

[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.

[30] 燕辉, 苏印泉, 李吉平, 等. 秦岭北坡刺槐人工林细根垂直分布及其与土壤养分的关系 [J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 65−68, 73.
Yan H, Su Y Q, Li J P, et al. Distribution characters of fine root of artificial *Robinia pseudoacacia* forests and its relation to soil nutrients in the northern slope of Qinling Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(3): 65−68, 73.

[31] Weemstra M, Kiorapostolou N, Ruijven J, et al. The role of fine-root mass, specific root length and life span in tree performance: a whole-tree exploration[J]. Functional Ecology, 2020, 34(3): 575−585.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 杨晓晖）