

宁夏油松林细根生物量和土壤特性研究

苏纪帅¹, 金晶炜², 白 于¹, 程积民^{1,2*}

(1. 西北农林科技大学 动物科技学院, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国科学院 水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

摘 要:以宁夏地区油松天然次生林(贺兰山、罗山)和人工林(六盘山)为研究对象,对其 0~40 cm 土层细根生物量、土壤特性及两者之间关系进行研究。结果表明,3 个地区油松林细根生物量集中分布于 0~20 cm 土层,总细根生物量、活细根生物量及其所占比例大小关系表现为贺兰山>六盘山>罗山,死细根生物量呈相反规律。除表层土壤(0~20 cm 土层)含水量外,3 个地区土壤含水量与土壤容重大小关系均表现为:六盘山>贺兰山>罗山,且随土层深度增加,土壤含水量逐渐减小,土壤容重逐渐增大。土壤全 C、全 N 和全 P 含量大小关系表现为:罗山>贺兰山>六盘山。相关分析表明,该区油松天然次生林细根生物量与土壤水分、土壤容重相关性更大,人工林则与土壤养分如全 N、全 P 等指标的相关性更大。

关键词:细根;油松;人工林;天然次生林;固碳

中图分类号:S791.254

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2014)04-0001-07

Studies on Fine Root Biomass and Soil Properties of *Pinus tabulaeformis* Forests in Ningxia

SU Ji-shuai¹, JIN Jing-wei², BAI Yu¹, CHENG Ji-min^{1,2*}

(1. College of Animal Science and Technology, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences /Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Taking natural secondary *Pinus tabulaeformis* forests (occurring in Helan Mountain and Luoshan Mountain) and artificial *P. tabulaeformis* forests (in Liupan Mountain) in Ningxia as research objects, fine root biomass and soil properties in 0–40 cm soil layer, as well as their relationships were examined. The results indicated that fine root biomass in three regions was mainly distributed in 0–20 cm soil layer. The total fine root biomass, alive fine root biomass and their corresponding ratios were ranked in the order of Helan > Liupan > Luoshan. While the dead fine root biomass followed an opposite pattern. Soil water content and soil bulk density of 0–40 cm soil layer were ranked in the order of Liupan > Helan > Luoshan with the exception of soil water content of surface soil (0–20 cm soil layer). With the increase of soil layer depth, soil water content gradually decreased and soil bulk density gradually increased. The total C, N and P contents in the soil were ranked in the order of Luoshan > Helan > Liupan. The correlation analysis between fine root biomass and soil properties exhibited that fine root biomass was more relevant to soil water content and soil bulk density in natural secondary *P. tabulaeformis* forests, and fine root biomass was more relevant to soil nutrients such as total N content and total P in artificial forests.

Key words: fine root; *Pinus tabulaeformis*; artificial forest; natural secondary forest; carbon sequestration

收稿日期:2013-10-12 修回日期:2013-11-21

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050202);国家自然科学基金重点项目(41230852)。

作者简介:苏纪帅,男,博士研究生,研究方向:草地恢复生态学。E-mail: Sujishuai302@163.com

*通信作者:程积民,男,教授,研究方向:草地生态学。E-mail: gyzcjm@ms.iswc.ac.cn

在全球气候变暖的背景下,作为陆地最大的生态系统,森林的固碳作用尤显重要^[1]。细根(直径 ≤ 2 mm)作为植物根系最活跃的组成部分,在森林生态系统能量流动和物质循环过程中起着关键性作用^[2]。据估计细根每年通过周转过程向地下输入的有机量占输入总量的50%左右^[3],已成为土壤有机碳的主要来源。若细根周转过程被忽略,土壤有机物和营养元素的周转将被低估20%~80%^[4],由此可见细根对森林植被固碳功能的发挥影响重大。植物细根生物量受多方面因素影响,其中与植物根系紧密接触的土壤会影响细根生长发育的全过程。土壤水分含量和土壤容重在很大程度上影响细根的垂直分布特征^[5-6]。养分丰富的土壤为细根提供良好的生存环境,其中氮是大多数温带生态系统中C和养分循环动态的限制性资源,适当增施氮肥可延长细根的生命^[7-9]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)因其具有耐干旱瘠薄、较强适应性和抗逆性等特点,被广泛用作水土保持、水源涵养和用材树种,已成为黄土高原地区分布最广的常绿针叶树种^[10-11]。国内已有针对某一区域内油松天然林或人工林细根以及土壤方面的研究报道^[12-15],但由于研究区域、目标等因素的局限性,尚缺乏针对同一区域油松天然林和人工林的研究。通过研究同一区域内油松天然林和人工林,可获悉其细根及土壤信息的现状和差异,通过进一步分析差异产生的原因,能够为油松林的后续管理利用提供理论依据和建议。宁夏油松林集中分布在贺兰山、六盘山和罗山,且目前有关细根的研究多集中于贺兰山。基于此,本研究分别选取宁夏贺兰山、罗山的天然次生油松林和六盘山的油松人工林作为对象,对其细根生物量、林地土壤特性及两者之间关系进行研究,以期探讨宁夏地区油松天然次生林和人工林在细根方面的固碳现状、差异和潜力及其利用方式,为后续油松林固碳研究奠定基础。

1 研究区概况

研究地点为贺兰山国家级自然保护区、六盘山王华南林场和罗山国家级自然保护区3个地区内的典型油松林。

贺兰山国家级自然保护区位于宁夏银川平原和阿拉善高原之间,该区具有温带草原区、荒漠区和山地森林区镶嵌分布的气候特征。年平均温度 -0.9 °C, ≥ 10 °C活动积温 478.6 °C,年均降水量 420 mm,降水集中在6—8月。按植被型可划分为4个植被垂直带:山前荒漠与荒漠草原带→山麓与低山

草原、灌丛带→中山针叶林带→高山、亚高山灌丛、草甸带。贺兰山有野生种子植物69科、324属、647种^[16]。油松林中伴生乔木树种有青海云杉(*Picea crassifolia*)、山杨(*Populus davidiana*)、杜松(*Juniperus rigida*)和灰榆(*Ulmus glaucescens*),林下灌木层有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、灰栒子(*Cotoneaster acutifolius*)、蒙古扁桃(*Amygdalus mongolica*)、狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)、小叶金露梅(*Potentilla parvifolia*)和小叶忍冬(*Lonicera microphylla*),林下草本植物以大披针藁草(*Carex lanceolata*)、林地早熟禾(*Poa nemoralis*)、小红菊(*Dendranthema chanelii*)、蒿属(*Artemisia*)、瓣蕊唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等为主,林下土壤类型为山地草甸土。

六盘山位于黄土高原西部,黄河中上游地区,该区属黄土高原石质山地温带半湿润气候区。年均气温 5.8 °C, ≥ 10 °C积温 1846.6 °C,年降水量 $500\sim 670$ mm。六盘山属温带草原区的南部森林草原地带,地带性植被类型为草甸草原和温带落叶阔叶林。六盘山地区共有维管植物93科359属836种^[17]。土壤类型随海拔升高依次分布山地褐土、山地棕壤和山地草甸土,其中以褐土为主。油松林中油松为绝对优势树种,林下灌木层有山楂(*Crataegus pinnatifida*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、小叶忍冬、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)和野蔷薇(*Rosa multiflora*),草本层有大披针藁草、风毛菊(*Saussurea sylvatica*)、鳞叶龙胆(*Gentiana squarrosa*)、卵叶茜草(*Rubia ovatifolia*)、蒿属和瓣蕊唐松草等,林下土壤类型为山地草甸土。

宁夏罗山国家级自然保护区位于宁夏回族自治区同心县境内,地处贺兰山和六盘山之间的过渡地带,该区属典型温带大陆性气候类型。年均气温 7.5 °C,年降水量 $400\sim 600$ mm, ≥ 10 °C活动积温 3100 °C。从山麓到山顶依次为:山麓荒漠草原层→浅山灌木层→油松、山杨林层→青海云杉林层。保护区有植物资源65科204属366种^[18]。油松林中伴生乔木树种有青海云杉、山杨和白桦(*Betula platyphylla*),林下灌木层有山楂、虎榛子、灰栒子、绣线菊和野蔷薇,草本层主要有大披针藁草、画眉草(*Eragrostis pilosa*)、羊草(*Leymus chinensis*)、戟叶火绒草(*Leontopodium dedekensii*)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、鹅观草(*Roegneria kamoji*)、蒿属、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、四叶葎(*Galium bungei*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)和瓣蕊唐松草等,林下土

壤类型为山地草甸土。

2 材料与方法

2.1 样地设置

在贺兰山和罗山分别选取具有典型代表性的天

然次生油松林作为研究对象,并随机设置3个面积为 $20\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的样地,样地间隔 $>30\text{ m}$,在六盘山选取具有典型代表性的油松人工林为研究对象,并随机设置3个面积为 $20\text{ m}\times 50\text{ m}$ 的样地,样地间隔 $>30\text{ m}$ (表1)。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of plots

样地	序号	海拔/m	郁闭度/%	演替阶段或林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株·hm ⁻²)
六盘山	1	2 149	80.0	28	15.81	6.80	2 590
	2	2 182	90.0	32	13.70	8.15	2 670
	3	2 197	90.0	32	15.30	8.71	3 010
贺兰山	1	2 251	95.0	演替中期	12.83	6.51	2 150
	2	2 238	90.0	演替中期	12.64	6.50	1 817
	3	2 362	80.0	演替中期	16.78	6.58	1 500
罗山	1	2 326	65.0	演替中期	14.80	5.62	1 417
	2	2 335	65.0	演替中期	16.64	6.89	1 367
	3	2 348	65.0	演替中期	13.81	4.99	1 483

2.2 根系调查

2011年7—8月份,利用内径9 cm的土钻,在天然次生油松林的每个样地内随机均衡钻取6个土样,在油松人工林的每个样地内则随机均衡钻取9个土样,用于细根的收集。采土深度为40 cm,分0~20 cm和20~40 cm 2层取样,分别收集装袋,带回实验室。用流水漂洗土样,过孔径0.4 mm的网筛,得到各层根系样品。将洗净的根系编号,挑出直径 $\leq 2\text{ mm}$ 的细根,并根据细根的表皮颜色、弹性、弯折角度和表皮与中柱分离程度的难易,区分活细根和死细根^[5]。细根在65℃下烘干至恒量,称量记为干质量。

$$\text{细根生物量} = \frac{\text{平均每根土芯细根重} \times 100}{\pi (D/2)^2} \quad (1)$$

式中: D 为土样内径(cm),细根生物量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

2.3 土壤特性调查

在油松林的每个样地中心设置1个 $1.0\text{ m}\times 0.5\text{ m}\times 0.5\text{ m}$ 的土壤剖面,进行土壤含水量和容重的测定。采用环刀法,自上而下,按照0~10、10~20、20~30和30~40 cm分4层取出完整的容重土样;并在每一土层中用铝盒收集适量土壤,用于土壤含水量的测定。采用烘干法测定土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)和土壤含水量(%);重铬酸钾法测定土壤全C($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$);凯氏定氮法测定土壤全N($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$);钼锑抗比色法测定土壤全P($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)。

2.4 数据处理

所有数据利用SPSS(18.0)软件进行分析。采用单因素方差分析和Duncan新复极差法比较不同数据组间的差异,用Pearson相关系数评价不同因子间的相关关系。

3 结果与分析

3.1 油松林细根生物量分布特征

油松林0~40 cm土层细根总生物量和活细根生物量大小关系均表现为:贺兰山 $>$ 六盘山 $>$ 罗山,死细根生物量大小关系则表现为贺兰山 $<$ 六盘山 $<$ 罗山,其中贺兰山与六盘山之间差异显著,罗山和六盘山之间无显著性差异(除20~40 cm土层死细根生物量之外)。0~40 cm土层中,活细根生物量占细根总生物量比例表现为:贺兰山 $>$ 六盘山 $>$ 罗山,其中0~20 cm土层中,三者之间均存在显著性差异,20~40 cm土层中,六盘山和罗山之间无显著性差异(表2)。3个研究区油松林0~40 cm土层的细根(活细根和死细根)生物量集中分布在0~20 cm土层,其比例在2/3以上。0~20 cm土层细根生物量所占比例大小关系为:六盘山 $>$ 罗山 $>$ 贺兰山,其中六盘山显著高于贺兰山,贺兰山和罗山之间无显著性差异。这表明宁夏地区油松人工林细根生物量在表层土壤的分配比例高于天然次生林,分布更浅层化。

3.2 油松林土壤特性

3.2.1 土壤含水量和土壤容重的垂直分布特征 3个研究区内油松林地0~20 cm土层即表层土壤的水分含量无显著性差异,20~40 cm土层中土壤含水量则表现为六盘山 $>$ 贺兰山 $>$ 罗山,且三者之间存在显著性差异,但土壤含水量基本均随土层深度增加而降低;0~40 cm土层的土壤容重大小总体表现为:六盘山 $>$ 贺兰山 $>$ 罗山,且土壤容重均随土层深度增加而增大。其中六盘山显著高于贺兰山和罗山。0~10 cm土层六盘山的容重值最大,为1.21,

主要受人为踩踏影响;贺兰山和罗山 30~40 cm 土壤容重,由此可知,油松天然次生林林地土壤容重远层的容重值分别为 0.94 和 0.91 明显小于六盘山土壤容重,优于人工林林地,更利于根系生长和发育(图 1)。

表 2 细根生物量组成分布特征

Table 2 Composition and distribution characteristics of fine root biomass (mean \pm SE)

土层/cm	样地	总细根生物量/(t·hm ⁻²)	活细根生物量/(t·hm ⁻²)	死细根生物量/(t·hm ⁻²)	活细根比例/%
0~20	贺兰山	26.13 \pm 5.39a	21.57 \pm 4.50a	4.55 \pm 0.89b	82.43 \pm 4.86a
	六盘山	23.48 \pm 3.74ab	17.50 \pm 3.03ab	5.97 \pm 0.82a	73.89 \pm 3.84b
	罗山	19.93 \pm 3.02b	13.56 \pm 2.02b	6.37 \pm 1.11a	68.12 \pm 3.69c
20~40	贺兰山	12.75 \pm 2.57a	9.98 \pm 2.06a	2.77 \pm 0.53b	77.99 \pm 3.54a
	六盘山	8.27 \pm 0.92b	5.48 \pm 0.65b	2.79 \pm 0.31b	66.04 \pm 3.55b
	罗山	9.90 \pm 1.41b	6.34 \pm 0.91b	3.56 \pm 0.56a	64.11 \pm 4.16b

注:同一土层同列数据后不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$),图 1 同。

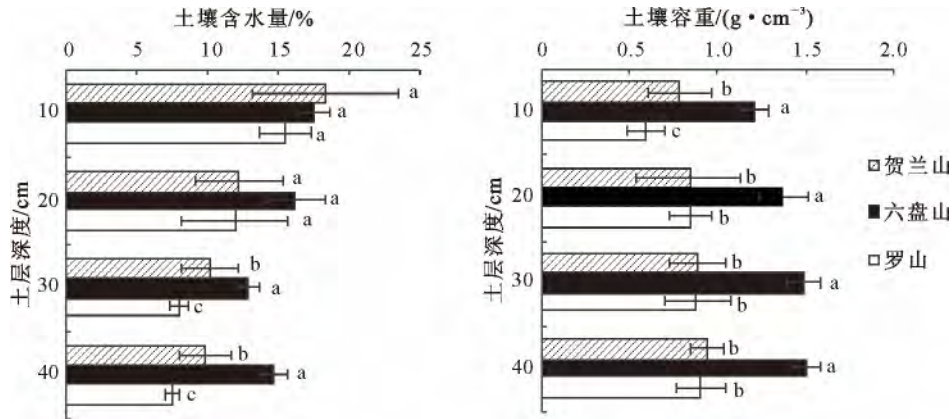


图 1 土壤含水量和土壤容重的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution characteristics of soil water content and soil bulk density

3.2.2 土壤全 C、全 N 和全 P 的垂直分布特征 3 个研究区内油松林土壤全 C、全 N 和全 P 含量均随土层深度增加而减小,依次为罗山>贺兰山>六盘山。其中 0~20 cm 土层中,罗山显著高于贺兰山和六盘山,贺兰山的全 C 和全 P 含量显著高于六盘山。油松林 0~10 cm 土层土壤中的 C 含量和养分

含量均最高,罗山、贺兰山和六盘山土壤全 C 含量分别为 63.60、49.75 和 28.98 mg·g⁻¹,土壤全 N 含量分别为 3.93、3.19 和 2.73 mg·g⁻¹,土壤全 P 含量分别为 0.67、0.42 和 0.23 mg·g⁻¹。可以看出,油松天然次生林林地土壤 C 储量和养分含量显著高于人工林林地土壤(图 2)。

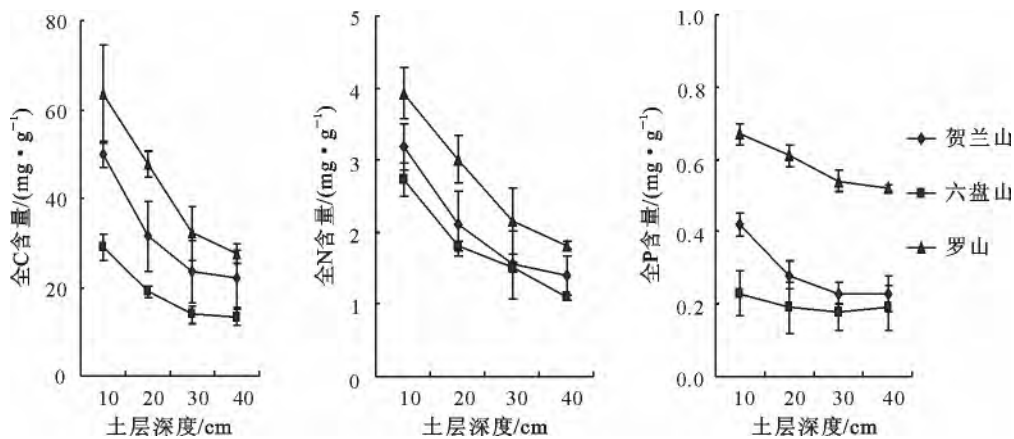


图 2 土壤全 C、全 N 和全 P 的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution characteristics of soil total C, N and P

3.3 油松林细根生物量与土壤特性的相关分析

油松天然次生林细根生物量与土壤水分、土壤容重之间存在极显著相关关系,但活细根生物量及其所占比例与土壤全 C、全 N 和全 P 之间的相关性

较弱;油松人工林细根生物量和活细根比例与土壤容重、土壤全 C、全 N、全 P 相关性较强,但与土壤含水量无显著相关性(表 3)。综上,油松天然次生林细根生物量与土壤含水量、土壤容重的相关性高于

人工林,油松人工林的细根生物量则与土壤养分如全 N 和全 P 等指标的相关性更大。

表 3 细根生物量与土壤特性的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between fine root biomass and soil properties

林分类型	项目	土壤含水量	土壤容重	土壤全 C	土壤全 N	土壤全 P
天然次生林	总细根生物量	0.940**	-0.790**	0.634*	0.583*	0.092
	活细根生物量	0.906**	-0.735**	0.522	0.470	-0.057
	死细根生物量	0.753**	-0.736**	0.866**	0.833**	0.656*
	活细根比例	0.460	-0.153	-0.115	-0.203	-0.755**
人工林	总细根生物量	0.497	-0.642*	0.685*	0.828**	0.846**
	活细根生物量	0.490	-0.619*	0.682*	0.823**	0.848**
	死细根生物量	0.520	-0.722**	0.685*	0.833**	0.828**
	活细根比例	0.531	-0.598*	0.613*	0.839**	0.879**

注: * 表示显著水平 ($p < 0.05$), ** 表示极显著水平 ($p < 0.01$)。

4 结论与讨论

通过调查贺兰山、六盘山和罗山油松林的细根生物量和土壤特性,发现油松林土壤含水量随土层深度增加而减小,土壤容重则随之增大^[11,13],且油松林细根生物量集中分布于表层土壤(0~20 cm),这与表层土壤中较高的水肥耦合性、资源有效性以及微生物活性密不可分^[8,19-21]。研究区油松林细根生物量大小排序为:贺兰山>六盘山>罗山,其中六盘山和罗山之间无显著性差异,但均显著低于贺兰山。在相同的林分密度或郁闭度条件下,油松天然次生林细根生物量将显著高于人工林,已被许多研究验证^[22-23]。与树种、林龄单一的人工林相比,天然(次生)林林分结构复杂和精良,“乔一灌一草”植被结合模式在充分截获光能的同时,有效降低地表水分的蒸发,并对土壤水分和养分结构进行调整,进而植物根系得以充分发展。与其他地区油松林相比,宁夏地区油松林较高的土壤水分、养分含量及伴生乔木树种和林下植物均可以部分解释其较高的细根生物量^[11,13,24-25];此外油松细根表面积与土壤水分呈显著正相关关系^[26],水肥优越的土壤更好地促使细根吸收其生长所需的水分和养分,为较高的细根生物量奠定了基础。

研究区油松林 0~40 cm 土层的土壤含水量与土壤容重大小关系均表现为:六盘山>贺兰山>罗山。土壤含水量的差异主要由六盘山较高的年降水量和罗山较高的水分蒸发量引起,表层土壤水分含量无显著差异则主要是因为天然林可有效降低地表水分蒸发量;同时六盘山油松人工林土壤因受人为踩踏等活动影响而紧实,土壤容重最大,相反地,油松天然次生林伴生阔叶乔木对土壤物理性质的改善作用显著高于油松^[27],这一切使得土壤容重呈现上述规律。土壤全 C、全 N 和全 P 含量大小关系表现为:罗山>贺兰山>六盘山。油松天然次生林较高的细根生物量和细根周转率决定了较高的土壤全 C

含量^[22],土壤中较高的养分含量则与其伴生乔木树种和林下侧根系灌木如沙棘等植物的“增肥效应”密不可分^[28-29]。油松林细根生物量与土壤特性之间的相关分析表明天然次生林细根生物量与土壤含水量、土壤容重的相关性高于其与土壤养分如全 N、全 P 的相关性,人工林则呈相反规律。由此推测土壤含水量仍为天然林生长发育的限制因素,而人工林因为年降雨量大,土壤水分已满足生长需要,相比之下,土壤养分成为该林分发展的限制因素。

结合林分细根生物量和土壤全 C 数据,推测宁夏地区油松天然次生林固碳能力高于人工林。由于宁夏地区并非油松生长的最适宜地区,罗山已为油松分布区的最西边界^[30],故不应过多干扰处于演替中期的天然次生油松林。而对油松人工林而言,在 10~30 a 之间,其细根生物量和碳库储量以较快的速度随树龄增长而增长,树龄达 60 a 后,细根生物量增长缓慢^[24,31]。由此可知,油松人工林具有很大的固碳潜力。虽然研究区油松人工林为中等密度林分,且细根生物量虽然随林分密度增长而增加,但土壤的持水性能一直在减弱^[11],长远看来,通过增加林分密度以发挥油松林固碳潜力的途径收效不大。建议适时、适度对油松人工林进行间伐,因为间伐初期,林下灌木和草本得以迅速生长,间伐形成的林窗减弱了油松枝叶淋溶物对其种子或幼苗的毒害作用,提高了透光率,利于油松幼苗的天然更新^[32-34]。同时由于油松林细根生物量受土壤养分影响很大,可通过施肥、建植混交林或在林下多栽植一些侧根系的灌木如沙棘以便提高林分细根生物量和土壤养分含量。此外,建议六盘山森林管理部门不要盲目追求经济效益或生态效益,可在仿拟该区油松天然次生林的植物种类、密度、结果、空间布局以及演替阶段性等方面的基础上,使该区油松人工林朝“近自然林”方向发展^[35],以便最终实现生态效益、经济效益和社会效益共同发展。

参考文献:

- [1] NORBY R J, HANSON P J, ONEILL E G, *et al.* Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implications for carbon storage [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12 (5): 1261-1266.
- [2] USMAN S, SINGH S P, RAWAT Y S, *et al.* Fine root decomposition and nitrogen mineralization patterns in *Quercus leucotrichophora* and *Pinus roxburghii* forests in central Himalaya [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 131 (1/3): 191-199.
- [3] RYAN M G, LAVIGNE M B, GOWER S T. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (D24): 28871-28883.
- [4] VOGT K A, VOGT D J, PALMIOTTO P A, *et al.* Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species [J]. *Plant and Soil*, 1995, 187 (2): 159-219.
- [5] 韦兰英, 上官周平. 黄土高原不同演替阶段草地植被细根垂直分布特征与土壤环境的关系 [J]. *生态学报*, 2006, 26 (11): 3740-3748.
- WEI L Y, SHANGGUAN Z P. Relationship between vertical distribution of fine root in different successional stages of herbaceous vegetation and soil environment in Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (11): 3740-3748. (in Chinese)
- [6] 杨丽韞, 罗天祥, 吴松涛. 长白山原始阔叶红松 (*Pinus koraiensis*) 林及其次生林细根生物量与垂直分布特征 [J]. *生态学报*, 2007, 27 (9): 3609-3617.
- YANG L Y, LUO T X, WU S T. Fine root biomass and its depth distribution across the primitive Korean pine and broad-leaved forest and its secondary forests in Changbai Mountain, northeast China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (9): 3609-3617. (in Chinese)
- [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 (1): 57-69.
- [8] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P. 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.
- [9] 于水强, 王政权, 史建伟, 等. 氮肥对水曲柳和落叶松细根寿命的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20 (10): 2332-2338.
- YU S Q, WANG Z Q, SHI J W, *et al.* Effects of nitrogen fertilization on fine root lifespan of *Fraxinus mandshurica* and *Larix gmelinii* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (10): 2332-2338. (in Chinese)
- [10] 张光灿, 刘霞, 周泽福, 等. 黄土丘陵区油松水土保持林生长过程与直径结构 [J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (4): 728-734.
- ZHANG G C, LIU X, ZHOU F Z, *et al.* Growth process and diameter structure of *Pinus tabulaeformis* forest for soil and water conservation in Loess Plateau hilly regions [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (4): 728-734. (in Chinese)
- [11] 黄琳琳, 陈云明, 张升, 等. 黄土丘陵区人工油松林地土壤特性及细根特征研究 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31(4): 37-41.
- HUANG L L, CHEN Y M, ZHANG S, *et al.* Distribution characteristics of fine root and soil properties in artificial *Pinus tabulaeformis* forest in Loess Hilly Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31 (4): 37-41. (in Chinese)
- [12] 刘建军, 王得祥, 雷德瑞, 等. 秦岭林区天然油松、锐齿栎林细根周转过程与能态变化 [J]. *林业科学*, 2002, 38 (4): 1-6.
- LIU J J, WANG D X, LEI D R, *et al.* Turnover process and energy change of fine roots of *Pinus tabulaeformis* and *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural forests in Qinling Mountains [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38 (4): 1-6. (in Chinese)
- [13] 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]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13 (4): 611-619. (in Chinese)
- [14] 侯琳, 雷德瑞, 张硕新, 等. 秦岭火地塘林区油松林土壤呼吸时空变异 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (19): 5225-5236.
- HOU L, LEI D R, ZHANG S X, *et al.* Temporal and spatial variations of soil respiration in *Pinus tabulaeformis* forest at Huoditang forest zone in the Qinling Mountains, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (19): 5225-5236. (in Chinese)
- [15] 李海燕, 王金成, 梁健. 辽东栎与油松根际土壤微生物群落结构比较研究 [J]. *土壤通报*, 2010, 41 (6): 1360-1364.
- LI H Y, WANG J C, LIANG J, *et al.* A comparative study about rhizosphere soil microbial community structure between *Quercus liaotungensis* and *Pinus tabulaeformis* [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41 (6): 1360-1364. (in Chinese)
- [16] 梁存柱, 朱宗元, 王炜, 等. 贺兰山植物群落类型多样性及其空间分异 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28 (3): 361-368.
- LIANG C Z, ZHU Z Y, WANG W, *et al.* The diversity and spatial distribution of plant communities in the Helan Mountains [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28 (3): 361-368. (in Chinese)
- [17] 戴君虎, 白洁, 邵力阳, 等. 六盘山植物区系基本特征的初步分析 [J]. *地理研究*, 2007, 26 (1): 91-101.
- DAI J H, BAI J, SHAO L Y, *et al.* A primary analysis of the flora on Liupan Mountains: its nature and characteristics [J]. *Geographical Research*, 2007, 26 (1): 91-101. (in Chinese)
- [18] 徐秀梅, 董永卿. 宁夏大罗山植被垂直带划分 [J]. *宁夏农林科技*, 2000, 5: 10-12.
- [19] SCHMID I, KAZDA M. Root distribution of Norway spruce in mono-specific and mixed stands on different soils [J]. *For-*

- est Ecology and Management, 2002, 159 (1-2): 37-47.
- [20] SILVA J S, REGO F C. Root distribution of a Mediterranean shrubland in Portugal [J]. Plant and Soil, 2003, 255 (2): 529-540
- [21] PUTTSEPP U, LOHMUS K, PERSSON H A, *et al.* Fine-root distribution and morphology in an acidic Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand in SW Sweden in relation to granulated wood ash application [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 221 (1-3): 291-298.
- [22] 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林细根生物量、季节动态及净生产力 [J]. 生态学报, 2003, 23 (9): 1719-1730.
YANG Y S, CHEN G S, LIN P, *et al.* Fine root distribution, seasonal pattern and production in a native forest and monoculture plantations in subtropical China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23 (9): 1719-1730. (in Chinese)
- [23] 王韧, 李晓景, 蔡金标, 等. 闽东沿海秋茄天然林与人工林生物量比较 [J]. 西南林学院学报, 2010, 30 (1): 16-20.
WANG R, LI X J, CAI J B, *et al.* Comparative study on biomass of the natural *Kandelia candel* forest and its plantation in the coastal area of east Fujian Province [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2010, 30 (1): 16-20. (in Chinese)
- [24] 刘建军, 王得祥, 雷瑞德, 等. 火地塘天然油松锐齿栎林细根生物量及其空间变化 [J]. 西北林学院学报, 2004, 19 (1): 1-4.
LIU J J, WANG D X, LEI R D, *et al.* Fine roots biomass and spatial dynamic in the natural stands of sharp-tooth oak Chinese pine at Huoditang Forest Region [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19 (1): 1-4. (in Chinese)
- [25] 刘月梅, 张兴昌, 王丹丹. 黄土性土壤固化对黑麦草生长和根系活力的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (10): 2604-2608.
LIU Y M, ZHANG X C, WANG D D. Effects of loess soil stabilization on *Lolium perenne* L. growth and root activity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (10): 2604-2608. (in Chinese)
- [26] 王迪海, 赵忠, 李剑. 土壤水分对黄土高原主要造林树种细根表面积季节动态的影响 [J]. 植物生态学报, 2010, 34 (7): 819-826.
WANG D H, ZHAO Z, LI J. Impact of soil moisture on the seasonal dynamics of fine root surface area of major afforestation tree species on China's Loess Plateau [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2010, 34 (7): 819-826. (in Chinese)
- [27] 刘建军, 雷瑞德, 吴钦孝, 等. 秦岭天然油松、锐齿栎林根系-土壤互动效应研究 [J]. 西北林学院学报, 2002, 17(1): 1-4.
LIU J J, LEI R D, WU Q X, *et al.* Root-soil interaction of natural Chinese pine and oak forests in Qinling Mountains [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2002, 17 (1): 1-4. (in Chinese)
- [28] 韩恩贤, 韩刚, 薄颖生. 黄土高原油松、侧柏与沙棘人工混交林生长及土壤特性研究 [J]. 西北林学院学报, 2007, 22 (3): 100-104.
HAN E X, HAN G, BO Y S. Studies on the growth and soil properties of *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis* and *Hippophae rhamnoides* mixed plantation on Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22 (3): 100-104. (in Chinese)
- [29] 张云鹏, 崔建国. 油松蒙古栎混交林细根生物量及养分现存量研究 [J]. 浙江林业科技, 2007, 27 (5): 16-20.
ZHANG Y P, CUI J G. Study on fine root biomass and nutrient in mixed plantation of *Quercus mongolicus* and *Pinus tabulaeformis* [J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2007, 27 (5): 16-20. (in Chinese)
- [30] 苏纪帅, 程积民, 高阳, 等. 宁夏大罗山4种主要植被类型的细根生物量 [J]. 应用生态学报, 2013, 24 (3): 626-632.
SU J S, CHENG J M, GAO Y, *et al.* Fine root biomass of four main vegetation types in Daluo Mountain of Ningxia, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (3): 626-632. (in Chinese)
- [31] CAO J X, WANG X P, TIAN Y, *et al.* Pattern of carbon allocation across three different stages of stand development of a Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) forest [J]. Ecological Research, 2012, 27 (5): 883-892.
- [32] 韩文娟, 袁晓青, 张文辉. 油松人工林林窗对幼苗天然更新的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (11): 2940-2948.
HAN W J, YUAN X Q, ZHANG W H. Effects of gap size on seedling natural regeneration in artificial *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (11): 2940-2948. (in Chinese)
- [33] 李登武, 王冬梅, 姚文旭. 油松的自毒作用及其生态学意义 [J]. 林业科学, 2010, 46 (11): 174-178.
LI D W, WANG D M, YAO W X. Autotoxicity of *Pinus tabulaeformis* and its ecology significance [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46 (11): 174-178. (in Chinese)
- [34] 杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等. 采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (1): 64-73.
YANG X Y, HAN Y Z, ZHANG Y X, *et al.* Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (1): 64-73. (in Chinese)
- [35] 胡建忠. 西部地区植被建设的主要途径探讨 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (3): 121-123.
HU J Z. Discussion on main approaches for vegetation construction in western region of China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17 (3): 121-123. (in Chinese)