

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170463

马尾松林冠下套种阔叶树 20 年间土壤肥力变化

詹学齐

(三明学院,福建省资源环境监测与可持续经营利用重点实验室,福建 三明 365004)

摘要:【目的】探讨马尾松公益林林相改造后土壤肥力的变化,以便为马尾松公益林经营提供依据。【方法】在马尾松公益林中采用间伐后套种细柄阿丁枫、木荷、闽楠的林相改造试验,把马尾松纯林改造培育为异龄复层的针阔混交林,并在改造当年、改造后 5 年、改造后 10 年、改造后 20 年对 4 种林分的土壤理化性质进行测定。【结果】4 种林分土壤的水稳性团聚体组成、土壤孔隙、土壤的有机质及养分含量均随着时间的推移呈增加的趋势,并且这种趋势随时间的进展而加大,增加的量表现为马尾松细柄阿丁枫混交林>马尾松木荷混交林>马尾松闽楠混交林>马尾松纯林,前 3 种林分相差较小,但前 3 种林分与马尾松纯林间的差异显著。马尾松纯林套种阔叶树林相改造后 20 年(2016 年)与套种当年(1996 年)相比,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林林地土壤 0~20 cm 层土壤,干土>0.25 mm 水稳性团聚体分别增加了 5.21%、4.67%、3.78%、1.24%,土壤总孔隙度分别增加了 3.82%、3.78%、3.01%、0.49%,土壤有机质分别增加了 9.67、8.39、7.26、2.84 g/kg,土壤全 N 含量分别增加了 0.22、0.13、0.14、0.05 g/kg,土壤全 P 分别增加了 0.10、0.06、0.05、0.04 g/kg。【结论】马尾松公益林套种阔叶树林相改造后形成的混交林具有较好的培肥土壤功能,有利于公益林的地力维持和持续经营。

关键词:马尾松;木荷;细柄阿丁枫;闽楠;套种;土壤肥力

中图分类号:S750;S714.8 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2018)06-0055-08

引文格式:詹学齐.马尾松林冠下套种阔叶树 20 年间土壤肥力变化[J].北京林业大学学报,2018,40(6):55-62.
Zhan Xueqi. Changes in soil fertility after interplanting pure *Pinus massoniana* plantations with broadleaved forest under the canopy during 20 years[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(6): 55-62.

Changes in soil fertility after interplanting pure *Pinus massoniana* plantations with broadleaved forest under the canopy during 20 years

Zhan Xueqi

(Sanming University, Fujian Provincial Key Laboratory of Resources and Environment Monitoring & Sustainable Management and Utilization, Sanming 365004, Fujian, China)

Abstract: [Objective] Long maintenance of soil fertility is an important research content of sustainable forest management in plantation. [Method] This article aims to explore the soil fertility changes on the treatment stands after *Pinus massoniana* pure forest transferred into uneven-aged conifer-hardwood mixed forest by thinning and then interplanting with *Altingia grailipes*, *Schima superba*, *Phoebe bournei*, respectively. The soil physical and chemical properties of four treatments were determined after forest interplanting with broadleaved tree species at the 1st, 5th, 10th and 20th years. [Result] The soil aggregate composition, soil pore, soil organic matter and soil nutrient content of the four treatments of forest soil all showed increasing trend with time, and this trend increased as time went on. The order of the increased amount of soil characteristics showed as *Pinus massoniana* × *Altingia grailipes* (MPA) >

Pinus massoniana × *Phoebe bournei* (MPP) > *Pinus massoniana* × *Schima superba* (MPS) > pure *Pinus massoniana* (PP). The differences in soil characteristics among the first three mixed stands were small, but the differences between the first three mixed forest and pure *Pinus massoniana* stands were significant. Compared the soil characteristics of the transformation forest between the first year and the 20th year, it was found that, in 0–2 cm soil of MPA, MPP, MPS and PP forest, the water stability aggregates of dry soil diameter >0.25 mm increased by 5.21%, 4.67%, 3.78%, 1.24%, the total soil porosity increased by 3.82%, 3.78%, 3.01%, and 0.49%, soil organic matter increased by 9.67, 8.39, 7.26, 2.84 g/kg, soil total nitrogen (N) content increased by 0.22, 0.13, 0.14, 0.05 g/kg, and soil total phosphorus (P) increased by 0.10, 0.06, 0.05, 0.04 g/kg, respectively. [Conclusion] The transformation forest of *Pinus massoniana* intercropping with broadleaved tree species has good function in fertilizing soil, and is conducive to the maintenance and sustainable management of the public welfare forest.

Key words: *Pinus massoniana*; *Schima superba*; *Altingia gracilipes*; *Phoebe bournei*; interplanting; soil fertility

土壤肥力是森林林地最重要的指标之一,它直接影响到林木的生长,从而决定着林分质量。众多研究表明人工针叶纯林的长期经营会导致地力衰退等问题^[1–4]。马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方最重要的造林树种,分布在我国南方广大林区,适应性强,对立地要求不高,能够在土壤肥力较差的林地上生长良好。但马尾松纯林存在着树种单一、林分质量低、生物多样性下降、美学效果差、森林火灾风险大、生态功能等级低等系列问题^[5–7],因此如何对马尾松纯林进行林相改造,提高林分质量和生态功能,已成为当前马尾松纯林经营过程中急需解决的重大课题。许多研究表明营造马尾松阔叶树混交林不仅能够提高生长量,而且有利于林地肥力的提高^[8–14],是维持林地的较好方法。但有关马尾松纯林进行林相改造后对土壤肥力长期观测研究目前国内未见报道。本文在福建省尤溪国有林场进行马尾松林冠下套种阔叶树林相改造试验^[15],并对培育改造后 20 年的林分进行长期的土壤肥力测定,以期对马尾松人工林的经营提供技术支撑。

1 研究地区概况

研究地区位于福建省中部的戴云山脉北侧的福建省三明市尤溪县,地理位置为 117°48′~118°36′E、25°48′~26°24′N,属中亚热带海洋性季风气候,气候温暖,雨量充沛,年平均气温为 18.9℃,1 月平均气温为 8℃,最高气温为 39℃,最低气温为 -4.5℃;年平均降水量为 1 580 mm,年蒸发量为 1 380 mm,年相对湿度为 83%,无霜期为 299~322 d,年积温为 5 783~7 161℃,历年最大日降水量为 131.7 mm,3—6 月为多雨季节,4 个月降水占全年降水量的 56%。

试验地设在福建尤溪县县城附近的尤溪国有林场城关工区水南山场,海拔为 200~500 m,土壤为红壤,土层为 40~80 cm,土壤肥力较差。1995 年林分改造时马尾松为 22 年生的中龄林,平均胸径为 16.5 cm,平均树高为 13.6 m,郁闭度为 0.8,密度为 900 株/hm²。1995 年 10 月在马尾松林中进行强度间伐,间伐后林分郁闭度在 0.4~0.5 之间,马尾松保留密度为 450~600 株/hm²,同年 11 月进行挖暗穴,穴规格为 40 cm×30 cm×30 cm,穴密度为 1 500 穴/hm²,1996 年 1 月造林,造林后 3 年每年采用块状锄草抚育 2 次。基本情况见表 1。

2 试验设计与研究方法

2.1 试验设计

试验采用完全随机区组设计,4 个处理,3 次重复。4 个处理分别为 A(林冠下套种细柄阿丁枫 *Altingia gracilipes* 1 500 株/hm²)、B(林冠下套种木荷 *Schima superba* 1 500 株/hm²)、C(林冠下套种闽楠 *Phoebe bournei* 1 500 株/hm²)、D(不套种为对照)。3 次重复,共设立 12 个标准地,每个标准地面积 20 m×20 m。

2.2 调查方法

分别于改造当年(1996 年)、改造后第 5 年(2001 年)、改造后第 10 年(2006 年)和改造后第 20 年(2016 年)对标准地进行全面调查,调查林木生长量、林地土壤。

2.2.1 生长量调查

在标准地内调查林木树高、胸径和株数,计算单位面积蓄积量。

2.2.2 土壤调查

在标准地内采用 S 型定点布点(5 点)进行土壤

调查,每个点均在两棵树之间,能够代表样地的状况,分别 0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层采集土壤样品,每个样地 5 个点的土样混合后取样土,分别测定土壤物理和化学性质。土壤水分测定采用环刀法,

土壤水稳性团聚体用机械筛分法(干筛和湿筛),有机质用重铬酸钾法,全氮用凯氏法,全磷用氢氧化钠碱熔钼锑抗比色法,水解氮用扩散吸收法,速效磷用盐酸氟化铵法,速效钾用火焰光度计法^[16]。

表 1 马尾松公益林培育改造后 20 年林分状况(2016 年)

Tab.1 Stand status of *Pinus massoniana* ecological public welfare forest 20 years after cultivation and transformation (in 2016)

| 标准地 Standard plot | 树种 Species | 生长量 Growth | | | | | 生物量/Biomass | |
|-------------------------|----------------------------------|--------------|------------|-------------------------------------|--|--|-------------------|---------------------------------|
| | | 树高 | 胸径 | 单株材积 | 林分密度/ (株·hm ⁻²) | 林分蓄积/ (m ³ ·hm ⁻²) | 单株 | 林分/ (t·hm ⁻²) |
| | | Height/ m | DBH/ cm | Individual volume/m ³ | Stand density/ (tree·ha ⁻¹) | Stand volume/ (m ³ ·ha ⁻¹) | Single tree/kg | Stand/ (t·ha ⁻¹) |
| A1 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 20.2 | 27.0 | 0.500 3 | 550 | 275.17 | 432.4 | 237.82 |
| | 细柄阿丁枫 <i>Altingla gracilipes</i> | 13.6 | 15.2 | 0.123 3 | 1 375 | 169.54 | 156.5 | 215.19 |
| B1 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 18.8 | 26.3 | 0.444 8 | 525 | 233.52 | 352.4 | 185.01 |
| | 木荷 <i>Schima superba</i> | 12.4 | 14.0 | 0.096 2 | 1 425 | 137.09 | 122.5 | 174.56 |
| C1 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 19.5 | 26.3 | 0.460 7 | 575 | 264.90 | 378.6 | 217.70 |
| | 闽楠 <i>Phoebe bournei</i> | 8.5 | 7.6 | 0.020 8 | 1 425 | 29.64 | 23.1 | 32.92 |
| D1 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 20.5 | 26.4 | 0.486 7 | 575 | 279.85 | 421.6 | 242.42 |
| A2 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 21.8 | 27.5 | 0.556 8 | 450 | 250.56 | 458.3 | 206.24 |
| | 细柄阿丁枫 <i>Altingla gracilipes</i> | 14.2 | 16.4 | 0.148 5 | 1 400 | 207.90 | 170.3 | 238.42 |
| B2 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 20.8 | 26.9 | 0.511 0 | 425 | 217.18 | 436.5 | 185.51 |
| | 木荷 <i>Schima superba</i> | 13.0 | 14.7 | 0.110 6 | 1 425 | 157.61 | 132.6 | 188.96 |
| C2 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 22.3 | 28.5 | 0.608 0 | 435 | 264.48 | 532.8 | 231.77 |
| | 闽楠 <i>Phoebe bournei</i> | 7.4 | 6.8 | 0.014 7 | 1 425 | 20.95 | 18.9 | 26.93 |
| D2 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 22.4 | 27.1 | 0.556 1 | 425 | 236.34 | 485.2 | 206.21 |
| A3 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 24.1 | 27.9 | 0.629 5 | 300 | 188.85 | 634.9 | 190.47 |
| | 细柄阿丁枫 <i>Altingla gracilipes</i> | 14.6 | 16.5 | 0.154 5 | 1 400 | 216.30 | 158.6 | 222.04 |
| B3 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 25.3 | 29.6 | 0.735 9 | 275 | 202.37 | 748.2 | 205.76 |
| | 木荷 <i>Schima superba</i> | 13.7 | 16.0 | 0.136 8 | 1 375 | 188.10 | 154.3 | 212.16 |
| C3 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 24.5 | 28.8 | 0.678 3 | 325 | 220.45 | 675.8 | 219.64 |
| | 闽楠 <i>Phoebe bournei</i> | 7.6 | 7.2 | 0.016 8 | 1 425 | 23.94 | 21.6 | 30.78 |
| D3 | 马尾松 <i>Pinus massoniana</i> | 24.8 | 28.9 | 0.690 6 | 275 | 189.92 | 687.3 | 189.01 |

3 结果与分析

3.1 马尾松套种阔叶树后不同时期土壤团聚体组成

土壤团聚体是土壤有机碳稳定和保护的载体,团聚体的粒径大小不同,储存有机碳的组成和能力也不同^[17]。马尾松人工林经过间伐套种阔叶树培育后,林分结构发生了很大的改变,由原来的马尾松纯林培育为异龄复层的针阔混交林,从而影响了林地结构和肥力。从表 2 可知,马尾松林分随着时间的推移,林地 0 ~ 20 cm 及 20 ~ 40 cm 层水稳性团聚体含量均呈增加的趋势,但不同林分组成增加的量有较大差异,马尾松纯林增加的量很小,而改造后的马尾松阔叶树混交林增加的量较大。改造的当年

(1996 年)4 种林分 0 ~ 20 cm 层干土水稳性团聚体在 82% ~ 83%,差异不显著。改造后的第 5 年(2001 年)马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林林地土壤 0 ~ 20 cm 层干土水稳性团聚体分别为 84.21% ± 0.39%、84.43% ± 0.34%、84.57% ± 0.27%、82.88% ± 0.27%,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林水稳性团聚体显著高于马尾松纯林($P < 0.05$),3 种改造林分之间均无显著差异。改造后的第 10 年(2006 年)马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林林地土壤 0 ~ 20 cm 层干土水稳性团聚体分别为 85.63% ± 0.37%、85.79% ±

0.21%、85.21% ± 0.44%、83.18% ± 0.41%，马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯林($P < 0.05$)。改造后的第 20 年(2016 年)马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林林地土壤 0 ~ 20 cm 层干土水稳性团聚体分别为 87.56% ± 0.49%、87.45% ± 0.32%、87.12% ±

0.51%、83.89% ± 0.27%，马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯林($P < 0.05$)。增加的量表现为马尾松细柄阿丁枫混交林 > 马尾松木荷混交林 > 马尾松闽楠混交林 > 马尾松纯林。湿土与干土呈现出相同的变化趋势,这表明马尾松人工林经间伐套种阔叶树培育后,土壤结构得到明显改善,土壤的稳定性增强。

表 2 马尾松林相改造后不同时期土壤的水稳性团聚体 >0.25 mm 组成

| Tab. 2 Composition of water stable aggregates of soil in different periods after transformation of <i>Pinus massoniana</i> | | | | | | % |
|--|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------|---|
| 林分 Stand | 土壤类型 Soil type | 1996 | 2001 | 2006 | 2016 | |
| A | 湿 Wet | 73.68 ± 0.76a | 75.850 ± 0.32a | 76.50 ± 0.58a | 79.32 ± 0.78a | |
| | 干 Dry | 82.35 ± 0.99a | 84.21 ± 0.39a | 85.63 ± 0.37a | 87.56 ± 0.49a | |
| B | 湿 Wet | 74.12 ± 0.57a | 76.06 ± 0.19a | 76.85 ± 0.69a | 78.77 ± 0.56b | |
| | 干 Dry | 82.78 ± 0.38a | 84.43 ± 0.34a | 85.79 ± 0.21a | 87.45 ± 0.32a | |
| C | 湿 Wet | 74.48 ± 0.43a | 75.64 ± 0.26b | 76.37 ± 0.68a | 77.55 ± 0.08c | |
| | 干 Dry | 83.34 ± 0.26a | 84.57 ± 0.27a | 85.21 ± 0.44b | 87.12 ± 0.51b | |
| D | 湿 Wet | 73.85 ± 0.55a | 74.22 ± 0.34c | 74.46 ± 0.34b | 74.98 ± 0.60d | |
| | 干 Dry | 82.65 ± 0.34a | 82.88 ± 0.27b | 83.18 ± 0.41c | 83.89 ± 0.27c | |

注:A 表示马尾松细柄阿丁枫混交林,B 表示马尾松木荷混交林,C 表示马尾松闽楠混交林,D 表示马尾松纯林。下同。同列不同小写字母表示林分之间差异显著($P < 0.05$)。Notes: A represents *Pinus massoniana* and *Altingia gracilipes* forest, B represents *Pinus massoniana* and *Schima superba* forest, C represents *Pinus massoniana* and *Phoebe bournei* forest, D represents *Pinus massoniana* pure forest. The same below. Different lowercase letters in the same column indicate the significant differences among different forests ($P < 0.05$).

3.2 马尾松套种阔叶树后不同时期土壤孔隙组成

土壤孔隙是土壤中物质和能量贮存和交换的场所,是土壤众多动物和微生物活动的地方,也是植物根系伸展并从中获取水分和养料的场所^[17]。从表 3 可知,马尾松林分随着时间的推移,土壤孔隙呈增加的趋势,但不同林分组成增加的量有较大差异,马尾松纯林增加的量很小,而改造后的马尾松阔叶树混交林增加的量较大。以 0 ~ 20 cm 层土壤为例,改造的当年(1996 年),马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林土壤总孔隙度分别为 53.74% ± 0.20%、53.97% ± 0.12%、54.04% ± 0.53%、53.87% ± 0.19%，不同林分之间无显著差异($P > 0.05$)。改造后的第 5 年(2001 年),4 种林分土壤总孔隙度分别增加了 0.80%、0.72%、0.94%、0.21%。马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林土壤总孔隙度均显著高于马尾松纯林($P < 0.05$)。改造后的第 10 年(2006 年),4 种林分分别增加了 2.48%、2.23%、1.31%、0.22%，马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯林($P < 0.05$)。改造后的第 20 年(2016 年),4 种林分分别增加了 3.82%、3.78%、3.04%、0.55%，马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松

木荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯林($P < 0.05$)。增加的量表现为马尾松细柄阿丁枫混交林 > 马尾松木荷混交林 > 马尾松闽楠混交林 > 马尾松纯林。

随着改造时间的推移,不同的林分组成土壤孔隙增加的量不同。从表 3 可知,土壤 0 ~ 20 cm 层,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松楠木混交林土壤总孔隙均随着时间的推移而显著增加($P < 0.05$),3 种林分 4 个年度间均有显著增加($P < 0.05$),而马尾松纯林随着时间的推移增加的量较小($P > 0.05$)。

3.3 马尾松套种阔叶树后不同时期土壤养分状况

土壤养分是土壤肥力的重要物质基础,也是植物营养元素的主要来源。土壤养分状况除了土壤的矿物质分解外,很大程度上与凋落物的量及分解速率有关。林木自土壤中吸收的矿物质养分相当一部分是以凋落物的形成归还土壤,由于不同树种生物学特性不同,使得其凋落物的质和量及分解速率均有较大的差异,从而影响土壤的养分状况^[13-14]。马尾松纯林经过套种阔叶树改造后,其凋落物的量比马尾松纯林有较大的提高,其分解速率也较快,回归土壤的养分量较多,从而提高了林地的养分含量。

3.3.1 土壤有机质

从表 4 可知,马尾松林经套种阔叶树培育后,随

表 3 马尾松林相改造后不同时期土壤的孔隙组成

Tab. 3 Pore composition of soil in different periods after transformation of *Pinus massoniana*

| 空隙指标 Pore index | 年份 Year | A | | B | | C | | D | |
|--|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | 0 ~ 20 cm | 20 ~ 40 cm | 0 ~ 20 cm | 20 ~ 40 cm | 0 ~ 20 cm | 20 ~ 40 cm | 0 ~ 20 cm | 20 ~ 40 cm |
| 土壤密度 Soil density/(g·cm ⁻³) | 1996 | 1.23 ± 0.02Ac | 1.31 ± 0.01Ac | 1.22 ± 0.01Ac | 1.30 ± 0.03Ac | 1.23 ± 0.02Ac | 1.31 ± 0.02Ac | 1.23 ± 0.02Ab | 1.30 ± 0.02Aa |
| | 2001 | 1.21 ± 0.01Ac | 1.29 ± 0.03Ac | 1.20 ± 0.02Ab | 1.29 ± 0.03Ab | 1.21 ± 0.02Ac | 1.30 ± 0.02Ac | 1.22 ± 0.03Ab | 1.30 ± 0.03Aa |
| | 2006 | 1.16 ± 0.02Ab | 1.23 ± 0.03Ab | 1.17 ± 0.02Ab | 1.24 ± 0.02Ab | 1.18 ± 0.02Bb | 1.26 ± 0.01Bb | 1.20 ± 0.02Cb | 1.29 ± 0.02Ca |
| | 2016 | 1.08 ± 0.03Aa | 1.16 ± 0.02Aa | 1.12 ± 0.03Ba | 1.18 ± 0.02Ba | 1.14 ± 0.01Ca | 1.19 ± 0.03Ba | 1.17 ± 0.03Da | 1.27 ± 0.02Ca |
| 毛管孔隙 Capillary pore/% | 1996 | 44.45 ± 0.33Ad | 38.56 ± 0.31Ad | 44.59 ± 0.34Ad | 38.72 ± 0.30Ad | 44.68 ± 0.50Ac | 38.83 ± 0.29Ab | 44.53 ± 0.41Aa | 38.64 ± 0.21Aa |
| | 2001 | 44.58 ± 0.35Bc | 39.34 ± 0.32Ac | 44.75 ± 0.25Bc | 39.33 ± 0.32Ac | 44.97 ± 0.31Ab | 39.14 ± 0.22Ab | 44.18 ± 0.11Ca | 38.80 ± 0.15Ba |
| | 2006 | 44.83 ± 0.22Ab | 40.23 ± 0.21Ab | 44.90 ± 0.25Ab | 39.86 ± 0.32Ab | 44.14 ± 0.21Bb | 39.58 ± 0.21Ba | 43.84 ± 0.21Ca | 38.87 ± 0.31Ca |
| | 2016 | 44.88 ± 0.21Aa | 41.15 ± 0.13Aa | 45.08 ± 0.22Aa | 40.67 ± 0.21Ba | 44.25 ± 0.23Ba | 39.76 ± 0.23Ba | 43.95 ± 0.31Ca | 38.92 ± 0.32Ca |
| 非毛管孔隙 Non-capillary pore/% | 1996 | 9.29 ± 0.13Ad | 7.34 ± 0.14Ac | 9.38 ± 0.22Ad | 7.41 ± 0.24Ab | 9.39 ± 0.24Ad | 7.50 ± 0.23Ab | 9.34 ± 0.22Ac | 7.53 ± 0.13Aa |
| | 2001 | 9.96 ± 0.32Bc | 7.75 ± 0.21Bb | 9.94 ± 0.25Bc | 7.80 ± 0.21Ab | 10.01 ± 0.22Ac | 7.62 ± 0.23Cb | 9.90 ± 0.18Cb | 7.62 ± 0.16Ca |
| | 2006 | 11.39 ± 0.22Ab | 8.04 ± 0.14Ab | 11.30 ± 0.15Ab | 8.25 ± 0.14Aa | 11.21 ± 0.17Bb | 7.87 ± 0.21Bb | 10.25 ± 0.11Ca | 7.71 ± 0.14Ca |
| | 2016 | 12.68 ± 0.31Aa | 8.56 ± 0.23Aa | 12.67 ± 0.21Aa | 8.43 ± 0.23Aa | 12.83 ± 0.22Aa | 8.12 ± 0.20Ba | 10.47 ± 0.22Ba | 7.85 ± 0.14Ca |
| 总孔隙 Total pore/% | 1996 | 53.74 ± 0.20Ad | 45.90 ± 0.17Ad | 53.97 ± 0.12Ad | 46.13 ± 0.54Ad | 54.04 ± 0.53Ac | 46.33 ± 0.06Ab | 53.87 ± 0.19Aa | 46.17 ± 0.34Aa |
| | 2001 | 54.54 ± 0.03Bc | 47.09 ± 0.11Ac | 54.69 ± 0.03Bc | 47.13 ± 0.54Ac | 54.98 ± 0.53Ab | 46.76 ± 0.01Bb | 54.08 ± 0.36Ca | 46.42 ± 0.31Ca |
| | 2006 | 56.22 ± 0.44Ab | 48.27 ± 0.35Ab | 56.20 ± 0.40Ab | 48.11 ± 0.46Ab | 55.35 ± 0.38Bb | 47.45 ± 0.42Ba | 54.09 ± 0.32Ca | 46.58 ± 0.45Ca |
| | 2016 | 57.56 ± 0.52Aa | 49.71 ± 0.36Aa | 57.75 ± 0.43Aa | 49.10 ± 0.44Aa | 57.08 ± 0.45Ba | 47.88 ± 0.43Ba | 54.42 ± 0.53Ca | 46.77 ± 0.46Ca |

注:同行不同大写字母表示林分之间差异显著 ($P < 0.05$), 同列不同小写字母表示同一林分不同时期之间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。Notes: difference capital letters in the same line mean the significant differences among different forests ($P < 0.05$), difference lowercase letters in the same column indicate the significant difference among different periods. The same below.

着时间的推移,土壤的有机质呈增加的趋势。以 0 ~ 20 cm 层土壤为例,改造的当年(1996 年),土壤有机质含量在 4 种林分间无显著差异 ($P > 0.05$)。改造后的第 5 年(2001 年),马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林 4 种林分土壤有机质分别增加了 1.53、1.92、2.07、0.63 g/kg,马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林土壤有机质均显著高于马尾松纯林 ($P < 0.05$)。改造后的第 10 年(2006 年),4 种林分土壤有机质分别增加了 5.32、4.62、3.89、1.58 g/kg,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯林 ($P < 0.05$)。改造后的第 20 年(2016 年),4 种林分土壤有机质分别增加了 9.70、8.39、7.23、2.84 g/kg,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯林 ($P < 0.05$)。

随着改造时间的推移,不同的林分土壤有机质均有不同程度的增加。从表 4 可知,土壤 0 ~ 20 cm 层,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松楠木混交林和马尾松纯林 4 种林分土壤有机质均随着时间的推移而显著增加 ($P < 0.05$),4 种林分在 4 个年度间均有显著增加 ($P < 0.05$)。

3.3.2 土壤全氮含量

从表 4 可知,马尾松林分经套种阔叶树培育后,

4 种林分土壤全 N 含量有所增加。以土壤 0 ~ 20 cm 层为例,改造后的第 5 年(2001 年),马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林土壤分别增加了 0.02、0.02、0.02、0.01 g/kg,4 种林分差异较小 ($P > 0.05$)。改造后的第 10 年(2006 年),4 种林分土壤全 N 含量分别增加了 0.08、0.05、0.07、0.03 g/kg,前 3 种增加的量均比马尾松纯林高,但差异不显著 ($P > 0.05$)。改造后的第 20 年(2016 年),4 种林分土壤全 N 含量分别增加了 0.22、0.13、0.14、0.05 g/kg,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林均达到显著高于马尾松纯林 ($P < 0.05$)。

随着改造时间的推移,不同的林分全氮含量增加的量不同。从表 4 可知,土壤 0 ~ 20 cm 层,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松楠木混交林全氮含量均随着时间的推移而显著增加 ($P < 0.05$),而马尾松纯林随着时间的推移增加的量较小 ($P > 0.05$)。

3.3.3 土壤全磷含量

我国南方林区土壤普遍缺磷,因此土壤磷的含量是土壤肥力的重要指标^[18]。从表 4 可知,马尾松林分经套种阔叶树培育后,4 种林分土壤全 P 含量有所增加,但增加的量较少。4 个年度 4 种林分间均无显著差异。以土壤 0 ~ 20 cm 层为例,马尾松细

柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林土壤 2016 年比 1996 年全 P 含量分别增加了 0.10、0.06、0.05、0.04 g/kg,前 3 种增加的量分别是马尾松纯林的 250.0%、150.0%、125.5%,表明改造林分比没有改造林分增加的量 大,有利于土壤 P 的积累。

随着改造时间的推移,不同的林分全 P 含量增加 的量不同。从表 4 可知,土壤 0~20 cm 层,马尾 松细柄阿丁枫林分随着时间的推移而显著增加 ($P<0.05$),而马尾松木荷混交林、马尾松楠木混交 林、马尾松纯林林分随着时间的推移增加的量均较 小($P>0.05$)。

3.3.4 土壤水解氮、速效磷、速效钾含量

从表 4 可知,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松 木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林 4 种林 分土壤水解氮含量 1996 年和 2001 年差异较小 ($P>0.05$)。2006 年与 2016 年差异较大 ($P< 0.05$),2016 年马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木 荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯

林($P<0.05$),2016 年 4 种林分间均达到显著差异, 表现为马尾松细柄阿丁枫混交林>马尾松木荷混交 林>马尾松闽楠混交林>马尾松纯林。不同年度比 较,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、 马尾松闽楠林分均随着时间的推移而极显著的增加 ($P<0.05$),而马尾松纯林林分随着时间的推移增 加的量较小($P>0.05$)。

速效磷含量,1996 年表现为马尾松闽楠混交 林>马尾松细柄阿丁枫混交林>马尾松纯林>马尾 松木荷混交林,2001 年表现为马尾松闽楠混交林> 马尾松细柄阿丁枫混交林>马尾松木荷混交林>马 尾松纯林,2006 年表现为马尾松细柄阿丁枫混交 林>马尾松闽楠混交林>马尾松木荷混交林>马尾 松纯林,2016 年表现为马尾松细柄阿丁枫混交林> 马尾松木荷混交林>马尾松闽楠混交林>马尾松纯 林,但差异不显著($P>0.05$)。4 种林分随着时间的 推移增加的量也均较小($P>0.05$)。

速效钾含量,1996 年和 2001 年 4 种林分基本 相近,差异不显著($P>0.05$);2006 年马尾松闽楠混

| 表 4 马尾松林相改造后不同时期土壤的养分含量 | | | | | | | | | | |
|--|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--|
| Tab.4 Soil nutrient content in different periods after transformation of <i>Pinus massoniana</i> | | | | | | | | | | |
| 养分含量 Nutrient content | 年份 Year | A | | B | | C | | D | | |
| | | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | 0~20 cm | 20~40 cm | |
| 有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹) | 1996 | 20.58±0.49Ac | 15.32±0.31Ad | 21.12±0.32Ad | 15.21±0.19Ad | 20.73±0.37Ad | 15.83±0.31Ac | 21.10±0.33Ad | 15.77±0.22Ab | |
| | 2001 | 22.11±0.43Bc | 16.21±0.19Ac | 23.04±0.24Ac | 15.98±0.32Ac | 22.80±0.35Ac | 16.02±0.32Ab | 21.73±0.22Cc | 15.68±0.21Bb | |
| | 2006 | 25.90±0.33Ab | 17.55±0.31Ab | 25.74±0.22Ab | 16.85±0.41Bb | 24.62±0.31Bb | 16.45±0.32Cb | 22.68±0.31Cb | 16.64±0.23Ca | |
| | 2016 | 30.28±0.38Aa | 18.76±0.22Aa | 29.51±0.31Aa | 17.66±0.31Ba | 27.96±0.33Ba | 17.48±0.31Ba | 23.94±0.41Ca | 16.89±0.32Ca | |
| 全 N Total N/(g·kg ⁻¹) | 1996 | 1.63±0.02Ac | 1.17±0.02Ab | 1.65±0.03Ab | 1.15±0.01Ab | 1.61±0.02Ac | 1.18±0.03Aa | 1.64±0.03Aa | 1.17±0.02Aa | |
| | 2001 | 1.65±0.03Ac | 1.19±0.02Bb | 1.67±0.03Ab | 1.18±0.03Bb | 1.63±0.02Ac | 1.21±0.03Aa | 1.65±0.03Aa | 1.17±0.03Ba | |
| | 2006 | 1.71±0.03Ab | 1.23±0.03Aa | 1.70±0.02Ab | 1.24±0.03Aa | 1.68±0.03Ab | 1.23±0.02Aa | 1.67±0.03Aa | 1.18±0.02Ba | |
| | 2016 | 1.85±0.03Aa | 1.26±0.03Aa | 1.78±0.03Ba | 1.28±0.04Aa | 1.75±0.02Ba | 1.25±0.03Aa | 1.69±0.02Ca | 1.20±0.02Ba | |
| 全 P Total P/(g·kg ⁻¹) | 1996 | 0.38±0.02Ab | 0.28±0.02Ab | 0.40±0.02Aa | 0.29±0.03Aa | 0.38±0.01Ab | 0.27±0.02Ab | 0.39±0.02Aa | 0.28±0.02Aa | |
| | 2001 | 0.40±0.02Ab | 0.30±0.02Ab | 0.41±0.03Aa | 0.32±0.03Aa | 0.39±0.01Ab | 0.29±0.03Ab | 0.38±0.01Aa | 0.29±0.02Aa | |
| | 2006 | 0.42±0.03Ab | 0.34±0.03Aa | 0.43±0.04Aa | 0.34±0.02Aa | 0.41±0.02Aa | 0.32±0.03Aa | 0.39±0.02Aa | 0.29±0.03Aa | |
| | 2016 | 0.48±0.04Aa | 0.37±0.03Aa | 0.46±0.03Aa | 0.36±0.03Aa | 0.43±0.03Aa | 0.35±0.02Aa | 0.41±0.02Aa | 0.31±0.03Aa | |
| 水解性 N Hydrolytic N/(mg·kg ⁻¹) | 1996 | 74.32±1.12Ac | 50.34±1.11Ad | 73.78±1.13Ac | 50.21±0.81Ad | 74.01±0.97Ac | 50.73±1.13Ac | 73.35±1.07Aa | 50.29±1.04Aa | |
| | 2001 | 76.58±1.31Ac | 53.46±1.13Ac | 75.81±1.14Ac | 52.89±1.02Ac | 75.56±1.12Ac | 51.98±1.13Ac | 73.76±0.92Aa | 50.65±1.11Aa | |
| | 2006 | 79.76±1.12Ab | 57.29±1.15Ab | 78.03±1.32Bb | 55.76±1.22Bb | 76.87±1.12Cb | 53.24±1.23Cb | 74.23±1.13Da | 51.17±1.11Da | |
| | 2016 | 85.46±1.32Aa | 63.56±1.32Aa | 82.39±1.22Ba | 59.70±1.17Ba | 79.44±1.14Ca | 55.62±1.31Ca | 75.48±1.24Da | 52.35±1.06Da | |
| 速效磷 P Available P/(mg·kg ⁻¹) | 1996 | 2.18±0.08Aa | 1.78±0.11Aa | 2.10±0.12Aa | 1.70±0.12Aa | 2.23±0.22Aa | 1.82±0.06Aa | 2.13±0.11Aa | 1.75±0.11Aa | |
| | 2001 | 2.27±0.14Aa | 1.85±0.14Aa | 2.19±0.14Aa | 1.77±0.1Aa | 2.28±0.27Aa | 1.85±0.13Aa | 2.17±0.12Aa | 1.79±0.12Aa | |
| | 2006 | 2.35±0.21Aa | 1.89±0.14Aa | 2.25±0.19Aa | 1.85±0.12Aa | 2.30±0.24Aa | 1.89±0.12Aa | 2.21±0.14Aa | 1.80±0.13Aa | |
| | 2016 | 2.56±0.23Aa | 2.13±0.12Aa | 2.48±0.26Aa | 2.09±0.22Aa | 2.38±0.22Aa | 2.03±0.18Aa | 2.26±0.15Aa | 1.84±0.12Aa | |
| 速效 K Available K/(mg·kg ⁻¹) | 1996 | 77.85±1.21Ac | 62.34±1.21Ad | 76.59±1.24Ac | 61.90±1.32Ac | 78.53±1.31Ac | 62.56±1.23Ad | 77.72±1.13Ab | 62.87±1.22Ab | |
| | 2001 | 79.67±1.21Ac | 65.42±1.35Ac | 78.75±1.21Ac | 63.47±1.31Ab | 80.21±1.18Ac | 64.88±1.24Ac | 78.86±1.11Ab | 63.90±1.25Ab | |
| | 2006 | 82.56±1.32Ab | 68.55±1.31Ab | 81.90±1.22Ab | 66.01±1.44Bb | 82.77±1.22Ab | 67.32±1.24Ab | 79.02±1.11Bb | 64.21±1.18Ca | |
| | 2016 | 95.81±1.51Aa | 78.63±1.32Aa | 90.35±1.51Ba | 74.87±1.42Ba | 87.75±1.24Ca | 71.78±1.21Ca | 82.41±1.34Da | 66.36±1.22Da | |

交林、马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林均显著高于马尾松纯林($P < 0.05$)；2016 年马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林均显著高于马尾松纯林($P < 0.05$)。不同年度比较,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林分均随着时间的推移而显著的增加($P < 0.05$),而马尾松纯林林分随着时间的推移较显著的增加($P < 0.05$)。

4 结论和讨论

土壤肥力是土壤的基本属性和本质特征的反映,是土壤从营养和环境方面供应与协调植物生长的能力,表现为直接为植物生长提供所需要的物质养分和机械支撑^[19]。本研究经过 20 年的试验发现,马尾松纯林的林地土壤的理化性质发生变化,土壤养分含量是随着时间的推移逐步提高的,土壤肥力也是慢慢提高的,这与传统的针叶纯林会引起地力衰退^[2-8]的说法是不同的。马尾松林分由于针叶是束状的,较稀疏,林下透光较多,林下植被旺盛,而且马尾松的针叶较易分解,自肥能力较强,因此不会引起地力衰退。

本研究发现,在马尾松纯林中套种阔叶树从而使马尾松纯林改变为异龄复层的针阔混交林^[25],不仅有利于改善林分结构提高林分生产力,而且也有利于林地土壤理化性质的改善,有利于土壤肥力的提高。本研究选择细柄阿丁枫、木荷、闽楠 3 个阔叶树种进行马尾松林冠下套种,形成的 3 种针阔混交林及马尾松纯林 4 种林分土壤的水稳性团聚体组成、土壤孔隙、土壤的有机质及养分含量均随着时间的推移呈增加的趋势,并且这种趋势随时间的进展而加大,增加的量表现为马尾松细柄阿丁枫混交林 > 马尾松木荷混交林 > 马尾松闽楠混交林 > 马尾松纯林,前 3 种林分相差较小,但前 3 种林分与马尾松纯林间的差异显著。这与陈绍栓等在杉木纯林中套种细柄阿丁枫、木荷的研究相一致^[13-14]。从表 1 可知,采用间伐套种的培育改造不仅保证了套种阔叶树种的生长,而且也促进了马尾松的生长,有利于培育马尾松大径材,这些都表明对马尾松纯林进行套种阔叶树的培育改造是提高林分生产力和生态功能的有效方法。

土壤理化性质是评价土壤肥力的重要指标,国内外研究表明,不同森林植被中土壤理化性状差异较大^[19-24],因此对不同林分的土壤肥力进行研究,可为林业生产经营提供科学依据。本研究发现,选择不同的阔叶树种在马尾松林冠进行套种其效果是不同的,这不仅表现在林木生长量上,同时也表现在

改善土壤肥力的功能上。马尾松纯林套种阔叶树林相改造后 20 年(2016 年)与套种当年(1996 年)相比,马尾松细柄阿丁枫混交林、马尾松木荷混交林、马尾松闽楠混交林、马尾松纯林林地土壤 0 ~ 20 cm 层土壤,干土水稳性团聚体分别增加了 5.21%、4.67%、3.78%、1.24%,土壤总孔隙度分别增加了 3.82%、3.78%、3.01%、0.49%,土壤有机质分别增加了 9.67、8.39、7.26、2.84 g/kg,土壤全 N 含量分别增加了 0.22、0.13、0.14、0.05 g/kg,土壤全 P 含量分别增加了 0.10、0.06、0.05、0.04 g/kg,这些都表明套种不同的树种不仅生长量有差异,而且培肥土壤的效果也有较大的差异。细柄阿丁枫是耐荫树种,在马尾松林冠下生长良好,生长量最大,林分结构也较好,林地的培肥功能最好;木荷是中性树种,在马尾松林冠下生长会受到一定的影响,生长量不如全光照,但生长基本上还是良好的,因而培肥土壤功能也较好;闽楠是珍贵树种,虽是耐荫树种,但由于生长较慢,所形成的混交林结构较简单,生长量较差,培肥土壤的功能也较差。所以在马尾松纯林中进行套种阔叶树的培育改造中,要选择耐荫的生长快的乡土阔叶树种。

参 考 文 献

[1] 马祥庆,范少辉,陈绍栓,等. 杉木人工林连作生物生产力的研究[J]. 林业科学,2003,39(2):78-83.
Ma X Q, Fan S H, Chen S S, et al. Study on biomass productivity of Chinese fir plantations after successive planting[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003,39(2):78-83.
[2] 张昌顺,李昆. 人工林地力的衰退与维护研究综述[J]. 世界林业研究,2005,18(1):17-21.
Zhang C S, Li K. Advance in research on soil degradation and soil improvement of timber plantations[J]. World Forestry Research, 2005,18(1):17-21.
[3] 范少辉,盛炜彤,马祥庆,等. 多代连栽对不同发育阶段杉木人工林生产力的影响[J]. 林业科学研究,2003,16(5):560-567.
Fan S H, Sheng W T, Ma X Q, et al. Effect of successive planting on productivity of Chinese fir of different age plantations[J]. Forest Research, 2003,16(5):560-567.
[4] 马祥庆. 杉木人工林连栽生产力下降研究进展[J]. 福建林学院学报,2001,21(4):380-384.
Ma X Q. A review for research of productivity decline in Chinese fir plantation after successive plantings[J]. Journal of Fujian College of Forestry,2001,21(4):380-384.
[5] 张华,叶章发,李宝福. 杉木、马尾松轮作对林地土壤肥力和林木生长的影响[J]. 林业科学,2001,37(5):10-15.
Zhang H, Ye Z F, Li B F. The effects of rotating plantation on the soil fertility of forest land and the growth of stand[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001,37(5):10-15.
[6] 杨承栋,孙启武,焦如珍,等. 大青山二代马尾松土壤性质变化与地力衰退关系的研究[J]. 土壤学报,2003,40(2):267-273.
Yang C D, Sun Q W, Jiao R Z, et al. Studies on the relationship

- between soil property changes and soil degradation under 1st and 2nd rotation masson pine plantation at Daqingshan [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 267–273.
- [7] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2610–2617.
- Cui N J, Zhang D J, Liu Y, et al. Plant diversity and soil physicochemical properties under different aged *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10): 2610–2617.
- [8] 洪宜聪. 马尾松闽粤栲异龄复层混交林的林分特征及涵养水源能力[J]. *东北林业大学学报*, 2017, 45(4): 53–59.
- Hong Y C. Stand characteristics and water conservation capacity of *Pinus massoniana* and *Castanopsis fissa* mixed plantation [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2017, 45(4): 53–59.
- [9] 丁敏, 倪荣新, 毛轩平. 马尾松林下套种阔叶树生长状况初报[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(3): 463–466.
- Ding M, Ni R X, Mao X P. Growth of *Pinus massoniana* and broad-leaved tree mixed forest [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2012, 29(3): 463–466.
- [10] 樊后保, 刘文飞, 苏兵强. 马尾松林下栽植闽粤栲对生态系统养分循环的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 28(5): 610–615.
- Fan H B, Liu W F, Su B Q. Impact of underplanting *Castanopsis fissa* on nutrient cycling in *Pinus massoniana* stand [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2008, 28(5): 610–615.
- [11] 林德喜, 樊后保, 苏兵强, 等. 马尾松林下套种阔叶树土壤理化性质的研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 655–659.
- Lin D X, Fan H B, Su B Q, et al. Effect of interplantation of broad-leaved trees in *Pinus massoniana* forest on physical and chemical properties of the soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 655–659.
- [12] 张明锦, 陈良华, 张健, 等. 马尾松人工林林窗内凋落叶微生物生物量碳和氮的动态变化[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 672–680.
- Zhang M J, Chen L H, Zhang J, et al. Dynamics of microbial biomass carbon and nitrogen during foliar litter decomposition under artificial forest gap in *Pinus massoniana* plantation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(3): 672–680.
- [13] 陈绍栓. 杉木细柄阿丁枫混交林涵养水源功能和土壤肥力的研究[J]. *生态学报*, 2002, 22(6): 957–961.
- Chen S S. The water holding capacity and soil fertility in the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Altingia gracilides* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 957–961.
- [14] 陈绍栓, 陈淑容. 杉木木荷混交林涵养水源功能和土壤肥力[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4): 599–603.
- Chen S S, Chen S R. Functions of the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Schima superba* in water conservation and soil fertility buildup [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(4): 599–603.
- [15] 陈绍栓, 许建伟, 吴载璋, 等. 不同强度疏伐对马尾松林分水源涵养功能时空格局的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(20): 6753–6760.
- Chen S S, Xu J W, Wu Z Z, et al. Effects of different thinning intensities on temporal and spatial patterns of water conservation of *Pinus massoniana* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(20): 6753–6760.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil physical and chemical property analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978.
- [17] 林大仪. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 98.
- Lin D Y. Edaphology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002: 98.
- [18] Wu P W, Ma X M, Tigabu M T, et al. Root morphological plasticity and biomass production of two Chinese fir clones with high phosphorus efficiency under low phosphorus stress [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(2): 228–234.
- [19] 易秀, 谷晓静, 侯燕卿, 等. 陕西省泾惠渠灌区土壤肥力质量综合评价[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(2): 132–137.
- Yi X, Gu X J, Hou Y Q, et al. Comprehensive assessment on soil fertility quality in Jinghuiqu irrigation district of Shaanxi Province [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(2): 132–137.
- [20] Rhoades C C, Miller S P, Shea M M. Soil properties and soil nitrogen dynamics of prairie-like forest openings and surrounding forests in Kentucky's Knobs Region [J]. *American Midland Naturalist*, 2004, 152(1): 1–11.
- [21] Fu B, Chen L, Ma K, et al. The relationships between land use and soil conditions in the hilly area of the Loess Plateau in northern Shaanxi, China [J]. *Catena*, 2000, 39(1): 69–78.
- [22] 杨晓娟, 王海燕, 刘玲, 等. 东北过伐林区不同林分类型土壤肥力质量评价研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1553–1560.
- Yang X J, Wang H Y, Liu L, et al. Evaluation of soil fertility quality under different forest stands in over-logged forest region, northeast China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1553–1560.
- [23] 李惠通, 张芸, 魏志超, 等. 不同发育阶段杉木人工林土壤肥力分析[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2): 322–328.
- Li H T, Zhang Y, Wei Z C, et al. Evaluation on soil fertility of Chinese fir plantations in different development stages [J]. *Forest Research*, 2017, 30(2): 322–328.
- [24] 曹成有, 朱丽辉, 蒋德明, 等. 科尔沁沙地不同人工植物群落对土壤养分和生物活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 168–171.
- Cao C Y, Zhu L H, Jiang D M, et al. Effects of artificial sand-fixation communities on soil nutrients and biological properties in horqin sandy land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 168–171.
- [25] 樊后保, 李燕燕, 苏兵强, 等. 马尾松-阔叶树混交异龄林生物量与生产力分配格局[J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 4162–4172.
- Fan H B, Li Y Y, Su B Q, et al. Allocation pattern of biomass and productivity in the mixed uneven-aged stands of Masson's pine and hardwood species [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 4162–4172.

(责任编辑 范娟
责任编委 赵秀海)