

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5期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.05.009

论文标题： 间伐对塞罕坝地区樟子松人工林生长及林下植物物种多样性的影响

作　　者： 张 菲，杨金蕾，许中旗，等

收稿日期： 2025-01-04

引文格式： 张菲,杨金蕾,许中旗,等.间伐对塞罕坝地区樟子松人工林生长及林下植物物种多样性的影响[J].中南林业科技大学学报,2026,46(5):80-88.

ZHANG F, YANG J L, XU Z Q, et al. Effects of thinning on the growth and the diversity undergrowth of *Pinus sylvestris* var. *mongholica* plantation in Saihanba area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):80-88.

相关论文推荐

Recommended articles

不同间伐强度对自然保护区人工林植被多样性及分布格局的影响——以河北省塞罕坝机械林场为例

Effects of tending thinning on the vegetation diversity and distribution pattern of artificial forests in nature reserves: a case study of Saihanba mechanical forest farm in Hebei Province

抚育间伐对川西柳杉人工林生长和林下植被多样性的影响

Effects of thinning on tree growth and understory vegetation diversity of *Cryptomeria fortunei* plantation

抚育间伐强度对针阔混交林碳动态变化的影响

Effects of thinning intensity on the carbon dynamics in mixed coniferous forests

抚育间伐对栓皮栎人工林直径和树高分布的影响

Effect of thinning on distribution of tree diameter and height in *Quercus variabilis* plantation

基于空间结构优化的长白落叶松人工林分间伐模型构建

Establishment of thinning models for *Larix olgensis* plantation based on spatial structure optimization

大兴安岭落叶松白桦混交林空间分布格局及其关联性对间伐强度的响应

Responses of spatial distribution patterns and associations of *Larix gmelinii* and *Populus davidiana* mixed forests in Daxing'an mountains to different tending thinning intensities

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.05.009 http: //qks.csuft.edu.cn

间伐对塞罕坝地区樟子松人工林生长及林下植物物种多样性的影响

张 菲[1]，杨金蕾[2]，许中旗[2]，贾 磊[2]，付立华[1]，程 顺[1]
（1. 河北省塞罕坝机械林场，河北 围场 068466；2. 河北农业大学 林学院，河北 保定 071000）

摘 要：【目的】了解间伐强度对塞罕坝地区樟子松人工林生长及林下植物物种多样性的影响，为樟子松人工林的科学经营提供科学依据。【方法】利用长期监测样地，对不同间伐强度下的樟子松人工林的胸径、材积、林分蓄积及物种多样性进行了研究。【结果】抚育间伐 3 a 后，间伐林分单木的胸径、材积的年均生长量均显著高于对照，低（LT，保留密度为 2 000 株 /hm^2）、中（MT，保留密度为 1 667 株 /hm^2）、高（HT，保留密度为 1 333 株 /hm^2）3 种间伐强度的胸径年生长量较对照（CK，密度为 3 200 ～ 3 425 株 /hm^2）分别增加了 22.22%、48.15% 和 81.48%；材积年生长量则较对照分别提升了 58.00%、72.00% 和 130.00%；间伐改变了林分的径级分布，使林分的径级结构从正态分布向对数正态分布转化；间伐林分的蓄积年生长量均低于对照，但未达到显著水平，而林分蓄积生长率则高于 CK，且 HT、MT 与对照之间达到了显著水平（$P < 0.05$），HT、MT 和 LT 的蓄积生长率较 CK 分别提升了 38.02%、23.37% 和 2.97%。间伐明显提升了林下植物的生物量和物种数量，HT、MT 和 LT 3 种处理下的林下生物量较对照提升了 123.53%、94.12% 和 35.29%，物种数量分别提升了 46.67%、70.00% 和 36.67%；Simpson 指数、Shannon 指数和 Margalef 指数随间伐强度的增加而增加，但各处理间差异未达到显著水平，林下植物生物量较物种多样性对抚育间伐更为敏感。【结论】间伐明显提升了塞罕坝地区樟子松人工林的胸径和单株材积的生长量、林分蓄积生长率，以及林下植物的生物量和物种数量。综合抚育间伐对林分生长及多样性的影响来看，当前塞罕坝地区樟子松人工林的适宜抚育强度为高强度，即保留密度 1 333 株 /hm^2。

关键词：塞罕坝地区；樟子松人工林；生长量；生物量；物种多样性
中图分类号：S753.7$^+$5 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)05-0080-09

Effects of thinning on the growth and the undergrowth diversity of *Pinus sylvestris* var. *mongholica* plantation in Saihanba area

ZHANG Fei[1], YANG Jinlei[2], XU Zhongqi[2], JIA Lei[2], FU Lihua[1], CHENG Shun[1]

（1.Saihanba Mechanical Forestry Farm, Weichang 068466, Hebei, China;
2.College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract:【Objective】The aim of this study is to understand the effects of thinning intensity on the growth and plant species diversity of *Pinus sylvestris* var. *mongholica* plantation in Saihanba area, and provide scientific basis for the scientific and reasonable management of the plantations.【Method】Based on the on long-term monitoring plots, the DBH, volume, stand stock and species diversity of *Pinus sylvestris* var. *mongholica* plantations under different thinning intensities were studied.【Result】After 3 years of tending thinning, the average annual growth of DBH (Diameter at breast height) and volume of each tree was significantly higher than that of CK, and the average annual growth of DBH of low (LT, 2 000 plant/hm^2), medium (MT, 1 667 plant /hm^2) and high (HT, 1 333 plant /hm^2) thinning intensity increased by 22.22%, 48.15% and 81.48%, respectively, compared with CK（3 200-3 425 plant /hm^2）. The annual growth of volume was increased by 58.00%, 72.00% and 130.00%, respectively. Thinning changed the DBH class distribution of the stand, which changed from normal to lognormal. The annual growth of stock of the thinning forests was lower than that of CK, but did not reach a significant level（$P > 0.05$）, and there was a significant level between HT, MT and the control ($P < 0.05$) in the annual growth rate, which were increased by 38.02%, 23.37% and 2.97% for HT, MT and LT respectively, compared with CK. The biomass of HT, MT and

收稿日期（Received）：2025-01-04 **修订日期**（Revised）：2025-04-31
基金项目：中央财政林业科技推广示范资金推广项目（冀 TG〔2023〕009 号）；河北省科学技术研究与发展计划项目（10236728）；国家重点研发计划项目（2019YFF0303203）。
第一作者：张菲（648139979@qq.com），高级工程师，硕士。 **通信作者：**许中旗（xzq7110@163.com），教授，博士。
引文格式：张菲 , 杨金蕾 , 许中旗 , 等 . 间伐对塞罕坝地区樟子松人工林生长及林下植物物种多样性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(5):80-88.
ZHANG F, YANG J L, XU Z Q, et al. Effects of thinning on the growth and the undergrowth diversity of *Pinus sylvestris* var. *mongholica* plantation in Saihanba area[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(5):80-88.

LT increased by 123.53%, 94.12% and 35.29% compared with CK, and the species number increased by 46.67%, 70.00% and 36.67%, respectively. The Simpson index, Shannon index and Margalef index increased with the increase of thinning intensity, but the differences among them did not reach a significant level; the biomass of understory plants was more sensitive to tending thinning than species diversity. 【Conclusion】Thinning obviously promotes the growth of DBH, individual tree volume, growth rate of forest stock, as well as the biomass and species number of understory plants; considering the impact on the growth and diversity of the stand, the current suitable tending intensity is HT, under which the density is about 1 333 trees /hm^2.

Keywords: Saihanba area; *Pinus sylvestris* var. *mongholica* plantation; growth; biomass; species diversity

我国人工造林取得了举世瞩目的成绩，但是我国的人工林也普遍存在生产力不高、生态功能低下等问题 [1]。抚育间伐是提高森林质量的有效手段，科学的抚育间伐可通过调控林分密度，弱化树木间的竞争，促进林木的生长，提高林分生产力 [2]。间伐明显促进了加拿大 New Brunswick 地区香脂冷杉 *Abies balsamea* 和红云杉 *Picea rubens* 林的生长量 [3]，经过抚育间伐的华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 人工林的胸径、单株材积、总蓄积量均显著高于对照 [4]。同时，抚育间伐还会通过对林分环境的改变，对林分的生物多样性产生影响。董凯丽等 [5] 发现，抚育后湿地松 *Pinus elliottii* 人工林的物种丰富度及 Simpson、Shannon-Wiener 和 Pielou 指数均有明显提升。陈瑜 [6] 也发现，抚育间伐能够促进杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林物种多样性的增加，但促进作用随时间的推移呈逐渐减弱趋势。同时，也有一些研究表明，抚育间伐并不总是能够促进林分生产力的增加 [7-9]。抚育间伐后木荷 *Schima superba*- 杉木混交林的单木胸径及材积生长量有明显提升，但是林分蓄积增长量则出现了明显的下降 [7]，汤景明等 [8]、陈哲等 [9] 也发现了类似现象。以上研究结果的不同，一方面可能与研究的树种不同有关，另一方面可能与各研究的间伐强度不同有关。多数研究都采用百分比来表示间伐强度，但因各林分的初始密度存在差异，因此，在相同间伐强度下，林分密度实际往往相差较大。研究间伐强度对林分的影响主要目的是针对特定的经营目标确定合理的林分密度，因此用保留密度来表示间伐的强度更为合理 [10]。

樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 是中国北方地区重要的造林树种，因其具有较强的耐寒、耐旱和抗逆性，自 20 世纪 60 年代开始，塞罕坝地区营造了大面积的樟子松人工林。确定该地区樟子松人工林的合理间伐强度，开展樟子松人工林的科学经营，是提升该地区森林质量和生态服务功能的关键。目前已有一些针对其他地区樟子松人工林抚育间伐技术的研究 [11-12]，但是已有研究或者主要针对幼龄林，或者从水量平衡角度确定合理的林分密度，因此，其研究结果对于塞罕坝地区樟子松人工林经营的指导作用具有一定的局限性。基于此，以塞罕坝地区樟子松人工林为研究对象，探讨不同间伐强度对樟子松人工林林分生长及林下植物多样性的影响，为该地区樟子松人工林的科学经营提供科学与技术支撑。

1　研究地概况

塞罕坝位于河北省承德市围场满族蒙古族自治县最北端，地处燕山山脉与蒙古高原交汇地带，地理位置为 42°02′ ～ 42°36′N、116°51′ ～ 117°39′E。塞罕坝地区属寒温带半干旱半湿润季风气候区，冬季寒冷，温度较低，积雪期较长，每年可达 7 个月，而春秋两季持续时间较短；年均气温 −1 ℃，极端高温和最低温分别为 30.9、−42.8 ℃，昼夜温差较大；该地区降水较少，年平均降水量为 460.3 mm，年均降水天数为 134 d，较为干旱，年平均蒸发量为 1 388 mm，接近年平均降水量的 3 倍。塞罕坝地区土壤类型丰富，主要有棕壤土、沼泽土、草甸土、风沙土、黑土、灰色森林土等，其中，灰色森林土占比最大，为 67.5%。塞罕坝地区植被类型多样，造林树种主要有华北落叶松、樟子松、白杆 *Picea meyeri*、白桦 *Betula platyphylla* 等；主要林下灌木为土庄绣线菊 *Spiraea ouensanensis*、山刺玫 *Rosa davurica*、忍冬 *Lonicera japonica* 等；主要草本有硬质早熟禾 *Poa sphondylodes*、乌苏里薹草 *Carex ussuriensis*、地榆 *Sanguisorba officinalis* 等。

2　研究方法

2.1　样地设置

于 2019 年 8 月在塞罕坝机械林场的千层板分场羊场作业区选择立地条件、林分密度及林分年龄相近的樟子松人工林设置样地。该樟子松人工林营造于 1979 年，林龄为 40 a。在樟子松人工林中设置 4 种不同间伐强度，分别为低强度间伐（LT，

保留密度 2 000 株 /hm^2）、中强度间伐（MT，保留密度 1 667 株 /hm^2）、高强度间伐（HT，保留密度 1 333 株 /hm^2）以及对照（CK，密度为 3 200 ～ 3 425 株 /hm^2）。间伐样地均按照“留优去劣”的原则进行采伐，采伐作业时间为 2019 年 8 月。作业完成后，在以上每种处理中设置 20 m×30 m 的 3 块样地，共计 12 块样地，样地基本情况见表 1。

表 1　样地基本情况
Table 1　The sample basic situation

间伐强度 Thinning intensity	胸径 DBH /cm	树高 Tree height /m	林龄 Age /a	海拔 Altitude /m	林分密度 Density /(株 ·hm^{-2})
CK	12.52 ～ 13.97	12.35 ～ 14.25	40	1 531.7 ～ 1 561.5	3 200 ～ 3 425
LT	15.38 ～ 16.29	10.94 ～ 44.59	40	1 531.7 ～ 1 548.7	2 000
MT	14.25 ～ 16.36	11.70 ～ 12.49	40	1 541.7 ～ 1 551.9	1 667
HT	16.32 ～ 17.01	11.36 ～ 11.86	40	1 535.6 ～ 1 567.1	1 333

2.2　林分因子的调查与计算

分别于 2019 年 8 月和 2022 年 8 月对各样地进行每木检尺，调查内容包括树高、胸径、冠幅等。然后，通过一元胸径材积方程 [13] 计算林木的单株材积、林分蓄积，平均生长率通过普雷斯勒公式 [14] 计算，计算公式如下。

一元胸径材积方程：

V=0.000 123$D^{2.494}$。　　（1）

式中：V 为单株立木材积（m^3）；D 为胸径（cm）。

林分蓄积：

M=V×N。　　（2）

式中：M 为样地蓄积（m^3/hm^2）；N 为林分密度（株 /hm^2）。

普雷斯勒公式：

$$P_V=\frac{V_t-V_{t-n}}{V_t+V_{t-n}}\times\frac{200}{n}。\quad（3）$$

式中：P_V 为生长率；V_t 为当年（2022 年）蓄积或材积；V_{t-n} 为前期（2019 年）蓄积或材积；n 为间隔期，本研究中为 3 a。

2.3　林下草本群落多样性与生物量的调查与计算

采用 5 点法在每个样地的 4 个角落以及中心位置设置 5 个 1 m×1 m 的样方，记录每个样方内草本植物的种类、数量、高度以及盖度。调查完成后，将样方内草本植物的地上部分全部收割并称质量，用于草本生物量的计算。

植物物种多样性采用 Simpson 指数（D_S）、Shannon-Wiener 指数（H'）、Pielou 指数（J）和 Margalef 指数（D_M）4 个常用的多样性指数来描述，计算公式为：

$$D_S=1-\sum P_i^2\ ；\quad（4）$$

$$H'=-\sum P_i\ln P_i\ ；\quad（5）$$

$$J=H'/\ln S\ ；\quad（6）$$

$$D_M=(S-1)/\ln N\ 。\quad（7）$$

式中：S 为样方中的物种数；N 为所有物种个体总数；P_i 为第 i 个物种的个体数占样方总个体数的比例。

2.4　不同处理间 β 多样性指数的计算

采用 Whittaker 指数、Cody 指数、Jaccard 指数 3 种 β 多样性指数对各处理之间的物种组成相似度进行评价。

Whittaker 指数（β_W）：

$\beta_W=S/(m_a-1)$。　　（8）

式中：S 为研究群落中的物种总数；m_a 为样方的平均物种数。

Cody 指数（β_C）：

β_C=[g(H)+I(H)]/2。　　（9）

式中：g(H) 为沿生境梯度 H 增加的物种数目；I(H) 为沿生境梯度 H 减少的物种数目。

Jaccard 指数（C_J）：

C_J=j/(a+b−j)。　　（10）

式中：j 为 2 个群落或样地共有物种数；a 和 b 分别为样地 A 和样地 B 的物种数。

3　结果与分析

3.1　抚育间伐对樟子松人工林生长的影响

3.1.1　抚育间伐对胸径生长量的影响

3 种处理下的胸径年均生长量均高于 CK，具体表现为 HT（0.49 cm/a）＞ MT（0.40 cm/a）＞ LT（0.33 cm/a）＞ CK（0.27 cm/a）。其中，3 种抚育强度之间，以及 3 种抚育强度与 CK 之间均存在显著差异（P ＜ 0.05），LT、MT 与 HT 3 种处理下胸径年均生长量比 CK 分别增长了 22.22%、

48.15% 和 81.48%（表 2）；同时，胸径的生长率也有明显提高，由高到低分别为 HT（2.79%）＞ MT（2.47%）＞ LT（2.03%）＞ CK（2.00%），其中 MT、HT 与 LT、CK 之间存在显著差异（$P < 0.05$）。以上结果说明，抚育间伐促进了林分胸径的生长，而且随着间伐强度的增加，林木的胸径年均生长量也随之增加。

表 2　不同间伐强度下樟子松人工林胸径年生长量 †
Table 2　Difference of mean annual DBH growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning intensity

间伐强度 Thinning intensity	胸径年均生长量 Mean annual DBH growth /(cm·a^{-1})	胸径生长率 DBH growth rate /%
CK	0.27±0.02 d	2.00±0.29 b
LT	0.33±0.03 c	2.03±0.15 b
MT	0.40±0.02 b	2.47±0.19 a
HT	0.49±0.03 a	2.79±0.20 a

† 表中数值为平均值 ± 标准误，不同小写字母表示同列不同处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。
The values in the table are mean±standard error; the different lowercase letters indicate that there are significant differences between the different treatments in the same column ($P < 0.05$). The same below.

3.1.2　抚育间伐对单株材积增长量的影响

3 种处理下的单株材积年均生长量均高于 CK，LT、MT、HT 3 种处理下单株材积年均生长量比 CK 分别增长了 58.00%、72.00% 和 130.00%。具体表现为 HT（0.011 5 m^3/a）＞ MT（0.008 6 m^3/a）＞ LT（0.007 9 m^3/a）＞ CK（0.005 0 m^3/a），其中 LT、MT、HT 与 CK 之间存在显著差异（$P < 0.05$）（表 3）。单株材积生长率表现为 HT（6.97%）＞ MT（6.23%）＞ LT（5.20%）＞ CK（5.05%），其中，MT、HT 与 LT、CK 之间存在显著差异（$P < 0.05$）。以上结果说明，抚育间伐可以有效促进林分单株材积的生长，而且间伐强度越大，促进效果越明显。

表 3　不同间伐强度下樟子松人工林单株材积生长量
Table 3　Difference of single tree mean annual volume growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning intensity

间伐强度 Thinning intensity	单株材积年均生长量 Single tree mean annual volume growth /(m^3·a^{-1})	单株材积生长率 Single tree volume growth rate /%
CK	0.005 0±0.000 4 c	5.05±0.64 b
LT	0.007 9±0.001 3 b	5.20±0.56 b
MT	0.008 6±0.001 1 b	6.23±0.30 a
HT	0.011 5±0.000 5 a	6.97±0.51 a

3.1.3　抚育间伐对林分蓄积生长量的影响

3 种处理下的林分蓄积年均生长量均低于 CK，具体表现为 CK（16.58 m^3·hm^{-2}·a^{-1}）＞ HT（15.39 m^3·hm^{-2}·a^{-1}）＞ MT（14.26 m^3·hm^{-2}·a^{-1}）＞ LT（14.16 m^3·hm^{-2}·a^{-1}），各处理之间均无显著差异（$P > 0.05$）（表 4）。林分蓄积生长率由高到低分别为 HT（6.97%）＞ MT（6.23%）＞ LT（5.20%）＞ CK（5.05%），HT、MT 和 LT 的蓄积生长率分别较 CK 增加了 38.02%、23.37% 和 2.97%，且 MT、HT 分别与 LT、CK 之间存在显著差异（$P < 0.05$）（表 4）。

表 4　不同间伐强度下樟子松人工林蓄积年生长量
Table 4　Difference of mean annual volume growth of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning intensity

间伐强度 Thinning intensity	蓄积年生长量 Mean annual volume growth /(m^3·hm^{-2}·a^{-1})	蓄积生长率 Volume growth rate /%
CK	16.58±0.83 a	5.05±0.64 b
LT	14.16±1.38 a	5.20±0.56 b
MT	14.26±2.08 a	6.23±0.30 a
HT	15.39±1.00 a	6.97±0.51 a

3.1.4　抚育间伐对林分径级分布的影响

间伐 3 a 后，3 种处理下大径阶（DBH ≥ 20 cm）林木的比例均有所增加，其中，LT、MT、HT 处理下大径级樟子松数量分别占总数的 35.48%、31.15% 和 43.13%，与间伐前相比分别增加了 5.24%、8.04% 和 11.88%。在对照样地中，大径阶林木数量占总数的 18.64%，与 2019 年相比只增加了 7.05%（图 1），说明抚育间伐明显促进了大径级林木数量的增加，林分质量明显提升。

林木直径分布的检验结果（表 5）表明，CK 在 2019 年和 2022 年均为明显的正态分布；抚育间伐当年，LT 的分布演变为对数正态分布，抚育 3 a 后（2022 年），LT 和 HT 均为对数正态分布，这说明抚育间伐改变了林分的径级分布，有使其向对数正态分布转化的趋势。同时，各间伐林分的偏度都为正值，且均大于 CK，说明抚育间伐使径级结构出现了明显的左偏，且随间伐时间的延长，其偏度有增加的趋势。

3.2　抚育间伐对樟子松人工林草本群落特征及生物量的影响

3.2.1　抚育间伐对樟子松人工林草本层植物数量特征的影响

根据林下草本植物的高度将 4 种处理后的草本植物划分为 6 个层次 [15]。在 LT 处理下，草本植物的高度为 0 ～ 80 cm，其中 10 ～ 20 cm 层的植物密度最大（2.6 万株 /hm^2），30 ～ 40 cm 高度层的盖度最大（33.00%）；在 MT 处理下，草本

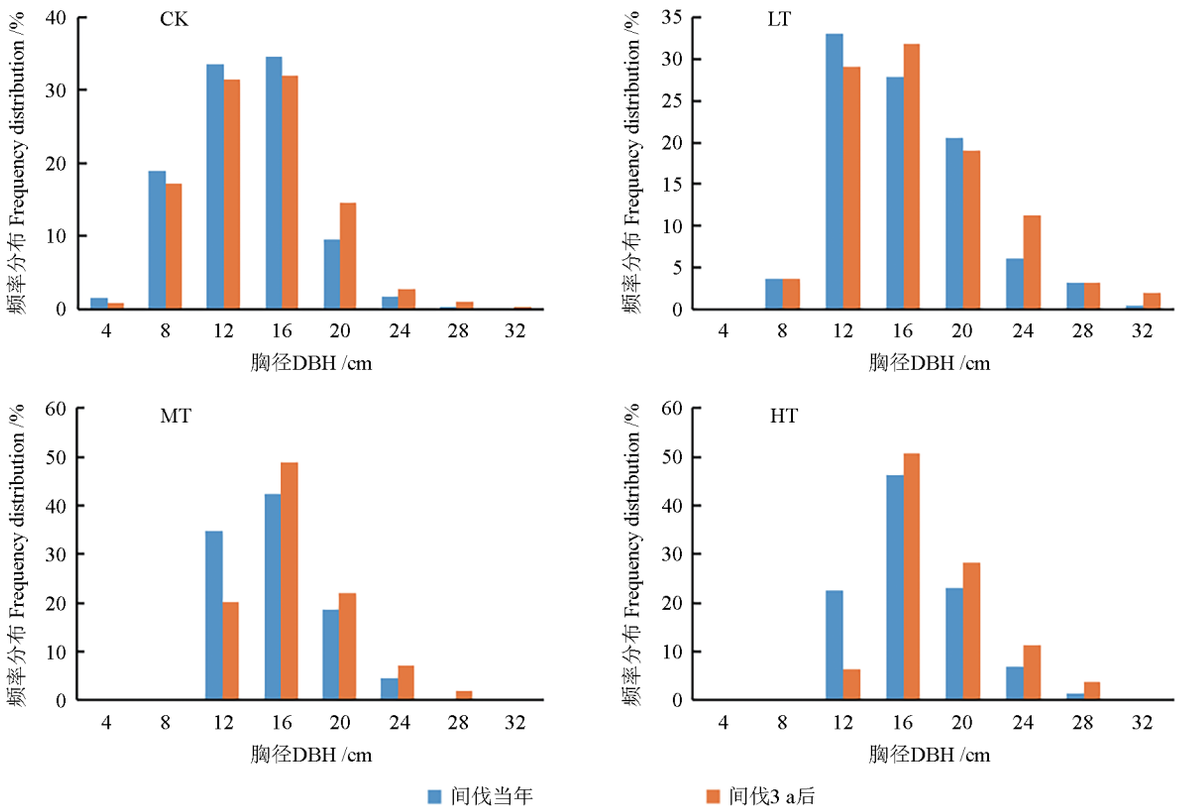


图 1　不同间伐强度下樟子松人工林径级结构的变化

Fig. 1　The change of DBH class structure of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning intensities

植物高度为 0 ～ 60 cm，在 10 ～ 20 cm 处密度最大（3.4 万株 /hm^2），20 ～ 30 cm 处盖度最大（20.09%）；在 HT 处理下，草本植物高度为 0 ～ 80 cm，在 10 ～ 20 cm 处密度最大（2.6 万株 /hm^2），40 ～ 50 cm 处盖度最大（38.75%）；在 CK 处理下，草本植物高度为 0 ～ 40 cm，在 0 ～ 10 cm 处密度最大（3.3 万株 /hm^2），在 20 ～ 30 cm 处盖度最大（36.00%）（图 2、图 3）。以上结果说明，抚育间伐改变了林下植被层的生长状况及外貌特征，显著提高了林下植被层的高度、盖度和密度，同时最大密度层和最大盖度层的高度也有明显上升。

3.2.2　抚育间伐对樟子松人工林草本层植物物种多样性和物种组成的影响

抚育间伐 3 a 后，LT、MT、HT、CK 4 种处理的林下植被草本物种数分别为 41、51、44、30 种，LT、MT、HT 较 CK 分别增加了 36.67%、70.00% 和 46.67%。以上结果说明，抚育间伐明显提高了林下植被层的物种数量。从多样性指数来看，不同间伐强度下的多样性指数之间差异不显著（$P > 0.05$），但总体上，Simpson 多样性指数和 Shannon-Wiener 多样性指数均表现为 MT ＞ HT ＞ LT ＞ CK，MT 处理下的多样性指数最高，分别为 0.77 和 1.81，CK 处理下多样性指数最低，分别为 0.72 和 1.50；Pielou 均匀度指数为 CK ＞ HT ＞ MT ＞ LT，其中 CK 最高（0.85），LT 最低（0.82）；Margalef 丰富度指数为 MT ＞ LT ＞ HT ＞ CK，其中 MT 最高（2.25），CK 最低（1.62）（表 6）。

LT 和 CK 之间的 Whittaker 指数和 Cody 指数低于 MT 和 HT，同时 Jaccard 指数高于 HT、MT，而 HT、MT 与 CK 之间的各个指数都较为接近，说明 LT 的物种组成与 CK 之间具有更高的相似性，而 HT、MT 与 CK 之间物种组成差异较大（表 7）。

表 5　不同间伐强度下樟子松人工林林分径级分布检验

Table 5　The test of DBH class distribution of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning intensities

间伐强度 Thinning intensity	年份 Year	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	大于 χ^2 概率 Probability greater than χ^2	分布（可靠性 0.95）Distribution (Reliability 0.95)
CK	2019	0.196 7	-0.040 0	0.805 9	正态分布
	2022	0.463 0	0.366 7	0.284 6	正态分布
LT	2019	0.709 0	0.230 2	0.634 8	对数正态分布
	2022	0.732 0	0.251 7	0.915 3	对数正态分布
MT	2019	0.588 3	-0.343 4	0.115 3	正态分布
	2022	0.734 0	0.484 6	0.074 1	正态分布
HT	2019	0.612 0	0.169 1	0.254 5	正态分布
	2022	0.788 8	0.334 5	0.276 5	对数正态分布

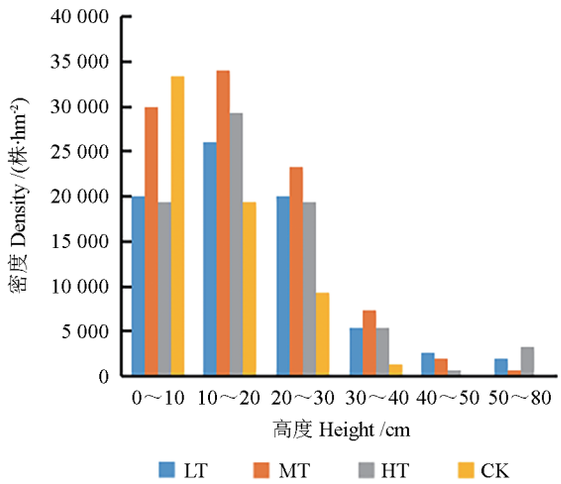


图 2　不同间伐强度下樟子松林下不同高度草本密度

Fig. 2　Density of herbs of different heights in the understory of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* under different thinning intensities

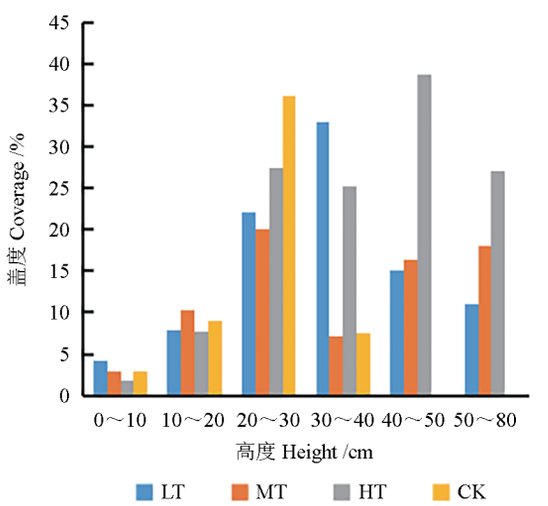


图 3　不同间伐强度下樟子松林下不同高度草本盖度

Fig. 3　Coverage of herbs different heights in the understory of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* under different thinning intensities

表 6　不同间伐强度下樟子松人工林林下植物物种多样性指数

Table 6　Diversity index of understory of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning intensities

间伐强度 Thinning intensity	Simpson 指数 Simpson index	Shannon-Wiener 指数 Shannon-Wiener index	Pielou 指数 Pielou index	Margalef 指数 Margalef index
CK	0.72±0.04 a	1.50±0.16 a	0.85±0.08 a	1.62±0.21 a
LT	0.74±0.05 a	1.65±0.16 a	0.82±0.03 a	1.92±0.18 a
MT	0.77±0.08 a	1.81±0.31 a	0.83±0.06 a	2.25±0.55 a
HT	0.76±0.02 a	1.66±0.12 a	0.84±0.02 a	1.77±0.27 a

3.2.3　抚育间伐对樟子松人工林下草本植物地上生物量的影响

不同间伐强度下林下草本植物地上生物量随间伐强度的增加而增加，LT、MT、HT、CK 4 种处理的草本生物量分别为 0.23、0.33、0.38、0.17 t/hm^2，与 CK 相比，LT、MT、HT 草本层的生物量增加了 35.29%、94.12% 和 123.53%，且 HT 与 CK 之间存在显著差异（$P < 0.05$）（图 4）。

表 7　不同间伐强度下樟子松人工林与 CK 之间的 β 多样性指数

Table 7　The *β* biodiversity index between the *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations under different thinning intensities and CK

类型 Types	Whittaker 指数 Whittaker index	Cody 指数 Cody index	Jaccard 指数 Jaccard index
LT 和 CK LT and CK	1.35	11.00	0.52
MT 和 CK MT and CK	1.41	16.00	0.42
HT 和 CK HT and CK	1.41	15.50	0.42

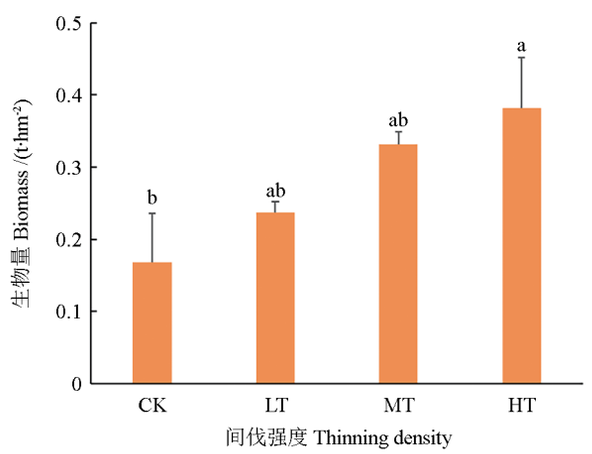


图 4　不同间伐强度下樟子松人工林林下草本地上生物量

Fig. 4　Changes in understory herbaceous biomass under different thinning intensities

4　讨　论

抚育间伐明显提高了樟子松人工林的胸径、单株材积的年生长量和生长率，且其对单木生长的促进作用随间伐强度的增加而增加。同时，发现抚育间伐后林分的蓄积量年生长量均有一定程度的下降，但蓄积生长率却有明显上升，HT、MT 和 LT 处理的樟子松人工林的蓄积生长率分别为 CK 的 1.03、1.23 和 1.38 倍，可见，HT 和 MT 明显提高了蓄积生长率，LT 则不明显。同时，从蓄积生长量来看，各个间伐强度处理间虽未达到显著差异水平，但 HT 和 MT 均表现出高于 LT 的趋势。这表明，尽管 HT 和 MT 的间伐强度更大，但其林分蓄积生长量最高，说明高强度间伐明显促进了樟子松人工林生产力的提高。多项研究都表明，抚育间伐能够促进林分单木的生长量，但是对林分蓄积量的影响则有不同的研究结果。温晶等[16]研究发现，大兴安岭林区兴安落叶松天然次生林在 10%、20%、30% 和 40%

的抚育强度下，其蓄积生长量均有明显增加，同时，以 30% 的间伐强度最为明显。董凯丽等 [5] 对湿地松人工林的研究，以及黄栋才等 [4]、商添雄等 [10] 分别对秦岭及山西长治的华北落叶松的研究发现，抚育间伐促进了林分蓄积生长量及生产力的增加。汤景明等 [8] 对日本落叶松的研究则表明，在较低抚育强度（35%）下，其蓄积量表现为增加，而在较高抚育强度下，则表现为下降。陈哲等 [9] 则发现，华北落叶松人工林的蓄积量增长量随间伐强度的增加而逐渐下降，王梓名等 [17] 对油松人工林的研究也发现，林分出材量随林分密度的下降呈逐渐下降趋势。抚育间伐对林分生长的影响是两个因素共同作用的结果 [18]。一方面，间伐导致林分密度下降，进而促进单株林木生长量提高；另一方面，林分密度的下降也会对林分整体生长产生一定影响。因此，在特定的年龄阶段应该有一个合理的密度范围，使其获得最高的生长量 [19]。抚育间伐研究的意义应该是针对特定的树种确定其在不同的年龄及立地条件下的合理密度范围。同时，需要进行较为长期的观察来确定不同间伐强度对林分生长的影响。本研究中，间伐 3 a 后，尽管林分蓄积生长量低于对照，但其蓄积生长率明显高于对照，因此，随着间伐时间的延长，间伐林分的生长量将会超过对照。

本研究也表明，间伐 3 a 后，林下草本植被层的高度、物种数量及生物量均有明显增加，物种多样性指数尽管在不同处理间未表现出明显差异，但各间伐处理均表现出高于对照的趋势。这说明，间伐能够明显促进林下植被层的发育。王凯等 [19] 发现，抚育间伐促进了油松人工林林下植被层物种多样性及生物量的增加，且生物量随间伐强度的增加而增加。丁磊等 [20] 和陈涵等 [21] 分别对落叶松人工林和杉木人工林的研究也得出了相似的结论。抚育间伐可以降低林分郁闭度，提高光合有效辐射和土壤温度，有利于林下植物的生长 [22]。同时，本研究还发现，抚育间伐后，相对于物种组成及生物多样性的变化，生物量的变化更为明显，低强度间伐（LT）、中强度间伐（MT）和高强度间伐（HT）3 种间伐强度使得林下植被物种数量分别提高了 36.67%、70.00% 和 46.67%，而生物量则分别提高了 35.29%、94.12% 和 123.53%。可见，林下植物生物量的变化对于间伐更为敏感。其原因在于，林下植被的生长对林分环境的改变能够作出直接的响应，而新物种的出现或者原有物种的消失则需要相对较长时间。另外，间伐也导致了物种组成的变化。LT、MT 和 HT 3 种间伐强度与 CK 之间的 β 多样性指数表明，LT 与 CK 之间的物种组成相似度更高，而 HT、MT 与 CK 之间的相似度则较低，这是由于低强度抚育间伐对林分环境的改变较小，其环境条件与 CK 更为接近，因此，物种组成也相似，而 HT 和 MT 对林分环境的改变程度更高，其物种组成的变化也更大。

总体来看，间伐明显提高了樟子松人工林胸径、单株材积的生长量以及林分蓄积的生长率，同时促进了林下植被生物量、生物多样性的提升。综合不同间伐强度对林分生长及林下植被的影响来看，HT 的效果最为明显，因此，在塞罕坝地区，对于 40 a 左右的樟子松人工林来说，适宜的林分密度为 1 333 株 /hm^2 左右，在该密度下能够同时获得较高的林分生长量及较高的林下植物物种多样性。同时，本研究的高强度抚育间伐林分的密度为 1 333 株 /hm^2，是否更低的密度能够取得更好的经营效果，还需要进一步的研究来证实。同时，本研究证明了抚育 3 a 后，樟子松人工林的生长及林下植被就会发生明显变化，而随着时间的延长，抚育的效果会进一步显现，因此还需要对抚育结果进行长期监测。

5 结 论

抚育间伐提高了樟子松人工林胸径、单株材积的生长量和林分蓄积生长率，但降低了林分的蓄积生长量；抚育间伐明显提升了林下植物的生物量和物种数量，物种多样性指数随间伐强度的增加而增加，林下植物生物量较物种多样性对抚育间伐更为敏感。综合林分生长及多样性对间伐的响应来看，塞罕坝地区 40 a 左右的樟子松人工林宜采用高强度抚育间伐，即保留密度在 1 333 株 /hm^2 左右较为适宜。

参考文献：

[1] 任雲雲 , 李雪 , 崔自杰 , 等 . 中国大径材人工林培育研究进展 [J]. 世界林业研究 ,2024,37(3):86-93.
REN Y Y, LI X, CUI Z J, et al. Research progress in cultivation of large-diameter timber plantation in China[J]. World Forestry Research,2024,37(3):86-93.

[2] WATERS C M, GONSALVES L, LAW B, et al. The effect of thinning on structural attributes of a low rainfall forest in eastern Australia[J]. Forest Ecology and Management,2018,409:571-583.

[3] COLE H A, NEWMASTER S G, LANTEIGNE L, et al. Long-term outcome of precommercial thinning on floristic diversity in northwestern New Brunswick, Canada[J]. iForest-Biogeosciences

and Forestry,2008,1:145-156.

[4] 黄栋才 , 郭鑫 , 王得祥 , 等 . 不同经营方法对秦岭华北落叶松林分生长和林下植被的影响 [J]. 林业科学 ,2024,60(8):57-66.
HUANG D C, GUO X, WANG D X, et al. Effects of different management methods on stand growth and understory vegetation of *Larix principis-rupprechtii* in Qinling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae,2024,60(8):57-66.

[5] 董凯丽 , 张国湘 , 王瑞辉 , 等 . 抚育间伐对湿地松人工林生长及林下植被多样性的影响 [J]. 林业资源管理 ,2019(4):59-68.
DONG K L, ZHANG G X, WANG R H, et al. Effects of thinning on the growth of *Pinus elliottii* plantation and the diversity of its undergrowth vegetation[J]. Forest Resources Management, 2019(4):59-68.

[6] 陈瑜 . 抚育间伐对中龄杉木生长及林下植物多样性的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2022.
CHEN Y. Effects of tending thinning on growth and understory vegetation diversity of middle age *Cunninghamia lanceolata*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2022.

[7] 姚甲宝 , 曾平生 , 袁小平 , 等 . 间伐强度对木荷 - 萌芽杉木中龄混交林生长和林分结构的影响 [J]. 林业科学研究 ,2017,30(3):511-517.
YAO J B, ZENG P S, YUAN X P, et al. Impacts of thinning intensities on growth and stand structure of *Schima superba*-sprouting *Cuninghamia lanceolata* mixed plantation[J]. Forest Research,2017,30(3):511-517.

[8] 汤景明 , 孙拥康 , 冯骏 , 等 . 不同强度间伐对日本落叶松人工林生长及林下植物多样性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2018,38(6):90-93,122.
TANG J M, SUN Y K, FENG J, et al. Influence of thinning on the growth and the diversity of undergrowth of *Larix kaempferi* plantation forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2018,38(6):90-93,122.

[9] 陈哲 , 魏浩亮 , 周庆营 , 等 . 抚育间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2022,42(5):54-64.
CHEN Z, WEI H L, ZHOU Q Y, et al. Influence of tending and thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2022,42(5):54-64.

[10] 商添雄 , 韩海荣 , 程小琴 , 等 . 华北落叶松人工林生长对抚育间伐的响应及其与土壤因子的关系 [J]. 林业科学研究 , 2019,32(6):40-47.
SHANG T X, HAN H R, CHENG X Q, et al. Response of *Larix principis-rupprechtii* plantation growth to thinning and its relationship with soil factors[J]. Forest Research,2019,32(6):40-47.

[11] 刘朝霞 , 吕荣 , 常金宝 , 等 . 沙地樟子松人工林适宜初植密度的确定及中龄林期密度调控研究 [J]. 内蒙古林业科技 , 1998,24(1):8-11,32.
LIU Z X, LYU R, CHANG J B, et al. Determination of suitable initial planting density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land and study on density regulation in middle-aged forest period[J]. Inner Mongolia Forestry Science & Technology,1998,24(1):8-11,32.

[12] 曾德慧 , 姜凤歧 . 从水量平衡角度探讨沙地樟子松人工林的合理密度 [J]. 防护林科技 ,1995(1):4-7,26.
ZENG D H, JIANG F Q. Discussion on reasonable density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land from the perspective of water balance[J]. Protection Forest Science and Technology,1995(1):4-7,26.

[13] 许晴 , 李晓莎 , 许中旗 , 等 . 塞罕坝地区樟子松立木材积表研究 [J]. 林业资源管理 ,2017(1):57-62.
XU Q, LI X S, XU Z Q, et al. Study on the volume table of Scotch pine in Saihanba area[J]. Forest Resources Management, 2017(1):57-62.

[14] 沈威 . 日本落叶松以林分平均木材积生长率代替林分蓄积生长率可行性验证 [J]. 防护林科技 ,2020(9):53-55.
SHEN W. Substitution of average wood timber volume growth percentage of *Larix olgensis* stand for stand volume growth percentage[J]. Protection Forest Science and Technology,2020(9):53-55.

[15] 周晓光 . 抚育间伐强度对马尾松公益林群落结构和生态服务功能的影响 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2014.
ZHOU X G. The research on the thinning effect on *Pinus massoniana* forest in community structure and ecosystem services[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2014.

[16] 温晶 , 张秋良 , 韩胜利 , 等 . 不同抚育间伐强度对兴安落叶松林分平均直径和树高生长的影响 [J]. 西北林学院学报 , 2018,33(5):163-166,178.
WEN J, ZHANG Q L, HAN S L, et al. Effects of different tending thinning intensities on the average diameter and height growth of *Larix gmelinii* forest[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(5):163-166,178.

[17] 王梓名 , 赵明明 , 任云卯 , 等 . 主伐龄油松建筑材林生长及土壤性质对林分密度的响应 [J]. 北京林业大学学报 ,2022, 44(12):88-101.
WANG Z M, ZHAO M M, REN Y M, et al. Response of growth and soil properties of Chinese pine building timber forest at felling age to stand density[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022,44(12):88-101.

[18] ZEIDE B. Thinning and growth: a full turnaround[J]. Journal of

Forestry,2001,99(1):20-25.

[19] 王凯 , 马履一 , 贾忠奎 , 等 . 不同林龄油松人工林林下植物对不同间伐强度的短期响应 [J]. 东北林业大学学报 , 2013,41(10):1-9.
WANG K, MA L Y, JIA Z K, et al. Short-term responses of undergrowth of *Pinus tabuliformis* plantation at different stand ages to different thinning intensity[J]. Journal of Northeast Forestry University,2013,41(10):1-9.

[20] 丁磊 , 潘丕克 , 李淳 , 等 . 间伐方式对日本落叶松人工林生长状况、林下植物多样性及土壤性质的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版),2024,53(4):483-490.
DING L, PAN P K, LI C, et al. Effect of thinning method on growth, understory plant diversity and soil characteristics of *Larix kaempferi* plantation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition),2024,53(4):483-490.

[21] 陈涵 , 郭弘婷 , 陈睿 , 等 . 杉木人工林林下植物多样性及其环境对不同间伐强度的短期响应 [J]. 生态学报 ,2023,43(24):10274-10284.
CHEN H, GUO H T, CHEN R, et al. Understory plant diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantations and its short-term environmental response to different thinning intensities[J]. Acta Ecologica Sinica,2023,43(24):10274-10284.

[22] SEIWA K, ETOH Y, HISITA M, et al. Roles of thinning intensity in hardwood recruitment and diversity in a conifer, *Criptomeria japonica* plantation: a 5-year demographic study[J]. Forest Ecology and Management,2012,269:177-187.

[本文编校：谢荣秀]

（上接第 67 页）

[17] 罗庆 , 樊新生 , 高更和 , 等 . 秦巴山区贫困村的空间分布特征及其影响因素 [J]. 经济地理 ,2016,36(4):126-132.
LUO Q, FAN X S, GAO G H, et al. Spatial distribution of poverty village and influencing factors in Qinba mountains[J]. Economic Geography,2016,36(4):126-132.

[18] 刘传勇 . 基于建成区平面形态和地理信息整合的襄汾县丁村聚落空间量化分析 [D]. 北京 : 北京交通大学 ,2019.
LIU C Y. The quantitative analysis of settlement space of Dingcun village in Xiangfen County based on the two-dimensional form of built-up area and geographic information integration[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2019.

[19] 张俊 , 冯越珺 , 尤赟 . 黄河流域水生态文明建设水平的时空分异及影响因素 [J]. 中南林业科技大学学报 (社会科学版), 2023,17(5):41-51.
ZHANG J, FENG Y J, YOU Y. Spatiotemporal differentiation and influencing factors of water ecological civilization construction in the Yellow River basin[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences),2023,17(5):41-51.

[20] 胡雨鑫 , 王雪梅 , 陈滢 , 等 . 基于地理探测器的我国不同林区林火驱动因素对比分析 [J]. 生态学报 ,2025,45(1):227-238.
HU Y X, WANG X M, CHEN Y, et al. Comparative analysis of forest fire driving in different forest regions of China based on the geographical detector approach[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(1):227-238.

[21] 卢天汉 , 周宇飞 , 李小川 . 怀集县森林防火远程视频监控系统的设计与实现 [J]. 林业与环境科学 ,2020,36(4):127-130.
LU T H, ZHOU Y F, LI X C. Design and implementation of the forest fire remote video monitoring system of Huaiji County[J]. Forestry and Environmental Science,2020,36(4):127-130.

[22] 王彦卷 , 张佳瑜 , 侯景伟 . 基于地形分析的山区森林火灾监控点选址方法 [J]. 林业资源管理 ,2020(2):135-140.
WANG Y J, ZHANG J Y, HOU J W. Location selection methods of mountain forest fire monitoring points based on terrain analysis[J]. Forest Resources Management,2020(2):135-140.

[23] 左海龙 . 基于 GIS 空间分析的视频监控点选址系统设计 [J]. 电子测试 ,2020(6):72-73.
ZUO H L. Design of video monitoring site selection system based on GIS spatial analysis[J]. Electronic Test,2020(6):72-73.

[24] 齐小亚 . 甘肃祁连山自然保护区森林防火视频监控点合理布局研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2017.
QI X Y. Research on the optimal location of video monitoring spots for forest fire prevention in Gansu Qilian mountain nature reserve[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2017.

[本文编校：谢荣秀]