

网络出版时间:2024-01-05 16:43 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.07.005
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.s.20240104.1018.009

初植密度对科尔沁沙地樟子松人工林生长和健康状况及土壤化学性质的影响

尹明宇^{1,2}, 吴波¹, 乌云塔娜², 路伟伟¹

(1 中国林业科学研究院 生态保护与修复研究所, 荒漠生态系统与全球变化国家林业和草原局重点实验室, 北京 100091;

2 中国林业科学研究院 经济林研究所, 林木遗传育种国家重点实验室, 河南 郑州 450003)

【摘要】【目的】研究不同初植密度对沙地樟子松人工林生长、健康状况及土壤化学性质的影响,旨在筛选适宜的初植密度,为沙地樟子松人工林的高效培育与可持续经营提供科学依据。【方法】以科尔沁沙地 43 年生樟子松人工林为对象,研究 12 个不同初植密度(417~10 000 株/hm²)下樟子松人工林生长状况(胸径、树高、枝下高、冠幅、单株材积、林分蓄积量、冠形、干形)与健康状况(病级、感病指数)及土壤化学性质(pH 和有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量)的变化,分析初植密度与樟子松人工林生长和健康状况及土壤化学性质间的相关性,采用冗余分析研究土壤化学性质对林分生长和健康状况的影响,并依据土壤化学性质对不同初植密度处理进行综合评价。【结果】①初植密度对沙地樟子松人工林生长、健康状况及土壤化学性质均有极显著影响($P<0.001$)。随着初植密度的增加,樟子松人工林胸径、冠幅、单株材积和存活率总体上均呈下降趋势,枝下高、冠形、病级和感病指数呈上升趋势,树高以及林分蓄积量呈先上升后下降趋势。当初植密度为 1 667~2 500 株/hm² 时,樟子松人工林的感病指数、存活率和林分蓄积量表现较优。②随着初植密度的增加,土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量以及 pH 值整体呈上升-下降-上升-下降的变化趋势。③相关性分析结果显示,初植密度与樟子松胸径、冠幅、单株材积呈极显著负相关,与枝下高、冠形、病级和感病指数呈显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)正相关;与土壤有效磷含量呈显著正相关,与土壤 pH 值及有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾含量呈负相关,但相关性不显著。④冗余分析结果表明,土壤化学性质对林分生长和健康指标变异的解释率之和为 68.43%,土壤有效磷是其中最主要的影响因子;综合评价结果显示,当初植密度分别为 1 667 和 2 500 株/hm² 时,土壤化学性质指标综合得分较高,说明其有利于土壤养分的积累。【结论】初植密度与樟子松人工林林分生长、健康状况及土壤化学性质密切相关,樟子松造林适宜采用中等初植密度(1 667~2 500 株/hm²)。

【关键词】 樟子松;初植密度;林分健康;土壤化学性质;科尔沁沙地

【中图分类号】 S791.253.05;S725.6 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-9387(2024)07-0042-11

Effects of initial planting density on growth, health status and soil chemical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in Horqin Sandy Land

YIN Mingyu^{1,2}, WU Bo¹, WUYUN tana², LU Weiwei¹

(1 Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Desert Ecosystem and Global Change, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2 State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Non-timber Forestry, Chinese Academy of Forestry, Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: 【Objective】Growth, health status and soil chemical properties were studied in *Pinus sylves-*

【收稿日期】 2023-05-06

【基金项目】 国家重点研发计划项目(2016YFC0500806);国家自然科学基金项目(32001372)

【作者简介】 尹明宇(1992—),男,河南新乡人,博士,主要从事林木遗传育种和荒漠生态学研究。E-mail:yymy920916@163.com

【通信作者】 吴波(1968—),男,吉林抚松人,研究员,博士生导师,主要从事景观生态学和荒漠化防治研究。

E-mail:wubo@caf.ac.cn

tris var. *mongolica* plantations with different initial planting densities on sandy lands and suitable densities were screened to provide basis for efficient cultivation and sustainable management of its plantations. 【Method】 Growth performance indexes including diameter at breast height (DBH), tree height, height to live crown base, crown width, individual tree volume, stand volume, stem form and crown shape, disease status including disease grade and index, and soil chemical properties including pH value and contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium were analyzed in 43-year-old *P. sylvestris* var. *mongolica* trial plantations with 12 initial planting densities (417–10 000 individual/hm²) in Horqin Sandy Land. The correlations of initial planting density with growth, health status and soil chemical properties were assessed. Redundancy analysis was used to study the effect of soil chemical properties on forest growth and health indicators, and different initial planting densities were evaluated comprehensively according to soil chemical properties. 【Result】 ① There were extremely significant ($P < 0.001$) differences in growth and health indexes of plants and soil chemical properties among different initial planting densities. DBH, crown width, individual volume and preservation rate decreased, height to live crown base, crown shape, disease grade and disease index increased, while tree height and stand volume increased first and then decreased with the increase of initial planting density. The disease index, preservation rate and stand volume performed well in plantations with initial planting densities of 1 667–2 500 individual/hm². ② The contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium and pH values showed an overall trend of increasing-decreasing-increasing-decreasing with increasing initial planting densities. ③ The initial planting density had highly significantly negative correlation with DBH, crown width and individual tree volume, while it had significantly or highly significantly positive correlations with height to live crown base, crown shape, disease grade and disease susceptibility index. Initial planting density also had significantly positive correlation with soil available phosphorus content, while it had insignificant negative correlations with soil pH value and contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, alkaline-hydrolyzed nitrogen and available potassium. ④ The RDA analysis showed that soil chemical properties explained 68.43% variations for stand growth and health, among which soil available phosphorus content was the most important factor. Comprehensive evaluation indicated that the comprehensive scores of soil chemical properties were high with initial planting densities of 1 667–2 500 individual/hm², which were beneficial for soil nutrient accumulation. 【Conclusion】 Initial planting density was closely related to stand growth, health and soil chemical properties. Medium planting densities (1 667–2 500 individual/hm²) were suitable for *P. sylvestris* var. *mongolica*.

Key words: *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; initial planting density; stand health; soil chemical property; Horqin Sandy Land

林分密度对林分生长、木材产出和生态效益的可持续发展发挥着决定性作用^[1]。林分密度及其驱动的林木竞争直接调控了光照、水、热等环境资源在林分中的分配,决定了林木空间结构,进而显著影响林木的胸径、单株材积、林分蓄积量、冠幅、树干圆满度和材质等生长、形质性状^[2-3]。研究表明,中等初植密度有利于杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林单株材积与保留株数达到最佳组合效果,实现较高的林分蓄积量^[4];高初植密度(2 500株/hm²)降低了杉木林平均胸径和存活率^[5],相同密度亦降低了

毛白杨(*Populus tomentosa*)人工林地土壤有机碳、有效磷含量,不利于林分与土壤间的养分平衡^[6];此外,在经营过程中,较低林分密度更有利于改善干旱、半干旱地区土壤水分、肥力状况等,促进林分天然更新,有利于林分健康与稳定^[7];中等林分密度(1 550株/hm²)可使云杉(*Picea asperata*)人工林的林分结构特征和土壤理化性质达到最优^[8],高密度樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林分透光、透风性差,容易导致病虫害加剧、林分衰退等不良后果^[9]。可见密度调控是实现人工林科学经营的

一种有效措施^[10],是人工林提质增效及生态、经济效益可持续发挥的关键。

樟子松天然分布于我国黑龙江大兴安岭海拔 400~900 m 山地及海拉尔以西、以南一带沙地,是速生、抗旱、耐寒、耐瘠薄的优良生态、经济树种。自 20 世纪 50 年代开始引种到北方干旱、半干旱区,樟子松在“三北”防护林工程中广泛应用,发挥着防风固沙、水土保持等重要生态功能^[11]。然而,自 20 世纪 90 年代以来,干旱、半干旱区的樟子松人工近熟林(树龄 30~35 年)普遍出现了长势衰弱、病虫害频发、枯梢死亡等林分衰退现象^[12]。林分密度不合理造成了土壤养分、水分失衡,是樟子松林衰退的主要原因之一^[13-14]。在人工林经营过程中适时调控林分密度是进行资源合理分配、保证林分健康稳定的必要措施^[15]。近年来,针对樟子松人工林适宜密度的研究成为热点,学者们从林木生长^[16]、树干液流量^[17]、水分利用^[18]、土壤理化性质^[19]等角度研究了林分密度效应。然而,关于樟子松林分初植密度与林分生长、健康状况和土壤化学性质关联性的系统研究尚鲜见报道,而这些研究有助于通过营林措施解决樟子松人工林的退化问题。本研究以科尔沁沙地 43 年生樟子松人工林为对象,系统分析初植密度对其林分生长和健康状况以及土壤化学性质的影

响,并分析土壤化学性质与林分生长和健康状况的相关性,旨在为樟子松人工林密度调控进而实现提质增效和可持续经营提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验地位于科尔沁沙地南缘辽宁省沙地治理与利用研究所章古台实验林场(经纬度 42°39'N,122°33'E;海拔 189~229 m)。该地属于大陆性亚湿润干旱气候,年均气温 6.82 °C,年均降水量 450~550 mm,降水集中在 6—8 月份,年均蒸发量 1 700 mm,土壤类型为风沙土^[20]。自 20 世纪 50 年代以来,为综合治理沙地,该地区大量营造了以樟子松为主的防风固沙林,其他植物还有杨树(*Populus* spp.)、榆树(*Ulmus pumila*)、色木槭(*Acer mono*)、山杏(*Prunus sibirica*)、山楂(*Crataegus pinnatifida*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、羊草(*Leymus chinensis*)、拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、藜(*Chenopodium album*)等。

1.2 试验林调查

樟子松密度试验林于 1980 年以 2 年生实生苗营造。本试验设置 D1~D12 共 12 个初植密度处理(表 1),每个处理 3 次重复,小区面积为 2 100 m²。

表 1 12 个不同初植密度樟子松林的基本信息

Table 1 Basic information of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* trial plantations with 12 initial planting densities

处理 Treatment	初植株行距/m Initial spacing	初植密度/(株·hm ⁻²) Initial planting density	现存密度/(株·hm ⁻²) Current stand density	存活率/% Preservation rate	林下植被盖度/% Coverage of understory vegetation
D1	4.0×6.0	417	383	91.93	30
D2	3.0×4.0	833	833	100.00	50
D3	3.0×3.0	1 111	450	40.50	40
D4	2.0×4.0	1 250	617	49.33	50
D5	2.0×3.0	1 667	1 100	65.99	15
D6	1.5×3.0	2 222	1 333	60.01	20
D7	2.0×2.0	2 500	1 650	66.00	40
D8	1.0×3.0	3 333	1 183	35.50	60
D9	1.5×2.0	3 333	833	25.00	40
D10	1.0×2.0	5 000	2 017	40.33	15
D11	1.5×1.0	6 667	1 850	27.75	10
D12	1.0×1.0	10 000	1 300	13.00	20

2021 年 6 月,每个小区设置 1 个 20 m×10 m 的样地,进行每木检尺,测量胸径、树高、枝下高、冠幅等生长性状,并根据樟子松二元材积公式计算单株材积^[21],以样地内林木单株材积之和除以样地面积,即得林分蓄积量。参照 Codesido 等^[22]及王欢等^[23]的标准,对樟子松干形、冠形进行分级评价,其中 1 级为最佳,4 级为最差。参照刘建华^[9]的标准对樟子松林分枯梢情况进行分级,病级从 1 级到 5

级分别表示所有枝条均未感病、25%以下枝条感病、>25%~50%枝条感病、>50%~75%枝条感病和>75%~100%枝条感病濒死。采用感病指数对樟子松林分枯梢情况进行评价,感病指数的计算公式为:

$$\text{感病指数} = \frac{\sum(\text{病级株数} \times \text{病级})}{\text{林分株数总和} \times \text{最高病级}} \times 100. \quad (1)$$

1.3 土样采集及测定

每个样地沿对角线选 5 个采样点,清除地表凋

落物,分别取0~40 cm 土层土壤样品,将5个采样点的土样等量混合制成1个土样,每个样地取1 kg 土样带回实验室用于化学性质测定。采用重铬酸钾氧化-分光光度法测定土壤有机碳含量,水体电位法测定土壤 pH 值,半微量凯氏法测定土壤全氮含量,碱熔-钼锑钨比色法测定全磷含量,碱熔-火焰光度法测定全钾含量,碱解扩散法测定碱解氮含量,双酸法测定土壤有效磷含量,乙酸铵浸提法-火焰光度法测定速效钾含量^[24]。

1.4 数据统计分析

应用方差分析和 Duncan's 多重比较检验樟子松人工林的生长和健康状况及土壤化学性质在不同初植密度间的差异,其中在对感病指数进行方差分析之前先进行反正弦平方根转换;计算各指标间的 Pearson 系数,分析其相关性;通过冗余分析(Redundancy analysis, RDA),解析土壤化学性质对林分生长和健康指标的影响;通过偏冗余分析(Partial redundancy analysis, pRDA),计算土壤化学性质对林分生长和健康指标变异的贡献率;采用蒙特卡罗置换检验(Monte Carlo permutation test),验证土壤化学性质与林分生长和健康指标的相关性,提取分析结果的排序轴1和排序轴2,根据公式(2)计算各排序轴的得分,根据公式(3)计算各密度处理的综合得分,具体计算公式如下^[25]:

$$F_i = \sum_{j=1}^8 u_{ij} Z_j; \quad (2)$$

$$Y = \sum_{i=1}^2 W_i F_i. \quad (3)$$

式中: F_i 为第*i*个排序轴的得分($i=1,2$), u_{ij} 为第*i*个排序轴与第*j*个土壤化学性质的相关系数, Z_j 为第*j*个土壤化学性质指标的标准化值; Y 为综合得

分, W_i 为第*i*个排序轴的权重,即第*i*个排序轴解释率与所选排序轴解释率之和的比值。

以上数据均应用 SPSS 13.0 软件以及 R version 4.2.1 软件的 vegan 包进行分析。

2 结果与分析

2.1 初植密度对沙地樟子松人工林生长及健康状况的影响

对12个初植密度处理樟子松林生长指标和感病指数进行方差分析和多重比较,结果见表2。表2表明,初植密度对沙地樟子松人工林各生长及健康状况指标均有极显著影响($P < 0.001$)。随着初植密度的增加,胸径、冠幅、单株材积和存活率总体均呈下降趋势,说明其长势减弱;枝下高、冠形、病级和感病指数总体均呈上升趋势,表明枯梢情况加重;树高以及林分蓄积量总体呈先上升后下降的趋势,说明过高的初植密度不利于林分的生长发育。12个处理中,D1处理的胸径、冠幅、单株材积最大,存活率较高,分别为25.37 cm、5.36 m、0.260 m³和91.93%,冠形、病级和感病指数最小,分别为1.00、1.13和22.63;D7处理的林分蓄积量最高,与D6和D10处理无显著差异,但显著高于其他处理($P < 0.05$),其感病指数与D1、D2、D3、D4处理差异显著,而与其他处理无明显差异;结合表1可知,12个处理中,D5、D6和D7处理的存活率均较高,分别为65.99%、60.01%和66.00%,之后随着林分密度持续增加,存活率急剧下降。综合来看,D5、D6和D7处理的感病指数、存活率和林分蓄积量表现较优,故推荐樟子松人工林的初植造林密度为1 667~2 500 株/hm²。

表2 初植密度对沙地樟子松人工林生长及健康状况的影响

Table 2 Effect of initial planting density on growth performance and health status of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands

处理 Treatment	树高/m Tree height	枝下高/m Height to live crown base	胸径/cm Diameter at breast height	冠幅/cm Crown width	单株材积/m ³ Individual tree volume
D1	10.95±1.03 c	4.69±0.64 g	25.37±3.31 a	5.36±0.68 a	0.260±0.071 a
D2	11.35±0.96 bc	5.89±0.83 f	20.01±3.28 c	4.04±0.72 b	0.171±0.058 bc
D3	9.70±1.35 d	3.78±0.61 h	21.58±3.89 b	4.30±0.63 b	0.180±0.072 b
D4	10.12±1.16 d	4.76±0.75 g	19.88±3.77 c	3.77±0.79 c	0.158±0.062 cd
D5	11.00±1.56 c	5.74±0.97 f	19.18±4.19 c	3.41±0.93 d	0.160±0.076 cd
D6	11.68±1.28 ab	7.24±1.04 d	17.28±3.22 de	3.24±0.67 d	0.132±0.053 ef
D7	11.76±1.41 ab	7.61±1.30 c	17.85±3.60 d	2.68±0.91 ef	0.142±0.064 de
D8	11.71±1.46 ab	8.06±1.11 b	16.27±3.52 e	2.75±0.69 e	0.120±0.056 fg
D9	10.13±1.01 d	6.56±0.81 e	14.35±2.80 f	2.61±0.80 ef	0.085±0.034 hi
D10	11.14±0.99 c	7.77±0.91 bc	14.73±3.00 f	2.06±0.69 h	0.095±0.040 h
D11	9.83±0.98 d	6.47±0.98 e	13.03±2.60 g	2.27±0.79 gh	0.070±0.028 i
D12	11.95±0.98 a	8.56±0.88 a	15.06±2.45 f	2.43±0.63 fg	0.102±0.035 gh
F 值 F value	30.894 ***	123.943 ***	71.815 ***	100.380 ***	59.012 ***

表 2(续) Table 2 (continued)

处理 Treatment	冠形 Crown shape	干形 Stem form	林分蓄积量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) Stand volume	病级 Disease grade	林分感病指数 Disease index
D1	1.00±0.00 e	1.78±0.74 cd	94.46±6.03 ef	1.13±0.34 d	22.63±0.23 e
D2	1.16±0.47 e	1.50±0.61 e	106.35±8.45 def	1.36±0.80 cd	27.30±4.51 de
D3	1.19±0.49 e	1.78±0.75 cd	121.35±7.78 de	1.48±0.89 cd	29.67±5.14 de
D4	1.30±0.52 de	1.84±0.83 bcd	118.02±15.22 de	1.54±0.87 cd	29.70±1.28 de
D5	1.63±0.95 bcd	1.94±0.89 abcd	152.01±59.70 bcd	1.80±1.17 bc	36.23±6.87 bcd
D6	1.60±0.88 cd	1.61±0.80 de	186.90±30.34 ab	1.65±0.99 c	33.00±0.85 cd
D7	1.99±1.10 ab	1.88±0.80 bcd	206.66±9.17 a	2.11±1.29 ab	42.30±6.67 ab
D8	1.84±0.99 abc	2.13±0.85 ab	131.35±35.16 cde	2.18±1.28 ab	43.73±3.64 ab
D9	2.02±1.06 a	2.08±0.88 abc	65.65±9.48 f	2.14±1.31 ab	42.50±7.50 abc
D10	1.97±1.02 abc	2.24±0.92 a	176.65±35.28 abc	2.31±1.33 a	46.20±8.84 ab
D11	2.13±1.11 a	1.96±0.79 abc	124.08±10.23 de	2.43±1.33 a	48.63±3.75 a
D12	2.20±1.03 a	1.95±0.81 abcd	153.02±22.19 bcd	2.44±1.38 a	48.90±7.04 a
F 值 F value	12.474***	5.986***	8.846***	9.444***	8.624***

注:数据均为“平均值±标准差”。同列数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$),***表示差异极显著($P<0.001$)。下同。

Note:The data are “mean ± standard deviation”. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$),and *** indicates extremely significant differences ($P<0.001$). The same below.

2.2 初植密度对沙地樟子松人工林地土壤化学性质的影响

表 3 表明,初植密度对土壤 pH 值以及有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量均有极显著影响。随着初植密度的增加,土壤 pH 值以及 7 个土壤养分含量整体上均呈上升-下降-上升-下降的趋势,其中土壤 pH 以 D2、D3 处理较高,有机碳、全氮含量以 D2 和 D7 处理较高,全钾含量以 D3

和 D9 处理较高,全磷和有效磷含量以 D2 和 D8 处理较高(D12 处理的有效磷含量受地形影响而表现异常),速效钾、碱解氮含量以 D8 和 D9 处理较高。此外结合表 1 可知,林下植被盖度随着初植密度的增加总体上呈升-降-升-降的趋势,其中 D2、D4 处理的盖度均达到 50%,D8 处理达到 60%。可见低、中初植密度有利于樟子松人工林地土壤养分的积累以及林下植被的生长。

表 3 初植密度对沙地樟子松人工林地土壤化学性质的影响

Table 3 Effect of initial planting density on soil chemical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands

处理 Treatment	pH	有机碳/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Organic carbon	全氮/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Total nitrogen	全磷/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Total phosphorus
D1	5.49±0.29 cd	7.69±1.62 ab	0.335±0.059 b	0.108±0.013 bc
D2	5.70±0.08 a	8.10±0.21 ab	0.416±0.018 a	0.130±0.005 a
D3	5.69±0.18 ab	7.48±0.67 bc	0.341±0.047 b	0.108±0.002 bc
D4	5.56±0.03 bc	6.09±0.20 de	0.281±0.003 cd	0.098±0.003 de
D5	5.58±0.02 abc	5.44±0.52 e	0.264±0.024 d	0.088±0.002 f
D6	5.17±0.03 e	7.73±0.99 ab	0.334±0.027 b	0.102±0.006 cd
D7	5.57±0.05 abc	8.96±0.90 a	0.348±0.029 b	0.112±0.006 b
D8	4.99±0.03 f	6.80±0.85 bcd	0.316±0.019 bc	0.126±0.006 a
D9	5.42±0.05 d	7.51±0.80 bc	0.333±0.031 b	0.111±0.005 b
D10	4.98±0.03 f	7.97±0.41 ab	0.306±0.007 bcd	0.093±0.002 ef
D11	5.61±0.09 abc	7.80±0.80 ab	0.340±0.028 b	0.107±0.001 bc
D12	5.53±0.05 cd	6.39±0.60 cde	0.279±0.028 cd	0.108±0.002 bc
F 值 F value	39.385***	6.629***	7.604***	30.303***
处理 Treatments	全钾/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Total potassium	碱解氮/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Alkali-hydrolyzed nitrogen	有效磷/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Available phosphorus	速效钾/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) Available potassium
D1	24.09±0.85 bc	50.54±8.18 abc	9.28±3.45 cde	53.69±17.74 de
D2	24.30±0.66 abc	53.90±3.74 abc	10.68±0.78 c	40.33±2.47 f
D3	25.53±1.59 a	51.73±7.53 abc	7.32±1.48 ef	53.27±3.49 de
D4	24.33±0.72 abc	46.37±3.57 bcd	5.81±0.35 f	49.47±2.59 e
D5	23.53±0.06 bcd	38.77±3.57 d	7.20±3.10 ef	76.47±2.73 b
D6	23.87±0.35 bc	53.03±5.24 abc	7.92±0.58 def	51.30±2.52 de

表 3(续) Table 3 (continued)

处理 Treatments	全钾/(g·kg ⁻¹) Total potassium	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) Alkali-hydrolyzed nitrogen	有效磷/(mg·kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾/(mg·kg ⁻¹) Available potassium
D7	23.13±0.47 cd	44.30±5.51 cd	10.45±1.15 c	56.67±7.22 d
D8	24.33±0.57 abc	60.70±8.35 a	15.47±0.60 b	89.67±2.59 a
D9	24.57±0.21 ab	57.43±9.05 ab	9.66±0.77 cd	77.60±3.01 b
D10	24.37±0.46 abc	51.13±1.97 abc	8.47±0.47 cde	66.80±1.47 c
D11	24.37±0.31 abc	48.87±0.75 bcd	9.03±0.58 cde	32.83±2.59 g
D12	24.27±0.49 bc	44.30±9.88 cd	18.23±0.65 a	39.67±2.59 f
F 值 F value	4.719***	3.272***	28.439***	87.081***

2.3 林分密度与沙地樟子松人工林生长和健康状况的相关性

相关性分析结果(表 4)显示,林分密度与樟子松生长和健康指标以及存活率密切相关。其中初植密度与现存密度间呈极显著正相关($P < 0.01$),且两者均与胸径、冠幅、单株材积呈极显著负相关,与枝下高、冠形、病级和感病指数呈显著或极显著正相关,说明较高的林分密度不利于林分的生长和健康。

而初植密度与存活率呈极显著负相关,现存密度与林分蓄积量呈极显著正相关。存活率与单株材积、胸径、冠幅呈极显著正相关,与冠形、干形、病级和感病指数呈显著或极显著负相关。单株材积与胸径、冠幅呈极显著正相关,与枝下高、病级、感病指数、冠形呈显著或极显著负相关。感病指数与冠形、枝下高、干形呈极显著正相关,与冠幅、胸径呈极显著负相关。

表 4 林分密度与沙地樟子松人工林生长和健康状况的相关性

Table 4 Correlation among stand density, growth and healthy characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands

性状 Trait	初植密度 Initial planting density	现存密度 Current stand density	树高 Tree height	枝下高 Height to live crown base	胸径 Diameter at breast height	冠幅 Crown width
现存密度 Current stand density	0.715**					
树高 Tree height	0.208	0.335				
枝下高 Height to live crown base	0.683*	0.777**	0.713**			
胸径 Diameter at breast height	-0.745**	-0.793**	-0.069	-0.727**		
冠幅 Crown width	-0.730**	-0.859**	-0.195	-0.796**	0.963**	
单株材积 Individual volume	-0.713**	-0.752**	0.013	-0.660*	0.992**	0.951**
冠形 Crown shape	0.814**	0.817**	0.222	0.807**	-0.915**	-0.947**
干形 Stem form	0.478	0.451	-0.060	0.440	-0.565	-0.639*
病级 Disease grade	0.841**	0.815**	0.159	0.773**	-0.918**	-0.952**
感病指数 Disease index	0.841**	0.817**	0.175	0.780**	-0.914**	-0.949**
林分蓄积量 Stand volume	0.269	0.738**	0.688*	0.652*	-0.305	-0.482
存活率 Preservation rate	-0.745**	-0.465	0.209	-0.406	0.732**	0.694**

性状 Trait	单株材积 Individual tree volume	冠形 Crown shape	干形 Stem form	病级 Disease grade	感病指数 Disease index	林分蓄积量 Stand volume
冠形 Crown shape	-0.883**					
干形 Stem form	-0.548	0.658*				
病级 Disease grade	-0.894**	0.978**	0.728**			
感病指数 Disease index	-0.887**	0.977**	0.723**	0.999**		
林分蓄积量 Stand volume	-0.255	0.438	0.098	0.380	0.386	
存活率 Preservation rate	0.763**	-0.730**	-0.663*	-0.780**	-0.769**	0.034**

注:“*”和“**”分别表示显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)相关。

Note: “*” and “**” indicate significant correlation at the levels of 0.05 and 0.01, respectively.

2.4 沙地樟子松人工林生长和健康状况与土壤化学性质的相关性

沙地樟子松人工林林分密度与土壤化学性质的相关性见表 5。表 5 显示,初植密度与土壤有效磷含量呈显著正相关,与土壤 pH 值及有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾含量呈负相关,但相关性

均不显著($P \geq 0.05$)。现存密度与土壤全钾呈显著负相关。土壤化学性质指标之间相关密切,土壤全氮与有机碳、全磷含量呈极显著正相关,土壤全磷与土壤碱解氮含量呈显著正相关。

进一步通过冗余分析(RDA)解析土壤化学性质指标对樟子松林生长、健康指标的影响,结果(图

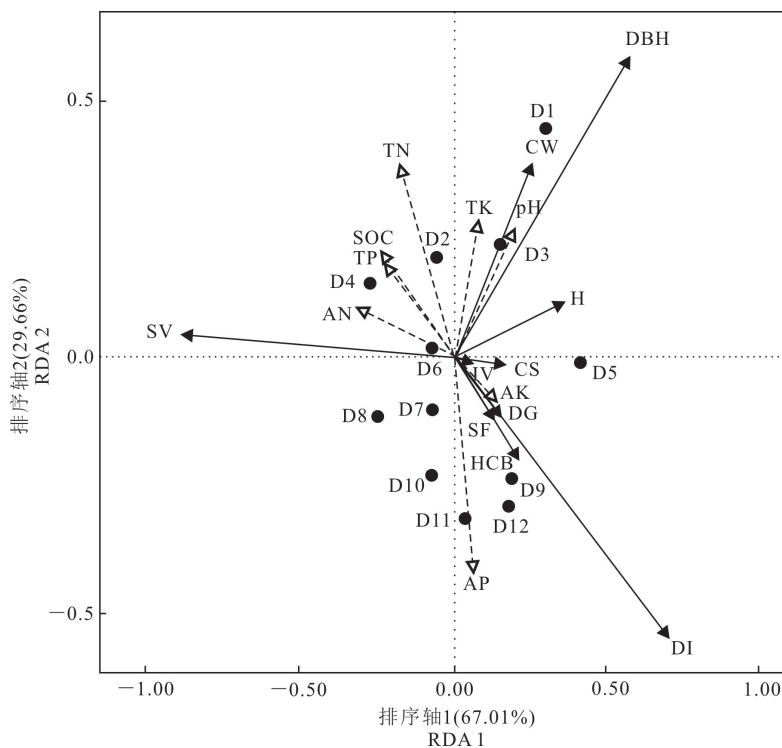
1)显示,排序轴 1 的解释率为 67.01%,与碱解氮、有机碳、全磷含量的相关性较高;排序轴 2 的解释率为 29.66%,与有效磷、全氮和全钾含量的相关性较

高;排序轴 1 和 2 对林分生长和健康指标变异的累积解释率达 96.67%,可知这 2 个排序轴能够充分反映土壤化学性质对林分生长、健康状况的影响。

表 5 沙地樟子松人工林分密度与土壤化学性质的相关性

Table 5 Correlation among stand density and chemical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands

性状 Trait	pH	有机碳 Soil organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
初植密度 Initial planting density	-0.158	-0.100	-0.336	-0.071	-0.125	-0.145	0.643*	-0.245
现存密度 Current stand density	-0.435	0.189	-0.227	-0.258	-0.611*	-0.181	0.250	-0.122
pH		-0.043	0.231	0.072	0.473	-0.490	-0.199	-0.572
有机碳 Soil organic carbon			0.768**	0.404	-0.200	0.343	-0.049	-0.256
全氮 Total nitrogen				0.720**	0.206	0.492	-0.037	-0.317
全磷 Total phosphorus					0.404	0.630*	0.527	-0.053
全钾 Total potassium						0.313	0.060	-0.195
碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen							0.185	0.314
有效磷 Available phosphorus								0.041



D1~D12. 不同初植密度处理;H. 树高;HCB. 枝下高;DBH. 胸径;CW. 冠幅;IV. 单株材积;CS. 冠形;SF. 干形;SV. 林分蓄积量;DG. 病级;DI. 感病指数;SOC. 有机碳;TN. 全氮;TP. 全磷;TK. 全钾;AN. 碱解氮;AP. 有效磷;AK. 速效钾。箭头长度反映了指标解释率的大小, 2 个箭头之间的夹角反映了指标间的相关性, 夹角小于 90° 时为正相关, 大于 90° 时为负相关。

D1~D12. Different planting densities treatment;H. Tree height;HCB. Height to live crown base;DBH. Diameter at breast height; CW. Crownwidth;IV. Individual tree volume;CS. Crown shape;SF. Stem form;SV. Stand volume;DG. Disease grade;DI. Disease index; SOC. Soil organic carbon;TN. Total nitrogen;TP. Total phosphorus;TK. Total potassium;AN. Alkali-hydrolyzed nitrogen;AP. Available phosphorus;AK. Available potassium. The length of arrow reflects the explanatory power of each indicator, and the angle between paired arrows reflects the correlation between indicators, with positive for less than 90° and negative for above 90°.

图 1 沙地樟子松人工林生长和健康状况与土壤化学性质的冗余分析

Fig. 1 Redundancy analysis among chemical properties, stand growth and healthy characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations on sandy lands

由图 1 还可知,胸径、冠幅、林分蓄积量和感病指数是影响沙地樟子松人工林林分生长、健康状况的主要因子,有效磷、全氮、全钾含量是影响其林下土壤化学性质的主要因子。pH 及全钾、全氮含量与胸径和冠幅呈正相关,碱解氮、全磷、有机碳、全氮含量与林分蓄积量呈正相关,土壤有机碳、全磷、全氮、碱解氮、全钾含量与感病指数呈负相关。说明较高的土壤养分含量有助于提高林分蓄积量及其健康程度。

偏冗余分析结果表明,土壤化学性质对林分生长、健康指标变异的总贡献率之和为 68.43%,贡献率从大到小排序依次为有效磷含量(17.93%)>pH 值(10.72%)>全钾含量(10.44%)>全氮含量

(9.00%)>碱解氮含量(7.32%)>速效钾含量(6.41%)>有机碳含量(4.51%)>全磷含量(2.10%);显著性检验结果显示,仅有效磷含量的影响达到显著水平($P < 0.05$),表明其是影响林分生长和健康状况的主要土壤化学性质指标。对不同初植密度樟子松人工林地的土壤化学性质指标进行综合评分,结果(表 6)发现,综合得分从大到小排序依次为 D5(0.26)>D7(-3.16)>D4(-3.21)>D10(-3.59)>D9(-4.11)>D3(-4.22)>D1(-4.36)>D8(-4.49)>D12(-4.56)>D6(-5.07)>D11(-5.43)>D2(-6.16),说明中等初植密度更有利于樟子松人工林保持较好的土壤养分状态。

表 6 不同初植密度沙地樟子松人工林地土壤化学性质的综合评分

Table 6 Comprehensive scores of soil chemical properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different initial planting densities on sandy lands

处理 Treatment	排序轴 1 得分 Axis 1's score	排序轴 2 得分 Axis 2's score	综合得分 Comprehensive score	排序 Rank
D5	-1.04	3.15	0.26	1
D7	-6.62	4.56	-3.16	2
D4	-7.78	6.96	-3.21	3
D10	-7.51	5.15	-3.59	4
D9	-7.96	4.45	-4.11	5
D3	-9.33	7.17	-4.22	6
D1	-8.95	5.83	-4.36	7
D8	-6.99	1.07	-4.49	8
D12	-7.73	2.49	-4.56	9
D6	-10.36	6.69	-5.07	10
D11	-11.28	7.60	-5.43	11
D2	-12.02	6.87	-6.16	12

3 讨论

3.1 初植密度对樟子松人工林生长及健康状况的影响

林分密度是反映林木空间利用程度的指标,密度会影响林木的营养生长空间,与林木生长发育密切相关^[26]。本研究中,不同的初植密度对樟子松人工林生长和健康指标均表现出一定程度的影响。随着初植密度增加,樟子松人工林的生长指标总体下降,健康状况恶化,这是因为高的初植密度加剧了林木间水分、光照和土壤养分的竞争,从而抑制了樟子松的胸径、冠幅、单株材积等的生长,这与前人对多数树种的研究结果^[8,27]类似。本研究中,不同初植密度处理樟子松人工林的树高总体上存在显著差异。这可能与林分年龄有关,如在中、幼龄林阶段,尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)的树高不受初植密度影响,但是生长 16 年之后不同密度

处理间会出现显著差异,表现出低密度促进树高生长的规律^[2]。亦有研究发现,在造林初期,高初植密度可以促进西南桦(*Betula alnoides*)的高生长,而生长 6 年之后不同初植密度处理之间树高逐渐趋于一致^[28]。由此可见,初植密度对树高的影响因树种和林龄而存在差异。

林分蓄积量是由林木单株材积和林木株数计算而来,两者的大小决定了林分蓄积量的变化^[29]。较高的初植密度导致林分竞争激烈,直接影响了存活率和林分蓄积量。前人对马尾松的研究表明,高初植密度可以显著提升中、幼龄林的林分蓄积量和出材量,进入近成熟林之后初植密度对蓄积量无显著影响^[30]。本研究中,随着林分初植密度的增加,樟子松人工林的单株材积和存活率总体上均呈下降趋势,这是因为高密度林分的透光率和通风性较低,樟子松人工林生长情况较差,且易遭受病虫害为害,造成林木枯死,影响樟子松人工林的存活率。本研究中,

林分蓄积量随初植密度的增加总体呈先升高后降低趋势,这可能与单株材积、存活率的变化有关。樟子松人工林的生长与健康状况之间存在密切联系,并且对林分初植密度的响应有差异,故需要综合考虑林分蓄积量、林分健康以及存活率确定合适的初植密度。

3.2 樟子松人工林地土壤化学性质对初植密度的响应

林分密度一方面通过影响凋落物储量和土壤有机质的分解速率等进而调控土壤养分输入,另一方面通过影响林分的养分利用效率进而调控土壤养分的输出,从而形成土壤理化性质的异质性^[31-32]。前人研究表明,柽柳(*Tamarix chinensis*)林地土壤的有机碳、碱解氮、有效磷含量随林分密度增大表现为先增加后减少的趋势,且中等林分密度有利于提高土壤肥力^[33]。本研究中,随着初植密度的增大,樟子松人工林地土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量以及 pH 值整体上均呈上升-下降-上升-下降的趋势。这可能是因为林分初植密度由低到中等水平时,林分郁闭度的增大促使林下植被和土壤腐殖质随之增多,使沙地土壤持水能力、微生物和酶活性增强,促进腐殖质转化成养分元素供植物吸收利用^[34],使各化学性质指标在中、低密度达到较高水平;而随着林分初植密度继续增大到高水平,林分整体情况变差,腐殖质不断积累而分解速度缓慢,林木的养分吸收量和留存量增加^[35],导致土壤养分含量下降,且林下植被减少。此外,高初植密度的 D12 处理林下土壤有效磷含量较高,可能是由于其地势低洼,土壤水分条件好,土壤微生物活动旺盛所致。

3.3 樟子松人工林地土壤化学性质与林分生长和健康状况的关系

前人研究表明,毛乌素沙地樟子松人工林的树高和胸径与林下土壤全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷和有机质含量等土壤化学性质指标呈显著正相关^[36]。本研究中,有效磷对樟子松林分生长、健康状况异质性的解释率最高,为 17.93%,是最主要的土壤特征指标,其与树高、枝下高呈显著正相关,与樟子松林分感病指数呈负相关,表明磷元素对樟子松林分的生长发育和病虫害抵抗能力至关重要。可见,林分初植密度不但影响土壤化学性质,而且还通过土壤化学性质影响樟子松林分的生长和健康状况。

4 结 论

初植密度显著影响了科尔沁沙地樟子松人工林生长、健康状况以及林下土壤的化学性质。随着初植密度的增大,樟子松人工林的胸径、冠幅、单株材积和存活率总体均呈下降趋势,枝下高、冠形、病级和感病指数总体均呈上升趋势,树高以及林分蓄积量总体呈先上升后下降趋势;林下土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量以及 pH 值整体呈上升-下降-上升-下降的趋势,土壤有效磷含量显著影响樟子松人工林林分的生长和健康状况。当初植密度为 1 667~2 500 株/hm² 时,樟子松人工林的感病指数、存活率、林分蓄积量和土壤化学性质的综合表现较优,建议将其作为沙地营造樟子松林的适宜造林密度。

[参考文献]

- [1] 李晓燕,段爱国,张建国,等. 不同良种与初植密度杉木林分密度指标动态特征 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(2): 72-80.
Li X Y, Duan A G, Zhang J G, et al. Dynamic characteristics of stand density measure of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations with different improved varieties and initial planting densities [J]. Forest Research, 2021, 34(2): 72-80.
- [2] 张程, 欧阳林男, 陈少雄. 3 种初植密度桉树林分生长、材种出材量及经济效益动态分析 [J]. 林业科学研究, 2021, 34(4): 58-65.
Zhang C, Ouyang L N, Chen S X. Dynamic analysis on economic benefit, growth and production of *Eucalypt plantations* with different initial densities [J]. Forest Research, 2021, 34(4): 58-65.
- [3] 黄宝灵, 吕成群, 蒙钰钗, 等. 不同造林密度对尾叶桉生长、产量及材性影响的研究 [J]. 林业科学, 2000, 36(1): 81-90.
Huang B L, Lü C Q, Meng Y C, et al. Effects of different planting densities on the growth, output and wood properties of *Eucalyptus urophylla* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2000, 36(1): 81-90.
- [4] 郭光智, 段爱国, 张建国. 南亚热带杉木林分蓄积量生长立地与密度效应 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(4): 19-25.
Guo G Z, Duan A G, Zhang J G. The site and planting density effects on the wood volume growth of Chinese fir plantations in south subtropical area [J]. Forest Research, 2019, 32(4): 19-25.
- [5] 熊光康, 厉月桥, 熊有强, 等. 低密度造林对杉木生长、形质和材种结构的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 165-173.
Xiong G K, Li Y J, Xiong Y Q, et al. Effects of low stand density afforestation on the growth, stem-form and timber assortment structure of *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edi-

- tion), 2021, 45(3): 165-173.
- [6] 赵雪梅, 孙向阳, 王海燕, 等. 不同密度三倍体毛白杨试验林土壤养分的动态变化 [J]. 林业科学研究, 2012, 25(6): 732-738.
Zhao X M, Sun X Y, Wang H Y, et al. Changes of soil nutrients contents in the triploid *Populus tomentosa* plantations with five stand spacings [J]. Forest Research, 2012, 25(6): 732-738.
- [7] Chen Y, Cao Y. Response of tree regeneration and understory plant species diversity to stand density in mature *Pinus tabulaeformis* plantations in the hilly area of the Loess Plateau, China [J]. Ecological Engineering, 2014, 73: 238-245.
- [8] 冯宜明, 李毅, 曹秀文, 等. 甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质 [J]. 林业科学, 2018, 54(10): 20-30.
Feng Y M, Li Y, Cao X W, et al. Characteristics of stand structure and soil physicochemical properties of artificial young *Picea asperata* plantation with different densities in southern Gansu [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(10): 20-30.
- [9] 刘建华. 章古台地区不同密度樟子松人工林衰退情况分析 [J]. 防护林科技, 2019(5): 19-20, 58.
Liu J H. Degeneration of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations at different densities in Zhanggutai area [J]. Protection Forest Science and Technology, 2019(5): 19-20, 58.
- [10] Baldwin V C, Peterson K D, Iii A C, et al. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 38-year-old loblolly pine [J]. Forest Ecology and Management, 2000, 137(1/2/3): 91-102.
- [11] 朱教君, 郑晓, 闫巧玲, 等. 三北防护林工程生态环境效应遥感监测与评估研究: 三北防护林体系工程建设 30 年 (1978—2008) [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Zhu J J, Zheng X, Yan Q L, et al. Assessment of impacts of the three-north protective forest program on ecological environments by remote sensing technology: launched after 30 year (1987-2008) [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [12] 焦树仁. 辽宁省章古台樟子松固沙林提早衰弱的原因与防治措施 [J]. 林业科学, 2001, 37(2): 131-138.
Jiao S R. Report on the causes of the early decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* shelterbelt and its preventative and control measures in Zhanggutai of Liaoning Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2001, 37(2): 131-138.
- [13] 杨涛, 徐慧, 李慧, 等. 樟子松人工林土壤养分、微生物及酶活性的研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 50-53.
Yang T, Xu H, Li H, et al. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity in *Pinus sylvestris* plantations [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2005, 19(3): 50-53.
- [14] Zheng X, Zhu J J, Yan Q L, et al. Effects of land use changes on the groundwater table and the decline of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in southern Horqin Sandy Land, Northeast China [J]. Agricultural Water Management, 2012, 109: 94-106.
- [15] 宋立宁, 朱教君, 郑晓. 基于沙地樟子松人工林衰退机制的营林方案 [J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3249-3256.
Song L N, Zhu J J, Zheng X. Forestation and management scheme of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations in sandy lands based on their decline mechanisms [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(11): 3249-3256.
- [16] 韩辉, 袁春良, 张学利, 等. 基于林分生长量的沙地樟子松初造林密度确定 [J]. 辽宁林业科技, 2020(6): 1-9, 58.
Han H, Yuan C L, Zhang X L, et al. Confirmation of initial planting density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in sandy land based on stand growth [J]. Journal of Liaoning Forestry Science and Technology, 2020(6): 1-9, 58.
- [17] 韩辉, 张学利, 党宏忠, 等. 基于树干液流通量的沙地樟子松合理林分密度的确定 [J]. 林业科学研究, 2015, 28(6): 797-803.
Han H, Zhang X L, Dang H Z, et al. Study on proper stand density of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in sandy land based on stem sap flow velocity [J]. Forest Research, 2015, 28(6): 797-803.
- [18] 韩辉, 张学利, 党宏忠, 等. 科尔沁沙地南缘樟子松林蒸腾强度的年际变化及与降水、地下水位间的关系 [J]. 林业科学, 2020, 56(11): 31-40.
Han H, Zhang X L, Dang H Z, et al. Inter-annual variation of transpiration intensity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* stand on the southern margin of Horqin Sandy Land and its relationship with precipitation and groundwater level [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(11): 31-40.
- [19] 于东伟, 雷泽勇, 赵国军, 等. 樟子松固沙林土壤理化特性对林分密度的响应 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 134-141.
Yu D W, Lei Z Y, Zhao G J, et al. Response of soil physicochemical properties under sand-fixation forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to stand density [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 134-141.
- [20] 王凯, 那恩航, 张日升, 等. 不同密度下沙地樟子松碳、氮、磷化学计量及养分重吸收特征 [J]. 生态学杂志, 2021, 40(2): 313-322.
Wang K, Na E H, Zhang R S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry and nutrient resorption of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* under different densities [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(2): 313-322.
- [21] 张日升, 于洪军, 王国晨, 等. 辽宁樟子松人工林二元材积表的编制 [J]. 辽宁林业科技, 2004(6): 22-24.
Zhang R S, Yu H J, Wang G C, et al. Compilation of volume table based on both DBH and tree height measurements of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in Liaoning province [J]. Journal of Liaoning Forestry Science and Technology, 2004(6): 22-24.
- [22] Codesido V, Fernández-López J. Juvenile genetic parameter estimates for vigour, stem form, branching habit and survival in three radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) progeny tests in Galicia, NW Spain [J]. European Journal of Forest Research, 2008, 127(4): 315-325.
- [23] 王欢, 曾建雄, 骆必刚, 等. 粤东地区西南桦优良无性系多性状综合选择 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(12): 72-75, 84.
Wang H, Zeng J X, Luo B G, et al. Multiple-trait combined se-

- lection of superior *Betula alnoides* clones in eastern Guangdong [J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2017, 37(12): 72-75, 84.
- [24] 中国林业科学研究院林业研究所. 林业行业标准: LY/T 1228—1999, LY/T 1229—1999, LY/T 1233—1999, LY/T 1234—1999, LY/T 1236—1999, LY/T 1237—1999, LY/T 1239—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- Research institute of forestry, Chinese academy of forestry. Forestry industry standard: LY/T 1228—1999, LY/T 1229—1999, LY/T 1233—1999, LY/T 1234—1999, LY/T 1236—1999, LY/T 1237—1999, LY/T 1239—1999 [S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [25] 周树平, 梁坤南, 杜健, 等. 不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究 [J]. 植物研究, 2017, 37(2): 200-210.
- Zhou S P, Liang K N, Du J, et al. Research on understory vegetation and soil physical-chemical properties of teak plantation with difference stand densities [J]. Bulletin of Botanical Research, 2017, 37(2): 200-210.
- [26] 董雪婷, 张静, 张志东, 等. 树种相互作用、林分密度和树木大小对华北落叶松生产力的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2722-2728.
- Dong X T, Zhang J, Zhang Z D, et al. Effects of tree species interaction, stand density, and tree size on the productivity of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(8): 2722-2728.
- [27] 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.
- [28] 郑海水, 黎明, 汪炳根, 等. 西南桦造林密度与林木生长的关系 [J]. 林业科学研究, 2003, 16(1): 81-86.
- Zheng H S, Li M, Wang B G, et al. Effect of initial planting spacing on the growth of *Betula alnoides* [J]. Forest Research, 2003, 16(1): 81-86.
- [29] 王慧, 郭晋平. 我国森林抚育间伐研究进展 [J]. 山西林业科技, 2008, 37(2): 29-32.
- Wang H, Guo J P. China's forests thinning experiment and research progress [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2008, 37(2): 29-32.
- [30] 谌红辉, 丁贵杰, 温恒辉, 等. 造林密度对马尾松林分生长与效益的影响研究 [J]. 林业科学研究, 2011, 24(4): 470-475.
- Chen H H, Ding G J, Wen H H, et al. Effects of planting density on growth and economic benefit of Masson pine plantation [J]. Forest Research, 2011, 24(4): 470-475.
- [31] 王凯, 赵成姣, 张日升, 等. 不同密度樟子松人工林土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 741-748.
- Wang K, Zhao C J, Zhang R S, et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations with different densities [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 741-748.
- [32] 侯瑞萍, 张克斌, 郝智如. 造林密度对樟子松人工林枯落物和土壤持水能力的影响 [J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 624-630.
- Hou R P, Zhang K B, Hao Z R. Effects of different afforestation densities of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on the water-holding capacity of forest litter and soil [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 624-630.
- [33] 陈萍, 夏江宝, 王善龙, 等. 黄河三角洲滨海滩涂不同密度柽柳林的土壤盐碱与养分特征 [J]. 生态学报, 2022, 42(24): 1-11.
- Chen P, Xia J B, Wang S L, et al. Variations in soil salinity and nutrient contents of *Tamarix chinensis* with different densities on the beach of the Yellow River Delta [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 1-11.
- [34] 陈婷, 郝敏, 孔范龙, 等. 枯落物分解及其影响因素 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1927-1935.
- Chen T, Xi M, Kong F L, et al. A review on litter decomposition and influence factors [J]. Chinese Journal of Ecology, 2016, 35(7): 1927-1935.
- [35] 肖兴翠, 李志辉, 唐作钧, 等. 林分密度对湿地松人工林养分循环速率和利用效率的影响 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2871-2880.
- Xiao X C, Li Z H, Tang Z J, et al. Effects of stand density on nutrient cycling rate and use efficiency of *Pinus elliottii* plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(11): 2871-2880.
- [36] 邓继峰, 丁国栋, 魏亚伟, 等. 毛乌素沙地南缘樟子松人工林土壤理化性质差异及其与林分生长的关系 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 160-166.
- Deng J F, Ding G D, Wei Y W, et al. Soil physiochemical properties and the relations with Mongolian pine growth in Southern Mu Us desert [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(8): 160-166.