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

不同经营世代刺槐人工林多功能经营的密度管理图研建

杨扬 彭祚登 刘伟韬 王鑫 王书婷 王少明

Research and development of density management map for multifunctional management of *Robinia pseudoacacia* plantations with different generations of management

Yang Yang, Peng Zuodeng, Liu Weitao, Wang Xinzhe, Wang Shuting, Wang Shaoming

引用本文:
杨扬, 彭祚登, 刘伟韬, 王鑫, 王书婷, 王少明. 不同经营世代刺槐人工林多功能经营的密度管理图研建[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(10):11–21. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230213
Yang Yang, Peng Zuodeng, Liu Weitao, Wang Xinzhe, Wang Shuting, Wang Shaoming. Research and development of density management map for multifunctional management of *Robinia pseudoacacia* plantations with different generations of management[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10):11–21. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230213

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230213

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杉木人工林碳汇木材多功能经营的最优轮伐期

Optimal rotation period of carbon sequestration wood multifunctional management in Chinese fir plantation

北京林业大学学报, 2022, 44(10): 120–128. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220399

豫西浅山区不同世代刺槐林土壤养分与结构特征

Soil nutrient and structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* in different generations in the shallow mountain areas of western Henan Province, central China

北京林业大学学报, 2020, 42(3): 54–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190263

晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应

Response of soil nutrients and their stoichiometric ratios to stand density in *Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province, northern China

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81–93. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190287

马尾松人工林密度控制图及密度预警研究

Development and application of density management diagram for *Pinus massoniana* plantation

北京林业大学学报, 2019, 41(5): 31–37. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20190015

干旱胁迫下环境与生理因子对晋西黄土区刺槐人工林树干液流的影响

Impact of environmental and physiological factors during drought stress on sap flow in *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province of northern China

北京林业大学学报, 2024, 46(4): 127–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230209

不同经营方式对油松成熟人工林生长和植物多样性的影响

Effects of different management methods on growth and plant diversity in mature *Pinus tabuliformis* plantations

北京林业大学学报, 2023, 45(12): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220302

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230213

不同经营世代刺槐人工林多功能经营的密度管理图研建

杨 扬[1] 彭祚登[1] 刘伟韬[1] 王鑫喆[1] 王书婷[1] 王少明[2]
（1. 北京林业大学林学院，森林培育与保护教育部重点实验室，北京 100083；2. 河南省洛阳市国有洛宁县全宝山林场，河南 洛宁 471716）

摘要:【目的】建立刺槐人工林多功能林分密度管理图，以实现对不同培育目的刺槐林的科学合理经营，为森林经营过程中的产量预测和抚育管理方案制定提供科学依据。**【方法】**以河南省洛宁县国有吕村林场的刺槐人工林为研究对象，针对不同经营世代的刺槐林，设置固定样地和临时样地，对胸径 2 cm 以上的林木进行每木检尺。测量指标包括胸径、树高、株数等，并测定刺槐一代林和二代林固定样地的土壤最大持水量，同时计算刺槐林分的碳储量。**【结果】**研究拟合了刺槐的最优树高生长曲线，建立了由等树高线、等直径线、等疏密度线、最大密度线以及自然稀疏线组成的林分密度管理图，最终得到了林分生产力、固碳和水源涵养能力的密度管理图。**【结论】**结合刺槐树高生长曲线，阐述了刺槐林分密度管理图在产量预估、资源清查和疏伐作业设计方面的应用方法。根据可靠性验证结果，本研究得出的模型适用于豫西丘陵区的刺槐人工林。

关键词：刺槐人工林；豫西丘陵；多功能森林经营；密度管理图
中图分类号：S753.3 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)10−0011−11
引文格式：杨扬，彭祚登，刘伟韬，等. 不同经营世代刺槐人工林多功能经营的密度管理图研建［J］. 北京林业大学学报，2024，46(10)：11−21. Yang Yang, Peng Zuodeng, Liu Weitao, et al. Research and development of density management map for multifunctional management of *Robinia pseudoacacia* plantations with different generations of management［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 11−21.

Research and development of density management map for multifunctional management of *Robinia pseudoacacia* plantations with different generations of management

Yang Yang[1] Peng Zuodeng[1] Liu Weitao[1] Wang Xinzhe[1] Wang Shuting[1] Wang Shaoming[2]
(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Quanbaoshan State-Owned Forest Farm of Luoning County, Luoning 471716, Henan, China)

Abstract:［**Objective**］This study established a multifunctional forest density management map for *Robinia pseudoacacia* plantations to achieve scientific and rational management of *R. pseudoacacia* forests with different cultivation purposes, and provide scientific basis for yield prediction and tending management plan formulation in forest management processes.［**Method**］The fixed and temporary sample plots of *R. pseudoacacia* plantations, which located in the State-Owned Lü Village Forest Farm in Luoning County, Henan Province of northern China were set up for different management generations of *R. pseudoacacia*. Each tree was measured, with indexes including DBH, tree height and the number of trees, and the maximum soil water capacity of fixed sample plots in the first and second generation of *R. pseudoacacia* forests was determined. Additionally, the carbon storage of *R. pseudoacacia* stands was calculated.［**Result**］The optimum tree height growth curve of *R. pseudoacacia* was fitted, and the stand density management map composed of equivalent tree height lines, equivalent diameter lines, equivalent thinning

收稿日期: 2023−09−01 **修回日期:** 2024−01−26
基金项目: 国家重点研发计划（2017YFDO600503）。
第一作者: 杨扬。主要研究方向：森林培育。Email: 974062986@qq.com 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号 北京林业大学林学院。
责任作者: 彭祚登，博士，教授。主要研究方向：森林培育。Email: zuodeng@sina.com 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

density lines, maximum density lines and natural sparse line was established. Finally, the density management map of stand productivity, carbon sequestration and water conservation ability was obtained. [**Conclusion**] In terms of height growth curve of *R. pseudoacacia* tree, the application of *R. pseudoacacia* stand density management map in yield prediction, resource inventory and thinning operation design is analyzed. According to the reliability verification results, the model obtained in this study is suitable for *R. pseudoacacia* plantations in the hilly area of western Henan Province of northern China.

Key words: *Robinia pseudoacacia* plantation; hills in western Henan Province; multifunctional forest management; density management map

森林的多功能经营是指人们在对一定面积的森林经营管理的过程中，使其同时发挥生产、科教、美学、休闲、生态保护等多种功能[1]。在大力推进生态文明建设的背景下，森林培育不仅要考虑生产功能的发挥，还应更多地考虑生态保护功能的发挥，包括提高固碳能力和增强水源涵养能力等。森林生态系统作为陆地生态系统最大的碳库，在区域以及全球碳循环中，扮演着重要角色[2]。现有研究表明，林龄、树种、密度等林分因子均会对林分的碳储情况产生一定影响[3−4]。森林水源涵养是森林生态系统发挥生态保护作用的一个重要方面，森林通过林冠、树干、枯落物和土壤等的连续作用，完成降雨的再分配，从而达到涵养水源的目的[5]。研究显示，不同的经营措施、林分类型、密度的林分，其水源涵养能力也各有差异[6−8]。总之，不同状况下的林分所能发挥的各种功能及其带来的收益各有差异。

林分密度在林木生长过程中会影响林木生长速率、树木干形[9−12]、土壤理化性质[13−15]、林下植被情况[15−17]等因素，从而影响林分的木材产量以及各种生态效益的实现。Lan 等[18]研究发现，林分密度、气候以及生物多样性共同调节着我国东北地区天然林生态系统的多功能性，其中林分密度对森林多功能性的影响最重要。因此，在林分经营过程中，合理的林分密度调控是一项重要的森林抚育管理措施。林分密度管理图最早由日本学者 Ando[19]提出并建立，它是一种基于林分密度效应建立的模型，能够在平面图上展示出林分生长过程中林分密度与相关的林分因子（如平均胸径、平均树高、林分蓄积等）之间的数量关系[20]。我国对林分密度管理图的应用起步较晚，尹泰龙等[21]于 1978 年首次将林分密度管理图引入国内，并编制了 5 种森林类型的林分密度管理图。目前，国内外学者们已为多个树种建立了林分密度管理图。例如，贾茜等[22]编制了油松（*Pinus tabuliformis*）的蓄积量−密度管理图，靳爱仙等[23]编制了马尾松（*Pinus massoniana*）人工林的碳储量密度管理图，向玉国[20]根据不同林分功能编制了落叶松（*Larix olgensis*）的生物量、碳储量以及水源涵养−密度管理图，Valbuena 等[24]和 Vacchiano 等[25]分别编制了地中海松（*Pinus halepensis*）和欧洲赤松（*Pinus sylvestris*）的林分密度管理图，用于预测林分密度与多种林分收益之间的关系，从而为森林经营管理者制定培育目的侧重点不同的抚育管理方案提供科学依据。

刺槐（*Robinia pseudoacacia*）于 1897 年首次引入我国山东青岛，现在全国大部分地区都有种植，是北方主要造林树种之一，在我国人工林培育中占有重要地位。目前，学者们已对刺槐进行了建筑材[26]、能源[27]、水土保持[28−29]、蜜源[30−31]等多种用途的研究。结果表明，不同经营世代的刺槐林其林木生长状况[32]、木材材性[26]、林地土壤性质[33]等均有一定差异。河南洛宁国有吕村林场营造有大量刺槐一代林，并在这些一代林的采伐迹地上通过萌蘖更新林分形成了刺槐二代林。然而，该地区的刺槐林抚育管理较为粗放，林分效益较低，且目前尚未有对不同经营世代刺槐的密度管理进行研究。因此，为确保刺槐定向培育具备科学合理的抚育管理方案，本研究编制不同经营世代刺槐林的多功能经营密度管理图，以指导林分管理。

1 研究区概况

河南省洛宁县国有吕村林场，位于 111°15′ ~ 111°35′E、34°20′ ~ 34°32′N 之间，属于伏牛山北坡山地立地亚区。洛宁地区在 20 世纪中期开始大量种植刺槐，仅吕村林场的刺槐种植面积就达 4 373 hm^2。洛宁县气候属暖温带半湿润气候，地势相对高差大，气候温凉湿润，春季多旱，夏季多雨，秋季日照长，冬季雨雪少。年平均气温 13.7 ℃，年日照 2 217.6 h，无霜期 180 ~ 200 d，年平均降水量 606 mm。土壤主要为褐土，pH 值 6.8 ~ 8.2，肥力中等。

2 材料与方法

2.1 样地设置与调查

刺槐一代林是植苗造林的实生起源林分，刺槐二代林是在一代林采伐迹地上的萌生起源林分。于

2019 年设置一代林固定样地 9 个、临时样地 21 个，二代林固定样地 18 个、临时样地 21 个，进行样地调查获得 69 个样地数据；在 2022 年增设一代林固定样地 9 个，对先后设置的一、二代林固定样地进行调查，共获得 36 个样地数据，两次调查共得 105 个样地数据,并补充使用了林场森林资源清查数据，共 8 个样地数据，前后共收集到 113 个样地数据，其中一代林共有 52 个样地数据，二代林共有 61 个样地数据。每个样地 20 m × 20 m，按 2 cm 起测径阶每木检尺，测定指标、株数、胸径、树高等。于 2022 年对一、二代林的 36 个固定样地进行土壤层的调查，采用剖面法在样地中选取代表性的点用环刀进行取样，烘干法测定土壤最大持水量。样地各项因子的调查情况见表 1、表 2。利用刺槐二元立木材积公式计算林分立木材积[34]，求和得到林分蓄积。

$$V = 0.000\,066\,125 \times D^{1.825\,716\,067\,631\,56} H^{0.956\,442\,809\,538\,439}$$

式中：V 为林木单株材积（m^3）；D 为林木胸径（cm）；H 为林木树高（m）。

2.2　树高生长曲线

选用 7 种常见的树高生长模型[1]（表 3）来拟合刺槐树高生长曲线。将林龄与林分平均高代入树高生长方程中，拟合各生长方程的参数，并选择拟合效果最好的树高生长方程来绘制树高生长曲线。

2.3　密度管理图的模型

林分密度管理图由等树高线、等直径线、等疏密度线和自然稀疏线几个线组构成。其中林分生产力功能用林分蓄积量代表；林分固碳功能用林分碳储量代表，林分碳储量由林分生物量转换而来，林分生物量用刺槐生物量异速生长方程[35]计算（表 4）；林分水源涵养功能用土壤最大持水量代表。各模型方程[1,20]如下

等树高线：

$$M = a_1 H^{b_1} N - a_2 H^{b_2} N^2 \tag{1}$$

等直径线：

$$M = a D^b N^c \tag{2}$$

表 1　刺槐林分样地特征

Tab. 1　Characteristics of *Robinia pseudoacacia* stand sample plots

世代 Generation	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	林分密度/（株·hm^{-2}） Stand density/(plant·ha^{-1})	平均单株材积/（株·m^{-3}） Average plant volume/(plant·m^{-3})	林分蓄积/（m^3·hm^{-2}） Stand volume/(m^3·ha^{-1})	样地数量 Sample plot number
一代 First generation	3.95 ~ 18.64	3.37 ~ 14.55	500 ~ 2 225	0.002 4 ~ 0.152 0	1.45 ~ 180.05	52
二代 Second generation	6.53 ~ 11.83	5.25 ~ 9.87	1 175 ~ 6 400	0.009 8 ~ 0.049 1	17.91 ~ 87.36	61

表 2　刺槐林分样地多功能特征

Tab. 2　Multifunctional characteristics of *R. pseudoacacia* stand sample plots

世代 Generation	林分密度/（株·hm^{-2}） Stand density/(plant·ha^{-1})	林分蓄积/（m^3·hm^{-2}） Stand volume/(m^3·ha^{-1})	碳储量/（t·hm^{-2}） Carbon storage/(t·ha^{-1})	土壤最大持水量/（t·hm^{-2}） Maximum water holding capacity of soil/(t·ha^{-1})
一代 First generation	725 ~ 1 775	75.28 ~ 180.05	33.43 ~ 79.97	2 550.20 ~ 2 825.53
二代 Second generation	1 175 ~ 2 300	37.11 ~ 72.15	16.96 ~ 32.47	2 365.60 ~ 2 747.73

表 3　常见树高生长方程

Tab. 3　Common tree height growth equations

编号 No.	模型名称 Model name	树高生长方程 Tree height growth equation
1	单分子 Single molecular	$H = a + b\mathrm{e}^{-\frac{c}{A}}$
2	Logistic	$H = \frac{a}{1+b\mathrm{e}^{-cA}}$
3	Gompertz	$H = a\mathrm{e}^{-b\mathrm{e}^{-cA}}$
4	Korf	$H = a\mathrm{e}^{-bA^{-c}}$
5	Mitscherlich	$H = a(1-b\mathrm{e}^{-cA})$
6	Richards	$H = a(1-\mathrm{e}^{-bA})^c$
7	Schumacher	$H = a\mathrm{e}^{-\frac{b}{A}}$

注：引自参考文献[1]。H为林分平均高（m），A为林分年龄，a、b、c为参数。下同。Notes: H is mean height of stand (m), A is stand age, a, b and c are parameters. The same below.

表 4 刺槐生物量异速生长方程

Tab. 4 Allometric growth equations of *R. pseudoacacia* biomass

器官 Organ	异速生长方程 Allometric growth equation	R^2
干 Stem	$W_{干}=0.025\ 83(D^2H)^{0.954\ 05}$	0.98
枝 Branch	$W_{枝}=0.004\ 64D^{3.213\ 07}$	0.95
叶 Leaf	$W_{叶}=0.023\ 40D^{1.927\ 68}$	0.96
皮 Bark	$W_{皮}=0.007\ 63(D^2H)^{0.944\ 78}$	0.91
根 Root	$W_{根}=0.017\ 79D^{2.644\ 80}$	0.88

最大密度线：

$$M = aN_{\max}^{-b} \tag{3}$$

等疏密度线：

$$M = k_d N_{\max}^{-(k_3-1)} \tag{4}$$

自然稀疏线：

$$M = k_4(N_0 - N)N_0^{-k_3} \tag{5}$$

蓄积量与碳储量的关系：

$$W = a_3 M + b_3 \tag{6}$$

$$C = C_c W \tag{7}$$

蓄积量土壤最大持水量的关系：

$$Y = a_4 \ln M + b_4 \tag{8}$$

式中：M 为林分蓄积量（m^3/hm^2）；H 为优势树高（m）；N_{max} 为最大林分密度（株/hm^2）；N 为林分密度（株/hm^2）；D 为林分平均直径（cm）；N_0 为林分初植密度（株/hm^2）；W 为林分生物量（t/hm^2）；C 为林分碳储量（t/hm^2）；C_c 为含碳率，大多数植物的含碳率为 0.45 ~ 0.50，本研究中刺槐各组分的含碳率均取 0.475[36−37]；a、b、c、a_1、b_1、a_2、b_2、a_3、b_3、a_4、b_4、k_d、k_3、k_4 均为参数，参数 k_d 中 d 为疏密度，取值范围为 0.2 ~ 1.0。

2.4 数据处理及分析

采用 Excel 2021、SPSS 27.0 对数据进行处理，并求解各方程的参数。对密度管理图林分蓄积量估计值进行检验，在 95% 可靠性前提下，相对误差小于 10%，精度大于 80% 则具有统计学意义，用 Origin 2021 进行绘图。

3 结果与分析

3.1 树高生长曲线的绘制

各树高生长方程的参数拟合结果如表 5 所示。在刺槐一代林和二代林的 7 个树高生长方程中，均仅有 Richards 方程不收敛，且 Schumacher 的拟合效果最优，其决定系数 R^2 均最大，分别为 0.958、0.875，故选择 Schumacher 方程作刺槐一、二代林的最优树高生长曲线，树高生长方程为

$$H_1 = 26.137e^{-\frac{7.547}{A_1}},\ R^2 = 0.958 \tag{9}$$

$$H_2 = 14.862e^{-\frac{6.061}{A_2}},\ R^2 = 0.875 \tag{10}$$

式中：H_1 和 H_2 分别为一、二代林分平均树高（m）；A_1 和 A_2 分别为一、二代林分平均林龄（年）。

根据刺槐一、二代林的最优树高生长曲线方程，绘制出树高生长曲线如图 1 所示。

刺槐一、二代林均在 20 年前生长较快，20 年后树高生长变慢并趋于平缓。刺槐一代林的树高生长明显优于刺槐二代林，在 30 年时，刺槐一代林预测树高达到 20.3 m，而刺槐二代林预测树高为 12.2 m，相差达 8.1 m。

表 5 树高生长方程参数拟合结果

Tab. 5 Parameter fitting results of tree height growth equations

树高生长方程 Tree height growth equation	一代林 First generation forest				二代林 Second generation forest			
	a	b	c	R^2	a	b	c	R^2
$H=a+be^{-\frac{c}{A}}$	4.275	45.332	19.436	0.955	7.242	181.498	63.587	0.873
$H=\frac{a}{1+be^{-cA}}$	1.439	−0.708	−0.017	0.901	6.596	−0.024	−0.173	0.796
$H=ae^{-be^{-cA}}$	1.003	−1.416	−0.046	0.933	6.741	−0.014	−0.22	0.748
$H=ae^{-bA^{-c}}$	1.882	−0.398	−0.631	0.922	7.061	-1.64×10^{-5}	−3.654	0.744
$H=a(1-be^{-cA})$	1.558	−1.458	−0.128	0.942	6.426	−0.024	−0.207	0.852
$H=a(1-e^{-bA})^c$								
$H=ae^{-\frac{b}{A}}$	26.137	7.547		0.958	14.862	6.061		0.875

注：$H=a(1-e^{-bA})^c$ 方程不收敛。Note: the equation of $H=a(1-e^{-bA})^c$ does not converge.

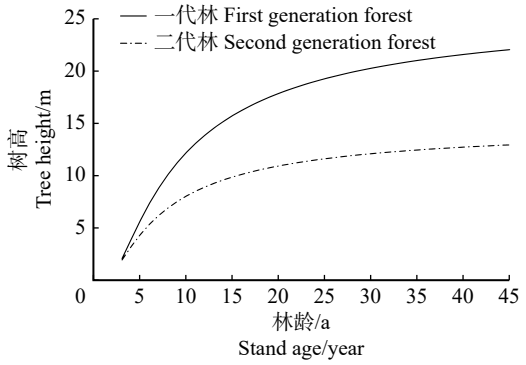


图 1　刺槐一、二代林树高生长曲线

Fig. 1　Tree height growth curves of first and second generation forest of *R. pseudoacacia*

3.2　生产力密度管理图的编制

林分密度管理模型的参数求解结果见表 6。林分蓄积量估计值在 95% 可靠性前提下，一代林密度管理图中等直径线和等树高线的相对误差分别为 6.41%、8.15%，精度分别为 92.93%、91.12%，二代林密度管理图中等直径线和等树高线的相对误差分别为 2.97%、7.58%，精度分别为 97.11%、91.80%，所以该结果具有统计学意义。

根据林分蓄积密度管理图(图 2、3)可知，一代林的自然稀疏线比二代林弯曲程度更大，说明刺槐一代林的自然稀疏程度比刺槐二代林强烈。在同一密度下，刺槐一代林的生长状况明显优于刺槐二代林，例如在林分密度为 1 000 株/hm^2 时，刺槐一代林可能达到的最大产量为 112.5 m^3/hm^2，此时一代林的林分平均树高和平均胸径分别为 17.8 m、13.6 cm，而刺槐二代林可能达到的最大产量为 72.9 m^3/hm^2，对应的平均树高和平均胸径分别为 10.8 m、11.8 cm。

3.3　碳储量密度管理图的编制

通过对刺槐各器官生物量、碳储量等的连续计算，最终得出林分碳储量和林分蓄积的方程为

$$C_1=0.475\times(0.956M_1-0.628),\ R^2=0.972 \quad (11)$$

$$C_2=0.475\times(0.951M_2-0.046),\ R^2=0.978 \quad (12)$$

式中：C_1 和 C_2 分别为一、二代林林分碳储量(t/hm^2)，M_1 和 M_2 分别为一、二代林林分蓄积量(m^3/hm^2)。

表 6　林分密度控制模型参数拟合结果

Tab. 6　Parameter fitting results of stand density control models

模型 Model	参数 Parameter	参数值 Parameter value	
		一代林 First generation forest	二代林 Second generation forest
等树高线 Equivalent tree height line	a_1	5.079×10^{-7}	6.660×10^{-7}
	b_1	4.378	4.886
	a_2	1.340×10^{-16}	1.848×10^{-15}
	b_2	9.164	8.576
等直径线 Equivalent diameter line	a	0.001	6.204×10^{-5}
	b	2.051	2.632
	c	0.914	1.084
最大密度线 Maximum density line	a	7.340×10^{3}	1.047×10^{4}
	b	0.605	0.719
等疏密度线 Equivalent thinning density line	k_3	1.605	1.719
	$k_{(1)}$	7.340×10^{3}	1.047×10^{4}
	$k_{(0.9)}$	6.606×10^{3}	9.427×10^{3}
	$k_{(0.8)}$	5.872×10^{3}	8.379×10^{3}
	$k_{(0.7)}$	5.138×10^{3}	7.332×10^{3}
	$k_{(0.6)}$	4.404×10^{3}	6.284×10^{3}
	$k_{(0.5)}$	3.670×10^{3}	5.237×10^{3}
	$k_{(0.4)}$	2.936×10^{3}	4.189×10^{3}
	$k_{(0.3)}$	2.202×10^{3}	3.142×10^{3}
	$k_{(0.2)}$	1.468×10^{3}	2.094×10^{3}
自然稀疏线 Natural sparse line	k_3	0.605	0.001
	k_4	8.814	0.031

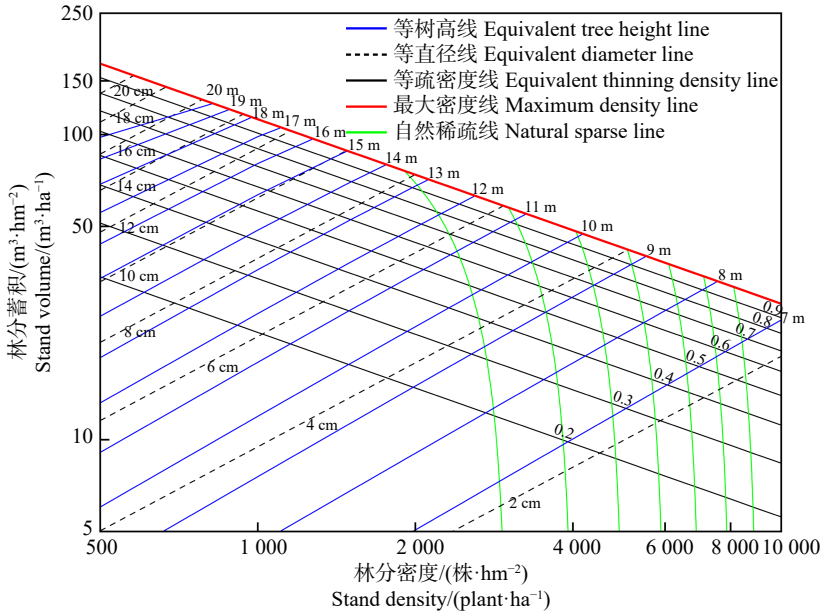


图 2 刺槐一代林林分蓄积密度管理图

Fig. 2 Density management map of stand volume of first generation *R. pseudoacacia* forest

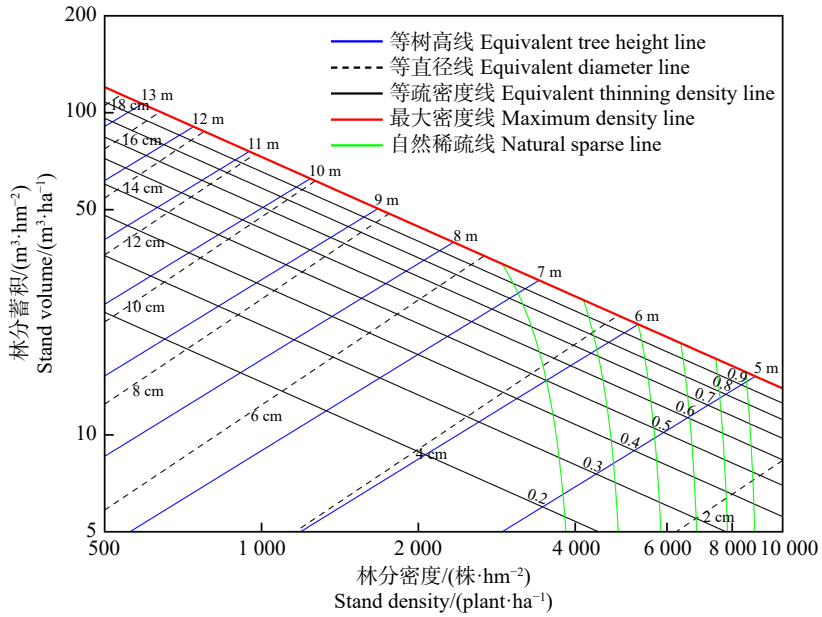


图 3 刺槐二代林林分蓄积密度管理图

Fig. 3 Density management map of stand volume of second generation *R. pseudoacacia* forest

将林分蓄积密度管理图中各曲线对应的方程代入林分碳储量与林分蓄积的关系式中，即得到组成林分碳储量密度管理图的各曲线方程，在 Origin 2021 软件中绘制出林分碳储量密度管理图(图 4、5)。

从林分碳储量与蓄积的关系式可知二者为线性关系，结合图 4 和图 5 可以看出，无论是刺槐一代林还是二代林的碳储量密度管理图，整体趋势与对应的林分蓄积密度管理图趋势基本一致。

3.4 水源涵养密度管理图编制

将林分蓄积量和对应的土壤最大持水量数据代入二者的关系式 $Y = a\ln M + b$ 中，求解出各参数，得到林分蓄积量与土壤最大持水量的方程式为

$$Y_1 = 286.395\ \ln M_1 + 1\ 323.767,\ R^2 = 0.702 \quad (13)$$

$$Y_2 = 391.026\ \ln M_2 + 985.825,\ R^2 = 0.684 \quad (14)$$

式中：Y_1 和 Y_2 分别为一、二代林土壤最大持水量(t/hm²)。

将林分蓄积密度管理图中各曲线对应的方程代入土壤最大持水量与林分蓄积的关系式中，即得到组成林分水源涵养密度管理图的各曲线方程，在 Origin 2021 软件中绘制出林分水源涵养密度管理图(图 6、7)。

从图 6、7 中可以看出，刺槐二代林的水源涵养功能受林分生长状况影响的程度较刺槐一代林更大。

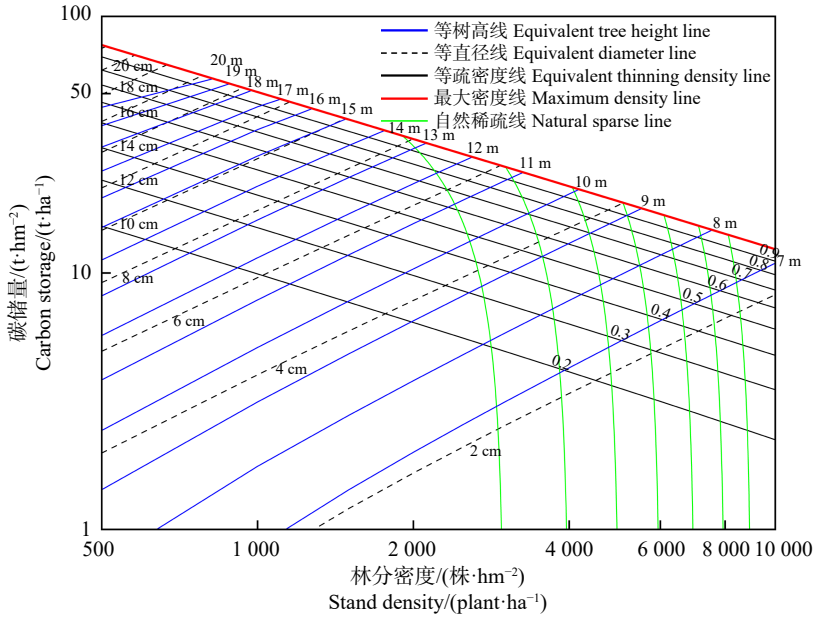


图 4　刺槐一代林碳储量密度管理图

Fig. 4　Density management map of carbon storage of *R. pseudoacacia* first generation forest

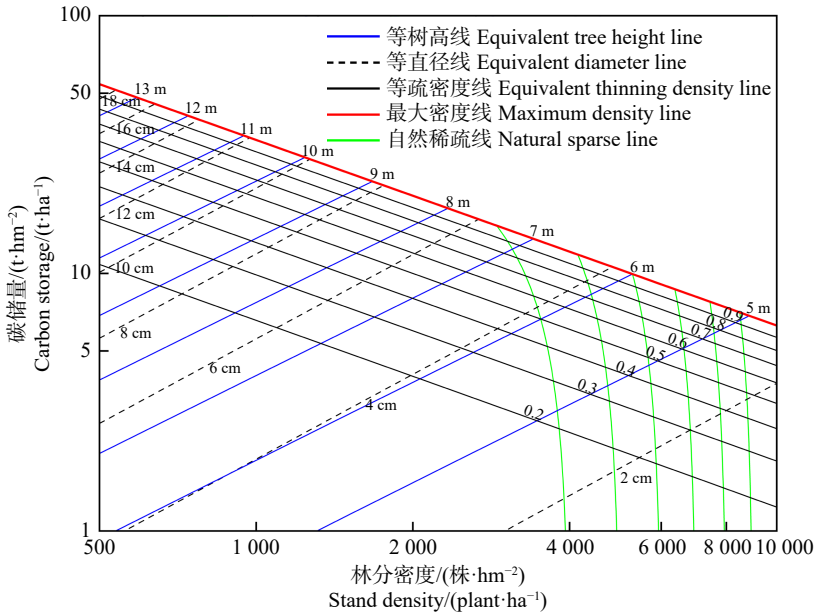


图 5　刺槐二代林碳储量密度管理图

Fig. 5　Density management map of carbon storage of second generation *R. pseudoacacia* forest

例如，在平均胸径为 6 cm、林分密度为 1 000 株/hm^2 时，刺槐一代林和二代林的土壤最大持水量分别为 2 204.5、1 976.1 t/hm^2。当平均胸径保持不变，林分密度为 2 000 株/hm^2 时，一、二代林的土壤最大持水量分别为 2 388.1、2 260.3 t/hm^2，两代林的土壤最大持水量差值分别为 183.6、284.2 t/hm^2。

3.5　刺槐密度管理图的应用

林分密度管理图的应用以刺槐一代林林分蓄积量密度管理图为例，碳储量密度管理图、水源涵养密度管理图的应用方法与林分蓄积密度管理图的一致。

3.5.1　林分产量预估

在已知刺槐一代林的平均树高、林分密度、林龄时，可对产量进行预估。例如，已知某刺槐一代林平均树高为 5.7 m，林分密度为 3 000 株/hm^2，林龄为 5 年，预估此林分的蓄积量及数量成熟龄。

第一步，从图 1 中得出此林分在 10 年、15 年、20 年时对应的林分平均树高分别为 12.3、15.8、17.9 m。

第二步，在图 2 中，根据林分平均树高、3 000 株/hm^2 自然稀疏线与最大密度线得出 10 年、15 年、20 年的林分蓄积量分别为 58、96、113 m^3/hm^2。

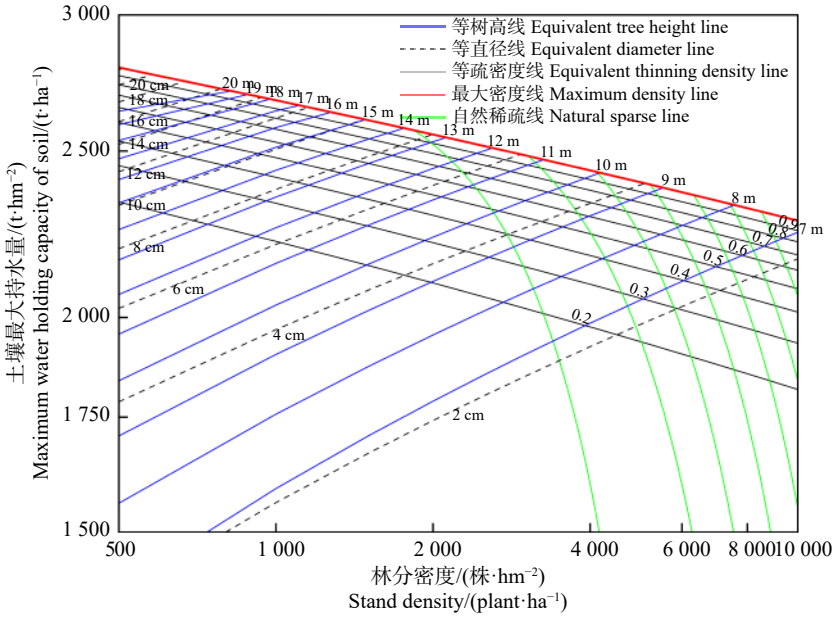


图 6 刺槐一代林水源涵养密度管理图

Fig. 6 Density management map of water conservation of first generation *R. pseudoacacia* forest

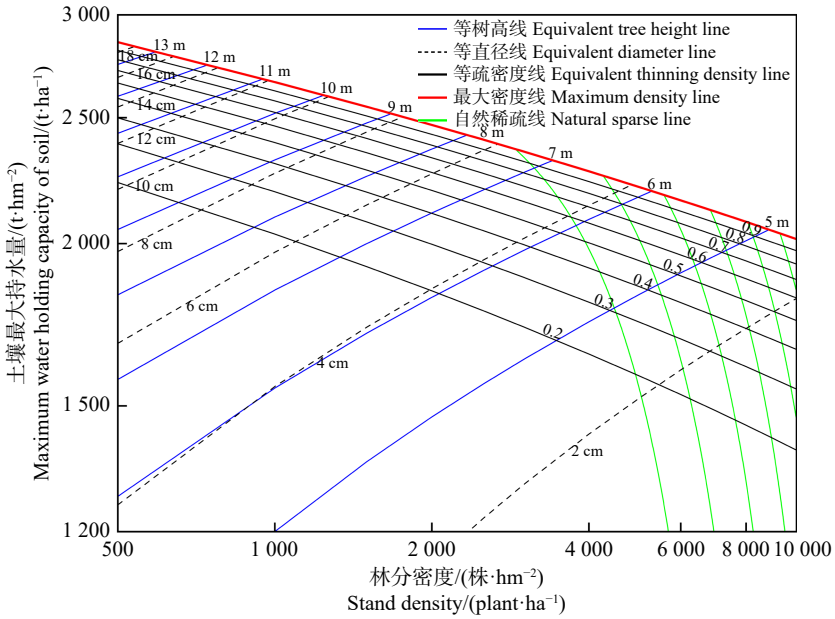


图 7 刺槐二代林水源涵养密度管理图

Fig. 7 Density management map of water conservation of second generation *R. pseudoacacia* forest

第三步，读图并计算出林分的连年生长量与年平均生长量，找到两者相等时（即年平均生长量达到最大时）的年龄，该年龄即为刺槐一代林的数量成熟龄。计算得出刺槐一代林的年平均生长量在 14 年和 16 年时分别为 6.38、6.20 m^3/hm^2，而在 15 年时林分蓄积为 96 m^3/hm^2，年平均生长量为 6.40 m^3/hm^2，故确定刺槐一代林的数量成熟龄为 15 年。

3.5.2 森林资源调查

若已知林分平均树高、平均胸径、林分密度、疏密度、蓄积量等任意两个因子的值，可根据密度管理图来推算其他几个因子的值。例如，已知某刺槐一代林的平均胸径为 12 cm，林分密度为 1 000 株/hm^2，估测该林分的平均树高、疏密度以及林分蓄积量。

第一步，在图 2 中找到 12 cm 的等直径线上横坐标为 1 000 株/hm^2 的点，可看出此点介于 16 和 17 m 的等树高线之间，根据两树高线之间的距离，按增加比例可得出该林分的平均树高为 16.6 m。

第二步，根据此点位置可看到，其刚好落到 0.8 的等疏密度线上，即该林分的疏密度为 0.8。

第三步，读出此点的纵坐标为 90.3，即该林分的蓄积量为 90.3 m^3/hm^2。

3.5.3 疏伐作业设计

以初植密度为 3 000 株/hm^2 的刺槐一代林为例，按疏伐后保持疏密度 0.6 的要求（在林分发展过

程中，疏密度高于 0.6 时才进行疏伐），确定该林分在 10 年、15 年和 20 年时需要保留的林分密度。

第一步，通过图 1 可查出刺槐一代林在 10 年、15 年、20 年时的林分平均高分别为 12.3、15.8、17.9 m。

第二步，林龄为 10 年时，在图 2 中找到 3 000 株/hm^2 的自然稀疏线上平均树高为 12.3 m 的点，可知此时林分经过自然稀疏林分密度到达了 2 130 株/hm^2，此点位于 0.8 与 0.9 的等疏密度线之间，读出此时林分的疏密度为 0.86，按要求将林分疏伐至疏密度为 0.6。找到疏密度为 0.6 的等疏密度线上平均树高为 12.3m 的点，可读出横坐标为 1 700，即林分应保留密度为 1 700 株/hm^2。

第三步，林龄为 15 年时，在图 2 中找到横坐标为 1 700、树高为 15.8 m 的点，可知该点在最大密度线范围以外，说明林分早已达到饱和状态。找到疏密度为 0.6 的等疏密度线上平均树高为 15.8 m 的点，读出横坐标为 950，即应将林分疏伐至 950 株/hm^2。

第四步，在林龄为 20 年时，林分平均树高为 17.9 m，同上，可得知林分应疏伐至 700 株/hm^2。

4　讨论和结论

4.1　讨　论

在分析林分蓄积量与土壤最大持水量关系时，我们发现决定系数 R^2 相对较低，这表明林分蓄积量与土壤最大持水量的相关性不强。这种弱相关性可能与刺槐属于浅根系树种有关，其根系对土壤的机械作用相对较弱，因此刺槐的林分密度对土壤的孔隙度影响可能较小。

根据本研究建立的刺槐一、二代林的密度管理图，可以得出：总体而言，在相同的林分密度下，刺槐一代林在生产、生态效益方面的潜力优于刺槐二代林。在 500 ~ 10 000 株/hm^2 的林分密度范围内，刺槐一代林的等树高线范围为 7 ~ 20 m，二代林为 5 ~ 13 m；刺槐一代林的等直径线范围为 2 ~ 20 cm，二代林为 2 ~ 18 cm。与闽楠（*Phoebe bournei*）[1]、落叶松[20]、油松[22]等树种相比，刺槐的等树高线和等直径线范围均偏小。这种现象产生的原因主要有两个：第一，不同树种的生理特性存在差异，刺槐的树高、胸径生长较快，但其上限值较低；第二，在实际生产中，刺槐的主伐年龄比其他树种要小。本研究选择的林分其林龄均在 20 年以内，这些样本数据研建的林分密度管理图，用于预测 25 年以内的林分产量将更为准确，而这正是实际生产中需要的。

本研究中用于研建刺槐树高生长曲线和刺槐林分密度管理图的样本数据均收集于豫西丘陵区。因此，本研究所建的模型仅适用于与该区域相同或相似的立地条件下的刺槐林。若用于其他区域的刺槐生长预测，其预测结果与实际收益相比可能会产生偏差。未来的研究可以考虑加入不同立地类型下刺槐林的生长数据，编制出不同立地类型下的刺槐密度管理图。本研究根据豫西地区刺槐人工林的主要用途以及主伐年龄，选择的林分林龄均在 20 年以内。后期可以收集部分林龄较大样本数据，获取更全面的监测数据，并增加建模的样本量，以提高林分密度管理图的预测精度以及预测范围。

4.2　结　论

本研究基于豫西丘陵区收集的刺槐人工林样地数据，建立了刺槐树高生长曲线和林分多功能密度管理图。通过结合树高生长曲线和林分密度管理图模型，可以预测林分在不同林分生长阶段的蓄积量、碳储量以及水源涵养能力。研究结果表明，在不同的林分生长阶段，林分适宜的经营密度不同，且林分蓄积量、碳储量和蓄水能力也各不相同。在实际生产中，根据需要林分所发挥功能的侧重点，可以综合分析本研究提供的 3 类密度管理图，以确定出最适宜的林分经营密度，从而制定科学合理的森林抚育管理方案。可靠性验证结果表明，本研究中得到的模型适用于豫西丘陵区刺槐人工林。

参　考　文　献

[1] 王雪. 金洞林场闽楠人工林多功能经营密度控制图研建 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
Wang X. Research and construction of multi-functional management density control map of *Phoebe bournei* plantation in Jindong Forest Farm[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.

[2] Newell J P, Vos R O. Accounting for forest carbon pool dynamics in product carbon footprints: challenges and opportunities[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2012, 37: 23−36.

[3] 刘雨欣. 间伐保留密度对杉木中龄林碳储量的影响 [J]. 福建林业科技, 2023, 50(1): 17−22, 30.
Liu Y X. Effect of thinning reserve density on carbon storage of middle-aged Chinese fir plantations[J]. Fujian Forestry Science and Technology, 2023, 50(1): 17−22, 30.

[4] 贾汉森, 段劼, 马履一, 等. 不同林龄刺槐人工林碳储量及分配规律 [J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(4): 636−642.
Jia H S, Duan J, Ma L Y, et al. Characteristics of carbon storage and sequestration in different age *Robinia psedudoacia* plantations[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2017, 44(4): 636−642.

[5] 孙向阳, 王根绪, 吴勇, 等. 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 [J]. 生态学报, 2013, 33(2): 501−508.
Sun X Y, Wang G X, Wu Y, et al. Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of western Sichuan, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 501−508.

[6] 王超, 樊琳琳, 杨健, 等. 不同经营措施对冀北山地油松林分水源涵养功能的影响 [J]. 林业与生态科学, 2023, 38(1): 1−7.
Wang C, Fan L L, Yang J, et al. Study on the influence of forest management on the water conservation capacity of *Pinus tabulaeformis* in mountain area of northern Hebei Province[J]. Forestry and Ecological Sciences, 2023, 38(1): 1−7.

[7] 王亚萍, 张淑兰, 韩勇, 等. 秦岭两种典型人工林不同密度时的枯落物持水功能差异 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(3): 100−108.
Wang Y P, Zhang S L, Han Y, et al. Differences in the water-retention function of humus layer between two typical forests with different densities in the Qinling Mountains[J]. Forest Research, 2023, 36(3): 100−108.

[8] Zheng X, Chen L, Gong W, et al. Evaluation of the water conservation function of different forest types in northeastern China[J]. Sustainability, 2019, 11(15): 4075.

[9] 郑颖, 冯健, 于世河, 等. 初植密度对 4 个落叶松无性系生长与干形的影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2021, 45(6): 72−80.
Zheng Y, Feng J, Yu S H, et al. Effects of initial planting density on growth and stem from of four *Larix* clones[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2021, 45(6): 72−80.

[10] Allen M, Brunner A, Antón-Fernández C, et al. The relationship between volume increment and stand density in Norway spruce plantations[J]. Forestry: an International Journal of Forest Research, 2021, 94(1): 151−165.

[11] 杨桂娟, 胡海帆, 孙洪刚, 等. 林分年龄、造林密度和林分自然稀疏对杉木人工林个体大小分化和生产力关系的影响 [J]. 林业科学, 2019, 55(11): 126−136.
Yang G J, Hu H F, Sun H G, et al. The influences of stand age, planting density and self-thinning on relationship between size inequality and periodic annual increment in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(11): 126−136.

[12] Li Q, Liu Z, Jin G. Impacts of stand density on tree crown structure and biomass: a global meta-analysis[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2022, 326: 109181.

[13] Hernández J, del Pino A, Vance E D, et al. *Eucalyptus* and *Pinus* stand density effects on soil carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 368: 28−38.

[14] 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.

[15] Zhang Y, Liu T, Guo J, et al. Changes in the understory diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties[J]. Global Ecology and Conservation, 2021, 28: e01628.

[16] 云慧雅, 毕华兴, 焦振寰, 等. 晋西黄土区不同林分类型和密度条件下林下灌草组成及多样性特征 [J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(3): 569−578.
Yun H Y, Bi H X, Jiao Z H, et al. Composition and diversity of understory plants under different stand types and densities in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(3): 569−578.

[17] Hedwall P O, Holmström E, Lindbladh M, et al. Concealed by darkness: how stand density can override the biodiversity benefits of mixed forests[J]. Ecosphere, 2019, 10(8): e02835.

[18] Lan J, Lei X, He X, et al. Stand density, climate and biodiversity jointly regulate the multifunctionality of natural forest ecosystems in northeast China[J]. European Journal of Forest Research, 2023: 1−15.

[19] Ando T. Ecological studies on the stand density control in even-aged pure stand[J]. Bulletin of the Government Forest Experiment Station, 1968, 210: 151−153.

[20] 向玉国. 金沟岭林场落叶松人工林系列密度控制图研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
Xiang Y G. Study on density control map of larch plantation series in Jingouling Forest Farm[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[21] 尹泰龙, 韩福庆, 迟金城, 等. 林分密度控制图的编制与应用 [J]. 中国林业科学, 1978(3): 1−11.
Yin T L, Han F Q, Chi J C, et al. Preparation and application of stand density control map[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1978(3): 1−11.

[22] 贾茜, 贾忠奎, 孙启越, 等. 油松建筑材密度管理图的编制及其应用 [J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(2): 65−69.
Jia Q, Jia Z K, Sun Q Y, et al. Preparation and application of density management map of *Pinus tabulaeformis*[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2021, 49(2): 65−69.

[23] 靳爱仙, 周国英, 史大林, 等. 马尾松人工林碳储量密度控制图的编制 [J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 54−57.
Jin A X, Zhou G Y, Shi D L, et al. Carbon storage density control map of Masson pine plantation[J]. Journal of Northwest Forestry College, 2009, 24(3): 54−57.

[24] Valbuena P P, Peso T C E, Bravo O F. Stand density management diagrams for two mediterranean pine species in eastern Spain[J]. Forest Systems, 2008, 17(2): 97−104.

[25] Vacchiano G, Motta R, Long J N, et al. A density management diagram for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): a tool for assessing the forest's protective effect[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 255(7): 2542−2554.

[26] 陈楠楠, 彭祚登, 李云. 不同无性系刺槐生长、材性及适用性 [J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(4): 164−173.
Chen N N, Peng Z D, Li Y. Growth, material properties and suitability of different *Robinia pseudoacacia* clones[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2023, 43(4): 164−173.

[27] 谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 等. 豫西刺槐能源林的热值动态 [J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2483−2490.
Tan X H, Liu S Q, Ma L Y, et al. Dynamics of caloric value of

Robinia pseudoacacia L. energy forest in the west of Henan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2483−2490.

[28] 常译方, 毕华兴, 许华森, 等. 晋西黄土区不同密度刺槐林对土壤水分的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 227−232.
Chang Y F, Bi H X, Xu H S, et al. Influence of different dendities of *Robinia pseudoacacia* forest on soil moisture in loess region of western Shanxi Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 227−232.

[29] 侯贵荣, 毕华兴, 魏曦, 等. 黄土残塬沟壑区刺槐林枯落物水源涵养功能综合评价 [J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 251−257.
Hou G R, Bi H X, Wei X, et al. Comprehensive evaluation of water conservation function of litters of *Robinia pseudoacacia* forest lands in gully region on Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(2): 251−257.

[30] 毛秀红, 荀守华, 张元帅, 等. 刺槐新品种‘蜜源 1 号’[J]. 园艺学报, 2018, 45(增刊 2): 2845−2846.
Mao X H, Xun S H, Zhang Y S, et al. A new cultivar of *Robinia pseudoacacia* ‘Miyuan 1’[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2018, 45(S2): 2845−2846.

[31] 王颖. 6 种刺槐种质蜜源性状的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
Wang Y. Study on nectar source traits of 6 *Robinia pseudoacacia* germplasm[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2019.

[32] 耿兵, 王华田, 王延平, 等. 刺槐萌生林与实生林的生长比较 [J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 59−64.
Geng B, Wang H T, Wang Y P, et al. Comparative study of coppice and seeding forest of *Robinia pseudoacacia* L.[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(2): 59−64.

[33] 王雅慧, 彭祚登, 李云. 豫西浅山区不同世代刺槐林土壤养分与结构特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 54−64.
Wang Y H, Peng Z D, Li Y. Soil nutrient and structure characteristics of *Robinia pseudoacacia* in different generations in the shallow mountain areas of western Henan Province, central China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(3): 54−64.

[34] 张江涛, 茹桃勤, 付祥建. 豫西丘陵区刺槐无性系生长气候因子研究 [J]. 林业科技, 2009, 34(6): 1−4.
Zhang J T, Ru T Q, Fu X J. Study on climate factors of *Robinia pseudoacacia* clones in hilly area of western Henan Province[J]. Forestry Science & Technology, 2009, 34(6): 1−4.

[35] 刘迎春, 王秋凤, 于贵瑞, 等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4277−4286.
Liu Y C, Wang Q F, Yu G R, et al. Ecosystems carbon storage and carbon sequestration potential of two main tree species for the Grain for Green Project on China’s hilly Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(15): 4277−4286.

[36] Deng L, Han Q, Zhang C, et al. Above-ground and below-ground ecosystem biomass accumulation and carbon sequestration with *Caragana korshinskii* Kom plantation development[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(3): 906−917.

[37] 刘维, 张晓丽, 马菁. 鹫峰国家森林公园主要乔木树种含碳率分析 [J]. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 214−218.
Liu W, Zhang X L, Ma J. Carbon content rate analysis on the main arbor species in Jiufeng National Forest Park[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 214−218.

（责任编辑　范　娟
责任编委　张会儒）