

# 不同栽培模式和立地条件对楸树人工林生长的影响

赵江宁,李盛婷,徐秋宇,邱 权,李吉跃,苏 艳,何 茜\*

(华南农业大学 林学与风景园林学院,广东 广州 510642)

**摘 要:**以河南省洛阳市洛宁县的楸树人工林为研究对象,对比分析不同栽培模式和立地条件下楸树的生长状况。结果表明:1)由于林分密度和土壤性质的差别,农林间作条件下楸树的生长情况显著优于非农林间作;2)低密度条件下楸树的生长情况更好,但高密度条件下楸树的每公顷蓄积量更高;3)在进行非农林间作的30年生楸树林中,缓坡条件下的树高和胸径比陡坡分别增长了31.30%和40.48%,下坡位条件下的树高和胸径比上坡位分别增长了22.52%和25.97%,不同坡向条件下的树高和胸径无明显差异;4)土壤中的养分含量(有机质、全N、全P、碱解N和有效P)是促进楸树生长的关键因子,按贡献率大小排序为:有效P、碱解N>全N、全P>有机质。所以,在河南省洛阳市洛宁县及周边地区进行楸树栽培时,应选择农林间作(低密度)+非农林间作(高密度+缓坡+下坡位)的方式。

**关键词:**栽培模式;立地条件;楸树

中图分类号:S792.99

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2020)03-0106-08

## Effects of Different Cultivation Patterns and Site Conditions on the Growth of *Catalpa bungei* Plantations

ZHAO Jiang-ning, LI Sheng-ting, XU Qiu-yu, QIU Quan, LI Ji-yue, SU Yan, HE Qian\*

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

**Abstract:** Taking the plantations of *Catalpa bungei* in Luoning County of Luoyang City, Henan Province as research objects, a comparative study was carried out on the growth of *C. bungei* under different cultivation patterns and site conditions. The results showed that 1) due to the differences in stand density and soil properties, the growth of *C. bungei* under agro-forestry pattern was significantly better than that under forestry pattern. 2) The growth with low density was better than with high density, but the volume per hectare with high density was higher. 3) In the 30-year-old plantations under forestry pattern, the height and diameter at breast height (DBH) in gentle slope increased by 31.30% and 40.48%, respectively compared to those in steep slope. At the same time, the height and DBH in the downslope increased by 22.52% and 25.97%, respectively compared to those in upslope. In addition, there was no significant difference in height and DBH in different slope aspects. 4) The nutrient contents (organic matter, total nitrogen, total phosphorus, alkaline nitrogen and available phosphorus) in the soils were key factors in promoting the growth, and they were sorted according to the contribution rate as alkaline nitrogen and available phosphorus > total nitrogen and total phosphorus > organic matter. Therefore, to cultivate *C. bungei* in Luoning County and its surrounding areas, it is preferable to adopt agro-forestry pattern with low density, or forestry pattern with high density in gentle and down slope.

**Key words:** cultivation pattern; site condition; *Catalpa bungei*

收稿日期:2019-09-12 修回日期:2019-10-20

基金项目:国家重点研发计划课题“楸树良种选育与高效培育技术研究”(2017YFD0600604)。

作者简介:赵江宁,研究方向:森林培育。E-mail:1561313145@qq.com

\*通信作者:何 茜,副教授。研究方向:森林培育与栽培生理生态。E-mail:heqian69@126.com

森林立地是指影响森林生产能力因素的总和,包括生物和非生物因素,即气候、土壤、生物等<sup>[1]</sup>。立地质量评价是指对立地的宜林性或潜在的生产力进行判断或预测,在实际应用中,立地类型是组织林业生产、调查设计、制定造林技术措施及提高林地生产力的基础<sup>[2]</sup>。因此,加强森林立地的相关研究对林业生产来说是十分必要的,通过研究森林立地,不仅能够选择最有生产力的造林树种,提出适宜的育林措施,并预估将来的森林生产力及木材产量,还能够对森林经营的各种效益、木材生产成本和育林投资作出估计<sup>[3]</sup>。现阶段,森林立地质量评价主要从环境因子和林木生长相结合的角度上进行,通过林木生长状况和林地环境条件的好坏来进行评价<sup>[4]</sup>,此外,在研究楸树人工林生长的同时,也应充分考虑人为栽培措施对其的影响。

梓(*Catalpa*)是多年生树木的一个属,常被作为花园和街道树木,用于美化环境,梓属植物共包括8种天然物种和2个杂交物种,楸树(*Catalpa bungei*)为其中的一种<sup>[5]</sup>。楸树具有多种价值,包括药用价值<sup>[6]</sup>、观赏价值以及经济价值等。近年来,楸树相关研究主要涉及2个方面,一是良种选育技术,既包括全基因组分析、转录组分析等理论研究<sup>[7-10]</sup>,也包括基因型筛选、无性系筛选等应用研究<sup>[11-13]</sup>;二是高效栽培技术,从楸树的病害鉴定<sup>[14]</sup>到最适环境因子(光、水、肥等)的筛选<sup>[15-19]</sup>,再到楸树在干旱条件下的死亡机制<sup>[20]</sup>,同样既包括理论研究,也包括应用研究。可以看出,楸树的相关研究比较广泛,但在其中却未见立地质量评价的相关报道。

研究栽培模式和立地条件对楸树人工林生长的影响需要选择恰当的指标,主要包括人为因子、林木生长因子以及环境因子。其中,人为因子包括农林间作情况和林分密度,林分密度作为影响立地质量的重要因子<sup>[21]</sup>,会对林木的生长状况产生影响,例如,一定范围内密度的增加会导致林木胸径的减少<sup>[22]</sup>,因此在实际生产中,常常通过间伐来调控人工林的生长情况<sup>[23]</sup>。林木生长因子主要包括树高和胸径,且二者之间关系密切<sup>[24]</sup>,此外,单位面积蓄积量的年增长量<sup>[25]</sup>也可作为评价因子。与林木生长因子相比,环境因子则涵盖范围较广,包括气候、地形和土壤等因子,进一步来看,地形因子包括坡形、坡位、坡度和坡向等等,土壤因子则包括土壤物理性质和养分含量<sup>[26]</sup>,有研究表明,在相对一致的气候条件下,土壤对森林生产力有决定性的作用,常被作为立地类型划分的重要依据<sup>[27]</sup>。森林立地质量评价的相关研究众多,从中可以发现,影响不同地区不同树种生长发育的主导立地因子不同。例如,

坡向和土层厚度是影响北京地区油松生长的主导立地因子<sup>[28]</sup>;坡向是影响塞罕坝华北落叶松人工林生产力的重要因子<sup>[29]</sup>;在土壤理化性质中,影响东北地区针阔混交林中林木生长的主导因子是土壤密度、有机质、全N和凋落物厚度<sup>[30]</sup>;影响福建省南平市延平林区天然针阔混交林中林木生长的主导因子分别是坡位、海拔和坡向<sup>[31]</sup>。由上述研究不难看出,人为、环境等因素对林木生长产生了重要影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于河南省洛阳市洛宁县的马店乡、下峪乡、罗岭乡、长水乡和上戈乡5个乡中。洛宁县地处洛阳市西部,地理坐标 $34^{\circ}05' - 34^{\circ}38'N$ 、 $111^{\circ}08' - 111^{\circ}49'E$ ,属伊洛河流域,总面积约 $2\ 300\text{ km}^2$ ,地形较为复杂,具有山地、丘陵、平原等多种类型,当地百姓常称为“七山二塬一分川”。该地气候适宜,四季分明,年均气温约 $14^{\circ}\text{C}$ ,降水主要集中于夏季,年均降水量为 $600\sim 800\text{ mm}$ ,土壤包括黄土、棕壤等多种类型,自然植被主要为暖温带落叶阔叶树种。

### 1.2 调查与测定

试验对象为18年生和30年生的楸树人工林。2018年7月进行野外调查,采用固定标准地法,在不同立地条件下的楸树人工林中设置 $20\text{ m}\times 20\text{ m}$ 标准地。此次试验共设置81个标准地(表1),其中31个为农林间作(农业为主,双层结构,行状间作),50个为非农林间作(楸树纯林)。

标准地设置好后,记录标准地号、坐标、海拔、林龄、林分密度、坡向、坡度、坡位和农林间作情况,并进行每木检尺,测量树高、胸径,同时,在标准地中远离林缘的位置随机选取3个点取表层(0~20 cm)土样,各点间隔至少为5 m,每个点取1个环刀和1袋土样。2018年8月进行室内试验<sup>[32]</sup>,采用环刀法测定土壤容重、最大持水量、毛管持水量、田间持水量、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度;采用玻璃电极法测定土壤pH值;采用高温外热重铬酸钾氧化容量法测定土壤有机质;采用开氏-蒸馏滴定法测定土壤全N;采用NaOH熔融-钼锑抗比色法测定土壤全P;采用NaOH熔融-火焰原子吸收分光光度法测定土壤全K;采用碱解扩散法测定土壤碱解N;采用盐酸-氟化铵提取-钼锑抗比色法测定土壤有效P;采用乙酸铵提取-火焰原子吸收分光光度法测定土壤速效K。

### 1.3 数据整理与分析

根据华北地区阔叶树立木材积公式<sup>[33]</sup>计算楸树的单株材积、每公顷蓄积量和年蓄积增长量,同

时,根据农林间作情况、林龄、林分密度、坡向、坡度和坡位对试验所设立的 81 个固定标准地进行分类整理(表 1)。

使用 Excel 2010 进行数据整理及作图;使用 SPSS 20.0 进行描述性分析和  $T$  检验;使用 R 语言进行相关性分析。

表 1 固定标准地设置及选取情况

Table 1 The situation of fixed standard plots

农林间作情况	林龄/a	标准地数	密度	坡向	坡度	坡位	标准地数/个
农林间作	18	3					
	30	28	低				16
非农林间作	18	33	高				10
			低				3
				高			30
				阴			23
				阳			10
						上	11
						下	16
		30	17	低			4
				高			12
					阴		9
				阳		8	
					缓	11	
					陡	4	
						上	6
						下	9

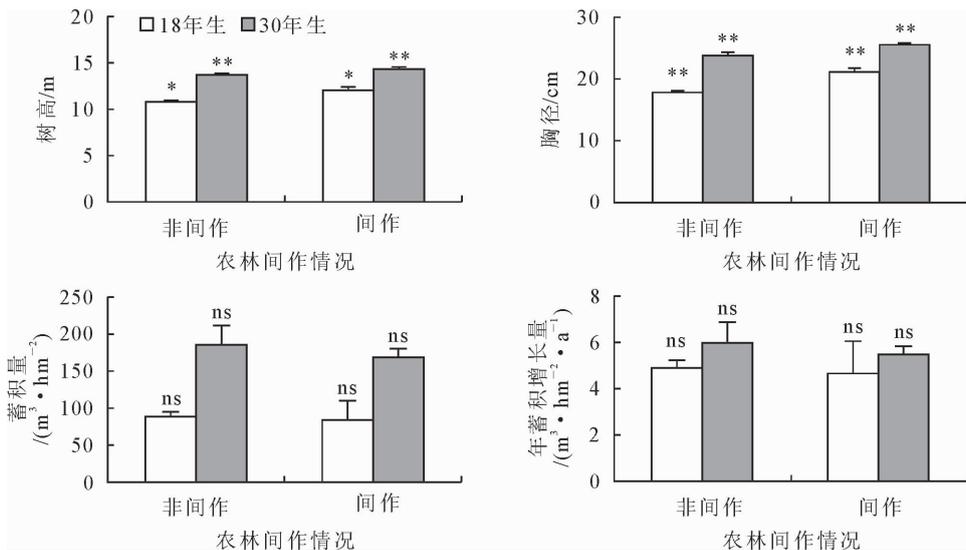
注:1. 林分密度根据当地实际情况设置,每公顷株数 $\leq 500$ 为低密度,每公顷株数 $> 500$ 为高密度;2. 按照林地坡度划分标准, $6^\circ \sim 15^\circ$ 为缓坡, $26^\circ \sim 35^\circ$ 为陡坡。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同栽培模式下的楸树生长状况

由图 1 可见,是否进行农林间作对楸树的树高、胸径和单株材积有显著或极显著影响。在 18 年生楸树林中,农林间作条件下楸树的树高( $11.98 \pm 0.43$  m)、胸径( $21.17 \pm 0.70$  cm)和单株材积( $0.22 \pm 0.02$  m<sup>3</sup>)高于非农林间作。此外,30 年生的楸树林也同样存在着这一规律。

从图 2 可以看出,在进行农林间作的楸树人工林中,不同密度条件下楸树的树高和胸径差异极显著,而每公顷蓄积量和年蓄积增长量差异不显著。在 30 年生的楸树林中,低密度条件下楸树的树高( $15.09 \pm 0.23$  m)和胸径( $27.04 \pm 0.47$  cm)高于高密度,但每公顷蓄积量( $154.79 \pm 14.62$  m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>)和年蓄积增长量( $5.10 \pm 0.50$  m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>)低于高密度。



注:字母 ns 表示差异不显著( $P > 0.05$ ); \* 表示差异显著( $0.01 < P < 0.05$ ); \*\* 表示差异极显著( $P < 0.01$ )。下同。

图 1 农林间作与非农林间作条件下楸树生长情况

Fig. 1 The growth of *Catalpa bungei* under agro-forestry and forestry patterns

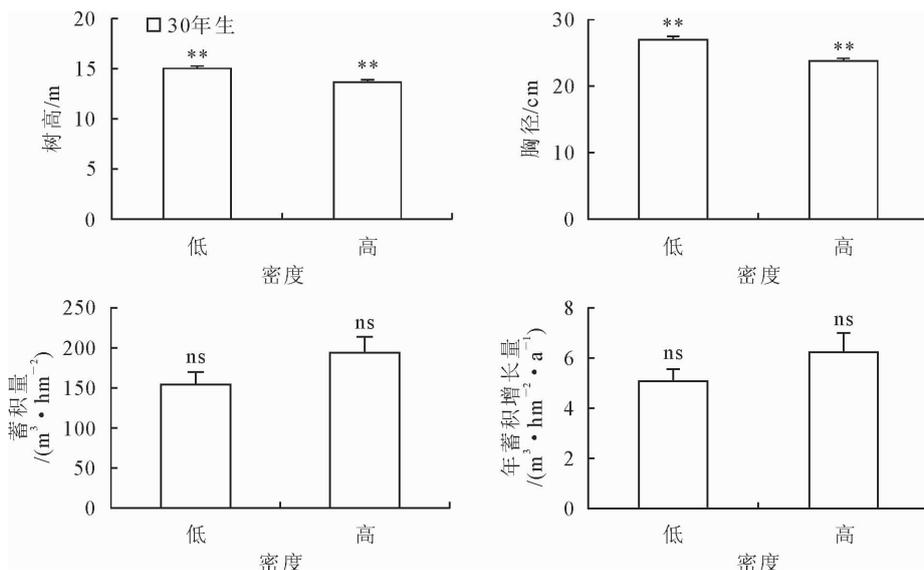


图 2 不同密度条件下农林间作楸树生长情况

Fig. 2 The growth of *C. bungei* under agro-forestry pattern with different densities

由图 3 可以得出,在进行非农林间作的楸树人工林中,不同密度条件下楸树的树高、胸径、每公顷蓄积量和年蓄积增长量差异均不显著。在 18 年生的楸树林中,低密度条件下楸树的树高( $10.67 \pm 0.29$  m)和胸径( $18.23 \pm 0.46$  cm)与高密度大致相等,但每公顷蓄积量( $59.30 \pm 16.97$   $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )和年蓄积增长量( $3.30 \pm 0.94$   $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )低于高密度。同样地,这一规律也存在于 30 年生的楸树林中。

## 2.2 农林间作与非农林间作条件下的土壤差异以及其与楸树生长的关系

农林间作与非农林间作条件下的土壤性质差异见表 2。农林间作条件下的土壤容重和 pH 值低于非农林间作,而土壤最大持水量、毛管持水量、田间持水量、总空隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、有机质、全 N、全 P、全 K、碱解 N、有效 P 和速效 K 高于非农林间作。

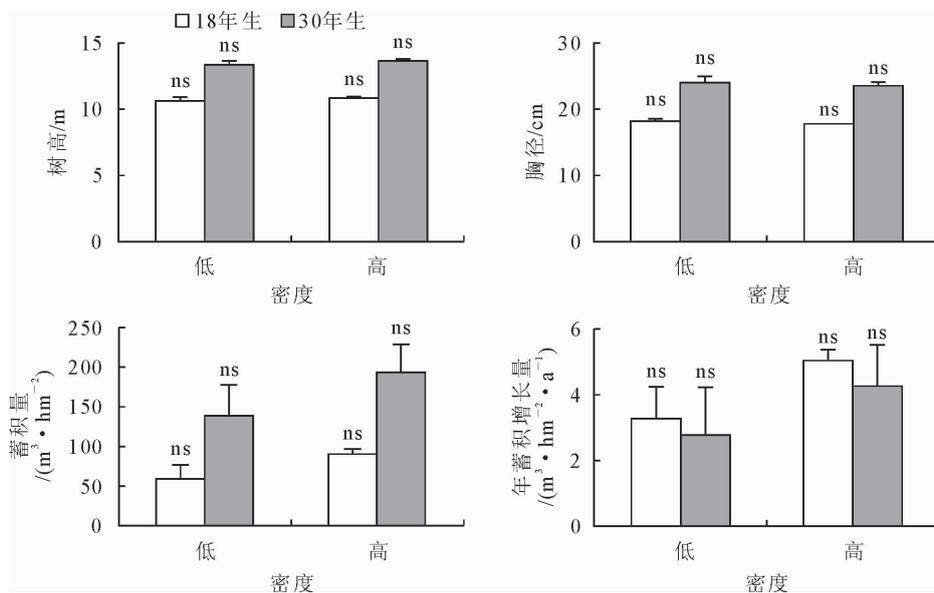


图 3 不同密度条件下非农林间作楸树生长情况

Fig. 3 The growth of *C. bungei* under forestry pattern with different densities

表 3 为楸树树高、胸径和土壤理化性质的皮尔森相关性分析结果。其中,楸树树高、胸径与土壤 pH 呈现极显著负相关关系;与土壤有机质、全 N、全 P、碱解 N 和有效 P 呈现极显著正相关关系;与土壤容重呈现不显著负相关关系;与土壤最大持水

量、田间持水量、总空隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、全 K 和速效 K 呈现不显著正相关关系。此外,楸树树高与土壤毛管持水量呈现不显著正相关关系,而楸树胸径与土壤毛管持水量呈现显著正相关关系。

表 2 农林间作与非农林间作条件下土壤理化性质

Table 2 The soil physical and chemical properties under agro-forestry and forestry patterns

土壤理化指标	农林间作	非农林间作
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.29±0.02	1.34±0.02
最大持水量/%	37.26±1.14	34.96±1.04
毛管持水量/%	34.25±0.92	32.27±0.83
田间持水量/%	30.47±0.74	29.41±0.61
总空隙度/%	51.34±0.92	49.61±0.93
毛管孔隙度/%	4.35±0.05	4.22±0.05
非毛管孔隙度/%	46.98±0.89	45.39±0.91
pH	7.54±0.10	7.72±0.06
有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	19.17±0.81	16.16±0.67
全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.18±0.04	1.01±0.03
全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.64±0.02	0.57±0.02
全钾/(g·kg <sup>-1</sup> )	18.02±0.18	17.93±0.12
碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	83.31±3.35	64.48±2.60
有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	19.33±2.36	10.20±1.34
速效钾/(mg·kg <sup>-1</sup> )	151.03±7.06	144.39±9.34

注:表中数据为平均值±标准误。

表 3 楸树树高、胸径和土壤理化性质相关性

Table 3 The correlation analysis between growth of *C. bungei* and soil physical and chemical properties

土壤理化指标	树高	胸径
容重	-0.15	-0.20
最大持水量	0.14	0.22
毛管持水量	0.15	0.22*
田间持水量	0.08	0.16
总空隙度	0.15	0.20
毛管孔隙度	0.11	0.19
非毛管孔隙度	0.15	0.19
pH	-0.32**	-0.37**
有机质	0.48**	0.47**
全氮	0.48**	0.49**
全磷	0.47**	0.49**
全钾	0.20	0.21
碱解氮	0.59**	0.63**
有效磷	0.58**	0.66**
速效钾	0.17	0.15

注:\*表示 0.05 水平上显著相关;\*\*表示 0.01 水平上显著相关。

## 2.3 不同立地条件下的楸树生长状况

由图 4 可见,在进行非农林间作的楸树人工林中,不同坡向条件下楸树的树高和胸径差异不显著。在 18 年生的楸树林中,阳坡条件下楸树的树高(10.67±0.16 m)和胸径(17.54±0.25 cm)与阴坡大致相等。同样地,在 30 年生的楸树林中也能发现这一规律。

由图 5 可以看出,在进行非农林间作的楸树人工林中,不同坡度条件下楸树的树高、胸径、每公顷蓄积量和年蓄积增长量差异均极显著。在 30 年生的楸树林中,缓坡条件下楸树的树高(14.64±0.18 m)、胸径(25.61±0.44 cm)、每公顷蓄积量(216.91±32.26 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)和年蓄积增长量(7.16±1.11 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)均高于陡坡。

由图 6 可以得出,在进行非农林间作的楸树人工林中,不同坡位条件下楸树的树高和胸径差异极显著,每公顷蓄积量和年蓄积增长量差异显著。在 18 年生的楸树林中,下坡位条件下楸树的树高(11.30±0.10 m)、胸径(18.31±0.19 cm)、每公顷蓄积量(94.85±6.72 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>)和年蓄积增长量(5.27±0.37 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)均高于上坡位。同样地,这一规律也存在于 30 年生的楸树林中。

## 3 结论与讨论

影响楸树人工林生长的因素很多,从人为因素到自然条件,从农林间作、林分密度等栽培模式到坡向、坡度、坡位、土壤等立地因子,其中一些因素的细微改变就可能会引起楸树生长状况变化。在进行具体研究时,为了保证试验的可靠性和准确性,也为了分析数据的可操作性,应该有所侧重地选择部分因素来进行研究。因此,通过结合文献与生产实际,确定此次研究的内容为栽培模式(农林间作情况、林分密度)和立地条件(土壤理化性质、坡向、坡度、坡位)对楸树生长的影响。

不同栽培模式下楸树的生长状况是不同的。相比于通常的林业栽培,采取农林间作可以显著地改

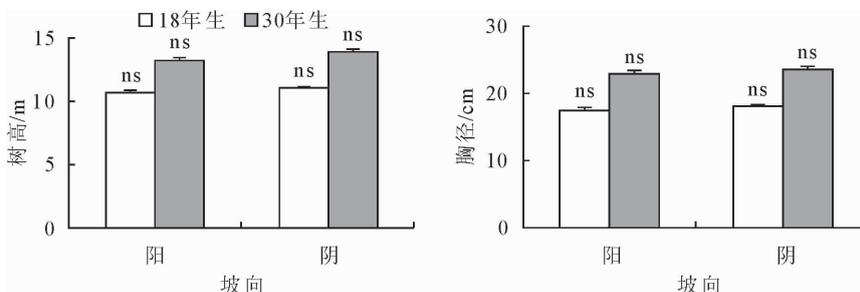


图 4 不同坡向条件下非农林间作楸树生长情况

Fig. 4 The growth of *C. bungei* under forestry pattern in different slope aspects

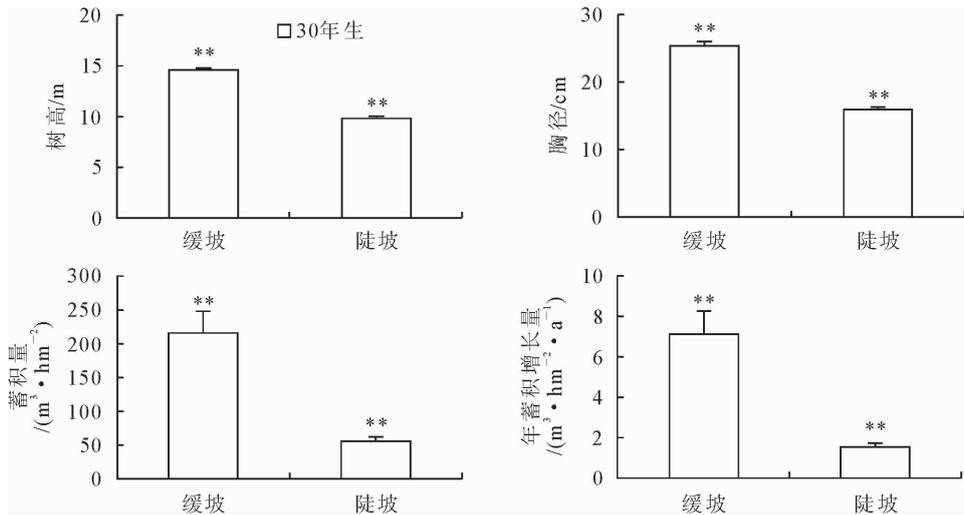


图 5 不同坡度条件下非农林间作楸树生长情况

Fig. 5 The growth of *C. bungei* under forestry pattern in different slope degree

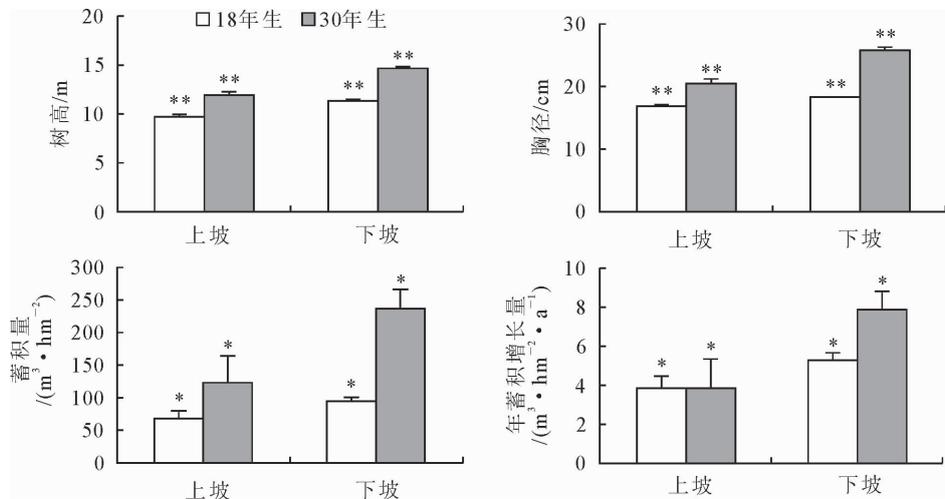


图 6 不同坡位条件下非农林间作楸树生长情况

Fig. 6 The growth of *C. bungei* under forestry patter in different slope aspects

善楸树的生长情况,主要是因为农林间作可以为楸树生长提供更适宜的土壤条件以及更大的生长空间,这两点在此次研究中已经得到证明。此外,林分密度也会对楸树生长产生影响,由于低密度种植可以为楸树生长提供足够的空间,减少其对于阳光、水分以及养分的争夺,因此农林间作条件下低密度种植可以显著提高楸树的生长,与此同时,低密度种植降低了单位面积楸树的株数,从而导致其每公顷蓄积量和年蓄积增长量出现了下降。同样在非农林间作条件下,低密度条件下楸树的每公顷蓄积量和年蓄积增长量低于高密度,然而这 2 种不同密度条件下楸树的生长情况基本一致,并没有表现出差异,说明在非农林间作条件下,可以采用较高的密度来种植楸树,以期得到更大的楸木产量。

进一步来看,不同土壤理化性质对楸树生长产生的影响是至关重要的。无论是从物理特征还是化

学性质上看,农林间作的土壤条件都要明显优于非农林间作,至于 pH 值,农林间作的土壤更加接近楸树喜爱的中性土,这些土壤性质为楸树的根系生长提供了广阔的空间、足够的水分和充足的养分,因此,农林间作条件下的楸树生长情况更好。此外,通过皮尔森相关性分析发现,在所有的土壤理化性质中,与楸树树高、胸径相关度最高的指标为 pH 值、有机质、全 N、全 P、碱解 N 和有效 P,这说明相比与物理性质,化学性质对楸树生长的影响更大,也可以说,土壤中的养分含量直接决定了楸树的生长情况,养分含量越高,生长情况越好,这一研究结果与王璐等<sup>[30]</sup>的研究结果基本一致。另外,当土壤含水量、孔隙度更高或容重更低时,楸树的生长情况也会更好,说明在栽植楸树时,可以通过松土、浇水等方式来改良土壤,从而改善楸树的生长情况。

同样地,不同立地条件下楸树的生长状况也是

不同的,由于农林间作条件下坡向、坡度、坡位等因子都严重受到了人为的破坏,因此,此次研究只考虑非农林间作条件下不同立地因子对楸树生长的影响。阴坡条件下的楸树生长情况与阳坡基本一致,说明在这一地区坡向不会对楸树的生长产生影响。相比于陡坡,缓坡条件下楸树的生长情况更好,这可能是由于缓坡条件下的树木能够更均匀地接受光照和吸收土壤养分;也可能是因为陡坡条件下树木抵抗灾害的能力较差,而在缓坡条件下,树木的根系能够充分固定土壤,对于洪水、暴风等灾害的抵抗力较强。这一研究结果与朱虹等<sup>[34]</sup>、肖化顺等<sup>[35]</sup>的研究结果较为一致,但与李艳洁等<sup>[36]</sup>的研究结果存在差异,这可能是不同的研究区域和研究对象所造成的。下坡位条件下的楸树生长情况要优于上坡位,这主要是由于上坡位的水分以及土壤养分会向下流失,然后在下坡位集中,因而上坡位树木无法获得足够的水分和土壤养分,其生长受到限制。

此次研究通过使用描述性分析、*T* 检验和相关性分析方法,发现栽培模式和立地条件对洛宁县楸树人工林生长的影响显著。在 30 年生楸树人工林中,农林间作条件下的单株材积比非农林间作分别增长了 11.43%。在进行农林间作的 30 年生楸树人工林中,低密度条件下的树高和胸径比高密度分别增长了 9.75% 和 13.09%,但每公顷蓄积量降低了 25.10%。在进行非农林间作的 30 年生楸树人工林中,高密度条件下的树高和胸径和低密度基本一致,但每公顷蓄积量提高了 40.09%;不同坡向条件下的树高和胸径基本一致;相比于陡坡,缓坡条件下树高和胸径分别增长了 31.30% 和 40.48%;下坡位条件下的树高和胸径比上坡位分别增长了 22.52% 和 25.97%。总之,在河南省洛阳市洛宁县及周边地区的楸树栽培过程中,最有利于楸树生长的栽培方式为农林间作(低密度)+非农林间作(高密度+缓坡+下坡位),既可以有效培育楸树大径材,也可以在很大程度上提高楸树的木材总产量。

#### 参考文献:

- [1] 杨文姬,王秀茹. 国内立地质量评价研究浅析[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 289-292.  
YANG W J, WANG X R. Analysis on the study of site quality evaluation in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(3): 289-292. (in Chinese)
- [2] 沈国舫, 等. 森林培育学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 410.
- [3] 殷有, 王萌, 刘明国, 等. 森林立地分类与评价研究[J]. 安徽农业科学, 2007(19): 5765-5767.
- [4] 汪祥森. 国外森林立地分类和立地质量评价[J]. 中南林业调查规划, 1990(1): 53-58.
- [5] OLSEN R T, KIRKBRIDE J H. Taxonomic revision of the genus *Catalpa* (bignoniaceae)[J]. Brittonia, 2017, 69(3): 387-421.
- [6] XU H, ZHOU Z, DONG J, et al. Suppression of cervical cancer cell survival by ursolic acid extracted from *Catalpa bungei* leaves[J]. Pharmacognosy Magazine, 2018, 14(56): 425-431.
- [7] WANG Z, ZHU T, MA W, et al. Genome-wide analysis of long non-coding RNAs in *Catalpa bungei* and their potential function in floral transition using high-throughput sequencing[J]. BMC Genetics, 2018, 19(1): 86.
- [8] WANG P, MA L, LI Y, et al. Transcriptome profiling of indole-3-butyric acid-induced adventitious root formation in softwood cuttings of the *Catalpa bungei* variety 'YU-1' at different developmental stages[J]. Genes & Genomics, 2016, 38(2): 145-162.
- [9] XIAO Y, MA W, LU N, et al. Genetic variation of growth traits and genotype-by-environment interactions in clones of *Catalpa bungei* and *Catalpa fargesii* f. *Duclouxii*[J]. Forests, 2019, 10(1): 57.
- [10] WANG P, MA Y, MA L, et al. Development and characterization of est-ssr markers for *Catalpa bungei* (bignoniaceae)[J]. Applications in Plant Sciences, 2016, 4(4): 1500117.
- [11] ZHENG H, ZHANG X, MA W, et al. Morphological and physiological responses to cyclic drought in two contrasting genotypes of *Catalpa bungei*[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 138: 77-87.
- [12] LIN J, WU L, LIANG J, et al. Effect of different plant growth regulators on callus induction in *Catalpa bungei*[J]. African Journal of Agricultural Research, 2010, 5(19): 2699-2704.
- [13] WANG J H, ZHANG H J, SHI S L, et al. Study on the soda-alkali semi-chemical pulping properties of *Catalpa bungei* c. A. Mey. Lop wood[C]//WANG J H, et al. 16th international symposium on wood, fiber and pulping chemistry, proceedings, vols I & II. Beijing: China Light Industry Press, 2011, 636-640.
- [14] COOK R T A, HENRICOT B, HENRICI A, et al. Morphological and phylogenetic comparisons amongst powdery mildews on *Catalpa* in the UK[J]. Mycological Research, 2006, 110(6): 672-685.
- [15] WU J W, SU Y, WANG J H, et al. Morphological and physiological acclimation of *Catalpa bungei* plantlets to different light conditions[J]. Photosynthetica, 2018, 56(2): 537-548.
- [16] WU J, LI J, SU Y, et al. A morphophysiological analysis of the effects of drought and shade on *Catalpa bungei* plantlets[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(3): 80.
- [17] QIU Q, LI J, WANG J, et al. Coupling effects of water and fertilizer on the growth characteristics of *Catalpa bungei* seedlings[J]. Pakistan Journal of Botany, 2015, 47(3): 889-896.
- [18] QIU Q, HE Q, WANG J, et al. Interactions between soil water and fertilizer on leaf photosynthesis and delta C-13 of *Catalpa bungei* seedlings[J]. Dendrobiology, 2016, 76: 25-34.
- [19] SHI H, MA W, SONG J, et al. Physiological and transcriptional responses of *Catalpa bungei* to drought stress under sufficient and deficient-nitrogen conditions[J]. Tree Physiology

- gy, 2017, 37(11): 1457-1468.
- [20] QIU Q, WANG J, SU Y, *et al.* Organ-level evaluation of the carbon starvation hypothesis in deciduous broad-leaved *Catalpa bungei* plants undergoing drought-induced mortality[J]. *Dendrobiology*, 2018, 80: 48-60.
- [21] 郭如意, 韦新良, 刘姗姗. 天目山区针阔混交林立地质量评价研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 233-240.
- GUO R Y, WEI X L, LIU S S. Site quality evaluation of coniferous and broad-leaved mixed forest in tianmu mountain[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(4): 233-240. (in Chinese)
- [22] 胡凌, 商侃侃, 张庆费, 等. 密度调控对香樟人工林林木生长及空间分布的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 20-25.
- HU L, SHANG K K, ZHANG Q F, *et al.* Effects of regulation on the growth and spatial distribution of *Cinnamomum camphora* plantations in shanghai[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(2): 20-25. (in Chinese)
- [23] 黄承标, 马承彪, 曹继钊, 等. 不同立地及间伐强度对马尾松人工幼林生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 141-145.
- HUANG C B, MA C B, CAO J Z, *et al.* Effects of different sites and intermediate cutting intensities on growth of planted young *Pinus massoniana* forests [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(1): 141-145. (in Chinese)
- [24] 邹得棉. 马尾松天然林立地质量评价[J]. 福建林业科技, 2001(1): 76-78.
- [25] 赵惠勋, 周晓峰, 王义弘, 等. 森林质量评价标准和评价指标[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(5): 58-61.
- ZHAO H X, ZHOU X F, WANG Y H, *et al.* Quality of forest evaluation standard and evaluation target [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2000, 28(5): 58-61. (in Chinese)
- [26] 唐诚, 王春胜, 庞圣江, 等. 广西大青山西南桦人工林立地类型划分及评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 52-57.
- TANG C, WANG C S, PANG S J, *et al.* Site classification and evaluation of *Betula alnoides* plantations at Guangxi Daqing Mountain [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(4): 52-57. (in Chinese)
- [27] 刘建军, 薛智德. 森林立地分类及质量评价[J]. 西北林学院学报, 1994, 9(3): 79-84.
- LIU J J, XUE Z D. A review on forest site classification and site quality evaluation[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1994, 9(3): 79-84. (in Chinese)
- [28] 段劫, 马履一, 贾黎明, 等. 北京低山地区油松人工林立地指数表的编制及应用[J]. 林业科学, 2009, 45(3): 7-12.
- DUAN J, MA L Y, JIA L M, *et al.* Establishment and application of site index table for *Pinus tabulaeformis* plantation in the low elevation area of Beijing [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(3): 7-12. (in Chinese)
- [29] 贾忠奎, 公宁宁, 姚凯, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林生产力对坡向的响应[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(4): 1-6.
- JIA Z K, GONG N N, YAO K, *et al.* Responses of *Larix principis-rupprechtii* plantation productivity on slope aspect [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2012, 27(4): 1-6. (in Chinese)
- [30] 王璐, 王海燕, 何丽鸿, 等. 天然云冷杉针阔混交林立地质量评价[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(3): 1-7.
- WANG L, WANG H Y, HE L H, *et al.* Site quality assessment of natural spruce-fir mixed forest [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016, 44(3): 1-7. (in Chinese)
- [31] 陈昌雄, 曹祖宁, 杨英恩, 等. 天然针阔混交林立地质量的主要影响因子研究[J]. 福建林学院学报, 2003, 24(4): 343-347.
- CHEN C X, CAO Z N, YANG Y E, *et al.* Study on the main site factors of natural mixed stands of conifer and broad-leaved trees [J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2003, 24(4): 343-347. (in Chinese)
- [32] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [33] 肖传法, 等. 木材·立木材积速算表[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 2000.
- [34] 朱虹, 杨凯. 红皮云杉人工林立地分类与质量评价[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 4-6.
- ZHU H, YANG K. Site classification and quality appraisal of *Picea koraiensis* plantations [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(5): 4-6. (in Chinese)
- [35] 肖化顺, 邵柏. 臭松次生林立地分类研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(6): 6-10.
- XIAO H S, SHAO B. Study on site classification of *Abies nephrolepis* secondary forest [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, 36(6): 6-10. (in Chinese)
- [36] 李艳洁, 周来, 靳爱仙, 等. 东京城林业局落叶松人工林立地质量评价[J]. 林业资源管理, 2017(2): 53-57.
- LI Y J, ZHOU L, JIN A X, *et al.* Evaluation on site quality of larch plantations in Dongjingcheng [J]. *Forest Resources Management*, 2017(2): 53-57. (in Chinese)