

# 川西南高原云南松林直径分布研究

李愿会

(国家林业局 西北林业调查规划设计院,陕西 西安 710048)

**摘要:**研究不同起源林分的直径分布规律,为云南松科学经营提供理论和方法论依据。利用样地调查数据,运用 Normal、Weibull、Beta 和 Gamma 概率密度函数拟合了云南松天然林和飞播林的直径分布,并对径阶分布数据进行  $\chi^2$  检验。结果表明,川西南高原云南松中等偏小胸径林木占大多数,大径阶林木少,直径分布曲线严重左偏,林木直径变动程度较大。飞播林直径分布集中,生长竞争剧烈,天然林离散程度大,后续林木数量不足。模型拟合结果显示,Normal 模型和 Gamma 模型拟合曲线形态与实际不符,总体估计株数偏小;Weibull 模型和 Beta 模型表现出了较好的适应性和灵活性,在整个径阶范围内具有较高的符合度,更适于描述该地云南松直径分布规律。

**关键词:**云南松;直径分布;天然林;飞播林

中图分类号:S791.257

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2018)03-0219-07

## Studies on Diameter Distribution of *Pinus yunnanensis* Forest in Plateaus of Sw-Sichuan Province

LI Yuan-hui

(Northwest Institute of Forest Inventory, Planning and Design, State Forestry Administration, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract:** The purpose of this study was to explore the distribution regularity of the diameter of different origin, and to provide theoretical and methodological bases for the management of *Pinus yunnanensis* stands. Based on the survey data, the diameter distribution of natural and aerially seeded forests of *Pinus yunnanensis* were separately fitted with Normal, Weibull, Beta and Gamma distribution functions, and all the distributions were checked by  $\chi^2$ -test. Majorities of *P. yunnanensis* trees were in small and medium-sized diameter, comparatively, less in large diameter. The diameter distribution curves significantly slanted to the left, besides, the variation of the diameter distribution changed much more. The aerially seeded stands had a narrow distribution, therefore the competition between them was keen. On the other hand, the dispersion of natural stands was larger, but the number of subsequent trees was insufficient. Normal model and Gamma model were inconsistent with the actual situations, from which the overall estimations on the tree number were too small. With higher compliance in all diameter distribution, Weibull model and Beta model showed good adaptability and flexibility, they were more suitable to describe the diameter distribution of *P. yunnanensis*.

**Key words:** *Pinus yunnanensis*; diameter distribution models; natural forest; aerial seeding forest

直径是森林结构的基本特征之一,是林分质量的重要标志。林木直径分布在森林经营管理中发挥着重要作用,平衡的直径结构是森林可持续经营的

主要目标。林木直径分布的研究已有逾百年的历史,迄今的研究大体可分为生物学分布规律和数学表达形式 2 个方面<sup>[1]</sup>。见诸文献的直径分布函数已

有 20 余种,随着计算机技术的发展和普及,越来越多的学者将数学函数与概率分布曲线进行拟合,描述直径结构的动态变化规律,应用较多的分布模型如 Weibull 分布、Beta 分布、Gamma 分布、Pearlreed 生长曲线、Logit-Logistic 分布、Pearson 分布、正态分布、对数正态分布、负指数分布、SB 分布等<sup>[2-20]</sup>。以往的研究多见于杉木<sup>[1-6]</sup>、油松<sup>[7]</sup>、栎类<sup>[8-9]</sup>、杨桦<sup>[10]</sup>、云冷杉<sup>[11]</sup>、落叶松<sup>[12-16]</sup>、马尾松<sup>[17-19]</sup>、红松<sup>[20]</sup>和毛白杨<sup>[21]</sup>等树种,国内学者如姜磊<sup>[22]</sup>等利用 Beta、Weibull 分布函数拟合及预测了滇中云南松林分的直径分布,李一清<sup>[23]</sup>用生长转移概率,建立了云南松林分直径预测模型,陈建珍<sup>[24]</sup>等用解析木建立了云南松次生林单木的胸径、树高和材积生长模型,但尚未见到关于川西南高原云南松直径结构研究的报道。已有研究表明,不同的森林类型直径分布规律差异较大,应选择不同的函数或参数建立分布模型。

云南松(*Pinus yunnanensis*)林是我国西南地区常见而重要的森林类型,也是我国亚热带西段偏干性生境条件的代表性群系<sup>[25]</sup>。云南松具有强阳性、耐干旱、耐瘠薄等特点,对环境适应性强,造林绿化和自然更新成效良好,经过几十年的培育,云南松已经发展成为四川、云南等地主要的生态和用材树种。但是,云南松林树种组成简单,生物多样性低,林地生产力不高,因此如何采取科学的经营技术,提高云南松林分质量,促进森林生态系统健康稳定,实现森林可持续经营是当地林业急切面对和急需解决的主要问题之一。

本研究利用 Normal、Weibull、Beta 和 Gamma4 种分布函数,拟合川西南高原云南松林直径分布,选出较优的直径分布模型,以期为研究云南松林分质量结构,预测林分生长收获,制订经营保护措施,提高森林质量,更好地发挥云南松森林生态系统功能提供科学依据。

## 1 研究区概况

试验区位于四川省凉山州西昌市,地理坐标为 101°46′—102°25′E、27°32′—28°10′N,海拔 1 500~3 200 m,气候属中亚热带高原季风类型,冬春干旱,夏秋多雨,干湿季分明,立体气候明显。年平均气温 17℃,最高气温 24℃,最低气温 9℃,≥0℃年积温 6 200~2 200℃。年降水量 1 004 mm,5—10 月降水量占全年的 93%,11—5 月为旱季。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,主要包括常绿阔叶针叶混交林、落叶阔叶针叶混交林、针叶混交林、干热河谷稀树灌木草丛、山地灌丛和草甸,主要乔木树种有云南松、华山松(*P. armandii*)、川滇冷杉(*Abies forrestii*)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucooides*)、黄毛青冈(*C. delavayi*)、高山栲(*Castanopsis delavayi*)、川滇高山栎(*Quercus aquifolioides*)、黄背栎(*Q. pannosa*)、麻栎(*Q. acutissima*)、锐齿槲栎(*Q. aliena*)等。土壤主要有黄红壤、黄棕壤、山地红壤等。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据及处理

数据来源于 2015 年四川省西昌市云南松临时样地,样地面积 20 m×20 m。采用罗盘仪测设边界,对胸径≥5 cm 的树木全林每木检尺,主要调查因子包括胸径、林龄、树高、郁闭度等,同时记载起源、海拔、坡度、坡向、坡位、更新和枯立木等状况。样地数量 93 块,其中天然林 48 块,飞播林 45 块,林木株数 3 422 株,分布海拔 1 500~3 000 m。样地基本情况见表 1。

分别将天然林和飞播林综合样地样木的调查资料,按 2 cm 径阶整化,作为模型拟合的原始数据。经统计整理后,形成径阶频度数据样本(图 1),计算平均直径、平均直径标准差、变动系数、偏度和峰度。

表 1 样地基本情况

Table 1 Statistics of plot information

森林类型	海拔/km		坡向		坡位			龄组		郁闭度		
	<2	≥2	阴坡	阳坡	上	中	下	幼中	成过熟	<0.5	≥0.5	
天然林	48	2	46	22	26	23	18	1	5	43	14	34
飞播林	45	11	34	14	31	13	30	8	17	28	8	37
合计	93	13	80	36	57	36	48	9	22	71	22	71

从径阶频数分布(图 1)可以看出,天然林径阶分布范围较大,最小径阶为 6 cm,最大径阶为 52 cm;飞播林径阶分布范围较小,最小径阶为 5 cm,最大径阶为 32 cm。飞播林径阶分布较为集中,天然林径阶离散程度明显>飞播林。天然林和

飞播林直径分布均呈现单峰有偏分布,天然林 14 cm 径阶的林木株数最大,飞播林 8 cm 径阶的林木株数最大,天然林峰值显著偏移大径阶位置。到达峰值后,随径阶增大,各径阶的林木株数逐渐减少,天然林递减速率相对平缓,飞播林下降较为陡峭。

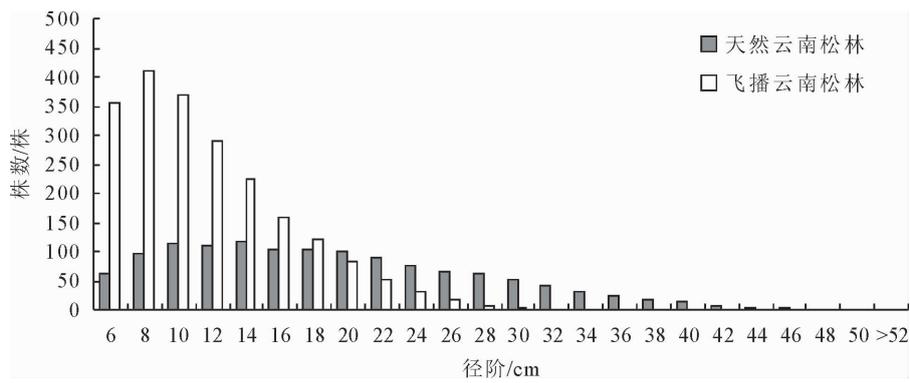


图1 云南松各径阶株数分布

Fig. 1 Diameter class distributions of *P. yunnanensis*

## 2.2 分布模型与参数估计

在样地数据分析的基础上,通过文献筛选,选择普遍采用的 Normal、Weibull、Beta 和 Gamma 分布函数拟合川西南高原云南松天然林和飞播林的直径分布,并采用  $\chi^2$  检验法检验拟合结果,显著水平取  $\alpha=0.05$ 。

### 2.2.1 Normal 分布 Normal 概率密度函数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中, $x$  为实测直径; $\bar{x}$  为正态分布的数学期望,即算术平均直径; $\sigma$  为其标准差。

Normal 分布是一种常见的分布,用于描述许多林分的直径分布。正态曲线呈钟型,左右对称,由林分直径的算术平均值和标准差决定。 $\bar{x}$  决定正态曲线的位置, $\sigma$  定正态分布的分散程度, $\sigma$  小则分布集中,曲线形态峭瘦, $\sigma$  大则分布分散,曲线形态矮胖。

由于分布曲线变化小,Normal 分布多用于拟合同龄人工林或特定阶段的林分直径分布,局限较大。

### 2.2.2 Weibull 分布 三参数 Weibull 概率密度函数

$$f(x) = \frac{c}{b} \left[ \frac{x-a}{b} \right]^{(c-1)} \exp \left[ - \left( \frac{x-a}{b} \right)^c \right] \quad (2)$$

$(x \geq a, b, c > 0)$

式中: $a$  为位置参数,可定义为林分最小起测直径; $b$  为尺度参数,确定其尺寸大小; $c$  为形状参数,确定曲线形状。

当  $c=1$  时,为负指数分布函数; $c < 1$  时,该曲线为反 J 型分布函数; $1 < c < 3.6$  时,为单峰正偏的山状曲线; $c \approx 3.6$  时,为近似正态分布; $c > 3.6$  时,分布曲线逐渐由正偏移向右偏; $c=2$  时,为  $\chi^2$  分布;当  $c \rightarrow \infty$ ,变为单点分布。

Weibull 三参数分布模型能拟合系列曲线和偏度等级,适应性广、灵活性强,且参数生物学意义明显,同时在闭区间上存在累积密度公式,被广泛用来

研究不同树种和森林类型的林分直径分布,已经成为林分直径分布研究中的一种理想模型,表现出了较高的精确度和适合度,但是参数估计方法至关重要,在一定程度上决定着模型的拟合效果。

### 2.2.3 Beta 分布 Beta 概率密度函数

$$f(x) = \frac{x^{a-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(a,\beta)} \quad (3)$$

Beta 分布函数为:

$$B(a,\beta) = \int_a^b (x-a)^a (b-a)^\beta dx \quad (4)$$

式中: $a$  为分布下限,取最小径阶; $b$  为分布上限,取最大径阶。 $\alpha$  和  $\beta$  为曲线的形状参数。

Beta 分布的显著优点是简单和适应性强,可拟合不同树种的林分直径分布,其灵活性归结于形状指数  $\alpha$  和  $\beta$ ,按照  $\alpha$  和  $\beta$  的不同量值和关系,Beta 分布可拟合多种多样的直径分布规律。当  $\alpha=\beta$ ,且均  $> 0$  时,对称单峰分布; $\alpha < \beta$ ,且均  $> 0$  时,左偏单峰分布; $\alpha > \beta$ ,且均  $> 0$  时,右偏单峰分布; $\alpha=\beta=0$  时,均匀分布; $\alpha \leq 0, \beta > 0$  时,递减分布; $\alpha > 0, \beta \leq 0$  时,递增分布。

### 2.2.4 Gamma 分布 Gamma 分布概率密度函数

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}}{\Gamma(\alpha)} (x > 0) \quad (5)$$

式中: $\beta$  为尺度参数, $\alpha$  为形状参数。 $\alpha=1$ ,为指数分布; $\alpha < 1$  时,单峰分布,峰值位于  $x=(\alpha-1)/\beta$ ;  $1 < \alpha \leq 2$ ,分布曲线先凸后凹; $\alpha > 2$  时,分布曲线为中间上凸,两侧下凸; $\alpha=n/2, \beta=1/2$  时,为卡方分布。

Gamma 分布也是适应性较强的函数模型,应用于多个树种的直径分布。

2.2.5 参数估计 最大似然法是 Weibull 分布模型参数估计的一种常见方法,估计精度高,对计算的要求也高。本研究中  $a$  值取 5,林木总株数  $N = \sum_{i=1}^k d_i$ ,  $d_i$  为径阶中值,根据最大似然估计法,给定  $c$  的初值利用(7)式迭代求出参数  $c$ ,代入(6)式求出参数  $b$ 。

$$b = \left[ \left( \sum_i^k n_i \times d_i^c \right) \div N \right]^{\frac{1}{c}} \quad (6)$$

$$\left[ \frac{\sum_i^k n_i \times \ln(d_i)}{\sum_i n_i} - \frac{\left( \sum_i^k n_i \times d_i^c \times \ln(d_i) \right) \div \sum_i^k n_i \times d_i^c}{\left[ \left( \sum_i^k n_i \times d_i^c \right) \div N \right]^{\frac{1}{c}}} \right] + \frac{1}{c} \quad (7)$$

矩法也是常用的一种分布参数的估计方法, Beta 分布和 Gamma 分布采用矩法进行参数估计。其原理是利用概率密度函数的参数与林木直径的矩之间的数学关系,通过样本林木直径的一阶矩和均方直径的二阶矩来估计参数。Normal 分布的参数可直接通过直径数学期望及标准差求解得到。

### 3 结果与分析

#### 3.1 直径分布特征

由样地直径分布特征因子可见(表 2),天然林平均胸径为 19.12 cm,飞播林为 11.66 cm,天然林直径变动系数为 46.75%,飞播林为 41.70%,表明云南松林分林木直径变动程度较大。这与云南松是强阳性树种,林木自然稀疏强烈和森林经营措施滞

后等有关。天然林偏度系数为 0.631 9,分布曲线左偏,具有较长右尾,峰度系数为  $-0.158 8 < 0$ ,说明天然林径阶分散。14 cm 径阶的林木株数最大,16~20 cm 径阶株数变化不大,22 cm 后缓慢递减并趋于平稳。中小径(6~24 cm)林木所占比重累计  $> 74.9\%$ ,直径 14 cm 以下的后续林木数量少,预示林分可持续生长性差。大径阶林木株数较少,其中直径  $\geq 38$  cm 的林木占总株数的 3.8%,少量大径木的存在,使得天然林径阶分布范围更大,曲线形状平坦。飞播林偏度系数为 0.969 3,偏度系数  $>$  天然林,说明飞播林直径分布左偏更为突出;峰度系数为 0.562 6  $> 0$ ,说明径阶分布更为集中,符合林分中小径(6~24 cm)林木所占比重累计  $> 98.6\%$  的实际。飞播林径阶分布离散程度小而集中,林分结构单一特征鲜明,严重缺少大径阶林木。曲线严重左偏,形态高瘦,飞播林正处于生长旺盛阶段,林木生长竞争激烈,小径木和被压木遭到淘汰,林分算术平均直径增大,但是直径分布峰值所对应的径阶移动较小。

表 2 特征因子

Table 2 Descriptive statistics of stand variables

森林类型	N/株	$d_{\max}/\text{cm}$	$d_{\min}/\text{cm}$	$\bar{d}/\text{cm}$	$\sigma_d$	变动系数	偏度	峰度
天然林	1 303	52	5	19.12	8.938 2	0.467 5	0.631 9	-0.158 8
飞播林	2 119	30	5	11.66	4.862 1	0.417 0	0.969 3	0.562 6

#### 3.2 天然林直径分布拟合

根据天然林样本数据,4 种分布模型的参数估计见表 3,模型估计的各径阶实际株数与理论株数见图 2,拟合结果检验见表 4。

表 3 天然林模型参数估计

Table 3 Parameters statistic of distribution models

模型	Normal	Weibull	Beta	Gamma
参数	$\bar{x}=19.12$	$a=5$	$\alpha=1.467 9$	$\alpha=0.176 9$
	$\sigma=8.938 2$	$b=15.700$	$\beta=3.520 9$	$\beta=2.496 8$
		$c=1.580 0$		

表 4 天然林模型拟合检验

Table 4 Chi-square test results

模型	$\chi^2$	$f$	$\chi_{0.05}^2$	$> \chi_{0.05}^2$ 的概率 $P$
Normal	138.051	21	32.671	0.028 287
Weibull	23.208	20	31.410	1.23E-13
Beta	30.182	21	32.671	0.027 751
Gamma	186.87	21	32.671	3.83E-08

注: E 表示指数。

由于 Normal 分布对偏度和峰度灵活性差,只能拟合与其曲线特征相近的直径分布<sup>[26]</sup>。Normal 模型的拟合参数求解是精确地,期望值为 19.21 cm,标准差为 8.938 2 cm,曲线随径阶增大逐渐上升,在平均直径达到峰值,与观测值偏离较大,中大径阶区域拟

合结果较好,但对中小径阶的估计株数偏低,总体上低估了林木株数,这与实际情况不符。

Weibull 分布的位置参数的估计精度直接影响模型拟合结果,考虑到林分最小直径受林分生长状况影响较大并与平均直径相关,本研究取起测径阶下限,  $a=5$ ,尺度参数  $b$  反映林木直径平均水平和个体差异,随林分平均直径增加而变化。形状参数  $c$  是关键参数,随着林分平均直径的增大而增大,估计值在 1~3.6 之间,曲线表现单峰左偏。Weibull 曲线峰值出现在 14 cm 径阶,随径阶增大逐渐下降,20~46 cm 径阶拟合的理论值非常接近于观测值,但是在过大和过小径阶上的估计值与实际值相差较大,这是其不足之处。

Beta 分布的形状参数  $\alpha, \beta$  均  $> 0$ ,表明曲线左偏,同时  $\alpha < \beta$ ,单峰曲线左偏最大。由图 2 可知,随径阶增大,曲线形状先凸后凹,在 12 cm 径阶达到峰值,较 Weibull 分布更为左偏,但峰度稍低,下降较为平缓,在整个径阶范围内的估计值与观测数据较为符合,对偏度和峰度表现出了较好的适应性。

Gamma 分布形状参数  $\beta > 2$ ,曲线先凸后凹,在 14 cm 径阶达到峰值,峰度最大,曲线上升和下降非常陡峭,形状过分尖锐,不符合峰度系数。模型对峰

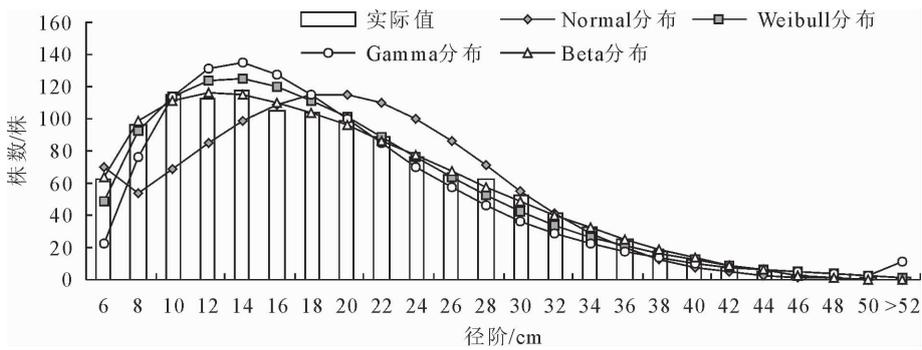


图 2 天然林分布模型的估计值与观测值

Fig. 2 Observed and predicted diameter distribution of different models of natural forest

值附近株数估计偏高,大径阶株数估计过低,最大径阶尾部上翘,50 cm 以上径阶的株数被高估 6.8 倍,严重偏离观测数据,整个径阶范围内的预估值存在较大偏差,显示了不好的效果。

### 3.3 飞播林直径分布拟合

根据飞播林样地观测数据,4 种分布模型的参数估计见表 5,模型估计的各径阶实际株数与理论株数见图 3,拟合结果检验见表 6。

表 5 飞播林模型参数估计

Table 5 Parameters statistic of distribution models

模型	Normal	Weibull	Beta	Gamma
参数	$\bar{x}=11.66$	$a=5$	$\alpha=1.1937$	$\alpha=0.2819$
	$\sigma=4.8621$	$b=7.3117$	$\beta=3.8212$	$\beta=1.8790$
		$c=1.3867$		

表 6 飞播林模型拟合检验

Table 6 Chi-square test results

模型	$\chi^2$	$f$	$\chi_{0.05}^2$	$>\chi_{0.05}^2$ 的概率 P
Normal	138.051	21	32.671	0.042173
Weibull	23.208	20	31.410	9.88E-42
Beta	30.182	21	32.671	0.032993
Gamma	186.87	21	32.671	1.75E-06

一般认为飞播林具有同龄林分直径结构的特征,单峰分布是其普遍分布规律。Normal 模型拟合参数分别为  $\bar{x}=11.66$  cm,  $\sigma=4.8621$  cm,拟合曲

线峰值位于平均直径,曲线形状与该地区飞播林中 小径阶林木占绝对优势的特征严重不符,现实林分与 Normal 分布结构差距较大,完全不能适用。

Weibull 分布的位置参数  $a=5$ ,尺度参数  $b=7.31$ ,直径  $<b$  值的林木株数约占总株数的 36.10%,这是因为林分中还存在相当数量直径  $<5$  cm 的林木,由于  $<$ 起测直径未被观测。形状参数  $c=1.3867$ ,曲线形状为单峰左偏。Weibull 拟合曲线峰值位于 8 cm 处,随径阶增大曲线降低,在整个径阶范围内较好地拟合了偏度和峰度,模型估计的理论值基本接近于观测值,总体拟合精度较高。

Beta 分布的形状参数  $\alpha=1.1937$ ,  $\beta=3.8212$  (图 3),拟合曲线在 8 cm 径阶轻微上凸达到峰值,随径阶增大,平滑下降,峰度较 Weibull 分布稍低,在 12~26 cm 径阶范围内的估计值与观测数据较为符合,对小径林木和大径林木株数预估偏小,对偏度和峰度具有较好的灵活性。

Gamma 分布形状参数  $\beta=1.8790$ ,拟合曲线形态为凸-凹-凸,在 8 cm 径阶达到峰值,曲线速率较为陡峭,形状尖峭。模型对 8~12 cm 径阶林木株数估计偏高,14~26 cm 径阶林木株数估计偏低,最大径阶尾部上翘,28 cm 以上径阶的株数被高估 8.6 倍,整个径阶范围内估计值与观测值存在较大偏差,拟合效果不好。

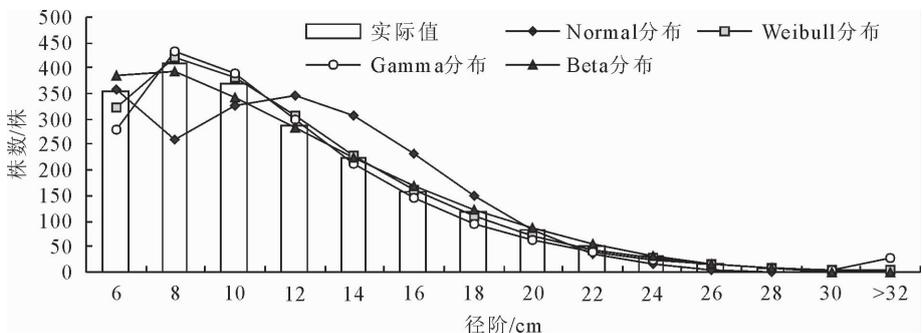


图 3 飞播林分布模型的估计值与观测值

Fig. 3 Observed and predicted diameter distribution of different models of aerially seeded forests

### 3.4 模型比较

本研究云南松天然林和飞播林的直径分布显示出明显的单峰左偏形状,4种模型估计的理论总株数均在3%的误差范围内,但不同模型之间存在一定差别。Normal模型无法拟合偏度和峰度,Gamma模型曲线陡峭,形状尖削,右尾上翘,曲线形态与实际特征差异明显。Normal模型更多地考虑了平均直径附近的林木,中小径阶林木株数偏大,大径阶

预估株数偏小;Gamma模型较多地估计了特大径阶林木株数,对频数-径阶占优势的林木株数估计不足,二者拟合结果总体偏小,与实际不符。图4中Weibull模型和Beta模型对该地区云南松直径分布特征表现出了较好的适应性和符合性,在整个径阶范围内与观测数据较为吻合,拟合精度高,能够较好地描述该地云南松直径分布规律。

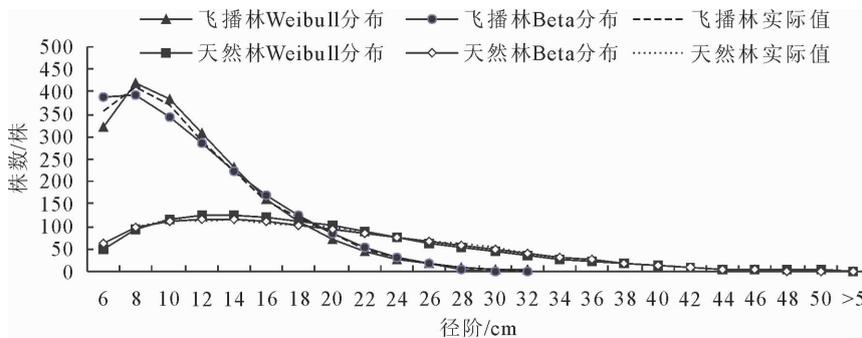


图4 Weibull模型和Beta模型的估计值与观测值

Fig. 4 Observed and predicted diameter distribution of Weibull model and Beta model

## 4 结论与讨论

云南松是我国重要造林绿化树种,其森林面积占全国乔木林面积的2.76%,位居全国第7,已经成为四川、云南等省主要的森林类型。由于立地条件差,森林经营措施滞后,川西南高原云南松林总体上树种组成简单、林分结构单一,直径分布不合理,生产力低。急需根据直径分布规律调整林分结构,建立持续稳定的森林生态系统,充分发挥云南松的生产功能和生态服务价值。

研究显示当地云南松林木株数密度偏低,中小径林木比重大,大径阶林木少,林分直径分布曲线严重左偏,天然林和飞播林直径分布差异明显。天然林直径结构复杂,后续林木数量不足,林分可持续性及其森林生态系统稳定性较差。飞播林小径林木株数最多,分布集中,生长竞争剧烈,林分质量不高。

模型比较评价表明,Weibull模型和Beta模型均较好地描述了该地区云南松的直径分布规律,从理论与实际观测结果都表现出了良好的适应性和灵活性,拟合效果最好,可作为直径分布的预测模型。

林木直径分布影响因素复杂而多样,在模型选择时,应根据研究林分的实际情况和研究目的具体分析。Normal模型本研究虽然完全不能使用,但是在某些确实近似的条件下也可取得较好的拟合结果。在栎类等阔叶林的直径分布研究中,Gamma模型似乎更为适用。结合当前森林经营理论的多元化,从经营管理的角度出发,根据不同林分特点和经

营目标,如何科学评价和选择林分直径分布模型,进一步提升Weibull函数和Beta函数模拟与预测的准确度仍需在实践中继续尝试,深入探讨。

### 参考文献:

- [1] 寇文正. 林木直径分布的研究[J]. 南京林产工业学院学报, 1982, 1(1): 51-65.
- [2] 刘丽颖, 张绍轩, 任佳佳, 等. 杉木不同龄组直径分布研究[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 178-183.  
LIU L Y, ZHANG S X, REN J J, et al. Diameter distribution of *Cunninghamia lanceolata* in different age groups[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1): 178-183. (in Chinese)
- [3] 周国强, 陈彩虹, 楚春晖, 等. 大围山杉木人工林不同海拔直径分布研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 86-91.  
ZHOU G Q, CHEN C H, CHU C H, et al. Diameter distribution of Chinese fir in different altitudes in Dawei mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 86-91. (in Chinese)
- [4] 郝文乾, 陈玲, 梅光义. 杉木人工林直径分布的坡向效应及其模拟[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(11): 61-69.  
HAO W Q, CHEN L, MEI G Y. Effects of slope aspect on diameter distribution of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2016, 44(11): 61-69. (in Chinese)
- [5] 张鹏, 王新杰, 许昊. 杉木幼龄林直径分布[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(11): 7-10, 13.  
ZHANG P, WANG X J, XU W. Stand diameter distribution model of young Chinese fir plantations[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(11): 7-10, 13. (in Chinese)

- [6] 惠刚盈,盛炜彤. 林分直径结构模型的研究[J]. 林业科学研究, 1995,8(2):127-131.  
HUI G Y, SHENG W T. Study on structure model of stand diameter[J]. Forest Research, 1995,8(2):127-131. (in Chinese)
- [7] 韩东锋,钱拴提,孙丙寅,等. 油松飞播林直径结构规律研究[J]. 西北林学院学报, 2008,23(5):182-187.  
HAN D F, QIAN S T, SUN B Y, *et al.* Regularities of diameter structure of aerial *Pinus tabulaeformis* afforestation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(5):182-187. (in Chinese)
- [8] 张雄清,雷渊才. 北京山区天然栎林直径分布的研究[J]. 西北林学院学报, 2009,24(6):1-5.  
ZHANG X Q, LEI Y C. Studies on diameter distribution of oak plants in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009,24(6):1-5. (in Chinese)
- [9] 陈新美,张会儒,武纪成,等. 柞树林直径分布模拟研究[J]. 林业资源管理, 2008(1):39-43.  
CHEN X M, ZHANG H R, WU J C, *et al.* Study on diameter distribution simulation of *Quercus mongolica* stands[J]. Forest Resources Management, 2008(1):39-43. (in Chinese)
- [10] 龚直文,亢新刚,杨华,等. 长白山杨桦次生林直径结构研究[J]. 西北林学院学报, 2009,24(3):1-6.  
GONG Z W, KANG X G, YANG H, *et al.* Diameter structure of polar-birch secondary forests in Changbai mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009,24(3):1-6. (in Chinese)
- [11] 张梦弢,亢新刚,郭韦伟,等. 长白山云冷杉混交林直径结构分布研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2015,43(9):65-72.  
ZHANG M T, KANG X G, GUO W W, *et al.* Diameter structural distribution of spruce-fir mixed forest in Changbai mountain[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015,43(9):65-72. (in Chinese)
- [12] 孟宪宇,邱水文. 长白落叶松直径分布收获模型的研究[J]. 北京林业大学学报, 1991,13(4):9-16.  
MENG X Y, QIU S W. A study on the diameter distribution yield model of Changbai *Larch*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1991,13(4):9-16. (in Chinese)
- [13] 马炜,孙玉军. 三种直径分布拟合模型在长白落叶松林分的实际应用[J]. 生物数学学报, 2012,27(3):548-554.  
MA W, SUN Y J. Modeling of stand diameter structure of *Larix olgensis* plantations [J]. Journal of Biomathematics, 2012,27(3):548-554. (in Chinese)
- [14] 李梦,仲崇淇. 长白落叶松人工林直径分布模型的研究[J]. 南京林业大学学报, 1998,16(1):60-63.  
LI M, ZHONG C Q. A Study on the diameter distribution model for *Larix olgensis* plantation[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 1998,16(1):60-63. (in Chinese)
- [15] 赵丹丹,李凤日,董利虎. 落叶松人工林直径分布动态预估模型[J]. 东北林业大学学报, 2015,43(5):42-48.  
ZHAO D D, LI F R, DONG L H. Predicting models of diameter distribution dynamic for *Larch* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015,43(5):42-48. (in Chinese)
- [16] 王蒙,李凤日. 基于抚育间伐效应的落叶松人工林直径分布动态模拟[J]. 应用生态学报, 2016,27(8):2429-2437.  
WANG M, LI F R. Modeling the diameter distribution of *Larix olgensis* plantation based on thinning effects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(8):2429-2437. (in Chinese)
- [17] 黄家荣,孟宪宇,关毓秀. 马尾松人工林直径分布神经网络模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2006,28(1):28-31.  
HUANG J R, MENG X Y, GUAN Y X. Neural network models of diameter distribution for *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2006,28(1):28-31. (in Chinese)
- [18] 黄庆丰. 马尾松林分直径分布收获模型的研究[J]. 林业资源管理, 1998(6):43-45.  
HUANG Q F. A study on the model of diameter distribution of *Pinus massoniana* stand[J]. Forest Resources Management, 1998(6):43-45. (in Chinese)
- [19] 黄荣珍,李凤,肖龙,等. 退化第四纪红黏土重建马尾松林恢复27年后林分直径分布模型研究[J]. 水土保持研究, 2011,18(5):128-131.  
HUANG R Z, LI F, XIAO L, *et al.* Study on diameter distribution of *Pinus massoniana* rehabilitating forest restored on degraded quaternary red soil after 27 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011,18(5):128-131. (in Chinese)
- [20] 张连金,惠刚盈,孙长忠. 天然红松阔叶林径级结构模拟[J]. 西北林学院学报, 2014,29(6):157-163.  
ZHANG L J, HUI G Y, SUN C Z. Modeling diameter distribution of natural broadleaved-korean pine mixed forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014,29(6):157-163. (in Chinese)
- [21] 黄家荣,郭芳,高光芹,等. 毛白杨农田防护林带直径分布预测[J]. 西北林学院学报, 2010,25(5):140-145.  
HUANG J R, GUO F, GAO G Q, *et al.* Diameter distribution Forecast of *Populus tomentosa* shelterbelts [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(5):140-145. (in Chinese)
- [22] 姜磊,陆元昌,廖声熙,等. 滇中高原云南松林分直径结构研究[J]. 林业科学研究, 2008,21(1):123-130.  
JIANG L, LU Y C, LIAO S X, *et al.* A study on diametral structure of Yunnan pine forest in the plateau of mid-Yunnan Province[J]. Forest Research, 2008,21(1):123-130. (in Chinese)
- [23] 李一清. 云南松林分直径结构的动态预测[J]. 林业科学研究, 1992,5(6):633-638.  
LI Y Q. A dynamic prediction of the diameter structure of *Pinus yunnanensis* Stands [J]. Forest Research, 1992, 5(6):633-638. (in Chinese)
- [24] 陈建珍,何超,许彦红. 2种云南松天然次生林林分生长模型构建方法的比较[J]. 西部林业科学, 2015,44(3):112-116.
- [25] 吴征镒. 中国植被[M]. 北京:科学出版社, 1983:238-241.
- [26] F. 洛茨, K. E. 哈勒, F. 左勒. 森林资源清查[M]. 北京:中国林业出版社, 1985:410-422.
- [27] 贾乃光,张青,李永慈. 数理统计[M]. 北京:中国林业出版社, 2006.