

张景路, 张绘芳, 高 健, 等. 基于林分生长模型的天山云杉碳汇潜力估测[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(6): 1332-1340.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.06.008

## 基于林分生长模型的天山云杉碳汇潜力估测

张景路, 张绘芳, 高 健, 朱雅丽, 地力夏提·包尔汉

(新疆林业科学院现代林业研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 为掌握研究区天山云杉(*Picea schrenkiana*)林分碳储量现状, 估算其碳汇潜力, 了解其碳汇动态变化过程, 分别基于 Gompertz、Logistic、Mitscherlich 和 Schumacher 等 4 个常用生长曲线方程, 采用林龄、平均树高、平均胸径和林分密度等指标构建林分蓄积量生长模型, 选取最优模型, 通过林分生物量-林分蓄积量回归模型和含碳系数建立林分碳储量生长模型, 计算不同林分条件下天山云杉生长到 180 a 的碳密度年均增长量, 预测研究区当前、30 a 后和 60 a 后的林分碳储量及碳汇潜力。结果表明, 对比不同生长曲线方程后选择 Schumacher 方程构建林分蓄积生长模型并转化为林分碳储量生长模型, 模型精度 89.082%, 估计值的标准差 13.006、总系统误差-0.293、平均系统误差-5.943、决定系数 0.895。基于林分碳储量生长模型计算出天山云杉在相同林分密度条件下, 随着林分立地条件的变化, 林分碳密度 0~180 a 年平均增长量为 0.020~0.641 t/(hm<sup>2</sup>·a), 研究区全域林分碳密度平均增长量为 0.299 t/(hm<sup>2</sup>·a), 年平均增长量拐点位于 30 a 处。天山云杉林分碳汇潜力为 1.245×10<sup>4</sup> t 碳; 当前、未来 30 a 和未来 60 a 林分碳储量分别为 3.439×10<sup>6</sup> t 碳、3.447×10<sup>6</sup> t 碳、3.450×10<sup>6</sup> t 碳, 未来 30 a、未来 31~60 a 的增长量分别为 8×10<sup>3</sup> t 碳、3×10<sup>3</sup> t 碳, 涨幅分别为 0.233% 和 0.087%。本研究构建的林分碳储量生长模型具有较高的精度和稳定性, 可用于研究区天山云杉林分碳汇潜力的估测; 研究区天山云杉成熟林、过熟林占比较高, 林分碳汇潜力低, 需进行林龄结构优化, 以促进天山云杉林的可持续发展。

**关键词:** 天山云杉; 林分蓄积量生长模型; 林分碳储量生长模型; 碳储量; 碳汇潜力

**中图分类号:** S758.5<sup>+</sup>1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4440(2023)06-1332-09

## Estimation of carbon sequestration potential of *Picea schrenkiana* based on stand growth model

ZHANG Jing-lu, ZHANG Hui-fang, GAO Jian, ZHU Ya-li, Dilixiati · Baoerhan

(Modern Forestry Research Institute of Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** The aim of the study was to understand the carbon storage status of *Picea schrenkiana* stand in the study area and estimate its carbon sequestration potential, as well as understand the dynamic change process of carbon sequestration. Growth model for stand volume was constructed by using indexes such as stand age, average tree height, average tree diameter and stand density based on four conventional growth curve equations of Gompertz, Logistic, Mitscherlich and Schumacher. The carbon reserve growth model of stand was established by stand biomass volume-stand volume regression model and carbon content coefficient after selecting the optimal model. The annual average growth amount of carbon density

of *P. schrenkiana* grew to 180 a under different stand conditions was calculated, and the present, 30 years later and 60 years later stand carbon storage and carbon sequestration potential in the study area was predicted. The results showed that, after comparing different growth curve equations, Schumacher equation was selected to construct the stand volume growth model which was transformed into stand carbon storage growth model with the model accuracy

收稿日期: 2022-10-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务专项 (KY2020019); 新疆林业和草原局天然林保护管理补助资金项目[新林规字(2021)476号]

作者简介: 张景路(1989-), 男, 山东阳谷人, 硕士, 助理研究员, 主要从事森林资源监测与遥感技术应用研究。(E-mail) 867591948@qq.com

通讯作者: 张绘芳, (E-mail) 396930128@qq.com

of 89.082%. The standard deviation of the estimated value was 13.006, the overall systematic error was  $-0.293$ , the average systematic error was  $-5.943$ , and the determination coefficient was 0.895. Based on the growth model of stand carbon storage, it was calculated that, under the same condition of stand density, the average annual growth of stand carbon density of *P. schrenkiana* was  $0.020-0.641 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  from 0 a to 180 a as the site condition of the stand changed. The average annual growth of stand carbon density in the study area was  $0.299 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , and the inflection point of average growth was located at 30 a. The carbon sequestration potential of *P. schrenkiana* stand was  $1.245 \times 10^4 \text{ t}$  carbon, and the carbon storage values of *P. schrenkiana* stand at present, in the future 30 a and 60 a were  $3.439 \times 10^6 \text{ t}$  carbon,  $3.447 \times 10^6 \text{ t}$  carbon,  $3.450 \times 10^6 \text{ t}$  carbon respectively, the growth values of carbon storage in the future 30 a and 31–60 a were  $8 \times 10^3 \text{ t}$  carbon,  $3 \times 10^3 \text{ t}$  carbon respectively, and the increases were 0.233% and 0.087% respectively. The stand carbon storage growth model constructed in this study shows high accuracy and stability, and can be used to estimate the stand carbon sequestration potential of *P. schrenkiana* in the study area. The proportion of mature forest and over mature forest of *P. schrenkiana* in the study area is high and the stand carbon sequestration potential is low, so it is necessary to optimize the forest age structure to promote the sustainable development of *P. schrenkiana* forest.

**Key words:** *Picea schrenkiana*; stand storage growth model; stand carbon storage growth model; carbon storage; carbon sequestration potential

森林是全球陆地生态系统中最大也是最重要的植被碳库和碳汇<sup>[1-2]</sup>。自世界各地频繁出现气候异常现象<sup>[3]</sup>、林业增汇减排纳入国家应对气候变化规划<sup>[4]</sup>以来,森林便以其巨大的碳贮能力和碳汇潜力成为被关注的焦点。准确估算森林生态系统固碳潜力,有利于理解森林碳汇的动态过程,也是加强森林生态系统科学管理和制定林业增汇减排具体措施的前提。

目前在大的空间尺度上,碳汇潜力的预测一般采用模型模拟法和遥感法,如汲玉河等<sup>[5]</sup>采用 BIOME4 模型法模拟了现存森林分布区的潜在顶级森林生态系统的碳储量,用顶级森林生态系统碳储量与现存森林生态系统碳储量之差作为森林生态系统的固碳潜力;周瑞伍等<sup>[6]</sup>根据 CART 模型模拟得到云南省不同森林植被类型的适宜生境面积,以适宜生境的森林植被碳储量与现实森林植被碳储量的差值作为森林植被固碳潜力,并据此测算了云南省森林植被总固碳潜力;李秀娟等<sup>[7]</sup>基于生态系统观测数据和遥感数据等建立生态系统碳周转模型(TECO-R),并模拟了1982–1999年森林生态系统的碳汇量及其年际变化,估算了森林植被与非植被的固碳潜力。在区域小尺度上,碳汇潜力预测的方法有时间序列法、时空替代法等。时间序列法是利用长期调查或观测资料,得到生态系统固碳量的时间序列,进而推算生态系统的固碳速率和固碳潜力,即通过2个观测点的碳储量的差来推演森林生态系统碳蓄积的动态过程的一种方法,如徐冰等<sup>[8]</sup>以森林资源清查资料和林业发展规划为依据,通过生物量密

度与林龄的关系预测了中国森林2000–2050年的碳汇潜力;李斌等<sup>[9]</sup>以同龄组林分单位面积最高年净固碳量为标准,估算现有不同龄组林分通过龄组转移达到成熟林时所固定的碳量,即未来通过自然生长增加的部分,并据此计算了湖南省杉木林碳汇潜力;陈科宇等<sup>[10]</sup>在假定森林面积不变的前提下,根据森林演替理论把各林型成熟林碳密度的平均值作为该林型演替终点的碳密度,并作为该林型理论最大固碳潜力的参照系估算了研究区单位面积固碳潜力。在这些基于时间序列的研究中,尤其是对于慢生树种,往往存在着龄组划分间隔过大的问题,动辄10~20年龄组的龄级期限使得研究结果往往呈现阶梯状分布,预测局限性大。此外,在不同环境条件下的林分往往具有不同的生长发育水平和碳汇潜力,这些不同在以往学者的研究中很少加以区分。

本研究依据林分调查因子计算天山云杉地位级指数、林分密度等多种指标,以4种生长曲线为基础构建了林分蓄积生长模型,并通过生物量蓄积量回归模型和含碳系数最终构建林分碳储量生长模型。设定天山云杉林分极限年龄时的碳储量作为林分最大碳容量,将林分最大碳容量与当前时点的碳储量的差值作为该林分的碳汇潜力。此外,将特定目标年和特定环境条件下天山云杉碳密度的年均增长量作为碳汇潜力的另一指标,通过林分碳储量生长模型计算不同林分条件下天山云杉由当前生长到180a碳密度年均增长量,以定量评价不同立地条件和林分密度下的研究区天山云杉林分碳汇潜力,并预

测 30 a、60 a 后的天山云杉林分碳储量。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区(图 1)为天山西部国有林管理局巩留分局东部山区和西天山国家级自然保护区<sup>[11]</sup>,位于新疆伊犁州巩留县,地处伊犁河谷中部,天山支脉那拉提山北麓,地理坐标为 81°34'E~83°35'E,42°54'N~43°38'N。气候属温带大陆性半干旱气候,年平均温度 7.4℃,年日照时数 2 731.7 h,年降水量 200~780 mm<sup>[12]</sup>;研究区东部、南部和北部有海拔 3 500~4 200 m 的那拉提山系和伊什格力克山系,阻隔了

蒙古高压干燥气流、南下的西伯利亚寒流和新疆南部干热风,地势向西倾斜而开阔,使得来自大西洋、里海的暖湿气流进入且受高山阻挡形成丰富降水。区域内水系丰富,有发源那拉提山系的乌勒肯库尔德宁、沙特布拉克、协天德 3 条主要河流,形成基本平行且南北走向的 3 条河谷。林区土壤主要为半淋溶土纲的灰褐土和钙层土纲的黑钙土、栗钙土<sup>[13]</sup>。研究区景观格局具有中亚山地森林特征<sup>[14]</sup>,林地和草地交错分布,林型简单,树种单纯,保存着完整的原始云杉类型和山地植被自然垂直带谱,是天山林区生长最好、分布最为集中的原始云杉林,也是天山山地森林生态系统的典型代表。

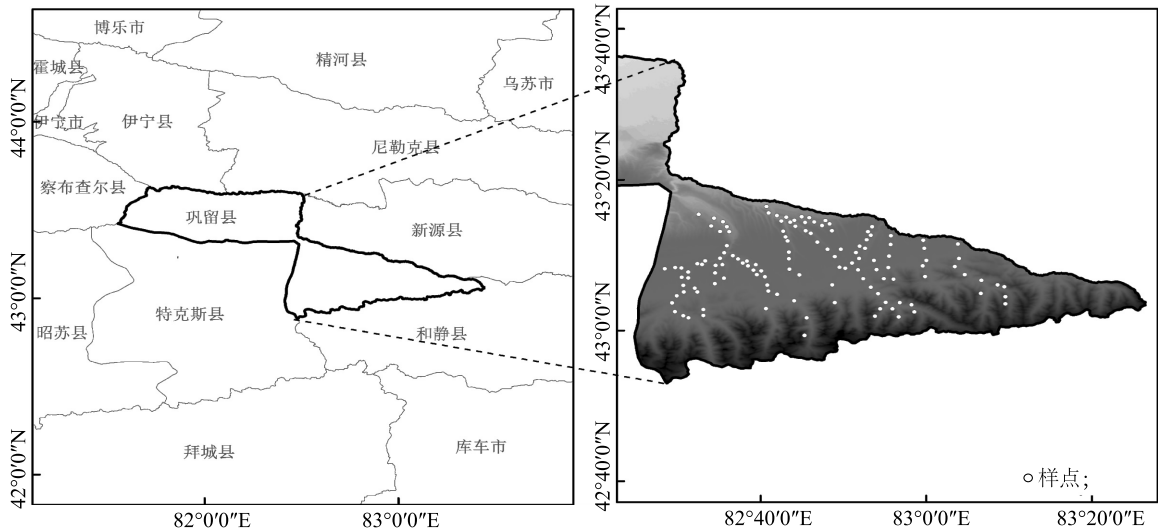


图 1 研究区地理位置及样点分布示意

Fig.1 Geographical location and sample distribution of the study area

### 1.2 数据来源与处理

采用研究区森林资源二类调查数据,提取研究区天山云杉相对纯林小班,以小班的平均年龄、平均树高、平均胸径和林分密度为基础数据。以 10 为步长划定各林阶,以正负 2 倍标准差为依据剔除各林阶范围内林分平均树高、胸径异常的样本,最终得到 133 个天山云杉样本数据。各林阶平均年龄、平均树高、平均胸径、林分密度详见表 1。

根据样本的极值将样本数据分组,以频率和组距的商为高,组距为底绘制频率直方图和正态曲线,计算样本的偏度、峰度并进行柯尔莫戈洛夫-斯米诺正太分布检验(K-S 检验)。结果(表 2)显示,平均年龄、平均树高与平均胸径偏度小于 0,呈负偏态分布,林分密度呈正偏态分布状态;4 组数据峰度均小于 0,即表征数据分布比正态分布的峰度高且狭窄。

样本数据的偏度与峰度绝对值均小于 1。4 个样本的 K-S 检验显著性均大于 0.05,说明样本服从正态分布,即在 0.05 水平上符合正态分布。

表 1 样本描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of samples

样本描述	平均年龄 (a)	平均树高 (m)	平均胸径 (cm)	林分密度 (株, 1 hm <sup>2</sup> )
均值	103.5	19.4	18.4	470.9
5%修整均值	103.7	19.7	18.5	463.3
中值	105.0	20.0	18.0	421.0
方差	1 451.8	47.3	30.5	52 283.1
标准差	38.1	6.9	5.5	228.7
极小值	20.0	5.0	6.0	66.0
极大值	185.0	30.0	30.0	1 080.0
范围	165.0	25.0	24.0	1 014.0
四分位距	57.5	10.0	8.0	331.5

表2 正态分布检验

Table 2 Normal distribution test

因子	偏度		峰度		K-S 检验	
	统计量	标准误	统计量	标准误	统计量	P 值
平均年龄	-0.104	0.241	-0.643	0.478	0.060	0.20
平均树高	-0.387	0.241	-0.724	0.478	0.087	0.06
平均胸径	-0.154	0.255	-0.395	0.506	0.053	0.20
林分密度	0.530	0.241	-0.171	0.478	0.104	0.07

表中,K-S 检验为柯尔莫戈洛夫-斯米诺正态分布检验。

### 1.3 研究方法

1.3.1 地位级导向曲线方程 基于各样本平均树高和平均年龄数据,拟合 Gompertz、Logistic、Mitscherlich 和 Schumacher 等 4 个常用树高生长曲线方程(表 3);比较各方程决定系数( $R^2$ )、残差平方和( $Q$ ),选择最符合树木生长规律和拟合效果最佳的方程作为地位级导向曲线。

表3 地位级导向曲线方程

Table 3 Status level guidance curve equation

方程	表达式
Gompertz	$Y = a \times \exp[-b \times \exp(-c \times age)]$
Logistic	$Y = a / [1 + b \times \exp(-c \times age)]$
Mitscherlich	$Y = a \times [1 - b \times \exp(-c \times age)]$
Schumacher	$Y = a \times \exp(-b / age)$

$a$ 、 $b$ 、 $c$  为参数; $age$  为林分平均年龄。

1.3.2 地位级指数( $SCI$ ) 采用林分平均树高及林分平均年龄为自变量建立地位级指数方程,拟合得到样本地位级指数作为立地指标。

$$SCI = H \times \frac{1 - \exp(-c \times age_0)^b}{1 - \exp(-c \times age)^b}$$

式中, $H$  为林分平均树高; $age$  为林分平均年龄; $age_0$  为林分基准年龄; $b$ 、 $c$  为参数。

1.3.3 林分密度指数( $SDI$ ) 林分密度指数<sup>[15]</sup>是林分在标准平均胸径时所具有的单位面积的株数,即林木对其所占空间的利用程度,是森林生长的重要影响因子<sup>[16]</sup>。这一指标能综合反映平均胸径和株数的情况,且与立地条件和林龄不共线<sup>[17]</sup>。计算公式为:

$$SDI = N \times (D_g / D_0)^\alpha$$

式中, $N$  为林分密度(株,  $1 \text{ hm}^2$ ),  $D_g$  为林分现实平均胸径,  $D_0$  为林分标准平均胸径,  $\alpha$  为自然稀疏率。

### 1.3.4 林分生长模型

1.3.4.1 林分平均直径生长模型 对于生长未受干扰的天然林来说,结合林龄、地位级指数和林分密度指数 3 个自变量即可得到拟合效果良好的生长模型,实现天然林林分生长的预测<sup>[18]</sup>。将林龄、地位级指数和林分密度指数指标分别引入 Gompertz、Logistic、Mitscherlich 和 Schumacher 等 4 个常用生长曲线方程(表 4),得到林分平均直径生长模型。

表4 林分平均直径生长模型

Table 4 Growth model of stand average diameter

方程	模型表达式
Gompertz	$DBH = (a \times SCI^b) \times \exp(-c \times SDI^d) \times \exp(-e \times age)$
Logistic	$DBH = (a \times SCI^b) / (1 + c \times SDI^d \times \exp(-e \times age))$
Mitscherlich	$DBH = (a \times SCI^b) \times (1 - c \times SDI^d \times \exp(-e \times age))$
Schumacher	$DBH = (a \times SCI^b) \times \exp(-c \times SDI^d / age)$

$DBH$  为林分平均直径; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  为参数; $SCI$  为地位级指数; $SDI$  为林分密度指数; $age$  为林分平均年龄。

1.3.4.2 林分蓄积量生长模型 将林分平均年龄、地位级指数和林分平均直径作为基础变量引入 Gompertz、Logistic、Mitscherlich 和 Schumacher 等方程中,即可求得林分蓄积量生长模型(表 5)。

表5 林分蓄积量生长模型

Table 5 Growth model of stand storage

方程	模型表达式
Gompertz	$VOL = (a \times SCI^b) \times \exp(-c \times DBH^d) \times \exp(-e \times age)$
Logistic	$VOL = (a \times SCI^b) / (1 + c \times DBH^d \times \exp(-e \times age))$
Mitscherlich	$VOL = (a \times SCI^b) \times (1 - c \times DBH^d \times \exp(-e \times age))$
Schumacher	$VOL = (a \times SCI^b) \times \exp(-c \times DBH^d / age)$

$VOL$  为林分蓄积量; $DBH$  为林分平均直径; $SDI$  为林分密度; $SCI$  为地位级指数; $age$  为林分平均年龄; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $e$  为参数。

1.3.4.3 林分碳储量生长模型 根据张煜星等<sup>[19]</sup>模拟的云杉单位生物量与单位蓄积量回归模型,可将林分蓄积量转换为林分生物量,模型如下:



$$B_{\alpha} = 0.62VOL^{0.9844}$$

式中,  $B_{\alpha}$  为林分地上生物量;  $VOL$  为林分蓄积量。

根据张绘芳等<sup>[20]</sup>、朱雅丽等<sup>[21]</sup>等研究的云杉含碳系数, 可将林分生物量转换为林分碳储量, 即可得到林分碳储量生长模型:

$$CS = 0.4624 B_{\alpha} \times R$$

式中:  $CS$  为林分碳储量;  $R$  为林分含碳系数。

#### 1.4 精度验证

为了比较不同地位级导向曲线方程所建立的模型的预测精度, 选取了 5 个评价指标 (表 6), 分别为决定系数 ( $R^2$ )、估计值的标准差 ( $SEE$ )、总系统误差 ( $TRE$ )、平均系统误差 ( $MSE$ )、模型精度 ( $P$ ), 从不同维度对模型的预测精度进行检验。

表 6 模型精度验证方法

Table 6 Model accuracy verification method

精度指标	公式
决定系数 ( $R^2$ )	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$
估计值的标准差 ( $SEE$ )	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}$
总系统误差 ( $TRE$ )	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i} \times 100\%$
平均系统误差 ( $MSE$ )	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i \times 100\%$
模型精度 ( $P$ )	$\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n  y_i - \hat{y}_i }{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i}\right) \times 100\%$

$y_i$  为实测值;  $\hat{y}_i$  为模型估计值;  $\bar{y}$  为样本平均值;  $n$  为检验样本数;  $p$  为参数个数。

#### 1.5 碳汇潜力计算

当前关于中国森林碳汇潜力的研究较少, 评估方法也处于探索阶段, 不同学者对碳汇潜力的概念有着不同的定义。本研究将碳汇潜力定义为某一森林系统根据森林演替理论演替为顶级自然林时所达到的最大碳储量与现实碳储量之间的差值, 计算方法为:

$$CSC = CSC_{\max} - CSC_t$$

式中,  $CSC$  为潜在碳储量;  $CSC_{\max}$  为生态系统最大碳储量;  $CSC_t$  为现实碳储量。

## 2 结果与分析

### 2.1 林分因子计算结果

2.1.1 地位级导向曲线 由表 7 可知, 各方程拟合

精度差异不大, 本研究综合分析各方程拟合曲线发现, Gompertz 方程是具有初始值的典型“S”形单递增函数, 拐点约位于最大值的三分之一处, 在生物学工程中适用范围较广<sup>[22]</sup>; Logistic 方程是生物种群动态模拟中最常用的方程, 具有对称型“S”形生长曲线, 拐点约位于最大值的二分之一处, 适合用于描述慢生树种的生长趋势<sup>[23]</sup>; Mitscherlich 方程是单分子方程, 曲线无拐点, 形态接近肩形, 适合初期生长较快、无拐点树种的生长过程<sup>[24]</sup>; Schumacher 是 Korf 方程的特定形式, 是基于同龄纯林树木年均增长量的同比增长率与年龄呈反向相关的假设原理得出的方程, 其曲线存在 1 个拐点<sup>[25]</sup>。综上所述, 结合天山云杉的生长特点, 选取 Logistic 方程作为地位级指数导向曲线最终方程, 即:

$$Y = 28.014 / [1 + 8.774 \exp(-0.031age)]$$

表 7 地位级导向曲线拟合参数及精度

Table 7 Fitting parameters and accuracy of status level guide curve

曲线方程	表达式	$a$	$b$	$c$	$R^2$
Gompertz	$Y = a \times \exp[-b \times \exp(-c \times age)]$	29.880	3.069	0.020	0.769
Logistic	$Y = a / [1 + b \times \exp(-c \times age)]$	28.014	8.774	0.031	0.769
Mitscherlich	$Y = a \times [1 - b \times \exp(-c \times age)]$	36.616	1.122	0.009	0.765
Schumacher	$Y = a \times \exp(-b/age)$	41.465	72.132		0.762

$a$ 、 $b$ 、 $c$  为参数;  $age$  为林分平均年龄;  $R^2$  为决定系数。

2.1.2 地位级指数 基准年龄是指树高生长趋于稳定且能灵敏反映立地差异的年龄<sup>[26]</sup>。确定基准年龄通常考虑树种生活史平均年龄 (主伐年龄) 一半左右的年数, 或树高、林分蓄积量生长过程中连年生长量或平均生长量最大的时期<sup>[27]</sup>。取天山云杉主伐年龄 160 a 的一半 (80 a) 作为基准年龄, 将表 7 中 Logistic 方程的参数  $b$  和  $c$  带入地位级指数方程得到:

$$SCI = H \times \{ [1 - \exp(-0.031 \times 80)]^{8.774} / [1 - \exp(-0.031 \times age)]^{8.774} \}$$

式中,  $SCI$  为地位级指数,  $H$  为林分平均树高,  $age$  为林分平均年龄。

2.1.3 林分密度指数 选取天山云杉基准年龄的平均胸径作为标准平均胸径, 即  $D_0 = 24$  cm, 方程斜率 ( $\alpha$ ) 受不同树种影响很小, 因此借鉴方怀龙<sup>[17]</sup>的成果取 -1.605。最终得到林分密度指数计算公式:

$$SDI = N \times (D_g / 24)^{-1.605}$$

式中,  $SDI$  为林分密度指数,  $N$  为林分密度,  $D_g$  为林分平均胸径。

## 2.2 林分生长模型

2.2.1 林分平均直径生长模型 采用 SPSS 非参数回归模块,以地位级指数、林分密度指数和林龄为自变量,林分平均胸径为因变量,计算林分平均直径生长模型参数并验证模型精度。由表 8 可知,Gompertz 方程和 Schumacher 方程估计值的标准差、总系统误差、平均系统误差的绝对值均显著低于 Logistic 方程和 Mitscherlich 方程,且前两者模型精度( $P$ )均高于 85.000%,其中,Gompertz 方程的总相对误差较低而模型精度较高,因此选取 Gompertz 方程作为天山云杉平均直径生长模型,表达式为:

$$DBH = -1.095 \times SCI^{0.373} \times (-5.154 \times SDI^{-0.082}) \times \exp(0.004 \times age)$$

式中, $DBH$  为林分平均直径, $SCI$  为地位级指数, $SDI$  为林分密度指数, $age$  为林分平均年龄。

表 8 林分平均直径生长模型参数拟合及精度验证

Table 8 Parameter fitting and accuracy verification of stand average diameter growth model

参数及精度	曲线方程			
	Logistic	Gompertz	Mitscherlich	Schumacher
$a$	12.778	-1.905	4.148	-7.788
$b$	0.188	0.373	0.470	0.106
$c$	0.000	5.154	-224.942	-8.102
$d$	1.229	-0.082	-2.515	-0.064
$e$	0.004	-0.004	0.005	70.966
$R^2$	0.870	0.828	0.808	0.877
$SEE$	9.480	4.036	11.700	4.898
$TRE$	-40.488	8.006	-58.544	10.075
$MSE$	-35.247	8.539	-52.088	5.194
$P(\%)$	63.351	88.813	47.304	85.149

$a, b, c, d, e$  为参数; $R^2$  为决定系数; $SEE$  为估计值的标准差; $TRE$  为总系统误差; $MSE$  为平均系统误差; $P$  为模型精度。

2.2.2 林分蓄积量生长模型 采用 SPSS 非参数回归模块,以地位级指数、林分平均直径和林龄为自变量,以林分每公顷蓄积量为因变量,计算林分蓄积量

生长模型参数并验证模型精度。由表 9 可知,各生长曲线间误差和精度差异均不大,其中 Logistic 方程模型精度最高,Schumacher 方程的误差的绝对值最小。进一步分析 4 个方程的差异,可知 Logistic、Gompertz 和 Mitscherlich 方程和林分年龄相关的参数均过小,使得生长曲线不能反映林分蓄积量随林龄增长的变化趋势,导致曲线存在初始值过大而增长量过小的问题,而 Schumacher 方程曲线形态更符合林分生长过程,因此选取 Schumacher 方程作为天山云杉林分蓄积量生长模型,表达式为:

$$VOL = 0.668 \times SCI^{2.101} \times 0.652 \times DBH^{-0.018} \times \exp(-3.124/age)$$

式中, $VOL$  为林分蓄积量, $SCI$  为地位级指数, $DBH$  为林分平均直径, $age$  为林分平均年龄。

表 9 林分蓄积量生长模型参数拟合及精度验证

Table 9 Parameter fitting and accuracy verification of stand storage growth model

参数及精度	方程			
	Logistic	Gompertz	Mitscherlich	Schumacher
$a$	0.787	-16.133	-2.905	0.668
$b$	2.100	2.100	2.100	2.101
$c$	-1.000	41.024	8.388	0.652
$d$	-0.004	-0.002	-0.002	-0.018
$e$	0.000	0.000	0.000	3.124
$R^2$	0.895	0.895	0.895	0.895
$SEE$	13.080	13.102	13.070	13.006
$TRE$	-1.051	-1.111	-1.027	-0.293
$MSE$	-6.301	-6.362	-6.286	-5.943
$P(\%)$	89.397	89.391	89.392	89.082

$a, b, c, d, e$  为参数; $R^2$  为决定系数; $SEE$  为估计值的标准差; $TRE$  为总系统误差; $MSE$  为平均系统误差; $P$  为模型精度。

2.2.3 林分碳储量生长模型 根据张煜星等<sup>[19]</sup>、张绘芳等<sup>[20]</sup>、朱雅丽等<sup>[21]</sup>的研究成果,得到云杉林分碳储量生长模型:

$$CS = 0.4624 \times \{0.6200 \times [(0.6680 \times SCI^{2.1010} \times 0.6520 \times DBH^{-0.0180} \times \exp(-3.1240/age))]^{0.9844}\}$$

简化后得到:

$$CS = 0.1265 \times [SCI^{2.1010} \times DBH^{-0.0180} \times \exp(-3.1240/age)]^{0.9844}$$

式中, $CS$  为林分碳储量, $SCI$  为地位级指数, $DBH$  为林分平均直径, $age$  为林分平均年龄。

## 2.3 云杉碳汇潜力计算

以研究区森林资源二类调查数据为基础,提取研

研究区的乔木林地和疏林地小班数据并计算林分平均年龄、平均树高、平均胸径和林分密度等林分因子。由于地位级指数反映的是林木生长环境的综合条件<sup>[28]</sup>,所以在可预见的时间范围内不会产生大的变动。林分密度指数受林分自然更新和枯损影响。提取和分析 1996–2016 年 20 年间研究区 30 块固定复测样地数据,研究发现,林分的更新和枯损受自然和人为的各类因素影响,具有一定程度的随机性,与林分、林阶、树高、胸径等均无显著相关性。综上,保持立地指数和林分密度指数不变,以林分平均年龄为基础变量对研究区天山云杉碳汇潜力进行计算。

**2.3.1 林分碳汇增长量** 以新疆森林资源补充调查操作细则中规定的天山云杉过熟林下限 160 a 加天山云杉龄级期限 20 a 后(180 a)作为林分平均年龄极限。将研究区天山云杉的地位级指数以 4 为跨度分

为 8 级,再将林分密度指数以 400 为跨度分为 5 级,扣除 9 个无现实分布的空值后得到阶梯式分布的不同地位级指数和林分密度的林分类型共 31 个。基于林分碳储量生长模型,取每一级别的中值计算不同立地条件和林分密度下 0~180 a 林分碳密度年均增长量,结果见表 10。由表 10 可知,林分碳密度年均增长量主要受立地条件影响,在相同林分密度条件下,随着林分立地条件的变化,林分碳密度 0~180 a 年平均增长量为 0.020~0.641 t/(hm<sup>2</sup>·a);林分密度对林分碳密度年均增长量的影响较小,随着林分密度的增加,林分碳密度年均增长量略有提升,在立地条件较差的区域林分密度带来的影响可忽略不计。采用各林分面积结合各林分类型碳汇平均增长量加权平均求得研究区全域天山云杉林分碳密度年平均增长量为 0.299 t/(hm<sup>2</sup>·a),年均增长量拐点位于 30 a 处。

表 10 不同林分条件下碳密度年均增长量

Table 10 Average annual growth of carbon density under different stand conditions

地位级指数	不同林分密度下的碳密度年均增长量[t/(hm <sup>2</sup> ·a)]				
	<400.0 (株,1 hm <sup>2</sup> )	400.1~800.0 (株,1 hm <sup>2</sup> )	800.1~1 200.0 (株,1 hm <sup>2</sup> )	1 200.1~1 600.0 (株,1 hm <sup>2</sup> )	>1 600.1 (株,1 hm <sup>2</sup> )
4.0~8.0	0.020 1	—	0.020 2	0.020 2	0.020 2
8.1~12.0	0.055 7	0.055 8	0.055 9	0.055 9	0.055 9
12.1~16.0	0.109 1	0.109 2	0.109 3	0.109 4	0.109 4
16.1~20.0	0.180 1	0.180 4	0.180 5	0.180 6	0.180 7
20.1~24.0	0.268 9	0.269 3	0.269 5	0.269 6	—
24.1~28.0	0.375 3	0.375 8	0.376 1	0.376 3	—
28.1~32.0	0.499 3	0.500 1	0.500 4	—	—
>32.1	0.641 0	—	—	—	—

—表示在所对应地位级指数下,没有能够达到此林分密度的林分。

**2.3.2 林分未来时刻的碳汇预测** 由于研究区天山云杉林分年龄整体较大,林龄超过 120 a 的占比达到 80.00% 以上,即 60 a 后研究区大部分林分平均年龄将达到过熟林上限,因此选择预测 30 a 后和 60 a 后 2 个时间节点的碳储量。以实际调查时间为起始时间节点,采用林分碳储量生长模型对研究区天山云杉林分碳储量当前值、未来 30 a 和未来 60 a 的林分碳储量进行预测,得到结果分别为 3.439×10<sup>6</sup> t 碳、3.447×10<sup>6</sup> t 碳、3.450×10<sup>6</sup> t 碳,未来 30 a、未来 30~60 a 增长量分别为 8×10<sup>3</sup> t 碳、3×10<sup>3</sup> t 碳,涨幅分别为 0.233% 和 0.087%。

将林分平均年龄达到过熟林上限(180 a)时的森林碳储量作为森林最大碳容量,将森林最大碳容

量和林分当前时点森林碳容量之间的差值作为碳汇潜力,根据林分碳储量生长模型求得研究区天山云杉林分最大碳容量为 3.451×10<sup>6</sup> t 碳,碳汇潜力为 1.245×10<sup>4</sup> t 碳。

### 3 结论与讨论

本研究分别基于 Gompertz、Logistic、Mitscherlich 和 Schumacher 等 4 个常用生长曲线方程,采用林龄、平均树高、平均胸径和林分密度等构建林分蓄积量生长模型,通过生物量蓄积量回归模型和含碳系数建立林分碳储量生长模型。其中 Schumacher 方程曲线形态更贴合天山云杉生长状况,所构建模型的精度较高,误差绝对值最小,模型精度 89.082%,



估计值的标准差 13.006, 总系统误差-0.293, 平均系统误差-5.943, 决定系数 0.895, 表明所构建的林分碳储量生长模型具有较高的精度和稳定性, 可用于研究区林分碳汇潜力的估测。

以林分碳储量生长模型为基础计算出研究区天山云杉林分碳密度 0~180 a 年平均增长量为  $0.020 \sim 0.641 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 研究区全域天山云杉林分碳密度年平均增长量为  $0.299 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 年均增长量拐点位于 30 a 处。研究区全域天山云杉碳汇潜力为  $1.245 \times 10^4 \text{ t}$ ; 当前、未来 30 a 和未来 60 a 林分碳储量分别为  $3.439 \times 10^6 \text{ t}$  碳、 $3.447 \times 10^6 \text{ t}$  碳、 $3.450 \times 10^6 \text{ t}$  碳, 未来 30 a、未来 30~60 a 增长量分别为  $8 \times 10^3 \text{ t}$  碳、 $3 \times 10^3 \text{ t}$  碳, 涨幅分别为 0.233%、0.087%。研究区天山云杉成熟林、过熟林占比较高, 林分碳汇潜力低, 需进行林龄结构优化, 以促进天山云杉林的可持续发展。

本研究采用研究区天山云杉的林龄、平均树高、平均胸径和林分密度等数据, 建立了天山云杉的林分平均直径生长模型和林分蓄积量生长模型, 并通过天山云杉生物量和蓄积量回归模型、含碳系数的转换构建了天山云杉林分碳储量生长模型。相较于需要借助土壤特性、气候因子或生物量的其他碳潜力预测数学模型方法, 该方法利用现有林地资源调查数据中的主要调查因子即可实现, 在实际的林业工作中模型需要的数据具有易得性和普适性。相较于生物量清单法和样点法中普遍采用的以龄组划分作为时间间隔的模式, 林分生长模型法在时间序列上具有更精细的分辨率, 可以灵活地预测未来任意时刻的林分因子和碳储量并计算其碳汇潜力。

研究区天山云杉碳储量增长率和单位增长量都低于李奇等<sup>[29]</sup>和郑拴丽<sup>[30]</sup>研究中的平均水平。这主要是因为研究区天山云杉林分具有不尽合理的年龄结构, 森林资源二类调查数据显示, 天山云杉平均林分年龄小于 60 a 的幼龄林仅占总面积的 7.35%, 成熟林和过熟林占总面积的 80.00% 以上, 因此, 其碳储量增长率和单位增长量均较低。如果没有人工干预(择伐、更新、造林、抚育等), 在自然生长的情况下, 研究区天山云杉林分碳储量将很快到达最大值。

在对林分碳密度及其变化的分析中, 笔者发现林分碳密度年均增长量受立地条件的影响大而受林分密度的影响小。由于生态系统的承载力是有限

的, 在光照、水文、土壤等条件的约束下, 森林系统的生产能力、贮藏能力不可能无限制地增长, 在承载力一定的情况下, 林分密度如共享潜在生产力的分母, 分母越大, 每株单木所分享到的资源就越少, 其生长态势也随之由快到慢。从本研究中对碳密度年均增长量研究的部分也可以看出, 研究区林分密度越大的地方, 立地指数的分布区间就越低, 在立地指数最大的区域, 即同树种同林龄下树高最高的区域, 林分密度没有超过  $1 \text{ hm}^2$  400 株。最终在立地条件和林分密度的双重影响下, 出现了林分碳密度增长量随林分密度的增长呈现略微增加这一结果。

森林的可再生性, 即森林的更替, 是其一切潜力的来源。森林的碳汇潜力不仅与环境条件、森林质量有关, 更受到森林面积变化的影响。现有天山云杉林之外的区域是否适宜其更新、生长? 该适宜区面积、固碳潜力有多大? 这些将是下一步研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] 杨帆, 刘金山, 贺东北. 我国森林碳库特点与森林碳汇潜力分析[J]. 中南林业调查规划, 2012, 31(1): 1-4.
- [2] 李顺龙. 森林碳汇问题研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2006.
- [3] 颜士鹏. 应对气候变化森林碳汇国际法律机制的演进及其发展趋势[J]. 法学评论, 2011(4): 127-133.
- [4] 姜霞. 中国林业碳汇潜力和发展路径研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [5] 汲玉河, 郭柯, 倪健, 等. 安徽省森林碳储量现状及固碳潜力[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 395-404.
- [6] 周瑞伍, 彭明春, 张一平. 云南主要森林植被碳储量及固碳潜力模拟研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 1089-1103.
- [7] 李秀娟, 周涛, 何学兆. NPP 增长驱动下的中国森林生态系统碳汇[J]. 自然资源学报, 2009, 24(3): 491-497.
- [8] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2000-2050 年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 587-594.
- [9] 李斌, 方晰, 项文化, 等. 湖南省杉木林植被碳储量、碳密度及碳吸存潜力[J]. 林业科学, 2013, 49(3): 25-32.
- [10] 陈科宇, 字洪标, 阿的鲁骥, 等. 青海省森林乔木层碳储量现状及固碳潜力[J]. 植物生态学报, 2018, 42(8): 43-52.
- [11] 程德波. 巩留县志[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 2005.
- [12] 魏文寿, 袁玉江, 喻树龙, 等. 中国天山山区 235 a 气候变化及降水趋势预测[J]. 中国沙漠, 2008, 28(5): 803-808.
- [13] 赵洪壮, 李有利, 杨景春, 等. 基于 DEM 数据的北天山地貌形态分析[J]. 地理科学, 2009, 29(3): 445-449.



- [14] 张绘芳,冯鹏飞,高健,等. 2015-2018年西天山国家级自然保护区自然资源保护成效监测[J].林业科技通讯,2020(7):53-58.
- [15] REINEKE L H. Perfecting a stand-density index for even-agedforests[J]. Journal of Agricultural Research, 1933,46(7):627-638.
- [16] 张连金,惠刚盈,孙长忠. 不同林分密度指标的比较研究[J].福建林学院学报,2011,31(3):257-261.
- [17] 方怀龙. 现有林分密度指标的评价[J].东北林业大学学报,1995,23(4):100-105.
- [18] 杜纪山. 天然林分生长模型在小班数据更新中的应用[J].林业科学,2000,36(3):52-58.
- [19] 张煜星,王雪军. 全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究[J].中国科学:生命科学,51(2):199-214.
- [20] 张绘芳,高亚琪,李霞,等. 新疆西伯利亚云杉生物量模型研究[J].中南林业科技大学学报,2015,35(11):115-120.
- [21] 朱雅丽,高亚琪,张绘芳,等. 新疆西伯利亚云杉含碳系数分析[J].林业资源管理,2016(3):44-48.
- [22] 李俊. 南方集体林区典型林分类型结构特征及生长模型研究[D].长沙:中南林业科技大学,2012.
- [23] 石丽萍,冯仲科. 人工林生长与收获预测模型的基本方法[J].北京林业大学学报,2005,27(S2):222-225.
- [24] 许巧燕. 林分生长模型的构建与模拟[D].杭州:浙江农林大学,2015.
- [25] 戎建涛,何友均,应苗苗,等. 丹清河林场天然次生林林分蓄积量生长模型[J].西北林学院学报,2014,29(3):155-160.
- [26] 陈永富. 基准年龄立地质量评价的影响分析[J].林业科学研究,2010(2):283-287.
- [27] 潘俊忠. 理论生长方程建立林分平均树高生长模型比较研究[J].林业勘察设计,2019,39(4):21-24.
- [28] 丁良忱,刘萍. 天山中东部雪岭云杉林立地等级表的编制[J].新疆农业科学,1986(6):25.
- [29] 李奇,朱建华,冯源,等. 中国森林乔木林碳储量及其固碳潜力预测[J].气候变化研究进展,2018,14(3):287-294.
- [30] 郑拴丽. 新疆天山雪岭云杉和阿尔泰山西伯利亚落叶松生物量、碳储量及空间分布格局研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2016.

(责任编辑:陈海霞)