

我国 5 种主要人工林乔木层碳储量生长模型 及其气候驱动分析¹

曾伟生¹ 蒲莹¹ 杨学云¹ 易善军²

(1. 国家林业和草原局林草调查规划院 北京 100714;

2. 国家林业和草原局产业发展规划院 北京 100010)

摘要:【目的】研建我国 5 种主要人工林（杉木林、杨树林、桉树林、落叶松林、马尾松林）的乔木层碳储量生长模型，确定碳储量平均生长量最大时的林龄，分析固碳能力差异及其受气候因子的影响，为提升人工林碳汇能力和森林可持续经营决策提供科学依据。【方法】基于第九次全国森林资源清查 8 520 块样地的碳储量数据，采用非线性加权回归方法和可变参数模型，建立 5 种主要人工林的乔木层碳储量生长模型，分析年均气温、年均降水量对模型参数的影响，并比较 5 种人工林乔木层固碳能力的差异。【结果】所建立的 5 种主要人工林的乔木层碳储量生长模型，其平均预估误差 MPE 在 5% 以内，模型自检和独立交叉检验的总体相对误差 TRE 都在 3% 以内。落叶松林、马尾松林、杉木林、杨树林和桉树林的乔木层碳储量年均生长量最大时的林龄分别为 24、16、12、6 和 2 a，对应的年均生长量分别为 1.50、1.85、2.10、2.96 和 6.97 t·hm⁻²；马尾松、杉木、杨树和桉树人工林的碳储量最大平均生长量分别是落叶松人工林的 1.23、1.40、1.97 和 4.65 倍。利用建立的模型分析了乔木层碳储量受气候因子的影响：年均气温每下降 1 °C，杨树林、马尾松林、桉树林和落叶松林的碳储量年均生长量分别降低 7.6%、4.5%、4.4% 和 3.0%；年均降水量每减少 100 mm，落叶松林的碳储量年均生长量平均降低 5.8%，但杨树林和桉树林的碳储量年均生长量反而略呈增加趋势。【结论】我国 5 种主要人工林的乔木层固碳能力从高到低依次为桉树林、杨树林、杉木林、马尾松林、落叶松林，它们均不同程度地受到年均气温和年均降水量的影响，其中受影响最大的是杨树林，其次是落叶松林、马尾松林和桉树林，而杉木林受到的影响不显著。为发挥我国人工林的固碳潜力，应参考其碳储量生长过程合理确定经营周期，并在统筹区域发展基础上努力发展桉树和杨树人工林。

关键词: 碳储量；固碳能力；可变参数；生长模型；连年生长量；平均生长量；气候因子

中图分类号：S758.5

文献标识码：A

文章编号：

Growth Models and Its Climate-Driven Analysis of Carbon Storage in Tree Layers of Five Major Plantation Types in China

Zeng Weisheng¹ Pu Ying¹ Yang Xueyun¹ Yi Shanjun²

(1. Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration Beijing 100714;

2. Institute of Forestry Industry Development and Planning, National Forestry and Grassland Administration Beijing 100010)

Abstract: 【Objective】Developing growth models of carbon storage in tree layers for five major plantation types in China, i.e., Chinese fir, poplar, eucalyptus, larch, and Masson pine, determining the stand age with maximum average carbon growth, and analyzing difference of and climate effect on carbon sequestration capacity would provide scientific basis for increasing carbon

收稿日期：2022-01-18；修回日期：2023-03-05。

基金项目：国家自然科学基金项目（31770676）及国家财政专项“森林资源监测与评价”（2130207）。

*曾伟生为通讯作者。

sequestration capacity of plantations and decision-making of sustainable forest management. 【Method】 Based on the carbon storage data of 8 520 sample plots from the 9th national forest inventory of China, the growth models of carbon storage in tree layers for five major plantations were developed through using weighted nonlinear regression method and variable parameter model, the impacts of two climate factors, i.e., mean annual temperature (MAT) and precipitation (MAP), to model parameters were analyzed, and the difference of carbon sequestration capacity in tree layers among five plantations was compared. 【Result】 The mean prediction errors of growth models of carbon storage in tree layers for five types of plantations developed in this study are less than 5%, and total relative errors are all less than 3% for both calibration and cross-validation. The mean carbon growth of larch, Masson pine, Chinese fir, poplar, and eucalyptus plantations reach to the highest 1.50, 1.85, 2.10, 2.96, 6.97 t·hm⁻², respectively at 24, 16, 12, 6, and 2 years old of stand age. Comparison to larch plantation, the highest mean carbon growth in tree layers of Masson pine, Chinese fir, poplar and eucalyptus plantations are 1.23, 1.40, 1.97 and 4.65 times, respectively. The models were used to analyze the influence of climate factors on carbon storage in tree layers. The results showed that 1 °C decrease in MAT could result in 7.6%, 4.5%, 4.0% and 3.0% decrease of annual mean carbon growth for poplar, Masson pine, eucalyptus, and larch plantations, respectively; and 100 mm decrease in MAP could result in 5.8% decrease of annual mean carbon growth for larch plantation, but increase in some extent for poplar and eucalyptus plantations. 【Conclusion】 The carbon sequestration capacity in tree layers of major five types of plantations was successively eucalyptus, poplar, Chinese fir, Masson pine and larch, which was affected by MAT and MAP to varying degrees. The most significant effect is to poplar plantation, followed by larch, Masson pine and eucalyptus plantations, but there is no significant effect to Chinese fir plantation. To maximize the carbon sequestration potential of plantations in China, we need to determine reasonable management cycle referring to the growing process of carbon storage, and do efforts for developing eucalyptus and poplar plantations based on balancing regional development.

Key words: carbon storage; carbon sequestration capacity; variable parameter; growth model; annual growth; mean growth; climate factor

森林生态系统是陆地生态系统的主体，对维持全球生态平衡发挥着重要作用。为了应对全球性气候变化，森林固碳能力已成为关注焦点（刘魏魏等，2015；邹佳勇，2017；尹晶萍等，2021）。2021年10月，国务院印发了《2030年前碳达峰行动方案》，积极推进碳达峰碳中和行动，并已上升为国家战略。行动方案提出的十大行动中，与林业相关的就是“碳汇能力巩固提升行动”，特别强调要提升生态系统碳汇能力，加强生态系统碳汇基础支撑，要求利用好国家林草生态综合监测评价成果，开展森林、草原、湿地等方面碳储量评估和潜力分析。

森林碳汇潜力与森林生长息息相关。森林生长一般分单木和林分两种水平，研究单木生长的文献较多（励龙昌，1990；邱学清等，1992；任瑞娟等，2008；魏晓慧等，2012；刘强等，2014；刘四海等，2017），而研究林分生长的文献相对较少（亢新刚等，2001；魏占才，2006；马丰丰、贾黎明，2008；高东启等，2014）。近年来，随着森林生态功能日益受到关注，生物量和碳储量生长模型逐渐成为研究焦点（赵菡等，2017；何潇等，2019；薛春泉等，2019；曹磊等，2020；吴恒等，2021）。要评估森林碳汇潜力，就需了解不同森林类型尤其人工林的碳汇潜力。每种森林的碳汇潜力可由其生长过程来反映，因此研究我国主要人工林的碳储量生长过程具有重要现实意义。从文献资料来看，目前关于生物量和碳储量生长模型的研究仅限于省级尺度（赵菡等，2017；何潇等，2019；薛春泉等，2019；曹磊等，2020；吴恒等，2021），尚未见到全国尺度研究林分碳储量生长模型的文献。另外，由于应对气候变化已在全球达成共识，气候因子对森林生长的影响也已成为近年研究热点之一。多项研究表明，年均气温和年均降水量对林木生长及森林生产力有显著影响（Zeng *et al.*, 2017；曾伟生等，2019；Du *et al.*, 2021；Guo *et al.*, 2022）。因此，研究建立含气候因子的碳储量生长模型，分析不同气候因子对主要类型人工林碳储量生长模型的影响，可为气候变化背景下科学开展森林经营提供依据。

根据第九次全国森林资源清查结果，在全国人工林中，杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、杨树(*Populus* spp.)、桉树(*Eucalyptus* spp.)、落叶松(*Larix* spp.)和马尾松(*Pinus massoniana*)人工林面积居前5位，其合计面积和蓄积量均占全国人工林一半以上（国家林业和草原局，2019）。全国森林资源清查资料覆盖面广、代表性强、数据翔实，而且涉及地域广阔、气候类型多样，这为研建不同森林类型的宏观尺度碳储量生长模型、分析其固碳能力差异及气候因子影响提供了可能。本研究的主要目的是研建我国5种主要人工林（杉木林、杨树林、桉树林、落叶松林、马尾松林）的乔木层碳储量生长模型，确定碳储量平均生长量最大时的林龄，分析固碳能力差异及其受气候因子的影响，为提升人工林碳汇能力和森林可持续经营决策提供科学依据。研究内容包括：1）建立我国5种主要人工林的乔木层碳储量平均生长模型，确定连年

生长量和平均生长量最大时的林龄，对比其生长过程差异；2) 建立含气候因子的可变参数碳储量生长模型，分析主要气候因子对碳储量生长与乔木层固碳能力的影响。

1 研究方法

1.1 数据资料

本研究所用数据为第九次全国森林资源清查 5 种主要人工林的样地数据，共涉及 8 520 块样地，其中落叶松林 1 080 块，马尾松林 820 块，杉木林 2 730 块，杨树林 2 877 块，桉树林 1 013 块。样地为方形或矩形，面积 600~800 m²。根据每株样木的树种和胸径，采用一元立木生物量模型及碳计量参数 (LY/T 2263-2014; LY/T 2264-2014; LY/T 2654-2016; Zeng, 2020) 计算干、枝、叶、根生物量及碳储量，然后汇总到样地，再换算成每公顷乔木层碳储量 (未含林下灌木层、草本层、枯枝落叶层和土壤层碳储量)，以此作为建模的目标变量。碳储量生长模型的解释变量主要是林龄。5 种人工林建模变量的特征数见表 1。

多项研究 (Zeng *et al.*, 2017; 曾伟生等, 2019; Du *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2022) 表明，在众多气候因子中，年均降水量和年均气温对森林生长有显著影响，因此本研究也采用这两项气候因子。根据 1981—2015 年全国气象数据，经高斯克吕格插值，得到每块样地的年均降水量和年均气温数据。5 种人工林的气候因子变化范围见表 2。

表 1 5 种人工林建模变量的统计特征数^①
Tab. 1 Statistical characteristics of modeling variables for five plantation types

人工林类型 Plantation type	变量 Variable	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变动系数 Coefficient of variation(%)
落叶松 <i>Larix</i> spp.	碳储量 Carbon storage /(t·hm ⁻²)	0.1	129.2	33.8	25.6	75.9
	林龄 Stand age /a	5	59	24.8	12.3	49.5
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	碳储量 Carbon storage /(t·hm ⁻²)	0.0	134.5	37.7	26.1	69.3
	林龄 Stand age /a	3	60	24.4	11.2	46.0
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	碳储量 Carbon storage /(t·hm ⁻²)	0.0	130.4	29.7	23.8	79.8
	林龄 Stand age /a	3	54	17.0	10.2	59.9
杨树 <i>Populus</i> spp.	碳储量 Carbon storage /(t·hm ⁻²)	0.0	118.9	25.6	19.4	75.8
	林龄 Stand age /a	1	20	10.2	4.4	43.3
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	碳储量 Carbon storage /(t·hm ⁻²)	0.1	148.1	28.6	21.8	76.4
	林龄 Stand age /a	1	16	4.6	3.1	66.7

^①杨树林 20 a 以上、桉树林 16 a 以上的样地数量较少且数据缺乏规律性和代表性，故未采用。The plots of poplar plantation over 20 years and eucalyptus plantation over 16 years are small and lack regularity and representativeness, so they are not used.

表 2 5 种人工林的气候因子平均值及变化范围

Tab. 2 Mean and Range of climate factors for five plantation types

人工林类型 Plantation type	年均降水量 Mean annual precipitation /mm			年均气温 Mean annual temperature /°C		
	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	最小值 Minimum	最大值 Maximum
	落叶松 <i>Larix</i> spp.	568	257	1 223	7	0
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1 338	740	2 293	16	12	20
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1 449	694	2 222	17	10	22
杨树 <i>Populus</i> spp.	696	79	1 583	13	3	18
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	1 439	672	1 984	19	12	23

1.2 建模方法

基于前述 8 520 块样地的每公顷乔木层碳储量与林龄数据，首先利用非线性回归估计方法，按人工林类型分别建立总体平均碳储量生长模型；然后引入两项常用气候因子，建立可变参数模型 (骆期邦等，

1997; 曾伟生等, 1999, 2011; 曾伟生, 2013), 分析气候因子是否对生长模型参数有显著影响; 最后再比较不同人工林的乔木层碳储量生长过程和固碳能力差异及受主要气候因子的影响大小。

1.2.1 总体平均碳储量生长模型 具有“S”型曲线特征的理论生长方程能客观反映各种林木因子(胸径、树高、材积等)和林分因子(平均胸径、平均高、蓄积量、生物量、碳储量等)由慢到快再逐渐变慢的生长过程。在众多理论生长方程中, 以 Richards、Logistic 生长方程适用性最好、应用也最广(魏晓慧等, 2012; 刘四海等, 2017; 曹磊等, 2020), 初步对比分析结果也表明它们优于其他生长模型。因此, 本研究的碳储量生长模型选用这 2 个生长方程:

$$C = a \times [1 - \exp(-b \times t)]^c + \varepsilon \quad ; \quad (1)$$

$$C = a / [1 + b \times \exp(-c \times t)] + \varepsilon \quad . \quad (2)$$

式中: C 为单位面积的乔木层碳储量 ($t \cdot \text{hm}^{-2}$); t 为林龄 (a); a 、 b 、 c 为模型参数, 其相应的 P 值要小于 0.05, 否则视为无统计学意义并应从模型中剔除; ε 为误差项, 假定其服从均值为 0 的正态分布。采用非线性回归估计方法求解模型参数。因碳储量数据与蓄积量类似, 具有异方差性, 求解模型参数时不能采用普通回归, 而应采用加权回归估计方法(曾伟生等, 1999, 2011; 曾伟生, 2013)。

1.2.2 含气候因子的可变参数模型 为了分析气候因子对碳储量生长模型的影响, 在总体平均模型(1 或 2)的基础上, 进一步增加气候因子作为模型解释变量。由于气候因子都属于定量因子, 常用的哑变量建模方法(Zeng *et al.*, 2011; 曾伟生等, 2011)和混合模型方法(曾伟生等, 2011; 符利勇等, 2011)并不适用, 本研究采用可变参数模型方法来建立含气候因子的乔木层碳储量生长模型。以 Richards 生长方程为例, 其可变参数模型表达式如下:

$$C = (a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2) \times \{1 - \exp[-(b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2) \times t]\}^{(c_0 + c_1 x_1 + c_2 x_2)} + \varepsilon \quad . \quad (3)$$

式中: x_1 、 x_2 分别表示年均降水量(以 100 mm 为单位参与建模)和年均气温(以 10°C 为单位参与建模), a_0 、 b_0 、 c_0 为固定参数, a_1 、 b_1 、 c_1 为 x_1 的可变参数, a_2 、 b_2 、 c_2 为 x_2 的可变参数。采用非线性回归估计方法求解模型参数(唐守正等, 2009)。同样, 为消除异方差的影响, 采用求解(1)式时的权函数对(3)式进行转换后再估计模型参数。

1.2.3 模型评价检验 采用确定系数 R^2 、估计值的标准差 SEE、总体相对误差 TRE 和平均预估误差 MPE(曾伟生等, 2011; Zeng *et al.*, 2017) 4 项指标评价模型。其中, TRE 和 MPE 的计算公式如下:

$$\text{TRE} = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)}{\sum \hat{y}_i} \times 100 \quad ; \quad (4)$$

$$\text{MPE} = t_\alpha \times (\text{SEE} / \bar{y}) / \sqrt{n} \times 100 \quad . \quad (5)$$

式中: y_i 为实际调查值; \hat{y}_i 为模型预估值; \bar{y} 为样本平均值; n 为样地数; t_α 为置信水平 α 时的 t 值。对所建碳储量生长模型计算以上 4 项指标, 根据指标值大小进行模型评价。

模型检验采用 5 折法, 即: 将样本机械或随机等分成 5 份, 用其中 4 份建模, 另外 1 份检验。根据 5 份样本的检验结果, 按(4)式计算总体相对误差; 如果在允许误差范围之内, 表明模型是适用的。

1.2.4 模型特性分析 所建 5 种主要人工林的乔木层碳储量生长模型反映了现实林分的总体平均生长过程。根据生长方程的特性, (1) 和 (2) 式的拐点林龄(即连年生长量最大的林龄)分别为:

$$t^* = 1/b \times \ln c \quad ; \quad (6)$$

$$t^* = 1/c \times \ln b \quad . \quad (7)$$

式中: t^* 为拐点林龄 (a); b 、 c 分别为 (1)、(2) 式中的模型参数。基于所建生长模型, 绘制乔木层碳储量的连年生长和平均生长曲线, 对比分析不同类型人工林的固碳能力差异。再根据模型 (3) 中可变参数的大小, 分析年均气温和年均降水量这两项气候因子对各类人工林生长的影响程度。

2 结果与分析

2.1 总体平均生长模型拟合结果

利用 5 种主要人工林样地的乔木层碳储量数据，采用非线性加权回归方法拟合生长模型（1）和（2），其拟合结果和评价指标见表 3。拟合碳储量生长模型时采用的权函数为 $1/t$ 。

从表 3 可看出，由于采用了空间换时间的方法，将不同地点不同林龄的林分视为相同林分不同生长阶段，所以碳储量生长模型的确定系数 R^2 较低，拟合效果最好的落叶松林模型（1）也只有 0.420，最差的杨树林模型（2）只有 0.206。杨树林模型相对较差，主要是涉及的树种和品种太多。但本研究目标是模拟宏观尺度的总体平均生长过程（图 1、2），并不过多关注单个样地数据的离散程度。从两项误差指标看，总体相对误差 TRE 都在 $\pm 5\%$ 以内，平均预估误差 MPE 也都在 5% 以内，因此效果是良好的。如果将相同林龄的样地取平均数再建模，5 种人工林的碳储量生长模型（1）的确定系数可提高到 0.823~0.970。从模型（1）和（2）的对比看，（1）式好于（2）式，尤其是 TRE 相差更明显。因此，后续含气候因子的可变参数模型均以（1）式的 Richards 模型为基础。根据 5 折法交叉检验结果，基于（1）式建立的落叶松林、马尾松林、杉木林、杨树林、桉树林的碳储量生长模型，其 TRE 值分别为 0.62%、0.96%、0.40%、-0.07%和-0.54%，与表 3 中的 TRE 值相比差异很小，说明所建模型参数稳定，效果良好。后面含气候因子的可变参数模型不再进行 5 折法交叉检验。

表 3 模型（1）和（2）的参数估计值和评价指标

Tab. 3 Parameter estimates and evaluation indices of models (1) and (2)

人工林类型 Plantation type	模型 Model	参数估计值 Parameter estimates			评价指标 Evaluation indices			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2	SEE ($t \cdot \text{hm}^{-2}$)	MPE (%)	TRE (%)
落叶松 <i>Larix</i> spp.	(1)	66.114	0.059 526	2.2 248	0.420	19.55	3.47	0.56
	(2)	51.097	19.329	0.16 633	0.391	20.02	3.56	2.73
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	(1)	55.446	0.083 625	2.0 604	0.287	22.08	4.05	0.96
	(2)	45.577	18.167	0.22 957	0.254	22.59	4.14	4.04
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	(1)	53.059	0.092 661	1.8 710	0.381	18.69	2.37	0.40
	(2)	44.136	15.178	0.25 276	0.367	18.91	2.39	2.54
杨树 <i>Populus</i> spp.	(1)	39.347	0.17 149	1.8 018	0.215	17.20	2.46	0.40
	(2)	33.026	12.974	0.44 264	0.206	17.30	2.51	1.81
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	(1)	67.640	0.14 701	1.1 550	0.297	18.31	3.94	-0.45
	(2)	42.016	15.030	0.99 991	0.293	18.37	4.13	4.60

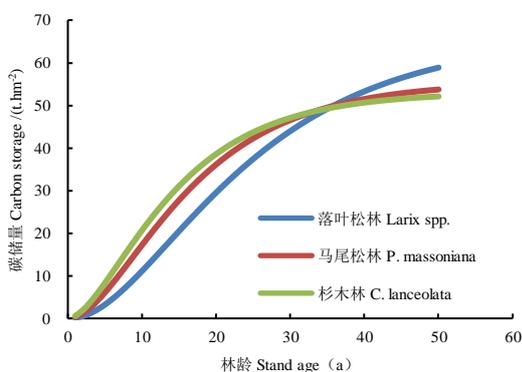


图1 3种人工针叶林的乔木层碳储量平均生长过程

Fig. 1 The average growing process of carbon storage in tree layers for three coniferous plantation types

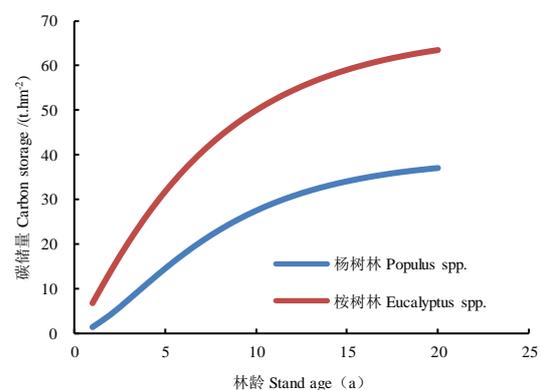


图2 2种人工阔叶林的乔木层碳储量平均生长过程

Fig. 2 The average growing process of carbon storage in tree layers for two broadleaved plantation types

4.4 研究结论与讨论

在总体平均生长模型（1）的基础上，引入年均降水量和年均气温，近似以线性方式作用于各模型参数，建立可变参数模型（3）。结果表明：对杉木人工林模型，2项气候因子均无显著影响；对马尾松人工林模型，仅年均气温对参数 c 有显著影响；对桉树人工林模型，2项气候因子对参数 b 均有显著影响；对杨树人工林模型，2项气候因子对参数 b 均有显著影响，且年均气温对参数 a 也有显著影响；对落叶松人工林模型，年均降水量对3个参数都有显著影响，而年均气温对参数 a 、 b 有显著影响。模型（3）的拟合结果见表4，其评价指标见表5。可以看出，除杉木人工林的各项评价指标值与模型（1）完全一致外，其他4个树种的人工林可变参数模型（3）均比总体平均模型（1）有所改进。

表 4 模型（3）的参数估计值

Tab. 4 Parameter estimates of models (3)

人工林类型 Plantation type	固定参数Constant parameter			可变参数Variable parameter					
	a_0	b_0	c_0	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2
落叶松 <i>Larix</i> spp.	69.041	0	0	-	28.354	0.19	-0.04	5.2	0
				40.976		433	374	510	
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	53.171	0.10	8.6	0	0	0	0	0	-3.3
		700	018						535
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	53.059	0.09	1.8	0	0	0	0	0	0
		266	710						
杨树 <i>Populus</i> spp.	5.0	0.08	2.0	0	27.642	-0.07	0.11	0	0
	416	693	162			238	705		
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	67.640	0.02	1.1	0	0	-0.01	0.07	0	0
		511	550			714	911		

表 5 模型（3）的评价指标

Tab. 5 Evaluation indices of models (3)

人工林类型 Plantation type	评价指标 Evaluation indices			
	R^2	SEE ($t \cdot hm^{-2}$)	MPE (%)	TRE (%)
落叶松 <i>Larix</i> spp.	0.469	18.72	3.34	1.14
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.293	22.01	4.04	1.10
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.381	18.69	2.37	0.40
杨树 <i>Populus</i> spp.	0.325	15.96	2.29	0.99
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	0.310	18.14	3.89	1.23

2.3 不同类型人工林的乔木层固碳能力比较

对表3中的乔木层碳储量生长模型（1）进一步对比分析可知，落叶松林的拐点林龄约为14 a，此时连年生长量达到最大值 $1.89 t \cdot hm^{-2}$ ；马尾松林的拐点林龄约为 9 a，连年生长量的最大值为 $2.29 t \cdot hm^{-2}$ ；杉木林的拐点林龄约为 7 a，连年生长量的最大值为 $2.52 t \cdot hm^{-2}$ ；杨树林的拐点林龄约为 4 a，连年生长量的最大值为 $3.52 t \cdot hm^{-2}$ ；桉树林的拐点林龄约为 2 a，连年生长量的最大值为 $7.15 t \cdot hm^{-2}$ （图3）。落叶松林、马尾松林、杉木林、杨树林和桉树林平均生长量达到最大时的林龄分别为24、16、12、6和2 a，对应的平均生长量分别为 1.50 、 1.85 、 2.10 、 2.96 和 $6.97 t \cdot hm^{-2}$ （图4）。如果以碳储量的最大平均生长量作为固碳能力的评定依据，5种主要人工林的固碳能力以桉树林最高，杨树林次之，然后是杉木林和马尾松林，最后为落叶松林。若以落叶松人工林作为对比基础，则马尾松、杉木、杨树和桉树人工林的固碳能力分别为它的1.23、1.40、1.97和4.65倍。如果按相同林龄的乔木层碳储量平均生长量进行对比，则不同人工林类型之间的差距会随林龄增大而缩小（表6）。这一结果表明：不同区域的人工林类型其固碳能力差异很大，最大差异可达4倍以上；同一类型的人工林应依据乔木层碳储量平均生长量达到最大时的林龄合理确

定经营周期。因此，为发挥我国人工林的最大碳汇潜力，统筹区域发展和开展科学经营都至关重要。

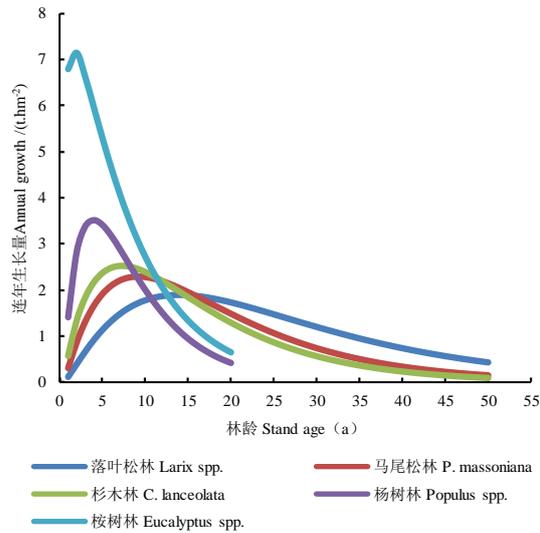


图3 5种人工林乔木层碳储量连年生长曲线
Fig. 3 The annual carbon growth curves in tree layers for five types of plantation

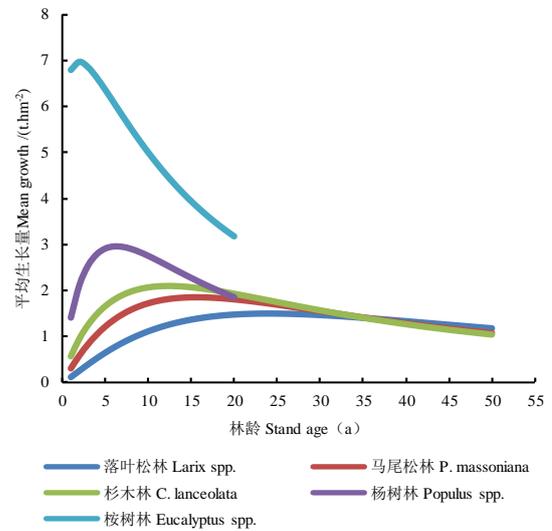


图4 5种人工林乔木层碳储量平均生长曲线
Fig. 4 The average carbon growth curves in tree layers for five types of plantation

表 6 5种人工林类型不同林龄时的乔木层碳储量年均生长量对比

Tab. 6 Comparison of average carbon growth on different ages in tree layers for five plantation types

人工林类型 Plantation type	年均生长量 Average carbon growth / (t·hm ⁻²)					最大值 Maximum
	5	10	15	20		
落叶松 <i>Larix</i> spp.	0.65	1.11	1.37	1.48	1.50	
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	1.21	1.72	1.85	1.81	1.85	
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	1.66	2.07	2.07	1.93	2.10	
杨树 <i>Populus</i> spp.	2.91	2.75	2.27	1.85	2.96	
桉树 <i>Eucalyptus</i> spp.	6.36	5.00	4.13	3.18	6.97	

2.4 气候因子对乔木层固碳能力的影响分析

对表4中含气候因子的可变参数乔木层碳储量生长模型(3)作进一步对比分析可知，除杉木林碳储量生长过程不受2项气候因子显著影响外，其他4种人工林的碳储量生长过程都不同程度地受到年均气温和年均降水量的影响。

2.4.1 马尾松林 碳储量生长过程受年均降水量影响不显著，但受年均气温影响显著，气温越高固碳能力就越强。根据表2中马尾松林样地的年均气温范围，划分高(18~20℃)、中(15~17℃)、低(12~14℃)3种场景，其碳储量平均生长量达到最大时的林龄分别为13、19、22 a，对应的平均生长量分别为2.16、1.78、1.58 t·hm⁻²，这相当于年均气温每降低1℃，固碳能力平均降低约4.5%。3种气候场景下的马尾松林生长过程见图5。

2.4.2 落叶松林 碳储量生长过程均受年均气温和年均降水量的显著影响。若按气温高(11~15℃)、中(6~10℃)、低(0~5℃)和降水量多(901~1220 mm)、中(571~900 mm)、少(250~570 mm)划分9种场景进行分析，则高温多雨场景的生产力最高，其平均生长量达到最大时的林龄为19 a，对应平均生长量为2.35 t·hm⁻²；随着气温降低或降水减少，落叶松人工林的生产力逐渐下降，低温多雨和高温少雨2种场景的最大平均生长量分别为1.60和0.78 t·hm⁻²，说明降水量影响更大。大体相当

于年均气温每下降1℃，固碳能力平均降低约3.0%；年均降水量每减少100mm，固碳能力平均降低约10.3%。高温多雨、中温多雨、低温多雨3种气候场景下的落叶松人工林乔木层碳储量生长过程见图6。

2.4.3 杨树林 碳储量生长过程均受年均气温和年均降水量的显著影响。若按气温高（13~18℃）、中（8~12℃）、低（3~7℃）和降水量多（1081~1580mm）、中（581~1080mm）、少（80~580mm）划分9种场景进行分析，则高温少雨场景的生产力最高，其平均生长量达到最大时的林龄为6a，对应平均生长量为4.43t·hm⁻²。随着气温降低，落叶松人工林的生产力显著下降，低温少雨场景的最大平均生长量仅为0.89t·hm⁻²，大体相当于年均气温每下降1℃，固碳能力平均降低约6.7%；而随着降水增多，落叶松人工林的生产力反而略有降低，高温多雨场景的最大平均生长量为3.04t·hm⁻²，大体相当于年均降水量每增加100mm，固碳能力平均降低约3.1%。这可能与杨树林生长环境有关，因为一般都栽植在平原地区，其生长不同程度地依靠地下水或农田灌溉。高温少雨、中温少雨、低温少雨3种气候场景下人工杨树林的乔木层碳储量生长过程见图7。

2.4.4 桉树林 碳储量生长过程均受年均气温和年均降水量的显著影响。若按气温高（20~23℃）、中（16~19℃）、低（12~15℃）和降水量多（1541~1980mm）、中（1101~1540mm）、少（670~1100mm）划分9种场景进行分析，则高温少雨场景的生产力最高，其平均生长量最大时的林龄为2a，对应平均生长量为8.49t·hm⁻²。随着气温降低，桉树人工林生产力会逐渐下降，低温少雨场景的最大平均生长量为5.52t·hm⁻²，大体相当于年均气温每下降1℃时固碳能力平均降低约4.4%；而随着降水增多，桉树人工林生产力与杨树类似地略有降低，高温多雨场景的最大平均生长量为8.01t·hm⁻²，大体相当于年均降水量每增加100mm时固碳能力平均降低约0.9%。降水对桉树人工林固碳能力有一定影响，但影响程度比杨树林小得多。高温少雨、中温少雨、低温少雨3种场景下桉树人工林的乔木层碳储量生长过程见图8。

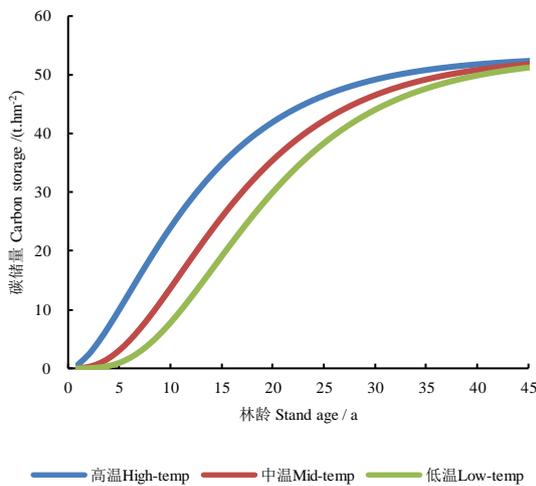


图5 马尾松人工林3种气候场景下乔木层碳储量生长过程

Fig. 5 The growing process of carbon storage in tree layers of *Pinus massoniana* plantation under three climate scenarios

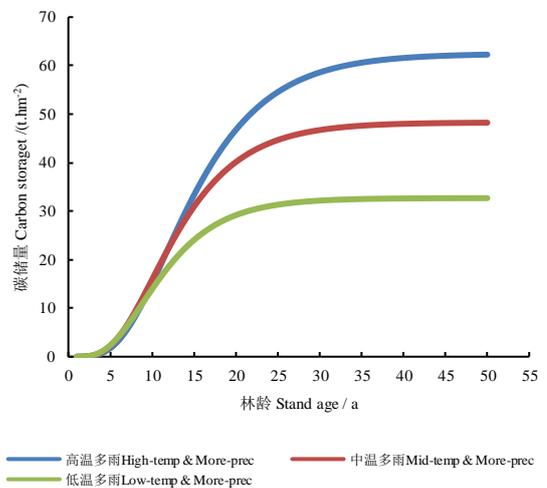


图6 落叶松人工林3种气候场景下乔木层碳储量生长过程

Fig. 6 The growing process of carbon storage in tree layers of *Larix* spp. plantation under three climate scenarios

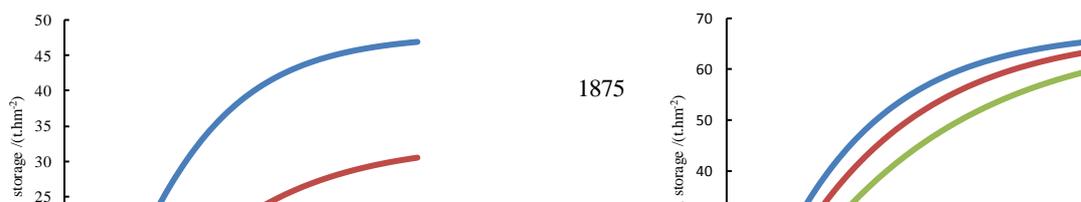


图7 杨树人工林3种气候场景下
乔木层碳储量生长过程

Fig. 7 The growing process of carbon storage in tree layers of *Populus* spp. plantation under three climate scenarios

图8 桉树人工林3种气候场景下
乔木层碳储量生长过程

Fig. 8 The growing process of carbon storage in tree layers of *Eucalyptus* spp. plantation under three climate scenarios

3 讨论

本研究采用我国森林资源连续清查中 5 种主要人工林的全部样地数据作为建模样本，在全国尺度上具有足够代表性，能客观反映不同人工林的现实平均固碳能力和差异，对指导我国人工林考虑碳汇能力的发展布局具有现实意义。由于采用的是空间换时间的宏观尺度分析方法，没有考虑中观尺度立地特征和微观尺度林分结构的影响，所建碳储量生长模型的确定系数 R^2 偏小。如果将相同林龄的样地取平均数再建模，5 种人工林的碳储量生长模型（1）的确定系数可从目前的 0.206~0.420 分别提高到 0.823~0.970。本研究的主要目的是从全国宏观尺度评估各类人工林的现实固碳能力差异及其对主要气候因子的响应，因此只建模反映了总体平均状况变化。结果显示，5 种主要人工林的乔木层碳储量生长模型的平均预估误差 MPE 都在 5% 以内，总体相对误差 TRE 都在 3% 以内，说明效果良好。

从年均气温和年均降水量这 2 项主要气候因子对碳储量生长模型的影响看，本研究结果与相关研究（Zeng *et al.*, 2017; 曾伟生等, 2019）基本一致。可变参数的设计采用了多元线性关系，这也是最常用的结构形式（骆期邦等, 1997; 曾伟生等, 1999, 2011; 曾伟生, 2013）。本研究将全部数据按年均气温和年均降水量分 3 个或 9 个分区进行了建模对比，发现其变化规律与可变参数模型拟合结果是一致的。如马尾松林按 3 个气温分区建模的参数 c 与年均气温的线性相关指数达到 0.80，杨树林按 9 个气温分区建模的参数 b 与年均气温的线性相关指数达到 0.87。如果需要分析气候因子与立地因子的共同影响，可参考赵茵等（2017）的成果作进一步研究。若将生长模型的研究尺度从宏观逐渐深入到中观和微观，则不仅要考虑立地因子，还要考虑林分结构因子。而且不同尺度的模型，考虑的影响因子是不一样的。宏观尺度主要考虑气温、降水等气候因子，中观尺度主要考虑地形、地貌、土壤等立地因子，微观尺度主要考虑结构、竞争等林分因子。将不同尺度的影响因子全部纳入同一个模型几乎是不现实的，因为很难获取符合条件的大量数据来支撑建模。

另外，由于杨树林和桉树林涉及树种和品种太多（如：杨树包括白杨、青杨、大叶杨、意杨、加拿大杨等；桉树包括巨桉、蓝桉、尾叶桉、细叶桉等很多品种），根据样地数按林龄的分布情况，杨树林 20 a 以上、桉树林 16 a 以上的样地数量较少且数据缺乏规律性和代表性，故未纳入本次建模数据范围。如果需要研究超过这个林龄的杨树林和桉树林的碳储量生长过程，则应当进一步从其他途径收集和补充样地数据。

需要补充说明的是，由于森林资源清查样地中存在森林抚育、采伐等经营活动，各类人工林样地中的乔木层碳储量肯定要少于整个生长过程的固碳总量。因此，本研究所建乔木层碳储量生长模型反映的

年均生长量或固碳能力应当会比实际值低一些。

4 结论

1) 本研究建立了反映年均降水量和气温影响的我国 5 种主要人工林的乔木层碳储量生长模型, 其平均预估误差 MPE 都在 5% 以内, 模型自检和独立交叉检验的总体相对误差 TRE 都在 3% 以内, 客观反映了 5 种人工林乔木层碳储量的总体平均生长过程。

2) 年均气温和年均降水量对 5 种主要人工林的乔木层碳储量生长过程和固碳能力有不同程度的影响。气候因子影响最大的是杨树林, 其次是落叶松林、马尾松林和桉树林, 而对杉木林则没有显著影响。

3) 我国 5 种主要人工林的乔木层平均固碳能力以桉树林最高, 杨树林次之, 然后是杉木林和马尾松林, 最后为落叶松林。若以落叶松林乔木层碳储量最大年均生长量作对比基础, 马尾松林、杉木林、杨树林和桉树林的固碳能力分别为落叶松林的 1.23、1.40、1.97 和 4.65 倍。为了发挥我国人工林固碳潜力, 在合理确定经营周期时应考虑不同类型人工林乔木层碳储量随林龄的变化规律, 并在统筹区域发展基础上努力发展桉树林和杨树林。

参 考 文 献

- 曹 磊, 刘晓彤, 李海奎, 等. 2020. 广东省常绿阔叶林生物量生长模型. 林业科学研究, 33(5): 61-67.
(Cao L, Liu X T, Li H K, *et al.* 2020. Biomass growth models for evergreen broad-leaved forests in Guangdong. Forest Research, 33(5): 61-67. [in Chinese])
- 符利勇, 曾伟生, 唐守正. 2011. 利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响. 生态学报, 31(19): 5797-5808.
(Fu L Y, Zeng W S, Tang S Z. 2011. Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic masson pine using mixed model. Acta Ecologica Sinica, 31(19): 5797-5808. [in Chinese])
- 高东启, 邓华锋, 王海宾. 2014. 基于哑变量的蒙古栎林分生长模型. 东北林业大学学报, 42(1): 61-64.
(Gao D Q, Deng H F, Wang H B. 2014. Dummy variables models in *Quercus mongolia* growth. Journal of Northeast Forestry University, 42(1): 61-64. [in Chinese])
- 国家林业和草原局. 2019. 中国森林资源报告(2014-2018). 北京: 中国林业出版社, 26-29.
(National Forestry and Grassland Administration. 2019. China forest resources report (2014-2018). Beijing: China Forestry Publishing House, 26-29. [in Chinese])
- 国家林业局. 2014a. 立木生物量模型及碳计量参数——马尾松(LY/T 2263-2014). 北京: 中国标准出版社.
(State Forestry Administration. 2014a. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Pinus massoniana* (LY/T 2263-2014). Beijing: China Standard Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2014b. 立木生物量模型及碳计量参数——杉木(LY/T 2264-2014). 北京: 中国标准出版社.
(State Forestry Administration. 2014b. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Cunninghamia lanceolata* (LY/T 2264-2014). Beijing: China Standard Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2016. 立木生物量模型及碳计量参数——落叶松(LY/T 2654-2016). 北京: 中国标准出版社.
(State Forestry Administration. 2016. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Larix* (LY/T 2654-2016). Beijing: China Standard Press. [in Chinese])
- 何 潇, 雷渊才, 薛春泉, 等. 2019. 广东省木荷碳密度及其不确定性估计. 林业科学, 55(11): 163-171.
(He X, Lei Y C, Xue C Q, *et al.* 2019. Carbon density uncertainty estimates for *Schima superba* in Guangdong Province. Scientia Silvae Sinicae, 55(11): 163-171. [in Chinese])
- 亢新刚, 崔相慧, 王 虹. 2001. 冀北次生林 3 个树种林分生长过程表的编制. 北京林业大学学报, 23(3): 39-42.
(Kang X Q, Cui X H, Wang H. 2001. Compilation of stand growth table for 3 tree species of secondary forest in north Hebei Province. Journal of Beijing Forestry University, 23(3): 39-42. [in Chinese])
- 励龙昌. 1990. 以潜能函数建立单木生长模型. 东北林业大学学报, 18(4): 22-28.
(Li L C. 1990. Construct individual tree growth model based on potential function. Journal of Northeast Forestry University, 18(4): 22-28. [in Chinese])
- 刘 强, 李凤日, 董利虎. 2014. 基于树冠竞争因子的落叶松人工林单木生长模型. 植物研究, 34(4): 547-553.
(Liu Q, Li F R, Dong L H. 2014. Individual tree growth model of larch plantation based on crown competition factors. Bulletin of Botanical Research, 34(4): 547-553. [in Chinese])
- 刘四海, 曾伟生. 2017. 马尾松宏观尺度的单木生长模型研究. 林业资源管理, (2): 28-33.
(Liu S H, Zeng W S. 2017. Large-scale individual tree growth models for *Pinus massoniana* in China. Forest Resources Management, (2): 28-33. [in Chinese])
- 刘魏魏, 王效科, 逯 非, 等. 2015. 全球森林生态系统碳储量、固碳能力估算及其区域特征. 应用生态学报, 26(9): 2881-2890.

- (Liu W W, Wang X K, Lu F, *et al.* 2015. Regional and global estimates of carbon stocks and carbon sequestration capability in forest ecosystems: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(9):2881-2890. [in Chinese])
- 骆期邦,曾伟生,彭长清. 1997. 可变参数相对树高曲线模型及其应用研究. *林业科学*, 33(3): 202-211.
- (Luo Q B, Zeng W S, Peng C Q. 1997. Variable relative tree height curve model and its application in tree volume estimation. *Scientia Silvae Sinicae*, 33(3): 202-211. [in Chinese])
- 马丰丰,贾黎明. 2008. 林分生长和收获模型研究进展. *世界林业研究*, 21(3):21-27.
- (Ma F F, Jia L M. 2008. Advances in the researches of stand growth and yield model. *World Forestry Research*, 21(3):21-27. [in Chinese])
- 邱学清,江希钿,黄健儿,等. 1992. 杉木人工林竞争指数及单木生长模型的研究. *福建林学院学报*, 12(3):309-316.
- (Qiu X Q, Jiang X D, Huang J E, *et al.* 1992. Study of competitive index and individual growing model of Chinese fir plantation. *Journal of Fujian College of Forestry*, 12(3):309-316. [in Chinese])
- 任瑞娟,亢新刚,杨 华. 2008. 天然林单木生长模型研究进展. *西北林学院学报*, 23(6):203-206.
- (Ren R J, Kang X G, Yang H. 2008. Review on growth model of individual tree in nature forest. *Journal of Northwest Forestry University*, 23(6):203-206. [in Chinese])
- 唐守正,郎奎建,李海奎. 2008. 统计和生物数学模型计算(ForStat 教程). 北京: 科学出版社.
- (Tang S Z, Lang K J, Li H K. 2008. Statistics and computation of biomathematical models (ForStat tutorial). Beijing: Science Press. [in Chinese])
- 魏晓慧,孙玉军,马 炜. 2012. 基于 Richards 方程的杉木树高生长模型. *浙江农林大学学报*, 29(5): 661-666.
- (Wei X H, Sun Y J, Ma W. 2012. A height growth model for *Cunninghamia lanceolata* based on Richards equation. *Journal of Zhejiang A & F University*, 29(5):661-666. [in Chinese])
- 魏占才. 2006. 长白落叶松人工林分模型的应用. *东北林业大学学报*, 34(4):31-33.
- (Wei Z C. 2006. Application of stand models of *Larix olgensis* plantations. *Journal of Northeast Forestry University*, 34(4):31-33. [in Chinese])
- 吴 恒,胥 辉. 2021. 四川省主要乔木林类型碳汇速率及储量动态分析. *林业资源管理*, (5): 47-55.
- (Wu H, Xu H. 2021. Carbon sequestration rate and dynamic analysis of main arbor forest types in Sichuan province. *Forest Resources Management*, (5): 47-55. [in Chinese])
- 薛春泉,徐期瑚,林丽平等. 2019. 广东主要乡土阔叶树种含年龄和胸径的单木生物量模型. *林业科学*, 55(2):97-108.
- (Xue C Q, Xu Q H, Lin L P, *et al.* 2019. Biomass models with breast height diameter and age for main native tree species in Guangdong Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(2):97-108. [in Chinese])
- 尹晶萍,张煜星,付 尧,等. 2021. 中国碳排放与森林植被碳吸收潜力研究. *林业资源管理*, (3): 53-61.
- (Yin J P, Zhang Y X, Fu Y, *et al.* The research of carbon emission and carbon sequestration potential of forest vegetation in China. *Forest Resources Management*, (3):53-61. [in Chinese])
- 曾伟生. 2013. 加权回归估计中不同权函数的对比分析. *林业资源管理*, (5):55-61.
- (Zeng W S. 2013. Comparison of different weight functions in weighted regression. *Forest Resources Management*, (5):55-61. [in Chinese])
- 曾伟生,陈新云,杨学云. 2019. 我国人工杨树的生物量建模和生产力分析. *林业科学*, 55(11): 1-8.
- (Zeng W S, Chen X Y, Yang X Y. 2019. Biomass modeling and productivity analysis of planted *Populus* spp. in China. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(11): 1-8. [in Chinese])
- 曾伟生,骆期邦,贺东北. 1999. 论加权回归与建模. *林业科学*, 35(5): 5-11.
- (Zeng W S, Luo Q B, He D B. 1999. Research on weighted regression and modeling. *Scientia Silvae Sinicae*, 35(5): 5-11. [in Chinese])
- 曾伟生,唐守正. 2011a. 非线性模型对数回归的偏差校正及与加权回归的对比分析. *林业科学研究*, 24(2): 137-143.
- (Zeng W S, Tang S Z. 2011a. Bias correction in logarithmic regression and comparison with weighted regression for nonlinear models. *Forest Research*, 24(2):137-143. [in Chinese])
- 曾伟生,唐守正. 2011b. 立木生物量模型的优度评价和精度分析. *林业科学*, 47(11): 106-113.
- (Zeng W S, Tang S Z. 2011b. Goodness evaluation and precision analysis of tree biomass equations. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(11): 106-113. [in Chinese])
- 曾伟生,唐守正,夏忠胜,等. 2011c. 利用线性混合模型和哑变量模型方法建立贵州省通用性生物量方程. *林业科学研究*, 24(3): 285-291.
- (Zeng W S, Tang S Z, Xia Z S, *et al.* 2011c. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct generalized single tree biomass equations in Guizhou. *Forest Research*, 24(3):285-291. [in Chinese])
- 赵 菡,雷渊才,符利勇. 2017. 江西省不同立地等级的马尾松林生物量估计和不确定性度量. *林业科学*, 53(8): 81-93.
- (Zhao H, Lei Y C, Fu L Y. 2017. Biomass and uncertainty estimates of *Pinus massoniana* forest for different site classes in Jiangxi Province. *Scientia Silvae Sinicae*, 53(8):81-93. [in Chinese])
- 邹佳勇. 2017. 森林生态系统碳储量和固碳能力研究进展. *中国林业经济*, (4): 74-75.
- (Zou J Y. 2017. Advances in research on forest ecosystem carbon reserves and solid carbon ability. *China Forestry Economics*, (4): 74-75. [in Chinese])

Du X, Chen X Y, Zeng W S, *et al.* 2021. A climate-sensitive transition matrix growth model for uneven-aged mixed-species oak forests in North China. *Forestry*, 94(2): 258-277.

Guo H, Lei X D, You L, *et al.* 2022. Climate-sensitive diameter distribution models of larch plantations in north and northeast China. *Forest Ecology and Management*, 506(2022)119947, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119947>.

Zeng W S. 2020. Assessment of individual tree above- and below-ground biomass models for 34 tree species in China // Elangovan P. *New ideas concerning science and technology*, volume 2. India: Book Publisher International, 26-37.

Zeng W S, Duo H R, Lei X D, *et al.* 2017. Individual tree biomass and growth models sensitive to climate variables for *Larix* spp. in China. *European Journal of Forest Research*, 136 (2): 233-249

Zeng W S, Zhang H R, Tang S Z. 2011. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales—a case study for masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(7): 1547-1554.