

DOI: 10.5846/stxb201805071016

刘迎春,高显连,付超,于贵瑞,刘兆英.基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力.生态学报,2019,39(11): - .

Liu Y C, Gao X L, Fu C, Yu G R, Liu Z Y. Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on National Forest Resources Inventory. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): - .

基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力

刘迎春^{1,*}, 高显连¹, 付超², 于贵瑞², 刘兆英³

1 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714

2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 北京工业大学信息学部, 北京 100124

摘要:森林是全球陆地生态系统中最大的植被碳库和碳汇,森林固碳被认为是各国抵减工业温室气体排放的重要途径,通过森林资源清查数据编制国家温室气体清单也是大多数国家的选择。但是,由于森林固碳本身的复杂性,未来通过森林固碳能够抵消多少工业碳排放往往并不清楚。如何基于森林资源清查数据估算森林的固碳潜力,仍是一个值得深入研究的领域。通过能够公开获得的森林资源清查数据,分起源(人工林和天然林)、36个树种、5个林龄组建立了国家和省两级森林蓄积量年增长量模型,并以第六次森林资源清查期为起点,估算了基线情景(造林、管理、干扰、气候、采伐等条件不变)下2001—2200年前中国森林生物量变化和中国森林生物量固碳潜力。结果认为,天然林蓄积量年增长量一般低于人工林;多数天然林树种的蓄积量增长过程符合理论上认为的中间高、前后低的逻辑斯蒂曲线形式,即中龄林、近熟林、成熟林年增长量高,幼龄林和过熟林年增长量低;人工林蓄积量增长过程多为前期高、后期低的形式,即幼龄林、中龄林和近熟林年增长量高,成熟林和过熟林年增长量低。基线情景下中国森林碳容量为12.82 Pg C,其中人工林为6.6 Pg C,天然林为6.2 Pg C;相对于2001年碳储量来说,到2200年中国森林生物量固碳潜力为6.52 Pg C。综合已有研究认为,中国森林生物量固碳潜力为6.52—13.57 Pg C。本研究可以用于优化森林生长过程模型,为我国森林管理政策的制定提供参考。

关键词:森林资源清查; 固碳潜力; 蓄积量年增长量; 基线水平

Estimation of carbon sequestration potential of forest biomass in China based on National Forest Resources Inventory

LIU Yingchun^{1,*}, GAO Xianlian¹, FU Chao², YU Guirui², LIU Zhaoying³

1 Academy of Forest Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

2 Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: Forests are the largest carbon pools and sinks of terrestrial ecosystems worldwide. Forest carbon sequestration is an important method for reducing industrial greenhouse gases (GHG) emissions, and an option for conducting nationally determined contributions (NDCs) in most countries that signed the Paris Agreement, which aims to help humans limit global temperature increases by no more than 2°C from pre-industry level. Most countries prepare national GHG inventories based on forest resources inventory data, which is considered as the most acceptable method. However, a few countries estimated the carbon sequestration potential of forests to offset the industry GHG emission in the future because of the uncertainty of forest carbon sequestration. Estimation of the carbon sequestration potential of forests based on forest resources

基金项目:国家自然科学基金(31400426、41671045); 国家重点研发计划(2016YFA0600104); 国家留学基金(201403270013)

收稿日期:2018-05-07; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyingchun@afip.com.cn

inventory requires an improved understanding of forest growth and forestry sustainability. In this study, based on the publicly available National Forest Resources Inventory of China, we established a forest volume increase model for natural and planted forests of 36 forest types and five age groups at the national and provincial levels. We used the biomass expansion factor (BEF) to calculate the annual biomass from volume and estimated the carbon carrying capacity and carbon sequestration potential of China's forest biomass in a baseline scenario (maintaining the current state of afforestation, management, disturbance, climate, harvesting, etc.). The results showed that the annual volume increase in natural forests was lower than that in planted forests. For natural forests, the volume slowly increased initially, then rapidly, and then slowly again. Young and over-mature forests increased slowly, while the middle, pre-mature and mature forests increased rapidly. For planted forests, the volume initially increased rapidly and then then slowly. Young, middle, and pre-mature forests increased rapidly, while mature and over-mature forests increased slowly. The carbon carry capacity of Chinese forests was 12.82 Pg C in the baseline scenario, in which the natural and planted forests showed values of 6.2 Pg C and 6.6 Pg C, respectively. The planted forests will reach a peak in 2085, and the natural forests will continue to absorb carbon after 2140. In 2200, the carbon sequestration potential of China's forest biomass will be 6.52 Pg C compared to the forest carbon stock in 2001. Thus, China's forests can conservative sequester of 6.52 Pg C even without any improvement or enhancement in forest management. The carbon sequestration potential is 6.52—13.57 Pg C based on our study and published studies. This study can help to improve forest productivity model and planning of climate change mitigation policies and forest management.

Key Words: National Forest Resources Inventory; carbon sequestration potential; volume increase; baseline scenario

森林作为全球重要的陆地生态系统和碳汇,成为《联合国气候变化框架公约》签署国抵减工业温室气体排放的重要途径^[1],也是完成 2016 年《巴黎协定》本世纪增温控制在 2℃ 以内目标的重要方法^[2]。森林碳循环不仅是全球变化生态学的核心研究内容之一,也是国际社会广泛关注的焦点。我国自建国以来已经完成了 8 次森林资源清查^[3],积累了大量数据;并且基于森林资源清查数据计算森林碳储量的方法比较成熟,从 1996 年至今已有很多文章发表^[4-10]。但基于森林资源清查数据评估我国森林固碳潜力的研究较少^[11],评估方法也处于探索阶段。与基于气候情景假设的过程模型相比,森林资源清查数据具有丰富的样地调查数据、明确的树种和蓄积量区域分布等优势。

已有利用森林资源清查数据预测我国森林生态系统碳储量的研究^[11-12],而这些研究结果用于研究森林固碳潜力问题时,往往存在很多值得改进的地方。比如,(1) 森林的林龄组划分上没有区分天然林和人工林^[11],而二者的林龄组界限差异非常大^[3],林龄组界限的设定直接影响到森林生长方程的建立;(2) 没有考虑同一树种在不同区域之间生长速率的差异^[11,13],往往以样地尺度的森林生长速率代替区域尺度的森林生长速率^[12]。

本文以森林资源清查数据为基础,在当前干扰条件(包括自然和人为的干扰)不变的前提下,探讨我国森林在基线情景下,森林植被碳储量和固碳潜力问题,为预测中国森林生物量碳储量、评估森林固碳对减缓温室气体排放的作用提供一些参考。

1 数据和方法

1.1 森林资源清查数据

中国森林资源清查数据是基于全国机械布点、样方调查的结果,是目前公认的权威性数据^[14]。由于中国森林资源清查数据是为森林资源管理服务,因此用该数据估算森林生物量碳库时,需要考虑以下问题:

(1) 森林碳库范围

中国森林资源清查数据提供了详细的、具有经济价值的森林面积和蓄积量(林木部分),没考虑经济价值

比较低的枝、叶、根等部分,本文采用蓄积量-生物量转换方法,将蓄积量扩展到生物量^[15]。

(2) 统计和计算单元

中国森林资源清查为便于实际调查和统计汇总工作,将全国所有木材部分具有经济价值的树种(被称为林分)按优势种归入到 42 个树种^[3]。由于我国幅员辽阔、气候条件存在很大差异,对于分布区域广的同一树种,其树种组成和结构也会差异很大,进而导致其固碳速率在全国不同区域之间存在巨大差异。这也意味着以清查数据中最小统计单元进行计算的结果,比采用全国汇总的计算结果更符合实际情况。中国森林资源清查数据最小统计单元为省(自治区、直辖市),因此,在模拟森林生长过程时,选择了省一级的数据作为计算单元分别计算,再汇总得到全国结果。

(3) 林龄组

林龄组的划分关系到森林生长曲线拟合的精度。中国森林资源清查数据关注木材是否可采伐,每一树种均按是否达到采伐阶段将其分成 5 个林龄组:幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林。而生态学意义上的成熟林是指森林生物量达到稳定阶段^[16-17],成熟林的林龄往往达到或超出清查中过熟林的林龄^[18-19]。因此,本文将森林资源清查数据中幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林四个林龄组划归到未成熟林,将过熟林划归到生态学中的成熟林。

(4) 森林属性

这里所说的森林属性包括森林范围和森林起源(人工林或天然林)。由我国第六次森林资源清查数据得知:我国林分面积占森林面积的 82.75%。而我国森林蓄积量即为林分蓄积量,全国林分蓄积量占全国活立木蓄积量(除了林分之外,还包括疏林地、散生木和四旁树)的 91.47%。因此,基于林分数据分析我国森林生物量更为合适。

中国森林资源清查数据提供了详细的林分和用材林数据,而林分起源数据无法与之匹配。由于天然林和人工林在碳积累速率和达到成熟时间存在巨大差异,分别拟合二者的固碳过程更精确。用材林以提供木材为主要目的,必然存在人为管理(包括采伐);并且《森林采伐更新管理办法》规定:“采伐林木的单位和个人,应当优先发展人工更新”;另外,我国森林年鉴中造林的类型包括了人工造林、封育、飞播造林 3 种,即人为提供种源和树苗形成的森林都应归入人工林。经过新中国几十年的造林和采伐活动,我国原有森林基本全部被采伐过一次,有些地方甚至多次择伐^[20]。因此,用材林应属于人工林,人工林的面积大于用材林的面积。由于无法判断用材林以外森林的起源,并且人工林的生长速率比天然林快,所以按照保守性原则,我们将用材林之外的林分划归为天然林。这样,本文中的林分、用材林(人工林)、天然林三者之间的关系为:天然林面积=林分面积-用材林面积;天然林总蓄积量=林分总蓄积量-用材林总蓄积量。

1.2 假设

由于中国森林资源清查数据和森林生物量碳库计算需求之间的差异,基于森林资源清查数据模拟森林生长过程,有必要作出以下假定:1) 在研究时间段内,干扰和气候条件没有发生显著变化,即不考虑气候变化;2) 同一省份同一树种同一林龄组内的森林面积随林龄均匀分布,同一树种同一林龄组不同省份间森林蓄积量的差异是因地位级差异导致,而非林龄差异导致;3) 假定用材林全部为人工林,其他为天然林。

1.3 森林固碳潜力模型框架

借助我国森林资源清查数据提供的当前条件下分区域(省、市、自治区)、分树种、分林龄组的林分蓄积量和面积数据,本文模拟了当前条件下森林生长过程中蓄积量随林龄的变化,之后将蓄积量扩展为生物量,再乘以含碳系数,换算为碳量,最后估算森林生物量碳容量和固碳潜力(图 1)。

在当前条件下,我国森林生物量碳积累过程,将此过程称之为基线情景下森林固碳过程。基线情景是指当前条件不发生明显变化的情景,包括气候条件、干扰强度(包括自然干扰和人为干扰)、人类管理方式(包括采伐和更新)、森林面积和物种组成等。

1.4 森林蓄积量年增长量

为了模拟森林蓄积量增长过程,需要计算分地区、分树种、分林龄组(5 个林龄组)的森林蓄积量年增长

量,之后将各林龄组森林的蓄积量年增长量按林龄组合,作为此树种的蓄积量年增长量曲线。各地区所有树种均建立了自己的蓄积量年增长量曲线后,树木按此曲线以年为步长生长;所有地区各树种增长量之和,即为全国森林蓄积量年增长量。

首先,计算 5 个林龄组内森林的单位面积蓄积量。设 $\bar{v}$ 为某一地区某一树种某一林龄组内森林的单位面积蓄积量 (volume), m^3/hm^2 ; V 为某一地区某一树种某一林龄组内森林的总蓄积量 (total volume), m^3 ; S 为某一地区某一树种某一林龄组内森林的总面积, hm^2 ; 三者的关系为 (式 1):

$$\bar{v} = \frac{V}{S} \quad (1)$$

然后,计算各林龄组内森林的蓄积量年增长量。由于我们假定林龄组内森林蓄积量随林龄增加呈线性增加,用 Δv 表示某一地区某一树种某一林龄组内的森林蓄积量年增长量, $\text{m}^3 \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$, 则 Δv 等于某一林龄组内平均林龄与最小林龄森林之间对应的蓄积量年增长量 (式 2):

$$\Delta v = \frac{\bar{v} - V_{\min}}{\bar{A} - A_{\min}} \quad (2)$$

式中, $V_{\min}$ 表示某一地区某一树种某一林龄组中最小林龄 ($A_{\min}$) 的森林对应的蓄积量, m^3/hm^2 。如果 Δv 用现有数据无法计算,我们采用该树种在相近区域或全国的值代替。 $\bar{A}$ 为某一地区某一树种某一林龄组内森林的平均林龄 (stand age)。为使计算能够进行,我们假定某一林龄组内森林的平均林龄 $\bar{A}$ 等于对该树种进行林龄组划分时使用的林龄上下限的平均值 (式 3), 各树种林龄组的划分见附表 1。

$$\bar{A} = \frac{1}{2}(A_{\max} - A_{\min}) \quad (3)$$

式中, $A_{\max}$ 为某一地区某一树种某一林龄组中最大林龄。同时,为使计算能够进行,我们假定幼龄林的 $A_{\min} = 0$, 即存在未造林地; 过熟林的林龄上限为过熟林林龄下限加成熟林的林龄上下限之差, 即过熟林的林龄变幅与成熟林的相等, 当然也可以分树种寿命设置更长的过熟林林龄上限^[21]。

某一地区某一树种某一林龄组中最小林龄 ($A_{\min}$) 和最大林龄 ($A_{\max}$) 所对应的蓄积量分别表示为 $V_{\min}$ 和 $V_{\max}$, m^3/hm^2 ; 这时二者的关系为 (式 4)。

$$V_{\max} = \Delta v(A_{\max} - A_{\min}) + V_{\min} \quad (4)$$

式 4 成立的前提条件为同一林龄组内森林面积随林龄均匀分布 (式 3 和式 5), 且蓄积量年增长量 (Δv) 恒定, 本文设定的时间间隔 (林龄步长) 为 1 年。

$$S = \bar{S}(A_{\max} - A_{\min}) \quad (5)$$

式中, $\bar{S}$ 为某一地区某一树种某一林龄组森林的平均面积, hm^2 。

在计算过程中,为使相邻两林龄组蓄积量呈连续变动状态,本文设定:除幼龄林的蓄积量最低值 $V_{\min} = 0$ 之外,相邻两林龄组中高林龄组的最低蓄积量 ($V_{\min}$) 等于低林龄组的最高蓄积量 ($V_{\max}$)。另外,对于某个区域某树种的蓄积量增长量不符合生长规律,或林龄序列不完整的森林,本文采用其他省区同一树种、本省区面积最大树种、全国森林同一林龄组蓄积量年增长量进行替代计算。

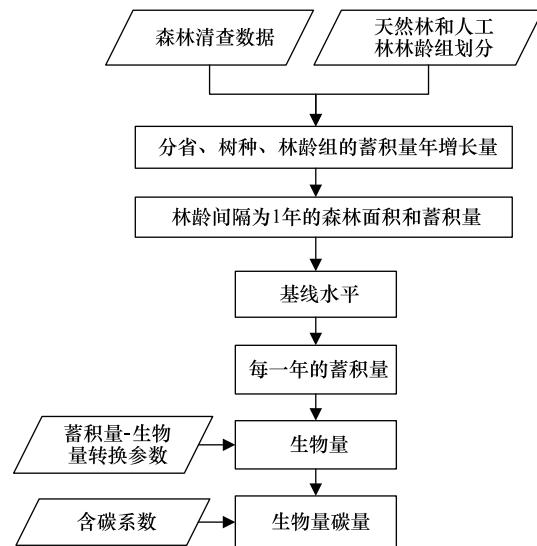


图 1 基于森林资源清查数据估算中国森林生物量固碳潜力的技术路线图

Fig.1 Schematic representation of simulating forest carbon sequestration potential based on National Forest Resources Inventory data

1.4.1 森林生物量和碳储量

森林蓄积量年增长量曲线描绘的是森林蓄积量的变化,所以在计算得到每一年的森林蓄积量之后,需要将蓄积量转化为生物量和碳储量。采用的蓄积量-生物量转换方程有两套参数可供使用:一套参数是将同一树种的蓄积量和生物量之间的关系用一个线性方程描述^[4](式 6);另一套参数是将同一树种每一个林龄组的蓄积量和生物量之间的关系分别用一个线性方程描述,即采用 5 组参数描述每个树种 5 个林龄组的蓄积量-生物量关系^[8],本文采用这套参数(附表 2)。

$$B = b_1 V + b_2 \quad (6)$$

式中, B 为森林生物量, Mg/hm^2 ; V 为森林蓄积量, m^3/hm^2 ; b_1 、 b_2 为系数。

森林及其产品的生物量换算为碳储量时采用含碳系数 0.5 计算。

1.4.2 森林生物量碳容量和固碳潜力

从森林蓄积量增长过程曲线可以看出,当森林的林龄达到过熟林上限时,森林蓄积量达到最大,其生物量碳储量也最大,我们将此时的森林生物量碳储量称为森林生物量碳容量;将森林生物量碳容量与当前(或某一年)森林生物量碳储量之差称为森林生物量固碳潜力^[22]。

2 结果

2.1 全国森林蓄积量年增长量

从分树种分林龄组的天然林和人工林蓄积年增长量的全国平均(表 1)可以看出:

1)我国森林蓄积年增长量存在人工林一般高于天然林,比如按林龄组计算人工林增长量是天然林增长量的倍数,冷杉 0.9—4.4 倍、云杉 1.2—2.3 倍、铁杉 1.0—4.6 倍、落叶松 1.4—2.6 倍、赤松 2.3—24.2 倍、黑松 0.7—12.7 倍、杉木 0.6—4.9 倍、柳杉 1.1—4.1 倍、楠木 1.9—3.6 倍、栎类 1.3—3.0 倍、檫树 1.7—4.4 倍、桉树 0.9—6.3 倍、木麻黄 1.0—8.8 倍、杨树 3.1—4.4 倍、桐类 2.5—5.3 倍、软阔类 2.4—7.8 倍;

2)多数天然林树种的森林蓄积量增长过程符合理论上认为的逻辑斯蒂生长模型的曲线形式,即中龄林、近熟林、成熟林蓄积量增长量高,幼龄林和过熟林蓄积量增长量低,比如,冷杉的中龄林、近熟林、成熟林蓄积量增长量分别为 4.40 、 4.13 、 $2.72 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,幼龄林和过熟林蓄积量增长量为 2.19 和 $2.68 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,柏木、樟子松、云南松、高山松、柳杉、栎类、硬阔类、檫树、软阔类、针叶混、针阔混等也符合这种情况。

3)人工林更多表现为幼龄林、中龄林和近熟林蓄积量年增长量高,成熟林和过熟林蓄积量年增长量低,比如,樟子松幼龄林、中龄林和近熟林蓄积量年增长量分别为 4.15 、 4.08 、 $5.17 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,成熟林和过熟林蓄积量增长量分别为 3.15 和 $3.67 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;赤松、思茅松、高山松、杉木、柳杉、水杉、檫树、桉树、杨树、桐类、软阔类、阔叶混等也存在同样规律。

与全国森林年增长量表(表 1)相似,每个省也建立了自己的分树种分林龄组的天然林和人工林蓄积量年增长量表(由于篇幅原因,本文没有列出),用于计算基线情景下每个省的森林生物量碳容量和固碳潜力。

2.2 基线情景下森林生物量变化及其固碳潜力

在基线情景下,我国森林持续生长,森林总生物量大约在 2140 年以后达到 25.6 Pg (12.82 Pg C),约为 2000 年的 2 倍;其中人工林为 13.2 Pg (6.6 Pg C),天然林为 12.4 Pg (6.2 Pg C) (图 2)。森林生长过程又可以分为两个时期:2001—2060 年间为迅速增加时期,我国森林生物量由 12.6 Pg 增加到 23.5 Pg ;2060 年之后为缓慢增加时期,森林生物量碳库趋于饱和,并在 22 世纪中期达到最大 25.6 Pg 。我国现有人工林总生物量碳储量在 2085 年左右达到最大,约为 13.2 Pg (6.6 Pg C);天然林总生物量碳储量在 2140 年以后达到最大。

以 2001 年全国森林生物量碳储量为基准(6.30 Pg C),基线情景下中国森林碳容量为 12.82 Pg C ,固碳潜力为 6.52 Pg C 。其中人工林为 3.36 Pg C ,天然林为 3.14 Pg C 。

表 1 全国天然林和人工林各林龄组森林蓄积量年增长率 ($\text{m}^3 \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)
Table 1 Annual volume increase ($\text{m}^3 \text{hm}^{-2} \text{a}^{-1}$) of natural and planted forests

树种 Forest type	天然林 Natural forest					人工林 Planted forest				
	幼龄林 Young	中龄林 Middle	近熟林 Pre-mature	成熟林 Mature	过熟林 Over-mature	幼龄林 Young	中龄林 Middle	近熟林 Pre-mature	成熟林 Mature	过熟林 Over-mature
红松 <i>P. koraiensis</i>	1.24	2.79	3.39	1.78	2.85 *	2.05	1.86	0.90	2.33	1.54
冷杉 <i>Abies</i>	2.19	4.40	4.13	2.72	2.68	1.97	10.46	10.02	11.95	5.65
云杉 <i>Picea</i>	1.09	2.30	2.02	2.19	3.02	1.88	3.33	4.61	3.48	3.69
铁杉 <i>Tsuga</i>	0.50	1.73	4.24	2.03	2.85 *	2.31	3.59	4.45	3.30	3.68
柏木 <i>Cupressus</i>	0.61	0.55	1.13	2.21	1.44	2.63	0.89	2.11	1.34	3.68
落叶松 <i>Larix</i>	1.41	1.68	2.08	1.22	1.41	2.80	4.18	4.81	1.66	3.68
樟子松 <i>P. sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	1.61	1.83	2.59	10.97	0.62	4.15	4.08	5.17	3.15	3.67
赤松 <i>P. densiflora</i>	0.17	0.31	0.61	0.71	1.63	4.11	3.59	4.45	3.30	3.67
黑松 <i>P. thunbergii</i>	0.97	0.21	0.35	1.03	1.63	0.65	1.57	4.45	3.30	3.66
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	0.89	1.52	3.37	0.67	3.45	1.82	2.00	3.65	0.40	3.66
华山松 <i>P. armandii</i>	1.57	2.06	3.58	4.26	3.45 *	2.86	1.34	9.61	3.30	3.66
油杉 <i>Keteleeria</i>	1.20	1.09	2.04	1.15	1.63	2.83	3.59	4.45	3.30	3.65
马尾松 <i>P. massoniana</i>	2.11	2.15	2.07	5.27	0.75	5.50	2.20	2.76	1.73	3.65
云南松 <i>P. yunnanensis</i>	2.84	3.64	12.34	5.99	6.23	5.90	3.62	5.08	5.94	4.49
思茅松 <i>P. kesiya</i> var. <i>langbianensis</i>	4.91	4.45	2.04	0.57	0.25	9.90	5.00	1.04	3.03	3.64
高山松 <i>P. densata</i>	3.74	4.09	5.52	6.00	1.92	4.18	11.35	8.43	2.84	3.64
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.94	2.47	3.82	0.94	5.80	4.61	4.08	4.81	3.94	3.50
柳杉 <i>Cryptomeria</i>	1.29	3.73	2.04	1.78	1.63	5.29	10.41	5.52	2.01	3.64
水杉 <i>Metasequoia</i>	6.66 *	4.76	2.04	1.78	1.63	6.83	2.89	11.23	3.30	3.63
水胡黄 <i>Fraxinus mandshurica</i> , <i>Juglans mandshurica</i> , <i>Phellodendron amurense</i>	2.15	1.33	8.60	1.78	2.43	3.10	2.33	2.00	3.41	2.66
樟树 <i>Cinnamomum</i>	1.91	2.90	2.04	1.78	1.63	2.18	2.35	4.45	3.30	3.63
楠木 <i>Phoebe</i>	1.23	0.84	2.04	1.78	1.72	4.41	2.45	4.45	3.30	3.62
栎类 <i>Quercus</i>	1.12	1.75	1.97	2.58	1.21	3.11	2.22	2.82	3.46	3.61
桦木 <i>Betula</i>	2.18	1.77	1.17	2.62	2.21	3.36	4.57	2.14	1.89	3.61
硬阔类 Other Hard wood broadleaf forest	1.42	1.48	1.71	1.90	1.58	2.89	2.14	3.54	1.68	3.61
椴树类 <i>Tilia</i>	2.11	0.58	5.08	1.78	0.89	4.11	1.68	2.22	1.42	3.61
樟树 <i>Sassafras</i>	1.44	1.73	2.04	1.78	1.63	6.39	3.11	3.48	3.30	3.60
桉树 <i>Eucalyptus</i>	1.41	0.62	3.89	1.78	1.63	7.40	3.91	3.59	4.37	4.18
木麻黄 <i>Casuarina</i>	0.89	1.25	0.58	1.78	1.63 *	0.86	10.98	4.45	2.42	3.60
杨树 <i>Populus</i>	1.68	1.24	2.25	1.60	1.07	6.55	5.42	6.94	5.32	3.82
桐类 <i>Paulownia</i>	1.83	0.55	1.11	1.78	1.63	9.75	2.35	4.92	5.37	4.12
软阔类 Other Soft wood broadleaf forest	0.82	1.26	1.85	2.07	0.98	6.42	5.83	5.81	5.06	4.95
杂木 Non-merchantable woods	1.20	1.47	2.18	0.84	1.91	3.07	1.98	2.14	1.81	3.59
针叶混 Needle-leaf mixed forest	2.01	2.82	2.45	3.72	1.91 *	5.09	4.91	2.39	7.14	0.88
针阔混 Broadleaf and needle-leaf mixed forest	1.90	4.35	5.78	2.34	2.15 *	4.26	2.29	3.18	3.08	2.21
阔叶混 Broadleaf mixed forest	2.17	2.00	3.98	3.04	2.35	5.26	3.25	6.18	2.15	3.59

* 为计算数值太大,参照相应树种蓄积量调整后的结果

3 讨论

蓄积量年增长率也叫净区域生产力 (Net Regional Productivity, NRP), 由生态系统生产力 (NEP) 扣除动物呼吸、人为活动、食物采集、采伐、放牧、火灾等排放后的生产力^[23]。人工林与天然林的蓄积量年增长率曲线均存在明显差异, 这跟人工林的管理方式有关。人工林受整地、火烧、割灌、抚育等森林管理行为影响, 导致

造林初期的土壤、光等条件好于天然林,森林生长限制因素少;但随着时间推移,尤其郁闭后树种单一的人工林,树木间水、光资源竞争加剧,生长限制因素增多;人工林更早达到用材径阶等级而被采伐。因此,用于森林生产力估算模型时,应充分考虑人工林与天然林的差异,提高模型精度。

本文计算的 2001 年(1999—2003 年)中国森林生物量碳储量为 6.30 Pg C,较 Wang 等^[24]的结果(9.91 Pg C)低,也低于 Li 等^[25]通过 CEVASA 模型估算的中国森林碳储量为 8.72 Pg C。与两个过程模型的研究结果存在差异的原因,一方面是森林面积不同:Wang 等^[24]的森林面积为 $229.01 \times 10^6 \text{ hm}^2$,明显高于我们使用的值($142.79 \times 10^6 \text{ hm}^2$),Li 等^[25]研究时间段(1981—1998 年)的森林面积为 $121.63 \times 10^6 \text{ hm}^2$,明显低于当前的森林面积。另一方面是计算的碳库内涵存在差异:本文用的数据源为森林资源清查数据,测定值为森林蓄积量,这就导致了本文计算的碳储量是剔除了中国当前干扰、采伐之后剩余的部分;而过程模型用的数据为 NPP 数据,即没有考虑造林、干扰、采伐、死亡等影响,是当前气候条件下、当前森林面积对应的森林潜在碳储量。

中国第七次森林资源清查(2004—2008 年)显示,我国乔木林碳储量为 6.66 Pg C^[10]。本文计算的基线情景下 2006 年林分碳储量为 6.95 Pg C,与第七次森林资源清查数据相近,略微偏高。除了使用的蓄积量-生物量转换方程有差异外,还有可能因为我国森林实际的采伐周期较本文设置的周期短、森林存在死亡现象、造林成活率低^[11]等因素导致。

本文计算的基线情景下 2001—2050 年森林生物量碳容量(11.22 Pg C)与 Xu 等^[11]的结果(13.09 Pg C)相近,二者相差 16.7%(表 2)。主要因为本文设定的森林碳饱和点以过熟林为准,到 2180 年才达到饱和点。Ju 等^[26]基于过程模型以及 Liu 等^[17]基于成熟林样点数据得到中国森林生物量碳容量(分别为 17.57 和 19.87 Pg C),明显高于本文结果,主要因为其对成熟林的定义更为严格,以接近当地气候条件的生物量最大值作为参考。Zhang 等^[27]的研究结果认为,2000—2025 年中国森林植被碳储量将增加 1.65 Pg C;本文的结果 2001—2026 年间中国森林生物量碳储量将增加 2.96 Pg C,明显高于 Zhang *et al.*的研究。这种差异主要与基本假设的差异有关,Zhang 等^[27]假定这段时间内全国森林平均生物量碳密度不变,而森林面积的扩大导致了森林碳储量的增加,这种假设是基于我国第 1—6 次森林资源清查期间全国森林平均生物量碳密度变化不大^[28]的基础上设定的,有其合理性。综合现有研究结果认为,中国森林固碳潜力在 6.52—13.57 Pg C。本文假定的基线为造林、管理、干扰、气候、采伐等条件不变,导致本文的估算结果相对保守,未来需要在气候变化、演替、新增采伐、新增造林等情景开展深入工作。

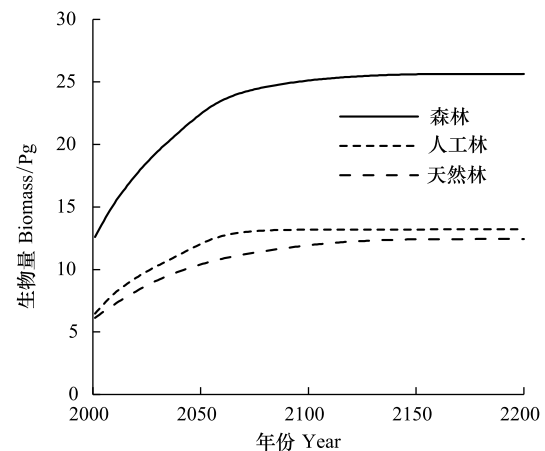


图 2 2001—2200 年基线情景下中国森林、人工林、天然林总生物量随时间变化

Fig.2 Total biomass of forests, planted forests and natural forests in China in the period of 2001 to 2200 under the baseline scenario

表 2 我国森林生物量碳容量研究结果的比较

Table 2 The studies of biomass carbon carrying capacity of forests in China

序号 No.	时间 Period	方法 Method	森林生物量碳容量 Carbon carrying capacity of forest biomass/Pg C	参考文献 Reference
1	2001—2100	过程模型	17.57	[26]
2	2000—2050	基于逻辑斯蒂曲线生长模型	13.09	[11]
3	—	基于成熟林样点数据	19.87	[17]
4	2000—2180	基于森林蓄积量年增长率	12.82	本文

参考文献 (References):

- [1] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [2] 联合国. 巴黎协定. 2015, https://unfccc.int/sites/default/files/chinese_paris_agreement.pdf.
- [3] 肖兴威. 中国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [4] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [5] Chen J, Chen W J, Liu J, Cihlar J, Gray S. Annual carbon balance of Canada's forests during 1895-1996. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 839-849.
- [6] Zhou G S, Wang Y H, Jiang Y L, Yang Z Y. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: a case study of China's *Larix* forests. *Forest Ecology and Management*, 2002, 169(1/2): 149-157.
- [7] Shvidenko A, Nilsson S. Dynamics of Russian forests and the carbon budget in 1961-1998: an assessment based on long-term forest inventory data. *Climatic Change*, 2002, 55(1/2): 5-37.
- [8] Pan Y D, Luo T X, Birdsey R, Hom J, Melillo J. New estimates of carbon storage and sequestration in china's forests: effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation. *Climatic Change*, 2004, 67(2/3): 211-236.
- [9] 徐新良. 造林对森林生态系统植被碳储量的影响研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [10] 李海奎, 雷渊才, 曾伟生. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. *林业科学*, 2011, 47(7): 7-12.
- [11] Xu B, Guo Z D, Piao S L, Fang J Y. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: A prediction based on forest biomass-age relationships. *Science China Life Sciences*, 2010, 53(7): 776-783.
- [12] Huang L, Liu J Y, Shao Q Q, Xu X L. Carbon sequestration by forestation across China: Past, present, and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(2): 1291-1299.
- [13] 李斌, 方晰, 项文化, 田大伦. 湖南省杉木林植被碳储量、碳密度及碳吸存潜力. *林业科学*, 2013, 49(3): 25-32.
- [14] 阮宇, 张小全, 杜凡. 中国木质林产品碳储量. *生态学报*, 2006, 26(12): 4212-4218.
- [15] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 1984, 223(4642): 1290-1293.
- [16] Odum E P. The strategy of ecosystem development. *Science*, 1969, 164(3877): 262-270.
- [17] Liu Y C, Yu G R, Wang Q F, Zhang Y J. Huge carbon sequestration potential in global forests. *Journal of Resources and Ecology*, 2012, 3(3): 193-201.
- [18] Liu Y C, Yu G R, Wang Q F, Zhang Y J, Xu Z H. Carbon carry capacity and carbon sequestration potential in China based on an integrated analysis of mature forest biomass. *Science China Life Sciences*, 2014, 57(12): 1218-1229.
- [19] Liu Y C, Yu G R, Wang Q F, Zhang Y J. How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(3): 323-333.
- [20] 张煜星. 人工造林对森林覆盖率的贡献分析. *东北林业大学学报*, 2007, 35(3): 76-78.
- [21] 邓华卫, 布仁仓, 刘晓梅, 贺伟, 胡远满, 黄乃伟. 模拟分类经营对小兴安岭林区森林生物量的影响. *生态学报*, 2012, 32(21): 6679-6687.
- [22] 刘迎春, 王秋风, 于贵瑞, 朱先进, 展小云, 郭群, 杨浩, 李胜功, 胡中民. 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. *生态学报*, 2011, 31(15): 4277-4286.
- [23] 于贵瑞, 王秋风, 刘迎春, 刘颖慧. 区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础. *地理科学进展*, 2011, 30(7): 771-787.
- [24] Wang S, Chen J M, Ju W M, Feng X, Chen M, Chen P, Yu G. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901-2001. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 524-537.
- [25] Li K R, Wang S Q, Cao M K. Vegetation and soil carbon storage in China. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2004, 47(1): 49-57.
- [26] Ju W M, Chen J M, Harvey D, Wang S. Future carbon balance of China's forests under climate change and increasing CO₂. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 538-562.
- [27] Zhang C X, Xie G D, Zhen L, Li S M, Deng X Z. Estimates of variation in Chinese terrestrial carbon storage under an environmental conservation policy scenario for 2000-2025. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(4): 315-321.
- [28] 于贵瑞, 王秋风. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学. 北京: 科学出版社, 2010.

附表 1 中国森林资源清查中各树种的林龄组划分

Table 1 The age group of forest types in the National Forest Resources Inventory of China

树种 Forest type	地区 Region	起源 Origin	龄组划分 Age group					参考 Reference
			幼龄林 Young	中龄林 Middle	近熟林 Pre-mature	成熟林 Mature	过熟林 Over-mature	
云杉、柏木、铁杉 <i>Picea, Cupressus, Tsuga</i>	北方	天然林	0—60	61—100	101—120	121—160	>160	[1]
		人工林	0—40	41—60	61—80	81—120	>120	
	南方	天然林	0—40	41—60	61—80	81—120	>120	
		人工林	0—20	21—40	41—60	61—80	>81	
落叶松、冷杉、樟子松、赤松、黑松 <i>Larix, Abies, P. sylvestris var. mongolica,</i> <i>P. densiflora, P. thunbergii</i>	北方	天然林	0—40	41—80	81—100	101—140	>140	[1]
		人工林	0—20	21—30	31—40	41—60	>60	
	南方	天然林	0—40	41—60	61—80	81—120	>120	
		人工林	0—20	21—30	31—40	41—60	>60	
油松、马尾松、云南松、 思茅松、华山松、高山松 <i>P. tabulaeformis, P. massoniana,</i> <i>P. yunnanensis, P. kesiya var.</i> <i>langbianensis, P. armandii, P. densata</i>	北方	天然林	0—30	31—50	51—60	61—80	>80	[1]
		人工林	0—20	21—30	31—40	41—60	>60	
	南方	天然林	0—20	21—30	31—40	41—60	>60	
		人工林	0—10	11—20	21—30	31—50	>50	
杨、桉、泡桐、木麻黄、软阔 <i>Populus, Eucalyptus, Sassafras,</i> <i>Paulownia, Casuarina, Other Soft wood</i> broadleaf forest	北方	人工林	0—10	11—15	16—20	21—30	>30	[1]
	南方	人工林	0—5	6—10	11—15	16—25	>25	
桦 <i>Betula</i>	北方	天然林	0—30	31—50	51—60	61—80	>80	[1]
		人工林	0—20	21—30	31—40	41—60	>60	
	南方	天然林	0—20	21—40	41—50	51—70	>70	
		人工林	0—10	11—20	21—30	31—50	>50	
栎、樟、楠、椴、水、胡、黄、硬阔 <i>Quercus, Cinnamomum, Phoebe,</i> <i>Tilia, Fraxinus mandshurica,</i> <i>Juglans mandshurica, Phellodendron</i> <i>amurense, Other Hard wood</i> broadleaf forest	南北	天然林	0—40	41—60	61—80	81—120	>120	[1]
		人工林	0—20	21—40	41—50	51—70	>70	
杉木、柳杉、水杉 <i>Cunninghamia lanceolate,</i> <i>Cryptomeria, Metasequoia</i>	南方	人工林	0—10	11—20	21—25	26—35	>35	[1]
红松 <i>P. koraiensis</i>	南北	人工林/ 天然林	0—60	61—100	101—130	131—170	>170	[2]
针叶混 Needle-leaf mixed forest	北方	天然林	0—50	51—90	91—110	111—150	>150	落叶松、云杉
		人工林	0—30	31—45	46—60	61—90	>90	
	南方	天然林	0—20	21—30	31—40	41—60	>60	马尾松
		人工林	0—10	11—20	21—30	31—50	>50	
针阔混 Broadleaf and needle- leaf mixed forest	北方	天然林	0—50	51—80	81—100	101—140	>140	红松、椴树
		人工林	0—30	31—50	51—65	66—95	>95	
	南方	天然林	0—30	31—45	46—60	61—90	>90	马尾松、栲
		人工林	0—15	16—30	31—40	41—60	>60	
阔叶混 Broadleaf mixed forest	北方	天然林	0—30	31—50	51—60	61—80	>80	杨、桦
		人工林	0—15	16—20	21—30	31—45	>45	
	南方	天然林	0—30	31—50	51—65	66—95	>95	木荷、栲
		人工林	0—15	16—30	31—40	41—60	>60	
杂木 Non-merchantable woods	南北	天然林	0—40	41—60	61—80	81—120	>120	栎、楠
		人工林	0—20	21—40	41—50	51—70	>70	