论文

全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究

张煜星¹, 王雪军^{2*}

1. 国家林业和草原局林产工业规划设计院, 北京 100714;

2. 国家林业和草原局驻北京森林资源监督专员办事处, 北京 100018

* 联系人, E-mail: wangxuejun320@126.com

收稿日期: 2020-09-02; 接受日期: 2020-12-25; 网络版发表日期: 2021-01-21

全国森林资源清查生物量基础建模项目和国家重点研发计划(批准号: 2017YFD0600903)资助

摘要 用蓄积量推算生物量是森林碳估测的重要方法之一, 但林分蓄积生物量模型只有个别树种在局部建立, 因此建立全国和区域性该类模型意义重大. 本研究根据森林资源清查抽样总体和气候差异等将全国划分成7个区域, 分区建立了25个树种、21个针、阔和针阔混交林林分生物量与蓄积量回归模型, 并利用1949~2018年间11个时段的森林资源数据, 测算了70年全国及各区域碳变化. 结果表明, 各区域碳变化差异明显. 1949~1976年间, 全国碳减少明显, 林分碳储量年均减少0.52%; 碳储总量年均减少0.13%. 1977~2018年林分碳和碳储总量均逐年增加, 其中1999~2003年时段增速最大, 分别为3.80%和3.14%; 70年间碳储总量由4.050 PgC(1 Pg=10¹⁵ g)增加到8.362 PgC, 增加了106.46%; 林分碳储量由3.938 PgC增加到7.669 PgC, 增加了94.74%; 林分碳密度在1973~1976年时段最低为35.24 Mg/ha(1 Mg=10⁶ g), 2014~2018年时段增加到42.63 Mg/ha, 且仍具有增长趋势, 未来中国碳汇潜力巨大.

关键词 森林资源, 森林资源清查, 生物量, 碳储量, 碳密度, 碳汇

森林碳储量的估测基于森林的生物量, 而森林生物量的估测基于森林的蓄积量^[1~5]. 因此, 用蓄积量估测全国森林生物量的方法主要有两种, 即基于单木蓄积量的生物量模型和基于林分单位公顷蓄积量的生物量模型. 林木的单木蓄积量模型建立历史悠久, 基于单木模型也已经建立了树种生物量-胸径或生物量-胸径和树高的一元或二元模型并颁布了标准^[5~18], 甚至某些树种已建立起按区域更为适用的生物量-蓄积量模型^[19~23]. 然而, 对于使用过往数据来说, 森林林分单位面积蓄积量推算森林生物量是最为便捷的方法, 这种

方法也具有较好的说服力, (生物量换算因子法)得到了较广泛的认可^[2,7,11,24~31], 特别是利用森林资源清查资料建立生物量与蓄积量的回归模型, 用以估测全国和区域生物量的方法, 具有明显的优势^[3,5,32~34], 但是我国一直没有完全建立起按树种的省级区域或全国的林分蓄积生物量模型. 当前研究大都集中在某一地域或某一树种进行模型建立^[17,35~38], 因此, 建立全国或省级范围内的生物量-蓄积量模型具有重要的科学意义.

按树种、分区域建立蓄积生物量型可以提高估测

引用格式: 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. 中国科学: 生命科学, 2021, 51: 199–214

Zhang Y X, Wang X J. Study on forest volume-to-biomass modeling and carbon storage dynamics in China (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2021, 51: 199–214, doi: 10.1360/SSV-2020-0301

生物量精度. 事实上, 全部建立分树种的林分蓄积生物量模型完全没有可能, 即使建模适应区域较小也存在极大的困难, 尤其是建立林分水平单位面积生物量-蓄积量模型, 由于地上伐倒木和地下根系生物量测定比单木模型的建立更为复杂和困难, 完成全国建模工作非常艰巨. 但几十年来我国林业科学家都在不懈地努力, 因而利用其研究资料并结合中国森林分布的不同气候区域研究建立全国森林生物量-蓄积量模型成为可能, 进而可以更精准地估测森林资源的生物量和碳储量变化.

1 研究方法

本文采用分区域建立的林分每公顷蓄积生物量回归模型方法, 对各类型森林资源生物量和碳储量进行测算.

1.1 区域划分

中国森林资源分布范围广, 各地区自然地理、气候差异较大, 建立森林生物量与蓄积量的回归模型应考虑不同的气候温、湿差异, 建立分区域的林分水平的蓄积生物量回归模型是较为实际和可靠的森林生物量估测方法, 这个区域单元划分的越小, 生物量与蓄积量的回归相关性越显著, 但是需求的样本量也越大. 按气候、自然地理区划建立森林生物量与蓄积量的回归模型, 还必须考虑我国森林资源清查的实际情况, 因为森林资源清查抽样体系是以省(区)为总体建立的, 跨气候区或自然地理区域较大的省(区)森林资源清查数

据若分小区进行统计, 会降低清查结果的精度. 因此, 在保证抽样总体数据完整的条件下, 将气候条件相近, 树种分布接近, 自然地理区域相连的省(区)划分为一个森林生物量估测单元, 建立生物量与蓄积量的回归模型比全国建立一个估测模型更可靠、更符合实际, 如果具有足够多的样本量, 也可以建立各省(区)的生物量估测模型.

本研究依据气候和自然地理相近、树种分布区域接近、森林资源清查数据按省为总体抽样等条件, 将我国划分为7个区域, 分别建立了森林蓄积生物量的回归模型. 东北区(NE)包括黑龙江、吉林和辽宁3省, 华北区(NN)包括北京、天津、河北、内蒙古和山西5省(区、市), 西北区(NW)包括陕西、甘肃、宁夏、青海和新疆5省(区), 中南区(MS)包括江苏、上海、山东、安徽、河南、湖北和湖南7省(区、市), 东南沿海区(ES)包括浙江、江西、福建、广东、广西和海南6省(区), 西南区(WS)包括四川、重庆、贵州和云南4省(区、市), 西藏区(XZ)包括西藏区. 香港、澳门和台湾以及西藏控制线外地区的森林资源生物量由于样本数据不足, 不包括在本研究内.

1.2 生物量模型建立

根据收集的文献资料(表1), 表中包含了各地区的主要建模样本的平均蓄积、最大蓄积、最小蓄积, 样本的平均生物量、最大生物量、最小生物量, 区域总的样本量和其中有地上生物量的样本数量, 以及相关样本数据的文献来源.

整理文献中的林分每公顷蓄积量和对应的每公顷

表 1 建模数据基本情况^{a)}

Table 1 Basic sample data for model building^{a)}

区域	Vave	Vmax	Vmin	Bave	Bmax	Bmin	N0	N1	文献来源
EN	128.23	512.00	14.89	102.89	385.95	18.59	318	307	[19,39~45]
NN	86.25	417.18	1.79	74.15	373.13	1.976	1184	1162	[41,42,43,46~56]
WN	162.14	836.25	3.16	132.48	559.01	3.19	249	244	[41,42,57~61,100]
MS	215.00	1234.8	10.25	150.96	656.04	7.27	155	94	[41,62~77]
ES	182.19	920.53	4.63	117.50	490.21	3.70	243	181	[41,63~66,78~92]
WS	265.25	1151.9	18.00	173.60	530.06	23.78	407	389	[37,41,42,93~99]
XZ	357.03	1084.85	44.22	207.17	462.86	46.50	999	999	[38,41,101]

a) “Vave”, “Vmax”和“Vmin”分别是指样本平均蓄积、样本最大蓄积、样本最小蓄积(单位: m^3/ha), “Bave”, “Bmax”和“Bmin”分别是指样本平均生物量、样本最大生物量、样本最小生物量(单位: Mg/ha), “N0”和“N1”分别是指样本量、有地上生物量的样本量(单位: 个)

总生物量、地上生物量、地下生物量建模数据, 分区归类树种的建模样本, 分别分区域建立了25个树种单位面积总生物量与蓄积量、地上生物量与蓄积量的林分生物量回归模型. 通过多种数学模型(指数、多项式、线性和幂函数模型)建模分析显示, 生物量与蓄积量的回归关系以幂函数模型为最优, 总生物量、地上生物量与蓄积量的模型拟合程度决定系数(R^2)均相对较高, 因此, 本研究最终选择了生物量-蓄积量幂函数

模型.

各区域按树种的生物量回归模型、原始数据样本数(N)和模型决定系数(R^2)详见表2.

同时, 为了全面测算各区域各森林类型其他树种的生物量, 对建模所有树种的样本实测数据按针叶树、阔叶树和全部树种(针阔混)3个类型建立了分区域的21个单位面积总生物量与蓄积量、地上生物量与蓄积量的林分生物量回归模型, 用以估算其他树种

表 2 全国主要树种林分每公顷生物量与每公顷蓄积量回归模型^{a)}

Table 2 Regression Model of China's main tree species volume-to-biomass^{a)}

区域	建模树种(组)	蓄积与地上生物量			蓄积与总生物量		
		模型表达式	样本数(N)	决定系数(R^2)	模型表达式	样本数(N)	决定系数(R^2)
全国分布区(CN)	白桦	$Y_a=1.0691 X^{0.8988}$	209	0.9659	$Y_b=1.3174 X^{0.9216}$	180	0.9707
	华山松	$Y_a=1.3644 X^{0.8331}$	37	0.9224	$Y_b=1.4527 X^{0.8545}$	37	0.9062
	栎类	$Y_a=1.1516 X^{0.8716}$	173	0.9530	$Y_b=2.1054 X^{0.8204}$	213	0.9472
	落叶松	$Y_a=1.2401 X^{0.8636}$	230	0.9814	$Y_b=1.4091 X^{0.8752}$	241	0.9696
	马尾松	$Y_a=0.6143 X^{0.9834}$	64	0.9007	$Y_b=0.6686 X^{0.9993}$	64	0.9118
	杉木	$Y_a=0.9362 X^{0.8607}$	80	0.9317	$Y_b=1.2877 X^{0.8427}$	88	0.9293
	云冷杉	$Y_a=1.3661 X^{0.8086}$	182	0.9301	$Y_b=1.9471 X^{0.7825}$	162	0.8471
	油松	$Y_a=1.2586 X^{0.8701}$	669	0.9275	$Y_b=1.7969 X^{0.8416}$	699	0.9293
	云南松	$Y_a=0.3919 X^{1.0995}$	40	0.9871	$Y_b=0.6803 X^{1.016}$	40	0.9833
	山杨白桦	$Y_a=1.8023 X^{0.7980}$	104	0.9202	$Y_b=2.5157 X^{0.7937}$	104	0.8949
东北区(NE)	油松	$Y_a=1.3272 X^{0.8725}$	195	0.9669	$Y_b=1.9693 X^{0.8339}$	195	0.9632
华北区(NN)	白桦	$Y_a=0.7234 X^{1.0072}$	116	0.9515	$Y_b=1.0863 X^{0.9823}$	116	0.9375
	栎类	$Y_a=1.0728 X^{0.8931}$	140	0.9646	$Y_b=1.6743 X^{0.8771}$	140	0.9667
	落叶松	$Y_a=1.2058 X^{0.8759}$	186	0.9839	$Y_b=1.3843 X^{0.8773}$	208	0.9735
	油松	$Y_a=1.0977 X^{0.8803}$	348	0.8897	$Y_b=1.4812 X^{0.8681}$	348	0.8870
	山杨白桦	$Y_a=1.3182 X^{0.8703}$	57	0.9302	$Y_b=1.5685 X^{0.9041}$	57	0.8894
西北区(NW)	油松	$Y_a=1.8672 X^{0.8198}$	103	0.9535	$Y_b=2.4747 X^{0.8015}$	103	0.9488
西南区(WS)	云冷杉	$Y_a=1.1086 X^{0.8350}$	99	0.8351	$Y_b=1.9427 X^{0.7790}$	99	0.8328
西藏区(XZ)	白桦	$Y_a=0.8509 X^{0.9339}$	38	0.9973	$Y_b=1.1441 X^{0.9403}$	38	0.9971
	栎类	$Y_a=0.7085 X^{1.10368}$	72	0.9980	$Y_b=0.9307 X^{1.0228}$	72	0.9983
	柏类	$Y_a=2.0471 X^{0.8992}$	130	0.9844	$Y_b=2.5512 X^{0.8992}$	130	0.9838
	高山松	$Y_a=0.5668 X^{0.9780}$	59	0.9986	$Y_b=0.6881 X^{0.9770}$	59	0.9984
	云南松	$Y_a=0.4313 X^{0.9842}$	51	0.8939	$Y_b=0.4802 X^{0.9945}$	51	0.8911
	云杉	$Y_a=0.6200 X^{0.98442}$	251	0.9988	$Y_b=0.7312 X^{0.9858}$	251	0.9986
	冷杉	$Y_a=0.2140 X^{1.1007}$	238	0.9864	$Y_b=0.2802 X^{1.0902}$	238	0.9875

a) 白桦(*Betula platyphylla*), 华山松(*Pinus armandii*), 栎类(*Quercus*), 落叶松(*Larix dahurica*), 马尾松(*Pinus massoniana*), 杉木(*Cunninghamia lanceolata*), 云冷杉(*Picea asperata* and *Abies fabri*), 油松(*Pinus tabulaeformis*), 云南松(*Pinus yunnanensis*), 山杨白桦(*Populus davidiana* and *Betula platyphylla*), 柏类(*Cupressaceae*), 高山松(*Pinus densata*), 云杉(*Picea asperata*), 冷杉(*Abies fabri*)

的生物量. 东南沿海区、中南区树种繁杂, 建模树种略显不足, 总生物量、地上生物量与蓄积量的模型决定系数(R^2)较低, 但仍在0.60以上; 其他区域的总生物量、地上生物量与蓄积量的模型的决定系数(R^2)都在0.90以上(表3).

生物量子回归模型: $Y = a X^b$. (1)

式中, Y : 单位面积生物量(总生物量 Yb ; 地上生物量

$$\text{生物量} = \sum_{i=1}^n \text{树种生物量} \times (\text{散生木树种蓄积} + \text{四旁树树种蓄积} + \text{疏林树种蓄积}) / \sum_{i=1}^n \text{树种蓄积}. \quad (2)$$

式中, i 为样地数, 树种生物量是指按生物量模型计算的生物量, 树种蓄积是指样地因子表中材积.

1.4 森林碳密度和碳储量计算

利用清查数据得到森林面积和蓄积量, 再根据林分平均蓄积量和生物量的换算公式和含碳系数, 得到各时期森林碳密度, 从而估算不同时期森林总碳储量. 具体公式为:

$$C_p = B \times C_c, \quad (3)$$

$$C_0 = C_p \times S. \quad (4)$$

式中, C_p 为碳密度(Mg/ha), B 为生物量(Mg), C_0 为碳储量(Mg), S 为森林面积(ha), C_c 为含碳系数, 取0.5, 无单位.

目前, 全国森林资源清查森林生物量测算方法主要通过全国生物量建模项目所建立的各种(组)单木生物量-胸径模型来测算, 为了验证本文提出的基于林分生物量-蓄积回归模型精度, 通过与全国第九次清查发布各省森林生物量数据值比较.

2 应用森林资源调查数据资料

本文利用的森林资源调查系列资料为1949年、1950~1962年、1973~1976年、1977~1981年、1984~1988年、1989~1993年、1994~1998年、1999~2003年、2004~2008年、2009~2013年和2014~2018年11个时段的数据^[103~109].

Ya (Mg/ha), X : 单位面积蓄积量(m^3/ha), a 和 b 为模型参数.

1.3 疏林、散生木和四旁树的生物量计算

分省、分区按对应乔木林树种的生物量转换因子进行计算, 然后合计、累计得到全国的疏林、散生林和四旁树的总生物量^[11,102]. 其计算公式为:

3 研究结果

3.1 生物量模型精度分析

本文依据林分蓄积生物量模型测算, 全国乔木林总生物量15343.63 TgC, 地上生物量为12242.06 TgC, 地下生物量为3101.57 TgC; 与全国第九次森林资源清查(2014~2018年)公布数据相比, 地上生物量比公布数据要低1.40%, 总生物量低1.08%, 地下生物量高出0.17%. 从全国31个省份测算结果对比分析来看, 基于这两种方法测算结果总体上基本接近, 两者相对误差均不超过13%, 如图1所示, 图中纵坐标为基于林分蓄积生物量模型方法测算值, 横坐标为基于胸径生物量模型测算值, 无论总生物量估计, 还是地上生物量估计, 两者测算结果具有很高的相似性, R^2 达到了0.99以上. 因此, 本文提出的林分蓄积生物量模型不但简便, 能够使用以往的蓄积量数据计算生物量提供方法, 而且模型适用范围缩小, 精度较高, 科学可行.

3.2 碳储总量和林分碳储量变化

森林资源总碳储量包括林分、疏林、散生木和四旁树的碳储量(以下简称碳储总量). 从1949~2018年, 全国森林碳储总量分别为4.050 PgC(1949年)、3.961 PgC(1950~1962年)、3.907 PgC(1973~1976年)、4.145 PgC(1977~1981年)、4.323 PgC(1984~1988年)、4.848 PgC(1989~1993年)、5.319 PgC(1994~1998年)、6.154 PgC(1999~2003年)、6.640 PgC(2004~2008年)、7.357 PgC(2009~2013年)和8.362 PgC(2014~2018年)(表4、图2). 碳储总量的变化趋势与全国森林面积和蓄积结构的变化趋势基本相同^[110], 主要受森林采伐的影响, 但

表 3 区域林分每公顷生物量与每公顷蓄积量回归模型^{a)}Table 3 Regression model of volume-to-biomass of forest stand in China^{a)}

模型分区	类型	模型表达式	样本数(N)	决定系数(R^2)
东北区(NE)	针叶林	$Ya=1.5912 X^{0.8128}$	274	0.9542
		$Yb=2.1412 X^{0.8109}$	223	0.9572
	阔叶林	$Ya=0.6608 X^{0.9705}$	170	0.9429
		$Yb=3.2382 X^{0.7309}$	55	0.7541
	针阔混交林	$Ya=1.4836 X^{0.8198}$	444	0.945
		$Yb=2.1568 X^{0.8095}$	278	0.9563
华北区(NN)	针叶林	$Ya=1.1643 X^{0.8718}$	542	0.9569
		$Yb=1.4592 X^{0.8681}$	564	0.9505
	阔叶林	$Ya=1.0453 X^{0.9261}$	444	0.8992
		$Yb=1.7092 X^{0.8846}$	450	0.9068
	针阔混交林	$Ya=1.2193 X^{0.8735}$	986	0.9308
		$Yb=1.7643 X^{0.8473}$	1014	0.9059
西北区(NW)	针叶林	$Ya=1.8557 X^{0.8076}$	141	0.9415
		$Yb=2.7025 X^{0.7772}$	130	0.9427
	阔叶林	$Ya=0.9861 X^{0.9206}$	103	0.9589
		$Yb=1.2648 X^{0.9142}$	97	0.9590
	针阔混交林	$Ya=1.2422 X^{0.8799}$	245	0.9518
		$Yb=1.6220 X^{0.8703}$	237	0.9515
中南区(MS)	针叶林	$Ya=2.7377 X^{0.6832}$	71	0.8550
		$Yb=3.1150 X^{0.6951}$	71	0.8544
	阔叶林	$Ya=0.9154 X^{1.0124}$	59	0.8004
		$Yb=1.4853 X^{0.9578}$	59	0.7707
	针阔混交林	$Ya=2.4482 X^{0.7562}$	130	0.6740
		$Yb=2.9650 X^{0.7576}$	130	0.6649
东南沿海区(ES)	针叶林	$Ya=0.6982 X^{0.9376}$	84	0.8453
		$Yb=1.7896 X^{0.8017}$	98	0.8375
	阔叶林	$Ya=1.2381 X^{0.9312}$	56	0.7461
		$Yb=2.3800 X^{0.8460}$	98	0.8665
	针阔混交林	$Ya=1.2747 X^{0.8668}$	144	0.6098
		$Yb=2.9960 X^{0.7474}$	197	0.7707
西南区(WS)	针叶林	$Ya=2.0039 X^{0.7519}$	226	0.9064
		$Yb=2.1339 X^{0.7722}$	235	0.9409
	阔叶林	$Ya=2.9176 X^{0.7394}$	165	0.8344
		$Yb=2.4170 X^{0.8196}$	165	0.8588
	针阔混交林	$Ya=3.4468 X^{0.6753}$	391	0.8114
		$Yb=3.5830 X^{0.7036}$	400	0.8209
*西藏区(XZ)	针叶林	$Ya=0.9224 X^{0.9292}$	33	0.9729
		$Yb=1.1382 X^{0.9268}$	33	0.9726
	阔叶林	$Ya=0.5761 X^{1.0273}$	76	0.9927
		$Yb=0.7617 X^{1.0138}$	76	0.9936
	针阔混交林	$Ya=0.6979 X^{0.9718}$	51	0.9646
		$Yb=0.8860 X^{0.9645}$	51	0.9637

a) 针叶林(coniferous forest), 阔叶林(broad-leaved forest), 针阔混交林(mixed forest). *: 西藏区的各树种、针、阔、针阔混交林生物量模型因缺乏样地数据, 模型由单木模型调查数据推导(周学武等人^[38], 桂来庭等人^[101])

图1 两种测算方法结果对比: A: 地上生物量测算结果对比; B: 总生物量测算结果对比(网络版彩图)

Figure 1 Result comparison of two calculation methods (A: above-ground biomass; B: total biomass) (color online)

图2 各时期森林碳储量变化(网络版彩图)

Figure 2 Changes of forest carbon storage in different periods (color online)

反映不出人工造林的影响。

1949~2018年, 全国林分碳储量的变化与碳储总量变化相近(表4、图2)。1949~1981年, 森林采伐量大于森林生长量和造林成林蓄积之和, 碳储量逐渐减少, 1973~1976年段碳储总量最低为3.907 PgC, 林分碳储量3.559 PgC, 这与当时社会经济发展对森林资源大量采伐消耗的情况一致; 但自20世纪70年代以来, 我国政府相继实施了“三北”防护林建设、退耕还林、天然林保护等多个生态建设工程, 1977~2018年碳储量不断增加, 到2014~2018年段碳储总量和林分碳储量达到最大值, 分别为8.362 PgC和7.669 PgC, 森林生长量和造林的成林蓄积大于森林采伐蓄积, 碳储量在采伐中仍然持续增长。年均碳总累积也由1977~1981年的0.048 PgC上升到2014~2018年的0.201 PgC, 呈现出快速增

长的态势。林分和疏林等资源对碳累积或损失的贡献见图3。自1977年以来林分碳累积也逐年增加, 由1977年每年的0.035 PgC增加到2018年的0.187 PgC, 增速提高5.3倍; 森林林分碳储量的变化趋势与全国森林面积和蓄积结构的变化趋势也基本相同, 是我国森林碳累积的主要贡献者。而疏林等资源碳累积在1993年以前为碳累积, 1994~2008年期间为碳损失, 2009~2018年以后再次转为碳累积。

3.3 年均碳储量变化

从全国林分碳和碳储总量年均变化分析, 1950~1976年, 我国森林资源碳减少明显, 林分碳年均减少0.52%, 碳总量年均减少0.13%。1977~2018年林分碳和碳总量均逐年增加, 其中在1999~2003年段, 增长

表 4 1949~2018年不同时期森林碳储量及年均碳累积^{a)}Table 4 Forest carbon storage and annual average carbon accumulation in different periods from 1949 to 2018^{a)}

调查期	林分		疏林等		森林资源	
	碳储量(PgC)	年均碳累积(PgC/yr)	碳储量(PgC)	年均碳累积(PgC/yr)	碳储量(PgC)	年均碳累积(PgC/yr)
1949	3.938	/	0.112	/	4.050	/
1950~1962	3.615	-0.027	0.346	0.020	3.961	-0.007
1973~1976	3.384	-0.017	0.523	0.013	3.907	-0.004
1977~1981	3.559	0.035	0.586	0.013	4.145	0.048
1984~1988	3.659	0.014	0.664	0.011	4.323	0.025
1989~1993	4.072	0.083	0.776	0.022	4.848	0.105
1994~1998	4.582	0.102	0.737	-0.008	5.319	0.094
1999~2003	5.452	0.174	0.702	-0.007	6.154	0.167
2004~2008	6.067	0.123	0.573	-0.026	6.640	0.097
2009~2013	6.733	0.133	0.624	0.010	7.357	0.143
2014~2018	7.669	0.187	0.693	0.014	8.362	0.201

a) “/”表示没有调查统计数据

图 3 疏林等碳储量占碳储总量的比重不同时期变化(网络版彩图)

Figure 3 Change of proportion of carbon storage such as sparse forest in total carbon storage in different periods (color online)

速率最大, 分别为3.80%和3.14%(图4和5)。

从各个区域的碳变化分析, 我国木材采伐比较集中的东北和西南区碳减少持续时间较长, 东北区在1950~1962年、1984~1988年2个调查时期林分碳增量都是负值, 西南区在1950~1962年、1973~1976年、1984~1988年3个调查时段碳增量都是负值, 林分采伐量大于生长量持续时间较长。其他各个区域碳增量从1977年起基本都是正值, 而且中南区和东南沿海区逐

渐成为碳增量年均增长最大的区域。

考虑全国造林的实际情况, 新造林地逐渐由疏林、散生木、四旁树达到郁闭成林, 时间相对较长, 成林率较低, 但这部分森林资源的碳积累数量较大。从碳总量年均变化可以看出, 森林采伐量集中的东北区、西南区碳变化与林分碳变化明显不同。1950~2018年东北区碳变化一直是正值, 即东北区虽然在新中国刚建初期提供了大量木材, 但森林经营采用“采育并重”的

图4 1949~2018年各区域林分碳储量年均变化率(网络版彩图)

Figure 4 Annual change rate of forest carbon storage in different regions from 1949 to 2018 (color online)

方针, 积极造林, 采伐迹地更新比较及时, 东北区一直处于碳积累过程. 西南地区在1977年以后碳积累也处于逐渐增加的过程. 其他各区域除华北在1977~1981年时段碳积累为负值外, 碳积累均为正值, 且不断增加, 其中中南和东南沿海区域增加速度最快(图5).

从全国、各区域的林分碳变化、森林资源碳总量变化分析得到一个共同结果, 1999年以后由于全国林业重大生态工程以及天然林资源保护工程等的建设, 年均碳变化率明显增加, 而且西北地区和华北地区的碳积累增速提升.

西藏地区碳储量除1949年和1950~1962年没有调查数据外, 其他时间段因调查方法不同, 不具备变化的可比性. 1977年西藏地区第一次森林资源清查(全国第二次)首次采用80米MSS卫星遥感数据进行了遥感调查, 而2001年(全国第六次清查)采用了30米TM卫星遥感数据等进行了第二次调查, 同时优化调整了样地布设数量和样地调查方法, 因此, 2001年与1977年的数据可比性较低, 其他调查时段的数据可比但变化极小.

从1949年到2018年, 疏林、散生木、四旁树等资源由0.112 PgC增加到0.693 PgC, 增加519.38%. 我国疏林、散生木、四旁树等资源对农村的生产和生活具有重要作用, 也是中华人民共和国成立初期造林活动的体现. 1949~2018年间, 疏林、散生木和四旁树的碳储量占碳储总量的比例在0~35.43%之间(图3), 特别是中南区疏林等资源的占比在1973~1998年间较高. 这一区内的上海市、江苏、山东等省(区)的疏林等碳储量

比例都较大. 可见, 如果不研究疏林、散生木和四旁树的碳储量, 仅研究森林林分的碳储量, 结论将会有较大的偏差.

从林分碳储量占碳储总量的比重分析, 1949~2018年, 全国及各个区域的林分碳储量比重变化都呈“U”型, 疏林等碳比重呈倒“U”型. 说明初期是因为林分蓄积比重较高, 在不断的采伐后, 其比重逐渐下降, 在森林采伐实施采伐限额以后, 特别是实施天然林保护工程后, 林分蓄积比重增加, 碳储量比重不断上升, 到2014~2018年, 林分碳储量占碳总量达到91.72%, 再次超过90%.

3.4 碳密度变化

从1949到2018年, 除西藏森林资源人为干扰少, 密度变化小外, 全国各区域林分平均碳密度变化较大, 但基本呈现先减少再增加的趋势. 在1973~1976年段, 全国林分平均密度达到最低为35.24 Mg/ha(图6), 1999~2003年恢复到中华人民共和国成立初期水平, 2014~2018年段达到最大值42.63 Mg/ha. 各个区域碳密度的下降持续时间较长, 几乎从1949~1998年近50年的持续降低, 这与该时期的成过熟林的比重降低有关^[110,111], 导致林分单位面积蓄积量降低, 加之人工林面积增加, 但单位面积蓄积量较低, 因此全国林分平均碳密度也降低.

各区域的林分碳密度极不平衡. 东北地区、西南地区是森林资源重要基地, 碳密度一直相对较高; 西

图 5 1949~2018年各区域森林资源碳总储量年均变化率(网络版彩图)

Figure 5 Annual average change rate of total carbon storage of forest resources in different regions from 1949 to 2018 (color online)

图 6 林分碳密度不同时期变化(网络版彩图)

Figure 6 Changes of forest stand carbon density in different periods (color online)

北地区森林资源分布少, 森林覆盖率低, 但森林主要集中在中高山地区(如天山、秦岭), 森林采伐量小, 碳密度相对较高。但是近10年来, 随着天然林资源保护工程成效显现, 全国林分碳密度、各区域林分碳密度都在增长, 各区域的碳密度差距逐渐缩小, 趋于接近。碳密度差距最大的西南区和中南区对比, 1950~1962年西南区碳密度是中南区碳密度的2.56倍, 到2014~2018年仅为1.41倍。这一数据充分说明, 全国各区域森林资源面积增加, 质量得到不断提高是一个普遍现象。

4 讨论与结论

(1) 全国林分碳和碳总量变化。1949~2018年, 林分碳储量在1973~1976年出现最低值, 为3.384 PgC, 减少14.07%。1976~2018年林分碳储量逐年增长, 到2014~2018年达最大7.669 PgC, 提高94.74%。森林资源碳储总量的变化和林分碳储量的变化规律一致, 1973~1976年段出现低谷, 为3.907 PgC, 减少3.53%; 1976~2018年后碳储总量持续增长, 到2014~2018年段

达到最大为8.362 PgC, 提高106.46%。林分碳储量占碳储总量的比例较高达90%以上, 仅1988~1993年段占比最低为83.98%。这因为20世纪50~70年代末, 森林采伐以成过熟林为主, 森林资源消耗过量, 林分碳储量下降明显, 但森林碳储总量因造林增碳而下降较缓; 80年代后, 虽然森林采伐量增加, 但是植树造林力度和成效较大, 林分面积不断增加, 林分碳储量增加速度明显比森林碳储总量增加速度快。全国碳汇的变化规律也与此基本相同, 1976年之前, 年均碳积累是负值, 以碳源为主, 1976年之后碳积累是正值, 而且积累能力不断提高。

(2) 各个区域林分碳和碳总量碳变化。从林分碳储量变化看, 我国木材采伐比较集中的东北和西南区碳减少持续时间较长, 东北区在1950~1962年、1984~1988年2个调查时期碳增量都是负值, 西南区在1950~1962年、1973~1976年、1984~1988年3个调查时段碳增量都是负值, 林分采伐量大于生长量持续时间较长。其他各个区域碳增量从1977年起持续增长, 而且中南区和东南沿海区域碳年均增长速度较大。

从碳总量变化看, 1950~2018年森林采伐量集中的东北区碳变化一直是正值, 即东北区虽然采伐量较大, 但造林力度更大, 森林经营采用“采育并重”的方针, 积极造林, 采伐迹地更新比较及时, 东北区一直处于碳积累过程。西南地区在1977年以后碳积累也处于逐渐增加的过程, 碳总量正增长比林分碳正增长时间提前10

年。其他各区域除华北在1977~1981年时段碳积累为负值外, 碳积累均为正值, 且不断增加, 其中中南和东南沿海区域增加速度最快。

(3) 碳密度变化。从1949到2018年, 在1973~1976年时段林分碳密度达到最低为35.24 Mg/ha, 2014~2018年段恢复到42.63 Mg/ha。近10年来随着天然林资源保护工程成效显现, 全国林分碳密度、各区域林分碳密度都在增长, 各区域的碳密度差距逐渐缩小, 趋于接近。碳密度差距最大的西南区和中南区对比, 1950~1962年西南区碳密度是中南区碳密度的2.56倍, 到2014~2018年仅为1.41倍。

(4) 讨论。由于各区域的建模样本数量所限, 一些区域的树种模型还没有建立, 如北方分布较广的杨树、榆树等, 南方的湿地松等资料缺乏, 需要研究者共同努力完善; 如果按分区逐渐增加树种模型, 同时考虑年龄变量, 这样会大大提高区域生物量估测的精度。

本研究建立了各区域按针、阔、混三类型的蓄积生物量模型, 对碳储量的宏观估测提供了简便的方法, 对森林资源遥感监测的碳估计具有重要的作用。另外, 与1973~1976年森林资源清查建立后的各次清查数据对比, 1949年的数据、1950~1962年森林资源普查数据存在统计标准的差异, 并且西南、西藏地区疏林等数据存在一定的缺失, 对森林资源碳储量变化有微弱影响。

参考文献

- 1 Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 1996, 5: 497-508 [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, 5: 497-508]
- 2 Feng Z W. Biomass and Productivity of Forest Ecosystems in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999 [冯宗炜. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999]
- 3 Tang S Z, Zhang H R, Xu H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 2000, 1: 19-27 [唐守正, 张会儒, 胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究. *林业科学*, 2000, 1: 19-27]
- 4 Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, et al. Estimation of terrestrial vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000 (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2007, 37: 804-812 [方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007, 37: 804-812]
- 5 Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2000, 20: 733-740 [刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林的碳动态及对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20: 733-740]
- 6 Zeng W S, Tang S Z. Using mixed-effects modeling method to establish compatible national and regional single-tree biomass equations (in Chinese). *Centr South Forest Invent Plan*, 2010, 29: 1-3 [曾伟生, 唐守正. 利用混合模型方法建立全国和区域相容性立木生物量方程. *中南林业调查规划*, 2010, 29: 1-3]

- 7 Zeng W S, Tang S Z, Huang G S, et al. Population classification and sample structure on modeling of single-tree biomass equations for national biomass estimation in China (in Chinese). *Forest Resour Manage*, 2010, 3: 16–23 [曾伟生, 唐守正, 黄国胜, 等. 全国立木生物量建模总体划分与样本构成研究. *林业资源管理*, 2010, 3: 16–23]
- 8 Zeng W S, Zhang H R, Tang S Z. Modeling Method of Standing Tree Biomass (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2011 [曾伟生, 张会儒, 唐守正. 立木生物量建模方法. 北京: 中国林业出版社, 2011]
- 9 Li H K, Lei Y C, Zeng W S. Forest carbon storage in china estimated using forestry inventory data (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 2011, 7: 7–12 [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, 7: 7–12]
- 10 Huang G S, Ma W, Wang X J, et al. Carbon storage measurement of larch forest in Northeastern China (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 2014, 50: 167–174 [黄国胜, 马伟, 王雪军, 等. 东北地区落叶松林碳储量估算. *林业科学*, 2014, 50: 167–174]
- 11 Wang X J, Huang G S, Sun Y J, et al. Forest carbon storage and dynamics in Liaoning province from 1984 to 2000 (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2008, 10: 145–152 [王雪军, 黄国胜, 孙玉军, 等. 近20年辽宁省森林碳储量及其动态变化. *生态学报*, 2008, 10: 145–152]
- 12 Xu X, Li K. Biomass carbon sequestration by planted forests in China. *Chin Geogr Sci*, 2010, 20: 289–297
- 13 Zhu Y J. Carbon Sequestration Contribution and Compensation of Forest Resources in China (in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 2012 [朱永杰. 中国省域森林资源碳汇贡献及其补偿问题研究. 北京: 中国林业出版社, 2012]
- 14 Zhang C H, Ju W M, Chen J M, et al. China's forest biomass carbon sink based on seven inventories from 1973 to 2008. *Clim Change*, 2013, 118: 933–948
- 15 Guo Z D, Hu H F, Li P, et al. Spatio-temporal changes in biomass carbon sinks in China's forests during 1977–2008 (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2013, 43: 421–431 [郭兆迪, 胡会峰, 李品, 等. 1977~2008年中国森林生物量碳汇的时空变化. *中国科学: 生命科学*, 2013, 5: 421–431]
- 16 Wang X J, Zhang Y X, Huang G S, et al. Estimation of forest productivity and carbon storage in three gorges reservoir (in Chinese). *Ecol Sci*, 2014, 33: 1114–1121 [王雪军, 张煜星, 黄国胜, 等. 三峡库区森林生产力和固碳能力估算. *生态科学*, 2014, 33: 1114–1121]
- 17 Zeng W S. Developing one-variable individual tree biomass models based on wood density for 34 tree species in China (in Chinese). *Forest Resour Manage*, 2017, 6: 33–38 [曾伟生. 基于木材密度的34个树种组一元立木生物量模型建立. *林业资源管理*, 2017, 6: 33–38]
- 18 Li Y, Xu X L, Zhang C. Study on dynamics of arboreal forest carbon storage in China (in Chinese). *Forest Eng*, 2015, 4: 50–55 [李妍, 徐新良, 张超. 中国乔木林碳储量变化研究. *森林工程*, 2015, 4: 50–55]
- 19 Li W H, Deng K M, Li F. Biomass and primary productivity of main ecosystems in Changbai Mountain (in Chinese). *Stud Forest Ecosyst*, 1981, 2: 34–50 [李文华, 邓坤枚, 李飞. 长白山主要生态系统生物量与初级生产力研究. *森林生态系统研究*, 1981, 2: 34–50]
- 20 Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance (in Chinese). *Acta Bot Sin*, 2001, 9: 967–973 [方精云, 陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 9: 967–973]
- 21 Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in china between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320–2322
- 22 Wang Z F, Feng Z K. On CVD model transforming forestry volume into biomass (in Chinese). *J Beihua Univ (Nat Sci)*, 2006, 3: 265–268 [王仲锋, 冯仲科. 森林蓄积量与生物量转换的CVD模型研究. *北华大学学报(自然科学版)*, 2006, 3: 265–268]
- 23 Yi F, Han Y Z, He Z S, et al. Study on the forest biomass and carbon density in Taiyue Mountain of Shanxi Province (in Chinese). *J Shanxi Agric Sci*, 2017, 4: 599–602 [伊锋, 韩有志, 贺自书, 等. 山西太岳山森林生物量与碳密度研究. *山西农业科学*, 2017, 4: 599–602]
- 24 Zhou Y R, Yu Z L. Carbon storage and carbon balance of main forest ecosystems in China (in Chinese). *J Plant Ecol*, 2000, 24: 518–522 [周玉荣, 于振良. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24: 518–522]
- 25 Wang X K, Feng Z W, Ouyang Z Y. Vegetation carbon storage and density of forest ecosystems in China (in Chinese). *Chin J Appl Ecol*, 2001, 12: 13–16 [王效科, 冯宗炜, 欧阳志云. 中国森林生态系统的植物碳储量和碳密度研究. *应用生态学报*, 2001, 12: 13–16]
- 26 Xu X L, Cao M K, Li K R. Temporal-spatial dynamics of carbon storage of forest vegetation in China (in Chinese). *Prog Geogr*, 2007, 6: 1–10 [徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究. *地理科学进展*, 2007, 6: 1–10]
- 27 Luo Y J, Zhang X Q, Wang X K, et al. Forest biomass estimation methods and their prospects (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 2009, 45: 129–134 [罗云建, 张小全, 王效科, 等. 森林生物量的估算方法及其研究进展. *林业科学*, 2009, 45: 129–134]
- 28 Guo Z D, Fang J Y, Pan Y D, et al. Inventory-based estimates of forest biomass carbon stocks in China: A comparison of three methods. *Forest Ecol Manage*, 2010, 259: 1225–1231
- 29 Yao Y T, Piao S L, Wang T. Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests. *Sci Bull*, 2018, 63: 1108–1117
- 30 Liu C X, Zhou X L, Lei X D, et al. Separating regressions for model fitting to reduce the uncertainty in forest volume-biomass relationship. *Forests*, 2019, 10: 658

- 31 Zhou X L, Lei X D, Liu C X, et al. Re-estimating the changes and ranges of forest biomass carbon in China during the past 40 years. *Forest Ecosyst*, 2019, 6: 51
- 32 Zeng W S. Sample collection approach for modeling of single tree biomass equations (in Chinese). *Centr South Forest Invent Plan*, 2010, 2: 1–6 [曾伟生. 立木生物量建模样本数据采集方法研究. *中南林业调查规划*, 2010, 2: 1–6]
- 33 Wang B, Huang J Y, Yang X S, et al. Estimation of biomass, net primary production and net ecosystem production of China's forests based on the 1999–2003 National Forest Inventory. *Scand J Forest Res*, 2010, 25: 544–553
- 34 Li H K, Zhao P X, Lei Y C, et al. Comparison on estimation of wood biomass using forest inventory data (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 2012, 48: 44–52 [李海奎, 赵鹏祥, 雷渊才, 等. 基于森林清查资料的乔木林生物量估算方法的比较. *林业科学*, 2012, 48: 44–52]
- 35 Ye J Z, Jiang Z L, Zhou B L, et al. Annual variation dynamics of Chinese fir forest biomass in Yangkou forest farm of Fujian Province (in Chinese). *J Nanjing Forest Univ: Nat Sci Ed*, 1984, 8: 1–9 [叶镜中, 姜志林, 周本琳, 等. 福建省洋口林场杉木林生物量的年变化动态. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 1984, 8: 1–9]
- 36 Xing Y Q, Wang L H. Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai Mountains based on forest inventory (in Chinese). *Chin J App Ecol*, 2007, 18: 3–10 [邢艳秋, 王立海. 基于森林调查数据的长白山天然林森林生物量相容性模型. *应用生态学报*, 2007, 18: 3–10]
- 37 Shao B, Yan T. Study on carbon storage and carbon density of forest in Sichuan Province (in Chinese). *J Southwest Forest Univ*, 2017, 37: 179–183 [邵波, 燕腾. 四川省森林植被碳储量及碳密度估算. *西南林业大学学报*, 2017, 37: 179–183]
- 38 Zhou X W, Liu J S, Zhang B, et al. Biomass distribution pattern and model establishment of fir forest in Xizang Province (in Chinese). *J Centr South Univ Forest Technol*, 2018, 38: 104–108 [周学武, 刘金山, 张蓓, 等. 西藏自治区冷杉林生物量分布格局及模型研建. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38: 104–108]
- 39 Bai Y Q. Establishment of biomass model of *Larix olgensis* plantation (in Chinese). *J Northeast Forest Univ*, 1982, S1: 29–37 [白云庆. 人工落叶松的生物量模型建立. *东北林学院学报(增刊)*, 1982, S1: 29–37]
- 40 Ding B Y, Sun J H. Study on biological productivity and accumulation and distribution of nutrient elements in *Fraxinus mandshurica* natural forest (in Chinese). *J Northeast Forest Univ*, 1989, 4: 1–9 [丁宝永, 孙继华. 水曲柳天然林生物生产力及营养元素的积累与分布的研究. *东北林业大学学报*, 1989, 4: 1–9]
- 41 Luo T X. Pattern and Mathematical Model of Biological Productivity of Main Forest Types in China (in Chinese). Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 1996 [罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 中国科学院研究生院(国家计划委员会自然资源综合考察委员会), 1996]
- 42 Chen X L. Carbon sink function of main forest types in North China (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2003 [陈遐林. 华北主要森林类型的碳汇功能研究. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2003]
- 43 Liu Z G, Ma Q Y. Study on biomass and productivity of *Larix principis rupprechtii* plantation (in Chinese). *J Beijing Forest Univ*, 1992, S5: 114–123 [刘志刚, 马钦彦. 华北落叶松人工林生物量及生产力的研究. *北京林业大学学报*, 1992, S5: 114–123]
- 44 Xu J L. Study on biomass model and biomass estimation of *Larix gmelinii* in Dongzheling river (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2009 [许俊利. 东折棱河落叶松生物量模型研究及生物量估算. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2009]
- 45 Ma W, Sun Y J. Biomass under different densities for middle-aged *Larix olgensis* plantation (in Chinese). *J Northeast Forest Univ*, 2013, 41: 13–17 [马炜, 孙玉军. 长白落叶松中龄林生物量及其密度效应. *东北林业大学学报*, 2013, 41: 13–17]
- 46 Xu Z B. Biomass of main forest types in Daxing'an Mountains (in Chinese). *J Ecol*, 1988, 7: 49–54 [徐振邦. 大兴安岭主要森林类型生物量研究. *生态学杂志*, 1988, 7: 49–54]
- 47 Cheng Y X, Li Z X. Preliminary study on biomass of *Larix gmelinii* in three forest types (in Chinese). *Forest Invest Design Inner Mongol*, 1989, 4: 29–39 [程云霄, 李忠孝. 初探三种森林类型的兴安落叶松生物量. *内蒙古林业调查设计*, 1989, 4: 29–39]
- 48 Feng L, Yang Y H. Study on biomass of three types of *Larix gmelinii* virgin forest (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 1985, 21: 86–92 [冯林, 杨玉琪. 兴安落叶松原始林三种林型生物产量的研究. *林业科学*, 1985, 21: 86–92]
- 49 Zhang F, Shangguan T L. Community characteristics and biomass of *Larix principisrupprechtii* forest in Guandi Mountain (in Chinese). *J Shanxi Univ (Nat Sci Ed)*, 1992, 15: 72–77 [张峰, 上官铁梁. 关帝山华北落叶松林的群落学特征和生物量. *山西大学学报(自然科学版)*, 1992, 15: 72–77]
- 50 Fan D X, Yu X X, Yue Y J, et al. Forest carbon storage and its dynamic change in Beijing (in Chinese). *J Beijing Forest Univ*, 2008, 30: 117–120

- [樊登星, 余新晓, 岳永杰, 等. 北京市森林碳储量及其动态变化. 北京林业大学学报, 2008, 30: 117–120]
- 51 Chen L N, Gai Q. Preliminary study on the biomass of *Larix principis rupprechtii* forest community in Pangquangou Nature Reserve (in Chinese). J Shanxi Agric Univ (Nat Sci Ed), 1991, 3: 240–247 [陈林娜, 盖强. 庞泉沟自然保护区华北落叶松森林群落生物量的初步研究. 山西农业大学学报(自然科学版), 1991, 3: 240–247]
 - 52 Zhao J L, Wang L X, Han H R, et al. Biomass and spatial distribution characteristics of pinus tabulaeformis natural secondary forest at different age groups in the Liaoheyuan Nature Reserve (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2014, 34: 7026–7037 [赵金龙, 王冻鑫, 韩海荣, 等. 辽河源不同龄组油松天然次生林生物量及空间分配特征. 生态学报, 2014, 34: 7026–7037]
 - 53 Zhang T T. Study on biomass and carbon storage of *Larix principis rupprechtii* plantation (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2012 [张田田. 华北落叶松人工林生物量与碳储量的研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2012]
 - 54 Zhang T T, Ma L Y, Jia Z K, et al. Biomass and carbon sequestration functions of *Larix principis-rupprechtii* young and middle-aged plantations (in Chinese). J Northeast Forest Univ, 2012, 40: 32–35 [张田田, 马履一, 贾忠奎, 等. 华北落叶松幼中龄林的生物量与碳汇功能. 东北林业大学学报, 2012, 40: 32–35]
 - 55 Liu Y W, Wang X Y, Ma L Y, et al. Biomass productivity of *Larix principis-rupprechtii* plantation of different age classes (in Chinese). Hebei J Forest Orchard Res, 2013, 28: 339–343 [刘延文, 王西洋, 马履一, 等. 华北落叶松人工林生物生产力研究. 河北林果研究, 2013, 28: 339–343]
 - 56 Zhang P. Study on forest carbon storage in Beijing (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2009 [张萍. 北京森林碳储量研究. 博士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2009]
 - 57 Liu G Q, Tu X N, Zhao S D, et al. Distributional characteristics on biomass and nutrient elements of pine-oak forest belt in Mt. Qinling (in Chinese). Sci Silvae Sin, 2001, 37: 28–36 [刘广全, 土小宁, 赵士洞, 等. 秦岭松栎林带生物量及其营养元素分布特征. 林业科学, 2001, 37: 28–36]
 - 58 Li Y Y, Wang L, Liu Q J, et al. Spatial pattern of carbon storage and carbon density in forest vegetation of Kanas National Reserve (in Chinese). Stud Arid Area, 2019, 36: 1136–1145 [李园园, 王蕾, 刘琪璟, 等. 新疆喀纳斯自然保护区森林碳储量及碳密度变化. 干旱区研究, 2019, 36: 1136–1145]
 - 59 Ren J H. Carbon storage and carbon density of natural pinus tabulaeformis forest in Helan Mountain in Ningxia (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Xianyang: Northeast Forestry University, 2001 [任军辉. 宁夏贺兰山天然油松林碳储量和碳密度研究. 硕士学位论文. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011]
 - 60 Zhang X B, Shanguan Z P. The bio-cycle patterns of nutrient elements and stand biomass in forest communities in hilly loess regions (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2005, 25: 527–537 [张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征. 生态学报, 2005, 25: 527–537]
 - 61 Liu J Q, Li J J, Hao H, et al. Analysis on biomass and carbon storage of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains and its Influence factors (in Chinese). Mod Agric Sci Technol, 2017, 12: 140–143 [刘建泉, 李进军, 郝虎, 等. 祁连山青海云杉林生物量与碳储量及其影响因素分析. 现代农业科技, 2017, 12: 140–143]
 - 62 Liu X C, Wen S Z, Feng H H, et al. Biomass study of the plantation of *Alnus cremastogyne* Burkill at different stages of age (in Chinese). J Centr South Univ Forest Technol, 2007, 27: 83–86 [刘贤词, 文仕知, 冯汉华, 等. 四川桤木人工林不同年龄段生物量的研究. 中南林业科技大学学报, 2007, 27: 83–86]
 - 63 Fang X, Tian D L, Xiang W H, et al. On carbon accumulation, distribution of different densities in slash pine plantation (in Chinese). J Zhejiang Forest Coll, 2003, 20: 374–379 [方晰, 田大伦, 项文化, 等. 不同密度湿地松人工林中碳的积累与分配. 浙江农林大学学报, 2003, 20: 374–379]
 - 64 Zhang L, Huang Y, Luo T X, et al. Age effects on stand biomass allocations to different components: A case study in forests of *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* (in Chinese). J Grad School China Acad Sci, 2005, 22: 170–178 [张林, 黄永, 罗天祥, 等. 林分各器官生物量随林龄的变化规律——以杉木、马尾松人工林为例. 中国科学院研究生院学报, 2005, 22: 170–178]
 - 65 Liu Q. Study on biomass and productivity of *Pinus massoniana* plantation with different age groups (in Chinese). J Centr South Forest Univ, 1996, 4: 47–51 [刘茜. 不同龄组马尾松人工林生物量及生产力的研究. 中南林学院学报, 1996, 4: 47–51]
 - 66 Zeng S C, Su Z Y, Xie Z S, et al. Productivity, carbon uptake and oxygen evolution of main stands in Baiyun Mountain (in Chinese). J South China Agric Univ, 2003, 24: 16–19 [曾曙才, 苏志尧, 谢正生, 等. 广州白云山主要林分的生产力及吸碳放氧研究. 华南农业大学学报, 2003, 24: 16–19]

- 67 Yang K, Guan D S. Biomass and its distribution of forest in the Pearl River Delta (in Chinese). *Ecol Environ Sci*, 2006, 15: 84–88 [杨昆, 管东生. 珠江三角洲森林的生物量和生产力研究. *生态环境学报*, 2006, 15: 84–88]
- 68 Xue Y, Wu Z P, Yang Z Y, et al. The carbon storage distribution pattern of different ages of *Casuarina equisetifolia* in Haikou City (in Chinese). *Trop Forest*, 2018, 46: 59–61 [薛杨, 吴至平, 杨众养, 等. 海口市不同林龄木麻黄林分碳储量分配格局. *热带森林*, 2018, 46: 59–61]
- 69 Ji G Z, Wu C Z, Hong W, et al. A study on the productivity and capacities of CO₂ fixation and O₂ production of the major stands in the Minjiang river vally (in Chinese). *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2003, 25: 828–833 [姬桂珍, 吴承祯, 洪伟, 等. 闽江流域主要林分生产力的空间分布格局及其吸碳放氧量的研究. *江西农业大学学报*, 2003, 25: 828–833]
- 70 Cai Y. A comparison of the biomass and their distribution patterns between the mixed forest of Chinese fir and *Michelia macclurei* and pure Chinese fir plantation (in Chinese). *J Fujian Forest Sci Technol*, 2007, 2: 48–52 [蔡勇. 杉木火力楠混交林和杉木纯林的生物量及分布格局研究. *福建林业科技*, 2007, 2: 48–52]
- 71 Lu S T. A study on productivity and ecological benefit in mixed stand of Chinese fir and *Sylvestrial elaeocarpus* (in Chinese). *J Fujian Coll Forest*, 1998, 18: 348–351 [卢善土. 杉木山杜英混交林林分生产力及生态效益的研究. *福建林学院学报*, 1998, 18: 348–351]
- 72 Qian N Z, Ye J Z. Biomass of Chinese fir mixed family plantation in Yangkou forest farm of Fujian Province (in Chinese). *J Nanjing Forest Univ (Nat Sci Ed)*, 1992, 16: 19–24 [钱能智, 叶镜中. 福建省洋口林场杉木混合家系人工林的生物量. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1992, 16: 19–24]
- 73 Hui G Y, Luo Y W, Zhang X L. Productivity of Chinese fir plantation in Dagangshan hilly area of Jiangxi Province (in Chinese). *Sci Silvae Sin*, 1989, 25: 564–569 [惠刚盈, 罗云伍, 张校林. 江西大岗山丘陵区杉木人工林生产力的研究. *林业科学*, 1989, 25: 564–569]
- 74 Nie D P. Productivity and nutrient cycling of Chinese fir plantation under different site conditions (in Chinese). *Forest Res*, 1993, 6: 643–649 [聂道平. 不同立地条件的杉木人工林生产力和养分循环. *林业科学研究*, 1993, 6: 643–649]
- 75 Qiu G Y. Study on the individual tree biomass of 20 year old *Cunninghamia lanceolata* plantation under different site conditions in North Fujian (in Chinese). *J Fujian Forest Sci Technol*, 1999, 3: 21–23 [邱贵云. 闽北不同立地条件20年生杉木人工林单株生物量的研究. *福建林业科技*, 1999, 3: 21–23]
- 76 Yang Y S, Ye D S, Yu X T, et al. Stand biomass in different rotations of Chinese fir (in Chinese). *J Northeast Forest Univ*, 1999, 27: 9–12 [杨玉盛, 叶德生, 俞新妥, 等. 不同栽杉代数林分生物量的研究. *东北林业大学学报*, 1999, 27: 9–12]
- 77 Hu L Y. Ecosystem service function and value evaluation of main forest types in Suichang County (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2014 [胡露云. 遂昌县主要森林类型生态系统服务功能及其价值评估. 硕士学位论文. 杭州: 浙江农林大学, 2014]
- 78 Liao H Z, Zhang C N. Study on the growth of *Castanopsis fissa* plantation (in Chinese). *Pract Forest Technol*, 1994, 5: 15–17 [廖涵宗, 张春能. 黧蒴栲人工林生长量的研究. *林业实用技术*, 1994, 5: 15–17]
- 79 Liao H Z, Zhang C N, Di D S, et al. Study on ecosystem productivity of *Fokienia hodginsii* plantation (in Chinese). *J Nanjing Forest Univ (Nat Sci Ed)*, 1995, 19: 59–66 [廖涵宗, 张春能, 邸道生, 等. 福建柏人工林生态系统生产力的研究. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1995, 19: 59–66]
- 80 Huang X H. Study on biomass, nutrient content and distribution of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Xijiang region (in Chinese). *Forest Invest Plan Centr South China*, 1988, 1: 13–21 [黄惜河. 西江地区杉木人工林生物量和营养元素含量及其分配的研究. *中南林业调查规划*, 1988, 1: 13–21]
- 81 Yang H X. Community structure, biomass and carbon storage of qercus natural secondary forest in Funiu Mountain area, Henan Province (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016 [杨红震. 河南伏牛山区栎类天然次生林群落结构与生物量、碳储量研究. 硕士学位论文. 郑州: 河南农业大学, 2016]
- 82 Chen X L. Biomass and carbon storage of forest ecosystem in Anren County, Hunan Province (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Changsha: Central South University of Forestry Science and Technology, 2016 [陈小林. 湖南安仁县森林生态系统生物量和碳储量研究. 硕士学位论文. 长沙: 中南林业科技大学, 2016]
- 83 Pan W S, Li L C, Gao Z H. Biomass and nutrient distribution of Chinese fir plantations in two different regions (in Chinese). *Hunan Forest Sci Technol*, 1980, 2: 1–10 [潘维涛, 李利村, 高正衡. 两个不同地域类型杉木林的生物产量和营养元素分布. *湖南林业科技*, 1980, 2: 1–10]
- 84 Deng Q X, Zhao Y, Wu L J, et al. Biomass productivity of a 12-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantation in Daqingshan of Guangxi (in Chinese). *Guangxi Forest Sci*, 2008, 37: 187–190 [邓秋香, 赵瑛, 伍禄军, 等. 广西大青山12年生杉木人工林的生物生产力. *广西林业科学*, 2008, 37: 187–190]

- 85 Wen Y G, Liang H W, Jiang H P. Study on biomass and distribution of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Guangxi (in Chinese). J Guangxi Agric Univ, 1995, 14: 55–64 [温远光, 梁宏温, 蒋海平. 广西杉木人工林生物量及分配规律的研究. 广西农业大学学报, 1995, 14: 55–64]
- 86 Wen Y G, Liang L R, Li J J, et al. Biological productivity of *Cunninghamia lanceolata* plantations in different eco geographical regions of Guangxi (in Chinese). Genomics Appl Biol, 1988, 7: 55–66 [温远光, 梁乐荣, 黎洁娟, 等. 广西不同生态地理区域杉木人工林的生物生产力. 基因组学与应用生物学, 1988, 7: 55–66]
- 87 Lin W J. Study on productivity and nutrient cycling of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Tianlin Laoshan (in Chinese). Genomics Appl Biol, 1991, 4: 27–39 [林卫江. 田林老山中山杉木人工林生产力及营养元素循环的研究. 基因组学与应用生物学, 1991, 4: 27–39]
- 88 Wei F, Li X X, Wen Y G, et al. Ecological research report on Chinese fir plantation in Tianlin Laoshan Mountain of Northwest Guangxi (in Chinese). Genomics Appl Biol, 1991, 10: 1–26 [韦峰, 李信贤, 温远光, 等. 桂西北田林老山中山杉木人工林生态研究报告. 基因组学与应用生物学, 1991, 10: 1–26]
- 89 Wen Z M, Liang H W, Li Y. Biological cycling of nutrient elements in tree layer of mature Chinese fir forest (in Chinese). J Plant Ecol, 1991, 15: 36–45 [温肇穆, 梁宏温, 黎跃. 杉木成熟林乔木层营养元素生物循环的研究. 植物生态学报, 1991, 15: 36–45]
- 90 Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W, et al. Biological productivity of *Cunninghamia lanceolata* forests in different natural zones (in Chinese). Ser Plant Ecol Geobot, 1984, 8: 93–100 [冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 等. 不同自然地带杉木林的生物生产力. 植物生态学与地植物学丛刊, 1984, 8: 93–100]
- 91 Deng S J, Wang K P, Gao H. Distribution of biomass and nutrient elements in aged Chinese fir plantation (in Chinese). J Ecol, 1988, 1: 13–18 [邓士坚, 王开平, 高虹. 杉木老龄人工林生物产量和营养元素含量的分布. 生态学杂志, 1988, 1: 13–18]
- 92 Zhao J H. Carbon storage forecast of *Eucommia ulmoides* afforestation for carbon sequestration in the Western Henan (in Chinese). Centr South Forest Invent Plan, 2015, 2: 59–61 [赵江红. 豫西杜仲碳汇造林碳储量预测. 中南林业调查规划, 2015, 2: 59–61]
- 93 Yu H, Peng J. Study on the biomass of natural *Pinus yunnanensis* in Niuda forest area of Shiping county, Yunnan Province (in Chinese). J Yunnan Univ (Nat Sci Ed), 1993, 15: 164–171 [虞泓, 彭鉴. 云南石屏县牛达林区天然云南松中幼年林林木生物量的研究. 云南大学学报 (自然科学版), 1993, 15: 164–171]
- 94 An H P, Jin X Q, Yang C H. Study on biomass growth law and forest biomass change of main vegetation types in early stage of Banqiao River watershed management (in Chinese). Guizhou Forest Sci Technol Period, 1991, 4: 20–34 [安和平, 金小麒, 杨成华. 板桥河小流域治理前期主要植被类型生物量生长规律及森林生物量变化研究. 贵州林业科技, 1991, 4: 20–34]
- 95 Ding G J. Changes of biomass and productivity of *Pinus massoniana* plantation—changes of biomass and productivity in different sites (in Chinese). J Mountain Agric Biol, 2000, 19: 411–417 [丁贵杰. 马尾松人工林生物量及生产力的变化规律: III 不同立地生物量及生产力变化. 山地农业生物学报, 2000, 19: 411–417]
- 96 Ding G J, Wang P C. Study on change laws of biomass and productivity of masson pine forest plantation II. Biomass and productivity of stand at different ages (in Chinese). Forest Res, 2002, 15: 54–60 [丁贵杰, 王鹏程. 马尾松人工林生物量及生产力变化规律研究 II. 不同林龄生物量及生产力. 林业科学研究, 2002, 15: 54–60]
- 97 Ding G J. Study on biomass and productivity of masson pine planting stand—I. Biomass and density effect of different planting density (in Chinese). J Fujian Coll Forest, 2003, 23: 34–38 [丁贵杰. 马尾松人工林生物量和生产力研究—I. 不同造林密度生物量及密度效应. 福建林学院学报, 2003, 23: 34–38]
- 98 Li X M. Determination of biomass of *Larix kaempferi* (in Chinese). Sichuan Forest Sci Technol, 1984, 1: 27–29 [李学明. 日本落叶松的生物产量测定. 四川林业科技, 1984, 1: 27–29]
- 99 Duan W X, Zhu B, Liu R, et al. Biomass and soil carbon dynamics in *Cryptomeria fortunei* plantations (in Chinese). J Beijing Forest Univ, 2007, 29: 55–59 [段文霞, 朱波, 刘锐, 等. 人工柳杉林生物量及其土壤碳动态分析. 北京林业大学学报, 2007, 29: 55–59]
- 100 Zhu X W, Shi Q M, Li Y L. A preliminary study on the biomass of trees and shrubs in Datong Baoku Forest Area, Qinghai Province (in Chinese). Sci Technol Qinghai Agric Forest, 1993, 1: 15–20 [朱兴武, 石青梅, 李永良, 等. 青海大通宝库林区乔灌木生物量的初步研究. 青海农林科技, 1993, 1: 15–20]
- 101 Gui L T, Zhang B, Wu N F, et al. Forest carbon density and distribution of Tibet autonomous region (in Chinese). Forest Invest Plan Centr South China, 2014, 33: 34–42 [桂来庭, 张蓓, 吴南飞, 等. 西藏自治区森林碳密度及分布规律研究. 中南林业调查规划, 2014, 33: 34–42]
- 102 Li H K, Lei Y C. Assessment of Forest Vegetation Biomass and Carbon Storage in China (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2010 [李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京: 中国林业出版社, 2010]
- 103 Ministry of Forestry of the PRC. Forest Resources in Contemporary China (1949–1993) (in Chinese). Department of Resources and Forestry

- Administration, Ministry of Forestry, 1996 [中华人民共和国林业部. 当代中国森林资源概况(1949-1993). 林业部资源和林政管理司, 1996]
- 104 Ministry of Forestry of the PRC. National Forest Resources Statistics (1994-1998) (in Chinese). Forest Resources Management Department of State Forestry Administration, 2000 [中华人民共和国林业部. 全国森林资源统计(1994-1998). 国家林业局森林资源管理司, 2000]
- 105 State Forestry Administration. China Forest Resources Report 2005 (in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 2005 [国家林业局. 中国森林资源报告. 北京: 中国林业出版社, 2005]
- 106 State Forestry Administration. China forestry Yearbook 2008 (in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 2008 [国家林业局. 中国林业年鉴 2008. 北京: 中国林业出版社, 2008]
- 107 State Forestry Administration. China Forest Resources Report (2009) (in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 2010 [国家林业局. 中国森林资源报告(2009). 北京: 中国林业出版社, 2010]
- 108 State Forestry Administration. National Forest Resources Statistics—The Eighth National Forest Resources Inventory (in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 2014 [国家林业局. 全国森林资源统计——第八次全国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2014]
- 109 National Forestry and Grassland Administration. National Forest Resources Statistics (2014-2018) (in Chinese). Beijing: China Forestry Press, 2019 [国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014-2018). 北京: 中国林业出版社, 2019]
- 110 Zhang Y X. Change analysis on Chinese forest construction from year 1950 to 2003 (in Chinese). J Beijing Forest Univ, 2006, 28: 80–87 [张煜星. 中国森林资源1950-2003年结构变化分析. 北京林业大学学报, 2006, 28: 80–87]
- 111 Zhang Y X, Song C H. Impacts of afforestation, deforestation, and reforestation on forest cover in China from 1949 to 2003. J Forest, 2006, 104: 383–387

Study on forest volume-to-biomass modeling and carbon storage dynamics in China

ZHANG YuXing¹ & WANG XueJun²

1 Forestry Industry Planning and Design Institute of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;

2 Office of the National Forestry and Grassland Administrations Forest Resources Supervision Commissioner in Beijing, Beijing 100018, China

Estimating forest biomass (in forest volume per unit area) is a significant forest carbon estimation method. However, models of forest volume-to-biomass were established based on the limited tree species at a local scale. Therefore, it is significant to establish regional and national biomass models. According to sampling populations and climate differences in forest resource inventory, China was divided into seven regions. Using the national biomass estimated data obtained in this study, we established forest volume-to-biomass regression models for 25 tree species and 21 forest stands of conifer, broad-leaved, and conifer-broad-leaved mixed forest in China. This study aims to reveal the changing patterns and causes of forest carbon storage and its contribution to carbon sinks across the nation and different regions in the past 70 years. Based on the established regression models and data of the forest resource inventory and statistics within 11 periods from 1949 to 2018, forest carbon storage and carbon source/sink capacity in China were systematically calculated. Results obtained showed that carbon change in various regions was significantly different. From 1949 to 1976, the carbon in China's forest resources decreased significantly; the average annual decrease was 0.52%. The total carbon in forest resources was 0.13%, and the reduction lasted for a long time in Northeast and Southwest China. From 1977 to 2018, the standing carbon and total carbon, which was 3.80% and 3.14%, respectively, increased each year, and the growth rate was the largest between 1999 and 2003. In 2018, the total carbon stored increased from 4.050 PgC (1 Pg=10¹⁵ g) to 8.362 PgC (an increase of 106.46%), and carbon storage of the forest increased from 3.938 PgC to 7.669 PgC (an increase of 94.74%). The lowest carbon density during 1973–1976 was 35.24 Mg/ha (1 Mg=10⁶ g), which increased to 42.63 Mg/ha between 2014 and 2018 and continued to increase. In the future, China's carbon sink potential will be huge.

forest resources, forest resources inventory, biomass, carbon storage, carbon density, carbon sink

doi: [10.1360/SSV-2020-0301](https://doi.org/10.1360/SSV-2020-0301)