

DOI: 10.5846/stxb201301240142

魏亚伟, 周旺明, 于大炮, 周莉, 方向民, 赵伟, 包也, 孟莹莹, 代力民. 我国东北天然林保护工程区森林植被的碳储量. 生态学报, 2014, 34 (20): 5696-5705.

Wei Y W, Zhou W M, Yu D P, Zhou L, Fang X M, Zhao W, Bao Y, Meng Y Y, Dai L M. Carbon storage of forest vegetation under the Natural Forest Protection Program in Northeast China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34 (20): 5696-5705.

## 我国东北天然林保护工程区森林植被的碳储量

魏亚伟<sup>1,2</sup>, 周旺明<sup>1</sup>, 于大炮<sup>1</sup>, 周莉<sup>1</sup>, 方向民<sup>1,2</sup>, 赵伟<sup>1,2</sup>,  
包也<sup>1,2</sup>, 孟莹莹<sup>1,2</sup>, 代力民<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所森林与土壤生态国家重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**以东北天然林保护工程区森林生态系统为对象, 通过对其主要森林类型进行调查, 探讨天保工程经营区划对森林植被固碳现状的影响, 并结合已有的东北林区生物量与蓄积量数据库, 建立了东北林区主要树种组的生物量-蓄积量回归模型, 然后以第 7 次森林资源清查为基础, 对东北天保工程区森林植被碳储量进行估算, 以期为全国森林生物量的估算和天保工程的评估提供参考。结果表明, 不同经营区之间(重点公益林、一般公益林和商品林)森林植被碳密度的差异并不显著, 这可能与天然林保护工程实施初期经营区划的标准、样地的选择以及天保工程实施过程中粗放的管理方式有关。东北天保工程区森林植被碳储量为 1045 TgC, 占东北、内蒙古三省森林植被总碳储量的 68%; 工程区以天然林为主, 占工程区总植被碳储量的 97%。工程区森林植被平均碳密度为 41 Mg/hm<sup>2</sup>, 较东北、内蒙古三省平均植被碳密度高 14%; 工程区植被碳密度随林龄的增加逐渐增大, 由幼龄林的 13 Mg/hm<sup>2</sup>到过熟林的 63 Mg/hm<sup>2</sup>。因此, 继续加强天然林保护工程的实施, 提高其林分质量, 这对未来我国森林碳汇潜力的增加和森林的可持续发展都具有重要的意义。

**关键词:**东北林区; 天然林保护工程; 经营区划; 生物量-蓄积量回归模型; 碳储量

## Carbon storage of forest vegetation under the Natural Forest Protection Program in Northeast China

WEI Yawei<sup>1,2</sup>, ZHOU Wangming<sup>1</sup>, YU Dapao<sup>1</sup>, ZHOU Li<sup>1</sup>, FANG Xiangmin<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei<sup>1,2</sup>, BAO Ye<sup>1,2</sup>, MENG Yingying<sup>1,2</sup>, DAI Limin<sup>1,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The Natural Forest Protection Program (NFPP), which aims at protecting ecological resources and achieving sustainable forest management, has been implemented for 10 years in Northeast China. Under the program forest ecosystems in the region have been divided into three management areas—Key conservation, General conservation and Commercial forest. Each of these three types of forest land is subject to different management measures (protecting or logging). Estimating carbon storage of forest vegetation in these areas is important both for understanding the capacity of forests in the Northeast region for carbon sequestration and as an aid to assessing the effectiveness of the NFPP in meeting its goals. To address this important need, this study selected five major forest types in the Northeast forest region—larch forest, birch forest, coniferous mixed forest, broadleaved mixed forest, coniferous and broadleaved mixed forest. Each forest type was divided into four age classes—young, mid-aged, premature and over mature forest. Tree biomass was calculated through

**基金项目:**国家林业公益性行业专项(201104070); 国家科技支撑计划课题(2012BAD22B04); 中国科学院战略性先导科技专项课题(XDA05060200)

收稿日期:2013-01-24; 网络出版日期:2014-03-11

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lmdai@iae.ac.cn

species-specific allometric equation models based on field measurement in the Daxing'anling, Xiaoxing'anling and Changbai mountains. At the same time, an dataset on biomass and volume of the main forest types in the Northeast forest region was established based on existing data from former studies. Since some studies have found that the relationship between forest biomass and volume fits relatively well within a liner regression framework, this study utilized this two data sources noted above to establish biomass-volume line regression models of the main tree species groups in the Northeast, focusing primarily on the five major forest types identified above. Forest biomass carbon storage in areas under the NFPP in the Northeast region was subsequently estimated based on data from the 7th National Forest Resource Inventory. Results showed that forest biomass carbon storage based on field measurement did not varied significantly with management areas, which likely reflects both the classification standard for the management areas and the relatively short period since the NFPP have been implemented. On the other hand, forest biomass carbon storage of lands under the NFPP was 1045 TgC, which accounted for 68% of total forest biomass carbon storage in the Northeast provinces of Jilin, Heilongjiang and Inner Mongolia. Moreover, forest biomass carbon density of lands under the program ( $41 \text{ Mg/hm}^2$ ) exceeded that of the average biomass carbon density in Northeast provinces ( $36 \text{ Mg/hm}^2$ ). Simultaneously, in the lands of the NFPP, forest biomass C density increased with forest age class, from  $16.4 \text{ Mg/hm}^2$  in young to  $63.0 \text{ Mg/hm}^2$  in over mature forest, thus the relative large areas of young and mid-aged forests (together accounted for 61% of total forest area), implying its great C sequestration potential in the future. In addition, forest biomass carbon storage was dominated by natural forest, which accounted for 97% of total biomass carbon storage under the NFPP. On an overall basis, the Natural Forest Protection Program acts an important role in the Northeast forest region, and it should be played an increasingly important role in forest ecosystem carbon sequestration and sustainable forest management in the next implemented decade.

**Key Words:** northeast forest region; natural forest protection program; classification-based forest management; biomass-volume line regression model; carbon storage

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,贮存了全球陆地植被碳库的 77% 和全球土壤碳库的 39%<sup>[1]</sup>,其每年与大气间的碳交换量高达陆地生态系统的 90%<sup>[2]</sup>,在维持全球碳平衡以及调节气候方面具有不可替代的作用。因此,明确森林生态系统的固碳现状对更好的了解森林生态系统碳循环以及森林生态系统的经营管理都具有重要的意义。

迄今为止,关于我国森林生物量的研究已经进行了很多<sup>[3-7]</sup>,但多数研究均基于 1998 年以前的森林资源清查资料,而且由于研究方法的不统一,造成研究结果间差异较大。尽管如此,研究结果均表明我国森林生态系统近 30 年来一直表现为明显的碳汇,尤其是国家实施重大生态工程以后,这种碳汇效应愈加显著<sup>[5,8]</sup>,然而对于重大生态工程在全国森林生态系统中的作用以及重大生态工程本身的固碳能力却很少被报道<sup>[7,9]</sup>。

大量研究结果表明由方精云等<sup>[10]</sup>建立的换算因子连续函数法(利用倒数方程来表示换算因子与蓄积量密度的关系)较好的实现了由样地实测到区

域推算的尺度转换,提高了估算精度,在全国森林生物量的估算中得到了较好的应用<sup>[3-5,11-13]</sup>。但是由于我国地域广阔、气候差异较大、植被类型多样,就全国尺度对某一森林类型而言,该方法存在样本数不足的缺陷,在全国尺度上产生的误差较大<sup>[6,14]</sup>。而将我国进行区域划分,对地理位置相近、气候条件相似、生长规律相同的植被类型进行归类,建立区域尺度上的生物量-蓄积量回归模型,无疑会提高森林生物量估算的精度<sup>[12,15]</sup>。

天然林资源保护工程(简称天保工程)作为我国六大林业重点工程之一,旨在促进我国天然林资源的恢复和发展,在全国森林生态系统中占有重要的地位。因此,本研究以东北天然林保护工程区森林生态系统为对象,通过对工程区主要森林类型进行调查,探讨天保工程经营区划对森林植被碳密度的影响,并通过结合已有的东北林区生物量与蓄积量数据库,重新建立了该区主要树种组的生物量-蓄积量回归模型,进而对东北天保工程区森林植被碳储量进行估算,以期为全国尺度森林植被碳储量的估

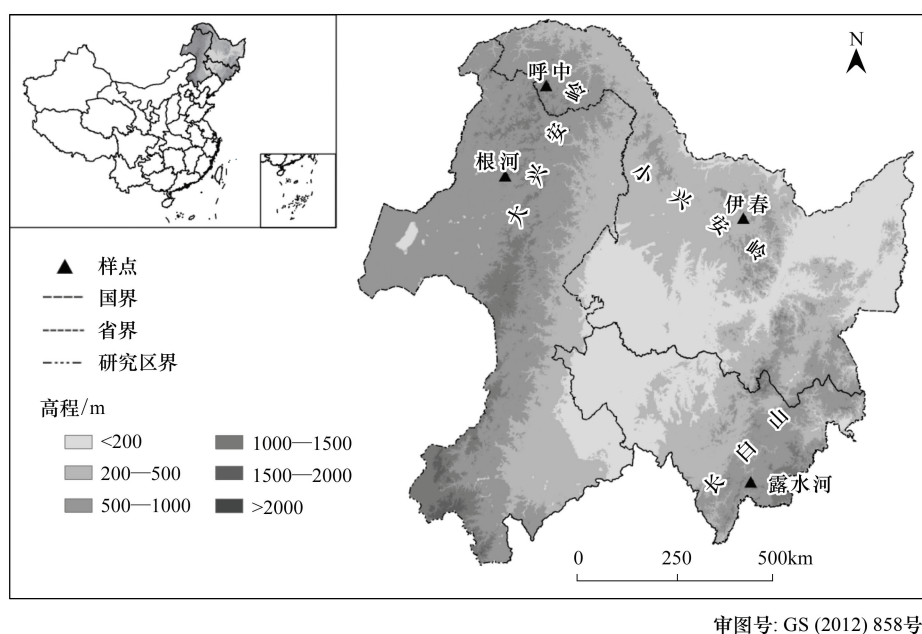
算和全国天保工程区森林生态效益的评估提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

东北天保工程区主要指东北内蒙古四大国有森工集团所占的区域(内蒙古森工、吉林森工、龙江森工和大兴安岭林业集团公司),总林地面积 2829 万  $\text{hm}^2$ ,其中乔木林面积 2550 万  $\text{hm}^2$ ,占东北内蒙古天保工程区总乔木林地面积的 88%,占东北内蒙古林区总乔木林面积的 72%。东北天保工程区位于东北内蒙古林区内,地处黑龙江、吉林和内蒙古三省

(区),主要包括大兴安岭、小兴安岭、张广才岭和长白山等山系(图 1)。该区横跨温带和寒温带两个气候带,冬天寒冷而干燥,夏天湿热而多雨;年均温为  $-2.5\sim 4.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,年降雨 350—1100 mm,降雨多集中在夏季;由南向北,该区年均温逐渐降低、生长季逐渐缩短。东北内蒙古林区包括 2 个完整的植被带,即寒温带落叶针叶林带和温带针阔混交林带;其中寒温带落叶针叶林带位于我国最北部的大兴安岭,以耐寒的落叶松(*Larix gmelinii*)为单优势树种;温带针阔混交林带位于小兴安岭和长白山,以喜湿的红松(*Pinus koraiensis*)和紫椴(*Tilia amurensis*)为优势种,伴生有多种阔叶树的阔叶红松林。



审图号: GS (2012) 858号

图 1 东北天保工程区样点分布

Fig.1 Location of study sites in the region of Natural Forest Protection Program in Northeast China

### 1.2 样地设置

研究地点分别设在东北天保工程区 4 个典型的实施单元内,即长白山林区的露水河、小兴安岭林区的伊春、以及大兴安岭林区的根河和呼中(图 1),研究点详细情况见表 1。根据东北内蒙古林区的主要植被类型分布,本研究分别在长白山和小兴安岭选择针阔混交林、针叶混交林和阔叶混交林,在大兴安岭选择落叶松林和白桦林,每个林型均包括幼龄林、中龄林、近熟林和过熟林等 4 个龄组<sup>[16]</sup>;另外,考虑到天保工程自身的特点,所有样地均分布在重点公益林、一般公益林和商品林区。样地面积均为

400  $\text{m}^2$  (20 m×20 m),调查样地内所有  $\text{DBH} \geq 5\text{ cm}$  的乔木,记录其胸径和树高等;并选择森林类型相同、林龄相近和地形条件相似的样地作为重复,每块样地至少 3 个重复,共设置样地 181 个。

### 1.3 植被碳储量计算

单株乔木生物量和蓄积量的计算分别参照长白山<sup>[17]</sup>、小兴安岭<sup>[18]</sup>和大兴安岭<sup>[19]</sup>林区的异速生长方程和一元立木材积表(吉林省和黑龙江省),然后根据样地面积转换得到各森林类型样地尺度的生物量密度与蓄积量密度;并结合已有的东北林区生物量与蓄积量数据库<sup>[20-21]</sup>,利用材积源-生物量法<sup>[3]</sup>

重新建立东北林区主要树种组的生物量( $Y$ )与蓄积量( $V$ )线性回归方程,记作方程 1:

$$Y=aV+b$$

式中, $Y$ 和 $V$ 分别为生物量密度( $\text{Mg}/\text{hm}^2$ )和蓄积量

密度( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ), $a,b$ 均为常数(表 2,其中红松、蒙古栎、杨树和樟子松数据均来自王新闯博士论文<sup>[21]</sup>;对个别未涉及到的树种组的生物量的计算均参照已建立的相似树种组的生物量-蓄积量方程)。

表 1 研究地点详细概况

Table 1 Overview of geography, climate and vegetation of study sites

研究地点 Sites	纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E	海拔 Elevation/m	年均温 Mean annual temperature/℃	年降雨 Mean annual precipitation/ mm	森林类型 Forest types	样地数 No. of plots
呼中	51°43'—52°24'	122°19'—124°03'	446—990	-0.8—1.1	359—636	落叶松、白桦	38
根河	50°29'—50°58'	120°56'—121°33'	446—1011	-2.5—-0.7	208—381	落叶松、白桦	41
伊春	47°05'—48°16'	128°12'—129°15'	259—599	1.2—2.8	421—823	针叶混、针阔混、阔 叶混	57
露水河	42°25'—42°39'	127°45'—128°00'	582—1039	2.6—4.8	509—810	针叶混、针阔混、阔 叶混	45

表 2 东北林区主要树种组生物量与蓄积量关系模型参数

Table 2 Parameters of the biomass-volume models for the main tree species in Northeast China

树种组 Tree specie group	参数 Parameters		相关系数 $R^2$ Correlation coefficient	样地数 $n$ No. of plots
	$a$	$b$		
针叶混 Coniferous mixed forest	0.708	26	0.859 **	46
针阔混 Coniferous and broadleaved mixed forest	0.788	-8.839	0.898 **	239
阔叶混 Broadleaved mixed forest	0.803	-0.289	0.815 **	236
白桦 <i>Betula</i> forest	0.744	3.989	0.812 **	96
落叶松 <i>Larix</i> forest	0.722	12.28	0.778 **	157
红松 <i>Pinus koraiensis</i> forest	0.634	7.134	0.990 **	88
蒙古栎 <i>Quercus</i> forest	1.207	-2.989	0.997 **	26
杨树 <i>Populus</i> forest	0.635	20.57	0.899 **	99
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	0.405	51.8	0.606 **	82

因第 7 次全国森林资源清查资料(2004—2008)中只有东北天保工程区的总面积和总蓄积,并未涉及到分树种的统计资料,因此本研究采取了如下处理<sup>[22]</sup>:通过已建立的主要树种组的生物量-蓄积量回归模型,分别计算出东北、内蒙古(第 3 次—第 7 次清查)各省总平均生物量与总平均蓄积量;分析表明,省域尺度平均生物量与平均蓄积量呈现良好的线性关系,且不随时段的不同而变化,因此,将二者进行回归,得到东北、内蒙古三省总平均生物量与总平均蓄积量的回归方程,记作方程 2(图 2)。

#### 1.4 方程验证

分别利用方程 1 和方程 2 对东北、内蒙古三省的天然林和人工林(第 7 次森林清查)进行计算,结果表明除内蒙古人工林外(59.47%),其余各结果的

相对误差均在 1.48%—6.74%(图 2),说明方程 2 对东北天保工程区省域尺度森林生物量的计算具有较高的精确性和可信度,因此可以用来对东北天保工程区森林植被生物量进行估算。

森林植被碳储量与生物量的转换系数采用目前国际上常用的转换系数 0.5<sup>[23]</sup>。

#### 1.5 数据处理

基于样地实测的天保工程经营区(重点公益林、一般公益林和商品林)和林龄(幼龄林、中龄林和近熟林)对植被碳密度的影响采用双因素方差分析(Two-way ANOVA);同一龄组不同经营区之间乔木碳密度的差异或同一经营区不同龄组间乔木碳密度的差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA),分析软件均为 SPSS 16.0,检验水平设在 0.05。



2 结果与分析

2.1 东北天保工程不同经营区森林植被碳密度

东北天保工程区森林植被碳密度受林龄的影响显著( $P<0.01$ ,表 3),近熟林大于中龄林和幼龄林,均有显著差异( $P<0.05$ ,图 3);不同经营区之间森林植被碳密度的变化较小( $P>0.05$ ,表 3),除在伊春林

区中龄林和近熟林中呈现出较大的差异外( $P<0.05$ ),其它各龄组不同经营区之间森林植被碳密度的变化均不显著( $P>0.05$ ,图 3)。此外,森林植被碳密度从长白山到小兴安岭到大兴安岭有逐渐减小的趋势(图 3),其中露水河、伊春、根河和呼中森林植被碳密度的变化范围分别为 64.15—216.70、53.11—139.96、41.32—134.65 和 40.08—98.72  $\text{Mg}/\text{hm}^2$ 。

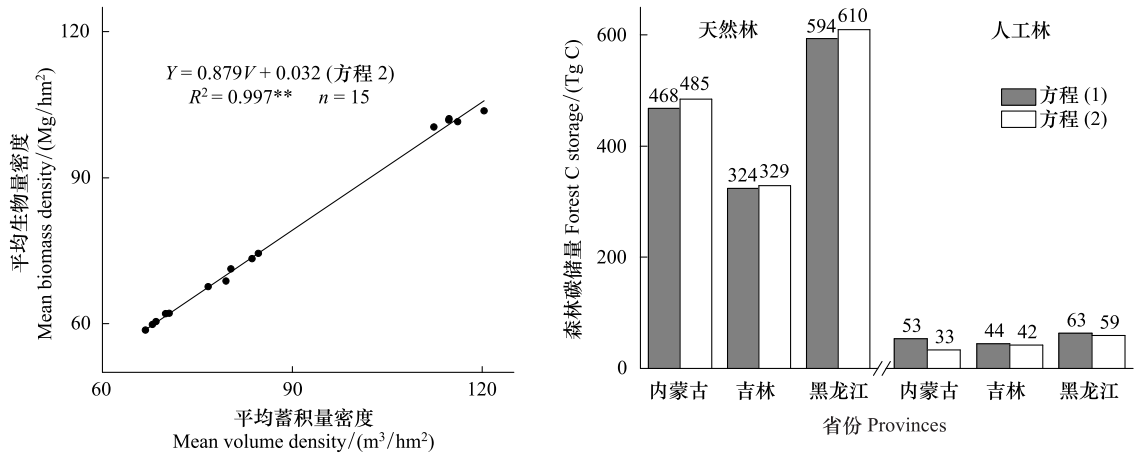


图 2 总平均生物量与总平均蓄积量的回归方程及其结果验证

Fig.2 The regression equation between total biomass density and total volume density and its certification result

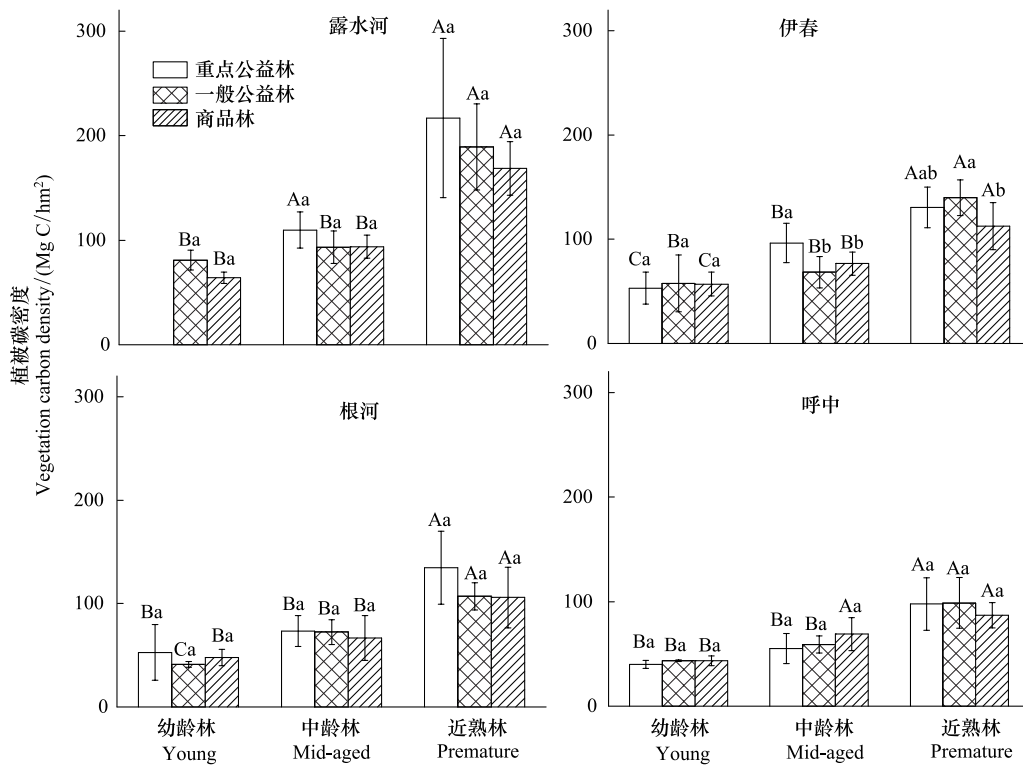


图 3 东北天保工程不同经营区森林植被碳密度

Fig.3 Forest vegetation carbon density in different management areas of Natural Forest Protection Program in Northeast

相同经营区不同龄组间大写字母不同表示各龄组之间碳密度有显著差异;相同龄组不同经营区之间小写字母不同表示各经营区之间碳密度有显著差异

表 3 经营区和林龄对森林植被碳密度的影响

影响因子 Factors	呼中			根河			伊春			露水河		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P	df	F	P
经营区 Management area (M)	2	0.09	0.91	2	1.37	0.27	2	1.86	0.17	2	1.74	0.20
林龄 Age class (A)	2	27.25	<0.01	2	27.85	<0.01	2	65.56	<0.01	2	23.81	<0.01
M×A	4	0.84	0.52	4	0.55	0.70	4	3.17	<0.05	3	0.31	0.82

经营区包括:重点公益林、一般公益林和商品林;林龄包括:幼龄林、中龄林和近熟林;  $P<0.05$  表示影响达显著水平,  $P<0.01$  表示影响达极显著水平

2.2 东北天保工程区森林植被碳储量

本研究首先对东北、内蒙古三省的森林植被碳储量进行了估算,结果表明东北、内蒙古三省森林植被总碳储量为 1547.24 TgC,地区间差异较大,黑龙

江省最高,其次是内蒙古,吉林省最小(表 4),这主要与森林面积有关;森林植被碳密度以吉林省最高,为 50.72 Mg/hm<sup>2</sup>,而东北、内蒙古三省的平均植被碳密度仅为 35.81 Mg/hm<sup>2</sup>。

表 4 东北、内蒙古三省森林植被碳储量及碳密度

统计单位 Province	面积 Area/ (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	碳储量 Carbon storage/ TgC	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm <sup>2</sup> )
内蒙古 Inner Mongolia	1681.26	521.47	31.02
吉林 Jilin	726.74	368.61	50.72
黑龙江 Heilongjiang	1912.63	657.16	34.36
合计 Total	4320.63	1547.24	35.81

东北天保工程区森林植被总碳储量为 1045.05 TgC,占东北、内蒙古三省森林植被总碳储量的 67.54%;其中天然林作为工程区森林植被的主要组成部分(1010.75 TgC),占工程区总植被碳储量的

96.72%。东北天保工程区森林植被平均碳密度为 40.99 Mg/hm<sup>2</sup>,较东北、内蒙古三省森林植被平均碳密度高 14%;且工程区天然林平均植被碳密度大于人工林,分别为 41.64 和 28.02 Mg/hm<sup>2</sup>(表 5)。

表 5 东北天保工程区森林植被碳储量及碳密度

森林类型 Forest type	面积 Area/ (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	碳储量 Carbon storage/ TgC	碳密度 Carbon density/ (Mg/hm <sup>2</sup> )
天然林 Natural forest	2427.39	1010.75	41.64
人工林 Planted forest	122.43	34.31	28.02
合计 Total	2549.82	1045.05	40.99

从林龄结构上看,东北天保工程区森林面积以中龄林和幼龄林为主,分别占工程区森林总面积的 43%和 20%,近熟林到成熟林到过熟林,森林面积逐渐减少;工程区森林植被碳储量以中龄林、近熟林和成熟林为主,三者共占东北天保工程区森林植被总碳储量的 83%,而幼龄林仅占 8%,这与幼龄林较差的林分质量有关(图 4)。森林植被碳密度均随林龄的增加逐渐增大,幼龄林最低,仅为 13.28—17.33 Mg/hm<sup>2</sup>,且幼龄林到中龄林,增加幅度最大,高达 113%—222%(图 4)。

3 讨论

3.1 天保工程经营区划对森林植被碳密度的影响

经营区划作为天保工程实施的途径之一,是实现天然林资源恢复和可持续发展的基础。黄从德等<sup>[12,15]</sup>对四川省森林生态系统进行研究得出针对不同区域采取不同的森林管理方法是提高森林碳吸存能力的有效措施。而天保工程实施初期,按照森林的主体功能不同,对其进行重新区划,将生态状况脆弱的林地区划界定为公益林,实施保护以求森林恢

复;将自然条件优越、立地条件较好、地势比较平缓、不易造成水土流失的林地区划界定为商品林,采取

集约管理,以实现森林可持续经营。

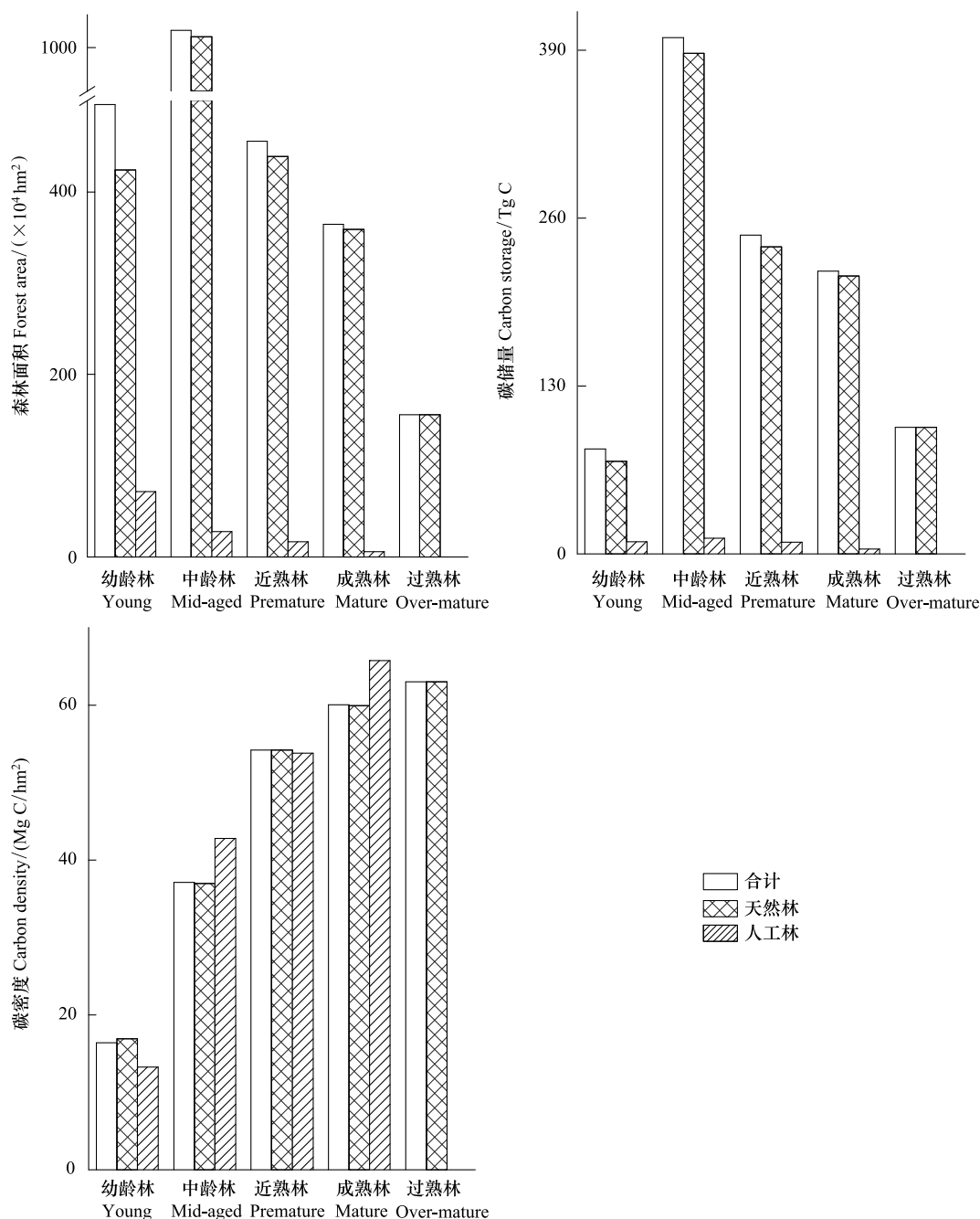


图4 东北天保工程区天不同龄组森林面积、碳储量及其碳密度

Fig.4 Forest area, vegetation carbon storage and density of different age groups in the region of Natural Forest Protection Program

本研究通过样地调查,首次对天保工程不同经营区的森林植被碳密度进行研究,探讨经营区划对森林植被碳密度的影响,这对我国森林分类经营和天保工程的具体实施都具有较大的指导意义。结果表明,东北天保工程4个不同的经营单元内,各经营区之间(重点公益林、一般公益林和商品林)森林植

被碳密度均无显著差异,这可能与天保工程实施初期经营区划的标准、界限的确定以及工程实施过程中粗放的管理方式有关。已有研究表明天保工程对森林质量的提高有较好的促进作用<sup>[13,24-25]</sup>,随着天保工程的进一步实施,经营区划的效果会更加显著。

### 3.2 天保工程在我国森林生态系统中的作用

天保工程作为林业重点工程之一,其森林面积(8768 万  $\text{hm}^2$ )占全国森林总面积的 45%,天然林面积(5997 万  $\text{hm}^2$ )占全国天然林总面积的 50%,在我国森林生态系统中具有举足轻重的作用(第七次全国森林资源清查)。研究表明,东北天保工程区森林植被总碳储量为 1045  $\text{TgC}$ ,占东北、内蒙古三省森林植被总碳储量的 68%,同时工程区植被碳密度也较东北内蒙古三省平均植被碳密度高 14%,这均与天保工程区较高的林分质量有关。工程区森林植被碳储量又以天然林为主,占工程区总植被碳储量的 97%。已有研究表明近 30 年来我国森林表现为碳汇的主要原因是人工林面积的增加<sup>[5,26]</sup>,而转变这种碳汇增长的方式,通过加强对天然林的管理,来提高天然林的林分质量,这对未来我国森林生态系统碳汇潜力的增加具有重要的意义<sup>[4,9,22]</sup>。

森林植被碳密度与演替阶段、年龄组成和人为干扰等因素有关<sup>[4]</sup>。由样地调查可知,天保工程区森林植被碳密度受林龄的影响显著,随林龄的增加逐渐增大,这与以往的研究结果相似<sup>[27-28]</sup>。与此同时,利用生物量-蓄积量线性回归模型估算而来的区域尺度森林植被碳密度也随林龄的增加逐渐增大,其中幼龄林到中年林到近熟林的增加幅度较大<sup>[29]</sup>;不过与样地实测相比,区域尺度森林植被碳密度明显较小,这不仅与样地的选择有关(样地实测经常以林分质量较高的样地为主),而且与我国森林整体较低林分质量有关;Pan 等<sup>[6]</sup>、Fang 等<sup>[5]</sup>研究均表明我国森林生物量远低于世界平均水平<sup>[30]</sup>。王效科等<sup>[31]</sup>研究也得出,我国现有的森林生态系统的实际碳储量只有潜在碳储量的一半左右,如果保护好现有的森林不被破坏,让其自然生长,中国森林生态系统将是一个重要碳汇。而通过对天保工程的实施,探讨适合我国森林发展的管理措施,对我国森林生态系统碳汇潜力的增加和森林管理都具有重要作用。

此外,尽管天保工程区天然林平均碳密度高于人工林,但在中年林和成熟林中,人工林植被碳密度均高于天然林,这说明如果加强对天保工程区人工林的管理,适当的延长其轮伐期<sup>[32]</sup>,人工林也可以在以天然林为主的东北森林生态系统固碳中发挥重要的作用。

### 3.3 估算方法的不确定性

本研究利用方精云等在全国尺度建立的换算因子连续函数法<sup>[5,33]</sup>并基于第 7 次森林资源清查对东北、内蒙古三省森林植被碳储量进行估算,结果为 1855.28  $\text{TgC}$ ,与本研究相比高出 20%,这与以往的研究结果相似<sup>[12-15]</sup>;Pan 等<sup>[6]</sup>也得出 Fang 等<sup>[5]</sup>在全国尺度上由于实测资料的取样点较少,导致对森林生物量的估算结果偏大;而将我国森林进行区域划分,将地理位置相近、气候条件相似、生长规律相同的森林类型进行归类,建立特定区域特定时段的碳库估算模型,并引用最新的生物量调查结果,不断更新现有的数据库<sup>[15,31]</sup>,将会是提高我国森林生物量估算精度的有效方法。

### 3.4 天保工程的实施对我国森林管理的启示

林业政策和林业工程不仅在改善生态环境方面起着重要作用,而且由此而引起的固碳能力也越来越受到重视<sup>[9,34]</sup>。本研究初步估算了东北天保工程区森林植被碳储量,这为全国天保工程区森林生态碳储量的估算提供了一定的基础。东北天保工程区森林植被碳储量占东北、内蒙古三省森林植被总碳储量的 68%,但其植被碳密度较世界森林平均水平仍有很大的差距,这与我国传统的森林经营目的和粗放的管理模式有关——以木材利用为主并忽视对采伐后森林的维护;国家实施重大生态工程以后,对森林的利用以及管理模式有所改善,但仍存在较多的问题。如何继续优化现有的管理模式,完善天然林保护工程实施过程中经营区划的具体措施,这对未来我国森林的可持续发展和碳汇潜力的增加都具有重要的意义。

**致谢:**露水河林业局、伊春林业局、根河林业局和呼中林业局对样地调查给予帮助,伊春林科院王清君院长和内蒙古农业大学的王飞老师对野外调查给予帮助,特此致谢。

### References:

- [1] Bousquet P, Peylin P, Ciais P, Le Quééré C, Friedlingstein P, Tans P P. Regional changes in carbon dioxide fluxes of land and oceans since 1980. *Science*, 2000, 290(5495): 1342-1346.
- [2] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K, Johnson C A. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third*



- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [ 3 ] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16 ( 5 ): 497-508.
- [ 4 ] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733-740.
- [ 5 ] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 to 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [ 6 ] Pan Y D, Luo T X, Birdsey R, Hom J, Mellio 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.
- [ 7 ] Wu Q B, Wang X K, Duan X N, Deng L B, Lu F, Ouyang Z Y, Feng Z W. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 ( 2 ): 517-524.
- [ 8 ] Piao S L, Fang J Y, Zhu B, Tan K. Forest biomass carbon stocks in China over the past 2 decades: Estimation based on integrated inventory and satellite data. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(G1), doi: 10.1029/2005JG000014.
- [ 9 ] Hu H F, Liu G H. Carbon sequestration of China's national natural forest protection project. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 ( 1 ): 291-296.
- [ 10 ] Fang J Y, Chen A P, Zhao S Q, Ci L J. Estimating biomass carbon of China's forests: supplementary notes on report published in *Science* ( 291: 2320- 2322 ) by Fang et al. ( 2001 ). *Acta Phytoecologica Sinica*, 2002, 26(2): 243-249.
- [ 11 ] Wang X J, Huang G H, Sun Y J, Fu X, Han A H. Forest carbon storage and dynamics in Liaoning Province from 1984 to 2000. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(10): 4757-4764.
- [ 12 ] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X, Zhang G Q. Spatial differentiation characteristics of forest vegetation carbon stock in Sichuan Provinc. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 ( 9 ): 5115-5121.
- [ 13 ] Wang X C, Qi G, Yu D P, Zhou L, Dai L M. Carbon storage, density, and distribution in forest ecosystems in Jilin Province of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22 ( 8 ): 2013-2020.
- [ 14 ] Zhao M, Zhou G S. Carbon storage of forest vegetation and its relationship with climatic factors. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(1): 50-54.
- [ 15 ] Huang C D, Zhang J, Yang W Q, Tang X. Spatiotemporal variation of carbon storage in forest vegetation in Sichuan Province. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2687-2692.
- [ 16 ] Xiao X W. China's Forest Resource Inventory. Beijing: China Forestry Press, 2005.
- [ 17 ] Chen C G, Zhu J F. The Main Forest Biomass of Northeast Mannual. Beijing: China Forestry Press, 1989.
- [ 18 ] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222(1/3): 9-16.
- [ 19 ] Han M Z, Zhou X F. A study on biomass and net primary production in a Dahurian larch birch forest ecosystem // Technology Division of the State Forestry Bureau. Long-term Research on China's Forest Ecosystems. Harbin: Northeast Forestry University Press, 1994: 451-458.
- [ 20 ] Luo T X. Patterns of Net Primary Productivity for Chinese Major Forest Types and Their Mathematical Models [ D ]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, 1996.
- [ 21 ] Wang X C. Distribution Pattern in Carbon Storage for Forest Ecosystems in Northeast China [ D ]. Shenyang: Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [ 22 ] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43 ( 9 ): 967-973.
- [ 23 ] Brown S, Lugo A E. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 1984, 223 ( 4642 ): 1290-1293.
- [ 24 ] Yang J M, Fan W Y, Li M Z, Tian L J, Mao X G, Yu Y. Quantitative driving analysis of forest biomass changes in Changbai Mountain forest region. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 47-52.
- [ 25 ] Huang L, Shao Q Q, Liu J Y. Forest carbon sequestration and carbon sink/source in Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(10): 3010-3020.
- [ 26 ] Piao S L, Fang J Y, Huang Y. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *China Basic Science*, 2010, 12(2): 20-22.
- [ 27 ] Zhao M, Zhou G S. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 2005, 207(3): 295-313.
- [ 28 ] Ni J, Zhang X S, Scurlock J M O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests. *Annals of Forest Science*, 2001, 58(4): 351-384.
- [ 29 ] Liu S N, Zhou T, Shu Y, Dai M, Wei L Y, Zhang X. The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(8): 2320-2330.
- [ 30 ] Dixon R X, Brown S, Houghton R A, Solomon A M, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [ 31 ] Wang X K, Feng Z W. The potential to sequester atmospheric carbon through forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(4): 72-74.

- [32] Qi G, Wang Q L, Wang X C, Qi L, Wang Q W, Ye Y J, Dai L M. Vegetation carbon storage in *Larix gmelinii* plantations in Great Xing'an Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 273-279.
- [33] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Terrestrial vegetation carbon sinks in China, 1981—2000. *Science in China (Series D)*, 2007, 50(9): 1341-1350.
- [34] Nabuurs G J, Dolman A J, Verkaik E, Kuikman P J, Van Diepen C A, Whitmore A P, Daamen W P, Oenema O, Kabat P, Mohren G M J. Article 3.3 and 3.4 of the Kyoto Protocol: consequences for industrialised countries' commitment, the monitoring needs, and possible side effects. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(2/3): 123-134.
- 参考文献:
- [3] 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.
- [4] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [9] 胡会峰, 刘国华. 中国天然林保护工程的固碳能力估算. *生态学报*, 2006, 26(1): 291-296.
- [10] 方精云, 陈安平, 赵淑清, 慈龙骏. 中国森林生物量的估算: 对 Fang 等 *Science* 一文 (*Science*, 2001, 291: 2320—2322) 的若干说明. *植物生态学报*, 2002, 26(2): 243-249.
- [11] 王雪军, 黄国胜, 孙玉军, 付晓, 韩爱惠. 近 20 年辽宁省森林碳储量及其动态变化. *生态学报*, 2008, 28(10): 4757-4764.
- [12] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵, 张国庆. 四川省森林植被碳储量的空间分异特征. *生态学报*, 2009, 29(9): 5115-5121.
- [13] 王新闯, 齐光, 于大炮, 周莉, 代力民. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2013-2020.
- [14] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50-54.
- [15] 黄从德, 张健, 杨万勤, 唐宵. 四川森林植被碳储量的时空变化. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2687-2692.
- [16] 肖兴威. 中国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [17] 陈传国, 朱俊凤. 东北主要林木生物量手册. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [19] 韩铭哲, 周晓峰. 兴安落叶松——白桦林生态系统生物量和净初级生产量的研究 // 国家林业部科技司. 中国森林生态系统定位研究. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1994: 451-458.
- [20] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 1996.
- [21] 王新闯. 东北地区森林生态系统碳储量空间分布格局 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2011.
- [22] 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, 43(9): 967-973.
- [24] 杨金明, 范文义, 李明泽, 田利军, 毛学刚, 于颖. 长白山林区森林生物量变化定量驱动分析. *应用生态学报*, 2011, 22(1): 47-52.
- [25] 黄麟, 邵全琴, 刘纪远. 江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局. *生态学报*, 2012, 32(10): 3010-3020.
- [26] 朴世龙, 方精云, 黄耀. 中国陆地生态系统碳收支. *中国基础科学*, 2010, 12(2): 20-22.
- [29] 刘双娜, 周涛, 舒阳, 戴铭, 魏林艳, 张鑫. 基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布. *生态学报*, 2012, 32(8): 2320-2330.
- [31] 王效科, 冯宗炜. 中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力. *生态学杂志*, 2000, 19(4): 72-74.
- [32] 齐光, 王庆礼, 王新闯, 齐麟, 王庆伟, 叶雨静, 代力民. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳贮量. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 273-279.
- [33] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(6): 804-812.