

河北省青龙满族自治县 2005—2050 年 森林植被碳储量及碳密度估算

赵忠宝^{1,2}, 耿世刚², 何鑫², 李克国², 万福绪¹

(1. 南京林业大学 林学院, 南京 210037; 2. 中国环境管理干部学院 生态学系, 河北 秦皇岛 066102)

摘要: 基于河北省青龙满族自治县第七次森林资源清查数据, 运用生物量转换因子法和平均生物量法, 结合不同树种的分子式含碳率, 估算了 2005 年青龙满族自治县森林植被碳储量和碳密度; 利用回归分析法拟合青龙满族自治县林龄与碳密度之间的曲线关系。以 2005 年为基准年, 假定林分面积保持不变, 林木保持生长, 推算 2020 年、2030 年、2050 年青龙满族自治县林分的碳储量和碳密度。研究表明: 2005 年青龙满族自治县森林植被碳储量为 255.5 万 t, 平均碳密度为 10.73 t/hm², 植被碳储量和碳密度大体呈现“北部和东南部山区较高, 中部河谷丘陵地带低”的空间格局, 植被碳密度国有林场高于其他乡镇; 油松、灌木、柞树和经济林是青龙满族自治县森林植被碳储量的主体; 2020 年、2030 年、2050 年青龙满族自治县林分的碳储量分别为 181.57 万 t, 256.37 万 t, 398.25 万 t, 林分碳储量保持稳定增长的趋势。

关键词: 森林植被; 碳储量; 碳密度; 回归分析; 青龙满族自治县

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)03-0264-05

Estimation of Storage and Density of Carbon in Forest Vegetation in Qinglong Manchu Autonomous County of Hebei Province from 2005 to 2050

ZHAO Zhongbao^{1,2}, GENG Shigang², HE Xin², LI Keguo², WAN Fuxu¹

(1. College of forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Department of Ecology, Environmental Management College of China, Qinhuangdao, Hebei 066102, China)

Abstract: Based on the 7th forest resource inventory data of Qinglong Manchu Autonomous County in 2005, the storage and density of carbon were calculated using the biomass expansion factor continuous function method and average-biomass computing method, the carbon content in the molecular formulas of various trees. Using the regression analysis method fitted the curve equation between carbon density and age, the carbon storage and density in 2020, 2030 and 2050 were estimated with the curve equation by setting 2005 as the base year, and assuming that the area of forest stand remained stable and tress kept on growing, not considering the influence of reforestation, logging, death, and so on. As the estimation of forest vegetation carbon storage and carbon density, the estimated results had a certain error, but could reflect the general situation of the carbon storage. Results are as follows: The carbon storage of forest vegetation in Qinglong Manchu Autonomous County was 255.5×10^4 t, the average carbon density was 10.73 t/hm². The forest vegetation carbon storage and density were higher in the northern and southeastern mountainous areas were low in the central river valley and hills areas with respect to spatial distribution. Forest vegetation in state-owned forest farms had relatively higher carbon density. The main body of forest vegetation carbon storage in Qinglong Manchu Autonomous County is *Pinus tabulaeformis*, shrubbery, *Quercus mongolica*, economic forest. The carbon storage was 1.8157×10^6 t, 2.5637×10^6 t and 3.9825×10^6 t in 2020, 2030 and 2050, respectively, in Qinglong Manchu Autonomous County.

Keywords: forest vegetation; carbon storage; carbon density; regression analysis; Qinglong Manchu Autonomous County

森林是陆地生态系统的主体,在生物圈物质交换和能力流动中扮演着重要角色,在全球的碳循环中起着重要作用。陆地上绿色植物吸收的 CO_2 中,森林占 80% 左右^[1],森林每生长 1 m^3 木材,可以吸收 1.83 t 的 CO_2 ^[2]。与其他陆地生态系统相比,森林生态系统具有较高的生产力,单位面积碳密度是农地的 $1.9\sim 5$ 倍,每年固定的碳约占整个陆地生态系统的 $2/3$ ^[2-3]。随着全球气候变化影响加剧,森林生态系统所具有的强大碳汇能力受到国际社会的广泛关注和高度重视。在巴厘岛国际气候变化大会上,明确地把森林问题作为一个主题纳入气候谈判,森林碳汇以其自身的优越性在应对气候变化中的作用被进一步强化,利用森林生态系统固碳具有成本低、容易操作、见效迅速等诸多优点,成为后京都时代减排的重要途径之一^[4]。

森林资源清查数据具有分布范围广、测量的因子容易获得、时间连续性强等优点,是估算区域、国家尺度森林碳储量的重要途径之一^[5-6]。与其他方法相比,利用森林资源清查数据对区域森林植被碳储量进行估测比较准确^[7]。利用森林资源清查数据对区域森林碳储量和碳密度进行估算,有利于进一步拓展森林资源清查数据在科学研究和管理决策领域的应用^[8]。目前基于森林资源清查数据估算碳储量的方法有平均生物量法、生物量转换因子法和生物量换算因子连续函数法,这些方法在碳估算及全球碳循环研究中被广泛使用,但目前基于森林资源清查数据碳估算主要是针对大、中尺度的研究^[9-14],小尺度上的研究报道相对较少^[15]。

本文利用河北省第七次森林资源清查数据和方精云等^[9]提出生物量换算因子连续函数法估算河北省青龙满族自治县森林碳储量和碳密度,旨在充分利用森林资源清查数据,明确青龙满族自治县森林植被碳储量和碳密度分布特征,为科学经营管理提供参考依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

青龙满族自治县位于河北省东北部,燕山山脉的东段,长城以北,隶属于秦皇岛市。地处 $118^\circ 33' 31''\sim 119^\circ 36' 30''\text{E}$, $40^\circ 04' 40''\sim 40^\circ 36' 52''\text{N}$ 。全县面积 $3\,510 \text{ km}^2$,中、低山和丘陵地约占全县面积的 80%,河谷占 10%,耕地占 10%,素有“八山一水一分田”之称。其地形是西、北、东三面较高,西南面较低。山脉多为东西走向,境内都山海拔 $1\,846.3 \text{ m}$,是燕山山脉东段的最高峰。土地主要由褐土和棕壤土组成,其中褐土占全县总面积的 79.6%,主要分布在低山、丘陵;棕

壤占全县总面积的 17.6%,主要分布在山区较高的山地。全县属暖温带湿润大陆性季风气候,四季分明,日照充足,昼夜温差大,平均气温 8.9°C ,平均降水量 715 mm ,年无霜期 162 d。目前全县森林资源主要以天然次生林为主,优势树种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、柞树(*Quercus mongolica*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、杨属(*Populus*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、白桦(*Betula platyphylla*)、灌木(*Shrubbery*)和经济林(Economic forest)等多种树种。

1.2 数据处理

本研究基础数据来源于青龙满族自治县第七次森林资源二类调查小班数据。首先进行数据格式转换,然后利用 ArcGIS 软件对小班数据进行数据分类、提取、合并等转换处理,建立 ArcGIS 数据库。同时结合青龙满族自治县政区图,建立小班数据与政区图空间联接,计算每个乡镇的碳储量和碳密度。青龙满族自治县二类调查小班数据库的属性表共记录小班面积、优势树种、地貌、坡向、坡位、土壤类型、林种、起源、森林类别、龄组、郁闭度、平均胸径、平均树高、蓄积量等 30 个调查因子。

1.3 研究方法

1.3.1 森林植被生物量计算方法 本研究的优势树种主要采用方精云建立的蓄积量与生物量的换算公式(表 1),计算出相应的生物量;灌木和经济林采用平均生物量法。

优势树种生物量的计算公式如下:

$$B = aV + b \quad (1)$$

$$B_{\text{灌木}} = 19.76 \times S \quad (2)$$

$$B_{\text{经济林}} = 23.7 \times S \quad (3)$$

式中: B ——单位面积生物量(t/hm^2); V ——单位面积活立木蓄积(m^3/hm^2); a, b ——参数; S ——面积(hm^2)。

本研究的森林碳储量是林木的活生物量,不包括林下灌木、林中枯立木、林下土壤、枯枝落叶层部分碳储量。主要研究的森林植被类型为林分、灌木、经济林。

表 1 不同树种生物量回归方程及含碳率

植被类型	生物量模型	含碳率
柞树/硬阔	$B = 1.1453V + 8.5473$ ^[9]	0.5249 ^[16] / 0.4834 ^[17]
油松	$B = 0.75543V + 5.0928$ ^[9]	0.5207 ^[17]
杨属	$B = 0.4754V + 30.6034$ ^[9]	0.4956 ^[17]
经济林	$B_{\text{经济林}} = 23.7S$ ^[18]	0.5000 ^[15]
灌木	$B_{\text{灌木}} = 19.76S$ ^[18]	0.5000 ^[15]
白桦	$B = 1.0687V + 10.2370$ ^[9]	0.4914 ^[17]
刺槐	$B = 0.82915V + 4.80298$ ^[19]	0.4998 ^[16]
软阔	$B = 0.7564V + 8.3103$ ^[9]	0.4956 ^[17]
华北落叶松	$B = 0.69096V + 33.806$ ^[9]	0.5211 ^[17]

1.3.2 森林植被碳储量和碳密度计算方法 森林碳储量的估算采用森林生物量乘以树种中碳元素的含量(含碳率)推算;本研究采用李海奎等^[17]运用植物分子式确定的不同树种含碳率;对于部分无确切含碳率参数的树种,采用公开发表论文中的含碳率;碳密度为单位面积碳储量。

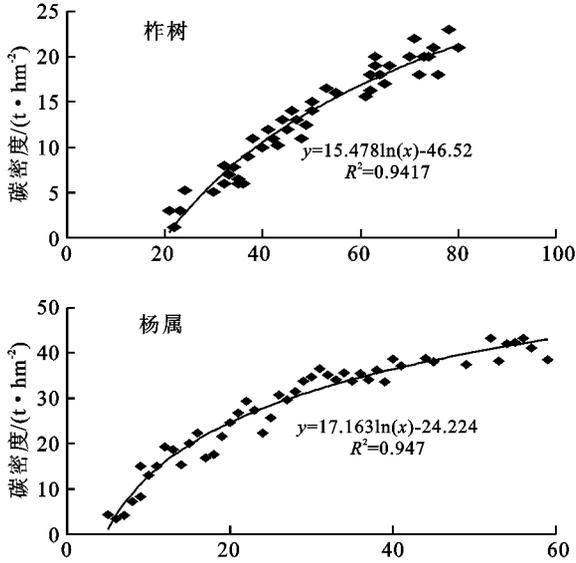


图 1 青龙满族自治县主要林分碳密度与林龄的拟合曲线

2 结果与分析

2.1 不同森林植被类型碳储量与碳密度分析

2005 年青龙满族自治县森林植被总碳储量为 255.5 万 t(表 2), 植被平均碳密度为 10.73 t/hm²。不同森林植被类型碳储量大小是油松>灌木>柞树>经济林>杨属>白桦树>刺槐>软阔>华北落叶松>硬阔。其中油松、灌木、柞树和经济林是青龙满族自治县森林生态系统碳储量的主体, 占森林植被总碳储量的 93.40%。

表 2 青龙满族自治县不同森林植被碳储量和碳密度

植被类型	面积/hm ²	生物量/万 t	碳储/万 t	碳密度/(t·hm ⁻²)
柞树	81604.40	114.64	60.17	7.37
油松	42460.46	127.8	66.54	15.67
杨属	3321.85	22.19	11.01	27.38
经济林	41359.99	98.02	49.01	11.85
灌木	63692.75	125.86	62.93	9.88
白桦	1799.60	8.90	4.40	24.45
刺槐	3546.50	1.80	0.89	2.51
软阔	298.63	0.67	0.33	11.05
硬阔	22.90	0.04	0.02	8.73
华北落叶林	73.70	0.40	0.20	27.14
合计	238180.78	500.32	255.50	10.73

1.3.3 林分碳储量和碳密度动态估算 在 Excel 中, 拟合各林分类型碳密度与林龄的关系, 找出对应的拟合方程(图 1)。以 2005 年为基准年, 假定到 2050 年青龙满族自治县林分小班面积保持不变, 保持生长状态, 推算 2020 年、2030 年、2050 年青龙满族自治县林分碳储量和碳密度。

不同森林植被碳密度大小顺序是杨属>华北落叶松>白桦树>油松>经济林>软阔>灌木>硬阔>柞树>刺槐。其中柞树、刺槐、硬阔、灌木的碳密度小于森林植被平均碳密度(10.73 t/hm²), 而柞树、刺槐、硬阔、灌木四者面积占森林植被总面积的 62.5%, 由于柞树、刺槐、硬阔、灌木碳密度较低, 造成青龙满族自治县森林植被总碳储量偏低, 今后应该加大对柞树、刺槐、硬阔、灌木的抚育管理, 增加其固碳能力。

2.2 林分碳储量与碳密度分析

青龙满族自治县林分面积为 130 565.4 hm², 占森林植被总面积的 54.82%。林分总碳储量为 140.02 万 t, 占森林植被总碳储量的 54.8%, 林分平均碳密度为 10.72 t/hm²(表 3)。林分中针阔分明, 以阔叶林为主。阔叶林碳储量为 74.2 万 t, 平均碳密度为 8.29 t/hm²; 针叶林碳储量为 65.81 万 t, 平均碳密度为 16.02 t/hm²。林分中油松、柞树、杨属是青龙满族自治县碳储量的主要树种, 三者碳储量分别占林分总碳储量的 46.86%, 42.61%, 6.35%, 对全县碳储量的贡献率较高。而林分中柞树和刺槐的碳密度分别为 7.4, 2.52 t/hm², 小于林分平均碳密度(10.72 t/hm²), 而两者面积占林分总面积的 64.40%, 这是造成青龙满族自治县林分碳储量偏低的主要原因, 今后应加强对柞树和刺槐的抚育管理和更新改造, 提高单位面积生产力。

表3 青龙满族自治县不同林分碳储量和碳密度

林分类型	面积/ hm ²	生物量/ 万 t	碳储/ 万 t	碳密度/ (t·hm ⁻²)
柞树	80560.6	113.67	59.66	7.41
油松	41014.9	126.02	65.62	16.00
杨属	3267.1	17.95	8.90	27.24
白桦	1799.6	8.95	4.40	24.45
刺槐	3528	1.79	0.89	2.52
软阔	298.6	0.67	0.33	11.05
硬阔	22.9	0.04	0.02	8.73
华北落叶松	73.7	0.38	0.20	27.14
合计	130565.4	269.47	140.02	10.72

2.3 林分中不同林龄碳储量与碳密度分析

青龙满族自治县林分以幼龄林和中龄林为主,碳储量分别为 82.59 万 t,35.23 万 t,分别占林分总碳储量的 58.98%,25.16%。全县林分不同龄组碳储量大小顺序为幼龄林>中龄林>近熟林>成熟林>过熟林(图 2)。2005 年全县林分中幼龄林、中龄林和近熟林的碳储量占林分总碳储量的 97.7%,面积占林分总面积的 98.98%,这对全县的碳储量持续增长十分有利。

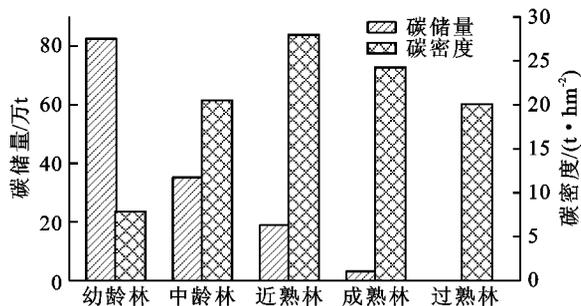


图2 青龙满族自治县不同龄组碳储量和碳密度

全县林分不同龄组碳密度的大小顺序为近熟林>成熟林>中龄林>过熟>幼龄林。幼龄林的碳密度最小,仅为 7.85 t/hm²,而面积占林分总面积的 80.60%,由于幼龄林的生产力较低,造成了全县碳储总量偏低,今后应加大对幼龄林的封山育林和抚育管理,减少不合理的人为干扰,增加其固碳能力。

2.4 不同起源林分碳储量与碳密度分析

青龙满族自治县林分主要由天然林和人工林组成。全县天然林面积为 104 286 hm²,碳储量为 89.13 万 t;人工林面积为 26 279.4 hm²,碳储量为 50.89 万 t(表 4)。全县林分碳储量以天然林为主。而人工林面积为天然面积的 1/4,碳储量为天然林的 0.57 倍,人工林碳储量对全县的碳储量贡献率很大。柞树全部为天然林,在天然林中碳储量最大(60.15 万 t),其次是油松(23.66 万 t)。在人工林中,油松碳储量最大(41.95 万 t),其次是杨属(8.35 万 t)。油松既是人工

林中碳储量最大者,也是天然林中碳储量较大者,可见油松对青龙满族自治县的碳汇功能贡献率较大。

天然林碳密度为 8.55 t/hm²,人工林碳密度为 19.36 t/hm²。天然林碳密度小于森林植被平均碳密度 10.73 t/hm²。人工林的生产力大于天然林,天然林以幼林为主,今后应加大天然林的封育和抚育管理,以增加其固碳能力。

表4 青龙满族自治县不同起源林分碳储量和碳密度

林分类型	碳储量/万 t		碳密度/(t·hm ⁻²)	
	天然林	人工林	天然林	人工林
柞树	59.66	—	7.3	—
油松	23.66	41.95	11.72	20.15
杨属	0.54	30.29	8.35	27.04
白桦	4.41	—	24.16	—
刺槐	—	0.89	—	2.53
软阔	0.26	0.07	6.37	15.13
硬阔	—	0.02	—	8.36
华北落叶松	0.11	0.09	30.75	19.18

2.5 青龙满族自治县森林碳储量和碳密度空间分布格局研究

青龙满族自治县的森林植被碳储量的空间分布格局具有明显的空间异质性,大体上表现为“北部和东南部山区较高,中部河谷丘陵地带低”的空间格局。在全县 25 个乡镇、2 林场和 1 个水库(简称库区)中(附图 13),青龙镇森林植被碳储量最高(23.82 万 t),占全县碳储量的 9.3%;碳储量最小的乡镇是朱杖子乡(3.22 万 t)。碳储量在 3~8 万 t 的乡镇占 11 个,占乡镇总数的 44%,大部分乡镇碳储量较低。森林植被平均碳密度大体上是随海拔增加而增加,北部都山林场最高(36.21 t/hm²),东南部祖山林场次之(21.49 t/hm²)。平均碳密度为 13~19 t/hm² 的乡镇有 3 个,其他大部分乡镇的碳储量为 6~13 t/hm²。青龙满族自治县森林植被碳储量和平均碳密度这种空间分布格局与青龙满族自治县森林植被的空间分布格局相一致,是由境内的地形地貌、立地条件、人为活动强度等差异形成的。从附图 13 可以看出,青龙满族自治县森林植被碳汇功能北部大于南部,森林植被平均碳密度表现为国有林场高于其他乡镇和库区,这说明国有林场生产力较高,森林植被结构和质量好于各乡镇。

2.6 青龙满族自治县森林碳储量和碳密度预测分析

基于青龙满族自治县第七次森林资源清查数据(2005)和林龄—碳密度模型(图 1),预测 2020 年、2030 年、2050 年青龙满族自治县林分碳储量和碳密度变化情况(附图 14)。到 2020 年、2030 年、2050 年

林分碳储量分别为 181.57 万 t, 256.37 万 t, 398.25 万 t, 林分碳密度分别为 13.91, 19.48, 30.5 t/hm²。和 2005 年相比, 林分碳储量和碳密度均有较大提高, 2005—2020 年, 林分碳储量年增长率为 2.77 万 t/a; 2020—2030 年, 林分碳储量年增长率为 7.48 万 t/a; 从 2030—2050 年, 林分碳储量年增长率为 7.09 万 t/a。青龙满族自治县的主要碳汇树种为柞树、油松和杨属, 占林分总面积的 95.62%, 柞树的成熟年龄为 120 a, 油松的成熟年龄为 80 a, 杨属的成熟年龄为 40 a, 目前柞树、油松和杨属的幼龄林占林分总面积的 78.46%, 中龄占 12.51%, 到 2050 年, 柞树达到近熟林, 油松和杨属达到成熟林和过熟林。由于柞树所占面积较大, 幼龄林占 61.48%, 所以到 2050 年青龙满族自治县的林分碳储量仍保持持续增长状态。

3 讨论

(1) 青龙满族自治县森林植被总碳储量为 255.5 万 t, 其中油松、灌木、柞树和经济林是青龙满族自治县森林植被碳储量的主体, 占总碳储量的 93.40%。林分碳储量占总碳储量的 54.8%。青龙满族自治县森林植被总碳储量占河北省同期森林植被碳储量的 4.18%^[14], 占全国同期森林植被碳储量的 0.03%^[17]。就碳密度来看, 森林植被平均碳密度为 10.73 t/hm², 林分碳密度为 10.72 t/hm², 植被平均碳密度和林分碳密度均低于河北省同期森林植被平均水平 (11.02 t/hm²)^[14]; 低于北京林分碳密度 (12.03 t/hm²)^[20], 也低于全国林分碳密度 (42.82 t/hm²)^[17]; 占林分碳储量最大的油松和柞树的碳密度分别为 16.00, 7.41 t/hm², 油松碳密度高于植被平均碳密度, 而柞树碳密度仅为 7.41 t/hm², 柞树面积占林分总面积的 61.70%, 由于柞树主要为天然次生幼林, 生产力较低, 造成了青龙满族自治县林分碳储总量偏低, 同时也说明柞树在未来有较大的固碳能力。

(2) 从各林龄看, 青龙满族自治县林分主要以幼龄林和中龄为主, 中、幼龄林碳储量占林分碳储量的 84.14%。幼龄林碳密度最低, 为 7.85 t/hm²; 近熟林最高, 为 27.94 t/hm², 这一结果与前人研究的结果不一致。有些研究者认为森林碳密度与林龄结构成正比, 随林龄增加林分碳密度也随之增长, 到过熟林达到最大^[21-22]。与前人研究结果不一致的主要原因是青龙满族自治县的森林植被在历史上曾遭受过大规模的人为破坏和砍伐, 蓄积量大的林分被伐掉, 剩余一些小老头树, 造成成熟林和过熟林的碳密度较低。同时也证实了人为破坏因素也是造成成熟林和过熟林的碳密度较低的主要原因之一^[23]。

(3) 从空间分布来看, 青龙满族自治县的森林植被碳储量的空间分布表现为“北部和东南部山区高, 中部河谷丘陵地带低”, 北部的碳汇功能大于南部。森林植被碳密度随海拔增加而增加, 北部都山林场最高, 东南部祖山林场次之, 国有林场的森林植被碳密度大于其他乡镇的碳密度, 国有林场表现出较高的森林生产力, 这与多年的封山育林和抚育管理密不可分。从空间分布来看, 全县分布着大面积的灌木林, 灌木林碳储量占植被总碳储量的 26.74%, 面积占 24.63%, 而灌木林在固碳释氧、涵养水源等方面的功能不如林分。青龙满族自治县是秦皇岛市的水源涵养地, 桃林口水库是全市的主要水源地, 周围主要以灌木林为主, 今后应该加大对库区和全县灌木林的改造, 有条件的地方逐步改为林灌结构, 充分发挥林分和灌木的涵养水源和碳汇功能。

(4) 不确定性分析。本文利用林分碳密度和林龄的关系, 在 Excel 中利用回归分析法, 拟合出不同林分碳密度—林龄曲线关系, 利用拟合曲线和 GIS 技术估算出青龙满族自治县碳储量和碳密度的时空分布特征, 充分挖掘森林资源清查数据在估算森林碳储量方面的功能, 也为中小尺度区域研究森林植被碳储量提供了新的研究思路和技术。本研究利用 Excel 进行碳密度—林龄的拟合, 比较容易操作, 但拟合曲线的估算结果, 也有一些不确定性, 需要时间去验证。此外, 本研究主要是利用方精云的蓄积量与生物量的换算法和李海奎等^[17]提出的植物分子式确定不同树种的含碳系数, 其不确定性也需要进一步研究。

致谢 感谢秦皇岛市林业局对本研究提供的数据支持。

参考文献:

- [1] Du H Q, Zhou G M, Fan W Y, et al. Spatial heterogeneity and carbon contribution of aboveground biomass of moso bamboo by using geostatistical theory [J]. *Plant Ecology*, 2010, 207(1): 131-139.
- [2] 李怒云. 中国林业碳汇 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
- [3] 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 [J]. *生态学报*, 2000, 20(5): 733-740.
- [4] 黄东. 森林碳汇: 后京都时代减排的重要途径 [J]. *林业经济*, 2008(10): 12-15.
- [5] 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 [J]. *林业科学*, 2012, 48(5): 44-52.
- [6] 邓蕾, 上官周平. 基于森林资源清查资料的森林碳储量计量方法 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 143-147.

4 结论

(1) 混交林林分 A—D 的落叶松生长曲线比较明显可以看出:林分 D>林分 C>林分 B>林分 A。混交林林分 B—D 的白桦树木生长出现交错现象,从各阶段平均值比较可以看出各林分的生长过程次序依次为:林分 D>林分 C>林分 B。山杨生长过程曲的排序为:林分 D>林分 C。而杉落针阔混交林比纯林和其他形式的混交林分具有更高的演替度和稳定性。

(2) 同一林分下年龄相近的各树种表现出:林分 B 中的白桦长势好于落叶松,林分 C 中的白桦和杨树好于落叶松,林分 D 中的白桦前期长势最好,其次落叶松和山杨,云杉由于处于刚刚进入中龄林,生长力相对较弱,并逐渐加强。

参考文献:

- [1] 付恒良,王树明. 穆稜林区天然次生林演替特点及天然更新[J]. 林业科技,1997,22(2):18-21.
- [2] 龚直文,顾丽,亢新刚,等. 长白山森林次生演替过程中林木空间格局研究[J]. 北京林业大学学报,2010,32

(2):92-99.

- [3] 康春国. 承德避暑山庄木兰围场地理及植物分析[J]. 森林工程,2003,19(3):7-8.
- [4] 雷向东,陆元昌,张会儒,等. 抚育间伐对落叶松杉落混交林的影响. 林业科学,2005,41(4):78-85.
- [5] 王鹏,陈丽华,卞西陈,等. 北沟林场天然次生林群落结构与种群分布格局[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1668-1674.
- [6] 梁文俊,丁国栋,韦立伟,等. 落叶松人工林密度对林木生长的影响[J]. 水土保持通报,2010,30(4):79-81.
- [7] 赵国武. 华山松生长规律的调查研究[J]. 辽宁林业科技,1994(1):30-31.
- [8] 王庆锁,罗春菊,张希和. 坝上、坝下白桦林林分结构和生长规律[J]. 北京林业大学学报,2000,22(3):96-98.
- [9] 亢新刚,崔相慧,王虹. 冀北次生林 3 个树种林分生长过程表的编制[J]. 北京林业大学学报,2001,23(3):39-42.
- [10] 谷建才. 华北土石山区典型区域主要类型森林健康分析与评价[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [11] 李春明,杜纪山,张会儒. 抚育间伐对森林生长的影响及其模型研究[J]. 林业科学研究,2003,16(5):636-641.

(上接第 268 页)

- [7] 周伟,王晓洁,关庆伟,等. 基于二类调查数据的森林植被碳储量和碳密度:以徐州市为例[J]. 东北林业大学学报,2012,40(10):71-74.
- [8] 张茂震,王广兴,刘安兴. 基于森林资源连续清查资料估算的浙江省森林生物量及生产力[J]. 林业科学,2009,45(9):13-17.
- [9] Fang J, Chen A, Peng C. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science,2001,292(5525):2320-2322.
- [10] Shvidenko A, Nilsson S. Dynamics of russian forests and the carbon budget in 1961-1998: An assessment based on long-term forest inventory data [J]. Climatic Change,2002,55(1/2):5-37.
- [11] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the U. S. forest sector from 1990 to 2010 [J]. Forest Ecology and Management,2007,241(1):14-27.
- [12] Chen J, Chen W, Liu J, et al. Annual carbon balance of Canada's forests during 1895-1996[J]. Global Biogeochem Cycles,2000,14(3):839-849.
- [13] 王新闯,齐光,于大炮,等. 吉林省森林生态系统的碳储量、碳密度及其分布[J]. 应用生态学报,2011,22(8):2013-2020.
- [14] 毕君,王超,李联地,等. 基于 IPCC 的河北省 2005 年森

林碳储量[J]. 东北林业大学学报,2011,39(12):36-39.

- [15] 任德智,葛立雯,同延玲,等. 陕西省宜君县森林碳密度及空间分布格局研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(1):155-162.
- [16] 张萍. 北京森林碳储量研究[D]. 北京:北京林业大学,2009.
- [17] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京:中国林业出版社,2010.
- [18] 方精云,刘国华,徐高龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报,1996,16(5):497-508.
- [19] 王超,毕君,宋熙龙,等. 太行山区刺槐林的生物量与碳汇量[J]. 中国农学通报 2013,29(4):14-18.
- [20] 王光华,刘琪璟. 基于 TM 影像和森林资源二类调查数据的北京森林碳汇估算[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(2):224-235.
- [21] 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[J]. 应用生态学报,2001,12(1):13-16.
- [22] Cheng C H, Hung C Y, Chen C P, et al. Biomass carbon accumulation in aging Japanese cedar plantations in Xitou, central Taiwan [J]. Botanical Studies,2013,54(1):1-9.
- [23] 林清山,洪伟. 中国森林碳储量研究综述[J]. 中国农学通报,2009,25(6):220-224.