

长白山森林植被碳储量与碳汇价值评价

顾丽¹, 郑小贤², 龚直文^{1*}

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 北京林业大学 森林资源与环境管理国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要:以长白山金沟岭林场作为研究区域, 研究了主要森林类型碳储量和碳密度的时空变化, 为我国森林生态系统碳平衡提供基础资料。结果表明: 1) 金沟岭林场森林植被碳储量从1997年的7 621.842 2 t 增加到2007年的8 018.125 9 t, 净增加了466.283 7 t。碳储量分布以中龄林与近熟林为主, 1997年与2007年所占的比例分别为87%与79%, 是一个潜在的巨大碳库; 2) 森林植被的平均碳密度随着龄级结构的增长而增加, 1997年与2007年分别为47.541 7 mg·hm⁻²与50.186 6 mg·hm⁻², 高于全国2008年森林平均植被碳密度42.82 mg·hm⁻², 但是低于世界的平均水平86.00 mg·hm⁻²; 3) 利用1997年与2007年两期数据分析了该林场森林植被的年固碳增量为39.63 t·hm⁻²·a⁻¹, 平均年增长率0.51%, 低于我国森林的平均年增长率1.6%, 该林场森林植被仍具有潜在的固碳空间; 4) 对森林植被的碳汇效益进行了计量, 1997年与2007年分别为2 728.130 8万元与2 744.954 8万元, 净增长了16.824 0万元。应加强对现有森林经营, 尤其是中幼龄林抚育, 提高森林质量, 从而增加现存森林的碳密度, 以此来提高森林固碳潜力。

关键词:森林类型; 碳储量; 碳密度; 固碳释氧

中图分类号:S758.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)04-0192-06

Dynamic Change of Forest Carbon Storage and Carbon Sink Evaluation in the Over-cutting Region of Changbai Mountains

GU Li¹, ZHENG Xiao-xian², GONG Zhi-wen^{1*}

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100 China; 2. Key Laboratory of Forest Resources and Environmental Management, State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper studied the carbon storage, density, and carbon sequestration and oxygen release values in forest ecosystems of over-cutting areas in Jingouling Forest Farm, located in Changbai Mountain, Jilin Province, China. The results showed that: 1) the total carbon storage in the forest ecosystems were 7 621.842 2 and 8 018.125 9 t in 1997 and 2007, respectively, with a net increase of 466.283 7 t. Middle-aged forests and nearly matured forest had a greater proportion than the forests in other age classes, so the carbon sequestration would be in a state of sustained growth and potentially huge carbon pool. 2) The age structure of the forests showed direct proportion with carbon density approximately, the average vegetation carbon density in this field were 47.541 7 mg·hm⁻² and 50.186 6 mg·hm⁻² respectively in 1997 and in 2007, which was higher than average carbon density of 42.82 mg·hm⁻² in China, but lower than the world average of 86.00 mg·hm⁻². 3) The forest vegetation in this farm had the annual average accumulation amount of 39.63 t·hm⁻²·a⁻¹ and the annual average accumulation rate of 0.51 %, which was lower the average accumulation rate of 1.6 % in China, but played a role of carbon sinks. 4) The carbon sink benefit was evaluated: the economic values were 2 728.130 8 and 2 744.954 8 million Yuan in 1997 and

收稿日期:2014-09-28 修回日期:2015-03-17

基金项目:国家自然科学基金(31300538);西北农林科技大学基本科研业务费专项(QN2013082)。

作者简介:顾丽,女,讲师,研究方向:森林资源监测。E-mail:guli_bj@126.com

*通信作者:龚直文,男,讲师,研究方向:森林可持续经营。E-mail:gozewe@126.com

2007, respectively, with a net increase of 16.824 0 million Yuan. It meant that the measures of forest conservation, degraded forest ecosystem restoration could significantly increase the potential of forest carbon sequestration in this area.

Key words: forest type; carbon storage; carbon density; carbon sequestration and oxygen release

森林是地球上最大的碳库,森林植被碳储量是生态建设的关键指标,并同时受到最直接的森林砍伐和退化的影响^[1-2]。大气中碳浓度的增加导致全球气候变暖与陆地生态系统的结构功能的失衡,威胁着人类的健康和生存安全。森林作为陆地生态系统的主体,储存着陆地生态系统几乎2/3的碳,同时具有最大的碳密度,在全球碳循环方面与减缓气候变化中发挥着重要作用^[3]。近年来,森林管理越来越多地考虑到森林作为碳汇的作用^[4],森林生态系统的碳储量与碳通量已经作为研究的重点,展开了大量的工作^[5-6]。

许多研究者对全球、国家和地区尺度上的森林植被碳库变化都进行了估算。目前,对国内碳储量与碳密度的研究既有国家尺度的^[7-9],也有地区尺度的报道^[10-11],这些研究有助于对森林植被碳库的认识。但是研究森林碳储量在时间尺度上的动态变化却很少,估计森林植被碳储量的时空变化对掌握碳储量与森林动态演变的关系是非常重要的。此外,“京都议定书”的全面实施,将导致地区和国家之间的碳汇额度的交易,准确估计一个地区的净碳汇增量将成为不可或缺的一部分。

长白山林区作为中国天然林保护工程实施的重点地区之一,目前分布着目前我国面积最大、保存最完整的红松阔叶混交林,因经营活动和气候变化的影响,森林生态系统功能有所削弱,已严重威胁到长白山森林生态系统的完整性、稳定性和整体功能,其森林碳汇功能及时空格局也有所改变。提高森林资源质量,维护长白山可持续发展成为目前急需解决的问题。本研究对金沟岭林场森林碳储量及固碳增量进行了分析,为区域森林碳储量及其固碳潜力的估算提供科学依据,使之发挥区域景观最大的生态效益及经济效益。

1 研究区概况

试验地区位于吉林省汪清县境内东北部金沟岭林场,属长白山系老爷岭山脉雪岭支脉,经营面积16 286 hm²。场部地理位置:130°10'E, 43°22'N。林场地貌为低山丘陵,海拔为300~1 200 m,坡度5°~25°,陡坡在35°以上的不足5%。本区属季风型气候,全年平均气温为3.9℃左右,≥0℃积温2 144℃;年降水量600~700 mm,且多集中在7月

份;本区属低山灰化土灰棕壤区,母岩为玄武岩^[12]。海拔800~1 000 m为针叶林灰棕壤土,平均厚度在40 cm左右。地带性植被为长白山红松针阔混交林。

2 材料与方法

2.1 数据来源

所选用的数据源如下:

1) 美国陆地资源卫星5号(Landsat 5)拍摄的研究区范围内TM遥感影像数据,包括1997-07和2007-10两个时相的1~7波段;2) 吉林省汪清林业局金沟岭林场的1997年和2007年1:10 000的林相图及二类调查数据;3) 研究区内1:50 000的地形图;4) 地类控制点野外调查数据与主要森林类型的样地调查数据。

2.2 林分生物量的估算方法

乔木层植被作为森林生态系统最大的碳储量来源,是迄今为止规模最大,最具活力的碳库,包含干、枝、叶、根的总重量^[13]。在森林生态系统中,Singh and Singh认为地上活植被物的碳储量与地下根系碳储量存在相关性^[14]。因此利用地上植被的碳密度与碳累积率量化森林生态系统的碳储量与碳通量是可行的^[15]。研究证明不同的森林类型中,其乔木层实测生物量与蓄积量二者之间存在良好的回归关系。利用材积源生物量法估算植被碳贮量估算方法已得到广泛应用。本文利用Y. D. Pan^[16]等利用5 415块样地建立的我国不同森林类型各龄组森林蓄积量—生物量的转换参数,来估算研究区11种林型乔木层的生物量,其中,针叶混交林使用云冷杉林参数;针阔混交林使用红松林参数;白桦林和杨树林使用杨桦林参数;榆树林、杂木林和阔叶混交林使用落叶栎林参数,其不同森林类型、林龄的蓄积量—生物量转换参数详见文献^[18]中的数据。

2.3 碳储量与碳密度的计算

国内与国外的研究者普遍采用的是直接或间接测定森林生物量来估算森林植被碳储量方法^[17]。采用国际上常用的转换率0.5进行计算。同时,本研究计算的森林植被碳储量为乔木层碳储量。

所用的年平均固碳增量与碳储量的平均年增长率计算公式如下^[30]:

$$\Delta W_c = (W_{c2007} - W_{c1997}) / (2007 - 1997) \quad (1)$$

$$\Delta = (W_{c2007} / W_{c1997})^{1/(2007 - 1997)} - 1 \quad (2)$$

式中: ΔW_c 为森林植被的年平均固碳增量, Δ 为森林乔木层碳储量的年平均增长率。

2.4 固碳释氧价值评价

固碳效益估算时,采用国际上常用的转换率 0.5;释放氧气效益估算时,根据光合作用的机理与植物代谢规律来推算,每制造 1 t 植物生物量,可放出氧气 1.19 t^[18]。

$$V_q = B_n (0.5P_c + 1.2P_o) \quad (3)$$

式中, V_q 是固碳释氧总的价值量; B_n 为估算的第 n 年森林植被的生物量; P_c 为市场固定 CO₂ 的价格,单位:元·t⁻¹; P_o 为市场制造 O₂ 价格单位:元·t⁻¹。

3 结果与分析

3.1 碳储量、碳密度及其变化

3.1.1 不同森林类型的碳储量、碳密度及其变化
1997 年至 2007 年的 10 a 间,长白山金沟岭林场森林面积没有变化;森林植被碳储量总量呈现持续增长的特征,该林场森林植被乔木层碳储量由 7 621.842 2 t 增长到 8 018.125 9 t,净增加了 466.283 7 t,这表明了 1997 年至 2007 年,金沟岭林场森林植被是 CO₂ 的一个“汇”。从表 1 可以看出,长白山金沟岭林场森林植

被碳储量主要集中在针阔混交林、阔叶混交林与针叶混交林,3 种林分类型碳储量所占比例达到该区的 70%以上;其次是人工落叶松林与白桦林。显然,这与该地区不同类型森林的面积是有明显关系的。但是,云杉林的面积明显大于杨树林与榆树林,但是其碳储量却相对较低,这主要是由于云杉林大多处于中、幼龄林阶段,导致其生物量积累相对较慢所致,这表明森林植被的生长阶段类碳储量的动态变化影响了该林场的碳汇功能。

10 a 间,长白山金沟岭林场森林植被的平均碳密度呈现增长的趋势,由 1997 年的 47.541 7 mg·hm⁻² 增长到 2007 年的 50.186 6 mg·hm⁻²,平均碳密度净增长了 2.957 9 mg·hm⁻²。碳密度的动态变化在不同森林类型中存在一定差别,其中,森林植被碳密度最大的林分类型为阔叶混交林 72.950 8 mg·hm⁻²,是平均值的 1.5 倍以上;其次为落叶松林与杨树林,其碳密度值均大于平均碳密度;碳密度最小的林分为樟子松林,还不到 10 mg·hm⁻²。1997 年到 2007 年,碳密度变化较大的林分是杂木林,由 3.550 2 mg·hm⁻² 增加到 40.718 4 mg·hm⁻²,可以说明森林植被碳密度与森林类型有关。

表 1 森林植被的面积、蓄积与碳储量及其变化

Table 1 Forest area, accumulation and the total carbon storage in recent ten years

林分类型	1997 年				2007 年			
	面积/km ²	蓄积/×10 ⁴ m ³	碳储量/t	碳密度/(mg·hm ⁻²)	面积/km ²	蓄积/×10 ⁴ m ³	碳储量/t	碳密度/(mg·hm ⁻²)
白桦林	4.872 7	4.222 1	194.135 9	39.841 1	2.913 0	2.651 4	122.053 3	41.899 4
红松林	0.618 2	0.121 4	13.926 3	22.525 6	0.087 0	0.001 7	4.000 0	45.967 0
阔叶混交林	24.148 6	32.047 7	1 761.662 7	72.950 8	25.944 1	35.930 0	1 975.607 5	76.148 7
落叶松林	23.667 3	32.761 2	1 317.781 5	55.679 3	11.762 4	13.031 4	750.623 4	63.815 7
杨树林	1.026 6	1.315 6	59.407 6	57.868 5	1.036 6	1.325 6	65.500 0	60.000 0
榆树林	1.118 4	0.832 1	50.254 1	44.935 7	0.392 8	0.484 8	28.156 0	71.680 5
云杉林	2.670 4	0.788 2	29.050 0	10.878 4	1.666 7	0.335 0	17.391 2	10.434 4
杂木林	0.008 6	0.000 2	0.030 4	3.550 2	0.052 4	0.036 7	2.133 6	40.718 4
樟子松林	0.056 8	0.001 7	0.594 7	10.465 6	1.146 9	2.014 2	55.005 2	47.960 5
针阔混交林	67.204 5	106.371 0	2 614.643 5	38.905 8	78.562 2	122.442 2	3 120.653 1	39.722 0
针叶混交林	34.926 9	58.988 0	1 580.355 5	45.247 5	36.202 1	60.143 8	1 877.002 6	53.657 2
总计	160.319 2	237.449 2	7 621.842 2	47.541 7	159.766 1	238.396 8	8 018.125 9	51.847 9

3.1.2 不同龄级森林植被的碳储量、碳密度及其变化 对比分析森林植被碳储量随各林龄组的变化看(图 1),近熟林所占的植被碳储量比例 1997 年与 2007 年分别为 60% 与 46%,可见金沟岭林场森林植被碳储量以近熟林占优势。该林场的近熟林碳储量由 4 581.324 4 t 下降到 3 791.743 3 t,净减少了 789.743 3 t。近熟林碳储量呈现下降趋势而幼、中龄林碳储量比例呈增长趋势,主要是由于森林生长和培育增强了其碳汇功能,同时,树木生长导致近熟林发展为一部分的成熟林,成熟林碳储功能增强。

分析林木年龄组成结构对森林植被碳密度的影响,即平均碳密度随林龄起伏变化明显。从图 2 可以看出,幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林和过熟林的森林植被碳密度有依次增加的趋势,碳密度以幼龄林最低,以过熟林碳密度最大。其中幼龄林与中龄林增加较快,近熟林、成熟林与过熟林增加不是很明显,过熟林的碳密度是幼龄林的 5 倍多,表明未到达成、过熟林的森林,其碳密度尚未达到最大值,随着时间的推移与森林植被的生长,其碳汇能力将会进一步提高。1997—2007 年,成熟林与过熟林的碳密度均有一定幅度的降低,这主要是因为生长衰退。



图1 不同林龄组的森林植被碳储量及其变化

Fig. 1 Changes of total carbon storage in different age groups

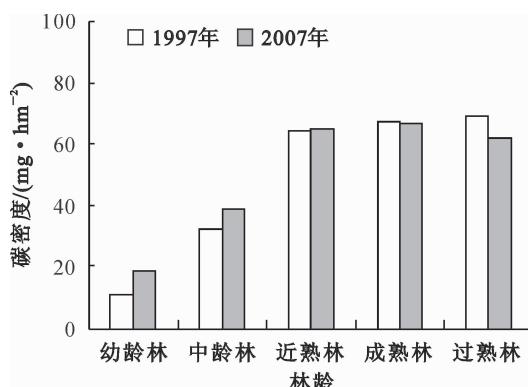


图2 不同年齡林分碳密度变化

Fig. 2 Mean carbon density in different age group

3.1.3 不同林种森林植被的碳储量、碳密度及其变化 长白山金沟岭林场森林主要有护路林、母树林、水土保持林与一般用材林4种功能类型,各林种所占有的面积比例与碳储量变化如图3和图4。可以看出,用材林所占的碳储量比例最大,达到93%以上,其他3种类型所占的碳储量比例合计不到7%。从森林植被碳密度随不同经营功能类型的变化看(图5),护路林的森林植被碳密度最低,1997年与2007年分别为 $28.028\text{8 mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 与 $36.264\text{7 mg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。1997年至2007年,水土保持林的植被碳密度增长最大,净增长了 $18.615\text{9 mg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明森林在保持可持续发展的情况下朝着多功能方向发展。



图3 不同林种的分布面积比例及其变化

Fig. 3 Changes of area in different forest function types

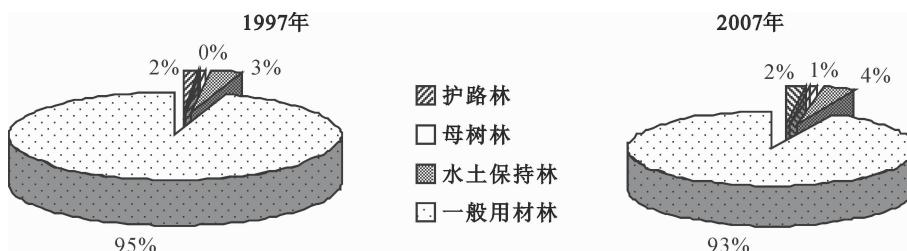


图4 不同林种的森林植被碳储量及其变化

Fig. 4 Changes of total carbon storage in different forest function types

3.2 森林植被的固碳增量

长白山金沟岭林场森林植被的固碳增量与平均年增长率分别是 $39.63\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 与0.51% (表2),固碳增量随着时间与林分类型的变化而变化,1997年至2007年,针阔混交林,针叶林与阔叶的分别是 $20.60\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $6.25\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 与 $12.78\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,3种林分类型的固碳增量均为正值,大小关系为针阔混交林>针叶林>阔叶

表2 各种林分类型固碳增量

Table 2 Carbon sequestration incremental in different forest types

林分类型	固碳增量 $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	平均年 增长率/%
混交林	20.60	0.76
阔叶林	6.25	0.30
针叶林	12.78	0.43
总计	39.63	0.51

林,同时,针阔混交林、针叶林与阔叶林的乔木层碳储量的平均年增长率分别为 0.76%、0.30% 和 0.43%。

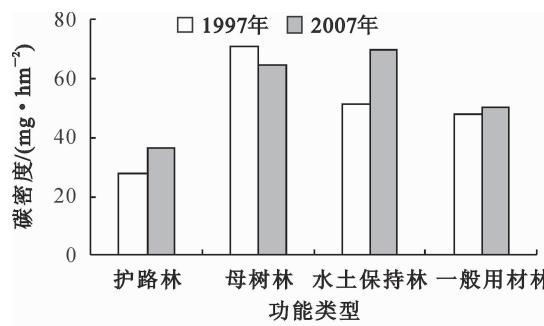


图 5 不同功能类型林分碳密度变化

Fig. 5 Mean carbon density in different forest function types

3.3 森林植被碳汇效益计量

本研究采用瑞典的碳税率 150 美元 · t⁻¹(折合人民币 1 200 元 · t⁻¹)与中华人民共和国卫生部网站中 2007 年春季氧气的平均价格(1 000 元 · t⁻¹)^[18], 来估算各种森林类型固碳和释氧价值。结果如表 3

所示,1997 年长白山金沟岭林场森林植被的固碳释氧总价值分别为 2 728.130 8 万元,其中固碳与释氧的价值分别为 914.457 3 万元与 1 813.673 6 万元;与之对比,2007 年,该地区森林植被固碳释氧总价值净增长了 16.824 0 万元,为 2 744.954 8 万元。该区以针叶混交林的固碳释氧价值最高,明显地高于阔叶林所产生的经济效益。

通过对比不同林龄的森林植被产生固碳释氧价值可以看出(表 4),长白山金沟岭林场以近熟林的固碳释氧价值最高,1997 年与 2007 年分别占总价值的 60.11% 与 51.41%;其次是中龄林,所占的比例分别为 27.20% 与 34.16%,二者分别占了总量的 87.31% 与 85.57%,说明了该林场有着较大分布面积的中龄林与近熟林在碳储量中起到了主导性作用。对比研究 2 个时期的固碳释氧效益发现近熟林的总价值有所下降,主要是因为近熟龄林木竞争加剧,导致枯损,生产力处于低缓水平,对此林分需加强抚育,生产力会逐步回升。

表 3 各种森林植被类型固碳释氧价值

Table 3 Carbon sequestration and oxygen release value according to different forest types

万元

林分类型	1997 年			2007 年		
	固碳价值	释氧价值	总价值	固碳价值	释氧价值	总价值
混交林	313.757 2	622.285 2	936.042 4	368.461 3	730.781 5	1 099.242 8
阔叶林	247.836 9	491.543 1	739.379 9	249.687 5	495.213 5	744.901 0
针叶林	352.863 2	699.845 3	1 052.708 5	301.947 8	598.863 2	900.811 1
总计	914.457 3	1 813.673 6	2 728.130 8	920.096 6	1 824.858 2	2 744.954 8

表 4 不同林龄级森林植被固碳释氧价值评估

Table 4 Carbon sequestration and oxygen release value in different age groups

万元

龄级	1997 年			2007 年		
	固碳价值	释氧价值	总价值	固碳价值	释氧价值	总价值
幼龄林	17.762 3	35.228 6	52.990 9	31.329 1	62.136 2	93.465 3
中龄林	248.771 8	493.397 4	742.169 2	314.300 9	623.363 6	937.664 5
近熟林	549.758 9	1 090.355 2	1 640.114 1	473.009 2	938.134 9	1 411.144 1
成熟林	97.488 8	193.352 8	290.841 6	145.733 5	145.603 9	291.337 4
过熟林	0.839 3	1.664 5	2.503 8	3.802 3	7.541 2	11.343 5

4 结论与讨论

森林蓄积量—生物量的转换参数受森林类型、立地质量,林分年龄与人为活动的影响。长白山金沟岭林场实施的天然林保护和退耕还林等林业生态工程,加大了森林经营力度,也相应增加了森林的碳储量,其乔木层碳储量 1997 年与 2007 年分别为 7 621.842 2 t 与 8 018.125 9 t,以中龄林与近熟林为主,随着林木的生长、成熟和经营管理水平的提高,该林区的固碳能力将处于持续增长的状态,是一个潜在的巨大碳库。

研究区碳密度与林分年龄结构近乎成正比,表

所示随着年龄增长碳密度也呈现增长的趋势,森林植被 1997 年与 2007 年的碳密度分别为 47.541 7

mg · hm⁻² 与 50.186 6 mg · hm⁻²,高于全国 2008

年森林平均植被碳密度 42.82 mg · hm⁻²^[19],但是低

于世界的平均水平 86.00 mg · hm⁻²^[12]。仍要加

强对现有森林经营,尤其是中幼龄林抚育,提高森林质量,从而增加森林碳密度,更好发挥森林生态功能。本研究分析森林植被的年固碳增量为 39.63

mg · hm⁻² · a⁻¹,平均年增长率 0.51%,低于我国森林的平均年增长率 1.6%^[20]。而欧洲与北美的一些森林的年固碳增量能达到 2.5~6.6 mg · hm⁻²

· a⁻¹^[7],表明该研究区内森林植被具有巨大的碳储

量及固碳空间,增加现存森林的碳密度是一个重要的方法来提高森林固碳增量。

在森林生态系统的各项服务功能中,森林的固碳释氧服务功能占森林生态系统公益价值的47.5%^[21],对生态系统价值的贡献最大。吉林金沟岭林场森林植被的固碳释氧1997年与2007年分别为2728.130.8万元与2744.954.8万元,净增长了16.824.0万元,为建立森林生态效益补偿机制或者直接投入市场交易提供了科学依据。长白山金沟岭林场土地肥沃,雨量充沛,森林植被年龄结构合理,有较高且持续时间长的生产力,碳库将越来越大,所创造的碳汇经济价值也会随之增加。

参考文献:

- [1] GIBBS H K, BROWN S, NILES J O, et al. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality[J]. Environmental Research Letters, 2007, 2(4):1-13.
- [2] BUNKER D E, DECLERCK F, BRADFORD J C, et al. Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest[J]. Science, 2005, 310(5750):1029-1031.
- [3] CHARLES P A, BOURQUE E T, NEILSON C G, et al. Optimizing carbon sequestration in commercial forests by integrating carbon management objectives in wood supply modeling[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2007, 12(7):1253-1275.
- [4] KIRBY K R, POTVIN C. Variation in carbon storage among tree species: Implications for the management of a small-scale carbon sink project[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 246(2/3):208-221.
- [5] FAHEY T J, WOODBURY P B, BATTLES J J, et al. Forest carbon storage: ecology, management, and policy[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 8(5):245-252.
- [6] CHATURVEDI R K, RAGHUBANSHI A S, SINGH J S. Carbon density and accumulation in woody species of tropical dry forest in India[J]. Forest Ecology Management, 2011, 262 (8):1576-1588.
- [7] KEITH H, MACKY B G, LINDENMAYER D B. Re-evaluation of forest biomass carbon stocks and lessons from the world's most carbon-dense forests[J]. Proceeding of the National Academy of Science of the USA, 2009, 106 (28): 11635-11640.
- [8] FANG J Y, CHEN A P, PENG C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. Science, 2001, 292(5525):2320-2322.
- [9] XU B, GUO Z D, PIAO S L, et al. Biomass carbon stocks in China's forests between 2000 and 2050: a prediction based on forest biomass-age relationships[J]. Sci. China Life Sci., 2010, 53(7):776-783.
- [10] 管东生,陈玉娟,黄芬芳.广州城市绿地系统碳的贮存、分布及其在碳氧平衡中的作用[J].中国环境科学,1998,18(5):437-441.
- GUAN D S, CHEN Y J, HUANG F F. The storage and distribution of carbon in urban vegetation and its roles in balance of carbon and oxygen in Guangzhou[J]. China Environmental Science, 1998,18(5):437-441. (in Chinese)
- [11] 张林,王礼茂.三北防护林体系森林碳密度及碳贮量动态[J].干旱区资源与环境,2010,24(8):136-140.
- ZHANG L, WANG L M. Dynamic forest carbon density and storage in the Three North Protective Forest System[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24 (8):136-140. (in Chinese)
- [12] 贺燕,张青,张梦弢,等.长白山杨桦次生林不同演替阶段林木空间分布格局研究[J].西北林学院学报,2015,30(1):8-13.
- HE Y, ZHANG Q, ZHANG M T, et al. Spatial distribution patterns of Polar-birch secondary forestry in different succession process stages in Changbai Mountain[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1):8-13. (in Chinese)
- [13] GIBBS H K, BROWN S, NILES J O, et al. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality[J]. Environmental Research Letters, 2007, 2(4):1-13.
- [14] SINGH L, SINGH J S. Importance of short lived components of a dry tropical forest for biomass production and nutrient cycling[J]. Journal of Vegetation Science, 1993, 4 (5):681-686.
- [15] 吴丹,邵全琴,刘纪远,等.1985—2030年江西泰和县森林植被碳储量的时空动态[J].应用生态学报,2011,22(1):41-46.
- [16] PAN Y D, LUO T X, BIRDSEY R, et al. New estimates of carbon storage and sequestration in China's forests: Effects of age-class and method on inventory-based carbon estimation [J]. Climate Change, 2004, 67(2/3):211-236.
- [17] 赵林,殷鸣放,陈晓非,等.森林碳汇研究的计量方法及研究现状综述[J].西北林学院学报,2008,23(1):59-63.
- ZHAO L, YIN M F, CHEN X F, et al. Summary of the research methods of forest carbon sink accounting[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23 (1):59-63. (in Chinese)
- [18] 顾丽.金沟岭林场森林多功能效益评价研究[D].北京:北京林业大学,2012.
- [19] 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[J].林业科学,2011,47(7):7-12.
- LI H K, LEI Y C, ZENG W S. Forest carbon storage in China estimated using forestry inventory data[J]. Sientia Silvae Sinicae, 2011, 47(7):7-12. (in Chinese)
- [20] 吴庆标,王效科,段晓男,等.中国森林生态系统植被固碳现状和潜力[J].生态学报,2008,28(2):517-524.
- WU Q B, WANG X K, DUAN X N, et al. Carbon sequestration and its potential by forest ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2):517-524. (in Chinese)
- [21] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,等.中国森林生态系统服务功能价值评估[J].生态学报,2005,25(8):2096-2102.
- YU X X, LU S W, JIN F, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8):2096-2102. (in Chinese)