DOI: 10.5846/stxb201304240799
李国伟,赵伟,魏亚伟,方向民,高波,代力民.天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响.生态学报,2015,35(4):984-992.
Li G W, Zhao W, Wei Y W, Fang X M, Gao B, Dai L M.Evaluation on the influence of natural forest protection program on forest ecosystem service function in changbai mountain.Acta Ecologica Sinica,2015,35(4):984-992.

天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响

李国伟[1,2],赵 伟[1,2,3],魏亚伟[1,2],方向民[1,2],高 波[4],代力民[1,*]

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 100085

3 大连软件和服务外包发展研究院, 大连 116000

4 吉林森工集团三岔子林业局, 白山 134700

摘要:森林生态系统具有多种服务功能,对生态安全、生物资源和生存环境的保护、实现社会经济可持续发展起着重要的作用。依据国家林业局发布的《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008),对涵养水源功能、保育土壤功能、固碳释氧功能、积累营养物质功能、净化大气功能 5 个方面进行评价,量化揭示天然林资源保护工程实施对长白山林区森林生态系统服务功能物质量及其价值的影响。结果表明:从 1998 年开始试点,到 2010 年一期正式结束,森林生态系统各项服务功能的物质量和价值量均呈现增加趋势。在涵养水源功能方面,调节水量增加了 657.28×10^4 m^3,累计增加价值为 113.45 亿元;在保育土壤功能方面,固土量增加了 4.6×10^4 t,土壤中减少的氮流失 0.02×10^4 t,减少的磷流失 0.01×10^4 t,减少钾流失 0.01×10^4 t,累计增加价值为 2.92 亿元;在固碳释氧功能方面,固碳量增加了 0.64×10^4 t,释氧量增加了 0.36×10^4 t,累计增加价值为 0.11 亿元;在积累营养物质功能方面,固氮量、固磷量、固钾量均增加 0.01×10^4 t,累计增加价值 0.3 亿元;在净化大气功能方面,吸收二氧化硫、氟化物、氮氧化物、滞尘量分别增加 24.71×10^4 kg、0.64×10^4 kg、1.08×10^4 kg、1962.76×10^4 kg,累计增加价值 5.09 亿元。森林生态系统服务功能价值总量增加了 121.87 亿元,平均每年增加约 10 亿元,超过工程每年各项投资之和。价值量增加额度依次为:1)涵养水源功能;2)固碳释氧功能;3)保育土壤功能;4)净化大气功能;5)积累营养物质功能。这些增加量只有一部分为工程区当地利用,其余都贡献到全国乃至全球。因此,及时制定和启动生态补偿等一系列政策和措施,将对更好的实施天然林资源保护工程、实现林区的可持续发展具有重要作用。

关键词:天然林资源保护工程;长白山林区;森林生态系统;服务功能价值;评价

Evaluation on the influence of natural forest protection program on forest ecosystem service function in changbai mountain

LI Guowei [1,2], ZHAO Wei [1,2,3], WEI Yawei [1,2], FANG Xiangmin[1,2], GAO Bo[4], DAI Limin[1,*]

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* 100085, *China*

3 *Dalian institute of software & service outsourcing, Dalian* 116000, *China*

4 *Sanchazi Forestry Bureau of Jilin Forest Industry Group Co.,Ltd, Baishan* 134700, *China*

Abstract: The forest ecosystem has a variety of natural and social service functions. It plays an important role in ecological security, biological species protection, conservation of the living environment, and realizing the sustainable development of economy and society. Based on the "Forest Ecosystem Services Assessment Standards (LY/T1721—2008)" issued by the

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(天然林资源保护工程固碳速率和潜力研究)(XDA05060201)

收稿日期:2013-04-24; **网络出版日期**:2014-04-11

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

State Forestry Administration, this paper evaluates five key functions of forest ecosystems-water conservation, soil conservation, carbon fixation and oxygen release, nutrient accumulation, and atmospheric environment purification. Focusing on the Changbai Mountain forest region in Northeast China, this study provides some quantitative evidence that the implemenationt of the Natural Forest Protection Program (NFPP) initiated in 1998 has had positive effects on the values and material quantities of ecosystem service functions. The results show that both material and value quantities of these functions tended to increase in the 12 years following the initiation of the program, the first phase of which was completed in 2010. With respect to water resource conservation, the amount of increment regulating water flow has been 657.28×10^4 m^3, reflecting a cumulative increase in value of 11.345 billion RMB. Regarding soil conservation, the amount of increment of soil fixation was 4.6×10^4 t, while the amount of reduction in nitrogen loss, phosphorus loss and potassium loss has been 0.02×10^4 t, 0.01×10^4 t, and 0.01×10^4 t, respectively. The cumulative increase in value of soil conservation is 0.29 billion RMB. With respect to the carbon fixation and oxygen release function, the increments of carbon fixation and oxygen release have been 0.64×10^4 t and 0.36×10^4 t, respectively, with a the cumulative increase in value of 11 million RMB. Regarding nutrient accumulation, the nitrogen content, solid phosphorus content, and solid potassium content each increased by 0.01×10^4 t, with a cumulative increase in value of 30 million RMB. Finally, in regard to the atmospheric environment purification function, the absorption of sulfur dioxide, nitrogen oxides, fluorides and dust have increased by 24.71×10^4 kg, 0.64×10^4 kg, 1.08×10^4 kg and 1962.76×10^4 kg, respectively, with a cumulative increase in value of 0.51 billion RMB. On an overall basis, from 1998—2010, the gross value of all of the aforementioned forest ecosystem service functions increased by 12.19 billion RMB, which is equivalent to an average annual rise of approximately 1 billion RMB. This exceeded the total annual investments. The aggregate values of the ecosystem services over this period were ranked in the following order: 1) water conservation; 2) carbon fixation and oxygen release function; 3) soil conservation function; 4) atmospheric environment purification; 5) nutrient accumulation. While not all of the values created via implementation of the NFPP were captured by the local forest region, other value increments were experienced by the entire country and even on a global scale as well. From a national perspective, it will be important to draft and launch a series of policies and measures for ecological compensation in a timely manner, which will not only insure social justice but also enhance the potential that the ongoing implementation of the NFPP will further strengthen both resource protection and the sustainable development of China's natural forests.

Key Words: Natural Forest Protection Project; Changbai mountain forest region; forest ecosystem; ecosystem service value; evaluation

森林生态系统服务功能是森林生态系统与生态过程所形成及维持人类赖以生存的自然环境条件与效用,对维持地球的生命支持系统,维持生命物质的生物地化循环与水循环,维持生物物种与遗传多样性,维持大气化学的平衡与稳定具有重要作用[1]。随着国际上对森林生态系统的研究越来越重视,不同学者从森林生态系统过程、生态系统服务功能维持及提高、生态系统经济价值等多个方面开展了大量研究[2-4]。近年来,我国生态系统服务研究取得了较快进展[5]。许多学者在借鉴国外理论与方法的基础上,探索和尝试不同方法对国家级尺度、省级尺度、区域尺度、流域尺度的不同类型森林生态系统服务及其价值评估的研究[6-13]。但是,由于评估指标体系多样、评估方法不统一、评估地点不同、评估结果之间差异较大,难以彼此之间进行比较。同时,这些研究大多集中在对某一个时间点的特定区域的森林,而从时间跨度上对国家巨额投资支持的林业工程的研究更少。为此,本文以天然林资源保护工程(以下简称天保工程)为切入点,以长白山典型林业局为研究对象,评估天然林保护工程一期实施 10 年来对林区带来的生态系统服务功能变化,旨在为天保工程更好的实施提供参考。

1 研究区概况

研究区位于长白山林区西南麓之间的吉林省三岔子林业局,经营面积 223438 hm^2,森林覆盖率 92.9%,具有典型的长白山植被类型特征,是长白山重点国有林区之一。从 1998 年天保工程开始试点,到 2010 年一期正式结束。研究区森林资源得到了有效保护和恢复,面积和蓄积呈现增加趋势。有林地面积从 201367 hm^2 增加到 207484 hm^2 蓄积从 23173683 m^3 增加到 24744445 m^3。由于工程要求全面停止天然林资源商品性采伐,将采伐对象转向人工林,所以人工林的面积和蓄积呈现下降趋势,而天然林资源的面积和蓄积大幅上升(图 1),林分质量逐渐提高,近成熟林、过熟林比例增大(图 2)。

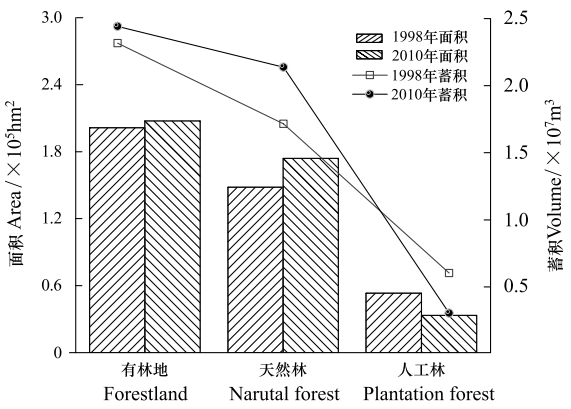


图 1 1998 年和 2010 年有林地面积、蓄积变化图

Fig.1 Changes of forest area and forest growing stock in 1998, 2000

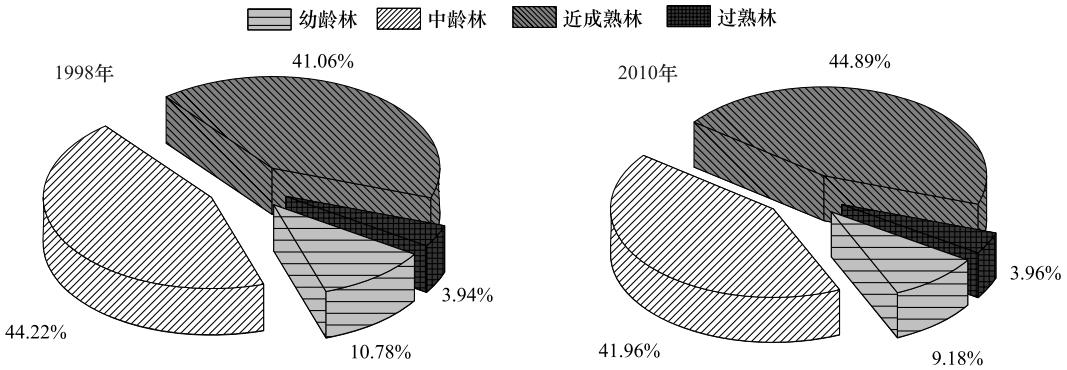


图 2 1998 年和 2010 年天然林林龄结构变化图

Fig.2 Changes of natural forest's forest age in 1998 and 2000

2 研究方法

本文按照 2008 年国家林业局颁布《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008),分析和评价研究区森林生态系统服务功能的物质量及价值量[14],包括涵养水源功能、保育土壤功能、固碳释氧功能、积累营养物质功能和净化大气环境功能。

2.1 涵养水源功能

涵养水源功能是森林通过对降水的截留、吸收和下渗,对降水进行再分配,减少无效水,增加有效水。主要通过调节水量和净化水质两个指标进行评价,其中净化水量采用年调节水量公式。

(1)年调节水量指标

年调节水量公式为:

$$G_{调} = 10A(P-E-C) \tag{1}$$

年调节水量价值公式为:

$$U_{调} = 10C_{库}A(P-E-C) \tag{2}$$

(2)净化水质指标

年调节水量的公式为:

$$G_{调}=10A(P-E-C) \tag{1}$$

年净化水质价值:

$$U_{水质}=10K_{水}A(P-E-C) \tag{3}$$

式中,$G_{调}$为林分年调节水量(m^3/a);$U_{调}$为林分年调节水量价值(元/a);$C_{库}$为水库库容造价(元/m^3);$U_{水质}$为林分年净化水质价值(元/a);$K_{水}$为水的净化费用(元/t);P 为林外降水量(mm/a);E 为林分蒸散量(mm/a);C 为地表径流量(mm/a);A 为林分面积(hm^2);10 为降水量转化为 t/hm 的单位换算系数;

2.2　保育土壤功能

保育土壤功能是森林中凋落物层层截留降水,减少或降低水滴对土壤表层的直接冲击,有效地固持土体,降低地表径流对土壤的冲蚀,使土壤流失量大大降低。同时,森林的生长发育及其代谢产物不断对土壤长生物理及化学影响,参与土壤内部的能量转换与物质循环,提高土壤肥力,改善土壤结构的功能。主要通过森林固土和森林保肥两个指标进行评价。

(1)固土指标

林分年固土量公式为:

$$G_{固土}=A(X_2-X_1) \tag{4}$$

年固土价值公式为:

$$U_{固土}=AC_{土}(X_2-X_1)/\rho \tag{5}$$

(2)保肥指标

年保肥量公式为:

$$G_N=AN(X_2-X_1) \tag{6}$$

$$G_P=AP(X_2-X_1) \tag{7}$$

$$G_K=AK(X_2-X_1) \tag{8}$$

年保肥价值公式为:

$$U_{肥}=A(X_2-X_1)(NC_1/R_1+PC_1/R_2+KC_2/R_2+MC_3) \tag{9}$$

式中,$G_{固土}$为林分固土量(t/a);$U_{固土}$为林分固土量价值(元/a);$U_{肥}$为林分年保肥价值(元/a);G_N 为森林固持土壤而减少的氮流失量(t/a);G_P 为森林固持土壤而减少的磷流失量(t/a);G_K 为森林固持土壤而减少的钾流失量(t/a);X_1为有林地土壤侵蚀模数($t\ hm^{-2}\ a^{-1}$);X_2为无林地土壤侵蚀模数($t\ hm^{-2}\ a^{-1}$);A 为林分面积(hm^2);ρ 为林地土壤容重(t/m^3);N 为土壤含氮量(%);P 为土壤含磷量(%);K 为土壤含钾量(%);R_1 为磷酸二铵化肥含氮量(%);R_2 为磷酸二铵化肥含磷量(%);R_3 为氯化钾化肥含钾量(%);C_1 为磷酸二铵化肥价格(元/t);C_2 为氯化钾化肥价格(元/t);C_3 为有机质价格(元/t)。

2.3　固碳释氧功能

固碳释氧功能是通过森林植被、土壤动物和微生物固定碳素、释放氧气。为此,根据光合作用化学反应公式,森林植被每积累 1.0 g 干物质,可以吸收 1.63 g CO_2,释放 1.19 g O_2。主要通过森林固碳和释氧两个指标进行评价。

(1)固碳指标

植被和土壤年固碳量公式为:

$$G_{碳}=A(1.63R_{碳}B_{年}+F_{土壤碳}) \tag{10}$$

年固碳价值计算公式为:

$$U_{碳}=AC_{碳}(1.63R_{碳}B_{年}+F_{土壤碳}) \tag{11}$$

(2)释氧指标

年释氧量的计算公式为:

$$G_{氧}=1.19AB_{年} \tag{12}$$

年释氧价值采用以下公式计算：

$$U_{氧} = 1.19C_{氧}\ AB_{年} \tag{13}$$

式中，$G_{碳}$为年固碳量(t/a)；$B_{年}$为林分净生产力(t hm^{-2} a^{-1})；$F_{土壤碳}$为单位面积林分土壤年固碳量(t hm^{-2} a^{-1})；$R_{碳}$为 CO_2中碳含量，为 27.27%；A 为林分面积(hm^2)；$U_{碳}$为林分年固碳价值(元/aFQB)；$C_{碳}$为固碳价格(元/t)；$G_{氧}$为林分年释氧量(t/a)；$U_{氧}$为林分年释氧价值(元/aFQB)；$C_{氧}$为氧气价格(元/t)。

2.4 积累营养物质功能

积累营养物质功能是森林植被在其生长过程中不断地从周围环境中吸收氮、磷、钾等营养物质，并储存在体内各器官，这些营养元素一部分通过生物地球化学循环以枯枝落叶形式归还土壤，一部分以树干淋洗和地表径流等形式流入江河湖泊，一部分以林产品形式输出生态系统，再以不同形式释放到周围环境中[15]。为此，选用林木营养积累指标反映森林积累营养物质功能。

(1)林木营养年积累量

$$G_{氮} = AN_{营养}B_{年} \tag{14}$$

$$G_{磷} = AP_{营养}B_{年} \tag{15}$$

$$G_{钾} = AK_{营养}B_{年} \tag{16}$$

(2)林木营养年积累价值

$$U_{营养} = AB_{年}(N_{营养}C_1/R_1 + P_{营养}C_1/R_2 + K_{营养}C_2/R_3) \tag{17}$$

式中，$G_{氮}$为林分固氮量(t/a)；$G_{磷}$为林分固磷量(t/a)；$G_{钾}$为林分固钾量(t/a)；$N_{营养}$为林分氮元素含量(%)；$P_{营养}$为林分磷元素含量(%)；$K_{营养}$为林分钾元素含量(%)；$B_{年}$为林分净生产力(t hm^{-2} a^{-1})；A 为林分面积(hm^2)；$U_{营养}$为林分营养物质年积累价值(元/aFQB)；R_1 为磷酸二铵化肥含氮量(%)；R_2 为磷酸二铵化肥含磷量(%)；R_3 为氯化钾化肥含钾量(%)；C_1 为磷酸二铵化肥价格(元/t)；C_2 为氯化钾化肥价格(元/t)。

2.5 净化大气环境功能

净化大气环境功能就是森林生态系统通过吸收、过滤、阻隔、分解等过程将大气中的有毒物质讲解和净化，从而起到净化大气的作用。为此，选取吸收二氧化硫(SO_2)、氟化物、氮氧化物和滞尘 4 个指标评价森林净化大气环境能力。

(1)吸收二氧化硫

年吸收二氧化硫量公式为：

$$G_{二氧化硫} = Q_{二氧化硫}A \tag{18}$$

年吸收二氧化硫价值公式为：

$$U_{二氧化硫} = K_{二氧化硫}Q_{二氧化硫}A \tag{19}$$

(2)吸收氟化物

年吸收氟化物量公式为：

$$G_{氟化物} = Q_{氟化物}A \tag{20}$$

年吸收氟化物价值：

$$U_{氟化物} = K_{氟化物}Q_{氟化物}A \tag{21}$$

(3)吸收氮氧化物

年吸收氮氧化物量公式为：

$$G_{氮氧化物} = Q_{氮氧物}A \tag{22}$$

年吸收氮氧化物价值公式为：

$$U_{氮氧化物} = K_{氮氧化物}Q_{氮氧化物}A \tag{23}$$

(4)滞尘指标

年滞尘量公式为：

$$G_{滞尘} = Q_{滞尘} A \tag{24}$$

年滞尘价值公式为:

$$U_{滞尘} = K_{滞尘} Q_{滞尘} A \tag{25}$$

式中,$G_{二氧化硫}$为林分年吸收二氧化硫量(t/a);$Q_{二氧化硫}$为单位面积林分吸收二氧化硫量(kg hm^{-2} a^{-1});$U_{二氧化硫}$为林分年吸收二氧化硫价值(元/aFQB);$K_{二氧化硫}$为二氧化硫的治理费用(元/kg);$G_{氟化物}$为林分年吸收氟化物量(t/a);$Q_{氟化物}$为单位面积林分吸收氟化物量(kg hm^{-2} a^{-1});$U_{氟化物}$为林分年吸收氟化物价值(元/aFQB);$K_{氟化物}$为氟化物的治理费用(元/kg);$G_{氮氧化物}$为林分年吸收氮氧化物量(t/a);$Q_{氮氧物}$为单位面积林分吸收氮氧化物量(kg hm^{-2} a^{-1});$U_{氮氧化物}$为林分年吸收氮氧化物价值(元/aFQB);$K_{氮氧化物}$为氮氧化物的治理费用(元/kg);$G_{滞尘}$为林分年滞尘量(t/a);$Q_{滞尘}$为单位面积林分年滞尘量(kg hm^{-2} a^{-1});$U_{滞尘}$为林分年滞尘价值(元/aFQB);$K_{滞尘}$为降尘清理费用(元/kg);A 为林分面积(hm^2)。

2.6　森林生态服务功能总价值

森林生态系统服务功能总价值为各个功能指标之和,具体公式为:

$$U = \sum_{i=1}^{11} U_i \tag{26}$$

式中,U 为森林生态系统服务功能年总价值(元/aFQB);U_i 为森林生态系统服务功能各分项年价值(元/aFQB)。

3　参数与结果

3.1　涵养水源功能

研究区年平均降水年平均降水量为 767 mm,由于长白山森林生态系统多年平均耗散水量占多年平均降水量的 35%,径流系数为 65%,地下径流量高达 86%,直接径流量仅占 14%[16],可以得出蒸散量和地表径流量分别为 268.45 mm、69.797 mm。根据公式(1),得出 1998 年和 2010 年,森林生态系统调节水量分别为 88302.11×10^4 m^3,88959.39×10^4 m^3,增加了 657.28×10^4 m^3,年均增加量达到 50.56×10^4 m^3。

根据 1993—1999 年,《中国水利年鉴》平均水库库容造价 2.17 元 t/m^3,2010 年价格指数 6.064,得出建设单位库容投资为 2.17×6.064 = 13.16 元/t[17]。水的净化费用(居民用水价格):1998 年全国各大中城市的居民平均用水价格平均值为 0.86 元/t[18],2010 年全国大中城市的居民用水终端价格平均值为 2.6 元/t。根据公式(2)、(3),得出 1998 年和 2010 年,调节水量价值和净化水质价值分别为 26.75 亿元、140.20 亿元,增长了 4.24 倍。

3.2　保育土壤功能

有林地与无林地土壤侵蚀模数差值 30 t hm^{-2} a^{-1},ρ = 1.03 t/m^3[19]。根据《森林生态系统服务功能评估规范》,人工挖土方每 100 m^3需 42 个工时[17]。1998 年,每个人工每天 30 元计算,获得挖取单位面积土方费用为 12.60 元/m^3。2010 年,当前每个人工每天 100 元计算,获得挖取单位面积土方费用为 42 元/m^3。根据公式(4)、(5)计算,得到 1998 年和 2010 年,固土量分别为 617.85×10^4 t、622.45×10^4 t,增加了 4.6×10^4 t,固土价值分别为 0.76 亿元、2.54 亿元,增加了 1.78 亿元。

对于保肥指标,该林分年保肥价值以年固土量中 N、P、K 的数量这和成磷酸二铵化肥和氯化钾化肥的价值来体现。R_1 R_1 = 14%;R_2 = 15.01%;R_3 R_3 = 50.00%[17];N = 0.37%,P = 0.108%,K = 0.239%,M = 3.7%[20]。2010 年,磷酸二铵价格为 3020 元/t,氯化钾价格为:2650 元/t,草炭土价格为 220 元/t,草炭土中含有机质 62.5%,折合为有机质价格为:320 元/t。1998 化肥价格均为 2549 元/t[21],草炭土价格为 180 元/t,草炭土中含有机质 62.5%,折合为有机质价格为:288 元/t。根据公式(6—8)计算,得到 1998 年和 2010 年,森林固持土壤减少的氮流失量分别为 2.28×10^4 t 和 2.30×10^4 t,累计减少量为 0.02×10^4 t。减少的磷流失量分别为 0.67×10^4 t 和 0.68×10^4 t,累计减少量为 0.01×10^4 t。减少的钾流失量分别为 1.48×10^4 t 和 1.49×10^4 t,累计减少量

为 0.01×10^4 t。根据公式(9),得到 1998 年和 2010 年保肥价值分别为 6.71 亿元和 7.85 亿元,增加了 1.14 亿元。

3.3 固碳释氧

植被年固碳量方面,针阔混交林、暗针叶林、明亮针叶林和阔叶林年净生产力分别为 20.19、13.45、9.5、14.19 t hm^{-2} a^{-1}[22]。土壤年固碳量方面,阔叶林和针叶林年固碳量分别为 1.17、0.8 t/a[23]。由于 1998 年,国际上没有碳排放交易,因此,1998 年和 2010 年的固碳价格均按照《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008)采用的瑞典碳税率 150 美元/t,折合人民币为 1200 元/t。同时,由于 1998 年制造氧气价格无法查证,因此与 2010 年相同,均采用中华人民共和国卫生部公布的 2007 年春季氧气平均价格 1000 元/t[17]。根据公式(10)、(11),计算得到 1998 年和 2010 年,固碳量分别为 81.76×10^4,82.40×10^4 t,增加了 0.64×10^4 t。固碳价值为 9.81 亿元,9.89 亿元,增加了 0.08 亿元。根据公式(12)、(13)计算得到,1998 年和 2010 年,释氧量分别为 47.05×10^4 t,47.41×10^4 t,增加了 0.36×10^4 t,释氧量价值分别为 4.71 亿元,4.74 亿元,增加了 0.03 亿元。

3.4 积累营养物质功能

森林生态系统养分积累取决于森林生态系统养分持留量和化肥价格。其中,林分净持留养分参照表 1。R_1、R_1R_2、R_3、C_1 C_1、C_2 C_2参照保育土壤功能指标,$B_{年}$参照固碳释氧功能指标。根据公式(14—17)计算得到,1998 年和 2010 年,林木固氮量分别为 0.76×10^4 t 和 0.77×10^4 t,固磷量分别为 0.07×10^4 t 和 0.08×10^4 t,固钾量分别为 0.32×10^4 t 和 0.33×10^4 t。1998—2010 年固氮量、固磷量、固钾量均增加 0.01×10^4 t。根据公式(18)计算得到,1998 年和 2010 年,林木营养年积累价值分别为 1.68 亿元和 1.98 亿元,增加了 0.3 亿元。

3.5 净化大气功能

针叶树平均吸收 SO_2、氟化物、氮氧化物和滞尘能力分别为:215.60,0.5,6.0,33200 kg/hm^2。阔叶树平均吸收 SO_2、氟化物、氮氧化物和滞尘能力分别为 88.65,4.65,6.0,10110 kg/hm^2[25]。1998 年,SO_2、氟化物、氮氧化物、降尘清理费用分别为 0.2 元/kg[26],0.04,0.04,0.04 元/kg[27]。2010 年,二氧化硫、氟化物、氮氧化物、降尘清理费用分别为 1.20,0.69,0.63,0.15 元/kg[28]。

表 1 林分净持留养分表/(kg hm^{-2} a^{-1})

Table 1 Forest net retention of nutrients

林分类型 Forest type	N	P	K
针阔混交林 Coniferous and broad-leaved mixed forest	33.19	3.3	14.52
暗针叶林 Coniferous mixed forest	94.53	11.09	33.27
落叶松林 Larix forest	6.25	1.06	2.87
阔叶林 Broad-leaved forest	5.05	1.58	2.45

数据来源:(吴钢等,2001)[24]

根据公式(18—25)计算得出,1998 年和 2010 年,吸收 SO_2量分别为 2304.18×10^4 kg 和 2328.89×10^4 kg,吸收 SO_2价值为 0.05 亿元和 0.28 亿元,二者增量分别为 24.71×10^4 kg 和 0.23 亿元。吸收氟化物量分别为 57.10×10^{4}g、57.74×10^4 kg,吸收氟化物价值分别为 0.0002,0.0039 亿元,二者增量分别为 0.64×10^4 kg 和 0.0037 亿元。吸收氮氧化物量分别为 124.49×10^{4}g、125.57×10^4 kg,吸收氮氧化物价值分别为 0.0005 、0.0078 亿元,二者增量分别为 1.08×10^4 kg 和 0.0073 亿元。滞尘量分别为 438533.18×10^4、440495.94×10^4 kg,滞尘价值分别为 1.75 、6.61 亿元,二者增量分别为 1962.76×10^4 kg 和 4.86 亿元。

3.6 生态系统服务总价值

可以看到与 1998 年相比,森林生态系统服务功能物质量也都呈现增加趋势,增幅达到 0.45%—14.29%。根据公式(26)计算得到,研究区森林生态系统服务功能总价值由 1998 年的 52.22 亿元提高到 2010 年的 174.09 亿元,增加了 2.22 倍。从 2010 年各服务功能价值量来看,涵养水源功能价值达到 140.20 亿元,保育土壤功能价值达到 10.39 亿元,固碳释氧功能达到 14.63 亿元,积累物质营养功能达到 1.98 亿元,净化大气功能达到 6.89 亿元。天保工程实施前后研究区森林生态系统服务功能价值量次序大小均是:涵养水源功能>固

碳释氧功能>保育土壤功能>净化大气功能>积累营养物质功能(表 2)。

表 2　森林生态系统服务功能价值评估表(亿元)

Table 2　Evaluation of forest ecosystem service values

生态系统服务功能价值 Ecosystem service values	1998 年 1998	2010 年 2010	差值 Difference
涵养水源功能 Water conservation	26.75	140. 20	113.45
保育土壤功能 Soil conservation	7.47	10. 39	2.92
固碳释氧功能 Carbon fixation and oxygen release	14.52	14.63	0. 11
积累营养物质功能 Nutrient accumulation	1.68	1.98	0. 3
净化大气功能 Atmospheric environment purification	1.80	6.89	5.09
总价值 The gross value	52.22	174.09	121.87

4　讨论与结论

(1)天保工程的实施,对于增加森林生态系统服务功能物质量和价值量具有重要作用。2010 年,研究区森林生态系统价值量比 1998 年增加了 121.87 亿元,平均每年增加约 10 亿元。这部分价值增量,一方面是由于物质量增加造成的,另一方面由于人工费增加、排污费增加、部分商品价值指数变动等原因造成的。由于研究区仅仅是长白山林区的典型区域之一,对于大多数都是工程区的长白山林区而言,天保工程将带来更大物质量和价值量增加,而森林生态系统产生的物质量只有一部分为当地享用,其余都贡献于全国乃至全球。也就是说,工程区为保护生态、恢复生态、发展生态付出了巨大的努力和牺牲,但其为全国乃至世界所提供的生态服务却是无偿的,这显然是不公平的。人们只看到了森林生态系统服务功能提供者与享用者之间巨大的经济发展差距,却没有或不愿看到其背后的巨大牺牲与无偿占用,虽然国家通过相关政策进行了一定程度的调节,但并不能体现生态服务的真正价值,这对于国家、地区、林区并非长远之计,还需要国家、地方以及各级林业主管部门制定和启动生态补偿等一系列政策和措施。只有这样,才能更好的实施天保工程,实现林区的可持续发展。

(2)天保工程实施,有效地保护了长白山林区宝贵的森林资源,改善生态环境。1998—2010 年,天保工程研究区森林资源净增长量达到 157.0762 万 m^3,如按 13 年间平均 72.3%的出材率和 2010 年平均木材售价 1045.18 元计算,应折合成 118697.01 万元。同时,工程要求大幅度调减木材产量,研究区累计完成调减量 21. 4 万 m^3,按照平均蓄积产生的服务功能价值计算,研究区森林资源净增加量和调减量产生的价值分别达到 13.17 亿元和 1.80 亿元,不仅为社会经济建设提供了后备资源,也对林区的生态系统服务功能产生重要影响。

(3)本研究是针对林业工程实施前后,对森林生态系统服务功能及其价值进行的评估。其结果有利于更直观的认识和了解林业工程对森林生态系统服务功能的影响,可以为评价其他林业工程所产生的生态效益提供参考和借鉴。天保工程天保工程但是,受基础资料的限制,无法对森林的每项生态系统功能计量,所以本文核算的森林生态系统服务功能总价值低估了实际结果,其价值体现仍然是不完全的。同时,在评价固碳释氧价值的过程中,由于 1998 年国际上没有碳交易,更没有固碳价格,氧气价格也采用和 2010 年相同的系数值,导致其结果高于实际价值。但这并不影响我们的研究,从结果可以看出,天保工程的实施,对森林生态系统服务功能的物质量和价值量产生了巨大的影响,这对加强森林生态系统的保护和管理,合理开发森林资源具有重要的指导意义。

参考文献(References):

[1] 靳芳, 鲁少伟, 余新晓, 饶良懿, 牛建植, 谢媛媛, 张振明. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1531-1536.

[2] Costanza R, d′Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O′Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of world′s ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-259.
[3] 刘霞, 张光灿, 江廷水, 杨明玉. 国内外公益林效益计量评价研究进展. 水土保持学报, 2000, 14(2): 95-100.
[4] Pimentel D, Harvey C, Resosudarmo P, Sinclair K, Kurz D, McNair M, Crist S, Shpritz L, Fitton L, Saffouri R, Blair R. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. Science, 1995, 267(5201): 1117-1123.
[5] 李文华, 张彪, 谢高地. 中国生态系统服务研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.
[6] 王兵, 任晓旭, 胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153.
[7] 刘勇, 李晋昌, 杨永刚. 基于生物量因子的山西省森林生态系统服务功能评估. 生态学报, 2012, 32(9): 2699-2706.
[8] 林媚珍, 马秀芳, 杨木壮, 蔡祗, 陈志云, 姜喜东. 广东省 1987 年至 2004 年森林生态系统服务功能价值动态评估. 资源科学, 2009, 31(6): 980-984.
[9] 王兵, 鲁绍伟, 尤文忠, 任晓旭, 刑兆凯, 王世明. 辽宁省森林生态系统服务价值评估. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1792-1798.
[10] 白杨, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华, 江波, 方瑜. 海河流域森林生态系统服务功能评估. 生态学报, 2011, 31(7): 2029-2039.
[11] 马利邦, 牛叔文, 杨丽娜, 马莉. 敦煌市生态系统服务价值评估及区域可持续发展研究. 生态与农村环境学报, 2010, 26(4): 294-300.
[12] 赵忠宝, 李克国, 曾广娟, 李德成. 秦皇岛市森林生态系统服务功能评价研究. 干旱区资源与环境, 2012, 26(2): 31-35.
[13] 王兵, 魏江生, 胡文. 中国灌木林-经济林-竹林的生态系统服务功能评估. 生态学报, 2011, 31(7): 1936-1945.
[14] 赵景柱, 肖寒, 吴钢. 生态系统服务的物质量与价值量评价方法的比较分析. 应用生态学报, 2000, 11(2): 290-292.
[15] 张永利, 杨锋伟, 王兵. 中国森林生态系统服务功能研究. 北京: 科学出版社, 2010: 21-21.
[16] 范世香, 裴铁璠. 长白山北坡森林生态系统的水文特征及其水量平衡 // 森林生态系统研究. 第 6 卷. 北京:中国林业出版社, 1992, 6: 240-247.
[17] 王兵, 杨锋伟, 郭浩. 森林生态系统服务评估规范(LY/T 1721-2008). 北京: 中国标准出版社, 2008.
[18] 中国建设信息编辑部. 部分城市公有住房租金和居民用水价格调整. 中国建设信息, 1998, (33): 9-9.
[19] 薛达元, 包浩生, 李文华. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估. 中国环境科学, 1999, 19(3): 247-252.
[20] 王志新, 牟长城, 韩燕茹. 吉林省森林效益的经济评价. 吉林林业科技, 2002, 31(4): 43-47.
[21] 薛达元. 生物多样性经济价值评估——长白山自然保护区案例研究. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
[22] 李文华, 邓昆枚, 李飞. 长白山主要森林生态系统生物生产量的研究. 森林生态系统研究, 1981, (2): 34-50.
[23] Zhou L, Dai L M, Wang S X, Huang X T, Wang X C, Qi L, Wang Q W, Li G W, Wei Y W, Shao G F. Changes in carbon density for three old-growth forests on Changbai Mountain, Northeast China: 1981-2010. Annals of Forest Science, 2011, 68(5): 953-958.
[24] 吴钢, 肖寒, 赵景柱, 邵国凡, 李静. 长白山森林生态系统服务功能. 中国科学(C 辑), 2001, 31(5): 471-480.
[25] 陈昌笃. 中国生物多样性国情研究报告. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.
[26] 吉林省环保厅. 关于印发吉林二氧化硫排污费征收实施办法的通知. 吉环发[1998]54 号.
[27] 国务院. 征收排污费暂行办法. 19820205.
[28] 国家发改委, 财政部, 国家环保总局,经贸委. 排污费征收标准及计算方法. 2003 年第 31 号令.