

# 我国森林碳汇核算的计量模型研究

张颖 吴丽莉 苏帆 杨志耕

(北京林业大学经济管理学院)

**摘要:**为了更好地对我国森林碳汇进行研究和管理工作,促进碳汇市场的发展,本文在经济控制理论的基础上,收集了1990—2007年林木蓄积量、生长量、枯损量和采伐量的数据,通过蓄积量转换法建立了森林碳汇核算的回归模型,并进行了分析。结果表明,相邻年份的森林生物碳储量 $C(k+1)$ 、 $C(k)$ 回归方程的拟合优度 $R^2=0.998$ ,调整后 $R^2=0.997$ ,模型的 $F$ 值为6 581.48,对应的 $P$ 值为0.00,表明模型成立并具有统计学意义。在此基础上,利用最小值法进一步求出了森林碳汇的最优核算价格为10.11~15.17美元/t,略高于目前国际上通用的碳税价格。本文通过计算还指出,要使我国森林由于经济发展而采伐消耗的碳储量最小,每年应采伐消耗的蓄积为4.26亿 $m^3$ ,这一结果对我国的森林资源管理提出了更高的要求。最后,本文对碳汇核算存在的一些问题进行了讨论,并建议碳汇核算应采用影子价格,把社会、经济发展对碳汇的影响,即人类社会、经济活动对森林碳汇的影响纳入核算范围,促进碳汇市场的持续发展。

**关键词:** 中国;森林碳汇;回归方程;碳汇经济;可持续发展

中图分类号: F307.2; S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2010)02-0194-07

ZHANG Ying; WU Li-li; SU Fan; YANG Zhi-geng. **An accounting model for forest carbon sinks in China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2010) 32(2) 194-200 [Ch, 24 ref. ] School of Economics and Management, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China.

In order to better understand forest carbon sinks and promote the development of carbon sinks market in China, we collected data on forest stock, growth, decline and harvest from 1990 to 2007, and established an accounting model for forest carbon sinks, based on economic cybernetics using a forest stock-converted method. The results show that forest carbon sinks in adjacent years was highly linearly correlated ( $R^2=0.998$ ,  $P<0.001$ ). Using a minimum value method, we found the optimal price of forest carbon sinks in China to be \$ 10.11-15.17 per ton of carbon, which is slightly higher than the international carbon price at present. The maximum volume of forest harvesting due to consumption of carbon reserves was 426 million  $m^3$  per year, suggesting a high requirement for the management of forest resources. Finally, we discussed some issues in the carbon sink accounting, and the necessity of including shadow prices in the model. The impact of social and economic development on carbon sinks should be considered to promote the sustainable development of carbon sinks market in China.

**Key words** China; forest carbon sinks; regression model; economics of carbon sinks; sustainable development

森林是重要的陆地生态系统,在应对全球气候变化中扮演着重要的角色。森林碳汇指森林等吸收并储存 $CO_2$ 的多少,或者吸收并储存 $CO_2$ 的能力。森林碳汇对降低大气中温室气体浓度、减缓全球气候变暖具有十分重要的作用。

对森林碳汇的计量研究起步于20世纪60年代

中后期<sup>[1]</sup>,但目前对碳汇计量的方法还不统一,具体的计量项目也未达成共识。森林碳汇的实物量计量方法主要有生物量法、蓄积量法、生物量清单法、涡旋相关法、涡度协方差法<sup>[2]</sup>;对价值量计量的方法主要有成本效益分析法、造林成本法、碳税率法、碳税法和造林成本均值法等,但目前还没有一种方

收稿日期:2009-09-22

基金项目:教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(07JJD910245)。

第一作者:张颖,教授,博士生导师。主要研究方向:资源与环境核算、区域经济学。电话:010-62338840 Email:zhangyin@bjfu.edu.cn

地址:100083 北京市清华东路35号北京林业大学39号信箱。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

法为世界各国所公认<sup>[3]</sup>。在我国,首先在国家层次上对森林碳汇进行计量的是康惠宁等人,其研究结果表明,我国森林每年平均净碳汇量为 $0.8627 \times 10^8$  t,未来20年内增加的森林净碳汇能力约为 $773 \times 10^8$  t<sup>[4]</sup>。2000年,王效科等<sup>[5]</sup>开展了中国森林生态系统中植物固定大气碳的潜力的研究,并对森林生态系统现存的植物碳储量进行了估算,计算结果表明我国森林生态系统现存的植物碳储量为 $3.255 \sim 3.724$  Pg( $1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$ )。同年,方精云<sup>[6]</sup>采用生物量法对森林总碳量进行估计,结果表明,我国森林总碳量为 $4.5 \times 10^9$  t,疏林及灌木丛总碳量为 $0.5 \times 10^9$  t。2005年,Piao等<sup>[7]</sup>对1982—1999年森林植被碳汇量进行估算,结果表明,1982—1999年森林植被年碳汇量为0.019 Pg。2003年,魏殿生<sup>[8]</sup>对我国森林年均碳汇量进行计算,结果为每年0.089 Pg。2007年,方精云等<sup>[9]</sup>又根据生物量法对1981—2000年森林植被年碳汇量进行估算,结果表明森林植被年碳汇量为0.075 Pg。2008年,顾凯平等<sup>[10]</sup>采用植物分子式的方法,根据第6次森林资源清查资料,按树种计算了森林的碳储量为5.50 Gt( $1 \text{ Gt} = 10^9 \text{ t}$ )。2009年,李秀娟等<sup>[11]</sup>采用NPP增长驱动下的碳周转模型分别计算了1982—1999年森林生态系统累积碳汇量为0.862 Pg,年均碳汇量为0.051 Pg,其中,年均固定在森林植被中的碳汇量为0.034 Pg,固定在凋落物中的碳汇量为0.013 Pg,固定在森林土壤中的碳汇量为0.004 Pg。从上

述计量结果可以看出,我国森林碳汇的计量结果差别很大,森林总碳储量最小的为 $3.255 \sim 3.724$  Pg<sup>[5]</sup>(约为 $3.255 \sim 3.724$  Gt),最大的为5.50 Gt<sup>[10]</sup>,中间的估计结果分别有4.19、4.45和5.41 Gt等<sup>[11]</sup>(见表1)。其中,计算的标准差为0.698,方差为0.487。同样,年均碳汇量的估计值的差别也很大,最小的每年为0.019 Pg,最大的每年为0.8627 Pg,估计的标准差、方差分别为0.029和0.001(见表2)。森林总碳汇估计的方差明显大于年均碳汇的方差,反映出森林碳汇总量计量差异高于年均碳汇计量差异;也反映出我国碳汇计量差别较大:并缺少科学的计量标准,对森林碳汇的家底还不是十分清楚。另外,在碳汇的计算上,通常采用不同树种的立木蓄积乘以它们的换算因子,得出碳汇的大小。对于其他木质生物量中的碳,是以立木数据为基础,应用推算因子来估计的。对于在选取蓄积量—生物量转换系数时,大多数选取0.45~0.55<sup>[15]</sup>,更多的采取固定值0.45。对于森林碳汇的经济计量,主要是在实物计算的基础上采用森林碳汇的价格乘以碳汇实物量值,求得森林碳汇的价值量。目前,国际上碳汇的价格为10~15美元/t<sup>[16]</sup>。鉴于上述国内外森林碳汇的研究现状,本文主要根据1990—2007年全国森林资源清查数据,采用蓄积量转换法,利用差分方程,研究森林碳汇的变化规律和未来变化趋势,并计算森林碳汇核算的最优价格,以起到抛砖引玉的作用。

表1 森林碳汇研究文献统计

| Tab. 1 Reference statistics on forest carbon sinks research |                                                                  |                                                                           |                                       |          |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------|
| 序号                                                          | 森林碳汇                                                             | 计算内容                                                                      | 计算方法                                  | 资料来源     |
| 1                                                           | $4.5 \times 10^9$ t<br>$0.5 \times 10^9$ t                       | 森林总碳量<br>疏林及灌木丛总碳量                                                        | 生物量法                                  | 参考文献[6]  |
| 2                                                           | $0.8627 \times 10^8$ t/a<br>$773 \times 10^8$ t                  | 年平均森林净碳汇量<br>未来20年内约增加的森林净碳汇能力                                            | 蓄积量法                                  | 参考文献[4]  |
| 3                                                           | $3.255 \sim 3.724$ Pg<br>( $1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$ )  | 森林生态系统现存的植物碳储量                                                            | 生物量清单法                                | 参考文献[5]  |
| 4                                                           | 0.862 Pg<br>0.051 Pg/a<br>0.034 Pg/a<br>0.013 Pg/a<br>0.004 Pg/a | 1982—1999年森林生态系统累积碳汇量<br>年均碳汇量<br>固定在植被中的碳汇量<br>固定在凋落物中的碳汇量<br>固定在土壤中的碳汇量 | NPP增长驱动下的碳周转模型                        | 参考文献[11] |
| 5                                                           | 0.019 Pg/a                                                       | 1982—1999年森林植被碳汇量                                                         | 基于森林资源清查资料(生物量法)                      | 参考文献[7]  |
| 6                                                           | 0.075 Pg/a                                                       | 1981—2000年森林植被碳汇的估算                                                       | 基于森林资源清查资料的碳汇估算量(生物量法)                | 参考文献[9]  |
| 7                                                           | 5.50 Gt ( $1 \text{ Gt} = 10^9 \text{ t}$ )                      | 按树种计算的森林碳储量                                                               | 根据第6次森林资源清查中不同树种调查统计的森林蓄积量计算(植物分子式方法) | 参考文献[10] |
| 8                                                           | 4.19 Gt                                                          | 森林总碳量                                                                     | 生物量法                                  | 参考文献[13] |
| 9                                                           | 4.45 Gt                                                          | 森林总碳量                                                                     | 生物量法                                  | 参考文献[14] |
| 10                                                          | 0.089 Pg/a                                                       | 森林年均碳汇量                                                                   | 生物量清单法                                | 参考文献[8]  |
| 11                                                          | 5.41 Gt                                                          | 森林总碳量                                                                     | 生物量法                                  | 参考文献[12] |

表 2 有关森林碳汇研究估计的标准差及方差  
Tab.2 The estimated variance and standard deviation for forest carbon sinks

| 序号 | 总碳储量/Gt | 年均碳汇量/(Pg·a <sup>-1</sup> ) | 标准差/方差      | 资料来源     | 备注                                        |
|----|---------|-----------------------------|-------------|----------|-------------------------------------------|
| 1  | 3.724   |                             |             | 参考文献[5]  | 总碳储量 3.255 ~ 3.724 Pg 的上限                 |
| 2  | 4.190   |                             |             | 参考文献[13] |                                           |
| 3  | 4.450   |                             |             | 参考文献[14] |                                           |
| 4  | 4.500   |                             | 0.698/0.487 | 参考文献[6]  |                                           |
| 5  | 5.410   |                             |             | 参考文献[12] |                                           |
| 6  | 5.500   |                             |             | 参考文献[10] |                                           |
| 7  |         | 0.086 27                    |             | 参考文献[4]  | 0.862 7×10 <sup>8</sup> t/a=0.086 27 Pg/a |
| 8  |         | 0.051                       |             | 参考文献[11] |                                           |
| 9  |         | 0.019                       | 0.029/0.001 | 参考文献[7]  |                                           |
| 10 |         | 0.075                       |             | 参考文献[9]  |                                           |
| 11 |         | 0.089                       |             | 参考文献[8]  | 89×10 <sup>6</sup> t=0.089 Pg             |

1 森林碳汇核算计量模型

根据森林生长特性和离散时间经济系统控制方程<sup>[17]</sup>,森林碳汇核算公式可以简单地抽象为下面的理论模型:

$$\begin{cases} C(k+1) = C(k) + G(k) - W(k) - L(k) \\ C(k_0) = C_0 \\ C(k) \geq 0, \quad 0 \leq L(k) \leq L(k)_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C(k)$  为森林蓄积的碳储量(t),  $G(k)$  为森林生长的碳储量(t),  $W(k)$  为森林枯损的碳储量(t),  $L(k)$  为森林采伐的碳储量(t)  $k$  为年份。

在上述模型中,  $L(k)$  为控制变量,其他变量为状态变量。森林碳汇核算就是要在方程(1)的约束下,使森林生物碳储量损失的价值最小。即

$$\min J_k = \varphi(C(N), N) + \sum_{k=1}^{k-1} F(C(k), L(k), k) \quad (2)$$

式中:  $\varphi(C(N), N)$  是森林碳储量价值的终端约束。

2 森林碳汇核算公式及数据收集

2.1 核算公式

根据李顺龙<sup>[16]</sup>的研究,按照蓄积量转换法,森林碳汇的核算公式为:

森林碳汇量 = 林木碳汇量 + 林下植被碳汇量 + 林地碳汇量 = 森林蓄积量 × 扩大系数 × 容积系数 × 含碳率 + 林下植物固碳量换算系数 × 森林蓄积量 + 林地固碳量换算系数 × 森林蓄积量 (3)

用字母表示为:

$$\begin{aligned} C_F &= V_F \delta \rho \gamma + \alpha V_F \delta \rho \gamma + \beta V_F \delta \rho \gamma = \\ &V_F \times 1.9 \times 0.5 \times 0.5 + 0.195 (V_F \times \\ &1.9 \times 0.5 \times 0.5) + 1.244 (V_F \times \\ &1.9 \times 0.5 \times 0.5) = \\ &2.439 (V_F \times 1.9 \times 0.5 \times 0.5) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $C_F$  为森林碳汇量;  $V_F$  为森林蓄积量;  $\delta$  为森林蓄积量换算成生物量蓄积的系数,也称生物量扩

大系数,一般取 1.90;  $\rho$  为将森林生物量蓄积转换成生物干重的系数,即容积密度,一般取 0.45 ~ 0.50,本文取 0.5;  $\gamma$  为将生物干重转换成固碳量的系数,即含碳率,一般取 0.5;  $\alpha$  为林下植物固碳量换算系数,即根据林木生物量计算林下植物(含凋落物)固碳量,一般取 0.195;  $\beta$  为林地固碳量换算系数,即根据森林生物量计算林地固碳量,一般取 1.244。

2.2 数据收集

森林碳汇核算的主要数据来源于《全国森林资源统计》<sup>[18]</sup>、《中国森林资源清查》<sup>[19]</sup>、《中国林业统计年鉴》<sup>[20]</sup>、《中国统计摘要(2008)》<sup>[21]</sup>和有关研究报告<sup>[22]</sup>。具体来说,森林蓄积量、森林年生长量的数据主要来源于《全国森林资源统计》;森林年消耗,如森林采伐量、森林枯损量的数据来源于《中国林业统计年鉴》。另外,在数据收集中,由于我国每 5 年进行一次森林资源清查,因此,森林蓄积量、森林年生长量和森林采伐量、森林枯损量基本上 5 年内保持相同。收集的森林碳汇核算的基本数据见表 3。根据公式(3)、(4)计算的森林碳汇量结果见表 4。

3 核算模型的估计

3.1 状态方程

根据表 4 的森林碳汇数据,采用线性回归进行计算。当模型包括所有变量,采用强行进入法计算的结果如表 5 ~ 7。

由表 5 可以看出, Durbin-Watson 为 0.708,不在 2 左右,说明残差不相互独立,存在自相关。由表 6 中的 Sig. =0.000 看出,模型具有统计学意义。同样,由表 7 的容忍度和 VIF 判断,模型存在严重的共线性,需重新进行计算。采用逐步回归法计算的模型的  $R^2=0.998$ ,调整后  $R^2=0.997$ 。模型的  $F$  值为 6 581.48, Sig. 值为 0.00,表示模型成立并具有统计学意义,即逐步回归后的  $C(k)$  可显著解释  $C(k+1)$ ,逐步回归模型的系数见表 8。

表 3 森林碳汇核算的基本数据

Tab.3 Table of basic data for accounting of forest carbon sinks

| 年份   | GDP/亿元    | 森林蓄积量/亿 m <sup>3</sup> | 森林年生长量/(亿 m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> ) | 森林年消耗量/(亿 m <sup>3</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |      |      |
|------|-----------|------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|------|------|
|      |           |                        |                                             | 采伐量                                         | 枯损量  | 小计   |
| 1990 | 18 667.8  | 101.37                 | 4.75                                        | 3.20                                        | 0.56 | 3.76 |
| 1991 | 21 781.5  | 101.37                 | 4.75                                        | 3.20                                        | 0.56 | 3.76 |
| 1992 | 26 923.5  | 101.37                 | 4.75                                        | 3.20                                        | 0.56 | 3.76 |
| 1993 | 35 333.9  | 101.37                 | 4.75                                        | 3.20                                        | 0.56 | 3.76 |
| 1994 | 48 197.9  | 100.86                 | 4.58                                        | 4.07                                        | 0.46 | 4.53 |
| 1995 | 60 793.7  | 100.86                 | 4.58                                        | 4.07                                        | 0.46 | 4.53 |
| 1996 | 71 176.6  | 100.86                 | 4.58                                        | 4.07                                        | 0.46 | 4.53 |
| 1997 | 78 973.0  | 100.86                 | 4.58                                        | 4.07                                        | 0.46 | 4.53 |
| 1998 | 84 402.3  | 100.86                 | 4.58                                        | 4.07                                        | 0.46 | 4.53 |
| 1999 | 89 677.1  | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2000 | 99 214.6  | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2001 | 109 655.2 | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2002 | 120 332.7 | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2003 | 135 822.8 | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2004 | 159 878.3 | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2005 | 183 217.5 | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2006 | 211 923.5 | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |
| 2007 | 249 529.9 | 124.56                 | 4.97                                        | 3.65                                        | 0.88 | 4.54 |

注：资料来源于参考文献[17-21]。

表 4 森林碳汇量计算结果

Tab.4 The calculation table of forest carbon sinks

| 年份   | GDP/亿元    | 森林蓄积碳储量/亿 t | 森林年生长碳量/(亿 t·a <sup>-1</sup> ) | 森林年消耗碳量/(亿 t·a <sup>-1</sup> ) |      |      |
|------|-----------|-------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|
|      |           |             |                                | 采伐量                            | 枯损量  | 小计   |
| 1990 | 18 667.8  | 117.44      | 5.50                           | 3.71                           | 0.65 | 4.35 |
| 1991 | 21 781.5  | 117.44      | 5.50                           | 3.71                           | 0.65 | 4.35 |
| 1992 | 26 923.5  | 117.44      | 5.50                           | 3.71                           | 0.65 | 4.35 |
| 1993 | 35 333.9  | 117.44      | 5.50                           | 3.71                           | 0.65 | 4.35 |
| 1994 | 48 197.9  | 116.84      | 5.30                           | 4.71                           | 0.54 | 5.25 |
| 1995 | 60 793.7  | 116.84      | 5.30                           | 4.71                           | 0.54 | 5.25 |
| 1996 | 71 176.6  | 116.84      | 5.30                           | 4.71                           | 0.54 | 5.25 |
| 1997 | 78 973.0  | 116.84      | 5.30                           | 4.71                           | 0.54 | 5.25 |
| 1998 | 84 402.3  | 116.84      | 5.30                           | 4.71                           | 0.54 | 5.25 |
| 1999 | 89 677.1  | 144.30      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2000 | 99 214.6  | 144.30      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2001 | 109 655.2 | 144.30      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2002 | 120 332.7 | 144.30      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2003 | 135 822.8 | 144.30      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2004 | 159 878.3 | 144.30      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2005 | 183 217.5 | 144.30      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2006 | 211 923.5 | 144.31      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |
| 2007 | 249 529.9 | 144.31      | 5.75                           | 4.23                           | 1.02 | 5.25 |

表 5 模型回归汇总表

Tab.5 Summary of regression model

| 模型    | <i>R</i> | <i>R</i> <sup>2</sup> | 调整后的 <i>R</i> <sup>2</sup> | 估计的标准误差  | Durbin-Watson |
|-------|----------|-----------------------|----------------------------|----------|---------------|
| 方程(1) | 1.000    | 1.000                 | 1.000                      | 0.000 59 | 0.708         |

表 6 模型方差分析表

Tab.6 ANOVA of model

|      | 平方和         | 自由度 | 平均平方和      | <i>F</i> 值               | Sig. 值 |
|------|-------------|-----|------------|--------------------------|--------|
| 回归方差 | 297 053.765 | 4   | 74 263.441 | 2.131 × 10 <sup>11</sup> | 0.000  |
| 残差   | 0.000       | 13  | 0.000      |                          |        |
| 总和   | 297 053.765 | 17  |            |                          |        |

表 7 模型回归系数  
Tab. 7 Coefficients of regression model

|        | 未标准化               |       | 标准化<br>回归系数 | <i>t</i> 值 | Sig. 值 | 共线性判断 |         |
|--------|--------------------|-------|-------------|------------|--------|-------|---------|
|        | 回归系数               | 标准误差  |             |            |        | 容忍度   | VIF     |
| $C(k)$ | $1.58 \times 10^5$ | 0.000 | 0.000       | 0.694      | 0.500  | 0.002 | 432.522 |
| $G(k)$ | 9.908              | 0.000 | 0.418       | 20 889.320 | 0.000  | 0.003 | 341.818 |
| $L(k)$ | 7.409              | 0.000 | 0.241       | 17 127.597 | 0.000  | 0.006 | 168.343 |
| $W(k)$ | 54.723             | 0.001 | 0.349       | 39 537.778 | 0.000  | 0.015 | 66.527  |

表 8 逐步回归模型系数  
Tab. 8 Coefficients of stepwise regression model

|        | 未标准化回归系数 |       | 标准化回归系数 | <i>t</i> 值 | Sig. 值 | 共线性判断 |       |
|--------|----------|-------|---------|------------|--------|-------|-------|
|        | 回归系数     | 标准误差  |         |            |        | 容忍度   | VIF   |
| $C(k)$ | 1.011    | 0.012 | 0.999   | 81.126     | 0.000  | 1.000 | 1.000 |

因此,森林碳汇的核算模型为:

$$C(k+1) = 1.011C(k) \tag{5}$$

在核算模型中,不包括  $G(k)$ 、 $W(k)$  和  $L(k)$ 。

3.2 性能指标

林木资源碳储量的消耗和经济发展之间存在一定的关系,尤其是森林采伐损失的碳储量和 GDP 之间存在二次曲线关系<sup>[22]</sup>。根据表 4 中的数据,采用 SPSS 软件计算二者之间的具体关系式为:

$$GDP = -7\,343\,062.440 + 3\,516\,775.471L(k) - 412\,558.604L^2(k) \tag{6}$$

方程的回归系数及相关检验见表 9。方程的  $R$  值为 0.818, $R^2$  值为 0.670, $F$  值为 15.213,Sig. 值为 0.000。

表 9 性能指标回归系数表

|          | 回归系数           | <i>t</i> 值 | Sig. 值 |
|----------|----------------|------------|--------|
| 常数项      | -7 343 062.440 | -5.377     | 0.000  |
| $L(k)$   | 3 516 775.471  | 5.409      | 0.000  |
| $L^2(k)$ | -412 558.604   | -5.359     | 0.000  |

根据有关研究,到 2020 年我国森林覆盖率达到 23% 以上,如果森林单位面积蓄积量提高到世界平均水平  $100\text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,森林总蓄积量可超过 200 亿  $\text{m}^3$ <sup>[23-24]</sup>。因此,按照 2020 年的最大目标计算,如果以 1990 年为初始点,到 2020 年,我国森林蓄积量为  $V(31) = 200\text{ 亿 m}^3$ ,此时,森林碳储量为  $C(31) = 2.439(V(31) \times 1.9 \times 0.5 \times 0.5) = 231.71\text{ 亿 t}$ 。按照目前国际上通用的碳汇价格(10~15 美元/t)<sup>[16]</sup>的下限计算,2020 年森林碳储量总价值为 2 317.05 亿美元。此时,根据状态方程,终端约束为  $10.11C(k) = 2\,317.1$ 。因此,性能指标变为:

$$\begin{aligned} \min J_{31} &= 10.11C(k) - 2\,317.10 + \\ &\sum_{k=1}^{30} (-7\,343\,062.440 + \\ &3\,516\,775.471L(k) - 412\,558.604L^2(k)) \end{aligned} \tag{7}$$

式(7)的具体含义为:在方程(6)、(7)的约束下,在时间  $[1\ k-1]$  内,求出  $k$  个控制变量  $L(1)$ ,  $L(2)$ , $\cdots$ ,  $L(k-1)$ ,使状态由初始  $C(1)$  转移到终止状态  $C(k)$ ,并使式(5)、(6)的性能指标取极小值,也就是在时间  $[1\ k-1]$  内,使林木的采伐碳储量的价值损失极小。

4 碳汇核算最优价格的计算

根据有关研究报告<sup>[23-24]</sup>,2020 年我国森林每年采伐利用总量可达到 10 亿  $\text{m}^3$  以上,折算成森林生物碳储量为 11.59 亿 t。因此,森林碳汇的状态方程为:

$$\begin{cases} C(k+1) = 1.011C(k) \\ C(k_{1990}) = 117.44 \\ C(k) \geq 0, \quad 0 \leq L(k) \leq L(k)_{\max} = 11.59 \end{cases}$$

令哈密顿函数  $H(k)$  为:

$$\begin{aligned} H(k) &= H(C(k), L(k), \lambda(k+1), k) = \\ &10.11C(k) - 2\,317.1 - 7\,343\,062.440 + \\ &3\,516\,775.471L(k) - 412\,558.604L^2(k) + \\ &\lambda^T(k+1) \times 1.011C(k) = \\ &-7\,345\,379.54 + 3\,516\,775.471L(k) - \\ &412\,558.604L^2(k) + (1.011\lambda^T(k+1) + \\ &10.11)C(k) \end{aligned}$$

由伴随方程

$$\dot{\lambda}(k) = \frac{\partial H^*(k)}{\partial C^*(k)} \tag{8}$$

得

$$\dot{\lambda}(k) = \frac{\partial H^*(k)}{\partial C^*(k)} = 1.011\lambda(k+1) + 10.11 \tag{9}$$

由耦合方程  $\frac{\partial H^*(k)}{\partial L^*(k)} = 0$  得

$$\begin{aligned} \frac{\partial H^*(k)}{\partial L^*(k)} &= 3\,516\,775.471 - 825\,117.208L(k) = 0 \\ &\text{进一步求得} \end{aligned} \tag{10}$$

$L^*(k) = 4.26$

同样,由横截条件  $\frac{\partial \varphi^*(N)}{\partial C^*(N)} = \lambda^*(N)$  得

$\lambda^*(N) = 10.11 \tag{11}$

这里,求得的  $\lambda^*(N) = 10.11$  美元/t,是 2020 年每吨碳的影子价格。如果按照国际上通用的碳汇价格 10~15 美元/t 的上限计算,2020 年每吨碳的影子价格为 15.17 美元。因此,根据目前国际上通用的碳汇价格,我国森林碳汇的最优价格应保持在 10.11~15.17 美元/t。此时,每年森林采伐利用量应为 4.26 亿 m<sup>3</sup>。

因此,上述计算结果的具体含义为,我国森林碳汇的最优价格为 10.11~15.17 美元/t,略高于目前国际上通用的碳汇价格,反映出我国碳汇的价值变化应与国际碳汇的价值变化大体一致。

5 结论与讨论

通过对 1990—2007 年我国森林全部碳储量的变化分析,得到:

1) 我国森林全部碳储量核算的模型为:

$$\begin{cases} C(k+1) = 1.011C(k) \\ C(k_{1990}) = 117.44 \\ C(k) \geq 0, \rho \leq L(k) \leq L(k)_{\max} = 11.59 \\ \min J_{31} = 10.11C(k) - 2\,317.10 + \\ \sum_{k=1}^{30} (-7\,343\,062.440 + \\ 3\,516\,775.471L(k) - \\ 412\,558.604L^2(k)) \end{cases}$$

其中,碳汇量  $C(k)$  与  $C(k+1)$  的回归方程的拟合优度  $R^2 = 0.998$ ,调整后  $R^2 = 0.997$ 。模型的  $F$  值为 6581.48, Sig. 值为 0.00,表明模型成立并具有统计学意义。目标函数也表明在 2020 年我国森林覆盖率达到 23% 的条件下和目前 GDP 发展速度的情况下,通过一定的控制措施,能够实现由于经济发展引起的森林采伐消耗的碳储量最小。因此,把该模型作为我国森林全部碳储量核算的模型是成立的。

2) 在 2020 年我国森林覆盖率达到 23% 以上,森林单位面积蓄积量提高到世界平均水平 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 和森林总蓄积量超过 200 亿 m<sup>3</sup> 的目标下,采用最优控制的方法求得我国森林碳汇的最优价格为 10.11~15.17 美元/t,略高于目前国际上常采用的 10~15 美元/t 的碳汇价格,反映出我国的森林培育成本略高于国际平均成本。另外,采用这种方法确定森林碳汇核算的价格是考虑了国际、国内因素的优化价格,也是森林资源资产评价中要求的影子价格,更符合资产评价的经济学含义,也是对资产评价

方法的丰富。另外,根据计算,要保持我国森林由于经济发展而采伐消耗的碳储量最小,必须保持 4.26 亿 m<sup>3</sup>/a 的采伐量。这对我国森林资源的管理提出了很高的要求。实际上,随着我国森林覆盖率的不断增加,2020 年我国的森林蓄积量将超过 200 亿 m<sup>3</sup>,每年的采伐量也达到 10 亿 m<sup>3</sup>[23-24],折合为森林全部碳储量为 24.39 亿 t,这对我国这一目标的实现提出了严重的挑战。

森林碳汇的评价是目前国际碳汇研究的一个热点问题,也是世界各国应对全球气候变化关注的一个焦点。但对森林碳汇的计量、评价更多地关注某一时点碳汇的大小,而对碳汇长期变化核算的计量还不多[9],尤其缺少对森林碳汇的最优价格、经济发展引起的森林采伐而消耗的碳汇最小化等的研究。本文采用状态方程和最优控制的方法计算了我国森林碳汇的最优价格,并求出了保证碳汇储量最大化和经济发展引起的采伐而消耗的碳汇的最小值,现对计算结果讨论如下:

1) 森林碳汇核算的计量更应关注长期趋势的变化,尤其要关注社会、经济发展对碳汇的影响,即人类社会、经济活动对森林碳汇大小的影响。只有这样,才能区分自然气候变化、社会经济发展变化对碳汇的影响,也才能制定出针对人类社会影响的政策、法规,促进社会经济发展的持续发展。一味地注重某一时点碳汇的计量,且不区分自然气候变化、社会经济发展变化对碳汇的影响,对政策、法规制定意义不大,且无助于森林资源的管理。

2) 发展低碳经济、碳汇经济或碳汇市场,离不开碳汇价格的计量。对森林碳汇价格的计量,应符合经济学的理论规范,即采用影子价格或最优价格来计量。一般自由市场竞争条件下形成的价格,比较接近或等于影子价格或最优价格。因此,在我国鼓励发展低碳经济的今天,对森林碳汇价值进行评估时,应该采用国际上市场竞争形成的常用的碳汇价格,不应该采用局部的成本价,这既不符合经济学规范,也不是评价要求的影子价格,更不能促进森林碳汇市场的发展。

3) 对森林碳汇的评价,应把社会、经济因素等纳入其中。生物学、生态学的评价更多地关注生物、生态因子的影响,如森林碳汇的计量,从生物学来说,主要受生长量、枯损量等因子影响;从社会、经济因素来说还受采伐量、经营管理水平等影响。因此,评估时应把这些因素考虑进来,这些因素正是政策制定的关键因素。

4) 根据不同目的,对林木的碳汇评价和森林全部碳汇的评价要区别开来。林木的碳汇评价主要用

于碳汇的经营和碳汇的交易、管理;森林全部碳汇的评价主要用于碳汇变化趋势核算的研究。因为其中的林下植被碳汇量和林地碳汇量在一个相对长的时期内不会发生大的变化,对经营管理和碳汇的交易不会产生大的影响,且贡献不大<sup>[16]</sup>。因此,目的不同,评价的公式、内容也不同,不能不分目的的评价、比较,否则,只能造成碳汇评价的不科学。

总之,本文采用状态方程和最优控制的方法研究森林碳汇的变化,并采用资源、环境经济学中影子价格定价的原理核算其价格,希望能对我国低碳经济和碳汇市场的发展有参考和促进意义。

参 考 文 献

[ 1 ] 陈根长. 林业的历史性转变与碳交换机制的建立 [J]. 林业经济问题, 2005, 25 (1): 1-6, 38.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] 黄方. 森林碳汇的经济价值 [J]. 广西林业, 2006 (5): 42-44.

[ 4 ] 康惠宁, 马钦彦, 袁嘉祖. 中国森林 C 汇功能基本估计 [J]. 应用生态学报, 1996, 7 (3): 230-234.

[ 5 ] 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 [J]. 生态学杂志, 2000, 19 (4): 72-74.

[ 6 ] 方精云. 北纬中高纬度的森林碳库可能远小于目前的估算植物 [J]. 生态学报, 2000, 24 (5): 635-638.

[ 7 ] PIAO S L, FANG J Y. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19: 1-6.

[ 8 ] 魏殿生. 造林绿化与气候变化——碳汇问题研究 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 124-125.

[ 9 ] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. 中国科学 D 辑, 2007, 37 (6): 804-812.

[ 10 ] 顾凯平, 张坤, 张丽霞. 森林碳汇计量方法的研究 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2008, 32 (5): 105-110.

[ 11 ] 李秀娟, 周涛, 何学兆. NPP 增长驱动下的中国森林生态系统碳汇 [J]. 自然资源学报, 2009, 24 (3): 491-497.

[ 12 ] WINJUM J K, DIXON R K, SCHROEDER P E. Forest management and carbon storage: An analysis of 12 key forest nations [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1993, 70 (1-4): 239-257.

[ 13 ] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳库 [M]. 北京: 中国科技出版社, 1996.

[ 14 ] 赵士洞, 汪业勋, 于振良, 等. 中国森林生态系统碳循环研究 [C]//生态学的新纪元——可持续发展的理论与实践. 北京: 中国生态学学会, 2000: 57-59.

[ 15 ] 张金华. 林业碳汇——人类生态宝库 [J]. 河北林业, 2008 (3): 13-14.

[ 16 ] 李顺龙. 森林碳汇问题研究 [M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2006: 100-101.

[ 17 ] 曾祥金. 经济控制论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 55-74.

[ 18 ] 国家林业局森林资源管理司. 全国森林资源统计 (1994—1998) [R]. 北京: 国家林业局, 2000: 6-15.

[ 19 ] 肖兴威. 中国森林资源清查 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 177-198.

[ 20 ] 国家林业局. 中国林业统计年鉴 (2006) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007: 10-12.

[ 21 ] 国家统计局. 中国统计摘要 (2008) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2008: 18-20.

[ 22 ] 张颖, 侯元兆, 魏小真, 等. 北京森林绿色核算研究 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30 (增刊 1): 232-237.

[ 23 ] 刘于鹤, 林进. 加强森林经营, 提高森林质量 [EB/OL]. (2008-12-30) [2009-08-08]. <http://www.forestry.gov.cn/distribution/2008/12/30/lyyw-2008-12-30-25514.html>.

[ 24 ] 刘于鹤, 林进. 加强森林经营, 提高森林质量——从编制实施森林经营方案出发 [J]. 林业经济, 2008 (7): 6-10.

(责任编辑 冯秀兰)