

1999—2003 年陕西省森林生态系统固碳释氧 服务功能价值评估

马长欣¹, 刘建军^{1,*}, 康博文¹, 孙尚华¹, 任军辉²

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 西藏职业技术学院, 西藏 拉萨 850030)

摘要: 基于陕西省森林生态系统的长期、连续定位观测, 采用陕西省第 6 次森林资源清查数据, 根据陕西省南北部气候差异显著的情况, 采用森林在陕西南、北不同气候带下的实际生产力计算了森林生态系统固碳释氧的实物量。并采用市场价值法、费用代替法、替代工程法、Volume-derived biomass 等方法估算森林生态系统固碳释氧服务功能的经济价值。结果表明: 1999—2003 年间, (1) 陕西省北部森林生态系统年固碳量 $524.6 \times 10^4 \text{ t}$, 年释氧量 $1404.6 \times 10^4 \text{ t}$, 单位面积年固碳量 $1.364 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 单位面积年释氧量 $3.652 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。(2) 南部森林生态系统年固碳量 $1797 \times 10^4 \text{ t}$, 年释氧量 $5918.9 \times 10^4 \text{ t}$, 单位面积年固碳量 $3.459 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 南部单位面积年释氧量 $9.260 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。陕西省南部森林生态功能明显优于北部森林。(3) 从森林类型来看, 林分单位面积生态功能最强, 经济价值最大, 疏林地的功能和价值则最小。(4) 陕西省森林生态系统年固碳经济价值是 328.27×10^8 元, 年释氧经济价值为 732.35×10^8 元, 总价值 1060.62×10^8 元。(5) 文中对陕西省优势树种固碳释氧功能的计算由于未能按照不同林龄分别计算, 存在一定误差, 需要进行更为深入、细致的研究。

关键词: 森林生态系统; 服务功能; 固碳释氧; 生产力

Evaluation of forest ecosystem carbon fixation and oxygen release services in Shaanxi Province from 1999 to 2003

MA Changxin¹, LIU Jianjun^{1,*}, KANG Bowen¹, SUN Shanghua¹, REN Junhui²

1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi Province, 712100, China

2 Tibet Vocational and Technical College, Lasa, Tibet, 850030, China

Abstract: From 1999 to 2003, the estimated carbon fixation per year was $526.4 \times 10^4 \text{ t}$ in northern Shaanxi, with $1404.6 \times 10^4 \text{ t}$ oxygen released per year. The values were equivalent to $1.364 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ carbon fixation per unit area per year and $3.652 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ oxygen released per unit area per year. Equivalent numbers for the south were $1797 \times 10^4 \text{ t C}$, $5918.9 \times 10^4 \text{ t O}_2$, $3.459 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a}) \text{ C}$ and $9.26 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a}) \text{ O}_2$. C fixation value per year in Shaanxi forests is 328.27×10^8 Yuan, oxygen released per year is 732.35×10^8 Yuan and total value is 1060.62×10^8 Yuan. Long-term and continuous observations of forest ecosystems were used in the survey. Data was taken from the sixth Shaanxi Province forest resources inventory, which showed a huge difference between the southern and northern climates of Shaanxi Province. Actual productivities in the different climatic zones of Shaanxi Province were used to estimate forest ecosystem carbon fixation and oxygen release services. These values were estimated by applying the method of market value, the method of substitution of expenses, the law of shadow project and the method of volume-derived biomass. Ecological functions in southern Shaanxi were clearly better than in the north. The forest stands had the highest value and function while the woodlands had the lowest. The total value of forest ecosystem C and O_2 services per year in Shaanxi Province was estimated at 1060×10^8 Yuan. More in-depth and detailed studies appeared necessary because the estimated carbon fixation and oxygen release values for dominant species were not classified by stand age.

基金项目: 陕西北部省区森林生态系统服务功能定位观测与评估技术资助项目(200704005/wb06)

收稿日期: 2009-07-07; **修订日期:** 2009-11-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljj@nwsuaf.edu.cn

Key Words: forest ecosystem; service function; carbon fixation oxygen released; mean net production

森林生态系统的固碳释氧服务功能是指森林生态系统通过森林植被、土壤动物和微生物固定碳素、释放氧气的功能。全球陆地生态系统在 20 世纪 80、90 年代以 $1-4 \text{ Pg a}^{-1}$ 的速率吸收碳,补偿了由于化石燃料使用造成碳排放总量的 10%—60%^[1]。森林生态系统是陆地生态系统的主体,也是陆地碳库中最大的一个,其有机碳储量占整个陆地植被碳储量的 76%—98%^[2]。而森林生态系统每年的碳固定量约占整个陆地生物碳固定量的 $2/3$ ^[3-4]。因此,森林生态系统在调节全球碳平衡、减缓大气中 CO_2 等温室气体浓度上升以及维护全球气候等方面中具有不可替代的作用^[5]。人类活动,主要是化石燃料燃烧和土地覆盖的变化,正在改变着大气组成,改变着吸收或散射太阳辐射能的地球表面特性,在诸多温室气体中, CO_2 是数量最多、对增强温室效应贡献最大的气体^[6-7]。大气组成的这些变化可能会改变温度、降水格局、海平面、极端事件以及自然环境和人类系统所依赖的其它气候因素^[7]。IPCC(政府间气候变化委员会)的报告指出,近百年来,由于大气 CO_2 浓度的增加,地表温度已上升 $0.3-0.6^\circ\text{C}$;预计到 2050 年,全球可能增温 $1.5-4.5^\circ\text{C}$ 。如何确保人类生存环境的可持续发展,减缓全球气候变化对地球生命支持系统产生的不良影响,已引起各国政府和科学家的高度重视。伴随着经济爆炸式的发展,中国由于大量使用化石燃料已成为世界上最大的工业源 CO_2 排放国之一。

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对生态系统价值的贡献最大,占森林生态系统公益价值的 47.5%^[8]。因此,量化森林生态系统固碳释氧服务功能,对促进将自然资源和环境因素纳入国民经济核算体系而最终为实现绿色 GDP,对进一步了解森林生态系统的碳收支和科学高效的经营以及管理森林资源具有重要的现实意义。同时,也有利于估算北半球、全球碳汇和在全球倡导进入碳低增长率的时代背景下定义一种新目标来管理陆地生态系统^[1]。本文以陕西省森林为研究对象,估算了陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能,并评价了其功能的经济价值,探讨了量化中国生态系统碳循环的重要性和紧迫性。

1 固碳释氧服务功能

国内外虽然对森林生态系统的服务功能分类不尽相同,而且固碳释氧功能有多种名称或类别,但实际的功能是一样的。Costanza 等^[9]综合了国际上已经出版的用各种不同方法对生态系统服务价值的评估研究结果,率先开展了全球生物圈生态系统服务价值的估算。根据 Costanza^[9]等的估算,森林生态系统气候调节(温室气体调节等)的平均价值是 $141 \text{ \$}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,土壤形成(有机物积累等)的平均价值是 $10 \text{ \$}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,原材料(木材等)的平均价值是 $138 \text{ \$}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。也有一些学者认为,Costanza 等^[9]对全球生态系统服务价值的评估结果难以令人信服,并存在一些分歧。尽管如此,Costanza 等^[9]为大区域的生态系统服务价值评估提供了可供参考的方法。

20 世纪 80 年代,我国开始了森林生态系统服务价值的评估工作,大多数研究借鉴了国外的一些方法。赵同谦^[10]把森林生态系统的服务功能划分为提供产品、调节功能、文化功能和生命支持功能四大类,建立了由林木产品、光合固氧等 13 项功能指标构成的森林生态系统评价指标体系。其中,光能释氧服务功能的价值为 $6732.48 \times 10^8 \text{ 元/a}$ 。余新晓等^[8]根据全国第 5 次资源清查资料及 Costanza 等^[9]的计算方法估算了我国森林生态系统固碳释氧服务功能的经济价值是 $14399.23 \times 10^8 \text{ 元/a}$ 。根据靳芳等^[11]的计算,1993、1998、2003 年我国森林生态系统的固碳功能价值量分别为 $8367.33 \times 10^8 \text{ 元}$ 、 $10265.85 \times 10^8 \text{ 元}$ 、 $11218.82 \times 10^8 \text{ 元}$ 。王兵等^[12]估算出我国经济林生态系统 2003 年服务功能价值 $11763.39 \times 10^8 \text{ 元}$ 。对于中国森林生态系统碳汇的计算,周玉荣等^[5]估算我国主要森林生态系统碳储量为 $281.16 \times 10^8 \text{ t}$,方精云等^[13]估算出我国森林总碳库由 4.3 Pg C 增加到 5.9 Pg C 。

以往的研究^[8-13]大多是在较宏观的层次上以全球、国家、大流域等为统计单位,而计算指标中的数据采用的又是全国的平均值,进而推广到大的层次上,导致最终统计数据误差较大。很难较准确的量化不同生境、地理条件下,各个地理区域森林生态系统的服务功能及其价值。在以往研究的基础上,本文根据陕西省独特的气候、地貌和地理条件将全省分为两大区域即陕西北部、陕西南部分别进行计算。本研究中的数据指标,大部

分是陕西省森林的实测值;无法获得实测值的,通过科学的筛选,用陕西省周边具有相同或比较类似地理气候条件的森林实测值代替,较准确的量化了森林生态系统的固碳释氧服务功能及其价值。

2 研究地概况

陕西省位居中国内陆,地处 $E105^{\circ}29'—111^{\circ}15'$, $N31^{\circ}42'—39^{\circ}35'$ 之间,全省总面积为 $20.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。从北到南可以分为陕北高原、关中平原、秦巴山地 3 个地貌区。地处东部湿润气候区向西部干旱气候区的过渡地带,属大陆性季风气候,横跨 3 个气候带,南北气候差异较大。陕南属北亚热带气候,关中及陕北大部属暖温带气候,陕北北部长城沿线属中温带气候。年均降雨量由北向南递增,全省在 320—1400mm 之间,夏季降水量占全年的 40%—60%。

陕西由北向南跨温带、暖温带和北亚热带 3 个气候带,相应的出现温带草原,暖温带落叶阔叶林,北亚热带含有常绿阔叶树种的落叶阔叶林。陕西境内的秦岭、巴山地区,山体高大地形复杂,森林植物种类相当丰富。据全国第六次森林资源连续清查成果数据,现有林地 670.39 万 hm^2 ,森林覆盖率 32.6%;天然林 467.59 万 hm^2 ,森林蓄积 30775.77 万 m^3 ,主要分布在秦巴山区、关山、黄龙山和桥山。森林中天然原始林很少,次生林占相当大的比例。陕西省森林中次生林约占陕西省森林总面积的 71%;天然原始森林仅分布在太白、周至、佛坪、宁陕等县交通不便的高山区和南郑、岚皋、平利等县的巴山北坡主脊部分。

3 研究方法

3.1 数据资料收集

本研究所用数据主要有二个来源:

(1)陕西省第六次(1999—2003 年)森林资源清查资料,以及全国各地的生物量、生物生产力的研究资料。按照陕西省森林资源清查资料的分类,将陕西省森林分为 5 种类型:林分、经济林、灌木林、疏林地和竹林。在搜集处理了陕西省森林资源清查资料的基础上,进一步分析整理了各类树种在全省各个行政县的面积和蓄积量,从而为该项研究的进行提供牢靠的数据基础。

(2)中国森林生态系统定位网络(CFERN)所属森林生态站依据《森林生态系统定位观测指标体系》(LY/T 1606—2003)开展的长期定位连续观测数据集,主要是陕西省秦岭生态站的观测数据集。

3.2 研究方法

本研究根据陕西省独特的气候、地貌和地理条件将全省分为两大区域即陕西北部、陕西南部分别进行计算。对于市场价值法、费用代替法、替代工程法以及参照 Costanza 等^[9]的计算方法中所采用的相关参数,本研究以最新的国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008)中国家公布的参数为依据,来计算森林生态系统的固碳释氧服务功能的价值评价。

3.2.1 生物量与生产力的计算

(1)林分生物量和生产力的计算

同一树种在不同的气候下生产力是不相同的,因此,本文在统计整理出清查资料的基础上,采用各树种在陕西南部、北部不同气候带下的实际生产力来计算森林生态系统固碳释氧的实物量。大部分树种在陕西南部、北部的实际生产力(平均生产力)通过查阅文献均可获得。

(2)经济林和竹林生物量和生产力的计算

根据聂道平等^[14]的研究结果,5 种立地条件下即厚腐肥沃型、厚腐厚土型、中腐中土型、中腐薄土型和薄腐薄土型,竹林生产力分别为 9.480—11.850 t/hm^2 、7.980—9.120 t/hm^2 、6.660—7.770 t/hm^2 、5.325—6.390 t/hm^2 和 4.650—5.685 t/hm^2 。本文中,陕西省森林土壤立地类型的划分依据土壤厚度、腐殖质层厚度、土壤紧实程度、坡度等因素。根据刘建军等^[15]的研究陕西南部立地类型应属于中腐薄土型,数值采用 6.390 t/hm^2 来计算;根据单长卷等^[16]的研究陕西北部的立地类型应属于薄腐薄土型,采用 4.650 t/hm^2 进行计算。

我国目前对经济林的生物量计算文献较少,很难获得需要的生产力数据。因此,根据国外文献^[17]的研究

成果及方精云^[18]的计算结果,陕西省经济林的生物量和生产力采用我国经济林生物量和生产力的平均值,即平均生物量为 23.7 t/hm^2 ,平均生产力采用 $9.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

(3) 疏林、灌木林生物量和生产力的计算

国内对于疏林、灌木林生物量的研究较少。根据方精云^[18]所得结果:秦岭淮河以北的东部、秦岭淮河以南和西北地区(包括甘肃、青海、宁夏和新疆),其平均生物量分别为 13.14 、 19.76 t/hm^2 和 13.90 t/hm^2 。本研究中,陕西北部应属于西北地区,故平均生物量采用 13.90 t/hm^2 ,计算得出生产力为 $3.475 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;陕西南部应属于秦岭淮河以南地区,故平均生物量采用 19.76 t/hm^2 ,计算得出生产力为 $4.940 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

根据周泽生等^[19]的研究,陕西北部主要灌木林的净生产力平均值为 $1.949 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。而任志远等^[20]经过实际测量,秦岭地区的灌木林净生产力平均值为 $9.600 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

(4) 数据补缺

对于无法确定实际生产力(平均生产力)的树种,本研究采用了以下两种方法来确定其生产力:

A 替代补缺法

对同一树种,查找其在陕西省相邻省份即近同纬度、同经度,有相似生境条件下的净生产力数据,来计算森林生态系统固碳释氧的服务功能实物量。

B 材积源驱动生物量法(Volume-derived biomass):

根据国家林业行业标准中植物固碳的计算方法,采用材积源驱动生物量法,利用蓄积计算出生物量,从而推算出植被的净生产力。

3.2.2 固碳释氧服务功能的计算

根据最新的国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008),固碳释氧服务功能的计算采用国家行业规范统一的公式(1)、(2)进行计算:

(1) 固碳服务功能

$$G_{\text{固碳}} = 1.63 R_{\text{碳}} A B_{\text{年}} \quad (1)$$

式中, $G_{\text{固碳}}$ 为植被年固碳量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), 1.63 为计算系数, $R_{\text{碳}}$ 为 CO_2 中碳的含量,为 27.27% , $B_{\text{年}}$ 为林分净生产力($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), A 为林分面积(hm^2)。

(2) 释氧服务功能

$$G_{\text{释氧}} = 1.19 A B_{\text{年}} \quad (2)$$

式中, $G_{\text{释氧}}$ 为林分年释氧量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), 1.19 为计算系数, $B_{\text{年}}$ 为林分净生产力($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), A 为林分面积(hm^2)。

3.2.3 固碳释氧价值的计算

根据最新的国家标准《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T 1721—2008),计算固碳释氧服务功能的价值采用公式(3)、(4)进行计算:

(1) 固碳价值的计算

$$U_{\text{固碳}} = C_{\text{碳}} 1.63 R_{\text{碳}} A B_{\text{年}} \quad (3)$$

式中, $U_{\text{固碳}}$ 为林分年固碳价值($\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$), $C_{\text{碳}}$ 为固碳价格($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$), 1.63 为计算系数, $R_{\text{碳}}$ 为 CO_2 中碳的含量,为 27.27% , $B_{\text{年}}$ 为林分净生产力($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), A 为林分面积(hm^2)。

(2) 释氧价值的计算

$$U_{\text{释氧}} = 1.19 C_{\text{氧}} A B_{\text{年}} \quad (4)$$

式中, $U_{\text{释氧}}$ 为林分年释氧价值($\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$), 1.19 为计算系数, $B_{\text{年}}$ 为林分净生产力($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), $C_{\text{氧}}$ 为氧气价格($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$), A 为林分面积(hm^2)。

4 研究结果

4.1 陕西省森林生产力的基本特征

陕西省净生产力的一般趋势是,南部森林生产力范围是 2.967 — $19.760 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,北部森林生产力范围

是 1.320—13.900 t/(hm²·a),表现出自南至北递减的规律。温带阔叶林大多在 8—14 t/(hm²·a)之间。松、杉等针叶树多在 5—11t/(hm²·a)之间。这些结果略高于世界的平均水平,这与陕西省森林大都未进入成熟阶段,从而表现出较快的生长速率有关。同一树种在陕西北部和陕西南部生产力差异非常显著。例如,栎类在陕西北部的生产力是 1.397 t/(hm²·a),而在南部却高达 7.282t/(hm²·a),南部净生产力是北部净生产力的 5 倍有余。但也有部分树种的生产力在北部和南部差异不明显。油松在陕西北部的生产力是 2.908 t/(hm²·a),在南部是 3.597 t/(hm²·a),后者仅为前者的 1.2 倍。表 1 列出了陕西省各类林分生产力的基本参数,即林分面积、林分蓄积和生物生产力。

表 1 陕西省各类森林的生物生产力
Table 1 Biological productivity of main forest types in Shaanxi Province

森林类型 Forest type	总面积 Area /(10 ² hm ²)	总蓄积 Total volume /(10 ² m ³)	陕西北部 平均生产力 Mean net production in Northern Shaanxi /(t/(hm ² ·a))	陕西南部 平均生产力 Mean net production in Southern Shaanxi /(t/(hm ² ·a))	数据类型 Data type	数据来源 Data source
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	9082.184	480082.884	2.908	3.597	I	[21,22]
华山松 <i>Pinus armandii</i>	1466.282	108997.854	10.209	11.270	I	[21,23]
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	2379.950	101863.320	—	8.340	I	[21,24]
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	101.950	5966.773	1.677	11.980	II	[21]
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> Linn. var. <i>mongolica</i>	61.540	1186.180	5.711	—	II	[18,21]
其它松类 Other pines and conifer forests	116.720	9714.060	—	6.940	I	[21,25]
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	1.350	9.320	—	9.870	I	[26]
冷杉 <i>Abies</i>	315.441	38297.781	—	8.750	I	[21]
云杉 <i>Picea</i>	108.581	7892.831	—	8.750	I	[21]
铁杉 <i>Tsuga Chinensis</i>	59.940	7497.720	—	8.900	III	[21]
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	355.600	18839.670	—	11.420	I	[21,27]
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	5691.516	161953.595	4.516	8.054	I	[28,29]
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	89.336	4780.135	1.930	8.930	III	[18]
柏类 <i>Cypress</i>	2302.582	58929.223	2.966	2.967	III	[18]
栎类 <i>Quercus</i>	36404.580	1768244.555	1.397	7.282	I	[21,30]
桦类 <i>Betula</i>	2585.636	172619.099	8.850	8.850	III	[18]
杨类 <i>Populus</i>	3239.729	130901.907	1.320	14.220	I	[23,31]
椴树类 <i>Tilia</i>	31.746	1541.251	8.850	8.850	III	[18]
硬阔 Hardwood	7233.245	480174.044	10.430	10.430	III	[18]
软阔 Softwood	2986.257	153327.048	10.430	10.430	III	[18]
竹林 Bamboo	335.287	—	4.650	6.390	II	[14]
经济林 Economic forestry	3408.700	—	9.200	9.200	I	[17]
疏林地 Woodlands	2408.770	40188.390	3.475	4.940	I	[18]
灌木林 Scrub	21611.890	—	1.949	9.600	I	[19]

“—”表示该树种在相应区域无分布;表中数据分为 3 种类型: I 表示生产力经查阅文献获得; II 表示采用替代补缺法确定生产力; III 表示通过材积源驱动生物量法计算其生产力

4.2 陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能的实物量分析

陕西省北部森林生态系统年固碳量为 524.6 × 10⁴t,释氧量为 1404.6 × 10⁴t,单位面积森林固碳量 1.364t,单位面积森林释氧量为 3.652t(表 2)。陕西省南部森林生态系统年固碳量为 1797 × 10⁴t,释氧量为 5918.9 × 10⁴t,单位面积森林固碳量 3.459t,单位面积森林释氧量为 9.260t。

表 2 陕西省各类森林的固碳释氧量

Table 2 Volume of carbon fixation and oxygen released by main forest types in Shaanxi Province									
森林类型 Forest type	固碳量 C fixation				释氧量 O ₂ released				
	北部森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Northern forests (t/a)	南部森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Southern forests (t/a)	北部单位面积森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Northern forests (t/(hm ² ·a))	南部单位面积森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Southern forests (t/(hm ² ·a))	北部森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Northern forests (t/a)	南部森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Southern forests (t/a)	北部单位面积森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Northern forests (t/(hm ² ·a))	南部单位面积森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Southern forests (t/(hm ² ·a))	南部单位面积森林年固碳量 Volume of C fixation per year in Southern forests (t/(hm ² ·a))
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	267169.335	1121652.781	1.293	1.599	715254.879	3002843.209	3.461	4.280	
华山松 <i>Pinus armandii</i> Franch	680.687	733786.391	4.538	5.010	1822.307	1964463.084	12.149	13.411	
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	-	882280.389	-	3.707	-	2362005.177	-	9.925	
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	7.453	54236.367	0.745	5.325	19.954	145199.397	1.995	14.256	
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> Linn. var. <i>mongolica</i>	10065.332	-	2.539	-	26946.497	-	6.796	-	
其它松类	-	34368.168	-	3.085	-	92009.063	-	8.259	
Other pines and conifer forests	-	34368.168	-	3.085	-	92009.063	-	8.259	
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	-	574.726	-	4.387	-	1538.634	-	11.745	
冷杉 <i>Abies</i>	-	122687.110	-	3.889	-	328452.941	-	10.413	
云杉 <i>Picea</i>	-	42231.318	-	3.889	-	113059.966	-	10.413	
铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>	-	23712.617	-	3.956	-	63482.454	-	10.591	
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	-	180509.722	-	5.076	-	483253.288	-	13.590	
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	1030294.916	200103.357	2.007	3.580	2758263.648	535708.571	5.374	9.584	
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	5459.592	10199.755	0.858	3.969	14616.199	27306.368	2.297	10.627	
柏类 <i>Cypress</i>	160914.769	142703.428	1.318	1.319	430794.475	382039.815	3.530	3.531	
栎类 <i>Quercus</i>	482382.766	9269171.379	0.621	3.237	1291415.522	24815048.65	1.662	8.666	
桦类 <i>Betula</i>	329167.481	687978.761	3.934	3.934	881233.794	1841828.759	10.532	10.532	
杨类 <i>Populus</i>	143846.089	498154.590	0.587	6.321	385098.899	1333639.209	1.571	16.922	
椴树类 <i>Tilia</i>	15.735	12472.614	3.934	3.934	42.126	33391.174	10.532	10.532	
硬阔 Hardwood	568678.871	2784758.704	4.636	4.636	1522443.945	7455242.751	12.412	12.412	
软阔 Softwood	257820.684	1126651.491	4.636	4.636	690227.049	3016225.552	12.412	12.412	
竹林 Bamboo	214.341	949.391	2.067	2.840	573.824	254167.043	5.534	7.604	
经济林 Economic forestry	559054.953	8349.020	4.089	4.089	1496679.184	2235165.576	10.948	10.948	
疏林地 Woodlands	156200.274	3068.745	1.545	2.196	418173.021	821551.986	4.135	5.879	
灌木林 Scrub	1274614.054	29440.030	0.866	4.267	3412344.908	7881564.970	2.319	11.424	
合计 Total	5246587.330	17970040.85	1.364 *	3.459 *	14045950.23	59189187.64	3.652 *	9.260 *	

* 平均值

可见,南部森林生态系统的功能性明显高于北部,年固碳量是北部的 3 倍有余,释氧量更是高达北部的 4 倍。而单位面积森林的服务功能,南部明显优于北部:南部的单位面积固碳量是北部的 2 倍,南部单位面积森林的释氧量达到了北部的近 3 倍。

4.3 陕西省森林生态系统固碳释氧服务功能的价值量分析

陕西省北部森林生态系统年固碳价值量为 62.96×10^8 元,释氧价值量为 140.46×10^8 元,单位面积森林固碳价值量 0.164×10^4 元,单位面积森林年释氧价值量为 0.365×10^4 元。陕西省南部森林生态系统年固碳价值量为 265.31×10^8 元,释氧价值量为 591.89×10^8 元,单位面积森林固碳价值量 0.415×10^4 元,单位面积森林释氧价值量为 0.926×10^4 元(表 3)。

4.4 陕西全省固碳释氧总量与平均值

陕西省森林年固碳量 2735.55×10^4 t,年释氧量 7323.51×10^4 t,而单位面积固碳量 $2.672 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,单位面积释氧量 $7.153 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。单位面积森林年固碳价值 0.341×10^4 元,释氧价值 0.760×10^4 元。单位面积森林的固碳释氧经济价值为 1.03×10^4 元/ $(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。同时,陕西省森林生态系统年固碳经济价值是 328.27×10^8 元,年释氧经济价值为 732.35×10^8 元,总价值 1060.62×10^8 元。

在固碳释氧服务功能的实物量和经济价值的计算过程中,经济林的各项结果均明显偏高(原因见下误差分析)。所以,在结论讨论中,不再加入经济林的对比讨论。

在陕西省各类森林单位面积固碳释氧服务功能价值量中,其大小顺序依次为:林分 > 竹林 > 灌木林 > 疏林地。其中,林分单位森林价值最大,为 1.1 万元;疏林地最小,0.74 万元。这和不同类型森林生产力的变化趋势是一致的,说明净生产力对森林服务功能价值具有重要影响(图 1)。

4.5 误差来源分析

(1)林分 对于林分生态功能评价的误差,可能的原因是:由于获得的陕西省不同林龄主要优势树种的平均生产力资料较少,无法用于计算,本研究未能按陕西省主要优势树种不同林龄的面积和不同林龄主要优势树种的平均生产力来计算。其平均生产力也是未来研究的重点。

(2)经济林 在固碳释氧服务功能的实物量和经济价值的计算过程中,经济林各项结果均明显偏高。造成这种差异的可能原因是经济林的生产力在陕西北部 and 南部均采用的是 $9.2 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。结果难以反映陕西北部 and 南部之间的差异,还导致经济林的功能性与其它森林类型相比,数值偏高。

(3)生态定位站 从目前的陕西省森林生态系统定位研究来看,目前陕西省只有一个森林生态系统定位站,数据的不全面可能会给研究结果带来一定影响。

5 结论与讨论

(1) 研究表明,陕西省 1999—2003 年森林生态系统年均固碳量 2735×10^4 t,年均释氧量 7323×10^4 t,固碳释氧总经济价值为 1060×10^8 元,相当于 2008 年陕西省 GDP(生产总值)的 15.47%。森林生态系统除了为社会提供直接产品(木材、药品等)的价值外,还具有巨大的间接经济价值,而这种经济价值比为人类提供林副产品价值更为显著,对人类社会贡献更大^[10],进一步说明陕西省森林生态系统在维护地区乃至全国生态平衡、促进经济发展中的作用是显著的。

(2) 陕西省北部森林生态系统年固碳量 524.6×10^4 t,单位面积年固碳量 $1.364 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,南部森林生态系统年固碳量 1797×10^4 t,单位面积年固碳量 $3.459 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;南部森林年固碳量是北部的 3.43 倍,单位面积固碳量是北部的 2.54 倍。相应的森林生态系统的经济价值总量,陕西南部为 732×10^8 元/a,北部

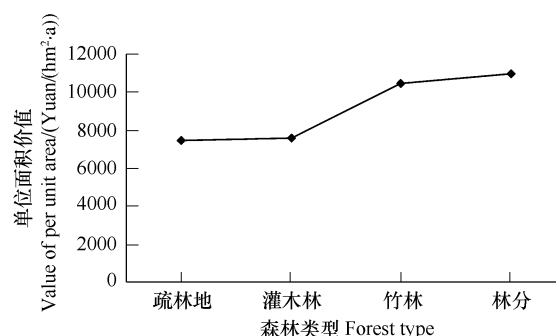


图 1 陕西省各类森林单位价值量比较

Fig. 1 Comparison of unit acreage between forest types

表 3 陕西省各类森林的固碳释氧价值量

Table 3 Evaluation of carbon fixation and oxygen released of main forest types in Shaanxi Province									
森林类型 Forest type	固碳价值量 The value of C fixation				释氧价值量 The value of O ₂ released				
	北部森林年固碳 价值量 Value of C fixation per year in Northern forests /(10 ⁴ yuan/a)	南部森林年固碳 价值量 Value of C fixation per year in Southern forests /(10 ⁴ yuan/a)	北部单位面积森 林年固碳价值量 Value of C fixation per unit area per year in Northern forests /(10 ⁴ yuan/ (hm ² ·a))	南部单位面积森 林年固碳价值量 Value of C fixation per unit area per year in Southern forests /(10 ⁴ yuan/ (hm ² ·a))	北部森林年固碳 价值量 Value of C fixation per year in Northern forests /(10 ⁴ yuan/a)	南部森林年固碳 价值量 Value of C fixation per year in Southern forests /(10 ⁴ yuan/a)	北部单位面积森 林年固碳价值量 Value of C fixation per unit area per year in Northern forests /(10 ⁴ yuan/ (hm ² ·a))	南部单位面积森 林年固碳价值量 Value of C fixation per unit area per year in Southern forests /(10 ⁴ yuan/ (hm ² ·a))	
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	32060.32	134598.33	0.155	0.192	71525.49	300284.32	0.346	0.428	
华山松 <i>Pinus armandii</i>	81.68	88054.37	0.545	0.601	182.23	196446.31	1.215	1.341	
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	-	105873.65	-	0.445	-	236200.52	-	0.992	
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	0.89	6508.36	0.089	0.639	2.00	14519.94	0.200	1.426	
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	1207.84	0.00	0.305	-	2694.65	0.00	0.680	-	
Linn. var. <i>mongolica</i>									
其它松类									
Other pines and conifer forests		4124.18	-	0.370	-	9200.91	-	0.826	
水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	-	68.97	-	0.526	-	153.86	-	1.175	
冷杉 <i>Abies</i>	-	14722.45	-	0.467	-	32845.29	-	1.041	
云杉 <i>Picea</i>	-	5067.76	-	0.467	-	11306.00	-	1.041	
铁杉 <i>Tsuga Chinensis</i>	-	2845.51	-	0.475	-	6348.25	-	1.059	
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	-	21661.17	-	0.609	-	48325.33	-	1.359	
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	123635.39	24012.40	0.241	0.430	275826.36	53570.86	0.537	0.958	
泡桐 <i>Paulownia fortunei</i>	655.15	1223.97	0.103	0.476	1461.62	2730.64	0.230	1.063	
柏类 <i>Cypress</i>	19309.77	17124.41	0.158	0.158	43079.45	38203.98	0.353	0.353	
栎类 <i>Quercus</i>	57885.93	1112300.57	0.075	0.388	129141.55	2481504.87	0.166	0.867	
桦类 <i>Betula</i>	39500.10	82557.45	0.472	0.472	88123.38	184182.88	1.053	1.053	
杨类 <i>Populus</i>	17261.53	59778.55	0.070	0.758	38509.89	133363.92	0.157	1.692	
椴树类 <i>Tilia</i>	1.89	1496.71	0.472	0.472	4.21	3339.12	1.053	1.053	
硬阔 Hardwood	68241.46	334171.04	0.556	0.556	152244.39	745524.28	1.241	1.241	
软阔 Softwood	30938.48	135198.18	0.556	0.556	69022.70	301622.56	1.241	1.241	
竹林 Bamboo	25.72	11392.69	0.248	0.341	57.38	25416.70	0.553	0.760	
经济林 Economic forestry	67086.59	100188.24	0.491	0.491	149667.92	223516.56	1.095	1.095	
疏林地 Woodlands	18744.03	36824.94	0.185	0.264	41817.30	82155.20	0.414	0.588	
灌木林 Scrub	152953.69	353280.35	0.104	0.512	341234.49	788156.50	0.232	1.142	
合计 Total	629590.48	2653074.26	0.164*	0.415*	1404595.02	5918918.76	0.365*	0.926*	

* 平均值

表 4 陕西省各类森林的固碳释氧服务功能

Table 4 The forest ecosystem services evaluation in Shaanxi Province

森林类型 Forest type	实物量 Volume			
	森林年固碳量 Volume of C fixation per year in forest /(t/a)	森林年释氧量 Volume of O ₂ released per year in forest /(t/a)	单位面积森林年固碳量 Volume of C fixation per unit area per year in forest /(t/(hm ² ·a))	单位面积森林年释氧量 Volume of O ₂ released per unit area per year in forest /(t/(hm ² ·a))
林分 Stands	21184737.379	56714917.358	2.839	7.601
灌木林 Scrub	4218617.004	11293909.877	1.952	5.226
疏林地 Woodlands	463074.794	1239725.007	1.922	5.147
竹林 Bamboo	95153.420	254740.866	2.838	7.598
经济林 Economic forestry	1393956.914	3731844.760	4.089	10.948
合计 Total	27355539.511	73235137.868	2.672 *	7.153 *
森林类型 Forest type	价值量 Value			
	森林年固碳价值量 Value of C fixation per year /(10 ⁴ Yuan/a)	森林年释氧价值量 Value of O ₂ released per year /(10 ⁴ Yuan/a)	单位面积森林年固碳价 值量 Value of C fixation per unit area per year /(10 ⁴ Yuan/(hm ² ·a))	单位面积森林年释氧价 值量 Value of O ₂ released per unit area per year /(10 ⁴ Yuan/(hm ² ·a))
林分 Stands	2542168.485	5671491.736	0.341	0.760
灌木林 Scrub	506234.0404	1129390.988	0.234	0.523
疏林地 Woodlands	55568.97532	123972.5007	0.231	0.515
竹林 Bamboo	11418.41041	25474.08665	0.339	0.758
经济林 Economic forestry	167274.8297	373184.476	0.491	1.095
合计 Total	3282664.741	7323513.787	0.321 *	0.715 *

* 平均值

328 × 10⁸ 元/a, 南部是北部的 2.23 倍。陕西南部森林的固碳释氧功能性和服务价值明显强于北部。这是由于陕西省地理由北向南, 由西向东的水热条件逐渐趋好, 有利于植物的生长, 所以森林的净生产力、固定 CO₂ 和吸收 O₂ 的能力及服务功能价值也呈现出相同的变化趋势。定量研究陕西南、北两大地域生态系统之间固碳释氧服务功能的差异, 对进一步理解陕西北森林生态系统结构、功能的重要性及其变化, 制定科学合理的林业政策有重要的参考价值。

对陕西省森林生态系统固碳功能的定量估算, 也有利于加强对其碳收支的了解。许多学者认为造成 CO₂ “失汇”的原因是由于对陆地生态系统, 尤其是森林生态系统的碳收支缺乏精确的了解, 认为所遗失的汇主要分布在北半球的陆地生态系统中^[6]。自 20 世纪 70 年代末开始, 由于造林和植被重建, 中国森林成为明显的碳汇, 年吸存量为 0.021Pg C^[32]。因此, 估算陕西省森林生态系统的固碳释氧量, 不仅有利于证实中国西北部温带森林是净碳汇, 而且有助于对森林生态系统的碳收支的了解。同时, 估算服务功能的经济价值, 为进行绿色 GDP 核算、生态补偿机制研究及生态省建设机制的研究奠定了基础。

(3) 由于森林生态系统的复杂性及估算其固碳的技术方法存在缺陷等原因, 对同一森林生态系统固碳量的估算会有差异, 这种差异有时会达到数倍之大。本研究中, 陕西省森林单位面积年固碳量 267.2 g/(m²·a), 高于方精云等^[18]估算结果中的陕西省平均值 183.14 g/(m²·a)。原因可能是:

方精云等^[18]估算结果 183.14 g/(m²·a) 是在 1996 年利用全国第三次森林清查资料估算陕西省 1984—1988 年间的年固碳量均值, 本研究是利用全国第六次森林清查资料估算陕西省在 1999—2003 年间的年固碳量均值。可能随着天保工程等森林保护工程的实施, 森林的林分结构和林龄结构在不断变化, 生产力进一步提升, 故高于 1996 年的值是合理的, 这也进一步说明估算森林生态系统固碳的复杂性。

(4) 森林固碳与森林的林龄构成、林分类型和森林结构等因素有关, 由于这些自然因素的综合作用, 导致我国不同地域之间的森林生态系统固碳量存在较大差异。陕西省森林年固碳量 2735.55 × 10⁴ t/a, 高于东北

的 $-330 \times 10^4 \text{ t/a}$ (- 表示东北为净碳源) 和内蒙古的 $1720 \times 10^4 \text{ t/a}$, 低于中国西南的 $3910 \times 10^4 \text{ t/a}$ 和中国东南的 $3490 \times 10^4 \text{ t/a}$ ^[1], 与我国气候条件尤其是水热条件变化一致。

根据周玉荣等^[5]的研究结果, 落叶阔叶林、暖性针叶林、常绿落叶阔叶林、云冷杉(*Picea-Abies*)林、落叶松(*Larix*)林占我国森林总面积的 82.1%, 占我国森林总碳贮量的 87%, 是我国森林的主要碳库。而陕西省的森林结构, 以上 5 种林分类型占全省总面积的 49.5%, 占总蓄积量的 68.4%, 这可能导致陕西省森林的碳密度高于全国平均值。

致谢: 本文撰写过程中, 得到 Martin Edward Parkes 教授的帮助, 特此致谢。

References:

- [1] Piao S H, Fang J Y, Philippe Ciais, Philippe Peylin, Yao Huang, Stephen sitch, Tao Wang. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7944):1009-1014.
- [2] WBGU (German Advisory Council on Global Change). The accounting of biological sinks and Sources under the Kyoto Protocol — A step forwards or backwards for global environmental protection? [2009-11-21]. http://www.awbremerhaven.de/WBGU/wbgu_sn1998_eng.1.html.
- [3] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *Bioscience*, 1981, 31: 29-33.
- [4] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest Ecosystems: Concepts and Management*. Orlando, FL, USA: Academic Press Inc, 1985: 313-335.
- [5] Zhou Y R, Yu Z L, Zhao S D. Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 518-522.
- [6] Fan H B, Huang Y Z, Yuan Y H, Li Y Y, Huang R Z, Fan H Y. Carbon cycling of forest ecosystems in response to global nitrogen deposition: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7):2997-3008.
- [7] IPCC. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability* // James J. McCarthy, Osvaldo F. Canziani, Neil A. Leary, David J. Dokken, Kasey S. White. Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 235-342.
- [8] Yu X X, Lu S W, Jin F, Chen L H, Rao L Y, Lu G Q. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8):2096-2102.
- [9] Costanza R, d'A rge R, Rudolf de Groot, Stephen Farber, Monica Grasso, Bruce Hannon, Karin Limburg, Shahid Naeem, Robert V. O'Neill, Jose Paruelo, Robert G. Raskin, Paul Sutton, Marjan van den Belt. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [10] Zhao T Q, Ouyang Z Y, Zheng H, Wang X K, Miao H. Forest ecosystem services and their valuation in China. *Journal of Nature Resources*, 2004, 19(4):480-491.
- [11] Jin F, Yu X X, Lu S W. *China forest ecosystem ecological services function and evaluation*. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007: 150-151.
- [12] Wang B, Lu S W. Evaluation of economic forest ecosystem services in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (2): 417- 425.
- [13] Fang J Y, Guo Z D, Piao S L, Chen A P. Evaluation of terrestrial ecosystems vegetation carbon sink in China from 1981 to 2000. *Science in China*, 2007, 37(6): 804-812.
- [14] Nie D P, Xu D Y, Zhu Y S. Effect of Stand structure, Site Condition and management Method on the Productivity of Bamboo Stands. *Forest Research*, 1995, 8(5):564-569.
- [15] Liu J J, Lei R D, Shang L B, Dang K L, Ye H M. Site classification at Huoditang forest farm. *Journal of Northwest Forestry College*, 1996, 11 (3):31-36.
- [16] Shang C J, Liang Z S, Hao W F, Liu S M. Relationship between growth of locust and soil water in the different habitats on the Loess Plateau. *Journal of Northwest Forestry College*, 2004, 19 (2): 9-14.
- [17] Iwaki Hideo. The distribution of plant biomass in net production area of Japan // Editorial Committee of Cross-section of Modern Ecology. *Cross-section of Modern Ecology*. Tokyo: Public Press, 1983:41-48.
- [18] 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.
- [19] Zhou Z S, Wang H S, Li L, Fu Z. Study on the Shrubbery Growth and Productivity. *Research of Soil and Water Conservation*, 1998, 5(1):103-108.
- [20] Ren Z Y, Li J. The valuation of ecological services from the Vegetation Ecosystems in the Qinling-Daba Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4):503-510.
- [21] Luo T X. *Patterns of Net Primary Productivity for Chinese Major Forest Types and Their Mathematical Models*. Beijing: Chinese Academy of Science, 1996.

- [22] Xiao Y. Comparative studies of biomass and productivity of *Pinus tabulaeformis* plantations in different climatic regions in Shaanxi Province. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1990, 14(3):237-248.
- [23] Chen C G, Peng H. Standing Crops and Productivity of the Major Forest types at the Huoditang Forest Region of the Qinling Mountains. *Journal of Northwest Forestry College*, 1996, 11(s): 92-102.
- [24] Zhang Z J, Wang Y H, Yuan Y X, Li Z Y, Cao L, Zhang G Z, Yu P T, Wang Y. Study on the biomass structure and distribution of natural secondary forest of *Pinus massoniana*. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2006, 29(5):37-43.
- [25] Xiao Y. Biomass and Productivity by Natural *Pinus henryi* forests. *Acta Phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1992, 16(3):227-233.
- [26] Li Z H, He L X, Zhou Y P, Zhou Q K. Study on the biomass structure and distribution of natural secondary forest of *Pinus massoniana*. *Journal of Central-South Forestry University*, 1996, 16(2):47-51.
- [27] Wen Y G, Yuan C A, Liu S R. Distribution and Simulation of Actual Productivity of *cunninghamia lanceolata* Plantation in China. *Guangxi Science*, 1995, 2(2), 56-62.
- [28] Liu K, Chen Y H. A Study on Biotical Productivity of *Robinia Pseudoacacia* Plantation at loess Plateau Area of North Weihe River. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 1989, 9(3):197-201.
- [29] Zhang B L. On the measurements and analysis of the biomass and production of black locust plantation in Weibei region of Shaanxi Province. Shaanxi: Northwest A&F University, 1988.
- [30] Guang Z Y. Study on Forest Biomass and Productivity in Henan. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(5):493-497.
- [31] Hu J Z. Evaluate the productivity and effect of soil improvement of poplar and hippophae mixed forest. *Hippophae*, 1994, 7(2):17-23.
- [32] 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 and 1998. *Science*, 2001, 292: 2320-2322.

参考文献:

- [5] 周玉荣,于振良,赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-512.
- [6] 樊后保, 黄玉梓, 袁颖红, 李燕燕, 黄荣珍, 樊海燕. 森林生态系统碳循环对全球氮沉降的响应. *生态学报*, 2007, 27(7):2997-3008.
- [8] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 陈丽华, 饶良懿, 陆贵巧. 中国森林生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2005, 25(8):2096-2102.
- [10] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 王效科, 苗鸿. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价. *自然资源学报*, 2004, 19(4):480-491.
- [11] 靳芳, 余新晓, 鲁绍伟. 中国森林生态系统生态学服务功能及其评价. 北京: 中国林业出版社, 2007: 150-151.
- [12] 王兵, 鲁绍伟. 中国经济林生态学系统服务价值评估. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 417-425
- [13] 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*, 2007, 37(6): 804-812.
- [14] 聂道平, 徐德应, 朱余生. 林分结构、立地条件和经营措施对竹林生产力的影响. *林业科学研究*, 1995, 8(5):564-569.
- [15] 刘建军, 雷瑞德, 尚廉斌, 党坤良, 叶宏谋. 火地塘林场立地分类的初步研究. *西北林学院学报*, 1996, 11(3):31-36.
- [16] 单长卷, 梁宗锁, 郝文芳, 刘淑明. 黄土高原不同立地条件下刺槐生长与水分关系研究. *西北林学院学报*, 2004, 19(2): 9-14.
- [17] 岩城英夫, 日本における植物現存量と純生産量の地域分布//现代生态学的断面編集委員会. 现代生态学的断面. 东京: 公立出版社, 1983: 41-48.
- [18] 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.
- [19] 周泽生, 王晗生, 李立, 傅佐. 灌木林的生长和生产力. *水土保持研究*, 1998, 5(1):103-108.
- [20] 任志远, 李晶. 陕南秦巴山区植被生态功能的价值评测. *地理学报*, 2003, 58(4):503-510.
- [21] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 北京: 中国科学院, 1996.
- [22] 肖瑜. 陕西省不同气候区域油松人工林生物量和生产力的比较研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1990, 14(3):237-248.
- [23] 陈存根, 彭鸿. 秦岭火地塘林区主要森林类型的现存量 and 生产力. *西北林学院学报*, 1996, 11(增):92-102.
- [24] 张治军, 王彦辉, 袁玉欣, 李志勇, 曹磊, 张国增, 于澎涛, 王颖. 马尾松天然次生林生物量的结构与分布. *河北农业大学学报*, 2006, 29(5):37-43.
- [25] 肖瑜. 巴山松天然林生物量和生产力的研究. *植物生态学与地植物学学报*, 1992, 16(3):227-233.
- [26] 李志辉, 何立新, 周育平, 周七昆. 水杉人工林生物产量及生产力的研究. *中南林学院学报*, 1996, 16(2):47-51.
- [27] 温远光, 元昌安, 刘世荣. 中国杉木林现实生产力的分布及模拟. *广西科学*, 1995, 2(2), 56-62.
- [28] 刘康, 陈一鹏. 渭北黄土高原区刺槐人工林群落生物生产力的研究. *西北植物学报*, 1989, 9(3):197-201.
- [29] 张柏林. 陕西省渭北地区刺槐人工林生物生产力的测定及分析. 陕西: 西北农林科技大学, 1988.
- [30] 光增云. 河南森林生物量与生产力研究. *河南农业大学学报*, 2006, 40(5):493-497.
- [31] 胡建忠. 山杨沙棘混交林生产力及改良土壤作用的评价. *沙棘*, 1994, 7(2):17-23.