

DOI: 10.5846/stxb201807091493

崔亚琴, 樊兰英, 刘随存, 孙拖焕. 山西省森林生态系统服务功能评估. 生态学报, 2019, 39(13): - .

Cui Y Q, Fan L Y, Liu S C, Sun T H. Evaluation of forest ecosystem services value in Shanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(13): - .

山西省森林生态系统服务功能评估

崔亚琴 樊兰英 刘随存 孙拖焕*

山西省林业科学研究院, 太原 030012

摘要: 森林生态系统服务功能评估一直是国内外研究热点之一, 森林不仅具有经济价值, 更有巨大的生态价值。基于山西省 2016 年森林资源 2 类调查数据, 根据中华人民共和国林业行业标准 LY/T1721—2008《森林生态系统服务功能评估规范》, 对山西省 11 个地市的主要植被类型生态系统服务功能进行评估。结果表明: 1) 2016 年, 山西省森林生态系统服务功能总价值为 3172.64 亿元, 其价值量由大到小的顺序为涵养水源、净化大气环境、保育土壤、固碳释氧、生物多样性保护、林木积累营养物质、森林游憩, 其中涵养水源、净化大气环境和保育土壤的价值量共占山西省森林生态系统服务功能总价值的 78.98%; 2) 山西省各市森林生态系统服务功能价值量由大到小的顺序为吕梁市、忻州市、临汾市、晋中市、长治市、运城市、晋城市、大同市、太原市、朔州市、阳泉市, 而单位面积价值量最大的是晋城市, 最小的是朔州市; 3) 不同林分类型生态系统服务功能价值量由大到小的顺序为乔木林(油松、栎类、针阔混、阔叶混、桦木及山杨类、落叶松、杨树及软阔类、槐类、柏木、针叶混、云杉、硬阔类和竹林)、灌木林和经济林; 4) 不同龄组提供的生态系统服务功能价值量由大到小的顺序为中龄林、幼龄林、成过熟林、近熟林。

关键词: 森林生态系统; 生态系统服务功能; 物质质量; 价值量; 山西省

Evaluation of forest ecosystem services value in Shanxi Province

CUI Yaqin, FAN Lanying, LIU Suicun, SUN Tuohuan*

Shanxi Academy of Forestry Sciences, Taiyuan 030012, China

Abstract: The evaluation of forest ecosystem service function is a hot topic at home and abroad. Forests bring not only economic benefits but also ecological benefits for humans. Based on the Forest Resources in Shanxi Province Report of 2016 and the standard specifications of the People's Republic of China (LY/T1721—2008, "Specifications for assessment of forest ecosystem service in China"), this study evaluated the value of main vegetation types of 11 cities in Shanxi Province. The results showed that: 1) the total value of forest ecosystem services was 3172.64 billion yuan in Shanxi Province in 2016, with high to low value observed in the order of water storage, air quality purification, soil conservation, carbon fixation and oxygen release, biodiversity conservation, nutrients accumulation, and forest recreation. Water storage, air quality purification, and soil conservation contributed 78.98% of the total ecosystem value; 2) the order of forest ecosystem services in cities from high value to low value is Lvliang, Xinzhou, Linfen, Jinzhong, Changzhi, Yuncheng, Jincheng, Datong, Taiyuan, Shuozhou, and Yangquan. The highest and lowest cities for monetary values per hectare of land are Jincheng and Shuozhou, respectively; 3) the order of forest ecosystem services in the stand forest from high value to low value is arboreal forest (*Pinus tabulaeformis*, *Quercus* spp., mixed broadleaf-conifer forest, broad-leaved mixed forest, *Betula* spp. and *Populus davidiana*, *Larix gmelinii*, *Populus* spp. and soft-broad tree, *Sophora japonica*, *Cupressus funebris*, Coniferous mixed forest, *Picea asperata*, hard-broad tree, and bamboo grove), shrubbery, and economic forest; 4) the order of forest ecosystem services based on age-group from high value to low value is middle forest, young forest,

基金项目: 山西省应用基础研究项目(201601D011063); 山西太原城市生态系统国家定位观测研究站; 山西省青年科技基金研究项目(201601D021115); 山西省科技基础条件平台(201605D121017)

收稿日期: 2018-07-09; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: suntuohuan@126.com

mature and over-mature forest, and near-mature forest.

Key Words: forest ecosystem; services and functions; physical account; monetary value; Shanxi province

森林是地球生物圈的重要组成部分,是陆地生态系统的主体。森林不仅为人类社会提供各种人类生产生活所需要的物质资源,更是维护生态平衡的重要调节器发挥着涵养水源、保育土壤、净化空气、防风固沙和生物多样性保护等多种生态服务功能^[1-2]。目前,如何对森林生态系统服务功能进行科学量化研究是摆在全球范围内的重要课题?只有对森林生态系统进行科学的价值评估,才能够有效地指导森林资源的合理利用,为维护森林生态系统的健康发展提供有力保障,对于森林保护、森林可持续经营以及生态补偿意义重大^[3-4]。

1997年,Daily探讨了生态系统服务功能的定义及其价值特性,以及生态系统服务功能与生物多样性的关系^[5]。同年,Costanza按照IGBP土地利用类型覆盖数据,将全球生态系统进行分类,并将服务功能分为17个类别,在全球尺度上对生态系统服务功能进行了评估^[6]。但其存在一些不足之处:(1)服务功能边界模糊,功能之间会产生重复计算的结果;(2)空气调节、涵养水源这样的服务功能并没有真实的进行市场交易,所以很难反应出其真实价格;(3)由于生态系统服务功能评估与以往的经济价格评估不同,涉及到社会、环境、经济等多重目标,所以很容易导致估值出现偏差。在1972年、1991年和2000年,日本农林水产省林野厅对本国的森林植被类型的功能价值开展了三次评估^[7-8]。自2009年到2011年内,英国启动了对生态系统的评估工作,把山水林田湖海纳入到了一个共同的生态系统评估中去,对25项生态系统服务进行了评估^[9]。尽管此评估工作和结果存在很多争议,但为正确评价森林生态服务功能具有一定的参考价值,同时,也为今后如何评价森林在生态环境建设中的作用和生态补偿机制研究提供了依据。

自20世纪80年代,我国就开展了森林生态系统服务功能评估方面的研究工作。我国学者针对不同尺度和不同生态系统类型进行了功能价值的研究工作。1999年,蒋延玲和周广胜根据我国第三次森林清查报告,对我国38种主要森林生态系统的公益价值进行评估^[10]。2000年,陈仲新和张新时根据Costanza提出的方法对我国生态系统的功能与效益进行价值估算^[11]。2001年,谢高地等对中国自然草地生态系统服务价值进行研究^[12]。2004年,赵同谦等人分析草地生态系统服务功能价值,并提出评价指标^[13]。随后谢高地等人又对我国青藏高原、青海草原等地区 and 群落生态系统进行价值分析^[14]。《中国森林生态系统服务评估》项目组,得出第七次(2004—2008年)^[15]和第八次(2009—2013年)^[16]全国森林资源清查期间的中国森林生态系统服务总价值分别为10.01万亿元/年和12.68万亿元/年。近年来,我国大部分省份、城市及自然保护区都开展了森林生态系统服务功能的评价工作,对其森林生态效益的物质质量、价值量及生态GDP进行了核算,这对我们认清各个地区的森林生态系统服务价值在国民经济和社会发展中的地位 and 作用提供了科学的依据和数据支撑。

由于研究者的研究内容和侧重点有所不同,采用的评估指标体系也不尽相同,因而,评价结果不具可比性。本文以中华人民共和国林业行业标准LY/T1606—2003《森林生态系统定位观测指标体系》^[17]和LY/T1721—2008《森林生态系统服务功能评估规范》^[18]为依据,结合山西省森林资源二类调查数据和山西省森林生态系统长期定位观测数据,对山西省森林生态系统服务功能进行评估。以期科学、定量的评价山西省森林生态系统服务功能,提高人们的环境意识,为山西省林业政策与生态环境建设发展提供科学依据。

1 研究区域概况

1.1 自然地理概况

山西省地处黄土高原东部、黄河中游、海河上游,介于E110°14'36"—114°33'24",N34°34'48"—40°43'24",全省纵长约682km,东西宽约385km,土地总面积15.67万km²。地处太行山与黄河中游峡谷之间,位于我国三大阶梯状地形上第二阶梯中部的前缘地带,巍然屹立于华北平原的西侧,地势由东北向西南倾斜。

在气候类型上,山西属大陆性季风气候,内长城以北地区属温带半干旱气候,内长城至阳泉-太岳山-河津一线为暖温带半干旱气候,其南为暖温带半湿润气候。具有冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,春秋较为短促,时空温差悬殊的气候特点。全省各地年均温介于 4.2—14.2℃,总体分布趋势为由北向南升高,由盆地向高山降低;全省各地年降水量介于 358—621mm 之间,季节分布不均,夏季 6—8 月降水相对集中,约占全年降水量的 60%,且省内降水分布受地形影响较大。

1.2 森林资源概况

根据山西省 2016 年森林资源清查结果,山西省土地面积为 1566.23 万 hm^2 ,林地面积为 836.83 万 hm^2 ,占总面积的 53.43%,森林面积为 340.51 万 hm^2 ,森林覆盖率为 21.74%,活立木蓄积为 15942.89 万 m^3 ,其中森林蓄积为 13310.68 万 m^3 ,占 83.49%。森林面积中,乔木林面积为 251.69 万 hm^2 ,占森林面积的 73.92%。

2 研究方法

2.1 数据来源

(1)依据 LY/T1606—2003《森林生态系统定位观测指标体系》^[17],中国森林生态系统研究网络(CFERN)开展的长期、连续、定位观测研究,收集的数据集。按照中华人民共和国林业行业标准 LY/T1721—2008《森林生态系统服务功能评估规范》^[18]中的评估方法和评估公式,对山西省森林生态系统服务功能进行评估。(2)山西省 2016 年森林资源二类调查数据。(3)我国权威机构公布的社会公共数据。(4)山西省 2013—2017 年进行的标准样地调查、取样、测定的数据。

2.2 评估方法

基于 2016 年的森林资源二类调查数据和 50 块大样地(1 hm^2 /块)实测数据,依据国家林业行业标准《森林生态服务功能评估规范》中的评估方法和评估公式(表 1),将森林生态系统服务功能分为涵养水源、保育土壤、固碳释氧、林木积累营养物质、净化大气环境、生物多样性保护和森林游憩等 7 项功能指标,应用分布式测算方法,将山西省分别分为大同市、晋城市、晋中市、临汾市、吕梁市、朔州市、太原市、忻州市、阳泉市、运城市 and 长治市 11 个一级测算单元,每个一级测算单元又按优势树种林分类型分别划分成 15 个二级测算单元,每个二级测算单元按照不同起源划分为天然林和人工林 2 个三级测算单元,每个三级测算单元再按龄组划分为幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林、过熟林 5 个四级测算单元,然后进行尺度转换、计算和整合,对山西省森林生态系统服务功能进行评估。

3 结果与分析

3.1 山西省森林生态系统服务功能的物质质量

2016 年山西省森林生态系统服务功能物质质量、以及单位面积物质质量测算结果见表 2。从表 2 中可以看出,各指标的物质质量测算结果主要有以下一些特点。

(1)山西省森林涵养水源物质质量为 101.03 亿 m^3 ,全省平均单位面积涵养水源量为 2028.02 m^3/hm^2 。根据 2016 年《山西省水资源公报》^[19]数据显示:山西省水资源总量为 134.14 亿 m^3 ,涵养水源物质质量相当于全省水资源总量的 75.32%。由此可见,山西省森林生态系统可谓是“绿色-安全”的水库,其对维护山西省地区的水资源安全起着十分重要的作用。

(2)保育土壤功能中,固土量最大,保持土壤肥力的能力次之。每年的总固土量为 7.23 亿 t/a ,单位面积的固土量 145.20 $\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 。在土壤保肥能力中,减少钾损失量>有机质>氮>磷,单位面积物质质量与其物质质量从高到低的顺序一致。

(3)固碳释氧功能中,山西省森林生态系统年固碳量 762.88 万 t ,释氧量 1788.97 万 t ,单位面积年固碳量和释氧量分别为 1.53 t/hm^2 和 3.59 t/hm^2 。《2016 年山西统计年鉴》^[20]统计结果显示,山西省能源的消费总量是 15958.30 万 t 标准煤,经碳排放转换系数^[21]换算,可知山西省碳排放量为 14493.10 万 t ,经计算可知,

表 1 山西省森林生态系统服务功能评估指标及公式
Table 1 Evaluation indicator formula for assessing forest ecosystem services in Shanxi Province

服务功能 Ecosystem services	评估指标 Evaluation index	计算公式 Formula	参数说明 Parameter description
涵养水源 Water storage	调节水量	$U_{\text{调}} = 10C_{\text{库}} \cdot A \cdot (P - E - C) \cdot F \cdot d$	$U_{\text{调}}$: 实测森林年调节水量价值 (元/a); $C_{\text{库}}$: 水库库容造价 (元/m ³); P : 实测林外降水量 (mm/a); E : 实测林分蒸散量 (mm/a); C : 实测地表快速径流量 (mm/a); A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
保育土壤 Soil conservation	固土	$U_{\text{固土}} = A \cdot C_{\text{土}} \cdot (X_2 - X_1) \cdot F \cdot d / \rho$	$U_{\text{固土}}$: 实测林分 a 固土价值 (元/a); X_1 : 有林地土壤侵蚀模数 (t hm ⁻² a ⁻¹); X_2 : 无林地土壤侵蚀模数 (t hm ⁻² a ⁻¹); $C_{\text{土}}$: 挖取和运输单位体积土方所需费用 (元/m ³); ρ : 土壤容重 (g/cm ³); A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
	保肥	$U_{\text{肥}} = A \cdot (X_1 - X_2) \cdot (N \cdot C_1 / R_1 + P \cdot C_1 / R_2 + K \cdot C_2 / R_3 + M \cdot C_3) \cdot F \cdot d$	$U_{\text{肥}}$: 实测林分 a 保肥价值 (元/a); X_1 : 有林地土壤侵蚀模数 (t hm ⁻² a ⁻¹); X_2 : 无林地土壤侵蚀模数 (t hm ⁻² a ⁻¹); N : 森林土壤平均含氮量 (%) ; P : 森林土壤平均含磷量 (%) ; K : 森林土壤平均含钾量 (%) ; M : 森林土壤有机质含量 (%) ; R_1 : 磷酸二铵化肥含氮量 (%) ; R_2 : 磷酸二铵化肥含磷量 (%) ; R_3 : 氯化钾化肥含钾量 (%) ; C_1 : 磷酸二铵化肥价格 (元/t) ; C_2 : 氯化钾化肥价格 (元/t) ; C_3 : 有机质价格 (元/t) ; A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数。
固碳释氧 Carbon fixation and Oxygen released	固碳	$U_{\text{碳}} = A \cdot C_{\text{碳}} \cdot (1.63R_{\text{碳}}B_{\text{年}} + F_{\text{土壤碳}}) \cdot F \cdot d$	$U_{\text{碳}}$: 实测林分年固碳价值 (元/a); $B_{\text{年}}$: 实测林分年净生产力 (t hm ⁻² a ⁻¹); $F_{\text{土壤碳}}$: 单位面积森林土壤年固碳量 (t hm ⁻² a ⁻¹); $C_{\text{碳}}$: 固碳价格 (元/t) ; $R_{\text{碳}}$: 二氧化碳中碳的含量, 为 27.27%; A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
	释氧	$U_{\text{氧}} = 1.19C_{\text{氧}} \cdot A \cdot B_{\text{年}} \cdot F \cdot d$	$U_{\text{氧}}$: 实测林分年释氧价值 (元/a); $B_{\text{年}}$: 实测林分年净生产力 (t hm ⁻² a ⁻¹); $C_{\text{氧}}$: 制造氧气的价格 (元/t) ; A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
积累营养物质 Nutrients accumulation	林木积累营养	$U_{\text{营养}} = A \cdot B \cdot (N_{\text{营养}}C_1/R_1 + P_{\text{营养}}C_1/R_2 + K_{\text{营养}}C_2/R_3) \cdot F \cdot d$	$U_{\text{营养}}$: 实测林分氮、磷、钾年增加值 (元/a); $N_{\text{营养}}$: 实测林木含氮量 (%) ; $P_{\text{营养}}$: 实测林木含磷量 (%) ; $K_{\text{营养}}$: 实测林木含钾量 (%) ; R_1 : 磷酸二铵含氮量 (%) ; R_2 : 磷酸二铵含磷量 (%) ; R_3 : 氯化钾含钾量 (%) ; C_1 : 磷酸二铵化肥价格 (元/t) ; C_2 : 氯化钾化肥价格 (元/t) ; B : 实测林分净生产力 (t hm ⁻² a ⁻¹); A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
净化大气环境 Air quality purifying	提供负离子	$U_{\text{负离子}} = 5.256 \times 10^{15} \cdot A \cdot H \cdot K_{\text{负离子}} \cdot (Q_{\text{负离子}} - 600) \cdot F \cdot L \cdot d$	$U_{\text{负离子}}$: 实测林分年提供负离子价值 (元/a); $K_{\text{负离子}}$: 负离子生产费用 (元/个); $Q_{\text{负离子}}$: 实测林分负离子浓度 (个/cm ³); L : 负离子寿命 (min); H : 林分高度 (m); A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
	吸收污染物	$U_{\text{污染物}} = K_{\text{污染物}} \cdot Q_{\text{污染物}} \cdot A \cdot F \cdot d$	$U_{\text{污染物}}$: 实测林分年吸收污染物总价值 (元/a); $K_{\text{污染物}}$: 污染物的治理费用 (元/kg); $Q_{\text{污染物}}$: 单位面积实测林分年吸收污染物量 (kg hm ⁻² a ⁻¹); A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
	滞尘	$U_{\text{滞尘}} = (Q_{\text{滞尘}} - Q_{\text{PM}_{10}} - Q_{\text{PM}_{2.5}}) \cdot K_{\text{滞尘}} \cdot F \cdot d + U_{\text{PM}_{10}} + U_{\text{PM}_{2.5}}$	$U_{\text{滞尘}}$: 实测林分年滞尘价值 (元/a); $Q_{\text{PM}_{10}}$: 单位面积实测林分年滞尘量 (kg hm ⁻² a ⁻¹); $Q_{\text{PM}_{2.5}}$: 单位面积实测林分年滞尘量 (kg hm ⁻² a ⁻¹); $K_{\text{滞尘}}$: 降尘清理费用 (元/kg); A : 林分面积 (hm ²); F : 森林生态功能修正系数; d : 贴现率。
生物多样性保护 Biodiversity conservation	物种保育	$U_{\text{总}} = \left(1 + 0.1 \sum_{m=1}^x E_m + 0.1 \sum_{n=1}^y B_n + 0.1 \sum_{r=1}^z O_r \right) \cdot S_1 \cdot A \cdot d$	$U_{\text{总}}$: 实测林分年生物多样性保护价值 (元/a); E_m : 实测林分或区域内物种 m 的濒危分值; B_n : 评估林分或区域内物种 n 的特有种; O_r : 评估林分(或区域)内物种 r 的古树年龄指数; x : 计算濒危指数物种数量; y : 计算特有种指数物种数量; z : 计算古树年龄指数物种数量; S_1 : 单位面积物种多样性保护价值 (元 hm ⁻² a ⁻¹); A : 林分面积 (hm ²); d : 贴现率。
森林游憩 Forest recreation	森林游憩	$U_r = \sum_i Y_i + Y_l$	U_r : 森林游憩功能的价值量 (元/a); Y_i : 各市森林公园的直接收入 (元); Y_l : 各市森林公园的间接收入 (元); i : 山西省 i 市

山西省森林年固定碳量约为山西省年排放量的 5.26%。尽管对抵消碳排放总量有限,与工业减排相比,森林固碳投资少、代价低、综合效益大,更具有经济可行性和现实操作性。因此,提高森林生态系统价值,是节能减排的重要措施。

(4)林木积累营养物质功能中,林木积累营养物质由高到低的顺序为 $N>K>P$,单位面积物质质量分别为 $0.04\text{t}/\text{hm}^2$ 、 $0.02\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $0.01\text{t}/\text{hm}^2$ 。林木在生长过程中不断从周围环境吸收营养物质,固定在植物体内,成为全球生物化学循环不可缺少的环节。通过对全省林木积累营养物质质量的核算,可以看出,山西省林木积累 N 量最大,积累 P 量最小这主要可能与植被类型、树种有关。油松是山西的乡土树种,在山西的栽植广泛,高甲荣等人^[22-23]研究表明:油松积累营养物质与山西省积累营养物质质量一致,也呈现出 $N>K>P$ 的规律。

(5)净化大气环境功能中,提供负离子数为 1.95×10^{25} 个/年,森林是天然的氧吧,释放的负氧离子能有效起到降尘、灭菌的作用^[24];吸收污染物(包括吸收二氧化硫、吸收氟化物、吸收氮氧化物)量为 6.34 亿 kg。其中,吸收二氧化硫的量最大,年吸收量可达 5.87 亿 kg,单位面积吸收二氧化硫的量可达 $117.81\text{kg}/\text{hm}^2$,吸收氮氧化物的量较大,吸收氟化物的量最低。在滞尘量方面,年滞纳 TSP 量为 868.75 亿 kg,单位面积滞纳 TSP 量为 1.74 万 kg/hm^2 ;年滞纳 PM_{10} 量为 0.27 亿 kg,滞纳 $\text{PM}_{2.5}$ 量为 0.13 亿 kg,单位面积滞纳 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 量分别为 $5.50\text{kg}/\text{hm}^2$ 和 $2.67\text{kg}/\text{hm}^2$ 。山西省作为全国的能源和重工业基地,环境污染非常严重。2016 年《山西省环境状况公报》^[25]显示,全省二氧化硫排放总量 105.56 万 t,氮氧化物排放总量 87.42 万 t。二氧化硫和氮氧化物吸收量分别相当于山西省工业二氧化硫排放量的 55.60%,工业氮氧化物排放量的 3.34%,因此,山西省森林生态系统在吸收大气污染物、净化大气环境方面具有重要的作用。

表 2 山西省森林生态系统服务物质质量

Table 2 Physical accounts of forest ecosystem services in Shanxi Province			
类别 Types	指标 Index	物质质量 Physical Accounts	单位面积物质质量 Physical Accounts per hectare
涵养水源 Water conservation	调节水量	$101.03\times10^8\text{m}^3$	$2028.02\text{m}^3/\text{hm}^2$
保育土壤 Soil conservation	固土	$7.23\times10^8\text{t}$	$145.20\text{t}/\text{hm}^2$
	减少氮损失	$349.06\times10^4\text{t}$	$0.70\text{t}/\text{hm}^2$
	减少磷损失	$69.53\times10^4\text{t}$	$0.14\text{t}/\text{hm}^2$
	减少钾损失	$1660.30\times10^4\text{t}$	$3.33\text{t}/\text{hm}^2$
	减少有机质损失	$1202.58\times10^4\text{t}$	$2.41\text{t}/\text{hm}^2$
固碳释氧	固碳	$762.88\times10^4\text{t}$	$1.53\text{t}/\text{hm}^2$
Carbon sequestration and Oxygen release	释氧	$1788.97\times10^4\text{t}$	$3.59\text{t}/\text{hm}^2$
林木积累营养物质 Trees accumulate nutrients	林木 N	$22.04\times10^4\text{t}$	$0.04\text{t}/\text{hm}^2$
	林木 P	$6.04\times10^4\text{t}$	$0.01\text{t}/\text{hm}^2$
	林木 K	$7.96\times10^4\text{t}$	$0.02\text{t}/\text{hm}^2$
净化大气环境	提供负离子数	1.95×10^{25}	3.92×10^{18}
Purifying atmospheric environment	吸收二氧化硫	$5.87\times10^8\text{kg}$	$117.81\text{kg}/\text{hm}^2$
	吸收氟化物	$0.18\times10^8\text{kg}$	$3.52\text{kg}/\text{hm}^2$
	吸收氮氧化物	$0.29\times10^8\text{kg}$	$5.87\text{kg}/\text{hm}^2$
	TSP	$868.75\times10^8\text{kg}$	$1.74\times10^4\text{kg}/\text{hm}^2$
	PM_{10}	$0.27\times10^8\text{kg}$	$5.50\text{kg}/\text{hm}^2$
	$\text{PM}_{2.5}$	$0.13\times10^8\text{kg}$	$2.67\text{kg}/\text{hm}^2$

3.2 山西省森林生态系统服务功能的价值量

2016 年山西省森林生态系统服务功能价值量、以及单位面积价值量测算结果见表 3。从表 3 中可以看出,各指标的价值量测算结果主要有以下一些特点。

各项森林生态系统服务功能的价值量、单位面积价值量及其所占比例由大到小分别为涵养水源 1034.58

亿元/a, 2.08 万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$, 占 32.61%, 净化大气环境 887.98 亿元/a, 1.78 万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$, 占 27.99%, 保育土壤 583.33 亿元/a, 1.17 万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$, 占 18.39%, 固碳释氧 328.48 亿元/a, 0.66 万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$, 占 10.35%, 生物多样性保护 255.67 亿元/a, 占 8.06%, 林木积累营养物质 76.91 亿元/a, 0.15 万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$, 占 2.42%, 森林游憩 5.69 亿元/a, 0.01 万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$, 占 0.18%。其中涵养水源、保育土壤和净化大气环境的价值量共占山西省森林生态系统服务功能总价值的 78.98%。可以看出, 山西省森林生态系统在涵养水源、保育土壤和净化大气环境方面的作用显著。

表 3 山西省森林生态系统服务价值量

Table 3 Monetary values of forest ecosystem services in Shanxi Province

类别 Types	价值量 Monetary values/ (亿元/a)	比例 Proportion/%	单位面积价值量 Monetary values per hectare/ (万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$)
涵养水源 Water conservation	1034.58	32.61	2.08
保育土壤 Soil conservation	583.33	18.39	1.17
固碳释氧 Carbon fixation	328.48	10.35	0.66
林木积累营养物质 Trees accumulate nutrients	76.91	2.42	0.15
净化大气环境 Purifying atmospheric environment	887.98	27.99	1.78
生物多样性保护 Biodiversity conservation	255.67	8.06	0.51
森林游憩 Forest recreation	5.69	0.18	0.01

3.3 山西省森林生态系统服务功能物质质量空间格局

山西省森林生态系统服务功能物质质量空间分布格局(图 1), 可以看出, 各项功能按照大小可划分为 5 个等级, 其中山西省西部吕梁市和临汾市均处于第 1 等级, 而北部的大同市和朔州市、中部的太原市和阳泉市各项功能所占比例较小, 基本处于倒数 1、2 等级。这主要是与各地市的森林资源总量、质量、气候、土壤、植被和经济发展等因素有关。大同市、朔州市、太原市和阳泉市的森林资源面积仅占全省林地总面积的 20.42%, 此外, 山西北部地区属于风沙源区, 盐碱地, 不利于植被的生长, 太原市为山西省会城市, 人口密集区。因而, 山西北部和中南部地区森林生态系统服务功能相对低下, 西部地区为吕梁山脉区, 森林资源丰富, 国家天保工程和退耕还林工程实施后, 森林资源更加多样化, 吕梁市、临汾市和忻州市的森林资源面积占全省林地总面积的 46.46%, 近达全省林地总面积的一半之多, 森林生态系统服务功能明显高于其他各地市。

3.4 山西省各市森林生态系统服务功能价值量

2016 年山西省各市森林生态系统服务功能价值量、以及单位面积价值量测算结果见表 4。从表 4 中可以看出, 山西省各市森林生态系统服务价值量由大到小的顺序为吕梁市、忻州市、临汾市、晋中市、长治市、运城市、晋城市、大同市、太原市、朔州市、阳泉市, 单位面积价值量最大的为晋城市, 其次是长治市和临汾市, 最小的为朔州市。从总价值量来说, 价值量主要是与森林的面积和蓄积有关; 但从单位面积价值量来看, 价值量最

表 4 山西省各市森林生态系统服务价值量

Table 4 Monetary values of forest ecosystem services for cities in Shanxi Province

市 City	价值量 Monetary values/ (亿元/a)	单位面积价值量 Monetary values per hectare/ (万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$)	市 City	价值量 Monetary values/ (亿元/a)	单位面积价值量 Monetary values per hectare/ (万元 $\text{hm}^2 \text{a}^{-1}$)
大同市	195.57	5.94	太原市	135.99	5.97
晋城市	264.83	7.06	忻州市	478.29	6.45
晋中市	341.26	6.54	阳泉市	97.85	6.04
临汾市	467.77	6.56	运城市	281.10	6.43
吕梁市	502.61	6.17	长治市	293.67	6.75
朔州市	113.70	5.08			

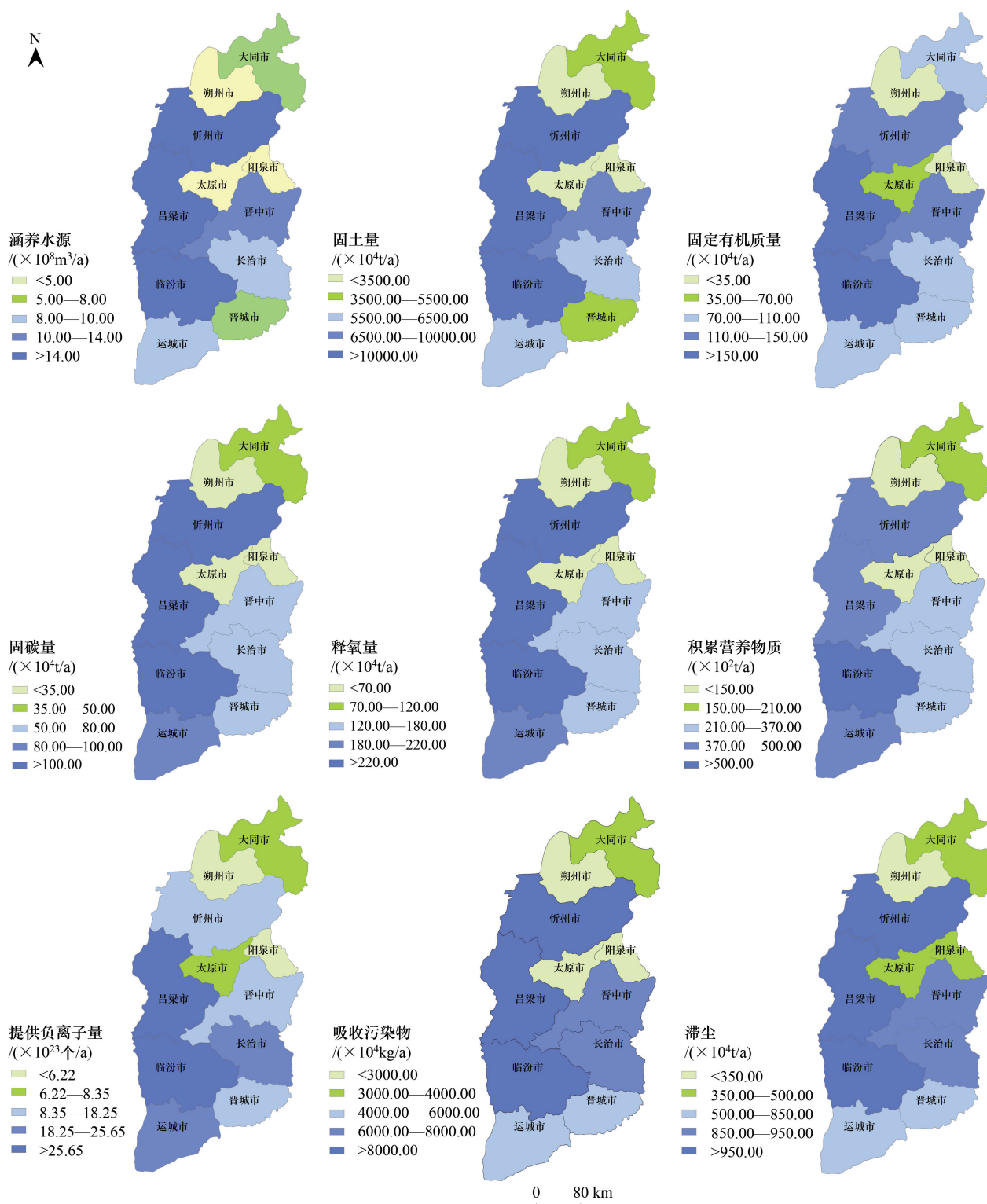


图1 山西省各市森林生态系统服务功能物质和价值量空间分布格局

Fig.1 Spatial distribution of forest ecosystem services in different cities in Shanxi Province

大的地区主要分布在山西省南部地区,而北部的朔州市最小,这主要是与当地的降水量有关,不同城市的水资源分布极不均匀,总体趋势是降水量由东南向西北递减,东南部降雨量充沛,其森林质量明显提高,各项评估指标也随之提高,从而直接影响不同地市之间单位面积价值量的大小。

3.5 山西省不同林分类型生态系统服务功能价值

山西省不同林分类型的生态系统服务功能价值量见表 5。可以看出,山西省主要植被类型中,除森林游憩功能外,其余 6 项功能合计价值量介于 255.67—1034.56 亿元/a 之间,其中,提供森林服务价值最大的是乔木林,为 1793.5211 亿元/a,其次为灌木林和经济林,分别为 1124.0055 亿元/a 和 249.4074 亿元/a。乔木林中,提供森林服务功能价值最大的是油松(593.2913 亿元/a),其次是栎类(329.9447 亿元/a),油松和栎类占乔木林提供总价值量的 51.48%,说明,油松和栎类在山西省森林生态系统服务功能中起了重要的作用。乔木林各林分类型服务功能价值量由大到小的顺序为油松、栎类、针阔混、阔叶混、桦木及山杨类、落叶松、杨树及软阔类、槐类、柏木、针叶混、云杉、硬阔类和竹林。这与树种自身的特性有关外,还与森林面积有一定的相关性。山西省灌木林所占的面积比例较大,其服务功能价值量也较大,而竹林所占的面积比例较小,所以,其提供的服务功能价值量最小。

表 5 山西省不同林分类型(优势树种组)的生态系统服务功能价值量/(亿元/a)
Table 5 Value of forest ecosystem services of different forest types in Shanxi Province

林分类型 Forest type	优势树种 Dominant Specie	涵养水源 Water storage	保育土壤 Soil conservation	固碳释氧 C fixation and O ₂ release	林木营养物质 Nutrients accumulation	净化大气环境 Air quality purifying	生物多样性 Biodiversity conservation	合计 Total value
乔木林 Arboreal forest	云杉	4.2995	2.4813	0.7369	0.3265	4.8652	0.8343	13.5438
	落叶松	31.4056	20.3522	11.0505	4.1215	32.2390	7.3582	106.5269
	油松	179.0821	104.1215	66.0097	13.9347	195.2105	34.9328	593.2913
	柏木	21.0223	11.7877	5.8297	2.3597	20.0931	5.1123	66.2049
	栎类	61.4384	37.4164	38.5894	11.3358	136.4669	44.6978	329.9447
	桦木及山杨类	21.5841	14.6204	13.1768	2.4203	40.9947	15.1069	107.9032
	硬阔类	1.5004	0.8123	0.7083	0.0933	0.5563	0.2722	3.9428
	杨树及软阔类	39.5268	22.0062	19.2460	2.6058	11.2428	8.1529	102.7805
	槐类	31.0783	17.1340	15.5188	1.9039	12.4034	6.0121	84.0506
	针叶混	11.6541	8.3566	5.7895	1.2897	10.2584	3.8753	41.2235
	阔叶混	40.6042	27.7837	20.5274	4.3367	13.6767	8.8422	115.7710
	针阔混	70.2655	39.6299	30.5357	11.2154	57.3252	19.3544	228.3261
	竹林	0.0030	0.0018	0.0013	0.0002	0.0043	0.0012	0.0118
灌木林 Shrubs forest	灌木林	419.0642	213.1136	72.8081	11.9127	327.3442	79.7628	1124.0055
经济林 Economic forest	经济林	102.0351	63.7017	27.9677	9.0521	25.2931	21.3577	249.4074
合计		1034.5637	583.3192	328.4961	76.9082	887.9738	255.6730	3166.9340

3.6 山西省不同龄组森林生态系统服务功能价值

山西省森林生态系统服务功能价值在不同龄组间存在一定的差异,幼龄林为 579.90 亿元/a,中龄林为 583.55 亿元/a,近熟林为 283.19 亿元/a,成过熟林为 346.87 亿元/a。不同龄组面积所占比例为幼龄林 65.89%,中龄林 15.94%,近熟林 8.14%,成过熟林 10.03%。因此,服务功能价值量与不同龄组所占的面积比例有较大的相关性^[26],服务功能价值最大的为中龄林,其次是幼龄林和成过熟林,近熟林最小。

4 结论与讨论

(1)根据《规范》,首次对山西省森林生态系统服务功能进行测算,得出山西省森林生态系统服务功能总价值为 3172.64 亿元/a。在 7 项森林生态系统服务功能中,价值量由大到小的顺序为涵养水源、净化大气环境、保育土壤、固碳释氧、生物多样性保护、林木积累营养物质、森林游憩。涵养水源功能所起的作用最大,这可能是与山西省的地形地貌特征和水源涵养林所占的面积等有关。

(2)森林生态系统服务功能价值在山西省不同市间由大到小的排序依次为吕梁市、忻州市、临汾市、晋中

市、长治市、运城市、晋城市、大同市、太原市、朔州市、阳泉市。分布在山西省西部的吕梁市森林生态系统服务功能总价值量排在第一,而山西省东部的阳泉市最小;而单位面积价值量最大的为晋城市,最小的为朔州市。从总价值量来说,主要是与森林面积和蓄积有关;但从单位面积价值量来看,主要与当地的降水量有关,南部大于北部地区。

(3)对于不同林分类型来说,灌木林提供的生态系统服务功能价值量高于其他林分,其次为油松和栎类,竹林提供的生态系统服务功能价值量最小。这主要是因为山西省灌木林面积最大、竹林面积最小。油松是山西重要的乡土树种,适应性最佳,乔木林中油松提供的生态系统服务功能价值量最大,这与林分类型自身的特性相关,因而,在森林经营管理中,在以乡土树种为基础的情况下,逐步形成多树种混交的林分结构,构建异龄、复层和混交的近自然经营模式,使其发挥最大的生态系统服务功能价值。

(4)对于不同龄组来说,中龄林提供的生态系统服务功能价值量最高,近熟林提供的生态系统功能价值量最小,且森林生态系统服务功能价值量大小主要与其森林面积有较显著的相关性。

(5)《规范》的评估方法是基于森林生态站长期连续观测的实测数据,以保证评估结果的准确性。目前,限于科技水平、计量方法以及监测手段等方面的影响,尚不能全面地对各项森林生态系统功能指标进行计量,评估测算方法仍需进一步改进与完善。比如:1)不同区域环境差异大,在进行大尺度的生态系统服务价值评估时,容易忽视局部具有阈值和非线性特征的生态过程^[28],因而,在今后的评估测算中应考虑生态区位、环境因素等影响;2)利用3S技术对现有评估模型参数进行修正,以实现生态系统的动态评估。

参考文献 (References):

- [1] Fischer J, Lindenmayer D B, Manning A D. Biodiversity, ecosystem function, and resilience: ten guiding principles for commodity production landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(2): 80-86.
- [2] Patterson T M, Coelho D L. Ecosystem services: Foundations, opportunities, and challenges for the forest products sector. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(8): 1637-1646.
- [3] 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.
- [4] 李少宁. 江西省暨大岗山森林生态系统服务功能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [5] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington DC: Island Press, 1997: 1-25.
- [6] 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 the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [7] 和爱军. 浅析日本的森林公益机能经济价值评价. *中南林业调查规划*, 2002, 21(2): 48-54.
- [8] 李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008: 1-36.
- [9] Watson R, Albon S. *The UK National Ecosystem Assessment: Synthesis of the Key Findings*. Oxford: Information Press, 2011: 5-84.
- [10] 蒋延玲, 周广胜. 中国主要森林生态系统公益的评估. *植物生态学报*, 1999, 25(5): 426-432.
- [11] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. *科学通报*, 2000, 45(1): 17-22.
- [12] 谢高地, 张钊铨, 鲁春霞, 郑度, 成升魁. 中国自然草地生态系统服务价值. *自然资源学报*, 2001, 16(1): 47-53.
- [13] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(6): 1101-1110.
- [14] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [15] 《中国森林生态系统服务评估》项目组. 中国森林生态服务功能评估. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [16] “中国森林资源核算研究”项目组. 生态文明制度构建中的中国森林资源核算研究. 北京: 中国林业出版社, 2015.
- [17] 国家林业局. LY/T 1606—2003 森林生态系统定位观测指标体系. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [18] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [19] 山西省水利厅. 2016 年山西省水资源公报. (2018-05-17) [2019-01-26]. http://www.sxwater.gov.cn/zncs/szyc/szygb/201805/t20180517_81393.html.
- [20] 山西省统计局. 山西统计年鉴 2016. (2017-06-19) [2018-06-26]. <http://www.stats-sx.gov.cn/tjsj/tjnj/nj2016/indexch.htm>.
- [21] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995-2004. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 158-161.
- [22] 高甲荣, 肖斌. 桥山林区油松人工林营养元素分配与积累的研究. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 667-671.
- [23] 高甲荣, 张东升, 肖斌, 牛健植. 黄土区油松人工林生态系统营养元素分配格局和积累的研究. *北京林业大学学报*, 2002, 24(1): 26-30.
- [24] 刘胜涛, 高鹏, 刘潘伟, 牛香, 王兵. 泰山森林生态系统服务功能及其价值评估. *生态学报*, 2017, 37(10): 3302-3310.
- [25] 山西省环境保护厅. 2016 年山西省环境状况公报. (2017-08-23) [2018-06-26]. http://www.shanxi.gov.cn/sj/tjtb/201708/t20170823_330415.shtml.
- [26] 牛香, 王兵. 基于分布式测算方法的福建省森林生态系统服务功能评估. *中国水土保持科学*, 2012, 10(2): 36-43.
- [27] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6987-6994.
- [28] 马国霞, 赵学涛, 吴琼, 潘韬. 生态系统生产总值核算概念界定和体系构建. *资源科学*, 2015, 37(9): 1709-1715.