

# 云南森林生态系统服务功能经济价值评价<sup>\*1</sup>

潘华 刘晓艺

(昆明理工大学管理与经济学院, 云南 昆明 650093)

**【摘要】**: 云南作为森林生态大省和长江上游生态安全屏障, 探讨研究其森林生态系统服务功能价值, 对于开展森林生态资产产权交易, 优化调整其林业产业结构, 推动长江上游森林生态建设, 具有十分重要的现实意义。文章结合云南森林生态系统实际, 以 2015 年为基准年对其经济价值进行评价。评价结果表明: 云南森林生态系统服务功能经济价值为 22 873.87 亿元/a; 单位面积价值量 100 608.17 元/(hm<sup>2</sup>·a)。价值构成中, 固碳释氧功能价值最大, 占总价值的 32.32%; 其次是物种保护价值, 占总价值的 24.09%; 而提供林产品价值和景观游憩价值分别仅占总价值的 2.38% 和 0.22%。云南森林生态系统服务功能间接经济价值远大于其直接经济价值的现实表明, 大力发展其森林生态服务产业十分必要。

**【关键词】**: 森林生态系统; 服务功能; 经济价值评价; 云南

**【中图分类号】**: X196 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1671-4407(2018)05-201-06

森林生态系统兼具资源和环境双重属性, 据此可分为两大类: 一是可进入市场交易并能够为人类带来直接经济利益的生态系统产品, 包括食品、医药、生产原料、景观游憩等; 二是难以独立市场化交易、但有间接经济利益的生态系统服务, 如生态系统的气候调节、水土保持、营养物质循环、固碳释氧等功能服务。广义上讲, 森林生态系统服务功能包括这两大类, 狭义上讲仅指后者, 本文所指为广义上的森林生态系统服务功能, 其价值涉及直接经济价值和间接经济价值。当然, 这是一种现实的使用价值, 相较于此, 还存在潜在(选择)价值, 即生态系统提供的服务功能在当前还没有被使用, 但未来却可能被使用并提供经济利益的价值<sup>[1]</sup>。另外, 还存在非使用价值, 即仅与人类的道德观念相关、难以获得经济利益的价值<sup>[1]</sup>。鉴于目前人们对森林生态系统服务功能的非经济价值在理性认知和评价技术方法方面尚处于初级探索阶段, 加之本文对森林生态系统服务功能的价值评价是出于服务森林生态资产产权交易和生态产业发展的目的。因此, 本文仅针对森林生态系统服务功能的经济价值进行评价, 重点是对其间接经济价值的评价。因为虽然其间接经济价值远超其直接经济价值, 但目前并未被纳入国民经济核算体系(SNA), 未来环境与经济综合核算体系(SEEA)的建立更是任重道远。

云南作为森林生态大省(2017年完成的云南省第四次森林资源二类调查汇总成果显示, 云南森林面积为 2 273.56×10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>, 为我国森林面积第三大省)和长江上游重要生态屏障, 管理维护好森林生态系统责任重大。正确认识和评价其森林生态系统服务功能的经济价值是考核履约责任的基础, 也是做好生态补偿的必要保证。

## 1 国内外研究综述

1974年, Holdren & Ehrlich<sup>[2]</sup>提出生态系统服务功能的概念。1997年, Costanza等<sup>[3]</sup>根据 McNeely等<sup>[4]</sup>、Pearce<sup>[5]</sup>等对生态系统服务功能的分类, 在全球尺度上划分出 16 个生态系统类型, 17 项生态系统服务功能, 并计算出全球生态系统服务

<sup>1</sup> **基金项目**: 国家社会科学基金一般项目“吸引社会资本投入生态补偿的市场化机制研究”(14BJY029); 云南省社会科学基金重点项目“云南融入长江经济带发展战略研究”(ZDZZD201406)

**第一作者简介**: 潘华(1958—), 男, 重庆人, 硕士, 教授, 研究方向为项目投融资及资产评估。E-mail: panhua589@126.com

功能的年均经济价值，将生态系统服务功能价值评价推向国际研究的前沿。20 世纪 90 年代以后，国内对生态系统服务功能的价值评价研究也相应进入了活跃时期。欧阳志云等<sup>[6]</sup>运用替代工程法、影子价格法等方法对我国陆地生态系统的间接经济价值做了探讨。谢高地等<sup>[7]</sup>基于 Costanza 等<sup>[3]</sup>的研究成果构建了中国陆地生态系统的单位面积价值当量因子表，并对青藏高原不同生态系统的经济价值进行了评价。欧阳志云、谢高地的研究成果加快了我国生态系统服务功能价值评价的发展进程，对相关理论的完善具有重要的意义。

赵元藩等<sup>[8]</sup>、张治军等<sup>[9]</sup>先后评估了云南森林生态系统服务功能的间接经济价值，评估的单位面积价值量分别为  $6.32 \times 10^4$  元/ $(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  和  $6.77 \times 10^4$  元/ $(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，不足的是缺少对直接经济价值的评价。2017 年完成的云南省第四次森林资源二类调查更新了云南森林资源数据库，为评估云南森林生态系统服务功能的最新经济价值提供了数据支撑。

## 2 评价体系及数据来源

### 2.1 评价体系

以国家林业局 2008 年发布的 LY/T1721 执行标准为参照，结合云南森林生态系统的自然状况，构建其服务功能的经济价值评价体系，如表 1 所示。

表 1 云南森林生态系统服务功能经济价值评价指标和方法

价值类型	价值项目	评价指标	评价方法
直接经济价值	提供林产品价值	林木产品；林副产品	市场价值法
	景观游憩价值	森林旅游年度直接收入	市场价值法
间接经济价值	涵养水源价值	蓄水价值	替代工程法
		净化水质价值	恢复费用法
	保育土壤价值	固土价值	机会成本法、替代工程法
		保肥价值	影子价格法
	固碳释氧价值	固碳价值	影子价格法—碳税率法
		释氧价值	影子价格法—工业制氧法
	净化大气价值	吸收大气污染物质价值；阻滞降尘价值	恢复费用法
	养分积累价值	氮、磷、钾元素积累价值	影子价格法
物种保护价值	生物物种资源保护价值	成果参照法	

## 2.2 数据来源

(1) 2017 年完成的云南省第四次森林资源二类调查汇总成果。

云南全省 16 个州(市)、129 个县(市、区)的林地面积为  $2\,607.11 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。其中,经济林木类资源面积为  $441 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,竹林面积为  $79 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ;林木绿化率为 67.82%;活立木总蓄积量为  $19.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。森林面积为  $2\,273.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ;森林覆盖率为 59.30%;森林蓄积量为  $18.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。林分单位面积平均蓄积量为  $94.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。

与 2003—2009 年完成的第三次调查数据相比,全省森林面积增加  $117 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,森林覆盖率从 56.24% 提高到 59.30%;林木绿化率从 64.50% 提高到 67.82%;人工林面积由  $438 \times 10^4 \text{ hm}^2$  增加到  $526 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,增长了 20.1%,人工林资源显著增加;活立木总蓄积量由  $16.12 \times 10^8 \text{ m}^3$  增加到  $19.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,增长了 18.7%;森林蓄积量由  $16.02 \times 10^8 \text{ m}^3$  增加到  $18.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,增长了 18.3%;林分单位面积平均蓄积量由  $84.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  增加到  $94.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ,增长了 12.2%,森林质量显著提高。

(2) 国家相关部门发布的社会公共数据(表 2)。

表 2 社会公共数据

名称	数据	名称	数据
水库建设单位成本/(元/t)	6.11	磷酸二铵含氮量/%	14.00
自来水净化费用/(元/t)	1.25	磷酸二铵含磷量/%	15.01
有机质价格/(元/t)	320.00	氯化钾含钾量/%	50.00
固碳价格/(元/t)	1 200.00	二氧化硫治理费/(元/kg)	1.20
氧气价格/(元/t)	1 000.00	氟化物治理费/(元/kg)	0.69
磷酸二铵价格/(元/t)	2 400.00	氮氧化物治理费/(元/kg)	0.63
氯化钾价格/(元/t)	2 200.00	降尘清理费/(元/kg)	0.15

(3) 中国气象局发布的相关气象数据。

(4) 科研机构公开发表的相关文献数据。

## 3 评价方法与结果

### 3.1 直接经济价值

生态系统服务功能的直接经济价值指可进入市场交易并能够为人类带来直接经济利益的生态系统产品的价值,包括生产原料、食品、医药、景观游憩等。直接经济价值能够提供直接的经济利益流入,可用生态系统产品的市场价格来估计。云南省林业相关产业发展已逐步覆盖第一、第二、第三产业,将各相关产业按照其所受益的森林生态系统服务功能价值项目进行分类,云南森林生态系统服务功能的直接经济价值主要体现在提供林产品价值和景观游憩价值两个方面。

#### 3.1.1 提供林产品价值

森林生态系统能够提供可以直接为人类使用的林产品，包括林木产品、林副产品等。作为森林资源生产最直接的林产品，林木产品、林副产品两项指标的产值之和能够较全面地反映出森林生态系统提供林产品的价值。

(1) 提供林木产品价值采用市场价值法进行评价，公式为：

$$U_{\text{林木}} = C_{\text{林木}} \times Y_1 \quad (1)$$

式中： $U_{\text{林木}}$ 为研究区森林年林木产品价值（元）； $C_{\text{林木}}$ 为林木产品的均价（元/t）； $Y_1$ 为研究区森林生态系统林木产品的年采伐量（t）。

(2) 提供林副产品价值采用市场价值法进行评价，公式为：

$$U_{\text{林副}} = C_{\text{林副}} \times Y_2 \quad (2)$$

式中： $U_{\text{林副}}$ 为研究区森林年林副产品价值（元）； $C_{\text{林副}}$ 为林副产品的均价（元/t）； $Y_2$ 为研究区森林生态系统林副产品的年产量（t）。

根据云南省林业厅的统计资料，截至 2015 年年底，全省森林年平均采伐量达  $3\,400 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，木材加工年产值约 200 亿元；林业造纸年产值 9.09 亿元；木本油料年产量  $90 \times 10^4 \text{ t}$ ，年产值 290 亿元；经营观赏性苗木基地面积  $450 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，年平均实现产值 45.69 亿元<sup>[10]</sup>。全省森林生态系统平均每年提供林产品价值合计 544.78 亿元。

### 3.1.2 景观游憩价值

以森林、野生动植物等特色资源为依托，以自然保护区、森林公园、国有林场等为载体，森林生态系统能够提供可以直接为人类使用的生态旅游产品，包括森林生态观光、森林休闲度假、森林探险等。提供生态旅游产品价值即景观游憩价值属于直接经济价值，可采用市场价值法进行评价。选择云南省内创造的森林旅游年度直接收入（如门票收入）反映其价值。

根据云南省林业厅公开的统计数据，2015 年全省依托森林公园、自然保护区等森林生态类旅游景区开展的森林旅游实现直接收入 50.2 亿元<sup>[10]</sup>。云南森林生态系统的年度景观游憩价值评价结果为 50.2 亿元。

## 3.2 间接经济价值

生态系统服务功能的间接经济价值是指难以独立市场化交易，但有间接经济利益流入的生态系统服务的价值。间接经济价值不能提供直接的经济利益流入，其价值评价方法需要根据各功能的表现特征来确定。云南森林生态系统服务功能的间接经济价值主要体现为涵养水源、保育土壤、固碳释氧、净化大气、养分积累和物种保护六类。

### 3.2.1 涵养水源价值

森林能够利用其四大作用层截留和吸收大部分降水，影响降水分布，蓄积水源。同时，林地土壤在对降水的渗透吸附过程中，能够降低水体中的污染物含量，净化水质<sup>[11]</sup>。本研究选择蓄水和净化水质两项指标反映云南森林生态系统的涵养水源价值。

森林涵养水源物质量:

$$Q=A \times J \times R \quad (3)$$

$$J=J_o \times K \quad (4)$$

$$R=R_o-R_g \quad (5)$$

其中:  $Q$  为与裸地相比, 研究区森林生态系统蓄积降水的年增加量 ( $\text{m}^3$ );  $A$  为研究区森林面积 ( $\text{hm}^2$ );  $J$  为研究区年平均产流降雨量 ( $\text{mm}$ );  $J_o$  为研究区年平均降水总量 ( $\text{mm}$ );  $K$  为研究区产流降雨量占降水总量比 (%);  $R$  为与裸地相比, 林地减少径流的效益系数;  $R_o$  为产流降雨条件下裸地降雨径流率 (%);  $R_g$  为产流降雨条件下林地降雨径流率 (%) [1]。

云南省年均蒸发量为 1 237.3 mm, 年均降水量为 1 086 mm。区域降水量小于蒸发量条件下, 森林植被对降雨径流的影响比较显著 [12]。根据已有的实测和研究成果, 林地降雨径流率  $R_g$  与区域森林覆盖率  $P_g$  呈显著负相关关系, 即为:  $R_g=-aP_g+b$  ( $a > 0$ )。其中,  $a$  为相关系数,  $b$  为未知常数, 相关系数在 0.463 2 ~ 0.63 之间, 本文取  $a=0.6$  [13-14]。则有:

$$\begin{aligned} Q &= A \times J_o \times K \times (R_o - R_g) \\ &= A \times J_o \times K \times [-0.6 \times 0 + b - (-0.6 \times P_g + b)] \\ &= 0.6 \times A \times J_o \times K \times P_g \end{aligned} \quad (6)$$

参数选取: 云南省森林面积  $A$  取值为  $2\,273.56 \times 10^4 \text{hm}^2$ ; 云南省 1961—2015 年全年降水量分布在 850 ~ 1 250 mm 之间, 全省年均降水量  $J_o$  取值为 1 086 mm; 根据降雨特征,  $K$  值取 0.6 [1]; 云南省森林覆盖率  $P_g$  为 59.30%。则有:  $Q=0.6 \times 2\,273.56 \times 10^4 \text{hm}^2 \times 1 \times 10^3 \text{m}^2/\text{hm}^2 \times 1\,086 \text{mm} \times 1 \times 10^{-3} \text{m/mm} \times 0.6 \times 59.30\% = 527.1 \times 10^8 \text{m}^3$

(1) 蓄水价值。由于森林蓄水效应类似于水库的蓄水功能, 该功能的生态经济价值可采用替代工程法进行评价, 即以水库的建筑成本替代森林生态系统的蓄水价值。公式为:

$$U_{\text{蓄水}} = C_{\text{库}} \times Q \quad (7)$$

式中:  $U_{\text{蓄水}}$  为研究区森林年蓄水价值 (元);  $C_{\text{库}}$  为水库建设单位成本 (元/t);  $Q$  为与裸地相比, 研究区森林生态系统蓄积降水的年增加量 ( $\text{m}^3$ )。

(2) 净化水质价值。森林生态系统年净化水质价值可以采用恢复费用法计算, 即结合云南省自来水的净化成本, 通过测算森林土壤稳定渗入降水量来评价。公式如下:

$$U_{\text{水质}} = K_{\text{水}} \times Q \quad (8)$$

式中:  $U_{\text{水质}}$  为研究区森林年净化水质价值 (元);  $K_{\text{水}}$  为云南省自来水净化费用 (元/t);  $Q$  为与裸地相比, 研究区森林生态系统蓄积降水的年增加量 ( $\text{m}^3$ )。

根据上述公式，云南省森林生态系统年蓄水价值为 3 220.58 亿元，年净化水质价值为 658.88 亿元，涵养水源的价值合计为 3 879.46 亿元。

### 3.2.2 保育土壤价值

森林的林冠层、林下植被层和枯枝落叶层能够有效减弱降水对林地土壤层的直接冲刷力，减少地表径流。同时由于森林植物根系的固结土壤作用，地上枯枝落叶层拦截过滤泥沙颗粒，可以有效地降低土地废弃损失、减轻泥沙淤积、减少养分流失[15]。本研究选择固土价值和保肥价值两项指标来反映云南省森林生态系统的保育土壤价值。

森林保育土壤物质量：

$$G_{\text{固}} = A \times (X_2 - X_1) \quad (9)$$

式中： $G_{\text{固}}$ 为研究区森林年固土量（t）； $A$ 为研究区森林面积（ $\text{hm}^2$ ）； $X_1$ 为研究区林地现实土壤年侵蚀模数（ $\text{t}/\text{hm}^2$ ）； $X_2$ 为研究区林地潜在土壤年侵蚀模数（ $\text{t}/\text{hm}^2$ ）<sup>[1]</sup>。

通用土壤侵蚀模数（包括潜在土壤侵蚀模数和现实土壤侵蚀模数）采用 USLE 模型进行计算，即将降雨侵蚀因子、土壤可蚀性因子、地形因子、地表植被覆盖因子和水土保持措施因子相乘。本研究以龙中华<sup>[16]</sup>的研究论文作为基础数据支持， $X_1$ 取 19.55  $\text{t}/\text{hm}^2$ ； $X_2$ 取 65.16  $\text{t}/\text{hm}^2$ 。

（1）固土价值。森林的固土价值包括减少土地废弃价值和减轻泥沙淤积价值，分别采用机会成本法和替代工程法进行评价。公式为：

$$U_{\text{固}} = U_{\text{固}i} + U_{\text{固}j} \quad (10)$$

$$U_{\text{固}i} = P \times G_{\text{固}} / (\rho \times H) \quad (11)$$

$$U_{\text{固}j} = C_{\text{库}} \times (G_{\text{固}} \times K) / \rho \quad (12)$$

式中： $U_{\text{固}}$ 为研究区森林年固土价值（元）； $U_{\text{固}i}$ 为减少土地废弃价值（元）； $U_{\text{固}j}$ 为减轻泥沙淤积价值（元）； $P$ 为林业年均收益（元/ $\text{hm}^2$ ）； $G_{\text{固}}$ 为研究区森林年固土量（t）； $\rho$ 为泥沙的平均容重（ $\text{t}/\text{m}^3$ ）； $H$ 为研究区森林表土土壤平均厚度（m）； $C_{\text{库}}$ 为水库建设单位库容投资（元/t）； $K$ 为流失的泥沙淤积于水库、江河、湖泊中的比例（%）。

参数选取：林业年均收益  $P$  取全国平均值 263.58 元/ $\text{hm}^2$ （1990 年不变价）<sup>[17]</sup>； $\rho$  取云南省土壤的平均容重 1.35  $\text{t}/\text{m}^3$ <sup>[8-9]</sup>； $H$  取我国耕作土壤的平均厚度 0.6 m<sup>[18]</sup>；根据中国主要流域的泥沙运动规律，土壤侵蚀流失的泥沙有 24% 淤积于水库、江河、湖泊中，即  $K=24\%$ <sup>[1]</sup>。

（2）保肥价值。森林生态系统的保肥价值即减少养分流失的价值，可以采用影子价格法进行评估。公式为：

$$U_{\text{肥}} = G_{\text{固}} \times \left( N_1 \times \frac{C_1}{R_1} + P_1 \times \frac{C_1}{R_2} + K_1 \times \frac{C_2}{R_3} \right) \quad (13)$$

式中： $U_{肥}$ 为研究区森林年保肥价值（元）； $G_{固}$ 为研究区森林年固土量（t）； $N_1$ 、 $P_1$ 、 $K_1$ 分别为研究区土壤中氮、磷、钾元素的平均含量（%）； $R_1$ 为磷酸二铵含氮量（%）； $R_2$ 为磷酸二铵含磷量（%）； $R_3$ 为氯化钾含钾量（%）； $C_1$ 、 $C_2$ 分别为磷酸二铵、氯化钾的市场价格（元/t）<sup>[1]</sup>。

根据黄翠先等<sup>[19]</sup>对云南省土壤养分的调查研究，云南省森林土壤中氮、磷、钾元素的平均质量分数分别取0.123%、0.108%、1.83%。

根据上述公式，云南省森林生态系统年固土价值为11.6亿元，年保肥价值为1232.73亿元，保育土壤的价值合计为1244.33亿元。

### 3.2.3 固碳释氧价值

森林生态系统能够利用植物的光合作用，通过森林植被吸收空气中的二氧化碳、释放氧气，维持大气碳氧平衡。针对云南森林生态系统固碳释氧价值的评估，本研究就固碳价值和释氧价值分别进行论述。

由 光 合 作 用 总 反 应 式  
 $CO_2(264g) + H_2O(108g) \xrightarrow{\text{(光能, 叶绿体)}} \text{葡萄糖}(180g) + O_2(192g) \rightarrow \text{多糖}(162g)$  可知，森林植物每积累1g干物质能够固定1.63g的二氧化碳，释放1.19g的氧气，二氧化碳中碳元素的比例为27.27%。

(1) 固碳价值。森林生态系统的固碳价值采用影子价格法——碳税率法进行评估，不考虑凋落物层的呼吸作用及土壤释放二氧化碳的影响，公式为：

$$U_{碳} = C_{碳} \times B_{年} \times 0.4445 \quad (14)$$

式中： $U_{碳}$ 为研究区森林年固碳价值（元）； $C_{碳}$ 为碳排放价格（元/t）； $B_{年}$ 为研究区森林的年均净初级生产力（NPP）；系数0.4445为森林植物积累干物质同时固定碳元素的比例。

何云玲和张一平<sup>[20]</sup>基于实际蒸散模型，通过与Chikugo模型相类似的推导过程，构建了符合云南省植被生长特征的植被净初级生产力模型，并分析了未来年度气候变化对生产力的影响。根据其研究结论得到云南省2015年度的植被净初级生产力（NPP）为 $4.29 \times 10^8$  t干物质。

(2) 释氧价值。森林生态系统的释氧价值采用影子价格法——工业制氧法进行计算，即以工业制氧的成本估算森林生态系统的释氧价值。公式为：

$$U_{氧} = C_{氧} \times B_{年} \times 1.19 \quad (15)$$

式中： $U_{氧}$ 为研究区森林年释氧价值（元）； $C_{氧}$ 为氧气价格（元/t）； $B_{年}$ 为研究区森林的年均净初级生产力（NPP）；系数1.19为森林植物积累干物质同时固定氧元素的比例。

根据上述公式，云南省森林生态系统年固碳价值为2288.29亿元，年释氧价值为5105.1亿元，固碳释氧的价值合计为7

393.39 亿元。

### 3.2.4 净化大气价值

森林生态系统因其自身性态能够对大气污染物质进行吸收和分解，同时释放负离子，降低噪声，从而净化大气环境。本研究仅选取吸收大气污染物质价值和阻滞降尘价值两项指标来反映云南省森林生态系统的净化大气价值。

(1) 吸收大气污染物质价值。森林吸收大气污染物质价值包括吸收二氧化硫价值、吸收氟化物价值和吸收氮氧化物价值。采用恢复费用法评估，即以云南省同期污染治理过程中消减单位质量二氧化硫、氟化物和氮氧化物的成本费用进行评价。公式为：

$$U_{\text{大气污染物质}} = U_{\text{硫}} + U_{\text{氟}} + U_{\text{氮氧}} \quad (16)$$

$$U_{\text{硫}} = K_{\text{硫}} \times Q_{\text{硫}} \times A \quad (17)$$

$$U_{\text{氟}} = K_{\text{氟}} \times Q_{\text{氟}} \times A \quad (18)$$

$$U_{\text{氮氧}} = K_{\text{氮氧}} \times Q_{\text{氮氧}} \times A \quad (19)$$

式中： $U_{\text{大气污染物质}}$ 为研究区森林年吸收大气污染物质价值（元）； $U_{\text{硫}}$ 、 $U_{\text{氟}}$ 、 $U_{\text{氮氧}}$ 分别为研究区森林年吸收二氧化硫、氟化物和氮氧化物价值（元）； $K_{\text{硫}}$ 、 $K_{\text{氟}}$ 、 $K_{\text{氮氧}}$ 分别为二氧化硫、氟化物和氮氧化物的消减成本（元/kg）； $Q_{\text{硫}}$ 、 $Q_{\text{氟}}$ 、 $Q_{\text{氮氧}}$ 分别为研究区森林对二氧化硫、氟化物和氮氧化物的年吸收量（kg/hm<sup>2</sup>）； $A$ 为研究区森林面积（hm<sup>2</sup>）。

(2) 阻滞降尘价值。森林的阻滞降尘价值采用恢复费用法进行评估，即以降尘的消减成本来估算森林生态系统滞尘功能的价值。公式为：

$$U_{\text{滞尘}} = K_{\text{滞尘}} \times Q_{\text{滞尘}} \times A \quad (20)$$

式中： $U_{\text{滞尘}}$ 为研究区森林年阻滞降尘价值（元）； $K_{\text{滞尘}}$ 为降尘清理费用（元/kg）； $Q_{\text{滞尘}}$ 为研究区森林的年滞尘量（kg/hm<sup>2</sup>）； $A$ 为研究区森林面积（hm<sup>2</sup>）。

据已有测定<sup>[17]</sup>，针叶林年平均吸收二氧化硫、氟化物、氮氧化物和滞尘能力分别为：214.93、0.5、6.0、33 200 kg/hm<sup>2</sup>；阔叶林年平均吸收二氧化硫、氟化物、氮氧化物和滞尘能力分别为：88.65、4.65、6.0、10 110kg/hm<sup>2</sup>；经济林吸收氟化物的能力为1.68 kg/hm<sup>2</sup>。云南省林业厅 2015 年公布的数据显示，云南省森林面积中乔木林占比 79.77%，经济林占比 11.08%，而乔木林中针叶林、针阔混交林、阔叶林占比又分别为：38%、10% 和 52%。根据云南森林植被分布比重计算得到云南森林植被年均吸收二氧化硫、氟化物、氮氧化物和滞尘能力分别为：128.89、2.31、6.0、18 026 kg/hm<sup>2</sup>。

根据上述公式，云南森林生态系统年吸收大气污染物质价值为 36.38 亿元，年阻滞降尘价值为 614.75 亿元，净化大气的价值合计为 651.13 亿元。

### 3.2.5 养分积累价值

森林植被的生长需从周围环境中持续汲取各类营养元素（以氮、磷、钾元素为主）并储存于自身体内。其对养分的积累不仅满足了自身的生长需求，同时也降低了下游水体的富营养化程度。选取森林植被对氮、磷、钾元素的积累来反映森林生态系统的养分积累价值，并采用影子价格法进行评估，公式为：

$$U_{\text{养分}} = B_{\text{年}} \times (N_2 \times \frac{C_1}{R_1} + P_2 \times \frac{C_1}{R_2} + K_2 \times \frac{C_2}{R_3}) \quad (21)$$

式中： $U_{\text{养分}}$ 为研究区森林年养分积累价值（元）； $B_{\text{年}}$ 为研究区森林年均净初级生产力（NPP）； $N_2$ 、 $P_2$ 、 $K_2$ 分别为研究区林木中氮、磷、钾元素的平均含量（%）； $R_1$ 为磷酸二铵氮元素含量（%）； $R_2$ 为磷酸二铵磷元素含量（%）； $R_3$ 为氯化钾钾元素含量（%）； $C_1$ 、 $C_2$ 分别为磷酸二铵和氯化钾的市场价格（元/t）<sup>[8]</sup>。

林木中的氮、磷、钾元素含量分别为 2.04%、1.4%、6.04%<sup>[19]</sup>。

根据上述公式，云南森林生态系统年养分积累价值为 3 600.7 亿元。

### 3.2.6 物种保护价值

森林生态系统作为自然界生物物种的主要栖息地，是宝贵种质生存与繁衍的重要场所。云南是全国植物和动物种类最多的省份，被誉为“动植物王国”，其在保护生物物种资源、维持生物物种多样性方面存在着巨大价值。本研究采用成果参照法对该类价值进行评估，即参照专家研究得出的云南省森林单位面积物种保护价值来进行评估。公式为：

$$U_{\text{生物}} = S_{\text{生}} \times A \quad (22)$$

式中： $U_{\text{生物}}$ 为研究区森林年物种保护价值（元）； $S_{\text{生}}$ 为研究区单位面积森林年物种保护价值（元/hm<sup>2</sup>）； $A$ 为研究区森林面积（hm<sup>2</sup>）。

本研究参考专家研究得出的云南森林物种保护价值 24 234.6 元/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[19]</sup>。

根据上式计算得到云南森林生态系统年物种保护价值为 5 509.88 亿元。

### 3.3 云南森林生态系统服务价值功能总价值及组成特征

根据以上评价结果，云南森林生态系统服务功能的总价值为 22 873.87 亿元/a（表 3）；单位面积森林生态系统服务功能的价值量为 100 608.17 元/(hm<sup>2</sup>·a)。

表 3 云南森林生态系统服务功能经济价值评价结果

价值项目	评价指标	评价结果/亿元	比例
提供林产品价值	林木产品；林副产品	544.78	2.38%

景观游憩价值	森林旅游年度直接收入	50.2	0.22%
涵养水源价值	蓄水价值；净化水质价值	3 879.46	16.96%
保育土壤价值	固土价值；保肥价值	1 244.33	5.44%
固碳释氧价值	固碳价值；释氧价值	7 393.39	32.32%
净化大气价值	吸收大气污染物质价值； 阻滞降尘价值	651.13	2.85%
养分积累价值	氮、磷、钾元素积累价值	3 600.70	15.74%
物种保护价值	生物物种资源保护价值	5 509.88	24.09%
合计		22 873.87	100.00%

从具体评价指标来看（图1），云南森林生态系统的价值构成中，固碳释氧的功能价值最大，其次是物种保护价值，而景观游憩价值所占比重不足1%。固碳释氧、物种保护、涵养水源和养分积累四项价值总和占云南省森林生态系统总价值的89.11%。对各项评价指标按其所贡献价值大小排列，依次为：固碳释氧价值>物种保护价值>涵养水源价值>养分积累价值>保育土壤价值>净化大气价值>提供林产品价值>景观游憩价值。

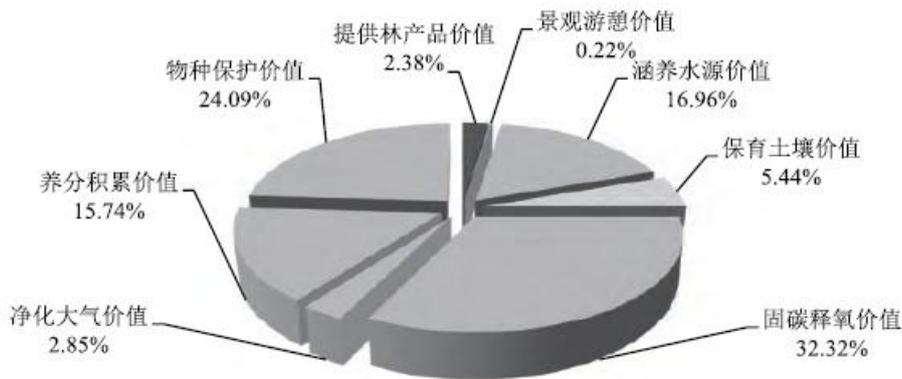


图1 云南省森林生态系统各服务功能价值量分布

#### 4 讨论

云南森林生态系统服务功能直接经济价值为594.98亿元/a，间接经济价值为22 278.89亿元/a。间接经济价值是直接经济价值的37.4倍，说明云南森林生态系统的生态价值很高，发展森林生态服务产业的空间巨大。但在云南森林生态系统服务功能价值构成中，作为以非消耗方式利用林业资源的景观游憩（第三产业）价值所占比重却不足1%，林业产业发展结构不合理<sup>[21]</sup>。此外，云南森林年平均采伐量达3 400×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>，但以木材加工和林业造纸为主的第二产业产值却仅有200多亿元，林产品附加值低也一定程度上拉低了直接经济价值比重。因此，云南省在推动林业产业向“精、深、优”方向发展，延伸产业链，提升林

产品附加值的同时，迫切需要进行林业产业结构优化调整，合理利用其丰富的森林旅游资源，大力发展森林生态服务产业。

由于研究数据和研究方法所限，本文未针对不同林种分类和地理分布进行差异化评估分析，也未反映森林生态系统服务功能在人类活动影响下土地利用变化的演变过程。未来需要更全面地反映云南森林生态系统服务功能价值，以更好地为云南森林资源的可持续和有效利用提供科学依据<sup>[22]</sup>。因此，构建合理的评估模型，揭示森林生态系统服务功能的时空差异，模拟预测其价值变化，应是下一阶段研究的主要内容。

## 5 结论

本文依据云南森林生态系统的自然状况，通过构建其服务功能价值评价指标和方法体系，对包括提供林产品、景观游憩、涵养水源等在内的八项服务功能进行经济价值评价。云南省森林面积  $2\,273.56 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ，森林生态系统服务功能总价值 22 873.87 亿元/a。云南森林生态系统的价值构成中，固碳释氧功能的价值最大，占总价值的 32.32%；其次是物种保护价值，占总价值的 24.09%；涵养水源价值占比 16.69%；养分积累价值占比 15.74%；保育土壤价值占比 5.44%；净化大气价值占比 2.85%；提供林产品价值和景观游憩价值则分别仅占总价值的 2.38% 和 0.22%。云南森林生态系统服务功能间接经济价值远大于直接经济价值的现实表明，云南省应当发展不依靠采伐天然林资源的森林旅游业作为新的替代林产业，拓展新产业、新业态，在争当生态文明建设排头兵的目标中创新发展、特色发展。

云南森林生态系统服务功能单位面积经济价值为  $10.06 \times 10^4 \text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ，较赵元藩等<sup>[8]</sup>、张治军等<sup>[9]</sup>估算的单位面积经济价值  $6.32 \times 10^4 \text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  和  $6.77 \times 10^4 \text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  高。一方面是因为后者的评价未计入直接经济价值，仅考虑其间接经济价值；另一方面是由于近年来云南加大了对森林资产的保护管理和生态恢复力度，有效提高了云南省的森林覆盖率和森林蓄积量。

### 参考文献:

[1]李文华. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.

[2]Holdren J P, Ehrlich P R. Human population and the global environment: Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force [J]. American Scientist, 1974, 62(3): 282-292.

[3]Costanza R, d' Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[4]McNeely J A, Miller K R, Reid W V, et al. Conserving the world's biological diversity [M]. Gland, Switzerland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 1990.

[5]Pearce D W. Blueprint 4: Capturing global environmental value[M]. London: Earthscan, 1995: 103-108.

[6]欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999 (5): 635-640.

[7]谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003 (2): 189-196.

[8]赵元藩, 温庆忠, 艾建林. 云南森林生态系统服务功能价值评估[J]. 林业科学研究, 2010 (2): 184-190.

- 
- [9]张治军,唐芳林,周红斌,等. 云南省森林生态系统服务功能及其价值评估[J]. 林业建设, 2011(2): 3-9.
- [10]云南林业的“十二五”[J]. 云南林业, 2016(3): 19-23.
- [11]胡世辉. 工布自然保护区森林生态系统服务功能及可持续发展研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [12]麻泽龙, 宫渊波, 胡庭兴, 等. 森林覆盖率与水土保持关系研究进展[J]. 四川农业大学学报, 2003(1): 54-58.
- [13]张庆费, 周晓峰. 呼兰河和汤旺河流域森林涵养水源和减沙效益的评价[J]. 生态经济, 1994(6): 21-24.
- [14]刘军会, 高吉喜. 北方农牧交错带生态系统服务价值测算及变化[J]. 山地学报, 2008(2): 145-153.
- [15]赖仕璋, 吴锡玄, 杨玉盛, 等. 论森林与土壤保持[J]. 福建水土保持, 2001(2): 11-14.
- [16]龙中华. 基于遥感的水土保持价值估算——以云南省为例[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [17]欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究[J]. 生态学报, 1999(5): 607-613.
- [18]刘青, 胡振鹏. 东江源区生态系统服务功能经济价值研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007(4): 532-536.
- [19]黄翠先, 席武俊, 白丽青, 等. 楚雄市森林生态系统服务功能价值评估[J]. 科技视界, 2014(8): 40-44.
- [20]何云玲, 张一平. 云南省自然植被净初级生产力的时空分布特征[J]. 山地学报, 2006(2): 193-201.
- [21]尚旭东. 云南林业产业发展研究[D]. 昆明: 西南林业大学, 2010.
- [22]隋磊, 赵智杰, 金羽, 等. 海南岛自然生态系统服务价值评估[J]. 生态经济, 2012(1): 20-27.