

富源县森林生态系统服务功能价值评估

张环宇

(云南省富源县林业和草原局, 云南 富源 655500)

摘要:根据 2020 年森林资源监测本底资料对云南省曲靖市富源县森林生态系统的支撑服务、调节服务、供给服务、文化服务 4 个服务类别的 8 个功能(保育土壤、林木养分固持、涵养水源、固碳释氧、净化大气环境、生物多样性保护、林木产品供给、森林康养)计 16 个指标(固土、保肥、氮固持、磷固持、钾固持、调节水量、净化水质、固碳、释氧、提供负离子、吸收气体污染物、滞尘效应、生物多样性保护、木材产品、非木材产品、森林康养)的价值,依据《森林生态系统服务功能评估规范》(GB/T38582—2020),进行价值评估。结果表明 2020 年富源县森林生态系统服务功能总价值约为 138.958 亿元·a⁻¹,单位面积价值约为 11.42 万元·hm⁻²·a⁻¹;各项森林生态系统服务功能价值表现为保育土壤>涵养水源>固碳释氧>生物多样性保护>森林康养>净化大气环境>林木产品供给>林木养分固持。

关键词:森林生态系统;服务功能;评价体系;价值评估;富源县

中图分类号: S718.55 文献标识码: A 文章编号: 1001-3776(2024)01-0054-011

Evaluation on Values of Forest Ecosystem Services in Fuyuan County

ZHANG Huanyu

(Fuyuan Forestry and Grassland Bureau of Yunnan, Fuyuan 655500, China)

Abstract: Based on monitoring data of forest resources of Fuyuan county, Yunnan province in 2020, according to GB/T 38582-2020, evaluation was made on values of the forest ecosystem services by 16 indicators like soil fixation, fertilizer conservation and nitrogen retention, etc. of 8 functional categories (soil conservation, forest nutrient retention, water conservation, carbon sequestration and oxygen release, air purification, biodiversity protection, forest product supply, forest healthcare), of 4 services categories (supporting services, regulating services, provisioning services and cultural services). The results showed that the total value of forest ecosystem services in Fuyuan county in 2020 was about 13.895 8 billion Yuan RMB/year, and unit area value was about 114 200 Yuan RMB/year. The value order of each forest ecosystem functions was soil conservation > water conservation > carbon fixation and oxygen release > biodiversity protection > forest health care > air purification > forest product supply > tree nutrient retention.

Key words: forest ecosystem; services; evaluation system; value assessment; Fuyuan county

森林生态系统服务是指自然生态系统及其物种所提供的能满足和维持人类生活所需要的条件和过程。森林生态系统服务功能主要表现形式很多,如保育土壤、增强肥力、养分固持、涵养水源、固碳释氧、净化大气、吸尘消声、物种资源保育、提供林副产品、森林康养等。王兵等于 2008 年依据《森林生态系统服务功能评估规范》(LY/T1721—2008),基于我国第 7 次森林资源清查数据及中国森林生态系统定位研究网络(CFERN)长

期定位观测数据,对我国森林生态系统生态服务功能进行了评价,得出 2009 年我国森林生态系统 6 项服务功能的总价值为 100 147.61 亿元人民币,为正确评价森林在生态环境建设中的作用、绿色 GDP 核算及生态补偿机制建立提供依据^[1]。张治军等于 2011 年结合第 6 次(1999—2003 年)和第 7 次(2004—2008 年)云南省森林资源清查资料及社会公共数据估算了云南省“十五”和“十一五”期间森林生态系统服务功能的总价值,表明生物多样性保护、涵养水源、固碳释氧、保育土壤、净化大气环境、林木营养物质积累、森林游憩与科研文化服务功能“十五”期间平均每年总价值为 9 851.66 亿元,“十一五”期间为 11 520.11 亿元^[2]。截至 2023 年 9 月,尚无机构和人员对云南省富源县森林生态系统服务功能的价值进行过评估,客观、科学地评价区域森林生态系统服务功能及其价值对于处于珠江上游的富源县十分必要,对于提高人们的环境意识、健全生态补偿机制和提高补偿标准、尽快将自然资源和环境纳入国民经济核算体系及正确处理社会经济发展与生态环境保护之间的关系具有重要的现实意义。

1 富源县简介

1.1 自然地理概况

富源县位于云南省东部,隶属曲靖市,辖 9 个镇、2 个街道和 1 个民族乡,127 个村民委员会、32 个社区居民委员会。地理坐标介于 25°02′38″~25°58′22″ N, 103°58′37″~104°49′48″ E。全县土地总面积为 325 100 hm²。富源县为云南的东大门,是内地进入云南的交通要道,区位优势较为显著。境内地势北高南低,由西北向东南略有倾斜,山脉基本属南北走向,乌蒙山支脉自北向南纵贯全境,最高海拔为 2 748.9 m,最低海拔为 1 110 m,相对高差 1 638.9 m。富源县地处滇东岩溶高原东部边缘部分,河流纵向切割、山川南北展布、地形破碎、山高谷深、坡陡流急、岩溶发达、河谷阶地狭窄零散,形成了中山、丘陵、河谷槽坝相间分布的中山峡谷地貌,全县山地面积占国土总面积的 90%以上,为典型的山区县。富源县属南温带山地季风半湿润气候,冬无严寒,夏无酷暑,雨热同季,干湿分明,年平均气温为 14.1 ℃,最热月均气温为 19.4 ℃,最冷月均气温为 5.2 ℃,年日照时数为 1 914 h,年降水量为 1 427 mm。河流均属珠江水系,主要河流有块泽河、黄泥河、丕德河、嘉河等^[3]。

1.2 森林资源概况

富源县的森林土壤主要有棕壤、黄棕壤、黄壤、红壤、黄红壤、酸性紫色土、黑色石灰土和红色石灰土八个土壤亚类,其中酸性紫色土、黑色石灰土和红色石灰土为非地带性土壤^[3]。富源县森林植被按《云南植被》分类系统分为 6 个植被型、6 个植被亚型、20 个群系。植被类型有半湿润常绿阔叶林、暖温性针叶林、落叶阔叶林、暖温性稀树灌木草丛、暖性灌丛、人工植被。因原生植被破坏较大,目前以人工林和次生林植被为主。

据富源县 2020 年森林资源监测本底资料,富源县林地总面积为 169 829.7911 hm²,其中森林面积为 153 448.977 5 hm²,森林覆盖率为 47.20%。活立木总蓄积量为 6 232 929 m³,其中有林地活立木总蓄积量为 6 029 935 m³,占活立木总蓄积量的 96.74%;其他林木(含疏林地林木、散生木、四旁树)202 994 m³,占 3.26%。全县森林面积包括有林地 121 710.754 1 hm²(含乔木林 121 511.756 8 hm²和竹林 198.997 3 hm²)和国家特别规定灌木林地 31 738.223 4 hm²。除寒温带树种红豆杉 *Taxus wallichiana* var. *chinensis* 林面积有 24.94 hm²之外,其余的有林地面积为 121 685.814 1 hm²;乔木林地中除 6 793.015 5 hm² 乔木经济林和 24.94 hm² 红豆杉之外,全县林分面积 114 693.801 3 hm²,其中针叶林面积 79 455.523 6 hm²、阔叶林面积 35 238.277 7 hm²;林分平均高在 9.56~12.33 m,竹林平均高为 6.5 m^[4](表 1)。

表 1 富源县各森林类型面积、平均高
Tab. 1 Area and average height of different forest types in Fuyuan county

森林类型	合计	温带、亚热带落叶阔叶林	亚热带常绿阔叶林	亚热带、热带常绿针叶林	亚热带竹林
面积/hm ²	121 685.814 1	8 482.244 6	33 549.048 6	79 455.523 6	198.997 3
林分平均高/m		12.33	9.56	10.80	6.50

注:富源县有林地总面积 121 710.754 1 hm²,扣除寒温带树种红豆杉林面积 24.94 hm²,其余有林地面积为 121 685.814 1 hm²。

据《云南省富源县森林资源规划设计调查报告》，县境内分布有国家珍稀濒危保护野生植物 8 种，包括：厚朴 *Houpoea officinalis*、凹叶厚朴 *Houpoea officinalis* ‘Biloba’、榉树 *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino、黄杉 *Pseudotsuga sinensis*、红花木莲 *Manglietia insignis*、金毛狗 *Cibotium barometz*、金荞麦 *Fagopyrum dibotrys*、扇蕨 *Lepisorus palmatopedatus*，均为国家Ⅱ级保护植物^[3]。栖息国家珍稀濒危保护野生动物 16 种，包括：短尾猴 *Macaca arctoides*、猕猴 *M. mulatta*、中华斑羚 *Naemorhedus griseus*、中国穿山甲 *Manis pentadactyla*、大灵猫 *Viverra zibetha*、小灵猫 *Viverricula indica*、林麝 *Moschus berezovskii*、白腹锦鸡 *Chrysolophus amherstiae*、红隼 *Falco tinnunculus*、松雀鹰 *Accipiter virgatus*、普通鵟 *Buteo buteo*、黑翅鸢 *Elanus caeruleus*、白尾鹞 *Circus cyaneus*、雕鸮 *Bubo bubo*、黑鸢云南亚种 *Milvus migrans govinda*、斑头鸺鹠 *Glaucidium cuculoides*，均为国家Ⅱ级保护动物^[3]。十八连山省级自然保护区分布的西南红山茶 *Camellia pitardii* 属于区域分布的特有种^[4]；据《富源县古树名木普查报告》，县内树龄>500 年古树有 4 株，树龄 300~499 年古树有 22 株，树龄 100~299 年古树有 48 株^[5]。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究中的数据来源主要为 2011—2021 年发表的相关文献资料，2020 年云南省森林资源监测富源县监测数据、国家及地方发布的社会公共资源数据（表 2）等。

表 2 社会公共资源数据
Tab. 2 Common resource price

名称	单价(含量)	名称	单价(含量)
磷酸二铵含氮量 ^[2]	14.00%	固碳价格	757 元·t ⁻¹
磷酸二铵含磷量 ^[2]	15.01%	制造氧气价格	1 314 元·t ⁻¹
氯化钾含钾量 ^[2]	50.00%	负氧离子生产费用 ^[6]	7.45 元·10 ⁻⁸ ·个 ⁻¹
磷酸二铵价格	3 900 元·t ⁻¹	二氧化硫治理费用 ^[6]	1.85 元·kg ⁻¹
氯化钾价格	3 100 元·t ⁻¹	氟化物治理费用 ^[6]	1.07 元·kg ⁻¹
有机质价格	320 元·t ⁻¹	氮氧化物治理费用 ^[6]	0.97 元·kg ⁻¹
水资源市场交易价格	5.12 元·t ⁻¹	降尘清理费用 ^[6]	0.22 元·kg ⁻¹
水的净化费用	3.75 元·t ⁻¹		

注：化肥价格采用农业农村部《中国农业信息网》2021 年春季化肥平均价。水资源市场交易价格（元·m⁻³），参照 2020 年曲靖市水费收取标准规定的工商业用水价格（含水费、污水处理费），取值 5.12 元·m⁻³。水的净化费用（元·m⁻³），参照 2020 年曲靖市水费收取标准规定的居民二阶段水费价格（不含污水处理费），取值 3.75 元·m⁻³。固碳价格(元·t⁻¹)，采用 2021 年 3 月瑞典碳税率 119 美元·t⁻¹（折合人民币 757 元·t⁻¹）。制造氧气价格(元·t⁻¹)，参照 2021 年 3 月曲靖市氧气平均价格 60 元一瓶（规格 40 升）计算，取值 1 314 元·t⁻¹。

2.2 评估指标体系的构建

按照《森林生态系统服务功能评估规范》（GB/T38582—2020）^[7]，结合富源县森林生态系统背景特征，构建适合富源县的森林生态系统服务功能评估指标体系（见表 3），包括支持服务、调节服务、供给服务、文化服务 4 个服务类别中保育土壤、林木养分固持、涵养水源、固碳释氧、净化大气环境、生物多样性保护、林木产品供给、森林康养 8 个功能类别共 16 个指标因子。

表 3 富源县主要森林生态系统类型净初级生产力计算
Tab. 3 Calculation of net primary productivity of main forest ecosystem types in Fuyuan county

指标	温带、亚热带落叶阔叶林	亚热带常绿阔叶林	亚热带、热带常绿针叶林	亚热带竹林
面积/10 ⁸ hm ²	0.295	0.108	0.537	0.009
净生产力/10 ⁸ t	1.691	1.865	5.309	0.255
平均净生产力/(t·hm ⁻²)	5.732	17.269	9.886	28.333

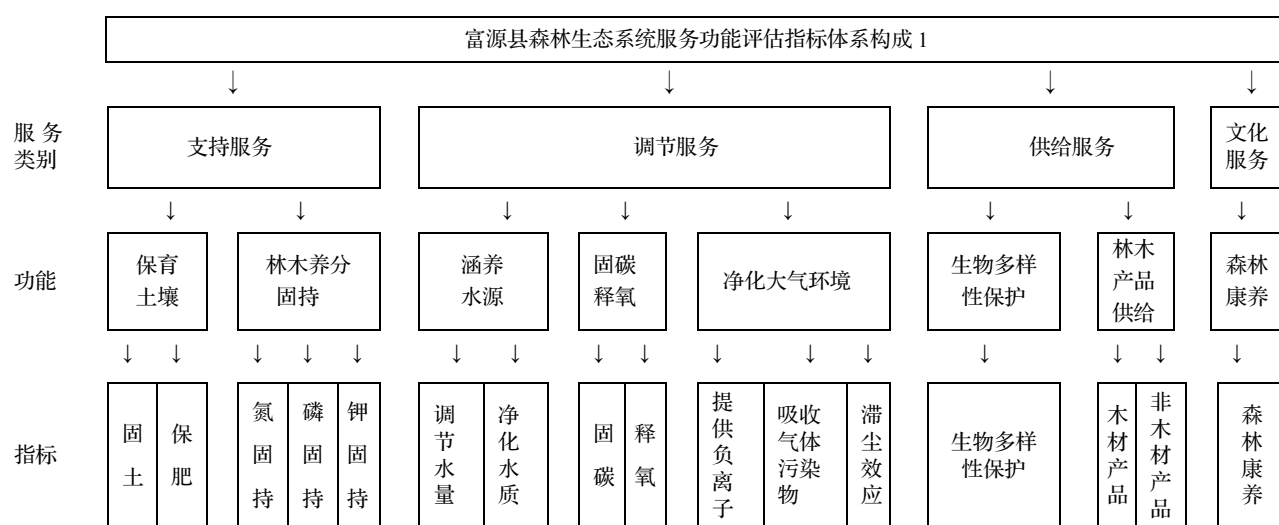


图 1 富源县森林生态系统服务功能评估指标体系构成

Fig. 1 The composition of assessment index of forest ecosystem services in Fuyuan county

2.3 评估方法

本研究以富源县森林生态服务系统作为研究对象,采用市场价值、影子工程等方法对支持服务、调节服务、供给服务、文化服务 4 个服务类别,保育土壤、林木养分固持、涵养水源、固碳释氧、净化大气环境、生物多样性保护、林木产品供给、森林康养 8 个功能类别,固土、保肥、氮固持等 16 项指标类别分别进行定量评估,最后估算出富源县森林生态系统服务功能的总经济价值。

因富源县位于云贵高原腹地,至今没有营造、区划出防风固沙林、农田防护林两类森林,所以没有设置森林防护功能类别的防风固沙和农田防护有关评估指标,不作价值评估;灌木林作为生态系统的一部分,其生态价值较高,但是评估规范未纳入评估对象,故在本次评估中,未纳入评估体系。本研究不涉及林地自身价值。

2.3.1 支持服务

2.3.1.1 保育土壤 森林保育土壤的功能包括森林固土和森林保肥两方面,本研究针对这 2 个指标开展评估。

(1) 固土价值计算

计算公式为:

$$G_{\text{固土}} = A \times (X_2 - X_1) \times F$$

$$U_{\text{固土}} = G_{\text{固土}} \times C_{\text{固土}} / \rho$$

式中, $G_{\text{固土}}$ 为森林年固土量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), A 为林分面积 (hm^2), X_1 为林分有林地土壤侵蚀模数 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), X_2 为无林地土壤侵蚀模数 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), F 为森林生态系统服务修正系数,取值为 1 (下同)。 $U_{\text{固土}}$ 为森林年固土价值 ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$); $C_{\text{固土}}$ 为挖取和运输单位体积土方所需费用 ($\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$),按富源县当前挖掘机挖土方 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 、付费 $500 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}$ 和运输土方 $8 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 计算,获得挖取和运输单位体积土方所需费用为 $8.625 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ 为林地土壤容重 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$), $\rho = 1.25 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 。有林地与无林地土壤侵蚀模数差值取云南省森林林地土壤侵蚀模数与无林地土壤侵蚀模数的差值为 $56.88 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [2]。

(2) 保肥价值计算

计算公式为:

$$G_N = A \times N \times (X_2 - X_1) \times F$$

$$G_P = A \times P \times (X_2 - X_1) \times F$$

$$G_K = A \times K \times (X_2 - X_1) \times F$$

$$G_{\text{有机质}} = A \times M \times (X_2 - X_1) \times F$$

$$U_{\text{肥}} = G_N \times C_1 / R_1 + G_P \times C_1 / R_2 + G_K \times C_2 / R_3 + G_{\text{有机质}} \times C_3$$

式中, G_N 为林分固持土壤而减少的 N 流失量 ($t \cdot a^{-1}$), G_P 为林分固持土壤而减少的 P 流失量 ($t \cdot a^{-1}$), G_K 为林分固持土壤而减少的 K 流失量 ($t \cdot a^{-1}$), $G_{有机质}$ 为林分固持土壤而减少的有机质流失量 ($t \cdot a^{-1}$), A 为林分面积 (hm^2), N 为土壤平均含 N 量(%), P 为土壤平均含 P 量(%), K 为土壤平均含 K 量(%), M 为土壤平均有机质含量(%); X_1 为林分有林地土壤侵蚀模数 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$), X_2 为无林地土壤侵蚀模数 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); F 为森林生态系统服务修正系数。 $U_{肥}$ 为森林年保肥价值 (元 $\cdot a^{-1}$), C_1 为磷酸二铵化肥价格 (元 $\cdot t^{-1}$), C_2 为氯化钾化肥价格 (元 $\cdot t^{-1}$), C_3 为有机质价格 (元 $\cdot t^{-1}$); R_1 为磷酸二铵化肥含氮量 (%), R_2 为磷酸二铵化肥含磷量 (%), R_3 为氯化钾化肥含钾量 (%)。

根据《云南省富源县农业资源与区划报告集》, $N=0.299\%$, $P=0.34\%$, $K=1.351\%$, $M=7.584\%$; 化肥含氮量、含磷量和含钾量以及化肥价格参考社会公共资源数据 (表 2) (下同)。

2.3.1.2 林木养分固持 本研究针对森林固持 N、P、K 的 3 个指标开展评估。林木养分固持量计算公式为:

$$\begin{aligned} G_N &= A \times N_{营养} \times B_{年} \times F \\ G_P &= A \times P_{营养} \times B_{年} \times F \\ G_K &= A \times K_{营养} \times B_{年} \times F \end{aligned}$$

式中, G_N 为林分年 N 固持量 ($t \cdot a^{-1}$), G_P 为林分年 P 固持量 ($t \cdot a^{-1}$), G_K 为林分年 K 固持量 ($t \cdot a^{-1}$); A 为某类林分面积 (hm^2); $N_{营养}$ 为某类林分林木 N 元素含量 (%), $P_{营养}$ 为某类林分林木 P 元素含量 (%), $K_{营养}$ 为某类林分林木 K 元素含量 (%); $B_{年}$ 为某类林分净生产力 ($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$), F 为森林生态系统服务修正系数。

根据赵同谦等整理得到的全国森林生态系统各类型森林面积、净生产力计算得出各森林生态系统的平均净生产力^[8], 作为富源县相关评估计算的各类森林净生产力参数使用 (见表 3)。

根据赵同谦等整理得到的主要森林生态系统类型植物体营养元素含量, 编制富源县的各森林生态系统植物体营养元素含量相关表格^[8] (见表 4)。

表 4 富源县主要森林生态系统类型植物体营养元素含量
Tab. 4 Nutrient element contents in main forest types in Fuyuan county

指标	温带、亚热带落叶阔叶林	亚热带常绿阔叶林	亚热带、热带常绿针叶林	亚热带竹林
N/%	0.531	0.826	0.420	0.651
P/%	0.042	0.035	0.075	0.079
K/%	0.201	0.633	0.213	0.550

林木养分固持价值计算公式为:

$$\begin{aligned} U_N &= G_N \times C_1 / R_1 \\ U_P &= G_P \times C_1 / R_2 \\ U_K &= G_K \times C_2 / R_3 \\ U_{养分固持} &= U_N + U_P + U_K \end{aligned}$$

式中, U_N 为林分年 N 固持价值 (元 $\cdot a^{-1}$), U_P 为林分年 P 固持价值 (元 $\cdot a^{-1}$), U_K 为林分年 K 固持价值 (元 $\cdot a^{-1}$); $U_{养分固持}$ 为林分年固持价值 (元 $\cdot a^{-1}$); G_N 为林分年 N 固持量 ($t \cdot a^{-1}$), G_P 为林分年 P 固持量 ($t \cdot a^{-1}$), G_K 为林分年 K 固持量 ($t \cdot a^{-1}$); C_1 为磷酸二铵的化肥价格 (元 $\cdot t^{-1}$), C_2 为氯化钾的化肥价格 (元 $\cdot t^{-1}$); R_1 为化肥磷酸二铵含氮量 (%), R_2 为化肥磷酸二铵含磷量 (%), R_3 为化肥氯化钾含钾量 (%)。

2.3.2 调节服务

2.3.2.1 涵养水源 涵养水源主要功能表现在增加可利用水资源、净化水质和调节径流等方面。本研究针对森林调节水量、净化水质 2 个指标开展评估。

(1) 调节水量价值计算

森林年调节水量计算公式为:

$$G_{调} = 10A \times (P_{水} - E - C) \times F$$

式中, $G_{调}$ 为森林年调节水量 ($m^3 \cdot a^{-1}$); 10 为降水量转化为 $t \cdot hm^{-2}$ 的单位换算系数; A 为林分面积 (hm^2),

$P_{\text{水}}$ 为林外降水量 ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), E 为林分蒸散量 ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), C 为林分地表快速径流量 ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$), F 为森林生态系统服务修正系数。查《云南省富源县农业资源与区划报告集》, $P_{\text{水}}$ 采用富源多年平均降水量 $1\,427\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$; E 采用多年平均蒸散量 $418\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, C 采用多年平均林分地表快速径流量 $680\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

森林年调节水量价值的计算公式为: $U_{\text{调}}=G_{\text{调}}\times C_{\text{库}}$

式中, $U_{\text{调}}$ 为森林年调节水量价值 ($\text{元}\cdot\text{a}^{-1}$), $G_{\text{调}}$ 为森林年调节水量 ($\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$); $C_{\text{库}}$ 为水资源市场交易价格 ($\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$), 参考社会公共资源数据 (表 2)。

(2) 净化水质价值计算

计算公式为:

$$G_{\text{净}}=10A\times(P_{\text{水}}-E-C)\times F$$

$$U_{\text{净}}=G_{\text{净}}\times K_{\text{水}}$$

式中, $G_{\text{净}}$ 为林分年净化水质量 ($\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$); $U_{\text{净}}$ 为林分年净化水质价值 ($\text{元}\cdot\text{a}^{-1}$); $K_{\text{水}}$ 为水的净化费用 ($\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$), 参考社会公共资源数据 (表 2)。

2.3.2.2 固碳释氧 本研究针对森林固碳、释氧 2 个指标开展评估。

(1) 森林固碳价值计算

①森林植被固碳: 根据光合作用化学方程式, 森林植被每积累 1 g 干物质可以固定 1.63 g CO_2 、释放 1.19 g O_2 , 而 CO_2 中 C 的比例为 27.27% 。计算公式为:

$$G_{\text{植被固碳}}=1.63\times R_{\text{碳}}\times A\times B_{\text{年}}\times F$$

式中, $G_{\text{植被固碳}}$ 为林分年固碳量 ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$), $R_{\text{碳}}$ 为 CO_2 中 C 的比例, 为 27.27% ; A 为某类林分面积 (hm^2), $B_{\text{年}}$ 为某类林分净生产力 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), F 为森林生态系统服务修正系数。

②土壤固碳: 森林土壤固碳量计算公式为:

$$G_{\text{土壤固碳}}=A\times S_{\text{土壤}}\times F$$

式中, $G_{\text{土壤固碳}}$ 为林分年固碳量 ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$), A 为针叶林或阔叶林林分面积 (hm^2), $S_{\text{土壤}}$ 为针叶林、阔叶林林分或竹林单位面积年土壤的固碳量 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), F 为森林生态系统服务修正系数。

据李晓曼等的研究成果, $S_{\text{土壤}}$ 取值为针叶林 $0.672\,7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、阔叶林 $1.6\,466\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、竹林 $0.461\,7\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ [9]。

③森林植被、土壤固碳量及价值计算公式为:

$$G_{\text{碳}}=G_{\text{植被固碳}}+G_{\text{土壤固碳}}$$

$$U_{\text{碳}}=G_{\text{碳}}\times C_{\text{碳}}$$

式中, $G_{\text{碳}}$ 为林分生态系统年固碳量 ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$), $U_{\text{碳}}$ 为森林植被年固碳价值 ($\text{元}\cdot\text{a}^{-1}$), $G_{\text{碳}}$ 为林分生态系统年固碳量 ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$), $C_{\text{碳}}$ 为固碳价格 ($\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$), 参考社会公共资源数据 (表 2)。

(2) 森林释氧价值计算

森林生态系统释放氧气的机理同上, 计算公式为:

$$G_{\text{氧}}=1.19\times A\times B_{\text{年}}\times F$$

$$U_{\text{氧}}=G_{\text{氧}}\times C_{\text{氧}}$$

式中, $G_{\text{氧}}$ 为森林的年释氧量 ($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$); A 为某类林分面积 (hm^2), $B_{\text{年}}$ 为某类林分净生产力 ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), F 为森林生态系统服务修正系数; $U_{\text{氧}}$ 为森林的年释放氧气价值 ($\text{元}\cdot\text{a}^{-1}$); $C_{\text{氧}}$ 为氧气价格 ($\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$), 参考社会公共资源数据 (表 2)。

2.3.2.3 净化大气环境

(1) 提供负离子价值计算

森林提供负离子数量 $G_{\text{负离子}}$ 采用如下公式计算:

$$G_{\text{负离子}}=5.256\times 10^{15}\times Q_{\text{负离子}}\times A\times H\times F/L$$

国内外研究证明,当空气中的负离子达到 $600 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上时,才能有益人体健康,因此森林提供的负离子价值 $U_{\text{负离子}}$ 采用如下公式计算:

$$U_{\text{负离子}} = 5.256 \times 10^{15} \times A \times H \times F \times K_{\text{负离子}} \times (Q_{\text{负离子}} - 600) / L$$

式中, $G_{\text{负离子}}$ 为森林年提供负离子数 ($\text{个} \cdot \text{a}^{-1}$), $Q_{\text{负离子}}$ 为林分负离子浓度 ($\text{个} \cdot \text{cm}^{-3}$), A 为林分面积 (hm^2), H 为林分高度 (m); F 为森林生态系统服务修正系数, L 为负离子寿命 (min); $U_{\text{负离子}}$ 为森林年提供负离子价值 ($\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$), $K_{\text{负离子}}$ 为负离子生产费用 ($\text{元} \cdot \text{个}^{-1}$)。

负离子生产费用参考社会公共资源数据(表2)。林分负离子浓度参考国政^[10]等人对西南地区天然林保护工程综合效益评价研究,取值为 $2121.4 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 负离子寿命为 10 min ; 林分高度参考二调数据(表1)。

(2) 吸收气体污染物价值计算

森林生态系统吸收气体污染物量及价值计算公式为:

$$G_{\text{二氧化硫}} = Q_{\text{二氧化硫}} \times A \times F / 1000$$

$$G_{\text{氟化物}} = Q_{\text{氟化物}} \times A \times F / 1000$$

$$G_{\text{氮氧化物}} = Q_{\text{氮氧化物}} \times A \times F / 1000$$

$$U_{\text{二氧化硫}} = G_{\text{二氧化硫}} \times K_{\text{二氧化硫}}$$

$$U_{\text{氟化物}} = G_{\text{氟化物}} \times K_{\text{氟化物}}$$

$$U_{\text{氮氧化物}} = G_{\text{氮氧化物}} \times K_{\text{氮氧化物}}$$

式中, $G_{\text{二氧化硫}}$ 为林分年吸收二氧化硫量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), $G_{\text{氟化物}}$ 为林分年吸收氟化物量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), $G_{\text{氮氧化物}}$ 为林分年吸收氮氧化物量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$); $Q_{\text{二氧化硫}}$ 为单位面积林分年吸收二氧化硫量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), $Q_{\text{氟化物}}$ 为单位面积林分年吸收氟化物量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), $Q_{\text{氮氧化物}}$ 为单位面积林分年吸收氮氧化物量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); A 为林分面积 (hm^2), F 为森林生态系统服务修正系数。 $U_{\text{二氧化硫}}$ 为林分年吸收二氧化硫价值 ($\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$), $U_{\text{氟化物}}$ 为林分年吸收氟化物价值 ($\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$), $U_{\text{氮氧化物}}$ 为林分年吸收氮氧化物价值 ($\text{元} \cdot \text{a}^{-1}$); $K_{\text{二氧化硫}}$ 为二氧化硫治理费用 ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$), $K_{\text{氟化物}}$ 为氟化物治理费用 ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$), $K_{\text{氮氧化物}}$ 为氮氧化物治理费用 ($\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

针叶树年平均吸收二氧化硫、氟化物、氮氧化物能力分别为 215.60 、 0.5 、 $6.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 阔叶树年平均吸收二氧化硫、氟化物、氮氧化物能力分别为 88.65 、 4.65 、 $6.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[11]。二氧化硫、氟化物、氮氧化物治理费用参考社会公共资源数据(表2)。

(3) 滞尘效应价值计算

① 滞纳 TSP

滞纳 TSP(总悬浮颗粒)计算公式:

$$G_{\text{TSP}} = Q_{\text{TSP}} \times A \times F / 100$$

式中, G_{TSP} 为林分年潜在滞纳 TSP(总悬浮颗粒物)量 ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$), Q_{TSP} 为林分单位面积年滞纳 TSP 量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), A 为林分面积 (hm^2), F 为森林生态系统服务修正系数。

② 滞纳 PM₁₀

$$G_{\text{PM10}} = 10 \times Q_{\text{PM10}} \times A \times n \times F \times LAI$$

式中, G_{PM10} 为林分年潜在滞纳 PM₁₀ 量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$), Q_{PM10} 为林分单位面积年滞纳 PM₁₀ 量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), A 为林分面积 (hm^2), n 为年洗脱次数, F 为森林生态系统服务修正系数, LAI 为叶面积指数。

③ 滞纳 PM_{2.5}

$$G_{\text{PM2.5}} = 10 \times Q_{\text{PM2.5}} \times A \times n \times F \times LAI$$

式中, $G_{\text{PM2.5}}$ 为林分年潜在滞纳 PM_{2.5} 量 ($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$), $Q_{\text{PM2.5}}$ 为林分单位面积年滞纳 PM_{2.5} 量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

根据房瑶瑶^[12]研究成果数据,经整理、计算得出各类森林单位面积年滞纳 TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 用于相关计算中。

④ 滞尘价值

用健康危害损失法替代计算林分滞纳 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的价值。其中, 滞纳 PM_{10} 的价值采用的是治疗因为空气颗粒物污染而引发的上呼吸道疾病的费用, 滞纳 $PM_{2.5}$ 的价值采用的是治疗因为空气颗粒物污染而引发的下呼吸道疾病的费用。林分吸滞其余颗粒物的价值仍选用降尘清理费用计算。

年滞尘价值计算公式:

$$U_{\text{滞尘}} = (G_{\text{TSP}} - G_{\text{PM}_{10}} - G_{\text{PM}_{2.5}}) \times K_{\text{TSP}} + U_{\text{PM}_{10}} + U_{\text{PM}_{2.5}}$$

式中, $U_{\text{滞尘}}$ 为林分年潜在滞尘价值 (元·a⁻¹), G_{TSP} 、 $G_{\text{PM}_{10}}$ 、 $G_{\text{PM}_{2.5}}$ 同上, K_{TSP} 为降尘清理费用 (元·kg⁻¹), $U_{\text{PM}_{10}}$ 为林分年潜在滞纳 PM_{10} 的价值 (元·a⁻¹), $U_{\text{PM}_{2.5}}$ 为林分年潜在滞纳 $PM_{2.5}$ 的价值 (元·a⁻¹)。

据文献资料, $U_{\text{PM}_{10}}$ 、 $U_{\text{PM}_{2.5}}$ 即 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 造成健康危害经济损失计算指标分别为 30.34 (元·kg⁻¹) 和 4 665.12 (元·kg⁻¹)^[13]。降尘清理费用参考社会公共资源数据 (表 2)。

2.3.3 供给服务

2.3.3.1 生物多样性保护

森林生态系统的年物种资源保育价值 $U_{\text{生}}$ 的计算公式为:

$$U_{\text{生}} = \left(1 + \sum_{m=1}^x E_m \times 0.1 + \sum_{n=1}^y B_n \times 0.1 + \sum_{r=1}^z O_r \times 0.1 \right) \times S_{\text{生}} \times A$$

式中, $U_{\text{生}}$ 为林分年物种资源保育价值 (元·a⁻¹), E_m 为林分 (或区域内) 物种 m 的珍稀濒危指数, B_n 为林分 (或区域内) 物种 n 的特有种指数, O_r 为林分 (或区域内) 物种 r 的古树年龄指数; x 为计算珍稀濒危物种数量, y 为计算特有种物种数量, z 为计算古树物种数量; $S_{\text{生}}$ 为单位面积物种资源保育价值 (元·hm⁻²·a⁻¹), A 为林分面积 (hm²)。

富源县濒危植物、动物的濒危等级, 对应珍稀濒危指数为 3, 特有种植物分布范围对应特有种指数为 2; 县内 >500 年、300 ~ 499 年、100 ~ 299 年的古树年龄, 对应指数分别为 3、2、1; 全县计算出一个 Shannon-Wiener 指数, 结果为 2.1。根据规范, 物种保育价值计算按 Shannon-Wiener 指数计算方法, 并划分为 7 个等级, 当 $2 \leq \text{指数} < 3$ 时, $S_{\text{生}}$ 为 10 000 元·hm⁻²·a⁻¹。

2.3.3.2 林木产品供给

林木产品供给包括森林提供食物类、药材类、油料类、材料类等林木产品的功能。

(1) 木材产品价值计算

木材产品价值采用下式计算:

$$U_{\text{木材产品}} = \sum_i^n (A_i \times S_i \times U_i) (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, $U_{\text{木材产品}}$ 为全县年木材产品价值 (元·a⁻¹), A_i 为第 i 种木材产品面积 (hm²), S_i 为第 i 种木材产品单位面积蓄积量 (m³·hm⁻²·a⁻¹), U_i 为第 i 种木材产品市场价格 (元·m⁻³)。

据《云南省林业和草原局关于公布实施云南省“十四五”期间年森林采伐限额的通知》, 富源县年总限额为 12.63 万 m³, 其中主伐 7.00 万 m³、更新采伐 2.15 万 m³、抚育采伐 2.31 万 m³、低产 (效) 林改造 0.16 万 m³、其他采伐 1.01 万 m³; 据编限档案中各种采伐类型纳入限额测算的单位面积蓄积量和采伐强度测算出年采伐面积和单位面积蓄积量, 主伐 750.95 hm²、93.2 m³·hm⁻²·a⁻¹; 更新采伐 1 467.58 hm²、14.65 m³·hm⁻²·a⁻¹; 抚育采伐 1 601 hm²、14.42 m³·hm⁻²·a⁻¹; 低产 (效) 林改造 156.10 hm²、10.25 m³·hm⁻²·a⁻¹; 其他采伐 2 589.74 hm²、3.9 m³·hm⁻²·a⁻¹。2021 年富源县木材产品原木市场价格 (元·m⁻³) 主伐为 700、更新采伐 700、抚育采伐 250、低产 (效) 林改造 350、其他采伐 450; 计算中, 先算出各采伐类型的蓄积量, 再按编限的出材率计算出原木材积, 按原木市场价格算出各类型价值, 再合计出总价值 (此为极限值)。

(2) 非木材产品价值计算

非木材产品价值采用下式计算：

$$U_{\text{非木材产品}} = \sum_i^n (A_i \times V_i \times P_i) (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中， $U_{\text{非木材产品}}$ 为全县年非木材产品价值（元·a⁻¹）， A_i 为第*i*种非木材产品种植面积（hm²）， V_i 为第*i*种非木材产品单位面积产量（kg·hm⁻²·a⁻¹）， P_i 为第*i*种非木材产品市场价格（元·kg⁻¹）。

根据 2020 年富源县《林业草原产业产值情况》（按现行价格），对富源县 2020 年非木材产品价值进行统计。

2.3.4 文化服务

文化服务针对的是森林康养方面，价值计算公式为：

$$U_r = 0.8 \times U_K$$

式中， U_r 为区域内年森林康养价值（元·a⁻¹）， U_K 为各行政区林业旅游与休闲产业及森林康复疗养产业的价值，包括旅游收入、直接带动的其他产业的产值（元·a⁻¹）， K 为行政区个数，0.8 为森林公园接待游客量和创造的旅游产值约占全国森林旅游的 80%。

考虑数据的可靠性，参照《（云南省）2020 年富源县国民经济和社会发展统计公报》，富源县 2020 年旅游综合收入 235 586.52 万元，计算得出富源县森林康养价值。

3 结果与分析

3.1 评估结果

本次评估结果（表 5）表明，富源县 2020 年森林生态系统 4 个服务类别 8 个功能类别生态系统服务功能总

表 5 富源县森林生态系统服务功能价值汇总
Tab. 5 Value of forest ecosystem services in Fuyuan county

服务类别及功能价值		功能类别及服务功能价值			指标类别及服务功能价值与能力		
服务类别	功能价值 /（亿元·a ⁻¹ ）	功能类别	服务功能价值 /（亿元·a ⁻¹ ）	占总值 量的比例/%	指标类别	服务功能价值 /（亿元·a ⁻¹ ）	服务能力
支持服务	21.575	保育土壤	18.690	13.45	固土	0.450	固土 652.38 万 t·a ⁻¹ ；减少 N、P、K、有机质损失分别为 1.95 万、2.22 万、8.81 万、49.48 万 t·a ⁻¹
					保肥	18.240	
		林木养分固持	2.885	2.08	氮固持	2.334	0.838 万 t·a ⁻¹
					磷固持	0.212	0.081 6 万 t·a ⁻¹
					钾固持	0.339	0.546 9 万 t·a ⁻¹
调节服务	69.021	涵养水源	33.470	24.09	调节水量	19.320	3.77 亿 m ³
					净化水质	14.150	3.77 亿 m ³
		固碳释氧	27.810	20.01	固碳	5.620	植被年固碳量为 63.08 万 t·a ⁻¹ ，土壤年固碳量 11.16 万 t·a ⁻¹ ；释氧 168.87 万 t·a ⁻¹
					释氧	22.190	

价值为 138.958 亿元·a⁻¹。其中，4 个服务类别支持服务、调节服务、供给服务、文化服务的功能价值分别为 21.575 亿、69.021 亿、29.512 亿、18.85 亿元·a⁻¹；8 个功能类别保育土壤、林木养分固持、涵养水源、固碳释氧、净化大气环境、生物多样性保护、林木产品供给、森林康养服务的功能价值分别为 18.69 亿、2.885 亿、33.47 亿、27.81 亿、7.741 亿、24.09 亿、5.422 亿、18.85 亿元·a⁻¹，占总值量的比例分别为 13.45%、2.08%、24.09%、20.01%、5.57%、17.34%、3.90%、13.57%。16 个指标因子的服务价值、服务能力见表 5。

表 5 (续)
Tab. 5 Value of forest ecosystem services in Fuyuan county

服务类别及功能价值		功能类别及服务功能价值			指标类别及服务功能价值与能力		
服务类别	功能价值 / (亿元·a ⁻¹)	功能类别	服务功能价值 / (亿元·a ⁻¹)	占总价值 量的比例/%	指标类别	服务功能值 / (亿元·a ⁻¹)	服务能力
供给服务	29.512	净化大气环境	7.741	5.57	提供负离子	0.077	提供负离子 27 254.22×10 ²⁰ 个; 吸收 二氧化硫 20 254 t·a ⁻¹ 、氟化物 204 t·a ⁻¹ 、氮氧化物 688 t·a ⁻¹ ; 滞纳空气 颗粒物量 (t·a ⁻¹) TSP、PM ₁₀ 、PM _{2.5} 为 2095.34、1401.39、146.86
					吸收气体 污 染物	0.384	
					滞尘效应	7.280	
		生物多样性保 护	24.090	17.34	生物多样性 保护	24.090	
		林木产品供给	5.422	3.90	木材产品	0.478	
					非木材产品	4.944	
文化服务	18.850	森林康养	18.850	13.57	森林康养	18.850	
合计	138.958		138.958	100.00			

3.2 结果分析

本研究依据富源县 2020 年森林资源监测结果评估得出富源县 2020 年森林生态系统服务功能总价值, 单位面积价值约为 11.42 万元·hm⁻²·a⁻¹, 参考张治军^[2]等对云南省森林生态系统服务功能价值的研究, 富源县单位面积森林生态系统服务功能价值量是云南省“十一五”期间平均水平的 1.81 倍。富源县 2020 年国内生产总值(GDP) 约为 246.96 亿元·a⁻¹, 良好的自然生态系统产生的价值不可小觑, 是“绿水青山就是金山银山”理论在富源的最好阐释, 运用好这座宝库将对富源今后的发展产生重要意义。

在 4 个服务类别的功能价值中, 调节服务类功能价值 (总值 69.021 亿元·a⁻¹) 最大, 占总价值的 49.67%, 文化服务类功能价值 (总值 18.85 亿元·a⁻¹) 最小, 占总价值的 13.57%。说明今后应更加重视对森林康养的潜力挖掘和开发建设。在 8 个功能类别服务价值中, 功能价值表现为涵养水源>固碳释氧>生物多样性保护>森林康养>保育土壤>净化大气环境>林木产品供给>林木养分固持; 除林木产品供给外, 云南省“十一五”期间 7 项森林生态系统服务功能贡献大小顺序依次为: 生物多样性保护>涵养水源>固碳释氧>保育土壤>净化大气环境>林木营养积累>森林游憩与科研文化^[2]。富源县生物多样性保护方面的功能价值地位弱于云南省, 符合富源县工业特别是煤炭工业较发达 (煤炭产量占云南省总产量的三分之一以上)、生物多样性丰富程度不及云南全省的实际情况, 其他各项与云南省的情况基本一致。

4 讨论

在林木产品供给的木材产品服务功能价值评估中, 由于使用的是“十四五”期间年森林采伐限额数据, 会使评估值偏大, 如果使用“十四五”期间年森林采伐平均数, 能够提高评估精度。

涵养水源、固碳释氧、生物多样性保护、森林康养、保育土壤、净化大气环境 6 项功能价值分别占总价值的 24.09%、20.01%、17.34%、13.57%、13.45%、5.56%, 6 项功能价值之和占总价值的 93.92%, 价值之和为 130.651 亿元·a⁻¹。提供木材产品的价值较低, 更多地体现在涵养水源、固碳释氧等间接价值中, 所以, 今后不仅要关注采伐林木获得经济收益, 更要关注森林健康, 加强林地林木保护, 提高森林质量, 加大森林康养的投入和建设力度, 全面发挥森林生态系统服务功能, 满足人们对森林价值的不同的、更高的需求。

森林生态系统价值评估对于森林保护、森林可持续经营以及生态补偿有着重要意义。森林生态系统服务功能及其价值评估对解决生态效益补偿的定量化问题有重要参考价值。本次森林生态系统服务功能价值的评估值 138.958 亿元·a⁻¹ 与目前富源县每年 0.19 亿元·a⁻¹ 的公益林补助相比较, 差值很大, 大幅度提高各项补助标准已

经成为各级政府需要研究的重点问题。

本次森林生态系统服务功能评估工作以富源县总体作为评估对象,未考虑龄组、县级以下行政区等因素,因此评估指标体系和方法完善仍是今后森林生态系统服务功能评价的研究重点。

5 结论

本文构建了云南省曲靖市富源县森林生态系统 4 个服务类别,8 个功能类别,固土、保肥、氮固持等 16 个指标作为价值衡量指标,对 2020 年富源县森林生态系统服务功能进行价值评估。结果表明,2020 年富源县森林生态系统服务功能总价值约为 138.958 亿元·a⁻¹,单位面积价值约为 11.42 万元·hm⁻²·a⁻¹;各项森林生态系统服务功能价值表现为保育土壤>涵养水源>固碳释氧>生物多样性保护>森林康养>净化大气环境>林木产品供给>林木养分固持。森林生态系统的涵养水源、固碳释氧、生物多样性保护、森林康养、保育土壤、净化大气环境 6 项功能价值之和为 130.651 亿元·a⁻¹,占总价值的 93.92%。通过本次估算,提供木材产品的价值较低,更多地体现在间接价值中,在生态系统服务价值上具有非常大的潜力,对地方经济发展和建设方面也将会产生巨大的推动作用。今后不仅要关注林木价值,更要关注森林健康,加大保护力度,提高森林质量,加大森林康养的潜力挖掘和开发建设,在未来的发展与保护过程中,应当更加注重于整体保护并且注重于间接使用价值的发掘和利用,全面发挥森林生态系统服务功能,满足人们对森林价值的多重需求。本次森林生态系统服务功能价值的评估值 138.958 亿元·a⁻¹与目前富源县每年 0.19 亿元·a⁻¹的公益林补助相比较,差值很大,大幅度提高各项补助标准已经成为各级政府需要研究的重点问题。

参考文献

- [1] 王兵,任晓旭,胡文.中国森林生态系统服务功能及其价值评估[J].林业科学,2011,47(2):146-147.
- [2] 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,2011,4:3-9.
- [3] 云南省林业调查规划院.云南省富源县森林资源规划设计调查报告[R].2016.
- [4] 云南省富源县林业和草原局.富源县 2020 年森林资源监测本底资料[R].2021.
- [5] 云南省富源县林业局.富源县古树名木普查报告[R].2018.
- [6] 杨明伟,邢德选,张定灿,等.云南铜壁关自然保护区森林生态系统服务功能价值评估[J].林业调查规划,2021,46(5):52-58.
- [7] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.森林生态系统服务功能评估规范:GB/T38582—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [8] 赵同谦,欧阳志云,郑华,等.中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J].自然资源学报,2004,19(4):480-487.
- [9] 李晓曼,康文星.广州市城市森林生态系统碳汇功能研究[J].中南林业科技大学学报,2008,28(1):11-12.
- [10] 国政,聂华,臧润国,等.西南地区天然林保护工程生态效益评价[D].呼和浩特:内蒙古农业大学学报,2005,32(2):70-71.
- [11] 李国伟,赵伟,魏亚伟,等.天然林资源保护工程对长白山林区森林生态系统服务功能的影响评价[J].生态学报,2005,35(4):3-12.
- [12] 房瑶瑶.森林调控空气颗粒物功能及其与叶片微观结构关系的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015.
- [13] 丛日征,王兵,牛香,等.陕西省森林生态系统净化大气环境功能价值评估[J].西北林学院学报,2017,32(5):75-82.