

三江源地区生态系统服务功能价值估算

文延延¹, 韩玉国¹, 解莹²

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.中国水利水电科学研究院 水生态环境研究所, 北京 100038)

摘要: [目的] 科学估算三江源生态系统服务价值, 为掌握流域生态资产储量以及生态安全保障提供科学依据。[方法] 运用改良的当量因子法、替代工程法、替代成本法科学评估三江源地区生态系统服务总价值和各单项生态服务功能价值, 并利用遥感与空间统计分析技术分析三江源地区生态系统服务功能价值空间分布特征, 明确其核心功能区定位。[结果] ①三江源地区生态系统服务功能总价值量为 2 464.85 亿元; 其中, 水源涵养服务功能的价值最高, 为 934.01 亿元, 所占比例为 38%, 核算结果符合三江源“中华水塔”的称号; 其次是气候调节、土壤保持, 占总价值的 33%; 栖息地保护、景观美学占总价值的 21%; 空气净化服务价值最低, 仅占总价值的 8%。②水源涵养、土壤保持、栖息地保护、景观美学 4 项功能价值表现为“北高南低”的格局, 气候调节、空气净化功能价值则呈现“东高西低”的分布特征。[结论] 玉树藏族自治州、果洛藏族自治州是重要的气候调节区和土壤保持区, 应持续推进林草生态保护与恢复, 建立水土流失综合防治体系, 不断提升土壤保持能力; 海西蒙古族藏族自治州、玉树藏族自治州、果洛藏族自治州是重要的水源涵养区与补给区, 应加强湿地水体保护, 降低被污染的风险。各流域间加强协同治理, 科学规划土地利用。

关键词: 生态系统服务功能; 三江源地区; 价值核算; 遥感技术; 当量因子法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)05-0277-08

中图分类号: Q148

文献参数: 文延延, 韩玉国, 解莹. 三江源地区生态系统服务功能价值估算[J]. 水土保持通报, 2025, 45(5): 277-284. Wen Yanyan, Han Yuguang, Xie Ying. Estimation of ecosystem service function values in Sanjiangyuan region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(5): 277-284. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.05.011; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.05.011.

Estimation of ecosystem service function values in Sanjiangyuan region

Wen Yanyan¹, Han Yuguang¹, Xie Ying²

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Institute of Water Ecology and Environment, China Academy of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] Scientifically estimate the value of ecosystem services in the Sanjiangyuan region to provide a scientific basis for understanding the ecological asset reserves and ecological security safeguards of the watershed. [Methods] Using the improved equivalent factor method, substitute engineering method, and substitute cost method, we scientifically assessed the total value of ecosystem services and the value of individual ecological service functions in the Sanjiangyuan region. By employing remote sensing and spatial statistical analysis techniques, we examined the spatial distribution characteristics of ecosystem service values in this region and identified its core functional zones. [Results] ① The total value of ecosystem services in the Sanjiangyuan region amounts to 246.485 billion yuan. Among these, water conservation services hold the highest value at 93.401 billion yuan, accounting for 38% of the total and consistent with the region's designation as China's 'water tower.' Climate regulation and soil conservation follow, comprising 33% of the total value. Habitat protection and landscape aesthetics contribute 21% of the total value. Air purification services showed the lowest value, accounting for only 8% of the total. ② The values of water conservation, soil retention, habitat protection, and landscape aesthetics exhibited a 'higher in the north, lower in the south' pattern, while climate regulation and air

收稿日期: 2025-03-30

修回日期: 2025-06-04

采用日期: 2025-06-05

资助项目: 国家重点研发计划项目“长江黄河流域水生态监测技术体系研究”(2021YFC3200102)

第一作者: 文延延(2001—), 女(汉族), 贵州省绥阳县人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务功能评价。Email: 2315974074@qq.com。

通信作者: 韩玉国(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治、流域面源污染治理等方面的研究。Email: yghan@bjfu.edu.cn。

purification values demonstrated an ‘higher in the east, lower in the west’ distribution characteristic. [Conclusion] Yushu Xizang Autonomous Prefecture and Guoluo Xizang Autonomous Prefecture serve as vital climate regulation zones and soil conservation areas. Efforts to advance forest and grassland ecological protection and restoration should be sustained, establishing a comprehensive system for soil and water erosion control to continuously enhance soil retention capacity. Haixi Mongol and Xizang Autonomous Prefecture, Yushu Xizang Autonomous Prefecture, and Guoluo Xizang Autonomous Prefecture are vital water conservation and recharge areas. Efforts should be intensified to protect wetland water bodies and reduce the risk of contamination. Different river basins should strengthen coordinated governance and scientifically plan land use.

Keywords: ecosystem service functions; Sanjiangyuan region; valuation; remote sensing technology; equivalent factor method

青海省三江源地区被称为“中华水塔”，是中国长江、黄河、澜沧江三大河流的发源地和重要补给地，是中国重要的生态屏障^[1-2]。2016年，中国国家领导人在视察青海时强调“青海最大的价值在生态，最大的责任在生态，最大的潜力也在生态”^[3]。通过多年优化治理，三江源地区植被覆盖率、水源供给量逐年提高，野生动物种群恢复速度递增，但由于特殊的地理位置和气候条件，三江源的生态环境十分脆弱，持续的生态保护修复和流域治理仍然十分重要^[4]。近年来，随着社会经济高速发展，在自然因素和不合理人类活动的双重影响下，三江源地区生态环境日益恶化，草场严重退化，水土流失加剧，土地沙漠化面积扩大，冰川、湿地退缩，生物多样性锐减^[5]，由此带来一系列生态问题。如草场植被退化降低了水源涵养能力；水土流失加剧和土地沙漠化面积扩大，降低了土壤肥力，影响农业发展。三江源地区各类生态系统所具有的水源涵养、水土保持等功能，对于该流域生态环境保护与治理意义重大，开展三江源地区生态系统服务功能价值的评估，有利于生态系统优化配置，促进生态服务功能的发挥和生态产品价值实现，推进生态环境系统治理，测算三江源地区生态系统服务功能价值，能够明确流域生态服务功能的本底价值，进而处理好生态保护与经济发展的关系，是生态环境保护和生态恢复措施实施的重要基础和依据^[6-8]。

Daily^[9]研究发现，可以运用多种价值评估方法核算不同地区的生态系统服务功能价值。生态系统服务价值评估是一个多维度、多方法的综合性研究领域，涵盖不同尺度、视角和评估要素。研究通常基于生态系统服务功能的物质量数据，借助市场价值法、替代成本法、避免损失法、影子工程法、成果参照法、当量因子法等进行价值评估^[10-11]。不同学者相继对生态系统的服务价值进行了评估与分析，例如，聂伟博^[12]利用替代成本法等价值评估方法核算了张掖市森林生态系统服务功能的价值量，发现了固碳释氧

功能贡献的价值最大。刘芊池等^[13]采用当量因子法对黄河山东段国家湿地公园开展生态系统服务价值评估，结果表明湿地公园生态系统服务价值与湿地公园面积和湿地率显著相关。王奕淇等^[14]利用当量因子法等对黄河流域的生态系统服务价值进行测度，结果表明调节服务价值的贡献最大。随着生态系统服务价值评估方法的完善及GIS和RS技术的快速发展，生态系统服务价值评估已从早期的生态系统服务功能综合测算逐步发展为时空演变规律的探究^[15]。由于不同区域中的生态系统具有多样性以及环境条件的多变性，生态系统服务价值在空间上有明显差异，探讨生态服务价值的空间异质性成为当下研究的重要科学议题^[16]。近年来，基于遥感技术的生态系统服务功能价值评估得到了广泛关注^[16]，即利用遥感数据计算生态系统面积并根据面积计算结果构建当量因子法模型^[17]，这种方法能够将生态系统服务功能价值在空间上可视化，评估结果更为直观。

当前有关三江源地区生态系统服务价值的研究多侧重基于单一核算方法的价值估算^[18-19]，且缺乏基于空间统计分析方法的时空分布特征研究。因此，本研究运用改良的当量因子法、替代工程法、替代成本法科学评估三江源地区生态系统服务总价值和各单项生态服务功能价值，基于多源空间数据以及遥感与空间统计分析技术，构建像元尺度的生态系统服务功能价值评估体系，描述各自治州、各流域生态系统服务价值的空间分异特征及其关键影响因素，分析三江源地区生态系统服务功能价值组成及空间格局，旨在为区域生态保护政策的制定及生态补偿机制的优化提供科学依据。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

青海三江源地区地处青藏高原腹地，地理坐标

为 $89^{\circ}45'—102^{\circ}23'E$, $31^{\circ}39'—36^{\circ}12'N$,是中国长江、黄河、澜沧江三大河流的源头,是高原生物多样性最集中的区域,也是气候变化的重要敏感区^[20-21]。三江源地区面积 $3.63 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中长江源地区面积为 $1.54 \times 10^7 \text{ hm}^2$,黄河源地区面积为 $1.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$,澜沧江源地区面积为 $3.68 \times 10^6 \text{ hm}^2$,行政区划包括青海省果洛、玉树藏族自治州全境以及海南藏族自治州兴海、同德两县和海南藏族自治州的泽库、河南两县以及格尔木市的唐古拉镇共计16县1镇^[22]。三江源地区为典型的高原大陆性气候,表现为冷热两季交替,干湿两季分明,年温差小,日温差大,日照时数长,辐射强烈,无明显的四季区分的气候特征^[23],主要为冷暖两季交替,干湿分明,水热同期。多年平均降水量为406.6 mm且降水年内分布不均,主要集中在暖季,全年降水量的85.3%都来自5—9月的降水量,降水量最大的月份为7月^[24]。三江源地区受降水集中、草场退化和沙化、城市建设等因素叠加影响,呈现出典型生态环境脆弱区特征,区域开发与生态保护协同治理面临多重挑战,人地矛盾突出,推进生态保护与高质量发展需求迫切。

1.2 数据来源

青海省三江源边界数据来自国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn>),青海三江源生态系统遥感监测数据集来自资源环境科学数据注册与出版系统;2023年土地利用数据、地表蒸散发ET数据、NPP数据、数字高程模型(digital elevation model, DEM)均来自中国科学院资源环境科学数据平台(<http://www.resdc.cn>);青海省各县区划数据来自国家地理信息公共服务平台(<https://www.tianditu.gov.cn/>);农作物的种植面积、农作物单位面积产量、农作物平均价格、青海省生态系统单位面积生物量均来自青海省统计局《青海统计年鉴2024年》;单位面积生态系统服务价值基础当量来自文献^[25];不同土地覆被对主要空气污染物的单位面积净化量可通过文献资料获取^[26-28];土地覆被的面积来自遥感数据解译获取;人工处理硫化物、氮氧化物、粉尘等空气污染物的价格参考《排污费征收使用管理条例》(国务院令字第369号);生态系统蒸发量来自气象数据空间插值结果;蒸发单位体积水汽的耗电量以市场上常见家用加湿器功率计算;电价采用国家电网公布的市场电价收费标准。

1.3 指标体系与核算方法

本研究采用改良的当量因子评估法、替代成本法、替代工程法对三江源生态服务价值进行估算,并根据生态系统提供服务的机制、类型和效用,结合三

江源生态系统的功能、属性和用途,及相关参数数据的可获取性,将三江源生态系统服务功能划分为调节服务、支持服务和文化服务3大类服务功能进行研究。其中调节服务主要包括水源涵养、空气净化和气候调节;支持服务主要包括土壤保持和栖息地保护;文化服务主要为景观美学,共6个指标(表1)。

表1 三江源区生态系统服务价值评价指标体系
Table 1 Evaluation index system for ecosystem service value of Sanjiangyuan region

分类	服务	服务价值评价指标
调节服务	水资源蓄积调节	水源涵养
	污染物净化	空气净化
	调节气候	气候调节
支持服务	水土保持	土壤保持
	支持服务	栖息地保护
文化服务	美学价值	景观美学

2023年三江源地区主要生态系统主要包括:森林生态系统、草地生态系统、湿地生态系统、农田生态系统、荒漠生态系统5大类(表2),总面积 $3.55 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。除5类生态系统之外,还存在包括采矿用地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地、水工建筑用地在内的其他生态系统,分布面积共 $3.36 \times 10^5 \text{ hm}^2$,因其所占面积较小,在各个指标计算中忽略不计。

表2 三江源地区生态系统分布面积

Table 2 Ecosystem area distribution in Sanjiangyuan region

生态系统类型	生态系统分布面积/ 10^4 hm^2	面积比例/ %
森林生态系统	140.17	3.95
草地生态系统	2 660.87	75.01
湿地生态系统	444.73	12.54
农田生态系统	8.84	0.25
荒漠生态系统	292.81	8.25

结合三江源地区生态系统服务功能特点及生态系统服务功能评估规范,水源涵养、土壤保持、栖息地保护、景观美学4项服务功能采用改良当量因子法核算生态系统服务价值,参照《生态系统服务功能评估技术规范(GB/T 38582—2020)》标准执行,并参考借鉴近年来国内学者相关的研究方法^[29],谢高地等^[11]借鉴千年生态系统评估(MA)框架,将生态系统服务功能详细划分为土壤保持、美学景观等11类。基于Costanza的研究成果,结合我国基本国情,以 1 hm^2 全国农田平均粮食产量的经济价值为基准单位(定义为1),以此推算出我国陆地生态系统单位面积的生态服务价值当量。

以三江源地区范围内农作物播种总面积与农业总产值为计算基础,根据以下计算公式进行计算:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_n \frac{A_i Q_i P_i}{M} \quad (1)$$

式中: E_a 为1个标准当量因子的生态系统服务价值量; A_i 为第*i*类农作物的种植面积(hm^2); Q_i 为第*i*类农作物单位面积产量(t/hm^2); P_i 为第*i*类农作物当年全国平均价格($\text{元}/\text{t}$); M 为所有农作物的种植面积。1/7指在无人力成本投入情况下自然运行的生态系统所提供的经济价值是单位面积农田所提供的粮食生产价值的1/7。

$$D_i = \frac{b_i}{B_i} \quad (2)$$

式中: D_i 为第*i*类生态系统基于生物量的调整因子; b_i 为三江源地区第*i*类生态系统单位面积生物量; B_i 为青海省第*i*类生态系统单位面积生物量。

$$VC_i = E_a \cdot D_i \quad (3)$$

$$VC_{ij} = e_{ij} \cdot VC_i \quad (4)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^n (F_i \cdot VC_{ij}) \quad (5)$$

式中: VC_i 为三江源地区第*i*类生态系统一个标准当量因子的生态系统服务价值量; VC_{ij} 为第*i*类生态系统第*j*项单位面积生态服务价值量; e_{ij} 为单位面积第*i*类生态系统第*j*项生态服务的基础当量(表3); ESV 为年生态系统服务总价值; F_i 为研究区第*i*种生态类型的分布面积。

表3 单位面积生态服务价值当量表

Table 3 Equivalent values of ecosystem service per unit area

项目	生态系统服务功能				
	草地	森林	湿地	农田	荒漠
水源涵养	1.52	4.09	13.44	0.77	0.07
土壤保持	2.24	4.02	1.99	1.47	0.17
栖息地保护	1.87	4.51	3.69	1.02	0.40
景观美学	0.87	2.08	4.69	0.17	0.24

根据公式分别计算出三江源地区单位面积水源涵养服务价值量、单位面积土壤保持服务价值量、单位面积栖息地保护服务价值量、单位面积景观美学服务价值量。具体结果详见表4。

空气净化、气候调节服务功能采用替代成本法与替代工程法进行核算生态系统服务价值,价值量评估方法主要是通过采用经济学和计量学方法,从价值量的角度对生态系统服务价值的大小进行货币化的过程,价值量评估不仅能对比分析某一相同服务在不同生态系统类别中的差异情况,也能综合分析某一生态系统的各项服务差别情况,具体核算公式为^[30]

$$V_x = \sum C_{ij} \cdot A_j \cdot P_j \quad (6)$$

式中: V_x 为空气净化价值($\text{元}/\text{年}$); C_{ij} 为第*j*类土地覆被对第*i*种空气污染物的单位面积净化量(g/m^2); A_j 为第*j*类土地覆被的面积(m^2); P_j 为人工处理第*i*种空气污染物的价格($\text{元}/\text{t}$)。

$$V_Q = ET \cdot \gamma \cdot P_e \quad (7)$$

式中: V_Q 为气候调节价值($\text{元}/\text{a}$); ET 为生态系统的蒸发量(m^3/a); γ 为蒸发单位体积水汽的耗电量[($\text{kw} \cdot \text{h}$)/ a]; P_e 为电价[$\text{元}/(\text{kw} \cdot \text{h})$]。

表4 三江源地区各类生态系统服务价值量

Table 4 Value of different types of ecosystem services in Sanjiangyuan region 单位:元/ hm^2

项目	生态系统服务价值量				
	草地	森林	湿地	农田	荒漠
水源涵养	388.1	1 971.8	18 033.2	376.2	26.5
土壤保持	946.1	2 402.9	1 513.1	918.3	17.7
栖息地保护	528.8	2 008.5	2 212.2	446.3	300.8
景观美学	19.4	788.7	4 910.9	7.0	8.8

2 结果

2.1 生态系统服务功能总价值

经核算,2023年三江源地区生态系统服务功能总价值为2 464.85亿元。各生态系统服务功能价值量呈现显著差异,其排序依次为:水源涵养(934.01亿元)>气候调节(466.03亿元)>土壤保持(354.05亿元)>栖息地保护(276.44亿元)>景观美学(234.89亿元)>空气净化(199.43亿元),其中,水源涵养服务价值最高,占总价值的38%;气候调节、土壤保持服务价值次之,合计比例达33%;栖息地保护与景观美学服务价值比例21%;空气净化服务价值最低,仅为8%。

2.2 各流域服务功能价值量

基于生态系统服务价值评估体系核算,2023年三江流域(长江、黄河、澜沧江)生态系统服务总价值达2 223.11亿元。流域价值总量分布特征为长江流域:1 262.39亿元(占全流域56.8%)、黄河流域:729.91亿元(占全流域32.8%)、澜沧江流域:230.81亿元(占全流域10.4%)。其中,各流域单位面积价值量为长江流域:79.4万元/ km^2 ;黄河流域:73.7万元/ km^2 ;澜沧江流域:62.7万元/ km^2 。水源涵养功能作为核心服务功能在各流域内价值量分别为:长江流域为514.95亿元(占流域价值总量41.6%)、黄河流域为266.81亿元(占流域价值总量36.5%)、澜沧江流域为64.19亿元(占流域价值总量27.8%)。各流域功能价值量排序稍有差别,如长江、黄河流域表现为:

水源涵养>气候调节>土壤保持>栖息地保护>景观美学>空气净化;而澜沧江流域则表现为:水源涵养>气候调节>土壤保持>栖息地保护>空气净化>景观美学。各流域功能价值量详见表5。

表5 三江流域生态系统服务功能价值量

Table 5 Values of ecosystem services functions in three-river basins

单位:亿元

流域	水源涵养价值量	空气净化价值量	气候调节价值量	土壤保持价值量	栖息地保护价值量	景观美学价值量
长江流域	514.95	96.66	220.20	168.40	131.74	130.44
黄河流域	266.81	60.83	143.30	110.64	81.89	66.44
澜沧江流域	64.19	23.96	55.70	41.01	29.54	16.41
总计	845.95	181.45	419.20	320.05	243.17	213.29

2.3 生态系统服务功能价值量空间变化

通过对三江源地区生态系统服务价值(ESV)的量化评估与空间可视化分析,结果表明,不同服务功能的价值量及其空间分布呈现显著异质性特征。气候调节服务价值的空间分布范围为0~7.23万元/km²,空气净化服务价值为0~2.41万元/km²,二者均呈现“东南高,西北低”的梯度格局。高值区主要集中于玉树藏族自治州和果洛藏族自治州,其分布与草地生态系统及森林覆盖区的空间格局高度吻合。水源涵养服务价值在三江源地区各功能中贡献最高,空间分布范围为0~13.95万元/km²。高值区集中分布于海西蒙古族藏族自治州、玉树藏族自治州及果洛藏族自治州,整体表现为由西北向东南递减的趋势。进一步分析表明,黄河流域水源涵养价值高值区(0~12.58万元/km²)主要分布于流域西部,与扎陵湖、鄂陵湖等大型淡水湖泊的分布密切相关;长江流域高值区集中于西北部,而澜沧江流域则呈现东部与西北部双核心分布模式,其空间分异主要受流域内湿地面积比例及土地利用类型影响。其余生态系统服务功能的价值量及空间分布特征表现为:①气候调节(0~6.54万元/km²),长江流域北部因草地覆盖度高,成为主要高值区;②土壤保持(0~3.62万元/km²),高值区集中于长江流域东南部,与森林生态系统的水土保持功能密切相关;③栖息地保护(0~1.52万元/km²)与景观美学(0~3.25万元/km²),空间分布受自然保护区与典型地貌单元(如冰川、湖泊)的区位影响显著;④空气净化(0~1.51万元/km²),与植被净初级生产力(NPP)的空间分异规律一致。

3 讨论

3.1 三江源地区生态系统服务功能价值特征及其空间格局

三江源地区是中国的主要生态功能区,其巨大的生态价值对我国的生态状况及国民经济发展起重要作用。通过对三江源地区2023年生态系统服务功

能价值的评估,研究表明(图1),三江源地区水源涵养、气候调节功能价值占较大比例,这与陈春阳等^[31]的研究结果一致。原因在于三江源地区拥有众多湖泊、河流,其中扎陵湖与鄂陵湖是黄河干流上最大的两个淡水湖,在水源涵养方面发挥了重要作用。三江源湿地、草地总面积占三江源总面积的87%,其调节温度、增加湿度的功能对维护生态系统结构保持生态平衡具有重要意义。各流域功能价值量排序稍有差别,其原因在于各流域水源涵养功能价值量与流域内河湖-湿地的面积分布呈正相关,澜沧江流域因森林覆盖率较高,其空气净化功能价值超越景观美学功能价值,形成区别于其他流域的独特排序特征。

基于三江源地区生态系统服务价值(ESV)评估数据,其空间分布呈现异质性。其中,水源涵养、土壤保持、栖息地保护、景观美学4项功能价值表现为“北高南低”的格局,而气候调节、空气净化功能价值则呈现“东高西低”的分布特征,这与姚俊飞等^[32]的研究结果一致。这一空间分布规律与三江源地区的地形梯度、水热条件、湿地分布、植被覆盖及人类活动强度等因素密切相关,并可通过遥感观测与实地调查数据得到验证^[33]。三江源北部以昆仑山脉-扎陵湖-鄂陵湖流域为主,地势较高,冰川融水补给充足,湿地与湖泊分布密集,使得水源涵养能力显著高于南部。北部高寒草甸覆盖度高于南部,增强土壤保持能力。南部地区(如玉树、果洛)受放牧、道路建设等人类活动影响更强,导致栖息地破碎化程度较高。东部巴颜喀拉山迎风坡降水较多,森林(如云杉、冷杉林)和灌丛生态系统占优,植被固碳释氧能力突出,因此气候调节与空气净化功能更强。西部可可西里等区域降水稀少,植被以低覆盖度草原为主,荒漠化趋势较强,生态系统调节服务较弱。

3.2 基于生态系统服务价值的保护策略建议

各行政单元与流域依据生态系统服务功能价值与其空间分布制定差异化保护策略。玉树、果洛藏族自治州的气候调节与土壤保持价值较高,但该区

域海拔高,地形多为高原山地,土壤侵蚀较为严重,可实施“地形-植被”适配型修复:在海拔 $<4\,000\text{ m}$ 区域推广乡土树种(如祁连圆柏)混交林, $>4\,000\text{ m}$ 区域以高山灌草带修复为主,同时构建三级防治网络:坡面(梯田+鱼鳞坑)-沟道(谷坊)-流域(拦沙坝)系统性治理,减少土壤侵蚀(参照《三江源国家公园生态修复技术导则》)。海西、玉树、果洛藏族自治州的

水源涵养价值较高,且该区域贡献了长江、黄河源区径流量的45%以上,但该区域生态支撑力与生态承载力较弱^[34],建议建立“水文-生物-化学”三维监测体系:布设自动水质监测站,禁止湿地核心区放牧,鼓励外围缓冲带人工种草。完善湿地水体动态监测与健康评价机制,建立水源地污染风险预警系统,保障水质安全。

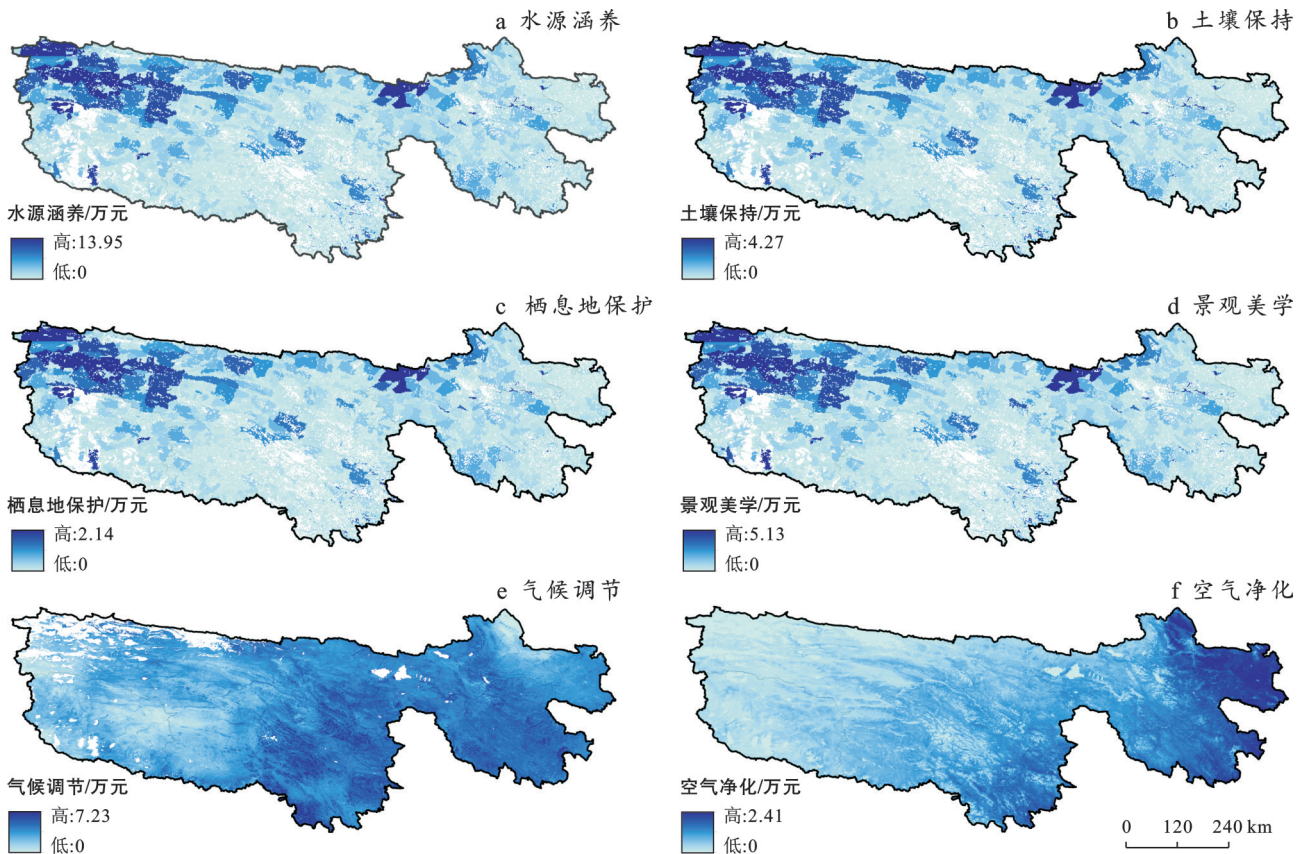


图1 三江源地区各类生态系统服务功能价值量空间分布

Fig.1 Spatial distribution of ecosystem service function values in Sanjiangyuan region

4 结论

(1) 三江源地区生态系统服务功能总价值达2 464.85亿元,各功能价值量差异显著,排序依次为:水源涵养(934.01亿元,38%) $>$ 气候调节(466.03亿元,19.0%) $>$ 水土保持(354.05亿元,14%) $>$ 栖息地保护(276.44亿元,11%) $>$ 景观美学(234.89亿元,10%) $>$ 空气净化(199.43亿元,8.0%)。其中,水源涵养、气候调节和水土保持三大功能贡献突出,合计比例达71%,凸显了该地区在水源涵养、气候调节及水土保持方面的核心生态功能。

(2) 三江流域生态系统服务价值空间分布呈现异质性。长江流域贡献最大(1 262.39亿元,56.8%),其次为黄河流域(729.91亿元,32.8%)和澜沧江流域

(230.81亿元,10.4%)。单位面积价值量表现为长江流域(79.4万元/ km^2) $>$ 黄河流域(73.7万元/ km^2) $>$ 澜沧江流域(62.7万元/ km^2),反映了不同流域生态系统的服务效率差异。水源涵养功能在三大流域中均占据主导地位,但所占比例存在差异:长江流域(41.6%) $>$ 黄河流域(36.5%) $>$ 澜沧江流域(27.8%)。三江源地区及三江流域的生态系统服务功能价值空间分异明显,水源涵养功能占据核心地位,而流域间差异主要受自然地理特征(如湿地分布、森林覆盖率)的影响。

(3) 基于生态系统服务功能评估结果,结合各自治州生态服务价值量及其空间异质性特征,明确核心功能区定位。气候调节与水土保持功能区:玉树藏族自治州和果洛藏族自治州;水源涵养与地下水

补给功能区:海西蒙古族藏族自治州、玉树藏族自治州及果洛藏族自治州。

参考文献 (References)

- [1] 冯晓珂,黄斌斌,李若男,等.三江源区生态系统和土壤保持服务对未来气候变化的响应特征[J].生态学报,2020,40(18):6351-6361.
Feng Xiaoyu, Huang Binbin, Li Ruonan, et al. Response characteristics of ecosystems and soil conservation services to future climate change in the three-rivers region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(18):6351-6361.
- [2] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J].地理学报,2012,67(1):3-12.
Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(1):3-12.
- [3] 何敏.打造生态文明高地 守护好“中华水塔”[N].青海日报,2024-09-19(1).
He Min. Building an ecological civilization highland and guarding the ‘Water Tower of China’ [N]. *Qinghai Daily*, 2024-09-19(1).
- [4] 桑春云,王倩,郭建茂,等.三江源牧草气候生产力变化及对气象干旱的响应[J].中国农业气象,2024,45(1):12-22.
Sang Chunyun, Wang Qian, Guo Jianmao, et al. Change in forage grass climate productivity and response to meteorological drought in Sanjiangyuan [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024,45(1):12-22.
- [5] 高文明,宋芊,张皓翔,等.三江源区生态脆弱性时空演变及驱动因素分析[J].生态环境学报,2024,33(10):1648-1660.
Gao Wenming, Song Qian, Zhang Haoxiang, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving factors of ecological vulnerability in Sanjiangyuan region [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2024,33(10):1648-1660.
- [6] 余欢,李鹏,王孝康,等.三江源地区2000—2020年水土保持服务时空变化及驱动因素[J].水土保持通报,2025,45(1):286-295.
She Huan, Li Peng, Wang Xiaokang, et al. Spatial and temporal changes and its driving factors of soil and water conservation services in Sanjiangyuan region during 2000—2020 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025,45(1):286-295.
- [7] 苟廷佳.生态产品价值实现推动乡村振兴发展的路径分析:以三江源地区为例[J].河北农业科学,2025,29(1):7-12.
Gou Tingjia. Analysis of the path for realizing ecological product value and promoting rural revitalization and development: Taking three river sources region as an example [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2025,29(1):7-12.
- [8] 许海英,杨超,李清泉.三江源国家公园生态系统服务价值的时空演变[J].生态学杂志,2024,43(6):1881-1890.
Xu Haiying, Yang Chao, Li Qingquan. Spatial-temporal variations of ecosystem service value in Sanjiangyuan National Park [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024,43(6):1881-1890.
- [9] Daily G C. Nature’s Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]// *The Future of Nature: Documents of Global Change*. Libby Robin, Sverker Sörlin, Paul Warde (ed). New Haven: Yale University Press, 2013.
- [10] 杨海江,勾晓华,唐呈瑞,等.2010—2021年中国森林生态系统服务功能价值评估研究进展[J].生态学杂志,2024,43(1):244-253.
Yang Haijiang, Gou Xiaohua, Tang Chengrui, et al. Research progress on the valuation of forest ecosystem services in China during 2010 to 2021 [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024,43(1):244-253.
- [11] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015,30(8):1243-1254.
- [12] 聂伟博.张掖市森林生态系统服务价值核算:以2020年为例[J].农业与技术,2024,44(20):48-51.
Nie Weibo. Valuation of forest ecosystem services in Zhangye City: A case study of 2020 [J]. *Agriculture and Technology*, 2024,44(20):48-51.
- [13] 刘芊池,蔡君,解梦婷,等.黄河下游山东段国家湿地公园生态系统服务价值评估[J].湿地科学,2024,22(5):697-706.
Liu Qianchi, Cai Jun, Xie Mengting, et al. Assessment of ecosystem service value of national wetland parks along the Shandong section of the Yellow River [J]. *Wetland Science*, 2024,22(5):697-706.
- [14] 王奕淇,孙学莹.黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素[J].环境科学,2024,45(5):2767-2779.
Wang Yiqi, Sun Xueying. Spatiotemporal evolution and influencing factors of ecosystem service value in the Yellow River basin [J]. *Environmental Science*, 2024,45(5):2767-2779.
- [15] 姜晗,吴群.基于LUCC的江苏省生态系统服务价值评

- 估及时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(11): 2712-2725.
- Jiang Han, Wu Qun. Ecological service value evaluation and temporal-spatial evolution characteristics in Jiangsu Province based on LUCC [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(11): 2712-2725.
- [16] 肖骁, 李京忠, 杨新军, 等. 黄河流域中上游林草生态调节服务功能价值核算[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7830-7844.
- Xiao Xiao, Li Jingzhong, Yang Xinjun, et al. Evaluation of forest-grassland ecosystem services value in the upper and middle reaches of the Yellow River basin, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7830-7844.
- [17] 王庆璞, 徐一鸣, 董世魁, 等. 近 40 年青藏高原生态系统服务价值时空动态变化与驱动力分析[J/OL] (2025-05-20). 草业科学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250520.1505.004.html>.
- Wang Qingpu, Xu Yiming, Dong Shikui, et al. Analysis of spatial and temporal dynamics and drivers of ecosystem service value on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2020 [J/OL] (2025-05-20). Pratacultural Science, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.S.20250520.1505.004.html>.
- [18] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 等. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1660-1672.
- Qiao Bin, Zhu Cunxiong, Cao Xiaoyun, et al. Spatial autocorrelation analysis of land use and ecosystem service value in Maduo County, Qinghai Province, China at the grid scale [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [19] 何晓燕. 三江源草地生态系统服务价值评估[J]. 青海草业, 2021, 30(3): 29-36.
- He Xiaoyan. Evaluation of the grassland ecosystem services in the source region of three rivers [J]. Qinghai Prataculture, 2021, 30(3): 29-36.
- [20] 肖建设, 乔斌, 陈国茜, 等. 黄河源区玛多县土地利用和生态系统服务价值的演变[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 510-521.
- Xiao Jianshe, Qiao Bin, Chen Guoqian, et al. Land use change and evolution of ecosystem service value in Maduo County of source region of the Yellow River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 510-521.
- [21] 曾纳, 任小丽, 何洪林, 等. 三江源国家公园草地地上生物量时空动态及其气候影响[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1175-1184.
- Zeng Na, Ren Xiaoli, He Honglin, et al. Spatial-temporal dynamics of the grassland aboveground biomass and its association with climate changes in the Three River Source National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1175-1184.
- [22] 王天宏, 蒋馥根, 龙依, 等. 1990—2020 年长江源地区生态环境质量动态变化及驱动力分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(3): 110-118.
- Wang Tianhong, Jiang Fugen, Long Yi, et al. Dynamic changes and driving forces of ecological environment quality in the source region of the Yangtze River from 1990 to 2020 [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(3): 110-118.
- [23] 张丽平, 敖洋轩, 徐龙坤, 等. 三江源地区蒸散发时空特征及其原因分析[J]. 科技创新与应用, 2021, 11(11): 1-8.
- Zhang Liping, Ao Yangqian, Xu Longkun, et al. Spatial and temporal characteristics of evapotranspiration in the sanjiangyuan area and their causes analysis [J]. Technology Innovation and Application, 2021, 11(11): 1-8.
- [24] 尹泓琳. 三江源典型流域降雨-径流模拟及驱动因素研究[D]. 青海 西宁: 青海大学, 2019.
- Yin Honglin. Study on rainfall-runoff simulation and driving factors in typical watershed of the three-river headwaters [D]. Xining, Qinghai: Qinghai University, 2019.
- [25] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- Xie Gaodi, Zhen Lin, Lu Chunxia, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(5): 911-919.
- [26] Escobedo F J, Nowak D J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest [J]. Landscape and Urban Planning, 2009, 90(3/4): 102-110.
- [27] Janhäll S. Review on urban vegetation and particle air pollution: Deposition and dispersion [J]. Atmospheric Environment, 2015, 105: 130-137.
- [28] Selmi W, Weber C, Rivière E, et al. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg City, France [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 17: 192-201.
- [29] 曾梦婷, 李志刚. 基于改进价值当量因子的北京市生态-经济协调度实证分析[J]. 生态经济, 2021, 37(4): 163-169.
- Zeng Mengting, Li Zhigang. An empirical analysis of eco-economic coordination degree in Beijing based on improved value equivalent factor [J]. Ecological Economy, 2021, 37(4): 163-169.