

水电开发对河流生态系统生产总值的影响

李沁园^{1,2}, 陈默³, 张思九¹, 任玉峰⁴, 林育青^{1,5}, 陈求稳^{1,5}

(1. 南京水利科学研究院生态环境研究所, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 宁波市水利水电规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000; 4. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443000; 5. 河海大学长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要:为探究水电开发对河流生态系统生产总值的影响,构建了水电开发下河流生态系统生产总值核算指标体系,以澜沧江与怒江为有无水电开发的典型河流,核算了澜沧江与怒江2016年和2021年河流生态系统生产总值并进行了对比分析。结果表明:以2021年价格为不变价格计算,2016—2021年澜沧江和怒江河流生态系统生产总值分别从1165.61亿元和385.53亿元增加至1264.22亿元和394.24亿元;调节服务价值始终占据河流生态系统生产总值的主要地位,水电开发提高了河流水电能源和洪水调蓄价值,降低了河流输沙、生境多样性及固碳增汇价值;水电开发提升了河流生态系统生产总值,使单位面积河流生态系统生产总值平均增加了0.87亿元/km²,促进了河流生态系统产品价值的实现,产生了显著社会经济效益。

关键词:河流生态系统生产总值;生态产品价值;水电开发;澜沧江;怒江

中图分类号:X826;X37 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)06-0233-09

Impact of hydropower development on gross river ecosystem product//LI Qinyuan^{1,2}, CHEN Mo³, ZHANG Sijiu¹, REN Yufeng⁴, LIN Yuqing^{1,5}, CHEN Qiwen^{1,5}(1. *Eco-Environmental Research Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China*; 2. *College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 3. *Ningbo Water Conservancy & Hydropower Planning and Design Institution Co., Ltd., Ningbo 315000, China*; 4. *China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China*; 5. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: To investigate the impact of hydropower development on the gross river ecosystem product, an accounting index system of gross river ecosystem product under hydropower development was constructed. With the Lancang River and Nu River used as typical rivers with and without hydropower development, the gross river ecosystem products of the rivers in 2016 and 2021 were calculated, and a comparative analysis was performed. The results showed that, with the price of 2021 used as the constant price, the gross river ecosystem product of the Lancang River increased from 116.561 billion RMB to 126.422 billion RMB during 2016 to 2021, and that of the Nu River increased from 38.553 billion RMB to 39.424 billion RMB. The regulation service value always contributed the most to the gross river ecosystem product. Hydropower development increased the values of hydropower energy and flood regulation of rivers, but reduced the values of sediment transport, habitat diversity, and carbon sequestration. Hydropower development significantly increased the gross river ecosystem product at a rate of 87 million RMB per year on average, promoting the value realization of river ecosystem products and producing significant social and economic benefits.

Key words: gross river ecosystem product; value of ecological products; hydropower development; Lancang River; Nu River

河流生态系统为人类提供了至关重要的生态系统服务,如水资源供给、水产品、水质净化、气候调节、洪水调蓄等^[1]。构建河流生态系统服务功能价

值评估体系,核算河流生态系统服务功能价值对平衡河流开发与保护具有重要意义。Costanza等^[2-3]构建了生态系统服务价值评估指标体系,促进了全

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3203900);国家自然科学基金创新研究群体项目(52121006);国家自然科学基金面上项目(52379070)

作者简介:李沁园(1995—),女,博士研究生,主要从事水生态系统服务功能价值评价研究。E-mail:liqinyuan1102@163.com

通信作者:林育青(1982—),女,正高级工程师,博士,主要从事流域水电开发生态保护研究。E-mail:yqlin@nhri.cn

球范围内生态系统服务价值的评估。欧阳志云等^[4]首次提出了生态系统生产总值的概念,将其定义为生态系统为人类福祉和经济社会可持续发展提供的产品与服务价值的总和,以揭示生态系统对经济社会发展 and 人类福祉的贡献,为评估生态系统保护效益与成效提供科学基础。已有研究针对水生态系统^[5]、流域生态系统^[6]和不同区域^[7-10]开展了生态系统生产总值指标体系构建和价值核算研究,但缺乏符合河流生态系统特征的相关研究,导致难以定量评估河流生态系统对社会经济发展的支撑作用。

随着社会经济发展对能源、防洪和水资源需求的提高,全球水电开发规模持续扩大^[11]。水电开发显著提升了河流生态系统防洪、发电、航运等服务功能^[12],将河流生态系统自然价值转化为可利用的经济价值,但也不可避免地破坏了河流连通性^[13],改变了河流水文水温情势^[14-15]、泥沙情势与河貌^[16],影响了河流生物地球化学循环^[17],破坏了水生生物栖息地^[18-19],进而影响了生境多样性以及河流输沙等基本服务功能,也影响了河流生态系统的稳定性及其服务功能的可持续性^[20]。已有研究通过计算单个水电开发项目实施前后河流生态系统服务功能的变化量来评估水电开发对河流生态系统服务功能的影响,揭示水电开发的实际生态效益和生态成本^[21-24],且通过对河流生态系统服务评估分析了梯级水电开发的生态影响^[25-26]。然而,已有指标核算方法未充分考虑水电开发后的河流生态系统特征和服务功能变化,水电开发前后的对比分析未排除社会经济发展和气候等环境条件变化的影响;为缓解建坝对河流生态系统的影响,通常采取相应保护措施并投入大量成本^[16,27-28],已有研究中均未考虑该成本对河流生态系统实际价值的影响。因此,水电开发下河流生态系统的实际价值尚未厘清,水电开发对河流生态系统服务功能的定量影响程度尚不明确,难以指导河流水电开发与生态保护协同工作。

本文针对水电开发下河流生态系统特征和服务功能特点,考虑相关保护措施的投入成本,构建水电开发下河流生态系统生产总值核算指标体系,并选择自然地理条件相似、社会经济发展水平一致的澜沧江和怒江作为有无水电开发的典型实例进行河流生态系统生产总值对比分析,定量分析水电开发对河流生态系统的直接影响,为协同河流生态价值实现与生态系统保护提供科学参考。

1 水电开发下河流生态系统生产总值核算指标体系

1.1 指标体系

通过分析水电开发下河流生态系统特征与功

能,根据全面性、科学性、典型性、可比性和可操作性指标筛选原则,参考水生态系统生产总值评估指标体系^[5],构建河流生态系统生产总值核算指标体系(图1),分为物质产品、调节服务和文化服务3大类,共12项核算指标。

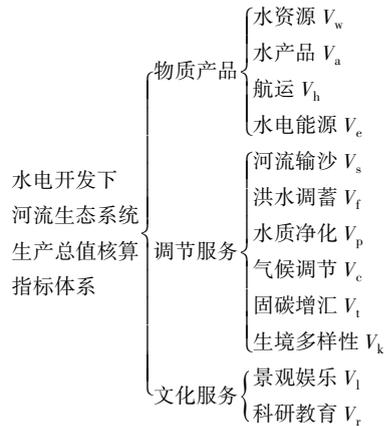


图1 水电开发下河流生态系统生产总值核算指标体系
Fig. 1 Accounting index system of gross river ecosystem product under hydropower development

1.2 核算方法

河流生态系统生产总值核算主要包括对各指标的功能量计算、价格确定和价值计算。

1.2.1 物质产品

a. 水资源。河流具有丰富的水资源,为工农业发展、人类生产生活及生态环境提供用水。以河流供水量表征水资源供给的功能量,采用市场价值法核算其价值:

$$V_w = Q_w P_w \quad (1)$$

式中: V_w 为水资源价值; Q_w 为供水总量; P_w 为水权交易价格。

b. 水产品。根据数据可获得性,以鱼类产品价值作为河流水产品价值评估依据。为减缓水电开发对鱼类的影响,采取了过鱼设施建设、增殖放流和支流生境替代等保护措施,均投入了运行成本,支流拆坝以恢复鱼类生境也损失了部分小水电发电效益^[16]。用市场价值法计算鱼类产品价值,减去保护措施成本核算水产品的实际价值:

$$V_a = G_f P_f - (W_{ez} P_e + I_i) - (I_x + I_y) - (I_m + I_n) \quad (2)$$

式中: V_a 为水产品价值; G_f 为鱼类捕捞量; P_f 为鱼类市场价格; W_{ez} 为支流小水电年发电量; P_e 为当年上网电价; I_i 为支流生境修复年投入成本; I_x 为增殖放流站年运行成本; I_y 为增殖放流年投入成本; I_m 为过鱼设施建设年均投入成本; I_n 为过鱼设施年维护成本。

c. 航运。河流具有航运功能,航运功能量为货物和旅客的周转量,采用市场价值法计算航运价值:

$$V_h = T_g P_g + T_p P_p \quad (3)$$

式中: V_h 为航运价值; T_g 为货物周转量; P_g 为货运价格; T_p 为旅客周转量; P_p 为客运价格。

d. 水电能源。水电开发将河流势能转化为电能,为人类社会经济发展提供水电清洁能源。水电能源功能量为各水电站每年的总发电量,采用市场价值法核算其价值:

$$V_e = W_e P_e \quad (4)$$

式中: V_e 为水电能源价值; W_e 为干流年水力发电量。

1.2.2 调节服务

a. 河流输沙。河流输沙对生物地球化学循环、河貌演变等有重要作用,影响和调节河流生态系统功能与过程。水电开发拦截泥沙导致库区泥沙淤积,产生了人工清淤的成本,但清理出的淤积泥沙通过资源化利用可产生一定的经济价值。对于国际河流,下游河流泥沙输送至境外,造成泥沙资源流失,损失了泥沙资源开发利用的价值。采用替代成本法,用淤积泥沙资源化利用产生的价值减去流失的泥沙资源价值和水库清淤成本核算河流输沙价值:

$$V_s = S_d P_s - S_s P_s - S_d I_d \quad (5)$$

式中: V_s 为河流输沙价值; S_d 水库库内泥沙淤积总量; P_s 为泥沙市场价格; S_s 为河流输沙量; I_d 为单位体积清淤成本。泥沙淤积量和输沙量用 InVEST 模型中的泥沙输移比模块计算,模型中水库泥沙拦截率采用 Brune 模型计算^[29]。

b. 洪水调蓄。河流自身具有较强的蓄水和下渗能力,能够调蓄洪水、削减洪峰。水库可蓄积上游洪水、为下游补充水资源,显著提高河流调洪补枯的能力。洪水调蓄功能量为河道和水库洪水调蓄能力,采用替代成本法核算其价值:

$$V_f = (Q_f + \sum_{i=1}^n Q_i) I_f \quad (6)$$

式中: V_f 为洪水调蓄价值; Q_f 为河道洪水调蓄能力; Q_i 为水库 i 的洪水调蓄能力,利用水库洪水调蓄功能评价模型^[30]计算; n 为水库总数; I_f 为水库单位体积蓄水的成本。

c. 水质净化。河流具有一定自净能力,可降解水体污染物,净化水质。结合数据可获得性,选取总氮、总磷表征水质状况。采用综合水质标识指数法^[31]核算水质净化价值:

$$V_p = \begin{cases} X_{np} P_{np} & \rho_w \leq \rho_s \\ I_a & \rho_w > \rho_s \end{cases} \quad (7)$$

式中: V_p 为水质净化价值; X_{np} 为氮磷负荷量,通过 InVEST 模型中的水质净化模块计算; P_{np} 为按肥料价格折算的氮磷单价; I_a 为污染物人工处理费用。

ρ_w 为河流污染物质量浓度; ρ_s 为功能区地表水环境质量标准对应的污染物质量浓度。

d. 气候调节。河流水面蒸发可吸收热量,降低环境温度,提高空气湿度,调节局部微气候。水电开发可增加水面面积,影响河流生态系统气候调节的功能。气候调节功能量为河流水面蒸发量,采用替代成本法核算其价值:

$$V_c = (A_w E \beta) P_v \quad (8)$$

式中: V_c 为气候调节价值; A_w 为水面面积; E 为年均蒸发量; β 为 1 m^3 水转化为蒸汽所需电量, $\beta = 125 \text{ kJ/m}^3$; P_v 为居民用电价。

e. 固碳增汇。河流水体中的浮游植物以及河岸带两侧陆地上的植物均可利用光合作用固定大气中的 CO_2 , 并将产生的有机物储存在自身组织中^[32], 从而起到固碳增汇的作用。根据光合作用反应方程式,理论上植物每生产 1 g 干物质可吸收 1.63 g CO_2 。固碳增汇功能量为浮游植物及河岸带陆域植物固碳量,采用市场价值法核算其价值:

$$V_l = C P_l \quad (9)$$

式中: V_l 为固碳增汇价值; C 为固碳量; P_l 为碳排放权交易价格。

f. 生境多样性。河流生态系统为水生生物提供了多样的生境,对维持生物多样性具有重要作用。水电开发减少了一定面积的适宜生境^[33], 导致需投入额外成本修复生境。采用成果参照法,用适宜生境面积的价值减去生境修复投入成本核算生境多样性价值:

$$V_k = A_k P_k - I_h \quad (10)$$

式中: V_k 为生境多样性价值; A_k 为适宜生境面积; P_k 为单位面积生境多样性价值; I_h 为生境修复成本。

1.2.3 文化服务

a. 景观娱乐。河流生态系统具有优美的人文自然景观,为游客提供了观光休闲娱乐价值。采用成果参照法核算景观美学价值,采用旅行费用法核算休闲娱乐价值:

$$V_l = A_e V_{lu} + R_j N \quad (11)$$

式中: V_l 为景观娱乐价值; A_e 为河流生态系统面积; V_{lu} 为单位面积河流景观美学价值; R_j 为旅游总收入; N 为河流景观旅游收入占旅游总收入比例,由《2000 年入境旅游者抽样调查分析报告》数据分析可知,自然山水风光旅游收入占旅游总收入的比例为 24.60% ,取河流景观旅游收入在自然山水风光旅游收入中占比为 50% ^[34],因此取 $N = 12.30\%$ 。

b. 科研教育。河流是科学研究的重点区域和教育科普的重要场所,具有科研价值和教育功能。采用成果参照法核算科研教育价值:

$$V_r = A_e V_m \quad (12)$$

式中: V_r 为科研教育价值; V_m 为单位面积河流科研教育价值。

2 实例分析

2.1 研究区概况

本文以澜沧江作为水电开发、怒江作为无水电开发的典型河流进行对比分析,定量研究水电开发对河流生态系统生产总值的影响。澜沧江和怒江是我国西南地区重要的国际河流,均发源于青藏高原,两江的地理位置和区域水文、气候等自然地理条件基本相似(图2)。怒江流域位于 $23^{\circ}5'N \sim 32^{\circ}48'N$ 、 $91^{\circ}13'E \sim 100^{\circ}15'E$,怒江干流全长约为 2013 km,流域面积为 13.6 万 km^2 ,是我国唯一干流没有进行水电开发的自然河流。澜沧江流域位于 $21^{\circ}6'N \sim 33^{\circ}48'N$ 、 $93^{\circ}48'E \sim 101^{\circ}51'E$,流域面积为 16.48 万 km^2 。2016 年前,澜沧江已开发了功果桥、小湾、漫湾、大朝山、糯扎渡和景洪 6 座水电站;2016—2021 年,澜沧江又在功果桥水电站以上河段开发了乌弄龙、里底、托巴、黄登、大华桥和苗尾 6 座水电站。结合澜沧江梯级水电开发时间与数据可获得性,选择 2016 年和 2021 年为典型年份,分别核算澜沧江与怒江的河流生态系统生产总值。

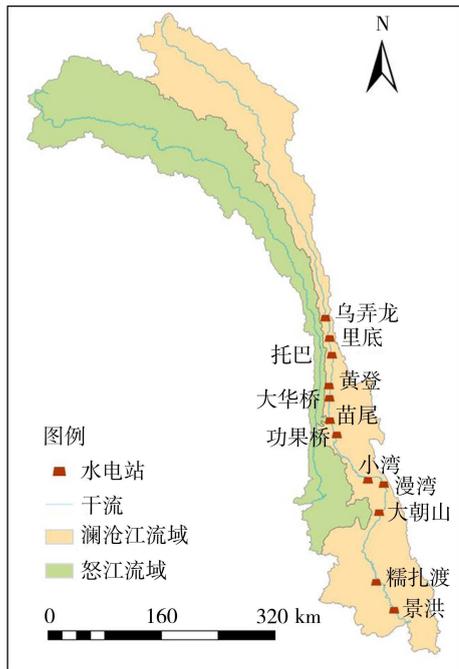


图2 研究区域

Fig. 2 Study area

河流生态系统生产总值主要考虑河流水体为人类带来的福祉,考虑到水电开发会影响陆域与水域生态系统之间的连接带与过渡区,进而影响区域提供的服务功能,因此,本文核算的研究区包括河道内

水域和河岸带陆域两部分。水域部分基于遥感解译的土地利用数据提取研究区水体面积,陆域部分参考《河湖生态缓冲带保护修复技术指南》中河流生态缓冲带陆域缓冲区范围的确定方法,对属于生态保护型且植被良好型河流的澜沧江和怒江干流,陆域缓冲区宽度不宜低于 30 m,因此在水域边界两侧分别构建 30 m 的陆域缓冲区。将水域面积和陆域面积相加分别得到两江的河流生态系统面积,如表 1 所示。

表1 澜沧江和怒江河流生态系统面积
Table 1 River ecosystem area of the Lancang River and Nu River

河流	年份	水域面积/ km^2	陆域面积/ km^2	河流生态系统 面积/ km^2
澜沧江	2016	524.17	157.81	681.98
	2021	534.75	158.73	693.48
怒江	2016	291.90	142.38	434.28
	2021	287.74	142.98	430.72

2.2 数据来源

本文使用数据包括 2016 年和 2021 年水文气象、地理信息和社会经济等数据,来源于水资源公报、水文年鉴、统计年鉴、文献资料和相关部门公开数据等。为消除社会经济发展导致价格变动的影响,选择规定不变价格的方式,以 2021 年的价格为不变价格,对 2016 年澜沧江和怒江河流生态系统生产总值进行换算,便于对不同年份结果进行比较。

根据对相关部门的调研并结合文献资料,估算了各项保护措施投入的成本。支流生境替代保护措施中,基独河作为澜沧江苗尾水电站的鱼类栖息保护地,于 2012 年拆除了已建水电站,损失年发电量约为 0.54 亿 $kW \cdot h$,2016 年和 2021 年支流生境修复年投入成本分别约为 0.24 亿元和 0.68 亿元,采取支流生境替代措施的总投入成本分别约为 0.34 亿元和 0.80 亿元。据调研,2016 年和 2021 年澜沧江干流水电开发河段的生境修复投入成本分别约为 0.88 亿元和 3.13 亿元。澜沧江目前已建有糯扎渡、功果桥和黄登等人工鱼类增殖放流站,已放流巨鲈、澜沧裂腹鱼、后背鲈鲤等多种人工增殖鱼类,2016 年和 2021 年增殖放流成本分别为 0.99 亿元和 3.04 亿元。为促进怒江渔业可持续发展,怒江已放流怒江裂腹鱼和后背鲈鲤等多种鱼类,2016 年和 2021 年增殖放流成本分别约为 0.69 亿元和 1.34 亿元;乌弄龙、黄登和大华桥等水电站建有升鱼机和集运鱼系统^[35],2016 年和 2021 年过鱼设施建设年均投入和维护成本分别为 0.07 亿元和 1.43 亿元。

2.3 澜沧江和怒江河流生态系统生产总值变化

2016 年和 2021 年澜沧江河流生态系统生产总

值分别为 845.05 亿元和 1264.22 亿元,以 2021 年的价格为不变价格换算后,2016 年澜沧江河流生态系统生产总值为 1 165.61 亿元,2021 年较 2016 年增长 98.61 亿元,增幅达 8.5%(表 2)。

表 2 澜沧江河流生态系统生产总值

Table 2 Gross river ecosystem product of the

Lancang River

服务类型	指标	服务功能价值/亿元			服务功能价值变化量/亿元
		2016 年 (换算前)	2016 年 (换算后)	2021 年	
物质产品	水资源	8.48	14.94	14.97	0.03
	水产品	3.35	5.13	10.11	4.98
	航运	5.47	7.92	9.58	1.66
	水电能源	112.10	131.29	182.24	50.95
调节服务	河流输沙	149.67	230.87	220.06	-10.81
	洪水调蓄	357.34	524.49	575.70	51.21
	水质净化	0.41	3.54	4.46	0.92
	气候调节	188.55	216.31	217.86	1.55
	固碳增汇	0.28	0.58	0.44	-0.14
	生境多样性	2.65	3.90	1.68	-2.22
文化服务	景观娱乐	7.06	15.34	15.63	0.29
	科研教育	7.69	11.30	11.49	0.19
河流生态系统生产总值		845.05	1165.61	1264.22	98.61

根据价值占比,洪水调蓄、河流输沙、气候调节和水电能源是澜沧江的主要服务功能。2016—2021 年澜沧江河流输沙、生境多样性和固碳增汇的价值有所下降,其他服务功能价值均有所增长。澜沧江河流生态系统生产总值中物质产品、调节服务和文化服务价值分别增长了 57.62 亿、40.51 亿、0.48 亿元,增幅分别为 36.2%、4.1%和 1.8%,物质产品价值增长最大,这与水电能源和水产品价值的显著增加有关。2016 年和 2021 年 3 种服务类型价值对澜沧江河流生态系统生产总值的贡献率均为调节服务最大、物质产品次之、文化服务最小,其中调节服务价值的贡献率大于 80.0%,是澜沧江河流生态系统最主要的服务类型,表明澜沧江对周围环境起到了十分重要的调节作用。相较于 2016 年,2021 年澜沧江物质产品对河流生态系统生产总值的贡献率上升了 3.5%,而调节服务和文化服务的贡献率分别下降了 3.3%和 0.1%。

2016—2021 年澜沧江上游新建了 6 座水电站,水力发电量和防洪库容增加,显著提升了澜沧江水电能源和洪水调蓄的价值。为保障发电所需的水位差,水库水位在非汛期需保持在较高水平,使得水库供水量有所减少,供水量与年发电量呈竞争关系^[36],因此水电开发对水资源价值的提升有限。水库建成淹没了库区碍航险滩,增加了下游河段枯水期流量,提高了航行安全性^[37],促进了货运航线发展和水上旅游客运服务,航运价值提升了

1.66 亿元,推动了河流航运价值的实现。库区环境改善增加了浮游植物生物量,使鱼类饵料增加,库区渔业产量提升^[38]。此外,澜沧江采取了增殖放流、支流生境替代和过鱼设施建设等保护措施^[35],有效维持了鱼类资源量。水电开发程度增强,鱼类捕捞量增加,水产品价值提升了 4.98 亿元,这与澜沧江干流鱼类捕捞量与水库总装机容量呈正相关关系的研究结论^[39]一致。2021 年澜沧江径流量减少造成输沙量下降,水库内泥沙淤积量减少,水库清淤成本降低,可资源化利用的泥沙量减少,导致 2021 年澜沧江河流输沙价值较 2016 年减少了 10.81 亿元。澜沧江水质状况整体较好,属于贫营养河流^[40],2021 年澜沧江上游水电开发后,氮磷含量较 2016 年均呈现增加趋势,但水质状况依旧达到功能区地表水环境质量标准,水质净化能力有所增强。水电开发减少了澜沧江的适宜生境面积^[33],水电开发程度增强使生境修复措施的投入成本随之增加,导致 2021 年澜沧江生境多样性的实际价值较 2016 年减少了 2.22 亿元。澜沧江新增的 6 座水库蓄水增加了水面面积,导致水体蒸发量增加,提升了河流对周围环境气候的调节能力。河流建坝减缓河流流速,水力停留时间增加;泥沙沉降降低水体浊度,促进水体浮游植物光合作用和固碳释氧。但水库蓄水淹没岸边带植被,导致其净初级生产力降低,使得整体固碳增汇价值有所下降。水库建设也带动了河流沿岸旅游业的发展和水库大坝科普教育基地的建设,提升了河流景观娱乐和科研教育的价值。综上,澜沧江河流生态系统生产总值呈增长趋势,水电开发对澜沧江河流生态系统生产总值的正效应大于负效应。

2016 年和 2021 年怒江河流生态系统生产总值分别为 282.08 亿元和 394.24 亿元。按不变价格计算,2016 年怒江河流生态系统生产总值为 385.53 亿元,2021 年较 2016 年增长了 8.71 亿元,增幅为 2.3%(表 3)。

2016—2021 年怒江未提供水电能源和航运价值,主要的服务功能为洪水调蓄和气候调节,这两项服务功能价值之和的平均占比达 95.1%。在此期间,洪水调蓄价值未变,固碳增汇和生境多样性的价值基本保持不变;水产品价值显著增长了 191.3%;气候调节、景观娱乐和科研教育价值有所下降。怒江的物质产品价值增长了 69.7%,调节服务价值增长了 0.5%,文化服务价值下降了 1.8%。相较于 2016 年,2021 年怒江河流生态系统生产总值的 3 种服务类型价值的贡献率略有变化,贡献率排序由调节服务最大、文化服务次之、物质产品最小变为调节服务最大、物质产品次之、文化服务最小。其中,物

表3 怒江河流生态系统生产总值

Table 3 Gross river ecosystem product of the Nu River

服务类型	指标	服务功能价值/亿元			服务功能价值变化量/亿元
		2016年 (换算前)	2016年 (换算后)	2021年	
物质产品	水资源	3.97	7.00	7.80	0.80
	水产品	2.18	3.35	9.76	6.41
	航运	0	0	0	0
	水电能源	0	0	0	0
调节服务	河流输沙	-13.64	-20.62	-16.28	4.34
	洪水调蓄	174.73	256.46	256.46	0
	水质净化	1.42	2.08	2.63	0.55
	气候调节	101.25	115.64	112.54	-3.10
	固碳增汇	0.13	0.26	0.25	-0.01
文化服务	生境多样性	2.39	3.52	3.56	0.04
	景观娱乐	4.75	10.64	10.38	-0.26
	科研教育	4.90	7.20	7.14	-0.06
河流生态系统生产总值		82.08	385.53	394.24	8.71

质产品价值的贡献率提升了1.8%，调节服务价值的贡献率减小了1.6%，文化服务价值的贡献率仅减小了0.1%，调节服务始终是最主要的服务类型。

随着社会经济发展，怒江沿岸用水需求增加，怒江供水量进一步提升，水资源价值增长了0.80亿元。为促进怒江渔业的可持续发展，怒江增殖放流了怒江裂腹鱼和后背鲈等多种鱼类，提升了水产品产量，水产品价值增长了6.41亿元，产生了显著的生态经济效益。2016年和2021年怒江的河流输沙价值计算结果均为负数，分析其原因是怒江无淤积泥沙资源化利用，但向境外输移了大量泥沙，导致泥沙资源流失、河流输沙价值下降。2021年较2016年河流输沙价值的损失减小了21.0%，这与怒江年输沙量下降、泥沙资源量损失减少有关。怒江干流未兴建水库，其洪水调蓄功能仅依靠河道下渗和蓄水能力，因此洪水调蓄价值没有变化。人类活动增强导致怒江氮磷负荷有所增加，但怒江总体水质达标率均为90%以上，说明怒江发挥了重要的水质净化功能。怒江提供的生境多样性价值超过3.50亿元且变化不大，表明怒江在维持生物多样性方面提供了重要的生境栖息地，并且生境多样性功能维持正常水平。与2016年相比，2021年怒江的年蒸发量和水面面积均有所减少，导致2021年怒江水面蒸发量较2016年下降了0.07亿m³，气候调节价值减少了3.10亿元。由于怒江岸边带植被和水体浮游植物生物量变化不大，因此净初级生产力变化不大，固碳增汇价值维持在一定水平。怒江具有美丽的自然风光和人文特色，吸引了众多游客，产生了超10亿元的经济价值。由于2021年怒江河流生态系统面积较2016年有所减少，景观娱乐价值减少了0.26亿元。怒江作为中国

唯一干流未建坝的大型河流，生物多样性丰富，原始生态环境提供了重要的研究和科普价值。综上，怒江河流生态系统生产总值主要受自然生态环境条件变化影响，2021年较2016年有所增长，河流生态系统的服务功能状态稳定。

2.4 水电开发对河流生态系统生产总值的影响

对比分析可知，2016年和2021年澜沧江比怒江的河流生态系统生产总值分别高780.08亿元和869.98亿元。澜沧江2016年和2021年单位面积河流生态系统生产总值分别为1.71亿元/km²和1.82亿元/km²，怒江则分别为0.89亿元/km²和0.92亿元/km²。水电开发提升了河流生态系统生产总值，使单位面积河流生态系统生产总值平均增加了0.87亿元/km²。

澜沧江单位面积河流生态系统生产总值均高于同时期的怒江，2016年和2021年分别超出94.3%和97.8%，表明水电开发显著提升了河流生态系统生产总值，促进了河流生态系统价值的实现。与2016年相比，2021年澜沧江河流生态系统生产总值较怒江高出的比例更大，说明加大水电开发程度能够进一步提升河流生态系统生产总值，产生显著社会效益。在水电开发影响下，河流生态系统物质产品的服务功能显著提升，随着水电开发程度的加大，物质产品服务价值在河流生态系统生产总值中的贡献进一步提高(表4)。澜沧江河流生态系统生产总值的增长比例大于怒江，尤其是将水电能源和航运的自然潜在价值转化为直接经济价值，表明水电开发可有效促进河流生态产品价值实现。除生境多样性外，澜沧江其他服务功能单位面积价值均高于同时期的怒江，证明水电开发对河流生态系统各项服务功能的正面影响均大于负面影响。澜沧江单位面积生境多样性价值均低于怒江，且澜沧江单位面积生境多样性价值有下降趋势，表明水电开发影响了河流生态系统的生境多样性，增加了河流生态系统的修复成本，未来水电开发程度的加强可能会进一步加剧该趋势，需要进一步关注这部分价值损失对河流生态系统服务功能可持续性的影响^[41-42]。

表4 各服务类型价值在河流生态系统生产总值中的占比
Table 4 Proportion of each service type value in gross river ecosystem product

河流	年份	服务类型价值占比/%		
		物质产品	调节服务	文化服务
澜沧江	2016	13.7	84.0	2.3
	2021	17.2	80.7	2.1
怒江	2016	2.7	92.7	4.6
	2021	4.5	91.1	4.4

本文考虑了水电开发河流采取保护措施投入的相应成本,在相关指标核算时减去了这部分成本,因此核算结果符合水电开发河流的实际情况,能够反映河流生态系统为人类提供的实际生态效益,核算结果更为合理。2016年和2021年,云南省生产总值(GDP)分别为14869.95亿元和27146.76亿元,总面积为39.41万km²,单位面积GDP分别为0.038亿元/km²和0.069亿元/km²。怒江和澜沧江单位面积河流生态系统生产总值均高于当年云南省单位面积GDP,表明两江为支撑云南省社会发展提供了重要价值。综上所述,水电开发是河流生态系统价值实现的有效手段,可将河流生态系统蕴藏价值转化为服务人类社会的经济价值,促进“绿水青山”向“金山银山”转化,为社会经济发展提供重要支撑。

3 结论

a. 以2021年价格为不变价格计算,2016—2021年澜沧江河流生态系统生产总值从1165.61亿元增加至1264.22亿元,增长了8.5%,物质产品、调节服务、文化服务价值分别增长了36.2%、4.1%、1.8%;怒江河流生态系统生产总值从385.53亿元增加至394.24亿元,增长了2.3%,物质产品、调节服务价值分别增长了69.7%、0.5%,文化服务价值下降了1.8%。

b. 澜沧江单位面积河流生态系统生产总值均高于同时期的怒江,说明水电开发显著提升了河流生态系统生产总值,促进河流生态系统价值的实现,产生了显著社会经济效益。与2016年相比,2021年澜沧江河流生态系统生产总值较怒江超出的比例更大,证明一定程度上提高水电开发程度能够进一步提升河流生态系统生产总值,促进河流生态系统价值实现。

c. 调节服务始终占据河流生态系统生产总值的主要地位,水电开发下水电能源和洪水调蓄等价值增长,河流输沙、生境多样性及固碳增汇价值下降。水电开发对河流生态系统生产总值的正效应大于负效应,是河流生态价值实现和转化的有效工程途径。

参考文献:

[1] HANNA D E L, TOMSCHA S A, DALLAIRE C O, et al. A review of riverine ecosystem service quantification: research gaps and recommendations [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(3): 1299-1311.

[2] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The

value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.

[3] DAILY G C. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems* [M]. Washington, D. C.: Island Press, 1997.

[4] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等. 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究[J]. *生态学报*, 2013, 33(21): 6747-6761. (OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al. Gross ecosystem product: concept, accounting framework and case study [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(21): 6747-6761. (in Chinese))

[5] 陈默,林育青,张建云,等. 水生态系统生产总值核算体系及应用[J]. *水资源保护*, 2023, 39(1): 234-242. (CHEN Mo, LIN Yuqing, ZHANG Jianyun, et al. Accounting system of gross water ecosystem product and its application [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(1): 234-242. (in Chinese))

[6] 赵锐,任昕芸,苏伟洲,等. 价值核算体系融合物质流分析的沱江流域生态系统生产总值分配研究[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2023, 38(3): 520-528. (ZHAO Rui, REN Xinyun, SU Weizhou, et al. Study on distribution of Tuojiang River Basin gross ecosystem product by value accounting system combined with material flow analysis [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)*, 2023, 38(3): 520-528. (in Chinese))

[7] 吴之见,杜思敏,黄云,等. 基于生态系统生产总值核算的生态保护成效评估:以赣南地区为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6670-6683. (WU Zhijian, DU Simin, HUANG Yun, et al. Assessment of ecological conservation effect in southern Jiangxi Province based on gross ecosystem product [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6670-6683. (in Chinese))

[8] 宋昌素,欧阳志云. 面向生态效益评估的生态系统生产总值GEP核算研究:以青海省为例[J]. *生态学报*, 2020, 40(10): 3207-3217. (SONG Changsu, OUYANG Zhiyun. Gross ecosystem product accounting for ecological benefits assessment: a case study of Qinghai Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 40(10): 3207-3217. (in Chinese))

[9] 陈宗铸,雷金睿,吴庭天,等. 国家公园生态系统生产总值核算:以海南热带雨林国家公园为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3883-3892. (CHEN Zongzhu, LEI Jinrui, WU Tingtian, et al. Gross ecosystem product accounting of national park: taking Hainan Tropical Rainforest National Park as an example [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(11): 3883-3892. (in Chinese))

[10] 曹静怡,刘昌辉,丰莎,等. 水利风景区生态系统生产总值核算[J]. *水利经济*, 2023, 41(5): 38-44. (CAO Jingyi, LIU Changhui, FENG Sha, et al. Gross domestic

- product accounting of ecosystem in water conservancy scenic spot [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2023, 41(5):38-44. (in Chinese))
- [11] ZARFL C, LUMSDON A E, BERLEKAMP J, et al. A global boom in hydropower dam construction[J]. *Aquatic Sciences*, 2015, 77(1):161-170.
- [12] WINEMILLER K O, MCINTYRE P B, CASTELLO L, et al. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong[J]. *Science*, 2016, 351(6269):128-129.
- [13] GRILL G, LEHNER B, THIEME M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019, 569(7755):215-221.
- [14] 尚文绣, 彭少明, 王煜, 等. 小浪底水利枢纽对黄河下游生态的影响分析[J]. *水资源保护*, 2022, 38(1):160-166. (SHANG Wenxiu, PENG Shaoming, WANG Yu, et al. Influence of Xiaolangdi Reservoir on ecological condition of the lower Yellow River[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1):160-166. (in Chinese))
- [15] 王康, 肖洋, 毛劲乔, 等. 水温变化影响下金沙江下游典型鱼类繁殖期研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(2):50-55. (WANG Kang, XIAO Yang, MAO Jingqiao, et al. Study on the spawning period of typical fishes in the lower reaches of Jinsha River under the influence of water temperature change [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(2):50-55. (in Chinese))
- [16] CHEN Qiuwen, LI Qinyuan, LIN Yuqing, et al. River damming impacts on fish habitat and associated conservation measures[J]. *Reviews of Geophysics*, 2023, 61(4):e2023RG000819.
- [17] CHEN Qiuwen, SHI Wenqing, HUISMAN J, et al. Hydropower reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream[J]. *National Science Review*, 2020, 7(9):1449-1457.
- [18] 戴凌全, 张培培, 常曼琪, 等. 三峡水库出库流量变化对洞庭湖定居性鱼类产卵生境的影响[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(5):38-45. (DAI Lingquan, ZHANG Peipei, CHANG Manqi, et al. Effect of outflow from Three Gorges Reservoir on spawning habitat of sedentary fish in Dongting Lake [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2023, 51(5):38-45. (in Chinese))
- [19] 纪道斌, 成再强, 龙良红, 等. 三峡水库不同运行期库首水温分层特性及生态效应[J]. *水资源保护*, 2022, 38(3):34-42. (JI Daobin, CHENG Zaiqiang, LONG Lianghong, et al. Characteristics of thermal stratification in head area of Three Gorges Reservoir and ecological effects in different operation periods [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3):34-42. (in Chinese))
- [20] MORAN E F, LOPEZ M C, MOORE N, et al. Sustainable hydropower in the 21st century [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(47):11891-11898.
- [21] 鲁春霞, 谢高地, 成升魁, 等. 水利工程对河流生态系统服务功能的影响评价方法初探[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5):803-807. (LU Chunxia, XIE Gao, CHENG Shengkui, et al. Approaches to evaluate the effects of hydraulic engineering on river ecosystem services [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5):803-807. (in Chinese))
- [22] 莫创荣, 李霞, 陈新庚, 等. 水电开发对河流生态系统服务功能影响的价值评估方法与案例研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2005, 44(增刊2):250-253. (MO Chuangrong, LI Xia, CHEN Xingeng, et al. Evaluation of hydropower development on river ecosystem services [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(Sup2):250-253. (in Chinese))
- [23] 肖建红, 施国庆, 毛春梅, 等. 水坝对河流生态系统服务功能影响评价[J]. *生态学报*, 2007, 27(2):526-537. (XIAO Jianhong, SHI Guoqing, MAO Chunmei, et al. Evaluation of effects of dams on river ecosystem service functions in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2):526-537. (in Chinese))
- [24] 魏国良, 崔保山, 董世魁, 等. 水电开发对河流生态系统服务功能的影响:以澜沧江漫湾水电工程为例[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(2):235-242. (WEI Guoliang, CUI Baoshan, DONG Shikui, et al. Impact of hydropower development on river ecosystem service: a case study from the Manwan Hydropower Project [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(2):235-242. (in Chinese))
- [25] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析:以武江干流为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9):2163-2176. (JIA Jianhui, CHEN Jianyao, LONG Xiaojun, et al. Evaluating the cumulative impacts of the hydropower development on the river ecosystem services in terms of spatial and temporal aspects: a case study in the mainstream of the Wujiang River [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9):2163-2176. (in Chinese))
- [26] 杨远祥, 申文金, 杨占彪, 等. 白龙江上游水梯级开发对河流生态系统服务功能的影响[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(7):21-25. (YANG Yuanxiang, SHEN Wenjin, YANG Zhanbiao, et al. Impact of hydropower cascade development on river ecosystem service functions of upper Bailongjiang River [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2014, 45(7):21-25. (in Chinese))
- [27] 吉小盼, 谭平, 刘园, 等. 长江流域上游梯级电站生态调度研究现状[J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(5):8-14. (JI Xiaopan, TAN Ping, LIU Yuan, et al. Research status of ecological operation of cascade hydropower stations in the upper Yangtze River Basin [J]. *Advances in*

- Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (5):8-14. (in Chinese))
- [28] 雷阳,董飞,刘晓波,等. 拆坝对河流生态环境影响利弊研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(4): 94-102. (LEI Yang, DONG Fei, LIU Xiaobo, et al. Review on influence of dam removal on advantages and disadvantages of river ecological environment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(4): 94-102. (in Chinese))
- [29] 傅开道,何大明. 澜沧江干流水库拦沙效应分析与预测[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊2): 117-122. (FU Kaidao, HE Daming. Analysis and prediction of sediment trapping efficiencies of the reservoirs in the mainstream of the Lancang River[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Sup2): 117-122. (in Chinese))
- [30] 饶恩明,肖焱,欧阳志云. 中国湖库洪水调蓄功能评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1356-1365. (RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun. Assessment of flood regulation service of lakes and reservoirs in China[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(8): 1356-1365. (in Chinese))
- [31] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 482-488. (XU Zuxin. Comprehensive water quality identification index for environmental quality assessment of surface water[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(4): 482-488. (in Chinese))
- [32] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等. 水生态服务功能分析及其间接价值评价[J]. 生态学报, 2004, 24(10): 2091-2099. (OUYANG Zhiyun, ZHAO Tongqian, WANG Xiaoke, et al. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2091-2099. (in Chinese))
- [33] 易雨君,侯传莹,唐彩红,等. 澜沧江中游河段中国结鱼栖息地模拟[J]. 水利水电技术, 2019, 50(5): 82-89. (YI Yujun, HOU Chuanying, TANG Caihong, et al. Habitat simulation of *Tor sinensis* in middle reaches of Lancang River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(5): 82-89. (in Chinese))
- [34] 刘姜艳. 湟水河红古段河道生态系统服务功能价值研究[D]. 兰州:兰州大学, 2020.
- [35] 沈春颖,杨锐国,秦鑫,等. 澜沧江流域过鱼设施的应用探讨[J]. 水力发电, 2023, 49(2): 1-5. (SHEN Chunying, YANG Ruiguo, QIN Xin, et al. Application of fish passage facilities in Lancang River basin[J]. Water Power, 2023, 49(2): 1-5. (in Chinese))
- [36] 何中政,周建中,贾本军,等. 基于梯度分析法的长江上游水库群供水-发电-环境互馈关系解析[J]. 水科学进展, 2020, 31(4): 601-610. (HE Zhongzheng, ZHOU Jianzhong, JIA Benjun, et al. Study on the mutual feedback relation among water supply-power generation-environment of reservoir group in the upper reaches of the Yangtze River based on gradient analysis method[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(4): 601-610. (in Chinese))
- [37] 李晋鹏. 水电梯级开发对澜沧江—湄公河国际航运通道建设的影响研究[J]. 水道港口, 2017, 38(6): 592-597. (LI Jinpeng. Effects of cascading hydropower exploitation on the construction of international shipping channel in the Lancang-Mekong River[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2017, 38(6): 592-597. (in Chinese))
- [38] 杜红春,朱挺兵,龚进玲,等. 杞麓湖浮游植物群落结构对富营养化的响应及鱼产力评估[J]. 淡水渔业, 2023, 53(1): 75-83. (DU Hongchun, ZHU Tingbing, GONG Jinling, et al. Phytoplankton community structure, eutrophication and fish productivity of Qilu Lake, a plateau lake[J]. Freshwater Fisheries, 2023, 53(1): 75-83. (in Chinese))
- [39] 洪迎新,施文卿,陈宇琛,等. 水电梯级开发进程中澜沧江干流鱼类群落演变特征[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 235-253. (HONG Yingxin, SHI Wenqing, CHEN Yuchen, et al. Succession of fish community in the mainstream of Lancang River during cascade hydropower development[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 235-253. (in Chinese))
- [40] 张琦,陈宇琛,林育青,等. 澜沧江梯级水库浮游植物群落结构特征及其关键驱动因子[J]. 湖泊科学, 2023, 35(2): 530-539. (ZHANG Qi, CHEN Yuchen, LIN Yuqing, et al. Characteristic of phytoplankton community structure and its driving factors along the cascade reservoirs in the Lancang River[J]. Journal of Lake Sciences, 2023, 35(2): 530-539. (in Chinese))
- [41] POFF N L, OLDEN J D, MERRITT D M, et al. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(14): 5732-5737.
- [42] 罗涵,巨莉,罗茂盛,等. 四川省水电开发基地水电开发程度评估[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(1): 71-80. (LUO Han, JU Li, LUO Maosheng, et al. Hydropower development degree evaluation of Sichuan hydropower development base[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(1): 71-80. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-12 编辑:施业)