

# 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

贾建辉<sup>1,2</sup>, 陈建耀<sup>1</sup>, 龙晓君<sup>3</sup>, 陈记臣<sup>4</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275;  
2. 广东省水利厅, 广州 510635; 3. 广东财经大学地理与旅游学院, 广州 510320;  
4. 广东省水利水电科学研究院, 广州 510635)

**摘要:** 水电开发对河流生态系统的影响不容忽视, 科学评估其影响有助于建立更可持续的水电开发模式。以武江干流为例, 利用当量因子法和功能价值评估法, 分析了武江干流梯级水电开发对受淹没影响的河岸带陆地生态系统和河流生态系统服务的效益及损失, 并就其对河流生态系统服务的综合效应进行了评估。结果显示: 武江干流水电开发使受淹没影响的河岸带生态系统和河流生态系统本身的服务价值均出现增加, 价值增量主要体现在水文调节、水资源供给等服务方面; 武江干流水电开发对河流生态系统服务的正效应大于负效应, 正效应主要体现在发电、水文调节、气体调节等方面, 负效应主要体现在维持生物多样性、土壤保持等支持服务方面。研究认为不同规模水电站的正负效应侧重点不同, 不同流域单位电能的生态损失难以直接横向比较。结合多年来武江鱼类资源跟踪调查数据, 分析了鱼类生物损失指数的变化趋势, 探讨了水电开发在时间上的累积生态效应及水电服务的空间格局差异。由于生物多样性等服务的影响难以用货币直接衡量, 加上水域的单位面积服务价值远高于其他生态用地类型, 导致负效应的价值评估偏保守, 武江干流水电开发的正负效应之比偏大。

**关键词:** 梯级水电开发; 生态系统服务; 累积效应评估; 武江

水电开发对河流生态系统的影响是涉及多个因素的复杂过程, 科学评估其影响有助于建立可持续的水电开发模式, 更有针对性地保护河流生态系统。国内外针对水电开发的生态环境影响开展了大量的研究, 除分析生境、生物等不同的影响因素评估水电开发的影响外, 还有利用生态系统服务价值评估法, 即从经济价值角度评估水电开发对河流生态系统的影响。Costanza<sup>[1]</sup>和千年生态系统评估 (Millennium Ecosystem Assessment, MA)<sup>[2]</sup>将生态系统服务定义为人们从自然系统中获得的收益。MA<sup>[2]</sup>在 Costanza<sup>[1]</sup>的基础上将生态系统服务分为供给、调节、支持和文化服务四大类。谢高地等<sup>[3]</sup>在 MA 四个大类的基础上, 将生态系统服务分为 11 个二级类别, 并提出了适宜我国的陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表。生态系统服务价值研究主要分为当量因子法和功能价值法<sup>[4]</sup>。当量因子法多从流域或区域的角度, 结合土地利用/覆被方式的转变来反映生态系统服务价值的变化, 多适用于大中空间尺度的分析。但水电开发对生态系统服务价值的

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771027, 41961144027, 41701585); 广东水利科技创新项目 (2020-09)

作者简介: 贾建辉 (1983-), 女, 河南郑州人, 博士研究生, 主要从事水电站生态环境方面的研究。

E-mail: 195432447@qq.com

通讯作者: 陈建耀 (1966-), 男, 福建莆田人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事流域水文过程及水环境等方面研究。E-mail: chenjiyao@mail.sysu.edu.cn

影响,不能简单地使用当量因子法,因为水电开发所产生的影响并不能简单地以淹没所造成的土地利用/覆被变化来衡量,其影响的范围很广,不局限于淹没所影响的河岸带陆地生态系统,也包括河流生态系统本身,需要结合功能价值法综合分析评估。目前国内外针对水电开发对生态系统服务影响的研究主要集中在中国、美国和巴西<sup>[5]</sup>,尤其集中在我国,如Wang等<sup>[6]</sup>、Chen等<sup>[7]</sup>、Li等<sup>[8]</sup>、莫创荣<sup>[9]</sup>、魏国良等<sup>[10]</sup>、赵小杰等<sup>[11]</sup>分别在不同流域针对水电开发对河流生态系统服务的影响开展了实证研究。现有分析多针对具体工程,采用功能价值法逐项评估,较少从流域角度构建评估体系,也难以反映生态系统服务的时空变化特征。近年来,随着InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs) 模型等生态系统服务分析工具的研发,生态系统服务的动态可视化评估成为研究热点,多通过区域土地利用/覆被方式的变化,从时间和空间上对生态系统服务进行分布特征分析和定量评估<sup>[12]</sup>。水电开发对河流生态系统服务的定量评估,可为评估水电项目的可持续性提供重要参考,也可为制订流域范围内的生态补偿对策提供科学依据。

本文以粤北的武江干流为例,采用当量因子和功能价值评估的相结合方法评估水电梯级开发的生态环境效应,同时针对生态系统服务的时空特征变化这一研究难点,采用模型计算、不同流域类比以及多年信息跟踪等方法,探讨水电开发的空间格局差异以及长时间的累积生态效应。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

武江是广东省北江的一级支流,发源于湖南省临武县三峰岭,地跨湖南、广东两省。武江干流全长260 km,流域集水面积7097 km<sup>2</sup>,其中广东境内河长168 km,流域面积3617 km<sup>2</sup>,总落差123 m。武江干流梯级水电站中,乐昌峡水利枢纽(以下简称乐昌峡)作为干流上的控制性工程,以下至韶关市共分六级开发,分别为张滩、富湾、长安、七星墩、塘头及溢洲水电站(图1),均为低水头径流式电站,水头5~7 m。目前,除塘头正在建设外,其他梯级工程均已投入使用,已投产运行的电站总装机容量20.86万kW,年均发电量为6.5亿kW·h。梯级开发情况详见表1<sup>[13-19]</sup>。

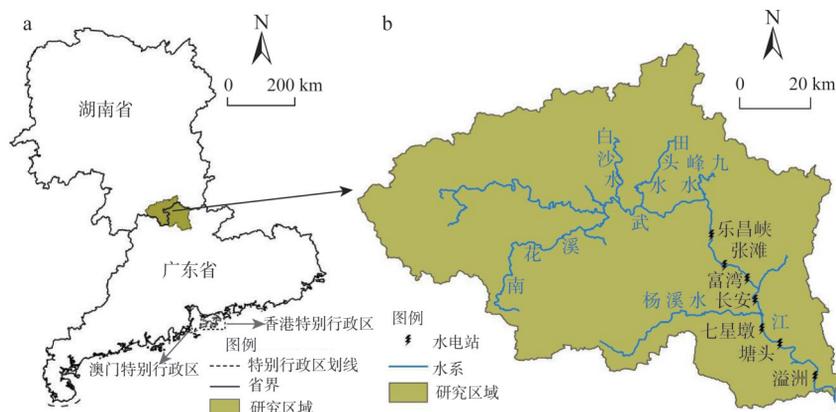


图1 研究区地理位置

Fig. 1 The location of the Wujiang River Basin

表1 武江干流梯级水电站的基本情况及其淹没影响指标

Table 1 Basic situation of cascade hydropower stations in the mainstream of the Wujiang River and its submerged area

梯级电站名称	总库容/ 万 m <sup>3</sup>	装机容量/ kW	投产年份	年均发电量/(万 kW·h)	淹没/hm <sup>2</sup>										
					耕地		林地				草地	园地	鱼塘	建设及 居民用地	未利 用地
					水田	旱地	针叶	针阔 混交	阔叶	灌木					
乐昌峡	34400	132000	2013	40800	48	112	291.6	52.7	24.6	7	19.1	7.2	—	126.3	8.8
张滩	1263	20600	1970	6912	4.67		—	—	—	—	—	—	—	—	—
富湾	525	12000	2001	3960	50.47		—	—	—	—	—	—	—	—	—
长安	720	12000	2003	4565	0.9	121.5	—	6.9	—	—	5.7	—	—	—	—
七星墩	1320	12000	2005	4095	7.2		—	—	—	—	—	1.3	—	—	—
塘头	1537.5	20000	—	4585	0	14.1	—	0.2	—	—	—	0.5	—	—	—
				(设计)											
溢洲	2323	20000	2007	7950	36	34.5	39	10.3	—	—	87.2	1.8	4.1	—	—

注：“—”表示无相关指标，下同。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 影响主要内容

水电开发对河流生态系统服务的影响按照范围可以分为淹没所影响的河岸带陆地生态系统（包括耕地、林地等）和河流生态系统本身（图2）。按照生态系统服务类别、人类的受益情况、主要影响范围等，建立水电开发对河流生态系统服务的影响评估体系（表2）。

### 1.2.2 效应评估方法

#### (1) 淹没影响的河岸带生态系统影响评估

对于淹没导致原耕地、林地、草地等生态系统服务价值的变化，利用当量因子法估算淹没对河岸带生态系统服务的影响。在谢高地等<sup>[3]</sup>2015年提出的当量因子表的基础上，调整生物量因子<sup>[21]</sup>、支付能力系数<sup>[22]</sup>，修正武江流域单位面积生态系统服务当量系数。1个标准单位生态系统服务价值当量定义为1 hm<sup>2</sup>耕地粮食产量经济价值的1/7<sup>[23,24]</sup>。2016年，韶关市粮食播种面积为15.7万 hm<sup>2</sup>，粮食产量为89.3万 t<sup>[25]</sup>，综合玉米、薯类等其他作物后，粮食综合平均收购价格为3.13元/kg，则生态系统服务价值当量因子为2539元/hm<sup>2</sup>，武江流域单位面积生态系统服务价值当量如表3所示。

#### (2) 对河流生态系统本身的效应评估

由于工程对生态系统的影响并不局限于河岸带生态系统，对河流生态系统本身的影响不能简单地以面积来衡量，因此利用功能价值法逐项核算，建立对河流生态系统的影响评估体系（表4）。

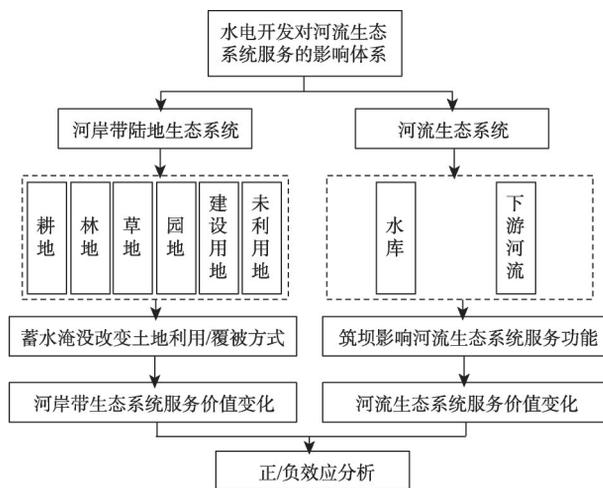


图2 水电开发对河流生态系统服务的影响体系

Fig. 2 Impact system of hydropower development on river ecosystem services

表2 水电开发对河流生态系统服务影响评估指标体系

Table 2 Index system for evaluating the impact of hydropower development on river ecosystem services

序号	服务类型	具体指标	正/负效应	主要影响范围	
1	供给	食物生产	粮食产品	-	淹没影响的河岸带生态系统
			渔业产品	-	
	原料生产	林产品	-		
		水资源供给	涵养水源	+/-	
	灌溉		+		
	发电		+		
	航运	+			
2	土壤保持	泥沙淤积	-	河流生态系统	
		控制侵蚀能力	-		
	维持养分循环	有机质生产	-		淹没影响的河岸带生态系统、
		固碳释氧	-		
	生物多样性	维持生物多样性	-		
3	调节	减少温室气体	+	河流生态系统	
		气候调节	+		河岸带生态系统、河流生态系统
	净化环境	净化水质	-	河流生态系统	
	水文调节	调蓄洪水	+	河岸带生态系统、河流生态系统	
4	文化	美学景观	旅游	+/-	河流生态系统

注：改编自文献 [6, 9, 20]，“+”表示正效应、“-”表示负效应，下同。

表3 武江流域单位面积生态系统服务价值当量

Table 3 Equivalent value per unit area of ecological services of Wujiang River Basin (WRB) (元/hm<sup>2</sup>)

生态系统分类		供给			调节				支持			文化
一级分类	二级分类	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
耕地	旱地	2330	1096	55	1836	987	274	740	2823	329	356	164
	水田	3727	247	-7208	3042	1562	466	7454	27	521	576	247
林地	针叶	603	1425	740	4659	13895	4083	9154	5646	438	5152	2247
	针阔混交	850	1946	1014	6440	19266	5454	9619	7838	603	7126	3124
	阔叶	795	1809	932	5947	17814	5289	12990	7263	548	6605	2905
	灌木	521	1178	603	3864	11593	3508	9181	4714	356	4303	1891
草地	灌草丛	1041	1535	850	5399	14279	4714	10469	6577	493	5975	2631
未利用地	裸地	0	0	0	55	0	274	82	55	0	55	27
水域	水系	2192	630	22720	2110	6276	15210	280199	2549	192	6989	5180

### 1.3 数据来源

研究所用的数据除来自各电站的环境影响评价等报告外，其他来源见表5。

## 2 结果分析

### 2.1 淹没对河岸带生态系统服务的影响评估

武江干流梯级电站的淹没指标如表1所示，结合表3计算淹没所影响的林地、草地等生态系统服务价值损失和水域生态系统服务价值增加，计算结果见表6。其中，乐昌峡

表4 水电开发对河流生态系统的影响评估体系

Table 4 Impact assessment system for hydropower development on ecosystem services

序号	服务类型	对河流生态系统本身的影响	评估方法与计算过程
1	供给 食物生产	几乎忽略不计	—
	原料生产	几乎忽略不计	—
	水资源 涵养水源	完全替代	—
	供给 灌溉	新增	机会成本法；灌溉价值=新增灌溉用水量或灌溉面积增加量×单位面积耕地粮食产值
	发电	新增	市场价值法；电力产品价值=年均发电量×上网电价
2	调节 气体调节	完全替代	市场价值法；航运价值=因水位提高而改善的航运量×因航运而节省的运输费用
	气候调节	完全替代	恢复费用法；减缓温室气体排放价值=温室气体排放量×治理温室气体的成本
	净化环境	受到影响	—
	水文调节	完全替代	替代工程法；净化水质价值=净化能力下降而增加的处理污水的量×污水处理厂处理单位体积污水的成本费用
3	支持 土壤保持 泥沙淤积	受到影响	机会成本法；调蓄洪水价值=减少的洪涝灾害损失
	控制侵蚀能力	受到影响	恢复费用法；水库淤积价值=因修建水库大坝导致的泥沙淤积量×单位重量泥沙的清理成本
	维持养分 有机质生产 循环	—	机会成本法；控制侵蚀价值=输送泥沙造陆收益
	固碳释氧	—	—
	生物多样性	受到影响	防护费用法；维持生物多样性价值=维持生物多样性所付出的成本
4	文化 美学景观 旅游	受到影响	旅行费用法；旅游价值=旅游容量×单位容量收入

注：改编自文献 [10, 26-28]；对食物、原料、维持养分循环等部分生态系统服务功能的影响，相对于被淹没的陆地生态系统而言，几乎可以忽略不计。

表5 研究中所采用的相关数据

Table 5 Relevant data used in this study

指标	单位	出处值	2016年值	数据来源
单位面积耕地粮食产量	t/hm <sup>2</sup>	—	5.679	韶关市统计局等 <sup>[25]</sup>
水电上网电价	元/(kW·h)	—	乐昌峡0.4038, 其他0.4382	实地调研
河流航运节省的单位运输费	元/(t·km)	0.6	0.6	鲁传一等 <sup>[26]</sup> , 欧阳志云等 <sup>[29]</sup>
泥沙干容重	t/m <sup>3</sup>	1.5	1.5	
单位重量的泥沙人工清理成本	元/t	—	6.7	
污水处理费用	元/t	—	0.8	实地调研
单位库容保护耕地面积	hm <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	0.000076	0.000076	欧阳志云等 <sup>[29]</sup>
治理C和SO <sub>2</sub> 的单位价值	元/t	260.9和600	371.3和854	肖建红等 <sup>[30]</sup> , 杨肃昌 <sup>[31]</sup> , 2016年价格通过贴现率贴现, 贴现率按4%计算

作为武江干流的龙头调节水库，淹没范围大，其他电站淹没范围相对较小。

经估算，淹没使武江干流河岸带生态系统服务的价值均出现增加，因淹没对陆地生态系统价值造成的损失和因水域面积增加而使生态系统服务价值增加最大的均为乐昌

表6 淹没对河岸带生态系统服务的影响评估结果

Table 6 Evaluation results of impact assessment of flooding on riparian ecosystem services (万元)

电站	乐昌峡		张滩		富湾		长安		七星墩		塘头		溢洲	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
服务类型														
供给 食物生产	-71	153	-1.4	1	-15	11	-30	30	-2	2	-3	3	-34	46
原料生产	-75	44	-0.3	0.3	-3	3	-16	9	-0.8	0.5	-2	0.9	-26	13
水资源供给	2	1584	2	11	18	115	1	307	0.9	19	0.1	34	14	474
调节 气体调节	-236	147	-1.1	1	-12	11	-30	28	-2	2	-3	3	-90	44
气候调节	-616	438	-0.6	3	-6	32	-34	85	-1	5	-3	9	-210	131
净化环境	-181	1061	-0.2	7	-2	77	-10	205	-0.3	13	-0.7	23	-66	318
水文调节	-428	19538	-2	131	-21	1414	-22	3783	-2	238	-2	415	-168	5851
支持 土壤保持	-276	178	-0.7	1	-7	13	-43	34	-2	2	-4	4	-98	53
维持养分循环	-25	13	-0.2	0.1	-2	1	-5	3	-0.3	0.2	-0.5	0.3	-10	4
生物多样性	-229	487	-0.2	3	-2	35	-13	94	-0.3	6	-0.9	10	-84	146
文化 美学景观	-100	361	-0.1	-0.1	-1	26	-6	70	-0.2	4	-0.4	8	-37	108
合计	21769		156		1683		4438		283		490		6379	

峡,其次分别为溢洲、长安、富湾、塘头、七星墩、张滩,这与淹没面积直接相关。在价值增量中,调节、供给服务所占的比例最大,尤其是水文调节、净化环境、水资源供给服务。由于水域单位面积服务价值远大于林地、草地等土地利用类型,仅就淹没面积来衡量,武江干流水电开发对河岸带生态系统服务的价值出现增加。

## 2.2 对河流生态系统服务的影响评估

在表4基础上,利用功能价值法,结合实际逐项计算武江干流水电开发对河流生态系统本身所带来的价值变化,计算结果如表7所示。其中,在支持服务中,考虑到武江梯级开发中上一级电站受下一级电站的回水影响,枯季泥沙在两级电站之间淤积,洪水期恢复天然河道特性,枯季落淤泥沙也会被冲刷,控制侵蚀能力影响较小,因此不纳入估算体系;与陆地生态系统相比,水电开发对河流有机质生产和固碳释氧服务的影响几乎可以忽略不计,维持养分循环不纳入估算体系;在维持生物多样性影响评估中,由于乐昌峡不适合修建鱼道,主要通过建设鱼类增殖站(建设成本1250万元)、实施人工增殖放流(50万元/a)、捕捞过鱼(80万/a)等措施来减缓对鱼类资源的影响,运营费按照107万/a、贴现率按2016年5年期国债利率4.32%<sup>[32,33]</sup>来计算生物多样性保护成本;由于武江干流电站均未修建过鱼通道,参考广东省内相近流域已投运鱼道的工程建设管理成本(鱼道建设538万元、人工增殖放流及产卵场重建费110万元/a、增殖放流25万元/a、运营费56万元/a)来估算生物多样性保护成本;在文化服务中,由于武江干流并未形成旅游资源,暂不纳入估算体系。

经估算,武江干流水电开发对河流生态系统本身的价值出现增加。增加主要体现在供给和调节服务方面,尤其是发电、气体调节和水文调节等服务的价值增量较大;损失主要体现在支持、调节服务方面,尤其是生物多样性、土壤保持和净化环境等服务的损失较大。

## 2.3 效应评估

综合分析蓄水淹没对河岸带生态系统及水电开发对河流生态系统本身所带来的影

表7 水电开发对河流生态系统服务的影响评估结果

Table 7 Evaluation results of the impact of hydropower development on river ecosystem services (万元)

服务类型	评估指标	乐昌峡	张滩	富湾	长安	七星墩	塘头	溢洲
供给	食物生产	—	—	—	—	—	—	—
	原料生产	—	—	—	—	—	—	—
	涵养水源	—	—	—	—	—	—	—
	灌溉	447	379	153	56	0	0	0
	电力	15984	2939	1684	1941	1741	1949	3380
	航运	0	0	48	34	0	0	163.2
调节	减少温室气体排放	2957	501	287	331	296	332	576
	气候调节	—	—	—	—	—	—	—
	净化水质	-275	-10	-4	-6	-11	-12	-19
	调蓄洪水	4639	170	71	97	178	207	313
支持	泥沙淤积	-532	-33	0	0	-26	-37	-229
	控制侵蚀能力	0	0	0	0	0	0	0
	有机质生产	—	—	—	—	—	—	—
	固碳释氧	—	—	—	—	—	—	—
	维持生物多样性	-821	-291	-291	-291	-291	-291	-291
文化	旅游	—	—	—	—	—	—	—
合计		22398	3655	1947	2162	1888	2148	3894

响，将对生态系统服务价值损失作为负效应，生态系统服务价值增加作为正效应，形成正负效应核算表，如表8所示。

经综合评估，武江干流水电开发对河流生态系统服务的正效应为80393万元，负效应为7102万元，总效应为73291万元。七宗电站的正/负效应之比在7.4~14.1之间，乐昌

表8 武江干流水电开发对河流生态系统服务的效应评估结果

Table 8 Evaluation results of the impact of Wujiang hydropower development on river ecosystem services (万元)

服务类型	评估指标	乐昌峡		张滩		富湾		长安		七星墩		塘头		溢洲	
		-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
供给	食物生产	-71	153	-1	1	-15	11	-30	30	-2	2	-3	3	-34	46
	原料生产	-75	44	-0.3	0.3	-3	3	-16	9	-0.8	0.5	-2	1	-26	13
	水资源供给	2	2031	2	390	18	268	-1	362	1	19	-0.1	34	14	474
	电力	—	15984	—	2939	—	1684	—	1941	—	1741	—	1949	—	3380
	航运	—	—	—	—	—	48	—	34	—	—	—	—	—	163
调节	气体调节	-236	3104	-1	502	-12	298	-30	359	-2	299	-3	335	-90	620
	气候调节	-616	438	-0.6	3	-6	32	-34	85	-1	5	-3	9	-210	131
	净化环境	-456	1061	-10	7	-6	77	-16	205	-11	13	-13	23	-85	318
	水文调节	-428	24177	-2	301	-21	1485	-22	3880	-2	416	-2	622	-168	6164
支持	土壤保持	-808	178	-34	1	-7	13	-44	34	-28	2	-42	4	-327	53
	维持养分循环	-25	13	0.2	0.1	-2	1	-5	3	-0.3	0.2	-0.5	0.3	-10	4
	生物多样性	-1050	487	-291	3	-293	35	-304	94	-291	6	-292	10	-375	146
文化	美学景观	-100	361	-0.1	2	-1	26	-6	70	-0.2	4	-0.4	8	-37	108
合计		44167		3811		3630		6600		2171		2638		10273	

峡>溢洲>长安>张滩>富湾>塘头>七星墩,乐昌峡作为武江干流唯一的中型水电站,调洪、发电等效益明显,总效应最大,七星墩、塘头的总效应最小。

若除去发电功能,正/负效应之比在2.3~10之间,长安>乐昌峡>富湾>溢洲>张滩>塘头>七星墩,长安、乐昌峡的正/负效应之比最大,七星墩、塘头正/负效应之比最小。按年均发电量来统计,武江干流梯级电站单位电能的负效应在0.05~0.17元/(kW·h)之间,分别占目前电价的11%(张滩)~39%(溢洲)。

按照服务类型排序,正效应中调节、供给服务所占的比例最大,其中乐昌峡、富湾、长安和溢洲的水文调节功能占正效应各类服务总价值的50%、37%、55%和53%,张滩、七星墩、塘头的发电功能占正效应各类服务总价值的71%、69%、65%。负效应中支持服务所占的比例最大,尤其是生物多样性服务,张滩、富湾、七星墩、塘头生物多样性服务占负效应各类服务总价值的86%、84%、87%、81%。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

(1) 按照影响范围估算,武江干流水电开发使受淹没影响的河岸带生态系统服务价值出现增加,与工程本身的淹没面积直接相关。增加主要体现在调节和供给服务方面,尤其是水文调节、水资源供给、净化环境等服务的价值增量较大;损失主要体现在调节、支持服务方面,尤其是气候调节、水文调节、土壤保持等服务的价值损失较大。河流生态系统本身的服务价值也出现增加,主要体现在调节、供给服务方面,尤其是发电、水文调节等服务的价值增量较大,生物多样性、土壤保持等支持服务价值损失较大。

(2) 按照正负效应估算,武江干流水电开发对河流生态系统服务的正效应大于负效应。正效应主要体现在发电>水文调节>气体调节等方面,负效应主要体现在生物多样性>土壤保持>气候调节等方面,维持养分循环等服务所占比例较小。通过正负效应对比分析显示,武江干流水电对河流生态系统服务的负效应不容忽视,如将负效应纳入现行的电价计量体系和水电成本评估中,电站的生存空间将会受到较大的影响。

综上所述,尽管分析结果显示武江干流水电开发对河流生态系统服务的正效应是明显的,但是其负效应也是不容忽视的。未来要侧重对维持生物多样性等提供非直接经济效益服务的研究,同时结合生态补偿或生态系统服务分析工具等,更有针对性地开展河流生态系统服务的累积效应评估和深入分析时空特征变化机理,以促进水电可持续利用和保护。

#### 3.2 讨论

(1) 本文对比分析了以往研究中的不同流域水电开发生态效应(表9),发现与本文的研究结论基本一致,主要包括:

① 水电开发的正效应主要体现在发电、气体调节、调蓄洪水、灌溉等方面,一般大中型水电站都是具有综合功能的水利工程,其正效应中调蓄洪水、灌溉等服务所占比例较高,正负效应之比相对较大,一些研究认为具有综合功能的工程,其生态系统服务价值损益并不能完全归结为水电,在研究中增加了变量<sup>[28]</sup>;小型水电站的正效应主要体现在发电方面。水电开发的负效应主要体现在包括生物多样性、净化环境、泥沙淤积等服务损失方面。对有高库大坝的大中型水电站来说,泥沙淤积损失不容忽视,因蓄水淹没

表9 不同流域水电开发的生态效应评估结论

Table 9 Conclusions on ecological effects of hydropower development in different river basins [元/(kW·h)]

地区或流域	工程规模	正效应主要内容	负效应主要内容	正/负效应之比	单位电能负效应	文献来源
福建九龙江, 3宗	小水电站	发电、灌溉、防洪、水产养殖	生物多样性损失、水质退化	1.1~1.6	0.19~0.23	Wang等 <sup>[6]</sup>
黄河小浪底水利枢纽	大型水库+电站	发电、防洪和减少温室气体减排	水库淤积、淹没、移民	1.1	0.04	Chen等 <sup>[7]</sup>
西藏怒江、澜沧江、雅鲁藏布江等, 15宗	大、小水电站	—	施工期环境污染、土壤侵蚀>NPP、固碳释氧功能及人类栖息地的损失>泥沙淤积、鱼类栖息地损失	—	0.39(大水电), 0.18(小水电)	Li等 <sup>[8]</sup>
澜沧江漫湾水电站	大水库+大水电站	发电、减少温室气体排放	泥沙淤积、生物多样性丧失、水环境污染	1.63~2.94	0.06	Yang等 <sup>[34]</sup>
雅砻江, 3宗	大水库+大水电站	发电、调蓄洪水、大气组分调节	控制侵蚀、河流输沙、植被生产、生物多样性维持	49:1	0.009	陈敏等 <sup>[35]</sup>
澜沧江干流, 19宗	大水电站	发电、减少温室气体排放、旅游、水产养殖、灌溉、调节小气候	固碳释氧、营养物质循环、涵养水源、生物多样性维持、土壤保持、净化水质、移民	4.27:1	0.08	陈晓舒等 <sup>[36]</sup>
东江干流流口水利枢纽	小水电站	发电、旅游、灌溉	淹没耕地、有机质生产、水质净化	1.6	0.31	莫创荣等 <sup>[9]</sup>
澜沧江漫湾水电站	大水库+大水电站	发电、休闲娱乐、航运、水产养殖、供水、调蓄洪水	河流输沙、生物多样性维持、农林草产品提供、固碳释氧、土壤及肥力保持、水质净化、营养物质循环	0.18	0.04	魏国良等 <sup>[10]</sup>
雅砻江, 5宗	大水电站	减少温室气体排放、调蓄洪水、调节气候、水产养殖、旅游	生态环境保护费用、泥沙淤积、水质净化、生物多样性维持等	12.7	0.005	赵小杰等 <sup>[11]</sup>
福建闽江建溪, 1宗	中型水电站	发电、调蓄洪水、减缓温室气体排放、航运、渔业生产、供水、旅游、灌溉	水土流失、生物多样性维持、水库泥沙淤积、造陆功能、库区侵蚀、淹没耕地等、水质净化	13.8	0.04	鲁传一等 <sup>[26]</sup>
贵州乌江猫跳河, 7宗	小水电站	调蓄洪水、减缓温室气体排放、发电、供水、灌溉、养殖	水质净化、生物多样性、河流输沙、淹没耕地等、移民	定性+半定量的方式	—	裴厦 <sup>[37]</sup> 等
湖南皂市水利枢纽	大水库+小水电站	调蓄洪水、发电、灌溉、航运、水产养殖	移民、泥沙淤积、水土流失等	—	0.21	肖建红 <sup>[38]</sup>
四川白龙江, 4宗	小水电站	发电	控制侵蚀、河流输沙、生物多样性维持、植被生产、固碳释氧	3.1	0.09	杨远祥 <sup>[39]</sup>
湄公河流域, 11宗	大水电站	发电、改善灌溉、防洪、水库渔业、水产养殖、通航等	渔获量、沉积物—营养物质、社会缓解成本	0.6	1.1(0.167美元)	Intralawan等 <sup>[28]</sup>
甘肃九甸峡水利枢纽	大水库+大水电站	新增库区水域、调蓄洪水、保护和改良耕地、减少温室气体排放	淹没, 减少下游水域、新增用水消耗、库区温室气体排放	0.9	0.43	杨肃昌等 <sup>[31]</sup>

所带来河岸带生态系统服务损失占较大的比例；对小型水电站来说，生物多样性损失往往占据较大的比例。现有的研究多针对有水库的电站，对占绝对多数的引水式梯级开发模式研究较少，引水式梯级水电开发的负效应更值得关注。

② 因工程所在流域不同，生态效应评估所采用的方法和具体指标各不相同，单位电能的生态损失也存在较大的差距，普遍在0.01~0.43元/(kW·h)之间。以湖南皂市水利枢纽为例，由于侧重对不同主体的生态补偿标准，评估指标中还包括移民安置费用，导致单位电能的负效应难以直接横向比较。总体来看，小型水电站的单位电能负效应高于大中型水电站。

(2) 由于水电开发对河流生物多样性、泥沙淤积等服务的影响难以用货币直接衡量，目前对于生物多样性等服务的价值评估偏保守，导致水电开发的正负效应比值比实际情况偏大。农业部、华南师范大学等单位曾在流域范围内开展过多次渔业资源调查，根据20世纪80年代潘炯华<sup>[40]</sup>鱼类调查成果及整理后的2008年、2014年等的鱼类资源调查数据<sup>[13,18,41]</sup>，采用生物完整性评估的鱼类生物损失指数来评估河流生态系统中鱼类物种的损失状况<sup>[42]</sup>，计算结果见表10。结果显示，鱼类生物损失指数呈下降趋势，与20世纪80年代比较，采集的鱼类种类减少了近一半。考虑到河道水利水电工程、过度捕捞和生境退化等是影响鱼类群落演替的主要原因<sup>[43-45]</sup>，在评估水电开发影响时不能忽视对生物多样性的负面影响，未来仍需从全流域的角度开展长期监测和系统分析，加强对生物多样性的定量评估研究。

(3) 部分研究认为发电效益不能纳入生态系统服务价值核算中，但因修筑水坝而产生的发电功能，仍属于人类从自然系统中获得的收益，只是服务的受益者不同，因此本文认为仍应纳入效应评估体系，未来可从生态补偿的角度研究利益相关者的利益调节和平衡。

(4) 水电开发导致的河流生态系统服务时空变化一直是个研究难点。从时间变化来看，除讨论中提及的利用多年鱼类跟踪调查的资料外，还可以利用模型方法反演一些生态系统服务功能的变化。武江干流水电站除张滩始建于1970年、塘头尚未建成外，其他电站分别建于2001—2013年之间，因此采用2000年和2015年的土地利用数据，利用InVEST模型计算了武江干流水电开发前后的集水范围内的产水量和水电服务价值，如图3所示，该图可反映流域水电服务价值的空间分布格局（2000年的

表10 武江鱼类损失指数变化

Table 10 Fish loss index changes in the Wujiang River Basin

调查时间	采集鱼类	鱼类生物损失指数
1980s	11目26科93属143种	
2008年	6目15科95种，新增记录15种	0.56
2014年	7目18科55属65种，新增记录10种	0.39

注：调查鱼类种类不包括外来种。

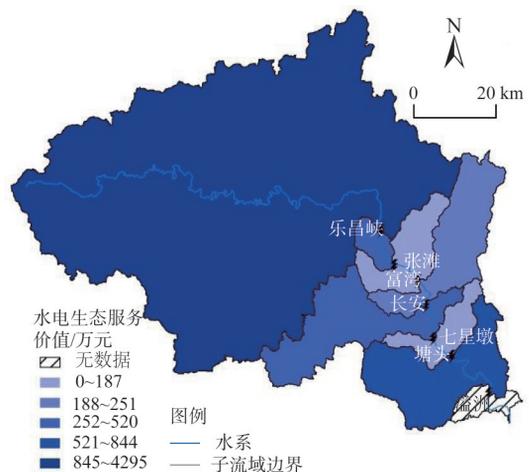


图3 2015年水电生态系统服务价值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of hydropower ecosystem service values in 2015

水电生态系统服务价值空间分布图略)。塘头电站建成后, 可结合最新的土地利用数据反映流域水电等服务的价值变化。

(5) 水域的单位面积服务价值在各类生态用地中是最高的。以表3为例, 水域的单位面积服务价值是水田的32.3倍, 是草地的6.4倍, 分析淹没对河岸带生态系统服务的影响, 结果总是增加的。对于淹没面积相对较小的小水电站来说, 当量因子法反映出的生态系统服务价值增量存在一定的误差, 需要进一步权衡。

### 参考文献(References):

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment Board. *Millennium Ecosystem Assessment: Frameworks*. Washington D C: World Resources Institute. 2005.
- [3] 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. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254. [XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [4] 薛明皋, 邢路, 王晓艳. 中国土地生态系统服务当量因子空间修正及价值评估. *中国土地科学*, 2018, 32(9): 81-88. [XUE M G, XING L, WANG X Y. Spatial correction and evaluation of ecosystem services in China. *China Land Science*, 2018, 32(9): 81-88.]
- [5] ESPÉCIE M, CARVALHO P, PINHEIRO M, et al. Ecosystem services and renewable power generation: A preliminary literature review. *Renewable Energy*, 2019, 140: 39-51.
- [6] WANG G, FANG Q, ZHANG L, et al. Valuing the effects of hydropower development on watershed ecosystem services: Case studies in the Jiulong River Watershed, Fujian province, China. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2010, 86(3): 363-368.
- [7] CHEN L, SUI X, WANG D, et al. The ecological benefit-loss evaluation in a riverine wetland for hydropower projects: A case study of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River, China. *Ecological Engineering*, 2016, 96: 34-44.
- [8] LI X, ZHANG J, XU L, et al. An evaluation of ecological losses from hydropower development in Tibet. *Ecological Engineering*, 2015, 76: 178-185.
- [9] 莫创荣, 孙艳军, 高长波, 等. 生态价值评估方法在水电开发环境影响评价中的应用研究. *水资源保护*, 2006, (5): 18-21. [MO C R, SUN Y J, GAO C B, et al. Application of ecological value evaluation method in environmental assessment of hydropower development. *Water Resources Protection*, 2006, (5): 18-21.]
- [10] 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. *环境科学学报*, 2008, (2): 235-242. [WEI G L, CUI B S, DONG S K, et al. Impact of hydropower development on river ecosystem service: A case study from the Manwan Hydropower Project. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, (2): 235-242.]
- [11] 赵小杰, 郑华, 赵同谦, 等. 雅砻江下游梯级水电开发生态环境影响的经济损益评价. *自然资源学报*, 2009, 24(10): 1729-1739. [ZHAO X J, ZHENG H, ZHAO T Q, et al. Evaluation of eco-environmental impact of hydropower development in the downstream of Yalong River. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1729-1739.]
- [12] SHARP R, TALLIS H T, RICKETTS T, et al. *INVEST 3.2.0 User's Guide*. Stanford: The Natural Capital Project, 2015.
- [13] 珠江水资源保护科学研究所. 广东省乐昌峡水利枢纽工程环境影响报告书. 广州: 珠江水资源保护科学研究所, 2008. [Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection. *Environmental impact statement of Lechangxia Water Control Project in Guangdong province*. Guangzhou: Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection, 2008.]
- [14] 珠江水资源保护科学研究所. 乐昌市张滩闸坝枢纽工程(重建)环境影响报告书. 广州: 珠江水资源保护科学研究所, 2011. [Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection. *Environmental impact statement of Zhangtan Sluice Dam Project (reconstruction) in Lechang city*. Guangzhou: Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection, 2011.]
- [15] 国家环保总局华南环境科学研究所. 韶关昌山水电站环境影响报告书. 广州: 国家环保总局华南环境科学研究所,

2000. [South China Institute of Environmental Science, MEE. Shaoguan Changshan Hydropower Station environmental impact statement. Guangzhou: South China Institute of Environmental Science, MEE, 2000.]
- [16] 国家环保总局华南环境科学研究所. 韶关长安水电站环境影响报告书. 广州: 国家环保总局华南环境科学研究所, 2005. [South China Institute of Environmental Science, MEE. Shaoguan Changsan Hydropower Station environmental impact statement. Guangzhou: South China Institute of Environmental Science, MEE, 2005.]
- [17] 乳源瑶族自治县环境监测站. 广东武水七星墩水电站环境质量调查及现状评价. 乳源瑶族自治县环境监测站, 2004. [Environmental Monitoring Station of Ruyuan Yao Autonomous County. Investigation and evaluation of environmental quality of Qixingdun Hydropower Station in Wushui, Guangdong province. Environmental Monitoring Station of Ruyuan Yao Autonomous County, 2004.]
- [18] 核工业二〇三研究所. 广东省乳源县武水塘头水电站工程环境影响报告书. 广州: 核工业二〇三研究所, 2018. [No 203. Research Institute of Nuclear Industry. Environmental impact statement of Tangtou Hydropower Plant project in Wujiang River Basin Ruyuan county, Guangdong province. Guangzhou: No 203. Research Institute of Nuclear Industry, 2018.]
- [19] 珠江水资源保护科学研究所. 韶关市溢洲水电站环境影响补充报告书. 广州: 珠江水资源保护科学研究所, 2009. [Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection. Shaoguan city Yizhou Hydropower Station environmental impact supplementary statement. Guangzhou: Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection, 2009.]
- [20] BRIONES-HIDROVO A, UCHE J, MARTÍNEZ A, et al. Estimating the hidden ecological costs of hydropower through an ecosystem services balance: A case study from Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 33-42.
- [21] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10-13. [XIE G D, XIAO Y, ZHEN L, et al. Study on ecosystem service value of food production in China. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(3): 10-13.]
- [22] 魏同洋. 生态系统服务价值评估技术比较研究: 以修水流域为例. 北京: 中国农业大学, 2015. [WEI T Y. Comparison of ecosystem services valuation method with a case study in Xiu River. Beijing: China Agricultural University, 2015.]
- [23] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196. [XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.]
- [24] 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. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919. [XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.]
- [25] 韶关市统计局, 国家统计局韶关调查队. 2017韶关统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017. [Shaoguan Statistics Bureau, National Bureau of Statistics Shaoguan Investigation Team. 2017 Shaoguan Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2017.]
- [26] 鲁传一, 周胜, 陈星. 水能资源开发生态补偿的测算方法与标准探讨. *生态经济*, 2011, (3): 27-33. [LU C Y, ZHOU S, CHEN X. The evaluation method and standard of ecosystem compensation in developing hydropower. *Ecological Economy*, 2011, (3): 27-33.]
- [27] 赵苗苗, 赵海凤, 李仁强, 等. 青海省1998—2012年草地生态系统服务功能价值评估. *自然资源学报*, 2017, 32(3): 418-433. [ZHAO M M, ZHAO H F, LI R Q, et al. Assessment on grassland ecosystem services in Qinghai province during 1998-2012. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(3): 418-433.]
- [28] INTRALAWAN A, WOOD D, FRANKEL R, et al. Tradeoff analysis between electricity generation and ecosystem services in the Lower Mekong Basin. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 27-35.
- [29] 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. *生态学报*, 2004, 24(10): 2091-2099. [OUYANG Z Y, ZHAO T Q, WANG X K, et al. Ecosystem services analyses and valuation of China terrestrial surface water system. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2091-2099.]
- [30] 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. *生态学报*, 2007, 27(2): 526-537. [XIAO J H, SHI G Q, MAO C M, et al. Evaluation of effects of dams on river ecosystem service functions in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 526-537.]

- [31] 杨肃昌, 刘巍文. 基于价值当量对水电开发影响生态系统服务价值的评价: 以甘南九甸峡工程为例. 中南大学学报: 社会科学版, 2018, 24(1): 78-85. [YANG S C, LIU W W. Evaluating the influence of hydropower development on ecosystem service value based on value equivalence: Taking Gannan Jiudianxia as an example. Journal of Central South University: Social Science, 2018, 24(1): 78-85.]
- [32] 彭武珍. 环境价值核算方法及应用研究. 杭州: 浙江工商大学, 2013. [PENG W Z. Research of method and application on environmental value accounting: A case of Zhejiang province. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2013.]
- [33] 中华人民共和国财政部公告 2016 年第 53 号. [http://gks.mof.gov.cn/zttz/guozaiguanli/gzfxdzs/201712/t20171208\\_2770090.htm](http://gks.mof.gov.cn/zttz/guozaiguanli/gzfxdzs/201712/t20171208_2770090.htm), 2013-05-03. [Ministry of Finance of the People's Republic of China Announcement No.53 of 2016. [http://gks.mof.gov.cn/zttz/guozaiguanli/gzfxdzs/201712/t20171208\\_2770090.htm](http://gks.mof.gov.cn/zttz/guozaiguanli/gzfxdzs/201712/t20171208_2770090.htm), 2013-05-03.]
- [34] YANG S, CHEN B. Environmental impact of Manwan Hydropower Plant on river ecosystem service. Energy Procedia, 2014, 61: 2721-2724.
- [35] 陈敏, 李绍才, 孙海龙, 等. 雅砻江下游梯级开发对河流生态系统服务功能的影响. 水力发电学报, 2011, 30(1): 89-93, 107. [CHEN M, LI S C, SUN H L, et al. Impact of cascade hydropower development in the lower-reach of Yalong River on river ecosystem services. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 89-93, 107.]
- [36] 陈晓舒, 赵同谦, 李聪, 等. 基于不同利益相关者的水电能源基地建设经济损益研究: 以澜沧江干流为例. 生态学报, 2017, 37(13): 4495-4504. [CHEN X S, ZHAO T Q, LI C, et al. Economic cost-benefit analysis of a hydropower development project based on different stakeholders: A case study of Lancang River, China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(13): 4495-4504.]
- [37] 裴厦, 谢高地, 鲁春霞, 等. 水利工程梯级开发对河流生态系统服务累积影响浅析: 以猫跳河为例. 资源科学, 2011, 33(8): 1469-1474. [PEI X, XIE G D, LU C X, et al. Cumulative effects of cascade hydropower development on river ecosystem services: A case study of the Maotiaohe River. Resources Science, 2011, 33(8): 1469-1474.]
- [38] 肖建红, 陈绍金, 于庆东, 等. 基于河流生态系统服务功能的皂市水利枢纽工程的生态补偿标准. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 611-617. [XIAO J H, CHEN S J, YU Q D, et al. Ecological compensation standard for Zhaoshi water conservancy project based on river ecosystem services. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(5): 611-617.]
- [39] 杨远祥, 申文金, 杨占彪, 等. 白龙江上游水电梯级开发对河流生态系统服务功能的影响. 水利水电技术, 2014, 45(7): 21-25. [YANG Y X, SHEN W J, YANG Z B, et al. Impact of hydropower cascade development on river ecosystem service functions of Upper Bailongjiang River. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(7): 21-25.]
- [40] 潘炯华. 珠江水系北江渔业资源. 广州: 广东科技出版社, 1987. [PAN J H. Beijiang Fishery Resources of the Pearl River. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1987.]
- [41] 珠江水利科学研究院. 广东省韶关市武水梯级开发规划环境影响回顾性研究报告. 广州: 珠江水利科学研究院, 2014. [Pearl River Hydraulic Research Institute. Retrospective research report on environmental impact of Wushui cascade hydropower development planning in Shaoguan city, Guangdong province. Guangzhou: Pearl River Hydraulic Research Institute, 2014.]
- [42] 仝路路, 郭传波, 王瑞, 等. 多重人类活动干扰下赣江流域水环境和鱼类资源的研究现状分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 2879-2892. [TONG L L, GUO C B, WANG R, et al. Research status of water environment and fish resources under multiple human disturbances in the Gan-Jiang River Basin: A review. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(12): 2879-2892.]
- [43] 高天扬, 谢迪, 彭宁东, 等. 北江鱼类群落结构多样性及其演替趋势. 水生态学杂志, 2018, 39(4): 54-62. [GAO T Y, XIE D, PENG N D, et al. Fish community structure diversity and succession in the Beijiang River. Journal of Hydroecology, 2018, 39(4): 54-62.]
- [44] 梁正芳, 梁庚顺, 陈湘舜, 等. 韶关市北江水系水利枢纽对鱼类繁殖的影响. 水产科技, 2003, (1): 5-9. [LIANG Z F, LIANG G S, CHEN X L, et al. The influence on fishes breeding from irrigation work in the Beijiang River near Shaoguan city. Fisheries Sciences Technology, 2003, (1): 5-9.]
- [45] 葛晓霞, 赵俊, 朱远生. 乐昌峡水利枢纽建设与鱼类保护. 人民珠江, 2009, 30(3): 29-32. [GE X X, ZHAO J, ZHU Y S. Construction of Lechang Gorge water conservancy project and fish protection. Pearl River, 2009, 30(3): 29-32.]

# 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

JIA Jian-hui<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-yao<sup>1</sup>, LONG Xiao-jun<sup>3</sup>, CHEN Ji-chen<sup>4</sup>

(1. Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Department of Water Resources of Guangdong Province, Guangzhou 510635, China; 3. School of Geography and Tourism, Guangdong University of Finance and Economics, Guangzhou 510320, China; 4. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China)

**Abstract:** The impact of hydropower development on river ecosystems cannot be ignored, and scientific evaluation of its impact will contribute to the establishment of a more sustainable hydropower development patterns. In this paper, we analyzed the benefits and losses of the cascade hydropower development in the mainstream of the Wujiang River on the riparian terrestrial ecosystems and river ecosystems by using both equivalent factor and functional value evaluation methods. Based on the benefits and losses, we made a comprehensive evaluation of the cascade hydropower development on the river ecosystem services. The results show that the hydropower development in the mainstream of the Wujiang River increased the values of the riparian terrestrial ecosystem and river ecosystem services, particularly in the hydrological regulating and water supply functions. In addition, positive effects of the development were found on the power generation, hydrological and air regulating functions, while negative effects were observed on biodiversity maintaining and soil conservation. And the positive effects on river ecosystem service are greater than the negative effects. It was difficult to compare directly the ecological losses of unit electrical energy with other basins as different hydropower stations had their own emphasis regarding the positive and negative effects. Based on the long-term survey data of fish resources in the Wujiang River, the trend of fish biological loss index was analyzed to understand temporal cumulative ecological effects of hydropower development. The differences in the spatial pattern of hydropower generation were discussed by using InVEST model. The impact of ecosystem services such as biodiversity was hard to evaluate directly in terms of currency, and the service value per unit area of the water body was considerably higher than that of any other land-use types, which resulted in a conservative, e.g. a low value of negative effects of the hydropower development in the mainstream of the Wujiang River, and a high ratio of positive to negative values.

**Keywords:** cascade hydropower development; ecosystem service; evaluation of cumulative impacts; Wujiang River