



# 长江上游航道整治工程 对生态系统服务价值的影响\*

曹有莉<sup>1</sup>, 万宇<sup>1,2</sup>, 李文杰<sup>1,2</sup>, 孔巧灵<sup>1</sup>, 杜洪波<sup>1,2</sup>, 张帅帅<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

3. 长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:** 航道整治工程江段的生态系统服务价值评价是衡量工程建设对生态系统可持续发展影响的关键指标。以长江上游朝天门—涪陵江段航道整治工程为案例, 通过土地利用变化为切入点, 采用当量因子法对工程前、中、后期生态系统服务价值进行评估。研究结果显示, 朝涪段的生态系统服务价值在2015—2018年下降1.40%, 随后在2018—2021年增长5.73%。在12项服务功能价值中, 占比最大的为水文调节, 其次为航运服务价值, 在工程前后均呈现上升趋势。不同地类的生态系统服务价值贡献度存在差异, 水域一直是主要贡献因子和敏感因子。研究结论可为促进航道建设与生态保护的协调发展提供理论依据。

**关键词:** 生态系统服务价值; 土地利用类型; 航道整治工程; 长江上游

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0123-07

## Impact of upper Yangtze River waterway regulation project on ecosystem service value

CAO Youli<sup>1</sup>, WAN Yu<sup>1,2</sup>, LI Wenjie<sup>1,2</sup>, KONG Qiaoling<sup>1</sup>, DU Hongbo<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuaishuai<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Transportation Engineering,

Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Yangtze River Chongqing Shipping Engineering Survey and Design Institute, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** The assessment of ecosystem service value in the river section of waterway regulation projects is a crucial indicator for measuring the impact of engineering construction on the sustainable development of ecosystems. Taking the waterway regulation project from Chaotianmen to Fuling in the upper reaches of the Yangtze River as a case study, this research employs land-use changes as a focal point and utilizes the equivalent factor method to assess the ecosystem service value in the pre-construction, mid-construction, and post-construction phases. The results show that the ecosystem service value in Chaofu section decreased by 1.40% from 2015 to 2018 but subsequently increased by 5.73% from 2018 to 2021. Among the twelve service functions, hydrological regulation has the highest proportion, followed by shipping service value, both showing an upward trend before and after the project. Different land types contribute differently to the ecosystem service value, with water bodies consistently being the main contributing and sensitive factors. The research findings can provide theoretical support for promoting the coordinated development of channel construction and ecological protection.

**Keywords:** ecosystem service value; land-use types; waterway regulation project; upper Yangtze River

收稿日期: 2023-11-22

\*基金项目: 国家自然科学基金项目 (52279058); 长江航道局科研项目 (KY2022-01)

作者简介: 曹有莉 (1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态航道。

通讯作者: 万宇 (1986—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为生态航道。E-mail: wanyu\_hhxy@cqjtu.edu.cn

生态系统服务价值是衡量自然环境对人类社会贡献的重要指标,对于评估生态系统可持续发展具有重要的意义。生态系统服务价值受研究区生态环境变化的影响,而航道整治工程在水运经济、引水和航运功能起着重要作用的同时,又会对河流生态环境造成一定影响。因此,研究航道整治工程的生态系统服务价值有助于促进航道工程建设与河流生态系统保护协调发展。

近年来,许多学者对生态系统服务价值开展了相关研究,在对长江流域生态系统服务价值时,多选择生态功能区<sup>[1]</sup>和长江经济带<sup>[2]</sup>相关地区,然而随着长江干流众多航道整治工程的实施,航道整治工程措施影响下工程江段的生态系统服务价值的评估同样不可忽略。另外,对于水利工程类生态系统服务价值的研究多集中于水资源开发利用工程如水库<sup>[3]</sup>、水系连通<sup>[4]</sup>和生态输水工程<sup>[5]</sup>等,多关注水文调控和多种水利服务功能,而航道整治工程则多专注于改善水域的通航条件和航道安全。因此,航道整治工程江段的生态系统服务价值评价,由于其涵盖了水域的航运功能和生态功能的独特性,对于更为全面地了解航道整治工程对河流生态系统的影响具有重要的意义。

朝天门—涪陵江段(以下简称“朝涪段”)航道整治工程是长江黄金水道建设的重点项目之一,2017年开工,2021年正式投入运营,是提升长江上游航道整体通过能力的关键<sup>[6]</sup>,对恢复长江上游河流生态具有积极作用。本研究以朝涪段航道整治工程所在江段及其缓冲带500 m为研究区域,以2015、2018、2021年分别代表工程整治前、中、后期,以土地利用变化为切入点,采用当量因子法对其进行生态系统服务价值评估,探究土地利用面积变化与生态系统服务价值转变之间的关系,揭示朝涪段航道整治工程建设对河流生态系统服务价值的影响,以期对长江上游生态航道

的建设提供理论依据。

## 1 研究背景

### 1.1 研究区域

河流生态缓冲带是河流生态系统的重要组成部分,本文研究区为长江上游朝天门—涪陵江段及江岸两侧500 m的缓冲带<sup>[7]</sup>,江段全长123 km,研究区域包括重庆市江北区、南岸区、巴南区、渝北区、长寿区、涪陵区的长江段。

### 1.2 数据来源

2015年的土地利用类型数据取自于中国科学院资源环境数据中心多时期土地利用监测数据库,2018、2021年取自欧空局Sentinel-2图像。参照GB/T 21010—2017《土地利用现状分类》,将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、湿地、未利用地和建设用地7类。食物生产中的农作物产量、播种面积、农作物价格农业产品统计数据以及建设用地的相关数据主要来自2016—2022年重庆市《江北区统计年鉴》、《渝北区统计年鉴》、《长寿区统计年鉴》、《涪陵区统计年鉴》、《南岸区统计年鉴》、《巴南区统计年鉴》、《重庆市统计年鉴》、《重庆市水资源公报》以及《全国农产品成本收益资料汇编2016》等。航运服务价值中的沿江港口货运量来源于2015、2018和2021年三峡通航统计年报,运价来源于2015、2018和2021年交通运输行业发展统计公报。

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务价值当量因子

基于谢高地等<sup>[8]</sup>的研究,本文选取净初级生产量(net primary production, NPP) NPP时空调节因子、降水时空调节因子和土壤保持时空调节因子3项功能性调节因子,将生态系统服务价值当量因子从全国范围修正到朝涪段范围,并以此构建朝涪段航道整治工程生态系统服务价值当量因子,如表1所示。

表1 朝涪段航道整治工程生态系统服务价值当量因子

生态系统一级分类	生态系统二级分类	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	0.74	0.17	0.16	0.34	0.54	0	0
	原料生产	0.16	0.39	0.23	0.34	0.15	0	0
	水资源供给	-2.55	0.59	0.37	5.06	16.18	-	0
调节服务	气体调节	0.60	1.28	0.81	1.28	0.52	0.01	0.01
	气候调节	0.31	3.83	2.14	2.42	1.54	0	0
	净化环境	0.09	1.12	0.71	2.42	3.73	-	0.07
	水文调节	2.92	7.29	4.56	47.30	199.57	0.06	0.06
支持服务	土壤保持	4.92	21.98	13.91	21.86	8.80	0.19	0.19
	维持养分循环	0.10	0.12	0.08	0.12	0.05	0	0
	生物多样性	0.11	1.42	0.90	5.28	1.71	0.01	0.01
文化服务	美学景观	0.05	0.62	0.40	3.18	1.27	0.01	0.01

注:“-”为后续单独计算的价值当量。

### 2.2 生态系统服务价值当量

1个标准单位生态系统服务价值当量因子是指1hm<sup>2</sup>研究区内平均产量的农田每年农作物产量的经济价值<sup>[9]</sup>。将农田的食物生产功能价值当量确定为1,除建设用地的水资源供给和净化环境功能外的价值当量,均以其为基准进行计算。以2015年研究区的物价水平为参考,引入居民消费价格指数对标准当量进行计算,得到2015—2021年研究区单位面积耕地的食物生产功能价值为4643.83元/hm<sup>2</sup>。为提高数据的准确性,参考谢高地等价值当量的

修正方法,得到修正后的生态系统服务功能价值当量为3445.68元/hm<sup>2</sup>。参考高振斌等<sup>[10]</sup>确定生态系统服务价值当量的方法,得到非建设用地的价值当量。参照李晓赛等<sup>[11]</sup>的研究,得到建设用地的价值当量。其中,水资源供给功能利用水资源消耗值近似计算,得到其价值当量为-8980.06元/hm<sup>2</sup>;净化环境功能应用市场价值法和防治成本法计算处理废水、废气、固体废弃物排放需要的价值量,得到其价值当量为-5734.88元/hm<sup>2</sup>。最终得到朝涪段生态系统服务价值当量,如表2所示。

表2 朝涪段航道整治工程生态系统服务价值当量

生态系统一级分类	生态系统二级分类	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	3445.68	787.36	727.59	1590.31	2494.61	0.00	0.00
	原料生产	763.97	1808.59	1070.60	1559.13	717.20	0.00	0.00
	水资源供给	-11829.09	2719.33	1722.24	23476.88	75144.15	-8980.06	0.00
调节服务	气体调节	2775.25	5948.08	3762.70	5924.69	2401.06	62.37	62.37
	气候调节	1449.99	17797.46	9947.25	11225.73	7140.81	0.00	0.00
	净化环境	420.96	5215.29	3284.57	11225.73	17306.34	-5734.88	311.83
	水文调节	13551.33	33855.66	21180.56	219631.22	926747.65	271.93	271.93
支持服务	土壤保持	22853.08	102069.78	64603.91	101520.43	40871.86	878.96	878.96
	维持养分循环	483.33	553.49	353.40	561.29	218.28	0.00	0.00
	生物多样性	530.10	6595.12	4168.07	24540.70	7951.56	62.37	62.37
文化服务	美学景观	233.87	2892.19	1839.77	14749.37	5893.51	31.18	31.18

### 2.3 生态系统服务价值

以水运货物运输价值作为朝涪段的航运价值,采用替代成本法对其进行计算,计算公式为:

$$V_w = PQL \quad (1)$$

式中:  $V_w$  为航运服务价值,元;  $Q$  为沿江港口货运量,t;  $P$  为运价,元/(t·km);  $L$  为运距,km。

参照谢高地等的研究,评价朝涪段航道整治工程研究区生态系统服务价值的计算公式为:

$$E_i = \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (2)$$

$$V_i = \sum A_i E_i \quad (3)$$

$$V = V_w + V_i \quad (4)$$

式中:  $E_{ij}$  为第  $i$  类生态系统的第  $j$  类生态系统服务功能价值系数,元/hm<sup>2</sup>;  $E_i$  为第  $i$  类生态系统中的供给服务、调节服务、支持服务、文化服务 4 类服务功能价值系数,元/hm<sup>2</sup>;  $V$  为研究区内生态系统服务总价值,元;  $V_i$  为研究区内供给服务、调节服务、支持服务、文化服务 4 类服务功能总价值,元;  $A_i$  为第  $i$  类生态系统的面积,hm<sup>2</sup>。

### 2.4 敏感性指数

为验证研究区生态系统类型对土地利用变化的代表性及生态系统服务价值系数的准确性,利用敏感性指数反映生态系统服务价值对其价值系数的依赖程度<sup>[12]</sup>进行计算:

$$C = \left| \frac{(V_j - V_i) / V_i}{(E_{j,n} - E_{i,n}) / E_{i,n}} \right| \quad (5)$$

式中:  $C$  为敏感性指数,%;  $i$  为初始值;  $j$  为单位面积生态系统服务价值调整后的值;  $n$  为土地利用类型种类。

### 2.5 生态贡献度

为确定土地利用变化引起的价值变化率,采用土地利用变化的生态系统服务价值贡献度进行计算<sup>[13]</sup>:

$$S_i = \frac{|\Delta V_i|}{\sum_{i=1}^n |\Delta V_i|} \quad (6)$$

式中:  $S_i$  为第  $i$  类生态系统在研究期内的生态系统服务价值贡献度,%;  $\Delta V_i$  为第  $i$  类生态系统在研究期内的生态系统服务价值变化量,元。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用类型

长江上游朝涪段航道整治工程前、中、后期,研究区域不同土地利用类型的面积如图 1 和表 3 所示。研究结果显示,水域为研究区域主要的土地利用类型,工程前、中、后期的占比均在 46% 以上,其次为建设用地和林地,占比也均在 18.80% 以上。研究区域不同土地利用类型面积在 2015—2021 年发生了显著的变化,工程后水域面积增加,这可能归因于航道整治工程的推进以及河流的边界调整。林地面积在 2015—2021 年稳定上升,耕地和草地面积降低。

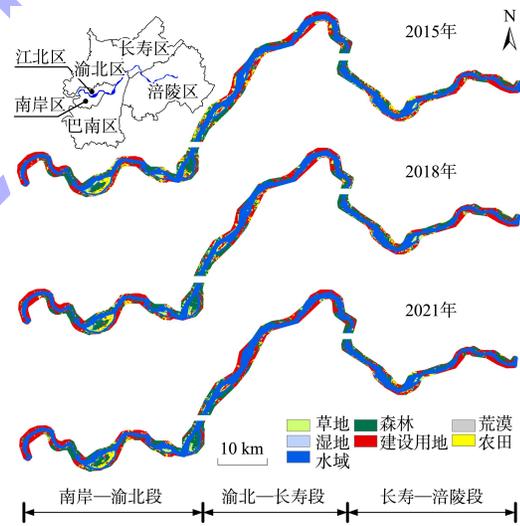


图 1 朝涪段航道整治工程研究区土地利用分类

表 3 朝涪段航道整治工程不同时期土地利用类型面积

年份	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
2015	1 586.91	4 468.61	1 052.22	5.75	11 063.22	5 563.77	17.04
2018	831.97	4 704.96	1 331.31	12.24	10 958.46	5 886.13	32.45
2021	734.85	4 722.00	928.09	7.93	11 477.62	5 845.16	41.89

### 3.2 生态系统服务价值

#### 3.2.1 不同土地利用类型的生态系统服务价值变化

2015、2018、2021 年研究区域生态服务总价值分别为 141.76 亿、139.77 亿、147.78 亿元,生态服务总价值在 2015—2018 年间经历了 1.40% 的

下降,随后在 2018—2021 年期间出现了 5.73% 的增长,表明航道整治工程建设平衡了其生态保护之间的关系,研究结果如表 4 和图 2 所示,水域为研究区内生态系统服务价值最显著的土地利用类型,工程前、中、后期占总生态系统服务价

值比例均超过90%。张璐等<sup>[14]</sup>研究也得出了在出水店水库工程区,水域对生态系统服务价值的贡献最为显著的结论。

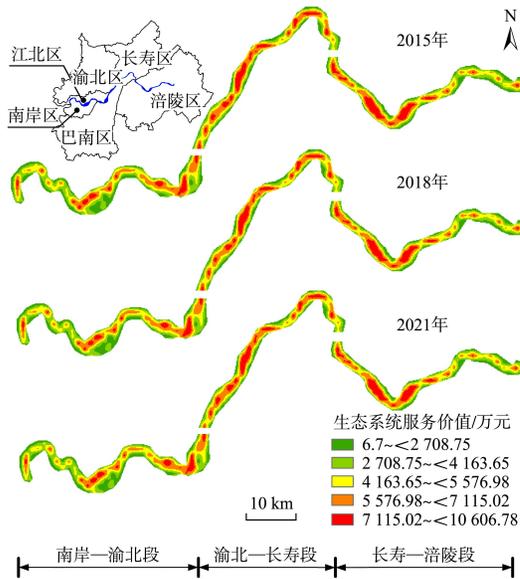


图2 2015—2021年朝涪段生态系统服务价值分布

表4 2015—2021年朝涪段各地类生态系统服务价值/亿元

年份	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地	总值
2015	0.55	8.05	5.03	0.02	128.86	-0.75	0.00	141.76
2018	0.29	8.48	1.50	0.05	130.24	-0.79	0.00	139.77
2021	0.25	8.51	1.05	0.03	138.72	-0.78	0.00	147.78

### 3.2.2 不同服务功能类型的生态系统服务价值变化

不同服务功能类型的生态系统服务价值如表5、6所示。不同的生态服务功能类型对朝涪段生态系统服务价值构成产生了显著影响。按照一级分类,调节服务在2015—2021年期间一直占据绝对主导地位,占总价值的76%以上,而供给服务、支持服务和文化服务的价值相对较小,按价值从高到低排序为调节服务>供给服务>支持服务>文化服务。

表5 2015—2021年朝涪段4大类生态系统服务价值/亿元

年份	供给服务	调节服务	支持服务	文化服务	总值
2015	17.05	110.01	13.83	0.87	141.76
2018	19.43	107.83	11.70	0.81	139.77
2021	22.67	112.61	11.67	0.83	147.78

表6 2015—2021年朝涪段单项生态系统服务价值/亿元

生态系统一级分类	生态系统二级分类	2015年	2018年	2021年
供给服务	食物生产	0.40	0.35	0.36
	原料生产	0.22	0.18	0.18
	水资源供给	7.83	7.76	8.16
	航运服务	8.60	11.14	13.97
调节服务	气体调节	0.75	0.62	0.62
	气候调节	2.05	1.77	1.76
	净化环境	1.98	1.85	1.93
	水文调节	105.23	103.59	108.30
支持服务	土壤保持	12.39	10.39	10.34
	维持养分循环	0.07	0.06	0.06
	生物多样性	1.37	1.25	1.27
文化服务	美学景观	0.87	0.81	0.83
总值		141.76	139.77	147.78

在供给服务中,航运服务功能价值占比最大,其次为水资源供给,在工程前后均呈现上升趋势。这一增长趋势的原因在于工程建设导致了朝涪段航运条件的改善和船舶大型化的趋势,从而使水路运输成本降低,货物运输量增加,带来规模效益。根据《重庆市统计年鉴》,2015—2021年间重庆市水路货物运输量总计增加了5 702.14万t。此外,水资源供给功能价值上升,说明工程建设时保护了施工范围内的饮用水源取水口,减少了工程建设的影响。

在调节服务中,工程前后水文调节功能价值整体上升。有学者研究发现,由于长江及其支流水资源丰富,整个区域的水文功能起着重要的调节作用,长江区域以水文调节为主导服务<sup>[15]</sup>。朝涪段开展的航道整治工程包括河道深化、水流改道等,有助于调整水文循环,维持水体的稳定性,对水资源的合理利用和管理有着积极影响。

工程前后支持服务中的土壤保持功能价值呈下降趋势,该结论与刘海等<sup>[16]</sup>在丹江口水源区的研究结果相反,可能是由于朝涪段航道整治工程的疏浚施工会对土壤保持造成一定的影响。

此外,在总价值中占比较小的供给服务中的食物生产、原料生产,调节服务中的气体调节、气候调节、净化环境,支持服务中的维持养分循环、生物多样性,文化服务中的美学景观,虽然

对总价值贡献较小，但它们的价值变化趋势相对平稳。这表明工程建设采取了如水生生物的生境异地重建、边滩修复等措施，减少航道整治工程对河流生态环境的影响。

### 3.3 生态系统服务价值变化的敏感性

根据生态系统服务价值的敏感性分析方法，将2015—2021年农田、林地、草地、水域、湿地和建设用地生态系统服务价值系数分别上下调整50%，得到各生态系统敏感性指数(表7)。2015—2021年所有土地利用类型的敏感性指数均小于1，表明生态系统服务价值对价值系数缺乏弹性，研究结果可信<sup>[17]</sup>。

表7 2015—2021年朝涪段生态系统服务价值敏感性指数 %

年份	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
2015	0.41	6.05	3.78	0.02	90.30	0.56	0
2018	0.22	6.59	1.17	0.04	92.59	0.61	0
2021	0.19	6.36	0.78	0.02	93.23	0.59	0

### 3.4 土地利用变化与生态系统服务价值关系

在2015—2018年期间，草地、林地和耕地均

向建设用地转换；而在2018—2021年期间，建设用地向草地、林地和耕地转换，如图3、4所示。朱利英等在没有工程建设的情况下研究发现，北运河流域土地利用变化的原因主要是城镇建设等人类活动。因此研究区各地类相互转换的原因可能是由于朝涪段航道整治工程是一个综合性的工程，包括建设沿岸基础设施、通航保障设施和堤防护岸工程等，同时为保护河流生态，其建设过程中也存在恢复河岸植被和保护水源地等措施。

朝涪段航道整治工程期间，研究区域各地类的生态系统服务价值贡献度如表8所示。研究表明，耕地、林地、草地、建设用地和水域生态系统服务价值贡献度占比较大；耕地、林地、草地、建设用地和水域的生态系统服务价值变化量对研究区总生态系统服务价值量变化影响较大，是主要的贡献因子和敏感因子。而张帅等对塔里木河的生态输水工程进行研究则发现草地生态系统服务价值占比最大，说明不同类型的工程建设对地类造成的影响不同，生态系统服务价值的主要贡献因子和敏感因子也会随之发生变化。

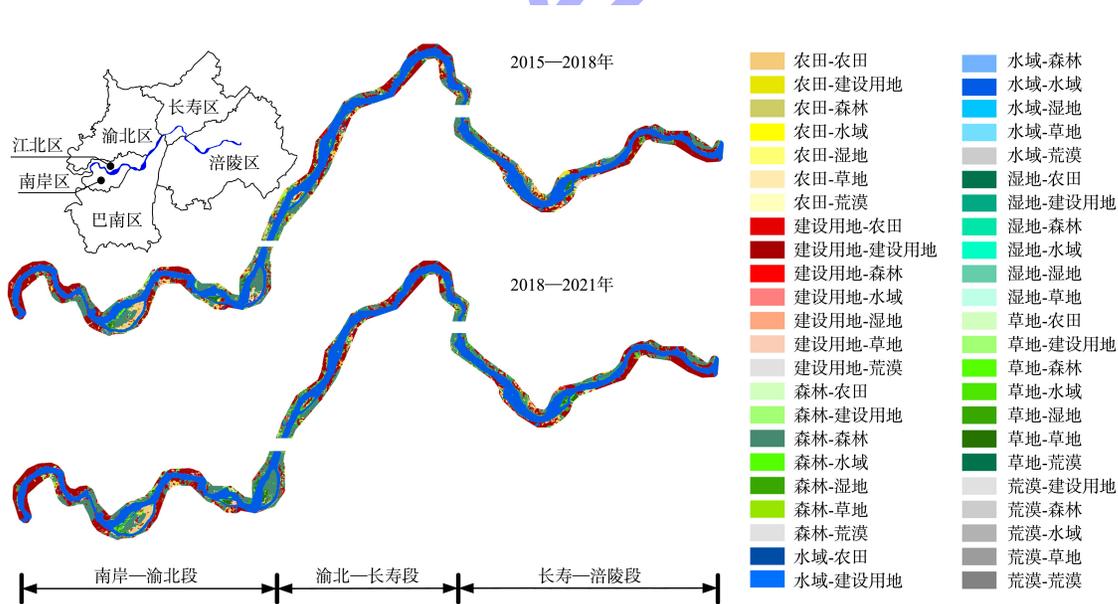


图3 朝涪段土地利用类型转移分布

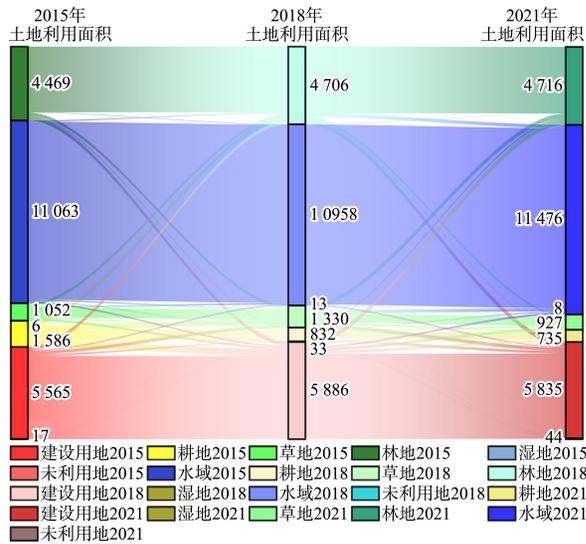


图 4 朝涪段土地利用转移数量变化(单位:hm<sup>2</sup>)

在不同时段内, 各地类生态系统服务价值贡献度存在差异, 除湿地和未利用地外, 水域、耕地、林地、建设用地和草地在各个阶段内的生态贡献率都存在骤升骤降现象, 其生态贡献率之和在 98% 以上。该结论与董亚坤等<sup>[18]</sup>在洱海流域得到的结论一致, 说明朝涪段区域生态环境良好, 航道整治工程的建设未对地区生态造成较大的干扰<sup>[19]</sup>。生态贡献率变化可能归因于工程建设过程中对沿岸带进行了规划和建设, 而湿地和未利用地面积较小, 对研究区总生态系统服务价值变化基本无影响。

表 8 2015—2021 年朝涪段各地类生态系统服务价值贡献度 %

年份	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地	未利用地
2015—2018	12.73	12.20	17.99	0.29	39.73	16.76	0.30
2018—2021	10.27	28.47	27.81	0.65	8.09	24.29	0.50
2015—2021	13.41	21.70	27.79	0.19	15.36	21.41	0.14

#### 4 结论

1) 在朝涪段航道整治工程整个建设期间, 研究区土地利用类型发生了改变, 但整个区域内的主导类型一直是水域、建设用地和林地, 占比达到 88.79%, 转变以各土地类型之间的内部转变和调整为主。

2) 朝涪段航道整治工程的生态系统服务价值主要来源于水域, 工程建设前、中、后期的生态系统服务总价值分别为 141.76 亿、139.77 亿、

147.78 亿元, 工程建设整个过程中呈现先减小后增大的趋势, 符合水利工程建设规律。

3) 朝涪段航道整治工程建设期间, 水域的生态系统服务价值变化量对研究区总生态系统服务价值量变化影响较大, 是主要的贡献因子和敏感因子。

#### 参考文献:

- [1] 杨雪婷, 邱孝枰, 朱付彪, 等. 长江上游重点生态功能区生态系统服务福祉效应与层级差异研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(4): 797-808.
- [2] 张中浩, 聂甜甜, 高阳, 等. 长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1086-1100.
- [3] 李奇宸, 王敏, 万甜, 等. 基于 LUC 的汤浦水库流域生态价值变化过程研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 184-189.
- [4] 刘玉玉, 张令光, 姜欣, 等. 水系连通过程中土地利用与生态服务价值变化分析: 以济南西部多水源连通交汇区为例[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(3): 30-36, 43.
- [5] 张帅, 汪洋, 夏婷婷, 等. 塔里木河生态输水条件下土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 739-749.
- [6] 龙浩, 李文杰, 杨胜发, 等. 长江朝涪段航道建设工程经济效益分析研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(7): 110-114, 127.
- [7] 周申蓓, 黄媛媛, 吕玲玲. 小浪底工程建设后黄河河岸带生态系统服务价值变化[J]. 人民黄河, 2022, 44(9): 122-125, 154.
- [8] 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.
- [9] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [10] 高振斌, 王小莉, 苏婧, 等. 基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(6): 563-570.
- [11] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 等. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 373-381.

(下转第 160 页)