

引文格式: 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. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202209031](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202209031)

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*

赵锐¹, 任昕芸¹, 苏伟洲^{2**}, 杜森¹, 王璐璐¹, 王彬², 薛琰焱¹

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 2. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621010)

摘要:【目的】探究 2018—2019 年沱江流域生态系统生产总值 (gross ecosystem product, GEP) 变化特征, 为流域生态补偿机制设计提供参考。【方法】利用 GEP 核算体系融合物质流分析开展流域城市的 GEP 分配, 揭示流域 GEP 的变化特征。【结果】(1) 2018 年和 2019 年沱江流域 GEP 分别为 4120.21 亿元和 4477.67 亿元, 其中, 气候调节服务价值和文化服务价值贡献最大, 二者累积贡献分别为 2468.99 亿元和 2721.14 亿元, 占比分别达 59.9% 和 60.8%; (2) 流域内成都的 GEP 总量最大, 2018 年和 2019 年分别为 1484.87 亿元和 1589.17 亿元; 泸州的 GEP 总量最小, 分别为 150.59 亿元和 168.48 亿元, 但其涨幅最高, 达 11.9%; (3) 2018 年, 内江生态价值溢出最多, 达 427.68 亿元, 但 2019 年减少至 99.76 亿元; 成都生态价值溢出的增量最大, 从 2018 年的 192.15 亿元增加至 2019 年的 329.49 亿元; 泸州由生态价值外溢转为生态价值消耗, 从 2018 年的 74.93 亿元减少至 2019 年的 -4.95 亿元, 由受偿主体转变为补偿主体。【结论】流域 GEP 因上下游生态服务供需关系呈现出价值流动特征, 其变化主要受生态流量变化、政策激励和产业结构调整等影响。

关键词: 生态系统生产总值; 核算; 物质流分析; 分配; 生态补偿

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2023) 03-0520-09

Study on Distribution of Tuojiang River Basin Gross Ecosystem Product by Value Accounting System Combined with Material Flow Analysis

ZHAO Rui¹, REN Xinyun¹, SU Weizhou², DU Sen¹, WANG Lulu¹, WANG Bin², XUE Yanye¹

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. School of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: [Purpose] To investigate the changes of gross ecosystem product (GEP) in Tuojiang River Basin from 2018 to 2019, providing insight into design of the ecological compensation mechanism. [Methods] GEP accounting system combined with material flow analysis was used to implement GEP allocation for river basin affiliated cities, and reveal its temporal variation. [Results] 1) The GEP of Tuojiang River Basin from 2018 and 2019 was 412.021 billion yuan and 447.767 billion yuan, respectively, in which climate regulation service value and cultural service value contributed the most,

收稿日期: 2022-09-19

修回日期: 2023-05-06

网络首发日期: 2023-07-07

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41571520); 四川省青年科技创新团队 (2022JDTD0005); 四川省重点研发计划项目 (2023YFG0111); 中国工程院战略咨询研究项目 (Q113520S02003)。

作者简介: 赵锐 (1983—), 男, 四川南充人, 博士, 教授, 主要从事环境生态系统工程研究。

E-mail: ruizhao@swjtu.edu.cn

**通信作者 Corresponding author: 苏伟洲 (1971—), 男, 云南石屏人, 博士, 教授, 主要从事环境经济与管

理研究。E-mail: suweizhou@swust.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/53.1044.S.20230706.0926.001.html>



their cumulative contribution was 246.899 billion yuan and 272.114 billion yuan from 2018 to 2019, accounting for 59.9% and 60.8%, respectively. 2) The GEP of Chengdu was the largest in the basin, with 148.487 billion yuan and 158.917 billion yuan in 2018 and 2019, respectively, whilst the GEP in Luzhou was the smallest, with 15.059 billion yuan and 16.848 billion yuan, respectively. However, the GEP increase regarding Luzhou was the highest, reaching 11.9%. 3) Neijiang exported the most (42.768 billion yuan) GEP to the basin in 2018, but it decreased to 9.976 billion yuan in 2019. Chengdu had the largest increase in its GEP supply, from 19.215 billion yuan in 2018 to 32.949 billion yuan in 2019. Luzhou had changed from GEP supply to GEP consumption, from 7.493 billion yuan in 2018 reducing to -0.495 billion yuan in 2019, from the indemnified subject to the compensation subject.

[**Conclusion**] Due to the supply and demand relationship between upstream and downstream in the river basin, GEP shows the characteristics of value flow, and its associated changes are mainly affected by ecological flow, policy incentives and industrial structure adjustment.

Keywords: gross ecosystem product; accounting; material flow analysis; allocation; ecological compensation

生态系统生产总值 (gross ecosystem product, GEP) 是指生态系统所能提供的产品和服务的经济价值^[1]。流域是一个由社会、经济和自然组成的生态系统,具有陆地和水生相互联系的特点^[2],承载气候调节、涵养水源、物质供给和文化服务等多种功能^[3],核算其生产总值对推动流域生态量化考核和指导生态补偿机制设计具有重要意义^[4]。国内外主要基于价值量评估对生态系统服务开展定量评价^[5],通过核算生态功能量并转换为生态经济价值量,得出生态系统生产总值^[6-7]。早期研究多是基于生态系统自身功能开展核算,但因系统内可能存在多种功能共同支撑一项服务的关联关系(如能量流动和物质循环共同实现碳固定),导致核算边界不清^[8-9]。在此基础上,相关研究尝试以系统服务导向为目标^[7],考虑生态系统结构和功能等特征引起的服务差异,构建了核算框架,可对不同尺度和不同类型的生态系统进行价值评估^[3, 6, 10]。

既有研究报道了包括省域^[11-12]、市域^[10, 13]、县域^[14-16]和生态功能区^[17-18]等在内的 GEP 核算案例,但目前针对流域 GEP 核算的研究还较少。OUYANG 等^[19]利用综合生态经济模型对黄河流域青海地区的 GEP 开展了核算,并识别了生态系统服务的跨区域流动特征;赵筱青等^[20]研究了 2005—2015 年抚仙湖流域土地利用变化对 GEP 的影响,揭示了单位面积 GEP 在空间上的变化趋势;PASTOR 等^[21]以葡萄牙 Rio Seco 河和希腊 Giofyros 河为研究对象,建立了适用于以间歇性

河流和短暂溪流为地貌特点的生态系统服务价值指标体系;HUANG 等^[2]对拉萨河流域 GEP 及补偿机制进行了研究,发现生态资源稀缺性对流域生态系统服务价值影响较大;刘家倩等^[22]利用生态耦合模型测算了鄱阳湖流域的 GEP,发现干旱气候对 GEP 存在抑制效应;马元希等^[23]建立了适应于黄河青海流域特征的 GEP 核算指标体系。上述关于流域 GEP 核算的相关研究中,尚未考虑上下游之间生态服务的供需关系和生态系统服务的转移关系^[23-24]。针对该问题,本研究在开展流域 GEP 核算时,引入物质流分析(material flow analysis, MFA)方法,对核算的 GEP 进行修正,以刻画生态服务在社会经济系统与流域自然生态系统之间的流动关系,表征 GEP 在人为活动干预与自然调节作用下的动态平衡变化。在此基础上,通过分析流域各城市实际提供的生态服务价值,识别流域生态补偿的补偿主体与受偿主体。沱江流域是长江的一级支流,沿线覆盖成渝双城经济圈内多个大中型城市,因工业分布密集、人口增长迅速导致生态系统服务功能退化,面临严重的资源瓶颈^[25]。通过开展 GEP 评估可揭示沱江流域的自然生态系统运行状态以及社会经济活动对流域生态系统的影响,对构建流域生态价值转化路径具有重要的引导作用。

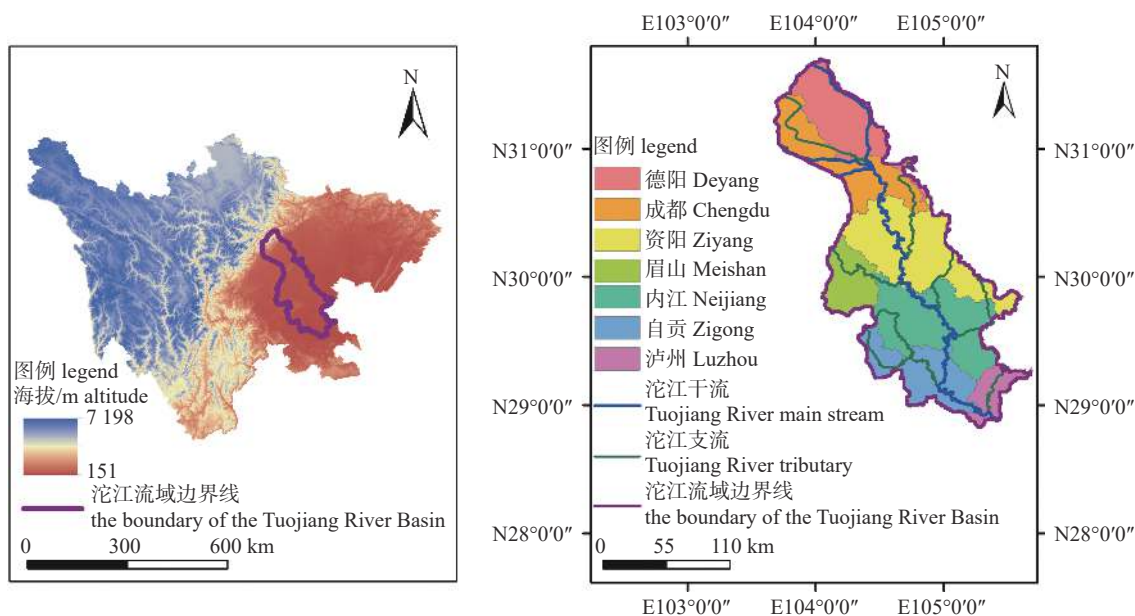
1 材料与方法

1.1 研究区概况

沱江位于四川省中东部,是长江上游最大的

支流之一,位于 $N28^{\circ}49'17''\sim 31^{\circ}42'3''$, $E 103^{\circ}40'57''\sim 105^{\circ}42'50''$, 全长 712 km, 流域面积约 27860 km^2 , 流域年均降水量 1200 mm。根据《沱江流域横向生态保护补偿协议》, 确定纳入补偿的区域共涉及 10 个市(州), 包括成都市、德阳市、自贡市、内江市、绵阳市、眉山市、宜

宾市、泸州市、资阳市和乐山市。流域人口超过 3700 万, GDP 占四川省的 30.8%, 也是四川省内污染较为严重的流域之一^[25]。由于绵阳市、宜宾市和乐山市所占流域面积不足全流域的 1%, 故本研究重点选择成都市、德阳市、内江市、泸州市、眉山市、资阳市和自贡市为研究区(图 1)。



注: 四川省行政地图审图号: 川 S(2021)00050 号, 四川省标准地图水系版审图号: 川 S(2021)00068 号; 底图无修改。

Note: Approval number of Sichuan administrative map is Sichuan S (2021) 00050, approval number of water system regarding Sichuan standard map is Sichuan S (2021) 00068; the base map has not been modified.

图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location diagram of study area

1.2 研究方法

1.2.1 流域生态系统生产总值核算

目前常用的 GEP 核算体系一般包括物质产品、调节服务和文化服务等 3 个部分^[6]。其中, 物质产品是指人类从生态系统中获取的可在市场交换的各种物质产品, 如食物、纤维、木材和药材等; 调节服务是指生态系统提供可改善人类生存与生活环境的福祉, 如水源涵养、土壤保持、洪水调蓄、空气净化和气候调节等; 文化服务是指从生态系统中获得的非物质福祉, 如生态旅游和景观游憩^[26]。本研究在此基础上, 结合《陆地 GEP 核算技术指南(2020)》, 确定了农业产品、林业产品、畜牧业产品、渔业产品、水资源、水源涵养、土壤保持、洪水调蓄、碳固定、空气净化、水质净化、气候调节和自然景观等共性指标。基于沱江流域实际, 剔除了防风固沙、海岸带防护和休闲旅游服务 3 个指标; 根据流域土地

类型占比情况, 提供生态系统服务价值的主要是耕地和林地, 分别占流域面积的 78% 和 14%^[27], 而耕地提供的物种保育功能有限^[12], 且四川盆地的生态保育型服务主要由盆周山地(大巴山、龙门山脉和川东平行岭谷)提供^[28], 并未涉及沱江流域, 故剔除了物种保育指标; 此外, 由于流域中氧气提供功能生态价值仅占总价值的 0.1%^[23], 故剔除了氧气提供指标。在保留共性指标、剔除不相关指标的基础上, 本研究最终形成适用于沱江流域的 GEP 核算指标体系。通过水量平衡法等量化各指标, 再通过影子价格和成本替代等方法将功能量转化为价值量, 所有指标产生的价值量总和即为该区域的 GEP(表 1)。

1.2.2 基于 MFA 的 GEP 分配

传统的 MFA 模型是利用直接物质输入量(direct material input, DMI)衡量进入经济生产和消费活动的物质; 利用直接物质输出量(direct

表 1 流域生态系统生产总值核算方法

Tab. 1 Accounting method of gross ecosystem product of river basin ecosystem

一级指标 the 1st level indicator	二级指标 the 2nd level indicator	核算公式 accounting formula	公式说明 formula description
物质产品 material products	农业、林业、畜牧业和渔业产品; 水资源 products of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery; water resources	$V_M = V_{GDP} \times \frac{S_{流域}}{S}$	V_M 为物质产品价值量, 亿元; V_{GDP} 为该区域GDP值, 亿元; $S_{流域}$ 为该区域内流域面积, km^2 ; S 为该区域行政面积, km^2 。
	水源涵养 water conservation	$Q_{wr} = \sum_{i=1}^n (P_i - R_i - ET_i) \times A_i$ $V_{wr} = Q_{wr} \times C_{we}$	Q_{wr} 为总水源涵养量, m^3/a ; P_i 为产流降雨量, mm/a ; R_i 为地表径流量, mm/a ; ET_i 为蒸散发量, mm/a ; A_i 为 <i>i</i> 类生态系统面积, m^2 ; i 为研究区第 <i>i</i> 类生态系统类型; n 为研究区生态系统类型; V_{wr} 为水源涵养总价值量, m^3/a ; C_{we} 为水资源交易市场价格, 元/ m^3 。
调节服务 regulation services	水土保持 soil conservation	$Q_{sr} = R \times K \times L \times S \times (1 - C_1 \times P)$ $V_{sr} = V_{sd} + V_{dpd}$ $V_{sd} = \lambda \times (Q_{sr} / \rho) \times C_2$ $V_{dpd} = \sum_{i=1}^n Q_{sr} \times C_i \times P_i$	Q_{sr} 为土壤保持量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C_1 为植被覆盖和管理因子; P 为水土保持措施因子; V_{sr} 为生态系统土壤保持价值, 元/ a ; V_{sd} 为减少泥沙淤积价值, 元/ a ; V_{dpd} 为减少面源污染价值, 元/ a ; C_2 为单位水库清淤工程费用, 元/ m^3 ; ρ 为土壤容重, t/m^3 ; λ 为泥沙淤积系数; i 为土壤中氮磷等营养物质数量, $i=1, 2, \dots, n$; C_i 为土壤中氮磷等营养物质的纯含量, %; P_i 为处理成本, 元/ m^3 。
	洪水调蓄 flood regulation and storage	$C_{fm} = C_{rc} + C_{lc}$ $V_{fm} = C_{fm} \times C_{we}$	C_{fm} 为洪水调蓄量, m^3/a ; C_{rc} 为库塘洪水调蓄量, m^3/a ; C_{lc} 为湖区洪水调蓄量, m^3/a ; V_{fm} 为生态系统洪水调蓄价值, 元/ a ; C_{we} 为水库单位库容的建设成本, 元/ m^3 。
	碳固定 carbon fixation	$Q_{CSO_2} = \sum_{i=1}^n A_i \times S_i$ $V_{cf} = Q_{CO_2} \times C_c$	Q_{CSO_2} 为土壤固碳量, t/a ; A_i 为不同系统中的土壤面积, hm^2 ; S_i 为不同系统实测土壤固碳量, $t/(hm^2 \cdot a)$; V_{cf} 为生态系统固碳价值, 元/ a ; Q_{CO_2} 为生态系统固碳总量, t/a ; C_c 为碳价格, 元/ t 。
	空气净化 air purification	$APQ = Q_{SO_2} + Q_{NO_x} + C_{dusts}$ $APV = Q_{SO_2} \times C_{SO_2} + Q_{NO_x} \times C_{NO_x} + Q_{dusts} \times C_{dusts}$	APQ 为大气污染物排放总量, t ; Q_{SO_2} 为二氧化硫排放量, t ; Q_{NO_x} 为氮氧化物排放量, t ; Q_{dusts} 为颗粒物排放量, t ; APV 为空气净化价值, 元; C_{SO_2} 为二氧化硫治理成本, 元/ t ; C_{NO_x} 为氮氧化物治理成本, 元/ t ; C_{dusts} 为颗粒物治理成本, 元/ t 。
	水质净化 water purification	$V_w = \sum_{i=1}^3 c_i \times Q_i$	V_w 为生态系统水质净化的价值, 元/ a ; c_i 为治理第 <i>i</i> 种污染物的成本, 元/ t ; Q_i 为第 <i>i</i> 种污染物的排放量, t 。
文化服务 cultural services	气候调节 climate regulation	$E_{we} = E_w \times q \times 10^3 / 3600 + E_w \times y$	E_{we} 为生态系统蒸发消耗的能量, kW/h ; E_w 为年蒸散量, mm ; q 为挥发潜热, 即蒸发1g水所需热量, J ; y 为加湿器将1 m^3 水转化为蒸汽的耗电量, kW/h 。
	自然景观 natural landscape	$N_t = \sum_{i=1}^n N_{ti}$ $V_r = \sum_{j=1}^n N_j \times TC_j$ $TC_j = T_j \times W_j + C_j$ $C_j = C_{tcj} + C_{lfj} + C_{efj}$	N_t 为旅客总人数; N_{ti} 为第 <i>i</i> 个旅游区的人数; n 为旅游区个数, $i=1, 2, 3, \dots, n$; V_r 为被核算地点的休闲旅游价值, 元/ a ; N_j 为每年 <i>j</i> 地到核算地区旅游的总人数; j 为被核算地点旅游的游客所在区域; TC_j 为来自 <i>j</i> 地的游客的平均旅行成本, 元/人; T_j 为来自 <i>j</i> 地的游客用于旅游地点的平均时间, d /人; W_j 为来自 <i>j</i> 地的游客的当地平均日工资, 元/人; C_j 为来自 <i>j</i> 地的游客花费的平均直接旅行费用, 元/人; C_{tcj} 为游客从 <i>j</i> 地到核算区域的交通费用, 元/人; C_{lfj} 为食宿花费, 元/人; C_{efj} 为门票费用, 元/人。

material output, DMO) 表征经济系统运行中产生的各类排放至环境中的废弃物^[29], 也可视为由人为活动产生的污染物排放对流域引起的负面效应。沱江流域系统的 DMI 由两部分构成, 一部分是系统实际提供的 GEP (DMI₁), 即基于 MFA 修正后的 GEP; 另一部分是人为干预对流域 GEP

提升产生的正面影响 (DMI₂)。由于在上下游关系中, 只存在上游的水质影响下游的可能, 因此假设 GEP 仅在沱江流域各城市内流动, 上游自然调节作用降低或排污量增大时, 下游 GEP 可能降低。在此假设的边界基础上, 建立流域生态系统的 MFA 模型为:

$$\sum_{i=1}^n \text{GEP}_i = \sum_{i=1}^n \text{DMI}_{1i} + \sum_{i=1}^n \text{DMI}_{2i} - \sum_{i=1}^n \text{DMO}_i \quad (1)$$

式中： n 为流域中的城市/区域数量， $n=7$ ， DMI_{1i} 是城市 i 修正的 GEP， DMI_{2i} 指城市 i 环境治理产生的 GEP 值，即投入的治理资金全部转化为该流域的 GEP，以治理资金价值量表征，单位为亿元； DMO_i 是污染价值量，根据《沱江流域横向生态保护补偿协议》中确定的污染物类型，结合数据可获性，将其限定为化学需氧量 (chemical oxygen demand, COD) 以及氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$) 两类，利用四川水污染物税额 2.8 元每污染当量计算^[30]，公式为：

$$\sum_{i=1}^n \text{DMO}_i = \sum_{i=1}^n (m \times M_{\text{COD}_i} + n \times M_{(\text{NH}_3\text{-N})_i}) \times T \quad (2)$$

式中： M_{COD_i} 和 $M_{(\text{NH}_3\text{-N})_i}$ 为城市 i 典型污染物的排放总量，kg； m 和 n 为污染当量系数，本研究中 $m=0.8$ ， $n=1.0$ ； T 为污染物处理成本，本研究中 $T=2.8$ 。

根据 GEP 核算结果，利用式 (1) 可得出修正后的 GEP (DMI_{1i})，结合流域水资源量 (WR_i) 可以得到流域内各区域的水资源分配价值 (NA_i)，计算公式为：

$$NA_i = WR_i / WR_{\text{total}} \times \text{DMI}_{1\text{total}} \quad (3)$$

式中： WR_{total} 为沱江流域当年水资源总量，亿 m^3 ； $\text{DMI}_{1\text{total}}$ 为修正后的流域生态系统 GEP 总量，亿元。

GEP 修正值 DMI_{1i} 与水资源分配价值 NA_i 的差值即为各区域的 GEP 分配值 (DD_i)，即： $DD_i = \text{DMI}_{1i} - NA_i$ 。若 $DD_i > 0$ ，则表示在当年内，流域内的城市 i 实际提供的 GEP 较水资源分配价值更大，说明该市对流域生态环境保护做出了贡献；若 $DD_i < 0$ ，则表示该市实际提供的 GEP 较平均分配的 GEP 更小，即消耗了更多的 GEP。

1.3 数据来源

本研究以 2018 年为基准年，测算了 2018 年和 2019 年沱江流域各城市的 GEP。其中，物质产品数据和文化服务 (自然景观) 数据来自 2018—2020 年四川省统计年鉴；调节服务 (水源涵养、土壤保持、洪水调蓄、碳固定、空气净化、水质净化和气候调节) 数据来自四川省生态环境科学研究院。

2 结果与分析

2.1 基于核算的 GEP 变化特征

图 2 显示：2018 年和 2019 年，沱江流域 GEP 分别为 4120.21 亿元和 4477.67 亿元，2019 年 GEP 较 2018 年增加了 8.7%，说明沱江流域生态环境系统整体运行良好。其中，气候调节服务价值占比最大，2018 年和 2019 年分别为 1268.92 亿元和 1476.64 亿元，分别占 GEP 总值的 30.8% 和 33.0%；2018 年和 2019 年文化服务价值分别为 1200.07 亿元和 1244.50 亿元，分别占 GEP 的 29.1% 和 27.8%，呈小幅下降趋势。上述二者的累积贡献占比分别达 59.9% 和 60.8%；而产品供给、土壤保持和洪水调蓄等服务价值变化不大，在 0.6% 的范围内波动。

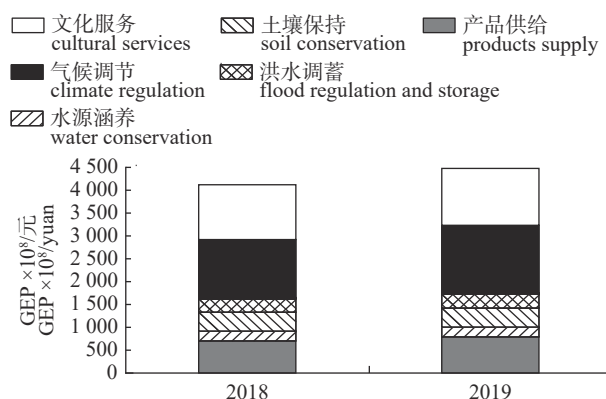


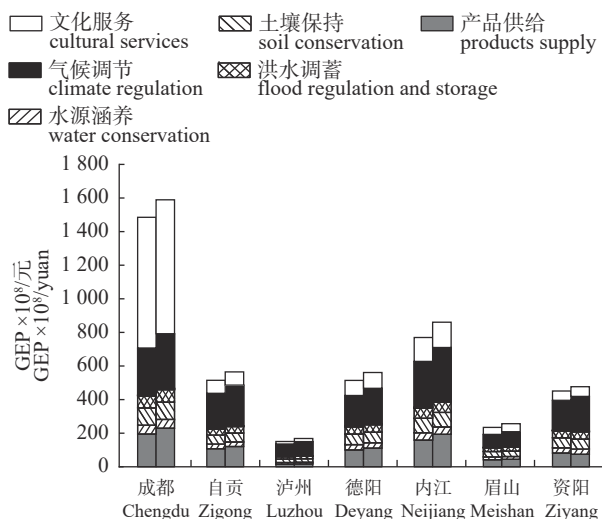
图 2 2018—2019 年沱江流域 GEP 变化

Fig. 2 GEP variation of Tuojiang River Basin from 2018 to 2019

2018—2019 年沱江流域内各城市的 GEP 变化情况各不相同 (图 3)。其中，成都的 GEP 总量最大，从 2018 年的 1484.87 亿元增长至 2019 年的 1589.17 亿元，增幅为 7.0%，分别占流域 GEP 的 36.0% 和 35.5%。相较于其他城市，成都虽然 GEP 处于最高水平，但增幅最小。泸州的 GEP 总量最小，2018 年和 2019 年分别为 150.59 亿元和 168.48 亿元，仅分别占流域 GEP 的 3.7% 和 3.8%，这与其高消耗与高污染的产业结构有关。

2.2 基于 MFA 的 GEP 修正结果

由图 4 可知：2018 年和 2019 年沱江流域污染价值总量分别为 4.38 亿元和 4.24 亿元，整体下降 3.1%。其中，德阳市产生的污染价值量最大，2018 年和 2019 年分别为 1.21 亿元和 1.15 亿元。



注:各城市左侧柱形为2018年的数据,右侧柱形为2019年的数据。
Note: In each city, left column indicates the data of 2018, and right column indicates the data of 2019.

图3 2018—2019年沱江流域各城市GEP变化

Fig. 3 Changes of GEP among cities in Tuojiang River Basin from 2018 to 2019

元,分别占27.7%和27.2%;其次为内江市,2018年和2019年的占比分别为26.1%和26.7%,呈现一定的上升趋势。2018—2019年流域治理价值总量分别为39.84亿元和43.74亿元,整体上升9.8%。其中,眉山的治理价值量占比最大,2018年和2019年分别为36.9%和37.6%,分析其原因可能在于眉山的畜禽养殖污染突出,各级环保督察促使地方政府投入更多的资金用于污染集中整治;其次为成都市,2018年和2019年的占比分别为35.6%和26.3%;内江市的治理投入相对最低,2018年和2019年的占比仅分别为4.2%和

2.6%;其余城市的治理价值量变化不大,基本在1.3%~6.9%的范围内波动。此外,各城市的污染价值量与治理价值量均存在较大差异,2018年和2019年的平均差异分别达18.63倍和27.85倍,其中眉山和泸州的差异较大,一方面反映了污染治理的紧迫性;另一方面体现了流域污染从上游向下游迁移的特点,需要考虑引入流域生态补偿机制减缓下游治理压力。

排除人为活动影响产生的价值后,流域各城市修正后的GEP均出现了不同程度的降低(图5),降幅在6.2%以内,说明现有的产业结构对沱江水环境容量具有一定冲击,而流域水环境治理对维持GEP供给具有支撑作用。其中,眉山市降幅最大,2018年和2019年的降幅分别为6.2%和5.8%;其余城市的降幅基本在1.0%以内。说明流域内开展综合治理对环境容量提升有积极影响;同时,随着产业结构的调整和生产效率的提高,有助于减少流域的污染排放。

2.3 流域各城市GEP的分配

由图6可知:内江2018年向沱江流域提供的生态价值最多,达到427.68亿元;但2019年减少至99.76亿元,减少了76.7%。成都市向沱江流域提供的生态价值增幅最大,从2018年的192.15亿元上升到2019年的329.49亿元,上升了71.5%。泸州是唯一由生态价值外溢转为生态价值消耗的城市,从2018年74.93亿元变为2019年的-4.95亿元。德阳市的生态消耗价值下降幅度最大,由-763.27亿元减少为-351.18亿元,减少了54.0%。

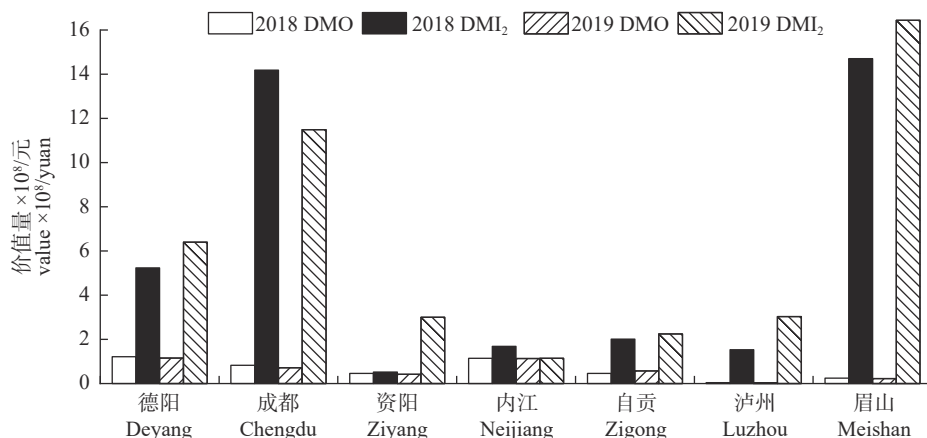


图4 沱江流域各市污染价值量(DMO)和治理价值量(DMI₂)变化

Fig. 4 Changes of pollution value (DMO) and pollution control value (DMI₂) among cities in Tuojiang River Basin

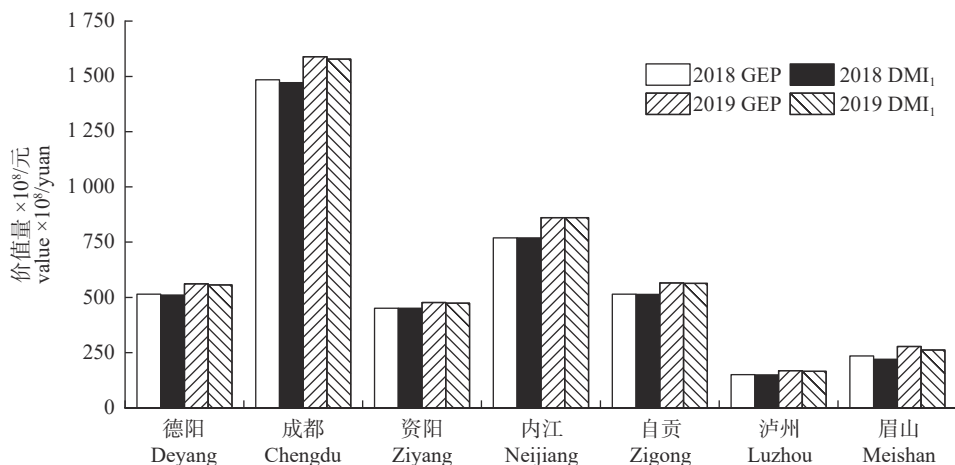
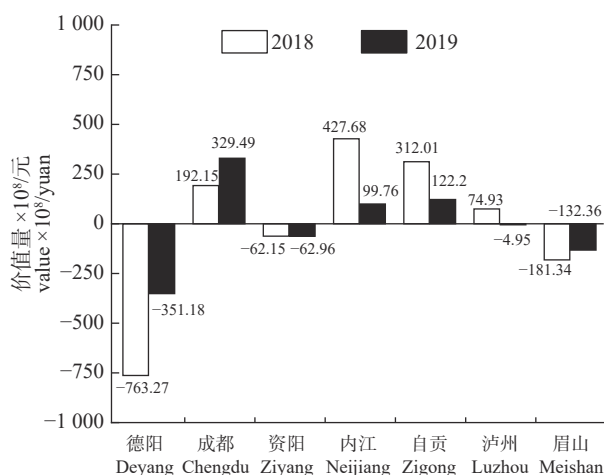


图 5 沱江流域各城市修正后 GEP 与核算 GEP 对比

Fig. 5 Comparison between the adjusted GEP and accounted GEP in Tuojiang River Basin

图 6 沱江流各城市 GEP 分配 (DD_i) 变化Fig. 6 Changes of GEP distribution (DD_i) among cities of Tuojiang River Basin

3 讨论

本研究通过对沱江流域 2018—2019 年的 GEP 核算后发现：流域内 GEP 总体呈现小幅上升，其中气候调节服务的上升趋势反映出沱江生态廊道的实施有效提升了植被面积和质量，增加了植被蒸腾耗能，有效调节了流域气候^[31]；而文化服务价值的小幅下降可能与区域城镇化发展引起建设用地面积扩张有关，继而影响了流域内的景观完整性^[32]；土壤保持和洪水调蓄等服务价值的小幅波动可能受到绿色创新政策驱动，产业结构优化和调整还在探索阶段，生产要素向第二、三产业聚集的同时仍存在资源非集约利用的情况，导致生态系统相关服务价值产生波动^[33-34]。经 MFA 修

正后，流域内 GEP 有所下降，其中降幅最大的眉山是受到食品加工以及畜禽养殖行业影响，在短期内面临水环境治理难题^[35]，说明流域内产业聚集和农灌需求等引起的叠加效应对 GEP 产生了冲击，而既有的流域综合治理对生态系统功能的支撑作用相对有限^[36]。

就流域内各城市 GEP 的变化而言，本研究认为其主要受生态流量变化、政策激励和产业结构调整的影响。特别是随着成渝城市群一体化发展、西部创新驱动先导区建设等重要绿色创新政策的出台，产业绿色转型的动能明显提升，如成都受政策激励，产业结构逐步向专业化和集约化发展，GEP 表现最高，生态价值也呈现一定的外溢特征，超大城市的资源“虹吸效应”在逐步放缓，区域间协同发展产生的环境经济效益也有一定体现^[33]。污染治理基础设施不足、支柱性产业高碳锁定效应明显的城市面临着生态系统价值消耗的发展瓶颈，如内江治理价值量呈现下降趋势，支流釜溪河和濛溪河上游水电开发密集，同期又有农灌需求，河流生态流量大幅降低，对水环境容量造成冲击^[37]，生态价值溢出也出现大幅降低，一方面是受生态流量补给不足的影响，另一方面则是医药制造、电子及通讯设备制造等新兴产业迅速集聚，既有的污染治理能力提升还存在一定差距^[38]。上述讨论也反映出生态环境保护与社会经济发展的现实矛盾，流域内各个城市的 GDP 产值、所承担的生态系统服务功能和生态消费等具有明显的时空异质性特点，应考虑加强彼此合作，形成上下游联动的发展网络，扩大网络

中产业共生规模,提升绿色生产效率,推动流域生态和社会经济的均衡发展^[36,39]。

流域生态补偿机制有助于平衡流域上下游相关利益主体经济利益,同时兼顾上下游积极性,促进生态环境质量的持续改善^[40]。为此,本研究进一步识别了流域内生态服务的供受方角色,以期作为流域生态补偿标准设计提供参考。通过引入MFA对GEP进行修正,沱江流域内城市间GEP分配差距更小,更符合由“较高水平、较大差距”向“更高水平、较小差距”转变的发展理念^[41]。2018年,德阳、资阳和眉山是排污方,应作为补偿主体;而成都、内江、自贡和泸州是纳污方,应作为受偿主体;2019年,德阳、资阳、泸州和眉山作为补偿主体,而成都、内江和自贡则作为受偿主体。2019年内江向沱江流域提供的生态价值相比2018年减少的最多,因河流生态流量减小,对水环境容量造成冲击,同时产业结构调整优势不明显,在一定程度上导致生态系统资源消耗增加^[38];成都向沱江流域提供的生态价值增幅最大,这可能是受成渝双城经济圈建设的政策激励,产业结构向专业化和集约化方向发展,资源配置和循环利用效率上升,在一定程度上减小了对生态环境的影响^[38];德阳的生态消耗价值下降幅度最大,可能与其产业结构调整有关,第三产业比重逐步上升,资源消耗有序降低^[31]。补偿主客体的变化,反映出生态服务的供需关系对流域生态系统服务价值的影响。为此,针对生态价值存在外溢的城市,应考虑加强区域间人才、技术和资本的交流与合作,持续推动技术进步与效率提升,以助力流域全域绿色发展;而针对生态价值消耗的城市,一方面应进一步提升污染治理效率,削减污染负荷;另一方面还要考虑产业转型,优化产业结构,降低能源消耗强度,减少对外部生态价值的依赖。

此外,通过本研究也发现存在一些问题,值得进一步探索:首先,受数据的可获性和有效性,城市排污数据无法具体到流域范围,只能通过流域内城市的相关统计数据来推算流域所辖范围内GEP变化情况;其次,并未综合考虑区域自然和社会经济发展水平来确定生态补偿的优先级,但优化后的GEP可反映区域社会经济与资源环境的协调发展水平,此方法有望为生态补偿标准的设计提供有益参考。

4 结论

本研究以沱江流域为研究对象,编制了适用于沱江流域的GEP核算指标体系;根据流域GEP变化,不仅考虑到环境的生态系统服务价值,也结合了流域水质和水量,从水资源、水环境、水生态统筹治理的角度出发,以GEP核算结果驱动生态补偿机制设计,并利用MFA优化了GEP核算结果,识别了流域内生态服务的供受方角色。沱江流域2018—2019年的GEP呈上升趋势,其中成都的GEP贡献最大,泸州的GEP贡献最小;就各城市分配的GEP而言,成都生态价值溢出的增量最大,增加了71.5%;泸州是唯一由生态价值外溢转为生态价值消耗的城市,从2018年的74.93亿元变为2019年-4.95亿元。

[参考文献]

- [1] 靳乐山,刘晋宏,孔德帅.将GEP纳入生态补偿绩效考核评估分析[J].生态学报,2019,39(1):24. DOI: 10.5846/stxb201809252081.
- [2] HUANG L, HE C L, WANG B. Study on the spatial changes concerning ecosystem services value in Lhasa River Basin, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(5): 7827. DOI: 10.1007/s11356-021-16245-8.
- [3] ZHANG Z M, GAO J F, FAN X Y, et al. Response of ecosystem services to socioeconomic development in the Yangtze River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 72: 481. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.08.035.
- [4] YU H J, XIE W, YANG L, et al. From payments for ecosystem services to eco-compensation: conceptual change or paradigm shift?[J]. Science of the Total Environment, 2020, 700: 134627. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134627.
- [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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.030.
- [6] 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. DOI: 10.5846/stxb201310092428.
- [7] 石敏俊,陈岭楠.GEP核算:理论内涵与现实挑战[J].中国环境管理,2022,14(2):5. DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.02.005.
- [8] COSTANZA R, D'ARGE R, GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253. DOI: 10.1038/387253a0.
- [9] 谢高地,鲁春霞,成升魁.全球生态系统服务价值评估研究进展[J].资源科学,2001,23(6):5. DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2001.06.002.
- [10] 邓娇娇,常璐,张月,等.福州市生态系统生产总值核算[J].应用生态学报,2021,32(11):3835. DOI: 10.13287/j.1001-9332.202111.018.

- [11] 罗芳, 潘安, 陈忠升, 等. 四川省土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(4): 734. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202010031](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202010031).
- [12] 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. DOI: [10.5846/stxb202004260999](https://doi.org/10.5846/stxb202004260999).
- [13] 牛乐, 王娇月, 郝凤明, 等. 基于生态系统服务付费模型的福州市区域生态补偿额度核算[J]. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3805. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202111.009](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202111.009).
- [14] 白玛, 卓嘎, 肖懿, 等. 基于生态系统生产总值核算的习水县生态保护成效评估[J]. 生态学报, 2020, 40(2): 499. DOI: [10.5846/stxb201812202767](https://doi.org/10.5846/stxb201812202767).
- [15] 牟雪洁, 王夏晖, 张箫, 等. 北京市延庆区生态系统生产总值核算及空间化[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 265. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2020.01.037](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2020.01.037).
- [16] 陈梅, 纪荣婷, 刘溪, 等. “两山”基地生态系统生产总值核算与“两山”转化分析: 以浙江省宁海县为例[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5899. DOI: [10.5846/stxb202008032025](https://doi.org/10.5846/stxb202008032025).
- [17] 高玉娟, 张莹. 国有林区生态生产总值GEP核算及生态贡献度研究[J]. 林业经济问题, 2020, 40(2): 173. DOI: [10.16832/j.cnki.1005-9709.2020.02.008](https://doi.org/10.16832/j.cnki.1005-9709.2020.02.008).
- [18] 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. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202111.010](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202111.010).
- [19] OUYANG Z Y, SONG C S, ZHENG H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(25): 14593. DOI: [10.1073/pnas.1911439117](https://doi.org/10.1073/pnas.1911439117).
- [20] 赵筱青, 苗培培, 普军伟, 等. 抚仙湖流域土地利用变化及其生态系统生产总值影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(2): 291. DOI: [10.13869/j.cnki.rswc.2020.02.041](https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2020.02.041).
- [21] PASTOR A V, TZORAKI O, BRUNO D, et al. Rethinking ecosystem service indicators for their application to intermittent rivers[J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108693. DOI: [10.1016/j.ecolind.2022.108693](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108693).
- [22] 刘家倩, 陆建忠, 田晴, 等. 干旱对鄱阳湖流域植被生态系统 GEP 的影响[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2022, 56(3): 513. DOI: [10.19603/j.cnki.1000-1190.2022.03.019](https://doi.org/10.19603/j.cnki.1000-1190.2022.03.019).
- [23] 马元希, 于德永, 王欣烨, 等. 黄河青海流域生态系统服务价值评估方法研究及时空变化分析[J]. 青海民族大学学报(社会科学版), 2022, 48(2): 70. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9227.2022.02.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9227.2022.02.009).
- [24] 耿翔燕, 葛颜祥, 张化楠. 基于重置成本的流域生态补偿标准研究: 以小清河流域为例[J]. 中国人口资源与环境, 2018, 28(1): 140. DOI: [10.12062/cpre.20170720](https://doi.org/10.12062/cpre.20170720).
- [25] 姚婧, 肖宇婷, 樊敏, 等. 沱江流域主要污染负荷预测及时空分布特征[J]. 中国环境监测, 2022, 38(3): 105. DOI: [10.19316/j.issn.1002-6002.2022.03.12](https://doi.org/10.19316/j.issn.1002-6002.2022.03.12).
- [26] 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): 1. DOI: [10.5846/stxb202104181007](https://doi.org/10.5846/stxb202104181007).
- [27] 樊敏, 肖宇婷, 姚婧, 等. 沱江流域污染负荷与生态系统服务价值空间关系解析研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(6): 1354. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj202206016](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj202206016).
- [28] 彭立, 邓伟, 黄佩, 等. 四川盆地多重生态系统服务景观指数评价与服务簇识别[J]. 生态学报, 2021, 41(23): 9328. DOI: [10.5846/stxb202009062319](https://doi.org/10.5846/stxb202009062319).
- [29] 陈效述, 乔立佳. 中国经济—环境系统的物质流分析[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 17. DOI: [10.11849/zrzyxb.2000.01.003](https://doi.org/10.11849/zrzyxb.2000.01.003).
- [30] 邓伟. 环境保护税税额地方确定权的实施现状与制度完善[J]. 税务研究, 2022(6): 33. DOI: [10.19376/j.cnki.cn11-1011/f.2022.06.021](https://doi.org/10.19376/j.cnki.cn11-1011/f.2022.06.021).
- [31] 李倩娜, 唐洪松, 胡艳. 沱江流域生态补偿模式演变、实践困境及优化对策[J]. 环境保护, 2022, 50(19): 24. DOI: [10.14026/j.cnki.0253-9705.2022.19.003](https://doi.org/10.14026/j.cnki.0253-9705.2022.19.003).
- [32] 杨亮洁, 杨晓蓉, 杨永春. 城市内生竞争力与外生竞争力耦合协调研究: 以成渝城市群为例[J]. 人文地理, 2021, 36(6): 76. DOI: [10.13959/j.issn.1003-2398.2021.06.009](https://doi.org/10.13959/j.issn.1003-2398.2021.06.009).
- [33] 王问芳, 时培豪, 黄庆华. 成渝地区双城经济圈绿色创新效率、演变趋势与影响因素研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2022, 44(3): 172. DOI: [10.13718/j.cnki.xdzk.2022.03.020](https://doi.org/10.13718/j.cnki.xdzk.2022.03.020).
- [34] 郑小强, 蒲泱竹. 成渝双城经济圈产业结构升级与环境效率: 基于非动态面板门槛模型[J]. 软科学, 2021, 35(11): 58. DOI: [10.13956/j.ss.1001-8409.2021.11.10](https://doi.org/10.13956/j.ss.1001-8409.2021.11.10).
- [35] 朱靖, 余玉冰, 王淑. 岷江流域水环境治理绩效综合评价方法研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(9): 1995. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj202009010](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj202009010).
- [36] 张玲玲, 车力, 王宗志, 等. 长江经济带水污染与经济脱钩关系演变及驱动因素研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(12): 47. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.12.005](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.12.005).
- [37] 温泉, 马迎群, 秦延文, 等. 成渝地区中小河流域生态环境保护存在的问题与对策[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(2): 493. DOI: [10.12153/j.issn.1674-991X.20210639](https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210639).
- [38] 蔡绍洪, 谷城, 张再杰. 长江经济带绿色发展水平测度及时空演化特征[J]. 华东经济管理, 2021, 35(11): 25. DOI: [10.19629/j.cnki.34-1014/f.210519005](https://doi.org/10.19629/j.cnki.34-1014/f.210519005).
- [39] ALHARBI O M L, BASHEER A A, KHATTAB R A. Health and environmental effects of persistent organic pollutants[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 263: 442. DOI: [10.1016/j.molliq.2018.05.029](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.029).
- [40] 邓元杰, 侯孟阳, 贾磊, 等. 基于生态系统服务价值评估的长征沿线革命老区生态补偿策略[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 159. DOI: [10.13287/j.1001-9332.202201.019](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202201.019).
- [41] 陈影, 文传浩, 沈体雁. 成渝地区双城经济圈绿色发展效率评价及时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1137. DOI: [10.11870/cjlyzyyhj202205017](https://doi.org/10.11870/cjlyzyyhj202205017).

责任编辑: 何馨成