

GEP 框架下气候生态产品价值核算 探索——以重庆市奉节县为例^{*}

王 勇^{1,2} 张天宇^{1,2} 李永华^{1,2} 黄宇杰³ 左燕丽⁴

张 继^{1,5} 张 芬^{1,2} 康 俊^{1,2} 谢成军^{1,2} 郑子谦^{1,2}

1 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室，重庆 401147

2 重庆市气候中心，重庆 401147

3 南京大学南京赫尔辛基大气与地球系统科学学院，南京 210023

4 重庆市奉节县气象局，奉节 404600

5 重庆市气象科学研究所，重庆 401147

提要：以气候资源为基础的气候生态产品的价值核算是生态产品总值（GEP）核算体系的重要分支，对破解气候资源“度量难-抵押难”的制度瓶颈具有重要科学价值，对推动气候资源资产化管理和生态产品价值实现具有关键科学意义。本研究以中国西南地区的重庆市奉节县为案例，从气候对生态产品贡献的角度出发，探索构建县域气候生态产品总值（GEP^C）核算体系。利用气象、生态环境和社会经济等数据，建立包含气候供给产品、气候调节服务、气候文化服务三大功能的 12 个具体指标的核算框架，系统评估了 2019—2023 年重庆市奉节县的气候生态产品价值。结果表明：2019—2023 年奉节县 GEP^C 年均值为 171.7 亿元，占 GDP 的 48%；呈现气候调节为主导的结构特征（气候调节服务价值 57.0% > 气候供给产品价值 38.6% > 气候文化服务价值 4.4%）；GEP^C 年际波动为 139.2~209.5 亿元，最多年（2023 年）是最少年（2019 年）的 1.5 倍。奉节县 GEP^C 与 GDP 的比值 2019—2023 年为 0.36~0.56（均值 0.48），参考绿金指数，该比值在一定程度上反映区域气候资源价值转化与经济发展水平的动态耦合程度。奉节县人均 GEP^C 约 1.6 万元·人⁻¹，单位面积 GEP^C 约 0.04 亿元 km⁻²，与东部浙江省安吉县存在较大差距。本研究是 GEP 框架下发展的“气候要素-服务功能-经济价值”模式的典型县域气候生态产品价值核算案例，可为全国其他区域的气候生态产品价值核算提供重要参考，也可为气候投融资、气候生态产品关联产业发展等领域提供重要决策支持。

关键字：气候生态产品；生态产品总值（GEP）；价值核算；奉节县

中图分类号：P467，X22

文献标志码：A

doi：10.7519/j.issn.1000-0526.2025.090901

*中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室开放重点研究课题（2024007K）、中国气象局青年创新团队项目（CMA2024QN15）、中国气象局创新发展专项（CXFZ2025J127）、重庆市气象局软科学研究项目（2024ZDAXM1）和中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室开放研究课题（2024013，2024008，2023011）共同资助

2025 年 5 月 13 日收稿；2025 年 7 月 26 日收修定稿

第一作者：王勇，主要从事气候变化、气候资源开发利用相关研究。E-mail:wong.yong@foxmail.com

通讯作者：张天宇，主要从事气候变化、气候资源经济转化相关研究。E-mail:zhangtianyu200421028@nuist.edu.cn

Exploration of Value Accounting of Climate Ecological Products Under GEP

Framework: A Case Study of Fengjie County in Chongqing

WANG Yong^{1,2} ZHANG Tianyu^{1,2} LI Yonghua^{1,2} HUANG Yujie³

ZUO Yanli⁴ ZHANG Ji^{1,5} ZHANG Fen^{1,2} KANG Jun^{1,2} XIE Chengjun^{1,2} ZHENG Ziqian^{1,2}

1 CMA Key Open Laboratory of Transforming Climate Resources to Economy, Chongqing 401147

2 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

3 Nanjing-Helsinki Institute Atmospheric and Earth System Sciences of Nanjing University, Nanjing 210023

4 Fengjie Meteorological Bureau, Chongqing Fengjie 404600

5 Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147

Abstract: Accounting for the value of climate ecological products based on climate resources is an important branch of the accounting system of gross ecosystem product (GEP), which is of great scientific value in solving the bottleneck of the system of "difficult to measure and difficult to mortgage" of climate resources. It is of key scientific significance in promoting the asset-based management of climate resources and realizing the value of ecological products. In this study, Fengjie County in Chongqing Municipality, is used as a case study to explore the construction of a gross climate ecosystem product (GEP^C) accounting system from the perspective of the contribution of climate to ecological products. Utilizing meteorological, ecological environment and socio-economic data, we established an accounting framework of 12 specific indexes containing the three major functions of climate supply products, climate regulation services, and climate cultural services, and systematically assessed the value of climate ecosystem products in Fengjie County, Chongqing Municipality, from 2019 to 2023. The results show that the annual mean value of GEP^C in Fengjie County in 2019–2023 is 17.17 billion yuan, accounting for 48% of GDP; the structural characteristics are dominated by "climate regulation" (57.0% of the value of climate regulation services > 38.5% of the value of climate supply products > 4.4% of the value of climate cultural services). The GEP^C fluctuates from 13.92 billion yuan to 20.95 billion yuan between years, with the peak year (2023) being 1.5 times the lowest years (2019). The ratio of GEP^C to GDP in Fengjie County ranges from 0.36 to 0.56 (mean value 0.48) in 2019–2023, with reference to the Green Gold Index, which reflects to some extent the dynamic coupling of the transformation of the value of climatic resources and the level of economic development. Fengjie County has a per capita GEP^C of about 16 000 yuan person⁻¹ and a unit area GEP^C of about 0.04 billion yuan km⁻², which is a big gap with Anji County in eastern Zhejiang Province. This study is a typical case of accounting for the value of climate eco-products under the model of "climate factor-service function-economic

value” developed under the framework of GEP, which can provide an important reference for accounting for the value of climate eco-products in other regions of the country, and also provide important decision support for the development of climate investment and financing, and the development of industries related to climate eco-products. It can also provide important decision-making support in the fields of climate investment and financing, and the development of industries related to climate ecological products.

Key words: climate ecological products, gross ecosystem product (GEP), value accounting, Fengjie County

生态系统为人类提供了生存发展的物质基础、环境条件及文化服务，包括清新空气、清洁水源和宜人气候等生态产品（欧阳志云等，2013）。

在生态产品价值核算方法学层面，国际国内已形成系统性框架。2021 年联合国统计委员会首次发布《环境经济核算体系：生态系统核算》（SEEA EA）（UNSC, 2025），而生态产品实质就是 SEEA 框架下的生态系统服务（邱琼等，2024）。谢高地等（2008）构建了中国生态系统服务价值当量因子表。欧阳志云等（2013）则创新地提出生态系统生产总值（亦称生态产品总值，GEP）的概念。近年来，全国性规范与诸多地方标准相继出台（欧阳志云等，2020；国家发改委和国家统计局，2022），GEP 按功能分为物质产品、调节服务、生态文化价值三大类（欧阳志云等，2013），调节服务在三者中占比最高，而调节服务中的气候调节价值普遍占 GEP 的 1/3 以上，表明气候调节价值是 GEP 核算的核心二级指标。

当前 GEP 气候调节服务核算中，实物量基于生态系统蒸散发消耗的能量，价值量参考人工调温调湿所需电费（欧阳志云等，2020；国家发改委和国家统计局，2022 年），其准确性依赖温度、湿度、蒸发等气象数据。气候资源不仅有本底和直接转化价值（如风能、太阳能等）（Wang et al, 2023），还通过影响农林牧渔、生态环境（如环境空气质量、净初级生产力、固碳释氧、负氧离子等）和文化旅游等产生附加经济价值（中国气象服务协会，2024）。例如，正快速增长的全球旅游业（2023 年全球旅游总收入 5.54 万亿美元）为全球气候旅游市场发展奠定规模优势，中国气象旅游有潜力成为全球气象旅游的引领者（中国气象服务协会，2024）。然而，当前的 GEP 核算中气候贡献价值主要存在两方面不足：一是风能、太阳能等清洁能源价值被多地研究忽略（林亦晴等，2023；游旭等，2019；张艳军等，2017），且气象数据、指标参数不统一导致可比性不足；二是气候对多个 GEP 细分指标的影响难以量化。这些问题表明气候贡献价值精准核算的紧迫性。

气候生态产品（GEP^C）指以气候资源为基础形成的生态产品，包括基础的气候生态要素产品以及衍生出含有气候服务功能的产品（范晓青等，2024；中国气象局，2024；赵思遥和李博，2024）。实践探索中，针对 GEP 的核算较多，而对 GEP^C核算的研究基础仍较薄弱。姚霞等（2022）和翟晓瑶等（2024）在浙江省开展 GEP^C核算初步研究，量化安吉县 2022 年 GEP^C为 259.08 亿元，约占 GDP 的 44.49%。中国气象服

务协会团体标准（屈雅等，2023）在指标和方法上提供了初步参考；孙维等（2025）基于该团标测算出安徽省旌德县 2020 年 GEP 气象产品价值为 59.76 亿元，略高于当年 GDP 值 54.92 亿元。余焰文等（2024）核算出抚州市气候生态系统气象利用价值年均值为 233 亿元，约占 GDP 的 15.3%。蒲秀妹等（2025）核算出 2021—2023 年四川雅安市生态系统气象利用价值年均值 260.33 亿元，占 GDP 的 28.4%。此外，刘世伟等（2020）和叶彩华等（2025）分别对中国积雪气候调节服务和北京怀柔天然氧吧生态服务价值开展了价值核算。

然而，现有 GEP^C 核算存在核算科目不统一、范围界定不清晰、数据来源与质量参差不齐、非市场价值难以量化等问题。 GEP^C 作为 GEP 的重要组成部分，基础性研究明显不足，导致 GEP^C 核算相关标准规范发展滞后（姜月清等，2024），制约了其对 GEP 的重要贡献作用。重庆是典型山地城市，立体气候特征明显，本文以奉节县为例，探索区域 GEP^C 核算指标与方法，为气候生态产品价值转化及未来纳入 GEP 提供参考。

1 研究区域

奉节县位于中国西南地区的重庆市的东北部，地处长江三峡库区腹心，地跨东经 $109^{\circ}1'17''\sim 109^{\circ}45'58''$ 、北纬 $30^{\circ}29'19''\sim 31^{\circ}22'33''$ ，幅员面积为 4098 km^2 ，其境内以山地为主，海拔为 $86\sim 2123\text{ m}$ （图 a）。奉节县属中亚热带暖湿东南季风气候，低海拔河谷地区为中亚热带，中、高海拔山区为暖温带（图 b）。奉节县气候温和，城区年平均气温为 18.7°C ，年均降水量为 1022 mm ，年降水日数为 155 d ，常年日照时数为 1341 h 。生态环境宜人，森林覆盖率为 64% ，空气优良天数年均 350 d 以上，2023 年地区生产总值 386.9 亿元 。

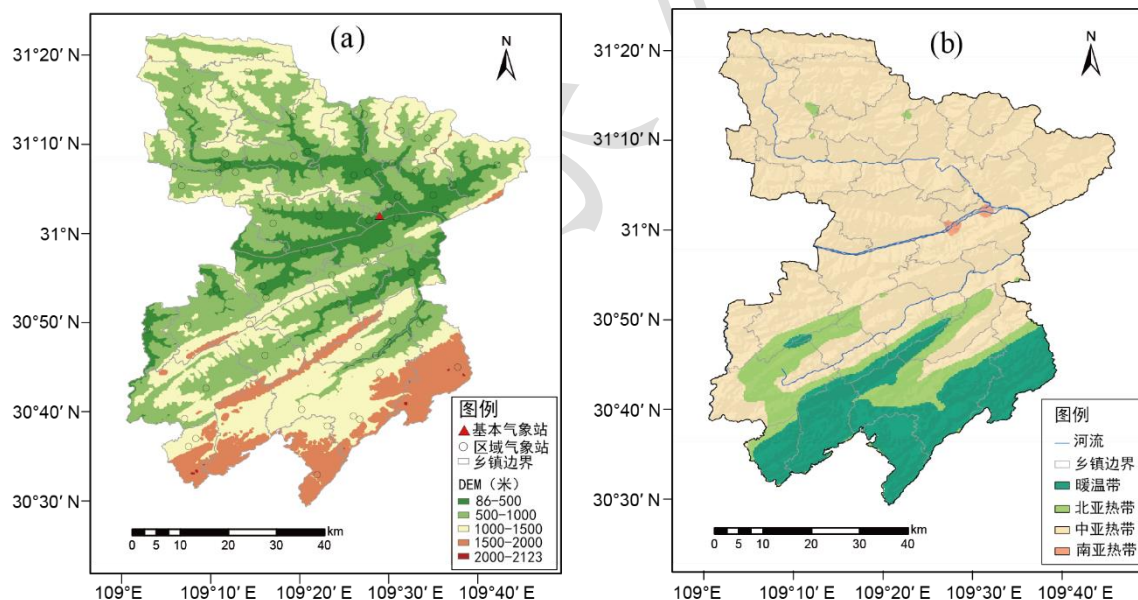


图 1 奉节县(a)高程及(b)气候带分布

Fig.1 (a) Elevation and (b) climate zone distribution of Fengjie County

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究使用气象、生态环境和社会经济三类数据（表 1）。

(1) 气象数据来源于中国气象局“天擎”气象大数据平台，包括 2019—2023 年奉节县 1 个国家级气象观测站和县域内 65 个省级气象观测站的气温、降水、湿度、风、云量等逐日观测数据。蒸发量采用 ERA5 再分析数据。

(2) 生态环境数据主要包括大气污染物、负氧离子、植被净生产力等。植被净初级生产力数据采用美国国家航空航天局(NASA)下载的 2019—2023 年 MOD17A3 数据,时间分辨率为 1 a, 空间分辨率为 500 m。空气质量与大气污染物监测数据来源于奉节县生态环境局。负氧离子数据来源于奉节县气象局(1 个观测站,海拔 1364.2 m)。土地利用数据来源于哥白尼土地监测中心, 空间分辨率为 250m。

(3) 社会经济数据主要包括灾害损失、农林牧渔业产量、风光水力发电量、旅游收入等。2019—2023 年国民经济和社会发展数据、农林牧渔业产量、产值数据来源于奉节县统计局; 旅游收入、人次数据来源于奉节县文化和旅游发展委员会; 风光水电的发电量数据来源于奉节县电力部门。暴雨洪涝灾害损失数据来源于中国气象局气象灾害管理系统。

表 1 本研究所用到的 2019—2023 年奉节县资料与来源

Table 1 Data and sources used in this study during 2019—2023 in Fengjie County			
资料	子类	详细信息	来源
气象	气温、降水、湿度、	1 个国家级气象站、65 个省级气象站的	中国气象局“天擎”气象大数据
	风、云量	逐日气象观测	平台
	蒸发	逐月蒸发量	ERA5 再分析数据
生态环境	大气污染物	逐日空气质量与 PM ₁₀ 、PM _{2.5} 浓度	奉节县生态环境局
	植被净初级生产力	MOD17A3 数据,时间分辨率为 1a, 空间	美国国家航空航天局(NASA)
	负氧离子	负氧离子观测数据	奉节县气象局
	土地利用	土地利用数据 LandCover (250m)	哥白尼土地监测服务
社会经济	灾害损失	逐年暴雨洪涝灾害损失	中国气象局气象灾害管理系统
	农林牧渔业产量、产	逐年农林牧渔业产量、产值	奉节县统计局
	发电量	逐年风光水力发电量	奉节县电力部门
	旅游	逐年旅游收入、人次	奉节县文化和旅游发展委员会
	GDP、人口	逐年 GDP、户籍人口	奉节县统计年鉴

2.2 研究方法

本研究基于 GEP 框架，采用“气候要素-服务功能-经济价值”模式进行 GEP^C 核算。依据 GEP 分类标准（欧阳志云等，2020；国家发改委和国家统计局，2022 年），将气候生态产品划分为气候供给产品、气候调节服务、气候文化服务三大类（赵思遥和李博，2024）。充分考虑气候对 GEP 中核算科目的贡献，通过筛选

GEP 分类指标，确定气候生态产品的分类指标，即由三大类 7 个功能科目细分为 12 个核算科目及指标（表 2）。对于气候供给产品，风光水电资源、农林牧渔业产品的价值利用风光水实际发电量、农林牧渔业产值等社会统计数据核算，淡水资源的价值则通过降水等气象要素计算。对于气候调节服务，核算主要依赖于气象观测、卫星遥感等非经济社会统计数据，部分核算公式中引入了当年气候因子。对于气候文化服务，利用旅游收入、人数等统计数据结合气象数据核算。每个科目指标单独核算，分别累计获得气候供给产品、气候调节服务、气候文化服务三大功能类价值，总和合计为 GEP^C。

表 2 奉节县气候生态产品价值核算指标与方法

Table 2 Indexes and methods for accounting the value of climate ecological products in Fengjie County				
产品大类	功能科目	核算科目	核算指标	核算方法
气候供给产品	生态能源供给	风、光、水电资源	风、光、水力发电量	市场价值法
	用水供给	可利用淡水资源	有效利用淡水资源量	
	农林牧渔产品供给	农林牧渔业产品	农林牧渔业产量	
气候调节服务	降温节能	植被蒸腾	森林生态系统植被蒸腾价值	替代成本法
		水面蒸发	水面蒸发价值	
		适宜气温减少用电消耗	适宜气温减少的用电量	
	固碳释氧与绿电减碳	固碳	固碳量	市场价值法
		释氧	释氧量	
		绿电减碳	绿电减碳量	
	空气调节	空气净化	污染物清除量	替代成本法
		负氧离子	负氧离子数	
气候文化服务	气候文旅	气候旅游	旅游人次、气候舒适度	旅行费用法

2.2.1 气候供给产品

气候供给产品指气候生态系统提供的物质供给，包括直接来源于气候系统中风、光、水等自然要素的物质产品，以及在优质的气候生态环境供给下农林牧渔等生产过程产生的物质产品（赵思遥和李博，2024）。本研究涵盖生态能源供给、用水供给与农林畜牧渔业产品。

(1)生态能源供给

采用市场价值法核算风光水力发电价值，计算方法参考 T/CMSA 0037—2023（屈雅等，2023）气象转化利用供给产品。风能、太阳能发电并网价格取燃煤发电市场交易基准价 0.3964 元 kWh⁻¹（重庆市发展和改革委员会，2021），水力发电并网价格取 0.305 元 kWh⁻¹（重庆市发展和改革委员会，2016）。

(2)用水供给

采用市场价值法核算淡水资源价值，计算方法参考 T/CMSA 0037—2023（屈雅等，2023）气象直接利

用供给产品中淡水资源。淡水资源价格取居民用水价格 3.5 元 t^{-1} （重庆市发展和改革委员会，2015）与居民污水处理费 1.0 元 t^{-1} （重庆市发展和改革委员会，2009）的差值，即 2.5 元 t^{-1} 。

(3)农林牧渔业产品

采用市场价值法核算农林牧渔业产品的气候价值，计算方法参考T/CMSA 0037-2023（屈雅等，2023）气象附加利用供给产品。本研究中产品种类包括农业、林业、畜牧业和渔业等4种类型，气候条件对农林牧渔业产品的贡献率取30%。

2.2.2 气候调节服务

GEP 中规定气候调节服务是指生态系统通过植被蒸腾作用、水面蒸发过程吸收太阳能，降低气温、增加空气湿度，改善人居环境舒适程度的生态功能（欧阳志云等，2020）。赵思遥和李博（2024）指出气候调节服务是降水、环流等气候要素对特定区域生态环境的整体调节，为维持或改善人类生存环境提供的价值。考虑气候对 GEP 中调节服务指标的贡献度，本研究的气候调节服务包括了降温节能、固碳释氧与绿电减碳和空气调节。

(1) 降温节能

1) 植被蒸腾与水面蒸发

按规定计算方法（欧阳志云等，2020），运用替代成本法采用空调等效降温所需要的用电量计算植物蒸腾与水面蒸发的价值。电价取居民生活用电价格 0.52 元 kWh^{-1} （重庆市发展和改革委员会，2023），空调开放天数取日最高气温大于 26℃天数，空调能效比取 3，挥发潜热取 2450。

2) 适宜气温减少能源消耗

采用市场价值法，用夏季适宜气温减少的用电消耗估算其价值，计算公式为：

$$V_e = E_e \times P_e = (D_s \times N_h \times E_d) \times P_e \quad (1)$$

式中： V_e 为适宜气温减少能源消耗价值（单位：元）， E_e 为夏季适宜气温减少的用电量（单位： kWh ）， D_s 为夏季舒适日数（单位：d），按《人居环境气候舒适度评价》（冯明等，2011）方法计算， N_h 为户籍数， E_d 为每户每天平均空调用电量（单位： kWh ），按每户 1 台空调每天使用 8 h 估算， P_e 为居民用电价格（单位：元 kWh^{-1} ），取 0.52 元 kWh^{-1} （重庆市发展和改革委员会，2023）。

(2) 固碳释氧与绿电减碳

1) 固碳释氧

参考欧阳志云等（2020）计算方法，采用净生态系统生产力法计算得到生态系统固碳释氧价值，再乘以气候贡献百分比得到固碳释氧的气候价值。碳交易价格取重庆 2019—2023 碳交易平均价格 27 元 t^{-1} ，来源 2023 年中国碳市场年报；氧气价格采用 Wind EDB 数据库重庆市 2022—2023 年的平均液氧交易价格 351 元 t^{-1} ；参考谢慧君等（2023）研究结果，考虑气候因素对岩溶区和非岩溶区植被净初级生产力的不同影响，

气候贡献百分比取岩溶区和非岩溶区的平均值 68.9%；净生态系统生产力采用 CASA 模型（张继等，2024）估算。

2) 绿电减碳

采用市场价值法核算使用绿电（只考虑风能、太阳能）减少的碳排放价值，计算公式为：

$$V_c = R_{CO_2} \times P_c = Y_c \times EF \times P_c \quad (1)$$

式中： V_c 为减碳价值（单位：元）， R_{CO_2} 为绿电减碳量（单位：t）， P_c 为碳交易价格（单位：元 t^{-1} ），取 27 元 t^{-1} ， Y_c 为风能太阳能发电量（单位：kWh），EF 为组合边际排放因子，参考 2022 年减排项目中国区域电网基准线排放因子（国家气候战略中心，2024）取 0.407275。

(3) 空气调节

1) 空气净化

参考欧阳志云等（2013）的做法，按照 T/CMSA 0037-2023（屈雅等，2023）降水和风对空气的净化计算方法，采用替代成本法核算降水与风对污染物的清除价值，大气颗粒物主要考虑 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 。混合层高度计算参考 GB/T 3840-1991（国家技术监督局和国家环境保护局，1992），取 2019—2023 年奉节县国家级气象站的逐日混合层高度平均值 760 m；污染物 $PM_{2.5}$ 造成经济损失取 4897 元 kg^{-1} ， PM_{10} 治理成本取 1875.9 元 t^{-1} （孙维等，2025）。

2) 负氧离子

采用替代成本法，按照《森林生态系统服务功能评估规范》（王兵等，2020）计算生态系统的空气负氧离子价值，再乘以气候贡献率得到其气候价值。空气负离子浓度与风速、空气温度、相对湿度、太阳辐射、天气现象等气象要素有较大相关性，浓度变化遵循雨天>阴天>多云>晴天的规律（邓玲等，2017）；参考方砚秋等（2022）分别以雨日和晴天建立的气象因子预测空气负离子浓度回归模型的决定系数 R^2 ，取两者均值 32% 作为气候贡献率；根据 CLCD 土地利用数据，得到奉节县林地面积为 2969.09 km^2 ，林地高度平均值 10.25 m（Liu et al, 2022）。

2.2.3 气候文化服务

气候文化服务指满足人们文化兴趣和休闲娱乐、知识获得等方面需求的气候产品（中国气象服务协会，2023），一般指良好的气候生态环境提供的景观旅游价值，为提高人类生活质量带来的价值（赵思遥和李博，2024）。采用旅行费用法，重点考虑适宜气候条件对旅游促进作用产生的气候文旅附加价值，计算公式为：

$$V_t = N_t \times C_t \times I \times R \quad (2)$$

式中： V_t 为气候旅游价值， N_t 为游客总人数（单位：人次）， C_t 为游客平均旅游消费水平（单位：元 $人次^{-1}$ ）， I 为文旅品牌影响力指数，根据中国县域品牌影响力报告（刘彦平和吕风勇，2022），奉节县取 0.366， R 来源于中国气象局生态气象业务服务《气候康养资源评价技术规范（试行）》中气候舒适度指标在气候康养资

源评价总分的占比，奉节县 2019—2023 年 R 值变化范围在 0.14~0.18。

3 结果与分析

3.1 气候供给产品价值

3.1.1 生态能源供给

图 2a 和图 2b 分别为 2019—2023 年奉节县风光水力发电量与风光水电价值变化。可以看到，光伏发电量较小，奉节发电主要依靠风能和水利。2019—2023 年光伏发电量、风力发电量总体上逐年增加，而水力发电量受降水影响波动较大。2023 年风、光、水力的发电量分别为 37.8×10^3 、 0.59×10^3 、 24.5×10^3 kWh，价值分别为 0.27、0.01、0.58 亿元，风光水力发电总价值为 0.86 亿元。

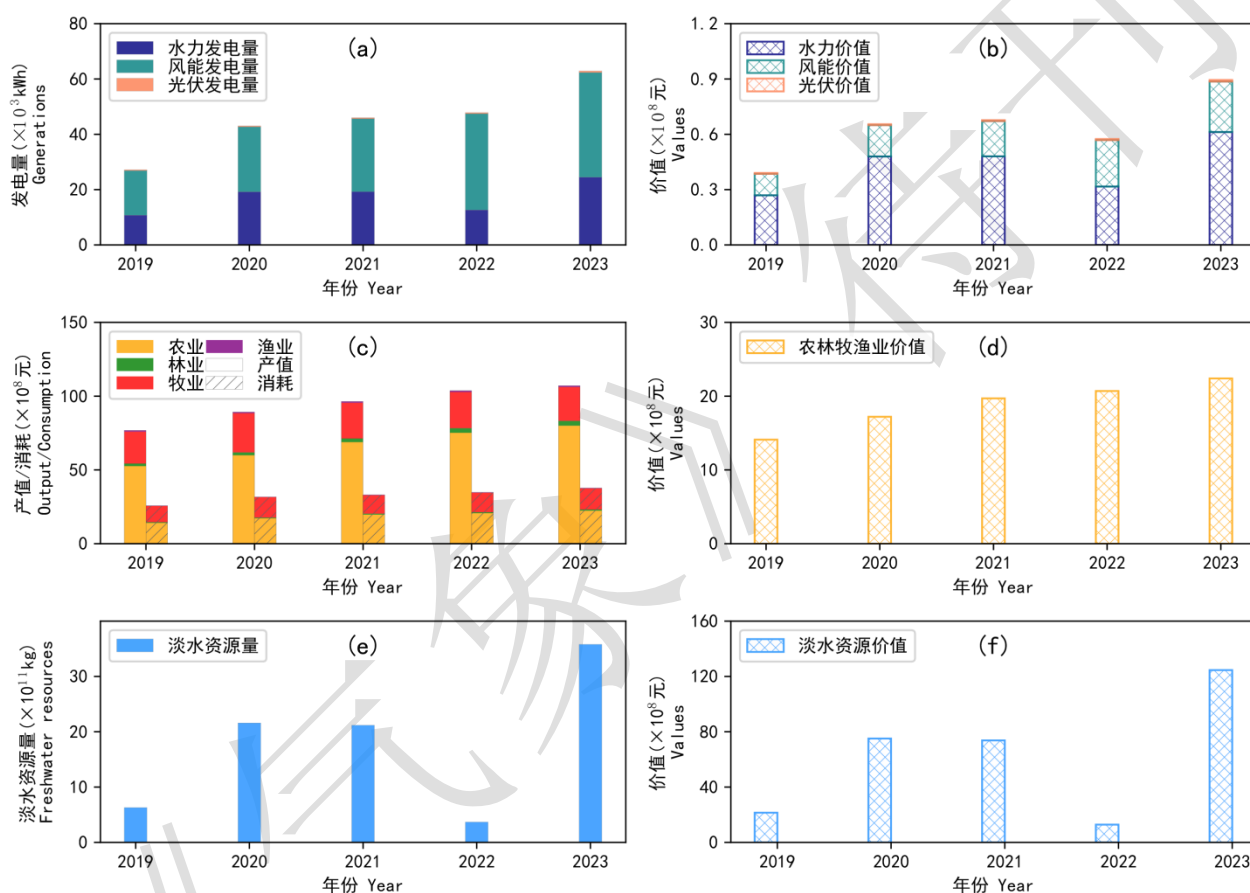


图 2 2019—2023 年奉节县气候供给产品物质量与价值量变化

(a)风光水力发电量, (b)风光水力发电价值, (c)农林牧渔业产值与消耗, (d)农林牧渔业价值, (e)淡水资源量, (f)淡水资源价值

Fig.2 Changes in physical quantity and values of climate-supplied products in Fengjie County during 2019—2023
(a) wind, solar and hydroelectric power generation, (b) values of wind, solar and hydroelectric power generation, (c) output and consumption of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery, (d) values of agriculture, forestry, animal husbandry and fishery, (e) freshwater resources quantity, (f) values of freshwater resources

3.1.2 农林牧渔业产品

图 2c 和图 2d 分别为 2019—2023 年奉节县农林牧渔业产值、消耗与气候价值的变化。农业、畜牧业产值较高，相应的消耗也较大；林业、渔业的产值和消耗较小。2019—2023 年奉节县农林牧渔业产值与其气候价值同步增加，产值从 76.8 亿元增至 107.1 亿元，气候价值从 17.8 亿元增至 24.3 亿元。

3.1.3 用水供给

图 2e 和图 2f 分别为 2019—2023 年奉节县淡水资源量与淡水资源价值的变化。总的来看，降水越多的年份，淡水资源量及其价值也越大。2019 年、2022 年降水偏少，淡水资源总量分别为 6.3 亿 t、3.7 亿 t，淡水资源价值仅 15.2 亿元、9.2 亿元；2023 年降水偏多，淡水资源总量达 35.8 亿 t，价值 88.8 亿元，为该 5 年最高。

3.2 气候调节服务价值

3.2.1 降温节能

（1） 植被蒸腾与水面蒸发

如图 3a 和图 3b 所示，奉节县水面蒸发的降温节能效果大于植被蒸腾。2019—2023 年植被蒸腾降温节约的电力消耗量为 21.8~26.3 亿 kWh，价值在 11.4~13.7 亿元；水面蒸发节约电力为 94.4~121.3 亿 kWh，价值在 49.1~63.1 亿元；两者总价值为 61.4~76.2 亿元。2023 年降温节能价值较少，主要由于蒸发量偏小。

（2） 适宜气温减少用电消耗

如图 3c 和图 3d 所示，2021 年夏季平均气温为 26.8 °C，舒适日数为 47 d，节省用电量为 0.99 亿 kWh，价值达 0.51 亿元，为近 5 年最高；2022 年夏季气温为 30.5 °C，舒适日数为 18 d，节省用电量为 0.38 亿 kWh，价值仅 0.20 亿元，为这 5 年最低。

3.2.2 固碳释氧与绿电减碳

2019—2023 年奉节县固碳、绿电减碳、释氧量与价值呈波动增加趋势，绿色能源减碳量在 6.7~15.6 万 t，固碳量为 486.3~636.2 万 t，释氧量为 353.7~462.7 万 t，总价值在 9.5~12.4 亿元（图 3e、图 3f）。2023 年固碳量、绿电减碳量和释氧量为近 5 年最高，价值分别为 1.2、0.04 和 11.2 亿元。

3.2.3 空气调节

（1） 空气净化

风速决定大气水平扩散能力，奉节县年平均风速为 1.4 m s^{-1} ，风对污染物的清除能力有限。降水影响污染物的湿清除，强度和持续时间越大，对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的清除作用越明显（郑飒飒等，2024）。2019—2023 年奉节县 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染物的清除量和价值波动明显（图 3g、图 3h）；2020 年清除量为 1499t，价值达 19.5 亿元，为 5 年最高；2023 年清除量为 880 t，价值仅 8.6 亿元，为 5 年最低。

（2） 负氧离子

如图 3i、图 3j 所示，负氧离子浓度越高，负氧离子个数越多，其相应的价值也越高。2019—2023 年负氧离子总数在 $3.8\sim 5.6\times 10^{25}$ 个，价值在 0.67~0.98 亿元。最低值出现在 2019 年，最高值出现在 2021 年。2023 年负氧离子总数为 5.3×10^{25} 个，价值为 0.93 亿元。

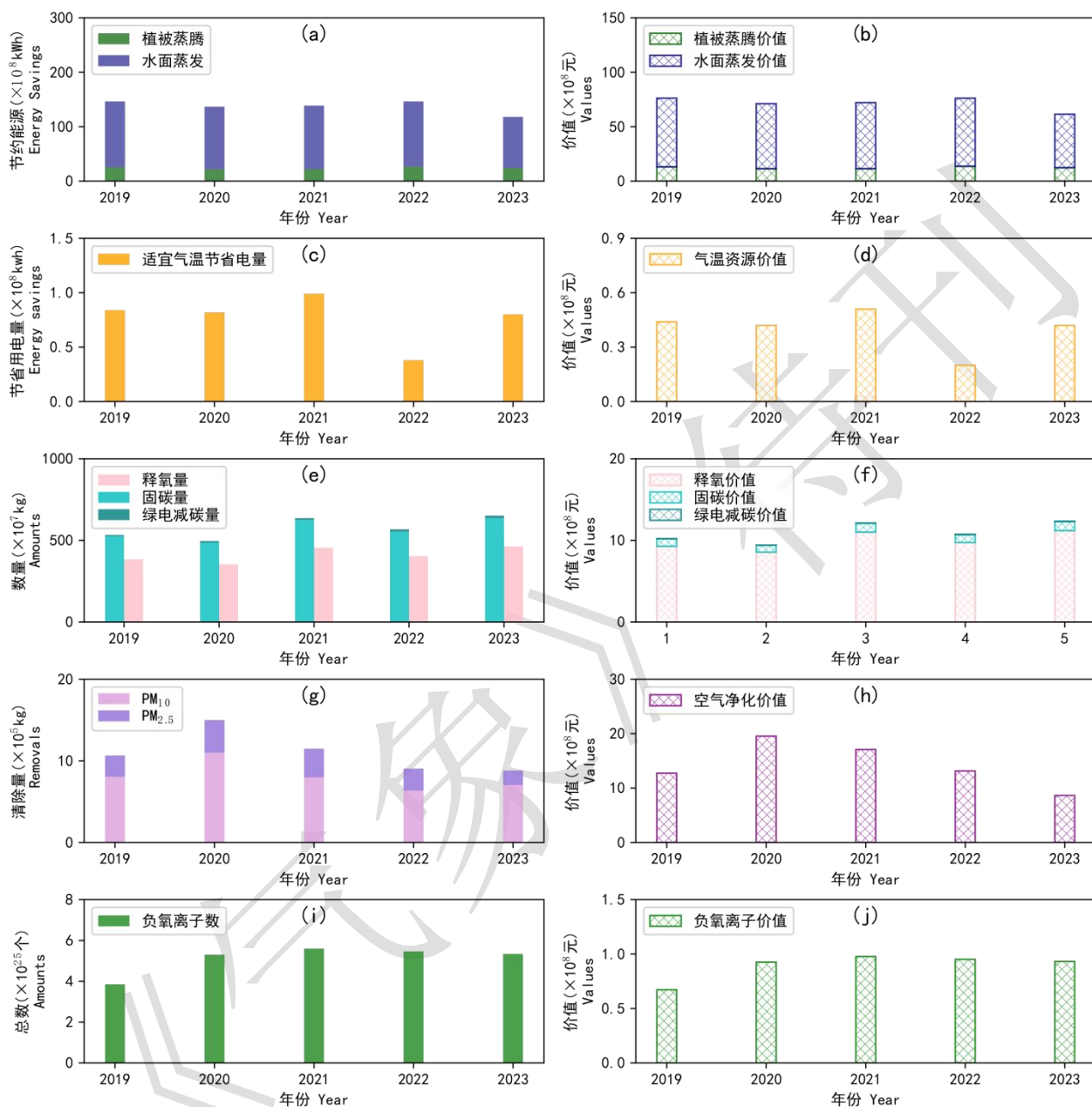


图 3 2019—2023 年奉节县气候调节服务物质质量与价值量变化

(a) 植被蒸腾与水面蒸发节约能源消耗, (b) 植被蒸腾与水面蒸发价值, (c) 适宜气温节省电量, (d) 适宜气温价值, (e) 固碳释氧、绿电减碳量, (f) 固碳释氧、绿电减碳价值, (g) 污染物清除量, (h) 空气净化价值, (i) 负氧离子数, (j) 负氧离子价值

Fig.3 Changes in physical quantity and value of climate regulation services in Fengjie County during 2019—2023

(a) energy savings from vegetation transpiration and water surface evaporation, (b) values of vegetation

transpiration and water surface evaporation, (c) electricity savings due to suitable temperatures, (d) values of suitable temperatures, (e) carbon sequestration, oxygen release and carbon reduction from green electricity, (f) values of carbon sequestration, oxygen release and carbon reduction from green electricity, (g) pollutant removals, (h) values of air purification, (i) amounts of negative oxygen ions, (j) values of negative oxygen ions

3.3 气候文化服务价值

以中国气象局《气候康养资源评价技术规范（试行）》中气候舒适度为较舒适及以上等级的天数为气候舒适日数。由图 4 可以看出，2019—2023 年奉节县年气候舒适日数在 147~182 d，气候舒适度指标分值占比为 0.14~0.18，旅游接待人数、收入和价值逐年增加。2023 年旅游人数为 3111 万人，旅游收入为 180 亿元，气候文化价值为 11.8 亿元，为 5 年最高值。

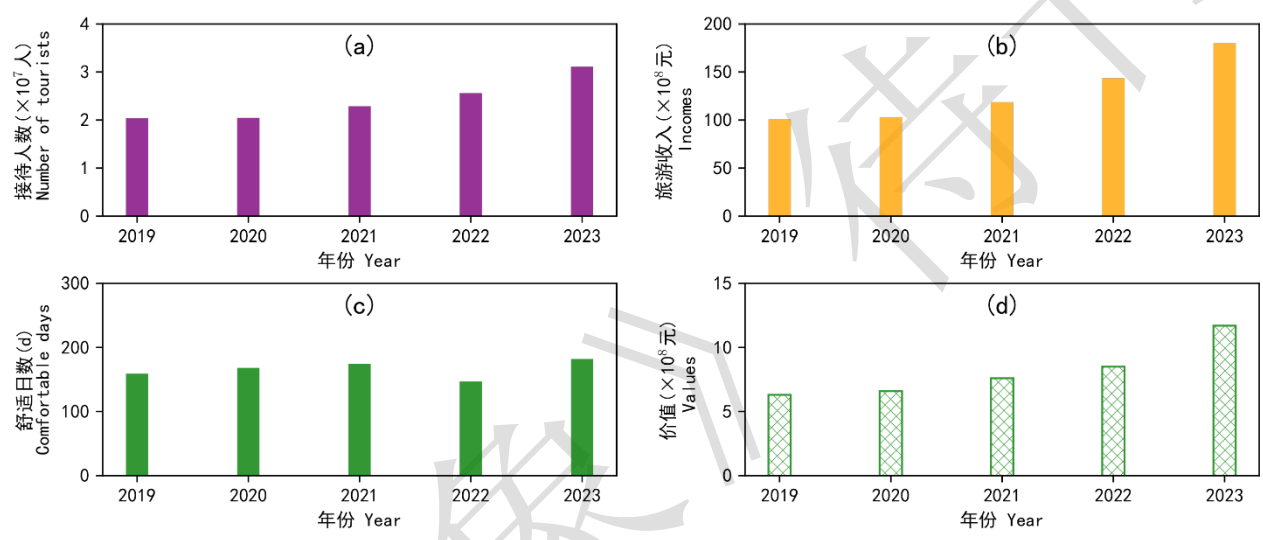


图 4 2019—2023 年奉节县(a)旅游接待人数、(b)旅游收入、(c)气候舒适日数与(d)价值变化

Fig.4 Changes in (a)tourism receipts, (b)tourism revenue, (c)climate comfort days and (d)value in Fengjie County during2019—2023

3.4 气候生态产品总值

在 GEP 的政策应用研究中，GEP 与 GDP 的关系有学者通过绿金指数（GGI）表征（马国霞等，2017；Liang et al, 2021），反映“绿水青山”与“金山银山”的转化关系。奉节县 GEP 高于 GDP，属于生态资源禀赋较高的区域（张艳军等，2017）。鉴于 GEP^C作为 GEP 的重要组成部分，参考绿金指数，通过 GEP^C/GDP 简要表征当年气候生态产品总值对 GDP 的贡献，并结合地均 GEP^C、人均 GEP^C 指标，探讨奉节县气候生态资源的经济转化。

错误!未找到引用源。为 2019—2023 奉节县气候生态产品实物量和价值量的 5 年平均值，图 5a 展示了奉节县气候生态产品价值组成与比例。奉节县 GEP^C 年均均为 171.7 亿元，占 GDP 的 48%。人均 GEP^C 为 1.6 万元·人⁻¹，单位面积 GEP^C 为 0.04 亿元 km⁻²。从 GEP^C 的构成来看，气候供给产品为 66.2 亿元（占 38.6%），

气候调节服务为 97.9 亿元（占 57.0%），气候文化服务为 7.6 亿元（占 4.4%）。在各子类中，降温节能的价值最高，为 71.8 亿元，占 GEP^C 的 41.8%；用水供给价值为 43.9 亿元，占 25.6 %；固碳释氧与绿电减碳的价值为 11.0 亿元，占 6.4%。生态能源供给价值约 0.6 亿元，占比最小仅 0.3%。

图 5b 和图 5c 为 2019—2023 年奉节县气候生态产品总值和 GEP^C/GDP 比值的变化。气候生态产品总值在 139.2~209.5 亿元，年际间差异明显，最多年份（2023 年）是最少年份（2019 年）的 1.5 倍。分功能大类来看，气候文化服务价值呈逐年增加趋势，从 5.5 亿元增加到 11.8 亿元。气候调节服务价值变幅较小，介于 83.8~102.9 亿元。气候供给产品价值变幅较大，最多年（2023 年）为最少年（2019 年）的 3.4 倍。从 GEP^C/GDP 比值变化看（图 5c），2020 年为最高（0.56），2022 年为最低（0.36），2019—2023 年平均比值为 0.48。

表 3 奉节县气候生态产品实物量和价值量（2019—2023 年均值）

Table 3 Physical volume and value of climate ecological products in Fengjie County (average 2019—2023)

大类	子类	指标	实物量	价值量（亿元）	合计（亿元）
气候供给	生态能源供给	风能发电	2.8 亿 kWh	0.2	0.6
		光伏发电	0.04 亿 kWh	0.01	
		水力发电	1.7 亿 kWh	0.43	
	用水供给	可利用降水量	17.7 亿 t	43.9	43.9
	农业	谷物及其他作物	44.63 万 t	3.44	15.6
		蔬菜、食用菌、花卉等	46.12 万 t	3.96	
		水果、坚果、茶、香料	47.49 万 t	5.88	
		中草药材	3.25 万 t	2.27	
		林木种植	1.73 万公顷	0.05	
	林业	木材	0.56 万 m ³	0.12	0.4
		林产品（生漆、橡胶等）	300t	0.19	
		牛	2.26 万头	0.48	5.5
	牧业	羊	21.45 万只	0.41	
		猪	64.36 万头	3.68	

		肉禽	338.29 万只	0.49	
		禽蛋	1.05 万 t	0.23	
		蚕茧	0.11 万 t	0.14	
		家兔	46.71 万只	0.04	
		渔业	鱼类	0.41 万 t	0.19
			虾蟹类	32.8t	0.01
		植被蒸腾	23.8 亿 kWh	12.38	
气候调节	降温节能	水面蒸发	113.51 亿 kWh	59.02	71.8
		适宜气温减少用电消耗	1.12 亿 kWh	0.4	
	固碳释氧	固碳	565.7 万 t	1.05	
	与	释氧	411.4 万 t	9.95	11.0
	绿电减碳	绿电减碳	11.5 万 t	0.03	
		净化 PM2.5	290.2t	14.21	
	空气调节	净化 PM10	809.3t	0.02	15.1
		负氧离子	5.1×10 ²⁵ 个	0.89	
气候文化	气候文旅	气候旅游	旅 游 人 次 2408 万、气候舒适度得 分占比 0.16	7.6	7.6

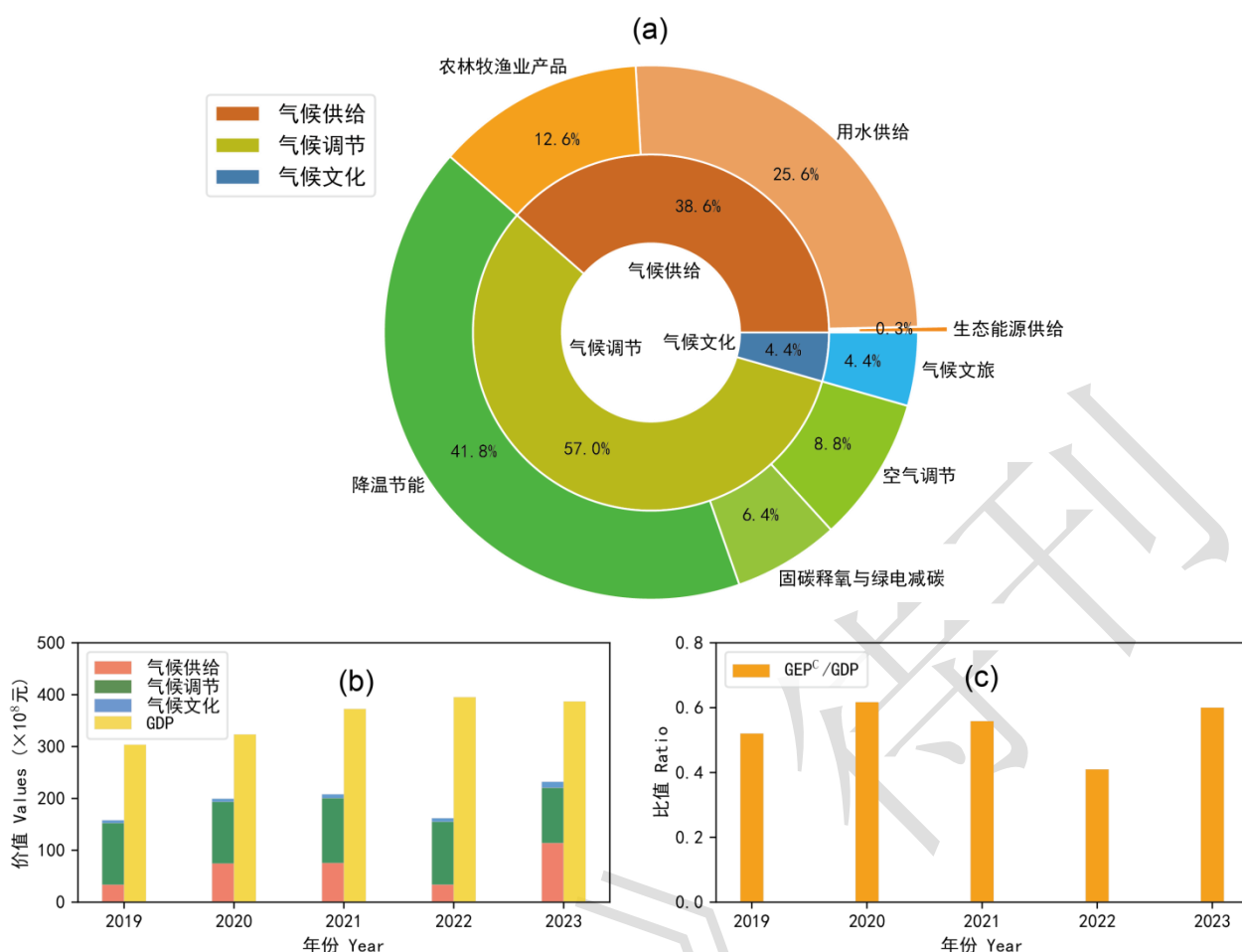


图 5 2019—2023 年奉节县(a)气候生态产品组成与比例、(b)气候生态产品总值和(c)GEP^C/GDP 比值的变化

Fig.5 (a)Proportion of climatic ecological products , (b)changes in gross value of climate ecological products and (c)GEP^C/GDP ratio in Fengjie County during 2019—2023

本研究将重庆奉节的核算结果与浙江省安吉县（翟晓瑶等，2024）进行初步对比（表 4）。奉节县的面积和户籍人口是安吉县的 2 倍多，但由于地理位置和经济发展等因素，奉节县 2022 年 GDP 仅为安吉县的 68%，GEP^C 总量约为安吉县的 55%。奉节县 GEP^C 与 GDP 比值为 0.36，略低于安吉县的 0.44。奉节县人均 GEP^C 和单位面积 GEP^C 分别为 1.35 万元·人⁻¹ 与 0.03 亿元·km⁻²，明显低于安吉县的 5.40 万元·人⁻¹ 与 0.14 亿元·km⁻²。这些指标差异在一定程度上反映了西部山区县（奉节）与东部生态县（安吉）的气候生态资源价值转化与经济发展水平的动态耦合程度的差异，受到地理因素、气候生态资源本底及开发利用、经济发展与绿色转型等多种因素的影响。

表 4 2022 年重庆市奉节县与浙江省安吉县的 GEP^C 等关联指标对比

Table 4 Comparison of key indexes between Fengjie County and Anji County in 2022

地区	面积/ /km ²	户籍人口/10 ⁴ 人	GDP/10 ⁸ 元	GEP ^C ×10 ⁸ 元	GEP ^C /GDP	人均 GEP ^C /(10 ⁴ 元·人 ⁻¹)	单位面积 GEP ^C
----	-------------------------	---------------------------	--------------------------	--	-----------------------	--	--------------------------

							/(10 ⁸ 元 km ⁻²)
奉节县	4098.4	105	395.2	161.9	0.36	1.35	0.03
安吉县	1886.0	48	582.4	259.1	0.44	5.40	0.14

注：浙江安吉县的数据来自《浙江统计年鉴 2023》（浙江省统计局和国家统计局浙江调查总队，2023）和翟晓瑶等（2024）。

3.5 与 T/CMSA 0037-2023（屈雅等，2023）对比

表 5 对比了本研究与 T/CMSA 0037-2023 在核算科目上的异同。与 GEP 一致，本研究与 T/CMSA 0037-2023 均将气候生态产品分为气候供给产品、气候调节服务和气候文化服务三大类。具体核算科目上，本研究设置 12 项，比 T/CMSA 0037-2023 的 9 项多 3 项：气候供给产品减少 1 项，气候调节服务增加 5 项，气候文化服务减少 1 项。

在气候供给产品方面，本研究依据气候调节与气候供给的区别，将 T/CMSA 0037-2023 中的气温电量调整至气候调节服务范畴（核算为适宜气温减少用电消耗）。结合奉节县渔业资源较丰富的特点，本研究在农林牧业产品中增加了渔业价值核算。在可利用淡水资源价值核算中，扣减了居民污水处理费，以贴近实际用水成本。在气候调节服务方面，本研究聚焦气候生态系统的自然调节功能，未纳入人工影响和雷电防护核算指标。为体现植被和水体在局地气候调节中的作用，本研究增加了植被蒸腾与水面蒸发科目（与 GEP 中的局部气候调节一致）。新增了固碳、释氧及绿电减碳（即风、光等绿色电力替代化石能源产生的二氧化碳减排量）核算科目，强调气候在这些生态调节中的关键作用。同时，考虑气候对森林康养的积极作用，增加了负氧离子价值核算。固碳、释氧、负氧离子本身属于 GEP 中调节核算科目，纳入 GEP^C 主要考虑气候贡献。对于空气净化，本研究相比 T/CMSA 0037-2023 中的混合层高度固定值有一定优化改进。在气候文化服务方面，由于细分景区的旅游数据难以获取，本研究借鉴屈雅等（2023）和翟晓瑶等（2024）的做法，构建了综合核算指标，考虑县域旅游总人数与收入、县域品牌影响力以及气候舒适度等因素。

表 5 本研究与 T/CMSA 0037—2023 对比

Table 5 Comparison between this study and T/CMSA 0037—2023

产品类型	核算科目		差异说明
	T/CMSA 0037-2023（9 项）	本研究 （12 项）	
气候供给	淡水	可利用淡水资源	1. 气候供给产品指标数量，本研究比 T/CMSA
产品	气温电量	/	

	光伏发电、水电、 风电	风、光、水电资源	0037-2023 少 1 项；
	农林牧业产品	农林牧渔业产品	2. 计算“可利用淡水资源”时，本研究考虑用水实际情况，在淡水资源价格中减去“居民污水处理费”；
气候调节 服务	降水 and 风对空气的净化	空气净化	3. 本研究在气候供给产品中不考虑“气温电量”，认为此项属于气候调节功能；
	人工影响天气对作物防灾减灾的调节	/	4. 奉节县位于长江三峡库区腹心，渔业资源较丰富，本研究增加考虑“渔业”。
	雷电防护对建筑物、轨道交通等的保护	/	5. 气候调节服务指标数量，本研究比 T/CMSA 0037-2023 多 5 项；
	/	植被蒸腾	6. “空气净化”科目污染物清除量公式中使用的混合层高度值，T/CMSA 0037-2023 为固定值 1000m，本研究使用气象数据推算实际混合层高度；
	/	水面蒸发	7. 同 GEP，GEP ^C 关注气候生态系统的自然调节功能，T/CMSA 0037-2023 中的人工影响天气和雷电防护核算在本研究未被纳入。
	/	适宜气温减少用电消耗	8. 本研究增加“植被蒸腾”“水面蒸发”的降温调节功能，与 GEP 中气候调节价值的核算科目保持一致；
	/	固碳	9. 考虑到气候对能源需求的调节作用，本研究增加“适宜气温减少的用电消耗”核算；
	/	释氧	10. 气候在固碳释氧的作用被纳入气候调节价值，符合 GEP 核算框架中调节价值的定义，增加“绿电减碳”符合新能源减碳的相关研究与政策。
	/	绿电减碳	11. 增加“负氧离子”是考虑气候对森林康养的积极作用。
	/	负氧离子	12. 考虑细分景区的旅游数据获取难度问题，本研究借鉴 T/CMSA 0037-2023 和翟晓瑶等（2024）的做法，综合考虑旅游人数与收入、县域品牌影响力、气候舒适度等因素构建气候文化服务核算指标。
	气象旅游目的地的文化服务	气候旅游	
	其他旅游目的地的气象文化服务		

4 讨论

气候资源价值转化需科学核算体系支撑。核心在于细化 GEP 框架中气候贡献维度,以揭示区域气候资源向经济价值的转化潜力。本研究在 GEP 框架下探索发展县域级“气候要素—服务功能—经济价值”的 GEP^C 核算体系,以重庆奉节县为案例探索的 GEP^C 核算体系实证了气候资源的多维度赋能效应。气候供给上,2019—2023 年奉节县农林牧渔业产值与气候供给价值同步增长,脐橙、白茶等农品牌发展及第一产业增加值提升,体现气候资源对农业的持续赋能。气候调节服务里,降温节能调节价值占比 41.8%,与其他区域 GEP 中的占比相近(张林波等,2023)。气候在固碳释氧、空气调节等方面的作用被纳入气候调节价值,符合 GEP 中调节价值的定义(欧阳志云等,2013,2020)。文化服务价值在 GEP 核算的不确定性相对较大,本研究借鉴屈雅等(2023)和翟晓瑶等(2024)的做法,综合考虑旅游人数与收入、县域品牌影响力、气候舒适度指标在气候康养资源中的占比等构建气候文化服务核算指标,虽存在一些不确定性,但已能较好反映气候对文旅康养产业的赋能作用;未来融入改进的气候舒适度模型(谭凯炎等,2022)可提升量化非市场价值的科学性。

准确区分气候生态产品的实物量与潜在量是核算技术的关键难题。GEP 规范表明,实物量是生态产品的物理量,价值量是生态产品的货币价值(国家发改委和国家统计局,2022 年)。根据现有 GEP^C 标准(屈雅等(2023)和相关研究(翟晓瑶等,2024)),气候生态产品的实物量是指该年份气候资源转化为气候生态产品的实际物质质量,价值量是其货币价值。这需要与气候资源潜力(如风、光等资源的理论可开发量)及其潜在价值区分开来。例如,重庆奉节县光能资源潜在价值约 23.7 亿元,而 2023 年光电价值仅 0.58 亿元。浙江安吉县光能资源潜在价值 72.7 亿元,而 2022 年光电价值仅 0.05 亿元(翟晓瑶等,2024)。然而,在实际核算中,部分科目的实物量与潜在量仍存在混淆且难以完全剥离的情况。对于风光水能等供给类产品,其年实物量可通过统计年报数据直接获取并核算价值。对于调节服务类科目(如植被蒸腾、水面蒸发、固碳释氧、空气净化等),虽然部分核算公式引入了当年气候因子(例如,植被蒸腾计算中纳入了日最高气温>26°C 的空调开放天数),但其数据源主要依赖气象观测、卫星遥感等非经济社会统计数据。这导致基于此类数据核算出的调节服务价值量,难以精准剥离并仅反映该年份气候资源实际转化形成的实物量(即当年实际产生的调节效益),而可能包含部分资源潜力的属性,导致核算得出的总价值可能高于当年气候生态产品的实际价值。未来需要引入更多经济社会统计数据源,发展精准量化气象生态因子对产业及 GDP 实际贡献的技术模型,优化核算公式与算法,提升核算结果的科学性与准确性。

当前 GEP^C 研究与应用仍面临标准不统一、量化科学性不足及转化机制缺失等挑战。尽管浙江、安徽、海南等地已开展 GEP^C 核算探索(姚霞等,2022;屈雅等,2023;孙维等,2025),但我国 GEP^C 尚缺乏统一标准,跨区域可比性有待加强。极端天气气候事件增多增强(乔琦等,2025;赵琳等,2025)对核算科目的负面影响,在未来标准完善中值得考虑。与此同时,GEP^C 应用转化机制尚未建立,当前研究仍停留在

理论测算层面。奉节县已将 GEP^C 纳入地方考核指标并入选重庆市 2024 年绿色低碳典型案例，为推动核算结果向政策化、市场化应用提供了宝贵经验。未来需在标准化体系、量化模型和转化路径等方面持续完善，以充分发挥气候生态产品对 GEP 核算及区域绿色发展的支撑作用。

5 结论

以气候资源为基础的气候生态产品是生态产品重要的组成部分。本研究是 GEP 框架下气候生态产品价值核算的一个典型县域案例：以重庆市奉节县为例，从气候对生态产品贡献的角度出发，利用气象、生态环境和社会经济等数据，构建气候供给产品、气候调节服务、气候文化服务三大功能的 GEP^C 核算 12 个具体指标，核算并分析了 2019—2023 年的气候生态产品价值，主要结果如下：

(1) 2019—2023 年奉节县气候生态产品总值年均均为 171.7 亿元，占 GDP 的 48%；呈现“气候调节”为主导的结构特征，气候调节服务价值占比最大（118 亿元，占 57%），其次是气候供给产品价值（66.2 亿元，占 38.6%），气候文化服务价值占比最小（7.6 亿元，占 4.4%）。

(2) 2019—2023 年奉节县气候生态产品价值年际波动为 139.2~209.5 亿元，最多年份是最少年份的 1.5 倍。气候文化价值逐年增加，由 5.5 亿元增加到 11.8 亿元；气候调节价值变幅较小，介于 83.8~102.9 亿元。气候供给产品价值变幅较大，最多年为最少年的 3.4 倍。

(3) 奉节县 GEP^C 与 GDP 的比值 2019—2023 年为 0.36~0.56（均值 0.48），参考绿金指数，该比值在一定程度上反映区域气候资源价值转化与经济发展水平的动态耦合程度。奉节县人均 GEP^C 约 1.6 万元/人，单位面积 GEP^C 约 0.04 亿元· km^2 ，与东部浙江省安吉县存在较大差距。

参考文献

- 重庆市发展和改革委员会，(2009-12-15). 重庆市物价局关于调整我市城市污水处理费和主城区自来水价格的通知 [EB/OL]. https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5581792.html.
- Chongqing Municipal Development and Reform Commission, (2009-12-15). Notice of Chongqing Municipal Price Bureau on adjusting urban sewage treatment fees and tap water prices in the main urban area [EB/OL]. [https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5581792.html\(in Chinese\)](https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5581792.html(in Chinese)).
- 重庆市发展和改革委员会，(2015-12-04). 重庆市物价局关于建立主城区居民用水阶梯价格制度的通知 [EB/OL]. https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5577793.html.Chongqing Municipal Development and Reform Commission, (2015-12-04). Notice of Chongqing Municipal Price Bureau on establishing a tiered pricing system for residential water use in the main urban area[EB/OL]. [https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5577793.html\(in Chinese\)](https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5577793.html(in Chinese)).

- 重庆市发展和改革委员会, (2016-08-16). 重庆市物价局关于奉节县新贺水电站上网电价的复函[EB/OL].
https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5577052.html. Chongqing Municipal Development and Reform Commission, (2016-08-16). Reply letter of Chongqing Municipal Price Bureau on the on-grid electricity price of xinhe hydropower station in Fengjie County[EB/OL].
https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/jgxx/jgzc/202003/t20200304_5577052.html(in Chinese).
- 重庆市发展和改革委员会, (2021-11-08). 重庆市发展和改革委员会关于深化我市燃煤发电上网电价市场化改革有关事项的通知 [EB/OL].
https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202111/t20211108_9937528.html. Chongqing Municipal Development and Reform Commission, (2021-11-08). Notice on deepening the market-oriented reform of online electricity prices for coal-fired power generation in Chongqing[EB/OL].
https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202111/t20211108_9937528.html(in Chinese).
- 重庆市发展和改革委员会, (2023-05-23). 重庆市发展和改革委员会关于第三监管周期重庆电网输配电价及有关事项的通知 [EB/OL].
https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202305/t20230523_11990060.html. Chongqing Municipal Development and Reform Commission, (2023-05-23). Notice of Chongqing Municipal Development and Reform Commission on transmission and distribution electricity prices of Chongqing power grid in the third regulatory cycle and related matters [EB/OL].
https://fzggw.cq.gov.cn/zwgk/zfxxgkml/zcwj/qtwj/202305/t20230523_11990060.html (in Chinese).
- 邓玲, 廖春花, 李学敏, 等, 2017. 山岳型景区空气负离子浓度分布特征及其与气象要素相关性研究综述[J]. 气象科技, 45(5): 882-888. Deng L, Liao C H, Li X M, et al, 2017. Review on researches on negative air ion concentration distribution and correlation with meteorological elements in mountain tourist areas[J]. Meteor Sci Technol, 45(5): 882-888(in Chinese).
- 冯明, 毛飞, 王学良, 等, 2011. 人居环境气候舒适度评价: GB/T 27963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社. Feng M, Mao F, Wang X L, et al, 2011. Climatic suitability evaluating on human settlement: GB/T 27963—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- 范晓青, 张勇, 庞君如, 2024. 基于气候生态产品价值实现的气象服务模式与发展思考[J]. 气象科技进展, 14(1): 66-69. Fan X Q, Zhang Y, Pang J R, 2024. Meteorological service model based on the value realization of climate ecological products and reflections on its development[J]. Adv Meteor Sci Technol, 14(1): 66-69 (in Chinese).
- 方砚秋, 张方敏, 陈龙, 等, 2022. 江西省空气负离子浓度特征与气象因子相关分析[J]. 气象科学, 42(2):

- 254-260. Fang Y Q, Zhang F M, Chen L, et al, 2022. Correlation analysis of negative air ion concentration and meteorological factors in Jiangxi[J]. J Meteor Sci, 42(2): 254-260 (in Chinese).国家发改委, 国家统计局, (2022-03-26). 国家发改委 国家统计局关于印发《生态产品总值核算规范(试行)》的通知[EB/OL]. <https://www.guoturen.com/wenku-9518>. National Development and Reform Commission, National Bureau of Statistics, (2022-03-26). Accounting standards for gross ecosystem product (trial implementation)[EB/OL]. <https://www.guoturen.com/wenku-9518> (in Chinese).
- 国家技术监督局, 国家环境保护局, 1992. 制定地方大气污染物排放标准的技术方法: GB/T 3840—1991[S]. 北京: 中国标准出版社. National Technical Supervision Bureau, National Environmental Protection Agency. Technical methods for making local emission standards of air pollutants: GB/T 3840—1991[S]. Beijing: China Standards Press(in Chinese).
- 国家气候战略中心, (2024-07-08). 2022 年减排项目中国区域电网基准线排放因子 [EB/OL]. <https://ccer.cets.org.cn/notice/noticeDetail?bulletinInfoId=1259912674523877376>. National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation, (2024-07-08). Baseline emission factors for regional power grids in China's 2022 mitigation projects[EB/OL]. <https://ccer.cets.org.cn/notice/noticeDetail?bulletinInfoId=1259912674523877376> (in Chinese).
- 王兵, 蒋有绪, 牛香, 等, 2020. 森林生态系统服务功能评估规范: GB/T 38582—2020[S]. 北京: 中国标准出版社. Wang B, Jiang Y X, Niu X, et al, 2020. Specification for assessment of forest ecosystem services: GB/T 38582—2020[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- 姜月清, 崔晓军, 张艳红, 等, 2024. 气候生态产品价值实现标准化建设初探[J]. 标准科学, (1): 88-95. Jiang Y Q, Cui X J, Zhang Y H, et al, 2024. Study on the standardization of the value of climate ecological products[J]. Stand Sci, (1): 88-95 (in Chinese).
- 林亦晴, 徐卫华, 李璞, 等, 2023. 生态产品价值实现率评价方法——以丽水市为例[J]. 生态学报, 43(1): 189-197. Lin Y Q, Xu W H, Li P, et al, 2023. Assessing the realization of the values of ecosystem products: a case study of Lishui, China[J]. Acta Ecol Sin, 43(1): 189-197 (in Chinese).
- 刘世伟, 王晓明, 效存德, 等, 2020. 中国积雪气候调节服务价值评估[J]. 气候变化研究进展, 16(5): 535-544. Liu S W, Wang X M, Xiao C D, et al, 2020. Evaluating climate regulation service of snow cover in China[J]. Climate Change Res, 16(5): 535-544 (in Chinese).
- 刘彦平, 吕风勇, 2022. 中国县域品牌影响力报告(2021): 推动共同富裕[M]. 北京: 中国社会科学出版社. Liu Y P, Lv F Y, 2022. China County Brand Influence Report 2021: Promoting Common Prosperity[M]. Beijing: China Social Sciences Press (in Chinese).

- 马国霞, 於方, 王金南, 等, 2017. 中国 2015 年陆地生态系统生产总值核算研究[J]. 中国环境科学, 37(4): 1474-1482. Ma G X, Yu F, Wang J N, et al, 2017. Measuring gross ecosystem product (GEP) of 2015 for terrestrial ecosystems in China[J]. China Environ Sci, 37(4): 1474-1482 (in Chinese).
- 欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等, 2013. 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, 33(21): 6747-6761. Ouyang Z Y, Zhu C Q, Yang G B, et al, 2013. Gross ecosystem product: concept, accounting framework and case study[J]. Acta Ecol Sin, 33(21): 6747-6761 (in Chinese).
- 欧阳志云, 王金南, 肖焱, 等, 2020. 陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南[Z]. Ouyang Z Y, Wang J N, Xiao Y, et al, 2020. Technical Guidelines for Gross Ecosystem Product (GEP) Accounting of Terrestrial Ecosystems [Z]. (in Chinese).
- 蒲秀姝, 孙英耀, 郭洁, 等, 2025. 雅安市生态系统气象利用价值核算与空间利用研究[J]. 农业灾害研究, 15(4): 83-85, 89. Pu X S, Sun Y Y, Guo J, et al, 2025. Study on meteorological utilization value accounting and spatial utilization of ecosystems in Ya'an City[J]. J Agr Catastrophology, 15(4): 83-85, 89 (in Chinese).
- 乔琦, 李莹, 杨国威, 等, 2025. 2024 年全球重大天气气候事件[J]. 气象, 51(5): 628-635. Qiao Q, Li Y, Yang G W, et al, 2025. Global major weather and climate events in 2024[J]. Meteor Mon, 51(5): 628-635 (in Chinese).
- 邱琼, 王宏伟, 景谦平, 2024. GEP 核算能代表生态产品价值核算吗?——基于 SEEA EA 对我国生态系统核算若干问题的探讨[J]. 中国国土资源经济, 37(4): 4-10. Qiu Q, Wang H W, Jing Q P, 2024. Could GEP accounting represent the monetary accounting for ecosystem product? —Discussion on ecosystem accounting in China based on SEEA EA[J]. Nat Res Econ China, 37(4): 4-10 (in Chinese).
- 屈雅, 杨彬, 孙维, 等, 2023. 生态系统生产总值气象价值核算技术指南: T/CMSA 0037—2023 [S]. 北京: 中国气象服务协会. Qu Y, Yang B, Sun W, et al, 2023. Technical guidelines for accounting the meteorological value of gross ecosystem product: T/CMSA 0037—2023 [S]. Beijing: China Meteorological Service Association (in Chinese).
- 孙维, 陶国清, 姚叶青, 等, 2025. 生态气象产品价值货币转化及实现途径初探[J]. 气象科技进展, 15(1): 48-54. Sun W, Tao G Q, Yao Y Q, et al, 2025. A preliminary study on the currency transformation and implementation approach of eco-meteorological product value[J]. Adv Meteor Sci Technol, 15(1): 48-54(in Chinese)..
- 谭凯炎, 闵庆文, 王培娟, 2022. 一种基于中国气候特征和人体舒适感受的气候舒适指数模型[J]. 气象, 48(7): 913-924. Tan K Y, Min Q W, Wang P J, 2022. A human climate comfort index model based on the climatic characteristics and human thermal sensations in China[J]. Meteor Mon, 48(7): 913-924 (in Chinese).
- 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等, 2008. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报, 23(5):

- 911-919. Xie G D, Zhen L, Lu C X, et al, 2008. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China[J]. *J Nat Res*, 23(5): 911-919 (in Chinese).
- 谢慧君, 谢亚巍, 曹聪, 等, 2023. 重庆市植被净初级生产力时空变化特征及驱动力分析[J]. *长江流域资源与环境*, 32(12): 2581-2597. Xie H J, Xie Y W, Cao C, et al, 2023. Spatial-temporal variation characteristics and driving forces of vegetation net primary productivity in Chongqing[J]. *Res Environ Yangtze Basin*, 32(12): 2581-2597 (in Chinese).
- 姚霞, 王阔, 郁珍艳, 等, 2022. 气候生态产品价值核算体系研究进展及应用[J]. *浙江气象*, 43(3): 1-8. Yao X, Wang K, Yu Z Y, et al, 2022. Research progress and application of climate-ecological product value accounting system[J]. *J Zhejiang Meteor*, 43(3): 1-8 (in Chinese).
- 叶彩华, 沙祎, 白韧, 等, 2025. “中国天然氧吧”气候生态产品价值分析——以北京怀柔为例[J]. *气象科技*, 53(1): 112-123. Ye C H, Sha Y, Bai R, et al, 2025. Value analysis of climate ecological products of “China natural oxygen bar”: taking Huairou, Beijing as an example[J]. *Meteor Sci Technol*, 53(1): 112-123 (in Chinese).
- 游旭, 何东进, 肖隼, 等, 2019. 县域生态保护成效评估方法——以峨山县为例[J]. *生态学报*, 39(9): 3051-3061. You X, He D J, Xiao Y, et al, 2019. Assessment of ecological protection effectiveness in a county area: using Eshan County as an example[J]. *Acta Ecol Sin*, 39(9): 3051-3061 (in Chinese).
- 余焰文, 邓力琛, 花宗, 等, 2024. 抚州市生态系统气象利用价值核算方法[J]. *气象与减灾研究*, 47(1): 50-56. Yu Y W, Deng L C, Hua Z, et al, 2024. Research on calculation method of ecosystem meteorological utilization value in Fuzhou[J]. *Meteor Disaster Re Res*, 47(1): 50-56 (in Chinese).
- 翟晓瑶, 王阔, 李正泉, 等, 2024. 浙江安吉气候生态产品总值探索和评估[J]. *气候变化研究进展*, 20(4): 475-484. Zhai X Y, Wang K, Li Z Q, et al, 2024. Value accounting and evaluation of gross climate ecosystem product in Anji county, Zhejiang province[J]. *Climate Change Res*, 20(4): 475-484 (in Chinese).
- 张继, 范莉, 陈艳英, 等, 2024. 基于FY4A静止卫星的植被NPP估算及时空分布——以多云雨山区重庆市为例[J]. *遥感信息*, 39(4): 115-124. Zhang J, Fan L, Chen Y Y, et al, 2024. Estimation and spatiotemporal distribution of vegetation NPP based on FY4A geostationary satellite: a case study of Chongqing in cloudy and rainy mountainous region[J]. *Remote Sens Inform*, 39(4): 115-124 (in Chinese).
- 张林波, 陈鑫, 梁田, 等, 2023. 我国生态产品价值核算的研究进展、问题与展望[J]. *环境科学研究*, 36(4): 743-756. Zhang L B, Chen X, Liang T, et al, 2023. Research progress, problems and prospects of ecosystem products value accounting in China[J]. *Res Environ Sci*, 36(4): 743-756 (in Chinese).
- 张艳军, 官冬杰, 翟俊, 等, 2017. 重庆市生态系统服务功能价值时空变化研究[J]. *环境科学学报*, 37(3): 1169-1177. Zhang Y J, Guan D J, Zhai J, et al, 2017. Spatial and temporal variations of ecosystem services

- value in Chongqing City[J]. *Acta Sci Circumst*, 37(3): 1169-1177 (in Chinese).
- 赵琳, 姜允迪, 钟海玲, 等, 2025. 2024 年中国气候特征及主要天气气候事件[J]. *气象*, 51(3): 349-357. Zhao L, Jiang Y D, Zhong H L, et al, 2025. Climate characteristics and major meteorological events over China in 2024[J]. *Meteor Mon*, 51(3): 349-357 (in Chinese).
- 赵思遥, 李博, 2024. 气候生态产品价值核算方法初探[J]. *气象科技进展*, 14(6): 24-32. Zhao S Y, Li B, 2024. A preliminary study on the value accounting method of climate ecological products[J]. *Adv Meteor Sci Technol*, 14(6): 24-32 (in Chinese).
- 中国气象服务协会, 2024. 中国气象经济发展报告(2024)[M]. 北京: 社会科学文献出版社. China Meteorological Service Association, 2024. Report on the Development of China's Meteorological Economy (2024)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press (China): 1-21, 256291 (in Chinese).
- 中国气象局, (2024-01-18). 中国气象局关于进一步推动气候生态产品价值实现的指导意见[EB/OL]. https://www.cma.gov.cn/ztbd/2023zt/20230524/2023052401/202401/t20240118_6014102.html. China Meteorological Administration, (2024-01-18). Guiding opinions on further promoting the value realization of climate-ecological products[EB/OL]. https://www.cma.gov.cn/ztbd/2023zt/20230524/2023052401/202401/t20240118_6014102.html (in Chinese).
- 浙江省统计局, 国家统计局浙江调查总队, 2023. 浙江统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社. Zhejiang Provincial Bureau of Statistics, NBS Survey Office in Zhejiang. (2023). Zhejiang Statistical Yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press(in Chinese)..
- 郑飒飒, 王维佳, 刘东升, 等, 2024. 四川盆地降水对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的清除作用分析[J]. *暴雨灾害*, 43(5): 607-616. Zheng S S, Wang W J, Liu D S, et al, 2024. Scavenging effect analysis of precipitation on $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Sichuan Basin[J]. *Torr Rain Dis*, 43(5): 607-616 (in Chinese).
- Liang L N, Siu W S, Wang M X, et al, 2021. Measuring gross ecosystem product of nine cities within the Pearl River Delta of China[J]. *Environ Chall*, 4: 100105.
- Liu X Q, Su Y J, Hu T Y, et al, 2022. Neural network guided interpolation for mapping canopy height of China's forests by integrating GEDI and ICESat-2 data[J]. *Remote Sens Environ*, 269: 112844.
- UNSC (United Nations Statistical Commission), (2025-03-21). System of environmental-economic accounting: ecosystem accounting[EB/OL]. <https://seea.un.org/ecosystem-accounting>.
- Wang Y J, Wang R, Tanaka K, et al, 2023. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China[J]. *Nature*, 619(7971): 761-767.