

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.017.

王陶, 周启刚, 毛永发, 等. 基于碳收支的三峡库区生态补偿分区及测度研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 394-403.

WANG Tao, ZHOU Qigang, MAO Yongfa, et al. Study on Ecological Compensation Zoning and Measurement in the Three Gorges Reservoir Area Based on Carbon Revenue and Expenditure[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 394-403.

# 基于碳收支的三峡库区生态补偿分区及测度研究

王陶<sup>1,3</sup>, 周启刚<sup>2,3</sup>, 毛永发<sup>1,3</sup>, 伍龙江<sup>1,3</sup>, 罗泓然<sup>1,3</sup>, 向宇峰<sup>4</sup>

(1.重庆工商大学 环境与资源学院, 重庆 400067; 2.重庆工商大学 公共管理学院,

重庆 400067; 3.生态环境空间信息数据挖掘与大数据集成重庆市重点实验室,

重庆 401320; 4.石柱土家族自治县精绘勘测有限公司, 重庆 409100)

**摘要:** [目的]揭示三峡库区碳收支的动态变化规律,划定碳收支的生态补偿分区,丰富生态补偿量化测度依据,完善生态补偿标准,进而为三峡库区相关部门制定生态补偿政策提供理论参考。[方法]以三峡库区26个区县为研究尺度,运用标准显性比较优势指数法、K-means聚类分析法和空间叠加分析等方法,基于三峡库区碳收支核算差异和库区地理位置,划分生态支付区和受偿区,测算了三峡库区生态补偿额度。[结果](1)2010—2017年三峡库区碳收支量总体结果均为正值,呈现先下降后上升的“∨”型波动上升趋势。(2)将三峡库区生态补偿分区重构为8种类型,分为4个一般受偿区、11个重点受偿区、10个一般支付区和1个重点支付区。(3)2010年、2012年、2014年和2017年三峡库区生态补偿总额度为20.26亿元、16.74亿元、21.17亿元和25.20亿元,总体呈现上涨的趋势,其中生态补偿以区内补偿为主,区内补偿占比为80%以上。[结论]2010—2017年三峡库区碳收支量均为正值且呈现上涨趋势,研究以碳收支为依据,结合全方位多角度因素构建生态补偿体系,实现生态补偿分区,为库区各区县的横向生态补偿提供量化依据,对促进区域协调可持续发展具有重大意义。

**关键词:**生态补偿; 碳收支; 补偿分区; 补偿测度; 三峡库区

中图分类号: X321

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0394-10

## Study on Ecological Compensation Zoning and Measurement in the Three Gorges Reservoir Area Based on Carbon Revenue and Expenditure

WANG Tao<sup>1,3</sup>, ZHOU Qigang<sup>2,3</sup>, MAO Yongfa<sup>1,3</sup>,

WU Longjiang<sup>1,3</sup>, LUO Hongran<sup>1,3</sup>, XIANG Yufeng<sup>4</sup>

(1.College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067,

China; 2.College of Tourism and Land Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067,

China; 3.Chongqing Key Laboratory of Spatial Data Mining and Big Data Integration for Ecology and Environment,

Chongqing 401320, China; 4.Shizhu Tujia Autonomous County Precision Survey Corporation, Chongqing 409100, China)

**Abstract:** [Objective] The aims of this study are to reveal the dynamic changes of carbon revenue and expenditure in the Three Gorges Reservoir Area, delineate the ecological compensation zones of carbon revenue and expenditure, enrich the quantitative measurement basis of ecological compensation, improve the ecological compensation standard, and then provide theoretical reference for the relevant departments in the Three Gorges Reservoir Area to formulate ecological compensation policies. [Methods] This study takes 26 districts and counties in the Three Gorges Reservoir area as the research samples, and uses the standard dominant comparative advantage index method, K-means cluster analysis and spatial overlay analysis to divide ecological payment areas and compensation areas based on the differences in carbon revenue and expenditure

收稿日期: 2022-05-30

修回日期: 2022-07-24

资助项目: 重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0493); 重庆市技术创新与应用发展重点研发项(cstc2018jszx-zdyfmxX0021); 重庆市基础研究及前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0497); 重庆工商大学研究生创新型科研基金(yjscxx2022-112-41)

第一作者: 王陶(1997—), 女, 重庆沙坪坝人, 硕士研究生, 研究方向为环境规划与管理。E-mail: 1034368199@qq.com

通信作者: 周启刚(1976—), 男, 重庆铜梁人, 博士, 教授, 主要从事环境规划与管理研究。E-mail: 827055619@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

accounting in the Three Gorges Reservoir area and the geographical location of the reservoir area, and to measure the ecological compensation amount in the Three Gorges Reservoir area. [Results] (1) The overall results of carbon revenue and expenditure in the Three Gorges Reservoir area from 2010 to 2017 were all positive, showing a ‘√’ type fluctuating upward trend of first decreasing and then increasing. (2) The ecological compensation zoning of the Three Gorges Reservoir Area was reconstructed into eight types, divided into four general compensation-receiving zones, 11 key compensation-receiving zones, 10 general payment zones and one key payment zone. (3) The total amount of ecological compensation in the Three Gorges Reservoir Area in 2010, 2012, 2014 and 2017 was RMB 2.026 billion, RMB 1.674 billion, RMB 2.117 billion and RMB 2.520 billion, respectively, showing an overall upward trend, with ecological compensation being dominated by compensation within the area, with compensation within the area accounting for over 80%. [Conclusion] From 2010 to 2017, the carbon revenue and expenditure in the Three Gorges Reservoir area were positive and showed an upward trend. The study takes carbon revenue and expenditure as the basis, combines all-round and multi-faceted factors to construct an ecological compensation system, realizes ecological compensation zoning, and provides a quantitative basis for horizontal ecological compensation in each district and county of the study area, which is of great significance for promoting coordinated and sustainable regional development.

**Keywords:** ecological compensation; carbon revenue and expenditure; compensation zoning; compensation measurement; Three Gorges Reservoir Area

生态补偿以保护和持续利用生态系统服务为目的<sup>[1]</sup>,以经济手段为主调节相关者利益关系<sup>[2]</sup>。在当前社会经济快速发展和生态环境资源匮乏的尖锐矛盾背景下,生态补偿是国内乃至国际学术界研究的热点问题。国内外学者使用了影子工程法<sup>[3]</sup>、机会成本法<sup>[4]</sup>、费用分析法<sup>[5]</sup>等研究方法,对中国<sup>[6]</sup>、城市群<sup>[7]</sup>、省市<sup>[8]</sup>和区县<sup>[9]</sup>等大小尺度的区域进行研究,并针对农田<sup>[10]</sup>、流域<sup>[11]</sup>、矿山<sup>[12]</sup>等要素进行生态补偿测度,其中碳补偿是低碳背景下提出的热点领域。

在当前低碳发展的生态文明建设背景下,碳补偿研究在实现“碳中和、碳达峰”中起重要的协调和推动作用,具有特殊性和紧迫性。目前的碳补偿多为纵向补偿,它由国家政府直接将定额补偿拨款下达至各个地区<sup>[13]</sup>。但纵向碳补偿难以解决区域的总体补偿额度问题,为了完善生态补偿理论,构建生态补偿机制,国内外学者从生态学<sup>[14]</sup>、地理学<sup>[15]</sup>、经济学<sup>[16]</sup>等多学科多领域多视角探究碳补偿的横向补偿问题。近年来,大量学者运用土地利用碳排放<sup>[17]</sup>、能源碳排放量<sup>[18]</sup>、农业碳汇总量<sup>[18]</sup>、农业修正碳排放量<sup>[19]</sup>和碳汇/碳源<sup>[20]</sup>等作为依据展开碳补偿额度计算研究。基于主体功能区划视角<sup>[21]</sup>、碳平衡视角<sup>[22]</sup>开展碳补偿分区研究,研究对象主要集中在湿地<sup>[23]</sup>、森林<sup>[24]</sup>和耕地<sup>[25]</sup>等领域,也有学者以中国<sup>[26]</sup>、省级<sup>[27]</sup>和城市群<sup>[21]</sup>等较大的地区作为研究区展开碳补偿研究,鲜有研究针对特殊研究区而展开。在目前的研究中,碳排放量是碳补偿量化的主要依据,鲜有学者从碳供给和碳供需方面考量碳补偿量化依据。且目前碳补

偿分区研究中缺少对区域碳排放位置、碳的经济贡献程度、碳的生态承载能力和单位面积碳吸收情况等碳补偿社会经济和生态环境属性的区分。

三峡库区作为重点生态功能区,其环境优越,具有丰富的生态资源。同时又是生态敏感脆弱区,其经济发展和环境保护间的矛盾突出,社会经济发展状况和生态环境健康状况的空间差异明显<sup>[28]</sup>。基于此,本研究以三峡库区为研究对象,综合考虑碳供需差异,基于区域碳收支量,测定库区各区县生态补偿额度。以库区地理位置划分的库首、库腹、库尾部区域,从地理空间角度出发,综合考虑碳排放经济贡献度、碳排放生态承载力、碳收支规模和生态资源结构等因素,划分生态补偿区域。为三峡库区节能减排、低碳发展规划提供参考依据,为相关部门制定生态补偿政策提供理论依据。

## 1 研究区概况

三峡库区是长江上游经济带的重要组成部分,是长江中下游地区的生态环境屏障和西部生态环境建设的重点,位于 $29^{\circ}16'—31^{\circ}25'N$ , $106^{\circ}—110^{\circ}50'E$ ,海拔 $33.6\sim 3105\text{ m}$ ,面积 $5.9\times 10^4\text{ km}^2$ ,包含湖北省和重庆市所辖的26个区县(图1)。依据《三峡库区近、中期农业和农村经济发展总体规划》可将三峡库区按照地理位置分为库首、库腹和库尾。其中库首包含湖北省宜昌市所辖的秭归县、兴山县、夷陵区,恩施州所辖的巴东县,其生态环境较好,但属于生态脆弱区和敏感区;库腹包含重庆市所辖的巫山县、巫溪县、奉节县和云阳县等11个区县,其自然地理状况较好,但经济基础薄弱<sup>[29]</sup>;库尾

包含长寿区、江津区和重庆核心城区,其经济发达,人口密度较大。三峡库区作为全国重点生态功能区,具有良好的生态环境、丰富自然资源和优渥的固碳功能。库区内经济社会的发展和人类活动增加了碳排放量,也加重了区域碳吸收压力。因此本研究以三峡库区为研究区,研究其碳收支变化情况,实行生态补偿分区和测度,以控制区域碳排放量,平衡区域碳收支与经济发展差异,实现区域低碳背景下可持续发展。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究所采用的数据是碳排放、碳吸收、土地利

用和 GDP 等统计数据和栅格数据,数据具体信息和来源见表 1。

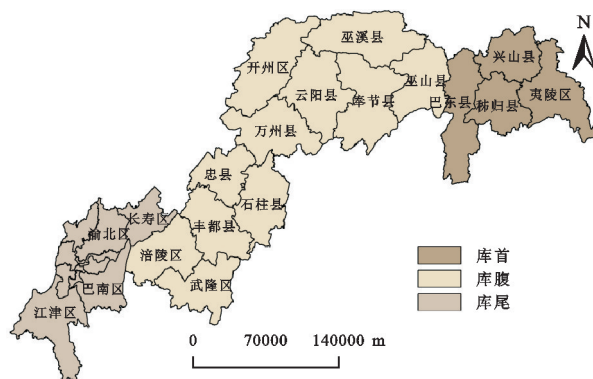


图 1 研究区位置示意图

表 1 数据来源

数据名称	数据类型	数据来源及预处理
碳排放/吸收数据	统计数据	数据来源于中国碳核算数据库 CEADs( <a href="https://www.ceads.net.cn/">https://www.ceads.net.cn/</a> ),采用粒子群优化-反向传播(PSO-BP)算法统一 DMSP/OLS 和 NPP/Ⅷ RS 卫星图像的规模,估算了 1997—2017 年中国 2735 个县 CO <sub>2</sub> 排放量和相应的县级陆地植被碳汇值
GDP	统计数据	国内生产总值(GDP)来自重庆统计年鉴和湖北统计年鉴
土地利用	栅格数据	三峡库区土地利用类型遥感监测空间分布数据是基于美国陆地卫星 Landsat TM 影像,经过系统辐射校正和几何校正,使用 ENVI5.3 进行辐射定标和大气校正,使用 ERDAS9.3 进行镶嵌处理,通过人工目视解译生成。以中科院土地利用覆盖分类体系为解译标准,将三峡库区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、建设用地、水域、未利用地 6 类,数据检验精度超过 85%,满足数据精度要求

### 2.2 研究方法

2.2.1 碳收支计算方法 碳收支是指碳汇吸收量和碳源排放量的差值<sup>[31]</sup>,碳收支总量计算公式如下:

$$Q = C_s - C_t \quad (1)$$

式中:Q 为碳收支量(t);C<sub>s</sub>为碳吸收量(t);C<sub>t</sub>为碳吸收量(t)。

2.2.2 生态补偿分区方法 本研究采用 SPSS Modeler 中的 K-means 聚类模型,基于标准显性比较优势指数(Normalized Revealed Comparative Advantage Index, NRCA Index)划分三峡库区生态补偿类型。K-means 聚类模型是一种迭代求解的聚类分析算法,将具有相近特征的数据成员进行分类组织,被称为无监督学习<sup>[32]</sup>。显性标准比较优势指数是在总结显性比较优势指数(RCA)的基础上衍生提出的衡量一国产品或产业在国际市场竞争力最具说服力的指标<sup>[33-34]</sup>。它现已广泛应用于能源利用、空间优势功能识别等方面,本研究将其运用于三峡库区碳收支各类优势属性识别上,其计算公式如下:

$$NRCA_j^i = X_j^i / X - X_j X^i / XX \quad (2)$$

式中:X<sub>j</sub><sup>i</sup>为*i*地区*j*属性的指标值;X<sub>j</sub>为所有地区*j*属性的总指标值;X<sup>i</sup>为*i*地区所有属性的总指标值;X 为所有地区及属性的总指标值,所选指标见表 2。

2.2.3 生态补偿测度方法 根据研究区 2010 年、2012 年、2014 年、2017 年内碳收支的计算结果,基于重庆市、湖北省碳排放交易试点市场价格,计算三峡库区各区县的生态补偿金额<sup>[35]</sup>。具体公式如下:

$$EC_{CO_2} = QP \quad (3)$$

式中:EC<sub>CO<sub>2</sub></sub>为生态补偿金额(元);Q 为各区县碳收支量(t);P 为重庆市、湖北省碳排放交易试点市场价格,重庆市碳排放交易试点市场价格平均值为 30.10 元/t,湖北省碳排放交易试点市场价格为 30.51 元/t。

## 3 结果与分析

### 3.1 三峡库区碳收支核算分析

3.1.1 碳排放时空特征 根据碳排放量核算结果,得到 2010—2017 年三峡库区碳排放总量值,借助 ArcGIS 软件绘制三峡库区碳排放的县域级空间分布图(图 2、图 3)。不同区域的碳排放量在空间上差异明显,为明确碳排放量空间分布状况,采用自然断点法将碳排放量划分为 4 类以表示三峡库区各区县碳排放量的高低,包括高值区(>8.7)、较高值区(3.4~8.7)、较低值区(1.8~3.4)、低值区(<1.8)。总体上看(图 2),2010 年、2012 年、2014 年、2017 年的碳排放量总量分别为 1.13×10<sup>8</sup>t, 1.21×10<sup>8</sup>t, 1.19×10<sup>8</sup>t 和 1.18×10<sup>8</sup>t,总体呈现先上升后下



降的波动趋势。从空间分布上看,三峡库区碳排放量有明显的空间分布差异,库尾碳排放量高,库首和库腹碳排放量低。其中碳排放高值区位于沙坪坝区和渝北区,全部位于库首,这些地区人类生活水平较高,工业企业蓬勃发展,能源消耗较高。碳排放低值区位于库腹和库首,这些区域能源碳消耗低。

表 2 标准显性比较优势指数指标值

指标名称	计算方式	指标含义
碳收支总量指标	$Q=C_s-C_i$	选取碳收支总量作为反映区域碳补偿总量规模属性。 $C_s$ 为碳吸收量; $C_i$ 为碳排放量
碳排放经济贡献系数指标	$ECC=\frac{G_i}{G}/\frac{C_i}{C}$	选取碳排放经济贡献系数(Economy Contributive Coefficient,ECC)表示区域碳补偿社会经济属性。 $G_i,G$ 分别为各县级单元和全区 GDP; $C_i,C$ 分别为各县级单元和全区的碳排放量
碳的生态承载系数指标	$ESC=\frac{CA_i}{CA}/\frac{C_i}{C}$	碳排放生态承载系数(Ecological Support Coefficient,ESC)表示区域生态环境属性。 $C_i,C$ 分别为各县级单元和全区的碳排放量; $CA_i,CA$ 分别为各县级单元和全区的固碳量
土地利用指数指标	$LU_i=\frac{S_i}{S}$	土地利用指数指标反映国土空间开发程度。 $S_i$ 为区域建设用地面积; $S$ 为区域总面积

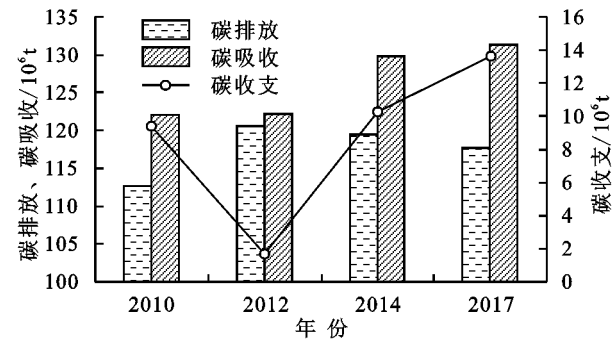


图 2 2010—2017 年碳排放、碳吸收和碳收支总量

3.1.2 碳吸收时空特征 根据碳吸收量核算结果,得到 2010—2017 年三峡库区碳吸收总量值,借助 ArcGIS 软件绘制三峡库区碳吸收的县域级空间分布图(图 4)。不同区域的碳吸收量在空间上差异明显,为明确碳吸收空间分布状况,采用自然断点法将碳吸收量划分为 4 类以表示三峡库区各区县碳吸收量的高低,包括高值区( $>7.06$ ),较高值区( $4.20\sim7.06$ ),较低值区( $1.19\sim4.20$ ),低值区( $<1.19$ )。总体上看(图 2),2010 年、2012 年、2014 年、2017 年的碳吸收总量分别为  $1.22\times10^8\text{t}$ 、 $1.22\times10^8\text{t}$ 、 $1.30\times10^8\text{t}$ 、 $1.31\times10^8\text{t}$ ,总体呈现逐年上升的趋势。从空间上看,三峡库区库首碳吸收量高,库腹靠近库首的区县吸收量也较高,库腹靠近库首的区县碳吸收量下降,库尾碳吸收量低,总体碳吸收量呈现由库首至库尾的下降趋势。其中碳吸收低值区和较低值区集中于重庆市主城九区内长寿区和忠县,大部分位于库尾区,该地区森林、农业资源稀缺,碳吸收能力不足;碳吸收量由低值区向四周逐渐增大,库腹的较高值区紧邻高值区。而库首区域的碳吸收量全部处于高值区和较高值区,该地区植物资源丰富,碳汇吸收能力较强。

3.1.3 碳收支时空特征 根据碳吸收量和碳排放量的核算结果差值,得到 2010—2017 年三峡库区碳收支量,

借助 ArcGIS 软件绘制三峡库区碳收支的空间分布图(图 5)。总体上看(图 2),2010 年、2012 年、2014 年、2017 年的碳收支总量分别为  $9.38\times10^6\text{t}$ 、 $1.66\times10^6\text{t}$ 、 $1.02\times10^7\text{t}$ 、 $1.36\times10^7\text{t}$ ,总体结果均为正值,碳吸收量大于碳排放量,总体呈现先下降后上升的波动上涨趋势,2010—2017 年三峡库区整体碳收支增大。2012 年重庆出台《重庆能源工业三年振兴规划》,重庆市能源消费总量迅速增加,导致区域 2012 年碳排放量迅猛增加,碳收支量骤减。从空间上看,以巴东县和夷陵区为首的库首具有较高的碳收支量,该区域以西的库腹区县碳收支量也较高,这些地区生态环境较好,森林面积范围广、植被覆盖率高,人类活动较少,工业发展较为不发达。碳收支的负值区域大多在库首的主城九区内,这些区域基本都是重庆市经济较为发达、工业化程度较高的地区。从时间上看,巫溪县、奉节县、巴东县、云阳县、石柱县、巫山县、开州区、武隆区、兴山县、丰都县、秭归县和忠县的碳收支量较高且趋于稳定。江津区和万州区碳收支量为正值但较低。夷陵区的 2010—2017 年碳收支量由正值下降为负值又上涨为正值,正负值都较低,巴南区、渝中区和涪陵区为负值且较低,这些区域碳排放量大于碳收支量,但碳收支量处于逐年上升的向好趋势。北碚区、长寿区、大渡口区、江北区、九龙坡区、南岸区沙坪坝区和渝北区,碳收支量较低且趋于稳定。

3.2 三峡库区碳补偿分区及补偿测度

3.2.1 碳补偿分区各属性比较优势指数 本研究引入生态补偿分区的优势判别因素,充分考虑碳收支规模、碳补偿社会属性、碳补偿生态属性、国土空间开发程度 4 个方面,选取碳收支量指标、碳排放经济贡献系数指标、碳的生态承载系数指标和土地利用指数指标,运用标准显性比较指数(NRCA Index)比

较三峡库区各区县属性的比较优势,为生态补偿分区提供依据。若  $NRCA > 0$ , 表示该区县此属性具有

比较优势;若  $NRCA < 0$ , 表示该区县此属性不具有比较优势。

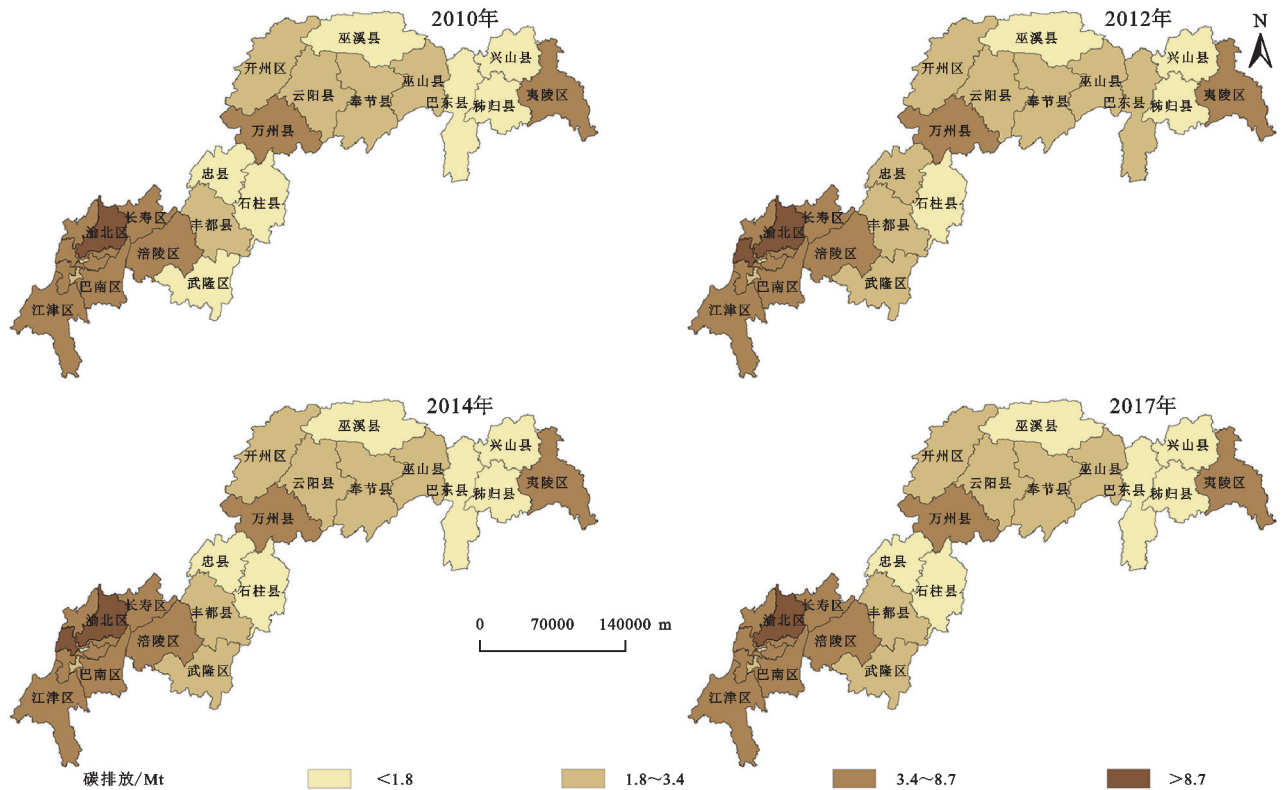


图3 2010—2017年三峡库区碳排放空间分布

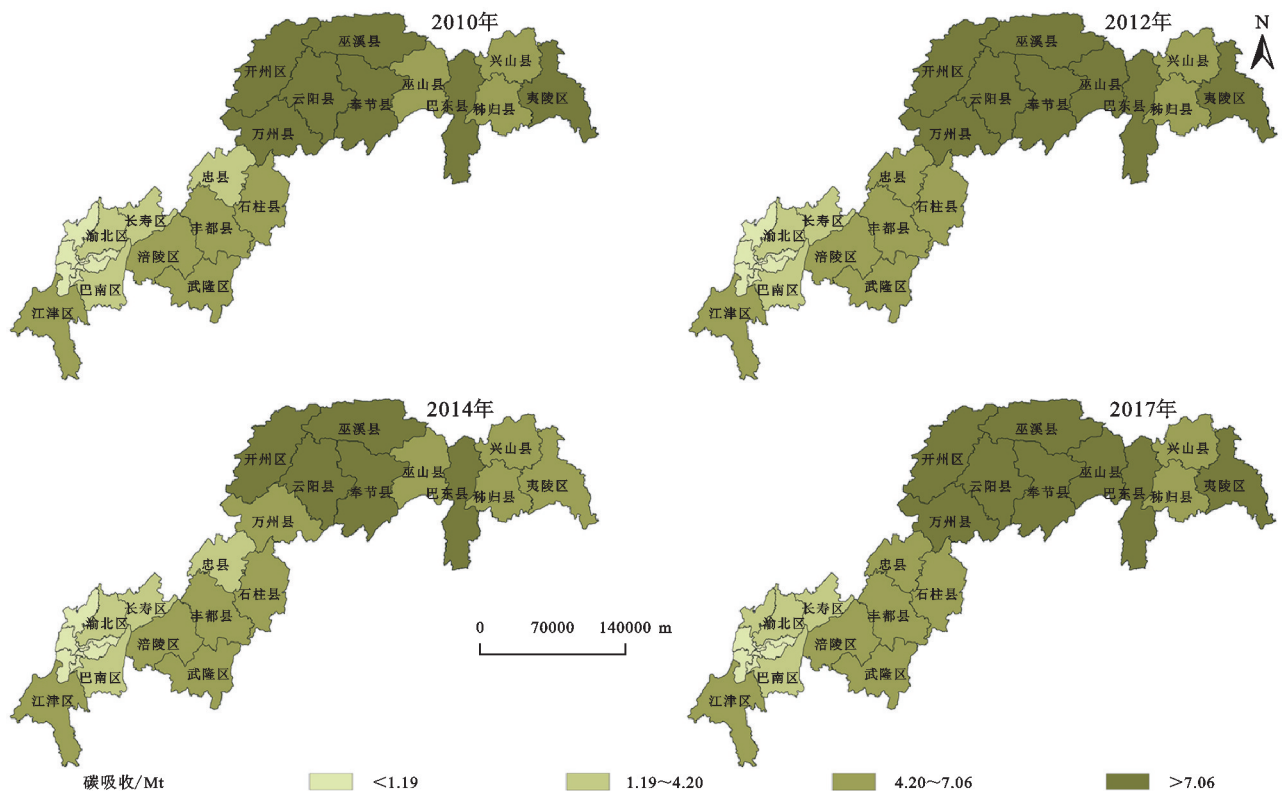


图4 2010—2017年三峡库区碳吸收空间分布

由表3可知,生态补偿总体规模优势区主要是武隆区、石柱县、开州区、丰都县、云阳区、秭归县、兴山县和巴东县等15个区县,这些地区能源消耗规模小,

植物茂密,生态环境状况良好;生态补偿经济属性优势区是除巫山县、巫溪县和渝中区外的所有区县,这些地区碳的经济效率和能源利用效率较高;碳补偿生

态环境属性的优势区包含除渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区和南岸区外的所有区县,这些地区提供了丰富的生态系统服务资源;碳补偿空间结

构优势区包含渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、渝北区、巴南区 and 长寿区,这些地区土地利用程度较大。

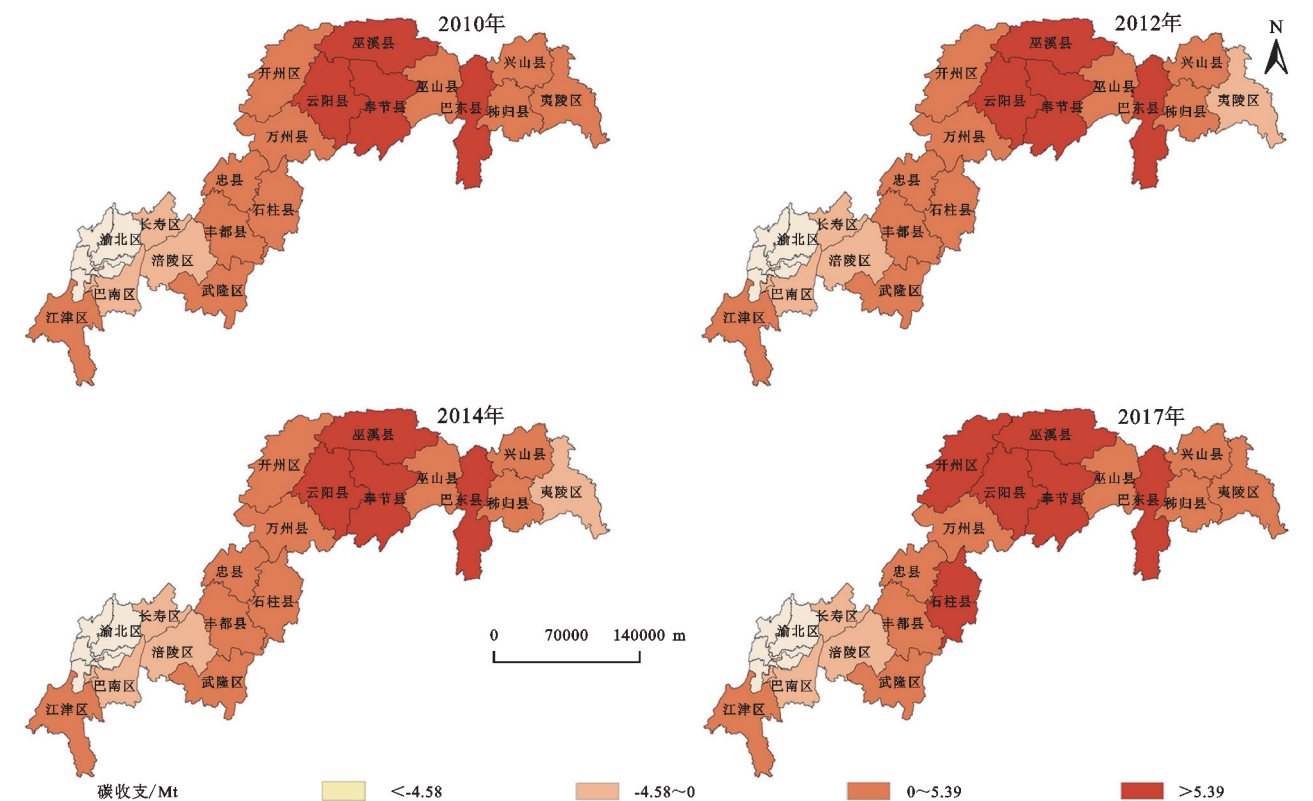


图 5 2010—2017 年三峡库区碳收支空间分布

表 3 三峡库区生态补偿各属性比较优势指数

地区	碳收支	ECC	ESC	LU
武隆区	0.0092	0.0003	0.0042	-0.0137
石柱县	0.0105	0.0006	0.0063	-0.0174
万州区	0.0032	0.0021	0.0012	-0.0066
开州区	0.0107	0.0010	0.0029	-0.0146
丰都县	0.0083	0.0006	0.0039	-0.0128
忠县	0.0055	0.0019	0.0034	-0.0108
云阳县	0.0128	0.0004	0.0045	-0.0176
奉节县	0.0143	0.0002	0.0043	-0.0188
巫山县	0.0101	-0.0002	0.0040	-0.0140
巫溪县	0.0165	-0.0007	0.0107	-0.0265
涪陵区	-0.0019	0.0021	0.0010	-0.0012
渝中区	-0.0199	-0.0228	-0.0623	0.1050
大渡口区	-0.0058	0.0002	-0.0016	0.0073
江北区	-0.0115	0.0004	-0.0038	0.0148
沙坪坝区	-0.0178	0.0010	-0.0008	0.0175
九龙坡区	-0.0153	0.0015	-0.0016	0.0154
南岸区	-0.0143	0.0006	-0.0022	0.0158
北碚区	-0.0103	0.0015	0.0005	0.0083
渝北区	-0.0235	0.0023	0.0014	0.0197
巴南区	-0.0050	0.0019	0.0009	0.0022
长寿区	-0.0076	0.0015	0.0009	0.0052
江津区	0.0018	0.0019	0.0013	-0.0049
秭归县	0.0080	0.0008	0.0061	-0.0148
兴山县	0.0085	0.0005	0.0073	-0.0163
夷陵区	0.0009	0.0008	0.0014	-0.0031
巴东县	0.0124	-0.0003	0.0059	-0.0180

3.2.2 碳补偿分区空间分析 本研究采用 K-mean 聚类模型,在区分支付区和受偿区的基础上,对 4 个标准显性优势指标进行聚类分析,将三峡库区各区县划分为重要受偿区、一般受偿区、一般支付区和重点支付区 4 类,分区依据及各区域特点如下:(1) 重要受偿区。碳收支量为正值,属于需要生态补偿的区域,且碳收支量高,生态承载力强,碳排放经济贡献程度低。(2) 一般受偿区。碳收支量为正值,属于需要生态补偿的区域,生态承载力水平较高,碳排放经济贡献程度较低。(3) 一般支付区。碳收支量为负值,属于需要支付补偿的区域,且生态承载力水平较低。(4) 重点支付区。碳收支量为负值,属于需要支付补偿的区域,且生态承载力水平低,碳排放经济贡献程度低。然后将生态补偿分区和库区地理位置划分的库首、库腹、库尾部区域进行叠加,最终将地理位置区域划分视角下的 2017 年三峡库区生态补偿分区重构为“重点受偿区-库腹区”“一般受偿区-库腹区”“一般支付区-库腹区”“重点支付区-库尾部”“一般支付区-库尾部”“一般受偿区-库尾部”“一般受偿区-库首部”“重点受偿区-库首部”8 种类型(图 6,表 4)。

(1) 支付区。重点支付区为重点支付区-库尾部,位于三峡库区库尾的渝中区,其经济发展水平高,GDP 位



居全市首位,碳排放经济贡献系数占比 23.51%,占比极高。同时区域碳的生态承载力系数占比 0.04%,占比极低,贡献系数与承载系数处于严重不匹配的状态,通过补偿支付手段可以有效缓解其对生态环境造成的压力,并提高支付区对保护碳汇资源、降低碳排放的积极性。

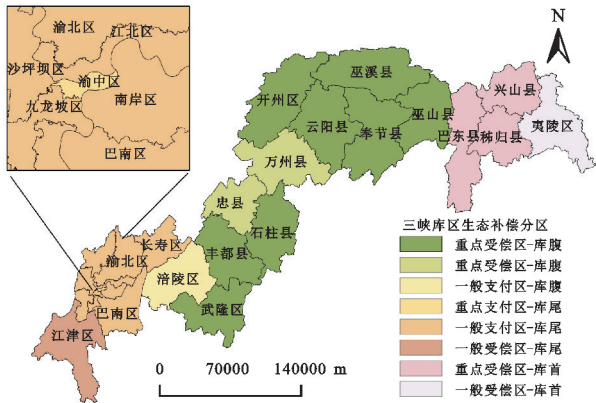


图 6 三峡库区生态补偿分区空间分布

表 4 三峡库区碳补偿类型区主要指标 %

生态补偿分区 (区县数)	GDP 占比	碳排放经济 贡献系数占比	碳的生态承载 系数占比	国土空间开 发程度占比
重点受偿区-库腹区(8)	11.72	20.71	58.28	0.46
一般受偿区-库腹区(2)	9.30	9.54	7.22	0.43
一般支付区-库腹区(1)	7.36	4.24	1.58	0.39
一般支付区-库尾区(9)	52.08	28.19	3.16	22.44
重点支付区-库尾区(1)	8.26	23.51	0.04	75.74
一般受偿区-库尾区(1)	5.54	4.10	2.14	0.27
一般受偿区-库首区(1)	3.21	1.88	1.94	0.14
重点受偿区-库首区(3)	2.54	7.83	25.64	0.13

一般支付区包含一般支付区-库腹区和一般支付区-库尾区两类共 10 个区县。一般支付区-库腹区为涪陵区,该地区 GDP 占比较高,碳排放经济贡献系数占比一般,碳的生态承载系数和国土空间开发程度占比较低。一般支付区-库尾区包含大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、渝北区和长寿区等 9 个区县。区域碳的生态承载系数相对较低,碳排放经济贡献系数占比一般,GDP 占比和国土开发程度占比较高。这些地区应增大工业生产效率,可积极创建新型低碳环保友好型企业,以降低能源碳排放,增加城市公园绿地建设,以增强碳汇功能和碳的生态承载力。

(2) 受偿区。重点受偿区包含重点受偿区-库腹区和重点受偿区-库首区,受偿区-库腹区包含武隆区、石柱县、开州区、丰都县、云阳县、奉节县、巫山县和巫溪县。这些区域 GDP 占比和国土开发程度较低,碳的生态承载系数极高(占比 58.28%),是三峡库区重要的碳汇吸收地区。重点受偿区-库首区包含秭归县、巴东县和兴山区 3 个区县。其经济发展水平低

(GDP 占比为 2.54%),碳排放经济贡献系数低(碳排放经济贡献系数占比为 7.83%),生态承载力较强(碳的生态承载系数占比为 25.64%),是三峡库区重要的生态环境保护地区。

一般受偿区包含一般受偿区-库腹区、一般受偿区-库尾区和一般受偿区-库首区,区域经济发展比较落后(GDP 占比为 9.30%,5.54%,3.21%),国土开发程度较低,碳汇资源较丰富。碳排放经济贡献系数占比较低。一般受偿区-库腹区碳的生态承载系数占比较高,一般受偿区-库尾区碳排放经济贡献系数占比较高,一般受偿区-库首区碳排放经济贡献系数占比较低。这些地区生态承载力状态良好,应在保护区域碳汇资源的前提下,加大开发,积极发展新能源产业,同时避免能源过度利用对环境的破坏。

3.2.3 生态补偿核算分析 本研究 2010—2017 年生态补偿额度见表 5,三峡库区区内补偿额度和区外补偿额度及占比见表 6—7。总体上看三峡库区生态补偿总额度增加,2010 年、2012 年、2014 年和 2017 年三峡库区生态补偿总额度为 20.26 亿元、16.74 亿元、21.17 亿元、25.20 亿元,总体呈现上涨的趋势。其中区外补偿总额度分别为 2.88 亿元、0.50 亿元、3.09 亿元、4.10 亿元,补偿总体呈现逐年上涨趋势。

由表 5 可知,2010—2017 年涪陵区、渝中区、大渡口区 and 江北区等 11 个区县生态补偿额度均为负值,这些区域均需要支付生态补偿,这些地区是重庆市经济发展中心,承载着区域的社会经济发展,碳汇能力较弱;夷陵区 2010 年生态补偿额度为 672 万元,属于生态补偿获补的区域,到 2012 年和 2014 年生态补偿额度变为  $-2.73 \times 10^3$  万元和  $-1.22 \times 10^2$  万元,变为支付区,而 2017 年生态补偿额度上升为  $1.53 \times 10^3$  万元,又回到生态补偿获补区,且碳收支量有一定上升,该区域碳收支额度总体呈现波动上升趋势;巴东县、兴山县、秭归县和江津区等 14 个区县生态补偿额度为正值,这些区域是生态补偿的区域,其森林、草原、湿地面积广阔,碳汇资源丰富,固碳能力比较强。

为了对比三峡库区区内外生态补偿额度关系,本研究统计了区内外 2010—2017 年的额度并计算其占生态补偿总额度比例(表 6)。总体上看,三峡库区区外生态补偿额度低于区内生态补偿额度,且区内和区外补偿额度均呈现先下降后上升趋势。2010 年、2012 年、2014 年和 2017 年区外生态补偿额度占比呈现先下降后上升的波动上升趋势,占比分别为 14.23%,2.99%,14.60%,16.26%。2010 年、2012 年、2014 年和 2017 年区内生态补偿额度占比呈现先上升后下降趋势,占比分别为 85.77%,97.01%,85.40%,83.74%。

表 5 三峡库区生态补偿价值								10 <sup>6</sup> t/元
地区	2010 年		2012 年		2014 年		2017 年	
	碳收支	碳补偿	碳收支	碳补偿	碳收支	碳补偿	碳收支	碳补偿
武隆区	4.67	140.55	4.01	120.81	4.63	139.22	4.83	145.51
石柱县	5.39	162.27	4.94	148.55	5.33	160.37	5.55	166.99
万州区	0.87	26.30	0.83	24.91	1.40	42.01	1.76	53.10
开州区	4.73	142.30	4.84	145.59	5.32	160.19	5.63	169.32
丰都县	3.96	119.15	3.76	113.32	4.20	126.29	4.40	132.46
忠县	2.45	73.87	2.49	74.80	2.77	83.29	2.96	88.96
云阳县	6.09	183.30	5.70	171.72	6.27	188.76	6.69	201.37
奉节县	7.11	214.03	6.50	195.64	7.15	215.14	7.47	224.93
巫山县	4.93	148.30	4.67	140.61	5.01	150.74	5.30	159.53
巫溪县	8.49	255.53	8.11	243.99	8.60	258.82	8.70	262.01
涪陵区	-0.63	-19.10	-0.94	-28.32	-0.61	-18.42	-0.90	-27.06
渝中区	-1.56	-46.99	-1.54	-46.39	-1.49	-44.78	-1.39	-41.83
大渡口区	-2.59	-77.91	-2.57	-77.44	-2.54	-76.33	-2.67	-80.49
江北区	-4.71	-141.81	-4.95	-148.96	-4.88	-147.03	-5.21	-156.93
沙坪坝区	-8.11	-244.08	-8.75	-263.51	-8.81	-265.19	-8.76	-263.82
九龙坡区	-7.20	-216.58	-7.38	-222.22	-7.43	-223.51	-7.40	-222.75
南岸区	-6.84	-205.95	-6.93	-208.52	-6.85	-206.26	-6.83	-205.47
北碚区	-4.58	-137.93	-5.20	-156.62	-5.29	-159.12	-5.15	-155.08
渝北区	-11.63	-350.02	-12.18	-366.71	-11.80	-355.19	-11.91	-358.36
巴南区	-2.62	-78.73	-2.52	-75.94	-2.36	-70.90	-2.48	-74.63
长寿区	-3.88	-116.65	-4.30	-129.46	-4.01	-120.83	-3.81	-114.53
江津区	0.53	15.93	0.05	1.49	0.91	27.40	1.02	30.62
秭归县	3.89	118.81	3.80	114.31	4.09	123.22	4.25	127.86
兴山县	4.28	130.72	4.27	128.65	4.42	133.02	4.55	137.07
夷陵区	0.22	6.72	-0.91	-27.29	-0.04	-1.22	0.51	15.30
巴东县	6.11	186.39	5.88	177.02	6.30	189.50	6.50	195.63

表 6 三峡库区区内外生态补偿额度及占比								
类型	2010 年		2012 年		2014 年		2017 年	
	补偿额度/亿元	占比/%	补偿额度/亿元	占比/%	补偿额度/亿元	占比/%	补偿额度/亿元	占比/%
区内补偿	17.38	85.77	16.24	97.01	18.09	85.40	21.10	83.74
区外补偿	2.88	14.23	0.50	2.99	3.09	14.60	4.10	16.26

为了分析三峡库区各类型区县碳收支情况,本研究统计了 2017 年的各区县生态补偿额度和生态支付额度并计算各个类型区域的占比(表 7—8)。总体来看,重点受偿区受偿额度高于一般受偿区受偿额度。重点受偿区-库腹区各区县受偿额度占比较高,其中巫溪县受偿额度最高,占比为 12.41%,主要是因为该区县的碳吸收量都较高而碳排放量较低。重点受偿区-库腹区的奉节县、云阳县和重点受偿区-库首区的巴东县受偿额度也较高,占比分别为 10.66%,9.54%,9.27%。一般受偿区-库首区的夷陵区受偿额度最低,占比为 0.72%,该区县的碳吸收量较低,而碳排放量较高。

由表 8 可知,总体上看,重点支付区的支付额度较低,支付额度最高的区县在一般支付区-库尾区。重点支付区-库尾区的渝中区支付额度较低,占比为

2.46%,碳的生态承载系数较低,占比为 0.04%。支付额度最高的区县为一般支付区-库尾区的渝北区,支付额度最低的区县为重点支付区-库尾区的渝中区。渝中区属于城市化发展地区,经济发展较好,国土开发强度占比 75.74%,GDP 高达 1 103 亿元,但碳排放经济贡献系数却不具有优势。从经济角度来看,其能源利用效率低。但是此区域生态承载系数极低,占比仅 0.04%,从生态角度看,此区域生态承载能力极差。能源消费碳排放与生态承载能力极度不协调,资源环境压力巨大,不仅对自生生态环境,也对其其他地区的生态环境产生巨大的压力,因此渝中区需对其他地区进行碳补偿,且被认定为重点支付区。一般支付区-库尾区的沙坪坝区、九龙坡区、南岸区和渝北区支付额度较高,占比都达到了 10%以上。



表7 三峡库区各生态受偿区县碳收支和生态补偿额度及占比

生态受偿区	区县	受偿额度/万元	占比/%
重点受偿区-库首区	秭归县	$1.28 \times 10^4$	6.06
	兴山县	$1.37 \times 10^4$	6.49
	巴东县	$1.96 \times 10^4$	9.27
	武隆区	$1.46 \times 10^4$	6.89
	石柱县	$1.67 \times 10^4$	7.91
	开州区	$1.69 \times 10^4$	8.02
重点受偿区-库腹区	丰都县	$1.32 \times 10^4$	6.28
	云阳县	$2.01 \times 10^4$	9.54
	奉节县	$2.25 \times 10^4$	10.66
	巫山县	$1.60 \times 10^4$	7.56
	巫溪县	$2.62 \times 10^4$	12.41
一般受偿区-库首区	夷陵区	$1.53 \times 10^3$	0.72
一般受偿区-库腹区	万州区	$5.31 \times 10^3$	2.52
	忠县	$8.90 \times 10^3$	4.21
一般受偿区-库尾区	江津区	$3.06 \times 10^3$	1.45

表8 三峡库区各生态支付区县生态补偿额度及占比

生态支付区	区县	支付额度/万元	占比/%
重点支付区-库尾区	渝中区	$-4.18 \times 10^3$	2.46
	大渡口区	$-8.05 \times 10^3$	4.73
	江北区	$-1.57 \times 10^4$	9.23
	沙坪坝区	$-2.64 \times 10^4$	15.51
	九龙坡区	$-2.23 \times 10^4$	13.10
一般支付区-库尾区	南岸区	$-2.05 \times 10^4$	12.08
	北碚区	$-1.55 \times 10^4$	9.12
	渝北区	$-3.58 \times 10^4$	21.07
	巴南区	$-7.46 \times 10^3$	4.39
	长寿区	$-1.15 \times 10^4$	6.73
一般支付区-库腹区	涪陵区	$-2.71 \times 10^3$	1.59

## 4 讨论

目前已有学者对三峡库区生态补偿进行大量研究,周健等<sup>[36]</sup>将生态足迹法引入生态补偿标准核算中,得到2016年三峡库区生态补偿需补偿约54.92亿元。丁佳佳等<sup>[37]</sup>基于修正后的生态系统服务价值核算方法,得到2019年重庆市的生态补偿额485.04亿元并进行生态补偿优先区域划分。官冬杰等<sup>[38]</sup>基于生态系统服务价值和机会成本法,得到三峡库区重庆段人均生态补偿额度为24 771元。孙盼盼等<sup>[39]</sup>以农户受偿意愿为依据,得到每户农户受偿价值为549.7元/a。赵旭等<sup>[40]</sup>依据三峡库区屏障带居民意愿支付调查,得到三峡屏障区居民生态补偿支付意愿最高为每年392.97元/人。而本研究基于碳收支量,核算三峡库区生态补偿额度,研究结果表明2017年生态补偿额度为25.20亿元。

通过对比分析发现,虽然以上学者使用生态补偿依据在以往研究中都得到了广泛运用,但由于研究目的和研究依据的差别,所计算出的生态补偿额度差距较大。以生态系统服务价值为依据的生态补偿研究

较为注重生态系统服务供给量,计算得到的生态补偿额度较大,生态补偿分区研究一般考虑单位面积生态系统服务非市场价值和单位面积地区生产总值两个因素的影响。而意愿支付、问卷调查等方法受主观影响较大,补偿额度随主观影响存在一定差异。本研究从碳供需角度出发,测算碳收支量,量化生态补偿额度,既消除了主观因素的影响又有丰富的理论价值。以碳收支为纽带,综合考虑碳排放经济效益和碳的生态承载力,加入排放规模、生态效益、经济效益和国土空间利用程度等因素进行生态补偿分区研究,全方位多角度考虑了来自生态、经济和社会中的多种因素影响。以碳收支为依据的生态补偿研究契合当前中国生态文明建设在“十四五”时期以“减少碳排放为主”的发展道路,为三峡库区横向生态补偿提供量化依据,对于促进区域协调发展发挥重大作用。

由于本研究以中国碳核算数据库 CEADs(<https://www.ceads.net.cn/>)提供的1997—2017年中国县级尺度碳排放/碳吸收清单为区域碳排放/碳吸收量,以提高数据的准确度,但由于数据的可获取性,本研究时间年限为2010年、2012年、2014年和2017年,未来需要继续跟踪数据发布情况或研究新的碳排放/碳吸收科学核算模型,更新研究的最新时间年限。

本研究发现三峡库区总体碳汇生态功能较强,碳汇资源丰富,在今后的发展过程中,应在不牺牲碳汇资源的前提下,进行合理的产业优化发展,在经济发展过程中,将三峡库区生态保护放在更重要的位置上。

## 5 结论

(1) 2010—2017年碳排放量总量总体呈现先上升后下降的波动趋势;碳吸收总体呈现先下降后上升的波动上升趋势;碳收支总量总体结果为正值,表明碳吸收量大于碳排放量,总体呈现先下降后上升的波动上升趋势,且三峡库区整体碳收支呈增长态势。2010年、2012年、2014年、2017年的碳收支总量分别为 $9.38 \times 10^6$  t、 $1.66 \times 10^6$  t、 $1.03 \times 10^7$  t、 $1.36 \times 10^7$  t。

(2) 依据各区县的标准显性比较优势指数值,将2017年三峡库区生态补偿分区重构为8种类型,其中库区总类型主要以一般支付区和重点受偿区为主,分为一般受偿区4个、重点受偿区11个、一般支付区10个和重点支付区1个。重点支付区是经济发展水平较高的重庆市渝中区,重点获补区主要位于经济发展相较落后但碳汇资源丰富的库首地区和库腹地区。

(3) 三峡库区所需生态补偿总额呈现逐年上升趋势,2010年、2012年、2014年和2017年三峡库区生态补偿总额为20.26亿元、16.74亿元、21.17亿元、25.20亿元。其中库区外补偿总额度分别为2.88亿元、0.50亿元、3.09亿元、4.10亿元,总体呈现先下

降后上升的“V型”波动上升态势,三峡库区碳汇能力逐年提升呈现向好态势。

#### 参考文献:

- [1] 贾卓,陈兴鹏,善孝玺.草地生态系统生态补偿标准和优先度研究:以甘肃省玛曲县为例[J].资源科学,2012,34(10):1951-1958.
- [2] 郑苗壮,刘岩,彭本荣,等.海洋生态补偿的理论及内涵解析[J].生态环境学报,2012,21(11):1911-1915.
- [3] 刘菊,傅斌,张成虎,等.基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):577-585.
- [4] 赖敏,陈凤桂.基于机会成本法的海洋保护区生态保护补偿标准[J].生态学报,2020,40(6):1901-1909.
- [5] 宋蕾,李峰.矿山修复治理保证金的标准核算模型[J].中国土地科学,2011,25(1):78-83.
- [6] 王怀毅,李忠魁,俞燕琴.中国生态补偿:理论与研究述评[J].生态经济,2022,38(3):164-170.
- [7] 朱媛媛,文一惠,谢婧,等.京津冀跨区域生态补偿机制探讨[J].环境保护,2021,49(15):21-26.
- [8] 顾丹丹,彭鹏,赵椿溪,等.纳入健康损失的生态补偿额度测算:基于省域尺度[J].经济地理,2021,41(9):193-203.
- [9] 张宜红.集中连片特困地区农户对生态补偿扶贫的满意度及其影响因素研究:基于罗霄山片区3县的调研[J].生态经济,2021,37(12):128-134,169.
- [10] 杨欣,尚光引,李研,等.农户农田生态补偿方式选择偏好及其影响因素研究:基于农户分化视角的实证[J].中国农业资源与区划,2020,41(10):131-137.
- [11] 谢慧明,毛狄,沈满洪.流域上游居民接受生态补偿意愿及其偏好研究:以新安江流域为例[J].生态学报,2022,42(16):6633-6643.
- [12] 李国志,张景然.矿产资源开发生态补偿文献综述及实践进展[J].自然资源学报,2021,36(2):525-540.
- [13] 蔡志坚,华国栋.对我国发展森林碳补偿贸易市场的相关问题探讨[J].林业经济问题,2005,25(2):68-71,76.
- [14] 戴洁,黄蕾,胡静,等.基于区域一体化背景下的长三角环境经济政策优化研究[J].中国环境管理,2019,11(3):77-81.
- [15] 赵荣钦,刘英,丁明磊,等.区域二元碳收支的理论方法研究进展[J].地理科学进展,2016,35(5):554-568.
- [16] 余光辉,耿军军,周佩纯,等.基于碳平衡的区域生态补偿量化研究:以长株潭绿心昭山示范区为例[J].长江流域资源与环境,2012,21(4):454-458.
- [17] 费苓芳.旅游者碳补偿支付意愿及碳补偿模式研究:以杭州西湖风景区为例[J].江苏商论,2012(12):89-91.
- [18] 周嘉,王钰萱,刘学荣,等.基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J].地理科学,2019,39(12):1955-1961.
- [19] 曹俊文,陶强强.长江经济带农业碳补偿修正测算及分析[J].农业资源与环境学报,2021,38(4):693-698.
- [20] 陈儒,邓悦,姜志德.基于修正碳计量的区域农业碳补偿时空格局[J].经济地理,2018,38(6):168-177.
- [21] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区[J].地理学报,2022,77(3):679-696.
- [22] 赵荣钦,张帅,黄贤金,等.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区[J].地理学报,2014,69(10):1425-1437.
- [23] 张巍.陕西省重点生态功能区碳汇/碳源核算与生态补偿研究[J].生态经济,2018,34(10):191-194.
- [24] 沈田华.三峡水库重庆库区生态公益林补偿机制研究[D].重庆:西南大学,2013.
- [25] 陈儒,姜志德.中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(4):87-97.
- [26] 万伦来,林春鑫,陈艺.基于相对碳赤字的中国省际碳补偿时空格局研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2572-2583.
- [27] 茹凯丽.基于土地利用的福建省碳排放与县域碳补偿研究[D].福州:福建农林大学,2020.
- [28] 孟浩斌,周启刚,李明慧,等.三峡库区生态系统服务时空变化及权衡与协同关系研究[J].生态与农村环境学报,2021,37(5):566-575.
- [29] 黄磊,吴传清,文传浩.三峡库区环境:经济—社会复合生态系统耦合协调发展研究[J].西部论坛,2017,27(4):83-92.
- [30] 王刚,张华兵,薛菲,等.成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究[J].自然资源学报,2017,32(7):1170-1182.
- [31] 高奇,师学义,王子凌,等.深圳市碳收支与土地利用变化的协整分析[J].水土保持研究,2013,20(6):277-283.
- [32] 杨俊闯,赵超. k-means 聚类算法研究综述[J].计算机工程与应用,2019,55(23):7-14,63.
- [33] Yu R, Cai J C, Leung P S. The normalized revealed comparative advantage index[J]. The Annals of Regional Science, 2009,43(1):267-282.
- [34] Balassa B. Trade liberalization and revealed comparative advantage[J]. Manchester School, 1965,33(2):99-123.
- [35] Zhai T, Wang J, Fang Y, et al. Integrating ecosystem services supply, demand and flow in ecological compensation: a case study of carbon sequestration services[J]. Sustainability, 2021,13(4):1-19.
- [36] 周健,官冬杰,周李磊.基于生态足迹的三峡库区重庆段后续发展生态补偿标准量化研究[J].环境科学学报,2018,38(11):4539-4553.
- [37] 丁佳佳,蔡庆,丁磊,等.基于生态价值核算的重庆市区域生态补偿策略研究[J].环境生态学,2022,4(2/3):23-30.
- [38] 官冬杰,龚巧灵,刘慧敏,等.重庆三峡库区生态补偿标准差别化模型构建及应用研究[J].环境科学学报,2016,36(11):4218-4227.
- [39] 孙盼盼,尹珂.基于农户意愿的三峡库区消落带弃耕经济补贴标准估算及影响因素分析[J].中国农学通报,2014,30(29):115-119.
- [40] 赵旭,池辰,何伟军.基于选择试验法的三峡库区居民生态补偿支付意愿研究[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):101-112.