

# 三峡库区1980—2021年土地利用碳排放格局及碳补偿

鄂施璇, 李琴, 张露洋

(重庆工商大学公共管理学院, 重庆 400067)

**摘要:** [目的] 揭示三峡库区土地利用碳排放格局并测算碳补偿价值, 为引导流域低碳发展, 健全流域碳补偿机制提供参考。[方法] 运用碳排放系数, 单位GDP能耗及经济贡献系数等方法, 测算三峡库区1980—2021年土地利用碳排放/碳吸收, 并以净碳排放为基准值, 对碳排放阈值及碳排放强度进行修正, 测算土地利用碳补偿价值。[结果] ①三峡库区1980—2021年土地利用碳排放及碳吸收整体呈上升趋势。耕地和林地是土地利用碳吸收主要载体, 城乡工矿居民用地是土地利用碳排放主要来源; ②碳吸收格局整体呈现西低东高的分布特征。1980—2021年碳吸收处于中高水平和高水平类型的区县明显增加, 且大多位于东部和北部, 低水平类型区县有所减少; ③碳排放格局在1980—1990年均处于低水平及中低水平类型; 2000—2021年库区整体碳排放量增加, 其中西部重庆市主城区、中部万州、开州区、云阳县以及东部夷陵区处于中高水平和高水平类型, 武隆区的碳排放处于中等水平类型; 巫溪、巫山、巴东、兴山、秭归县等区县的碳排放处于低水平和中低水平类型; ④研究区9个区县为生态盈余区, 应获碳补偿资金最高的是奉节县  $6.87 \times 10^5$  元, 17个区县为生态赤字区, 支付碳补偿金额较高的是渝北区  $1.53 \times 10^7$  元。[结论] 应从以下方面引导流域低碳发展: 推动区域合作治理碳排放, 建立横向碳补偿机制; 控制建设用地规模, 优化土地利用配置; 落实绿色发展理念, 增强碳汇能力; 优化能源供给结构, 提高能源利用率等。

**关键词:** 土地利用; 碳排放; 碳补偿; 三峡库区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0300-07

中图分类号: F301.2, X24

**文献参数:** 鄂施璇, 李琴, 张露洋. 三峡库区1980—2021年土地利用碳排放格局及碳补偿[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 300-306. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230220.007; E Shixuan, Li Qin, Zhang Luyang. Land use carbon emission pattern and carbon compensation in Three Gorges reservoir area during 1980—2021 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 300-306.

## Land Use Carbon Emission Pattern and Carbon Compensation in Three Gorges Reservoir Area During 1980—2021

E Shixuan, Li Qin, Zhang Luyang

(Institute of Public Administration, Chongqing Technology and Business

University, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** [Objective] The land use carbon emission pattern was analyzed and the value of carbon compensation was estimated in the Three Gorges reservoir area in order to provide a reference for guiding low-carbon development and improving the carbon compensation mechanism in the basin. [Methods] We used the carbon emission factor, energy consumption per unit GDP, and economic contribution coefficient to calculate the carbon compensation value of land use. The net carbon emission was taken as the benchmark value. The carbon emission threshold and carbon emission intensity were revised. [Results] ① Carbon emission and carbon absorption in the Three Gorges reservoir area showed an overall upward trend from 1980 to 2021. Cultivated land and forest land were the main sources of carbon sequestration from regional land use, and urban and rural industrial, mining, and residential land were the main sources of carbon emissions from regional land use; ② The carbon absorption pattern was low in the west and high in the east. From 1980 to 2021, the districts and counties with middle-high level and high level carbon absorption increased significantly, and

收稿日期: 2022-08-21

修回日期: 2022-10-15

资助项目: 国家社会科学基金青年项目“三权分置下宅基地发展权转移增值收益共享研究”(21CJY002)

第一作者: 鄂施璇(1987—), 女(满族), 黑龙江省鸡西市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地利用与管理。Email: eshixuan@126.com。

most of them were located in the east and north of the study area, while the counties with low level carbon absorption decreased; ③ In terms of carbon emission patterns, land use carbon emissions in the Three Gorges Reservoir area from 1980 to 1990 were at a low level or medium-low level. The overall carbon emissions of the reservoir area increased from 2000 to 2021, with the main urban area of Chongqing City in the west; Wanzhou, Kaizhou District, and Yunyang County in the middle; and Yiling District in the east at medium and high levels. Wulong County was at a medium level. The carbon emissions of Badong, Wushan, Wuxi, Zigui County, and other surrounding areas were at low and medium-low levels; ④ In the study area, nine districts and counties were ecological surplus areas and should obtain carbon offset funds. Fengjie County should receive the highest carbon compensation fund of  $6.87 \times 10^5$  yuan. Seventeen districts and counties were ecological deficit areas. Yubei District paid the highest amount of carbon offsets of  $1.53 \times 10^7$  yuan. [Conclusion] In the ecological deficit areas, regional cooperation should be promoted to control carbon emissions, and a horizontal carbon compensation mechanism should be established. The scale of construction land should be controlled, and land use allocation should be optimized. The concept of green development should be implemented to enhance carbon sequestration capacity. Energy supply structure should be optimized and energy utilization rate should be increased to guide low-carbon development of the watershed.

**Keywords:** landuse; carbon emissions; carbon compensation; Three Gorges reservoir area

碳排放作为衡量温室气体排放的主要指标,对其进行研究有利于解决全球变暖问题<sup>[1]</sup>。2020年9月22日,中国在第七十五届联合国大会提出“中国要在2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”<sup>[2]</sup>。推动碳中和、碳减排等战略目标的实施,是促进中国绿色低碳可持续发展的重要举措<sup>[3]</sup>。

土地利用变化所引起的碳排放量仅次于化石燃料使用所引起的碳排放量,是人类活动引起碳排放总量的1/3,其对碳排放的影响已经引起广泛关注<sup>[4]</sup>。三峡库区是以丘陵山地为主的独特流域地理单元,生态环境敏感,同时由于三峡移民工程,使得这一典型移民区和生态敏感区的土地利用发生了较大变化<sup>[5]</sup>。因此,探索库区土地利用碳排放格局及碳补偿,是促进库区低碳经济发展的关键突破口。

国内外关于土地利用碳排核算<sup>[6-7]</sup>、影响因素<sup>[8-9]</sup>、碳排机理与碳排放效应<sup>[10-11]</sup>、土地利用碳排放与经济发展关系等<sup>[12]</sup>方面的相关研究不断完善,少部分学者开展了碳补偿及分区研究<sup>[13]</sup>,但针对长时间序列,不同区域土地利用碳排放格局与经济发展相结合,进行碳补偿分区的研究仍需进一步展开。研究方法上采用土地利用碳排放及碳足迹法、空间计量模型、RS与GIS技术等方法<sup>[1,7,9]</sup>。从研究区域来看,已有研究涵盖全国及湖南省、江苏省、广东省及福建省等各省市层面<sup>[3-4,8,13]</sup>,但基于流域视角,针对三峡库区这类受人类活动剧烈扰动的生态敏感区的土地利用碳排放格局及碳补偿关注较少。

鉴于此,本文以三峡库区26个区县为研究单元,运用碳排放系数、GDP能源和经济贡献系数等方法,测算三峡库区1980—2021年土地利用碳排放/碳吸

收,揭示40 a多来研究区土地利用碳排放时空格局,并以净碳排放量为基准值,通过对各区县碳排放阈值及碳排放强度二次修正,探讨三峡库区土地利用碳补偿价值,旨在为国家实现“碳达峰”“碳中和”战略目标,引导流域低碳发展,健全流域碳补偿机制提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

三峡库区位于中国西南部,地处东经 $106^{\circ}20'$ — $110^{\circ}30'$ ,北纬 $28^{\circ}32'$ — $31^{\circ}50'$ 的长江上游下段,涉及范围包括湖北省4个县(区)和重庆市22个县(区),是一个受回水及三峡工程影响的独特地理单元。2021年研究区土地总面积 $5.77 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ ,1980—2021年土地利用结构中耕地和城乡工矿居民用地变化较明显,耕地面积从 $2.22 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ 减少到 $2.11 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ ,减少了 $1.16 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ ;城乡工矿居民用地面积由 $2.66 \times 10^4$   $\text{hm}^2$ 增加到 $1.60 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ ,增加了 $1.33 \times 10^5$   $\text{hm}^2$ 。三峡库区是人类活动剧烈扰动的生态敏感脆弱区,其土地利用碳排放与经济发展具有一定的典型性。

### 1.2 数据来源

本研究采用的数据主要包括三峡库区26个区县的土地利用数据以及GDP、能源消耗、农业生产活动等区域社会经济数据。三峡库区土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心的全国土地利用数据库(<http://www.resdc.cn>)。区域经济社会数据源于《湖北统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《重庆统计年鉴》以及区县的国民经济和社会发展统计公报。

## 2 研究方法

本研究将土地利用类型划分为耕地、林地、水域、草地、城乡工矿居民用地及未利用地。因水域和未利用地固碳能力不强<sup>[1]</sup>,耕地、林地、草地和城乡工矿居民用地是主要研究地类。耕地是碳汇/碳源,耕地、林地和草地是碳吸收地类,城乡工矿居民用地和耕地是碳排放地类。

### 2.1 碳吸收测算

2.1.1 林地、草地碳吸收 采用碳吸收系数法,林地、草地碳吸收测算方法如下:

$$C_i = S_i \times \alpha_i \quad (1)$$

式中: $C_i$  表示第  $i$  种地类碳吸收量; $\alpha_i$  表示第  $i$  种地类的碳吸收系数; $S_i$  表示第  $i$  种地类的面积。参考已有研究成果<sup>[14]</sup>,草地和林地碳吸收系数分别为 0.910, 3.180 t/hm<sup>2</sup>。

2.1.2 耕地碳吸收 借鉴已有研究成果<sup>[15]</sup>,可根据农作物生育期光合作用的碳吸收替代耕地碳吸收,计算方法如下:

$$C = \sum_{j=1}^n C_j \times E_i = \sum_{i=1}^n \delta_i \times D_i \times (1 - \gamma_i) / H_i \quad (2)$$

式中: $C$  为生育期作物光合作用的碳吸收量; $E_i$  为第  $i$  种作物生物产量; $C_j$  表示第  $i$  种农作物的碳吸收量; $H_i$  为第  $i$  种作物经济系数; $D_i$  为第  $i$  种作物的经济产量,即经济产量与生物产量的比; $\delta_i$  表示第  $i$  种农作物通过光合作用合成单位有机质的碳吸收率; $\gamma_i$  表示第  $i$  种农作物的含水率(表 1)。

表 1 农作物碳吸收率、含水率及经济系数

Table 1 Carbon absorption rate, water content and economic coefficient of crops

农作物	碳吸收率( $\delta_i$ )	含水率( $\gamma_i$ )	经济系数( $H_i$ )
蔬菜	0.45	0.90	0.60
稻谷	0.42	0.12	0.45
烟叶	0.45	0.85	0.55
瓜果	0.45	0.90	0.70
花生	0.45	0.10	0.43
油菜籽	0.45	0.10	0.43
小麦	0.49	0.12	0.40
玉米	0.47	0.13	0.40
薯类	0.42	0.70	0.70

注:本表数据参考已有研究整理而得<sup>[16]</sup>。

### 2.2 碳排放测算

2.2.1 耕地碳排放 受人类活动干扰,耕地作为碳源,在测算碳排放时主要考虑化肥施用、耕作面积、农药使用、灌溉面积、农业机械总动力、农膜使用量等因素<sup>[17]</sup>。公式如下:

$$I = \sum_{i=1}^n K_i \times \sigma_i \quad (3)$$

式中: $I$  为耕地碳排放; $K_i$  表示第  $i$  种碳源因子使用量; $\sigma_i$  表示第  $i$  种碳源因子的转换系数。耕作面积、农业机械总动力、灌溉面积、农膜的转换系数分别为 3.13 kg/hm<sup>2</sup>, 0.18 kg/kW, 266.48 kg/hm<sup>2</sup>, 5.18 kg/kg, 农药与化肥的转换系数分别为 0.90 kg/kg 与 4.93 kg/kg<sup>[18]</sup>。

2.2.2 城乡工矿居民用地碳排放 依据陈芷君等研究方法<sup>[19]</sup>,利用区县生产总值(GDP)和单位 GDP 能耗分步计算,得到各区县城乡工矿居民用地碳排放量。首先,运用化石燃料消耗量计算湖北省、重庆市城乡工矿居民用地碳排放量,公式如下:

$$I_i^1 = \sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n W_i \times J_i \times K_i \times \theta \quad (4)$$

式中: $I_i^1$  为城乡工矿居民用地碳排放量; $K_i$  表示第  $i$  种能源碳排放系数; $W_i$  为第  $i$  种能源消耗量; $\theta$  为表示第  $i$  种能源碳氧化率; $e_i$  为第  $i$  种能源燃烧排放的二氧化碳量; $J_i$  为第  $i$  种能源平均地位发热量。测算城乡工矿居民用地碳排放选取的能源主要有 9 种,分别为煤炭、原油、焦炭、汽油、柴油、煤油、天然气和燃料油。参考 IPCC《国家温室气体排放清单指南》,以上 8 种能源的碳排放系数分别为 26.8, 25.8, 20.0, 18.9, 19.6, 20.2, 21.1 及 15.3;平均地位发热量分别为  $2.09 \times 10^{10}$ ,  $2.84 \times 10^{10}$ ,  $4.18 \times 10^{10}$ ,  $4.31 \times 10^{10}$ ,  $4.31 \times 10^{10}$ ,  $4.27 \times 10^{10}$ ,  $4.18 \times 10^{10}$  J/t 及 35 584.50 kJ/m<sup>3</sup>;碳氧化率分别为 0.94, 0.93, 0.98, 0.98, 0.98, 0.98, 0.98, 0.99<sup>[19]</sup>。其次,计算各区县城乡工矿居民用地碳排放量,公式如下:

$$I_c = I_i^1 \times e_c / \sum_{c=1}^n e_c = I_i^1 \times \text{GDP}_c \times D_c / \sum_{c=1}^n (\text{GDP}_c \times D_c) \quad (5)$$

式中: $I_c$  表示第  $c$  区县城乡工矿居民用地碳排放量; $e_c$  表示第  $c$  区县能源消耗量; $\text{GDP}_c$  表示第  $c$  区县地区生产总值; $D_c$  表示第  $c$  区县单位 GDP 能耗。

### 2.3 土地利用碳补偿价值测算

2.3.1 碳补偿基准值的确定 依据碳排放量与碳吸收量的差值(净碳排放量)确定碳补偿基准值<sup>[20]</sup>。如果差值为负,则该区县的固碳能力大于碳排放能力,即能完全吸收该区县的碳排放量,也能吸收相邻区县的碳排量,因此,应给予一定资金补偿;相反支付资金进行补偿。公式如下:

$$L_i = M_i - N_i \quad (6)$$

式中: $L_i$  为第  $i$  区县的净碳排放量,即碳补偿基准值; $M_i$  为第  $i$  区县的碳排放量; $N_i$  为第  $i$  区县的碳吸收量,即  $i$  区县的生态系统固碳能力。如果  $L_i > 0$

时,则该县应该支付资金进行补偿;如  $L_i < 0$  时,则该县得到资金补偿。

公式(6)得到的碳补偿基准值忽略了各区县经济发展水平、区位等存在的差异,因此,本文借助碳排放阈值  $F_i$  来减小误差,获得更加真实的碳补偿基准值<sup>[21]</sup>,修正公式如下:

$$F_i = \text{ECC} \times D = \frac{R_i}{R} / \frac{M_i}{M} \times D \quad (7)$$

式中: $F_i$  表示第  $i$  区县的碳排放阈值;ECC 碳排放的经济贡献系数<sup>[1]</sup>;  $D$  表示 1980—2021 年三峡库区各个区县排放量的平均值;  $R_i$  表示第  $i$  区县的国内生产总值(GDP);  $R$  表示三峡库区的国内生产总值(GDP);  $M$  表示三峡库区的总碳排放量。

三峡库区 1980—2021 年土地利用类型数据时间跨度较大,各个区县碳排放强度存在时空差异。因此需要再次修正,修正公式如下<sup>[22]</sup>:

$$M_i^1 = M_i \times \left(1 + \frac{Q_{cif} - Q_c}{Q_{if} - Q_1}\right) \times \frac{Q_{cif}}{Q} \quad (8)$$

式中: $M_i^1$  表示第  $i$  区县修正后的碳排放量;  $Q_{cif}$  表示 2021 年第  $i$  区县的碳排放强度;  $Q_{if}$  表示 1980 年第  $i$  区县的碳排放强度;  $Q_c$  表示 2021 年三峡库区的总排放强度;  $Q_1$  表示 1980 年三峡库区的总排放强度;  $Q$  表示 2021 年三峡库区的平均碳排放强度。通过上述两次修正,得到更加合理真实的碳补偿基准值计算公式,如下:

$$L_i^1 = M_i^1 - N_i - F_i \quad (9)$$

修正后,碳补偿基准值更接近真实情况,当  $L_i^1 > 0$  时,则该县应该支付资金进行补偿;  $L_i^1 < 0$  时,则该县得到资金补偿。

2.3.2 碳补偿基准值修正后的碳补偿价值计算 根据赵荣钦等<sup>[21]</sup>研究方法,可得到碳补偿价值计算方法,如下:

$$P_i = |L_i^1| \times \varphi \times \omega = |M_i^1 - N_i - F_i| \times \varphi \times \omega \quad (10)$$

式中: $P_i$  表示第  $i$  区县得到或者支付的碳补偿资金;  $\varphi$  表示单位碳的价格;  $\omega_i$  表示第  $i$  区县的碳补偿系数。

$$\varphi = \frac{(S_{\max} + S_{\min})}{2} \times \frac{G_1}{G} \quad (11)$$

式中: $S_{\max}$  表示国内碳汇价格的最大值;  $S_{\min}$  表示国内碳汇价格的最小值;  $G_1$  表示三峡库区 2021 年人均 GDP;  $G$  表示全国 2021 年人均 GDP。

由于各区县经济发展水平不同,各区县碳补偿的能力也不同。根据各区县经济发展水平确定碳补偿系数,更能够保证补偿价值真实可行。其计算方式如下:

$$\omega_i = \frac{A_i}{1 + a e^{-bt}} \quad (12)$$

式中: $A_i$  表示第  $i$  区县的碳补偿能力,即第  $i$  区县 GDP 与三峡库区 GDP 之比;  $t$  表示 2021 年三峡库区的恩格尔系数;  $a, b$  表示常数,本次研究常数取 1。

## 3 结果与分析

### 3.1 三峡库区土地利用碳排放特征分析

三峡库区 1980—2021 年碳排放总量整体上不断增加。碳吸收量整体呈上升趋势,其中 2000—2021 年上升趋于平缓。净碳排放量在 1980,1990,2000 年分别为  $-8.99 \times 10^6$ ,  $-8.47 \times 10^6$ ,  $-2.13 \times 10^6$  t,均为负,即三峡库区碳吸收量大于碳排放量,生态系统较好,可以完全吸收区域内的碳排放量,还可额外吸收相邻区域的碳排放量;2010 年和 2021 年净碳排放量为正,分别为  $1.38 \times 10^7$ ,  $1.61 \times 10^7$  t,这一时期三峡库区碳吸收量小于碳排放量,不能完全吸收研究区的土地利用碳排放量。

从碳吸收来看,碳吸收量从 1980 年的  $1.12 \times 10^7$  t 增加到 2021 年的  $1.64 \times 10^7$  t,增长率达到 46.43%。草地碳吸收量在 1980—2000 年期间逐年增加,在 2000—2021 年期间明显减少,其对碳吸收量的贡献率都相对较少,均在 10% 以下;耕地碳吸收量在 1980—2021 年逐渐增加,其对碳吸收量的贡献率稳定在 17.05%~42.98% 间;林地碳吸收量在 1980—2021 年呈波动上升趋势,其对碳吸收量的贡献率在 53.57%~76.98% 间。林地对碳吸收量的贡献率最多,其次是耕地,最后是草地,可见,耕地和林地是三峡库区土地利用碳吸收的主要载体。40 a 来研究区林地面积变化相对较小,而随着农业科技的发展,农作物产量不断增加,农作物固碳能力明显提高。

从碳排放来看,三峡库区碳排放量从 1980 年  $2.16 \times 10^6$  t 增加到 2021 年  $3.24 \times 10^7$  t。将 1980 年碳排放量作为基准,1990,2000,2010,2021 年的碳排放量分别是 1980 年的 1.72,5.25,13.41,14.81 倍。其中耕地碳排放量在 1980—2021 年缓慢增加,其占研究区碳排放总量由 1980 年的 11.33% 下降到 2021 年的 1.83%;城乡工矿居民用地碳排放量从 1980 年  $1.92 \times 10^6$  t 增加到 2021 年  $3.18 \times 10^7$  t,以 1980 年为定期,40 a 来研究区城乡工矿居民用地碳排放量定期增长率达到了 1 556.25%,碳排放总量占比由 1980 年的 88.68% 增长到 2021 年的 98.17%。可见,三峡库区土地利用碳排放的主要来源是城乡工矿居民用地。



### 3.2 三峡库区土地利用碳吸收格局

借鉴已有研究方法<sup>[23]</sup>,将研究区土地利用碳吸收分 5 个类型,低水平类型( $0 \sim 2.00 \times 10^5$  t),中低水平类型( $2.00 \times 10^5 \sim 4.00 \times 10^5$  t),中等水平类型( $4.00 \times 10^5 \sim 6.00 \times 10^5$  t),中高水平类型( $6.00 \times 10^5 \sim 8.00 \times 10^5$  t)和高水平类型( $8.00 \times 10^5 \sim 10.00 \times 10^5$  t)。采用 ArcGIS 10.5 得到三峡库区 1980—2021

年土地利用碳吸收空间分布(图 1)。从空间格局可见,三峡库区整体呈现西低东高的分布特征,分布差异明显。1980—2021 年大部分区县土地利用碳吸收逐年增加,碳吸收处于中高水平和高水平类型的区县明显增加,且大多数位于东部和北部,低水平类型区县有所减少,位于重庆市主城区的渝中、江北、北碚、沙坪坝、南岸、九龙坡及大渡口区均处于低水平类型。

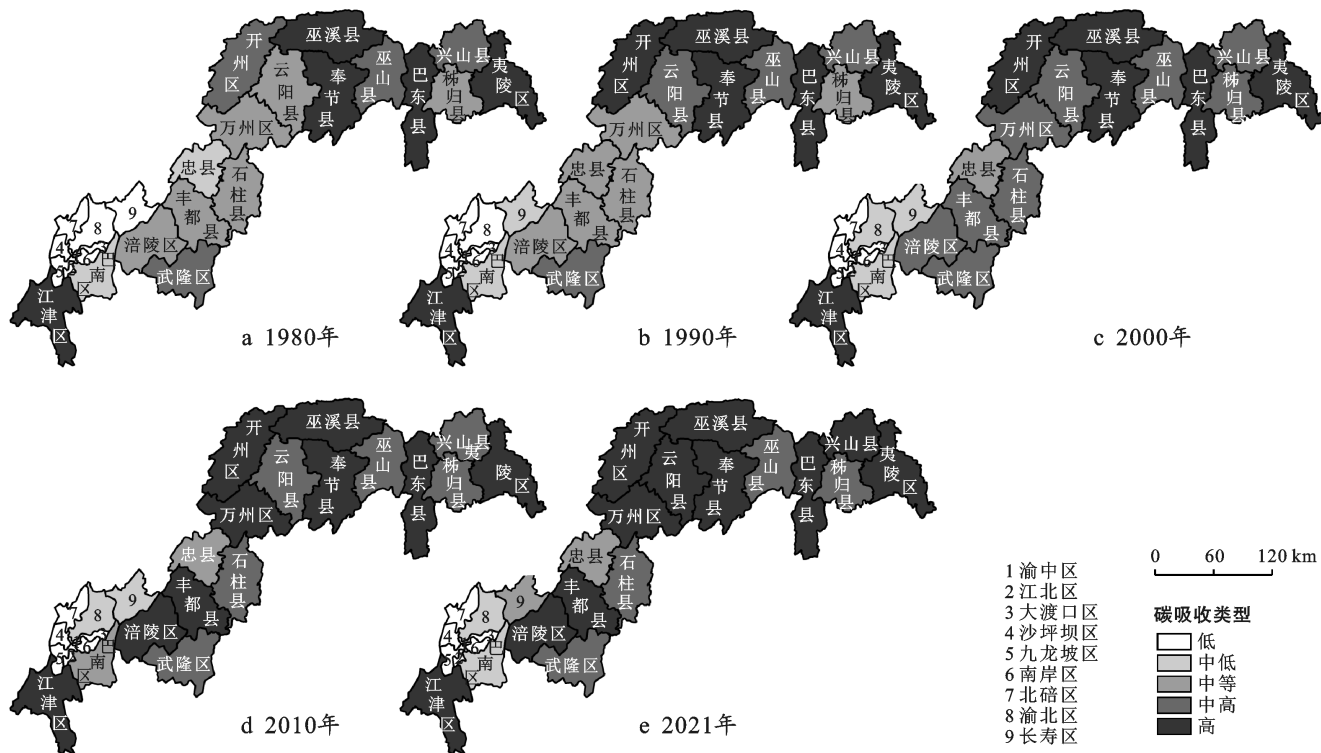


图 1 1980—2021 年三峡库区土地利用碳吸收格局

Fig.1 Carbon absorption pattern of land use in the Three Gorges reservoir area from 1980 to 2021

### 3.3 三峡库区土地利用碳排放格局

借鉴已有研究方法<sup>[23]</sup>,将研究区土地利用碳排放划分为高水平、中高水平、中低水平、中等水平和低水平 5 种类型。从碳排放空间差异上看(图 2),1980—1990 年三峡库区土地利用碳排放均处于低水平及中低水平类型,这一时期作为土地利用碳排主要来源的城乡工矿居民用地增长较慢,生态环境较好;2000—2021 年库区整体碳排放量增加,其中西部重庆市主城区、中部万州、开州区、云阳县以及东部湖北夷陵区的土地利用碳排放持续升高,处于中高水平和高水平类型;武隆区的碳排放处于中等水平类型;巫溪、巫山、巴东、兴山、秭归县等区县的碳排放处于低水平和中低水平类型。

### 3.4 三峡库区土地利用碳补偿价值分析

依据公式(6)–(12),三峡库区 2021 年作为基准年,得到 2021 年三峡库区土地利用碳补偿金额(表 2)。

表 2 2021 年三峡库区各区县土地利用碳补偿价值

Table 2 Carbon compensation value of land use in the Three Gorges reservoir area from 2021

区县	补偿金额/ $10^4$ 元	区县	补偿金额/ $10^4$ 元
夷陵区	65.19	长寿区	411.85
兴山县	-12.54	涪陵区	292.88
秭归县	-12.83	武隆区	-10.95
巴东县	-18.14	渝中区	499.22
巫山县	-14.41	江北区	1 233.36
巫溪县	-18.92	渝北区	1 527.71
奉节县	-68.69	巴南区	184.37
云阳县	62.95	北碚区	112.79
开州区	9.131	沙坪坝区	213.031
万州区	27.94	南岸区	315.86
忠县	41.01	九龙坡区	973.81
石柱县	-15.56	大渡口区	11.54
丰都县	-2.86	江津区	315.66

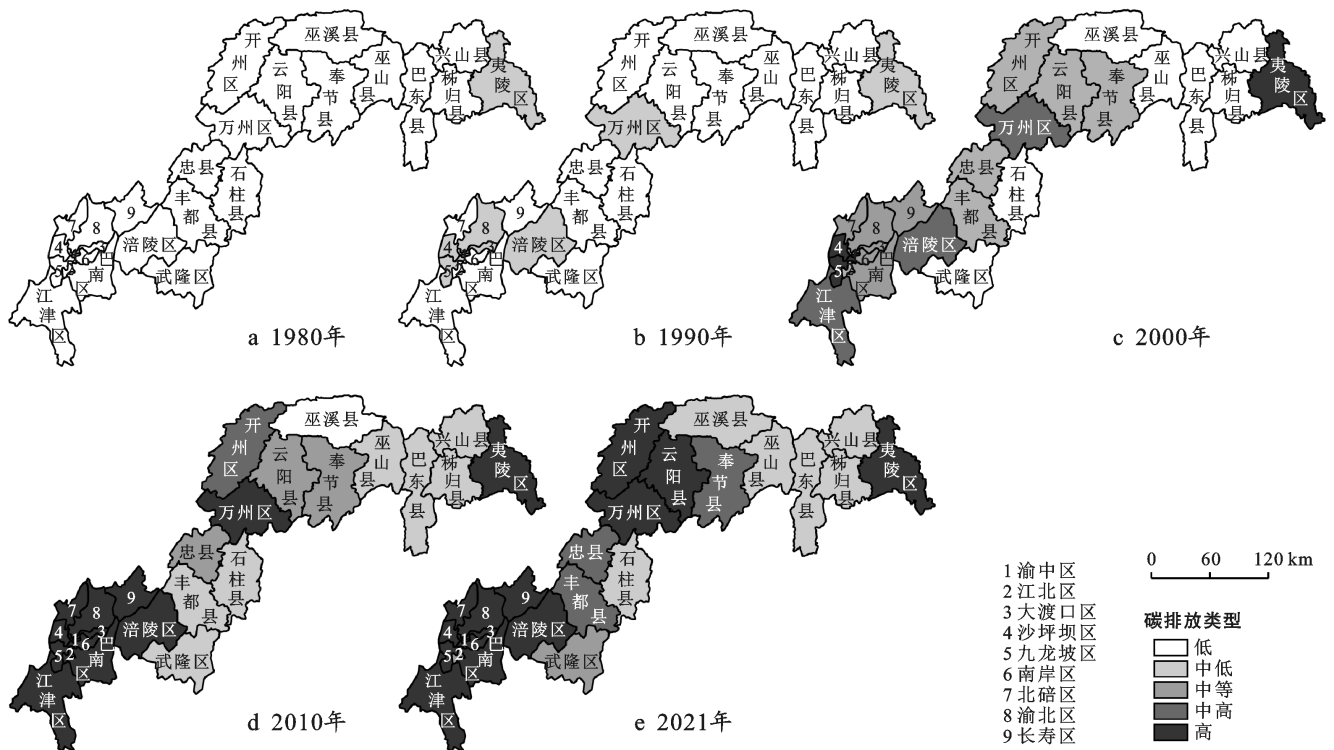


图 2 1980—2021 年三峡库区土地利用碳排放格局

Fig.2 Carbon emission pattern of land use in the Three Gorges reservoir area from 1980 to 2021

由表 2 可知,研究区 9 个区县为生态盈余区域,应获取碳补偿资金,补偿资金由多到少依次为奉节、巫溪、巴东、石柱、巫山、秭归、兴山县、武隆区以及丰都县。其余 17 个区县为生态赤字区,碳补偿支付资金较高的区县依次为渝北区、江北区、九龙坡区、渝中区以及长寿区,补偿金额分别为  $1.53 \times 10^7$ ,  $1.23 \times 10^7$ ,  $9.74 \times 10^6$ ,  $4.99 \times 10^6$ ,  $4.12 \times 10^6$  元;生态赤字碳补偿资金较少的区县分别为万州区、大渡口区以及开州区,补偿资金分别为  $2.79 \times 10^5$ ,  $1.15 \times 10^5$ ,  $9.13 \times 10^4$  元。研究成果与已有研究成果量级相同。可以看出,各地区土地利用碳补偿价值与其净碳排放量密切相关,生态赤字区碳补偿金额较高的区县其人均 GDP 及第二产业占比较高。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文运用碳排放系数、GDP 能源、经济贡献系数等方法,测算三峡库区 26 个区县 1980—2021 年土地利用碳排放/碳吸收,分析 40 多年来库区的土地利用碳排放时空格局,并以净碳排放量为基准值,对区县碳排放阈值及碳排放强度二次修正,测算库区土地利用碳补偿价值。弥补了已有研究从长时间序列,基于流域视角,探讨三峡库区这类受人类活动剧烈扰动的生态敏感区的土地利用碳排放格局及碳补偿关注较

少的不足。预测未来一段时期内三峡库区土地利用碳排放格局及碳补偿将是下一步的研究重点。

### 4.2 结论

(1) 三峡库区 1980—2021 年碳排放及碳吸收整体呈上升趋势。净碳排放量在 1980—2000 年碳吸收大于碳排放;2010—2021 年三峡库区碳吸收小于碳排放。耕地和林地是土地利用碳吸收的主要载体,城乡工矿居民用地是土地利用碳排放的主要来源。

(2) 碳吸收格局上,整体呈现西低东高的分布特征。1980—2021 年碳吸收处于中高水平和高水平类型的区县明显增加,且大多位于东部和北部,低水平类型区县有所减少,位于重庆市主城区的渝中、江北、北碚、沙坪坝、南岸、九龙坡及大渡口区均处于低水平类型。

(3) 碳排放格局上,1980—1990 年三峡库区土地利用碳排放均处于低水平及中低水平类型;2000—2021 年库区整体碳排放量增加,其中西部重庆市主城区、中部万州、开州区、云阳县以及东部湖北夷陵区的土地利用碳排放持续升高,处于中高水平和高水平类型;武隆区的碳排放处于中等水平类型;巫溪、巫山、巴东、兴山、秭归县等区县的碳排放处于低水平和中低水平类型。

(4) 碳补偿价值上,研究区 9 个区县为生态盈余区域,应获取碳补偿资金,补偿资金由多到少依次为

奉节、巫溪、巴东、石柱、巫山、秭归、兴山县、武隆区以及丰都县。除上述区县外,其余 17 个区县为生态赤字区。生态赤字区碳补偿金额较高的区县其人均 GDP 及第二产业占比较高。

根据以上结论提出以下建议:①推动区域合作治理碳排放,建立横向碳补偿机制。借助政府碳补偿约束手段,建立生态盈余区域与赤字区的碳补偿机制,实现三峡库区流域间合用治理土地利用碳排放,实施产业升级与经济高质量转型发展;②控制建设用地规模,优化土地利用配置。推进土地集约利用,提高土地利用效率,对于城乡工矿居民用地,合理控制开发规模与边界,实施建设用地减量化,实施土地资源优化配置;③落实绿色发展理念,大力增强碳汇能力。实现土地利用绿色、低碳转型,加强耕地、林地与草地的保护,对于研究区生态赤字区,通过植树造林,提高森林覆盖率,限制森林采伐,增加碳汇量;④优化能源供给结构,提高能源利用率。提高高能耗、高污染行业的准入门槛,优先使用低碳新能源、减少使用煤炭等化石燃料的消耗,推动技术革新,走好生态产业化及产生生态化路线。

#### [参 考 文 献]

- [1] 周嘉,王钰莹,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.
- [2] 韦玉琼,龙飞,乡村振兴背景下农业农村碳排放变动及减排策略[J].农业经济问题,2022(9):62-73.
- [3] 杨静媛,张明,多玲花,等.江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J].环境科学研究,2022,35(10):2312-2321.
- [4] 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.
- [5] 王兆林,鄂施璇,陈军利.近 40 年来三峡库区农村人口与居民点用地演变脱钩及驱动效应分析[J].农业工程学报,2022,38(13):273-284.
- [6] 张玥,代亚强,陈媛媛,等.土地利用隐性转型与土地利用碳排放空间关联研究[J].中国土地科学,2022,36(6):100-112.
- [7] 易丹,欧名豪,郭杰,等.土地利用碳排放及低碳优化研究进展与趋势展望[J].资源科学,2022,44(8):1545-1559.
- [8] 张中秋,劳燕玲,赵宁俊,等.广东省土地利用—碳减排—经济增长的脱钩关系[J].水土保持通报,2022,42(1):250-258.
- [9] 禹康康,王延华,孙恬,等.太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J].土壤,2022,54(2):406-414.
- [10] Yang Guangchun, Shang Peipei, He Lichun, et al. Interregional carbon compensation cost forecast and priority index calculation based on the theoretical carbon deficit: China as a case [J]. Science of the Total Environment, 2019,654:786-800.
- [11] Cui Xiaolin, Wei Xiaoqing, Liu Wei, et al. Spatial and temporal analysis of carbon sources and sinks through land use/cover changes in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration region [J]. Physics and Chemistry of the Earth (A/B/C), 2019,110:61-70.
- [12] 孙赫,梁红梅,常学礼,等.中国土地利用碳排放及其空间关联[J].经济地理,2015,35(3):154-162.
- [13] 周萍,陈松林,李晶,等.福建省土地利用变化碳排放时空差异与碳补偿[J].水土保持通报,2022,42(3):356-365.
- [14] 张杰,陈海,刘迪,等.基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J].西北大学学报(自然科学版),2022,52(1):21-31.
- [15] 杨滨键,田景仁,孙红雨.农业生产碳足迹影响因素研究:基于 SVAR 模型[J].生态经济,2019,35(8):120-127.
- [16] 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.
- [17] 伍国勇,陈莹,孙小钧.中国种植业碳补偿率区域差异、动态演进及收敛性分析[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(10):1774-1785.
- [18] 李波,张俊飏,李海鹏.中国农业碳排放时空特征及影响因素分解[J].中国人口·资源与环境,2011,21(8):80-86.
- [19] 陈芷君,刘毅华,林华荣.广东省土地利用碳排放与经济增长之间的脱钩分析[J].生态经济,2018,34(5):26-32.
- [20] 周勇,赵伟.西安市土地利用结构碳排放核算及低碳优化研究[J].生态经济,2018,34(5):21-25.
- [21] 赵荣钦,刘英,马林,等.基于碳收支核算的河南省县域空间横向碳补偿研究[J].自然资源学报,2016,31(10):1675-1687.
- [22] 李璐,董捷,徐磊,等.功能区土地利用碳收支空间分异及碳补偿分区:以武汉城市圈为例[J].自然资源学报,2019,34(5):1003-1015.
- [23] 王政强,覃盟琳,唐世斌,等.北部湾城市群土地利用碳收支时空分异及碳补偿分区[J].水土保持通报,2022,42(5):348-359.