

引用格式: 黄怀玉, 龚直文. 格网尺度的重庆市碳补偿研究: 基于土地利用视角[J]. 资源科学, 2023, 45(12): 2358-2371. [Huang H Y, Gong Z W. Grid scale measurement of carbon compensation in Chongqing City: Based on the perspective of land use[J]. Resources Science, 2023, 45(12): 2358-2371.] DOI: 10.18402/resci.2023.12.05

# 格网尺度的重庆市碳补偿研究

## ——基于土地利用视角

黄怀玉, 龚直文

(1. 西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源经济与环境管理研究中心, 杨凌 712100)

**摘要:**【目的】完善碳补偿机制是应对气候变化、助力碳中和目标实现的重要行动。基于土地利用变化, 从格网尺度建立行政单元内部间的碳补偿机制, 可为区域低碳协调发展提供科学参考。【方法】本文基于5 km×5 km的格网单元, 采用土地覆盖及社会经济数据对2000—2020年重庆市碳源/汇进行核算, 探究碳源/汇的时空演变规律, 以修正后的净碳排放量作为基准值对碳补偿价值进行研究, 最后探讨重庆市实现碳补偿的路径。【结果】①研究期间, 重庆市碳排放量呈现持续增加的态势, 总计增长3729.07万t; 碳吸收量缓慢增加, 总计增长5.93万t。②碳排放呈现以中心城区为高值中心, 向两翼逐渐降低的“核心—外围”空间结构, 碳排放减少区域以长寿区为主, 增加区域则主要在渝北、九龙坡、沙坪坝和巴南西北部; 碳吸收总体呈现出“两翼高、中部低”的分布特征, 奉节、云阳和万州等区县一带为碳吸收增长区, 渝东北以及中心城区的部分地区为碳吸收减少区。③碳补偿支付区集中在中心城区、梁平中部、开州东南部和丰都西南部等地, 总计支付金额为233702.58万元; 获补区主要分布在两翼地区和主城都市区内少量区域, 总计获补金额为140638.72万元。【结论】重庆市碳排放远大于碳吸收, 格网化碳补偿价值存在空间异质性。建议根据实际情况制定差异化的资金补偿政策, 保障碳获补地区的经济利益, 强调碳支付区的生态保护责任, 多途径推进跨区县的横向生态补偿, 协同促进生态保护与经济发展的双赢。

**关键词:** 土地利用; 碳补偿; 格网尺度; 时空演变; 重庆

DOI: 10.18402/resci.2023.12.05

## 1 引言

为充分践行“两山”理念、推动生态优势持续转化为经济优势, 近年来党中央和社会各界高度重视生态产品价值实现工作<sup>[1]</sup>。自2018年以来, 中国陆续印发了《建立市场化、多元化生态保护补偿机制行动计划》《生态综合补偿试点方案》《2030年前碳达峰行动方案》《关于建立健全生态产品价值实现机制的意见》等政策文件, 为将“绿水青山”转化为“金山银山”提供了政策指导, 对强化生态环境保护和绿色产业发展作了系统性的安排, 强调把生态保

护补偿作为生态产品价值实现的主要途径<sup>[2]</sup>。基于“双碳”目标的时代背景, 中国不仅要强化减排责任, 有效控制碳排放总量和增加碳汇, 还要高度重视跨地区间碳减排的协同性与公平性<sup>[3]</sup>。碳补偿作为生态补偿重要方式, 能够调节利益相关者之间的关系, 实现生态服务功能的有偿化; 同时, 已有研究证实了生态补偿机制能够促进产业结构调整和技术进步, 显著降低碳排放总量<sup>[4]</sup>, 实现碳减排与经济增长双赢。因此, 科学确定不同地区的碳补偿价值已成为缓解碳排放、促进地区协调公平发展亟待解

收稿日期: 2023-02-14 修订日期: 2023-09-02

基金项目: 陕西省社会科学基金项目(2022R009); 陕西省林业科技创新专项(SXLK2023-05-1)。

作者简介: 黄怀玉, 女, 广西河池人, 博士研究生, 研究方向为资源经济与环境管理。E-mail: hhy2021@nwfufu.edu.cn

通讯作者: 龚直文, 男, 福建寿宁人, 博士, 副教授, 研究方向为林业经济理论与政策。E-mail: gongzhiwen@nwfufu.edu.cn

2023年12月

决的问题。

由土地利用视角开展碳源/汇的监测是开展碳补偿价值研究的基础。土地利用变化与土地管理活动会造成碳源/汇功能发生转化,不同类型的土地利用方式对生态系统产生的效果有所差异,使土地利用类型既可能成为碳源,也可能成为碳汇<sup>[5]</sup>。一方面,土地利用通过改变生态系统结构与土壤环境直接影响植被碳储量<sup>[6]</sup>,贡献了巨大的碳汇<sup>[7]</sup>,能够使全球陆地生态系统碳汇加速增长<sup>[8]</sup>。另一方面,随着城镇化步伐的加快,采伐森林、开垦耕地和建设用地扩张等引起的直接或间接碳排放,使土地利用成为重要的碳排放源<sup>[9]</sup>。基于土地利用的碳源/汇研究为了解社会-生态系统的碳循环提供了前提和基础<sup>[10]</sup>,而碳补偿则为开展土地利用低碳优化提供了契机和动力。因此,合理优化土地利用结构,科学设计碳补偿机制,对改善生态环境、构建低碳发展模式有重要的意义。

碳补偿是碳排放主体以经济手段对碳汇主体或生态保护者给予一定补偿,以消除碳排放外部性的行为;其目的是促进碳减排,实现区域发展的公平化和可持续化<sup>[11]</sup>。目前碳补偿机制建立主要围绕补偿主体、补偿标准和补偿方式展开。①补偿主体的研究主要根据“谁受益、谁付费”的原则,在省域(地市、区县)之间确定重点碳支付和碳受偿地区<sup>[12,13]</sup>,探究相关利益主体在生态责任与经济利益之间的联结关系。②对不同地区制定碳补偿标准的方法需考虑地区资源禀赋差异和经济发展水平差异等诸多因素,以确保其公平性。目前主要通过相对量碳赤字法<sup>[14]</sup>、碳赤字敏感度法<sup>[15]</sup>、碳排放责任分配法<sup>[16]</sup>计算相应的区域碳补偿标准,也可通过投入产出模型对各地区碳减排的成本进行估算,进而设计基于减排成本的差异化碳补偿标准<sup>[17]</sup>。丁振民等<sup>[18]</sup>构建生态补偿理论模型,解决了小尺度(乡镇、村)层面社会经济统计数据缺失无法进行补偿标准测算的问题,但此回归模型的使用需要大样本、多时期的面板数据才能保证补偿结果的可靠性。③在碳补偿方式上,有政府碳补偿、个人碳补偿、土地利用碳补偿及区域横向碳补偿等多种方式<sup>[19]</sup>,还有通过金融工具和碳税等手段构建的政府、市场和社会相互耦合的多元化生态补偿模式<sup>[20]</sup>,以及基于责任和

收益匹配视角构建的共担碳排放责任体系<sup>[21]</sup>。这些研究成果为区域间碳补偿机制的建立提供了很好的解决方案,但在价值核算上存在研究尺度太大的问题。格网化分析方法是一种将矢量数据栅格化的重要手段,主要把矢量数据或栅格数据以空间统计计算的形式完成数据重构<sup>[22]</sup>。其特点是在建立空间栅格索引的同时,能够将不同类型数据相结合,打破了以传统行政区域为最小研究单元的评价方法;在丰富评价单元属性维度的同时,也细化了评价单元的空间精度<sup>[23]</sup>。目前已有学者基于不同格网尺度对土地利用变化、生态系统服务价值时空分异、生境质量差异、“三生”空间功能、生态分区开展研究<sup>[24-26]</sup>,为本文从格网化角度分析碳补偿价值提供了技术基础,有助于测定特定区域的碳补偿并精准识别补偿主客体。

重庆市作为长江上游的重要生态屏障区域及经济金融中心,城市化水平和人类活动引起的土地利用变化对生态环境的扰动程度不断增强<sup>[27]</sup>,经济发展与环境保护压力凸显。为有效增强生态系统碳汇服务功能,重庆积极探索将“绿水青山”转化为“金山银山”的路径,出台《重庆市实施横向生态补偿提高森林覆盖率工作方案(试行)》政策文件,建立了以森林覆盖率为衡量指标的生态保护补偿激励机制<sup>[28]</sup>和地方林业碳汇交易试点<sup>[29]</sup>。但目前仍然缺乏土地利用碳汇产品价值核算研究,存在生态保护资金短缺、跨区域碳补偿机制不健全等问题<sup>[30]</sup>,亟需探索一套符合重庆自然本底和社会经济发展特点的碳补偿标准,推动生态效益与经济效益的有机统一,从而实现生态服务受益区与生态服务供给区协同发展。

鉴于此,本文基于2000—2020年的土地覆盖数据,在测算土地利用碳源/汇的基础上,分析重庆市土地利用碳源/汇的时空演变规律,基于格网尺度核算各区县的碳补偿价值,在此基础上探讨重庆市横向生态补偿的实现路径,以期重庆市制定生态补偿政策提供科学参考,为同类型的山地城市提供借鉴。

## 2 研究区、数据与方法

### 2.1 研究区概况

重庆市地处中国西南部,是青藏高原与长江中

下游平原的过渡地带。其地形地貌复杂多样,以山地丘陵为主,背靠大巴山和武陵山两座山脉,东北和东南部是主要的森林资源区,2021年全市森林覆盖率达到54.5%,其以独特的区域格局和丰富的自然资源对西南乃至全国的生态安全起到重要的支撑作用。重庆市现辖26个区和12个县,国土面积约为8.24万km<sup>2</sup>,作为长江中上游地区的经济、金融和物流中心,2021年其地区生产总值达到27894.02亿元,城镇化建设步伐不断加快。根据区域协调发展的布局,重庆市划分为三大区域:主城都市区(包括中心城区和主城新区)、渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群(图1)。

### 2.2 数据来源与处理

为了保证数据的连续性与一致性,本文所使用的重庆市三期(2000年、2010年、2020年)土地覆盖数据来源于30 m空间分辨率的全球地表覆盖数据

集(GlobeLand 30)。该数据集研制时所使用的分类影像主要是30 m多光谱影像,2020版数据还使用了16 m分辨率高分一号(GF-1)多光谱影像,是目前可以公开获取到的分辨率最高、分类精度最好的全球土地覆盖数据集<sup>[31]</sup>。根据重庆市土地利用特点,将该数据集的土地覆盖类型重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地6个一级地类。重庆市行政边界矢量数据来源于全国1:100万基础地理数据库;能源消费、地区生产总值等社会经济数据来源于《重庆统计年鉴》。

格网尺度是从微观角度衡量土地利用时空演变的数据载体和有效分析单元。格网过大会导致精度不够;格网过小则容易产生冗余,忽视各地类之间的相互影响<sup>[32]</sup>。因此,经过反复试验后,本文利用ArcGIS 10.8软件,以5 km×5 km的格网单元划分研究区,得到3638个基础单元,导入2000年、2010

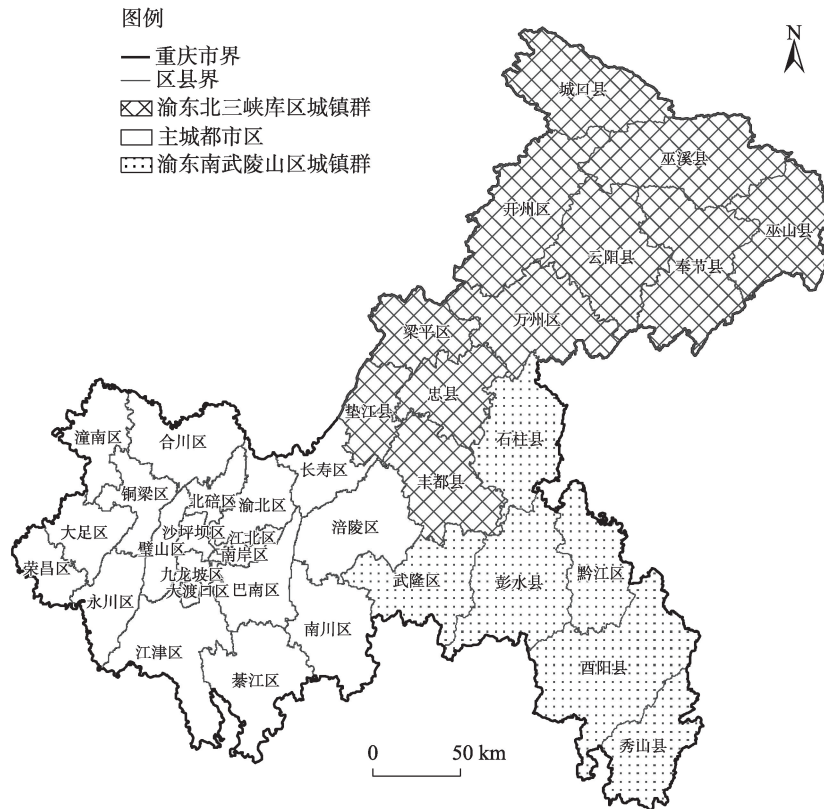


图1 研究区概况

Figure 1 Location of the study area

2023年12月

年及2020年三期土地利用分类数据,并汇总统计每个格网不同土地利用类型的面积,计算得到每个格网的碳源、碳汇量,最终完成格网尺度下空间数据的重构。

### 2.3 土地利用碳源/汇测算方法

耕地既能通过呼吸作用产生碳源,又能进行光合作用吸收二氧化碳。根据王刚等<sup>[33]</sup>的研究,耕地农作物的碳排放系数大于其土壤的固碳系数,因此将耕地视为碳源。林地可以进行碳封存,草地可以吸收并储存二氧化碳,水域和未利用地碳排放强度在长时间范围内没有太大变化,因此将它们视为碳汇<sup>[34]</sup>;建设用地作为一种碳源,承载着人类的多种活动方式,其产生的碳排放主要通过化石能源的消耗来间接反映<sup>[35]</sup>。

#### 2.3.1 土地利用碳源测算

建设用地所产生的碳源用人类生产活动中能源消费产生的二氧化碳量来表示,在《重庆统计年鉴》中主要有7类化石能源消费,即煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、天然气和电力,在计算时需要根据折标煤系数把能源消费量折算成标准煤量。在参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》及相关学者研究结果<sup>[35]</sup>后,得出不同能源的折标准煤系数及碳排放转换系数(表1)。化石能源总碳排放量的计算公式如下:

$$CS = \sum_{j=1}^7 (m_j \times \beta_j \times r_j) \quad (1)$$

式中:  $CS$  为重庆市7类化石能源的总碳排放量;  $m_j$  为第  $j$  种化石能源消费量 ( $j=1, 2, \dots, 7$  分别代表煤炭、焦炭、汽油、煤油、柴油、天然气和电力);  $\beta_j$  为第  $j$  种化石能源的折标煤系数;  $r_j$  为第  $j$  种化石能源的

表1 折标煤系数及碳排放转换系数

Table 1 Conversion coefficient of standard coal and carbon emission

能源类型	折标准煤系数	碳排放转换系数
煤炭	0.7143 kgce/kg	0.7559
焦炭	0.9714 kgce/kg	0.8550
汽油	1.4714 kgce/kg	0.5538
煤油	1.4714 kgce/kg	0.5714
柴油	1.4571 kgce/kg	0.5921
天然气	1.3300 kgce/m <sup>3</sup>	0.4483
电力	0.4040 kgce/kW·h	0.7935

碳排放转换系数<sup>[36]</sup>。

结合已有的研究方法<sup>[37]</sup>,利用重庆市总GDP值与总建设用地面积的比值,再乘以每个格网的建设用地面积,从而获取每个格网的GDP数据,再采用单位GDP能耗法测算单个格网的建设用地碳排放量,计算公式为:

$$CS_i = \frac{CS \times E_i}{\sum_{i=1}^{3638} E_i} = \frac{CS \times G_i \times D}{\sum_{i=1}^{3638} (G_i \times D)} \quad (2)$$

式中:  $CS_i$  为第  $i$  个格网的建设用地碳排放量;  $E_i$  为第  $i$  个格网的能源消耗量;  $G_i$  为第  $i$  个格网的地区生产总值;  $D$  为单位GDP能耗,采用能源消耗量与地区生产总值之比来计算。为消除价格因素的影响,每年的GDP和单位GDP能耗以2000年不变价计算。

土地利用碳排放体现为建设用地碳排放与耕地碳排放之和,具体计算公式为:

$$E_i^c = CS_i + B_i \times \mu \quad (3)$$

式中:  $E_i^c$  为第  $i$  个格网的土地利用碳源量;  $B_i$  为第  $i$  个格网的耕地面积;  $\mu$  为耕地碳排放系数<sup>[38]</sup>,取值  $0.469 \text{ t/hm}^2$ 。

#### 2.3.2 土地利用碳汇测算

结合魏燕茹等<sup>[39]</sup>的研究,得出土地利用碳汇量的测算公式为:

$$E_i^a = \sum_{k=1}^4 \sum_{i=1}^{3638} (A_{ki} \times \alpha_{ki}) \quad (4)$$

式中:  $E_i^a$  为第  $i$  个格网的土地利用碳汇量;  $A_{ki}$  为第  $k$  种土地利用类型 ( $k=1, 2, 3, 4$  分别代表林地、草地、水域、未利用地) 在第  $i$  个格网的面积;  $\alpha_{ki}$  为第  $k$  种土地利用类型的碳吸收系数。采用苑韶峰等<sup>[38]</sup>的研究成果,根据经纬度和地理状况的分类,考虑地区实际情况得到修正后的碳吸收系数(此处碳吸收系数为负值)。重庆市林地、草地、水域和未利用地的碳吸收系数分别为  $-0.605$ 、 $-0.021$ 、 $-0.025$  和  $-0.003 \text{ t/hm}^2$ 。

### 2.4 碳补偿模型

将碳源量与碳汇量的差值作为地区是否获得碳补偿的确定依据。若碳汇量大于碳源量,说明该地区生态系统固碳能力强,还有足够的盈余量吸收非本地区溢出的碳排放,因此该地区是碳补偿获补区;反之是碳补偿支付区。碳补偿的判断公式为:

$$L_i = E_i^c + E_i^a \quad (5)$$

式中： $L_i$ 为第*i*个格网的碳补偿基准值。

2.4.1 碳补偿基准值修正方法

在重庆市的实际情况下,不同区县的土地利用类型、发展模式都各有特点,导致净碳排放量具有明显的差异特征。若仅以净碳排放量作为碳补偿的判断依据,忽视补偿资金超过地区自身经济承受能力的问题,最终的碳补偿结果很难具有可操作性,有失公平性与合理性。对此设定一个碳排放临界值  $P_i$ <sup>[36]</sup>,计算公式为:

$$P_i = ECC \times M = \frac{G_i \times M}{\frac{C_i}{C}} \quad (6)$$

式中： $P_i$ 为碳排放临界值； $ECC$ 为经济贡献系数； $M$ 为重庆市碳排放平均值； $G_i$ 、 $G$ 分别为第*i*个格网的GDP和重庆市GDP； $C_i$ 、 $C$ 分别为第*i*个格网的碳排放量和重庆市的总碳排放量。

碳排放强度是碳排放经济效率的体现,通常情况下会随着技术进步而逐渐降低。考虑到不同区县间碳排放强度时空差异明显,为充分反映不同地区碳排放经济效率的差异,这里选取2010年和2020年两个截面年份,对碳排放量进行修正<sup>[11]</sup>:

$$\widehat{E}_i^c = E_i^c \times \left( \frac{G_{t1-i}}{G_{t2-i}} - \frac{G_{T1}}{G_{T2}} + 1 \right) \times \frac{G_{t1-i}}{G_T} \quad (7)$$

式中： $\widehat{E}_i^c$ 为修正后的2020年碳排放量； $G_{t1-i}$ 和 $G_{t2-i}$ 分别为2020年和2010年第*i*个格网的单位GDP碳排放； $G_{T1}$ 和 $G_{T2}$ 分别为2020年和2010年重庆市总的单位GDP碳排放； $G_T$ 为2020年重庆市平均单位GDP碳排放。

修正后的碳补偿判断值的计算公式为:

$$L_i' = \widehat{E}_i^c + E_i^a - P_i \quad (8)$$

式中： $L_i'$ 为修正后的碳补偿基准值。 $L_i' > 0$ 时,该地区为碳补偿资金支付区； $L_i' < 0$ 时,该地区为碳补偿资金获补区。经过修正后的 $L_i'$ 避免了净碳排放值过大造成的结果失真,更具准确性。

2.4.2 碳补偿价值计算方法

地区碳补偿额度需要以货币量来表示,具体计算公式为:

$$M_i = |L_i'| \times \vartheta \times \gamma_i \quad (9)$$

式中： $M_i$ 为获得或支付的碳补偿资金； $\vartheta$ 为单位碳价格； $\gamma_i$ 为碳补偿系数,此处取值为1。在计算价值时,碳支付区产生净碳排放,  $\vartheta$ 应选用碳排放交易价格；而碳获补区产生净碳汇,  $\vartheta$ 应选用碳汇价格。重庆作为西部地区唯一的碳市场试点省市,早在2014年就正式启动了碳市场运行。截至2022年4月底,重庆地方碳市场累计成交量达到3363.83万t,成交金额突破6.92亿元,由此推算碳排放交易价格为20.57元/t CO<sub>2</sub>,即75.43元/t C;再参考已有研究成果,本文采用碳汇影子价格作为最终的单位碳汇价格<sup>[40,41]</sup>,取100.2元/t。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化概况

重庆市的土地利用类型主要以耕地、林地和草地为主,3种地类面积约占总地类面积的95%以上。如表2所示,2000—2020年重庆市不同类型土地利用面积发生较大变化,土地利用结构有所转变,总体表现为:建设用地、林地和水域面积不断增长,分别增加20.67万、10.15万和3.58万hm<sup>2</sup>,其中建设用地面积增加的幅度最大,达到359.48%;水域和林地增加的幅度分别为38.33%和2.99%。而耕

表2 2000—2020年重庆市土地利用变化  
Table 2 Land use change in Chongqing, 2000-2020

土地利用类型	2000年		2010年		2020年		2000—2020年 面积变化/万hm <sup>2</sup>
	面积/万hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/万hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/万hm <sup>2</sup>	比例/%	
耕地	404.02	49.05	404.73	49.13	384.25	46.65	-19.77
林地	340.02	41.28	349.96	42.49	350.17	42.51	10.15
草地	64.01	7.77	50.77	6.16	49.72	6.04	-14.29
水域	9.34	1.13	9.89	1.20	12.92	1.57	3.58
建设用地	5.75	0.70	7.98	0.97	26.42	3.21	20.67
未利用地	0.57	0.07	0.39	0.05	0.15	0.02	-0.42

2023年12月

地、草地、未利用地的面积明显减少,分别减少19.77万、14.29万和0.42万 $\text{hm}^2$ ,减少的幅度分别为4.89%、22.34%、73.68%。

根据土地利用转移变化的过程(表3),2000—2020年重庆市各土地利用类型发生较为剧烈的转移,转移用地总面积达到121.51万 $\text{hm}^2$ 。从转出面积来看,耕地、林地和草地为主要转出者,占转出面积的40.34%、28.96%和27.78%,其他3种土地利用类型转出仅占2.92%。从转入面积来看,以林地、耕地、建设用地和草地转入为主,分别占转入面积的37.35%、24.10%、17.74%和16.02%。综合来看,耕地、草地和未利用地净流出面积分别为19.74万、14.30万和0.41万 $\text{hm}^2$ ;建设用地、林地和水域净流入面积分别为20.67万、10.20万和3.58万 $\text{hm}^2$ 。

### 3.2 土地利用碳源/汇时间演变分析

根据土地利用数据及社会经济数据,计算得出2000—2020年重庆市土地利用的碳源、碳汇及净碳排放量(表4)。总体来看,耕地和建设用地产生的碳排放量呈现增加状态,2000—2020年增长了3729.07万t。其中,2000—2010年碳排放量大幅提升,10年间增长2倍有余;而2010—2020年碳排放量增长较为缓慢,较2010年而言,2020年碳排放量

增长率仅为13.32%。在碳源结构中,建设用地碳排放量占总碳排放量的比例均在87%以上,相对耕地而言,建设用地是更重要的碳源用地类型。在碳汇结构中,2000—2020年碳吸收总量总计增长5.93万t,2000—2010年碳吸收的增长率为2.78%,2010—2020年碳吸收基本呈现稳定状态。其中,林地固碳贡献率均高达99%以上,草地及水域起着弱碳汇作用,未利用地的碳汇贡献可以忽略不计。因此林地是重庆市土地利用碳吸收的主要载体。总体而言,研究期内重庆市土地利用碳源总量均大于碳汇总量,其中,建设用地碳排放量远超林地的碳吸收量,两者之间存在较大差距,这不利于重庆市的节能减排和低碳绿色发展。因此,应将控制建设用地扩张作为今后减少碳源的重点任务,并保障林地、草地的面积以促进碳汇增加。

### 3.3 土地利用碳源/汇空间格局分析

本文基于ArcGIS平台,在格网尺度下将重庆市碳排放量从低到高按(0.00, 2.29]万、(2.29, 8.90]万、(8.90, 22.67]万、(22.67, 42.87]万t进行划分。从空间分布图来看(图2),2000—2020年碳排放量持续波动增长,其中在重庆市西部的变化最为明显。2000年,大多数格网的碳排放量处于(0.00, 2.29]万t区间

表3 2000—2020年重庆市土地利用转移矩阵(万 $\text{hm}^2$ )

Table 3 Land use transfer matrix in Chongqing, 2000-2020 ( $10^4 \text{hm}^2$ )

2000年	2020年						
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	转出
耕地	354.96	21.35	6.32	2.83	18.49	0.02	49.02
林地	19.64	304.74	12.76	1.38	1.41	0.01	35.19
草地	7.68	23.58	30.25	1.03	1.41	0.05	33.76
水域	1.25	0.39	0.27	7.19	0.21	0.02	2.14
建设用地	0.65	0.05	0.08	0.09	4.87	0.00	0.88
未利用地	0.06	0.01	0.04	0.39	0.02	0.04	0.52
转入	29.28	45.39	19.46	5.72	21.55	0.11	—

表4 2000—2020年重庆市土地利用碳源与碳汇(万t)

Table 4 Carbon sources and sinks of land use in Chongqing, 2000-2020 ( $10^4 \text{t}$ )

年份	碳源			碳汇				净碳排放量	
	耕地	建设用地	合计	林地	草地	水域	未利用地		合计
2000	189.49	1348.98	1538.47	-205.71	-1.34	-0.23	0.00	-207.28	1331.19
2010	189.82	4458.37	4648.19	-211.73	-1.07	-0.25	0.00	-213.05	4435.14
2020	180.21	5087.33	5267.54	-211.85	-1.04	-0.32	0.00	-213.21	5054.33

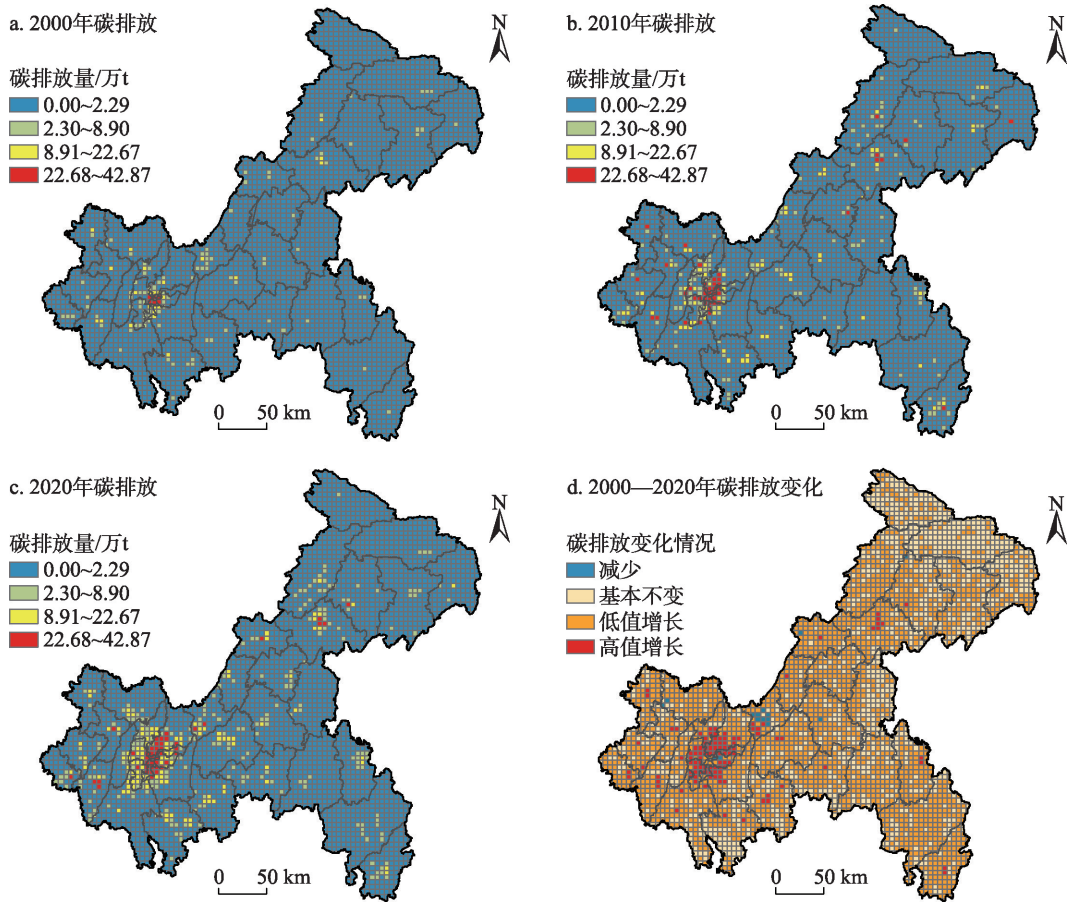


图2 2000—2020年重庆市土地利用碳排放格局

Figure 2 Carbon emission patterns of land use in Chongqing, 2000-2020

内,其中重庆渝中、江北、南岸西部、沙坪坝东南部以及九龙坡东北部属于碳排放高值区;到2020年,碳排放量已经由中心城区扩散到主城新区等四周以及渝东北的万州区,其余地区基本呈现稳定缓慢增长趋势。万州区地处三峡库区经济中心,库区移民搬迁在一定程度上导致了建设用地扩张,其碳排放量的增加与地理位置、交通运输建设、经济发展水平和政府基本规划等因素密切相关。从2000—2020年碳排放变化量整体来看(图2d),碳排放量在长寿区具有下降态势,下降幅度较小;碳排放量高值增长区(增长量 > 10 万 t)主要集中在重庆渝北、九龙坡、沙坪坝、江北、巴南西北部等区县,其余为低值增长区或无变化区。因此,主城都市区仍然是重庆市土地利用碳排放增长的主要贡献者,未来规划需要进一步优化各区县产业结构,适当控制建设用地的扩张,采取节能减排等措施降低碳排放量。

参考碳排放量的划分方法,将重庆市2000—2020年每个格网碳吸收量划分为4个不同区间。从图3来看,重庆市碳吸收量总体呈现出“两翼高、中部低”的分布特征,主要表现为渝东北高、渝东南次之和主城都市区最低,其中:碳吸收高值区主要聚集在渝东北城镇群的城口、巫山、石柱、开州北部等区县内部,以及零散分布在渝东南城镇群的部分区域;碳吸收低值区的分布以中心城区及西部的潼南区、合川区和铜梁区等地为主。从2000—2020年的变化趋势来看(图3d),重庆市大多数地区的碳吸收量基本保持不变。部分地区由于固碳能力强,属于生态涵养与生态保护发展区,其碳吸收变化量表现为缓慢上升趋势,尤其在奉节、云阳、万州等区县一带以及石柱县北部的增加幅度最为明显。碳吸收量减少区域主要分布在渝东北城镇群的梁平区、忠县、丰都县北部以及中心城区的南岸区、巴南区西

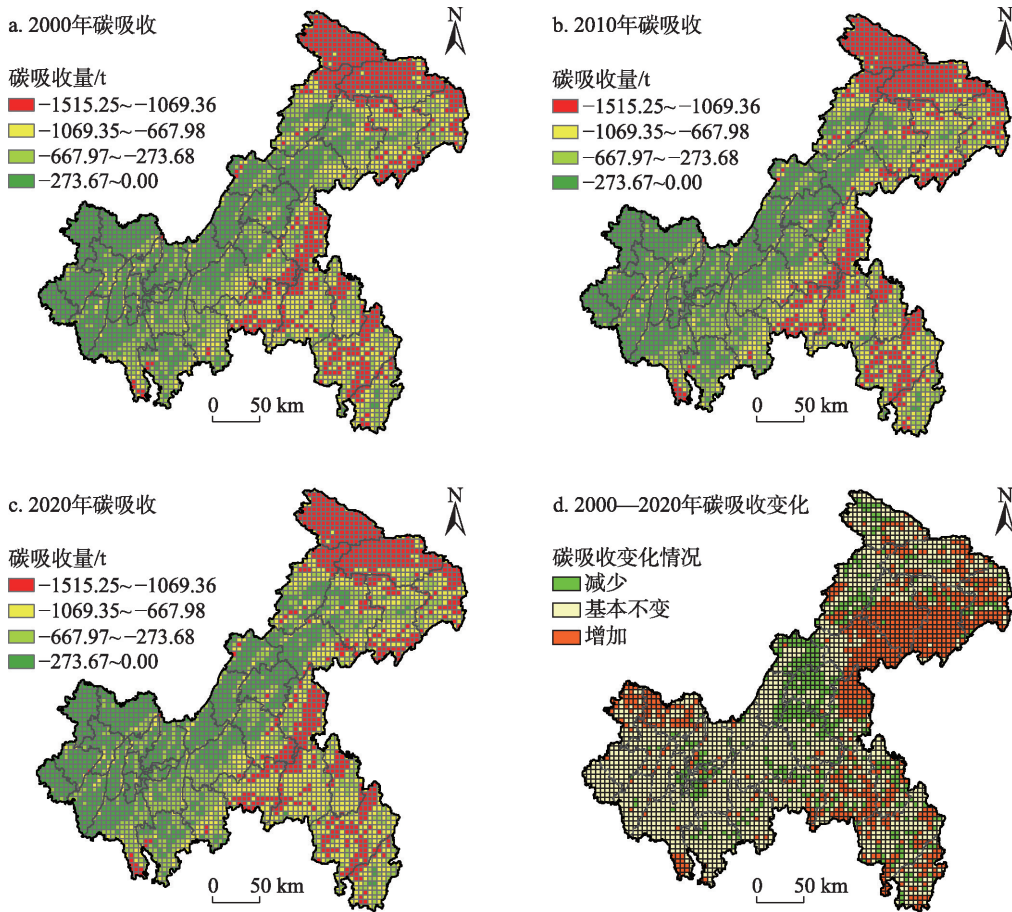


图3 2000—2020年重庆市土地利用碳吸收格局

Figure 3 Carbon sink patterns of land use in Chongqing, 2000-2020

部、九龙坡东北部等部分地区,可能由于其草地面积减少以及未利用地资源被开发导致碳吸收量减少。整体来看,碳汇变化的分布基本上与林地、草地的分布相吻合,与渝东北和渝东南的生态保护规

划在空间上相匹配。

### 3.4 碳补偿价值核算

基于格网尺度,精细化和定量化分析补偿价值在行政单元内的空间异质性,如图4a所示(碳补偿

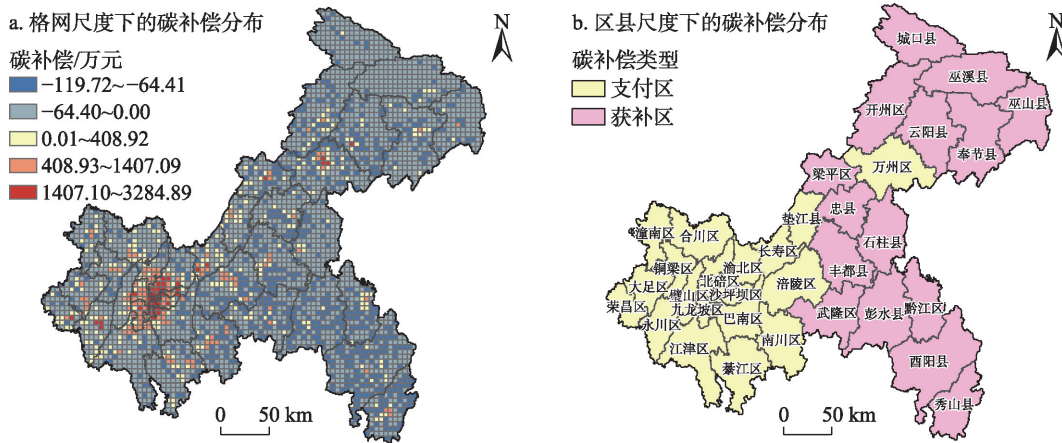


图4 2020年重庆市土地利用碳补偿价值格局

Figure 4 Spatial distribution of land use carbon compensation value of Chongqing, 2020



价值为正表示支付区,碳补偿价值为负表示获补区)。分析发现,支付区主要集中于中心城区并局部分散在主城新区,全市碳支付金额总计233702.58万元,单个格网最高支付金额位于大渡口区北部,达到3284.89万元。此外,支付区还零星分散在梁平中部、开州东南部和丰都西南部等地。这些区县在行政单元上属于受偿区,但在格网尺度下,区县内部存在部分地区属于支付区,且总支付额度低于总受偿额度。格网尺度下重庆市碳受偿额度达到140638.72万元,碳受偿区除了大量分布在重庆市两翼地区,还有主城都市区内部少量区域。出现这一现象的原因是:这些区域虽然具有高碳排放量的特征,但它们在抓住发展机会、贡献地区生产总值的同时,还能提高碳排放效率,在经过碳补偿模型修正过后,这些区域的碳排放盈余量增加,甚至还可以吸收周围其他地区的碳排放,因此可以获得补偿金额。由此可知,在考虑地区经济支付水平能力、

碳排放效率的基础上对碳补偿标准进行修正,在一定程度上保证了各地区的合理利益以及补偿标准的公平性,从而更好地衡量支付区的生态保护责任与受偿区的经济利益。

从行政单元划分来看(图4b),将格网尺度下的碳补偿汇总得到各区县的净碳补偿价值,如表5所示(支付额度用正值表示,受偿额度用负值表示),有江北、沙坪坝、大渡口等22个区县最终需要支付碳补偿资金。其中,江北区需要支付的净额最多,达到27527.29万元,究其原因主要是,位于中心城区的江北区经济发展水平较高,建设用地面积占总面积的48%,生态用地资源匮乏,从而导致其碳排放量高、碳吸收能力弱。其次,沙坪坝区、大渡口区等也需要支付较高的碳补偿金额,该类区县在近20年均呈现出了碳排放变化量高值增长、碳吸收变化量减少的基本特征。酉阳、彭水、武隆等15个区县最终应该获得碳补偿金额,且大多位于重庆东

表5 重庆市各区县碳补偿价值(万元)

Table 5 Carbon compensation value of each district and county in Chongqing (10<sup>4</sup> yuan)

序号	支付区	受偿额度	支付额度	净支付额度	受偿区	受偿额度	支付额度	净受偿额度
1	江北区	-230.63	27757.92	27527.29	酉阳县	-12897.31	1144.60	-11752.71
2	沙坪坝区	-192.39	21276.73	21084.34	彭水县	-7570.27	535.08	-7035.19
3	大渡口区	0.00	18755.50	18755.50	武隆区	-7230.33	1956.62	-5273.71
4	九龙坡区	-64.35	13696.86	13632.52	秀山县	-7886.51	3013.49	-4873.02
5	渝中区	0.00	12064.70	12064.70	黔江区	-6546.69	2103.92	-4442.77
6	渝北区	-2100.66	14129.26	12028.61	云阳县	-6272.09	2718.33	-3553.76
7	北碚区	-1251.94	9461.53	8209.60	奉节县	-5164.02	1787.85	-3376.17
8	长寿区	-2035.65	9056.28	7020.64	丰都县	-6049.25	2944.40	-3104.85
9	巴南区	-2308.11	8687.46	6379.35	城口县	-3153.70	154.41	-2999.29
10	永川区	-1531.25	7609.82	6078.57	开州区	-5878.19	3220.52	-2657.67
11	南岸区	-71.62	6148.75	6077.13	巫山县	-3214.47	767.05	-2447.43
12	綦江区	-4381.76	6776.29	2394.53	忠县	-3848.63	1694.68	-2153.94
13	铜梁区	-1182.25	3435.99	2253.74	巫溪县	-2635.72	588.25	-2047.48
14	大足区	-2795.79	5012.73	2216.94	石柱县	-2710.85	816.11	-1894.74
15	万州区	-8626.42	10608.93	1982.51	梁平区	-4801.31	3270.82	-1530.49
16	南川区	-4810.13	6212.23	1402.10	涪陵区	-8568.90	7445.64	-1123.26
17	荣昌区	-1955.75	3208.81	1253.06				
18	江津区	-4102.15	5232.33	1130.18				
19	垫江县	-1742.51	2499.18	756.66				
20	璧山区	-961.33	1556.32	594.99				
21	潼南区	-2440.18	2840.51	400.33				
22	合川区	-3425.62	3512.67	87.04				

2023年12月

南、东北两个城镇群。其中,净获补额度最多的是酉阳县,达到1.18亿元,原因是该区经济发展缓慢,工业发展受限,同时拥有较为丰富的森林资源。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文通过对重庆市土地利用变化、碳源/汇时间变化及空间格局分布进行分析,深入探讨格网尺度下的碳补偿价值,得出的主要结论如下:

(1)2000—2020年重庆市碳排放量呈现“大幅上升—缓慢上升”的发展态势,总计增长3729.07万t;碳吸收总量缓慢增长,总计增加5.93万t,整体变化幅度较小。其中,建设用地是主要碳源,林地是主要碳汇。

(2)重庆市碳排放空间格局呈现以中心城区为高值中心,向两翼逐渐降低的“核心—外围”空间结构;碳排放减少区域主要发生在长寿区,高值增长区域主要包括重庆渝北、九龙坡、沙坪坝、江北、巴南西北部等地。碳吸收空间格局总体呈现出“两翼高、中部低”的分布特征,奉节、云阳和万州等区县一带为碳吸收增长区,渝东北城镇群和中心城区的部分地区为碳吸收减少区。

(3)格网尺度下重庆市碳补偿价值存在较大的空间异质性,碳支付地区主要分布在主城都市区,单个格网最高支付金额位于大渡口区北部,总计支付金额达到233702.58万元;碳获补地区涵盖范围较广,总计获补金额为140638.72万元。从区县尺度来看,江北区的净支付额度最高,酉阳县的净获补额度最高。

### 4.2 讨论

重庆市作为长江上游唯一的直辖市,既具有城市发展的典型性,又具有生态资源的丰富性,地理位置和区位优势得天独厚。从格网尺度分析重庆市土地利用碳源/汇的时空动态特征,量化碳补偿价值,对于优化重庆市土地利用结构、提高固碳增汇能力具有重要现实意义,同时也可同为同类型城市提供借鉴和示范。

本文发现重庆市土地利用碳排放经历了急剧上升和缓慢上升两个阶段,表明生态环境效果逐渐显现,这与重庆市在2014年正式启动碳排放权交易

试点工作密切相关。林地、草地等主要碳汇载体在转入或转出的过程中,面积变化不明显,导致碳吸收量呈现缓慢增长的趋势。总体而言,未来降低土地利用碳排放量仍需控制建设用地扩张,重视主城区都市区高碳源的特征,发挥渝东南和渝东北两翼地区的特色优势,最大可能地增强林地、草地和水域的碳汇能力。

碳补偿的研究结果揭示了重庆市碳补偿机制建立的必要性,最终的碳补偿价值相比于地区生产总值偏低,各级地方政府的经济压力并不大,在碳补偿的具体实践中具有一定的可操作性。同时,重庆碳补偿价值存在空间异质性,因而根据实际情况制定差异化的资金补偿政策,关系到重庆市内部公平与效率的实现。一方面,地方政府应牢固树立可持续发展理念,增加公共财政对生态补偿尤其是碳补偿方面的投入;另一方面,仅依靠地方政府财政支持的发展模式是不可持续的,重庆市有必要聚焦碳汇产品价值化的有效路径,构建“绿水青山”向“金山银山”转化、促进碳汇资源变现的平台,进一步实施横向生态补偿制度,从而实现生态与发展的双赢。例如,承担着经济发展重任的主城都市区由于生态保护空间有限,可以通过签订横向生态补偿提高碳汇量协议,向具有水源涵养、固碳释氧、水土保持等重要生态功能的渝东南、渝东北地区购买碳汇,最终发挥各地区禀赋优势,既能保证经济社会发展,又能实现生态环境保护。

本文选用格网尺度对行政单元内部土地利用碳源/汇的可视化表达,从微观尺度出发,充分考虑了空间异质性,为开展碳补偿研究提供了新方法和新视角,但仍存在一些需要改进和加强的地方。首先,受基础数据和研究方法限制,土地利用碳源与碳汇的测算方法仍有待进一步完善。例如,目前学术界对耕地产生的碳源/汇功能进行了相关探讨,但仍未定下确切结论,本文在参考前人研究的基础上,认为耕地既是碳源,也是碳汇。由于不同区域间地理环境的差异性,以及格网尺度下难以单独计算耕地的碳排放与碳吸收,因此,本文根据重庆市实际情况,结合耕地的 $CH_4$ 碳排放系数和 $CO_2$ 碳吸收系数,采用了按经纬度及地理状况进行修正后得

到的耕地净碳排放系数。今后的研究可分别衡量耕地的碳源与碳汇作用,进而准确评估研究区土地利用所产生的碳排放与碳吸收量。其次,土地利用碳排放/吸收还具有容量限制,未来可以基于碳收支核算,在评价资源环境综合承载力的基础上,建立不同地区之间的碳排放容量交易模式,根据该地区必须控制的碳排放总量和生态容量进行交易。再次,不同用途的建设用地产生的碳排放量会有所差异。由于研究尺度的限制,建设用地碳排放仅以能源消耗产生的碳排放量间接计算,所得结果可能会导致建设用地碳排放量偏低,但采用全市的数据进行验证后发现此影响较小。此外,目前的研究主要是在过去时间的基础上对碳补偿进行探讨和分析,今后还可以进一步增加对未来补偿主客体转化的预测,通过分析补偿主客体的变动情况及原因,判断哪些区域将会实现生态好转,哪些区域仍需支付大额的补偿资金,从而确定碳汇提质增效区域的优先序。

### 参考文献(References):

- [1] 詹琉璐,杨建州.生态产品价值及实现路径的经济学思考[J].经济问题,2022,(7):19-26.[Zhan L L, Yang J Z. An economics analysis on the value and its implementation paths of eco-products [J]. On Economic Problems, 2022, (7): 19-26.]
- [2] 李坦,徐帆,祁云云.从“共饮一江水”到“共护一江水”:新安江生态补偿下农户就业与收入的变化[J].管理世界,2022,38(11):102-124.[Li T, Xu F, Qi Y Y. From “drinking one river” to “protecting one river”: The changes of farmers’ employment and income under the ecological compensation in Xin’an River[J]. Journal of Management World, 2022, 38(11): 102-124.]
- [3] 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.[Xia S Y, Yang Y. Spatio-temporal differentiation of carbon budget and carbon compensation zoning in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration based on the Plan for Major Function-oriented Zones [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(3): 679-696.]
- [4] 张晖,顾典,吴霜,等.流域生态补偿政策下受偿地区碳减排效应:以新安江流域为例[J].资源科学,2022,44(4):768-779.[Zhang H, Gu D, Wu S, et al. Effect of emission reduction in the compensated areas under the policy of watershed eco-compensation: A case study of the Xin’an River Basin[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 768-779.]
- [5] 王天福,龚直文,邓元杰.基于土地利用变化的陕西省植被碳汇提质增效优先区识别[J].自然资源学报,2022,37(5):1214-1232.[Wang T F, Gong Z W, Deng Y J. Identification of priority areas for improving quality and efficiency of vegetation carbon sinks in Shaanxi Province based on land use change[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1214-1232.]
- [6] Li J S, Guo X M, Chuai X W, et al. Reexamine China’s terrestrial ecosystem carbon balance under land use-type and climate change [J]. Land Use Policy, 2021, DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.105275.
- [7] Yu Z, Ciais P, Piao S L, et al. Forest expansion dominates China’s land carbon sink since 1980[J]. Nature Communications, 2022, DOI: 10.1038/s41467-022-32961-2.
- [8] Piao S L, Huang M T, Liu Z, et al. Lower land-use emissions responsible for increased net land carbon sink during the slow warming period[J]. Nature Geoscience, 2018, DOI: 10.1038/s41561-018-0204-7.
- [9] 蔡利民,揣小伟,向爱,等.关于土地利用碳补偿的思考与展望[J].现代城市研究,2023,(6):2-7,16.[Cai L M, Chuai X W, Xiang A, et al. Reflections and prospects on land use carbon compensation[J]. Modern Urban Research, 2023, (6): 2-7, 16.]
- [10] 黄贤金,张秀英,卢学鹤,等.面向碳中和的中国低碳国土开发利用[J].自然资源学报,2021,36(12):2995-3006.[Huang X J, Zhang X Y, Lu X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [11] 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.[Zhao R Q, Liu Y, Ma L, et al. County-level carbon compensation of Henan Province based on carbon budget estimation[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1675-1687.]
- [12] Yang G C, Shang P P, He L C, 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.
- [13] Miao Y, Kong C, Wang L, et al. A provincial lateral carbon emissions compensation plan in China based on carbon budget perspective[J]. Science of the Total Environment, 2019, 692: 1086-1096.
- [14] 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.[Wan L L, Lin C X, Chen Y. Temporal and spatial patterns of inter-provincial carbon compensation in China based on relative carbon deficit[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12): 2572-2583.]
- [15] 闫丰,王洋,杜哲,等.基于IPCC排放因子法估算碳足迹的京津冀生态补偿量化[J].农业工程学报,2018,34(4):15-20.[Yan F, Wang Y, Du Z, et al. Quantification of ecological compensation in

2023年12月

- Beijing-Tianjin-Hebei based on carbon footprint calculated using emission factor method proposed by IPCC[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(4): 15-20.]
- [16] 王文治, 胡雍, 张晓宇. 中国省域碳排放责任分配方法比较与碳补偿设计[J]. 资源科学, 2023, 45(10): 1913-1930. [Wang W Z, Hu Y, Zhang X Y. Comparison of carbon emission responsibility allocation methods and carbon compensation design among provinces in China[J]. Resources Science, 2023, 45(10): 1913-1930.]
- [17] 钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 等. 基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制[J]. 环境科学, 2023, 44(8): 4637-4646. [Zhong S Y, Zhang X M, Wu J, et al. Carbon offsetting mechanism of China province based on carbon reduction cost[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4637-4646.]
- [18] 丁振民, 姚顺波. 小尺度区域生态补偿标准的理论模型设计及测度[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2182-2192. [Ding Z M, Yao S B. Model and measurement of payment for ecosystem services at small scale[J]. Resources Science, 2019, 41(12): 2182-2192.]
- [19] 赵荣钦, 刘英, 李宇翔, 等. 区域碳补偿研究综述: 机制、模式及政策建议[J]. 地域研究与开发, 2015, 34(5): 116-120. [Zhao R Q, Liu Y, Li Y X, et al. Overview of regional carbon compensation: Mechanism, pattern and policy suggestions[J]. Areal Research and Development, 2015, 34(5): 116-120.]
- [20] 郑云辰, 葛颜祥, 接玉梅, 等. 流域多元化生态补偿分析框架: 补偿主体视角[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(7): 131-139. [Zheng Y C, Ge Y X, Jie Y M, et al. Analysis framework of diversified watered eco-compensation: A perspective of compensation subject[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(7): 131-139.]
- [21] 杨军, 杨泽, 丛建辉, 等. 责任和收益匹配原则下中国省域碳排放责任共担方案优化[J]. 资源科学, 2022, 44(9): 1745-1758. [Yang J, Yang Z, Cong J H, et al. Optimization of China's provincial carbon emission responsibility sharing scheme based on the principle of responsibility and benefit matching[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1745-1758.]
- [22] 李建春, 袁文华. 基于GIS格网模型的银川市土地生态安全评价研究[J]. 自然资源学报, 2017, 32(6): 988-1001. [Li J C, Yuan W H. Assessment of urban land ecological security in Yinchuan City based on the grid method[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(6): 988-1001.]
- [23] 李露然. 基于格网GIS的生态系统服务价值时空变化研究: 以九寨沟自然保护区为例[D]. 上海: 上海师范大学, 2015. [Li L R. The Research of Ecosystem Service Value Temporal and Spatial Change of Based on Grid GIS Method: A Case Study of Jiuzhaigou Natural Reserve[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2015.]
- [24] 杨光宗, 吕凯, 李峰. 基于格网尺度的南昌市土地利用变化及生态系统服务价值时空相关性分析[J]. 中国土地科学, 2022, 36(8): 121-130. [Yang G Z, Lv K, Li F. Spatial and temporal correlation analysis of land use change and ecosystem service value in Nanchang City based on grid scale[J]. China Land Science, 2022, 36(8): 121-130.]
- [25] 唐秀美, 刘玉, 任艳敏. 基于格网尺度的密云水库区域“三生”空间功能测度与时空变化分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(5): 60-69. [Tang X M, Liu Y, Ren Y M. Ecological-production-living spaces transformation and analysis of land use based on grid scale in Miyun Reservoir area[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(5): 60-69.]
- [26] 彭建, 徐飞雄. 不同格网尺度下的黄山市生境质量差异分析[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(6): 887-897. [Peng J, Xu F X. Effect of grid size on habitat quality assessment: A case study of Huangshan City[J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(6): 887-897.]
- [27] 向书江, 张筹, 王丹, 等. 近20年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1198-1213. [Xiang S J, Zhang Q, Wang D, et al. Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000-2020[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1198-1213.]
- [28] 孙博文. 建立健全生态产品价值实现机制的瓶颈制约与策略选择[J]. 改革, 2022, (5): 34-51. [Sun B W. The bottleneck restriction and strategies of establishing and improving the value realization mechanism of ecological products[J]. Reform, 2022, (5): 34-51.]
- [29] 彭红军, 徐笑, 俞小平. 林业碳汇产品价值实现路径综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 177-186. [Peng H J, Xu X, Yu X P, et al. A review of the value realization path of forestry carbon sink products[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022, 46(6): 177-186.]
- [30] 孙博文, 彭绪庶. 生态产品价值实现模式、关键问题及制度保障体系[J]. 生态经济, 2021, 37(6): 13-19. [Sun B W, Peng X S. Realization mode, key issues and institutional guarantee system of ecological product value[J]. Ecological Economy, 2021, 37(6): 13-19.]
- [31] 贾磊, 姚顺波, 邓元杰, 等. 2000-2020年陕西秦巴山区生境质量时空演变及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(2): 398-413. [Jia L, Yao S B, Deng Y J, et al. Temporal and spatial evolution of habitat quality and its topographic gradient effects in the Qinling-Daba Mountain area, Shaanxi Province from 2000 to 2020[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(2): 398-413.]
- [32] 郭椿阳, 高建华, 樊鹏飞, 等. 基于格网尺度的永城市土地利用转型研究与热点探测[J]. 中国土地科学, 2016, 30(4): 43-51.

- [Guo C Y, Gao J H, Fan P F, et al. Land use transition and hot-spots detection in Yongcheng City based on grid scale[J]. *China Land Science*, 2016, 30(4): 43–51.]
- [33] 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. [Wang G, Zhang H B, Xue F, et al. Relations between land use carbon budget and economic development at county level in Chengdu City [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(7): 1170–1182.]
- [34] 王秋贤, 高志强, 宁吉才. 基于公平的中国省域碳排放差异模型构建探讨: 以中国2010年碳排放为例[J]. *资源科学*, 2014, 36(5): 998–1004. [Wang Q X, Gao Z Q, Ning J C. Model building discussions on the provincial differences of carbon emissions in China based on fairness for 2010[J]. *Resources Science*, 2014, 36(5): 998–1004.]
- [35] 于博, 杨旭, 吴相利. 哈长城市群县域碳排放空间溢出效应及影响因素研究: 基于NPP-VIIRS夜间灯光数据的实证[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(2): 697–706. [Yu B, Yang X, Wu X L. Study on spatial spillover effects and influencing factors of carbon emissions in county areas of Ha-Chang City Group: Evidence from NPP-VIIRS nightlight data[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(2): 697–706.]
- [36] 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. [Zhou J, Wang Y X, Liu X R, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China's provinces based on land use change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(12): 1955–1961.]
- [37] 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. [Zhang J, Chen H, Liu D, et al. The spatial and temporal variation and influencing factors of land use carbon emissions at county scale[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(1): 21–31.]
- [38] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区[J]. *生态学报*, 2021, 41(14): 5814–5824. [Wei Y R, Chen S L. Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5814–5824.]
- [39] 苑韶峰, 唐奕钰. 低碳视角下长江经济带土地利用碳排放的空间分异[J]. *经济地理*, 2019, 39(2): 190–198. [Yuan S F, Tang Y Y. Spatial differentiation of land use carbon emissions in the Yangtze River Economic Belt based on low carbon perspective[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(2): 190–198.]
- [40] 张颖, 吴丽莉, 苏帆, 等. 我国森林碳汇核算的计量模型研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(2): 194–200. [Zhang Y, Wu L L, Su F, et al. An accounting model for forest carbon sinks in China [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(2): 194–200.]
- [41] 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. [Yu G H, Geng J J, Zhou P C, et al. Quantitative research on regional ecological compensation based on carbon balance: Take Zhaoshan Demonstration Area of Chang-zhutan Green Heart as an example[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(4): 454–458.]

# Grid scale measurement of carbon compensation in Chongqing City: Based on the perspective of land use

HUANG Huaiyu, GONG Zhiwen

(1. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Center for Resource Economics and Environmental Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** [Objective] Improving the carbon compensation mechanism is an important action to cope with climate change and realize the goal of carbon neutrality. At the grid scale, the establishment of carbon compensation between administrative units can provide a reference for regional low-carbon coordinated development based on land use change. [Methods] Using land cover and socioeconomic data at a grid scale of 5 km×5 km, this study calculated the carbon source/sink of land use in Chongqing from 2000 to 2020, and then explored the spatiotemporal evolution characteristics of the carbon source/sink. Further more, the carbon compensation value with the revised net carbon emissions was estimated. Finally, the path for Chongqing to achieve carbon compensation was discussed. [Results] During the research period, carbon emissions in Chongqing showed a continuous increase, with a total increase of 37.29 million tons. The carbon absorption was slowly increasing, with a total increase of 0.059 million tons. The carbon emissions showed a “core-periphery” spatial structure with the central urban area as the high-value center and gradually decreasing towards the two wings. The areas with reduced carbon emissions were mainly in Changshou, while the areas with increased emissions mainly occurred in Yubei, Jiulongpo, Shapingba, and the northwest of Ba’nan. The carbon absorption showed a distribution pattern of “high in two wings and low in the middle” in general. Fengjie, Yunyang, and Wanzhou were areas of carbon sink growth, while the northeast of Chongqing and some areas in the central urban area showed the reduction of carbon sink. The carbon compensation paying areas were concentrated in the central urban area, central Liangping, southeastern Kaizhou, and southwestern Fengdu, with a total payment amount of 2.337 billion yuan. The regions that can receive carbon compensation were mainly distributed in the two wings and a small number within the main urban area, with a total amount of 1.406 billion yuan. [Conclusion] Carbon emissions in Chongqing far exceed carbon absorption, and there exists spatial heterogeneity in the carbon compensation value at the grid scale. It is recommended to formulate differentiated compensation funding policies according to the actual situation, so as to ensure the economic interests of carbon compensation receiving areas and emphasize the ecological protection responsibility of carbon compensation paying areas. It is also necessary to promote cross-regional and county-level horizontal ecological compensation through multiple channels, and create a win-win situation between ecological protection and economic development.

**Key words:** land use; carbon compensation; grid scale; spatiotemporal evolution; Chongqing