

# 福建省土地利用变化碳排放时空差异与碳补偿

周萍<sup>1,2</sup>, 陈松林<sup>1,2</sup>, 李晶<sup>1,2</sup>, 李晨欣<sup>1,2</sup>

(1.福建师范大学地理科学学院, 福建福州 350007; 2.福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福建福州 350007)

**摘要:** [目的] 开展土地利用碳排放差异与碳补偿研究, 为各地域根据净碳排放量制定低碳发展政策提供依据。[方法] 基于2005—2020年福建省土地利用和能源消费数据, 构建碳排放以及碳补偿价值测算模型, 计算各市域不同时间段的碳排放量以及碳补偿价值。[结果] ①福建省土地利用变化净碳排放呈现出明显的增长趋势, 增长速度先快后慢。建设用地为主要碳源, 其碳排放量增加  $3.41 \times 10^7$  t; 林地为主要碳汇, 其碳吸收量减少近  $3.00 \times 10^4$  t。②净碳排放量高值区域主要分布在碳排放量高、碳补偿率低的福州市、泉州市和漳州市, 净碳排放量低值区域主要分布在碳排放量少、碳补偿率高的南平市, 除厦门市外, 各市的净碳排放强度与净碳排放量的空间分布相似。③碳补偿价值与各市净碳排放量的空间分布具有高度相似性, 高碳补偿区主要是经济发展水平高、净碳排放量大的福州市、泉州市, 受偿区主要是经济发展水平低、净碳排放量小的南平市。[结论] 为实现区域协调以及低碳发展, 需不断完善碳补偿机制, 从低碳层面依靠碳补偿推动区域低碳协调发展。

**关键词:** 土地利用; 碳排放; 碳补偿; 福建省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)03-0356-10

中图分类号: F301.2, X32

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.044; Zhou Ping, Chen Songlin, Li Jing, et al. Temporal and spatial differences in carbon emissions and carbon neutrality caused by land use changes in Fujian Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 356-365.

## Temporal and Spatial Differences in Carbon Emissions and Carbon Neutrality Caused by Land Use Changes in Fujian Province

Zhou Ping<sup>1,2</sup>, Chen Songlin<sup>1,2</sup>, Li Jing<sup>1,2</sup>, Li Chenxin<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China;

2. Provincial Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment of Fujian Province, Fuzhou, Fujian 350007, China)

**Abstract:** [Objective] The differences in carbon emissions and carbon neutrality due to land use changes were analyzed in order to provide a basis for formulating low-carbon development policies in various regions according to net carbon emissions. [Methods] Based on data for land use and energy consumption in Fujian Province from 2005 to 2020, carbon emissions and carbon neutrality value calculation models were constructed to calculate the carbon emissions and carbon neutrality values for different cities in different periods. [Results] ① The net carbon emissions for land use changes in Fujian Province showed an obvious growth trend, and the growth rate was initially fast and then slowed. Construction land was the main carbon source, and its carbon emissions increased by 34.08 million tons. Forest land was the main carbon sink, and its carbon absorption decreased by nearly 30 000 tons. ② The areas with high net carbon emissions were mainly located in Fuzhou, Quanzhou, and Zhangzhou cities. These areas exhibited high carbon emissions and low carbon neutrality rate. The areas with low net carbon emissions were mainly located in Nanping City where low carbon emissions and high carbon neutrality rate were observed. Except for Xiamen City, the intensity of net carbon emissions in each city was similar to the spatial distribution of net carbon emissions. ③ The carbon neutrality value was highly similar to the spatial distribution of net carbon emissions in each city. The high carbon neutrality areas

收稿日期: 2021-11-05

修回日期: 2022-02-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“多视角下台商对大陆农业投资的技术扩散研究”(41771136); 福建省科技计划项目(2019R0124)

第一作者: 周萍(1997—), 女(汉族), 四川省广安市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与碳排放。Email: 2469556328@qq.com。

通信作者: 陈松林(1964—), 男(汉族), 福建省南安市人, 博士、教授, 主要从事土壤与土地资源研究。Email: slchen6@163.com。

were mainly in Fuzhou City and Quanzhou City where economic development level was high and net carbon emission was large, while the compensation area was mainly found in Nanping City where economic development level was low and net carbon emission was small. [Conclusion] In order to achieve regional coordination and low-carbon development, it is necessary to constantly improve the carbon neutrality mechanism and to rely on carbon neutrality to promote coordinated development of regional low-carbon policies.

**Keywords:** land use; carbon emissions; carbon neutrality; Fujian Province

全球气候变化已成为人类社会可持续发展面临的主要挑战,温室气体导致的全球气候变暖已成为人们关注的热点问题之一。目前,有关碳排放的研究多集中在碳排放与经济增长关系、碳排放机理等方面<sup>[1-3]</sup>。然而,人类活动通过改变土地利用方式进而改变能源消费格局,从而影响碳排放的数量和速率。因此土地利用变化是引起区域碳排放的重要因素之一。由于自然条件和人类活动的差异,不同地类具有不同的碳排放强度,土地利用变化必然会对区域“自然—社会”二元碳循环过程产生深远影响<sup>[4]</sup>。目前关于土地利用碳排放研究主要包括不同土地利用碳排放效应的时空演变<sup>[5-6]</sup>、土地利用碳排放的特征及影响因素<sup>[7-8]</sup>、土地利用碳排放与经济发展<sup>[9-10]</sup>、土地利用碳排放与碳足迹等<sup>[11-12]</sup>方面,研究方法包括灰色理论模型<sup>[13-14]</sup>、LMDI 模型<sup>[15-16]</sup>、SBM 模型<sup>[17]</sup>、面板数据回归模型等<sup>[18]</sup>。而面对生态环境与经济发展的问题,如何将土地利用碳排放的时空差异与经济发展相结合,进行碳补偿,促进低碳经济发展还需进一步展开研究。福建省作为全国首个生态文明先行示范区,在城镇化、工业化的进程中也面临着净碳排放量迅速增长的问题。本文通过研究 2005—2020 年福建省不同土地利用类型的碳排放、碳补偿等,探明不同土地利用方式下福建省碳排放的时空演变特征,结合碳排放与经济发展关系进行碳补偿分区,为福建省低碳发展提供科学依据。

## 1 研究区概况

福建省地处中国东南沿海,东隔台湾海峡与台湾地区相望,东北与浙江省毗邻,西北横贯武夷山脉与江西省相连,西南与广东省交界。全省陆域面积  $1.24 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。地势西北高,东南低,山地、丘陵占全省总面积的 80% 以上,闽西和闽中大山带自东北向西南横贯全省,平原主要分布于沿海地区,气候类型为亚热带海洋性季风气候。福建省是中国六大林区之一,2019 年森林覆盖率达 66.8%,森林覆盖率全国第一,现辖福州市、厦门市、泉州市、龙岩市、莆田市、漳州市、南平市、三明市、宁德市 9 个设区市,2020 年实现地区生产总值  $4.39 \times 10^{12}$  元,人均地区生产总值 105 818 元,是中国东南沿海经济较发达的省份之一。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 ([http // www. resdc. cn/](http://www.resdc.cn/)),以 2005,2010,2015,2020 年 Landsat TM/ETM/OLI 影像作为主要数据源,空间分辨率为  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,通过 ArcGIS 10.2 对土地利用数据和全省行政单元图进行叠加、裁剪、分类、提取,依据我国土地利用分类系统,结合区域土地利用类型的特征,将福建省土地利用类型划分为 6 个一级地类:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,得到福建省及各设区市的土地利用数据。社会经济数据主要来源于《福建统计年鉴》及各设区市统计年鉴等。

### 2.2 研究方法

2.2.1 土地利用程度综合体系 土地利用程度指人类活动对土地开发和利用的深度和广度,表现为土地覆被类型变化的频繁程度,对土地利用程度及其变化进行定量分析,可表达该地区土地利用的综合水平和变化趋势<sup>[19]</sup>,测算公式为:

(1) 土地利用程度综合指数。

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \cdot C_i \quad (1)$$

式中: $L$  是土地利用程度综合指数; $n$  是土地利用程度分级数; $A_i$  为第  $i$  级土地利用程度分级指数,采用刘纪元提出的土地利用程度分级<sup>[20]</sup>(表 1); $C_i$  为对应土地利用程度等级类型占研究区总面积的比例。

(2) 土地利用程度变化量、变化率。

$$\Delta L_{b-a} = L_b - L_a = 100 \times \left( \sum_{i=1}^n A_i \cdot C_{ib} - \sum_{i=1}^n A_i \cdot C_{ia} \right) \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot C_{i,b}) - \sum_{i=1}^n (A_i \cdot C_{i,a})}{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot C_{i,a})} \quad (3)$$

式中: $L_a, L_b$  分别是  $a$  时间和  $b$  时间土地利用程度综合指数; $C_{ia}$  和  $C_{ib}$  分别对应  $a$  时间和  $b$  时间第  $i$  级土地利用面积占研究区总面积的比例; $R$  为土地利用程度变化率。若  $\Delta L_{b-a} > 0$  或  $R > 0$ ,则该区域的土地利用处于发展时期,反之处于调整时期或衰退期。

表 1 福建省土地利用程度分级

类型	未利用土地	林、草、水用地	农业用地	城镇聚落用地
土地利用类型	未利用地	林地、草地、水域用地	耕地、草地	城镇、居民点、工矿用地、交通用地
分级指数	1	2	3	4

2.2.2 碳排放测算 在土地利用数据的基础上,计算出不同土地利用的碳排放量,净碳排放量等于碳源与碳汇的差值。耕地的农作物具有碳吸收的功能,但在短时间内又通过呼吸作用释放到空气中去,作为碳汇的功能不明显<sup>[21]</sup>。因此以林地、草地、水域、未利用地作为碳汇,建设用地、耕地作为碳源。土地利用碳排放测算公式为:

$$C_e = \sum_{i=1}^5 e_i = \sum_{i=1}^5 A_i \times \alpha_i + C_b \quad (4)$$

式中: $C_e$  为碳排放量; $e_i$  为第  $i$  种土地利用产生的碳排放量(吸收); $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积,包括林地、草地、水域、未利用地、耕地; $\alpha_i$  为第  $i$  种土地利用类型的碳排放系数。通过查阅相关文献以及结合区域的实际情况,确定 5 种土地利用类型的碳排放系数(表 2)。

表 2 福建省土地利用类型碳排放系数

土地利用类型	碳排放系数/ ( $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	参考来源
耕地	0.461	周思宇 <sup>[22]</sup>
林地	-0.612 5	苏雅丽 <sup>[23]</sup> 、李颖等 <sup>[24]</sup>
草地	-0.021	尹晶萍 <sup>[25]</sup> 、王穗子等 <sup>[26]</sup>
水域	-0.410	黄麟 <sup>[27]</sup> 、方精云等 <sup>[21]</sup>
未利用地	-0.005	赖力 <sup>[28]</sup> 、张赫等 <sup>[29]</sup>

注:负数表示碳汇。

根据福建省能源消耗情况以及数据的可获取性,选取原煤、焦炭、天然气、汽油、柴油、燃料油、液化石油气、煤油等能源来测算建设用地的碳排放量,测算公式为:

$$C_b = \sum m_j \times \beta_j \times \gamma_j \quad (5)$$

式中: $C_b$  为建设用地的碳排放量; $m_j$  为化石能源消耗量; $\beta_j$  为折算标准煤系数; $\gamma_j$  为碳排放系数,其中标准煤换算系数取自于《中国能源统计年鉴》,碳排放系数取自于 IPCC 碳排放计算值(表 3)。

2.2.3 碳排放强度 碳排放强度即单位面积碳排放,表示土地利用的碳排放状况<sup>[30]</sup>。测算公式为:

$$C_{ej} = e_i / A_i \quad (6)$$

式中: $C_{ej}$  为第  $i$  种土地利用类型的碳排放强度; $e_i$  为对应土地利用类型的碳排放量; $A_i$  为对应土地利用类型的面积。

2.2.4 碳补偿模型 以净碳排放量作为碳补偿基准

值确定的依据<sup>[31]</sup>。若净碳排放量为负值,说明该地区碳汇能力大于碳排放量,生态系统不仅能够吸收本地区的碳排放,而且还能吸附附近地区的碳排放,因此该地区应获得碳补偿资金,反之,则应支付碳补偿资金<sup>[32]</sup>。测算公式为:

$$L_i = E_{ci} - S_{ci} \quad (7)$$

式中: $L_i$  为  $i$  地区的碳补偿基准值; $E_{ci}$  为  $i$  地区碳排放量( $t$ ); $S_{ci}$  为  $i$  地区的碳吸收量( $t$ )。  $L_i > 0$  时,应支付碳补偿资金, $L_i < 0$  时,则应获得碳补偿资金。

表 3 福建省能源碳排放系数

能源种类	折算标准煤系数 (以标准煤计)/ ( $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碳排放系数 (以碳/标准煤计)/ ( $t \cdot t^{-1}$ )
原煤	0.714 3	0.755 9
焦炭	0.971 4	0.855 0
天然气	1.330 0	0.448 3
汽油	1.471 4	0.553 8
柴油	1.457 1	0.592 1
燃料油	1.428 6	0.618 5
液化石油气	1.714 3	0.504 2
煤油	1.714 1	0.571 4

但由于各地区的经济发展水平、碳排放强度、碳排放效率等存在差异,仅考虑净碳排放量作为碳补偿基准值,可能会造成某些地区需支付的资金过高,使计算的结果存在一定偏差,因此,需对基准值  $L_i$  进行修正,将每个地区设定一个碳排放阈值  $P_i$ <sup>[33]</sup>,测算公式为:

$$P_i = \text{ECC} \times D = \frac{G_i}{G} / \frac{C_i}{C} \times D \quad (8)$$

式中: $P_i$  为各市的碳排放阈值( $t$ ); $\text{ECC}$  为碳排放的经济贡献系数<sup>[33]</sup>;  $D$  为全省各市碳排放平均值( $t$ ); $G_i, G$  分别为各市的生产总值和福建省的生产总值(万元); $C_i, C$  分别为各市的碳排放量和福建省的总碳排放量( $t$ )。

由于不同市域间的碳排放强度也存在时空差异,因此结合不同市域 2015 年和 2020 年碳排放强度及其与全省碳排放强度的对比情况,对碳排放量进行修正<sup>[32]</sup>,测算公式为:

$$E_{ei}^1 = E_{ei} \times \left( \frac{G_{i1} - i}{G_{i2} - i} - \frac{G_{T1}}{G_{T2}} + 1 \right) \times \frac{G_{i1-i}}{G_T} \quad (9)$$

式中: $E_{ei}^1$  为修正后市域  $i$  的碳排放量; $G_{i1-i}$  和  $G_{i2-i}$

分别为 2020, 2015 年市域  $i$  的单位地区生产总值( $t$ /万元);  $G_{T1}$  和  $G_{T2}$  分别为 2020 年和 2015 年福建省的单位 GDP( $t$ /万元);  $G_T$  为 2020 年福建省各市平均单位地区生产总值碳排放( $t$ /万元)。经过修正后的碳补偿基准值如下:

$$L_i^1 = E_{Ci}^1 - S_{Ci} - P_i \quad (10)$$

式中:如果  $L_i^1 > 0$ , 则该地应支付碳补偿资金;  $L_i^1 = 0$ , 则不需要支付与不能获得补偿资金,  $L_i^1 < 0$ , 则该地获得碳补偿资金。

赵荣钦等<sup>[31]</sup>在余光辉等<sup>[34]</sup>研究基础上对模型进行适当的修正, 得到碳补偿价值的计算方法:

$$M_i = |L_i^1| \times \alpha \times \gamma \quad (11)$$

式中:  $M_i$  为  $i$  地区获得或支付的碳补偿资金(万元);  $\alpha$  为单位碳价(元/ $t$ );  $\gamma$  为生态补偿系数。其中  $\alpha$  的计算公式为:

$$\alpha = \frac{(P_{\max} + P_{\min})}{2} \times \frac{G_{P1}}{G_{P2}} \quad (12)$$

式中:  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  分别为目前国内碳汇价格的最大值和最小值<sup>[35]</sup>;  $G_{P1}$  为福建省 2020 年人均生产总值(万元/人);  $G_{P2}$  为全国 2020 年人均生产总值(万元/人)。

$\gamma$  则通过改进后的 Peal 生长曲线模型<sup>[36-37]</sup>来表示:

$$\gamma_i = \frac{A_i}{(1 + e^{-t})} \quad (13)$$

式中:  $\gamma_i$  为第  $i$  个地区的碳补偿系数;  $A_i$  为碳补偿

能力, 等于  $i$  地区生产总值与福建省生产总值之比;  $e$  为自然对数的底数;  $t$  为 2020 年福建省的恩格尔系数。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用状况

3.1.1 土地利用现状及变化 对 9 个市的 6 个一级地类面积进行统计, 得到福建省及其各设区市的土地利用情况(表 4—5)。2020 年底福建省土地总面积为  $1.22 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 土地利用类型以林地、耕地、草地为主, 其中林地面积所占比重最大, 约 61.82%, 主要分布在宁德、南平、三明和龙岩, 4 个市的林地面积约占 71.97%; 其次是耕地和草地, 分别占土地总面积的 16.85%, 15.10%, 耕地主要分布在泉州、南平、三明和漳州, 草地主要分布在龙岩、南平、宁德和三明; 水域、建设用地、未利用地则分别占 1.64%, 4.50%, 0.09%, 水域主要分布在福州、泉州、宁德和漳州, 建设用地主要分布在福州、泉州、龙岩和漳州, 未利用地主要分布在泉州、龙岩、南平和宁德。

2005—2020 年, 福建省土地利用结构不断发生变化, 土地利用变化表现为耕地、林地面积减少, 其余 4 种土地利用类型面积均呈不同程度的增长, 其中建设用地变化幅度最大, 从 2005—2020 年面积增长  $186\ 619.12 \text{ hm}^2$ , 变化率达 51.32%; 其次是水域用地, 面积增长  $33\ 896.24 \text{ hm}^2$ , 变化率达 20.33%; 而耕地、林地则分别减少  $93\ 775.51, 67\ 275.35 \text{ hm}^2$ 。

表 4 2005—2020 年福建省各土地利用类型面积及比例变化

年份	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2020	面积/ $\text{hm}^2$	2 061 916.80	7 564 347.26	1 848 011.31	200 595.89	550 245.97	10 720.96
	比例/%	16.85	61.82	15.10	1.64	4.50	0.09
2015	面积/ $\text{hm}^2$	2 080 395.43	7 583 658.72	1 844 175.81	181462.29	492174.38	10169.77
	比例/%	17.06	62.20	15.13	1.35	4.04	0.08
2010	面积/ $\text{hm}^2$	2 116 103.93	7 589479.68	1 848 294.41	187 570.27	440 635.14	10 221.22
	比例/%	17.36	62.25	15.16	1.54	3.61	0.08
2005	面积/ $\text{hm}^2$	2 155 692.30	7 631 622.61	1 837 451.97	166 699.65	363 626.86	10 013.61
	比例/%	17.72	62.73	15.10	1.37	2.99	0.08

3.1.2 土地利用程度 福建省及其各市域的土地利用程度综合指数和土地利用程度变化率见图 1。如图 1 所示, 2005—2020 年, 福建省土地利用程度综合指数呈上升趋势, 土地利用程度变化率为 0.009 6, 大于 0, 表明福建省总体土地利用水平处于发展期, 但 15 a 间土地利用程度综合指数变化量仅增加 2.14, 总体土地利用程度变化不大。

从各个市域来看, 4 个年份中, 各市的土地利用

程度变化率均大于 0, 土地利用程度变化呈上升状态, 福州市、泉州市、莆田市、厦门市、漳州市这 5 个沿海城市的土地利用程度综合指数均高于福建省整体水平, 其中厦门市土地利用程度综合指数最高, 达到 287.96, 变化量和变化率也最高, 在 2005—2010 年, 土地利用程度综合指数变化量和变化率分别达到 7.72, 0.028 2, 建设用地占全市土地面积的比例从 2005 年 18.99% 增长到 2020 年的 30.81%, 说明随着

厦门市经济快速发展,城市化进程加快,城市建成区面积不断增大。龙岩、南平、宁德、三明市的土地利用程度综合指数均低于全省整体水平,其中三明市最

低,2020 年的土地利用程度综合指数仅为 215.97,2005—2020 年的变化量和变化率分别为 0.97,0.004 6,土地利用程度变化小。

表 5 2020 年福建省各市域各土地利用类型面积及比例

土地利用类型	项目	福州市	泉州市	龙岩市	南平市	宁德市	莆田市	三明市	厦门市	漳州市
耕地	面积/hm <sup>2</sup>	193 017.98	249 699.74	200 948.66	491 947.58	220 809.09	113 546.90	294 639.86	42 783.69	254 523.30
	比例/%	9.36	12.11	9.75	23.86	10.71	5.51	14.29	2.08	12.34
林地	面积/hm <sup>2</sup>	695 294.77	559 843.54	1 386 574.77	1 690 973.62	784 934.64	177 748.68	1 574 890.80	45 276.46	648 809.99
	比例/%	9.19	7.40	18.33	22.45	10.38	2.35	20.82	0.60	8.58
草地	面积/hm <sup>2</sup>	159 518.90	158 375.14	239 474.19	387 105.74	244 415.11	52 341.95	371 273.95	14 370.77	221 135.55
	比例/%	8.63	8.57	12.96	20.95	13.23	2.83	20.09	0.78	11.97
水域	面积/hm <sup>2</sup>	50 376.61	21 592.36	9 744.80	21 044.04	25 427.96	14 287.58	15 773.27	9 923.74	32 425.54
	比例/%	25.11	10.76	4.86	10.49	12.68	7.12	7.86	4.95	16.16
建设用地	面积/hm <sup>2</sup>	79 075.86	132 096.04	59 652.42	30 913.13	26 543.29	37 300.55	36 066.40	50 030.27	98 568.01
	比例/%	14.37	24.01	10.84	5.62	5.62	6.78	6.56	9.09	17.91
未利用地	面积/hm <sup>2</sup>	202.73	1 550.34	3 350.85	1 921.16	1 450.11	354.71	653.65	9.55	1 227.86
	比例/%	1.89	14.46	31.26	17.92	13.53	3.31	6.10	0.09	11.45
总计	面积/hm <sup>2</sup>	1 177 486.85	1 123 157.16	1 899 745.69	2 623 905.27	1 303 580.2	395 580.37	2 293 297.93	162 394.48	1 256 690.25
	比例/%	9.62	9.18	15.53	21.44	10.65	3.23	18.74	1.33	10.27

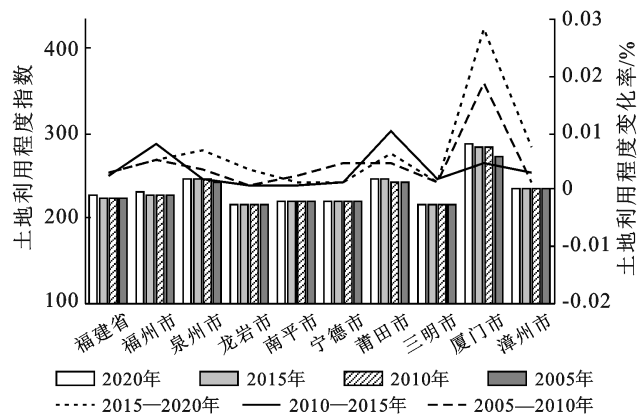


图 1 福建省 2005—2020 年土地利用程度综合指数和土地利用程度变化率

### 3.2 土地利用碳排放变化特征分析

3.2.1 土地利用碳排放总体特征分析 福建省 2005—2020 年碳源、碳汇以及净碳排放量见表 6。2005—2020 年福建省土地利用净碳排放呈明显的增

长趋势,从 2005 年  $1.74 \times 10^7$  t 增长到 2020 年  $5.145 \times 10^7$  t,增长 3 406.19 t,增幅达 196.00%。其中,2005—2010 年增加  $1.75 \times 10^7$  t,增长率为 100.81%,2010—2015 年增加  $5.35 \times 10^6$  t,增长率为 15.31%,2015—2020 年增长  $1.12 \times 10^7$  t,增长率为 27.75%,增长速度在 2005—2010 年达到最快,而后逐渐放缓。

土地利用的净碳排放量受到碳汇和碳源的影响。碳源主要包括建设用地和耕地,以建设用地为主。建设用地碳排放量由 2005 年  $2.12 \times 10^7$  t 增长至 2020 年  $5.53 \times 10^7$  t,增长 1.61 倍,其中 2005—2010 年增长速度最快达 83.00%。这也是土地利用净碳排放量在 2005—2010 年迅速增长的主要原因。2005—2020 年福建省耕地面积减少,耕地碳排放量也随之减少,但耕地的碳排放较弱,对整体碳排放量影响较小。从碳汇来看,林地在碳汇中起着主要作用,碳汇量从 2005 年  $4.78 \times 10^6$  t 减少至 2020 年的  $4.75 \times 10^6$  t。

表 6 福建省土地利用碳排放

10<sup>4</sup> t

年份	碳源			碳汇				净碳排放量	
	建设用地	耕地	总计	林地	草地	水域	未利用地		
2005	2 118.35	99.38	2 217.73	467.44	3.86	6.83	0.01	478.14	1 739.59
2010	3 872.23	97.55	3 969.78	464.86	3.88	7.69	0.01	476.43	3 493.35
2015	4 407.94	95.91	4 503.84	464.50	3.87	7.44	0.01	475.82	4 028.03
2020	5 526.15	95.05	5 621.21	463.32	3.88	8.22	0.01	475.43	5 145.78

### 3.2.2 土地利用碳排放时空特征分析

(1) 土地利用碳排放量及强度的时空分析。从福建省各市域碳排放量的空间分布(图 2)来看,福州

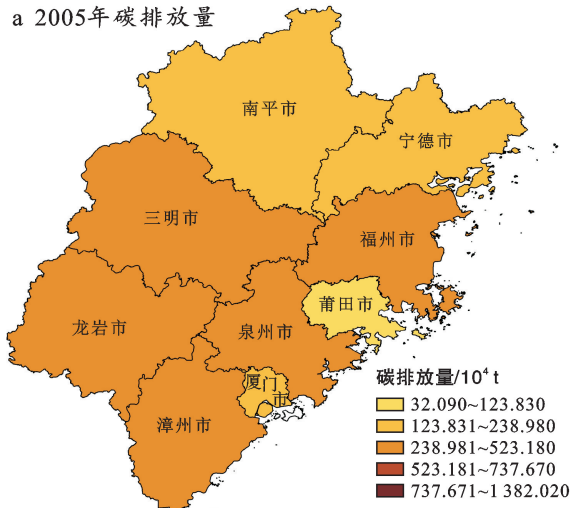
市和泉州市处于碳排放量的高值区域。两个市的碳排放量占整个省的 48.35%,作为福建省经济发展的重点区域,泉州市和福州市 2020 年分别实现地区生

产总值  $1.02 \times 10^{12}$ ,  $1.00 \times 10^{12}$  元,成为福建省内 2 个 GDP 总量超过万亿的城市。经济快速发展也带来了建设用地以及建设用地承载的人类活动消耗的能源量的增长。2020 年泉州市和福州市的能源消费量占整个省的 45.26%,与碳排放量的比例相当;三明市、漳州市处于碳排放量中高值区域;龙岩市、宁德市处于中值区域;厦门市处于中低值区域;南平市、莆田市则处于低值区域,南平市碳排放量低的主要原因是林地和草地土地利用面积比例大,分别占福建省的 22.45%,20.95%,以及经济发展水平较低,2020 年

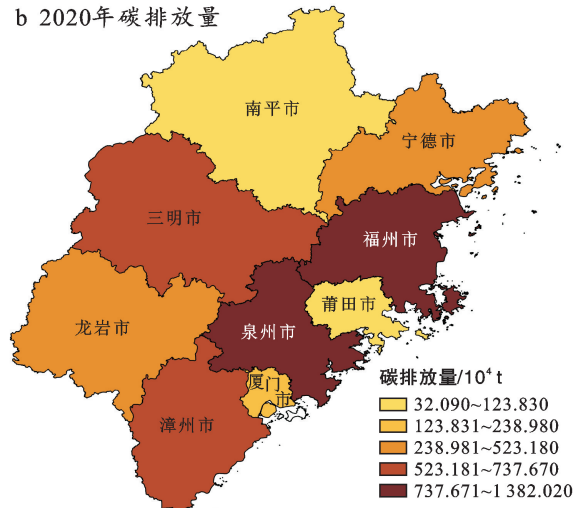
GDP 仅达  $2.01 \times 10^{11}$  元,能源消耗量仅占 1.92%。从时间尺度来看,2005—2020 年除南平市的碳排放量有所下降外,其余各市均呈不同程度增加,其中泉州和福州增长幅度最大,从  $6.29 \times 10^6$  t 增长至  $2.54 \times 10^7$  t,增长近 4 倍。

福建省各市的碳排放强度见图 2。除厦门市外,福建省各市的碳排放强度与碳排放量的空间分布具有高度相似性,厦门市碳排放强度大主要因为经济发展水平高,2020 年 GDP 达  $6.38 \times 10^{11}$  元,但土地利用面积较小,导致碳排放总量较少。

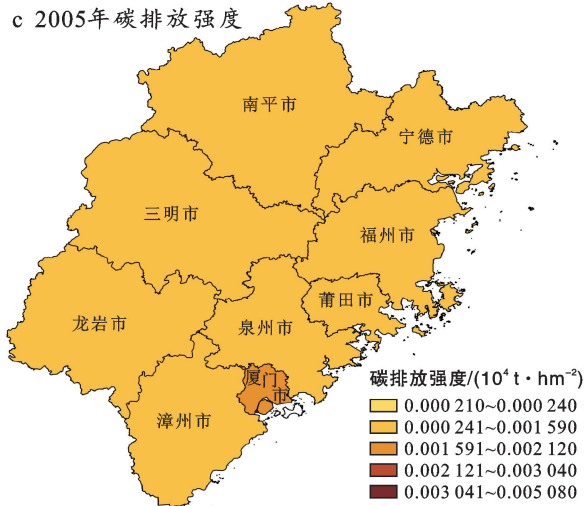
a 2005年碳排放量



b 2020年碳排放量



c 2005年碳排放强度



d 2020年碳排放强度

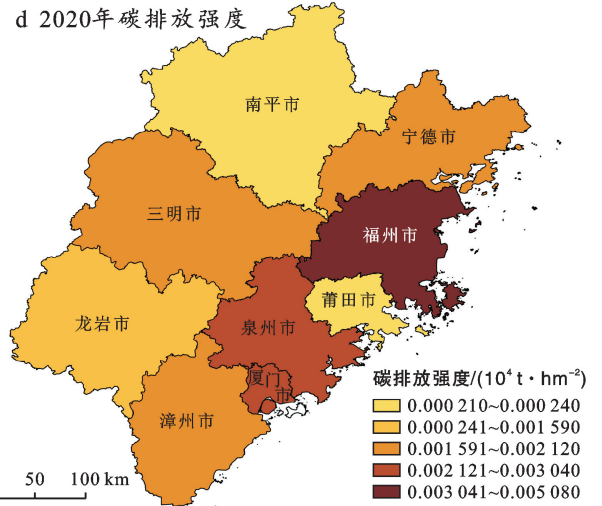


图 2 2005—2020 福建省土地利用碳排放格局

(2) 土地利用碳吸收量及强度的时空分析。从福建省各市域碳吸收量的空间分布(图 3)来看,碳吸收量高值区域主要分布在闽北和闽西地区,闽东南则是碳吸收量较低值区域,其中三明市、南平市处高值区域,龙岩市处中高值区域。3 个城市的碳吸收量占整个区域的 60.78%,林地、草地土地利用面积所占比例大,分别占全省的 61.60%,54.00%。福州市由于水域面积比重大,占全省的 25.11%,碳吸收量

相对较多。从时间尺度来看,除莆田市的碳吸收量有所增加外,其余各市的碳吸收量基本不变;从碳吸收强度来看,各市的碳吸收强度与碳吸收量的空间分布存在一定差异性,受各种土地利用面积影响,龙岩市的碳吸收强度处于高值区域,而三明市、南平市、福州市处于中高值区域,泉州市、莆田市处于中值区域,宁德市处于中低值区域,漳州市、厦门市处于低值区域。

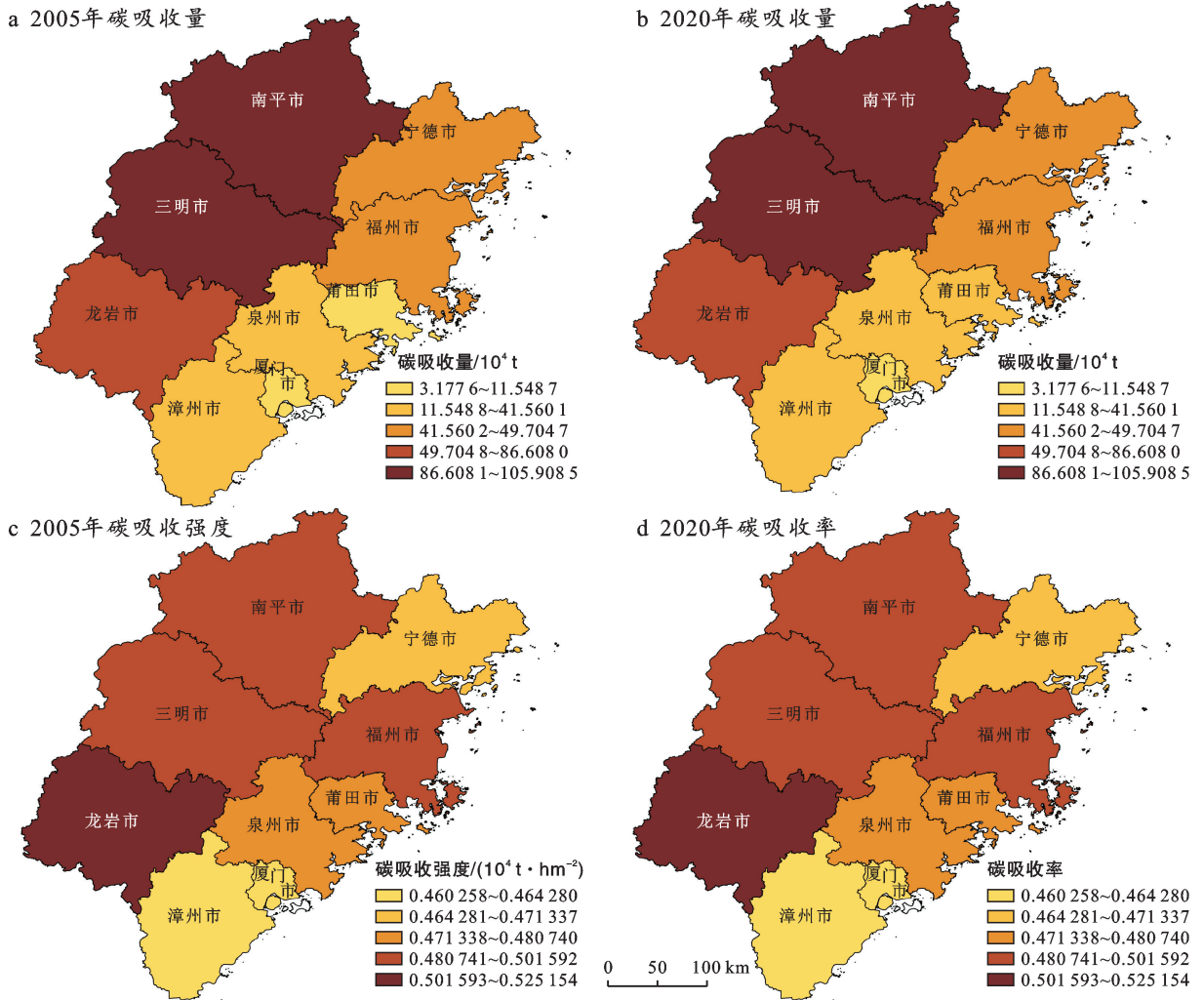


图 3 2005—2020 福建省土地利用碳吸收格局

(3) 土地利用净碳排放量及强度的时空分析。从福建省各市域净碳排放量的空间分布(图 4)来看,净碳排放量与碳排放量的空间分布具有高度一致性,净碳排放高值区域分布在经济发展水平高、能源消耗高、碳排放高的福州市和泉州市,以及中高值区域的漳州市,3 个市的净碳排放量占整个省的 66.03%;三明市虽碳吸收量高,但碳排放量高,导致净碳排放量处于中值区域;南平市、龙岩市由于碳吸收量高,碳排放量低,净碳排放量处于较低值区域;厦门市则由于土地利用面积较小,处于较低值区域。除厦门市外,各市的净碳排放量强度与净碳排放量的空间分布相似。2005—2020 年除南平市、莆田市外,其余各市的净碳排放量均呈不同程度的增加,其中泉州市和福州市增长幅度最大,增长近 4.5 倍,净碳排放量的增加主要是建设用地面积不断扩大,在建设用地利用过程中能源消耗的增加,最终导致碳排放量的快速增加。

(4) 土地利用碳补偿率的时空分析。碳补偿率是碳吸收量与碳排放量的比值,碳补偿率越高,说

明碳汇能力越强。从福建省市域空间的碳补偿率空间分布(图 5)来看,各市域的碳补偿率与净碳排放强度的空间分布具有一定关联性,碳汇能力弱的区域主要分布在净碳排放强度高的厦门、泉州和福州市,2020 年 3 个市的 GDP 处于福建省前三位,人口密度大,产业结构以二、三产业为主,建设用地面积及其碳排放量大,林地面积小,3 个市的林地面积仅占全省林地面积的 17.19%,较高的碳排放量加上较低的碳吸收量导致该区域碳补偿率低,碳汇能力弱。碳汇能力强的区域主要分布在净碳排放强度低的南平市,2020 年南平市的 GDP 处于全省末位,南平市绝大部分处于山区,人口密度小,林地面积大,占全省林地面积的 22.45%,碳吸收能力强。2005—2020 年,除南平市、莆田市外,其余各市的碳汇能力均不同程度地下降,其中福州市、泉州市下降幅度最大,快速地工业化、城市化,建设用地扩张,林地、草地等生态用地减少,综合导致碳排放量的增加,碳吸收量减少,碳汇能力减弱。

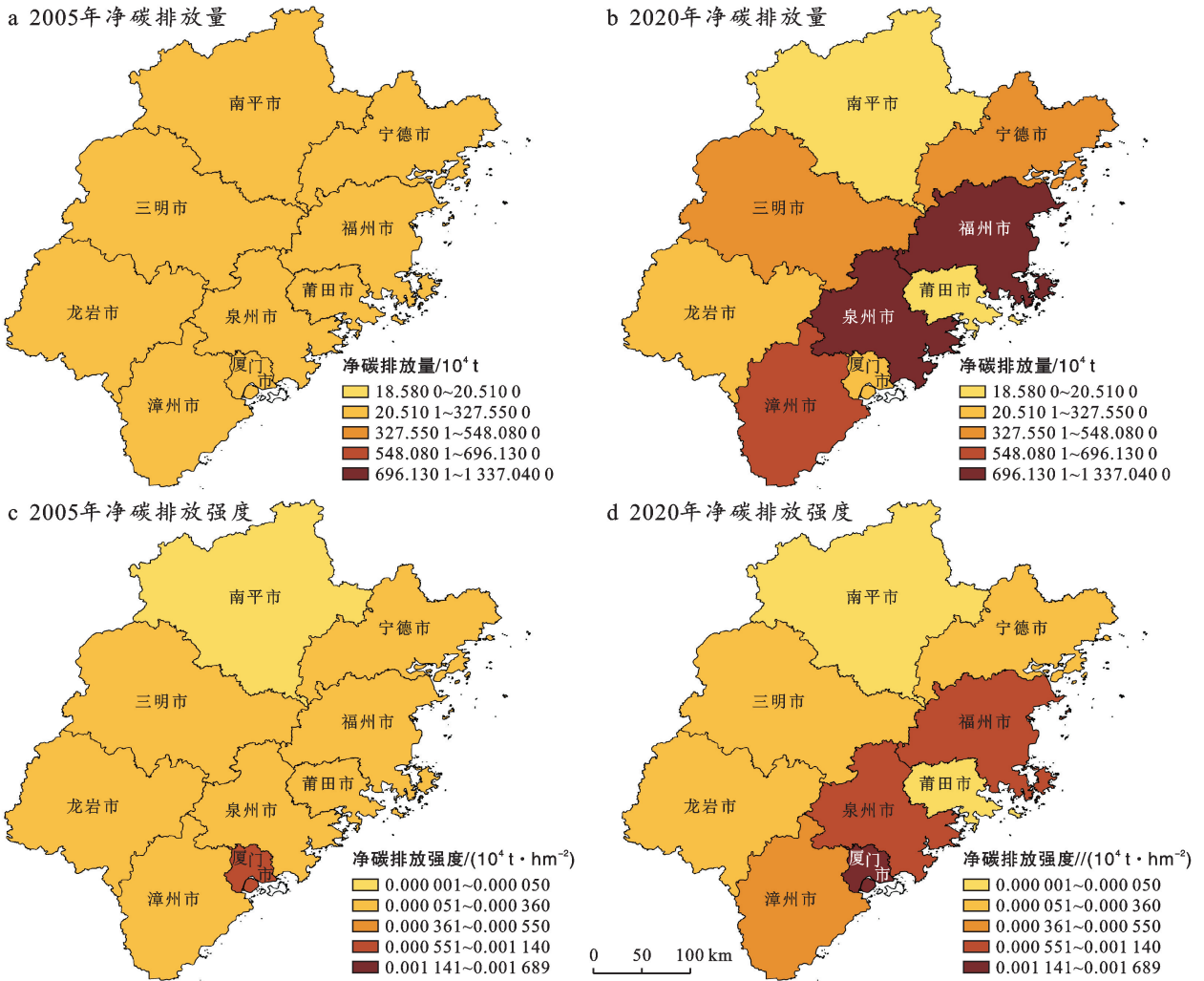


图 4 2005—2020 福建省土地利用净碳排放格局

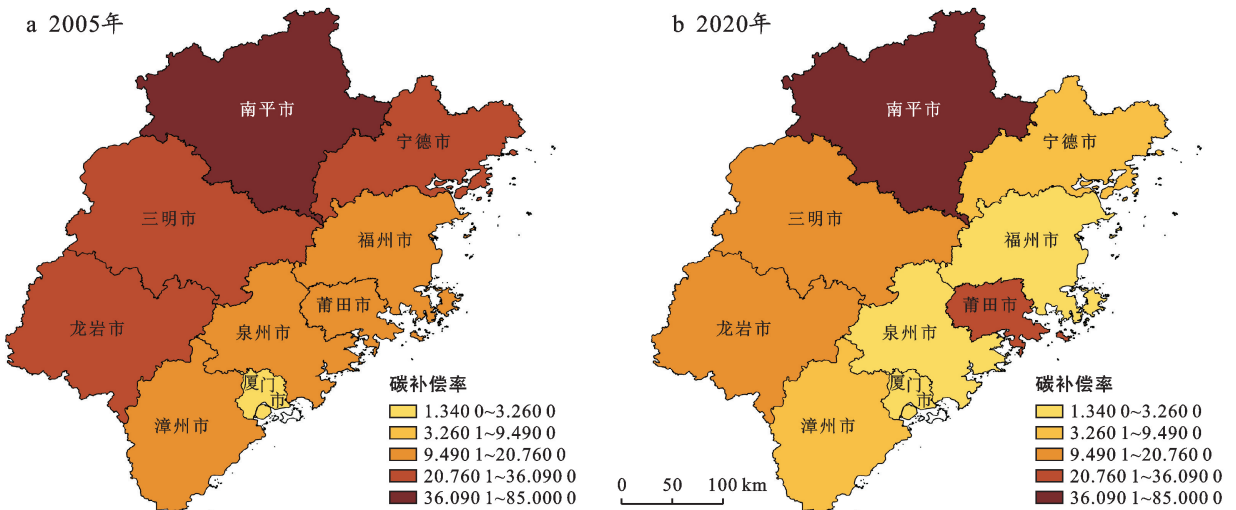


图 5 2005—2020 福建省土地利用碳补偿率格局

3.2.3 碳补偿价值核算与分析 2020 年福建省 9 个市的碳补偿价值如表 7 和图 6 所示。碳补偿价值与各市净碳排放量的空间分布具有高度的相似性,其

中,向外支付碳补偿资金最多的是福州市,其次是泉州市,分别需要支付  $2.21 \times 10^8$ ,  $1.51 \times 10^8$  元,这与两者的经济发展水平高、净碳排放量大、碳补偿率低有



直接关联性;相反南平市则因净碳排放量少,碳补偿率高,经济发展水平低,而获得碳补偿资金。依据福建省各市域碳补偿价值不同,大致可以将福建省各市分为高补偿区、中补偿区、低补偿区、受偿区,高补偿区包括福州市、泉州市、漳州市,中补偿区包括漳州市、三明市,低补偿区包括龙岩市、厦门市和莆田市,受偿区包括南平市。从净碳排放量与碳补偿价值的关系来看,净碳排放量越多,支付的碳补偿资金越多,相反,净碳排放量越少,获得的碳补偿资金越多。从区域经济发展、碳补偿率、碳补偿价值来看,要实现区域协调以及低碳发展,需要不断缩小经济差距,努力实现区域内部公平发展,依靠碳补偿从低碳层面推动区域低碳协调发展。

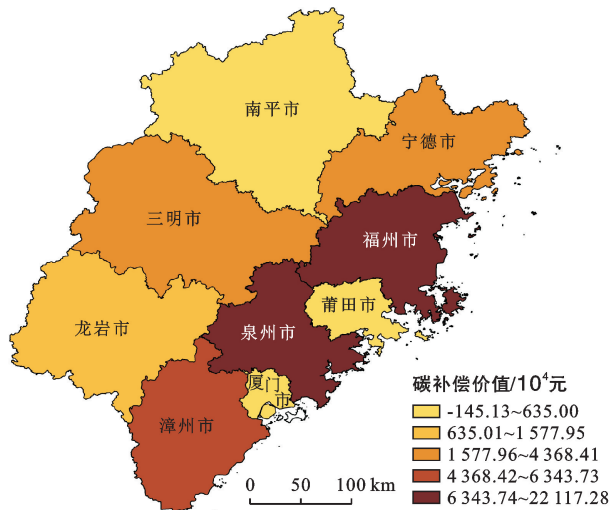


图 6 2020 福建省土地利用碳补偿价值格局

表 7 福建省各市域土地利用碳补偿价值

城市	福州市	泉州市	漳州市	三明市	宁德市	龙岩市	厦门市	莆田市	南平市
补偿金额/ $10^4$ 元	22 117.28	15 102.70	6 343.73	4 368.41	3 039.03	1 577.95	635.00	36.89	-145.13

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 福建省的耕地、建设用地主要集中在福州市、泉州市和漳州市等地区,与国内外其他地区已有研究结果类似<sup>[7,38]</sup>,土地利用程度高,人口密集,经济发展水平高,能源消耗量大的地区,产生的碳排放量大,且林地所占面积小,碳吸收量少,导致区域碳补偿率低,碳汇能力弱。林地、草地主要集中在宁德市、南平市和三明市等地区,该地区多处于山地地区,土地利用程度低,城镇发展水平低,林地面积比重大,主要承担生态功能,碳吸收量大,碳汇能力强。

(2) 从区域经济发展、碳补偿率、碳补偿价值来看,要实现区域协调以及低碳发展,需要福州市、泉州市等碳补偿区向经济发展水平低、净碳排放量小、碳补偿率高的受偿区支付碳补偿资金,不断缩小经济差距,努力实现区域内部公平发展,依靠碳补偿从低碳层面推动区域低碳协调发展<sup>[39]</sup>。同时土地利用的净碳排放量受到碳汇和碳源的影响,而林地作为主要的碳汇对碳的吸收量远远低于建设用地的碳排放量,无法实现碳平衡,为此,要控制好化石能源的消耗,调整能源消费结构,发展清洁能源,减少碳源的排放,提高林地、草地的面积,逐步实现碳平衡。

(3) 本研究结合 IPCC 以及参考相关文献,选择与福建省自然条件相近地区的碳排放系数,构建合理的土地利用碳排放核算体系,数据结果与已有研究一致<sup>[40]</sup>,并进一步构建碳补偿模型,进行碳补偿价值

分区,研究结果有一定合理性,但福建省作为一个森林植被覆盖率高的省份,不同植被的碳吸收能力存在差异,在未来的研究中应进一步将林地碳排放的计算进行细化<sup>[25,41]</sup>。其次,在进行碳补偿价值分区时,以市域为单位,不利于各地区提出更有针对性的低碳发展对策,未来应深入到更小的县域尺度,同时结合城市产业结构的低碳优化,提出针对性的低碳发展对策<sup>[42]</sup>。

### 4.2 结论

(1) 2005—2020 年福建省的土地利用净碳排放量呈明显增长趋势,增长速度先快,而后逐渐放缓。建设用地为主要碳源,其碳排放量增长近 1.61 倍,林地为主要的碳汇,碳吸收量随着土地利用面积的减少而减少。碳汇对碳的吸收量远远低于碳源的碳排放量,无法实现碳平衡,导致净碳排放量大。

(2) 从福建省各市域净碳排放量、碳补偿率的空间分布来看,净碳排放量高值区域主要分布在以福州市、泉州市、漳州市为主的碳排放量大,碳吸收量小,碳补偿率低的区域,净碳排量低值区域主要分布在以南平市为主碳排放量少,碳补偿率高的区域。

(3) 碳补偿价值与各市净碳排放量的空间分布具有高度相似性,依据福建省各市域碳补偿价值的不同,可以将福建省各市分为高补偿区、中补偿区、低补偿区、受偿区,中高补偿区主要是福建省经济发展水平高,碳排放量大,碳补偿率低的区域,受偿区则是经济发展水平低,碳排放量少,碳补偿率高的区域。为此,要实现区域协调发展以及低碳发展,需要通过建

立以政府为主导区域横向碳补偿体制,不断缩小经济差距,努力实现区域内部公平发展,依靠碳补偿从低碳层面推动区域低碳协调发展,同时高碳排放的区域也应提高能源利用率,调整能源消费结构,从源头上减少碳排放。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Soytas U, Sari R, Ewing B T. Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States [J]. *Ecological Economics*, 2007, 62(3/4): 482-489.
- [2] 刘慧,成升魁,张雷.人类经济活动影响碳排放的国际研究动态[J].*地理科学进展*, 2002, 21(5): 420-429.
- [3] 朱永彬,王铮,庞丽,等.基于经济模拟的中国能源消费与碳排放高峰预测[J].*地理学报*, 2009, 64(8): 935-944.
- [4] 赵荣钦,陈志刚,黄贤金,等.南京大学土地利用碳排放研究进展[J].*地理科学*, 2012, 32(12): 1473-1480.
- [5] 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.
- [6] 杨国清,朱文锐,文雅,等.20年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究[J].*生态环境学报*, 2019, 28(2): 332-340.
- [7] 冯杰,张胜,王涛.中国省际土地利用碳排放及其影响因素分析[J].*统计与决策*, 2019, 35(5): 141-145.
- [8] 独孤昌慧.中国农地利用碳排放及影响因素研究: 1990—2016年[J].*生态经济*, 2020, 36(5): 19-23.
- [9] 黄鑫,邢秀为,程文仕.土地利用碳排放与GDP含金量的脱钩关系及驱动因素[J].*地域研究与开发*, 2020, 39(3): 156-161.
- [10] 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.
- [11] 宋山梅,向俊峰.贵州省喀斯特不同土地利用方式碳排放和碳足迹生态效应[J].*林业资源管理*, 2018(6): 57-63.
- [12] 彭文甫,周介铭,徐新良,等.基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J].*生态学报*, 2016, 36(22): 7244-7259.
- [13] 严慈,侯兰功.基于灰色理论的陕西省土地利用变化及其碳排放研究[J].*西安理工大学学报*, 2021, 37(1): 25-31.
- [14] 曲鲁平,翟腾腾,张全景.基于灰色理论模型的山东省土地利用碳排放研究[J].*山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(2): 290-296.
- [15] 马肖迪,谭晓波.基于LMDI模型的湖南省土地利用碳排放影响因素研究[J].*湖南工业大学学报*, 2019, 33(6): 60-66.
- [16] 丁正满,蒋小荣.基于LMDI分解的襄阳市土地利用碳排放与经济增长的脱钩关系研究[J].*农村经济与科技*, 2020, 31(17): 50-52.
- [17] 胡光伟,刘玉安,张明,等.基于SBM模型的湖南省城市土地集约节约利用碳排放效率评价[J].*国土资源科技管理*, 2020, 37(6): 14-27.
- [18] 杨皓然,吴群.基于系统GMM面板模型的土地利用碳排放效应研究:以中国省际面板数据为例[J].*土壤通报*, 2019, 50(3): 541-549.
- [19] 谭术魁,刘琦,李雅楠.中国土地利用空间均衡度时空特征分析[J].*中国土地科学*, 2017, 31(11): 40-46.
- [20] 刘纪远,张增祥,庄大方,等.20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析[J].*地理研究*, 2003, 22(1): 1-12.
- [21] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].*中国科学(D辑:地球科学)*, 2007, 37(6): 804-812.
- [22] 周思宇,郝凤明,尹岩,等.东北地区耕地利用碳排放核算及驱动因素[J].*应用生态学报*, 2021, 32(11): 3865-3871.
- [23] 苏雅丽,张艳芳.陕西省土地利用变化的碳排放效益研究[J].*水土保持学报*, 2011, 25(1): 152-156.
- [24] 李颖,黄贤金,甄峰.江苏省区域不同土地利用方式的碳排放效应分析[J].*农业工程学报*, 2008, 24(S2): 102-107.
- [25] 尹晶萍,张煜星,付尧,等.中国碳排放与森林植被碳吸收潜力研究[J].*林业资源管理*, 2021(3): 53-61.
- [26] 王穗子,刘帅,樊江文,等.碳交易市场现状及草地碳汇潜力研究[J].*草业学报*, 2018, 27(6): 177-187.
- [27] 黄麟,刘纪远,邵全琴,等.1990—2030年中国主要陆地生态系统碳固定服务时空变化[J].*生态学报*, 2016, 36(13): 3891-3902.
- [28] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].南京:南京大学, 2010.
- [29] 张赫,彭千芮,王睿,等.中国县域碳汇时空格局及影响因素[J].*生态学报*, 2020, 40(24): 8988-8998.
- [30] Tao Yuguang, Huang Zhenfang. Review of accounting for carbon dioxide emissions from tourism at different spatial scales [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(5): 246-254.
- [31] 卢俊宇,黄贤金,戴靓,等.基于时空尺度的中国省级区域能源消费碳排放公平性分析[J].*自然资源学报*, 2012, 27(12): 2006-2017.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.

- [22] 傅华, 陈亚明, 王彦荣, 等. 阿拉善主要草地类型土壤有机碳特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 469-476.
- [23] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- [24] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山中段青海云杉林土壤肥力质量评价研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1368-1377.
- [25] 李龙, 姚云峰, 秦富仓. 内蒙古赤峰梯田土壤有机碳含量分布特征及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2930-2935.
- [26] 尤海舟, 毕君, 王超, 等. 河北小五台山不同海拔白桦林土壤有机碳密度分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 432-437.
- [27] 周启龙, 多吉顿珠, 陈少锋, 等. 西藏北部不同草地类型土壤碳、氮、磷的变化特征[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 251-255.
- [28] 何金军, 魏江生, 左合君, 等. 集宁一二连浩特铁路干线防护林土壤的理化特性[J]. 环境科学研究, 2008, 21(4): 151-156.
- [29] 任书杰, 曹明奎, 陶波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 58-67.
- [30] Spain A V. Influence of environmental conditions and some soil chemical properties on the carbon and nitrogen contents of some tropical Australian rainforest soils [J]. Soil Research, 1990, 28(6): 825.
- [31] Sollins P, Homann P, Caldwell B A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: Mechanisms and controls [J]. Geoderma, 1996, 74(1/2): 65-105.
- [32] 刁二龙, 曹广超, 曹生奎, 等. 祁连山南坡不同土地利用方式下土壤碳氮含量及通径分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5): 1346-1354.
- [33] 张少凤. 锡林郭勒羊草草原不同利用方式下群落与土壤碳氮特征研究[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古大学, 2018.
- [34] 韩磊, 庄涛, 周慧华, 等. 小清河滨岸带土壤碳氮变化及影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 28-34.
- [35] 朱凤武, 徐彩瑶, 濮俊杰, 等. 苏北滩涂围垦区土壤碳氮磷含量及其生态化学计量特征[J]. 中国土地科学, 2017, 31(12): 77-83.
- [36] 刘永忠, 李齐霞, 孙万荣, 等. 气候干旱与作物干旱指标体系[J]. 山西农业科学, 2005, 33(3): 50-53.
- [37] 马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 皖北平原蒙城县农田土壤有机碳空间变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1153-1159.
- [38] 贾海霞, 汪霞, 李佳, 等. 新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5106-5116.
- [39] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils [J]. Plant and Soil, 2002, 241(2): 155-176.
- [40] 元晓春, 林惠瑛, 曾泉鑫, 等. 武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1560-1570.

(上接第 365 页)

- [35] 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.
- [36] 徐婕, 潘洪义, 黄佩. 基于 LUCC 的四川省主体功能区碳排放与生态补偿研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 142-152.
- [37] 滕永忠, 白保勋, 陈东海, 等. 河南省中北部不同土地利用类型净碳汇及其价值[J]. 河南农业科学, 2019, 48(9): 60-66.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Zhou Xiaolu, Lei Xiangdong, Liu Caixia, et al. Re-estimating the changes and ranges of forest biomass carbon in China during the past 40 years [J]. Forest Ecosystems, 2019, 6: 51.
- [42] 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.