

DOI: 10.5846/stxb202006301705

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. 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. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5814-5824.

福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区

魏燕茹^{1,2}, 陈松林^{1,2,*}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 福建师范大学湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要: 全球变暖与二氧化碳浓度升高密不可分, 在工业化及城镇化发展过程中, 人类对土地利用和改造是造成全球大气中含碳量迅速增加的重要原因, 且土地在利用过程中碳减排的潜力较大。因此, 从不同土地利用方式视角研究福建省碳排放量, 采用基尼系数来衡量福建省各设区市碳收支的空间差异, 探索区域内土地利用碳收支规模和空间分异; 运用社会网络分析方法对福建省土地利用碳排放空间网络结构的整体特征和设区市在网络结构中的角色进行考察, 有助于从基础层面对人类活动所造成的环境影响进行评估, 及时调整土地利用方式从而促进低碳经济发展。结果表明: 2006—2018 年福建省土地利用净碳排放量逐年递增, 呈现东高西低的空间分布特征, 建设用地是主要碳源, 而林地起到主要碳汇的作用; 区域内碳补偿率逐年递减且存在明显的空间差异, 经济较发达的区域碳补偿率低于经济欠发达的区域, 生态承载系数东西差距不断加强, 东部地区碳排放的比例明显超过了碳吸收的比例; 福建省土地利用碳排放空间上具有明显的关联性和溢出效应, 碳排放空间关联网络越来越复杂、稳定, 各设区市在网络中所处地位和作用存在明显的不均衡性, 厦门市在整个碳排放网络中占据领导地位, 其他城市的碳影响力在网络中的地位及作用随着经济联系逐渐加强正在逐步提高; 对网络空间聚类发现, 第一模块和第三模块对模块内外均有溢出效应且密度值较大, 属于“双向溢出模块”, 其余第二、四模块均属于“净收益模块”。在研究的基础上将福建省各设区市分为 3 类区域: 低碳优化区、碳总量控制区和碳汇功能区, 并提出协同减排的差异化对策建议。

关键词: 土地利用; 碳排放; 社会网络分析; 碳平衡分区; 福建省

Spatial correlation and carbon balance zoning of land use carbon emissions in Fujian Province

WEI Yanru^{1,2}, CHEN Songlin^{1,2,*}

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

2 State Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology of the Ministry of Science and Technology and Fujian Province, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Global warming is inseparable from the increase in carbon dioxide concentration. In the process of industrialization and urbanization, the use and transformation of land by humans is an important reason for the rapid increase in carbon content in the global atmosphere, and there is a great potential for carbon emissions reduction during the process of land utilization. Therefore, the carbon emissions of Fujian Province was studied from the perspective of different land use methods. The Gini coefficient was used to measure the spatial differences of carbon budget of cities in Fujian Province, and the scale and spatial differences of land use carbon budgets in the region were explored. Using social network analysis method, we investigated the overall characteristics of the spatial network structure of land use carbon emissions in Fujian Province and the role of city in the network structure, which is helpful to assess the environmental impact caused by

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771136); 福建省科技计划项目(2019R0124)

收稿日期: 2020-06-30; 网络出版日期: 2021-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: slchen6@163.com

human activities at the basic level and adjust land use methods in time so as to promote the development of low-carbon economy. The results showed that from 2006 to 2018, the net carbon emissions from land use in Fujian Province increased year by year, indicating a spatial distribution characteristic of high in the east and low in the west. Construction land is the main carbon source, and forest land plays the role of the main carbon sink. The carbon compensation rate in the region decreased year by year and had obviously spatial differences, and the carbon compensation rate of economically developed regions is lower than that of economically underdeveloped regions. The gap between the east and the west in the ecological carrying coefficients is constantly increasing, and the proportion of carbon emissions in the eastern region obviously exceeds that of carbon absorption. Carbon emissions from land use in Fujian province has obvious spatial relevance and spillover effects. The spatial network of carbon emissions is becoming more and more complex and stable. The status and role of different cities in the network are obviously imbalanced. Xiamen City occupies the leading position in the entire carbon emission network, and the status and role of the carbon influence of other cities in the network is gradually increasing as economic links gradually strengthen. It is found in the network space clustering that the first and third modules have both internal and external spillover effects with high density value, which belong to the "two-way spillover module", and the remaining second and fourth modules belong to the "net income module". On the basis of the research, cities in Fujian province are divided into three types of areas: low-carbon optimization area, total carbon control area, and carbon sink functional area. We put forward relevant policy recommendations for the coordinated emission reduction.

Key Words: land use; carbon emission; social network analysis; carbon balance zoning; Fujian Province

随着人类活动对自然界的影 响不断加深,一系列全球性的问题也随之出现,全球变暖成为了当今热议的话题,有些学者认为人类活动是造成全球变暖的主要原因,有些则持其他观点^[1-3]。但不可否认的是,全球变暖与二氧化碳浓度升高密不可分,而土地利用与土地覆被变化所引起的碳排放量占人类活动碳排放总量的 1/3,仅次于化石燃料使用的碳排放量,且影响着整个区域的碳汇碳源格局^[3-7]。

近年来地理学者开展了大量关于碳收支核算、区域碳循环与碳平衡及碳补偿的研究^[8-15],大部分学者逐渐意识到区际环境管理中,碳排放的空间溢出是不可忽视的关键环节,因此这些研究逐渐将空间要素纳入其中,主要包括时空耦合、空间溢出、空间关联性 & 空间格局动态演化等^[16-24],但仍存在一些不足:大多数研究在进行空间相关性分析时,仅考虑到地理要素,而各地区之间碳排放的空间关系还受到各种市场环境和政策因素的影响,空间关系是复杂且多样的。其二,发达地区能源消耗量大且缺乏自给能力,依赖于外界的能源供给,欠发达地区则需要发达地区的资金、技术支持,两者会在经济往来的过程中不断强化碳排放空间关联,因此有必要探明碳排放空间关联网络中不同区域所扮演的角色。此外,大多数学者对土地利用碳排放问题的研究重点在于碳排放的效益和机理,对于研究成果的实际应用有待拓展,碳平衡分区方案可综合考量区域碳排放特征及空间溢出效应,对于开展空间碳补偿及低碳发展策略的制定有一定的实践意义。

福建省在全国率先提出生态省的建设构想,也是全国首批生态省建设试点省之一。目前省域尺度的碳排放研究区主要集中在中部和沿海发达地区,对福建省碳排放空间关联度的研究有待深入,且缺少基于“关系数据”来研究福建省碳排放整体的空间关联关系、结构及空间传导机制。以福建省为研究对象,从不同土地利用方式视角研究碳排放量,采用基尼系数来衡量福建省各设区市碳收支及其强度的空间差异,探索区域内土地利用碳收支规模和空间分异。构建福建省设区市碳排放的引力矩阵,运用社会网络分析方法分析碳排放空间关联网络的整体特征,并明确各设区市在网络中的角色,提出低碳导向的碳平衡分区,为福建省生态文明建设试验区的建设、社会经济的绿色发展及产业结构的调整提供科学指导。

1 研究区概况

福建省地处中国东南部,位于北纬 23°—28°、东经 115°—120°之间。东北毗邻浙江省,西部武夷山脉与

江西省相连,西南与广东省交界,与台湾省隔海相望,是中国大陆重要的出海口,也是 21 世纪海上丝绸之路核心区。福建省向来以生态环境优美著称,森林覆盖率 65.95%,居全国第一。2016 年 6 月,福建被确立为全国首个国家生态文明试验区,其生态建设备受外界关注。福建省 2018 年地区生产总值增长至 35804.04 亿元,目前,第一产业产值比重为 6.7%,第二产业产值比重为 48.1%,第三产业产值比重 45.2%,在“十三五”规划期内福建省地区生产总值将突破 4 万亿大关。福建省全省陆域面积 1239.68 万 hm^2 ,其中农用地占总面积 89.31%,建设用地占 7.16%。土地作为社会经济和城市发展所需的重要依托,在利用过程中碳减排的潜力较大,需要进一步挖掘福建省土地利用过程中的碳减排潜力,实现碳减排目标,推进生态文明建设。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

数据主要来源于《福建统计年鉴》(2007—2019 年)、《福建国土资源年鉴》(2007—2019 年)、《福建省能源统计年鉴》(2007—2019 年)及各设区市统计年鉴等,为消除价格变动的影 响,采用 GDP 平减指数将相关的数据统一折算成 2006 年不变价格;碳排放量采用联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)清单法核算。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用碳排放量测算

土地利用碳排放量测算:即不同地类面积乘于其碳排放系数,得出农用地及建设用地的碳排放量之和。农用地土地利用碳排放量测算主要包括耕地、园地、林地、草地、湿地、水域、未利用地和其他农用地等,碳排放计算公式为:

$$C_i = S_i \cdot V_i \quad (1)$$

式中, C_i 表示第 i 种地类的碳排放量; S_i 代表第 i 种地类的面积; V_i 代表第 i 种地类的碳排放系数。其中, $i=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$,分别表示耕地、园地、林地、草地、湿地、水域及未利用地,考虑到这些利用方式的碳排放量在较长的时期内变化不大,因此采用赖力和蓝家程等研究的碳排放系数^[25-27],碳排放量依次为 0.461、-2.451、-5.052、-0.949、-0.41、-0.253、-0.005,其他农用地的碳排放量主要来自牲畜(牛、羊、猪、家禽等)饲养,以及人类活动带来的碳排放,借鉴 Eggleston 的研究结果,碳排放系数取值为 0.95 t/a ^[28]。

建设用地碳排放包括城市绿地、化石能源消耗、电力消耗和人口呼吸,计算公式为:

$$C_{\text{con}} = C_s + C_{\text{fue}} + C_{\text{ele}} + C_{\text{peo}} \quad (2)$$

式中, C_{con} 为建设用地碳排放总量; C_s 为城市绿地的碳排放量,城市绿地大多数为景观树和草地,因此城市绿地的碳排放系数应介于林地与草地之间,由于无法获得具体的种植比例,取两者的平均值-3.001 作为城市绿地的碳排放系数^[29]; C_{fue} 为化石能源消耗碳排放量,碳含量、平均低位发热值和碳氧化率的取值参照 IPCC 和《综合能耗计算通则》公布的数据^[29-32],具体系数见表 1; C_{ele} 为电力消耗碳排放量; C_{peo} 为人口呼吸碳排放量,按每人每天排出 0.9kg CO_2 ,即按 0.2455 kg 碳进行计算^[30]。

表 1 各类能源标准煤换算系数及碳排放系数

Table 1 Standard coal conversion factors and carbon emission factors for various energy sources

能源类型 Energy types	原煤 Raw coal	焦炭 Hard coke	天然气 Natural gas	汽油 Gasoline	柴油 Diesel oil	燃料油 Fuel oil	液化石油气 Liquefied petroleum gas	煤油 Kerosene	热力 Heat	电力 Electricity
折标准煤系数 Standard coal coefficient/ ($10^4\text{tce}/10^4\text{t}$)	0.7559	0.855	0.4483	0.5538	0.5921	0.6185	0.5042	0.5714	0.26	0.7935
碳排放系数 Carbon emission coefficient/ ($10^4\text{t}/10^4\text{tce}$)	0.7143	0.9714	1.2143	1.4714	1.4571	1.4286	1.7143	1.4714	0.0341	0.404

2.2.2 碳收支空间差异分析

(1) 碳排放基尼系数

基尼系数是 20 世纪初经济学家基尼,依据洛伦兹曲线所定义的测定收入差异状况的指标,同样可用于衡量某一指标的均质程度及区域差异^[33]。这里采用基尼系数来度量福建省碳排放补偿率的空间差异。计算公式如下:

$$Guni = \sum_i \sum_j |z_i - z_j| \div 2n^2 \bar{z} \quad (3)$$

式中, z_i, z_j 为城市 i 和城市 j 的碳排放补偿率, \bar{z} 为福建省全省所有地区同一指标的平均值。 n 代表地区总数。Gini 值一般介于 0—1 之间,Gini 值越小,表示区域差异越小。基尼系数低于 0.3 表示“最佳平均状态”,此时各地区碳吸收量与碳排放量高度协调;“合理状态”在 0.3—0.4 之间,表示各地区碳吸收量与碳排放量勉强协调;“警报状态”为 0.4—0.6,则各地区碳吸收量与碳排放量处于不协调状态;0.6 以上表示“危险状态”,此时各地区碳吸收量与碳排放量为高度不协调状态。

(2) 碳排放的生态承载系数

碳生态承载系数(Ecological Support Coefficient, ESC)即表示某一地区碳吸收量占全区比例与该区域碳排放量占全区比例的商,反映了该区域碳汇能力的大小^[34]。计算方法如下:

$$ESC = \frac{C_{Ai}}{C_A} / \frac{C_i}{C} \quad (4)$$

式中, C_{Ai} 和 C_A 分别表示 i 城市及全省的碳吸收量, C_i 和 C 分别表示 i 城市及全省的碳排放量。当 $ESC > 1$ 时,意味着该地区碳吸收比率大于碳排放的比率,说明具有较强的碳汇能力; $ESC < 1$,则说明碳汇能力较弱。

2.2.3 碳排放网络的构建

(1) 城市碳排放联系的测度

为了建立福建省的碳排放网络关系,首先需要刻画城市之间的碳排放关联程度。引力模型由物理学的万有引力定律演化而来,1929 年引力模型首次被 Reilly 应用于人口地理分析,随后引力模型应用范围不断拓宽,并逐渐融入社会科学研究中,相较其他模型,引力模型更适用于总量数据,便于利用截面数据刻画空间关联的变化趋势,当前已逐渐成为量化研究空间关系及作用的主要工具^[20-24]。为了更直观地展现福建省设区市之间土地利用碳排放的引力关系,将碳排放量和生产总值、人均收入等加入原来的指标体系中,同时引入参数 k ,主要用于反映城市碳排放权重,测度碳排放关联程度的拓展公式为:

$$R_{ij} = k_{ij} \cdot \frac{\sqrt[3]{G_i P_i C_i} \cdot \sqrt[3]{G_j P_j C_j}}{[d_{ij}/(e_i - e_j)]^2}, k = \frac{C_i}{C_i + C_j} \quad (5)$$

式中, R_{ij} 和 d_{ij} 分别表示城市 i 和城市 j 之间的引力和空间距离; G, P, C 分别为城市 i 的生产总值、年末人口数和碳排放量, e_i 和 e_j 表示城市 i 和城市 j 的人均收入。 k 为调节因子,体现城市 i 对城市 j 碳排放关联的贡献率。

利用式(5)计算福建省设区市碳排放的引力矩阵,值反映城市之间碳排放引力的强弱;为了更好地对比历年的网络特征变化,同时防止各地区之间存在普遍的联系,使一些微弱空间联系影响整体的网络特征,需对城市间引力矩阵单元设定阈值:

$$I_A(\omega) = \begin{cases} 1, \omega \in A \\ 0, \omega \notin A \end{cases} \quad (6)$$

将历年引力矩阵每一行的平均值指定为截止点,并将高于平均值的关联度指定为 1,则对应于该单位的该行城市对行城市的碳排放作用明显;反之指定为 0,表示作用不大,由此得到福建省碳排放空间关系矩阵。

(2) 整体网络特征

网络密度用于反映网络成员间关联的紧密性,网络密度 D 计算公式如下:

$$D = \frac{m}{n(n-1)} \quad (7)$$

式中, n 是节点数, $n(n-1)$ 为最大可能关系数, m 为实际关系数。值越高, 则各成员之间的联系越密切。

关联度反映网络结构稳定性和脆弱性, 关联度 C 计算公式如下:

$$C = 1 - \left[\frac{v}{n(n-1)/2} \right] \quad (8)$$

式中, v 为网络中不可达的点对数目。 C 数值越大网络结构越稳定。

网络等级用于衡量网络成员在网络中的主要位置。网络等级 H 计算公式如下:

$$H = 1 - \frac{s}{\max(s)} \quad (9)$$

式中, s 为网络中对称地可达的点对数, $\max(s)$ 为对称可到达的点对的最大数量。

网络效率是指网络存在多余的关联线的程度。网络效率 E 计算公式如下:

$$E = 1 - \frac{r}{\max(r)} \quad (10)$$

式中, r 为多余线, $\max(r)$ 为最大可能的多余线, 其数值越大, 各成员联系就越松散, 网络也越不稳定。

3 结果分析

3.1 碳排放时空特征分析

3.1.1 福建省土地利用碳排放时空演变分析

根据福建省 2006—2018 年能源消耗及土地利用现状数据, 计算得到 2006—2018 年土地利用碳排放量 (图 1)。碳源指建设用地及耕地的碳排放量, 碳汇为园地、林地、草地、湿地、水域及未利用地的碳吸收量。

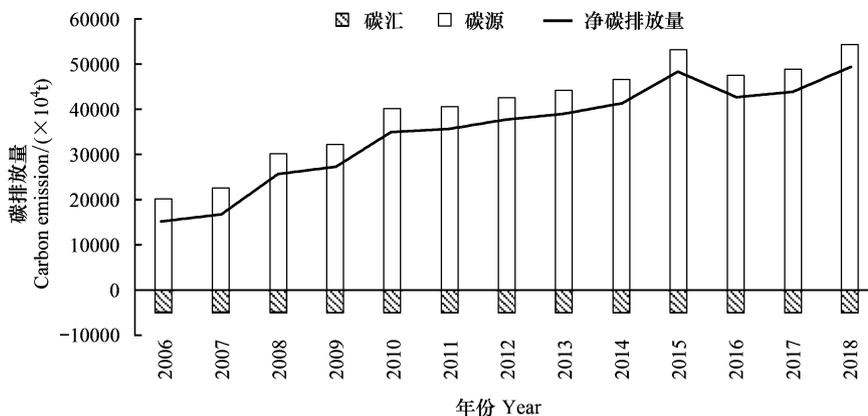


图 1 2006—2018 年福建省土地利用碳排放量变化图

Fig.1 Carbon emissions from land use in Fujian Province from 2006 to 2017

福建省土地利用净碳排放量整体呈递增的态势, 峰值出现在 2018 年, 与土地利用碳源量的变化趋势相吻合, 而土地利用碳汇量的变化幅度较小, 基本保持稳定。在研究期间内, 净碳排放量从 2006 年的 15413 万 t 增加至 2018 年的 49522 万 t, 增幅达 221.29%, 年均增长幅度为 17.02%。以 2015 年为分界点, 福建省净碳排放量变化可分为先增长后波动两个阶段。第一阶段, 从 2006—2015 年, 福建省土地利用净碳排放量呈逐渐增长的趋势, 在这个时期内福建省城镇化水平大幅度提高, 土地利用方式也发生较大变化, 能源消耗大幅攀升, 建设用地逐年递增, 因此导致碳排放总量不断增加, 年均增长幅度达 21.98%, 其中, 建设用地碳排放评价指标中各项能源消费总量增长迅速, 以焦炭、天然气、电力等增长最为迅速, 天然气涨幅达 80 倍以上, 也使得同期碳源总量快速增长; 第二阶段, 从 2016—2018 年, 福建省土地利用净碳排放量出现较为明显的波动, 2016 年净

排放量出现一次下降,此次下降主要原因也是由于能源消费总量的减少,节能减排举措的实施初见成效,然而在 2017 年之后重新呈现抬头趋势。

从土地利用结构上分析,建设用地是主要碳源,碳排放占比从 2006 年的 98.64% 增长到 2018 年的 99.59%。耕地及其他农用地是另一碳源,但碳排放较弱,且占总面积比例较低,因此二者的碳排放量在较长时间内基本保持稳定,随着城市化进程不断推进而减少,碳排放贡献从 2006 年的 1.36% 下降到 2018 年的 0.41%;另一方面,从碳吸收来看,城市绿地、草地、水域及未利用地碳吸收总量维持在 $0-50 \times 10^4 \text{t}$ 左右,起到弱碳汇作用,其次是园地和湿地的碳吸收量,而林地起到主要碳汇的作用,但建设用地碳排放量放远超林地碳吸收量,两者间比例悬殊,无法显著平衡碳源。为减少福建省土地利用净碳排放量,应将碳源的控制作为今后的工作重心,并保障绿地面积以促进碳汇的增加,才能有效减少净碳排放量。

从空间分布上看,福建省土地利用碳排放总体呈现东高西低的分布特征,根据各设区市的碳排放量,将碳排放强度分为 4 个等级:微度碳排放区 ($\leq 1000 \times 10^4 \text{t}$)、轻度碳排放 ($1000-3000 \times 10^4 \text{t}$)、中度碳排放区 ($3000-5000 \times 10^4 \text{t}$)、重度碳排放区 ($\geq 5000 \times 10^4 \text{t}$) (图 2)。研究期间内碳排放量的空间分布,除了龙岩保持较为稳定的状态,其余城市均处于持续波动增长状态;其中福州市、漳州市和宁德市碳排放量在研究期内大幅度增长;而厦门市、莆田市、三明市和南平市 4 个城市的碳排放量也呈现上升趋势,但幅度较小,相较于这几个城市而言,泉州市在其相应强度等级范围内数值增长较大。各设区市碳排放总量多寡排行依次为泉州市、福州市、宁德市、漳州市、厦门市、三明市、莆田市、龙岩市和南平市,总量最多的是泉州市和福州市,占全省碳排放总量 46.59%,而厦门市作为福建省老牌经济大市并未上榜,这与厦门市地域狭小、政府政策制度、能源利用效率较高等因素相关。沿海城市与内陆地区相比较而言,总体上碳排放量均较高,需进一步优化各产业间用地结构,保有一定数量的碳汇,未来规划用地应适当控制建设用地,防止碳汇用地大面积向碳源用地转变。

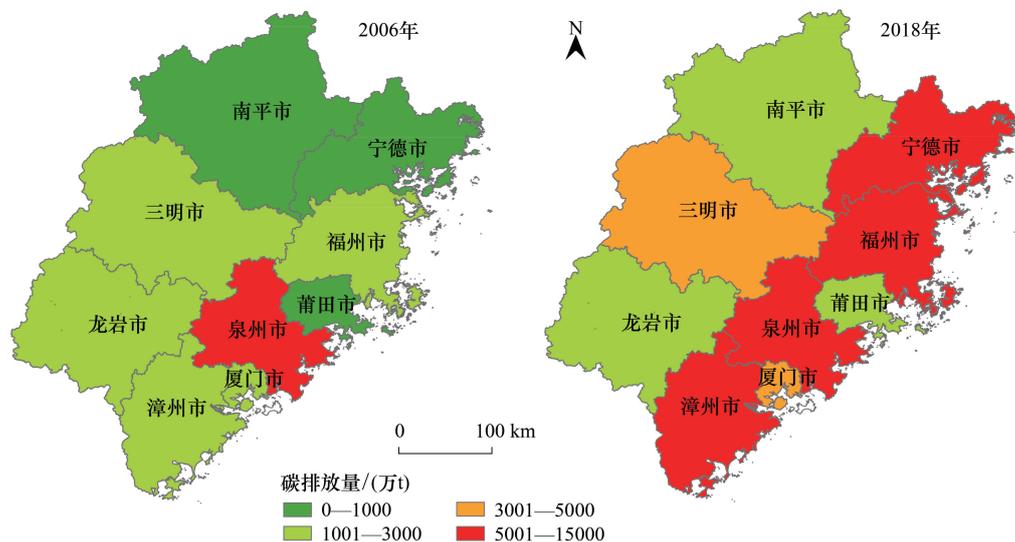


图 2 福建省土地利用碳排放量空间分布图

Fig.2 Spatial Distribution of Carbon Emissions from Land Use in Fujian Province

3.1.2 福建省空间碳平衡分析

对福建省区域碳收支核算进行对比分析发现(图 3),全省历年的碳补偿率均不足 35%,且逐年递减,至 2018 年福建省碳补偿率仅为 10.05%,这表明福建省的总碳吸收量远不足以补偿人类活动所带来的碳排放,因此福建省表现为净碳源。就各设区市而言,碳补偿率存在明显的空间差异,根据基尼系数的算法,可以得到福建省历年碳补偿率的基尼系数均超过 0.5 的分配差距警戒线,处于“警戒状态”,省内各地区碳吸收量与碳排放量存在失衡状况,部分年份出现基尼系数大于 0.6,进入“危险状态”,说明各地区碳吸收量与碳排放量处

于高度不协调状态,2016年之后基尼系数逐渐稳定,但仍处在失衡状态,不利于全省协同减排的实现。从全省角度来看,经济较发达的区域,其碳补偿率往往低于经济欠发达的区域,出现该现象的原因主要有:首先,经济较发达的地区,工业化发展水平相对较高,大量的能源消耗带来较大的碳排放量;第二,从产业结构看,经济较发达的区域,一般以第二、三产业为主,经济发展必然会占用第一产业的生态空间,同时也降低了区域的碳汇能力;第三,经济欠发达的地区往往位于山区,发展相对落后,森林覆盖面积广必然会增强生态系统碳汇能力,这在一定程度上保障了区域的碳补偿率。

福建省碳生态承载系数(ESC)空间差异明显,呈现出东低西高的特征,且生态承载力东西差距不断加强。根据碳排放生态承载系数的大小,将福建省分为4类区域(图4)。总体空间特征为:西部南平市、三明市、龙岩市等区域的生态承载系数较高,其余地区相对偏低,东部的福州市、厦门市、莆田市和泉州市最低。西部地区在研究区间内大都处于1或2.0以上且在不断提高,2018年南平市生态承载系数已达到5.15,龙岩市也突破3,这表明西部山区的林地具有较高的碳汇能力和相对较低的碳排放强度;而东部地区生态承载系数较低,大多处于1以下且均有下降趋势,其中福州市、莆田市、宁德市在研究区间变化明显,宁德市从碳汇能力较强的区域转入碳汇能力较弱的区域,说明东部地区碳排放的比例明显超过了碳吸收的比例,并有进一步强化的趋势,需要加强碳汇能力,缓解生态压力。



图3 福建省土地利用碳排放基尼系数与碳补偿率变化图
Fig.3 Changes of Gini coefficient and carbon compensation rate of land use carbon emissions in Fujian Province

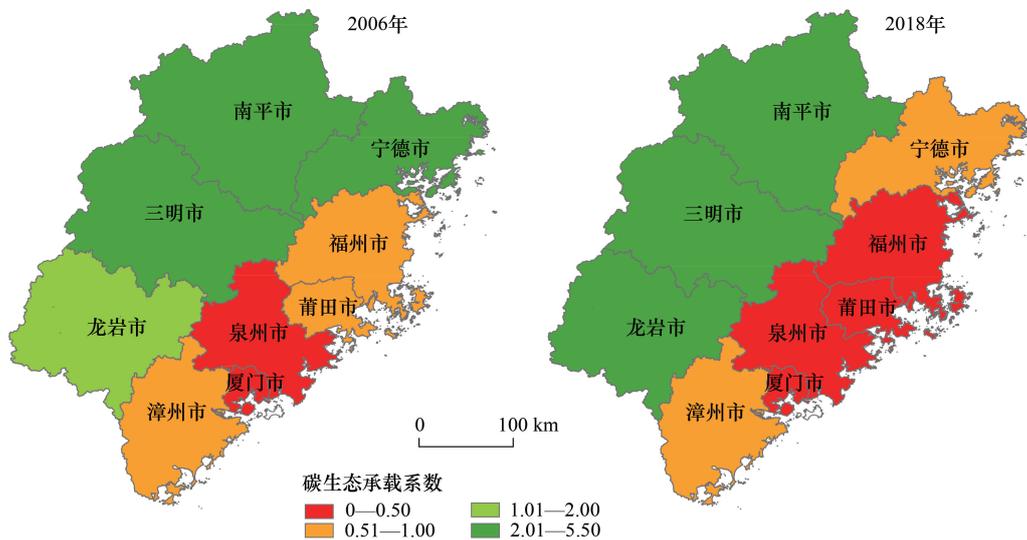


图4 福建省生态承载系数空间分布图
Fig.4 Spatial distribution of Ecological Support Coefficient in Fujian Province

3.2 福建省碳排放空间关联网络的实证分析

3.2.1 城市网络关联度分析

根据式(5)构建的碳排放空间引力矩阵,以福建省9个设区市为社会网络的节点,保留引力大小作为网络的边,关联数反映空间关联网络的规模。生成2018年福建省土地利用碳排放空间关联关系可视化网络图,颜色越深,引力越大(图5)。

从图5可以看出,各城市间存在普遍的碳排放关联关系,厦门市处于网络的中心位置,碳辐射能力最强,

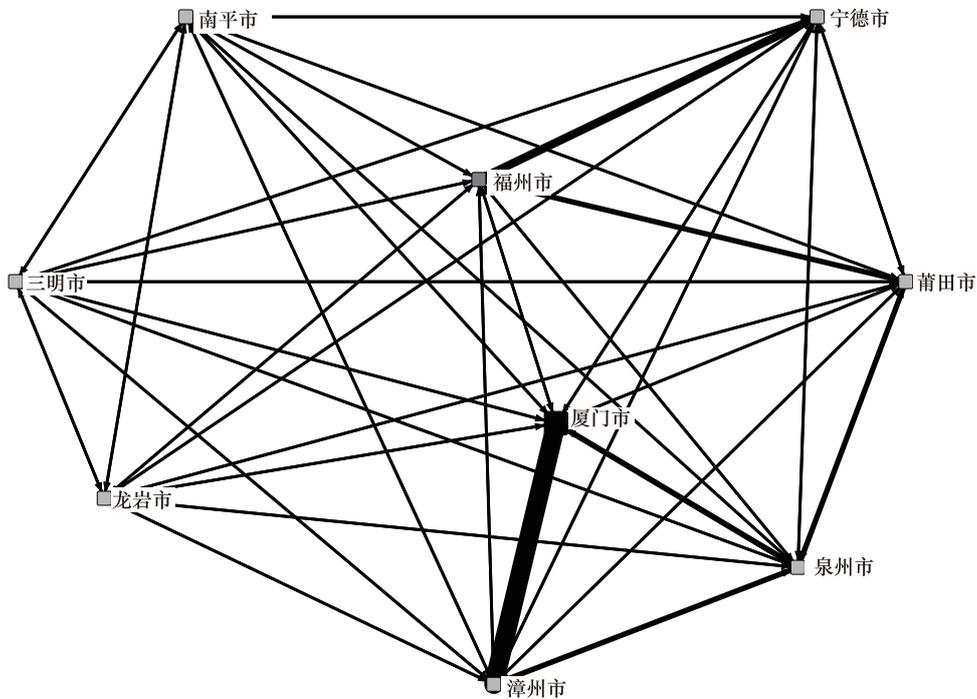


图5 福建省土地利用碳排放空间关联网络结构图

Fig.5 Structure diagram of spatial association network of land-use carbon emissions in Fujian Province

与其他城市有着较为紧密的联系,同时能够对其他城市产生较大的碳溢出影响,对漳州市及泉州市影响最大;福州市的碳辐射能力次于厦门,影响范围有限,对宁德市的影响较大;南平、三明、龙岩、莆田等城市位于网络的边缘部分,因此它们所受的碳辐射及对其他城市的碳影响力都较弱。从区位上看,东部的碳排放联系更加紧密,西部地区所受影响较有限。从社会经济水平上看,碳排放网络中心节点城市均为人均 GDP 较高且社会影响深远的地区,如经济特区厦门市和行政中心福州市等。

将福建省各设区市之间的关系矩阵,代入式(6)至式(10)计算 2006—2018 年整体的网络密度、关联度、网络等级以及网络效率(表 2)。从表 2 可以看出,网络密度呈现上升趋势,从 2006 年的 0.0556 提高到了 2018 年的 0.358,但各城市之间的碳关联紧密度仍然不高,各城市还有很大的协作空间共同实现节能减排的目标。2006—2010 年关联度在不断增长,2011 年后的整体关联度均为 1,表明了福建省碳排放存在普遍的空间溢出关系,而不仅限于地理邻近的城市才产生溢出关系。网络等级和网络效率均呈现下降趋势,网络等级至 2018 年下降为 0,说明福建省各设区市在碳排放空间关联网络中地位差异较小,不存在等级森严的现象。网络效率由 2006 年的 1 下降到了 2018 年的 0.5714,说明福建省各设区市之间的碳排放联系逐渐紧密,网络结构变得更加稳定、复杂。

表 2 福建省土地利用碳排放整体网络特征演变趋势

Table 2 Evolution trend of the overall network of land-use carbon emissions in Fujian Province

年份 Year	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
网络密度 Density	0.0556	0.0694	0.0694	0.0833	0.1111	0.1944	0.2500	0.2639	0.2778	0.2778	0.284	0.3111	0.3580
关联度 Reciprocity	0.2778	0.2778	0.2778	0.3056	0.7778	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
网络等级 Hierare	1.0000	0.8571	0.8571	0.8750	0.9167	0.8621	0.7586	0.5455	0.5588	0.7667	0.7647	0.2222	0.000
网络效率 Efficie	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.8929	0.7857	0.7857	0.7500	0.7143	0.6429	0.5714	0.5714

3.2.2 碳排放空间关联网络的中心性分析

利用节点中心性、接近中心性、中间中心性 3 个指标对福建省各设区市的关系矩阵进行深入地分析,选取 2006 年和 2018 年的数据进行比较(表 3)。这些指标均能反映某些节点在网络中的“权力”,也反映了节点间的协作关系,即衡量各城市分别对其他城市产生多大影响力,以期根据中心性对各城市进行“权力”分类。从总体上看,厦门市的 3 个中心性指标值远高于其他城市,由此表明厦门市碳辐射范围较大,在整个碳排放网络中占据领导地位,泉州市紧随其后,这说明福建省碳排放空间关联网络以厦门、泉州为中心,这 2 个城市对于福建省碳排放的空间溢出有着重要的影响;福州市与三明市指标值接近,仅次于厦门与泉州市,说明其在连接南平市、宁德市等离中心较远的城市起到重要的作用;而龙岩市、漳州市等城市的中心性指标值都比较小,表明了这些城市的碳影响力较弱。从演变趋势上看,各城市的各项中心性指标都有所提升,表明随着经济联系逐渐加强和产业转移,其他城市的碳影响力在网络中的地位及作用正在逐步提高,碳排放空间网络关系不断向复杂化发展。

福建省 9 个设区市的碳排放联系存在不均衡性。由表 3 可知,节点与接近中心性的均值分别为 55.556 和 71.500,说明网络中各城市间存在较为复杂的碳排放空间联系。中间中心性反映了某个城市作为最短桥梁中介城市的次数,均值为 6.349,说明了在网络中平均每个城市有 6.349 次作为碳排放关联的最短桥梁中介,次数相对较少。其次,网络内部各城市存在差异,以节点中心性为例,最大值与最小值分别为 100 和 25,相差 75,由此表明了城市碳影响力差异较大。应根据各个城市在碳排放空间关联网络中所处的位置及与其他城市的关联等信息,提出更有针对性的协同减排对策。

表 3 福建省土地利用碳排放空间关联网络中心度

Table 3 Centrality of Spatial Linkage Network for Land-Use Carbon Emissions in Fujian Province

城市 City	节点中心性 Degree			接近中心性 Closeness			中间中心性 Betweenness		
	2006	2018	变化量 Variation	2006	2018	变化量 Variation	2006	2018	变化量 Variation
福州市	0.000	62.500	62.500	0.000	72.727	72.727	0.000	4.464	4.464
厦门市	50.000	100.000	50.000	20.000	100.000	80.000	21.429	28.393	6.964
莆田市	0.000	37.500	37.500	0.000	61.538	61.538	0.000	0.714	0.714
三明市	12.500	62.500	50.000	18.605	72.727	54.122	0.000	1.607	1.607
泉州市	12.500	87.500	75.000	18.605	88.889	70.289	0.000	20.536	20.536
漳州市	12.500	25.000	12.500	18.605	57.143	38.538	0.000	0.000	0.000
南平市	0.000	50.000	50.000	0.000	66.667	66.667	0.000	0.714	0.714
龙岩市	12.500	25.000	12.500	18.605	57.143	38.538	0.000	0.000	0.000
宁德市	0.000	50.000	50.000	0.000	66.667	66.667	0.000	0.714	0.714
均值 Average	11.111	55.556	44.444	10.491	71.500	61.010	2.381	6.349	3.968

3.2.3 碳排放空间关联网络聚类分析

为了更好地分析网络中不同城市的角色,采用空间聚类的方法将团体分块,研究模块内部及模块之间的关系。运用 CONCOR 迭代收敛法,选择收敛标准为 0.2,最大分割密度为 2,福建省 9 个设区市被划分为 4 个模块,同时得出各模块之间的密度值(表 4)。

表 4 福建省土地利用碳排放空间关联模块划分与密度值

Table 4 Spatial correlation module division and density value of land use carbon emission in Fujian province

模块 Module	城市 City	密度值 Density	第一模块 Module 1	第二模块 Module 2	第三模块 Module 3	第四模块 Module 4
第一模块 Module 1	福州市、三明市	第一模块 Module 1	0.500	0.833	0.750	0.000
第二模块 Module 2	莆田市、宁德市、南平市	第二模块 Module 2	0.667	0.000	1.000	0.000
第三模块 Module 3	厦门市、泉州市	第三模块 Module 3	0.000	0.333	1.000	0.750
第四模块 Module 4	漳州市、龙岩市	第四模块 Module 4	0.000	0.000	0.750	0.000

第一模块包括福州市和三明市,碳排放空间溢出主要是体现于第二、三模块。第三模块包括厦门市和泉州市。第一、三模块的碳排放对模块内外均有溢出效应且密度值较大,属于“双向溢出模块”,说明第一、三模块内的城市通过产业转移、能源消费、商业合作等方法和其他模块之间产生较大的碳排放关联,但第三模块板块内部的碳排放空间溢出效应较强;第二模块包括莆田、宁德、南平 3 个城市,主要与第一、三模块关联,第四板块的空间溢出效应比较弱,主要受第三模块影响,第二、四模块发出的关系数目均小于接收的关系数目,属于碳排放“净收益模块”,吸收大部分来自其他城市的碳溢出。

碳排在空间上存在动态关联、交互影响的“溢出”效应,局部的治理很难从根本上解决环境污染问题,应考虑整体效应,发挥厦门市的中心性位置、福州和泉州等城市的联动功能,建立省域内协同碳减排机制。不同地区环境规制的差异,容易造成碳排在区域间转移,尤其应注意东部地区为实现产业升级和治理环境污染,将高能耗、高污染的产业向西部较不发达地区转移,从而产生“碳转移”问题。可将碳交易市场引入环境管理之中,以各设区市在碳排放网络中的角色定位为参考,从而限制碳排放的溢出转移,碳排放“净收益”地区也可获得一定的经济补偿,共同实现公平、高效低碳发展。

3.3 福建省空间碳平衡分区优化思路

基于对福建省各设区市碳排放总量、碳补偿率、生态承载系数及网络空间关联特征等指标的测算,综合考量区域碳平衡及绿色发展,将各设区市分为 3 类区域:低碳优化区、碳总量控制区、碳汇功能区,针对不同的功能区,提出相应的碳减排目标和减排方案。碳平衡分区以碳排放量和生态承载系数等指标为划分依据,以空间关联性及其聚类模块划分为角色定位,以此确定未来的优化方向,基于低碳导向的目标而言,分区方案可以为福建省总量控制及协同减排提供参考。碳平衡分区侧重于从低碳角度提出各地区未来发展方向,仅作为区域碳补偿及协调发展的参考。事实上,各设区市内部也存在较大的空间差异,且区域具体功能定位仍需综合考虑其他影响因素来确定,但福建省未来发展可重点考虑以下低碳策略:

(1) 低碳优化区:碳排放总量大于 3000 万 t 且生态承载系数小于 0.5 的区域。包括福州市、厦门市和泉州市,该类区域在网络中处于较中心位置,碳排放表现为空间“溢出”,总体特征是经济较发达,产业结构主要以二、三产业为主,虽然碳生态承载力较低,但经济基础好,产业可逐渐向高新技术、新材料、新能源等低碳产业转型,突出服务业优势。其次,该类区域有明显的低碳产业发展优势且与全省其他区域的关联较强,可利用本身的影响力和经济辐射,带动周边地区的经济、产业结构调整,提高碳排放经济效益。

(2) 碳总量控制区:碳排放总量大于 3000 万 t,生态承载系数大于 0.5 的区域。该类区域主要有莆田市、三明市、漳州市和宁德市,在碳排放网络中溢出效应较弱,一定程度上能起到联通作用。该类地区生态压力中等,但区域生产总值并不高,单位碳排放经济效益相对较低。因此,该区域应秉承保护环境、控制碳源的前提,调整能源消费结构,加大科技投入,提高能源利用率,进一步加快产业升级转型,实现节能减排;同时做好中间桥梁作用,吸收发达地区的技术经验,努力打造成为分担全省碳源压力的后备力量。

(3) 碳汇功能区:碳排放总量小于 3000 万 t 的轻度碳排放区,且生态承载系数大于 1,在空间上表现为“净收益”的区域,包括龙岩市、南平市。该类区域林地及园地面积大,因此具有较高的碳汇能力,并且能吸收大部分其他地区的碳溢出,对保障全省的碳汇总量具有重要作用,生态压力较低,社会生产活动强度较小,说明该区域在环境保护和控制碳源方面均取得良好的成效。区域内低碳产业发展态势良好,主要有食品生产、农产品加工、木竹加工等传统产业,且环境质量高,对于发展旅游业、高新技术产业等也具有一定的优势,该地区应稳定碳汇来源,缓解全省碳压力,并继续促进绿色环保产业的发展。

4 结论与讨论

4.1 主要结论

通过对福建省各年土地利用碳排放量的研究分析发现:(1) 2006—2018 年福建省土地利用净碳排放量总体上呈逐年递增的态势,建设用地为主要碳源,林地起到主要的碳汇作用,其他用地对碳排放量变化影响较

小。碳排放总体呈现东高西低的空间分布特征,研究区间内除龙岩外,其余城市均处于持续波动增长状态;(2)福建省碳补偿率偏低且逐年递减,表现为净碳源。区域内碳补偿率存在明显的空间差异,基尼系数均超过0.5的分配差距警戒线。碳生态承载系数空间差异明显,呈现出东低西高的特征,且东西差距不断加强;(3)在土地利用碳排放空间关联网络中,各城市间存在普遍的碳排放关联关系且逐渐加强。厦门市的中心性指标值远高于其他城市,在网络中占据领导地位,泉州市次之,福州市与三明市起到联通作用,其他城市在网络中的地位及作用也在逐步提高,但空间联系存在不均衡性;(4)对网络空间聚类发现,第一模块的福州市、三明市和第三模块的厦门市、泉州市对模块内外均有溢出效应且密度值较大,属于“双向溢出模块”,其余第二、四模块均属于“净收益模块”。

4.2 讨论

在测算不同土地利用方式的碳排放时,采用的碳排放系数来自于其他文献,虽选择了与福建省自然条件较为相符的研究成果,但因为各地自然植被状况、地表覆被、能源强度等存在差异,可能会影响最终结果的准确性,在以后的研究中可以根据福建省的实际情况对这些系数进行深入分析,探究出更加适用于福建省省情的碳排放系数。其次,在碳排放网络构建过程中,各设区市之间的关联要素尚未得到全面的反映,这也将成为进一步研究的方向。文中碳平衡分区是以市域为单位,不利于区域内部的区分,随着年份的增长、数据资源的齐全,可以考虑以县域为单位进行碳平衡分区研究,可使研究结果更好地与主体功能区划结合起来,尝试开展县域空间碳交易市场研究,对于实现区域公平及低碳发展具有一定的现实意义。

参考文献 (References):

- [1] 韩骥,周翔,象伟宁.土地利用碳排放效应及其低碳管理研究进展.生态学报,2016,36(4):1152-1161.
- [2] Green C. Potential scale-related problems in estimating the costs of CO₂ mitigation policies. *Climatic Change*, 2000, 44(3): 331-349.
- [3] 钟超,刘宇,汪明月,史巧玲.中国碳强度减排目标实现的路径及可行性研究.中国人口·资源与环境,2018,28(10):18-26.
- [4] 黎孔清,陈银蓉.低碳理念下的南京市土地集约利用评价.中国土地科学,2013,27(1):61-66.
- [5] 代如锋,丑洁明,董文杰,杨杨永.中国碳排放的历史特征及未来趋势预测分析.北京师范大学学报:自然科学版,2017,53(1):80-86.
- [6] 屈超,陈甜.中国2030年碳排放强度减排潜力测算.中国人口·资源与环境,2016,26(7):62-69.
- [7] 马晓哲,王铮.土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展.生态学报,2015,35(17):5898-5907.
- [8] 张苗,甘臣林,陈银蓉.基于SBM模型的土地集约利用碳排放效率分析与低碳优化.中国土地科学,2016,30(3):37-45.
- [9] 郑颖,逯非,刘晶茹,王效科.我国典型城市化石能源消费CO₂排放及其影响因素比较研究.生态学报,2020,40(10):3315-3327.
- [10] 罗谷松,李涛.碳排放影响下的中国省域土地利用效率差异动态变化与影响因素.生态学报,2019,39(13):4751-4760.
- [11] 李旭.经济快速发展区域碳排放机制与低碳发展策略[D].福州:福建师范大学,2013.
- [12] 郑德凤,刘晓星,王燕燕,吕乐婷.中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局.生态学报,2020,40(2):447-458.
- [13] 田文举,徐政.影响碳排放的因素研究——基于东盟国家的实证分析(英文).资源与生态学报,2018,9(5):500-507.
- [14] 张福祥.辽宁省区域碳排放—经济发展—环境保护耦合协调分析[D].大连:辽宁师范大学,2018.
- [15] 夏琳琳,张妍,李名镜.城市碳代谢过程研究进展.生态学报,2017,37(12):4268-4277.
- [16] 刘佳骏,史丹,汪川.中国碳排放空间相关与空间溢出效应研究.自然资源学报,2015,30(8):1289-1303.
- [17] 程叶青,王哲野,张守志,叶信岳,姜会明.中国能源消费碳排放强度及其影响因素的空间计量.地理学报,2013,68(10):1418-1431.
- [18] 孙庆刚,郭菊娥,师博.中国省域间能源强度空间溢出效应分析.中国人口·资源与环境,2013,23(11):137-143.
- [19] 李建豹,黄贤金.基于空间面板模型的碳排放影响因素分析——以长江经济带为例.长江流域资源与环境,2015,24(10):1665-1671.
- [20] 庞庆华,李涵,杨田田.长江经济带碳排放的空间关联性及其影响因素.科技管理研究,2019,39(15):246-251.
- [21] 张帅,袁长伟,赵小曼.中国交通运输碳排放空间聚类与关联网络结构分析.经济地理,2019,39(1):122-129.
- [22] 张德钢,陆远权.中国碳排放的空间关联及其解释——基于社会网络分析法.软科学,2017,31(4):15-18.
- [23] 杨桂元,吴齐,涂洋.中国省际碳排放的空间关联及其影响因素研究——基于社会网络分析方法.商业经济与管理,2016,(4):56-68,78-78.
- [24] 梁经伟,文淑惠,方俊智.中国—东盟自贸区城市群空间经济关联研究——基于社会网络分析法的视角.地理科学,2015,35(5):521-528.
- [25] 蓝家程,傅瓦利,袁波,张婷,彭景涛.重庆市不同土地利用碳排放及碳足迹分析.水土保持学报,2012,26(1):146-150,155-155.
- [26] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[D].南京:南京大学,2010.
- [27] 王方怡,洪志猛,康智明,兰思仁,陈世品,叶玉珍.福建省农业碳排放时空变化及其驱动因素.福建农业学报,2019,34(1):124-134.
- [28] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [C]. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES, 2006.
- [29] 周健,肖荣波,庄长伟,邓一荣.城市森林碳汇及其抵消能源碳排放效果——以广州为例.生态学报,2013,33(18):5865-5873.
- [30] 杨国清,朱文锐,文雅,林英昌.20年来广东省土地利用碳排放强度与效率空间分异研究.生态环境学报,2019,28(2):332-340.
- [31] 刘晔,陈银蓉,袁凯华,刘秋彤.城市土地利用碳减排潜力研究——以武汉市为例.资源开发与市场,2019,35(5):638-645,699-699.
- [32] 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.经济地理,2019,39(2):190-198.
- [33] 赵荣钦,张帅,黄贤金,秦耀辰,刘英,丁明磊,焦士兴.中原经济区县域碳收支空间分异及碳平衡分区.地理学报,2014,69(10):1425-1437.
- [34] 王刚,张华兵,薛菲,甄艳.成都市县域土地利用碳收支与经济发展关系研究.自然资源学报,2017,32(7):1170-1182.