

碳中和视角下市域碳补偿机制构建——以陕西省为例

张宇<sup>1</sup>, 蔺康莉<sup>2</sup>, 纪欣卓<sup>1</sup>, 孔德豪<sup>2</sup>

(1. 长安大学土地工程学院, 陕西西安 710054; 2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西西安 710054)

**摘要** 为促进区域低碳发展转型、完善碳补偿理论体系、实现碳中和目标, 采用碳排放系数法和碳生态承载指数法, 以陕西省为例, 开展2010—2018年土地利用净碳排放核算, 探究陕西省土地利用净碳排放时空演变规律, 分析碳生态承载能力差异, 并以各地区每年碳盈余(占用)指标量状况为基础, 识别出碳补偿行为过程中的支付区与获补区, 测算出陕西省各地区碳补偿额度。结果表明, 2010—2018年陕西省土地利用净碳排放总量呈逐年递增趋势, 增长速度在2014年后逐渐放缓, 碳排放总体呈现出自北向南逐渐递减的空间分布特征; 陕西省碳生态承载能力表现为自北向南逐渐递增的特点, 且南北差距在不断扩大; 在整个研究期间, 榆林市、渭南市、西安市是碳补偿行为中最主要的支付区, 商洛市、安康市、汉中市是主要的获补区; 陕西省碳补偿总额度总体在不断提升, 增长速率也在逐年提高, 不同地区的增长速率不一致, 其中, 榆林市碳补偿额度占比最高且增长速率最快。因此, 加快构建省内各市之间碳补偿机制对我国实现“双碳”目标、制定有效的碳减排政策、推动区域协调发展具有重要意义。

**关键词** 碳中和; 碳排放; 碳补偿; 土地利用; 陕西省

**中图分类号** X 321 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2023)09-0058-07

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.09.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Construction of Carbon Compensation Mechanism in Urban Area from the Perspective of Carbon Neutrality—Taking Shaanxi Province as an Example

ZHANG Yu<sup>1</sup>, LIN Kang-Li<sup>2</sup>, JI Xin-zhuo<sup>1</sup> et al (1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054; 2. School of Earth Sciences and Land Resources, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054)

**Abstract** In order to promote the transformation of regional low-carbon development, improve the theoretical system of carbon compensation and achieve the goal of carbon neutralization, the carbon emission coefficient method and the carbon ecological bearing index method were adopted to carry out the accounting of net carbon emissions from land use in Shaanxi Province from 2010 to 2018, explore the temporal and spatial evolution law of net carbon emissions from land use in Shaanxi Province, analyze the differences in carbon ecological carrying capacity. And based on the annual carbon surplus (occupancy) index of each region, the payment area and compensation area in the process of carbon compensation behavior were identified, and the carbon compensation amount in various regions of Shaanxi Province was calculated. The results showed that from 2010 to 2018, the total net carbon emissions from land use in Shaanxi Province showed an increasing trend year by year, and the growth rate gradually slowed down after 2014. The overall carbon emissions showed a spatial distribution characteristic of gradually decreasing from north to south. The carbon ecological carrying capacity of Shaanxi Province was gradually increasing from north to south, and the gap between north and south was expanding. During the whole study period, Yulin City, Weinan City and Xi'an City were the most important payment areas in the carbon compensation behavior, and Shangluo City, Ankang City and Hanzhong City were the main compensation areas. The total amount of carbon compensation in Shaanxi Province was constantly increasing, and the growth rate was also increasing year by year. The growth rate of different regions was inconsistent. Among them, Yulin City had the highest proportion of carbon compensation and the fastest growth rate. Therefore, it is of great significance to accelerate the construction of the carbon compensation mechanism among cities in the province for China to achieve the "double carbon" goal, formulate effective carbon emission reduction policies, and promote regional coordinated development.

**Key words** Carbon neutralization; Carbon emissions; Carbon compensation; Land use; Shaanxi Province

为应对气候变暖, 各个国家正积极实施碳补偿政策以推动不同地区降低二氧化碳的排放量, 我国作为碳排放量最多的国家之一, 面临着严峻的减排压力<sup>[1]</sup>。2020年9月, 习近平总书记在第七十五届联合国大会上宣布“中国二氧化碳排放力争在2030年前达到峰值, 2060年前实现碳中和”<sup>[2]</sup>, 这是我国对世界的庄严承诺, 为我国生态文明建设和低碳发展转型指明了方向<sup>[3]</sup>。已有研究证明, 土地利用是人类活动的主要方式, 因土地利用变化引起的二氧化碳排放量占人类活动影响二氧化碳排放总量的1/3<sup>[4-6]</sup>。在气候变暖和节能减排的背景下, 基于土地利用碳排放测算探讨市域碳补偿机制构建方式, 对明确地区之间内部发展差异、地区低碳发展转型以及有目标地制定碳减排政策具有重要意义。

碳补偿是指某一碳排放主体以经济或非经济形式对生

态保护主体给予一定补偿的行为。目前生态补偿方面研究主要包含耕地生态补偿<sup>[7]</sup>、农业生态补偿<sup>[8]</sup>、流域生态补偿<sup>[9]</sup>、碳生态补偿<sup>[10]</sup>等, 但对碳补偿的专门研究仍属于探索阶段<sup>[11]</sup>。有学者对土地利用碳排放测算方法和区域碳补偿模型展开了大量研究<sup>[12-15]</sup>, 现阶段碳补偿机制研究主要是在区域碳收支核算的基础上, 识别碳补偿行为中的主客体, 其碳源值大于碳汇值就是碳补偿行为中的支出方, 相反, 若碳源值小于碳汇值即为碳补偿行为中的获补方<sup>[16-20]</sup>, 得到的研究结果通常是很多地区相对碳赤字, 支付区支付的金额远大于获补区得到的补偿。目前的碳补偿研究中存在一定缺陷, 基于碳源扣除碳汇的量进行额度计算得到的碳补偿量通常很大, 超出一些地区的支付能力, 不具备现实性。此外, 关于碳补偿机制基于省内各市之间横向碳补偿理论体系还比较缺乏。以城市为碳补偿单元, 相对于省域和县域来说更易于管理, 更具有现实性, 可以促进城市之间的公平发展, 维持城市之间经济与生态的平衡, 体现社会公平。碳补偿额度的计

**作者简介** 张宇(1999—), 女, 山西阳泉人, 硕士研究生, 研究方向: 土地利用管理。

**收稿日期** 2022-07-17; **修回日期** 2022-08-18

算应基于支付区多占用获补区盈余的那部分碳排放指标进行计算,而不是根据碳源超出碳汇的值即净碳排放量计算,碳补偿额度确定的难度就在于计算出支付区多占用的碳排放指标。

陕西省内部自然气候条件、产业结构、资源禀赋、经济发展状态、生态压力等空间差异明显。陕西省陕北地区作为我国国家级能源重化工基地,煤炭资源富饶,其煤炭资源产量和可采量均在全国前列,长期位于矿产采集和能源粗加工低端,导致碳排放量巨大,因此,碳排放治理难度加大;关中地区是陕西省乃至西北地区的城市群聚集区,人口众多,经济活跃,也是陕西省粮食主产区,碳排放量持续增长;陕西省陕南地区林地草地密集,是重要的碳汇和碳储存地区。从碳中和角度出发,构建省内各市之间的碳补偿机制,有助于开拓生态补偿渠道,实现城市之间的社会公平,促进城市生态与经济的和谐发展。该研究基于 2010—2018 年省级和市级统计数据,进行陕西省各市土地利用碳排放核算;从碳盈余和碳占用角度,确定陕西省碳补偿的指标和额度,探索碳补偿应用模型,丰富碳补偿机制构建的研究,为城市未来低碳发展转型提供决策参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况 陕西省位于西北内陆腹地,地处 31°42′~39°35′N、105°29′~111°15′E(图 1),地势南北高、中间低,横跨 3 个气候带。由于自然地理环境、资源禀赋和经济发展的差异,形成了陕北、关中和陕南 3 大区域。陕南地处秦巴山区,属于亚热带气候,是国家南水北调水源保护地,林地密集,相对具有较强的碳汇能力;关中及陕北南部、中部属于暖温带气候,为城市群集中地区,城镇化的快速发展造成了碳排放量的升高;陕北北部属中温带气候,为国家级能源重化工基地,能源粗放开采也给生态和环境造成压力。因此,陕西省在研究市域碳补偿机制方面具有典型性和代表性。

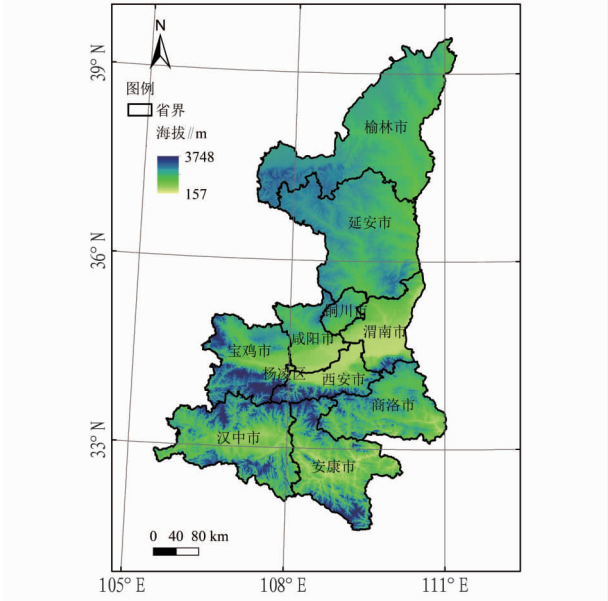


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 数据来源 以陕西省 11 个地级行政区为研究单元,其中能源消耗量、主要农作物产量、人口、GDP、恩格尔系数等数据来源于《中国城市统计年鉴》《陕西省统计年鉴》及各区市统计年鉴和统计公报,各类土地利用数据来源于每年土地利用变更调查数据。

1.3 研究方法

1.3.1 土地利用净碳排放。土地利用净碳排放总量为经济活动的碳源排放与生态系统碳汇吸收的差值;将建设用地代表经济发展过程引起的碳源排放,包括能源消耗和人类呼吸两大类;将耕地、林地、草地、水域作为生态系统碳汇吸收。土地利用净碳排放量计算公式如下:

C<sub>N</sub> = C<sub>E</sub> - C<sub>A</sub> (1)

C<sub>E</sub> = E × σ + p × θ (2)

C<sub>A</sub> = C<sub>e</sub> + C<sub>f</sub> (3)

式中,C<sub>N</sub> 表示某市土地利用净碳排放量(t);C<sub>E</sub> 表示某市碳源排放量(t),C<sub>A</sub> 表示某市碳汇吸收量(t)。E 表示某市能源消耗总量(t 标准煤);σ 表示单位能耗 CO<sub>2</sub> 排放系数,取 1.87 t 标准煤/t<sup>[21]</sup>;p 为某市常住人口总量;θ 为每人每年碳排放量,取值 0.079 t/(人·a)<sup>[22]</sup>。

林地、草地、水域的碳吸收计算公式如下:

C<sub>e</sub> = Σ (L × δ) (4)

式中,C<sub>e</sub> 表示 CO<sub>2</sub> 碳汇吸收量(t);L 表示各类用地面积(hm<sup>2</sup>);δ 表示各类用地单位面积固碳速率(t/hm<sup>2</sup>),林地、草地、水域的 δ 分别为 3.810 t/hm<sup>2</sup><sup>[23]</sup>、0.910 t/hm<sup>2</sup>、0.298 t/hm<sup>2</sup><sup>[24]</sup>。

耕地碳吸收计算公式如下:

C<sub>f</sub> = Σ C<sub>p</sub> = Σ (C<sub>g</sub> × Y<sub>w</sub> × H) (5)

式中,C<sub>f</sub> 为农作物生育期的光合作用碳吸收量(t);C<sub>p</sub> 为某种作物碳吸收量(t);C<sub>g</sub> 为某种作物的碳吸收率(%);H 为某种作物的经济系数<sup>[25]</sup>;Y<sub>w</sub> 为某种作物的年经济产量(t)。陕西省主要农作物的碳吸收率和经济系数见表 1。

表 1 陕西省主要农作物的碳吸收率和经济系数  
Table 1 Carbon absorption rate and economic coefficient of main crops in Shaanxi Province

| 作物类型 Crop type   | H    | C <sub>g</sub> /% |
|------------------|------|-------------------|
| 小麦 Wheat         | 0.40 | 48.53             |
| 玉米 Corn          | 0.40 | 47.09             |
| 大豆 Soybean       | 0.34 | 45.00             |
| 稻谷 Unhusked rice | 0.40 | 45.00             |
| 油菜籽 Rapeseed     | 0.25 | 45.00             |
| 花生 Peanut        | 0.43 | 45.00             |

1.3.2 碳生态承载指数。碳的生态承载指数(ESC)可以客观反映该地区碳生态承载能力的大小,即碳汇能力的大小<sup>[26]</sup>,计算方式如下:

ESC = (C<sub>Ai</sub> / C<sub>A</sub>) / (C<sub>Ei</sub> / C<sub>E</sub>) (6)

式中,C<sub>Ai</sub> 和 C<sub>A</sub> 分别表示地区及全省的碳吸收量(t);C<sub>Ei</sub> 和 C<sub>E</sub> 分别表示地区及全省的碳排放量(t)。ESC>1 表示该地

区碳吸收率大于碳排放率,具有相对较高的碳补偿率和较强的碳生态承载能力;ESC 越低表明该地区碳汇能力和碳补偿率越低。

### 1.3.3 碳盈余(占用)量。计算公式如下:

$$C_D = (d - e_0) \times p \quad (7)$$

式中, $C_D$  表示某市(区)碳盈余或碳占用量(t); $d$  表示区域人均碳排放强度( $\text{t}/\text{人}$ ); $p$  为某市常住人口总量(人); $e_0$  表示低碳情景下陕西省人均碳排放强度,为  $1.497 \text{ t}/\text{人}$  [27]。若  $C_D > 0$ ,则表明该市(区)占用其他地区的碳指标量;若  $C_D < 0$ ,则表明该市(区)向其他地区提供自身碳盈余量。

1.3.4 碳补偿额度测算。将各地区碳盈余(占用)量情况作为碳补偿基准确认的原则,由于 11 个地市经济发展水平不同导致碳补偿实际支付意愿也有差异,该研究使用生长曲线函数模型对不同经济条件和发展水平下的碳补偿指数进行适当调整 [28],计算公式如下:

$$P = C_D \times P_c \times r \quad (8)$$

式中, $P$  为某市(区)的碳补偿额度(元); $P_c$  为单位碳价格(元/t); $r$  为碳补偿指数,表示在不同经济条件情况下,地区对碳补偿的补偿意愿与能力的差异,其表达式如下:

$$r = K / (1 + ae^{-bt}) \quad (9)$$

式中, $K$  为区域经济发展水平,用地区人均 GDP 与地区整体 GDP 之比来表示; $a$ 、 $b$  为常数; $t$  为地区恩格尔系数; $e$  为自然常数。修正后的生态补偿系数公式如下:

$$r_i = \frac{e^i \times G_i}{(e^i + 1) \times G} \quad (10)$$

式中, $r_i$  为地区碳补偿系数; $G_i$  为  $i$  地区人均 GDP(元); $G$  为地区整体 GDP(元)。

## 2 结果与分析

### 2.1 陕西省土地利用净碳排放量时空特征

2.1.1 土地利用净碳排放量时间演变。根据陕西省 2010—2018 年能源消耗与土地利用现状数据,计算得到陕西省 2010—2018 年碳排放量(图 2)。从图 2 可以看出,近 19 年陕西省土地利用净碳排放量呈持续增长态势,但还未达峰值,与总碳源排放趋势吻合。在研究期间内,净碳排放总量从 2010 年的  $1.44 \times 10^8 \text{ t}$  增长至 2018 年的  $2.75 \times 10^8 \text{ t}$ ,增幅达到 90.97%。陕西省土地利用净碳排放量增长趋势呈现出阶段性特征,大体可以分为 2 个阶段:2010—2014 年是净碳排放量的快速增长时期,从 2010 年的  $1.44 \times 10^8 \text{ t}$  增长至 2014 年的  $2.35 \times 10^8 \text{ t}$ ,增幅为 63.19%;2014—2018 年是净碳排放量的缓慢增长时期,从 2014 年的  $2.35 \times 10^8 \text{ t}$  增长到 2018 年的  $2.75 \times 10^8 \text{ t}$ ,增幅为 17.02%,这说明近些年陕西省实行低碳发展政策取得了显著成效,二氧化碳排放量逐渐达到最高值。总体来看,陕西省碳汇量远远低于碳源量,不断增长的碳源得不到更多的碳汇来抵消,最终呈现为碳排放增长明显,而碳吸收地类面积逐年减少也进一步造成净碳排放总量的增长。

从陕西省碳源碳汇结构变化(表 2)来看,陕西省总碳汇吸收在研究期内变化幅度较小,基本保持稳定。其中,对碳汇总量影响最大的是林地,占陕西省总碳汇量 70%左右,其

次是耕地和草地,分别占比 25% 和 4% 左右,说明林地是陕西省主要的碳汇来源。2010—2018 年陕西省林地碳汇正在呈逐渐递减的趋势,从  $42.773 \times 10^6 \text{ t}$  降低至  $42.539 \times 10^6 \text{ t}$ 。随着陕西省整体经济的增长,能源需求也在不断增加,这意味着如果要实现“双碳”目标,应减少化石能源的使用,因此,寻找替代能源以及建立能源供应体系是目前面临的重要问题 [29]。

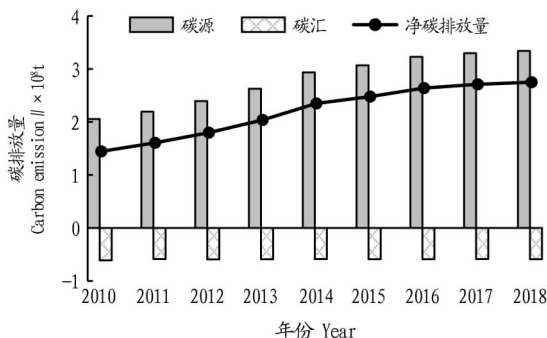


图 2 2010—2018 年陕西省土地利用碳排放量变化

Fig. 2 Changes of land use carbon emissions in Shaanxi Province from 2010 to 2018

2.1.2 土地利用净碳排放量空间演变。运用 ArcGIS 10.2 对陕西省土地利用净碳排放量进行空间可视化 [30],结果如图 3 所示,总体来看,陕西省土地利用净碳排放量在空间上呈现出北部和中部高、南部低的分布特征。2010—2018 年土地利用碳排放量高值地区存在明显扩散现象,2010 年起以榆林市、渭南市 2 个高值区逐渐向外围扩散,周围地区整体碳排放量提升明显。经过碳排放量核算可知,以榆林市、渭南市、咸阳市、宝鸡市的土地利用净碳排放量较高,安康市、商洛市、杨凌示范区的土地利用碳排放量较低。由于受到经济社会发展水平、资源禀赋、人口、环境承载力等多重因素的影响,各个市(区)之间存在显著的地区差异。陕北地区以榆林市为代表,作为国家级能源重化工基地,能源直接消耗引起的碳排放量较为显著。由于陕北地区自然气候问题,林草地稀疏,这也是净碳排放量比其他地区多的原因。而关中地区作为陕西省的经济中心,其中以西安为代表,经济的快速增长造成能源需求与能源消耗持续增多,碳排放占比也增多,陕南地区以安康市、商洛市为代表,土地利用净碳排放量为负值,说明其碳汇量大于碳源量,生态系统相对优越。

2.2 陕西省碳生态承载能力 比较不同地区碳生态承载指数(ESC)的分布情况(图 4)发现,总体来看,陕南地区如汉中市、安康市、商洛市、宝鸡市等区域的生态承载指数较高,陕北、关中地区相对偏低,榆林市、渭南市碳生态承载指数较低。2010 年,ESC>1 的地区有安康市、商洛市、汉中市、延安市、宝鸡市、杨陵区,表明以上地区碳吸收率大于碳排放率,具有相对较高的碳补偿率和较强的碳汇能力;ESC<1 的地区有榆林市、渭南市、西安市、咸阳市、铜川市。2018 年与 2010 年相比,铜川市、汉中市、宝鸡市、咸阳市和安康市碳生态承载指数明显提升,表明以上城市碳汇能力在逐年增长,生态得到好转;相比之下,榆林市、西安市、杨陵区、延安市碳生态

承载能力逐年下降,说明其碳排放的比例明显超过了碳吸收的比例,并且碳吸收有进一步弱化的趋势。因此,这些地区在经济发展的同时更应该需要注重生态保护,加强碳汇能力,以协调生态保护与经济发展之间的矛盾。

表 2 2010—2018 年陕西省土地利用碳源和碳汇结构变化

Table 2 Changes of carbon source and carbon sink structure of land use in Shaanxi Province from 2010 to 2018

单位:×10<sup>6</sup> t

| 年份<br>Year | 碳源 Carbon source          |                   | 碳汇 Carbon sink  |                       |                  |
|------------|---------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
|            | 建设用地<br>Construction land | 林地<br>Forest land | 草地<br>Grassland | 耕地<br>Cultivated land | 水域<br>Water area |
| 2010       | 205. 616                  | 42. 773           | 2. 625          | 15. 644               | 0. 089           |
| 2011       | 219. 346                  | 42. 749           | 2. 623          | 13. 188               | 0. 090           |
| 2012       | 239. 287                  | 42. 738           | 2. 620          | 13. 976               | 0. 091           |
| 2013       | 262. 831                  | 42. 703           | 2. 616          | 13. 608               | 0. 092           |
| 2014       | 293. 699                  | 42. 661           | 2. 603          | 13. 350               | 0. 092           |
| 2015       | 306. 865                  | 42. 564           | 2. 596          | 13. 727               | 0. 091           |
| 2016       | 322. 846                  | 42. 564           | 2. 612          | 13. 621               | 0. 091           |
| 2017       | 329. 731                  | 42. 545           | 2. 611          | 13. 433               | 0. 091           |
| 2018       | 333. 982                  | 42. 539           | 2. 610          | 13. 715               | 0. 091           |

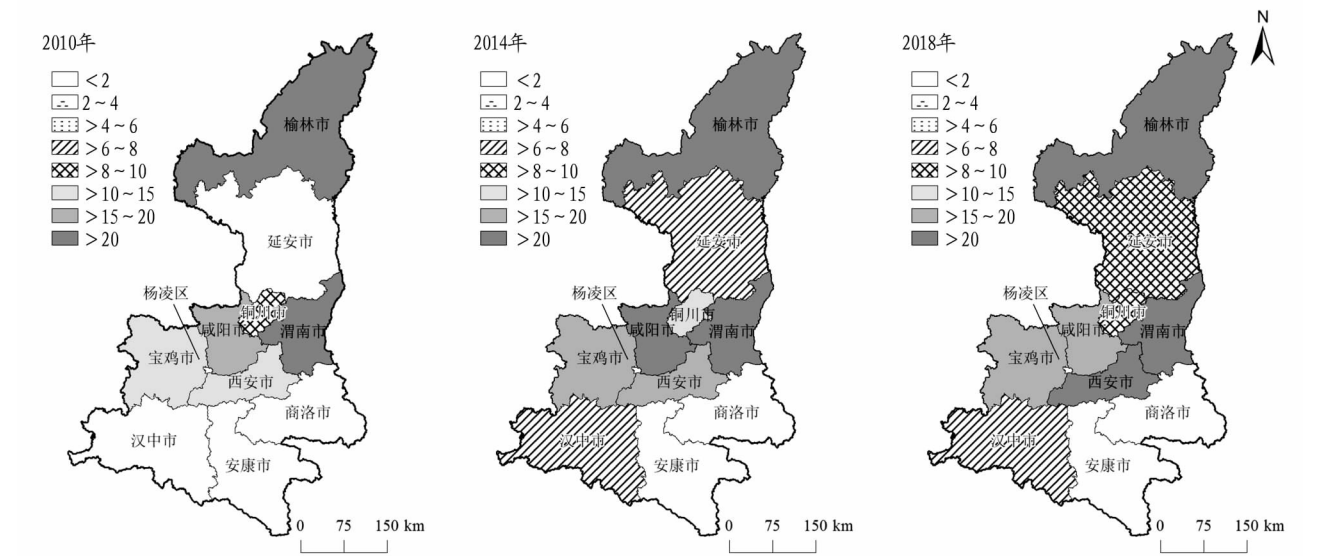


图 3 2010—2018 年陕西省土地利用净碳排放量空间格局演变(单位:×10<sup>8</sup> t)

Fig. 3 Evolution of spatial pattern of land use net carbon emission in Shaanxi Province from 2010 to 2018

**2.3 碳盈余(占用)量变化** 根据碳补偿理论,市域碳补偿的标准并非传统的地区碳源减去碳汇的价值,而是在市域净碳排放的基础上去除城市发展过程中拥有的一定量的碳排放权,关键在于将碳排放权指标进行量化,即计算出碳盈余和碳占用量进行碳补偿额度。基于 2010—2018 年陕西省土地利用碳排放量盈余与占用量的测算(表 3),识别出支付区与获补区,碳补偿支付区在不断增多,获补区不断较少。2010 年,碳补偿行为中的支付区主要由榆林市、铜川市、渭南市、咸阳市、宝鸡市、西安市组成;获补区主要有延安市、汉中市、安康市、商洛市、杨凌区组成。到 2018 年,延安市、汉中市和杨凌区转变为支付区。

表 3 2010—2018 年陕西省碳盈余(占用)量变化

Table 3 Change of carbon surplus (occupation) in Shaanxi Province from 2010 to 2018

单位:×10<sup>6</sup> t

| 地区 Area      | 2010 年  | 2011 年  | 2012 年  | 2013 年  | 2014 年  | 2015 年  | 2016 年  | 2017 年  | 2018 年  |
|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 西安 Xi'an     | +2. 13  | +0. 84  | +0. 56  | +5. 57  | +3. 28  | +4. 57  | +4. 94  | +5. 97  | +5. 36  |
| 铜川 Tongchuan | +8. 42  | +9. 16  | +10. 09 | +11. 19 | +9. 82  | +8. 92  | +8. 80  | +8. 36  | +8. 54  |
| 宝鸡 Baoji     | +8. 48  | +9. 39  | +8. 95  | +10. 49 | +10. 14 | +9. 94  | +10. 93 | +10. 55 | +9. 91  |
| 咸阳 Xianyang  | +10. 00 | +14. 23 | +18. 57 | +21. 91 | +21. 88 | +24. 31 | +23. 58 | +12. 74 | +11. 68 |
| 渭南 Weinan    | +32. 35 | +36. 49 | +41. 82 | +44. 39 | +45. 02 | +51. 75 | +54. 14 | +52. 51 | +53. 35 |
| 延安 Yanan     | -1. 69  | +1. 34  | +2. 16  | +3. 07  | +2. 94  | +1. 36  | +2. 41  | +3. 88  | +6. 41  |

接下表

续表 3

| 地区 Area     | 2010 年 | 2011 年  | 2012 年  | 2013 年  | 2014 年  | 2015 年  | 2016 年  | 2017 年  | 2018 年  |
|-------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 汉中 Hanzhong | -3.66  | -2.68   | -1.16   | +0.19   | +1.31   | +0.37   | +0.68   | +1.65   | +2.09   |
| 榆林 Yulin    | +50.86 | +53.11  | +59.40  | +67.99  | +98.90  | +109.22 | +119.16 | +129.30 | +131.16 |
| 安康 Ankang   | -9.47  | -9.01   | -5.59   | -10.08  | -8.58   | -8.75   | -9.49   | -8.52   | -8.30   |
| 商洛 Shangluo | -8.54  | -8.27   | -7.88   | -7.63   | -6.80   | -6.85   | -6.65   | -6.46   | -6.59   |
| 杨凌 Yangling | -0.30  | -0.26   | -0.24   | -0.22   | -0.21   | -0.21   | +2.43   | +2.61   | +2.58   |
| 合计 Total    | +88.58 | +104.34 | +126.68 | +146.87 | +177.70 | +194.63 | +210.93 | +212.59 | +216.19 |

注：“+”表示碳占用；“-”表示碳盈余。  
Note: “+” indicates carbon occupancy; “-” indicates carbon surplus.

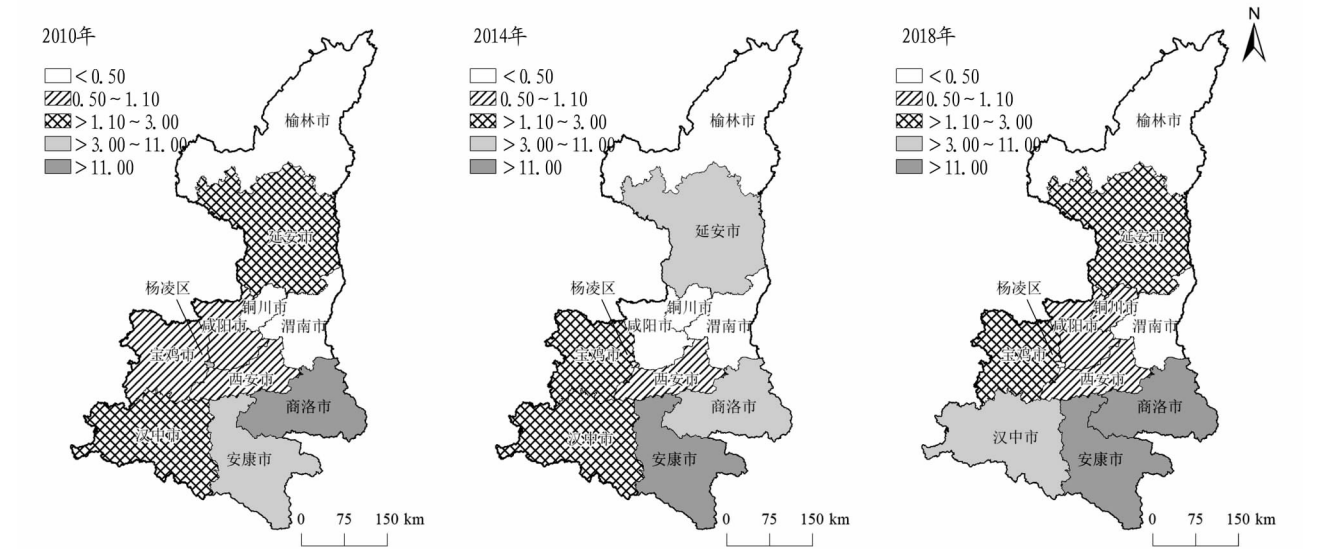


图 4 2010—2018 年陕西省碳生态承载指数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of carbon ecological carrying index in Shaanxi Province in 2010–2018

**2.4 碳补偿价值变化** 根据测算结果,结合我国单位碳价格计算了 11 个市(区)碳生态补偿额度(图 5)。碳补偿机制要解决的是各城市社会经济发展与生态保护之间的不协调问题,本质是合理配置资源,调整生态保护和经济之间的利益关系,调整受益者与受损者之间的不公平分配,最终目的是降低区域发展之间的不平衡,缩小城市间的差距。对于碳补偿额度的测算,目前国际上的碳税价格为 66~99 元/t,根据《2018 年中国碳价调查》结果取值为 51 元/t,最终结果取值为 51 元/t,陕西省部分地区煤矿污染严重,生态建设任务艰巨,因此应采用此价格作为单位碳价格。

由图 5 可知,2010—2018 年陕西省碳补偿总额呈现不断上升趋势,从 15.5 亿元上升至 181.7 亿元。具体来看,有以下特点:位于陕北地区和关中地区的榆林市、渭南市、西安市需要支付的碳补偿额度相对比其他支付区城市高,其中支出额度最多的地区为榆林市,并且呈现不断增长的趋势,每年平均需要支付的碳补偿额度为 63.9 亿元,这与其能源粗放利用导致碳排放量有着直接关系。榆林市为陕西省的煤炭采集地区,矿产资源采掘业特色突出,碳排放治理难度大,须转变经济发展模式来提升区域碳排放与资源禀赋特征的匹配度;部分地区在研究期前期为获补地区,而后随着社会经济的发展,碳排放逐渐提升,逐渐转变为支付地区,主要包括延安市、汉中市、杨陵区,导致发生转变的原因主要是近几年

这 3 个市(区)GDP 快速增长,表明其经济发展明显提升,碳排放量得不到好的控制,同时,这些地区碳汇能力也未得到提升,依旧保持在原有水平,与高速增长的碳排放严重不匹配;只有安康市、商洛市在整个研究期为获补区,即为碳受偿地区,其碳受偿额度在整个研究期间呈现出波动递增的趋势,主要原因是该地区林地草地面积大,密度高,碳汇资源丰富,碳承载力与固碳能力较强。经上述分析可知,碳补偿地区通常是经济贡献度高的地区,而碳受偿地区则是生态贡献度高的地区,因此在碳补偿测算模型中经过修正后,实质上允许经济贡献度高的地区碳排放权指标有所提高,其所需要支付的相应碳补偿额度就会降低。部分碳排放量较少的市(区),因其经济贡献度较低,经过模型修正后,其碳排放量也较少,所获的碳补偿额度也会相应下降,碳盈余(占用)量的计算充分考虑了市区对陕西省整体的经济 and 生态贡献度,而且计算出来的碳补偿额度也只占城市 GDP 的一小部分,具备承担资金补偿的现实性,最终得到的碳补偿方案相对促进了城市之间的公平发展。通过上述分析发现陕西省各市(区)的经济发展极不平衡,碳生态承载能力和经济发展阶段处于严重不匹配状态。因此,要解决发展不平衡问题,不仅需要政府的支持,更要探索碳补偿有效机制,努力实现内部的公平发展,不断缩小各市区之间的经济差距,碳补偿是从低碳角度推动区域低碳协调发展的重要举措。



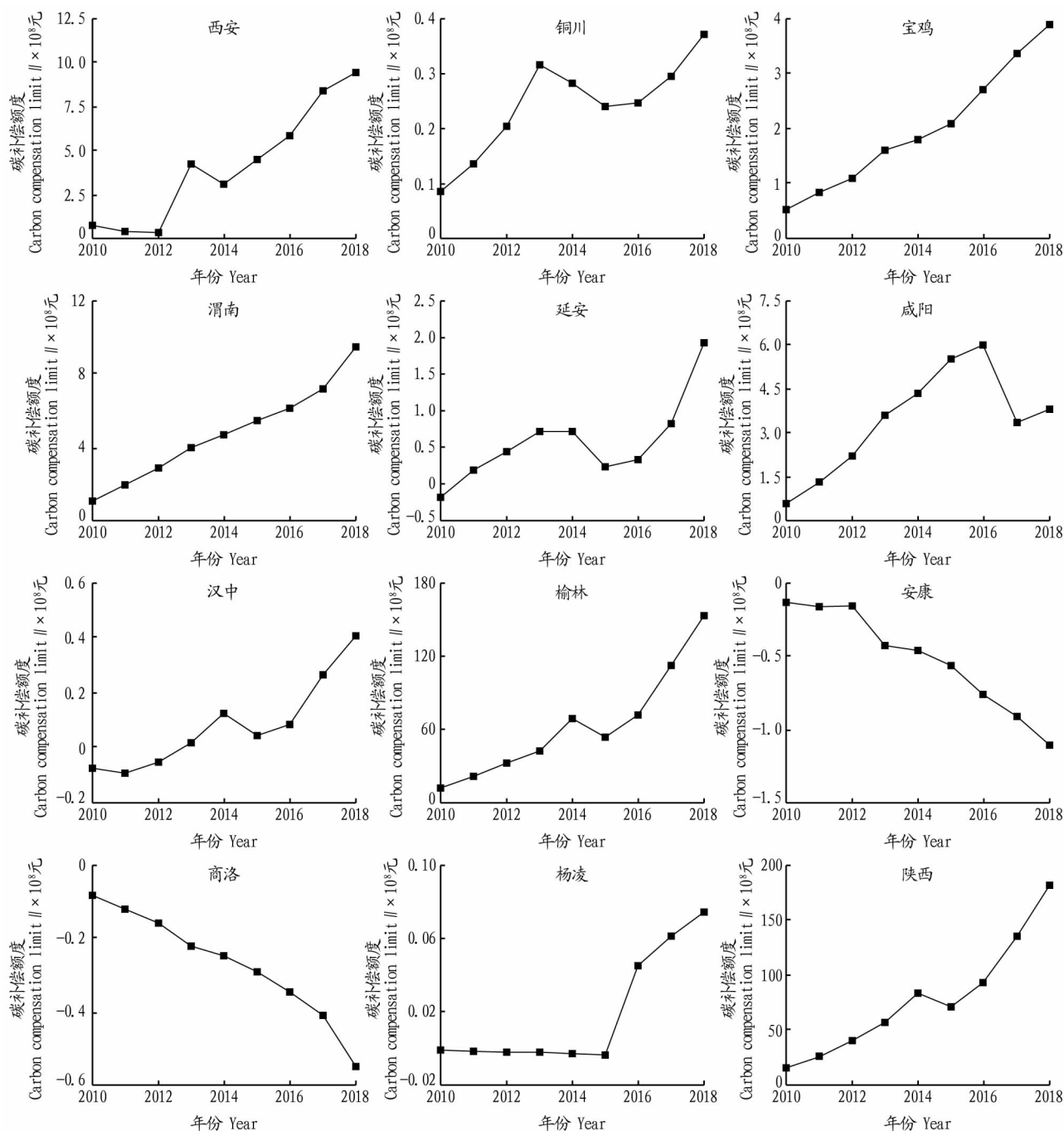


图 5 2010—2018 年陕西省碳补偿额度趋势

Fig. 5 Trend chart of carbon compensation amount in Shaanxi Province from 2010 to 2018

### 3 结论与讨论

**3.1 结论** 该研究构建了基于城市碳排放权的市域碳补偿机制,对 2010—2018 年陕西省及其各市土地利用碳排放量进行了核算和分析,并基于各个市(区)碳盈余或占用量的实际情况识别出碳补偿行为中的支付区和获补区,对其碳补偿额度进行计算,得到了以下结论:

(1) 2010—2018 年陕西省土地利用净碳排放总量呈逐年递增趋势,增长速度在 2014 年后逐渐放缓,碳排放量总体呈现出自北向南逐渐递减的空间分布特征,从碳排放结构来看,建设用地为主要碳源,林地和耕地为主要碳汇,研究区内

除宝鸡市、铜川市、咸阳市外,其余城市净碳排放量均处于波动增长状态。

(2) 陕西省碳生态承载力具有明显的差异性,呈现出自北向南逐渐递增的总体特征,且差距不断加大,2018 年与 2010 年相比,铜川市、汉中市、宝鸡市、咸阳市和安康市碳生态承载指数逐渐提升,表明以上城市碳汇能力在逐年增长,生态得到好转,相比之下,榆林市、西安市、杨凌区、延安市碳生态承载力逐渐下降。

(3) 在对碳补偿主客体进行识别并对碳补偿额度进行计算后,得出在整个研究期间榆林市、渭南市、西安市是主要的

支付区,商洛市、安康市、汉中市是主要的获补区。随着社会经济的高速发展,越来越多的城市由获补区逐渐演变为支付区;陕西省碳补偿总额不断提升,其中榆林市、渭南市碳补偿额度占比较多,这说明陕西省完成双碳目标实现低碳发展的任务仍然很艰巨。

**3.2 讨论** 基于研究结果,在未来城市实现低碳发展过程中需考虑以下几点策略:①加强对耕地、林地、草地等其他生态用地的保护。林草地发挥的碳汇作用不容忽视,因此,在碳汇较低的地区应提高植被覆盖度增加碳储量,碳汇较高的地区应实施严格的生态保护制度,保证碳汇能力不降低。②推广能源清洁利用和转化技术,从根本上减少碳排放量,转变能源利用结构,将以化石能源为主的高碳排能源利用结构转变为以可再生清洁能源为主的能源利用结构。③加快建立城市碳源和碳汇数据库,实现区域碳源和碳汇量速查,动态更新的碳排放数据是碳补偿机制建立的基础,也是实现双碳目标的重要途径。在双碳目标的引领下,未来城市的发展要同时兼顾社会、生态与经济效益,将探索低碳发展模式融入城市发展规划中。

需要说明的是,虽然该研究在改进区域碳补偿机制的基础上,对陕西省市域碳补偿额度进行了系统分析,进一步优化了碳补偿理论机制,但在测算陕西省各市(区)土地利用净碳排放量时,虽然选取的相关碳排放系数研究成果与陕西省自然条件较为相符,但是因为每个地区的能源排放强度、林地草地等植被覆盖密度,自然植被状况等均存在一定差异,可能对研究结果的精度造成影响。除此之外,由于数据限制,该研究未测算耕地利用过程中产生的碳源,也未考虑耕地撂荒、熟制差异对碳汇能力的影响。在今后的研究中应该注重建立可以实时监测的本地化碳排放因子,细化碳排放量的计算方法,这样计算出的结果精度才会更高,更具有政策指导意义。该研究从市域尺度上开展碳补偿研究,实质上,碳排放量和碳补偿额度核算可以尝试基于不同用地类型地块尺度开展,更微观的研究尺度可以使碳补偿研究具有更大的应用价值,更具操作性,另外可以对碳补偿未来趋势进行预测,提出更加有效的应对措施。

## 参考文献

- [1] 刘志华,徐军委,张彩虹. 科技创新、产业结构升级与碳排放效率:基于省际面板数据的PVAR分析[J]. 自然资源学报,2022,37(2):508-520.
- [2] 习近平. 坚定信心克艰克难共建更加美好的世界:在第七十六届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中国产经,2021(19):8-11.
- [3] 王灿,张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理,2020,12(6):58-64.

(上接第52页)

- [18] 张继平,张林波,王凤玉,等. 井冈山国家级自然保护区森林土壤养分含量的空间变化[J]. 土壤,2014,46(2):262-268.
- [19] 张秋芳,陈奶寿,陈坦,等. 不同恢复年限侵蚀红壤生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学,2016,14(2):59-66.
- [20] 魏超,王洋,王楠,等. 陆地生态系统植被氮磷化学计量研究进展[J]. 植物生态学报,2012,36(11):1205-1216.
- [21] HOBBI E S E, GOUGH L. Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska[J]. Oecologia,2002,131(3):453-462.

- [4] HOUGHTON R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850-1990[J]. Tellus B:Chemical and physical meteorology,1999,51(2):298-313.
- [5] GOLDEWIJK K K, RAMANKUTTY N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets[J]. GeoJournal,2004,61(4):335-344.
- [6] 赵荣钦,黄贤金. 基于能源消费的江苏省土地利用碳排放与碳足迹[J]. 地理研究,2010,29(9):1639-1649.
- [7] 崔宁波,生世玉,方袁意. 粮食安全视角下省际耕地生态补偿的标准量化与机制构建[J]. 中国农业大学学报,2021,26(11):232-243.
- [8] 陈儒,姜志德. 中国省域低碳农业横向空间生态补偿研究[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(4):87-97.
- [9] 郝春旭,赵艺柯,何珂,等. 基于利益相关者的赤水河流域市场化生态补偿机制设计[J]. 生态经济,2019,35(2):168-173.
- [10] 马明娟,李强,周文瑞. 碳中和视域下黄河流域碳生态补偿研究[J]. 人民黄河,2021,43(12):5-11.
- [11] 吴立军,田启波. 碳中和目标下中国地区碳生态安全与生态补偿研究[J]. 地理研究,2022,41(1):149-166.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 马远,刘真真. 黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. 生态经济,2021,37(7):35-43.
- [15] 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.
- [16] 刘燕华,李宇航,王文涛. 中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(9):1-5.
- [17] 张巍. 陕西省重点生态功能区碳汇/碳源核算与生态补偿研究[J]. 生态经济,2018,34(10):191-194.
- [18] 王雅敬,谢炳庚,李晓青,等. 长株潭经济圈土地利用变化的碳排放量及生态补偿研究[J]. 生态科学,2017,36(4):160-165.
- [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.
- [20] 黄晶晶,李玲玲,徐琳瑜. 基于外溢生态系统服务价值的区域生态补偿机制研究[J]. 生态学报,2021,41(17):6994-7001.
- [21] 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.
- [22] 曾德珩,李生萍,吴雅,郑倩婧. 重庆市五大功能区碳失衡及其对策[J]. 经济地理,2016,36(8):152-157.
- [23] 杨洁,谢保鹏,张德罡. 基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. 中国生态农业学报,2021,29(6):1018-1029.
- [24] 段晓男,王效科,逄非,等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报,2008,28(2):463-469.
- [25] 田云,张俊德,罗小峰. 中国种植业净碳效益与经济效益协调性区域比较研究[J]. 经济地理,2014,34(3):142-148.
- [26] 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.
- [27] 董梅,李存芳. 低碳省区试点政策的净碳减排效应[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(11):63-74.
- [28] FANG G C, TIAN L X, LIU M G, et al. How to optimize the development of carbon trading in China—Enlightenment from evolution rules of the EU carbon price[J]. Applied energy,2018,211:1039-1049.
- [29] 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.
- [30] 莫惠斌,王少剑. 黄河流域县域碳排放的时空格局演变及空间效应机制[J]. 地理科学,2021,41(8):1324-1335.

- [22] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry,2010,98(1/2/3):139-151.
- [23] 曾全超,李鑫,董扬红,等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报,2015,30(5):870-879.
- [24] 赵维俊,刘贤德,金铭,等. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报,2016,53(2):477-489.
- [25] NOTTINGHAM A T, TURNER B L, WHITAKER J, et al. Soil microbial nutrient constraints along a tropical forest elevation gradient: A below-ground test of a biogeochemical paradigm[J]. Biogeosciences discussions,2015,12(8):6489-6523.