

基于相对碳赤字的中国省际 碳补偿时空格局研究

万伦来 林春鑫 陈艺¹

(合肥工业大学 经济学院, 安徽 合肥 230009)

【摘要】: 为研究揭示中国省际碳补偿时空格局变化特征, 文章对基于绝对量碳赤字的碳补偿测算模型进行了改进, 构建了相对量碳赤字的碳补偿测算模型。研究表明: (1) 2007~2017 年我国碳补偿总额呈现下降趋势, 且呈现出显著的阶段性, 主要是受到我国经济发展进入新常态, 全国各地的 GDP 增速不断放缓的影响。(2) 从我国各省(市)来看: 碳补偿额度平均值排在前列的省(市)主要有上海、辽宁、江苏、天津、山东、浙江、山西、北京, 而排名较后的省份主要有内蒙古、新疆、广东、黑龙江。(3) 我国碳补偿额度热点区主要分布在东部沿海区域的江苏、浙江、上海; 冷点区主要分布在西北区域的甘肃、青海、新疆以及东北区域的黑龙江、吉林。碳补偿额度整体呈现以东部沿海, 京津, 北部沿海区域为中心向外围递减的空间格局, 表现为经济较发达地区向经济欠发达地区进行补偿, 且 2007~2017 年我国碳补偿空间格局变化较小, 即碳补偿空间格局具有“惯性”特点。

【关键词】: 碳补偿 相对碳赤字 绝对碳赤字 碳补偿测算模型 时空格局

【中图分类号】: F124.5 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2020)12-2572-12

为应对全球气候变化, 世界许多国家积极实施碳补偿以推动不同区域公平地削减二氧化碳的排放。所谓碳补偿是指某一碳排放主体以经济或非经济方式对碳汇主体或生态保护者给予一定补偿的行为^[1]。我国高度重视气候变化问题, 在巴黎气候变化大会上庄严承诺到 2030 年单位 GDP 的碳排放要比 2005 年下降 60%~65%; 有学者提出要建立全国各省“碳源-碳汇”的平衡账户, 加快建立健全“国家碳补偿制度”。而我国地域辽阔, 不同地区资源禀赋存在较大差异, 地区经济发展和碳排放不平衡性问题均较为突出^[2]。因此, 科学确定不同区域碳补偿额度已成为推动区域公平协调发展亟待解决的重要课题。

事实上, 目前关于碳补偿额度测定方法主要有 3 种: 一是从碳汇价值角度确定碳补偿标准, 该方法是通过测算出碳汇增加所产生的价值, 进而利用估算出的价值来确定碳补偿标准。例如, 于谨凯等^[3]基于影子价格法测算碳汇渔业的碳汇价值, 计算了 2001~2009 年山东省海水贝类养殖业的碳补偿额度。于金娜等^[4]建立碳汇效益函数, 以黄土高原常见的退耕树种刺槐为例, 探索了退耕还林补贴标准。王正淑等^[5]基于碳汇价值, 探索禁伐政策下退耕林地补偿标准, 研究结果表明县南沟流域退耕林地补偿标准为 3692.35 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)。二是从补偿意愿角度确定碳补偿标准, 该方法是通过实地问卷调查形式, 询问支付者或受偿者的支付意愿金额或受偿意愿金额来确定碳补偿标准。例如, 杨浩等^[6]利用四川省诺华川西南林业碳汇项目参与农户的调查数据, 测算出农户森林碳汇生态补偿额度范围在 1758 到 2025 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)之间。陈儒等^[7]通过问卷调研获取陕西泾阳县农户低碳农业生产受偿意愿数据, 厘定了农户的生态补偿金额。三是从碳平衡角度确定碳补偿标准, 该方法是通过测算碳排放与碳汇间的差值, 再与碳交易市场价格相乘来确定碳补偿标准。例如, 余光辉等^[8]基于碳平衡视角, 对长株潭及其生态“绿心区”昭山示范区开展生态补偿的量化研究。赵荣钦等^[9]通过碳收支的核算, 开展了河南省县域空间碳补偿研究, 分析得到河南省县域碳补偿率的空间分布具有显著的区

作者简介: 万伦来(1963~), 男, 教授, 主要研究方向为区域与资源环境经济。E-mail: wllsong9194@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(71573070)

域差异。胡小飞等^[10]基于碳足迹和碳承载力差值构建生态补偿标准模型,研究江西省 11 个地市的生态补偿时空变化特征。李颖等^[11]、陈儒等^[12]通过对农田生态系统碳排放和汇进行计算,开展了农业碳补偿研究。以上三种碳补偿额度测度方法均存在着一定的优势和劣势,从碳汇价值角度确定碳补偿标准,其主要优点是极大地方便了某一碳汇增加项目的碳补偿额度测算,但其仅考虑了碳汇的增加,忽略了相应碳排放的产生;从补偿意愿角度确定碳补偿标准,其主要优点是能较好地反映出受访者的补偿意愿,但调查结果容易受到受访者的性别、家庭收入和教育背景等因素影响且不同的问卷设计方法导致不同的评估结果。从碳平衡角度确定碳补偿标准,其主要优点是不仅综合考虑到碳排放和碳汇,而且碳排放和碳汇均为可定量分析的硬性指标,有效地规避问卷调查结果容易受到受访者特征影响的弊端,也利于不同地区制定统一的碳补偿标准,但不同地区统一碳补偿标准的制定,还需考虑不同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。

综上所述,已有从碳平衡角度确定的区域碳补偿标准基本上是基于碳赤字的绝对量来确定的,而没有综合考虑不同地区的资源禀赋差异和经济发展水平差异对碳补偿造成的影响。本文创新之处是考虑到区域人口数量、土地面积、科技水平、生态本底等因素的差异性和经济发展水平差异性,据此构建了基于相对量碳赤字的碳补偿测算模型,进而对我国省际碳补偿的时空变化特征进行了系统分析,冀为建立健全碳补偿机制体制提供有价值的参考资料。

1 研究方法和数据来源

1.1 基于相对量碳赤字的碳补偿测算模型

研究区域碳补偿时空变化特征,必须先测算碳补偿额度。目前,学术界大多是以碳赤字的绝对量进行碳补偿额度测算的^[10, 13]。该方法的基本模型为:

$$C_{di} = C_p - C_s; ACC_{di} = C_{di} \cdot P_c \quad (1)$$

式中: C_{di} 为*i*区域碳赤字,即为绝对碳赤字(为便于表述,下文中出现的碳赤字均表示绝对碳赤字),t/a; C_p 为碳排放量,t/a; C_s 为碳汇量,t/a; ACC_{di} 是*i*区域的碳补偿额度; P_c 是标准碳单价,元/t。若 $C_{di} > 0$,则该地区应支付碳补偿;反之则应获得碳补偿。

虽然(1)式为研究碳补偿提供了极大的便利,但该模型一方面未能充分考虑区域资源禀赋差异对碳补偿所造成的影响。这是因为不同地区的资源禀赋往往存在较大差异,人口数量越多的地区承担着更大的社会经济压力,也面临着更大的碳排放压力;土地面积越大的地区,碳赤字容纳空间越大,碳赤字容纳能力也越强。因此,人口数量越多、土地面积越大的地区,应该允许存在较大的碳赤字^[14]。技术水平较高的地区,不仅创造出较大的经济效益,而且有效地减少了碳排放,降低了环境污染,也产生了一定生态效益;生态本底较差的地区,固碳能力较弱,承担了更多的生态保育责任。因此,技术水平越高、生态本底越差地区,也应该允许存在较大的碳赤字^[15],另一方面未能充分考虑区域经济发展水平差异对碳补偿所造成的影响。这是因为不同地区的经济发展水平往往也存在较大差异,碳补偿能力也存在较大差异^[8]。因此,区域间碳补偿研究有必要充分考虑不同地区资源禀赋差异和经济发展水平差异。

YangGC等^[14]、闫丰等^[16]基于不同地区人口数量和土地面积差异,分别提出不同地区的碳赤字敏感度、理论碳赤字,并进一步构建出碳赤字的相对量。陈儒等^[16]基于不同地区生态本底差异,采用生态系统服务功能价值评估的当量因子法构建碳汇修正系数,对碳汇量进行修正。同时,考虑不同地区科技水平差异,运用非期望产出的SBM模型测算不同地区农业发展绩效,并在此基础上对碳排放量进行修正;本文借鉴以上学者研究,综合考虑不同地区人口数量、土地面积、科技水平、生态本底等资源禀赋差异构建相对碳赤字模型对(1)式进行改进,具体模型为:

$$\begin{aligned}
C_{adi} &= C_P \cdot \alpha_i - C_S \cdot \beta_i \\
V_i &= \frac{C_{adi} - C_{adi-\min}}{C_{adi-\max} - C_{adi-\min}}; \\
\eta_i &= \frac{V_i \cdot R_i \cdot M_i}{\sum V_i \cdot R_i \cdot M_i} \\
C_i &= C_{di} - \eta_i \cdot \sum C_{di}
\end{aligned} \tag{2}$$

式中: C_{adi} 为*i*区域修正后碳赤字; α_i 为*i*区域碳排放修正系数; β_i 为*i*区域碳汇修正系数; V_i 为 C_{adi} 无量纲化处理值; η_i 为*i*区域碳赤字系数; R_i 为*i*区域人口数量; M_i 为*i*区域土地面积, hm^2 ; C_i 为*i*区域相对碳赤字, t/a 。碳赤字系数可表示各区域所允许达到碳赤字程度, 碳赤字系数越高说明该区域允许存在更大的碳赤字, 反之则越小, 若 $C_i > 0$, 意味着该区域实际碳赤字超过所允许达到的碳赤字, 则该地区应支付碳补偿; 反之则应获得碳补偿。

(2)式中碳排量修正系数 α 计算公式为 $\alpha_i = 1 - (\rho_i - \bar{\rho}) / \bar{\rho}$ (其中, ρ_i 为*i*省(市)碳排放效率值, $\bar{\rho}$ 为各省(市)碳排放效率平均值, 本文采用非期望产出的SBM模型测算碳排放效率 ρ_i , 分别将就业人口(L)、资本存量(C)、能源消费量(E)作为投入, 国内生产总值作为期望产出, 碳排放量作为非期望产出)。这是因为碳排放效率高能有效反映不同地区技术水平差异。对于技术水平高于平均值的地区, 碳排放经过修正后在一定程度上被放大, 反之缩小。碳汇修正系数 β 计算公式为 $\beta_i = 1 + (\overline{ESV}_i - \overline{ESV}) / \overline{ESV}$ (其中, $\overline{ESV}_i$ 为*i*省(市)单位面积生态系统服务功能价值; $\overline{ESV}$ 为各省(市)单位面积生态系统服务功能价值的平均值)。这是因为生态系统服务功能价值高低表征了生态系统服务能力的大小, 可以量化反映不同区域生态本底的差异。对于生态本底高于平均值的地区, 碳汇量经过修正后在一定程度上被放大, 反之缩小。

此外, 考虑到区域间经济发展水平差异, 本文借鉴余光辉等^[8]引入改进后的 R. Pearl 生长曲线确定碳补偿系数, 最终碳补偿额度计算公式如下:

$$ACC_i = C_i \cdot P_c \cdot \theta_i \tag{3}$$

式中: ACC_i 为*i*区域的碳补偿额度; P_c 为标准碳单价; θ_i 为*i*区域碳补偿系数。碳补偿系数 θ 计算公式为 $\theta_i = G_i / G_T (1 + a e^{-bt})$ (其中, a 和 b 是常数, 为了计算方便取值为 $1^{[8,12]}$), e 表示自然对数的底, t 是全域恩格尔系数的倒数, G_i 为*i*区域人均GDP; G_T 为全域人均GDP。这是因为改进后的 R. Pearl 生长曲线能够切实反映不同经济发展水平和生活水平下人们的支付意愿, G_i / G_T 表示不同地区的补偿能力, 恩格尔系数表示经济发展水平。

1.2 碳排放、碳汇核算

本文结合 IPCC 温室气体清单方法及文献[10]建立省级层面碳收支核算方法体系, 其中: 能源消耗碳排放主要包括煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料、天然气等 8 种能源消耗产生的碳排放, 根据联合国环境规划署 2017 年度报告指出, 2000~2016 年世界主要经济体 92.1%的二氧化碳排放量来自于能源消耗过程, 本文取 92.1%为碳排放总量和能源消费碳排放量转换率, 通过能源消费碳排放进行换算得到碳排放总量; 碳汇主要包括农作物、森林、草地、湿地的碳吸收。具体各项碳收支的计算方法见表 1, 相关碳排放因子、农作物经济系数、含水率等数据详见数据来源。

表 1 碳收支核算方法及参数说明

核算项目	计算方法	参数说明
碳排放	$C_e = \sum A_i \cdot \phi_i \cdot \gamma \times \frac{44}{12}$ $C_p = C_e / 92.1\%$	C_e 为碳排放总量; C_p 为各种能源消费碳排放量; A_i 为第 i 种能源的消费量; ϕ_i 为第 i 种能源折标准煤系数; γ 为标准煤的碳排放系数, 本文取国家发改委能源研究所推荐值 0.67t; 44/12 为 CO_2 和 C 的分子量比率; 92.1% 为碳排放总量和能源消费碳排放量转换率, 根据联合国环境规划署 2017 年度报告取值
农作物碳汇	$C_c = \varepsilon \cdot z \cdot \sum \frac{p_j(1 - \omega_j)}{o_j} \times \frac{44}{12}$	ε 为修正系数, 取值 0.07; z 为生物量和碳量的转化系数, 取值 0.5; p_j 为第 j 种农作物的经济产量; ω_j 为第 j 种经济作物的含水率; o_j 为经济系数, 即第 j 种农作物经济产量与生物产量之比
其他植被碳汇	$C = \sum S_i \cdot \sigma_i \times \frac{44}{12}$	C 为植被碳汇总量(t/a); S_i 为 i 植被面积(hm^2); σ_i 为 i 植被年均净初级生产力(NEP)($t/hm^2 \cdot a$): 森林、草地、湿地的 NEP 取值分别为 3.81、0.95、7

1.3 数据来源

本文选取 2007~2017 年为考察期限,之所以以 2007 年作为起始年份,是因为 2007 年中国政府正式颁布《中国应对气候变化国家方案》,以国家层面施行应对气候变化政策的时间为起点,采用中国省域面板数据,对 11 年来中国省际碳补偿时空变化特征进行分析。考虑数据可得性和可比较性,本文剔除了我国西藏、台湾、香港、澳门等地区。碳排放测算的各能源消费量来源于国家统计局(2007-2017)、折煤系数(ϕ_i)来源于《中国能源统计年鉴 2005》、碳排放系数(γ)为国家发改委能源研究所推荐值;碳汇测算的森林面积、草地面积,农作物产量均来源于国家统计局(2007-2017)、湿地面积来源于第二次全国湿地资源调查(2009-2013),农作物碳汇修正系数 ε 、生物量和碳量的转化系数 z ^[16]、植被年均净初级生产力 NEP^[17,18]、经济作物的含水率 ω 、经济系数 o ^[19,20],各系数可通过相关研究成果查询;修正指标测算涉及的恩格尔系数(t)、国内生产总值(GDP)、就业人口及资本存量计算所需数据(资产形成总额、固定资产形成总额、固定资产投资额、固定资产投资价格指数)均来源于各省(市)历年统计年鉴,其中国内生产总值以 2007 年为基期,根据地区生产总值指数进行平减,固定资产形成总额、资本形成总额均以 2007 年为基期根据固定资本形成价格指数进行平减;单位面积生态系统服务功能价值 ESV_i 来源于谢高地等^[21]的研究;人口数量(R)一年末常住人口数量,土地面积(M)均来源于《中国统计年鉴》、标准碳单价(P_c),根据《2018 年中国碳价调查》结果取值为 51 元/t。

2 结果与分析

为了揭示碳补偿的时空演变特征,必须先测算出我国各省(市)碳排放、碳汇及相应的修正系数,再结合标准碳单价估算各省(市)的碳补偿额度。为此,本文通过(3)式计算得到 2007~2017 年我国各省(市)年均碳补偿额度如表 2 所列,在此基础上分别绘制出 2007~2017 年全国碳补偿总额的变化趋势如图 1(a)所示(为使读者区分,碳补偿额度为正的省(市)称为碳支付省(市),反之为碳受偿省(市))。

表 2 2007~2017 年我国各省(市)碳补偿额度(亿元)

地区	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
北京	56.51	53.70	53.20	50.87	45.29	45.00	40.58	41.94	41.90	41.28	41.35

天津	45.46	44.66	48.63	60.67	66.67	66.69	68.11	65.62	65.60	63.71	60.28
河北	25.68	27.85	29.83	27.90	30.59	29.76	33.65	28.92	28.25	27.77	29.78
山西	50.93	47.95	44.94	46.45	51.54	54.08	57.08	56.97	54.22	51.07	47.06
内蒙古	-113.01	-121.37	-130.96	-140.85	-147.44	-151.76	-151.03	-148.70	-151.70	-155.25	-154.66
辽宁	61.24	63.43	66.04	73.18	76.89	80.44	76.46	76.20	70.29	66.89	65.52
吉林	-1.17	-1.73	-1.48	0.71	3.43	2.50	1.08	0.68	-1.63	-2.38	-3.83
黑龙江	-45.32	-35.56	-36.41	-37.17	-38.85	-36.32	-38.21	-37.15	-36.65	-36.27	-35.87
上海	105.98	105.68	100.73	104.98	103.00	99.27	101.67	92.19	96.36	97.77	97.71
江苏	67.29	70.01	67.89	52.10	51.69	50.18	60.50	60.13	65.26	71.78	80.87
浙江	54.79	54.10	54.38	55.43	56.17	51.86	54.14	52.79	54.01	54.18	55.28
安徽	-0.16	1.23	2.36	2.93	3.53	4.24	6.15	6.86	6.74	6.56	5.57
福建	3.85	4.32	9.70	14.18	18.69	18.38	16.42	23.60	21.95	19.62	20.53
江西	-4.04	-5.14	-4.69	-2.71	-1.38	-1.28	-0.99	-1.05	-0.20	0.21	1.22
山东	53.29	62.64	57.13	52.38	40.23	41.34	45.78	52.99	66.71	76.99	88.39
河南	7.18	7.63	5.95	5.66	5.36	0.68	2.69	1.86	1.56	0.30	-0.93
湖北	5.62	4.33	5.51	8.45	11.89	11.53	6.71	6.73	6.25	6.17	5.89
湖南	-1.20	-3.46	-3.22	-2.82	-0.57	-1.43	-3.28	-5.03	-4.11	-4.47	-5.13
广东	-7.51	-8.98	-20.22	-43.92	-63.07	-68.68	-56.42	-58.47	-59.91	-61.96	-64.40
广西	-8.97	-11.25	-10.20	-7.97	-4.90	-3.29	-5.22	-5.51	-6.36	-5.78	-6.36
海南	1.56	1.65	1.95	2.58	3.72	3.94	3.22	3.93	4.74	4.57	4.18
重庆	4.50	5.68	6.78	8.56	10.89	10.71	7.83	9.37	9.94	9.96	8.98
四川	-20.36	-20.73	-21.62	-24.22	-30.24	-33.48	-33.91	-35.48	-37.08	-39.30	-40.67
贵州	2.89	1.29	2.12	2.02	2.71	3.88	4.14	3.67	3.75	4.90	6.87
云南	-4.29	-6.08	-4.90	-3.45	-2.67	-1.89	-3.78	-5.35	-6.93	-7.45	-7.38
陕西	1.10	2.32	3.26	6.82	8.16	12.27	15.11	17.14	16.48	17.84	16.77
甘肃	-14.05	-15.43	-16.63	-18.09	-20.21	-21.30	-21.70	-22.15	-22.49	-23.01	-22.62
青海	-24.76	-25.12	-24.81	-25.18	-25.18	-24.82	-34.75	-35.32	-35.94	-35.65	-36.03
宁夏	6.90	7.51	8.48	10.57	14.79	16.30	17.64	17.87	18.67	18.75	18.89

新疆	-79.34	-81.84	-82.20	-85.96	-94.69	-97.06	-98.50	-98.01	-97.86	-98.56	-97.73
全国	230.58	229.28	211.57	194.09	176.07	161.75	171.17	167.22	171.85	170.23	179.50

2.1 碳补偿额度测算结果

本文在(1)式和(3)式计算基础上,得到2007~2017年我各省(市)平均碳补偿额度,如表3所列。

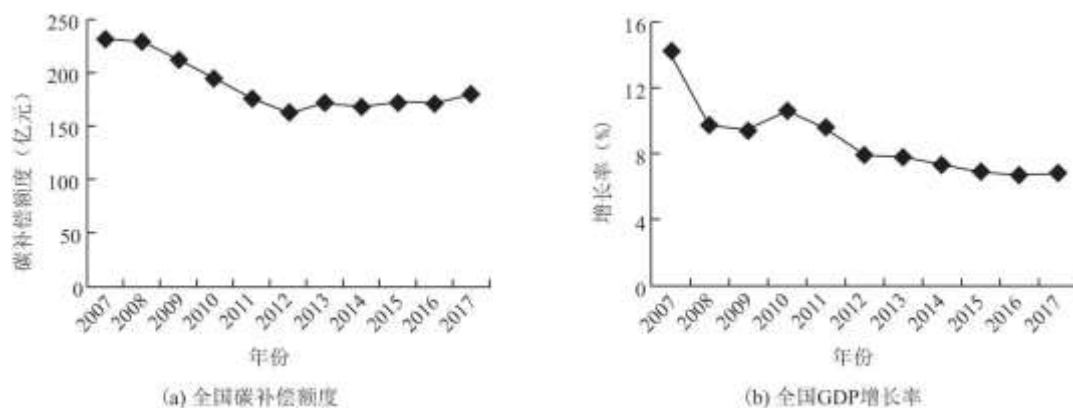


图1 2007~2017年全国碳补偿总额和GDP增长率

表3 2007~2017年我国各省(市)平均碳补偿额度(亿元)

地区	修正前平均碳补偿额度	修正后平均碳补偿额度
北京	24.26	46.51
天津	29.83	59.64
河北	110.22	29.09
山西	99.28	51.12
内蒙古	-0.31	-142.43
辽宁	91.62	70.60
吉林	14.01	-0.35
黑龙江	-9.16	-37.62
上海	46.62	100.49
江苏	113.77	63.43
浙江	61.94	54.28

安徽	32.30	4.18
福建	23.36	15.57
江西	3.35	-1.82
山东	172.30	57.99
河南	76.52	3.45
湖北	34.17	7.19
湖南	18.43	-3.16
广东	85.75	-46.69
广西	-2.39	-6.89
海南	5.89	3.28
重庆	17.71	8.47
四川	8.06	-30.64
贵州	26.26	3.48
云南	-10.15	-4.92
陕西	42.84	10.66
甘肃	7.68	-19.79
青海	-35.64	-29.78
宁夏	22.96	14.22
新疆	9.74	-91.98
全国	1121.23	187.57

(1) 如表 3 所示,修正前碳受偿地区仅为内蒙古、黑龙江、广西、云南、青海 5 个省份,其余江苏、河北、山西等 25 个省(市)均为碳支付地区。相比之下,修正后碳受偿地区由修正前的 5 个省份增至青海、四川、黑龙江等 12 个省(市),而修正后碳支付地区由修正前 25 个省(市)减少至北京、河北、山西等 18 个省(市),其中吉林、江西、广西、甘肃、新疆等经济欠发达省份由碳支付地区变为碳受偿地区,表明在考虑不同地区人口数量与土地面积的基础上,纳入科技水平和生态本底将更有利于提升不同地区碳补偿的公平性,促进区域间的协调发展,由此可知,修正后的不同地区碳补偿标准更为科学、合理。

(2) 修正前全国平均碳补偿额度为 1121.23 亿元,碳补偿额度平均值排名前列的地区为山东、江苏、河北、山西、辽宁,碳补偿额度分别为 172.30、113.77、110.22、99.28、91.62 亿元,排名较后的地区为青海、云南、黑龙江、广西、内蒙古,碳补偿额度分别为-35.64、-10.15、-9.16、-2.39、-0.31 亿元。相比之下,修正后全国碳补偿额度为 187.57 亿元,碳补偿额度平均值排在前列的省(市)主要有上海、辽宁、江苏、天津、山东、浙江、山西、北京,碳补偿额度分别为 100.49、70.60、63.43、59.64、57.99、54.28、51.12、46.51 亿元,而排名较后的省份主要有内蒙古、新疆、广东、黑龙江,碳补偿额度分别为-142.43、-91.98、

-46.69、-37.62 亿元,究其原因主要是,一方面,上海、江苏和浙江同属“长江三角洲”地区,北京、天津和山东位于“环渤海经济圈”区位优势均十分突出,且人口密集,经济发展水平高,发展速度快,是我国经济增长的领头羊^[22,23]。另一方面,江浙沪、京津和山东地区经济的高速增长也造成了二氧化碳的高排放,考虑到二氧化碳的高排放空间溢出作用严重损害其他省(市)的生态环境,要求这些省市必须增加碳补偿支付,因而上海、江苏、浙江、北京、天津、山东平均碳补偿额度排在前列。山西省作为典型的资源型地区及煤炭生产与消费的第一大省,在为中国经济发展提供能源保障的同时,也形成了经济发展以煤为主的惯性依赖。与此同时,煤炭资源不合理、低效的开发利用使得山西省无论是 CO₂ 的总排放量,人均排放量,还是单位 GDP 排放量在全国都处于较高位置^[24,25],长期的高碳排放量必然给其他省(市)的生态环境带来严重影响,从而使得山西省平均碳补偿额度排在前列。需要指出的是辽宁省碳补偿额度排名靠前似乎有点异常,事实上学术界已证实了辽宁省碳补偿额度排名较靠前^[14],本文研究也充分证实这一点,究其原因主要有:一是辽宁省作为中国重工业大省,是我国能源消耗的大户,而且随着东北老工业基地的振兴与发展,辽宁作为东三省的领头羊,工业化程度高,必将消耗大量的能源,同时造成了二氧化碳的高排放;二是辽宁省作为国家老工业基地,产业结构存在“刚性”^[26]使得产业转型升级比较缓慢,同时也使得推广诸如清洁能源、清洁产品以及清洁生产等很难实行,因而辽宁省碳补偿额度排名较靠前。内蒙古、新疆、黑龙江三省幅员辽阔,自然条件得天独厚,拥有丰富的森林、草地储备^[27,28]。这些省份丰富的碳汇资源储备使得拥有较高碳汇量不仅能完全容纳本地区的碳排放,而且还能够大量吸收其他省(市)外溢的二氧化碳,因而内蒙古、新疆、黑龙江碳补偿额度排名较后。此外,广东省碳补偿额度排名较后似乎也有点异常,究其原因主要有:一是广东省是全国第一人口大省,承担了更大的社会经济压力,也面临着更大的碳排放压力;二是广东省的科技进度速度领跑全国各省(市),科技水平处于全国领先地位。科技的领先优势为我国创造了巨大的经济效益,同时有效地减少了碳排放,降低了环境污染,因而广东省碳补偿额度排名较后。事实上,YangGC 等^[14]的研究也发现了广东省这一经济社会现象。

2.2 碳补偿额度的时空分析

(1)由图 1(a)可知:2007~2017 年我国碳补偿总额呈现下降趋势,从 230.58 亿元下降到 179.5 亿元,年均下降率 2.47%。究其原因主要是我国经济发展进入新常态,全国各地的 GDP 增速不断放缓,尤其是经济发达省(市)GDP 增速明显放缓,全国各地碳补偿支付意愿下降,因而碳补偿总额呈现出下降趋势。我国碳补偿总额同时也呈现出显著阶段性特征,2007~2012 年是碳补偿总额的快速下降期,年均下降率为 6.85%;2013~2017 年碳补偿总额基本保持稳定。究其原因主要是 2007 年全球金融危机爆发,2007~2012 年我国 GDP 增长率由 14.23%骤降至 7.86%,这使得碳支付省(市)的支付意愿显著下降,因而碳补偿总额快速下降;2013 年以来,我国经济转型取得初步成效,经济增长率的下降势头得到遏制,2013~2017 年的 GDP 增长率稳定的保持在 7%上下,全国各地的碳补偿支付意愿也趋于稳定(如图 1(b)所示),因而碳补偿总额也基本保持稳定。

(2)分省(市)来看,在东北区域中,2007~2017 年黑龙江碳补偿额度无显著变化,维持在-37.5 亿元上下波动,主要原因是黑龙江拥有丰富的森林碳汇资源,拥有较为稳定二氧化碳吸纳能力;吉林、辽宁碳补偿额度均呈现出先升后降变化趋势,吉林碳补偿额度波动幅度较大,变化区间为-3.83~3.43 亿元,主要原因在于振兴东北老工业基地战略实施初期,吉林、辽宁必将消耗大量的能源,造成了二氧化碳的高排放,随着振兴战略持续推进,吉林、辽宁产业结构不断优化,科技水平也不断提高,二氧化碳排放量也显现下降趋势,从而使得吉林、辽宁碳补偿额度均呈现出先升后降的变化趋势。在京津区域中,北京碳补偿额度持续下降,年均下降率为 3.08%,说明北京生态环境持续改善,生态环境保护取得显著成效。天津碳补偿额度先增加后保持稳定,年均增长率为 2.86%。在北部区域中,河北碳补偿额度呈现出缓慢增长趋势,年均增长率仅为 1.49%,而山东碳补偿额度呈现先降后升趋势,于 2011 年跌至谷底后以 14.2%的年均增长率迅速增长,碳补偿额度变化区间为 40~90 亿元。究其原因主要是 2007~2011 年山东省碳排放增速明显慢于全国碳排放增速,使得山东省碳排放对其他省(市)生态环境产生的影响减弱,因而山东碳补偿额度呈现下降趋势;自 2010 年以来,我国启动低碳试点省份和城市建设工作,尤其在 2012 年,低碳试点工作基本在全国全面开展,2012~2017 年山东省碳排放增速明显快于全国碳排放增速,山东省碳排放对其他省(市)生态环境产生的影响增强,从而使得山东碳补偿额度呈现上升趋势。在东部沿海区域中,上海碳补偿额度呈现缓慢下降趋势,年均下降率为 0.81%,说明上海生态环境也逐步改善,二氧化碳的空间溢出对其他省(市)的生态环境造成的影响也逐渐降低。江苏碳补偿额度呈现先降后升趋势,变化区间为 51.69~80.87 亿元,浙江碳补偿额度无明显变化,波动于 54.28 亿元上下。在南部沿海区域中,福建碳补偿额度增长迅速,年均增长率为 18.2%,海南碳补偿额度无明显变化,广东碳补偿额度下降迅速,年均下降率达 23.97%,主要原因在于广东省的科技进度速度领跑全国各

省(市),科技水平不断提升,科技的领先优势有效地减少了碳排放,因而广东碳补偿额度迅速下降。在中部区域中,安徽、江西碳补偿额度呈现波动上升趋势,河南、湖北、湖南的碳补偿额度呈现先升后降的趋势,而山西碳补偿额度呈现出“降—升—降”的剧烈波动趋势,波动区间为 44.94~57.08 亿元,究其原因主要是山西作为典型的资源型地区,经济发展对资源具有较高的依赖性^[26]。由于 2007 年金融危机爆发,山西省经济受到严重影响,GDP 增长率由 2007 年的 15.2%下滑到 2009 年的 5.4%,能源消耗量也因此出现一定程度下滑,与此同时,碳排放量也出现下降,其空间外溢作用降低,从而使得碳补偿额度呈现下降趋势,随着山西经济形势好转,能源消耗量迅速增加,碳排放量也迅速增加,从而碳补偿额度再次上升,而近年来,山西省积极探索低碳经济发展路径,尤其是 2014 年发布了《山西省应对气候变化规划(2013~2020 年)》,山西省二氧化碳减排工作取得显著成效,从而使得山西省碳补偿额度再次下降。西南、西北区域主要为碳受偿地区,其中碳受偿省(市)广西、云南碳补偿额度均呈现出先升后降的趋势,四川、甘肃、青海、新疆、内蒙古的碳补偿额度呈现出下降趋势,四川的下降速度最快,年均下降率达 7.17%;碳支付省份陕西、宁夏、贵州,重庆的碳补偿额度均呈现上升趋势,陕西上升速度最快,年均增长率达 31.36%。说明西南、西北区域中碳受偿省(市)的生态环境保护成效显著优于碳支付省(市),碳补偿省(市)的低碳优势得到进一步地扩大,也更加凸显出生态环境保护的重要性。

(3)为了进一步从空间角度探究经碳补偿额度变化特征,本文测算了碳补偿额度的空间自相关指数:Global Moran' sI 指数、Local Moran' sI 指数,结合 Glocal Moran' sI 指数显著性,绘制了表 4,同时以 2007、2012、2017 年为时点,绘制碳补偿的 Moran' sI 散点图(图 2a、2b、2c),并根据各地区与相邻地域的空间关系划分为 4 类:高一高聚集区;低—低聚集区;高一低聚集区;低—高聚集区。将我国分为东北、京津、北部沿海、东部沿海、南部沿海、中部、西北、西南八大区域,得到 2007~2017 年各区域的年均碳补偿额度如表 5 所示。

由表 5 可知,2007~2017 年我国碳补偿额度整体呈现以东部沿海,京津,北部沿海区域为中心向外围递减的空间格局,各区域平均碳补偿额度大小依次为东部沿海>京津>北部沿海>中部>东北>南部沿海>西南>西北。究其原因主要是我国经济发展水平整体表现为以东部沿海,京津,北部沿海区域为中心向外围递减的格局,导致能源消耗量和二氧化碳排放量也均相似格局,而我国碳汇量整体呈现出以东部沿海,京津,北部沿海区域为中心向外围递增的空间格局,基于以上两种大体相反的变化趋势,二氧化碳排放的空间溢出作用为东部沿海,京津,北部沿海区域最高,中部、东北、南部沿海区域次之,而西南、西北区域省(市)最低,从而导致碳补偿额度整体呈现以东部沿海,京津,北部沿海区域为中心向外围递减的格局。东部沿海、京津,北部沿海区域主要为碳支付地区,西南、西北区主要为碳受偿地区,我国碳补偿整体表现为经济较发达地区向经济欠发达地区进行补偿,从而也体现出了碳补偿测算模型的合理性。同时,碳补偿 Global Moran' sI 指数值均为正,且 2007~2010 年、2015~2017 年均通过显著性检验,说明我国碳补偿额度存在空间正相关关系,而这种空间正相关关系在 2007~2011 年整体上呈现出下降趋势,2012~2017 年呈现出上升趋势。这表明自我国邻近省(市)碳补偿额度之间相互影响、紧密联系,但随着时间的推移,各省(市)碳补偿额度相似的地区在空间上集中分布的状态呈现出先减少后增加的趋势。

表 4 2007~2017 年 Global Moran' sI 指数值

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Moran' sI	0.222*	0.217*	0.2018*	0.154*	0.123	0.094	0.129	0.125	0.145*	0.155**	0.1738**

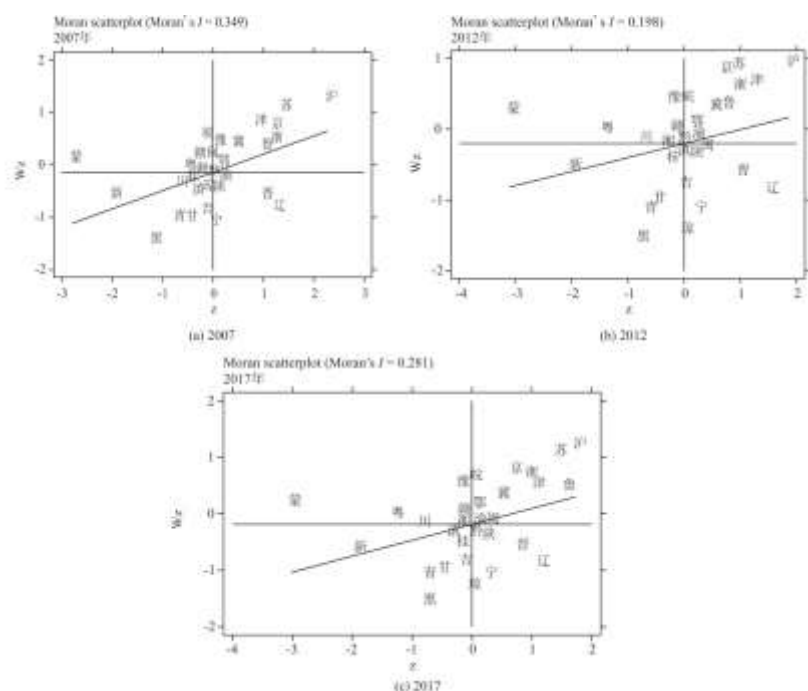


图 2 2007、2012、2017 年我国碳补偿额度的 Moran' sI 散点图

表 5 2007~2017 年我国各区域碳补偿额度(亿元)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
东北	14.75	26.14	28.15	36.72	41.47	46.62	39.33	39.72	32.01	28.25	25.82
京津	101.97	98.36	101.82	111.54	111.96	111.69	108.69	107.56	107.5	104.99	101.63
北部沿海	78.97	90.49	86.96	80.29	70.83	71.11	79.43	81.91	94.97	104.76	118.16
东部沿海	228.06	229.78	223.01	212.51	210.86	201.31	216.31	205.11	215.64	223.74	233.85
南部沿海	-2.1	-3.01	-8.57	-27.16	-40.67	-46.36	-36.77	-30.93	-33.22	-37.77	-39.69
中部	58.33	52.55	50.86	57.95	70.38	67.82	68.35	66.33	64.46	59.84	53.67
西北	-223.17	-233.93	-242.85	-252.7	-264.56	-266.37	-273.22	-269.18	-272.84	-275.89	-275.38
西南	-26.23	-31.1	-27.81	-25.06	-24.2	-24.07	-30.94	-33.3	-36.68	-37.68	-38.56

(4)从碳补偿邻近区域的空间差异程度来看(图 2a、2b、2c),局部空间碳补偿的 Local Moran' sI 指数与 Global Moran' sI 指数所反映的空间集聚走势保持一致,表现出正的空间自相关关系,其中高一高聚集区主要分布在东部沿海的上海、江苏、浙江,且在 2007~2017 年期间未产生明显的区位变化。低—低聚集区主要分布在西北区域的甘肃、青海、新疆以及东北区域的黑龙江,其中甘肃、新疆、黑龙江在 2007~2017 年始终处在低—低聚集区;高一低聚集区始终为东北区域的辽宁省;低—高聚集区仅在 2012 年西北区域的内蒙古出现;由此可知,虽然随着时间的推移,我国碳补偿额度相似的地区在空间上呈现集中分布的状态先减少后增加(表 4),但仍存在一定的空间集聚效应,且这种效应在东部沿海、西北、东北区域表现得较为显著。整体来看,2007~2017 年

我国碳补偿额度热点区主要分布在东部沿海的上海、江苏、浙江,其中江苏始终位于碳补偿热点区;我国碳补偿额度冷点区主要分布在西北区域的甘肃、青海、新疆以及东北区域的黑龙江、吉林,其中甘肃、青海、新疆、黑龙江始终位于碳补偿额度冷点区,即经济发展程度高,生态环境受到较严重影响的地区向经济发展程度低而生态环境保护良好地区进行补偿,有利于促进不同地区的公平协调发展。

3 结论、讨论和建议

3.1 结论

本文在考虑到区域人口数量、土地面积、科技水平、生态本底等因素的差异性和经济发展水平差异性情形下,构建了基于相对量碳赤字的碳补偿测算模型对 2007~2017 年我国 30 个省(市)的碳补偿额度进行了测算,并对其时空变化特征进行了系统分析,得出以下结论:

(1)修正前后的碳补偿空间分异特征明显,碳受偿省(市)由修正前的仅为内蒙古、黑龙江、广西、云南、青海 5 个省份增至修正后青海、四川、黑龙江等 12 个省(市);碳支付省(市)由江苏、河北、山西等 25 个省(市)减少至北京、河北、山西等 18 个省(市);全国碳补偿额度平均值也由修正前 1121.23 亿元减少至修正后 187.57 亿元。

(2)2007~2017 年我国碳补偿总额呈现下降趋势,从 230.58 亿元下降到 179.5 亿元,年均下降率 2.47%。碳补偿总额的下降呈现出显著的阶段性,2007~2012 年是碳补偿总额的快速下降期,年均下降率为 6.85%;而 2013~2017 年碳补偿总额基本保持稳定。

(3)从我国各省(市)来看:碳补偿额度平均值排在前列的省(市)主要有上海、辽宁、江苏、天津、山东,浙江、山西、北京,而排名较后的省份主要有内蒙古、新疆、广东、黑龙江。

(4)我国各区域碳补偿额度表现出空间正相关关系,且东部沿海、西北、东北区域存在显著地空间集聚效应,其中高一高聚集区主要分布在东部沿海的上海、江苏、浙江,低—低聚集区主要分布在西北区域的甘肃、青海、新疆以及东北区域的黑龙江。我国碳补偿额度整体呈现以东部,京津,北部区域为中心向外围递减的空间格局,表现为经济较发达地区向经济欠发达地区进行补偿,且十一年间我国碳补偿空间格局变化较小,即碳补偿空间格局具有“惯性”特点。

3.2 讨论

虽然本文在改进区域间碳补偿模型基础上,对我国省际碳补偿额度时空变化特征进行了系统分析,为区域间碳补偿理论方法的应用进行了有益尝试,但是本文研究尚存在如下几个方面有待不断完善。

(1)由于数据限制,本文采用每五年进行一次清查的森林数据测算森林碳汇量,若能采用各省(市)每年的遥感数据测算碳汇量,将能更准确测算出各省(市)每年的碳汇量,在后续研究中应精益求精,力求更接近真实值。这里需要说明的是,本文重点突出区域碳补偿标准的构建,而碳补偿额度高低仅作为参考值,且研究的是我国省际碳补偿,因而碳补偿方向不会受到太大影响。其次,相关研究认为农作物收获后,收获部分转化为食物消费后重新释放到大气中^[29],从长期来看并未增加区域的碳汇量,这里需要强调的是,本文是以一年为周期,农作物的生长也将能产生较大的碳汇,因而有必要测算农作物碳汇。

(2)区域间碳补偿可以从不同空间尺度开展,实质上,更微观的空间尺度之间也具有较大的差异,如果能开展地市级、县级、甚至乡镇空间单元之间的碳补偿研究也具有较大的实践价值,同时也使碳补偿具有地方可操作性,这也是未来的研究方向之一。且目前碳补偿研究多集中于对过去时间的碳补偿分析,极少对未来时间的碳补偿进行预测,可以加强碳补偿未来变化趋势的研究,

提高碳补偿对低碳发展的现实指导作用。

3.3 政策建议

为保障不同地区获得平等的生存权、环境权和发展权,促进区域间协调、平衡和可持续发展,生态补偿试图构建出不同地区的补偿机制,因此,需要确定谁是生态补偿主客体,制定合理的生态补偿额度测算方法以及有效地实施和管理生态补偿。碳补偿作为生态补偿的一部分,也需要解决这些问题,基于以上研究结论,提出以下政策建议:

(1) 建立全国各省“碳源-碳汇”的平衡账户,通过第三方碳核证机构,完成碳监测、计量、评估等相关工作,精确核算省域碳账户收支情况。

(2) 建立不同省域碳补偿的横向转移支付制度,实现碳补偿从地方—中央—地方的转移,因此,中央政府和地方政府均应设立“碳基金”账户对碳补偿资金进行管理。遵循“谁受益,谁补偿;谁保护、谁受偿”的公平补偿原则,相对碳赤字为正值的地区应为碳补偿主体,作为碳补偿的支付者,需要解决的核心问题是碳补偿的来源问题,地方政府可将碳补偿支出纳入到政府预算中,通过征收碳税筹集部分资金,剩余部分由政府财政出资。碳税主要针对产生大量碳排放的行业,如煤炭开采及水泥生产等行业及使用高碳排放量产品的个人,如使用大型汽车、高耗能家电等。这样不仅可以获得碳补偿的资金来源,还能提高企业及个人的环保意识;相对碳赤字为负值的地区应为碳补偿客体,作为碳补偿的获得者,需要解决的核心问题是碳补偿的分配问题,地方政府可以将部分资金返还给积极实施碳减排政策且成效显著的企业及补贴给购买节能产品的个人。

(3) 构建碳排放绩效及生态系统服务功能测评机制,将区域科技水平、生态本底、人口数量、土地面积等资源禀赋的差异性引入碳补偿框架内,实现区域间碳补偿的公平性。依托测评机制,对于科技水平落后,生态本底优越的地区可采用适度宽松的环境保护政策,加强技术扶持,提高碳排放绩效,而对于科技水平先进,生态本底脆弱的地区,制定严格的环境保护政策,激励企业低碳发展,实现经济发展的低碳转型。

(4) 从长远来看,中央政府可设立碳补偿领导小组,从各省份挑选小组成员,负责碳补偿的协调管理,行使碳补偿工作的协调、监督、仲裁、奖惩等相关职责。同时,中央政府可以将碳补偿制度构建纳入到地方政府绩效考核,促使碳补偿制度的形成及有效运行。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 颜艳梅, 王铮, 吴乐英, 等. 中国碳排放强度影响因素对区域差异的作用分析[J]. 环境科学学报, 2016, 36(9): 3436-3444.
- [3] 于谨凯, 杨志坤, 邵桂兰. 基于影子价格法的碳汇渔业碳补偿额度分析——以山东海水贝类养殖业为例[J]. 农业经济与管理, 2011(6): 83-90.
- [4] 于金娜, 姚顺波. 基于碳汇效益视角的最优退耕还林补贴标准研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 34-39.
- [5] 王正淑, 王继军, 刘佳. 基于碳汇的县南沟流域退耕林地补偿标准研究[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 779-788.
- [6] 杨浩, 曾圣丰, 曾维忠, 等. 基于希克斯分析法的中国森林碳汇造林生态补偿——以“放牧地-碳汇林地”土地用途转变为例[J]. 科技管理研究, 2016, 36(9): 221-227.

-
- [7]陈儒,姜志德.农户低碳农业生产生态补偿标准研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(9):63-70.
- [8]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.
- [9]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.
- [10]胡小飞,邹妍,傅春.基于碳足迹的江西生态补偿标准时空格局[J].应用生态学报,2017,28(2):493-499.
- [11]李颖,葛颜祥,刘爱华,等.基于粮食作物碳汇功能的农业生态补偿机制研究[J].农业经济问题,2014,35(10):33-40.
- [12]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.
- [13]彭文英,马思瀛,张丽亚,等.基于碳平衡的城乡生态补偿长效机制研究——以北京市为例[J].生态经济,2016,32(9):162-166.
- [14]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.
- [15]陈儒,邓悦,姜志德.基于修正碳计量的区域农业碳补偿时空格局[J].经济地理,2018,38(6):168-177.
- [16]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.
- [17]谢鸿宇,陈贤生,林凯荣,等.基于碳循环的化石能源及电力生态足迹[J].生态学报,2008,28(4):1729-1735.
- [18]梅雪英,张修峰.长江口典型湿地植被储碳、固碳功能研究——以崇明东滩芦苇带为例[J].中国生态农业学报,2008,16(2):269-272.
- [19]中国农业百科全书总编辑委员会农业经济卷编辑委员会.中国农业百科全书:农作物卷[M].北京:农业出版社,1991.
- [20]ZHANG X X, FAN C H, MA Y C, et al. Two approaches for net ecosystem carbon budgets and soil carbon sequestration in a rice-wheat rotation system in China[J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2014,100(3):301-313.
- [21]谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [22]杨玲萍,吕涛.苏浙沪碳排放影响因素分解及比较分析[J].当代经济管理,2011,33(5):56-61.
- [23]皮建才,仰海锐.京津冀协同发展中产业转移的区位选择——区域内还是区域外?[J].经济管理,2017,39(7):19-33.
- [24]侯博,李伟,卢辰宇.低碳经济与山西“碳压力”[J].中国人口·资源与环境,2012,22(S2):62-65.
- [25]吴彼爱,高建华.中部六省低碳发展水平测度及发展潜力分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(S2):14-19.

-
- [26]孔宪丽, 于立, 于左. 辽宁经济增长周期波动特征及机制的实证分析[J]. 统计与决策, 2010(19):117-121.
- [27]高冠龙, 张小由. 内蒙古碳排放现状及森林碳汇的重要性分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(S2):24-27.
- [28]2014 尚二萍, 张红旗. 1980s~2010s 新疆伊犁河谷草地碳存储动态评估[J]. 资源科学, 2016, 38(7):1229-1238.
- [29]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.