

黄河流域碳生态安全水平空间格局与动态演进

蒋毓琪, 杨怡康, 田文博, 刘通

(山西大同大学 商学院, 山西 大同 037009)

摘要: [目的] 分析中国重要的“能源流域”黄河流域的碳生态安全水平空间差异与动态演进, 客观反映黄河流域碳生态安全现状及其演变趋势, 为碳生态安全格局优化提供参考。[方法] 在驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)分析框架下构建黄河流域碳生态安全评价指标体系, 借助逼近于理想解的排序方法(TOPSIS)评估碳生态安全水平并运用核密度估计法分析时空演变特征。[结果] ①2012—2021年黄河流域碳汇量和碳排放量逐年增加, 碳排放量增长速度快于碳汇量。从空间范围看, 碳汇量具有“西高东低”的特点, 而碳排放量呈“西低东高”的特征。②黄河流域碳生态安全水平逐年提升, 由2012年的0.356增长到2021年的0.639。在空间分布上, 上游地区碳生态安全水平高于中、下游地区, 呈现出“上游领先, 中游追赶, 下游超越”的特征。此外, 碳生态安全等级均趋于良好。③基于核密度估计结果, 黄河流域区域间碳生态安全水平差异逐渐缩小, 且上游区域内碳生态安全水平差异性下降快于中、下游地区。[结论] 基于黄河流域碳生态安全现状, 建议上游地区继续增强碳汇能力, 中、下游地区发展附加值高的技术密集型和清洁能源产业, 推动GDP绿色增长。此外, 应建立碳生态补偿机制, 协调解决跨区域碳生态安全问题, 提升全流域碳生态安全水平。

关键词: 碳生态安全; 空间格局; 动态演进; 黄河流域; 山西省大同市

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0419-07

中图分类号: X32, X24

文献参数: 蒋毓琪, 杨怡康, 田文博, 等. 黄河流域碳生态安全水平空间格局与动态演进[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 419-425. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.048; Jiang Yuqi, Yang Yikang, Tian Wenbo, et al. Spatial pattern and dynamic evolution of carbon ecological security level in Yellow River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 419-425.

Spatial Pattern and Dynamic Evolution of Carbon Ecological Security Level in Yellow River Basin

Jiang Yuqi, Yang Yikang, Tian Wenbo, Liu Tong

(School of Business, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China)

Abstract: [Objective] The spatial differences and dynamic evolution of carbon ecological security level were analyzed to optimize the overall plan of carbon ecological security in the Yellow River basin (an important “energy basin” in China) in order to objectively reflect the current status and evolution trend of carbon ecological security, and to provide a reference for optimizing the carbon ecological security pattern. [Methods] An evaluation index system for carbon ecological security in the Yellow River basin was constructed under the framework of driving-pressure-state-impact-response (DPSIR) analysis. The technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) model was used to evaluate the level of carbon ecological security, and the spatial-temporal evolution characteristics were analyzed by the kernel density estimation method. [Results] ① Carbon sinks and carbon emissions increased from 2012 to 2021 in the Yellow River basin, and the growth rate of carbon emissions was faster than that of carbon sinks. Carbon sinks were spatially characterized as “higher in the west and lower in the east”, while carbon emissions were “lower in the west and higher in

收稿日期: 2023-07-28

修回日期: 2023-09-22

资助项目: 教育部人文社会科学研究规划青年项目“山西矿区生态占用赤字负外部效应测度与补偿机制研究”(20YJC630052); 山西省社会科学院2022年度青年课题(YWQN202203); 山西省社会科学界联合会重点课题(SSKLZDKT2022107); 山西省教育厅高校哲学社会科学课题(2022W121); 山西大同大学2022年度一般项目(2022K01)

第一作者: 蒋毓琪(1983—), 男(汉族), 山西省大同市人, 博士, 副教授, 主要从事资源与环境经济研究。Email: jiangyuqi1913@163.com。

通信作者: 杨怡康(1990—), 女(汉族), 山西省大同市人, 硕士, 讲师, 主要从事资源与环境经济研究。Email: yangyikang1433@163.com。

the east”。② The carbon ecological security level in the Yellow River basin increased over time, from 0.356 in 2012 to 0.639 in 2021. In terms of spatial distribution, the carbon ecological security level in the upstream region was higher than in the middle and downstream regions, and was characterized as “upstream leading, midstream catching up, and downstream surpassing”. In addition, the level of carbon ecological security tended to be good. ③ Based on the kernel density estimation results, the differences in carbon security levels among different regions in the Yellow River basin were gradually narrowing, and were decreasing in the upstream region faster than in the middle and downstream regions. [Conclusion] Based on the current status of carbon ecological security in the Yellow River basin, carbon sink capacity in the upstream region is expected to increase over time, while clean energy industries and technology-intensive industries with high added value should be developed to promote green GDP growth in the middle and downstream regions. In addition, a carbon ecological compensation mechanism should be established to coordinate and resolve cross-regional security issues, and to improve the carbon ecological security level of the entire basin.

Keywords: carbon ecological security; spatial pattern; dynamic evolution; Yellow River basin; Datong City, Shanxi Province

丰富的自然资源必然成为区域社会经济发展的逻辑起点和路径依赖。在区域经济增长同时,碳排放量超额导致环境污染,严重影响生态安全^[1]。目前,生态安全成为学者们关注可持续发展研究领域的热点话题。在研究对象上,分别从流域水生态安全^[2]、区域生态安全格局识别^[3]与城市生态安全空间异质性^[4]等领域开展研究。在研究内容方面上,主要聚焦于生态环境风险综合评价,生态安全格局变化与生态安全系统管理等^[5]。碳安全作为国家生态安全的重要载体,需将其提升到国家战略层面加以考量^[6]。有学者基于碳足迹理论,构建碳安全评价模型,测度碳安全水平^[7]。在此基础上,个别学者引入碳排放指数,运用 STIRPAT 模型分析其影响因素,借助灰色 GM(1,1)模型预测地区碳安全状况^[8]。此外,还有学者以碳中和为视角,通过估算碳生态盈亏状况和碳生态经济协调指数,评价中国碳生态安全水平^[9]。在研究方法上,研究成果主要集中于压力—状态—响应模型(PSR)^[10]、生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)^[11]与生态足迹模型等^[12]。黄河流域作为特殊的地理单元,其生态安全状况引起部分学者关注,研究成果主要集中于生态安全测度^[13]、指标体系构建^[14]、等级分布^[15]与时空演进^[16]及格局优化等^[17]。

国内外学者已从生态安全的多个方面开展研究,具有一定的理论基础与实证借鉴。黄河流域作为中国重要的“能源流域”,有限碳汇量与超额碳排放之间不平衡显著,严重影响着碳生态安全。而碳生态安全与生态—经济协同推进与“双碳”目标实现紧密相关,这一现象却较少被关注。本研究以黄河流域 9 省(区)为研究对象,探析碳生态安全水平及其时空差异与演进格局,以期客观反映黄河流域碳生态安全现状及其演变趋势,为碳生态安全格局优化提供参考。

1 研究区概况

黄河流域流经青海、甘肃、山西和山东等 9 个省(区),含煤区域 35.7 km²,富集丰裕的煤炭资源,其产量居全国之首。2021 年,黄河流域碳排放量高达 3.80×10⁹ t,占全国碳排放总量的 34.9%,单位 GDP 碳排放水平高于全国平均水平的 28.5%^[18]。资源、能源过度利用使得碳生态承载压力较大,影响黄河流域碳生态安全。本研究参照水利部黄河水利委员会划定的自然流域范围,为了保证地区级行政单元完整性以及充分考虑地区经济社会、生态系统与黄河的关联性原则^[19],参考张可云和张颖对黄河流域范围及其划分界线^[20],将青海省、四川省、甘肃省和宁夏回族自治区作为黄河流域上游地区。中游地区包括内蒙古自治区、陕西省和山西省。下游地区包括河南省和山东省。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究数据均来自 2012—2021 年《中国能源统计年鉴》《中国环境年鉴》《中国统计年鉴》以及黄河流域 9 省(区)的统计年鉴和社会发展统计公报等。其中,碳汇量测算涉及各类生产性土地 NPP_i 值,参考葛全胜的研究成果^[21],碳排放量的测算参照郑德凤等的研究成果^[22]。2012 年党的十八大提出,将生态文明建设并列为“五位一体”之一,折射出生态安全被提升到前所未有的高度。因此,本研究以 2012 年为考察基期。

2.2 研究方法

本研究的边际贡献体现在 3 个方面:①参照森林、土地、水、城市群和旅游等不同研究对象的生态安全划分标准,确定黄河流域碳生态安全等级划分标

准; ②借助 TOPSIS 评价法修正传统物元模型评估碳生态安全水平; ③运用核密度估计方法分析碳生态安全水平空间格局特征与动态演进。

2.2.1 碳汇量与碳排放量测算 依据生态足迹理论, 区域碳足迹, 即碳排放规模反映社会经济生态需求, 而碳承载能力, 即碳汇量体现区域生态供给。倘若碳生态供求平衡, 即碳中和; 倘若区域碳供求失衡, 影响碳生态安全。因此, 区域碳承载能力、碳足迹与碳生态平衡^[9], 分别表示为:

$$CS = \sum S_i NPP_i \quad (1)$$

$$CE = \sum K_j e_j \quad (2)$$

$$CES = CS - CE \quad (3)$$

式中: S_i 为区域第 i 类土地面积 (hm^2); NPP_i 为区域第 i 类土地面积的净碳汇能力 (t/hm^2); K_i 与 e_i 分别为区域第 j 类能源的消费量 (t)、碳排放因子; CS 为区域碳承载能力 (t), 表征该区域生态承载力及生态供给; CE 为区域碳足迹 (t), 表征该区域经济发展的碳排放及生态需求; CES 表征区域碳生态供求平衡状态 (t)。

2.2.2 碳生态安全评价体系构建 碳生态安全是一个包含自然资源、生态环境与社会经济等多重要素的复合系统, 需要构建科学性与综合性较强的指标体系并对其进行精准量化。1997 年, 欧洲环境署提出了驱动力—压力—状态—影响—响应 (DPSIR) 模型, 即驱动力—压力—状态—影响—响应模型, 具有多维影响因素间的信息耦合及其演化内在机理的特点^[23], 能够清晰阐释碳生态安全。因此, 借鉴已有指标体系的相关成果^[24], 构建黄河流域碳生态经济协调评价指标体系 (表 1)。

已有关于森林、土地与水等不同研究对象的生态

安全划分标准, 均将其划分为 5 个等级, 且生态安全指数区间设置相同^[25-27]。故本研究将黄河流域碳生态安全水平划分为 5 个等级且碳生态安全指数区间设置与已有成果保持一致 (表 2)。

表 1 黄河流域碳生态安全评价指标体系及权重
Table 1 Evaluation index system and weight of carbon ecological security in Yellow River basin

准则层	指标层	变量 指标号	指标 属性	指标 权重
驱动力 (D)	GDP/亿元	X_{11}	+	0.086
	固定资产投资/亿元	X_{12}	+	0.027
	人均可支配收入/元	X_{13}	+	0.031
	人口密度/(人· hm^{-2})	X_{14}	+	0.016
	城市化率/%	X_{15}	+	0.020
压力 (P)	碳排放量/ 10^8 t	X_{21}	-	0.114
	单位 GDP 能耗/($\text{t}/10^4$ 元)	X_{22}	-	0.086
	单位 GDP 工业烟粉尘排放量/($\text{t}/10^4$ 元)	X_{23}	-	0.068
	能源工业投资/亿元	X_{24}	-	0.029
	第二产业比例/%	X_{25}	-	0.032
状态 (S)	碳汇量/ 10^8 t	X_{31}	+	0.103
	原煤消费量比例/%	X_{32}	+	0.042
	森林覆盖率/%	X_{33}	+	0.039
	人均公园绿地面积/(m^2 /人)	X_{34}	+	0.014
	环境突发事件次数/次	X_{35}	-	0.012
影响 (I)	空气质量优良率/%	X_{41}	+	0.009
	建成区绿化覆盖率/%	X_{42}	+	0.023
	第三产业比例/%	X_{43}	+	0.057
响应 (R)	造林面积/ 10^4 hm^2	X_{51}	+	0.055
	节能环保支出/亿元	X_{52}	+	0.072
	R & D 经费投资/亿元	X_{53}	+	0.013
	生活垃圾无害化处理率/%	X_{54}	+	0.018
	工业固体废弃物综合利用率/%	X_{55}	+	0.034

表 2 黄河流域碳生态安全等级划分标准

Table 2 Evaluation criterion of carbon ecological security in Yellow River basin

碳生态安全指数	碳生态安全等级	特征描述
$ESI > 0.75$	安全 (I)	生态系统完善, 其服务功能良好, 可协调资源环境与经济发展
$0.5 < ESI \leq 0.75$	良好 (II)	生态系统较完整, 其服务功能较好, 可基本协调资源环境与经济发展
$0.35 < ESI \leq 0.5$	临界安全 (III)	生态系统较完整, 其服务功能可维持经济发展
$0.25 < ESI \leq 0.35$	敏感 (IV)	生态服务功能退化, 经济发展伴随着环境污染
$ESI \leq 0.25$	危险 (V)	生态系统紊乱, 丧失部分服务功能, 阻碍经济发展

2.2.3 碳生态安全评估模型构建 TOPSIS 的全称是逼近于理想解的排序方法 (technique for order preference by similarity to ideal solution), 通过构造“正、负理想解”, 评价研究对象与理想的接近程度, 以此作为评价依据, 具有计算便捷与应用灵活的优势, 适用于多维评价目标综合评判。故本研究选取 TOPSIS 评估黄河流域碳生态安全^[28]。

(1) 标准化处理。碳生态安全评价指标的单位与取值范围存在差异, 需消除量纲影响, 本研究运用极差法对其进行归一化处理^[29]。

指标为正向, 标准化公式表示为:

$$x_{ij}^* = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (4)$$

指标为负向, 标准化公式表示为:

$$x_{ij}^* = (x_{\max} - x_{ij}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (5)$$

式中: x_{ij}^* 为标注化后的值; x_{ij} 为第 i 个省份第 j 个指标值; x_{\max}, x_{\min} 分别为第 i 个系统第 j 个指标的最大值和最小值。

(2) 确定指标权重。参考张建威和黄茂兴的研究成果^[30], 运用熵权法确定指标权重。

首先, 计算指标比重, 表示为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^*} \quad (6)$$

其次, 计算指标熵值, 表示为:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}, \quad k = \frac{1}{\ln m} \quad (7)$$

再次, 计算指标的信息效用值, 表示为:

$$r_j = 1 - e_j \quad (8)$$

然后, 计算指标的权重, 表示为:

$$w_j = \frac{r_j}{\sum_{i=1}^n r_j} \quad (9)$$

最后, 计算加权标准化矩阵, 表示为:

$$T = Y_{ij} \cdot W_{ij} \quad (10)$$

式中: T 为加权标准化矩阵; Y_{ij} 为标准化的指标矩阵; W_{ij} 为权重矩阵。

(3) 确定正负理想解

$$T^+ = \{\max T_{ij} \mid j=1, 2, 3, \dots, m\} \quad (11)$$

$$T^- = \{\min T_{ij} \mid j=1, 2, 3, \dots, m\} \quad (12)$$

式中: T^+ 为正理想解; T^- 为负理想解。

(4) 确定评价指标到正、负理想解的距离

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (T_{ij} - T_i^+)^2} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (T_{ij} - T_i^-)^2} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (14)$$

式中: D^+ 为评价对象到正理想解的距离; D^- 为评价对象到负理想解的距离。

(5) 确定贴近度

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m) \quad (15)$$

式中: C_i 为贴近度, 阈值处于 $[0, 1]$, 其值越大表征碳生态安全状况越好。

2.2.4 碳生态空间演进模型构建 核密度估计是一种典型的非参数估计方法, 主要通过连续密度函数描述变量的动态演进与延展特征等^[31]。故本研究采用核密度估计法分析黄河流域碳生态安全水平的动态演变情况, 表示为:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{X_i - x}{h}\right) \quad (16)$$

式中: $f(x)$ 为密度函数; K 为核函数; n 为变量观测值的个数; h 为宽带; X_i 为变量观测值; x 为变量观

测值的均值。

核函数有多种形式, 包括高斯核函数、二次核函数与三角核函数等, 本研究选择运用较多的高斯核函数进行估计^[32]。

$$K(x) = \frac{\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}} \quad (17)$$

$$h = \left(\frac{4}{3n}\right)^{\frac{1}{5}} \approx 1.06n^{-\frac{1}{5}} \quad (18)$$

3 结果与分析

3.1 碳汇量与碳排放量结果与分析

由公式(1)–(2)可得到 2012—2021 黄河流域各省碳汇量(图 1)与碳排放量(图 2)。结果显示, 黄河流域不同省份的碳汇量与碳排放量存在较大差异。

从碳汇量看, 黄河流域碳汇量由 2012 年的 2.003×10^9 t 增加到 2021 年的 2.282×10^9 t, 增长趋于平缓, 年均变化率为 1.39%。从整体上看, 黄河流域上游地区的平均碳汇量较高, 中游地区次之, 下游地区最低, 呈现出“西高东低”的特征。从年均碳汇量看, 碳汇量的高值区主要分布于内蒙古、青海、宁夏和甘肃, 低值区分布于陕西和山西。

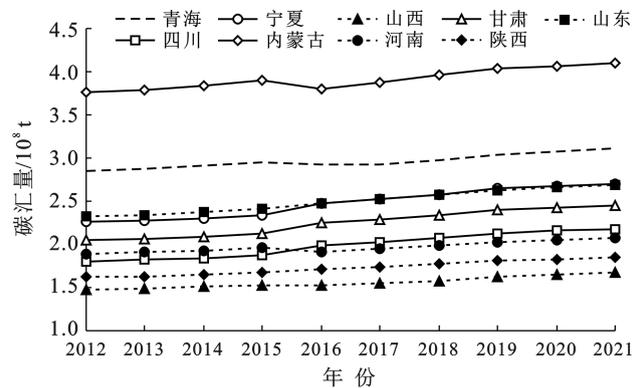


图 1 2012—2021 年黄河流域各省份碳汇量
Fig.1 Carbon sinks in different provinces Yellow River basin from 2012 to 2021

从碳排放量看, 黄河流域碳排放量由 2012 年的 2.097×10^9 t 增加到 2021 年的 4.445×10^9 t, 增长速度较快, 年增长率为 11.19%。从整体上看, 黄河流域下游地区的平均碳排放量较高, 中游地区次之, 上游地区最低, 表现为“西低东高”的特点。从年均碳排放量看, 山东、内蒙古、山西、河南、四川和陕西是高排放省份, 青海、宁夏和甘肃是低排放省份。

3.2 碳生态安全估算结果与分析

基于 TOPSIS 模型, 由公式(15)可知, 2012—2021 年黄河流域碳生态安全贴近度指数由 0.356 增

长到 0.639, 呈逐年上升趋势(图 3)。其中, 2012—2016 年, 黄河流域碳生态安全水平上升幅度较小, 由 0.356 提升至 0.450, 年均增长率为 5.28%。2017—2021 年, 黄河流域碳生态安全整体水平增速大幅提升, 由 0.481 增长到 0.664, 年均增长率达到 36.60%。具体来看, 2012 年, 黄河流域所有省份碳生态安全水平均为临界安全等级。2013 年起, 青海省率先实现了碳生态安全等级由临界安全过渡到良好, 而至 2018 年, 只有山西省碳生态安全处于临界安全等级, 其余各省均处于良好状态。截至 2020 年, 黄河流域所有省份碳生态安全均达到良好等级, 但上游地区碳生态安全水平高于中、下游地区。总之, 黄河流域整体碳生态安全具有“小幅上升—快速上升”的特点, 碳生态安全等级由敏感逐渐向良好状态转变。

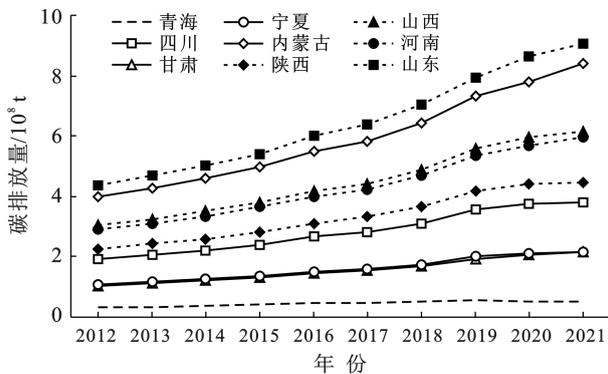


图 2 2012—2021 年黄河流域各省份碳排放量

Fig.2 Carbon emissions in different provinces of Yellow River basin from 2012 to 2021

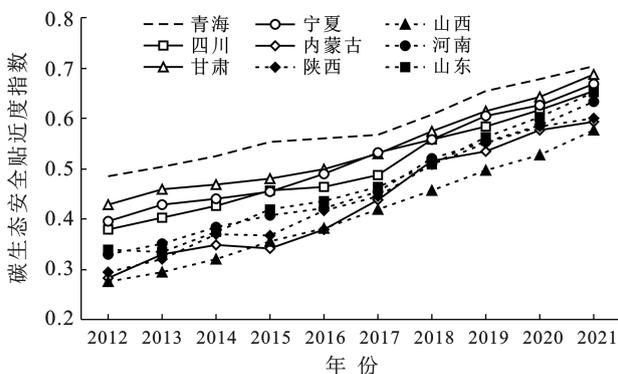


图 3 2012—2021 年黄河流域各省份碳生态安全贴近度指数
Fig.3 Proximity index of carbon ecological security in different provinces of Yellow River basin from 2012 to 2021

3.3 碳生态安全空间动态演进结果与分析

为了进一步明晰黄河流域碳生态安全的时空差异, 从上、中、下游地区碳生态安全水平分布进行分析(图 4)。2012—2021 年青海、甘肃、宁夏和四川的上游地区碳生态安全水平均高于黄河流域整体水平, 处于领先地位。中游地区的内蒙古、陕西和山西碳生态

安全水平与流域整体水平的差距由 0.72 减少到 0.50, 具有追赶趋势且差距逐年缩小。下游地区的河南、山东碳生态安全水平提升速度较快, 于 2021 年达到了 0.642, 高于了黄河流域整体水平 0.640, 呈超越态势。为了改善区域生态环境, 中下游地区调结构、促转型, 推动经济绿色转型发展, 加大生态治理力度, 其生态安全等级均经历了“敏感—临界安全—良好”3 个阶段, 使得碳生态安全水平大幅改善。

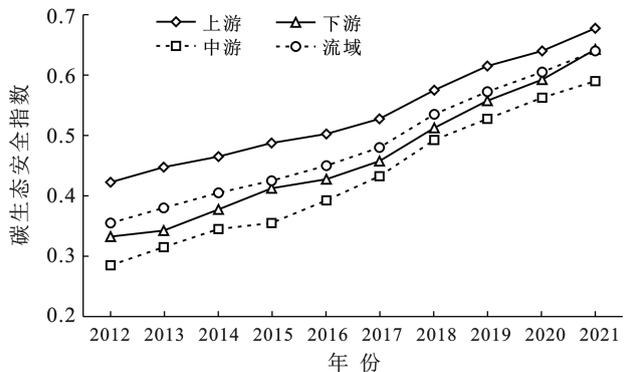


图 4 2012—2021 年黄河流域区域碳生态安全水平变化趋势
Fig.4 Change trend of carbon ecological security in Yellow River basin from 2012 to 2021

本研究借助 Stata14 软件的 kdensity 命令绘制概率密度函数图形。由公式(16)—(18)可知, 2012—2021 年黄河流域碳生态安全水平的核密度曲线整体右移, 表明其水平提升明显, 但从上、中、下游不同区域的曲线位置移动看, 右移幅度存在差异(图 5)。从分布形态看, 黄河流域整体与上、中、下游地区的核密度曲线由平缓变为陡峭, 峰值提高且波幅宽度变小, 呈收敛特点, 这意味着黄河流域不同区域的碳安全水平差异逐渐缩小。上游地区的核密度曲线波峰高度上升, 波幅宽度变小, 由平缓向陡峭转变, 表明区域内差异性下降。中游地区的核密度曲线波峰高度先持平后上升, 由陡峭变为平缓, 说明区域内差异性由大变小。下游地区波峰高度上升且提升幅度较大, 波幅宽度变窄且不明显, 表明该区域内差异性略有变小。从分布延展性看, 黄河流域上、中、下游地区的核密度曲线的右拖尾变长, 表征流域内不同省份的碳安全水平均有所提升。黄河流域上、中、下游地区碳生态安全演进格局所呈现的特点, 可归结为上游地区具有先天自然资源与生态环境优势, 西部大开发的政策导向使得碳生态安全水平总体较好。中游地区高污染、高能耗威胁着生态安全, 为了扭转这一局面, 实行经济绿色转型发展, 使得碳生态安全水平稳步提升。下游地区采取生态保护治理与修复、减污降碳协同增效行动, 提升碳生态安全质量。

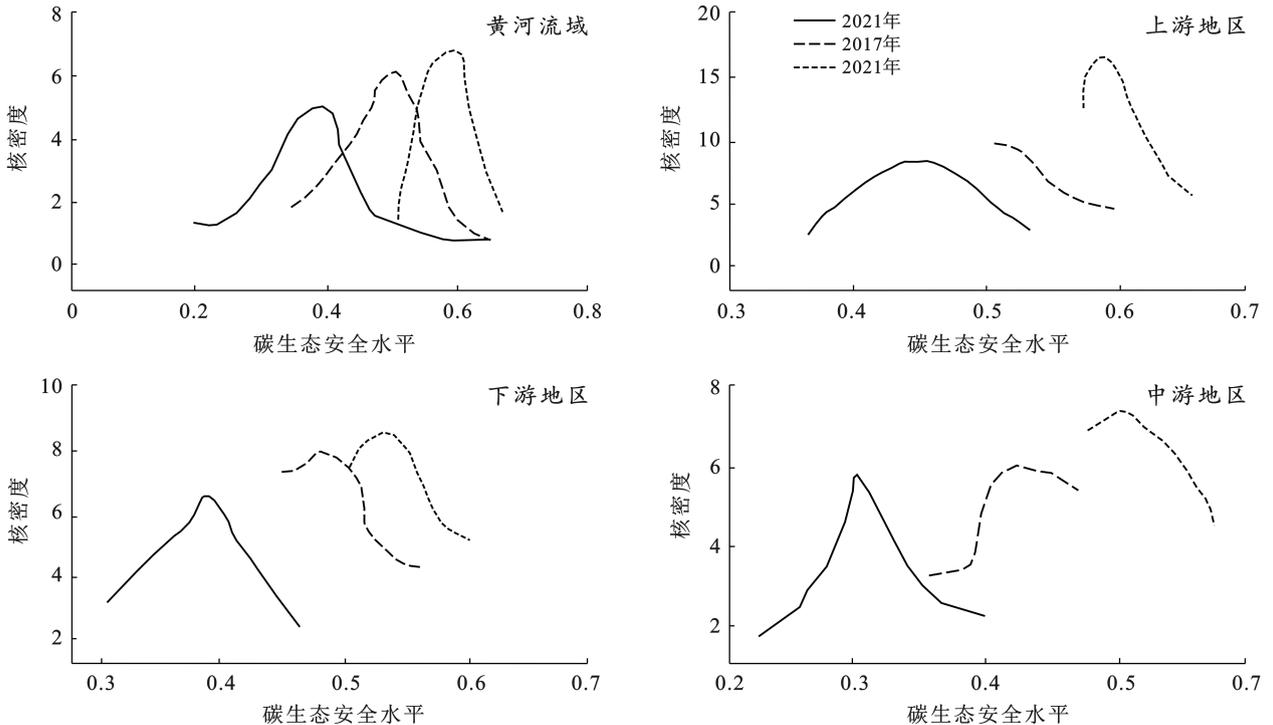


图 5 2012—2021 年黄河流域不同地区碳生态安全水平核密度变化特征

Fig.5 Variation characteristics of kernel density for carbon ecological security in different regions of Yellow River basin from 2012 to 2021

4 讨论与结论

4.1 讨论

碳生态安全属于生态安全体系范畴,是生态安全系统的重要组成单元。由于碳生态安全的研究成果较少,本研究在借鉴已有生态安全的相关成果基础上,尝试着从碳生态平衡视角探析黄河流域碳生态安全。研究结果显示,2012—2021 年黄河流域整体碳生态安全水平呈上升趋势且碳生态安全等级趋于好转,这与吴立军等对黄河流域生态安全提升的评价结果相吻合^[9],某种程度上反映了黄河流域碳生态安全的真实情况。

从空间差异与演进格局视角看,马小雯等提出了黄河流域生态安全表现为“中游领先,下游超越”的观点^[33],与本研究得出碳生态安全呈“上游领先,中游追赶,下游超越”的特征不一致,原因在于前者在构建生态安全评价指标体系中包含了水土流失、水资源等影响因素,而且生态环境脆弱和水资源缺乏是影响上游甘肃、宁夏生态安全的主要障碍因子,导致上游地区生态安全水平被中下游赶超。本研究侧重碳汇与碳排放之间的平衡性,基于此构建碳生态安全评价指标体系。基于“要素禀赋理论”,上游地区拥有丰富的森林、草地等自然资源,生态系统碳汇能力较强,而中、下游地区诸多省份制定了环境保护与环境规章制度,倒逼减能降碳^[34],提升碳生态安全水平,逐年缩

小与上游碳生态安全差距。

黄河流域碳生态安全是涉及自然环境、地理位置、经济发展以及政策制度等多重影响因素的系统工程,需打破行政区划界限且整体统筹协调。今后可以从全流域碳生态安全的系统规划角度出发,制定个性化碳生态安全的阶段性任务,合理规划不同地区碳生态安全水平提升的实现路径,进一步缩小碳生态安全水平差异,进而实现黄河流域碳生态安全平衡。

4.2 结论

本研究以黄河流域 9 省(区)为研究对象,基于 DSPIR 模型构建碳生态安全评价指标体系,在此基础上借助 TOPSIS 评价法修正传统物元模型评估碳生态安全水平并运用核密度估计方法分析碳生态安全水平空间格局特征与动态演进。

(1) 黄河流域碳汇量与碳排放量呈现地区异化特征。从时间上看,碳汇量与碳排放量逐年增加,但前者增长速度快于后者。从空间上看,年均碳汇量表现为上游地区高于中、下游,而碳排放量表现为下游地区高于上、中游地区。在地理位置上,碳汇量与碳排放量分别呈“西低东高”与“西高东低”的分布格局。

(2) 黄河流域碳生态安全水平提升且安全等级提高。碳生态安全水平呈“小幅上升—快速上升”的变化趋势。在空间分布上,上游地区碳生态安全水平高于中、下游地区且具有“上游领先,中游追赶,下游超越”的特征。

(3) 黄河流域碳生态安全水平空间差异显著且趋于缩小。从区域内看,上游区域内碳生态安全水平差异性下降快于中、下游地区。从区域间看,不同地区在动态演进过程中碳安全水平差异逐渐缩小并趋于收敛。

[参 考 文 献]

- [1] 杨怡康,蒋毓琪,朱少英.环境规制对山西煤炭经济绿色转型的影响研究[J].资源节约与环保,2021(7):126-127,130.
- [2] 黄博,李博文,雷正烨,等.基于 TOPSIS 模型及综合权重的武威市水资源承载力和水安全评价[J].水利规划与设计,2023(2):56-63.
- [3] 文惠,邓西鹏,李颖,等.整合生态空间的县域生态安全格局识别与构建:以武夷山市为例[J].生态学杂志,2023,42(5):1197-1204.
- [4] 魏家星,张昱镇,连紫璇,等.基于生态供需空间的区域生态安全格局构建研究:以苏南城市群为例[J].长江流域资源与环境,2022,31(2):387-397.
- [5] 王耕,周腾禹.基于文献计量分析的区域生态安全研究热点与趋势.生态学报,2019,39(18):378-385.
- [6] 赵先贵,肖玲,马彩虹,等.山西省碳足迹动态分析及碳排放等级评估[J].干旱区资源与环境,2014,28(9):21-26.
- [7] 韦良焕,林宁,鞠美庭.基于碳足迹和碳承载力的新疆碳安全评价[J].水土保持通报,2017,37(1):281-285,291.
- [8] 邱高会.区域碳安全评价及预测研究[J].生态经济,2014,30(8):14-17,41.
- [9] 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.
- [10] 魏竞超,李自涵,董媛媛.基于压力—状态—响应(PSR)模型的黄河流域环境安全评价体系法治化研究[J].中国环境监测,2023,39(1):19-28.
- [11] 杨园园,戴尔阜,付华.基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架[J].首都师范大学学报:自然科学版,2012,33(3):41-47.
- [12] 熊鹰,艾赣雄,周晨,等.基于改进三维生态足迹模型的洞庭湖区生态可持续时空演化研究[J].生态学报,2022,42(3):1165-1179.
- [13] 彭月,李昌晓,李健.2000—2012年宁夏黄河流域生态安全综合评价[J].资源科学,2015,37(12):2480-2490.
- [14] 冯琰玮,甄江红.黄河流域内蒙古段生态安全格局优化研究[J].中国农业资源与区划,2022,43(10):129-138.
- [15] 宋玲玲,田青,李宗杰,等.基于 PSR 模型的甘肃黄河流域生态安全研究[J].西部林业科学,2015,44(2):126-130,140.
- [16] 王怡然,王雅晖,杨金霖,等.黄河流域森林生态安全等级评价与时空演变分析[J].生态学报,2022,42(6):2112-2121.
- [17] 赵诚诚,潘竟虎.基于供需视角的黄河流域甘肃段生态安全格局识别与优化[J].生态学报,2022,42(17):6973-6984.
- [18] 董战峰,龙凤.黄河流域低碳发展:困境与路径[J].华北水利水电大学学报(社会科学版),2022,38(4):1-6.
- [19] 张乐艺,李霞,冯京辉,等.2000—2018年黄河流域 NDVI时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J].水土保持通报,2021,41(5):276-286.
- [20] 张可云,张颖.不同空间尺度下黄河流域区域经济差异的演变[J].经济地理,2020,40(7):1-11.
- [21] 葛全胜,戴君虎,何凡能,等.过去300年中国土地利用、土地覆被变化与碳循环研究[J].中国科学(D辑:地球科学),2008,38(2):197-210.
- [22] 郑德凤,刘晓星,王燕燕,等.中国省际碳足迹广度、深度评价及时空格局[J].生态学报,2020,40(2):447-458.
- [23] 马荣,孙艳红.基于 DPSIR 框架的黄河流域旅游生态安全动态评价研究[J].生态经济,2021,37(12):145-151,162.
- [24] 朱艳娜,何刚,张贵生,等.皖江示范区新型城镇化与生态环境耦合协调及空间分异研究[J].安全与环境学报,2021,21(6):2865-2874.
- [25] 冯彦,郑洁,祝凌云,等.基于 PSR 模型的湖北省县域森林生态安全评价及时空演变[J].经济地理,2017,37(2):171-178.
- [26] 田泽,陈柯婧,潘晶晶,等.基于突变理论方法的我国黄河流域土地生态安全评价[J].水利经济,2021,39(5):13-19.
- [27] 牛最荣,贾玲.三生空间角度的甘肃长江流域水生态安全评价及障碍诊断[J].水生态学杂志,2023,44(2):19-25.
- [28] 余灏哲,韩美.基于模糊物元模型的山东省水资源安全 TOPSIS 评价[J].安全与环境工程,2015,22(6):1-6.
- [29] 蒋毓琪,陈珂.浑河流域上游森林生态服务空间流转变价值及其对沈阳城市段供水量影响的通径分析[J].水土保持通报,2017,37(6):285-290.
- [30] 张建威,黄茂兴.黄河流域经济高质量发展与生态环境耦合协调发展研究[J].统计与决策,2021,37(16):142-145.
- [31] 杨光明,陈也,张帆,等.基于 PSR 模型的三峡库区生态安全评价及动态预警研究[J].生态经济,2021,37(4):209-214.
- [32] 夏美君,李健,闫永蚕.京津冀城市群生态福利绩效时空格局及演进特征[J].生态环境学报,2023,32(4):814-824.
- [33] 马小雯,郭精军.黄河流域生态安全评价及障碍因素研究[J].统计与决策,2023,39(8):63-68.
- [34] 蒋毓琪,杨怡康,朱少英.基于三维生态足迹模型的山西省矿区2010—2019年自然资本存量动态评估[J].水土保持通报,2021,41(6):165-170,179.