

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.018.

崔新蕾, 王艳融, 马艳茹. 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调的动态演进及其影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 275-287.

Cui Xinlei, Wang Yanrong, Ma Yanru. Dynamic Evolution of Carbon Reduction-Pollution Reduction-Green Expansion-Economic Growth Coupling Coordination and Its Influencing Factors in the Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 275-287.

黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调的动态演进及其影响因素

崔新蕾, 王艳融, 马艳茹

(内蒙古大学 经济管理学院, 呼和浩特 010021)

摘 要: [目的]探究黄河流域环境保护与经济耦合协调性及其影响因素,为全流域高质量发展提供理论参考。[方法]基于耦合协调模型、Dagum 基尼系数、马尔科夫链和地理加权回归模型,研究分析了 2009—2020 年黄河流域降碳—减污—扩绿—增长的时空耦合动态演进及其影响因子。[结果](1) 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长的耦合协调度总体呈现波动中上升趋势,耦合协调度值空间上呈现下游地区最大,中游地区次之,上游地区最小。(2) 上游地区耦合协调度水平的地区内差距明显高于中下游地区,地区间差距由大到小依次为上游与下游>上游与中游>中游与下游,地区差距主要来源于地区内差距和超变密度差距。(3) 降碳—减污—扩绿—增长系统的耦合协调度状态之间流动性较低,具有维持原有状态的稳定性,且短时间内难以实现跨越式的发展演进。(4) 产业结构优化能够有效促进黄河流域耦合协调发展,政府干预对大部分省区耦合协调发展促进作用明显,市场需求与技术成果有效结合才能更进一步促进黄河流域耦合协调度的提升。[结论]黄河流域降碳—减污—扩绿—增长的时空耦合整体呈上升趋势,影响此系统耦合协调度的因素较为复杂,未来应从优化产业结构、加强技术成果转化等方面,促进黄河流域降碳—减污—扩绿—增长协同发展。

关键词: 降碳—减污—扩绿—增长; 时空耦合; 黄河流域

中图分类号: X16; X37

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0275-13

Dynamic Evolution of Carbon Reduction-Pollution Reduction-Green Expansion-Economic Growth Coupling Coordination and Its Influencing Factors in the Yellow River Basin

Cui Xinlei, Wang Yanrong, Ma Yanru

(College of Economics and Management, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the coupling and coordination of environmental protection and economic development in the Yellow River Basin and its influencing factors, so as to provide a theoretical reference for the high-quality development of the whole basin. [Methods] Based on the coupling coordination model, Dagum Gini coefficient, Markov chain and geographically weighted regression model, the spatiotemporal coupling dynamic evolution of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in the Yellow River Basin from 2009 to 2020 and its influencing factors were studied and analyzed. [Results] (1) The coupling coordination degree of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in the Yellow River Basin showed generally a fluctuating upward trend. The

收稿日期: 2023-08-25

修回日期: 2023-10-10

资助项目: 国家自然科学基金(42361046); 教育部人文社会科学研究资助项目(22YJA630010); 内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2022MS07023); 内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持项目”(NJYT23123); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费(20700-54220384)

第一作者: 崔新蕾(1985—), 女, 内蒙古包头人, 博士, 教授, 主要从事土地经济与管理、区域经济与政策评估研究。E-mail: cuixinlei2016@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

coupling coordination degree was the largest in the lower reaches, followed by the middle reaches, and the least in the upper reaches. (2) The intraregional gap in the coupling coordination level of the upper reaches was significantly higher than that in the middle and lower reaches of the region. The gap between regions followed the order: upper and middle > upper and lower > middle and lower. The gap among regions and intensity of transvariation was the major source of the overall gap. (3) The coupling coordination degree of carbon reduction-pollution reduction-economic green expansion-economic growth system had the low fluidity, which had the stability of maintaining the original state. It was difficult to achieve leapfrog development evolution in a short period. (4) Industrial structure optimization can effectively promote the coupling coordinated development of the Yellow River Basin. Government intervention has an obvious role in promoting the coupling coordinated development of most provinces and regions. The effective combination of market demand and technological achievements can further improve the coupling coordination degree of the Yellow River Basin. [Conclusion] The overall spatiotemporal coupling of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in the Yellow River Basin is on the rise. The factors affecting the coordination degree of this system coupling are relatively complex. In the future, efforts should be made to optimize the industrial structure, to strengthen the transformation of technological achievements, and to promote the coordinated development of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in the Yellow River Basin.

Keywords: carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth; spatiotemporal coupling; Yellow River Basin

党的二十大报告提出,要协同推进降碳、减污、扩绿、增长,改善生态环境。在中国生态环境保护进入碳减排治理新阶段与新旧动能转换和经济社会全面绿色低碳转型的关键时期,协同推进减污降碳成为生态文明建设目标的重点战略方向。达到经济社会绿色转型成功的目标需进一步改善生态环境质量,实现从量变到质变。降碳、减污、扩绿、增长相互交织、相互作用,正确处理降碳、减污、扩绿、增长是新时期推动绿色发展、建设生态文明、推进高质量增长面临的重大理论和实践问题。《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》和十九届五中全会明确提出改善黄河流域生态环境与促进经济高质量发展的重要目标,黄河流域作为中国发展的重要经济地带,在生态安全 and 经济高质量发展方面具有重要的地位^[1]。保护黄河流域生态环境,实现区域整体高质量发展,探究黄河流域降碳、减污、扩绿、增长系统的耦合协调发展的动态演进及其影响因素研究具有十分重要的意义。

经济高速增长加剧了气候变化、环境污染和生物多样性减少等生态问题,导致生态系统和经济系统的矛盾加深^[2],带来黄河流域资源承载超限、生态环境脆弱等问题^[3]。目前关于黄河流域生态环境与经济高质量发展的研究围绕以下几个方面展开:第一,重点分析黄河流域资源利用情况并探讨其生态环境质量的现状。从土地资源^[4]、水资源保护^[5]和能源等^[6]

角度分析区域资源利用情况,探讨黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势。第二,从不同尺度测算黄河流域经济高质量发展水平。现有研究从省域^[5]、地级市^[7]、县域^[8]角度分别测算经济高质量发展水平,分析研究黄河流域区域高质量发展的空间分布以及区域经济发展状况。第三,从相关性角度出发,构建黄河流域生态环境与经济高质量发展的指标体系。通过耦合协调模型^[9]、VAR模型^[10]和一致性模型等^[11]研究黄河流域生态系统与经济高质量发展的耦合关系和时空协调性。综上所述,从经济高质量发展与生态环境保护角度探究黄河流域区域发展的研究较为丰富全面。

国际政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出,主要污染物和温室气体具有非常紧密的关系,呈现同根同源同过程的特征,但降碳减污往往不是单一因素所决定的,同一影响因素对大气污染物、二氧化碳排放可能存在不同的影响,在相异时空尺度中会出现相反的异质性特征。为探究降碳减污协同关系,一方面从不同尺度探索地区减污降碳协同增效的关键路径^[12],并利用脱钩弹性指数^[13]、时空演化特征^[14]、空间关联指数^[15]分析降碳减污的协同趋势与时空异质性。另一方面,从政策实施、企业活动等因素对降碳减污协同效应影响角度,探讨碳减排政策的减污效应与污染控制政策的降碳效应。碳减

排政策^[16]、碳交易政策^[17]、碳达峰目标等^[18]减少碳排放量的政策对地区污染物有显著的抑制作用。企业脱硫工程^[19]、气候政策^[20]、大气污染治理政策等^[12]污染物治理政策的实施可以降低地区碳排放水平。降碳减污相辅相成,并具有协同增长趋势,加大环境规制力度还可以促进污染物与二氧化碳排放的协同效应,并实现二者协同效应的扩张^[21]。上述都为新时期开展降碳减污协同效应研究提供了思路和借鉴,但将降碳减污协同效应与经济增长和绿色发展放在同一框架下的研究存在缺失。在我国生态环境保护的关键时期研究四者的相关关系与特征,可为进一步实现经济社会发展全面绿色转型提供政策建议。

对于具有重要地位的黄河流域来讲,不仅要重视降碳减污协同作用的生态效益与经济效益,更应将降碳、减污、扩绿和增长纳入统一框架下,能够更好地解决发展过程中存在的突出矛盾,并通过对比系统之间的差异性来有效解决问题。降碳—减污—扩绿—增长是多层次、非线性的动态系统,探究黄河流域“降碳—减污—扩绿—增长”4系统耦合协调性并分析其时空演变特征,对黄河流域生态改善与经济高质量发展走互利共赢的可持续发展道路具有现实指导意义。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域(北纬 32°—42°,东经 96°—119°)是我国重要的生态屏障,在生态保护和推动经济高质量发展方面具有重要地位。黄河发源地为青海省巴颜喀拉山脉,流经地包括青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东,最终注入渤海。黄河流域横贯我国东、中、西三大区域,上中下游地区自然要素与经济发展具有较大差异。在我国迈入发展新阶段的背景下,黄河流域生态环境脆弱与资源承载超限问题凸显,激化生态保护与经济高质量发展之间的矛盾。构建黄河流域降碳—减污—扩绿—增长的统一系统,在新发展理念下寻求经济与生态发展平衡点,为黄河流域相关政策的落实推进提供理论依据。

1.2 数据来源

2009—2020 年黄河流域 9 个省区的二氧化碳相关数据来源于《中国能源统计年鉴》(2010—2021 年),按照《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》标准计算 8 种能源消费量(实物量)获得;2009—2020 年绿色金融数据基于《中国科技统计年鉴》(2010—2021 年)、《中国金融统计年鉴》(2010—2021 年)、《中国能源统计年鉴》(2010—2021 年)、《中国农业统计

年鉴》(2010—2021 年)与《中国第三产业统计年鉴》(2010—2021 年),借鉴贾洪文等^[22]方法通过熵值法计算得出;低碳指数参考李荣杰等^[23]研究方法计算获得;全要素生产率参考刘建国等^[24]研究方法测算;人力资本水平参考姚洋等^[25]方法测算;绿色专利数据来源于国家知识产权局;绿色专利分类号来源于 WIPO 绿色专利清单,其余变量数据来源于《中国统计年鉴》(2010—2021 年),部分缺失值采用均值或线性插值法进行补充。黄河流域的上游地区包括青海、甘肃、宁夏、四川、内蒙古,中游地区包括陕西、山西,下游地区包括河南、山东。

2 材料与方法

2.1 评价指标体系构建

借鉴已有指标体系相关成果,依据降碳—减污—扩绿—增长交互作用机制,基于客观性、全面性、典型性以及数据的可获得性原则,构建涵盖降碳、减污、扩绿、增长 4 个子系统 28 个指标的综合评价体系,具体见表 1。

2.2 研究方法

2.2.1 综合评价法 为保障黄河流域降碳—减污—扩绿—增长综合评价体系计算结果的全面性、客观性,选用综合评价法对其进行测度。计算综合评价指标的方法有很多,其中,熵值法通过计算不同指标的权重,能够防止主观因素对结果产生的影响,故本文选用熵值法对黄河流域降碳—减污—扩绿—增长各指标赋权,计算综合得分对指标评价体系进行测度。

由于黄河流域减污—降碳—扩绿—增长综合评价体系的各项指标在数值大小和单位上存在明显区别,需先采用标准化方法消除这些差异,具体计算过程如下:

对于正向指标采用公式(1)进行标准化处理。

$$X_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_{ij}\}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

对于负向指标采用公式(2)进行标准化处理。

$$X_{ij} = \frac{\max\{X_{ij}\} - X_{ij}}{\max\{X_{ij}\} - \min\{X_{ij}\}} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为地区 i 中指标 j 的样本值; \max 和 \min 为样本值的最大值和最小值。评价指标对子系统的影响存在正向效应和负向效应,当指标越大对子系统的影响越好时,则为正向效应,反之则为负向效应。

因标准化处理后 X_{ij} 会出现零值,故将所有数据整体向右平移 0.000 1 个单位得到 Y_{ij} 。

表 1 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in the Yellow River Basin

目标层	指标层	公式	单位	指标属性
降碳	CO ₂ 排放量	CO ₂ 排放量/行政区划面积	t/km ²	—
	人均 CO ₂	CO ₂ 排放量/总人口数	t/万人	—
	CO ₂ 强度	CO ₂ 排放量/GDP	t/万元	—
	低碳指数	见参考文献[23]		—
	能源结构	煤炭消费总量/能源消费总量	%	—
	SO ₂	SO ₂ 排放量/工业总产值	t/百万元	—
	工业废水	工业废水/工业总产值	t/元	—
	工业烟尘	工业烟尘/工业总产值	t/百万元	—
减污	PM _{2.5}		g/m ³	—
	环境污染治理支出强度	环境支出/GDP	%	+
	农药使用量	农药使用量/耕地面积	t/hm ²	—
	农用化肥使用量	农用化肥使用量/耕地面积	t/hm ²	—
	农用地膜使用量	农用地膜使用量/耕地面积	t/hm ²	—
	绿色金融	见参考文献[22]		+
	绿色发明专利		项	+
	绿色实用专利		项	+
扩绿	建成区绿化覆盖率	建成区植被绿化面积/建成区面积	%	+
	人均绿地面积	绿地面积/总人口	hm ² /万人	+
	固定资产投资水平	固定资产投资/GDP	%	+
	城镇化率	城市人口/总人口	%	+
	人均 GDP	GDP/总人口	元/人	+
	全要素生产率	见参考文献[24]		+
	GDP 增长率		%	+
	居民消费水平	社会零售总额/总人口	万元/人	+
增长	人均可支配收入	可支配收入/总人口	元/人	+
	人力资本	见参考文献[25]		+
	对外开放程度	进出口总额/GDP	%	+
	R&D 投入强度	企业研发经费支出/企业营业总收入	%	+

计算各个指标标准化后的比重(q_{ij}):

$$q_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^m Y_{ij}} \tag{3}$$

计算第 j 项指标的熵值 e_j :

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (q_{ij} \ln q_{ij}), \quad e \in (0, 1] \tag{4}$$

计算第 j 项指标的差异性系数(g_j):

$$g_j = 1 - e_j \tag{5}$$

计算第 j 项指标的权重(W_j):

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \tag{6}$$

计算各项指标的综合评分(S_i):

$$S_i = \sum_{i=1}^m W_j Y_{ij} \tag{7}$$

2.2.2 耦合协调度模型 引入耦合协调度模型来测度降碳、减污、扩绿和增长 4 个子系统之间的耦合协调度,借鉴已有文献研究^[26],耦合度计算公式如下:

$$C = \left\{ \frac{U_1 U_2 U_3 U_4}{[(U_1 + U_2 + U_3 + U_4)/4]^4} \right\}^{\frac{1}{4}} \tag{8}$$

式中: C 为耦合度; U_1, U_2, U_3, U_4 分别为降碳系统、减污系统、扩绿系统和增长系统的综合发展得分,在计算出耦合度之后,建立耦合协调度模型来研究各个子系统间的互动关系和协调发展情况,计算公式如下:

$$T(U_1, U_2, U_3, U_4) = \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \beta_3 U_3 + \beta_4 U_4 \tag{9}$$

$$D(U_1, U_2, U_3, U_4) = \sqrt{C(U_1, U_2, U_3, U_4) \times T(U_1, U_2, U_3, U_4)} \tag{10}$$

式中: T 为复合系统之间的综合贡献指数; D 为耦合协调度; β 为待定系数,此系数表示不同子系统在复

合系统中所占权重大小,该权重大小可以充分显示出不同子系统在复合系统中的重要程度,借鉴方传棣等^[2]的设定方法,将降碳、减污、扩绿和增长的待定系数均设定为 1/4,耦合协调度等级具体分类见表 2。

表 2 耦合协调度等级评价标准

Table 2 Coupling coordination level evaluation criteria			
耦合协调度等级	区间范围	耦合协调度等级	区间范围
极度失调(Ⅰ)	$0.000 \leq D < 0.100$	勉强协调(Ⅵ)	$0.500 \leq D < 0.600$
严重失调(Ⅱ)	$0.100 \leq D < 0.200$	初级协调(Ⅶ)	$0.600 \leq D < 0.700$
中度失调(Ⅲ)	$0.200 \leq D < 0.300$	中级协调(Ⅷ)	$0.700 \leq D < 0.800$
轻度失调(Ⅳ)	$0.300 \leq D < 0.400$	良性协调(Ⅸ)	$0.800 \leq D < 0.900$
濒临失调(Ⅴ)	$0.400 \leq D < 0.500$	优质协调(Ⅹ)	$0.900 \leq D \leq 1.000$

2.2.3 Dagum 基尼系数及其分解 Dagum 基尼系数及其分解通过计算地区内差距、地区间差距和超变密度这 3 个方面的数据,全面、有效地测度地区差距,分析地区演变规律。根据现有研究文献对该方法测算和分解^[27],对 9 个省区降碳—减污—扩绿—增长的耦合协调度空间分布的基尼系数进行计算。

2.2.4 马尔科夫链 为便于后续研究,将前文耦合协调度等级进行合并,按水平高低重新划分为濒临失调($0 \leq \text{耦合协调度} < 0.5$)、初级协调($0.5 \leq \text{耦合协调度} < 0.6$)、中级协调($0.6 \leq \text{耦合协调度} < 0.7$)、高级协调($0.7 \leq \text{耦合协调度} \leq 1$)这 4 种类型,以滞后 1 a 为条件构造一个 4×4 的马尔可夫转移概率矩阵 m ,用该矩阵来呈现不同年份不同地区耦合协调度类型之间的转移:

$$m_{ij} = n_{ij} / n_i \tag{11}$$

式中: m_{ij} 为某省区耦合协调度类型从 t 年的 i 状态转移到 $(t+1)$ 的 j 状态的概率; n_{ij} 为黄河流域内耦合协调度类型从 t 年的 i 状态转移到 $(t+1)$ 的 j 状态的省区数量(个); n_i 为黄河流域内耦合协调度类型处于 i 状态的总共省区数量(个)。随着时间的推移,耦合协调度类型不发生改变的称为平稳,耦合协调度类型得到改善的称为向上转移,否则为向下转移。

2.2.5 地理加权回归模型 地理加权回归模型(geographically weighted regression,GWR)是空间异质性研究的经典模型。不同影响因素对黄河流域降碳—减污—扩绿—增长的耦合协调度影响在空间上存在明显差异,而 GWR 将黄河流域不同省区空间位置纳入回归模型中进行研究,使各影响因素与耦合协调度的关系可以随着空间位置的变化而变化,并对不同位置两者之间的关系进行了较处理好。其模型为:

$$D_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i \tag{12}$$

式中: D_i 为第 i 个省区的耦合协调度; x_{ik} 为第 i 个省

区的产业结构合理化、产业结构高级化、政府干预程度和技术成果市场化这 4 个影响因素; (u_i, v_i) 为第 i 个省区的时空坐标; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距项; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为回归参数; ϵ_i 为随机误差。

3 结果与分析

3.1 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长指数分析

黄河流域降碳—减污—扩绿—增长的变动趋势如图 1 所示。研究期内降碳指数一直较为平稳,变动幅度不明显。减污指数在 2017 年前并未出现明显变动,2017 年后整体发展水平并不平稳,2017—2020 年,减污指数先下降后上升而后又呈现下降趋势。扩绿指数和增长指数都呈现波动式上升趋势,其中,扩绿指数从 0.303 上升到 0.338,一直处于 4 系统的最低层次,增长指数从 0.401 上升到 0.452。

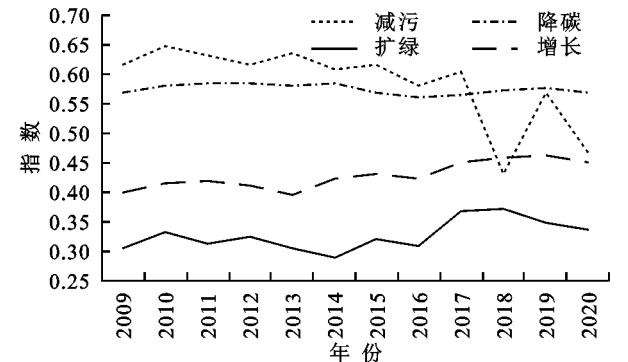


图 1 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长系统的指数变动趋势

Fig. 1 Exponential trend of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in the Yellow River Basin

3.1.1 黄河流域降碳系统指数趋势分析 上、中游地区的降碳指数均呈现波动中逐步下降态势,如图 2 所示。上游地区的降碳指数在 2009—2010 年出现了短暂的上升,而后转为下降;中游地区的降碳指数在研究期内发生 3 次波动,2009—2010 年、2013—2014 年和 2016—2017 年这三年间降碳指数都呈下降趋势,之后的两年都在上升,但后一个上升期的降碳指数上升幅度没有前一个上升期上升幅度大,甚至在最后一个阶段即 2017—2019 年降碳指数趋于水平。究其原因,如上游的内蒙古、中游的山西这些省区具有丰富的自然资源,构成以化石能源为主的能源消费结构,地区能源产业发展较快,使得这些地区碳排放量过高,从而降碳指数较低。下游地区的降碳指数呈现波动中缓慢上升态势。2009—2014 年下游地区降碳指数波动式上升,2014—2016 年该指数转为下降,2016—2019 年又开始上升。山东、河南这两个地区

随着产业转型升级,其降碳指数高于其他省份并呈现不断提升态势。

3.1.2 黄河流域减污系统指数趋势分析 黄河流域多数省区减污指数呈现下降态势。上、中、下游地区的减污指数变动趋势极为相似,2017年前减污指数缓慢下降,2017—2020年呈现波动式下降;下游地区的减污指数要略低于中、上游地区,说明河南、山东两地的减污水平与整个黄河流域的其他地区相比,还有待进一步提升。一方面黄河流域农产品主产区主要集中在下游的农耕区,如河南是我国重要的粮食生产基地,农药、农业化肥等污染物排放量与上中游区相比较;另一方面,下游地区的产业结构以重工业为主也导致了环境污染,比如山东省之前“一钢独大”的产业布局,在促进山东经济快速发展的同时也带来大量工业废水、烟尘等污染物的排放。

3.1.3 黄河流域扩绿系统指数趋势分析 黄河流域中、上游地区的扩绿指数在2009—2020年差距较小,上游地区的扩绿指数在研究期内并未达至有效状态,该指数发展落后于其他省区;下游地区的扩绿指数在研究期内反复上下波动,其数值高于中、上游地区。

中、上游地区的经济增长主要是依靠高能耗、高污染产业,在发展各项产业的同时并没有充分考虑环境保护问题,使生态环境遭到严重破坏,无法统筹生态环境与经济增长的协调发展,使其环境问题日益突出。下游地区注重生态环境与经济发展统筹兼顾,在发展的同时加大对绿色技术研发投入,重视新兴产业发展,其扩绿指数大于中、上游地区。

3.1.4 黄河流域增长系统指数趋势分析 黄河流域上、中、下游地区的增长指数均处于波动不稳定状态。上、中游地区的增长指数在小幅度波动中上升,下游地区的增长指数波动较大,在2013年呈现下降现象后快速上升。初期下游地区资源的利用与整合能力亟待加强,产业结构布局不合理,无法实现资源的有效利用,使得增长指数并未明显提升,后期下游地区加快推进产业转型升级,随着山东和河南新旧动能接续转换,产业转型升级“稳好新转”的发展模式不断优化,增长指数高于其他省区,并且表现为不断上升趋势;陕西、宁夏、山西等省区由于自身地理位置、自然条件等方面的制约,增长指数并不平稳,表现为在上升和下降中不断更替。

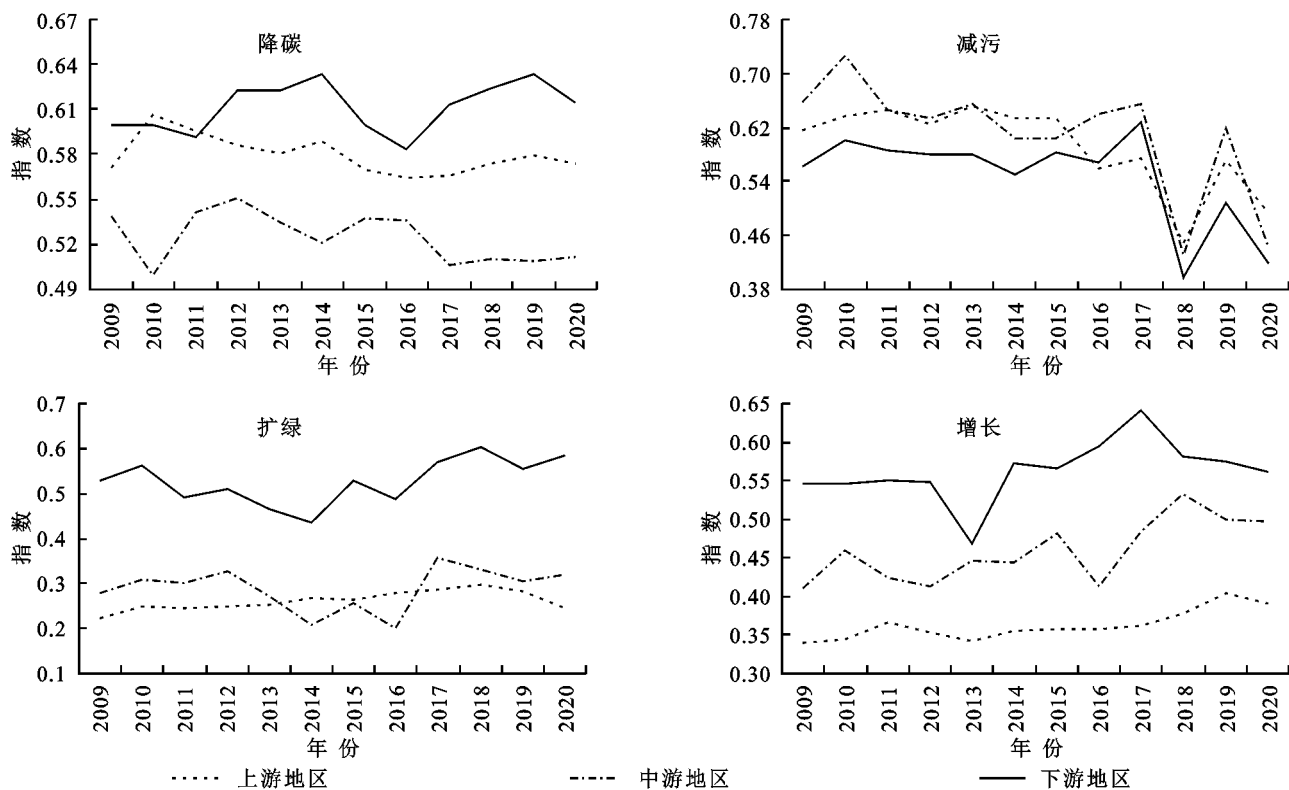


图 2 黄河流域上、中、下游降碳—减污—扩绿—增长系统指数变动趋势

Fig. 2 Trend of carbon reduction-pollution reduction-green expansion-economic growth in the upper, middle and lower reaches of the Yellow River Basin

3.2 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调时空演变特征

黄河流域降碳—减污—扩绿—增长的耦合协调度

结果如图 3 所示。黄河流域耦合度由 2009 年的 0.866 提升到 2020 年的 0.912,耦合协调度由 2009 年的 0.637 提升到 2020 年的 0.643,但不同地区存在明显的差异。

为更直观地分析黄河流域 9 省区降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度时空格局,利用 ArcGIS 软件对 2009 年、2013 年、2017 年、2020 年的测算结果进行可视化分析,结果如图 4 所示。

2009 年,山东处于良性协调阶段,内蒙古和陕西处于中级协调阶段,甘肃和青海处于濒临失调阶段,其余省区均处于初级协调阶段,黄河流域未出现处在优质协调阶段的省区。2013 年,黄河流域大部分省区耦合协调

度相比 2009 年整体上均未发生较大变化,只有青海、内蒙古和山东的耦合协调度在下降,青海耦合协调度由濒临失调演变为中度失调,内蒙古由中级协调演变为初级协调,山东由良性协调演变为中级协调。2017 年,青海耦合协调度有明显改善,演变为濒临失调,山东转为原来的良性协调。2020 年,青海耦合协调度发展态势良好,表现为勉强协调,甘肃耦合协调度有明显改善,由濒临失调演变为勉强协调。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1825 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 4 2009 年、2013 年、2017 年、2020 年耦合协调度空间演变格局

Fig. 4 Spatial evolution pattern of coupling coordination degree in 2009, 2013, 2017 and 2020

3.3 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的地区差距演进

采用 Dagum 基尼系数方法,测度 2009—2020 年黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度水平地区差距及其子群分解差距。

3.3.1 耦合协调度水平的总体地区差距及其演变 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度水平总体存在较大差距,总体基尼系数在 0.114 1~0.060 7 波动,呈现“下降—上升—下降”的发展趋势,如图 5 所示。将研究期内总体地区差距变化可划分为 3 个阶段:第一阶段为 2009—2011 年,该阶段耦合协调度水平的基尼系数总体呈小幅下降趋势;第二阶段为 2011—2013 年,基尼系数总体指数触底反弹,不均衡现象趋于扩大,在 2013 年基尼系数达到峰值 0.114 1;第三阶段 2013—2020 年,该阶段耦合协调度水平基尼系数总体呈波动下降态势,到 2020 年降到最低值 0.060 7,黄河流域耦合协调度水平的总体不均衡现象在不断改善。

3.3.2 耦合协调度水平的地区内差距及其演变 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度水平的地区内差距演变趋势如图 5 所示。从数值差异角度来看,上游地区的地区内差距最大,中、下游地区内差距都低于上游地区,研究期内耦合协调度的基尼系数平均值从大到小排序为上游地区>中游地区>下游地区。从各区域演变趋势来看,上游地区基尼系数表现出“先下降—后上升—再下降”的变化规律,而中、下游区域的基尼系数则表现出“一直下降”的变化规

律,地区内基尼系数波动性大小依次为上游地区>下游地区>中游地区。

分地区来看,上游地区基尼系数总体变动较为明显,2009—2013 年呈“U”型变化,即 2009—2011 年表现为下降,2011—2013 年转为上升,在 2013 年地区内差距上升至研究期内最大值 0.138 6,随后基尼系数呈下降趋势,降到研究期内最小值 0.055 1。在研究期内,上游地区内差距呈现出“先减小—后增大—再减小”的过程,且有逐渐减小的趋势;中游地区内的区域差距与下游地区的演化趋势基本一致,且不平衡现象都有所减少,但中游地区的基尼系数变动要比下游地区的变动更加平稳。中游地区基尼系数总体有所减小,2009—2016 年由 0.045 1 下降至 0.038 0,2016—2018 年由 0.038 0 增加至 0.043 8,此后基尼系数有所下降,到 2020 年下降至研究期间最小值 0.033 2。下游地区基尼系数总体上表现为波动中下降趋势,表明下游地区内差距在逐渐减小,下游地区基尼系数在 2009—2015 年呈下降趋势,由 0.059 5 下降至 0.046 5,以 2009 年为基期,年均下降率为 0.19%,降幅为 21.82%,2015—2020 年基尼系数由 0.046 5 下降至 0.273,年均下降率为 0.32%,降幅为 32.05%,该地区基尼系数总体呈减小的变化趋势,但在研究期末,下游地区的基尼系数已经低于其平均值,说明这一时期内下游地区内发展较为平均。

综合黄河流域总体及上、中、下游三大地区看来,尽管在研究期内不同地区的基尼系数呈现上下起伏波动,但是黄河流域总体及上中下游地区的基尼系数

在演变趋势中呈现逐渐减小趋势。中、下游地区的经济发展起步早、发展速度快且成效显著,其工业化水平较高。近年来中央政府对区域协调发展和环境保护更加重视,提出了一系列具有前瞻性、战略性和全局性的区域协调发展战略和绿色发展战略,中、下游地区抓住发展机遇大力发展,使中、下游地区之间形成了一个相互促进的协作关系,从而使其发展趋于平衡,基尼系数也在不断下降。而上游地区的发展较中、下游地区的发展相对滞后,正处在一个追赶的阶段,政府为促进上游地区的发展,出台了一系列产业扶持政策,采取财政转移支付的手段,致使部分依靠自然资源禀赋带动经济增长的城市得到了较快发展,同时也伴随着产生一系列环境问题,地区内耦合协调度水平逐渐拉大,基尼系数下降不显著。

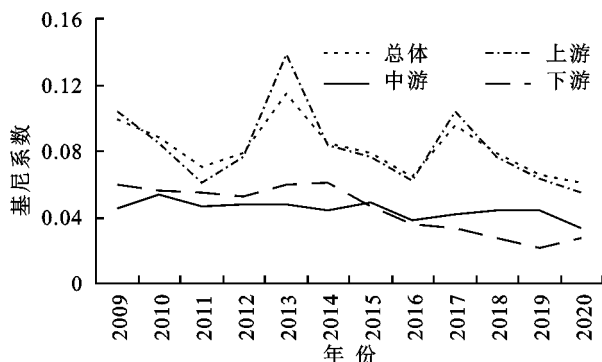


图5 总体与上中下游地区内耦合协调度水平差距的演变

Fig. 5 Evolution of the gap between the coupling coordination level in the Yellow River Basin and the upper, middle and lower reaches

3.3.3 耦合协调度水平的地区间差距及其演变 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度水平的地区间差距演变趋势如图6所示。从地区间基尼系数差异角度来看,不同地区间耦合协调度水平差距较为显著,地区间的基尼系数平均值按从大到小顺序排序为:上游与下游>上游与中游>中游与下游。从地区间基尼系数的变动趋势角度来看,可将研究期分为两个阶段:第一阶段是2009—2013年,该阶段内上游与中游、上游与下游地区间基尼系数表现为在波动中上升,中游与下游地区间基尼系数变化较为平稳;第二阶段是2013—2020年,该阶段内不同地区间的基尼系数在波动中都呈现递减趋势。

上游与中下游地区间基尼系数总体演变趋势基本一致,上游与中游地区间基尼系数在2009—2013年介于0.067 0~0.113 6,在2013年达到最大值0.113 6;上游与下游地区间基尼系数在2009—2013年介于0.092 6~0.132 9,在2013年达到最大值0.132 9,说明在这一阶段内上游与中下游地区间降

碳—减污—扩绿—增长的耦合协调度发展水平存在不平衡,这种不平衡在逐步扩大,上游地区4个子系统耦合协调度发展程度落后于中下游地区,且上游地区与下游地区间基尼系数增幅大于中游地区,上游地区与下游地区间差距增加明显快于中游地区。2013—2020年上游地区与中游地区基尼系数从0.113 6下降到0.055 6,上游地区与下游地区基尼系数从0.132 9下降到0.087 7,表明上游地区和中下游地区之间发展的不平衡现象在逐步缩减。

中游与下游地区间基尼系数在2009—2014年位于0.068 7~0.081 4,基尼系数变动较小,之后基尼系数从2014年的0.081 4下降到2020年0.053 3,2020年的基尼系数是研究期内中游与下游地区间的最低值,说明黄河流域中下游地区间4个子系统的耦合协调度发展水平较为均衡。研究期初,位于中下游地区的省区相较于上游地区来说,其在发展经济的同时也注重对生态环境的保护,耦合协调度水平较高,于是上游地区与中下游地区间差距拉大;而到后期,上游地区经济发展状况稳步好转的同时也注重生态保护,降碳—减污—扩绿—增长的耦合协调度水平在逐步提高,中下游地区基尼系数在不断缩小。

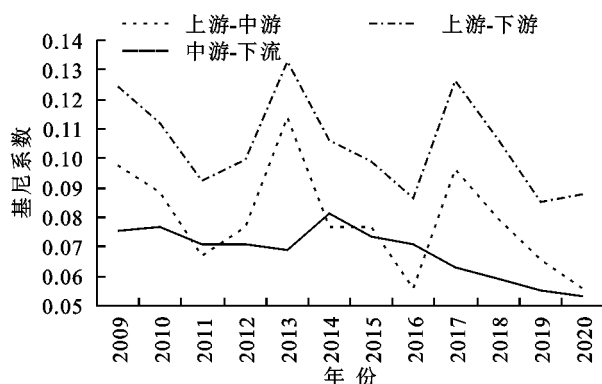


图6 上中下游地区间耦合协调度水平差距的演变

Fig. 6 Evolution of the gap in the level of coupling coordination between the upper, middle and lower reaches

3.3.4 耦合协调度水平的差距来源及其贡献 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度水平的差异来源贡献率如图7所示。研究期内,黄河流域4个子系统耦合协调度水平的地区差距主要来源是地区内和地区间差距,地区内差距的平均贡献率为34.48%,地区间的平均贡献率为52.09%,超变密度差距不大,平均贡献率为11.98%。从演变趋势来看,地区内差距基本处于平稳状态,而地区间差距的贡献率整体呈现“U”形变化趋势,波动较大,超变密度贡献率则整体呈先上升后下降的变化态势,存在一定波动。具体来看,地区内差距的贡献率介于31%~40%,变动较小;超变密度贡献率在2009—2014年呈波动式上升,

由 13.16% 上升至最大值 19.94%，随后转为递减趋势，2014—2020 年减至 5.76%，下降幅度显著；地区间差距贡献率在 2009—2014 年呈下降趋势，到 2014 年下降至最低值 42.98%，2014—2020 年在波动中呈上升态势，升至最大值 65.49%。

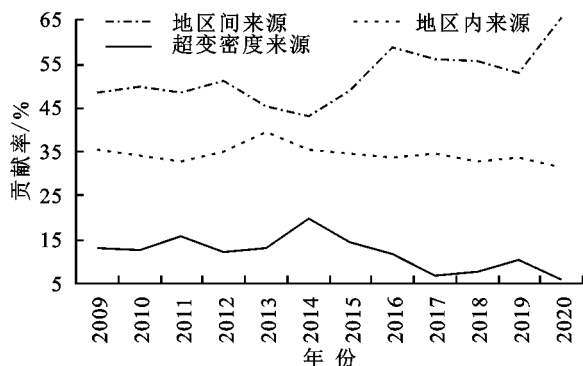


图 7 耦合协调度水平差距贡献率的演变

Fig. 7 Evolution of the contribution rate of the gap between the level of coupling coordination

3.4 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的动态演化特征

使用马尔科夫链模型计算黄河流域各省区降碳—减污—扩绿—增长系统耦合协调度等级随时间转移的概率，测算结果见表 4。其中，主对角线代表的是耦合协调度等级不发生改变的概率，非对角线代表的是耦合协调度等级向上转移或向下转移的概率。

表 4 2009—2020 年耦合协调度的马尔科夫转移概率矩阵

Table 4 Markov transfer probability matrix of coupling coordination degree from 2009 to 2020

$t/(t+1)$	$n/\text{个}$	濒临 失调	初级 协调	中级 协调	高级 协调
濒临失调	11	0.5455	0.2727	0.1818	0.0000
初级协调	4	0.0000	0.7500	0.2500	0.0000
中级协调	28	0.1071	0.0357	0.7500	0.1071
高级协调	56	0.0000	0.0000	0.0893	0.9107

主对角线上的 4 个概率值都比非对角线上的概率值要大，说明黄河流域各省区降碳—减污—扩绿—增长系统耦合协调度不轻易在不同类型间发生转变，都保持最初的耦合协调度类型。具体来看，研究期内起初表现为濒临失调、初级协调、中级协调和高级协调类型的省区一年后仍维持原有类型的概率分别为 55%，75%，75%，91%，其中高级协调这一耦合协调度类型概率值最大，说明耦合协调度更倾向于向最高等级集聚。

非对角线位置的数值中，位于主对角线左侧的数值都小于主对角线右侧的数值，表明耦合协调类等级发生向下转移的可能要小于发生向上转移的可能，耦合协调度等级整体更倾向于向上转移，说明黄河流域

各省区降碳—减污—扩绿—增长系统耦合协调度有长期增长趋势，这和前文所述研究结果相吻合。非对角线上的数值并不完全为 0，且这些非 0 数值集中于对角线两侧，表明黄河流域部分省区 4 子系统耦合协调度类型存在向更高等级或更低等级转移的可能性发生在连续两年间，通常情况下不会发生耦合协调度类型的跃迁（如从初级协调直接跳跃到高级协调），大多数省区都只是一个向上或向下迁移的过程，表明黄河流域各省区降碳—减污—扩绿—增长系统耦合协调度的演化是一个相对稳定且持续的过程，很难在较短时间内发生跨越式的发展。

3.5 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的驱动机制分析

综合考虑黄河流域各省区影响降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的因素，从产业结构合理化、产业结构高级化、政府干预程度和技术成果市场化这 4 个因素进行驱动因子分析。其中，产业结构合理化采用泰尔指数来度量^[28]，产业结构高级化采用第三产业增加值与第二产业增加值的比值衡量，政府干预程度采用一般财政支出与 GDP 比值衡量，技术成果市场化采用技术市场成交额与 GDP 比值衡量。

从图 8 中可以看出，产业结构合理化的回归系数在研究期初表现为“中间低两边高”，宁夏、陕西和内蒙古等大部分省区的产业结构合理化对系统耦合协调度的影响都表现为负向影响。在研究期末则表现为“中间高两边低”，说明研究期间大部分地区的产业结构调整更加趋于合理化，促进黄河流域各省区降碳—减污—扩绿—增长系统协同增效，只有青海、四川和内蒙古 3 省区的产业结构还需进一步优化。产业结构合理化对能源消耗量具有重要影响，在相同产出水平条件下，最优的产业结构可以降低能源消耗量，而能源消耗量对于降碳—减污—扩绿—增长系统的耦合协调又有非常重要的影响。三次产业的能源消耗量差异较大，随着产业结构的调整与演进，产业结构优化有效减少了能源消耗量，从而促进降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的增长。

从图 9 中可以看出，2009 年青海、甘肃、河南的产业结构高级化抑制了该地区耦合协调度水平，陕西、四川和内蒙古等省区的产业结构高级化对于耦合协调度起促进作用；到 2020 年，四川、青海和内蒙古的产业结构高级化对耦合协调度的影响从正向转变为负向，其余地区转变为正向影响。产业结构升级是我国推动碳减排、实现碳达峰的有效途径，其升级转换能够有效地淘汰落后产能，提高全要素生产率，推动产业发展向高附加值、高技术方向转变，减少经济

活动中的高耗能、高污染产业,有效地提高了绿色生产效益,极大地减少污染物的排放。陕西、河南和山东等省区致力于推动传统工业产业的转型升级,提升自身产品和服务的附加值,并迈向高端价值链。与此

同时,这些省区的新兴行业、高科技行业也得到了迅速的发展,推动生产效率不断提升,由此降低了生产过程中的污染物排放,从而促进降碳—减污—扩绿—增长系统的耦合协调度。

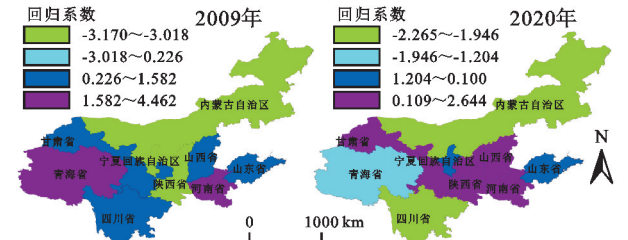


图 8 产业结构合理化与 4 系统耦合协调水平变化 GWR 模型的回归系数估计分布

Fig. 8 Regression coefficient of the GWR model estimates the change of the coupling coordination level between industrial structure rationalization and the four systems

如图 10 所示,政府干预程度对黄河流域各省区降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的影响与产业结构合理化的影响相似。在 2009 年,宁夏、陕西和内蒙古等大部分省区的政府干预程度对于耦合协调度水平的影响为负向,说明在研究期初以市场为导向的经济发展模式更有利于降碳—减污—扩绿—增长耦合系统的协同发展;到 2020 年,对于黄河流域大部分省区的政府干预程度对耦合协调度的影响为正向,影响程度最大的是甘肃、陕西和山西,说明在研究期末,政府介入能对市场起良性引导作用,有助于将政策优势发挥到最大化程度,有效促进降碳—减污—扩绿—增长系统耦合协调度水平的增长。

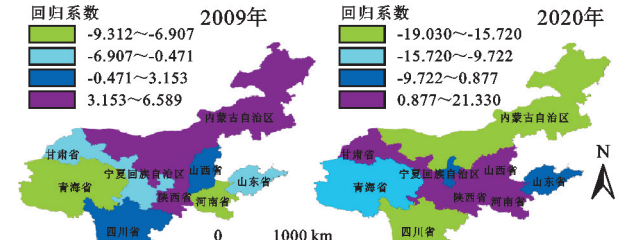


图 9 产业结构高级化与 4 系统耦合协调水平变化 GWR 模型的回归系数估计分布

Fig. 9 Regression coefficient of the GWR model estimates the change of the coupling coordination level between upgrading of industrial structure and the four systems

2009 年与 2020 年相比,黄河流域的大部分省区技术成果市场化对于耦合协调度的积极影响在增强,但并没有有效促进降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的提升(图 11)。技术成果市场化是实现经济转型升级的重要推力,能够实现高水平保护与高质量发展并重。不同省区要结合现实需求,构建有利于技术成果转化的创新机制,注重市场导向,因此各省区在技术研发初期就要注意,所研究和创造的成果必须具有实用性、效益性以及理论方面的科学性,只有将市场需要和技术研发有机地结合在一起,使科研工作与生产效益产生密切的联系,才能将科技成果真正地运用到实际生产中,技术成果才能转换,才能有利于市场,才能在实现降碳—减污—扩绿—增长的过程中发挥最大效益。

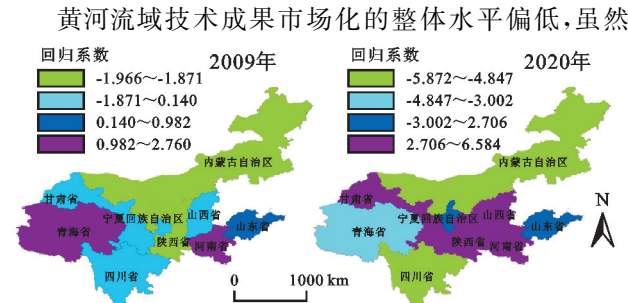


图 10 政府干预程度与 4 系统耦合协调水平变化 GWR 模型的回归系数估计分布

Fig. 10 Regression coefficient of the GWR model estimates the change of the coupling coordination level between government intervention and the four systems

4 结论

(1) 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合度在波动中呈现小幅上升趋势,降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度呈现先上升后下降再上升趋势。其中,降碳指数并未出现明显变动,扩绿指数和增长指数都

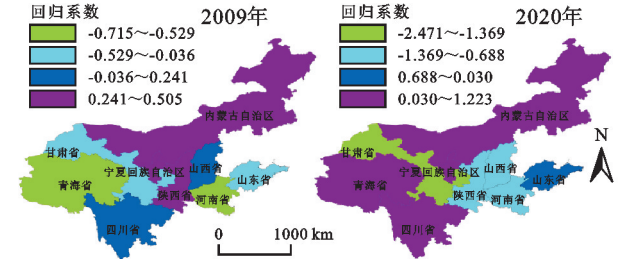


图 11 技术成果市场化与 4 系统耦合协调水平变化 GWR 模型的回归系数估计分布

Fig. 11 Regression coefficient of the GWR model estimates the change of the coupling coordination level between the marketization of technical achievements and the four systems

呈现波动式上升,减污指数呈现波动式下降。黄河流域 4 子系统的耦合协调度中,四川、河南、甘肃和青海的耦合协调度均表现为上升态势,其中河南耦合协调度提升最高,山东、宁夏和内蒙古的耦合协调度呈现下降趋势,陕西和山西的耦合协调度较为平稳;降碳—减污—扩绿—增长系统耦合协调度水平呈现出

下游地区>中游地区>上游地区的空间格局。

(2) 黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度水平的地区内差距演变趋势中,上游地区内差距明显高于其他两个地区,但这种不平衡现象存在缩小趋势;各地区之间的耦合协调度水平具有明显的差距,地区间差距由大到小依次为上游与下游>上游与中游>中游与下游;研究期内黄河流域耦合协调度水平的地区差距主要来源于地区内差距和地区间差距。

(3) 黄河流域各省区降碳—减污—扩绿—增长系统耦合协调度状态不同类型之间流动性较低,具有维持原有类型的稳定性;耦合协调度类型向上转移的概率大于向下转移的概率,即各省区耦合协调度存在长期增长趋势;4个子系统耦合协调度水平一般情况下不会出现耦合协调度类型的跃迁,大部分省区耦合协调度类型只是向上或向下转移一个等级。

(4) 影响黄河流域降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度水平的因素中,大部分地区的产业结构调整更加趋于合理化,能够促进黄河流域各省区降碳—减污—扩绿—增长4系统协同发展;产业结构高级化对耦合协调度影响的正向和负向作用均有体现,不同的是正向影响在减弱,负向影响在增强,且研究期内该影响因素的作用大小存在显著的空间异质性;黄河流域大部分地区的政府干预对降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的作用从抑制转变为促进,说明在研究期初,政府介入不利于4系统耦合协调度的提升,在发展的后期,政府介入有利于有效提升降碳—减污—扩绿—增长4系统耦合协调度水平;技术成果市场化对降碳—减污—扩绿—增长4系统耦合协调度的影响较小,并没有有效促进降碳—减污—扩绿—增长耦合协调度的提升。

参考文献(References):

- [1] 陈明华,岳海珺,郝云飞,等.黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J].数量经济技术经济研究,2021,38(9):25-44.
Chen M H, Yue H J, Hao Y F, et al. The spatial disparity, dynamic evolution and driving factors of ecological efficiency in the Yellow River Basin[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2021,38(9):25-44.
- [2] 方传棣,成金华,赵鹏大.大保护战略下长江经济带矿产-经济-环境耦合协调度时空演化研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(6):65-73.
Fang C D, Cheng J H, Zhao P D. Temporal and spatial evolution of mineral-economic-environment coordination degree in the Yangtze River Economic Belt under the Great Protection Strategy [J]. China Population, Resources and Environment, 2019,29(6):65-73.
- [3] 于法稳,方兰.黄河流域生态保护和高质量发展的若干问题[J].中国软科学,2020(6):85-95.
Yu F W, Fang L. Issues regarding the ecological protection and high-quality development of Yellow River Basin [J]. China Soft Science, 2020(6):85-95.
- [4] 冯薇,赵荣钦,谢志祥,等.碳中和目标下土地利用碳排放效率及其时空格局:以黄河流域72个地级市为例[J].中国土地科学,2023,37(1):102-113.
Feng W, Zhao R Q, Xie Z X, et al. Land use carbon emission efficiency and its spatial-temporal pattern under carbon neutral target: A case study of 72 cities in the Yellow River Basin [J]. China Land Science, 2023, 37(1):102-113.
- [5] 徐辉,王亿文,张宗艳,等.黄河流域水-能源-粮食耦合机理及协调发展时空演变[J].资源科学,2021,43(12):2526-2537.
Xu H, Wang Y W, Zhang Z Y, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin [J]. Resources Science, 2021,43(12):2526-2537.
- [6] 张雪薇,杜凤莲,申晓燕,等.黄河流域经济-能源-生态-科技耦合协调发展时空格局及其影响因素[J].安全与环境学报,2023,23(7):2545-2556.
Zhang X W, Du F L, Shen X Y, et al. Coupling coordination development and spatial differentiation of economy-energy-ecology-science and technology in the Yellow River Basin [J]. Journal of Safety and Environment, 2023,23(7):2545-2556.
- [7] 张学良,贾文星,吴胜男.黄河流域高质量发展的时空跃迁及驱动因素分析[J].中国人口科学,2022(3):72-85, 127-128.
Zhang X L, Jia W X, Wu S N. Research on the temporal-spatial transition and driving mechanism of high-quality development in the Yellow River Basin [J]. Chinese Journal of Population Science, 2022(3):72-85, 127-128.
- [8] 苗长虹,张佰发.黄河流域高质量发展分区分级分类调控策略研究[J].经济地理,2021,41(10):143-153.
Miao C H, Zhang B F. Regulation strategy of zoning-gradation-classification for high-quality development in the Yellow River Basin [J]. Economic Geography, 2021, 41(10):143-153.
- [9] 石涛.黄河流域生态保护与经济高质量发展耦合协调度及空间网络效应[J].区域经济评论,2020(3):25-34.
Shi T. Spatial correlation network and regional connected effect of coupling coordination degree between ecological protection and high-quality economic development in the Yellow River regions [J]. Regional Economic Review, 2020(3):25-34.
- [10] 魏敏,李书昊.新时代中国经济高质量发展水平的测度研究[J].数量经济技术经济研究,2018,35(11):3-20.

- Wei M, Li S H. Study on the measurement of economic high-quality development level in China in the new era [J]. *The Journal of Quantitative & Technical Economics*, 2018, 35(11): 3-20.
- [11] 韩梦涛, 涂建军, 徐桂萍, 等. 黄河流域水域生态系统服务与经济发展时空协调性[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 167-176.
- Han M T, Tu J J, Xu G P, et al. Spatio-temporal coordination between aquatic ecosystem services and economic development in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(4): 167-176.
- [12] Tollefsen P, Rypdal K, Torvanger A, et al. Air pollution policies in Europe: Efficiency gains from integrating climate effects with damage costs to health and crops[J]. *Environmental Science & Policy*, 2009, 12(7): 870-881.
- [13] 刘杰, 刘紫薇, 焦珊珊, 等. 中国城市减碳降霾的协同效应分析[J]. *城市与环境研究*, 2019, 6(4): 80-97.
- Liu J, Liu Z W, Jiao S S, et al. Co-effect of CO₂ mitigation and PM_{2.5} control in Chinese cities[J]. *Urban and Environmental Studies*, 2019, 6(4): 80-97.
- [14] 王兆峰, 李竹, 吴卫. 长江经济带不同等级城市碳排放的时空演变及其影响因素[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(10): 2273-2281.
- Wang Z F, Li Z, Wu W. Spatio-temporal evolution and influencing factors of carbon emissions in different grade cities in the Yangtze River economic belt[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, 35(10): 2273-2281.
- [15] 郑航, 叶阿忠. 空间关联网络结构特征的减排效应: 基于城市群视角[J]. *环境科学*, 2022, 43(10): 4401-4407.
- Zheng H, Ye A Z. Carbon emission reduction effect of spatial correlation network structure characteristics: From the perspective of urban agglomeration[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(10): 4401-4407.
- [16] Burtraw D, Krupnick A, Palmer K, et al. Ancillary benefits of reduced air pollution in the US from moderate greenhouse gas mitigation policies in the electricity sector[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2003, 45(3): 650-673.
- [17] Liu J Y, Woodward R T, Zhang Y J. Has carbon emissions trading reduced PM_{2.5} in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(10): 6631-6643.
- [18] Yang X, Teng F. Air quality benefit of China's mitigation target to peak its emission by 2030[J]. *Climate Policy*, 2018, 18(1): 99-110.
- [19] Gu A L, Teng F, Feng X Z. Effects of pollution control measures on carbon emission reduction in China: Evidence from the 11th and 12th Five-Year Plans[J]. *Climate Policy*, 2018, 18(2): 198-209.
- [20] 郑石明, 何裕捷, 邹克. 气候政策协同: 机制与效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(8): 1-12.
- Zheng S M, He Y J, Zou K. Climate policy synergy: Mechanism and effect[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(8): 1-12.
- [21] Wang B, Wang Y F, Zhao Y Q. Collaborative governance mechanism of climate change and air pollution: Evidence from China[J]. *Sustainability*, 2021, 13(12): 6785.
- [22] 贾洪文, 樊树钢. 黄河流域绿色金融与经济高质量发展耦合协调研究[J]. *生态经济*, 2023, 39(10): 89-98.
- Jia H W, Fan S G. Study on the coupling and coordination of green finance and high quality economic development in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Economy*, 2023, 39(10): 89-98.
- [23] 李荣杰, 李娜, 张静, 等. 地区能源结构低碳化差异的收敛机制及影响因素: 基于加权多维向量夹角指数[J]. *统计与信息论坛*, 2020, 35(10): 90-99.
- Li R J, Li N, Zhang J, et al. Regional differences convergence of low-carbon energy structure and influencing factors: Based on weighted multi-dimensional vector angle [J]. *Statistics & Information*, 2020, 35(10): 90-99.
- [24] 刘建国, 张文忠. 中国区域全要素生产率的空间溢出关联效应研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(5): 522-530.
- Liu J G, Zhang W Z. The spatial spillover effects of regional total factor productivity in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(5): 522-530.
- [25] 姚洋, 崔静远. 中国人力资本的测算研究[J]. *中国人口科学*, 2015(1): 70-78, 127.
- Yao Y, Cui J Y. Estimation of China's human capital stock[J]. *Chinese Journal of Population Science*, 2015(1): 70-78, 127.
- [26] 张康洁, 于法稳, 李福夺. 中国农村信息化、农业产业化与乡村生态化耦合协调发展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(6): 182-195.
- Zhang K J, Yu F W, Li F D. Coupling coordinated development of rural informatization, agricultural industrialization, and rural ecologicalization in China[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2023, 33(6): 182-195.
- [27] 张永姣, 丁少斌, 方创琳. 中国数字经济产业发展的时空分异及空间收敛性分析: 基于企业大数据的考察[J]. *经济地理*, 2023, 43(3): 120-130.
- Zhang Y J, Ding S B, Fang C L. Spatiotemporal variation and spatial convergence of China's digital economy industry development: Based on the big data of enterprise[J]. *Economic Geography*, 2023, 43(3): 120-130.
- [28] 黄纪强, 祁毓. 环境税能否倒逼产业结构优化与升级: 基于环境“费改税”的准自然实验[J]. *产业经济研究*, 2022(2): 1-13.
- Huang J Q, Qi Y. Can environmental taxes force industrial structure optimization and upgrading: A quasi-natural experiment based on environmental “Fee to Tax” [J]. *Industrial Economics Research*, 2022(2): 1-13.