

我国碳排放—经济增长—生态环境三维系统耦合

协调时空演化

吕靖焯¹ 李珏

(西安科技大学管理学院, 陕西西安 710054)

【摘要】: 从耦合和空间演化的角度, 测度了 30 个省份碳排放—经济增长—生态环境三维系统的耦合协调度, 并分析了各省份耦合协调度的空间相关性。研究发现: 我国各省份三维系统基本处于轻度失调和勉强协调的状态, 地理分布的空间异质性特征明显, 空间相关性的研究表明, 三维系统存在逐年降低的正相关关系。部分省份表现出空间聚集的特征, 河南、山西等省份存在“高一高”聚集效应, 新疆存在“低—低”聚集效应, 大多数省份不存在空间聚集效应。根据实证分析结果, 从调整能源结构、推动区域低碳减排合作等方面提出了相关政策建议。

【关键词】: 碳排放 经济增长 生态环境 耦合协调度 时空演化

【中图分类号】: F062.2 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1671-4407(2022)11-036-08

国家对碳排放、经济增长和生态环境的重视程度越来越高, 2020 年习近平总书记提出中国将提高国家自主贡献力度, 力争二氧化碳排放 2030 年前达到峰值, 2060 年前实现碳中和, 推动经济高质量发展^[1]。党的十九届五中全会进一步指出, 未来生产和生活向低碳化转型发展, 推动碳排放目标的实现和绿色中国的建设^[2]。由此可见, 碳排放目标的实现与经济高质量发展和生态环境建设息息相关。

如何在实现碳排放目标的基础上, 实现经济高质量发展和生态环境优化, 是我国目前面临的重要问题。然而, 各省份碳排放水平不同、经济发展不平衡、生态环境存在差异, 各省份碳排放、经济增长和生态环境三者的关系也错综复杂。因此, 厘清碳排放、经济增长和生态环境的关系, 对于实现我国碳排放目标、经济高质量发展、绿色中国的建设具有重要意义。

国内外学者对经济与碳排放、生态环境等要素之间关系的研究, 主要是从环境与经济的关系、碳排放与经济的关系、能源、经济与环境的关系三方面进行。第一, 关于经济发展与环境关系的研究。国外文献对经济发展与环境关系现状的研究较广泛, Feng 等^[3]发现中国边境地区经济发展与环境保护严重失衡。

Andrée 等^[4]发现地区经济环境决定了环境产出临界点的形状、幅度和位置。Song^[5]认为经济增长加上持续高水平技术投资对环境保护有实际作用。Yao 等^[6]认为, 一定经济水平下, 增加可再生能源消费, 发展中国家可以更好地实现可持续发展目标。国内学者范慧平等^[7]发现, 短期内优化环境需要付出经济代价,

1基金项目: 国家社会科学基金项目“我国‘一带一路’能源投资政策绿色效果评价与改进策略研究”(20BJY076); 西安科技大学博士后启动基金“基于风险评价的陕西企业碳金融市场参与策略研究”(8250119003); 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究项目“陕西省碳排放—经济增长—生态环境协同发展测度与对策研究”(2021ND0235)

第一作者简介: 吕靖焯, 博士, 副教授, 研究方向为能源经济与管理。E-mail: lyujy@xust.edu.cn

良好的生态是经济长期健康发展的基础。周茜^[8]发现经济发展中的技术要素会对生态环境产生重要影响。

第二,关于经济发展与碳排放关系的研究。国外文献中, Du 等^[9]与 Salman 等^[10]研究发现经济发展和碳排放具有关联性。Li 等^[11]发现经济发展模式的改变对低碳发展具有重要意义。Zheng 等^[12]发现同时实现经济持续增长和减少碳排放的目标是困难的。Mardani 等^[13]指出研究碳排放与经济增长之间的关系有助于制定合理的能源政策。Shahbaz 等^[14]发现应把经济增长的生态后果放在最优先的位置。国内学者关于经济发展与碳排放关系的研究主要有:原嫄和孙欣彤^[15]发现中国仍处于碳排放与经济同步增长阶段,武娜等^[16]认为晋陕蒙地区生产中的隐含碳问题不容忽视,杨晓华等^[17]发现制造业经济和碳排放呈倒“N”型关系,吕康娟和何云雪^[18]发现长江三角城市群经济集聚对碳排放强度产生先促进后抑制的直接影响。

第三,关于能源、经济与环境关系的研究。国外文献中, Li&Li^[19]、Nguyen 等^[20]、Vujović^[21]、Akadiri 等^[22]发现能源消耗和经济增长是碳排放量增加的重要因素。国内学者对能源、经济与环境关系进行研究的有:吴鸣然等^[23]、傅强等^[24]认为能源、环境、经济具有关联性,关伟和金一^[25]发现随着我国经济的发展,能源效率有所提高,碳排放量有所下降。

学者们运用 BP 神经网络模型^[7]、Commoner 污染方程模型^[8]、PVAR 模型^[15]、DPSIR 模型^[16]、空间计量模型^[18]等,对经济发展、碳排放、环境两两关系和能源、经济和环境三者关系进行了研究,研究发现能源强度是碳排放的重要影响因素,碳排放与经济发展具有关联性,经济发展为生态环境优化提供动力,具有借鉴意义。但是,目前对碳排放、经济发展、环境的研究大多都是基于两者关系的探讨,需要进一步研究三者之间的关系。通过研究碳排放、经济、生态环境的关系,有利于推动我国碳排放目标和经济高质量目标的实现,为我国绿色发展提供一定的理论借鉴。

因此,本文基于耦合的视角,测度 2005—2019 年我国 30 个省份碳排放、经济增长和生态环境三维系统的耦合协调度。2005—2009 年我国经济平均增速是 13.07%,属于高速增长阶段。2010—2014 年受经济危机的持续影响,我国经济平均增速为 11.14%,2014 年经济平均增速下降至 8.4%,进入了经济发展低迷期。2015—2019 年我国经济平均增速为 7.2%,属于新常态时期。基于此,本文将分析经济高速增长期、经济低迷期和中国经济新常态期三个阶段耦合协调度的时空演化,并构建空间计量模型,采用 Moran' sI 指数分析各地区耦合协调度的空间相关性,提出了促进我国碳排放、经济增长、生态环境协调发展的建议。

1 三维系统耦合机理

耦合是系统之间相互影响的状态,碳排放—经济增长—生态环境是一个两两相互影响的系统,如图 1 所示。首先,碳排放和经济增长的关系体现为:减少碳排放,推动经济健康发展,经济增长又为低碳发展提供技术等支持。其次,碳排放和生态环境的关系体现为:减少碳排放有利于保护生态环境,良好的生态环境为污染物的排放提供更高强度的承载力。最后,生态环境和经济增长的关系体现为:良好的资源禀赋和生态环境承载力为经济发展创造条件,经济增长为生态环境建设提供资金、技术等支持。碳排放、经济增长、生态环境三维系统协调发展,相互促进。

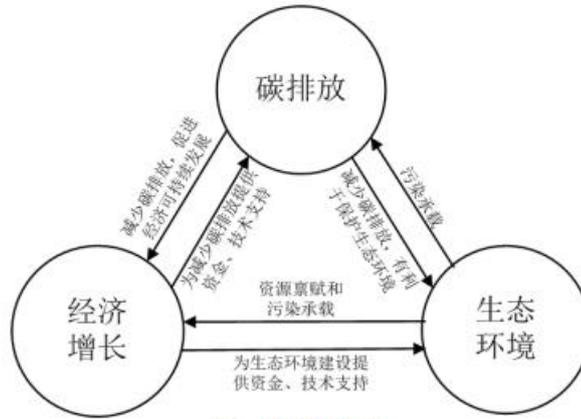


图1 耦合机理图

碳排放—经济增长—生态环境又是一个错综复杂的三维系统。碳排放与每个人的生产、生活都息息相关，它不仅会影响各产业的发展，而且会影响人们的生活方式，决定了人们利用新能源的态度。通过碳排放交易市场的发展，可以促进新能源的推广和使用，有利于增强经济发展活力和保护生态环境。而新能源的利用方式与生态环境也是息息相关的，例如风力较强的地区可以利用风能发电。此外，通过建立碳排放市场，控制碳排放量为经济高质量增长和生态环境保护创造了条件。

经济增长为减少碳排放和生态环境保护提供了必要的资金、技术等支持。通过支持新能源产业的发展和引进碳减排技术，减少碳排放量，保护环境。但是受各区域生态环境和自然资源禀赋的异质性制约，不同区域经济发展水平和模式差别较大，生态环境影响区域比较优势的发挥。对生态环境的破坏程度是经济发展质量的重要评判标准，而生态环境的保护又离不开环境治理技术的应用和资金的投入。

生态环境是经济长期发展的保障，是碳排放的承载者。同时，经济社会的发展为生态环境的保护提供了资金及技术保障，减少碳排放对环境具有积极意义。

三维系统中，任何一个子系统无法与其他子系统协调发展时，整体的耦合协调水平都会降低。当三个子系统进行耦合时，其中两个子系统发展水平降低，而另外一个上升时，整体耦合协调水平下降。即使是发展水平都处于上升或下降阶段，但其中一个子系统增长或下降速度不能与其他两个相匹配时，整体的耦合协调度也会下降。并且，当两个或者多个子系统之间的相互关系不再存在时，形成脱钩效应。因此，碳排放、经济增长和生态环境三个子系统各自的发展水平和变化速度都会影响整体耦合协调度的大小。其中两个子系统出现脱钩时，三维系统的耦合协调度也会下降。

2 指标选取与模型构建

2.1 指标选取与综合指数计算

2.1.1 指标选取

第一，碳排放。化石燃料的燃烧会产生大量二氧化碳，并且考虑能源消费品种和数据的可获得性，参考前人的研究^[26]，选择各省份煤炭、焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油、天然气的消费量核算碳排放，并且参考 IPCC 提供的核算方法进行估算，计算方法如下：

$$CO_2 = \sum_{i=1}^n (E_i \times NCV_i \times CEF_i \times COF_i) \quad (1)$$

式中：CO₂ 是碳排放量，n 是能源种类数量，E_i 是第 i 类能源的消耗量，NCV_i 是第 i 类能源的平均低位发热量，CEF_i 是第 i 类能源的含碳量，COF_i 是第 i 类能源的碳氧化因子^[26]。

第二，经济增长。2005—2019 年是我国经济从高速增长阶段向经济新常态阶段的过渡时期，地区生产总值增长率由高速向中高速转变，采用地区生产总值增长率衡量我国经济增长状况，能够更有针对性地体现我国各个阶段经济增长的特点与趋势，因此，经济增长采用 2005—2019 年地区生产总值增长率指标。

第三，生态环境。生态环境的好坏不仅反映出一个地区生产生活质量，并且也会限制该地区生产、服务的发展水平。本文采用建成区绿化覆盖率、森林覆盖率、治理工业废气完成投资额、治理工业废水完成投资额、人均用水量和城市污水排放量指标测算生态环境水平。

2.1.2 综合指数计算

运用熵值法计算权重，加入时间变量，得出以下综合指数的计算模型^[27]：

(1) 数据标准化。

$$\text{正向指标标准化: } x'_{\theta ij} = x_{\theta ij} / x_{\max} \quad (2)$$

$$\text{负向指标标准化: } x'_{\theta ij} = x_{\min} / x_{\theta ij} \quad (3)$$

式中：x_{θ ij} 是第 θ 年省份 i 的第 j 个指标值，x_{max} 是某一指标的最大值，x_{min} 是某一指标的最小值^[27]。

(2) 确定某省份某一年的数据在某一指标中的权重 y_{θ ij}：

$$y_{\theta ij} = x'_{\theta ij} / \sum_{\theta} \sum_i x'_{\theta ij} \quad (4)$$

(3) 确定第 j 项指标的熵值 e_j：

$$e_j = -\ln(rn) \sum_{\theta} \sum_i y_{\theta ij} \ln(y_{\theta ij}) \quad (5)$$

式中：r 为年份的数量，n 为省份的数量。

(4) 确定第 j 项指标的信息效用值 h_j：

$$h_j = 1 - e_j \quad (6)$$

(5) 确定各指标的权重 w_j :

$$w_j = h_j / \sum_j h_j \quad (7)$$

(6) 确定综合指数 $S_{\theta i}$:

$$S_{\theta i} = \sum_j (w_j x'_{\theta ij}) \quad (8)$$

考虑到数据的科学性和可获得性,本研究主要采用中国 30 个省份(西藏和港澳台地区除外)2005—2019 年的数据。目前,最新的统计年鉴年份为 2020,因此,主要的数据来源为 2006—2020 年的《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国统计年鉴》。

2.2 模型构建

首先构建耦合协调度模型,计算各省份 2005—2019 年耦合协调度。其次构建空间计量模型,分析各省份耦合协调度是否具有空间相关性以及哪些省份存在空间聚集效应。

2.2.1 耦合协调度模型的构建

耦合协调度能辨别系统在相互影响的过程中是否达到协调,同时能判断协调的等级。构建碳排放—经济增长—生态环境三维系统的耦合协调度模型^[28],具体步骤为:

(1) 构建碳排放—经济增长—生态环境耦合模型,计算耦合度 C :

$$C = \left\{ \frac{U_1 U_2 U_3}{\frac{(U_1 + U_2 + U_3)}{3}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中: C 代表耦合度; U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示各省份碳排放量综合指数、经济增长综合指数和生态环境综合指数。

(2) 构建碳排放—经济增长—生态环境耦合协调模型,计算耦合协调度 D :

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 + \lambda U_3 \quad (10)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (11)$$

式中: D 为耦合协调度, T 是协调指数, α 、 β 、 λ 是碳排放、经济增长和生态环境的权重,令 $\alpha = \beta = \lambda = 1/3$ ^[28]。并且,把三维系统的耦合协调度分为 8 个阶段^[29],并且给出 8 个不同的协调等级,具体分类见表 1 所列。

表 1 碳排放—经济增长—生态环境耦合协调度及等级划分

等级	耦合协调度 D	协调等级
1	0.8 < D ≤ 1	优质协调
2	0.7 < D ≤ 0.8	良好协调
3	0.6 < D ≤ 0.7	中等协调
4	0.5 < D ≤ 0.6	轻度协调
5	0.4 < D ≤ 0.5	勉强协调
6	0.3 < D ≤ 0.4	轻度失调
7	0.2 < D ≤ 0.3	中度失调
8	0 ≤ D ≤ 0.2	严重失调

2.2.2 空间计量模型的构建

空间自相关模型可以衡量某一变量的空间聚集特征，本文中主要用来分析各省份间碳排放、经济增长和生态环境三维系统的耦合协调度与各省份地理位置之间的空间依赖关系或空间关联程度。本文参考文献^[28]，采用全局 Moran' sI 指数判断各省份是否有空间相关性，其具体公式为：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (12)$$

式中：n 代表省份的数量， x_i 、 x_j 是 i 省份与 j 省份的耦合协调度，是平均值， w_{ij} 是空间权重矩阵，Moran' sI 的范围是 $[-1, 1]$ ^[28]。

全局莫兰指数检验是否存在空间相关性，无法得出空间相关性特征，因此需要进一步计算局部莫兰指数，其计算公式为：

$$I_i = x_i \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \quad (13)$$

3 三维系统综合指数及耦合协调度时空演化分析

3.1 碳排放、经济增长、生态环境三维系统综合指数分析

运用熵值法确定指标权重，得到 2005—2019 年碳排放、经济增长和生态环境的综合指数，如图 2 所示。碳排放综合指数呈增长趋势。2005—2009 年增长幅度大，而 2010—2014 年和 2015—2019 年两个时期增长幅度小，这可能是由于我国低碳减排政策发挥了一定作用。经济增长综合指数是区域生产总值增速的体现，在三个综合指数中，经济增长整体发展水平较高。2005—2009 年，经济增长综合指数下降幅度较小，主要是我国经济尚处于高速增长的阶段。2010—2014 年，下降幅度较大，金融危机的影响尚存。2015—2019 年，下降幅度较大，经济新常态下，中国不再片面追求经济高速增长。

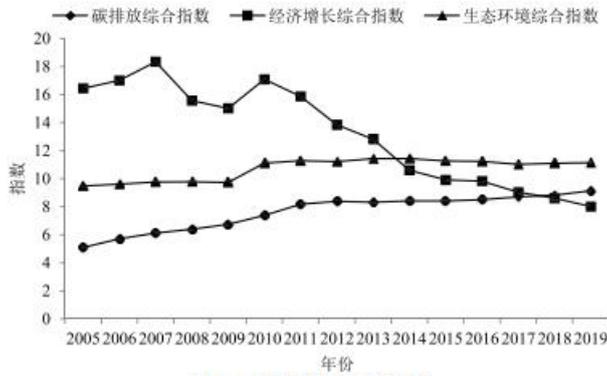


图2 三维系统综合指数

在 2005—2019 年间，生态环境综合指数整体变化较为平稳。生态环境受到一定的破坏，但是整体向好。2010 年生态环境综合指数上升幅度较大，原因可能是这一时期我国经济发展速度放缓，生态环境质量有所改善。

三维系统综合发展水平呈现趋近的状态，其中，最重要的是经济增长水平下降幅度大，而碳排放水平上升幅度较大。2019 年生态环境综合指数、经济增长综合指数、碳排放综合指数分别是 11.14、8.02、9.14，最大值与最小值的差距只有 2，三维系统的发展水平差距缩小，逐渐呈现出融合协调发展的态势。

3.2 三维系统耦合协调度时空演化分析

3.2.1 各省份耦合协调度的整体水平相对较低

从整体看，我国各省份 2005—2019 年碳排放—经济增长—生态环境的耦合协调度在 0.22~0.62 范围内，极差为 0.4，耦合协调度变化幅度较大，如表 2 所示。2005—2019 年整体耦合协调度较低，说明碳排放—经济增长—生态环境三维系统还没有形成良好的发展状态，还有进一步改善的空间。

3.2.2 耦合协调度的区域差距呈现出先扩大后逐渐缩小的趋势

从耦合协调度与均值的比较来看，2005 年经济高速增长期，这一年均值以上的省份少于均值以下的省份，如表 3 所示。2012 年经济低迷期，这一年均值以上的省份比 2005 年增加了 6 个：福建、湖北、四川、贵州、云南、陕西。2019 年经济新常态期，均值以上的省份和均值以下的省份数量相同，与 2005 年相比，均值以上省份数量增加，说明随着经济高质量发展，耦合协调度区域差异正在缩小，因此，节能减排不仅要考虑各个省份的特点，还要综合考虑区域间的协调，更要通过减排成效较高的地区带动高排放区域协同治理。

3.2.3 耦合协调等级低且各时期变化显著

将各省份的耦合协调度划分为不同的耦合协调类型，得出我国碳排放—经济增长—生态环境三维系统的空间分布图，如图 3~图 5 所示。

第一，不同时期耦合协调等级呈先上升后下降的趋势。从各时期耦合协调等级的变化来看，2005 年经济高速增长期，轻度失调的省份最多，可能的原因是我国经济高速增长，对生态环境的保护不到位，环境

政策执行力度弱。2012年经济低迷期，与2005年相比，耦合协调水平有所上升，可能的原因是席卷全球的经济危机导致经济放缓，对能源需求相对减少，生产的碳排放量有所降低，环境压力受经济收缩的影响有所减轻。但是出现轻度协调的主要原因是全球经济危机导致经济发展增速放缓，而不是环境问题真正得到解决。2019年经济新常态期，轻度失调的省份最多，与2005年相比，其中8个省份耦合协调等级下降，究其原因是高质量发展和供给侧结构性改革，各个区域将环境问题放在首位，部分地区碳排放与经济发展初步出现脱钩效应，一系列环境治理措施初见成效的结果。

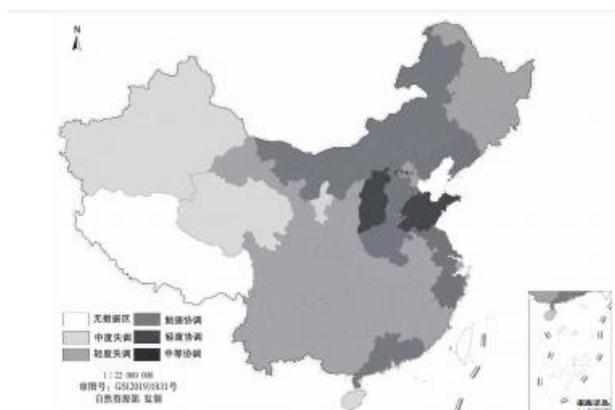


图3 2005年耦合协调等级空间分布

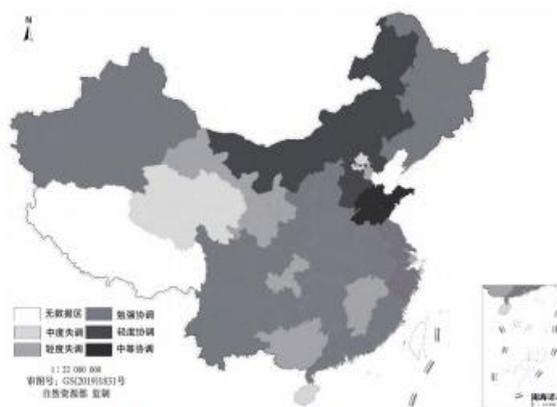


图4 2012年耦合协调等级空间分布

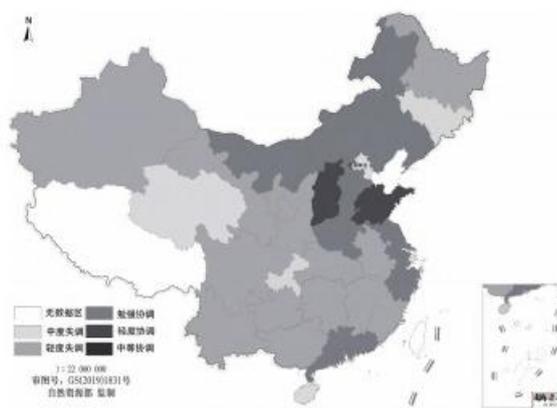


图5 2019年耦合协调等级空间分布

第二，不同省份耦合协调等级呈现出东高西低的差异化特征。从各省耦合协调等级的变化来看，2019年与2005年相比，有20个省份耦合协调等级没有变化，10个省份耦合协调度发生变化。耦合协调等级上升的省份是宁夏和新疆，其上升的原因可能是在经济发展过程中，产业结构优化使得碳排放、经济增长和

生态环境三维系统协同发展水平上升。耦合协调等级下降的省份以东部地区的北京、天津、上海为代表，其下降的原因可能是这几个区域重视环境治理问题，优化产业发展门类，关停并转移了大批高排放的企业，同时，不断加强企业碳排放管理。这些地区因地制宜发展低碳产业，碳排放、个省份耦合协调度发生变化。耦合协调等级上升的省份是宁夏和新疆，其上升的原因可能是在经济发展过程中，产业结构优化使得碳排放、经济增长和生态环境三维系统协同发展水平上升。耦合协调等级下降的省份以东部地区的北京、天津、上海为代表，其下降的原因可能是这几个区域重视环境治理问题，优化产业发展门类，关停并转移了大批高排放的企业，同时，不断加强企业碳排放管理。这些地区因地制宜发展低碳产业，碳排放、环境和经济发展之间的矛盾在一定程度上得到了缓解，经济发展和碳排放已经初步显现出脱钩效应。因此，其他省份可以通过加强环境治理力度、重视生态环境优化、促进经济主体的节能减排等方式实现碳排放脱钩，推动绿色发展。这与吴鸣然^[23]的观点是一致的，共同表明粗放式的经济发展方式是不可持续的，需要提高能源的使用效率等来维护能源、经济、环境的协调发展，本文研究充分考虑碳排放、经济增长、生态环境三维系统的协调发展关系。

表 2 各省份碳排放—经济增长—生态环境耦合协调度

省份	经济高速增长期					经济低迷期					经济新常态期					各 省 份 均 值
	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	
北京	0.33	0.35	0.37	0.31	0.32	0.32	0.29	0.29	0.28	0.28	0.27	0.26	0.26	0.26	0.25	0.30
天津	0.34	0.34	0.36	0.37	0.37	0.40	0.40	0.37	0.36	0.34	0.33	0.32	0.24	0.25	0.27	0.34
河北	0.48	0.49	0.49	0.48	0.48	0.54	0.58	0.53	0.51	0.48	0.47	0.47	0.46	0.49	0.48	0.50
山西	0.59	0.49	0.53	0.44	0.39	0.54	0.54	0.50	0.50	0.43	0.39	0.41	0.48	0.50	0.51	0.48
内蒙古	0.50	0.51	0.49	0.50	0.50	0.54	0.57	0.54	0.51	0.49	0.48	0.48	0.42	0.48	0.49	0.50
辽宁	0.45	0.47	0.50	0.49	0.49	0.54	0.53	0.49	0.48	0.43	0.37	0.44	0.40	0.43	0.44	0.46
吉林	0.34	0.38	0.39	0.40	0.38	0.42	0.44	0.41	0.36	0.34	0.33	0.34	0.31	0.30	0.27	0.36
黑龙江	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.44	0.44	0.42	0.39	0.36	0.36	0.37	0.37	0.33	0.33	0.38
上海	0.35	0.36	0.37	0.33	0.30	0.35	0.32	0.31	0.32	0.31	0.31	0.32	0.32	0.29	0.29	0.32
江苏	0.46	0.49	0.54	0.46	0.47	0.49	0.50	0.48	0.49	0.47	0.48	0.48	0.45	0.44	0.43	0.48
浙江	0.43	0.46	0.49	0.44	0.43	0.46	0.44	0.42	0.44	0.43	0.43	0.42	0.42	0.40	0.40	0.43
安徽	0.35	0.37	0.39	0.38	0.39	0.43	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.40	0.39	0.38	0.38	0.39
福建	0.35	0.39	0.42	0.40	0.41	0.43	0.42	0.42	0.42	0.42	0.41	0.38	0.37	0.38	0.38	0.40
江西	0.35	0.35	0.37	0.37	0.37	0.41	0.40	0.38	0.38	0.38	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
山东	0.55	0.57	0.57	0.56	0.57	0.61	0.62	0.61	0.58	0.58	0.57	0.59	0.58	0.56	0.55	0.58
河南	0.44	0.47	0.48	0.47	0.45	0.50	0.51	0.47	0.46	0.46	0.45	0.44	0.42	0.41	0.40	0.46
湖北	0.37	0.39	0.41	0.40	0.41	0.45	0.45	0.42	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.36	0.37	0.40
湖南	0.37	0.39	0.42	0.41	0.41	0.44	0.43	0.41	0.40	0.38	0.38	0.37	0.38	0.36	0.36	0.39
广东	0.46	0.48	0.51	0.44	0.44	0.51	0.47	0.44	0.45	0.44	0.46	0.44	0.44	0.44	0.43	0.46
广西	0.33	0.34	0.36	0.35	0.37	0.39	0.39	0.38	0.38	0.35	0.34	0.33	0.33	0.33	0.33	0.35
海南	0.22	0.26	0.31	0.27	0.29	0.33	0.31	0.29	0.29	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.28
重庆	0.31	0.33	0.36	0.35	0.36	0.41	0.41	0.38	0.36	0.35	0.35	0.34	0.32	0.28	0.28	0.35
四川	0.37	0.39	0.41	0.38	0.43	0.44	0.45	0.42	0.39	0.38	0.37	0.36	0.36	0.35	0.34	0.39
贵州	0.35	0.37	0.40	0.36	0.38	0.40	0.43	0.43	0.42	0.40	0.39	0.39	0.39	0.37	0.36	0.39
云南	0.33	0.36	0.38	0.36	0.39	0.41	0.43	0.44	0.51	0.36	0.36	0.35	0.37	0.37	0.36	0.39

陕西	0.37	0.40	0.43	0.44	0.43	0.46	0.48	0.48	0.46	0.44	0.42	0.41	0.42	0.41	0.39	0.43
甘肃	0.30	0.31	0.31	0.30	0.30	0.34	0.36	0.37	0.35	0.33	0.32	0.32	0.26	0.30	0.30	0.32
青海	0.24	0.25	0.26	0.27	0.24	0.30	0.29	0.28	0.28	0.26	0.24	0.25	0.24	0.24	0.23	0.26
宁夏	0.28	0.30	0.30	0.31	0.31	0.35	0.36	0.36	0.35	0.33	0.33	0.33	0.34	0.34	0.34	0.33
新疆	0.29	0.30	0.31	0.32	0.29	0.36	0.39	0.40	0.41	0.41	0.39	0.38	0.39	0.37	0.38	0.36
各年份均值	0.38	0.39	0.41	0.39	0.39	0.43	0.44	0.42	0.41	0.39	0.38	0.38	0.37	0.37	0.36	—

表 3 不同时期各省份耦合协调度的比较

经济高速增长期（2005 年）		经济低迷期（2012 年）		经济新常态期（2019 年）	
2005 年均值以上的省份	2005 年均值以下的省份	2012 年均值以上的省份	2012 年均值以下的省份	2019 年均值以上的省份	2019 年均值以下的省份
河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、浙江、福建、山东、河南、湖北、广东、四川、贵州、云南、陕西	北京、天津、吉林、黑龙江、上海、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆	河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、浙江、福建、山东、河南、湖北、广东、四川、贵州、云南、陕西	北京、天津、吉林、黑龙江、上海、安徽、江西、湖南、广西、海南、重庆、甘肃、青海、宁夏、新疆	河北、山西、内蒙古、辽宁、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南、湖北、广东、陕西、甘肃	北京、天津、吉林、黑龙江、上海、湖南、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南、青海、宁夏、新疆

4 三维系统耦合协调度空间相关性分析

4.1 全局莫兰指数分析

各省份碳排放—经济增长—生态环境三维系统耦合协调分布表现出明显的地区差异性，因此，通过计算全局莫兰指数，探究耦合协调度的空间相关性，如表 4 所示。结果表明，2005 年、2012 年和 2019 年的莫兰指数都大于 0，并且 P 值都小于 0.1，通过显著性检验，说明各省份存在显著的空间相关关系。

表 4 全局莫兰指数

模型参数	2005 年	2012 年	2019 年
Moran' sI	0.2747	0.1812	0.1695
z-score	1.8653	1.1507	1.1506
P-value	0.03	0.09	0.09

从 2005 年、2012 年和 2019 年的莫兰指数看出，我国各省份碳排放—经济增长—生态环境三维系统耦合协调度存在空间相关性，但空间相关性逐渐减弱。由于全局莫兰指数只能得出存在相关性，并不能得出具体的空间聚集性特征，为了进一步分析存在较强空间聚集性的省份，需要计算局部莫兰指数。

4.2 局部空间莫兰指数分析

由于全局空间莫兰指数不能反映局部的空间效应，因此通过局部莫兰指数可以说明哪些省份在空间上存在较强的空间聚集性。通过对局部莫兰指数的分析，得到 Lisa 聚集图。把我国各省份三维系统协调聚集

类型分为5类：“高一高”聚集区、“高一低”聚集区、“低一高”聚集区、“低一低”聚集区、“不显著”区域（表5）。

表5 各省份的空间聚集类型

空间聚集类型	经济高速增长期（2005年）	经济低迷期（2012年）	经济新常态期（2019年）
“高一高”聚集区	河北、山西、河南	河北、辽宁、山西、河南、山东	河北、山西、河南、山东、安徽
“高一低”聚集区	/	/	新疆
“低一高”聚集区	安徽	安徽	/
“低一低”聚集区	新疆、四川	新疆	/
“不显著”区域	其他省份	其他省份	其他省份

第一，新疆在观察期内，由“低一低”聚集变为“高一低”聚集。可能的原因是新疆地处我国西北部，经济增长综合水平高，产业结构也在不断优化，第三产业总量逐渐超过第二产业，碳排放水平得到一定的控制，生态环境优化，耦合协调度上升，三维系统协同发展水平上升。周围省份甘肃、青海的生态环境也较恶劣，经济发展综合水平高，经济发展与生态环境状况不协调，耦合协调度低。因此，由比较稳定的“低一低”聚集变为“高一低”聚集。这体现了西北地区生态环境水平与经济发展水平不相适应，应注重绿色低碳发展，促进区域协同发展，先进地区带动落后地区共同进步。

第二，河北、河南、山西形成稳定的“高一高”聚集格局。形成“高一高”聚集的优势在于各地区发展不再片面地追求GDP增速。劣势在于经济发展过程中各种能源开采量增加，碳排放量也不断增长。由此可以看出，我国应有效控制碳排放量，促进区域低碳减排合作。这与原嫒和孙欣彤^[15]的研究结论是一致的，共同表明我国仍处于碳排放与经济同步增长阶段，但是原嫒和孙欣彤^[15]并未考虑碳排放—经济增长—生态环境三维系统的融合发展，因此，本文对三维系统协调发展的研究，有利于我国碳排放即将达到峰值之际的政策制定和实施。

第三，大多数省份不存在聚集效应。其中可能的原因是影响碳排放的经济社会因素是复杂的，只考虑经济增长和生态环境对其的影响是片面的。或者可能的原因是部分省份碳排放和经济增长存在脱钩效应，三维系统耦合协调度低，对周围省份的影响小，因此不存在聚集效应。这个研究结论和Zheng等^[12]的研究结论是一致的，共同表明中国碳排放的社会经济驱动因素是复杂的，但是Zheng等^[12]并未考虑碳排放与经济增长脱钩的影响。因此，本文通过对碳排放的驱动因素及其相互作用的分析，对我国成功规划出一条既能实现经济持续增长又能减少碳排放的道路具有一定的借鉴作用。

5 主要结论与政策建议

5.1 主要结论

本文主要以2005—2019年我国30个省份为研究对象，通过分析碳排放—经济增长—生态环境三维系统的耦合协调度，采用全局莫兰指数和局部莫兰指数分析空间关联性，最终得出以下几点结论：

(1) 经济增长综合指数呈下降趋势，生态环境综合指数和碳排放综合指数上升，前者上升幅度小，后者上升幅度大。这与我国经济增速放缓、生态环境正在优化以及碳排放量上升的现状相符合。

(2) 从耦合协调度时空演化的角度来看, 耦合协调度的整体水平相对较低。从经济高速增长期到经济新常态期, 耦合协调度区域差距缩小, 耦合协调等级呈现先上升后下降、东高西低的特点。部分省份耦合协调度下降, 这可能与地区经济发展方式、产业结构、碳排放脱钩状况等有关。

(3) 由全局莫兰指数分析得出, 三维系统的耦合协调度是正相关的, 但空间相关性呈现下降的趋势。由局部莫兰指数可以看出, 新疆由“低—低”聚集变为“高一低”聚集, 这可能的原因是新疆产业结构、生态环境等出现优化, 耦合协调等级上升, 而周围省份三维系统的协调发展水平较低。河南、山西等省份形成稳定的“高一高”聚集格局, 在一定程度上说明, 这些地区的发展不再片面追求 GDP 增速。大多数省份不存在聚集效应, 其中可能的原因是影响碳排放的经济社会因素是复杂的, 只考虑经济增长和生态环境对其的影响是片面的, 或者可能的原因是部分省份碳排放和经济增长存在脱钩效应, 三维系统耦合协调度低, 对周围省份的影响小, 因此不存在聚集效应。

5.2 政策建议

(1) 调整能源结构, 促进区域低碳减排合作。政府层面, 应制定合理科学的能源消费目标, 把经济增长的生态后果放在优先位置, 切实维护经济与资源、环境的协同, 以实现可持续发展。应对清洁能源的生产和消费给予资金和技术支持, 以防生产成本和价格过高, 消费者难以接受, 阻碍新能源的发展。区域间碳排放水平和碳减排能力不同, 国家应重点支持碳排放水平高且碳减排能力低的地区, 给予资金支持和政策扶持。加强地区间的合作, 交流低碳减排的经验, 引进和学习新能源生产的技术。碳排放的社会经济驱动因素较复杂, 高度审慎地设计碳减排路径对我国经济发展具有重大意义。

(2) 促进区域协同发展, 带动落后地区共同进步。对于政策制定, 应因地制宜, 综合考虑经济增长速度和生态环境承载力之间的关系以及能源强度与碳排放的关系, 切忌一味地追求发展速度而忽略经济发展质量。通过产业协同发展, 跨经济部门进行合作, 可改变地区发展不平衡的现状。经济增长和持续的高水平技术投资对环境保护有实际作用, 可推动落后地区的高科技产业发展。

(3) 改善生态环境, 鼓励绿色低碳发展。南北方生态环境和能源禀赋不同, 应制定差异化发展路线。优化传统产业, 重视绿色低碳发展。优化产业结构, 鼓励支持高科技低排放的产业发展。并且, 政府应制定保护生态环境的相关政策及法规, 发挥各地区的优势, 扬长避短。加强对环保型企业的支持, 提升居民环保低碳和节约资源的意识, 推动生态平衡发展, 加强环境治理力度、重视生态环境优化。

参考文献:

[1] 习近平. 在二十国集团领导人利雅得峰会“守护地球”主题边会上的致辞[N]. 人民日报, 2020-11-23 (2).

[2] 黄润秋. 深入贯彻落实党的十九届五中全会精神协同推进生态环境高水平保护和经济高质量发展[J]. 环境保护, 2021 (Z1): 13-21.

[3] Feng J C, Tang S, Yu Z. Integrated development of economic growth, energy consumption, and environment protection from different regions: Based on city level [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 4268-4273.

[4] Andrée B P J, Chamorro A, Spencer P, et al. Revisiting the relation between economic growth

and the environment; a global assessment of deforestation, pollution and carbon emission [EB/OL]. [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.028>.

[5] Song Z G. Economic growth and carbon emissions: Estimation of a panel threshold model for the transition process in China [EB/OL]. [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123773>.

[6] Yao S J, Zhang S, Zhang X M. Renewable energy, carbon emission and economic growth: A revised environmental Kuznets Curve perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235: 1338-1352.

[7] 范慧平, 孟天醒, 文倩, 等. 河南省生态环境与经济增长关系的动态计量分析[J]. *河南农业大学学报*, 2015 (4) : 511-516.

[8] 周茜. 中国经济增长对环境质量的互动效应研究[J]. *统计与决策*, 2019 (1) : 150-154.

[9] Du Q, Zhou J, Pan T, et al. Relationship of carbon emissions and economic growth in China's construction industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220: 99-109.

[10] Salman M, Long X L, Dauda L, et al. The impact of institutional quality on economic growth and carbon emissions: Evidence from Indonesia, South Korea and Thailand [EB/OL]. [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118331>.

[11] Li L, Hong X F, Peng K. A spatial panel analysis of carbon emissions, economic growth and high-technology industry in China [J]. *Structural Change and Economic Dynamics*, 2019, 49: 83-92.

[12] Zheng J L, Mi Z F, Coffman D M, et al. The slowdown in China's carbon emissions growth in the new phase of economic development [J]. *One Earth*, 2019, 1: 240-253.

[13] Mardani A, Streimikiene D, Cavallaro F, et al. Carbon dioxide (CO₂) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017 [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 649: 31-49.

[14] Shahbaz M, Nasir M A, Hille E, et al. UK's net-zero carbon emissions target: Investigating the potential role of economic growth, financial development, and R&D expenditures based on historical data (1870-2017) [EB/OL]. [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120255>.

[15] 原嫻, 孙欣彤. 城市化、产业结构、能源消费、经济增长与碳排放的关联性分析——基于中国省份际收入水平异质性的实证研究[J]. *气候变化研究进展*, 2020 (6) : 738-747.

[16] 武娜, 沈镭, 钟帅, 张超. 晋陕蒙地区经济增长与碳排放时空耦合关系[J]. *经济地理*, 2019 (9) : 17-23.

- [17] 杨晓华, 胡怡文. 制造业碳排放和经济增长脱钩关系研究——基于速度和数量双重视角[J]. 生态经济, 2021 (4) : 13-18.
- [18] 吕康娟, 何云雪. 长三角城市群的经济集聚、技术进步与碳排放强度——基于空间计量和中介效应的实证研究[J]. 生态经济, 2021 (1) : 13-20.
- [19] Li J Y, Li S S. Energy investment, economic growth and carbon emissions in China—Empirical analysis based on spatial Durbin model[EB/OL]. [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111425>.
- [20] Nguyen T T, Pham T A T, Tram H T X. Role of information and communication technologies and innovation in driving carbon emissions and economic growth in selected G-20 countries [EB/OL]. [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110162>.
- [21] Vujović T, Petković Z, Pavlović M, et al. Economic growth based in carbon dioxide emission intensity [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 506: 179-185.
- [22] Akadiri S S, Alola A A, Olasehinde-Williams G, et al. The role of electricity consumption, globalization and economic growth in carbon dioxide emissions and its implications for environmental sustainability targets [EB/OL]. [2022-03-28]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134653>.
- [23] 吴鸣然, 赵敏. 能源消费、环境污染与经济增长的动态关系——基于中国 1990—2014 年时间序列数据[J]. 技术经济与管理研究, 2016 (12) : 25-29.
- [24] 傅强, 张小漫, 张亚军. 环境污染与经济增长、能源消费、FDI 和城镇化的双向耦合关系[J]. 华东经济管理, 2017 (1) : 83-91.
- [25] 关伟, 金一. 中国能源利用、经济增长演进对生态环境的脉冲响应[J]. 经济地理, 2020 (2) : 31-40.
- [26] 禹湘, 陈楠, 李曼琪. 中国低碳试点城市的碳排放特征与碳减排路径研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020 (7) : 1-9.
- [27] 杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J]. 经济问题, 2015 (3) : 115-119.
- [28] 田泽, 景晓栋, 肖钦文. 长江经济带碳排放—产业结构—区域创新耦合度及时空演化[J]. 华东经济管理, 2020 (2) : 10-17.
- [29] 杨阳, 唐晓岚, 贾艳艳, 等. 长江流域人口—土地—经济城镇化的时空耦合协调性与驱动因子分析[J]. 世界地理研究, 2021 (5) : 978-990.