

绿美河源背景下降碳减污扩绿增长的耦合协调研究

张帆

广东技术师范大学创新创业学院, 广东广州, 中国

【摘要】研究降碳、减污、扩绿与增长的耦合协调机制,对支撑广东省河源市经济社会发展全面绿色转型具有重要理论意义。基于2010-2023年数据构建河源“降碳-减污-扩绿-增长”四维系统,综合运用熵值法、指数法、耦合协调度模型等计算得到指标指数、子系统指数、系统综合指数、各子系统间耦合协调度。结果表明,河源经济社会发展全面绿色转型取得了显著成效,已从“降碳减污为主”稳定转向了“降碳减污扩绿增长并进”的可持续发展阶段。在该四维系统中,减污与降碳是初期的核心支撑,增长与扩绿则为后期的核心支撑。四个子系统间的耦合协调度随时间演进实现了从严重失调向良好协调的跨越,呈“快速提升-平台调整-持续提升-高位调整”的四阶段特征。系统耦合协调度在平台调整期的停滞和高位调整期的波动均与对政策实施调整的适应有关。

【关键词】绿美河源;“降碳-减污-扩绿-增长”系统;子系统;指数;耦合协调

【基金项目】河源市哲学社会科学规划项目(编号:HYSK23P58)

1.引言

协同推进降碳、减污、扩绿、增长是中国根据当前发展状况而提出的重大战略部署[1]。2022年12月,广东省开始深入推进“绿美广东生态建设”策略并强调,要突出绿美广东引领,高水平谋划推进生态文明建设,围绕品质提升抓绿化,围绕啃硬骨头抓治污,围绕结构优化抓“双碳”[2]。作为绿美广东生态建设综合改革试点的河源市,位于广东省东北部,在“十四五”时期实现生态环境质量全方位跃升[3]。在绿美河源生态建设背景下,研究降碳、减污、扩绿与增长的耦合协调发展机制,对支撑河源市经济社会发展全面绿色转型、绿美广东生态建设综合改革具有重要理论意义。

近年来,围绕城市降碳、减污、扩绿、增长的耦合协调发展问题,学界已开展了较为集中的研究。在理论内涵上,降碳、减污、扩绿、增长是新时代生态文明战略任务的基本内容,协同推进这四者是建设人与自然和谐共生现代化的关键[4];在实证研究上,以降碳、减污、扩绿、增长为准则层来构建评价指标体系,常采用熵值法和指数法评估评价价值权重和综合发展水平[5],常采

用耦合协调度模型测量降碳、减污、扩绿、增长的协同发展程度[6]。本研究拟先构建河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统的评价指标体系,然后运用熵值法和指数法计算指标权重和指数,最后采用耦合协调度模型测度河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统内各子系统间的耦合协调度,分析影响子系统间耦合协调度的原因,为河源市建设绿美广东生态建设综合改革试点提供政策理论依据。

2.河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统构建

2.1 评价指标体系构建

构建河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统评价指标体系,如表1所示。降碳为战略引领,通过控排温室气体来倒逼产业与能源结构的绿色转型,可选取能够表征绿色低碳生产、能源结构优化、绿色低碳生活这三方面状况的指标;减污为基础前提,改善、降低生态环境的质量、压力,可选取能够表征废水处理、生活垃圾处理、大气治理这三方面能力的指标;扩绿为重要支撑,提升自然碳汇、营造生态屏障,可选取能够表征城市绿化环境、城市绿色公共服务、城市生态涵养这三方面状况的指标;增长为核心目标,以新发展理念为指引来构建评价指标体系。

表1.河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统评价指标体系

子系统	子系统权重	评价指标	评价指标权重	评价指标选取依据	评价指标属性
降碳(C)	23.24%	C1: 单位工业增加值能耗(吨标准煤/万元)	5.41%	表征绿色低碳生产水平	负向
		C2: 单位GDP电耗(千瓦时/万元)	8.39%	表征能源结构优化水平	负向
		C3: 城市每万人拥有公共交通工具运营数(标台)	9.45%	表征绿色低碳生活水平	正向
减污	12.31%	W1: 城市污水处理率(%)	2.32%	表征废水处理能力	正向

(W)		W2: 城市生活垃圾无害化处理率 (%)	2.37%	表征生活垃圾处理能力	正向
		W3: 单位工业总产值颗粒物去除量 (吨/亿元)	7.62%	表征大气治理能力	正向
扩绿 (G)	29.89%	G1: 建成区绿化覆盖面积 (平方公里)	7.29%	表征绿化环境状况	正向
		G2: 城市人均公园绿地面积 (平方米)	14.78%	表征绿色公共服务状况	正向
		G3: 年末实有封山育林面积 (万公顷)	7.82%	表征生态涵养状况	正向
增长 (D)	34.57%	D1: 工业企业 R&D 经费 (亿元)	9.23%	表征创新资源投入状况	正向
		D2: 卫生机构床位数 (张)	7.52%	表征公共资源共享状况	正向
		D3: 单位 GDP 能耗 (吨标准煤/万元)	5.09%	表征绿色低碳发展水平	负向
		D4: 进出口总额 (亿美元)	8.12%	表征对外开放水平	正向
		D5: 城乡居民收入差距	4.61%	表征城乡协调发展水平	负向

2.2 数据来源

本研究的各项数据主要来源于广东省统计局门户网站发布的历年《广东统计年鉴》，河源市人民政府门户网站发布的历年《河源统计年鉴》《河源市国民经济和社会发展统计公报》，以上数据的时间跨度为 2010-2023 年。

3.研究方法

3.1 熵值法

采用熵值法来计算河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下的子系统权重和评价指标权重，进而计算指标指数、子系统指数和系统综合指数，计算步骤如下[7]:

(1) 原始数据的标准化处理

正向指标:

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{j \min}}{x_{j \max} - x_{j \min}} \tag{1}$$

负向指标:

$$Z_{ij} = \frac{x_{j \max} - x_{ij}}{x_{j \max} - x_{j \min}} \tag{2}$$

式中，i 指样本，j 指指标， $x_{j \max}$ 指第 j 项指标的最大值， $x_{j \min}$ 指第 j 项指标的最小值。

(2) 指标权重的计算

$$P_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \tag{3}$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \tag{4}$$

$$W_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^m (1 - E_j)} \tag{5}$$

式中， P_{ij} 为指标下 i 样本所占比重， E_j 为 j 指标的信息熵，n 为样本数， W_j 为 j 指标的权重，m 为指标数。计算得到子系统权重

和评价指标权重，如表 1 所示。

(3) 指标指数 U_j 、子系统指数 U_{ir} 和综合指数 U_i

$$U_j = W_j \cdot Z_{ij} \tag{6}$$

$$U_{ir} = \sum_{j \in r} W_j \cdot Z_{ij} \tag{7}$$

$$U_i = \sum_{r=1}^4 U_{ir} \tag{8}$$

式中， U_j 为第 i 个样本下 j 指标的指数， U_{ir} 为第 i 个样本在第 r 个子系统的指数， $j \in r$ 表示属于第 r 个子系统的所有指标， U_i 为系统综合指数。

3.2 耦合协调度模型

采用耦合协调度模型来计算河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下四个子系统间、任意两个子系统间、任意三个子系统间的耦合协调度，计算公式如下[8]:

(1) 子系统间的耦合度 C_t

$$C_t = \left[\frac{\prod_{i=1}^t U_i}{(\sum_{i=1}^t U_i)^t} \right]^{\frac{1}{t}} \tag{9}$$

式中，t 为子系统的个数 (t 可取 2, 3 或 4)。

(2) 子系统间的通用综合指数 T_t

$$T_t = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t U_i \tag{10}$$

式中，视降碳、减污、扩绿、增长等子系统的协同地位均等，权重均取 $\frac{1}{t}$ 。

(3) 子系统间的耦合协调度 D_t

$$D_t = \sqrt{C_t \times T_t} \tag{11}$$

D_t 越大，子系统间的耦合协调水平越高。参考文献将耦合协调度划分为三大类、十等级[9]，如表 2 所示。

表 2.耦合协调度 D_t 等级划分标准

D_t 范围	(0.0, 0.1)	[0.1, 0.2)	[0.2, 0.3)	[0.3, 0.4)	[0.4, 0.5)	[0.5, 0.6)	[0.6, 0.7)	[0.7, 0.8)	[0.8, 0.9)	[0.9, 1.0)
D_t 类别	失调				临界		协调			
D_t 等级	极度失调	严重失调	中度失调	轻度失调	濒临失调	勉强协调	初级协调	中级协调	良好协调	优质协调

4.结果与讨论

4.1 河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统综合指数的时间分布特征

河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统综合指

数的时间分布如图 1 所示。2010-2023 年，该四维系统综合指数整体呈上升趋势，2023 年 (0.780) 是 2010 年 (0.080) 的 9.75 倍。这表明近年来，河源经济社会发展全面绿色转

型取得了显著成效。

值得注意的是，系统综合指数在 2010-2019 年期间持续快速增长，在 2020 年经历了短暂的下降后，于 2021 年快速上升并于 2021-2023 年保持较稳定的数值。2019-2021 年，系统指标指数的时间分布如图 2 所示。2020 年系统综合指数的下降是 C3、W3、G2、D4、W2、C2 等指标共同作用的结果，G2、D1、C3、D4、W3、D2、G1、G3、D5、W1 等指标则贡献了 2021 年系统综合指数的上升，即 C3、W3、G2、D4 等四个指标是导致系统综合指数波动的关键指标。这表明绿色公共服务供给、大气治理、绿色低碳生活、对外开放等水平的提升是影响系统综合指数增长持续性的关键。

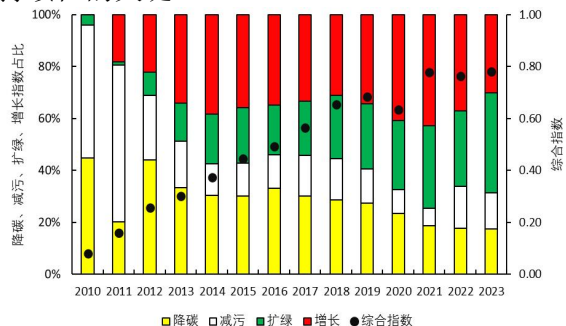


图 1.河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统综合指数及子系统比重的时间分布（2010-2023 年）

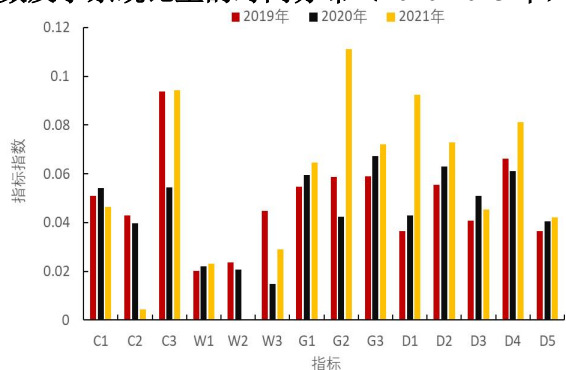


图 2.河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统指标指数的时间分布（2019-2021 年）

4.2 河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下各子系统指数所占比重的时间分布特征

河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下各子系统指数所占比重的时间分布如图 1 所示。降碳子系统比重在 2010 年高达 44.84%，是支撑四维系统的核心支撑；这一比重在 2010-2023 年波动下行并在 2021-2023 年趋于稳定，降至 2023 年的 17.30%。这表明该比重呈“高位波动下降、逐步趋稳”的演变特征，降碳工作从早期的规模性发展阶段，逐步进入常态化攻坚阶段。

减污子系统比重呈“先高后低、阶段性回升”的演变特征。该比重在 2010-2011 年处于高位，2011 年达 60.27%，与降碳同为四维系统初期的核心支撑；于 2011-2021 年呈大幅下降趋势，在 2021 年降至 6.71%，这可能与传统减排空间收窄、污染治理进入深水区有关；该比重于 2022 年和 2023 年升至 16.07% 和 14.13% 并趋于稳定，这可能与新要求下减污工作再度调整有关。

在观测期内，扩绿子系统比重从 2010 年的 4.14% 快速攀升至 2023 年的 38.31%，成为四个子系统中增长趋势最稳定、占比提升最显著的维度。这表明该比重呈“稳步趋升、成为核心支撑”的演变特征，城市绿化环境改善、绿色公共服务提升、生态涵养强化等扩绿举措逐渐成为提升系统综合指数的关键因子，筑牢了城市生态屏障。

增长子系统比重从 2010 年的极低值快速增至 2013 年的 34.09% 后，在 2013-2023 年期间高位保持在 30.25%-42.86%，呈“快速跃升、高位趋稳”的演变特征。这表明增长与扩绿同为四维系统后期的核心支撑，河源高质量发展与扩绿建设力度实现了同步增强。

2022-2023 年，四个子系统的比重已趋于稳定，且均衡性比 2013 年显著增强，这表明随着绿美河源生态建设的深入推进，河源绿色转型已从“降碳减污为主”稳定转向了“降碳减污扩绿增长并进”的可持续发展阶段。

4.3 河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下任意两个子系统间的耦合协调度

河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下任意两个子系统间耦合协调度的时间分布如图 3 所示。2013-2023 年，六组耦合协调度曲线均实现了从严重失调向良好协调或优质协调的跨越，呈现“在分化中趋同”的特征，演化路径主要分两种情况。

“扩绿-增长”“降碳-扩绿”“降碳-增长”这三个体系的演化路径较为相似，呈“稳步抬升-高位波动”的特征。“扩绿-增长”的耦合协调度持续提升至 2020 年的良好协调以后，后于 2021-2023 年在良好协调或优质协调波动。“降碳-扩绿”的耦合协调度则在 2018 年达到良好协调后持续在良好协调的区间段波动。“降碳-增长”在六组曲线中最先于 2016 年达到良好协调水平，后持续在良好协调或优质协调间波动。

“降碳-减污”“减污-扩绿”“减污-增长”等减污相关组合则都从 2010 年的严重失调波动

上升至 2022-2023 年的优质协调或良好协调水平，均表现为“低位起步、快速提升、阶段性波动”的特征，减污相关组合是影响四维系统整体协调发展水平的关键点。在耦合协调度的波动上升期间，“减污-增长”体系经历了 2012-2014 年、2019-2021 年这两个重要的逐年下降期，“减污-扩绿”“降碳-减污”体系均经历了 2020-2021 年这个重要的下降期，这三个体系的耦合协调度均在 2020 年骤降、在 2022 年骤升，这表明减污与其它子系统间的协同发展受政策影响显著。

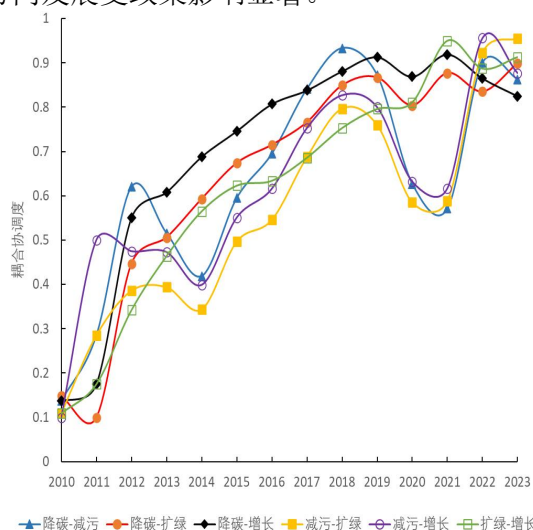


图 3.河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下任意两个子系统间耦合协调度（2010-2023 年）

4.4 河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下任意三个子系统间的耦合协调度

河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下任意三个子系统间耦合协调度的时间分布如图 4 所示。在观测期内，四组曲线的耦合协调度呈波动上升趋势，均实现了从严重失调向良好协调或优质协调的跨越。“降碳-减污-扩绿”“降碳-减污-增长”“减污-扩绿-增长”这三个体系的时间演化路径相似，相应的三组曲线除了均在 2014 年出现了“波谷”外，还分别在 2020 年、2021 年、2020 年出现了“波谷”。“降碳-扩绿-增长”体系对应曲线的耦合协调度增长趋势的稳健性更好，未在 2014 年、但在 2020 年出现了“波谷”。扩绿相关组合的三组曲线均在 2020 年出现“波谷”，这很可能与河源市于 2020 年印发实施的《广东省河源市国家森林城市建设总体规划（2019-2028）》有关[10]，扩绿工作的结构性优化调整会影响其与其它三个子系统间的耦合协调性。减污相关组合的三组曲线均在 2014 年出现“波谷”，则很可能与中国于 2013 年 9 月印发实施的《大

气污染防治行动计划》（简称“大气十条”）有关[11]，从而影响治污与其它三个子系统间的耦合协调性。2020 年，河源市污染防治“三大战役”领导小组发布当年的第一号令——《关于全市打好打赢污染防治攻坚战命令》[12]，“降碳-减污-扩绿”“减污-扩绿-增长”相应曲线出现“波谷”的时间比“降碳-减污-增长”早一年，可能与当年减污与扩绿政策叠加效应导致的大的工作结构调整有关，这在 4.3 节中“减污-扩绿”体系在 2020 年六组体系的耦合协调度中处于最低值得到了印证。

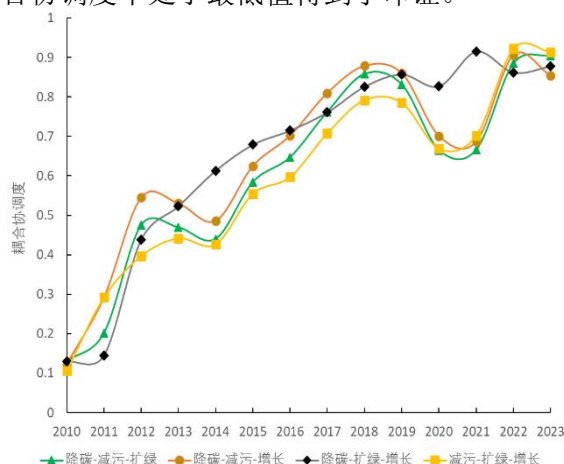


图 4.河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统下任意三个子系统间耦合协调度（2010-2023 年）

4.5 河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统的耦合协调度

河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统耦合协调度的时间分布如图 5 所示。四个子系统间的耦合协调度随时间演进实现了从严重失调向良好协调的跨越，呈“快速提升-平台调整-持续提升-高位调整”的四阶段特征。在快速提升期（2010-2012 年），系统耦合协调度从 2010 年的严重失调跃升至 2012 年的濒临失调（临界状态）。2013-2014 年，系统耦合协调度仍处于濒临失调状态，变化不明显；图 1 表明，该时期处于政策实施调整期，四个子系统比重出现了重大改变。2015-2018 年，系统耦合协调度从初级协调提升至 2018 年的良好协调，在图 1 所示的结构相对稳定的四个子系统作用下，四维系统的耦合协调性得到了不断增强。在高位调整期（2019-2023 年），系统耦合协调度经历了“先下降再提升后趋于稳定”的演化；结合 4.3 节、4.4 节的分析可知，减污、扩绿政策叠加引起的工作结构调整和再适应过程导致了系统耦合协调度在 2019-2021 年出现了波动；在 2022-2023 年，系统耦合协调度趋于稳定并处于良好协调水平。

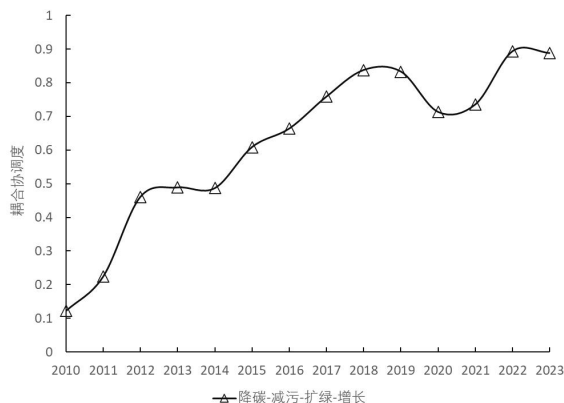


图 5.河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统耦合协调度 (2010-2023 年)

5. 结论

2010-2023 年, 河源经济社会发展全面绿色转型取得了显著成效, 已从“降碳减污为主”稳定转向了“降碳减污扩绿增长并进”的可持续发展阶段。绿色公共服务供给、大气治理、绿色低碳生活、对外开放等水平的提升是影响河源“降碳-减污-扩绿-增长”系统综合指数增长持续性的关键。在该四维系统中, 减污与降碳是初期的核心支撑, 增长与扩绿则为后期的核心支撑。四个子系统间的耦合协调度随时间演进实现了从严重失调向良好协调的跨越, 呈“快速提升-平台调整-持续提升-高位调整”的四阶段特征。系统耦合协调度在平台调整期的停滞与对政策实施调整的适应有关。减污相关组合是影响四维系统整体协调发展水平的关键点。减污、扩绿政策叠加引起的工作结构调整和再适应过程导致了系统耦合协调度在 2019-2021 年出现了波动。

参考文献

[1] 郑辉, 谷瑞娜. 长江经济带减污降碳扩绿增长协同效应与影响因素分析[J]. 长江流域

资源与环境, 2025, 34 (12): 2795-2805.

[2] 琳琳. 绿美广东引领: 为广东高质量发展“筑新板”[J]. 人民之声, 2023, (1): 36-39.

[3] 河源市生态环境局. 河源: 绿美建设绘新卷生态答卷亮底色[J]. 环境, 2026, (1): 29-31.

[4] 庄贵阳, 王思博. 协同推进降碳减污扩绿增长: 内涵、挑战及应对[J]. 城市与环境研究, 2023, (02): 45-55.

[5] 崔强, 李群, 殷凤朝. 京津冀城市群降碳-减污-扩绿-增长耦合协调度测算及驱动机制[J]. 数学的实践与认识, 2026, 56 (3): 133-144.

[6] 刘亦文, 李桢泉. 中国降碳减污扩绿增长耦合协调的时空演化及组态提升路径[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40 (2): 53-63.

[7] 赵伟, 李香英, 王智勇. 中国粮食产业链现代化发展水平测度及影响因素分析[J]. 统计与决策, 2025, 41 (23): 102-107.

[8] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36 (03): 793-810.

[9] 谢倩, 徐文. 我国护理人力资源配置与经济发展水平耦合协调及空间关系[J]. 护理研究, 2026, 40 (07): 1114-1118.

[10] 河源市创森办, 河源市林业局. 同绘绿色画卷呵护万绿河源[J]. 国土绿化, 2023, (6): 16-21.

[11] 曹倩雯. 环境规制与企业税负——基于《大气污染防治行动计划》的研究[J]. 财政科学, 2022, (11): 133-145.

[12] 张晓芒. 黄赞: 奋斗书写巾帼志服务基层展风采[J]. 环境, 2023, (5): 32-34.