

中国水资源消耗与产业结构升级的动态解耦关系

赵炳南^{1,2}, 栗晓玲^{1,2}, 褚江东^{1,2}, 张 凯^{1,2}, 王太山^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院)

摘要:以除港澳台外的中国 31 个省(区、市)为研究对象,借助解耦指数重映射、核密度估计、Dagum 基尼系数分解与空间马尔可夫链等方法,系统评估了 2003—2023 年中国区域尺度解耦关系的阶段性特征、空间差异及动态演变机制。结果表明:中国整体解耦水平稳步提升,其中东部地区长期维持高水平解耦状态,中西部地区呈现阶段性改善与结构波动并存的格局;各阶段解耦指数整体呈上升趋势,区域协调性持续增强,但 2021—2023 年出现了一定程度的回摆;区域间差异是解耦不平衡的主要影响因素,地区发展不均衡是核心问题,区域内部协调性虽随着时间逐步改善,但后期极化趋势有所加剧;2021 年以来省际解耦指数呈现显著空间集聚特征,东部地区形成高解耦水平的高-高集聚区,西部部分省(区、市)则形成低解耦水平的低-低集聚区;区域解耦状态具有明显的空间依赖性和邻域溢出效应,邻近地区的高解耦状态可显著提升本地向优跃迁的概率,而不利状态亦存在空间扩散风险。

关键词:水资源消耗;产业结构;Tapio 解耦模型;Dagum 基尼系数;空间马尔可夫链

Dynamic decoupling relationship between water resources consumption and industrial structure upgrading in China//Zhao Bingnan^{1,2}, Su Xiaoling^{1,2}, Chu Jiangdong^{1,2}, Zhang Kai^{1,2}, Wang Taishan^{1,2} (1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University)

Abstract: Taking China's 31 provincial-level administrative regions, excluding Hongkong, Macao and Taiwan as research objects, this paper systematically evaluates the phased characteristics, regional disparities and dynamic evolution mechanisms of the regional-scale decoupling relationship in China from 2003 to 2023 by employing methods including remapping of decoupling index, kernel density estimation, Dagum Gini coefficient decomposition and spatial Markov chain. The results indicate that China's overall decoupling level has improved steadily, among which eastern region has maintained a high-level decoupling state for a long time, and central and western regions present a pattern of coexisting phased improvement and structural fluctuation. Decoupling index shows an overall upward trend in each period with continuously enhanced regional coordination, but a certain degree of reversal has occurred from 2021 to 2023. Interregional disparity is dominant contributor to unbalanced decoupling development, and unbalanced regional development is core issue. Although the internal coordination of each region has gradually improved over time, polarization trend has intensified in the later period. Since 2021, provincial decoupling index has exhibited significant spatial agglomeration characteristics: eastern region has formed a high-high agglomeration area with high decoupling level, while some western provinces have formed a low-low agglomeration area with low decoupling level. The regional decoupling state presents obvious spatial dependence and neighborhood spillover effects. The high decoupling state of neighboring regions can significantly increase the probability of local upward transition, while the adverse state also poses the risk of spatial diffusion.

Key words: water resources consumption; industrial structure; Tapio decoupling model; Dagum Gini coefficient; spatial Markov chain

联合国在《2030 年可持续发展议程》^[1]中明确提出,在水资源日益紧缺的背景下,应全面提升用水效率,加强水生态系统的保护与恢复。作为全球最大的发展中国家,中国面临严峻的水资源短缺问题,

人均水资源量仅为世界平均水平的 1/4,且水资源时空分布高度不均^[2]。随着城市化进程快速推进与产业结构持续优化,水资源供需矛盾日益加剧,已成为制约中国经济高质量发展与区域协调升级的重

基金项目:陕西省水利科技计划项目(2024slkj-14)

作者简介:赵炳南(2001—),男,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:zbn1120877235@nwfau.edu.cn

通信作者:栗晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:xiaolingsu@nwfau.edu.cn

要瓶颈^[3-4]。近年来,国家不断强化水资源管理制度建设,推动水资源与经济社会发展的协同优化,引导产业结构向节水型、高附加值方向转型,以实现资源高效利用与经济绿色转型发展协同推进的目标^[5-7]。在此背景下,系统研究水资源消耗与产业结构升级之间的解耦关系,对于揭示资源约束下经济转型的动力机制、探索区域水资源和产业结构的协同优化路径,具有重要的理论意义与实践价值。

近年来,解耦理论被广泛用于探讨资源环境压力与经济发展的协调关系,相关研究多采用 Tapio 解耦模型、对数均值迪氏分解(LMDI)等^[8-9]方法识别与量化解耦关系。例如,Sun 等^[10]基于省域产业结构与碳排放解耦模型,分析了二者的空间协同效应;Gao^[11]运用 Tapio 指数探讨了农业碳排放与经济增长的响应关系。随着研究的不断深入,解耦理论的应用逐步拓展至水资源领域。例如,张丽娜等^[12]采用 Tapio 解耦模型分析了流域水资源消耗结构与产业结构高级化的适配机制;Wang 等^[13]结合 Tapio 解耦模型与 LMDI 方法,评估了中国及各省(区、市)用水与经济增长的解耦状态。受水网格局、跨区域调水与流域协同发展等因素影响,省际水资源消耗表现出明显的空间耦合特征^[14-15],但现有研究多聚焦于碳排放、能源效率等领域^[16],忽视了水资源消耗与产业结构关系中的空间交互机制。例如,Zhang 等^[17]结合熵权法、空间自相关与马尔可夫链方法,探讨绿色金融与经济弹性的耦合演化过程;Wang 等^[18]则基于 slacks 的超效率模型与空间马尔可夫链方法,分析了城市碳排放绩效的时空演变特征。相较而言,水资源解耦过程中的空间联动特征与邻域溢出效应仍有待深入揭示。此外,Tapio 解耦模型虽可通过解耦指数判断解耦状态,但难以精确区分不同类型解耦之间的内在差异,如强解耦与强负解耦状态虽增长或下降趋势相同,但其反映的解耦机制截然不同,若仅依赖弹性系数进行动态分析可能会误判解耦状态的演变规律与区域分异特征。

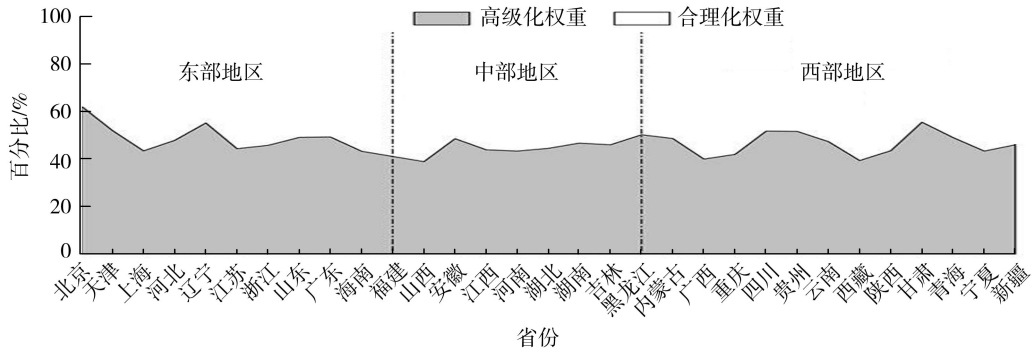


图1 产业结构升级指数的权重分配比例

Fig.1 Weight distribution ratio of industrial structure upgrading index

中国幅员辽阔,地形复杂多样,导致各地区在水资源禀赋、气候条件及经济发展路径上存在显著差异。为此,本文以中国 31 个省级行政区为研究对象(因台湾、香港和澳门地区数据缺失,未纳入分析范围),选取的指标包括各省(区、市)的总用水量、三次产业的增加值和就业人数,数据主要来源于 2003—2023 年《中国统计年鉴》和《中国水资源公报》,构建水资源消耗与产业结构升级的动态解耦分析框架,综合运用解耦指数重映射、核密度估计、Dagum 基尼系数分解与空间马尔可夫链等方法,系统评估 2003—2023 年区域水资源消耗与产业结构升级解耦关系的演化态势、空间差异与动态转移特征,进而识别其关键影响机制,为实现水资源节约利用与产业结构协同优化提供政策参考。

1 研究方法

1.1 解耦模型构建

1.1.1 产业结构升级指数

产业结构升级指数由两部分构成:①产业结构合理化指数,一般采用泰尔指数(Theil index)衡量,用以反映三次产业间资源配置的协调程度;②产业结构高级化指数,通过第三产业增加值与第二产业增加值之比进行度量^[2],用以体现产业向高附加值、服务型方向升级的趋势。

为综合反映区域产业结构演变水平,本文采用熵权法对产业结构合理化指数与产业结构高级化指数进行加权处理,得到产业结构升级指数。通过客观赋权形成综合测度指标,以反映区域产业结构在横向配置优化(合理化)与纵向层级演进(高级化)两个维度的协同演进过程,刻画区域产业系统整体的结构升级路径。相较于单一维度指标,产业结构升级指数能够识别比例协调、但层级未升或片面升级导致结构失衡等问题,其权重分配比例如图 1 所示(图中高级化权重与合理化权重占比之和为 1)。

1.1.2 解耦模型

解耦模型最早应用于物理学领域,后由经济合作与发展组织^[19]引入经济学范畴,用于描述经济增长与资源环境之间的关系。当资源消耗增速低于经济增速时,可判定二者呈解耦状态。为了更有效地反映动态过程中解耦状态的不确定性,提升趋势预测的准确性,Tapio^[16]在传统解耦模型的基础上引入增量数据,称为 Tapio 解耦模型。本文根据水资源消耗与产业结构升级指数变化率的正负属性及解耦指数,将解耦状态划分为 8 种类型,见表 1。

表 1 解耦状态分类

Table 1 Classification of decoupling states				
解耦状态	具体类型	水资源消耗变化率趋势	产业结构升级指数变化率趋势	解耦指数
负解耦	扩张型负解耦	增长趋势	增长趋势	>1.2
	强负解耦	增长趋势	下降趋势	<0
	弱负解耦	下降趋势	下降趋势	0~<0.8
解耦	弱解耦	增长趋势	增长趋势	0~<0.8
	强解耦	下降趋势	增长趋势	<0
	衰退型解耦	下降趋势	下降趋势	>1.2
耦合	扩张型耦合	增长趋势	增长趋势	0.8~1.2
	衰退型耦合	下降趋势	下降趋势	0.8~1.2

1.1.3 改进的解耦指数重定义

为提升解耦状态识别的准确性与后续动态分析的可操作性,进一步改进解耦指数:构建数值映射关系,将原始解耦指数转换至特定数值区间,实现解耦状态与数值区间的一一对应,从而为解耦过程的动态演变分析提供更明确的判别基础。解耦指数转换公式为:

$$D = \left[P \pm \lambda \frac{\ln(|d| + 1) - \ln(|d_{\min}| + 1)}{\ln(|d_{\max}| + 1) - \ln(|d_{\min}| + 1)} \right] \times 10 \tag{1}$$

式中: D 为改进的解耦指数; d 为原始解耦指数; P 为基准优先级值,依据各类解耦状态的相对优劣设定,扩张型负解耦、强负解耦、弱负解耦、弱解耦、强解耦、衰退型解耦、扩张型耦合、衰退型耦合的取值分别确定为 0、-3、-2、2、3、-1、0、-1; λ 为缩放因子,本文取 1。由于原始解耦指数值差异较大、分布呈偏态特征,而对数函数可缩小不同解耦状态内部数值的差异,避免信息丢失并提升指标的可比性,因此采用自然对数函数对原始解耦指数进行数值压缩。经转换后, D 被标准化映射到 $[-40,40]$,每 10 个单位区间对应一种解耦类型。例如,数值在 $[30,40]$ 代表强解耦,而在 $[-40,-30]$ 则对应强负解耦。

1.2 核密度估计

核密度估计是一种常用的非参数统计方法,广泛应用于区域变量不平衡分布特征的分析。采用核密度估计法对解耦指数的概率密度分布进行分析。

该方法不依赖于任何先验分布假设,可直接基于观测样本构建概率密度函数,进而揭示研究对象在空间或时间上的分布状态及其演化趋势^[20-21]。

1.3 Dagum 基尼系数

Dagum 基尼系数是一种可分解的区域差异度量方法,常用于衡量区域间收入、效率、资源配置等适配水平的差异结构及其来源^[22]。与传统基尼系数不同,Dagum 基尼系数(G_l)可将总体差异进一步细分为区域内差异(G_w)、区域间差异(G_{nb})以及由区域交叉重叠导致的高变密度项(G_l) 3 部分。

采用 G_l 对区域间解耦指数差异进行分析。根据各地区内部自然条件与经济社会发展特征的相似性,以及区域间的差异性,将 31 个省(区、市)划分为 8 个经济区,作为分析区域适配度空间差异的基础单元,具体划分如下:①东北地区,包括辽宁、吉林、黑龙江;②华北沿海地区,包括北京、天津、河北、山东;③华东沿海地区,包括上海、江苏、浙江;④长江中游地区,包括安徽、江西、湖北、湖南;⑤黄河中游地区,包括山西、内蒙古、河南、陕西;⑥华南沿海地区,包括福建、广东、海南;⑦西南地区,包括广西、重庆、四川、贵州、云南、西藏;⑧西北地区,包括甘肃、青海、宁夏、新疆。

1.4 空间自相关模型

为揭示各省(区、市)水资源消耗和产业结构升级指数解耦指数的空间相关性特征,引入莫兰指数开展空间自相关分析。莫兰指数是空间计量经济学中常用的空间分析工具,主要包括全局莫兰指数与局部莫兰指数,可有效识别变量在空间上的集聚、扩散或随机分布特征,广泛应用于资源配置、区域发展不平衡性等研究领域^[23-24]。

a. 全局莫兰指数。全局莫兰指数 I 用于度量某一变量在研究区范围内的总体空间相关性^[25]。采用基于空间邻接关系构建的 0~1 邻接矩阵,即当省(区、市) i 和 j 相邻时, $w_{ij} = 1$,反之则为 0; n 为区域总数; I 值域为 $[-1,1]$, $I > 0$ 表示正相关,即相邻省(区、市)的解耦指数表现出显著的相似性;当 $I < 0$ 时,表明存在负相关,即相邻省(区、市)解耦指数差异较大; I 越趋近于 1,空间集聚程度越强,解耦状态分布越集中,反之则空间异质性增强。

b. 局部莫兰指数。局部莫兰指数用来探究局部空间异质性和不均衡性,进而识别高-高、低-低、高-低、低-高等空间聚集或离散模式。

采用局部莫兰指数构建 LISA 聚类图,以识别区域水资源消耗量和产业结构升级指数解耦指数的空间集聚类型,进而揭示其空间相关强度及区域间的空间异质性特征。

1.5 空间马尔可夫链

核密度估计虽可用于分析变量分布的演化趋势,但难以揭示其内部状态转移过程,亦无法有效表征区域间的空间异质性^[26]。

空间马尔可夫链是在传统马尔可夫链的基础上引入空间滞后效应,即在传统状态转移分析的基础上,结合区域邻接关系,通过引入空间权重矩阵 W 将其细化为多个基于空间邻接条件下的状态转移矩阵,从而更精确地反映区域间的空间溢出效应与互动机制。为便于识别演化趋势并提升模型计算的稳定性,基于由高到低的解耦水平,将 8 种解耦状态类型归为 4 个大类:①解耦区,包括强解耦、弱解耦,表征水资源消耗与产业结构升级的协调优化;②过渡区,包括衰退型解耦、扩张型耦合,表现为阶段性调整但协同性不足;③失衡区,包括扩张型负解耦、衰退型耦合,存在显著的资源-结构失衡特征;④负解耦区,包括弱负解耦、强负解耦,表现为资源过度消耗或产业结构退化。

2 结果与分析

2.1 解耦类型空间演变特征及机制

为系统揭示产业结构升级与水资源消耗解耦关系在不同经济发展阶段的空间演变特征,以国家“五年规划”为时间划分依据,分析各阶段解耦状态类型的空间分布格局与驱动机制。图 2 为 2013—2023 年全国解耦状态类型区域演化分布(本文地图均基于审图号为 GS(2024)0650 号的标准地图)。

2003—2005 年(图 2(a))全国多数省(区、市)表现出强负解耦特征,反映出经济发展初期水资源

利用方式较为粗放。以第二产业为核心的高耗水、低附加值产业在多数省(区、市)占据主导,水资源利用效率偏低,解耦水平整体较弱,中西部地区尤为突出,呈现资源环境压力积聚与产业结构调整滞缓的双重特征。相较之下,东南沿海经济基础较好地区依托先期技术引进与产业结构转型优势,单位产值水耗相对较低,逐步向弱解耦状态演进,体现了不同地区在产业起点、要素禀赋与资源管理能力上的差异。

2006—2010 年(图 2(b))国家层面全面推进节水型社会建设,加大了对水资源利用效率的政策干预与基础设施投入,引导地方政府推广节水灌溉、中水回用、工业循环用水等节水技术。在此背景下,全国解耦状态类型结构发生显著调整,扩张型负解耦和衰退型耦合等过渡类型占比显著增加,成为解耦状态从负向向正向演进的关键中间环节。陕西、四川等高耗水省份逐步脱离极端负解耦状态,表明节水政策实施初见成效,但受限于发展路径依赖与区域经济结构惯性,产业结构转型进程仍显缓慢,解耦机制尚以技术导向为主,效率提升领先于结构优化,整体解耦水平提升有限。

2011 年国务院发布《实行最严格水资源管理制度意见》,正式确立“用水总量控制、用水效率控制、水功能区限制纳污”三条红线,标志着中国水资源治理由政策引导向制度约束的刚性阶段转变^[27]。在此背景下,2011—2015 年(图 2(c))全国解耦格局实现显著跃迁,浙江、江苏等东部省份率先形成规模化解耦集群,重庆、贵州等西南省份也实现了解耦跃迁。第三产业快速发展,服务业占比持续提升,高技术制造业替代传统高耗水产业趋势明显增强,

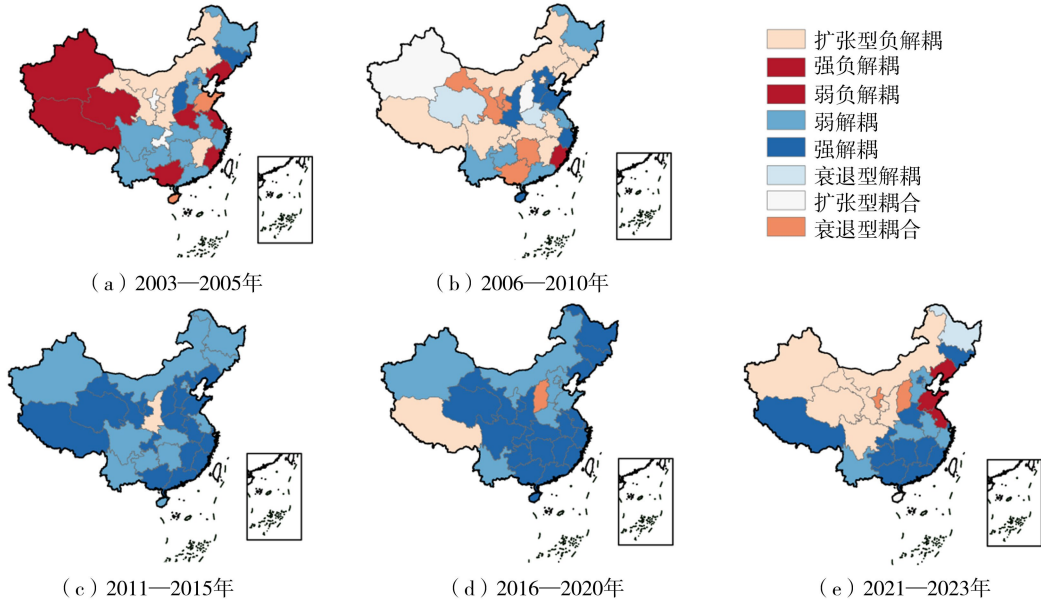


图 2 2013—2023 全国解耦状态类型区域演化分布

Fig. 2 Regional evolution and distribution of national decoupling types from 2013 to 2023

带动单位产值水耗大幅下降。同时,绿色工艺与节水设施的广泛应用强化了技术驱动作用,政策压力与产业结构调整实现初步耦合,构建起系统性解耦机制。“节水优先”被确立为国家治水基本方针,治水理念由“增供导向”转向“需求控制-效率提升”导向。

2016—2020 年(图 2(d),“十三五”规划期间)绿色发展理念持续深化,“节水优先、系统治理、空间均衡、两手发力”治水方针的落地,推动了解耦关系由被动响应向内生优化转化^[28]。解耦状态类型在全国范围内趋于稳定,正向解耦占比显著提升。中西部地区(四川、甘肃、广西、云南等)依托国家生态补偿、节水投资与产业引导等政策支持,实现由过渡区向解耦区的转变,标志着结构调整、技术进步与政策执行的多元协同机制初步建成。然而,河南、海南等部分省(区、市)由于高耗水产业仍占经济主导地位,未能有效突破产业结构路径依赖,依然处于耦合状态,表明区域经济绿色转型内生动力仍需加强。

受新冠疫情后经济快速复苏与“双碳”目标提前实施的双重影响,2021—2023 年(图 2(e))解耦关系呈现阶段性波动特征。新疆、青海、宁夏、四川等西部地区资源型与能源型省(区、市)在承担国家能源安全保障任务的背景下,高耗水项目集中上马,导致解耦效率短期退化。与此同时,天津、江苏、山东等部分东部经济大省(区、市)受产业结构优化趋近临界点、单位水耗边际改善空间减弱、刚性用水需求反弹等因素影响,再度呈现扩张型负解耦状态。表明在外部冲击与内部结构惯性的共同作用下,区域解耦机制仍面临阶段脆弱性。尽管如此,东部沿海省(区、市)依托成熟的绿色技术体系与治理能力,持续保持正解耦趋势,“十四五”规划提出的“以水定域、以水定地、以水定人、以水定产”理念进一步强化了水资源红线约束^[29]。

总体而言,2003—2023 年产业结构升级指数与水资源消耗间解耦关系的演化,不仅呈现空间格局的阶段性重构特征,更揭示了解耦机制的资源粗放利用-政策干预引导-技术节水推动-结构协同优化动

态演进路径,各阶段政策执行力、技术渗透率与结构调整幅度的协同耦合程度,是驱动区域解耦趋势转变的核心要素。

2.2 基于核密度估计解耦指数概率密度分布特征

图 3 为基于核密度估计法绘制的 2003—2023 年中国 31 个省(区、市)解耦指数概率密度分布。为揭示各时期解耦状态的整体水平、区域差异及集中程度的动态变化,从分布位置、形态结构与峰度特征 3 个维度进行分析。

a. 全国层面:解耦指数整体呈右移趋势,峰值逐步提升,反映出解耦水平总体增强的趋势。具体而言,2003—2005 年全国解耦指数曲线以双峰特征为主,低值区密度较高,显示多数省(区、市)处于负向解耦或耦合状态,区域差异显著;2006—2010 年右侧次峰逐步形成并扩大,解耦类型逐渐由负向向正向过渡。2011—2015 年为解耦改善关键时期,正向解耦主峰显著抬升,多数省(区、市)实现向正向解耦的跃迁。2016—2020 年正向解耦峰值达到最高且分布集中,区域解耦趋于协调;2021—2023 年曲线形态出现波动,右峰密度下降,曲线略有展宽,表明部分省(区、市)解耦水平短期回落或结构分化,但总体仍处于较高水平。

b. 东部地区:整体解耦水平稳定且高度集中,全时段呈右偏单峰分布,解耦指数多集中于高值区间,显著高于全国平均水平。2011—2020 年峰度大幅提升,以江浙沪、珠三角等地区为代表的强解耦格局凸显;2021—2023 年虽呈小幅扩散趋势,但主峰仍位于高值区,协调发展优势持续巩固。

c. 中部地区:解耦状态显著改善,区域差异逐步收敛。2003—2010 年呈低值双峰形态,多数省(区、市)处于负解耦或扩张型耦合阶段;2011—2015 年右侧主峰形成并逐渐增强,区域差异减弱,解耦趋势显著;2016—2020 年主峰明显右移,整体实现正向解耦,但仍伴有部分尾部拖曳现象;2021—2023 年分布趋于平缓,阶段性差异依然存在。

d. 西部地区:解耦水平波动幅度较大,空间分

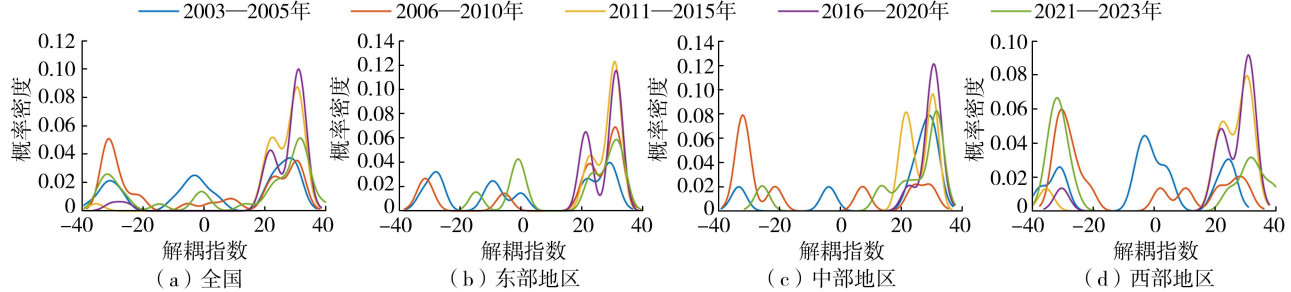


图 3 解耦指数概率密度分布

Fig. 3 Probability density distribution of decoupling index

布明显离散。2003—2010 年呈典型多峰结构,区域异质性与两极分化突出;2011—2015 年右侧峰值逐步抬升,部分省(区、市)向解耦状态转型,但整体离散格局未显著改变;2016—2020 年解耦峰值进一步提升,分布集中度有所增强;2021—2023 年解耦分布再度趋于分散,右峰密度降低,左侧低值区重新扩大,扩张型负解耦现象明显回升。

2.3 Dagum 基尼系数解耦指数分析

表 2 为中国 31 个省(区、市) Dagum 基尼系数解耦指数分解结果。可见,2003—2023 年 G_i 呈波动变化特征,整体呈先上升后下降再上升趋势。2003—2005 年 G_i 为 0.30,表明区域解耦水平差异较大,不均衡性较强;全国尚处于产业结构升级与水资源消耗解耦初期,地区间协调性不足。2006—2010 年, G_i 上升至 0.42,达到研究时段最大值,表明区域解耦差异进一步扩大;东部和中部部分地区因产业结构升级加快,实现了解耦,而西部及资源型地区解耦进程缓慢。2011—2015 年 G_i 显著下降至 0.04,表明全国解耦水平趋于收敛,区域差异显著缩小。2016—2020 年 G_i 小幅回升至 0.09,区域解耦水平差异略有反弹,这可能与部分省(区、市)绿色转型进度、发展基础不均有关,尤其是在政策执行效能与技术吸收能力存在区域差异的背景下,不同省(区、市)解耦路径再次出现分化;伴随全国经济复苏,东部和中部地区解耦水平继续提升。2021—2023 年 G_i 回升至 0.34,区域解耦差异重新扩大,反映出疫情后经济快速复苏与“双碳”目标实施带来的阶段性挑战。

表 2 2003—2023 中国 Dagum 基尼系数解耦指数分解结果
Table 2 Decomposition results of Dagum Gini coefficient for national decoupling index from 2003 to 2023

时段	G_i	G_w	G_{nb}	G_t	贡献率%		
					G_w	G_{nb}	G_t
2003—2005 年	0.30	0.03	0.25	0.02	10.37	83.73	5.90
2006—2010 年	0.42	0.04	0.35	0.03	9.04	83.19	7.77
2011—2015 年	0.04	0.01	0.04	0.01	11.73	83.95	4.32
2016—2020 年	0.09	0.01	0.07	0.01	10.72	80.96	8.32
2021—2023 年	0.34	0.03	0.28	0.03	7.95	83.51	8.54

分解结果显示,区域间差异始终占据主导地位,2003—2023 年区域间差异维持在 80%以上,表明区域发展不均衡是解耦水平差异的核心成因。区域内差异整体呈逐步下降趋势,尽管地区间差异较为显著,但区域内部的解耦协调性有所提升。 G_i 呈逐步上升趋势,表明区域间解耦水平的不稳定性与波动性有所增强。

图 4 为 2003—2021 年中国八大区域水资源消耗与产业结构升级 Dagum 基尼系数解耦指数年际变化特征。总体而言,研究期间各地区 G_i 均呈显著

的波动特征。2003—2006 年东北、华南沿海和西北等地区 G_i 大幅上升,尤其是华南沿海地区于 2006 年达到峰值;区域间水资源消耗与产业结构升级解耦程度差异显著,反映出各地区在产业结构转型和资源利用效率方面存在突出的发展不平衡问题。2006—2011 年各地区 G_i 普遍快速下降,并于 2011 年达到研究期间最低值,表明水资源消耗与产业结构升级的协调性显著提升,区域差异大幅缩小,各地区在资源利用与产业结构发展的耦合水平趋于一致。但 2011 年以后, G_i 再次呈波动上升趋势,尤其是黄河中游地区增幅尤为显著,并于 2021 年再次显著上升,区域间水资源消耗与产业结构升级解耦程度再次出现分化。

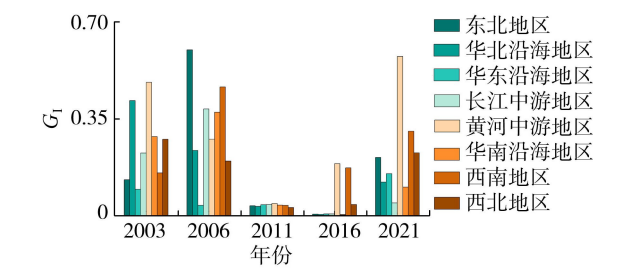


图 4 不同地区水资源消耗与产业结构升级 Dagum 基尼系数解耦指数变化

Fig. 4 Changes in Gini coefficient of decoupling index between water resources consumption and industrial structure upgrading in different regions

2.4 空间自相关分析

基于空间自相关方法计算各省(区、市)水资源消耗与产业结构升级解耦指数的全局莫兰指数,结果见表 3。从时间维度来看,各阶段 I 呈现一定的变化趋势。2003—2017 年 I 均为负值,表明各省(区、市)解耦指数空间分布整体呈较弱的负空间自相关性,且 P 值(显著性水平)与 Z 值(Z 统计量)均未通过显著性检验;省(区、市)际解耦指数的空间分布具有随机性,未形成显著的空间集聚特征。2018—2020 年 I 为 0.006,接近于 0,省际解耦水平差异无

表 3 水资源消耗与产业结构升级解耦指数的全局莫兰指数统计结果

Table 3 Moran's I statistics of decoupling index between water resources consumption and industrial structure upgrading

时段	I	P 值	Z 值
2003—2005 年	-0.158	0.189	-0.040
2006—2008 年	-0.102	0.366	-0.022
2009—2011 年	-0.001	0.989	0.010
2012—2014 年	-0.105	0.313	-0.023
2015—2017 年	-0.078	0.480	-0.014
2018—2020 年	0.006	0.941	0.013
2021—2023 年	0.493	0.010	0.210

明显的空间集聚规律。2021—2023 年空间自相关特征发生显著变化, I 升至 0.493,空间分布呈较强的正空间自相关性($P<0.01,Z>0.196$),空间相邻省(区、市)的解耦指数表现出较高的空间一致性。

鉴于 I 统计量在识别空间集聚特征时存在局限性,进一步采用 LISA 聚类图对各地区局部空间集聚程度进行评估。LISA 可有效揭示局部空间高-高、低-低、低-高和高-低等 4 种集聚特征。局部莫兰指数散点图如图 5 所示。

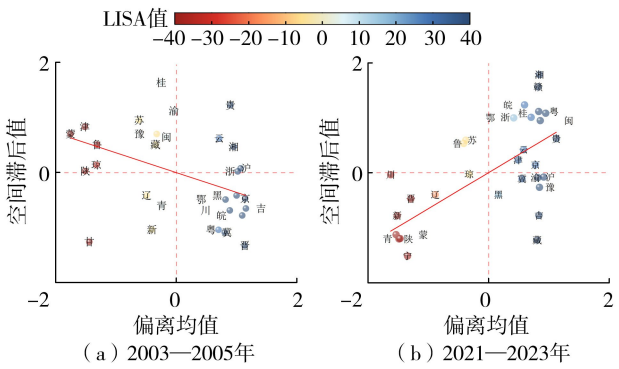


图 5 局部莫兰指数散点图

Fig. 5 Local Moran index scatter plot

由图 5 可见,2003—2005 年空间解耦指数表现出较强的空间异质性,图中第一、四象限省(区、市)的占比较大,趋势线呈负斜率,表明区域间解耦水平差异显著,空间集聚效应较弱,空间异质性较为突出。2021—2023 年空间解耦指数分布特征逐渐趋于一致,区域空间集聚效应显著增强,大量省(区、市)集中于第二象限,表明高解耦水平的省(区、市)在空间上表现出较强的同质性,形成显著的区域集聚效应;同时部分省(区、市)分布于第三象限,反映出低解耦水平地区在空间上亦具有较强的一致性,进一步说明区域解耦水平的空间格局逐步趋于稳定。

2.5 基于空间马尔可夫转移矩阵的解耦指数分析

由表 4 可知,相同类型省(区、市)的解耦水平在不同时期及邻近省(区、市)解耦状态呈现显著的空间依赖性,表明邻近省(区、市)的解耦状态对本省(区、市)解耦状态的转移概率具有明显影响。具体而言,邻近省(区、市)的状态越佳,本省(区、市)向更优状态转移的概率越大。例如,对于处于解耦状态的省(区、市),当邻近省(区、市)同样处于解耦状态时,该省(区、市)维持当前状态的概率高达 0.87;但随着邻近省(区、市)状态依次下降至失衡区、负解耦区和过渡区,本省(区、市)维持现状的概率分别降低至 0.79、0.62 和 0.55,向更低等级状态转移的风险显著上升,表明邻近省(区、市)的良好状态有利于提升本省(区、市)发展的稳定性,而邻近省(区、市)状态的恶化则会加剧本省(区、市)的

退化风险。

表 4 解耦指数的空间马尔可夫状态转移概率矩阵

当前状态		邻近省(区、市)状态(概率值)			
		解耦区	过渡区	失衡区	负解耦区
解耦区	解耦区	0.87	0.55	0.79	0.62
	过渡区	0	0.06	0	0.12
	失衡区	0.07	0.33	0.15	0.15
	负解耦区	0.06	0.07	0.06	0.12
过渡区	解耦区	0.75	0.33	0	1.00
	过渡区	0	0	0	0
	失衡区	0.25	0.67	1.00	0
	负解耦区	0	0	0	0
失衡区	解耦区	0.50	0.49	0.86	0.48
	过渡区	0	0	0	0.09
	失衡区	0.50	0.48	0.14	0.43
	负解耦区	0	0.03	0	0
负解耦区	解耦区	0.33	0	0.13	0.25
	过渡区	0.33	0	0	0
	失衡区	0.33	1.00	0.63	0.50
	负解耦区	0	0	0.25	0.25

此外,过渡区和失衡区省(区、市)向更优状态转移的概率明显受到邻近省(区、市)状态的积极影响。当过渡区省(区、市)邻近解耦区时,其向解耦状态优化的概率高达 0.79;而邻近省(区、市)为负解耦区时,则呈现显著的退化趋势,向下转移的概率达 0.63。失衡区省(区、市)若邻近过渡区或解耦区,转移至解耦状态的概率分别高达 1.00 和 0.62,表现出较好的发展和改善潜力;但若邻近省(区、市)为负解耦区或同样的失衡区时,则显示出复杂且不利的状态转移特征。

负解耦区省(区、市)的状态改善高度依赖邻近省(区、市)的正向带动作用。当邻近省(区、市)为解耦区或过渡区时,负解耦区省(区、市)转移至解耦状态的概率分别为 0.55 和 0.33;若邻近省(区、市)同样处于负解耦区,则本省(区、市)将必然向失衡状态恶化,呈现显著的负向空间集聚效应。

受样本量限制,部分状态转移概率为 1 的情况(如过渡区及失衡区内部转移)仅为个别事件,不具备足够的代表性。总体来看,各省(区、市)解耦状态的空间转移过程具有显著的邻域依赖性,表明区域发展水平的提升或退化不仅取决于自身内部条件,也在很大程度上受邻近区域发展状态的影响,进一步凸显了跨区域合作、政策协同与经济联动的重要性。通过强化区域联动,可有效推动区域整体解耦水平的提高。

传统空间马尔可夫链仅基于单一转移概率进行分析,难以全面揭示系统的长期演化轨迹。相比之下,马尔可夫过程的极限分布能够更准确地刻画区

域解耦指数的长期演进特征。如表 5 所示,在不考虑空间滞后效应的情况下,系统最终停留在解耦区的概率为 0.67,其次为失衡区,表明整体演化路径具有较高的稳定性,但仍存在一定程度的潜在失衡风险。

表 5 基于空间马尔可夫链的解耦指数稳态分布

Table 5 Steady-state distribution of decoupling index based on spatial Markov chain				
状态类型	条件概率			
	解耦区	过渡区	失衡区	负解耦区
稳态分布	0.67	0.03	0.24	0.01
邻近解耦区	0.78	0.01	0.17	0.04
邻近过渡区	0.77	0.00	0.17	0.06
邻近失衡区	0.55	0.13	0.22	0.11
邻近负解耦区	0.50	0.02	0.41	0.06

在纳入空间滞后因素后,空间马尔可夫链进一步揭示出显著的空间依赖性与空间异质性。当邻近省(区、市)处于解耦区或过渡区时,本省(区、市)维持在解耦区的条件概率分别上升至 0.78 和 0.77,表现出明显的空间集聚特征与正向溢出效应。与之相反,若邻近省(区、市)处于失衡区或负解耦区,本省(区、市)落入失衡区的条件概率将显著上升至 0.22 和 0.41,说明不利发展状态具有较强的空间传导效应。

3 结 论

- a. 在“五年规划”政策引导下,中国水资源消耗与产业结构升级的解耦关系呈现明显的阶段性演化特征,整体由强负解耦逐步向正向解耦转变。“十二五”“十三五”时期,节水型社会建设与绿色发展战略的深入实施,有力推动了正向解耦格局的形成。2021 年以后,受疫情后经济复苏与“双碳”目标实施压力的叠加影响,部分地区解耦状态出现短期回调,但东部沿海核心区域仍维持稳定的正向解耦,体现出资源管控与产业结构优化的高度协同性及较强的发展韧性。
- b. 2003—2023 年中国水资源消耗与产业结构升级的解耦关系在区域演化上呈现东高西低、中部改善的异质性格局,东部地区解耦稳定性最强,西部地区波动性显著,Dagum 基尼系数分析结果表明,解耦差异呈先升后降再反弹的态势,地区间发展协调性不足是差异产生的主要原因。空间上,全局莫兰指数由负转正,表明解耦水平由随机分布向显著集聚转变,高-高与低-低集群逐步形成,空间格局趋于稳定。
- c. 中国省域水资源消耗与产业结构升级解耦状态随时间演进呈现总体改善趋势,并伴随显著的空间依赖特征,解耦区所占比例逐步上升,同时,解耦状态的转移显著受邻近省(区、市)状态影响,表现出明显的空间正向溢出效应与不利状态的传导性。

参考文献:

[1] Department of Economic and Social Affairs. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development [R]. New York: United Nations, 2015.

[2] 张梅,郑伊佳. 人类命运共同体视域下跨境水资源的研究进展与展望[J]. 水利经济, 2024, 42 (1) : 34-42. (Zhang Mei, Zheng Yijia. Research progress and prospect of cross-border water resources research from the perspective of a community with a shared future for mankind[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (1) : 34-42. (in Chinese))

[3] 干春晖,郑若谷,余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011 (5) : 4-16. (Gan Chunhui, Zheng Ruogu, Yu Dianfan. The impact of China's industrial structure change on economic growth and fluctuations[J]. Economic Research, 2011 (5) : 4-16. (in Chinese))

[4] 陈雷. 全面实施水资源消耗总量和强度双控行动 着力保障经济社会持续健康发展[J]. 中国水利, 2016 (23) : 21-24. (Chen Lei. Comprehensively implement the dual control of total water consumption and intensity to ensure the sustainable and healthy development of the economy and society [J]. China Water Resources, 2016 (23) : 21-24. (in Chinese))

[5] 高而坤. 设定水资源消耗上限 严格实行用水总量控制[J]. 中国水利, 2016 (13) : 1-2. (Gao Erkun. Set the upper limit of water resource consumption and strictly implement the total water use control [J]. China Water Resources, 2016 (13) : 1-2. (in Chinese))

[6] 陈晓红,杨桂山. 中国产业结构演化与水资源利用效率的协同关系研究[J]. 水利学报, 2021, 52 (6) : 653-662. (Chen Xiaohong, Yang Guishan. Research on the synergistic relationship between China's industrial structure evolution and water resources utilization efficiency[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52 (6) : 653-662. (in Chinese))

[7] 胡文俊,孙岩. 世界主要国家的节水措施及其启发与思考[J]. 水利经济, 2024, 42 (2) : 1-6. (Hu Wenjun, Sun Yan. Inspiration and reflection on review of water saving measures in major countries[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42 (2) : 1-6. (in Chinese))

[8] 杨天通,赵文晋,周杨,等. 水资源可持续利用及其与经济脱钩分析:以长春市为例[J]. 人民长江, 2019, 50 (4) : 135-141. (Yang Tiantong, Zhao Wenjin, Zhou Yang, et al. Sustainable utilization of water resources and its decoupling analysis from economic development: a case study of Changchun City [J]. Yangtze River, 2019, 50 (4) : 135-141. (in Chinese))

[9] 郭旭宁,李云玲,唱彤,等. “荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J]. 水资源保护, 2023, 39 (3) : 1-7. (Guo Xuning, Li Yunling, Chang Tong, et al. “Jingchu

- Anlan” modern water network construction ideas and implementation paths [J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39 (3): 1-7. (in Chinese)
- [10] Sun Yuqing, Liu Yingchao, Yang Zhiwei, et al. Study on the decoupling and interaction effect between industrial structure upgrading and carbon emissions under dual carbon targets [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20 (15): 6498.
- [11] Gao Dandan. Study on the coupling coordination and obstacle factors between high-quality agricultural development and ecological construction in China [J]. *Environmental Research Communications*, 2023, 5: 075004.
- [12] 张丽娜, 吴凤平, 张陈俊, 等. 流域水资源消耗结构与产业结构高级化适配性研究 [J]. *系统工程理论与实践*, 2020, 40 (11): 2743-2754. (Zhang Lina, Wu Fengping, Zhang Chenjun, et al. Research on the adaptability of water resources consumption structure and industrial structure upgrading in river basins [J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2020, 40 (11): 2743-2754. (in Chinese))
- [13] Wang Qiang, Wang Xiaowei. Moving to economic growth without water demand growth: a decomposition analysis of decoupling from economic growth and water use in 31 provinces of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138362.
- [14] Tao Miaomiao, Poletti S, Wen Le, et al. Modelling the role of industrial structure adjustment on China’ s energy efficiency: insights from technology innovation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 441: 140861.
- [15] Xiong Xin, Wang Yuxin, Liu Bin, et al. The impact of green finance on the optimization of industrial structure: evidence from China [J]. *PLoS One*, 2023, 18 (8): e0289844.
- [16] Tapio P. Towards a theory of decoupling: degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. *Transport Policy*, 2005, 12 (2): 137-151.
- [17] Zhang Jin, Zhang Shuiping, Huang Xin, et al. Spatiotemporal evolution of coordinated development between economic resilience and green finance under the background of sustainable development [J]. *Sustainability*, 2023, 15 (11): 9101.
- [18] Wang Shaojian, Gao Shuang, Huang Yongyan, et al. Spatiotemporal evolution of urban carbon emission performance in China and prediction of future trends [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30 (5): 757-774.
- [19] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth [R]. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2002.
- [20] 陈军飞, 张玉琦, 嵇娟, 等. 长三角城市群洪涝韧性时空演化及影响因素 [J]. *水资源保护*, 2024, 40 (6): 58-68. (Chen Junfei, Zhang Yuqi, Ji Juan, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of flood resilience in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40 (6): 58-68. (in Chinese))
- [21] 朱鑫杰, 张宏兵, 曾繁鑫, 等. 基于变分模态分解的弹性参数核密度估计方法 [J]. *科学技术与工程*, 2024, 24 (10): 4005-4012. (Zhu Xinjie, Zhang Hongbing, Zeng Fanxin, et al. Elastic parameter kernel density estimation method based on variational mode decomposition [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24 (10): 4005-4012. (in Chinese))
- [22] 杨亚锋, 李欣瑞, 王红瑞, 等. 基于“四水四定”的京津冀地区水资源空间均衡及其分布动态演进分析 [J]. *水资源保护*, 2025, 41 (1): 107-113. (Yang Yafeng, Li Xinrui, Wang Hongrui, et al. Analysis on spatial balance and dynamic evolution of water resources distribution in Beijing-Tianjin-Hebei region based on “four waters and four determinations” [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41 (1): 107-113. (in Chinese))
- [23] Zhou D, Liu X, Wu S. Spatial disparities and convergence of China’ s water use efficiency: a provincial perspective [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 602-612.
- [24] Su Lijuan, Wang Yatao, Yu Fangfang. Analysis of regional differences and spatial spillover effects of agricultural carbon emissions in China [J]. *Heliyon*, 2023, 9 (6): e16752.
- [25] 蒲英霞, 马荣华, 葛莹, 等. 基于空间马尔可夫链的江苏区域趋同时空演变 [J]. *地理学报*, 2005 (5): 817-826. (Pu Yingxia, Ma Ronghua, Ge Ying, et al. Spatial-temporal evolution of convergence in Jiangsu region based on spatial Markov chain [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005 (5): 817-826. (in Chinese))
- [26] Rey S J. Spatial empirics for economic growth and convergence [J]. *Geographical Analysis*, 2010, 33 (3): 195-214.
- [27] 司雨, 王英. 习近平治水思路的系统哲学基础 [J]. *水利经济*, 2024, 42 (5): 41-46. (Si Yu, Wang Ying. Systematic philosophical basis of Xi Jinping’ s water management ideas [J]. *Water Resources Economics*, 2024, 42 (5): 41-46. (in Chinese))
- [28] 沈际杰, 柏欣莉, 衣鹏. 节水建设城市用水时空差异模型研究 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2022, 50 (1): 38-43. (Shen Jijie, Bai Xinli, Yi Peng. Study on spatiotemporal difference model of urban water use in water-saving construction [J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2022, 50 (1): 38-43. (in Chinese))
- [29] 褚俊英, 李孟泽, 周祖昊, 等. 水资源保护利用“四水四定”的创新管理模式 [J]. *水资源保护*, 2024, 40 (2): 23-27. (Chu Junying, Li Mengze, Zhou Zuhao, et al. Innovative management model of “four waters and four determinations” for water resources protection and utilization [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40 (2): 23-27. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 04 - 22 编辑: 胡新宇)