



基于能源结构层面碳减排的绿色金融策略评价及耦合分析

焦健¹, 沈剑飞¹, 李昂^{2*}

1. 华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206;

2. 北京化工大学 经济管理学院, 北京 100029

摘要: 在“十五五”规划草案对能源发展提出新要求的大背景下, 完善绿色金融策略以提供坚实保障显得尤为迫切。本文构建了绿色金融策略评价体系, 并计算了2016—2022年我国各区域绿色金融绩效及其耦合协调度。研究发现, 绿色金融在推动能源结构转型和减少碳排放方面的绩效正逐步增强。在策略排序上, 华北地区以绿色信贷持续保持最佳状态; 东北地区在2016—2020年期间, 绿色信贷位列首位, 而绿色债券在2022年实现超越; 东部地区在2016年绿色信贷居首, 随后绿色债券在2018—2020年期间超越, 直至2022年绿色基金位居榜首。中南和西南地区则呈现出绿色信贷与绿色债券交替领先的态势; 西北地区则以绿色信贷持续领跑, 而第二名从2016年的绿色基金转变为绿色债券。进一步分析后发现, 促进能源结构转型的绿色金融策略在各区域展现出差异化的演进路径, 策略间的耦合协调度逐渐提升, 其中中南、西南、东部地区的耦合协调度最高。本文还深入分析了不同区域耦合协调度的时空演化趋势, 为有效配置绿色金融资源、提高能源转型效率提供了政策指导。

关键词: 能源结构转型; 绿色金融策略排序; 演变路径; 耦合协调

中图分类号: F424.2; F832

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2026)03-0323-19

引言

“十五五”规划纲要着重强调了实施能源安全新战略的决策, 指出能源结构转型是实现经济与环境保

护双赢的关键, 也是推动环境、社会和公司治理(ESG)实践的内在逻辑。鉴于中国煤炭资源丰富而油气不足的国情, 能源消费结构呈现出“一大三小”的格局, 即煤炭、石油、天然气和清洁能源的消费量

收稿日期: 2026-03-30; 修回日期: 2026-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目: 基于时空尺度的电力容量市场优化及机制研究(72474066)

作者简介: 焦健(1995—), 男, 博士研究生, 研究方向为能源转型。E-mail: 1151326253@qq.com

沈剑飞(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为能源转型、绿色创新。E-mail: shenjianfei@263.net.cn

*李昂(1995—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为绿色创新、能源转型。E-mail: 1026758739@qq.com(通讯作者)

引用格式: 焦健, 沈剑飞, 李昂. 基于能源结构层面碳减排的绿色金融策略评价及耦合分析[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2026, 18(3): 323-341. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260033. CSTR: 32282.14.JES.20260033

JIAO J, SHEN J F, LI A. Evaluation and Coupling Analysis of Green Finance Strategies for Carbon Reduction at the Energy Structure Level[J]. Journal of Engineering Studies, 2026, 18(3): 323-341. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20260033. CSTR: 32282.14.JES.20260033

中, 煤炭占据主导地位, 而清洁能源则相对较少^[1]。从碳排放总量来看, 2024年中国因能源活动产生的CO₂排放量为105.5亿t, 占同期中国碳排放总量的84%, 占全球能源总碳排放量的30.69%^[2]。同时, 化石能源在能源消费总量中占比较大(82.5%), 而清洁能源消费仅占17.5%^[3]。为减轻化石能源的碳排放影响并满足经济社会对能源的高度需求, 能源结构转型在当前及未来一段时间内显得尤为重要^[4]。然而, 在通过能源结构转型减少碳排放的过程中, 技术和应用前景的不确定性导致了长期存在的风险和不确定性的回报率, 使得转型主体难以迅速获得回报^[5], 这可能削弱能源生产商的转型动力, 进而对经济发展产生不利影响。因此, 制定恰当的定向融资策略对于支持能源结构转型的可持续性至关重要。

在政策支持方面, 《国家碳达峰试点建设方案》明确指出, 清洁低碳转型是试点的首要任务, 尤其是能源的绿色低碳转型位列其首^[5]。同时, 该方案提出要完善绿色金融等政策机制, 以保障绿色转型的顺利进行。类似地, 《G20转型金融框架》也强调了加大金融支持低碳转型的力度和质量^[6]。为了尽快实现政策目标并最终达成“双碳”目标, 首要任务是对作为碳排放主要来源的能源行业进行结构转型。这需要充足的资金作为支撑, 以顺利度过能源转型过程中化石能源与清洁能源更替的阵痛期。然而, 中国的能源结构转型面临着许多资金支持问题。如2022年清洁能源发电补贴累计拖欠4000亿RMB左右^[7], 而根据预测, 清洁能源发电量占比在2035年将达50%^[8], 这对未来数十年间中国能源转型过程的资金供给产生了巨大的压力。作为绿色低碳转型中的重要融资工具, 绿色金融可以有效供给各行业和地区的融资需求^[9], 也是能源结构转型的必要前提。因此, 需要加强绿色金融与能源结构转型及碳减排的关联, 从而使能源发展得到来自绿色金融的充分支持。

当前, 中国能源结构转型正面临多维度挑战。从煤炭产业高质量发展的视角出发, 为了在竞争中脱颖而出, 更高效的燃煤机组亟须更为充足的资金支持。与此同时, 从推动清洁能源发展的角度来看, 针对风电、光伏、水电、生物质等可再生资源的开发利用, 必须开辟更为专业的资金渠道来满足其日益增长的资金需求。因

此, 无论是为了减少化石能源消费还是提升清洁能源占比, 能源结构的可持续转型均依赖于能为该过程持续提供稳定资金支持的渠道。在推进能源结构转型、实现碳减排的征途中, 技术的进步固然重要, 但更为基础的是拥有持续、稳定的绿色融资渠道。

自2016年起, 中国人民银行颁布了《关于构建绿色金融体系的指导意见》, 中国由此成为全球首个建立系统性绿色金融政策框架的国家。这一政策在推动我国能源转型和碳减排过程中发挥了日益关键的作用。绿色金融体系的构建, 不仅能够优化资源配置, 吸引更多社会资本流向绿色产业, 抑制与化石能源相关的污染性投资^[10], 还能催生新的清洁能源技术, 为能源转型注入新动力^[11]。我国的绿色金融主要分为绿色信贷、绿色债券、绿色基金、绿色保险以及环境权益工具。不同的绿色金融体系策略能够从多方面解决环境外部性, 中国多种绿色金融策略并行的态势对于因地制宜地促进能源结构转型具有积极意义。当前中国绿色金融发展正处于快速起步期, 必然伴随着一些与现实不匹配的情况, 如绿色金融策略的运用不符合当地能源结构优化的实际情况等^[12]。尤其是在能源转型正处于关键阶段的当前时期, 绿色金融需要在发展过程中不断完善, 以更好地促进能源结构向低碳方向转型。

基于促进能源结构转型与碳减排的视角, 本文旨在探索最优的绿色金融策略组合优序。研究主要聚焦于解决两个核心问题: ①不同区域促进能源转型的最佳绿色金融策略排序为何? ②绿色金融策略在不同区域的演进态势及其相互耦合机制如何? 为此, 本文将能源结构转型及碳减排目标与传统金融要素(如政策支持、金融环境等)相结合, 审视当前绿色金融策略的实施效果, 进而因地制宜地分析策略优序, 探究不同区域绿色金融策略的排序、演变规律及发展态势, 构建出最具促进作用的绿色金融策略布局框架(图1), 以期完善绿色金融体系、推动能源结构可持续转型及实现深度碳减排提供重要参考。

1 研究综述

本节系统梳理了能源结构转型对碳排放的重要性以及绿色金融机制在中国能源结构转型及碳减排过程

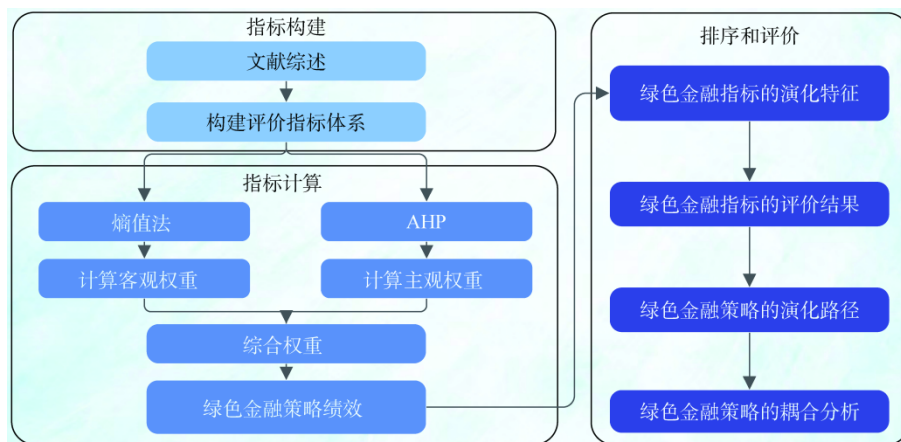


图1 研究框架
Figure 1 Research framework

中的作用。

1.1 能源结构转型的发展、影响、风险与需求

(1) 能源结构转型的发展。以低碳为目标的能源结构转型能够有效地抑制气候变化对经济社会发展产生的负面影响, 缓和经济发展和环境效益之间的冲突, 促进可持续发展^[13]。能源结构转型, 一般是指从依赖传统的化石燃料(如煤炭)向煤炭的清洁高效利用以及光伏、风电、水电、生物质等清洁能源的转变过程^[14, 15]。

(2) 能源结构转型对碳排放的影响。能源结构转型对于减少碳排放的积极作用已经得到了众多国家的学者和证据的支持。基于中国、东盟、美国、欧盟视角的研究均发现清洁能源的开发利用能够有效降低碳排放^[16-19]。特别在具体到清洁能源层面, 与传统的燃煤电站相比, 风电项目展现出巨大的碳减排潜力^[20]。此外, 在实现降低碳排放的同时促进经济发展的目标上, 风电、光伏和水电等清洁能源项目被证实具有良好的效果^[21]。

(3) 能源结构转型的过程风险。单项清洁能源的开发利用及其对传统煤炭的替代, 可能并不会实现人们想象中的碳减排目标, 也就是说, 仅依靠单项清洁能源所带来的碳减排效果可能被高估了^[22]。当前能源结构转型的正确路径应当是煤炭清洁高效利用的同时兼顾各种清洁能源的开发利用。因此, 能源转型过程在当前碳中和背景下面临的关键挑战是如何兼顾传

统能源的清洁使用和清洁能源的高效利用。

(4) 能源结构转型对融资的需求。在能源转型过程中, 如何平衡传统能源的清洁利用与清洁能源的高效开发, 成为所有相关企业面临的巨大资金挑战。传统煤炭企业需在既定产能规划上追加投资, 以实现既有产能的清洁化转型; 而清洁能源企业则需根据各地区的资源特色, 在不同地区投资于多样化的清洁能源项目。相较于能源结构转型前的单一供给模式, 新结构在多个层面引发了显著的资金需求增长, 这无疑给各类能源企业的融资带来了严峻压力, 进而可能阻碍能源转型的持续深化。在此背景下, 实施绿色金融策略被视为解决这一关键融资难题的有效途径。

1.2 绿色金融的影响与策略

(1) 绿色金融与能源绿色转型。当前, 我国在能源结构转型方面的努力以及对碳减排的积极成效, 正日益吸引着众多利益相关者的目光, 同时, 绿色金融机制在转型过程中的关键作用也愈加凸显。当前, 一个核心议题是如何运用多样化的绿色金融策略来达成碳减排与可持续发展的目标, 而其中关键在于绿色金融策略如何推动了能源结构的绿色转型。当前文献逐渐认识到绿色金融机制与能源绿色化转型之间的重要关联。绿色金融出现的目标便是促进可持续发展, 而其中最重要的部分就是用于能源领域的绿色转型^[23]。有学者指出, 绿色金融能够引导贷款资金向环保产业转向, 且能源消费结构的优化需要绿色金融的支

持^[24, 25]。绿色金融的实施与化石能源使用呈现负相关关系, 与清洁能源的使用呈现正相关关系^[26]。同时, 绿色金融有利于将传统能源转变为清洁能源的举措实施^[27], 能够有效地促进能源消费结构调整^[28]。

(2) 绿色金融策略研究。在欧盟碳排放交易体系 (EU Emissions Trading System, EU ETS) 开发清洁能源技术时, 碳金融发挥了重要作用^[29]。绿色信贷在遏制污染行业发展, 促进能源向清洁能源转型方面发挥了重要作用^[30]。在绿色债券的相关研究中, 其在 OECD 成员国中促进了风电和水电的持续发展, 并且能够有效促进绿色经济的复苏^[31]。相关证据证实了以 PPP 项目为代表的绿色基金增强了传统能源向清洁能源的过渡^[32]。其他如绿色保险等的绿色金融策略, 也被证实对于减排降碳具有积极的作用^[33]。

(3) 绿色金融评价。在以往关于绿色金融评价体系的研究中, 已经涵盖了能源、财务、社会、政策等多重维度的考量。从可持续发展的视角出发, 某些研究不仅从利益相关者、财务、环境、社会、技术和制度等维度出发, 还针对中国如何实现有效资源管理的最佳绿色金融方案进行了评估^[34]。同时, 这些研究也从金融机构绿色融资、企业绿色绩效、政府绿色支持三个维度来衡量绿色金融发展体系的成效^[35]。此外, 研究还从能源、碳排放、可再生电力、财务等角度对欧洲多国的绿色融资进行了深入评价^[36], 并从政策和市场两个维度对中国各省的绿色金融发展态势进行了评估^[37]。更进一步地, 有研究构建了包含资金支持、资源配置、信息传递和风险防范四个方面的指标评价体系, 以全面评估中国绿色金融的发展状况^[38]。当前关于绿色金融评价体系构建的相关研究可分为两类: 一是分区域讨论绿色金融的发展情况, 二是构建体系用以评估绿色金融的实施效果。而根据能源结构转型与绿色金融的紧密需求, 判断某区域是否适合某种绿色金融策略的关键是将能源结构转型的相关要素纳入评价体系, 并据以考察绿色金融的适用性。

2 方法和数据

2.1 确定评价指标体系

为了构建一个科学合理的指标体系, 本研究特别征询了能源结构转型与绿色金融领域内 10 位专家的

意见, 并综合当前的研究成果, 从能源、碳减排、政策环境、社会这四个关键维度中精挑细选了 19 项指标, 旨在全面评估中国支持能源结构转型的绿色金融策略。这 19 项指标的具体内容已列在表 1 中。

2.1.1 对能源转型的支持 支持规模 (A1): 用于支持能源结构整体向绿色化转型的资金规模正在逐年增加^[39]。当前, 中国各类绿色金融策略对能源转型的支持力度显著, 其中绿色信贷的增长率长期保持在 15% 以上, 占同期企业和其他单位贷款增量的比例也长期保持在 14% 以上。这一指标充分体现了绿色金融对某区域能源结构转型的总体支持力度。

传统能源转型 (A2): 用于支持传统煤炭向煤炭清洁高效利用转型的绿色资金^[39]。当前, 中国传统化石能源的消费量约占整体能源消耗的 85%。在能源结构转型的进程中, 一个至关重要的环节是推动以煤炭为代表的传统化石能源向清洁型能源的转变, 这一转变在短期内是实现碳减排快速下降的有效途径。这一转变的成效, 直接反映了各类绿色金融策略对传统能源清洁化转型的支持力度与效果。

对风电的支持 (A3): 用于支持能源结构向风电倾斜的资金^[40]。在西北、华北、东北、华东地区风力资源相对丰富^[41], 这些地区的绿色金融策略落地时将会着重考虑对风电的支持, 以提高能源转型效率。该指标体现出绿色金融策略对风电的倾斜力度。

对光伏的支持 (A4): 用于支持能源结构向光伏转型的资金^[42]。在华北、华东、西北地区, 光照条件较好, 这些地区的绿色资金会将光伏作为重点发展项目进行投资。该指标体现出绿色金融策略对光伏的支持力度。

对水电的支持 (A5): 用于支持能源结构向水电转型的资金^[43]。在中南和西南地区, 水电资源和设施较为完备^[41], 这些地区的绿色资金在投资时会重点考虑向更为稳定的水电倾斜。该指标体现出绿色金融策略对水电的支持力度。

对生物质发电的支持 (A6): 用于支持能源结构向生物质发电转型的资金^[44]。中国生物质发电较为完善的地区位于华东、东北和中南部分省份, 这些地区的绿色资金会在投资时考虑到生物质的作用。该指标体现出绿色资金对于生物质发电的支持力度。

表1 绿色金融策略绩效评价指标体系
Table 1 Performance evaluation index system for green finance strategy

维度	指标	描述
对能源转型的支持 EN	支持规模	各类绿色金融策略对能源绿色转型的支持总量
	用于传统能源转型的资金	各类绿色金融策略用于传统化石能源清洁化转型的比例
	对风电的支持	各类绿色金融策略用于发展风电的比例或资金
	对水电的支持	各类绿色金融策略用于发展水电的比例或资金
	对光伏的支持	各类绿色金融策略用于发展光伏的比例或资金
	对生物质发电的支持	各类绿色金融策略用于发展生物质的比例或资金
	对地热发电的支持	各类绿色金融策略用于发展地热的比例或资金
	发电成本补贴率	绿色金融策略对清洁能源发电成本的补贴
对碳减排的支持 CR	直接用于 CO ₂ 减排	绿色融资直接用于 CO ₂ 减排的部分
	用于区域生态友好型项目的比例	绿色融资用于提升生态环境水平的部分
	用于能源固定资产投资的比例	绿色融资用于能源相关固定资产的部分
	用于能源末端排放改造	绿色融资用于能源排放环节改造的部分
	用于生产部门过程碳排放的控制的比例	绿色融资用于生产过程当中碳减排的部分
政策和金融环境 PF	地方绿色金融种类发展程度	各地区各类绿色金融方式的先进程度
	政府对该类绿色金融的支持力度	各地区政府出台的绿色金融相关政策情况
	该类绿色金融得到的保障	各地区在绿色金融方面投入的资金、人力等情况
社会福利效果 SW	绿色融资对生物多样性和气候的保护	绿色金融用于保护当地生物多样性等社会责任的履行情况
	对绿色消费的引导	绿色金融对当地绿色消费的提振作用
	就业岗位	绿色金融及其附属产业带来的就业情况

对地热发电的支持（A7）：用于支持能源结构向地热转型的资金^[45]。中国地热资源多分布在西南地区的云南西部地区，对地区性的能源转型具有一定的促进作用，这些地区的绿色资金配置会考虑到地热。该指标体现出绿色资金对于地热发电的支持力度。

发电成本补贴率（A8）：发电成本包括运营费用和维护成本两部分，设计能源系统运营过程中的工资、能源、产品、服务的运行资金、发电设备的维护等^[46]。清洁能源竞争力弱，需要绿色金融对这部分成本进行更多覆盖。

2.1.2 对碳减排的支持 直接用于 CO₂ 减排（B1）：直接投资于碳减排的绿色融资比例^[34, 46]。由于能源结构的转型间接地有助于减少未来的碳排放，但在直接阻止碳排放的过程中，某些路径上的碳减排难度较大。因此，二氧化碳的捕集、利用与封存可以作为一项保底技术，直接减少 CO₂ 的排放。这一指标反映了绿色融资策略对直接减少碳排放技术和举措的支持强度。

用于区域生态友好型项目的比例（B2）：用于支持区域中生态友好型项目的绿色资金比例^[34]。在气候投融资试点工作的积极推动下，生态友好型项目获得支持的数量持续攀升，截至 2023 年 10 月，已接近 2000 项，这有力地促进了碳减排，为能源结构的转型提供了坚实支撑。这些生态友好型项目不仅数量众多，而且作为能源结构转型中实现碳减排目标的关键环节，其作用不容小觑。

能源固定资产投资（B3）：对清洁能源相关的各类固定资产进行投资是碳减排的源头减量方式^[35]。社会固定资产投资无法全部覆盖该部分，绿色融资资金应当对这部分资金进行有效覆盖，使后续能源结构转型和碳减排过程更加顺畅。

对能源末端排放改造（B4）：用于减少生产过程末端所产出的碳排放的绿色资金^[46]。该阶段是生产过程中最后一个产生碳排放的环节，在当前时期该阶段是碳排放的主要来源，用于该阶段的绿色融资资金能够有效抑制碳排放。

生产过程碳排放控制 (B5): 用于减少生产过程中各环节所产出的碳排放的绿色资金^[47]。该阶段是碳生命周期中间环节, 主要通过绿色融资进行工艺改造, 实现生产过程的绿色化。

2.1.3 政策和金融环境 地方绿色金融种类发展程度 (C1): 各区域的金融环境是绿色金融能否以及多大程度发挥效用的关键保障^[48]。不同绿色金融类型在各地区的发展程度是其绿色金融环境的直接体现。该指标体现了绿色金融策略在各地区是否有为能源转型提供支持的良好金融环境。

政府对该类绿色金融的支持力度 (C2): 地方政府对绿色金融的接纳和支持力度, 是绿色金融得以顺利落地, 并且真正对接到具体能源项目的基础^[35]。该指标体现出绿色金融策略在各区域是否有良好的政策支持和兜底环境。

该类绿色金融得到的保障 (C3): 各区域是否有足够的资金、政策、人员及其他各类保障绿色金融发展的条件, 是绿色金融发展的重要保障^[35]。不同绿色金融策略受制于各区域不同的发展规划可能得到不同的保障程度, 体现出各类绿色金融策略发展的差异性。

2.1.4 社会福利效果 绿色融资对生物多样性和气候的保护 (D1): 金融机构持有的资产中与生态系统相关的比例^[34]。生物多样性保护必须依托栖息地森林、湿地的保护, 在实现生物多样性保护的同时, 也协同增加了碳的吸纳能力。绿色金融在促进能源转型中需要考虑到可能造成的对生态的影响。

对绿色消费的引导 (D2): 绿色金融发展会带动绿色消费、促进社会绿色意识的提升和绿色资金体量的扩大, 是未来绿色金融持续发展的社会保障^[46]。

就业岗位 (D3): 绿色金融通过促进各类能源转型能够造就大量就业岗位, 对就业岗位的促进能提升能源转型的社会价值, 有利于转型过程顺利完成和绿色资金持续供给^[48]。

2.2 研究方法

2.2.1 熵值法-AHP-TOPSIS 方法 (1) 层次分析法。①构建层次结构模型。选取拟解决的问题作为目标层、为实现目标而采取的措施作为准则层, 用于解

决问题的备选方案作为方案层。②构造判断矩阵。通过两两比较确定各个准则相对于目标的权重。判断矩阵的构建以九位标度法为标准, 见表2。③一致性检验。利用式 (1) 计算一致性指标, 利用式 (2) 计算一致性比例。

表2 九位标度法

Table 2 Nine digit scale method

标度	含义
1	两个元素同样重要
3	前者比后者稍微重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者极其重要
9	前者比后者强烈重要
2,4,6,8	上述相邻判断的中间值

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

其中, CI为一致性指标; $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值; n 为矩阵阶数。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

其中, CR为一致性比例; RI为随机一致性指标。

(2) 熵值法。①对数据进行标准化。利用式 (3) 计算第 j 项指标下第 i 年指标值的比例 y_{ij} 。

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (0 \leq y_{ij} \leq 1) \quad (3)$$

其中, x'_{ij} 为标准化后的指标值。

②计算指标信息熵值 e 和信息效用值 d 。利用式 (4) 计算信息熵值, 利用式 (5) 计算信息效用值, m 为样本数量。

$$e_j = -\frac{\sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}}{\ln m} \quad (4)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

③计算指标权重。利用式 (6) 计算第 j 项指标的权重 w_j 。

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (6)$$

AHP 方法虽然能考虑决策者的意图, 但其主观

性较强。而熵值法则能客观地反映情况, 但无法体现决策者对指标的重视程度。为了克服单一赋权方法的不足, 将AHP和熵值法进行整合^[49]。综合权重 ω_j 是由AHP方法计算的权重 ω_{1j} 和熵值法计算的权重 ω_{2j} 共同构成, 其计算如式(7)所示。

$$\omega_j = \frac{\sqrt{\omega_{1j}\omega_{2j}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{\omega_{1j}\omega_{2j}}} \quad (7)$$

(3) TOPSIS方法。目前, 多准则决策方法已经普遍地应用在能源规划、资源配置、政策制定等多个领域^[50]。TOPSIS是把各备选方案与理想解和负理想解作比较, 若其中有一个方案最接近理想解, 而同时又远离负理想解, 则该方案是备选方案中最好的方案。TOPSIS已被广泛应用于多属性决策当中, 算法过程如下。

①标准化决策矩阵。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}, \quad i=1, \dots, m; \quad j=1, \dots, n \quad (8)$$

②计算加权标准化决策矩阵。 w_j 是指标 j 的权重 v_j 。

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \quad \sum_{j=1}^n w_j = 1 \quad (9)$$

③确定理想解和负理想解。 A^+ 表示理想解, A^- 表示负理想解,

$$\begin{aligned} A^+ &= \{v_1^+, \dots, v_n^+\} \\ A^- &= \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \end{aligned} \quad (10)$$

当指标 j 为利益指标时,

$$v_j^+ = \max\{v_{ij}, i=1, \dots, m\}, \quad v_j^- = \min\{v_{ij}, i=1, \dots, m\} \quad (11)$$

当指标 j 为成本指标时,

$$v_j^- = \max\{v_{ij}, i=1, \dots, m\}, \quad v_j^+ = \min\{v_{ij}, i=1, \dots, m\} \quad (12)$$

④计算每个备选方案到理想解的距离 D_i^+ 和到负理想解的距离 D_i^- 。

$$\begin{aligned} D_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, \quad i=1, \dots, m \\ D_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, \quad i=1, \dots, m \end{aligned} \quad (13)$$

⑤计算最接近理想解的方案。按照 C_i 递减排序。

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (14)$$

2.2.2 耦合协调度模型 (CCD) 耦合协调模型可以根据系统中多个子系统的综合评价识别区耦合协调情况, 从而在绿色金融的整体发展中反映出具体绿色金融策略的差异。具体计算过程如下。

$$C = \left(\frac{\prod_{i=1}^n U_i}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i \right)^n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (15)$$

式中, C 为系统的耦合度, 表示各自系统相互之间的作用程度, 在此基础上计算耦合协调水平; U_i 表示子系统 i 的值, 本文中为5类绿色金融策略的得分。

$$T = \sum_{i=1}^n \omega_i U_i \quad (16)$$

$$D = \sqrt{CT} \quad (17)$$

式中, T 为协调指数; D 为耦合协调度; ω_i 为子系统 i 的权重, 参考已有研究, 将权重定为0.2。采用十级分类法对耦合协调度进行分类, 如表3所示。

表3 耦合协调度等级区分

Table 3 Classification of coupling coordination levels

协调度的区间	协调等级	协调度的区间	协调等级
[0, 0.1)	极度失调	[0.5, 0.6)	勉强协调
[0.1, 0.2)	严重失调	[0.6, 0.7)	初级协调
[0.2, 0.3)	中度失调	[0.7, 0.8)	中级协调
[0.3, 0.4)	轻度失调	[0.8, 0.9)	良好协调
[0.4, 0.5)	濒临失调	[0.9, 1]	优质协调

2.3 数据

本研究以中国六大区域[华北、东北、华东、中南、西南、西北, 共30个省、自治区、直辖市(不含西藏、港澳台)]为研究主体, 时间跨度为2016—2022年。所有原始数据均源自公开出版的权威年鉴、行业发展规划、专业数据库及政府官方网站, 并经过计算与整理, 最终形成了表1中所示的指标体系。其具体来源与处理流程如下。表4列示了数据来源。

(1) 绿色金融策略数据。各区域绿色信贷、绿色债券、绿色基金、绿色保险及碳金融的规模、投向及

表4 数据来源

Table 4 Data source

数据类型	具体来源	网址
绿色金融策略数据	《中国绿色金融发展报告》	http://fx.cfph.cn/plugin.php?id=nds_books&action=index
	《中国地方绿色金融发展报告》	https://iigf.cufe.edu.cn
清洁能源与能源结构数据	《中国可再生能源发展报告》	http://www.creei.cn/web/index.html
	《中国能源统计年鉴》	https://www.stats.gov.cn/hd/lyzx/zxgk/nytj/
	《中国电力年鉴》	http://www.ceppc.org.cn/dlnj/
碳排放数据	中国碳核算数据库	https://www.ceads.net/
	多尺度排放清单模型	http://meicmodel.org
政策环境数据	地区统计年鉴	https://www.stats.gov.cn/sj/ndsjs/

结构数据, 主要来源于2017—2023年各年度出版的《中国绿色金融发展报告》和《中国地方绿色金融发展报告》, 以及国家统计局的权威数据。对于报告中未直接披露的细分指标(如“用于传统能源转型的资金”), 则依据报告内“分地区绿色信贷投向分布”章节的原始数据, 按传统能源转型项目占比进行加权计算得到。部分缺失数据参考Ran和Zhang^[51]的测算方法进行补充。

(2) 清洁能源与能源结构数据。各区域风电、光伏、水电、生物质、地热的装机容量、发电量、投资额及发电成本补贴数据, 来自2017—2023年各年度《中国可再生能源发展报告》《中国能源统计年鉴》《中国电力年鉴》、各省级统计年鉴、各时期水电发展规划、风电发展规划、光伏发展规划、生物质能源发展规划。

(3) 碳排放数据。各区域能源消费相关的CO₂排放总量、直接减排量、末端治理及过程控制数据, 主要来自中国碳核算数据库(CEADs, <https://www.ceads.net/>)及多尺度排放清单模型(MEIC, <http://meicmodel.org>)。对于数据库未覆盖指标, 根据各省《环境统计年报》中“废气治理设施运行费用”及“碳捕集项目投资额”等数据进行估算。数据处理的框架参考了Trolborg等^[52]的做法。

(4) 政策环境数据来自各省级统计年鉴和各地政府机构网站。社会数据来自各省级统计年鉴和各地民政与社保机构网站。

3 结果分析

3.1 绿色金融战略指数的演化特征

为了对中国区域绿色金融策略作出更为深入的评价, 将样本划分为华北(北京、天津、河北、山西、内蒙古), 东北(辽宁、吉林、黑龙江), 华东(上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东), 中南(河南、湖北、湖南、广东、广西、海南), 西南(重庆、四川、贵州、云南), 西北(陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆)。由于数据的可用性, 西藏、香港、澳门和台湾未被包括。

总体来看, 在2016—2022年间, 中国绿色金融策略评价指数展现出上升的总体趋势。具体而言, 如图2(a)所示, 对能源转型的支持(EN)指标从2016年的中低值区间跃升至2022年的中高值区间。图2(b)揭示, 各区域增速整体呈现下降趋势, 增长最快的区域由原先的东部、中南、西南、西北转变为东北、华北和东部区域, 这表明绿色金融对能源转型的支持具有鲜明的区域特性。碳减排的支持指标(CR)的变动趋势与EN相似, 六大区域在2016—2018年间增长缓慢甚至下降, 但2018—2020年间迅速上升, 这表明绿色金融对碳减排的直接支持具有显著的阶段性特征。政策和金融环境(PF)指标则呈现出先增后降的总体趋势, 绿色金融的发展环境在2016—2018年间迅速成长, 随后趋于平缓。社会福利效果(SW)指标则以缓慢增长的态势展现, 成为四类指标中变动最为缓慢的一个, 这表明当前绿色金融战略的

实施主要聚焦于能源和低碳领域,尚未充分渗透至社会福利层面。

3.2 绿色金融战略选择的评价结果

3.2.1 权重计算结果 在利用熵值法进行客观权重计算的过程中,鉴于研究时间跨度较大,各研究区域中绿色金融的发展速度呈现较大波动。因此,本研究采用不同时期熵值法初始权重的平均值作为混合权重的计算基础,旨在减轻因不同时期发展水平差异所带来的影响。从表5中可以观察到,在中国各区域绿色金融战略指标体系中,对能源转型的支持被视为最为关键的因素,其次是碳减排的支持、政策与金融环境以及社会福利效果。在具体指标中,排名前三的分别是直接用于CO₂减排、用于能源末端排放改造以及政府对此类绿色金融的支持力度。

3.2.2 排序计算结果 利用AHP-熵值法-TOPSIS方法所得的各区域绿色金融战略优先级排序及其变动,详见表6。因各区域在自然资源条件、碳减排优势、政策与金融环境及社会状况上存在差异,绿色金融战略的适用性亦有所区别。华北地区,绿色信贷始终是

首要选择,而次要选项由2016年的绿色债券转变为绿色基金与PPP,总体上绿色信贷最为关键,绿色基金与绿色债券为第二梯队,绿色金融居第三梯队,绿色保险则排在最后。东北地区,2016—2020年绿色信贷为首选,2022年变为绿色债券。整体上,绿色金融战略排序未有显著变化,绿色信贷与绿色债券交替领先,其后依次为绿色基金、碳金融及绿色保险。东部地区,2016年绿色信贷居首,2018和2020年绿色债券居首,2022年绿色基金居首,整体变化较为频繁。从时期看,绿色信贷的优先级呈下降趋势,绿色债券呈横向波动,而绿色基金与PPP的优先级则逐渐上升。碳金融与绿色保险作为优先级较低绿色金融战略,在2022年也出现顺序波动。中南地区,2016—2022年间,绿色信贷与绿色债券均位于前两位。与上述区域不同,碳金融在中南地区整体上排在第三位,表明其试点与发展情况较好。西南地区,始终是绿色信贷、绿色债券与碳金融位列前三,同样说明碳金融在该区域的发展情况良好。西北地区,绿色信贷居首位,其次是2016年的绿色基金与后续的绿色债券,整体上绿色债券的战略位置优于绿色基金。

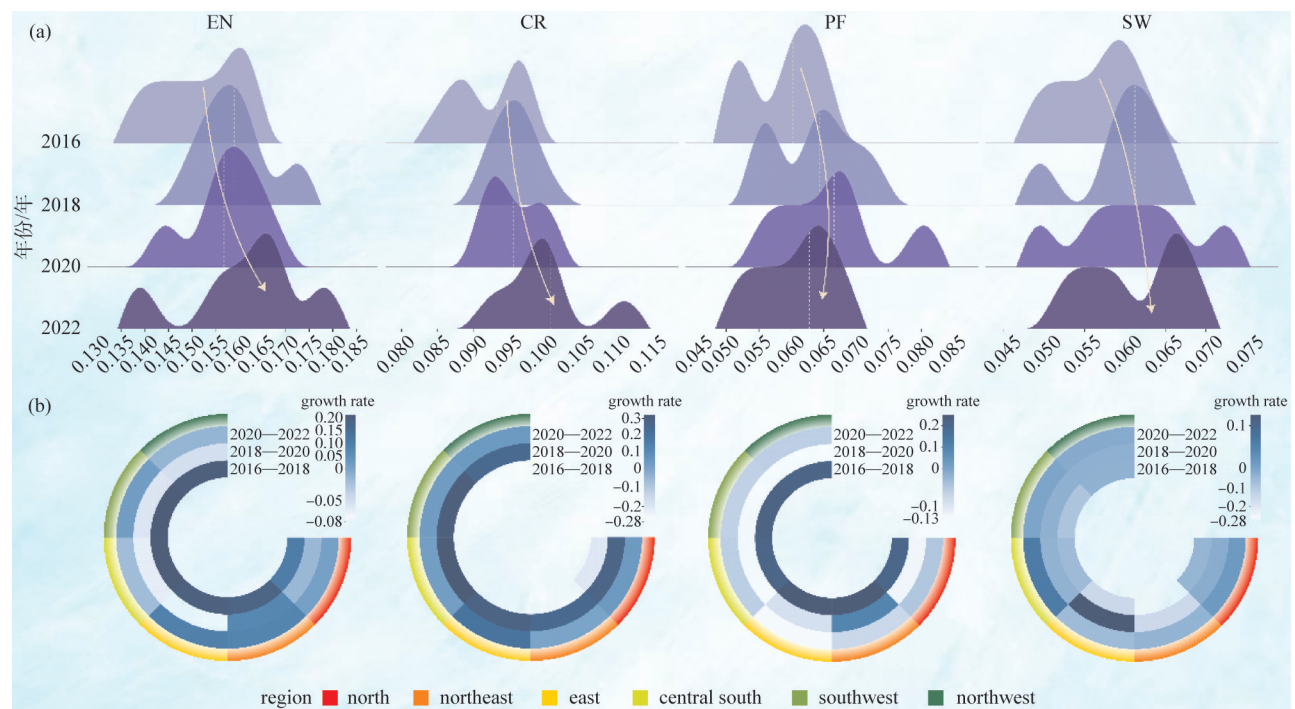


图2 绿色金融战略指数的时空演变趋势

Figure 2 The spatiotemporal evolution trend of the Green Finance Strategy Index

表5 权重计算结果

Table 5 Weight calculation results

维度	权重	维度排序	指标	AHP 权重	熵值法平均权重	综合权重	指标排序
对能源转型的支持 EN	0.325	2	支持规模	0.011	0.061	0.0359	15
			用于传统能源转型的资金	0.044	0.028	0.0358	16
			对风电的支持	0.075	0.042	0.0586	7
			对水电的支持	0.075	0.056	0.0656	5
			对光伏的支持	0.075	0.029	0.0524	9
			对生物质发电的支持	0.024	0.031	0.0279	17
			对地热发电的支持	0.024	0.030	0.0271	18
			发电成本补贴率	0.016	0.029	0.0221	19
对碳减排的支持 CR	0.360	1	直接用于 CO ₂ 减排	0.122	0.064	0.0927	1
			用于区域生态友好型项目的比例	0.040	0.081	0.0602	6
			用于能源固定资产投资的比例	0.041	0.046	0.0435	12
			用于能源末端排放改造	0.095	0.086	0.0903	2
			用于生产部门过程碳排放的控制的比例	0.060	0.086	0.0731	4
政策和金融环境 PF	0.182	3	地方绿色金融种类发展程度	0.028	0.050	0.0387	13
			政府对该类绿色金融的支持力度	0.102	0.070	0.0864	3
			该类绿色金融得到的保障	0.044	0.070	0.0571	8
社会福利效果 SW	0.133	4	绿色融资对生物多样性和气候的保护	0.049	0.047	0.0484	10
			对绿色消费的引导	0.025	0.051	0.0380	14
			就业岗位	0.049	0.043	0.0463	11

碳金融与绿色保险则排在其后。

3.2.3 绿色金融战略变动频率分析 从2016—2022年六个区域绿色金融战略优序评价结果中可以观察到，各区域展现出不同的绿色金融战略变化速度。为了深入探究绿色金融战略的发展特性，将对各区域的变化频率进行细致分析。图3描绘了各区域绿色金融战略的变动情况：当两个绿色金融战略备选方案的排序发生变动时，赋值为1；三个方案变动时，赋值为2；四个方案变动时，赋值为3；若所有方案顺序均发生变化，则赋值为4。可以看出，东部地区在2020—2022年间尤为活跃，甚至全部出现变动，这表明该地区绿色金融环境高度活跃，各类金融战略在实施过程中得以不断升级，并展现出较强的绿色金融创新性。相比之下，华北地区的活跃度虽次之，但呈现下降趋势。而西北、西南、东北、中南等地区则相对稳定，这既反映了既有战略实施的成熟度，也暗示了这些区域目前对绿色金融的进一步探索相对不足。

3.3 绿色金融策略选择的演变路径

为更深入地研究各区域绿色金融策略的发展动向，以各绿色金融方案的得分为基准，结合各区域不同绿色金融策略在不同阶段的演变特征，将变化路径细分为四种类型：持续上升、波动上升、波动下降、持续下降。

图4展示了在各区域中不同绿色金融策略的演变路径。在西北地区，可以观察到绿色债券和绿色基金的数值呈现波动下降趋势，而绿色信贷则持续下滑；与此相反，碳市场和绿色保险的数值则呈现出波动上升的态势。这表明，尽管绿色信贷和绿色债券在各时期内依然是西北地区的主流策略，但从促进碳减排的角度来看，它们的重要性似乎有所减弱。与此同时，碳金融和绿色保险等规模较小的绿色金融策略，在促进碳减排方面的效用正逐渐显现，其重要性日益增加。这一现象可能与西北地区得天独厚的风光资源对绿色金融策略所具有的吸引力密切相关。

表6 按地区和年份排列的绿色金融策略优先级
Table 6 Priority of green finance strategies by region and year

地区	排序	绿色金融策略			
		2016年	2018年	2020年	2022年
北部	1	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷
	2	绿色债券	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP
	3	绿色基金和PPP	碳金融	绿色债券	绿色债券
	4	碳金融	绿色债券	碳金融	碳金融
	5	绿色保险	绿色保险	绿色保险	绿色保险
东北	1	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷	绿色债券
	2	绿色债券	绿色债券	绿色债券	绿色信贷
	3	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP
	4	碳金融	碳金融	碳金融	碳金融
	5	绿色保险	绿色保险	绿色保险	绿色保险
东部	1	绿色信贷	绿色债券	绿色债券	绿色基金和PPP
	2	绿色债券	绿色信贷	绿色基金和PPP	绿色信贷
	3	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	绿色信贷	绿色债券
	4	碳金融	碳金融	碳金融	绿色保险
	5	绿色保险	绿色保险	绿色保险	碳金融
中南	1	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷
	2	绿色债券	绿色债券	绿色债券	绿色债券
	3	碳金融	碳金融	碳金融	绿色基金和PPP
	4	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	碳金融
	5	绿色保险	绿色保险	绿色保险	绿色保险
西南	1	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷
	2	绿色债券	绿色债券	绿色债券	绿色债券
	3	碳金融	碳金融	碳金融	碳金融
	4	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	绿色保险	绿色保险
	5	绿色保险	绿色保险	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP
西北	1	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷	绿色信贷
	2	绿色基金和PPP	绿色债券	绿色债券	绿色债券
	3	绿色债券	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP	绿色基金和PPP
	4	碳金融	碳金融	碳金融	碳金融
	5	绿色保险	绿色保险	绿色保险	绿色保险

在华北地区，绿色债券与绿色信贷的走势显现出下降趋势，而绿色基金、碳市场及绿色保险等新兴绿色金融策略则呈现上升态势。这一现象背后，是华北地区围绕首都区域所实施的绿色金融创新策略更为活跃，且对各类绿色金融策略的配置更为均衡所致。

在东北地区，除了绿色信贷略有下滑外，其余四类绿色金融策略均呈现出波动上升的趋势。尤为值得

一提的是，在优序策略排序中，东北地区表现出了极高的稳定性。近期，绿色债券超越了绿色信贷，成为最有利于碳减排的绿色金融策略，这表明东北地区的绿色金融发展正处于一个稳定的发展期，其发展策略有向华北地区特征过渡的趋势。

在东部地区，绿色基金与绿色保险持续上升，而绿色信贷与碳市场则呈现波动下降趋势。绿色债券则

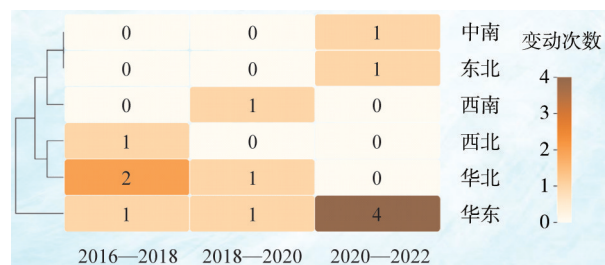


图3 各区域绿色金融策略变动频率

Figure 3 Frequency of changes in green finance strategies in various regions

持续下降,这反映了东部地区绿色金融策略的优序变动。值得注意的是,绿色基金的上漲幅度较大,最终在排序中逐渐超越了绿色信贷与绿色债券。这一现象的原因在于,东部地区作为我国经济最为发达的区域,各类政策和市场因素促进了绿色基金等新兴绿色金融策略的快速发展,其碳减排效果也更为显著,彰显了该地区在利用绿色金融促进碳减排实践方面的领先地位。

在中南地区,绿色债券与绿色基金呈现持续上升趋势,绿色保险呈波动上升,碳市场则波动下降,而绿色信贷持续下降。然而,中南地区的绿色金融策略排序较为稳定,这表明该地区各类绿色金融策略之间的总体差异较小,各具体策略的变动对总体排序影响不大。这一现象的成因在于早期该地区碳市场试点的丰富性,这带动了绿色金融的健全发展,使中南地区的绿色金融策略保持了相对稳定的状态。

在西南地区,绿色债券与绿色保险持续上升,碳市场波动上升而绿色基金波动下降。从该地区绿色金融策略的排序来看,整体较为稳定。尽管绿色信贷有所下降,但它始终保持最优排序;而绿色债券虽然有所上升但始终未能超过绿色信贷。这一现象的原因在于西南地区主要依赖水力资源作为传统能源的替代品,其能源结构相对不丰富且在碳减排效用不高。

3.4 具体绿色金融策略的耦合协调度分析

利用耦合协调度模型对各区域中各类绿色金融策略的耦合情况进行了深入分析,结果显示,五种绿色金融策略在各区域的耦合情况整体上呈现出稳定上升的趋势(见图5)。从总体上看,中南地区、西南地区及东部地区的耦合协调度(CCD)最高,这主要归因于三个方面的因素:首先,华东和南部地区经济发达,为绿色金融策略的实施提供了坚实的经济基础;其次,2016年“十三五”规划对中部、东部和南部地区的风电等清洁能源进行了重点部署,这些区域在近年来的能源结构转型和碳减排进程显著加快,导致资金需求激增,进而提升了绿色金融的活跃度;最后,这些区域的绿色金融策略试点和实践程度较高,进一步促进了CCD的提升。华北地区CCD在2016—2018年出现快速上涨,这与该时期碳市场、绿色保险等新型绿色金融模式的加速发展有关。西北地区的CCD整体上最低,虽然西北地区有大量的风电、光伏等资源储备,但受制于金融发展落后,制约

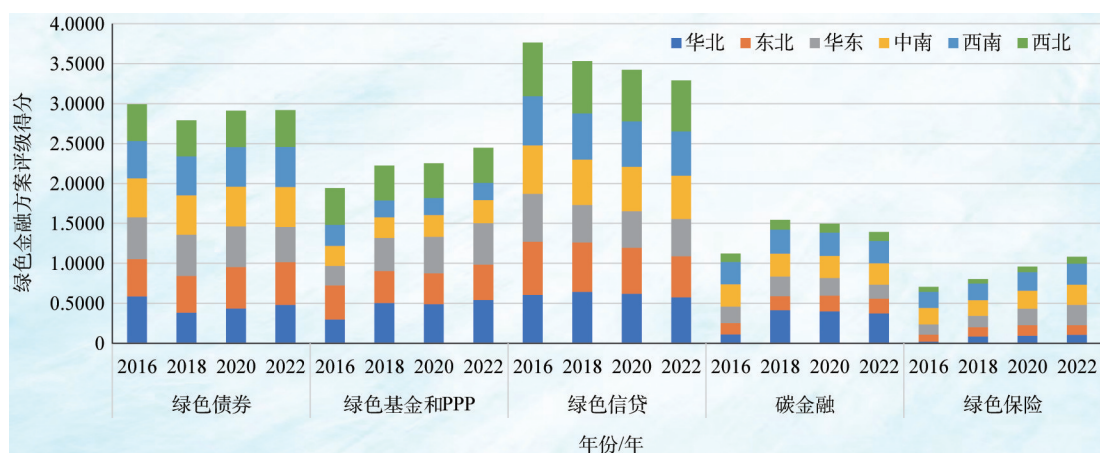


图4 绿色金融战略选择的演变

Figure 4 Evolution of green finance strategy selection

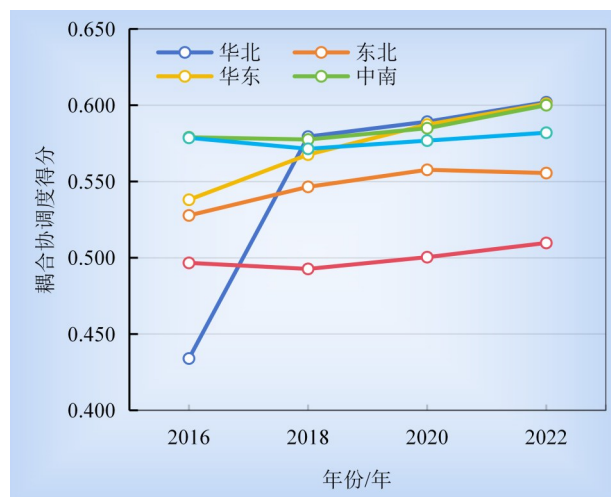


图5 各区域绿色金融策略CCD时间演进趋势

Figure 5 Time evolution trend of CCD for green finance strategies in various regions

了该地区绿色金融的协同发展。

不同区域CCD时空演化趋势分析的结果如表7所示, 2016年, 华北和西北地区处于濒临失调的阶段, 而东北、东部、中南和西南地区则勉强协调。到了2018年, 华北地区升级为勉强协调状态, 随后在2020年, 西北地区也达到了这一水平。这标志着我国以碳减排为动力的绿色金融策略的耦合程度正处于积极提升的态势中。2022年, 华北、东部和中南地区实现了初级协调, 其协调效率得到进一步提升。这一时空演变趋势反映出, 我国各区域在推进绿色金融策略时, 均已将能源结构转型与碳减排纳入考量, 且此趋势正稳步增强。在经济较为发达的地区, 因其拥有更为丰富的财政资源和较高的金融发展水平, 故而在实施碳减排过程中能更好地与绿色金融的协同发展相结合, 进而促使绿色金融水平持续上升。相比之下, 经济欠发达地区在兼顾碳减排与绿色金融协同发展方面显得力不从心, 导致绿色金融策略间的协同程度相对较弱。

4 结果与讨论

4.1 研究结果

研究显示, 以能源结构转型及减少碳排放为目标

表7 不同区域CCD时空演化趋势

Table 7 Temporal and spatial evolution trends of CCD in different regions

年份/年	华北	东北	华东	中南	西南	西北
2016	濒临失调	勉强协调	勉强协调	勉强协调	勉强协调	濒临失调
2018	勉强协调	勉强协调	勉强协调	勉强协调	勉强协调	濒临失调
2020	勉强协调	勉强协调	勉强协调	勉强协调	勉强协调	勉强协调
2022	初级协调	勉强协调	初级协调	初级协调	勉强协调	勉强协调

的绿色金融发展策略, 并非一成不变, 而是展现出区域性和时间性的动态变化特征, 这一发现与现有研究相符^[37]。这种复杂的动态性对绿色金融的发展产生了深远的影响^[53]。研究进一步指出, 各类具体的绿色金融策略在各区域的发展路径和内部关系同样处于变化之中, 为未来绿色金融与能源结构转型的深度融合提供了可靠的指导和依据。

基于能源结构转型的绿色金融策略的四个维度得分总体上呈上升趋势, 与Sun等^[54]的研究结果一致, 其中绿色金融对能源转型指标的支持增长速度最快。从各绿色金融策略的排序中可以看出, 绿色金融的有效配置对促进能源结构转型和减少碳排放具有积极效应, 有助于实现经济与环境的双赢, 这一结论与现有研究相吻合^[55]。具体而言, 在华北地区, 绿色信贷始终占据首位; 东北地区在2016—2020年间以绿色信贷为主, 2022年转向绿色债券; 东部地区经历了绿色信贷、绿色债券到绿色基金的转变; 中南、西南和西北地区在2016—2022年间均以绿色信贷为先, 其中中南和西南地区的碳金融排序较高。总体上与^[37]的研究相呼应, 东部地区的绿色金融策略变动最为频繁, 其次是华北地区, 其他四个区域变动较小, 这主要归因于东部地区的经济发达、金融活跃度高以及完备的政策和环境保护^[56], 而中国幅员辽阔, 其他区域拥有独特的清洁能源资源储备^[57], 导致东部地区在能源转型过程中对绿色金融的依赖程度较低。

从各类绿色金融策略的演变路径来看, 东部地区绿色基金和绿色保险呈上升趋势, 其余策略则下降;

中南地区绿色债券、绿色基金和绿色保险呈上升趋势, 其他下降; 西南地区绿色债券、碳市场和绿色保险发展良好; 东北地区各绿色金融策略逐渐向好; 华北地区绿色基金、碳市场和绿色保险呈上升趋势; 西北地区仅碳市场和绿色保险势头良好。这表明各区域绿色金融策略的发展趋势及其未来方向。值得注意的是, 与 Zhang 等^[58-59]的研究不同, 尽管作为最主要和基础的绿色金融策略, 绿色信贷在各区域中具有重要地位, 但其促进能源结构转型和碳减排的得分正在逐渐下降^[60], 相反, 绿色保险虽然体量小, 但近年来对能源结构转型的促进作用在增强^[60-61]。其他类型的绿色金融策略在区域能源结构转型促进效用表现出较强的差异性, 提示不同区域应结合自身可再生资源禀赋和优势能源, 选择合适的绿色金融策略以提升融资效率和能源转型效率。进一步分析各区域中绿色金融策略之间的耦合协调度 (CCD) 发现, 整体上呈现逐渐上升态势, 但水平仍不高^[35], 表明中国在推动能源结构转型的绿色金融道路上仍有较大发展空间。特别是东部区域相对于西部区域具有更强的 CCD, 而西部拥有更广阔的土地和可再生资源, 这反映出当前中国金融发展与能源转型之间的不匹配性, 导致绿色金融更多地与当地经济环境挂钩而非能源转型导向。

4.2 政策建议

绿色金融的发展与能源结构的转型及碳减排紧密相连, 不同区域的能源结构特性又对绿色金融的发展带来不同的影响。因此, 须综合考虑各区域的能源资源优势、能源结构转型特点以及绿色金融的发展趋势, 构建一个基于“能源-金融”综合框架的区域绿色金融发展策略。基于此提出政策建议如下:

(1) 为高效支持能源结构转型, 应依据各地区所拥有的可再生资源禀赋及其在清洁能源技术上的优势, 因地制宜地采取差异化绿色金融策略。这意味着针对不同的能源转型项目, 需实施不同的金融策略, 充分考量各类绿色金融策略在各区域的效用差异。

(2) 为促进绿色金融的可持续发展, 应根据其发展特性和不同演变路径及趋势, 以及各策略间的协同程度, 制定合适的绿色金融发展路径。各区域应依据

具体发展特性, 为当地绿色金融的持续发展提供支持, 确保其能持续为碳减排提供资金支持。

(3) 在认识到绿色金融对能源结构转型和碳减排的积极作用后, 各地应结合地区经济、社会和能源条件, 为不同绿色金融策略在当地的发展制定有针对性的支持政策, 以提升政策对绿色金融的支持程度。

(4) 在利用绿色金融促进能源结构转型的过程中, 应特别关注其对能源结构转型的积极影响。通过为能源绿色金融向清洁能源的发展提供充足资金, 支持能源结构不断向更绿色的方向转型, 进而助力碳达峰碳中和目标的早日实现。

5 结论

能源结构转型是实现“双碳”目标的关键路径, 而巨额的资金需求使得绿色金融成为不可或缺的支撑力量。本文基于 2016—2022 年的面板数据, 构建了包含能源、碳减排、政策与社会四大维度的评价体系, 深入探究了中国六大区域绿色金融策略的优序演变及耦合协调机制。研究结论如下:

(1) 绿色金融对能源转型的支撑效能呈显著增强态势, 但区域间存在非均衡性。2016—2022 年间, 中国各区域绿色金融策略的综合绩效指数整体呈上升趋势, 特别是在支持能源结构转型和直接碳减排方面的得分提升明显。这表明绿色金融体系已从初期的规模扩张逐步转向对能源转型的实质性深度支持。然而, 不同区域的起步基础与发展速率差异显著, 东部及南部经济发达地区在绩效得分上普遍领先于西部地区。

(2) 绿色金融策略优序呈现鲜明的“区域异质性”与“动态演变性”。研究发现, 不同区域在促进能源转型的过程中并不存在普适的单一最优策略, 而是呈现出“因地制宜”与“因时而变”的双重特征。华北地区表现出极强的路径依赖与稳定性, 绿色信贷在 2016—2022 年间始终占据主导地位。与之形成鲜明对比的是东部地区, 其策略演变呈现出快速迭代的动态性, 经历了从 2016 年绿色信贷主导, 到 2018—2020 年绿色债券领跑, 最终在 2022 年转向由绿色基金 PPP 占据首位的变迁过程; 东北地区也在 2022 年

出现了绿色债券对绿色信贷的反超;而中南、西南及西北地区则更多表现为多轮驱动格局,其中中南与西南长期维持绿色信贷与绿色债券交替领先的态势,西北地区虽始终以绿色信贷为首,但第二梯队的竞争则由2016年的绿色基金逐渐转变为后续年份的绿色债券。这一演变规律表明,随着能源转型的深入,各区域正根据自身禀赋对金融工具进行动态适配与调整。

(3) 策略演变路径揭示了“新旧更替”的内在逻辑。通过对演变路径的分析发现,传统的绿色信贷虽然目前仍占据重要份额,但在多数区域呈现出“持续下降”或“波动下降”的趋势,其相对重要性正在减弱。与此形成鲜明对比的是,绿色保险作为一种新兴工具,在所有六大区域均展现出“波动上升”的强劲势头,尽管其当前体量较小,但边际贡献正在快速增加。这预示着未来绿色金融将从单一的债务融资向多

元化、风险保障型工具组合转变。

(4) 策略间的耦合协调度稳步提升,但与资源禀赋存在错位。各区域五类绿色金融策略(信贷、债券、基金、碳金融、保险)的CCD整体由“濒临失调”向“初级协调”迈进。经济发达的中南、东部及西南地区拥有最高的耦合协调度,而拥有丰富风光资源的西北地区协调度最低。这一发现揭示了当前中国绿色金融发展的一个结构性矛盾,即金融资源的协同效率更多受制于区域经济发展水平,而非能源转型的实际紧迫性与资源禀赋,存在明显的“金融-能源”错配现象。

综上所述,未来在制定绿色金融支持政策时,应摒弃“一刀切”的思维,充分尊重各区域的资源禀赋差异和发展阶段特征,实施差异化、动态化的策略组合,并重点引导金融资源向资源丰富但金融落后的地区流动,以提升整体转型效率。

参考文献

- [1] Xu W, Sun L. Market incentive based environmental regulation and energy consumption structure transformation: Empirical evidence from China's carbon emission trading pilot program[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economic*, 2023, 40(07): 133-55.
- [2] International Energy Agency. CO₂ Emissions in 2022[M]. Paris: OECD, 2023.
- [3] 徐丹丹, 刘昱廷. 中国能源消费结构转型与金融韧性[J]. *现代金融研究*, 2025, 30(6): 46-56.
Xu D D, Liu Y T. Transformation of China's energy consumption structure and financial resilience[J]. *Journal of Modern Finance*, 2025, 30(6): 46-56.
- [4] Zhou X Y, Zhang J, Li J P. Industrial structural transformation and carbon dioxide emissions in China[J]. *Energy Policy*, 2013, 57: 43-51.
- [5] 国家发展改革委. 国家碳达峰试点建设方案 [EB/OL]. (2023-10-20)[2026-03-02]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202311/t20231106_1361806.html.
National Development and Reform Commission. National carbon peak pilot construction plan[EB/OL]. (2023-10-20)[2026-03-02]. http://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202311/t20231106_1361806.html.
- [6] G20 Sustainable Finance Working Group. The 2022 G20 Sustainable Finance Report[R]. Washington, D.C.: G20 Sustainable Finance Working Group, 2022.
- [7] 颜越. 我国可再生能源发电项目补贴退坡的困境机理解析[J]. *能源技术与管理*, 2022, 47(6): 203-205.
Yan Y. Analysis of the dilemma mechanism of subsidy phase-out for renewable energy power generation projects in China[J]. *Energy Technology and Management*, 2022, 47(6): 203-205.
- [8] 李晨潇, 刘凯莉, 马思睿. 绿色金融发展对省域能源消费结构转型影响的空间效应[J]. *经济地理*, 2024, 44(8): 148-157.
Li C X, Liu K L, Ma S R. Spatial effects of green finance development on the transformation of energy consumption structure at the provincial level[J]. *Economic Geography*, 2024, 44(8): 148-157.
- [9] 郭旻申, 方先明. 绿色金融、数字经济与工业碳减排[J]. *现代经济探讨*, 2025(7): 50-61.
Guo M S, Fang X M. Green finance, digital economy, and industrial carbon emission reduction[J]. *Modern Economic Research*, 2025(7): 50-61.
- [10] 王健龙, 王伟龙, 刘勇. 绿色金融政策何以驱动中国城市能源转型?[J]. *经济与管理研究*, 2025, 46(11): 91-109.
Wang J L, Wang W L, Liu Y. How can the green finance policy drive urban energy transition in China?[J]. *Research on Economics and Management*, 2025, 46(11): 91-109.
- [11] 韩先锋, 曾迪. 绿色金融政策能否促进城市绿色创新集聚[J]. *金融理论与实践*, 2025(5): 55-66.

- Han X F, Zeng D. Can green finance policies promote agglomeration of urban green innovation?[J]. *Financial Theory & Practice*, 2025(5): 55-66.
- [12] 李艳梅, 彭寒. 随机演化博弈视角下能源行业结构转型分析[J]. *技术经济与管理研究*, 2026(2): 10-18.
Li Y M, Peng H. Analysis of structural transformation in the energy industry from the perspective of stochastic evolutionary game theory [J]. *Journal of Technical Economics & Management*, 2026(2): 10-18.
- [13] 范英, 衣博文. 能源转型的规律、驱动机制与中国路径[J]. *管理世界*, 2021, 37(8): 95-104, M0004.
Fan Y, Yi B W. Evolution, driving mechanism, and pathway of China's energy transition[J]. *Journal of Management World*, 2021, 37(8): 95-104, M0004.
- [14] Zou C N, Xiong B, Xue H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 480-491.
- [15] Lin B Q, Li Z. Towards world's low carbon development: The role of clean energy[J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118160.
- [16] Liu X Y, Zhang S, Bae J. The impact of renewable energy and agriculture on carbon dioxide emissions: Investigating the environmental Kuznets curve in four selected ASEAN countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 1239-1247.
- [17] Gozgor G. A new approach to the renewable energy-growth nexus: Evidence from the USA[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(17): 16590-16600.
- [18] 陈绍晴, 蔡茂雪, 魏婷, 等. 需求和技术转型下城市地铁碳减排潜力及经济效应: 以广州市为案例[J]. *系统工程理论与实践*, 2026, 46(1): 105-120.
Chen S Q, Cai M X, Wei T, et al. Evolving emission reduction potential and economic effects of urban subways amid technology and demand transformation: A case study of Guangzhou[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2026, 46(1): 105-120.
- [19] Liu Y, Xie X Q, Wang M. Energy structure and carbon emission: Analysis against the background of the current energy crisis in the EU[J]. *Energy*, 2023, 280: 128129.
- [20] Li J Y, Li S S, Wu F. Research on carbon emission reduction benefit of wind power project based on life cycle assessment theory[J]. *Renewable Energy*, 2020, 155: 456-468.
- [21] Wang Q, Guo J L, Li R R. Better renewable with economic growth without carbon growth: A comparative study of impact of turbine, photovoltaics, and hydropower on economy and carbon emission[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 426: 139046.
- [22] Chen X Z, Liu C, van Oel P, et al. Water and carbon risks within hydropower development on national scale[J]. *Applied Energy*, 2022, 325: 119872.
- [23] 马丽梅, 孙雪琳. 碳定价与能源转型: 基于国际碳市场的经验证据[J]. *世界经济研究*, 2026(2): 325-334.
Ma L M, Sun X L. Carbon pricing and energy transition: Empirical evidence from international carbon markets[J]. *World Economy Studies*, 2026(2): 325-334.
- [24] Salazar J. Environmental finance: Linking two worlds[C]. *Workshop on Financial Innovations for Biodiversity Bratislava*, 1998: 2-18.
- [25] Cowan E. Topical issues in environmental finance[J]. *Asia Branch of the Canadian International Development Agency (CIDA), Singapore: EEPSEA*, 1998: 1-20.
- [26] 刘浩冬, 徐秋艳. 绿色金融对高碳行业碳减排效率的影响: 来自电力行业的证据[J]. *自然资源学报*, 2025, 40(11): 3096-3116.
Liu H D, Xu Q Y. The impact of green finance on carbon emission reduction efficiency in high-carbon sectors: Evidence from the power sector[J]. *Journal of Natural Resources*, 2025, 40(11): 3096-3116.
- [27] 吴家庆. 绿色金融政策与包容性绿色增长: 基于绿色金融改革创新试验区的准自然实验[J]. *统计与决策*, 2026, 42(5): 137-142.
Wu J Q. Green finance policies and inclusive green growth: A quasi-natural experiment based on the green finance reform and innovation pilot zone[J]. *Statistics & Decision*, 2026, 42(5): 137-142.
- [28] 简冠群, 郭阳阳. 绿色金融政策能否提高可再生能源企业投资?[J]. *中国环境管理*, 2026, 18(1): 80-88.
Jian G Q, Guo Y Y. Can green finance policies increase investment in renewable energy enterprises?[J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2026, 18(1): 80-88.
- [29] Nie P Y, Chen Y H, Yang Y C, et al. Subsidies in carbon finance for promoting renewable energy development[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 677-684.
- [30] 潘怡麟, 潘舒芯, 朱凯. 绿色信贷的碳减排效应-来自碳排放空间分布数据的证据[J/OL]. *财经研究*, 1-16. [2026-03-15]. <https://doi.org/10.16538/j.cnki.jfe.20250412.101>.
Pan Y L, Pan S X, Zhu K. The carbon emission reduction effect of green credit: Evidence based on carbon emission spatial data[J/OL].

- Journal of Finance and Economics, 1-16. [2026-03-15]. <https://doi.org/10.16538/j.cnki.jfe.20250412.101>.
- [31] Zhao L H, Chau K Y, Tran T K, et al. Enhancing green economic recovery through green bonds financing and energy efficiency investments[J]. *Economic Analysis and Policy*, 2022, 76: 488-501.
- [32] Raghutla C, Kolati Y. Public-private partnerships investment in energy as new determinant of renewable energy: The role of political cooperation in China and India[J]. *Energy Reports*, 2023, 10: 3092-3101.
- [33] Shi B B, Jiang L S, Bao R, et al. The impact of insurance on pollution emissions: Evidence from China's environmental pollution liability insurance[J]. *Economic Modelling*, 2023, 121: 106229.
- [34] Dai Y J, Chen X Y. Evaluating green financing mechanisms for natural resource management: Implications for achieving sustainable development goals[J]. *Resources Policy*, 2023, 86: 104160.
- [35] Zhao L T, Li F R, Wang D S. How to achieve the common developments of green finance and clean energy in China? Evidence from coupling coordination evaluation[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 111011.
- [36] Iqbal S, Taghizadeh-Hesary F, Mohsin M, et al. Assessing the role of the green finance index in environmental pollution reduction[J]. *Studies of Applied Economics*, 2021, 39(3): 1-14.
- [37] Lyu C C, Bian B C, Lee C C, et al. Regional gap and the trend of green finance development in China[J]. *Energy Economics*, 2021, 102: 105476.
- [38] Huang Y M, Chen C, Lei L J, et al. Impacts of green finance on green innovation: A spatial and nonlinear perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132548.
- [39] Xu J J, Wang J C, Li R, et al. Is green finance fostering high-quality energy development in China? A spatial spillover perspective[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2023, 50: 101201.
- [40] 徐珂珂, 刘鑫, 裴文明, 等. 黄河流域风光资源开发及对能源转型的影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2026, 49(2): 263-272.
- Xu K K, Liu X, Pei W M, et al. Research on the development of wind-solar resources in the Yellow River Basin and its impact on energy transition[J]. *Environmental Science & Technology*, 2026, 49(2): 263-272.
- [41] Li T, Li A, Guo X P. The sustainable development-oriented development and utilization of renewable energy industry: A comprehensive analysis of MCDM methods[J]. *Energy*, 2020, 212: 118694.
- [42] Magni C A, Marchioni A, Baschieri D. Impact of financing and payout policy on the economic profitability of solar photovoltaic plants[J]. *International Journal of Production Economics*, 2022, 244: 108338.
- [43] Chu S J, Dhakal S, Ou C Q. Greening small hydropower: A brief review[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2021, 36: 100676.
- [44] Trivedi J, Chakraborty D, Nobanee H. Modelling the growth dynamics of sustainable renewable energy - Flourishing green financing[J]. *Energy Policy*, 2023, 183: 113846.
- [45] Taghizadeh-Hesary F, Mortha A, Farabi-Asl H, et al. Role of energy finance in geothermal power development in Japan[J]. *International Review of Economics & Finance*, 2020, 70: 398-412.
- [46] Shi Y R, Zhao Y Q. The contribution of green finance to energy security in the construction of new energy system: Empirical research from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 429: 139480.
- [47] Zhang M S, Lian Y, Zhao H, et al. Unlocking green financing for building energy retrofit: A survey in the western China[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 30: 100520.
- [48] Wang F Y, Wang R, He Z L. The impact of environmental pollution and green finance on the high-quality development of energy based on spatial Dubin model[J]. *Resources Policy*, 2021, 74: 102451.
- [49] Fan R L, Zhang H L, Gao Y. The global cooperation in asteroid mining based on AHP, entropy and TOPSIS[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2023, 437: 127535.
- [50] Wang J J, Jing Y Y, Zhang C F, et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9): 2263-2278.
- [51] Ran C Y, Zhang Y R. The driving force of carbon emissions reduction in China: Does green finance work? [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 421: 138502.
- [52] Troldborg M, Heslop S, Hough R L. Assessing the sustainability of renewable energy technologies using multi-criteria analysis: Suitability of approach for national-scale assessments and associated uncertainties[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 1173-1184.
- [53] Berrou R, Dessertine P, Migliorelli M. An overview of green finance[M]//The Rise of Green Finance in Europe. Cham: Springer International Publishing, 2019: 3-29.
- [54] Sun H Y, Chen F S. The impact of green finance on China's regional energy consumption structure based on system GMM[J]. *Resources*

Policy, 2022, 76: 102588.

- [55] Ge T, Cai X S, Song X W. How does renewable energy technology innovation affect the upgrading of industrial structure? The moderating effect of green finance[J]. *Renewable Energy*, 2022, 197: 1106-1114.
- [56] Song M L, Xie Q J, Shen Z Y. Impact of green credit on high-efficiency utilization of energy in China considering environmental constraints[J]. *Energy Policy*, 2021, 153: 112267.
- [57] Zheng H Y, Song M L, Shen Z Y. The evolution of renewable energy and its impact on carbon reduction in China[J]. *Energy*, 2021, 237: 121639.
- [58] Zhang D Y. Does the green loan policy boost greener production? Evidence from Chinese firms[J]. *Emerging Markets Review*, 2022, 51: 100882.
- [59] Xing C, Zhang Y M, Tripe D. Green credit policy and corporate access to bank loans in China: The role of environmental disclosure and green innovation[J]. *International Review of Financial Analysis*, 2021, 77: 101838.
- [60] Chen Q P, Ning B, Pan Y, et al. Green finance and outward foreign direct investment: Evidence from a quasi-natural experiment of green insurance in China[J]. *Asia Pacific Journal of Management*, 2022, 39(3): 899-924.
- [61] 何源, 李鹏程, 杨洁. 绿色金融标准化研究的文献计量学分析[J]. *标准科学*, 2024(1): 4-13.
- He Y, Li P C, Yang J. Bibliometrics analysis of standardization research on green finance[J]. *Standard Science*, 2024(1): 4-13.

Evaluation and Coupling Analysis of Green Finance Strategies for Carbon Reduction at the Energy Structure Level

JIAO Jian¹, SHEN Jianfei¹, LI Ang^{2*}

1. School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

Highlights

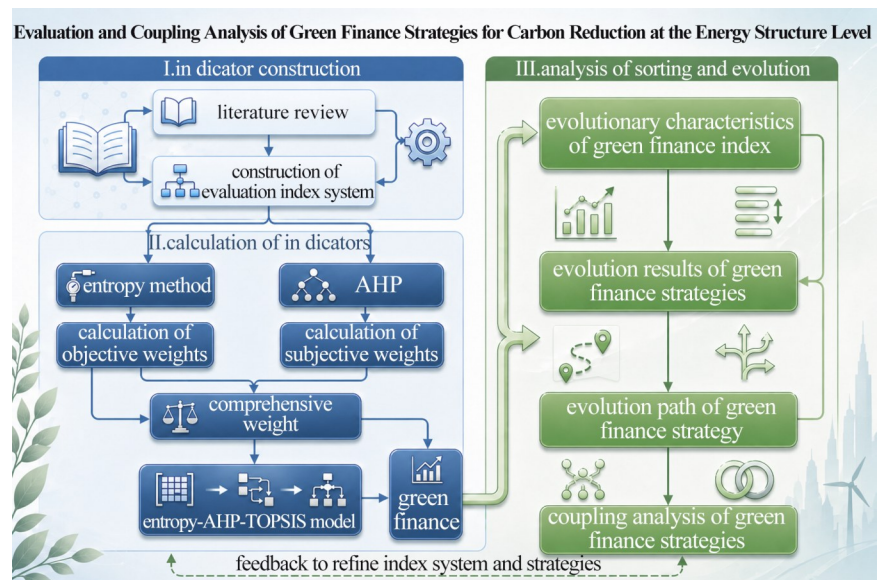
A four-dimension evaluation system for green finance strategies is developed covering energy, carbon reduction, policy, and social effects.

The optimal green finance strategy portfolios vary significantly across China's six major regions during 2016–2022.

Green credit's dominance declines while green insurance shows a rising trend in all regions.

Coupling coordination among green finance strategies improves but remains lower in western regions.

Graphical Abstract



Abstract: Against the backdrop of new requirements for energy structure transformation proposed in the 15th Five-Year Plan, this study aims to identify the regional applicability ranking of green finance strategies that promote energy structure transformation and carbon emission reduction, and to reveal the evolutionary paths and coupling coordination characteristics of

these strategies, thereby providing a basis for the region-specific allocation of green financial resources.

An evaluation system comprising four dimensions (support for energy transition, support for carbon emission reduction, policy and financial environment, and social welfare effects) and 19 indicators was constructed. Taking six major regions of China (North China, Northeast China, East China, Central-South China, Southwest China, and Northwest China, covering 30 provinces and equivalents) as the sample, a combined weighting method integrating the entropy method, analytic hierarchy process (AHP), and TOPSIS was employed to calculate the performance scores and regional rankings of five green finance strategies—green credit, green bonds, green funds and PPPs, carbon finance, and green insurance—for the period 2016–2022. The coupling coordination degree model was then used to analyze the level of coupling coordination among the five strategies.

From 2016 to 2022, the overall performance of green finance strategies showed an upward trend across all regions, with the "support for energy transition" dimension exhibiting the fastest growth. Significant regional differences were observed in strategy rankings. In North China, green credit consistently ranked first. In Northeast China, green credit ranked first from 2016 to 2020, but was overtaken by green bonds in 2022. In East China, the top-ranked strategy changed from green credit (2016) to green bonds (2018–2020) and then to green funds and PPPs (2022). In Central-South and Southwest China, green credit and green bonds remained the top two throughout the period. In Northwest China, green credit was always first, while the second position shifted from green funds and PPPs (2016) to green bonds (2018–2022). In terms of evolutionary paths, green credit showed a declining trend in most regions, whereas green insurance exhibited a fluctuating or continuously rising trend in all six regions. Regarding coupling coordination, Central-South, Southwest, and East China achieved the highest levels (reaching primary coordination in 2022, with coordination degree approximately 0.6–0.7), while Northwest China had the lowest level (barely coordination, approximately 0.5). Nationwide, the overall coordination level gradually improved from (near disorder) to barely coordination or primary coordination between 2016 and 2022.

The role of green finance in promoting energy structure transformation and carbon emission reduction has been steadily strengthening, but the optimal portfolio of strategies varies dynamically across regions. Economically developed regions exhibit more frequent strategy changes and higher coupling coordination, whereas the western region lags due to its less developed financial system. It is recommended that region-specific and differentiated green finance strategies be adopted, with attention to the declining relative importance of green credit and the rapid rise of emerging strategies such as green insurance. A limitation of this study is that the data only go up to 2022; future research can verify the persistence of the observed evolutionary trends once more recent data become available.

Keywords: energy structure transformation; ranking of green finance strategies; evolutionary path; coupling coordination