

基于半参数模型的我国能源结构调整减碳效应研究

王祉静^{1,2}, 王红瑞², 张 力², 李一阳²

(1. 上海交通大学数学科学学院, 上海 200240; 2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 基于我国 30 个省(区、市)2008—2019 年数据, 围绕能源结构调整在碳排放控制中的核心作用, 采用 Kaya 恒等式及其扩展形式, 结合平滑剪切绝对偏差法构建了精细化评估指标体系, 分析了各要素的碳减排贡献, 并引入半参数模型, 揭示了能源结构调整中水力发电比例与地区碳排放间的动态联系。结果表明: 控制发电量与调整能源结构是减碳贡献最高的两种方式; 通过提高水力发电的比例优化能源结构, 可以显著促进碳减排, 且水力发电比例 8%、38%、76% 是影响碳减排的 3 个关键阈值; 同时通过地区异质性分析提出了差异化的能源结构调整策略。

关键词: “双碳”目标; 能源结构; 平滑剪切绝对偏差法; 半参数模型; 水力发电

中图分类号: TV877

文献标志码: A

文章编号: 1004-6933(2025)06-0209-08

Research on carbon reduction effect of China's energy structure adjustment based on semi-parametric models//
WANG Zhijing^{1,2}, WANG Hongrui², ZHANG Li², LI Yiyang² (1. School of Mathematical Sciences, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on panel data from 30 provinces, municipalities, and autonomous regions in China from 2008 to 2019, considering the pivotal role of energy structure adjustment in carbon emission control, this study utilizes the Kaya identity and its extensions, combined with the SCAD (smoothly clipped absolute deviation) method for index selection, to construct a detailed assessment system and analyze the contribution of various elements to carbon reduction. By further incorporating a semi-parametric model, the dynamic relationship between energy structure adjustments and regional carbon emissions is revealed. The research indicates that controlling power generation and adjusting the energy structure are the two most effective methods for contributing to carbon reduction. Furthermore, optimizing the energy structure by increasing the proportion of hydropower significantly facilitates carbon reduction. The hydropower proportions of 8%, 38%, and 76% are identified as critical thresholds impacting carbon reduction significantly. Additionally, through an analysis of regional heterogeneity, differentiated strategies for adjusting energy structures are proposed.

Key words: carbon peaking and carbon neutrality goals; energy structure; SCAD method; semi-parametric model; hydropower

全球变暖已严重威胁地球生态安全与人类可持续发展, 成为当今世界面临的最为严峻的环境问题之一。在低碳化转型的背景下, 联合国提出了可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs), 旨在实现能源、经济和环境三者之间的协调与绿色发展。与此同时, 全球各国正积极推进碳减排进程并大力发展清洁能源, 我国提出的“双碳”战略目标深刻体现了能源结构调整的迫切需求^[1]。水力发电作为当前世界上最大的可再生电力来源, 被普遍视为清洁、低碳且环境友好的能源^[2], 不仅有助于稳定电力供应和推动工业发展, 还可带动区域经济

增长, 拓展健康与教育服务覆盖范围, 提升民生福祉, 进而有效支撑可持续发展目标的实现^[3-4]。

根据国际能源署估计^[5], 为了实现全球净零碳排放目标, 全世界每年需生产近 8 万亿 kW·h 的水力发电量, 这将在一定程度上推动“双碳”目标如期实现。然而, 水电资源的不断开发带来了径流变化、生态破坏等一系列复杂多样的环境风险, 而在最大化水电开发效益和最小化环境破坏之间取得平衡极其困难。因此, 准确量化水电开发对环境的影响, 对于推进清洁能源的使用和实现可持续发展具有重要意义, 相关学者对此开展了大量研究。Shen 等^[6]指

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279005); 国家重点研发计划项目(2023YFC3205600)

作者简介: 王祉静(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事水文统计研究。E-mail: wangzhijing_wzj@163.com

通信作者: 王红瑞(1963—), 男, 教授, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

出,作为清洁能源的水资源利用,显著降低了我国各省份的碳排放水平,并揭示了其健康协同效应。在碳约束背景下,部分学者从多目标优化与复杂系统的角度出发,构建水-能-碳耦合系统模型,并对其进行分析^[7-9];也有研究从水-能-粮角度,探讨三者之间的协调关系^[10-11]。在“双碳”目标下,对水资源与水系统的研究应从机理、量化、调控 3 个层面展开^[1,12]。然而,目前关于水力发电的水碳关系研究多聚焦于水电开发量与减碳效果之间的对应关系,通常局限于微观层面绝对量的关联分析。在将水电开发纳入更广泛的能源系统进行宏观层面评估时,常用方法(投入产出模型、全生命周期评价模型、可计算一般均衡模型以及生态网络分析等)均存在一定的局限性。首先,影响碳排放的关键变量通常依赖主观设定,缺乏客观筛选依据;其次,模型构建需对变量间关系做出较强的假设,限制了其适用性与稳健性。例如,戴嵘等^[13]与邵帅等^[14]均假定能源结构与碳排放之间存在(对数)线性关系,而传统参数模型难以准确捕捉水电开发占比与碳排放之间的复杂非线性互动关系。为此,本文基于平滑剪切绝对偏差(smoothly clipped absolute deviation, SCAD)法自适应构建评估指标体系,以有效降低变量选择中的主观偏差,使模型结果更具科学性和解释力^[15]。同时,进一步引入半参数模型进行分析,该模型无需预设具体的函数形式,能够灵活识别变量间的非线性关系,同时揭示资源利用与经济社会各环节之间的内在联系,具有广泛的应用优势。

水资源的高效利用在实现“双碳”目标过程中发挥着关键作用。通过水电能源替代化石能源并优化能源结构,推动了“碳达峰”与“碳中和”的进程。然而,由于我国不同地区的水资源禀赋与能源结构存在显著差异^[16-17],导致当前广泛应用的电能当量、CGE 等减碳效应评估方法存在以下不足:①模型可拓展性较弱,难以解决区域异质性与时间动态变化问题;②根据单一模型与参数设定进行分析易引起较大误差,致使关于能源结构与碳排放特征及其定量描述的研究较为粗略。

本文基于我国 30 个省(区、市)(鉴于数据的可获取性,不含港澳台和西藏)2008—2019 年的面板数据,结合 Kaya 恒等式分解与 SCAD 法筛选出影响区域碳排放的核心变量,并构建半参数模型,定量揭示不同发展阶段能源结构变化(特别是水电能源占比变化)对碳排放的减排效应,探讨区域能源结构调整路径的差异化特征及其政策含义。

1 研究方法

1.1 指标选择方法

1.1.1 Kaya 恒等式

对于碳排放的研究由来已久,不同学者在指标选择上也存在差异^[18-19]。其中,广泛采纳的分析框架为 Kaya 恒等式:将碳排放表示为能源碳强度、单位 GDP 能源强度、人均 GDP 与人口总量四部分的乘积。Kaya 恒等式将碳排放总量进行简单分解,并且保证了分解后的结果具有可观测性与可解释性。基于 Kaya 恒等式,一些学者对碳排放的分解进行了拓展研究^[20-21]。

Kaya 恒等式及其衍生模型能够从宏观层面直接解释碳排放的主要变化趋势。然而,在实际数据观测与模型拟合过程中,除上述 4 个核心因素外,还存在因统计口径、区域社会经济结构、政策执行偏差等引起的随机扰动,这些未能被核心因素完全捕捉的部分,通常称为误差因素,同样需要纳入分析。

Kaya 恒等式的分解及其拓展形式可为后续指标体系的构建提供初步依据,然而,该分解方法仍具有一定的主观性,其结果往往依赖于研究者对于专业知识的理解与判断。

1.1.2 SCAD 法

为了准确识别对碳排放具有显著影响的关键潜在变量,同时保证模型的简洁性并减少选择过程中的主观偏差,采用 SCAD 法选择指标,以保证指标选择的客观性。

SCAD 法通过施加惩罚函数来实现指标选择,其惩罚函数因具备以下优势而被广泛采用^[15,22-23]:①无偏性,在大样本下对重要变量保持较小的估计偏差,可以有效减少模型的系统误差;②稀疏性,能够将不重要变量系数压缩至 0,实现变量选择并提升模型的可解释性;③连续性,惩罚函数在系数趋近于 0 处具有连续的一阶导数,保证了解路径的平滑,增强了估计结果的稳定性^[22]。SCAD 法的核心在于对变量系数施加惩罚,通过最小化包含损失函数(用模型拟合结果与真实结果之差来衡量)和惩罚项的目标函数实现变量筛选,以达到压缩系数从而优化模型结构的目的。

1.2 半参数模型

1.2.1 模型形式

在进行数据建模分析时,模型主要分为参数模型与非参数模型两大类。参数模型的含义比较直观且易于解释,其缺点为需要预先设定模型的具体形式,一旦模型设定与实际数据关系不符,可能导致结果偏差甚至不可靠。而非参数模型作为一种数据驱

动的分析工具,能够较好地捕捉变量间的非线性关系,具有较高的稳健性和灵活性,通常可达到较优的拟合效果。然而,非参数模型的局限在于模型结果的可解释性较差,难以揭示变量间的具体作用机制。

为了平衡模型的拟合能力与可解释性,Engle等^[24]提出了半参数模型,并逐渐成为学术界的研究热点。半参数模型有机融合了参数方法与非参数方法,兼具参数模型的良好可解释性与非参数模型的高度灵活性。作为一类典型的半参数模型,部分线性模型通过耦合线性成分与非线性(非参数)成分,能够有效分析同时包含线性与非线性影响因素的数据结构,因而被广泛应用于多个研究领域。

在本文的半参数模型中, $\{(X_i, U_i, C_i), 1 \leq i \leq n\}$ 表示来自自变量组 (X, U, C) 的数据样本,其中 i 表示每个省份, n 表示省份总数($n=30$); X 、 U 为影响碳排放的影响因素,均为通过SCAD法选择出的对碳排放有显著影响的经济或社会指标,其中向量 X 对响应变量的影响具有线性形式,向量 β 为 X 对应的参数向量,用来度量 X 中每个变量的变化对响应变量带来的平均影响, U 对响应变量的影响具有非参数的形式,通过未知函数 $g(\cdot)$ 刻画。线性成分通过显式的参数估计,揭示某些关键变量的线性效应,便于政策解读与结果解释;非线性成分则采用数据驱动的方式捕捉更为复杂、非线性的影响关系,以弥补纯线性模型在拟合能力方面的不足。

考虑到水力发电比重全面体现了可再生能源的占比,并反映了环境友好性、电力供应稳定性、能源安全性和经济性,将其选定为评估能源结构的关键指标,并纳入模型的非参数部分,以灵活捕捉其与碳排放之间的复杂非线性关系。为了深入分析能源结构调整对碳排放的具体影响,将其他重要指标作为控制变量纳入半参数模型的线性部分。该设定确保了模型既具有较好的解释能力,又能够准确拟合数据的实际特征。

1.2.2 求解

光滑样条法在半参数模型求解中具有显著优势:①通用性,适用于处理连续型与离散型数据;②适应性,能有效应对数据的非线性变化与异常值;③光滑性,可生成平滑曲线以避免过度拟合。因此,选用光滑样条法估计部分线性模型。具体而言,该方法的目标函数是损失函数与含光滑惩罚项的和,通过极小化目标函数实现参数求解。考虑到能源结构对碳排放的影响通常不会有明显的突变或尖峰现象出现,即二者之间的连接函数是光滑的,同时为了防止过拟合问题,在目标函数中利用惩罚函数对 $g(\cdot)$ 的波动性进行惩罚。值得注意的是,半参数

模型在求解非线性部分时,允许参数结果与模型设定根据数据的分布和特征自适应调整。这一特性使得半参数模型在处理异质性较大数据时,相较于传统参数模型表现出更强的灵活性与适应性,有助于更准确地捕捉数据间的非线性关系和区域间的差异性特征。因此,当数据来源存在显著异质性时,半参数模型能够在保持稳定性的同时,揭示不同阶段或区域数据的真实规律与动态变化。对于光滑参数的选取,选择交叉验证法,通过极小化残差平方和来求解。基于半参数模型的能源结构减碳效应分析算法流程如图1所示。

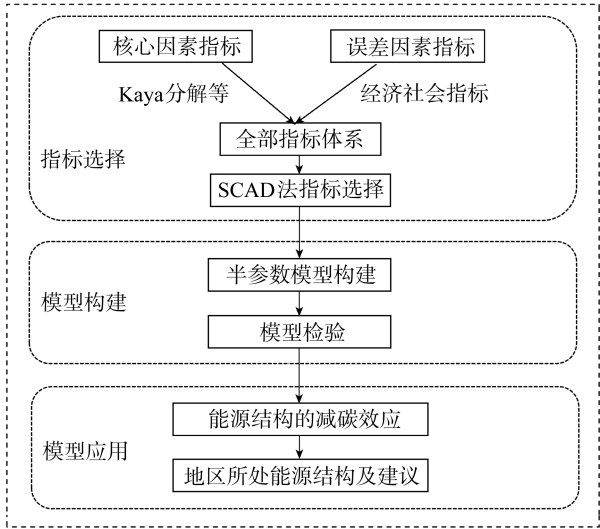


图1 基于半参数模型的能源结构减碳效应分析算法流程

Fig.1 Algorithmic process for analyzing carbon reduction effect of energy structure using semi-parametric models

2 研究区概况与数据来源

以我国30个省(区、市)为研究区,依据各地区经济发展水平、能源结构以及资源禀赋等方面的显著差异,将研究区分为东部、中部、西部和东北部4个地理区域。其中,东部地区涵盖北京、天津、河北、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南;中部地区由山西、安徽、江西、河南、湖北和湖南组成;西部地区包括内蒙古、广西、重庆、四川、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆;东北部地区则包括辽宁、吉林和黑龙江。

东部地区由于经济起步较早,工业化和城市化水平较高,能源需求呈现多样化特征;中部地区农业与工业并重,西部地区自然资源丰富,但经济发展相对滞后,两个地区能源结构均兼具传统能源与清洁能源;东北地区以重工业和能源产业为核心,是我国重要的能源供应区域。各区域在能源资源禀赋方面差异显著,进而影响了各自能源发展战略与模式。

数据时间跨度为 2008—2019 年;碳排放数据来自中国碳核算数据库 (<https://www.ceads.net.cn/>),水资源、能源数据来自《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》和各省历年的《水资源公报》,其他经济社会发展数据来源于《中国统计年鉴》。

3 结果与分析

3.1 指标选择结果

综合相关文献^[25-26]对碳排放影响因素的分析,在 SCAD 法候选自变量中加入更为详尽的能源和经济指标。数据主要包括能源消耗量、能源结构、GDP、人均收入、区域耗煤量、水力发电量、用水总量、工业用水量、工业废气治理设施、工业废气治理设施运行费用、林地面积、工业废气治理设施处理能力(标态)、森林蓄积量、森林面积、总发电量、地区第一产业生产总值、地区第二产业生产总值等 17 个备选变量。

采用 SCAD 法筛选关键影响因素,通过调整惩罚参数,逐步压缩不显著变量的系数至 0,将 SCAD 法的变量筛选结果与 Kaya 恒等式相结合,得到影响碳排放的 7 个因素,见表 1。

表 1 碳排放因素及贡献排序

Table 1 Carbon emission factors and their contribution ranking			
名称	单位	含义	减碳贡献/%
总发电量	亿 kW·h	发电情况	43.4
水力发电在总发电量中的占比	%	能源结构代理变量	20.9
GDP	亿元	地区经济情况	6.1
第三产业在地区产业结构中的占比	%	地区产业结构的代理变量	4.3
林地面积	万 hm ²	基础减碳情况	4.2
人口总量	万人	人力资本情况	4.1
工业废气治理设施运行费用	万元	人工治理情况	3.7

表 2 指标间的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient between indicators							
变量	总发电量	水力发电在总发电量中的占比	GDP	第三产业在地区产业结构中的占比	林地面积	人口总量	工业废气治理设施运行费用
总发电量	1.000 0	-0.088 9	0.662 3	-0.045 6	0.025 6	0.491 6	0.177 5
水力发电在总发电量中的占比	-0.088 9	1.000 0	-0.142 4	-0.123 4	0.131 1	0.025 1	-0.127 5
GDP	0.662 3	-0.142 4	1.000 0	0.119 5	-0.115 1	0.656 4	0.138 1
第三产业在地区产业结构中的占比	-0.045 6	-0.123 4	0.119 5	1.000 0	-0.149 3	-0.122 6	0.044 2
林地面积	0.025 6	0.131 1	-0.115 1	-0.149 3	1.000 0	0.045 3	-0.062 3
人口总量	0.491 6	0.025 1	0.656 4	-0.122 6	0.045 3	1.000 0	0.069 8
工业废气治理设施运行费用	0.177 5	-0.127 5	0.138 1	0.044 2	-0.062 3	0.069 8	1.000 0

选取水力发电在总发电量中的占比作为能源结构代理变量,是因为水电是仅次于火电的发电方式,且作为一种清洁可再生能源,其占比能够较好地反映地区能源结构的绿色转型程度。此外,相较于绝对发电量,水电在总发电量中的占比能够更为有效地衡量各地区的能源结构,避免地区间因发电规模不同导致的结果偏差。

进一步计算各指标间的皮尔逊相关系数(表 2),结果显示,仅 GDP、人口总量与总发电量三者间存在较高相关性,其余变量的相关系数均低于 0.2,表明其相关性较弱,从而有效排除了高度相关变量可能引发的共线性问题。

识别关键变量后,需进一步分析其减碳效应。基于 SCAD 法的拟合结果,各影响因素对碳排放的具体贡献见表 1。

总发电量的减排贡献表明,通过有效控制用电量、减少非必要的电力消耗,可在很大程度上降低区域碳排放水平。尽管从理论角度看,限制用电量能够减少碳排放量,但在实践中,大规模削减地区用电通常面临显著阻力,尤其是在电力需求持续增长的情况下;且单纯依赖限电手段来实现碳减排忽视了能源结构的复杂性和多样性,因此,优化能源结构成为关键路径。特别是在维持总发电量稳定的前提下,提高水力发电在能源组合中的比重,不仅有助于降低对化石燃料发电的依赖,还可以显著减少温室气体的排放。由表 1 可见,提高水力发电在总发电量中占比的碳减排效果,显著高于通过其他单一措施所能达到的减排效果,充分证明了能源结构转型在减碳实践中的巨大潜力与现实意义。

3.2 半参数模型拟合结果

基于碳排放数据,采用光滑样条法对部分线性模型进行估计,其中线性成分求解结果见表 3。

表 3 中变量系数反映了该变量每变动一个单位时,碳排放量在平均意义上的变动幅度;显著性水

表 3 线性成分回归系数

Table 3 Linear component regression coefficients

变量	系数	标准误	t	p
总发电量	1.123 ***	0.984	11.414	$<2\times10^{-16}$
GDP	-0.551 ***	0.071 4	-7.725	1.22×10^{-13}
第三产业在地区 产业结构中的占比	-214.3 ***	72.51	-2.955	0.003 338
林地面积	5.598 ***	0.746	7.503	5.34×10^{-13}
人口总量	2.728 ***	0.374	7.283	2.23×10^{-12}
工业废气治理 设施运行费用	0.014 ***	0.002	7.375	1.23×10^{-12}
常数	14 650 ***	3 847	3.807	0.000 166

注：***表示变量在 0.01 水平下显著。

平用于衡量变量对碳排放影响的统计显著性,变量的显著性越高,其对碳排放的解释作用越确定。

半参数模型的决定系数 R^2 为 0.867,表明该模型的拟合效果较好,选择的变量可以解释碳排放的 86.7%,说明了半参数模型结果的可信度。由于水力发电在总发电量中的占比位于非线性成分,其对碳排放的影响难以用显式表示,因此绘制拟合图像,即控制其他线性成分的变量后,半参数模型的拟合结果见图 2,其中纵坐标是中心化之后的数值。

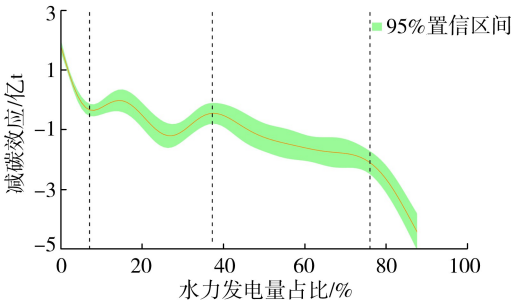


图 2 能源结构对碳排放的影响

Fig. 2 Impact of energy structure on carbon emissions

图 2 展示了能源结构调整对碳排放的复杂非线性影响。具体而言,在确保总发电量稳定的前提下,提高水力发电在能源结构中的占比与碳排放量的逐步下降之间存在明显的相关性,该相关性可分为 4 个阶段,其分界点为 3 个门限值。

第 1 阶段对应水力发电占比约为 8%。当水力发电占比低于该水平时,水力发电主要替代了高碳排放的燃煤发电,因而碳排放随着水力发电占比的上升而显著下降;水力发电占比每增加 1%,碳排放量平均可减少约 5%;在 95%置信水平下,其置信区间为 3%~7%,置信区间宽度约为 4%,表明在该阶段能源结构调整的边际减碳效益最为显著。

第 2 阶段对应水力发电占比为 8%~38%。水力发电替代高碳能源的效果开始减弱,碳排放降低的速度减缓并伴随一定的波动,需考虑水力发电的

稳定供应问题;水力发电占比每增加 1%,碳减排效果平均为 0.13%,且在 95%置信水平下,这一效果并不显著。

第 3 阶段为水力发电占比超过 38%而未达到 76%时。随着水力发电占比的进一步增加,碳排放量持续下降;水力发电占比每提高 1%,可实现约 2%的碳减排效果,且 95%置信水平下置信区间为 1%~3%,置信区间宽度约为 2%。

进入第 4 阶段,水力发电占比超过 76%。碳减排效果更加显著,水力发电占比每提高 1%,减碳效果约为 9%,95%置信水平下置信区间为 7%~11%,表明水力发电占比的提升对碳排放减少具有持续增强的正面影响。

通过明确水力发电占比对碳排放的阶段性影响,为政策制定者制定科学的水力发电计划提供了依据。通过不同阶段水力发电与减碳关系的变化,可以更精确地预测能源结构调整带来的碳减排效果。

进一步对拟合半参数模型进行检验,残差拟合结果、QQ 图以及杠杆值的结果都表明拟合的模型具有良好的可信度^[27-28]。

3.3 不同区域差异化分析

基于不同地区水资源禀赋和利用的研究成果^[29-30],探究能源结构调整对东部、中部、西部和东北地区减碳效应的影响。结果表明,西部地区的碳排放量最低,东部次之,而东北和中部地区的碳排放量较高(图 3)。表 4 为 2008—2019 年 4 个区域碳排放量的持续增长趋势;表 5 为 4 个区域能源结构的变化。

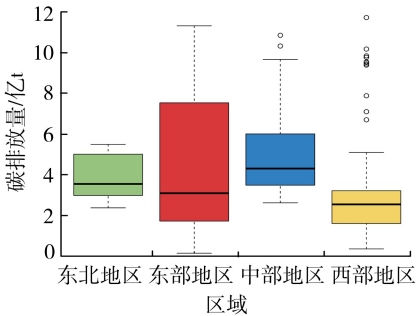


图 3 不同区域碳排放量

Fig. 3 Carbon emissions in different regions

就能源结构而言,2008—2019 年我国的能源结构经历了显著的变化。在此期间,火力发电在能源结构中所占比例逐年降低,而水力发电和其他清洁能源占比持续上升。尽管火力发电仍然占据主导地位(占比超过 70%),但其占比的持续下降反映了能源结构调整的积极方向。相较之下,水力发电的占比稳定增长至约 20%,未出现重大变化。此外,风

表 4 不同区域碳排放变化趋势

Table 4 Trends of carbon emissions changes in different regions

年份	碳排放量/万 t				年份	碳排放量/万 t			
	东北地区	东部地区	中部地区	西部地区		东北地区	东部地区	中部地区	西部地区
2008	32 779. 74	34 956. 65	38 871. 91	21 620. 12	2014	39 866. 46	43 413. 91	50 637. 57	32 267. 59
2009	34 140. 61	36 480. 92	40 789. 03	23 465. 26	2015	37 099. 48	44 558. 07	52 390. 76	31 280. 95
2010	37 308. 57	39 987. 28	44 717. 71	25 708. 65	2016	36 739. 77	44 704. 83	52 970. 45	31 928. 48
2011	40 610. 79	43 922. 80	48 862. 5	29 296. 74	2017	37 157. 14	45 031. 53	54 607. 23	33 240. 71
2012	41 530. 69	44 350. 51	49 011. 23	31 327. 64	2018	37 853. 03	44 648. 98	57 456. 60	35 054. 57
2013	40 041. 94	43 681. 56	49 054. 27	31 682. 73	2019	39 570. 07	45 020. 74	58 454. 22	37 800. 00

表 5 不同区域能源结构变化

Table 5 Changes in energy structure in different regions

年份	火力发电占比/%				水力发电占比/%			
	东北地区	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区	东部地区	中部地区	西部地区
2008	89. 04	86. 51	73. 77	64. 84	4. 70	6. 77	24. 27	32. 77
2009	93. 15	89. 65	78. 51	65. 74	4. 21	4. 74	21. 23	32. 25
2010	89. 19	88. 14	78. 58	64. 84	6. 43	6. 09	20. 90	32. 28
2011	90. 02	90. 08	82. 24	66. 89	3. 83	4. 15	17. 33	29. 87
2012	88. 79	87. 74	78. 57	63. 57	4. 04	5. 40	20. 57	32. 90
2013	84. 45	88. 28	82. 31	62. 69	6. 62	4. 83	16. 97	32. 84
2014	83. 37	86. 73	79. 50	58. 75	4. 04	4. 90	18. 62	35. 92
2015	83. 95	85. 34	79. 07	56. 21	3. 29	5. 22	19. 26	37. 66
2016	81. 28	83. 48	77. 65	55. 32	4. 25	5. 98	19. 59	36. 56
2017	80. 30	83. 95	77. 29	54. 44	3. 23	4. 14	18. 42	35. 77
2018	77. 06	82. 51	77. 81	54. 47	3. 16	3. 19	16. 13	34. 63
2019	75. 37	79. 08	77. 60	55. 07	3. 34	4. 19	15. 40	33. 53

能、太阳能等其他清洁能源的发电比例也在不断增加,为我国能源结构的转型提供了新的动力。

从区域的角度来看,我国各地区的能源结构存在显著差异。西部地区拥有较高的水力发电潜力,水力发电占比显著高于其他区域。目前,西部地区的水力发电占比已接近第 2 和第 3 阶段的交界点(38%),呈现阶段性波动。

中部地区的水力发电占比约为 23%,已突破第 1 阶段门槛,进入能源结构调整的中级阶段。在此阶段,进一步提升水力发电占比对碳减排的边际贡献相对有限。因此,该地区的碳减排政策应充分结合绿色低碳的经济发展模式,积极发展风能、太阳能和生物质能项目,加快主要低碳能源的技术化和产业化发展,不断提高可再生能源和清洁能源在一次能源结构中的占比。

东部和东北地区水力发电占比相对较低(约 5%),尚未进入第 1 阶段。因此,东部和东北地区应进一步挖掘水力发电的潜力,提高其占比,保持适度外来电比例,提升清洁能源的规模化与商业化水平。

鉴于东部地区水力发电潜力有限,将西部地区水力发电输送至东部,有助于优化东部能源结构,大幅降低碳排放,促进东部地区的减碳贡献,进而降低全国的碳排放总量。基于 2008—2019 年数据,发现西部地区水力发电占比达 34. 87%,在现有西电东送背景下,若合理规划西部地区水力发电向东部地

区的输送路径与通道,将西部地区 9. 01% 的水电资源调配至东部,同时充分考虑输电过程中可能的电量损失与调度效率,可将东部地区水力发电占比从 5. 18% 提升至接近 8%,有助于东部地区突破第 1 阶段门槛,该能源结构调整可削减东部地区各省份碳排放,平均减碳幅度超 20%。

通过在更大规模上采用水电等清洁能源,并提升其在能源结构中的占比,不仅可以确保电力供应的稳定性,同时也能显著降低碳排放水平。从整体来看,能源结构的优化可以分为 4 个主要阶段。第 1 阶段,水力发电对碳排放的减少贡献尤为显著;进入第 2 阶段时,水力发电对减碳的贡献出现波动;而在第 3 和第 4 阶段,随着水力发电占比的进一步提升,其在替代高碳排放能源方面的作用日益加强。需要注意的是,我国各地区在能源结构方面存在较大的差异。东部与东北地区的水力发电占比相对较低,约为 5%,而中部地区约为 23%,西部地区更是超过 30%。

综上所述,能源结构调整在实现我国“双碳”目标过程中发挥着关键的作用。通过大规模推广应用水电等清洁能源,并持续提高其在整体能源结构中的占比,不仅有助于保障电力供应的稳定性,还能显著降低碳排放水平。

我国各区域在能源结构方面存在显著差异。这就要求在制定碳减排政策时,应充分考虑区域资源

禀赋与发展阶段的差异,实施差异化、精准化的能源转型路径。

4 结 论

a. 能源结构的转型与优化对于我国实现高质量发展及达成“双碳”目标具有重要意义。半参数模型的分析结果表明,通过进一步提升水力发电在能源结构中的占比,能够在保障能源供应安全的前提下有效降低碳排放水平。本文并非仅关注水力发电的绝对减碳效果,而是从能源结构视角出发,分析水力发电占比变化对碳排放的整体减碳效应。与传统方法不同,本文采用数据驱动的半参数建模方式,摒弃了传统的将减碳效应设定为常数的简化假设,能够灵活捕捉水力发电占比与碳排放之间的非线性动态关系。这一关系呈现出非线性特征,反映了能源结构调整与碳减排之间的复杂作用机制。

b. 提高水力发电占比对碳排放的影响呈现4阶段性变化,与3个关键门限点(8%、38%、76%)相关联。在不同阶段,碳减排效果存在差异:第1阶段,水力发电对碳排放减少的贡献尤为显著;进入第2阶段时,水力发电对减碳的贡献出现波动;而在第3和第4阶段,随着水力发电占比的进一步提升,其在替代高碳排放能源方面的作用日益加强。这种分阶段的效果差异为地区性能源结构调整提供了决策思路。

c. 通过对我国各地区能源结构演变路径的分析,揭示了区域间在能源结构与碳排放方面的显著差异。对“西电东送”战略的探讨表明,考虑到东部与东北地区在水力发电方面的开发潜力有限,但碳排放强度相对较高,通过优化能源结构提升水力发电占比,可以带来显著的减碳效益。而西部地区虽具备优越的水能资源优势,水电开发潜力巨大,但由于地区经济发展水平和能源需求的局限,增加水电装机对于减少该地区碳排放的边际效益有限。因此,实施“西电东送”战略,即将西部地区丰富的水电资源输送至东部和东北地区,不仅有助于实现全国范围内能源资源的优化配置,还能显著降低东部和东北地区的碳排放水平,为全国的减碳做出贡献。

d. 本文采用的半参数模型在水文水资源领域展现出良好的应用前景,尤其适用于传统线性模型难以准确刻画复杂非线性关系的研究中,在降雨径流模拟、水资源管理、水质模拟、参数不确定性分析以及流域综合管理等多个方面,半参数模型能够显著提升模型的灵活性和适用性,有效揭示复杂的参数依赖关系,从而增强模型的解释力和预测能力。

参考文献:

[1] 左其享,吴青松,马军霞,等. “双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J]. 水资源保护,2023,39(1):8-14. (ZUO Qiting, WU Qingsong, MA Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behaviors regulation under carbon peak and carbon neutrality goals[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):8-14. (in Chinese))

[2] 陆佑楣. 我国水电开发与可持续发展[J]. 水力发电,2005,31(2):1-4. (LU Youmei. Hydropower exploitation and sustainable development in China[J]. Water Power,2005,31(2):1-4. (in Chinese))

[3] 王红瑞,赵含,李占玲,等. 减碳与生物多样性若干问题评述[J]. 西北大学学报(自然科学版):2023,53(1):17-24. (WANG Hongrui, ZHAO Han, LI Zhanling, et al. Review on some issues of carbon reduction and biodiversity [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition),2023,53(1):17-24. (in Chinese))

[4] 张黎鸣,王红瑞,潘成忠,等. 资源型地区产业结构调整对水资源利用效率影响的实证分析:来自中国10个资源型省份的经验证据[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2021,57(3):353-362. (ZHANG Liming, WANG Hongrui, PAN Chengzhong, et al. Empirical analysis on the influence of industrial structure adjustment on water resource utilization efficiency in resource-based regions: empirical evidence from 10 resource-based provinces in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science),2021,57(3):353-362. (in Chinese))

[5] Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector [R]. Paris: International Energy Agency,2021.

[6] SHEN Jianxiang, CHEN Xiaotong, LI Haoran, et al. Incorporating health cobenefits into province-driven climate policy: a case of banning new internal combustion engine vehicle sales in China[J]. Environmental Science & Technology,2023,57(3):1214-1224.

[7] 张力,李晓军,王红瑞,等. 水-能源-碳排放复杂关系研究进展及展望[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):13-21. (ZHANG Li, LI Xiaojun, WANG Hongrui, et al. Research progress and prospect of complex relationship between water-energy-carbon emission [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2023,21(1):13-21. (in Chinese))

[8] LI Ruishi, ZHAO Rongqin, XIE Zhixiang, et al. Water-energy-carbon nexus at campus scale: case of North China University of Water Resources and Electric Power[J]. Energy Policy,2022,166:113001.

[9] 左其享,张志卓,马军霞. 黄河流域水资源利用水平与经济社会发展的关系[J]. 中国人口·资源与环境,2021,31(10):29-38. (ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, MA Junxia. Relationship between water resource utilization level and socio-economic development in the Yellow River

- Basin [J]. China population, Resources and Environment, 2021, 31(10): 29-38. (in Chinese))
- [10] 孙才志, 魏亚琼, 赵良仕. 干旱区水-能源-粮食纽带系统协同演化: 以中国西北地区为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 320-333. (SUN Caizhi, WEI Yaqiong, ZHAO Liangshi. Co-evolution of water-energy-food nexus in arid areas: take Northwest China as an example[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(2): 320-333. (in Chinese))
- [11] 王红瑞, 赵伟静, 邓彩云, 等. 水-能源-粮食纽带关系若干问题解析[J]. 自然资源学报, 2022, 37(2): 307-319. (WANG Hongrui, ZHAO Weijing, DENG Caiyun, et al. Analysis on issues of water-energy-food nexus [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(2): 307-319. (in Chinese))
- [12] 赵荣钦, 余娇, 肖连刚, 等. 基于“水-能碳”关联的城市水系统碳排放研究[J]. 地理学报, 2021, 76(12): 3119-3134. (ZHAO Rongqin, YU Jiao, XIAO Lianguang, et al. Carbon emissions of urban water system based on water-energy-carbon nexus[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(12): 3119-3134. (in Chinese))
- [13] 戴嵘, 曹建华. 中国能源结构调整的减碳效应估算[J]. 统计与决策, 2015(7): 117-120. (DAI Rong, CAO Jianhua. Estimation of the carbon reduction effects of China's energy structure adjustment[J]. Statistics and Decision, 2015(7): 117-120. (in Chinese))
- [14] 邵帅, 杨莉莉, 曹建华. 工业能源消费碳排放影响因素研究: 基于 STIRPAT 模型的上海分行业动态面板数据实证分析[J]. 财经研究, 2010, 36(11): 16-27. (SHAO Shuai, YANG Lili, CAO Jianhua. Study on influencing factors of CO₂ emissions from industrial energy consumption: an empirical analysis based on STIRPAT model and industrial sectors' dynamic panel data in Shanghai[J]. Journal of Finance and Economics, 2010, 36(11): 16-27. (in Chinese))
- [15] FAN Jianqing, LI Runze. Variable selection via nonconcave penalized likelihood and its oracle properties [J]. Journal of the American Statistical Association, 2001, 96(456): 1348-1360.
- [16] 石广明, 王金南, 毕军. 基于莫氏指数的中国动态工业用水绩效分析[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(12): 3237-3242. (SHI Guangming, WANG Jinnan, BI Jun. Dynamic performance analysis of China's industrial water use based on the Malmquist index [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(12): 3237-3242. (in Chinese))
- [17] 曾萌, 张园园, 王红瑞, 等. 中国水-能源纽带关系双向消耗核算研究[J]. 水资源保护, 2022, 38(5): 159-165. (ZENG Meng, ZHANG Yuanyuan, WANG Hongrui, et al. Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 159-165. (in Chinese))
- [18] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 基于 CGE 模型的 CO₂ 减排对中国经济的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(12): 1621-1624. (WANG Can, CHEN Jining, ZOU Ji. Impact assessment of CO₂ mitigation on China economy based on a CGE model[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(12): 1621-1624. (in Chinese))
- [19] 姜钰卿, 唐旭, 任凯鹏, 等. 基于双层嵌套 SDA 的中国减污降碳驱动因素研究[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(12): 3294-3304. (JIANG Yuqing, TANG Xu, REN Kaipeng, et al. Research on the drivers of pollution and carbon reduction in China based on double-layer nested SDA[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2022, 42(12): 3294-3304. (in Chinese))
- [20] 高振宇, 王益. 我国生产用能源消费变动的分解分析[J]. 统计研究, 2007(3): 52-57. (GAO Zhenyu, WANG Yi. The decomposition analysis of change of energy consumption for production in China [J]. Statistical Research, 2007(3): 52-57. (in Chinese))
- [21] ALBRECHT J, FRANÇOIS D, SCHOORS K. A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals[J]. Energy Policy, 2002, 30(9): 727-736.
- [22] HEINZE G, WALLISCH C, DUNKLER D. Variable selection: a review and recommendations for the practicing statistician[J]. Biometrical Journal, 2018, 60(3): 431-449.
- [23] DESBOULETS L D D. A review on variable selection in regression analysis[J]. Econometrics, 2018, 6(4): 45.
- [24] ENGLE R F, GRANGER C W J, RICE J, et al. Semiparametric estimates of the relation between weather and electricity sales [J]. Journal of the American Statistical Association, 1986, 81(394): 310-320.
- [25] 孙才志, 马奇飞, 赵良仕. 基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1022-1035. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1022-1035. (in Chinese))
- [26] 宋德勇, 卢忠宝. 中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2009, 19(3): 18-24. (SONG Deyong, LU Zhongbao. The factor decomposition and periodic fluctuations of carbon emission in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2009, 19(3): 18-24. (in Chinese))
- [27] 王红瑞, 林欣, 钱龙霞, 等. 基于异方差检验的水文过程隐含周期分析模型及其应用: I 模型[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1183-1189. (WANG Hongrui, LIN Xin, QIAN Longxia, et al. Cryptic period analysis model of hydrological process based on heteroscedasticity test and its application I: model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1183-1189. (in Chinese))

(下转第 250 页)

[26] 笄文怡,朱广伟,吴志旭,等. 2002—2017 年千岛湖浮游植物群落结构变化及其影响因素[J]. 湖泊科学,2019, 31(5): 1320-1333. (DA Wenyi, ZHU Guangwei, WU Zhixu, et al. Long-term variation of phytoplankton community and driving factors in Qiandaohu Reservoir, southeast China [J]. Journal of Lake Science, 2019, 31(5): 1320-1333. (in Chinese))

[27] 王维刚,史海滨,李仙岳,等. 基于改进 SWAT 模型的灌溉-施肥-耕作对乌梁素河流域营养物负荷及作物产量的影响[J]. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1505-1523. (WANG Weigang, SHI Haibin, LI Xianyu, et al. Effect of irrigation-fertilization-tillage on nutrient loading and crop yield in Ulansuhai watershed based on improved SWAT model[J]. Journal of Lake Science, 2022, 34(5): 1505-1523. (in Chinese))

[28] 陈丽娜,张文硕,徐俊增,等. 基于 SWAT 模型的南方水稻灌区全生育期面源污染特征及控制模拟[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 198-205. (CHEN Lina, ZHANG Wenshuo, XU Junzeng, et al. Simulation of non-point source pollution characteristics and control effect in southern paddy irrigation district based on SWAT model during paddy growth period [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 198-205. (in Chinese))

[29] 张靖雨,夏小林,汪邦稳,等. 不同配置乡村植被缓冲带阻控径流污染特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 383-391. (ZHANG Jingyu, XIA Xiaolin, WANG Bangwen, et al. Study on the characteristics of runoff pollution control in different configurations of rural vegetation buffer strips [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2): 383-391. (in Chinese))

[30] 陆帅帅,周念清,蔡奕,等. 洞庭湖湿地潜流带地下水中氮磷迁移转化过程及驱动机制分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(5): 122-130. (LU Shuaishuai, ZHOU Nianqing, CAI Yi, et al. Analysis of nitrogen and phosphorus migration and transformation and driving mechanism in hyporheic zone groundwater of Dongting Lake wetland[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(5): 122-130. (in Chinese))

[31] 秦沂樟,白静,赵健,等. 生态沟渠磷拦截效应对不同因子的响应特征[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊1): 122-130. (QIN Yizhang, BAI Jing, ZHAO Jian, et al. Response characteristics of phosphorus interception effects to different factors in ecological ditches[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(Sup1): 122-130. (in Chinese))

[32] 吕翔宇,朱梦圆,马永山,等. 太湖流域典型水源水库藻类水华的促发条件[J]. 湖泊科学, 2023, 35(5): 1516-1528. (LYU Xiangyu, ZHU Mengyuan, MA Yongshan, et al. Driving factors of algal blooms in drinking-water reservoirs in Lake Tai Basin[J]. Journal of Lake Science, 2023, 35(5): 1516-1528. (in Chinese))

[33] 王寿兵,屈云芳,徐紫然. 基于生物操纵的富营养化湖泊蓝藻控制实践[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 1-4. (WANG Shoubing, QU Yunfang, XU Ziran. Algal bloom control in eutrophic lakes and reservoirs based on biomanipulation[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 1-4. (in Chinese))

[34] 黄宇波,曹光荣,范向军,等. 汛期水库调度对小江水华的影响[J]. 长江科学院院报. 2024, 41(1): 52-58. (HUANG Yubo, CAO Guangrong, FAN Xiangjun, et al. Influence of reservoir operation in flood season on water bloom of Xiaojiang River[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2024, 41(1): 52-58. (in Chinese))

[35] 褚俊英,周祖昊,王浩,等. 流域综合治理的多维嵌套理论与技术体系[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 1-5. (CHU Junying, ZHOU Zuhao, WANG Hao, et al. Study on multi-dimensional nested theory and technological system for comprehensive watershed management [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 1-5. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-09 编辑:胡新宇)

+++++
(上接第 216 页)

[28] 王红瑞,林欣,钱龙霞,等. 基于异方差检验的水文过程隐含周期分析模型及其应用: II 应用[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1296-1301. (WANG Hongrui, LIN Xin, QIAN Longxia, et al. Cryptic period analysis model of hydrological process based on heteroskedasticity test and its application: II application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1296-1301. (in Chinese))

[29] 孙才志,刘淑彬. 基于 MRIO 模型的中国省(市)区水足迹测度及空间转移格局[J]. 自然资源学报, 2019, 34(5): 945-956. (SUN Caizhi, LIU Shubin. Water footprint and space transfer at provincial level of China based on MRIO model[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 945-956. (in Chinese))

[30] 洪思扬,王红瑞,来文立,等. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5): 800-813. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LAI Wenli, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in China [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 800-813. (in Chinese))

(收稿日期:2025-02-08 编辑:胡新宇)