

人力资本结构高级化对碳排放效率的提升效应研究

姚李亭¹, 彭 香², 张 毅³

(1. 深圳大学 中国经济特区研究中心, 广东 深圳 518060; 2. 重庆财经学院 金融学院, 重庆 401320; 3. 重庆图强工程技术咨询有限公司, 重庆 401121)

摘 要:人力资本结构高级化不仅能促进技术进步, 推动节能减排技术的创新和应用, 还能加速生产模式和消费模式的绿色化转型, 提升能源利用效率和使用结构, 从而提升碳排放效率。利用我国30个省份2003—2022年的面板数据, 采用向量夹角法测算人力资本结构高级化程度, 运用非径向方向距离函数模型(NDDF)评估碳排放效率, 通过双向固定效应模型考察人力资本结构高级化对碳排放效率的影响, 结果表明:人力资本结构高级化显著提升了地区碳排放效率, 这种提升效应能够通过促进技术创新和优化能源消费结构两条渠道来实现;人力资本结构高级化对地区碳排放效率的提升效应在技术水平较高、市场化程度较高、环境规制强度较高的地区显著, 但在技术水平较低、市场化程度较低、环境规制强度较低的地区不显著。因此, 应积极推动人力资本结构高级化, 促进低碳技术创新, 优化能源消费结构, 加快市场化进程, 完善环境规制, 充分发挥人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。

关键词:人力资本结构高级化; 碳排放效率; 技术创新; 能源消费结构; 市场化程度; 环境规制

中图分类号:F240; F205 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-8131(2025)05-0094-14

引用格式:姚李亭, 彭香, 张毅. 人力资本结构高级化对碳排放效率的提升效应研究[J]. 西部论坛, 2025, 35(5): 94-107.

YAO Li-ting, PENG Xiang, ZHANG Yi. The lifting effect of human capital structure upgrading on carbon emission efficiency[J]. West Forum, 2025, 35(5): 94-107.

* 收稿日期: 2025-01-16; 修回日期: 2025-06-28

基金项目:重庆市教育委员会人文社会科学研究规划项目(24SKGH364)

作者简介:姚李亭(1987), 男, 河南安阳人; 博士, 主要从事人力资本、绿色发展研究; E-mail: 573635741@qq.com。
彭香(1990), 女(苗族), 湖南隆回人; 副教授, 博士, 主要从事绿色发展、乡村振兴研究; E-mail: 498580115@qq.com。
张毅(1988), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事区域经济规划与战略研究; E-mail: 529030776@qq.com。

一、引言

为积极应对气候变化,展现大国担当,我国明确提出“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的战略目标(以下简称“双碳”目标)。作为发展中国家,我国需要保持经济稳定增长,要在促进经济增长的同时实现“双碳”目标,必须提高碳排放效率。促进技术创新、优化能源结构等是提高碳排放效率的有效路径,但在老龄化程度加深、人口红利消减的现实背景下,也不能忽视人口高质量发展的重要性,应推动“人口红利”向“人力资本红利”转化,有效提升碳排放效率,进而为绿色低碳发展提供可持续动力。现有文献从不同角度对碳排放效率的影响因素进行了深入探讨,其中人力资本的影响是一个重要研究方向。有些文献直接考察人力资本对碳排放效率的影响,认为人力资本增长可以降低物质资本边际报酬递减和二氧化碳排放带来的负效应,同时实现经济增长和二氧化碳减排(安超等,2019)^[1],因而人力资本水平提升可以显著提高碳排放效率(郭炳南等,2018;何伟军等,2022)^[2-3];有些文献关注人力资本的门槛效应和调节效应,比如人力资本水平在数字经济影响农业碳排放效率、数字物流影响流通业碳排放效率中具有门槛作用(田云等,2024;李金凤,2024)^[4-5],人力资本水平提升在农机购置补贴及数字经济影响农业碳排放效率中发挥调节作用(田媛等,2024;李艳等,2024;史常亮,2025)^[6-8]。然而,鲜有文献深入考察人力资本结构对碳排放效率的影响。

人力资本体现为劳动者受到教育、培训、实践经验、迁移、保健等方面的投资而获得的知识和技能积累,是重要的生产要素。舒尔茨的人力资本理论认为,人力资本包括“量”和“质”两个方面,并强调后者是促进经济增长的主要因素。从“质”的角度来看,在经济发展过程中,初级人力资本将逐步向高级人力资本演化,而高级人力资本具有较强的生产配置能力、技术创新吸收能力,对生产率提升的贡献更为显著(骆蓓函,2021)^[9]。因此,人力资本的积累不仅是总体水平的提升,更是高级人力资本占比增加的结构改善。由于人力资本凝聚于劳动者身上,人力资本结构体现为拥有不同人力资本的劳动者之间的比例关系,人力资本结构高级化则是拥有高级人力资本的人口比例提升(刘智勇等,2018;程锐等,2019)^[10-11]。从理论上讲,人力资本结构高级化不仅能够促进技术进步(靳涛等,2022)^[12],推动节能减排技术的创新和应用,还能够优化生产模式,提升能源利用效率和使用结构(林毅夫等,2023)^[13],并能加速消费模式绿色化转型(郑洁,2022)^[14],从而提升碳排放效率。

鉴于人力资本结构高级化是提升碳排放效率的重要途径,本文在已有研究的基础上,探讨人力资本结构高级化对碳排放效率的影响及其机制,并利用我国30个省份2003—2022年的面板数据进行实证验证。本文的边际贡献主要在于:第一,将人力资本结构高级化与碳排放效率纳入统一的分析框架,拓展和深化了碳排放效率和人力资本领域的研究,并为人力资本结构高级化提升碳排放效率的作用提供了经验证据。第二,运用并行多重中介效应模型和Bootstrap法验证了人力资本结构高级化通过促进技术创新和改善能源消费结构两条渠道提升碳排放效率的传导机制,有助于深入认识人力资本积累与碳减排之间的内在联系。第三,进一步从技术水平、市场化程度、环境规制强度等方面考察了人力资本结构高级化影响碳排放效率的异质性,为充分发挥人力资本结构高级化的积极效应和有效提升各地区碳排放效率提供了借鉴和启示。

二、理论分析与研究假说

1. 人力资本结构高级化对碳排放效率的影响

新结构环境经济学认为,经济系统的要素禀赋结构内生决定最优生产决策,对应最优的环境结构

(林毅夫等,2023;郑洁,2022)^[13-14]。碳排放效率的提升主要来自两个方面:一是技术进步。核心技术以及关键工艺、设备的持续创新突破,能够有效降低单位产出的二氧化碳排放量,从而实现碳排放效率持续上升。二是结构改善。要素资源从碳排放效率较低的粗放型产业转向碳排放效率较高的集约型产业,更多地使用碳排放较少的能源,都能够显著减少社会财富创造过程中的碳排放,进而提高碳排放效率。在生产实践中,拥有高级人力资本(受教育程度更高)的劳动者对核心技术和关键流程把握更精准,能够更快接受新型生产理念,理解新型生产原理,运用新型生产工具(Nelson et al.,1966)^[15],从而通过促进技术创新提升碳排放效率。目前,能源消耗是碳排放的主要来源,受教育程度较高的人群具有更强的环保意识,不仅会在能源生产过程中积极减少碳排放,还会在能源使用过程中更青睐清洁能源,从而通过改善能源消费结构提升碳排放效率。

(1)促进技术创新效应。人力资本是存在于人体之中的具有经济价值的知识、技能和体力等质量因素之和,而人是技术的创造者、模仿者和实施者,因此,人力资本是推动技术创新的关键要素。相较于初级人力资本,高级人力资本通常使劳动者具有更加丰富的知识及活跃的思维,既能够更好地通过“干中学”进行技术创新(Arrow,1962)^[16],还能够更有效地通过吸收技术溢出实现模仿创新和二次创新(Caselli et al.,2006)^[17]。此外,由于新技术通常具备非竞争性、部分排他性的特点(Romer,1990)^[18],使得受教育程度较高的劳动者在新技术的应用方面也具有显著优势。因此,人力资本结构高级化能够有效促进技术创新,而技术创新会推动生产方式由粗放型转变为集约型。相较于主要依靠增加生产要素投入数量来实现经济增长的粗放型增长,集约型增长主要依靠提高生产效率、优化资源配置来实现经济增长,能够显著提升碳排放效率。同时,技术创新还会推动生产过程中的核心工艺、关键设备持续更新,不断提效降碳。

(2)优化能源消费结构效应。随着人力资本结构的高级化,消费者、企业和政府等行为主体的环保意识逐步增强(郑洁,2022)^[14],市场竞争的内涵随之发生转变,企业会主动改变生产任务中的能源要素投入比例,并通过降低煤炭等高碳能源的消费量提高生产的清洁性,进而增强自身的低碳竞争力(张慧智等,2024)^[19]。人力资本结构高级化为优化能源消费结构提供了有利条件,就政策而言,使更多具备能源管理知识的人才参与制定和执行相关政策(如加大对清洁能源研发和推广力度,限制高排放能源的使用等);就生产而言,使更多具有清洁能源专业知识和技能的劳动者在一线生产过程中提高能源使用效率;就消费而言,使更多关注绿色生产与服务的消费者通过市场机制倒逼企业降低高碳能源消费量。因此,随着人力资本结构的高级化,全社会的能源消费会不断从高碳能源消费转向低碳能源消费,进而通过优化能源消费结构提升碳排放效率。

基于上述分析,提出以下两个假说:

H1:人力资本结构高级化会促进碳排放效率提升。

H2:人力资本结构高级化能够通过促进技术创新和改善能源消费结构提升碳排放效率。

2. 人力资本结构高级化影响碳排放效率的异质性

我国地域广阔,各地区的资源禀赋、产业结构、经济实力等存在显著差异。不同地区之间的技术水平(欧阳晓等,2012)^[20]、市场化程度(樊纲等,2011)^[21]、环境规制强度(马海良等,2020)^[22]等区别明显,而这些差异可能导致人力资本结构高级化对碳排放效率的影响程度不同。

(1)技术水平异质性。技术水平差异通过技术适配性和知识吸收能力影响人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。一方面,根据技术差距理论(Griffith et al.,2004)^[23],技术水平较高地区的先进

设备更易与高级人力资本形成互补,突破创新瓶颈,促进碳排放效率的提升。例如碳捕集与封存技术不仅需要高级工程师,还需要先进装备的支持,高技术水平地区可以提供充足的先进设备支持高级人力资本发挥作用,从而增强人力资本结构高级化对碳排放效率的提升效果。相反,技术水平较低的地区由于先进设备不足,无法充分发挥高级人力资本的作用,甚至可能导致拥有高级人力资本的劳动者因缺乏适配岗位而从事低技能工作,形成技能岗位错配,无法充分发挥人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。另一方面,根据知识吸收能力理论(Cohen et al., 1990)^[24],高技术地区具备更强的技术吸收与再创新能力,可以使技术创新产生的低碳技术迅速扩散,并结合具体运用场景进行再创新,增强人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。而低技术地区的技术吸收能力不足,低碳技术溢出效应不能充分发挥,进而制约人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。

(2)市场化程度异质性。市场化程度的不同通过要素配置效率以及技术创新激励影响人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。一方面,在市场化程度较高的地区,生产要素流通壁垒低、成本小、速度快(张美莎等, 2024)^[25],有利于高级人力资本向集约型产业聚集,从而加速粗放型增长向集约型增长转变,增强人力资本结构高级化通过改善经济结构提升碳排放效率的作用机制。而在市场发育程度较低的地区,人力资本流动受阻,对人力资本结构高级化的碳排放效率提升作用形成约束。另一方面,低碳技术创新活动具备明显的正外部性,在产生较大环境和社会收益的同时较难阻止技术模仿与抄袭(郭丰等, 2025)^[26]。在市场化程度较高的地区,知识产权保护制度较为完善,有助于缓解低碳技术创新的外部性问题,通过维护低碳技术创新主体的合法利益激励低碳技术创新(王越等, 2025)^[27],强化人力资本结构高级化通过促进技术创新提升碳排放效率的作用机制。而在市场化程度较低的地区,知识产权保护不够完善,不利于人力资本高级化的技术创新促进效应发挥。

(3)环境规制强度异质性。环境规制通过成本内部化机制引导和约束企业行为,不同地区的环境规制差异会导致企业受到的环境压力不同。“碳锁定”理论认为:一方面,现有技术(如燃煤发电)因长期投资和规模效应而获得竞争优势,替代技术难以进入市场;另一方面,生产设备等基础设施寿命较长且沉没成本高,短期内难以转型;加上低碳技术研发周期较长、市场风险较大,会导致企业长期依赖化石能源体系,阻碍低碳转型,从而形成“碳锁定”(钟军委等, 2024)^[28]。在环境规制强度高的地区,企业碳排放成本较高(马海良等, 2020)^[22],会迫使企业调整技术进步路线,更多地选择低碳技术。企业将高级人力资本投入低碳技术研发,并加快吸收现有低碳技术以降低碳排放成本,从而可以通过技术创新和技术吸收增强人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。而在环境规制强度低的地区,企业碳排放成本较低,且外部监管较弱,导致企业往往会为保持现有盈利而维持“碳锁定”,不愿将高级人力资本投入低碳技术研发,从而阻碍人力资本结构高级化对碳排放效率的促进作用发挥。

基于上述分析,本文提出假说 H3:人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用在技术水平较高、市场化程度较高、环境规制强度较高的地区更强。

三、实证研究设计

1. 基准模型构建

为验证人力资本结构高级化对碳排放效率的影响,本文参考邓荣荣和张翱翔(2021)^[29]的研究,构建如下计量模型:

$$\ln(CEE_{it}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(Hstruc_{it}) + \alpha_2 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

其中,下标*i*和*t*分别代表地区(省份)和年份,被解释变量“碳排放效率”为*i*地区*t*年碳排放效率(*CEE_{it}*)的自然对数值,核心解释变量“人力资本结构高级化”为*i*地区*t*年人力资本结构高级化指数(*Hstruc_{it}*)的自然对数值,*X_{it}*代表控制变量, μ_i 、 ν_t 分别表示省份和年份固定效应, ε_{it} 为随机扰动项。

(1)地区人力资本结构高级化水平的测度。本文借鉴刘智勇等(2018)^[10]的研究,运用向量夹角法测算样本省份的人力资本高级化指数,该指数能够反映人力资本结构高级化的动态演进过程以及不同人力资本的匹配和互补关系,切合人力资本结构高级化的本质含义(程锐等,2019)^[11]。

(2)地区碳排放效率的测度。本文采用综合考虑多种投入和多种产出的数据包络分析(DEA)方法评估地区碳排放效率,具体采用非径向方向距离函数(NDDF)进行测算。借鉴马大来等(2015)^[30]的研究,投入指标包括“劳动力投入”(年末就业人口数,万人)、“资本存量”(以1996年为基期,使用永续盘存法计算,亿元)、“能源消费总量”(万吨标准煤),期望产出为“地区生产总值”(以1996年为基期,亿元),非期望产出为“二氧化碳排放量”(万吨)。

(3)控制变量的选取。本文借鉴Li和Lin(2017)^[31]、李珊珊和马艳芹(2019)^[32]、贾智杰等(2023)^[33]、杨浩昌等(2023)^[34]的研究,选取以下6个控制变量:一是“政府干预程度”,用地方财政一般预算支出与GDP之比衡量;二是“产业结构”,用第三产业增加值占GDP的比重衡量;三是“对外开放水平”,用进出口总额与GDP之比衡量;四是“经济发展水平”,用人均实际GDP的自然对数值衡量;五是“技术创新水平”,用人均发明专利申请数衡量;六是“能源消费结构”,用煤炭消费量占化石能源消费总量的比重衡量。

2. 样本选择与数据处理

鉴于数据的可获得性,本文以我国30个省份(不包括港澳台地区和西藏自治区)为研究样本,样本期间为2003—2022年。使用的数据主要来源于历年《中国统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国价格统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及各地区统计年鉴和国家统计局网站、中国市场化指数数据库(<https://cmi.ssap.com.cn>)等,个别缺失数据按照时间趋势进行补全。主要变量的描述性统计结果见表1。

表1 主要变量的描述性统计结果

	变 量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	碳排放效率	600	-0.367	0.265	-1.242	0
核心解释变量	人力资本结构高级化	600	2.891	0.043	2.773	3.043
控制变量	政府干预程度	600	0.218	0.096	0.079	0.627
	产业结构	600	0.448	0.094	0.283	0.816
	对外开放水平	600	0.300	0.360	0.007	1.721
	经济发展水平	600	1.529	0.665	-0.487	3.031
	技术创新水平	600	0.051	0.089	0.001	0.866
	能源消费结构	600	0.746	0.155	0.016	0.958

四、实证结果分析

1. 基准回归

采用省级面板数据进行 Hausman 检验,结果显示 P 值远小于 0.01,拒绝原假设,说明非观测效应与解释变量存在一定的相关性,固定效应估计量满足大样本渐进一致性。因此,选择固定效应模型进行基准回归,检验结果见表 2。在逐步加入控制变量过程中,“人力资本结构高级化”的回归系数均在 1% 的水平上显著为正,表明人力资本结构高级化显著提升了碳排放效率,假说 H1 得到验证。

表 2 基准回归结果

变 量	碳排放效率						
人力资本结构高级化	2.980*** (5.94)	3.567*** (7.11)	3.832*** (8.25)	2.683*** (6.02)	2.588*** (5.48)	1.404*** (3.53)	1.398*** (3.78)
政府干预程度		-1.195*** (-7.54)	-1.288*** (-7.58)	-0.993*** (-6.39)	-0.850*** (-5.62)	-0.481*** (-3.60)	-0.425*** (-3.35)
产业结构			1.203*** (7.58)	1.049*** (7.16)	1.256*** (8.26)	1.211*** (8.69)	1.193*** (8.45)
对外开放水平				-0.276*** (-6.28)	-0.369*** (-6.25)	-0.204*** (-3.85)	-0.218*** (-4.43)
经济发展水平					0.241*** (3.41)	0.301*** (5.51)	0.272*** (4.69)
技术创新水平						0.973*** (6.94)	0.757*** (4.93)
能源消费结构							-0.251*** (-3.45)
常数项	-8.900*** (-6.02)	-10.461*** (-7.12)	-11.936*** (-8.70)	-8.143*** (-6.08)	-8.291*** (-5.93)	-5.277*** (-4.52)	-5.024*** (-4.58)
年份和省份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
样本量	600	600	600	600	600	600	600
R^2	0.871	0.884	0.898	0.908	0.913	0.931	0.932

注: *、**、***分别表示 10%、5%、1% 的显著性水平,小括号中数值为稳健 t 统计量,下表同。

2. 稳健性检验

(1) 内生性处理。为缓解遗漏变量、双向因果关系等引起的内生性问题,本文采用 GMM 估计和工具变量法进行内生性处理。第一,引入“碳排放效率”的滞后 1 期项进行系统 GMM 估计,检验结果见表 3 的(1)列,“人力资本结构高级化”的系数显著为正。第二,选取人力资本结构高级化的滞后 5 期项为工具变量(陈强,2014)^[35],使用两阶段最小二乘法(2SLS)进行估计,检验结果见表 3 的(2)(3)列。Kleibergen-Paap rk LM 统计量和 Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量拒绝工具变量不可识别和弱工具变量原假设,表明工具变量选取有效;第一阶段回归结果显示,工具变量与“人力资本结构高级化”显著正相

关;第二阶段回归结果显示,工具变量拟合的“人力资本结构高级化”的回归系数在 1%水平上显著为正。上述检验结果表明,在缓解内生性问题后,人力资本结构高级化显著提升了碳排放效率的结论依旧成立。

(2)更换估计方法。考虑到省级面板数据可能存在组间异方差、组内自相关和组间同期相关等问题,采用面板矫正标准误(XTPCSE)和可行广义最小二乘法(FGLS)进行模型估计。检验结果见表 3 的(4)(5)列,“人力资本结构高级化”的估计系数均显著为正,表明基准模型的回归结果是稳健的。

(3)删除直辖市样本。考虑到直辖市特殊的地位使其与其他省级区域存在显著差异(林伯强等,2019)^[36],删除直辖市样本后重新进行检验。回归结果见表 3 的(6)列,“人力资本结构高级化”的系数仍然显著为正。

表 3 稳健性检验结果 1

变 量	内生性处理			更换估计方法		删除
	系统 GMM 估计	2SLS 第一阶段	2SLS 第二阶段	FGLS	XTPCSE	直辖市样本
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	碳排放效率	人力资本 结构高级化	碳排放效率	碳排放效率	碳排放效率	碳排放效率
碳排放效率滞后 1 期	0.928 *** (5.90)					
人力资本结构高级化	1.153 ** (2.34)		5.036 *** [2.74]	1.290 *** [4.75]	0.462 ** [1.98]	0.796 ** (2.17)
工具变量		0.217 *** (4.95)				
化石能源消费占比						
AR(1) 检验值	-2.43 {0.015}					
AR(2) 检验值	-1.58 {0.114}					
Hansen 检验值	10.15 {0.965}					
K-P rk LM 统计量			24.596 {0.000}			
K-P rk Wald F 统计量		24.468 {16.38}				
样本量	570	600	600	600	600	520
R ²		0.965	0.920		0.869	0.939

注:中括号中数值为稳健 z 统计量;大括号中(除 Kleibergen-Paap rk Wald F 检验对应的是 10%显著性水平下临界值外)数值为 P 值;所有模型均控制了控制变量和固定效应,限于篇幅,控制变量估计结果略;下表同。

(4)替换被解释变量的测量方法。借鉴周五七和聂鸣等(2012)^[37]、吴泓翰和徐玖平等(2023)^[38]的做法,使用包含非期望产出的 SBM 模型测度样本地区的碳排放效率,得到变量“碳排放效率 1”,以其为被解释变量重新进行检验。回归结果见表 4 的(1)(2)(3)列,“人力资本结构高级化”的系数还是显著为正,进一步表明基准回归结果是稳健的。

(5)替换核心解释变量的度量方式。第一,借鉴刘智勇等(2018)^[10]、程锐和马莉莉(2019)^[11]的做法,基于大专以上、高中、初中、小学、文盲半文盲 5 类受教育程度计算得到变量“人力资本结构高级化 1”。第二,借鉴张月玲等(2015)^[39]和骆蓓函(2021)^[9]的做法,未上过学、小学、初中、高中、大专、本科以

及研究生的受教育年限分别赋值为 0、6、9、12、15、16、19.3 年,将其与相应的就业人员比重相乘,用其中属于高等教育的后三项之和衡量“人力资本结构高级化 2”。第三,借鉴 Vandenbussche 等(2006)^[40]的做法,用就业人员中高中及以上人员占比和大专及以上人员占比衡量“人力资本结构高级化 3”和“人力资本结构高级化 4”。分别以上述指标为核心解释变量重新进行检验,回归结果见表 4 的(4)至(7)列所示,无论如何调整人力资本结构高级化的度量方法,人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用都是显著的,再次表明本文的分析结果具有良好的稳健性。

表 4 稳健性检验结果 2

变 量	替换被解释变量			替换核心解释变量			
	碳排放效率 1			碳排放效率			
	(1) LSDV 方法	(2) XTGLS 命令	(3) XTPCSE 命令	(4)	(5)	(6)	(7)
人力资本结构高级化	1.169** (2.35)	0.920** [2.50]	0.692** [2.00]				
人力资本结构高级化 1				0.205*** (4.34)			
人力资本结构高级化 2					0.067*** (6.40)		
人力资本结构高级化 3						0.522*** (4.27)	
人力资本结构高级化 4							1.083*** (6.50)
样本量	600	600	600	600	600	600	600
R ²	0.927		0.879	0.933	0.936	0.933	0.936

3. 作用机制检验

本文借鉴温忠麟等(2004)^[41]的研究,构建如下中介效应方程组:

$$\ln(CEE_{it}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(Hstruc_{it}) + \alpha_2 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hstruc_{it}) + \beta_2 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

$$\ln(CEE_{it}) = \gamma_0 + \gamma_1 \ln(Hstruc_{it}) + \gamma_2 M_{it} + \gamma_3 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

其中, M_{it} 为中介变量,其他变量同基准模型。根据前文理论分析,选取“技术创新水平”和“能源消费结构”两个中介变量,计算方法同前。若中介效应显著, α_1 、 γ_1 、 $\beta_1 \cdot \gamma_2$ 分别表示总效应、直接效应、间接效应,中介效应占总效应的比重为 $\beta_1 \cdot \gamma_2 / \alpha_1$,并可通过 Sobel 检验进一步分析中介效应的显著性。表 5 的(1)至(5)列汇报了使用逐步法估计中介效应的检验结果。Sobel 值均在 1%的水平上显著,表明中介效应显著存在,即人力资本结构高级化可以通过促进技术创新和优化能源消费结构两个渠道提升碳排放效率,假说 H2 得到验证。其中,“技术创新水平”的间接效应占比为 45.71%，“能源消费结构”的间接效应占比为 22.68%,表明促进技术创新渠道的中介效应更大。

传统的逐步法只能单独检验单一变量的中介效应(温忠麟等,2004)^[41],但在现实经济社会中,技术

创新水平和能源消费结构会同时对碳排放效率产生影响,单独检验结果显著并不能证明共同作用下亦显著。因此,本文参考 Preacher 和 Hayes(2008)^[42]的研究,构建如下并行多重中介效应方程组:

$$\ln(CEE_{it}) = \alpha_0 + \alpha_1 \ln(Hstruc_{it}) + \alpha_2 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

$$Tech_inno_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hstruc_{it}) + \beta_2 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

$$Estruc_{it} = \theta_0 + \theta_1 \ln(Hstruc_{it}) + \theta_2 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

$$\ln(CEE_{it}) = \gamma_0 + \gamma_1 \ln(Hstruc_{it}) + \gamma_2 Tech_inno_{it} + \gamma_3 Estruc_{it} + \gamma_4 X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it}$$

其中, $Tech_inno_{it}$ 和 $Estruc_{it}$ 为中介变量“技术创新水平”和“能源消费结构”。系数 α_1 表示人力资本结构高级化影响碳排放效率的总效应, γ_1 表示人力资本结构高级化的直接效应, $\beta_1\gamma_2$ 和 $\theta_1\gamma_3$ 分别表示人力资本结构高级化通过促进技术创新和改善能源消费结构产生的间接效应,总效应、直接效应、间接效应三者之间的关系为: $\alpha_1 = \gamma_1 + (\beta_1 \cdot \gamma_2 + \theta_1 \cdot \gamma_3)$ 。检验结果见表 5 的(1)(2)(3)(6)列。两个中介变量的间接效应以及总间接效应至少在 5%的水平上显著,表明人力资本结构高级化可以同时通过促进技术创新和优化能源消费结构两条渠道提升碳排放效率。其中,通过促进技术创新的间接效应占总效应比重约为 35.57%,通过优化能源消费结构的间接效应占总效应比重约为 10.42%,总间接效应占总效应比重约为 45.99%。

表 5 中介机制检验结果

变 量	单独中介效应逐步回归检验					并行多重中介效应	
	基准模型	促进技术创新渠道		优化能源消费结构渠道			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)		(6)
	碳排放效率	技术创新	碳排放效率	能源消费结构	碳排放效率		碳排放效率
人力资本结构高级化	2.588*** (5.48)	1.217*** (4.11)	1.404*** (3.53)	-1.075*** (-2.73)	2.000*** (5.42)	1.398*** (3.97)	
技术创新水平			0.973*** (6.94)			0.757*** (5.17)	
能源消费结构					-0.546*** (-9.48)	-0.251*** (-3.63)	
间接效应(技术创新水平)			1.183*** [5.72]			0.920*** [4.02]	
间接效应(能源消费结构)					0.587*** [3.599]	0.269** [2.08]	
总间接效应						1.190*** [4.27]	
直接效应			1.404*** [3.77]		2.000*** [5.31]	1.398*** (3.97)	
总效应	2.588*** (5.48)						
间接效应占比			45.71%		22.68%	45.99%	
样本量	600	600	600	600	600	600	
R ²	0.913	0.827	0.931	0.874	0.925	0.932	

此外,参考加州大学洛杉矶分校统计咨询小组的做法,进一步使用 Bootstrap 法检验间接效应的显著性。重复 2 000 次的检验结果见表 6,促进技术创新渠道的间接效应为 0.920,优化能源消费结构渠道的间接效应为 0.269,总间接效应为 1.190,所有间接效应至少在 5%的水平上显著,表明本文的中介效应分析结果是稳健的。

表 6 中介效应 Bootstrap 检验结果

	观测系数	Bootstrap 标准误	Z	$P> Z $	基于正态分布的 95%置信区间
间接效应(技术创新水平)	0.920 486	0.256 637	3.59	0.000 330	0.417 486, 1.423 486
间接效应(能源消费结构)	0.269 496	0.134 666	2.00	0.045 000	0.005 556, 0.533 436 1
总间接效应	1.189 982	0.297 816	4.00	0.000 065	0.606 274, 1.773 690

4. 异质性分析

本文采用分组检验的方法进行异质性分析,并参考连玉君等(2010)^[43]的做法,采用费舍尔组合检验法进行组间系数差异检验。具体来讲,进行如下分组:第一,借鉴郝翠红和李建民(2018)^[44]、英杰等(2024)^[45]的方法,采用劳均发明专利申请授权数(发明专利申请授权量与就业人数之比)和研发经费存量(参照资本存量的计算方法将各地区研发经费内部支出转化为存量数据)衡量地区技术水平,按样本期内的平均值进行地区排名,分别将排名前 50%的地区划为“高专利”组和“高研发经费”组,排名后 50%的地区分别划为“低专利”组和“低研发经费”组。第二,借鉴蔡庆丰等(2020)^[46]、叶祥松和刘敬(2020)^[47]、李华和董艳玲(2020)^[48]的研究,采用市场化指数衡量各地区的市场化程度,按样本期内的平均值进行地区排名,将排名前 50%的地区划为“高市场化程度”组,排名后 50%的地区划为“低市场化程度”组。第三,借鉴林伯强和谭睿鹏(2019)^[36]的做法,采用工业固体废物综合利用率衡量各地区的环境规制强度,按样本期内的平均值进行地区排名,将排名前 50%的地区划为“强环境规制”组,排名后 50%的地区划为“弱环境规制”组。分组检验结果见表 7。

表 7 异质性分析结果

变 量	创新水平异质性				市场化程度异质性		环境规制强度异质性	
	高专利	低专利	高研发 经费	低研发 经费	高市场化 程度	低市场化 程度	强环境 规制	弱环境 规制
人力资本	1.448***	-0.046	2.477***	0.063	2.979***	-0.363	2.734***	-0.398
结构高级化	(3.03)	(-0.11)	(4.82)	(0.17)	(5.69)	(-1.03)	(4.83)	(-1.02)
样本量	300	300	300	300	300	300	300	300
R ²	0.832	0.965	0.844	0.968	0.827	0.970	0.823	0.962
组间系数差异	1.493**{0.041}		2.414***{0.001}		3.341***{0.000}		3.131***{0.000}	

注:组间系数差异检验(Bootstrap)的经验 P 值通过自体抽样 2 000 次得到。

在“高专利”“高研发经费”“高市场化程度”“强环境规制”组,“人力资本结构高级化”对“碳排放效率”的回归系数显著为正,而在“低专利”“低研发经费”“低市场化程度”“弱环境规制”组,“人力资本结构高级化”的回归系数不显著,且组间系数差异显著。上述分析结果表明,在技术水平较高、市场化程度较高、环境规制强度较高的地区,人力资本结构高级化显著提升了碳排放效率;但在技术水平较低、市场

化程度较低、环境规制强度较低的地区,人力资本结构高级化对碳排放效率没有显著影响。由此,假说H3得到验证。

五、结论与启示

当前,绿色低碳转型是推动经济高质量发展的核心要义之一,提升碳排放效率则是实现“双碳”目标的关键路径。人力资本作为驱动高质量发展的核心要素,其结构的高级化成为提升碳排放效率的重要途径。本文基于2003—2022年我国30个省份的面板数据,运用向量夹角法测算人力资本结构高级化程度,使用非径向方向距离函数模型测量碳排放效率,采用双向固定效应模型考察人力资本结构高级化对碳排放效率的影响,结果发现:人力资本结构高级化显著提升了地区碳排放效率,该结论在经过内生性处理、更改估计方法、删除直辖市样本、替换核心解释变量和被解释变量等稳健检验后依然成立;人力资本结构高级化能够通过促进技术创新和优化能源消费结构两条渠道提升碳排放效率;人力资本结构高级化显著提升了技术水平较高、市场化程度较高、环境规制强度较高地区的碳排放效率,但对技术水平较低、市场化程度较低、环境规制强度较低地区的碳排放效率没有显著影响。根据上述结论,本文得到以下启示:

第一,各地区应积极贯彻落实“优先发展教育战略”“人才强国战略”等决策部署,加快人力资本结构高级化进程。包括:实施“碳中和教育示范工程”,建设低碳专业实训基地,持续赋能碳排放效率提升;创新人才培养体制机制,推进教育数字化,打造“碳数据智慧教育平台”,培养碳资产管理人才;实施“内培外引”的人才战略,采取对内培养与对外引进相结合的措施,建立低碳研发中心,促进人才共享与成果转化;完善人才治理体系,构建“碳排放绩效评价体系”,将单位碳排放效率纳入项目评审、人才评定和奖励的关键指标,构建“教育—人才—产业”协同发展的低碳发展生态系统。

第二,以提升人力资本结构高级化为抓手,通过技术创新与能源消费结构优化协同驱动低碳发展,构建“技术—人才—能源”三位一体的政策体系。各地区需强化政策协同,将人力资本培育与技术创新、能源消费结构优化深度融合,形成系统化的发展路径。应加快构建创新体系,坚持技术攻关与制度保障并重:一方面,完善知识产权保护体系,建立全链条创新激励机制,夯实全面创新的基础;另一方面,培育开放包容的创新生态,通过产学研协同、创新文化培育等举措释放高级人力资本的潜能。同时,要立足能源资源禀赋推动能源消费深度转型:重点控制化石能源消费,推动煤炭清洁高效利用与新能源规模化开发;加速构建新型电力系统,统筹推进“沙戈荒”基地等新能源项目建设。

第三,各地区需要根据当地技术基础、市场发育状态、环境规制等实际情况,结合自身禀赋优势,因地制宜制定发展策略,充分发挥人力资本结构高级化对碳排放效率的提升作用。要优化制度环境以激发创新活力,通过政策激励引导高级人力资本积极参与低碳技术研发,比如建立绿色技术专利快速审批通道、对低碳创新成果给予税收减免等,形成“人才—技术—产业”良性循环;要构建市场化驱动机制,明确政府与市场边界,建立以碳排放权交易为核心的市场化调节机制,通过要素价格信号引导资本、技术、人才向低碳领域集聚。

参考文献:

- [1] 安超,雷明.二氧化碳排放、人力资本和内生经济增长研究[J].中国管理科学,2019,27(5):149-160.
- [2] 郭炳南,卜亚.人力资本、产业结构与中国碳排放效率——基于SBM与Tobit模型的实证研究[J].当代经济管理,2018,40(6):13-20.
- [3] 何伟军,李闻钦,邓明亮.人力资本、绿色科技创新与长江经济带全要素碳排放效率[J].科技进步与对策,2022,39

- (9):23-32.
- [4] 田云,蔡艳蓉,张蕙杰.数字经济对农业碳排放效率的影响——基于门槛效应和空间溢出效应的检验[J].农业技术经济,2024(11):89-107.
- [5] 李金凤.数字物流对流通业碳排放效率的影响——基于人力资本和环境规制的门槛效应[J].商业经济研究,2024(14):38-41.
- [6] 田媛,曾令秋.农机购置补贴对农业绿色全要素生产率的影响研究[J].西部论坛,2024,34(2):94-109.
- [7] 李艳,赵田田,舒泰一,等.数字经济发展水平对碳排放约束下农业生产效率的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2024,32(11):1829-1842.
- [8] 史常亮.农业数字化转型的减污降碳协同效应[J/OL].环境科学,1-16(2025-04-25). <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.2024.12220>.
- [9] 骆著函.人力资本结构高级化对服务业结构升级的影响研究——基于中国城市面板数据[J].广东财经大学学报,2021,36(2):39-53.
- [10] 刘智勇,李海崢,胡永远,等.人力资本结构高级化与经济增长——兼论东中西部地区差距的形成和缩小[J].经济研究,2018,53(3):50-63.
- [11] 程锐,马莉莉.人力资本结构高级化与出口产品质量升级——基于跨国面板数据的实证分析[J].国际经贸探索,2019,35(4):42-59.
- [12] 靳涛,王卫卿.人力资本结构提升、知识产权保护与技术进步——基于中国省级面板数据的实证检验[J].吉林大学社会科学学报,2022,62(4):21-33,233.
- [13] 林毅夫,付才辉,郑洁.新结构环境经济学:新框架与新见解[J].经济理论与经济管理,2023,43(9):4-17.
- [14] 郑洁.人力资本结构与环境污染:新结构经济学视角的理论初探[J].经济评论,2022(6):36-52.
- [15] NELSON R R, HELPS E S. Investment in humans, technological diffusion, and economic growth [J]. The American Economic Review, 1966, 56(1/2): 69-75.
- [16] ARROW K J. The economic implications of learning by doing[J]. The Review of Economic Studies, 1962, 29(3): 155-173.
- [17] CASELLI F, COLEMAN W J. The world technology frontier[J]. American Economic Review, 2006, 96(3): 499-522.
- [18] ROMER P M, Endogenous technical change[J]. Journal of Political Economy, 1990, 98(5): 71-102.
- [19] 张慧智,孙茹峰.中国全球价值链地位、环境规制与碳排放绩效[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),2024,77(1): 123-135.
- [20] 欧阳晓,易先忠,生延超.技术差距、资源分配与后发大国经济增长方式转换[J].中国工业经济,2012(6):18-30.
- [21] 樊纲,王小鲁,马光荣.中国市场化进程对经济增长的贡献[J].经济研究,2011,46(9):4-16.
- [22] 马海良,董书丽.不同类型环境规制对碳排放效率的影响[J].北京理工大学学报(社会科学版),2020,22(4):1-10.
- [23] GRIFFITH R, REDDING S, REENEN J. Mapping the two faces of R&D: Productivity growth in a panel of OECD industries [J]. The Review of Economics and Statistics, 2004, 86: 883-895.
- [24] COHEN W, LEVINTHAL D. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation [J]. Administrative Science Quarterly, 1990, 35: 128-152.
- [25] 张美莎,邱勃,冯涛.异质性研发与“生产率困境”——基于政府支持和市场化的调节效应[J].软科学,2024,38(3): 61-69.
- [26] 郭丰,任毅,段云桂,等.知识产权保护对企业数字技术创新的影响效应研究——来自中国上市公司的证据[J].管理评论,2025,37(1):77-89.
- [27] 王越,阳镇,贺俊.知识产权保护与企业绿色技术创新——基于知识产权示范城市建设的证据[J/OL].科学学与科学技术管理,1-31(2025-03-26). <https://doi.org/10.20201/j.cnki.ssttm.20250326.001>.
- [28] 钟军委,李雨欣,赵卓娅.中国绿色税制对区域经济“碳锁定”的影响[J].中国人口·资源与环境,2024,34(8):13-21.
- [29] 邓荣荣,张翱翔.中国城市数字金融发展对碳排放绩效的影响及机理[J].资源科学,2021,43(11):2316-2330.

- [30] 马大来,陈仲常,王玲. 中国省际碳排放效率的空间计量[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(1):67-77.
- [31] LI J,LIN B. Does energy and CO₂ emissions performance of China benefit from regional integration? [J]. Energy Policy, 2017,101:366-378.
- [32] 李珊珊,马艳芹. 环境规制对全要素碳排放效率分解因素的影响——基于门槛效应的视角[J]. 山西财经大学学报, 2019,41(2):50-62.
- [33] 贾智杰,林伯强,温师燕. 碳排放权交易试点与全要素生产率——兼论波特假说、技术溢出与污染天堂[J]. 经济学动态,2023(3):66-86.
- [34] 杨浩昌,钟时权,李廉水. 绿色技术创新与碳排放效率:影响机制及回弹效应[J]. 科技进步与对策,2023,40(8):99-107.
- [35] 陈强. 高级计量经济学及Stata应用[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2014.
- [36] 林伯强,谭睿鹏. 中国经济集聚与绿色经济效率[J]. 经济研究,2019,54(2):119-132.
- [37] 周五七,聂鸣. 中国工业碳排放效率的区域差异研究——基于非参数前沿的实证分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2012,29(9):58-70,161.
- [38] 吴泓翰,徐玖平. 绿色金融对中国地区碳排放效率的影响效应分析——基于动态空间面板模型的实证研究[J]. 社会科学研究,2023(6):84-92.
- [39] 张月玲,叶阿忠,陈泓. 人力资本结构、适宜技术选择与全要素生产率变动分解——基于区域异质性随机前沿生产函数的经验分析[J]. 财经研究,2015,41(6):4-18.
- [40] VANDENBUSSCHE J, AGHION P, MEGHIR C. Growth, distance to frontier and composition of human capital[J]. Journal of Economic Growth, 2006,11(2):97-127.
- [41] 温忠麟,张雷,侯杰泰,等. 中介效应检验程序及其应用[J]. 心理学报,2004(5):614-620.
- [42] PREACHER K J, HAYES A F. Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models[J]. Behavior Research Methods, 2008,40(3):879-891.
- [43] 连玉君,彭方平,苏治. 融资约束与流动性管理行为[J]. 金融研究,2010(10):158-171.
- [44] 郝翠红,李建民. 技术进步、研发投入与性别工资差距——基于CGSS数据的实证分析[J]. 贵州财经大学学报,2018(5):44-54.
- [45] 英洁,宋佳莹,高传胜. 人口老龄化、医疗卫生支出与就业——基于健康人力资本与技术水平的机制分析[J]. 西北人口,2024,45(3):79-91.
- [46] 蔡庆丰,陈熠辉,林焜. 信贷资源可得性与企业创新:激励还是抑制? ——基于银行网点数据和金融地理结构的微观证据[J]. 经济研究,2020,55(10):124-140.
- [47] 叶祥松,刘敬. 政府支持与市场化程度对制造业科技进步的影响[J]. 经济研究,2020,55(5):83-98.
- [48] 李华,董艳玲. 基本公共服务均等化是否缩小了经济增长质量的地区差距? [J]. 数量经济技术经济研究,2020,37(7):48-70.

The Lifting Effect of Human Capital Structure Upgrading on Carbon Emission Efficiency

YAO Li-ting¹, PENG Xiang², ZHANG Yi³

- (1. China Center for Special Economic Zone Research, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China;
2. School of Finance, Chongqing Finance and Economics College, Chongqing 401320, China;
3. Chongqing Tuqiang Engineering Technology Consulting Co., Ltd., Chongqing 401121, China)

Summary: In recent years, green and low-carbon transformation has become a core imperative for promoting high-quality economic development, with improving carbon emission efficiency serving as a critical

pathway. In this context, human capital—as a fundamental driver of development—should contribute significantly to enhancing carbon emission efficiency through the upgrading of its structural composition. However, while existing literature extensively investigates the relationship between aggregate human capital and carbon emissions, systematic research on how the upgrading of human capital structure affects carbon emission efficiency remains limited. In particular, there is a lack of in-depth analysis of the intrinsic transmission mechanisms and heterogeneous effects through which such structural changes influence carbon emission efficiency.

This study measures the provincial-level upgrading of human capital structure using the vector angle method and evaluates carbon emission efficiency through the non-radial directional distance function (NDDF) model to examine the impact of human capital structure upgrading on carbon emission efficiency. Empirical results indicate that human capital structure upgrading significantly improves carbon emission efficiency across regions. Specifically, this effect operates primarily through channels such as fostering technological innovation and optimizing the energy consumption structure. Furthermore, regional technological capability, the degree of marketization, and the intensity of environmental regulation can amplify the positive impact of human capital structure upgrading on carbon emission efficiency.

Compared to prior research, this paper offers three marginal contributions. First, it integrates human capital structure upgrading and carbon emission efficiency into a unified analytical framework, exploring pathways to improve carbon emission efficiency from the perspective of human capital structure advancement. Second, regarding mechanisms, it employs parallel multiple mediation analysis combined with the Bootstrap method to test whether human capital structure upgrading improves regional carbon emission efficiency through technological innovation and energy consumption structure optimization. This approach deepens the understanding of the intrinsic relationship between human capital structure upgrading and carbon emission efficiency. Third, given that the effect of human capital structure upgrading on carbon emission efficiency is moderated by marketization level, regional technology, and environmental regulation, this study further examines their roles in this relationship. These findings offer significant policy implications.

This research partially unveils the intrinsic mechanisms through which human capital structure optimization drives carbon emission efficiency improvement. It provides a basis for policymakers to design targeted talent development and green transition synergy policies under the “Dual Carbon” goals framework. Additionally, it offers differentiated policy guidance for provinces at varying development stages to enhance the alignment between human capital and low-carbon technologies, thereby better leveraging human capital structure upgrading to serve regional green and low-carbon development.

Keywords: human capital structure upgrading; carbon emission efficiency; technological innovation; energy consumption structure; degree of marketization; environmental regulation

CLC number: F240; F205

Document code: A

Article ID: 1674-8131(2025)05-0094-14

(编辑: 刘仁芳; 朱 艳)