

# APEC成员国技术进步与碳排放分类研究与启示

李雅楠, 魏力蛟\*

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年5月24日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月24日

## 摘要

全球气候变化加剧、碳排放问题成为国际焦点, 为探究技术进步在不同经济发展阶段国家碳减排中的作用机制, 寻求有效的碳减排路径, 本文以APEC组织中的17个国家2005~2022年的有关面板数据为基础, 运用多种回归模型深入分析不同经济发展阶段国家技术进步对人均碳排放量的影响: 从整体看, 通电率、专利申请量等变量对人均碳排放有正向影响, ICT产品出口等变量则呈负向影响, 其中人均GDP和人口密度的作用最为突出。分国家类型来看, 高等收入国家中, 通电率、高科技出口等变量显著正向影响人均碳排放; 中高等收入国家里, 通信技术产品出口、专利申请量等对人均碳排放的正向影响显著增强; 中低等收入国家中, 通信技术产品出口占比、移动网络用户占比呈正向影响, 人均GDP却呈负向影响; 中国的移动网络用户占比和人口密度对人均碳排放呈正向影响。最后基于研究结果, 对各收入类型成员国制定差异化碳减排政策、推动全球碳减排进程提出相关建议。

## 关键词

碳排放, 技术进步, 亚太经合组织

# Research and Implications on the Technological Progress and Carbon Emissions Classification of APEC Member Countries

Yanan Li, Lijiao Wei\*

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 24<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 16<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 24<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 李雅楠, 魏力蛟. APEC 成员国技术进步与碳排放分类研究与启示[J]. 建模与仿真, 2025, 14(6): 233-246.  
DOI: 10.12677/mos.2025.146493

## Abstract

With the intensification of global climate change, the issue of carbon emissions has become an international focus. In order to explore the mechanism of technological progress in carbon emission reduction for countries at different stages of economic development and seek effective paths for carbon emission reduction, this paper, based on the relevant panel data of 17 countries within the APEC from 2005 to 2022, uses a variety of regression models to deeply analyze the impact of technological progress on per capita carbon emissions in countries at different economic development stages. Overall, variables such as the electricity access rate and the number of patent applications have a positive effect on per capita carbon emissions, while variables such as the export of ICT products have a negative effect. Among them, per capita GDP and population density play the most prominent roles. In terms of different types of countries, in high-income countries, variables such as the electricity access rate and high-tech exports have a significant positive impact on per capita carbon emissions. In upper-middle-income countries, the positive effects of variables such as the export of communication technology products and the number of patent applications on per capita carbon emissions are significantly enhanced. In lower-middle-income countries, the proportion of exports of communication technology products and mobile network users has a positive effect, while per capita GDP has a negative effect. In China, the proportion of mobile network users and the population density have a positive effect on per capita carbon emissions. Finally, based on the research results, relevant suggestions are put forward for member countries of different income types to formulate differentiated carbon emission reduction policies and to promote the global carbon emission reduction process.

## Keywords

Carbon Emission, Technological Progress, Asia-Pacific Economic Cooperation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言与文献综述

在全球气候变化的大背景下, 碳排放问题已成为国际社会广泛关注的焦点。大量温室气体排放, 尤其是二氧化碳排放, 被认为是导致全球气候变暖、极端天气事件频发的主要原因之一。在此紧迫形势下, 深入探究各国碳排放影响因素及减排策略刻不容缓。

亚太经济合作组织(APEC)自 1989 年成立, 从最初的 12 个成员发展到如今的 21 个成员, 其成员国经济活动在全球经济格局中占据重要地位。APEC 的目标包括相互依存、互利共赢、建立多边贸易体系以及消除贸易壁垒等。然而, APEC 多数成员国属于新兴或发展中经济体, 为推动经济增长, 对化石燃料的消耗巨大, 这使得 APEC 成员国的碳排放情况对全球碳排放总量有着不可忽视的影响。例如, 部分 APEC 发展中经济体的航空碳排放增长态势已引发广泛关注。因此, 对 APEC 成员国碳排放问题进行深入研究, 有助于理解全球碳排放水平上升的态势, 为全球碳减排行动提供重要参考。

技术进步被普遍认为是实现碳减排目标的关键因素。在能源领域, 技术进步能够提高能源利用效率, 开发清洁能源, 从而减少对传统化石能源的依赖, 降低碳排放。因此, 本文旨在基于 APEC 成员国 17 个国家的相关数据, 通过分类研究判断不同经济发展阶段国家的技术进步对人均碳排放量的影响, 为中国推进高质量发展, 如期实现碳减排目标制定更具针对性的碳减排政策提供理论依据和实践指导, 同时也

为全球碳减排事业贡献有价值的参考。

### 1.1. 技术进步对碳排放的直接影响研究

首先, 技术进步对碳排放的影响具有双向性。在技术进步对碳排放的直接影响方面, 诸多研究为其有助于降低碳排放的观点提供了有力支撑。例如, Gao 等(2022)通过构建固定效应模型和中介效应模型, 明确证实绿色技术创新绿色技术创新可显著降低碳排放水平[1], 吴康等(2024)借助非线性模型揭示了绿色技术创新与碳排放之间的倒“U”型关系[2], 孙振清等(2023)通过建立动态面板数据模型和固定效应模型指出研究技术创新投入在碳减排方面作用更显著, 产出作用相对较弱[3]。Ben Lahouel 等(2021)构建的平滑过渡回归模型(STR)显示, 信息通信技术(ICT)的使用能够有效提升碳效率[4], Bilal 等(2022)和 You 等(2024)分别通过动态看似不相关回归(DSUR)和面板异质性因果关系测试, 证实技术创新与 CO<sub>2</sub> 排放之间存在负相关关系, 且信息技术(ICT)影响十分显著[5] [6]。邵帅等(2023)运用 DEA 方法发现, 绿色技术进步对碳排放绩效改善起着关键作用, 并且具有正向空间溢出效应, 某一地区的绿色技术进步能够辐射带动周边地区[7]。李晓钟和张小红(2023)基于扩展 STIRPAT 模型、胡熠和靳曙畅(2022)等建立的理论模型均表明互联网发展和技术进步对碳排放强度有显著抑制作用, 这些研究从多维度为技术进步降低碳排放提供了坚实证据[8] [9]。然而, Ganda(2019)采用系统广义矩估计(GMM)方法, Li 和 Wang (2017)开发规模-强度双重效应模型均指出技术进步会推动经济增长, 而经济增长往往伴随着能源消耗的增加, 从而导致碳排放的上升[10] [11]。

### 1.2. 技术进步对于碳减排的调节作用研究

除技术进步会对碳排放产生直接影响的研究以外, 也有学者发现技术进步在其他因素与碳排放的关系中发挥着重要调节作用。Du 等人(2022)采用两步系统广义矩量法(SYS-GMM)研究发现技术创新在金融发展对 CO<sub>2</sub> 排放的积极影响中发挥着调节作用[12]。杨亦民等(2023)通过构建 DEA 模型、Kaya-LMDI 碳排放驱动因素分解模型以及门槛回归模型研究发现, 环境规制通过促进技术创新来降低碳排放[13], 周雪琼(2023)建立的基准回归模型表明, 颠覆性技术创新在新质生产力与碳排放绩效的正向关系中具有调节作用[14]。李新安和李慧(2022)运用面板回归模型和 GMM 动态面板模型研究发现, 外商直接投资(FDI)通过技术溢出、技术进步偏向等影响制造业的碳排放[15]。但也有学者指出, 技术进步既能够直接影响碳排放, 也能够调节其他因素对碳排放的影响。胡灵珊和熊萍萍(2023)通过动态面板模型及环境规制的中介效应模型揭示了绿色技术创新在低碳转型中的直接效应和中介效应[16], 孙丽文等(2023)通过建立有调节的中介模型研究发现技术创新能显著减少碳排放, 并且在产业结构升级和环境规制对碳排放的影响中起到部分调节作用[17]。

### 1.3. 数字技术对碳排放的影响研究

作为现代技术进步的重要体现, 数字技术对碳排放产生了多方面影响。杜欣(2023)通过基准回归研究发现, 绿色技术创新能力和绿色全要素生产率是数字经济推动碳减排的重要途径[18], 刘鹏飞和韩晓琳(2023)通过构建的面板回归与空间杜宾模型(SDM)认为, 数字技术发展通过推动产业结构高级化调整和提升能源利用效率来实现碳减排[19]。张珺倩和郑永扣(2023)的固定效应模型也表明数字化转型有助于降低企业碳排放强度[20], 陈晓等(2023)通过双向固定效应模型与空间杜宾模型(SDM)发现, 数字技术创新通过降低能源消耗强度和推动产业结构升级降低城市碳排放强度[21]。然而, 易子榆等(2023)运用面板向量自回归模型(PVAR)研究发现, 数字产业自身技术发展过程会增加碳排放强度, 但能通过赋能上下游产业技术革新实现碳减排, 从而整体推动国家低碳转型发展[22]。

## 2. 数据来源与分析

### 2.1. 数据来源

本研究采用 APEC 组织 19 个成员国 2005~2022 年人均二氧化碳排放量、人均 GDP (2015 年不变价美元)、通电率(占人口的百分比)、人口密度(每公里土地面积人数)、信息和通信技术(ICT)产品出口(占产品出口总量的百分比)、专利申请量(居民)、高科技出口(占制成品出口的百分比)、使用网络人数(占人口的百分比)、固定电话用户(每 100 人)等数据, 所有数据来源于世界银行数据库。

### 2.2. 变量选择

考虑到数据的完整性与可获得性, 本研究主要以 APEC 组织 21 个成员中的越南、美国、泰国、新加坡、俄罗斯、菲律宾、秘鲁、新西兰、墨西哥、马来西亚、韩国、日本、印度尼西亚、中国、智利、加拿大、澳大利亚 17 个成员国家 2005~2022 年的面板数据为样本, 不考虑组织中剩余两个国家巴布亚新几内亚、文莱以及两个地区成员。考虑到数据可获得性, 首先以通电率  $re$  (占人口的百分比)、信息和通信技术(ICT)产品出口  $ie$  (占产品出口总量的百分比)、专利申请量(居民)  $pa$ 、高科技出口  $he$  (占制成品出口的百分比)、使用网络人数  $mw$  (占人口的百分比)、固定电话用户  $ph$  (每 100 人)等作为技术进步衡量指标, 以各国的人均  $CO_2$  排放量  $ce$  (人均公吨数)作为碳排放衡量指标, 加入变量人口密度  $pd$ , 人均国内生产总值  $g$ , 对技术进步对二氧化碳排放的影响进行探究, 采用插值法对部分数据缺失值进行补齐, 为了消除序列数据的不稳定性和可能存在的异方差现象, 首先对人均 GDP、人均  $CO_2$  排放量和人口数量、人口密度、专利申请量五个变量的数据均进行了对数化处理。然后针对 APEC 组织的成员国收入水平特征, 按照世界银行的分类标准, 对其中 8 个高等收入国家、6 个中高等收入国家、3 个中低等收入国家三种类型国家和中国个体分别进行分析, 本论文主要采用 Stata 软件进行实证部分的研究。

### 2.3. 描述性统计分析

对模型中所有变量进行简单的描述性统计分析, 其结果如表 1 所示。

Table 1. Descriptive statistics

表 1. 描述性统计

变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
人均 $CO_2$ 排放量( $ce$ )	306	1.770	0.870	-0.230	2.990
通电率( $re$ )	306	98.13	4.040	77.20	100
ICT 产品出口( $ie$ )	306	14.02	13.48	0.0400	50.86
专利申请量( $pa$ )	306	8.220	2.730	3.300	14.23
高科技出口占比( $he$ )	306	24.38	16.08	1.430	67.05
使用网络人数占比( $mw$ )	306	61.60	26.31	3.600	97.57
固定电话用户占比( $ph$ )	306	25.64	16.61	2.400	60.70
人均 GDP ( $g$ )	306	9.490	1.100	7.380	11.13
人口密度( $pd$ )	306	4.310	1.910	0.970	8.980

### 2.4. 单位根检验

对人均  $CO_2$  排放量( $ce$ )、通电率( $re$ )、ICT 产品出口( $ie$ )、专利申请量( $pa$ )、高科技出口占比( $he$ )、使用

网络人数占比(*mw*)、固定电话用户占比(*ph*)、人均 GDP (*g*)、人口密度(*pd*) 9 个序列进行单位根检验的, 本研究采用 LLC、HT、IPS、Breitung 方法来检验单位根, 结果如表 2 所示。

根据表 2 中使用 LLC 和 IPS 方法的单位根检验结果来看, 所有序列的一阶差分序列均在 1% 的水平下显著拒绝了原假设, 即上述序列均为一阶单整序列 I (1), 满足了同阶单整的前提, 因此可以进行进一步的协整检验。

**Table 2.** Unit root test

**表 2.** 单位根检验

	LLC	HT	IPS	Breitung
<i>ce</i> (C, T)				
<i>ce</i> (C, T, 1)	-6.3293***	-5.5612***	-7.6233***	-4.5414***
<i>ce</i> (C, T, 2)				
<i>re</i> (C, T)		-5.2088***	-5.0641***	
<i>re</i> (C, T, 1)	-9.4980***			-5.8263***
<i>re</i> (C, T, 2)				
<i>ie</i> (C, T)	-8.1840***		-2.7096***	
<i>ie</i> (C, T, 1)		-10.3508***		-7.3188***
<i>ie</i> (C, T, 2)				
<i>pa</i> (C, T)		-2.3271***		
<i>pa</i> (C, T, 1)	-9.0368***		-8.9414***	-9.1035***
<i>pa</i> (C, T, 2)				
<i>he</i> (C, T)	-3.2506***			
<i>he</i> (C, T, 1)		-6.6943***	-7.8280***	-4.3627***
<i>he</i> (C, T, 2)				
<i>mw</i> (C, T)	-3.3923***			
<i>mw</i> (C, T, 1)		-6.6055***	-7.7439***	-6.3875***
<i>mw</i> (C, T, 2)				
<i>ph</i> (C, T)	-4.7634***			
<i>ph</i> (C, T, 1)		-7.2436***	-7.2293***	-5.7419***
<i>ph</i> (C, T, 2)				
<i>g</i> (C, T)	-4.2523***			
<i>g</i> (C, T, 1)		-2.9152***	-8.2307***	-4.9402***
<i>g</i> (C, T, 2)				
<i>pd</i> (C, T)	-3.7761***			
<i>pd</i> (C, T, 1)			-5.2033***	
<i>pd</i> (C, T, 2)		-19.3269***		

注: (C, T, 1)表示有常数项和时间趋势的一阶差分序列, (C, T, 2)表示有常数项和时间趋势的二阶差分序列, 数值为统计量值, \*\*\*表示在 1%显著性水平下拒绝原假设。

## 2.5. 协整检验

对 APEC 组织 17 个成员国人均 CO<sub>2</sub> 排放量(*ce*)、通电率(*re*)、ICT 产品出口(*ie*)、专利申请量(*pa*)、高科技出口占比(*he*)、使用网络人数占比(*mw*)、固定电话用户占比(*ph*)、人均 GDP(*g*)、人口密度(*pd*) 9 个序列之间是否存在协整关系进行检验, 检验结果如表 3 所示。

**Table 3.** Cointegration test

**表 3.** 协整检验

检验方法	统计量	统计量值	p 值
Kao	MDF	-2.8182	0.0024***
	DF	-2.8426	0.0022***
	ADF	-1.9065	0.0283**
	UMDF	-3.2037	0.0007***
	UDF	-3.0049	0.0013***

注: \*\*表示在 5%显著性水平下拒绝原假设, \*\*\*表示在 1%显著性水平下拒绝原假设。

由表 3 可知, 通过 Kao 检验, ADF 统计量协整检验结果在 5%的水平上显著, 其他统计量检验结果在 1%的水平上显著, 通过了协整检验, 可以认为变量 *ce*、*re*、*ie*、*pa*、*he*、*mw*、*ph*、*g*、*pd* 等 9 个序列间存在长期均衡关系。

## 3. 技术进步对碳排放影响实证分析

### 3.1. 回归模型建立

表 4 为建立的混合回归模型、固定效应模型、随机效应模型、使用聚类稳健标准误的固定效应模型、使用聚类稳健标准误的随机效应模型, 广义最小二乘法建立回归模型。

根据表 4, 采用广义最小二乘法(GLS 估计)修正变量之间存在的异方差和自相关问题, 修正后的模型中 8 个解释变量在 0.001 的水平上均显著。由 GLS 估计的结果确定的回归模型为:

$$ce = 0.066re - 0.011ie + 0.091pa + 0.018he - 0.003mw + 0.009ph + 0.331g - 0.134pd - 8.315 \quad (1)$$

**Table 4.** Regression analysis of influencing factors of carbon emissions

**表 4.** 碳排放量影响因素回归分析

	OLS	FE_robust	RE_robust	FE	RE	GLS
<i>re</i>	0.0655*** (0.00472)	0.0131*** (0.00349)	0.0112*** (0.00323)	0.0131*** (0.00212)	0.0112*** (0.00219)	0.0655*** (0.00465)
<i>ie</i>	-0.0107*** (0.00366)	0.00527 (0.00313)	0.00577* (0.00343)	0.00527*** (0.00131)	0.00577*** (0.00140)	-0.0107*** (0.00361)
<i>pa</i>	0.0906*** (0.00719)	0.00824 (0.0215)	0.0371*** (0.0175)	0.00824 (0.0137)	0.0371*** (0.0124)	0.0906*** (0.00708)
<i>he</i>	0.0180*** (0.00281)	0.00533** (0.00185)	0.00456** (0.00225)	0.00533*** (0.00138)	0.00456*** (0.00146)	0.0180*** (0.00277)

续表

<i>mw</i>	-0.00261*** (0.000937)	-0.000567 (0.000731)	-0.00115 (0.00100)	-0.000567 (0.000427)	-0.00115*** (0.000407)	-0.00261*** (0.000923)
<i>ph</i>	0.00871*** (0.00171)	0.00476** (0.00165)	0.00587*** (0.00183)	0.00476*** (0.000807)	0.00587*** (0.000775)	0.00871*** (0.00168)
<i>g</i>	0.331*** (0.0318)	0.680*** (0.0964)	0.563*** (0.0740)	0.680*** (0.0544)	0.563*** (0.0439)	0.331*** (0.0313)
<i>pd</i>	-0.134*** (0.0102)	-0.702*** (0.141)	-0.159*** (0.0412)	-0.702*** (0.111)	-0.159*** (0.0309)	-0.134*** (0.0100)
<i>_cons</i>	-8.315*** (0.467)	-3.298*** (0.560)	-4.560*** (0.685)	-3.298*** (0.577)	-4.560*** (0.405)	-8.315*** (0.460)
<i>N</i>	306	306	306	306	306	306
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.925	0.785		0.785		

Standard errors in parentheses: \* $p < 0.1$ , \*\* $p < 0.05$ , \*\*\* $p < 0.01$ , 下同。

其中, 解释变量通电率(*re*)系数为正、ICT 产品出口(*ie*)系数为负、专利申请量(*pa*)系数为正、高科技出口占比(*he*)系数为正、使用网络人数占比(*mw*)系数为负、固定电话用户占比(*ph*)系数为正、人均 GDP (*g*)系数为正、人口密度(*pd*)的系数为负, 且均在 1%的水平上显著, 即通电率、专利申请量、高科技出口占比、固定电话用户占比、人均 GDP 均对人均 CO<sub>2</sub> 排放量有正向影响, ICT 产品出口、使用网络人数占比、人口密度对人均 CO<sub>2</sub> 排放量有负向影响, 回归系数符号与预期相一致。

### 3.2. 区域异质性分析

本研究考虑到不同国家收入水平不同和所处的经济发展阶段不同, 科技发展水平存在一定差异, 可能导致整体的回归结果不具有说明性。针对这一问题, 依据 APEC 成员国国家收入等级分类情况, 分别对其中 8 个高等收入国家、6 个中等收入国家以及 3 个中低收入国家采用广义最小二乘法(Generalized Least Squares)对模型进行参数估计。初步回归后具体的参数估计结果如表 5, 表 7, 表 9 所示。

**Table 5.** Regression analysis in high-income countries

**表 5.** 高等收入国家回归分析

变量	回归系数	标准误差	z 统计量	p 值
<i>re</i>	0.096178	0.036824	2.61	0.009
<i>ie</i>	0.000269	0.003282	0.08	0.935
<i>pa</i>	0.0561744	0.004896	11.47	0.000
<i>he</i>	0.023906	0.002624	-0.01	0.000
<i>mw</i>	-0.000720	0.000827	-0.87	0.384
<i>ph</i>	0.008969	0.000945	9.50	0.000
<i>g</i>	0.285649	0.030420	9.39	0.000
<i>pd</i>	-0.166258	0.007665	-21.69	0.000
<i>_cons</i>	-10.89606	3.573411	-3.05	0.002

根据表 5, 由广义最小二乘法估计的模型为:

$$ce = 0.096re - 0.0002ie + 0.056pa + 0.01824he - 0.0007mw + 0.009ph + 0.286g - 0.166pd - 10.896 \quad (2)$$

对于 8 个高等收入国家的回归结果显示, Wald 检验统计量为 2963.43, p 值 < 0.001, 说明模型整体有效, 但上述表格中, 除解释变量 *ie*, *mw* 外, 其他变量 *re*, *pa*, *he*, *ph*, *g*, *pd* 系数均在 1% 的水平上显著, 且变量 *ie*, *mw* 的系数均小于 0.001, 推断可能的原因是对于大多数高等收入国家特别是澳大利亚, 智利, 新西兰和加拿大来说, 信息和通信技术产品出口占比(*ie*)很小且随人均碳排放量变化不大如图 1, 而除智利以外其他国家使用网络用户占比(*mw*)均接近 100%, 如图 2, 因此删除上述两个变量后进行回归, 回归结果如表 6 所示。

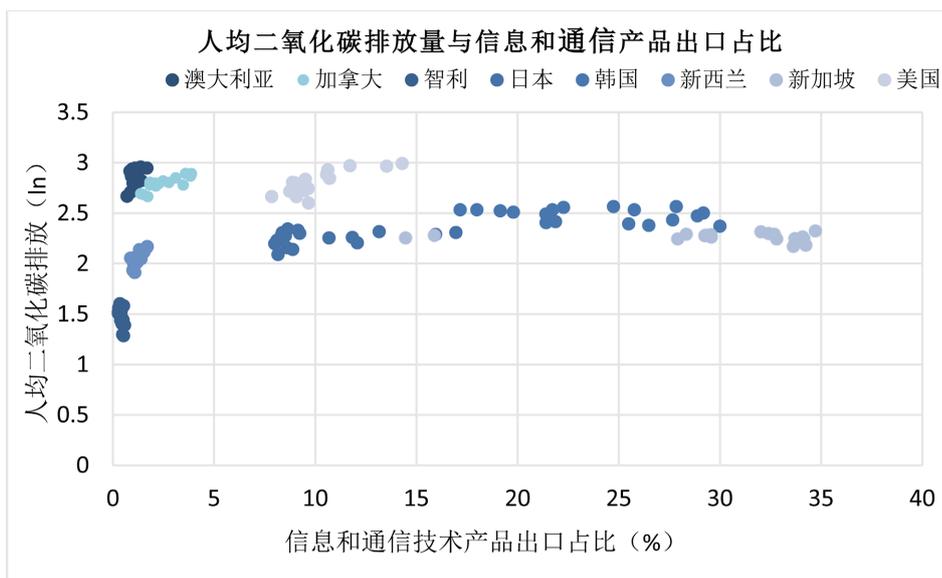


Figure 1. Scatter plot of *ce* versus *ie* in high-income countries  
图 1. 高等收入国家人均 CO<sub>2</sub> 排放量与信息和通信技术产品出口占比散点图

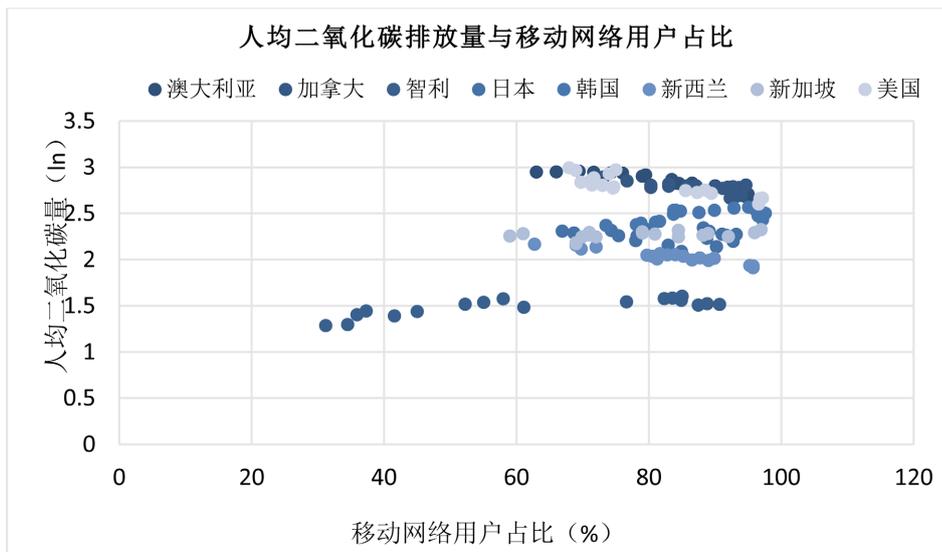


Figure 2. Scatter plot of *ce* versus *mw* in high-income countries  
图 2. 高等收入国家人均 CO<sub>2</sub> 排放量与移动网络用户占比散点图

根据表 6, 由广义最小二乘法估计的模型为:

$$ce = 0.080re + 0.055pa + 0.024he + 0.009ph + 0.28g - 0.166pd - 9.25 \quad (3)$$

对于高等收入国家的回归结果显示, Wald 检验统计量为 2947.17, p 值 < 0.001, 说明模型整体有效, 且上述表格中所有变量系数均在 5%的水平上显著。

**Table 6.** Regression analysis in high-income countries

**表 6.** 高等收入国家回归分析

变量	回归系数	标准误差	z 统计量	p 值
<i>re</i>	0.0796296	0.0314191	2.53	0.011
<i>pa</i>	0.0551276	0.0043061	12.80	0.000
<i>he</i>	0.0240266	0.001444	16.64	0.000
<i>ph</i>	0.0092505	0.000887	10.43	0.000
<i>g</i>	0.2804906	0.0265125	10.58	0.000
<i>pd</i>	-0.1657015	0.0071369	-23.22	0.000
<i>_cons</i>	-9.249577	3.028569	-3.05	0.002

**Table 7.** Regression analysis in upper-middle-income countries

**表 7.** 中高等收入国家回归分析

变量	回归系数	标准误差	z 统计量	p 值
<i>re</i>	0.048349	0.005473	8.83	0.000
<i>ie</i>	-0.02883	0.005929	-4.86	0.000
<i>pa</i>	0.139938	0.007275	19.24	0.000
<i>he</i>	0.044356	0.003787	11.71	0.000
<i>mw</i>	-0.005498	0.001114	-4.93	0.000
<i>ph</i>	-0.001248	0.003781	-0.33	0.741
<i>g</i>	0.244904	0.080358	3.05	0.002
<i>pd</i>	-0.356197	0.042191	-8.44	0.000
<i>_cons</i>	-5.302515	0.677527	-7.83	0.000

根据表 7, 由广义最小二乘法估计的模型为:

$$ce = 0.048re - 0.029ie + 0.14pa + 0.044he - 0.005mw - 0.001ph + 0.245g - 0.356pd - 5.303 \quad (4)$$

对于 6 个中高等收入国家的回归结果显示, Wald 检验统计量为 2101.43, p 值 < 0.001, 说明模型整体有效, 但上述表格中, 除解释变量 *ph* 外, 其他变量 *re*, *ie*, *pa*, *he*, *he*, *g*, *pd* 系数均在 1%的水平上显著, 变量 *ph* 的系数为负且小于 0.002, 推断可能的原因是, 对于高等收入国家而言, 固定电话用户占比与二氧化碳排放成正比, 固定电话用户减少, 而移动网络等用户占比增多都从某种程度上说明了科技的进步和发展, 最终使得碳排放减少, 而对于大多数中高等收入国家的固定电话用户占比(*ph*)呈先减后增的非线性变化趋势, 没有达到一定的拐点, 如图 3, 它的增加或减少还不能说明和衡量科技的发展, 而用移动网络用户占比衡量可能更为科学, 因此删除 *ph* 变量后进行回归, 回归结果如表 8

所示。

根据表 8, 由广义最小二乘法估计的模型为:

$$ce = 0.048re - 0.029ie + 0.139pa + 0.044he - 0.005mw + 0.242g - 0.348pd - 5.287 \quad (5)$$

对于中高等收入国家的回归结果显示, Wald 检验统计量为 2099.20, p 值 < 0.001, 说明模型整体有效, 删除变量 *ph* 后, 其他变量的系数变化很小, 且上述表格中所有变量系数均在 1% 的水平上显著。

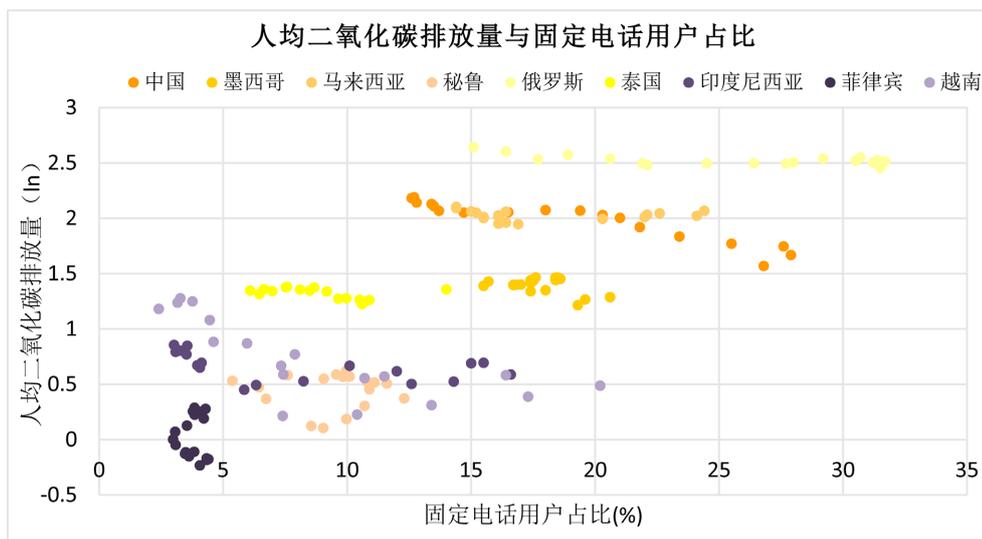


Figure 3. Scatter plot of *ce* versus *ph* in upper-middle-income countries

图 3. 中高等及中低等收入国家人均 CO<sub>2</sub> 排放量与固定电话用户占比散点图

Table 8. Regression analysis in upper-middle-income countries

表 8. 中高等收入国家回归分析

变量	回归系数	标准误差	z 统计量	p 值
<i>re</i>	0.047973	0.005356	8.96	0.000
<i>ie</i>	-0.029087	0.005883	-4.94	0.000
<i>pa</i>	0.138807	0.006421	21.62	0.000
<i>he</i>	0.044169	0.003746	11.79	0.000
<i>mw</i>	-0.005363	0.001037	-5.17	0.000
<i>g</i>	0.242346	0.080024	3.03	0.002
<i>pd</i>	-0.347718	0.03349	-10.38	0.000
_cons	-5.286527	0.676134	-7.82	0.000

Table 9. Regression analysis in lower-middle-income countries

表 9. 中低等收入国家回归分析

变量	回归系数	标准误差	z 统计量	p 值
<i>re</i>	0.029625	0.008555	3.46	0.001
<i>ie</i>	0.011810	0.004474	2.64	0.008
<i>pa</i>	0.181144	0.10666	1.70	0.089

续表

<i>he</i>	-0.001312	0.005126	-0.26	0.798
<i>mw</i>	0.011716	0.002501	4.69	0.000
<i>ph</i>	0.007795	0.006938	1.12	0.261
<i>g</i>	-0.940202	0.321378	-2.93	0.003
<i>pd</i>	-0.802834	0.153456	-5.23	0.000
_cons	7.737867	2.624296	2.95	0.003

根据表 9, 由广义最小二乘法估计的模型为:

$$ce = 0.030re + 0.012ie + 0.181pa + 0.001he + 0.012mw + 0.008ph - 0.94g - 0.803pd + 7.738 \quad (6)$$

对于 3 个中低收入国家的回归结果显示, Wald 检验统计量为 374.67,  $p$  值  $< 0.001$ , 说明模型整体有效, 但上述表格中, 除解释变量 *he*, *ph* 外, 其他变量 *re*, *ie*, *mw*, *g*, *pd* 系数均在 1% 的水平上显著, *pa* 系数在 10% 的水平上显著, 变量 *g* 的系数为负, 说明对于中低收入水平国家而言, 经济发展并不一定使得人均碳排放增加, 可能因为经济发展水平还未达到一定拐点, 而人均碳排放水平很大程度上与经济发展阶段有关。变量 *he* 和 *ph* 的系数小于 0.01 且不显著, 推断可能的原因是: 对于菲律宾、越南、印尼, 由于这些国家在全球化产业链中主要承担的是低附加值环节, 例如组装、测试、包装等, 依赖于低成本优势而非技术优势, 以高科技产品出口占比(*he*)衡量科技进步并不合理, 而印尼和越南的固定电话用户占比(*ph*)呈非线性变化趋势, 如图 4, 用移动网络用户占比衡量可能更为科学, 因此删除上述两个变量后进行回归, 回归结果如表 10 所示。

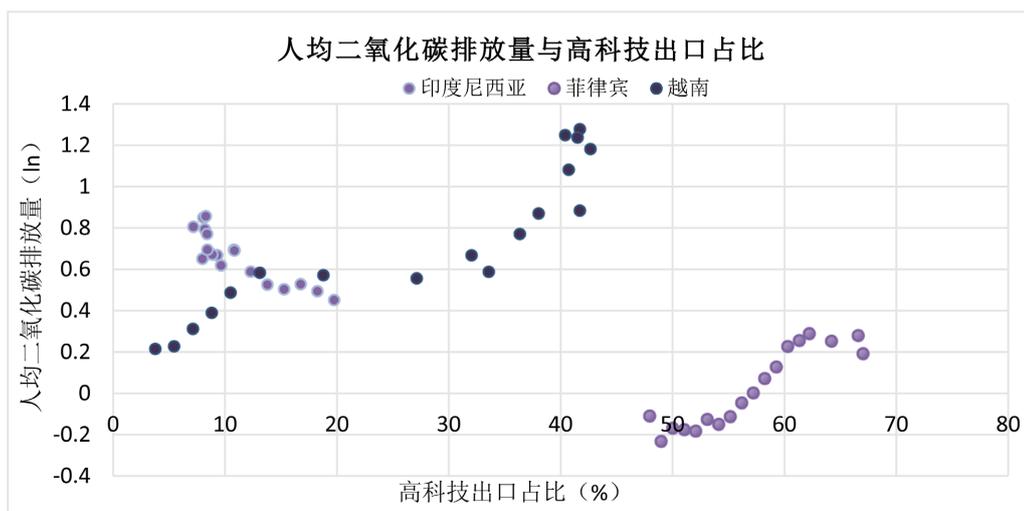


Figure 4. Scatter plot of *ce* versus *he* in lower-income countries

图 4. 中低收入国家人均 CO<sub>2</sub> 排放量与高科技出口占比散点图

Table 10. Regression analysis in lower-middle-income countries

表 10. 中低收入国家回归分析

变量	回归系数	标准误差	z 统计量	p 值
<i>re</i>	0.035352	0.007293	4.85	0.000
<i>ie</i>	0.010796	0.002838	3.80	0.000

续表

<i>pa</i>	0.176076	0.077437	2.27	0.023
<i>mw</i>	0.010990	0.002391	4.60	0.000
<i>g</i>	-1.039276	0.206570	-5.03	0.000
<i>pd</i>	-0.835672	0.139060	-6.01	0.000
<i>_cons</i>	8.251254	2.032013	4.06	0.000

根据表 10, 由广义最小二乘法估计的模型为:

$$ce = 0.035re + 0.011ie + 0.176pa + 0.011mw - 1.039g - 0.836pd + 8.251 \quad (7)$$

对于高等收入国家的回归结果显示, Wald 检验统计量为 362.86,  $p$  值  $< 0.001$ , 说明模型整体有效, 删除变量 *he* 和 *ph* 后, 其他变量的系数变化很小, 且上述表格中所有变量系数均在 5% 的水平上显著。

下面同样对中国 2005~2022 年的相关数据进行逐步回归, 后向消除法保留  $p < 0.1$  的变量, 删除变量  $\ln pa$ ,  $\ln g$ , 回归结果如表 11 所示:

**Table 11.** Regression analysis of China's technology growth and carbon emissions

**表 11.** 中国技术进步与碳排放回归分析

变量	回归系数	标准误差	$z$ 统计量	$p$ 值
<i>re</i>	0.129611	0.013657	9.49	0.000
<i>ie</i>	-0.02726	0.012617	-2.16	0.054
<i>he</i>	0.028126	0.013413	2.10	0.060
<i>mw</i>	0.002443	0.00128	1.91	0.083
<i>ph</i>	0.02801	0.005063	5.53	0.000
<i>pd</i>	5.902931	1.302201	4.53	0.001
<i>_cons</i>	-41.071	6.319332	-6.50	0.000

由普通最小二乘法估计的回归模型为:

$$ce = 0.129re - 0.027ie + 0.028he + 0.002mw + 0.028ph + 5.903pd - 41.071 \quad (8)$$

回归模型显示,  $F$  统计量为 668.40,  $P < 0.001$ ,  $Adj-R^2$  为 0.9973, 表明拟合效果比较理想, 其中, 解释变量 *ie* 的系数小于 0, 其他变量的系数均大于 0, 且均在 1% 的水平上显著, 值得注意的是, 对比前文 APEC 成员国整体以及三种收入类型国家的分类别回归结果, 中国个体的回归结果中, 人口密度 *pd* 的系数为正, 而其他回归结果中 *pd* 系数均为负, 即该结果表明, 中国的人均碳排放与人口密度呈正比, 这一现象可能是因为相对于其他国家而言, 中国的人口密度大且工业化集中在东部沿海高密度城市群, 城市化以及制造业与能源密集型产业主导, 所以人均碳排放相对于去工业化与服务主导, 能源清洁化的其他欧美国家处于较高水平。

#### 4. 结论与建议

对于 APEC 组织 17 个成员国样本数据进行分析, 影响碳排放水平的因素中, 变量通电率(*re*)、专利申请量(*pa*)、高科技出口占比(*he*)、固定电话用户占比(*ph*)、人均 GDP (*g*)均对人均碳排放有正向影响, ICT 产品出口(*ie*)、使用网络人数占比(*mw*)、人口密度(*pd*)均对人均二氧化碳排放量有负向影响, 而人均 GDP 和人口密度的影响最为显著。对于 8 个高等收入国家样本, 人口密度对人均碳排放的影响显著增加, 系

数符号不变, 对于 6 个中高等收入国家样本, 通信技术产品出口、专利申请量、高科技出口、人均 GDP、对人均碳排放的影响显著增加, 系数符号不变, 对于 3 个中低等收入国家, 通信技术产品出口占比、移动网络用户占比对人均二氧化碳排放量有着正向影响, 而人均 GDP 对人均碳排放产生负向影响, 专利申请量、人均 GDP、人口密度对人均二氧化碳排放量的影响显著增加, 对于中国个体的样本进行分析, 移动网络用户占比和人口密度均对人均二氧化碳排放量产生正向影响, 通电率、固定电话用户占比、人口密度对人均二氧化碳排放量的影响显著增加。总体来看, 技术进步对 APEC 成员国碳排放的影响存在异质性。高等收入国家凭借技术优势与完善产业体系, 技术相关变量对碳排放增长的促进作用较小; 中高等收入国家技术进步在推动经济发展同时, 对碳减排有一定积极作用; 中低等收入国家技术进步与碳排放关系复杂, 且受经济发展阶段制约; 中国作为发展中大国, 人口密度与产业结构特征导致碳排放影响因素具有独特性。

最后, 基于以上实证分析结果提出以下建议: APEC 成员国应依据自身发展阶段, 差异化制定技术创新与碳减排政策。高等收入国家可加大清洁能源技术研发投入, 助力全球碳减排; 以美国为例, 作为全球碳排放大国和技术创新强国, 应充分发挥其在清洁能源技术研发与数字化技术应用领域的优势。在能源技术创新方面, 加大对太阳能、风能、氢能等可再生能源技术的资金投入和政策支持, 推动能源结构从化石能源向清洁能源转型。同时, 利用其在信息技术领域的领先地位, 通过物联网、大数据等技术优化工业生产、交通运输等领域的能源管理系统, 提高能源利用效率。此外, 美国应加强技术合作与经验共享, 通过技术输出帮助发展中国家实现低碳发展, 在全球碳减排中承担与其能力相匹配的责任。中高等收入国家应加速产业升级, 推动绿色技术应用; 中国作为全球第二大经济体、最大的发展中国家与制造业大国, 实现碳减排目标对全球气候治理至关重要。在产业结构优化方面, 需加快淘汰高能耗、高污染的落后产能, 推动钢铁、水泥、化工等传统产业向智能化、绿色化升级, 推广电弧炉炼钢、新型干法水泥生产等低碳技术。同时, 大力发展新能源汽车、高端装备制造、数字经济等战略性新兴产业, 降低对高碳产业的依赖。在能源结构调整上, 持续提升可再生能源占比, 加强风电、光伏等清洁能源的开发与消纳能力建设, 完善储能技术配套。在技术创新层面, 加大对低碳技术研发的支持, 设立专项基金鼓励关键技术攻关, 推动产学研深度融合。同时, 优化产业空间布局, 完善碳排放权交易市场, 加强公众环保教育。中低等收入国家需加强技术引进与吸收, 避免高碳发展路径; 以印度尼西亚为例, 应优先加强与发达国家及国际组织的合作, 通过技术转让、国际援助等方式引进先进的清洁能源技术与低碳生产工艺。充分利用其丰富的生物质能、地热能资源, 引进高效的能源转化技术, 减少对煤炭等传统能源的依赖。在产业发展上, 避免盲目承接高污染、高能耗产业转移, 推动制造业向高附加值环节升级。同时, 加强国内基础设施建设与数字化水平提升, 利用数字技术优化能源分配与管理。此外, 政府需完善环保法规与激励政策, 引导企业加大绿色投资, 鼓励公众参与低碳行动, 实现经济发展与环境保护的协调共进。

## 参考文献

- [1] Gao, P., Wang, Y., Zou, Y., Su, X., Che, X. and Yang, X. (2022) Green Technology Innovation and Carbon Emissions Nexus in China: Does Industrial Structure Upgrading Matter? *Frontiers in Psychology*, **13**, Article 951172. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.951172>
- [2] 吴康, 耿一睿, 郭涛. 城市群绿色技术创新对碳排放的影响——基于人力资本的调节效应[J]. 自然资源学报, 2024, 39(9): 2121-2139.
- [3] 孙振清, 刘保留, 李欢欢. 产业结构调整、技术创新与区域碳减排——基于地区面板数据的实证研究[J]. 经济体制改革, 2020(3): 101-108.
- [4] Ben Lahouel, B., Taleb, L., Ben Zaied, Y. and Managi, S. (2021) Does ICT Change the Relationship between Total Factor Productivity and CO<sub>2</sub> Emissions? Evidence Based on a Nonlinear Model. *Energy Economics*, **101**, Article 105406. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105406>

- [5] Bilal, A., Li, X., Zhu, N., Sharma, R. and Jahanger, A. (2021) Green Technology Innovation, Globalization, and CO<sub>2</sub> Emissions: Recent Insights from the OBOR Economies. *Sustainability*, **14**, Article 236. <https://doi.org/10.3390/su14010236>
- [6] You, Z., Li, L. and Waqas, M. (2024) How Do Information and Communication Technology, Human Capital and Renewable Energy Affect CO<sub>2</sub> Emission: New Insights from BRI Countries. *Heliyon*, **10**, e26481.
- [7] 邵帅, 范美婷, 杨莉莉. 经济结构调整、绿色技术进步与中国低碳转型发展——基于总体技术前沿和空间溢出效应视角的经验考察[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 46-69+4-10.
- [8] 李晓钟, 张小红. 互联网、技术进步与中国碳排放强度——基于扩展 STIRPAT 模型的实证分析[J]. 杭州电子科技大学学报(社会科学版), 2021, 17(6): 1-8+16.
- [9] 胡熠, 靳曙畅. 数字技术助力“双碳”目标实现: 理论机制与实践路径[J]. 财会月刊, 2022(6): 111-118.
- [10] Ganda, F. (2019) The Impact of Innovation and Technology Investments on Carbon Emissions in Selected Organisation for Economic Co-Operation and Development Countries. *Journal of Cleaner Production*, **217**, 469-483. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.235>
- [11] Li, M.Q. and Wang, Q. (2017) Will Technology Advances Alleviate Climate Change? Dual Effects of Technology Change on Aggregate Carbon Dioxide Emissions. *Energy for Sustainable Development*, **41**, 61-68, <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.08.004>
- [12] Du, J.G., Ali, K., Alnori, F., et al. (2022) The Nexus of Financial Development, Technological Innovation, Institutional Quality, and Environmental Quality: Evidence from OECD Economies. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 58179-58200. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19763-1>
- [13] 杨亦民, 王梓龙, 邓旭辉. 环境规制、技术创新与碳排放回弹效应——基于中国工业数据的实证检验[J]. 贵州社会科学, 2024(3): 135-144.
- [14] 周雪琼. 新质生产力、颠覆性技术创新与碳排放绩效[J]. 技术经济与管理研究, 2024(11): 1-6.
- [15] 李新安, 李慧. 外资引入、技术进步偏向影响了制造业的碳排放吗?——来自我国 27 个制造行业面板数据模型的实证检验[J]. 中国软科学, 2022(1): 159-170.
- [16] 胡灵珊, 熊萍萍. 绿色技术创新如何助推制造业企业低碳转型——基于京津冀地区环境规制的中介效应检验[J]. 生态经济, 2024, 40(12): 63-70.
- [17] 孙丽文, 李翼凡, 任相伟. 产业结构升级、技术创新与碳排放——一个有调节的中介模型[J]. 技术经济, 2020, 39(6): 1-9.
- [18] 杜欣. 数字经济促进碳减排的机制与效应——基于绿色技术进步视角的经验考察[J]. 科技进步与对策, 2023, 40(19): 22-32.
- [19] 刘鹏飞, 韩晓琳. 数字技术发展对区域碳排放的影响效应及其作用机制——以长江经济带为例[J]. 生态经济, 2024, 40(4): 26-35.
- [20] 张珺倩, 郑永扣. 数字化转型能减少企业碳排放吗?——来自中国上市公司的证据[J/OL]. 工程管理科技前沿, 1-13. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1013.N.20241128.0948.006.html>, 2024-12-25.
- [21] 陈晓, 张鑫奥, 王育宝. 数字技术创新赋能城市低碳转型路径机制研究[J]. 科技进步与对策, 2024, 41(23): 41-51.
- [22] 易子榆, 魏龙, 王磊. 数字产业技术发展对碳排放强度的影响效应研究[J]. 国际经贸探索, 2022, 38(4): 22-37.