

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.05.013

CSTR:32310.14.stbxb.2026.05.013

郭婧, 魏珍, 李婧梅, 等. “双碳”背景下青海省行业碳排放驱动因素与经济增长脱钩关系[J]. 水土保持学报, 2026, 40(5): 402-415.

Guo Jing, Wei Zhen, Li Jingmei, et al. Drivers of industrial carbon emissions and their decoupling relationships with economic growth in Qinghai Province in context of dual carbon goals[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5): 402-415.

“双碳”背景下青海省行业碳排放驱动因素与 经济增长脱钩关系

郭婧¹, 魏珍², 李婧梅¹, 周华坤³, 李宏林⁴

(1. 青海省社会科学院生态文明研究所, 西宁 810000; 2. 青海省社会科学院经济研究所, 西宁 810000;

3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海省寒区恢复生态学重点实验室, 西宁 810008;

4. 青海大学省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 西宁 810016)

摘要: [目的] 在“双碳”目标背景下, 明确区域主要行业碳排放驱动机制及与经济增长的脱钩状态, 对制定差异化减排策略具有重要意义。[方法] 基于2010—2022年青海省细分行业能源消费数据, 构建Tapio脱钩模型与LMDI指数分解模型, 量化分析22个细分行业碳排放的驱动因素及其与经济增长的脱钩演变特征。[结果] 1) 2010—2022年, 青海省细分行业碳排放量由32.01 Mt增至55.33 Mt, 增加23.32 Mt。其中, 电力、蒸汽、热水的生产和供应业是碳排放增量的最大贡献者, 贡献率达39.90%。2) 2010—2015年, 青海省碳排放与经济增长交替呈现增长负脱钩和弱脱钩2种不稳定状态; 2016年后逐步向强脱钩过渡, 并于2022年实现强脱钩。3) 经济水平效应是碳排放增长的核心驱动力, 尤其是高耗能行业; 能源强度效应是主要抑制力; 能源结构效应在电力等行业表现出显著的减排贡献。4) 高耗能行业成为青海各行业的脱钩主力, 2021—2022年, 有色金属冶炼及压延加工业实现人口规模、能源效率与能源结构的同步强脱钩。[结论] 青海省碳减排的重点在于继续强化高耗能行业的能源结构调整、注重产业结构优化与能源效率提升的协同效应, 并加强对新兴行业碳排放的监测和管理。

关键词: 行业碳排放; Tapio模型; LMDI指数分解模型; 驱动因素

中图分类号: X196; F205

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0402-14

Drivers of Industrial Carbon Emissions and Their Decoupling Relationships with Economic Growth in Qinghai Province in Context of Dual Carbon Goals

Guo Jing¹, Wei Zhen², Li Jingmei¹, Zhou Huakun³, Li Honglin⁴

(1. Research Institute for Eco-Civilization, Qinghai Academy of Social Sciences, Xining 810000, China; 2. Institute of Economics,

Qinghai Academy of Social Sciences, Xining 810000, China; 3. Key Laboratory of Restoration Ecology of Cold Area in

Qinghai Province, Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China;

4. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] In the context of dual carbon goals, clarifying the driving mechanisms of carbon emissions in key regional industries and their decoupling status from economic growth is of great significance for formulating differentiated emission reduction strategies. [Methods] Based on energy consumption data of sub-sectors in Qinghai Province from 2010 to 2022, the Tapio decoupling model and the logarithmic mean Divisia index (LMDI) decomposition model were applied to quantitatively analyze the drivers of industrial carbon emissions and the evolutionary characteristics of their decoupling from economic growth across 22 sub-sectors. [Results] 1) From 2010 to 2022, carbon emissions from sub-sectors in Qinghai Province increased from 32.01 Mt to 55.33 Mt, an increase of 23.32 Mt. Among these, the electricity, steam, and hot water production and supply sector contributed the most to the

收稿日期: 2026-02-27

修回日期: 2026-03-25

录用日期: 2026-04-17

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-07-17

资助项目: 青海省科技厅基础研究面上项目(2025-ZJ-990M); 中央财政林业科技推广示范项目(青[2024]TG12)

第一作者: 郭婧(1989—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事生态经济、环境生态研究。E-mail: 352097314@qq.com

通信作者: 李宏林(1986—), 男, 博士生导师, 副教授, 主要从事群落生态和恢复生态研究。E-mail: honglinli@qhu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

increase, accounting for 39.90%. 2) From 2010 to 2015, carbon emissions and economic growth in Qinghai Province alternated between two unstable states: expansive negative decoupling and weak decoupling. After 2016, the relationship gradually transitioned to strong decoupling, which was achieved in 2022. 3) The economic level effect was the core driver of carbon emission growth, especially in high-energy-consuming industries; the energy intensity effect was the main restraining factor; and the energy structure effect made a significant contribution to emission reduction in industries such as electricity. 4) High energy-consuming industries became the main force of decoupling across sectors in Qinghai. During 2021—2022, the smelting and rolling of non-ferrous metals achieved simultaneous strong decoupling in population scale, energy efficiency, and energy structure. [Conclusion] The focus of carbon emission reduction in Qinghai Province lies in further strengthening energy structure adjustment in high-energy-consuming industries, emphasizing the synergistic effects of industrial structure optimization and energy efficiency improvement, as well as strengthening the monitoring and management of carbon emissions in emerging industries.

Keywords: industry carbon emissions; Tapio model; LMDI index decomposition model; driving factors

Received: 2026-02-27

Revised: 2026-03-25

Accepted: 2026-04-17

Online(www.cnki.net): 2026-07-17

目前,减少碳排放已演变为全球治理的核心共识与学术界的前沿议题。在此背景下,中国各省份立足区域资源禀赋与发展阶段,因地制宜地制定碳减排目标及政策体系。青海作为国家生态安全屏障与“双碳”目标关键承载区,凭借清洁能源产业优势及巨大的生态固碳潜力,相继出台一系列节能减排政策以应对挑战(表1)。然而,宏观政策的落地亟须微观行业层面的精准支撑,行业减排已逐渐成为实现区域碳目标的关键抓手。针对青海省分行业碳排放进行探索和影响因素分析,对提升生态系统碳汇转化能力和有序推进重点领域节能降碳具有重要的现实意义。

排放的动态演变是能源消费结构、能源强度、产业结构演进、城镇化推进速度、经济发展规模和人口总量等多重因素非线性耦合交互的结果^[1-3]。在“双碳”目标下,厘清经济增长与碳排放的脱钩关系及其驱动机制,已成为评估区域低碳转型成效的核心议题。现有研究^[4-6]主要基于环境库兹涅茨曲线(EKC)假说与脱钩理论展开,前者揭示环境污染与经济发展之间的“倒U”形非线性关联,后者则聚焦EKC假设与解耦理论关系^[7]。其中,Tapio脱钩模型因能细化识别强脱钩和弱脱钩等8种状态,较传统OECD模型具有更高的判别精度,被广泛应用于低碳发展评估^[8-10];而基于Kaya恒等式的对数平均迪氏指数(LMDI)分解法,凭借无残差、可加性和扩展性强等优势,成为量化碳排放驱动因子的主流方法^[11-12]。

在实证研究中,学界已构建以Tapio脱钩模型识别状态、LMDI方法分解因子和Kaya恒等式搭建框

架为基础的方法论体系^[13-15]。早期研究^[16-17]多聚焦于钢铁、交通和工业等宏观部门或单一省份的静态特征分析,证实能源结构、经济规模和人口总量是驱动碳排放变化的关键因素。随着“双碳”研究的深化,碳排放分析已从“静态截面”向“动态全链条”转型。针对传统模型难以刻画要素时变特征的缺陷,朱嘉晴等^[18]率先将时变参数C-D生产函数嵌入LMDI框架,精准捕捉技术进步与要素投入对农业碳排放的非线性演化特征。在评价维度上,行业解析也转向全链条与智能化,如He等^[19]系统解构旅游全产业链碳排放特征;而任晓松等^[20]则引入机器学习算法优化高耗能行业模拟,显著提升细分场景下碳减排路径预测的前瞻性与精度。

尽管上述研究在行业解析上取得最新进展,但针对生态脆弱区省域尺度细分行业的碳减排研究仍匮乏。现有实证分析多集中于东部发达省份^[21]、农业主产区^[22]或长江经济带^[23]等,相对忽视青藏高原国家生态安全屏障区的省域特性;而且分析尺度多局限于三大产业或单一行业,缺乏对细分行业特征的系统测度。基于此,本文选取青海省为对象,创新性地拓展现有研究在生态脆弱区视角的局限,运用Tapio脱钩模型实证分析其经济增长与碳排放的脱钩关系及其演变规律;并借助LMDI模型对22个细分行业碳排放的核心驱动因素进行机制解析,精准识别高风险与高潜力行业。研究成果不仅有助于因地制宜地提出碳减排措施,也可同类生态功能区制定绿色、低碳与可持续发展战略提供参考。

表 1 青海省节能减排主要政策
Table 1 Main policies for energy conservation and emission reduction in Qinghai Province

颁布时间(年-月)	政策文件名称	相关内容
2020-07	《青海省实施〈中华人民共和国节约能源法〉办法》	明确节能目标责任制,将考核结果纳入政府及负责人评价体系;强化重点用能单位管理,推动建筑、交通等领域节能
2021-12	《青海省严格能效约束推动重点领域节能降碳技术改造实施方案(2021—2025年)》	聚焦能源消耗占比高、改造条件相对成熟且示范带动作用显著的重点领域,率先开展节能降碳技术改造
2022-05	《青海省生态环境保护条例》	纳入节能减排政策体系,强化生态保护与污染治理协同,完善地方环保标准(如水生态修复、VOCs治理等)
2022-09	《青海省“十四五”节能减排实施方案》	推进节能减排工作,切实提高能源利用效率,持续改善生态环境质量,全面完成“十四五”节能减排约束性目标任务,促进经济社会发展全面绿色转型
2022-12	《青海省碳达峰实施方案》	提出“1+6+8”碳达峰体系,实施能源绿色低碳转型、循环经济助力降碳等十大行动
2025-05	《青海省清洁能源产业发展促进条例》	规范清洁能源产业范围,推动光伏、风电、储能等产业发展,促进清洁能源与数字经济、旅游业融合

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海省(31°39′~39°19′N,89°35′~103°04′E)位于“世界屋脊”青藏高原的东北部,是长江、黄河和澜沧江的发源地,生态地位极为重要,同时也是中国清洁能源基地和资源型经济省份,碳排放特征与生态保护需求存在显著关联。经济发展方面,2022年地区生产总值达3 610.1亿元,同比增长2.3%,产业结构呈“二产主导、一产稳健、三产承压”格局^[24]。能源结构上,青海省清洁能源禀赋突出,水电、光伏和风电装机量居全国前列,但工业领域仍依赖化石能源消费,形成“清洁能源富集与局部高碳排放并存”的特征。独特的地理环境与产业结构,使得青海省碳排放既涉及能源消耗、工业生产等传统领域,又与生态保护、清洁能源开发等战略目标深度交织,成为研究生态脆弱区碳排放与经济发展脱钩、低碳转型路径的典型区域。

1.2 研究方法

1.2.1 碳排放核算 为确保碳排放核算结果的准确性,避免重复计算,本研究剔除生产过程中直接生成的CO₂。依据《2006年IPCC国家温室气体清单指南》^[25]中的标准核算方法,计算公式为:

$$C = \sum_{i,j} C_{ij} = \sum_{i,j} E_{ij} N_j Y_j O_j \frac{44}{12} \tag{1}$$

式中:C为碳排放总量,t; C_{ij} 为第*i*产业部门第*j*种能源的碳排放总量,t; E_{ij} 为该部门对第*j*种能源的消耗总量,t[对于天然气,需将其体积消耗量m³乘以标准状态下密度0.717 kg/m³换算为质量(t)后代入计算]; N_j 为第*j*种能源的实际平均热值,GJ/t; Y_j 为第*j*种能源的单位热值含碳量,t/GJ; O_j 为该能源的碳氧化率,取值范围0~1;44和12分别为二氧化碳的相对分子质量

和碳的相对原子质量。各类燃料的碳排放系数(以CO₂计)分别为:原煤1.900 3 t/t,焦炭2.860 4 t/t,原油3.020 2 t/t,汽油2.925 1 t/t,煤油3.017 9 t/t,柴油3.095 9 t/t,燃油3.170 5 t/t,天然气2.162 2 t/t。

1.2.2 LMDI 模型建立 基于Kaya恒等式构建行业碳排放变化的等式为:

$$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} \frac{C_{ij}}{E_{ij}} \times \frac{E_{ij}}{E_i} \times \frac{E_i}{G_i} \times \frac{G_i}{G} \times \frac{G}{P} \times P \tag{2}$$
$$= \sum_{ij} F_{ij} \times Q_{ij} \times T_{ij} \times S_{ij} \times A_{ij} \times P_{ij}$$

式中:C为碳排放量;*i*为能源消费行业;*j*为化石燃料种类; E 为能源消费量; G 为行业生产总值; P 为地区人口总数; F_{ij} (碳排放系数)、 Q_{ij} (能源结构)、 T_{ij} (能源强度)、 S_{ij} (产业结构)、 A_{ij} (经济水平)及 P_{ij} (人口规模)分别对应模型中的核心解释变量。

基于Ang^[26]的LMDI分解方法与前述Kaya恒等式,将青海省能源消费碳排放的综合影响效应分解为6大核心效应,即碳排放系数效应、能源结构效应、能源强度效应、产业结构效应、经济水平效应和人口规模效应,计算公式为:

$$\Delta C_{tot} = C_t - C_o = \Delta C_F + \Delta C_Q + \Delta C_T + \Delta C_S + \Delta C_A + \Delta C_P \tag{3}$$

式中: ΔC_{tot} 为碳排放现值与基期值的差额; C_t 为第*t*年碳排放总量,t。在各种驱动效应中, ΔC_F (碳排放系数效应)表征碳排放系数变动对总量的影响程度; ΔC_Q (能源结构效应)刻画能源消费结构调整的碳排放作用强度; ΔC_T (能源强度效应)反映能源强度变化引发的碳排放变动; ΔC_S (产业结构效应)衡量产业结构调整对碳排放的影响水平; ΔC_A (经济水平效应)表征经济发展水平变迁对总量的作用程度; ΔC_P (人口规模效应)量化人口规模变化对碳排放的影响力度。

基于LMDI加法分解模型,对各驱动因素的效应值进行进一步分解,得到表达式为:

$$\Delta C_Q = \sum_{i,j} \frac{(C_{ij,t} - C_{ij,0})}{(\ln C_{ij,t} - \ln C_{ij,0})} \times \ln \frac{Q_{ij,t}}{Q_{ij,0}} \quad (4)$$

$$\Delta C_T = \sum_{i,j} \frac{(C_{ij,t} - C_{ij,0})}{(\ln C_{ij,t} - \ln C_{ij,0})} \times \ln \frac{T_{ij,t}}{T_{ij,0}} \quad (5)$$

$$\Delta C_S = \sum_{i,j} \frac{(C_{ij,t} - C_{ij,0})}{(\ln C_{ij,t} - \ln C_{ij,0})} \times \ln \frac{S_{ij,t}}{S_{ij,0}} \quad (6)$$

$$\Delta C_A = \sum_{i,j} \frac{(C_{ij,t} - C_{ij,0})}{(\ln C_{ij,t} - \ln C_{ij,0})} \times \ln \frac{A_{ij,t}}{A_{ij,0}} \quad (7)$$

$$\Delta C_P = \sum_{i,j} \frac{(C_{ij,t} - C_{ij,0})}{(\ln C_{ij,t} - \ln C_{ij,0})} \times \ln \frac{P_{ij,t}}{P_{ij,0}} \quad (8)$$

$$\delta = \frac{\Delta C_x}{\sum_x |\Delta C_x|} \times 100\% \quad (9)$$

式中: ΔC_Q 、 ΔC_T 、 ΔC_S 、 ΔC_A 和 ΔC_P 分别为能源结构效应、能源强度效应、产业结构效应、经济水平效应和人口规模效应; $C_{ij,t}$ 和 $C_{ij,0}$ 并非原始值,而是基于Kaya恒等式重构的理论值; δ 为驱动因素的相对贡献度; x 为各驱动因素的值。

1.2.3 Tapio脱钩模型 参考Tapio脱钩模型构建碳排放与经济增长的脱钩关系分析模型,计算公式为:

$$\epsilon = \frac{\Delta C/C_0}{\Delta G/G_0} \quad (10)$$

式中: ϵ 为脱钩指数; ΔC 为碳排放变化量,t; ΔG 为地区生产总值变化量,亿元; C_0 为基期碳排放量,t; G_0 为基期地区生产总值,亿元。

结合碳排放与GDP的增长情况及脱钩指数(ϵ)的不同取值,脱钩状态可细分为8类^[27],具体分类结果见表2。

1.2.4 经济水平效应的剥离与量化 碳排放总量的变化是能源结构、能源强度、产业结构、经济规模(增长)和人口规模等多重因素共同作用的结果。剥离经济水平效应在数学上假定其他因素(如能源强度、

$$D = -\frac{\Delta E}{\Delta G} \times \frac{G_0}{C_0} = -\left(\frac{\Delta E_s}{\Delta G} \times \frac{G_0}{C_0} + \frac{\Delta E_i}{\Delta G} \times \frac{G_0}{C_0} + \frac{\Delta S_i}{\Delta G} \times \frac{G_0}{C_0} + \frac{\Delta P_p}{\Delta G} \times \frac{G_0}{C_0} \right) = D_{Es} + D_{Ei} + D_{Si} + D_{Pp} \quad (13)$$

式中: D 为剥离经济水平效应后的总脱钩努力指标; D_{Es} 、 D_{Ei} 、 D_{Si} 、 D_{Pp} 分别为能源结构、能源强度、产业结构、人口规模4大效应的脱钩努力贡献。脱钩努力程度的分类依据为:1)强脱钩努力($D \geq 1$),驱动因素显著促进经济增长与碳排放脱钩,脱钩效应突出;2)无脱钩努力($D \leq 0$),驱动因素未起到脱钩促进作用,反而成为碳排放增长的推动因素;3)弱脱钩努力($0 < D < 1$),驱动因素对脱钩存在一定促进效用,但弱于经济水平效应对碳排放的正向驱动作用。

能源结构等)保持基期水平不变,仅由行业产出规模的变化所引致的碳排放增量,即为被剥离出的经济水平效应。

表2 Tapio脱钩模型脱钩状态判断

Table 2 Determination of decoupling status in Tapio decoupling model

脱钩状态		ΔC	ΔG	ϵ
脱钩	强脱钩	—	+	$(-\infty, 0)$
	弱脱钩	+	+	$[0, 0.8)$
	衰退脱钩	—	—	$(1.2, +\infty)$
连接	增长连结	+	+	$[0.8, 1.2]$
	衰退连结	—	—	$[0.8, 1.2]$
负脱钩	强负脱钩	+	—	$(-\infty, 0)$
	弱负脱钩	—	—	$[0, 0.8)$
	增长负脱钩	+	+	$(1.2, +\infty)$

基于Kaya恒等式,行业增加值已调整为2010年不变价,以剔除价格波动对真实经济增长的干扰。根据LMDI分解公式,经济水平效应的具体剥离算式为:

$$\Delta C_{GDP} = \sum_i L(C_i^t, C_i^0) \times \ln \left(\frac{G_i^t}{G_i^0} \right) \quad (11)$$

式中: $L(C_i^t, C_i^0) = \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0}$ 为对数平均权重函数,用于消除分解残差; G_i^t 和 G_i^0 分别为报告期和基期的第*i*行业实际增加值。

1.2.5 脱钩努力模型 碳排放相关研究^[28]指出,剔除经济水平效应对碳排放的驱动干扰,是精准评估脱钩努力实际成效的关键。为此,本研究结合Tapio脱钩指数模型与LMDI指数分解模型的分析优势,将碳排放变化量分解为能源结构、能源强度、产业结构和人口规模四大效应维度,同时剥离经济水平效应的影响,最终得到叠加结果(ΔE):

$$\Delta E = \Delta C - \Delta C_{GDP} = \Delta E_s + \Delta E_i + \Delta S_i + \Delta P_p \quad (12)$$

在经济水平效应呈现正向驱动特征的情形下,

计算公式为:

1.3 数据来源与处理

本文所用的青海省2010—2022年分行业碳排放数据直接引自中国碳排放数据库(China emissions accounts and datasets, CEADs)^[29];能源消费量、年末常住人口、GDP及分行业GDP等数据,均引自《青海省统计年鉴(2011—2023)》^[30]。其中,工业部门中的纺织业、石油加工及炼焦业、化学原料及化学制品制造业等的分行业增加值采用“(行业产值/工业总产值)×工业总产值”的方式进行核算^[31]。为保证数据

的可比性,已将历年 GDP 数据调整为 2010 年不变价,以消除价格因素的影响。

2 结果与分析

2.1 青海省行业碳排放特征

根据对青海省 22 个主要细分行业的分析,2022 年青海省行业碳排放总量达 55.33 Mt,三次产业的碳排放占比呈现显著分化特征:第一产业占比为 0.86%,第二产业占比为 84.76%,第三产业占比为 14.39%(图 1)。从细分行业来看,全省碳排放重点行业占比前 5 位的行业依次为电力、蒸汽、热水的生产和供应业(48.22%)、化学原料及化学制品制造业

(11.79%)、交通运输、仓储及邮电通信业(11.70%)、石油和天然气开采业(10.65%)和非金属矿物制品业(6.72%)。在能源结构层面,煤炭仍是青海省的主导能源类型,其消费对应的碳排放量占全省行业碳排放总量的 61.05%,是碳排放的核心来源。具体而言,煤炭碳排放高度集中于四大行业:电力、蒸汽、热水的生产和供应业(69.07%)、化学原料及化学制品制造业(15.81%)、非金属矿物制品(9.24%)和黑色金属冶炼(3.01%)。石油消费相关碳排放以交通运输、仓储及邮电通信业、建筑业和化学原料及化学制品制造业为主要贡献行业;天然气消费产生的碳排放最主要分布在石油和天然气开采业,占比为 57.62%。

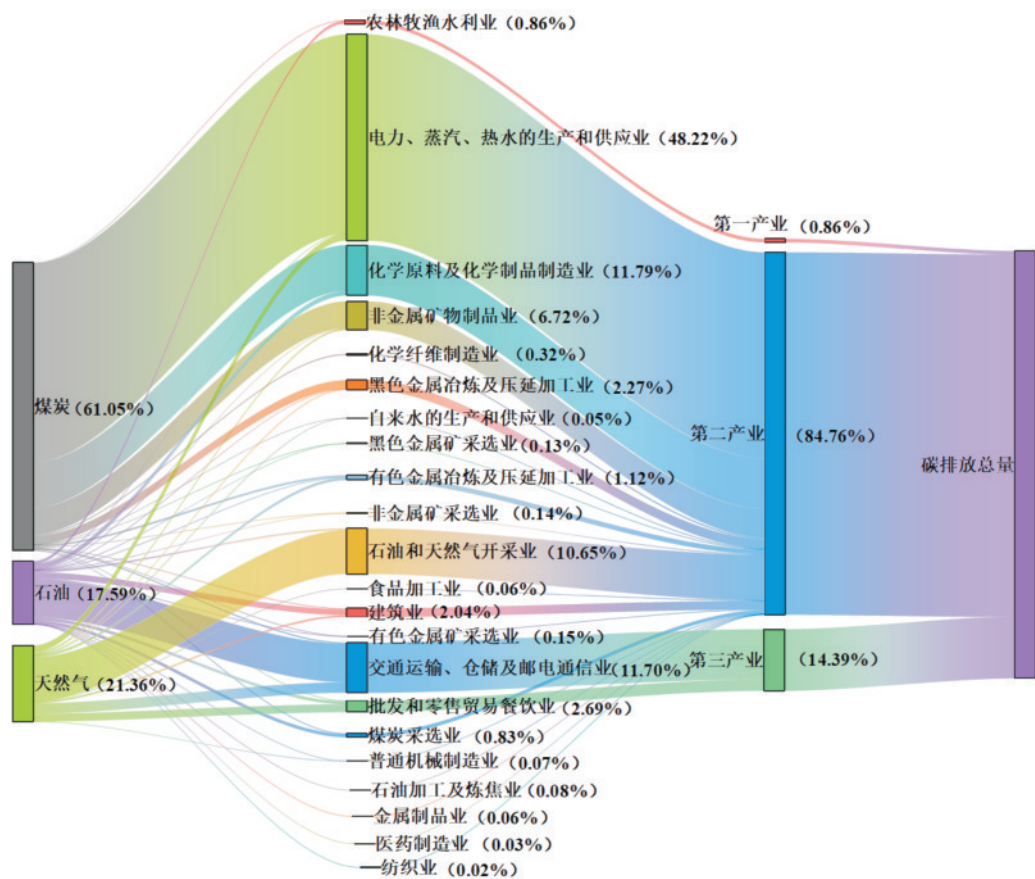


图 1 2022 年青海省一次能源至主要行业的碳排放流动路径
Fig.1 Flow of carbon emissions from primary energy to major sectors in Qinghai Province in 2022

由图 2 可知,2010—2022 年青海省碳排放平均值为 48.89 Mt,其动态变化呈不规则“M”形波动趋势。2010—2016 年为前期上升阶段,从 32.01 Mt 增长至 56.67 Mt,年平均复合增长率约为 10.0%;2017—2020 年,从 53.49 Mt 降至 47.93 Mt,下降 5.56 Mt,年平均下降率为 3.60%;随后,在 2021 年达到峰值(56.38 Mt)后再次下降至 55.33 Mt。2010—2022 年青海省排放碳强度呈折线持续下降趋势,先从 2010 年的 2.37 t/万元上升至 2012 年的 2.94 t/万元,再降至 2022 年的 1.50 t/万元,年平均下降 2.82%。

2010—2022 年,青海省细分行业碳排放量从 32.01 Mt 增长至 55.33 Mt,增加 23.32 Mt。其中,电力、蒸汽、热水的生产和供应业的碳排放量增长贡献最大,增幅达 8.57 Mt,占细分行业碳排放总增量的 39.90%。有色金属矿采选业、纺织业、石油加工及炼焦业、医药制造业、普通机械制造业和食品加工业 6 个行业的碳排放量均呈现不同程度的减少,降幅为 0.40~0.01 Mt,而其他行业呈正增长态势。由表 3 可知,碳排放高度集聚于电力、石油加工及非金属/黑色金属冶炼等高耗能行业,且整体呈波动上升态

势。此特征源于资源禀赋与产业结构的共同作用，青海虽矿产与清洁能源富集，但受新能源消纳和外送瓶颈制约，仍不得不依赖燃煤火电支撑。同时，作为西部欠发达地区，经济增长需求驱动高耗能项目扩张，叠加高原低温气候增加能源消费刚性，进一步推高碳排放。

2.2 青海省能源消费状况

能源消费强度作为衡量能耗效率的指标，在一定程度上反映某个行业的技术进步情况。本文以能源消费量占总能源消费量的 10% 为界，低于 10% 的行业列为图 3a，高于 10% 的行业列为图 3b。从整体演变特征来看，2010—2022 年青海省细分行业能源消费强度呈现差异化变化态势，其中电力、蒸汽、热水的生产和供应业略有波动上升，黑色金属冶炼及压延加工业表现为曲线上升趋势，其余行业均呈现波动下降特征。说明黑色金属冶炼及压延加工业作为典型高耗能重工业，对传统能源的依赖度较高，低碳技术改造尚未形成规模化减排效

应。但其余行业通过技术创新、管理优化、结构调整等措施，逐步提升能源利用效率。此变化趋势侧面表明，产业发展模式正逐步向低能耗精细化发展模式转型。

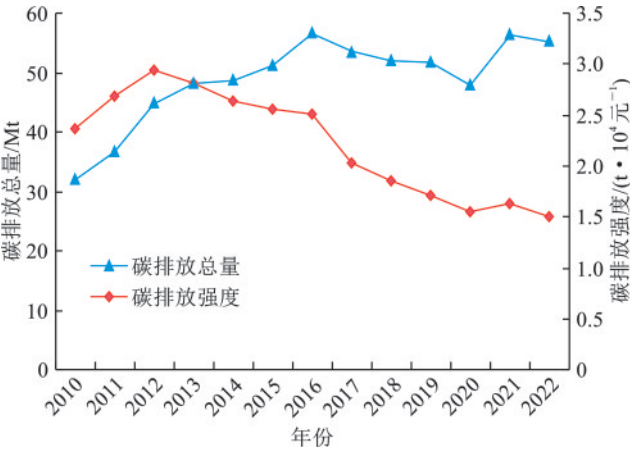


图 2 2010—2022 年青海省碳排放总量和碳排放强度动态变化
Fig.2 Dynamic changes in total carbon emissions and carbon emission intensity in Qinghai Province from 2010 to 2022

表 3 青海省细分行业碳排放量
Table 3 Carbon emissions by sub-sector in Qinghai Province

细分行业	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年	2021 年	2022 年
FFAHFWC	0.32	0.34	0.34	0.34	0.34	0.32	0.37	0.32	0.31	0.31	0.33	0.33	0.32
CMMD	0.23	1.73	0.27	0.28	0.22	0.27	0.26	0.19	0.15	0.17	0.15	0.21	0.32
PNGE	2.23	3.02	4.35	4.36	4.37	4.72	5.30	5.72	5.52	5.37	4.08	4.53	4.22
FMMD	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.05
NMMD	0.45	0.09	0.60	0.52	0.40	0.12	0.10	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.06
NMLMD	0.06	0.06	0.22	0.23	0.17	0.17	0.18	0.04	0.04	0.03	0.02	0.06	0.08
TI	0.02	0	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.01
PPC	0.29	0.28	0.31	0.29	0.13	0.60	0.05	0.06	0.12	0.13	0.20	0.19	0.23
RCMCP	1.16	0.68	4.00	3.31	4.09	5.10	6.25	4.52	4.47	4.81	4.16	4.60	4.59
MPP	0.02	0	0.10	0.08	0.13	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0	0.12	0.01
NMP	4.29	3.63	7.08	8.69	5.85	8.45	8.99	7.05	6.84	7.03	6.36	3.96	5.39
SPFM	4.81	4.45	5.76	6.78	6.99	6.60	6.28	6.16	6.66	7.06	6.98	7.76	7.32
SPNM	0.44	1.35	0.57	0.64	0.55	0.62	0.65	0.64	0.65	0.67	0.69	0.57	0.68
MP	0.02	0	0.03	0.03	0.02	0.07	0.08	0.01	0	0	0.01	0.03	0.02
OM	0.05	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02
PSESHW	9.97	9.97	12.66	13.59	13.16	14.19	16.65	17.42	14.96	13.69	12.45	18.12	18.55
CONSTR	0.32	0.37	0.38	0.39	0.42	0.52	0.58	0.65	0.68	0.68	0.73	0.78	0.77
TSPTS	2.24	2.40	2.44	2.57	2.75	3.01	3.47	3.92	4.37	4.52	4.33	4.77	4.94
WRTC	0.68	0.76	0.75	0.78	0.78	0.58	0.84	1.34	1.50	1.65	1.59	1.97	1.37
FP	0.05	0.02	0.11	0.12	0.11	0.30	0.35	0.05	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03
PSTW	0	0	0.01	0.01	0.01	0.05	0.07	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02
CF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12

注：FFAHFWC 为农林牧渔水利业；CMMD 为煤炭采选业；PNGE 为石油和天然气开采业；FMMD 为黑色金属矿采选业；NMMD 为有色金属矿采选业；NMLMD 为非金属矿采选业；TI 为纺织业；PPC 为石油加工及炼焦业；RCMCP 为化学原料及化学制品制造业；MPP 为医药制造业；NMP 为非金属矿物制品业；SPFM 为黑色金属冶炼及压延加工业；SPNM 为有色金属冶炼及压延加工业；MP 为金属制品业；OM 为普通机械制造业；PSESHW 为电力、蒸汽、热水的生产和供应业；CONSTR 为建筑业；TSPTS 为交通运输、仓储及邮电通信业；WRTC 为批发和零售贸易餐饮业；FP 为食品加工业；PSTW 为自来水的生产和供应业；CF 为化学纤维制造业。下同。

从细分行业分析,高耗能行业中以黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属冶炼及压延加工业 2 类为典型代表。能源消费强度呈现差异化变化特征,除黑色金属冶炼及压延加工业外,其余行业均表现出显著的下降态势,分别从 2010 年的 23.71%、12.18%

和 11.31% 降至 2022 年的 12.11%、8.08% 和 3.80%,但与其他行业相比,仍处于较高水平;黑色金属矿采选业、纺织业、石油加工及炼焦业、医药制造业、金属制品业、普通机械制造业等行业的能源消费量占比多年来一直处于较低水平(低于 1.00%)。

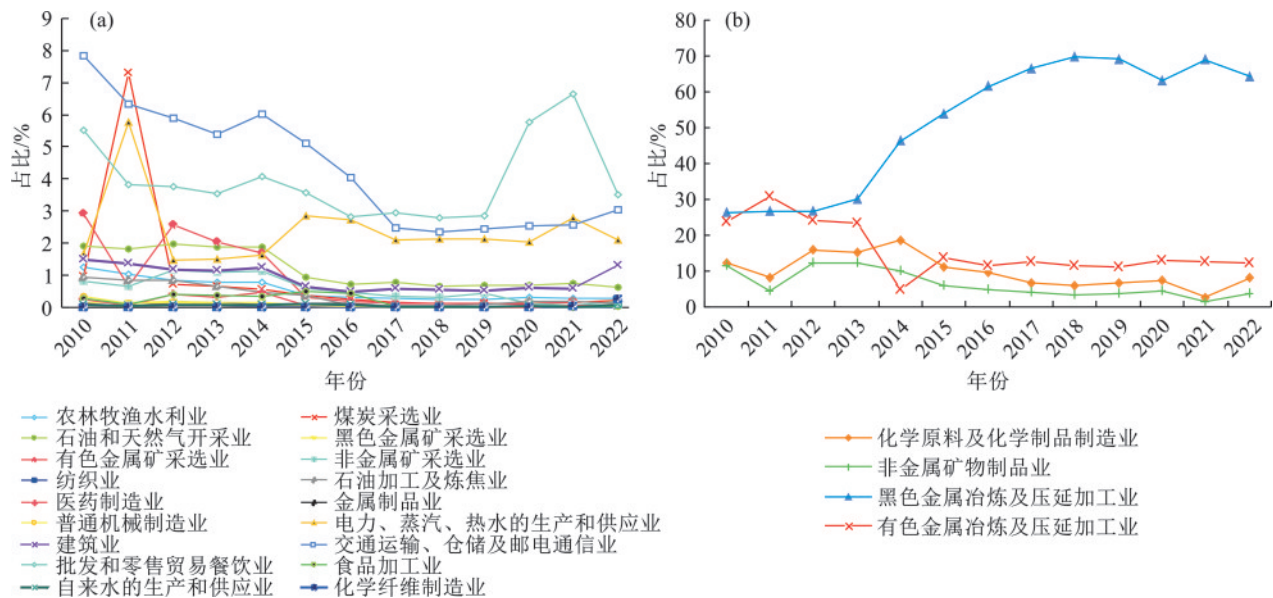


图 3 2010—2022 年青海省细分行业能源消费强度
Fig.3 Energy consumption intensity by sub-sector in Qinghai Province from 2010 to 2022

2.3 青海省碳排放与经济增长的脱钩效应

由表 4 可知,青海省碳排放与经济增长的脱钩关系呈 4 种类型,分别为增长负脱钩、弱脱钩、增长连结和强脱钩。

表 4 2010—2022 年青海省碳排放与经济增长的脱钩状态
Table 4 Decoupling status between carbon emissions and economic growth in Qinghai Province from 2010 to 2022

年份	$\Delta C/\text{Mt}$	$\Delta G/\text{亿元}$	ϵ	脱钩状态
2010—2011	0.151	0.015	10.232	增长负脱钩
2011—2012	0.219	0.115	1.894	增长负脱钩
2012—2013	0.072	0.121	0.597	弱脱钩
2013—2014	0.013	0.078	0.160	弱脱钩
2014—2015	0.053	0.088	0.604	弱脱钩
2015—2016	0.103	0.123	0.842	增长连结
2016—2017	-0.056	0.170	-0.330	强脱钩
2017—2018	-0.029	0.059	-0.487	强脱钩
2018—2019	-0.004	0.079	-0.045	强脱钩
2019—2020	-0.074	0.020	-3.697	强脱钩
2020—2021	0.176	0.119	1.486	增长负脱钩
2021—2022	-0.019	0.067	-0.277	强脱钩

从时间维度来看,除 2010—2011 年脱钩指数处于相对较高水平外,其余年份脱钩指数均呈现平稳波动的变化特征。将脱钩关系的演化过程划分为 3 个阶段:1)2010—2015 年(“十一五”末期和“十二五”期间),此阶段青海省碳排放与经济增长交替呈现增长负脱钩和弱脱钩 2 种状态,可见二者的脱钩关系尚未稳定,且先后 2 次出现增长负脱钩的不利情况,反映出该阶段区域低碳发展仍面临一定挑战。2)2016—2020 年(“十三五”时期),此阶段的脱钩状态实现重要转变,从增长连结逐步向强脱钩过渡,且强脱钩成为该阶段的主要脱钩类型。与上一阶段相比,脱钩状态得到实质性改善,彰显该时期低碳转型政策的有效性。3)2021—2022 年(“十四五”前期),此阶段处于增长负脱钩向强脱钩的快速转变。可能原因是减碳政策落地后,2021 年青海省强化对高耗能行业(如化工、建材)的减排约束,同时扩大清洁能源(水电、光伏)的替代比例,直接推动碳排放下降。2022 年经济增长更多依赖于特色农牧业、生态旅游业和数字经济等低耗能产业,实现经济增长与碳排放强脱钩。

2.4 青海省行业碳排放影响因素分解分析

从重点行业的差异特征(图 4)来看,石油加工及炼焦业、化学原料及化学制品制造业、有色金属冶炼及压延加工业等高耗能工业为核心排放源,在经济水平、产业结构效应中呈强正贡献(深红色);而在能

源强度效应中呈强负贡献(深蓝色),说明这类行业属于“经济拉动排放、能效抑制排放”的典型行业。而电力、蒸汽、热水的生产和供应业在能源结构效应的负贡献较突出,反映青海清洁能源发电对电力行

业碳排放的抑制作用。低耗能的服务业行业中,农林牧渔水利业、批发和零售贸易餐饮业、食品加工业的各效应的贡献均较弱(以白色为主),对整体碳排放的影响较小。

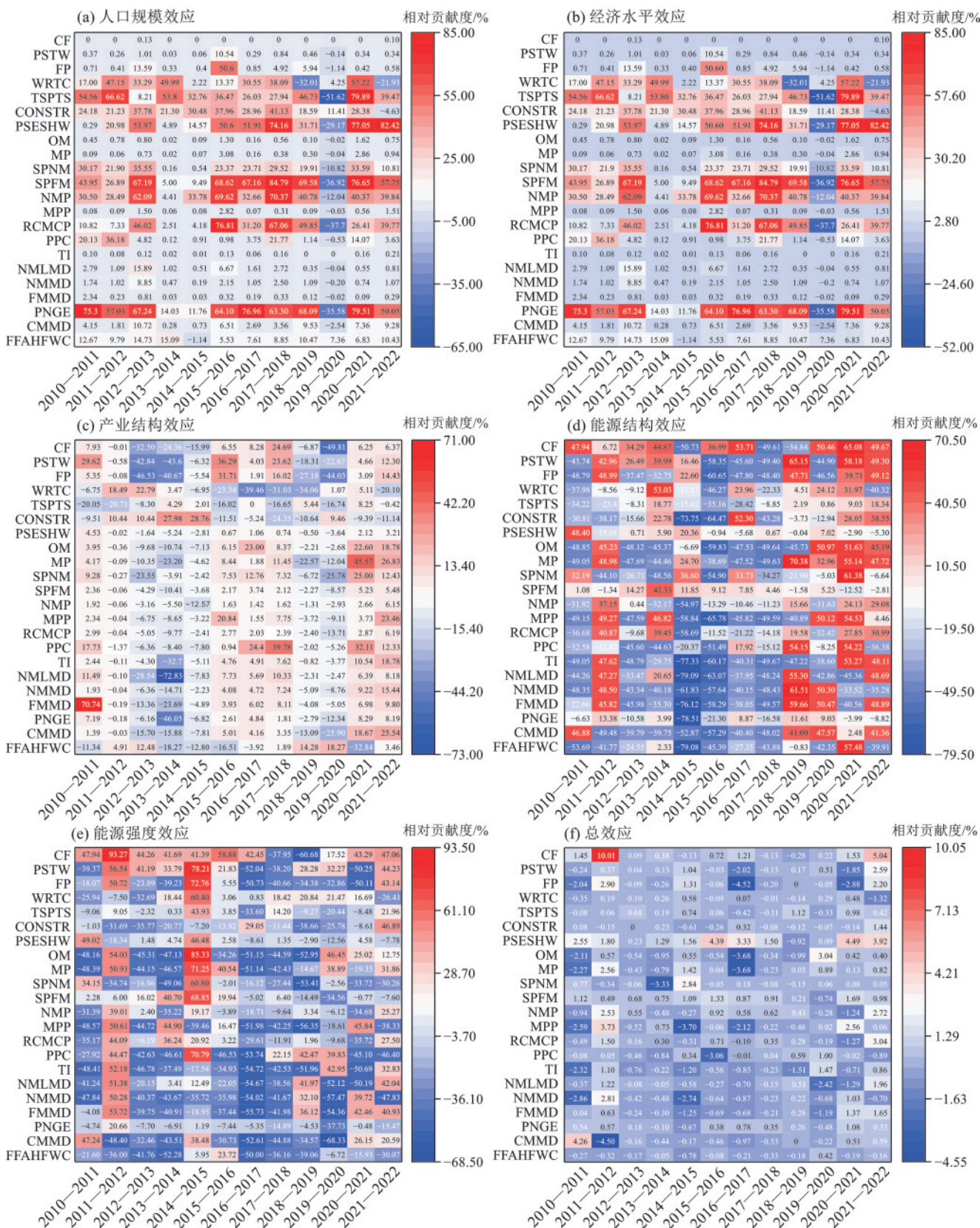


图4 2010—2022年青海省细分行业碳排放量变化的驱动因素相对贡献度

Fig.4 Relative contributions of drivers to carbon emission changes by sub-sector in Qinghai Province from 2010 to 2022

2.5 青海省碳排放影响因素脱钩努力分析

结合“十一五”末期至“十二五”“十三五”“十四五”初期 3 个阶段(表 5),青海碳排放脱钩呈“弱贡献—局部显现—显著增强”的递进特征。2010—2015 年,脱钩基础初步形成但整体偏弱,能源结构因素普遍为负,对脱钩贡献有限。仅农林牧渔水利业和有色金属矿采选业的能源结构,以及食品加工业、化学纤维制造业的能源强度呈现强脱钩态势,反映早期能耗效率与清洁化的局部进展;而建筑业受人口规模拉动呈现强负脱钩,是此阶段的核心压力点。2016—2020 年,脱钩进程受阻,多数行业产业结构保持稳定,但能源结构与强度的强脱钩占比回落,交通运输业因人口增长转为强负脱钩,仅石油天然气开采业的能源结构维持强脱钩状态。2021—2022 年脱钩努力显著增强,能源结构与强度重新成为核心驱动力,化学原料及交通运输业能源结构重回强脱钩,有色金属冶炼等行业能效优化明显,且产业结构因素在各行业普遍转向弱脱钩,标志着政策调控效果实现广泛覆盖。

高耗能行业仍为脱钩的主力,其中非金属矿物制品业在 2021—2022 年表现显著,其人口规模因素的脱钩努力指数高达 29.015($D \geq 1$ 为强脱钩),该数值远超临界值,表明该时期人口规模因素对碳排放的抑制作用极强,与能源结构、能源强度效应同步呈现强脱钩努力状态。自来水的生产和供应业、化学纤维制造业及化学原料及化学制品制造业等的能源结构、能源强度均实现强脱钩。传统能源行业转型提速,如煤炭采选业从早期负向影响转为全因素弱脱钩;石油和天然气开采业的产业结构持续改善,脱钩努力逐步增强。说明能源结构与能源强度是脱钩的核心支撑,后期实现多行业正向转化;产业结构因素均衡发力,政策效果覆盖广泛;人口规模影响虽小,但在非金属矿物制品业等行业仍形成强负脱钩压力。

综上可知,青海碳排放脱钩已进入“能效结构驱动+产业结构协同”阶段,但高耗能行业的人口规模协同性、部分领域的负脱钩问题仍需强化治理。

表 5 青海省细分行业碳排放影响因素脱钩努力情况
Table 5 Decoupling effort of factors influencing carbon emissions in sub-sectors of Qinghai Province

细分行业	2010—2015 年				2016—2020 年				2021—2022 年			
	人口规模	产业结构	能源结构	能源强度	人口规模	产业结构	能源结构	能源强度	人口规模	产业结构	能源结构	能源强度
FFAHFWC	-0.034	-0.111	-1.192	-0.405	0.142*	0.134*	0.001*	-0.490	-0.016	0.008*	-0.091	-0.068
CMMD	-0.015	-0.106	-0.975	-0.193	-0.002	-0.005	-0.705	-1.057	0.024*	0.162*	0.262*	0.130*
PNGE	-0.199	-0.106	-0.720	0.062*	0.076*	-0.005	-0.073	-0.425	0.088*	0.162*	-0.174	-0.305
FMMD	-0.001	-0.106	-0.901	-0.119	0	-0.005	-0.720	-1.073	0.003*	0.162*	0.806*	0.675*
NMMD	-0.015	-0.106	-2.240	-1.457	0.021*	-0.005	-0.613	-0.966	0.001*	0.162*	-0.369	-0.501
NMLMD	-0.006	-0.106	-0.290	0.492*	0.005*	-0.005	-1.208	-1.560	0.001*	0.162*	0.962*	0.831*
TI	-0.001	-0.106	-2.039	-1.257	0	-0.005	-0.386	-0.739	0	0.162*	0.414*	0.282*
PPC	-0.025	-0.106	-0.890	-0.108	0.003*	-0.005	0.975*	0.622*	0.002*	0.162*	-0.477	-0.608
RCMCP	-0.159	-0.106	-0.110	0.672*	0.033*	-0.005	-0.266	-0.618	0.004*	0.162*	1.167**	1.035**
MPP	-0.001	-0.106	-1.519	-0.737	0	-0.005	-1.213	-1.566	-0.003	0.162*	0.014*	-0.118
NMP	-0.367	-0.106	-0.646	0.136*	0.102*	-0.005	-0.089	-0.441	29.015**	0.162*	1.003**	0.872*
SPFM	-0.338	-0.106	0.714*	1.496**	-0.070	-0.005	0.026*	-0.326	0.525*	0.162*	-0.077	-0.209
SPNM	-0.031	-0.106	-0.555	0.227*	0.002*	-0.005	0.102*	-0.250	-0.069	0.162*	-0.037	-0.168
MP	-0.002	-0.106	-0.092	0.691*	0.001*	-0.005	-1.316	-1.669	0	0.162*	0.395	0.264
OM	-0.003	-0.106	-1.581	-0.798	0.001*	-0.005	-0.811	-1.164	-0.001	0.162*	0.183	0.052
PSESHW	5.069**	-0.106	0.531*	1.313**	-0.093	-0.005	-0.297	-0.649	0.022	0.162	-0.281	-0.413
CONSTR	0.279*	0.170*	-0.831	-0.325	-0.095	-0.026	0.213*	-0.118	0.001*	-0.139	0.781*	0.949*
TSPTS	0.797*	-0.173	-0.432	0.418*	0.400*	-0.080	-0.463	-0.740	-0.019	-0.003	0.169*	0.202*
WRTC	0.437*	0.078*	-0.436	0.162*	-3.943	-0.262	0.713*	0.617*	-0.082	-0.190	-0.638	-0.418
FP	-0.008	-0.106	0.555*	1.337**	0.004*	-0.005	-2.217	-2.569	0	0.162*	1.081**	0.949*
PSTW	-0.001	-0.106	0.329*	1.111**	0.001*	-0.005	-0.559	-0.911	0	0.162*	1.277**	1.146**
CF	0	-0.106	1.259**	10.644**	0	-0.005	0.696*	0.344*	0.002*	0.162*	2.505**	2.373**

注: *、** 分别表示弱脱钩努力和强脱钩努力。

3 讨论

已有针对青海省碳排放的影响因素开展分解研究,相关探索虽视角各异,但研究焦点多集中于宏观层面,对细分领域的针对性分析相对有限。任君等^[33]在青海省土地利用碳排放时空差异特征及其影响因素的研究中指出,土地利用碳足迹压力指数持续增大,经济发展、能源结构、建设用地规模及人口密度是碳排放的主要促进因素;高亚培等^[34]分析青海“三生空间”演变及碳排放的多情景模拟表明,青海省净碳排放量差异明显,2000—2020年“三生空间”净碳排放量处于增长状态;其余学者^[35-36]分别对青海农业和交通体系碳排放等方面进行了阐述。

尽管本文在宏观驱动机制上与冯雨^[37]和李鑫雨^[38]的研究结论相吻合,但研究突破以往仅关注宏观总量的局限,通过分行业测算揭示行业的异质性,并引入脱钩努力指数将分析从单纯的状态判别深化为对驱动因素贡献率的量化,从而更深刻地解析青海碳减排的内在机理。能源强度效应既展现出突出的降碳成效,又为碳排放与经济增长的脱钩进程提供重要支撑。该研究与吴茜等^[39]、赖文亭等^[21]、宋旭等^[40]关于省外地区碳排放影响因素及脱钩努力的研究结论具有一致性,表明能源强度对脱钩关系的积极作用在不同区域层面具有共性特征。说明经济增长的增量效应具有普遍性,青海多数行业中经济增长是碳排放的核心推动因素;能源强度的减量效应是跨区域减排关键,青海能源强度对碳排放的抑制作用及脱钩贡献,凸显能效提升在西部省份碳减排中的共性价值。同时,青海的行业特征也体现区域差异性,其中2021—2022年产业结构因素在多数行业呈现均衡的弱脱钩,反映青海产业结构优化的政策效果更具普惠性。青海传统能源行业(如煤炭采选业等)的脱钩转型进度快于甘肃同类行业,与青海清洁能源资源禀赋的开发利用密切相关。因此,通过降低能源消费强度、提升能源利用效率,不仅是加速青海省碳减排进程的关键举措,更是有效提高该省碳排放与经济增长脱钩水平的核心切入点,可为区域低碳转型提供重要支撑。

理论层面,本研究弥补青海碳排放研究“重宏观、轻行业”的不足,明确细分行业中“经济增长-人口规模(增量)-能源强度-能源结构(减量)”的驱动逻辑,完善西部省份行业碳排放的研究谱系。实践层面,研究为青海“双碳”路径提供行业靶向。首先,需持续推动高耗能行业(如有色金属冶炼)的节能技术升级,强化能源强度对脱钩的支撑作用;其次,精准施策产业结构优化,针对黑色金属冶炼及压延加工业、有色金属矿采选业等仍存负脱钩风险的行业,需

结合其人口规模拉动特征,配套差异化的产能调控与低碳转型政策;最后,依托青海风光资源优势,进一步放大能源结构对脱钩的驱动效应,同时避免能源开采行业(如油气开采)的脱钩反复。立足我国“双碳”战略实施的大背景,青海省碳减排的重点应在继续强化高耗能行业的能源结构调整、注重产业结构优化与能源效率提升的协同效应,并加强对新兴行业碳排放的监测和管理。

由于青海省各市州部分社会经济数据及分产业分部门的能源数据难以获取,本文无法更深入地探究市州直接的影响因素、并分析其细分行业的碳排放的脱钩关系等。因此,未来可通过开展更广泛的调查,或运用大数据机器学习及深度挖掘等技术,获取更丰富、更详尽的数据,以完善本研究。后续研究可结合青海“十五五”能源规划,针对高耗能行业开展碳达峰情景模拟,同时纳入森林碳汇、城镇化率等因素,完善青海碳排放的多维度评估体系,为其“双碳”目标的行业落地提供更精准的量化支撑。

4 结论

1)2022年青海省的行业碳排放总量为55.33 Mt,第一产业、第二产业、第三产业的占比分别为0.86%、84.76%、14.39%。煤炭是青海省行业碳排放的主要来源,碳排放占比为61.05%。2010—2022年,青海省细分行业碳排放量从32.01 Mt增长至55.33 Mt,增加23.32 Mt。其中,电力、蒸汽、热水的生产和供应业的碳排放量增长贡献最大,增幅达8.57 Mt,占细分行业碳排放总增量的39.90%。

2)LMDI分解结果显示,人口规模效应整体贡献微弱;经济水平效应与高耗能行业扩张高度耦合,对碳排放产生显著正向拉动;而能源强度效应表现出极强的负向抑制作用,尤其是高耗能行业能效提升效果显著。时间演变上,2016—2022年已进入能效提升与结构优化双轮驱动减排阶段,技术进步对碳增长的遏制作用日益凸显。

3)青海省碳排放与经济增长的脱钩关系呈现4种类型,分别为增长负脱钩、弱脱钩、增长连结和强脱钩。2010—2015年,呈现增长负脱钩和弱脱钩2种不稳定状态;2016—2020年,青海省碳排放与经济增长的脱钩状态表现为从增长连结逐步向强脱钩过渡;2022年再次达到强脱钩状态,标志着青海省初步实现经济增长与碳排放的相对解耦。

4)2010—2022年,青海碳排放脱钩努力呈“弱贡献-局部显现-显著增强”的递进特征,2021—2022年已进入“能效结构驱动+产业结构协同”阶段,能源结构、能源强度与产业结构的优化成为脱钩核心支撑。

5 政策建议

1) 优化产业结构, 推动工业低碳转型。建议严格控制高载能行业盲目扩张, 依法依规退出落后产能, 引导企业实施节能降碳改造。同时, 应加快绿色低碳现代产业体系建设, 提升绿色产业GDP占比, 推动第一产业绿色有机食品、生态畜牧业及第3产业国际生态旅游等绿色行业的规模化发展, 为区域碳排放减排目标的实现奠定产业基础。并通过专项科研基金支持清洁能源技术研发, 赋能产业低碳转型。

2) 深化能源结构调整, 提升清洁能源利用效率。应加大清洁能源替代力度, 扩大替代规模, 通过新增光伏发电、风力发电装机容量、优化水电利用效率等举措, 促进“风、光、水、火、储”多能源的集约整合与高效利用, 强化能源供给的低碳化与稳定性。特别需要解决高载能行业绿电转化难题, 通过“源-网-荷-储-碳”五维协同技术体系, 推动负荷调节策略与碳减排需求衔接, 将绿电优势转化为碳效提升。

3) 强化科技创新引领, 培育新质生产力。提出强化传统工业生产设备智能化改造的实施建议, 以智能化转型优化工业能源利用效率, 助力工业领域低碳转型。突破电碳协同关键技术, 研发高载能负荷与多能源协同的电碳调节技术, 构建智慧能源管理平台, 实现“以电控碳、以碳优电”的良性循环。同时, 提升劳动者素质与技能, 针对重点碳排放行业开展清洁能源技术应用培训, 着力培育复合型专业人才, 以人才赋能产业融合进程, 为碳排放协同管理提供有力的人力支撑, 强化低碳发展与产业升级的人才保障。

4) 完善市场机制, 深化碳市场建设。青海应深度融入全国碳市场建设, 构建覆盖重点排放单位的数据核算、市场监管、履约清缴等全链条监管体系。通过建立绿电溯源交易平台, 推动电力市场、绿证市场、碳市场有效衔接, 完善绿色电力价格形成机制, 强化高耗能企业使用绿电的刚性约束。到2027年, 实现参与碳排放权交易市场企业覆盖工业领域主要排放行业, 碳排放配额清缴履约率保持100%。

5) 优化行业人力资源配置, 由“规模扩张”向“质量增效”转型。对非金属矿物制品、黑色金属冶炼等高碳锁定效应强的行业, 严格控制单纯扩大生产规模的用工需求, 转而加大对高技能绿色技术人才的引进与培养。鼓励高耗能企业利用数字化、智能化技术替代传统人工操作, 降低单位产出的用工密度。结合青海生态定位, 建立行业间劳动力流动引导机制, 将富余劳动力从高碳制造环节引导至生态旅游、清洁能源运维等低碳服务领域, 实现就业结构与能源结构的协同优化。

6) 提升生态系统碳汇能力, 推动区域协同减排。青海应持续提升生态系统碳汇能力, 通过国土绿化行动、草原生态修复等措施, 实现森林覆盖率和草原综合植被盖度“双提升”。同时, 探索区域协同减排机制, 深化与周边省份、援青省市的战略合作, 在大型风光基地建设、电力外送通道建设、新能源消纳等方面形成优势互补, 共同构建绿色低碳发展新格局。

参考文献:

- [1] 赵欣, 龙如银. 江苏省碳排放现状及因素分解实证分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(7): 25-30.
Zhao Xin, Long Ruyin. The status and decomposition model of carbon emissions for Jiangsu Province[J]. China Population Resources and Environment, 2010, 20(7): 25-30.
- [2] 黄蕊, 王铮, 丁冠群, 等. 基于STIRPAT模型的江苏省能源消费碳排放影响因素分析及趋势预测[J]. 地理研究, 2016, 35(4): 781-789.
Huang Rui, Wang Zheng, Ding Guanqun, et al. Trend prediction and analysis of influencing factors of carbon emissions from energy consumption in Jiangsu Province based on STIRPAT model[J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 781-789.
- [3] 王敏, 冯相昭, 安祺, 等. 基于脱钩指数和LMDI的青海省绿色低碳发展策略研究[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(5): 598-607.
Wang Min, Feng Xiangzhao, An Qi, et al. Study on green and low-carbon development in Qinghai Province based on decoupling index and LMDI[J]. Climate Change Research, 2021, 17(5): 598-607.
- [4] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. The Quarterly Journal of Economics, 1995, 110(2): 353-377.
- [5] Acaravci A, Ozturk I. On the relationship between energy consumption, CO₂ emissions and economic growth in Europe[J]. Energy, 2010, 35(12): 5412-5420.
- [6] Song Yan, Zhang Ming, Zhou Min. Study on the decoupling relationship between CO₂ emissions and economic development based on two-dimensional decoupling theory: A case between China and the United States[J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 230-236.
- [7] 陆根尧, 盛龙. 基于环境库兹涅茨曲线假说的经济增长与环境污染关系研究: 以浙江省为例[J]. 工业技术经济, 2012, 31(4): 28-35.
Lu Genyao, Sheng Long. Study on the relation between economic growth and environmental pollution based on the hypothesis of environmental kuznets curve: Take Zhejiang Province as an example[J]. Industrial Technology and Economy, 2012, 31(4): 28-35.

- [8] Liu Liangliang, Ding Donghong, He Jun. Fiscal decentralization, economic growth, and haze pollution decoupling effects: A simple model and evidence from China [J]. *Computational Economics*, 2019, 54(4): 1423-1441.
- [9] Shi Yao bo, Zhao Xin xin, Jang C L, et al. Decoupling effect between economic development and environmental pollution: A spatial-temporal investigation using 31 provinces in China [J]. *Energy and Environment*, 2019, 30(5): 755-775.
- [10] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressures from economic growth [EB/OL]. (2002) [2026-09-24]. [[http://www.olis.oecd.org/olis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd\(2002\)1-final](http://www.olis.oecd.org/olis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd(2002)1-final)] ([http://www.olis.oecd.org/olis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd\(2002\)1-final](http://www.olis.oecd.org/olis/2002doc.nsf/LinkTo/sg-sd(2002)1-final)).
- [11] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995—2004 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(6): 158-161.
- Xu Guoquan, Liu Zeyuan, Jiang Zhaohua. Decomposition model and empirical study of carbon emissions for China, 1995—2004 [J]. *China Population Resources and Environment*, 2006, 16(6): 158-161.
- [12] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide [J]. *Energy Policy*, 2005, 33(7): 867-871.
- [13] Mousavi S E, Sadeghi S H H, Akbariyeh H. Decomposition of CO₂ emissions from energy consumption in Iran using LMDI method [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 79: 1564-1573.
- [14] Fang C, Yu J. Driving forces and decoupling effects of PM_{2.5} emissions in China's industrial sector: An integrated analysis of LMDI and geographical detector [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 288: e117658.
- [15] 桂河, 李静, 尚梦媛. “双碳”背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究 [J]. *中南林业科技大学学报(社会科学版)*, 2021, 15(6): 37-44.
- Gui He, Li Jing, Shang Mengyuan. Study on temporal characteristics, driving mechanism and decoupling effect of agricultural carbon emission in Ningxia under the background of “double carbon” [J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology (Social Sciences)*, 2021, 15(6): 37-44.
- [16] Wang Y, Chen W, Zhang X, et al. Decoupling CO₂ emissions from economic growth in China's iron and steel industry: A sectoral and regional analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: e123708.
- [17] Song Y, Zhang M, Liu Z, et al. Decoupling trend and driving factors of CO₂ emissions from China's transportation sector: 1991—2015 [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(30): 30969-30982.
- [18] 朱嘉晴, 秦会艳, 张梦春. 基于时变参数C-D生产函数的江西省农业碳排放驱动因素及脱钩效应 [J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3085-3094.
- Zhu Jiaqing, Qin Huiyan, Zhang Mengchun. Driving factors and decoupling effects of agricultural carbon emissions in Jiangxi Province based on time-varying parameter C-D production function [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 3085-3094.
- [19] He Yan, Wang Liguang, Zhu Hai, et al. Tourism carbon emission forecasting, the decoupling effect and its driving factors in the Yangtze River economic belt under the “double carbon” target [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(6): 1329-1343.
- [20] 任晓松, 邢邦彦. 基于机器学习的山西省资源型城市碳排放影响因素分析与达峰预测 [J]. *环境科学*, 2026, 47(4): 2091-2099.
- Ren Xiaosong, Xing Bangyan. Machine learning-based factor analysis and carbon peaking scenario simulation for resource-based cities from Shanxi Province [J]. *Environmental Science*, 2026, 47(4): 2091-2099.
- [21] 赖文亭, 王远, 黄琳琳, 等. 福建省行业碳排放驱动因素分解及其与经济增长脱钩关系 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(10): 3529-3538.
- Lai Wenting, Wang Yuan, Huang Linlin, et al. Decomposition of driving factors of industry-related CO₂ emissions and its decoupling with economic growth in Fujian Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(10): 3529-3538.
- [22] 方苗, 贺义雄, 余晓洋. 农业碳排放研究: 空间格局、脱钩效应及驱动因素: 以浙江省为例 [J]. *资源开发与市场*, 2022, 38(12): 1461-1467.
- Fang Miao, He Yixiong, Yu Xiaoyang. Agricultural carbon emissions: Spatial pattern, decoupling effect and driving factors: Taking Zhejiang Province as an example [J]. *Resource Development and Market*, 2022, 38(12): 1461-1467.
- [23] 黄磊, 刘姿妍. 长江经济带三大城市群碳排放的时空特征与峰值预测研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2026, 35(2): 275-287.
- Huang Lei, Liu Ziyang. Spatio-temporal characteristics and prediction of carbon emission peak in the three major urban agglomerations of the Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2026, 35(2): 275-287.
- [24] 青海省统计局, 国家统计局青海调查总队. 青海统计年鉴 2022 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- Qinghai Provincial Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Qinghai Survey Team. Qinghai statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [25] 政府间气候变化专门委员会. 2006年IPCC国家温室气体清单指南 [M]. 日本: 日本全球环境战略研究所,

- 2006;89-102.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [M]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006;89-102.
- [26] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method? [J]. Energy Policy, 2004, 32(9): 1131-1139.
- [27] Tapio P. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001 [J]. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.
- [28] Wang Qiang, Wang Shasha. Decoupling economic growth from carbon emissions growth in the United States: The role of research and development [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 234: 702-713.
- [29] Carbon Emission Accounts and Datasets (CEADs). 中国碳核算数据库 (Carbon Emission Accounts and Datasets, CEADs) [DS/OL]. (2016) [2026-09-24]. https://www.ceads.net.cn [https://www.ceads.net.cn].
- CEADs Team. Carbon Emission Accounts and Datasets (CEADs) [DS/OL]. (2016) [2026-09-24]. https://www.ceads.net [https://www.ceads.net].
- [30] 青海省统计局. 青海省统计年鉴 (2011—2023) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011—2023.
- Qinghai Provincial Bureau of Statistics. Qinghai statistical yearbook (2011—2023) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011—2023.
- [31] 贺勇, 傅飞飞, 廖诺. 基于STIRPAT模型的工业研发投入对碳排放影响效应分析 [J]. 科技管理研究, 2021, 41(17): 206-212.
- He Yong, Fu Feifei, Liao Nuo. Analysis on the effect of R&D investment on carbon emission in industrial sector based on STIRPAT model [J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(17): 206-212.
- [32] 青海省能源局, 水电水利规划设计总院. 青海省清洁能源发展报告 2022 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2023.
- Qinghai Provincial Energy Bureau, China Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design. Qinghai clean energy development report 2022 [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2023.
- [33] 任君, 高亚培, 王全喜, 等. 基于LMDI模型的青海省土地利用碳排放时空差异特征及影响因素研究 [J/OL]. 甘肃农业大学学报, 1-14 [2026-05-06]. [https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20251125.1339.006].
- Ren Jun, Gao Yapei, Wang Quanxi, et al. Research on spatial and temporal differences in land use carbon emissions and influencing factors based on LMDI model: A case study of Qinghai Province, China [J/OL]. Journal of Gansu Agricultural University, 1-14 [2026-05-06]. [https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20251125.1339.006].
- [34] 高亚培, 刘玮, 李成英, 等. 青藏高寒区“三生空间”演变及碳排放多情景模拟: 以青海省为例 [J]. 环境科学, 2025, 46(8): 4923-4933.
- Gao Yapei, Liu Wei, Li Chengying, et al. Evolution of production-living-ecological spaces and multi-scenario simulation of carbon emissions in the Qinghai-Tibet Plateau vulnerable region: A case study of Qinghai Province, China [J]. Environmental Science, 2025, 46(8): 4923-4933.
- [35] 杜榕. 青海农业碳排放现状与对策 [J]. 广东蚕业, 2023, 57(11): 28-31.
- Du Rong. Study on the current status and countermeasures of agricultural carbon emissions in Qinghai Province [J]. Guangdong Sericulture, 2023, 57(11): 28-31.
- [36] 卞利花, 吉敏全. 青海交通碳排放影响因素及预测研究 [J]. 生态经济, 2019, 35(2): 35-39.
- Bian Lihua, Ji Minquan. Research on influencing factors and prediction of transportation carbon emissions in Qinghai [J]. Ecological Economy, 2019, 35(2): 35-39.
- [37] 冯雨. 青海省碳排放时空差异及能源消费领域预测研究 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2023.
- Feng Yu. Spatial and temporal differences in carbon emissions and prediction of energy consumption in Qinghai Province [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2023.
- [38] 李鑫雨. 青海省主要能源消费碳排放影响因素及脱钩效应研究 [J]. 青海科技, 2023, 30(5): 96-102.
- Li Xinyu. Analysis of factors influencing carbon emissions from energy consumption in Qinghai Province and the decoupling effect [J]. Qinghai Science and Technology, 2023, 30(5): 96-102.
- [39] 吴茜, 陈强强. 甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究 [J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 274-283.
- Wu Xi, Chen Qiangqiang. Influencing factors and decoupling efforts of industry-related carbon emissions in Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 274-283.
- [40] 宋旭, 贾俊松, 陈春谛, 等. 江西省能耗碳排放时空特征、脱钩关系及其驱动因素 [J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7451-7463.
- Song Xu, Jia Junsong, Chen Chundi, et al. Spatio-temporal characteristics, decoupling relation and its driving factors of the carbon emission from energy consumption in underdeveloped Jiangxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(20): 7451-7463.