DOI: 10.20103/j.stxb.202312012634

党牛,林景曜,王强,李一楠,张琦琦,陈达荃.青藏高原地区能源碳排放时空格局及驱动因素.生态学报,2024,44(18):8033-8046.

Dang N, Lin J Y, Wang Q, Li Y N, Zhang Q Q, Chen D Q.Spatio-temporal patterns and driving factors of energy CO_2 emission in the Qinghai-Tibet region. Acta Ecologica Sinica,2024,44(18):8033-8046.

青藏高原地区能源碳排放时空格局及驱动因素

党 牛[1,2],林景曜[1,2],王 强[1,2,*],李一楠[1,2],张琦琦[1,2],陈达荃[1,2]

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350117

2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要:青藏地区经济发展滞后,自然本底脆弱,开展能源碳排放时空格局演变及其驱动因素研究,对突破经济发展对能源消耗的路径依赖,降低生态环境代价具有重要的现实价值。基于青藏地区 2005—2020 年能源碳排放与经济发展数据,分析了碳排放的部门来源及其时空演化过程,并探讨了其内在机理。研究表明:(1)青藏地区能源碳排放规模 15 年间扩张 2.37 倍,增速显著高于全国其他地区,生态恶化和环境污染风险较高。(2)青藏地区能源碳排放重心主要位于高原北缘和东缘,研究期内空间格局总体稳定,但青藏南部生态脆弱区碳排放规模逐渐上升。(3)工业为青藏地区能源碳排放最主要来源,占比高达 72.4%。服务业为增速最快部门,能源碳排放规模 15 年增长 408.7%。(4)青藏地区总体处于“低经济发展水平-低能源消耗”的滞后发展阶段中,研究时段内交通与服务业能源碳排放与经济增长呈现增长连接和扩张负脱钩状态,经济发展产生较大环境压力。(5)青藏地区经济发展与能源碳排放具有紧密的因果联系,但影响程度具有明显的空间异质性。最后,基于青藏地区自然本底,经济发展,环境压力的三元互馈关系,探讨了不同区域经济发展与二氧化碳减排的协调路径。

关键词:能源碳排放;时空演变;经济增长;生态环境;青藏地区

Spatio-temporal patterns and driving factors of energy CO_2 emission in the Qinghai-Tibet region

DANG Niu[1,2], LIN Jingyao[1,2], WANG Qiang[1,2,*], LI Yinan[1,2], ZHANG Qiqi[1,2], CHEN Daquan[1,2]

1 *School of Geograhical sciences, Fujian Normal University, Fuzhou* 350117, *China*

2 *Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou* 350007, *China*

Abstract: As the third pole of the world, the Qinghai-Tibet region plays an extremely important role in the global ecosystem. However, the ecological environment threshold of the Qinghai-Tibet region has long been in a critical state, with fragile natural endowments that are easily disturbed and damaged by human activities. It is urgently needed to strengthen local environmental governance and reduce carbon dioxide emissions. At the same time, the Qinghai-Tibet region has harsh terrain and climate conditions, a sparse population, and relatively low levels of urbanization and industrialization. In this regard, it is imperative to improve the economic level to eliminate relative poverty and improve people's livelihood. However, economic development inevitably consumes fossil energy and produces energy carbon emissions, conflicting with the regional ecological barrier positioning and ecological protection work. Therefore, studying spatial and temporal patterns of energy and carbon emissions and their drivers is critical to decoupling economic growth from energy use and reducing ecological/environmental costs. Using carbon dioxide emission panel data in 2005, 2010, 2015, and 2020 published by China City Greenhouse Gas Working Group, this paper analyzes the spatiotemporal evolution of energy carbon emission

基金项目:福建省科学技术厅公益类竞争性项目 (2023R1039); 国家自然科学基金面上项目(41971159,41971164); 教育部人文社会科学研究项目 (21YJCZH006)

收稿日期:2023-12-01; **网络出版日期**:2024-07-17

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wangq@fjnu.edu.cn

sources in the Qinghai-Tibet region and their driving mechanisms. Key findings include: Firstly, the carbon dioxide emissions have expanded 2.37 times over 15 years, growing faster than other regions in China. And this increase poses a serious risk to ecological degradation and pollution. Secondly, the center of carbon dioxide emissions in the Qinghai-Tibet region is mainly located along the northern and eastern edges of the plateau. The spatial pattern remained stable during the study period, but the scale of carbon dioxide emissions in the ecologically fragile areas of southern Qinghai-Tibet gradually increased. Thirdly, the industrial sector is the major source of carbon dioxide emissions in the Qinghai-Tibet region, accounting for as much as 72.4% of emissions. Moreover, the service industry is the fastest-growing sector, and emissions increased by 408.7% over 15 years. Fourthly, the Qinghai-Tibet region exhibits a feature of low development and low energy consumption. Meanwhile, the carbon dioxide emissions from transportation and services are positively correlated with economic growth. Fifthly, the economic impacts on carbon dioxide emissions vary spatially but exhibit a close causal relationship. Finally, considering natural, economic, and environmental interlinkages, pathways for coordinated regional development and emission reductions are discussed. The study aims to enhance macro-level understanding of the characteristics of energy carbon emissions in the Qinghai-Tibet region and provide a scientific basis for research on coordinated pathways between regional economic development and energy carbon reduction, to facilitate sustainable development in the Qinghai-Tibet Plateau region.

Key Words: energy CO_2 emissions; spatio-temporal evolution; economic growth; ecological environment; the Qinghai-Tibet region

全球超过 70%的二氧化碳排放来自于化石能源消耗,并导致了一系列生态环境问题[1]。但由于经济增长对能源消耗的路径依赖,探索兼顾经济增长和生态环境效益的协调发展路径成为学术界关注的焦点[2]。青藏地区作为世界第三极,全球生物多样性基地,北半球气候调节器,亚洲水塔和自然碳库,在全球生态系统中具有极其重要的地位[3—4]。然而青藏地区生态环境阈值长期处于临界状态[5],自然本底脆弱,极易受到人类活动干扰和破坏[6—7]。迫切需要强化地方环境治理,减少二氧化碳排放(以下简称碳排放)。但同时,青藏地区地形气候条件恶劣,人口稀疏,城市化和工业化水平较低,总体发展较为滞后。亟需提升经济水平消除相对贫困,改善人民生活。然而经济发展不可避免消耗化石能源,产生能源碳排放,与区域生态屏障定位和生态保护工作相冲突。为此,开展青藏地区能源碳排放与经济增长的交互影响研究,总结不同地区与部门能源碳排放的时空特征,并探讨其内在增长机理,有助于把握青藏地区能源碳排放责任划分侧重和治理优先级,从而科学环境规制消减经济发展与生态保护的冲突对立,推动地区绿色协调可持续发展。

但由于青藏地区碳排放规模整体较小,排放总量远低于地区碳汇总量[8]。且涉及行政区划较多,能源消费及相关碳排放数据收集困难,完整程度较差,导致青藏地区社会-经济系统碳排放研究相对较少[9]。已有研究主要集中于特定区域和特定部门,如庄明浩等以关联关系视角对青藏地区家庭能源碳排放进行研究[10],发现以畜粪,柴薪,秸秆等传统生物质能为主的能源消费结构阻断了生态系统物质循环,导致植被破坏和水土流失,而以电力,天然气等清洁能源为主的消费结构则有利于降低 PM2.5 浓度和提升居民健康水平。刘妤等利用四种化石能源消费了估算了西藏自治区交通部门碳排放规模[11],发现碳排总量 10 年增长 2.37 倍,航空和公路运输为增长主要驱动力。Yu 等指出农业投入为青藏高原农业部门最大碳排放来源[12],占比高达 65%。其中电力消耗和氮肥施用量在农业投入中占据主导地位,并分别贡献了 24%和 7%的碳排放。胡西武等发现工业为青海能源碳排放的主要部门[13],占比高达 74.72%。此外,基于 Tapio 脱钩模型,认为青海碳排放与经济增长的关系经历了弱脱钩向强脱钩的转变,经济发展对能源消耗的路径依赖逐渐削弱。

整体来看,已有研究或聚焦部分区域,或针对特定部门,相对侧重于能源碳排放规模测算,驱动因子分解,以及与生态环境和经济发展的具体关系分析。但对于青藏地区整体能源碳排放的时空格局演变缺乏认识,对于碳排放来源部门及其组成结构缺乏了解。而青藏高原作为相对独立的社会经济单元,能源碳减排工作涉及

多部门多区域利益协调与责任分配,更需要在整体协调的框架下对不同部门区域采用针对性措施,因此有必要增强对青藏地区能源碳排放的宏观把握。

基于以上认识,本文以青藏地区全域为研究对象,利用生态环境部中国城市温室气体组 2005 年,2010 年,2015 年和 2020 年四期二氧化碳排放面板数据,对青藏地区能源碳排放来源的时空演变及其驱动机制进行分析。本文将从以下两个方面为现有青藏高原碳排放研究做出贡献:(1)建立对青藏高原全域能源碳排放格局及其组成结构的科学认识。(2)尝试对青藏地区能源碳排放的驱动因素及其空间异质性进行分析。研究旨在增强对青藏地区能源碳排放特征的宏观认识,为区域经济发展与能源碳减排的协调路径研究提供科学基础,助力青藏高原可持续发展。

1　数据与方法

1.1　研究区域

青藏高原作为自然地理单元,包括昆仑山,阿尔金山,祁连山以南,横断山脉以西,喜马拉雅山脉以北的广大区域,总面积约为 250 万 km^2,横跨中国多个省级行政单元。参考《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035 年)》实施区域,以及陈佳锐等青藏高原研究范围[14],本文研究范围包括青海与西藏全域,以及新疆 4 个地级市(州,地区)级行政区域,甘肃 3 个地级市(州)级行政区域,四川 3 个自治州,云南 3 个地级市(州)级行政区域,共计 28 个城市(图 1)。

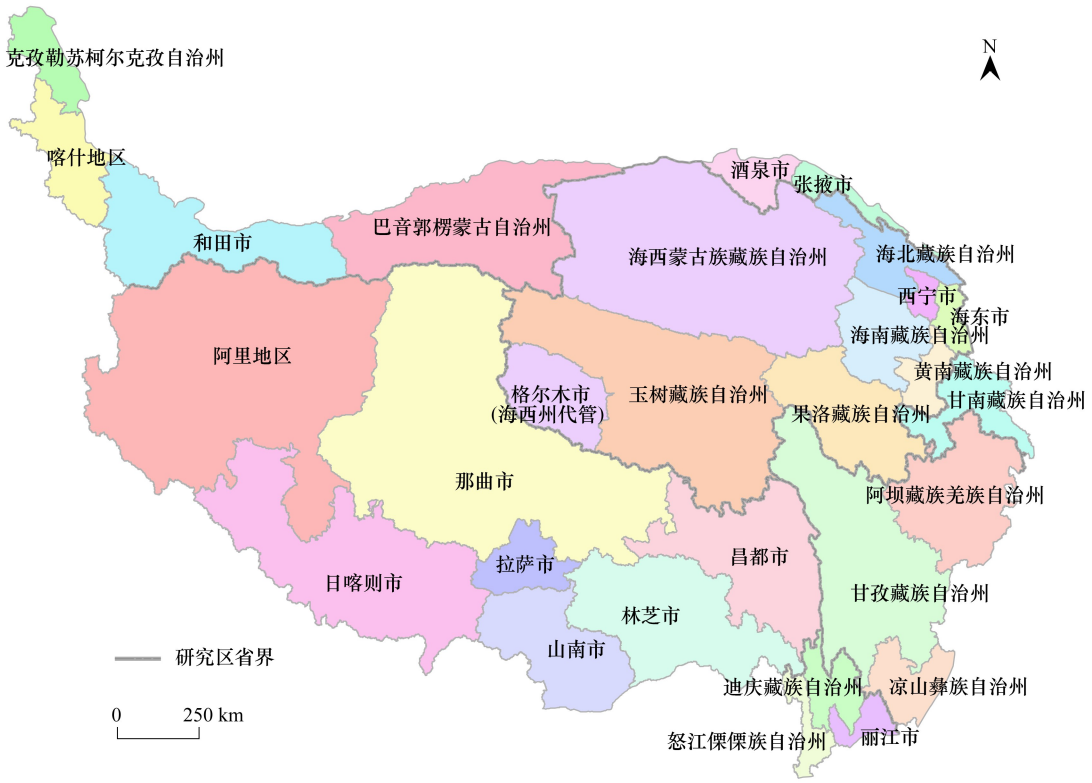


图 1　研究区域范围

Fig.1　Scope of the study area

1.2　时空格局演化研究方法

本文主要应用 ArcGis 软件标准差椭圆与平均中心工具反映青藏地区能源消费碳排放的空间演化过程与重心分布变化。标准差椭圆(Standard Deviational Ellipse, SDE)可用于检测一组数据的分布与方向,显示要素的主要空间走向。标准差椭圆的计算需要三个数值,包括旋转的角度,沿长轴的偏差和沿短轴的偏差。长轴

与短轴的偏差基于要素的平均中心,即所有点 x 坐标的平均值与 y 坐标的平均值。旋转角 θ 参照平均中心计算[15]:

$$\tan\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \sum_{i=1}^{n} y_i^2\right)^2 + 4\left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i\right)^2}}{2\sum_{i=1}^{n} x_i y_i} \tag{1}$$

计算出 θ 后,基于 θ 计算 x 轴与 y 轴的偏差 δ。

$$\delta_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i\cos\theta - y_i\sin\theta)^2}{n}} \tag{2}$$

$$\delta_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i\sin\theta - y_i\cos\theta)^2}{n}} \tag{3}$$

以上三个元素可以确定一个围绕平均中心的椭圆,通常认为其长轴走向代表点要素的主要空间走向,短轴长度代表点要素的离散程度,细长的椭圆指示更加显著的空间走向。

平均中心用于研究区域中所有要素的平均 x 坐标和 y 坐标,可代表地理要素空间分布的相对位置。对于追踪空间分布变化,以及不同类型要素分布特征可视化比较具有重要作用。仅基于地理坐标的平均中心计算公式为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \tag{4}$$

式中,x_i 和 y_i 为要素的坐标,n 等于要素总数。

如要素存在 Z 属性,平均中心可计算要素的第三维中心,此处 Z 属性为不同地级市碳排放值。

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=1}^{n} z_i}{n}, \bar{Z}_w = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i z_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{5}$$

1.3 Tapio 脱钩模型

脱钩理论(Decoupling theory)最早由德国伍珀塔尔(Wuppertal)研究所提出,仅用于表示资源消耗与财富增长的关联程度[16]。之后,脱钩理论成为衡量区域可持续发展状态的关键指标,并逐渐应用于二氧化碳排放相关研究中[17]。Tapio 在芬兰交通系统碳排放的研究中指出[18],经济增长与相关二氧化碳排放不仅存在脱钩状态,亦存在正向耦合关系。因此将弹性法引入脱钩理论,并将脱钩指标细分为 8 种类型。

按照 Tapio 脱钩模型设定,公式如下[16]:

$$DI_{T-B} = \frac{\Delta C_{T-B}}{\Delta \mathrm{GDP}_{T-B}} \tag{6}$$

式中,DI_{T-B} 为基期年 B 至目标年 T 的脱钩指数,ΔC_{T-B} 与 $\Delta\mathrm{GDP}_{T-B}$ 分别为基期年 B 至目标年 T 的碳排放与 GDP 规模变化率,分别由公式 7 和公式 8 表示:

$$\Delta C_{T-B} = (C_T - C_B)/C_B \tag{7}$$

$$\Delta\mathrm{GDP}_{T-B} = (\mathrm{GDP}_T - \mathrm{GDP}_B)/\mathrm{GDP}_B \tag{8}$$

受益于西部大开发战略的实施,研究时段内,青藏高原经济普遍呈现增长趋势,ΔGDP 均大于 0。因此,本文涉及的脱钩状态主要包括:

(1)强脱钩状态:$\Delta C<0$,$DI<0$, 经济增长,碳排放规模缩小,经济发展完全摆脱对能源消耗的依赖,处于低碳发展最理想阶段。

(2)弱脱钩状态:$\Delta C<0, 0<DI<0.8$, 经济与碳排放规模均增长,但经济增速高于碳排放增速,经济发展对能源消耗的依赖程度较低,处于低碳发展较理想阶段。

(3)增长连接:$\Delta C>0, 0.8<DI<1.2$, 经济与碳排放规模增速基本相当,经济发展处于对能源消耗的路径依赖中,为青藏地区生态环境治理的次关键区域。

(4)扩张负脱钩:$\Delta C>0, DI>1.2$, 经济与碳排放规模均增长,但碳排放增速高于经济增速,经济增长以过度能源消耗为代价,为青藏地区生态环境治理的关键区域。

1.4　地理加权回归模型

地理加权回归模型(Geographically weighted regression,GWR)是在线性回归模型的基础上,充分考虑变量空间非平稳性和空间依赖的回归方法。本文利用 GWR 模型揭示青藏地区经济发展对能源碳排放影响的空间异质性。公式如下[19—20]:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \tag{8}$$

式中,Y_i为区域 i 的能源碳排放规模,(u_i, v_i)表示区域 i 的空间地理位置,$\beta_0(u_i, v_i)$为截距,x_k则为第 k 个解释变量,$\beta_k(u_i, v_i)$为区域 i 的第 k 个回归系数。

青藏高原经济发展指标参考王少剑等能源碳排放驱动因子选择标准[21],同时考虑数据可得性,遴选人口规模(常住人口数量),富裕程度(人均 GDP),技术水平(能源强度的倒数)三个指标表征青藏地区经济发展水平。应用 GWR 模型分析青藏地区经济发展对能源碳排放影响的空间异质性。

1.5　数据来源

青藏地区能源碳排放数据收集自中国生态环境部城市温室气体工作组(China City Greenhouse Gas Working Group,CCG)。该组数据以相对统一的口径详细统计了农业,工业,服务业,家庭,交通五大部门能源消费数据,并汇总形成能源碳排放数据[22—24],为青藏地区能源碳排放来源部门及其组成结构研究提供了良好基础。此外,2005、2010、2015、2020 四期碳排放数据同时提供青藏高原各地级市(州,地区)对应时间节点常住人口、GDP 与人均 GDP 数据,数据主要源于中国城市统计年鉴,中国区域经济统计年鉴以及青海、西藏、新疆、甘肃、四川、云南六省政府统计公报。能源强度为能源消费量与 GDP 的比值,由以上数据推算得到。

2　结果分析

2.1　青藏地区能源碳排放时空演化特征

2005—2020 年,青藏高原地区与全国能源碳排放增长趋势基本一致,均经历了 2005—2015 年的高速增长阶段和 2015—2020 的低速增长阶段(图 2)。15 年间青藏地区能源碳排放由 5400 万 t 上升为 12800 万 t,增长约 2.37 倍。而同期中国总量增长约 1.69 倍,青藏地区能源碳排放增长速度显著高于全国平均水平(图 2)。虽然这一现象与基期排放规模较小有关,但青藏地区的工业发展和大规模基础设施建设[25],结合脆弱的自然本底,仍将使区域生态环境面临较大压力。

基于地区视角,2005 年和 2020 年,青藏地区能源碳排放规模排名均为:青海,新疆地区,四川地区,甘肃地区,云南地区和西藏,具有相对稳定性(图 2)。整体呈现“北高南低,东高西低”的空间分布格局。而基于城市尺度,这一空间格局更加明显(图 3)。除拉萨外,所有的中型,重型,超重型能源碳排放城市均位于高原北部和东部边缘,广大南部和中部腹地均为轻型能源碳排放。这一空间格局与人类活动密切相关,东部三江(金沙江,澜沧江,怒江)流域和东北部河湟谷地海拔相对较低,是青藏地区最主要的人口集聚区和城镇发展区。而北部柴达木盆地区矿产资源丰富,开发强度较大,对生态环境的扰动较大。

标准差椭圆与平均中心可用于反映青藏地区能源消费碳排放的时空演化过程(图 3)。四个时间节点,标准差椭圆形态特征与空间位置差异不大,表明时间段内青藏地区能源碳排放空间格局整体稳定,变化较小。椭圆主要位于高原东北部,表明能源碳排放高值区域主要集聚于区域东部和北部。而四个时间节点平均中心均位于青藏地区明显偏北,相对靠东的位置。在东西方向的变化上,经历了“东(2010)-西(2015)-西(2020)”

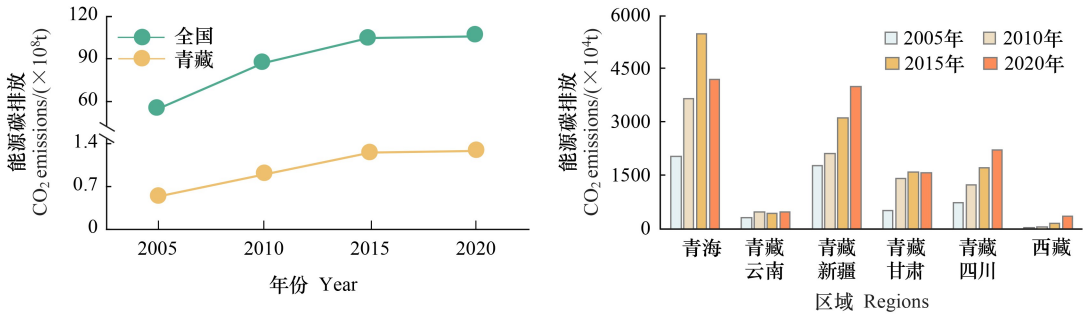


图 2 2005——2020 年青藏地区能源碳排放变化趋势

Fig.2 The changing trend of energy CO_2 emissions in the Qinghai-Tibet region from 2005 to 2020

的空间位置变化。在南北方向上经历了“北(2010)-北(2015)-南(2020)”的空间位置变化。整体上看,2020 年能源碳排放重心位于 2005 年西南方向,表明 15 年间,西部和南部在青藏地区能源碳排放格局中的地位呈现上升趋势。标准差椭圆和平均中心的空间位置特征共同表明,青藏地区能源碳排放高值区域显著集聚于北部和东部区域,整体空间格局具有稳定性,但传统低碳排区域西部和南部在碳排放格局中的重要性稍有上升。

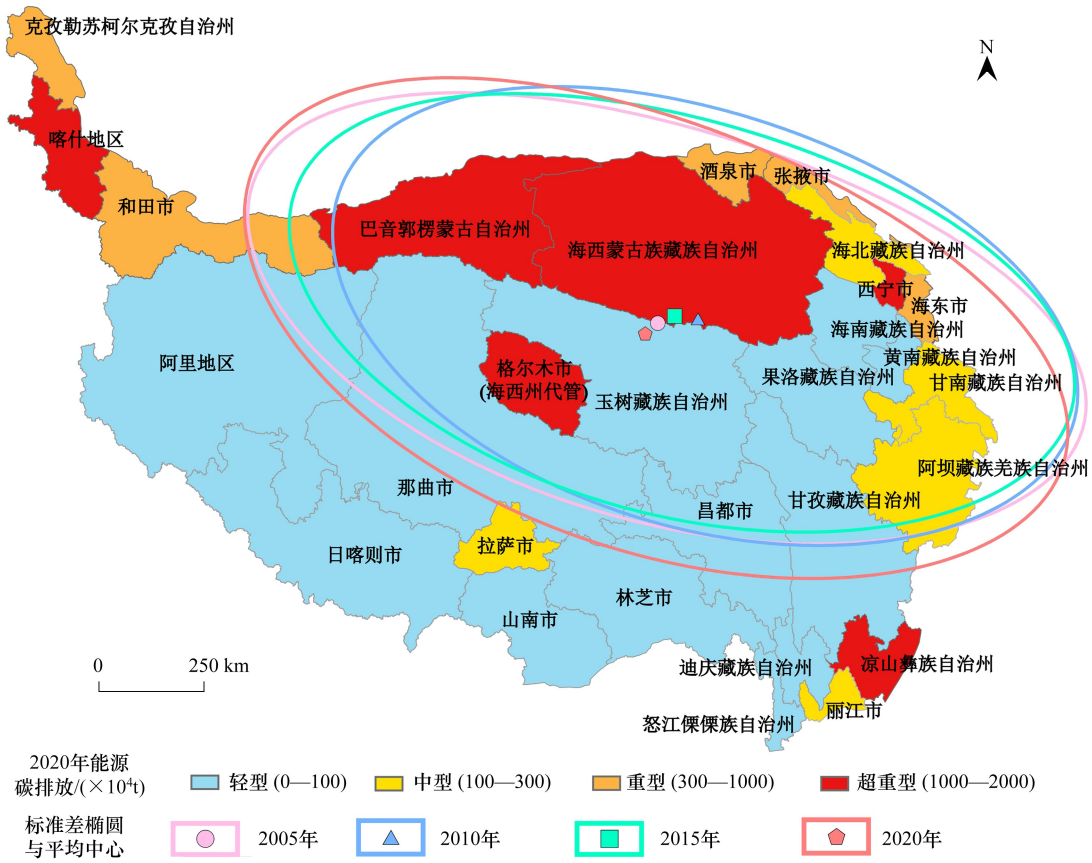


图 3 青藏高原地区能源碳排放空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of energy carbon emissions in the Qinghai-Tibet Plateau region

2.2 青藏地区能源碳排放来源结构特征

从青藏地区能源碳排放的部门来源来看(表 1),工业能源消耗为地区碳排放的最主要来源,2020 年占比高达 72.4%。其次为交通部门,占比约为 13.1%。家庭部门为第三大能源碳排放来源,占比约为 7.4%。服务

业和农业对碳排放总量贡献较小,占比分别为 4.1%和 3.0%,这一能源碳排放部门来源结构和全国基本一致。

表 1　各部门能源碳排放对比

Table 1　Comparison of energy carbon emissions in various sectors

部门 Sectors	2005/万 t	2010/万 t	2015/万 t	2020/万 t	2020 年占比/% Share in 2020	青藏增长率/% Growth rate of the Qinghai-Tibet	全国增长率/% Growth rate of the country
农业 Agriculture	152	191	247	382	3.0	151.3	81.4
工业 Industry	3612	6889	8820	9292	72.4	157.3	61.8
服务业 Services	103	80	437	524	4.1	408.7	216.3
家庭 Households	692	612	777	947	7.4	36.8	33.3
交通 Transport	886	1240	2241	1691	13.1	90.9	154.9
总和 Total	5444	9016	12527	12836	100	135.8	68.7

从青藏地区能源碳排放各来源部门的增长趋势来看(表 1),碳排规模较小的服务业增长速度最高,2005—2020 年增长率为 408.7%。这一巨大增长与青藏地区产业结构的持续优化有关,服务业占比持续提升,导致相关能源碳排放增长迅速。但同时,过高的增长速率,表明青藏地区服务业需要提升能源使用效率。而工业部门能源碳排放增速排名第二位,15 年间增长率高达 157.3%。农业部门能源碳排放增速为 151.3%,排名第三位,与农业现代化程度不断提升有关,机械化水平,单位耕地面积用电量等指标呈高速增长趋势[26]。交通部门的能源碳排放增长,则与区域交通通达度提升和旅游人数的高速增长直接相关[11,27]。同期家庭能源碳排放增长率为 36.8%,为变化最小的部门。这一趋势与青藏地区家庭能源消费的清洁化转型密切相关,传统生物质和化石能源消费逐渐降低,清洁能源的普及率快速提升[28—29]。与同期全国能源碳排放各来源部门的变化趋势相比,除交通部门外,青藏地区增长速度均显著高于全国,其中工业能源碳排放增速为全国增速的 2.5 倍,表明青藏地区以工业为主的能源碳排放仍有较大增长空间,未来区域生态环境仍将面临一定压力。

2.3　能源碳排放与经济发展的关联性

2.3.1　整体发展阶段划分

借鉴郝瑞军等方法[30],运用碳排-经济四分位图探讨青藏地区能源消耗与经济发展的具体关系。其中横轴为 2020 年各地人均 GDP 值,代表区域经济发展水平。纵轴为 2020 年各地人均能源碳排放量,代表区域经济发展对能源的依赖程度。如图 4 所示,和全国其他地区相比,2020 年青藏高原地区人均 GDP 为 3.96 万元,而人均能源碳排放为 4.07t,位于四分位图第三象限,表明青藏地区经济发展与能源消耗的关系为“低经济发展水平-低能源消耗”。这一结果与青藏地区实际发展水平相符,区域整体自然环境恶劣,人口稀疏,城镇化率低于全国平均水平。虽能源矿产资源丰富但受限于脆弱的生态环境背景,开发规模较小。因此能源碳排放规

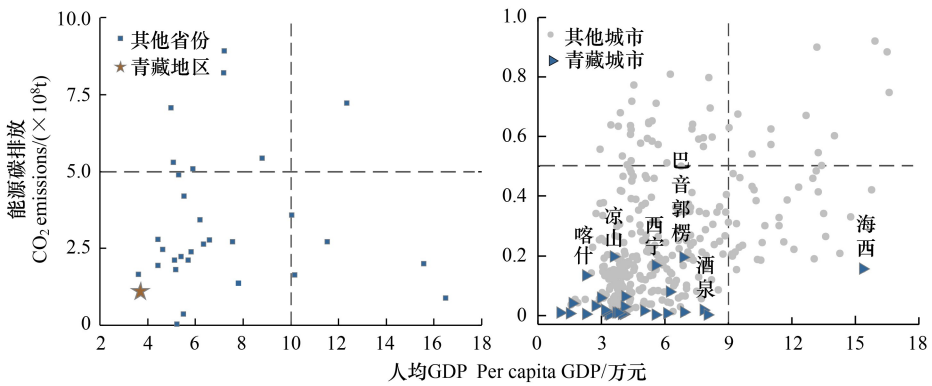


图 4　2020 年青藏高原碳排-经济四分位图

Fig.4　Carbon emission-economy quartile map of the Qinghai-Tibet Plateau in 2020

模较小,总体经济发展滞后。而基于城市尺度,除海西蒙古族藏族自治州依靠柴达木盆地资源优势,进入第四象限外,其他 27 座城市均位于第三象限,表明青藏地区城市经济发展水平同样在全国居于落后地位。

2.3.2 部门碳排放与经济发展的关联性分析

基于 Tapio 脱钩模型分析结果显示(表 2),2005—2020 年青藏地区经济发展与能源碳排放整体呈现弱脱钩关系,表明区域经济与能源碳排放均呈现增长趋势,但经济增长速度高于碳排放增长速度。和全国不同区域城市经济增长对能源消耗的较高依赖程度相比[31],这一现状表明时间段内青藏地区生态环境保护工作卓有成效[7],经济增长所付出的环境代价较小,处于低碳转型发展较为理想的状态。

表 2 青藏地区能源碳排放与经济增长脱钩状态

Table 2 Decoupling state of energy CO_2 emissions and economic growth in the Qinghai-Tibet region

年份 Years	部门 Sectors	碳变化 Changes in CO_2 emissions	脱钩指数 Decoupling index	状态 Status
2005—2010	农业	0.257	0.189	弱脱钩
	工业	0.907	0.669	弱脱钩
	服务业	−0.223	−0.165	强脱钩
	家庭	−0.116	−0.085	强脱钩
	交通	0.400	0.295	弱脱钩
	能源	0.656	0.484	弱脱钩
2010—2015	农业	0.293	0.378	弱脱钩
	工业	0.280	0.362	弱脱钩
	服务业	4.463	5.760	扩张负脱钩
	家庭	0.270	0.348	弱脱钩
	交通	0.807	1.042	增长连接
	能源	0.389	0.503	弱脱钩
2015—2020	农业	0.547	1.385	增长连接
	工业	0.054	0.136	弱脱钩
	服务业	0.199	0.504	弱脱钩
	家庭	0.219	0.554	弱脱钩
	交通	−0.245	−0.622	强脱钩
	能源	0.025	0.062	弱脱钩
2005—2020	农业	1.513	0.313	弱脱钩
	工业	1.573	0.325	弱脱钩
	服务业	4.087	0.846	增长连接
	家庭	0.368	0.076	弱脱钩
	交通	0.909	0.188	弱脱钩
	能源	1.358	0.281	弱脱钩

而在经济发展与能源消耗整体负脱钩的情境下,不同碳排放来源部门在时间段内变化显著。农业能源碳排放整体呈现弱脱钩状态,但 2015—2020 年呈现增长连接状态,产业规模与碳排放规模呈现同速扩张。其原因可能是时间段内,青藏地区农业投入与农业产出均呈现明显增长趋势,农业现代化转型逐渐完成,生产方式机械化,产业化趋势加强[26],导致相应能源消耗快速增长。服务业能源碳排放在时间段内与经济发展整体呈现增长连接,而交通部门则在 2010—2015 年亦呈现增长连接状态。这一现状与青藏地区逐步完善的交通基础设施和爆发式增长的旅游规模直接相关。2005 年,西藏公路总通车里程 4.3 万 km,2020 年这一数字变化为 11.7 万 km,交通通达度显著提升。同时,2005 年,西藏自治区共接待国内外游客 180 万,2020 年这一数字上升为 3505 万,15 年间增长约 18.5 倍。青藏地区旅游经济的大发展和交通规模的迅速扩张,导致对能源消费的依赖程度上升,为控制服务业碳排放规模形成了挑战。

2.4　能源碳排放驱动因子分析

当自变量具有空间相关性时,基于全局回归的最小二乘法(Ordinary Least Squares, OLS)模型难以解释空间相互作用下的变量关系,因此需要采用局部回归模型分析空间结构对变量的影响[32]。青藏地区能源碳排放呈现显著的空间集聚现象,且 GWR 模型赤池信息准则值(AIC)低于 OLS 模型,拟合优度(R^2)优于 OLS 模型(表 3)。表明局部加权回归模型对变量间关系具有更强的解释力度[19],后续将采用 GWR 模型结果进行分析。

虽然仅从人口规模,富裕程度和技术进步三个维度表征青藏高原经济发展水平,但全局回归模型拟合优度 R^2大于 0.595,三个因素能够解释区域 59.5%以上的能源碳排放(表 3),表明青藏地区经济发展与碳排放具有紧密的因果关系。人口规模和富裕程度是能源碳排放增长的关键驱动因素,而技术进步则能够抑制碳排放增长。基于 ArcGis 自然断点法将回归系数划分为高值,中值,低值三种类型。图 5 表明,人口规模,经济发展和技术水平对能源碳排放的影响具有区域异质性。

表 3　OLS 模型与 GWR 模型参数对比

Table 3　Comparison of parameters between the OLS model and GWR model

参数 Parameters	2005		2020	
	OLS	GWR	OLS	GWR
AIC	128.098	119.804	152.252	144.184
R^2	0.595	0.644	0.785	0.804

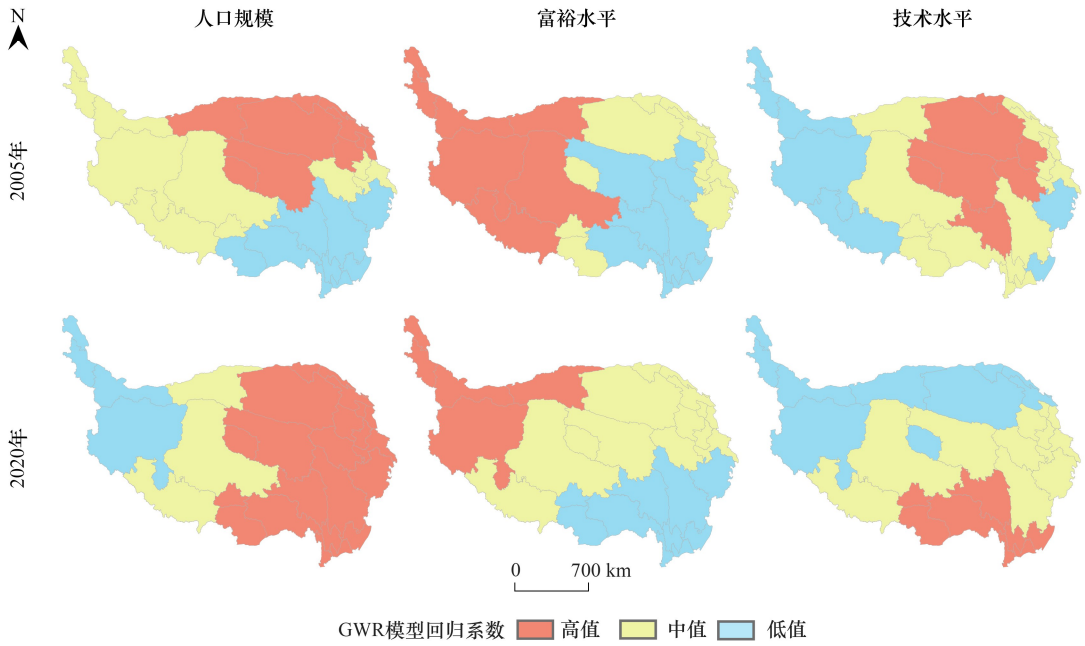


图 5　经济发展与能源碳排放地理加权回归系数空间分布

Fig.5　Spatial distribution of regression coefficients between economic growth and energy carbon emissions

人口规模与碳排放具有显著的正相关关系,且随着时间的推移系数逐渐变大(表 4)。这一现象与青藏高原人口规模和人类活动足迹的不断提升有关,受益于少数民族人口较高的自然增长率以及不断增加的外来人口流入,生态环境脆弱的青藏地区已成为世界人口高增长区之一[33]。人口增长-能源需求扩张-能源碳排放增加的传导路径在此过程中不断固化[34]。此外,人口增长伴随着现代化进程的加速,单位人口能源消费规模持续增长,商品能源占比显著提升[35],导致人口规模扩张的碳效应持续加强。而从区域角度来看,回归系数高

值区域相对集中于青藏高原人口较为密集的河湟谷地、三江流域等东部地区,而高原腹地和西部地区回归系数较小,整体具有“东高西低”的空间分布格局,与青藏地区人口“西疏东密”的经向地域分异规律基本吻合[33]。这一现象与青藏高原自然本底有关,相较高原腹地和西部地区,东部大部分区域海拔较低,土壤肥沃,气候温和,适宜生产活动和城镇建设布局,因此人口在此区域高度集聚,从而导致了更大规模能源碳排放。但研究时段内,区域人口规模碳排放回归系数的增长,与江西、甘肃等类似发展阶段地区人口集聚的低碳排放效应具有明显区别[36—37]。表明脆弱自然本底约束下,中国其他区域以人口集聚和城镇化扩张推动区域经济发展的策略,并不适用于青藏高原地区。

表 4 2005 年与 2020 年 GWR 模型因子回归系数统计结果

Table 4 Statistical results of regression coefficients from the GWR model in 2005 and 2020

因子 Factors	平均值 Mean		中位数 Median		标准差 Standard deviation	
	2005	2020	2005	2020	2005	2020
人口规模 Population size	1.918	3.879	1.938	3.959	0.176	0.150
富裕程度 Affluence	1.927	1.147	1.920	1.156	0.077	0.077
技术水平 Technology level	−0.153	−0.608	−0.154	−0.595	0.005	0.016

富裕程度提升显著增加能源碳排放,但研究时段内平均回归系数呈现下降趋势(表 4),且回归系数高值区域呈现明显的收缩趋势。这一现象符合能源阶梯理论,收入增加提升商品能源消费量,从而导致碳排放增加[21,38]。但同时高收入居民出于环境与健康外部性考量,主动优化能源消费类型与结构,减少传统生物质能与化石能源消费,增加清洁能源比重[29]。已有研究表明,研究时段内,青藏地区清洁能源开发与供给强度明显增加,基础设施布局逐渐完善,家庭能源消费结构显著优化[28—29,39]。从而一定程度上抵消了经济发展对化石能源的路径依赖,使富裕程度对能源碳排放影响的平均回归系数下降,高值区域收缩。回归系数的空间分异则与区域主导产业密切相关,低值区域主要分布于高原东南部,旅游业为区域支柱产业,经济发展对化石能源依赖性较弱,收入增长对能源碳排放影响较小。而高原北部区域,采矿业,能源工业为区域主导产业,高度依赖能源要素投入,经济发展对能源消费的路径依赖较强,居民收入增长导致更大规模能源碳排放。

技术水平是青藏地区能源碳排放的关键抑制因素,且作用强度显著提升(表 4),这一现象与研究时段内能源强度的显著下降有关。2005 年,青藏地区每万元 GDP 需消耗 0.76t 标准煤,但在 2020 这一数值下降为 0.34t标准煤,技术进步-能源效率提升-能源碳减排的正向传导路径明显增强[40—41]。但同时,回归系数存在明显的空间异质性。海西、巴音郭楞等工矿业城市,技术水平提升对能源碳减排的影响较为明显。受限于脆弱自然本底与落后经济发展,青藏工业发展总体呈现规模小,技术薄弱,产品初级的特点,生产效率较为低下,发展高度依赖基础要素投入[42]。但在国家“能耗双控”政策以及供给侧结构性改革的硬性约束下,海西,巴音郭楞等资源型城市以绿色、低碳、循环发展为目标,着力改变粗放型产业发展方式,单位能源消费碳排放显著下降,因此具有更优的碳减排效益。而西南部以旅游业为主的地区,产业结构具有绿色低碳特征,由于边际效应技术水平提升的碳减排效益相对较小。

3 讨论

3.1 青藏地区低碳发展路径浅析

青藏高原能源碳排放整体呈现“北高南低,东高西低”的空间分布特征,与人类活动强度、区域开发强度的空间分布格局基本一致[14,25]。人口、城镇、产业的分布是决定能源碳排放规模的关键基础条件,而在更深层次则受制于高原东缘与北缘相对优势的地形、气候、土壤等自然本底条件[33]。而从能源碳排放来源结构来看,与全国基本一致[41],工业为青藏高原能源碳排放的最大来源部门[13],而日益成为区域经济发展关键支撑的交通、服务业碳排放呈现高速增长趋势[11],经济发展的模式与结构已成为青藏地区环境压力的重要挑战。

但这一能源碳排放空间分布格局与部门来源结构,也为区域环境规制与经济发展的协调路径指明了发展

方向。青藏地区整体处于“低经济水平-低能源消耗”的滞后发展阶段之中(图 4),这一现状与生态功能区和生态屏障区的定位密切相关[5]。严格的环境规制一定程度上保障了青藏地区生态环境安全,但同时也导致发展机会受限,难以实现共同富裕和区域协调发展。因此,在区域生态屏障功能和脆弱自然本底约束下,如何突破经济发展与能源消耗的“三-二-一-四”象限发展规律,实现经济发展与能源消耗的解耦,成为区域高质量发展的关键问题。本文从青藏地区自然本底,经济发展,环境压力的三元互馈关系出发(图 6),依据经济结构和规模将高原划分为北缘盆地及周边工矿业城市,东缘旅游型城市,和高原腹地生态功能型城市三种类型,分别探讨其经济发展与碳减排的协调路径。

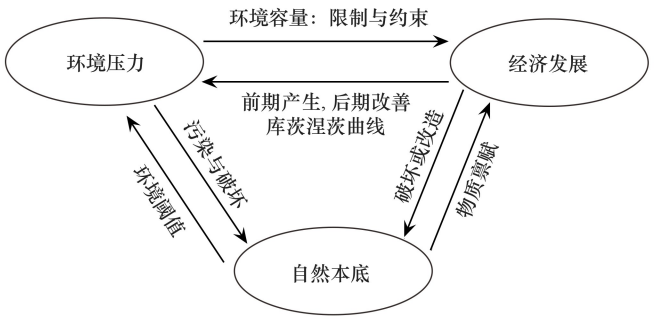


图 6　青藏地区自然本底,经济发展与环境压力的三元互馈关系

Fig.6　The triple feedback relationship of natural background, economic development, and environmental pressure in the Qinghai-Tibet Plateau

高原北部柴达木盆地及周缘地区矿产资源丰富,自然本底较好,为经济发展提供了良好的物质禀赋。周缘城市以第二产业为主,工矿业发达,经济发展水平居于高原地区前列。但粗放型的经济发展模式产生了较大规模的碳排放与环境压力,加剧了区域荒漠化程度与空气污染水平,同时也限制和约束了经济可持续发展。因此这一类型区域低碳发展的关键在于转变经济发展方式。但柴达木盆地区是中国重要的资源能源保供基地,以工业拉动经济增长的方式仍将长期维持,低碳发展的关键在于发挥技术水平提升对碳排放的关键抑制作用,提升产业链和能源系统效率。

而位于高原东缘的民族自治区域,依托高原自然风光(自然本底)和历史人文景观,已成为国内国际热门旅游区域(经济发展)。以旅游业为主的服务行业对化石能源依赖较小,具有较好生态环境效益。但随着交通基础设施建设和旅游经济的大发展,服务业和交通部门碳排放快速增长,这一现象将破坏旅游业赖以发展的关键环境基础。因此,区域发展的关键在于自然本底条件的维持与韧性提升,旅游业开发建设需充分考虑环境阈值,坚持“绿水青山就是金山银山”的发展观念是推动经济环境协调发展的关键所在。

广大高原腹地海拔较高,气候严寒,生态环境具有脆弱性和敏感性,环境破坏后修复极其困难[5]。同时受限于自然环境本底,区域人口稀疏,经济发展滞后,碳排放规模较小,整体处于自然本底脆弱-经济发展滞后-环境压力较弱的低水平三元互馈关系之中。但研究时段内,区域碳排放呈现增长趋势,环境污染,生态退化仍在高原腹地持续发生[7],表明这一低水平循环模式仍然面临平衡破坏的局面。综合此区域脆弱自然本底,同时考虑在全国生态环境治理大局中的关键地位,后续仍需以生态环境保护为重点,减少化石能源消费和相关碳排放。经济发展则需要充分考虑生态环境承载力,以环境友好型的特色农业和生态旅游为战略产业。

3.2　研究不足与展望

首先,区域碳排放受到多维因素并行影响。但受限于数据可得性,本文仅从人口规模,富裕程度,技术水平三个角度评估区域碳排放的驱动因素。而忽略了文化,政策以及其他可用于表征经济发展的因子影响。后续随着数据资料的丰富,应当开展青藏地区能源碳排放更加全面的驱动因素分析。其次,本文基于青藏地区能源碳排放时空格局演化过程,并结合自然本底,经济发展与环境压力的三元互馈关系,定性探讨了不同区域

的低碳发展路径。后续应当考虑借鉴青藏地区碳汇相关研究,建立模型模拟量化地区经济发展与碳排放的变化趋势,研制更小尺度行政单元的可行低碳发展路径。最后,青藏高原作为一个相对独立的社会经济单元,深入探讨内部各区域之间、高原与其他区域间能源碳排放隐含流动的格局、过程与机制,将更有助于碳排放责任明晰与区域功能协同。

4 结论与建议

4.1 结论

本文基于青藏地区能源碳排放与经济发展数据,总结了青藏高原能源碳排放及其来源的时空演化过程,并利用碳排-经济四分位图、Tapio 脱钩模型和 GWR 模型分析了区域碳排放增长的内在机理。主要结论如下:

(1)2005—2020 年,青藏地区能源碳排放由 5400 万 t 上升为 12800 万 t,15 年间增长约 2.37 倍,显著高于同期中国能源碳排放增速,地区生态恶化和环境污染的风险高于其他区域。而从增长趋势来看,青藏地区能源碳排放规模时序变化特征与全国基本一致,均经历 2005—2015 年高速增长和 2015—2020 年低速增长两个阶段。

(2)从空间分布来看,青藏地区能源碳排放格局总体稳定,重心区域主要位于高原北缘和东缘。但存在一定的南移趋势,青藏高原腹地及南部生态环境脆弱区碳排放规模增长迅速。

(3)从能源碳排放的来源结构看,青藏地区与全国具有一致性。工业能源消耗为地区碳排放的最主要来源,占比高达 72.4%,之后依次为交通,家庭,服务业和农业。其中服务业为能源碳排放增速最大部门,15 年间增幅超过 400%。

(4)碳排-经济四分位图显示,青藏地区及各市州多数区域仍处于“低经济发展水平-低能源消耗”的落后发展阶段。基于部门视角,农业和家庭部门能源碳排放与经济增长整体呈现强脱钩和弱脱钩状态,整体发展水平较优。而服务业和交通部门研究时段内出现增长连接和扩张负脱钩状态,经济增长产生了较大的环境压力。

(5)青藏地区经济发展与碳排放具有紧密的因果关系,人口规模和富裕程度是能源碳排放增长的关键驱动因素,而技术进步则能够抑制碳排放增长。但不同因子的影响程度存在明显的空间异质性,主要经济、产业聚集区人口规模扩张将产生更大规模碳排放;而以旅游等服务业为主的地区,收入增长对碳排放的影响相对较小;工矿业城市技术水平提升碳减排效益显著高于其他区域。

4.2 政策建议

基于青藏地区能源碳排放时空格局及其来源结构,并结合区域国土空间规划定位,从区域和部门两个视角出发,为青藏高原经济发展与能源碳减排的协调路径规制提供政策建议:

(1)基于区域视角,以河湟谷地和三江流域为核心的高原北缘和东缘,经济发展水平较好,但人口的增长和集聚仍使区域面临生态环境恶化的不利局面。低碳发展的关键在于必须与人口承载规模相适应。建议加强对不同区域人口承载阈值的模拟与测算工作,主动优化城镇发展和人居环境格局,以集中供暖、分布式清洁能源设施建设等措施优化能源供给。同时,依托优势经济发展水平,引导相关产业与居民主动攀登能源阶梯,优化能源消费类型与结构,以消减人口集聚的强碳排效应。而对于广大高原腹地区域,自然本底脆弱,能源碳排放的增长趋势成为区域可持续发展的巨大挑战。要求区域产业发展需充分考虑资源环境承载力,科学评判负面生态效应。严格限制建材、采矿等高耗能产业发展,大力发展能源要素投入较少的特色农产品加工、藏医药科技、生态旅游等高附加值行业。同时,以转移支付为手段,提升家庭太阳能、沼气设施普及率,以替代畜粪、煤炭等高碳能源,将能源消耗和碳排放规模控制在合理范围内。

(2)基于部门角度,能源碳排放规模较大的工业,增速较快的服务业为青藏地区能源碳减排的关键领域。能源消费与经济发展具有相似背景的西北地区实证研究表明,工业用煤和火力发电为碳减排关键领域[43]。工业部门需着重发挥技术水平对碳排放的抑制作用,倒逼传统工业提升能源强度或进行电气化适配改造,鼓

励支持引导新能源产业的投资与布局,加大太阳能、风电布局建设力度,打造低碳产业体系。相较工业,服务业更加环境友好。低碳发展的关键是增强服务行业从业人员绿色环保意识,将“节能减排”贯穿于全服务流程。逐步优化服务设施用具,淘汰高耗能设备,大力开发低碳交通旅游线路,建设能源节约型服务行业。此外,对于生态环境阈值处于临界状态的旅游区域,应设置旅游人数上限,限制燃油载具通行,以降低能源碳排放规模,防止不可逆环境后果的产生。

参考文献(References):

[1] Wang S J, Wang J Y, Fang C L, Li S J. Estimating the impacts of urban form on CO_2 emission efficiency in the Pearl River Delta, China. Cities, 2019, 85: 117-129.

[2] Wei Y M, Han R, Wang C, Yu B Y, Liang Q M, Yuan X C, Chang J J, Zhao Q Y, Liao H, Tang B J, Yan J Y, Cheng L J, Yang Z L. Self-preservation strategy for approaching global warming targets in the post-Paris Agreement era. Nature Communications, 2020, 11(1): 1624.

[3] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 马耀明, 徐柏青, 朱立平, 张凡, 王伟财, 艾丽坤, 杨晓新. 从青藏高原到第三极和泛第三极. 中国科学院院刊, 2017, 32(9): 924-931.

[4] Cheng C J, He N P, Li M X, Xu L, Cai W X, Li X, Zhao W Z, Li C, Sun O J. Plant species richness on the Tibetan Plateau: patterns and determinants. Ecography, 2023, 1: e06265.

[5] 高峰, 律可心, 乔智, 马丰魁, 姜群鸥. 青藏高原东缘生态过渡带碳中和评估与预测. 生态学报, 2022, 42(23): 9442-9455.

[6] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. 中国科学院院刊, 2021, 36(11): 1298-1306.

[7] 陈发虎, 汪亚峰, 甄晓林, 孙建. 全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究. 中国藏学, 2021(4): 21-28.

[8] 汪涛, 王晓昳, 刘丹, 吕冠廷, 任帅, 丁金枝, 陈报章, 曲建升, 汪亚峰, 朴世龙, 陈发虎. 青藏高原碳汇现状及其未来趋势. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(7): 1506-1516.

[9] Fan W G, Meng M M, Lu J C, Dong X B, Wei H J, Wang X C, Zhang Q. Decoupling elasticity and driving factors of energy consumption and economic development in the Qinghai-Tibet Plateau. Sustainability, 2020, 12(4): 1326.

[10] 庄明浩, 鲁玺, 王艳芬, 杨树. 青藏高原牧区家庭能源消费对生态环境和人体健康的影响研究现状与展望. 生态学报, 2023, 43(5): 1775-1783.

[11] 刘好, 吴梦羽, 母睿静. 西藏地区交通运输业碳排放驱动因素分解及脱钩效应研究. 西藏大学学报: 社会科学版, 2021, 36(1): 126-133.

[12] Yu L, Liu S L, Wang F F, Liu Y X, Li M Q, Wang Q B, Dong S, Zhao W W, Tran L S P, Sun Y X, Li W Q, Dong Y H, Beazley R E, Qian H. Effects of agricultural activities on energy-carbon-water nexus of the Qinghai-Tibet Plateau. Journal of Cleaner Production, 2022, 331: 129995.

[13] 胡西武, 黄蕾, 李毅. 应对气候变化下的青藏高原碳脱钩水平测度及碳达峰路径选择——以青海省为例. 青海社会科学, 2021(5): 43-54.

[14] 陈佳锐, 李佳洺, 马仁锋, 张文忠. 青藏高原区域开发强度与生态安全的时空耦合演进. 生态学报, 2023, 43(10): 4039-4053.

[15] Bishop M A. Point pattern analysis of eruption points for the Mount Gambier volcanic sub - province: a quantitative geographical approach to the understanding of volcano distribution. Area, 2007, 39(2): 230-241.

[16] Chen B, Yang Q, Li J S, Chen G Q. Decoupling analysis on energy consumption, embodied GHG emissions and economic growth-The case study of Macao. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 662-672.

[17] Zhang Z X. Decoupling China′s carbon emissions increase from economic growth: an economic analysis and policy implications. World Development, 2000, 28(4): 739-752.

[18] 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. Transport Policy, 2005, 12(2): 137-151.

[19] Ma X W, Ji Y J, Yuan Y F, Van Oort N, Jin Y C, Hoogendoorn S. A comparison in travel patterns and determinants of user demand between docked and dockless bike-sharing systems using multi-sourced data. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020, 139: 148-173.

[20] Zhang S B, Lei J, Tong Y J, Zhang X L, Lu D N, Fan L Q, Duan Z L. Temporal and spatial responses of ecological resilience to climate change and human activities in the economic belt on the northern slope of the Tianshan Mountains, China. Journal of Arid Land, 2023, 15(10): 1245-1268.

[21] 王少剑, 黄永源. 中国城市碳排放强度的空间溢出效应及驱动因素. 地理学报, 2019, 74(6): 1131-1148.

[22] Cai B F, Cui C, Zhang D, Cao L B, Wu P C, Pang L Y, Zhang J H, Dai C Y. China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis. Applied Energy, 2019, 253: 113579.

[23] Cai B F, Liang S, Zhou J, Wang J N, Cao L B, Qu S, Xu M, Yang Z F. China high resolution emission database (CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 129: 232-239.

[24] Cai B F, Lu J, Wang J N, Dong H J, Liu X M, Chen Y, Chen Z M, Cong J H, Cui Z P, Dai C Y, Fang K, Feng T, Guo J, Li F, Meng F X, Tang W, Wang G Z, Xie Y S, Zhang J J. A benchmark city-level carbon dioxide emission inventory for China in 2005. Applied Energy, 2019, 253: 113579.

[25] 杨华, 徐勇, 王丽佳, 徐琳. 青藏高原人类活动强度时空变化与影响因素. 生态学报, 2023, 43(10): 3995-4009.

[26] 刘玉洁, 吕硕, 陈洁, 张婕, 邱双娟, 胡一帆, 葛全胜. 青藏高原农业现代化时空分异及其驱动机制. 地理学报, 2022, 77(1): 214-227.

[27] Ping X G, Jiang Z G, Li C W. Status and future perspectives of energy consumption and its ecological impacts in the Qinghai-Tibet region. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(1): 514-523.

[28] 王强, 周侃, 林键. 中国城乡家庭能源平等变化特征分析. 地理学报, 2022, 77(2): 457-473.

[29] Wang Q, Fan J, Kwan M P, Zhou K, Shen G F, Li N, Wu B W, Lin J. Examining energy inequality under the rapid residential energy transition in China through household surveys. Nature Energy, 2023, 8: 251-263.

[30] 郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颉斌斌, 杜海波. 中国能源消费碳排放的空间化与时空动态. 环境科学, 2022, 43(11): 5305-5314.

[31] 潘竟虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应. 地理学报, 2021, 76(1): 206-222.

[32] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.

[33] 戚伟, 刘盛和, 周亮. 青藏高原人口地域分异规律及“胡焕庸线”思想应用. 地理学报, 2020, 75(2): 255-267.

[34] 王强, 樊杰, 伍世代. 1990—2009 年中国区域能源效率时空分异特征与成因. 地理研究, 2014, 33(1): 43-56.

[35] 卞勇, 曾雪兰. 基于三部门划分的能源碳排放总量目标地区分解. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(10): 106-114.

[36] Yang Y, Jia J S, Chen C D. Residential energy-related CO_2 emissions in China′s less developed regions: a case study of Jiangxi. Sustainability, 2020, 12(5): 2000.

[37] Xin L L, Jia J S, Hu W H, Zeng H Q, Chen C D, Wu B. Decomposition and decoupling analysis of CO_2 emissions based on LMDI and two-dimensional decoupling model in Gansu Province, China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(11): 6013.

[38] 杨青林, 赵荣钦, 胡月明, 肖连刚, 谢志祥, 揣小伟, 谢英凯. 京津冀地区经济社会要素与碳排放的时空耦合关系. 生态学报, 2023, 43(9): 3458-3472.

[39] 姜璐, 邢冉, 陈兴鹏, 薛冰. 青藏高原农区农户的家庭能源消费研究. 地理科学, 2020, 40(3): 447-454.

[40] 王正, 樊杰. 能源消费碳排放的影响因素特征及研究展望. 地理研究, 2022, 41(10): 2587-2599.

[41] Jia J S, Xin L L, Lu C F, Wu B, Zhong Y X. China′s CO_2 emissions: A systematical decomposition concurrently from multi-sectors and multi-stages since 1980 by an extended logarithmic mean divisia index. Energy Strategy Reviews, 2023, 49: 101141.

[42] 马海涛. 青藏高原绿色工业化的分区发展策略. 发展研究, 2020(5): 68-73.

[43] Zhang Z X, Jia J S, Guo Y L, Wu B, Chen C D. Scenario of carbon dioxide (CO_2) emission peaking and reduction path implication in five northwestern provinces of China by the low emissions analysis platform (LEAP) model. Frontiers in Energy Research, 2022, 10:983751.