

马楠,邓晓红,李宗省,等.甘肃省实现“双碳”目标的情景模拟及对策建议[J].中国沙漠,2023,43(5):66-73.

甘肃省实现“双碳”目标的情景模拟及对策建议

马楠^{1a}, 邓晓红^{1abc}, 李宗省^{2ab}, 马镇邦^{1a}, 闫淑霖^{1a}, 裴惠娟^{2c}

(1.兰州大学 a.经济学院, b.县域经济发展研究院, c.乡村振兴战略研究院, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 a.内陆河流域生态水文重点实验室, b.甘肃省祁连山生态环境研究中心, c.文献情报中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:核算区域的碳排放和碳汇量,分析其影响因素并预测未来变化情况,对区域适应气候变化和实现“双碳”目标具有重要的指导意义。本研究基于LMDI模型、STIRPAT模型、FLUS-InVEST模型等定量分析甘肃省碳排放与碳汇的现状特征及模拟未来变化情景,并定性讨论甘肃省减排增汇过程中可能遇到的挑战与机遇,提出甘肃省实现“双碳”目标的路径及具体的对策建议。结果表明:(1)甘肃省碳排放呈上升趋势,二次产业是排放大户。(2)经济产出是甘肃省碳排放增长的主导因素。(3)在全面优化情景下甘肃省碳排放如期达峰,减排效果最为理想。(4)甘肃省短期内新增碳汇缺口较大,难以抵消全部的碳排放。建议甘肃省实现“双碳”目标宜分两阶段进行,减排和增汇多措并举并优化经济发展、产业结构和能源消费等。

关键词:碳中和; 碳减排; LMDI; STIRPAT; 甘肃省

文章编号: 1000-694X(2023)05-066-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00042

中图分类号: X87

文献标志码: A

0 引言

以温暖化为主要特征的全球气候变化,因其带给地球生态和人类社会的灾难性风险,已成为当今世界面临的最严峻挑战之一^[1],对此各国政府和国际组织做出了一系列举措积极应对气候变化^[2]。作为负责任的大国,中国持续更新国家自主贡献目标,并在2020年提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的目标。这体现了中国应对全球气候变化的坚定决心,彰显了中国推动全球生态安全构建的大国担当。减排和增汇是实现“双碳”目标的两条主线^[3],即一方面从源头上减少人为碳排放,另一方面要增加生态系统的固碳能力^[4]。

学界对碳排放的研究主要围绕碳排放的核算、影响因素、预测等方面展开^[3,5-10]。碳核算是对碳源排碳量数据的量化,在碳循环体系中将碳源大体分为自然源和人为源两类,一般认为人为源是引起二

氧化碳浓度增加、导致气候变暖的主要因素,其中又以能源消费碳排放占主导^[11],目前常用的能源消费碳排放核算方法为IPCC(政府间气候变化专门委员会)指南法^[6,9]。研究碳排放的各种可能影响因素,既有助于探究二氧化碳的排放机制,也有利于决策者制定相应的减排措施^[11]。国内学者从国家、区域、产业部门等多个尺度开展了碳排放影响因素的研究工作,其中出现频率较高的影响因素包括GDP、人口、能源强度、能源结构、研发投入等,在具体的研究方法上,一般采用计量回归分析或分解分析模型^[3,5-10]。预测碳排放对于制定科学的低碳政策具有重要参考价值,采用STIRPAT模型结合不同的情景预测碳排放,并预估碳达峰是当前的研究热点^[7-9]。

陆地生态系统具有固碳、防风固沙、水土保持等功能,其中固碳功能又称碳汇功能^[12],指的是陆地生态系统利用光合作用吸收二氧化碳并储存在植被和土壤中^[13]。陆地生态系统在全球碳循环中

收稿日期:2023-02-08; 改回日期:2023-03-12

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42271288);科技部第二次青藏高原科学考察项目(2019QZKK0405);甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA505);中国科学院“西部之光”项目(E0290906)

作者简介:马楠(1998—),女,青海西宁人,硕士研究生,研究方向为生态经济。E-mail: manan1900@163.com

通信作者:邓晓红(E-mail: dengxg@lzu.edu.cn)

发挥着十分重要的作用,2010—2019年平均每年固定31%的人为碳排放^[12]。陆地生态系统也是全球碳循环中受人类活动影响最大的部分^[13],土地利用/覆被变化(LUCC)作为人类活动对地表影响的重要载体^[14],是影响陆地碳汇变化的最主要因素^[13]。LUCC通过影响陆地生态系统的结构和功能,改变土壤和植被属性,引起生态系统固碳能力变化^[15]。因此基于以LUCC为碳汇数据源的InVEST模型来计算碳汇量是碳汇评估的经典手段^[16-22]。由于陆地生态系统处于动态变动中^[21],不少学者通过模拟未来不同情景下的LUCC来预测碳汇^[21-22],常用的LUCC预测模型有CA-Markov模型、FLUS模型等。

甘肃省是中国西部重要的生态安全屏障,经济发展与东中部地区相比较为落后,近年来依托“一带一路”建设,推进西部大开发等国家战略的实施,经济发展取得显著成效。但甘肃省当前仍处于工业化中期向后期转化阶段,经济发展不可避免地导

致了碳排放增长等环境问题。此外,随着城镇化的快速推进,甘肃省土地利用格局也在发生明显变化,并影响到区域碳汇功能。如何在保持经济增长的同时实现减排增汇的目标是甘肃省在未来发展中值得深入研究的课题,在此背景下,开展甘肃省碳排放、碳汇现状分析和未来预测工作,对于如期实现“双碳”目标,推动经济高质量发展具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 研究框架

本文以甘肃省碳排放、碳汇为研究对象,核算因能源消耗和土地利用引起的碳排放、碳汇变化,探究影响碳排放的因素,模拟未来不同情景下碳排放和碳汇的变化趋势,综合上述分析,讨论甘肃省在减排增汇过程中可能面临的挑战与机遇和“双碳”目标的实现路径,并提出具体的对策建议,研究框架如图1所示。

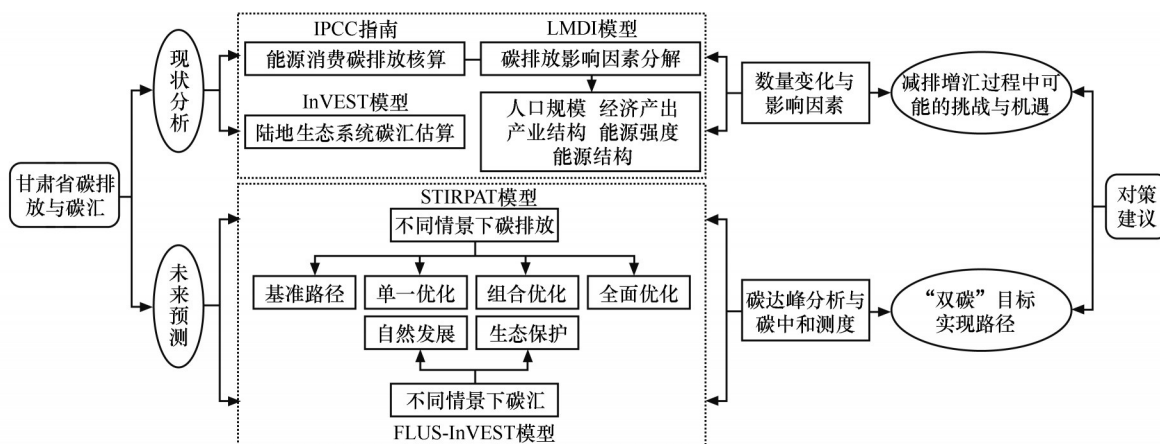


图1 研究框架

Fig.1 The research framework

1.2 研究方法

1.2.1 碳排放核算

采用《2006 IPCC 国家温室气体清单指南》核算甘肃省能源消费碳排放,由于产生碳排放的是三次产业终端能源消费,可不考虑生活能源消费^[23]。具体的计算公式为:

$$CE = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 EC_{ij} EF_j \quad (1)$$

式中: i 为产业类型; j 为能源类型; CE 为能源消费产生的碳排放量; EC_{ij} 为*i*产业*j*能源的消费量(标准量); EF_j 为*j*能源的碳排放系数。选取煤炭、焦炭、

原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、液化石油气和天然气9种能源进行碳排放核算,碳排放系数根据各类能源的平均低位发热量、折标煤系数等指标计算得出^[9]。

1.2.2 LMDI分解模型

利用LMDI分解模型进行甘肃省能源消费碳排放影响因素的分解,参考赵选民等^[6]的方法,首先构建扩展的Kaya恒等式:

$$E = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \left(P \times \frac{Y}{P} \times \frac{Y_i}{Y} \times \frac{C_i}{Y_i} \times \frac{C_{ij}}{C_i} \times \frac{E_{ij}}{C_{ij}} \right) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 (P \times A \times IS_i \times EI_i \times ES_{ij} \times EF_j) \quad (2)$$

式中: E 表示能源消费碳排放量; i, j 的意义同式(1); P 表示人口数量; Y 表示 GDP; Y_i 表示 i 产业产值; C_i 表示 i 产业的能源消费总量; C_{ij} 为 i 产业 j 能源的消费量; E_{ij} 为 i 产业 j 能源的碳排放量; A 表示人均 GDP; IS_i 表示 i 产业的 GDP 比例; EI_i 表示 i 产业的能源强度; ES_{ij} 表示 i 产业能源消费中 j 能源的消费比例; EF_j 表示 j 能源的碳排放系数。

定义能源消费碳排放变化量 ΔE 为综合效应, 根据 LMDI 加法分解, 综合效应由人口规模效应 ΔP 、经济产出效应 ΔA 、产业结构效应 ΔIS 、能源强度效应 ΔEI 、能源结构效应 ΔES 和排放系数效应 ΔEF 构成, 由于在分析中一般假定各能源的碳排放系数为定值^[23], 所以 $\Delta EF=0$, 因此综合效应可以表示为:

$$\Delta E = \Delta P + \Delta A + \Delta IS + \Delta EI + \Delta ES \quad (3)$$

各因素的逐年效应为:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \left(\frac{E_{ij}^t - E_{ij}^{t-1}}{\ln E_{ij}^t - \ln E_{ij}^{t-1}} \times \ln \frac{P^t}{P^{t-1}} \right) \quad (4)$$

$$\Delta A = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \left(\frac{E_{ij}^t - E_{ij}^{t-1}}{\ln E_{ij}^t - \ln E_{ij}^{t-1}} \times \ln \frac{A^t}{A^{t-1}} \right) \quad (5)$$

$$\Delta IS = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \left(\frac{E_{ij}^t - E_{ij}^{t-1}}{\ln E_{ij}^t - \ln E_{ij}^{t-1}} \times \ln \frac{IS_{ij}^t}{IS_{ij}^{t-1}} \right) \quad (6)$$

$$\Delta EI = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \left(\frac{E_{ij}^t - E_{ij}^{t-1}}{\ln E_{ij}^t - \ln E_{ij}^{t-1}} \times \ln \frac{EI_{ij}^t}{EI_{ij}^{t-1}} \right) \quad (7)$$

$$\Delta ES = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^9 \left(\frac{E_{ij}^t - E_{ij}^{t-1}}{\ln E_{ij}^t - \ln E_{ij}^{t-1}} \times \ln \frac{ES_{ij}^t}{ES_{ij}^{t-1}} \right) \quad (8)$$

以上各式中, t 表示年份。

1.2.3 STIRPAT 模型及情景设定

IPAT 模型是一个表示人类活动对环境影响的定量关系模型, 认为人口 (P)、富裕度 (A) 和技术 (T) 三要素共同对环境产生影响, 对 IPAT 模型进行改进得到了 STIRPAT 模型——一个可拓展的随机性的环境影响评估模型^[24]。根据甘肃省实际情况, 对 P 、 A 、 T 三要素进行拓展, 选取人口、城镇化率、经济产出、产业结构、能源强度和能源结构 6 个变量作为碳排放的影响变量, 构建新的模型为:

$$\ln C = \ln a + b \ln P_1 + c \ln P_2 + d \ln A_1 + e \ln A_2 + f \ln T_1 + g \ln T_2 + \ln i \quad (9)$$

各变量的定义如表 1 所列。

参考张剑等^[7]的方法, 设定基准情景 (S_0)、单一优化情景 ($S_1 \sim S_4$)、组合优化情景 ($S_5 \sim S_6$) 和全面优化情景 (S_7) 作为碳排放预测情景。 S_0 沿袭当前发展路径, 各变量的发展速度为中速; $S_1 \sim S_4$ 分别对富

表 1 模型变量

Table 1 Description of variables in the model

变量	描述	单位
碳排放量 (C)	能源消费碳排放量	万 t
人口 (P_1)	年末总人口	万人
城镇化率 (P_2)	城镇人口/年末总人口	%
经济产出 (A_1)	GDP/年末总人口	万元/人
产业结构 (A_2)	第二产业产值占比	%
能源强度 (T_1)	能源消费总量/GDP	吨标煤/万元
能源结构 (T_2)	煤炭消费量/能源消费总量	%

裕度和技术各个变量的发展速度在 S_0 基础上进行调整; $S_5 \sim S_6$ 分别对富裕度变量和技术变量发展速度在 S_0 基础上进行调整; S_7 对富裕度和技术全部变量发展速度在 S_0 基础上进行调整。具体的情景设置如表 2 所列。

表 2 碳排放情景设定

Table 2 Description of different carbon emission scenarios

情景	P_1	P_2	A_1	A_2	T_1	T_2
S_0	中增长	中增长	中增长	中增长	中增长	中增长
S_1	中增长	中增长	低增长	中增长	中增长	中增长
S_2	中增长	中增长	中增长	高降低	中增长	中增长
S_3	中增长	中增长	中增长	中增长	高降低	中增长
S_4	中增长	中增长	中增长	中增长	中增长	高降低
S_5	中增长	中增长	低增长	高降低	中增长	中增长
S_6	中增长	中增长	中增长	中增长	高降低	高降低
S_7	中增长	中增长	低增长	高降低	高降低	高降低

为对应国家“五年”规划, 将预测期间 2021—2060 年以 5 年为周期分成 8 个阶段, 分阶段赋予变量发展速度。变量发展速度的设定主要依据历史增速、《甘肃省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》^[25] 和学者的预测数据^[26], 并在此基础上进行了适当调整。

1.2.4 InVEST 模型固碳模块

通过 InVEST 模型固碳模块进行甘肃省陆地碳汇评估, 模型基于各地类的碳密度和土地利用数据估算 4 个碳库 (地上生物量、地下生物量、土壤有机物和死亡有机物) 的碳汇量。计算公式如下:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (10)$$

$$C_{\text{new}} = C_{\text{total}-t} - C_{\text{total}-(t-n)} \quad (11)$$

式中: C_{total} 为陆地碳汇总量 (万 t, 下同); C_{above} 为地上

部分碳汇量; C_{below} 为地下部分碳汇量; C_{dead} 为死亡有机物碳汇量; C_{soil} 为土壤碳汇量; C_{new} 为陆地碳汇新增量; t 、 $t-n$ 表示年份。

模型用户手册所做的假设是将各地类的碳密度视为常量(表3),本文碳密度数据根据学者们在研究区、研究区内流域等的研究结果权衡得到^[16-20]。

表3 不同土地利用类型碳密度($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 3 Carbon density of different land-use types($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)

土地利用类型	C_{above}	C_{below}	C_{soil}	C_{dead}
耕地	8.61	36.90	86.40	11.41
林地	53.86	69.55	261.55	10.32
草地	18.15	46.87	155.56	4.64
水域	1.35	1.08	149.17	0.00
建设用地	1.85	13.75	0.00	0.00
未利用地	4.87	3.25	55.55	0.00

1.2.5 FLUS模型及情景构建

FLUS模型是Liu等^[27]基于CA模型改良得到的LUCC预测模型,模型包含CA模块、Markov模块和人工神经网络模型算法(ANN)模块三部分,用于自然因素和人文因素驱动下土地变化情景模拟。在分析甘肃省2000—2020年五期国土空间格局变化的基础上,参考杨洁等^[21]和刘晓娟等^[22]的方法,设定自然发展和生态保护两种LUCC预测情景。情景1:自然发展情景,假定未来LUCC遵循当前变化趋势和特征,影响LUCC的因素没有发生较大变化。情景2:生态保护情景,加大对生态功能区的保护,限制林地、草地向其他地类的转出。选择高程、坡度、坡向、气温、降水量、到高速公路的距离、到铁路的距离、人口和GDP作为LUCC的驱动因素。

1.3 数据来源

人口、GDP等经济社会数据来源于《甘肃发展年鉴》(2001—2021年);各类能源的折标煤系数来源于《中国能源统计年鉴2020》,平均低位发热量等数据来源于《省级温室气体清单编制指南》(试行)。为消除价格因素的影响,涉及人均GDP计算时折算为2000年不变价格。甘肃省边界、高程、降水量、气温等数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn/data>),坡度、坡向数据基于高程数据计算得出;路网数据来源于OpenStreetMap(www.openstreetmap.org);土地利用数据来源于武汉大学黄听教授团队制作的中国30米年度土地覆

盖产品(<https://zenodo.org/record/581691#.YzAATnZBy5d>),经过合并和重分类将土地利用分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六大类。

2 结果与分析

2.1 现状分析

2.1.1 碳排放与碳汇现状

甘肃省2000—2020年能源消费碳排放量与陆地生态系统碳汇量如图2所示。甘肃省碳排放总体呈增长态势,2000年为2142.00万t,2020年为5862.95万t,增幅为173.71%。分产业来看,第二产业的碳排放远超过其他产业,在三次产业中占主导地位。甘肃省碳汇总量呈上升趋势,在2000—2020年间累计增加了23476.76万t,具体到各年度,碳汇新增量存在一定波动。

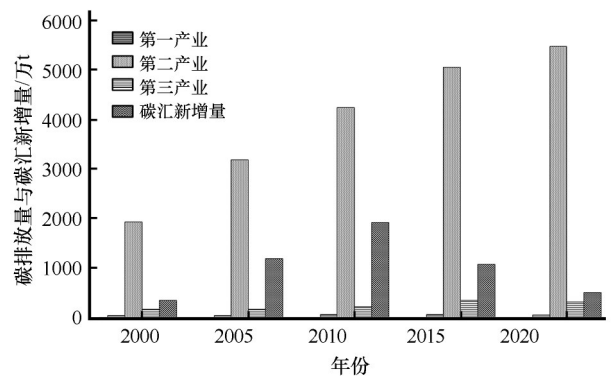


图2 甘肃省2000—2020年碳排放量与碳汇量

Fig.2 Carbon emissions and carbon sinks of Gansu province during the period of 2000—2020

2.1.2 碳排放影响因素分解

以2000年为基期,利用公式(2)~(8)对甘肃省2001—2020年碳排放进行影响因素分解,得到人口规模、经济产出、产业结构、能源强度、能源结构的逐年效应(表4),效应值为正表明该因素能够拉动碳排放增长,反之则表明抑制碳排放增长^[28]。

人口规模逐年效应呈现一定正负波动,与同期甘肃省人口变动事实相对应,人口增加时人口规模效应为正,人口减少时人口规模效应为负。但总的来说,人口数量变化对碳排放的影响比较微弱。

经济产出的逐年效应恒为正值,且绝对值远高于其他因素,表明经济产出是甘肃省碳排放增长的主导因素。

表4 甘肃省2001—2020年碳排放变化分解逐年效应(万t)

Table 4 Factor decomposition results of carbon emission variation in Gansu province during the period of 2001—2020 (10 000 t)

年份	人口规模	经济产出	产业结构	能源强度	能源结构
2001	2.59	300.09	13.11	-8.98	4.84
2005	1.70	413.70	7.70	-66.21	3.77
2010	2.92	440.26	105.43	-138.00	14.46
2015	-4.77	330.26	-190.26	-65.41	-2.38
2020	-3.92	154.00	-45.23	22.64	5.43

考虑篇幅限制,只列出以上5年数据,详细结果可联系作者查看。

产业结构逐年效应存在一定起伏,与同期甘肃省二产占比的变化趋势一致。在产业结构效应为正的年份二产占比较前一年增加,产业结构效应为负的年份二产占比较前一年减少,表明二产占比降低抑制碳排放增长的作用明显。

能源强度的逐年效应除2004年和2020年为正值外其余年份均为负值,同期甘肃省能源强度整体呈下降趋势,仅在2004年和2020年有所回升,说明能源强度下降对碳排放的负向驱动作用较强。

能源结构逐年效应的变化趋势与同期煤炭、焦炭、燃料油等高碳能源(这3种能源的碳排放系数在9种能源中位居前三)消费占比的变化趋势一致,能源结构效应为负的年份高碳能源消费占比均较前一年有所降低,说明减少对高碳能源的消费可以有效抑制碳排放增长。

2.2 模拟预测

2.2.1 碳达峰分析

对STIRPAT模型变量数据进行初步处理和检验后,利用最小二乘法对式(9)进行多元回归分析,发现除人口外各变量系数的方差膨胀因子(VIF)均大于10,说明变量间存在严重的多重共线性,为得到稳健的拟合结果,采用岭回归方法消除多重共线性的影响。在SPSS 26环境中调用自带程序Ridge Regression,发现在岭参数 $k=0.1$ 之后岭回归系数值逐渐平缓并趋于稳定,由于 k 值要求尽可能小,因此确定 k 值为0.1,得到回归方程和具体的回归结果如下:

$$\ln C = 6.301 \ln P_1 + 0.403 \ln P_2 + 0.182 \ln A_1 + 0.444 \ln A_2 - 0.162 \ln T_1 + 0.827 \ln T_2 - 47.357 \quad (12)$$

从拟合结果来看,能源强度与碳排放呈现负相

表5 岭回归结果

Table 5 Results of ridge regression

变量	系数	标准误	标准系数	t	P
常量	-47.357	19.511	0.000	-2.427	0.029
$\ln P_1$	6.301	2.527	0.122	2.493	0.026
$\ln P_2$	0.403	0.036	0.296	11.109	0.000
$\ln A_1$	0.182	0.014	0.324	12.552	0.005
$\ln A_2$	0.444	0.134	0.168	3.318	0.000
$\ln T_1$	-0.162	0.030	-0.202	-5.414	0.000
$\ln T_2$	0.827	0.191	0.232	4.331	0.001

调整的 $R^2=0.966$,F统计量=96.554, sig.(F统计量)=0.000。

关的关系^[7,9],这与一般的研究结果不符,但与甘肃省已有研究保持一致^[29-30],这可能是由于甘肃省能源强度的下降幅度较小,且在发展中对高碳能源的依赖较大,技术进步对碳排放的抑制作用被其他因素所抵消。为验证预测模型的有效性,将历史数据代入回归方程中与基于式(1)计算得出的碳排放进行对比,结果显示预测结果的平均误差率为4.10%,表明预测模型较为可靠。

根据回归结果和情景设置得到8种情景下甘肃省2021—2060年的碳排放变化趋势如图3所示。在基准情景(S0)下,碳排放缓慢增长,直到2050年才达峰,峰值为8 393.96万t。对比4种单一优化情景(S1~S4),在减少未来煤炭能源消费的情景S4下减排效果最明显,碳排放于2030年如期达峰,峰值较情景S0减少1 967.72万t。对比两种组合优化情

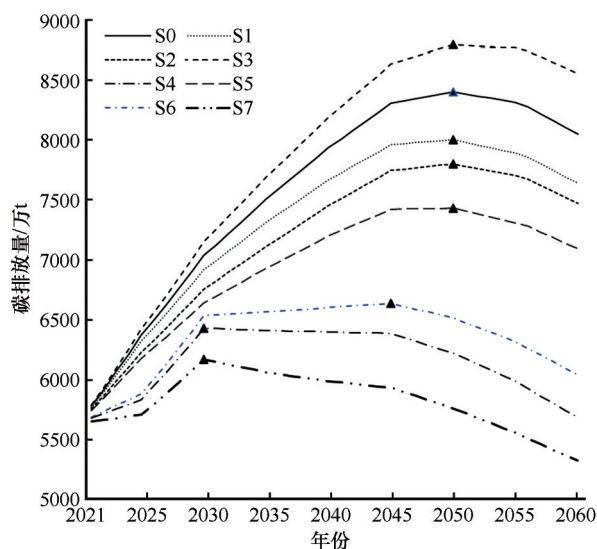


图3 不同情景下碳排放变化趋势

Fig.3 Variation trend of carbon emission under different scenarios

景(S5和S6),发现对能源强度和能源结构进行优化的效果比对经济产出和产业结构进行调整要好,在情景S6中碳排放达峰,年份较情景S5提前了5年,且前者的达峰量比后者少791.81万t。在全面优化情景(S7)下,碳排放于2030年如期达峰,达峰量为6 167.02万t,峰值比情景S0少226.89万t,比S4和S6分别少259.18万t和466.77万t。综合来看,在S7情景下的减排效果最为理想,说明甘肃省要想如期高质量实现2030年碳达峰目标,需要多项措施并举。需要注意的是,历史数据的选择、情景数据的设定都会对预测结果产生影响,因此利用计量模型预测碳排放存在一定的不确定性^[9]。

2.2.2 碳中和测度

根据FLUS-InVEST模型耦合的预测结果,在自然发展情景下,甘肃省2060年陆地生态系统碳汇总量为720 044.07万t,较2020年增加了2.55%,平均每年新增碳汇447.54万t;在生态保护情景下,2060年碳汇总量为752 919.95万t,较2020年增加了7.23%,平均每年新增碳汇1 269.43万t;生态保护情景下2060年林地、草地等生态功能区面积占比较自然发展情景高7.09%。可以看出,加大对生态功能区的保护,控制林地、草地向其他地类的转移,对提高甘肃省陆地生态系统固碳能力的作用十分显著。

结合碳排放预测结果,根据2060年新增碳汇预测值对碳排放量的抵消程度,分析甘肃省2060年碳中和进程^[4]。在碳汇为自然发展情景下,2060年甘肃省新增碳汇对8种情景下碳排放的抵消程度分别为5.56%、5.86%、5.99%、5.24%、7.87%、6.31%、7.41%和8.41%。在碳汇为生态保护情景下,2060年甘肃省新增碳汇对8种情景下碳排放的抵消程度分别为15.78%、16.63%、17.00%、14.85%、22.34%、17.90%、21.02%和23.85%。以上结果显示,在碳汇为生态保护情景且碳排放为全面优化情景时,甘肃省2060碳中和进程最高,表明同时从减排和增汇两端发力,“一减一加”相结合的策略对推进碳中和目标的效果更突出。

3 讨论及对策建议

3.1 减排增汇过程中的挑战与机遇

人口数量变化对碳排放带来的影响仍有较长的过渡期。实证结果显示,人口规模与碳排放增长紧密联系,这可以用消费行为解释,如建筑需求、汽

车使用等。虽然从数值上来看,人口因素对碳排放的影响比较微弱,但当前生育支持政策的完善和生育意愿的降低加大了人口变化的不确定性,对持续降低碳排放带来了一定的挑战。

以高碳排放为代价的经济发展方式需要转变。分解模型显示经济规模扩张是甘肃省碳排放增长的最主要因素,预测结果也表明降低经济增速可以减少碳排放,但加快经济发展是缩小其与发达地区差距的重要途径,因此对甘肃省而言,应采取可持续的发展战略,积极谋取经济与环境的协调发展,推动经济高质量发展。

产业结构调整任务艰巨。分解结果表明降低二产占比可以减少碳排放,但甘肃省作为老工业基地,其国民经济运行对二产依赖性较强。通过进一步调整产业结构,降低二产占比的方式来减少碳排放难度较大。同时,甘肃省工业以石化、钢铁等传统行业为主,能源消费在甘肃省终端能源消费中的占比一直保持在80%以上,产业用能短板比较明显,调整产业结构,提高产业用能效率是未来重要的优化方向。

能源和技术革新空间大。能源强度反映的是能源的利用效率,其变动是由技术决定的,能源强度降低可以抑制碳排放增长,但当前甘肃省能源强度高于全国平均水平,说明甘肃省能源技术发展还有很大提升空间。此外,在进行碳排放核算和影响因素分解时,为方便理论分析一般都假定碳排放系数不变,但在实际中碳排放系数会随着技术的进步而降低,说明技术革新对于降低能源消费产生的碳排放大有可为。

清洁能源生产和消费需进一步优化。分解模型显示减少高碳能源消费可以降低碳排放,但甘肃省能源消费一直以化石能源为主,同时其又具有突出的清洁能源生产和开发优势,可开发量和开发条件居于全国前列,这表明甘肃省未来在发挥清洁能源的优势上具有较大潜力。如何有效发挥清洁能源的作用对于甘肃省既是机遇也是挑战。

存在固碳缺口,增汇强度有待提高。预测结果显示,短期内甘肃省碳排放和碳汇存在缺口,仅仅依靠生态碳汇对于推进碳中和进程的贡献有限。如何将生态工程增汇和碳捕集利用与封存技术等相结合,稳定现有碳汇的同时实现新增碳汇的可持续供给是甘肃省碳汇发展的难点和重点。

3.2 对策建议

从碳排放和碳汇的模拟结果来看,甘肃省实现“双碳”目标宜多措并举、统筹兼顾,综合模拟结果和上述讨论内容,建议甘肃省的“双碳”目标实现路径分两阶段稳步进行。第一阶段(当前至2030年)为低碳经济高质量发展阶段,碳排碳汇特征为高排高汇直至碳达峰,这是甘肃省的减排攻坚期。这一阶段应以经济转型、产业调整、能效提高和技术革新为主,加强经济工作战略谋划,引导产业转型和企业用能结构调整,布局清洁能源研发项目。第二阶段(2031—2060年)为零碳绿色发展阶段,碳排碳汇的特征为低排高汇,这是甘肃省实现低碳增汇的关键期,这一阶段应以绿色经济、清洁能源和碳汇技术为主,发展绿色低碳循环经济,打造清洁能源基础设施体系,加大固碳研发投入。

在未来发展中,倡导低碳生活和绿色产品消费。加大公共交通系统建设,鼓励居民低碳出行。推广低能耗、低碳排放建材的使用,加强已有建筑绿色改造,提升建筑低碳运维水平。扩大绿色产品的采购范围,采取补贴等方式促进绿色消费。

加强经济发展战略谋划和产业发展顶层设计,推动经济高质量发展。深入推进供给侧结构性改革,提高资源配置效率,提升经济增长质量。进一步优化产业结构,加快农业绿色发展,布局高耗能产业向清洁能源生产大户区域倾斜,调整高耗能产业的用能模式,推进工业向高端化、绿色化、智能化方向转型,促进物流、金融服务、生态旅游等现代服务业绿色升级。

加大创新投入,低碳、零碳、固碳技术齐驱并进。采取绿色信贷等激励措施,激发企业低碳技术创新动力,实现向前沿性先进产业的转化。加强河西地区、陇东地区等清洁能源基地间的合作,推进零碳技术在能源生产、运输、消费等环节的共通、共建、共享,打造能源经济国家先进示范区。加大固碳技术研发力度,积极布局生物质能碳捕集与封存、直接空气捕集等固碳封存项目建设。

打造清洁能源生产和消费体系。依托资源优势,建立“风、光、水、火、核、生物”“六能融合”的绿色清洁能源体系。提高清洁能源利用和协调控制技术,在河西地区打造高耗能低污染产业集群,建立清洁能源就地消纳示范项目和示范区,向东中部地区高耗能行业提供具有竞争力的清洁能源报价,塑造清洁能源本地消纳和对外输送的双市场布局。

强化国土空间规划与生态修复工程,提高生态碳汇可持续供给水平。开展土壤水分植被承载力约束下的“山水林田湖草沙”国土空间科学规划,充分挖掘生态系统的固碳潜力,实现新增碳汇的可持续供给。提高生态环境治理与修复水平,推进政策落实和成果巩固,筑牢国家西部生态安全屏障。

参考文献:

- [1] 方精云,朱江玲,石岳.生态系统对全球变暖的响应[J].科学通报,2018,63(2):136-140.
- [2] 郑艳.全球应对气候变化灾害风险的进展与对策[J].人民论坛,2022(14):24-27.
- [3] 张伟,张金锁,邹绍辉,等.基于LMDI的陕西省能源消费碳排放因素分解研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(9):26-31.
- [4] 许蕊,黄贤金,王佩玉,等.黄河流域国土空间碳中和度研究:以内蒙古段为例[J].生态学报,2022,42(23):9651-9662.
- [5] 邵帅,杨莉莉,曹建华.工业能源消费碳排放影响因素研究:基于STIRPAT模型的上海分行业动态面板数据实证分析[J].财经研究,2010,36(11):16-27.
- [6] 赵选民,卞腾锐.基于LMDI的能源消费碳排放因素分解:以陕西省为例[J].经济问题,2015(2):35-39.
- [7] 张剑,刘景洋,董莉,等.中国能源消费CO₂排放的影响因素及情景分析[J].环境工程技术学报,2023,13(1):71-78.
- [8] 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.
- [9] 王利兵,张赞.中国能源碳排放因素分解与情景预测[J].电力建设,2021,42(9):1-9.
- [10] 王长建,汪菲,张虹鸥.新疆能源消费碳排放过程及其影响因素:基于扩展的Kaya恒等式[J].生态学报,2016,36(8):2151-2163.
- [11] 王明星.关于温室气体浓度变化及其引起的气候变化的几个问题[J].气候与环境研究,2000(3):329-332.
- [12] 杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.
- [13] 陶波,葛全胜,李克让,等.陆地生态系统碳循环研究进展[J].地理研究,2001(5):564-575.
- [14] 陈雪萍,赵学勇,王瑞雄,等.气候变化与土地利用/覆被变化对中国北方农牧交错带水资源影响研究进展[J].中国沙漠,2022,42(3):170-177.
- [15] 柯新利,唐兰萍.城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响:以湖北省为例[J].生态学报,2019,39(2):672-683.
- [16] 刘孟竹,王彦芳,裴宏伟.退耕还林(草)背景下中国北方农牧交错带土地利用及碳储量变化[J].中国沙漠,2021,41(1):174-182.
- [17] 邓喆,丁文广,蒲晓婷,等.基于InVEST模型的祁连山国家公园碳储量时空分布研究[J].水土保持通报,2022,42(3):324-334.
- [18] 任玺锦,裴婷婷,陈英,等.基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J].生态科学,2021,40(4):66-74.

- [19] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报,2021,41(10):4052-4065.
- [20] Zhou J J, Zhao Y R, Huang P, et al. Impacts of ecological restoration projects on the ecosystem carbon storage of inland river basin in arid area, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 118: 106803.
- [21] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于InVEST和CA-Markov模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(6):1018-1029.
- [22] 刘晓娟,黎夏,梁迅,等.基于FLUS-InVEST模型的中国未来土地利用变化及其对碳储量影响的模拟[J].热带地理,2019,39(3):397-409.
- [23] 宋德勇,卢忠宝.中国碳排放影响因素分解及其周期性波动研究[J].中国人口·资源与环境,2009,19(3):18-24.
- [24] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3):351-365.
- [25] 甘肃省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要[Z]. 甘肃省人民政府,2021.
- [26] 李平,娄峰,王宏伟.2016-2035年中国经济总量及其结构分析预测[J].中国工程科学,2017,19(1):13-20.
- [27] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 168:94-116.
- [28] 张捷,石柳,赵秀娟.广东省终端能源消费碳排放增长的驱动因素[J].技术经济,2014,33(5):64-71.
- [29] 牛君,程智超.基于STIRPAT模型的甘肃省碳达峰预测[J].开发研究,2022(4):123-132.
- [30] 王星,刘高理.甘肃省人口规模、结构对碳排放影响的实证分析:基于扩展的STIRPAT模型[J].兰州大学学报(社会科学版),2014,42(1):127-132.

Scenario simulation and countermeasure suggestions for achieving the "carbon peaking and carbon neutrality goals" in Gansu province

Ma Nan^{1a}, Deng Xiaohong^{1abc}, Li Zongxing^{2ab}, Ma Zhenbang^{1a}, Yan Shulin^{1a}, Pei Huijuan^{2c}

(1. a. School of Economics / b. Institute of County Economic Development / c. Institute of Rural Revitalization Strategy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. a. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin / b. Gansu Qilian Mountains Ecology Research Center / c. Information Center, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The work of accounting of carbon emissions and sinks, along with impact factor analysis and future projection, is of great importance for regions to adapt to climate change and achieve carbon peak and carbon neutrality targets. This study first quantitatively analyzed and simulated the current characteristics and future scenarios of carbon emissions and carbon sinks in Gansu province based on the LMDI model, STIRPAT model, and FLUS-InVEST model. Then qualitatively discussed the possible challenges and opportunities in the process of reducing emissions and increasing sinks in Gansu province, and finally proposed a pathway and specific countermeasure suggestions for Gansu province to achieve its carbon peak and carbon neutral targets. The results show that: (1) Gansu province's carbon emissions are on the rise, and secondary industries are the major contributors to carbon emissions. (2) Economic output is the dominant factor in the growth of carbon emissions in Gansu province. (3) Under the full optimization scenario, Gansu province's carbon emissions peak in 2030 as scheduled, and the emission reduction effect is the most satisfactory. (4) Gansu Province has a significant gap in newly added carbon sinks in the short term, making it difficult to offset all carbon emissions. It is recommended that Gansu province's pathway to achieve its carbon peak and carbon neutral targets be carried out in two stages, with multiple measures to reduce carbon emissions and increase carbon sinks and optimize economic development, industry structure and energy consumption.

Key words: carbon neutrality; carbon reduction; LMDI; STIRPAT; Gansu province