

西北地区能源生产消费特征与发展路径研究

孙勇凯¹, 罗西^{2,3}, 王登甲^{2,3}, 刘艳峰^{2,3}, 刘加平^{2,4}

(1. 西安建筑科技大学管理学院, 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 西安 710055; 3. 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 西安 710055; 4. 西安建筑科技大学建筑学院, 西安 710055)

摘要: 西北地区能源资源丰富, 但存在着能源效率低下、能源结构失配等严峻问题; 评估能源发展水平并针对性地设计能源发展路径, 对保障西北地区能源安全、提升发展质量具有重要价值。本文从西北地区发展实际出发, 深入剖析了区域的能源生产消费水平特征, 明晰了能源发展面临的突出问题; 综合采用灰色预测方法、多元回归方法预测了2023—2030年的能源发展水平, 据此完成了西北地区能源发展路径设计。研究表明, 近年来西北地区的能源结构不断优化, 可再生能源生产消费水平持续上升, 但生产消费比例仍然远低于传统能源, 经济、产业、技术问题对能源发展的影响不容忽视。为此建议, 以传统能源与新能源相互融合为发展方向, 采取持续推进供给革命、消费革命、技术革命、体制革命、交流合作等发展途径, 按照多主体协同方式, 实施总体能源发展的行动方案, 通过能源转型实现西北地区绿色更新发展。

关键词: 西北地区; 能源规划; 能源生产消费; 可再生能源; 绿色更新发展

中图分类号: F206 **文献标识码:** A

Energy Production and Consumption Characteristics and Energy Development Path in Northwest China

Sun Yongkai¹, Luo Xi^{2,3}, Wang Dengjia^{2,3}, Liu Yanfeng^{2,3}, Liu Jiaping^{2,4}

(1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China; 3. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Northwest China is rich in energy resources. However, problems such as low energy efficiency and energy structure mismatch remain. Assessing the energy development level and designing energy development paths are crucial for ensuring energy security and promoting energy development quality in Northwest China. This study analyzed the characteristics of energy production and consumption in Northwest China and clarified the prominent problems in energy development. The gray forecasting and multiple regression methods were used to forecast the energy development level from 2023 to 2030, and the energy development path in Northwest China was designed accordingly. Our results show that in Northwest China, the energy structure has been continuously optimized in recent years, and the production and consumption of renewable energies continued to rise; however, the production and consumption of renewable energies was still far lower than that of traditional energies. In addition, the impact of economic, industrial,

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-09

通讯作者: 罗西, 西部绿色建筑国家重点实验室副教授, 研究方向为区域综合能源系统规划; E-mail: xiluo@xauat.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“西部‘一带一路’沿线城镇绿色更新发展战略研究”(2022-XZ-38); 国家自然科学基金项目(52008328)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

and technological issues on energy development is significant. To promote the green renewal and development through energy transition, this study proposed to focus on the integration of traditional and new energies, adopt development methods such as supply revolution, consumption revolution, technological revolution, institutional revolution, exchange and cooperation, and implement an energy development action plan using a multi-subject collaborative approach.

Keywords: Northwest China; energy planning; energy production and consumption; renewable energy; green renewal and development

一、前言

构建清洁低碳、安全高效的能源体系是保障国家能源安全和能源发展质量的重要目标 [1]。西北地区包括陕西、甘肃、青海、新疆、宁夏 5 个省份，是我国重要的能源基地，承担着能源供应重任。西北地区能源资源富集，但仍存在能源利用效率低下、结构不合理等问题，在一定程度上制约了区域能源发展。“一带一路”倡议深化了区域间的能源合作，给西北地区能源发展带来了重要机遇 [2]。结合自身能源发展条件，制定新时期的能源发展路径，是实现西北地区能源高质量发展的关键所在。

明晰能源生产消费特征，认清能源发展中存在的问题，是科学制定能源发展路径的基础和前提。已有较多研究探讨了我国能源生产消费总体特征及演变趋势，提出了碳中和目标下能源转型路径 [3~5]；部分研究专门针对西北地区能源发展特征展开 [6]，得出了可再生能源发展潜力大、能源转型任务艰巨的结论，提出了以多能融合发展来实现西北地区能源革命的能源发展路径 [7,8]；还有研究针对西北地区的单一省份开展分析，如剖析新疆的能源生产消费特征并形成能源发展建议 [9]。也要注意，由于自然资源禀赋、社会发展水平存在差异，西北地区各省份的能源生产消费特征具有显著的差异性；在能源资源特点分析的基础上，因地制宜设计能源发展路径是保证西北地区能源转型顺利推进的必要

条件，相关研究也待深化和细化。

本研究采用西北地区五省份统计局发布的 2012—2021 年历年统计年鉴中的能源生产与消费数据，梳理西北地区能源生产消费特征；基于 2011—2020 年能源生产消费的历史数据，建立多情境下能源生产消费预测模型，进而对面向 2030 年的能源发展趋势进行预测；根据预测结果，设计能源发展路径，以期为西北地区能源高质量发展提供参考。

二、西北地区能源资源储量及开发现状

(一) 能源资源储量

西北地区各类型能源资源储量情况如表 1 和图 1 所示。可以看出，西北地区各类能源资源极为丰富，煤炭储量占全国总探明储量的 33.07%，其中陕西、新疆的煤炭储量分别占据全国总探明储量的 18.11%、11.72%；石油储量占全国总探明储量的 41.97%，其中新疆、甘肃和陕西的石油储量分别占全国总探明储量的 17.3%、10.93%、10.17%；天然气储量位居全国前列，仅陕西和新疆的天然气储量之和就达到了全国总探明储量的 35.64%；太阳能可开发利用量占据全国总量的 35.51%，其中新疆、青海所占比例分别达到 18.92%、9.07%；风能资源位居全国前列，新疆和青海的风能可开发利用量之和达到全国总量的 22.29%。由于五省份地处 400 mm 年等降水量线之外，水能可开发利用量仅占全国总量的 8.38%，水资源整体较为匮乏。但由于新疆有

表 1 全国及西北地区五省份不同类型能源资源储量情况 [10~12]

地区	探明储量			可开发利用量		
	煤炭/ $\times 10^9$ t	石油/ $\times 10^8$ t	天然气/ $\times 10^{10}$ m ³	太阳能/(kW·h·m ⁻²)	风能/(W·m ⁻²)	水能/ $\times 10^9$ m ³
全国	162.29	36.19	626.66	1493.40	221.20	3160.52
陕西	29.39	3.68	110.96	1321.47	135.51	41.96
甘肃	1.53	3.96	5.88	1636.62	197.95	40.80
新疆	19.01	6.26	112.38	1626.30	201.33	80.10
青海	0.23	0.83	10.55	1798.11	191.49	101.19
宁夏	3.50	0.47	2.81	1617.78	199.94	1.10

注：太阳能可开发利用量为 2021 年数据，其余能源的储量为 2020 年数据。

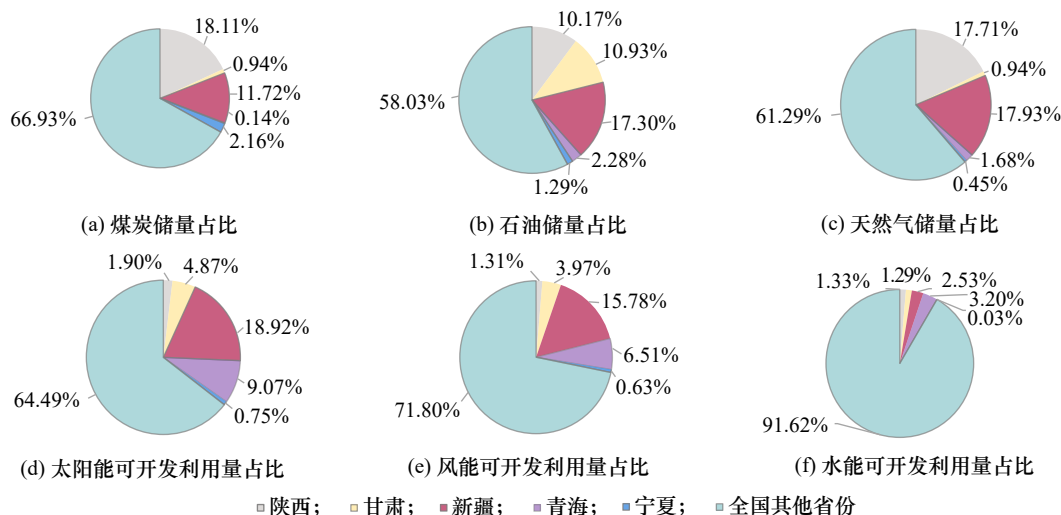


图1 西北地区五省份能源储量情况的全国占比 (2020年)

天山的高山积雪，形成了季节性水能资源，且澜沧江发源于青海省，河道天然落差1553 m，理论蕴藏有785.50 MW的水能资源 [13]，因此，新疆和青海两省的水能资源相对较为丰富。

(二) 能源资源开发

发挥区域能源资源优势，合理开发利用能源资源，是满足经济和社会发展对能源需求的重要保障。图2展示了西北地区五省份2020年各类型可再生能源发电装机容量占全国总量的比例情况。可以看出，虽然西北地区可再生能源资源丰富，但能源开发利用仍有待提升。具体来看，新疆和青海的太阳能资源丰富，尤其是新疆地区的太阳能可开发利用量达到全国总量的18.92%，但新疆和青海的太阳能发电装机容量占全国总量的比例分别仅为4.99%、6.31%。新疆和青海的风能可开发利用量分别占全国总量的15.78%、6.51%，但风电装机容量占全国总量的比例分别仅为8.38%、2.99%。与太阳能和风能资源相比，各省份水电装机容量全国占比相对较低，均在4%以下。

三、西北地区能源生产消费特征

(一) 能源生产

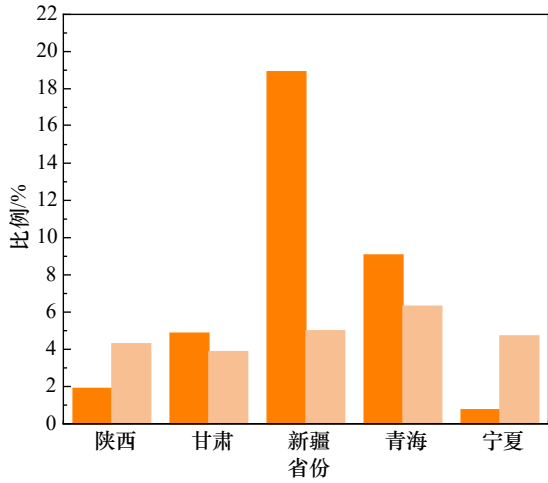
西北地区能源生产类型以原煤为主，原油和天然气产量次之，可再生能源虽然资源丰富，但产量仍然最少。2011—2020年，原煤产量稳中有升，原油和

天然气产量平稳发展，可再生能源产量逐年递增。在能源生产总量上，西北地区2020年较2011年的增长约为 3.940×10^8 tce，年均增长率为5.37%。与2011年相比，西北地区2020年可再生能源发电量增长约为 6.843×10^7 tce，年均增长率为13.93% (见图3)。

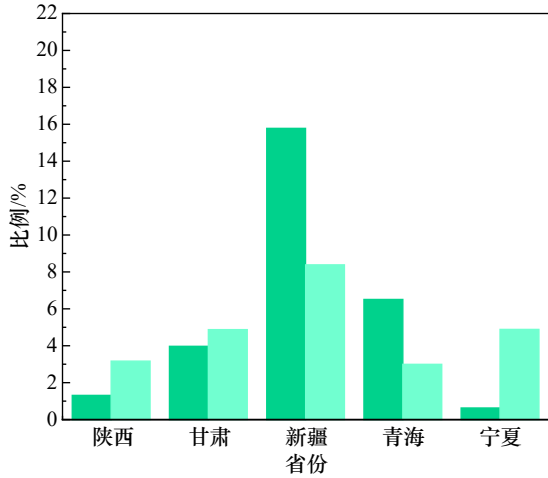
西北地区不同省份在能源生产总量方面具有一定的差异性。其中，陕西的能源总产量最大，2020年为 5.917×10^8 tce；宁夏的能源总产量最小，2020年的能源产量为 6.352×10^7 tce。不同省份的能源生产结构也具有明显差异，如陕西、新疆、宁夏的原煤生产量远超其他类型能源，而甘肃、青海的可再生能源生产比例高于其他类型能源。图4展示了2020年西北地区五省份的能源生产情况。可以看出，陕西和新疆作为传统的能源生产大省，2020年的煤炭产量分别为 4.77×10^8 tce、 1.79×10^8 tce，煤炭产量远超其他省份。甘肃、新疆、青海可再生能源发展较为迅速，2020年的可再生能源发电量已分别达到 2.662×10^7 tce、 2.585×10^7 tce、 2.639×10^7 tce，是陕西、宁夏两省份可再生能源发电量的2倍以上。

(二) 能源消费

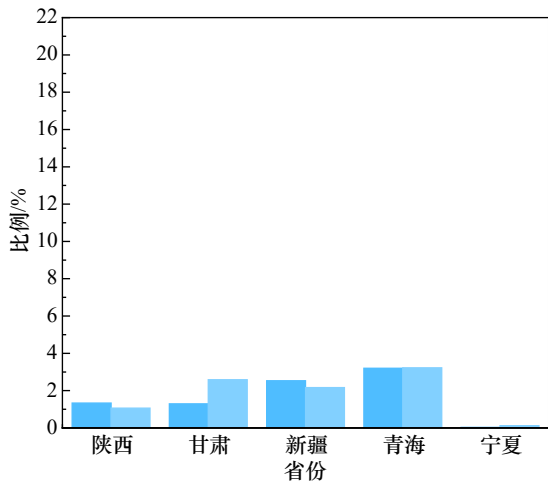
2011—2020年，西北地区能源消费量逐年递增，2020年较2011年的能源消费量增长约为 2.031×10^8 tce，年均增长率为5.61%。目前，西北地区能源消费类型仍以煤炭为主，石油、天然气、可再生能源消费比例较小，但可再生能源消费量却在持续上涨。2015年后，西北地区可再生能源发电的



可开发利用量全国占比;
发电装机容量全国占比
(a) 太阳能



可开发利用量全国占比;
风电装机容量全国占比
(b) 风能



可开发利用量全国占比;
水电装机容量全国占比
(c) 水能

图2 西北五省份2020年不同类型能源可开发利用量与能源发电装机容量的全国占比情况 [14]

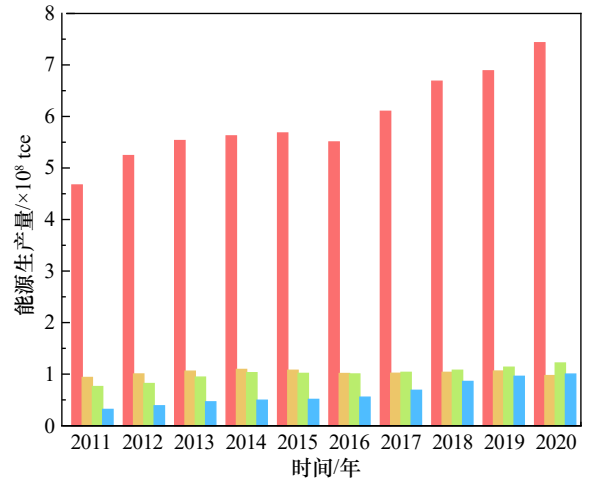


图3 2011—2020年西北地区能源总生产量变化情况
注：“一次电力”指太阳能、风能、水能等可再生能源发电。

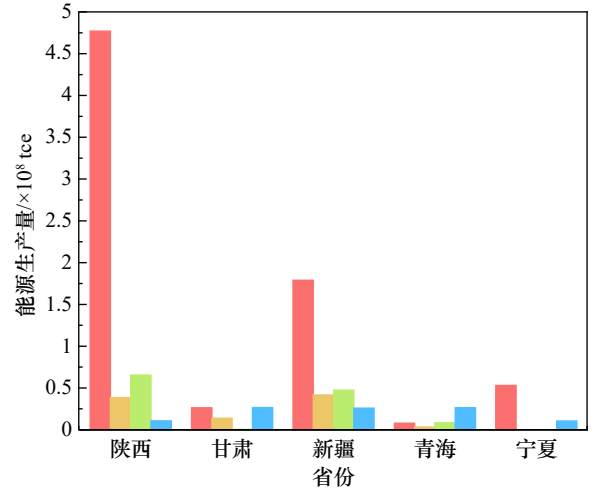


图4 2020年西北地区五省份的能源生产量情况

消费量已超过石油、天然气消费量，仅次于煤炭消费量。与2011年相比，2020年西北地区的煤炭消费量增长约为 1.364×10^8 tce，年均增长率为5.65%，可再生能源发电的消费量增长约为 5.214×10^7 tce，年均增长率达到11.20%（见图5）。

西北地区不同省份在能源消费总量方面差异显著。其中，陕西、新疆的能源消费量远超其他省份，青海的能源消费量最小。不同省份在能源消费结构方面同样具有明显差异，如陕西、甘肃、新疆、宁夏的煤炭消费量远超其他类型能源，而青海的可再生能源消费量高于其他类型能源。图6展示了2020年西北地区五省份的能源消费情况。可以看

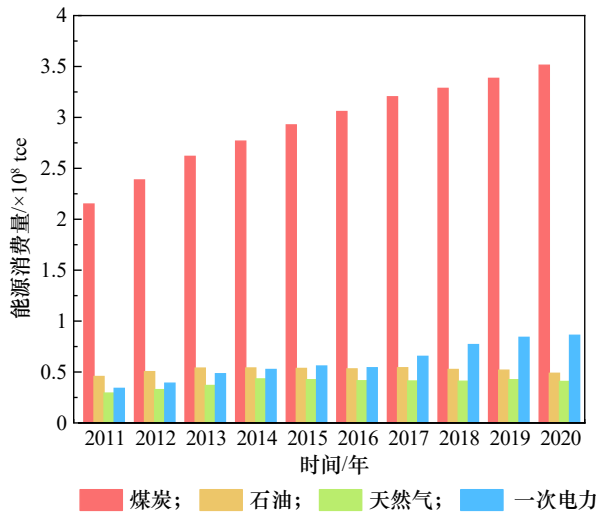


图5 西北地区能源总消费量变化趋势 (2011—2020年)

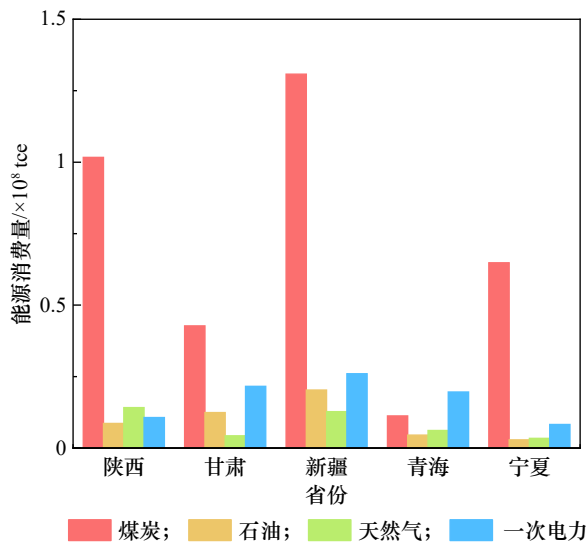


图6 西北地区五省份能源消费量 (2020年)

出，陕西、甘肃、新疆、宁夏的传统能源消费量较高，其中陕西和新疆2020年的煤炭消费量均在 1×10^8 tce以上，而青海煤炭消费量则最小，仅为 1.123×10^7 tce。甘肃、新疆、青海的可再生能源电力消费量远超其他省份。

(三) 能源平衡

能源生产和消费结构是衡量能源发展质量的重要指标。本研究从时间和空间角度对西北地区的能源结构情况进行分析。图7展示了2011—2020年西北地区能源生产和消费结构的变化情况。可以看出，西北地区的能源生产结构与消费结构一直持续

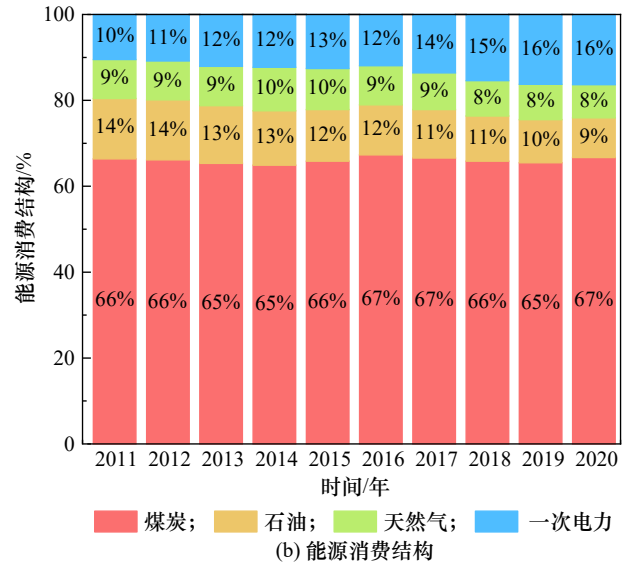
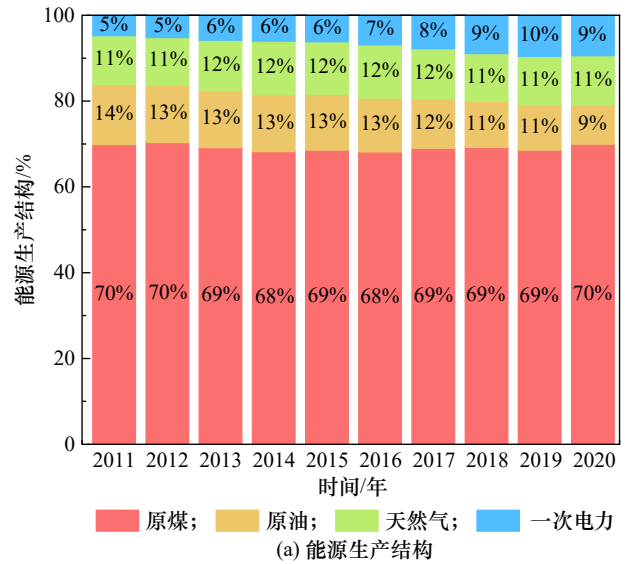


图7 西北地区能源结构的变化趋势

优化，可再生能源发电的生产与消费占比不断提升。2011—2020年，可再生能源发电的生产占比已从5%上升到9%，消费占比从10%上升到16%。但目前，西北地区能源生产与消费仍以煤炭为主，煤炭生产与消费占能源生产总量与消费总量的比例均在65%以上，而可再生能源发电的生产和消费则占比较小，发展潜力有待进一步挖掘。

西北地区不同省份在能源生产消费结构方面具有显著差异（见图8）。其中，陕西、新疆、宁夏的原煤生产占比与消费占比远超其他类型能源，甘肃和青海可再生能源发电的生产占比高于其他类型能源，青海可再生能源发电的消费占比高于其他类型能源。与全国整体水平相比，陕西、新疆、宁夏

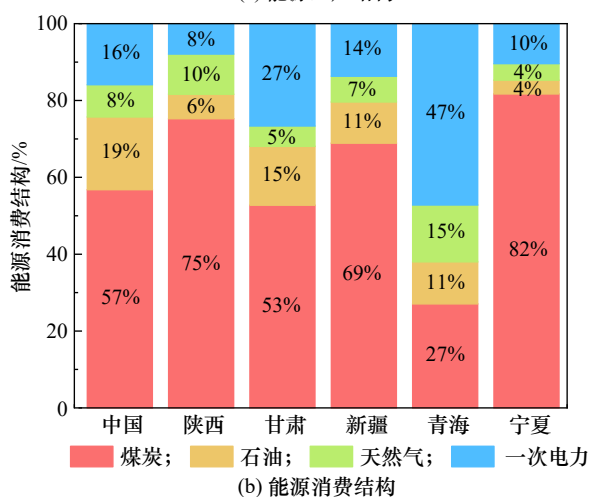
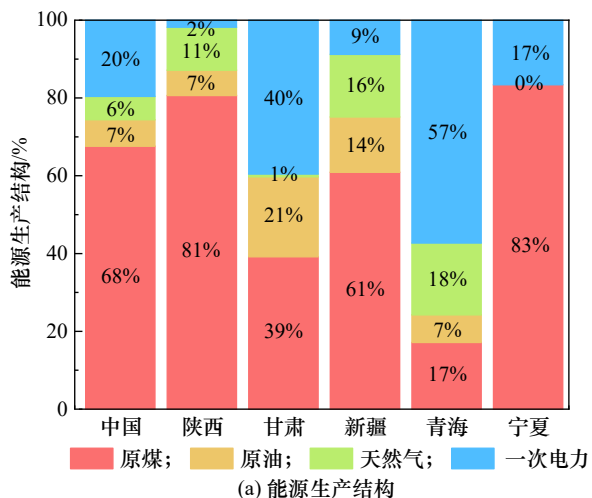
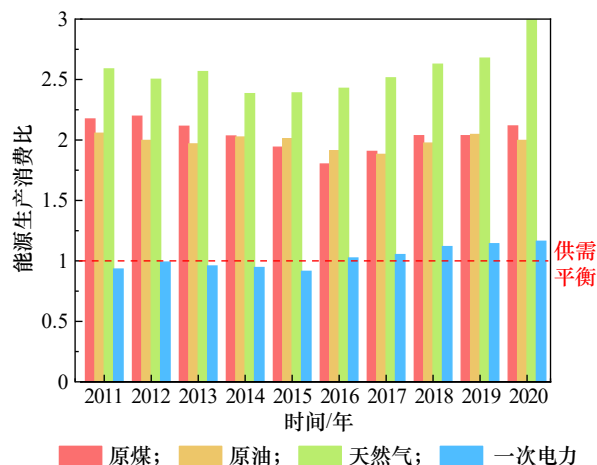


图8 全国及西北地区五省份的能源结构 (2020年) [15]

能源生产与消费结构有待优化, 可再生能源生产与消费比例仍需提升。

能源供需平衡深刻影响着能源市场变化和能源的安全保供。图9展示了西北地区2011—2020年的能源供需比的变化情况。可以看出, 西北地区能源发展在整体上呈现出供大于需的特点, 承担了北煤南运、西电东送、西气东输等国家能源保供重任。其中, 天然气供需差异最大, 供给量约为需求量的2.5倍。自2016年起, 可再生能源发电供应也逐渐大于需求, 优质能源外送到我国其他地区, 为我国可再生能源发展贡献了巨大力量。

图10展示了2020年西北地区五省份与全国其他省份 (不含香港、澳门、台湾地区) 能源供需比的对比结果。可以看出, 陕西与新疆为煤炭外送地区, 两省的原煤供需比高于全国平均水平, 其中陕西原煤供需比位居全国第一。陕西、甘肃、新疆为

图9 西北地区的能源供需比变化情况 (2011—2020年)
注: 能源生产消费比即为能源年生产量与能源年消费量的比值。

石油外送地区, 三省的原油供需比分别位居全国第一、第四和第三。陕西、新疆、青海为天然气外送省份, 三省的天然气供需比分别位居全国第一、第二和第四。陕西、甘肃、新疆、青海和宁夏五省均为可再生能源外送省份, 为我国其他地区源源不断地输送清洁能源。

四、面向2030年的西北地区能源生产消费预测

分别利用灰色预测方法、多元回归方法, 对西北地区的能源生产消费的多情境进行预测。其中, 基于灰色预测方法的能源发展预测是从能源生产消费的历史数据中挖掘规律以预测能源走势, 基于多元回归方法的能源发展预测则是在考虑经济、产业、技术等多重因素的综合影响下预测能源发展。将灰色预测方法预测结果与多元回归方法预测结果进行对比分析, 既可评估外部环境变化对能源发展速度的影响程度, 也能发现能源发展的阻碍和促进因素, 有助于科学决策。

(一) 灰色预测方法

基于2011—2020年西北地区五省份的能源生产量和消费量数据, 建立GM(1,1)灰色预测模型[16], 对2023—2030年五省份的能源生产和消费情况分别进行预测。灰色预测模型的构建流程如图11所示。将2011—2020年西北地区各省份的能源生产/消费的预测值和真实值代入公式(1)进行

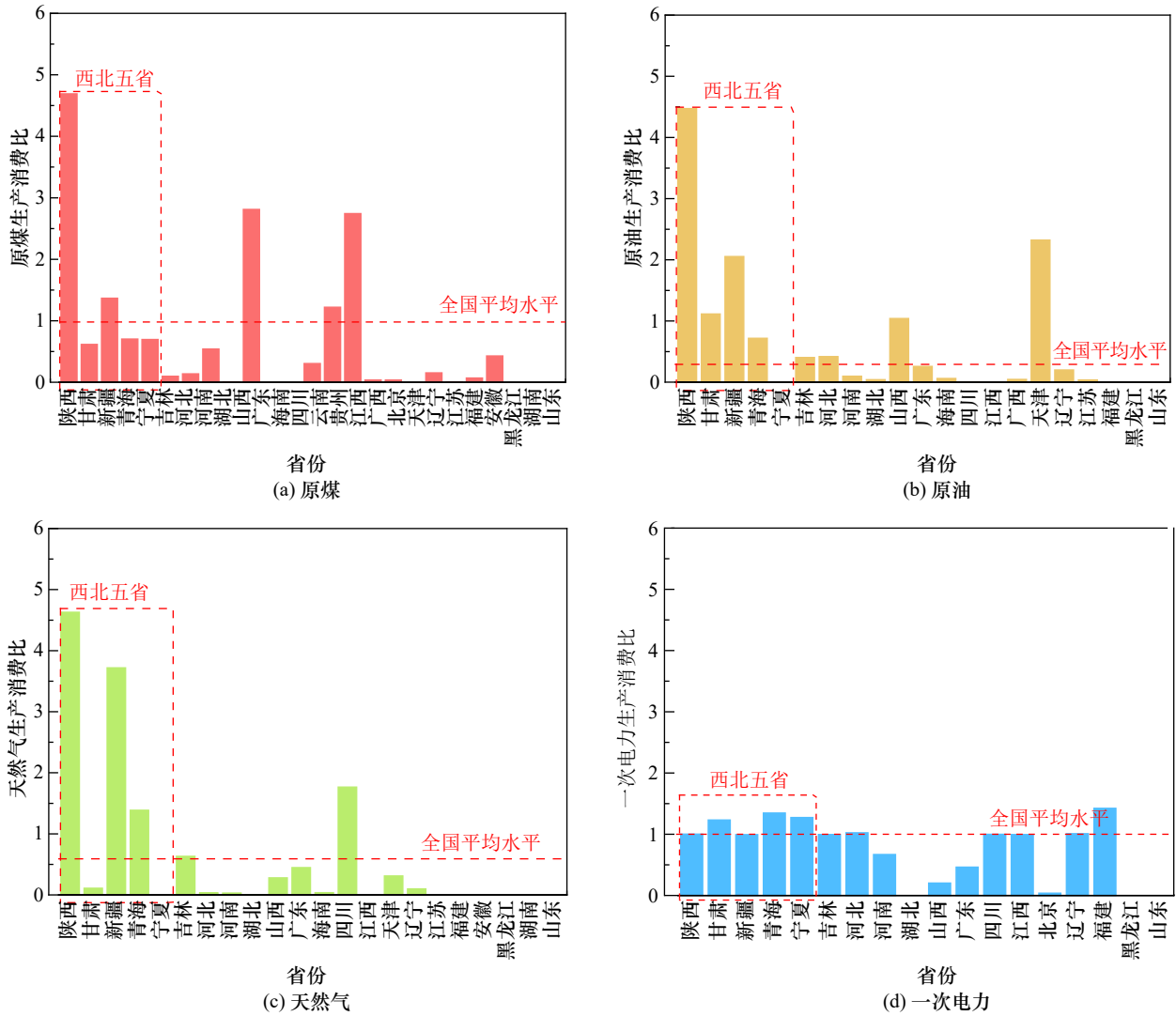


图10 各省份不同类型能源供需比情况(2020年)

注：图中未出现的省份因数据缺失未列出。

平均相对误差检验，可得检验结果均在合理的误差范围内（模型平均相对误差小于0.2）。因此，本研究建立的灰色预测模型可用于能源生产量和消费量的预测，最终的预测结果如图12所示。

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{a(t) - f(t)}{a(t)} \right| \quad (1)$$

式(1)中， Δ 为模型的平均相对误差； n 为预测值的个数； $a(t)$ 为真实值； $f(t)$ 为预测值。

经测算可以看出，到2030年年底，西北地区能源生产总量和消费总量分别达到 1.744×10^9 tce、 8.867×10^8 tce。2023—2030年，西北地区五省份的能源生产量与消费量仍呈逐年递增趋势，其中陕西和新疆的能源生产量与消费量增速较快。各省份的

能源生产与消费结构也将持续改善，尽管生产与消费类型仍以煤炭为主，但可再生能源发电生产与消费比例不断增加。到2030年年底，可再生能源将成为甘肃、青海和宁夏的能源生产主导。

(二) 多元回归方法

多元线性回归方法用于预测能源生产消费量的计算公式如下：

$$Y_{i,t} = \alpha_{i,t} + \sum_{l=1}^L \beta_l x_{l,i,t} + \varepsilon_{i,t} \quad (2)$$

式(2)中， Y 为能源生产量或消费量， i 为省份， t 为年份； $\alpha_{i,t}$ 为个体异质性； L 为影响的因素个数； β 为回归系数； x 为经济、产业、技术等因素取值； ε 为随机扰动项。

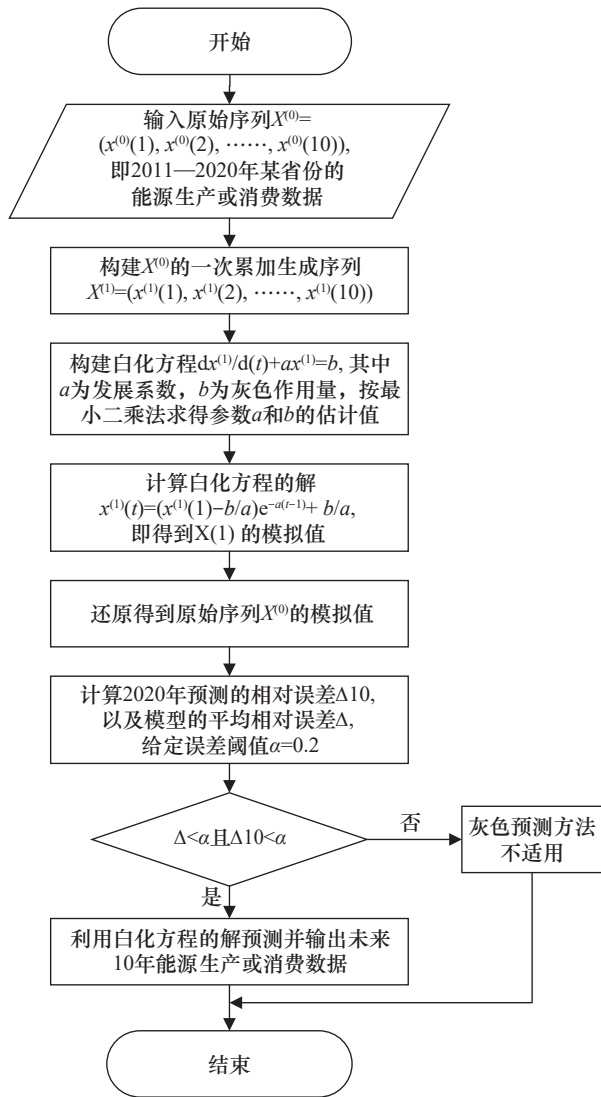


图11 灰色预测流程图

1. 能源生产消费与影响因素的量化关系

厘清能源生产消费量与其影响因素的关系，是某一地区在能源经济、产业、技术等社会发展因素约束下，对未来能源生产消费情况进行预测的基础。本研究利用多元回归方法，挖掘西北地区能源生产消费的关键影响因素，并在此基础上建立能源生产量和消费量与其关键影响因素的定量关系，进而根据两者的定量关系式并结合影响因素预测值得到未来的能源生产与消费情况。

根据国内外已有的研究成果，能源生产消费受到当地经济 [17,18]、人口 [19]、产业 [20,21]、技术 [22]、政策 [23,24] 因素的共同影响。借鉴能源经济领域的可拓展的随机性的环境影响评估模型

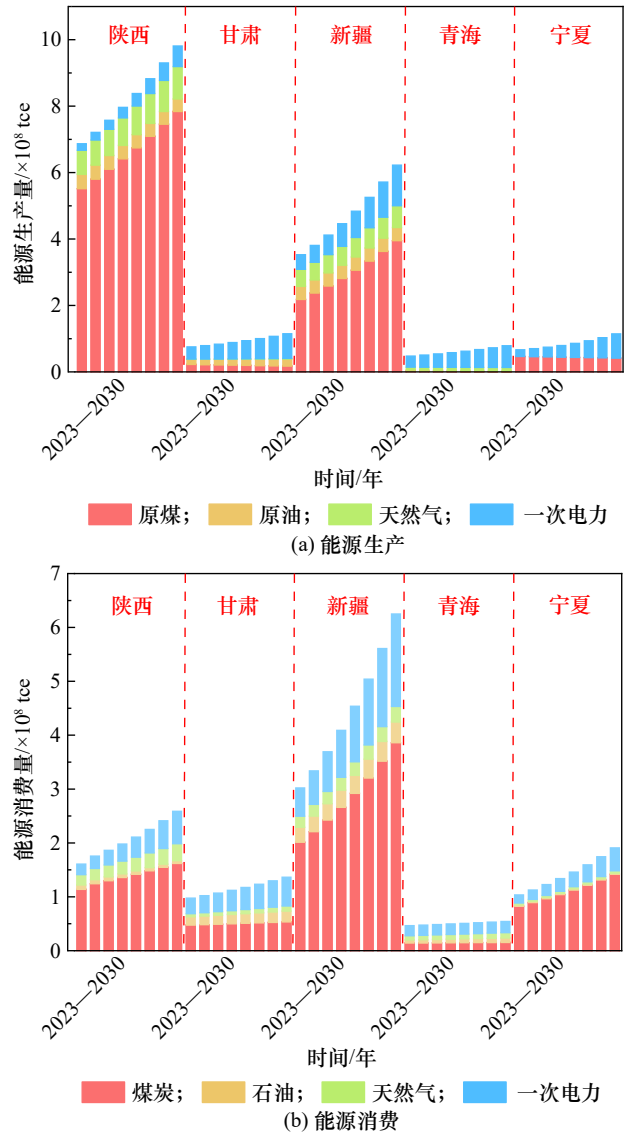


图12 基于灰色预测方法的西北地区五省能源生产消费情况预测

(STIRPAT) [25]，本文选取政策效应、经济水平、产业结构、城市规模、能源行业从业人数、技术水平、能源价格指数、居民消费价格指数、固定资产投资作为解释变量，分别建立了能源生产量回归模型和能源消费量回归模型。对西北地区而言，2015年，国家发布的《推动共建丝绸之路经济带和21世纪海上丝绸之路的愿景与行动》对该区域的能源生产与消费至关重要。为分析“一带一路”建设对西北地区能源发展的影响，本研究将2015年之前的政策效应变量取值为0，2015年之后取值为1 [26]。

本研究综合使用全国及各省份（不含香港、澳门、台湾地区）的统计年鉴数据，选取2011—2020年

的面板数据进行分析。具体变量界定和描述性统计情况见表2。

对上文所选取的面板数据进行豪斯曼检验，得出的西北地区能源生产量和消费量模型检验结果分别为33.88 ($p=0.000$)和33.50 ($p=0.000$)，故应建立固定效应回归模型。为避免自相关、异方差和截面相关问题导致的结果不准确问题，本研究利用全面可行广义最小二乘法进行估计 [26]，并利用Stata/SE 14.0对样本数据进行分析。

表3展示了能源生产量回归模型（模型1）和能源消费量回归模型（模型2）的预测结果。从表中分别可得到年度能源生产消费量与其影响因素的定量关系为：

$$\ln P_{i,t} = -0.554E_{i,t} + 1.748\ln G_{i,t} - 0.487\ln S_{i,t} + 0.174\ln J_{i,t} - 0.286\ln T_{i,t} - 0.001F_{i,t} + 0.011R_{i,t} + 0.106\ln A_{i,t} - 3.115$$

$$\ln C_{i,t} = 0.081E_{i,t} + 0.830\ln G_{i,t} - 0.008I_{i,t} - 0.082\ln S_{i,t} + 0.066\ln J_{i,t} - 0.264\ln T_{i,t} - 0.001F_{i,t} + 0.019R_{i,t} + 0.158\ln A_{i,t} + 0.012$$

其中*i*为省份，*t*为年份。

2. 基于影响因素的能源生产消费预测

将能源生产消费量影响因素的预测值代入年度能源生产消费量与其影响因素的关系式，得到预测结果如图13所示。可以看出，2023—2030年，西北地区五省份的能源生产与消费量将逐年递增，其中，陕西和新疆的能源生产与消费量增长速度较快。陕西和新疆的能源生产与消费量仍远超其他地区，且呈现出差距逐渐增大的趋势。

对比图12和图13可以发现，两种方法获得的预测结果相近，但在多元回归方法得到的结果中，

2030年年底可实现的能源生产消费量略小，其根本原因在于西北地区各省份经济、产业、技术等发展速度略低于能源发展速度。具体来说，西北地区各省份的产业技术基础相对薄弱，尽管“一带一路”能源合作促进了当地的经济社会发展，但经济、产业、技术问题仍将在一定程度上影响西北地区的能源发展速度。

需要说明的是，本研究基于2011—2020年西北地区的能源发展及其影响因素的历史数据建立预测模型，而并未考虑2020年后的政策环境变化，预测结果存在一定误差。但可预计在“双碳”政策的影响下，西北地区能源供应能力将快速提升，能源消费稳定发展，能源结构得到更快优化，可再生能源持续加速发展。

（三）两种预测方法的精度比较

为比较灰色预测方法和回归预测方法的预测结果准确度，本研究利用公式（3）分别计算了西北地区五省份能源生产量和消费量预测模型的平均相对精度，结果如表4所示。

$$A = 1 - \Delta \tag{3}$$

式（3）中，*A*为模型的平均相对精度； Δ 为模型的平均相对误差。

由表4可看出，两种预测方法的平均相对精度均在0.8及以上，均为有效的预测模型 [16]，其中灰色预测模型比多元回归预测模型的平均相对精度更高。但是，灰色预测模型主要适用于短期预测，随着预测时间跨度增加，其预测结果准确度将会降低 [27]。

表2 变量界定与描述性统计

变量类型	变量名称	定义	符号	均值				
				陕西	甘肃	新疆	青海	宁夏
被解释变量	能源生产总量	能源生产总量的对数 (tce)	lnP	10.79	8.67	9.96	8.29	8.66
	能源消费总量	能源消费总量的对数 (tce)	lnC	9.36	8.91	9.62	8.28	8.65
	政策效应	虚拟变量 (0, 1), 2015年前取值为0, 2015年及之后取值为1	E	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
	经济水平	地区生产总值的对数 (亿元)	lnG	9.86	8.85	9.20	7.68	7.93
	产业结构	第二产业与第三产业的比值	I	1.29	0.83	1.09	0.88	0.93
解释变量	城市规模	年末常住人口的对数 (万人)	lnS	8.26	7.87	7.78	6.38	6.53
	能源行业从业人数	电力、热力、燃气及水生产和供应业人数的对数 (万人)	lnJ	2.60	2.33	2.22	0.81	1.64
	技术水平	企事业单位的研究与开发经费内部支出的对数 (亿元)	lnT	6.02	4.39	3.94	2.73	3.40
	能源价格指数	燃料、动力类购进价格指数	F	100.38	99.55	100.65	100.00	100.33
	居民消费水平	居民消费价格指数	R	102.45	102.45	102.53	102.08	102.37
	固定资产投资	固定资产投资额的对数 (亿元)	lnA	9.87	8.77	9.06	8.01	7.96

表3 能源生产量和消费量模型的预测结果

变量	模型1	模型2
	能源生产量 回归模型	能源消费量 回归模型
E	-0.554*** (0.026)	0.081*** (0.000)
$\ln G$	1.748*** (0.024)	0.830*** (0.002)
I	-0.002 (0.006)	-0.008*** (0.000)
$\ln S$	-0.487*** (0.054)	-0.082*** (0.010)
$\ln J$	0.174*** (0.009)	0.066*** (0.001)
$\ln T$	-0.286*** (0.015)	-0.264*** (0.001)
F	-0.001*** (0.000)	-0.001*** (0.000)
R	0.011*** (0.002)	0.019*** (0.000)
$\ln A$	0.106*** (0.007)	0.158*** (0.001)
常数项	-3.115*** (0.091)	0.012 (0.078)
模型平均相对误差	0.190	0.160

注: ***表示在1%水平下显著; 括号外为回归系数, 括号内为标准误差。

五、西北地区未来能源发展路径设计

基于西北地区各省份能源生产与消费特征及预测结果, 结合国家及各省“十四五”发展规划, 本研究遵循“发展方向-发展途径-行动方案”的思路设计了西北地区的能源发展路径(见图14), 并对比分析了西北地区五省份未来能源发展的差异(见表5)。

(一) 发展方向

西北地区能源发展的整体思路是以资源禀赋为基础, 遵循“因地制宜、协调发展”的基本原则, 加快建立完善的现代能源体系。西北地区能源整体发展方向为多种能源融合发展。其中, 陕西和新疆采用低碳化、多能融合发展模式, 清洁高效利用传统能源, 推进煤炭由燃料向原料转化, 推动清洁能源多能互补应用, 并逐步实现各领域可再生能源替代化石能源应用; 甘肃、青海、宁夏采用可再生能源重点发展模式, 高比例开发利用可再生能源, 实现风电和光伏发电的基地化开发, 同时推动可再生能源大规模外送, 尤其是青海地区, 应朝着打造国家清洁能源产业高地目标迈进。在区域能源协调发展中, 西北地区五省份应不断深化能源合作, 畅通能源市场循环、能源产业循环、经济社会循环; 陕西重点承担传统能源保供重

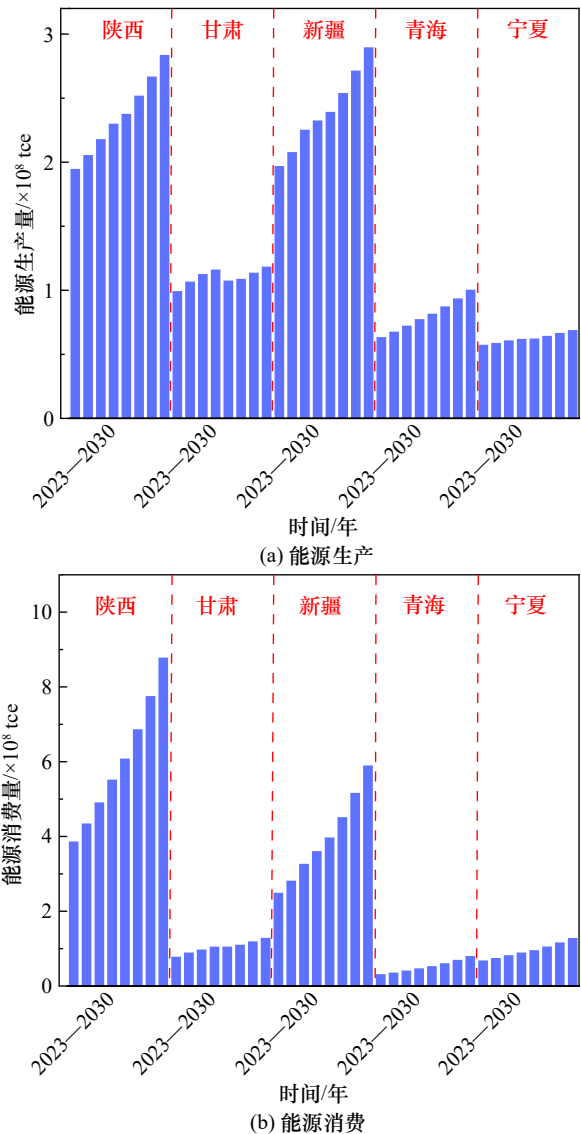


图13 基于多元回归方法的西北五省份能源生产消费情况预测

任, 新疆重点承担传统能源与可再生能源保供重任, 甘肃、青海、宁夏重点承担可再生能源保供重任。同时, 西北地区五省份应各司其职保障国家能源安全, 其中新疆应发挥“一带一路”核心区作用, 建设外引内联的能源互联互通大通道, 建立区域能源交易中心, 建立区域性能源工程与技术服务中心; 陕西重点打造“西电东送”枢纽, 保障华北地区电力安全; 宁夏重点打造“西电东送”网架枢纽、“西气东输”输配枢纽、区域煤炭储运枢纽; 甘肃重点打造油、气、煤、电跨区能源输送通道及能源中转枢纽; 青海重点打造海南、海西清洁能源电力枢纽, 向我国其他省份源源不断输送高质量能源。

表4 模型的平均相对精度

省份	能源类型	灰色预测方法的精度		多元回归方法的精度	
		能源生产量模型	能源消费量模型	能源生产量模型	能源消费量模型
陕西	煤炭	0.98	0.99		
	石油	0.95	0.94		
	天然气	0.96	0.94		
	一次电力	0.94	0.93		
甘肃	煤炭	0.96	0.98		
	石油	0.97	0.98		
	天然气	0.80	0.99		
	一次电力	0.95	0.96		
新疆	煤炭	0.95	0.97		
	石油	0.97	0.96		
	天然气	0.97	0.91	0.81	0.84
	一次电力	0.92	0.93		
青海	煤炭	0.80	0.89		
	石油	0.96	0.95		
	天然气	0.96	0.95		
	一次电力	0.86	0.90		
宁夏	煤炭	0.96	0.97		
	石油	/	0.93		
	天然气	/	0.93		
	一次电力	0.90	0.88		

注：“/”表示未计算模型精度。由于自2017年之后，宁夏的原油和天然气生产量均为0，因而认为2023—2030年该数据仍为0，并未建立模型对其预测。

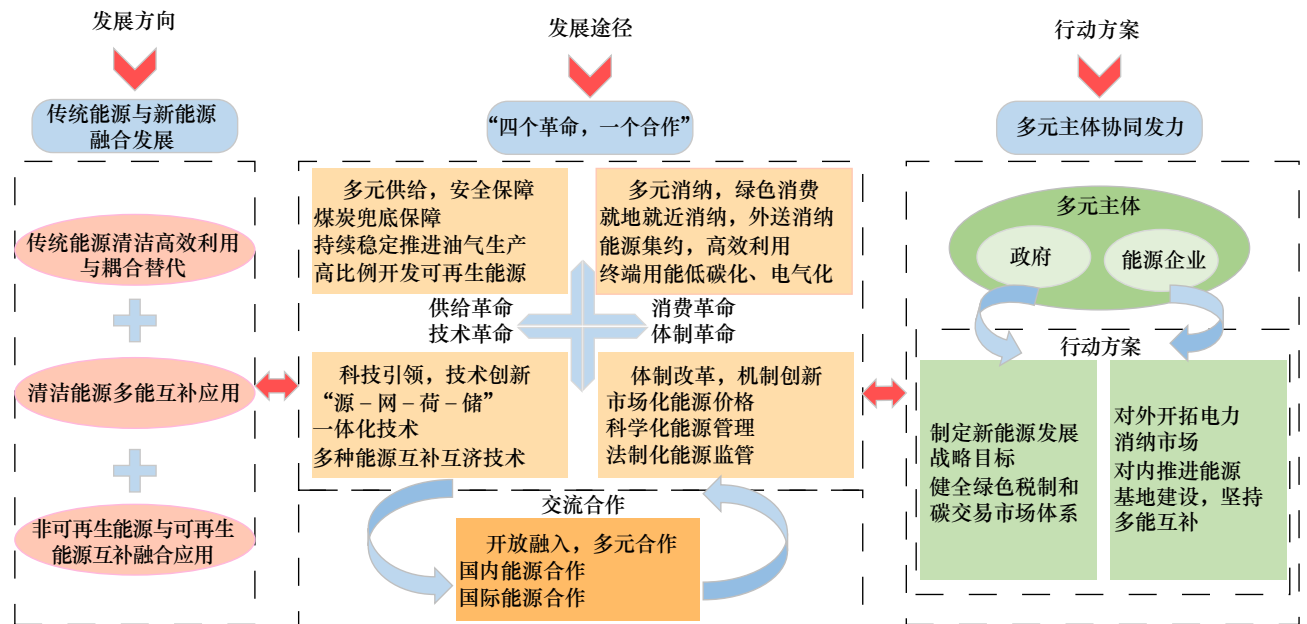


图14 西北地区能源发展路径

表5 西北地区五省份未来能源发展差异对比

地区	发展方向	建设目标	主要任务	在区域协调发展中的作用
陕西	低碳化多能融合发展	建设国家级能源革命创新示范区	推进传统能源耦合替代, 清洁能源多能互补应用, 重点推动能化产业清洁化高端化	“西电东送” 枢纽
甘肃	可再生能源重点发展	打造国家现代能源综合生产基地、储备基地、输出基地和战略通道	基地化发展新能源, 重点协调推进各区域能源开发利用	油、气、煤、电跨区能源输送通道及能源中转枢纽
新疆	低碳化多能融合发展	建设“油-气-风-光-水-储”一体化示范区	推进传统能源耦合替代, 清洁能源多能互补应用, 重点建设能源大通道	外引内联的能源互联互通大通道
青海	可再生能源重点发展	打造国家清洁能源产业高地	推进清洁能源高比例、高质量、市场化、基地化、集约化发展	海南、海西清洁能源电力枢纽
宁夏	可再生能源重点发展	建设国家新能源综合示范区	重点发展太阳能发电和风电, 探索水电和生物质发电	“西电东送” 网架枢纽、“西气东输” 输配枢纽、区域煤炭储运枢纽

(二) 发展途径

基于“四个革命, 一个合作”的能源安全战略要求, 提出了适宜西北地区的能源发展途径。

1. 加快推进“多元供给、安全保障”的能源供给革命, 提升能源供给能力和供给质量

一是优化煤炭生产布局, 开展智能煤矿建设, 循环利用煤炭生产过程中的伴生废弃资源, 推进煤炭生产模式向智能化、绿色化、集约化转变。二是推进千万吨级油气生产基地建设, 提高油气开采效率和油气储采比, 探索油气生产过程中产生的二氧化碳捕集封存技术。三是大力推进风、光、水可再生能源的基地化与规模化开发, 探索地热、氢能等新能源品种生产利用, 推动新能源快速跃升发展。

2. 加快推进“多元消纳、绿色消费”的能源消费革命, 加速能源消费清洁低碳转型

一是加强电网基础设施建设及智能化升级, 强化可再生能源发电在终端直接应用能力; 优化新建电网布局, 积极推动可再生能源跨省跨区消纳。二是优化西北地区产业结构, 提高第三产业比重, 改造和整顿第二产业中高能耗行业; 推广建筑节能设备应用, 大力宣传节能环保政策, 提高居民节能意识, 从而实现能源集约, 高效利用。三是推进终端用能的低碳化与电气化, 在工业领域进一步提升重点碳排放行业的电气化率, 在建筑领域推广建设屋顶光伏建筑, 积极倡导电取暖, 在交通领域推广轨道交通、电动汽车等, 提高电能消费比重。

3. 推进“科技引领、技术创新”的能源技术革命, 解决能源发展中的技术难题

一是创新“源-网-荷-储”一体化技术。在源端, 攻关新能源开发利用技术和传统能源高效清洁开采技术; 在网端, 提升输配电技术, 保证电力供应的稳定性和安全性; 在荷端, 开展负荷建模与预测技术, 解决负荷随机性、分散性、多样性导致的供需失配问题; 在储能端, 研发电源侧、电网侧和用户侧储能技术, 保证供电质量。二是实施多能互补互济技术, 整合风能、太阳能、水能、煤炭、天然气等资源组合优势, 设计多能互补系统, 优化系统容量配置, 优化系统运行, 开展多能系统评估, 最终形成经济、环保并能保证用户需求的能源系统。

4. 推进“体制改革、机制创新”的能源体制改革, 提高能源资源配置效率

一是鼓励多元主体参与电力市场, 形成发电侧和售电侧的“多买多卖”格局, 实现由市场竞争和供需的电价形成机制。二是深化“放管服”改革, 简化能源项目审批流程, 强化准入和退出监管, 优化营商环境, 实现能源科学化管理。三是强化顶层设计, 制定可再生能源开发利用的税收补贴优惠政策, 出台支持储能产业发展的相关举措, 用地方政策进一步规范能源行业发展。

5. 深化国内外能源交流合作, 提升对外开放程度

一是加强省内各企业、企业和科研院所的合

作，攻关能源发展中的技术难题。二是推进各省间的合作，积极与长江三角洲、京津冀地区开展能源合作，以促进能源消纳并带动社会经济发展；强化与周边省份合作，发挥区域能源互补优势，保障能源供给安全。三是借助“一带一路”能源合作契机，积极开展国际合作，进行基础设施互联互通建设，形成基础设施网络；构建能源资源合作上下游一体化产业链，保障能源供给安全。

（三）行动方案

在行动方案上，政府和能源企业应协同发力，共同推动能源高质量发展。

政府应发挥主导地位，营造良好能源政策环境，破除制约能源高质量发展的体制机制障碍。一是未制定能源发展“五年规划”的西北省份应尽快做出规划，明确能源生产、能源消费、能源效率的发展目标、能源项目建设重点任务、能源发展保障措施等。二是以经济补贴和税收优惠的方式，大力支持可再生能源开发利用，将碳储存作为新的产业发展方向，将碳配额拍卖用于补贴可再生能源发电项目，以营造适应新能源发展的市场环境。

能源企业应科学化能源布局，大力推进技术创新，高效开采化石能源，高比例开发可再生能源。对外提高能源外送能力，把握国家优化输电通道布局机遇，开拓外部电力消纳市场；对内推进能源基地建设，提升保障能力和利用效率，坚持多能互补。

六、结语

立足西北地区的发展实际，本研究深入剖析了西北地区各省份的能源资源储量及开发现状、能源生产消费特征，明晰了能源发展中的现存问题，并分别基于灰色预测方法和多元回归方法对面向2030年的能源发展水平进行了预测，最后基于预测结果设计了西北地区能源发展路径。本研究得到如下结论。

西北地区能源生产和消费量一直保持逐年递增趋势，能源生产和消费类型始终以煤炭为主，可再生能源生产消费比例较小，但在持续上涨。其中，陕西、新疆、宁夏的传统能源生产消费量较大，青海、甘肃、新疆的可再生能源发展迅速。

到2030年前，西北地区各省份的能源生产和消

费量仍将逐年递增，能源生产和消费结构也将不断优化。与灰色预测方法得到的结果相比，多元回归方法得到的结果中能源生产消费量增速稍慢，其根本原因在于西北地区各省份的经济、产业、技术等发展速度略低于能源发展速度，在综合考虑以上因素的情况下能源发展速度将会受到一定影响。

西北地区各省份由于资源禀赋各不相同，应遵循“因地制宜、协调发展”的原则，制定能源发展路径。整体上应以传统能源与新能源相互融合为发展方向，持续推进供给革命、消费革命、技术革命、体制革命与交流合作，通过多主体协同发力，加快建立起完善的现代能源体系。

参考文献

- [1] 卢纯. 开启我国能源体系重大变革和清洁能源创新发展新时代——深刻理解碳达峰、碳中和目标的重大历史意义[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021(14): 28-41.
Lu C. Opening a new era of major changes in China's energy system and innovative development of clean and renewable energy—Deeply understanding the great historical significance of the targets of carbon peak and carbon neutralization [J]. *Frontiers*, 2021(14): 28-41.
- [2] 赵伟. 国家战略、“一带一路”倡议与西部选择[J]. 现代经济探讨, 2022(7): 1-9.
Zhao W. National strategy, the Belt and Road Initiative and the choice of the west [J]. *Modern Economic Research*, 2022(7): 1-9.
- [3] 苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1001-1009.
Su J, Liang Y B, Ding L, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(9): 1001-1009.
- [4] 张璐, 龚乾厅. “双碳”背景下我国能源消费战略推进的路径选择[J]. 南京工业大学学报(社会科学版), 2022, 21(2): 12-23.
Zhang L, Gong Q T. On path selection of promoting China's energy consumption strategy in context of “Carbon peaking and carbon neutrality” [J]. *Journal of Nanjing Tech University(Social Science Edition)*, 2022, 21(2): 12-23.
- [5] 张永生, 董舵, 肖逸, 等. 我国能源生产、消费、储能现状及碳中和条件下变化趋势[J]. 科学通报, 2021, 66(34): 4466-4476.
Zhang Y S, Dong D, Xiao Y, et al. Current status and trends in energy production, consumption, and storage under carbon neutrality conditions in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(34): 4466-4476.
- [6] 司起步, 邱硕, 毕胜山, 等. 碳强度和水资源约束下2030年中国西北五省能源供给规划研究[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(5): 31-42.
Si Q B, Qiu S, Bi S S, et al. Energy supply planning the five northwest provinces in 2030 under carbon intensity and water resource constraints [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(5): 31-42.

- [7] 宋宇辰, 陈田澍, 李昊东. 西部六省能源消费与经济发展协调度分析 [J]. 资源开发与市场, 2016, 32(7): 848–852.
Song Y C, Chen T S, Li H D. Six western provinces of energy consumption and economic development coordination degree analysis [J]. Resource Development & Market, 2016, 32(7): 848–852.
- [8] 朱汉雄, 耿笑颖, 肖宇, 等. 新时代西北地区推进能源革命的战略路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 92–100.
Zhu H X, Geng X Y, Xiao Y, et al. Strategic path for energy revolution in Northwest China in the new era [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 92–100.
- [9] 邓铭江, 明波, 李研, 等. “双碳”目标下新疆能源系统绿色转型路径 [J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1107–1122.
Deng M J, Ming B, Li Y, et al. Pathways towards a cleaner energy system for Xinjiang under carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1107–1122.
- [10] 左其亨, 李佳伟, 马军霞, 等. 新疆水资源时空变化特征及适应性利用战略研究 [J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 21–27.
Zuo Q T, Li J W, Ma J X, et al. Study on spatio-temporal variation characteristics and adaptive utilization strategy of water resources in Xinjiang [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 21–27.
- [11] 中华人民共和国自然资源部. 2020 年全国矿产资源储量统计表 [R]. 北京: 中华人民共和国自然资源部, 2021.
Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2020 national mineral resources reserves statistics [R]. Beijing: Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, 2021.
- [12] 中国气象局风能太阳能中心. 2021 年中国风能太阳能资源年景公报 [R]. 北京: 中国气象局风能太阳能中心, 2022.
China Meteorological Administration Wind and Solar Energy Centre. China wind and solar energy resources bulletin 2021 [R]. Beijing: China Meteorological Administration Wind and Solar Energy Centre, 2022.
- [13] 中华人民共和国水利部. 2021 年中国水资源公报 [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2022.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. 2021 China water resources bulletin 2021 [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2022.
- [14] 中国电力企业联合会. 中国电力统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
China Electricity Council. China electricity statistical yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [15] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [16] 邓聚龙. 灰预测与灰决策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
Deng J L. Grey prediction and grey decision [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2002.
- [17] 罗良忠, 林嘉豪, 谭云清. 数字经济对能源消费的影响研究——基于区域一体化中介效应和遮掩效应的检验 [J]. 学习与实践, 2022 (6): 44–53.
Luo L Z, Lin J H, Tan Y Q. Research on influence of digital economy on energy consumption [J]. Study and Practice, 2022 (6): 44–53.
- [18] 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 R, Wang Z, Ding G Q, 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.
- [19] 王少剑, 苏泳娴, 赵亚博. 中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素 [J]. 地理学报, 2018, 73(3): 414–428.
Wang S J, Su Y X, Zhao Y B. Regional inequality, spatial spillover effects and influencing factors of China's city-level energy-related carbon emissions [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 414–428.
- [20] Cheng Y Q, Wang Z Y, Ye X Y. Spatiotemporal dynamics of carbon intensity from energy consumption in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(4): 631–650.
- [21] 赵文琦, 胡健. 能源产业集聚对经济增长的影响研究——基于“一带一路”沿线西部 9 省区的实证分析 [J]. 西安财经大学学报, 2020, 33(5): 71–81.
Zhao W Q, H J. Research on the influence of energy industry agglomeration on economic growth: Based on the empirical analysis of nine western provinces along “the Belt and Road” [J]. Journal of Xi'an University of Finance and Economics, 2020, 33(5): 71–81.
- [22] 丁利春, 周佳琦, 李瑞. 山西能源偏向型技术进步的实证分析——基于二重嵌套的 CES 生产函数 [J]. 经济问题, 2022 (5): 111–118.
Ding L C, Zhou J Q, Li R. An empirical analysis of energy-biased technological progress in Shanxi Province: CES production function based on double nesting [J]. On Economic Problems, 2022 (5): 111–118.
- [23] 魏羽秀. 我国一线城市能源消费对比与节能建议 [J]. 环境保护, 2022, 50(13): 68–71.
Wei Y X. Comparison of energy consumption and suggestions of energy saving in first-tier cities in China [J]. Environmental Protection, 2022, 50(13): 68–71.
- [24] 谌仁俊, 周双双. 节能目标政策与区域协调发展: 来自中国企业的证据 [J]. 世界经济, 2022, 45(7): 205–232.
Shen R J, Zhou S S. Energy-saving target policies and regional coordinated development: Evidence from Chinese firms [J]. The Journal of World Economy, 2022, 45(7): 205–232.
- [25] 田娟娟, 张金锁. 基于 STIRPAT 模型的煤炭资源富集区碳排放影响因素分析 [J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(4): 692–699.
Tian J J, Zhang J S. Analysis of influencing factors of carbon emission in coal-rich areas based on STIRPAT model [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(4): 692–699.
- [26] 王双英, 陈海宁, 魏萍. 中国“一带一路”沿线城市能源消费影响因素研究——基于双向固定效应模型 [J]. 中国石油大学学报: 社会科学版, 2022, 38(2): 19–26.
Wang S Y, Chen H N, Wei P. Study on the influencing factors of energy consumption in China's cities along the Belt and Road: Based on two-way fixed effects model [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2022, 38(2): 19–26.
- [27] 李英杰, 韩平. 中国数字经济发展综合评价与预测 [J]. 统计与决策, 2022, 38(2): 90–94.
Li Y J, Han P. Comprehensive evaluation and prediction on China's digital economy development [J]. Statistics & Decision, 2022, 38(2): 90–94.