

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

司起步, 邱硕, 毕胜山, 吴江涛

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了对碳达峰和水资源短缺形势下中国西北五省能源供给侧的合理配置进行全面把控, 以便推进西北五省能源转型, 实现低碳发展, 以 2017 年为基期, 以 2018—2030 年为预测期, 利用长期能源替代规划系统(LEAP)模型对西北五省的终端能源需求量进行预测分析, 从供给侧出发, 研究了西北五省 2018—2030 年在碳强度约束和水资源约束下的能源结构变革、能源供给规划、能源调度规划和产能建设规划。结果表明, 发展可再生能源是未来西北五省实现碳达峰和碳中和的主攻方向, 一次能源结构中原煤、油气和非化石能源的比例将从 2017 年的 6:3:1 变为 2030 年的 3:3:4, 终端能源结构中煤炭、油气和电力的比例将从 2017 年的 5:3:2 变为 2030 年的 1:5:4; 能源生产方面表明煤炭产量仍呈上升态势, 石油产量保持低速上升的趋势, 天然气的增产潜力大; 电气化是未来发展的趋势, 电力供应能力将持续增强, 西北五省水资源的短缺将进一步遏制火电的发展。该研究可望在合理配置水资源的基础上为西北五省的低碳发展提供参考。

关键词: 西北五省; 能源供给; 碳强度约束; 水资源约束

中图分类号: TK01 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202205004 **文章编号:** 0253-987X(2022)05-0031-12



OSID 码

Energy Supply Planning of the Five Northwest Provinces in 2030 Under Carbon Intensity and Water Resource Constraints

SI Qibu, QIU Shuo, BI Shengshan, WU Jiangtao

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For comprehensive control over rational allocation at the energy supply side, better energy transformation and low-carbon development in the five northwest provinces in the context of peak CO₂ emissions and water shortage, the LEAP model is used to predict the end energy demands of these provinces by taking 2017 as the base year and 2018—2030 as predictive period. Moreover, their energy structure reform, energy supply planning, energy dispatching planning and capacity construction planning in 2018—2030 are studied from the supply side under carbon intensity and water resource constraints. The results show that developing renewable energy will be the main mean for these provinces to achieve carbon peaking and carbon neutrality. In terms of energy mix, the proportion of raw coal, oil and gas, and non-fossil energy among primary energy will change from 6:3:1 in 2017 to 3:3:4 in 2030 and that of the coal, oil and gas, and electricity among the end-use energy will change from 5:3:2 in 2017 to 1:5:4 in 2030. In terms of energy production, the coal production is still on the rise, the oil production keeps a low growth trend,

and the natural gas has great potential to increase production. Electrification is the trend of future development, power supply capacity will continue to increase, the shortage of water resources in these provinces will further curb the development of thermal power. This study is expected to provide theoretical reference for the low-carbon development of these provinces under the premise of rational allocation of water resources.

Keywords: five northwest provinces; energy supply; carbon intensity constraint; water resource constraint

工业革命以来,人类大量使用石油、煤炭等化石燃料,造成了二氧化碳的大规模排放,全球气候变暖已经成为国际社会的共识,由此引发的碳排放计划也陆续在各发达国家和发展中国家公布。2020年习近平主席在第七十五届联合国大会上宣布,中国的二氧化碳排放力争于2030年前达到顶峰,力争争取2060年前实现碳中和,中国面临着巨大的减排压力。此外,中国的能源分布呈现“煤多油气少”“北多南少”以及“西多东少”的特点,开展有效的能源规划关乎我国未来能源可持续发展的方向。

西北地区是中国能源富集地区之一,其中:四大盆地石油总储量为281亿吨,占全国总储量的27.6%^[1],煤炭资源占全国的61.9%,天然气储量2.32万亿立方米;风能可采量约占全国的40%^[2];太阳能资源也较为丰富,全国2/3地区日照小时数大于2 200 h,而西北绝大部分地区日照小时数大于3 000 h^[3]。因此,西北地区是中国重要的能源净输出地,布置有诸如西部原油成品油管道,西气东输一线、二线、三线管道,准东—四川±1 100 kV特高压直流输电工程,哈密—郑州±800 kV特高压直流工程,酒泉—湖南±800 kV特高压直流输电工程等的国家能源大动脉工程。西北地区的能源发展不仅对于自身经济发展具有重要意义,也对中国未来能源可持续发展以及能源安全具有重要意义。

近年来,众多学者对西北五省能源方面的研究多集中在能源消费碳排放的核算和影响因素分析^[4-8]、能源消费碳排放峰值的预测以及经济发展与碳排放量的关系等,但是鲜有关于西北五省能源供给侧的规划研究。韦良焕等^[9]计算了西北五省2000—2017年的温室气体排放清单;董棒棒等^[10]运用情景分析法对西北地区2017—2030年能源消费碳排放量进行了预测;邓小乐等^[11]利用可拓展的随机性的环境影响评估(STIRPAT)模型对西北五省2015—2030年碳排放峰值进行了预测;邢强^[12]对西北五省经济发展与碳排放量的关系进行了研究;龚新蜀等^[13]、郭卫香等^[14]对西北五省产业结构与碳排

放的关系进行了关联分析。此外,水资源短缺已经成为制约西北五省能源工业发展的一个重要因素,中国工程院科研人员^[15]和孙廷容等^[16]对西北地区能源(石油天然气、煤炭)工业用水现状及发展进行了研究,并提出了未来可持续发展的用水对策,但是未考虑电力工业;项潇智等^[17]从全国的层面对我国能源产业的用水现状和各类能源产出的发展趋势进行了研究,并预测了2020和2030年我国能源产业的需求情况,但是并未给出各类能源具体的发展规划;Qiu等^[18]从全国的层面对我国到2060年在碳中和约束下的能源需求和供给规划进行了研究,但是并未考虑水资源约束的影响。

本文同时考虑了国家层面碳减排计划和水资源短缺现实情况对西北五省能源发展的影响,在碳排放强度和水资源两个约束条件下,从供给侧出发,基于煤、油、气、电4种能源形式建立非线性规划模型。该模型考虑了能源从生产到消耗的所有过程,进而得到在碳排放强度和水资源约束下,西北五省未来的能源供给规划和能源结构的变革。

1 计算模型介绍

本文的整体研究思路如图1所示。以2017年为基期,以2018—2030年为预测期,首先通过能源需求预测模型^[19]预测出西北五省2018—2030年的终端能源需求量;然后计算出西北五省在2003—2017年间的碳排放强度;再者采用对数平均迪氏指数(LMDI)因素分解法和STIRPAT模型^[20]分析西北五省各省区能源工业用水量分别与各省区GDP、技术水平等因素之间的回归关系,并进一步预测西北五省2018—2030年的能源工业用水量;在上述的基础上,最终利用能源供给优化模型得到在碳排放约束和水资源约束条件下的西北五省未来的能源供给规划,为西北五省碳达峰、碳中和政策的制定提供参考。

1.1 能源需求预测模型

本文利用长期能源替代规划系统(LEAP)模

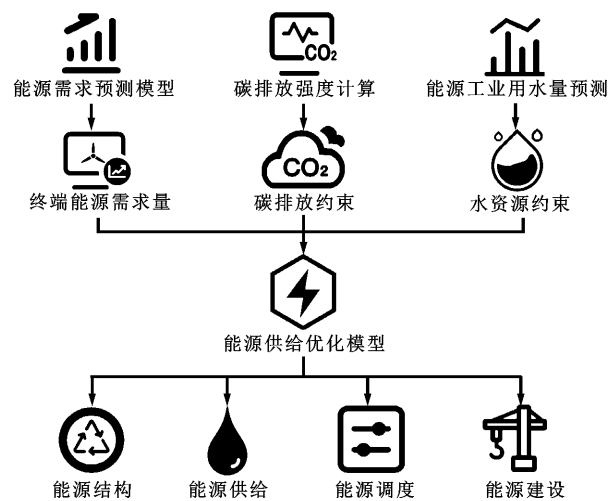


图 1 整体研究思路流程图

Fig. 1 Overall research flow chart

型^[21]建立情景分析对西北五省各省区的终端能源需求量做预测分析,该分析过程主要考虑三大产业和生活的八大具体能源消费部门,其中工业部门细分成诸如煤炭开采洗选业、石油和天然气开采业等 41 项子部门,在调研历史年份 GDP、人口、城镇率、各消费部门的终端能源消费量以及终端能源结构的基础上,对未来的趋势加以预测,以此得到未来的终端能源需求量。

各部门的终端能源需求总量由活动水平和能源强度共同决定,其中不同种类能源的需求量由各品种能源与终端能源需求总量的占比决定。各类一次能源及二次能源的需求量分别为

$$D_{pe}(m)=\sum_i\sum_jL(i,j)E(i,j)B(i,j,m)\quad (1)$$

$$D_{se}(n)=\sum_i\sum_jL(i,j)E(i,j)B(i,j,n)\quad (2)$$

式中: $L(i,j)$ 和 $E(i,j)$ 分别表示*i*部门的*j*子部门的活动水平和能源强度; $B(i,j,m)$ 和 $B(i,j,n)$ 分别表示能源需求*i*部门的*j*子部门中*m*品种一次能源和*n*品种二次能源在终端能源需求总量中的比重。所有部门的终端能源需求总量为

$$D=\sum_mD_{pe}(m)+\sum_nD_{se}(n)\quad (3)$$

1.2 STIRPAT 模型

Ehrlich 等在 20 世纪 70 年代提出了环境压力模型,即 IPAT 模型^[20]。该模型认为环境变化的主要驱动力因素有人口总量、人均财富和技术水平,因此得出等式 $I=PAT$ 。该模型简洁易懂,一经提出便得到广泛的认可和应用,但是随着研究的深入,IPAT 模型各变量间只能同比例变动的缺陷也逐渐暴露出来。基于此,Dietz 等在 1994 年提出扩展型

IPAT 模型,即 STIRPAT 模型。该模型弥补了 IPAT 模型的不足,表达式为

$$I=aP^bA^cT^de\quad (4)$$

式中: I 表示对环境的影响; P 、 A 、 T 分别表示人口因素、经济因素和技术因素; a 为该模型系数; P 、 A 、 T 的指数 b 、 c 、 d 均可通过模型估算出来; e 为残差项。为降低分析过程中出现的异方差情况,通常将 STIRPAT 模型对数化,得到如下表达式

$$\ln I=\ln a+b\ln P+c\ln A+d\ln T+\ln e\quad (5)$$

根据 LMDI 因素分解,本文所考虑的能源工业用水量影响因素如表 1 所示。

表 1 能源工业用水量影响因素

Table 1 Influence factors of water consumption in energy industry		
变量	定义	
能源工业用水量 $W/(10^4\text{ m}^3)$	能源工业用水量=Σ(能源开采/生产/投入量×用水定额)	
工业生产总产值 $I/\text{亿元}$	统计年鉴中工业增加值(1978 年不变价格)	
工业用水强度 $G/(\text{m}^3\cdot\text{万元}^{-1})$	工业用水强度=工业用水总量/工业生产总产值	
能源工业用水占比 $R/\%$	能源工业用水占比=能源工业用水量/工业用水总量	

根据 STIRPAT 模型的基本公式,构建能源工业用水量预测方程为

$$W=aI^{\lambda_1}G^{\lambda_2}R^{\lambda_3}e\quad (6)$$

两边同时取对数,得

$$\ln W=\ln a+\lambda_1\ln I+\lambda_2\ln G+\lambda_3\ln R+\ln e\quad (7)$$

1.3 能源供给优化模型

根据上述能源需求预测模型和 STIRPAT 模型的预测结果,本文建立西北五省能源供给的非线性规划模型,对能源供给的生产、运输、转换等环节进行布局优化^[18],能源供给优化模型如图 2 所示。

1.3.1 优化目标

本文以西北五省在 2017—2030 年间煤、油、气、电 4 种能源形式的基础设施建设、生产运营、运输调度和进口能源 4 类成本之和最低为优化目标

$$C_{\min}=C_{\text{inf}}+C_{\text{pro}}+C_{\text{tra}}+C_{\text{imp}}\quad (8)$$

式中: C_{inf} 、 C_{pro} 、 C_{tra} 、 C_{imp} 分别对应基础设施建设成本、生产运营成本、运输调度成本以及进口能源成本。各类成本具体包括

$$C_{\text{inf}}=\sum_kQ_{\text{inf}}(k)P_{\text{inf}}(k)\quad (9)$$

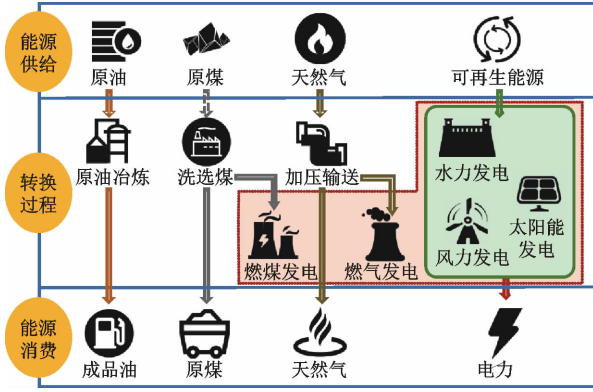


图2 能源供给优化模型

Fig. 2 Energy supply optimization model diagram

$$C_{\text{pro}} = \sum_k Q_{\text{pro}}(k) P_{\text{pro}}(k) \quad (10)$$

$$C_{\text{tra}} = \sum_k Q_{\text{tra}}(k) P_{\text{tra}}(k) \quad (11)$$

$$C_{\text{imp}} = \sum_k Q_{\text{imp}}(k) P_{\text{imp}}(k) \quad (12)$$

式中: k 表示煤、油、气、电 4 种能源形式; Q_{inf} 、 Q_{pro} 、 Q_{tra} 、 Q_{imp} 分别表示煤、油、气、电相关基础设施建设容量、生产量、运输量以及进口量; P_{inf} 、 P_{pro} 、 P_{tra} 、 P_{imp} 分别表示对应于 Q_{inf} 、 Q_{pro} 、 Q_{tra} 、 Q_{imp} 的单位价格。

1.3.2 约束条件

本文考虑的约束条件主要包括以下几种。

(1) 终端能源需求总量约束为

$$D(s, y) = \sum_m D_{\text{pe}}(s, y, m) + \sum_n D_{\text{se}}(s, y, n) \quad (13)$$

式中: s 、 y 分别表示省份、年份。

(2) 供需平衡约束分别为

$$Q_{\text{pe}}^{\text{pro}}(s, y, k) + Q_{\text{pe}}^{\text{imp}}(s, y, k) + Q_{\text{pe}}^{\text{ti}}(s, y, k) = Q_{\text{pe}}^{\text{to}}(s, y, k) + D_{\text{pe}}(s, y, k) \quad (14)$$

$$Q_{\text{se}}^{\text{pro}}(s, y, k) + Q_{\text{se}}^{\text{imp}}(s, y, k) + Q_{\text{se}}^{\text{ti}}(s, y, k) = Q_{\text{se}}^{\text{to}}(s, y, k) + D_{\text{se}}(s, y, k) \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{pe}}^{\text{pro}}$ 、 $Q_{\text{pe}}^{\text{imp}}$ 、 $Q_{\text{pe}}^{\text{ti}}$ 、 $Q_{\text{pe}}^{\text{to}}$ 分别表示一次能源的生产量、进口量、调入量和调出量; $Q_{\text{se}}^{\text{pro}}$ 、 $Q_{\text{se}}^{\text{imp}}$ 、 $Q_{\text{se}}^{\text{ti}}$ 、 $Q_{\text{se}}^{\text{to}}$ 分别表示二次能源的生产量、进口量、调入量和调出量。

(3) 资源储量约束为

$$\sum_{y=2017}^{2030} Q_{\text{pe}}^{\text{pro}}(s, y, m) \leq \hat{S}(s, m) \quad (16)$$

式中: $\hat{S}$ 表示能源储量。

(4) 基础设施产能约束主要包括煤、油、气、电 4 种能源形式的产能约束、进口容量约束、调入容量约束和调出容量约束。

$$Q_{\text{pro}}(s, y, k) \leq \hat{Q}_{\text{pro}}(s, y, k) \quad (17)$$

$$Q_{\text{imp}}(s, y, k) \leq \hat{Q}_{\text{imp}}(s, y, k) \quad (18)$$

$$Q_{\text{ti}}(s, y, k) \leq \hat{Q}_{\text{ti}}(s, y, k) \quad (19)$$

$$Q_{\text{to}}(s, y, k) \leq \hat{Q}_{\text{to}}(s, y, k) \quad (20)$$

式中: Q_{pro} 、 Q_{imp} 、 Q_{ti} 、 Q_{to} 分别表示能源的生产量、进口量、调入量和调出量; $\hat{Q}_{\text{pro}}$ 、 $\hat{Q}_{\text{imp}}$ 、 $\hat{Q}_{\text{ti}}$ 、 $\hat{Q}_{\text{to}}$ 分别表示能源生产、进口、调入和调出基础设施的最大容量。

(5) 碳排放和水资源约束分别为

$$\sum_m (D_{\text{pe}}(s, y, m) e(m)) \leq \hat{M}(s, y) \quad (21)$$

$$\sum_m (Q_{\text{pe}}^{\text{pro}}(i, j, m) w(m)) + \sum_n (Q_{\text{se}}^{\text{pro}}(i, j, n) w(n)) \leq \hat{W}(i, j) \quad (22)$$

式中: $e(m)$ 表示某品种一次能源 CO_2 排放系数; $\hat{M}$ 表示 CO_2 排放量限额; $w(m)$ 、 $w(n)$ 分别表示生产单位 m 品种一次能源所耗水量和生产单位 n 品种二次能源所耗水量; $\hat{W}$ 表示能源工业用水量限额。

2 模型参数假设

2.1 终端能源需求预测

本文在基准情景中首先调研了 1978—2017 年各省区 GDP、各消费部门 GDP 占比、人口、城镇率作为基本假设条件,然后利用各省区 2010—2017 能源平衡表计算各部门在 2010—2017 年的终端能源消费总量以及各品种能源在终端能源消费总量的比重。在预测情景中,本文在参考有关政府文件和专业相关部门论文^[1,7,22-23]、报告的基础上,对未来各省区各部门的活动水平和能源强度加以预测,最终得到西北五省 2017—2030 年终端能源需求总量的预测结果,如图 3 所示。

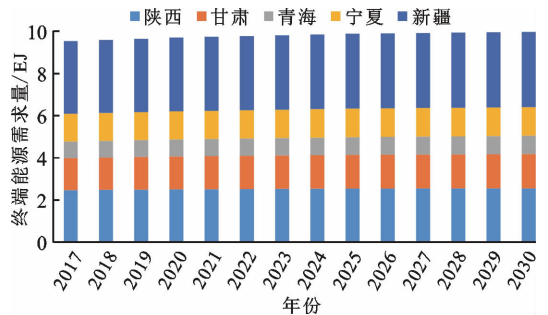


图3 西北五省 2017—2030 年终端能源需求预测

Fig. 3 Forecast of terminal energy demand of the five northwest provinces from 2017 to 2030

2.2 碳排放强度约束

本文首先利用能源平衡表计算出西北五省 2003—2017 年的碳排放量,进而结合 2003—2017 年各省区的 GDP 情况,得到了西北五省 2003—2017 年碳排放强度,如图 4 所示。

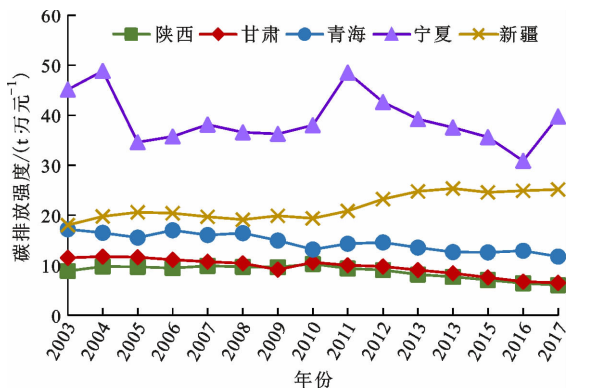


图 4 西北五省 2003—2017 年碳排放强度

Fig. 4 Carbon emission intensity of the five northwest provinces from 2003 to 2017

在 2020 年 12 月的气候雄心峰会上,习近平主席对国际社会做出承诺:到 2030 年,中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比 2005 年下降 65%以上。

根据《中国应对气候变化的政策与行动 2018 年年度报告》^[24]发布的内容,“2017 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放(简称碳强度)比 2005 年下降约 46%,已超过 2020 年碳强度下降 40%~45%的目标,提前 3 年完成上限目标,碳排放快速增长的局面得到初步扭转。”西北五省 2005 年和 2017 年碳排放强度的对比如表 2 所示,在西北五省中,没有一个省份达到国家层面下降 46%的水平,只有甘肃省下降 44.07%,已经达到了 40%~45%的目标,而宁夏和新疆两省的碳排放强度不降反升。

表 2 西北五省 2005、2017 年碳排放强度的对比

Table 2 Comparison of carbon intensity between 2005 and 2017 in the five northwest provinces

省份	2005 年 碳排放强度/ (t·万元 ⁻¹)	2017 年 碳排放强度/ (t·万元 ⁻¹)	2017 年相比于 2005 年 变化/%
陕西	9.695 4	6.036 8	-37.74
甘肃	11.594 1	6.484 3	-44.07
青海	15.552 1	11.721 7	-24.63
宁夏	34.601 2	39.746 1	14.85
新疆	20.585 6	25.185 6	22.35

基于此,宁夏和新疆两省要想在 2020 年达到碳强度下降 40%~45%的目标是不现实的,同样地,现实中要想让宁夏和新疆两省在 2030 年达到碳强度下降 65%以上的目标也是有极大困难的。

本文最终把西北五省看成一个整体,将 2030 年西北五省平均碳排放强度比 2005 年下降 65%作为

碳约束指标,其中碳排放强度下降快的省份可以为碳排放强度下降慢的省份做出一定的补偿。

2.3 水资源约束

根据能源平衡表,本文采用用水定额法对西北五省历史年份 2004—2017 年的能源工业用水量进行核算,用水定额数据均来自于各省份用水定额标准文件。其中能源工业是指采掘、采集和开发自然界能源资源,或将自然资源加工转换为燃料、动力的工业。为与能源平衡表中的数据相联系,本文选取了煤炭采选业、天然原油和天然气开采业、原油加工业、电力生产业作为计算对象。其中电力生产业包括火力发电、水力发电、风力发电和太阳能发电。

利用 2004—2017 年历史数据对式(7)进行回归分析,因能源工业用水量各影响因素存在显著多重共线性问题,故采用 SPSS 中岭回归分析^[20]对式(7)进行回归分析,分析结果如表 3 所示。表 3 中各拟合方程 F 检验所对应的 P 值均为 0.000 0,说明回归方程显著,即能源工业用水量与工业生产总产值、工业用水强度以及能源工业用水占比这 3 个因素的关系具有显著性,回归模型显著成立。此外, R^2 和调整 R^2 均接近 1,说明样本数据全部被回归方程解释,回归模型的拟合优度较高,模型设定合理。图 5 中 2004—2017 年的数据分别给出了各省能源工业用水量的实际值和预测值,可以看出,预测值和实际值基本重合,这进一步说明了拟合效果较好,拟合方程的可靠性强。

最终,在综合考虑工业发展、节水技术进步以及能源工业用水占比变化的基础上,对西北五省 2018—2030 年工业生产总产值、工业用水强度以及能源工业用水占比 3 个因素进行合理预测,代入各回归方程,可得西北五省 2018—2030 年的能源工业用

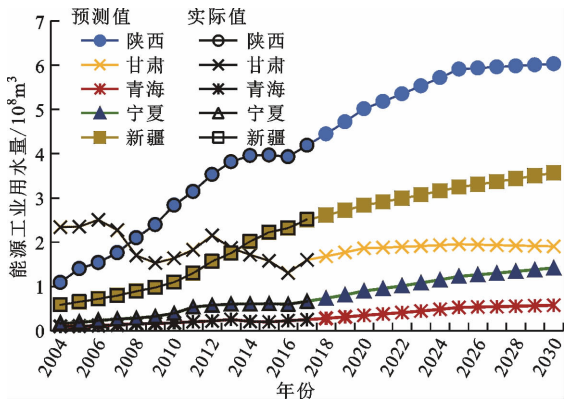


图 5 西北五省 2004—2030 年能源工业用水量预测

Fig. 5 Forecast of water consumption of energy industry in the five northwest provinces from 2004 to 2030

表 3 西北五省能源工业用水量岭回归分析

Table 3 Ridge regression analysis of water consumption of energy industry in the five northwest provinces

省份	拟合方程	R^2	调整 R^2	F 值	P 值
陕西	$\ln W = -4.418\ 2 + 0.986\ 5 \ln I + 0.984\ 9 \ln G + 0.993\ 8 \ln R$	0.999\ 9	1.000\ 0	4.217\ 2	0.000\ 0
甘肃	$\ln W = -4.679\ 5 + 1.008\ 7 \ln I + 1.007\ 3 \ln G + 0.992\ 5 \ln R$	0.999\ 2	0.999\ 0	4\ 173.218\ 5	0.000\ 0
青海	$\ln W = -4.455\ 6 + 0.993\ 6 \ln I + 0.983\ 3 \ln G + 0.984\ 3 \ln R$	0.999\ 8	0.999\ 7	1.442\ 7	0.000\ 0
宁夏	$\ln W = -4.371\ 9 + 1.000\ 3 \ln I + 0.970\ 1 \ln G + 0.969\ 9 \ln R$	0.999\ 9	0.999\ 9	4.559\ 8	0.000\ 0
新疆	$\ln W = -4.076\ 8 + 0.978\ 7 \ln I + 0.941\ 9 \ln G + 0.971\ 7 \ln R$	0.999\ 8	0.999\ 7	1.439\ 7	0.000\ 0

水量,如图 5 中 2018—2030 年的数据所示。

3 能源供给优化模型结果分析

3.1 能源结构分析

能源结构是指一定时期、一定区域内各类能源在能源总量中的比例关系,是反映一个国家或一个地区生产技术发展水平的重要标志。本文分析了西北五省的一次能源消费结构和终端能源需求结构。

3.1.1 一次能源结构

图 6 表示西北五省一次能源消费结构,图 7 表示西北五省一次能源消费百分比结构。从图 6 中可以看出,2017—2030 年期间,西北地区一次能源消费总量呈明显上升的趋势,由 2017 年的 13.50 EJ 上升到 2030 年的 24.60 EJ。其中,煤炭仍是主要的能源形式,但是由图 7 可以看出,其占比在不断下降,呈现煤炭在逐渐加速被其他能源所取代的趋势,到 2030 年煤炭在一次能源消费总量中的占比降低至 32%;原油的消费量将在 2028 年左右达峰,呈现先稳步增长后略有回落的趋势,其占比也稳中有降,由 2017 年的 19.21%降至 2030 年的 14.35%;天然气的消费量增速明显,2030 年天然气消费量将达到 4.57 EJ,占一次能源消费总量的 18.60%,相比于 2017 年的 8.10%提高 10.5 个百分点;非化石能源

的消费量增长迅速,由 2017 年的 0.79 EJ 增长至 2030 年的 8.59 EJ,2030 年非化石能源在一次能源消费总量中的占比达到 34.91%,已超越煤炭成为第一主力能源。

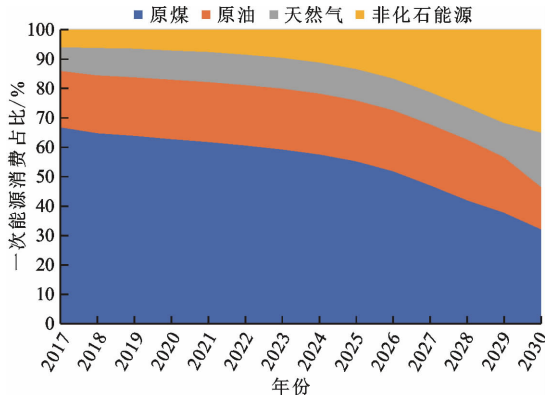


图 7 西北五省 2017—2030 年一次能源消费百分比结构
Fig. 7 Percentage structure of primary energy consumption of the five northwest provinces from 2017 to 2030

3.1.2 终端能源结构

图 8 表示终端能源需求结构,图 9 表示终端能源需求百分比结构。由图 8 可知,西北五省在 2017—2030 年间终端能源需求总量呈平稳增长的趋势。其中,煤炭的终端能源需求量呈明显降低的趋势,由 2017 年的 4.52 EJ 下降至 2030 年的 1.14 EJ,其在终端能源需求总量中的占比将由

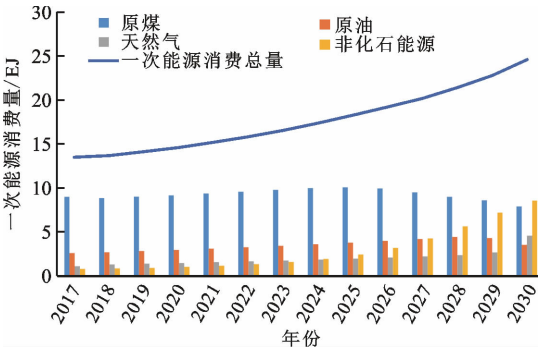


图 6 西北五省 2017—2030 年一次能源消费结构
Fig. 6 Primary energy consumption structure of the five northwest provinces from 2017 to 2030

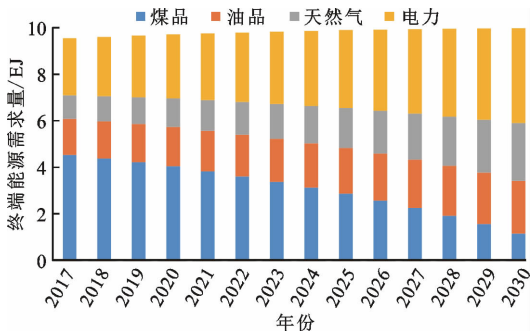


图 8 西北五省 2017—2030 年终端能源需求结构
Fig. 8 Terminal energy demand structure of the five northwest provinces from 2017 to 2030

2017 年的 47.42% 下降到 2030 年的 11.40%; 成品油的终端需求呈缓慢上升的趋势, 由 2017 年的 1.55 EJ 增长至 2030 年的 2.28 EJ; 天然气的终端需求呈明显上升的趋势, 2030 年将达到 2.48 EJ, 其在 2030 年的终端能源需求总量中占比将达到 24.88%, 相较于 2017 年的 1.01 EJ 和 10.62%, 提高了 1.47 EJ 和近 15%; 电力需求量明显增加, 由 2017 年的 25.71% 上升至 2030 年的 40.93%。

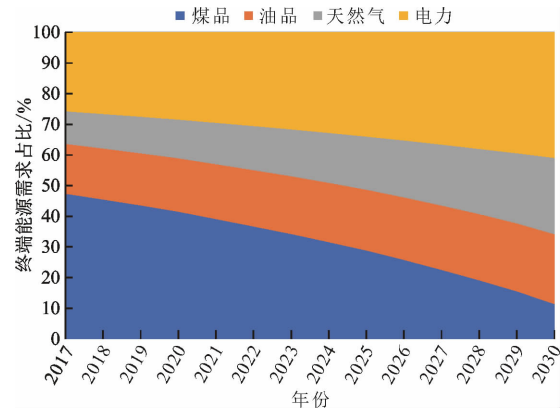


图 9 西北五省 2017—2030 年终端能源需求百分比结构
Fig. 9 Percentage structure of terminal energy demand of the five northwest provinces from 2017 to 2030

3.2 能源生产布局

本文主要分析了西北五省各省区原煤、原油、成品油、天然气和电力 5 种主要能源形式的生产量, 分别如图 10~14 所示。

由图 10 可以看出, 2017—2030 年间西北五省原煤生产量呈先稳步增长后趋于稳定的趋势。一方面随着煤电大基地大通道建设的推进, 西北五省涵盖陕北、哈密、准东、宁东 4 个千万千瓦级大型煤电基地将作为西北地区主要的原煤消费地; 另一方面, 在中国中东部煤矿区资源大幅减少的背景下, 西北

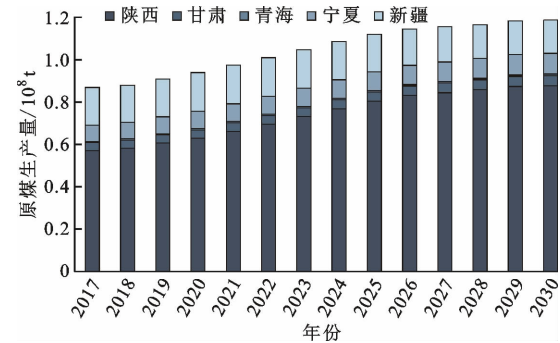


图 10 西北五省 2017—2030 年原煤生产量
Fig. 10 Raw coal production of the five northwest provinces from 2017 to 2030

地区已成为中国重要的能源接替区, 所产原煤将源源不断地运输至中东部地区。在西北五省中, 陕西原煤生产量在原煤总产量中占据绝对优势, 2017—2030 年间一直保持着 65% 以上的占比, 这得益于陕西占据神东、陕北、黄陇 3 个亿吨级大型煤炭基地; 新疆原煤产量稳中有降, 到 2030 年新疆的原煤产量将占到西北五省原煤总产量的 13.32%; 宁夏原煤产量处于稳定增加的状态, 由 2017 年的 0.76 亿吨增长至 2030 年的 0.98 亿吨; 青海和甘肃煤炭资源相对匮乏, 原煤生产量相对稳定。

由图 11 可以看出, 2017—2030 年, 西北五省原油产量主要由陕西和新疆两省贡献, 呈现先增后降的变化趋势, 在 2028 年左右达到顶峰。其中, 陕西在未来的生产中呈现先增后减的变化趋势, 在 2024 年左右出现峰值; 新疆在 2017—2030 年的原油产量呈现稳步递增的趋势, 并在 2025 年左右超越陕西成为西北五省第一产油大省, 到 2030 年新疆的原油产量将占到西北五省原油总产量的 72.40%。由图 12 可以看出, 2017—2030 年间西北五省成品油产量呈稳步上升的趋势, 成品油产量将进一步在陕西和新疆两省集中, 将由 2017 年的 66.84% 上升到 2030 年的 84.81%。总体而言, 石油作为工业的血液, 其不可替代性较高, 变化幅度相对平稳。

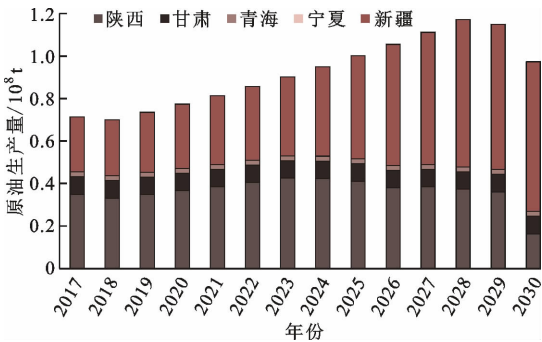


图 11 西北五省 2017—2030 年原油生产量
Fig. 11 Crude oil production of the five northwest provinces from 2017 to 2030

由图 13 可以看出, 在天然气生产方面, 西北五省在 2017—2030 年的天然气产量呈明显递增的趋势。其中, 陕西和新疆两省是主要贡献方, 两者天然气产量占到总产量的 90% 以上。新疆的天然气产量呈快速递增的趋势, 并在 2022 年左右超过陕西成为西北五省第一产气大省; 青海将稳步开发柴达木盆地的油气资源, 天然气产量稳步提升; 甘肃和宁夏的天然气产量相对匮乏。

由图 14 可以看出, 在电力生产方面, 西北五省

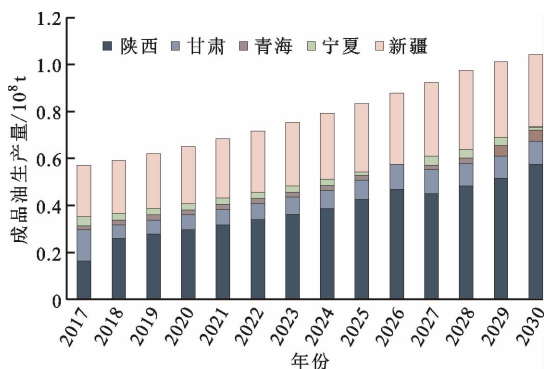


图 12 西北五省 2017—2030 年成品油生产量

Fig. 12 Refined oil production of the five northwest provinces from 2017 to 2030

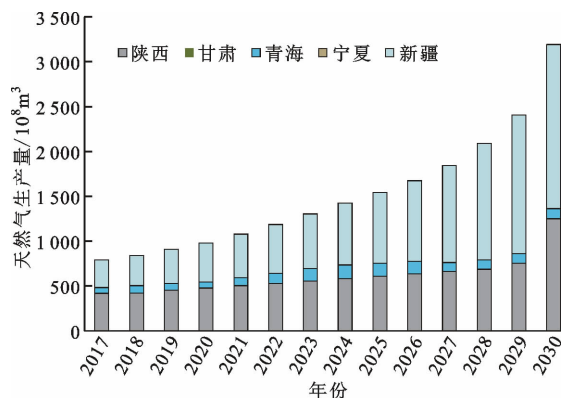


图 13 西北五省 2017—2030 年天然气生产量

Fig. 13 Gas production of the five northwest provinces from 2017 to 2030

2017—2030 年的电力生产量呈幂函数递增的趋势。其中,随着“疆电东送”通道的进一步打开,借助哈密—郑州±800 kV、准东—四川±1 100 kV 以及准东—华东±1 000 kV 的特高压直流线路,新疆的电力产量呈现大幅上升,到 2030 年新疆的电力生产量将达到 1 505.98 TW·h, 占到西北五省总产量的 40% 以上,源源不断地将电力送往中东部地区;宁夏

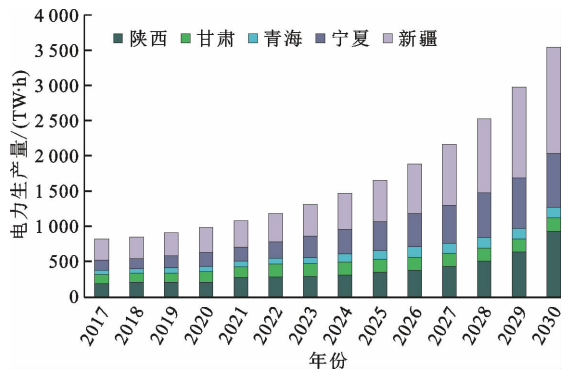


图 14 西北五省 2017—2030 年电力生产量

Fig. 14 Power production of the five northwest provinces from 2017 to 2030

风能和煤炭资源丰富,借助宁夏—山东±660 kV 直流输电线路以及宁夏—浙江±800 kV 特高压直流输电线路,电力产量也呈现不断攀升的趋势;陕西、甘肃和青海三省也均有一条自己的特高压输电线路,电力产量稳步提高。

3.3 能源调度方案

能源调度分析反映了西北五省省与省之间能源贸易往来的情况,且进入新疆的中哈原油管线和中国—中亚天然气管线反映了西北地区能源进口的情况。此外,因本文以西北五省为研究对象,其与我国其他省份能源互通的关系亦看作是能源进口/出口的关系,图 15~18 分别表示西北五省原油、成品油、天然气和电力 4 种能源形式的调度情况,图中线条的粗细表示调度量的大小。

由图 15 和图 16 可以看出,2017—2030 年间,西北五省原油和成品油的外输量在逐年提高,原油量从 2017 年的 0.16 亿吨提高至 2030 年的 0.24 亿吨,成品油量从 2017 年的 0.21 亿吨提高至 2030 年的 0.56 亿吨。在原油外输方面,起主要贡献作用的是新疆;在成品油外输方面,起主要贡献作用的是陕西。青海的油气资源主要来源于柴达木盆地,主要负责供给自身需求和外输至西藏地区。宁夏的油气资源相对贫乏,主要依赖于马惠原油管道的供给。

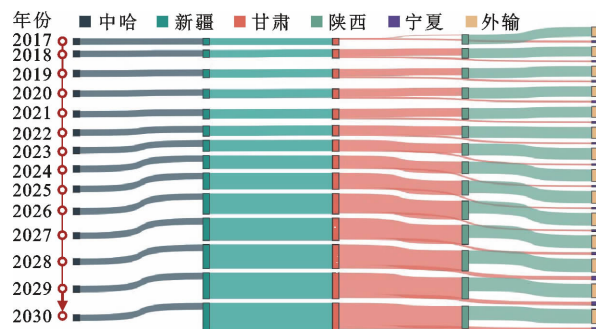


图 15 西北五省 2017—2030 年原油调度

Fig. 15 Crude oil dispatching diagram of the northwest provinces from 2017 to 2030

由图 15 可以看出,我国从中哈管道进口的原油量处于一个基本稳定的状态,随时间的变化比较小,这一方面主要是国家能源安全的限制,尽可能稳定我国原油的对外依存度;另一方面,随着西部大开发的进一步深入以及非常规油气勘探开发技术的应用,西北地区油气资源将得到进一步的开发,西北五省的原油产量大幅提高,在满足自身需求的情况下,有能力向我国中东部地区输送更多油量以保障其发展需求。在 2017—2030 年期间,新疆向甘肃调出的

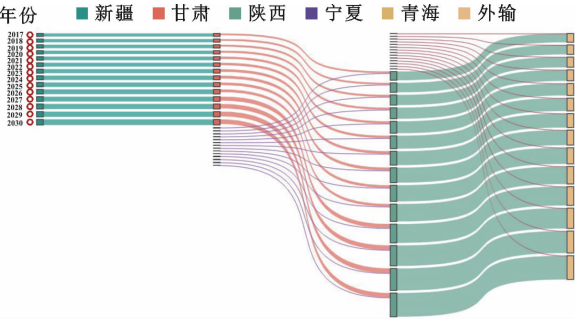


图 16 西北五省 2017—2030 年成品油调度

Fig. 16 Refined oil dispatching diagram of the northwest provinces from 2017 to 2030

原油量在逐年提高,从 2017 年的 0.12 亿吨增长至 2030 年的 0.48 亿吨。

由图 17 可以看出,在天然气调度方面,我国由中哈管道进口的天然气量随年份的增长呈现先增后趋于稳定的趋势,新疆和陕西两省的天然气外输量随年份增长呈快速增长的趋势。甘肃和宁夏两省主要通过西气东输管道消耗来自于上游省份的天然气,青海借助于柴达木盆地的气田主要满足自身和西藏地区天然气的需求,一部分调至甘肃。

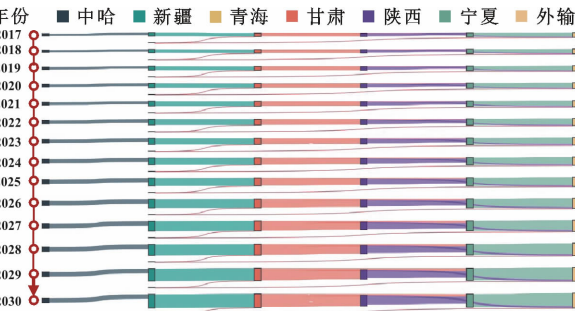


图 17 西北五省 2017—2030 年天然气调度

Fig. 17 Gas dispatching diagram of the northwest provinces from 2017 to 2030

随着电气化程度的不断提高,由图 18 可以看出,在 2017—2030 年期间,我国对电力的需求将保持高速增长,尤其是中东部地区。我国先进的特高压输电技术使得远距离、大容量的输电成为可能,近几年我国陆续投入诸如哈密—郑州、酒泉—湖南、宁夏—浙江等一系列的特高压输电线路,使得西北地区能源生产地与东南地区能源消费地联系的更加紧密。西北五省的外输电量将大幅提升,将由 2017 年的 94.97 TW·h 提高至 2030 年的 2 386.78 TW·h。其中,新疆和宁夏两省外输电量增长的速度最为明显,陕西和甘肃次之。青海以清洁能源发电为主,于 2021 年左右将通过青海—河南±800 kV 特高压直

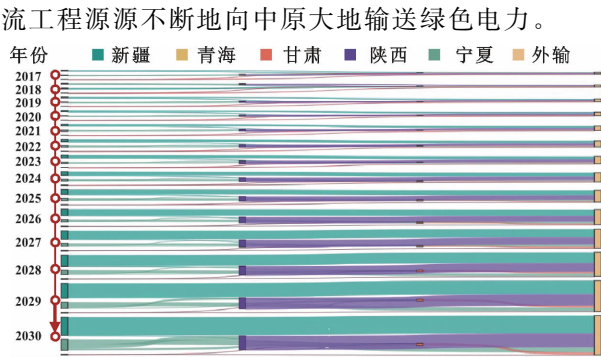


图 18 西北五省 2017—2030 年电力调度

Fig. 18 Power dispatching diagram of the northwest provinces from 2017 to 2030

3.4 能源生产建设分析

表 4 给出了西北五省基准年 2017 年和预测期末年 2030 年能源产能的对比分析,包括原煤产能、原油产能、成品油产能、天然气产能。表 5 给出了 2030 年电力产能在未加水资源约束和加水资源约束两种情形下的对比分析。

由表 4 可以看出,在中国中东部可开采煤炭资源量大幅减少的背景下,煤炭的产能基地有向西移的趋势,除青海外,西北五省其他各省区煤炭产能在 2017—2030 年间均呈增长的趋势。其中,陕西煤炭产能增长最快,由 2017 年 5.75 亿吨增长至 2030 年 10.26 亿吨;宁夏次之,煤炭产能由 2017 年 0.78 亿吨增长至 2030 年 1.18 亿吨。甘肃和新疆两省的煤炭产能相对增幅不大,维持稳定增长的状态;青海生态环境脆弱,且作为我国重要的水源涵养地,维持原有煤炭产能建设水平。

在原油产能建设方面,新疆的原油产能随年份增长而增长,其他四省基本不变。新疆拥有新疆油田、塔里木油田两个千万吨级大油田,原油产能将由 2017 年 0.37 亿吨增长至 2030 年的 0.82 亿吨。

在成品油产能建设方面,西北地区成品油生产将集中在陕西和新疆两省,其成品油产能随年份增加而增加,分别由 2017 年的 0.21 亿吨、0.38 亿吨增加至 2030 年的 0.56 亿吨、0.48 亿吨。甘肃、青海和宁夏三省基本维持原有成品油产能水平。

西北地区作为中国天然气主产区之一,在国家大力支持天然气发展的背景下,2017—2030 年间天然气产能建设将得到大幅提高。其中,新疆天然气产能提高幅度最大,2030 年将达到 236.883 Gm³,是 2017 年的将近 7 倍;陕西 2030 年天然气产能将达到 187.487 Gm³,是 2017 年的将近 4 倍;青海依

托柴达木盆地的油气资源,2030 年天然气产能将达到 20.118 Gm³,是 2017 的近 3 倍。甘肃和宁夏两省天然气资源匮乏,产能建设水平较低。

由表 5 可知,水资源约束的加入进一步限制了西北五省火电的发展,相比于未加水资源约束火电总产能下降了 146.16 TW·h,而可再生能源电力的产能建设得到进一步加强,相比于未加水资源约

束可再生能源电力总产能上升了 46.36 TW·h。此外,水资源在西北五省各省区的分布也不均衡,其中宁夏和甘肃两省的水资源最为短缺^[25],该两省在加水资源约束情况下的火电产能相比于未加水资源约束分别减少了 249.82 TW·h 和 70.46 TW·h,而水资源较为丰富的陕西和青海两省火电产能有所上升,以保障西北五省电力的稳定供应。

表 4 西北五省 2017 年和 2030 年能源产能建设对比

Table 4 Comparison of energy capacity construction in 2017 and 2030 in the five northwest provinces

年份	省份	煤炭产能/10 ⁸ t	原油产能/10 ⁸ t	成品油产能/10 ⁸ t	天然气产能/10 ⁸ m ³	电力产能/(TW·h)
2017 年	陕西	5.75	0.50	0.21	486.83	299.55
	甘肃	0.49	0.11	0.14	0.99	252.58
	青海	0.10	0.03	0.03	70.11	110.90
	宁夏	0.78	0	0.06	0	252.92
	新疆	1.82	0.37	0.38	350.16	524.54
2030 年	陕西	10.26	0.51	0.56	1 874.87	938.41
	甘肃	0.61	0.12	0.15	0.99	216.46
	青海	0.10	0.03	0.03	201.18	154.97
	宁夏	1.18	0	0.06	0	764.53
	新疆	2.06	0.82	0.48	2 368.83	1 505.98

表 5 西北五省 2030 年加水资源约束前后的电力产能建设对比

Table 5 Comparison of power capacity construction before and after water resource constraint in 2030 in the five northwest provinces

是否加入水 资源约束	电力类型	电力产能/(TW·h)					
		陕西	甘肃	青海	宁夏	新疆	西北五省总量
未加水资源约束	火电	156.07	193.53	37.74	612.79	341.87	1 342.00
	可再生能源电力	623.47	89.66	83.50	377.41	1 164.11	2 338.15
加水资源约束	火电	344.81	123.07	63.66	362.97	301.33	1 195.84
	可再生能源电力	593.60	93.39	91.31	401.56	1 204.65	2 384.51

4 结 论

本文以 2017 年为基期,在对西北五省 2018—2030 年终端能源需求总量进行预测分析的基础上,从供给侧出发,探讨了西北五省未来至 2030 年在碳排放强度约束和水资源约束下煤、油、气、电 4 种能源形式的结构变革、生产规划、调度规划和生产建设规划,得出以下结论。

(1)未来至 2030 年,西北五省一次能源消费总量仍呈明显增加的趋势,但是其能源结构发生了颠覆性改变,原煤、油气和非化石能源的比例从 2017 年的 6:3:1 变为 2030 年的 3:3:4,发展可再生能源是未来实现碳达峰和碳中和的主攻方向。终端能源

需求总量呈缓慢增加的趋势,煤炭、油气和电力的比例从 2017 年的 5:3:2 变为 2030 年的 1:5:4,城镇化和电气化是未来发展的趋势。

(2)能源生产方面:煤炭仍是保障能源供应的基础性能源,随着煤炭基地的进一步西移,西北五省煤炭生产量仍呈上升态势;西北五省是我国重要产油区,原油和成品油的生产将低速上升,原油产量将在 2028 年左右达到峰值;天然气产量明显提升,2030 年产量将是 2017 年的 4 倍之多,增产潜力大;电力供应能力持续增强,2030 年产量相比于 2017 年提高超过 3 倍。

(3)能源调度方面:中哈管道进口原油量保持稳定,新疆—甘肃—陕西原油和成品油主干管道输送

能力需扩展2~3倍,陕西作为西北五省能源外输的“桥头堡”,原油和成品油外输能力需扩展1~2倍;中国—中亚天然气管线进口天然气量将进一步增加,到2027年将达到管线额定容量85 Gm³,新疆—甘肃—宁夏—陕西天然气主干管道输送能力需扩展3~4倍,陕西和宁夏的外输能力需扩展2~3倍;提升西北五省电力主产地与中东部地区电力消费地的通达能力,国家已开始布局西北五省各省区特高压外输线路的建设,未来有进一步加强的趋势。

(4)能源生产建设方面:煤炭2030年产能将是2017年的1.6倍,原油2030年的产能将比2017年增长47%,均集中于陕西、新疆两省,两省的产能之和将占到总产能的85%;成品油2030年产能将比2017年增长54%,主要集中于陕西和新疆两省,两省成品油产能之和占到成品油总产能的81%;天然气2030年产能将近是2017年的5倍,主要集中于陕西、新疆两省,两省天然气产能之和与天然气总产能之比超过95%;到2030年,可再生能源电力产能将超过火电产能发挥主要作用,而水资源约束的加入更加遏制了宁夏和甘肃两省火电的发展,与此同时水资源较为丰富的陕西和青海两省的火电产能有所上升,以保障西北五省电力的稳定供应。

参考文献:

- [1] 胡健, 焦兵. 油气资源开发对西部区域经济拉动效应的比较研究: 基于陕西、四川、青海和新疆4省区的研究[J]. 管理学报, 2008, 5(5): 655-658.
HU Jian, JIAO Bing. Stimulation effect on our western regional economy of developing oil and gas resources: a comparative study of tree provinces and an autonomous region in our western regions [J]. Chinese Journal of Management, 2008, 5(5): 655-658.
- [2] 刘海燕, 方创琳, 蔺雪芹. 西北地区风能资源开发与大规模并网及非并网风电产业基地建设[J]. 资源科学, 2008, 30(11): 1667-1676.
LIU Haiyan, FANG Chuanglin, LIN Xueqin. Wind energy resource exploitation and large-scale on-grid and off-grid wind power industrial base construction in northwest China [J]. Resources Science, 2008, 30(11): 1667-1676.
- [3] 周扬, 吴文祥, 胡莹, 等. 西北地区太阳能资源空间分布特征及资源潜力评估[J]. 自然资源学报, 2010, 25(10): 1738-1749.
ZHOU Yang, WU Wenxiang, HU Ying, et al. The temporal-spatial distribution and evaluation of potential solar energy resources in northwest China [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(10): 1738-1749.
- [4] 郝丽, 孙娴, 张文静, 等. 陕西省能源消费碳排放及脱钩分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 298-305.
HAO Li, SUN Xian, ZHANG Wenjing, et al. Carbon emissions and decoupling analysis on energy consumption in Shaanxi province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(5): 298-305.
- [5] 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.
ZHAO Xuanmin, BIAN Tengruai. Factor decomposition of carbon emissions from energy consumption of Shaanxi province based on LMDI [J]. On Economic Problems, 2015(2): 35-39.
- [6] 黎水宝, 程志, 王伟, 等. 基于能源平衡表的宁夏二氧化碳排放核算研究[J]. 环境工程, 2015, 33(12): 130-133.
LI Shuibao, CHENG Zhi, WANG Wei, et al. Accounting of CO₂ emissions for Ningxia based on the energy balance [J]. Environmental Engineering, 2015, 33(12): 130-133.
- [7] 王磊, 宋乃平. 宁夏经济增长过程中的碳排放分析与预测[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 23-27.
WANG Lei, SONG Naiping. Analysis and forecast on carbon emission in process of economic growth in Ningxia [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(7): 23-27.
- [8] 汪菲, 王长建. 新疆能源消费碳排放的多变量驱动因素分析: 基于扩展的STIRPAT模型[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 441-452.
WANG Fei, WANG Changjian. Examining the driving factors of energy related carbon emissions using the extended STIRPAT model based on IPAT identity in Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 441-452.
- [9] 韦良焕, 于坤, 莫治新, 等. 西北五省温室气体排放核算及动态研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 32-37.
WEI Lianghuan, YU Kun, MO Zhixin, et al. Accounting and dynamics of greenhouse gases emissions in five northwestern provinces [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(1): 32-37.
- [10] 董棒棒, 李莉, 唐洪松, 等. 环境规制、FDI与能源消费碳排放峰值预测: 以西北五省为例[J]. 干旱区地理, 2019, 42(3): 689-697.
DONG Bangbang, LI Li, TANG Hongsong, et al. Environmental regulation, FDI and energy consumption peak carbon emissions forecast: a case of five

- provinces in northwest China [J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(3): 689-697.
- [11] 邓小乐, 孙慧. 基于 STIRPAT 模型的西北五省区碳排放峰值预测研究 [J]. *生态经济*, 2016, 32(9): 36-41.
- DENG Xiaole, SUN Hui. Forecast of the northwest five provinces' carbon emission based on STIRPAT model [J]. *Ecological Economy*, 2016, 32(9): 36-41.
- [12] 邢强. 西北五省经济发展与碳排放量的关系研究: 基于面板数据的分析 [D]. 兰州: 兰州财经大学, 2014.
- [13] 龚新蜀, 李龙. 西北五省产业结构与碳排放量的关联分析 [J]. *工业技术经济*, 2014, 33(4): 154-160.
- GONG Xinshu, LI Long. Correlation analysis between industrial structure and carbon emission in five northwest provinces [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2014, 33(4): 154-160.
- [14] 郭卫香, 孙慧. 西北 5 省碳排放与产业结构碳锁定的灰色关联分析 [J]. *工业技术经济*, 2018, 37(7): 119-127.
- GUO Weixiang, SUN Hui. A grey correlation analysis of carbon emission and industrial structure carbon locked in northwest five provinces [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2018, 37(7): 119-127.
- [15] 中国工程院“西北地区工矿资源开发的用水和可持续发展对策研究”课题组. 西北地区能源(石油天然气、煤炭)工业用水对策研究 [J]. *水利规划与设计*, 2003(3): 4-5.
- Research group of “research on water use and sustainable development countermeasures for industrial and mining resources development in northwest China” of Chinese Academy of Engineering. Policy study of the water supply for energy resources (natural gas and coal) industry in north-west China [J]. *Water Resources Planning and Design*, 2003(3): 4-5.
- [16] 孙廷容, 张洪波, 黄强. 西北水资源与能源工业可持续发展战略研究 [J]. *西北水力发电*, 2004, 20(4): 9-12.
- SUN Tingrong, ZHANG Hongbo, HUANG Qiang. A strategic study on northwestern China water resource and energy industry sustainable development [J]. *Journal of Northwest Hydroelectric Power*, 2004, 20(4): 9-12.
- [17] 项潇智, 贾绍凤. 中国能源产业的现状需水估算与趋势分析 [J]. *自然资源学报*, 2016, 31(1): 114-123.
- XIANG Xiaozhi, JIA Shaofeng. Estimation and trend analysis of water demand of energy industry in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(1): 114-123.
- [18] QIU Shuo, LEI Tian, WU Jiangtao, et al. Energy demand and supply planning of China through 2060 [J]. *Energy*, 2021, 234: 121193.
- [19] 邱硕, 王雪强, 毕胜山, 等. 陕西省能源需求预测及其影响因素分析 [J]. *中国管理科学*, 2016, 24(S1): 921-926.
- QIU Shuo, WANG Xueqiang, BI Shengshan, et al. Forecast of energy demand in Shaanxi province and analysis of its influencing factors [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(S1): 921-926.
- [20] 路利平. 陕西省 CO₂ 排放影响因素分解及碳排放峰值预测 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2017.
- [21] 邱硕, 王雪强, 毕胜山, 等. LEAP 模型下的陕西省节能与温室气体减排潜力分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(11): 28-35.
- QIU Shuo, WANG Xueqiang, BI Shengshan, et al. Analysis of energy conservation and GHG emission reduction potential of Shaanxi province under the LEAP model [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(11): 28-35.
- [22] 马红祥, 刘大千. 甘肃经济增长率周期性分析与预测 [J]. *开发研究*, 2019(5): 23-29.
- MA Hongxiang, LIU Daqian. Periodicity analysis and prediction of economic growth rate in Gansu [J]. *Research on Development*, 2019(5): 23-29.
- [23] 刘晓, 巫朝霞. 丝绸之路新疆经济预测研究 [J]. *石河子科技*, 2019(3): 11-16.
- LIU Xiao, WU Chaoxia. Study on the economic forecast of Xinjiang along the Silk Road [J]. *Shihezi Science and Technology*, 2019(3): 11-16.
- [24] 中华人民共和国生态环境部. 中国应对气候变化的政策与行动 2018 年度报告 [R/OL]. [2021-09-24]. <http://www.mee.gov.cn/ywgz/ymqhbh/qhbhlf/201811/P020210303510160595227.pdf>.
- [25] 温胜芳, 单保庆, 马静, 等. 水资源缺乏地区地表水环境承载现状研究: 以京津冀和西北五省(自治区)为例 [J]. *中国工程科学*, 2017, 19(4): 88-96.
- WEN Shengfang, SHAN Baoqing, MA Jing, et al. Surface water environmental carrying capacity in water-deficient areas: a case study on Jingjinji and the five northwestern provinces and autonomous regions in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2017, 19(4): 88-96.

(编辑 武红江 亢列梅)