

清洁能源示范省建设背景下青海能源需求预测及清洁化发展对策

李红霞, 张祥成, 李芳, 张海宁, 李楠, 马雪

(国网青海省电力公司清洁能源发展研究院, 青海 西宁 810008)

摘 要: 2018 年青海省获批建设国家清洁能源示范省并于同年提出《青海省建设国家清洁能源示范省工作方案(2018—2020 年)》, 以绿色、高效和安全为总目标, 推进能源生产和消费革命, 为中国能源清洁转型与现代能源体系建设贡献力量。在清洁能源示范省建设背景下, 开展青海能源需求预测及清洁化发展对策研究。首先, 分析青海省清洁能源发展现状以及面临的挑战; 然后, 通过双变异差分进化算法优化 BP 神经网络预测模型, 建立 DMDE-BPNN 混合预测模型; 分析青海省典型水平年能源需求预测结果, 探讨青海省能源清洁化发展对策。

关键词: 能源需求预测; 清洁化发展对策; DMDE-BPNN 混合预测模型; 国家清洁能源示范省

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202007277

0 引言

2018 年, 国家能源局印发《关于青海创建国家清洁能源示范省有关事项的复函》, 支持青海创建国家清洁能源示范省, 在建设过程中, 一些挑战逐步显现, 能源消费逐年递增, 能源需求逐渐由单一向多元化转变, 难于精准预测, 导致无法有针对性地调整能源结构和布局。迫切需要寻找精准预测方法, 准确研判能源需求并提出清洁化发展对策, 从而使清洁能源示范省建设与经济、社会、环境发展实现协调。

目前针对能源发展问题, 已有相关研究提出了解决方案。文献[1]从能源供需的宏观角度为中国电能替代路径提供了参考方向; 文献[2]通过建立能耗量预测模型, 实现了能源耗量的实时管控; 文献[3]预测了中国新能源消费量, 并针对中国新能源可持续发展提出了对策和建议; 文献[4]分析了中国新能源发展存在的问题, 并针对相应的问题提出了对策; 文献[5]针对高消耗、高排放的能源发展问题, 提出了高比例新能

源的发展趋势。然而, 国内缺乏针对具体场景和约束的能源需求预测以及相应发展对策研究, 为与青海省类似的省级或区域能源发展所面临的具体问题提供科学的解决方法。

同时, 目前能源需求预测存在影响因素繁多、构建模型复杂、预测精度不足等问题, 而准确的能源需求预测, 不仅可以指导能源如何发展, 提高能源利用率, 还可以协助制定合理的节能环保政策, 最终实现能源、经济与环境可持续协调发展, 为青海建设清洁能源示范省提供理论基础和技术支撑。

现有研究主要利用自回归模型、灰色模型、支持向量机和 BP 神经网络模型(back propagation neural network, BPNN)等单个模型描述并预测能源需求变化特征。文献[6]利用单一的差分整合移动平均自回归模型(autoregressive integrated moving average model, ARIMA)模型对中国能源消费进行了预测; 文献[7]提出了基于灰色模型(grey model, GM)对中国能源消费进行了预测; 文献[8]提出了基于最小二乘支持向量机对中国能源消费进行了计算; 文献[9]提出了一种基于 BP 神经网络的预测技术, 并运用该算法对能源管理系统能源消费量进行建模与分析; 文献[10]提出了一种能源消费组合模型, 该模型采用

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2021-01-30。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(我国减少清洁能源发电弃能的机制设计及其模拟模型研究, 71573084)。

ARIMA 和 BPNN 模型进行优化组合, 其预测精度要优于单一模型; 能源消费受多方面因素的制约, 这些因素之间既有线性的关系, 也包含非线性的关系^[11-14]。与其他数学模型相比, BPNN 模型具有较强的非线性映射能力和柔性的网络拓扑结构, 对于非线性复杂问题具有很好的适用性, 但是 BP 神经网络模型也有容易陷入局部最优、诊断精度低、收敛速度慢等缺点。文献^[15]针对这些缺点, 提出一种差分进化算法 (differential evolution algorithm, DE) 与 BPNN 相结合的方法。因此, 本文结合双变异差分进化算法 (double mutations differential evolution algorithm, DMDE) 和 BPNN 的优点, 通过采用 DMDE 模型优化 BPNN 模型对能源消费进行预测, 从而较好的分析青海能源需求的变化规律和波动特征。

针对目前能源需求预测存在的问题以及研究青海能源清洁化发展对策的迫切需要性, 本文提出一种基于 DMDE-BPNN 的能源需求预测方法。首先, 分析青海省能源清洁发展现状以及面临的挑战; 然后, 建立 DMDE-BPNN 混合预测模型, 并以青海省为案例, 分析典型水平年能源需求预测结果; 最后, 结合预测结果探讨青海省能源清洁化发展对策。能源清洁化发展对策研究对于提升新能源消纳, 深入探索能源革命的高质量推动具有重要意义。

1 青海省能源清洁发展现状及挑战

青海清洁能源丰富, 丰光富水好风, 清洁能源开发建设条件优越, 是国内罕有以清洁能源为主的多能互补能源基地。图 1 为青海省清洁能源装机情况。

(1) 青海省太阳能资源极为丰富, 总储量约为 30 亿 kW, 全国排名第 2; 截至 2019 年底, 装机为 1 122.013 3 万 kW。

(2) 水能资源储量 2 337.46 万 kW, 位居全国第 5 位; 截至 2019 年底, 装机为 1 191.968 万 kW。

(3) 风能资源总储量为 4.119 亿 kW, 估算风能资源技术可开发量约 0.121 亿 kW。截至 2019 年底, 装机为 461.8 万 kW。

2019 年, 青海可再生能源整体占比达到 87.61%, 全年外送清洁电量超过 100 亿 kW·h。

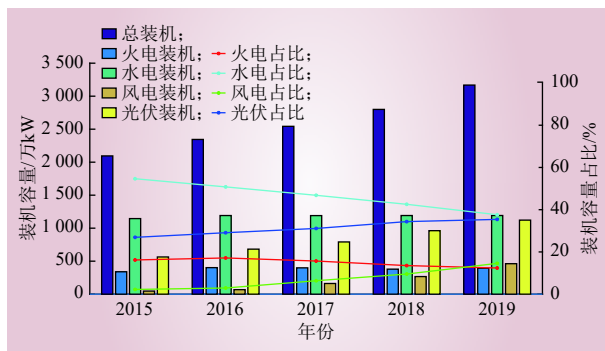


图 1 青海省清洁能源装机情况

Fig. 1 Installation situation of clean energy in Qinghai Province

虽然清洁能源装机特别是新能源装机逐年快速增长, 但同时暴露出来的诸多问题也制约着青海能源的持续清洁化发展, 主要挑战如下。

(1) 新能源产业整体对政策扶持的依赖度较高, 受政策调整的影响较大, 面临可持续发展的难题。

(2) 省内增量电力市场空间不足, 省外电力市场空间竞争激烈, 新能源消纳困难。

(3) 系统调节能力不足, 随着新能源装机占比提升, 系统缺乏可灵活调节电源, 给电网调度运行带来较大压力。

(4) 电网建设与新能源发展不匹配, 新能源配套电网送出工程建设周期远高于新能源本体建设周期, 短时存在外送通道能力与新能源发展不匹配问题。

2 基于 DMDE-BPNN 的混合预测模型

2.1 模型预测方法对比

目前常用的能源预测方法包括 ARIMA 模型、GM 模型、支持向量机和 BPNN 模型, 其优劣势分析如表 1 所示^[16-18]。由表 1 可知, 与其他数学模型相比, BPNN 模型具有较强的非线性映射能力和柔性的网络拓扑结构, 对于非线性复杂问题具有很好的适用性, 但是 BPNN 模型也有容易陷入局部最优、收敛速度慢等缺点。因此, 本节针对 BPNN 存在的缺点, 通过 DMDE 进行优化 BPNN 预测模型, 从而建立 DMDE-BPNN 混合预测模型对青海能源进行预测。

表1 能源预测方法对比

Table 1 Comparison of energy forecasting methods

方法	优点	缺点
ARIMA模型	所需资料不多，可用自身变数数列来进行预测	必须具有自相关，不适用于受社会因素影响较大的现象
GM模型	不需要大量样本，预测准确度高	误差偏大，不适合做长期预测
支持向量机	可向高维空间进行映射，解决非线性的分类，分类效果较好	对大规模训练样本难以实施，对缺失数据、参数和核函数的选择敏感
BPNN	具有很强的非线性映射能力和柔性的网络结构	容易陷入局部极小值，收敛速度慢

2.2 DMDE-BPNN 混合预测模型

BPNN 预测模型由一个输入层、一个隐含层和一个输出层构成^[9]。BPNN 预测模型确立的过程就是对训练集训练的过程，在此过程中决策变量很多，BPNN 的标准学习算法使其易陷入局部最优解且收敛速度慢。

双变异差分进化算法（DMDE）是在差分进化算法（DE）的基础上引入双变异策略，通过添加其他可行解的信息，调整和平衡收敛速度与种群多样性之间的矛盾。因此通过 DMDE 优化 BPNN 可以避免陷入局部点，使 BPNN 模型的预测结果具有较低误差^[19-20]。

DE 的核心是变异算子，当前应用最多的变异算子有 3 种类型，分别如式（1）~（3）所示，都存在适用性不强的问题。

$$v_i^G = x_{r0}^G + F(x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (1)$$

$$v_i^G = x_{\text{best}}^G + F(x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (2)$$

$$v_i^G = x_i^G + F(x_{\text{best}}^G - x_i^G) + F(x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (3)$$

式中： $r0$ 、 $r1$ 、 $r2$ 为 3 个彼此不相等的数； x_i^G 、 x_{r0}^G 、 x_{r1}^G 、 x_{r2}^G 为父代种群中不同的个体； V_i^G 为变异个体； x_{best}^G 为当前种群中的最优个体； F 为缩放因子，其取值通常在 [0,1] 之内，控制偏差向量的放大作用 G 为迭代次数。

DMDE 的变异算子是将最优个体引导机制改成基于排序的可行解选取递减策略引导机制，解决了种群早熟和多样性流失的问题，具体的改进变异算子为

$$v_i^G = x_i^G + F(x_{\text{best}}^{\text{BFSG}} - x_i^G) + F(x_{r1}^G - x_{r2}^G) \quad (4)$$

$x_{\text{best}}^{\text{BFSG}}$ 是从 $[1, \text{rank}(G)]$ 范围内随机选择的变

异个体， $\text{rank}(G)$ 可以根据下式求得。

$$\text{rank}(G) = N_p - (N_p - 1) \sqrt{G/G_m} \quad (5)$$

式中： G_m 为最大迭代次数； N_p 为群体规模。

利用种群的适应度方差来看种群的聚集情况， f_i 为第 i 个个体的适应度， $\bar{f}$ 为当前种群的平均适应度，则种群平均适应度方差 δ^2 可定义为

$$\delta^2 = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \left| \frac{f_i - \bar{f}}{\max\{|f_i - \bar{f}|\}} \right| \quad (6)$$

当 $\delta^2=0$ 时，则 $|f_i - \bar{f}|=0$ ，即 $f_i=\bar{f}$ ，说明种群陷入局部最优，出现早熟；当 $\delta^2 \neq 0$ 时，则 $|f_i - \bar{f}| \neq 0$ ，分两种情况：远大于 0 时，说明个体都远离平均个体，种群是分散的处在随机搜索阶段；接近于 0 时，说明个体与个体间都相互靠近，处于聚集的状态，可以得出 δ^2 与种群的聚集程度成反比。

双变异策略的具体实现过程可表示为

$$v_i^G = \begin{cases} x_i^G + F(x_{\text{best}}^{\text{BFSG}} - x_i^G) + F(x_{r1}^G - x_{r2}^G), & L \text{ 达到阈值} \\ x_i^G + F(x_{r1}^G - x_{r2}^G), & L \text{ 未达到阈值} \end{cases} \quad (7)$$

DMDE 通过计算 δ^2 的值判断种群是否出现聚集，多策略变异机制充分利用了两个变异算子各自的优势，调整和平衡了收敛速度和种群多样性之间的矛盾。

2.3 DMDE-BPNN 模型求解算法

DMDE-BPNN 混合算法的流程如图 2 所示。DMDE-BPNN 是把 DMDE 算法与 BPNN 算法结合起来的一种两阶段混合算法：第一阶段是用 DMDE 算法对 BPNN 的初始权值和阈值进行全局预搜索，第二阶段将第一阶段获得的最优解赋给 BPNN 作为其初始权值和阈值，再利用 BP 算法深度局部搜索，得到满足训练目标的网络权值和阈值，最终得到 BPNN 预测模型。

3 基于 DMDE-BPNN 的青海省能源需求预测

本文选择青海省作为研究对象，历年能源数据如图 3 所示（数据来源为省级统计年鉴）。

3.1 基础数据及预测过程分析

由于能源需求受社会、经济、人口、技术发展、政策等众多因素影响，本文结合当前关于能

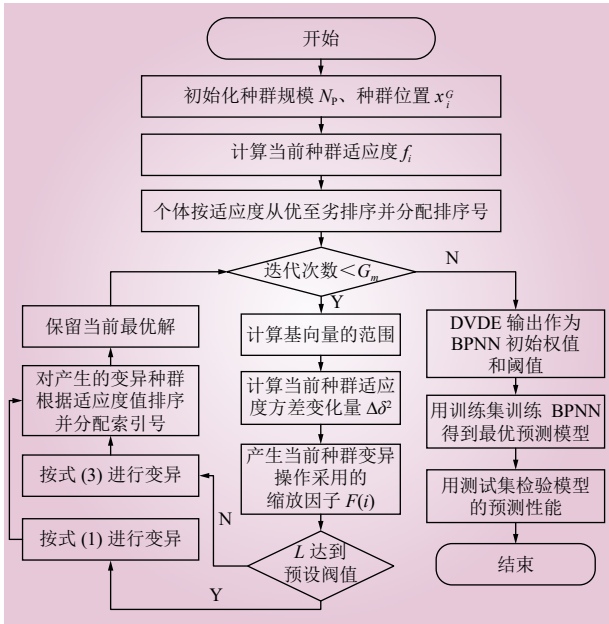


图 2 DMDE-BPNN 混合算法流程
Fig. 2 Flow chart of the DMDE-BPNN hybrid algorithm

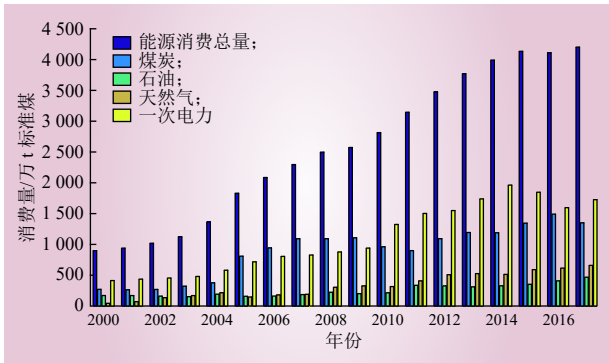


图 3 青海省历年能源数据
Fig. 3 Energy data of Qinghai Province over the years

源预测的研究，选取经济发展水平（GDP，亿元）、常住人口（ P ，万人）、第三产业占比（ TR ，%）、城镇化率（ UR ，%）、居民消费水平（ TC ，元）、技术水平支出（ RD ，亿元）等影响因素进行分析，并设定基准、高增长和低增长 3 种能源发展情景，以此来研究清洁能源示范省建设背景下青海能源需求以及发展战略，青海省能源发展影响因素基础数据如表 2 所示。

以高经济增长、快速城镇化、人口快速增长、三产比例快速提高的情况定义为高增长情景；将经济增速较低、低速城镇化、人口低速增长、三产比例较低速度增长为低增长情景；基于对现实情况的分析以及对未来发展可能性的分

表 2 青海省能源发展指标基础数据
Table 2 Basic data of energy development indicators of Qinghai Province

年份	GDP/亿元	UR/%	TC/元	P /万人	TR/%	RD/亿元
2000	263.68	0.35	2 384	516.50	43.51	1.29
2001	294.56	0.36	2 598	523.10	44.24	5.40
2002	336.39	0.38	2 828	528.60	44.24	6.30
2003	381.05	0.38	3 105	533.80	44.56	2.40
2004	438.08	0.39	3 443	538.60	44.22	3.00
2005	522.96	0.39	3 888	543.20	40.80	3.00
2006	615.37	0.39	4 229	547.70	40.47	3.30
2007	735.85	0.40	4 978	551.60	40.08	3.80
2008	905.23	0.41	5 830	554.30	39.32	3.90
2009	1 121.91	0.42	6 501	557.30	35.52	7.60
2010	1 247.03	0.45	7 326	563.47	37.76	9.90
2011	1 532.06	0.46	8 744	568.17	35.26	12.60
2012	1 875.07	0.47	10 289	573.17	33.29	13.20
2013	2 098.80	0.49	12 070	577.79	36.50	13.80
2014	2 317.50	0.50	13 534	583.42	36.81	14.30
2015	2 491.50	0.50	15 167	588.43	40.17	11.60
2016	2 610.17	0.52	16 751	593.46	42.19	14.00
2017	2 760.02	0.53	18 020	598.38	44.25	17.90

析，将能源消费中速增长情况定义为基准情景。不同情景中指标参数设置如表 3 所示。

本文预测采用的是自上而下和自下而上相结合的方式，即总量预测与分能源的总量预测之间会存在差距，对两者之间进行结合，考虑政策约束等条件后进行技术调整处理。首先，根据自上而下的能源总量、分品种预测出来加总的总量、约束条件确定初步的能源总预测量，然后对各分能源消耗量按照预测出来的比例对总量进行分配，确定初步的分品种能源需求。然后根据分品种的能源相应发展约束对其进行调整，最后再反映到能源总量的调整上。能源预测过程分析如图 4 所示。

3.2 不同情景下青海能源预测结果

本文采用 DMDE-BPNN 混合预测模型对青海省能源需求进行预测，设总体大小 $N_p=500$ ，迭代次数最大值 $G=100$ 。记录每个种群变化生成的最小值，并迭代生成不同情况下的适应度曲线，如图 5 所示。

由图 5 可知，当算法在基础情景中运行时，



表 3 不同情景中指标参数设置
Table 3 Index parameter setting in different scenarios

情景	指标	参数设置
固定设置	人口总量	2025年：640万，2035年：660万，2050年：维持在660万左右
	研发经费	2025年：GDP的1.5%，2035年：GDP的2.5%，2050年：GDP的3.5%
基准情景	GDP	2021—2025年年均增长6.5%，2026—2035年年均增长5.5%，2035—2050年年均增长3.5%
	城镇化率	2025年达65%，2035年达70%，2035年以后城镇化进程放缓，到2050年达78%
	第三产业比值	2025年达55%，2035年达60%，预计到2050年，青海省第三产业比重将提高到65%左右
低增长情景	GDP	2021—2025年年均增长6%，2026—2035年年均增长5%，2035—2050年年均增长3%
	城镇化率	2025年达63%，2035年达68%，2035年以后城镇化进程放缓，到2050年达76%
	第三产业比值	2025年达53%，2035年达58%，预计到2050年，青海省第三产业比重将提高到63%左右
高增长情景	GDP	2021—2025年年均增长7%，2026—2035年年均增长6%，2035—2050年年均增长4%
	城镇化率	2025年达67%，2035年达72%，2035年以后城镇化进程放缓，到2050年达80%
	第三产业比值	2025年达57%，2035年达62%，预计到2050年，青海省第三产业比重将提高到67%左右

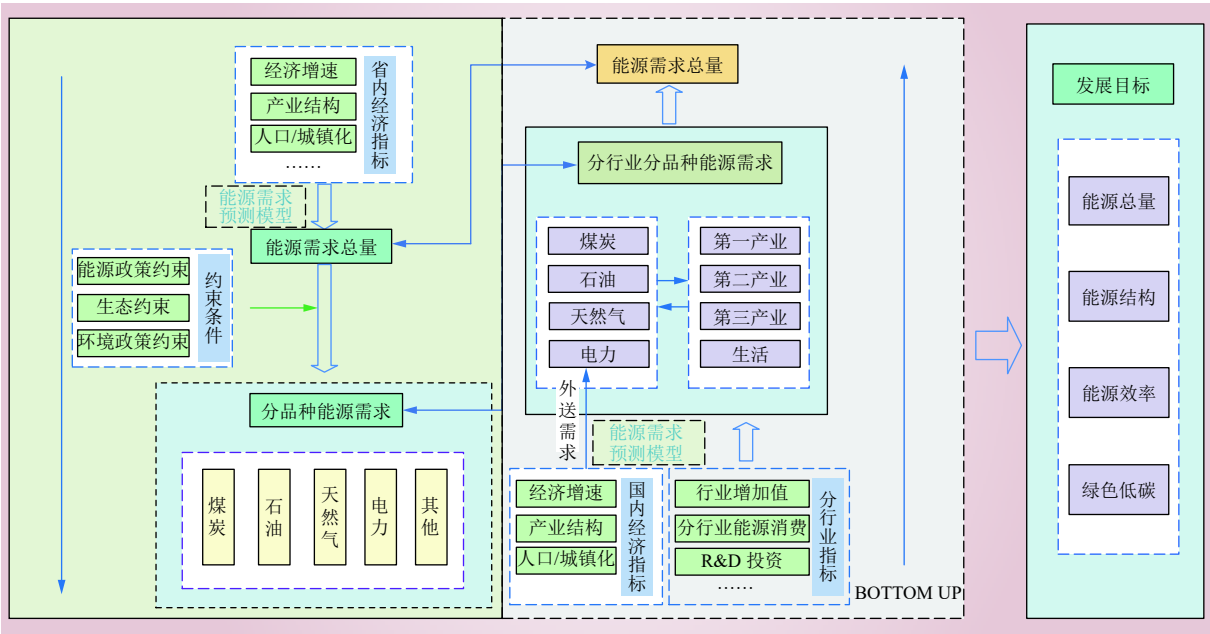


图 4 能源预测过程
Fig. 4 Energy forecasting process

其在大约在 19 次迭代之前不会收敛。总计算时间约为 22.15 s，最优解计算时间为 6.94 s。在高速增长情景和低速增长情景中分别迭代 19 次、20 次时寻到最优解。

根据上面的能源数据和场景设置以及不同场景中指标的参数设置，采用 DMDE-BPNN 混合预测模型对 3 种情景先青海省关键水平年能源需求情况进行预测。得到基础情景、高速发展情景和低速增长情景中各能源需求量如表 4 所示。

按照青海省能源发展定位，综合考虑安全、

资源、环境、技术与经济等因素，结合需求分析结果，预计青海省 2025、2035 以及 2050 年，能源消费总量分别为 5 164 万~5 973 万 t 标准煤、6 295 万~8 028 万 t 标准煤、6 584 万~9 183 万 t 标准煤。2050 年清洁能源将在能源中占据主导地位，化石能源步入下行通道。煤炭主要受政策及需求下降影响呈下降趋势，2025 年消耗约为 1 220 万 t，2035 年为 1 120 万 t，2050 年降至 600 万 t。石油及天然气需求受资源储量约束较为明显，石油呈下降趋势，在 2025 年之前维持在 444 万 t 左

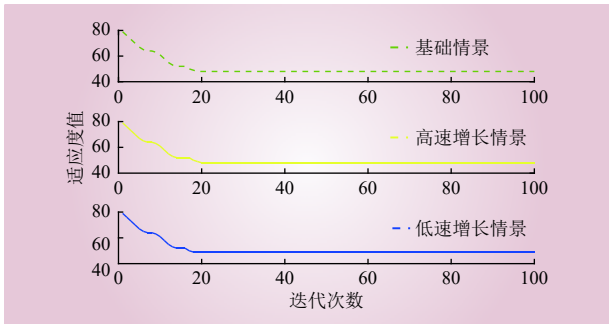


图 5 DMDE-BNPP 算法下 3 种场景的适应度曲线
Fig. 5 Adaptability curves of three scenarios with DMDE-BNPP algorithm

表 4 3 种不同情景下青海能源需求预测结果
Table 4 Energy demand forecasting results under three different scenarios in Qinghai Province

年份	情景	能源 总量/ 万 t 标准煤	煤炭/ 万 t 标准煤	石油/ 万 t	天然 气/亿 m ³	其他 清洁 能源/万 t 标准煤	全社 会用 电量/ 亿 (kW·h)	外送 电量/ 亿 (kW·h)
2025	基础	5 600	1 220	444	60	2 948	1 050	400
	高速增长	5 973	1 220	481	62	3 238	1 140	400
	低速增长	5 164	1 220	413	58	2 650	920	400
2035	基础	7 230	1 120	471	87	4 280	1 510	650
	高速增长	8 028	1 120	506	87	5 012	1 750	650
	低速增长	6 295	1 120	420	87	3 274	1 200	400
2050	基础	7 700	600	377	87	5 405	1 869	800
	高速增长	9 183	600	428	87	6 815	2 340	800
	低速增长	6 584	600	376	87	4 225	1 480	400

右，2035 年约为 471 万 t，2050 年将至 377 万 t。天然气需求在 2025 年维持在 60 亿 m³ 左右，2035—2050 年维持在 87 亿 m³ 左右。清洁能源则呈上升趋势，增长较为明显，2025 年消耗约为 2 948 万 t，2035 年为 4 280 万 t，2050 年降至 5 405 万 t。电力受清洁能源高速发展、外送通道建设等影响呈上升趋势，在基础情景中 2025 年发电量为 1 450 亿 kW·h，2035 年发电量为 2 160 亿 kW·h，2050 年电力供应提升至 2 619 亿 kW·h，其中全社会用电量分别为 1 050 亿 kW·h、1 510 亿 kW·h、1 819 亿 kW·h，外送电量分别为 400 亿 kW·h、650 亿 kW·h、800 亿 kW·h。此外，可以从表 4 中

可以看出，高速增长情景中能源需求最多，基础情景次之，低速发展情景中能源需求量最少，这是因为经济、人口等快速增长等会带动能源需求快速发展。

3.3 不同背景下青海能源预测结果分析

图 6 分别为基础情景、高速增长情景和低速增长情景中一次能源消费结构。

根据预测结果并考虑电能替代因素，煤炭增量需求由清洁能源替代，3 种情境中煤炭需求呈下降趋势，在基础情景中煤炭消费占比从 2025 年的 22% 降至 2050 年的 8%，高速增长情景中所占比重比基础情景中小，而低速增长情景中所占比重则要比基础情景要大。此外，石油需求逐渐由清洁能源替代，其所占比重也在持续下降，在基础情景中从 2025 年的 12% 降至 2050 年的 8%，高速增长情景中所占比重比基础情景中小，而低速增长情景中所占比重基本和基础情景一样。天然气所占比重基本维持不变，在基础情景中从维持在 15% 左右，高速增长情景中所占比重比基础情景中小，而低速增长情景中所占比重则要比基础情景要大。清洁能源消费占比在持续增长，在基础情景中从 2025 年的 52% 升至 2050 年的 70%，高速增长情景中所占比重比基础情景中大，而低速增长情景中所占比重则要比基础情景要小。

青海定位于清洁能源外送大省，外送能源以电力为主，在清洁能源示范省建设过程中，电力供给在满足省内需求的同时，还重点关注保障大规模清洁电力外送。结合能源需求预测结果以及青海省资源条件与能源开发预期，青海省发电量情况如图 7 所示，即发电量按全社会用电量和外送电量预测值之和计算。图 7 为不同情景下青海省发电量及清洁能源发电量占比。基准情景下预计 2025 年发电量约为 1 450 亿 kW·h，2035、2050 分别为 2 160 亿和 2 619 亿 kW·h，清洁能源发电占比分别为 85%、95% 和 100%。高速增长情景下预计 2025 年发电量约为 1 540 亿 kW·h，2035、2050 分别为 2 400 亿和 3 140 亿 kW·h，清洁能源发电占比分别为 87%、96% 和 100%。低速增长情景下预计 2025 年发电量约为 1 320 亿 kW·h，2035、2050 分别为 1 600 亿和 1 880 亿 kW·h，清洁能源发电占比分别为 89%、95% 和 100%。

图 8~9 为不同情景下青海省清洁能源效率目

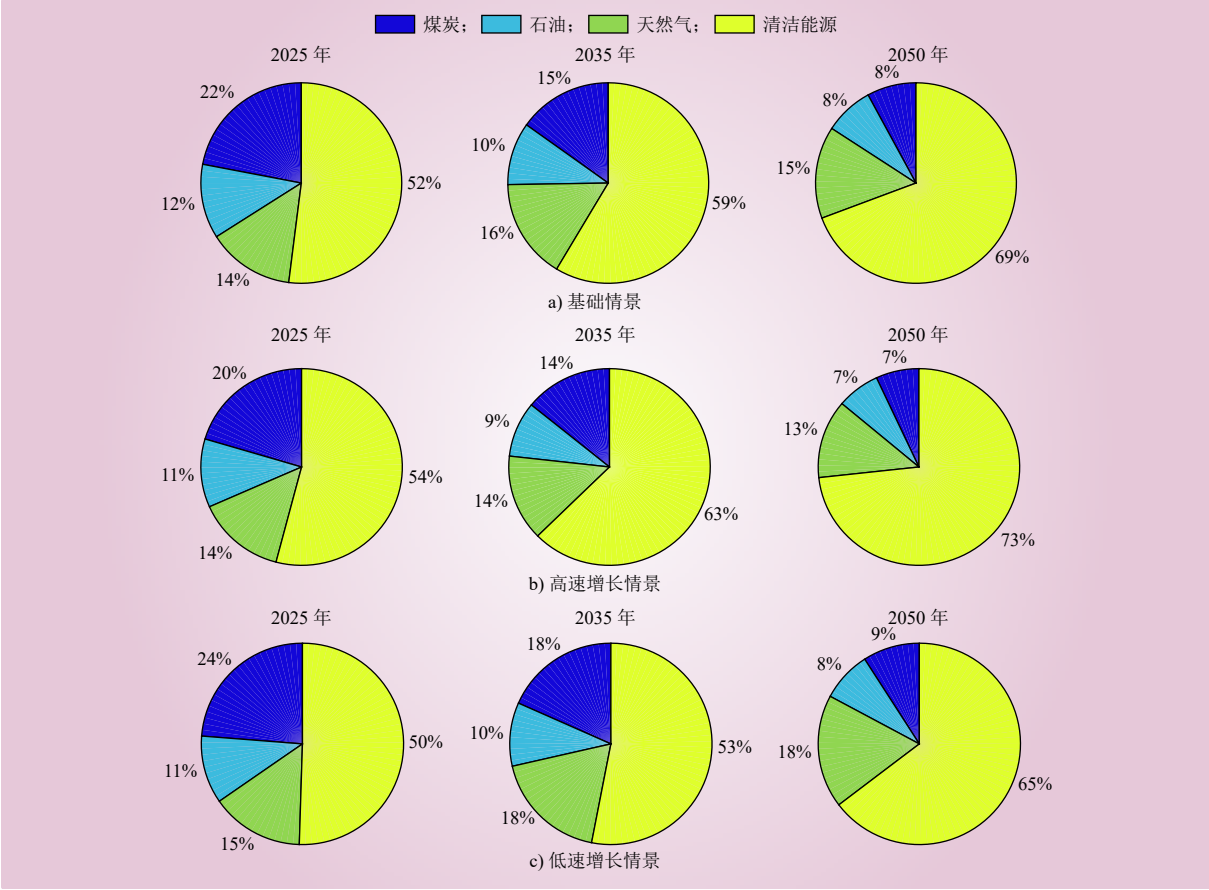


图 6 基础情景、高速增长情景、低速增长情景下的一次能源消费结构

Fig. 6 Primary energy consumption structure under basic scenarios, high-speed growth scenarios and low-speed growth scenarios

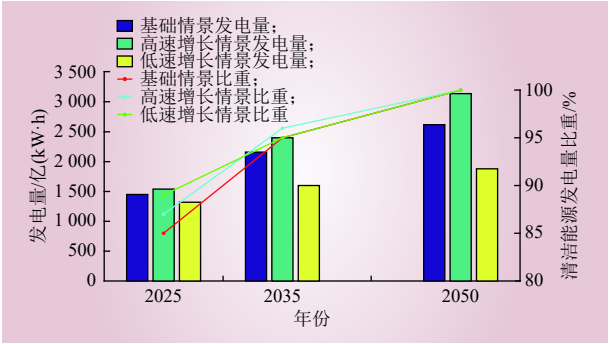


图 7 不同情景下青海省发电量

Fig. 7 Power generation under different scenarios in Qinghai Province

标和电力效率目标。能源效率用单位 GDP 能耗表示，电力效率用供电煤耗和电网综合线损率表示，在 3 种情景中能源效率和电力效率呈下降趋势。在基础情景中，2025、2035 和 2050 年能源效率分别为 1.09、0.78 和 0.48 t 标准煤/万元；在高速增长情景中分别为 1.06、0.72 和 0.42 t 标准煤/

万元；在低速增长情景中分别为 1.14、0.85 和 0.56 t 标准煤/万元。3 种情景中供电煤耗都一样，2025、2035 和 2050 年分别为 325、310 和 300 g/(kW·h)，电网综合线损率 3 种情景中也一样，2025、2035 和 2050 年分别为 2.8%、2.7% 和 2.5%。

图 10 为不同情景下青海省清洁能源绿色低碳

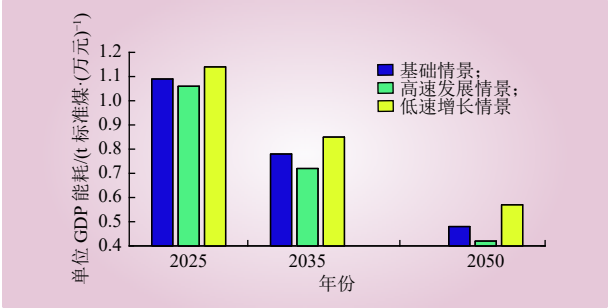


图 8 不同情景下青海省清洁能源效率目标

Fig. 8 Clean energy efficiency targets under different scenarios in Qinghai Province

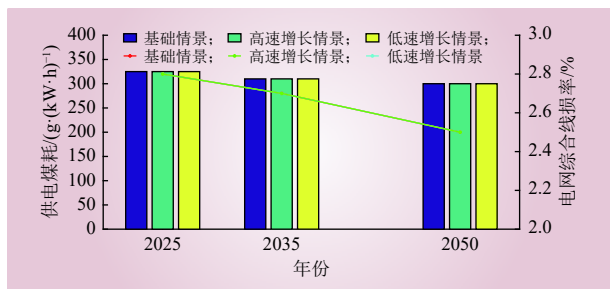


图 9 不同情景下青海省清洁能源电力效率目标

Fig. 9 Clean energy power efficiency targets under different scenarios in Qinghai Province

指标，用单位 GDP 碳排放表示，在 3 种情景中清洁能源绿色低碳指标呈下降趋势。基础情境中，2025、2035 和 2050 年分别为 3.56、2.75 和 1.53 t/万元；高速发展情境中，2025、2035 和 2050 年分别为 3.59、2.58 和 1.34 t/万元；低速增长情境中，2025、2035 和 2050 年分别为 3.61、3.01 和 1.81 t/万元。

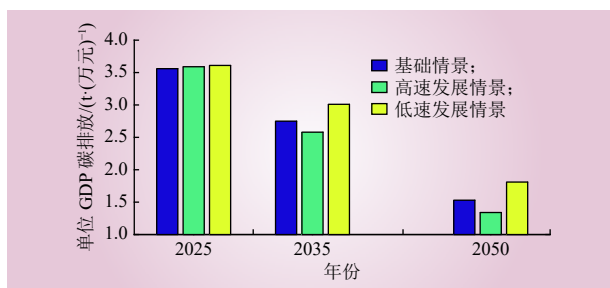


图 10 不同情景下青海省清洁能源绿色低碳指标

Fig. 10 Green low-carbon indicators of clean energy under different scenarios in Qinghai Province

4 青海省能源清洁化发展对策

以中国能源清洁转型大背景为契机，青海有必要、有能力、有条件更有能力率先创建清洁能源示范省。本文在基于 DMDE-BPNN 的青海省能源需求预测结果分析的基础上提出以下几点能源清洁化发展对策，为青海省未来能源发展提供思路 and 参考。

(1) 基于政府视角的能源清洁化发展对策。

①明确分阶段目标定位。根据预测结果分析，把 2025 年、2035 年、2050 年作为 3 个阶段的时间节点，将减煤、低碳、绿色为 3 个阶段循序渐进的目标，优化顶层设计、完善政策制度，加快能源互联网建设和新技术、新能源的推广，提

高能源利用效率，力争实现“清洁替代，2025 清洁能源示范区”“低碳循环，2035 清洁能源贡献区”和“绿色生态，2050 清洁能源全覆盖”。助力青海从“地理高原”迈向“生态高原”。

②构建“一带、两地、一区、多点”清洁能源开发布局。青海清洁能源资源优势明显，可开发潜力巨大，青海应紧抓国家能源示范省建设的重要机遇，做优水电，构建黄河上游绿色水电开发带；统筹风光，建设海南州和海西州清洁能源基地；倍增油气，建成柴达木盆地国家级油气资源战略接替区；突破非常规能源发展瓶颈，探索多种非常规能源开发利用，打造能源革命的青海样本。

③加大节能减排政策力度。近几年在节能减排政策的推动下，青海省许多高能耗、高污染产业向低能耗、低污染转型。根据预测结果，2025—2050 年青海省单位 GDP 碳排放将保持稳步下降态势，而加大节能减排力度，可以降低能源消耗水平，降低工业部门单位 GDP 能耗。因此，青海应继续引导高能耗产业进行转型，对转型成功的产业给予一定奖励。

(2) 基于电力行业视角的能源清洁化发展对策。

①提升青海清洁能源电力外送能力。从预测结果可以看到，青海省清洁能源发电占比将在 2025—2050 年期间保持稳步增长态势，清洁能源外送需求迫切，为应对这一趋势，电力行业应推动能源消费结构优化，重点关注新能源消纳问题，同时加强富裕电力外送；尽快完善青海省电力外送通道建设，争取青海第二条特高压直流外送通道“十四五”末建成投运，提升青海清洁能源外送能力。

②优化电源结构，提高清洁和低碳能源消费所占比重。青海省是全国太阳能、水能、风能等清洁能源资源最为丰富的地区之一，清洁能源开发建设条件优越，青海电力应借助这一优势，合理安排电源结构。一方面，积极发展 IGCC、PFBC 等先进发电技术，实现煤炭清洁化利用；另一方面，努力提高清洁能源发电装机容量和发电量，做优水电、做大光伏、做活光热、做强风电，加快各类储能技术应用，积极研发地热能发电，减少污染排放，助力能源清洁发展。

(3) 基于用户视角的能源清洁化发展对策。

①积极参与清洁能源与多产业融合的生产方式，提高清洁能源消纳能力。依托广泛的农牧业基础积极推动“清洁能源+农牧业”生产方式，开展温棚蔬菜生产、光伏农业大棚等工作；充分利用特色高原生态旅游产业的优势，积极推行“清洁能源+旅游”产业，全面带动本地清洁能源消费升级。

②响应政府号召，实现清洁用能。逐步消除土暖气、大柴灶和燃煤等低效的传统采暖方式，因地制宜，宜气则气、宜电则电、宜热则热，尽可能利用清洁能源，加快提高清洁取暖比重；绿色交通方面，新能源汽车不仅有利于降低对传统石油能源的依赖，保障能源安全，也能够参与电网互动调节，发挥削峰填谷作用，促进新能源消纳，应积极推广新能源汽车，推动用能清洁化。

5 结论

为全面推进青海省国家清洁能源示范省建设工作，本文分析了青海省清洁能源发展现状和面临的挑战，建立了基于 DMDE-BPNN 的混合预测模型对青海能源需求进行预测，并以此为基础提出了青海能源清洁化发展对策。

(1) 青海省 2050 年清洁能源将在能源中占据主导地位，化石能源步入下行通道。在基础情景中煤炭消费量占能源消费总量从 2025 年的 22% 降至 2050 年的 8%，石油从 12% 降至 8%，清洁能源从 52% 升至 70%。

(2) 未来能源消费中电力占比持续上升，这源于清洁能源消费比例持续上升。基准情景下预计 2025 年电力消费约为 1 450 亿 kW·h，2035、2050 分别为 2 160 亿、2 619 亿 kW·h，清洁能源发展比例分别为 85%、95% 和 100%。

(3) 在基础情景中，青海省 2025、2035 和 2050 年能源效率目标分别为 1.09、0.78、0.48 t 标准煤/万元；供电煤耗目标分别为 325、310、300 g/(kW·h)，电网综合线损率目标分别为 2.8%、2.7%、2.5%。绿色低碳指标目标分别为 3.56、2.75、1.53 t/万元。

(4) 分别从政府、行业 and 用户视角出发，提出了青海实现能源清洁化转型发展目标的对应策略。

参考文献：

- [1] 何悦. 中国能源供需预测模型及电能替代对策研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
HE Yue. Research on prediction model of energy supply-demand in China and electric energy substitution strategy[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [2] 罗坤杰, 张颖慧. 基于 BP 神经网络预测模型能源管理系统研究与应用 [J]. 工业控制计算机, 2019, 32(9): 46–47, 49.
LUO Kunjie, ZHANG Yinghui. Energy management system based on BP neural network prediction model[J]. Industrial Control Computer, 2019, 32(9): 46–47, 49.
- [3] 姜洪殿, 董康银, 孙仁金, 等. 中国新能源消费预测及对策研究 [J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1196–1202.
JIANG Hongdian, DONG Kangyin, SUN Renjin, et al. China's new energy: Current status, consumption forecasting and countermeasures[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8): 1196–1202.
- [4] 姚劲. 中国新能源产业发展存在的问题及对策 [J]. 科技创新与应用, 2019(30): 114–115.
- [5] 王耀华, 焦冰琦, 张富强, 等. 计及高比例可再生能源运行特性的中长期电力发展分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 9–16.
WANG Yaohua, JIAO Bingqi, ZHANG Fuqiang, et al. Medium and long-term electric power development considering operating characteristics of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 9–16.
- [6] 丁咏梅, 拓明辉, 赵喜林. 基于向量自回归模型的能源消费结构影响因素分析 [J]. 能源研究与管理, 2017(3): 23–28.
DING Yongmei, TUO Minghui, ZHAO Xilin. Econometrical analysis on the structure and influential factors of energy consume based on VAR model[J]. Energy Research and Management, 2017(3): 23–28.
- [7] 穆海林, 王文超, 宁亚东, 等. 基于改进灰色模型的能源消费预测研究 [J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(4): 493–497.
MU Hailin, WANG Wenchao, NING Yadong, et al. Study of energy consumption prediction based on improved grey model[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(4): 493–497.
- [8] 马彪. 基于最小二乘支持向量机的我国能源消费计算方法 [J]. 工业技术经济, 2019, 38(6): 139–144.
MA Biao. China's energy consumption calculation method based on least squares support vector machine[J]. Journal of Industrial



- Technological Economics, 2019, 38(6): 139–144.
- [9] 刘川来, 郭坤. BP 神经网络预测技术在企业能源管理系统中的应用[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 203–206.
- LIU Chuanlai, GUO Kun. The application of BP neural network prediction technology in enterprise energy management system[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(2): 203–206.
- [10] 谢小军, 邱云兰, 时凌. 基于 ARIMA 和 BP 神经网络组合模型的能源消费预测[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(10): 292–298.
- XIE Xiaojun, QIU Yunlan, SHI Ling. Prediction of energy consumption based on ARIMA and BP neural network combined model[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2019, 49(10): 292–298.
- [11] 马法尧. 基于 BP 神经网络模型与 ARMA 模型的库存预测比较[J]. 统计与决策, 2014(19): 34–37.
- [12] 张金锁, 冯雪, 邹绍辉. 基于趋势组合的我国煤炭需求预测模型研究[J]. 商业研究, 2014(6): 51–56.
- ZHANG Jinsuo, FENG Xue, ZOU Shaohui. On China's coal demand forecast model based on the trend combination[J]. Commercial Research, 2014(6): 51–56.
- [13] 桂梅, 刘莲花. 基于 ARIMA 模型对海南省社会消费品零售总额的预测[J]. 数学的实践与认识, 2017, 47(3): 25–30.
- GUI Mei, LIU Lianhua. Prediction of the total retail sales of consumer goods based on the ARIMA model[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2017, 47(3): 25–30.
- [14] YE T. Stock forecasting method based on wavelet analysis and ARIMA-SVR model[C]//2017 3rd International Conference on Information Management (ICIM). Chengdu, China. IEEE, 2017: 102–106.
- [15] 孔德钱, 张新燕, 童涛, 等. 基于差分进化算法与 BP 神经网络的变压器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 57–61.
- KONG Deqian, ZHANG Xinyan, TONG Tao, *et al.* Transformer fault diagnosis based on differential evolution algorithm and BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(5): 57–61.
- [16] 郝小会, 杨正军, 郝延, 等. 基于改进 GM-ARMA 组合模型的风电功率中长期预测方法[J]. 电工技术, 2021(7): 11–13, 16.
- HAO Xiaohui, YANG Zhengjun, HAO Yan, *et al.* A medium and long term wind power prediction method based on improved GM-ARMA combination model[J]. Electric Engineering, 2021(7): 11–13, 16.
- [17] SUN T, WU R J, CUI Y F, *et al.* Sequent extended Kalman filter capacity estimation method for lithium-ion batteries based on discrete battery aging model and support vector machine[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 39: 102594.
- [18] 张喆, 杨宏宇, 高新亭, 等. 大数据环境下基于 BPNN 模型的配电网规划适应性评价方法研究[J]. 供用电, 2021, 38(5): 56–63, 88.
- ZHANG Zhe, YANG Hongyu, GAO Xinting, *et al.* Research on evaluation method of distribution network planning scheme adaptability based on BPNN model[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(5): 56–63, 88.
- [19] 陈春霞, 孙祥娥. 基于双变异策略差分进化算法的模糊 PI 参数整定[J]. 武汉科技大学学报, 2020, 43(3): 219–223.
- CHEN Chunxia, SUN Xiang'e. Parameter tuning for fuzzy PI controller based on differential evolution algorithm with double mutation strategies[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2020, 43(3): 219–223.
- [20] 贾时, 梁晓丹, 何茂伟, 等. 一种新的双种群多变异差分与粒子群混合算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(增刊2): 44–46.
- JIA Shi, LIANG Xiaodan, HE Maowei, *et al.* Novel hybrid algorithm based on particle swarm optimization and dual population multiple mutation differential evolution[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S2): 44–46.
- 作者简介:**
- 李红霞(1974—), 女, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统规划方面的工作, E-mail: lhxia2629@qh.sgcc.com.cn;
- 张祥成(1983—), 男, 高级工程师, 从事能源电力规划方面的工作, E-mail: zxcheng0431@qh.sgcc.com.cn;
- 李芳(1994—), 女, 助理工程师, 硕士, 通讯作者, 从事电力经济、电力供需方面的工作, E-mail: lifang13264485133@126.com;
- 张海宁(1974—), 男, 教授级高级工程师, 从事能源电力规划方面的工作, E-mail: zhning9131@qh.sgcc.com.cn;
- 李楠(1990—), 男, 工程师, 博士研究生, 从事能源电力规划方面的工作, E-mail: lnan0514@qh.sgcc.com.cn;
- 马雪(1990—), 女, 高工, 硕士, 从事能源电力规划方面的工作, E-mail: mxue2726@qh.sgcc.com.cn.
- (责任编辑 许晓艳)
- (下转第 26 页)