



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\) 在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

李芳盛,齐云国,韩文婧.基于多层次模型对美国新能源应用情况的分析研究[J].能源环境保护,2019,33(5):6-11+43.

LI Fangsheng, QI Yunguo, HAN Wenjing. The analysis and prediction of the application of new energy in American based on multi-layered model[J]. Energy Environmental Protection, 2019, 33(5): 6-11+43.

基于多层次模型对美国新能源应用情况的分析研究

李芳盛¹, 齐云国², 韩文婧²

(1. 青岛科技大学, 山东 青岛 266042; 2. 潍坊职业学院, 山东 潍坊 261000)

摘要: 为了给我国新能源发展战略提供参考, 选取加利福尼亚州、亚利桑那州、新墨西哥州和德克萨斯州4个典型地区进行建模, 分析了行业、人口、气候、地理等因素与新能源使用量的相关性, 预测了未来新能源发展情况。结果表明, 各州新能源领域在1960到2009年之间取得了快速发展, 在政策、技术与基础设施没有突破的情况下, 各州新能源领域将在2025到2050年之间保持稳定。

关键词: 新能源; 环境保护; 可持续性发展; 多层次模型

中图分类号: X382

文献标志码: A

文章编号: 1006-8759(2019)05-0006-06

The analysis and prediction of the application of new energy in American based on multi-layered model

LI Fangsheng¹, QI Yunguo², HAN Wenjing²

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. Weifang Vocational College, Weifang 261000, China)

Abstract: In order to provide scientific reference to the new energy developing in China, California, Arizona, New Mexico and Texas were selected to establish models through correlation analysis between new energy consumption and factors of profession, population, climate, geography. Then the development of new energy in the future was predicted. This research shows that these four states experienced rapidly development from 1960 to 2009, and the new energy industry would keep stable between 2025 and 2050 in condition that there is no breakthrough in aspects of the politics, technology and infrastructure.

Key words: New energy; Environment protection; Sustainable development; Multi-layered model

0 引言

与传统化石能源相比, 新能源具有低碳与低排放的优势且符合人类对绿色生态环境的需求^[1]。作为超级大国, 美国在具有巨大的能源需要的同时对生态环境的保护力度更为显著。早在2008年, 美国政府就已提出“绿色能源再造美国”的能源战略, 通过提升能源利用率、鼓励能源多元化和倡导节能来实现能源自主

和独立, 以在保证能源安全的同时保护生态环境并减少对不稳定能源来源地的依赖^[2]。本文分析了美国几个具有明显能源架构特征的加利福尼亚州(California, CA)、亚利桑那州(Arizona, AZ)、新墨西哥州(New Mexico, NM)和德克萨斯州(Texas, TX), 通过构建能源多层次模型对相应区域新能源的使用情况进行预测与评估, 为具有类似能源结构的国家与地区新能源的发展提供参考与借鉴。

1 研究方法

1.1 数据

在新能源领域,美国处于世界领先水平,其早期对于各地能源的针对性规划使美国不同地区能源架构区别明显。此外,美国对能源各类数据统计起始较早且所统计数据精确度高,故本文选择目前美国能源署所公布的加利福尼亚州、亚利桑那州、新墨西哥州和德克萨斯州四个州在1960年到2009年的能源相关数据共605个数据集进行研究。本研究中新能源种类主要包括电能、天然气与再生能源。

1.2 新能源模型

本文新能源使用情况的分析采用分析多层次模型,由总体概念层、公共层、基础模型层构成,文章将分别对总体问题描述、公共模型建立方法与具体能源模型的建立^[3]等方面进行阐述。

1.2.1 总体能源模型

基于所收集数据集特征对总体能源概况进行描述,并针对能源的实际应用需求与分布特征构建问题域并进行形式化描述。对各个所构建问题域采用不同算法进行聚类分析,并根据聚类分析结果构建总体域 N 。本文所构建总体能源模型相关方程如方程1~5所示。

$$N = \langle N_F, N_T, N_W, R \rangle \quad (1)$$

式中: N_F —归一化单位; N_T —能源分类标准; N_W —地区; R —地区与分类间的算法关系。

$$N_F = \langle N_{Btu}, N_{barrels}, N_{dollars}, N_{others} \rangle \quad (2)$$

式中: N_{Btu} —单位为十亿英热的变量; $N_{barrels}$ —单位为千桶的变量; $N_{dollars}$ —单位为百万美元的变量; N_{others} —其他单位变量。

$$N_T = \langle N_{T1}, N_{T2}, N_{T3}, N_{T4} \rangle \quad (3)$$

式中: N_{T1} —能源生产; N_{T2} —能源消费; N_{T3} —能源价格; N_{T4} —能源支出。

$$N_W = \langle N_{W1}, N_{W2}, N_{W3}, N_{W4} \rangle \quad (4)$$

式中: N_{W1} —加利福尼亚州; N_{W2} —亚利桑那州; N_{W3} —新墨西哥州; N_{W4} —德克萨斯州。

$$R = \langle R_1, R_2, \dots \rangle \quad (5)$$

式中: R_1, R_2, \dots —聚类算法。

1.2.2 各州能源发展历程模型

引入时间变量,对各个所构建问题域基于时间变量再次采用不同算法进行聚类分析,并根据聚类分析结果构建总体域 N 。本文所构建总体能源模型相关方程分别为方程1'与方程2~4。

$$N = \langle N_F, N_T, N_W, R, T \rangle \quad (1')$$

式中: T 为时间。

为精确的评价各个因素对新能源发展的具体影响,本文定义如方程6所示相关系数方程。

$$P_{AB} = A \odot B(i) \quad (6)$$

式中: P_{AB} 为相关系数; A 为再生能源时间序列; B 为再生能源影响因素时间序列。

1.2.3 各州新能源影响因素模型

综合考虑各地区新能源生产、消费、价格和支出方面的情况,对各州新能源的利用情况进行对比分析。能源概况模型分别方程7~10所示:

$$\text{能源生产: } F_1 = \sum_{i=1}^5 a_i f_i + \frac{A_i}{t} (F_N + F_W + F_W + F_G + F_{\text{other}}) \quad (7)$$

$$\text{能源消费: } F_2 = \sum_{i=1}^5 a_i f_i + \frac{A_i}{t} (F_N + F_W + F_W + F_G + F_{\text{other}}) \quad (8)$$

$$\text{能源价格: } F_3 = \sum_{i=1}^5 a_i f_i + \frac{A_i}{t} (F_N + F_W + F_W + F_G + F_{\text{other}}) \quad (9)$$

$$\text{能源支出: } F_4 = \sum_{i=1}^5 a_i f_i + \frac{A_i}{t} (F_N + F_W + F_W + F_G + F_{\text{other}}) \quad (10)$$

式中: f_i 为能源生产、消费、价格和支出对各种能源利用情况的影响; a_i 为各种能源利用的权重因子; A_i 为各种因子影响深度; t —政策变化持续时间; F_N 为地理因素, F_W 为行业因素, F_M 为人口因素, F_G 为气候因素, F_{other} 为其他因素。

各目标函数的相关约束条件分别如方程11~17所示。

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 = 1 \quad (11)$$

$$\begin{cases} a_i \geq 0 \\ f_i \geq 0 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (12)$$

$$F_N = \begin{cases} 0, \text{该因素无影响} \\ 1, \text{该因素有影响} \end{cases} \quad (13)$$

$$F_W = \begin{cases} 0, \text{该因素无影响} \\ 1, \text{该因素有影响} \end{cases} \quad (14)$$

$$F_M = \begin{cases} 0, \text{该因素无影响} \\ 1, \text{该因素有影响} \end{cases} \quad (15)$$

$$F_G = \begin{cases} 0, \text{该因素无影响} \\ 1, \text{该因素有影响} \end{cases} \quad (16)$$

$$F_{\text{other}} = \begin{cases} 0, \text{该因素无影响} \\ 1, \text{该因素有影响} \end{cases} \quad (17)$$

1.2.4 各州新能源预测模型

根据上述各模型的分析结果,采用SVM算法

对各州新能源概况建立预测模型如方程 18~21 所示。

$$P = \langle P_1, P_2, P_3, P_4, S, T_M \rangle \quad (18)$$

式中: P 为预测年份能源总量; P_1 为模型编号; P_2 为能源种类; P_3 为历史能源概况数据; P_4 为能源数据操作; S 为能源数据处理算法; T_M 为预测年份。

$$P_1 = \langle P_{T1}, P_{T2}, P_{T3}, P_{T4} \rangle \quad (19)$$

式中: P_{T1} 为生产模型; P_{T2} 为消费模型; P_{T3} 为价格模型; P_{T4} 为支出模型。

$$P_3 = \langle P_{D1}, P_{D2}, P_{D3}, P_{D4} \rangle \quad (20)$$

式中: P_{D1} 为数据库; P_{D2} 为表格; P_{D3} 为字段; P_{D4} 为数据类型。

$$P_4 = \langle P_{in}, P_{out}, P_{del}, P_{uadr} \rangle \quad (21)$$

式中: P_{in} 为输入; P_{out} 为输出; P_{del} 为删除; P_{uadr} 为更改。

1.3 数据处理

Matlab 具有计算结果准确高, 程序兼容性好等优势, 本文相关模型采用 Matlab 软件根据各个模型分别编写计算程序进行数据处理。

2 研究结果

能源总体模型分析结果表明, 能源总体状况主要受能源生产比重 (Energy generation, EG)、能源消费比重 (Energy consumption, EC)、能源价格比重 (Energy price, EP) 与能源支出比重 (Energy expenditure, EE) 四个因素影响。本文研究中能源生产比重为各种能源生产量在能源生产总量的比值, 能源消费比重为相应各种能源的使用量在能源使用总量的比值, 能源价格比重为相应能源的价格与能源单价总和的比值, 而能源支出比重为相应能

源消费支出额与能源消费支出总额的比值。

2.1 各州能源概况

加利福尼亚州、亚利桑那州、新墨西哥州与德克萨斯州各州能源消费比重、生产比重、价格比重与支出比重情况如表 1 所示。各州的能源需求与生产具有明显的表征性。加利福尼亚州新能源消费比重与价格比重分别达到 67.64% 与 51.21%, 而其生产比重与支出比重则分别为 23.51% 与 13.29%。因此加利福尼亚州对于新能源能源需求较高但其新能源生产能力不足, 可能由于其地理条件不适宜发展水能、风能以及核能, 故该州属于需求型新能源架构。亚利桑那州新能源生产比重与价格比重分别为 69.12% 与 52.03%, 而其新能源消费比重与支出比重则分别为 29.7% 与 21.44%。该州新能源产出较高, 但消费不足, 这源于其以制造业、旅游业为主的经济结构限制其新能源的消费, 但该地区适宜各类新能源产出, 属于溢出型新能源架构。新墨西哥州作为美国能源与矿产最为丰富的地区, 其能源新能源消费与新消费支出比重分别达到 57.22% 与 64.40%, 而其新能源生产比重与价格比重则分别为 32.64% 与 43.12%。其主要原因为该州较强的天然气生产能力与其发展良好的新能源行业, 但该州电能的生产由于地域的限制而处于较低水平, 因此新墨西哥州属于半需求型新能源架构。德克萨斯州新能源消费比重、生产比重、价格比重与支出比重分别为 57.84%、24.87%、39.81% 与 46.69%, 该州作为美国风电重心, 其新能源产出较高, 但由于该地区各类工业的聚集, 导致其对能源的需求较大, 因此得克萨斯州属于工业需求型新能源架构。

表 1 各州目前主要新能源消费比重、生产比重、价格比重与支出比重情况

(单位: %)

	加利福尼亚州		亚利桑那州		新墨西哥州		德克萨斯州	
	天然气	电力	天然气	电力	天然气	电力	天然气	电力
消费比重	35.40	32.24	11.91	17.79	33.21	25.02	25.83	32.01
生产比重	13.82	9.69	32.10	37.02	28.56	4.08	17.90	6.97
价格比重	41.44	9.77	49.28	18.93	33.10	10.02	29.09	10.72
支出比重	4.11	9.18	2.00	19.44	62.36	2.04	42.14	4.55

2.2 各州能源发展历史

引入时间变量, 对各州能源的生产与消费变化历史情况进行分析。各州能源生产与消费变化趋势分别如图 1 所示。从 1960 年到 2009 年 50 年间, 加利福尼亚州天然气与电能为代表的新能源

生产量发展较快而新能源的消费量发展速度缓慢, 亚利桑那州以天然气与电能为代表的新能源生产量发展速度迅速增加而消费量增长速度缓慢, 新墨西哥州以天然气与电能为代表的新能源生产量增长缓慢而消费量增长速度缓慢, 此外, 德

克萨州以天然气与电能为代表的新能源生产量

增长缓慢而消费量增长速度迅速。

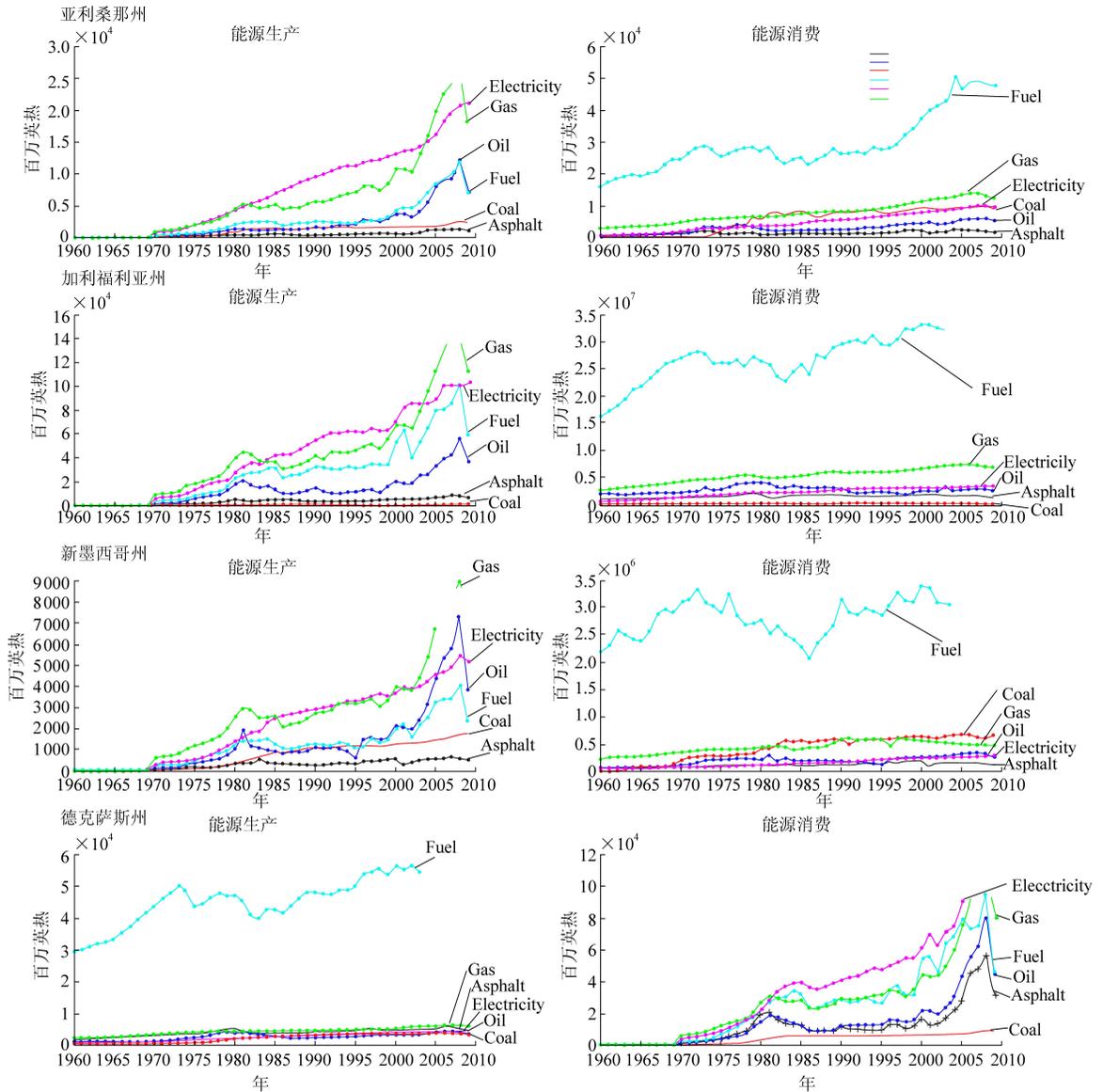


图1 各州能源生产与消费的变化趋势

对各州新能源使用情况进行对比分析,如图2所示。加利福尼亚州、亚利桑那州与德克萨斯州在1960到2009年50年间变化能量生产量均大

幅上升,而新墨西哥州的新能源发展缓慢。对各州新能源产量相关性的分析结果表明各州新能源产量相关性系数均大于0.5,各州新能源产量具有一定的相关关系,详见表2。

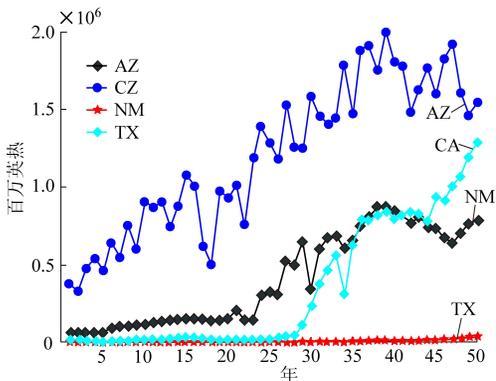


图2 各州新能源对比分析

表2 各州新能源生产情况相关性系数

	亚利桑那州	加利福尼亚州	德克萨斯州	新墨西哥州
亚利桑那州	1	/	/	/
加利福尼亚州	0.646	1	/	/
德克萨斯州	0.549	0.501	1	/
新墨西哥州	0.616	0.623	0.581	1

2.3 各州新能源发展影响因素研究

加利福尼亚州新能源使用情况与人口、行业、

气候与地理因素的变化趋势如图 3 所示。各州新能源的使用情况随着人口、行业、气候与地理因素的发展而不断发展。各州根据其所具备的不同条件,其新能源发展趋势与各影响因素也各不相同。对于亚利桑那州和加利福尼亚州,因其化石燃料的稀缺,其早期的新能源政策注重于新能源的发展,故其早期新能源发展较德克萨斯州与新墨西哥州增长较快。而对于德克萨斯州与新墨西哥州,其丰富的化石能源使其新能源早期的发展受到抑制,而其后期对新能源领域的重视使其新能源领域在后期快速增长。但由于人口、地理、气候和行业因素的发展受多种政策以及其他因素的影响,因此其发展不明显。根据表 3 中各因素与新能源发展情况的相关系数可见,人口、行业、气候与地理因素均能

影响新能源的使用情况。人口因素主要通过通过对能源的消费对新能源的使用情况产生影响,而气候与地理因素则主要影响新能源的生产条件,此外,行业因素则对新能源的消费种类具有重要影响。由表 3 可见,人口因素与新能源的相关系数保持在 0.70 与 0.72 之间,因此人口因素对新能源的使用情况影响最为明显。此外,地理气候与行业因素对于其新能源与各个地区的适应度的影响较大。例如新墨西哥州和德克萨斯州作为工业集中区,其工业多用使用石化能源,因其能源应用设备尚未更新,主要使用能源依旧为石化能源,故目前行业因素对于其新能源的使用影响较小。但就新墨西哥州和德克萨斯州新能源应用的急剧增加,可采取加大新能源储备以防止能源缺口的发生。

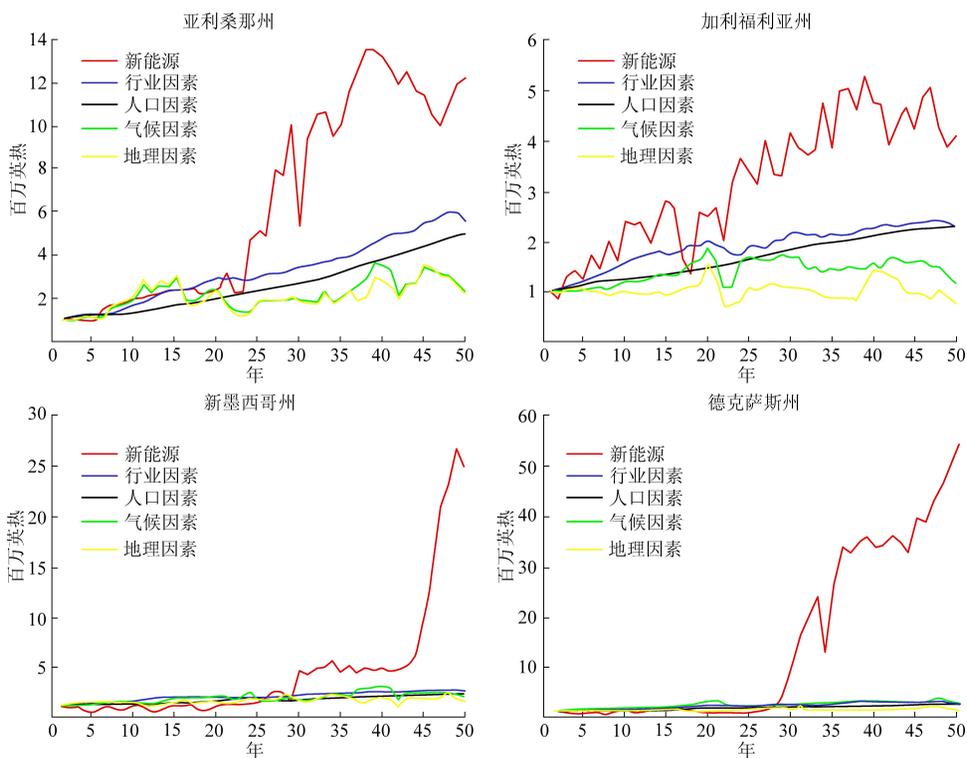


图 3 各州新能源使用情况与人口、行业、气候、地理因素的变化趋势

表 3 各州新能源使用情况与人口、行业、气候、地理因素的相关系数

	行业	人口	气候	地理因素
亚利桑那州	0.689	0.704	0.674	0.572
加利福尼亚州	0.707	0.714	0.679	0.581
新墨西哥州	0.664	0.713	0.648	0.561
德克萨斯州	0.653	0.709	0.646	0.569

2.4 各州新能源未来发展趋势

对各州在 2025 年到 2050 年新能源的使用情况进行预测,预测结果如表 4 所示。因亚利桑那

州在初期以新能源为主的政策建设,其新能源产出较高且未来新能源架构稳定性强,该州对石化能源的依赖性较低,未来可采取能源换资源的方式来推动亚利桑那州经济发展。对于第一产业为主的加利福尼亚州则可采取以保持当地生态为主的政策来减少能源开发,并推动以新能源代替石化能源的政策以保证该州的能源供给。针对墨西哥与德克萨斯州,应加大对新能源领域的扶持力度促进新能源行业的发展。此外,对于新能源与石化能源供应量均不足的地区,可采取与比邻州

合作的方式以互补形式共同发展。

表4 各州2025年与2050年的能源使用情况

(单位:%)

		柏油	燃料	石油	煤	新能源			总量
						电能	天然气	再生能源	
亚利桑那州	2025	3.80	10.00	10.40	18.60	18.30	24.20	14.70	57.20
	2050	3.90	10.60	10.60	19.20	18.00	24.30	13.50	55.80
加利福尼亚州	2025	3.50	4.40	0.50	67.60	6.90	14.10	2.90	23.90
	2050	3.20	5.40	0.50	66.80	6.80	14.20	3.00	24.00
新墨西哥州	2025	2.70	6.30	12.60	62.00	5.60	9.80	0.90	16.30
	2050	2.80	6.40	11.90	62.60	5.30	9.80	1.10	16.20
德克萨斯州	2025	6.10	5.20	4.90	68.90	5.90	7.50	1.50	24.90
	2050	7.20	5.00	4.70	67.70	6.00	7.90	1.50	25.40

3 结论

本文采用多层次模型对美国加利福尼亚州、亚利桑那州、新墨西哥州和德克萨斯州新能源的发展历史与应用前景进行了相关研究。研究结果表明:

(1)各州新能源领域在1960到2009年之间取得快速发展,且在政策、技术与基础设施等方面无突破的情况下,各州新能源领域将在2025到2050年之间保持稳定。

(2)新能源的消费、生产、价格与支出比重受多种因素影响,如基础设施、相关政策、经济结构等。政策调控对能源领域的发展具有重要作用,通过财政补贴与减税等措施政府能促进新能源的快速发展^[4,5]。美国各州根据自身条件的差异所制定的不同政策是各州新能源消费、生产、价格与支出比重差异产生的重要潜在原因。

(3)科学技术的发展、环保和经济社会可持续等需求推动新能源领域不断发展。加利福尼亚州、亚利桑那州与新墨西哥州新能源生产量的快速发展主要基于各州丰富的自然资源与完善的基础设施。而德克萨斯州新能源消费量的快速增长则可能得益于该州对新能源消费的政策支持。

(4)行业、人口、气候与地理因素均对新能源的消费具有一定程度的影响^[6-9]。本文对行业、人口、气候与地理因素对新能源发展影响的研究发现行业、人口、气候与地理因素均对各州新能源使用量具有明显影响,且人口与新能源使用量的相关性最大。人口总量是新能源消费的主体,能源的使用量与人口成正相关关系,而行业对新能源的影响则因不同行业的能源消费量各不相同,轻工业能源使用量常低于重工业。气候与地理因素

对新能源的影响则因其对居民室内温度控制与交通运输的需求。此外,地理因素主要通过交通能源消费的形式对新能源的消耗提供增长点,随着交通行业的发展新能源随着能源需求量的增长而不断增长。

(5)新能源的发展与环境保护和可持续发展息息相关,而新能源的发展受到政策、技术与基础设施的影响与限制^[10,11]。我国部分地区存在类似于本文所研究的美国四州的情况^[12]。江浙沪地区能源架构体系与加利福尼亚州及其相似,该地区制造业与高端电子行业集中,其能源需求量巨大但因受各因素所限,能源生产能力较弱,其属于需求型新能源架构^[13,14]。而东三省地区能源架构与新墨西哥州和德克萨斯州的能源领域发展情况类似,东三省地区石化资源丰富且为重工业聚集地,该地区能源生产能力较强且能源需要较大,属于半需求型新能源架构^[15,16]。因此,本文根据美国四州所发现的各种能源架构模对我国各地区能源架构具有一定适应性,可以作为我国未来能源政策指标的建立与推行的参考。

参考文献

- [1] Wang Q., Ye H., Sun L., et al. Two-stage innovation efficiency of new energy enterprises in China: A non-radial DEA approach[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2016, 112: 254-261.
- [2] 贾智彬,孙德强,张映红,等.美国能源战略发展史对中国能源战略发展的启示[J].中外能源,2016,21(2):1-7.
- [3] 道格拉斯·A,卢克.多层次模型[C].格致出版社:2012.
- [4] Friedlander G D. Power/energy: Problems and progress: Global politics has fueled an overdue search by the industrial nations for new energy sources[J]. IEEE Spectrum, 2013, 11(1): 60-65.
- [5] Erensu, S. Powering neoliberalization: Energy and politics in the

(下转第43页)

- [J].环境科学,2015,36(6):1975-1982.
- [2] 周洪光.如何正确认识火电厂湿烟气排放及白雾现象[J].环境工程,2015(33):433-437.
- [3] 姚增权.湿烟气的抬升与凝结[J].国际电力,2003,7(1):42-46.
- [4] 王立伟,王兰河.防结冰装置在湿法脱硫烟囱上的应用[J].电力安全技术,2012,14(7):60-61.
- [5] 王建春,马果骏.湿法烟气脱硫对环境的影响及对策[J].中国环保产业,2017(3):27-32.
- [6] C.Dene.Revised Wet Stack Design Guide[R].USA:Electric Power Research Institute,2012:2-35-2-41.
- [7] 陈晓,黄佩东,齐宝军,等.烟囱口防结冰电热装置:CN201010580644[P].2014-07-16.
- [8] 张沈时,张海峰,张克西,等.节能型烟囱防结冰装置:CN201610153810[P].2018-09-04.

(上接第11页)

- making of a new Turkey[J].Energy Research & Social Science,2018,41:S2214629618304080.
- [6] 夏泽义,张炜.中国能源消费与人口、经济增长关系的实证研究[J].人口与经济,2009,5:7-11.
- [7] 史丹,张金隆.产业结构变动对能源消费的影响[J].经济理论与经济管理,2003,8:30-32.
- [8] 辜胜阻,王晓杰.新能源产业的特征和发展思路[J].经济管理,2006(11):29-32.
- [9] 郑有飞,白雪,许遐祯.风力发电对江苏省的环境影响及对策初探[J].能源环境保护,2008,22(3):40-43.
- [10] 罗来军,朱善利,邹宗宪.我国新能源战略的重大技术挑战及化解对策[J].数量经济技术经济研究,2015,2:113-128.
- [11] 马宁,佟鑫.用科学理念指导新能源建设的环境保护[J].科学管理研究,2016(4):68-71.
- [12] 付融冰,张慧明.中国能源的现状[J].能源环境保护,2005,19(1):8-12.
- [13] 罗佐县.江浙沪地区能源消费问题研究[J].资源与产业,2007,9(2):94-97.
- [14] 谢长风.江浙沪能源消费与经济增长关系的研究[D].南京航空航天大学,2014.
- [15] 朱天星,宋永辉,宋力.东北三省能源消费、要素投入与经济增长关系研究——基于长面板和面板因果检验模型[J].经济经纬,2015(4):13-18.
- [16] 沈悦.东北三省与俄罗斯开展能源合作问题研究[J].对外经贸,2010(5):20-23.

(上接第16页)

- [11] 鲁许鳌.生物质和煤共气化共燃的实验和机理研究[D].华北电力大学(北京),2010.
- [12] Ning C, Yang R T. Ab initio molecular orbital calculation on graphite: Selection of molecular system and model chemistry[J].Carbon,1998,36(7-8):1061-1070.
- [13] 邢其毅,徐瑞秋,周政.基础有机化学[M].北京:高等教育出版社,2005:889
- [14] OLSON E S, LAUMB J D, BENSON S A, et al. An improved model for flue gas-mercury interactions on activated carbons [C]//Proceedings of the Combined Power Plant Air Pollutant Control Mega Symposium,2003:19-22.
- [15] Montoya A, Truong T N, Sarofim A F. Application of Density Functional Theory to the Study of the Reaction of NO with Char-Bound Nitrogen during Combustion[J].Journal of Physical Chemistry A,2000,104(36):8409-8417.
- [16] FRISCH M J, TRUCKS G W, SCHLEGEL H B, et al. Gaussian 16: Revision A.03[CP].Wallingford CT: Gaussian Inc.,2016
- [17] Hobson J P. Physical adsorption[J].C R C Critical Reviews in Solid State Sciences,1973,4(1-4):221-245.
- [18] Tian L, Feiwu C. Multiwfn: a multifunctional wavefunction analyzer[J].Journal of Computational Chemistry,2012,33(5):580-592.
- [19] Mayer I. Bond order and valence: Relations to Mulliken's population analysis [J]. International Journal of Quantum Chemistry,2010,26(1):151-154.
- [20] 陆遥,刁永发,陈晨,等.溴化石油焦氧化烟气中Hg⁰的机理[J].化工学报,2018,69(10):4394-4401.
- [21] Runnim C, Promarak V, Hannongbua S, et al. Complete reaction mechanisms of mercury oxidation on halogenated activated carbon[J].Journal of Hazardous Materials,2016,310:253-260.