

“双碳”目标下的煤电退出机制研究

——基于情景分析灰色预测法

摘要：中国表明将在 2030 年前实现碳达峰，争取在 2060 年之前实现碳中和。

“双碳”目标作为“十四五”期间重点发展目标，对碳排放量占比较高的电力行业进行低碳转型升级具有指导意义，目前以煤电为主，水电为辅的发电结构还将长期存在，本文对中国长期以来的电力政策进行梳理后采用情景模拟法，进一步使用电力统计数据进行灰色预测证明了绿色节能政策干预对煤电退出的积极影响，在此基础上结合中国现有新能源发展技术给出相关煤电退出的政策建议。

关键词：“双碳”目标；煤电退出；情景分析灰色预测法

0 引言

根据国际能源署（简称 IEA）的统计，2018 年全球碳排放总量大致为 331.43 亿吨，其中中国碳排放总量达到 100 亿吨，占比达到 30%。在享受经济高速发展的同时，如何平衡碳排放量和经济增长的成本与收益日益迫切，中国的环境政策和节能减排措施同时对全球治理提供了重要经验。

2020 年 9 月 22 日，中国在第七十五届联合国大会上申明“将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，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”。“双碳”政策作为“十四五”计划的重点发展指导，中国陆续制定了多项相关政策文件^[1]，积极建设碳交易市场^[2]，发布多行业碳排放核算国家标准，在全国范围内对历史碳排放数据进行核算、报告与核查^[3]。

电力行业作为经济发展的基础行业，中国电力行业碳排放量约占碳排放总量的 50%，所以在保障电力供应的同时加快电力行业低碳转型成为重中之重，直接影响中国“双碳”目标的实现。本文的将首先以智利电力系统退煤战略和清洁能源转型作为国外案例进行对比；进一步梳理中国电力政策的发展，剖析相关政策的现状与实施效果；利用电力使用情况与分电源发电量数据设定情景并模拟分析，结合灰色预测方法测算中国未来发电结构情况；最后，基于上述分析给出中国切实可行的煤电减量与电力系统转型规划。

1 国外案例

为了应对气候变化，积极推动能源低碳转型已成为许多国家的战略之一。2019年6月4日，智利政府承诺将在2040年之前退役国内所有燃煤电站，并在2050年实现碳中和^[4]。此前，智利国内的温室气体总量中有32%来自电力部门。而在供电系统中，燃煤发电占据了智利大约40%的用电总量，所排放的温室气体总量更是高达电力部门温室气体排放总量的80%^[5]。基于此，智利制定了分五步走的退煤计划^[6]。

1.1 智利面临的挑战

位于南美的智利可再生资源十分丰富，其富裕的风资源和光资源为燃煤发电退出能源结构，推动清洁能源转型提供了有利的先天条件。然而，由于煤电在原先能源结构中占比较大，煤电的退出必然会是一项系统而又困难的复杂工程，必将面临多种因素的干扰与挑战：

（1）电力供应充裕性挑战。智利55%的煤电装机位于SING区域，又因为智利的可再生能源资源开发还处于起步阶段，贸然退煤将会导致该区域产生巨大的电力和电量缺口。这一结果的另一影响就是作为智利支柱产业的采矿业将会收到极大限制，因为采矿业需要极大电量供应；

（2）电网互联挑战，智利因其特殊的地理条件，国家电网的分布呈现出南北方向鱼骨形分布。地理位置和基础设施导致有限的通道容量无法满足清洁电力的配置需求，产生了严重的阻塞问题，极大阻碍了北部清洁能源资源的开发^[7]。

（3）灵活性资源挑战。系统灵活性资源的充裕性对于风、光资源发电在电力系统中起支柱作用有着较大影响，需要有充足的灵活性资源能够在长时间尺度上兼容风电季节性出力波动和光伏日内波动^[8]，以及短时间尺度上容纳新能源出力和新型负荷的不确定性。而煤电的退出会导致现存的资源灵活性大幅度减少，影响电力系统安全运行，甚至导致供电系统瘫痪。

1.2 智利的政策规划

针对上述问题，智利政府颁布实施了一系列相关的政策来针对性地解决这些问题，为能源结构的改革提供了不同阶段的战略目标，具体如下：

（1）持续推进可再生能源发展的能源政策，出台非常规可再生能源法案、电力拍卖机制、净计量法、碳税法案^[9]；

（2）促进可再生能源项目投资开发的电力拍卖制度，以独特的拍卖结构形

成了美元计价、宽松的资格审查制度^[10]、较长的交付时间和严格的逾期惩罚的拍卖流程来吸引开发商参与^[11]；

（3）电网建设和煤电机组改造。解决线路阻塞和广域配置能力，通过建设卡诺电池加速储能设施建设并提前布局灵活性资源^[12]；

（4）考虑多时间尺度灵活性需求的灵活性资源规划。以上这些政策与规划极大地推动了智利国内以风电和光电为代表的可再生能源的发展^[13]。

中国虽然与智利相隔万里，有着极为不同的国情与发展情况，但是在能源供给，尤其是电力发展上有着许多相似的地方。在退出煤电的过程中，也遇到了如煤电主导的电力供应结构、资源与负荷的逆向分布格局、突出的电力广域配置需求以及巨大的低碳减排压力等一系列问题。

2 中国电力现状与政策

“十三五”的规划纲要确定了创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，同时对能源发展提出了环境和气候变化的约束性要求，这几点在“十四五”能源规划中愈发重视。结合已经圆满完成的“十三五”能源规划以及“十四五”规划开局之年 2021 年的能源规划，对于国家关于煤电发展的政策导向进行分析。

长期以来，我国能源消费与社会用电量呈现稳定增长趋势，2019 年中国电力消费量占全球的 27.8%，但人均电力消费量相较于美国仍然较低。2020 年中国全国发电量约为 76236 亿千瓦时，其中火力发电为 51743 亿千瓦时，尤其以煤炭发电 49177 亿千瓦时为主。其次，水力发电为 13552 亿千瓦时位居第二。长期以来，中国的电力系统以火电为主，水电为辅。近些年来，核电、风电等新能源发电建设不断加快，这得益于中国新能源企业的不断创新，而更多的在于中国电力政策对于新能源的倾斜。

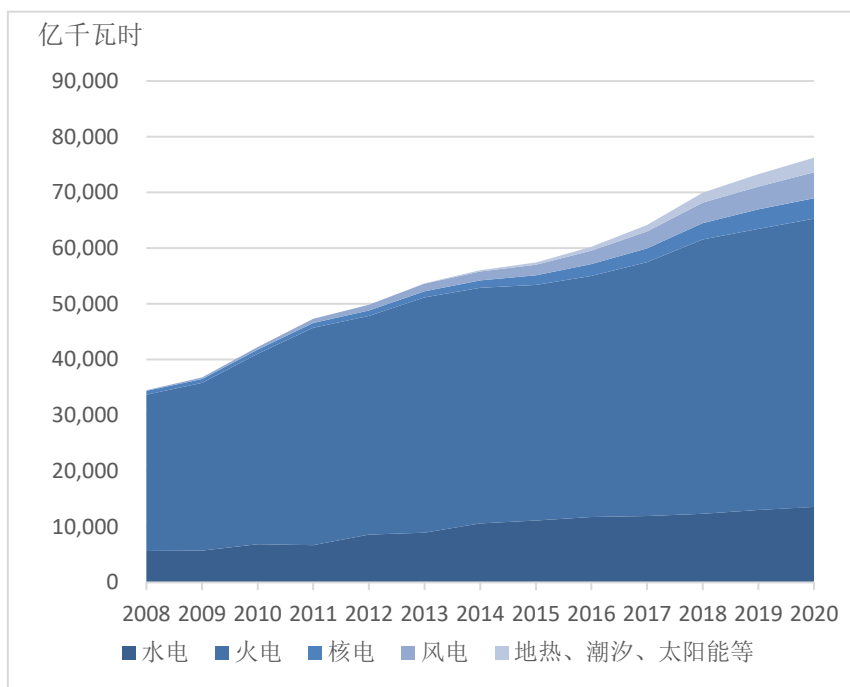


图 1：中国国家电网分电源发电量

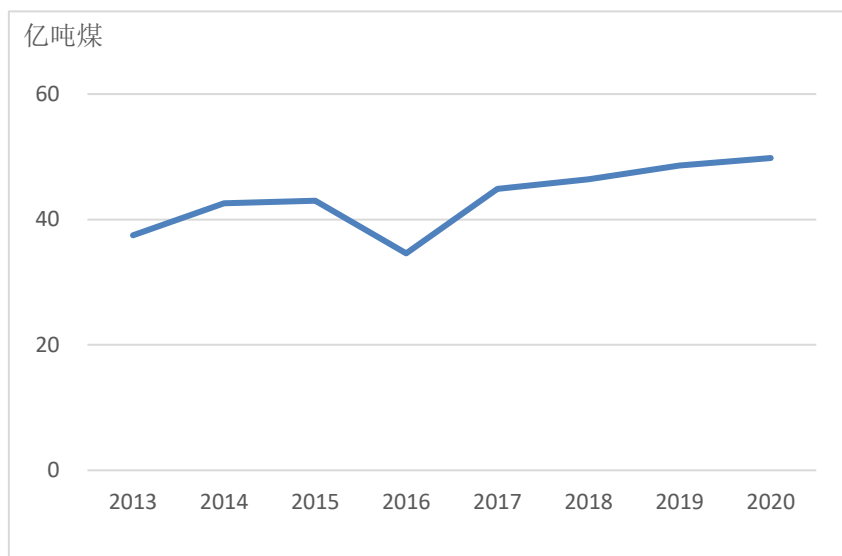


图 2：2013-2020 我国能源消费情况

2.1 政策说明

根据 2016 年结合各地“十三五”电力供需形势发布的《国家发展改革委国家能源局关于促进我国煤电有序发展的通知》，国家对于我国煤电发展做出了几点重大要求：

(1) 建立煤电规划建设风险预警机制；(2) 严控煤电总量规模，“十三五”规划对煤电装机提出了限制性的目标，2020 年不超过 11 亿千瓦。同时对于电力盈余以及大气污染防治重点区域，将不再安排新增煤电规划建设规模。加大淘汰

落后产能力度，逐步淘汰服役年限长，不符合能效、环保、安全、质量等要求的火电机组，优先淘汰 30 万千瓦以下运行满 20 年的纯凝机组和运行满 25 年的抽凝热电机组；（3）有序推进煤电建设，严格按程序核准建设煤电项目，对于未取齐开工必要支持性文件而开工建设的煤电项目，相应省级发展改革委（能源局）要责令其立即停止建设，相关部门要依法依规予以严肃处理；（4）严肃处理违规建设项目，对于存在未按核准要求建设、未核先建及未达开工条件建设等违规建设行为的煤电项目，相应省级发展改革委（能源局）要责令其立即停止建设。

2021 年 7 月 16 日国家能源局召开的全体党员干部大会指出，要扎实做好“六稳工作”，全面落实“六保”任务，持续巩固拓展疫情防控和能源改革发展成果，统筹推进保障能源安全和绿色低碳发展，不断推进“四个革命、一个合作”能源安全新战略走深走实。同时，各地“十四五”规划和 2035 年远景目标建设或者征求意见稿相继公布，总体而言，多地明确扎实做好碳达峰、碳中和各项工作，优化产业结构和能源结构，推动煤炭清洁高效利用，大力发展新能源。其中天津、上海等城市提出积极对接全国碳排放权交易市场，完善能源消费双控制度；重庆、内蒙古等城市提出推进新能源需求侧改革，做好电网建设，发展氢能经济。

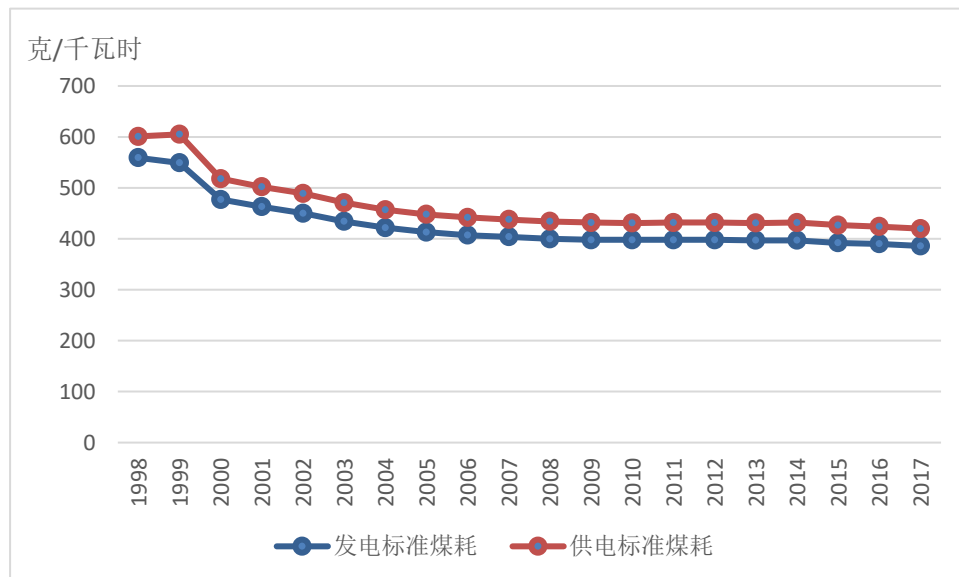


图 3：发电与供电标准耗煤情况（克/千瓦时）

2.2 政策分析

从供给侧看煤电规划，电力行业的碳排放占全国碳排放的 40%，所以国家把电力行业作为一个最重要的控制点，“十四五”规划强调继续压缩煤炭产能。现在煤炭产能超过了 50 亿吨，需要大幅度的压减。煤炭消费占比（2019）为 57.7%，

需要进一步控制降低占比；石油消费应当从如今的 7.5 亿到 8 亿吨控制在 7 亿吨以下。虽然非化石能源消费无论是水电、核电还是风电，发展还算良好，今年预计能够超过 16%，但“十四五”对于非化石能源规划至少应该是 19%到 20%，所以对于新能源的发展还需要进一步加大力度。

2013 年以来治理大气污染，有所成效，但 2019 年二氧化碳排放量达到 90 多亿吨，创造历史新高。治理大气污染，减煤电是首选，而煤电装机一定要做好严格控制。如果按照如今的电力需求增速，未来五年的增长将会是 1.6 万亿千瓦时，其中留给煤电的空间很小，除了煤电的容量置换以及灵活的煤电电力，对于如今的煤电装机已经是足够了，即使仍需新建煤电项目，建议同步建设碳捕获、利用与封存技术（CCUS）、积极开展 CCUS 低碳化改造等。如今国家能源局对于煤电规划建设风险预警进行了进一步的细分，包括煤电装机充裕度预警指标、资源约束指标、煤电建设经济性预警指标，严格做好对煤电建设的控制。当然，煤电行业的规模也需要不断缩减，需要在能源供应充足的前提下与清洁能源协调发展。

针对国家提出的 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的目标，总体思路是以清洁低碳可持续发展为方向，加快实施“两个替代”，促进“双主导、双脱钩”。其中清洁替代是能源生产领域碳减排的根本举措，关键是严控煤电总量，转变功能定位，煤电发电量占比应由 2020 年的 61%降至 2030 年的 42%。煤电应该逐步从主力能源向调节性能源转化，争取在“十四五”期间实现煤炭消费量零增长。

同时为了保证能够满足能源总需求增长的情况，应加快大型风光水发电基地规划开发建设，到 2030 年清洁能源占一次能源比重提升至 31%。国家能源集团也提出可再生能源新增装机要达到 7000-8000 万千瓦。当然，将风电、核电以及光伏发电等可再生能源从替代能源向主力能源转变，还需要进一步通过技术和模式创新解决风电和光伏发电波动性较大的问题，保证电力系统的稳定输出和用电安全。

3 情景分析法检验政策效果

3.1 GM（1,1）模型预测

3.1.1 GM（1，1）模型原理

灰色预测理论由学者邓聚龙在 1982 提出,“灰色”即是指信息不完整的系统。灰色预测具体是指采用 GM (1,1) 灰色预测模型对系统未来发展变化趋势进行的预测工作。GM (1,1) 中运用了单变量的一阶微分方程,主要方法为基于累加序列构造微分方程,将微分方程离散化后得到的矩阵形式使用最小二乘法,求得微分方程的解。

若给定原始时间数据列:

$$X^{(0)} = (X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n))$$

若将原始数据列进行一次累加生成,获得新的数据列:

$$X^{(1)} = (X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n))$$

其中:

$$X^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i X^{(0)}(k), (i = 1, 2, \dots, n)$$

灰色系统建模思想是直接将时间序列转化为微分方程,从而建立抽象系统的发展变化动态模型。建立的 GM(h,n)模型,是微分方程的时间连续函数模型,括号中的 h 表示方程的阶数, n 表示变量的个数。

本文运用 Matlab 实现 GM (1,1) 对未来十年我国能源消费量及全社会用电量预测 (含 2021 年)。

3.1.2 预测结果

表格 1:未来十年我国能源消费量预测 (单位: 亿吨煤)

年份	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
能源消费量	51.20	53.13	55.13	57.22	59.38	61.62	63.95	66.36	68.87	71.47

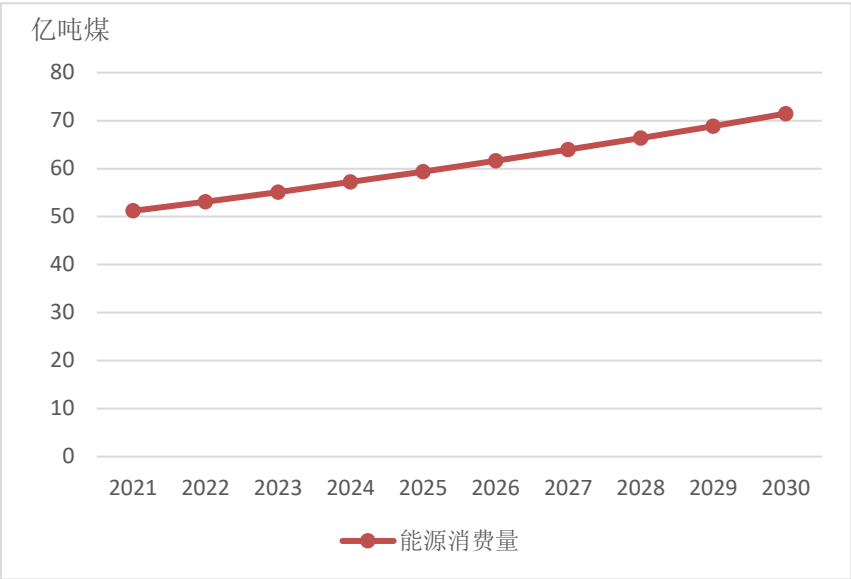


图 4：GM（1,1）模型预测未来十年能源消费量

表格 2：未来十年我国全社会用电量预测（单位：亿千瓦时）

年份	2021	2022	2023	2024	2025
全社会用电量	79482.11	83764.13	88276.84	93032.67	98044.72
年份	2026	2027	2028	2029	2030
全社会用电量	103326.78	108893.41	114759.94	120942.52	127458.18

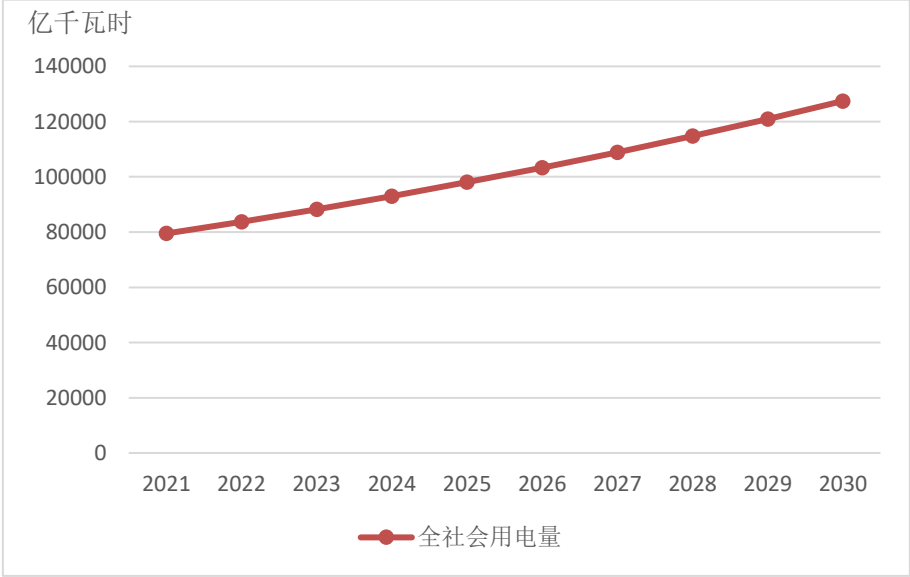


图 5：GM（1,1）模型预测未来十年全社会用电量预测（单位：亿千瓦时）

以上结果均通过了系统精度检验。

3.2 情景分析法

3.2.1 模型原理与数据来源

情景分析法是在对经济、产业或技术的重大演变提出各种关键假设的基础上，通过对于未来严密的推理与描述来构想未来各种可能的方案，进而对政策进行评

价。它的主要优点是能够对未来发展情景做出长期、多种可能性的描绘。由于本文仅考虑政策影响，构造忽略社会、政治等其他因素影响的简化情景分析模型，从而更有利于政策决策者拟定解决具体问题的详细方案。

本文使用中国电力企业联合会公布的 2008-2020 年全国电力工业统计快报中公布的数据，

3.2.2 构造情景

基于上文的分析，我们假设两种情景：

情景一：在国家经济发展基础上的非化石能源发电量正常递减。

情景二：在绿色节能政策干预与导向下的非化石能源节约量。

在情景一中，要预测非干预的正常化石能源减少量，同样运用 GM（1,1）灰色预测模型得到未来 10 年预测的非化石能源与化石能源发电比例为：

表格 3：情景一未来 10 年预测的非化石能源与化石能源发电比例（%）

年份	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
火电发电比例	67.53	66.44	65.38	64.33	63.30	62.29	61.29	60.31	59.34	58.39
（其中）煤炭发电比例	59.64	58.23	56.84	55.49	54.17	52.89	51.63	50.40	49.21	48.04
非化石能源发电比例	32.47	33.56	34.62	35.67	36.70	37.71	38.71	39.69	40.66	41.61

以上结果均通过了系统精度检验。

在情景二中，参考上文政策制定情况。煤发电量预计在 2030 降到 42%，假定政策匀速推进。2020 年煤炭发电占比为 63.2%，则每年的煤炭发电比例预计情况约为：

表格 4：情景二未来 10 年预测的非化石能源与化石能源发电比例（%）

年份	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
（火电中）煤炭发电比例	61.08	58.96	56.84	54.72	52.60	50.48	48.36	46.24	44.12	42

3.2.3 政策评估

在情景一与情景二中，分别用预测出的未来用电需求量乘以煤炭发电的比重得到预计发电所需煤炭需求量。两者对比可得出在政策推进的情况下，2021—2030 十年内总计可减少以煤炭发电的电量 25179.085 亿千瓦时。结合当前的煤炭发电效率，2020 年生产一千瓦时的电需要 320g 标准煤。即相当于政策实施后使十年减少了 80573.07 万吨煤用量。

4 煤电退出分析

4.1 零碳电力情况

目前具有可行性的零碳电力主要包括光伏、风电、水电以及核电。其中，水

电发展受自然因素限制较大，难以与产业布局相匹配，成本下降空间较低；而第三代核电技术规模化建设后成本将下降到 0.25 元/kWh，但核电发展具有不确定性，核技术取得进一步突破前难以大范围普及；风电目前成本接近 0.2 元/kWh，未来成本有望继续下降但空间不大；而大规模光伏制氢与氢基产业能够灵活配合，在目前上网电价已经实现 0.1 元/kWh 左右时，能够通过进一步扩大分布式光伏覆盖范围推进光伏发电普及，加之未来光伏发电组件的成本有望伴随企业技术创新持续下降到 2000 元/kW 以下，这将使得中国光伏发电成本达到 0.07-0.2 元/kWh。

中国太阳能资源分布具有很大的地域性差异，甘肃、内蒙古、青海与西藏年水平面总辐照量超过 1750kWh/m²，属于太阳能资源最为丰富的地区；其次，新疆、宁夏、山西、陕西、河北、四川与云南年水平面总辐照量超过 1400-1750kWh/m²。

4.2 零碳电力政策规划

2021 年下半年以来，煤炭供应短缺与双控政策的叠加影响导致全国各地出现不同程度的限电。主要原因在于受煤炭供需关系影响导致煤炭价格不断上涨，电厂煤炭存量下降导致供电能力下降，催生了煤电价格涨价诉求，致使电价市场化改革推进。在追求“双碳”目标的同时，合理制定零碳电力政策才能够平衡环保与发展的矛盾。基于本文分析，我们给出如下政策建议：

（1）政策组合拳需要不断完善政策内涵和政策组合机制，基于电力发展与结构加强政策对于煤电退出与新能源发展的支持力度；

（2）设计充分考虑可再生能源资源特性的电力市场结构，加强电力供给市场的竞争性与流动性，充分发挥市场作用；

（3）加强对电网、储能等电力基础设施的规划建设，并对系统灵活性资源进行提前规划布局；

（4）对不同时间尺度下系统的灵活性资源供应予以充分关注，细化主力电源一次能源可用性和高比例新能源系统运行的动态需求。

参考文献

- [1] LIU Z, GUAN D B, MOORE S, et al. Climate policy: steps to China's carbon peak[J]. Nature, 2015, 522(7556): 279-281.
- [2] TAN X P, WANG X Y. The market performance of carbon trading in China: a theoretical framework of structure-conduct-performance[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159: 410-424.
- [3] 王鸣华. 发达国家碳排放交易机制构建及启示[J]. 经济纵横, 2015(6): 118-120.
- [4] PALMA BEHNKE R, BARRÍA C, BASOA K, et al. Chilean NDC mitigation proposal: methodological approach and supporting ambition[R]. Santiago: COP25 Scientific Committee, 2019.
- [5] Ministerio de Energía. Gobierno anuncia la salida ocho centrales a carbón en 5 años y la meta de retiro total al 2040[EB/OL]. (2019-06-04)[2021-03-15]. <https://energia.gob.cl/noticias/nacional/gobierno-anuncia-la-salida-ocho-centrales-carbon-en-5-anos-y-la-meta-de-retiro-total-al-2040-0>.
- [6] Ministerio de Energía. NDC and carbon neutrality plan[R]. Chile: Ministerio de Energía, 2020.
- [7] Ministerio de Energía. Energy 2050[EB/OL]. (2016-08) [2021-03-15]. <http://www.energia2050.cl/wp-content/uploads/2016/08/Energy-2050-Chile-s-Energy-Policy.pdf>.
- [8] Ministerio de Energía. COP25 Ministerio de Energía[EB/OL]. (2019)[2021-03-15]. <https://energia.gob.cl/mini-sitio/cop25-ministerio-de-energia>.
- [9] IDB. Clean energy auctions in Latin America [R/OL]. (2020-01) [2021-03-15]. <https://publications.iadb.org/en/clean-energy-auctions-latin-america>.
- [10] GIZ. Batería Carnot, una alternativa posible[R/OL]. (2020-09-16)[2021-03-15]. <https://4echile-datastore.s3.eu-central-1.amazonaws.com/wp-content/uploads/2020/11/12182946/201112-MG-Chile-Carnot-Batteries-Webinar.pdf>
- [11] CEN. Analysis of potential conversion of coal-fired plants in Chile [R/OL]. (2021-02-24) [2021-03-15]. <https://www.coordinador.cl/wp-content/uploads/2021/02/Coal-power-plant-reconversion-ATA-Feb-2021.pdf>.
- [12] CEN. Estudio de operación y desarrollo del SEN sin centrales a carbón: informe principal [R/OL]. (2018-12) [2021-03-15]. https://www.coordinador.cl/wp-content/old-docs/2019/01/20190102-Estudio_OPyDES-Sin-carb%C3%B3n_Informe_Principal.pdf
- [13] 孙华东, 王宝财, 李文锋, 等. 高比例电力电子电力系统 频率响应的惯量体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16): 5179-5192. SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192(in Chinese).