

中国东北电网冬季资源充足性研究报告

2023年9月

课题研究人员：

加州大学圣地亚哥分校

(UC San Diego)

Michael Davidson (戴蔚森）

Fikri Kucuksayacigil

魏明

姚伯雨

睿博能源智库 ***(RAP)***

Max Dupuy

高驰

华北电力大学

袁家海

张健

张凯

关于项目

本报告是由中国新型电力市场研究库（the Electricity Market Tracker）项目完成的。这是一个为中国各省的电力市场设计之争提供独立的分析工具的项目。通过汇总公开的市场与电网的数据、开发仿真建模工具，并研究国际实践经验，中国新型电力市场研究库旨在探讨与政策息息相关的研究议题，并将研究成果广泛地分享给各方利益相关者。

要了解更多关于中国新型电力市场研究库项目的信息，请访问网址：www.emtracker.org

目录

关于项目 3
目录 4
执行摘要 6
1. 报告目的 6
2. 主要研究结果 6
3. 政策影响 7
1. 引言 7
1. 2021年秋东北电网停电事故分析-背景 8
2. 2021秋东北电网停电事故分析-回溯 9
3. 东北电网停电事故的背后原因-众说纷纭 9
1. 风电出力的表现 9
2. 经济复苏和电力需求激增 9
3. 煤炭价格上涨和供应紧张 10
4. 煤电上网电价机制的影响 10
5. 跨区域电力输送的合同义务 10
4. 化解这场危机所采取的直接措施 10
2. 研究方法 11
1. 负荷、发电与输电 11
2. 情景设置 12
3. 仿真结果 13
1. 2022年12月 13
2. 敏感度分析 — 高装机容量缩减 16
3. 2023年2月 17
4. 政策建议 19
1. 市场与价格 19
2. 规划流程 20
3. 其他政策视角 21
参考资料 23
附录 27
1. 输入数据 27
1. 数据来源 27
2. 电力需求 27

3. 燃料价格 28
4. 输电网拓扑图，路线容量及线损 28
5. 供热运行中的容量分配 30
6. NSE 费用 30
2. 模型 30
1. 计算设置 30
2. 资源分类 31
3. 决策变量，约束条件和目标函数 31
4. 备转容量 31
5. 水库水电仿真 32
6. 情景设置 32

执行摘要

1. 报告目的

本报告提供了两种国际上常见的公共报告的案例研究，它们在支持一个可靠的新能源系统方面非常重要，特别是在市场化的电力系统环境中：

1)停电事故事后分析报告：在大规模停电或其它系统危机之后，正式委托并发表一份事故原因的深入调查分析，对必要的改革进行讨论，这是非常有价值的。我们用一个实例，回顾了中国2021年底在东北电网（NEG）发生的电力危机。

2) 季节性资源充足性展望报告：发表这份季节性展望可有助于管控短期风险，并提高人们对系统可靠性和新型能源系统的信心。我们的案例研究利用截至2022年10月的数据，给出了2022 / 2023年冬季两个月的资源充足性展望。

国家能源局在2023年2月发布了《关于完善电力系统运行方式分析制度强化电力系统运行安全风险管控的通知》（通知）。这份通知是首份从系统层面，规定常规化运行方式分析以规避系统风险的政策文件，为增强电力系统可靠性，提前预知电力系统风险，迈出了坚实的一大步。具体而言，该通知要求各电网企业每年进行三次系统运行方式分析，分别是：系统年度运行分析、迎峰度冬、以及迎峰度夏分析。除此之外，也要求对上一年度系统运行情况进行总结，分析“调管范围内电力安全事故（实践）情况”。本报告旨在抛砖引玉，本着国家能源局在《通知》中提出的要求，借鉴了国际上关于资源充足性分析的前沿实践方法，以东北电网为例来阐释这些系统分析的一些方法，并对2021年东北的停电事故做了一些分析，并提出了一些政策上的建议，以供参考。

2. 主要研究结果

<u>2021 停电事故调查分析</u>

- 如果没有煤电上网电价的价格限制等僵化政策，或行政要求的大量电力外调，资源将足以在极端天气条件下维持系统可靠性。
- 然而由于行政要求的大量电力外调等僵化政策，加之极端天气的影响，导致了严重的拉闸限电事件。

<u>2022 / 2023冬季建模结果</u>

- 建模仿真表明，在没有政策僵化或要求优先外调的情况下，发电资源将足以保持系统的可靠性。
- 然而，建模仿真也表明，政策僵化，例如因煤炭、电力市场的不完全开放导致的部分煤电机组停产，致使系统仍存在严重的系统“紧张”和拉闸限电的风险。

3. 政策影响

1. 应改革那些不灵活的行政性定价和不完善的市场机制。我们建议：
    a. 实施地区性统一的现货市场，一开始采用可行的且尽量简化的市场设计。这会让对发电厂（和其他电力资源）的激励措施合理化，并有助于指导各地区实行“统一”的经济调度。
    b. 放开（甚至取消）行政性基准煤电上网电价价格，并放宽现货市场价格上限。现货市场定价应尽快取代行政性基准煤电上网电价价格，作为对火力发电厂的新补偿机制。
    c. 由本报告中所述的能源机构实施透明的回顾性和前瞻性的资源充足性评估过程。
2. 最后，我们根据国际经验提出了两个结论性思路：
    a. 建设更多的煤电厂不太可能成为支撑一个可靠的新型能源电力系统的成本最低的解决方案。
    b. 反而，重要的是要继续出台政策和市场规则，以发挥需求响应和节能投资带来的效益。这些措施有助于以合理的成本实现一个可靠的系统，并为紧急情况下的“有序用电”政策提供更好的选择。

1. 引言

本报告提供了两种国际上常见的公共报告的案例研究，它们在支持一个可靠的新能源系统方面非常重要，特别是在市场化的电力系统环境中。

1)停电事故事后分析报告：在大规模拉闸限电或其它系统危机后，正式委托发表一份调查报告，对事件起因进行深入分析，讨论对政策和市场规则进行必要的改革，都是非常有价值的。这有助于让政策制定部门、市场参与者和终端用户理解政策意图，合理评估典型的危机后争论，如波动性可再生能源发电对可靠性的影响。我们用一个实例，回顾了中国2021年底发生在东北电网（NEG）的电力危机。

2) 季节性资源充足性展望报告：发表这份季节性展望报告可有助于管控短期风险，并提高人们对可靠性和新型能源系统的信心。我们的案例调研采用了截至2022年10月的数据，给出了2022 / 2023年冬季两个月的资源充足性展望。

我们在这些分析中借鉴了国际上关于资源充足性分析的前沿实践方法。然而，我们的东北电网案例分析与国际前沿实践相比还有一定距离，一个重要方面是：相对于美国和欧盟电力系统的市场化部分，东北电网（以及中国其他电网地区）的公开数据相对稀缺。此外，这类全面的资源充足性报告往往需要有一个大的分析团队，并得到政府支持。在这些方面，

我们的案例研究旨在抛砖引玉，希望有正式指定的机构用足够的资源来编写更详细的报告。

1. 2021年秋东北电网停电事故分析-背景

本节概述了东北地区2021年秋季发生的停电事故。调查此次事故的主要动机是为了降低可靠性风险，为将来不再重蹈覆辙提供宝贵的经验。在其他国家，事后分析报告通常由政策制定部门委托，并由某些实体机构。例如，在美国，区域系统运营商（RTOs/ISOs）或州级公共事业委员会负责报告的撰写，他们可以不受限制地调取系统运行数据，获得系统操作人员的证词等。以下是近年来一些最著名的停电事件公开调查报告：2021年得克萨斯电力危机[1]，2020年加州电力危机[2]，2019年英国电力危机[3][4]，以及2016年南澳大利亚电力危机[5]。

这些事后分析报告为未来的研究提供了切入点。在这些研究中，可以通过各种建模进行更细粒度的描述和分析。在本报告中，对2021年东北地区停电事件的描述，启发了情景的设计，在这些情景中，对一些潜在的影响因素进行了仔细研究，以衡量它们对东北电网资源充足性的影响。类似的分析过程也可能在全社会范围进行：在权威部门发布这些报告后，各分析师、研究机构和观察人员所做的衍生研究项目将会进一步推动这类调查。

2021年秋，中国经历了一场大范围的电力危机，揭示了在中国电力行业转型过程中确保安全性和可靠性的挑战。从2021年9月开始，中国约20个省开始实施了有序用电和拉闸限电。其中，东北电网——包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古东部（蒙东）—— 所在地区的限电情况最为严重。东北地区的居民经历了前所未有的突然停电。最初只影响到工厂的限电情况，逐步蔓延到了家庭、交通、供水和其他基本的社会用电。

在东北电网内，最大的需求中心和最大的净电力输入省是辽宁，而最多的发电盈余来自蒙东（图1）。东北电网作为净电力输出地，还向邻近的华北电网输出电力，涵盖了北京、河北、河南、山东、山西和天津等地。

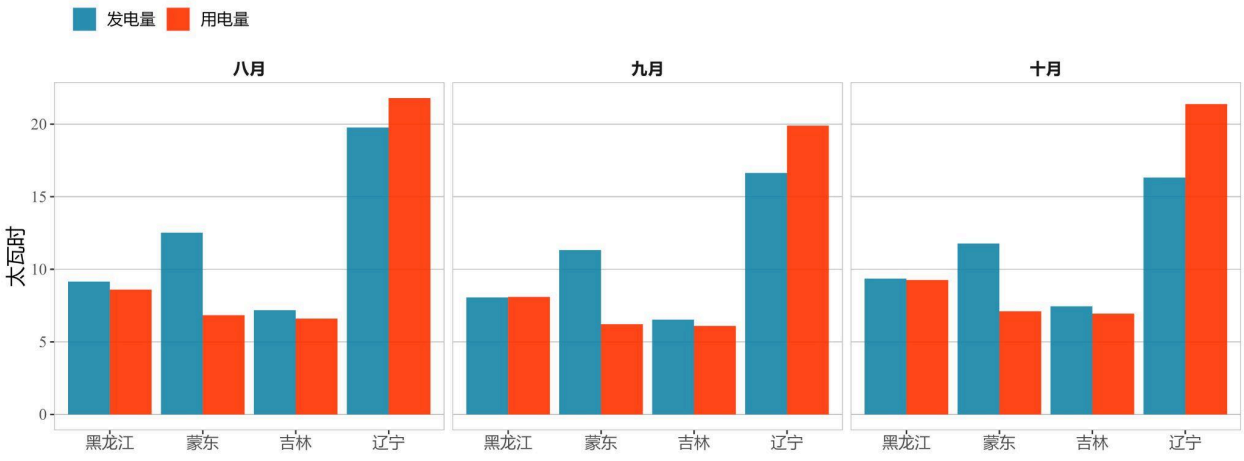


图 1. 2021年秋季停电事故期间东北地区的发用电量[6] [7]

下一节简要介绍2021年中国东北电网的停电事故，重点关注辽宁这个东北电网电力需求最大的省份。通过回顾性分析，我们评估了从官方发布到媒体评论提出的一些潜在因素，以深入了解这些因素是否会造成最后的拉闸限电。虽然东北电网中其他省份的系统条件略有不同，但辽宁电力系统的许多常见问题也会出现在别的省份，这使辽宁成为研究的合适案例。

2. 2021秋东北电网停电事故分析-回溯

2021年前八个月，在经济快速复苏的推动下，辽宁的电力需求激增，较去年同期增长9.5%，创历史新高。从2021年9月10日起，辽宁省净调入电量大幅下降，给当地供电造成压力，无法满足工业负荷。从9月23日至25日，电力供应危机进一步上升到严重级别。为实施“有序用电管理办法”，辽宁启动了三轮二级（10-20%负荷缺口）有序用电措施，这些措施旨在在供电不足的情况下，通过运用行政、经济和技术等措施，削减能源密集型工业用户的电力需求，确保电网的稳定，尽可能满足社会需求[8]。

在一些用电高峰时期，即使对辽宁电网实施了4169兆瓦的最大削峰措施，东北电网仍出现了停电情况。严重的停电导致系统频率低于49.8 Hz，这可能会损害某些电气设备，并导致频率崩溃和电网解列。根据《电网调度管理条例》，东北电网调度部门指示实施电网事故拉闸限电[9]。与较为可控的有序用电不同，拉闸限电是确保系统稳定的最终手段，对工业、住宅和商业用户都有重大影响。针对火电短缺，2021年10月6日，蒙东电网发布了“有序用电计划”，再加上蒙东电网电力容量充足、需求低，该地区避免了大规模停电。

3. 东北电网停电事故的背后原因-众说纷纭

这场全国性危机引起了专家和利益攸关方之间的激烈讨论，也引起了媒体的广泛关注。在此背景下，我们列出一些关键的讨论，这启发了我们在下一节中考虑的仿真建模场景。

1. 风电出力的表现

与其它引起全球媒体关注的严重停电事件类似，东北电网的拉闸限电也被归咎于可再生能源供应不足。诚然，由于每年的天气模式，7月至9月是东北电网的弱风期，每月发电量降至强风期的仅一半左右。一则官方报道显示，在9月份一场寒潮过后，风力发电的出力下降。但尽管如此，值得注意的是，大部分的拉闸限电发生在此次寒潮之前。此外，风能在辽宁的电力供应中作用很小，只占2021年的总发电量的比例不到9%。

2. 经济复苏和电力需求激增

强劲的经济复苏导致电力需求不断增加。2021年，中国经济从新冠疫情中迅速复苏，GDP同比增长8.1%[10]。在东北，经济增长虽然略缓，但仍比去年同期增长了5.8%[11]。2021年，辽宁电力需求增长6.3%，为自2012年以来的第二高增长率[12]。

3. 煤炭价格上涨和供应紧张

煤炭价格全年都在上涨。2021年7月、8月和9月，由于煤矿事件、安全检查、安全监督、环保检查和在陕西举办的全运会等因素造成的限产[13]，导致煤炭价格攀升。自20世纪90年代以来，煤炭市场价格已经放开，但相关部门仍保留了对供应的管制。煤矿安全、产能过剩和煤炭行业利润管理引起了一些担忧，推动了中央政府对煤炭供给的干预[14]。2020年底，这些限制与国际煤炭贸易形势变化的合力，导致2021年动力煤价格过高，以及许多发电厂全年煤炭库存偏低的情况。为应对煤炭供应短缺和电力危机，国家发改委和能源局通过增加国内煤炭供应来缓解严峻的形势。

4. 煤电上网电价机制的影响

相对于煤炭成本的上升，过低的电价上限导致发电企业遭受严重亏损，对保障发电的积极性降低。据秦皇岛港2021年9月的统计，5500千卡动力煤的价格达到了20多年来的最高水平，超过2000元/吨，远高于一年前的600-630元/吨[15]。以往，电网的上网基准电价是行政制定的，而且根据煤炭价格变化对电价进行的调整也不够及时[16]。自2015年新一轮电力行业改革开始以来，煤电厂增加了在中长期（MLT）市场中的参与度。然而，市场价格通常仍不得超过行政性上网电价的上限。从2020年开始，上网电价被允许在一定范围内浮动（不低于规定上网电价的-15%，最高不超过10%），而且2021年电力危机之后，这一范围进一步扩大，允许市场在决定电价定价方面发挥更大作用[17]。然而，这种受限的定价灵活性仍然不足以让煤电企业将增加的燃料成本转嫁给消费者。

以辽宁为例，在2021年10月之前，煤电批发价格上限为0.4124（基准电价0.3749元/kWh*110%）[18] 。假设一个典型的煤电厂每发电一千瓦时使用305.5克标准煤[19]，相当于388.8克Q5500动力煤，并且动力煤价格达到2000元/吨，那么该煤电机组的发电成本大约将达到0.78元/千瓦时。即使在考虑其它非燃料成本之前，这也将导致该典型电厂遭受0.37元/千瓦时的损失。煤炭价格远远超过了燃煤发电厂无法收回其运营成本的临界点。作为回应，一些煤电厂选择减产或直接停产[20] [21]。

5. 跨区域电力输送的合同义务

东北电网负有向华北电网输送电力的长期合同义务。两条跨区域输电线路连接东北电网与华北电网，总传输能力约为5吉瓦。虽然中国的超高压输电线路建设处于世界领先，但这些线路的灵活运行仍在不断发展。这些线路上的计划输电量非常严格，通常在实际调度前几个月确定。在停电事故期间，东北电网仍在向山东、河北等邻近省份按照合同外送电力，而这些省份面临的电力短缺并不太严重[14][22]。因此，虽然华北电网的条件紧张，但这些省份能够从工业和商业用户那里削减负荷，而不会限制居民用电。

对这些潜在因素的回顾为建模工作打下了坚实的基础，在对东北电网的模拟中将这些因素的组合进行评估，以考察其对电力系统可能产生的影响。

4. 化解这场危机所采取的直接措施

受目前以煤电为主的能源结构的制约，对辽宁来说，短期内煤炭供应管理仍然是电力可靠性的关键组成部分。为应对即将到来的电力紧张情况，2021年9月底，辽宁省工业与信

息化厅和国家电网辽宁电力公司暂停了镁生产企业的运行，从电网释放了约2000兆瓦的电力需求。同时，要求18个燃煤电厂减少停机检修，这些煤电厂的总发电装机容量为6150兆瓦[23]。

此外，国家发展和改革委员会，正在努力通过更好的电价机制和改善能源结构来确保全国的电力供应[24]。

2021年9月27日后，辽宁有序用电措施进一步加强，消除了大范围停电。国家发改委和国家能源管理局也通过增加国内煤炭供应缓解火力发电厂的压力。辽宁省煤电厂的库存从2021年9月底的189万吨逐渐增加到10月初的236万吨，电力负荷缺口从9月底的5000兆瓦缩小到10月初的2000兆瓦[23]。黑龙江和吉林也经历了类似的情况，因此，这两个省也发生了限电和停电。

2. 研究方法

本研究采用机组组合与经济调度（Unit Commitment and Economic Dispatch, UCED）模型来研究东北电网中的发电、传输和用电，以及通过超高压线路向华北电网的送电情况。本研究的目的是评估2022年12月和2023年2月东北电网在各种情景下的资源充足性。模型输入包括从每个月的4周所选数据，共8周，以重复的边界条件单独运行。

1. 负荷、发电与输电

东北电网中的电力负荷由两部分组成：区域内电力需求和向华北电网送电的义务。根据2018年度国家发改委各省级电网典型电力负荷曲线，我们对东北电网地区的电力需求进行模拟[7]，并按5%的年增长率进行未来电力需求预测。外送电力任务则是根据华北电网中电力需求最大的山东省的分段式小时级式需求曲线推算到月度跨区域能源传输数据 [25]。这样的曲线有效地捕捉了受电省份的负荷特点。当模拟过程中电力需求未满足时，该模型将以极高的价格产生未供应能源（NSE）的成本，即本研究中的NSE惩罚。

发电厂的信息包括机组级燃煤发电厂的发电参数，并将其分类为热电联产（CHP）机组和纯发电机组。黑龙江省和辽宁省也有很少部分的燃气发电机组。每个省份的可再生能源的出力是基于“Renewables Ninja”平台收集到的典型每小时曲线，这是一个基于天气和卫星数据模拟每小时太阳能和风力发电输出的平台，覆盖了全球各个地区[26] 。图2汇总了东北电网中的装机容量。在冬季几个月里，当热电联产机组以最大产能生产热力时，其相应的最大电力输出将降至其额定容量的70%左右[27] [28] [29]（如附录表A.6所示）。

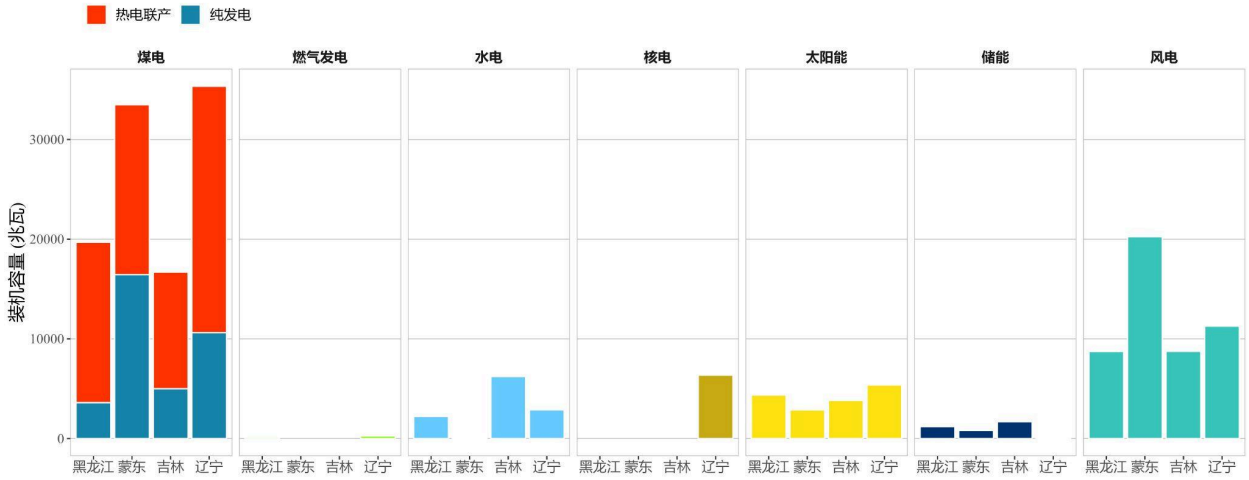


图 **2.** 东北电网的装机容量

本研究综合考虑各省之间的输电线路容量，并根据各区域之间的线路长度和电压计算每对相邻省份之间的传输损耗（详细信息见附录）。

2. 情景设置

基准情景模拟正常运行，包括使用从2020年以来的可再生能源出力曲线，基于2020年的长期合同价格的标准煤炭价格，以及煤电机组的常规运行。这一情景假设资源是由一个高效的现货市场根据最低成本进行调度。在东北电网内部，不存在除输电线路容量外的省际传输障碍，所有区域资源在调度决策期间都得到平等对待。尽管基准情景与实际运行存在差异，但提供了在理想情况下，电网如何实现在短期系统成本最小化运行的宝贵思路。其他情景则探讨了东北电网目前使用的各项现有策略和调度规则所产生的影响。

表1中列出了各种情景，其中“-”表示基准输入。需求**“+15%”**指的是，考虑到中国历史记录中在极端天气条件下的数据，所有地区的能源需求增加了15% [30]。**“**缩减**”**煤电机组容量是指每个地区纯发电煤电机组容量的减少占总煤电机组容量的约20%。该场景设定在整个东北电网降低了约11%的煤电容量（其中，辽宁地区降低了20% [31]，黑龙江和吉林各降低了10%，蒙东未降低）。这一缩减程度是对2021年东北电网停电事故期间实际煤电容量缩减的估计，这在很大程度上是由于不灵活的定价机制所致。**“**高**”**煤炭价格是根据2021年10月的最高燃料价格计算出来的。可再生能源出力**“**低**”**是指过去10年相关月份的最低平均可再生能源发电量。华北电网NSE惩罚**“**高**”**NSE意味着华北电网中的NSE成本是东北电网的两倍，以模拟优先向华北电网送电，并将本地需求视为次要的情况。所有热电联产机组都保证在所有情境下保持出力。

表 **1.** 模拟的情景和关键参数

情景	需求	煤电装机容量	煤炭价格	可再生能源出力	华北电网NSE惩罚
极端天气	+ 15%	-	-	低	-
高燃料价格和缩减容量	-	缩减	高	-	-
优先外送	-	-	-	-	高
因素叠加	+15%	缩减	高	低	高

3. 仿真结果

本研究对2022年12月（冬季高峰期）和2023年2月做了建模仿真。这两个月的主要区别是，2022年12月的整体能源需求更高。每年1月/2月的农历新年假期会减少一定的能源使用量。

表 **2. 2022/2023**年冬季各情景的运营成本（百万美元）。汇率**: 1** 美元**= 7.00** 人民币

	基准情景		极端天气情景		因素叠加情景	
	2022年**12**月	**2023**年**2**月	**2022**年**12**月	**2023**年**2**月	**2022**年**12**月	**2023**年**2**月
可变成本	1,589	1,597	2,181	2,211	3,379	3,228
启动成本	3.25	10.8	1.9	9.3	0.5	7.7

基准情景具有最低的可变成本和最高的启动成本，表明煤电机组经济地分配其发电资源与更频繁的机组启停（表2）。在极端天气情景下，电力需求的增加和可再生能源的低可用性导致燃煤发电量的增加，以及机组启停次数的减少。在因素叠加情景下，资源不足导致最少的启停次数以及煤电厂的高发电量，这反映在这两个月内最高的可变成本和最低的启动成本。

1. 2022年12月

在基准情景下，所有东北电网地区都能维持资源充足，并履行外送华北电网的合同义务。东北电网的主要电力来源是煤电和风电，并且当风力发电充足时，煤电机组会降低出力（图3）。内蒙古东部拥有丰富的发电能力，主要为黑龙江和辽宁供电。此外，吉林还在高风力发电时期为黑龙江和辽宁供电。储能系统在夜间风力资源充足时充电，高峰时段放电，以缓解系统压力。

在极端天气情景下，系统面临高电力需求和低可再生能源供应，但在良好的市场运行下，东北电网仍能够保持其资源充足性，同时在大部分时间能够履行其对华北电网的外送任务。然而，在可再生能源极其有限且电力需求高的时段，会出现少量NSE时段（图4）。受极端天气影响，所有省份的煤电出力都会增加，且煤电机组减少了启停次数，以保持更高的发电量，并弥补可再生能源的供应不足。风电的减少和需求的增加也导致了储能机组充放电的幅度和频率的降低。

通常，煤电机组可以稳定地满足基底负荷的电力需求，很少停机。假设市场运行良好，现有的煤电机组产能可以在各种风电可用性情景下与风力发电良好匹配。

在因素叠加情景下，东北电网无法维持其资源充足性并履行其对华北电网的外送任务。该地区出现了严重的电力缺口NSE，即使是在夜间风电可用性不足和煤电产能减少的非高峰时段（图5）亦是如此。在低风电和高负荷时段，热电联产机组的最大出力削减会显著压缩东北电网的容量充足性和调峰灵活性。

基准、极端天气和因素叠加三种情景显示，在12月的四周内，东北电网的可再生能源发电份额分别为34%、23%和24%。在极端天气情景下观察到的可再生能源份额的减少可以归因于太阳能和风能资源的可用性不足。因素叠加情景表明，与极端天气情景相比，可再生能源的份额略有增加，主要是由于煤电对发电的贡献减少。

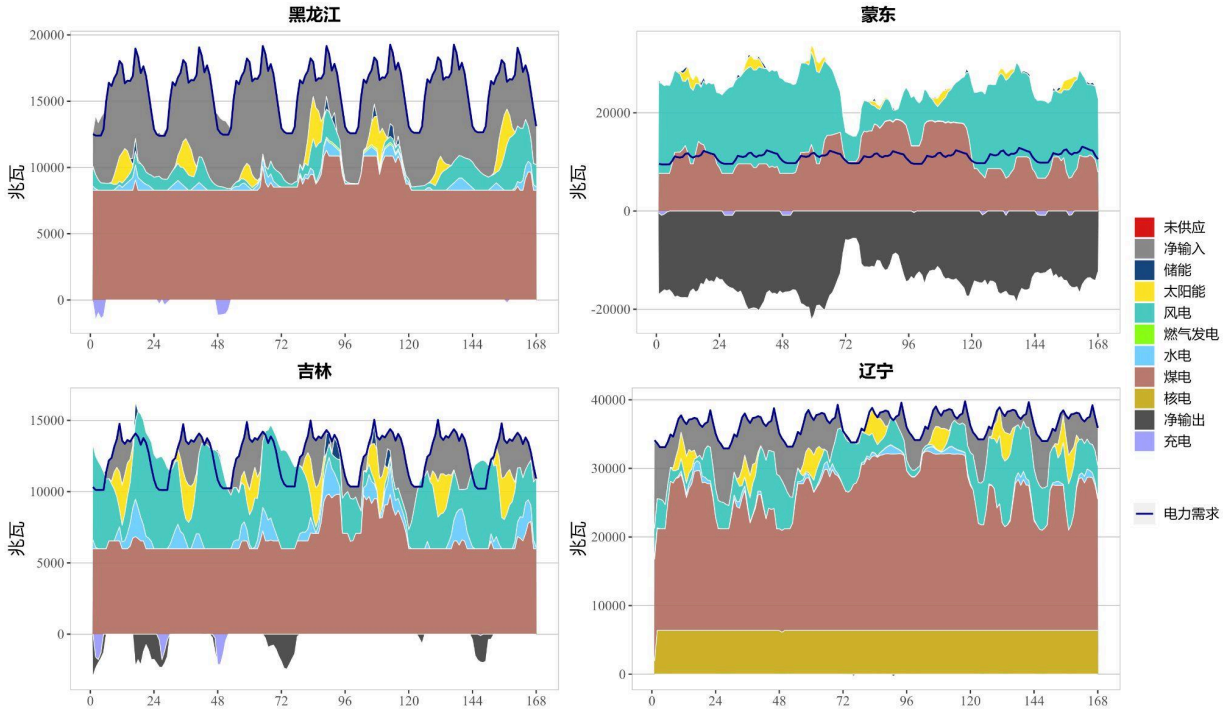


图 **3. 2022**年**12**月用电高峰周的调度结果（基准情景）

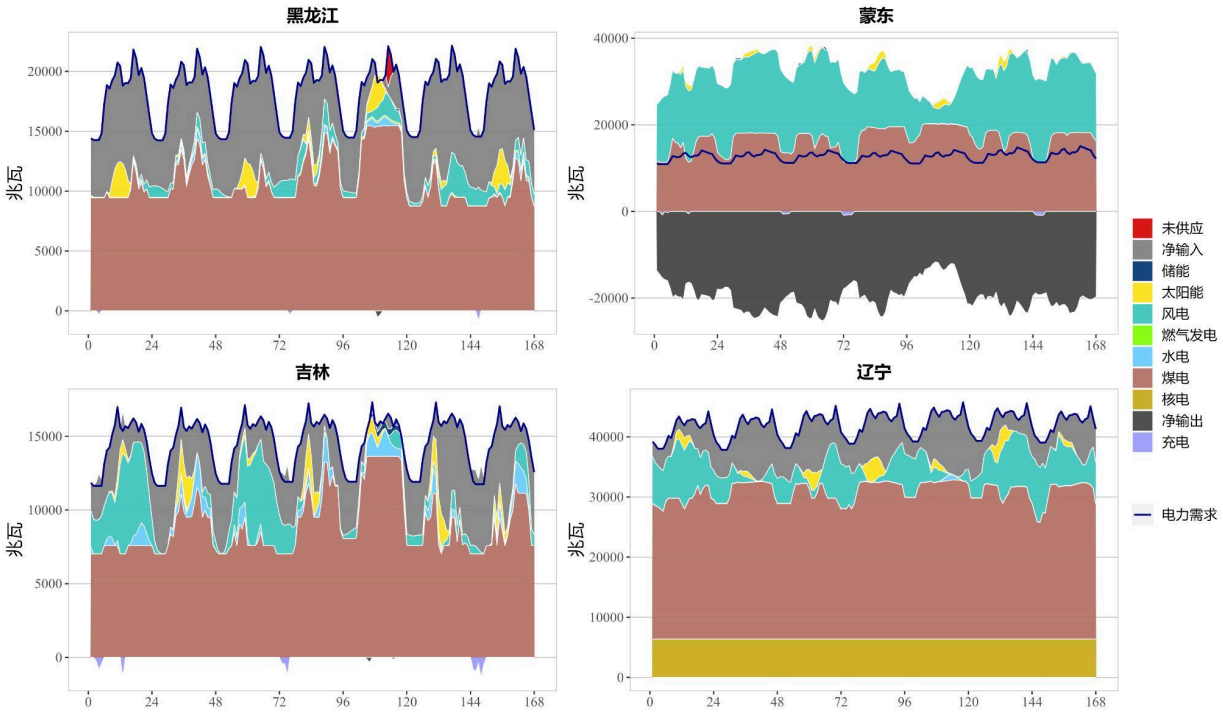


图 4. 2022年12月用电高峰周的调度结果(极端天气情景)

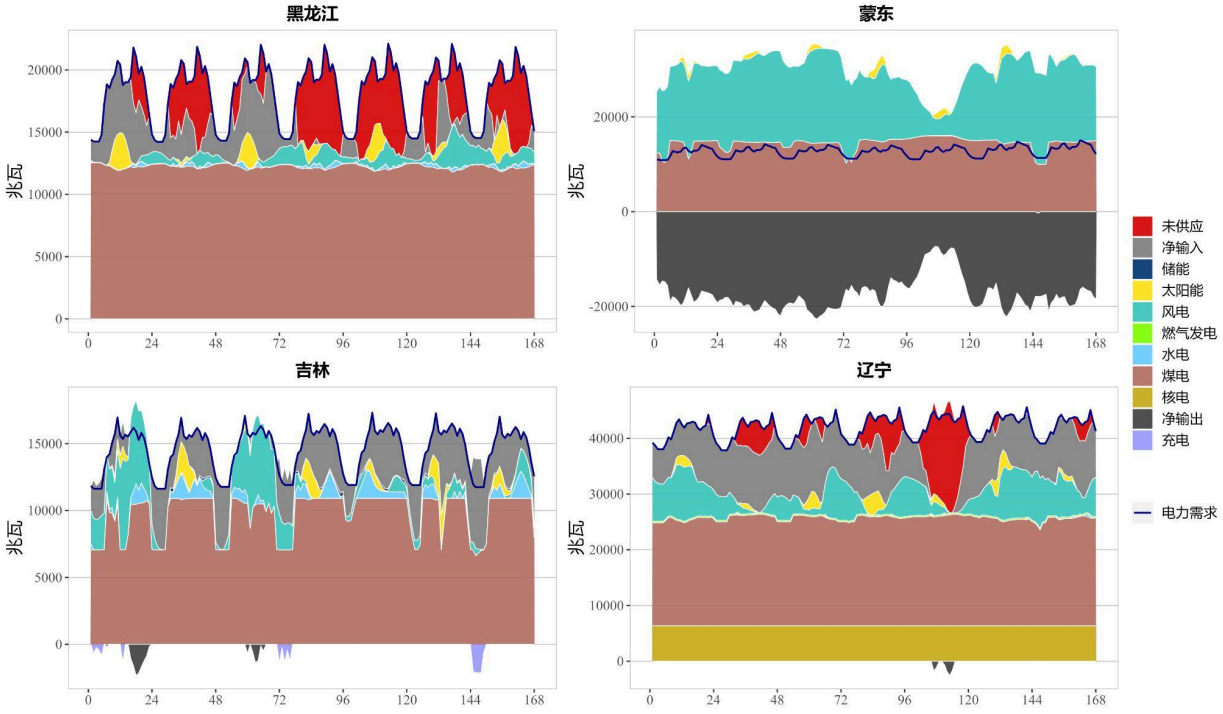


图 5. 2022年12月用电高峰周的调度结果(因素叠加情景)

基准情景中输电线路的平均利用率为43%，而因素叠加情景的结果为33%（图6）。利用率减少是由于能源供应的限制导致所有省份在履行对华北电网送电任务后都出现了自给自足的趋势。相较于基准情景，因素叠加使蒙东和吉林的外送线路使用增加，其他外送线路的电力传输减少。在因素叠加情景下，吉林对黑龙江的支持不足导致吉林向黑龙江输送的电力减少，从而增加了黑龙江的NSE。

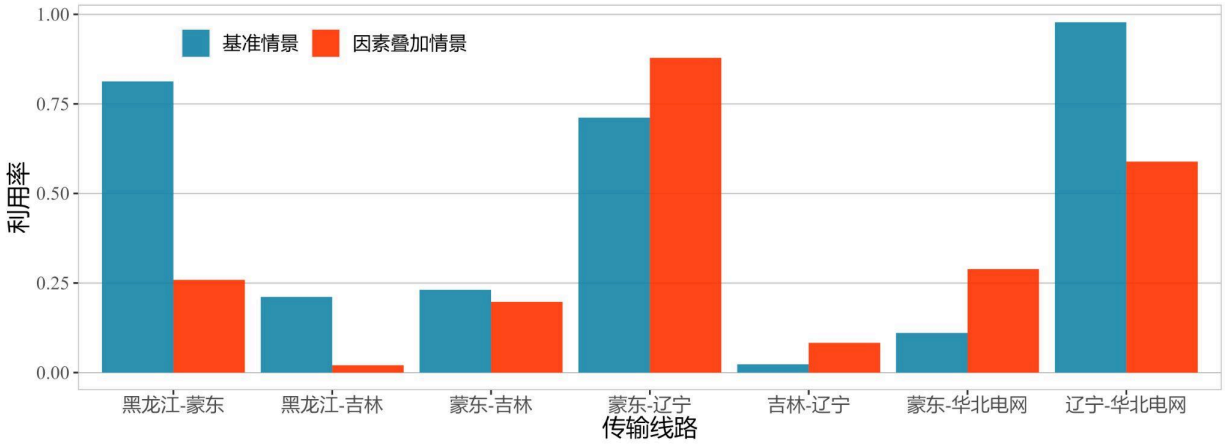


图 6. 2022年12月输电线路利用率

2. 敏感度分析 — 高装机容量缩减

历史数据表明，在2022年冬季的东北大停电期间，辽宁省的煤发电机容量中有6150兆瓦不可用 [31]。基于记载和估算，辽宁省缩减的煤电容量可能已经达到总煤电容量的20-30%。由于东北电网里的其他三个省网的负荷较低，煤电容量缩减对其他省份的影响也较低。

在对东北电网内的所有省份进行平均后，我们得到平均缩减煤电容量百分比（11%），并作为主情景。在高装机容量缩减的敏感性分析中，我们将辽宁省的煤电缩减容量百分比（20%）扩展到整个东北地区（不包括黑龙江，因为其纯发电机组的占比非常低）。这样的敏感度分析的目的是探讨煤电机组容量缩减对电力系统的潜在影响，特别是对NSE的影响。

我们评估了这两种容量缩减情景如何影响2022年12月的发电成本和NSE花费。在用电负荷不变的情况下，相比于11%缩减情景，20%缩减情景产生较少的启动和停机次数，从而降低了启停成本。这是因为在巨大的负荷压力下，大多数可用机组处于运行状态。

表3呈现了与NSE相关的发现：对于额外的9%的容量缩减，系统将面临额外的最高达约7000兆瓦的NSE。这将使最大瞬时NSE从瞬时总负荷的22.4%升至34%。NSE的平均值会增加两倍以上，从总负荷的2.4%增至8.4%。

敏感性分析结果突显了进一步缩减煤电容量的影响。在很大程度上，缩减煤电容量是由于低效的定价机制。从满足电力需求的角度讲，这也表明了有效市场机制对于东北电网的可靠性至关重要。

表 3. 2022年12月在煤电缩减容量为11%和20%情景下的东北电网的NSE

	东北电网最大NSE (MW)	东北电网最大NSE (% of Demand)	东北电网平均NSE (MW)	东北电网平均NSE (% of Demand)
11%缩减	21,553	22.4	2,124	2.4
20%缩减	28,428	34.0	6,498	8.4

3. 2023年2月

相比于2022年12月，2023年2月的电力需求以及系统压力更小（图7）。模拟结果显示，在各种情景下，东北电网资源充裕度在2023年2月的表现都与其在2022年12月的表现相似。这两个月份的仿真结果的区别在于，2月更低的平均和最大电力需求导致了极端天气条件下NSE和输电线路利用率的下降，使各省能够利用自身发电能力更好地满足需求（表4和表5）。储能可以更多地用于缓解高峰期电力需求，从而减轻系统充足性的压力。预计东北地区储能的增长将对提高资源的充足性做出积极贡献。

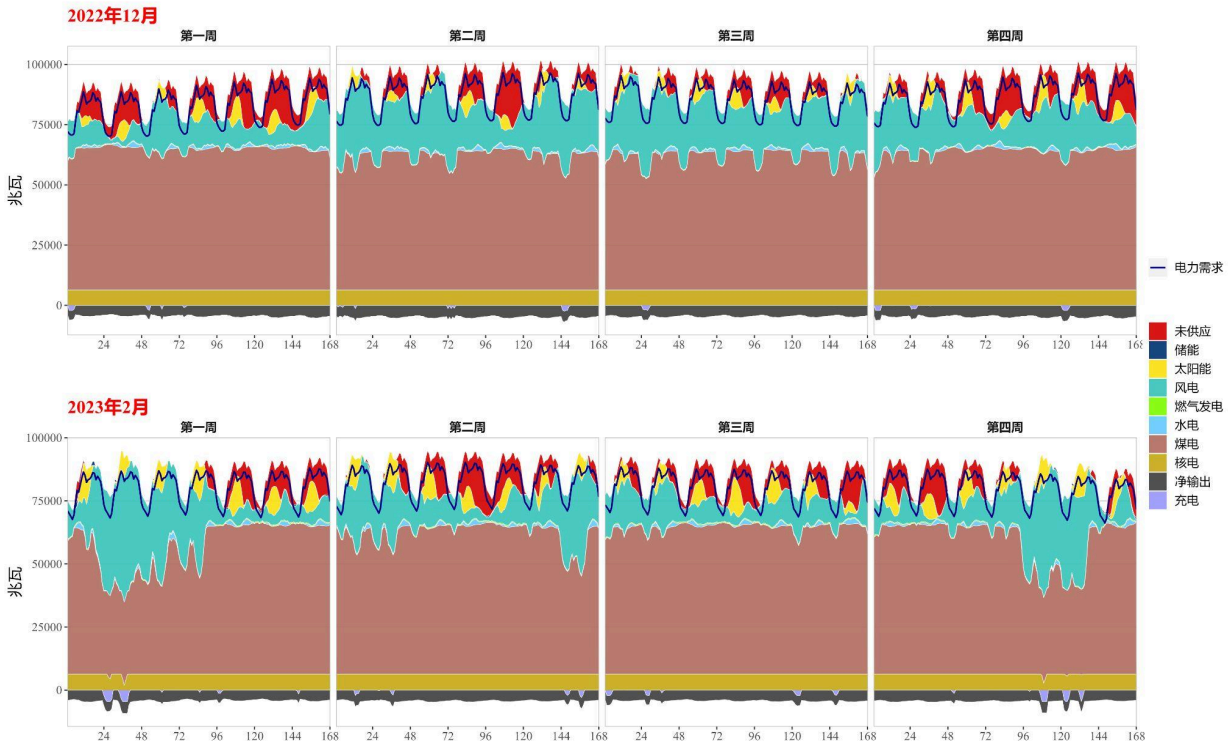


图 7. 东北电网地区的月调度量 (因素叠加情景)

表 4. 东北电网和华北电网的电力需求

模型时段	东北电网最大需求(MW)	东北电网平均需求(MW)	华北电网最大需求(MW)	华北电网平均需求(MW)
12/2022	84,239	74,435	4,776	4,012
2/2023	78,383	70,146	4,124	3,658

表 **5.** 因素叠加情景下**NSE**、输电线路利用率、储能量

模型时段	东北电网最大NSE (占需求%)	东北电网平均NSE (占需求%)	平均线路利用率 (%)	储电总充能量 (MWh)
2022年**12**月	29.3	7.2	33.1	65,879
2023年**2**月	26.0	6.1	31.0	151,133

虽然辽宁总体上是一个净电力输入省，但它在向华北电网输送东北地区生产的电能方面发挥着重要作用（图8）。在因素叠加情景中，由于所有省份都需要优先保证满足更多的本地电力供应，净传输流量总体下降。原来电力资源充裕的省份对其他省份的支持变少，而其他发电出力不足的省份，如辽宁，由于有送电合同，仍必须完成大量的外输任务，进一步增剧了本地的电力紧缺。

根据2022年12月和2023年2月的模拟结果，蒙东电网是主要的电力外送地区，吉林在风电资源充足的情况下提供外送，从而帮助黑龙江和辽宁满足电力需求。在最极端条件下（因素叠加情景），黑龙江和辽宁产生了大量NSE。该模型的结果还表明，在所有情景下，可再生能源的弃电率很低，这与东北冬季2-3%的实际弃电率基本一致。由于风电在发电组合中所占的比例很高，东北电网中风力发电的可用性与NSE的发生呈正相关。这种关系在高峰时段和非高峰时段都可以观察到，当风力发电的可用性受到严重限制时，就会产生大量的电力缺口。

东北电网内连接蒙东与吉林、蒙东与黑龙江的交流输电线路改善了资源充足性和风电平衡。正在建设的新交流线路（例如，巴林-奈曼-阜新500千伏，输电能力为1000兆瓦）也将有助于缓解一些线路阻塞，推进可再生能源并网。

储能可以在缓解资源充足性挑战方面发挥一定作用，但也有几点需要注意。在一些产生大量NSE的东北电网区域，储能系统容量远小于发电容量。例如，辽宁虽然在因素叠加情景下资源严重不足，但却只有16兆瓦的电池存储容量。另一方面，一些可能发生NSE的东北电网地区却有着不小的储电容量，但由于发电厂充电资源严重不足，这些机组往往无法运行。例如，黑龙江有1200兆瓦的抽水蓄能容量，但在因素叠加情景下即使在NSE时段也没能得到调度。由于系统长时间面临压力，没有盈余电力供储能系统充电，因此它们对电网提供

的支持较少。此外，为避免意外拉闸限电，模型为储能系统保留了很大一部分容量用作备转容量。

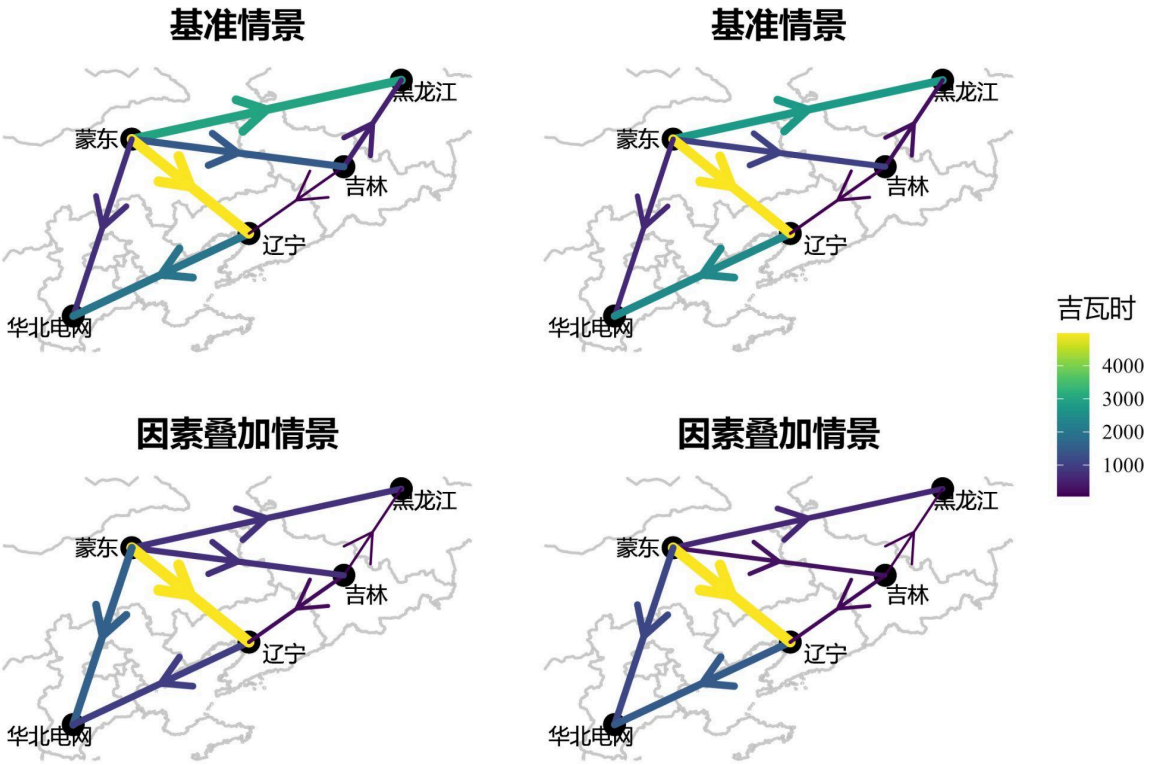


图 8. 输电网络潮流 (左边为2022年12月情景，右边为2023年2月情景)

4. 政策建议

本文介绍的停电事故事后分析报告和季节性资源充足性展望结果表明，为了在实现减排目标的同时，支持以合理的成本实现电力系统的可靠性，需要进行一些政策改革。在这一节里，我们将讨论政策、补偿机制和规划流程中存在的一些问题，并提出一些实用建议。

1. 市场与价格

2021年的东北电荒并不是由于缺乏火力发电容量造成的；造成这场危机的主要原因之一是当前的煤电上网电价机制，这一机制阻碍了电力市场调节煤电价格从而应对升高的动力煤价格的能力。2021年，煤炭价格大幅上涨，但上网燃煤电价却不够灵活，无法反映这种

价格飙升，市场上主要的发电合同以月度或更长时间的中长期（MLT）合同为主，导致煤电厂也无法灵活调整发电量。结果，煤电厂发现自己发电越多，亏损越严重，导致部分煤电产能蓄而不发[32]。虽然这可能对减排目标做出了积极的短期贡献，但这并不是一种有效或可持续的方式。更广泛地说，这些政策僵化的影响不仅仅是遏制了煤电产能。如果不纠正这些问题，将阻碍电力系统在未来几年消纳更多的波动性可再生能源发电的能力。

我们建议加快建设一个统一的区域性东北电力现货市场，作为实现对资源进行合理化补偿的基础。在严格做好市场力监管的前提下建设统一的区域现货市场可以消除价格限制，鼓励可调度资源响应高价格信号，在系统需要时在更短的时间内提供电能，并在太阳能或风能出力较高的时段消纳更多的波动性可再生能源。目前，全国各地正在进行现货市场试点，但也出台了许多不同的规则。我们建议尽快跳过省级现货市场的实施，直接进入各区域统一的区域现货市场。现有的东北地区辅助服务市场机制可作为初步基础，依此来建立实用的区域现货市场。优先考虑的事项应该是创建一个随时间变化的批发现货价格波动机制，以反映系统条件，为各种资源提供合理补偿[33]。

一旦统一区域现货市场开始运作，就不需要行政规定的煤电基准价格作为对热电厂的补偿机制。在2021年停电事故之后，发改委扩大了市场交易的上网电价的上下浮动区间。具体来说，该下限此前曾被设定为不低于基准电价的15%，而上限则被设定为不高于基准电价的10%。现在上下限都扩大到了20%（且高耗能企业市场交易电价不受上浮20%的幅度限制），以帮助解决基准电价与燃料煤价格之间的冲突[17]。这虽然向前迈出了积极的一步，但市场仍有许多限制。

首先，未来煤价仍可能再次居高不下，届时，即使价格帽进一步小幅度放宽，仍可能很难激励发电意愿。换句话说，这可能会妨碍为足够的容量提供补偿，无法让电厂应对不时之需。其次，当煤炭价格走低时，煤电企业往往会寻找各种办法将生产效率提高到最优发电效率水平以上，从而导致系统成本和排放密度的升高。第三，如果调度中心力保在每个月底都需要完成中长期合同规定的发电小时数，往往就会破坏小时级灵活性，而这种灵活性恰好是高比例风电和太阳能发电系统非常需要的。第四，与中国经济中的许多其他产业一样，电力行业正在朝着“计划外”发展。在过去，基准电价在促进电气化和稳定电价方面发挥了作用。然而，2021年的停电事故表明，政府制定的煤电上网电价机制并不能很好地适应新型能源系统。

相关机构可以考虑放开行政制定的基准电价，让现货市场在火力发电资源补偿方面发挥更大的作用。与其他国家一样，热电厂仍然可以寻求在竞争市场内赢得中长期合同（通过财务合同，如差价合同），但中长期电价不应再通过行政制定，行政手段也不应对电价波动幅度过度设限——现货市场应该是调动热电厂积极性的主要价格信号。

2. 规划流程

充足性评估展望通过观察系统充分性是否存在风险，来研究在某个季节到来之前（通常是冬季和夏季）如何保证电力系统的安全性。它是全球许多电力系统规划过程中一个重要且不断发展的一环。虽然即使有了季节性资源充足性评估，系统仍可能存在间歇发生的可靠性问题，但很明显，完善的前瞻性分析有助于实现电力系统的可靠性和安全性，特别是

在更开放、更市场化、可再生能源份额不断增长的系统中。如何优化这些过程是美国和欧盟的一个热门话题[34][35]。此外，充足性评估展望的情景设置可以作为事故事后分析的参考依据。一旦找出资源充足性的脆弱点，决策部门便能基于风险做出决策，来解决这种不足。

一些值得关注的例子包括由ENTSO-E在欧盟开展的季节性展望研究，以及在美国联邦层面的NERC和FERC的监督下，由各区域可靠性组织进行的季节性可靠性评估[36][37][38]。国际上，对极端天气的预测以及天气对供求的影响预测仍在开发和完善的过程中。在中国由热电联产电厂提供大型集中供暖的地区，前瞻性分析还应包括与供热系统的相互作用。

3. 其他政策视角

最后，我们根据国际经验和我们对东北地区和中国整体现状的理解，提出了另外三点建议，可以为今后的工作起到借鉴作用。

首先，在考虑电力可靠性问题时，我们的重点不应仅在于关注是否有足够的火力发电容量满足峰值负荷，更应强调优化各类资源的利用。电力系统中的软件部分（如调度操作、政府法规、市场规则、商业模式及激励政策）与硬件部分（如发电厂、输配电线路）同等重要。

其次，建更多的煤电厂不太可能是支持一个可靠的新型能源电力系统最经济的办法，而我们上述建议的市场和规划机制可能会找到比新建煤电产能更好的解决方案，以支持电网消纳不断增加的可再生能源发电量。这些方案很有可能会优于燃煤电厂“先立后破”的方案。这缘于几个在世界上各处逐渐明晰，并且在中国也适用的因素：包括风能、太阳能和储能资源成本的下降，以及随时可用的低成本需求响应和节能措施[39]。一个具有高度灵活性的电力系统可以最大限度地利用便宜的波动性可再生资源，同时优化其他稳定资源的支撑作用。虽然我们在本文中的分析并不是研究东北电网乃至全国煤电产能的长期发展路径，但最近的一些建模研究表明，中国现有的火力发电厂有能力支持可再生能源份额占80%的电力系统，而无需进一步扩建其煤电设施[40]。从长远来看，可能需要新的“清洁可调度能源”电力资源（如核电、抽水蓄能、以及碳捕集燃气发电机组）来支持未来可再生能源渗透率更高的电力结构。在包括东北地区在内的几个区域电网中，都有建设大量的电池储能和抽水蓄能电站的计划，这可以部分抵消可靠性方面对煤电的需求。其他输电线路也在建设中，如果有效运营，将有助于缓解资源充足性的挑战。

第三，必须继续出台政策，制定市场规则，以发挥需求响应和节能效益。为鼓励全面开发更灵活的资源，为新型能源系统服务，系统规划部门可以利用其他的需求侧资源，包括节能。在东北电网内，由于现有煤电容量大，对增加系统灵活性的兴趣主要集中在对现有煤电厂的改造上[41]。虽然这些电厂可以在小时和天的规模上提供部分急需的灵活性，但更细尺度上的灵活性需要在几秒内调整功率输出，就要有各种快速响应资源的参与，如需求响应、能源存储，也可能是燃气发电机组[42]。市场的设计应允许现货电力市场有更加多样化的参与者（包括那些代表需求侧资源的参与者）。这些资源可以提供有价值的系统灵活性服务，有助于消纳更大比例的可再生能源发电，并因此应获得全面和公平的回报。这些资源可以提供更好和低成本的替代方案，在一定程度上取代社会成本较为昂贵的“有序用电”政策。

参考资料

[1] Energy Institute, the University of Texas at Austin. (2021, July). The timeline and events of the February 2021 Texas electric grid blackouts. https://energy.utexas.edu/sites/default/files/UTAustin%20%282021%29%20EventsFebruary2021TexasBlackout%2020210714.pdf

[2] California Independent System Operator. (2021, January). Final root cause analysis mid-August 2020 extreme heat wave. http://www.caiso.com/Documents/Final-Root-Cause-Analysis-Mid-August-2020-Extreme-Heat-Wave.pdf

[3] National Grid ESO. (2019, September). Technical report on the events of 9 August 2019. https://www.nationalgrideso.com/document/152346/download

[4] The Energy Emergencies Executive Committee. (2020, January). GB power system disruption on 9 August 2019. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/855767/e3c-gb-power-disruption-9-august-2019-final-report.pdf

[5] Australian Energy Regulator. (2018, December). Investigation report into South Australia's 2016 state-wide blackout. https://www.aer.gov.au/wholesale-markets/compliance-reporting/investigation-report-into-south-australias-2016-state-wide-blackout

[6] 国家统计局. 中国统计数据库。 https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=A01

[7] 中国国家发改委, 各省级电网典型电力负荷曲线, (2018) https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201912/P020191230336066090861.pdf

[8] 中国日报网. (2021, 9月). 辽宁电力供应缺口增至严重级别, 将尽最大可能避免拉闸限电. http://ln.people.com.cn/n2/2021/0926/c378317-34932096.html

[9] 辽宁日报. (2021, 9月). 全省电力保障工作会议在沈召开, 六项措施保障电力供应 http://www.ln.gov.cn/ywdt/msrd/202109/t20210927_4247223.html

[10] 新华社. (2022, 1月). 承压前行, 2021年中国经济增长8.1%. http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/17/content_5668894.htm

[11] 新华社. (2021, 1月). 中国辽宁省宣布2021年GDP增长率为5.8%. https://english.news.cn/20220121/7333aecbeba9465ab9bfd3ed020c89f1/c.html

[12] 国家统计局. (2023, 2月). 辽宁省用电量数据. https://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E8%BE%BD%E5%AE%81%20%E7%94%B5%E5%8A%9B%E6%B6%88%E8%B4%B9%E9%87%8F

[13] 我的钢铁网. (2022). 动力煤2021年回顾及2022年展望.
https://m.mysteel.com/22/0105/10/23B14CA1A2CC91B2_abc.html

[14] Davidson, M. (2021, November 18). China's power outage: The real reasons behind Beijing's energy crisis. Foreign Affairs. Retrieved from
https://www.foreignaffairs.com/articles/china/2021-11-18/chinas-power-outage

[15] 新华社. (2021, 11月22日). 大涨之后，煤价为何又大跌.
http://lw.news.cn/2021-11/22/c_1310325179.htm.

[16] 国家能源管理局. (2021, 8月). 关于建立煤电价格联动机制的意见.

http://www.nea.gov.cn/2011-08/16/c_131052545.htm

[17] 国家发改委. (2021, 10月. 关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知。
https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202110/t20211012_1299461.html

[18] 辽宁省发改委. (2020). 关于印发辽宁省深化燃煤发电上网电价形成机制改革实施方案的通知。
http://www.ln.gov.cn/qmzx/lwlb/zcyjd/jdhgzcssld_144722/wzjd_144795/202009/t20200922_3977282.html

[19] 国家发改委. (2021, 11月) 全国煤电机组转型升级改造方案。
https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/P020211103333054582799.pdf

[20] 新华社. (2021, 11月). 多地为什么“拉闸限电”？继续电力提供应能否保障？
http://www.news.cn/politics/2021-09/29/c_1127914464.htm

[21] 碳道网. (2021, 10月). 解析三种缺电和东北拉闸限电的影响.
http://www.ideacarbon.org/news_free/56154/?pc=pc

[22] 澎湃网. “限电”卷土重来：多省电力缺口何来，东北罕见拉闸何故.
https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_14689233

[23] 人民日报网. (2021, 10月7日). 辽宁省全力以赴保电保煤保暖。
http://ln.people.com.cn/n2/2021/1007/c378317-34944905.html

[24] 新华社. (2021, 10月4日). China goes all out to cope with power outages
http://www.news.cn/english/2021-10/04/c_1310226141.htm

[25] 康世崴，李凯，王庆，等. ±800kV扎鲁特—山东特高压直流运行曲线研究 [J]. 山东电力技术. 2018, 45(6):1-6. doi: 10.3969/j.issn.1007-9904.2018.06.001.

[26] Renewables.ninja. (n.d.). Retrieved from https://www.renewables.ninja

[27] Lyu, Q., Chen, T., Wang, H., Yu, T., Li, Q., & Tang, W. (2014). Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator. Automation of Electric Power Systems, 38(11), 34-41. doi:10.7500/AEPS20130724002.

[28] Wang, K., Zhang, L., E, Z., Zhou, L., Zhang, Y., Gan, Z., Wang, Z., Li, G., & Qu, B. (2018). Research of thermoelectric decoupling of cogeneration unit based on absorption heat pump. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 170. doi:10.1088/1755-1315/170/4/042163.

[29] Wang, Z., Gu, Y., Liu, H., & Li, C. (2022). Comparison and analysis of heat-power decoupling technologies for CHP units. Chemical Industry and Engineering Progress, 41(7), 3564-3572. doi:10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1626.

[30] 中国气象. https://data.cma.cn/site/article/id/40779.html

[31] 辽宁日报.（2021年10月7日）. 我省全力以赴 保电保煤保暖. http://epaper.lnd.com.cn/lnrbepaper/pad/con/202110/07/content_128741.html

[32] 新浪金融. (2021,11月22日). 谁造成了煤慌? https://finance.sina.com.cn/stock/hyyj/2021-11-22/doc-iktzscyy7086985.shtml

[33] The Regulatory Assistance Project (RAP). (2022, March). 电力现货市场风险管理：发电运行成本分析、电力现货市场监测、市场力筛选和减缓. Retrieved from https://www.raponline.org/knowledge-center/rap-spot-market-risk-management-final/

[34] Dupuy, M., Gao, C. 加强电力可靠性：欧盟及美国探索新流程完善季度电力分析. The Regulatory Assistance Project (RAP), December (2022) https://www.raponline.org/knowledge-center/enhancing-power-reliability-eu-and-us-explore-new-process-to-improve-seasonal-power-reliability-outlooks/

[35] The Redefining Resource Adequacy Task Force. (2021). Redefining Resource Adequacy for Modern Power Systems. The Energy Systems Integration Group (ESIG). Retrieved from https://www.esig.energy/wp-content/uploads/2021/08/ESIG-Redefining-Resource-Adequacy-2021.pdf

[36] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). (2022). Winter Outlook 2022-2023 Summer 2022 Review. Retrieved from https://www.entsoe.eu/outlooks/seasonal/

[37] North American Electric Reliability Corporation (NERC). (2022). Reliability Assessments. Retrieved from https://www.nerc.com/pa/RAPA/ra/Pages/default.aspx

[38] Federal Energy Regulatory Commission (FERC). (2022, October). Winter Energy Market and Reliability Assessment 2022-2023. Retrieved from https://www.ferc.gov/media/report-2022-2023-winter-assessment

[39] Energy Innovation. (2021, May). The Coal Cost Crossover 2.0. Retrieved from https://energyinnovation.org/publication/the-coal-cost-crossover-2021/

[40] Abhyankar, N., Lin, J., Kahrl, F., et al. (2022). Achieving an 80% carbon-free electricity system in China by 2035. iScience, 25(10), 105180. https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105180.

[41] 北极星. (2022, October 12). 辽宁省加快推进清洁能源强省建设实施方案. https://huanbao.bjx.com.cn/news/20221012/1260327.shtml

[42] Yuan, J., & Zhang, J. (2022). Improving power system flexibility: Technical paths, economics, and policy recommendations. Natural Resources Defense Council.

附录

1. 输入数据

1. 数据来源

本研究中使用的数据全部来自公开数据源，包括但不限于Global Energy Monitor（GEM）万得金融终端（WIND）、Renewables Ninja（RN）、PowerGenome（PG），以及新闻文章和报道（NR）。有关数据来源的更多细节，请参见表A.1。

表 **A.1** 发电侧数据来源

发电厂类型	装机容量	表现数据	容量系数	热率	启动成本	燃料价格
煤电	GEM	NR	1	GEM	PG	WIND
天然气发电	GEM	NR	1	PG	PG	WIND
风电	WIND	1	RN	0	0	0
太阳能	WIND	1	RN	0	0	0
水电	WIND	PG	WIND	0	0	0
核电	NR	NR	1	-	PG	0
储能	NR	1	1	0	0	0

2. 电力需求

东北电网电力需求和东北电网向华北电网送电义务如图A.1所示。

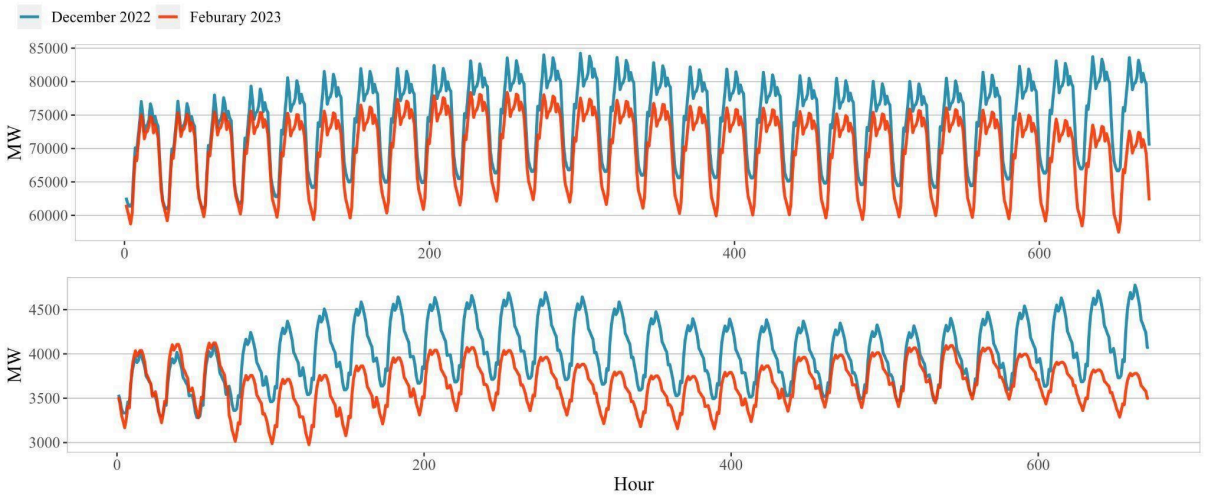


图 A.1 2022 / 2023冬季的电力需求 (上图为东北电网, 下图为东北向华北电网送电量)

3. 燃料价格

表A.2中显示了燃料价格。基准中的煤炭价格根据秦皇岛港Q5500年度长期合同价格+至各地区的运输成本(假设0.33元/(吨*公里))计算。高燃料价格和缩减容量情景下的煤价是指根据以下条件计算的月度长期合约煤炭价格+运输成本:

月度长期合约煤炭价格(周指数)=1/3*(上周二的(CCI指数+ CCTD指数+ CECI指数))

表 A.2 煤炭价格 ($/MMBtu)

省份	基准煤价	高煤价
黑龙江	5.82	7.27
蒙东	4.74	8.19
吉林	5.38	8.84
辽宁	4.52	7.98

各情景下的天然气价格均参照国务院公布的基准天然气价格，见表A.3。

表 A.3 天然气价格 ($/MMBTu)

省份	基准燃气价格
黑龙江	6.56
蒙东	4.88
吉林	6.56
辽宁	7.36

4. 输电网拓扑图，路线容量及线损

按传输路径及电压综合考虑的输电线路如图A.2所示。各传输路径的最大输电容量如表A.4所示。输电期间发生的线损按并联线路计算(R = 1 / sum_k（1/r_k），r_k =线路k上的电阻，其中r_k以%表示），根据表A.5中的具体损耗计算。

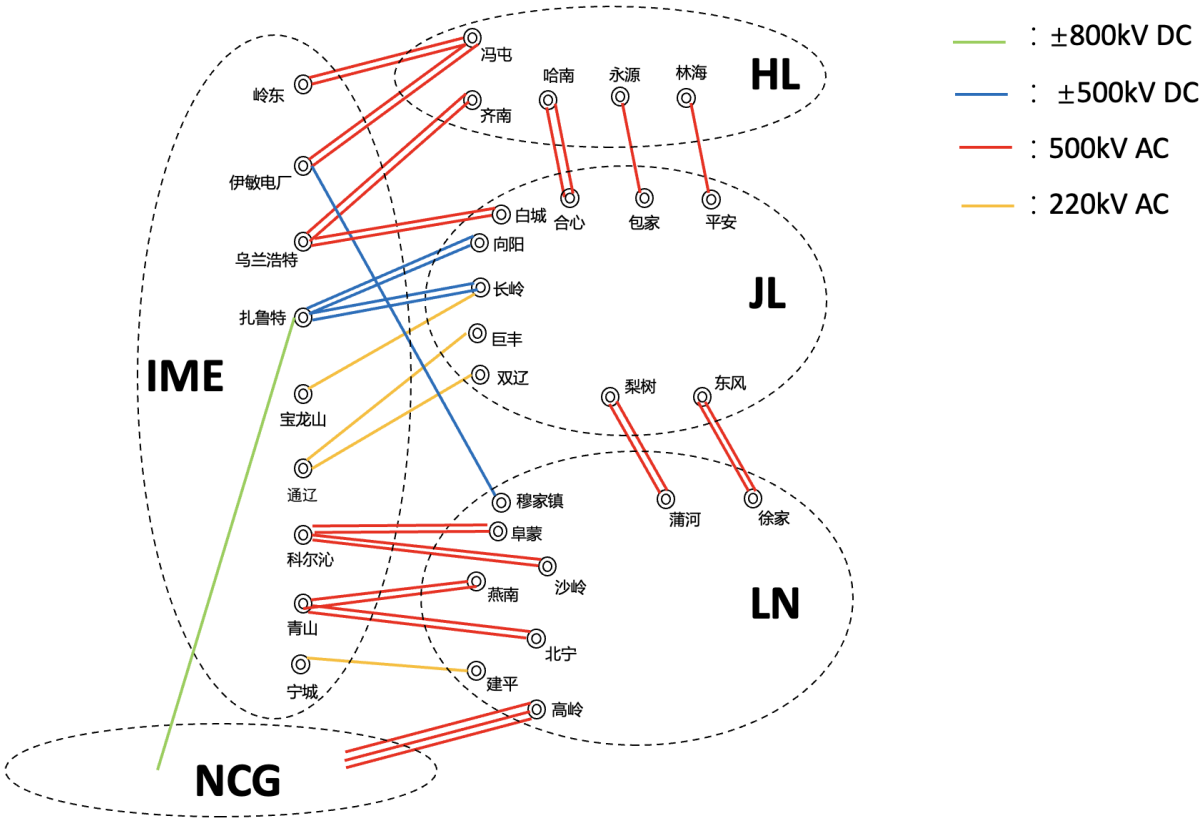


图 A.2 东北电网网络拓扑

表 **A.4** 各传输路线的容量

路线	总容量 **(MW)**	路线	总容量 **(MW)**
黑龙江-蒙东	5,400	黑龙江-吉林	3,600
蒙东-吉林	9,360	蒙东-辽宁	10,400
吉林-辽宁	3,600	蒙东-华北电网	10,000
辽宁-华北电网	3,000		

表 **A.5** 输电损失

输电线	线损 **(**每**100**英里**)**	输电线	线损 **(**每**100**英里**)**
±800 kV DC	0.31%	±500 kV DC	0.45%
500 kV AC	1.30%	200 kV AC	4.20%

5. 供热运行中的容量分配

东北约有三分之二的煤电装机容量来自热电联产机组，它们在冬季为东北提供70%的热负荷。当机组产生最大热量时，相应的最大功率输出将减少，如表A.6所示。

表 **A.6** 热电联产机组发电的最大功率输出

额定容量 **(MW)**	缩减容量**(MW)**	**CHP**机组数
0 - 150	不变	120
200	155	39
300	241	30
330	279	61
600	410	9
800	不变	2
1000	不变	2

6. NSE 费用

在基准情景下，所有地区和华北电网对NSE的惩罚为9000美元/MWh。在优先外送情境下，这一数字仅在东北地区将减少到4500美元/MWh。

2. 模型

1. 计算设置

本模型为混合整数线性规划模型。我们利用势垒方法在分支定界树的起始节点上找到一个松弛解。该混合整数模型（MIP）的最优性差距为0.5%，时间上限为26小时（时间充足，因为一个情景运行只需要3 - 4分钟）。我们使用Julia作为编程语言，使用JuMP作为数学优化接口，用Gurobi作为优化引擎。

我们独立地求解每个星期的结果，并在每周的开始和结束时强制执行重复的边界条件。相对于一次模拟整个月，每周独立求解模型显著减少了计算时间。

2. 资源分类

火电资源（受机组组合运行规则控制）包括热电联产煤电、纯发电煤电、核能和天然气机组。储能单元有电池和抽水蓄能电站。所有水电机组均为水库水电机组。不可调度的可再生资源是太阳能（太阳能光伏）和风能（陆上风能）。可调度的可再生资源只包括水库水电机组。

火电资源按机组级别的装机容量表示。所有其他资源按总装机容量进行综合考虑。

3. 决策变量，约束条件和目标函数

每小时的决策变量包括火电机组组合、启停状态、调度、储能机组的充电量、储能机组充电状态、区域NSE、输电线路流量以及上下运行备用。机组组合、启动、停止等变量都是整数变量。我们对华北电网没有设置发电资源。

约束条件包括太阳能和风能调度的天气条件限制、投产运行的火电资源的最低电力需求、火电资源的爬升/下降限制、受能源容量制约的储电机组的充电状态、考虑双向效率因素的储能机组的充放电操作（我们将储能机组的充电状态固定在相同的水平）、火电机组的投产运行、火电资源的最低爬升/下降时间区间，考虑线损情况下受电力容量限制的线路流量，需求平衡约束（外送区域和接收区域的传输损失平均分配）、来自资源的上下备用贡献，以及东北电网各地区每小时的上下备用需求。我们确保连东北电网到华北电网传输线路上的流量是单向的（仅从东北到华北电网)。

目标函数是可变成本、启动成本和NSE费用的总和。可变成本包括可变的运行和维护成本和燃料成本。启动成本是在火电源开始运行时产生的，它包括每兆瓦的启动成本和在启动运行期间燃烧的燃料成本。NSE费用是指以停电形式出现的未满足需求的成本。我们假设燃料价格在一个月内保持不变。

4. 备转容量

火电资源的爬坡备用容量的贡献小于投产运行容量，也小于扣除调度量后剩余投产容量，以及爬升容量。火电资源的下降备用容量贡献小于投产运行容量、也小于最低电力需求和下降容量。

可调度可再生资源的爬坡备用容量的贡献受到其总容量和扣除调度量后剩余容量的限制。这些资源的下降备用容量贡献受其总容量和调度量的限制。

水库水电的爬坡备用贡献受到其总容量、排除调度量后的剩余容量、以及考虑最低水位要求的剩余能源容量和爬坡容量的限制。这些资源的下降备用贡献受到下降容量和调度量的限制。

储能机组在充电和放电时对爬坡和下降备用容量均有贡献。有关此建模的详细信息可以在本项目Github库中找到。

对每个区域，对爬坡备用容量的要求包括需求的5%加上可再生能源调度的10%，并包括一个应急备用容量（最大的火电机组装机容量或交流输电线路容量，可定义为N-1应急容量）。我们忽略了华北电网的运行备用，因为东北电网只需要满足华北电网的需求。下降备用要求与爬升备用要求相同，只是没有应急备用和不可调度的资源可用作下降备用容量。

5. 水库水电仿真

我们将水库水电机组同时作为储能机组和发电厂来建模。它可以在水库中储存水，并控制发电量。储存的水量由流量和发电量控制。储存的水量不超过水库的装机容量上限，也不低于允许的最低水位限。我们把一周开始和结束的水位固定为装机容量的一半。

电站水流量是指历史每小时发电量数据除以容量（类似于不可调度资源的容量系数）。容量和历史发电数据从万得金融终端获得，并假设发电量在整个月保持不变。

6. 情景设置

极端天气情景模拟了所有地区的电力需求增加15%，并使用了过去10年相关数月最低的平均可再生能源容量系数。高燃料价格和缩减容量情景模拟2021年东北拉闸限电的情况，采用2021年10月的极端燃料价格，纯发电的燃煤发电厂产能减少20%。我们分别降低每个地区的煤电厂的容量，从效率最低的机组（最高热率）开始，直到下降到总煤电产能的20%。根据其长期输电合同的规定，通过在华北电网实施比东北更高的NSE惩罚，优先考虑支援华北电网的电力输出。因素叠加情景结合了极端天气、高燃料价格和缩减容量，以及优先外送这三个情景的全部因素。