引用格式：宋中炜, 赵宇, 高翔, 等. 中国能源韧性提升战略：多元化布局与本土化能力建设. 中国科学院院刊, 2026, 41(1): 13-30, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251216011.
Song Z W, Zhao Y, Gao X, et al. Strategies for enhancing China's energy resilience: Trade-offs between diversification and localization. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2026, 41(1): 13-30, doi: 10.3724/j.issn.1000-3045.20251216011. (in Chinese)

# 中国能源韧性提升战略：多元化布局与本土化能力建设

宋中炜[1] 赵 宇[2] 高 翔[2] 潘教峰[1,3*]

1 中国科学院大学 公共政策管理学院 北京 100049
2 中国科学院数学与系统科学研究院 数学科学全国重点实验室 北京 100190
3 中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190

**摘要** 近年来，国际地缘政治冲突加剧，传统能源安全框架的脆弱性凸显，能源安全观亟须从“供应稳定”转向“韧性提升”。文章以能源韧性提升战略为核心，探讨多元化与本土化策略在能源韧性建设中的差异化作用机制并梳理相应的政策实践。在此基础上，结合中国能源现状，文章认为短期应以进口来源、路径多元化与本土保障并重，依托多元进口渠道稳定供应，同时提升能源效率与勘探能力；中长期需推动能源结构转型，以可再生能源为主导，通过技术自主化重构全球产业链，以“本土保障+全球合作”的复合模式，平衡短期稳健性与长期适应性，助力中国实现能源韧性升级。

**关键词** 能源韧性，能源政策，效益评估，一般均衡

DOI 10.3724/j.issn.1000-3045.20251216011
CSTR 32128.14.CASbulletin.20251216011

能源是经济发展和民生安定中不可或缺的基础性商品。近年来，中美经贸摩擦、新冠疫情和俄乌冲突等国际重大突发事件频发，造成能源供需严重错配，能源价格剧烈波动，扰乱国际社会经济正常发展。特别是俄乌冲突及随之造成的欧洲能源危机，以极具破坏性的方式凸显了能源的重要战略地位[1]。2021年，欧盟约41%的天然气、22.5%的石油和44%的煤炭依赖俄罗斯进口，俄乌冲突爆发后，欧盟对俄罗斯的能

*通信作者
资助项目：新一代人工智能国家科技重大专项（2022ZD0116407），国家社会科学基金重大项目（23&ZD093）
修改稿收到日期：2026年1月9日

源制裁使欧盟天然气供应量骤降，欧洲天然气价格一度飙升至超300欧元/兆瓦时①，引发工业停产、居民用电危机与通胀高企[2]。这些负面冲击一度持续长达2年左右，揭示了传统能源安全框架的脆弱性——以往以价格可负担和可连续获取为核心的能源安全要求已难以应对复杂风险。

在此背景下，“能源韧性”（energy resilience）迅速取代单一“能源安全”成为国际政策与学术界的关注焦点。国际能源署（IEA）将能源韧性②定义为能源系统及其组件应对危险事件或趋势的能力，以维持其基本功能、特征和结构的能力，以及适应、学习和转换的能力[3]。亚太经合组织认为能源韧性是使能源系统能够抵御极端自然和人为灾害，及时有效地恢复正常状态并更好地重建，从而确保社会的稳定能源供应，减少能源供应中断对人类生活和经济活动的负面影响的能力和质量③。可以看出，尽管表述各异，但对能源韧性的共识通常强调3类能力。① 抵御能力，指能源系统能够承受冲击事件破坏并减轻其影响，维持关键系统功能和服务可用性的能力。② 适应能力，指能源系统在没有恢复活动的介入下通过系统运行方式的调整或资源配置对冲击事件进行适应的能力。③ 恢复能力，指系统在遭受破坏后快速恢复到正常或更高水平状态的能力。综上，能源韧性在传统能源安全框架侧重“持续、稳定的能源供应”的基础上，进一步强调能源系统的适应性和恢复力，关注在危险事件和长期压力下，能源系统在外部冲击影响下动态抵御冲击、进行适应性调整并快速恢复原有功能的能力[4]。

## 1 能源韧性提升的常见策略

在政策实践层面，多元化（diversification）和本土化（localization）是最常涉及的2类韧性提升策略[5]。

（1）能源多元化策略，包括能源供应来源多样化、运输路线多元化和能源品种多元化[6]。这一策略既能通过供给分散稀释中断风险，提升能源系统的抵御能力，又能够保障在单一国家供应中断后迅速切换供给渠道获取替代商品，提升能源系统的适应和恢复能力。能源多元化策略更适合位于多边贸易体系枢纽地位、国土面积有限且能源资源不足、高度依赖能源进口的国家/地区。其中，欧洲的多数国家都是此类策略的典型代表。例如，在欧洲能源危机后，欧盟委员会发布《欧洲廉价、安全、可持续能源联合行动》，明确要通过天然气进口多元化稳定能源价格和保障天然气供应，并提供额外投资用于能源转型，提高可再生能源比重与本土能源供应能力，加快工业、运输部门的电气化进程④。

（2）能源本土化策略，则关注本地能源资源替代、产业培育和提高能源效率，进而实现降低对外部能源的依赖[7,8]，主要包括能源供给本土化和能源技术本土化2个维度。这一策略既通过构筑国内供给能力提升能源系统的抵御能力，也确保了在面临重大外部风险时具备弹性的、可随时恢复或扩张的国内供应潜力，实现能源系统的适应和恢复能力建设。能源本土化策略更适合具备能源资源开发潜力、具有强大工业基础和技术研发能力、面临重大外部风险的国家/地区。其

① European Commission, Report on energy prices and costs in Europe. (2024-03-22)[2026-01-08]. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A136%3AFIN&qid=1711266005450.

② IEA. Making the energy sector more resilient to climate change. (2015-12-01)[2026-01-08]. https://www.iea.org/reports/making-the-energy-sector-more-resilient-to-climate-change.

③ APEC. APEC Energy Resiliency Principle. (2020-08-27)[2026-01-08]. https://mddb.apec.org/Documents/2020/EWG/EWG59/20_ewg59_023.pdf.

④ REPowerEU: Affordable, secure and sustainable energy for Europe. (2022-05-08)[2025-03-05]. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.

中，美国是能源本土化战略的典型代表。通过对内加强“能源独立”、对外谋求“能源主导”，美国意图强化对石油美元体制下国际能源市场的操控，以及能源气候议题中的国际合作主导，构建以美国为中心的本土化、近岸化与“友岸化”供应链体系[9]。

作为全球价值链中的核心生产基地，中国的能源韧性建设不仅关乎国内社会稳定和国家经济安全，更对全球生产网络和经贸格局的平稳运行具有深远影响。在多元化和本土化的能源韧性提升策略的选择上，中国作为全球多边贸易和外交体系的关键枢纽，具有实施多元化策略的良好外部环境。同时，中国完备的工业体系和强大的技术研发能力，也为能源本土化策略的部署奠定了坚实基础。那么，中国在短期与中长期内如何选择政策组合以更低的政策成本提高能源韧性？不同阶段的能源韧性政策如何转变？针对这一研究问题，本文先就多元化和本土化策略对能源韧性的影响机制、政策实例与现实局限进行剖析，再结合我国的能源系统发展现状，为中国的能源韧性构筑路径提出了相关政策建议。

## 2 多元化与本土化提升能源韧性的机制

### 2.1 能源多元化的韧性提升机制

（1）在增强能源系统的抵御能力方面，能源多元化策略通过构建能源种类、地理空间和运输渠道的差异化布局，形成多维度、多层次的能源进口与供应网络，以降低对单一国家或单一能源品类的过度依赖。通过网络的构建分散供应风险，吸收单一供应来源中断对能源供给的冲击，从而有效抵御地缘政治等因素引起的能源中断对经济造成的冲击，避免经济的剧烈波动。能源品种上，可再生电力、火电、石油、天然气等多种能源的并存，使单一燃料对能源系统影响降低，因而当某种能源因外部冲击而中断或价格飙升时，整体能源供应仍可维持基本稳定。

（2）在增强能源系统的适应能力方面，能源供应来源与运输路线多元化的策略通过构建多国家、多企业的能源供应网络，增强能源来源替代性与能源供给的谈判空间，从而在面临突发性供给中断时，能够灵活调整、迅速适应。能源种类的多元化通过提高跨品种替代与调峰能力，使能源系统在供需失衡时以电气化、燃料切换、储能与需求响应等方式实现能源供应的结构调整，使能源系统的用能结构具有更大的弹性。

（3）在增强能源系统的恢复能力方面，能源多元化策略通过构建多来源、多路径的能源供应网络，能够形成可替代的能源输送通道。当系统遭受外部冲击时，该网络能够支持能源供给在不同来源与路径之间快速切换，降低寻找替代能源，以及协调物流所需的时间成本和经济损失，从而加速能源供给秩序的恢复。多元化的能源结构能够为应急响应和灾后重建提供更多的工具和选择，能够有效缩短系统瘫痪的时间。

### 2.2 能源本土化的韧性提升机制

（1）在增强能源韧性的抵御能力方面，本土化策略通过强化本地化石能源的勘探，风能、太阳能等可再生能源开发和能源高效利用，提升能源的可得性与价格的稳定性，减少因外部政治博弈和贸易条件变化导致的供应不确定性。能源技术本土化则在关键设备生产链条实现自主可控，能源技术和设备制造能力使能源设施不受制于全球供应链。一旦外部供给受阻，国内产能能够迅速填补缺口，保证能源系统各环节基础设施供给、质量稳定，从而降低基础设施故障概率，整体上提高系统抗冲击能力。

（2）在增强能源韧性的适应能力方面，能源本土化策略着力于促进本土能源转型、技术创新与产业升级。在应对冲击事件中，以可再生能源为主体的新型电力系统的构建，能够极大提高能源系统的柔性化、数字化，实现对冲击的快速响应。通过培育本土化技术研发与制造能力，推动产业链整合，强化本土能源产业的工业基础，构建多种能源协同互补的供应格

局。能源本土化策略使能源系统面对需求变化、外部冲击或政策转型时具备灵活调节和结构调整能力，确保能源系统的核心功能在变局中维持稳定运行。

（3）在增强能源韧性的恢复能力方面，本土能源供给能力的建设通过提高可调度的本土能源产能，在应对冲击的短期内形成应急能源供应，降低停供持续时间。能源技术本土化策略形成的国内生产与技术体系则能够使能源系统在冲击后依托本地能源技术设施的生产能力与技术标准体系建设，迅速替换备用能源设施，缩短能源中断持续时间，实现能源系统功能的迅速恢复。

## 3 能源韧性提升的多元化、本土化政策实践

当前，全球能源系统面临多风险源同时作用、跨区域跨部门传导及突发性增强的复杂影响，并呈现显著的风险叠加效应。一方面，地缘政治因素放大了油气供给端与运输通道的脆弱性，局部冲突、制裁，以及海上咽喉要道的安全风险更易触发供应中断与价格剧烈波动。另一方面，气候变化及极端天气事件从供需两端同步施压，既削弱化石能源与电力基础设施的运行稳定性，又通过改变终端用能结构、推升峰值负荷等方式加大系统调峰压力。此外，能源转型进程加速，可再生能源高比例并网导致间歇性上升与调峰需求扩张。关键矿产与装备制造供应链的高度集中，进一步使能源安全问题扩展为“资源—技术—产业链”多维安全议题。在此复杂背景下，各经济体也基于其国情差异，在其能源韧性建设中实践了不同的多元化或本土化策略。

### 3.1 能源多元化的政策实践

能源进口来源多元化策略的政策难度较低，是当前多数国家建设能源韧性的战略选择。例如，日本《新国际资源战略》要求促进进口来源多元化，保障油气稳定供给的方针，在加强与中东国家的能源外交的同时积极与资源丰富的国家开展外交，并支持日本企业参与美国页岩油气开发、俄罗斯北极地区的液化天然气（LNG）项目，以及在拉丁美洲和非洲的新油气田项目[10]。在俄乌冲突发生后，欧盟多国重启或加速LNG终端和跨国天然气管道的建设。截至2022年底，欧盟共有15个大型LNG进口终端的拟建或在建项目[11]。

在能源品种多元化方面，德国长期坚持能源转型战略，其制定的《可再生能源法》（*Renewable Energy Law*）通过了固定上网电价补贴机制（FIT）、直接营销和拍卖机制等，形成长期、稳定的刺激可再生能源发展的政策框架，为德国能源结构的根本性转变奠定了坚实的基础。丹麦则在石油危机后开始注重开发可再生能源——在长期发展后，风能和太阳能现已成为丹麦能源供应的支柱，灵活的热电联产和储能设施也提高了电力系统调节能力。

### 3.2 能源本土化的政策实践

本土化策略推行对本地能源资源禀赋或产业链基础具有较高要求，因此主要被若干代表性大国所采用。

在能源供给本土化方面，美国在第一次石油危机后的能源短缺和油价攀升压力下启动“非常规天然气研究计划”（Unconventional Gas Research Program），推进页岩气革命。页岩气革命的成功助力美国实现由能源进口国向能源出口国的转变，成为全球最重要的天然气净出口国之一，实现了能源独立[12]。印度政府制定实施“国家太阳能计划”（Jawaharlal Nehru National Solar Mission），配合各类具体的激励政策极大促进光伏的大规模利用。截至2024年3月31日，印度光伏项目累计装机达81.81吉瓦，其中并网装机78.86吉瓦、离网装机2.95吉瓦，装机量位居世界第5位⑤。此外，为实现煤炭自给自足，印度政府制定了

⑤ Annual Report 2023-24. (2024-10-14)[2025-03-05]. https://mnre.gov.in/en/annual-report-2023-24/.

雄心勃勃的5年生产目标，计划将煤炭总产量从2024—2025财年的10.8亿吨增加到2029—2030财年的15亿吨。

在能源技术本土化方面，中国在新能源技术上的持续创新和技术突破则是典型案例。以中国光伏产业为例，中国光伏政策体系经历了由立法奠基、价格机制完善到结构性优化的渐进式演进。2005年通过的《中华人民共和国可再生能源法》确立了促进开发利用、保障能源安全与保护环境的基本目标，为可再生能源发展提供了法律依据。2011年印发的《国家发展改革委关于完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知》，建立了光伏上网标杆电价框架，显著提升投资预期并推动装机规模快速增长。2013年印发的《国家发展改革委关于发挥价格杠杆作用促进光伏产业健康发展的通知》进一步细化价格与项目管理机制，引导产业由无序扩张转向规范有序。2015年底印发的《国家发展改革委关于完善陆上风电、光伏发电上网标杆电价政策的通知》按资源区分级并设置随规模与成本动态退坡的标杆电价机制。自2017年起，光伏、风电电价补贴标准持续下调并在部分项目中取消，倒逼企业降本增效、促进技术迭代，同时加速行业向“平价上网”过渡。与之相配套，政策重点由单纯扩容转向提高发电效率与消纳水平、完善产品与技术标准、强化并网与调度能力；2017年印发的《国家能源局关于可再生能源发展“十三五”规划实施的指导意见》明确了2017—2020年可再生能源累计装机目标，优化了增长路径。近年来，从国家到地方的多层级政策支持持续完善，既覆盖“卡脖子”技术攻关，也强化产业规范和场景落地。例如，《国家能源局等部门关于推进能源装备高质量发展的指导意见》《电力装备行业稳增长工作方案（2025—2026年）》《新型储能制造业高质量发展行动方案》等，为光伏由规模化装机向多元化应用延伸提供了稳定制度环境与持续市场动能。这一系列技术本土化政策推动我国从21世纪初依赖进口多晶硅与设备，到2023年实现硅料、电池片、组件全链条国产化，占全球80%以上产能[13]。同时，消费侧减排政策和技术创新政策的协同也有效促进能源结构清洁化和电气化转型[14]，不断扩大国内市场需求。这不仅使中国在受到欧美产业制裁时仍能维持产能稳定，更通过技术领先实现技术输出，成为全球光伏产业链的关键环节[15]。

### 3.3 能源韧性提升政策的现实困境

以上政策虽已在实践中取得一定效果，但各国能源韧性的整体提升仍受到多方位因素的约束。

一方面，短期内可行的多元化举措主要集中于进口来源的多元化与运输通道的多元化。但在全球治理格局深刻调整的背景下，进口来源国的地缘政治摩擦与运输通道的高度集中等因素叠加，反而会提高能源供给的波动性，能源供给的风险点难以回避。2023年，约有70%的海运石油贸易量和50%以上的LNG运输量经由美国能源信息署（EIA）界定的全球7个关键海上运输咽喉要道进行运输，若因军事冲突或其他原因导致其短期或长期关闭，将对能源进口国造成严重冲击[16]。以红海危机为例，受胡塞武装袭击影响，多家主要航运企业宣布避开曼德海峡（该海峡在2023年上半年承担全球约12%的海运石油贸易和8%的LNG贸易运输）。大量商船绕行非洲好望角，导致2023年12月流经曼德海峡的原油量比1—11月的平均水平减少约18%，运费上涨约20%⑥。

另一方面，受能源种类及终端用能结构相对固化、技术水平不足等因素制约，短期多数国家的主要能源产品仍以石油、天然气和煤炭等传统化石能源为

⑥ Red Sea attacks increase shipping times and freight rates. (2024-02-01) [2025-03-05]. https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=61363.

主。可再生能源对化石能源的规模化替代仍受到储能、调峰与远距离输电等关键技术的限制，其间歇性与季节性也决定了如果无法完成源网荷储多端的系统性改革，可再生能源的装机规模将无法有效转化为可靠的能源供给，在能源系统的韧性构建中埋下隐患。这导致能源品种多元化和能源供应、技术本土化政策在短期内往往不具备较大的政策操作空间，主要集中在中长期规划。

## 4 中国能源系统发展现状与韧性提升潜力

### 4.1 中国能源系统发展现状

从能源整体需求来看，我国能源总体自给率较高，但石油对外依赖度高，能源安全总体可控。供给侧方面，“富煤贫油少气”的资源格局对我国能源本土化造成了较大的制约。消费侧方面，我国能源强度水平较高，经济发展对能源需求较大。根据国际能源署数据，2024年主要发达国家的能源强度大多在3—4兆焦/千美元之间，而我国约为6兆焦/千美元。能源自给方面，中国能源自给率长期处于较高水平（80%左右），且2016—2024年能源自给率总体稳步提高，2024年达到约86.2%（图1）。然而，细分能源品种来看，过去20年间，中国原油产量增速明显低于消费量增速，原油供需缺口逐年扩大，需要大规模进口原油以满足国内需求。2014年，中国成为全球第一大原油进口国，2017年原油进口依赖度突破70%。

我国拥有丰富的煤炭、水能、陆上与海上风能，以及太阳能资源，地热能、生物质能等也有广泛分布，这为发展多元化的能源结构提供了天然的物理基础。从能源消费结构来看，自2000年以来，中国能源消费结构呈现显著的多元化发展特征，逐步打破以煤

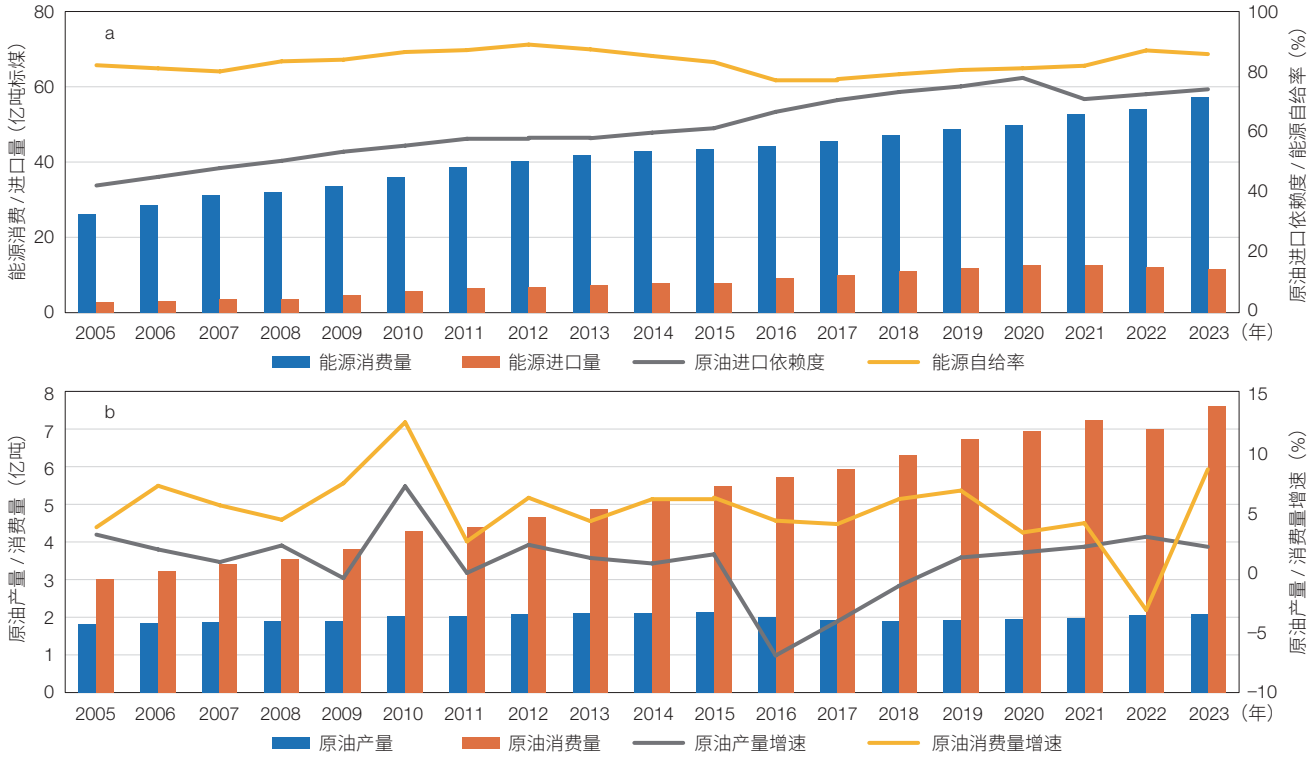



图1 2005—2023年我国能源发展情况

Figure 1 Energy development in China from 2005 to 2023

（a）能源消费量、进口量、自给率及原油进口依赖度；（b）原油产量/消费量及其增速

(a) Energy consumption, imports, self-sufficiency rate, and crude oil import dependency; (b) Crude oil production/consumption and growth rates

炭为主导的单一化格局。至2024年，煤炭消费占总能源消费量比例从1996年的72.7%持续下降至53%左右，而同期由非化石能源与天然气构成的新型能源体系有较快发展：天然气占总能源消费量比例从2%提升至8.75%，成为工业与民用领域的重要过渡能源；非化石能源中，水电发电量增长约5.5倍，占比从5.6%增长至7.1%，风电、光伏发电装机从近乎空白发展至装机量达到1.41太瓦，在新增发电装机中占比稳定提高，叠加水电、核能稳步扩张，非化石能源整体占比接近20%（图2）。但从整体能源消费结构来看，煤炭仍是我国最主要能源来源，且石油需求呈现一定刚性，占总能源消费量比例长期稳定在20%左右[17]。

完善的基础设施建设（电网、储能设施、氢能基础设施、油气管道等）与现代化大型油气港口，为各类能源的接入、输送、消纳和储存提供了坚实支撑。从石油及天然气进口来看，中国近年来持续推进能源进口多元化战略，已初步构建了海陆并进、多源互补的进口体系，但总体进口来源较为集中，对咽喉要道的依赖较强，仍存在供应国地缘风险及航运通道安全等潜在挑战。石油方面，2024年俄罗斯是我国最大进口来源地，占比约19.6%。此外，沙特阿拉伯占比14.2%，马来西亚占比12.7%，伊拉克占比11.5%。前5位进口来源占总石油进口的65.4%，前10位占88.4%（图3a）。天然气方面，管道天然气和LNG进口占比分别为41.8%和58.2%。其中，管道天然气主要来自土库曼斯坦和俄罗斯，分别占管道天然气进口的46%和40%。LNG主要来自澳大利亚和卡塔尔，分别占LNG进口的34.2%和23.9%（图3b）。进口路径方面，南向海上通道是我国进口油气海上通道的核心，约80%的石油和60%的天然气经南向海上通道运输⑦至我国，占我国海上油气运输总量的94%—98%[18]。但是，该区域受大国博弈、海盗及潜在冲突威胁。在大国博弈之下，可能引发技术封锁、金融制裁或关键海域通行干扰，而其安全和我国油气市场的安全息息相关[19]。

## 4.2 中国能源韧性提升潜力

当前，我国经济持续高质量发展。中等消费群体

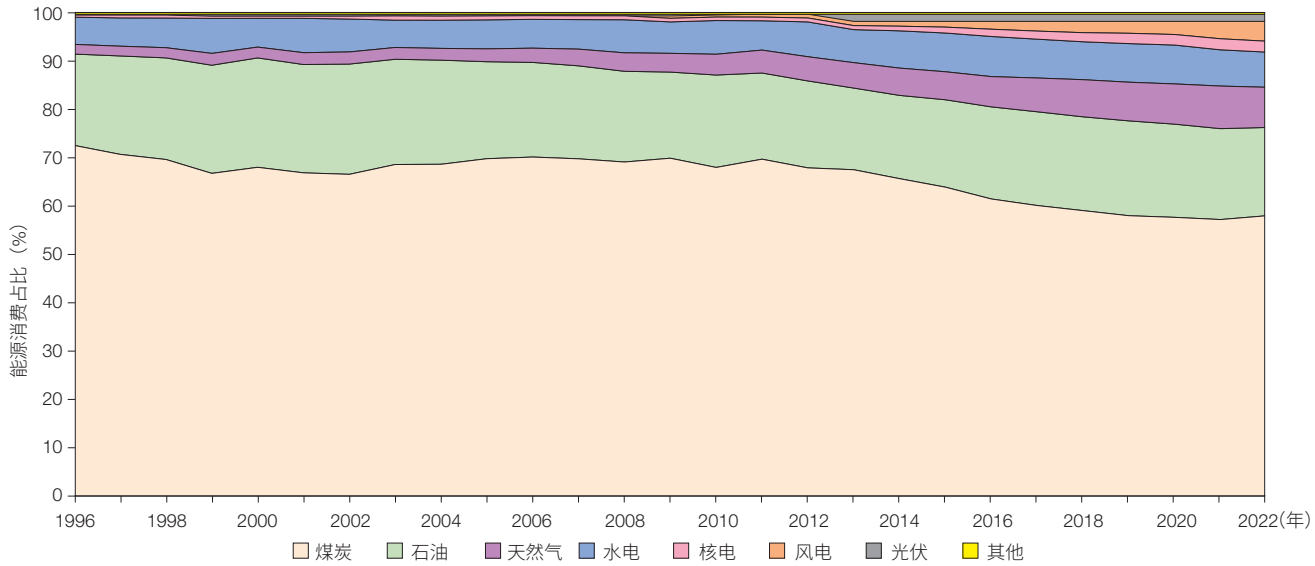



图2　1996—2022年中国能源消费结构

Figure 2　China's energy consumption structure from 1996 to 2022

⑦ 主要为中东航线、非洲航线与东南亚航线等经南海、东南亚海域的海上运输通道，主要海上航线节点为马六甲海峡、龙目海峡、巽他海峡等。

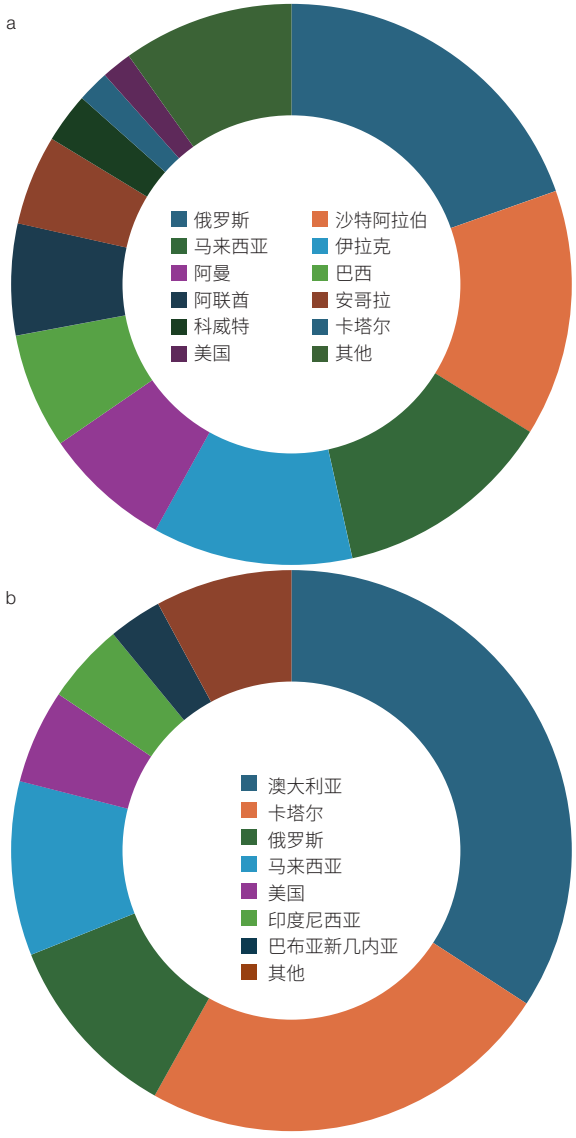



图 3　2024 年中国能源进口来源

Figure 3　China's energy import sources in 2024

（a）原油进口来源；（b）天然气进口来源

(a) Crude oil import sources; (b) Natural gas import sources

增加，能源消费的刚性需求不断提升，但风、光等新能源技术尚未进入大规模开发利用阶段，可再生能源增量难以在短时间内实现对化石能源的大比例替代[20,21]。总体上，中国能源系统在应对多重外部冲击方面总体韧性较低，但提升潜力明显。

*在能源品种的多元化方面*，我国可再生能源在总发电量中的占比仍有巨大提升空间。各类风、光、生物质能技术的进步将持续降低能源结构向高比例可再生能源转型的成本，扩大可再生能源在能源供应侧占比。化石能源中页岩气、煤层气等非常规油气资源基础雄厚，技术进步有望提升其经济可采性，成为保障油气供应底线的坚实基础。

*在供应来源的多元化方面*，从能源外交角度来看，我国庞大的内需市场、日趋完善的政策环境所构成的稳定的、规模化的能源进口需求，将帮助中国与资源国之间形成长期稳定的合作关系，从而为我国在全球能源贸易格局中赢得重要的议价能力和多元化选择空间。

*在能源技术本土化方面*，我国已形成从原材料、核心零部件到整机制造、系统集成的完整产业链，具备极强的成本控制能力和快速迭代能力，这是支撑能源技术本土化战略的核心竞争力。

此外，在中国数字化进程持续推进的背景下，中国能源韧性提升呈现制度、技术与产业协同的叠加优势：① 数字化的发展拓展了韧性治理的边界，外部冲击下对供给侧运行状态的持续监测、对需求侧场景的高精度预测，并通过在线优化生成恢复路径，构建“预警—应急—恢复—适应”的闭环决策流程，显著提升对突发事件的响应速度与决策质量。② 市场与政策工具为数据要素赋能，辅助能源传输、需求响应与虚拟电厂在统一价格信号下参与供需调节，分布式储能与车网互动作为柔性容量，强化峰谷转移、事故缓释与跨时段资源配置能力，从而提升系统的可恢复性与稳定裕度。③ 数据要素与能源生产、存储、运输、消费全链条深度耦合驱动能源产业在技术架构、商业模式上实现结构性变革，形成以数据驱动的系统性转型，持续增强能源系统的可观测性、可预测性与自适应能力，提高系统韧性。

## 5 中国能源韧性提升的策略建议

综上，我国本土煤炭供给安全可控，油气对外依赖度高，可再生能源产业链全球领先，基础设施网络

完善，政策体系持续优化，能源系统呈现出“基础稳固、结构性风险突出、韧性提升潜力明显”的特征。从策略选择的现实基础来看，我国同时具备能源多元化策略所需的外部环境基础和能源本土化策略所需的内部资源、技术禀赋。因此，在提升国家能源韧性的战略选择中，应考虑多元化与本土化政策的齐头并进，强化政策的互补性和协同性。

### 5.1 短期内策略建议

短期内，应以油气资源的进口来源多元化为核心，积极扩展国际能源多边合作关系，以能源供给本土化为保障，增强国际突发事件下能源韧性。

（1）通过地缘经济合作构建稳固的外部屏障，提升能源系统的抵御能力。一方面，深化“一带一路”能源供应链网络建设。推进重大能源通道项目（如中巴经济走廊、中国—中亚天然气管道D线等）的落地与运营，形成绕开传统战略瓶颈的陆上和海上能源输送替代路线；构建“能源+”合作新模式，推动能源合作与基础设施建设、制造业产能、金融投资“捆绑式”发展，将能源贸易关系升级为全方位的能源经济伙伴关系。另一方面，积极参与并塑造全球能源治理体系。在多边框架（如IEA、二十国集团、上海合作组织等）中发挥建设性作用；践行“能源外交”，积极斡旋主要资源国间的地区冲突，以发展项目促进区域经济融合，化解地缘政治矛盾，从政治源头降低供应中断风险。

（2）通过强化内部系统弹性和外部合作机制，提升能源系统的适应能力。一方面，巩固并优化国内传统能源“压舱石”作用。实施油气产能保障工程，通过财税优惠和技术支持，鼓励加大对老油田的稳产技术改造和非常规油气（页岩油、致密气）的经济有效开发，确保国内油气产量维持在安全底线之上；通过市场化手段鼓励商业能源储备，扩大原油和天然气的战略储备规模，优化储备布局和轮换机制，确保在紧急状态下具备足够的缓冲能力。另一方面，在国际多边框架下建立能源安全预警与应急响应机制。共享航运安全等信息，倡导多边协调与互助。

（3）加速能源消费侧的电气化与智能化转型，利用新能源优势提升能源系统的恢复能力。全面推动终端用能电气化，制定分行业电气化路线图。例如，在交通领域，加大充电基础设施建设支持力度；在建筑领域，推广高效电驱动热泵供暖；在工业领域，鼓励电窑炉、电锅炉替代燃煤燃油设备等。构建柔性负荷资源池。通过电价信号（如分时电价）和智能控制技术，整合电动汽车、智能家居、用户侧储能等分布式资源，形成规模化、可调控的“虚拟电厂”，平抑电网峰谷差，提升电力系统对波动性新能源的消纳能力和整体韧性。通过这些方式，引导能源消费结构向我国具备资源和技术优势的新能源领域转型，更大程度提升能源系统的恢复能力。

在实现2030年前碳达峰目标的短期阶段，电气化转型推进与能源高效利用能够降低油气资源需求，增加电力消费，减少我国能源对外依赖程度。但受电力结构限制，短期煤炭消费将出现增长，导致煤炭消费峰值提高。根据可计算一般均衡模型[⑧]测算，在经济方面，这一短期策略会提高国内煤炭需求，降低石油需求，使主要能源产品中煤炭价格上涨0.09%—1.22%、原油价格降低0.07%—1.24%，并最终带动消费者价格指数提高了0.06%—0.68%，促进国内生产总值（GDP）增长0.07%—0.53%。环境方面，短期策略在带来韧性提升的同时，煤炭消费的潜在增长对国家减排行动带来一定阻碍，但电气化程度的提高对碳排放的上升起到抑制作用，最终使短期碳排放峰值变动

⑧ 为进行能源韧性提升的综合效益评估，本研究构建了一个全球多区域递归动态可计算一般均衡模型，模型基于一般均衡理论构建，通过描述世界主要国家和地区的生产、分配、贸易等行为对经济进行量化分析，详细模型介绍请见附录。

–0.60%—2.94%。

### 5.2 中长期政策建议

从中长期来看，应以能源品种多元化为核心，以培育产业链创新、自主能力为保障，最终实现我国能源系统的常态化韧性建设。

（1）通过多样化资源开发夯实能源供给基底，提升能源系统的抵御能力。一方面，大力推进非常规油气资源战略开发，打破供给“天花板”。启动页岩油气科技攻坚与标准先行计划，设立国家级页岩油气研发中心，联合企业与科研院所，重点攻关深层、超深层页岩油气勘探开发核心技术。同步建立涵盖地质评价、钻井、压裂、环保全流程的行业技术标准体系，引导产业规范化、高效化发展。另一方面，加速推动可再生能源建设，重塑供给结构。实施“新能源基地+特高压通道”的协同建设模式，在西部、北部地区建设大型风光储一体化基地，并同步规划建设配套的特高压外送通道，实现新能源电力的大范围、高效率优化配置，从源头上增加清洁电力供应。

（2）基于数字技术构建智慧能源供需生态，增强能源系统的适应能力。在供给端，加快建设智能电网，提升电网智能化与灵活调节能力。大力发展抽水蓄能、新型储能，并推动煤电机组灵活性改造，建设足以平抑新能源波动性的多层次调节资源。在需求端，激活响应资源，通过深化电价改革，建立分时电价、实时电价等市场信号机制，培育虚拟电厂聚合商，整合工商业可中断负荷、电动汽车、智能楼宇等分布式资源，使负荷侧成为系统动态平衡的积极参与者。

（3）培育面向未来的能源科技产业体系，保障能源系统的恢复能力。一方面，实施能源关键技术装备“强链”工程。围绕页岩油气装备（如旋转导向钻井系统）、大型风电机组、高效光伏电池、氢能电解槽及燃料电池等关键环节，实施国产化攻关与“首台套”推广应用政策，确保产业链、供应链安全。另一方面，布局下一代能源科技创新体系。加大对新型储能、小型模块化核反应堆（SMR）、绿氢制备与储运、能源人工智能等前沿技术的研发投入，建立从基础研究、技术开发到工程示范的全链条创新体系，为能源系统的迭代升级和快速恢复提供技术解决方案。

至2045年左右的中长期阶段，能源结构转型的逐步完成使电力成为主要能源，形成清洁、安全、高效的新型能源消费方式，降低能源总体消费需求。以科技创新为基础，使风电、光伏等可再生能源产业带动上下游产业链形成新的经济增长点，培育出一系列高技术新兴企业，以增强中国在国际能源产业链中话语权，推动国际能源产业链重构，使我国能源韧性水平得到大幅提高。根据可计算一般均衡模型测算，这一中长期策略会通过产业结构的变化使中国能源消费总量降低16.83%—20.08%，其中煤炭消费占比降低22.38%—25.62%，石油消费占比降低3.92%—6.16%，非化石能源消费占比提高28.10%—34.08%，实现非化石能源消费比重目标⑨的同时油气进口降低35.80%—48.08%，从而对中国能源韧性起到极大增益。经济方面，煤炭、油气等化石能源生产部门明显衰退，但清洁能源产业的扩张吸收大量劳动力，并基于产业结构带动服务业、仪器仪表行业就业，使中国总体就业提高2.16%—2.80%，带动GDP提高1.16%—1.41%。

## 参考文献

1 冯玉军, 张锐. 乌克兰危机下国际能源供应链断裂重组及其战略影响. 亚太安全与海洋研究, 2023, (3): 17-35.
Feng Y J, Zhang R. The disruption and reconfiguration of the international energy supply chain in the wake of the Ukraine

⑨ 参考《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中2060年非化石能源消费比重达到80%以上的目标线性计算得到。

crisis and its strategic influences. Asia-Pacific Security and Maritime Affairs, 2023, (3): 17-35. (in Chinese)

2 邹洋, 王剑晓, 戴璟, 等. 欧洲能源危机成因、影响与应对措施. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 1-13.
Zou Y, Wang J X, Dai J, et al. Causes, impacts and mitigation measures of European energy crisis. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 1-13. (in Chinese)

3 International Energy Agency. Making the Energy Sector More Resilient to Climate Change. Paris: IEA, 2015.

4 朱彤. 能源安全新风险与新逻辑: 系统韧性的视角——兼论新逻辑下我国能源安全问题与战略思路. 技术经济, 2023, 42(2): 1-10.
Zhu T. New risks and new logics of energy security: From the perspective of system resilience concurrently discussing problem of energy security and strategic thinking under the new logic in China. Journal of Technology Economics, 2023, 42(2): 1-10. (in Chinese)

5 Grossman G M, Helpman E, Lhuillier H. Supply chain resilience: Should policy promote international diversification or reshoring?. Journal of Political Economy, 2023, 131(12): 3462-3496.

6 Sharifi A, Yamagata Y. Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1654-1677.

7 Roggema R, van den Dobbelsteen A. Swarm planning for climate change: An alternative pathway for resilience. Building Research & Information, 2012, 40(5): 606-624.

8 Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J, et al. Spatial and temporal quantification of resilience at the community scale. Applied Geography, 2013, 42: 95-107.

9 王诺亚. 美国能源安全战略体系研究. 国际经济合作, 2023, (5): 80-90.
Wang N Y. Research on US energy security strategy system. Journal of International Economic Cooperation, 2023, (5): 80-90. (in Chinese)

10 张心馨, 苏宏伟. 日本关键矿产政府保障措施的分析与比较——以《资源确保战略》和《新国际资源战略》为例. 现代日本经济, 2024, (4): 69-82.
Zhang X X, Su H W. Analysis and comparison of government measures for securing Japan's critical minerals: Based on *the Resource Security Strategy* and *the New International Resource Strategy*. Contemporary Economy of Japan, 2024, (4): 69-82. (in Chinese)

11 许嫣然. 俄乌冲突中的"能源武器化"与能源韧性——以欧盟政策分析为主线. 外交评论(外交学院学报), 2023, 40(3): 78-105.
Xu Y R. "Weaponizing energy" in Russia-Ukraine conflict and energy resilience: An analysis focusing on EU policies. Foreign Affairs Review, 2023, 40(3): 78-105. (in Chinese)

12 李岚春, 刘清, 陈伟, 等. 新阶段美国清洁能源战略解构与比较研究. 中国科学院院刊, 2024, 39(8): 1348-1364.
Li L C, Liu Q, Chen W, et al. Research and implications of the US clean energy strategy. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(8): 1348-1364. (in Chinese)

13 International Energy Agency. Renewables 2024 Analysis and Forecast to 2030. Paris: IEA, 2024.

14 范英,肖旭.面向新型工业化的碳定价政策与创新投入协同优化. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2024, 37(5): 1-14.
Fan Y, Xiao X. Collaborative optimization of carbon pricing policy and innovation investment for new industrialization. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2024, 37(5): 1-14. (in Chinese)

15 李思奇, 金扬凯. 欧盟《净零工业法案》对中国的影响及应对. 国际贸易, 2023, (10): 35-45.
Li S Q, Jin Y K. The impact of *the EU Net Zero Industry Act* on China and countermeasures for China. Intertrade, 2023, (10): 35-45. (in Chinese)

16 Dunn C, Barden J. 2024 World Oil Transit Chokepoints. Washington DC: U. S. Energy Information Administration, 2024.

17 吴裕根, 王佟, 苗琦, 等. 中国能源消费形势分析及能源安全体系建设. 中国煤炭地质, 2024, 36(3): 38-42.
Wu Y G, Wang T, Miao Q, et al. Analysis of China's energy consumption situation and construction of energy security system. Coal Geology of China, 2024, 36(3): 38-42. (in Chinese)

18 梁萌, 赵赏鑫, 任重远, 等. 新时期中国油气进口通道的风险与应对策略. 油气储运, 2022, 41(8): 875-884.

Liang M, Zhao S X, Ren Z Y, et al. Risk for oil and gas import routes of China in the new era and its countermeasures. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8): 875-884. (in Chinese)

19 孙龙德, 张鹏程, 江航, 等. 油气安全与能源转型的新趋势. 世界石油工业, 2024, 31(1): 6-15.
Sun L D, Zhang P C, Jiang H, et al. New trends in oil and gas security and energy transition. World Petroleum Industry, 2024, 31(1): 6-15. (in Chinese)

20 吕建中. 保障能源安全需做好传统能源与新能源战略协同. 世界石油工业, 2022, 29(2): 1-6.
Lv J Z. Necessary to coordinate traditional and new energy strategies to ensure energy security. World Petroleum Industry, 2022, 29(2): 1-6. (in Chinese)

21 谢克昌. 面向2035年我国能源发展的思考与建议. 中国工程科学, 2022, 24(6): 1-7.
Xie K C. China's energy development for 2035: Strategic thinking and suggestions. Strategic Study of CAE, 2022, 24 (6): 1-7. (in Chinese)

22 Liang Y S, Zhang Y N, Wang Y H, et al. Chinese electricity-focused input-output dataset with detailed coal power and alternative energy for 2018. Scientific Data, 2023, 10(1): 553.

23 Aguiar A, Chepeliev M, Corong E, et al. The global trade analysis project (GTAP) data base: Version 11. Journal of Global Economic Analysis, 2022, 7(2): 1-37.

24 Fujimori S, Hasegawa T, Masui T, et al. SSP3: AIM implementation of shared socioeconomic pathways. Global Environmental Change, 2017, 42: 268-283.

# Strategies for enhancing China's energy resilience: Trade-offs between diversification and localization

SONG Zhongwei[1] ZHAO Yu[2] GAO Xiang[2] PAN Jiaofeng[1,3*]

（1 School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
2 State Key Laboratory of Mathematical Sciences, Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China）

**Abstract** In recent years, intensified geopolitical conflicts worldwide have increasingly exposed the vulnerabilities of traditional energy security frameworks, necessitating a shift in perspective from "ensuring stable supply" to "building systemic resilience". This study explores pathways to enhance China's energy resilience, analyzes how diversification and localization strategies can strengthen national energy security, and reviews related policy practices. Building on this analysis and considering China's current energy landscape, the study proposes that in the short term, emphasis should be placed on diversifying import sources and routes while strengthening domestic supply assurance. In the medium to long term, it is essential to accelerate the transition toward a renewable energy-dominated structure and rebuild global supply chains through greater technological autonomy. By adopting such a hybrid model that combines domestic assurance with global cooperation, China can balance short-term stability with long-term adaptability, thereby

*Corresponding author

enhancing its energy resilience.

**Keywords** energy resilience, energy policy, benefits assessment, general equilibrium

**宋中炜** 中国科学院大学公共政策与管理学院博士研究生。主要研究方向：低碳能源转型、综合评估模型构建。
E-mail: songzhongwei22@mails.ucas.ac.cn

**SONG Zhongwei** Ph. D. candidate at School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS). His research focuses on low-carbon energy transformation, and construction of integrated assessment model.
E-mail: songzhongwei22@mails.ucas.ac.cn

**潘教峰** 中国科学院科技战略咨询研究院院长、研究员，中国科学院大学公共政策与管理学院院长。中国发展战略学研究会理事长，《中国科学院院刊》编委。主要从事科技战略规划、运筹与决策、创新政策和智库理论方法研究。E-mail: jfpan@casisd.cn

**PAN Jiaofeng** Professor, president of the Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences (CAS), dean of the School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), chairman of Chinese Association of Development Strategy Studies, and editor of *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*. His research focuses on S&T strategic planning, operations research and decision making, innovation policy, and think-tank theory and method research. E-mail: jfpan@casisd.cn

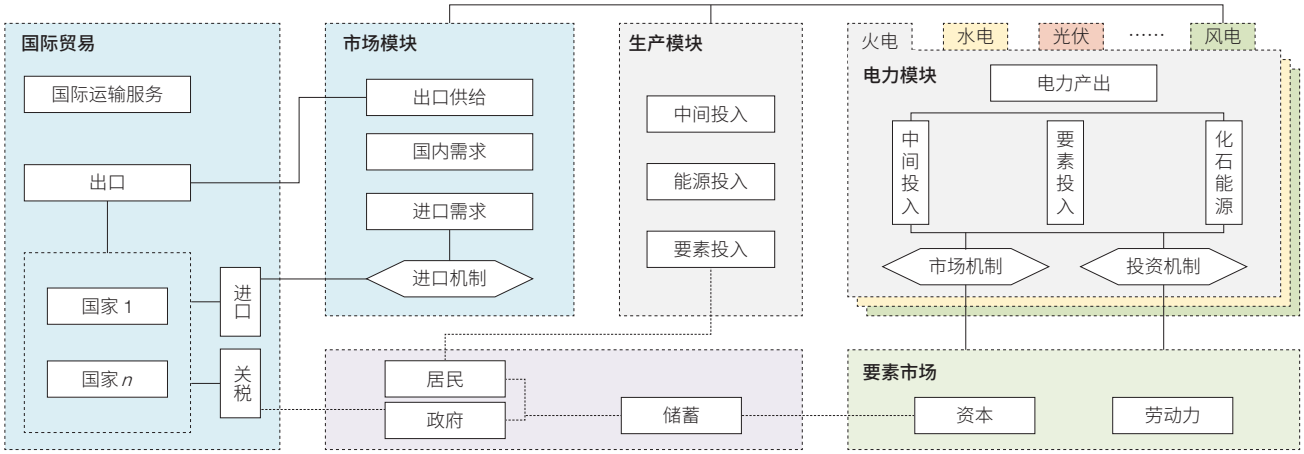
■责任编辑：岳凌生

## 附录： 可计算一般均衡模型介绍

### 1 能源韧性提升政策效益的评估方法

为进行能源韧性提升的综合效益评估，本研究构建了一个全球多区域递归动态可计算一般均衡模型（CGE），通过耦合电力技术进步、电力市场发展模块，能够模拟经济社会发展中不同政策措施对能源消费、经济发展、劳动就业等多方面的影响。

附图1展示了一般均衡模型的主要结构框架，模型通过生产模块描述除电力部门外其他部门的生产，使用电力模块刻画多种电力技术的生产并形成一种电力商品。各国家地区内部经济活动的主体为居民、企业和政府，各主体需求加总形成国内总商品需求，总需求在国家层面区分本地和进口2种不同的投入品来源，并以国家作为一个主体与世界其他国家和地区进行贸易活动。市场模块中，国内总需求分解为国内和进口需求，国内生产供给国内需求与出口。针对本文研究问题，在市场模块中设计进口政策机制实现对进口来源国的控制，在电力模块中，通过电力市场和投资机制实现不同电力技术的发展控制。模型中存在资本和劳动力两种要素投入，采用多层嵌套的CGE函数刻画生产行为，固定差异弹性（CDE）需求系统描述居民消费行为，Armington假设区分进口产品来源。在地区设置上，模型保留了世界主要经济体及主要能源生产、出口国家。模型假设市场是完全竞争的，生产保持规模报酬不变。




附图 1　一般均衡模型结构框架

Appendix Figure 1　Computable general equilibrium （CGE） model framework

## 2 模型数据及情景设定

### 2.1 模型数据

本文模型的经济贸易数据采用全球贸易分析模型（GTAP）第 11b 版数据库，能源数据使用《中国能源统计年鉴》《中国电力年鉴》中各种能源生产消费数据，行业层面通过与中国投入产出表、《中国能源统计年鉴》进行行业匹配，地区层面选取中国主要的原油进口与世界主要原油出口的国家和地区，最终形成包含 28 个部门、23 个国家和地区（附表 1 和 2）的经济数据，以及中国能源生产消费的数据库；同时，参考 2018 年中国细分电力技术投入产出数据集[22]，构建 2017 年细分电力技术卫星数据。模型外生参数主要参考 GTAP 第 11b 版数据库[23]、AIM/CGE 模型[24]的取值进行设定。模型以 2017 年为起始年，并根据世界银行的各国经济发展指标、联合国秘书处经济和社会事务部（UNDESA）发布的《2024 世界人口展望》，以及国家统计局发布的相关数据，将我国与主要国家和地区的能源经济数据校核至 2023 年，以 2023 年作为基准年份进行情景模拟冲击。

本文在情景冲击中采取短期闭合设定。在短期内，劳动力价格存在黏性，因此认为实际工资保持不变，但劳动力可以在各部门间流动且允许失业存在。固定资产投资在冲击期内无法形成新的资本，因此国内总资本存量固定在期初水平，资本收益内生，且资本可以在行业间部分流动。劳动及资本的要素收入形成居民消费，税率与技术进步等参数在冲击中保持不变。

### 2.2 情景设定

本文共设计“多元化”“本土化”“本土化+电气化转型”和“长期能源转型”4 类共 7 种情景对中国能源韧性提升策略进行研究（附表 3）。首先，在多元化情景中，在世界主要油气出口国出口量满足中国进口需求的前提下，中国将油气进口需求平均分配至每个出口国，最大程度分散进口来源。

（1）在“本土化”情景中，假设中国提高化石能源消费中本土资源较丰富的煤炭的占比（不改变电力生产部门的煤炭消费），冲击方式参考 GTAP 模型中方法，计算公式为：

$$share_a = share0_a\left(\frac{1 + Policy}{1 + share0_a \cdot Policy}\right) \quad (1)$$

其中，$share_a$、$share0_a$ 分别为冲击情景与基准情景下各行业煤炭消费份额参数；$Policy$ 为政策强度参数，基于冲击力度取值为 0.5、1。

（2）在“本土化+电气化转型”情景中，假设中国提高化石能源消费中本土资源较丰富的煤炭的占比

附表 1　数据部门设置

Appendix Table 1　Database sector setup

| 部门设置 | 包括行业 |
|---|---|
| 农林牧渔产品和服务 | 水稻，小麦，其他谷物，蔬果，油籽，甘蔗、甜菜，植物纤维，其他农作物，牛、羊、马，其他动物产品，生牛奶，羊毛、桑蚕茧，林业，渔业 |
| 煤炭采选产品 | 煤炭 |
| 石油和天然气开采产品 | 石油，天然气 |
| 其他采选产品 | 其他采选产品 |
| 食品烟草 | 牛肉制品，其他肉制品，动植物油，乳制品，大米制品，白糖，其他食品，饮料和烟草制品 |
| 纺织品 | 纺织品 |
| 纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品 | 服饰，皮革产品 |
| 石油、炼焦产品和核燃料加工品 | 石油、煤炭制品 |
| 化学产品 | 化工产品，基础医药产品，橡塑制品 |
| 非金属矿物制品 | 非金属矿物制品 |
| 金属冶炼和压延加工品 | 黑色金属，其他金属 |
| 金属制品 | 金属制品 |
| 通信设备、计算机和其他电子设备 | 计算机、电子和光学产品 |
| 电气机械和器材 | 电气设备 |
| 交通运输设备 | 汽车及零部件，其他运输设备 |
| 其他机械设备 | 其他机械设备 |
| 其他制造产品 | 木材产品，出版物及纸制品，其他制造业 |
| 电力、热力的生产和供应 | 电力生产 |
| 燃气生产和供应 | 燃气生产输配 |
| 水的生产和供应 | 水的生产 |
| 建筑 | 建筑业 |
| 批发和零售 | 贸易服务 |
| 交通运输、仓储和邮政 | 其他运输业，水路运输，航空运输，仓储和支持活动 |
| 信息传输、软件和信息技术服务 | 信息通信服务 |
| 金融地产 | 其他金融服务，保险，房地产服务 |
| 商业及技术服务 | 其他商业服务 |
| 住宿和餐饮 | 住宿餐饮服务 |
| 休闲及其他服务 | 娱乐及其他服务，公共管理和国防，教育，卫生及社会工作，居民服务 |

之外，提高终端电气化率，采取与“本土化”相同的冲击方式，政策强度参数取值为0.5、1。

（3）在“长期能源转型”情景中，模型对长期能源转型进行模拟，中国能源转型取得较大成果，能源系统通过发展风电、光伏产业提高能源供应能力与能源韧性水平。情景假设大幅度提高中国的终端电气化水平，风电、光伏发电得到较大发展，火电发电逐渐作为调峰使用，发电量大幅降低。水电、核电假设维持当前水平。电气化率冲击方式与前文相同，政策强度参数取值为5、10，通过外生固定火电、水电与核

附表2　数据地区设置

Appendix Table 2　Database region setting

| 地区设置 | 包括地区的GTAP代码 |
|---|---|
| 澳大利亚 | aus |
| 中国 | chn |
| 日本 | jpn |
| 韩国 | kor |
| 东盟 | brn, khm, idn, lao, mys, sgp, tha, phl, vnm, xse |
| 印度 | ind |
| 加拿大 | can |
| 美国 | usa |
| 墨西哥 | mex |
| 中南美洲 | arg, bol, bra, chl, col, ecu, pry, per, ury, ven, xsm, cri, gtm,hnd, nic, pan, slv, xca |
| 欧洲 | aut, bel, bgr, hrv, cyp, cze, dnk, est, fin, fra, deu, grc, hun, irl, ita, lva, ltu, lux, nld, mlt, pol, prt, svk, rou, svn, esp, swe, gbr, che, xef, nor, alb, srb, ukr, xee, xer |
| 其他独联体国家 | blr, kaz, kgz, tjk, uzb, xsu |
| 俄罗斯 | rus |
| 其他中东国家 | arm, aze, geo, bhr, irn, isr, jor, lbn, omn, pse, qat, syr, tur, xws |
| 伊拉克 | irq |
| 科威特 | kwt |
| 沙特阿拉伯 | sau |
| 阿联酋 | are |
| 北非 | dza, egy, mar, tun, xnf |
| 西非 | ben, bfa, cmr, civ, gha, gin, mli, ner, nga, sen, tgo, xwf |
| 中非 | caf, tcd, cog, cod, gnq, gab, xac |
| 东南非洲 | com, eth, ken, mdg, mwi, mus, moz, rwa, sdn, tza, uga, zmb, zwe, xec, bwa, swz, nam, zaf, xsc |
| 世界其他地区 | nzl, xoc, hkg, mng, twn, xea, afg, bgd, npl, pak, lka, xsa, xna, dom, hti, jam, pri, xcb, tto, xtw |

电发电量方式控制发电量，风电、光伏发电由模型内生。

通过以上情景设定，本文对提升中国能源韧性的多种方式的综合效益进行评估。

## 3 主要模块设置

### 3.1 生产模块

生产模块中对每个生产部门的生产过程使用多层嵌套的函数形式实现，非能源商品作为中间投入，按比例投入生产，能源商品、劳动力与资本投入在一般生产部门中作为要素类投入，存在替代关系。对于电力生产，石油炼焦业、化学制品业、煤炭采选和燃气生产供应业等使用能源产品作为原材料投入的能源生产部门，将其对应的作为原料的能源投入设置为中间投入，与劳动力、资本之间不存在替代关系。电力生产作为生产模块中的子模块被进一步刻画。

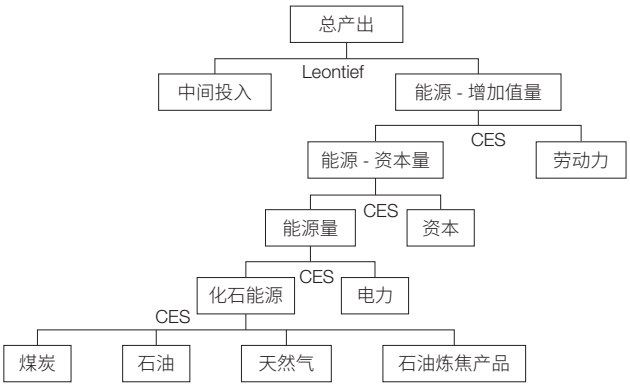
在模型中，生产决策过程在区域层级进行描述，嵌套结构见附图2。

部门总产出使用Leontief函数形式由中间投入束与能源-增加值束构成：

附表3　情景设定

Appendix Table 3　Scenario setting

| 情景编号 | 分类 | 情景设计 |
|---|---|---|
| D1 | 多元化 | 中国采取进口多元化的方式分散石油进口来源，以提高石油能源供应链韧性 |
| L1 | 本土化 | 增加中国化石能源的消费中煤炭占比，降低石油及天然气占比，煤炭消费占比提高1.9%—3.5%。通过提高本土资源丰富能源的消费，降低对能源进口的依赖性，以提高石油能源供应链韧性 |
| L2 | | |
| E1 | 本土化+电气化转型 | 在中国采取提高能源供给本土化生产的基础上，提高国内电气化率3.3%—7.7%，进一步提高对本土可控能源的消费，提高能源产业链韧性 |
| E2 | | |
| T1 | 长期能源转型 | 对长期能源转型进行模拟，电气化率提高23%—33%，火电发电量降低50%，增长的电力需求均由风电及光伏发电满足 |
| T2 | | |




附图 2　生产模块结构图生产模块结构图

Appendix Figure 2　Production module structure diagram

$$QINT_{a,sr} = XP_{a,sr} \tag{2}$$

$$VE_{a,sr} = XP_{a,sr} \tag{3}$$

$$PX_{a,sr} = s_{\text{int},a,sr} PINT_{a,sr} + s_{ve,a,sr} PVE_{a,sr} \tag{4}$$

其中，$QINT_{a,sr}$表示区域$sr$生产部门$a$对于中间产品的需求，$XP_{a,sr}$表示区域$sr$生产部门$a$的总产出，$VE_{a,sr}$表示区域$sr$生产部门$a$对能源-增加值合成量的需求。$PX_{a,sr}$为产出价格，$PVE_{a,sr}$、$PINT_{a,sr}$分别表示中间产品与能源-增加值合成量的综合价格，$s_{\text{int},a,sr}$、$s_{ve,a,sr}$表示中间产品与能源-增加值合成量的份额参数。后文下标除另行说明外含义相同。

中间投入束是基于中间产品的投入按比例合成：

$$XA_{i,a,sr} = QINT_{a,sr} \tag{5}$$

$$PINT_{a,sr} = \sum_i s_{i,a,sr} PAT_{i,sr} \tag{6}$$

其中，$XA_{i,a,sr}$表示产品需求，$PAT_{i,sr}$表示产品的国内价格，$s_{i,a,sr}$为中间投入的份额。

能源-增加值束使用CES函数形式由能源束与增加值投入构成：

$$EN_{a,sr} = \left(\frac{PVE_{a,sr}}{PEN_{a,sr}}\right)^{\sigma^{va}_{a,sr}} VE_{a,sr} \tag{7}$$

$$VA_{a,sr} = (TFP_{a,sr})^{\sigma^{va}_{a,sr}-1} \left(\frac{PVE_{a,sr}}{PVA_{a,sr}}\right)^{\sigma^{va}_{a,sr}} VE_{a,sr} \tag{8}$$

$$PVE_{a,sr} = \left[ s^{va}_{a,sr} \left(\frac{PVA_{a,sr}}{TFP_{a,sr}}\right)^{1-\sigma^{va}_{a,sr}} + s^{en}_{a,sr} (PKE_{a,sr})^{1-\sigma^{va}_{a,sr}} \right]^{1/(1-\sigma^{va}_{a,sr})} \tag{9}$$

其中，$EN_{a,sr}$、$VA_{a,sr}$表示能源合成量与增加值总量，$\sigma^{va}_{a,sr}$为弹性参数。$TFP_{a,sr}$表示全要素生产率，由基准校调得出，在各冲击中保持一致。$PEN_{a,sr}$、$PVA_{a,sr}$表示能源合成量价格与增加值价格。$s^{va}_{a,sr}$、$s^{en}_{a,sr}$为份额参数。

增加值束使用CES函数形式由资本与劳动投入构成：

$$K_{a,sr} = \left(\frac{PVA_{a,sr}}{PK_{a,sr}}\right)^{\sigma^{va}_{a,sr}} VA_{a,sr} \tag{10}$$

$$L_{a,sr} = \left(\frac{PVA_{a,sr}}{PL_{a,sr}}\right)^{\sigma^{va}_{a,sr}} VA_{a,sr} \tag{11}$$

$$PVA_{a,sr} = \left[ s^{k}_{a,sr} (PK_{a,sr})^{1-\sigma^{va}_{a,sr}} + s^{l}_{a,sr} (PL_{a,sr})^{1-\sigma^{va}_{a,sr}} \right]^{1/(1-\sigma^{va}_{a,sr})} \tag{12}$$

其中，$K_{a,sr}$、$L_{a,sr}$表示资本与劳动力投入量，$\sigma^{va}_{a,sr}$为弹性参数。$PK_{a,sr}$、$PL_{a,sr}$表示资本与劳动力价格。$s^{k}_{a,sr}$、

$s^{l}_{a,sr}$为份额参数。

能源束使用CES函数形式由化石能源束与电力投入构成：

$$XA_{ely,a,sr}=(AEEI^{ely}_{a,sr})^{\sigma^{en}_{a,sr}-1}\left(\frac{PEN_{a,sr}}{PAT_{ely,sr}}\right)^{\sigma^{en}_{a,sr}}EN_{a,sr} \tag{13}$$

$$FO_{a,sr}=(AEEI^{fos}_{a,sr})^{\sigma^{en}_{a,sr}-1}\left(\frac{PEN_{a,sr}}{PFO_{a,sr}}\right)^{\sigma^{en}_{a,sr}}EN_{a,sr} \tag{14}$$

$$PEN_{a,sr}=\left[s^{ely}_{a,sr}\left(\frac{PFO_{a,sr}}{AEEI^{fos}_{a,sr}}\right)^{1-\sigma^{en}_{a,sr}}+s^{fo}_{a,sr}\left(\frac{PAT_{ely,sr}}{AEEI^{ely}_{a,sr}}\right)^{1-\sigma^{en}_{a,sr}}\right]^{1/(1-\sigma^{en}_{a,sr})} \tag{15}$$

其中，$XA_{ely,a,sr}$、$FO_{a,sr}$表示电力投入与化石能源投入，$AEEI^{ely}_{a,sr}$与$AEEI^{fos}_{a,sr}$为针对于电力和化石能源的自主能源效率进步参数，$\sigma^{en}_{a,sr}$为弹性参数，$PFO_{a,sr}$为化石能源价格，$s^{ely}_{a,sr}$、$s^{fo}_{a,sr}$为份额参数。

化石能源束使用CES函数形式由煤炭、石油、天然气、燃气、石油炼焦产品投入构成：

$$XA_{fos,a,sr}=\left(\frac{PFO_{a,sr}}{PAT_{fos,sr}}\right)^{\sigma^{fo}_{a,sr}}FO_{a,sr} \tag{16}$$

$$PFO_{a,sr}=\left[\sum_{fos}s_{fos,a,sr}\left(PAT_{fos,sr}\right)^{1-\sigma^{fo}_{a,sr}}\right]^{1/(1-\sigma^{fo}_{a,sr})} \tag{17}$$

其中，$XA_{fos,a,sr}$表示化石能源投入，$\sigma^{fo}_{a,sr}$为弹性参数。$PFO_{a,sr}$表示化石能源价格，$s_{fos,a,sr}$为份额参数。

### 3.2 贸易模块

生产模块与最终需求中的商品需求构成了贸易模块中的总需求，基于模型“市场对市场”的贸易形式，区域内各部门商品需求首先被加总为市场需求，各区域市场内价格被视为是均匀的：

$$XAT_{i,sr}=\sum_{aa}XA_{i,aa,sr} \tag{18}$$

其中，$XAT_{i,sr}$表示商品的市场需求。

各区域市场的总需求由国内市场供给和国际市场供给满足。市场需求使用阿明顿规范，假设各国内商品和进口商品之间存在产品差异，使用CES结构首先区分对国内的需求和对国际市场的进口需求：

$$XDT_{i,sr}=XAT_{i,sr}\left(\frac{PAT_{i,sr}}{PDT_{i,sr}}\right)^{\sigma^{a}_{i,sr}} \tag{19}$$

$$XM_{i,sr}=XAT_{i,sr}\left(\frac{PAT_{i,sr}}{PM^{p}_{i,sr}}\right)^{\sigma^{a}_{i,sr}} \tag{20}$$

$$PAT_{i,sr}=\left[s^{xdt}_{i,sr}\left(PDT_{i,sr}\right)^{1-\sigma^{a}_{i,sr}}+s^{xm}_{i,sr}\left(PM^{p}_{i,sr}\right)^{1-\sigma^{a}_{i,sr}}\right]^{1/(1-\sigma^{a}_{i,sr})} \tag{21}$$

其中，$XDT_{i,sr}$、$XM_{i,sr}$表示国内产品、进口产品的需求，$\sigma^{a}_{i,sr}$为替代弹性，$PDT_{i,sr}$、$PM^{p}_{i,sr}$表示国内产品、进口产品价格，进口价格含税。$s^{xdt}_{i,sr}$、$s^{xm}_{i,sr}$为份额参数。

贸易的需求由各区域的部门产品供给满足，同样基于模型“市场对市场”的贸易形式，各区域内生产部门面临国内和国际市场的最优配置决策，基于CET函数形式分配给2个市场：

$$XN^{s}_{i,sr}=XP_{i,sr}\left(\frac{PN^{s}_{i,sr}}{PP_{i,sr}}\right)^{\omega_{i,sr}} \tag{22}$$

$$XE^{s}_{i,sr}=XP_{i,sr}\left(\frac{PE^{s}_{i,sr}}{PP_{i,sr}}\right)^{\omega_{i,sr}} \tag{23}$$

$$PP_{i,sr}=\left[s^{xds}_{i,sr}\left(PD_{i,sr}\right)^{1+\omega_{i,sr}}+s^{xns}_{i,sr}\left(PN^{s}_{i,sr}\right)^{1+\omega_{i,sr}}+s^{xes}_{i,sr}\left(PE^{s}_{i,sr}\right)^{1+\omega_{i,sr}}\right]^{1/(1+\omega_{i,sr})} \tag{24}$$

其中，$XN^{s}_{i,sr}$、$XE^{s}_{i,sr}$为出口量表示国内市场供给与出口量，$\omega_{i,sr}$为CET转换弹性。$PD_{i,sr}$、$PN^{s}_{i,sr}$、$PE^{s}_{i,sr}$表示本地供给、国内供给、出口价格，$PP_{i,sr}$为含税的产出价格。$s^{xds}_{i,sr}$、$s^{xns}_{i,sr}$、$s^{xes}_{i,sr}$为份额参数。

国内市场需求、国际运输服务需求加总后与国内市场供给形成供需平衡：

$$XN^{s}_{i,sr}=XDT_{i,sr}+XTT_{i,sr} \tag{25}$$

$$PN^{s}_{i,sr}=PDT_{i,sr} \tag{26}$$

其中，$XTT_{i,sr}$为国际运输服务需求，其余变量在前文已说明。