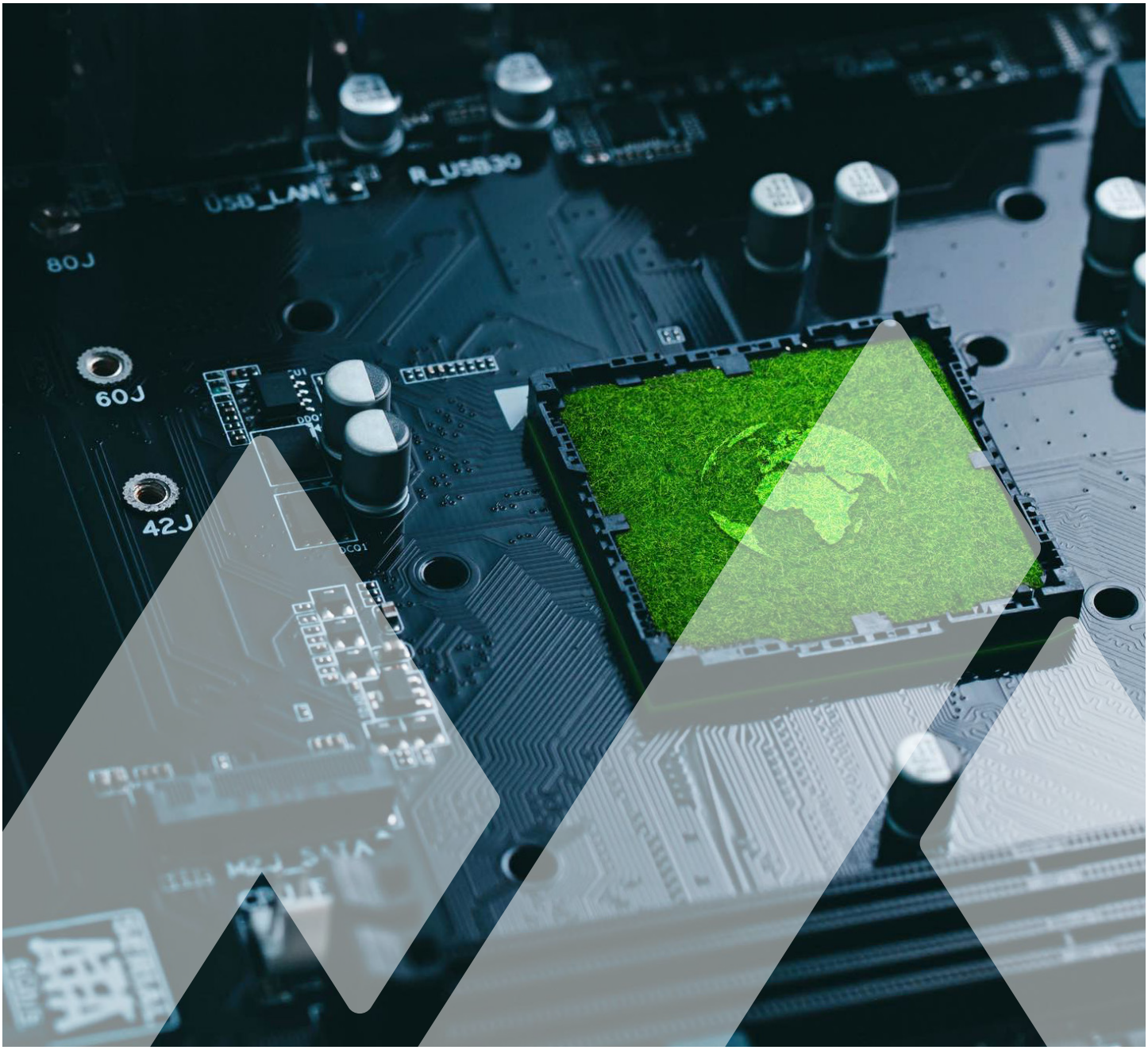
解耦算力发展与碳排放

数据中心用能增长的挑战与解决路径



2024.11

关于落基山研究所（RMI）

落基山研究所(Rocky Mountain Institute, RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库，与政府部门、企业、科研机构及创业者协作，推动全球能源变革，以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所着重借助经济可行的市场化手段，加速能效提升，推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市及华盛顿特区和尼日利亚设有办事处。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所：**李婷，李威，廖登峰，刘雨菁，刘子屹，王广煦，王萌，徐红柚**
作者姓名按姓氏首字母顺序排列。

联系方式

刘雨菁， yujingliu@rmi.org
李　威， wli@rmi.org

引用建议

刘雨菁，李威，刘子屹，王萌，王广煦等. 解耦算力发展与碳排放 – 数据中心用能增长的挑战与解决路径，落基山研究所，2024, https://rmi.org.cn/insights/decarbonizing-data-centers-report/

RMI重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许感兴趣的各方通过知识共享CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

除特别注明，本报告中所有图片均来自iStock。

鸣谢

本报告作者特别感谢以下来自企业和研究机构的专家对报告撰写提供的洞见与建议。

丁世兴　东南大学电气工程学院
丁肇豪　华北电力大学电气与电子工程学院
郭　丰　中国电子学会节能减排工作推进委员会
侯士彦　中国通信学会信息通信能源专业委员会
蒋则明　联通支付有限公司
李卫兵　联通支付有限公司
孟　垚　清华大学能源互联网创新研究院
欧阳武　中国通信学会
齐曙光　中国通信学会信息通信能源专业委员会，
　　中国信息通信研究院泰尔系统实验室
邵双全　华中科技大学能源与动力工程学院
唐　进　北京中创碳投科技有限公司
陶思成　联通支付有限公司
完欣玥　中国通信学会
周滢垭　腾讯碳中和实验室

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构，以及项目支持方的观点。

执行摘要

算力是数据中心服务器对数据处理并实现结果输出的一种能力，是集信息计算力、网络运载力、数据存储力于一体的新型生产力。随着全球产业数字化、智能化转型升级，算力成为最受重视的战略性生产力，对其的需求也在快速攀升。算力产生于数据中心的运行，并伴随着大量的能源消耗，算力的指数级增长意味着数据中心用能的剧增。既要大力发展数字经济，又要实现碳中和目标，则必须实现算力增长与能源消耗碳排放的解耦。若算力发展可以打破由传统化石能源带来的碳排放约束、实现规模化增长，算力驱动的数智化转型将极大地赋能各行各业低碳转型、产生协同效应。鉴此，从政策、市场、技术路径等方面深入探索算力增长与能源消耗碳排放的解耦，具有重要意义和高度紧迫性。

当前，算力的发展速度已显著超越能源基础设施的规划建设步伐，既加剧了能源稳定供给的压力，也为双碳目标和能源转型带来不小的挑战。实现数据中心大幅度降低碳排放主要依靠能效提升和绿色电力的应用，但是，目前数据中心的建设标准中能效评估指标和能效措施尚不充分，算力需求与绿色电力供应之间存在时空不匹配问题，同时，数据中心节能降碳的政策和市场机制的协同保障不足，这些构成有效应对算力中心碳排放的主要挑战。

针对以上主要挑战，本报告从数据中心规划选址、建设改造、运行管理、保障机制的全流程视角，结合全球的最新趋势与实践，提出四个方向的重点解决路径，以期为政策制定者及行业实践者提供兼具前瞻性与务实性的行动建议。

- **统筹考虑六大要素，优化数据中心选址布局：**数据中心应在选址阶段坚持需求导向、成本导向、绿色导向、安全导向，综合协调考虑算力应用场景、绿色电力资源、自然冷源、余热利用、土地价格及政策、网络基础设施等要素，以确保在满足业务需求和经济性的同时，也能实现节能降碳潜力的最大化。

- **发挥标准引领作用，提高数据中心能效水平：**为提高数据中心的能效并促进减碳，应充分发挥标准的引领作用，设定合理的能碳指标，构建综合的多指标能碳评估体系。同时，也应完善数据中心节能标准，积极引导新型制冷技术、高效安全供电及新型储能、高效算力设备及系统等节能技术以及余热回收技术、智能化能源管理系统的应用。

- **打造清洁低碳、电网友好的数据中心电力消费模式：**在运行管理环节，最大化数据中心的绿电供应是实现数据中心用能低碳化的重要抓手。一方面，数据中心运行方可因地制宜地组合选择场内分布式可再生能源、绿电专线直供、绿电交易、绿证交易等采购方式，加速实现电力供应的绿色化。另一方面，算力与电力系统的友好互动有利于实现电网清洁化和数据中心用电低碳化的双赢效应，数据中心应充分挖掘算力调度、制冷等多个系统的时空灵活性，积极推动电力需求侧管理、响应电力市场价格信号，促进实现园区、区域等多层级的算电协同效应。

- **促成政策与市场合力，推动数据中心绿色发展：**应完善针对数据中心和数据中心产品（例如算力等）的碳排放约束政策和披露机制，通过上市公司、下游算力买方等主体推动数据中心碳排放披露，鼓励购买低碳数据产品。应建立明确的数据中心碳核算体系，明确数据类产品的碳核算边界，解决不同运营控制类型的数据中心碳排放权责分配问题。同时，应推动绿色金融工具在数据中心领域的应用，开发创新绿色金融工具、扩充绿色债券项目目录，为节能降碳技术提供金融指引和资金支持。

目录

执行摘要 4

1. 解耦算力发展与碳排放是实现碳中和的必由之路 6

1.1 全球算力发展浪潮推动数据中心用能和碳排放显著增长 6

1.2 实现算碳解耦是达成数智化转型和低碳转型双赢的必经之路 9

2. 全球数据中心算碳解耦的系统性挑战. 13

2.1 规划建设难以协调，基础设施落后于算力发展 13

2.2 多环节能效亟待提升，评估与建设标准缺乏指引 16

2.3 算力与绿电时空不匹配，用能低碳化存在显著障碍 20

2.4 政策与市场保障有待完善，数据中心减碳缺乏推动力 21

3. 数据中心算碳解耦全方位转型路径 24

3.1 协同六大要素优化数据中心选址布局 24

3.2 多维度促进新建与既有数据中心能效提升 30

3.2.1 完善新建数据中心的能碳评估与建设标准 30

3.2.2 全面开展低能效数据中心降碳改造 31

3.3 将数据中心打造成大规模绿色电力消纳的创新场景 34

3.3.1 实现多元稳定的绿色电力供给 34

3.3.2 促进算力 - 电力系统协同运行 39

3.4 推动政策和市场机制保障数据中心节能降碳 42

4. 赋能绿色智慧未来：算碳解耦行动建议 46

参考文献. 48

1. 解耦算力发展与碳排放是实现碳中和的必由之路

1.1 全球算力发展浪潮推动数据中心用能和碳排放显著增长

算力是数据中心服务器对数据处理并实现结果输出的一种能力，是集信息计算力、网络运载力、数据存储力于一体的新型生产力。随着全球产业数字化、智能化转型升级，算力[i]已经成为全球最受重视的战略性生产力，对其需求也在快速攀升。近年来，大数据、人工智能等新一代数字技术与实体经济加速融合，正驱动着生产方式和生活方式的深刻改变。据国际数据公司（IDC）数据显示，从 2017 年到 2022 年，全球十五个主要国家[ii]的数字经济占 GDP 的平均比重已经从 44.1% 上升到 50.2%，预计到 2026 年将上升到 54.0%、金额超过 40 万亿美金[1]。伴随着数据量的指数级增长，数据正在成为新一轮科技革命和产业变革的关键生产要素，算力则是激活数据要素增长潜能的最重要的新质生产力。

对通用人工智能时代到来的普遍预期，使得算力建设加速形成新的浪潮。开放人工智能研究中心（Open AI）的 ChatGPT 的发布引发了全球对人工智能大模型的广泛关注，人工智能的发展与布局是各国政府和企业的战略布局重点之一。中国、美国、欧盟等主要经济体均从国家（区域）层面发布了与人工智能及算力相关的战略政策（图表 1）。继 ChatGPT 仅用两个月吸引了 1 亿全球用户后，谷歌、社群元宇宙公司 Meta、阿里巴巴、百度等科技公司也都各自开发推出了 Gemini、LLaMA、通义千问、问心一言等大模型，人工智能正快速渗透进各行各业和日常生活。伴随着人工智能复杂度和能力的不断提高，对算力的需求也在剧烈增加。据中国信息通信研究院测算[iii]，2023 年全球计算设备算力规模为 1,369EFlops，连续两年增速近 50%，且预计未来 5 年增速将超过 50%[2]。

数据中心是承载算力的物理实体，并建立在计算、存储、通信三大科技基础上，正在从提供传统基础算力向提供智能算力快速发展。近 20 年，全球数据中心市场规模的年平均增长率突破了 20%，并经历了三个主要发展阶段，即从初始的服务于政府、高校和企业的本地化信息和计算中心，过渡到云服务供应商引领的公有云计算中心，再发展到近年来面向人工智能场景的智能算力中心[3]。中国数据中心市场同样历经了一轮高速发展，根据工业和信息化部数据，截至 2023 年底，全国在用数据中心标准机架超过 810 万架，算力总规模达到 230EFLOPS，近 5 年年均增速近 30%，其中智能算力规模达到 70EFLOPS，较上一年增速超过 70%，智能算力占比已提高到 30% 以上[4]。预计到 2025 年，中国在全球数据中心市场规模的占比将从 2008 年的 6% 上升到 30% 左右[5]。

---

i 算力（Computing Power），是数据中心服务器对数据处理并实现结果输出的一种能力，是衡量数据中心计算能力的一个综合指标，包含通用计算能力、超级计算能力和智能计算能力。常用计量单位是每秒执行的浮点运算次数（FLOPS，1EFLOPS=10^{18}FLOPS），数值越大代表综合计算能力越强。来源于《算力基础设施高质量发展行动计划》。

ii 包括：美国、中国、日本、德国、印度、英国、法国、加拿大、意大利、巴西、韩国、澳大利亚、爱尔兰、新加坡和南非（按2022年GDP排序）。

iii 根据2017年起的每年服务器出货量*当年服务器平均算力累加测算；EFlops指每秒进行百亿亿次浮点运算的能力。

图表 1　全球部分国家（经济体）算力发展关键政策一览

国家（经济体）	算力发展关键政策、战略、计划	主要目标
美国	《国家战略性计算计划（更新版）：引领未来计算》 《引领未来的先进计算生态系统：战略计划》 《国家人工智能研究和发展战略计划》	• 建成有活力的国家大数据创新生态系统 • 将先进计算生态系统作为国家的战略资产 • 保持美国在人工智能领域的领先地位
中国	《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》 《新型数据中心发展三年行动计划（2021–2023年）》 《数字中国建设整体布局规划》	• 加快打造一批算力高质量供给、数据高效率流通的大数据发展高地 • 构建以新型数据中心为核心的智能算力生态体系，发挥对数字经济的赋能和驱动作用 • 到 2035 年，数字化发展水平进入世界前列，数字中国建设取得重大成就
欧盟	《高性能计算：欧洲在全球竞争中的地位》 《2030数字指南针》 《塑造欧洲的数字未来》	• 实现高性能计算领导地位 • 到 2030 年，有至少 2,000 万 ICT[iv] 领域专家 • 到 2030 年,至少 75% 的欧盟公司应进行云计算、大数据和人工智能等的实际应用，至少 90% 的中小企业应达到基本数字化水平
日本	《半导体和数字产业战略》 《综合数据战略》	• 建设“超智能社会 5.0” • 发展优质云产业，培育扎根于日本的数字产业，促进数据基地建设
德国	《德国人工智能战略》 《国际数字化政策战略》	• 将德国和欧洲打造成人工智能的领先基地，确保德国未来的竞争力 • 加强安全、可持续的全球数字基础设施建设
新加坡	《国家人工智能战略》 《数字连接蓝图》	• 到 2030 年，在高价值关键领域成为全球人工智能部署与解决方案创新的领跑者 • 确保新加坡的数字基础设施具备世界一流的韧性和安全性

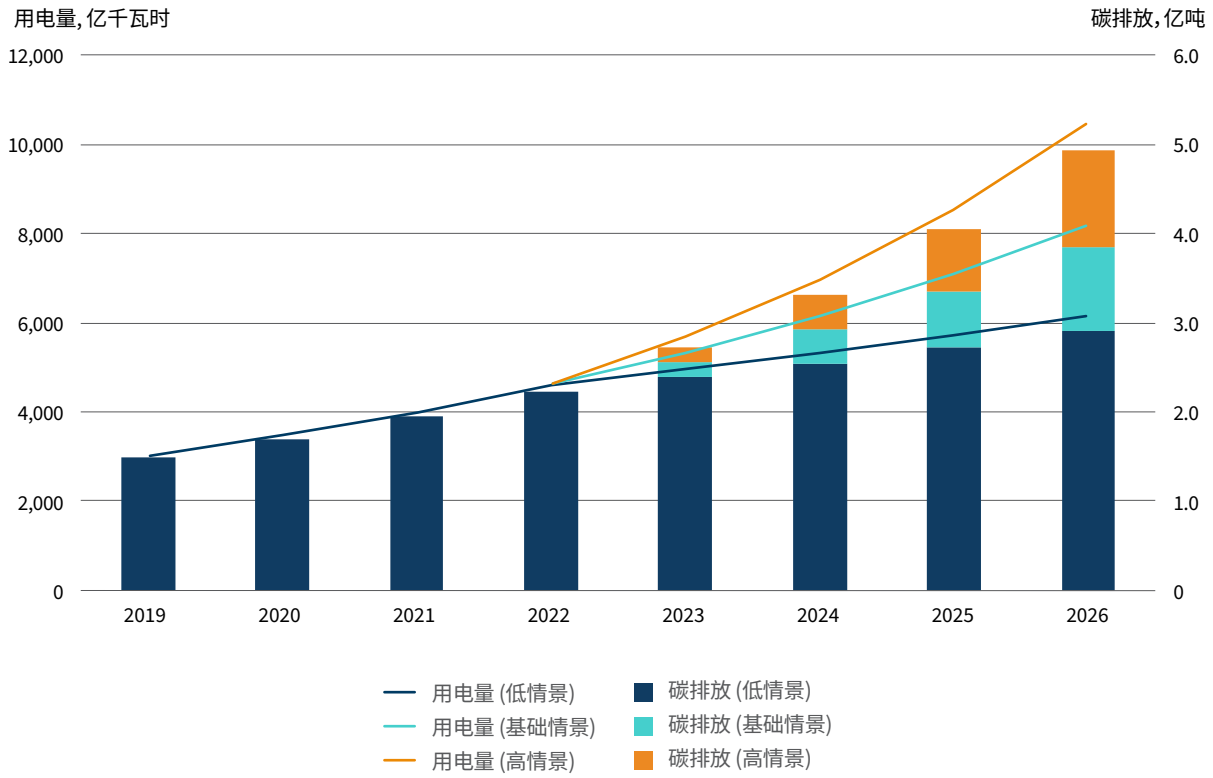
来源：落基山研究所整理

算力生产，或者说数据中心的运行伴随着大量能源的消耗，算力的指数级增长也将带来数据中心用能的剧增，其中最主要的能源消耗来自于电力。全球发电量中超过 60% 来自煤炭、天然气等化石燃料[6]，意味着如果不改变现有发电结构，算力用电的不断增长也将带来更多的碳排放。据国际能源署估算，2022 年全球数据中心用电量约 4,600 亿千瓦时，占全球用电量的 1.7% 左右，折算碳排放约 2.2 亿吨[v]；预计在 2022 到 2026 年期间，取决于数据中心的部署速度和能效提高幅度，以及人工智能、区块链等技术发展速度，数据中心用电量年均增速将达到 8–23%，即 2026 年用电量可能达到 6,200–10,500 亿千瓦时[7]，对应碳排放约 2.9–4.9 亿吨。展望 2030 年，根据多家半导体研究和资讯公司（如 Semianalysis[8]、TechInsights[9]）和金融机构（如高盛[10]）预测，全球数据中心年用电量将进一步上升到 7,500– 23,000 亿千瓦时，对应年碳排放约 3.4–10.4 亿吨。

iv　ICT(Information and communication technology)指信息通信技术。

v　根据数据中心年用电量*当年的全球平均电力排放因子计算，2019-2023全球电力排放因子数据来源于EMBER，2024–2030年的排放因子按照趋势外推得到，https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/ 。

图表 2　全球数据中心用电量和对应碳排放趋势

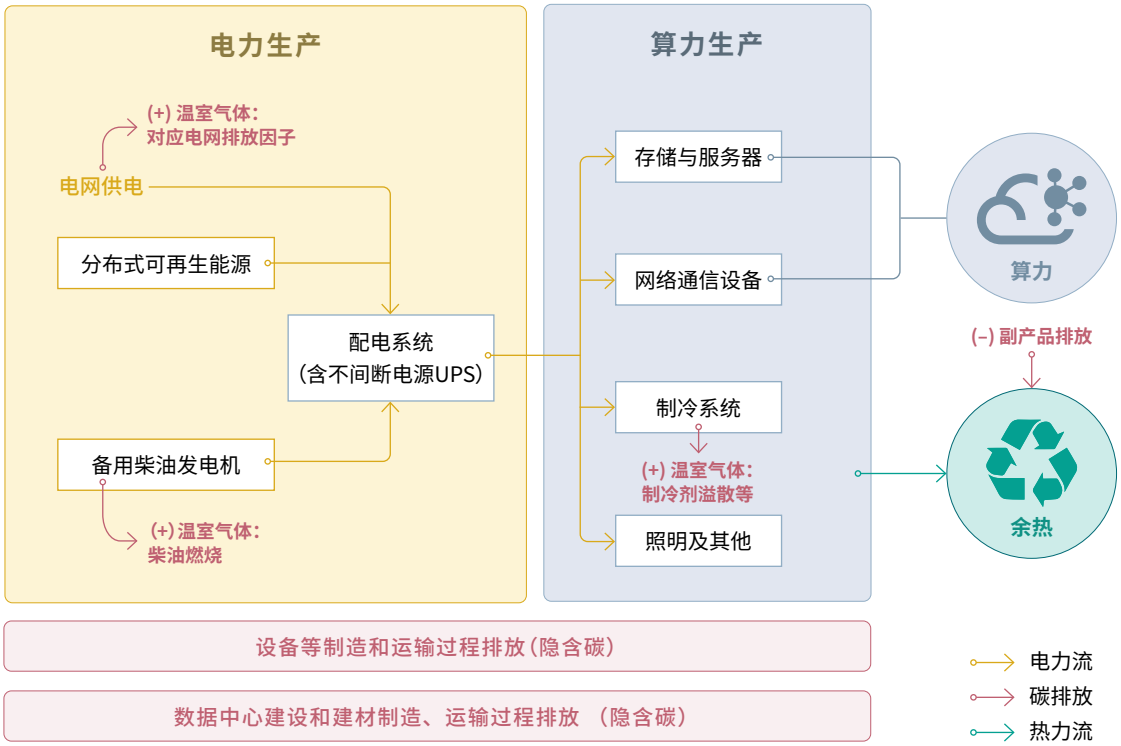


来源：国际能源署 IEA，能源智库 EMBER，落基山研究所

除了向电网采购电力所带来的间接排放以外，数据中心运行过程中的温室气体排放来源还包括备用柴油发电、制冷剂溢散等环节（图表 3）。数据中心对供电可靠性要求极高，目前尚没有成熟的低零碳备用电源解决方案，因此会配备柴油发电机作为备用电源。柴油发电机发电的平均排放因子约为 0.762 $kgCO_2/kWh$[vi]，为 2023 年全球电网排放因子（约 0.482 $kgCO_2/kWh$）的 1.6 倍左右。数据中心中柴油发电机排放总量取决于其使用频次。此外，数据中心制冷剂逸散也会导致部分温室气体排放，排放总量取决于制冷剂的溢散率。以数据中心制冷系统常用制冷剂 R410a 和 R134a 为例，其在 100 年的时间框架内，对大气温室效应的贡献分别相当于相同质量二氧化碳的 1,924 倍和 1,300 倍 [11]。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）公布的默认值，中大型商用空调所需填充制冷剂在 50-2,000kg 之间，年溢散率 10%–30%[12]。**此外，从全生命周期角度来看，若考虑算力生产使用的设备、所在数据中心建设过程的隐含碳排放等，算力的碳足迹会进一步上升。**

vi 根据 GHG Protocol，柴油燃烧的二氧化碳排放因子是 74100 $kgCO_2/TJ$；进一步假设发电效率 35%，计算得到柴油发电排放因子。

图表 3　　算力生产流程图及碳排放来源



来源：落基山研究所

1.2 实现算碳解耦是达成数智化转型和低碳转型双赢的必经之路

在碳中和这一全球共识的背景下，多个国家（地区）亦陆续提出了数据中心低碳发展的相关政策目标。截止到 2024 年 8 月，全球已有 147 个国家做出了碳中和承诺以应对气候变化、实现可持续发展，这覆盖了全球约 93% 的 GDP、89% 的人口和 88% 的温室气体排放 [13]。世界各国政府在将算力发展视为重要战略的同时，也认识到了相关的能源消费与碳排放的问题，并颁布了一系列配套政策，要求数据中心进行节能降耗和低碳转型（图表 4）。例如，基于《数据中心优化倡议》等一系列政策，美国正在通过改造或关停老旧低效的数据中心、提升服务器利用率及设施可用性等措施降低数据中心的能耗；欧盟提出了数据中心行业的降碳目标，并要求数据中心对电能利用效率（PUE）、基础设施效率（DCiE）[vii] 等指标进行报告，加速构建数据中心节能体系架构、推广数据中心实践指南，力求确保数据中心在 2030 年之前达到气候中性的目标。在双碳目标指引下，我国正在多措并举推动数据中心绿色低碳发展，相继发布《深入实施“东数西算”工程 加快构建全国一体化算力网的实施意见》、《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》、《数字化绿色化协同转型发展实施指南》等政策，不断完善数据中心建设布局，严格要求新建项目能效水平和推进存量项目节能降碳改造，并提出到 2025 年，新建及改扩建大型和超大型数据中心 PUE 降至 1.25 以内，即在 2023 年全国数据中心平均水平 1.48[14] 的基础上下降约 16%，同时还须优化数据中心新能源供给方式，促进算力电力协同规划布局。

vii　数据中心电能利用效率（Power Usage Effectiveness，PUE）指数据中心总耗电量与数据中心IT设备耗电量的比值，PUE数值越接近1，表明用于IT设备的电能占比越高，制冷、供配电等非IT设备耗能占比越低。数据中心基础设施效率（Data Center Infrastructure Efficiency, DCiE）是PUE的倒数。

图表 4　部分国家（经济体）数据中心绿色低碳发展关键政策一览

国家（经济体）	关键政策、战略、计划	主要内容
美国	《数据中心优化倡议》(2016版) 《数据中心优化倡议》(2019版)	• 《数据中心优化倡议》2016版要求新建数据中心PUE低于1.4，老旧改造数据中心PUE低于1.5 • 但2019年更新版中已经删除了对PUE的要求，新增对数据中心安装能源计量设备、提高服务器虚拟化率、提高服务器的利用率、报告以小时为单位的设施可用性等方面的要求
中国	《深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》 《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》 《数字化绿色化协同转型发展实施指南》	• 到2025年底，新建及改扩建大型和超大型数据中心PUE降至1.25以内，国家枢纽节点数据中心PUE不得高于1.2 • 到2025年底，算力电力双向协同机制初步形成，国家枢纽节点新建数据中心绿电占比超过80% • 推动绿色低碳数字基础设施建设，推进低效设施节能降碳改造，“老旧小散”设施整合改造 • 统筹数据中心发展需求和新能源资源禀赋，开展算力、电力基础设施协同布局规划，提升算力与电力协同运行水平
欧盟	《欧洲绿色协议》 《欧洲的气候中和数据中心公约》 《能源效率指令》	• 最晚到2030 年实现数据中心气候中性 • 到2030年数据中心能源效率提升至少30%，且要求新建设施必须达到严格能效标准
日本	《绿色增长战略》	• 到2030年所有新建数据中心节能30%，并要求数据中心使用部分可再生能源电力；到2040年实现半导体和通信行业的碳中和目标
德国	《能源效率法案》	• 根据数据中心建成运营时间不同，要求PUE不得高于1.2–1.5，可再生能源使用比例不得少于10%–20% • 从2025年起新建的数据中心余热回收率达到30%
新加坡	《绿色数据中心路线图》	• 提出提高冷却设备效率、IT设备温湿度耐受能力、数据中心的资源调度和负荷分配集成优化能力等建议

来源：落基山研究所整理

全球数据中心市场的领先企业也陆续提出了企业自身的碳中和目标，使得解耦算力增长与碳排放上升呈现了政府和企业双轮驱动的趋势。截至 2024 年 11 月，全球超过 6,000 家组织机构已根据科学碳目标倡议（SBTi）的要求设定或承诺设定与 1.5°C温控目标一致的减排目标，其中 420 家属于软件服务业，在所有行业中排名第三，占比 6.8%[15]。全球五百强企业中，互联网科技企业和数据中心服务商的碳中和目标大多设定在 2030 年及之前，早于多数企业所设定的 2050 年目标。鉴于算力市场相关企业碳排放源涉及上下游设备生产和运输、员工出行等价值链相关排放[16]，目前国内外已有多个领军企业针对价值链层面设定了减排目标并取得了初步成果（图表 5）。以谷歌、微软、荷兰支付公司 Adyen 和德国电子商务公司 Zalando 为代表的全球互联网公司已经相继实现自身运营碳中和，并向“全天候零碳能源”（24/7 CFE）[viii] 供应目标努力。中国数据中心和云服务企业中，已有至少 12 家提出了自身运营以及价值链相关的碳中和目标，其中，腾讯和阿里巴巴云计算业务率先宣布将不晚于 2030 年实现自身运营及价值链碳中和。

viii 根据24/7 全天候零碳能源（24/7 CFE）契约定义，24/7 CFE指所有地点每天每个小时的每千瓦时用电量都由零碳电力供应，https://www.un.org/en/energy-compacts/page/compact-247-carbon-free-energy。

图表 5　全球部分数据中心相关企业碳中和目标

企业类型	企业	目标设定及路线图		
		自身运营层面	价值链层面	数据中心具体目标
数据中心运营商	Equinix	• 到2030年，实现 100%可再生能源利用 • 到2030年，范围一和范围二[ix]实现气候中和	• 到2030年，燃料和能源相关活动产生的范围三温室气体绝对排放量较2019年减少 50% • 到2025年，让66%的供应商完成科学碳目标（SBT）的设定	• 到2030年欧洲数据中心实现碳中和 • 通过发行绿色债券获取资金，并将全部净收益用于支持绿色数据中心、能效项目和购电协议
	秦淮数据	• 到2050年，运营范围温室气体排放量较2022年下降 90%	• 到2050年，价值链范围温室气体排放量较2022年下降90%	• 平均PUE长期保持1.21或更低水平 • 到2030年，集团国内新一代超大规模数据中心，将100%采用可再生能源 • 到2040年，全球自有数据中心算力园区100%使用绿色能源
	万国数据	• 到2030年实现碳中和及100%使用可再生能源	• 公开资料有限	• 2030年数据中心的平均PUE达到1.20
	中国移动	• 到2025年，单位电信业务总量综合能耗下降率较2020年不低于20% • 到2025年，单位电信业务总量温室气体排放下降率较2020年不低于20%	• 公开资料有限	• 自建新大型、超大型数据中心年均设计PUE控制在1.3以下，严寒与寒冷地区进一步控制在1.25以下
云服务提供商	Amazon	• 2023年全球运营所使用的电能实现100%可再生能源匹配 • 2040年实现净零碳排放	• 公开资料有限	• 2023年全球数据中心运营所使用的电能实现100%可再生能源匹配
	Google	• 2017 年全球运营（包括数据中心和办公室）实现100%的可再生能源	• 到2030年在所有业务和价值链中实现净零排放（尽可能通过减少并移除排放实现目标） • 到2030年，将范围一、范围二和范围三的综合绝对排放量较2019年减少50%	• 到2030年，所有数据中心和办公园区均采用全天候零碳能源运营
	Microsoft	• 到2025年实现100%采用可再生能源 • 到2030年实现碳负排放 • 到2050年，从大气环境中消除自1975年公司成立以来的碳排放量总和，其中包括直接排放和因用电产生的间接碳排放	• 到2030年范围三排放量相较于2020年减少50%以上	• 到2030年，在100%的时间里，实现100%的电力消耗与零碳能源相匹配
	阿里巴巴	• 不晚于2030年实现自身运营碳中和	• 不晚于2030年，阿里巴巴协同上下游价值链实现碳排放强度比2020年降低50% • 云计算作为数字化基础设施，在同阿里巴巴一起实现范围一和范围二碳中和的基础上，率先实现范围三的碳中和，成为绿色云	• 保持自有数据中心年均PUE不超过1.3
	腾讯	• 不晚于2030年，实现100%绿色电力	• 不晚于2030年，实现自身运营及供应链的全面碳中和	• 自建数据中心平均PUE不超过1.35

来源：绿色和平[17]，各公司官网，落基山研究所整理

ix　根据《温室气体核算体系：企业价值链（范围三）核算和报告标准》的定义，企业温室气体排放可以被分为范围一、范围二和范围三。范围一报告企业拥有或控制的运营产生的排放。范围二报告企业消耗的购买或收购的电力、蒸汽、供热或供冷而产生的排放。范围三报告企业价值链上发生的所有间接排放（范围二中未包括的），包括上游和下游的排放。对应表中，范围一和范围二指企业自身运营层面的直接或间接温室气体排放，范围三指价值链层面的间接温室气体排放。

若算力发展可以打破由传统化石能源带来的碳排放约束、实现规模化增长，由算力驱动的数智化转型将极大地赋能各行各业，通过与各种降碳技术结合，与低碳转型产生协同效应。数智技术是实现碳中和目标的助推器，可以和多种降碳技术结合、融入产业应用场景，从而显著提升生产和服务效率，并推动生产方式和消费模式向绿色、节能、循环的方向发展[18]。以电力行业为例，在电力生产端，数智技术的应用可显著提高波动性新能源的预测精度，优化电力市场交易策略、提高收益率，促进新能源资产的可持续投资；在电力输配端，数智技术在电网一二次设备、发电机组和调度管理系统的广泛应用可提高电力调度的预判、预控能力，利用无人机、机器人等数智手段进行设备巡检也会极大提高电网运维管理的效率；在电力消费端，数智技术可对能源供给和消耗进行全方位实时检测，辅助企业和园区开展能效分析和生产环节优化等。

图表 6　　实现碳中和的创新科技体系

来源：落基山研究所 & 百度智能云[19]

2. 全球数据中心算碳解耦的系统性挑战

2.1 规划建设难以协调，基础设施落后于算力发展

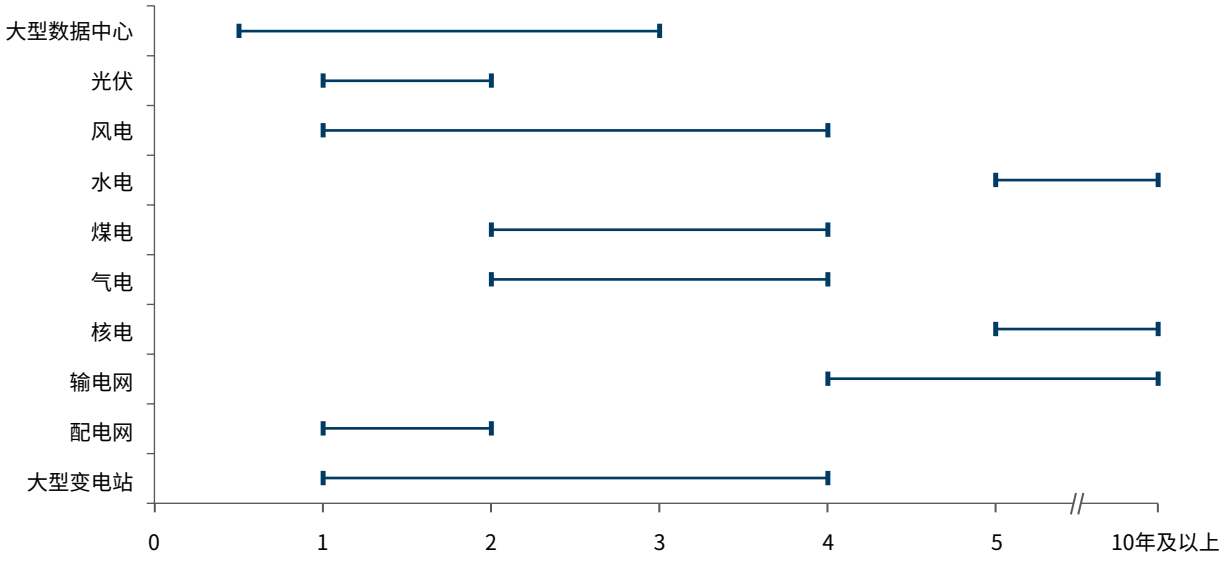
随着生成式人工智能的发展，企业的算力投资逐步从通用算力转向智能算力，算力需求呈现爆发式增长。相较于传统数据中心提供通用算力，智算中心提供的智能算力在硬件层面大规模使用 GPU、FGPA、ASIC 等 AI 芯片替代通用的 CPU 芯片。标配的超微 8 卡 GPU 智算服务器设计功能为 3,000 瓦，是通用 X86 CPU 服务器设计功率 350 瓦的 8–9 倍。据谷歌和美国加州大学伯克利分校研究，在人工智能训推任务等需求推动下，提供智能算力带来的能耗将明显增加：

- 在训练阶段，假设数据中心 PUE 为 1.1，在 10,000 张英伟达 V100 GPU 上训练 OpenAI GPT-3 模型大约需要 14.8 天，总能耗将达到 128.7 万千瓦时。GPT4.0 模型有参数 1.8 万亿，共使用 2.4 万台 A100 GPU 服务器，训练时间 90–100 天，模型训练耗电量更大。

- 在推理阶段，耗电量将进一步提高。假设 ChatGPT 每天接受 1.95 亿次需求，则其每日运行所需电量将达到 56 万千瓦时，对应年用电量约为 21 万名中国居民的全年生活用电量 。

数据中心智算化趋势带来用电需求的巨幅增长，加剧了全球电力短缺，也面临自身可持续规模化发展的瓶颈。据世邦魏理仕（CBRE）发布的《2024 全球数据中心趋势》报告，全球持续的电力短缺问题显著制约了数据中心市场规模增长，北美、欧洲、拉丁美洲和亚太地区的数据中心运营商都不得不将获取电力作为首要关注 。电力基础设施规划周期长、建设工程点多面广，输配电网规划建设节奏往往落后于数据中心，大量数据中心项目密集并网容易导致电网接入资源紧张（图表 7），突显由局部地区短时间新增的数据中心给电力保供带来的压力。

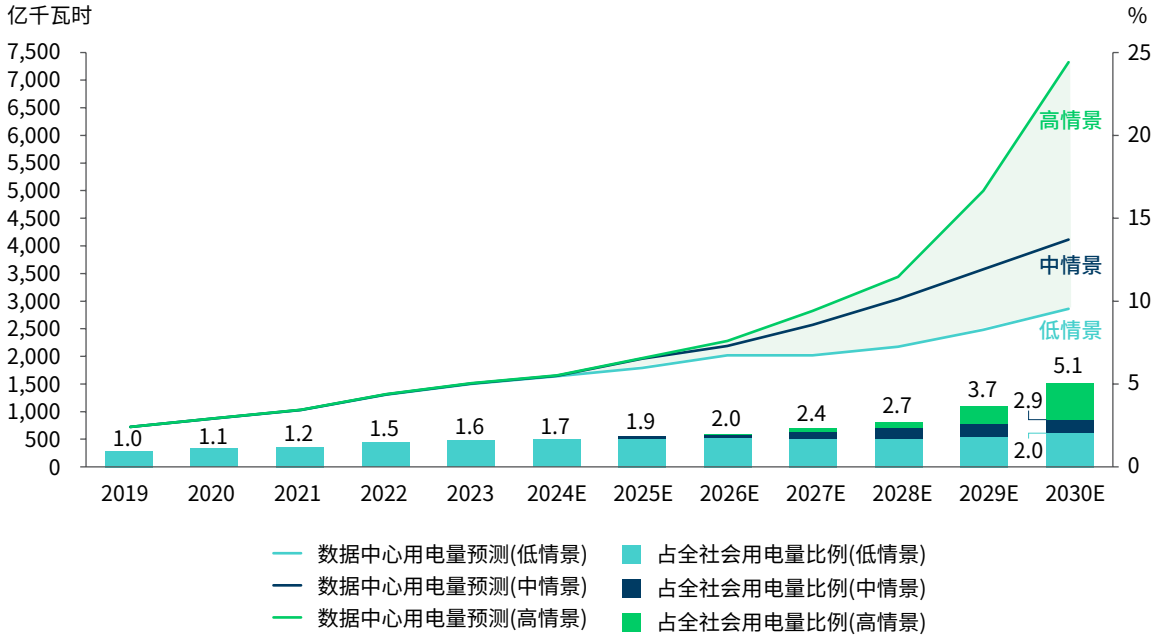
图表 7　　数据中心、各类型发电机组、输配电网规划建设周期对比



来源：国际能源署 IEA[20]，美国能源署 EIA[21]，落基山研究所

中国数据中心用电量也呈现加速上涨趋势，预计从 2023 年到 2030 年，其在全社会用电量中的占比可能从 1.6% 增长到 5% 左右。根据中国信通院测算，截至 2023 年底，我国数据中心总耗电量达到 1,500 亿千瓦时，同比增长 15.4%，占我国全社会用电量的 1.6%，对应碳排放总量约为 0.84 亿吨[22]；到 2030 年，数据中心的用电量在低、中、高三种不同的增长假设下，分别将超过 3,000 亿、4,000 亿和 7,000 亿千瓦时[23]，相比 2023 年用电量翻 2–5 倍[x]。假设我国全社会用电量在 2023-2030 年间保持 6.7% 的年增速，预计到 2030 年中国数据中心用电量占比将增加到 2.0%–5.1%。

图表 8　中国数据中心用电需求预测，2019–2030 年



注：假设未来七年全社会用电量年均增长率为 6.7%。

来源：中国信息通信研究院[24]，中国电力企业联合会[25]，落基山研究所

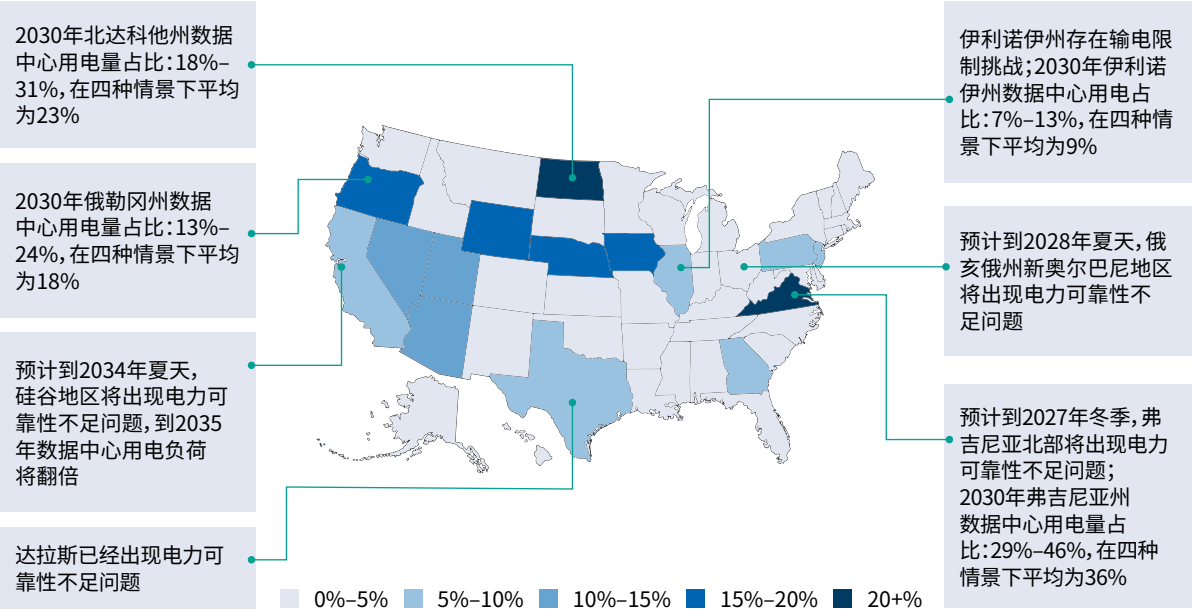
同时，数据中心呈现大型化和区域集聚化趋势，进一步加剧了对局部地区电网供电稳定性的挑战。随着技术和商业模式的发展，全球数据中心业务形态已经从机柜租赁转变为算力租赁，要求更高效、集约地部署算力，推动了全球大型数据中心集约建设和微小数据中心的转型淘汰。根据市场研究机构 Synergy Research Group 数据，截至 2023 年底，全球大型数据中心数量增加到 992 个，并在 2024 年初突破千个大关，相比 2018 年底数量增长一倍，预计未来四年大型数据中心数量将再翻一番[26]。大型化和集聚化趋势导致单点用电负荷显著增长，容易造成所在配电网局部过载、上级输电线路阻塞等影响供电稳定性和电能质量等问题。以美国为例，美国电力科学研究院 EPRI 预计美国数据中心占全社会用电量比例将从 2023 年的 4% 增长到 2030 年的 4.6%–9.1%[xi]（根据不同情景），其中 80% 的数据中心用电量将集中在全美约 30% 的州中[27]，道明证券（TD Securities）测算得克萨斯州达拉斯市、弗吉尼亚北部、俄亥俄州新奥尔巴尼市、加州硅谷等数据中心集中区域会相继发生电力系统灵活性和可靠性资源不足的问题[28]。

---

x　目前数据中心在官方用电量统计中并未单独列项，因此其现状及未来预估用电量数据均为各家机构估算得到。不同机构采用的统计口径和估算方法存在差异，但对数据中心用电量未来保持增长基本存在共识。

xi　EPRI 的报告分析了美国数据中心在四种情景下的未来能耗情况。在低增长情景中，数据中心用电量将以每年 3.7% 的速度增长，到 2030 年美国数据中心用电量占美国总用电量达到 4.6%。在中等增长情景中，预计数据中心用电量年增长率为 5%，到 2030 年数据中心用电量占总用电量的 5%。高增长情景中，数据中心用电量年增长率为 10%、15%，到 2030 年数据中心将消耗美国总用电量的 6.8% 至 9.1%。

图表 9　美国各州数据中心 2030 年用电量占比预估及局部地区潜在电力系统挑战举例



注：各州 2030 年数据中心用电占比数据为 EPRI 报告中四种情景数据的平均值。

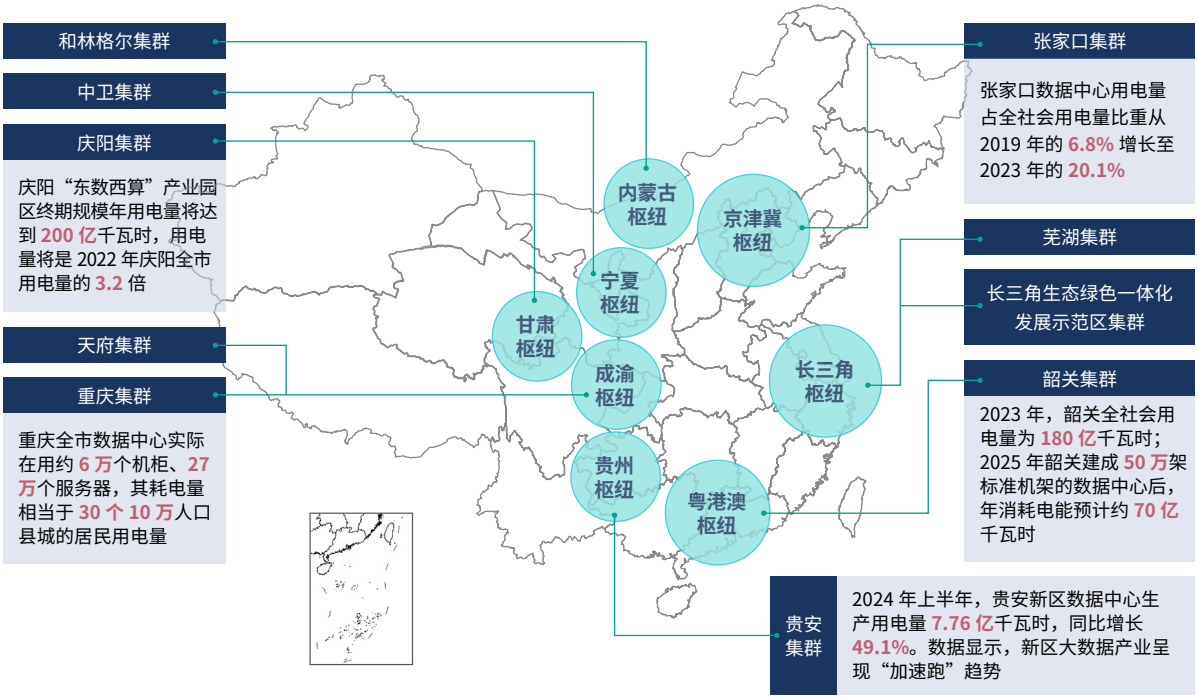
来源：TD Securities[29]，数据中心咨询公司 Data center dynamics[30]，EPRI[31]，落基山研究所

在我国，算力发展带来的用电需求将进一步向枢纽集群城市聚拢。2021 年发布的《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》[32] 对全国算力布局进行了顶层设计，提出了八大国家枢纽节点 [xii] 建设布局，后续确定对应的十大集群 [xiii]；2023 年国家发展改革委等部门联合印发的《深入实施“东数西算”工程 加快构建全国一体化算力网的实施意见》进一步强调，国家枢纽节点外原则上不得新建各类大型及超大型数据中心，目标到 2025 年底，国家枢纽节点地区各类新增算力占全国新增算力的 60% 以上 [33]。在国家枢纽节点建设和承接周边算力需求溢出的推动下，各个集群耗电量出现明显增长，张家口数据中心用电量占全市用电量比重已经从 2019 年的 6.8% 增长至 2023 年的 20.1%，庆阳“东数西算”产业园区终期规模年用电量预计将达到 2022 年全市用电量的 3.2 倍 [34]，区域电网企业增容和配套电源建设压力进一步增加。

xii　八大枢纽指京津冀枢纽、长三角枢纽、粤港澳大湾区枢纽、成渝枢纽、内蒙古枢纽、贵州枢纽、甘肃枢纽、宁夏枢纽。

xiii　十大集群指中卫集群、天府集群、重庆集群、贵安集群、庆阳集群、和林格尔集群、张家口集群、芜湖集群、韶关集群、长三角生态绿色一体化发展示范区集群。

图表 10　“东数西算”工程规划的八大枢纽和十大集群数据中心用电情况



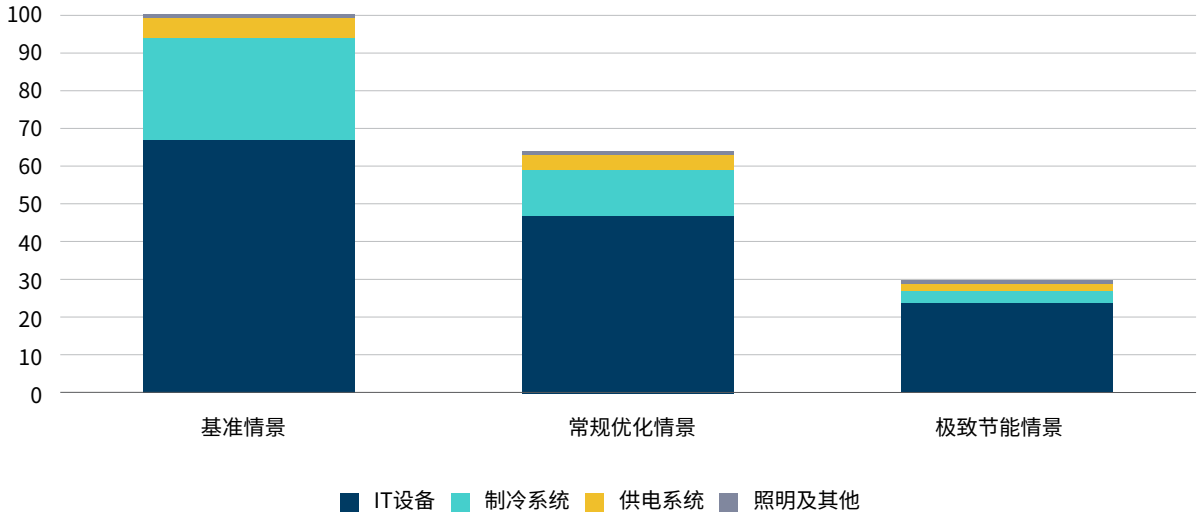
来源：国家发展改革委[35]，公开资料[xiv]，落基山研究所

2.2 多环节能效亟待提升，评估与建设标准缺乏指引

能效提升是降低数据中心用能的关键手段之一，数据中心的 IT 设备、制冷系统、供配电系统均有能效提升的巨大潜力。2023 年我国数据中心平均 PUE 为 1.48，IT 设备能耗约占数据中心总能耗的 67%，制冷系统约占 27%，供配电系统约占 5%，照明及其他约占 1%[36]。数据中心的节能技术可以分为 IT 设备节能和辅助设备节能两个部分，这些技术共同作用于整体能效提高和能源消耗量的减少。基于数据中心能效优化的实际应用和最新技术进展，图表 6 展示了数据中心能效提升的巨大潜力。在常规优化情景下，通过采用如虚拟化技术和储存设备升级等 IT 设备能效优化措施，数据中心能耗可减少约 20%；通过采用如内部气流优化等冷却系统优化手段，数据中心能耗可进一步减少约 15%，使数据中心整体能耗有望下降约 35%。在极致节能情景下，数据中心 IT 设备与辅助设备均采用最先进的能效技术，总体能耗有可能下降至 70%。

xiv　公开资料来源包括国网冀北电力有限公司经济技术研究院、韶关头条公众号、国网庆阳供电公司公众号、智慧重庆公众号、贵州贵安新区管理委员会公众号。

图表 11　　数据中心能效提升潜力



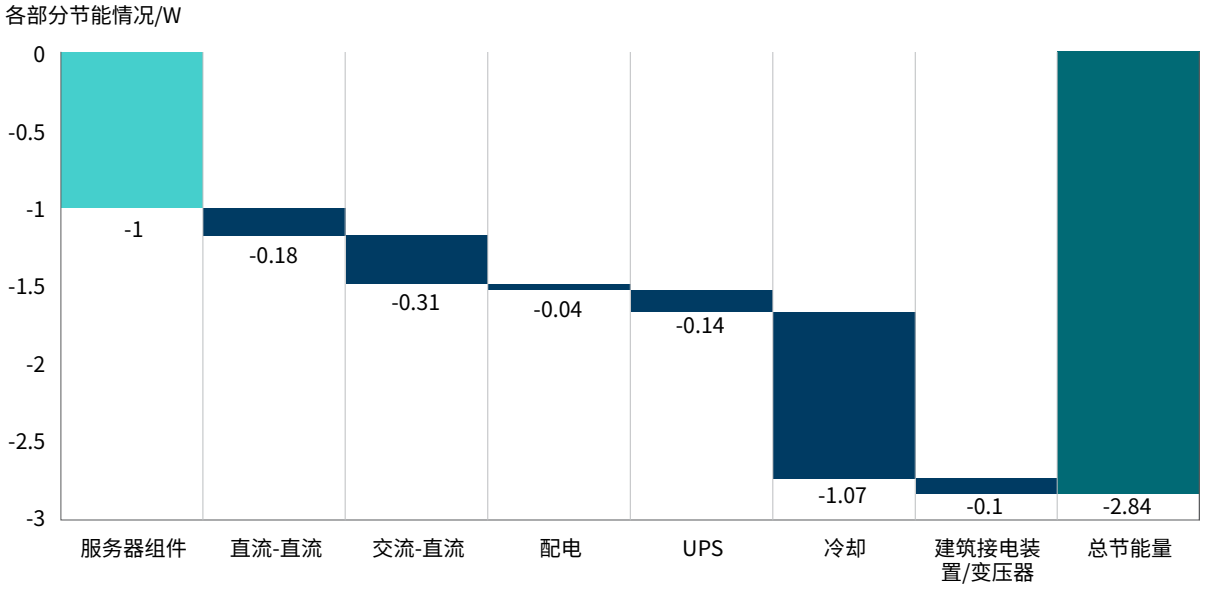
注：基准情景下数据中心的总能耗设定为 100。
来源：广西大学 [37]，落基山研究所

既有数据中心的能效提升问题尤为迫切。中小型数据中心建设时间较早，PUE 普遍较高，有的超过 1.8 甚至在 2.0 以上 。据测算，2023 年我国中小型数据中心机架约 110 万架，年度总耗电量约 256 亿千瓦时，占数据中心年度总耗电量的 17%[xv]。大型数据中心和超大型数据中心得益于规模效应，能更高效地分配和使用电力、冷却和空间等资源，整体运行能效相对较高。截至 2019 年底，全国超大型数据中心平均 PUE 已降至 1.46。但超大型数据中心规模庞大，能耗总量依然居于高位。低能效数据中心亟需进行节能改造、有效降低能源消耗和运营成本，才能延长使用寿命以继续支持人工智能等新技术的快速发展。国家政策已经对存量数据中心的能效推升提出了明确要求。国家发展改革委等部门印发的《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》中明确提出加快推进低效数据中心节能降碳改造和“老旧小散”数据中心整合改造，结合现行标准要求，逐步淘汰不符合现行强制性国家标准要求的落后低效产品设备。

数据中心节能技术已经相对成熟，但目前推广节能技术存在主要障碍，即数据中心建设标准中的能效评估指标和相应能效措施尚不充分、需要完善。以 PUE 作为主要评估指标具有较大局限性。PUE 为比值指标，它不能反映能耗总量的变化，无法全面衡量数据中心的能效水平。仅依靠 PUE 值评判，易导致仅关注数据中心辅助设备（制冷、配电、照明等）的能效变化，而忽视 IT 设备自身的节能潜力。例如，IT 设备利用率通常比较低，如服务器利用率仅在 5%–15%，即便在空闲状态下，服务器也会以最大功率的 30%-40% 运行 [38]，导致大量电力浪费，这一问题无法在 PUE 中体现出来。例如，在某项目中，数据中心通过虚拟化技术将 IT 设备运行功率从 100kW 降低到 80kW，总耗电功率从 143kW 降低到 116kW，相比虚拟化前节省约 27kW，但 PUE 反而从 1.43 升高至 1.45[39]。实际上，IT 设备层面的能效提高会在整个数据中心产生“级联效应”,减少配电和制冷系统的能耗。例如，在一个 PUE 值为 1.9 的数据中心中，服务器层面每节省 1W 能源，整体可节省约 2.84W（图表 12）。

xv　落基山研究所基于工业和信息化部数据测算。

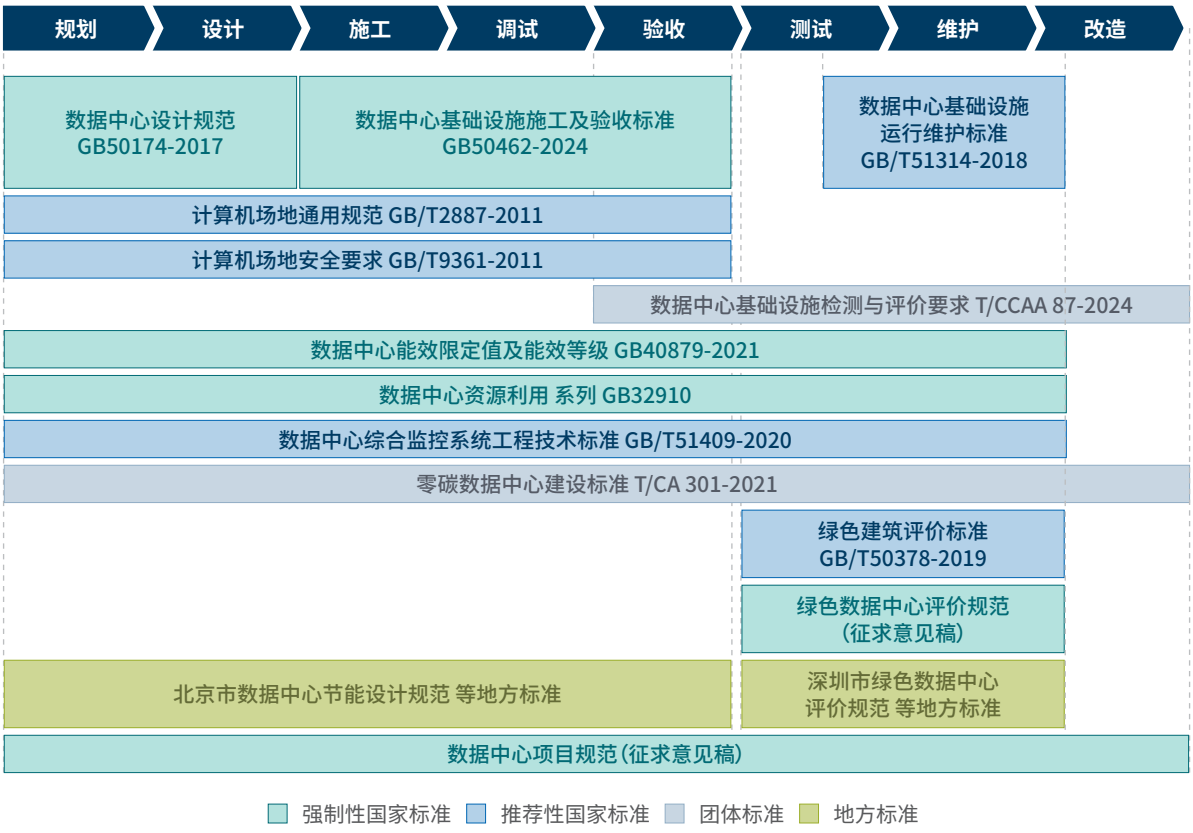
图表 12　IT 设备能效提升带动数据中心整体节能的能效瀑布原理



来源：维谛技术[40]，落基山研究所

另一方面，数据中心的建设与管理标准对能效措施的引导不足。《数据中心设计规范》中引用了《公共建筑节能设计标准》里的围护结构热工设计节能规定，忽略了数据中心与公共建筑在能效要求上的本质区别。公共建筑如办公楼、商场以提供舒适的人居环境为主要目标，而数据中心则主要为 IT 设备服务。IT 设备功率大、发热量高，需要持续地将热量排到室外，因此，数据中心在围护结构的能效要求上，必须考虑其独特的热环境特性，这与公共建筑的能效要求存在显著差异。尽管我国数据中心标准体系已基本覆盖从规划设计、施工验收到维护改造的全生命周期管理（图表 13），但尚未针对不同规模与业务类型的数据中心制定全面的能效引导性指标。虽然部分地方标准在节能减排方面提出了更具体的要求（图表 14），例如设定了数据中心规模对应的 PUE 上限，鼓励使用太阳能、风能等可再生能源，并在制冷设备、供配电系统、给排水系统、余热利用等方面推荐了一些详细的节能技术措施，但这些规定尚未在全国性标准中体现，且缺少节能措施的定量要求。

图表 13　我国现有数据中心标准体系



来源：落基山研究所

图表 14　国家与地方现行数据中心设计标准中节能降碳的要求

设计标准	级别	是否强制	PUE要求	可再生能源要求	碳排放要求	设备能效要求	余热利用要求
数据中心设计规范 GB50174-2017	国家级	强制性	无	无	无	空调和制冷设备的选用应符合运行可靠、经济适用、节能和环保的要求	数据中心空调系统的节能根据地区和气候环境决定是否采用余热回收技术
北京市数据中心节能设计规范 DB11/T 1282-2022	地方级	推荐性	以年能源消费量为标准： ＜1万吨标准煤，PUE≤1.3 1-2万吨，PUE≤1.25 2-3万吨，PUE≤1.2 ＞3万吨，PUE≤1.15 边缘数据中心≤1.6	可再生能源充足区域优先利用可再生能源；数据中心可通过自建分布式可再生能源设施或通过绿色电力交易等方式提高可再生能源利用水平	无	空调和制冷设备能效水平应不低于2级（节能水平）。宜采用高效的制冷设备，如变频空调、EC风机等	数据中心空调系统设计应分别计算自然冷却和余热回收的经济效益，采用经济效益最大的节能设计方案
上海市数据中心建设导则	地方级	推荐性	新建大型数据中心单项目综合 PUE 严格控制不超过1.3；新建边缘数据中心单项目PUE 不应高于1.5	数据中心建筑或园区内宜采用太阳能、风能等可再生能源	无	空调制冷设备应优先选用配置变频、变容量冷却设备，冷却系统能效比应满足 PUE 指标控制的要求	应使用各种创新技术提高制冷效率，包括但不限于外供冷、蓄冷技术、冷热通道密封、盲板密封、余热利用、热泵技术、间接蒸发冷却等

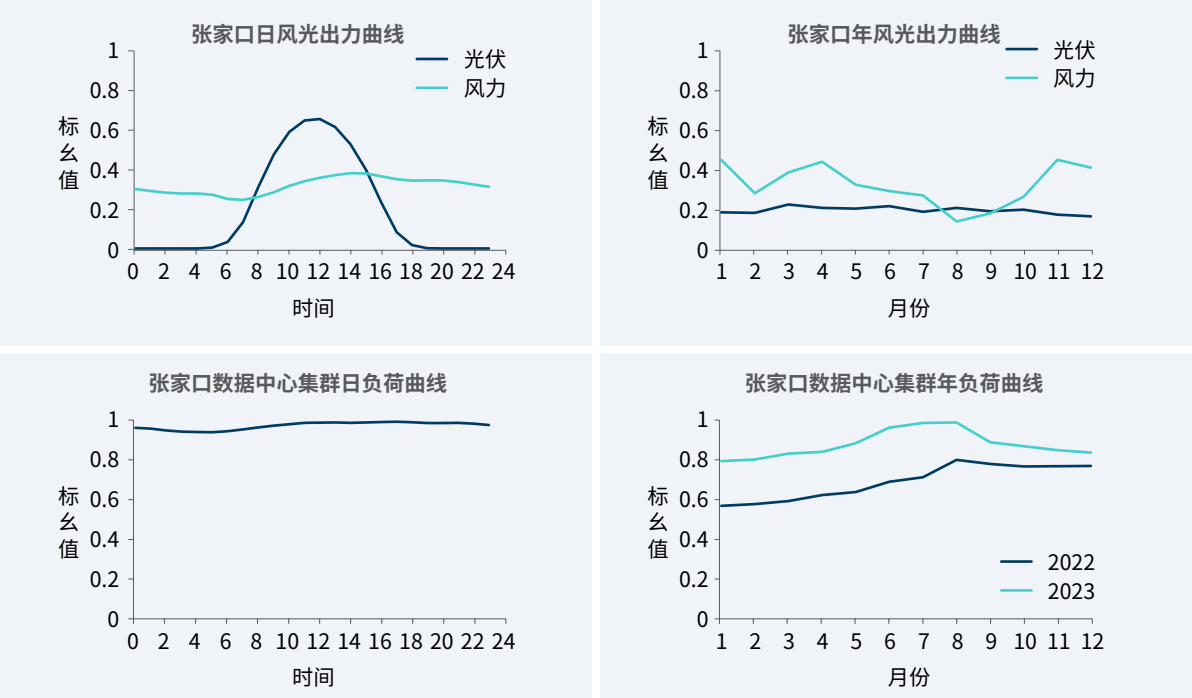
来源：落基山研究所

2.3 算力与绿电时空不匹配，用能低碳化存在显著障碍

在能效提高的基础上，用零碳绿色电力（简称“绿电”，主要包含风电、光伏、水电等）满足算力用能需求是进一步降低碳排放的关键。目前看，我国现有数据中心的负荷分布特性与绿电资源地理分布存在一定的时空不匹配，对数据中心大规模、高比例使用绿电带来了挑战。整体上看，目前全球范围内数据中心绿电使用主要通过采购绿电、绿证等实现，平均绿电使用水平仍然较低。根据 2024 年绿色和平对国内 25 家主要云服务及数据中心企业的调研报告 [xvi]，超过八成企业用电结构中绿电占比在过去两年内暂未突破 10% 或未作公开披露，领先企业最高达到 40% 左右 [41]。自 2017 年，谷歌公司已在年度总量层面实现了全球数据中心的 100% 绿电使用，但是如果约束数据中心负荷和所采购绿电在小时层面和同一电网区域上匹配，此时绿电使用比例实际为大约 64%[42]。无论是通过物理连接，还是实现更细颗粒度的绿电市场交易，都需要进一步考虑算力和绿电的时间和空间匹配性。

从时间匹配性上来看，风电、光伏（简称“新能源”）的发电波动性导致其难以满足数据中心对电力系统“7×24”稳定供应的要求。数据中心用电要求高电源稳定性，用电负荷呈现“日内波动小、夏季负荷大”的特征，然而以风电、光伏为代表的新能源发电则呈现出“日内波动大、季节不确定性强”的特征，晚上用电高峰“日落无光”、夏季常见的“极热无风”的现象严重影响新能源发电能力，导致数据中心用电时间与新能源发电时间存在显著差异。根据图表 15，张家口风光出力曲线与数据中心集群负荷曲线在日内和季节维度均存在一定程度的时间错配问题。作为我国“东数西算”工程规划的十大集群之一，张家口数据中心集群目前投运机柜超 33 万架、服务器超 150 万台，智能算力占比为 38%[43]，略高于我国整体智能算力占比 [44]，具有一定参考价值。智能算力占比不断提高，会进一步加剧数据中心用电负荷的波动性与不确定性，举例而言，对于人工智能训练任务来说，其工作负载随机性强且负载率最高可达 100%，而对于人工智能线上推理任务来说，负载率主要受用户使用影响，往往在用户活动密集的早上九点至夜间十点时间段中响应量更大。2022 年，在国家算力枢纽节点所在省份中，河北、甘肃及宁夏的新能源装机占比就已超过 50%，并仍在不断上升，未来新能源发电与数据中心用电负荷时段性错配、季节性错配将越来越明显。

图表 15　日内和月度张家口风光出力曲线及数据中心集群负荷曲线对比

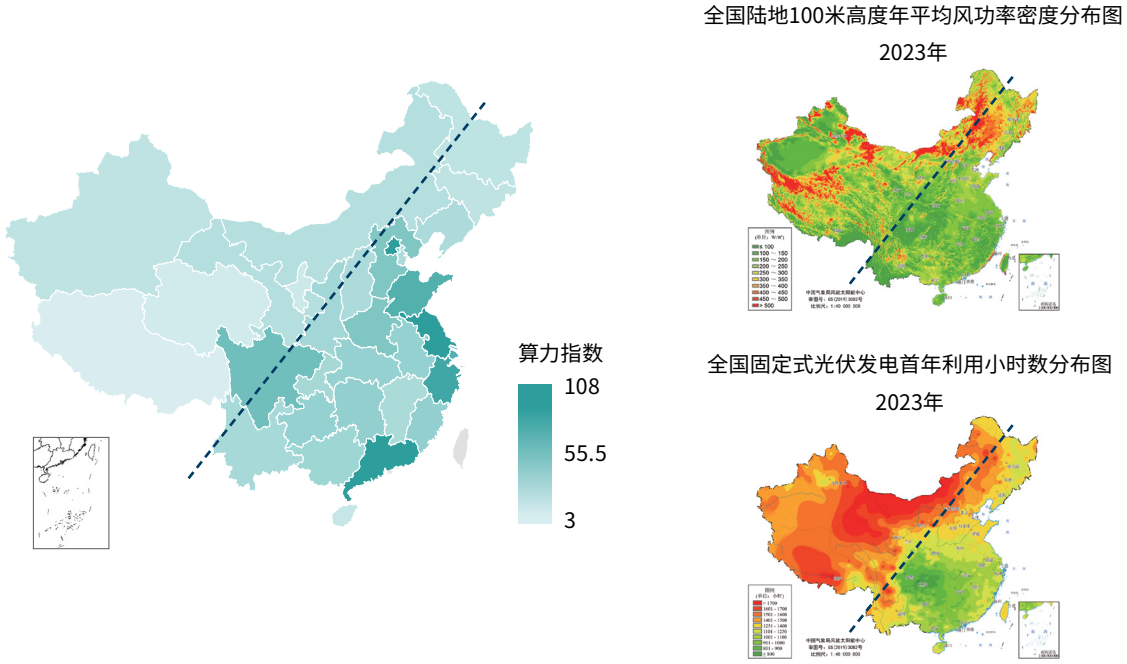


来源：国网冀北电力有限公司经济技术研究院 [45]、美国国家航空航天局 MERRA-2 数据库 [46]、落基山研究所

xvi　入选云服务企业在2023上半年中国公有云IaaS市场份额占比超52%，入选数据中心企业2022年市场份额占比超60%。

从空间上来看，算力需求与绿电资源分布错位，加剧了资源配置挑战。通过中国信息通信研究院发布的算力发展指数分析[47]，我国既有算力布局以需求为导向，主要集中在东部沿海地区，但风、光、水等可再生能源富集在中西部地区，形成了明显的空间资源错配。为应对这一挑战，我国已提出了“东数西算”规划，提出积极推动东部人工智能模型训练推理、机器学习、视频渲染、离线分析、存储备份等高时延业务向西部迁移，推动算力和绿色电力协同建设[48]。这项规划在落实层面仍存在挑战，例如，虽然西部数据中心枢纽集群与新能源大基地选址整体耦合，但由于前期规划协调不足，既有新能源大基地往往已配套了外送计划，新能源发电目前阶段并没有实际输送给当地的数据中心。

图表 16　　中国省份算力发展指数及风光资源分布图



注：中国算力发展指数是用于衡量中国算力发展水平的评价指标，从算力规模、算力产业、算力技术、算力环境和算力应用五个维度选取相关指标建立中国算力发展指数 2.0，详见中国信息通信研究院《中国算力发展指数白皮书（2023 年）》。

来源：中国信息通信研究院[49]、中国水利科学研究院[50]、落基山研究所

2.4 政策与市场保障有待完善，数据中心减碳缺乏推动力

政策和市场机制是数据中心节能降碳的关键保障和重要推动力。2024 年国务院办公厅发布的《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》提出建立能耗双控向碳排放双控全面转型新机制，并在“十五五”时期将碳排放强度降低作为国民经济和社会发展约束性指标。这一规定为数据中心与碳排放解耦提供了总体政策支持，将为数据中心减排带来新的动力。与此同时，数据中心持续节能降碳的政策和市场机制仍需进一步完善。

首先，针对数据中心和数据中心产品（例如算力等）的碳排放披露机制不足，数据中心减碳缺乏来自政策或市场的直接推动力。全球范围内，针对数据中心的可持续性披露正从自愿转向强制要求。例如，欧盟的可持续发展报告指令（Corporate Sustainability Reporting Directive, CSRD）要求数据中心运营方披露能效、碳排放、用水等数据[51]；2023 年，加州发布了美国首个企业气候数据法案（The Climate Corporate Data Accountability Act），要求加州年营收大于 10 亿美元的大型企业从 2025 年起公布范围一和二的碳排放数据，2027 年起公布范围三的碳排放数据。加州众多数据中心运营企业将受此法案影响，测算并公布碳排放数据[52]。我国目前尚没有出台数据中心披露碳排放的相关政策，除广东省碳市场外，数据中心尚未纳入各级碳市场，且目前全国碳市场只考虑范围一排放，数据中心减碳缺少来自市场的压力；在沪、深、北三大交易所上市的公司开展包括碳排放在内的企业 ESG

披露仍属于自愿行为，且仍缺乏统一的规范指引。

其次，数据中心和算力产品尚没有明确的碳核算方法。开发数据中心和算力的碳核算体系，需要解决两方面问题。一方面，需要明确数据中心和算力碳排放的核算边界。数据中心的运营方式较为多样，通常可以分为自有设施、主机托管、公共云服务三种类型。三种类型数据中心的 IT 设备部分与基础设施部分的所有者、运营者和使用者存在不同的组合方式由此带来不同的核算边界（图表 17）。同时，算力对其他行业减排的贡献是否应纳入算力碳核算边界仍未有定论。目前，我国和国际上均未有统一明确的数据中心碳核算方法学，因此如何合理确定数据中心、算力等的碳排放的核算边界范围需要厘清。另一方面，数据中心的碳排放数据收集与报告等工作有待建立。国际上，一项由数字基础设施认证机构 Uptime Institute 针对数据中心运营方的调查显示，由于计算方法学的缺失以及测量设备和能力的不足，大多的数据中心运营方仍未做好碳排放数据报告的准备[53]。同时，我国本土数据库也尚未完全建立，在碳核算中使用国外数据库由于其地域、技术和时间的代表性不足，其结果可能无法真实反映我国各类生产活动的碳足迹情况。例如，瑞士 Ecoinvent 碳足迹数据库中的中国国家电力排放因子比生态环境部 2024 年 4 月最新发布的中国 2021 年电力平均排放因子高 51.2%。使用绿证购买绿电尚未得到普遍国际认可，在碳核算中是否能够抵消也具有不确定性。排放因子与相关能源证书都会极大影响碳核算的结果和效力。

图表 17　不同运营控制类型的数据中心对不同主体的排放范围分配情况[xvii]

数据中心设施运营类型	温室气体排放核算范围	
	IT相关排放	基础设施相关排放
IT运营商自有设施		
IT运营商	2	2
IT运营商采用主机托管		
IT运营商	2	3
托管商	3	2
IT运营商采用公共云服务		
IT运营商	3	3
云服务运营商	2	2
IT运营商采用公共云服务，同时云服务运营商采用主机托管		
IT运营商	3	3
托管商	3	2
云服务运营商	2	3

来源：Uptime Institute，落基山研究所

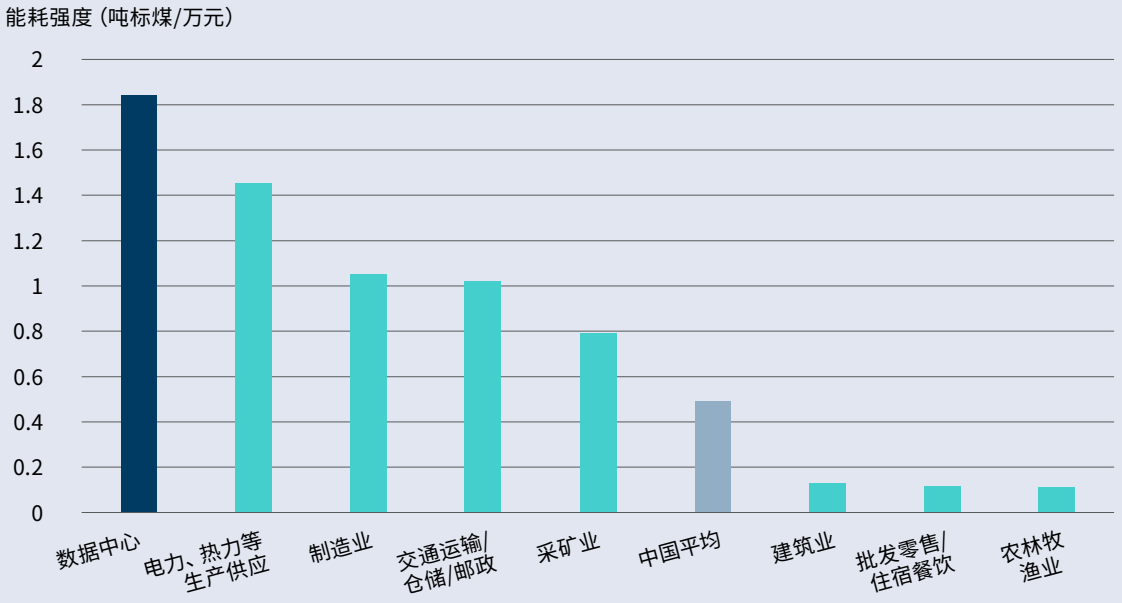
第三，数据中心减碳行动缺少金融支持，数据中心减碳技术未明确纳入绿色债券支持项目目录。新建数据中心的节能投入和既有数据中心能效提升改造均需较大的资金投入。国际上，超过 80% 的数据中心运营方对于高昂的花费感到担忧，特别是老旧数据中心升级成本高昂的问题更加突出[54]。有针对性的金融支持能够有效推动数据中心节能降碳技术应用。在我国，目前支持数据中心深度减排的一些技术成本高昂，推广不易。当前数据中心领域的各类减碳技术尚未被纳入《绿色债券支持的项目目录》[55]等技术目录中，绿色数据中心金融业务仍缺乏明确技术指引。正是考虑到上述问题，我国《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》已经提出积极发展绿色金融和转型金融产品服务，鼓励金融机构按照市场化法治化原则为数据中心节能降碳改造和用能设备更新项目提供资金支持。

xvii IT运营商是需要使用算力或者数据服务的实体（企业、政府部门等）；托管商是提供数据中心空间和基础设施的公司，允许其他公司将其IT设备放置在其数据中心建筑中并提供电力、冷却和安全服务；云服务运营商是提供云计算服务的公司，负责管理底层的云基础设施、虚拟化和网络资源。IT相关排放指IT设备用能造成的碳排放，基础设施相关排放指数据中心制冷、照明、通风等设备用能造成的碳排放。

实例：科学合理的能耗强度计量机制对于数据中心发展至关重要

在能耗双控体系下，地方政府为完成能耗总量和强度的指标，会谨慎分配能耗指标，优先分给能够带动地方经济发展的项目。以当前的测算方法，数据中心的能耗强度明显高于其他行业（图表18），这影响了各地方政府对于开展数据中心项目的积极性。数据中心能耗强度高的问题很大程度上是测算方法失真所致，并不完全符合行业实际。一方面，数据中心的运行除了贡献于数据中心运营产值（即服务器租赁费用）的增加之外，还为运行在其上的各种云计算、大数据、互联网服务等应用类产业贡献了大量运营产值。有研究指出，2023年我国数字经济核心产业增加至超过12万亿元，占GDP比重10%左右[56]，而数据中心作为数字经济的重要支撑，其市场规模估计不及3,000亿元左右，两者存在数量级上的差距。数据中心实际贡献的产值难以计入到数据中心能耗强度的计算之中，造成了所谓的**“行业失真”**。另一方面，由于数字经济的跨地域特性，相关应用类产业并不一定被统计入数据中心所在属地，导致数据中心所在地实际上在被动分摊应用类产业所在地的能耗指标压力，造成了所谓的**“区域失真”**。针对上述问题，应在能耗强度计量机制和测算方法层面优化改进，更好引导数据中心行业绿色发展[57]。

图表 18　各行业能耗强度



数据来源：中国能源统计年鉴 2021，中国统计年鉴 2022，落基山研究所 [xviii]

xviii 数据中心能耗强度根据2020年市场规模以及耗电量计算，由于市场规模通常大于GDP，实际数据中的能耗强度可能更高，其他行业的能耗强度由行业能耗除以行业增加值计算，数据来自统计年鉴。电力按照2020年全国平均火力发电煤耗折算为用标准煤标识的一次能耗，折算系数为305.5 gce/kWh。

3. 数据中心算碳解耦全方位转型路径

3.1 协同六大要素优化数据中心选址布局

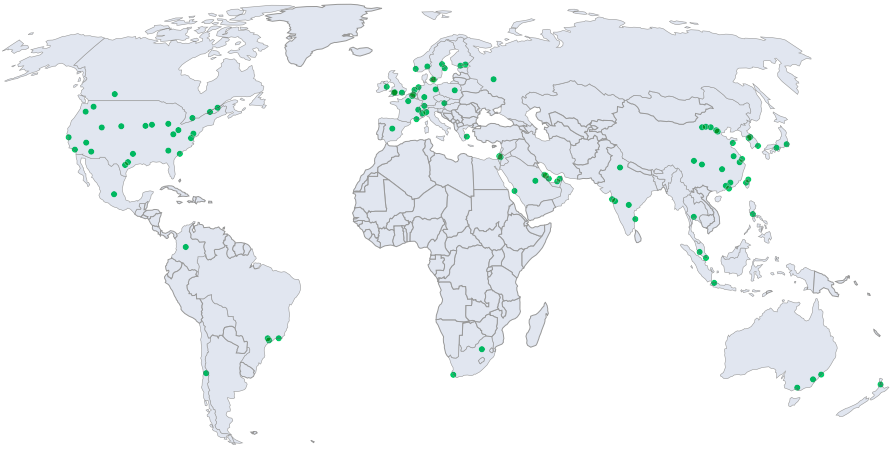
数据中心作为支撑算力发展和数字经济的关键基础设施，其规划与布局对数字经济的高质量发展和区域经济的可持续发展具有重要影响。数据中心的业务需求主要集中在人口和企业密集的经济发达地区，对电力和冷却资源的需求巨大，而这些地区的绿电资源往往相对紧缺。同时，数据中心必须遵守政府的政策法规要求，管理包括自然灾害和电力中断在内的多种风险。因此，合理规划数据中心的布局，对于确保数据中心的稳定运行、降低运营成本至关重要，也是提高能源利用效率、保障数字经济低碳可持续发展的关键之一。

通过全局性、战略性规划，数据中心可以在满足业务需求的同时，优化资源配置、降低成本，并减少碳排放和环境影响，实现绿色高质量发展。具体而言，数据中心规划选址需要统筹考虑算力需求、电力、冷却、热利用、土地、网络这六大关键要素，以确保技术可行性、经济性和节能降碳。

1）算力需求：

数据中心的选址决策受到算力应用场景的直接影响，应用场景对时延的要求决定了数据中心与用户的物理距离。数据中心距离用户越近，提供内容、服务和应用的速度和效率就越高。对于金融交易、自动驾驶、物联网 IoT 等需要低延迟和高运营性能的企业而言，通常使用边缘数据中心来减少时延、提高性能。因此在需求导向下的数据中心选址需要靠近这些商业活动密集的区域，以便为用户提供快速且可靠的数据处理服务，满足用户低时延要求。对人工智能的算力需求更需要进行科学区分推理和训练算力，推理算力通常需要接近用户，而训练算力则不需要。此外，靠近终端用户能一定程度降低带宽成本，降低网络拥堵概率，较短的数据传输距离也能够减少传输过程中的能耗和碳足迹。如图表 19 所示，全球七家最大的云提供商数据中心主要分布在美国、欧洲及中国东部等经济发达、用户算力需求量大地区。2023 年谷歌在都灵新建云区域，以满足意大利经济需求并提供低延迟、连接性和数据主权功能[58]；伦敦作为全球金融中心也拥有高度集中的数据中心，七家最大的云提供商[xix]中有六家在伦敦设立数据中心[59]。对于时延要求不高的应用场景，如非实时数据分析、数据托管或大模型训练，则可以选择相对偏远的地区建设中大型数据中心。如中国贵州、内蒙古、甘肃、宁夏节点内的数据中心集群优先承接后台加工、离线分析、存储备份等非实时算力需求[60]。

图表 19　全球七家最大的云提供商数据中心分布



来源：云网络安全公司 Netskope[61]，落基山研究所

xix　全球七家最大的云提供商为亚马逊、谷歌、IBM、微软、甲骨文、腾讯和阿里巴巴。

2）绿色电力资源：

随着企业对环保和可持续发展的重视程度不断提升，选择数据中心的电力来源成为了企业履行社会责任和推进绿色发展战略的关键环节。数字基础设施提供商 Flexential 对来自不同行业的 350 名董事及以上级别的 IT 决策者进行调查，其中 94% 的受访者所在企业愿意为数据中心或第三方云服务供应商使用零碳能源或购买碳信用支付更多费用 [62]。数据中心的选址规划应当考虑绿色电力的易得性，以降低数据中心的碳足迹和能源成本。为获取绿色电力，数据中心选址时可以考虑以下策略：

- **在具有充足的风、光、水、核电等零碳电源的地区建设数据中心，通过电网获取绿色电力或者通过物理连接直接使用绿色电力。**

  - 当地电网较为清洁情况下，可以选择在当地建设数据中心，与绿电发电方签署购售电合同以获取较低成本的绿色电力。例如，2022年中国首个100%清洁能源可溯源绿色大数据中心在青海建成投运[63]。青海具有丰富的风、光、水等绿电能源，截至2023年底，青海绿电装机占比92.8%、发电量占比84.5%，清洁的电网结合全国最低的新能源上网电价（0.2277 元/kWh）使得青海发展算力优势明显[64]。

  - 在当地具有充足的绿电资源且在政策允许的情况下，数据中心可以通过微电网、源网荷储、绿电直供等方式获取绿色电力。2014年，TEL-Rjukan数据中心于挪威开展建设，利用附近多个水电站为自身配备的两个独立电网提供稳定且低成本的电力，实现100%水电直供数据中心[65]。2024年，美国能源公司Talen Energy位于宾夕法尼亚州的Cumulus数据中心园区被亚马逊AWS收购[66]，该园区拥有4个变电站，总电力容量高达 960 兆瓦，并且由相邻的 Susquehanna核电站直接供电，确保了清洁、可靠的电力供应[67]。

  然而，即使物理上靠近绿电资源，受限于电力系统既有的长距离输送规划等限制，数据中心也可能无法有效获取当地绿色电力。因此相关主体必须在规划早期考虑算力、电力基础设施协同布局，以确保新建绿电项目与新建数据中心的供需匹配。

- **在绿电资源稀缺地区，数据中心可以通过长距离交易获取绿电，以期打破地理位置的限制。**

  这种策略依赖于电网的长距离输送能力，需要通过电力交易以实现数据中心的绿色供电。目前，由于我国省间输电通道不足、输配电网络成本较高等问题，绿电需求方“买不到”和供给方“卖不掉”的现象仍然存在，省间绿电交易壁垒仍有待进一步打通。因此，当本地绿电资源不足时，数据中心选址需要优先考虑跨省跨区绿电交易市场活跃、输电通道较为富余的地区。

在使用绿色电力的同时，数据中心还可采用双路或多路供电以及使用多种清洁能源互补等方式来保障用电的安全和稳定。例如，数据中心托管商 Green Mountain 公司位于挪威雷恩岛的 SVG1 数据中心配置了 3 个独立电网，每个电网由多个水力发电厂进行供电，以此来保障供电安全 [68]：中国甘肃国网云数据中心则利用光伏、风电和水电互补实现了运行中 100% 清洁能源稳定供电 [69]。

3）自然冷源：

自然冷源指的是利用外部自然环境中的低温空气或水来降低数据中心的温度，从而减少甚至消除对传统机械制冷系统的依赖。充分利用自然冷源的策略方向包括：

- **选择寒冷或温和气候区，利用低温的外部空气直接或间接冷却数据中心。**例如贵安数据中心集群部署在贵州贵安新区，属于亚热带湿润温和型气候，年平均温度15°C左右，空气质量好。截止2022年底，贵安投运及在建的数据中心18个，这些数据中心在设计上充分结合贵州自然条件的优势，采用自然冷却技术提高能源效率。具体措施包括直接将外部冷空气引入数据中心冷却IT设备，冷却塔利用自然冷却散热降温而不启用水冷主机等。

- **选择气候干燥的地区，使用蒸发冷却技术。**以乌鲁木齐为例，当地属于典型温带大陆性干燥气候，某数据中心通过采用蒸发冷却冷水机组和乙二醇自由冷技术的新型蒸发冷却空调系统，实现了全年完全自然冷却。这种系统充分利用了室外环境干空气能与冬季自然冷源，显著降低了能耗。在夏季最热时期，该数据中心的蒸发冷却冷水机组能够保持出水温度平均值为14.9°C，而新型蒸发冷却空调系统的COP值达到6.65，与传统机房制冷系统相比，节能率超过了60%[70]。

- **选择靠近自然水源如江河湖泊的地区，采用水冷系统进行冷却。**例如微软将数据中心部署在苏格兰奥克尼群岛海岸附近的海面下，利用常年寒冷的海水为数据中心散热。谷歌的芬兰哈密那数据中心选址在寒冷的地区，100% 使用海水对相关设备进行散热。全球首个商用海底数据中心项目位于海南省陵水黎族自治县。相较于同等规模的陆地传统数据中心，100个海底数据舱每年能节省用电总量1.22亿千瓦时、节省建设用地面积6.8万平方米、节省淡水10.5万吨[71]。

图表 20　数据中心自然冷源利用示意图

直接自然风冷却

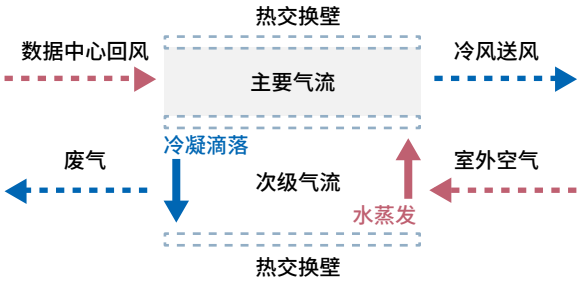
根据室外冷空气的温度高低，将室外冷空气直接引入数据中心完全或部分替代空调送风

· 对空气质量要求高
· 能耗低，节能率高

间接蒸发冷却

利用直接蒸发冷却后的空气，通过换热器冷却回风

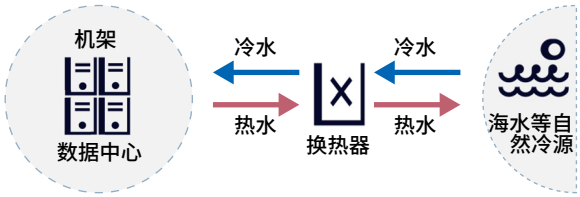
· 充分利用自然冷源，按需制冷
· 结构简单，可靠性高



自然水冷

将室外自然低温水源（海水、湖水、江河水等）引入数据中心进行冷却

· 需要做热仿真，考虑风向风强、海水温度变化、水中杂质、水垢等
· 采用特殊材料技术防止海水腐蚀



来源：落基山研究所

在规划新建数据中心时，还需要考虑气候变化的长期趋势和地质灾害的可能性，这对于确保冷却策略的长期有效性至关重要。为了配合自然冷源的利用，数据中心可采用智能控制系统，实现实时监控室内外的温度和湿度，自动调整冷却系统的运行模式，以提高能效减少能源消耗。同时，数据中心可以应用相变储能材料，将夜晚的冷能储存起来白天释放。此外，通过利用季节性气候变化，在气候条件适宜时增加新风量或采用季节性储冷方法，可以进一步降低冷却系统的能耗。这些措施有助于数据中心在面对未来几十年的气候变化时，保持其冷却策略的有效性和安全性。

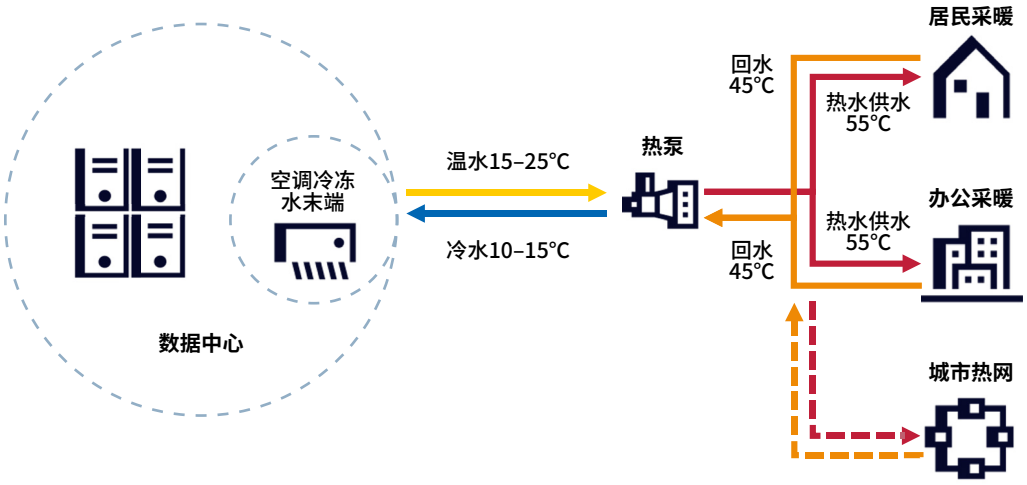
4）余热利用：

余热是指数据中心在运行过程中产生的废热，这些热量通常由服务器和相关设备产生，需要被冷却系统排出以保持设备的正常运行。通过利用吸收式制冷、热泵系统、热能储存以及与区域供暖系统的结合，数据中心的余热能够转化为可用的热能或电能，实现能源的再利用。余热用于供暖和生活热水最常见，有以下两种形式。

- **对于园区内的数据中心，在规划数据中心选址时考虑园区内多种功能建筑的用热需求，特别是办公建筑和员工宿舍的供暖和生活热水需求，实现余热精准匹配利用。**数据中心余热的就近利用能够最小化热量输送过程中的损失，提高能源利用效率。例如，北京某数据中心园区具有数据中心、科技大厦、员工宿舍、办公楼、培训中心及酒店多种建筑形态，建筑面积30万平方米，采用热泵机组对数据中心冷却水、冷冻水余热进行利用用于园区供暖和生活热水，每年减少碳排放量1.3万吨。

- **对于独立的数据中心，通过直接换热或热泵与城市供热管网结合，可以将数据中心的余热输送到供热网的建筑末端。**数据中心全年都具有比较稳定的排热量，跨季节相变储热技术能够解决供暖在时间上的供需不匹配问题，从而实现全年余热的有效利用。例如，巴黎 Equinix PA10 数据中心每年产生 10,000 兆瓦时的热量，通过液体冷却系统以 28°C的温度回收服务器产生的热量，随后利用三个热泵提升温度到 65°C，并通过热交换器将热水分配给热网运营商。这不仅为 Plaine Saulnier 城市开发区 1,000 多户家庭供暖，还在 2024 年奥运会期间为巴黎奥林匹克水上运动中心提供热量 [72]。此外，园区内数据中心在满足园区内部供热需求后，仍有剩余废热，这部分热量同样可与城市供热管网结合，进一步扩大余热的利用范围。

图表 21　数据中心余热回收示意图



来源：落基山研究所

5）土地价格及政策因素：

在考虑建设数据中心时，土地价格、地方优惠政策、人才招聘难度、政府审批流程及宏观政策同样是关键因素。数据中心的建设成本在很大程度上受到土地价格的影响。土地成本因地区而异，一些地方政府为了吸引投资，可能会提供优惠的土地价格。例如，贵州和内蒙古等地因其丰富的电力资源和适宜的气候条件，提供了相对较低的土地价格，吸引了包括苹果、腾讯、阿里、华为等科技巨头建设数据中心。此外，不同地区可能会提供税收减免、资金补贴等激励措施，这些政策有助于降低数据中心的运营成本。根据赛迪顾问的数据显示，数据中心电费占比可达总成本的近 60%，因此电价优惠对降低成本尤为重要。为了吸引更多的数据中心建设，一些地区如安徽、山东、山西、西藏、江西等出台了优先批地等优惠政策。[73] 同时，数据中心的运营依赖于专业技术人员，因此当地人才储备和招聘难度也是选址时需要考虑的因素，拥有高等教育机构和科研资源的地区可能更有优势。

数据中心的建设需要政府的批准，不同地区的审批流程和标准可能不同，一些地区可能对数据中心的能耗和碳排放量有严格的限制。国家政策对数据中心的科学选址、合理布局和可持续发展有着重要影响。为了促进数据中心合理布局、供需平衡、绿色集约和互联互通，我国出台了《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》，根据能源结构、产业布局、市场发展、气候环境等因素，在全国范围内布局建设国家八大枢纽节点并发展十大数据中心集群，引导数据中心集约化、规模化、绿色化发展。国家政策对数据中心布局的影响是全方位的，从土地价格、地方优惠政策到人才招聘难度、政府审批流程，再到绿色集约与互联互通的导向，都提供了决策支持。

6）网络基础设施：

随着云计算和人工智能等技术的发展，数据中心对带宽的需求持续增长，选址应当考虑到与高速光纤网络的距离及网络的可扩展性，根据运行的应用程序类型、预期数据流量和未来扩展计划等因素，重点选择合适的光缆，能够支持当前的数据传输需求以及未来潜在的需求。同时，数据中心还需要部署高性能的网络设备，比如高速交换机和路由器，并采用先进的网络技术，如 10GbE、40GbE 或 100GbE 连接，以提升网络性能。对于以下两类数据中心的选址，从带宽资源规划的角度需要注意：

- **对于需要实时数据处理的服务，数据中心的选址应尽可能靠近主要网络服务提供商的节点或互联网交换中心，**以便利用现有的网络基础设施，减少数据传输延迟，提高数据处理效率。

- **对于智算中心，选址时则需特别关注光纤网络的容量和可扩展性。**如果某个地区的光纤网络已经接近饱和，那么即使该地区其他条件优越，也可能不适合作为数据中心的选址。

此外，数据中心的规划还应考虑数据传输安全，减少业务中断风险。例如，采用冗余的网络设备和路径设计，可以减少业务中断的风险。通过采用密集的光纤连接网络和先进技术提升带宽，可以保障数据的实时传输，确保数据中心的高效运行。

以四个原则导向协同六大要素

数据中心宏观规划选址的决策过程必须综合考虑以上多个关键因素，以确保其布局的合理性和高效性。这一决策过程是复杂的，涉及多方面的考量，应包括需求、成本、环境和安全等维度。为了实现数据中心的最优布局，数据中心的选址布局应遵循以下四大原则：

1） **需求导向：**布局应靠近数据需求密集的区域，以减少延迟并提高服务质量。这涉及对网络时延的要求、数字产业的发展水平以及地区信息化程度的深入分析。

2） **成本导向**：选址应基于电力成本、土地价格及人力资源成本的综合考量，以实现运营成本的最小化。此外，应充分利用自然冷源，以降低冷却系统的能耗，从而减少能源成本。

3） **绿色导向：**优先考虑可再生能源丰富和气候条件适宜的地区，以促进能源的可持续使用，并减少碳排放和对环境的影响。

4） **安全导向：**数据中心的选址必须确保物理和网络的双重安全，同时考虑到地质稳定性和低灾害风险，以保障数据和服务的安全性不受威胁。

除了上述原则之外，数据中心的选址布局还需要考虑政策环境、交通环境等因素，以确保数据中心的长期稳定运行和可持续发展。通过科学合理的布局，数据中心不仅能够更好地服务于数字经济的发展，还能实现经济效益和环境效益的双赢。

图表 22　数据中心多因素选址策略概览

	需求导向	成本导向	绿色导向	安全导向
算力应用场景	· 根据不同业务场景时延要求，确定与用户物理距离	· 靠近终端用户以降低带宽成本 · 缩短数据传输距离以减少数据中心的能耗		
绿色电力资源		· 充分利用绿电丰富的地区资源以降低供电成本	· 物理上靠近绿电资源，提高供电中绿色电力比例 · 交易上确保跨省跨区绿电交易可行、易得	· 选取双路或多路供电以及互补绿色电力，保证数据中心用电安全、稳定
自然冷源		· 充分利用自然冷源，替代部分或全部电力制冷系统 · 在夜间或温度较低时储存冷能，用于白天冷却	· 充分利用自然冷源替代部分或全部电力制冷系统	· 减少对主动制冷系统的依赖 · 保证适宜的运营环境，如温湿度的稳定性
余热利用		· 将原本浪费的热量转化为有经济价值的能源 · 部分地区对余热利用提供税收优惠、补贴等激励措施	· 提高整体能源利用效率，减少能耗和碳排放	
土地价格及政策因素		· 确保土地价格与人力资源成本合理，以降低运营成本 · 利用地方政府提供的税收减免、资金补贴等激励措施		
网络基础设施	· 关注当地网络资源配套情况，匹配高性能、低时延、高频实时交互业务需求	· 具备灵活的扩展能力，能够快速扩展带宽和增加节点，降低长期投资风险		· 采用冗余的网络设备和路径设计，减少业务中断风险 · 密集光纤连接网络、先进技术提升带宽，保障实时传输

来源：落基山研究所

3.2 多维度促进新建与既有数据中心能效提升

3.2.1 完善新建数据中心的能碳评估与建设标准

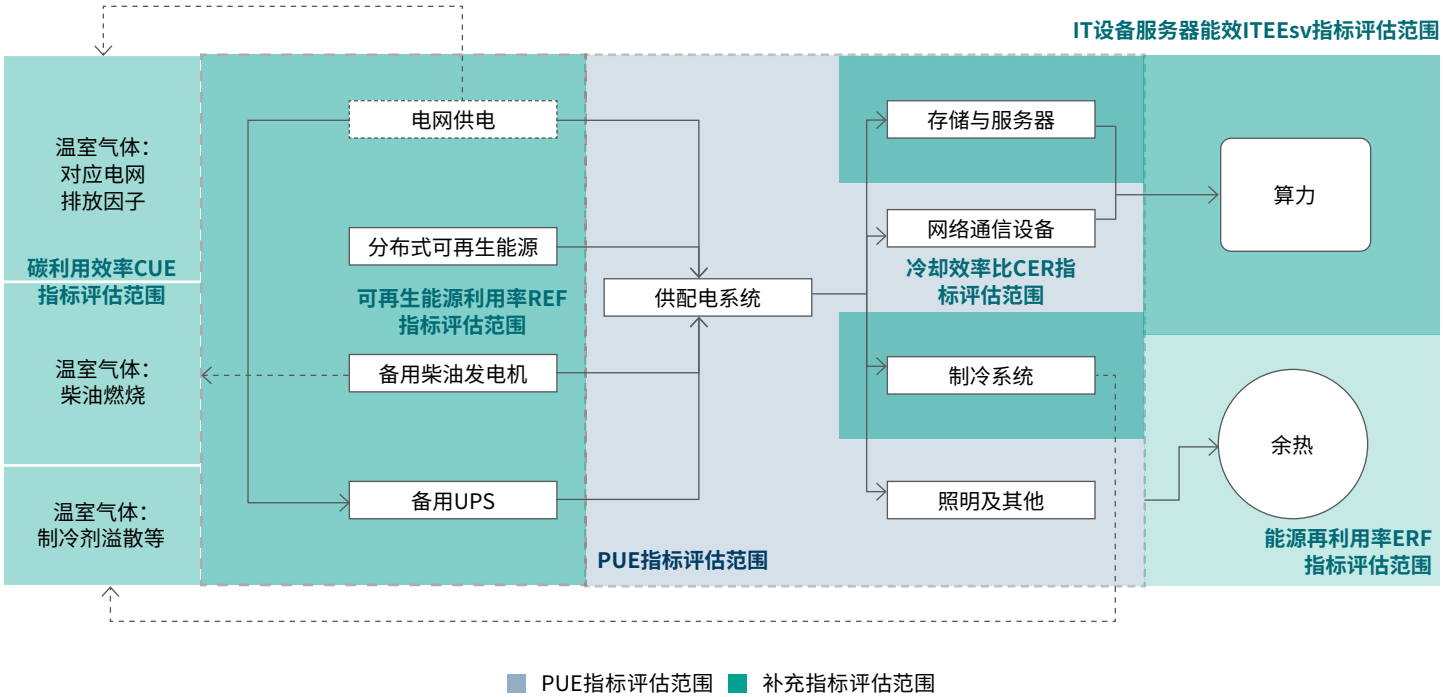
从数据中心评估指标角度看，需要在 PUE 之外构建全面的多维度能碳评估指标体系。数据中心能碳评估体系需要综合考量能源消耗种类、能效水平、碳排放控制等关键维度，为数据中心能源消耗和碳排放影响的评估提供更全面的视角。图表 23 展示了推荐的数据中心能碳评估指标，覆盖数据中心电力流、算力流、热流等环节，确保了评估的全面性。同时，数据中心标准中的能碳指标应结合地区差异性，如气候条件、能源结构和水资源状况等，设定合理的引导值和限定值，确保评估体系的科学性、适用性和有效性（图表 24）。

图表 23　　全面评估数据中心能碳水平的推荐指标

评估对象	说明	主要评估指标	计算公式
能源类型	通过衡量数据中心使用可再生能源的比例，促进太阳能、风能等可再生能源的利用，降低对传统化石能源的依赖，有助于缓解气候变化。	可再生能源利用率 (Renewable Energy Factor, REF)	REF=数据中心使用的可再生能源电量÷数据中心总耗电量
冷却效率	数据中心的冷却系统通常是除IT设备之外最重要的组成部分，占数据中心用电总量的30–40%。引入冷却效率比（CER）或冷却性能系数（COP）等指标，可以更准确地评估冷却系统的性能，直观地反映出冷却系统在移除数据中心热量方面的效率。	冷却效率比 (Cooling Efficiency Ratio, CER)	CER=数据中心冷却系统输出的冷量÷冷却系统所消耗的电量
余热利用	数据中心运行产生大量余热，有效利用潜力巨大。可输送至附近建筑或社区用于供暖，减少对传统能源依赖；也能用于工业生产加热需求或驱动制冷机为自身及周边设施供冷。回收利用数据中心余热，可降低能耗、减少碳排放，符合可持续发展要求，在提高能源利用效率的同时，为实现绿色发展提供新途径。	能源再利用率 (Energy Reuse Factor，ERF)	ERF=数据中心再利用的能源量÷数据中心总能源消耗量
碳排放	衡量数据中心运营中产生的碳排放量，包括直接排放（如数据中心现场燃烧的燃料）和间接排放（如购买的电力产生的排放），降低数据中心对气候变化的影响。	碳利用效率 (Carbon Usage Effectiveness, CUE)	CUE = 数据中心能源使用产生的二氧化碳排放当量 (CO_2eq)÷IT设备能耗 (kWh)
IT设备能效	IT设备包括服务器、存储设备和网络设备。服务器系统是IT设备的核心设备，服务器用能占IT设备的80%以上，减少服务器的能源使用对减少数据中心的能源使用非常有效。通过优化服务器硬件配置，采用低功耗的处理器、节能型内存、高效的电源，以及服务器虚拟化技术及能源管理软件，能够有效降低服务器的能耗。	IT设备服务器能效 (IT Energy Efficiency of Servers, ITEEsv)	ITEEsv=IT设备服务器处理任务数÷服务器能耗

来源：落基山研究所

图表 24　全面的数据中心能碳评估体系



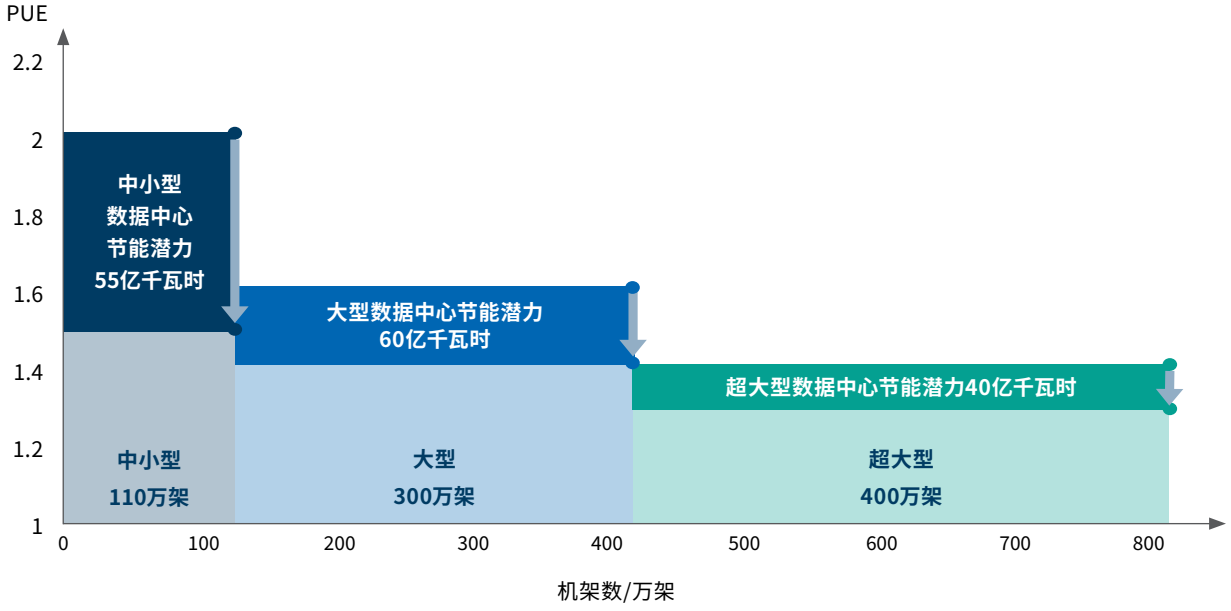
来源：落基山研究所

数据中心的建设标准应融入更全面的节能低碳技术与管理措施，从源头上优化能源使用和降低碳排放。数据中心的建设与节能标准应至少涵盖三个方面：**1）非 IT 部分建筑节能。**通过绿色建筑设计减少数据中心建筑的能源需求，包括优化围护结构热工性能、利用自然冷却等措施，同时，采用高效制冷和配电系统以降低设备能源消耗，以及部署智能化管理系统以实现能源使用的实时监控和优化。**2）IT 设备与软件系统节能。**通过提高算法效率优化算力需求，调度优化算力分布提高服务器利用率，选择高能效的服务器、存储设备和网络设备，可以显著提高数据中心 IT 系统的能源效率。**3）可再生能源利用。**多元化电力供给与算力 - 电力协同将助力电力零碳化。此外，还应注重采购低碳 IT 设备，使用可持续建筑材料，确保室内环境质量，并通过生命周期评估来降低建筑物的整体环境影响。这些设计策略有助于实现数据中心全生命周期降碳，同时实现运行能耗最小化。

3.2.2 全面开展低能效数据中心降碳改造

针对既有数据中心的能效提升，应根据数据中心的实际情况和需求，制定差异化的改造方案。对于全面落后的老旧数据中心，考虑实施关停并转的措施。对于大型及超大型数据中心，节能改造应分阶段、分批次细致实施，包括优化运营管理、进行局部升级改造以及全面的系统升级，以持续推进节能和低碳升级。根据落基山研究所的估算，对既有数据中心进行分类节能改造，在仅提升非 IT 设备部分能效的情况下，改造后的中小型、大型、超大型数据中心的平均 PUE 有望分别降低至 1.5、1.4、1.3，这将分别实现每年节能 55 亿、60 亿、40 亿千瓦时，节能率分别可达 25%、13% 和 7%，每年总体节能量预计达到 155 亿千瓦时（图表 25）。

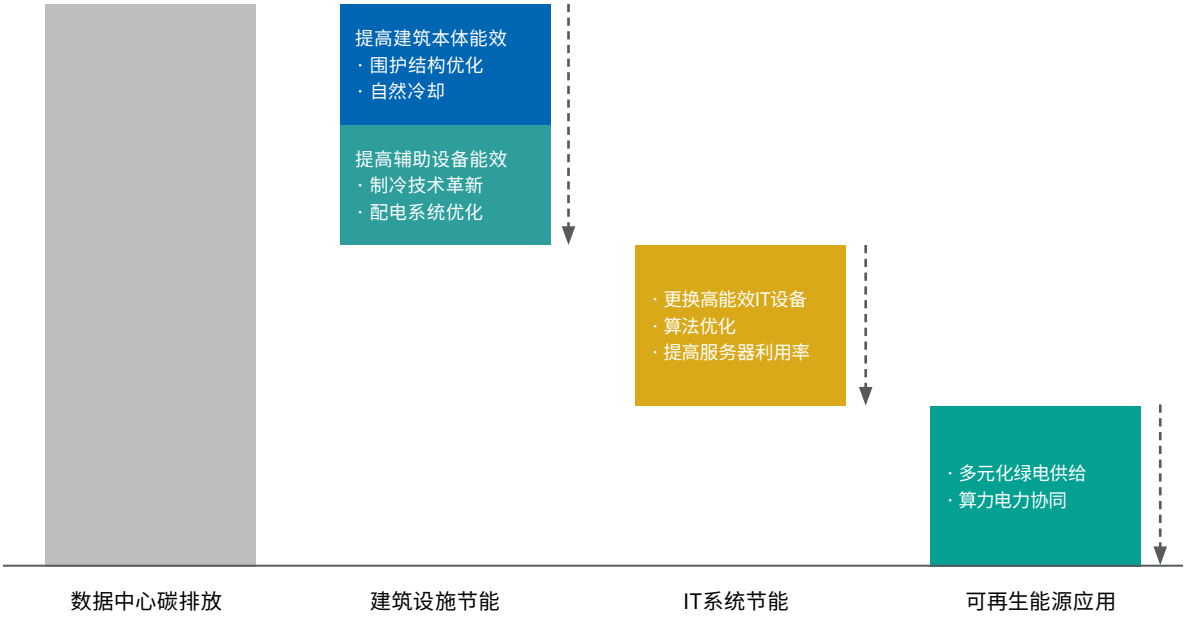
图表 25　我国数据中心分类节能改造潜力



来源：落基山研究所

数据中心的节能降碳改造是一项系统工程，主要从建筑设施节能、IT 设备与软件系统节能及可再生能源应用三方面入手。首先，除 IT 设备以外的建筑设施节能措施既包括围护结构优化、自然冷却等提高建筑本体能效的措施，也包括提高制冷系统、配电系统等辅助设备能效的措施。其次，IT 设备与软件系统节能着重于硬件与软件两个层面。硬件包括更换高能效的 IT 设备；软件则主要是通过算法优化和提高服务器利用率来提高整体能效。最后，通过选择多元化绿色电力供应方式并在运行中增加算电协同，数据中心能够进一步减少对化石能源的依赖，提高可再生能源的利用率。

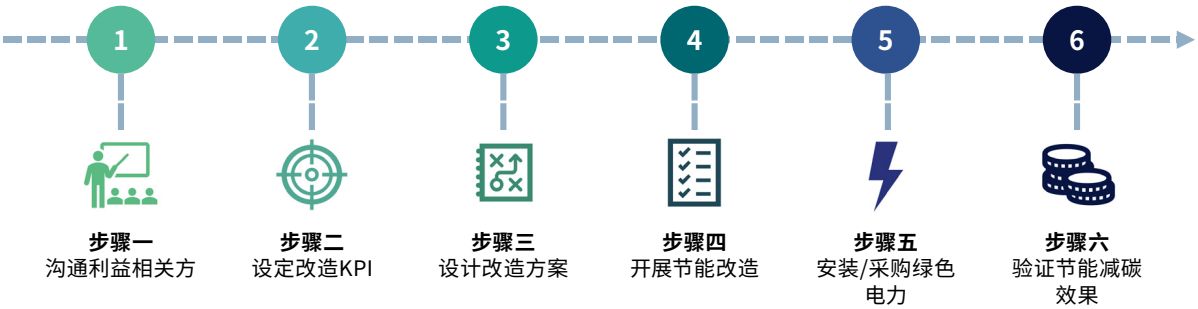
图表 26　数据中心节能降碳改造路径示意



来源：落基山研究所

数据中心节能改造需有效应对数据泄露风险、停运风险及跨专业协调挑战，以确保项目成功并降低对运营的影响。为减少数据泄露和停运风险，改造方案对生产过程的干扰程度越低，其市场接受度越高。顺应此市场趋势，模块化数据中心成为首选解决方案。以高效智能微模块数据中心为例，该技术整合 IT 机柜、制冷、不间断电源、消防、照明、监控、布线、安防等模块，通过简易拼装与连接，实现快速整体交付，显著缩短施工周期，最大程度减少对运营的干扰。此外，应充分利用现有冗余资源，实施分阶段改造。为提升跨专业工作效率，建议建立跨专业沟通协调机制，并遵循以下步骤（图表 27）：首先，与所有利益相关者密切沟通，确保需求与顾虑得到妥善处理；其次，明确关键绩效指标（KPI），确保改造目标清晰且获得共识；再次，设计改造方案，执行节能改造，并安装或采购绿色电力设备；最后，通过数据收集与结果测量，验证改造措施是否达到预期效果。

图表 27　数据中心节能改造主要流程

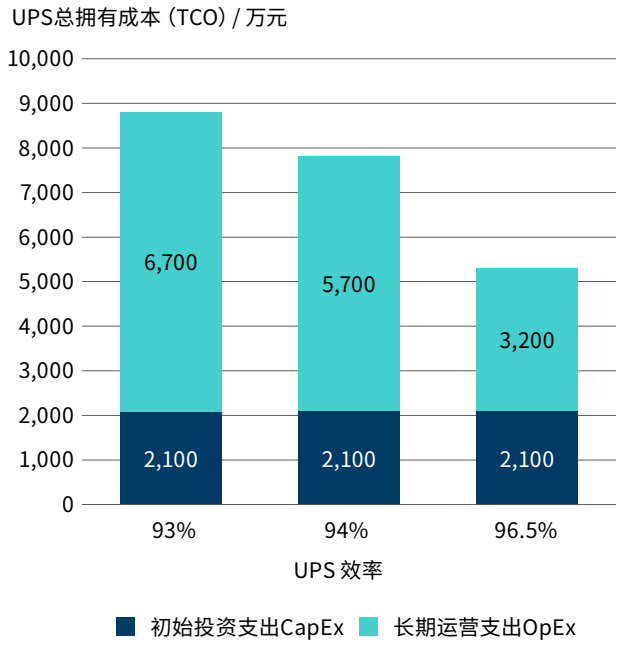


来源：落基山研究所

提升数据中心运营者对节能改造经济性的认知与评估能力，对于推广降本增效的节能技术至关重要。通常情况下，数据中心缺乏专门的能效团队，导致运营者对能效的经济性认识有限。为了更直观地理解节能改造带来的经济收益，并认可其价值，运营者可以运用合适的财务分析工具，如投资回报率（ROI）和总拥有成本（TCO）模型。ROI 模型能够预测项目投资的回报，并助力在多种改造方案中选择出最具成本效益的方案。与此同时，TCO 模型提供了全生命周期成本的视角，包括初始投资、运营成本、维护费用及潜在的节能收益，为评估节能改造项目提供了全面的经济性分析。在数据中心的应用实例中，高功率、长寿命资产的能效提升对 TCO 的影响尤为显著。例如，一个 10MW 的数据中心将不间断电源（UPS）效率从 93% 提升至 94%，可以在十年内节省高达 1,000 万元的运营支出（OpEx）；若效率进一步提升到 96.5%，节省的成本可增加到 2,500 万元（图表 28）[74]。在实际应用中，ROI 和 TCO 模型可以结合使用，以更全面地评估节能改造项目的潜在价值。

图表 28　数据中心关键基础设施的使用寿命（左）以及 UPS 效率与 TCO 的关系（右）

设备	使用寿命
机架PDU	8–12年
电缆（单根电缆）	8–20年
母线系统（铜排、插接模块）	8–20年
UPS—大规模中央供电系统（3000+ kVA）	15–20年
UPS—机架式	4–8年
电池	5–10年
远程配电面板（RPP）	8–12年
计算机房PDU	8–12年
电气开关设备和变压器	20年以上
发电机	20年以上



注：右图设定在一个 10 MW 数据中心中，UPS 生命周期为 10 年，每千瓦时的成本约为 0.73 元。
来源：伊顿电气[75]，通用电气[76]，落基山研究所

3.3 将数据中心打造成大规模绿色电力消纳的创新场景

3.3.1 实现多元稳定的绿色电力供给

在运行管理环节，最大化数据中心的绿电供应是实现数据中心用能低碳化的重要抓手。图表 29 总结了四种企业实现绿电供应的方式：前两种是通过场内分布式光伏、风电等可再生能源项目自发自用、或者通过专线直接与场外可再生能源项目相连的方式实现绿电供应，这两种方法都在物理层面实现了电源与数据中心的直接连接；后两种则是通过绿电交易、绿证购买等市场交易的方式，打破了地理位置的限制，通过买卖双方的合同约束或者通过第三方作为认证机构，实现了绿色电力及其对应的环境权益的交易和确权。

图表 29　四种企业实现绿色电力供应的方式

分类	方式	描述
基于地理位置	场内分布式可再生能源项目	企业在场内直接安装分布式光伏或分散式风电等可再生能源发电设备，产生的电量自己使用，余电上网
	绿电专线直供	以专线形式直接连接可再生能源发电侧到用户或供电方（例如园区），再由供电方直接提供给下级用户
基于市场交易	绿电交易	可再生能源发电企业与企业用户（或由售电公司代理）之间签订购售电合同（电力购买协议 PPA）
	绿证交易	由可再生能源发电企业申请、由政府相关部门或第三方机构核发，用以证明与核算可再生能源发电环境属性的证书 中国：国家能源局电力业务资质管理中心核发的绿色电力证书 GEC 国际主流：REC，GO，I-REC，TIGR 等

来源：落基山研究所

数据中心运行方应根据自身用电规模、所处项目阶段、风险偏好、经济效益、环境披露要求等因素，组合选择采购方式，不断提高绿色电力供应占比。

图表 30　数据中心四种绿色电力供应方式特征对比

方式	供应规模	供应速度	经济性	机制成熟度	环境披露认可度	
					中国	国际
场内分布式可再生能源项目	★☆☆☆	★★☆☆	★★★★	★★★★	基本均认可	基本均认可
场外绿电专线直供	★★☆☆	★☆☆☆	★★★☆	★☆☆☆		
绿电交易	★★★☆	★★★☆	★★☆☆	★★☆☆		自愿市场（例如RE100，SBTi等）基本均认可，部分强制市场有特殊要求：例如《欧盟电池和废电池法规 (EU) 2023/1542》的配套碳足迹核算授权方案的征求意见稿（以下简称“新电池法规”）暂时对电力购买协议PPA不认可
绿证交易	★★★★	★★★★	★☆☆☆	★★★☆		自愿市场基本均认可，部分强制市场有特殊要求：例如欧盟碳边境调节机制 (CBAM)、新电池法规等均不认可单独的绿证
该评分基于全球市场整体情况，具体国家/地区市场可能有所差异：从1星到4星，星级越高代表供应规模越大（越能满足企业需求）、供应速度越快（企业所需准备时间越短）、经济性越高（企业额外付出成本越少甚至有收益）、机制成熟度越高（企业面临风险越小）。						

来源：落基山研究所

场内分布式可再生能源由于其经济性高、建设难度低等优势应该是企业的首选，但普遍面临规模有限的问题。一般情况下，数据中心屋顶面积部分会被制冷系统占据，剩余可用安装屋顶光伏的面积有限。假设一个数据中心安装有约 4,700 架机柜，屋顶面积为 3,000 平方米并在约 60% 区域面积设有太阳能光伏板，则屋顶光伏年发电量占该数据中心年用电量约为 0.65%[xx]，不足 1%。除屋顶外，数据中心还可考虑在所在园区停车棚、空地等场景安装分布式风电、光伏，但整体绿电供应规模严重受到屋顶面积、土地资源约束，仍需探索其他方式以满足绿色电力需求。

xx　参考中国移动位于北京市大兴区的大白楼数据中心进行计算。该数据中心安装有约4,700架机柜，太阳能光伏板覆盖3,000㎡楼面屋顶，光伏电站年发电量可达40万度。假设单位机柜年耗电量为10,000kWh，数据中心全年平均PUE为1.3，计算得到屋顶光伏年发电量占该数据中心年用电量约为0.65%。

绿电专线直供理论上可以突破场内安装面积限制，实现大规模的绿电供应，而且一般可以减少电力输配费用的支出、经济性较强，但往往需要明确的政策和市场机制支持。目前的数据中心绿电专线直供案例多采用较为可控的水电和核电资源（参考 3.1 节 TEL-Rjukan 数据中心和 Cumulus 数据中心案例），但水电、核电均有明显的地域限制，上述案例很难规模化推广。而广泛分布的风光新能源出力存在波动性和间歇性特点，和数据中心所需的稳定供电存在矛盾，往往需要网电或者可调节电源作为备用，全绿电直供方案仍需技术论证。若采用网电作为备用，由于目前试点较少、机制尚不成熟，数据中心需要和电网协商合理的备用费用，或者一同和电网探索算电协同的新型共享商业模式、将数据中心从被动的电力消费者转变为主动的电网灵活性资源（详见下一节）[77]。但这都意味着绿电直供方式会需要更复杂的方案设计和更长的准备时间。国内外领先的数据中心企业也正在积极试点液流电池、绿氢氨醇燃料电池、可再生燃料发电机、先进核能等创新的电力稳定备用零碳技术方案，促进数据中心实现稳定的绿电直供。

案例：创新的电力稳定备用零碳技术方案

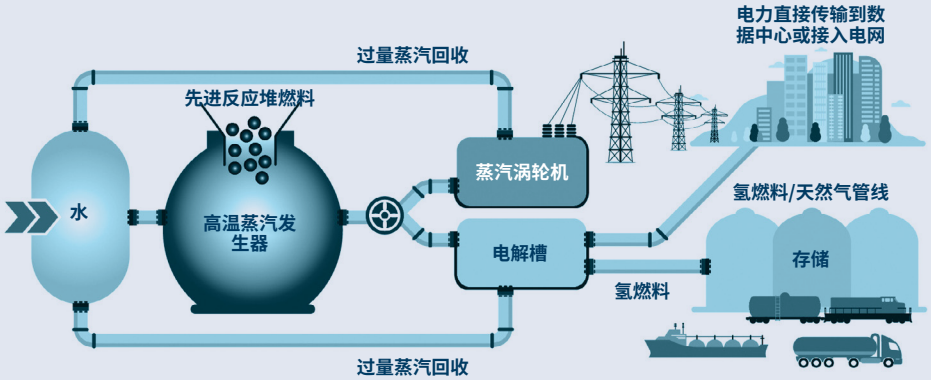
- **液流电池：**2022 年 9 月，美国 Kinetic Solutions 公司为一处位于亚利桑那州的数据中心采购了 1.3MWh 的全钒液流电池，以搭配 400kW 光伏来应对电网故障时电力短缺问题 [78]。2023 年底，中国张家口怀来云数据中心配套的铁铬液流电池储能项目成功交付，容量为 500kW/4,000kWh，可满足数据中心每天 8 小时的削峰填谷需求，同时也可以在紧急情况下起到电力备用效果 [79]。

- **氢燃料电池：**2020 年 6 月，微软在犹他州盐湖城的数据中心，使用 250kW 的氢燃料电池系统顺利支持了 10 排微软 Azure 云服务器连续 48 小时的不间断运行 [80]。2022 年，微软与美国氢燃料电池公司 Plug Power 合作开发以氢为动力的 3MW 发电系统，被证实可作为数据中心大型柴油发电机组的可替代方案 [81]。

- **可再生燃料发电机：**2021 年，微软在瑞典数据中心使用 Evolution Diesel Plus（一种林业和造纸生产的副产品妥尔油）作为发电机燃料，与标准化石柴油混合物相比，这种柴油含有至少 50% 的可再生原材料，减少接近 50% 的净二氧化碳排放量 [82]。数据中心企业也在考虑使用可再生氢化植物油（HVO）作为发电机燃料，如亚马逊 [83]、数据中心托管商 Digital Realty[84] 均已在多个数据中心中采用了 HVO。

- **先进核能发电技术：**近年来，小型模块化核反应堆（SMR）、核聚变等先进核能发电技术取得了一系列关键突破，其供电稳定、零排放的特点使其有望成为数据中心供电新选项。美国 Green Energy Partners 计划在萨里核电站旁新建 30 个数据中心，同时新建 4–6 座 250MW 小型模块化反应堆以直供数据中心用电 [85]。此外，利用 SMR 产生的大量热量和零碳电力接入电解槽，从而电解高温热水产生氢气，实现了绿电与绿氢的耦合生产。

图表 31　利用小型模块化核反应堆 SMR 分解水并对数据中心进行供电流程图



来源：Green Energy Partners[86]，落基山研究所

由于上述场内分布式绿电供应规模受限、绿电直供技术机制仍不成熟，绿电交易和绿证交易是目前全球领先数据中心企业最常用的实现绿电消费的方式。这两种方式能够实现的前提是数据中心所在国家 / 地区建立了相关的市场交易机制，这需要电网、交易中心、政府等相关方共同建立起常态化的绿证、绿电交易机制以及配套绿色环境权益的认证、核销等机制，保证其中绿色环境权益的唯一性、权威性、可溯源性，使其在国内外碳监管体系和 RE100、SBTi 等主流国际倡议中受到广泛认可。电力购买协议 PPA 等绿电交易模式已在欧美等国运行多年，根据欧洲企业采购可再生能源平台 RE-Source 和北美清洁能源买家协会 CEBA 的统计数据，在 2014-2023 这十年中，企业已通过绿电交易为欧洲带来了 36.1 GW 的新增可再生能源装机，为美国带来了 77.6 GW 的新增零碳电力装机 [xxi, 87]。对于我国而言，绿证市场于 2017 年起步且制度已较为成熟，截至 2024 年 8 月底，全国累计核发绿证 18.41 亿个，累计单独交易绿证（不含绿电交易绿证）1.5 亿个且供应规模充足 [88]，2024 年 1-8 月交易均价在 10 元 / 个 [xxii] 以下 [89]；而绿电交易于 2021 年 9 月起步，但发展速度显著，2021 至 2023 年成交电量分别为 87 亿、181 亿、697 亿千瓦时，年均增速达 283%[90]。2023 年中国绿色电力（绿证）消费 TOP100 企业中，数据中心服务相关企业达到了 8 家 [91]。

从国际环境权益认证趋势考虑，企业应愈发重视所采购绿电和数据中心用电的时空匹配性。主流国际认证规则中，在欧盟 RED III 框架指引下，欧盟绿证 GOs 核发的机构 AIB 将在时间和空间尺度上精细 GOs 作为 2024 年的重要战略之一，以求体现 GOs 所对应绿色电力更精确的地理位置、发电时间和技术类型 [92]；RE100 报告指南 2024 中首次提出企业可以额外声明所采取的时空匹配（全天候零碳能源采购）的策略，而且在市场成员进展表中会将分时匹配作为第四个影响力指标，并声明未来可能会针对时空匹配制定汇报框架 [93]。**部分领先的数据中心企业正积极推进全天候零碳能源采购策略，以寻求实现用电负荷和所采购绿电的时间匹配度可以达到小时级别，地理匹配度可以达到绿电的生产和消费在同一电网区域：**

- **策略一：根据负荷曲线定制 PPA**

  2021 年，美国数据中心运营商 Iron Mountain 提出到 2040 年实现全天候零碳能源供应的目标 [94]。为实现这一目标，Iron Mountain 与电力零售商（RPD Energy、Direct Energy）和碳核算公司 Cleartrace 等开展合作，对数据中心每小时能源使用情况和碳排放量进行跟踪及预测，根据数据中心负荷曲线，与不同绿电供应商签订多个购电协议，同时将风能、太阳能和水力发电进行组合，提高可再生能源供电的灵活性和稳定性，确保数据中心的实际用电在任何时间点都能与可再生能源相匹配 [95]。

- **策略二：购买分时绿电证书**

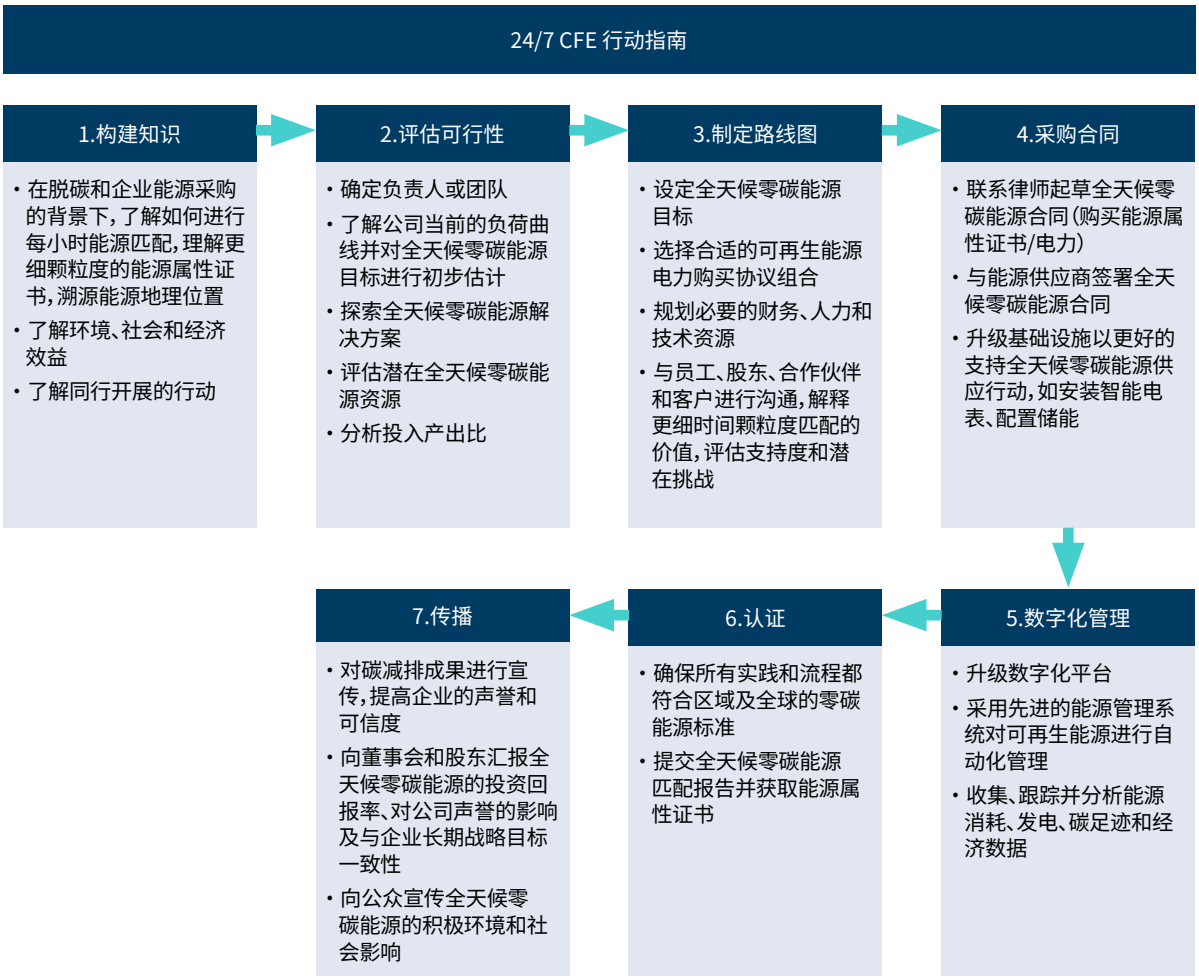
  谷歌与 M-RETS、APX 等机构合作共同开发了基于时间的能源属性证书（T-EACs），并于 2021 年起在美国、丹麦、智利等地区开展试点工作。在智利，谷歌与非盈利机构 EnergyTag、能源公司 ACCIONA Energia 和 AES Andes 合作开展了试点项目，利用至少小时级的电力数据，将智利数据中心每小时能耗与三个可再生能源项目的每小时发电量进行匹配，以满足 100% 电力需求同时核销对应的 I-REC 证书 [96]。

---

xxi 欧洲统计口径为电力购买协议PPA的贡献，美国统计口径数字除了PPA外，还包括了绿色电费Green tarrifs, 税务股权投资Tax equity investments, 直接投资Project ownership等绿电采购方式的贡献。

xxii 1个绿证单位对应1,000千瓦时可再生能源电量。

图表 32　全天候零碳能源（24/7 CFE）供应行动指南



来源：欧洲电力行业协会 Eurelectric[97]，落基山研究所

从环境披露的认可度来看，目前自愿市场对这四种方式基本均认可，而强制市场对基于地理位置的两种方式有更加偏好的趋势。在国内，“1044 号文”[98] 明确指出，绿证是我国可再生能源电量环境属性的唯一证明，是认定可再生能源电力生产、消费的唯一凭证。因此单独的绿证交易和“证电合一”的绿电交易原则上并无认可差异，均可应用于可再生能源电力消纳责任权重、能耗双控、高耗能企业刚性约束等场景。国际上，RE100、SBTi 等自愿市场同样对绿电、绿证交易并无认可差异，但有望进一步要求更细颗粒度的时空匹配。强制市场方面，近年来以欧盟 CBAM、新电池法规为代表的碳壁垒贸易政策，对企业用以抵扣间接排放的绿电供应方式提出了更加严格的要求。CBAM 和新电池法规均不认可“证电分离”交易的绿证，而新电池法规目前的征求意见稿中，仅认可基于地理位置的两种方式。除了电池和电动汽车之外，电子产品和 ICT 行业也是欧盟新循环经济行动计划[99] 中重点关注的七个行业之一，因此很可能在后续政策中采取类似的认可方式。

3.3.2 促进算力 - 电力系统协同运行

发展算力与电力系统的友好互动，有利于实现电网清洁化和数据中心用电低碳化的双赢效应。在全球电力低碳化进程中，快速发展的风、光等波动性新能源使得电力系统面临着供需双重不确定性，亟需更多可观可控的灵活性资源来满足供需平衡。数据中心作为用电规模快速增长的用电大户，有望成为重要的需求侧灵活性来源。从电网角度而言，实现数据中心用电负荷与电网的友好互动，将不仅减轻电网平衡压力、帮助电网消纳更多新能源、进一步降低电网排放因子，长期上看还将减少峰荷机组投资和延缓输配线路扩容；从数据中心角度而言，在电力市场化地区，新能源发电量较大时段的电价往往较低，如果数据中心用电负荷能够跟随电价信息实现移峰填谷，还将显著降低数据中心运营成本，让数据中心以更低成本、更低碳方式实现稳定供电。

算力工作负载可以实现时间和空间上的转移，为电力系统提供时空灵活性，是解决算力 - 绿电时空不匹配的重要基础。IT 设备是数据中心里最大的用电负荷，可以进一步分为工作负载用电和服务器用电，前者反映了数据中心处理任务的动态变化，后者则是支持这些任务的核心设备的基本能耗。一般数据中心的工作负载可根据任务对处理时间的灵敏性分为延迟容忍型负载（离线工作负载）和延迟敏感型负载（在线工作负载）。

- **延迟容忍型负载：**主要由数据处理信息复杂、计算时间长的任务组成，能够容忍一定程度的时间延迟，而负载调度系统会根据任务内容确定优先级，将其投入排队等待服务器计算资源，响应时间主要受资源的空闲情况和其他任务优先级等因素影响，可能持续几分钟或几小时，在一定程度上实现了数据中心负荷的时间灵活性；

- **延迟敏感型负载：**主要由实时任务组成，对时间延迟的敏感型高，而负载调度系统会根据实际需要，为重要的在线负载在异地服务器或机房上进行冗余备份，在这种情况下，当原机房出现紧急情况时，负载调度系统可以迅速将运行指令调度到备用服务器上继续处理，或者调度到不同地理位置上的数据中心，从而实现了数据中心负荷的空间灵活性。

图表 33 总结了数据中心主要的时间与空间灵活性来源以及和网荷互动的特性。在满足某计算任务对计算资源和数据资源需求的条件下，负载调度管理系统可以按照一定目标，更改工作负载的处理计划，将部分可调工作负载从负载高峰时段推迟到低谷时段，或将部分负载转移到其他服务器上处理。利用这种运行灵活性，数据中心能够成为电力系统需求侧重要的可调资源，不仅可以为电网提供小时级的调峰以及分钟内的调频等辅助服务，而且可以参与电网经济调度、机组组合等运行规划过程，从而实现算电协同调度[100]。

此外，在算力电力友好互动和协同调度中，除了算力工作负载灵活性外，制冷、备用电源等系统亦可提供可观的灵活性。例如，调节制冷系统、蓄冷系统等设备，利用数据中心机房的热惯性、供冷网络的热惯性，通过分布式电储能进行削峰填谷等手段响应电网信号，可提供秒级到小时级的时间灵活性，实现电热冷等多能耦合的协同运行，也可有效提升算力用能绿色化水平。

图表 33　数据中心电力需求侧时间与空间灵活性来源一览

负荷类别	主要设备	负荷占比	调控方式	时间灵活性					空间灵活性
				秒级	分钟级	小时级	日级	>日级	
IT系统负荷	存储与服务器	～50%	在线工作负载调度[xxiii]						✔
			离线工作负载调度[xxiv]	✔	✔	✔	✔	✔	
			服务器用电管理	✔	✔				
制冷系统负荷	空调、供冷网站	～30%	温度调节，利用热惯性	✔	✔	✔			
备用电源	柴油发电机	N/A	启停，功率调节		✔	✔	✔	✔	
	储能系统	N/A	充放策略优化	✔	✔	✔			

来源：华北电力大学[101]，落基山研究所

在实际运行层面，数据中心算力 - 电力协同也可以分为园区和区域两个层级。园区层级算电协同调度指的是单体数据中心内部工作负载和能源系统的灵活调度，而区域层级算电协同调度则是多个数据中心之间的协同灵活调度。图表 34 展示了全球范围内不同层级、不同类型的算力 - 电力协同优化运行案例。

（1）园区级算电协同调度

对于园区算电协同调度，首先需要构造数据中心内部高效、低碳的供能体系，在保证算力用电可靠性要求前提下，通过集中负荷管理、替换低效供冷方式等优化数据中心内部的供能结构，以及在供能侧引入可再生能源，从而实现高效低碳用能、降低建设与运营成本；其次数据中心运营商需要发掘数据中心的灵活调节能力，根据计算负载特性，通过调控逻辑耦合性较弱的计算负载作为灵活性资源，在不影响业务逻辑的前提下使其用能自动匹配电碳市场信号、可再生能源出力特性，从而进一步降低用能成本、提高绿电使用占比、减少碳排放。

目前，园区算电协同调度在实际应用中取得了一定的进展，但在多系统管理运维、业务协调等方向仍面临一些挑战。一些园区已经开始采用智能化的能源管理系统和算力调度系统，能够实时监测和分析能源和算力的使用情况，并根据需求进行优化调度。例如，某些园区通过大数据分析和人工智能算法，实现了对服务器负载的精准预测，从而能够提前调整能源供应，提高能源利用效率。但园区算电协同调度涉及到多个系统的协同工作，包括能源供应系统、算力调度系统、制冷系统等，需要专业的技术人员进行管理和维护，否则可能会影响系统的稳定性和可靠性。此外，在数据中心实际运行过程中，数据中心园区内各类设备运行一体，在不影响数据中心用能可靠性的前提下，如何准确地将与业务逻辑耦合性较弱的部分灵活性资源实时识别并独立控制也是一大难题。

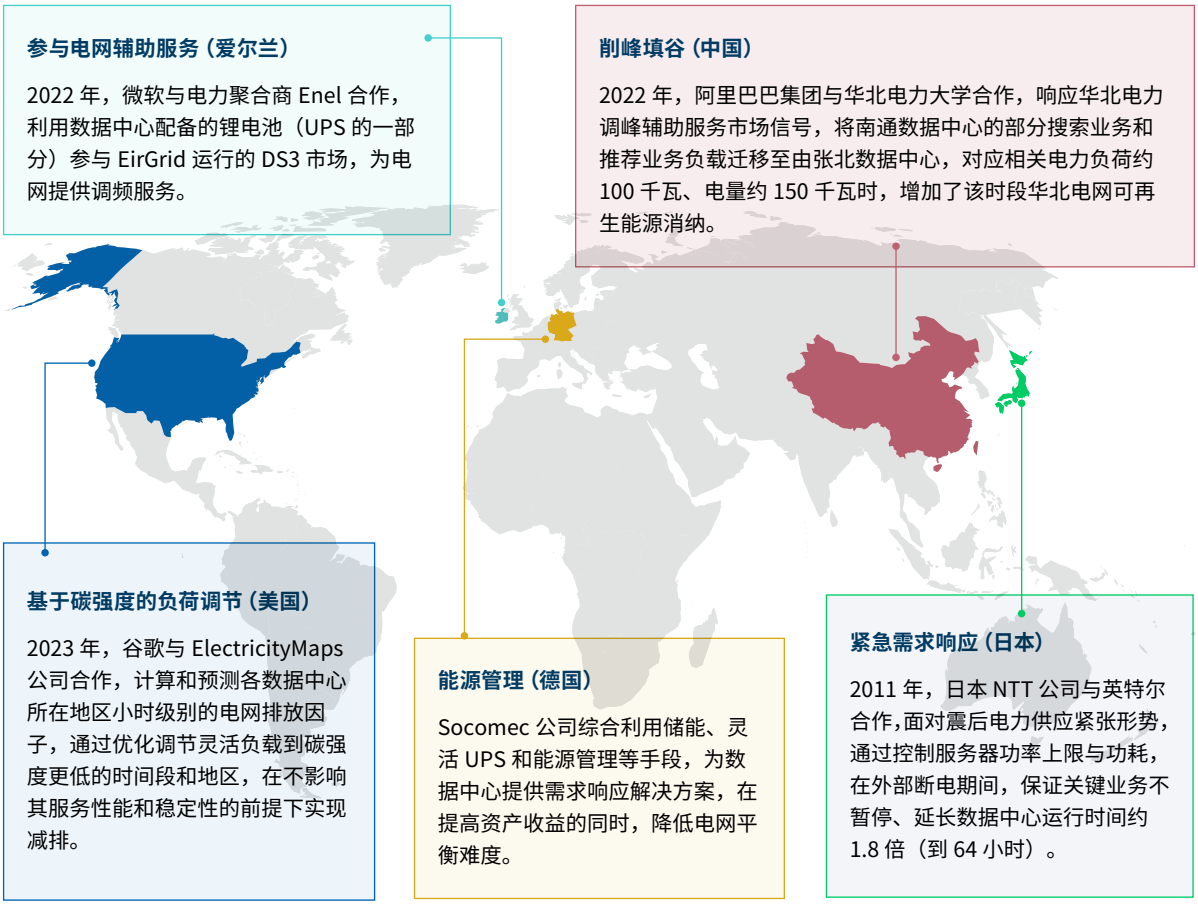
xxiii 为了保证在线负载的计算安全和服务质量，负载调度系统会根据实际需要，为重要的在线负载在异地服务器或机房上进行冗余备份。在网络带宽允许的情况下，为实现工作负载的空间调度转移提供了可行性，例如大模型响应。

xxiv 取决于任务类型，周期性任务分为秒、分钟、小时、日、周、月等周期，例如大模型训练；非周期性任务响应时间取决于资源空闲情况和其他任务优先级，响应时间持续几分钟或几小时不等。能否提供空间灵活性取决于是否实现了数据备份。

（2）区域级算电协同调度

随着数据中心规模的扩大和电力需求的日益增长，区域级算电协同调度逐渐成为智能电网和数据中心能源管理中的关键问题。区域级算电协同调度的特点体现在其广域协同、多数据中心调度以及跨区域的能源和算力资源优化管理。它涉及多个地理分布的数据中心，通过动态调整计算负载和电力消耗，在广域范围内实现资源共享和最优配置。这种调度不仅需要考虑电力供需平衡，还需协调各数据中心间的计算任务分配，尤其是在应对电价波动、负载变化和可再生能源波动时，调度系统需具备高度灵活性和自适应性。区域级调度通常与电力市场紧密结合，通过参与需求响应、调频等辅助服务、现货市场等市场机制优化能源成本，提升经济效益，同时实现算力价格和电力价格的交叉关联。未来，算电协同调度还可以进一步响应分时分区动态电网排放因子等碳信号，以精确降低数据中心用电带来的碳排放。

图表 34　　算力 - 电力协同优化运行全球案例



来源：阿里巴巴[102]，丹麦 Electricity Maps 公司[103]，微软[104]，德国能源署[105]，英特尔[106]，落基山研究所整理

3.4 推动政策和市场机制保障数据中心节能降碳

数据中心的节能降碳需要政策的引导与支撑。在有效的碳排放披露机制和金融手段支持下，以明确的碳核算与评价体系为基础，由政府政策、金融机构、采购数据服务的下游企业协同发力产生激励和约束机制。

首先，应完善数据中心和数据中心产品（例如算力等）的碳排放披露机制，推动数据中心进行碳排放披露，加强数据中心碳管理。上市公司和大型企业、有算力采购需求的公共部门或下游企业（即算力或数据服务的使用方）可以针对上游数据中心企业提出更加明确的碳要求，在助力自身环境目标实现的同时，自下而上推动整个数据中心产业链的脱碳。

- **以上市公司和大型企业碳排放披露为抓手，推动数据中心运营商以及相关企业进行碳排放披露。**国际上，上市公司的 ESG 披露正经历从自愿披露到强制披露的转变，例如欧盟陆续提出了针对企业的强制碳排放披露要求。数据中心企业通常为大型企业且已上市。以我国为例，头部前三的企业以及前五的数据中心企业所占市场份额总和分别高达 50.1% 和 59.5%[107]，且均为上市公司。针对数据中心行业的上市公司提出强制碳排放披露要求可以覆盖较大范围的数据中心进行碳排放披露，推动其率先进行节能降碳，并为中小型数据中心提供经验和示范，辐射带动全行业的碳排放披露。

- **下游企业或公共部门应对低碳算力提出采购需求，推动数据中心企业的降碳。**全球云计算服务市场规模近年来呈现快速增长，2023 年其规模接近 6,000 亿美元 [108]，预计未来几年还将持续快速增长。越来越多企业倾向于从第三方购买云算力服务，而非自建数据中心。同时，政府部门的数字化转型也带来了迅速增长的政府算力采购需求。随着我国数字政府建设工作的不断推进 [109]，我国政务云市场迅速增长，2023 年政务云整体市场规模到达 794.5 亿元，相比 2022 年增长 50% 以上 [110]。这一趋势下，算力服务的下游买方应提出对低碳算力的明确采购要求。欧盟联合研究中心（JRC）2020 年发布的《欧盟数据中心和云服务绿色采购准则》报告 [111] 中建议公共机构在购买云服务时对数据中心提出 PUE、可再生能源使用以及制冷剂 GWP 等要求，推动上游数据中心减排。企业还可以通过与托管商或云服务签订合约，明确其供应商所提供的算力或数据服务的碳排放限值；政府和公共部门可以将碳排放相关指标纳入政府采购需求标准，如《数据库政府采购需求标准》等 [112]。

- **在绿色数据中心评价中纳入碳排放指标。**当前，全球范围内数据中心相关的可持续认证体系大致可以分为两类，一类是在可持续建筑认证体系中纳入了一些针对数据中心的评价指标，如美国的 LEED、欧洲的 BREEAM；另一类是专门针对数据中心的认证体系，如欧盟数据中心准则（EU Code of Conduct for Data Centres）以及我国的《国家绿色数据中心评价指标体系》。然而，这些认证以能源效率和可持续性指标为主，碳排放并未成为数据中心认证的主流指标。将碳排放指标纳入数据中心可持续认证体系能够有效推动数据中心的降碳管理。

案例：绿色数据中心认证推动我国绿色数据中心发展

我国早在 2015 年就发布了《国家绿色数据中心试点工作方案》，先后评选出 5 批共计 246 家国家绿色数据中心。至今，我国已经建立了较为全面的绿色数据中心认证评价体系，包括绿色数据中心评价指标（图表 35）、申报流程等。另外，我国也不断发布更新《国家绿色数据中心先进适用产品目录》，与绿色数据中心评价工作配合，推动利用先进产品技术助力数据中心节能降碳。国家绿色数据中心的评价认证带来的良好的示范效应，极大推动了我国数据中心的节能降碳，2023 年度国家绿色数据中心 PUE 平均值已从 2020 年的 1.44 降至约 1.26[113]。

图表 35　我国国家绿色数据中心评价指标体系

能源高效利用

- 能源利用效率
- 可再生能源及储能利用水平
- 单位信息流量综合能耗下降水平
- 能源利用智慧管控水平
- 余热余冷利用水平

科学布局集约建设

- 科学布局水平
- 集约建设水平

绿色低碳发展

- 水资源利用水平
- 水资源采购水平
- 绿色运维水平
- 绿色化改造提升情况
- 绿色公共服务水平

算力资源高效利用

- 机柜资源利用水平（上架率）
- 算力负荷利用水平
- 网络资源利用水平
- 信息系统能效及单位能耗产出水平

来源：工业和信息化部，落基山研究所

其次，建立和完善数据中心碳核算体系是数据中心碳管理的基础。明确数据中心范围三碳排放核算、确定不同主体和所有权结构的碳排放划分、利用数据平台完善数据收集与管理以及国际标准衔接是数据中心碳核算体系建设需要解决的关键问题。

- **数据中心碳排放计量方法学的设计应着重明确范围三碳排放的计量方法。**由于范围三温室气体排放的计量涉及相关方多、计量难度较大，数据中心碳核算方法需要主要解决范围三核算问题。数据中心范围三温室气体排放主要包含 9 个关键类别（图表 36）。确定范围三核算来源及排放数据是一大难点，突破这一问题能有助提高碳排放报告的准确性。

图表 36　数据中心范围三温室气体排放源

来源：施耐德[114]，落基山研究所

- **数据中心运营方应积极采用数据中心基础设施管理平台（DCIM），以规范能碳数据的采集、处理和交流流程。**DCIM 能够高效地采集和管理数据中心的运营状况、能耗和碳排放等信息，提高数据采集的便捷性和可靠性。此外，DCIM 的应用有助于统一数据中心碳排放数据的披露格式，便于国家层面进行统计和管理。

- **推动数据中心碳核算标准的国际对接。**鉴于全球互联网的迅猛发展及国际上基于气候变化的关税政策，为应对跨境数据服务及其碳排放问题，数据中心及算力产品的碳排放核算标准需与国际标准接轨。ISO 国际标准化组织于 2022 年发布了《信息技术 - 数据中心 - 关键性能指标 - 第 8 部分：碳使用效率（CUE）》国际标准，将碳使用效率定为关键绩效指标，用于量化数据中心使用阶段的碳排放量。我国在构建数据中心碳核算体系时，应充分考虑与国际标准的对接，同时注重本土碳排放因子数据库的建立与国际互认。

此外，还需要加强绿色金融工具在数据中心领域的应用。需要建立市场化、专业化的绿色金融运作和监管模式，鼓励符合条件的银行开发创新的数据中心绿色信贷产品，并通过将数据中心节能降碳技术纳入绿色债券支持目录等方式为金融支持数据中心项目提供指引。政府还应支持数据中心企业通过发行绿色债券、开展资产证券化等方式优化融资结构[115]。数据中心企业应设立明确的可持续发展关键绩效指标，如碳排放目标，并通过设立绿色金融框架，有效追踪和管理其资金使用，确保其与可持续发展目标保持一致，吸引投资者并降低融资成本。

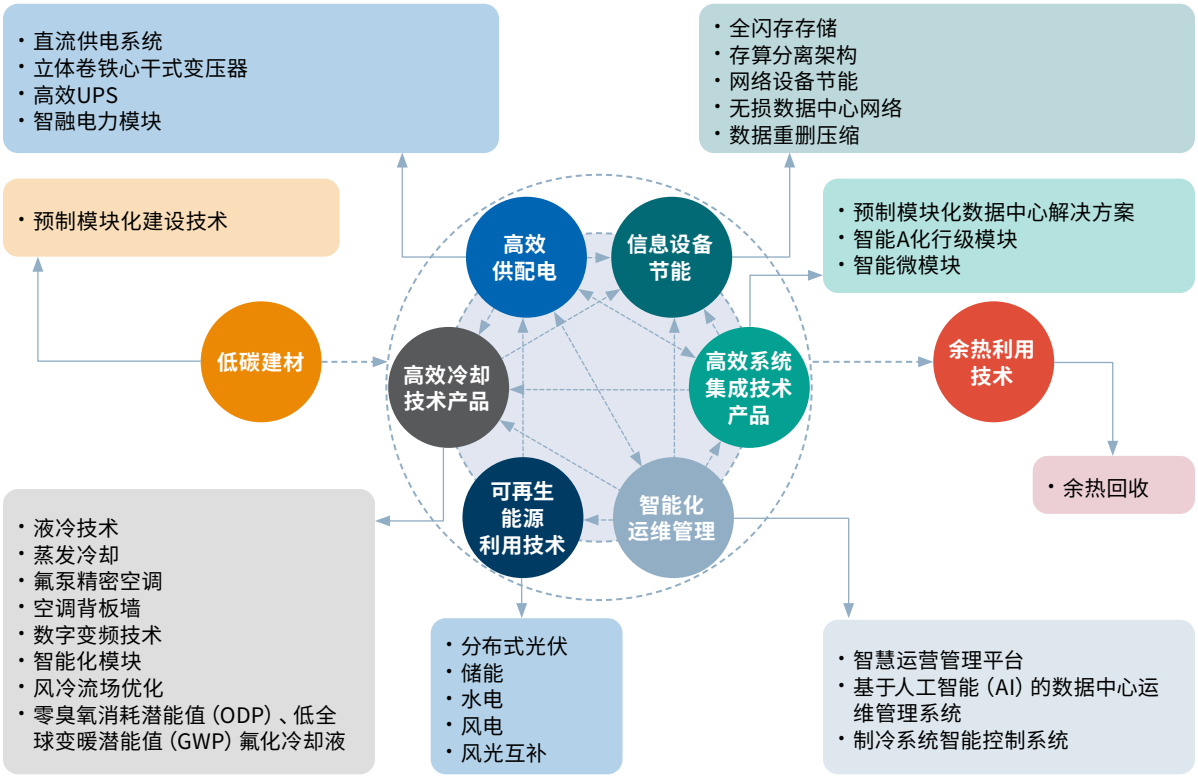
- **开发创新绿色金融工具，为绿色数据中心节能降碳技术的应用提供多样化的资金支持。**多样化创新的绿色金融工具能针对不同的数据中心能效提升应用场景，提供更加定制化的融资服务。放眼全球数据中心和云计算领域，诸如 Equinix、Digital Realty、Nabiax、Atos 和百度等 IT 运营商或数据中心托管商都纷纷涉足可持续融资。绿色债券（Green Bond）以及可持续发展挂钩贷款（Sustainable Linked Loan, SLL）是当前应用在数据中心项目中的最主流的两类绿色金融工具，其中绿色债券需要与特定的项目绑定（如新建绿色数据中心项目），而 SLL 更加灵活，企业可以自由使用资金，贷款利率需与某些指标（如电源利用效率 PUE 目标、碳排放或用水量等）挂钩。另外，也可以考虑在数据中心改造项目中探索合同能源管理等模式，引入节能服务公司等第三方，解决既有数据中心能效改造项目中高初始投资的问题，并实现多方共赢。

案例：绿色金融工具支持绿色数据中心项目

新加坡电信（Singtel）集团是新加坡最大的数据中心运营商之一。渣打银行、华侨银行等四家银行共同为其数据中心子公司提供了约 4 亿美元的绿色贷款，支持其绿色转型。贷款协议规定该资金所支持的数据中心必须达到超金级认证（Green Mark GoldPlus[xxv]）。在绿色贷款支持下，两个旗舰数据中心 DC West 和 DC Kim Chuan 获得了绿色建筑铂金级认证（Green Mark Platinum）。

- **扩充绿色债券项目目录，为金融支持绿色数据中心项目提供指引。**绿色项目和绿色领域的专业性目录清单是专门用于界定和遴选符合各类绿色债券支持和适用范围的工具，能够为金融机构、企业和上市公司等市场主体发行绿色债券募集资金提供更加明确的指引，也能为各级地方政府制定绿色债券激励机制、出台相关配套政策提供参考。数据中心节能是多个子系统节能和多项技术集成应用的结果（图表 37），应鼓励金融政策将这一技术系统纳入绿色金融支持项目清单中。预制模块化建设技术、低碳建筑材料、废旧电子设备回收利用等帮助数据中心全生命周期减排的技术也应纳入绿色投融资目录，最大程度支持数据中心实现全生命周期零排放。

图表 37　数据中心低碳技术汇总



来源：节能与综合利用司[116]，落基山研究所

xxv　新加坡推出的绿色建筑认证标识，有铂金级、超金级、黄金级和认证级四个认证等级。

4. 赋能绿色智慧未来：算碳解耦行动建议

规划选址—统筹考虑多方面因素优化数据中心选址布局

- **提高绿色电力可获取性：**优先选择风、光、水等零碳电力资源富集的地区建设数据中心，通过使用当地清洁电网、电力直供、微电网等方式就近使用绿色电力。当地可再生能源资源稀缺时，优先考虑拥有跨省跨区绿电交易市场的地区，通过市场方式实现数据中心绿电供应。考虑到可再生能源出力不稳定性，还可以结合双路或多路供电以及多种能源互补以保障数据中心用电的安全、稳定。

- **充分考虑自然冷源：**优先选择气候寒冷或温和的地区，以便利用室外低温空气进行冷却。优先选择靠近自然水源的地区如江河湖海，便于实施高效的自然水冷系统。将自然冷源技术与智能控制系统相结合，实现自动调节，提高冷却效率。结合自然冷源与传统冷源构建可靠的制冷系统，确保数据中心稳定运行。

- **挖掘余热利用潜力：**在园区内规划数据中心时，优先考虑数据中心周边建筑的用热需求，实现余热的精准对接和高效分配。除了就近利用余热外，通过采用热泵、储热、远距离输热等技术，将数据中心余热高效整合进区域供暖系统。积极把握并利用国家和地方政府为余热利用提供的税收减免、资金补贴等激励措施，以降低项目成本。

新建与改造—发挥标准引领作用，提高新建与既有数据中心节能降碳水平

- **构建多维度能碳评估指标体系：**在 PUE 指标的基础上，引入可再生能源利用率、冷却效率、能源再利用率、碳利用率、IT 设备服务器能效等多个评价指标，构建全面的数据中心多维度能碳评估指标体系。根据数据中心所在地的气候条件、能源结构状况，设定合理的能碳指标引导值和约束值。

- **完善数据中心节能标准，推动节能减碳技术广泛应用：**将绿色建筑设计理念融入数据中心标准，充分挖掘自然冷却的潜力，并优化围护结构。引导使用节能技术如高效冷却、高效电气设备、高效 IT 设备。推荐采用余热回收技术以及智能化能源管理系统。鼓励利用可再生能源，如太阳能光伏、风力发电和储能系统。

- **加快改造低能效数据中心：**根据数据中心的规模和运营年限，制定分类节能改造计划。对于老旧且能效低下的中小型数据中心，考虑关停并转措施。对于大型和超大型数据中心，合理采取局部与系统改造措施。优先采用模块化数据中心用于改造，减少对运营的影响。建立跨专业能效沟通机制，确保各方面的协同合作。定期进行节能评估，提高对能效措施经济性的认识。

运行管理—打造清洁低碳、电网友好的数据中心电力消费模式

- **多元化绿色电力采购方式：**数据中心运行方应综合考虑自身用电规模、所处项目阶段、风险偏好、经济效益、环境披露要求等因素，组合选择场内分布式可再生能源、绿电专线直供、绿电交易、绿证交易等采购方式，加速实现电力供应的绿色化

- **完善绿电、绿证交易制度：**政府、电网、交易中心等相关方需要共同建立起常态化的绿证、绿电交易等市场机制，同时保证其中环境权益的唯一性、权威性、可溯源性，提高国内、国际的认可度。在绿电供给较为紧张的地区，应进一步畅通跨省跨地区绿电交易机制，提高交易频次、交易规模和输电通道的可得性。

- **探索算电协同的最佳模式：**企业需选拔专业技术人员综合管理能源供应、算力调度、制冷等多个系统，实时识别并独立控制与实时业务逻辑耦合性较弱的部分灵活性资源，而且在空间上能够对所拥有的数据中心实现跨地区资源共享和最优配置。更重要的是，数据中心时空调度都需要电力市场设计上提供足够的价格激励信号，推动需求侧灵活性资源常态化参与现货、辅助服务、需求响应等市场机制，促进园区级和区域级的算电协同调度，实现算力价格和电力价格的交叉关联。

- **规模化示范绿色数据中心和算电协同试点：**数据中心主体应联合当地新能源企业、电网公司积极打造数据中心源网荷储全绿电直供实践，可优先考虑在集中式或分布式可再生能源富集、国家算力枢纽节点地区进行示范探索，同时探索绿氢氨醇燃料电池、核能小堆等零碳供电新选择。培育算电协同商业模式、总结管理运行经验，以点带面，促进全国范围的算电协同推广。

保障机制—政策和市场合力保障数据中心绿色高质量发展

- **完善针对数据中心和数据中心产品的碳排放约束政策和披露机制：**对于数据中心领域的上市公司和大型企业提出强制碳排放披露要求；鼓励通过绿色采购自下而上推动数据中心节能降碳，有算力采购需求的下游企业可以对上游数据中心企业提出减碳要求，政府和公共部门宜将碳排放相关指标纳入数据服务采购需求标准；在数据中心可持续认证指标体系中加入碳排放相关指标。

- **建立统一的数据中心碳核算体系：**制定针对数据中心的碳排放核算标准，特别要明确数据中心范围三碳排放的计量方法；明确数据中心不同主体和所有权结构的碳排放划定；鼓励应用 DCIM 等数字化工具，规范数据中心数据采集和处理，加强能碳相关信息发布和透明度；并在数据中心碳核算标准的制定过程中注重国际对标和互认。

- **运用绿色金融工具为数据中心节能降碳提供资金支持：**鼓励金融机构和企业开发适合数据中心项目的创新绿色金融工具，为绿色数据中心节能降碳技术的应用提供多样化的资金支持；将液冷、高效系统集成技术、智能化运维等数据中心节能降碳技术纳入《绿色债券支持项目目录》等绿色金融技术目录，为绿色金融支持数据中心节能降碳提供明确指引。

参考文献

1 IDC&浪潮信息&清华全球产业元，2022–2023全球计算力指数评估报告，2023年7月，https://www.igi.tsinghua.edu.cn/info/1019/1321.htm

2 中国青年报，算力、新质生产力与国家治理现代化，2024年5月，http://theory.people.com.cn/n1/2024/0512/c40531-40234127.html

3 中国通服数字基建产业研究院，中国数据中心产业发展白皮书（2023 年），2023年4月，https://aimg8.dlssyht.cn/u/551001/ueditor/file/276/551001/1684888884683143.pdf

4 国务院新闻办就2024年一季度工业和信息化发展情况举行发布会, https://www.gov.cn/lianbo/fabu/202404/content_6952362.htm

5 中国通服数字基建产业研究院，中国数据中心产业发展白皮书（2023 年），2023年4月，https://aimg8.dlssyht.cn/u/551001/ueditor/file/276/551001/1684888884683143.pdf

6 EMBER，2024全球电力评论，https://ember-climate.org/app/uploads/2024/04/ZH_Global-Electricity-Review-2024.pdf

7 IEA (2024), Electricity 2024, IEA, Paris https://www.iea.org/reports/electricity-2024, Licence: CC BY 4.0

8 AI Datacenter Energy Dilemma - Race for AI Datacenter Space, https://www.semianalysis.com/p/ai-datacenter-energy-dilemma-race

9 AI chips will consume over 1.5% of the world’s electricity over the next five years – and 1B tons of carbon, https://library.techinsights.com/strategy-analytics/wp-asset/2012723#code=DCC-2406-803

10 GS SUSTAIN: Generational Growth — AI/data centers’ global power surge and the sustainability impact, https://www.goldmansachs.com/images/migrated/insights/pages/gs-research/gs-sustain-generational-growth-ai-data-centers-global-power-surge-and-the-sustainability-impact/sustain-data-center-redaction.pdf

11 Emission Factors in Refrigerants and Fugitive Gases, https://www.climatiq.io/data/category/refrigerants-and-fugitive-gases

12 GHG Protocol HFC Tool (Version 1.0)，https://ghgprotocol.org/sites/default/files/hfc-cfc_1.pdf

13 Net Zero Tracker, https://zerotracker.net/

14 中国信息通信研究院，《中国绿色算力发展研究报告（2024年）》，https://mp.weixin.qq.com/s/-wqtRt812G4HinUJY0tPzg

15 The Science Based Targets initiative (SBTi), https://sciencebasedtargets.org/companies-taking-action

16 绿色云端2024, https://www.greenpeace.org.cn/wp-content/uploads/2024/07/Clean-Cloud-2024.pdf

17 绿色云端2024, https://www.greenpeace.org.cn/wp-content/uploads/2024/07/Clean-Cloud-2024.pdf

18 落基山研究所&百度智能云，数智碳中和——以数智技术助力关键相关方实现碳达峰碳中和，2022年1月，北京，https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2022/03/shuzhitanzhonghe-1.pdf

19 落基山研究所&百度智能云，数智碳中和——以数智技术助力关键相关方实现碳达峰碳中和，2022年1月，北京，https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2022/03/shuzhitanzhonghe-1.pdf

20 Average lead times to build new electricity grid assets in Europe and the United States, 2010-2021, IEA, https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-lead-times-to-build-new-electricity-grid-assets-in-europe-and-the-united-states-2010-2021

21 Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2023, https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/elec_cost_perf.pdf
22 中国信息通信研究院《中国绿色算力发展研究报告（2024年）》, http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202407/P020240711551514828756.pdf
23 中国电力发展促进会电力与算力协同专业委员会《电力与算力协同发展蓝皮书（2024）》, https://mp.weixin.qq.com/s/EN8a3GDUlxoOgfD50vkEzg
24 中国电力发展促进会电力与算力协同专业委员会《电力与算力协同发展蓝皮书（2024）》, https://mp.weixin.qq.com/s/EN8a3GDUlxoOgfD50vkEzg
25 中国电力联合会，中国电力统计年鉴2020–2023
26 Hyperscale Data Centers Hit the Thousand Mark; Total Capacity is Doubling Every Four Years, https://www.srgresearch.com/articles/hyperscale-data-centers-hit-the-thousand-mark-total-capacity-is-doubling-every-four-years
27 Powering Intelligence Analyzing Artificial Intelligence and Data Center Energy Consumption, https://www.wpr.org/wp-content/uploads/2024/06/3002028905_Powering-Intelligence_-Analyzing-Artificial-Intelligence-and-Data-Center-Energy-Consumption.pdf
28 Data Centers Part II: Power Constraints – The Path Forward, https://www.tdsecurities.com/ca/en/data-centers-2-power-constraints
29 Data Centers Part II: Power Constraints – The Path Forward, https://www.tdsecurities.com/ca/en/data-centers-2-power-constraints
30 PG&E: 3.5GW of data center capacity in California's connection pipeline over next five years，https://www.datacenterdynamics.com/en/news/pge-35gw-of-data-center-capacity-in-connection-pipeline-over-next-five-years/
31 Powering Intelligence Analyzing Artificial Intelligence and Data Center Energy Consumption, https://www.wpr.org/wp-content/uploads/2024/06/3002028905_Powering-Intelligence_-Analyzing-Artificial-Intelligence-and-Data-Center-Energy-Consumption.pdf
32 《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/26/5612405/files/37d38a7728564ad8b5e4f08c16cfc8f2.pdf
33 国家发展改革委等部门《关于深入实施"东数西算"工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924596.htm#:~:text=%E4%B8%BA%E6%B7%B1%E5%85%A5%E8%B4%AF%E5%BD%BB%E8%90%BD%E5%AE%9E%E5%85%9A%E4%B8%AD%E5%A4%AE
34 【数字经济】革命老区抢滩"中国算谷", https://mp.weixin.qq.com/s/d3dlE43emt1kQBYXeMa07Q
35 一图读懂 | "东数西算"工程解读，https://gbdy.ndrc.gov.cn/gbdyzcjd/202202/t20220217_1315798.html
36 中国信息通信研究院，《中国绿色算力发展研究报告（2024年）》，https://mp.weixin.qq.com/s/-wqtRt812G4HinUJY0tPzg
37 H. Zhu et al., Future data center energy-conservation and emission-reduction technologies in the context of smart and low-carbon city construction, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722006266
38 美通社，浪潮信息赵帅：从算力源头减少碳排放，绿色化实践与度量体系缺一不可，https://www.163.com/dy/article/IECQSPEL051494RM.html
39 曹播，虚拟化技术对PUE的冲击，https://qikan.cqvip.com/Qikan/Article/ReadIndex?id=38817089&info=KScD%2fBJlWofP7TuHGekfXHrkSmm5RM6%2fBaBNmiCkD%2bc%3d
40 维谛技术，漫谈数据中心PUE --由PUE的"BUG"谈如何正确认识PUE，https://mp.weixin.qq.com/s/okEL4ErxDSN99bN6c6e9wQ
41 绿色云端2024, https://www.greenpeace.org.cn/wp-content/uploads/2024/07/Clean-Cloud-2024.pdf
42 Google 2024 Environmental Report，https://sustainability.google/reports/google-2024-environmental-report/

43 【文字实录】国网冀北岳昊：智能算力快速发展对电力供需的影响分析——2024年新型电力系统线上研讨会（第五期）, https://mp.weixin.qq.com/s/vOnvD5u8DfHSmd6_zR6afQ
44 国务院新闻办就2024年一季度工业和信息化发展情况举行发布会, https://www.gov.cn/lianbo/fabu/202404/content_6952362.htm
45 国网冀北经研院 岳昊：智能算力快速发展对电力供需的影响分析, https://mp.weixin.qq.com/s/w05pYBIQRzfWRmTx2KyycA
46 Stefan Pfenninger & Iain Staffell, https://www.renewables.ninja/
47 《中国算力发展指数白皮书（2023年）》, http://www.caict.ac.cn/english/research/whitepapers/202311/P020231103309012315580.pdf
48 国家发展改革委等部门《关于深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202401/content_6924596.htm#:~:text=%E4%B8%BA%E6%B7%B1%E5%85%A5%E8%B4%AF%E5%BD%BB%E8%90%BD%E5%AE%9E%E5%85%9A%E4%B8%AD%E5%A4%AE
49 《中国算力发展指数白皮书（2023年）》, http://www.caict.ac.cn/english/research/whitepapers/202311/P020231103309012315580.pdf
50 2023年中国风能太阳能资源年景公报, https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202402/t20240222_6082082.html#:~:text=2023%E5%B9%B4%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E9%A3%8E%E8%83%BD%E5%A4%AA
51 Rajan Sodhi, How CSRD and EED are Reshaping Data Center Sustainability Reporting, Hyperview
52 Rajan Sodhi, How California's New Emissions Disclosure Law Will Affect Data Centers, Hyperview
53 Uptime institute, Uptime Institute Global Data Center Survey 2024
54 Douglas Donnellan, et. Al., Uptime institute global data center survey 2024, Uptime Institute
55 中国人民银行等，《绿色债券支持项目目录（2021年版）》
56 国家互联网信息办公室（2024），数字中国发展报告（2023）
57 国家信息中心，“碳达峰、碳中和”目标下应三管齐下 有效发挥数据中心集群化阶乘化降耗效应，https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202106/t20210602_1282418.html
58 The new Google Cloud region in Turin Italy is now open, https://cloud.google.com/blog/products/infrastructure/new-google-cloud-region-in-turin-italy-now-open
59 Where are the hyperscale cloud providers building their data centres? , https://www.techmonitor.ai/hardware/cloud/where-cloud-providers-building-data-centres?cf-view
60 《全国一体化大数据中心协同创新体系算力枢纽实施方案》, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-05/26/5612405/files/37d38a7728564ad8b5e4f08c16cfc8f2.pdf
61 Where are the hyperscale cloud providers building their data centres?, https://www.techmonitor.ai/hardware/cloud/where-cloud-providers-building-data-centres?cf-view
62 Ambitious AI roadmaps are challenging existing infrastructure, https://www.flexential.com/resources/report/state-ai-infrastructure
63 中国首个零碳数据中心！年减碳量超30万吨，https://mp.weixin.qq.com/s/MwDsjCxMF06exQCx-1uWIA
64 打造“绿色算力基地”青海有底气，http://www.qinghai.gov.cn/zwgk/system/2024/03/29/030040479.shtml
65 TEL-Rjukan, https://greenmountain.no/data-center/tel-rjukan/
66 AWS acquires Talen's nuclear data center campus in Pennsylvania, https://www.datacenterdynamics.com/en/news/aws-acquires-talens-nuclear-data-center-campus-in-pennsylvania/
67 Unlocking Value CUMULUS, https://ir.talenenergy.com/static-files/f02c44a9-d2dc-45c1-9331-eee1495f7d2d
68 SVG-Rennesøy, https://greenmountain.no/data-center/svg-rennesoy/

69 “绿电”变算力 探访国家级绿色数据中心如何高效节能降碳, http://www.news.cn/local/20240111/e41a2a8b28e34fbbbc6952fe743c5556/c.html
70 制冷与空调，新型蒸发冷却空调系统在数据中心的运行测试分析，https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIwMTcxMjI4Mw==&mid=2247509740&idx=1&sn=1e7cc5560458c13f39b0cd50aa441f99&chksm=96eb5118a19cd80e05273cbe42e5f7a63511d2792dc929473d963ade2bf61273a48581712143&scene=27
71 中央纪委国家监委网站，把数据存进海底——探访全球首个商用海底数据中心，https://www.cdjjjc.gov.cn/content/2024/03/11/28474.html
72 雪球，2024巴黎奥运会：用数据中心余热为泳池供暖, https://xueqiu.com/4850661141/299310314
73 赛迪顾问简析全国数据中心布局：局地供不应求，避免一哄而上，https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_8724913
74 DataCenter Knowledge, Using a Total Cost of Ownership (TCO) Model for Your Data Center, https://www.datacenterknowledge.com/business/using-a-total-cost-of-ownership-tco-model-for-your-data-center
75 Eaton, Best practices for modernizing vintage data centers, https://datacenters.lbl.gov/sites/default/files/Best%20practices%20for%20modernizing%20vintage%20data%20centers.pdf
76 DataCenter Knowledge, Using a Total Cost of Ownership (TCO) Model for Your Data Center, https://www.datacenterknowledge.com/business/using-a-total-cost-of-ownership-tco-model-for-your-data-center
77 Powering Intelligence Analyzing Artificial Intelligence and Data Center Energy Consumption, https://www.wpr.org/wp-content/uploads/2024/06/3002028905_Powering-Intelligence_-Analyzing-Artificial-Intelligence-and-Data-Center-Energy-Consumption.pdf
78 Invinity Energy Systems, 1.3 MWh sale to U.S. Datacenter, https://invinity.com/mwh-sale-flow-battery-us-datacenter/
79 数据中心不配锂电池，长时储能技术更优？, https://mp.weixin.qq.com/s/VNL66TP9-C6KiR6dIg3CYQ
80 Microsoft tests hydrogen fuel cells for backup power at datacenters, https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/hydrogen-datacenters/
81 Hydrogen fuel cells could provide emission free backup power at datacenters, Microsoft says, https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/hydrogen-fuel-cells-could-provide-emission-free-backup-power-at-datacenters-microsoft-says/
82 Progress on our commitment to sustainable backup power in datacenters by 2030, https://azure.microsoft.com/en-us/blog/progress-on-our-commitment-to-sustainable-backup-power-in-datacenters-by-2030/
83 Hydrotreated vegetable oil (HVO) can result in as much as 90% less greenhouse gas emissions over the fuel’s life cycle when compared with diesel, https://www.aboutamazon.eu/news/sustainability/harnessing-the-power-of-plants-to-decarbonise-our-data-centres
84 Digital Realty Expands Renewable Generator Fuel Rollout to the U.S., https://www.digitalrealty.com/about/newsroom/press-releases/123258/digital-realty-expands-renewable-generator-fuel-rollout-to-the-u.s.--
85 Green Energy Partners plans to expand Virginia’s capacity with nuclear powered data centers, https://www.datacenterdynamics.com/en/news/green-energy-partners-plans-to-expand-virginias-capacity-with-nuclear-powered-data-centers/
86 SMALL MODULAR REACTORS TURN WATER INTO ENERGY, https://water2.energy/gems/
87 郝一涵，江漪，路舒童，创新金融机制助力中国可再生能源发展——绿电长期交易合同的机遇与挑战，落基山研究所，2024，https://rmi.org.cn/insights/green-power-long-term-agreement/
88 国家能源局，国家能源局发布2024年8月全国可再生能源绿色电力证书核发及交易数据，https://www.nea.gov.cn/2024-09/11/c_1310786091.htm

89 能源杂志，封面报道 | 绿证新时代，https://www.inengyuan.com/juececankao/13668.html
90 人民日报，《电力中长期交易基本规则—绿色电力交易专章》发布——推动经营主体积极参与绿电交易，https://www.gov.cn/zhengce/202408/content_6970517.htm
91 中国电力企业联合会，2023年中国绿色电力（绿证）消费TOP100企业名录正式发布，https://mp.weixin.qq.com/s/9dQPn2UZNjEVrSnu9a3r3Q
92 AIB NEWS - 21 December 2023, https://www.aib-net.org/newsletter/web.html?n2g=exu6l9s3-94w48wba-dy4
93 RE100 Reporting Guidance 2024, https://www.there100.org/sites/re100/files/2024-10/RE100%20Reporting%20Guidance%202024%20v3.pdf
94 Sustainable green data centers, https://www.ironmountain.com/data-centers/sustainability
95 Iron Mountain's Innovative 24/7 CFE Solution Lightens Its Data Center Customers' Carbon Emissions Load, Serving 100+ U.S. Facilities, https://cleartrace.io/iron-mountains-innovative-24-7-cfe-solution-lightens-its-data-center-customers-carbon-emissions-load-serving-100-u-s-facilities/
96 Timely progress towards around-the-clock carbon-free energy, https://cloud.google.com/blog/topics/sustainability/t-eacs-help-drive-around-the-clock-carbon-free-energy
97 My journey towards procuring carbon-free energy on an hourly basis: A comprehensive guide from knowledge-building to certification & reporting, https://247.eurelectric.org/buyers-journey/
98 国家发展改革委 财政部 国家能源局，关于做好可再生能源绿色电力证书全覆盖工作 促进可再生能源电力消费的通知，https://zfxxgk.nea.gov.cn/2023-07/25/c_1310735434.htm
99 European Commission, A new Circular Economy Action Plan -- For a cleaner and more competitive Europe, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN
100 Yin X, Ye C, Ding Y, Song Y. Exploiting Internet Data Centers as Energy Prosumers in Integrated Electricity-Heat System. IEEE Trans Smart Grid 2023;14:167–82. https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3197613.
101 曹雨洁, 丁肇豪, 王鹏, 张素芳, 刘吉臻, & 刘文娟等. (2022). 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二):机遇与挑战. 中国电机工程学报(010), 042.
102 助力绿色低碳 阿里巴巴与华北电力大学数据中心算力-电力协同调度项目多项成果发布，https://developer.aliyun.com/article/1135139
103 Discover How Google is Reaching Its Sustainability Goals With Electricity Maps，https://www.electricitymaps.com/client-stories/google
104 Microsoft datacenter batteries to support growth of renewables on the power grid, https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/ireland-wind-farm-datacenter-ups/
105 德国能源署（发布方）（dena，2022）：中德数据中心灵活性研究——现状和最佳实践
106 Dynamically Controlling Server Power Consumption and Reducing Data Center Peak Usage by 16 to 18 Percent, https://www.intel.co.id/content/dam/www/public/us/en/documents/articles/ntt-data-case-study.pdf
107 瞻研院，洞察2022：中国IDC(互联网数据中心)行业竞争格局及市场份额
108 中商产业研究院，《2024-2029年中国云计算行业深度分析及发展趋势预测研究报告》
109 国务院，国务院关于加强数字政府建设的指导意见
110 IDC, 中国政务云市场规模达794.5亿，大模型引领市场新增长，https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prCHC52441924
111 Dodd, N., Alfieri, F., De Oliveira Gama Caldas, M., Maya-Drysdale, L., Viegand, J., Flucker, S., Tozer, R., Whitehead, B., Wu, A. and Brocklehurst, F., Development of the EU Green Public Procurement (GPP) Criteria for Data Centres, Server Rooms and Cloud Services, EUR 30251 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-19447-7, doi:10.2760/964841, JRC118558.

112 财政部，工业和信息化部，《数据库政府采购需求标准（2023年版）》，2023
113 魏文栋，（2024）多举措推动算力牵手绿电，经济日报
114 Paul Lin and Robert Bunger, Recommended Inventory for Data Center Scope 3 GHG Emissions Reporting, Schneider Electric
115 南昌市人民政府，关于打造区域金融中心 加快金融业高质量发展的实施意见，http://ncjk.nc.gov.cn/ncjkq/jsjsyshj/202304/14612472a72e49b196d339df6ddcb942.shtml
116 节能与综合利用司，《国家信息化领域节能技术应用指南与案例（2022年版）》，https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/nyjy/art/2022/art_fbb57e69a8b148cfa263953a71b53e2e.html

刘雨菁，李威，刘子屹，王萌，王广煦等. 解耦算力发展与碳排放 – 数据中心用能增长的挑战与解决路径，落基山研究所，2024, https://rmi.org.cn/insights/decarbonizing-data-centers-report/

RMI 重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。 因此，我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

除特别注明，本报告中所有图片均来自iStock。

RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

© 2024年11月，落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。