

中国绿色算力发展研究报告 (2023 年)

中国信息通信研究院产业与规划所

内蒙古和林格尔新区管理委员会

2023年7月

版权声明

本报告版权属于中国信息通信研究院、内蒙古和林格尔新区管委会，并受法律保护。转载、摘编或利用其它方式使用本报告文字或者观点的，应注明“来源：中国信息通信研究院、内蒙古和林格尔新区管委会”。违反上述声明者，编者将追究其相关法律责任。

前 言

建设数字中国是数字时代推进中国式现代化的重要引擎，作为一种新型生产力，算力已成为推动数字经济发展的核心力量，正强有力地支撑数字中国建设。享受算力带来高价值驱动力的同时，也不能忽视算力背后的高能耗问题，这不仅是能耗、环境和气候的挑战，更是算力产业高质量发展的挑战。

在碳达峰碳中和目标引领下，大力推动算力绿色化发展，实现绿色算力升级，是我国建设数字基础设施和展现节能减碳大国担当的重要命题。近年来，绿色算力在政策顶层规划、技术产品创新和赋能传统产业低碳转型方面取得积极成效。

本报告提出了绿色算力内涵定义，围绕算力生产、算力运营、算力管理、算力应用等层次，建立了绿色算力高效（Efficient）、低碳（Low carbon）、智能（Intelligent）、集约（Intensive）发展的 ELII 框架。以此为基础，报告对当前全球及我国绿色算力发展现状进行系统性梳理。同时，报告分析了主导绿色算力发展成效的四大关键因素，展望我国绿色算力发展趋势，并提出下一步发展建议。

今年是我院首次发布绿色算力主题的报告，旨在厘清绿色算力概念内涵、发展框架及趋势，以定性分析为主，为业界展现当前典型发展举措与实践案例，仍有诸多不足，恳请各界批评指正。下一步，报告将聚焦绿色算力总规模、发展增速、区域水平排名等关键量化指标，并于明年推出，敬请关注。

目 录

一、绿色算力即算力的绿色低碳追求.....	1
（一）绿色算力的内涵及价值.....	1
（二）绿色算力发展 ELII 框架	2
1.算力生产绿色化：高效.....	2
2.算力运营绿色化：低碳.....	3
3.算力管理绿色化：智能.....	5
4.算力应用绿色化：集约.....	5
二、全球绿色算力发展进入活跃期.....	6
（一）算力生产绿色化技术产品加速迭代.....	6
（二）算力运营绿色化建设布局全面提速.....	7
（三）算力管理绿色化得到政策持续加码.....	9
（四）算力应用绿色化落地赋能效应倍增.....	10
三、中国绿色算力发展态势良好.....	11
（一）算力生产绿色化正吸引头部主体竞赛.....	11
（二）算力运营绿色化得到全面推进与提升.....	13
（三）算力管理绿色化强支撑算力集群建设.....	16
（四）算力应用绿色化加速产业数字化转型.....	19
四、绿色算力发展受四大关键因素主导.....	20
（一）算力规模激增带来持续性的降碳挑战.....	20
（二）算效持续提升但仍需重大技术突破.....	21
（三）电能利用率受益于技术创新稳步优化.....	22
（四）碳排放因子受益于政策推动持续降低.....	23
（五）中国绿色算力发展整体展望.....	24
五、多措并举推进绿色算力发展.....	24
（一）顶层保障，健全绿色算力一体化发展机制.....	24
（二）创新先行，加速绿色算力核心技术研发.....	25
（三）行业发力，构筑绿色算力产业协同生态.....	25
（四）引导布局，强化绿色算力与东数西算协同.....	26
（五）应用赋能，推进绿色算力赋能千行百业.....	26

一、绿色算力即算力的绿色低碳追求

（一）绿色算力的内涵及价值

建设数字中国是数字时代推进中国式现代化的重要引擎，作为一种新型生产力，算力已成为推动数字经济发展的核心力量，正强有力地支撑数字中国建设。当前，算力已广泛融合到社会生产生活的各个方面，为千行百业的数字化转型提供基础动力，是当今社会的核心资源，也是支撑经济社会加速数字化转型的重要底座。享受算力带来高价值驱动力的同时，也不能忽视算力背后的高能耗问题。据国家发展改革委高技术司公布数据显示，我国数据中心年用电量已占全社会用电的 2% 左右，且该占比仍在快速增长。

绿色算力，即算力的绿色低碳追求，是算力高质量发展的重要目标，可通过融合推进算力生产、算力运营、算力管理、算力应用等层次的绿色化来实现。算力生产层依托 IT 计算设备实现算力的生产供给，算力运营层主要依托数据中心用能实现算力的运营控制，算力管理层通过算网协同、算力网络实现算力的管理调度，算力应用层通过算力服务平台实现算力的应用赋能。协同融合推进这四个层次的绿色化，才能助力绿色算力高质量发展。

推进绿色算力发展，具有重要战略意义。第一，发展绿色算力，将致力于在算力供给侧各层次推进绿色低碳化，这也是算力持续高能耗形势下的必然选择。第二，发展绿色算力，将致力于进一步降低算力成本，通过构建公共算力服务平台，加强数据、算力和经济之间的协同联动，从而有效赋能千行百业绿色化转型升级，促进数字经济的

可持续发展。第三，发展绿色算力，是信息通信行业践行国家双碳战略、落实节能降耗的关键举措之一，可为民众营造更好的生活和生态环境。

（二）绿色算力发展 ELII 框架

结合绿色算力的内涵和特点，本报告围绕算力生产、算力运营、算力管理、算力应用四个层次，建立绿色算力高效（Efficient）、低碳（Low carbon）、智能（Intelligent）、集约（Intensive）发展的 ELII 框架。



图 1 绿色算力发展 ELII 框架

1. 算力生产绿色化：高效

算力生产绿色化，主要指算力生产 IT 计算设备运行的高效化，通过提升底层软硬件架构计算的高效性从而降低能耗，是绿色算力在算力设备微观层面的核心体现。

算力生产的高效主要通过工艺技术进步、Chiplet（芯粒）封装以及架构创新提升单芯片性能（芯片层），运用存算一体、网络存储融合等技术促进计算存储网络协同（系统层），以及通过异构计算资源

池化实现计算平台统一调度（平台层）等方式来提高算效。在摩尔定律下的集成电路尺寸微缩提升了单位面积的晶体管密度，从而提高了单芯片算力，但随着器件尺寸逐渐逼近物理极限，后续很难继续通过提升芯片面积和晶体管集成度来增加算力。同时，传统冯·诺依曼存储墙与功耗墙瓶颈无法满足未来的应用需求，而直接利用存储器本身进行数据处理的存内计算，以及以 GPU、NPU、TPU、DPU 等异构芯片为代表的异构计算，有望突破冯·诺依曼架构，成为绿色算力落地的关键技术。算力规模、算效是算力生产高效性的核心指征。CP（Computational Power）即算力规模，指区域内计算设备产生的算力总规模，一般单位为 Flops。CE（Computational Efficiency）即算效，指 IT 计算设备的算力效率，表示单位能耗可产生的算力规模，一般单位为 Flops/W。

2. 算力运营绿色化：低碳

算力运营绿色化，主要指算力运营层面用能的低碳化，包括用能源头方面提升可再生能源利用率与推进能源循环利用，以及能源使用方面通过运用新技术持续优化能源使用效率，是支撑算力规模化、绿色化发展的关键所在，也是绿色算力在能源消耗宏观层面的集中体现。

用能源头低碳化，包括绿电交易、绿证购买，采用分布式电站就近消纳及集中式绿电发电站供电，绿电直供或混合供电，以及推进资源及能源的循环利用。绿电交易是“证电合一”的交易，购买绿电时可以取得电能使用权和绿色电力证书；绿证交易是“证电分离”的交易，用户可以单独购买绿证，以获得绿色电力消费证明。部署分布式光伏

发电，实现就近消纳绿电，降低运行成本、提高用能的安全性和可靠性。集中式绿电发电站供电，主要通过电网公司的电网将大型新能源发电站的清洁能源输送到用电侧来实现电力脱碳，主要有集中式风电、集中式光伏发电等。推进资源及能源的循环利用，包括水资源回收利用、余热回收利用、电子设备回收利用等，将废弃的可循环利用资源进行二次或多次利用。**CEF (Carbon Emission Factor)**即碳排放因子，是用能源头低碳化的核心指征，指单位能耗对应的碳排放量，一般单位为 tCO_2/MWh 。

能源利用低碳化，主要是优化电能使用效率。随着数据中心信息设备高密度集成化，信息设备产生的热量在不断增加，而数据中心的空调制冷占数据中心总功耗的 10%~50%，因此降低数据中心的空调耗电量可以有效的优化电能使用效率。当前，液冷技术是当下最有效的散热技术，其原理是通过利用液体的高热容和高热传导性能，将信息设备产生的热量传递到液体中，然后通过液体的流动将热量带走。尤其是浸没式液冷，将发热元器件完全浸没在电介质流体中，依靠冷却液吸收热量，替代冷空气给信息设备降温。相对于直接用电制冷散热，采用液冷技术不仅节约能源消耗，而且还有效地减少用电制冷过程中 3~4 倍的碳排放，从而达到算力运营的绿色化。**PUE (Power Usage Effectiveness)** 即电能使用效率，指数据中心总能耗与 IT 负载能耗的比值，其中数据中心总能耗包括 IT 设备能耗和制冷、配电等系统的能耗，其值大于 1，越接近 1 表明非 IT 设备耗能越少，即能效水平越好。

3. 算力管理绿色化：智能

算力管理绿色化，主要指算力管理调度层面的智能化，依托算力网络对分散、异构的算力进行智能感知、连接和统筹调度，实现绿色算力资源的配置优化，是当前算力绿色化发展正努力实践的方向。

算力管理智能化，主要包括算力调度、算网协同。算力调度实现算力区域布局优化，使算力任务倾向于能源供给绿色化和气候寒冷 PUE 值低的区域。算力调度是算力网络的大脑，主要通过区域布局和结构调整进行全网异构算力资源的优化整合、智能编排、弹性调度，有序引导不同算力需求向相应区域合理布局和迁移，协同解决算力资源结构性失衡问题，实现总体时空布局优化和成本优化，进一步提升算网资源利用率。算网协同实现算力供需精准匹配。算网协同是算力网络的神经中枢，通过感知应用及算力，算网协同对算力进行灵活匹配、动态调度，最终将任务路由到合适的目标计算节点，实现算力与需求精准匹配，最终构建数据、计算资源、网络的一体化服务，直接通过网络调用接入的各类算力资源，实现一站式的算力服务。

4. 算力应用绿色化：集约

算力应用绿色化，主要指算力赋能应用的集约化，通过构建公共算力服务平台，进一步降低算力成本，并深层次融入支撑应用需求侧业务，推进应用需求侧的绿色化改造与升级，其本质是推进算力基础设施的可持续发展，也是绿色算力发展的重要延伸。

算力应用集约化，包括公共普惠算力服务提供与推进需求侧降本增效。能源利用效率和算力能效水平提升，在支撑产业发展方面将起

到关键作用。在绿色算力的支撑下，数字技术与电力、工业、建筑、交通等重点碳排放领域深度融合，减少能源与资源消耗，促进传统产业能源优化、成本优化、风险预知及决策控制，整体上实现节能降本提质增效。在绿色算力发展带动下，新一代人工智能算力基础设施的包容性、普惠性、安全性、共享性及节能性进一步增强，公共算力服务平台建设加快推进，算力的公共性与普惠性进一步带动数字化转型和智能化升级。

二、全球绿色算力发展进入活跃期

（一）算力生产绿色化技术产品加速迭代

世界各国加快出台算力政策推动算力生产技术的高效演进。美国在 2022 年出台《2022 年芯片和科技法案》，为行业提供 527 亿美元，用于半导体制造、研发和劳动力发展。同年还更新了《关键和新兴技术清单》，新版关键和新兴技术确定了包括超级计算、边缘计算、云计算、数据存储、计算架构、数据处理和分析在内的先进计算技术领域列在了首位。欧盟在 2022 年出台了《芯片法案》，以提升欧盟在全球的芯片生产份额。日本发布了《下一代计算平台开发战略》、《量子技术创新战略》等，在国家层面开展算力生产的统一研发部署。

围绕算效的提升，科技龙头企业加快产品迭代升级。在单芯片性能提升方面，目前台积电和三星均已进入到 3nm 制程工艺时代，与 5nm 工艺相比，台积电 3nm 工艺的晶体管逻辑密度可以提升 1.7 倍，性能有 11% 的提升。而在同等性能下，3nm 工艺的功耗比 5nm 降低 25%-30%。英特尔的 Ponte Vecchio 加速卡利用 Chiplet 技术，即片内

互连技术，将不同工艺下制造的多个芯片封装集成到同一芯片中，晶体管数量突破 1000 亿个，使异构计算利用不同架构芯片形成更高效的解决方案成为了可能。

计算存储网络协同方面，当前存算一体技术正在由研究领域逐步进入商用化，在云端计算的应用场景，存算一体方案主要是围绕将计算和 DRAM 集成做创新，以降低内存访问的数据量和延迟。三星基于其 HBM2 DRAM 技术集成了计算逻辑，使得 DRAM 既可以当作一块普通存储器来用，也可以在写入和读出的同时让计算逻辑去做计算。存储与网络的融合也在日益加深，通过存储网络新兴技术，有效提高主机通过远程网络访问存储的性能，解决通信协议带来的存储性能损失问题。

计算平台统一调度方面，主要通过跨计算架构的统一编程框架来实现，通过时间或空间的切分和复用，以及虚拟化、算力网络等技术，实现硬件资源池化重构。英特尔推出跨架构编程工具 oneAPI，旨在简化跨架构之间的编程，可以与英特尔自身设备及其他厂商的芯片配合使用，以优化工作负载，为异构计算提供了统一和简化的应用程序开发编程模型。

（二）算力运营绿色化建设布局全面提速

全球各国统筹协调可再生能源供应与算力低碳发展。美国制定了数据中心整合计划（DCOI），以优化现有的数据中心能源效率为目的，通过整合和重组等各种途径方式来减少能源消耗，并设定了具体的优化值和目标，从而实现低碳发展。《欧洲气候中立数据中心公约》

提出，到 2025 年欧洲数据中心使用可再生能源电力要达到 75%，到 2030 年达到 100%。日本制定《绿色增长战略》，明确在 2030 年之前，将新建数据中心的能耗降低 30% 以上，并将日本国内数据中心的部分电力转换为可再生能源。此外，日本还在 2022 年出台了《能源合理化使用和非化石能源转换法》，要求运营商提高包括空调等在内的数据中心设施和设备的能源消耗效率，降低 PUE 值。德国在 2023 年出台了《能源效率法案》，要求 2026 年 7 月开始投入使用的数据中心必须将 PUE 控制在 1.3 以下，同时对一定规模以上的企业按要求披露废热及 PUE 等相关信息。

美国数据中心可再生能源的利用走在世界前列，特别是互联网、消费电子等行业巨头。根据标准普尔全球报告数据，美国数据中心运营商消耗了美国企业可用可再生能源的 2/3。亚马逊、苹果、谷歌、Meta、微软、IBM 等公司致力于碳中和或碳负战略，全球大型数据中心正朝着使用 100% 可再生能源运行的方向迈进。目前，企业所有数据中心均使用 100% 可再生能源运行的情况仍然少见，但一些企业脱颖而出。作为全球最大的可再生能源企业采购商，亚马逊的可再生能源比例达到 65%。微软 2022 年签署了一项购电协议，为其爱尔兰数据中心园区提供 900 兆瓦的风能和太阳能。Switch 是一家数据中心运营企业，自 2016 年以来，其所有 4 个数据中心均使用可再生能源运营。

聚焦优化 PUE 能效，全球各国的数据中心在因地施策。位于北美洲的谷歌数据中心，通过创新的市电直供、热空气隔离、水侧节能

等技术和大量的运营优化，成功地将 PUE 值降低到 1.12。同时，利用深度学习算法不断跟踪 IT 设备能耗、室外气温以及制冷等设备的设置情况，每 30 秒就计算一次 PUE，依托机器学习对 PUE 进行研究，建立模型并预测和改善数据中心的能效情况。靠近瑞典北部的北极圈数据中心（Meta），通过数个巨型风扇引入室外极地的自然冷风为服务器降温，形成自然冷却，PUE 能效值基本维持在 1.1 以下。位于亚洲的新加坡微软数据中心，通过进一步净化处理水产生的再生水来源和机械冷却来保持服务器在适当的温度下运行。

（三）算力管理绿色化得到政策持续加码

主动扩张网络触角实现多数据中心互联互通。美国数据中心初期随网而建，基本选址于经济发达地区毗邻主电信机房及光纤网络所汇聚的骨干网络节点附近。随着 4G 通信技术的发展，数据互联需求攀升，单纯依赖向 IDC 运营商租借带宽已不能满足互联网巨头的高速发展需求，2016 年起微软、Meta 等互联网企业及数据中心厂商开始参与海缆建设，主要用于数据中心互联，实现海缆提供信息传输通道、数据中心承担信息存储处理的分工。另外，随着用户需求分布不断分散，用户区位分布也逐渐向外扩张，加之用户对时延性要求的日益提升，美国 IDC 运营商一方面通过自行建设光缆和传输网络，加强网络布局，扩大网络覆盖缓解时延，实现全球范围内数据中心的互联互通；另一方面也在不断提升自身的网络结构和网络能力，为数据中心互联网络提供高带宽、高可靠的传输能力，实现端到端安全转发，保证不同网络区域、租户的安全防护，并使用三层互联模式提供多活架构的

应用，有利于应用在多个数据中心之间灵活扩展。

技术创新推动美国算力集约化管理。为实现绿色算力统筹管理，美国 IDC 运营商从托管服务向下游输出网络与 IT 服务能力，在规模化基础上通过连接各数据中心边缘节点拓展能力边界，实现网间互联，打通东西向流量通道。美国 IDC 龙头 Equinix 建立了网间互联平台 Platform Equinix 和 Equinix Internet Exchange 等多种解决方案，随着更多边缘节点的部署，网间互联业务为客户建立起网络间的私有连接，提升组织的协作效率，同时帮助云计算厂商灵活分配算力，实现降本增效。

（四）算力应用绿色化落地赋能效应倍增

算力绿色赋能的核心作用越加凸显，助力传统行业“碳中和”。运用算力叠加数字化技术，构建可感、可知、可视、可控的数据体系，提升传统行业各个环节利用效率、提升智能化水平已然成为必然趋势。以英伟达为例，目前以英伟达 GPU 为主的算力解决方案已经深入应用到各领域。在汽车制造领域，梅赛德斯-奔驰与英伟达合作开发软件定义汽车，通过引入英伟达的计算平台对智能驾驶功能进行测试和验证，将 AI 和元宇宙技术进一步融入到开发流程中，能够创建反馈回路，以减少浪费、降低能耗并不断提高质量，打造更智能、更高效的数字工厂。在医药领域，英伟达推出 BioNeMo 云服务产品，能够加速药物研发过程中最耗时、费用最高的阶段，包括加速新蛋白质和治疗方法的创建以及基因组学、化学、生物学和分子动力学等领域的研究。

大模型的崛起加速扩大智算产业的引擎效应。智能计算正在重塑云、软件、芯片产业，并影响其他产业的智能化转型。以 GPT 为代表的人工智能大模型技术可以广泛的应用到金融、互联网、融媒体等行业领域，提供各类场景化服务，提升传统行业数字化转型，激发大量的智能算力需求。以谷歌、OpenAI、Meta、亚马逊等为代表的国外企业加速储备智能算力资源，纷纷推出大模型并持续推动产品升级。目前微软已有的 3 个数据中心区域部署了企业级 Azure OpenAI 服务，可以在基于 Azure 智能云平台上的 OpenAI 服务中使用 ChatGPT，未来部署范围将持续扩大。大模型分解和处理复杂问题的能力，与智能算力处理海量数据的高性能计算能力，极大提升企业任务生成和执行效率，并且将以新的软件模型开发范式，有力提升企业应用生产效率，科学助力企业降本增效，实现绿色化转型。

三、中国绿色算力发展态势良好

（一）算力生产绿色化正吸引头部主体竞赛

我国高度重视先进计算能力提升。工信部《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023 年）》中明确提出，要加快提升算力算效水平，加快高性能、智能计算中心部署，推动 CPU、GPU 等异构算力提升，逐步提高自主研发算力的部署比例，推进新型数据中心算力供应多元化，支撑各类智能应用。同时，工信部、科技部多项科技计划支持先进计算的技术研发和产业化落地。此外，国家也前瞻布局面向未来的量子计算。《国务院关于全面加强基础科学研究的若干意见》

提出，拓展实施国家重大科技项目，加快实施量子通信与量子计算机、脑科学与类脑研究等领域。

国内头部主体围绕算力底层软硬件计算架构方面积极进行技术创新，推动算效的提升。计算存储网络协同方面，为了拉近计算资源和存储资源的距离，阿里达摩院研发了基于 DRAM 的 3D 键合堆叠存算一体芯片，将计算芯片和存储芯片用特定金属材质和工艺进行互联，实现内存、算法以及计算模块的融合，大幅提升带宽并降低功耗。华为推出超融合数据中心网络智能无损技术，基于其智能无损算法实现业界首个 0 丢包以太网，可构建出大规模、低时延、高吞吐的算力网络，助力算力 100% 释放。计算平台统一调度方面，华为于 2021 年发布了北冥多样性计算融合架构，为多样性计算硬件及集群打造了完整软件栈，可帮助开发者在多样算力环境下，实现与单机相同的应用开发和部署体验，并获得远超单一算力的应用性能。

专栏一：我国算力生产绿色化实践典型案例

案例 1：中国联通 GPU 资源编排调度赋能绿色 AI 智算¹

中国联通打造 AI 算力绿色节能调度系统，可对 AI 算力的 IT 系统能耗进行全生命周期的细颗粒度管控，针对 AI 训练、AI 推理、AI 研发等场景对 AI 算力进行能耗压降。一是对底层的 AI 算力 GPU 物理资源进行灵活共享、随取随用，解决了 GPU 资源利用率低造成的 IT 系统能耗浪费等行业痛点问题。二是针对不同的 AI 任务场

¹ 案例来源：首届“新绿杯”信息通信行业赋能碳达峰碳中和创新大赛优秀奖案例。

景，提出了 GPU 存算协同、AI 大模型压缩、分时调度等多项 AI 算力调度模型，旨在提升 AI 算力的计算能效。

该系统包括三层架构：AI 算力资源共享层、AI 算力资源能耗监控层、AI 算力节能调度层。GPU 算力资源虚拟化技术可以支持国产化 AI 芯片（海光、寒武纪），并在电信行业、金融行业多个头部企业 AI 算力上实现了商用部署。该项目在 ITU 成功牵头全球首个 AI 算力节能调度相关的国际标准，产生核心专利 20 项，配套 ITU 国际标准 3 项，研究方向已入选中国科协青托项目，获得新绿杯优秀奖、通信世界绿色节能算力榜十大解决方案、华彩杯算力奖等多个奖项。

（二）算力运营绿色化得到全面推进与提升

政府密切关注算力运营用能低碳。近年来，国家发改委、工信部等部委发布一系列政策，引导数据中心应用可再生能源，鼓励数据中心企业参与可再生能源市场化交易。在国家发改委对各国家算力枢纽节点复函中，也提到了要提高各数据中心集群可再生能源使用率。算力能效受到重点政策关注。2022 年 8 月，工信部等七部委联合印发《信息通信行业绿色低碳发展行动计划（2022-2025 年）》，提出到 2025 年，全国新建大型、超大型数据中心电能利用效率（PUE）降到 1.3 以下。

打造“零碳数据中心”成为算力低碳化发展的终极目标。打造 100% 利用可再生能源的“零碳数据中心”已成为头部服务商的重要发展方向，中国移动、腾讯、华为等多数大型企业均已开展相关工作。如中

国电信与能源企业合作，打造数字青海绿色大数据中心，自建分布式光伏+电化学储能的绿电供应系统，是全国首个 100%清洁能源可溯源绿色大数据中心，也是全国首个大数据中心领域源网荷储一体化绿电智慧供应系统示范样板。三峡东岳庙数据中心 100%采用绿色电力供电，取消了柴油发电机及油库的建设，同时接国网备用电源，节省数据中心整体建设成本 20%和后期运维成本的 15%，形成并发布了零碳数据中心建设的企业标准和团体标准。我国数据中心相关企业积极探索绿色算力资源循环利用技术应用，在余热回收利用和水资源回收利用方面进行了有效的实践应用。

各主体通过不同技术手段优化 PUE。在系统集成方面，采用微模块技术，集成了机架系统、供配电系统、监控管理系统、制冷系统、综合布线系统、防雷接地系统和消防系统等核心部件，并支持高频模块化 UPS 配置和智能休眠。如华为智能微模块技术，刷新微模块产品 PUE 测试记录，年平均 PUE 低至 1.11。在高效制冷方面，当前我国市场上已萌生出芯片级的冷却技术，如喷淋式液冷技术，将低温冷却液送入服务器精准喷淋芯片等发热单元，直接对发热源进行冷却带走热量，达到精准冷却的效果。与传统制冷相比，喷淋后的高温冷却液能够返回冷液分配装置与冷却水换热处理为低温冷却液后再次进入服务器喷淋，能够可重复使用，长期使用的数据中心 PUE 可达到 1.2 以下。在高效运维方面，阿里云智能运维机器人融合了众多先进技术，可实现不同程度的复杂 IT 运维操作，协助工作人员对数据中

心环境进行日常巡检、远程任务调用、随工监管、数据中心资产安全管理等工作。

专栏二：我国算力运营绿色化实践典型案例

案例 2：中国移动呼和浩特数据中心提升绿电比例²

中国移动呼和浩特数据中心结合政策指引、内部偏差控制、准确掌握电力市场动态及时交易和调整等举措，避免核减绿电使用量，最大程度提高绿电使用比例。2022 年数据中心绿电使用比例为 58%，达到政策要求上限。不仅如此，在现有绿电使用比例的基础上，中国移动呼和浩特数据中心与供电公司、新能源发电企业建立联系，在保证用电价格稳定的前提下，积极开展新能源电量替代工作。主要通过预估用电负荷增加计划，新能源发电企业开展电厂建设、发电和入网，设置单独计量表、独立结算，实现全部用电量绿电替代。2019 年至 2022 年，中国移动呼和浩特数据中心共用绿电 5.27 亿度，绿电比例从 41%提升至 58%。同时积极探索将剩余 42%的火电通过与绿电供应企业合作，替代其中部分火电量，进一步提升绿电比例。

案例 3：中国移动哈尔滨数据中心集中余热回收³

中国移动哈尔滨数据中心建设的集中余热回收系统，是通过采用水源热泵机组与空调系统冷冻水回水进行热交换，将园区机房内 IT 设备产生的余热重复利用作为办公采暖和办公用热水的热源。余热回收系统通过构建多级热泵并联或串联模式，逐级提升供暖温

² 案例来源：首届“新绿杯”信息通信行业赋能碳达峰碳中和创新大赛二等奖案例。

³ 案例来源：首届“新绿杯”信息通信行业赋能碳达峰碳中和创新大赛优秀奖案例。

度，通过模拟计算提出精细化连接方案；通过关键部件模拟验证，提升压缩式热泵宽负荷调节运行特性；通过全系统动态仿真，实现压缩机、膨胀阀与换热器压力灵活匹配，达到高效、稳定、经济的运行策略。该余热回收系统，年回收 IT 设备提供余热利用量 1.03 万千瓦，年减少碳排放约 889 吨。下一步，哈尔滨数据中心正在与哈尔滨工业大学共同研究高温余热回收系统，探索接入供热管网实现对园区外周边居民企业进行冬季供暖。

案例 4：中国电信东江湖大数据中心推进全自然冷却⁴

中国电信东江湖大数据中心是全国首个“全自然冷却数据中心”，获评工信部“2020 年国家绿色数据中心”。本项目创造性的采用湖水直供制冷、集中式冷冻水机组作为备份，通过联合研发的数字化管理平台实现智慧化运营管理。主机房采用封闭冷通道、列间空调等节能技术，并通过大量 CFD 仿真优化气流组织。采取余热回收方式减少对环境的影响，经权威机构评测，园区排水导致附近水域温升在 1℃以内。自 2017 年 6 月投产以来，年平均 PUE 值保持在 1.19 左右，是我国南方地区最节能的数据中心之一。通过湖水水冷、节能 UPS、AI 调优等创新，年减少碳排放 9691 吨 CO₂。通过余热回收创新，年减少碳排放 1888 吨 CO₂。

（三）算力管理绿色化强支撑算力集群建设

以算力网络支撑算力管理绿色化发展是大势所趋。从国家政策引导看，《数字中国建设整体布局规划》提出要系统优化算力基础设施

⁴ 案例来源：首届“新绿杯”信息通信行业赋能碳达峰碳中和创新大赛优秀奖案例。

布局，促进东西部算力高效互补和协同联动，到 2025 年基本形成横向打通、纵向贯通、协调有力的一体化推进格局。届时算力将成为像水电一样的基础资源，推动算力网络成为社会性基础设施。算力网络作为“东数西算”的神经中枢，不光可以推动中西部地区数据中心绿色化发展，还可以承载除冷存储灾备以外更多的应用。从技术发展角度来看，芯片产业链壁垒较高，打造先进计算芯片需要时间沉淀，算力网络一定程度上能够绕开高端壁垒的限制，以网络的方式来组织算力、按需调度，实现算力管理集约化，满足社会对于算力日益增长的需求。2023 年 4 月科技部高新技术司成立国家超算互联网联合体，通过算力网络连接全国众多超算中心的方式，构建一体化算力服务平台，并计划到 2025 年底，形成技术先进、模式创新、服务优质、生态完善的总体布局。

“东数西算”工程引导数据中心规模化、集约化、绿色化发展。受市场内生算力需求驱动，及国家相关政策引导，我国数据中心总体布局持续优化，协同一体趋势将进一步增强。在市场层面，中西部地区自然环境优越，土地、电力等资源充足，但本地数据中心市场需求相对较低；东部地区市场需求旺盛，但土地、电力、人员等生产要素成本较高，东西部协同发展逐渐成为趋势。在政策层面，通过系统性工程“东数西算”统筹规划算力建设及调度，有利于发挥区位优势，解决东西部算力需求与要素资源不匹配的问题，形成多层次、绿色低碳的全国一体化大数据中心体系，推动数据中心集约化发展。除地域布局上的东西部协同外，为应对不断涌现的应用场景需求，不同类型数据

中心也协同发展。政府鼓励兼具绿色集约、高算力、高能效的新型数据中心发展，引导我国数据中心产业由通用数据中心占主导，演变为多类型数据中心共同发展的新局面，共同提供集约化算力服务。

“东数西算”工程推动各地积极建设算力调度平台，实现算力区域布局优化。作为算力网络最核心的功能，社会团体、超算中心、科研机构、地方政府等多方积极布局算力调度领域，目前已发布或建设 10 余个算力调度平台。平台主要目的是通过统一纳管异构计算资源，建设异构算力资源管理与调度统一门户，实现跨服务商、跨地区、跨架构的算力动态调配、优化利用、互联互通，促进数据流通和深化数据应用。北京发布的算力互联互通验证平台，旨在有效整合分散在各地区、各领域的优质算力资源，通过统一度量、统一接口、统一管理、统一计费等方式，实现跨区域、跨领域、跨机房的动态调配和优化利用，促进东西部算力高效互补和协同联动，提升北京互联网交换中心面向西北骨干网间数据交换水平；宁夏上线国内首个一体化算力交易调度平台，可整合算力提供方的零散算力，利用一体化协同调度系统智慧匹配算力资源，为智算、超算、通用算力等各类算力产品提供算力发现、供需撮合、交易购买、调度使用等综合服务，有效结合东西部算力发展需求，助力形成自由流通、按需配置、有效共享的数据要素市场。

表 1 我国已发布或建设的算力调度平台情况⁵

时间	枢纽	省市	平台名称
2023.6.5	京津冀	北京	全国一体化算力算网调度平台（1.0 版本正式发布）

⁵ 中国信通院依据互联网公开信息整理。

2023.5.29	非枢纽	太原	全国一体化算力网络国家枢纽节点山西项目（已开工建设）
2023.5.25	贵州	贵州	全国一体化算力网络国家（贵州）枢纽节点算力调度平台（1.0 版本运营一年，2.0 版正式上线）
2023.4.26	长三角	上海	上海算力交易平台
2023.4.25	粤港澳	深圳	粤港澳大湾区算力调度平台
2023.3.21	成渝	重庆	天翼云成渝枢纽重庆 3AZ 节点、天翼云重庆城市云、“东数西算”重庆算力调度枢纽
2023.3.14	甘肃	甘肃	甘肃省算力资源统一调度平台
2023.3.3	京津冀	北京	算力互联互通验证平台（二期已发布）
2023.2.28	京津冀	北京	集群算力服务调度与采购平台
2023.2.27	非枢纽	郑州	郑州城市算力网（已开工建设）
2023.2.24	宁夏	宁夏	东数西算一体化算力服务平台
2023.2.24	长三角	南京	南京市城市算力网运营平台
2023.2.22	甘肃	庆阳	庆阳-郑州高新区算力网络平台
2023.2.20	长三角	上海	上海市人工智能公共算力服务平台
2023.1.29	长三角	苏州	全国一体化算力网络长三角枢纽节点吴江算力调度中心（已开工建设）
2023.1.10	非枢纽	合肥	算力一体化统一管理服务平台（已完成招标）
2022.10.16	成渝	重庆	重庆嘉云智能算力中心（已正式签约）

（四）算力应用绿色化加速产业数字化转型

我国算力不断升级，成为驱动行业数字化发展的新引擎。得益于算力技术不断演进，我国算力应用持续丰富，助推各行业各领域的智能化改造和数字化转型。绿色算力供给正加快企业“上云用数赋智”，全面赋能企业生产、运营及管理等环节，降低传统企业整体能耗。当前，绿色算力已成为能源、制造、零售、交通、医疗等传统产业的数字化转型的重要基础支撑。在工业制造领域，山东钢铁集团有限公司与国家超级计算济南中心联合成立先进钢铁材料数字化研发云平台，通过先进算力一举破解了“猫耳形”痛点。在自动驾驶领域，智能网联汽车行业在智能算力的支撑下驶上“快车道”，算力的应用有效降低了

自动驾驶模型训练成本，提升计算效率，让车端感知架构实现升级。在医疗领域，国家超算长沙中心助力智慧医疗，基于超算平台实现 4 秒完成疏松检测、4 分钟内生成检测报告的“骨质疏松智能医生”诊断过程，大幅缩短检测时间，降低了检测成本。

我国智能计算中心加快布局，为业界提供绿色普惠智算服务能力。随着全国一体化算力网络和“东数西算”工程的部署，当前全国范围形成智能计算中心建设的热潮。根据国家信息中心《智能计算中心创新发展指南》数据显示，我国超过 30 个城市正在建设或提出建设智算中心。智算中心在推进 AI 产业化、赋能产业 AI 化、助力治理智能化、促进产业集群化等方面发挥显著作用。它不但具有“聚合器”作用，还兼具“孵化器”和“倍增器”作用，既能够带动人工智能及相关产业的倍速增长，还可以为技术创新提供动力。从落地情况看，智算中心普适普惠的服务生态正逐步构建，绿色低碳的发展格局正加速形成。

四、绿色算力发展受四大关键因素主导

（一）算力规模激增带来持续性的降碳挑战

AI 大模型及 AIGC 应用双重爆发，算力规模 CP 激增，为区域绿色算力发展带来挑战。据工信部统计数据显示，我国算力规模年增长率近 30%，截至 2022 年底，我国算力总规模达到 180EFLOPS（百亿亿次浮点运算/秒），位列全球第二。但从应用需求看，算力领域的缺口仍然不小，尤其是以 AI 大模型与 AIGC 为代表的 AI 技术实现突破性演进，带来全球算力市场需求的高速上涨。

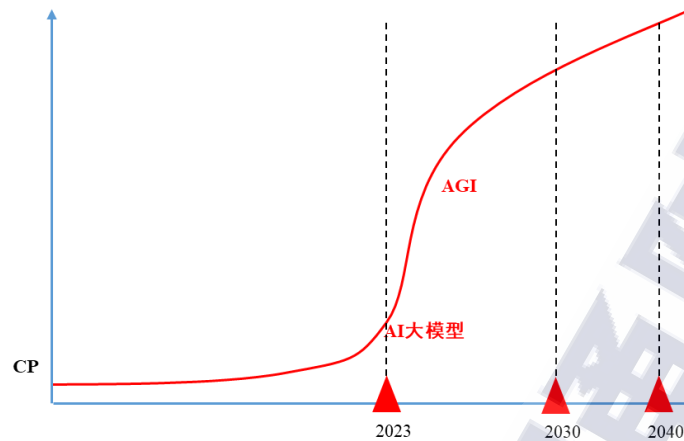


图 2 算力规模 CP 发展趋势

（二）算效持续提升但仍需重大技术突破

计算机软硬件架构持续协同优化，未来需要新一代半导体芯片、量子计算技术突破，从而极大提升算效 CE。随着摩尔定律发展逐渐接近物理和经济极限，追逐高主频和 CPU 性能等架构设计遭遇“功耗墙”、“内存墙”的限制，以摩尔定律为驱动、硬件能力提升为主导的固有升级路径已经临近天花板，底层软硬件架构计算的创新模式由单点突破逐步向端到端优化演进。不仅如此，半导体新体系及其微电子等多功能器件技术也在更新迭代，业界将目光开始转向拥有小体积、低功耗等优势的四代半导体。第四代半导体具有优异的物理化学特性、良好的导电性以及发光性能，在功率半导体器件、紫外探测器、气体传感器以及光电子器件领域具有广阔的应用前景。此外，新的计算范式也在酝酿中，量子计算的算力指数级远超越传统电子计算，业界已认识到量子计算对人类社会的巨大影响，当前许多国家都在开展量子计算研究。

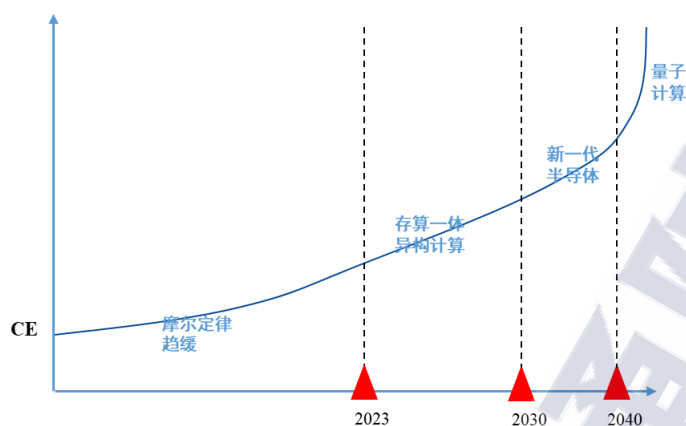


图 3 算效 CE 发展趋势

（三）电能利用率受益于技术创新稳步优化

随着液冷技术逐渐开始应用和规模化，PUE 在持续降低逼近 1，力争在 IT 设备外实现零碳排。数据中心的用能部分为 IT 设备、制冷系统、供配电系统、照明及其它。制冷是 IT 设备之外的最大耗能源。以 PUE 为 1.5 的数据中心为例，其 IT 设备耗能约占 67%，制冷系统约占 27%，供配电系统约占 5%，照明及其它约占 1%。减少制冷能耗，是降低 PUE 的主要途径。液冷、间接蒸发冷、全变频氟泵等先进技术正逐步应用于数据中心，均可有效减少数据中心制冷方面的用电，提升制冷效率，助力 PUE 值持续降低。

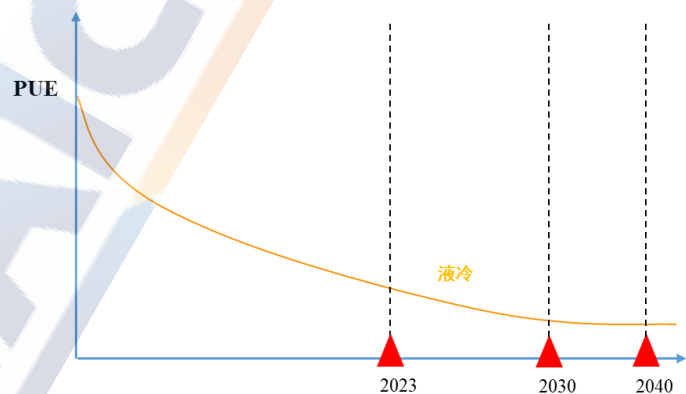


图 4 PUE 发展趋势

（四）碳排放因子受益于政策推动持续降低

随着可再生能源对化石能源的替代，数据中心可再生能源占比向着 100% 发力，碳排因子 CEF 在持续降低，力争在能源层面实现零碳排。2022 年 11 月，国家发改委、国家统计局和国家能源局联合发布的《关于进一步做好新增可再生能源消费不纳入能源消费总量控制有关工作的通知》（发改运行〔2022〕1258 号），明确“新增可再生能源电力消费量不纳入能源消费总量控制”，为数据中心能源层面实现零碳排奠定政策机制基础。从各地推进数据中心节能审查看，可再生能源利用方案已经成为项目节能报告的必备，并对可再生能源利用比例有了明确要求。北京市发改委《关于印发进一步加强数据中心项目节能审查若干规定的通知》明确规定，“鼓励 2021 年及以后建成的项目，年可再生能源利用量占年能源消费量的比例按照每年 10% 递增，到 2030 年实现 100%”。此外，具备高安全性、资源无限性的可控核聚变，被认为是可再生能源的下一个大趋势，但其多项关键技术均在挑战人类科学技术的极限，未来实现突破后将彻底实现能源消耗的零碳排。

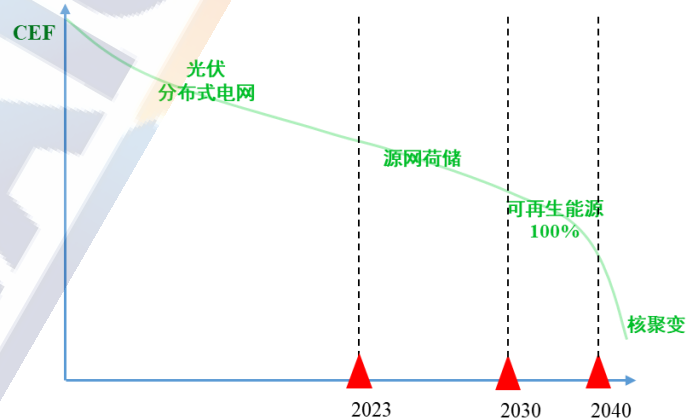


图 5 碳排放因子 CEF 发展趋势

（五）中国绿色算力发展整体展望

当前算力规模爆炸式增长，带来算力能耗的急剧增长，不过随着 PUE 稳步下降，算效短期内逐步提升，以及可再生能源利用率稳步提升后碳排因子降低，区域绿色算力发展成效将显现，绿色算力技术产品将有力支撑算力领域节能降碳。据中国信息通信研究院测算，2022 年度绿色算力发展节能 194.94 亿度电，相当于呼和浩特市半年的耗电量；减少二氧化碳排放 1634 万吨，相当于 15 座燃煤电厂的总碳排放量。

预计到 2030 年，液冷技术规模落地后 PUE 接近 1，单位能耗碳排放随着绿电在电网中占比不断提高将有所下降，此外算力规模进入稳步增长阶段，区域绿色算力碳排将放缓并达到顶峰。

展望未来，随着新一代半导体、量子计算等技术逐步商用，新型电力系统中新能源占比不断取得突破，可控核聚变逐步成为现实，用于算力生产供给的绿电占比将逼近 100%，碳排放直接归零，届时业界将持续推进算力全产业链中增加的碳排放量以及核减的碳排放量的研究。

五、多措并举推进绿色算力发展

（一）顶层保障，健全绿色算力一体化发展机制

加快建立绿色算力发展一体化机制。当前我国绿色算力发展处于起步期，虽然各地纷纷发起绿色算力发展倡导，但仍缺乏统一的绿色算力评价方法。下一步，应深化体制机制优势，多部委联合完善绿色算力发展机制，统筹设计绿色算力一体化发展路径。建立“东数西算”

绿色算力发展协同机制。围绕八大枢纽节点，推进绿色算力协同化发展。**开展我国绿色算力区域发展评估。**目前我国已经形成一大批数据中心标准，对于低碳、零碳、负碳数据中心标准制定仍属于空窗期。要加快形成绿色算力评估标准，研究制定绿色算力发展指数，推进绿色算力发展成效评估，遴选典型示范。

（二）创新先行，加速绿色算力核心技术研发

把握多样性算力和计算体系架构变革机遇，加强绿色算力核心技术研发突破。探索存算融合架构，围绕计算存储墙、功耗墙瓶颈，发展内存计算、近存计算、感存算一体的计算架构，探索算网融合架构，推动算力部署网络化、泛在化。围绕前沿颠覆计算体系，加快推动基础理论、核心算法、关键材料、制造工艺等一体化创新突破，推进与现有计算体系融合发展，抢占未来竞争制高点。**加速绿色算力产品应用落地。**以用促建，助力绿色算力产品迭代升级。深入挖掘绿色算力在数字政府、工业互联网、车联网、金融科技等创新场景下的融合应用，提升绿色算力在医疗、交通、教育等领域的应用水平，加快推进绿色算力在更多生产生活场景的应用落地。引导算力基础设施积极应用先进绿色数据中心技术，对采购国产算力产品的企业提供适当补贴，并鼓励央国企单位优先采购国产技术产品，形成内循环良好生态。

（三）行业发力，构筑绿色算力产业协同生态

建立绿色算力产业链协同创新体系。立足行业协同创新需求，联合芯片 IP 供应商、运营商、设备商、整机、部件、基础软件厂家和科研院所等主体打造绿色算力协同创新平台，汇聚各创新主体人才资源、

技术资源，实现绿色算力的互联互通和协同共享，打通绿色算力生态链。**完善绿色算力标准体系。**当前绿色算力标准体系仍不完善，产业界应注重贯穿算力全生命周期绿色标准，从算力生产、算力供给、算力管理及算力赋能层面同步实现绿色算力的新技术研发和新标准建设，为实现“双碳”目标贡献标准化力量。**完善绿色算力产业支撑配套服务。**依托第三方权威智库，为数据中心运营企业建立绿色采购制度提供行业指导，开展绿色、低碳数据中心评估认证，提供满足市场需求的数据中心绿色、低碳等级评估等综合服务。

（四）引导布局，强化绿色算力与东数西算协同

紧抓“东数西算”工程和“双碳”目标实施机遇期，鼓励在数据中心集群周边配套建设可再生能源电厂，协同做好数据中心集群建设及可再生能源基地建设工作，引导数据中心向气候条件适宜和可再生能源富集地区部署。大力推进分布式可再生能源在用户侧直接就近利用，引导可再生能源就近消纳，结合储能、氢能等新技术，提升可再生能源在数据中心能源供应中的比重。**加强风光储与算力负荷等协同互动，积极发展源网荷储一体化的绿色能源产业，形成数能深度融合发展的典型范式。****探索绿色算力跨省市交易。**探索出台绿色算力跨省市交易政策，建立绿色算力信用评价等制度，打造绿色算力供应生态链，制定绿色算力产品服务目录。

（五）应用赋能，推进绿色算力赋能千行百业

加大普惠性算力基础设施建设力度，加强对算力资源普及率、经济社会价值转化率等关键指标的动态监测。**推动算力基础设施服务模**

式从提供算力为主向提供“算法+算力”转变，通过提供预置行业算法、构建预训练大模型、推进算法模型持续升级、提供专业化数据和算法服务，让更多的用户享受普适普惠的智能计算服务。以政府侧和市场侧实际需求为牵引，引导制造、能源、交通等领域的大型企业加快打造一批“经济效益好、社会影响大、示范效应强”的典型应用，激发算力引擎赋能千行百业，加快推进算力在更多生产生活场景的应用落地。

中国信息通信研究院 产业与规划研究所

地址：北京市西城区南礼士路华远大厦

邮编：100191

电话：010-68021375

传真：010-68021274

网址：www.caict.ac.cn

