中国环境与发展国际合作委员会

专题政策研究报告

绿色发展国际合作的多元驱动机制与实施路径

——聚焦数据中心绿色转型

中国环境与发展国际合作委员会 2026 年年会

2026 年 9 月

专题政策研究项目组成员

中外组长*:

李永红	国合会副秘书长、生态环境部国际合作司司长
Kevin Gallager	波士顿大学教授、波士顿大学全球发展政策中心主任
张建宇	“一带一路”绿色发展国际联盟首席发展总监
Fabby Tumiwa	印度尼西亚基础服务改革研究所执行理事

中方成员*:

王金照	中国国际发展知识中心常务副主任
吉拥军	中国人民对外友好协会副秘书长
李　忠	国家发展改革委能源研究所副所长
罗必雄	中国能建首席科学家、中国电力工程顾问集团有限公司党委书记/董事长、电力规划设计总院院长
瞿　亢	中国银行（香港）可持续发展总监
梁　希	上海交通大学智慧能源学院客座教授/广东南方碳捕集与封存产业中心秘书长
李　霞	生态环境部对外合作与交流中心副主任

外方成员*:

Mengdi YUE	波士顿大学全球发展政策研究中心非常驻学者
Cecilia Springer	波士顿大学全球发展政策研究中心非常驻学者
Hamza Haroon	气候脆弱论坛及 V20 财长集团（CVF-V20）西亚和南亚区域主任
Renato de Gaspi	约翰霍普金斯大学“净零工业政策实验室”拉丁美洲高级研究员
Ardhitya Eduard Yeremia Lalisang	印度尼西亚大学社会政治科学学院国际关系系高级助理教授
Farid Wijaya	印度尼西亚基础服务改革研究所部门脱碳研究经理

顾问：

郭　敬	“一带一路”绿色发展国际联盟常务理事

曾劲松	正大集团副总裁
Sara Jane Ahmed	V20 财长会议常务董事兼财务顾问
Erik Bergdorf	亚洲基础设施投资银行首任首席经济学家
张敏文	国际财务报告准则基金会（IFRS）北京办公室主任兼国际可持续报告准则理事会（ISSB）主席特别顾问
方　莉	世界资源研究所（美国）北京代表处首席代
郭慎宇	洛克菲勒兄弟基金会中国项目主任/北京代表处首席代表
Faizel Ismail	开普敦大学纳尔逊·曼德拉公共治理学院院长
Elizabeth Thurbon	新南威尔士大学教授
Adrianna Abdenur	Plataforma CIPÓ 联合创始人兼首席执行官
Pepukaye Bardouille	布里奇顿倡议主任兼巴巴多斯总理办公室气候韧性特别顾问
Eric Masanet	加利福尼亚大学圣巴巴拉分校布伦环境科学与管理学院教授

协调员:

郭晓林	中方协调员、生态环境部对外合作与交流中心政策研究部处长
朱　琳	外方协调员、波士顿大学全球发展政策中心项目经理
Alexandra Miller	波士顿大学全球发展政策中心项目协调员
Arief Rosadi	印度尼西亚基础服务改革研究所研究院

支持专家:

晏　薇	生态环境部对外合作与交流中心政策研究部室主任
段光正	生态环境部对外合作与交流中心政策研究部高级项目主管
夏菖佑	广东南方碳捕集与封存产业中心项目总监
郝小然	“一带一路”绿色发展国际联盟副处长
张　楠	“一带一路”绿色发展国际联盟高级项目主管
施　川	生态环境部对外合作与交流中心合作二处高级项目主管

* 本专题政策研究项目组联合组长、成员以其个人身份参加研究工作，不代表其所在单位，亦不代表国合会观点。

执行摘要

一、研究背景及重要性

当前，世界百年变局加速演进，绿色发展国际合作面临深刻变化。单边主义、保护主义抬头，主要发达经济体政策转向加剧了全球气候治理的碎片化和不确定性；地缘政治持续冲突导致国际资源从气候治理等领域分流外溢；贸易壁垒上升对绿色技术、产品及产业链的跨境流动造成新的阻碍。少数发达国家凭借技术优势主导低碳规则制定，而全球南方国家仍面临发展与减排的双重压力，多边治理机制面临系统性困境。

在此背景下，深化国际绿色合作已成为全球经济和政治关系的关键“稳定器”。中国作为最大发展中国家，建设性参与全球生态环境治理，提出的构建“人类命运共同体”“人与自然生命共同体”等理念，以及“完善全球生态治理，建设生态友好型世界经济”的政治主张，为凝聚全球生态治理共识、推动完善公平合理的全球环境治理体系发挥了重要作用。中国自身生态环境保护与绿色转型形成大量创新成果，并深入推进南南合作和绿色“一带一路”建设，持续为全球生态环境治理和世界经济绿色低碳转型注入稳定性和正能量。

作为产业绿色转型的关键组成部分，数据中心正凭借其整合技术、资本、政策与基础设施的能力，成为驱动产业绿色转型的核心节点。一方面，数据中心支撑人工智能、云计算等前沿技术发展，其能源需求与碳排放量呈指数级增长，倒逼绿色技术创新与规模化应用。另一方面，数据中心建设运营涉及电力、制冷、建筑、IT 硬件等跨领域协同，可有效检验并集成各类绿色解决方案，带动可再生能源、储能、智能电网、液冷技术等上下游产业链绿色升级。2024 年全球数据中心用电量达 415 太瓦时，占全球总用电量的 1.5%，若不加以干预，到 2030 年将达到约 945 太瓦时。算力需求与绿色转型之间的矛盾是全球共同面临的挑战，亟需通过国际合作探索兼顾效率与可持续的发展路径。

对中国而言，本研究具有三重战略意义：一是中国作为世界第二大数字经济体，已构建起覆盖 14 个省份的 8 大枢纽节点、10 个数据中心集群，2025 年数据中心总体供给规模超过 25 吉瓦。推动数据中心绿色转型既是落实“双碳”目标的内在要求，也是巩固数字经济竞争优势的关键举措。二是中国在绿色数据中心领域的政策框架、技术标准与运营实践已形成系统性经验（包括“东数西算”空

间规划、强制性 PUE[电源使用效率]标准、绿电直连机制等），具备与发展中国家分享的知识价值。三是数据中心绿色转型是连接数字基础设施与绿色产业转型的枢纽型议题，中国可通过双边、区域、多边三个层级的合作，将国内经验转化为国际公共产品，在全球绿色治理中发挥引领作用。

二、主要研究内容

（一）数据中心建设及运营对驱动绿色发展国际合作的的作用。本研究从产业系统视角出发，阐明数据中心绿色转型的合作场景覆盖上游绿电开发投资与应用、中游液冷与余热回收等技术、下游碳排放核算等服务，适合不同发展阶段的国家参与。数据中心能够促进能源领域系统性降碳、支撑新型电力系统建设、推动可再生能源项目共建，进而构建超越数据中心自身边界的绿色产业合作网络。这一问题的特殊重要性在于：以往绿色发展国际合作多聚焦能源、交通、制造业等领域，数据中心作为新兴业态的相关研究存在空白，亟需从理论上厘清其枢纽地位和驱动机制。

（二）中国绿色数据中心转型的政策框架与实施路径。本研究系统梳理了中国绿色数据中心转型的四层政策架构——顶层为国家气候承诺（“双碳”目标），“1+N”治理体系将承诺转化为部门任务，五年计划规定量化目标，2024 年专项行动计划整合约束性要求。在实施层面，中国通过空间规划（“东数西算”）、技术标准与创新激励、市场化赋能政策、跨境合作与能力建设四大维度推动政策落地。这一问题的特殊重要性在于：中国模式为发展中国家提供了“政府引导、市场赋能、技术创新”的可复制参考路径。

（三）中国在资源节约型数据中心发展方面积累的可转移的最佳实践。本研究通过阿里云千岛湖（深层湖水冷却，设计 PUE 低于 1.3）、阿里张北（风墙自然冷却与浸没式液冷，PUE 达 1.13-1.25）、腾讯天津（废热回收每年避免 5.24 万吨二氧化碳排放，PUE 达 1.09）、中国能建庆阳（近零碳工业园区，PUE≤1.20，可再生能源占比超 90%）和中国能建乌兰察布（中国首个绿电直连示范，每年避免 56.7 万吨二氧化碳排放）等案例，验证了政策如何有效转化为运营成果。这些实践案例验证了中国绿色数据中心政策从顶层设计到运营成果的有效转化，为国际合作提供了可量化的绩效基准和可复制的技术路径，夯实了坚实的互信基础。

（四）东南亚、非洲、拉丁美洲等区域的绿色数据中心发展面临的共同挑

战与机遇。本研究深入分析了南非（电力系统面临 9.5 吉瓦“基础供应悬崖”、缺乏强制性绿色数据中心标准）、巴西（可再生电力优势显著、但面临监管不确定性和输电容量竞争）、气候脆弱论坛与 V20 国家（拥有近 20 亿人口却仅占全球数据中心容量不到 1%）。研究这些发展中地区的数据中心增长十分重要，因为它揭示了数字基础设施的快速扩张如何与气候脆弱性、资源与基础设施约束以及发展优先事项交织在一起，由此引出一个问题：数据中心究竟能支撑广泛的经济社会发展，还是会加剧既有的环境与社会挑战。此外，中国一直是这些地区最大的双边发展融资提供方，表明双方合作具有坚实基础。研究发现，电力供应约束、资源竞争、监管不确定性、技能差距是各区域面临的共同挑战。这一问题的特殊重要性在于：识别区域差异和共性瓶颈，为差异化合作策略提供依据。

（五）如何通过双边、区域、多边三个层级的合作推动数据中心绿色转型。本研究以印度尼西亚为深度案例，诊断其绿色数据中心工业基础（工业走廊、绿色产业组件、清洁能源生态系统、政策杠杆四个支柱的优势与差距），提出通过“绿色芯片与电子”“清洁技术制造”“可再生能源与电网”三个渠道将数据中心需求引导至产业转型。在此基础上，按双边、区域、多边三个合作层级和短、中、长三个时间框架提出系统的政策建议，其关键意义在于将理论研究转化为可操作的行动方案，为政策制定者提供决策参考。

三、政策建议

数据中心和绿色结构转型的国际合作应从“短期的对话和标准制定”，演进到“中期的协调投资和制度框架”，最终发展到“长期的集成产业发展和融资机制”。不同层级的合作在此过程中发挥互补作用：双边合作支持符合国家特征和优先事项的定制解决方案；区域合作可产生规模经济和共享基础设施效益；多边合作可提供共同标准、融资和治理框架。

（一）双边合作层面。短期看，建议推动相关部委、开发商和公用事业公司之间关于绿色数据中心规划的结构化政策对话，分享中国在监管框架、市场机制和绿色数据中心发展方面的经验；推进关于 PUE（电源使用效率）、WUE（水利用效率）及其他指标的联合研究，为未来标准制定奠定基础。中期，与选定的伙伴国家合作，建立专门的双边数据中心合作框架，将数据中心与绿色结构转型相联系；创建双边工作组，涵盖政府机构、公用事业公司、金融机构和私营部门利

益相关者；开发混合融资机制，使中国的政策性银行、商业银行和发展机构能够与伙伴国家的金融机构并肩合作。长期看：将数据中心纳入更广泛的产业发展战略和绿色投资生态系统；将长期合作机制制度化，加强当地能力建设，确保数据中心发展通过加强国内能力和产生广泛的经济社会效益来促进绿色产业转型。

（二）区域合作层面。短期看，建议通过金砖国家数字经济合作网络、V20联盟、中国-东盟和中非合作论坛等区域平台，共同制定绿色数据中心标准和基准；建立关于绿色数据中心的谅解备忘录和区域合作框架；通过技术交流、工作组和知识共享倡议促进同行学习。中期，建议协同推进中国对外直接投资与数据中心配套基础设施和供应链建设；开发数字与清洁能源基础设施一体化的区域试点走廊。长期看，建议利用共享基础设施和比较优势，构建区域绿色数据中心供应链；支持区域制造中心、技术培训中心和产业合作平台；促进下游价值创造，涉及电池、冷却系统、矿物加工和低碳制造等领域。

（三）多边合作层面。短期看，建议在G20、UNFCCC及其他全球论坛中将绿色数据中心提升为优先议题；与国际电信联盟和国际能源署等机构合作，开展分析框架和数据收集工作；将绿色数据中心定位为全球气候、能源和发展合作的关键组成部分。中期，建议推动绿色数据中心标准的全球互认与协调；协调碳核算方法、可再生能源证书和可持续信息披露框架。长期看，建议动员气候融资和基于市场的机制用于绿色数字基础设施，包括利用UNFCCC第6条货币化绿色数据中心的减排量；加强与绿色气候基金、全球环境基金及多边开发银行等现有多边气候融资平台的对接，争取优惠资本支持；为绿色数据中心及相关基础设施设立专门的融资窗口或投资机制。

关键词：绿色发展国际合作，绿色转型，数据中心，驱动机制

术语与缩略语表

缩略语	中文全称	英文全称	释义
AKTESP	协议、知识、技术、经济、社会、政治框架	Agreement, Knowledge, Technological, Economic, Social, Political	一种用于分析能源转型障碍的理论框架，围绕六类障碍展开分析。
BESS	电池储能系统	Battery Energy Storage Systems	利用电池储存电能以备后用的系统，支持电网稳定和可再生能源消纳。
BRIGC	一带一路绿色发展国际联盟	Belt and Road Initiative International Green Development Coalition	2019 年成立的促进"一带一路"40 余个伙伴国绿色基础设施合作的多边平台。
CCUE	碳计算利用效率	Carbon Computing Usage Effectiveness	衡量数据中心单位计算产出所产生碳排放的指标。
CEI	碳排放强度	Carbon Emission Intensity	衡量单位产出或活动所产生碳排放量的指标。
CERST	碳减排支持工具	Carbon Emission Reduction Supporting Tool	中国人民银行设立的货币政策工具，为碳减排项目提供 1.75%利率的低成本资金。
CPECC	中国电力工程顾问集团	China Power Engineering Consulting Group	中国国有工程企业，主导庆阳、乌兰察布等工业园区级绿色数据中心项目。
CVF–V20	气候脆弱论坛及 V20 财长集团	Climate Vulnerable Forum and V20 Group of Finance Ministers	气候脆弱论坛及 V20 财长集团（CVF–V20）代表 74 个气候脆弱成员国，覆盖近 17 亿人口。CVF-V20 旨在通过其旗舰倡议《气候繁荣计划》（CPPs）为成员国实现繁荣。CPPs 是开创性的中长期国家投资战略，融合发展、气候与自然议题，旨在为构建项目储备、吸引资本以

缩略语	中文全称	英文全称	释义
			及加快技术获取与共同开发提供结构化、战略性框架。
CUE	碳利用效率	Carbon Usage Effectiveness	衡量数据中心总碳足迹与其 IT 设备能耗之比的指标。
DC-CFA2	数据中心申请征集第二期	Data Center Call for Application 2	新加坡在 BCA-IMDA 绿色标志框架下的第二轮数据中心用地分配，要求 100%IT 负载时 PUE≤1.25 且绿色电力占比≥50%。
EDWC	东数西算	Eastern Data, Western Computing	中国于 2021 年启动的国家级空间规划工程，建立 8 个国家算力枢纽节点和 10 个数据中心集群，将东部算力需求引导至可再生能源丰富的西部地区。
EPR	延伸生产者责任	Extended Producer Responsibility	要求生产者对产品进行全生命周期管理至消费后阶段的监管制度，包括处置和回收。
ESO	电子系统运营商	Electronic System Operator	根据印尼 PP 71/2019 法规注册的运营数字基础设施系统的实体。
FOCAC	中非合作论坛	Forum on China-Africa Cooperation	中国与非洲国家间的多边合作平台，涵盖数字基础设施和绿色发展等领域。
GW	吉瓦	Gigawatt	功率单位，等于十亿瓦，常用于衡量大规模发电或用电容量。
GJ	吉焦	Gigajoule	能量单位，等于十亿焦耳，用于衡量热能产出。
GWh	吉瓦时	Gigawatt-hour	能量单位，等于十亿瓦时，用于衡量大规模电力消耗或发电量。
IEA	国际能源署	International Energy Agency	提供全球能源问题分析和政策建议的政府间组织。
IEC	国际电工委员会	International Electrotechnical Commission	制定和发布电气、电子及相关技术领域国际标准的国际标准组织。

缩略语	中文全称	英文全称	释义
IPP	独立发电商	Independent Power Producer	向电网或特定购电方出售电力的私营发电实体，区别于公用事业所属发电。
ISO	国际标准化组织	International Organization for Standardization	制定自愿性国际标准的独立非政府间国际组织。
ITU	国际电信联盟	International Telecommunication Union	联合国负责信息通信技术的专门机构，制定绿色数据中心标准（如ITU-T L.1300、L.1320）。
JDA	联合开发区	Joint Development Area	用于协作工业开发的指定区域，如印尼加朗岛联合开发区用于半导体和光子产业。
kWh	千瓦时	Kilowatt-hour	能量单位，等于一千瓦时，为电力消费的标准计费单位。
MEMR	能源和矿产资源部（印尼）	Ministry of Energy and Mineral Resources	印尼负责能源政策、电力监管和矿产资源管理的政府部门。
MIIT	工业和信息化部（中国）	Ministry of Industry and Information Technology	中国负责产业政策、信息技术标准和数据中心监管的政府部门。
MW	兆瓦	Megawatt	功率单位，等于一百万瓦，用于衡量数据中心容量或发电量。
NDRC	国家发展和改革委员会（中国）	National Development and Reform Commission	中国宏观经济管理部门，负责经济规划、价格政策和气候政策协调。
NEA	国家能源局（中国）	National Energy Administration	中国负责能源行业监管和规划的政府机构。
NIB	新工业巴西	Nova Indústria Brasil	巴西政府产业政策计划，其第四项任务聚焦数字基础设施作为生产力转型的驱动力。
OECD	经济合作与发展组织	Organisation for Economic Co-operation and	由发达经济体组成的政府间组织，致力于改善经济和社会福祉的政策促进。

缩略语	中文全称	英文全称	释义
		Development	
OSS-RBA	在线单一提交—基于风险的方法（印尼）	Online Single Submission–Risk-Based Approach	印尼投资统筹委员会（BKPM）运营的投资许可框架，采用风险分级简化商业许可流程。
P3DN	国内产品使用提升计划	Peningkatan Penggunaan Produk Dalam Negeri	印尼推动在公共采购和基础设施中使用国产制成品的政策框架。
PFAS	全氟和多氟烷基物质	Per- and Polyfluoroalkyl Substances	一类被称为"永久性化学品"的合成化学物质，具有极高的环境持久性，部分用于数据中心浸没式冷却液。
PLN	印尼国家电力公司	Perusahaan Listrik Negara	印尼国有电力公用事业公司，是主要电力供应商和唯一输电网运营商。
PPA	购电协议	Power Purchase Agreement	发电方与购电方之间签订的长期电力采购合同，通常用于可再生能源采购。
PUE	电源使用效率	Power Usage Effectiveness	数据中心总能耗与 IT 设备能耗之比，计算公式为：数据中心总能耗 ÷ IT 设备能耗。为数据中心能效的行业标准指标，PUE 值越低表示能效越高。
REC	可再生能源证书	Renewable Energy Certificate	代表 1 兆瓦时可再生能源发电环境属性的可交易证书，区别于碳信用。
REDATA	数据中心特殊制度	Regime Especial de Data Centers	巴西数据中心税收激励框架（MP 1.318/2025），已到期并待恢复。
REIPPPP	可再生能源独立发电商采购计划（南非）	Renewable Energy Independent Power Producer Procurement Programme	南非通过竞争性招标从私营开发商采购可再生能源电力的计划。
RPJMN	国家中期发展计划（印尼）	Rencana Pembangunan	印尼五年期国家发展计划，当前为 2025—2029 周期，设定包括数字基

缩略语	中文全称	英文全称	释义
		Jangka Menengah Nasional	础设施在内的部门优先事项。
RUPTL	电力供应业务计划（印尼）	Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik	印尼国家电力公司（PLN）编制的国家电力供应计划，覆盖十年期的发电容量扩建和燃料结构目标。
SNI	印尼国家标准	Standar Nasional Indonesia	印尼国家标准体系，包括 SNI 8799 系列数据中心设计、运营和能源管理标准。
SS 564	新加坡标准 564	Singapore Standard 564	新加坡数据中心资源效率标准，自 2011 年生效，建立能耗和水用的基准要求。
TKDN	国产化率要求（印尼）	Tingkat Komponen Dalam Negeri	印尼产业政策工具，要求特定产品和基础设施中国产组件达到最低比例。
TWh	太瓦时	Terawatt-hour	能量单位，等于一万亿瓦时，用于衡量国家或全球规模的电力消费。
UNFCCC	联合国气候变化框架公约	United Nations Framework Convention on Climate Change	为全球气候行动提供框架的国际条约，包括《巴黎协定》和第 6 条碳市场机制。
UNEP	联合国环境规划署	United Nations Environment Programme	全球领先的环境权威机构，负责设定全球环境议程并促进可持续发展。
UNIDO	联合国工业发展组织	United Nations Industrial Development Organization	联合国专门机构，致力于促进工业发展以实现减贫、包容性全球化和环境可持续性。
WUE	水利用效率	Water Usage Effectiveness	数据中心总用水量与 IT 设备能耗之比，计算公式为：年总用水量（升）÷ IT 设备能耗（千瓦时）。WUE 值越低表示用水效率越高。

目录

执行摘要 iv
术语与缩略语表 viii
一、引言：数据中心与产业绿色转型的必要性 1
（一）绿色发展国际合作新形势下的产业绿色转型机遇 1
（二）产业绿色转型的定义 2
（三）产业绿色转型视域下的数据中心：驱动绿色发展国际合作的机制与路径 4
二、中国数据中心绿色转型的经验与进展 6
（一）中国绿色数据中心转型的分层政策框架 6
（二）政策实施：四大支撑维度 8
（三）资源节约型数据中心发展的最佳实践 13
（四）中国数据中心的低碳实践 15
（五）章节综述：中国模式、挑战与未来展望 20
三、绿色数据中心发展的国际经验与最佳实践 24
（一）案例研究：南非、巴西及气候脆弱国家 24
（二）重点区域绿色数据中心发展的优先领域与新兴趋势 30
（三）重点区域绿色数据中心发展的进一步需求 31
四、印度尼西亚–中国案例研究 33
（一）印度尼西亚–中国战略关系 33
（二）展望印度尼西亚的数字经济、数据中心与可持续发展 33
（三）数据中心规模化和可持续发展的障碍 35
（四）数据中心作为工业生态系统中的一个节点 37
（五）印度尼西亚的工业基础 38
（六）打造绿色产业转型潜力：引导需求 39
（七）引导和提升合作：东盟-中国 40
五、政策建议 41
（一）双边合作政策建议 42
（二）区域合作政策建议 43
（三）多边合作政策建议 43

一、引言：数据中心与产业绿色转型的必要性

（一）绿色发展国际合作新形势下的产业绿色转型机遇

1. 当前全球形势变化及对绿色发展国际合作的影响

当前，世界百年变局加速演进，绿色发展国际合作面临新的形势变化。单边主义、保护主义抬头及主要发达经济体政策转向，加剧了全球气候治理的碎片化和不确定性，地缘政治持续冲突导致国际资源从气候治理等领域分流外溢，贸易壁垒上升亦对绿色技术、产品及产业链的跨境流动造成新的障碍。

气候等全球生态环境议题与政治、经济深度交织，对全球发展的影响日益深远。少数发达国家凭借技术优势主导低碳规则制定，而全球南方国家仍面临发展与减排双重压力。合作机制呈现碎片化特征，多边治理机制面临系统性困境。

在此背景下，全球生态环境治理亟待构建和强化体现国家平等、遵循多边主义、实现协同治理的国际规则体系，破解全球生态环境治理困境，推动构建公平、合理、高效的全球生态环境治理新格局。

2. 绿色发展国际合作：全球经济发展与政治关系的稳定力量

虽然全球处于新的动荡变革期，但气候变化、生物多样性丧失、环境污染给人类生存和发展带来的挑战仍然日益严峻，绿色低碳转型的大势不可逆转，全球绿色转型机遇仍大于挑战。深化国际绿色合作已成为全球经济和政治关系的关键“稳定器”，通过产业与技术合作创造共同利益，并为重塑全球治理体系提供实践平台和互利共赢的叙事框架。特别是中国生态文明建设成就以及在全球环境治理中的引领力有目共睹，国际社会对其期待不断提升。

中国作为最大发展中国家，一直以来建设性参与全球生态环境治理，不断贡献中国智慧，推动全球可持续发展。中国提出的构建“人类命运共同体”“人与自然生命共同体”等理念，以及“完善全球生态治理，建设生态友好型世界经济”的政治主张，为凝聚全球生态治理共识、推动完善公平合理、合作共赢的全球环境治理体系发挥了重要推动作用。与此同时，中国自身生态环境保护、绿色转型形成大量创新成果，并不断深入推进南南合作和绿色“一带一路”建设，持续为全球生态环境治理和世界经济绿色低碳转型注入稳定性和正能量。

3. 产业绿色转型：深化国际合作的重要驱动力

面对全球生态环境治理新形势、新挑战，各国将绿色低碳产业和技术创新等作为巩固长期竞争优势的重要赛道，产业绿色转型推动国际合作的作用日益凸显。作为产业绿色转型的关键组成部分，数据中心正凭借其可整合技术、资本、政策与基础设施的能力，成为驱动产业绿色转型的核心节点，推动深化绿色国际务实合作，并协同创造经济增长与能源转型等多重效益。

一方面，数据中心支撑着人工智能、云计算、物联网等前沿技术发展，其能源需求与碳排放量快速增长，倒逼绿色技术创新与规模化应用。另一方面，数据中心具备强大的跨领域

资源整合能力——在单一设施内集聚对绿色电力、先进冷却技术、低碳材料及数字人才的需求。其建设与运营涉及电力、冷却、建筑、信息技术硬件及废物管理等多个领域的协同配合，进而使每一座数据中心成为绿色成套解决方案的试验场，以及推动其在更广泛产业链中规模化应用的平台。因此，推动数据中心绿色低碳转型，不仅有助于降低行业自身碳足迹，更能通过技术外溢和标准引领，带动可再生能源、储能、智能电网、液冷技术、电子废弃物可持续管理等上下游产业链绿色升级，形成“以点带面”的转型效应。

（二）产业绿色转型的定义

1. 国际上对产业绿色转型相关概念的理解

国际上，产业绿色转型本身尚无统一的标准定义，但联合国等机构系统阐述和推广的相关概念被广泛接受。联合国工业发展组织（UNIDO）认为“产业绿色化”是对现有产业进行绿色改造，使其发展不再依赖日益增长的自然资源的消耗和污染[1]；联合国环境署（UNEP）认为“绿色经济”是低碳、资源节约、社会包容的经济模式[2]；经济合作与发展组织（OECD）认为“绿色增长”是在确保自然资产可持续提供资源与环境服务的同时，促进经济增长与发展[3]；联合国框架下的“绿色公正转型”强调采取整体措施应对气候变化和环境恶化，同时确保社会公正和公平。

2. 中国对产业绿色转型的定位和政策

产业绿色转型是中国推动高质量发展、实现人与自然和谐共生现代化的重要抓手。其内涵超越了传统意义上单纯的污染治理或末端控制，而是指以绿色低碳理念为引领，以技术创新为驱动，推动产业结构、生产方式、能源结构乃至发展方式的系统性、根本性变革，将绿色发展理念深度融入经济社会发展的全领域、全过程，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，最终实现经济社会发展与生态环境保护的协同共赢。

在实践层面，中国政府于 2024 年发布的《绿色低碳转型产业指导目录（2024 年版）》将宏观的绿色理念具体化为可操作的产业政策。该政策文件不仅将名称从“绿色产业”调整为“绿色低碳转型产业”，更从产业边界、覆盖范围、内涵要求上进行系统重构，明确界定了节能降碳、环境保护、资源循环利用、能源绿色转型、生态保护修复和利用、基础设施升级、绿色服务七大类产业。具体而言，中国产业绿色转型既包含对钢铁、石化等传统高耗能产业的深度改造，也包含对新能源、新材料等新兴绿色产业的培育壮大；既着眼于能源供给端的清洁替代，也着眼于消费端基础设施的绿色升级；并将绿色转型从生产领域延伸至涵盖咨询、金融、技术研发等在内的全链条服务体系。

---

[1] United Nations. Green industries essential to foster sustainable economic growth[EB/OL]. (2011-10-12)[2026-08-08]. https://news.un.org/en/story/2011/10/391272.

[2] United Nations Environment Programme (UNEP). Supporting resource efficiency: green economy[EB/OL]. UNEP, [2026-08-08].

[3] Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). Towards green growth[R/OL]. OECD, 2011[2026-08-08]. https://sdgs.un.org/publications/towards-green-growth-17519.

3. 不同定义和理解的对比与关键要素

梳理相关概念和政策发现，产业绿色转型的实质是对技术、社会、经济和制度进行系统性投资或变革，以构建一种可持续的、包容性的新发展模式。

总体而言，产业绿色转型的定义可归纳为：**以推动经济社会发展全面绿色化、低碳化为目标，通过技术创新、制度创新和系统优化，推动能源结构、产业结构、生产方式向高效、清洁、低碳方向系统性转变的动态过程。**其核心要素包括：技术创新驱动、全系统覆盖、效率持续提升、发展可持续与社会包容性。

产业绿色转型首先须在经济发展与碳减排之间取得平衡，确保转型成本处于可承受范围内，并维持产业竞争力。就数据中心而言，这一平衡体现为权衡其自身的能源消耗与碳排放足迹，以及其所带来的系统性能效提升——包括优化电网负荷、加速可再生能源部署，以及替代其他更高碳排放强度的计算活动。该评估具有动态特征：随着可再生能源渗透率与冷却效率的持续改善，数据中心在全生命周期内的净效益将逐步趋于有利。与此同时，产业绿色转型应遵循公正转型原则。在数据中心领域，应优先确保其发展所产生的能源相关效益与经济效益得到公平分配，切实保障发展中国家及弱势群体的发展权利。具体而言，具有社会包容性的转型应当考量：新增投资的受益主体是谁，转型政策是否对特定群体造成不成比例的影响。这亦意味着需在不同人群间拓展参与渠道、就业机会、技能培养及数字基础设施的可及性。此外，数据中心语境下的产业绿色转型不局限于碳排放问题，还涵盖水资源消耗、污染物排放、关键矿物资源管理及电子废弃物处置等维度，相关内容在第 2.3 节予以论述。

从驱动要素看，产业绿色转型涵盖政策、技术、经济、社会等四个方面，其相互结合并共同推动转型目标的实现。从全生命周期角度看，产业绿色转型涉及产业全生命周期的绿色降碳，即从生产制造、建设、运营使用到回收处置的全链条低碳化。

在此过程中，国际合作能够有效促进政策、技术、资本的互动与流动，优化资源配置、提高资源利用效率，使产业绿色转型从单一国家行动到跨国协同，形成技术、资金、标准等公共产品供给机制，从而提升绿色转型的有效性和可持续性。同时，各经济体在政策、技术、资金及社会方面的共同诉求与关切，也将进一步推动彼此间合作与交流，实现全球产业链与供应链的深度协同发展。

（三）产业绿色转型视域下的数据中心：驱动绿色发展国际合作的机制与路径

1. 数据中心快速发展及其绿色转型的紧迫性

随着数字经济高速发展，算力需求的指数级爆发与能源供给刚性约束之间的矛盾已日渐凸显。国际能源署（IEA）《能源与人工智能》报告显示，2024 年全球数据中心用电量达 415 太瓦时，占全球总用电量的 1.5%，与英国全年用电量相当，到 2030 年全球数据中心用电量将达到约 945 太瓦时。作为当前全球最大的数据中心市场，美国的数据中心电力需求为 47 吉瓦，有预测认为到 2028 年这一数字将达到 95 吉瓦。作为全球算力需求的主要承载地，中

国已构建起覆盖 14 个省份的 8 大枢纽节点、10 个数据中心集群，2025 年其数据中心总体供给规模超过 25 吉瓦，在“东数西算”战略框架下，庞大的算力规模与绿电供需的时空错配，正倒逼“算电协同”与绿色转型加速推进；此外，非洲、东南亚等地区的数据中心建设也呈爆发式增长。在此背景下，算力需求与绿色转型之间的矛盾是全球共同面临的挑战，亟需通过国际合作探索兼顾效率与可持续的发展路径。

2. 数据中心绿色转型：驱动绿色发展国际合作的核心枢纽

作为现代产业体系的关键组成部分、数字经济发展的重要基础设施与战略性产业，数据中心既是“能耗大户”，也是“产业绿色转型枢纽”，既是电力、水、土地和原材料的重要消耗者，也具有带动产业升级、吸纳金融投资、承载数字经济等重要功能，能直接带动绿电消纳、长时储能、余热利用、低碳材料等上下游产业发展，并涵盖水资源与废弃物管理、低碳能源系统、惠益分享等发展维度，其驱动绿色发展国际合作的重要性日益显现。从产业系统视角看，数据中心绿色转型有助于推动上下游产业链转型，合作场景覆盖上游的绿电开发投资与应用、中游的液冷、余热回收等技术、下游的碳排放核算等服务，适合不同发展阶段的国家参与，在促进能源领域系统性降碳、降低钢铁等传统产业能耗、支撑新型电力系统建设、优化电力促进绿电消纳、推动可再生能源项目共建等方面发挥积极作用，这有助于推动经济活动逐步降低对高碳密集型重工业的依赖，进而带动构建超越数据中心自身边界的绿色产业合作网络，为相关区域及合作方带来广泛的经济、社会与环境效益。

当前，绿色发展国际合作多聚焦能源、交通、制造业等领域，虽然数据中心作为新兴业态其低碳、高效、可持续的运营模式，正成为化解自身能耗挑战、支撑数字经济与绿色转型协同发展的重要路径，然而相关国际绿色标准、合作机制以及公共产品供给等领域仍存在研究空白；此外，迄今为止对绿色数据中心的探索，主要侧重于数据中心现场能源、资源和材料使用的脱碳，而非数据中心所在地区或国家的更广泛转型，导致其减碳潜力远未释放。

基于此，本研究立足数据中心绿色转型这一关键领域，探索数据中心的环境压力、碳排放挑战及东道国利益保障等问题，并通过具体案例深入剖析其驱动绿色发展国际合作的机制与路径，旨在为数字时代绿色转型的国际合作提供理论支撑与实践参考。

二、中国数据中心绿色转型的经验与进展

2024 年，中国数据中心用电量达到 166 太瓦时（占全国总量的 1.68%），预计到 2030 年将达到 400 太瓦时（占 3.7%），复合年增长率为 13-16%[4,5]。截至 2024 年底，全国平均 PUE 为 1.46，八个国家算力枢纽节点在 2025 年 3 月表现更佳，约为 1.3，而最先进的设施已达到 1.04[6]。作为世界第二大数字经济体，中国已形成以“政府引导、市场赋能、技术创新”为特征的绿色数据中心转型框架，在快速扩展算力的同时推进低碳转型。

本章概述了中国绿色数据中心转型的政策框架、实施维度、资源效率实践和运营案例，为发展中国家提供可操作的参考路径。

（一）中国绿色数据中心转型的分层政策框架

中国的绿色数据中心政策框架通过四层架构运行：（1）顶层为国家气候承诺，（2）“1+N”治理体系将承诺转化为部门任务，（3）五年计划规定量化目标，（4）2024 年专项行动计划整合了约束性要求（图 1）。这种分层设计确保了高层级的气候承诺逐级落实到可执行的部门要求中，既提供了方向上的明确性，也产生了合规压力。

顶层是“双碳”目标——中国在 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的承诺[7]——“1+N”政策体系——2021 年正式确立的总体气候治理架构，其中“1”指指导性文件，“N”指部门-specific 行动计划——提供了总体方向性任务[8]。

[4] 中国信息通信研究院.《绿色算力发展研究报告（2025）》[R]. 北京：中国信息通信研究院，2025.

[5] 韩雪. 数据中心低碳化运行可有效缓解 AI 巨大能源需求[EB/OL]. 国务院发展研究中心，2024-05-20. https://www.drc.gov.cn/DocView.aspx?chnid=379&leafid=1338&docid=2907711.

[6] 国家发展改革委，国家能源局，国家数据局. 关于促进可再生能源绿色电力证书市场高质量发展的意见[EB/OL]. (2025-03-18)[2026-06-22]. https://www.nda.gov.cn/sjj/swdt/sjdt/0318/20250318212051776584737_pc.html.

[7] 新华社. 继往开来，开启全球应对气候变化新征程[OL]. 北京：中国日报，2020(2020-12-14)[2026-04-27]. https://language.chinadaily.com.cn/a/202012/14/WS5fd6b592a31024ad0ba9b8bc.html.

[8] 国务院新闻办公室. 中国碳达峰碳中和行动[OL]. 北京：中华人民共和国生态环境部，2025(2025-11-08)[2026-04-27].



图 1 中国绿色数据中心转型的政策框架架构

《“十四五”数字经济发展规划》和《“十四五”信息通信行业发展规划》将双碳任务转化为数字基础设施的具体目标。这些规划明确将数据中心定位为既是主要能源消耗者，也是脱碳的关键目标，为 PUE 降低、区域布局和可再生能源利用设定了要求[9,10]。"十四五"规划所设定的上述目标将在"十五五"（2026—2030 年）期间延续并进一步收紧，政策重心从能效提升转向数字基础设施的强制性脱碳（见第 2.5.3 节）。

至关重要的是，2024 年 7 月，国家发展和改革委员会（NDRC）联合工业和信息化部（MIIT）、国家能源局（NEA）和国家数据局发布的《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》——是迄今为止最具权威性的行业专项文件，将 PUE 门槛、可再生能源目标和改造义务整合到一个统一的合规框架中[11]。根据该计划，到 2025 年底，新建和扩建的大型及以上数据中心必须实现 PUE ≤ 1.25，而国家算力枢纽节点内的数据中心项目则需满足更严格的 PUE ≤ 1.2；现有不合规的设施须进行强制改造或淘汰。到 2025 年底，国家算力枢纽节点的新建数据中心必须从可再生能源中获取 80%以上的电力。该计划还设定了到 2025 年底将全国所有数据中心的平均 PUE 降至 1.5 以下的目标。

[9] 中华人民共和国国务院.“十四五”数字经济发展规划[R/OL]. 北京：中华人民共和国国务院，2021(2021-12-12)[2026-04-27]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/202203/t20220325_1320207.html.

[10] 中华人民共和国工业和信息化部.“十四五”信息通信行业发展规划[R/OL]. 北京：中华人民共和国工业和信息化部，2021(2021-11-01)[2026-04-27]. https://data.mofcom.gov.cn/upload/file/02.pdf.

[11] 国家发展改革委. 数据中心绿色低碳发展专项行动计划[R]. 北京：国家发展改革委，2025.

2026 年 4 月，四部委联合印发《关于推动人工智能与能源双向赋能的行动计划》[12]，将原有针对数据中心的专项规制框架拓展为联结人工智能基础设施与能源体系的综合性国家制度安排，并设定 2027 年及 2030 年阶段性目标，同时部署"百万千瓦级"算力—能源协同试点项目。

上述政策框架确立了方向上的明确性和合规压力。然而，其实际落实取决于四个相互关联的实施维度——空间规划、标准与创新、市场机制和国际合作（见第 3.2 节）。

（二）政策实施：四大支撑维度

在第 3.1 节概述的政策框架基础上，中国的实施体系通过四个相互加强的维度运作：空间规划奠定基础设施基础，标准定义合规路径，市场机制降低经济障碍，国际合作扩大影响并促进学习。

1. 战略规划与空间优化

此维度将区域布局任务付诸实施。中国最独特的贡献在于其对计算基础设施和清洁能源资源的国家级空间协调。“东数西算”工程于 2021 年启动实施，2022 年全面启动建设，建立了以八个国家算力枢纽节点（东部：京津冀、长三角、粤港澳大湾区、成渝；西部：内蒙古、贵州、甘肃、宁夏）和十个国家数据中心集群为支撑的全国一体化算力网络[13]，每个节点被赋予不同的功能角色：

西部枢纽侧重承接非时延敏感型工作负载——即无需实时响应的任务，如批量数据处理、人工智能模型训练及备份归档，因此可部署于远离终端用户的地区——并明确将可再生能源电力接入作为优先方向。截至 2025 年底，上述枢纽新建数据中心用电中超过 80%来自风能、太阳能及水力发电[4]。

东部枢纽毗邻中国经济核心区域——包括京津冀地区、长三角地区及粤港澳大湾区——承担人工智能训练、实时金融及电子商务等高附加值、低时延应用业务。新建大型及超大型数据中心需实现 PUE ≤ 1.25（枢纽节点 ≤ 1.2）。

水资源方面：东数西算战略优先考虑可再生能源而非水资源丰裕度，因为水资源限制可以通过液冷、强制性 WUE 指标和场地级规划来解决。西部枢纽因其风能、太阳能和自然冷却优势而被选中。东部枢纽情况各异——沿海地区水资源可用性更好。

国际可转移性："东数西算"模式为面临数字需求与可再生能源供给之间存在地理错配的国家提供了可复制的蓝图，例如印度（马哈拉施特拉邦需求与喜马拉雅水电资源之错配）、

---

[12] 国家发展改革委，国家能源局，工业和信息化部，国家数据局. 关于促进人工智能与能源双向赋能的行动计划[EB/OL]. (2026-05-08) [2026-05-09]. https://www.nda.gov.cn/sjj/zwgk/zcfb/0508/20260508194112925527578_pc.html.

[13] 国家发展改革委，中央网信办，工业和信息化部，国家能源局. 关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的实施意见[R/OL]. 北京：国家发展改革委等，2021(2021-05-26)[2026-04-16]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202105/t20210526_1280838.html.

巴西（圣保罗产业集群与亚马孙水电资源之错配）及印度尼西亚（爪哇岛需求与苏拉威西太阳能资源之错配），表明"绿色"与"数字"双重转型可通过系统性的空间战略实现相互促进。然而，该模式依托中国庞大的统一大市场。规模较小的国家可能需要：（1）推进区域合作（如东盟层面的统筹规划）以聚合需求；或（2）将该模式适配至省级或城市一级尺度。

2. 技术标准与创新激励

此维度为政策合规提供技术基础，将 PUE 和可再生能源目标转化为可衡量的基准。中国已建立了覆盖全生命周期的标准体系和有针对性的创新支持，拥有 30 多项国家和行业标准来管理数据中心的可持续性，包括：

（1）GB 40879-2021《数据中心能效限定值及能效等级》[14]，一项强制性国家标准，设定了具有约束力的 PUE 阈值——PUE 超过 1.30 的数据中心将面临合规限制，对新建和现有设施有不同要求[15]；

（2）GB/T 44989-2024《绿色数据中心评价》[16]，将能源效率、用水量、碳排放、可再生能源利用和绿色采购整合到一个五级评级体系中；于 2025 年 6 月实施，作为国家绿色数据中心认定的合格基准（二级及以上），直接将标准与政策激励挂钩；

（3）五项液冷标准[17,18,19,20,21]（YD/T 3979-2021 至 YD/T 3983-2021），涵盖浸没式和冷板式系统、冷却液、通用技术要求和测试方法及能效，与 ITU-T L.1320[22]和 L.1300[23]保持一致。

---

[14] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 数据中心能效限定值及能效等级：GB 40879-2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.

[15] 财政部，生态环境部，工业和信息化部. 关于印发《绿色数据中心政府采购需求标准（试行）》的通知[EB/OL]. (2023-03-20)[2026-04-13]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-04/22/content_5752654.htm.

[16] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 绿色数据中心评价：GB/T 44989-2024[S/OL]. (2024-11-28)[2026-04-13]. https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=2CA3493EC30B989C84DE36B466F44545.

[17] 工业和信息化部. 数据中心浸没式液冷服务器系统技术要求和测试方法：YD/T 3979-2021[S]. 北京：人民邮电出版社，2021.

[18] 工业和信息化部. 数据中心冷板式液冷服务器系统技术要求和测试方法：YD/T 3980-2021[S]. 北京：人民邮电出版社，2021.

[19] 工业和信息化部. 数据中心液冷系统冷却液体技术要求和测试方法：YD/T 3981-2021[S]. 北京：人民邮电出版社，2021.

[20] 工业和信息化部. 数据中心液冷系统冷却液体技术要求和测试方法：YD/T 3982-2021[S]. 北京：人民邮电出版社，2021.

[21] 工业和信息化部. 数据中心液冷服务器系统能源效率技术要求和测试方法：YD/T 3983-2021[S]. 北京：人民邮电出版社，2021.

[22] 国际电信联盟. 绿色数据中心最佳实践：ITU-T L.1300[S]. 日内瓦：ITU，2014.

[23] 国际电信联盟. 电信和数据中心供电与冷却设备的能效指标和测量方法：ITU-T L.1320[S]. 日内瓦：ITU，2014.

作为标准的补充，中国部署了实践示范和财政激励措施：

（1）截至 2025 年，工业和信息化部（MIIT）及其他五个部委已分五批评选出 246 个国家绿色数据中心[24,25]。被认定的数据中心享有优惠政策，包括根据更广泛的制造业政策获得增值税（VAT）即征即退资格[26]、符合条件的设备加速折旧[27]，以及在某些省份，优先获得绿色电力交易资格和部署液冷及节能冷却技术的补贴。

（2）中国的液冷市场增长迅速：冷板式系统占已部署液冷容量的 80-90%[28]，而浸没式冷却因 AI 工作负载而势头增强。2024 年市场规模约为 4.98 亿美元，预计到 2032 年将超过 33 亿美元（复合年增长率约 27%）[29]。

国际可转移性：这种“标准+示范+激励”的三位一体可以降低采用风险和成本。其机制如下：（1）标准提供清晰的合规路径并降低技术选择风险——政策制定者可以采用协调统一的国际标准（例如通过 ITU 成员资格），而非从头制定国内标准；（2）示范项目验证技术在当地条件下的性能，建立投资者和运营商的信心；（3）财政激励（税收抵免、贴息贷款、补助金）解决成本障碍，在国内财政能力有限的情况下，可与开发银行的特许融资搭配使用。

3. 市场化赋能政策

此维度解决政策雄心与实施成本之间的经济可行性差距。中国的绿色数据中心生态系统通过两个相互关联的市场机制运作：

绿色电力采购与整合：2025 年，中国绿色电力交易量达到 3285 亿千瓦时（同比增长 38.3%）[30]。国家发展和改革委员会（NDRC）建立了“绿电直连”机制，允许可再生能源通过专用线路供电而无需经过公共电网[31]，现已在全国 20 多个省份实施[32]。国家目标要求枢纽

---

[24] 工业和信息化部，国家发展改革委，商务部等. 关于公布 2021 年度国家绿色数据中心名单的通知[EB/OL]. (2022-03-10)[2026-04-13]. https://www.ncsti.gov.cn/kjdt/tzgg/202203/t20220317_62950.html.

[25] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 绿色数据中心评价：GB/T 44989-2024[S/OL]. (2024-11-28)[2026-04-13]. https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/gb/newGbInfo?hcno=2CA3493EC30B989C84DE36B466F44545.

[26] 财政部，税务总局. 关于进一步加大增值税期末留抵退税政策实施力度的公告：财政部 税务总局公告 2022 年第 14 号[A/OL]. (2022-03-21)[2026-04-13]. https://www.shui5.cn/article/f8/156371.html.

[27] 财政部，税务总局. 关于设备器具扣除有关企业所得税政策的通知：财税〔2018〕54 号[A/OL]. (2018-05-07)[2026-04-13]. https://www.shui5.cn/article/2f/120800.html.

[28] 东吴证券. AI 液冷行业深度报告[R/OL]. (2025-01-23)[2026-04-13]. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202501231642496101_1.pdf.

[29] Credence Research. China data center liquid cooling market size, share and forecast, 2024–2032[R/OL]. (2024)[2026-04-13]. https://www.credenceresearch.com/report/china-data-center-liquid-cooling-market.

[30] 国家能源局. 2025 年全国能源形势新闻发布会[EB/OL]. (2026-01-30)[2026-04-13]. https://www.cctd.com.cn/show-16-253783-1.html.

[31] 国家发展改革委，国家能源局. 关于促进绿色电力直连有序发展的通知：发改能源〔2025〕650 号[A/OL].

节点的新数据中心到 2025 年底实现 80%以上的绿色电力消费[33]，其中内蒙古枢纽在 2025 年第一季度达到 84.57%[34]。2026 年 4 月的《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动计划》将该机制提升为国家优先事项 [12]。

定向金融支持：中国人民银行的碳减排支持工具（CERST）提供 1.75%利率的低成本资金[35]。截至 2025 年底，中国绿色贷款余额达到 44.77 万亿元人民币[36]，绿色数据中心在不断扩大支持类别下越来越有资格获得贷款[37]。国家绿色发展基金（首期规模 885 亿元人民币）也投资于支撑绿色数据中心的清洁能源基础设施[38]，而枢纽地区的地方政府提供额外激励，包括补贴土地和优惠电价 [11]。

国际可转移性：这些工具解决了发展中国家面临的两大障碍——高额的初始资本成本和缺乏可融资的项目结构。适应路径包括：（1）在国家开发银行设立“绿色数据中心贷款窗口”，提供与 PUE 挂钩的优惠利率；或（2）构建双边绿色购电协议（PPA）以降低承购方风险。适用性因情况而异：拥有成熟电力市场的中高收入国家（如巴西、南非）可以更容易地采用这些措施，而低收入国家可能需要替代路径，如开发银行的特许融资或多边联合融资机制。在国家开发银行缺位的情况下，替代方案包括多边融资（亚行、亚投行、世界银行）和区域发展基金；跨部门协调可以通过机构间工作组实现，即使没有中国正式的制度架构。

4. **跨境合作与能力建设**

此维度将国内政策影响扩展到国境之外。在一带一路倡议下，中国将绿色数据中心发展纳入与发展中国家的数字基础设施合作中。一带一路绿色发展国际联盟（BRIGC）成立于 2019 年，是促进 40 多个伙伴国家绿色基础设施合作的多边平台[39]，主要合作领域包括：

(2025-05-30)[2026-04-13]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202505/t20250530_1398138.html.

[32] 国家能源局. 绿电直连政策为可再生能源与用户开启“绿电快车道”[EB/OL]. (2026-01-30)[2026-04-13]. https://www.nea.gov.cn/20260130/b5b729cb7ad74723bcd614b663c75da6/c.html.

[33] 国家发展改革委，工业和信息化部，国家能源局，国家数据局. 数据中心绿色低碳发展专项行动计划：发改环资〔2024〕970 号 [A/OL]. (2024-07-23)[2026-04-13]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202407/t20240723_1391894.html.

[34] 深圳市政府. 绿色算力大基地是如何建成的 [EB/OL]. (2025-06-16)[2026-04-13]. https://www.szzg.gov.cn/2025/szzg/xyzx/202506/t20250616_5033818.htm.

[35] 中国人民银行. 碳减排支持工具问答 [EB/OL]. (2021-11-08)[2026-04-13]. https://www.pbc.gov.cn/goutongjiaoliu/113456/113469/4363541/index.html.

[36] 中国人民银行. 2025 年四季度金融机构贷款投向统计报告 [EB/OL]. (2026-02)[2026-04-13]. http://www.financeun.com/newsDetail/63034.shtml.

[37] 中国人民银行. 碳减排支持工具支持领域扩大 [EB/OL]. (2026-01-19)[2026-04-13]. https://www.21jingji.com/article/20260119/herald/12d12cc3e80da65a80eb0768bb3a5275.html.

[38] 财政部，生态环境部，上海市人民政府. 设立国家绿色发展基金股份有限公司：首期规模 885 亿元[EB/OL]. (2020-07-15)[2026-04-13]. http://www.greenfinance.org.cn/displaynews.php?id=2910.

[39] 一带一路绿色发展国际联盟（BRIGC）. 关于 BRIGC[EB/OL]. (2019)[2026-04-13]. http://www.brigc.net.

政策对话与标准对接：中国参与 ITU-T 第 5 研究组[40]，为 L.1300[22] 和 L.1320[23] 等绿色数据中心标准做出贡献，并支持发展中国家采用协调统一的信息与通信技术（ICT）可持续发展框架[41]；

技术援助与培训：通过中非合作论坛（FOCAC）和“数字丝绸之路”，中国在以下方面提供能力建设：（1）绿色数据中心设计和运营——PUE 优化、液冷部署和可再生能源整合；（2）政策和监管框架——标准采用、监测系统和合规机制；以及（3）劳动力发展——为设施管理人员和技术人员提供培训项目[42]。中国的“数字丝绸之路”倡议已支持巴基斯坦、印度尼西亚和马来西亚的绿色数据中心项目[43]；

南南气候合作：中国的南南气候合作基金已向 40 多个发展中国家提供气候相关技术援助[44]，绿色 ICT 基础设施日益成为其中的重点。

2025 年，中国国家互联网信息办公室发布《数字化绿色化协同转型发展报告》，强调了与东盟和非洲国家的绿色数据中心技术共享[45]，并在 2024 年世界互联网大会上联合主办了数字化绿色化协同转型论坛，汇聚了来自 20 多个国家的参与者[46]。

国际可转移性：依托一带一路绿色合作（BRIGC）及国际电信联盟（ITU）等多边平台，可获取经审定的标准、同行学习机制及联合融资渠道。关键经验在于：国际合作发挥最佳效用的方式是强化本地机构能力，而非替代之。上述平台框架下的能力建设举措亦应推动技术教育与劳动力培养领域的广泛参与，确保女性、青年、农村社区及其他代表性不足的群体能够分享数字基础设施领域的发展机遇。

---

[40] ITU-T 第 5 研究组：环境、气候变化与循环经济. 中国为绿色数据中心标准做出贡献. https://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2022-2024/05/Pages/default.aspx

[41] 国际电信联盟. 数据中心绿色化：电子学习课程 [EB/OL]. [2026-04-13]. https://academy.itu.int/training-courses/full-catalogue/greening-data-centers-0.

[42] 中华人民共和国外交部. 中非合作论坛北京行动计划（2025-2027）[EB/OL]. (2024-09-05)[2026-04-13]. https://www.mfa.gov.cn/eng/xw/zyxw/202409/t20240905_11485719.html.

[43] 世界互联网大会. 推动共建“一带一路”数字标准共同发展 [R/OL]. (2023)[2026-04-13]. https://bulletinofcas.researchcommons.org/cgi/viewcontent.cgi?article=3297&context=journal.

[44] 国家发展改革委. 绿色发展援助[R/OL]. [2026-04-13]. http://www.cidca.gov.cn/download/gjhzlsfzyz.pdf.

[45] 国家互联网信息办公室. 数字化绿色化协同转型发展报告（2025）[R/OL]. (2025)[2026-04-13]. https://www.cac.gov.cn/cms/pub/interact/downloadfile.jsp?filepath=ZBWvETi1XzcBKtOIkqelkKyZubXJ7XhTtEum6u4y3J0JlNefDligM1XYyprdiboOnswF1rKyF1/z6NGp9PsSoDEjTcORl73kmCTdYOvdSjs=.

[46] 中国中央电视台. 2024 年世界互联网大会数字化绿色化协同转型论坛[EB/OL]. (2024-11-22)[2026-04-13]. https://city.news.cctv.com/2024/11/22/ARTIMMrB30PBQ7MyKBZrBjJi241122.shtml.

（三）资源节约型数据中心发展的最佳实践

虽然第 3.1 和 3.2 节讨论了政策和实施架构，但可持续的数据中心运营还需要审慎管理水、矿产和电网资源。随着 AI 驱动的计算密度上升，数据中心日益与当地社区争夺稀缺资源。本节探讨中国在处理这些冲突方面的经验。

1. 管理水–能关系：缓解资源竞争

中国数据中心的扩张加剧了北方缺水地区和东部电网受限城市的资源竞争。北京是水资源紧张的一个典型例证：2024 年，该市的数据中心估计年用水量达 2200-3000 万立方米，在 2020-2024 年间消费量迅速上升[47]。由于北京市政供水的 70%来自南水北调工程，数据中心依赖自来水进行冷却间接与居民用水需求竞争^57^。与此同时，东部枢纽饱和的配电网络为新的高密度设施带来了“并网困难”；例如，河北怀来集群急需建设一条新的 220 千伏输电线路（480 兆瓦）以满足需求[48]。

中国通过三层解耦战略应对这些限制：

（1）空间解耦：东数西算将批处理任务迁移到可再生能源丰富的西部地区，同时将实时工作负载保留在东部。

（2）效率解耦：政府强制执行 PUE 和 WUE 双指标，推动运营商采用液冷和闭环系统。

（3）时间解耦：协调的储能系统在可再生电力过剩期间充电，在高峰需求期间放电，使负荷曲线与可变发电相匹配。

冷却创新是弥补剩余差距的核心。液冷是最成熟的选项：它能减少 30-40%的用水量和 30-50%的用电量，将 PUE 降至 1.1 以下，并消除对清洁淡水的依赖[49]。自然冷却效率更高但受地理条件限制。领先的运营商正在进一步推进：腾讯已部署使用海水冷却的海底数据中心，并正在试点氢燃料电池作为备用电源[50]。关于热污染，中国的 GB 3838-2002 标准将受纳水体的周平均温升限制在≤1°C[51]。向液冷（闭环系统）的转变本身避免了向水体排放热量。一项环境方面的隐忧值得关注：部分浸没式冷却技术依赖氟化冷却液——即全氟化流体，因其导热性能与电气绝缘特性而被采用，但被列为 PFAS（"永久性化学品"），具有极高的环境持久性与全球变暖潜势。随着中国（在"双碳"及化学品管控政策框架下）以及欧盟和美国持

---

[47] 李华，刘小林. 北京市数据中心节能降碳对策研究[EB/OL]. (2024-03-06) [2026-05-03]. https://blog.csdn.net/j6UL6lQ4vA97XlM/article/details/136498131.

[48] 王宁，蔡建军，张旭. 冀北张家口十八家 220 千伏输变电工程预计年底竣工，支撑怀来数字经济发展[EB/OL]. (2021-10-14) [2026-05-03]. http://www.zjknews.com/xianqu/huailai/202110/14/341411.html.

[49] 华勤技术股份有限公司. 华勤技术 2023 年半年度报告[R/OL]. (2023-08-31) [2026-05-03]. https://www.huaqin.com/uploads/files/20230804/eba81f2249cd5686343fbfa7e8b8c0ae.pdf.

[50] 腾讯云开发者社区. 全国首个商用海底数据中心在海南陵水下水[EB/OL]. (2024-03-31) [2026-05-03]. https://cloud.tencent.com/developer/news/1043012.

[51] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准：GB 3838-2002[S]. 北京：中国环境科学出版社，2002.

续收紧 PFAS 限制措施，该行业正加速向无氟替代方案转型，如合成油及生物基冷却液——中国企业正在该领域布局产能，而围绕标准与替代技术的国际合作可加速这一转型进程。

国际可转移性：资源竞争模式并非中国独有。关键的可转移要素包括：（1）将计算负载与资源可用性相匹配的空间规划；（2）在不指定特定技术的情况下创造合规压力的强制性效率指标；以及（3）减少电网依赖的集成储能系统。制度前提是数字基础设施规划者与水和能源监管机构之间的协调。

2. 节约关键矿产和资源的经验

数据中心建设涉及关键矿产消费的“金字塔”结构（图 2）：底层是用于电力传输和冷却的铜[52]；中层是用于备用电源储能的锂、钴和镍[53]；顶层是用于芯片制造的硅、镓、锗和稀土元素[54]。

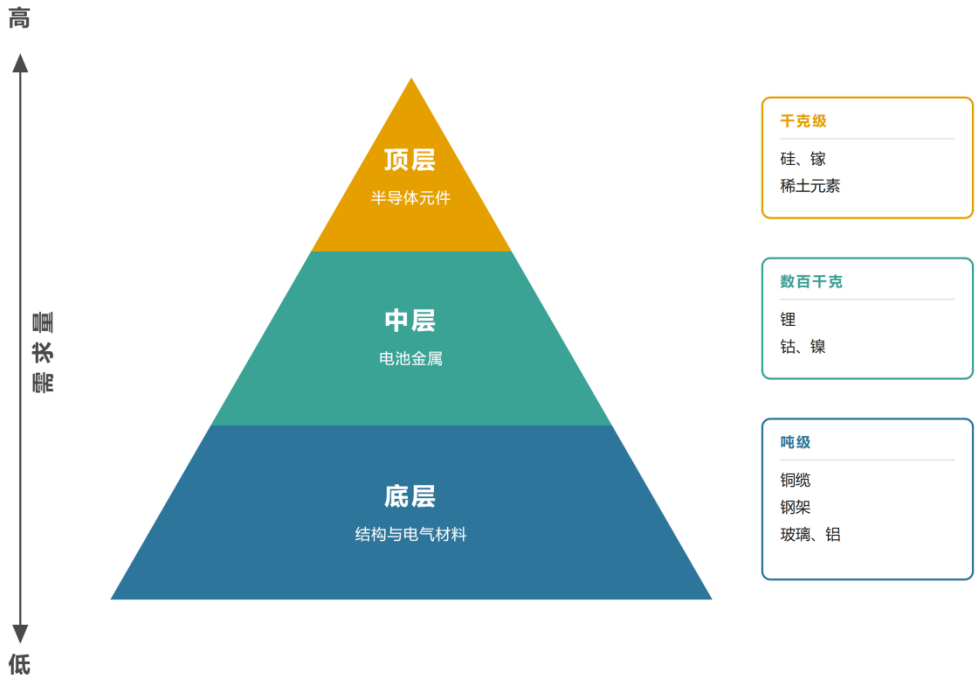


图 2 数据中心基础设施矿产消费的“金字塔”

中国正通过三条路径减少关键矿产消耗：短期内，液冷减少冷却系统规模和铜用量；中长期内，计算能效提升减少了实现同等算力所需的芯片数量，而光互连技术等新兴前沿有望

[52] 光大证券. 光大证券：数据中心快速发展或加剧铜短缺，看涨铜价持续上行[EB/OL]. (2024-04-07) [2026-05-03]. https://stock.jrj.com.cn/2024/04/07092340135589.shtml.

[53] IEA. Global Critical Minerals Outlook 2024[EB/OL]. (2024-05-17) [2026-05-03]. https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024.

[54] NEPCON ASIA. Semiconductor Materials Market Analysis: TECHCET Predicts Global Market Size to Reach Approximately $73 Billion in 2024[EB/OL]. (2024-10-17) [2026-05-03]. https://www.nepconasia.com/zh-cn/news-center/news/2024/10/17.html.

减少对铜缆的依赖[55]。此外，东数西算倡议促进在西部地区集群部署，通过规模化建设降低单位算力的基础设施投资[56]。

除材料消耗外，数据中心基础设施中的隐含碳——特别是半导体、服务器和建筑材料中的隐含碳——在生命周期排放中占有重要份额，值得关注。关键材料的碳足迹因其生产所用电力结构的不同而有显著差异：用煤电为主生产的多晶硅碳足迹高于用水电生产的；用更清洁电网生产的铝的隐含碳明显较低。这为与拥有比较优势和更清洁电力结构的伙伴国家开展合作创造了可能性，使其成为低碳组件的潜在联合生产者，将协调规划扩展到数据中心本身之外。这为与伙伴国家开展合作开辟了可能性——这些国家凭借比较优势及更清洁的电力结构，具备成为低碳投入品联合生产基地的潜力。例如，利用可再生水电将金属硅精炼为低碳多晶硅（如第三章巴西案例所述），或在更清洁的电网条件下制造铝制机架与铜互连部件。此类联合生产将协调规划的范围拓展至数据中心本身之外，并将数字基础设施需求与东道国产业升级相衔接。

（四）中国数据中心的低碳实践

本节介绍四个案例，展示中国的政策框架如何转化为运营实践：从企业主导的自然禀赋设计（阿里云、腾讯），到工业园区规模的源网荷储一体化（中国能建集团的庆阳和乌兰察布项目），说明政策雄心、技术创新和组织能力如何汇聚以交付可验证的脱碳成果。

1. 案例 1：阿里云——千岛湖和张北数据中心

阿里云的两个旗舰数据中心展示了自然资源禀赋如何驱动大规模能效提升，其共同原则是：与自然协同设计，而非对抗自然。

千岛湖：深层湖水冷却。该数据中心于 2015 年在浙江省启用，是中国首个深层湖水冷却设施。闭环系统从深处取水，通过热交换器吸收废热，通过 2.5 公里长的渠道将升温后的水回用于自然冷却[57]——使全年超过 90%的时间无需机械制冷即可运行，设计 PUE 低于 1.3（最低 1.17）[58]。

张北：风电自然冷却与浸没式液冷（图 3）。位于河北省海拔约 1400 米处，园区利用寒冷气候和风能。“风墙”技术将新鲜空气引入服务器机房，将机械制冷时间减少至每年约

[55] EEWorld. 打破材料极限！石墨烯半导体加速 AI 和数据中心算力升级[EB/OL]. (2025-02-20) [2026-05-03]. https://www.eeworld.com.cn/emp/Tektronixchina/a393921.jspx.

[56] 国家发展改革委. 关于加快构建全国一体化大数据中心协同创新体系的指导意见（发改高技〔2020〕1922 号）[EB/OL]. (2020-12-28) [2026-05-03]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202012/t20201228_1260496.html.

[57] 阿里云. 千岛湖数据中心：绿色创新 2.0[EB/OL]. (2015-09-25)[2026-04-13]. https://developer.aliyun.com/article/218478.

[58] InfoQ. 阿里云千岛湖数据中心启用：自然、城市与科技的结合[EB/OL]. (2015-09-09)[2026-04-13]. https://www.infoq.cn/article/2015/09/aliyun-qiandaohu-datacenter.

15 天[59]。大规模浸没式液冷实现了每机架 60 千瓦的功率密度[60]，园区 PUE 范围在 1.13 至 1.25 之间[61]。



图 3 阿里张北数据中心鸟瞰图

2023 年，阿里云在张北启动了废热市政供暖项目，首个供暖季输送 14，670 吉焦热量，替代 617.8 吨标准煤[62]。一期规划容量为 21 兆瓦，该系统将数据中心转变为双重用途基础设施节点——既提供计算能力又提供冬季供暖[63]。

规模化清洁能源采购：在 2024 财年，清洁电力占阿里云自建数据中心消费量的 56.0%，一份为期 20 年的绿色电力购买协议每年提供 1.7 亿千瓦时。自建数据中心的平均 PUE 达到 1.20 [错误!未定义书签。]。

可转移性：千岛湖—张北模式表明，世界级的能效始于选址和资源测绘——在大型水体附近采用深层水冷却，在寒冷气候区采用自然空气冷却，在存在区域供暖的地方进行废热回收——而非仅依赖技术。

2. **案例 2：腾讯天津数据中心**

---

59 新浪财经. 探访阿里云：服务器泡在“水”里[EB/OL]. (2021-08-02)[2026-04-13]. https://finance.sina.cn/tech/2021-08-02/detail-ikqcfncc0404442.d.html?vt=4.

60 中国青年网. 探访阿里云张北数据中心[EB/OL]. (2021-08-20)[2026-04-13]. https://df.youth.cn/dfzl/202108/t20210820_13178125.htm.

61 新华网. 阿里云张北数据中心绿色 IT 技术助力碳达峰碳中和[EB/OL]. (2021-07-22)[2026-04-13]. http://www.news.cn/tech/20210722/21ba34f4b01a410db5c1dc94e2378a62/c.html.

62 阿里巴巴集团. 阿里巴巴集团 2024 财年 ESG 报告[R/OL]. (2024-07-22)[2026-04-13]. https://www.alibabagroup.com/zh-HK/document-1752127870676762624.

63 搜狐. 数据中心碳中和路径及典型案例[EB/OL]. [2026-04-13]. https://www.sohu.com/a/587775208_121124371.

腾讯天津数据中心位于滨海新区，体现了一种范式转变：回收废热用于市政供暖，将数据中心从“能源黑洞”转变为社区热源。

废热回收。磁悬浮热泵从冷却回路中捕获低品位废热（30-40°C），将其提升至 55°C 用于居民供暖[64]。一期（试点）回收约 1/10 的总废热用于园区办公楼供暖，每年减少二氧化碳排放 4040 吨[65]。二期接入滨海新区区域供热网络，目前每年避免 52400 吨二氧化碳排放。

分布式可再生能源整合。园区拥有 10.54 兆瓦分布式太阳能光伏微电网，每年产生 1200 万千瓦时零碳电力[66]。

液冷与 AI 驱动优化。冷板式液冷结合 AI 驱动的温度控制，实现了低至 1.09 的 PUE[67]——是中国大型运营数据中心中最低的之一。园区还采用腾讯的 T-block 预制模块化架构，将 IT、电力和制冷集成到工厂组装的模块中，实现精确的容量扩展，在腾讯的整体组合中每年节约约 1.5 亿千瓦时电力[68]。

LEED 铂金认证。2021 年，该设施成为中国首个获得 LEED V4 O+M 铂金认证的数据中心——美国绿色建筑委员会颁发的最高级别认证[69]——验证了在能源、水、废物和室内环境质量指标方面的持续运营表现。

可转移性：天津模式解决了一个被忽视的问题：数据中心的废热如何处理？在有冬季供暖需求的地区，废热回收将数据中心从能源负担转变为社区资产。关键的障碍是制度性的——将运营商与供热公司对接需要政策协调——而非技术性的。对于热带地区，废热可以驱动吸收式制冷机用于冷却或工业过程。更广泛的经验是，可持续性设计应超越设施边界。

3. 案例 3：源网荷储一体化——中国能建庆阳和乌兰察布项目

如果说阿里云和腾讯展示的是企业主导的自然禀赋设计，中国电力工程顾问集团（CPECC）则展示了不同的范式：国有企业主导的工业园区级基础设施，通过两个互补项目将“源网荷储”理念转化为运营现实。

庆阳：近零碳工业园区

---

[64] 腾讯. 腾讯碳中和目标及行动路线报告[R/OL]. (2022-02)[2026-04-13]. https://www.tencent.com/attachments/carbon-neutrality/tencent-carbon-neutrality-report.pdf.

[65] 腾讯云. 腾讯天津数据中心余热回收：一次初步探索[EB/OL]. (2020-01-02)[2026-04-13]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1564374.

[66] 中国信息通信研究院. 中国绿色算力发展研究报告[R/OL]. (2024-07)[2026-04-13]. https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202407/P020240711551514828756.pdf.

[67] 会议通. 2025 绿色算力创新行动与数据中心液冷技术发展论坛[EB/OL]. (2025-09-04)[2026-04-13]. https://www.huiyi-123.com/article/4b4j8l3e-179.html.

[68] 兆龙互联. 降低数据中心 PUE：走向绿色环保的实践[EB/OL]. [2026-04-13]. https://zlstore.com/blogDetail/4.

[69] 腾讯云. 天津新闻报导腾讯[EB/OL]. (2021-06-08)[2026-04-13]. https://cloud.tencent.com/developer/article/1832306.

位于甘肃庆阳——东数西算下的国家算力枢纽节点——中国能建庆阳智慧零碳大数据产业园是中国最全面的数据中心脱碳项目之一。设计规模为 24000 个标准机架（60 兆瓦 IT 负载），A1 期已投入运营，机架利用率达 85%。

该项目实现 PUE ≤ 1.20，可再生能源占比超过 90%，符合近零碳设施标准。利用庆阳的风光资源，包括 150 兆瓦风电、50 兆瓦太阳能光伏，以及一个动态匹配需求与可再生能源发电的智慧运营平台。

冷却方面，高密度节点采用浸没式液冷，中密度节点采用冷板式加间接蒸发冷却。园区还达到中国绿色建筑二星级标准，整合了雨水收集、废热回收和预制模块化施工。

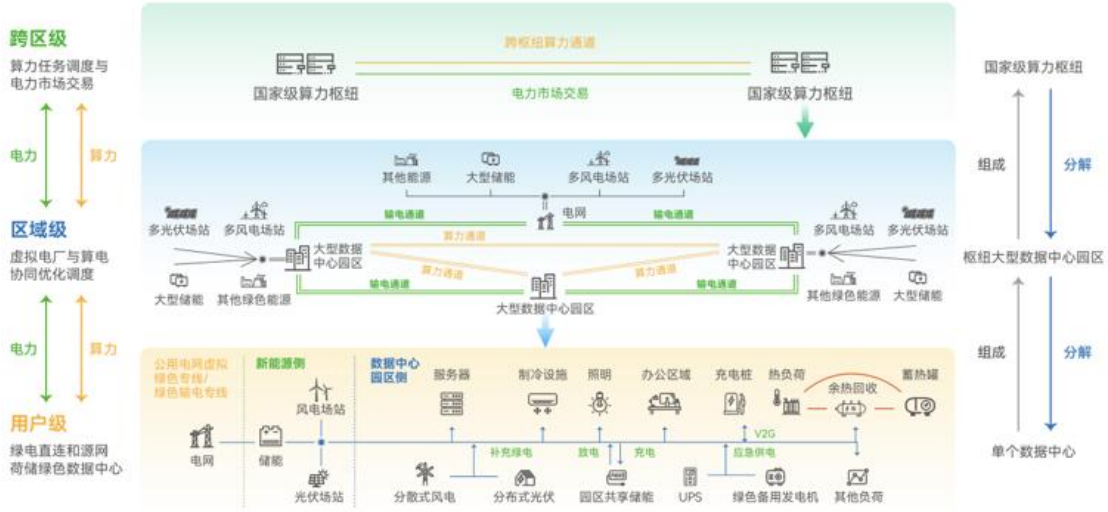


图 4 跨省→区域→用户级算电融合架构

乌兰察布：中国首个绿电直连示范

中金数据乌兰察布 380 兆瓦项目将第二章第（二）节第 3 点所述的“绿电直连”机制付诸实施。位于内蒙古，它整合了风力发电、智能输电、直供和储能，为数据中心集群实现可追溯的清洁能源供应（图 4）。

该项目决定性的创新在于其“以荷定源”方法：可再生能源容量根据实际数据中心负载确定规模，发电和需求作为一个统一系统运行，消除了弃风弃光。

一期（已运营）包括 200 兆瓦风电和 100 兆瓦太阳能光伏，每年生产 8.48 亿千瓦时绿色电力——实现 38.74%的可再生能源替代率，每年减少二氧化碳排放 56.7 万吨。



图 5 中金数据乌兰察布园区效果图

在这些项目基础上，中国能建提出了三层融合架构——“跨省→区域→用户级”——形成了一套将数字基础设施与清洁能源可用性对接的可复制模板。

启示：中国能建模式表明，将计算和能源基础设施作为一个协调统一的规划来部署，能实现更高的可再生能源利用率和更低的成本。三个要素是可复制的：（1）“以荷定源”原则——根据承诺需求确定可再生能源容量规模，消除弃电；（2）一体化交付模式——由单一实体负责发电、电网和运营，减少协调摩擦；（3）分层架构——各国可以从单个设施的用户级直连开始，随着需求增长扩展到区域融合。核心洞见是，计算和能源转型在作为一个系统规划时最为有效。

4. 全球接入中国绿色算力资源

随着中国领先设施在西部枢纽地区实现低于 1.15 的 PUE 和超过 80%的可再生能源占比，国际用户可以将此基础设施作为本地能力的补充——而非替代——来接入。

在本地建设同等规模的 AI 训练集群，成本通常比接入中国西部地区高出 2-3 倍。对于有净零承诺的组织（如欧盟 Fit for 55、新加坡绿色计划 2030），来自可再生资源丰富地区

的绿色算力提供了一条范围三减排路径——为多云战略增加一个低碳节点，而非替代国内基础设施。

存在两个担忧。关于数据主权，工作负载分区允许敏感数据保留在本地，而计算密集型任务（推理扩展、批处理、微调）在国外的绿色基础设施上运行。关于标准，前进的道路是绿色数据中心认证的互认（PUE、WUE、碳足迹指标）。

其底层逻辑简明：**世界需要更多算力，且需要清洁算力**。各国可与中国合作，将非涉密的计算密集型工作负载——如人工智能推理、批量处理及模型微调——调度至中国的绿色计算基础设施，在获取高性价比算力资源的同时降低自身碳足迹。

（五）章节综述：中国模式、挑战与未来展望

本节综合中国绿色数据中心转型的决定性特征，承认剩余的障碍，并概述“十五五”期间的发展轨迹和国际合作优先事项。

1. 中国模式：政策、资源效率与实践的综合

中国的方法整合了六个相互依存的维度——三个来自政策架构层，三个来自实践验证层。

政策架构维度：

（1）顶层战略协调。双碳目标和“1+N”框架通过五年计划层层落实到部门专项文件（如 2024 年专项行动计划），确保数据中心脱碳是国家气候治理的组成部分。

（2）空间-能源耦合。东数西算将计算需求与可再生能源供应在空间上进行匹配，专用光纤网络使这种重新分配对大多数工作负载具有商业可行性。

（3）标准驱动创新与市场混合。强制性 PUE 阈值（GB 40879-2021）和绿色评级体系（GB/T 44989-2024）创造合规压力，而并行的市场机制——绿电交易、碳减排金融工具和财政激励——使运营商能够以最低成本超越监管底线。

实践验证维度：

（4）三层解耦的资源效率创新。中国应对资源竞争遵循系统逻辑：空间解耦（将批处理迁移到资源丰富的西部地区）、效率解耦（双 PUE/WUE 指标推动液冷）和时间解耦（储能系统使负荷与可再生发电相匹配）。

（5）自然禀赋驱动设计。实现高效率始于选址——阿里云的千岛湖数据中心利用深层湖水，而张北园区利用寒冷气候和风能。这些例子表明，选址如何减少能源需求，技术放大而非替代地理优势。

（6）实践先行验证。中国的框架以可验证的结果为锚：腾讯天津每年避免 52,400 吨二氧化碳排放（PUE 1.09）；阿里张北为市政供暖输送 14,670 吉焦废热；中国能建庆阳实现 PUE ≤ 1.20，清洁能源占比超 90%；中国能建乌兰察布作为中国首个绿电直连示范，每年避免 56.7 万吨二氧化碳排放。这些例子验证了政策已有效转化为运营成果。

这六个维度与上述政策框架（第二章第（一）节）、实施维度（第二章第（二）节）、资源效率实践（第二章第（三）节）和实施案例（第二章第（四）节）相对应。

2. **其他挑战**

尽管取得了显著进展，结构性障碍依然存在：

（1）AI 驱动的能源激增。大模型训练集群的快速扩展正在加速能源需求，超出了当前的效率提升。中国数据中心用电量预计到 2030 年将占全国用电量的 3.7%，高于 2024 年的约 1.6%[4,5,70]，主要由 AI 工作负载驱动。这一增长轨迹挑战了仅靠效率提升就能抵消消费增长的假设。

（2）中小数据中心改造成本高。 虽然新建大型设施能轻松实现 PUE ≤ 1.25，但成千上万的旧小型数据中心仍在以 1.5-2.0 以上的 PUE 运行，在现行能源价格下，用液冷或高效电力系统进行改造缺乏经济回报——形成效率的“长尾”。

（3）绿色电力市场机制不完善。绿色电力交易量虽增长迅速，但跨省壁垒、绿证流动性不足（此处绿证用于认证电力的可再生能源属性，与将经核证的减排量货币化的碳信用有所区别），加之数字行业缺乏统一的碳定价机制，致使部分地区的运营方无法以具有竞争力的价格获取绿色电力。"绿电直连"机制虽已在部分省份落地，但尚未全面铺开——乌兰察布项目（第 3.4.3 节）提供了可复制的模板，但其规模化推广所需的跨地区政策协调尚不具备全国性基础。

资源竞争加剧。随着计算密度上升，数据中心与当地社区在水资源和电网容量方面的竞争加剧。当前政策框架通过 PUE/WUE 指标应对这一问题，但尚未将数据中心规划与地方层面的水资源配置和电网容量规划完全整合。

3. **“十五五”时期（2026–2030）展望：迈向强制性脱碳**

“十五五”规划纲要将标志着数字基础设施从“效率提升”向“强制性脱碳”的战略转变：

（1）碳指标与监测。2026 年 4 月，中国将数字基础设施列为五大重点节能领域之一。在“十五五”期间，数据中心将面临更严格的碳法规——预计 CUE（碳利用效率）和 CEI（碳排放强度）等指标将被纳入评估框架，与国际实践（如欧盟能效指令）接轨。

（2）严格准入门槛与硬约束。这一认定使得执行严格的 PUE 准入门槛（枢纽节点绿色电力≥80%）、高密度设施强制采用液冷以及加速淘汰不合规设施成为可能。

（3）算电协同。数据中心将日益演变为吸收可变可再生能源的灵活电网节点，得到改进的绿电交易、扩大的储能和改造补贴的支持。“算电协同”的概念——将计算调度与可再生发电进行协同优化——已从试点过渡到系统部署，2026 年 4 月的《关于促进人工智能与

[70] 中国信息通信研究院，国网经济技术研究院有限公司等. 电力与算力协同发展蓝皮书[R/OL]. 北京：中国能源报，2024(2024-09-02) [2026-05-03]. http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-09/02/content_26079346.htm.

能源双向赋能的行动计划》对此予以确认。中国能建的“跨省→区域→用户级”融合架构为此转变提供了早期框架。

4. 国际合作：未来需求与建议

中国的绿色数据中心转型为国际合作提供了若干切入点——不是作为单方面的出口模式，而是作为对共同脱碳议程的贡献。

（1）绿色标准与认证对接。国家绿色数据中心标准——中国的 GB/T 44989、欧盟的行为准则、东盟的绿色 ICT 框架、ISO/IEC 标准——目前尚无正式的等效互认。应优先推动 PUE/WUE 测量方法和可再生能源归属规则的互认，ITU-T 第 5 研究组可作为现有平台。

（2）技术和运营经验交流。中国的实践——规模化液冷、废热回收、闭环水系统、AI 驱动冷却优化以及集成可再生能源储能系统——已在商业上得到验证，但尚未广泛采用。这些实践主要针对冷却和基础设施效率；对于与计算直接相关的排放，机会包括节能服务器硬件、AI 工作负载调度优化以及可再生能源驱动的计算运营。结构化交流项目和联合试点可以加速采用，同时允许接收方在当地条件下验证性能。这些是情境适应性方法，而非固定蓝图。

（3）绿色算力资源合作。中国的西部枢纽，可再生能源占比超过 80%，PUE 低于 1.2，为国际用户提供低碳计算能力。中国能建的庆阳项目展示了该模式的运营可行性。实现这一点需要双边数据治理框架来处理工作负载分区、跨境网络基础设施以及绿电归属互认，中国西部枢纽与东盟中心之间的试点走廊可作为潜在试验田。

（4）发展中国家能力建设。中国的经验强调了跨部门协调的重要性——将数字基础设施规划与能源、水和气候政策相结合——这是许多国家仍在建设中的治理能力。项目应转移适应能力，而不仅仅是设备。这意味着：（1）建设当地运营和维护绿色数据中心的本地能力；（2）支持政策和监管发展，使伙伴国家能够设计自己的绿色数据中心框架；（3）确保接入中国绿色算力资源是迈向本地能力的垫脚石，而非永久替代。多边平台如 BRIGC、南南气候合作基金和 FOCAC 可作为交付渠道。中国与伙伴国家之间的双边合作协议提供了额外路径，特别是针对项目-specific 的技术转让和协调的基础设施投资。

（5）联合国际项目与标准协调。2026 年 4 月的《关于促进人工智能与能源双向赋能的行动计划》呼吁协调推进 AI 和能源基础设施的国际扩展，以及“AI+能源”技术标准的跨境对接——为技术转让、联合试点和参与全球协调的标准制定创造了机会。

（6）赋能基础设施合作。除数据中心本身外，赋能基础设施——可再生能源发电、储能和输电网络——的合作同样关键，因为这些辅助部门往往成为数据中心增长的制约因素。中国在“绿电直连”机制以及算力枢纽与可再生能源区域一体化规划方面的经验提供了可复制的模式。

这五个方向相互关联：（1）标准对接为（3）资源合作和（5）项目协作建立信任；（2）技术交流和（4）能力建设确保本地主导的成果。总体原则是，合作应扩大选择范围，而非规定单一路径。

三、绿色数据中心发展的国际经验与最佳实践

全球范围内，在人工智能和云计算需求激增的驱动下，数据中心已成为能耗最高的工业负荷之一[71]。全球数据中心电力需求预计将从 2024 年的约 415 TWh 增长至 2030 年的 945 TWh[72]。数据中心在东南亚、撒哈拉以南非洲和拉丁美洲等关键地区正快速扩张。与此同时，发展中地区正面临日益增长的能源需求、迫切的基础设施建设需求，以及推动工业化进程升级转型的政策要求。本章对南非、巴西及气候脆弱国家的绿色数据中心发展现状进行评估，旨在识别当前实践、挑战以及数据中心驱动的绿色工业转型机遇。

（一）案例研究：南非、巴西及气候脆弱国家

1. 南非：监管改革与水资源及废弃物管理创新

南非拥有非洲最大的数据中心市场，2025 年占非洲大陆总容量的 40%以上，超过 60 座设施集中分布于约翰内斯堡、开普敦和德班[73]。超大规模云服务商（Microsoft Azure、AWS、Google）和托管服务提供商（Teraco、Africa Data Centres）正在快速扩张，然而其依赖的电力系统仍具有高碳特征：2024 年南非仅 17%的电力来自低碳能源，而全球平均水平为 41%[74]。数据中心主要依赖 Eskom 以煤电为主的电网系统，并在限电轮供期间依靠柴油备用发电机维持运行。

近期大型科技企业对南非数据中心的投资引发了对透明度的关切，涉及其对水资源和环境的影响，以及数据中心是否能转化为当地社区的共享利益[75]。一个积极的环保趋势是可再生能源在这些设施中的应用日益增长（专栏 1）。这些案例表明，数据中心作为大型电力采购方，能够推动新增可再生能源装机接入电网，而非重新分配现有发电量。

专栏 1：电力许可改革与可再生能源购电协议浪潮

南非《电力监管法》于 2021 年 8 月修订，将嵌入式发电的许可门槛从 1 MW 提高至 100 MW，并于 2022 年 12 月彻底取消该门槛。此项改革在各行业引发了企业可再生能源购电协

[71] Rahman S, Khan T A. Energy storage systems for AI data centers: a review of technologies, characteristics, and applicability[J/OL]. Energies, 2026, 19(3): 634[2026-08-08]. https://doi.org/10.3390/en19030634.

[72] International Energy Agency (IEA). Energy and AI[R/OL]. 2026[2026-08-08]. https://www.iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai.

[73] ADCA. Data centres in Africa 2026: the economic report[R/OL]. African Actors of Data Center Association (ADCA), 2026[2026-08-08]. https://africadca.org/wp-content/uploads/2026/02/DataCentresInAfrica2026-EN.pdf.

[74] Ember. Africa: electricity access remains an urgent problem across the continent[EB/OL]. (2026-04-13)[2026-08-08]. https://ember-energy.org/countries-and-regions/africa.

[75] Kimathi S K. South Africa tribunal approves Equinix data centres despite activist objections[EB/OL]. Reuters, (2026-07-28)[2026-08-08].
https://www.reuters.com/business/energy/south-africa-tribunal-approves-equinix-data-centres-despite-activist-objections-2026-07-28/.

议（PPA）的签约浪潮，数据中心行业亦在其中。

Africa Data Centres 与 Distributed Power Africa 签署了 12 MW 轮转输送太阳能购电协议[76]；Vodacom 与 SOLA 达成了虚拟购电协议；南非最大的托管服务提供商 Teraco 在自由邦省建成投运 120 MW 太阳能光伏设施，年发电量超过 338,000 MWh[77]，并于 2025 年与 NOA 追加签署风电购电协议，以实现供电多元化[78]。

尽管已取得一定进展，但要将数据中心增长全面转化为社区层面的利益共享和更广泛的绿色工业转型，仍需克服若干障碍。

第一，南非电力系统面临电力供应缺口、能源普及和电网接入三重挑战。2029 年至 2030 年间，预计将出现 9.5 GW 的基础供应断崖，其主要原因是 8.4 GW 的 Eskom 煤电机组退役以及从莫桑比克进口的 1.15 GW 卡霍拉巴萨水电合约到期[79]。鉴于仍有 12%的南非人口缺乏电力接入，数据中心扩张可能挤占居民用电需求，加剧现有的能源公平差距[80]。此外，在 2022 年和 2024 年可再生能源独立发电商采购计划（REIPPPP）招标轮次中，由于输电基础设施不足，风电项目均未中标，而风力资源最丰富的开普省恰恰受此影响最为严重[81]。

第二，缺乏专门的绿色数据中心标准。《国家数据与云政策》虽提及"低碳可持续发展要求"，但尚未制定可执行的 PUE（电能利用效率）、WUE（水利用效率）、可再生能源占比或建筑材料隐含碳排放的基准标准。因此，运营商透明度仅依赖企业自愿承诺，削弱了绿色金融、认证及双边合作的基准依据。

第三，水资源消耗和硬件废弃物正造成局部环境压力。南非水资源紧张状况日益加剧[82]，

[76] Swinhoe D. Africa DC signs 12MW solar PPA in South Africa[EB/OL]. DCD, (2023-03-14)[2026-08-08]. https://www.datacenterdynamics.com/en/news/africa-dc-signs-12mw-solar-ppa-in-south-africa/.

[77] Sehloho M. SA's Teraco to power data centers with 120MW solar plant[EB/OL]. Connecting Africa, (2024-02-22)[2026-08-08].
https://www.connectingafrica.com/data-centers/sa-s-teraco-to-power-data-centers-with-120mw-solar-plant.

[78] Teraco. Teraco signs wind PPA to power data centre facilities sustainably[EB/OL]. (2025-02-26)[2026-08-08]. https://www.teraco.co.za/news/teraco-signs-wind-ppa-to-power-data-centre-facilities-sustainably/.

[79] Eskom. Medium-term system adequacy outlook 2026-2030: generation system adequacy for the Republic of South Africa[R/OL]. 2025[2026-08-08]. https://www.ntcsa.co.za/wp-content/uploads/2025/10/Medium-Term-System-Adequacy-Outlook-2026-2030.pdf.

[80] World Bank. Access to electricity (% of population) - South Africa[EB/OL]. 2024[2026-08-08]. https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=ZA.

[81] MOLEPO P M, ABOALEZ K, MATHABA T N D. Analysis of barriers to South Africa's energy transition: perspectives from industry experts[J/OL]. Energy for Sustainable Development, 2025, 88: 101777[2026-08-08]. https://doi.org/10.1016/j.esd.2025.101777.

[82] Louw A. South Africa: making sense of a water crisis after historic floods[EB/OL]. Greenpeace International, (2026-04-23)[2026-08-08].
https://www.greenpeace.org/international/story/81923/south-africa-water-crisis-after-historic-floods/.

数据中心用水量预计将从 2025 年的 180 亿升增至 2030 年的 300 亿升[83]。然而，这并不意味着位于水资源紧张地区的数据中心必然不可持续——采用先进冷却技术的最佳实践数据中心可以实现极高的水利用效率。在废弃物管理方面，数据中心硬件寿命较短同样值得关注。南非 2021 年《延伸生产者责任条例》要求生产者对产品进行全生命周期管理至消费后阶段，并配套实施了涵盖电气和电子设备的专项方案，该方案同样适用于数据中心。

专栏 2：运营商在水资源利用与硬件生命周期末端管理的实践

头部运营商在水资源和废弃物管理方面已先行推进。Teraco 新建的数据中心——包括约翰内斯堡的 JB4 和 JB5 以及开普敦的 CT2 扩建项目——采用闭环冷冻水系统配合自然冷却（free-air cooling），目标是实现持续冷却过程零用水，并降低单位 IT 千瓦时用水量。2025 年卡内基梅隆大学非洲分校的一项研究表明，在执行相同计算任务时，南非数据中心的用水量低于美国平均水平[84]。在硬件管理方面，Desco 和 ITAD Africa 等经认证的 IT 资产处置企业对退役服务器进行评估，优先考虑翻新、再利用或转售，随后在南非延伸生产者责任（EPR）及电子废弃物合规框架下对剩余部分进行拆解以回收贵金属[85]。

2. 巴西：绿电依托型布局（powershoring）与绿色产业链整合

巴西目前是拉丁美洲数据中心市场无可争议的领导者，占据该地区约 41%的市场投资[86]。支撑这一地位的关键驱动力是"powershoring"（绿电依托型布局）[87]，即指将能源和资源密集型产业活动战略性转移至兼具充沛、低成本清洁能源与关键自然要素禀赋的地区。绿色数据中心的绿电依托型布局体现了"可再生能源拉动效应"，即清洁能源的可获得性日益决定全球价值链的区位选择[88]。

[83] Mordor Intelligence. South Africa data center water consumption market size[R/OL]. 2025[2026-08-08]. https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/study-of-data-center-water-consumption-in-south-africa.

[84] Frantz A. Water consumption of African data centers in the age of AI[EB/OL]. Carnegie Mellon University Africa, (2025-08-13)[2026-08-08]. https://www.africa.engineering.cmu.edu/news/2025/08/13-water-efficiency.html.

[85] Cape Business News. The hidden gold in your drawer: how eWaste is powering the circular economy[EB/OL]. (2025-06-27)[2026-08-08]. https://cbn.co.za/industry-news/recycling-waste-management-news/the-hidden-gold-in-your-drawer-how-ewaste-is-powering-the-circular-economy/.

[86] Businesswire. Latin America data center market landscape 2025-2030: Brazil leads the charge, holding over 41% of Latin America's data center investments[EB/OL]. (2025-05-05)[2026-08-08]. https://www.businesswire.com/news/home/20250505397648/en/Latin-America-Data-Center-Market-Landscape-2025-2030-Brazil-Leads-the-Charge-Holding-Over-41-of-Latin-Americas-Data-Center-Investments---ResearchAndMarkets.com.

[87] Arbache J, Esteves L A. Resilience with efficiency: how powershoring can contribute to the decarbonization and economic development of Latin America and the Caribbean[R]. CAF, 2023.

[88] SAMADI S, FISCHER A, LECHTENBÖHMER S. The renewables pull effect: how regional differences in renewable energy costs could influence where industrial production is located in the future[J/OL]. Energy Research & Social

按照巴西政府自身的定位框架，巴西的核心竞争优势在于电力本身的类型：据财政部高级顾问透露，与其他地区相比，该国以可再生能源为主的电力矩阵可将人工智能处理的碳足迹降低高达 75%[89]。这一判断塑造了将巴西定位为低碳数字基础设施"可持续枢纽"的官方话语。政府亦高度关注数据主权问题——目前 60%的巴西数据在境外处理[90]，由此引发了更为广泛的问题：仅靠数据中心本土化布局无法解决这些问题，包括数字基础设施由谁掌控，以及即使设施位于国内，巴西能否对其数据和人工智能生态系统保持战略控制权。

国际科技企业正在巴西数据中心领域建立重要布局，其中字节跳动在塞阿拉州佩森港综合体（Pecém Port Complex）投资 500 亿雷亚尔的建设项目是最为突出的案例。然而，巴西政府通过"新工业巴西"（NIB）计划第四项任务所阐述的目标远不止于此——该计划意在将数据中心投资作为推动生产力转型的杠杆，刺激本土零部件制造、培育本地供应链，并将研发扎根于本国科研机构[91]。

巴西数据中心投资的立法格局目前处于监管真空状态，此前 REDATA 税收激励措施（MP 1.318/2025）已经到期 4。这一挫折给国际投资者造成了重大财政不确定性，促使国会围绕第 3018/2024 号法案和第 278/2026 号法案展开讨论，分别旨在对数据中心进行规范和激励，后者涉及 REDATA 的永久性恢复[92,93]。

除监管不确定性外，该行业的快速扩张也加剧了围绕清洁基础设施的结构性竞争。在近期向国家互联系统提交的 39 项接入申请中，有 34 项涉及数据中心，合计负荷达 7.04 GW，使数字基础设施与工业项目和绿氢项目在有限的输电容量上形成直接竞争[94]。数据中心建成后在创造本地长期就业岗位方面相对于其他行业也较为有限[95]，这一问题在国会辩论中已被

Science, 2023, 104: 103257[2026-08-08].
https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103257.

[89] BRANDÃO R, LINS L M. Data centers in Brazil: mapping the digital infrastructure in Brazil, notes for a study on data centers[R/OL]. Cetic.br|NIC.br, Internet Sectoral Overview, 2025, No. 4[2026-08-08].
https://cetic.br/media/docs/publicacoes/6/en-us/20251209175206/iso-y17-n4-data_centers_in_brazil.pdf.

[90] Coelho L. 'IA para quem?': entenda o boom de data centers no Brasil[EB/OL]. Dialogue Earth, (2026-03-04)[2026-08-08]. https://dialogue.earth/pt-br/energia/ia-boom-data-centers-brasil/.

[91] Millard P, Saraiva A. Brazil emerges as AI hot spot with TikTok's data center push[EB/OL]. Bloomberg, (2025-12-03)[2026-08-08].
https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-12-03/brazil-emerges-as-ai-hot-spot-with-tiktok-s-data-center-push.

[92] Brazilian Senate. PL 3018/2024[Z]. 2024.

[93] Brazilian Chamber of Deputies. PL 278/2026[Z]. 2026.

[94] BNAmericas. Data centers dominate list of projects authorized to access Brazil's power grid[EB/OL]. (2026-02-04)[2026-08-08].
https://www.bnamericas.com/en/news/data-centers-dominate-list-of-projects-authorized-to-access-brazils-power-grid

[95] Dotan T. The AI data-center boom is a job-creation bust[N/OL]. Wall Street Journal, 2025-02-25[2026-08-08]. https://www.wsj.com/tech/ai-data-center-job-creation-48038b67.

重点提出[96]。政治层面的困难在于：成本是即时的、有形的，而收益在很大程度上仍然是预期性的。弥合这一差距需要超越被动承接的定位，转向将数据中心投资与绿色产业转型和国内价值链发展进行有意识的深度整合。在此意义上，巴西与中国的互补性为合作与共同发展提供了切实可行的路径。

作为全球第四大金属硅出口国，巴西在将数据中心发展与绿色产业转型相结合方面具有巨大潜力。金属硅是多晶硅的基础原料，而多晶硅是太阳能光伏板和半导体制造的核心材料。巴西拥有不断扩张的大型加工厂产业基础[97]。与此同时，中国在多晶硅精炼下游环节占据主导地位，且已是巴西数据中心硬件的主要供应国[98]。因此，在国际绿色数据中心合作方面存在结构性互补潜力：以中国的精炼技术加工巴西的金属硅，由巴西以可再生能源为主的电网提供动力，从而生产全球碳排放最低的多晶硅。低碳多晶硅可同时实现数据中心的低碳建设与低碳运营。

鉴于巴西数据中心及其关联制造业基础所带来的绿色产业转型潜力，核心挑战在于确保未来的数据中心投资能够转化为真正的产业整合，而非仅仅是被动承接。围绕数据主权和数字基础设施控制权的争论日趋激烈，巴西力求确保与数据生成、存储和处理相关的经济价值和战略利益能够留存国内，而非集中于外资平台和基础设施之中。巴西的数据中心发展还引发了收益分配不均的关切：若投资主要服务于全球科技企业，而脆弱群体仍面临能源获取不足的困境——这在巴西部分地区仍是一项挑战——或数字经济的参与度有限，则上述不平等问题将更加突出。

[96] TV Senado. Comissão de Ciência e Tecnologia discute regulamentação de data centers de IA[EB/OL]. (2026-04-15)[2026-08-08]. https://www.youtube.com/watch?v=tPWWOVCzjCY.

[97] LEITE C, RELVA S G, PEYERL D. Atlas of the Brazilian industry's future 2025: pathways and opportunities for a new low-carbon economy[R/OL]. São Paulo: Instituto E+, 2025[2026-08-08]. https://emaisenergia.org/wp-content/uploads/2025/11/emais_atlas-miolo-digital_en_251107-16h37_f.pdf.

[98] Passos E, Santos R, Arbache J, et al. Powershoring in the Global South: unlocking green industrial potential[R]. E+ Energy Transition & NZIPL, 2025.

3. 气候脆弱国家：合作与多元化

气候脆弱型经济体，如气候脆弱论坛（Climate Vulnerable Forum）及其 V20 财长集团（V20 Group of Finance Ministers）的 74 个成员国，在很大程度上被排除在全球数据中心驱动的转型之外。尽管代表近 20 亿人口，气候脆弱国家承载的全球数据中心容量不足 1%。这既反映了结构性差距，也揭示了国际合作的战略机遇。

近期发展显示出良好势头。菲律宾已建成一座具备 AI 能力的超大规模数据中心，并计划到 2028 年实现 1.5 GW 的容量[99]。肯尼亚正在开发地热驱动型数据中心及配套云基础设施[100]。巴基斯坦已启动 AI 就绪数据中心合作项目，并为未来需求划拨了最高 2,000 MW 的电力容量，同时进口了 17–22 GW 的太阳能设备，主要来自中国[101]。

尽管取得了上述进展，亚马逊云服务（Amazon Web Services）、谷歌云（Google Cloud）和微软云（Microsoft Azure）等全球超大规模服务提供商在气候脆弱国家市场的存在感依然有限，而中国企业，尤其是华为，则保持着更强的市场足迹。这使中国成为这些市场及快速发展的全球绿色数据中心产业的关键合作伙伴。中国作为许多气候脆弱国家战略能源伙伴的地位，进一步强化了这一合作机遇。

气候脆弱国家的数据中心发展面临若干独特挑战。其一，气候脆弱国家面临较高的气候风险溢价，从而推高借贷成本（V20 国家面临 1.2%的债务成本上浮，产生约 620 亿美元的额外利息支出）[102]。气候投资需求估计每年达 4,900 亿美元，远超当前约 900 亿美元的融资规模。风险定价失当及气候融资渠道受限进一步制约了基础设施发展。

其二，数据中心需要稳定、大容量的电力系统。然而，许多气候脆弱国家面临电网效率低下和输电能力不足的问题。此外，数据中心的运营效率在一定程度上受气候条件制约。热带气候地区的 PUE 平均值约为 1.7，而中国的一流设施可将 PUE 降至 1.3，在液冷等理想条件下甚至可达 1.1[103]。同时，水资源约束在面临气候相关水资源风险的国家中进一步增加了复杂性。数据中心可能对本已稀缺的水资源造成额外压力，尤其是在冷却系统依赖大量用水

---

[99] DICT. Philippine data center capacity may hit 1.5 GW by 2028[EB/OL]. BusinessWorld, (2025-10-23)[2026-08-08]. https://www.bworldonline.com/corporate/2025/10/23/707346/philippine-data-center-capacity-may-hit-1-5-gw-by-2028-dict/.

[100] Microsoft. Microsoft and G42 announce $1 billion comprehensive digital ecosystem initiative for Kenya[EB/OL]. (2024-05-22)[2026-08-08]. https://news.microsoft.com/source/2024/05/22/microsoft-and-g42-announce-1-billion-comprehensive-digital-ecosystem-initiative-for-kenya/.

[101] Business Recorder. Pakistan allocates 2,000 MW to Bitcoin mining, AI data centers in bold digital economy push[EB/OL]. (2025-05-25)[2026-08-08]. https://www.brecorder.com/news/40364594.

[102] Kling G, Lo Y C, Murinde V, et al. Climate vulnerability and the cost of debt[J/OL]. Oxford Open Economics, 2025, 4: odaf003[2026-08-08]. https://academic.oup.com/ooec/article/doi/10.1093/ooec/odaf003/8236479.

[103] Uptime Institute. Global PUEs, are they going anywhere?[EB/OL]. (2024-12)[2026-08-08]. https://journal.uptimeinstitute.com/global-pues-are-they-going-anywhere/.

的情况下，因此提升用水效率、采用气候韧性设计以及实施可持续水资源管理，是实现公正且可持续的绿色数据中心发展的必要条件。

与此同时，许多 V20 国家严重依赖进口能源为数据中心供电，加剧了进口支出和财政空间的压力。若效率参数在经济上未能达到预期，还面临搁浅资产和沉没成本的潜在威胁。这为中国通过投资可再生能源发电能力、储能系统和电网基础设施来支持 V20 经济体创造了明确的机遇，以保障未来数据中心由清洁、经济、可持续的能源驱动。

综合上述挑战，开展合作的战略理据十分充分。气候脆弱型经济体属于全球增长最快的经济体之列。因此，整合绿色数字基础设施并依托绿色"一带一路"的既有布局，可在这些经济体中建立长期的技术合作伙伴关系。此举亦将巩固中国作为全球南方赋能型技术领导者的地位。

气候脆弱国家数据中心的发展，同时有助于降低数字基础设施集中于少数大型市场所带来的风险。在气候脆弱国家间分布式部署绿色数据中心，可构建更具韧性、更多元化、更具抗冲击能力的网络体系。

最后，在全球气候领导力格局深刻演变之际，与 CVF-V20 国家合作，对接其《气候繁荣计划》（Climate Prosperity Plans）和国家平台（Country Platforms），为中国及其他国家推进投资项目和多边解决方案提供了重要机遇。绿色数据中心合作伙伴关系将打通能源、金融和技术领域的协同联动。随着气候脆弱国家在未来数十年的持续增长，当下的合作可转化为持久的贸易关系与投资纽带，更为重要的是，将构建起横跨多个产业、能够充分释放数字经济潜力的可靠且更具韧性的供应链体系。尽管数字基础设施的气候韧性超出本研究范围，但其对投资规划和预算配置的重要性将日益凸显，并可与后续气候变化适应相关工作建立联动。

（二）重点区域绿色数据中心发展的优先领域与新兴趋势

上述案例研究揭示了各国和各地区在推动数据中心赋能绿色产业转型方面的若干共同优先领域。

首先，电力供应约束是各快速发展的地区共同面临的首要挑战。尽管各区域在电力来源、电网基础设施和电力市场结构方面存在差异，但数据中心带来的新增负荷均在加剧各地区电网的可靠性和成本压力。发电资源不足可能导致限电及其相关的负面经济影响。输电瓶颈同样可能制约数据中心发展，这凸显了发电与输配电容量均衡、协调建设以满足日益增长的电力需求的重要性。在低收入国家，电网稳固容量不足从根本上限制了其承接大型数据中心负荷的能力。对于绿色数据中心而言，本地电网的碳强度可能成为低碳电力供应的制约因素。此外，直接采购可再生能源电力的能力（如通过购电协议 PPA）因各国的可再生能源禀赋和监管环境不同而存在显著差异。

其次，除电力供应外，数据中心还加剧了对土地和水等其他本地资源的竞争。数据中心需要大面积土地用于服务器机房及配套设施建设，且通常有特定的选址要求，如靠近输电接

入点和光纤网络。采用蒸发冷却技术的数据中心耗水量巨大——冷却对于计算设备的效率和整体运行至关重要。资源获取方面的竞争已在部分地区引发了对数据中心日益强烈的反对声浪，威胁到数据中心实现其发展潜力。因此，当地社区对共享资源的需求是绿色、负责任数据中心发展的优先关切领域。

能源与资源获取是各地区数据中心发展面临的共同且认知充分的优先事项。与此同时，也有必要强调绿色数据中心发展的新兴趋势。国际经验表明，数据主权正日益影响发展中地区数据中心的部署。在本国大量数据需在境外处理的国家（如上文讨论的巴西），可能面临经济价值外流、敏感数据流向控制力下降等问题，同时因长距离传输至海外数据中心而产生更高的网络延迟。低延迟应用（如实时服务、AI 推理、金融交易、电子政务平台）受益于地理位置邻近的数据中心，这凸显了需要考虑如何使数据主权目标与特定类型的计算应用相协调。

此外，数据中心容量与人口中心之间不匹配的问题，正成为绿色产业转型中日益突出的关切。例如，气候脆弱国家承载了全球 18 亿人口，却仅拥有全球不到 1%的数据中心容量。尽管全球南方部分地区预计将迎来数字基础设施投资的快速增长，但许多国家日益担忧国内或区域数据中心容量不足可能加深现有的技术鸿沟和数字鸿沟。这一关切对于气候脆弱国家尤为紧迫，这些国家尤其有望从绿色数据中心技术的应用中显著获益——用于支持气候适应、能源系统优化和更广泛的经济社会发展。国内数字基础设施获取受限还可能制约各国从日益增长的数字需求中留住经济价值、加强数字主权以及更充分地参与新兴的人工智能和数据驱动产业的能力。

（三）重点区域绿色数据中心发展的进一步需求

一系列新兴机制可支持绿色数据中心的发展，使其更直接地服务于全球南方国家的绿色产业转型，同时推动公正且具包容性的转型进程。一种可行的路径是通过现有的多边、区域或双边合作平台——如金砖国家数字生态系统合作网络、V20 成员国联盟机制以及双边标准对话——共同制定绿色数据中心标准和基准评估框架。此类框架可针对 PUE、WUE、可再生能源采购比例和隐含碳排放披露建立统一指标，有助于为绿色金融、认证和国际合作确立更清晰的基准。对于区域层面的框架，区域一体化应作为重要考量。

与此同时，各国可将数据中心需求重新定位为电力系统的资产而非负担。在可再生能源项目因未来购电方不确定而难以获得融资的国家，一个大型、可预期、信用良好的数据中心客户可以发挥锚定作用，使新建太阳能、风能、储能或输电项目具备可融资性——南非的案例即为明证。

在数据中心获得公共金融支持（如政策性银行、多边贷款机构或混合融资工具）的情况下，可将可再生能源利用作为融资条件。仅当新建或扩建数据中心配套新增可再生能源装机容量及电网或储能升级，且该新增容量有助于提升东道国电力供应而非挤占既有供应时，方可释放资金。这将使合作模式从"中国为绿色数据中心提供融资"转变为"中国以数字需求为

锚定，推动伙伴国下一波清洁电力和电网投资"。

另一个重点领域是将数据中心发展与更广泛的国内产业和社会经济目标相衔接。新兴模式不仅限于承接数字基础设施，而是致力于将数据中心投资与本地供应链建设、工业加工、人才培养和循环经济活动相结合。上述国别分析中的案例包括：巴西的多晶硅加工、南非的本地化绿色数据中心供应链（冷却系统、电池、太阳能组件），以及气候脆弱国家的工业增长、技能发展和储能/冷却效率提升。数据中心投资还可与关键矿产加工和电子废弃物循环经济相衔接，通过锚定需求合同和联合工业园区，将冶炼、精炼和服务器翻新能力引入本土。上述路径通过强化本地产业能力、创造高质量就业机会、促进技术转移以及创造更广泛的经济与社会效益，能够共同推动公正且具包容性的绿色转型。这些路径亦反映了全球南方国家对从数字基础设施扩张中留存更多经济价值、减少对外国技术供应商依赖的广泛关注。与数据主权相关的讨论日益突出，各国政府致力于确保不断增长的数字需求转化为国内基础设施投资、本地数据存储、更强大的国家或区域数字生态系统，以及更高的本地数字经济参与度。例如，南非已出台国家法规，要汽数据生成于本国的数据须留在南非境内。

气候融资和碳市场工具也可为扩大可再生能源驱动和节能型数据中心基础设施提供路径。联合国气候变化框架公约（UNFCCC）第六条下的机制，以及多边气候金融机构和国家平台路径，有望用于将可再生能源数据中心及相关电网投资带来的减排量货币化。这可能有助于改善项目可融资性，并为集成式数字与能源基础设施项目吸引优惠性或混合融资。更广泛而言，跨境"绿色数字走廊"和协调投资平台的提案已作为可行模式出现，可将光纤基础设施、云服务、可再生能源部署、储能和物流系统整合为更大的区域发展战略，鼓励沿价值链参与。在上述讨论中，一个核心关切始终是确保能源约束国家的数据中心发展能够支持能源普及、电网可靠性、工业发展和本地能力的更广泛提升，而非创建主要服务于境外商业需求的孤立基础设施系统。该路径有助于确保数字基础设施通过创造广泛的经济与社会效益，为公正且具包容性的绿色转型作出贡献。

四、印度尼西亚–中国案例研究

（一）印度尼西亚–中国战略关系

印尼与中国已建立 76 年外交关系，两国于 1950 年 4 月 13 日正式建交。此后，两国在贸易、基础设施、汽车、能源与采矿、文化合作等多个战略领域持续开展合作。两国关系的牢固程度可从经济与政治两方面的成就来衡量。中国已连续 10 余年保持印尼最大贸易伙伴地位，2025 年双边贸易总额达 1670 亿美元[104]。这一经济融合是两国通过启动全面战略对话（CSD）将双边关系提升至更具战略性水平的基础。全面战略对话是一个新的双边平台，旨在统筹五大关键支柱的战略合作：政治、经济、海事、人文交流和安全[105]。该对话还涵盖更广泛的议题，如能源、贸易、矿产、产业合作以及中国在东盟的承诺[106]。这一高层外交协定表明，两国致力于从政治到经济开展深入、广泛的合作，双方互为战略盟友。

中国投资所发挥的作用已为印尼公众和商界利益相关方所熟知。从在印尼可再生能源项目中承担设计、采购和施工（EPC）业务[107]，到在加拉旺建设宁德时代（CATL）电池工厂[108]、在苏邦建设比亚迪（BYD）电动车工厂[109]，再到印尼国家电力公司（PLN）与天合光能、PT Agra Surya Energy 组建合资企业建设光伏组件制造[110]，这些投资是中国支持印尼绿色发展生态系统的明证。有鉴于此，中印尼合作可以拓展至绿色数据中心这一新趋势和新兴议题。

（二）展望印度尼西亚的数字经济、数据中心与可持续发展

数据中心与绿色产业转型的概念，与印尼数字经济愿景及其改善数字基础设施的需求密切相关[111]。这一愿景有两个方面：其一，利用 AI 能力提升公共行政、服务和创意娱乐经济领域的效率与生产力；其二，将数据中心及其周边生态系统作为一个新的增长部门来发展，

---

[104] Antara. Indonesia-China promote bilateral trade beyond USD 167 million. (2026). https://www.antaranews.com/berita/5704855/ri-china-dorong-perdagangan-bilateral-lampaui-167-miliar-dolar-as.

[105] Antara. Indonesia-China Launched New Strategic Dialogue to Deepen Bilateral Ties. (2026). https://en.antaranews.com/news/428099/indonesia-china-launch-new-strategic-dialogue-to-deepen-bilateral-ties.

[106] Indonesia MOFA. Indonesia and China Launched Comprehensive Strategic Dialogue (CSD). (2026). https://kemlu.go.id/berita/indonesia-dan-tiongkok-luncurkan-dialog-strategis-komprehensif-perdana-di-jakarta?type=publication.

[107] PowerChina. Southeast Asia’s Largest’s floating PV power plant ready to begin operating. (2023). https://en.powerchina.cn/2023-10/09/c_828594.htm.

[108] Karawang New Industry City. Groundbreaking Ceremony of CATL Electric Vehicle Battery Plant. (2025). https://www.knic.co.id/groundbreaking-ceremony-of-catl-electric-vehicle-battery-plant-june-29th-2025.

[109] Jakarta Globe. Chinee EV Manufacturer BYD Announces $1.3 Billion Investment in Indonesia. (2024). https://jakartaglobe.id/business/chinese-ev-manufacturer-byd-announces-13-billion-investment-in-indonesia.

[110] Sinamas. Building Solar PV Manufacture, Sinarmas bring China partner. (2023). https://www.sinarmas.com/blog/?p=3941.

[111] Indonesia Ministry of Development Plan (Bappenas). Indonesia Long-Term Development Plan. Bappenas. (2023) [2026–04-04]. https://indonesia2045.go.id.

这与本研究强调的数据中心驱动绿色产业转型的理念相一致[112]。政府将数据中心视为国家战略性基础设施，强调通过协作生态系统推进去中心化布局，并欢迎外国投资。

发展这一数据中心生态系统和基础设施的举措之一，是在巴淡农萨数字公园设立特别经济区，聚焦数据中心建设[113]。该区位因毗邻新加坡和柔佛而具有战略价值，有望支撑东南亚数字经济生态系统的发展[114]。这一构想得到现有区域政策的支持，即《东盟数字总体规划2030》、《东盟数字一体化框架》和《数字经济框架协议》（DEFA）[115]。

目前，印尼约有 204 个数据中心，主要分布于雅加达（107 个）、巴淡（20 个）及其他城市[116]。数据中心发展预计将持续增长，2026-2031 年预计平均复合年增长率（CAGR）为 13.71%[117]。数据中心增长还将影响电力部门需求——政府估计，到 2033 年数据中心电力需求将达到 5.2 吉瓦，而 2025 年底仅为 1 吉瓦。

在印尼开发数据中心的公司众多，其中外国公司大多来自美国（如 AWS、微软 Azure、Princeton Digital、Digital Realty 和谷歌等超大规模运营商），印尼本土公司仅为少数。尽管拥有若干旗舰项目，中国数据中心企业在印尼的存在仍十分有限，例如腾讯集团投资 5 亿美元用于开发基础设施[118]，以及华为在 2022-2027 年间投资 3 亿美元，重点布局印尼云基础设施，为 ICT、交通服务、银行服务、企业集团和零售服务等多类企业提供支持[119]。截至 2026 年上半年，印尼数据中心投资总额已达 144 万亿印尼盾（约合 81 亿美元）[120]。然而，业界

---

[112] President Republic of Indonesia. President Jokowi: Downstreaming and Digitalization are key to increase Indonesia economic development. (2024). https://presidenri.go.id/siaran-pers/presiden-jokowi-hilirisasi-dan-digitalisasi-kunci-dorong-pertumbuhan-ekonomi-indonesia/

[113] Indonesia Special Economic Zone. Development of Data Center in Special Economic Zone as milestone in developing Indonesia Digital Ecosystem. (2022). https://kek.go.id/media/press/Pembangunan-Data-Center-di-Kawasan-Ekonomi-Khusus-Nongsa-sebagai-Milestone-Pengembangan-Ekosistem-Digital-Indonesia-330

[114] Telin. Building Ecosystem in the Next Digital Bridge in Southeast Asia. https://www.telin.net/id/insight/artikel/membangun-ekosistem-di-balik-jembatan-digital-berikutnya-di-asia-tenggara.

[115] ASEAN. Key Documents related to ASEAN e-commerce. https://asean.org/our-communities/economic-community/asean-e-commerce/key-documents/.

[116] Data Center Map. Indonesia. https://www.datacentermap.com/indonesia/.

[117] Mordor Intelligence. Indonesia Data Center Market. (2020). https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/indonesia-data-center-market.

[118] Bisnis. Tencent Build the third Data Center in Indonesia and ready to invest Rp. 11 Trilliun (or equal to USD 500 Million). (2025) [3 September 2026]. https://teknologi.bisnis.com/read/20250217/101/1840347/tencent-bangun-data-center-ketiga-di-ri-tahun-ini-siap-investasi-rp811-triliun.

[119] Jakarta Globe. Huawei Builds Jakarta Data Center in Just 37 Days. (2022). https://jakartaglobe.id/tech/huawei-builds-jakarta-data-center-in-just-37-days

[120] Bisnis. Data Center Investment Reached Rp 114 triliun H12026. (2026). https://teknologi.bisnis.com/read/20260831/101/1999620/investasi-data-center-tembus-rp114-triliun-semester-i2026-terdongkrak-ai.

呼吁将数据中心纳入绿色发展和更广泛的经济增长议程。数据中心不仅是计算运营，还需要环境管理和资源考量以实现绿色数据中心，包括大容量稳定的电力负荷、效率与冷却目标、可再生能源采购，以及用水、备用电源和韧性需求。

（三）数据中心规模化和可持续发展的障碍

1. 印度尼西亚的绿色数据中心准备度

在本节中，准备度不是由技术参数定义的，而是侧重于使绿色数据中心发展更具吸引力和可投资性的政策一致性。

印尼的绿色数据中心准备度最好被理解为不是单一轨迹上的单一位置，而是由不同约束条件形成的不同政策工具配置。表 1 从政策配置角度对印尼与新加坡、马来西亚和欧盟进行了比较。结果表明，印尼绿色数据中心准备度仍处于较早发展阶段——PUE 和 WUE 等关键议题尚未纳入监管，也未与碳信用挂钩。在环境影响合规方面，与其他三个国家/地区相比，印尼的数据中心标准仍属自愿性质，尚无生效的数据中心专门法定披露制度。在与国家目标整合方面，《中期发展计划》（RPJMN 2025-2029）已纳入 AI 和数字基础设施，并制定了绿色数据中心 PPP 方案，但实施仍面临挑战。在最后一项指标碳信用方面，该体系在印尼仍在发展之中，印尼碳价相对较低，为每吨 4-5 美元[121]。

表 1 绿色数据中心政策配置：比较视角下的印尼[122]

指标	印度尼西亚	新加坡	马来西亚	欧盟
环境影响合规	自愿性 Greenship 数据中心标准（GBC Indonesia/IPUSTAH-ID）；尚无法定数据中心特定披露制度。	强制性：SS 564 自 2011 年起生效；2024 年 BCA-IMDA 绿色标志数据中心更新；DC-CFA2 申请人需达到白金认证且 100% IT 负载下 PUE ≤ 1.25。	MCMC MTSFB TC G004: 2024 技术规范；2025 年 10 月启动国家可持续数据中心框架（NSDCF）。	EED 第 12 条及授权法规（EU）2024/1364 要求 IT 负载 ≥ 500 kW 的数据中心年度报告；首次报告 2024 年 9 月 15 日。
可持续性合规	KemKominfo 绿色数据中心政策；PLN 绿色即服务 / 可再生能源证书计划（2024 年 10.99 TWh，同比	DC-CFA2 要求新增容量至少 50% 为绿色路径电力；碳税 2024–25 年为 25 新元 / tCO_2e，2030 年升至	NSDCF 六层分级；企业可再生能源供应计划（CRESS）允许第三方清洁能源采购。	欧盟数据中心行为准则（自愿）；2024 年 3 月通过欧盟可持续性评级方案；与欧盟分类法数据处理标准对齐。

[121] CNBC. The Government set a target to sell carbon USD 40 per ton. (2026). https://www.cnbcindonesia.com/news/20260902191316-4-764484/pemerintah-targetkan-harga-karbon-bisa-dijual-sampai-us--40-per-ton.

[122] This matrix adopted from Tenggara Strategic Report. Powering the Future: Advancing Green Data Centers in Indonesia. (2026). https://asset.tenggara.id/assets/source/file-research/2026-gdc/Research%20Report%20-%20Advancing%20Green%20Data%20Center%20in%20Indonesia.pdf.

	增长 117%）；合规要求较轻。	50–80 新元。		
与国家目标整合	RPJMN 2025–2029 将 AI 和数字基础设施纳入 Bappenas 领导下；绿色数据中心 PPP 计划被提及； 实施法规待定。	与新加坡绿色计划 2030 和 IMDA 绿色数据中心路线图顺序推进；DC-CFA2 阈值与国家数字经济目标对齐。	NETR 目标到 2050 年 70% 可再生能源；NSDCF 定位为行业实施层。	EED 实施 Fit-for-55；CSRD 将数据中心披露纳入价值链企业气候报告。
碳信用	IDXCarbon 于 2023 年 9 月启动；ETS 合规扩展到 2023 年 99 个燃煤机组，2024 年上半年 146 个；数据中心覆盖仍较轻。	碳税适用于大型直接排放；自愿国际信用允许在定义资格下作为部分补充。	Bursa Carbon Exchange（自愿，2022 年起）；ETS 试点阶段。	EU ETS 全面运行； 覆盖电力发电，因此间接为数据中心电网消耗定价。

在电力供应方面，印尼大多数数据中心从国有公用事业公司 PLN 购电。然而，由于可再生能源开发不足（仅占 18%），PLN 的大部分发电组合来自煤炭，约占 57-67%[123]。按现行法规，数据中心企业还被允许配备柴油发电作为应急或备用电源[124]。印尼国内也日益意识到，外国公司将绿色能源作为一项要求[125]。作为替代方案，PLN 提供可再生能源证书（REC）[126]，但由于发电仍以化石燃料为主，该工具的质量往往受到质疑。

类似的模式也出现在电力和用水管理方面。印尼数据中心仍依赖 PAM Jaya（一家国有供水公司）和地下水，且尚未建立数据中心 WUE 标准法规。另一挑战是清洁水危机，地下水不符合数据中心用水标准。作为建议，雅加达的数据中心应使用再生水，而非加重 PAM Jaya 的供水负担、消耗地下水储量。此外，PUE 也未受政府监管。但独立于政府之外，印度尼西亚绿色建筑委员会（GBCI）开发了 Greenship 认证作为绿色建筑评级体系，将 PUE（<1.3）和 WUE（<2 升/千瓦时）标准列为要求[127]。

在印度尼西亚，几个基础性要素已经就位，朝着绿色数据中心生态系统方向发展，包括绿色建筑认证、PLN REC 计划和初生的碳市场，但缺乏与绿色数据中心框架的整合尚未演进。

[123] MEMR. Renewable Energy Mix Generation in April 2026 beyond the target. (2026). https://gatrik.esdm.go.id/berita/bauran-ebt-pembangkit-listrik-april-2026-lampaui-target.

[124] See Indonesia Law No. 30/2009 on Electricity and Minister MEMR Regulation No. 11/2011 on Operation of the Electric Power Business.

[125] Kata Data. Foreign Investor start requiring the use of renewable energy for data center. (2026). https://katadata.co.id/digital/teknologi/6a86ce404895e/investor-asing-mulai-syaratkan-data-center-pakai-energi-terbarukan.

[126] Digital Edge. Digital Edge Indonesia Jakarta lead REC for sustainable data center. (2022). https://id.digitaledgedc.com/id/berita-id/berkomitmen-dukung-netralitas-karbon-edge-dc-gunakan-renewable-energy-certificate-rec-dari-pln.

[127] Green Building Council. Greenship New Building. https://gbcindonesia.org/etalase.

2. 投资便利度

高投资便利度不仅需要税收或财政激励，还需要稳定和透明的环境，以降低项目风险和缩短工期。[128]目前，印尼没有专门针对绿色数据中心的税收优惠。在非税收激励工具方面，政府为“节能”设备以及与数据中心相关的其他设备（如冷却系统）提供通用的加速许可和海关豁免。[129]

3. 政策不确定性

对数据中心和数字基础设施的需求很高，但政策一致性仍面临挑战。例如，为数据中心供电的可再生能源的迫切需求与当前仍偏重化石燃料发电的能源政策不一致。不确定性还源于不断演变的数字基础设施监管框架，例如规范个人数据保护的第 27/2022 号法律及其将数据视为寄存品而非资产的衍生法规。与此同时，印尼推出了涵盖设施设计、运营和能源管理的数据中心标准 SNI 8799 系列[130]，但采用和执行仍不均衡，且尚未建立全面的绿色数据中心绩效强制性框架。

（四）数据中心作为工业生态系统中的一个节点

当代数据中心容量的扩张通常以结果来界定：投产的兆瓦数、投资金额、出口的服务。然而，一个大规模的现代数据中心更准确地应被理解为一个工业节点——一个对电力有着严格负荷曲线要求的强势采购方，对设备的认证标准是其他工业买家很少设定的，对连接性、水资源、人力资源以及日益增长的颗粒化排放核算也有要求。

对于印尼而言，这种框架的意义在于数据中心参与其中的流动在很大程度上正是绿色工业发展所依赖的流动。

政策任务不是利用数据中心来建立一个独立的绿色数据中心行业，而是利用数据中心的锚定需求，将印尼已在追求的绿色工业价值链的需求拉动整合起来（见图 6）。

[128] PP No. 33/2026 on the Governance of Law No.22/2022 Implementation. Related with Personal Data Protection policy.

[129] Tenggara Strategic. Research Report: Powering the Future: Advancing Green Data Centers in Indonesia. (2026). https://asset.tenggara.id/assets/source/file-research/2026-gdc/Research%20Report%20-%20Advancing%20Green%20Data%20Center%20in%20Indonesia.pdf

[130] National Standard Agency. SNI 8799-1:2023 on data center technical specification. https://pesta.bsn.go.id/produk/detail/14326-sni8799-12023

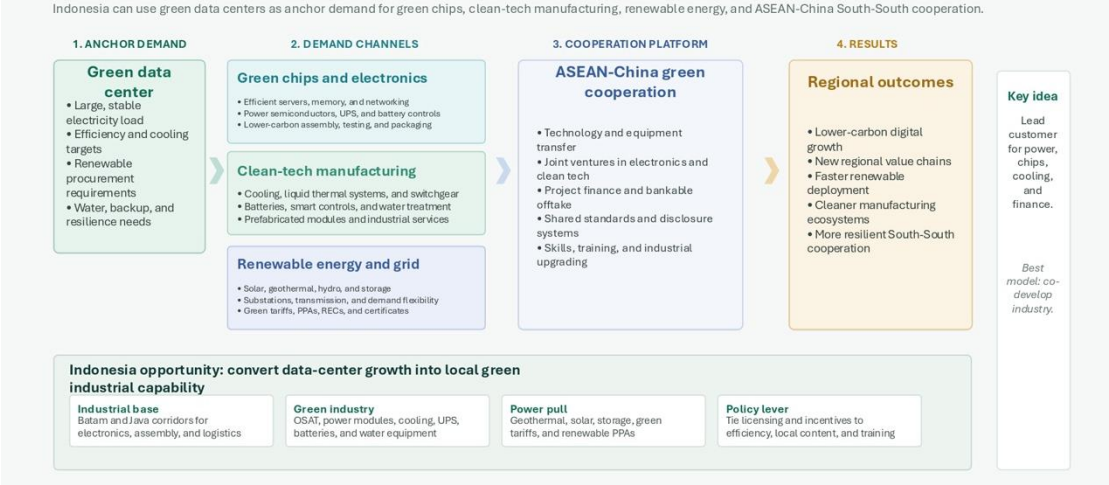


图 6 印尼绿色数据中心价值链与合作路径

（五）印度尼西亚的工业基础

本节介绍印尼的工业基础及其现有资产、关键参与者、监管工具和报告数据。我们关注的工业基础类型包括工业走廊、绿色工业组件、清洁能源生态系统和政策杠杆。

1. 工业走廊：爪哇和巴淡

印尼的数据中心活动集中在两个具有不同产业和电网特征的走廊。爪哇走廊，包括雅加达、勿加泗、芝比东、芝卡朗和加拉旺，是成熟的中心，以金融部门的需求和长期发展的托管市场为支撑。巴淡走廊是较新的发展，得到特别经济区地位以及靠近新加坡海底光缆基础设施的延迟优势的支持[131]。巴淡位于一个由 PLN 巴淡公司管理的较小、独立平衡的电网系统上，具有不同的燃料组合和不同的规模限制。它们的战略地位和优势可将数据中心增长转化为本地绿色工业能力，包括电子、组装和物流领域。

2. 绿色工业组件

印尼在与数据中心相关的绿色工业组件方面的制造能力参差不齐。印尼拥有发达的电池原材料工业[132]，增值不断增加。巴淡走廊也有半导体和光子学产业。然而，其他典型的数据中心设备，如功率模块、冷却系统、不间断电源（UPS）和水处理设备，仍是国内能力基本缺失的类别。

3. 清洁能源生态系统：地热、太阳能、储能、REC 和 PPA

印尼清洁电力生态系统在资源禀赋上具有鲜明的结构特征，但在交付和可融资性方面面临挑战。鉴于外国投资者为数据中心寻求绿色电力的倾向，绿色电力需求可通过地热或太阳

[131] Special Economic Zone. Indonesia-Singapore strengthen collaboration through Special Economic Zone, pushing digital investment and industry. (2026). https://kek.go.id/id/media/press/indonesia-singapura-perkuat-kolaborasi-melalui-kek-dorong-investasi-digital-dan-industri.

[132] Natioan Research and Innovation Center. From Research to Industry, Indonesia Aim battery Technology Sovereignty. (2026). https://www.brin.go.id/news/129858/dari-riset-ke-industri-indonesia-bidik-kemandirian-teknologi-baterai.

能提高可再生能源渗透率，并将发电与储能以及 REC、PPA 等多种机制相结合。绿色数据中心需求的增长可助力清洁电力生态系统的发展。

4. **政策杠杆：许可、财政、效率、本地含量、培训**

印尼数据中心政策格局呈多层次叠加，但其深度取决于投资规模而非绿色成效。现有若干政府法规、财政激励和举措，如在线单一提交-基于风险的方法（OSS-RBA）、电子交易相关法规[133]，以及特定行业特别税收法规[134]。

这些工具中没有一项以 PUE、WUE 或碳强度结果为条件，Greenship 认证仍然是自愿的，因此一个在低效煤电电网下运行的超大规模运营商与一个地热锚定的 Tier IV 建设享有相同的政策包。TKDN/P3DN 框架下的本地含量要求（经 2025 年第 35 号工业部长条例为外国直接投资运营商简化）适用于智能手机、医疗设备和电信基础设施，但尚未覆盖数据中心服务器或 GPU。

人才培养是另一大差距。Komdigi-NVIDIA-Cisco-Indosat 印尼 AI 卓越中心[135]和 2026 年 2 月的 Danantara-ARM 协议是近期的新增举措，但目前尚无印尼国家工作能力标准（SKKNI）模块涵盖数据中心调试或关键环境维护，印尼高校也没有专门的数据中心学位项目，200% 的培训超额扣除政策仍未得到充分利用。在上述五个类别中，差距确实存在，但数据中心热潮正是提升杠杆作用的机遇。

（六）打造绿色产业转型潜力：引导需求

以下，我们提出三个渠道，通过它们可以将数据中心相关需求用于推动印尼的绿色产业转型。

渠道 1：绿色芯片与电子

第一个渠道涉及数据中心价值链的上游硅、光学和封装层，该层的效率提升最直接地转化为单位算力的功耗和冷却负荷降低。印尼在这一层的基础是最薄弱的；相应的拉动机会是最雄心勃勃的、周期最长的，并且最依赖于以技术转让为条件的合资企业。Galang Island JDA 和 Danantara-ARM 协议共同标志着一个切入点。[136]

渠道 2：清洁技术制造

---

[133] JDIH BPK. PP No. 71 of 2019. https://peraturan.bpk.go.id/Details/126141/pp-no-78-tahun-2019

[134] JDIH BPK. PP No. 78 of 2019.. https://peraturan.bpk.go.id/Details/122030/pp-no-71-tahun-2019.

[135] Lancuhed July 2025, targeting one million digitally-skilled Indonesian by 2027. Ministry of Digital Information. Komdigi launched AI Center of Excellence along with Indonesat, CISCO, and NVIDIA. (2025). https://investortrust.id/business/72227/komdigi-luncurkan-ai-center-of-excellence-bersama-indosat-cisco-dan-nvidia.

[136] Danantara Indonesia. Building Indonesia's Chip Future: Danantara Indonesia Launch Training Program with Arm to Build World-Class Semiconductor Talents. (2026). https://teknologi.bisnis.com/read/20260831/101/1999620/investasi-data-center-tembus-rp114-triliun-semester-i2026-terdongkrak-ai.

第二个渠道涉及将通用数据中心与绿色数据中心区分开来的设备和基础设施层。印尼在这一渠道的基础远比芯片层深厚。相应的拉动机会也因此比芯片层更易着手，周期更短，单项投资的资本要求更低。然而，正是使这些层面充满前景的成熟度，也使其面临更大的区域竞争[137]：越南、泰国、马来西亚和菲律宾都拥有不同程度的清洁技术制造能力。印尼并非任何单一层面的天然赢家，但是一个可信的中级候选者，必须将需求侧优势转化为供给侧捕获。

渠道 3：可再生能源与电网

可再生能源与电网渠道涉及数据中心采购在印尼电力体系中创造的需求侧工具。其拉动逻辑是相同的：数据中心需求是一个投资锚点，问题在于印尼的采购架构能否将该需求转化为新建可再生能源产能、输电交付和可融资的证书信号。

（七）引导和提升合作：东盟-中国

印尼是东南亚绿色数据中心工业化最大的单一离散市场，但不是唯一的一个，与中国合作的战略价值应由东盟其他国家视为区域公共产品。来自芯片、清洁技术和可再生能源的拉动在其组件流动中是区域性的，即使在其税基中是国家的。同样，它组织的需求在其超大规模客户群中是区域性的，即使在其电网承购方中是国家的。就此而言，与中国合作可以在若干有助于绿色产业转型的领域带来提升：低碳数字增长、新的区域价值链、更快的可再生能源部署、更清洁的制造生态系统以及更有韧性的南南合作。

[137] Deza Shira & Associates. Asia Manufacturing Index 2026. (2026). https://www.dezshira.com/asia-manufacturing-index?ENTRY=%252Fnews%252Fasia-manufacturing-index-malaysia-places-second-among-asean-economies%252F

五、政策建议

数据中心因其在全球气候变化、水资源和能源系统方面的影响，日益成为国际合作的重点领域。与此同时，国际合作正面临多边治理弱化、融资缺口和地缘政治扰动等挑战。本研究论证了通过数据中心与绿色结构转型开展绿色发展国际合作的机遇大于挑战。本章围绕研究所突出的三大主题——水资源与废弃物管理、低碳运营、国内产业衔接——提出数据中心与绿色结构转型国际合作的具体政策建议，上述主题对于数据中心赋能绿色工业转型具有关键意义。

上述三大主题代表了数据中心在绿色结构转型中潜在角色的互补性维度。水资源与废弃物管理聚焦于通过提升用水效率、推动电子废弃物和关键材料的循环经济路径、以及最大限度减少数据中心快速扩张带来的其他环境外部性，减轻对本地自然资源的压力。气候脆弱国家在水资源紧张和水资源可得性方面面临特殊关切。南非等其他国家已建立循环经济法规，旨在应对数据中心硬件寿命较短的问题，并管理这一不断增长行业可能产生的废弃物。水资源利用、冷却技术和废弃物管理实践可通过运营标准、报告要求和环境保障措施相对较快地得到改善，因此可作为国际合作的近期优先事项。

低碳运营是指最大限度降低数据中心建设和运营全生命周期温室气体排放，同时推动将必要的低碳技术和实践融入更广泛的绿色转型。本研究讨论的低碳技术和实践包括可再生能源电力采购、能效提升、依托灵活性的智慧能源与计算管理，以及低碳配套基础设施。如第三章和第四章所述，可再生能源电力采购和 PUE 在许多全球南方国家面临挑战。与此同时，第二章讨论的中国案例展示了这些领域的显著进展，例如千岛湖和张北数据中心的高效冷却技术、腾讯天津数据中心的分布式可再生能源应用等。实现低碳运营需要在可再生能源发电、输电、储能及配套监管框架方面进行协调投资，因此随着清洁能源基础设施与数据中心同步建设，低碳运营构成中期合作目标。

国内产业衔接是指数据中心投资在东道国产生更广泛经济和产业效益的程度，是绿色工业转型概念的根基所在。这是一个渐进过程，取决于持续投资、制度能力以及国内产业的成熟度，因此构成国际合作的长期支柱。与此同时，确保数据中心发展的可及性与惠益共享这一最终目标，也应指引短期和中期目标的设定。

本研究的政策建议围绕上述三大主题展开，按合作层级（双边、区域、多边）和时间框架（短期、中期、长期）进行组织。双边合作层面指中国与单个国家之间的合作，如通过相关部委直接协调或公私合作伙伴关系。区域合作层面指中国在东盟等区域框架内或金砖国家、V20 联盟等多国议题集团中的合作。多边合作层面指中国在 G20、联合国气候变化框架公约（UNFCCC）等涵盖多个地区和发展水平的

在时间框架方面，本研究将短期界定为未来 1 至 3 年，中期为未来 3 至 5 年，长期为 5 年及以后。鉴于基础设施和发展规划的时间跨度较长，长期建议亦应视为短期和中期行动的指导原则。

（一）双边合作政策建议

短期内，双边合作应聚焦于转化中国在本土构建绿色数据中心生态系统的经验。中国绿色数据中心转型的政策框架可根据其他国家的国情——包括其国家承诺和政策架构、行业与地理特征以及市场化赋能环境的现状——进行适配。一个务实的切入点是在相关部委、开发企业和公用事业机构之间建立结构化政策对话，

对话成果可包括联合研究倡议，针对 WUE、PUE、碳计算利用效率（CCUE）等指标及其他潜在度量——包括本地劳动力参与度、技能发展、技术转移和社区效益——开展研究，为未来标准制定奠定基础。聚焦水资源与废弃物管理可在较短时间内产生转型成效。
在伙伴国为 CVF-V20 成员国的情况下，上述对话可通过国家平台（Country Platform）和《气候繁荣计划》机制以试点方式召开，使多个气候脆弱经济体与中国共享同一条对话轨道，而非孤立开展磋商，从而降低较小经济体的参与成本。

中期内，中国可与选定的伙伴国建立以低碳运营及其配套基础设施为支撑的双边数据中心合作专项框架。本研究凸显了中国和印尼在发展数据中心领域的合作潜力，虽然尚未提出或形成正式的合作框架，但该合作有望推动印尼产业升级，并可能聚焦绿色芯片与电子、清洁技术制造、可再生能源及电网基础设施等方向。此类框架可超越单一投资项目，聚焦协调投资，例如在绿色工业园区中整合数据中心低碳运营与共享清洁能源基础设施或余热利用系统。超越短期政策对话，中期合作可设立双边工作组，汇聚政府机构、公用事业机构、金融机构和私营部门利益相关方，共同识别优先行动、消除监管壁垒，并推动标准与中国国内绿色数据中心政策框架对接。此外，通过技术、政策和法规促进数据中心负荷灵活性，可为当地电网带来广泛效益。

中期双边合作还需纳入绿色金融考量，鉴于许多发展中国家在中期仍将面临融资缺口，且绿色数据中心对高质量基础设施有内在需求。在中国持续为海外数字和物理基础设施提供融资的同时，监管机构应确保海外数据中心项目达到与中国境内新建数据中心同等的标准，包括中国 2024 年绿色数据中心专项行动计划中的 PUE 目标，以及中国 2026 年碳达峰行动方案中关于新建数据中心主要使用绿色电力的规定。鉴于许多伙伴国面临的紧迫水资源问题，建议为海外项目增设 WUE 目标。

长期双边合作应聚焦于国内产业衔接，最大化数字基础设施投资带来的更广泛发展效益。以印尼为例，中国可在既有双边框架基础上，将绿色数据中心嵌入印尼绿色投资格局的独特特征之中，包括升级关键矿产加工以及冷却系统、太阳能光伏和储能技术的本土化制造。类似路径可根据其他伙伴国的比较优势和产业优先方向进行适配。

（二）区域合作政策建议

短期内，中国可与区域平台合作共同制定绿色数据中心标准和基准。可承载此类标准和基准的区域平台包括金砖国家数字生态系统合作网络、V20 联盟、中国—东盟以及中非合作论坛。上述平台可推动绿色数据中心谅解备忘录的制定，作为后续投资及其他行动的起点。区域平台还可通过创建聚焦数据中心、水资源与废弃物管理以及绿色工业转型的工作组、技术交流和知识共享倡议，支持不同国家背景下监管机构、公用事业机构和行业利益相关方之间的同行学习。现有协调机制——如中国—东盟能源合作框架——可予强化并拓展至绿色数据中心领域。

中期内，区域合作应强调对低碳基础设施的协调投资，此类投资往往超越国界。中国的对外直接投资可将数据中心投资与底层清洁能源和输电基础设施进行捆绑。区域合作的另一个中期机遇是开发可互操作的绿色数字基础设施，包括绿色代币和灵活算力等机制，在加强区域物理一体化的同时促进低碳计算资源在区域和数字层面的交换。上述协调投资组合可形成"绿色数字走廊"，在伙伴区域内整合并优化物理和数字基础设施。

长期区域合作层面，中国应与区域平台合作推动下游价值创造。在更长期内，中国应帮助伙伴国构建依托区域共享基础设施的区域绿色数据中心供应链。对于不在同一地理区域的多国议题集团（如 V20 国家），中国可在数据中心领域将合作重点聚焦于工业增长、技能发展以及平台特定议题（如 V20 国家的冷却效率）。在东盟，区域合作可依托现有制造能力，开发绿色数据中心用太阳能组件、电池、冷却系统和电力管理设备的集成供应链。在非洲，通过中非合作论坛（FOCAC）开展的合作可支持与数字基础设施部署相衔接的区域制造中心和技术培训中心。在金砖国家框架内，合作可聚焦于成员国间的产业互补性，包括矿产加工、电池制造和低碳工业生产。

（三）多边合作政策建议

短期内，中国应将绿色数据中心合作定位为 G20、UNFCCC 等现有重要多边平台的成果产出。短期内的一个关键目标是将绿色数据中心从特定基础设施议题提升为全球气候与发展合作的基础性组成部分。中国还可与国际电信联盟（ITU）、国际能源署（IEA）等国际组织合作，制定共享分析框架、技术指南、数据主权路径以及与数据中心相关的数据收集工作。特别是，中国应支持联合国秘书长提议的"人工智能环境透明度倡议"等多边倡议，用于报告数据中心在碳、水、空气质量、土地、公平性和成本等多维度的影响。厘清数据中心的责任成本是确保其为数字行业之外的准入和利益共享作出贡献的必要条件。在上述多边平台上，中国应推动近期开发一项评估数据中心系统级绿色转型潜力的指标。与此相关，中国在战略环境评价（SEA）这一领域拥有成熟专业经验，可为将数据中心倡议事前评估及定期再评估所需的主题范围、时间视野和指标制度化提供框架。

中期内，中国应优先推进绿色数据中心标准及相关标准（如碳核算、可再生能源证书等）的互认与对接。随着各国制定各自的数据中心能效、可再生能源采购和排放核算标准，碎片化的监管体系可能为低碳投资和国际合作设置壁垒。中国可通过多边机构和标准制定机构推动上述新兴绿色数据中心相关认证和核算体系之间更高程度的互操作性。合作可涉及国际电信联盟（ITU）、国际标准化组织（ISO）和国际电工委员会（IEC）等国际组织，为技术协调提供平台。更高程度的标准化将降低投资者面临的不确定性，提升全球可比性，并促进与数字基础设施挂钩的国际绿色金融机制的发展。

长期内，中国在多边平台上的合作应转向释放气候融资和市场工具，确保绿色数据中心驱动转型的资金可得性。具体路径包括利用 UNFCCC 第六条将绿色数据中心减排量货币化，以及与绿色气候基金、全球环境基金和多边开发银行等现有气候融资平台对接以撬动优惠资本。随着时间推移，多边合作可支持设立绿色数字基础设施专项融资窗口或投资机制，类似于现有的可再生能源和气候韧性机制。上述举措将有助于确保发展中国家在全球数字经济增长中获得参与机会，同时推进气候目标、强化能源体系、推动绿色结构转型，并通过本地能力建设、技术转移和广泛的经济与社会效益支持公正且具包容性的转型。

上述政策建议汇总于图 7，该图按合作层级和时间框架呈现建议矩阵，标注了各时间框架内的重点主题及本研究的核心建议。

表 2 按合作层级、时间框架和重点主题划分的政策建议

合作层级	短期（1-3 年）	中期（3-5 年）	长期（5 年以上）
双边	• 在部委、公用事业公司、开发商等之间启动关于绿色数据中心规划的政策对话； • 分享中国在监管框架、市场机制和绿色数据中心发展方面的经验； • 启动关于 PUE、WUE 及其他指标的联合研究	• 建立专门的双边合作框架，将数据中心与绿色结构转型相联系； • 创建双边工作组，涵盖政府、公用事业、金融机构、开发商等； • 开发涉及中国及伙伴国银行和发展机构的融资机制	• 将数据中心纳入更广泛的产业发展战略和绿色投资生态系统； • 将长期合作机制制度化，加强当地能力建设，带来广泛的经济效益
区域	• 通过金砖、东盟、中非合作论坛等区域平台制定绿色数据中心标准和基准； • 建立关于绿色数据中心的谅解备忘录和区域合作框架； • 通过技术交流、工作组和知识共享倡议促进同行学习	• 将中国 FDI 与配套基础设施和供应链捆绑； • 开发数字与清洁能源基础设施一体化的区域试点走廊	• 利用共享基础设施和比较优势，构建区域绿色数据中心供应链； • 支持区域制造中心、技术培训中心和产业合作平台； • 促进下游价值创造，涉及电池、冷却系统、矿物加工和低碳制造等领域

多边	• 在 G20、UNFCCC 及其他全球论坛中将绿色数据中心提升为优先议题； • 与国际电联（ITU）、国际能源署（IEA）等机构合作，开展分析框架和数据收集工作；• 将绿色数据中心定位为全球气候、能源和发展合作的关键组成部分	• 推动绿色数据中心标准的全球互认与协调； • 协调碳核算方法、可再生能源证书和可持续信息披露框架	• 动员气候融资和基于市场的机制用于绿色数字基础设施； • 为绿色数据中心及相关基础设施设立专门的融资窗口或投资机制

综合来看，上述建议表明：数据中心与绿色结构转型的国际合作应在短期内从对话和标准制定起步，中期推进协调投资和制度框架建设，长期最终实现集成式产业发展和融资机制。此外，各时间框架内的重点主题反映了上述目标实现进度的差异：水资源与废弃物管理的运营改善可在较短时间内落地，低碳运营有赖于中期能源系统投资和政策改革，而坚实的国内产业衔接则需要持续的、长期的经济和制度发展。通过在不同层级和不同时间框架下推进上述建议，中国及伙伴国可为数据中心和数字基础设施确立新的发展方向，确保其以环境可持续、经济韧性且社会包容的方式，推动全球南方实现更广泛的绿色结构转型。