

## 第3章

# AI 对能源低碳转型的赋能效应

能源作为国民经济的基础性产业，是经济社会发展的命脉所在。当前，数字技术与人工智能技术的深度融合，不仅为能源生产与消费的深刻变革注入了强劲动力，更成为引领能源革命和经济新增长的核心引擎。本章将深入探讨人工智能在能源系统中的广泛应用潜力，重点分析其在电力系统、交通、建筑、工业及跨领域应用场景中的深远影响。最后，通过虚拟电厂的典型案例，全面阐释人工智能技术的赋能效应及其对未来能源格局的战略意义。

### 3.1 AI 与能源的新力量组合

人工智能的飞速发展与深度应用，正在为能源行业的可持续发展注入澎湃动力。IEA 将人工智能与能源并称为新时代的“力量组合”，这一具有颠覆性和创新性的结合，正在重新定义全球能源未来格局。<sup>①</sup>

#### 3.1.1 AI 技术赋能效应巨大

智能技术在经济社会发展领域的应用，将展现出显著的节能减排效应。

<sup>①</sup> Rozite V, Miller J, Oh S. Why AI and Energy Are the New Power Couple[EB/OL]. IEA, (2023-11-02)[2024-12-26]. <https://www.iea.org/commentaries/why-ai-and-energy-are-the-new-power-couple>.

多项研究表明，数字和智能技术的广泛应用可显著加快全球脱碳进程（如表 3-1 所示）。预计在 2030—2050 年，加快各个行业数字化进程有望将全球温室气体排放量减少 20% 左右。例如，埃森哲与世界经济论坛（2022）的联合研究显示，弱数字技术（包括人工智能）在各行业得以全面推广，到 2050 年全球碳排放量相比常规商业（Business As Usual, BAU）情景可减少约 20%。<sup>①</sup>

表 3-1 AI 等数字技术对全球能源和气候减排效应的估计

| 研究机构                             | 技术类型           | 减排效应                                    | 减排量   | 经济效应  |
|----------------------------------|----------------|---|---|---|
| 埃森哲与世界经济论坛（2022） <sup>a</sup>    | 33 种数字技术（含 AI） | 到 2050 年，相对于 BAU 情景，减少 20% 温室气体排放       | —   | —   |
| 全球电子可持续发展推进协会（2022） <sup>b</sup> | 数字通信技术（含 AI）   | 到 2030 年，减少 20% 二氧化碳排放                  | 2030 年排放量维持在 2015 年的水平                            | —   |
| 波士顿咨询公司（2021） <sup>c</sup>       | AI             | 到 2030 年，减少 5%~10% 温室气体排放               | 到 2030 年，减少相当于 26 亿~53 亿吨 CO <sub>2</sub> e 的温室气体 | 为企业的可持续发展创造 1.3 万亿~2.6 万亿美元价值               |
| 微软和普华永道（2019） <sup>d</sup>       | AI             | 到 2030 年，相对于 BAU 情景，减少 1.5%~4.0% 温室气体排放 | 到 2030 年，减少相当于 9 亿~24 亿吨 CO <sub>2</sub> e 的温室气体  | 创造 3.6 万亿~5.2 万亿美元潜在收益和 1840 万~3820 万个净就业岗位 |

资料来源：笔者根据各研究报告整理。(a) Rozite V, Miller J, Oh S. Why AI and Energy Are the New Power Couple[EB/OL]. IEA, (2023-11-02)[2024-12-26]. <https://www.iea.org/commentaries/why-ai-and-energy-are-the-new-power-couple>; (b) GeSI. SMARTer2030 ICT Solutions for 21st Century Challenges[EB/OL].[2024-07-19]. <https://gesi.org/research/smarter2030-ict-solutions-for-21st-century-challenges>; (c) Boston Consulting Group. Reduce Carbon and Costs with

① Rozite V, Miller J, Oh S. Why AI and Energy Are the New Power Couple[EB/OL]. IEA, (2023-11-02)[2024-12-26]. <https://www.iea.org/commentaries/why-ai-and-energy-are-the-new-power-couple>.

the Power of AI [EB/OL]. (2021-01-26)[2024-07-12].<https://www.bcg.com/publications/2021/ai-to-reduce-carbon-emissions>; (d) Microsoft, PwC. How AI Can Enable A Sustainable Future[R/OL]. (2019)[2024-12-26]. <https://www.pwc.co.uk/sustainability-climate-change/assets/pdf/how-ai-can-enable-a-sustainable-future.pdf>.

在所有的数字技术中，人工智能的节能减排潜力尤为突出。微软和普华永道（2019）以及波士顿咨询公司（2021）的研究报告指出，到2030年，AI技术有望减少9亿~53亿吨CO<sub>2</sub>e的温室气体排放，这相当于2030年澳大利亚、加拿大和日本的年度碳排放总和。这一减排量相当于在基准情景的基础上减少1.5%~10%的全球温室气体排放。此外，人工智能的减排效益还伴随着经济生产力的显著提升，AI技术预计可为全球经济带来3.6万亿~5.2万亿美元的潜在收益。同时这一技术革命还将创造1840万~3820万个净就业岗位，规模接近英国当前的就业人数，为全球经济注入新活力。

人工智能对我国实现碳达峰、碳中和目标的贡献潜力巨大，其减排效应与国际减排水平相当（见表3-2）。中国信息通信研究院的量化分析显示，随着2030年前各行业数字化水平的持续提升，数字技术（包括人工智能）有望赋能全社会整体碳排放减少12%~22%。这一数据表明，数字技术将成为推动我国低碳转型的重要引擎。<sup>①</sup>

表3-2 AI等数字技术对中国能源和气候减排效应的估计

| 研究机构                             | 技术类型      | 减排量                       | 经济效应 |
|----------------------------------|-----------|---------------------------|------|
| 中国信息通信研究院<br>(2021) <sup>a</sup> | 数字技术(含AI) | 2030年,减少全社会总体12%~22%碳排放   | —    |
| 柴麒敏、李墨宇<br>(2022) <sup>b</sup>   | 数智技术(含AI) | “十四五”期间,每年平均减少0.5亿吨二氧化碳排放 | —    |

<sup>①</sup> 中国信息通信研究院. 数字碳中和白皮书 [R/OL]. (2021-12)[2024-12-26]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bs/202112/P020211220632111694171.pdf>.

续表

| 研究机构                         | 技术类型                        | 减排量                              | 经济效应                            |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| IDC & 百度 (2021) <sup>①</sup> | AI                          | 2060年, 累计减少超过350亿吨碳排放(8.75亿吨/年)  | —                               |
|                              | 信息技术                        | 2060年, 累计减少超过610亿吨碳排放(15.25亿吨/年) | —                               |
| 中金公司研究院 (2021) <sup>d</sup>  | 智能电网、无人机、机器人、工业互联网、AI和智能驾驶等 | —                                | 预计2021—2030年, 将在国内新诞生近2万亿元的产业空间 |

资料来源: 作者根据各研究报告整理。(a) 中国信息通信研究院. 数字碳中和白皮书 [R/OL]. (2021-12)[2024-12-26]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202112/P020211220632111694171.pdf>; (b) 柴麒麟, 李墨宇. 全球碳中和进程下数智技术的应用场景与效应评估 [J]. 闽江学刊, 2022(5): 51-60, 173; (c) IDC & 百度. 2021年中国人工智能助力“双碳”目标达成白皮书 [EB/OL]. (2021-12-29)[2024-12-26]. <https://esg.baidu.com/SpecialReport>; (d) 中金公司. “碳”致中和, 方兴未“AI” [EB/OL]. (2021-07-09)[2024-12-26]. <https://research.cicc.com/frontend/recommend/detail?id=2156>.

国际数据公司 (International Data Corporation, IDC) 和百度联合发布的《人工智能助力中国“双碳”目标达成白皮书》进一步揭示了人工智能技术在减排方面的深远影响。<sup>①</sup> 报告指出, 2020—2060年, 人工智能相关技术累计将助力中国碳减排超过350亿吨, 折合年均减排约8.75亿吨; 与此同时, 信息技术的应用预计将带来碳减排累计610亿吨, 折合年均减排15.25亿吨。这些数据充分体现了人工智能和信息技术在助力“双碳”目标达成中的战略价值。

也有研究从更加全面的角度, 兼顾了数智技术的减排效应与增耗效应。例如, 在“十四五”期间, 若不考虑减排效应, 5G、大数据中心和人工智能

<sup>①</sup> IDC, 百度. 人工智能助力中国“双碳”目标达成白皮书 [R/OL]. (2021-12-31)[2024-12-26]. <https://esg.baidu.com/SpecialReport>.

物联网每年平均将增加 1.9 亿吨二氧化碳排放；如果考虑减排效应，则每年平均减少 0.5 亿吨二氧化碳排放。如果不纳入人工智能物联网（AIoT）的减排作用，数智技术应用总体将增排 1.3 亿吨二氧化碳。长期来看，随着数字技术与能源技术的双重革命不断深化，其叠加效应将日益显现。特别是在智能基础设施建设的推动下，各行业的智能化升级改造将更好地实现绿色协同效应，从而进一步释放显著的减排潜力。

另外，中金公司研究院的分析指出，人工智能将加速与城市、制造业、交通、电力等典型场景的深度融合，催生智能驾驶、智能制造等新业态，为实现提效降耗、推进碳中和注入新动能。据预测，2021—2030 年，智能电网、民用无人机、移动机器人等十个领域将在中国新增近 2 万亿元的产业空间。<sup>①</sup>这不仅彰显了人工智能对实现低碳目标的直接贡献，也为中国绿色经济的发展开辟了广阔的增长空间。

总之，数字技术和人工智能在碳减排和经济提质增效中的作用不可或缺。它们不仅为实现“双碳”目标提供了强有力的技术支撑，也在重塑经济发展模式、催生绿色产业新生态方面发挥着关键作用。

### 3.1.2 AI 减排效应分布不均

部分研究进一步探讨了 AI 赋能效应的行业分布（见表 3-3）。人工智能技术在能源、工业和交通领域展现出显著的减排效应，成为推动全球可持续发展的重要驱动力。以微软和普华永道（2019）的研究为例，在能源领域，人工智能的应用预计到 2030 年比基准情景下全球碳排放减少 1.6%~2.2%，同时推动全球 GDP 规模增长 1.6%~2.2%。在农业领域虽然减排效应相对较小，但 AI 技术仍可将碳排放降低 0.1%~0.3%，并带来 0.2%~0.3% 的 GDP 增长。在交通领域，受反弹效应的影响，碳排放可能呈现一定的不确定性，研究估算其变化范围从比基准情景增加 0.3% 至减少 1.7%。尽管如此，交通领域的经济增长效应依然显著，GDP 增长预计达 1.2%~1.8%。

---

<sup>①</sup> 中金公司.“碳”致中和，方兴未“AI”[EB/OL].(2021-07-09)[2024-12-26]. <https://research.cicc.com/frontend/recommend/detail?id=2156>.

表 3-3 对于 AI 技术在不同行业的能源减排和经济效应的估计

| 层面               | 农业  | 能源  | 工业                                  | 建筑                            | 交通  | 水资源  | 资料来源                              |
|------------------|---|---|-------------------------------------|-------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| 全球层面 - AI 技术     | 比 2030 年基准全球碳排放降低 0.1%~0.3%；比 2030 年基准全球 GDP 规模增长 0.2%~0.3% | 比 2030 年基准全球碳排放降低 1.6%~2.2%；比 2030 年基准全球 GDP 规模增长 1.6%~2.2% | —                                   | —                             | 比 2030 年基准全球碳排放增加 0.3% 至降低 1.7%；比 2030 年基准全球 GDP 规模增长 1.2%~1.8% | 碳排放影响忽略不计；比 2030 年基准全球 GDP 规模增长 0.04%~0.2% | 微软和普华永道 (2019) <sup>a</sup>       |
| 中国 - 数字技术        | —   | —   | 到 2030 年温室气体减排，减少 13%~22% 碳排放       | 到 2030 年温室气体减排，减少 23%~40% 碳排放 | 到 2030 年温室气体减排，减少 10%~33% 碳排放                                   | —  | 中国信息通信研究院 (2021) <sup>b</sup>     |
| 中国 - 数字技术 (含 AI) | 到 2030 年温室气体减排，每年减少 0.22~0.65 亿吨碳排放                         | 到 2030 年温室气体减排，每年减少 4.34~7.77 亿吨碳排放                         | 到 2030 年温室气体减排，每年减少 1.12~3.25 亿吨碳排放 | —                             | 到 2030 年温室气体减排，每年减少 1.61~2.34 亿吨碳排放                             | —  | 全球电子可持续发展推进协会 (2020) <sup>c</sup> |

资料来源：(a) Microsoft, PwC. How AI Can Enable A Sustainable Future[R/OL]. (2019)[2024-12-26]. <https://www.pwc.co.uk/sustainability-climate-change/assets/pdf/how-ai-can-enable-a-sustainable-future.pdf>; (b) 中国信息通信研究院. 数字碳中和白皮书 [R/OL]. (2021-12)[2024-12-26]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202112/P020211220632111694171.pdf>; (c) GeSI. Digital solutions for climate action[R/OL]. (2020). <https://gesi.org/public/research/download/52>.

从中国的视角来看，中国信息通信研究院通过对不同行业能耗和碳排放结构的精确分析，深入探讨了数字技术在行业内各环节的减碳成效及占比，并结合行业整体碳排放情况评估了数字技术的赋能效应。研究表明，伴随数字化和智能化的深入发展，到2030年，人工智能等数字技术将在工业、建筑业和交通业等重点行业实现大幅度的减排：工业领域的减碳比例预计为13%~22%，建筑业高达23%~40%，而交通业则为10%~33%。这些数据充分展现了AI技术在优化能源利用、提高行业效率和推动低碳转型中的核心作用。<sup>①</sup>

然而，人工智能的应用潜力和减排优势在全球范围内呈现显著的不平等性。整体而言，AI的全球性减排效应主要集中在北美、欧洲和东亚地区，这些区域的减排量约为5%，而中东、北非和中南美洲的温室气体减排量相对较低，仅为0.5%~1.5%。<sup>②</sup>地区间减排效应的差异主要受到行业结构和产业重点不同的影响。

在北美和欧洲地区，温室气体的净减排主要得益于能源和交通领域化石燃料使用效率的提高，这些地区的先进技术基础、完善的基础设施和高效的能源管理体系为AI的广泛应用提供了强有力的支持。相比之下，中南美洲和撒哈拉以南非洲地区的绝对和相对减排量较低，原因在于这些地区工业化程度较低，能源和交通领域化石燃料效率的提升对整体碳排放量的影响有限。此外，这些地区面临显著的数字鸿沟问题，人工智能技术的普及速度较慢，技术红利的释放尚需时日。

值得关注的是，技术普及的不均衡性可能带来连锁反应。一方面，数字技术的欠发达使得中南美洲和撒哈拉以南非洲等地区难以快速享受人工智能

---

① 中国信息通信研究院. 数字碳中和白皮书[R/OL]. (2021-12)[2024-12-26]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202112/P020211220632111694171.pdf>.

② 具体数据为：北美洲 GDP+4.2%、温室气体排放 -6.1%，欧洲 GDP+5.4%、温室气体排放 -4.9%，东亚 GDP+5.1%、温室气体排放 -4.8%，中东和北非 GDP+2.9%、温室气体排放 -1.7%，中南美洲 GDP+2.2%、温室气体排放 -0.9%，撒哈拉以南非洲 GDP+1.3%、温室气体排放 -0.2%，“印太”地区 GDP+3.4%、温室气体排放 -2.4%。资料来源：Microsoft, PwC. How AI Can Enable A Sustainable Future[R/OL]. (2019)[2024-12-26]. <https://www.pwc.co.uk/sustainability-climate-change/assets/pdf/how-ai-can-enable-a-sustainable-future.pdf>.

带来的效率提升和减排效应；另一方面，其他更早采用人工智能技术的地区可能通过产业升级和效率提升，将低端制造需求外溢至这些欠发达地区，从而导致生产活动增加并推高碳排放。换言之，人工智能技术的广泛应用不仅可能加剧全球减排效应的地区差距，还可能通过全球化的供应链效应，间接推动部分欠发达地区的碳排放增加。

在推动人工智能技术应用的同时，必须正视这种不平等性所带来的挑战。国际社会需要进一步加强跨地区的技术合作，帮助落后地区缩小数字鸿沟，提升人工智能的应用水平。例如，通过技术转让、基础设施投资和能力建设等多维度支持，确保 AI 技术的减排效应在全球范围内更均衡地释放，从而实现真正意义上的全球碳中和目标。

## 3.2 AI 与供给侧能源技术

全球范围内，领先的科技公司和能源企业正积极探索人工智能在能源领域的广泛应用。随着智能技术与能源系统深度融合，能源系统将拥有自组织、自检查、自平衡和自优化等多种智能化能力，升级为智慧能源系统。

### 3.2.1 人工智能赋能新型电力系统

在碳中和目标和气候政策的推动下，全球能源系统正在经历深刻的变革与转型，尤其是可再生能源和数字技术的快速发展，对传统电网和能源管理系统提出了全新的要求与挑战。

到 2030 年，全球发电量中预计 80% 将由可再生能源提供，其中太阳能光伏发电量占比超过一半。<sup>①</sup> 我国风电和光伏发电量到 2060 年将分别达到 5000~8000 TW·h 和 3000~6000 TW·h，占总发电量的 65%~70%。<sup>②</sup> 然而，大规模可再生能源电力接入的间歇性和波动性特征会对电网系统的稳定性构

---

① IEA. World Energy Outlook 2023[R/OL].(2023-10)[2024-12-26]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.

② 清华大学碳中和研究院. 中国碳中和目标下的风光技术展望 [R]. 2024.

成巨大挑战。

传统电网在整合间歇性能源（如风电和光伏）方面存在着显著的不适应，导致能源利用效率低下，而全球气候变化加剧所引发的极端天气将进一步放大这些影响。例如，极端低温天气可能导致风机低温停机或叶片覆冰，进而影响风能的稳定性；极端高温天气会降低光伏系统的光电转换效率，同时影响设备散热并加速老化。近年来，极端天气频繁影响我国新能源的发电能力，2021年9月东北电网和2024年5月四川地区的电力短缺与紧急停电事件均是由于新能源发电不足引发的。随着未来风电和光电的进一步大规模开发，气候条件的不确定性将更加凸显，迫切需要依赖智能技术在能源系统中的应用，来确保电力系统的安全性与稳定性。

与此同时，能源需求侧同样面临深刻变革，传统的能源需求侧正被灵活化和随机化趋势所取代。随着碳中和目标的推进，电动汽车、光储直柔建筑、工业4.0等灵活用电技术的快速发展以及大规模应用，上亿级点位的交互受电充电对电网负荷响应形成冲击，需求侧的灵活性和随机性需要大幅度提升。<sup>①</sup>。根据国际能源署报告，2025年全球电动汽车销量预计突破2000万辆，占全球汽车总销量1/4以上<sup>②</sup>；到2030年，全球电动汽车数量将是现在的近10倍<sup>③</sup>。电动汽车的充电行为具有高度随机性，受用户驾驶习惯、充电基础设施分布和电价政策等多种因素影响，尤其是在充电高峰期会对电网稳定性造成巨大压力。

智能电网是智能技术、数字技术与传统物理电网的深度融合，被认为是应对未来能源挑战的理想选择。它不仅能适应新能源的间歇性和分布式特性，还能够有效应对复杂、多变的能源需求。在新型电力系统的构建过程中，人

---

① 柴麒敏, 李墨宇. 全球碳中和进程下数智技术的应用场景与效应评估 [J]. 阅江学刊, 2022, 14(5):51-60, 173.

② IEA. Global EV Outlook 2025[R/OL]. IEA, Paris.(2025)[2025-12-09]. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>.

③ IEA. World Energy Outlook 2023[R/OL].(2023-10)[2024-12-26]. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.

人工智能作为“超级大脑”发挥了核心作用，通过能量流、信息流和业务流的高效耦合，能够在不同类型和不同规模的能源及需求之间，平滑地实现快速实时平衡、灵活调度、优化配置、高效及可靠运行。

人工智能在能源系统中还发挥着多种关键性作用。一是精准预测能源需求，AI 通过分析历史用电数据、气象模式和用户消费行为，借助机器学习算法帮助能源企业更精准地预测未来的能源需求。这种能力尤其适用于应对电动汽车的随机性充电行为和灵活用电模式。二是新能源出力预测，利用历史数据和数值天气预报，AI 能够准确预测风电和光伏等新能源的出力情况，帮助电网优化调度，降低因天气波动引起的供电不稳定性。三是分布式能源整合，AI 技术能显著优化分布式能源资源的整合，使电力系统在应对多样化电源接入时更具灵活性和高效性；还能够协调不同类型的能源资源，实现电力供需平衡。四是市场交易智能化，在能源市场交易中，AI 能快速处理海量数据，识别最佳交易时机和价格，帮助发电企业和售电公司优化决策，从而实现更高的经济效益。五是碳排放监测与管理，AI 通过对碳排放数据的监测和分析，能帮助能源企业和政府更好地追踪碳排放来源，评估减排政策效果，并优化碳管理策略。

以远景能源为例，该企业在新能源领域的智能化技术应用展现了人工智能在提升可再生能源效率和可靠性方面的巨大潜力。远景能源通过人工智能技术应用于天气模型的预测，将中长期天气预测的准确率提升了 30%。<sup>①</sup> 这种进步可以帮助风电等依赖天气条件的新能源更精准地规划发电计划，降低因天气变化导致的能源不稳定风险。远景的“智能风机”通过使用数字孪生技术，能够实时有效检测整个风机的运行状况，变预警为预防，让风机寿命更久、收益更多；同时实现机群彼此协同，达到风场级协同最优，提升整体发电效率与收

---

① 中国能源网. 远景科技集团张雷出席夏季达沃斯，用绿色科技助力全球零碳转型 [EB/OL]. (2024-06-26)[2024-07-26]. [https://www.cnenergynews.cn/guangfu/2024/06/26/detail\\_20240626166084.html](https://www.cnenergynews.cn/guangfu/2024/06/26/detail_20240626166084.html).