



**中国环境与发展国际合作委员会  
专题政策研究报告**

**数字化与绿色技术促进可持续发展**

中国环境与发展国际合作委员会 2023 年年会

2023 年 6 月

# 专题政策研究项目组成员

(中外组长、成员、支持专家及协调员姓名、单位、职务/职称)

## 中外组长\*: 中方组长

**龚克教授** 世界工程组织联合会 (WFEO) 前任主席, 中国新一代人工智能发展战略研究院执行院长

## 外方组长

**德克·梅森纳教授** 德国联邦环境署 (UBA) 署长

**梁锦慧女士** 世界经济论坛执行董事、自然与气候中心全球总负责人

**安东尼娅·加维尔女士** 前世界经济论坛全球气候行动负责人, 自然与气候中心副主任, 执行委员会成员

## 中外成员\*: 中方团队

**刘刚教授**, 博士生导师, 南开大学经济研究所所长, 中国新一代人工智能发展战略研究院首席经济学家

**邵超峰** 南开大学环境科学与工程学院教授、博士生导师

**刘捷** 中国新一代人工智能发展战略研究院讲师

**张昕蔚** 中国新一代人工智能发展战略研究院助理研究员

**廖明希** 世界工程组织联合会前任主席助手

**王冠一** 南开大学国际组织任职服务办公室主任

**景然** 中国新一代人工智能发展战略研究院管理人员

## 外方团队

**Stephan Ramesohl 博士** 伍珀塔尔研究所数字转型与循环经济研究部门联合负责人

**Felix Creutzig 教授** 柏林工业大学土地利用, 基础设施与交通工作小组负责人, 可持续性经济学主席

**单志广博士** 国家信息中心信息化和产业发展部主任

**Anna Zagorski** 德国联邦环境署 (UBA) 研究员

**梁国勇博士** 联合国贸发会议资深经济学家

**Eric White** 世界经济论坛 SDG 科技创新负责人

**Daniel Hausmann** 气候、能源、环境与生物多样性领域 战略与业务发展经理 (GIZ 东亚)

**赵丽智** 德国联邦环境署（UBA）科学主任

**Jan-Hendrik Eisenbart** 德国国际合作机构中德环境伙伴关系项目三期顾问

**代敏** 德国国际合作机构中德环境伙伴关系项目三期项目经理

**Niels Thevs 博士** 德国国际合作机构中德环境伙伴关系项目三期项目主任

**Markus Wypior** 德国国际合作机构能源转型中德环境伙伴关系项目三期部门主任

#### 支持专家: 中方专家

**赵星** 南开大学电子信息与光学工程学院教授、博士生导师，中国新一代人工智能发展战略研究院办公室主任

**罗纯** 中国新一代人工智能发展战略研究院博士后

#### 外方专家

**Mattias Höjer 教授** 皇家理工学院环境战略与未来研究教授

**Marcel Dorsch 博士** 德国联邦环境署（UBA）数字变革与可持续转型高级科学家，德国联邦环境署数字环境可持续发展联盟（CODES）联络人

**许浩博士** 腾讯可持续社会价值副总裁，碳中和实验室负责人

**Lisa Wee** 剑维软件技术集团可持续发展全球主管

**夏学英** 施耐德电气公司事务与可持续发展中国区总监

**关大博教授** 清华大学地球系统科学系特聘教授

**王道平博士** 世界经济论坛全球气候治理霍夫曼研究员

#### 协调员: 中方协调员

**裴蕾** 南开大学滨海开发研究院办公室主任

#### 外方协调员

**李秋苹** 世界经济论坛新兴市场与气候行动负责人

**Anna Rosenbaum** 德国联邦环境署（UBA）国际事务主任

\*本项目组长和成员以个人身份参与项目工作。本报告中所表达的观点和意见仅代表参与此项专题政策研究团队专家个人立场，不代表其所在组织和国合会的观点和意见。

# 执行摘要

## 一、研究意义

在过去的几十年里，中国经济经历了惊人的数字化转型过程。这一过程极大地促进了中国的经济发展，并将其影响力扩展至国际舞台。中国环境与发展国际合作委员会（CCICED）的这份特别政策研究报告在探讨数字化与可持续发展之间联系时，始终坚持和依托一个明确的使命：作为 21 世纪的主要转型力量，数字化必须为可持续发展服务。这份报告是由国际国内成员所共同组成的项目组进行的理论和实证研究成果，旨在为在中国背景下促进数字化和绿色技术的可持续发展提供政策建议。在此特别感谢 CCICED 国际首席顾问 Scott Vaughan 先生和 CCICED 中国首席顾问刘世锦教授在整个项目周期内提供的宝贵指导。

在全球范围内实现可持续发展是一项史无前例的任务。应对可持续发展挑战的高效战略应以全面的系统视角审视复杂的社会-技术-经济转型过程，涵盖农业和食品、消费、能源、制造业和城市交通运输等多个领域，并考虑其相互依赖和协同作用。在实践中，应具备强大的能力来启动、推动和扩大实现可持续性的多种转型进程。数字化代表了通用目的技术（GPT）的下一个层次，它提供了一个强大的数字能力的解决方案空间，以匹配迫切需要的转型能力。为了更好地实现这一潜力，数字化转型需要在国家政策框架层面得到指导，以便为技术创新和部署提供方向和目的。同时，需要制定一个整体的政策方案来解决数字技术和可持续转型之间的战略差距。

## 二、研究重点

中国在数字领域的发展上取得了突破性进展，数字产业规模已居于世界第二。然而，中国数字经济的快速发展也伴随着能源消耗和碳排放的快速上升，以及其他环境问题，如电子垃圾的产生。目前，中国的数字基础设施、数字科技公司和数字化服务体系正面临着绿色升级的巨大压力。为了实现这种升级，需要采取积极的政策措施，促进节能，提高能源效率，促进数字基础设施，特别是数据中心的脱碳。此外，政策应积极促进数字公司的低碳发展，鼓励绿色社会责任和可持续发展报告，并提高数字技术的支持能力，使产业能够减少碳排放。

在城市层面，数字化带来了一些城市问题，但在交通、建筑和城市规划等领域也提供了可持续的解决方案。例如，数字化可以用在线服务取代资源需求型的线下活动，优化现有活动，并提高资源的循环利用效率。然而，数字化和相应的效率提升也会导致能源和资源消耗的增加，也就是所谓的反弹效应，这可能会抵消掉效率提升所带来的效益。从概念上讲，城市交通和建筑的可持续性转型分为“避免、转移和改进”三个部分。数字化支持所有这三个领域的转型，并为新兴的新技术和商业模式提供机会。在空间规划方面，人工智能和机器学习可以帮助促进节能的城市形态和包容性。建设智能可持续城市可以创造三赢：支持经济增长，提高生活质量，减少地方和全球环境负担。实现这些目标需要大量的政策方面的努力，例如，构建一个“智能可持续城市评审”系统，推进城市数字治理，推广可持续发展特区，以及在人工智能的支持下实施可持续城市规划。

在应对气候变化的过程中，数字技术对于减缓行动和适应努力都做出了贡献。中国《2035 年国家气候变化适应战略》强调了技术支持和研发的作用，在此背景下，部署相关的先进数字技术，如人工智能用于高精度气象预报，是一个重要的行动领域。在这方面，政府应加强对该领域科技研究的支持，完善多源数据整合和多机构协调，并加快相关立法工作。

作为一项通用目的技术（GPT），数字设备和应用反映并重塑了社会关系和对世界的理解。因此，了解推广数字技术的成本和收益是至关重要的，特别是对于那些可能会从中受益或不受益的人而言。性别维度也十分关键，有必要将性别分析纳入政策规划与监测的范畴。为了处理与性别有关的偏见，政府可以考虑采取以下政策行动：提高意识，检测数据集中的偏见，减少现有的偏见，并提高透明度。这需要让有性别意识的人类在人工智能发展的过程中持续发挥作用。

### 三、关键政策建议

政府必须设定明确的标准、时间线以及可靠的路径来实现数字领域的脱碳，满足碳达峰、碳中和的目标。一个关键的步骤是，加快数字基础设施的绿色转型，通过促进节能、提高能源效率来减少碳排放，特别是针对数据中心。除此

之外，有效管理由电子设备整个生命周期中产生的碳排放数据也至关重要。在企业层面，当务之急是促进和激励绿色社会责任和可持续性报告的披露。就数字技术而言，硬件和软件都应该不断优化，以便在赋能其他行业管理和减少碳排放过程中发挥日益重要的作用。在这种情况下，数字技术是绿色转型的关键推动因素，在规划过程和消费者选择方面都是如此。

中国已经在发展智慧城市方面取得了重大进展，但还需要进一步与绿色转型接轨。为解决这一问题，政府应该探索构建一个“智慧可持续城市评审”系统，该系统将评估数字技术在多大程度上被有效地用于促进交通、建筑和空间规划等关键领域的可持续性发展。政府也有必要根据气候目标推进城市数字治理，在人工智能的支持下改善可持续的城市规划，并促进高效的集合流动。

利用数字技术对于构建气候韧性和强化极端事件的早期预警系统至关重要。为实现这一目标，政府应该优先支持有针对性的数字适应解决方案的研究和创新。当然，同样重要的是，在气候变化领域设定数据标准、完善数据共享机制、协调政策，包括促进不同机构间的信息交流合作。政府还应该采取立法措施，激励开发适应气候变化的数字解决方案。

在数字化进程中，性别主流化至关重要，关键是要将性别分析和鼓励女性参与纳入政策制定与实施的过程中。为实现这一目标，收集按性别分类的数据并促进以数据为基础的性别研究至关重要。此外，在新兴数字技术和解决方案的风险评估中，包括在人工智能领域，迫切需要检测和减轻性别偏见。

# 目录

1. 理论基础和概念框架.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 迎接可持续发展转型带来的挑战.....	1
1.2.1 挑战的本质是什么.....	1
1.2.2 如何应对挑战：构建实现可持续发展的核心转型能力.....	3
1.3 数字能力与可持续发展：机会空间.....	4
1.4 数字技术驱动可持续发展：中国的实践与愿景.....	7
1.4.1 中国数字经济特征.....	7
1.4.2 技术体系和应用领域.....	8
1.4.3 数字技术在经济领域的创新应用.....	9
1.4.4 数字技术在社会领域的应用.....	10
1.5 利用数字化转型机会空间：消除数字技术与可持续发展间的战略差距.....	11
1.6 总结.....	15
2. 数字化部门的绿色化转型发展：加快数字化，促进绿色化.....	17
2.1 引言.....	17
2.2 发展现状及困境.....	18
2.2.1 数字化部门的绿色发展现状.....	18
2.2.2 数字化部门与绿色发展的融合.....	19
2.3 数字领域的绿色发展路径.....	21
2.3.1 数字基础设施和设备.....	21
2.3.2 绿色数字服务.....	26
2.3.3 数字化企业绿色发展.....	27
2.4 基于数字技术的绿色化模式.....	31
3. 数字化技术与城市可持续发展.....	34
3.1 引言.....	34
3.2 中国智慧城市现状.....	35
3.3 交通运输业：避免-转移-改进.....	38
3.4 建筑业：避免-转移-改进.....	41
3.5 空间规划：利用人工智能进行可持续城市设计.....	42
4. 数字技术与气候变化适应.....	44

4.1	中国适应气候变化的主要挑战.....	44
4.2	适应气候变化的潜在数字解决方案.....	47
4.2.1	高精度降水预报的人工智能技术.....	47
4.2.2	城市水务领域的运营数字孪生.....	49
4.3	利用数字化适应的治理创新.....	50
5.	性别观点.....	52
6.	政策建议.....	55
6.1	绿色数字产业.....	55
6.2	构建智慧可持续城市.....	57
6.3	运用数字化推动应对气候变化的适应性.....	58
6.4	在数字化中推广性别主流化.....	59
	参考文献: .....	60
	附录1 - 2021年中国数字技术应用和应用领域的技术复杂度测量指数..	65
	附录2 - 欧洲典型实践案例.....	66
	附录3 - 在中国的实践案例: 腾讯的碳中和目标和路线图.....	69
	附录4 - 数字化推动成都市绿色高质量转型发展的创新实践.....	71

# 数字化与绿色技术促进可持续发展

## 1. 理论基础和概念框架

### 1.1 引言

本研究的首要议题将我们这个时代最相关的两个发展趋势联系在一起，它们有一个明确的使命：数字化作为 21 世纪转型的主要驱动力量，必须为可持续发展服务，这是我们面临的最紧迫变革挑战。

第一章构建了一个概念框架，研究的主题是如何利用数字技术促进可持续发展、数字技术带来哪些机遇和政策内涵。在此基础上，本报告的后续章节通过实际调查和案例研究，对理论基础和概念框架进行阐述。

第一章提出了如下问题。首先，摆在我们面前的可持续性挑战的性质是什么？复杂技术、经济和社会系统进入成功转型路径需要什么样的转型能力（第 1.1 节）？其次，作为通用目的技术，数字技术和解决方案应对可持续性转型挑战的关键机制和潜在贡献是什么（1.2 节）？第三，中国数字经济发展模式的基本特征是什么，数字商业生态系统的现状如何（第 1.3 节）？第四，为了充分受益于数字技术带来的机会空间，需要弥补哪些战略缺口？数字经济和社会可持续发展具有哪些特点，需要什么样的新政策思维？以及利用数字能力和解决方案促进可持续性的政策体系是什么（第 1.4 节）？

### 1.2 迎接可持续发展转型带来的挑战

#### 1.2.1 挑战的本质是什么

进入 21 世纪，人类面临着全球地球系统及其生态平衡的不断恶化的风险。根据“行星边界”概念（Rockström 等人，2009），越来越多的科学证据表明，人类活动正在超越地球的生态极限，例如，生物多样性的加速消失或淡水资源的压力增加。最突出的是，气候变化的影响正波及全球社会，要求严格减少温

室气体排放，并最终在本世纪中叶实现气候中立的目标<sup>1</sup>。数字化本身就是人类社会的主要力量，对地球边界有直接和间接的影响（Creutzig 等人，2022）。

因此，世界上所有国家都面临着一个共同的挑战，那就是为实现社会经济可持续发展设定方向，同时保护我们人类福祉和繁荣的生态基础。从联合国《变革我们的世界——2030 年可持续发展议程》<sup>2</sup>提出的 17 个可持续发展目标来看，可持续发展面临的挑战的本质是统筹和协调经济、社会和生态环境发展。尽管我们正共同经历日益严峻的生态危机，在人口零增长和实现全球范围内平等的经济繁荣之间，世界仍然面临分歧与不同的权衡。

应对这一挑战的一个整体方法是中国提出的生态文明战略。面对加速工业化和城市化过程中出现的资源和环境问题，2012 年中国共产党的十八大报告提出生态文明建设战略，认为生态文明是人类为保护和建设美好生态环境而取得的物质成果、精神成果和制度成果的总和，贯穿于经济建设、政治建设、文化建设、社会建设全过程。2015 年 3 月 24 日，中共中央政治局会议审议通过了《关于加快推进生态文明建设的意见》（简称《意见》）。2015 年 10 月，加强生态文明建设首次被写入国家“五年规划”。2018 年 3 月 1 日，第十三届全国人民代表大会第一次会议通过的宪法修正案，将宪法第八十九条“国务院行使下列职权”中第六项“领导管理经济工作和城乡建设”修改为“领导和管理经济工作和城乡建设、生态文明建设”。强调生态文明建设是中国发展理念和发展方式的根本转变，涉及经济、政治、文化、社会建设方方面面，并与生产力布局、空间格局、产业结构、生产方式、生活方式，以及价值理念、制度体制紧密相关，是一项全面而系统的工程。

面对气候变化带来的挑战，在全球范围内实现可持续发展是一项史无前例的任务，总结为如下特征：

- 采取行动的迫切性。目前的趋势和对生态临界点的预测（如全球气候系统）表明，可操作的空间正在缩小，实现可持续系统变化的时间窗口正在关闭。

---

<sup>1</sup> 政府间气候变化专门委员会 IPCC (2023): IPCC 第六次评估报告 (AR6) 的综合报告, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>, 2023 年 3 月 29 日访问。

<sup>2</sup> 联合国 (2015): 变革我们的世界: 2030 年可持续发展议程, 大会于 2015 年 9 月 25 日通过的决议 (A/RES/70/1), 访问时间为 2023 年 3 月 29 日。

- 在平衡生态和环境边界的基础上，协调社会 and 经济发展进程的复杂性。经济、社会和生态环境之间的关系是相互交织的，需要我们采取系统性战略和方法，在健康的自然环境中提高人类的福祉和生活质量。更加重要的是，实现可持续发展目标需要我们在气候变化、生物多样性和其他对人类生存的威胁方面进行全球合作。
- 在某些方面需要雄心壮志——其中之一是在几十年内实现社会的脱碳。要求在经济和社会中进行深远的系统变革，如过渡到完全实现可再生能源供应和大幅减少全球资源消耗的传统模式。
- 各个层面都需要具备系统思维。个人、机构或社会都必须接受、了解和应对复杂系统中的多层面联系、相互依赖以及动态变化。在这方面，寻找切实可行的行动点和建设性意见非常重要。

### 1.2.2 如何应对挑战：构建实现可持续发展的核心转型能力

应对可持续性挑战的有效战略目的在于推动技术-经济-社会的转型过程。

这需要如下的关键要素：

- 一个涵盖所有可持续转型领域的综合系统观。这些领域包括能源、交通、农业、粮食、制造业、消费、城镇及城市转型。例如，应对气候变化需要所有部门减少碳排放。此外，还需要考虑它们之间的相互依赖和协同作用。例如，引进电动汽车和扩大可再生能源，城市规划和交通需求模式之间的复杂关系。
- 重新定义个人和集体行动的物理和组织边界条件的结构性变化。例如，由集中式传统能源供给系统转变为分散的可再生能源系统，加强新公共交通基础设施建设，改造城市建筑环境，重新设计市场和政府的经济规则，改革机构设置、任务和能力等。
- 要深刻理解和认识技术-经济-社会复杂系统演化的过程，积累和掌握关于复杂系统演化的因果关系和解决方案的越来越多的证据和知识。在解决复杂系统问题时，没有显而易见的解决方案。整个世界的进步需要逐步实现，在短期成就中获利的同时要积极投资长期解决方案，我们需要通过持续学习积累和提高我们解决问题的能力。
- 在地球村时代，复杂系统的协同与国际合作不再是局部性的，需要世界各

国的共同努力、联合行动和共同治理。

在实践层面上，上述要求可以转化为启动、推动、管理和扩大在各个层面上实现社会、经济和环境可持续性转型所需的核心能力。基于对通用可持续性转型能力的认识，我们可以为探索、评估和执行对可持续发展具有潜在贡献的数字解决方案提供分析框架。应对可持续发展的挑战所需要的通用能力能够高水平实现多元目标（表 1.1）。

表 1.1 实现可持续发展的转型能力

<b>监测地球系统</b>	监测并分析环境空间的状态，明确和衡量关键绩效指标的趋势，量化个人倡议和公共政策的影响，使人类活动与环境影响脱钩
<b>管理复杂的技术系统</b>	控制、优化、（重新）设计技术基础设施和设备，尤其是为了实现脱碳的能源供给和可持续的资源利用
<b>指导研究与创新</b>	加强科学研发和创新，利用新兴技术能力解决可持续性面临的挑战（创新的方向性）
<b>改革经济价值创造</b>	管理经济交易，塑造（国际）价值网络和市场的治理结构，以刺激商业模式创新，激发创业动能
<b>强化人的参与</b>	通过价值导向、信息、教育和赋予个人权力，以及在社区、组织和社会中鼓励社会创新，激发个人和集体承诺（准备行动），并增强他们的能力（行动能力）
<b>适应性机构和政策</b>	调节治理体系，建立有效的机构，通过新的协作模式和强化监管学习促进政策创新

### 1.3 数字能力与可持续发展：机会空间

与前三次工业革命不同，正在进行的数字化变革在信息层面上根本地改变着技术、经济和社会复杂系统的结构及其相互关系。之前，这些相互关系主要是发生在物理空间和社会空间，而数字经济和社会则是基于网络空间的发展，是数据资产驱动的。数据资产是网络空间的所有存在物，是网络空间对物理空间和社会空间中的物与物、物与人和人与人关系的映射。通过网络空间的数据挖掘、分析和预测，人类可以优化和管控物理空间，形成数字能力，为实现经济、社会和生态环境的统筹和协调创造条件。数据资产映射的不仅包括制造业、基础设施、建筑和自然环境等物理空间，而且包括经济、社会和文化等社会空

间空间。网络空间、数据资产和数字能力为创造以可持续发展为导向的新的技术经济社会系统提供了机会空间。同时，对网络空间发展、数据资产和数字能力的应用，同样需要新型政治和体制改革及其监管能力的提升（见第 1.4 节）。

这一过程是由作为新一代信息技术的数字技术的杰出发展推动的。数字技术是一个包括互联网、物联网（IoT）、5G/6G 移动通信、云计算或边缘计算、大数据分析和人工智能在内的复杂技术体系。在大多数案例中，这些技术相互组合产生数字解决方案，并继而实现技术本身的升级迭代。比如，自动驾驶建立在先进传感器、5G/6G 通信、高性能边缘计算和人工智能技术组合的基础上。此外，具有多业务的综合型数字平台积累的数字能力更加通用，能够让社会获得多种连接和数字服务。数字平台和初创企业的互动具有特别的意义，两类企业共同构成产业创新生态。初创企业往往通过解决经济、社会、生态领域的局部痛点问题取得成功，而综合平台则在选择与匹配机会、技术、人力资源以及创业的金融资源等方面发挥着重要的作用。

因此，通过开发新的应用场景，数字平台是网络空间的搭建者和拓展者。平台及其主导的产业创新生态共同推动数字转型。从技术的视角看，数字转型是一个多维度的现象，它将实体硬件与虚拟软件和服务有效结合起来。因而，作为数字能力和网络空间的构建者，平台及其主导的产业创新生态包括软硬件创新生态的协同。

网络空间发展和数字能力积累为可持续性提供了巨大的机遇。通过感知、连接、数据采集、挖掘和共享，不断增长的高性能算力和驱动的数据分析，持续提高网络空间的控制和优化能力，最终实现包括机器人在内的自动化设备对物理世界的干预，使人类能够不断监测、评估、重组和优化经济和社会活动。因而，数字化转型提供了一个强大的数字能力解决方案空间。图 1.1 列出了数字能力和转型能力的匹配关系。

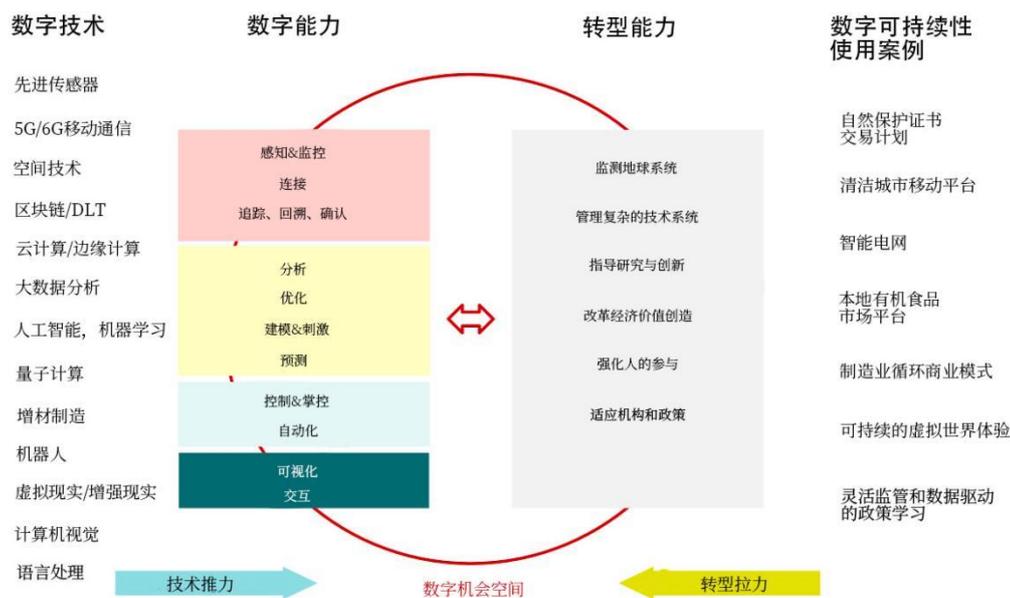


图 1.1 可持续性数字机会空间的说明图示

关键在于：如何利用数字机会空间应对可持续性面临的挑战？数字化转型及其技术并不局限于特定的使用案例和部门。与 19 世纪末电力的引入等历史先例相一致，数字化转型代表了通用目的技术（GPT）的新阶段，为广泛推动整个人类文明的技术创新和社会经济发展奠定了基础。数字技术用途广泛，无处不在，其影响几乎扩散到人类生活的每一个方面。

数字化转型带来了经济成本持续下降的新模式。根据著名的计算性能摩尔定律，技术进步会不断压缩硬件成本。一旦建立了基础设施和设备的物理基础，并涵盖软件开发的初始成本，数字能力和外延的任何扩展都可以以非常低的甚至接近零的边际成本实现。这与传统制造模式存在根本性差别，它为在用户群和应用领域内扩展数字服务以及在应用领域和部门之间的转移开辟了迄今尚未看到的机会。

这些方面对可持续性政策制定的影响是直接的。我们需要增加绿色数字技术的可获得性和可及性，不断积累数字能力。同时，通过广泛介绍和宣传可持续性数字解决方案的应用案例，应用数字能力加速转型进程。

因此，我们的任务是双重的：

- **技术推力**。持续的技术进步与创新正在提高数字技术的性能，也正在增强数字工具箱的多元化和功能性。这种潜力需要被利用并引导到应对紧迫的可持续性挑战上。这项任务的部分内容是减少数字技术本身在能源需求、温室气体排放和电子垃圾方面的环境足迹（见第 2 章）。同时，为避免人工智能给人类带来的风险，在某些领域限制技术发展也很重要，比如在多模式能力方面。<sup>3</sup>
- **转型拉力**。从转型的角度来看，成功的应用案例需要在更大范围内扩散，为经济社会系统的变革增加关键动力。可持续转型能力的概念有助于我们系统搜索和找寻从数字能力中获益的机会，促进技术和解决方案的可持续部署和商业化。

这一小节为描述第 1.1 节中提到的数字技术与可持续性转型能力之间的关系提供了一个通用的框架（例如，在不确定和复杂情况下如何更好地决策）。它强调如何塑造技术、经济和社会可持续发展所需的复杂的技术-经济-社会创新系统一般原则。这为下一节勾勒政策制定的总体框架，以及在后面几章更详细地讨论可持续城市与适应气候变化奠定基础。

## 1.4 数字技术驱动可持续发展：中国的实践与愿景

2015 年之后，通过发展数字经济实现可持续发展，成为中国的战略选择。本小节基于 2200 家中国数字骨干企业技术合作关系的数据量化分析，研究数字技术的创新应用如何通过构筑数字能力驱动可持续发展经济、生态和社会目标的实现。

### 1.4.1 中国数字经济特征

从 2200 家数字骨干企业的核心业务分类看，中国数字企业广泛分布在 20 个业务领域。其中，企业技术集成与方案、智慧商业和零售两个业务领域的企业数占比最高，分别为 17.20%和 10.31%。智能机器人、智能硬件、科技金融、智慧医疗、智能制造领域企业数占比相对较高，分别为 8.39%、8.06%、7.39%、7.27%、6.26%。<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> 见 <https://europepmc.org/article/med/26185241>; <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3514094.3534146>.

<sup>4</sup> 数据来源：中国工程院新一代人工智能发展战略研究所 中国智能（数字）经济数据库，2022 年。

这些企业以若干居主导地位的平台节点为中心。2021 年，在中国数字经济价值网络图（图 1.2）中，价值网络度数中心度最高的 10% 节点拥有网络中约 70% 的链接。<sup>5</sup> 包括华为、百度、阿里巴巴、腾讯、京东、科大讯飞和商汤科技在内的创新型平台企业及其主导的产业创新生态，是中国数字经济发展的主导者。平台与研究型大学、科研机构、科技型中小企业和新创企业、政府和其他组织共同组成产业创新生态，是数字技术和能力积累的载体。

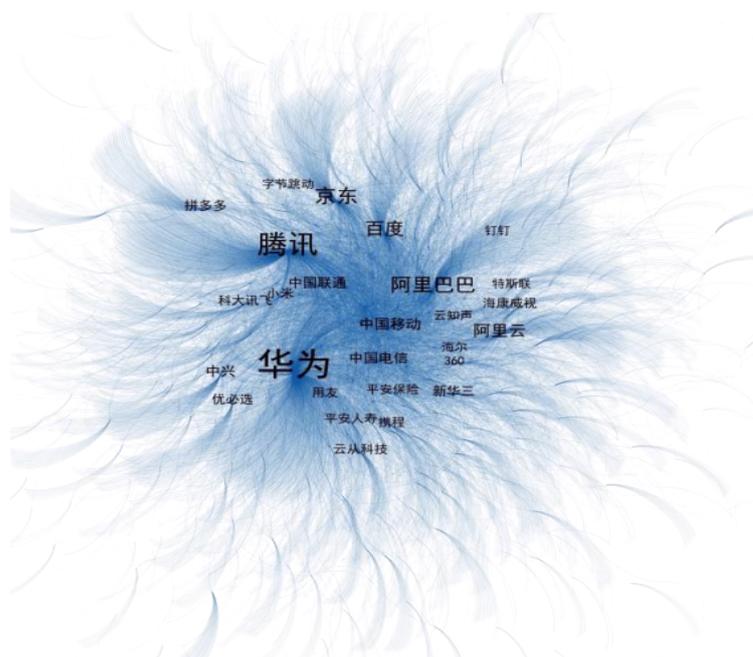


图 1.2 2021 年中国数字经济价值网络图

#### 1.4.2 技术体系和应用领域

数字技术是一个复杂技术体系，包括大数据和云计算、物联网、智能机器人、智能推荐、5G、区块链、语音识别、虚拟 / 增加现实、AI 芯片、计算机视觉、自然语言处理、生物识别、空间技术、光电技术、自动驾驶、人机交互和知识图谱在内的 17 种关键技术。

在中国，数字技术被广泛应用于 19 个应用领域，包括企业智能管理、智能营销与新零售、科技金融、智慧城市、智能医疗、新媒体和数字内容、智能制

---

<sup>5</sup> 同上。

造、智能教育、智能交通、网络安全、智能物流、智慧文旅、智能政务、智慧能源、智能硬件、智能网联汽车、智能家居、智慧农业和智能安防。

对 2021 年中国数字经济技术应用复杂度的测算结果看（附录 1），知识图谱、区块链、人机交互、自然语言处理和智能推荐，是技术应用复杂度排名前五的关键数字技术。对应用领域技术体系复杂度测算的结果表明，智能制造、智能家居、智能营销、新零售、智能硬件和企业智能管理是技术复杂度排名前六的应用领域。无论是 17 种技术还是 19 种应用领域之间的技术复杂度差异不大，说明数字技术具有明显的通用目的技术特征。

### 1.4.3 数字技术在经济领域的创新应用

数字技术在经济领域的应用率先在消费互联网形成规模化，然后扩展到工业互联网领域。2016 年以来，消费互联网的升级和网络空间产业生态向中小城市和农村地区的下移，在带动第三产业发展的同时，辐射第二产业的转型升级。

新一代信息技术的创新应用在消费互联网领域催生交易平台主导的网络空间产业生态。交易平台的发展产生了实时在线、可共享和交易的海量数据。数据生态的形成进一步引致算法、算力和区块链技术的创新和应用，推动包括数字技术体系的发展和应用领域的拓展。

中国消费互联网领域网络空间产业生态成熟于包括北京、上海、杭州、重庆和深圳在内的大都市。2016 年以来，这一趋势已经向中小城市和农村地区下移。此外，新型平台推动了电子商务在衣食住行在内的诸多垂直领域发展，不仅消费者享受到更加便捷的服务，而且为中低收入人群尤其是农村居民创造了大量的就业和创业机会。

工业互联网是新一代信息技术和工业经济深度融合的新型基础设施，通过产业链和价值链的万物互联，构造出全新的制造、服务和价值创造体系。人工智能，尤其是工业人工智能的创新应用，是产业互联网发展的核心引擎。生产智能化包括智能工厂、智能生产线和智能装备的开发和生产。从人工智能和制造业融合发展的现状看，2021 年 2200 家骨干数字企业与制造业 32 个行业的技术合作关系中，排名前五的均为装备制造业。智能装备是人工智能和制造业深度融合发展的前沿。截止 2023 年 1 月，世界经济论坛遴选出的全球 132 家灯塔

工厂中，中国境内灯塔工厂共有 50 家。<sup>6</sup> 从企业数字化和智能化转型实践看，人工智能和制造业的深度融合发展能够持续提升全要素生产率，将使中国经济步入中高增长阶段。

#### 1.4.4 数字技术在社会领域的应用

数字技术在社会领域的应用主要是解决中国工业化和城市化发展中出现的“社会痛点”问题。其中，运用数字技术解决城市问题和实现脱贫是数字技术在社会领域应用的成功范例。

##### **智慧城市**

进入 21 世纪，中国城市化进入快速发展阶段。城市的快速发展同时带来了城市的包括交通、安全、污染、上学难和就医难在内的“社会痛点”问题。智能安防和智慧城市成为数字技术应用的重要场景。2009 年以来，边缘计算和云计算体系的结合催生了城市大脑，为智慧城市建设和发展奠定了数字能力。第三章会详细阐述智慧城市这一话题。

##### **数字扶贫**

2016 年，中国政府制定和发布《网络扶贫行动计划》，要求实施网络扶贫五大工程：网络覆盖、农村电商、网络扶智、信息服务和网络公益，充分发挥数字技术在助推脱贫攻坚中的重要作用，实现精准扶贫、精准脱贫。经过多年的努力，中国实现 7000 多万农村贫困人口的脱贫。其中，数字技术的创新应用在脱贫过程中发挥了巨大作用。<sup>7</sup>

到 2020 年，中国网络扶贫取得的主要成果是：贫困地区网络全覆盖，贫困村通光纤比例由实施电信普遍服务之前不到 70% 提高到现在的 98%；电子商务进农村实现对 832 个贫困县全覆盖，全国农村网络零售额由 2014 年的 1800 亿元，增长到 2019 年的 1.7 万亿元，规模扩大了 8.4 倍；中小学（含教学点）互联网接入率从 2016 年底的 79.2% 上升到 2020 年 8 月的 98.7%，推动了远程教育的发展，使我们最偏远的农村得到和城市一样的高水平教育；远程医疗实现国家级

---

<sup>6</sup> <https://initiatives.weforum.org/global-lighthouse-network/home>

<sup>7</sup> [http://www.xinhuanet.com/politics/2015-12/03/c\\_128494323.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/2015-12/03/c_128494323.htm)

贫困县县级医院全覆盖，全国行政村基础金融服务覆盖率达 99.2%。<sup>8</sup>

### 1.5 利用数字化转型机会空间：消除数字技术与可持续发展间的战略差距

上一节揭示了通过部署数字技术和利用数字能力实现经济和社会的多方面转型来促进可持续发展的巨大机会。为了充分把握这一机遇，我们必须更好地了解如何实施数字解决方案，探索传播渠道的多样性。

起点是可期的，因为很多数字能力已经显现。数字技术和解决方案已经在人们的生活中无处不在，提供了多样化的应用，并日益塑造着这个世界。通过研发，促进商业创新和开辟新市场，许多参与者正在推动技术边界的扩张。成功利用这些参与者的创造力和相关市场的动力将是至关重要的。然而，数字化转型还远远没有成为一种可以自我实现的可持续性承诺。

技术创新、商业模式和应用案例仍然为利润最大化的短视模式服务，而这往往以资源消耗和环境破坏为代价，甚至永久依赖普遍存在的不可持续的化石路径。在数字技术的潜力与实际的对可持续性转型的贡献之间仍然存在战略差距。回顾数字化作为一种通用目的技术（GPT）的性质，任何不利的影​​响都与数字技术本身的内在性质无关，而是完全取决于应用领域和应用案例的经济社会政治框架。这不仅适用于数字化的生态效应，而且在可持续发展的社会方面也可以发现矛盾的地方，如性别问题。虽然数字化可以改善妇女的生活，例如，通过农村地区的电子商务，但人工智能模型有可能具有扭曲的和性别偏见的数据基础，这样的风险越来越大，导致这种解决方案存在结果缺陷、歧视、不平等等问题（专栏 1.1）。为确保数据的合理使用，政府需要获取有关数据偏见的知识，系统学习，并遵守国际准则（伯克利-哈斯公平、性别和领导力中心，2020 年）。

---

<sup>8</sup> [https://www.gov.cn/xinwen/2020-11/06/content\\_5558468.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2020-11/06/content_5558468.htm)

## 专栏 1.1 人工智能与偏见

人工智能（AI）是“一个基于机器的系统，它能够通过输出来影响环境……实现一组特定的目标”（UNESCO、OECD 和 IDB，2022）。这个定义阐述了人工智能的优势，同时也揭示了它的弱点。算法使用数据来做出可靠的预测和看似中立的决定。然而，算法的数据集来自现有数据。因此，更多时候，这些数据不是中立的，而是具有偏见的特征。偏见是对某件事情的无理偏好，而且往往是在无意识中发生的。从数据收集到数据标记，再到分析、评估和解释——在数据处理周期的每个阶段都能发现偏见（世界经济论坛，2022）。例如，性别偏见可以在无数的例子和不同的应用领域中发现。当偏见在训练数据时被写入算法，那就变得与人工智能和机器学习十分相关。这有一个例子，“无用数据导致无用结果”，即输入数据所传达的质量和价值在输出中重现，这可能通过直接和间接的歧视对人类造成伤害，比如在健康、招聘或翻译软件方面（麦肯锡，2021）。对各行业的 133 个人工智能系统进行的一项全球分析发现，44.2% 的系统表现出性别偏见（联合国妇女署，2023）。人工智能系统如 ChatGPT 的使用日益增多，有可能使偏见的再现成为一个越来越普遍的问题。

使人工智能系统促进性别平等的一个主要挑战是现有的性别数据差距。联合国妇女署在 2022 年指出，只有 42% 的性别数据用于监测可持续发展目标的特定性别层面，或者可以获得。性别数据差距需要 22 年才能消除（Encarnacion 等人，2022）。为了使女孩和妇女的多样性在数据中得到体现和代表，并以此来解决训练数据中的基本偏见，收集按性别分类的数据是不可少的。此外，最好考虑新形式的数据来源以确保多样化和多学科的团队，并将性别平等倡导者和其他民间社会团体纳入发展进程中（联合国妇女署，2018 年）。

数字化转型需要政治框架和指导，来为技术创新和部署指明方向。这既要利用迄今尚未开发的潜在利益，也要限制当下存在的不利影响。

因此，需要一个整体的政策方法来解决技术实施和部署周期的各个阶段的战略差距。这种方法需要考虑利益相关者在复杂的社会技术系统中不同的角色和责任。以创新和有利于商业的框架为目标，利用私营企业和市场活力，需要对首要的生态和社会价值以及引导经济活动走向脱碳和资源效率的实际激励措施进行明确的指导，这阐明了（公共）机构的作用和有效性，并强调了政治在执行适当协调机制方面的责任。

以下三个核心板块对于努力实现数字驱动的可持续发展转型的政策举措至关重要（图 1.3）：

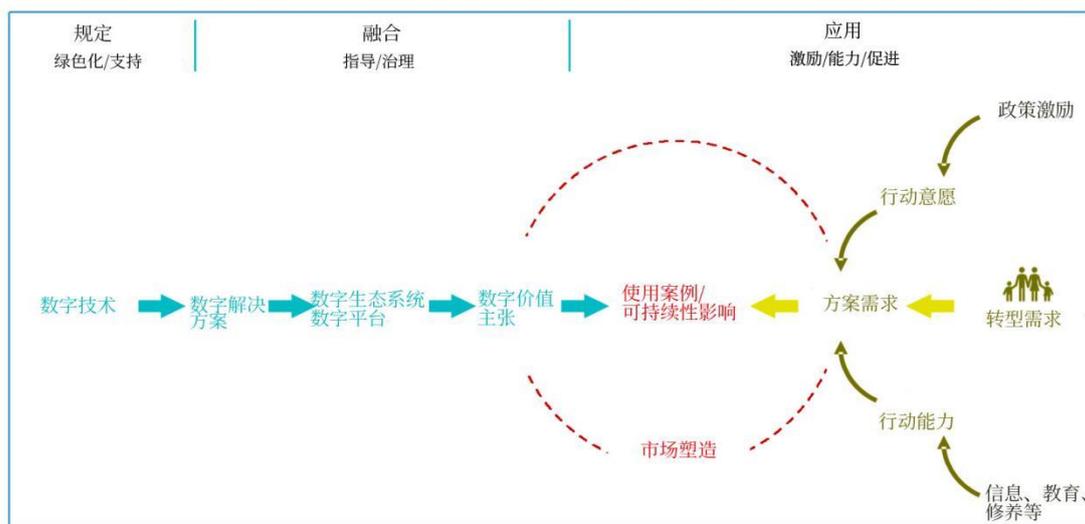


图 1.3 数字化可持续性战略政策空间的说明图示

### 促进绿色技术发展

考虑到数字技术越来越普遍，技术创新的势头也越来越强劲（见第 1.3 节），主要任务是减少数字技术的环境足迹。因此，数字化部门的“绿色化”和脱碳必须成为技术供应早期阶段的政策重点，包括减少资源使用和加强数字设备的循环利用。

相应地，在提高生态环境质量要求方面，学术研究机构、民间和私人的研发资金将会提供很大的帮助。在这种情况下，早期阶段的技术发展将受益于技术商业化阶段就存在的对可持续性的适当激励，如对数据中心和电信基础设施的清洁能源供应的监管，以及设备的适当再利用和回收（见第 2 章）。

### 引导和管理可持续的数字价值主张

企业、个人和平台参与者在整合数字技术和积累数字能力方面发挥着重要作用，例如在数字生态系统内。他们制定了获取解决方案的规则和边界，并确定了享受所提供的数字价值主张的条件。

通常情况下，这些参与者的商业利益和普遍的市场特征决定了结果，同样，这些结果往往还不是以可持续性目标为导向的。因此，在这个阶段，政策和有效的市场监督机构可以在指导和管理所提供的范围和规则方面发挥重要作用，例如，在生态标准、公平、性别平等、竞争中的公平竞争环境、互操作性、包

容性、隐私保护和消费者保护等方面。这需要一个整体的制度设计方案，以及各政府机构之间的政策协调。

### **壮大市场发展势头，强化可持续发展转型动力**

同时，个人参与和市场力量代表了可持续性转型的强大动力。因此，各种私人 and 公共利益相关者需要阐明他们对实现具有可持续性影响的数字使用案例日益增长的需求，这引发了技术创新、解决方案的开发，以及旨在抓住不断增长的绿色解决方案市场的参与者的商业参与。

因此，政策应提高利益相关者的行动意愿，为可持续的使用案例提供经济和监管激励。此外，政策应加强利益相关者的行动能力，例如，提高个人素养、教育、消除或减轻障碍、促进自我组织与社交等。

此外，政策制定的一个非常重要的作用是提供补充性的市场框架和市场激励措施，以建立和发展部署可持续数字解决方案的自我维持的商业动力（例如，使用排放监管、温室气体交易计划或资源定价的通用战略）。同样重要的是，要打消与不可持续的结果相关的数字价值主张，如促进温室气体密集型消费或化石燃料的开采。

以下各章会详细讨论数字化部门绿色化、智慧城市和气候变化适应领域的战略差距和相关政策要求。其中，将重点关注以下几个方面：1）通过数字解决方案实现治理创新和相关的政策能力增长的机会，即数字化作为政策改革的促进因素和驱动力；2）政治在创造和塑造市场方面的关键作用，从而为私营商业模式创新和创业打下基础；3）减缓气候变化、资源管理、自然保护等总体环境政策框架的重要性，如强制增长可再生能源（RES），作为实现数据中心脱碳能源供应的关键，或者实施适当的二氧化碳和资源定价，以更好地将有害的环境外部因素与个人合理的商业行动联系起来；4）政府主导的旨在保护环境的数字项目的贡献，这些项目是数字能力积累的驱动力，因此可以在相邻的数字解决方案领域引发繁衍和增长效应（参考专栏 1.2 太湖污染治理的案例研究）。

## 1.6 总结

第一章提供了一个反映战略差距的概念框架、相关的政策方法以及选定的主要政策，以利用数字化的变革力量应对可持续性挑战。数字化进程为理解、监测和管理我们的社会经济系统提供了新的能力，由此扩大了社会和经济中迫切需要的可持续性转型的能力。基于与数据相关的以及个人、公司和机构之间越来越多的虚拟互动，一种新的所谓社会经济网络空间正在出现，它为商业和政治行动定义了具体条件。网络空间有一个突出的特点，那就是，作为一个动

### 专栏 1.2 太湖污染管控和无锡的物联网产业集群

太湖经济区是中国经济最发达的地区之一。自 2005 年以来，工业化和人口密度的持续增加显然给太湖的生态系统带来了压力。2007 年 5 月 29 日，由太湖水污染引起的蓝藻污染事件导致无锡自来水污染，生活用水和饮用水严重短缺。解决太湖污染问题的关键是采用物联网技术，开发基于多源数据的蓝藻监测和预警系统，这已经显示出无锡发展基于物联网的数字经济的重要机遇。

2009 年，依托国家传感网工程技术研究中心、上海微系统与信息技术研究所，中国科学院与无锡市政府联合成立了无锡物联网产业研究院和无锡高新区微纳传感网工程技术研究开发中心，支持太湖污染治理的物联网技术研发。随着污染治理的成功实施，2012 年，无锡物联网从业人员突破 10 万人；2018 年，无锡正式主导中国物联网标准；2021 年，无锡物联网集群入选并获批国家先进制造业集群；2022 年 12 月，无锡物联网企业总数突破 4000 家。

态的经济创新生态系统，它以技术性能不断增长的平台为中心，正在推动商业模式创新，激发创业动力。同时，这些动力必须与可持续发展的总体目标保持一致，这就要求在前瞻性防护和指导性市场框架（事前监管）以及减轻对不良发展的反应（事后监管）方面做出有效的决策。

以下各章将详细阐述可持续发展的数字机会空间与实现这种转变的相关战略差距和政策要求之间的相互作用。本报告将重点关注应对气候变化和减少温室气体排放的迫切需求。作为世界第二大经济体、温室气体排放量最高、人口几乎最多的国家，中国既承担全球责任，也拥有国家需求，即将其经济发展转向依靠无碳的可再生资源，并最终实现整个社会和经济的脱碳。

在此背景下，本报告重点在于可持续城市（第 3 章）和气候变化适应（第 4 章）这两个主要使用案例，它们代表着复杂且具有挑战性的全球转型领域，将广泛受益于创新的数字解决方案的贡献。然而，作为一个基本的先决条件，任何数字解决方案和基础设施的环境足迹都必须得到最小化，以防止不良的回弹

效应，保护数字技术部署所取得的生态效益。作为后续讨论的基准，第 2 章将提供确保可持续和气候友好型数字化的见解和建议。

## 2. 数字化部门的绿色化转型发展：加快数字化，促进绿色化

### 2.1 引言

当前，可持续发展已成为国际共识，围绕低碳发展的经济社会变革已然开启。在联合国《2030 年可持续发展议程》的指引下，全球已有超过 130 个国家和地区承诺碳达峰或碳中和，释放出强烈的绿色低碳转型信号。

随着人类社会步入数字时代，引发广泛而深刻的经济社会系统性变革，催生新的生产方式、生活方式、思维模式。数字化部门的发展，在促进绿色技术创新、提高绿色经济效率、实现节能减排降碳等几乎所有领域具有积极作用，并且成为绿色转型升级的驱动力之一。同时，用于信息和通信技术（ICT）设备制造的原材料和稀土开采对人类、动物和环境造成了巨大的影响。冶金过程中产生的有毒废气（二氧化硫、重金属）造成的空气污染、稀土元素生产过程中的废水处理残留物、放射性污染和沙漠化对生态环境均产生了诸多负面影响，而稀土开采又是数字基础设施生产的需要。此外，数字化部门的快速发展加速了能源消耗，且该趋势将继续快速发展。

数字化部门与经济绿色转型的联系体现在三个方面：1）数字产业通过整条价值链直接减少碳排放；2）数字产业助力技术与社会创新以推动绿色化（绿色发展的间接效益）；3）数字化部门的绿色化具有回弹效应，这意味着通过提高能源效率所节约的能源，会部分或完全被扩大的能源消耗所抵消。然而，实现数字化减少整体能源消耗和资源使用的愿景可能仍将面临挑战，因为数字化在提高效率的同时，可能增加了能源/资源的消耗，这就会抵消效率上的提高。

国际社会已意识到数字化为绿色化激活的新机遇，例如欧盟委员会发布“绿色新政”，并将绿色化和数字化双轨转型作为未来 5 年的工作重点，并且在德国等欧洲国家已经涌现了一些实践案例（见附录 2）。德勤和全球电子可持续发展推进协会（GeSI）报告显示，数字技术对联合国 169 个可持续发展子目标中的 60% 产生直接影响，未来十年内数字技术将通过赋能其他行业减少全球 20% 碳排放量。<sup>9</sup>全球气候行动峰会《指数级气候行动路线图》显示，数字技

---

<sup>9</sup> 全球可持续发展倡议（GeSI），德勤。有目的的数字化：实现更智能的 2030 议程[EB/OL]。[2023-02-02]. <https://gesi.org>.

术在各领域的应用能够帮助全球碳排放减少 15%-20% (Rockström and Figueres, 2018)。

对“数字经济”“数字化部门”和“数字基础设施”这些术语标准化定义的欠缺，为全球统计人员带来重大挑战，阻碍了准确的测量和分析。根据美国经济分析局的数据，数字经济活动由数字基础设施（硬件和软件）、电子商务（B to B 和 B to C）和有价数字服务组成，包括电信服务、互联网和数据服务、云服务等。SDIA（可持续数字基础设施联盟）对数字基础设施的定义如下：

“提供数字商品、产品和服务所需的全部物理和基于软件的基础设施。这包括数据中心、光纤基础设施、服务器硬件、人员、IT 虚拟化和基础设施软件、操作系统等。”然而，关键在于，数字基础设施不仅包括处理数据的数据中心，还包括数据流经的网络。这些网络在数字基础设施的总体框架中发挥着重要的作用。在本章中，术语“数字化部门”和“ICT 产业”在中国的语境下交替使用。根据中国国家统计局发布的《中国国民经济行业分类与代码》（GB/T 4754-2021），数字产业包括“C39 计算机、通信设备和其他电子设备制造”、“I64 互联网及相关服务”和“I65 软件和信息技术服务”等子行业。数字化部门涵盖各种要素，包括作为数字化设施的智能和高效的计算中心。数字化公司将绿色发展作为其运营的一个基本方面，而数字化服务通过算法优化为减少能源消耗作出贡献。通过向各行业和部门提供数据分析和数字化转型服务，数字化部门在赋能绿色化转型方面发挥了重要作用。本章重点介绍 ICT 领域的绿色化战略和数字化部门促进可持续发展的方式，并提供相关的政策建议。

## 2.2 发展现状及困境

### 2.2.1 数字化部门的绿色发展现状

中国数字经济发展取得新突破。根据中国信息通信研究院（CAICT）的数据，2021 年，数字经济规模达到 45.5 万亿元，同比名义增长 16.2%，高于同期 GDP 名义增速 3.4 个百分点，占 GDP 比重达到 39.8%，其中数字产业化增加值规模达 8.4 万亿元，比上年增长 11.9%，占 GDP 比重为 7.3%<sup>10</sup>。

数字经济的高速发展引致了数字化需求和数字产业化部门的高速增长，与

---

<sup>10</sup> CAICT. China Digital Economy Development Report (2022) [EB/OL]. [2023-02-02].

之相对应，数字产业化部门的碳排放量亦高速增长。据统计，2012-2017 年间，中国数字化部门包括上述提到的细分行业的碳排放总量涨幅为 61%，其涨幅为所有经济部门之最，其中，互联网、软件、电信等 ICT 服务业的快速发展是影响数字产业化部门碳排放量增长的主导因素。2017 年 ICT 制造业碳排放量约为 8166 万吨，占 ICT 产业碳排放总量的 59%，较 2012 年排放量增长了 40.6%，2017 年 ICT 服务业碳排放量约为 5595 万吨，占 ICT 产业碳排放总量的 41%，与 2012 年相比 ICT 服务业碳排放量涨幅高达 106.0%，增长幅度远超 ICT 制造业<sup>11</sup>。总之，随着数字产业化部门对社会经济发展的支撑作用的不断强化，ICT 产业碳排放快速增长趋势短期内将延续，同时，随着 1) 数字产业化部门自身节能降碳技术进步，2) 中国能源结构调整优化，3) 非化石能源消费比重提高，ICT 产业碳排放中长期将呈下降趋势。

## 2.2.2 数字化部门与绿色发展的融合

### **数字基础设施：绿色升级压力巨大**

根据欧盟信息和通信技术部门发布的《能源和环境效率框架倡议》，信息和通信行业使用了近 10%的能源，释放了 4%的二氧化碳。中国的数字产业，尤其是数字基础设施建设，正处于绿色转型的初始阶段。数据中心、5G 基站等数字设施在节能减排方面面临越来越大的压力。目前，世界各国尚未制定统一的标准来监测和衡量数字技术带来的节能减排效果。减少碳排放量核算的高成本对客观有效地衡量数字基础设施建设和改造带来的节能减排效益提出了挑战。因此，我们很难直接凭借核算结果来评估和激励这些建设和改造项目。

数字基础设施领域的一个重要问题是公共和私人部门都缺乏透明度。这种缺乏透明度的现象渗透到各个方面，包括数据中心和软件，因此很难确定其能源消耗水平。为了在数字化过程中有效地实施有针对性且有意义的可持续性措施，就必须提高这些领域的透明度。一个潜在的方法是，系统地对不同类型的数字基础设施进行分类，如数据中心、网络和软件应用，并确定需要透明度和关键绩效指标的具体行动领域，以明确其可持续性。

### **数字化公司：面临更高的成本和更严的监管**

---

<sup>11</sup> CAITI. White Paper on Digital Carbon Neutrality [EB/OL]. [2023-02-02]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202112/P020211220632111694171.pdf>.

数字化公司目前正处于一个竞争激烈的经营环境，其特点主要有两个方面。首先，它们在绿色升级、研发绿色 ICT 产品和服务、实施低碳运营以及营销和推广工作中承担着巨大成本；其次，他们必须遵守国际碳税政策、绿色贸易壁垒和其他监管措施。<sup>12</sup>这些公司必须迅速适应碳达峰和碳中和背景下更严格的进/出口标准和生产/运营要求。此外，缺乏标准化的绿色产品认证和标签削弱了绿色产品市场的监管。因此，数字公司在管理其绿色产品方面面临困境，甚至主要互联网巨头公布的环境影响数字也缺乏可验证性。在这样一个混乱的环境中，消费者无法辨别哪些数字产品或服务是环保的。

### **数字化服务：强化社会共识，赋能绿色转型**

公共部门在监管、环境污染控制及其他方面发挥着关键作用。然而，困难在于准确衡量数字化服务为绿色 GDP 带来的贡献，这就阻碍了对绿色 ICT 产品、服务研发和社会支持的有效投资（见专栏 2.1）。反过来又对研发和融资提出了挑战。因此，与传统产品相比，绿色 ICT 产品和服务的定价往往相对较高。然而，由于社会对绿色消费概念的宣传有限，公众对绿色 ICT 产品和服务的认可度仍然很低。因此，消费者发现在考虑价格、质量和其他原因的情况下，做出明智的决定并积极选择绿色 ICT 产品和服务是很难的。

此外，软件在确定所部署的信息和通信技术的环境友好性方面起着重要作用。它直接影响能源消耗，并可能导致硬件的过早更换。因此，承认与软件有关的陈旧问题及其对环境的影响是至关重要的。

#### 专栏 2.1 术语定义

对于“绿色 ICT”、“绿色产品”、“低碳”、“绿色产品”、“绿色数据中心”、“绿色电力”和“清洁能源”等术语，并没有普遍认同的定义。在本报告中，绿色/可持续 ICT 和绿色产品这些术语是指消费品、数字服务和 IT 解决方案，旨在减少其整个生命周期的环境影响，包括生产、使用和处置。其目的是尽量减少能源和资源的消耗。

术语“清洁能源”或“绿色电力”是指不排放或只排放极少量污染物的能源，从而有助于节约能源，减少环境污染，并将对生态的破坏降到最低。专家们共同定义的清洁能源主要包括太阳能、生物能源、氢能、风能、海洋能、生物能源、氢能、风能、海洋能、地热能和水电。原则上，可持续的数字化努力减少与数字化部门相关的环境影响和能源消耗。努力的重点是最大限度地提高数字基础设施的效率，并尽可能地减少其对环境的总体影响。

<sup>12</sup> 绿色贸易壁垒也被称为生态壁垒。它们指的是进口国为保护自然资源、生态环境和人类及动物健康而采取的措施。

在全球范围内，数字基础设施和数据流量的快速增长为监管其环境影响带来了挑战。重要的是，探索新的技术解决方案，并通过研究广泛的环境指标形成一个数字经济的整体视角。硬件设备的生产周期应该是智能且环保的，应从最初阶段就考虑产品的寿命和可回收性。而软件应用程序应该以节能的方式运行。数字经济与其他众多行业相互关联，是经济和社会生态转型的核心。为了有效解决数字化中的可持续性问题，必须提高数字基础设施各方面的透明度。追究数字公司的责任，要求他们及时、全面地评估和报告其环境影响是十分必要的。为了了解和减轻与数字经济相关的环境影响，必须了解具体的电力消耗、温室气体排放以及由此产生的其他环境影响。

## 2.3 数字领域的绿色发展路径

### 2.3.1 数字基础设施和设备

#### 现状

2022年，中国的电信行业经历了大幅增长，其业务收入达到1.58万亿元人民币，与上一年相比增长了8%。值得注意的是，数据中心、云计算、大数据和物联网（IoT）等新兴行业经历了快速发展，在2022年贡献了3072亿元人民币的总业务收入。这一数字与上一年相比，增长率高达32.4%。<sup>13</sup>此外，中国的移动通信基础设施也出现了大幅扩张。到2022年底，全国共有1083万个移动通信基站，其中5G基站占213.2万个，占总数的21.3%，比上一年年底明显增加了7个百分点。此外，中国的电子信息制造业也呈现出显著的业绩。2022年1月至11月，规模以上电子信息制造业增加值同比增长8.3%，分别超过工业和高科技制造业4.5和0.3个百分点。

随着数字基础设施和设施的迅速扩张，减少碳排放的压力也相应增加。对废弃的数字基础设施和设备的材料处理不当，会对土壤和周边环境造成不利影响。此外，预计到2035年，中国的数据中心和5G基站的总耗电量将达到全国总耗电量的5%-7%，而它们的总碳排放量占中国总碳排放量的2%-4%。考虑到数据中心和5G基站的平均使用寿命约为10年，加上其他因素，数字基础设施内

---

<sup>13</sup> 工信部。2022年电信业统计公报[EB/OL]. [2023-02-02].  
[http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/02/content\\_5739680.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2023-02/02/content_5739680.htm).

部减少碳排放的“滞后效应”对中国实现碳排放目标构成重大挑战。

- **5G 基站。**截至 2022 年 9 月底，全球 5G 用户达到 8.53 亿，同比增长 113.5%，在移动用户中渗透率为 10.5%。2022 年 11 月底，中国累计开通 5G 基站总数达 228.7 万个，占全球 5G 基站总数的 60%以上。与 4G 基站相比，5G 基站有明显的改进。5G 基站的带宽增加了 5 倍多，通道数量增加了 8 倍，发射功率增加了 6 倍多。因此，5G 基站的峰值功耗约为 4G 基站的 3 至 4 倍。目前，5G 网络的能源消耗仍然很高。2021 年，中国三大通信运营商的能源消耗总量为 1369 万吨标准煤，其中电力消耗为 1053 亿千瓦时。例如，中国移动的基站耗电量约占其总耗电量的 65%，其中 5G 基站约占其整体基站数的 12%。此外，随着 5G 基站的部署继续迅速扩大，以及预计到 2030 年启动 6G 建设，预计能源消耗将在很长一段时间内上升。
- **数据中心。**2018 年，数据中心约占全球能源消耗的 1%<sup>14</sup>。然而，2021 年全球计算设备算力总规模达到 615EFlops，增速达到 44%。据预测，到 2030 年，全球算力规模将达到 56ZFlops，平均年增速达到 65%。2021 年，中国的计算设备对总计算能力的贡献显著，达到 202EFlops，全球占比约为 33%，表现出超过 50%的显著增长率，高于全球增速。在能源消耗方面，2020 年，中国数据中心能耗总量为 939 亿千瓦时，碳排放量为 6464 万吨，预计到 2030 年，中国数据中心能耗总量将达到 3800 亿千瓦时左右，碳排放增长率将超过 300%<sup>15</sup>。国内数据中心的可再生能源利用率相对较低，普遍在 30% 以下。这与《欧洲气候中立数据中心公约》设定的宏伟目标相差甚远，该公约的目标是到 2025 年可再生能源利用率达到 75%，到 2030 年达到 100%。除了能源消耗和碳排放，解决其他问题也至关重要，如卤化冷却液的使用、电子垃圾管理和其他相关的环境问题。
- **芯片制造。**根据中国半导体行业协会提供的统计数据，2021 年中国集成电路（IC）行业销售额达到人民币 10548.3 亿元，同比增长 18.2%。其中，制造业销售额 3176.3 亿元，同比大幅增长 24.1%。未来，在制造业智能化升级浪潮的推动下，中国芯片市场规模有望继续扩大。在 IC 制造领域，由于所使用的原材料和辅助材料种类繁多，以及所涉及的设备种类繁多，因

<sup>14</sup> 参阅“重新校准全球数据中心能源使用估计”

<sup>15</sup> 开放数据中心委员会. 数据中心算力碳效白皮书

此对生产和环境提出了严格的要求。IC 制造的生产过程会产生废水、废气、噪音和固体废物，对环境造成不利影响。重要的是要解决这些问题，并采取适当的措施来减轻与集成电路生产相关的负面环境影响。

- **光伏器件制造。**预计 2022 年新增太阳能发电装机容量为 87.41GW，同比增长 60.3%。基于市场上标准的 25 年使用寿命，几年后废弃的光伏组件数量将非常大。PV 装置制造过程产生负面的环境影响，包括由于在硅原材料的生产过程中产生的有毒液体 SiCl<sub>4</sub>、来自公司的废气和废水不加选择地排放、废弃组件的处理和光污染而导致的环境危害。生产技术、监管力度、经济效益等相关因素决定了负面影响的程度。

### **未来发展路径**

**推广应用绿色节能技术。**为了提高资源效率并降低通信网络设施的能耗，须推动 5G 网络技术解决方案的创新。包括网络技术、智能系统、网络能效评估和产品生命周期评估工具的进步。绿色数据中心已经成功地采用了尖端的液体冷却技术，如全液体冷却、冷板液体冷却、热管液体冷却和液体浸没冷却。这些技术能够在数据中心实施全面的液体冷却解决方案，将初级和次级侧的液体冷却循环与冷却剂分配装置相结合。在电子设备制造领域，大力鼓励企业探索轻量化、模块化和智能化设计技术的突破。此外，应优先使用无毒、无害、节能、易回收的新材料。专栏 2.2 包含了绿色节能技术的一些应用实例。

#### **专栏 2.2 绿色节能技术案例选编**

##### **通信基站的节能改造**

以通信网络三大运营商为例，中国移动于 2007 年启动绿色行动计划，有序推进通信基站节能改造，积极开展绿色 5G、家庭绿色上网等行动。中国移动提出以绿色网络架构和节能网络技术推动绿色网络发展，实现“碳达峰、碳中和”目标。中国电信从 2007 年开始开展节能减排工作，并在十三五期间完成了 FTTH 光接入网的改造升级，实现了单位信息流量能耗下降 60%；与中兴通讯联合开发 5G 基站综合节能解决方案，试点区域日均能耗降低 17%；95%以上的自建基站采用自主研发的节能技术，年能耗降低近 15%。中国联通通过推进极简建站和潮汐节能，聚焦提升清洁能源消费比重，打造 4G/5G 协同智慧节能管理平台，提供精准的能耗判断和多样化的节能方案服务，有效实现多制式智能网络协同和个性化差异化节能调度。（准确的利用率和恢复数据暂时无法获得，持续跟踪。）

##### **数据中心的绿色发展**

首创绿色数据中心通过模式创新和技术创新，提供多元化解方案。例如，中国

联通浙江德清数据中心采用了分布式天然气能源模式，降低了电能消耗，综合能源利用效率高达 86%。腾讯上海青浦草营数据中心应用了微模块技术，实现了精准的制冷管理。通过使单个微模块的电源使用效率（PUE）达到 1.08 左右，数据中心的年 PUE 降低至 1.28，入选“2020 年度国家绿色数据中心”名单。通过部署世界上最大的液冷集群和使用绝缘冷却剂，阿里巴巴浙江云计算人和数据中心的 PUE 已降至 1.09<sup>16</sup>；该中心通过为磐久服务器配备倚天 710，采用最先进的 5nm 技术，使其单芯片可容纳高达 600 亿个晶体管，性能超越行业标杆 20%，能效比提升 50%以上。展望未来，数据中心需要通过设计、建设、运营、维护等全生命周期的完善管理，以及创新和先进技术的运用，进一步挖掘其绿色潜力<sup>17</sup>。

### 绿色数据中心法规

为支持绿色发展原则，实现碳达峰和碳中和目标，中国工业和信息化部于 2021 年 7 月发布了《新型数据中心发展三年行动计划（2021-2023）》。这是在数据中心行业内促进环境可持续发展实践的具体目标。该计划设定的主要目标之一是到 2021 年底将全国数据中心的平均利用率提高到 55%以上。此外，该计划旨在将新建大型数据中心的电力使用效率（PUE）降低到 1.35 以下。到 2023 年底，该计划进一步设想全国数据中心机架规模保持约 20%的年均增长率。这一增长将伴随着超过 60%的平均利用率的增长。为了优化能源效率，新建的大型数据中心的 PUE 目标是在全国范围内低于 1.3，在严寒地区低于 1.25。通过这些措施，中国旨在提高其数据中心基础设施的可持续性和能效，与其碳中和绿色发展目标保持一致。

但是，需要注意的是，在评估数据中心的整体优化和效率时，不应孤立地评估 PUE。根据测量时间和其他因素，PUE 值可能会有很大变化。要全面了解数据中心的基础设施效率，关键是要考虑其他指标，如可再生能源系数（ERF）、冷却效率比（CER）和用水效率（WUE）。只有在综合分析时，这些指标才能提供对数据中心效率的全面评估。仅仅依靠 PUE 作为衡量效率的标准，并不能完整准确地描述数据中心的基础设施效率。有关数据中心相关重要指标的更多详细信息，包括来自欧洲的案例研究，请参阅附录 2-欧洲典型实践案例。该资源为评估和提高数据中心运营效率提供了进一步的见解。

**提高绿色能源应用比例。**在气候条件较好的地区，鼓励实施小型风电、屋顶光伏等本地可再生能源。此外，还鼓励通过电力交易探索低成本绿色电力选择，如在绿色电力价格具有竞争力的地区由大规模用户直接购买。对于较小的数据中心，可以通过利用模块化氢燃料电池、太阳能电池板房屋和其他相关技术来优化能源供应模式。为降低 5G 基站建设能耗，我国积极推进 5G 基站共建共享。此外，该国还促进了与 5G 基础设施相关的绿色电力交易（见专栏 2.3），确保以更可持续的方式为这些基站和相关设施供电。

<sup>16</sup> <http://www.ke-hai.com/upfile/201405071006133496.PDF>

<sup>17</sup> <https://blogs.microsoft.com/blog/2020/01/16/microsoft-will-be-carbon-negative-by-2030>

### 专栏 2.3 通信基站共建共享与绿电交易

2020 年，在共享铁塔资源的基础上，中国共享共建 5G 基站数达 33 万个，占基站总量比例超过 45%，通过共建共享，基站能耗可减少 20%-30%，并有效节约土地、杆塔、管道、设备等资源投入，助力全社会节能减排。2021 年 1 月，新疆完成了首笔 5G 基站全绿电交易，基于新疆电力交易中心电力交易平台，中国联通乌鲁木齐市分公司运营的 490 座 5G 基站通过 3 个售电公司完成了 1 月份月度合同电量转让交易，共计达成全绿电交易电量 450 万千瓦时，为清洁能源消纳开拓了空间。

**强化行业标准作用和绿色生产监管。**行业标准、技术支撑、产业激励等，可以撬动信息与能源融合创新，落实能源终端可管可控，提升产品碳足迹管理。制定相关绿色生产经营管理办法，完善能耗和碳排放监测、统计、监管、审查、报告、披露等规章制度，形成全价值链绿色低碳发展管理体系，加大对 ICT 产品绿色生产的监管力度，对乱排污企业进行处罚。

**促进废弃电子设备产品的回收。**除了建立废弃电子产品和包装的强制回收清单和相关管理措施（见专栏 2.4）外，还需要进一步关注回收技术的研究和应用。具体而言，需要在废弃电子设备的拆卸、运输、回收和再利用方面取得进展，这可以由第三方专业机构有效开展。标准和技术规范的制定、工艺环境管理、智能化精细化拆解等，都要更加严格执行。应确保符合部件回收的标准要求。

### 专栏 2.4 电子设备的共享、利用和回收：平台的作用

闲鱼、爱回收、转转等平台是促进资源共享和二手交易的有效工具，可以更高效地利用资源，减少过度消耗，形成可持续发展模式。例如，闲鱼通过支持 20 多个业务类别，在 2021 年减少超过 174 万吨的碳排放，展示了其影响力<sup>18</sup>。随着废弃电子产品数量的不断增长，闲鱼和类似的平台为二手交易提供了空间，可以显著减少碳排放，减轻环境负担。根据爱回收、拍机堂、拍拍网的母公司 ATRENEW 的测算，2021 年这些平台的二手手机销量贡献了 30.41kg 的碳减排量，是同品牌新手机销量贡献的 72.6%；全平台二手手机销售贡献了 46.3692 万吨的碳减排量，相当于 230 万亩（15 亩=1 公顷）城市森林一年的碳汇效应。2021 年共回收和绿色处理废弃电子设备 22.3 万台，减少电子产品污染约 35.7 吨。

**开展电子设备产品碳足迹核算。**电子设备行业在管理碳资产时，必须综合考虑电子设备的资源消耗、效率、生命周期、可维修性、可回收性等因素，整合电子设备生产全过程的数据，评估电子设备产品在整个生命周期内产生的碳排放。推广产品碳标签需要对产品和服务所涉及的材料消耗、制造、运输、使

<sup>18</sup> 闲鱼碳减排报告：2021 年 20 多个业务类别实现碳减排超 174 万吨 <https://www.dsb.cn/177084.html>

用和废物处理过程中产生的碳排放进行定量评估。该评估应与公司采取的碳减排措施及其碳中和行动的信息一起显示在产品碳标签上。

### 2.3.2 绿色数字服务

#### *目前发展现状*

在数字经济发展的背景下，支持人工智能技术发展和应用的算法模型训练需求显著增长。然而，这种增长也导致了数字行业内能源消耗和碳排放的增加。近年来，超大规模人工智能模型产业的发展，开拓了“大算力+大数据+大参数”的人工智能全新发展途径，同时亦进一步推动了模型训练规模和所需计算量的急剧增长。马萨诸塞大学阿姆斯特分校的一项研究表明 Transformer、GPT-2 等流行的深度神经网络模型训练过程中，可排放超过 62.6 万磅的二氧化碳当量，其碳排放量是美国汽车平均寿命期内排放量的五倍<sup>19</sup>。谷歌的一项研究则认为，随着机器学习模型规模的扩大和精准性的提升，更大的模型会引致计算量需求的激增，从而进一步引致碳排放量的上升，因此，算法研究人员应谨慎挑选算法模型并将模型的能效作为评价计算密集型模型的一个指标<sup>20</sup>。

同时，中国超大规模人工智能模型产业亦在飞速发展。2021 年 4 月，阿里达摩院发布了 270 亿参数的中文预训练语言模型 PLUG，训练数据量为 1TB。2021 年 4 月，华为与循环智能等机构联合发布了千亿参数的中文预训练语言模型“盘古 NLP”，其模型参数量达 1100 亿，预训练阶段数据量达 40TB。2021 年 7 月，百度推出 ERNIE 3.0 知识增强大模型，参数规模达到百亿，训练数据总量达到 4TB

#### *未来发展路径*

在绿色发展的背景下，超大规模人工智能模型产业的发展和数据训练规模的扩大所带来的碳排放问题对数字行业提出了重大挑战。

**探索和优化大型模型的运行能效。**2021 年 6 月，阿里达摩院发布了具有万亿参数的中文多模态预训练模型 M6，研发过程中，该模型在 480 卡的 V100GPU 上进行了训练，相比谷歌、英伟达等机构，节省算力资源超 80%，训练效率提

---

<sup>19</sup> Strubell E, Ganesh A, McCallum A. Energy and policy considerations for deep learning in NLP[J]. arXiv preprint arXiv:1906.02243, 2019.

<sup>20</sup> Patterson D, Gonzalez J, Le Q, et al. Carbon emissions and large neural network training[J]. arXiv preprint arXiv:2104.10350, 2021.

升近 11 倍<sup>21</sup>。

**使用“轻量化 AI”降低功耗。**例如，南京人工智能芯片创新研究院、中科院自动化所（CASIA）聚焦“轻量化 AI”，解决人工智能在行业应用中面临的存储暴涨、数据堰塞、隐私泄露、能耗高企等问题。轻量化的 AI 平台可以以更低的功耗来训练和运行人工智能算法，从而最大化地发掘硬件的能力。轻量化人工智能通过一系列轻量化技术来提高芯片、平台和算法的效率，以实现低功耗的人工智能训练和应用部署，并不需要依赖与云端交互便可实现智能化操作。

然而，值得注意的是，仅仅关注人工智能算法的效率和优化并不是解决数字行业带来的环境挑战的唯一解决方案。虽然提高效率至关重要，但同样重要的是，要以普遍、充分的减少总体消费为目标，以防止潜在的反弹效应。

### 2.3.3 数字化企业绿色发展

#### *目前发展现状*

除了促进电子设备制造业、通信业、软件和信息服务业的绿色发展外，还必须优先考虑数字企业的绿色发展。数字企业作为数字产业的综合载体，发挥着举足轻重的作用。然而，随着数字业务的持续快速增长和工业生态复杂性的增加，这些公司的运营和供应链产生的碳排放呈上升趋势。数字公司产生碳排放的主要来源包括其温室气体排放源的直接排放和散逸性排放（范围 1），以及购买电力和热能等能源产生的间接排放（范围 2）。此外，办公空间、员工通勤、商务旅行和供应链中的其他相关因素的排放也会影响整体碳足迹（范围 3）。最近的数据表明，范围 2 和 3 占领先数字公司产生的温室气体排放的大部分，如下所述。

2022 年，阿里巴巴温室气体总排放量为 1325 万吨。其中，阿里巴巴实体控制范围内的直接温室气体排放为 92.7 万吨，包括固定源燃烧（如天然气使用）、逸散性排放（如制冷剂逸散）、移动源排放（零售业务中自有交通工具）。阿里巴巴因外购电力和热力所产生的温室气体排放为 444.5 万吨，外购电力和热力主要用于云计算数据中心、零售门店、仓库和办公场所的运营需求。在价值链上下游间接产生的温室气体排放上，2022 财年能够准确计量的排放量

---

<sup>21</sup> 北京人工智能研究院.超大规模人工智能模型产业发展报告

约为 787.7 万吨，其主要由电商外购的运输和配送服务中的燃油消耗、租赁数据中心的外购电力、包材和耗材的使用及员工差旅等所产生<sup>22</sup>。

2021 年，由腾讯拥有或控制的温室气体排放源所产生的直接碳排放量为 1.9 万吨，约占 0.4%，主要包括自有车辆运行、柴油发电、制冷剂逃逸等。由腾讯购买的电力或其他能源所产生的温室气体间接排放量为 234.9 万吨，约占 45.9%，主要为自有及合建数据中心及办公楼用电。腾讯供应链中所产生的所有其他间接排放量 274.3 万吨，约占 53.7%，主要为资本货物（如基建耗材、数据中心设备）、租赁资产（如租赁的数据中心用电）及员工差旅等<sup>23</sup>。

百度 2020 年二氧化碳排放当量为 49.08414 万吨，2021 年为 179.16078 万吨，其中直接排放量为 1.6407 万吨，包括固定燃烧源和逸散排放，涉及锅炉设备、餐厅设备、制冷机等，间接排放 60.17402 万吨，涉及外购电力以及外购蒸汽和热力，其他间接排放 117.34606 万吨，包括员工通勤、租赁数据中心电耗<sup>24</sup>。

## 未来发展路径

**强调绿色发展的社会责任，鼓励可持续性报告。**2020 年以来，腾讯、蚂蚁、阿里巴巴、百度、华为等知名互联网平台企业纷纷启动碳中和行动计划。这些公司通过披露其绿色发展倡议、途径和目标，展示了对透明度的承诺。他们利用各种方式，如发布路线图、环境信息披露（ESG）报告和企业社会责任（CSR）报告来传达他们的进展。为了使其战略与可持续发展目标保持一致，公司必须加强数字和绿色发展战略的整合。大型数字公司正在带头迅速走向可持续发展，为其他公司树立了榜样（见专栏 2.5）。

### 专栏 2.5 数字公司宣布的碳中和路线图

2021 年 4 月，蚂蚁集团宣布了其碳中和路线图，概述了三个主要目标。首先，该公司致力于通过利用可再生能源来提高能源效率并减少其办公楼和交通运输的排放。其次，蚂蚁集团承诺与优先考虑低能耗或可再生能源使用的数据服务提供商合作，到 2025 年实现 30%的可再生能源电力消耗率。此外，该公司旨在鼓励其供应商建立并实施碳中和目标。最后，在减排措施不足的情况下，蚂蚁集团承诺通过建立碳汇森林或直接购买碳信用产品来抵消剩余的排放量。

<sup>22</sup> 阿里巴巴.环境、社会和治理报告 2022

<sup>23</sup> 腾讯.腾讯碳中和目标及行动路线报告

<sup>24</sup> 百度.百度 2021 年环境、社会及管治（ESG）报告

2021年12月，阿里巴巴发布《阿里巴巴碳中和行动报告》，提出三大目标：不晚于2030年，实现自身运营碳中和，不晚于2030年，协同上下游价值链实现碳排放强度比2020年降低50%。此外，阿里巴巴还承诺不断通过助力消费者和企业，激发绿色低碳发展的广泛社会参与，到2035年的15年间，带动产业生态累计减碳15亿吨。“能源转型、科技创新、参与者经济”将成为未来实现碳中和的核心因素。

2022年2月，腾讯发布了《腾讯碳中和目标及行动路线报告》，公布了其碳中和行动计划（见附录3）。腾讯承诺不仅在其运营中，而且在其整个供应链中实现全面的碳中和。到2030年，该公司的目标是确保100%的电力来自可再生能源和绿色能源。实现路线图包括三个方面：节能和提高效率，增加可再生能源的利用，以及碳抵消计划。同时，腾讯还致力于在消费者中推广绿色生活方式、行业数字化低碳转型、推动可持续社会价值创新等方面以身作则。通过这些努力，腾讯希望加速在国家和社会层面实现碳中和的进程。

**转向可再生能源，以促进私营部门减少碳排放的行动。**内部运营层面的碳减排对于数字公司的绿色发展至关重要（见专栏2.6）。公司可以推动创新，并在管理和技术领域实施节能减排措施，以减少碳足迹。一方面，企业可以通过在自建办公园区内引入光伏发电、风光互补系统、太阳能供暖等绿色能源，实现源头低碳排放。此外，企业可以积极参与绿色电力交易，探索碳汇技术创新，实现碳消除和碳抵消。另一方面，企业可以通过利用数字技术，如智能传感器和物联网，来推动绿色办公实践，实现办公园区和楼宇的智能化。通过构建可视化、智能化的能源管控中心，实现企业精细化能耗管理，实现绿色办公。

### 专栏 2.6 企业减少碳排放的实践案例

#### 使用清洁能源帮助企业减少碳排放

2022上半年，阿里巴巴清洁能源交易超8亿度，相比2021年全年实现超150%的增长。同年，阿里巴巴通过能源结构转型，阿里巴巴共实现减碳619944吨，阿里云21.6%的电力已由清洁低碳能源提供。菜鸟依照国际最高的物流场地可持续标准设计物流园区，并积极铺设分布式光伏发电设备，累计装机容量24.9兆瓦，减碳1.6万吨。

2021年，百度在备用屋顶区域安装了光伏发电设备，百度大厦和鹏寰大厦屋顶安装的光伏发电系统每年发电量可达100万度，可减少二氧化碳排放约600吨<sup>25</sup>。

在仓储行业，京东物流布局了与园区并网的屋顶分布式光伏发电系统。2020年，该系统发电量达到253.8万千瓦时，减少碳排放约2000吨。

然而，密切跟踪和监测大公司的做法至关重要，特别是在他们如何计算排放量、能源和其他资源节约方面。这包括密切关注企业社会责任（CSR）报告中提供的信息。“清洁能源”和“低碳”这两个词容易被误用，可能导致“漂绿”，即公司可能歪曲其环境影响和可持续发展的努力。

<sup>25</sup> 百度. 百度2021年环境、社会及管治（ESG）报告

## 智能园区和智能楼宇帮助企业减少碳排放

阿里巴巴西溪园区广泛应用智能物联网和传感器，实现了基于人流量的空调和灯光调节。在 2020 年至 2021 年期间，阿里巴巴实现了员工人均能耗降低 10% 以上。阿里巴巴制定了到 2030 年用电动汽车取代所有短途燃油汽车的目标，同时还推动其物流运输的智能化，包括扩大电动无人物流车“小蛮驴”的覆盖范围，并加快其自动驾驶卡车“大蛮驴”的研发进度。

百度一贯优先获得国际标准化能源管理和环境管理体系认证。截至 2021 年 12 月 31 日，百度办公楼宇已通过 ISO50001 能源管理体系认证，管理百度楼宇的安信行物业公司已获得 ISO14001 环境管理体系认证。

目前，腾讯旗下众多建筑已获得 LEED 金级设计认证或符合中国绿色建筑标准。2020 年，深圳腾讯滨海大厦通过空调末端控制的技术优化改造和管理节能等一系列措施，在 2019 年的用电量基础上节省了 598 万度电，减少排放约 2690 吨二氧化碳当量。

**推动供应链和产业生态系统的绿色转型。**数字公司在塑造工业供应链方面发挥着重要作用，并有可能与上下游合作伙伴合作，推动相关产品和供应链的低碳转型。通过这些努力，数字公司可以为创建一个更加环保和可持续的商业生态系统做出贡献。一方面，数字公司可以利用自己的数字技术专长，构建和优化全面的绿色供应链，包括绿色产品包装、环保物流和运输、节能仓储、无纸化电子采购等解决方案，以实现节能减排。另一方面，数字公司可以通过优化 ICT 设备和终端设施的生产、销售、使用、回收和再利用，以及最大限度地重复使用组件（如过时的服务器机架）来减少 ICT 设备废弃物的碳排放，从而促进循环经济。

**引导消费端绿色习惯的养成。**数字公司提供了一个独特的机会，可以利用其对用户的影响力，并通过其可广泛访问的数字服务来增强环境意识。通过引导消费者采用绿色生活方式和培育支持碳中和的积极社会环境（见专栏 2.7），这些公司可以为推进环境保护做出重大贡献。数字公司的持续努力已经产生了显著的碳减排效果，并成功地在旅行、家庭、办公、学习、餐饮、购物和电子产品回收等各个领域培养了绿色消费习惯。因此，需要重视数字公司在拥抱绿色价值方面的贡献。

**支持消费者减少数据和硬件消耗。**可以采取其他措施来促进环境友好行为，例如尽量减少数字资源的使用。优化视频内容以匹配终端设备的显示大小是确保默认分辨率与设备功能一致的一种方法。此外，默认情况下禁用网页上视频内容的自动播放有助于减少不必要的数据消耗。为防止可能鼓励过度使用数据

的虚假激励，应避免大数据量的统一费率。

### 专栏 2.7 引导绿色生活方式的数字公司

2022 年，阿里巴巴建立了“88 碳账户”体系，覆盖淘宝、饿了么、闲鱼、高德、菜鸟等多应用场景和产业生态。截至 2022 年 7 月，阿里巴巴产业生态下，已有超过 2000 万用户在日常生活中主动参与减碳，践行绿色生活方式。

美团平台于 2017 年推出“青山计划”，推动餐饮外卖行业绿色消费。该倡议旨在引导平台商家通过使用环保袋、使用可回收包装、提供无餐具选择等措施提供环保服务。同时鼓励消费者从源头上减少消费。过去五年，超过 2 亿美团外卖用户选择了“无需餐具”功能，促成“环保订单”比例增长近 40 倍。在线宣传环保理念已超过 30 亿人次。此外，超过 33 万家商户获得了“助力低碳消费”徽章，这表明提高绿色消费意识的努力取得了初步成效<sup>26</sup>。

百度在其 APP 应用中新增“绿色模块”，于日常生活场景中提升公众的环保意识。开发的“AI 分垃圾”小程序，帮助用户对垃圾进行精细化分类。

腾讯通过一系列举措向用户和消费者宣传其绿色发展理念。例如，腾讯游戏旗下天美工作室群应联合国环境规划署（UNEP）邀约，加入“玩游戏，救地球”联盟。通过此次合作，天美旨在增强公众的环保意识，并利用游戏的影响力为碳中和做出贡献。此外，在腾讯公益平台上有 2458 万人次捐赠超过 4.6 亿元，帮助了 2583 个自然保护项目。

值得注意的是，“绿色消费”或“绿色生活方式”可以有不同的解释。为了避免“漂绿”，建议参考企业社会责任报告，以清楚地了解这些术语的含义。例如，如果正在生产消耗大量能源的视频游戏，则不应假定此类活动是环境友好的。此外，必须认识到，仅仅具备“环保意识”并不一定能转化为真正的环保行为。

## 2.4 基于数字技术的绿色化模式

**用数字服务推动绿色发展。**在软件和信息技术服务行业运营的公司可以提供广泛的解决方案，包括软件开发、数据分析和智能转型，以帮助不同行业的企业管理和优化其对生产和商业活动的环境影响（见专栏 2.8）。大型数字化服务公司和跨行业领先企业也可以为制造业等传统行业的中小型企业提供信息技术咨询服务或综合解决方案，促进数字化与绿色协同转型，将技术融入工业企业的绿色发展。

**应用关键清洁技术，推动绿色发展。**数字技术在提高传统行业的效率和优化资源配置方面具有巨大潜力。特别是在能源优化和决策控制等领域，其在推

<sup>26</sup> 美团.美团青山项目五周年进展报告

动流程和服务创新的同时，促进了智能和绿色发展。5G 等新网络技术的出现，使每个生产单元都可感知、可通信、可连接、可计算。人工智能驱动的分析技术改变了决策过程，并增强了智能决策能力。云计算和大数据技术已经在各个领域实现了新的应用。利用传感器收集的海量数据，这些技术能够有效利用数据资源并释放其全部价值。根据 IDC 的研究，在 2021 年至 2024 年期间，云计算的应用有可能减少超过 10 亿吨的二氧化碳排放量。到 2060 年，人工智能相关技术对碳减排的贡献将逐年增加，最低目标为 70%<sup>27</sup>。

**应用软件和信息技术服务行业。**软件和信息技术服务业通过提供网络化、数字化、智能化的技术解决方案，在推动经济社会绿色发展中发挥着至关重要的作用。这些解决方案在为产业转型升级、结构优化、政府监管和社会服务现代化赋能的同时，加快了绿色生产方式和生活方式的普及，为全面降低社会能耗贡献了力量。下一代信息技术可以有效应用于能源密集型行业，推动能源结构的清洁化转型。它提高了能源效率，减少了环境影响，促进了资源循环利用，从而直接有助于减少碳排放，实现碳峰值和碳中和目标。这在能源和电力、工业、建筑和运输等关键碳排放部门尤为重要。通过加强数字技术与这些部门的深度融合，可以减少能源和资源消耗，实现生产和碳效率的同步提升。此外，需要明确关键阶段和未来发展路径。例如，世界经济论坛制定了一个框架，其中包括软件定义车辆的关键转型阶段，包括所需的主要战略决策以及每个阶段可以实现的相关影响<sup>28</sup>。

### 专栏 2.8 智能技术优化行业环境足迹

在快递和物流领域，阿里巴巴旗下的菜鸟物流在全行业率先推出了基于电子面单的数字化包裹管理工具，以取代传统纸质面单，降低碳排放。基于电子面单的数字化包裹管理工具已经累计应用于超过 1000 亿个快递包裹，帮助全行业节省纸张 4000 亿张。结合大数据算法模型，通过进一步优化和设计纸箱型号并由算法推荐最合适的装箱方案，阿里巴巴平均减少 15% 的包材使用，进一步推动了快递行业的低碳绿色发展。

在仓储和物流领域，华为实施了提高仓库存储效率的措施。这包括采用更密集的存储方法，并通过使用自动化设备而不是人工劳动向“黑灯仓库”过渡。此外，华为还通过优化物流包装箱的选择，尽量减少过度包装和填充物的使用。并通过定制周转容器实施纸箱回收，利用旧包装材料做新包装用途。2020 年，华为在物流运输环节减少了逾 11.4 万吨碳排放，平均每台产品的运输环节碳排放减少 15%，相当

<sup>27</sup> <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1182/98386.htm>.

<sup>28</sup> <https://www.weforum.org/agenda/2023/04/3-ways-intelligent-cars-positively-impact-daily-mobility>.

于种植了 6.5 万棵树<sup>29</sup>。

百度通过各种举措在提升交通服务方面发挥了举足轻重的作用。一个显著的贡献是智能交通信号控制器的部署，该控制器根据实时交通流量调整交通灯的持续时间。这一智能系统有助于减少道路拥堵，并最大限度地减少因车辆空转而产生的碳排放。该公司还开发了用于智能停车的第六代大倾角高位视频技术智慧停车技术，具备车位引导、无人收费、停车场无人化管理等功能。通过简化停车位运营，百度的创新显著减少了因车辆寻找停车位、支付费用和不必要的空转而造成的碳排放。百度进一步开发了 ACE 智能交通系统引擎，建立了全面的智能交通系统，满足各种场景的智能交通需求，为低碳出行赋能<sup>30</sup>。

---

<sup>29</sup> <http://finance.people.com.cn/n1/2022/0925/c1004-32533527.html>.

<sup>30</sup> 百度. 百度 2021 年环境、社会及管治 (ESG) 报告

### 3. 数字化技术与城市可持续发展

#### 3.1 引言

数字化有助于解决多个城市痛点，并提供可持续的解决方案。持续的城市化推动了地球的变化，并影响着经济和社会发展。由于城市是一个复杂的系统，捕捉其动态变化是一项艰巨的任务。数字技术提供了管理复杂性的机会，增加了一个新的治理层。虽然不受约束的数字化会加速不可持续的结果，但数字化也可以成为通过循环和充足来加速城市碳中和和包容性的系统转型的推动者。

城市是以众多个体之间的交流和沟通为特征的地方。最初城市出现的核心理论表明，城市首先是贸易枢纽，在此基础上城市的其他功能日益完善。这一倒数第二的社会角色是通过有形基础设施实现的，为许多空间和流动性有限的人提供住所，使人们能够举办会议和运送货物。城市的吸引力恰恰在于提供了交换机会，这些机会往往转化为经济、社会和文化机会以及多样化的生活方式。然而，城市的这一光荣角色因其成功而大打折扣，至少在以目前的方式实施时是如此。大城市饱受拥堵之苦，有形基础设施和运输系统带来了空气污染、气候变化、交通拥堵、住房短缺、供水不足和能源短缺等不可持续的后果。普遍的交通拥堵成为了城市的“痛点”，不仅导致环境恶化，而且使人们的生活也受到影响（使许多人更加难以承受高昂的生活费用），限制了经济发展的潜力。

从全球可持续发展的角度来看，城市的作用至关重要（Skea 等人，2022）。直接和间接的能源使用和消费是人为气候变化的主要驱动因素（Lwasa 等人，2022）。城市化加剧了土地流失，因此也在一定程度上加剧了粮食不安全和生物多样性的丧失，特别是在珠江三角洲（Bren d Amour，2016）。在城市内部，空气污染、噪音和不安全的交通状况损害了福祉和场所质量。

数字化可以支持可持续转型，它可以在城市的三个领域实现：交通、建筑和城市规划。首先，数字化可以用服务取代需要资源需求型活动，例如用出行取代视频会议。其次，数字化可以支持活动的优化，例如，通过优化暖通空调的智能家居或共享出租车的拼车出行。第三，数字化可以强化资源的使用，从而降低每项服务的资源需求，例如，支持灵活空间的高使用率，并避免建设和运营的资源使用。第四，数字化可以传达可持续发展的影响，启动更可持续的

决策，例如，通过敏捷和人工智能辅助的可持续发展城市规划。

尽管潜力巨大，但需要注意的是：数字化和相关的效率提高会导致消费水平提高，即所谓的反弹效应，这甚至可能会过度补偿效率效应。一种风险是将 SMART 误解为等同于可持续，而在许多情况下，SMART 并不等同于可持续（Höjer 和 Wang 2015）。信息和通信技术对环境的影响也很大，而且在迅速增加。这一观察结果表明了正确评估系统影响的重要性，关注承诺高可持续性胜利的选项，以及避免与高环境负担相关的数字化。

随着城市经济和社会的发展，人口不断聚集，这也催生了创新，从而产生了新的服务提供方式，以改善不希望出现的结果，并提供可持续发展的途径。数字化和人工智能是通用技术，可以应用在生活的各个领域。在某些情况下，数字化增加了痛苦，例如，促进消费增加、使街道上堵满了送货车或数据中心的能源需求不断增加（通常由燃煤电厂提供）时。然而，数字和绿色技术也为解决城市发展问题创造了条件。其中最重要的是，数字技术的应用有可能在提高质量的同时避免数量的增加——增加物质周转。在交通方面，可选方案包括实现车队电气化、以公共交通和共享共用交通方式取代私家车、提供安全的自行车基础设施，以及通过家庭办公等方式限制交通总量。在住房方面，可选方案包括通过对高人均建筑面积征收奢侈税、被动式房屋标准、改造、用热泵取代燃气供暖、实施高效电器顶级运行计划等方式限制总的空间需求。在空间规划方面，可选方案包括促进公共交通沿线的紧凑型发展，以及采用灵活的数字工具优化城市环境，以实现可持续发展。在工业领域，通过循环设计可节省大量资源。所有这些例子都要求其积极影响不被间接影响所掩盖，例如当道路空间更大时，交通量会更多，当光照更便宜时，照明会更多，或者当节省通勤时间时，休闲旅行会更多。

### 3.2 中国智慧城市现状

从 2011 年开始，“十二五”规划涵盖了数字/智能城市。2011 年，中国的“十二五”规划推动了基础设施建设、城市信息化和精细化管理，以提高城市数字化能力。自 2012 年以来，中国一直在推进智慧城市建设<sup>31</sup>。2013 年至 2015

---

<sup>31</sup> 中华人民共和国住房和城乡建设部（2012）《关于开展国家智慧城市试点工作的通知》

年，中国住房和城乡建设部选择了 290 个城市、地区和城镇作为智慧城市建设试点，并建立了以安全与基础设施、智慧建筑与宜居、城市功能提升、智慧管理与服务为重点的指标体系，指导试点地区顺利实施智慧城市建设。为确保智慧城市的健康可持续发展，中国国务院办公厅提出了指导方针和目标，其中包括促进信息产业和基础设施的发展和升级（2013）<sup>32</sup>。加大信息资源开发共享，科学制定智慧城市建设顶层设计（2014 年）<sup>33</sup>，以及建立数字城市地理空间框架（2015 年）<sup>34</sup>。

从 2016 年开始，“十三五”规划进一步促进数字/智能城市。在“十三五”期间，中国专注于提供与智慧城市和行业相关的智能技术，以提高生产力和资源效率。主要目标是将智能技术与城市规划和产业相结合，到 2020 年在数字中国取得显著成果，如形成特色鲜明的智慧城市。核心技术包括云计算、大数据、5G、物联网等。创新项目包括智慧农业（如智慧粮仓，2016），智慧能源系统（形成“源-网-荷-储”协调发展，2016），智慧海洋（旨在充分利用海洋资源，2016），智慧交通（如客运信息服务，2017；道路车辆综合管理，2018 年），地理空间信息系统（如时空大数据平台建设，2019）<sup>35</sup>。

从 2021 年开始，“十四五”规划继续加强对数字/智能城市的关注。“十四五”继续建设数字中国和智慧城市，实现技术发展和在线应用的双重路径。技术开发包括云计算、大数据、物联网、工业互联网、区块链、人工智能、虚拟现实和增强现实。为推进管理服务数字化，中国提出建设数字乡村，实现中国农村数字化，打破数据壁垒，提高协同处理能力和运行效率。同时，中国持续建设智慧城市，实现物业、养老、育儿、旅游、医疗、物流、交通等生活服务的智能化转型，打造数字生活的便利环境，创新服务模式和产品<sup>36</sup>。

**《关于推进智慧城市健康发展的指导意见》——中国智慧城市建设的基本原则。**该原则有四个方面。一是智慧城市以人为本，创新城市管理和公共服务方式，为城市居民提供广覆盖、多层次、差异化、高质量的公共服务体系。第

---

<sup>32</sup> 中华人民共和国国务院办公厅（2013）《促进信息消费扩大内需的若干意见》

<sup>33</sup> 中华人民共和国国家发展和改革委员会（2014）《关于推进智慧城市健康发展的指导意见》

<sup>34</sup> 国家基础地理信息中心（2015）《关于推进数字城市向智慧城市转型升级的通知》

<sup>35</sup> 中华人民共和国自然资源部（2019）《智慧城市时空大数据平台建设技术纲要》

<sup>36</sup> 中华人民共和国国务院办公厅（2021 年）《中国第 14 个五年计划和 2035 年愿景纲要》

二，根据城市地理区位、历史文化、资源禀赋、产业特色、信息化基础等，应用先进适用技术科学推进智慧城市建设。智慧城市可在综合条件较好的区域或地区先行先试，逐步在全国推广，避免贪大求全、重复建设。第三，智慧城市重在激发市场活力，鼓励社会资本参与投资、建设、运营，建立智慧城市可持续发展机制。第四，智慧城市应遵循安全信息管理原则，避免数据泄露，保护隐私。

**中国的新型城镇化政策正取得显著进展。**常住人口城镇化率为 65%且持续增长，需要进一步改革户籍制度。城市群是城市化空间模式的中心，由世界领先的高速铁路网连接，高速铁路网正在迅速扩张。城市越来越多地围绕高科技制造和信息技术进行设计，改善公共服务和基础设施，同时改造老旧社区（52500 个单元，2022 年）和棚户区（181 万个单元，2022 年）。农村地区的发展同样领先，重点是水、电、道路和互联网，农村和城市之间的收入差距越来越小。

这些发展遇到了若干挑战。环境、交通、城市规划建设、土地利用等领域的痛点日益突出，因资源开发利用不平衡而加剧（Jiang et al., 2021）。新型城镇化最大的挑战是促进均衡发展，减轻大城市的压力。中国目前提出的措施是通过技术效率实现乡村振兴和城市群的绿色发展（Liu and Li, 2021）。挑战还包括改变中国人认为大城市的个人发展机会比小城市或乡村更有前途的传统思维，以及确定经济手段来增加农村地区对年轻人才和企业的吸引力。

**深圳和杭州是中国数字城市的两个典范。深圳的智慧城市发展模式被称为“1+4”。**以公共服务、城市治理、数字经济、安全防控四个领域的新型基础设施建设为支撑。作为国家基础设施高质量发展试点，深圳已建成 7 万个 5G 基站，实现 5G 网络全城覆盖，支撑智慧城市发展。深圳通这款 APP 为居民日常生活、政务办事提供依据。所谓一城一图，设想的是城市一体化监管。深圳建立 5G 产业集群推动数字经济发展，实施《深圳经济特区数据条例》保障数据安全。

杭州智慧城市的架构是核心系统+子平台（区县市）+数据系统+应用场景。核心系统连接所有子平台和数据库，实现多平台数据和业务互通。围绕核心系统和子平台构建应用场景，实现医疗、交通、房管、产业发展等领域的智能化。

在成都等中西部大城市，也采取了推动数字化、绿色发展的创新举措（见附录4）。

**中国智慧城市为温室气体减排的高效系统管理提供了机会。**实现碳中和目标还需要更换化石燃料硬件。基于数字和人工智能的应用程序可以支持居民、城市管理人员和行业减少温室气体排放。水质、空气污染、交通流量和公民在线服务的数字监测构成了数字应用的支柱，其中许多是基于人工智能的。对于居民来说，基于人工智能的物流改进，如果得到真正的激励措施的支持，如运输中的CO<sub>2</sub>定价，可以降低包装和退货率，提高消费者满意度。基于人工智能的服务，特别是在共享移动性中，提供了移动性的实质性改进，特别是如果伴随着更高的每辆车的占用率（Guo 等人，2020；克罗伊齐格，2021）。对于城市管理者来说，人工智能能够实时调整运营计划，快速实施城市级气候目标和应急措施，从而减少因灾害、运营失误和不良调度方法造成的资源浪费和CO<sub>2</sub>排放。对于工业来说，人工智能能够实时监督所有生产过程，包括产品原材料的选择、生产、运输和销售，以最大限度地利用生产资源，降低生产成本和CO<sub>2</sub>排放。AI实时计算和预测市场需求，根据生产和销售计划实时调整产量，并防止过度生产造成的CO<sub>2</sub>排放（Johnson 等人，2021）。然而，加速的消耗和温室气体排放往往过度补偿了效率收益，除了基于人工智能的效率外，还需要采取系统措施来实现气候目标（Creutzig 等人，2022）。

接下来将重点讨论三个领域：交通、建筑和城市规划。第3章重点介绍了数字解决方案如何提供可持续发展和健康经济的潜力，并提出了三项政策建议。

### 3.3 交通运输业：避免-转移-改进

城市交通向可持续发展的转变可分为“避免、转移和改进”（Bongardt et al., 2013）。数字化可以支持所有三个领域的转型，此外，还可以为新的商业模式提供机会。这三个类别的特征如下：

- **避免。**这一行动领域的重点是通过提供减少旅行和运输需求的高水平服务，完全避免高耗能的旅行。关键选项包括家庭办公政策、数字化工作环境和提供高可达性但低效率机动化交通的城市规划。
- **转移。**侧重于从污染较大的交通方式转向污染较少的交通方式，这往往意

意味着从私人机动交通方式转向环保交通方式，如公共交通或主动交通方式（骑自行车和步行）。数字化是新模式的核心，既能提供个人交通的灵活性和便利性，又能保持公共交通的部分效率——共享的集合交通和多模式路线。

- **改进。**侧重于技术效率，包括车辆和交通流量的效率。特别是对于后者，数字化方案可以提供至关重要的支持。

详细介绍了三个选项，在这些选项中，数字化可以利用可持续转型的巨大潜力。第一个是共享或共享出行。有许多智能交通选择，所有这些都出现在中国的城市中。然而，了解它们不同的环境足迹是有益的。一些智能交通方案选择属于那些环境足迹最差的，尤其是叫车服务。叫车服务包括没有乘客的乘车（所谓的空驶），这使得叫车服务高度排放，并加剧了拥堵。相比之下，自行车和电动滑板车共享展示了环境效益。此外，拼车服务，如滴滴的拼车选项，提供了大量的好处。国际交通论坛在赫尔辛基的一项模型研究中证明，用共享出行（禁止私人车辆进入城市）取代通勤出行可以减少 37%的拥堵和 33%的温室气体排放——甚至在车队电气化之前。共享出行不仅依赖于数字智能手机服务，还依赖于最佳路由算法，因此需要先进的数字化业务模式。世界经济论坛主办的全球新移动联盟寻求加速向共享、电动、互联和自动驾驶（SEAM）解决方案的同步过渡，以提供绿色城市，同时创造新的商业机会（世界经济论坛，2023）。

第二个是在线工作和教育。家庭办公室避免了出差，为员工节省了时间。因此，一项针对大流行封锁期间中国员工的研究发现，在家工作的工作质量更高（Qu and Yan, 2023）。由于流感大流行，中国和全球大多数其他国家被迫接受在线教育，导致学生的碳足迹大幅减少（Yin et al., 2022）。然而，为了充分发挥学生的教育潜力并满足他们的社会需求，在线教育必须辅以现场研讨会。

第三是交通流量的高效管理。杭州的城市大脑收集并结合了可用的城市数据处理与人工智能。尽管杭州的人口在 2010 年至 2020 年间增长了约 150 万，约 30%，但平均出行速度提高了 15.3%，高峰时段拥堵率降低了 9.2%（Caprotti 和 Liu, 2022）。因此，杭州的交通拥堵排名从中国的第 2 位下降到第 57 位

(Yan 和 Li, 2022) (见专栏 3.1)。公共交通也可以更高效地运营。通过结合射频识别、全球定位系统和视频分析技术,轻轨速度和位置监控系统可以提高铁路运营安全(MTR Lab, 2023)。

### 专栏 3.1 杭州的城市大脑

杭州在城市交通、智慧城市、智慧政务等方面的数字技术综合应用,为中国城市发展提供了示范和借鉴。通过发展跨境电子商务平台,如阿里巴巴及其金融子公司蚂蚁金服,这座城市已成为在线交易中心。这些平台吸引了来自中国和海外的数百万客户和商家,为在线交易、物流和服务创造了巨大的需求和复杂性。为了满足这一需求,杭州开发了云计算(阿里云)和人工智能(达摩院)等先进的计算基础设施。

通过生产摄像机、传感器和视频分析系统等智能安全产品,杭州也成为世界监控市场的引领者。海康威视、大华科技等公司率先应用人工智能云框架“云边融合”,提供涵盖完整云计算和边缘计算的融合计算架构,支持交通管理、公共安全、防灾、城市治理等多种用途。杭州还举办了 2016 年 G20 峰会等重大活动,展示了其智慧城市能力。

杭州的数字/智慧城市发展得益于积极的城市治理,将数据基础设施嵌入到城市规划和管理中。该市于 2017 年创建智慧城市项目综合试验区,涵盖 11 大系统、48 个应用场景。该市还与阿里巴巴达摩院等机构合作,以促进创新和研究领域,如量子计算、机器学习、自然语言处理和计算机视觉。

杭州城市大脑是利用云计算和人工智能技术,对城市数据进行采集、分析和应用的智慧城市平台。由杭州市政府和阿里云牵头,海康威视、大华技术、浙江中控等企业支持,杭州城市大脑于 2016 年 4 月初步设计,用于交通拥堵治理,作为首个应用场景。通过大数据处理交通数据,自动控制红绿灯,有效缓解了杭州的交通问题。2017 年,杭州城市大脑 1.0 正式发布,通过智能调节红绿灯,试点区域通行时间减少 15.3%。2018 年,城市大脑升级,从“治堵”转向“治城”,涵盖警务、交通、城管、文旅、卫健、房管、应急、农业、环保、市场监管、基层治理等 11 大系统、48 个应用场景。通过部门间业务协同创新,高效配置公共资源,精准科学决策,显著提升城市治理效能。城市大脑支持设计有效措施,如提供专用公交线路(减少道路上的车辆数量)、建设共享停车信息平台(减少道路上的车辆数量)、建设多中心城市(减少道路车辆数量)等。

打造杭州城市大脑的目的是提升城市治理和服务质量,提高城市运行效率和安全性。其中,交通管理尤为重要,因为交通拥堵影响人们的出行便利和生活质量,消耗能源,排放温室气体。使用城市大脑实时监测和优化交通数据,可以减少车辆等待时间,增加道路通行能力,减少汽油消耗和碳排放。然而,系统性影响(如诱导需求)可能会大大损害温室气体排放的减少。城市大脑将需要解决隐私问题,这是许多中国公民关心的一个主要问题。

总体而言,共享交通、远程办公和流量管理这三项措施都有助于改善交通流量。除非与限制私家车交通的补充措施(如市中心收费)相结合,否则存在很高的风险,即好处被拥堵城市中存在的潜在需求所吞噬。

### 3.4 建筑业：避免-转移-改进

建筑可持续性涉及考虑室内空气质量，避免建筑的高材料和温室气体排放足迹，以及节能使用，作为整个城市基础设施的一部分。除其他外，根据一项关于更有效利用建筑物的研究（Höjer 和 Mjörnell, 2018），这包括：

- **避免。**减少对空间的需求，更有效地利用空间（共享办公桌和其他空间等）。使用模块化设计，使空间适应新的用途。翻新旧建筑，而不是用新建筑取代它们。将数字充分性应用于家庭中的信通技术使用。
- **转移。**通过私人热泵、屋顶太阳能供暖、地热能 and 区域供暖的大型热泵提供供暖服务。在屋顶上用太阳能光伏分散能源供应，安装更多的双层玻璃窗，更好的隔热和 LED 照明等。
- **改进。**利用更高效的能源，在燃煤和燃气发电厂中使用智能电表创建虚拟负载管理，以减少空气污染和温室气体排放。通过智能建筑优化能源使用。改造现有建筑，优化被动式住房的节材结构，例如基于 3-D 打印；利用数字经济和家庭办公来优化现有建筑的使用。

选择了三个数字案例研究，包括基于大数据的建筑存量管理、数字充分性和智能计量与反馈。首先，基于大数据的方法可以优化现有建筑存量的使用和改造，以实现可持续性。一个关键的应用是现有建筑存量的热性能的数据来源，以分配改造的最佳策略，节省宝贵的能源和天然气。基于数据的策略可能包括在冬季用热像仪扫描建筑库存。与气候数据和气候预测相结合，可以计算建筑存量改造的优先次序。另一项战略涉及重新分配占地面积，特别是根据数字经济的要求。银行办事处和零售的减少伴随着物流仓储需求的增加。大数据工具可以帮助以最佳方式重新分配并减少对占地空间的需求。

其次，数字充分性可以支持家庭和建筑用户的可持续生活方式（Santarius 等人，2022）。数字充分性包括硬件、软件、用户和经济充分性。一个核心动机是，能源使用和温室气体排放的增加越来越多地归因于数字化以及数字设备的大量购买和使用。此外，开采稀有矿物会在地球上留下“伤疤”，是与数字化相关的不可持续的关键问题。在城市中实现用户充足性的战略包括教育活动和关于流媒体服务的能源和温室气体排放足迹的信息披露。更激进的措施包括

限制或禁止在线广告。

第三，智能计量和反馈可以创建虚拟发电厂，创造可持续和经济优势，而不是新的天然气和煤炭发电厂的建设。智能计量允许在高电价时进行动态定价和减少负荷。它可以节省家庭预算，并将公用事业从建设经济上不可行的发电厂的负担中解放出来，释放很少使用的容量。对于高消费家庭，智能计量和信息反馈（例如，关于价格和节能机会）可以减少 16% 的能源费用，即使目前的实施通常达不到这么高的数字。尽管如此，智能计量和信息反馈与价格信号相结合，如果在全球持续应用几年，可以减少至少十亿吨的温室气体排放（Khanna 等人，2021）。

### 3.5 空间规划：利用人工智能进行可持续城市设计

空间规划是指对城市的预先且长期的管理。空间布局预先决定了交通可达性、住房负担能力、就业市场机会、空气污染、噪音滋扰以及交通和建筑使用产生的温室气体排放。空间规划是一项前瞻性战略，旨在实现巨大的可持续发展收益。可持续发展评估的主要维度包括城市形态带来的能源使用和温室气体排放、当地空气质量和环境、吸水能力（海绵城市）以及场所质量，包括老年人和儿童的出行体验。

数字化和机器学习可以支持可持续发展的城市规划（Milojevic-Dupont 和 Creutzig, 2021）。空间布局和街道网络将能源使用和温室气体排放计算在内，使规划者能够估计城市形态在推动空气污染和温室气体排放方面的相关性（Silva 等，2017）。柏林的一项案例研究表明，中心性和副中心的存在是预测城市形态引起的温室气体排放的关键预测因素，可以对街道和建筑规模进行估算（Wagner 等人，2022）。并且，依靠预测学习，这种先进的模式识别可用于规划城市形态以及以交通为导向的发展，这些都需要高空间精度，并根据所需的可持续性指标（Milojevic-Dupont 和 Creutzig, 2021; Silva 等人，2018）。高分辨率地图还可以可视化建筑环境在放大热浪和相关热负荷方面的贡献，从而实现有针对性的城市复原力计划和城市绿化战略。<sup>37</sup>

---

<sup>37</sup> 参见例如：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722003687>;  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2212095523000615>。

空间和交通规划也是技术解决方案与性别平等和包容性交织在一起的领域。空间规划和智能出行解决方案必须以包容性的方式设计，以避免重复过去排斥妇女、儿童和老年人的错误（见专栏 3.2）。

### 专栏 3.2 性别包容性智慧城市的避免-转变-改进框架

在 20 世纪的城市设计和决策中，存在一种“默认男性”的做法，这种做法或观点系统性地排除了女性、儿童和不同障碍人士的观点和需求。由于公共基础设施（包括交通手段）以男性为中心的设计，女性处于不利地位。然而，有充分证据表明，女性遵循不同的出行模式，这与频繁连续旅行和对公共交通的更高依赖有关（Rambo11, 2021）。因此，必须加强女性在决策和技术相关职业中的代表性，以释放包容性智慧城市建设的全部潜力。

尽管许多现有的城市政策及其基础数据集没有充分考虑其他情况的用例，但使用既往模式训练的人工智能可能会导致现有的性别偏见长期存在并加剧不平等。在世界各地，城市都认识到这些风险并已开始采取相应措施。通过使用按性别分列的数据示例，以下建议旨在为包容性智慧城市治理提供信息：

- 避免。这种方法依赖于与性别无关的数据源，这些数据源延续了性别的固有观念，并歧视年龄和能力。例如，当这种方法运用在电动汽车公共充电站的可及性时，坐轮椅或有其他行动需求的人仍然有着很大的阻碍（Falchetta 和 Noussan, 2021）。

- 转移。这种方法强调按性别分类的数据变化，并纳入不同利益相关者的观点。按性别分类的数据应纳入数字应用、智能基础设施和相关政策制定的所有领域。因此需要进行性别敏感调查、关于智慧城市性别平等的研究以及混合方法，以更好地了解所有公民的需求和关切，不管性别、年龄或其他因素。欧洲的“DIAMOND”项目就是一个很好的实践例子。它是来自多个欧盟国家的研究机构的联合倡议，通过调查、文献综述、焦点小组讨论和社交媒体数据分析进行微观数据收集，以筛选最有前景的政策，以实现更具包容性的出行版图（Santarremigia 等人，2022）。

- 改进。这种方法旨在改进智慧城市设计并使之人性化，以确保包容和安全的公共空间。智慧城市中。安全、无障碍和包容的空间和行程的重新调整对于女性尤其重要，因为她们尤其受到持续骚扰和基于性别的暴力的影响（联合国妇女署，2022）。相关措施包括充足的照明、监控摄像头和训练有素的工作人员等，以提高公共场所的安全意识。新技术可以借鉴这些尝试，比如在英国，Path Community App 为用户提供最安全的回家路线信息。<sup>38</sup>

<sup>38</sup>请参阅 Path 社区应用程序等。

## 4. 数字技术与气候变化适应

气候变化正在影响我们的环境和生态，逐步改变人类的活动。虽然采取缓解措施仍然是一个优先事项，但政府的行动还必须集中于帮助人们适应当今气候变化的影响、建设气候适应型社会。新兴数字技术可以提供更高效、更快速、更可靠的风险监测和预测，可以根据定量、可操作的指标做出更科学的决策（Argyroudis 等，2022）。2013 年，中国政府首次发布适应气候变化战略。2022 年 5 月发布的《国家适应气候变化战略 2035》进一步提出了新时代中国适应气候变化的基本原则和主要目标。该战略强调加强科技支撑，加快研发和采用气候变化适应技术。在此背景下，利用数字技术提升我国气候变化适应能力是必要的、有理有据的，在建设气候适应性未来方面有至关重要的作用。

本章旨在为中国部署数字技术促进气候变化适应提供政策建议。它首先确定了中国适应气候变化的主要挑战，然后讨论了在国际上开发和部署的高性能数字解决方案。随后，本章分析了中国数字解决方案的应用情况，并为推进类似方法提出了政策建议。为了与报告的总体主题保持一致，本章重点讨论城市地区的适应问题，并更广泛地讨论未来研究中将制定的数字适应解决方案和政策。

### 4.1 中国适应气候变化的主要挑战

气候变化的挑战分析必须从科学评估气候变化对中国的影响和风险开始。根据 IPCC AR6 (Masson- Delmotte 等，2021)<sup>39</sup>中的风险框架，第 4 章的分析将风险定义为对生态或人类系统造成不利后果的可能性，将影响定义为已实现的风险对自然和人类系统造成的后果。气候变化风险和影响是气候相关危害与生态或人类系统的暴露程度和脆弱性之间动态相互作用的结果。<sup>40</sup>在此框架下，

---

<sup>39</sup>在气候变化的背景下，气候变化的潜在影响以及人类对气候变化的反应可能会产生风险。与这两类风险相关的概念是“物理风险”和“过渡风险”。本章讨论的风险（包括其组成部分：危害、暴露和脆弱性）仅指前者。

<sup>40</sup>与气候相关的危害：可能发生的自然趋势或事件，可能导致生命损失、伤害或其他健康影响，以及财产、基础设施、生计、服务提供、生态系统和环境资源的损害和损失。暴露包括人的生存、生活活动；物种或生态系统；环境功能、服务和资源；基础设施；或可能受到不利影响的地点和环境中的经济、社会或文化资产。脆弱性是指受到不利影响的倾向或倾向。脆弱性包含多种概念和要素，包括对伤害的敏感性或易感性以及缺乏应对和适应的能力。

图 4.1 展示了中国面临的主要气候变化风险。<sup>41</sup>



图 4.1 中国面临的主要气候变化风险

中国与气候相关的主要灾害一方面是与气候相关的极端天气事件的增加，另一方面是由于暴露程度的增加而导致的脆弱性增加。近百年来，中国年平均气温和降水特征发生了显著变化：<sup>42</sup>1901-2010 年，地表平均气温上升了 0.98℃，特别是 1980 年以来增温速度加快；预计平均气温变化将高于全球平均水平，到本世纪末将上升 5° C。虽然年平均降水量没有出现明显变化，但降水量的时空分布发生了明显变化。气候条件的变化也改变了中国天气和极端气候的严重程度。根据 EM-DAT，<sup>43</sup>自 2001 年以来，中国共记录了 482 次极端天气和气候事件。其中最常见五种极端天气包括洪水（202 次）、风暴（192 次）、山体滑坡（53 次）、干旱（22 次）和极端气温（9 次）。<sup>44</sup>

主要暴露包括两类，即自然生态系统和社会经济系统。在中国，自然生态系统的脆弱性主要表现在社会经济发展对水资源、陆地生态系统和沿海生态系

<sup>41</sup> 参见：1) 中华人民共和国气候变化第三次国家信息通报[Z/OL]。(2018)。 [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/China%203NC\\_English\\_0.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/China%203NC_English_0.pdf)。2) 气候风险国家概况：中国[Z/OL]。(2021)。 <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/703641/climate-risk-country-profile-china.pdf>。3) 国家适应气候变化战略 2035[Z/OL]。(2022)。 <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202206/W020220613636562919192.pdf>。

<sup>42</sup> 世界银行气候变化知识门户[EB/OL]。[2023-03-15]。 <https://climateknowledgeportal.worldbank.org>。

<sup>43</sup> EM-DAT 代表紧急事件数据库。它是一个国际数据库，包含 1900 年以来世界各地发生的自然和技术灾害的综合信息。

<sup>44</sup> 洪水包括河流、山洪和沿海洪水；风暴包括热带气旋和对流风暴；极端温度包括极端炎热和寒冷以及严酷的冬季条件。

统造成压力。农业灌溉设施不足、城市基础设施缺乏风险规划、医疗资源供给不足等反映了社会经济系统的脆弱性，而高温干旱导致水位下降波及水力发电是另一个潜在风险。

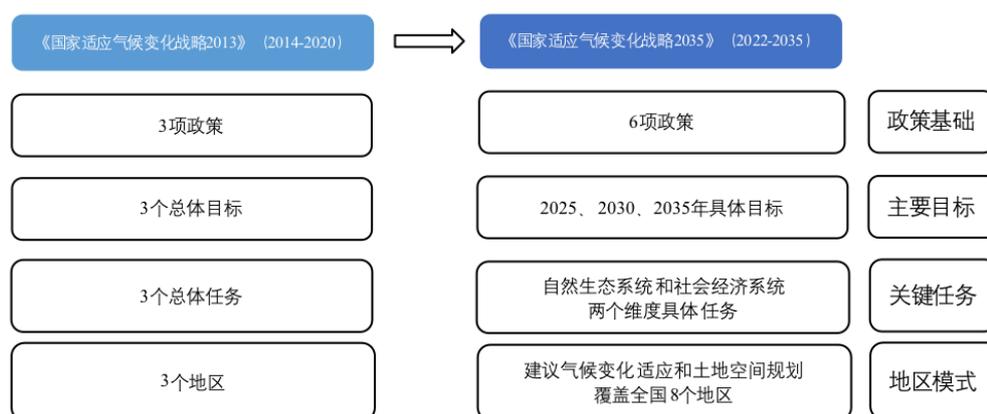
尽管中国已经采取了一些适应措施来减少上述危害、暴露或脆弱性，但仍有许多遗留风险没有得到有效应对和适应（见图 4.1）。根据《中国气候变化蓝皮书（2023）》，<sup>45</sup>主要影响（已产生的风险）包括水资源短缺；土壤退化、旱地扩张和荒漠化；海岸侵蚀率和海水入侵；农业部门生产力下降和粮食安全；城市基础设施和更广泛经济的运行受到干扰；与高温相关的死亡率增加；水传播疾病和媒介传播疾病增加；营养不良等。这些是中国需要适应的主要风险。

中国始终坚持减缓与适应并重，实施了促进适应气候变化的国家战略（见专栏 4.1）。《国家适应气候变化战略 2035》明确了缓解中国气候变化风险的三个适应重点：1）加强气候变化监测、预警和风险管理；2）提高水资源、陆地生态系统、海岸带等自然生态系统适应气候变化的能力；3）提高农业、城市系统、人类健康等社会经济系统适应气候变化的能力。

#### 专栏 4.1 中国适应气候变化的政策和行动

2013年以来，中国先后发布了两个版本的《国家适应气候变化战略》。最新版本《国家适应气候变化战略2035》更加突出气候变化监测预警和风险管理，包括完善气候变化观测网络，强化气候变化监测预测预警，加强气候变化影响和风险评估，强化综合防灾减灾等任务举措。

专栏图 4.3.1 中国气候变化适应战略



<sup>45</sup>同上。

## 4.2 适应气候变化的潜在数字解决方案

鉴于上述中国气候变化适应的主要挑战和优先事项，本节考虑中国的需求探讨国际案例和最佳实践。广泛的文献综述重点关注数字技术和工具在促进气候变化适应方面的潜在作用，其中一些工具可以帮助制定适应气候变化的长期规划，而另一些工具则可以帮助预测和应对直接的气候变化危害。如第 3 章所示，空间规划可以帮助城市增强应对气候变化挑战的抵御能力。本节探讨了另外两个主要领域：气候变化监测和预警；应对洪水的城市水资源管理。这些都是中国面临的最常见的直接气候灾害。

### 4.2.1 高精度降水预报的人工智能技术

气候变化监测和灾害预警依赖于精确的气候和极端天气预测。中国在开发和实施极端天气预报和风险管理系统方面取得了巨大的努力和进展（见表 4.2）。当前的天气预报通常依赖于由世界上最大的超级计算机提供支持的传统物理技术。这些方法受到高计算要求的限制，并且对它们所基于的物理定律的近似值很敏感。（Kalchbrenner 和 Espeholt ， 2021）。因此，天气预报系统可以进一步提高效率和准确性。例如，中国气象局发布了《气象科技发展引领规划 2020-2035 年》，通过发展和部署特定目标多维立体观测技术、智能协同观测技术、多维立体观测技术等智慧技术，推动气象现代化建设。——多源观测数据融合应用技术。<sup>46</sup>

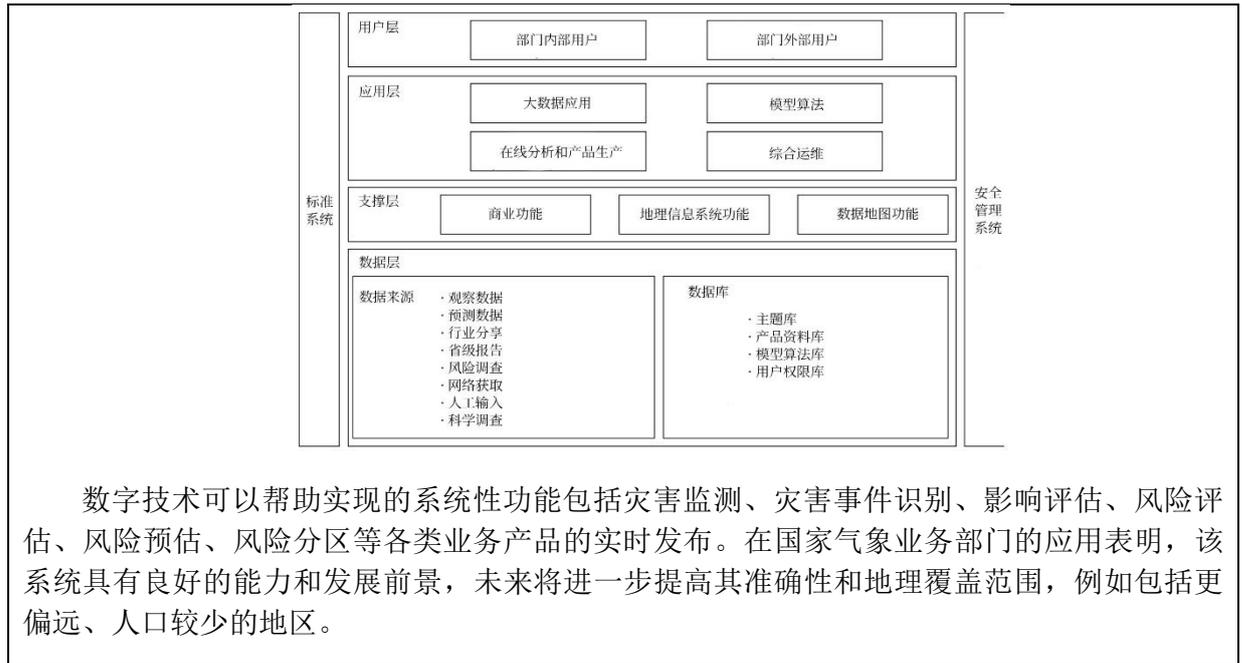
**表 4.2 中国气象灾害风险管理体系<sup>47</sup>**

为提高灾害风险管理能力，中国已形成气象灾害调查、致灾阈值识别、致灾阈值预警系统、灾害风险定量评估、精细化灾害风险区划、灾害风险区划等技术体系，建设了建设了大数据应用、模式算法、在线分析与产品制作和运营等 4 个中心系统，实现了实时监测、定量评估。风险管理体系明确了地方（省、市、县）和中央政府的风险管理职责。（图 4.2.1）。

图 4.2.1 气象灾害风险管理体系框架

<sup>46</sup>气象科技发展引领计划 2020-2035[Z/OL]. (2019). <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-11/04/5456909/files/c7c2e1cfb36d4817ba6f6d8fd293f7f7.pdf>.

<sup>47</sup>李英, 王国富. 气象灾害风险管理系统的设计与实现. 应用流星科学, 2022, 33(5): 628-640. DOI: 10.11898/1001-7313.20220510.



目前，中国正在开发一种利用人工智能技术进行精确降水预报的有效方法（Espeholt 等人，2022）。与依赖物理定律的传统方法不同，人工智能天气预报模型学习直接根据观测数据预测天气模式，从而实现更快、更准确的预测（Kalchbrenner 和 Espeholt，2021）。通过结合人工智能技术进行降水预报，科学家们可以实现一种新的天气预报精准模型。这种方法消除了对天气物理数据进行手动编辑的需要，而是利用观测到的天气现象，进行“端到端”学习。此外，人工智能技术允许在低精度硬件上进行并行预测，这代表了天气预报方法的重大进步。

这些方法，包括谷歌的 MetNet-2、盘古天气等，可能会提高预测的范围和分辨率（Bi 等人，2022）。尽管仍处于实验室阶段，但 MetNet-2 已显示出其准确、高效的降水预报潜力（Espeholt 等人，2022）。MetNet-2 的预测性能和速度超过了传统的基于物理的模型，特别是对于临近预报（即预测未来 2-6 小时的天气）。与基于物理的模型相比，MetNet-2 的性能优于最先进的高分辨率集合预报模型，可提前 12 小时进行天气预报。<sup>48</sup>同时，基于人工智能的方法的计算要求较低，速度更快。在预测所需的时间方面，基于物理的模型大约需要一个小时，而 MetNet-2 只需一秒（Kalchbrenner 和 Espeholt，2021）。

<sup>48</sup>HREF 模型 [EB/OL]. [2023-03-16]. [https://nomads.ncep.noaa.gov/txt\\_descriptions/HREF\\_doc.shtml](https://nomads.ncep.noaa.gov/txt_descriptions/HREF_doc.shtml).

这些模型最近在《自然通讯》等期刊上发表，尚未正式应用，当前面临着几大障碍。首先，技术需要进一步发展，以扩大天气现象的考虑范围，并将预报范围延长到数天和数周，而中国尚缺乏有效的大学和企业研究机构多元参与的机制和激励措施。例如，根据《中华人民共和国气象法》，一些天气探测数据是保密的，<sup>49</sup>这可能会影响民间机构对新技术研究所需数据的可用性。此外，气象部门内部虽然有创新激励，但外部参与创新缺乏有效渠道和激励。其次，它们的数据更加密集、多源，这在数据收集、集成和治理方面产生了问题（Kalchbrenner 和 Espeholt，2021）。

#### 4.2.2 城市水务领域的运营数字孪生

气候变化导致的降水时空分布变化给中国城市地区的水资源管理带来了挑战。与降水事件相关的巨大不确定性导致下水道系统内高流量频率增加，引发下水道溢流。这些溢流将未经处理的废水排放到环境中，对水环境水生态造成严重威胁（Digital Water, 2023），并加剧水污染、水资源短缺风险和水传播疾病。<sup>50</sup>瑞典的哥德堡和赫尔辛堡等城市实施了数字孪生水资源管理技术，这对于降低中国城市水务部门对气候变化的脆弱性具有较好的示范作用。

数字孪生技术构建了一个具有在线流量预测和控制策略建议功能的决策支持系统。利用数字孪生技术，决策者们可以实现控制策略变化影响的快速可视化，从而增强决策的信心（Digital Water, 2023）。仿真结果表明，实施实时控制策略可以显著减少哥德堡案例中的下水道溢流事件，潜在的好处包括更稳定的水处理过程、更低的临界负载风险以及更灵活的增加处理材料堆积问题应对。大雨过后，中国城市的下水道溢流很常见（Talamini 等人，2016）。未经处理的废水可能携带来自地面的污染物进入城市环境，造成水污染、淡水短缺和水传播疾病的增加。<sup>51</sup>这种气候变化的脆弱性在中国尚未得到很好的解决，而快速的城市化和日益增加的气候灾害将会加剧这种脆弱性。因此，扩大数字孪生解决技术将对中国的城市水管理产生重大影响。

---

<sup>49</sup>中华人民共和国气象法[EB/OL]。[2023-03-16]。 [http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2005-09/27/content\\_70627.htm](http://www.gov.cn/ziliao/flfg/2005-09/27/content_70627.htm)。

<sup>50</sup>合流下水道系统会导致大雨后患病风险[EB/OL]。[2023-03-16]。 <https://today.uic.edu/combined-sewer-systems-lead-to-risk-of-illness-after-heavy-rains/>。

<sup>51</sup>同上。

在借鉴哥德堡和赫尔辛堡案例经验的同时，实施数字孪生也面临着一些挑战（Digital Water, 2023）。其中一项主要挑战是如何整合多个来源的水流量波动的数据，包括天气预报、用水实体、污水处理部门。高质量数据收集和管理的不足、机构间数据传输协调机制的缺乏或隐私保护法律的缺失都可能阻碍多源数据的顺利整合。另一个挑战是如何在控制室操作员之间建立对数字孪生系统的信心。

### 4.3 利用数字化适应的治理创新

正如之前的案例研究所证明的那样，数字化在促进气候变化适应方面发挥着重要作用。同时，开发和部署此类数字解决方案面临许多挑战，可分为四类：1) 数字技术的发展，特别是推动技术从实验室到实际应用的研究；2) 数据收集、管理和整合；3) 多个机构之间的协调问题，以及 4) 关于共享数据或开发新方法的允许性的法律问题。此外，气候变化适应规划需要审查长期风险，例如极端事件模式随时间变化的风险——多次洪水、热浪、干旱、野火等。人工智能应在这方面发挥重要作用，帮助识别这些风险。长期风险并支持有关如何建立复原力的决策。

中国启动了一系列研发计划，以促进创建适应气候变化的数字解决方案。例如，科技部正在支持极端天气和预报技术的研究，以及数字适应决策支持系统的研究。然而，该领域的资金相对有限，导致此类研究通常在大学和其他公共研究机构小规模进行。而且研究结果往往停留在实验室阶段，实际应用的“最后一公里问题”仍未得到解决。此外，中国仍缺乏鼓励各部门参与开发气候适应数字解决方案的综合激励政策。私营部门研究机构在这方面也拥有强大的能力。鉴于适应工作本质上是长期的，并且往往具有积极的外部性，因此需要适当的激励政策来解决市场失灵问题并促进私营部门的参与。

部署适应气候变化的数字技术需要多个数据源的支持，包括来自个人、企业、政府和非营利组织的数据。无论从技术、法律还是管理的角度来看，这些多源数据都不容易整合在一起。首先，统计标准不同、部门数据质量参差不齐，导致中国数据孤岛现象严重、信息共享不畅。其次，隐私和数据安全无法得到保障，削弱了个人和企业共享数据的意愿。三是缺乏规范的共享方式和政策。

中国政府在这方面也做出了很多尝试。例如，政府发布了国土空间规划蓝图，用以实施监管信息系统技术规范。这一技术规范系统地描述了国土规划数据的采集标准、数据管理和数据监管策略。

部署数字技术来适应气候变化需要跨部门多个机构的协调努力。例如，农业、城市规划、应急管理和气象部门需要交换有关适应气候变化的数字解决方案的信息。中国正在积极建立适应气候变化跨部门协调机制，推动政策和技术协调推进。例如，17个部门联合发布了《国家适应气候变化战略2035》，但实质性协调机制仍处于探索阶段，尚未完全建立有效的协调机制。

在部署适应气候变化的新型数字方法时，可能会出现与责任和问责相关的法律问题。确定谁对数字适应技术造成的潜在不确定性和危害负责对于解决这些问题至关重要。由于部署数字解决方案仍处于初级阶段，需要相关的政府政策支持，如第6.3节所述。

## 5. 性别观点

过去 50 年破纪录的经济增长使中国社会的大部分人都受益，但尚未能够充分提高女性相对于男性同行的地位。在大多数从工业经济转向服务经济的国家中，妇女的平等程度遵循一个 U 型路径，从工业化社会之前的较高平等水平，下降至工业社会的较低平等水平，再次提升至服务经济中的较高平等水平。在服务业已经占 GDP 一半以上的中国，这种模式并不成立，女性平等遵循 L 形路径（Brusseovich 等，2021）。女性劳动力参与率从 1990 年的 73% 下降到 2021 年的 61%，而男性劳动力参与率从 1990 年的 86% 下降到 2021 年的 78%。<sup>52</sup> 因此，尽管中国在经济增长和总体福利方面取得了巨大进步，但对于其人口来说，一些趋势表明男女之间的不平等日益加剧。

麦肯锡的一项研究表明，工业 4.0 有可能通过开辟新的机会（尤其是为女性）来改善当前的劳动力市场状况。以前必须由人类完成的任务可以外包或自动化，从而改变工作方式。麦肯锡估计，女性将稍微受到工作（部分）自动化的影响，这将带来更大的灵活性，但也会导致活动的必要转变以及特定技能的重要性日益增加。在中国，到 2030 年，大约 4 至 3600 万女性（占 2017 年就业人数的 1% 至 10%）可能需要跨职业和技能转型以保持就业（Madgavkar 等，2019）。

更广泛地说，人工智能(AI)和数字基础设施不仅仅是技术。“从根本讲，人工智能是技术和社会实践、制度和基础设施、政治和文化。这使得计算理性和具体工作紧密相连：人工智能系统反映并产生社会关系和对世界的理解”（Crawford，2021）。如今，女性仅占全球人工智能工作者的 22%（联合国妇女署，2023 年）。这种情况在整个科学、技术、工程和数学（STEM）领域也很明显，女性在这些领域中占绝大多数。无论是在高等教育、大学教育还是劳动力市场，女性在世界各地 STEM 领域的代表性不足（Ortiz-Martinez 等，2023）。他们约占全球科研职位的 29%，在东亚和太平洋地区约占 23%（联合国教科文组织，2020a）。硅谷的科技公司估计，技术职位申请者中只有 1% 是女性（联合国教科文组织，2020b）。联合国教科文组织报告称，全球研发职位

---

<sup>52</sup>世界银行 2023 年数据（[劳动力参与率，总计（占 15 岁以上总人口的百分比）](https://data.worldbank.org/SH.LVTS.EV.ZS)（模拟国际劳工组织估计）- 中国 | 数据 (worldbank.org)，访问日期：2023 年 3 月 7 日）。

中女性占 31%，而女性操作基本数字技术的可能性比男性低 25%。<sup>53</sup>

在中国，工程和数学领域的学生中女性比例不到 30%，受好评的科技职位由女性担任的比例不到 20%，中国科学院的工程和数学领域教师中女性比例仅为 6%（联合国开发计划署，2021 年）。联合国开发计划署驻地代表估计，中国绿色经济中 80% 的高薪 STEM 工作将由男性担任（联合国开发计划署，2022 年）。AI 指数 2021 年度报告估计，计算机科学终身教授中只有 16% 是女性（Zhang D. et al., 2021）。虽然在许多 G20 国家中，女性作为人工智能文章发表者的比例约为 10-30%，但在中国，这一比例在过去十年中始终保持在 4% 左右（OECD, 2022）。然而，这些数字应被理解为基线，表明存在更多现有数据中不可见的性别不平等现象。一项针对工程和数学领域性别差距的研究表明，缺少按性别分类的数据会阻碍政策制定者了解问题的真正深度（Vargas-Solar, 2022）。

尽管利用妥当的科技带来了新的工作岗位和可能性，但也带来了一些社会不公正现象：那些因工业 4.0 而受益的群体是能使用这些方式和服务的人群，并不包括那些可能被抛在后面的人是那些与数字脱节的人、那些无力承担数字解决方案的人、那些没有或未被授予访问权限的人、那些缺乏基础知识和教育选择的人，以及那些不相信自己的数字技能的人。受这些障碍和由此产生的数字鸿沟影响的最大边缘群体是女性（GAMA, 2022）。如果歧视因其他因素（称为交叉性）而加剧，则不利因素可能会增加。这意味着基于性别认同、性取向、年龄、出身、残疾或社会经济地位的歧视不能相互孤立地看待或简单地相加，而是在交叉点上出现新形式的歧视。因此，生活在偏远和农村地区的妇女、原住民妇女、残疾妇女或年轻或老年妇女面临着额外的、可能不同形式的障碍和边缘化（联合国教科文组织，2020c）。

将妇女排除在基于数字技术的设计、政策和社会干预之外会对有效缓解和预防气候变化产生有害后果。首先，女性更容易受到气候变化的影响。气候变化预计将增加基于性别的暴力、童婚和女孩的辍学率，并迫使妇女走更远的距离来完成日常任务（UNFCCC, 2022）。如果数字解决方案没有适当考虑女性的

---

<sup>53</sup> 教科文组织，UIS 数据中心（[UIS 统计数据 \(unesco.org\)](https://uis.unesco.org)，访问日期：2023 年 3 月 17 日）。

需求，就有可能加剧现有的不平等并限制这些解决方案的有效性。

其次，女性是气候变化适应和预防措施的有效推动者，可以说比男性更有效。然而，女性在“绿色工作”和工程和数学领域的代表性不足，而这对于成功应用数字工具实现可持续发展目标至关重要。此外，担任决策职位的女性可以果断地将她们领导的公司转向可持续增长的方向（Deininger 和 Gren，2022）。人们还发现，女性是 ESG 计划和改善可持续商业实践的更有效推动者。如果女性在对开发数字解决方案至关重要的工程和数学领域仍然很少，那么这些行业很可能无法充分利用人才来寻找有效的解决方案，以实现惠及所有人的数字行业的绿色转型（Giner-赖克尔，2023）。

### 专栏 5.1 通用人工智能：匹配中的性别偏见

推进以人为本的人工智能，特别关注减少性别和其他偏见，有利于气候和社会公平。人工智能是一项颠覆性技术，将改变人们的工作方式。Gartner 预测，到 2025 年，50% 的知识工作者将每天使用人工智能，高于 2019 年的 2%（Bradley，2020）。人工智能潜在影响的一个生动例子是，它可以显著减少知识工作者平均花费在查找数据上的 25% 的时间（Patenall，2022）。

匹配，是指将工作者与职位进行匹配的过程，是一个很有前景的领域，在这个过程中，AI 有望帮助减轻知识工作者的负担。然而，算法偏差可能会导致不同性别的不平等待遇。例如，将性别设置为女性会导致搜索查询中出现的高薪工作较少（Collett et al.，2022）。此外，LinkedIn 发现，男性比女性更常看到空缺职位，这仅仅是因为男性往往更频繁地寻找工作（Wall 和 Schellmann，2021）。工程和数学领域的职位空缺向男性展示的可能性比女性高 20%，这加剧了该领域已经占据主导地位的不平等现象（Lambrecht 和 Tucker，2019）。

人工智能也可能是解决方案的一部分，因为它可以调整工作描述的语言并使其更加平等，例如在 Textio 公司中（Black 和 van Esch，2020）。另一个希望可能是人工智能支持的积极的劳动力市场政策。人工智能可能有助于政府改善职位空缺和求职者之间的匹配。大数据分析可能会确定最重要的技能提升或再培训干预措施。如果这些措施部分是专门针对女性的需求而制定的，或者相关人工智能的编程方式是专门针对女性候选人的，那么这可能会对就业市场产生有益的影响（Collette 等人，2022）。

让女性从事有影响力的绿色工作（通常基于工程和数学领域的专业知识）可以改善气候变化缓解措施。最近，世界银行得出结论，女性在这些高薪绿色工作中的代表性不足。他们仅占工程和数学领域学生的 8%、董事会职位的 15%、全球首席执行官的 4%、水务公司经理的 23% 以及可再生能源领域的 32%。只有 62 名女性和 100 名男性被评为“绿色人才”。<sup>54</sup>然而，自《巴黎协定》签署以来，性别多元化程度较高的公司比多元化程度较低的公司减少了 5% 的二氧化碳排放量。公司董事会中女性比例的提高有助于减少能源消耗、用水和温室气体排放。最后，研究发现，工程和数学领域的女性比男性同行更能有力地促进气候减缓（Deininger 和 Gren，2022）。因此，改进人工智能匹配算法，特别是“绿色工作”的算法，可能会为公正的可持续转型带来立竿见影的好处。

<sup>54</sup>LinkedIn，2022 年。全球绿色技能报告（[li-green-economy-report-2022-annex.pdf](https://li-green-economy-report-2022-annex.pdf) (linkedin.com)），访问日期：2023 年 3 月 16 日）。

## 6. 政策建议

过去几十年来，中国经济经历了快速的数字化进程，为中国经济发展做出了巨大贡献，并将其影响力延伸至境外。在此背景下，本研究旨在探讨数字化与可持续发展之间的联系，并具有明确的使命：数字化作为 21 世纪的主导变革力量，必须为可持续发展服务。该研究评估了中国背景下的数字化与可持续发展之间的关系，回顾了全球最佳实践，并就四大行动领域提供了政策建议：绿色数字部门、建设可持续智慧城市、利用数字化适应气候变化以及将性别观点纳入主流在数字化转型中。

### 6.1 绿色数字产业

#### ● 推动数字基础设施和设施绿色转型，减少碳排放

一是推动数字基础设施节能增效、低碳化。具体而言，政策行动应从两个方面入手：对新型数字基础设施建设实施严格、可持续的监管；推动现有新型基础设施的节能低碳转型。这要求聚焦 5G、数据中心、软件设计与开发、工业互联网等重点领域，在行业标准化组织、科研院所等组织的支持下，加快数据中心、机构和龙头企业对绿色低碳技术的研发，并鼓励企业加快液冷、自然冷却、高压直流、余热回收等节能技术的应用，延长环保产品的使用寿命；重复利用 ICT 设备，淘汰废旧设备；逐步淘汰高耗能设备，推进数据中心 ICT 设备节能等级、碳等级标准制定，有序淘汰高耗能、低效率设施。然而，人们担心“漂绿”的可能性，“清洁能源”或“绿色基础设施”等术语可能变得主观且易于解释，这有时会在数字公司的实践中得到验证。为了确保数字基础设施在可持续发展方面取得真正进展，透明度成为一个重要的先决条件。

第二点措施是通过绿色电力交易，优化现有数据中心的能源结构，提高风能、太阳能等新能源的效率，减少数据中心的碳排放。基于阿里巴巴、蚂蚁集团和百度的承诺，建议对所有数据中心和一定规模以上的数字公司制定具有约束力的 100% 可再生能源目标。目标虽然明确，但时间和机制上仍需灵活。要对国家计算中心和数据中心年度能耗进行评估并公布评估结果，支持有条件的大型数据中心利用电能使用效率、能耗等指标开展能效评估，如冷却效率比、能源再利用系数和水利用效率等。此外，云服务应标明每个服务单位的碳足迹，推动零碳数据中心分级建设，定期评估并公布评估结果。有关能源消耗的信息以及 PUE 等指标和前面章节中讨

论的其他指标应公开透明。数字公司应该通过公开展示他们如何实现这些指标来展示透明度。

三是管理电子设备全生命周期碳排放数据。鼓励制造企业建立“碳资产管理系统”，监测不同环节、不同产品的碳排放数据，规范碳数据管理，通过核算准确识别实际情况。鼓励上游原材料、零部件企业将碳排放数据传输至下游，通过绿色供应链管理，为下游企业追踪其产品碳足迹和碳排放提供高质量的数据库，利用碳生产率、碳产量等指标评价绿色生产。

- **积极推动数字企业低碳发展，倡导绿色社会责任**

第一，倡导数字企业承担社会责任，建立相应的激励机制，鼓励大型数字企业跟踪、测量和公开其能源消耗和碳排放情况，并关注数字技术对环境的积极和消极影响。

第二，基于实现国际和国内标准的统一，建立具有中国特色的环境、社会和公司治理评估体系，推动建立科学、规范的中国特色指标体系，有效引导数字企业在投资中更加注重环境和社会责任。应制定企业环境、社会和公司治理报告标准，加强政府监管机构对企业环境、社会和公司治理合规性的评估。

第三，探索应用“数字产品绿色护照”等数字工具，基于供应链记录碳排放足迹，并在政府采购指导下设计激励措施和价格机制，促使消费者购买更多环保产品和服务。

第四，利用数字平台服务促进绿色消费，培养公众绿色生活习惯，例如支持消费者减少数据和硬件消耗。算法可能更倾向于消费高质量、长寿命的产品，但降低高周转、高材料密集型产品的消费。改善有利于共享经济服务模式（如共享出行、在线办公和闲置物品交易）的政策环境。

- **改善数字技术的支持服务能力，赋能各行业管理、减少碳排放。**

政策制定者应适应各行业的发展需求，实现精确的碳排放管理和低碳生产，加快基础、前沿和适用软件及信息技术服务的研发和推广，增强数字碳管理和减排创新能力的支持。

在数字技术部署中减少碳排放方面，优化算法非常重要，因为更高效的机器学习算法（如稀疏模型）可以提高模型运行的效率并减少能源消耗，同时利用专用芯

片进行大型模型训练。与通用处理器相比，专用芯片和针对机器学习训练优化的系统在使用时可以显著提高大型模型的性能和能源效率。此外，应使用云计算而不是内部计算资源来减少能源消耗。

通过应用数字技术减少碳排放来赋能其他行业，重要的是加强对实时数据交换、信息处理与集成等感知技术的研究，提高碳传感器的综合性能，推动数据挖掘、机器学习和建模分析等大数据技术的突破，促进碳效率的数据管理、分析和预测。还需要加强各种技术的面向碳效率的研发，并促进区块链在碳资产管理和碳交易平台中的应用。此外，还需要具体的政策行动来支持针对系统性集成数字和绿色转型的推广中心的建设。

在智能能源和智能制造等领域，数字企业和相关机构可以开展数字碳管理和减排的示范应用，为工业公司提供绿色升级和转型的数字服务或解决方案，推动传统产业的数字化、智能化、网络化和低碳化发展，更好地促进各领域的数字减排工作。

## 6.2 构建智慧可持续城市

智慧可持续解决方案可以在城市层面创造三赢机会：它们可以促进现代经济部门的发展；使城市更宜居，提高生活质量；帮助减轻地方和全球环境负担。然而，实现这些目标需要大量的政策和技术努力，以及数字基础设施建设和可持续目标的专业知识。一个核心风险是将智慧等同于可持续。数字解决方案是通用技术，可以使应用、技术和业务活动更加高效，但环境后果也取决于反弹效应和应用领域。因此，在承诺最高可持续性收益的领域和应用中加倍努力至关重要，特别是在减少温室气体排放、改善空气质量、鼓励可持续生活方式和实现高质量生活方面。以下政策可以帮助实现中国城市的三赢局面。

- **建立“智慧可持续城市评审”系统**

审计的作用是评估绩效结果，以确保在这种情况下数字化带来的机会得到充分利用，支持在移动性、建筑和空间规划方面的可持续发展。当发现弱点时，应提出激励措施、法规和进一步研究建议。可以将“智慧可持续城市评审”推广为“可持续数字化评审”，涵盖社会各个方面。

- **在应对气候问题的背景下推进城市数字治理**

杭州和深圳等城市在数字基础设施方面处于世界领先地位，并具备高度适应性

的城市治理潜力。建议这些城市的城市气候管理充分利用这些基础设施来推动气候中和。这需要协调的规划、评估在减少温室气体排放方面最有效的选项，并开发与气候目标一致的数字应用于移动性、建筑和城市规划领域。数字创新有潜力改善可持续基础设施以及城市治理实践。

- **推动试验高效共享集约出行的特殊经济可持续区**

通过税收减免和优先进入城市道路网络等手段，提供拼车和类似服务，将多人在一辆车（小巴）运输。同时，限制和规范街边停车，并对私家车征收市区通行费。预期的结果是一个更为高效的门到门出行系统，无拥堵，空气质量更好，城市经济运行更顺畅。在数字平台的支持下，杭州等城市将在这方面推进这一政策，并成为全球先行者。

- **应用人工智能推进可持续城市规划**

绘制建筑库存及其与能源相关的特征、街道网络，并计算城市形态的可持续性指标。将结果应用于可持续城市规划，使城市使用更易达、能源和资源消耗更低、更健康，并对降雨量大和极端高温和低温事件具有抵抗力。为所有中国市政提供可扩展的服务。

### 6.3 运用数字化推动应对气候变化的适应性

- **加强对科技创新的支持，制定更具弹性、针对性的数字化适应性解决方案**

全面评估与中国气候变化适应相关的科学、技术、经济和社会研究成果，从农业、城市和生态系统管理方面开始，系统地加强数字技术在农业生产、城市防灾减灾和生态保护中的应用。特别需要注意的是，政府应支持对数字化适应性解决方案实施的研究，包括对大学和研究机构提供支持，促进研究活动与实际应用之间的联系。

- **改进多源数据整合、管理及多机构协调合作机制**

在气候变化适应领域制定数据标准、数据共享机制和协调政策，尤其包括以下方面：1）建立数据共享中心（数据市场），弥补不同数字项目之间的数据差距；2）制定适当的数据监管政策，消除数据共享的不利因素（例如，隐私政策、公平正义）；3）建立农业、城市规划、应急管理和气象部门之间的信息交流和合作机制。数字化气候变化适应技术需要大量多源数据的支持。土地和空间规划实施监督信息

系统的技术规范是一个很好的参考。

- 加快立法以促进数字气候变化适应解决方案

加快建立支持发展和部署数字气候变化适应解决方案的法律框架，尤其包括：  
(a) 制定保护试错活动的法律，这对于新技术的部署至关重要；(b) 完善有关数据共享和隐私保护的法律法规，消除数据共享和多利益相关方参与的不利因素。

#### 6.4 在数字化中推广性别主流化

作为一种典型的通用技术，人工智能既反映社会关系和对世界的理解，也会产生这些关系和理解。因此，在推广人工智能和数字基础设施在社会中的普遍应用时，必须提出一些问题，例如哪些资源是必要的、如何获取这些资源，以及谁会受益，谁不会受益。为了解决这些问题，报告提出以下建议：第一，将性别分析纳入政策规划和监测工作中；第二，在规划、实施和监测过程中赋予妇女和多元化专家权力；第三，使性别分解数据成为每个数据收集活动的一部分，并促进基于数据的性别研究；第四，在评估新的数字技术和解决方案的风险时，包括对偏见的检测，并采取措施减轻偏见。为应对与人工智能相关的性别偏见，政府可以考虑以下政策行动：

- 提高意识。了解偏见，系统地研究它们，并遵循国际准则。例如，实施解决数据和人工智能系统性别偏见的政策，如鼓励公司进行性别影响评估或推动算法透明度，可以加速这一过程。
- 检测数据集中的偏见。风险分析有助于识别数据集中的弱点和威胁。借助软件、使用可解释的人工智能技术而非黑盒模型，通过分解分析评估偏见，并借鉴科学研究，可以使偏见变得明显。
- 减少现有的偏见。通过改进数据收集过程、将数据源组合在一起，并进行去偏见处理，例如平衡数据、消除刻板特征，可以修正数据集中的现有弱点。
- 沟通。在方法和数据模型方面保持透明是很重要的。公开结果和项目设计有助于使他人理解和改进模型。

## 参考文献:

- Argyroudis, S. A., Mitoulis, S. A., and Chatzi, E. (2022) 《数字技术可以增强关键基础设施的气候适应性》 [J/OL]. 气候风险管理, 2022 年, 35: 100387. DOI:10.1016/j.crm.2021.100387.
- Berkley Haas Center for Equity, Gender and Leadership, 2020. 《减轻人工智能中的偏见: 公平流畅领导力手册》 (UCB\_Playbook\_R10\_V2\_spreads2.pdf (berkeley.edu), 访问日期: 2023 年 3 月 13 日).
- Bi, K., Xie, L., and Zhang, H. (2022) Pangu-Weather: 《一种快速准确的全球天气预报的 3D 高分辨率模型》 [M/OL]. arXiv, 2022[2023-03-15]. <http://arxiv.org/abs/2211.02556>. DOI:10.48550/arXiv.2211.02556.
- Black, J. S., and van Esch, P. (2020) 《AI 增强招聘: 什么是 AI 增强招聘, 经理应如何使用?》商业视野, 63, 215 - 226.
- Bongardt, D. 等 (2013) 《低碳陆路交通: 政策手册》. (劳特利奇出版社).
- Bradley, A. J. (2020) 《做好准备, 虚拟助手的爆炸即将到来》 ([https://blogs.gartner.com/anthony\\_bradley/2020/08/10/brace-yourself-for-an-explosion-of-virtual-assistants/](https://blogs.gartner.com/anthony_bradley/2020/08/10/brace-yourself-for-an-explosion-of-virtual-assistants/), 访问日期: 2023 年 3 月 7 日).
- Bren d' Amour, C. 等 (2016) 《未来城市土地扩张及对全球农田的影响》国家科学院院刊 201606036.
- Brussevich, M. 等 (2021) 《中国的再平衡与性别不平等》, 国际货币基金组织 (中国的再平衡与性别不平等 (imf.org)).
- Caprotti, F., and Liu, D. (2022) 《平台城市主义与中国智慧城市: 杭州城市大脑的共同生产与地域化》. 地理学杂志 87, 1559 - 1573.
- Collett, C., G. Neff, and L. Gouvea Gomes (2022) 《AI 对妇女的工作生活的影响》, 联合国教科文组织, 46.
- Crawford, K. (2021) 《人工智能地图集》. 权力、政治与人工智能的地球代价. 纽黑文, 伦敦: 耶鲁大学出版社, 8.
- Creutzig, F. 等 (2022) 《数字化与人类世》. 环境与资源年度评论, 第 47 卷: 479-509 (2022 年 10 月卷), 首次作为 2022 年 9 月 2 日预先发表的评论 (<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120920-100056>).
- Deininger, F. 和 Gren, A. (2022) 《绿色工作对妇女可以应对气候危机并促进平等》 (绿色工作对妇女可以应对气候危机并促进平等 (worldbank.org), 访问日期: 2023 年 3 月 14 日).
- 数字水: 城市水务部门的运行数字孪生体 [EB/OL]// 国际水协会. [2023-03-16]. <https://iwa-network.org/publications/operational-digital-twins-in-the-urban-water-sector-case-studies/>.
- Encarnacion, J., Emandi, R., and Seck, P. (2022) 《关闭性别数据差距将需要 22 年》 (<https://data.unwomen.org/features/it-will-take-22-years-close-sdg-gender-data-gaps>, 访问日期: 2023 年 1 月 30 日).
- Espeholt, L., Agrawal, S., and Sønderby, C. (2022) 《12 小时降水预报的深度学习》 [J/OL]. 自然通讯, 2022, 13(1): 5145. DOI:10.1038/s41467-022-32483-x.
- Falchetta, G., and Noussan, M. (2021) 《欧洲电动汽车充电网络: 可达性和部署趋势分析》. 交通研究 D 部分: 交通与环境 94, 102813.

- Giner-Reichl, I. (2023) 《女性如何推动绿色转型》(女性如何推动绿色转型? | 世界经济论坛 (weforum.org), 访问日期: 2023 年 3 月 14 日).
- GSMA (2022) 《移动性别差距报告 2022》(移动性别差距报告 2022, 访问日期: 2023 年 3 月 6 日).
- Guo, Y., Xin, F., and Li, X. (2020) 《共享经济进入者的市场影响: 来自美国和中国的证据》. 电子商务研究, 20, 629 - 649 (2020).
- Höjer, M., and Mjörnell, K. (2018) 《建筑物更高效利用的措施和步骤》. 可持续性 10, 1949.
- Höjer, M., and Wangel, J. (2015) 《智慧可持续城市: 定义与挑战》. ICT 创新与可持续发展 333 - 349 (Springer).
- Jiang, H. 等 (2021) 《1990 年至 2015 年中国城市化可持续性评估, 基于土地利用效率指标》. npj 城市可持续性 1, 1 - 13.
- Johnson, M. 等 (2021) 《大数据和人工智能对产业的影响: 为数据驱动经济制定劳动力路线图》. 全球灵活系统管理杂志 22, 197 - 217.
- Kalchbrenner, N. 和 Espeholt, L (2021) 《气象网-2: 用于 12 小时降水预测的深度学习》 [EB/OL]. [2023-03-15]. <https://ai.googleblog.com/2021/11/metnet-2-deep-learning-for-12-hour.html>.
- Khanna, T. M. 等 (2021) 《在住宅建筑中减少能源消耗和 CO2 排放中行为变化的作用的多国元分析》. 自然能源 6, 925 - 932.
- Lambrecht, A., Tucker, C. (2019) 《“算法偏见? 对 STEM 职业广告中明显基于性别的歧视的实证研究”》. 管理科学 65(7).
- Liu, T., and Li, Y. (2021) 《中国泛珠三角城市群的绿色发展》. 科学报告 11, 15717.
- Lwasa, S. 等 (2022) 《城市系统和其他定居点》. 联合国政府间气候变化专门委员会, 2022 年: 气候变化 2022 年: 气候变化的减缓. 第三工作组对第六次评估报告的贡献 158 (剑桥大学出版社, 2022).
- Madgavkar A. 等 (2019) 《工作中的女性未来: 自动化时代的转变》, 麦肯锡 (工作中的女性未来: 自动化时代的转变 | 麦肯锡, 访问日期: 2023 年 9 月 2 日).
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A. (2021) 《2021 年气候变化: 物理科学基础》 [J]. 第一工作组对第六次评估报告的贡献, 2021 年, 2.
- McKinsey, 2021. 《关于人工智能和性别偏见的对话》 (关于人工智能和性别偏见的对话 | McKinsey, 访问日期: 2023 年 3 月 17 日).
- Meteorological Technology Development Leading Program 2020-2035[Z/OL]. (2019). <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-11/04/5456909/files/c7c2e1cfb36d4817ba6f6d8fd293f7f7.pdf>.
- Milojevic-Dupont, N., and Creutzig, F. (2021) 《用于地理差异化城市气候变化减缓的机器学习》. 可持续城市与社会 64, 102526.
- MTR Lab (2023). 《创新解决方案》. <https://www.mtrlab.com/hk/tech-solution?lang=en>.
- OECD (2022) 《人工智能对妇女工作生活的影响》(报告: 人工智能对妇女工作生活的影响, 访问日期: 2023 年 3 月 7 日), 21.

- Ortiz-Martinez G. 等 (2023) 《高等教育中女性留存情况分析》，人文社会科学交流 10；催化剂, 2022. 《科学、技术、工程和数学领域的女性》（科学、技术、工程和数学领域的女性）| 催化剂, 访问日期: 2023 年 3 月 17 日); 女性工程师协会, 2022. “全球科学、技术、工程和数学领域人力资源”（全球科学、技术、工程和数学领域人力资源劳动力 - 女性工程师协会 (swe.org), 访问日期: 2023 年 3 月 8 日).
- Patenaill, H. (2022) 《知识工作者是谁, 人工智能技术如何加快他们的工作?》(知识工作者是谁, 人工智能技术如何加快他们的工作? - Aiimi, 访问日期: 2023 年 3 月 14 日).
- Patterson, D. 等 (2021) 《碳排放和大型神经网络训练》[J]. arXiv 预印本 arXiv:2104.10350.
- Qu, J., and Yan, J. (2023) 《COVID-19 流行危机期间在家工作与在办公室工作对工作绩效的影响: 来自中国的证据》. 亚太人力资源期刊 61, 196 - 231.
- Ramboll. (2021) 《性别与(智能)出行》. 绿皮书.
- Rockström, J. et al. (2009) 《人类安全操作空间》. 自然, 461(7263), 472 - 475. <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- Rockström, J., and Figueres, C. (2018) 《指数级气候行动路线图》. 全球气候行动峰会. [EB/OL]. [2023-02-02]. <https://exponentialroadmap.org/exponential-roadmap/>.
- Santarius, T. et al. (2022) 《数字充实: 关于有限地球上信息通信技术的概念考虑》. Ann. Telecommun. doi:10.1007/s12243-022-00914-x.
- Santarremigia, F., Molero, G., and Malviya, A. (2022) 《从数据中揭示公平可行的知识以支持女性参与交通系统的方法论: 钻石方法》.
- Silva, M. C. et al. (2017) 《基于神经网络的空间显式方法论框架用于评估城市形态对能源需求的影响》. 应用能源 202, 386 - 398.
- Silva, M.C. et al. (2018) 《一种基于场景的方法用于评估城市发展路径的能源性能》. 可持续城市与社会. doi:10.1016/j.scs.2018.01.028.
- Skea, J. et al. (2022) 《2022 年气候变化: 减缓气候变化》. 政策摘要报告. (IPCC, 2022).
- Strubell, E., Ganesh, A., and McCallum, A., (2019) 《自然语言处理中的能源和政策考虑》[J]. arXiv 预印本 arXiv:1906.02243.
- Talamini, G., Shao, D., and Su, X. (2016) 《中国深圳市的综合性下水道溢流问题: 以大沙河为案例》. 可持续发展与规划 2016. 马来西亚槟城, 2016: 785-796[2023-03-16]. <http://library.witpress.com/viewpaper.asp?pcode=SDP16-066-1>. DOI:10.2495/SDP160661.
- UN Women (2018) 《使女性和女孩可见: 性别数据差距及其重要性[问题简报]》. 检索自 <https://www.unwomen.org/-/media/headquarters/attachments/sections/library/publications/2018/making-women-and-girls-visible-gender-data-gaps-and-why-they-matter-en.pdf?la=en&vs=2783> (访问日期: 2023 年 3 月 14 日).
- UN Women (2022) 《与女性和女孩共创安全和赋权的公共空间》.
- UN Women (2023) 《聚焦: 国际妇女节》. 检索自 <https://www.unwomen.org/en/news/in-focus/international-womens-day> (访问日期: 2023 年 3 月 13 日).

- UN Women (2023) 《聚焦：国际妇女节》. 检索自 <https://www.unwomen.org/en/news/in-focus/international-womens-day> (访问日期: 2023年3月13日).
- UNDP (2021) 《设计一个更公平的未来: 为什么科技领域的女性对于实现更加平等的世界至关重要》. 检索自 <https://www.undp.org/publications/designing-fairer-future-why-women-tech-are-key-more-equal-world> (访问日期: 2023年3月17日).
- UNDP (2022) 《科学中的女性能改变世界》. 检索自 <https://www.undp.org/publications/women-science-can-change-world> (访问日期: 2023年3月17日).
- UNESCO (2020a) 《STEM教育对亚洲女性和女孩的突破障碍和性别不平等问题的探索》. 检索自 <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373842> (访问日期: 2023年3月8日).
- UNESCO (2020b) 《AI和新兴技术中的性别偏见》. 检索自 <https://en.unesco.org/themes/women-s-and-girls-education/gender-biases-ai-and-emerging-technologies> (访问日期: 2023年3月7日).
- UNESCO (2020c) 《人工智能与性别平等: 联合国教科文组织全球对话的关键发现》. 检索自 <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373093> (访问日期: 2023年3月6日).
- UNESCO, OECD, IDB (2022) 《人工智能对女性工作生活的影响》. 检索自 <https://www.iadb.org/en/news/人工智能对女性工作生活的影响> (访问日期: 2023年3月13日).
- UNFCCC (2022) 《气候变化的性别差异影响、妇女作为变革推动者和妇女机遇的维度和例证》. 秘书处综合报告. 检索自 <https://unfccc.int/documents/273070> (访问日期: 2023年7月16日).
- Vargas-Solar, G. (2022) 《通过识别关于女性的缺失数据集进行交叉研究 STEM 领域的性别差距: 一个多方面的问题》, 应用科学 12(12).
- Wagner, F. et al. (2022) 《使用可解释的机器学习来理解城市形态如何塑造可持续出行》. 交通研究第 D 部分: 交通与环境 111, 103442.
- Wall, S., Schellmann, H. (2021) 《领英的招聘 AI 存在偏见, 公司的解决方案是增加 AI》. MIT 技术评论. 检索自 <https://www.technologyreview.com/2021/06/16/1026223/linkedin-job-matching-ai-was-biased/> (访问日期: 2023年3月7日).
- World Economic Forum (2022). 《开源数据科学: 如何减少人工智能的偏见》. 检索自 <https://www.weforum.org/projects/open-source-data-science-how-to-reduce-bias-in-ai> (访问日期: 2023年3月13日).
- World Economic Forum (2023). 《全球新移动联盟》. 全球新移动联盟. 检索自 <https://initiatives.weforum.org/global-new-mobility-coalition/home>.
- Yan, X., and Li, T. (2022) 《建设和应用城市数字基础设施——面对中国杭州 COVID-19 的实践》. 工程、建设和建筑管理.
- Yin, Z. et al. (2022) 《在线教育对 COVID-19 大流行背景下碳排放的影响——以中国大学为例》. 应用能源 314, 118875.
- Zhang D. et al. (2021) 《AI 指数 2021 年度报告》, 138 (2021-AI-Index-Report\_Master.pdf (stanford.edu), 访问日期: 2023年3月7日).

## 致 谢

非常感谢中国环境与发展国际合作委员会（国合会）设立并支持“数字化与绿色技术促进可持续发展”政策研究课题，为中外方专家提供了一个充分讨论和交流的平台。特别感谢国合会中方首席顾问刘世锦先生、外方首席顾问 **Scott Vaughan** 先生在课题实施过程中提供的咨询建议，感谢国合会秘书处处长张慧勇先生、副处长刘侃女士、高级项目主管郝小然女士为本课题提供的咨询、组织和协调等方面的支持。同时项目组对以下专家和同事为本项目研究所做出的重要贡献表示感谢：

国合会国际支持办公室 (SISO): Sam Zhang, 郑琦, Brice Li, Isaak Bowers  
世界经济论坛 Maya Ben Dror, Na Na, Helen Burdett, 彭婷, Tony Wu, 雷哲琼,  
Mario Canales  
德国环境署: Marcel Dickow  
国际可持续发展研究所: Hans Baumgarten  
国家信息中心: 房毓菲  
腾讯: 童流川  
WPS 小组: Kristine St-Pierre  
上海财经大学: 钟睿

附录 1 - 2021 年中国数字技术应用和应用领域的技术复杂度测量指数

序号	技术	技术应用 复杂度指数	应用领域	应用领域技术 复杂度指数
1	知识图谱	16.5685	智能制造	18.8338
2	区块链	16.2024	智能家居	18.766
3	人机交互	16.0711	智能营销和零售	18.677
4	自然语言处理	16.0669	智能硬件	18.5538
5	智能推荐	15.9579	企业智能管理	18.5489
6	大数据与云计算	15.9505	智能农业	18.5262
7	语音识别	15.8385	新媒体和数字内容	18.4512
8	智能芯片	15.8158	智能文化和旅游	18.3505
9	计算机视觉	15.8113	智能安全	18.3421
10	空间技术	15.7028	智能医疗	18.0937
11	自动驾驶	15.6962	智能物流	18.0227
12	生物识别	15.6318	智能交通	17.6297
13	第五代移动通信技术	15.6195	智能城市	17.547
14	虚拟/增强现实	15.6053	智能能源	17.2894
15	智能机器人	15.5315	智能互联车辆	17.2766
16	物联网	15.5029	智能教育	16.8158
17	光电技术	15.1286	智能治理	16.2989
18			网络安全	15.4846
19			智能金融	14.6639

## 附录 2 - 欧洲典型实践案例

- 数据中心的 KPI4DCE 指标体系

有许多出色的绿色数字经济案例，一些德国案例非常值得关注。其中之一是由德国环境署（UBA）创建的用于数据中心的 KPI4DCE 指标体系。这种计算方法（KPI4DCE）可以确定数据中心的能源和资源效率，考虑到 ICT 产品的整个生命周期和供应结构。KPI4DCE 方法不仅计算诸如电源使用效率（PUE）和全球变暖潜能（GWP）等能源效率指标，还计算原材料需求、累积能量需求（CED）和非生物耗尽潜力（ADP）。因此，这个指标体系为寻求提高效率的数据中心提供了有价值的最佳实践指南。

- 数据中心的公共能效注册

减少数据中心对环境影响的另一个解决方案是建立一个数据中心的公共能效注册。目前，还没有统计记录或数据库以公司报告的数据为基础总结数据中心的能源消耗，这使得难以获得它们的能源效率的整体图景，并评估其能源消耗的发展，设定最低要求并检查其是否符合要求。能效注册将在能源消耗和效率方面提供透明度，为立法和市场动态提供依据。数据中心是数字化和其他行业效率改进的重要贡献者。然而，需要对其能源效率和能源消耗进行透明度，以激励和竞争实现可持续和节能的数字基础设施转型。研究项目“建立德国数据中心注册并开发评估能效数据中心的系统”（简称：Peer DC）旨在建立一个安全的数据库，并为提高数据中心能源效率创造前提条件。其三个主要目标是：1) 建立数据中心注册并可视化其内容；2) 开发适用于能效数据中心的评估系统和软件；3) 研究将数据中心评估系统在欧洲范围内推广的可行性。

注册将提供关于德国数据中心能源消耗和能源效率的可靠信息，使公众和联邦政府能够更好地评估数字化对未来数据中心能源消耗的影响，并更加真实地估计效率潜力。同时，通过将数据中心作为可利用的余热来源进行突出，该注册可以促进热能转型。作为一个基于网络的地理信息门户，注册包含与数据中心的能效和其他相关信息有关的数据，并以适当的形式向公众开放。概念上正在考虑扩展该注册至其他欧盟成员国。

- 绿色 ICT 采购

ICT 设备在能源和资源需求方面具有很高的环境影响，而它们使用的时间越短，环境影响就越大。通过在采购过程中考虑可持续性标准并延长设备的使用寿命/重复利用，有很大的潜力减少 ICT 使用的环境影响。私营和公共机构应采用战略性的可持续 ICT 采购策略，以减少电子废物和其他环境影响。诸如德国的蓝天使（Blue Angel）等生态标签可以通过为环境友好的 ICT 产品和数字服务提供高质量标准来为此努力做出贡献。蓝天使包括一个全面的生态标准和健康因素目录，例如使用非致癌材料和低噪音水平。它是绿色采购的重要标志，为消费者提供指导。这个 40 年历史的政府标志确保了消费者的透明度和方向性，同时创造了市场动态。蓝天使适用于广泛的 ICT 产品，包括在确定如何使用环保信息和通信技术方面起重要作用的软件。软件影响能源消耗，并可能导致过早更换硬件（即“与软件相关的过时现象”）。

- 能效和资源高效的软件编程

迄今为止，软件开发和数据处理的学科尚未受到技术的限制。不高效的编程通常可以通过更快的处理器和更大的主内存来弥补，这导致需要传输和存储的数据量更大。然而，由于低效或臃肿的软件而导致硬件的高使用率，会直接影响能源消耗和硬件更新周期。“SoftAWERE - 能源高效和资源节约开发的软件架构工具”项目旨在解决以下任务：1) 访问软件开发组件和工具的能源效率和硬件需求；2) 开发支持软件开发人员创建能源高效和节约硬件的工具；3) 调查能源高效软件的可行性并制定能源效率评估概念；4) 通过各种沟通渠道提高人们对软件能源和资源消耗的意识；5) 增加第三方对软件能源消耗的透明度。

此外，SoftAWERE 项目旨在通过促进可持续数字化来为德国政府的气候保护目标做出贡献。通过开发能源高效和节约资源的软件，该项目为实现这一目标打下了坚实的基础。

- 数字基础设施的环境影响透明度

必须改善数字基础设施的透明度。可以通过实施数据中心的可持续能源认证来实现这一目标，从而能够更好地规划和推动未来的扩展。云服务应该标明每个服务单位的碳足迹（例如，每小时、每年）。这将创建市场透明度，激励

云服务提供商提供环境友好的服务。此外，电信网络运营商（宽带、电话、移动）应该为其服务标明每个传输单位的碳足迹。这将使客户能够选择更环保的传输路径。

- 宽带和移动网络扩展中的能源效率和资源保护

在宽带扩展方面，应优先考虑向终端用户扩展能源高效的光纤网络和 5G 基础设施，而不是其他传输技术。移动网络的扩展应通过减少不同供应商在相同地区的多次无线覆盖来进行精简和资源高效化。

- 数据中心的环保规划、运营和处置

在选择新数据中心的位置时，应考虑废热利用。通常情况下，数据中心的规模过大，运行能力低下，因此未来规划应更加与实际需求相匹配。应使用模块化概念来提高数据中心在部分负荷范围内的效率。这些中心还拥有大量的硬件和有价值的原材料，因此必须开发监测仪器来回收电子废物。应识别和重新利用可重复使用的技术，并开发监测机制以优化回收流程。

- 支持用户减少数据和硬件消耗

视频内容应优化以适应终端设备的显示尺寸，确保默认分辨率与设备的能力相匹配。此外，默认情况下应禁用网页上视频内容的自动播放。为了防止可能鼓励过度数据使用的错误激励，应避免提供大容量数据流量的固定费率。

### 附录 3 - 在中国的实践案例：腾讯的碳中和目标和路线图

2022 年 2 月，腾讯宣布了其碳中和目标和路线图。腾讯承诺到 2030 年在自身运营和供应链中实现碳中和，并且在 2030 年之前所有消耗的电力将全部使用绿色能源。在路线图中，腾讯宣布了三个实施计划以实现自我零碳排放：

**可再生能源（RE）** - 腾讯积极参与绿色电力市场交易，以确保可再生能源供应。在 2023 年的交易市场中，腾讯已经签署了可持续电力交易合同，总计 534 GWh，其中四个数据中心实现了 100% 的可再生能源覆盖。腾讯还投资分布式太阳能和现场能源储存，以在校园内创建微网，这使得腾讯能够利用其数字能力，例如智能能源管理平台，增加可再生能源的使用，并未来参与电力市场交易。

**能源效率** - 腾讯在其第四代“T-block”数据中心采用了高效节能设计，所有腾讯数据中心的平均能源使用效率（PUE）低于 1.3。努力包括模块化、电源优化、冷却优化、负载优化、选址等。为了补充硬件设计，腾讯部署了数据中心智能平台，应用自动化管理、监控和分析以及基于人工智能的智能建议，让数据中心更加高效和环保。

**低碳供应链和抵消** - 作为减少第三方排放的努力的一部分，腾讯积极倡导低碳供应链，并与供应商合作进行低碳服务器采购和租用数据中心。除了积极减排外，碳抵消也是腾讯实现最终净零碳排放的一种补充方法。腾讯支持新兴的碳抵消技术，例如开发定量方法和用于碳信用度量的数字工具。

除了自身的碳中和目标，腾讯还希望成为鼓励社会拥抱可持续和低碳消费的领导者，推动各行业实现低碳转型，并促进可持续经济和社会发展，这与其推动可持续创新以实现社会价值的战略目标相一致。

**推动产业部门的低碳转型** - 腾讯积极应用数字技术来帮助优化能源效率，实现零碳建筑和公园。例如，腾讯云提供“Enerlink”和“Enertwin”来连接能源数据，以及“Carbon Engine”来统计温室气体清单。腾讯还提供特定的数字解决方案来改善与碳相关的绩效，例如林业碳信用验证的数字化，二氧化碳地下存储的可视化以及钢铁行业的虚拟电厂解决方案。

**推广低碳生活方式** - 腾讯推出一系列互联网产品来促进低碳生活方式。具

体来说，腾讯推出了一个碳中和知识问答小程序，以提高意识，并推出了一个碳岛游戏，供玩家建立一个可持续的岛屿。腾讯还推出了蓝色星球小程序，鼓励消费者乘坐公共交通工具。在办公协作软件方面，腾讯提供腾讯会议、腾讯文档和企业微信，以促进在线、无纸化的工作方式。

#### 附录 4 - 数字化推动成都市绿色高质量转型发展的创新实践

成都市地处中国西南地区、四川盆地西部、成都平原腹地，总面积 14335 平方千米，属亚热带季风性湿润气候，自古有“天府之国”的美誉。成都市为四川省省会、超大城市、国家中心城市、成渝地区双城经济圈核心城市。截至 2021 年年末，常住人口 2119.2 万人、位居全国第 4，常住人口城镇化率 79.48%；地区生产总值 19917 亿元（2936 亿美元）、位居全国第 7 位，高于同期德国柏林、韩国首尔、加拿大多伦多等城市，居全球前 30 名之内。

成都市属于成渝地区双城经济圈（成渝城市群发展规划）核心城市，2018 年开展了《成都可持续发展导则》、实施了面向 SDGs 的城市可持续发展问题诊断，对标关键问题和 SDGs 编制了《成都市可持续发展规划》和《成都市国家可持续发展议程创新示范区建设方案》。多年来，成都市紧密围绕国家数据中心节点城市和国家可持续发展议程创新示范区建设的发展新机遇，采用数字化的手段努力将生态环境建设行动效果转化为地方社会经济发展效果，以数字经济为核心的新经济业态快速发展，在保持经济快速平稳增长的同时，实现了主要污染物排放总量的不断下降和生态环境质量的逐步好转（自 2015 年以来，成都市 GDP 从 10801.2 亿元增长到 19917 亿元，同期单位 GDP 能耗从 0.369tce/万元下降到 0.313，PM10 浓度由 108 下降到 61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，PM2.5 浓度由 64 下降到 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，NO<sub>2</sub> 浓度由 53 下降到 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，森林覆盖率由 38.4%提升到 40.8%，重要江河湖泊水功能区水质达标率由 35%提升到 100%），推动经济绿色数字化转型。

成都，古来享有“天府之国”的美誉，它拥有独特的川西平原山水格局、两千多年的建城史、丰富的天府文化内涵。这座城市在历史中生长，在传承中蜕变，融汇成一座富庶安逸、底蕴深厚、魅力独具的文化之都、历史之城，形成了以古蜀文化为核心，水文化、三国文化、商贸文化、民俗文化、诗歌文化等多元包容的文化体系；“两山相望、山城相融；城水相映、百水润城”的特殊区位条件，形成了城山相望的蜀川盛景、城水相映的城市水岸名片。