

· 人工智能与未来社会（十九） ·

从“红色 AI”到“绿色 AI”

——人工智能的生态范式转换

吴红¹ 姜惠²

【内容摘要】 生态范式转换是人工智能发展的新趋势。在精度与效率的审度权衡中，“红色人工智能”目前在人工智能领域占据范式主导，多数智能系统以精度与速度为首要准则，却在很大程度上忽视全生命周期中的巨大生态成本。着眼于对准确性的无休止追求及对生态足迹的现实性考察，重视效率且蕴有强大生态潜力的“绿色人工智能”应运而生。人工智能的生态范式转换就是推动“红色人工智能”跃迁至“绿色人工智能”。这一转换既包含环境可持续性、生态正义和生态自由的理论议题，同时存在资本陷阱、政策滞后、技术缺陷和价值迷思的实践困境。对此，需要从研发、监管、应用各环节探索改革方案，以推进人工智能的生态范式转换。

【关键词】 人工智能 红色人工智能 绿色人工智能 范式转换 生态伦理

【作者】 1 吴红，上海交通大学马克思主义学院教授；

2 姜惠，上海交通大学马克思主义学院博士研究生。（上海 200240）

【基金项目】 国家社科基金重大项目“人工智能伦理风险防范研究”（20&ZD041）

近年来，随着计算能力的指数级增长，人工智能领域不断涌现出复杂模型和创新应用。依赖海量计算资源来提高精度而不顾生态成本的人工智能范式，被直接归类为“红色人工智能”（红色 AI/Red AI）。大型复杂模型消耗了大量能源，导致碳排放等生态足迹增加，人工智能与生态困境隐蔽地交织在一起。“危机是新理论出现的恰当序幕”，^①“绿色人工智能”（绿色 AI/Green AI）的概念应运而生，它将能源效率和可持续性放在首位，以减少人工智能对生态环境的负面效应。尽管人工智能的发展范式与生态环境之间的议题讨论暂未成为显性话题，但对实现更高精度的无限追求将不断要求人工智能的快速迭代，并加速和扩大对生态环境的影响。在此情形下，推进人工智能的生态范式转换，已成为一项紧迫任务。有研究报告显示，2025 年全球绿色技术和可持续





发展的市场价值将达 254.7 亿美元, 2030 年预计将达 739 亿美元, 在预测期间 (2025 年至 2030 年) 的年复合增长率为 23.7%。^②人工智能的生态范式转换大有可为, 其开辟出一条新的通往可持续发展的未来生态技术之路。

人工智能的潜在生态危机及其应对

作为一项数据依赖型技术, 人工智能相应地具有资源密集型的技术属性。随着对更先进模型的无限追求, 能源消耗、碳足迹、电子废物等生态成本日益增长, 红色人工智能的发展范式并不具备环境可持续性。为抑制生态危机的进一步加深, 对人工智能进行变革转型势在必行。结合计算成本与环境代价, 构建以效率为导向的绿色人工智能, 在降低成本的同时促进环境管理。

(一) 红色 AI 的生态成本及危机状态

自 2012 年人工智能领域掀起一场深度学习革命以来, 预测模型通过不断训练而表现出前所未有的精度。此后, 致力于追求精度与速度的规范渐趋常态化。准确性的提高强劲推进了人工智能在社会各领域应用的广泛化和精准性, 例如“AI for Earth”“AI for Climate”等计划, 通过利用图像分析来监测濒危物种等方式, 帮助人们监测、建模并管理自然系统。总体来看, 蕴于其高效精准的技术优势, 目前人工智能领域倾向于追求准确性等性能, 而要运行这样的高精度模型, 需要越来越多的计算资源。2018 年的数据显示, 以 2012 年的数据为比较基准, 大型人工智能训练的运行速度每 3.5 个月就会翻一番, 计算需求增加了 30 万倍以上,^③这种趋势主要源于对人工智能性能指标的追求及对效率指标的牺牲, 学界将这种狭隘的关注归类为“红色人工智能”。^④红色人工智能是指不顾成本而试图通过使用海量计算资源来提高精度, 本质上是“购买”更强的结果。

当我们透视红色人工智能辉煌的幕后是一个计算密集型过程时, 有必要在隐蔽的反常与危机中进一步考究其生态成本。已有证据表明人工智能会对生态环境产生负面影响, 甚至可能引发生态危机, 学界对此话题的讨论结果主要表现为人工智能的能源消耗、碳排放和智能垃圾三个方面。首先, 人工智能对环境的最大影响来自其不断增长的能源需求。据估计, 由生成式人工智能驱动搜索引擎能源消耗量是传统网络搜索能源消耗量的 4~5 倍。OpenAI 首席执行官山姆·阿尔特曼 (Sam Altman) 也已承认, 人工智能行业正在走向能源危机。尽管人工智能会减少用电量并优化电网效率, 但其自身就是用电大户, 目前数据中心已消耗全球 2% 以上的电力, 预计至 2025 年将上升到 8%~21%。^⑤伴随对更高质量模型的无限追求, 计算软件、硬件、学习算法的进步加速了智能产品的周转率, 因而增加了对金属和塑料等制造材料的需求, 刺激了钴、钨铁矿和稀土元素的开采。能源消耗的增加直接导致巨大碳足迹。研究人员认为, 训练“单一大型语言深度学习模型”, 大约排放 300 吨二氧化碳, 相比之下, 普通人一年的二氧化碳排放量约为 5 吨, 可见人工智能的碳足迹之大。此外, 人工智能系统的更换和升级不断产生新的电子废物。世界经济论坛 (WEF) 预计, 2050 年电子废物总量将超过 1.2 亿吨。^⑥电子废物中含有铅、汞和镉等危险化学物质, 若不进行安全处理便会污染土壤和水源, 长此以往将对环境构成严重挑战。

概而论之, 当前人工智能领域以红色人工智能为主导范式, 以牺牲能源效率为代价, 试图在准确性方面达到最先进的结果。鉴于对模型先进性的迫切渴求, 尝试克服传统范式的局限变得愈为重要。否则, 人工智能所具有的生态足迹可能会对全球生态系统产生负效应, 最终阻碍人工智

能的可持续发展。因而，结合红色人工智能的计算成本与生态成本，改进人工智能的效率问题迫在眉睫，人工智能范式的生态转向由此揭开序幕。

（二）人工智能范式生态化过渡的核心议题

“在转变时期，新旧范式所能解决的问题之间有很大交集，但并不完全重叠。在解题方式上也有一个决定性的差异。”^⑦有鉴于此，需要厘清人工智能范式转换中的焦点与重点，继而更深入地探究这一论题。要而言之，从红色人工智能跃迁至绿色人工智能，旨在引领创造一种更加可持续和负责任的技术开发形式，核心要义在于范式转换的生态审视。

当前，对可持续性的呼唤在人工智能领域愈发迫切。艾梅·范·温斯伯格（Aimee van Wynsberghe）认为，在第三次人工智能伦理浪潮中，可持续性是一个焦点问题。从宏观层面看，“可持续性”涵盖经济可持续性、社会可持续性和环境可持续性三方面。着眼于人工智能范式的生态转向，其首要且核心所指为环境可持续性，焦点在于研发在不同代际始终与环境资源相融合适应的人工智能，强调在人工智能的整个生命周期实现生态完整性。环境可持续性人工智能不仅关注人工智能的应用环节，更涉及人工智能的整个社会技术系统。国外学者将可持续人工智能理解为两个部分：“AI for Sustainability”和“Sustainability of AI”，^⑧前者被解释为“人工智能促进可持续发展”，旨在探索人工智能的应用以实现可持续性，该话题在近年受到诸多关注；后者被解释为“人工智能的可持续性”，涉及衡量人工智能模型开发的可持续性，该话题似乎在人工智能的相关研究中成为被隐蔽的一部分。在人工智能的现实应用场域中，无论是红色人工智能，抑或绿色人工智能，都可以在不同场景中作为应对生态问题的解决方案，因而在 AI for Sustainability 层面两者的根本机制是同一的。不过，在 Sustainability of AI 层面，红色人工智能和绿色人工智能的实际准则具有不可通约性。由于人工智能训练和调整阶段的环境影响是 Sustainability of AI 的核心，所以实现从红色人工智能到绿色人工智能的生态转向，关键在于控制人工智能基础设施、模型训练等技术应用环节之前的生态足迹。

同时，在“智能鸿沟”（AI divide）存在的境况下，人工智能及其相关生态问题不免在一定程度上触及正义之纲，生态正义成为人工智能范式探讨的必要议题。一方面，人工智能的生态成本及产生的环境负担更多地由发展中国家承担。能源问题专家埃里克·维达朗（Éric Vidalenc）指出，“产品的科技含量越高，其可回收性越差”，^⑨智能废物的回收性更低。不过，这种垃圾并没有滞留在西方发达国家，而是被运送到非洲或亚洲的发展中国家。另一方面，人工智能成本与收益的离散不止于此，环境分配不仅包含环境危害的分配，也包括环境利益的分配。处于智能鸿沟之优势的群体或地区通常更易采用“AI+”的先进技术和解决方案，便也更容易获得人工智能带来的低碳减排等环境利益。从长远来看，尽管当前关于红色人工智能的生态足迹尚未成为显性话题，但随着时间的推移，当代未能解决的人工智能生态足迹将由后代承担，这是隐藏于效益表象背后的代际生态非正义。与红色人工智能对生态正义构成挑战不同，绿色人工智能围绕效率指标降低生态成本，一定程度上可以在技术源头上应对人工智能生态成本与收益失衡的非正义现象。

另外，在生态自由的维度下审思人工智能的范式转换具有旨归意蕴。在人与自然的生命共同体中，人工智能具有人与自然之间物质变换的中介属性，人们将人工智能作为工具以不断深化对自然的认识和改造。在红色人工智能的视野范围内，精确度与速度是第一准则，不顾生态成本且随意应用红色人工智能导致人与自然仍处于利用与被利用的对立关系。此时，在高科技的助推下，



人类获得了征服自然的自由，不过这是一种有限自由，它遮蔽了人与自然真正的和谐稳定。超越征服自然的自由，红色人工智能应被绿色人工智能取代，以实现人、绿色人工智能、自然之间的共生共荣，进而获得生态自由。绿色人工智能作为生态自由的实现手段，意味着人工智能与生态智慧相结合，开发更具弹性和适应性的人工智能系统。研究人员主张这种融合范式是“向联合生产、融合研究的转变”，^⑩将生态学与人工智能学科深度融合，而不是孤立地将人工智能应用于生态学，这更有利于激发人工智能新范式。

（三）绿色 AI 的生态潜力及危机应对

作为对红色人工智能及其生态危机的回应，罗伊·施瓦茨（Roy Schwartz）等提出人工智能发展的另一种选择，即在考虑计算成本的前提下引入绿色人工智能。与红色人工智能不同，绿色人工智能并不优先考虑准确性和速度，而是将可持续性和效率作为首要评价标准。以提高效率为中心，绿色人工智能的研究重点是开发环境可持续性人工智能技术，通过探索节能模型训练、资源感知算法和环保硬件设计等技术，优化算法、硬件和数据中心运营，以降低能耗并最大限度地减少人工智能系统的碳足迹。延续可持续 AI 的解释方式，绿色人工智能存在两条并行路径：AI for Green，在运行、应用阶段作为技术手段来解决生态问题；Green of AI，减少模型在开发、训练及应用阶段对自然环境的负面影响。

与强调精度的红色人工智能产生巨大生态足迹不同，重视效率的绿色人工智能蕴涵着重要生态潜力。在人工智能系统的开发阶段，绿色人工智能有利于打破关于模型“越大越好”的误解。红色人工智能的研究范式固地认为人工智能模型越大，提供的服务性能越好，但较大的模型需要更多的数据和计算能力来训练推理，从而带来更大的生态足迹。不过，中国团队研发的 DeepSeek 打破了人工智能发展需要依赖大规模资源消耗的模式，其通过混合专家架构（MoE）和强化反馈微调（RFT）技术，在保持模型性能的同时将推理能耗大幅降低，突破了大模型需要集中算力、提升参数规模的传统观念，使人们真切感受到了绿色人工智能的可能性及其重大意义。

绿色人工智能的精益模型冲击了红色人工智能对大模型的“迷恋”。例如，Gadepally 团队开发了一种可以“混合和匹配模型以最适合手头任务”的人工智能新模型——CLOVER，它首先明确用户正在尝试做什么，然后只选择该任务真正需要的模型，从而减少对其他人工智能模型的使用。Gadepally 团队报告称，CLOVER 可以将人工智能的温室气体排放量减少 75% 以上，且输出结果的准确性仅下降 2%~4%。^⑪所以，在一般的应用场域中，如果不是必须追求严谨精细的结果，那么这种精益模型在某些情况下可以成为大模型的替代方案。客观来看，这种小规模项目计划目前尚未在现实场景中广泛应用。此外，在人工智能的应用阶段，绿色人工智能成为有效应对经济、社会、生态挑战的新颖方案，为人类生活的可持续性转型做出贡献。例如，德国已设立绿色人工智能试点项目（Green-AI Hub Mittelstand），德国联邦环境部（BMUV）投资 1.5 亿欧元用于人工智能的可持续设计和应用，并在 2024 年 5 月展示了该项目的首批成果。其中包括 Green-AI Hub Mittelstand 与 INTEX 合作开发的由人工智能支持的可持续纺织品建议和退货系统，该系统在工业中试验使用后，每年可节省数百万吨纺织品。^⑫绿色人工智能试点项目是德国“人工智能助益环境和气候”计划框架内的一项倡议，其首批成果鲜明表现出绿色人工智能保护资源和节省材料的生态福祉。

总的来说，绿色人工智能谋求在获得准确的高质量结果的同时，无需付出更多计算资源，甚

至缩减计算资源的使用，以实现更少能源消耗和更高效率指标。可以清晰看到，红色人工智能与绿色人工智能的根本不同在于，两种范式对计算能力与能源效率之间的权衡抉择。

人工智能生态范式转换的现实梗阻

绿色人工智能新范式的新发现、新理论，既是建设性的也是破坏性的。客观来看，目前无论在学术界抑或科技界，人工智能的生态范式转换都未得到应有的热烈讨论，也不具备充分的保障条件来推进这一转换的开展，反而面临着一系列困境和挑战。在此背景下，全面审度红色人工智能与绿色人工智能之间的现实挑战，才能为其生态范式转换构筑稳固的基石。

（一）资本陷阱：资本增殖逐利的无限性

从历史维度来看，资本与技术具有内在的耦合互动，在人工智能的三起两落中，“可以清晰地看到资本在其中的流入与流出”。^⑭资本是人工智能发展的驱动力量，而人工智能是“资本及其自行增殖”的实现手段。资本所有者在人工智能巨大的市场规模中逐渐意识到，人工智能可以成为将企业运营货币化和利润最大化的宝贵工具，并可以通过预测分析、个性化营销等方式解锁新的盈利机会。在利润的驱使下，资本无限度应用人工智能开拓盈利途径，甚至将人工智能技术本身货币化。因而，“机器智能不仅是技术逻辑的产物，也是社会逻辑（生产剩余价值的逻辑）的产物。资本主义就是技术逻辑与社会逻辑的融合，而人工智能正是计算化与商品化融合的最新表现。”^⑮有文章指出：“在硅谷，少数巨头正在享受自19世纪末以来所未见过的市场份额和利润率。”^⑯谋求价值增殖的资本逻辑在人工智能领域不断渗透扩张。拥有主导控制权的科技巨头有着强烈的逐利动机去投资和建设人工智能，在规模经济效应下，甚至可能导致垄断。

人工智能具有收益递增的特性，即提高的预测精度通常会吸引更多用户，进而产生更多的数据，这些数据又反过来促进基于丰富计算资源的预测精度进一步提高。“全球统计数据库”（Statista）2023年的统计显示，自2016年以来，人工智能领域的投资增长了六倍多，2022年全球企业在人工智能领域的投资总额接近920亿美元。^⑰在技术逻辑与资本逻辑的动态融合中，人工智能体系以追求精度与速度的红色人工智能为主要范式。在利润的蒙蔽中，资本通常不会考虑效率问题，反而在与技术的“联姻”中掩饰资本增殖过程中的人工智能生态弊病。使人们不自觉、无意识地“正处于日益严重的危机之中”。^⑱有学者指出，无论是谢尔盖·布林在巩固公司垄断权力的同时支持奇点的想法，还是埃隆·马斯克在建造（或试图建造）自动驾驶汽车的全自动生产工厂时警告人工智能灾难，抑或比尔·盖茨提出机器人税收计划，这些人工智能领域多样复杂的冲突争论一定程度上掩盖了更为严峻的现实，即这些人工智能巨头不过是追求利润最大化的市场计算的抽象力量的化身。^⑲有鉴于此，人工智能的生态议题从现实角度而言是值得关注的紧迫问题，而资本的逐利本性将人工智能的精度与速度置于关注首位，可能掩饰人工智能的效率问题。

（二）政策滞后：人工智能配套政策的不完善性

人工智能的迭代更新突飞猛进，其发展步伐甚至快于相关法律、伦理和监管框架的建构速度。在现阶段，多国政府已逐渐认识到绿色人工智能的重要性，但具体政策尚未广泛建立，具有一定的滞后性。有学者明确指出，“人工智能绿色化之路面临着巨大的政策挑战，其中最为关键的是政府需要为人工智能及其应用制定法律和伦理框架”。^⑳根据斯坦福以人为本人工智能研究所



(Stanford HAI) 发布的《2024 年人工智能指数报告》(AI Index Report 2024), 2016 年至 2023 年期间, 128 个国家/地区共发布包含“人工智能”的相关法案 148 项。其中, 经济和公共财政一直是人工智能相关立法的主要焦点, 而以“环境保护”(environmental protection) 为主题的法案仅有 2021 年所通过的 1 项。^②在伦理规范方面, 可持续性目前并未得到人工智能伦理政策的普遍关注。^③

欧盟《人工智能法案》(Artificial Intelligence Act, 以下简称《法案》) 是全球首部全面监管人工智能的法规。遗憾的是, 《法案》中尚未明确提到绿色人工智能。不过在《法案》的协商制定中, 要求基于 2019 年《可信赖人工智能伦理准则》(Ethics Guidelines for Trustworthy AI), 将其中的环境福祉原则转化至人工智能模型的设计和使用中。^④美国以人工智能的技术发展应用为重点, 在其治理政策中几乎不见与绿色人工智能相关的论述。例如, 在 2023 年发布的《关于安全、可靠和可信的人工智能行政命令》(Executive Order on Safe, Secure, and Trustworthy Artificial Intelligence) 中仅简要提及“促进安全、负责任和肯定权利的人工智能在国外的开发和部署, 以解决全球挑战, 如推进可持续发展和减轻对关键基础设施的危险”^⑤的目标。“显然, 美国法规不会强制执行绿色算法的开发。”^⑥

我国于 2017 年印发《新一代人工智能发展规划》(以下简称《规划》), 其中强调运用人工智能加强环境保护的智能化。随后, 我国对人工智能政策的重视程度不断提升。为深入贯彻《规划》精神, 2019 年国家林业和草原局发布《关于促进林业和草原人工智能发展的指导意见》, 推动人工智能与林草业融合创新。2023 年, 《数字中国建设整体布局规划》进一步明确建设绿色智慧的数字生态文明目标。在国家政策的引领下, 地方性政策相应出台。例如, 山西省发挥能源富足优势, 在人工智能产业链中游发展绿色低碳;^⑦河北省提出“重点园区按需建设规模适度、绿色先进的配套数据中心”;^⑧内蒙古自治区“推动绿色节能算力基础设施”建设, 明确提出“新建大型数据中心设计电能利用效率(PUE)不高于 1.2, 水资源利用效率(WUE)不高于 1.2”的用能要求。^⑨

从全球视野来看, 当前对绿色人工智能的政策关注只是初步意识和简单提及, 尚无专门以绿色人工智能为主题的政策法案。各国政府需要进一步明确绿色人工智能的伦理法律界限, 预先设置评判标准与治理方案, 以确保人工智能技术的生态转型。

值得关注的是, 要求政府监管的最响亮呼声来自技术领导层本身。高层研究人员呼吁建立国家机构来监管人工智能, 但同时也出现了不要过度监管的声音, 理由在于以免扼杀人工智能的发展与进步。^⑩所以, 当前对人工智能生态转向的政策关注面临着效率与性能的谨慎权衡之要, 需要审慎制定效率与性能兼容的政策框架。

(三) 技术缺陷: 体系架构的不可持续性

着眼于技术本身, 从长远来看人工智能的发展目前尚处于起点阶段, 类比于物理学发展阶段的“伽利略时代”, 或“比伽利略时代还要洪荒”。^⑪推进绿色人工智能, 意味着人工智能不仅是有效优化能源使用的解决方案, 而且本质上应是低能耗的。不过, 艾伦人工智能研究所(Allen Institute for AI)的高级研究科学家杰西·道奇(Jesse Dodge)指出:“当人工智能开发人员创建新系统时, 他们试图提高性能、准确性或模型的功能, 但不太关注效率。”^⑫人工智能目前的架构特性尚不足以自主迈向环境可持续。

在训练模型时, 开发人员通常专注于提高准确性, 并以之前的模型为起点, 为了获取所需输

出,通常需要测试数千种配置以确定可以使用的参数。其中,图形处理单元(GPU)执行大规模并行计算任务,其架构由数百或数千个内核组成,能够同时处理多个操作,但这种复杂的设施构造会导致高能耗高排放。当然,训练只是人工智能模型碳排放的一部分。随着模型的进一步开发,碳排放等生态成本在模型推理或实时运行阶段贡献更为显著。例如,ChatGPT与用户聊天时,为了及时快速响应,这些模型使用冗余硬件,一直保持运行状态,等待用户提出问题,^⑩造成额外的资源浪费。另外,基于推论的实验重复是又一常被忽视的解释原因。在以准确性为导向的人工智能研究中,通常只报告最终结果,而不管研究过程中的试验如何,所以红色人工智能研究存在着可重复性危机。该危机的内在挑战在于,拒绝共享源代码、训练模型、数据信息等,致使研究人员需要不断经历漫长且成本高昂的试错过程。所以,在现有研究的基础上进行构建不仅需要承担模型原始发布所消耗的实验成本,也需要反复实验以实现研究的可靠性,从而给环境带来不必要的双重成本。^⑪更为关键的是,红色人工智能领域缺乏对节能技术的系统研究,目前一些数据中心购买了可再生能源信用额度,不过这些可再生能源尚不足以满足技术迭代更新对更高能源的需求。虽然从化石燃料转向可再生能源是实现社会、经济和环境发展的关键,但数据中心作为“吃水用电”大户,在没有对能源使用进行系统规划的情况下,反而会加剧能源的供应压力,阻碍人工智能向可持续性方向转变。

(四) 价值挑战:工具理性泛滥具有迷思性

由于资本逻辑作祟与科技决定论推动,工具理性随人工智能的快速发展而不断增强。^⑫“这种效率至上、具有明确目的导向的思维”^⑬助推不同群体在人工智能精度与效率间的价值迷思,成为抑制人工智能实现生态范式转型的重要因素。

实际上,目前关于红色人工智能与绿色人工智能话题的讨论并不充分,“人们只是将人工智能视为位于云端的无形之物”。^⑭而且,“工具理性无限泛滥并侵蚀人们的思想,效用、兴趣和目的等因素占据首位”,^⑮以致在高效精确的技术优势面前,人们似乎并没有警惕到隐藏其后的巨大计算成本。于公众而言,之所以选择某种智能系统是因为技术潜力能够满足生活所需,公众通常更注重对人工智能运行速度、数据准确性等性能要素的考量。加之智能系统具有复杂性,公众也不易意识到不计计算成本的高精度人工智能所带来的生态成本。进而,公众对智能系统类别的青睐与选择直接影响到企业对智能系统的设计与研发,为满足用户需求,企业会专注于通过海量训练数据提高性能。加之企业以盈利为目标导向,其选择的智能系统将经济价值放在首要位置,甚至以“商业机密”为由拒绝公开人工智能生态成本的相关数据。现有研究发现,与数据中心相关的排放主要被归于科技公司的排放范畴,即组织购买电力所产生的排放。^⑯根据国际能源署(IEA)的数据,仅数据中心和数据传输网络就各占全球电力消耗的1%~1.5%左右。^⑰随着越来越多的组织和行业采用人工智能技术,这一比例预计将以惊人的速度上升。不仅如此,政府在人工智能领域也面临价值矛盾,在眼前经济利益和长期环境可持续性之间陷入两难境地。考虑到区域发展,政府在人工智能发展浪潮中需要在社会效益与自然生态中作出艰难抉择,尽管全球化大背景下存在技术转让政策,可以为减免当地的环境负效应而将数据中心等人工智能基础设施迁移至其他地方,但统筹全球布局来看,红色人工智能暂时难以实现社会效益与生态环境的和谐共存。概言之,在“人—技术—社会”的复杂系统中,人工智能系统的发展轨迹会受社会规范和价值选择的影响,因而工具理性的泛滥极易导致人工智能性能与效率之间的失衡。

人工智能生态范式转换的推进路径

当人工智能处于技术创新和可持续发展的十字路口时，绿色人工智能提供了引导技术发展轨迹的关键路径。对绿色人工智能的探索并非单纯是一项研究活动，更需要呼吁全社会培养科技与生态融合共进的观念，实现智能且绿色的技术进步愿景。为了克服人工智能生态范式转换的滞碍困境，推进绿色人工智能的技术研究并开发有效的环境解决方案，必须加强各领域、各主体之间的通力合作。

（一）研发端：打造全栈式生态技术布局

国外对绿色人工智能的理论关注早于国内，凯特·克劳福德（Kate Crawford）自2018年开始发表人工智能行业环境成本的观点论述，但这些观点一直被忽视甚至否认。^③2020年，学者罗伊·施瓦茨发表关于绿色人工智能的专题论文。OpenAI首席执行官山姆·阿尔特曼公开承认，功能强大的人工智能模型可能需要消耗比以前更多的能源，人工智能时代需要“能源突破”。这一观点，引起研究人员、监管机构和行业巨头对生成式人工智能生态环境影响的讨论。在国内，李彦宏在2022年全国两会首提“绿色AI”，强调发展绿色算力和绿色算法；^④周鸿祎等面对“人工智能的尽头是能源”的预测，也多次就人工智能的能源问题发表见解。总的来看，国内外科学家、企业家对绿色人工智能已有一定程度的重视，而实现智能系统的转型，首先应从技术本身着手。只有将人工智能技术之“体”去“红”存“绿”，才能以此为中心辅之以伦理、政策等多维之“翼”，进而构建绿色智能系统。目前，主要的着力点至少有以下几个方面。

一是环境导向设计。设计阶段是智能系统生命周期的初始阶段，设计理念决定着智能技术的发展方向，所以推动红色人工智能走向绿色人工智能，应在设计阶段围绕绿色性能、环境属性等要素开启环境导向设计。环境导向设计也称为生态设计、环保设计等，人工智能的环境导向设计要求优化算法、芯片架构、人工智能框架等，提前布局消除人工智能生命周期各个环节的生态负效应，提高能源利用效率，并推动人工智能发挥生态正效应。

二是可持续数据管理。数据是人工智能的燃料，是必不可缺的要素存在，不过红色人工智能系统全周期所需的大量数据及其处理往往以巨大的生态足迹为代价。因此，可以通过环境可持续的数据管理方法来解决这个问题。从当前的研究报告可见，人工智能领域已开创出一系列可持续数据管理技术。在数据收集阶段，通过数据增强等技术重用现有数据，避免模型训练时需要完全重新收集数据的情况。在数据存储阶段，可利用数据压缩和编码方法来缩小数据文件大小，减少压缩数据占用的存储空间。在模型训练阶段，可在聚合或匿名数据上训练人工智能模型，以在保护隐私的同时保持准确性，减少所需计算资源消耗。^⑤另外，DeepSeek在数据供给模式上实现了从传统的“资源依赖型”向“技术创造型”的转变，让AI能够自主生成高质量的训练数据，为人工智能的数据供给与管理提供了全新的思路。^⑥

三是绿色传感。在基础设施方面，“绿色传感”在绿色人工智能领域应运而生，力图在传感过程中节省能源，包括物理的绿色传感和虚拟的绿色传感。在实际应用中，前者如用于直接测量城市基础设施和环境污染可持续性的物理传感器，后者如使用大数据或社交媒体数据检测道路拥堵的虚拟传感器，因为它可以检测拥堵区域中可能造成的环境污染。通过占空比、唤醒无线电、传感器选择或调度、自适应采样等绿色传感技术，可有效减少传感设备所需的能量。^⑦

（二）监管端：加强全方位政策干预与环境规制

从技术领域对人工智能做出创新改进的同时，需要配置与之相符的审查监管机制，以保障人工智能向绿色发展轨迹迈进。克劳斯·施瓦布（Klaus Schwab）在强调人工智能或“第四次工业革命”带来的治理挑战时指出，敏捷治理是应对之策，我们目前看到的许多技术进步在当前的监管框架中没有得到适当的解释，甚至可能会破坏政府与公民建立的社会关系。敏捷治理意味着监管机构必须重塑自身来更好地理解监管内容，从而不断适应快速变化的新技术和新环境。^④与私营部门不同，政府在人工智能领域扮演着推动者、领导者、监管者和用户的多重角色，且需要发挥双重作用：一方面，更好地利用技术手段为民众提供服务，提高效率，优化资源配置；另一方面，通过法律法规、财政投资、行业自律等政策工具保持技术良性，在追求性能改进的同时重视缩减计算成本。^⑤故而，政府的约束机制于 AI for Sustainability 及 Sustainability of AI 而言都至关重要。

红色人工智能已对生态环境造成一定程度的负面影响，技术的迭代更新将不断加剧生态负效应。面对政策滞后、监管不足的现状，政府需加强政策干预。根据政府干预政策，正式环境规制通常可分为命令控制型和市场激励型，前者是指立法和标准的制定，后者涉及赠款、补贴或减税等。^⑥因此，要为人工智能全周期制定技术标准，以避免人工智能无节制的高耗能生产。例如，考虑到人工智能技术需要建立在绿色可靠的数据源之上，才能创建更高效的人工智能系统，所以有必要制定绿色能源数据标准化的法律规定，减少人工智能对化石燃料的使用和依赖。同时，也要完善人工智能的环境影响评估和整改指南，基于对人工智能生态足迹的考察进行问责，如通过征收环境税来对人工智能的负面生态效应予以强制性支付与补偿。

此外，考虑到监管行动落后于技术发展速度，而自上而下的监管方法通常需要成熟的法律和政策引导，在目前不充分的法律政策保障下，可以尝试对人工智能生态范式转换采取交互式监管模式。这种治理模型基于技术与法律制定之间的互动，连接技术和立法两个领域的平衡与完善。从监管到技术（Regulatory-to-Technology, R2T）的宏观过程，根据现有立法设置智能系统的构建和应用，创建包含生态环境效应的人工智能技术影响评估；从技术到监管（Technology-to-Regulatory, T2R）的宏观过程，旨在根据技术发展或智能系统与社会之间关系的发展而不断调整完善法律。这种混合式人工智能治理模式，将自上而下和自下而上的监管整合到一个渐进式战略中，从而能够很大程度地降低面对快速变革发展的人工智能而可能出现的监管不力风险。^⑦

（三）应用端：构建多主体绿色 AI 素养体系

将环境可持续性嵌入人工智能体系，不仅需要在人工智能模型的开发和部署中构建绿色智能系统，也需要进一步将人工智能应用于生态问题的解决，在社会实验中达致性能与效率之间的平衡。不过，人工智能利益相关者的价值迷思易致他们对绿色人工智能的理解与应用程度较低，即主体的绿色人工智能素养有待提升。人工智能素养是个体能够批判性评估人工智能技术，与其有效沟通和协作，并在网络、家庭、工作场所将人工智能作为工具的能力。^⑧世界多国已敏锐捕捉到这一新兴概念与变革趋势。美国于 2024 年 6 月 18 日发布《人工智能素养：理解、评估和使用新兴技术的框架》（*AI Literacy: A Framework to Understand, Evaluate, and Use Emerging Technology*）报告，澳大利亚于 2024 年 8 月 28 日发布《了解人工智能素养和数字包容性：我们如何应用人工智能向善》（*Understanding AI Literacy and Digital Inclusion: How We Can Use AI for Good*）研究报

告,欧盟于2024年8月1日正式生效的《人工智能法案》(Artificial Intelligence Act)第4条对“人工智能素养”做出规定。尽管目前对人工智能素养的研究报告暂时还未与绿色AI直接相联,但AI素养不是一个静态的概念,它随着人工智能技术的进步而发展。因而,我们需要从现有研究报告中汲取概念内核,进而创新绿色人工智能素养。从需求主体层面来看,人工智能素养主要体现在计算机或工程背景专业人员、消费者两个方向。^④对此,或许可以首先从技术专家与公众着手,构建绿色人工智能素养体系。

提高技术专家对人工智能应用的选择辨别力。对于开发人员来说,了解人工智能模型在具体应用领域的成本收益至关重要。在评估不同的人工智能模型时,一个重要的步骤是批判性地审视其必要的通用性水平。虽然采用最大的人工智能模型可能很诱人,但评估此类模型是否真的能提高性能,或者更简单、资源密集度较低的模型就已足够,这一点至关重要。^⑤开发人员需要对多种替代方案进行研究和分析,深化对绿色人工智能的认识与应用。此外,合理安排人工智能在不同场景中的应用,有助于更有效地实现技术价值。例如,机器学习和自然语言处理(NLP)工具对于医疗健康问题具有革命性意义,也非常适合预测海啸、地震等自然灾害,但若仅用于生成博客文章或创建有趣故事则可能不是这些高计算量工具的最佳用途。如果一家公司使用生成式人工智能进行内容创作,应尽量确保这些模型只在必要时使用,或者降低其他计算成本,以缩减整体计算预算。^⑥

推动“绿色公民”在人工智能领域的生态自我实现。用户的认知与偏好影响人工智能的创建与应用,因而要从意识与行动两方面来激发用户对人工智能生态转型的责任感与自觉性。一方面,在人工智能的普及教育中,应加强绿色人工智能的理念传播,提升用户对人工智能生态成本的认识,明确区别红色人工智能与绿色人工智能在精度与效率之间的侧重,引导用户做出绿色人工智能技术道路引领绿色未来的价值判断。由此,用户在选择技术产品时优先选择环境友好型产品,提高用户对低精度模型的接受度。另一方面,不仅要培养用户对人工智能与生态环境协同融合的观念意识,更要进一步利用人工智能推进环境可持续性,积极利用低能耗的人工智能解决生态问题,尽量避免其生态效益低于计算成本,助推绿色智能社会的建设。

结语

人工智能站在技术发展的最前沿,但其强大变革能力背后隐藏着一个基本问题:人工智能是绿色的吗?对于该问题,当前主要范式的人工智能所能给予的回答显然是否定的,其发展轨迹具有重大生态挑战。究其要因,红色人工智能旨在使用大量计算资源来提高准确性,在不顾及成本的情况下,对高精度系统的建模和开发会导致所需数据量、模型计算规模和基础设施容量的急剧增长,进而引发高能耗、高排放等环境问题。然而,在考虑人与自然和谐共生的美好愿景下,研究和利用人工智能的方式必须进行根本性转变。相比之下,绿色人工智能是对红色人工智能的批判性革新,引导我们重新思考人工智能技术的开发和部署方式,力求在不增加甚至减少计算资源需求的情况下努力提高性能,尽管有时可能以牺牲准确性为代价,最终旨在构建环保和包容的人工智能模型。通过将生态理念嵌入人工智能全生命周期,创造生态与技术深度融合的人工智能,并确保人工智能驱动的未来具有可持续性。如此,绿色人工智能不仅为人工智能领域的发展指明新的方向,实现技术进步与生态责任的平衡共担,更从长远视角为社会各领域的创新和负责任发

展提供启迪性新路径。当然，绿色人工智能也可能引发“杰文斯悖论”（Jevons Paradox），即技术的进步虽然提高了效率，但反而导致资源消耗增加。由于论文主题与篇幅的限制，笔者将另文专题论述。

注释：

①⑦⑩ 托马斯·库恩：《科学革命的结构》，张卜天译，北京：北京大学出版社，2022年，第139页，第138页，第120页。

② “Green Technology & Sustainability Market by Offering (Carbon Accounting Software, ESG Reporting Tools, Compliance & Risk Management Tools), Application (Sustainable Supply Chain & Logistics, Energy & Emission Reduction) -Global Forecast to 2030,” <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/green-technology-and-sustainability-market-224421448.html>, 2025-03-01.

③ Dario Amodi, Danny Hernandez, “AI and Compute,” <https://openai.com/index/ai-and-compute/>, 2018-05-16.

④ Roy Schwartz, Jesse Dodge, Noah Smith, et al., “Green AI,” *Communications of the ACM*, vol.63, no.12, 2020, pp.54-63.

⑤ Amy Stein, “Artificial Intelligence and Climate Change,” *Yale Journal on Regulation*, vol.37, no.3, 2020, pp.890-939.

⑥ Alokya Kanungo, “The Green Dilemma: Can AI Fulfil Its Potential Without Harming the Environment?” <https://earth.org/the-green-dilemma-can-ai-fulfil-its-potential-without-harming-the-environment/>, 2023-07-18.

⑧ Aimee van Wynsberghe, “Sustainable AI: AI for Sustainability and the Sustainability of AI,” *AI and Ethics*, vol.1, no.3, 2021, pp.213-218.

⑨ Arnault Pachot, Celine Patissier, “Artificial Intelligence & Environmental Protection: The Paradox of an Energy-Consuming Technology Serving the Ecological Challenges of Tomorrow,” <https://hal.science/hal-03913935/document>, 2022-12-27.

⑩ Barbara Han, Kush Varshney, Shannon LaDeau, et al., “A Synergistic Future for AI and Ecology,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol.120, no.38, 2023, pp.1-7.

⑪ Kathryn Hulick, “To ‘Green’ AI, Scientists are Making It Less Resource-Hungry,” <https://www.snextplores.org/article/green-artificial-intelligence-less-energy-ai-climate>, 2024-02-08.

⑫ “Großer Schritt für KI und Umwelt: BMUV Zeigt Erste Ergebnisse der Green-AI Hub Pilotprojekte,” <https://www.bmu.de/pressemitteilung/grosser-schritt-fuer-ki-und-umwelt->

[bmu-zeigt-erste-ergebnisse-der-green-ai-hub-pilotprojekte](https://www.bmu.de/pressemitteilung/grosser-schritt-fuer-ki-und-umwelt-bmu-zeigt-erste-ergebnisse-der-green-ai-hub-pilotprojekte), 2024-05-14.

⑬ 生蕾：《资本逻辑操控下人工智能时代的劳动危机》，《海南大学学报》（人文社会科学版）2020年第2期。

⑭⑮ Nick Dyer-Witheford, Atle Kjøsen, James Steinhoff, *Inhuman Power: Artificial Intelligence and the Future of Capitalism*, London: Pluto Press, 2019, p.3, p.4.

⑯ “The Rise of the Superstars,” *The Economist*, <https://www.economist.com/special-report/2016/09/15/the-rise-of-the-superstars>, 2016-09-15.

⑰ “Global Total Corporate Artificial Intelligence (AI) Investment From 2015 to 2022,” <https://www.statista.com/statistics/941137/ai-investment-and-funding-worldwide/>, 2023-04-01.

⑱ Takemura Noriyoshi, “Ecological Transition from ‘Red AI’ to ‘Green AI’ on the Move: Tackling Environmental Complexity with Super Intelligence,” *Research Bulletin*, no. 45, 2021, pp. 27-38.

⑲ Nestor Maslej, Loredana Fattorini, Raymond Perrault, et al., “Artificial Intelligence Index Report 2024,” Institute for Human-Centered AI, Stanford: Stanford University, 2024, p.381.

⑳ Anna Jobin, Marcello Ienca, Effy Vayena, “The Global Landscape of AI Ethics Guidelines,” *Nature Machine Intelligence*, vol. 1, no.9, 2019, pp. 389-399.

㉑ European Union, “Artificial Intelligence Act,” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1689>, 2024-06-13.

㉒ The White House, “FACT SHEET: President Biden Issues Executive Order on Safe, Secure, and Trustworthy Artificial Intelligence,” <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/10/30/fact-sheet-president-biden-issues-executive-order-on-safe-secure-and-trustworthy-artificial-intelligence/>, 2023-10-30.

㉓ Verónica Bolón-Canedo, Laura Morán-Fernández, Brais Cancela, et al., “A Review of Green Artificial Intelligence: Towards a More Sustainable Future,” *Neurocomputing*, vol.599, 2024, pp.1-10.

㉔ 《山西省人民政府办公厅关于印发山西省促进先进算力与人工智能融合发展若干措施的通知》，<http://www.shanxi.gov.cn/zfxxgk/zfxxgkzl/fdzdgknr/lzyj/szfbgtwj/02407/>



t20240703_9601756.shtml, 2024年6月26日。

⑳《河北省人民政府办公厅关于进一步优化算力布局推动人工智能产业创新发展的意见》, <http://www.hebei.gov.cn/columns/3d33a20b-4271-4b3b-8cae-3664e980d262/202405/15/4a0d9a00-dbd3-450c-ae31-f09393d8f1b7.html>, 2024年5月23日。

㉑《内蒙古自治区政务服务与数据管理局等四部门关于印发〈内蒙古自治区促进通用人工智能发展若干措施〉的通知》, http://gxt.nmg.gov.cn/zwgk/fdzdgknr/tzgg/202402/t20240207_2467100.html, 2024年2月1日。

㉒④ Yogesh Dwivedi, Laurie Hughes, Elvira Ismagilova, et al., "Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary Perspectives on Emerging Challenges, Opportunities, and Agenda for Research, Practice and Policy," *International Journal of Information Management*, vol. 57, 2021, pp.1-47.

㉓ 黄堃:《AI专家李云飞:人工智能未到“牛顿时代”》, http://m.xinhuanet.com/2017-10/29/c_1121872804.htm, 2017年10月29日。

㉔ ⑤ Keith Kirkpatrick, "The Carbon Footprint of Artificial Intelligence," *Communications of the ACM*, vol. 66, no. 8, 2023, pp. 17-19.

㉕ Kylie Foy, "AI Models are Devouring Energy. Tools to Reduce Consumption are Here, If Data Centers will Adopt," <https://www.ll.mit.edu/news/ai-models-are-devouring-energy-tools-reduce-consumption-are-here-if-data-centers-will-adopt>, 2023-09-22.

㉖ Josh Cows, Andreas Tsamados, Mariarosaria Taddeo, et al., "The AI Gambit: Leveraging Artificial Intelligence to Combat Climate Change—Opportunities, Challenges, and Recommendations," *AI & Society*, vol.38, 2023, pp.283-307.

㉗ 姜延强:《人工智能的伦理困境与正解》,《道德与文明》2022年第1期。

㉘ 谢瑜、王潇毅:《人工智能情感的伦理风险及其应对》,《伦理学研究》2024年第1期。

㉙ Hongxia Hou, "On the Three Constraints of the Development of Artificial Intelligence: Value, Liberation and Responsibility," *Cultures of Science*, vol. 4, no. 3, 2021, pp. 159-168.

㉚ Qinglan Huang, Yiyang Zhao, "Green AI Computing: Where are the Pathways?" [https://metalab.essec.edu/green-ai-](https://metalab.essec.edu/green-ai-computing-where-are-the-pathways/)

[computing-where-are-the-pathways/](https://metalab.essec.edu/green-ai-computing-where-are-the-pathways/). 2023-05-01.

㉛ IEA, "Data Centres and Data Transmission Networks," <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>, 2025-03-01.

㉜ Kate Crawford, "Generative AI is Guzzling Water and Energy," *Nature*, vol. 626, 2024, p.693.

㉝ 赵广立:《李彦宏委员:算力算法要低碳,加快发展绿色AI》,《中国社会科学报》2022年3月7日。

㉞ "What is Green AI? How it is Revolutionizing Tech for Sustainable Future," <https://vegavid.com/blog/what-is-green-ai/#>, 2023-08-08.

㉟ 陈连虎:《冲击与重构:DeepSeek引发AI生态变革》,《软件与集成电路》2025年第Z1期。

㊱ Tan Yigitcanlar, Rashid Mehmood, Juan Corchado, "Green Artificial Intelligence: Towards an Efficient, Sustainable and Equitable Technology for Smart Cities and Futures," *Sustainability*, vol. 13, no. 16, 2021, pp.1-14.

㊲ Ali Guenduez, Tobias Mettler, "Strategically Constructed Narratives on Artificial Intelligence: What Stories are Told in Governmental Artificial Intelligence Policies?" *Government Information Quarterly*, vol. 40, no. 1, 2023, pp.1-13.

㊳ 陈瑶:《环境规制影响工业绿色转型的中介及门槛效应研究》,《财经理论与实践》2023年第6期。

㊴ Patricia de Almeida, Carlos dos Santos, Josivania Farias, "Artificial Intelligence Regulation: a Framework for Governance," *Ethics and Information Technology*, vol. 23, no. 3, 2021, pp. 505-525.

㊵ Duri Long, Brian Magerko, "What is AI Literacy? Competencies and Design Considerations," *CHI 20: Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2020, pp. 1-16.

㊶ 蔡迎春、张静蓓、虞晨琳等:《数智时代的人工智能素养:内涵、框架与实施路径》,《中国图书馆学报》2024年第4期。

㊷ Ian Hodgkinson, Nick Jennings, Tom Jackson, "Everyone must Understand the Environmental Costs of AI," <https://oecd.ai/en/wonk/understand-environmental-costs>, 2024-10-04.

㊸ Ajay Kumar, Tom Davenport, "How to Make Generative AI Greener," <https://hbr.org/2023/07/how-to-make-generative-ai-greener>, 2023-07-20.

编辑 张蕾

更正声明

因编辑部工作疏忽,本刊2025年第4期所刊陈平原教授《有线广播及大喇叭的政治/文化功能——1970年代粤东山村的声音记忆》一文中,第153页“上下两卷900万字的大书”,应为“上下两卷90万字的大书”,特此更正。

《探索与争鸣》编辑部