



脑认知科学和人工智能驱动的未来教育变革

北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室教授 薛 贵

北京师范大学智慧学习研究院联席院长 刘德建

【摘要】脑认知科学与人工智能快速发展，推动人类社会加速向智能时代演进，对人类生存发展能力提出了全新要求，也推动教育目标和方式发生根本性变革。未来教育体系的设计需要突破知识传递的限制，以推动人类持续繁衍与进化为目标、以学习力培养为核心、以个性化按需学习为导向、以人脑学习规律为指导、以技术创新为依托，帮助个体培养有机的知识体系、强大的认知能力和持久的学习动力。实现未来教育目标，需要社会各界从教育政策、科学研究、教师教育、考试评价、课程设置和技术创新等方面协同行动，推动未来教育变革从理论走向实践。

【关键词】脑科学 人工智能 教育变革 学习力

【中图分类号】TP18/G521

【文献标识码】A

【DOI】10.16619/j.cnki.rmltxsqy.2024.17.001

教育通过传授知识、培养技能和塑造价值观来促进个体的全面发展，并进一步推动社会进步和人类文明发展。随着脑认知科学和人工智能技术的不断发展，世界正在加快进入智能时代。在历史上，每一次科技革命都对教育产生了深远的影响，推动了教育目标、内容、评价和技术的变革^[1]。如果说以蒸汽机发明和机械制造技术进步为代表的第一次工业革命促进了教育的普及和职业教育的兴起，以电气化和大规模生产为代表的第二次工业革命推动了学科的专业化，以信息化和自动化为代表的第三次工业革命推动了教育的信息化和个性化，那么脑认知科学和人工智能推动的以智能化为代表的第四次工业革命则将从根本上改变教育的目标、内容和实现方式，从而带来史无前例的教育底层变革。这是因为，不同于之前任何一次工业革命，智能化不仅将以更快的速度和在更大范围内推动技术变革和生产关系的改变，同时将第一次对人类最引以为傲的核心能力（即智力）和尊严构成挑战。未来已来，教育也必须迅速行动，以帮助儿童为未来做好准备。在这样的背景下，深入探讨脑认知科学和人工智能背景下的未来教育

薛贵，北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室教授，教育部“长江学者”特聘教授。研究方向为人类学习和记忆的认知和神经机制。主要论文有《内部动机、外部动机与创造力的关系研究》《事件相关功能磁共振成像研究及其在认知神经科学研究中的运用》《Transformative Neural Representations Support Long-Term Episodic Memory》《Individual-Specific and Shared Representations During Episodic Memory Encoding and Retrieval》等。刘德建，北京师范大学智慧学习研究院联席院长，教授级高级工程师。研究方向为人工智能与大数据教育应用、数字教育。



变革就显得尤为重要与紧迫。本文将首先介绍脑认知科学和人工智能技术的发展趋势，分析智能时代对人类生存和发展的新要求；继而，重点阐述智能时代创新教育的设计原则和体系；最后，就智能时代创新教育实践的实施路径给出建议。

脑认知科学和人工智能技术的发展趋势

脑认知科学范式变革和前沿进展。随着神经科学研究技术和方法不断进步，研究者能够在前所未有的规模和分辨率上记录和分析神经细胞结构、连接方式、基因表达和活动模式，这推动了人们对大脑结构和功能的理解。^[2]在2020年被Nature Methods评为年度技术的空间转录组技术，^[3]可以清晰描述大脑的细胞类型，^[4]启发其功能。结合空间转录组技术，研究者构建了小鼠^[5]和灵长类动物^[6]的大脑细胞类型图谱、初步刻画了人类大脑图谱^[7]以及海马单神经元的全脑空间组织投射^[8]。还有研究者结合空间转录组技术和颅内脑电技术，将基因表达与脑振荡联系起来，确定了与记忆形成振荡特征相关的基因。^[9]

在脑认知领域，2017年Neuropixels的出现使得大规模记录单个神经元活动成为现实，帮助人们更好地理解大脑的复杂动态网络。^[10]采用这种方法，研究者揭示了人脑在细胞层面如何编码、理解和产生语言，^[11]甚至发现单个细胞就可以“听懂”词义。^[12]另外，采用先进的分析思路，研究者也可以解析大脑复杂认知功能的神经机制，包括猕猴在空间序列记忆时的环状结构表征，^[13]前额叶通过增强和转换记忆表征来减少干扰等，^[14]以及人类认知地图形成的机制。^[15]

脑认知科学的进展还带来临床应用的突破。比如，脑机接口技术构建了人脑和外部设备之间的直接信息桥梁，在动作、^[16]语言、^[17]精神疾病诊断、^[18]盲人重获视力（如借助Neuralink的新产品Blindsight）、动作想象和思维^[19]等领域取得了广泛进展，从而被Nature提名为2024年七大

关键科学技术之一。^[20]使用全新的双向脑机接口技术，研究者可以通过对体感皮层的微刺激让患者产生触觉，使抓握物体所花费的时间从20.9秒减少到10.2秒，更接近健全人类能力。^[21]最新的语音脑机接口可以通过将尝试讲话引起的神经活动解码为文本或声音，帮助瘫痪患者实现快速交流，解码速度能达到每分钟62个单词；^[22]甚至可以生成语音和虚拟形象，交流准确率可以达到85%以上。^[23]

人工智能技术路线和最新进展。近年来人工智能无论在AI芯片、^[24]网络架构和算法，^[25]还是在基础和科学应用领域^[26]都取得了较大进展。在大家耳熟能详的图像识别、自然语言理解和强化学习等三大基础领域，人工智能更是取得了令世人瞩目的进步。随着2013年Word2Vec等词嵌入技术的出现，以及后来的长短时记忆网络和注意力机制的广泛应用，机器对自然语言的理解程度得到极大加深。Transformer模型通过自注意力机制（Self-Attention Mechanism）能够捕捉序列数据中长距离依赖的关系。^[27]随后几年里，基于Transformer的大规模预训练语言模型迅速崛起，极大提高了自然语言理解和生成能力。在大模型基础上，通过微调（Fine-Tuning）的方式适应各种下游任务，极大地拓展了大语言模型的应用范围。另外，将图神经网络与多模态学习结合，AI能更好地理解和生成复杂的人类语言和视觉场景，推动了Midjourney V5、ChatGPT-4o和Sora等多模态理解和场景生成的应用。在强化学习领域，继2016年DeepMind公司开发的AlphaGo战胜围棋世界冠军李世石之后，^[28]2019年AlphaStar又在《星际争霸2》中战胜了人类顶级选手，^[29]2020年DeepMind开发的MuZero，不仅在围棋，还在国际象棋和日本将棋等项目上展现出超越人类的游戏策略。^[30]

除了这些通用领域的应用，AI for Science是另一片人工智能大展身手的领域。AI在生物、^[31]化学、^[32]数学、^[33]神经^[34]乃至考古^[35]等领



域取得了重大的进展。比如，DeepMind团队开发的几代AlphaFold破解了蛋白质结构这一困扰学界数十年的难题。^[36]2024年6月，Evolutionary Scale AI发布蛋白质语言模型ESM3，支持蛋白质序列、结构和功能这三种模态的任意组合转换。团队用其设计出新型绿色荧光蛋白，而自然界可能需要5亿年进化才能产生这样的结果。^[37]2023年12月，DeepMind用AI研究数学中的帽子集问题，发现了新的大型帽子集构造。^[38]2024年1月，AlphaGeometry可以解答国际数学奥林匹克30道题目中的25道，达到竞赛金牌得主的水平；^[39]2024年5月，MIT科学家用AI发现了3个新的可积偏微分方程。^[40]

脑认知科学和人工智能的协同发展。脑认知科学与人工智能在各自取得迅猛发展的同时，近年来也逐步融合并相互促进。一方面，人工智能可以为脑认知科学提供强大的分析和解释工具。比如，通过深度学习算法模拟人脑的神经活动，可以实现对人脑如何进行图像识别、^[41]自然语言处理、^[42]语音识别^[43]以及视频观看^[44]等的解释和预测。从人工智能算法中获取启发，科学家还能解析大脑的计算过程，发现人脑中递归的网络架构有助于快速识别物体、^[45]婴儿可以通过无监督学习进行图像识别^[46]以及额顶皮层在语言加工中存在高层次、长时程的预测性编码^[47]等现象。

另一方面，脑认知科学可以深入评估人工智能的能力特征，理解其作用机制，启发新的人工智能算法。认知科学建立了完善的评估方法论用以准确评估模型的能力，提供了多维度的基准测试。比如，研究发现以ChatGPT为代表的大语言模型在瑞文矩阵推理、^[48]情感识别、^[49]文本注释^[50]等多项能力上接近甚至超越人类表现，以及表现出与人类非常相似的心智理论模式^[51]。然而，模型在复杂类比推理、^[52]因果推理^[53]以及言语推理和计划^[54]等方面仍有待提高。更为重要的是，认知科学通过研究心智、大脑和行为，为人工智能提供了重要的理论基础和灵感。早期的

神经网络和深度学习借鉴了神经元和视觉系统的工作原理，主流的Transformer则模仿了人类选择性注意的方式，^[55]最新的GPT模型结合了基于人类反馈的强化学习机制（Reinforcement Learning from Human Feedback, RLHF）^[56]。还有研究发现，在神经网络中引入人类的元学习方法可以让模型表现出与人类相似的系统性和灵活性；^[57]模拟海马和内嗅皮层的工作机制，可以成功实现认知地图的形成^[58]。最后，通过人类思维链（chain-of-thought）的方式给予GPT提示，可以显著提高模型在任务中的表现。^[59]

可以看到，脑认知科学和人工智能作为两个前沿领域，近年来取得了飞速进步。一方面，脑认知科学通过刻画神经元集群和环路层面的大脑结构和功能，正在深入揭示人脑智能的机制，推动大脑解码（读脑）和调控（写脑）的相关研究及快速落地；另一方面，人工智能在硬件和算法架构、基础大模型和行业应用，以及专业和科学领域也取得了很大进展，正在日益推动各个行业的深度变革。随着脑认知科学和人工智能的深度融合，人类社会将很快进入全面智能时代。

智能时代对人类生存和发展的新要求

时代演变带来的是不断变化的挑战和机遇，也对个体能力提出了全新的要求。理解不同时代的特征和对能力的需求，能够让人们更好地应对变化并保持竞争力。农耕时代大约从公元前9000年至17世纪（在不同地区开始和结束的时间有所不同），是以农业为主要经济活动的时期。社会结构以家庭和部落为单位，生产活动依赖自然环境和劳动力。这个时代要求人拥有强壮的体力和长时间的耐力，掌握种植、养殖、灌溉等农业技能，强调家庭和社区合作，互助劳作是常态。特别是水稻的种植所需要的灌溉系统的建立，需要广泛的人际合作，中国南方人民合作精神的建立^[60]即是典型例子。



工业时代开始于18世纪的第一次工业革命（1760年~1840年），其主要特征是机械化生产、大规模工厂和城市化。工业时代要求人具有操作和维护机器的技能，机械工程和技术知识变得重要。特别是从机械化到电气化的发展，对体能的要求逐步降低，但对专业分工和效率的要求越来越高。这就要求劳动者具有较高的基础素质，阅读和书写能力成为必需；同时也强调人的纪律性和守时性，按时上下班、严格遵守规章制度。亚当·斯密（Adam Smith）在《国富论》中强调了劳动分工的重要性，认为产业工人需要高度的专业化技能以提高生产效率。工业时代对基础教育、专业技能、分工合作和纪律性的强调，成为现代教育体系设计的关键考量，其影响一直持续至今。

从20世纪末开始，人类进入了信息化时代。信息和通信技术（ICT）快速发展，互联网、大数据等技术显著改变了人们的生活和工作方式。这个时代要求人具备数字素养，掌握使用计算机和互联网以及应对信息冗余的能力。比尔·盖茨就一直强调编程、数据分析等技能的重要性，他指出，创新和快速适应变化能力是适应信息化时代的关键。同时，面对信息化时代的复杂问题（如全球化、网络安全等），需要人们具备系统思维和解决复杂问题的能力。世界经济论坛（WEF）在《未来就业报告》中提到，信息时代的劳动力需要具备“复合技能”，如复杂问题解决、批判性思维和情绪智能。然而，虽然教育信息化在技术层面逐步普及，但当下的教育内容和目标却还远没有满足信息时代对人的要求。

更具有挑战的是，随着科技的不断发展，世界正在加快进入智能时代，从而对人提出更为不同的要求。

第一，智能时代更加突出人脑智能的价值。前文提到，脑认知科学和人工智能在理解大脑运行模式的基础上，还在模仿大脑的工作方式，在大数据和强计算支持的弱人工智能基础上，将进

一步实现通用的强人工智能。正如工业革命后机器替代了大量的体力劳动，智能时代来临人工智能会替代大量的技能劳动，包括生产线工人、汽车司机、外语翻译、职业棋手、初级会计、律师、程序员、外科医生等。以前人们认知中的创新劳动，比如原画师，甚至某些专业的科学领域，包括数学、化学、生物、考古等，其中部分有明确定义的边界和目标、可以依据大数据进行计算和预测的领域劳动也逐步被人工智能所取代。这些新的变化迫使人们更加深入地思考人脑智能的本质，并不断提高智能的水平。如何突出人脑智能的优势，实现人脑智能和人工智能协作共生，教育必将在其中承担更大责任，也必须作出重要变革。

第二，智能时代更加强调个体的学习能力。在人工智能时代，知识的爆炸式增长将成为常态，职业和工作的更迭也将更加频繁，从而更加强调新知识技能的学习。依托互联网以及生成式人工智能，知识获取更加便捷高效；基于人工智能的知识图谱构建，知识分析和整合也更加精确；穿戴式甚至微创侵入式脑机接口将使得人机协作更加自然顺畅。在这个背景下，生僻的知识、碎片化的知识、僵化的知识将失去在大脑中存储的意义，而系统的知识、广泛联系的知识、能灵活应用的知识才是能支撑创新问题解决的知识，才是人脑最值得识记的知识，也才是教育需要重点传授的知识。同时，知识获取的场所也从教室扩展到全空间，获取的媒介从书本拓展到混合现实，获取的途径从被动接受拓展到主动构建。因此，传统的知识教育模式必将进行重大变革，旨在培养强大的学习能力以及“学会学习”的学科也将变成像语文、数学等一样的、人人必修的基础学科。

第三，智能时代更加青睐综合和专项知识技能兼具的T型人才。随着知识获取容易程度的提高，以及共用智能工具平台的涌现，一个人能掌握的知识和使用工具将越来越多。因此，掌握



多学科领域知识，熟练使用多种工具的个体会越来越多，他们将展现出更大的竞争优势。未来，一个人将承担多个人的角色，从而降低人际沟通和团队管理的成本；少数人甚至一个人的企业在市场中将拥有更大的灵活性、更高的效率以及更强的竞争力。除了掌握多种知识和技能外，如果个体在某些特定领域拥有超过AI的专业技能，成为某个领域的顶尖专业人才，能够创新知识产品，将具有更强大的竞争优势。从这个意义上讲，智能时代更加青睐拥有综合和专项能力的T型人才。

第四，智能时代将对个人成长动力提出更高要求。生命长度的增加和知识演变的加速让一劳永逸式的学习成为过去。终身学习不仅是高品质生活的必然要求，更是个体在未来生存和发展的前提。一方面，虽然脑认知科学与人工智能的发展在客观上能提高个体学习效率，但也极大地加剧了竞争的激烈程度，提高了取得竞争优势的门槛，从而对人的学习动力和耐力提出了更高的要求；另一方面，基于人工智能技术的消费品正在精准地“劫持”个体的奖赏系统，通过高脂高糖食品、高情绪价值商品、沉浸式虚拟游戏、个性化短视频推送、便捷的购物体验、针对性广告，乃至定向推送的消费贷，助推消费主义和享乐主义，分散精力并消磨意志，还可能导致抑郁焦虑等精神心理问题。因此，未来影响个人终身发展的最大挑战不是资源的多少，而是个体是否拥有抵制诱惑的强大意志力和渴望成长的强大动力。

可以看到，智能时代将带来全新的社会和经济形态，也对人的能力构成提出了全新要求。同农耕时代、工业时代和信息时代不同，智能时代要求人拥有更强大的智能、学习能力和学习动力，才能掌握多领域的知识和技能，在某些专业领域开拓创新并出类拔萃，抵挡诱惑并努力实现个人成长目标。从这个意义上讲，教育的目标应该远远超越传统的知识讲授，并回归到支撑人类生存和发展的最底层能力，也就是人类适应快速

变化的不确定环境的能力，这也是未来教育要遵循的第一性原理。

智能时代的创新教育体系设计

教育是为未来培养人才。处在迅猛发展变化的时代，教育必须未雨绸缪、提前行动，这已经成为了社会的广泛共识。历史上，应对科技和社会的变革，教育也作出了积极的应对。因应工业革命而产生的教育1.0，是传统的教师主导型教育。其主要特征是以教师为中心，教师是知识的主要传授者，学生主要是被动接受者。同时采用固定的教材和标准化的考试。在教育2.0阶段，教育所指向的学习则是以学生为中心的主动学习。其主要特征是强调学生的主动性和参与感，鼓励自主学习，倡导教师与学生、学生与学生之间的互动，同时采用更加丰富的学习资源，以及项目、论文、实践等更加多元的评估形式。信息技术的引入推动了教育3.0的发展，互联网、计算机、多媒体等广泛应用于教育，在线学习，个性化学习和数据驱动成为其主要特征。那在智能时代，我们需要什么样的教育呢？

一些专家强调科技进步对教育的促进作用，提出了教育4.0的概念。在教育4.0阶段，智能化与全方位个性化教育成为主要特征。AI和大数据可以提供超个性化的学习路径和资源，VR和AR则能够提供沉浸式和实践性的学习体验。正如世界经济论坛在2024年4月的报告中指出，AI如一把双刃剑，给未来教育带来了巨大挑战的同时，也有助于应对教育的问题。为应对挑战，未来教育需要聚焦全球公民技能（global citizen skills）、创新和创造技能（innovation and creativity skills）、技术技能（technology skills）、人际交往技能（interpersonal skills）。而AI也能够推动个性化的自适应学习（personalized and self-paced learning）、可获得与包容性的学



习 (accessible and inclusive learning)、问题导向的合作学习 (problem-based and collaborative learning), 以及学生驱动的终身学习 (lifelong and student-driven learning)。可见, 教育4.0的核心在于实现个性化和自驱动的学习, 以使个体更好掌握未来所需的核心技能。

教育4.0是否能成为未来教育的答案呢? 前文提到, 脑认知科学和人工智能所推动的智能化革命, 和之前的任何一次技术革命都有着显著的不同。依据惯性和线性思维所设想的未来教育, 可能无法真正全面反映时代变化的趋势, 以及对教育的全新需求。设计智能时代的教育体系, 需要遵循全新的理念。这里, 我们重点从五个方面进行讨论。

思维破界为前提。脑认知科学和人工智能的快速发展趋势, 以及对人的能力要求的根本变化, 要求我们全面突破习惯思维的模式, 跳出传统教育的框架, 从第一性原理来重新认识教育的作用, 这是真正实现教育变革的前提。

第一, 未来教育需要突破知识传递的界限, 转向推动人类传承和进化的根本任务。智能时代的加速到来, 给人类带来翻天覆地的变化。知识迭代的加快、知识范围的扩增、知识获取的便利, 都极大地降低了通过正规教育来获得有限范围、标准化知识的必要性。现有教育体系中所规定的全员必须掌握的基础知识, 不仅缺乏系统科学的论证, 也无法适应时代发展的需求。而人类面临的成长动力缺失、心理健康危机等更加严峻的考验, 迫切需要通过教育的变革来积极应对。从这个意义上来讲, 教育的目的应该从传递知识和技能转向推动人类繁衍和进化。这是教育使命的一个巨大转变, 也指引着未来教育变革的方向。

第二, 未来教育需要突破传统学科专业的界限, 实现多学科和跨学科的教育创新。教育的学科划分是基于工业时代的劳动分工而建立起

来的。无论从大脑知识存储的原理、学科发展趋势、社会需求变化, 还是人类发展需求来看, 这种学科划分的必要性都在日益降低。从知识获取上看, 跨学科的主题式、项目制学习将能更好促进知识体系的形成和灵活应用; 从学科发展上看, 学科交叉融合将是创新的源泉; 从社会需求上看, 未来专业分工将更加模糊, 多专业和跨专业将更加普遍; 从人类发展上看, 教育需要从对人的知识技能的培养转向对人的综合培养, 除了传统的数学、语文、英语、物理、地理、生物、化学、计算机等基础学科之外, 如体育和健康科学、心理学、认知科学与神经科学、社会学以及其他更多与人相关的人文学科将更能促进个人发展。

第三, 未来教育需要突破教育方式的边界, 实现大脑塑造的全景教育。面临智能时代的挑战, 教育的根本任务是提升人的学习能力, 其本质是对大脑的科学塑造。除了传统的教育教学活动, 还有很多的方式可以实现对大脑的科学塑造。比如, 除了知识的讲授, 通过动手实践不仅有助于知识的掌握, 还有助于技能的习得; 体育锻炼, 特别是有氧运动, 是强身健体、调节情绪、巩固记忆的有效方法; 充足有效的睡眠是改善情绪、提升注意力和学习记忆的有效策略; 基于大脑的学习原理的计算机游戏是提高学习动机和学习效率的科学方式; 当然, 对大脑活动的直接调控, 如采用药物、神经反馈和脑刺激等方式, 虽然目前更多用于脑功能疾病治疗、障碍康复以及学习困难矫正中, 但未来在充分考虑安全和伦理的前提下, 也将有可能应用到正常人群的学习能力增强中。

最后, 未来教育需要突破教育技术的边界, 实现符合大脑规律的高效教育。虽然信息技术和人工智能正在快速地改变教育样态, 但目前更多表现为技术能力, 而更少考虑学习的规律和需求; 更多注重数据的采集, 而缺少有效分析和规律提取, 没有完成从数据到证据的转化。为真正实现技术赋能的未来学习, 一方面, 需要更加突



出脑认知科学的重要地位。脑认知科学不仅能够为人工智能和大数据提供理论基础和关键指标，还能提供直接高效的技术，包括数据采集技术、指标分析技术、评估诊断技术、干预训练技术等。另一方面，需要打破技术壁垒，实现脑认知科学与物联网、大数据和人工智能技术的深度有机融合，这将为未来教育提供强大技术支撑。

能力提升为核心。未来究竟需要什么样的能力？传统做法是基于对未来趋势的洞察，定义一系列能够符合未来社会形态的能力和素养体系，比如教育4.0所强调的技能素养、人际交往、全球意识，等等。虽然这样的预测具有积极的意义，但也往往存在明显的局限。这是因为人类往往高估短时间技术变革的影响，而低估长时间技术变革的力量。特别是基于脑认知科学和人工智能技术的迅猛发展，未来社会形态必然会加速演变。对科学技术进步、社会生产组织形态、人际交往模式乃至国际竞争形势的预测，都会面临极大的不确定性。

面对复杂多变，难以预测的未来世界，我们究竟需要什么样的能力呢？对于这个问题，我们或许可以从人类漫长的进化历史中寻求启示。人类经过几百万年的进化，大脑体积明显增大，认知能力显著提高，知识技能获取速度极大加快。尽管如此，个体在成长过程中所获取的知识并不能通过基因遗传给后代。婴儿在出生的时候，除了本能行为，头脑中并没有外显的知识和技能，包括语言、运动和社会交往，等等。相反，婴儿却拥有异常强大的学习能力，确保其在世界任何地方都能学会当地的语言，适应当地的自然和社会环境，熟悉当地的文化，掌握生存和发展的技能。这种强大的学习能力就是人类能够以不变应万变，在数百万年复杂的气候环境变化中得以生存的根基，也应该成为我们要重点强调的在未来快速多变的时代所要具备的关键底层能力。

未来人类所需具备的关键底层能力就是人类强大的学习力。学习力这个概念最早由美国

麻省理工学院的佛睿斯特（Jay Forrester）于1965年在《一种新型的公司设计》一文中提出。^[61]20世纪90年代中期，学习力逐渐成为一项前沿的管理理论，被广泛应用于企业管理和企业文化领域。在教育领域，学习力是一个新的概念。国内外的研究者对其内涵的一般定义为：一个人的学习动力、学习毅力、学习能力和学习创新力的总和，是人们获取知识、分享知识、运用知识和创造知识的能力。联合国教科文组织出版的《学会生存》一书中提出：“未来的文盲不是目不识丁的人，而是没有学会怎样学习的人。”

对学习力的要素，英国布里斯托尔大学Claxton教授于2002年首先提出了学习力构成的四个要素“4R”：坚韧力（resilience）、策应力（resourcefulness）、反省力（reflection）、关系力（relationships）^[62]。在此基础上，英国ELLI项目进一步丰富了学习力的构成要素，提出了七要素理论，分别是：变化和学习（changing and learning）、批判性好奇心（critical curiosity）、意义形成（meaning making）、创造性（creativity）、学习关系（learning relationships）、策略意识（strategic awareness）、坚韧力（resilience）。美国哈佛大学Kirby教授在长期的教学实践中丰富了学习力的内涵，并于2005年出版了专著《学习力》。他认为学习力应该是一个包括学习动力、学习态度、学习方法、学习效率、创新思维和创造力的综合体。

在总结学习力的既有研究，结合脑认知科学的发现后，我们从脑科学的视角提出了面向未来的学习力的三大要素，包括有机的知识体系、强大的认知能力和持久的学习动机。^[63]其中有机知识体系，是指能够从具体到抽象之间形成多个层级，各层级内部和层级之间紧密联系，从而构成复杂的、有结构性的知识网络，进而加快新知识掌握的速度，促进知识的迁移、灵活应用和创



新。人脑的感知运动皮层、颞叶皮层和顶下小叶等区域构成了人脑有机知识知识存储的主要生理载体。强大的认知能力是指人们获取和加工信息并且创造知识的一系列认知能力的组合，包含了信息的选择（注意力）、短时存储（短时记忆）、分析与加工（计划与推理）、更新与抑制（执行功能）、长时保存和转化（长时记忆）以及元认知监控等成份。这些高级的认知功能主要由大脑前额叶及其所在的执行控制网络来完成。持久学习动机则包含了充满激情、热爱和好奇，渴望成长的动力系统；善于调节情绪、控制冲动、延迟满足，拥有强大复原力和坚韧力的控制系统；追求卓越，拥有明确的人生目标和意义的方向系统。这个部分需要大脑古老的边缘系统和最近进化的内侧前额叶系统的共同作用。

大量的研究表明，学习力不仅是预测一个学生学习成绩的重要指标，^[64]更是预测个体长远发展，包括职业、收入、生活满意度，甚至身体健康和寿命的关键。^[65]因此，基于脑认知科学的学习力体系，不仅可以帮助学生适应未来，也能够解决当下的现实需求，从而实现教育中短期目标和长远目标的协调统一，以及应试教育和素质教育协调统一。

按需学习为导向。每个人的大脑都是独一无二的，这是个人独特的基因和环境因素共同作用的结果，也是人脑充分成熟的标志。脑功能影像的研究发现，成人个体的脑功能连接模式具有独特的特征。就像指纹一样，我们也可以通过个体的脑网络连接模式来准确识别个人。^[66]这种大脑结构和功能的独特性，是个性化的教育底层生物基础。近年来，“内卷”现象在教育领域表现得尤为明显，主要特征表现为社会、学校和家庭以单一和统一的标准为目标，在狭窄的赛道激烈竞争，从而导致学生压力过大，身心健康遭受威胁。而个性化教育被认为是破解教育内卷的最有效方法。因人而异、因材施教，这不仅是教育的理想状态，更是教育的最终目标；这不仅是尊重

个体差异、充分实现个人潜能的重要途径，也是破除教育内卷的必然要求。而学生数量减少和人工智能技术的应用普及将大大提升个性化教育的可行性。未来，按需学习将成为一种必然的学习范式，^[67]学习者可以在自然情境中，根据多样化的学习需求，满足多层次学习目标的进阶要求，通过智能技术有效连接学习资源、环境与服务。更重要的是，以按需学习为导向，将能更好地提升学生学习能力。

首先，按需学习可以帮助个体更好构建有机知识体系。根据加德纳的“多元智能理论”，不同个体可能在语言、逻辑数学、空间、音乐、身体运动、人际、内省和自然观察等方面具有不同的智能优势。在具体的知识领域，不同学生在知识背景、学习风格、兴趣爱好和能力水平上存在差异。通过按需学习，可以依据学生自身的知识背景选择恰当的教学内容，根据学生的学习风格调整学习方式，从而使得教育资源的投入更加高效和有针对性，避免教育资源和时间的浪费，从而提高教育效率。

其次，按需学习能更好照顾每个孩子的认知能力，提供针对性的训练。教师可以根据每个学生的认知能力水平，提供适当支持和任务挑战。对于学习困难的学生，按需学习可以提供额外的资源和帮助，让其赶上进度；对于学习优秀的学生，按需学习可以提供更高难度任务和机会，激发其潜力。此外，按需学习可以在精准评估学生学习能力的基础上，有针对性地改善学生认知能力短板，强化优势能力，从而实现“均衡+优势”的能力发展模式。

最后，按需学习能最大程度激发学生的学习动机和兴趣。按需学习根据每个学生的优势量身定制学习计划，使他们能够在自己的擅长领域得到认可。按需学习注重学生的兴趣和内在动机，通过关注和利用学生的兴趣点来设计课程内容和教学方法，能够更好地激发他们的学习热情和主动性。按需学习还注重学生的心理和情感需求，



通过建立良好的人际关系和学习环境，更好地支持学生的心理健康和情感发展。内卷现象往往源于外在动机（如排名和升学压力）驱动下的同质竞争，而按需学习通过关注和培养学生的内在动机，培养其发自内心的热爱，为自我发展注入持久的动力。

可以看到，通过按需学习，可以更好匹配学习内容、学习难度和学习方式，从而实现高效的有机知识体系建构；也能够通过认知能力的精准评估和个性化干预训练，实现认知能力的科学提升；最后，还通过匹配个体目标与价值来提高学习兴趣 and 内在动机，从而提升学习动力。因此，按需学习可以更加有效地培养学习力，从而成为未来教育的必然选择。

大脑规律为指导。基于学习力的培养目标，为实现科学高效、切实可行的教育变革，我们还需要尊重大脑发育规律、大脑运作规律、大脑学习规律，制定科学的课程大纲和培养体系，应用有效的学习方法和策略，实施科学准确的考核评估方式。

学习的一个主要目的就是要建立有机的知识体系。有机知识体系的重要特征是模块化、层级性和结构化。^[68]为了建立有机的知识体系，可以依据材料之间的相似性和联系性来安排学习材料，开展大单元、跨主题和项目制学习，通过运用组块或思维导图等方式来更好组织知识。^[69]更重要的是，有机知识的形成需要从根本上转变教育方式，要从“老师的教”转向“学生的学”，实现从输入到输出的转变，包括采用“费曼学习法”以及布置完成综合性作业等，从而更好地发现知识间关系、更有序组织知识，构建符合自己已有知识背景的知识体系。^[70]另外，大量研究表明，分散学习^[71]和以测代练^[72]是非常有效的学习方法，当前却没有被师生很好地使用。

我国现有的教育体系还没有将认知能力培养提高到其应有的重要地位。除了少数学校在拔尖创新人才选拔中开展认知能力测试，大多数学

校还是更看重学习成绩和学科竞赛。这里面有多方面原因。首先，学校长期以来都是通过考试来进行评价，而对认知能力的影响认识不足；其次，虽然有些教育工作者认识到认知能力的重要性，但错误地认为其是先天决定的，后天无法改变；再次，部分教育工作者重视认知能力评估和训练，但认为常规教学就能很好地培养学生的认知能力，无需开展专门训练；最后，部分教育工作者认识到系统性、针对性培养学生认知能力的必要性，但尚未掌握认知能力的科学定义、还不会使用科学的测评工具和训练手段。基于脑科学的认知能力培养，需要认识到认知能力在学生学习和长远发展中的重要作用，认清其发展规律和影响因素。同时要掌握科学的测评方法，更要掌握科学训练认知能力的方法。^[73]比如，小学阶段是大脑前额叶成熟的一个主要时期，也是大脑注意、工作记忆等认知能力快速发展的时期，是通过教育促进前额叶发展的重要机会窗口。对学生开展科学的学习能力评估和干预训练，是提高学生学习能力的一个重要策略。^[74]大量研究表明，通过长期针对性的工作记忆训练，并注重训练的生态学效度和可迁移性，确实可以提高学生的认知能力以及学业表现。^[75]

人的动力系统的培养也同样需要遵循大脑的规律。人的情绪动机包含了多条复杂的通路，包括多条多巴胺通路，负责预期、学习、决策和愉悦体验等；五羟色胺通路则与人的情绪状态密切相关，其异常可能导致抑郁、冲动、酗酒、自杀、攻击及暴力行为等；下丘脑-垂体-肾上腺轴（HPA）则与人的压力水平和应激反应密切相关，调节消化系统、免疫系统、情绪系统、代谢系统以及性行为等。这些通路共同构成了人的基本动力系统，比如接近和规避。喜好和厌恶影响人是否增加或者减少某种行为；面对未知与不确定性，人会产生强大的好奇心，但也会规避风险；自控力使人可以根据目标，对动机进行调节；而习惯是经过长期行为所习得，不依赖外在奖励和



惩罚的持久稳定动力。这些基本的情绪动机系统与各种学习生活经验进行连接，就会产生个体独特而复杂的动机模式。

从脑科学的角度认识人的动力系统，可以为动机塑造提供很多创新的思路。一是学校要特别关注动机情绪的培养，将之放在与知识和能力同等甚至更高的位置，而不是仅仅为了减少心理健康问题或者进行危机干预；二是在教学的组织中，在注重知识技能传授效率的同时，要更多培养学生的内在学习动机和兴趣，例如，通过建立起知识与真实生活的联系，适宜的难度以及及时正面的反馈，鼓励创新和包容失败的氛围，等等；三是在各个学习阶段都要特别注重生涯规划和价值观的塑造，这不仅决定了人才成长的方向，也决定了成长的动力和个性化的发展路径；四是鉴于现阶段学生的物质生活水平和发展需求，要用更高的目标和价值观，包括全球视野、家国情怀、探索未知、科技创新、社会平等、人际关怀等来激发其成长动力；五是要综合利用各种动机系统的力量，包括奖励、惩罚、习惯和自控力，等等，提升动机系统的持久性和灵活性；六是在传递学习动机相关知识的同时，更要注重社会情绪技能的培养，将强大的学习动力变成一种自发的习惯。

在未来教育的设计中，我们还需要充分认识到体育的重要作用。体育活动尤其是有氧体育运动不仅有助于增强体质，还对学业成绩和心理健康有显著影响。大量有关青少年的研究发现，体育运动与学校表现，^[76]如阅读和数学成绩^[77]甚至是平均绩点^[78]和认知之间存在正相关关系。有氧体育锻炼可以促进脑源性神经营养因子（BDNF）分泌，增加海马体的体积——海马体在记忆习得和巩固中起着关键作用，从而增强记忆能力和提升学习成绩。^[79]另外，有氧运动对青少年情绪调节和心理压力释放具有显著的积极作用。一方面，体育锻炼通过改善内分泌系统，如促进多巴胺、血清素等神经递质的分泌，可减轻

抑郁和焦虑等负面情绪。^[80]另一方面，体育锻炼可以帮助青少年转移负面情绪并增加积极情绪体验。^[81]根据世界卫生组织最新的身体活动指南建议，5岁~17岁的儿童青少年每天应至少进行60分钟以有氧运动为主的中等到剧烈强度的身体活动，每周至少应有3天进行剧烈强度有氧运动以及增强肌肉和骨骼的运动。

可以看到，脑认知科学的研究可以为学习力的培养提供全新的认识，为科学和高效学习力提升提供重要的理论支撑和实践指导。未来教育的设计，包括相关的政策制定、课程体系，教学方法以及评价体系，都需要充分依据大脑的规律。

技术创新为依托。在智能时代，科技进步将有可能为未来教育的变革提供强有力的支撑，但前提条件是要符合未来的教育的目标以及学习的规律。其中，脑认知科学将为未来教育设计提供理论基础、关键指标和科学方法，而人工智能和物联网等技术则将一方面为教育提供强大的工具来变革传统的教育手段和评价方式，另一方面通过对管理和教学工作的自动化和提质增效来释放教育管理者和教师的时间，让他们有更多精力从事人工智能无法胜任的工作；最后，虚拟现实和游戏引擎等技术将为教育提供更加真实的环境，提高学习动机和效率。

脑认知科学除了能加深对人脑功能的本质认识，帮助重新定义未来教育的目标外，还将从多个方面推动未来教育技术的进步。首先，脑认知科学揭示了人脑发育的规律以及人脑学习记忆的规律。这些规律不仅可以在认知层面更新教育管理者、教师和学生的观念，改善教育政策、教学行为和学习方式，更可以为人工智能和虚拟现实等未来教育技术的应用提供科学的指引，包括产品理念和功能设计、关键指标的制定、针对性的数据收集，以及基于脑认知科学原理的模型建构和数据验证等。

其次，脑认知科学能提供很多用于学习能力评估和训练效果提升的技术。比如，认知测评技



术结合脑影像技术可以更加精准测量个体的大脑功能和认知能力。根据Anderson于1982年提出的认知技能发展理论和Glaser等人于1985年对认知技能维度的分类理论，一些认知技能测量的技术可以更好地实现，包括知识获取、组织和结构的测量；问题表征深度的测量；心理表征模型的测量；元认知技能的测量；任务完成自动化程度的测量；程序技能效率的测量。这些都大大超过了传统的教育测评手段，能够实现对有机知识体系和认知技能的深度评估。脑认知科学还能够更好地评估学生的学习动力，相关技术包括：传统的问卷测量、心理投射技术、内隐联系技术以及脑影像，等等。这些技术和人工智能、大数据以及虚拟现实相结合，未来将使评估和辅助具有更好的精度和干预效果。

最后，教育的本质就是塑造大脑，脑认知科学所提供的技术和方法，可以实现对大脑的精准调控。一些相对无损的技术，比如，神经影像技术、无损脑刺激和脑机接口技术，以及一些神经类的药物，已经在医疗领域得到了广泛的应用，在治疗大脑疾病和改善大脑认知和情绪功能等方面起到了良好的作用，未来也有可能成为改善和治疗学习障碍以及使正常人认知增强的技术。还有一些微创技术，如侵入式脑机接口、侵入式神经刺激调控（包括光、电、声、磁、光遗传等），神经递质、荷尔蒙和激素等药物技术等，在解决了安全和伦理问题的前提下，未来都有可能成为有效的教育手段。

在人工智能领域，菲尔兹数学科学学院院长库马尔·默蒂表示：“人工智能带来的机遇，超越了技术层面，超越了特定学科，而是为全球范围教育领域带来革新。”世界经济论坛在2024年4月发布的报告中也指出，AI可以通过修改（augmentation）和自动化（automation）来支持教师的角色。可以自动化的工作包括：编制特定主题的书籍、期刊、文章和视听材料清单；使用标准参考资料核实事实、日期和统计数据；使

用答题纸或电子标记设备对家庭作业和考试进行评分，计算和记录结果。可以赋能的工作包括：分析绩效数据以确定教学系统、课程或教学材料的有效性；设计学习产品，包括基于网络的辅助工具或电子绩效支持系统；开发教学或培训材料，如讲义、学习材料或测验；为教师助理或志愿者布置作业。这样老师有更多的时间从事课程设计，完善教学方法，提供社会情绪支持，提供个性化的教学指导和与家长交流等。

与此同时，我们也要警惕人工智能技术的误用、滥用。比如，在传统的应试教育思想的指导下，人工智能可能被作为高效的刷题机器。通过知识点的精细拆分和习题匹配，人工智能指导下的习题推送可以帮助学生掌握碎片化的知识点，但却不利于有机知识体系的形成。这种基于有限知识边界来促进知识掌握的学习模式，只能培养更多千人一面的学生，而与因人而异、按需学习的个性化教育模式背道而驰。还有一些人工智能技术采集了大量数据，但并没有形成有效共享，从而成为信息孤岛；更没有通过科学系统的分析形成有价值的科学证据，因而难以对教学实践形成指导，造成大量资源的浪费；更有一些人工智能技术被滥用为随时监视教师和学生的工具，加大师生压力和不安全感，甚至阻碍学习。

除了脑认知科学和人工智能技术，虚拟现实和游戏技术也可以为未来教育赋能。虚拟现实和游戏技术也可以为未来教育赋能。虚拟现实技术通过模拟现实情景，在培养学生学习力方面具有众多独特价值。首先，它可以让学生更加具身地体会文字所不能描述的信息，更好构建具体与抽象知识相融合的有机知识体系。更重要的是，通过与生成式AI技术相融合，人工智能和虚拟现实可以形成有关数量、几何、物理、化学、生物、政治、经济、历史、社会和心理等的世界模型。学生通过与虚拟的世界模型的交互来获得科学的知识。这将从根本上改变教师传授的方式，真正实现知识的生长，促进有机知识体系的形成。其次，虚拟现实和游戏技术可以用于认



知能力的测评和提升。相较于传统的认知测评和训练，结合虚拟现实的游戏化测评和训练技术将具有生态化的优势，从而大大提高测评的准确性与训练的效果，特别是训练效果的迁移。最后，虚拟现实和游戏技术有助于学习动机的培养。虚拟现实和游戏技术所提供的良好的视听效果、沉浸式体验和及时反馈，可以极大提高学生的学习动机和兴趣，甚至可能上瘾。此外，这两类技术还可以用以提高学生的心理品质和学习动力。比如，通过模拟物理和社会压力环境，可以训练学生的抗压能力和心理韧性；通过创设个性化的成功环境，可以增强学生的成功体验，极大提高成长动力。

可以看到，脑认知科学和人工智能技术可以在多个方面推动未来教育体系的设计，包括对教育本质的重新定义、重新设定以学习力为核心的教育目标、提供尊重大脑规律的学习方法、千人千面的按需学习路径，以及切实助力完成上述目标的全新教育科技。这些将为未来教育变革的实现提供全面的支撑。

智能时代创新教育实践的实施路径

为推动智能时代的教育深度变革，社会各界，包括政府和教育管理者、科研工作者、教师、学生和家长，以及教育科技的从业者，等等，都必须统一认识、协调步伐、积极行动，从而实现教育变革从理论走向实践。

在政府和政策层面，需加大和加快教育的科学化和智能化转型，加快相关政策出台和标准制定，加大在基础和应用研究与实施中的经费投入、过程监管和证据累计，强调依据科学证据指导教学变革并客观独立评估实施效果，从而实现从数据、证据到实践的正向循环。同时，要大力推进优质均衡教育的全面落地，特别是要实现因材施教的公平而不是绝对的平均主义。要为拔尖创新人才、学习困难儿童提供充分的资源以促进

其发展，也要为具有不同能力特长和兴趣爱好的学生提供充分的选择和差异化发展路径；积极推动小班化教学，更好照顾到每个学生的需求；在学校办学模式上，要鼓励学校特色化办学，为不同孩子提供充分的选择；在考核指标和方式上，要发展多元综合考核，避免单一标准。

在科学研究方面，我们对大脑的认识还有待持续深入，对微观大脑活动与教育实践的关系也需要持续研究。人工智能底层技术和教育领域的应用需要加快发展。国家应在脑认知科学、人工智能与教育融合领域进行重大战略布局和资源投入，加快相关的研究基地建设、项目立项、人才引进和培养；面对未来教育的重大问题，脑科学、信息科学、计算机科学、教育科学等相关学科的工作者应该开展跨学科交叉联合攻关。

在教师教育方面，要加强对教师的脑认知科学知识、研究方法和实践应用的教育。在师范院校开设脑科学通识课程；在心理学、教育学等相关专业开设脑与学习、脑科学与教育等专业课程；对现有教师加强脑认知科学的继续教育和实践指导；加强对教师人工智能和信息素养的培养，使其熟练掌握教育相关人工智能工具，提高教学效率和质量；引导教师转变思想、提升技能，使其对学生的学习能力、心理品质和知识体系状况能够进行科学评估，充分了解学生兴趣和需求，成为学生个性化发展的有力指导者。

在课程建设方面，学校需要改革现有的学科课程，加大主题式和项目制等深度学习课程，促进有机知识体系形成；学校要积极推动学生学习能力课程的建设，通过设置专门“脑育”课程，改造“心理健康”课程，发展脑科学与学科教学结合的“融合”课程，设置脑科学理论指导下的课后选修等“辅助”课程，组织多种特色活动或主题活动等“活动”课程，将脑科学融入学校教学的各个方面；加强信息和人工智能素养课程，提高学生的人工智能思维，促进其对人工智能底层知识的掌握并培养其相关技能；同时，更加重



视体育课程，特别是有氧运动，改善学生身体素质、心理品质和学习能力；最后，加强人文学科课程，提升学生的人文素养，为学生长远发展提供正确方向和持续动力。

在考试评价方面，要突破传统单一考试模式，拓展多种测查形式，更加强调对基础素养、学习能力和优势特色的考察，形成“综合性+个性化”的评估体系；突出对学生知识体系掌握、基础认知能力水平的测查，以及对知识灵活使用和创新能力的考察；采用多种手段对学生的学习动机和心理品质进行精准有效评价，将其作为教育质量监测以及升学和选拔的重要依据；在考试评价实施上，要科学设置考察节点和反馈机制，形成报告和发展性评价以促进学生发展。

在技术研发方面，要围绕基于脑认知科学和人工智能时代下的教育目标，创新融合人工智能技术、脑认知测评和干预技术，虚拟现实技术、物联网和大数据技术，神经反馈和调控技术，开发和推广能真正推动学生有机知识体系的形成、强大学习能力的培养和持久学习动机的塑造，且符合人脑学习和教育规律的产品和技术体系；在加强产品研发的同时，也要注重实践验证，特别是在严谨科学实验基础上的数据化验证、数学模型发展和一般性科学规律总结，让上述科学技术成为推动学习力提升、促进未来教育变革的强大力量。

总之，脑认知科学和人工智能正在以前所未有的广度、深度和速度推动着科技进步和社会转型，给人类提出全新的要求并带来前所未有的挑战。在全新的时代，未来教育担负着促进人类发展和推动人类进化的使命，需要迎接挑战、主动变革并立即行动。脑认知科学基于对人脑智能本质、大脑发育规律、学习记忆规律、动机情绪规律等的深入认识，以及创新的大脑评估和调控技术，通过与人工智能技术等有机融合，将为未来教育提供目标定位、实施路径和技术手段等方面的强大支持，推动未来教育变革的真正实现。

注释

[1]薛贵：《脑科学与学习变革》，《教育家》，2018年第4期。

[2]A. T. Lee; E. F. Chang et al., "Large-Scale Neurophysiology and Single-Cell Profiling in Human Neuroscience," *Nature*, 2024, 630(8017).

[3]V. Marx, "Method of the Year: Spatially Resolved Transcriptomics," *Nature Methods*, 2021, 18(1).

[4]E. Lein; L. E. Borm and S. Linnarsson, "The Promise of Spatial Transcriptomics for Neuroscience in the Era of Molecular Cell Typing," *Science*, 2017, 358(6359).

[5]Z. Yao et al., "A High-Resolution Transcriptomic and Spatial Atlas of Cell Types in the Whole Mouse Brain," *Nature*, 2023, 624(7991).

[6]A. Chen et al., "Single-Cell Spatial Transcriptome Reveals Cell-Type Organization in the Mmacaque Cortex," *Cell*, 2023, 186(17).

[7]K. Siletti et al., "Transcriptomic Diversity of Cell Types Across the Adult Human Brain," *Science*, 2023, 382(6667).

[8]S. Qiu et al., "Whole-Brain Spatial Organization of Hippocampal Single-Neuron Projectomes," *Science*, 2024, 383(6682).

[9]S. Berto et al., "Gene-Expression Correlates of the Oscillatory Signatures Supporting Human Episodic Memory Encoding," *Nature Neuroscience*, 2021, 24(4).

[10]J. E. Chung et al., "High-Density Single-Unit Human Cortical Recordings Using the Neuropixels Probe," *Neuron*, 2022, 110(15).

[11]M. K. Leonard et al., "Large-Scale Single-Neuron Speech Sound Encoding Across the Depth of Human Cortex," *Nature*, 13 December 2023; A. R. Khanna et al., "Single-Neuronal Elements of Speech Production in Humans," *Nature*, 2024, 626(7999).

[12]M. Jamali et al., "Semantic Encoding During Language Comprehension at Single-Cell Resolution,"

Nature, 3 July 2024.

[13]Y. Xie et al., "Geometry of Sequence Working Memory in Macaque Prefrontal Cortex," *Science*, 2022, 375(6581).

[14]M. F. Panichello and T. J. Buschman, "Shared Mechanisms Underlie the Control of Working Memory and Attention," *Nature*, 2021, 592(7855).

[15]A. O. Constantinescu; J. X. O'Reilly and T. E. Behrens, "Organizing Conceptual Knowledge in Humans with a Gridlike Code," *Science*, 2016, 352(6292).

[16]F. R. Willett et al., "Hand Knob Area of Premotor Cortex Represents the Whole Body in a Compositional Way," *Cell*, 2020, 181(2).

[17]A. B. Silva et al., "The Speech Neuroprosthesis," *Nature Reviews Neuroscience*, 2024, 25(7).

[18]L. L. Oganessian and M. M. Shanechi, "Brain-Computer Interfaces for Neuropsychiatric Disorders," *Nature Reviews Bioengineering*, 3 June 2024.

[19]C. Lai et al., "Volitional Activation of Remote Place Representations with a Hippocampal Brain-Machine Interface," *Science*, 2023, 382(6670).

[20]M. Eisenstein, "Seven Technologies to Watch in 2024," *Nature*, 2024, 625(7996).

[21]S. N. Flesher et al., "A Brain-Computer Interface that Evokes Tactile Sensations Improves Robotic Arm Control," *Science*, 2021, 372(6544).

[22]F. R. Willett, et al., "A High-Performance Speech Neuroprosthesis," *Nature*, 2023, 620(7976).

[23]S. L. Metzger et al., "A High-Performance Neuroprosthesis for Speech Decoding and Avatar Control," *Nature*, 2023, 620(7976).

[24]Z. Xu et al., "Large-Scale Photonic Chiplet Taichi Empowers 160-TOPS/W Artificial General Intelligence," *Science*, 2024, 384(6692).

[25]D. P. Kingma and M. Welling, "Auto-Encoding Variational Bayes," 20 December 2013; I. Goodfellow et al., "Generative Adversarial Nets," in M. Ranzato et al. (eds.),

Advances in Neural Information Processing Systems, 2014, 27; D. J. Rezende; S. Mohamed and D. Wierstra, "Stochastic Backpropagation and Approximate Inference in Deep Generative Models," *International Conference on Machine Learning*, 30 May 2014; A. Radford; L. Metz and S. Chintala, "Unsupervised Representation Learning with Deep Convolutional Generative Adversarial Networks," 19 November 2015; M. Arjovsky and L. Bottou, "Towards Principled Methods for Training Generative Adversarial Networks," 17 January 2017; I. Higgins et al., "Beta-VAE: Learning Basic Visual Concepts with a Constrained Variational Framework," *ICLR 2017 Poster*, 22 July 2022.

[26]T. N. Kipf and M. Welling, "Semi-Supervised Classification with Graph Convolutional Networks," 9 September 2016; W. Hamilton; Z. Ying and J. Leskovec, "Inductive Representation Learning on Large Graphs," in M. Ranzato et al. (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30.

[27][55]A. Vaswani et al., "Attention Is All You Need," in M. Ranzato et al. (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2017, 30.

[28]D. Silver et al., "Mastering the Game of Go with Deep Neural Networks and Tree Search," *Nature*, 2016, 529(7587).

[29]O. Vinyals et al., "Grandmaster Level in StarCraft II Using Multi-Agent Reinforcement Learning," *Nature*, 2019, 575(7782).

[30]J. Schrittwieser et al., "Mastering Atari, Go, Chess and Shogi by Planning with a Learned Model," *Nature*, 2020, 588(7839).

[31]J. T. Rapp; B. J. Bremer and P. A. Romero, "Self-Driving Laboratories to Autonomously Navigate the Protein Fitness Landscape," *Nature Chemical Engineering*, 2024, 1(1).

[32]F. Wong et al., "Discovery of a Structural Class of Antibiotics with Explainable Deep Learning," *Nature*, 2023, 626(7997).



- [33][38]B. Romera-Paredes et al., "Mathematical Discoveries from Program Search with Large Language Models," *Nature*, 2023, 625(7995); S. Kantamneni; Z. Liu and M. Tegmark, "OptPDE: Discovering Novel Integrable Systems via AI-Human Collaboration," 7 May 2024.
- [34]E. J. Bacon et al., "Neuroimage Analysis Using Artificial Intelligence Approaches: A Systematic Review," *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2024, 62.
- [35]A. Balla et al., "Locating Macedonian Tombs Using Predictive Modelling," *Journal of Cultural Heritage*, 2013, 14(5).
- [36]P. Cramer, "AlphaFold2 and the Future of Structural Biology," *Nature Structural & Molecular Biology*, 2021, 28(9); J. Jumper et al., "Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold," *Nature*, 2021, 596(7873); J. Abramson et al., "Accurate Structure Prediction of Biomolecular Interactions with AlphaFold 3," *Nature*, 2024, 630(8016).
- [37]T. Hayes, et al., "Simulating 500 Million Years of Evolution with a Language Model," <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2024.07.01.600583v1>.
- [39]T. H. Trinh et al., "Solving Olympiad Geometry Without Human Demonstrations," *Nature*, 2024, 625(7995).
- [40]S. Kantamneni; Z. Liu and M. Tegmark, "OptPDE: Discovering Novel Integrable Systems via AI-Human Collaboration," 7 May 2024.
- [41]T. Horikawa et al., "Neural Decoding of Visual Imagery During Sleep," *Science*, 2013, 340(6132).
- [42]A. G. Huth et al., "Natural Speech Reveals the Semantic Maps That Tile Human Cerebral Cortex," *Nature*, 2016, 532(7600).
- [43]A. Défossez et al., "Decoding Speech Perception from Non-Invasive Brain Recordings," *Nature Machine Intelligence*, 2023, 5(10); Y. Li et al., "Dissecting Neural Computations in the Human Auditory Pathway Using Deep Neural Networks for Speech," *Nature Neuroscience*, 2023, 26(12).
- [44]J. Tang et al., "Semantic Reconstruction of Continuous Language from Non-Invasive Brain Recordings," *Nature Neuroscience*, 2023, 26(5).
- [45]K. Kar et al., "Evidence That Recurrent Circuits Are Critical to the Ventral Stream's Execution of Core Object Recognition Behavior," *Nature Neuroscience*, 2019, 22(6).
- [46]C. Zhuang et al., "Unsupervised Neural Network Models of the Ventral Visual Stream," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(3).
- [47]C. Caucheteux; A. Gramfort and J. R. King, "Evidence of a Predictive Coding Hierarchy in the Human Brain Listening to Speech," *Nature Human Behaviour*, 2023, 7(3).
- [48][52]T. Webb; K. J. Holyoak and H. Lu, "Emergent Analogical Reasoning in Large Language Models," *Nature Human Behaviour*, 2023, 7(9).
- [49]Z. Elyoseph et al., "ChatGPT Outperforms Humans in Emotional Awareness Evaluations," *Frontiers in Psychology*, 2023, 14.
- [50]F. Gilardi; M. Alizadeh and M. Kubli, "ChatGPT Outperforms Crowd Workers for Text-Annotation Tasks," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2023, 120(30).
- [51]J. W. A. Strachan et al., "Testing Theory of Mind in Large Language Models and Humans," *Nature Human Behaviour*, 2024,
- [53]M. Binza and E. Schulz, "Using Cognitive Psychology to Understand GPT-3," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 120(6).
- [54]R. Loconte et al., "Challenging ChatGPT 'intelligence' with human tools: A Neuropsychological Investigation on Prefrontal Functioning of a Large Language Model," *SSRN Electronic Journal*, 2023.
- [56]L. Ouyang et al., "Training Language Models to Follow Instructions with Human Feedback," in M. Ranzato et al. (eds.), *Advances in Neural Information*



Processing Systems, 2022.

[57]B. M. Lake and M. Baroni, "Human-Like Systematic Generalization Through a Meta-Learning Neural Network," *Nature*, 2023, 623(7985).

[58]J. C. Whittington; J. Warren and T. E. Behrens, "Relating Transformers to Models and Neural Representations of the Hippocampal Formation," 7 December 2021.

[59]J. Wei et al., "Chain-of-Thought Prompting Elicits Reasoning in Large Language Models," in M. Ranzato et al. (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2022, 35.

[60]T. Talhelm et al., "Large-Scale Psychological Differences Within China Explained by Rice Versus Wheat Agriculture," *Science*, 2014, 344(6184).

[61]J. W. Forrester, "A New Corporate Design," *Industrial Management Review (pre-1986)*, 1965, 7(1).

[62]GL Claxton, *Building Learning Power: Helping Young People Become Better Learners*, Bristol: TLO Ltd, 2005.

[63]薛贵：《脑科学时代的未来教育目标变革》，《人民教育》，2020年第10期。

[64]I. J. Deary et al., "Intelligence and Educational Achievement," *Intelligence*, 2007, 35(1).

[65]T. Duster; R. J. Herrnstein and C. A. Murray, *The Bell Curve*, Washington: Free Press, 1994.

[66]E. S. Finn et al., "Functional Connectome Fingerprinting: Identifying Individuals Using Patterns of Brain Connectivity," *Nature Neuroscience*, 2015, 18(11).

[67]刘德建等：《智能技术赋能按需学习：理论进路与要素表征》，《电化教育研究》，2023年第4期。

[68][69][70]曹怡然、薛贵：《构建有机知识体系，促进学生学习能力发展》，《教育家》，2024年第17期。

[71]周钰、薛贵：《“熟能生巧”：如何通过分散学习提高学习效率》，《教育家》，2020

年第24期。

[72]刘楚麒、薛贵：《科学设置测试，促进知识获得》，《教育家》，2020年第24期。

[73]尹媛媛、薛贵：《人类智力与大脑的发展》，《教育家》，2020年第24期。

[74]薛贵：《基于脑科学的学习能力测评与提升》，《教育家》，2018年第28期。

[75]王思思、薛贵：《提升大脑潜力：工作记忆训练能够提高智力吗？》，《教育家》，2020年第24期。

[76]D. Martínez-Gómez et al., "Active Commuting to School and Cognitive Performance in Adolescents: The AVENA Study," *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, 2011, 165(4); J. Morales et al., "Physical Activity, Perceptual-Motor Performance, and Academic Learning in 9-to-16-Years-Old School Children," *International Journal of Sport Psychology*, 2011, 42(4); D. P. COE et al., "Effect of Physical Education and Activity Levels on Academic Achievement in Children," *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 2006, 38(8); A. K. Travlos et al., "High Intensity Physical Education Classes and Cognitive Performance in Eighth-Grade Students: An Applied Study," *International Journal of Sport and Exercise Psychology*, 2010, 8(3).

[77]B. Sibley and J. Etnier, "The Relationship Between Physical Activity and Cognition in Children: A Meta-Analysis," *Psychology, Education, Medicine-Pediatric Exercise Science*, 2003, 15(3).

[78]C. K. Fox et al., "Physical Activity and Sports Team Participation: Associations with Academic Outcomes in Middle School and High School Students," *Journal of School Health*, 2010, 80(1); K. J. Lindner, "The Physical Activity Participation-Academic Performance Relationship Revisited: Perceived and Actual Performance and the Effect of Banding (Academic Tracking)," *Pediatric Exercise Science*, 2002, 14(2).

[79]K. I. Erickson et al., "Exercise Training Increases

Size of Hippocampus and Improves Memory," <https://doi.org/10.1073/pnas.1015950108>, 2011; D. K. Binder and H. E. Scharfman, "Brain-derived neurotrophic factor," *Growth Factors*, 2004, 22(3); H. Park and M. Poo, "Neurotrophin Regulation of Neural Circuit Development and Function," *Nature Reviews Neuroscience*, 2013, 14(1); M. M. Herting and X. Chu, "Exercise, Cognition, and the Adolescent Brain," *Birth Defects Research*, 2017, 109(20); É. W. Griffin et al., "Aerobic Exercise Improves Hippocampal Function and Increases BDNF in the Serum of Young Adult Males," *Physiology & Behavior*, 2011, 104(5).

[80]X. Wang et al., "Systematic Review and Meta-Analysis of the Effects of Exercise on Depression in

Adolescents," *Child Adolesc Psychiatry Ment Health*, 2022, 16(1); A. Philippot et al., "Impact of Physical Exercise on Depression and Anxiety in Adolescent Inpatients: A Randomized Controlled Trial," *Journal of Affective Disorders*, 2022, 301.

[81]Q. X. Ng et al., "Managing Childhood and Adolescent Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder (ADHD) with Exercise: A Systematic Review," *Complementary Therapies in Medicine Journal*, 2017, 34; N. J. Thom et al., "Effect of Acute Aerobic Exercise on Ocular Measures of Attention to Emotionally Expressive Faces," *International Journal of Behavioral Medicine*, 2021, 28(3).

责编 / 桂琰 美编 / 梁丽琛

The Future Educational Evolution Driven by Brain and Cognitive Science and Artificial Intelligence

Xue Gui Liu Dejian

Abstract: The rapid development of brain and cognitive science and artificial intelligence is accelerating the evolution of human society into the intelligent era, placing new demands on human survival and developmental capabilities. This also drives fundamental changes in educational goals and methods. The design of future education systems needs to go beyond the transmission of knowledge. Instead, it should aim to promote continued human development and evolution, by focusing on cultivating learning capabilities, being oriented towards personalized learning on demand, being guided by the principles of human brain learning, and relying on technological innovation. This approach will help individuals develop an organic knowledge system, strong cognitive abilities, and enduring learning motivation. To achieve the goals of future education, all sectors of society must collaborate on education policies, scientific research, teacher education, assessment and evaluation, curriculum design, and technological innovation. This collaborative effort will drive the transformation of future education from theory into practice.

Keywords: brain science, artificial intelligence, educational transformation, learning capability