

特约评述

DOI: 10.12211/2096-8280.2024-033

DNA 数据存储技术的法律治理议题

焦洪涛¹, 齐蒙², 邵滨³, 蒋劲松⁴

(¹ 华中科技大学法学院, 湖北 武汉 430074; ² 杭州华为企业通信技术有限公司, 浙江 杭州 310051; ³ 湖南大学法学院, 湖南 长沙 410082; ⁴ 清华大学科学史系, 北京 100084)

摘要: DNA 数据存储技术是合成生物学的关键分支领域, 以其存储密度高、存储时期长、稳定、安全等特点, 有望成为当下数据爆炸式增长导致存储能力不足的解决方案。DNA 数据存储技术的快速发展为现行法律体系带来冲击, 探讨 DNA 数据存储技术的法律治理议题是强化新兴科技伦理治理的重要内容。在人权层面, 探讨可能引发的对“人的尊严”的挑战和数据鸿沟问题, 建议完善 DNA 数据存储基于科技伦理治理框架上的政策法律体系; 在安全层面, 探讨可能引发的信息安全和生物安全相关问题, 建议结合信息安全和生物安全两个维度强化 DNA 数据存储技术的安全治理; 在知识产权层面, 探讨 DNA 合成和测序技术、DNA 介质以及重组 DNA 的微生物中涉及的可专利性等问题, 建议完善专利保护规则, 优化知识产权法治环境, 以促进 DNA 数据存储技术科技创新和产业创新。

关键词: DNA 数据存储技术; 合成生物学; 信息安全; 法律治理; 科技伦理治理

中图分类号: NO31 文献标志码: A

Legal issues for the storage of DNA data

JIAO Hongtao¹, QI Meng², SHAO Bin³, JIANG Jinsong⁴

(¹ Law School of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; ² Hangzhou Huawei Enterprise Communication Technology Co., Ltd., Hangzhou 310051, Zhejiang, China; ³ Law School of Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China; ⁴ Department of History of Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: DNA data storage is a key for the development and application of synthetic biology. With the advent of high density storage technology for long period and more stable and secure data storage, the shortage of storage capacity caused by the explosive growth of data can be addressed. Thus, exploring the legal issues for the storage of DNA data is more important than ever for ethics with the emerging science and technology. At the human rights level, human dignity and privacy need to be protected, and the data gap between human beings available and unavailable to the data to be minimized, through the development of complete policy and legal systems for DNA data storage. At the security level, it is suggested to strengthen the security governance of DNA data storage technology by combining

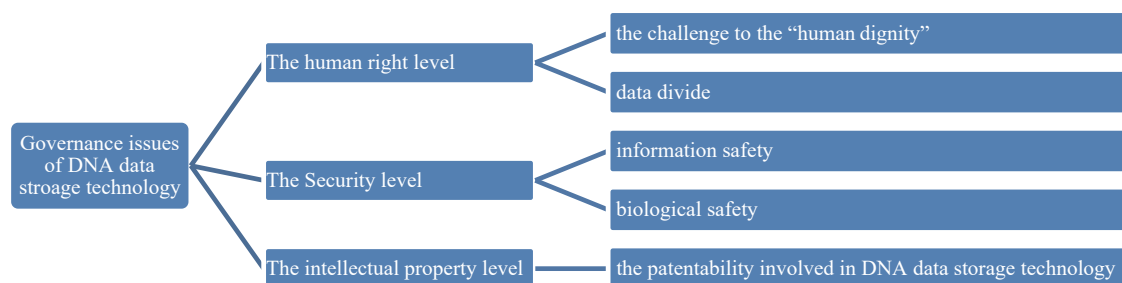
收稿日期: 2024-04-02 修回日期: 2024-06-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0902400); 教育部人文社会科学研究规划基金 (19YJA820022); 华中科技大学人文社会科学自主创新重大及交叉项目 (2020WKZDJC020)

引用本文: 焦洪涛, 齐蒙, 邵滨, 蒋劲松. DNA 数据存储技术的法律治理议题[J]. 合成生物学, 2025, 6(1): 177-189

Citation: JIAO Hongtao, QI Meng, SHAO Bin, JIANG Jinsong. Legal issues for the storage of DNA data[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(1): 177-189

information security and biosafety issue. At the level of intellectual property, it is suggested to improve patent protection, and optimize the legal environment of intellectual property, so as to promote the technological innovation and application of DNA data storage technology.



Keywords: DNA data storage technology; synthetic biology; information security; legal governance; governance over ethics in science and technology

1 问题的提出

习近平总书记强调,“科技创新能够催生新产业、新模式、新动能,是发展新质生产力的核心要素”。当前,新一轮科技革命和产业革命正在迸发,数据成为关键生产要素,而数据存储产业则已成为发展新质生产力的新引擎。2020年,全球数据量已达到 47 ZB (1 ZB=10²¹ B)^[1], 预计在 2035 年达到 2.142 YB (1 YB=10²⁴ B)^[2]。面对迅猛增长的数据量,数据存储行业迎来技术发展新机遇与法律治理新议题。从最早打孔纸卡的出现,到磁带、碟片的诞生直至硬盘、光盘、U 盘的广泛使用,存储介质不断更迭演变。传统的存储技术逐渐暴露出存储时间短^[3]、对环境要求高^[4]、能源消耗多^[5-6]以及污染环境等问题,以 DNA 数据存储为代表的新型存储技术正在迸发新机。

DNA 数据存储技术使用 DNA 作为存储介质,受到了广泛关注。作为遗传资源的存储介质, DNA 具有存储时间长^[7]、存储密度高、耗能低、稳定和安全等诸多优势^[8],在广泛的应用场景中体现出巨大的商业价值,也可能对存储行业带来颠覆性改变^[9-12]。DNA 数据存储技术的快速发展,为海量数据存储提供了重要解决方案之一,同时面临新兴技术的法律治理问题。

DNA 数据存储技术是信息技术和生物技术融

合的典范,是解决海量数据存储难题的重要方案,为发挥数据生产要素形成新质生产力贡献技术和产业支撑。通过厘清 DNA 数据存储技术的科学特征,探索在人权、安全和知识产权等层面可能引发的法律议题,有助于提升合成生物学领域的科技伦理治理能力,推进 DNA 数据存储产业合规发展。

2 既有研究

近年来, DNA 数据存储技术逐渐成为合成生物学领域的前沿与热点^[13],在技术研发、数据安全以及政策供给等方面均取得重要进展。

在 DNA 数据存储技术研发方面,自 1988 年由 Davis^[14]对 DNA 数据存储进行概念验证以来,在 DNA 合成技术和测序技术的加持下,诞生了一系列标志性事件,推动了 DNA 存储技术的创新发展及商业化运用。2001 年, Bancroft 等学者^[15]首次将《双城记》中的两句话进行了 DNA 编码。随后,哈佛医学院的 Church 等学者^[9]于 2012 年取得里程碑式的研究成果,提出了一种“两种碱基映射一种比特”的灵活编码方式,并将一部 659 kb 的图书编码存储至 DNA 中。2016 年, Blawat 和 Gaedke 等^[16]使用前向纠错码实现数据的存储和纠错。2018 年, Organick 等^[11]通过实验验证了一个

能够实现数据随机存取的大规模DNA存储系统。2021年, Yim等^[17]提出了一种新的DNA数据存储方法, 通过电刺激的方式实现了细菌和计算机之间的连接, 成功将活细胞DNA的数据写入和存储, 突破了传统DNA数据存储方法依赖于体外DNA合成与存储的限制, 创新了活细胞中的DNA存储。技术突破的同时, DNA数据存储的商业化也取得了进展。比如, IT研究与顾问咨询公司Gartner曾预测, 截至2024年, 约有30%的信息存储企业将会使用DNA存储, 以应对海量的数据信息^[18]。2016年, Helixworks公司在Amazon上提供512 kB容量的DNA存储硬盘, 成为首家提供商业化DNA数据存储的企业^[19]。2023年, Biomemory公司推出了DNA数据存储卡^[20]。此外, 我国中科院元公司等也相继推出DNA数据存储服务业务。

DNA数据存储技术的发展, 能够有效解决数字社会面临的数据存储挑战, 但也面临技术治理如何响应与因应的策略问题。袁芳等学者^[21]对DNA数据存储技术从论文、专利、政策和企业四个角度对比了我国与美国存在的差异, 结合实际情况从政策、安全预警和学术交流的角度为我国DNA数据存储技术的发展提出了建议。张淑芳等学者^[22]从存储框架、编码技术、挑战和发展的角度阐述了我国当前DNA技术的研究进展。已经涌现的关于合成生物学领域科技治理的学术讨论, 可以为DNA数据存储技术的治理提供借鉴。Morgan Meyer等学者^[23]从政治、制度和实践等方面对合成生物学相关技术中的“负责任”理念与行动进行了探讨。焦洪涛等学者^[24]探讨了合成生物学法律风险的本质、治理模式和提出人权、安全和产权三阶治理框架。Jonathan B. Tucker等学者^[25]从意外释放、故意误用等风险来源以及减少风险的解决方案等方面讨论了合成生物学的前景和威胁。雷瑞鹏等学者^[26]则从高技术伦理的角度探究了合成生物学的产生、使用、相关的责任和规范等, 并对相关技术的伦理管制提出了见解。Lisa M. Gehrke等学者^[27]从伦理、安全和法律的角度, 结合美国专利法中可专利客体的范围以及在专利审查过程中的考虑讨论了人工合成DNA的可专利性问题。陈大明等学者^[28]从DNA合成与存储技术的专利布局 and 知识图谱方面分析了当前的

代表性专利, 并对DNA合成与存储的发展进行分析, 对其在竞争格局中的布局与运营提出了建议。

DNA数据存储技术的治理问题关乎其健康发展。我国颁行系列政策法规来促进和保障DNA数据存储技术的创新。在政策层面, 2022年3月, 中共中央办公厅、国务院办公厅在《关于加强科技伦理治理的指导意见》中提出了伦理先行、依法依规、敏捷治理、立足国情和开放合作的五大要求, 为防范科技创新可能带来的伦理风险、推动科技向善、实现高水平科技自立自强提供了保障。这是我国DNA数据存储技术发展和应用监管的主要政策依据。在法律层面, 2020年, 全国人大常委会通过《中华人民共和国生物安全法》以生物安全专门立法的形式防范和应对生物安全风险, 为DNA数据存储技术带来的安全风险提供治理依据。2021年, 全国人大常委会通过了《中华人民共和国数据安全法》, 为DNA数据存储中数据安全治理提供了法律依据。在行政法规层面, 国务院制定的《中华人民共和国人类遗传资源管理条例》为DNA数据存储技术中涉及到人类遗传资源部分的监管提供直接依据^[29-30]。

3 DNA数据存储技术的原理与应用

3.1 DNA数据存储技术原理

DNA数据存储技术, 是以DNA作为存储介质, 对数据进行编码, 将编码后的信息存储在DNA分子中, 从而模拟存储设备进行数据的读写操作^[31]。DNA是一种天然的存储介质^[32], 其基本结构和功能单位是脱氧核苷酸, 而储存功能的实现有赖于脱氧核苷酸四种不同含氮碱基即腺嘌呤(简称A)、胸腺嘧啶(简称T)、胞嘧啶(简称C)和鸟嘌呤(简称G)^[33]的多样性排列, 这和计算机中的二进制存储模式异曲同工。因此, 可以通过将信息编码成碱基序列, 并进行写入实现存储, 也可以通过对DNA进行测序和解码来实现读取。总体上看, DNA数据存储流程包括将0/1二进制信息转换为A/T/C/G碱基序列, 利用人工DNA合成技术将碱基序列合成为DNA多聚物分子, 以及通

过测序技术进行数据读出等环节^[34]。

3.2 DNA数据存储技术的应用

DNA数据存储具有存储期限长、存储密度高^[35]、耗能低、稳定、安全等特点,并展现出广阔的应用前景:

(1) 海量冷数据库 DNA数据存储在读取和写入效率上未必存在突出优势,但其存储密度高,期限长,可以应用于海量冷数据库,通过对不常用的数据建立DNA数据存储中心从而节约成本和资源,特别适合数据的长期备份。针对像政府机关的备份文件或者历史文档等需要长期保存但不需要经常被使用的数据,DNA数据存储技术尤其适用。

(2) 隐蔽信息载体 通过将DNA分子封装在硅微珠并融合进材料中,结合3D打印技术,日常万物都可能成为隐蔽的信息载体,如眼镜片、手套、扣子等等,有极强的隐蔽性。若通过DNA数据存储技术与加密技术的结合,更可以进一步实现编码系统与密码系统的双重保险,信息安全性得以加强。

(3) 生物计算机 1983年,生物计算机的概念开始呈现,诸多发达国家启动研发工作。与传统计算机相比,生物计算的容量往往更大,速度提升显著,并且体积更小,抗干扰能力更强,该领域得到快速发展。Alexander Green等专家^[36]通过编码合成DNA片段,并通过基因编辑技术将DNA片段移入大肠杆菌细胞体内,产生一种生物计算机。这种类型的计算机能够通过“与或非”逻辑进行判定从而控制细胞。2019年,Raja Appuswamy等专家^[37]提出名为Oligo Archive的体系结构,实现了基于DNA后端的数据库来保存结构化数据,能够对数据进行存档和恢复,还可以通过SQL语言来操作相应的DNA数据库。

4 人权层面的法律治理议题

人权是现代法治实践的基础价值,在科技发展具有重要的规范意义^[38]。DNA数据存储技术会聚了现代生物技术和数据科学,该领域的人权

议题可从两个维度解析:在生物技术层面,DNA数据存储技术面临的人权议题主要是“人”的尊严面临挑战以及从“体外隐私”到“体内隐私”两个方面;在数据科学层面,DNA数据存储技术面临的人权议题主要是技术发展所带来的数字鸿沟和基因鸿沟问题。

4.1 “人的尊严”面临挑战

DNA数据存储技术发展导致“人的尊严”面临挑战主要表现在两个方面。

一方面是由作为存储介质的DNA引发的挑战。DNA数据存储技术的存储介质是DNA,主要有两大类,一类是基于人工合成的DNA以及微生物的DNA,这是目前主要的DNA数据存储介质。由于此类DNA介质与人体无关,讨论其面临的“人”的尊严挑战无直接关联意义,故不是本文关注的重点;另一类是将人的DNA作为存储介质,尽管目前应用可能较少,但其对“人的尊严”的挑战亟待关注。

另一方面是由DNA数据存储的应用场景,即将其作为隐蔽的信息载体与人体部分结合或与其他前沿生命科学技术结合时引发的挑战,如DNA数据存储技术与脑机接口技术、生物增强技术结合时,强调尊重“人的尊严”具有重要意义。

“人的尊严”是人生存和发展的基本要素^[39],首先表现为人在“身体”方面的特质,即生命尊严。生命尊严使得人之所以为人,明确了人所具有的区别于其他生物物种的特性。每个人都具有独特的基因组和生命特征,无论其身份和地位高低、身体健康与否,都享有同等的生命尊严。生命尊严还在于对人的身体的尊重,保护其完整性。我国《宪法》第三十三条明确规定国家尊重和保障人权,《民法典》第九百九十条明确规定民事主体享有生命权、身体权和隐私权等人格权。就DNA数据存储而言,如果将人的DNA用作存储介质,那么首先要将其从人的“身体”中进行分离,破坏了其身体完整性,有损害人的尊严。即使使用人工合成的DNA作为DNA数据存储介质,仍然可能侵犯人的尊严。这主要体现在两个方面:一是在DNA数据存储的应用场景中,如果将其应用

到人体之中,比如将其作为隐蔽的信息载体植入人的身体部位中,会破坏人类身体本身的完整性,人面临被“物化”的风险,损害人类的生命尊严;二是这种技术的应用可能造成人与人之间生命尊严的平等性出现失衡和紊乱,即那些承载了DNA数据存储的人可能借由特定技术享有较之于其他人更具便利性和安全性的数据存储服务,并产生难以预测的技术滥用后果。鉴于此,在进行DNA数据存储相关实验过程中,如若使用人类DNA进行实验应当经过充分的风险评估和伦理审查,对存在伦理风险的实验操作应当予以禁止或者严格限制。具体而言,如系利用人体脱落的细胞尚可考虑接纳,如系利用活体的人的器官或者细胞则应予排除。

4.2 数字鸿沟

数字鸿沟属于数字人权保障中需要重点关注的议题。数字人权的理念,发端于 Robert B. Gelman 在 1997 年根据 1948 年《世界人权宣言》提出的《网络空间人权宣言》。2004 年,在西班牙通过《世界新兴人权宣言》。2011 年,联合国言论自由报告员签署《言论自由和互联网联合宣言》。2015 年,世界经济论坛认为,数字权利基本上是互联网时代的人权。数字鸿沟最初是因互联网技术的扩散所孕育的一种机会不平等,包括因介入差异导致的数字鸿沟和因使用差异导致的数字不平等,直接表现为数字信息技术在使用者与未使用者(无能力或能力障碍使用者)之间的社会分层^[40]。具体到DNA数据存储领域,则表现为使用DNA数据存储技术的人和未使用或没有条件使用该技术的人之间所形成的分层。

在科技发展的过程中,人类的每个成员都应该有公平均等的机会在技术进步中获得惠益分享。但是DNA数据存储技术的发展可能进一步加大发达国家与发展中国家之间的差距,出现更多的不公平并产生“数字鸿沟”。DNA数据存储的前沿技术还掌握在以美国为首的发达国家手中^[41],无论是DNA介质的合成、信息的写入还是读取,均需要专门研发的设施提供支持。DNA数据存储技术带来信息存储领域的深刻变革,而技术较为落后

的发展中国家显然处于劣势,发展中国家甚至难以获取相关信息,无法充分享有和利用DNA数据存储技术发展带来的数字红利。这种难以弥合和跨越的“数字鸿沟”制约着数字人权的实现。

5 安全层面的法律治理议题

DNA数据存储技术带来的安全议题主要包括两个方面:一是信息安全,进一步表现为介质(信息载体)安全和数据(信息本体)安全;二是生物安全,表现为人工合成的DNA存储介质可能带来的基因污染、基因突变等问题。

5.1 信息安全

信息存储的介质从最初的骨骼、竹简、石壁,发展到纸张、磁带、影带,信息逐渐被转化为人类不可读的信号存放在介质中,在需要读取的时候再从介质中按照一定的方式方法取出。在计算机网络时代,通过二进制数据来对信息进行编码和解码是最为高效、稳定且扩展性强的存储方案,信息更进一步地被虚拟化和数字化。在此发展阶段,信息从开始的人类可读,到可见但不可读,到虚拟地不可见也不可读;从开始的缓速传播,到快速传播,再到光速传播,信息的存储量不断增大,存储效率不断提升,传播速度不断加快,信息的隐蔽性越来越强。但与此同时,人类对信息的依赖性也越来越高,信息的监控、管理、保护变得更加困难和艰巨。从间谍到黑客,从信息泄露到漏洞攻击,人类面临的信息安全难题也随着存储技术的发展呈现更趋多元化的态势——更加难以发现与识别,也更加难以回应与解决。

DNA数据存储的介质是一种纳米级物质,存储的容量、密度和效率得到空前发展,其隐蔽性是传统的数据存储方式无法比拟的。随着情报获取技术、间谍技术、信息隐藏技术和信息传播在新兴技术基础上的进一步迭代更新,信息安全面临的威胁日益严峻和复杂,应及早开展本领域信息安全预警和风险防御的战略布局。

DNA数据存储设备,即DNA介质,属于数据存储的物理条件,其安全与否直接关系到所存储

数据的安全。当DNA存储的数据涉及公共通信和信息服务、能源、交通、水利、金融、公共服务、电子政务等重要行业和领域时，大规模存储设备可能构成《网络安全法》第三十一条规定的与国家安全、国计民生、公共利益相关的关键信息基础设施。此时，DNA存储的运行安全构成了网络安全的重要部分，也构成了数据安全的基础。同时，DNA数据存储是典型的数据处理活动，可能涉及数据的收集、存储、加工、传输、提供等环节，在我国应当受到《数据安全法》的规制。

此外，需要关注DNA介质污染问题。譬如，DNA数据存储技术与黑客技术的结合将会使DNA像被感染的U盘，所有与之接触的设备都可能被植入恶意程序或者后门，需要提前通过多级防范、权限管理等保障措施来维护安全。在我国DNA数据存储技术快速发展的关键期，面对境外相关技术与设施的引进与使用，应当更趋审慎，提前做好风险防范。

5.2 生物安全

DNA数据存储技术的安全议题，不仅要关注信息安全问题，也要关注生物安全问题。我国《生物安全法》第三十四条规定，禁止从事危及公众健康、损害生物资源、破坏生态系统和生物多样性等危害生物安全的生物技术研究、开发与应用活动。目前，DNA数据存储技术在生物安全层面的风险源主要集中于DNA库污染。

人工合成DNA是目前最主要的DNA数据存储介质。基因的突变具有不定向性和随机性。这意味着至少在现阶段，基因突变是无法被准确预测的。而重组DNA的微生物中，DNA并非天然产生，而是人工合成的，这种“人造”产物在生命活动中是否会引发突变，引发突变的概率和剧烈程度是否会更大都无法确定，但事实上存在着发生最坏后果的可能性。并且，重组DNA的微生物是能够正常繁衍生息的，其具有自我复制和进化的能力，在开放环境中前期繁殖的数量会成指数型增长，在管控不当的情况下很容易造成繁殖失控。

不排除如下可能，这种人工合成的新的生物会成为自然界中的入侵物种，在某一片区域泛滥

成灾，威胁当地的物种，破坏生态的正常秩序，并在大自然中得以广泛传播，难以被消灭处理。在另一种可能发生的情形下，在自然选择和生物与自然的交互中，生物的基因突变会在自然的基因库中进行流动，产生目前无法预料的后果。尽管许多研究者对此保持乐观态度，但其仍然存在恶化的可能性，从而对生态DNA库造成污染。对此，美国国立卫生研究院成立了重组DNA咨询委员会，在合成生物的安全操作上制定了管理方案和监督的程序，并建立实验的风险评估机制，对潜在的安全风险进行评估。尽管在既有的实验测试统计中，这种影响程度通常低到可以忽略，并可能在环境中迅速消失，但是鉴于其复制和进化的潜力，有必要采取特别的监测与预防措施。

光盘等硅基存储的介质，往往因难以降解而对环境产生污染。与之相比，DNA数据存储介质，作为易被降解的有机物，反而可能成为一种“环境友好型”的解决方案。从这个角度来观察，DNA数据存储技术的可控应用，也具备促进环境保护、有利于生态安全的特点。

6 知识产权层面的法律治理议题

DNA数据存储技术在知识产权层面的法律治理议题，主要聚焦于DNA数据存储技术成果的专利保护问题。具体而言，涵盖DNA合成技术和测序技术的专利授权问题、DNA介质的可专利性问题以及重组DNA的微生物的专利保护等问题。

6.1 DNA合成技术和测序技术

DNA数据存储的关键核心技术是DNA的合成技术和测序技术。DNA合成技术存在多种实现方式，有的是通过类似喷墨打印机的方式，通过带有脱氧核苷酸的喷头“打印”所需要的DNA链；也有通过类似“打孔卡”的方式，首先合成标准的“打孔纸带”（即带有一定标准的DNA骨架链条），然后通过酶的切割作用来进行“打孔”的操作，实现将特定的信息存入的效果，未来可能涌现更多更先进的合成方案。DNA测序技术存在化学切割和酶切割等多种方法，但大体上的原理都

是通过分离碱基或者进行同位素标记等方式来测得DNA的序列排布。DNA测序技术一般是检测特定DNA链种的脱氧核苷酸的序列,虽然在此过程中可能对DNA链的结构进行破坏或者造成改变,但并非出于追求改变DNA的结构和功能的目的。

无论是DNA合成技术还是测序技术,本质上是一种技术方案,属于可专利的客体范围。二者面临的问题是技术的不可预测性,特别是DNA合成技术的不可预测性可能带来技术效果的不可预期性。这与现行专利公开制度存在“弱兼容”问题,即在专利审查中面对DNA合成技术方案的技术效果具有的不可预期性,如何确定其达到专利充分公开的标准。

6.2 DNA介质

DNA合成的技术方案并非单一,在不同的技术方案中使用介质的特性也不尽相同。有鉴于此,对DNA介质的可专利性问题也应根据介质的不同来进行分类讨论。

对于使用类似打印的方式,根据特定的待存储数据流,将脱氧核糖核苷酸合成为承载信息的DNA链。在这种情况下,信息存储介质的最小单位是脱氧核糖核苷酸,但是脱氧核糖核苷酸是天然存在的,相关智力成果可能属于科学发现,而不属于具备“可专利性”的客体。如果使用到的脱氧核苷酸不是天然存在的,而是通过人力劳动将其设计改造成为了具有一定标准的“元件”,并能够被准确表征,且具有实用价值,那么应当认为其符合我国《专利审查指南》第二部分第十章第9.1.2.2节规定的内容,其本身以及制备方法均属于具备“可专利性”的客体。

如果从更广义的范围对DNA介质进行判断,则介质也可以认为是承载信息的特定的DNA链条,由于其经过人工的合成而产生,从客体角度而言其的确属于一种物质发明,属于具备“可专利性”的客体。如果仅是对存储数据的表达,DNA链本身并不满足“创造性”的要求,无法满足专利授权条件。然而,如果在合成过程中设计了一定的系统规则或者接口的标准,比如通过接口的设计可以实现更高效的信息提取,或者能便

捷地获得摘要等,那么此时DNA介质就不只是单纯的信息表达,而是经过设计的信息存储系统,因此可能具有实用性、新颖性和创造性,可以被授予专利权。

对于类似“打孔”的方式,其DNA介质则是相当于用于打孔的“纸带”,即DNA链骨架。在这种情况下,如果是自然界中任意一段DNA都可以作为“纸带”来进行操作,那么这种DNA介质可能属于科学发现,而不属于具备“可专利性”的客体。如果是通过人工设计的有一定标准的,或者高效便捷的“纸带”介质,则可以在满足创造性、新颖性和实用性基础上被授予专利权。

6.3 重组DNA的微生物

关于重组DNA的微生物是否可授予专利权一直存有争论。长期以来都只有非生命的发明才能授予专利权,但是随着生物科技,尤其是合成生物学的迅速发展,许多情况已时过境迁,需要重新审视。可专利性与发明是否具有生命无关,对于具有一定特征的生命物质,其特征是否由人为干预产生才是关键^[42]。如我国《专利审查指南》第二部分第十章第9.1.2.1部分明确了微生物既不属于动物,也不属于植物的范畴,因而微生物不属于《专利法》第二十五条第一款第(四)项所列的情况,可以被给予专利保护。但是需要明确的是未经人类的任何技术处理而存在于自然界的微生物属于科学发现,不能够被授予专利。只有当微生物经过分离成为纯培养物,并且具有特定的工业用途时,才属于具备“可专利性”的客体。质言之,微生物是否能够获得专利保护,关键在于微生物是否经过分离成为纯培养物,并且具有工业用途。

在DNA数据存储技术中重组DNA的微生物与基因编辑技术也有不同,基因编辑技术重组的目的是为了改变微生物的性状,使之具备某种功能或者价值,而DNA数据存储技术中的DNA只是存储信息。在这种情况下,如果导入人工合成的DNA后的微生物性状并没有实质性的改变,而是仅仅作为信息的存储介质,作为人工合成的DNA链的载体,此时该微生物没有因为人类的劳动和

智慧而产生某种新的特征,因此不能授予专利权。如果是通过一定系统或者接口的设计,将微生物制作成具备一定标准的“生物硬盘”,能够方便或者高效地进行存储,则是通过人的劳动与智慧改变了微生物的特征,具有特定工业用途,可以获得专利保护。

7 回应方案与建议

7.1 人权层面

7.1.1 依法依规,及时推动DNA数据存储技术伦理规范上升为国家法律法规

德国学者马克斯·韦伯(Max·Weber)提出“责任伦理”的概念,旨在强调科学技术的研究应该具有预见性,需要对未来可能面临的风险和不确定因素进行充分的考虑,而不是仅仅只考虑眼前的利益。科技工作者不仅应当对过去和当前的行为负责,还需要对未来可预见的风险承担责任。对相关风险的评估也不能仅仅局限于单一个体或者领域,而应着眼于更多相关领域和整个人类的发展。具体而言,DNA数据存储技术的发展必须要坚持伦理先行,强调技术发展应当具有预见性和前瞻性,在创新过程中考虑更广泛社会、道德、环境议题,同时创造柔性的与适应性的系统以应对创新的未知结果。DNA数据存储技术及产业的发展,要在责任伦理的指引下强调“责任式创新”,构建技术创新治理的适应性制度体系以引导新兴技术发展能够满足社会物质需求和道德伦理要求,其治理体系化要素包括包容性、预测性、自省性以及响应性^[43]。

2022年,中共中央办公厅国务院办公厅印发《关于加强科技伦理治理的意见》,指出要提高科技伦理治理法治化水平。推动在科技创新的基础性立法中对科技伦理监管、违规查处等治理工作作出明确规定,在其他相关立法中落实科技伦理要求,并及时推动将重要的科技伦理规范上升为国家法律法规。DNA数据存储技术的创新发展既要坚持伦理先行,避免技术发展对“人的尊严”的挑战以及带来的数字鸿沟等风险,更要加快推进将重要的DNA数据存储技术伦理规范上升为国

家法律法规。

就DNA数据存储可能带来的人权方面的挑战,应在以下两个方面展开伦理治理规范上升为法律规范的工作。一方面,要对相关技术可能导致的伦理风险进行全面评估,对可能损害“人”的尊严的实验操作进行详细的排除性规定;另一方面,要对技术发展可能带来的“数字鸿沟”和“基因鸿沟”问题进行风险评估与预警规则。具体而言,DNA数据存储相关伦理治理规范的法治化包括以下内容:

首先,在法律原则层面,引入“科技公序良俗”原则作为DNA数据存储技术相关立法的核心原则之一。公序良俗是跨哲学、法学的多学科共享概念,具有真理性、良善性、时代性、范导性、泛在性等特点,包含以人为本、创新发展、和平安全、公平公正、诚信履责等内容^[44]。经由“科技公序良俗”,可以有效整合DNA数据存储行业的法律法规、公共政策、行业规范、技术标准等诸多规范类型,协调DNA数据存储技术科技治理的刚性规则和柔性规则。其次,在国家科技伦理委员会和相关组织指导下,制定DNA数据存储行业的伦理风险“发现-处置-追责”流程规则,明确监管部门的监管责任和行业协会的自律责任。再次,由DNA数据存储相关的科学共同体与产业行业组织牵头制定自治性规范,比如《DNA数据存储技术发展伦理指南》,明确DNA数据存储行业的伦理要求,引导科研机构、科研人员以及其他创新主体合规开展创新活动。在已有的自治性规范基础上,将伦理价值指令转化为立法目的,将共识性的自律规范转化为具有法律强制性的他律规范,将底线性基础性关键性的伦理规范转化为法律规则。

7.1.2 立足国情,在契合DNA数据存储伦理治理框架基础上完善政策法规体系

对DNA数据存储技术伦理治理规范给予法律的确认和保障,这是伦理治理规范得以有效实施的重要基础。科技伦理治理体系的有效运行,有赖于科技法治的有力支撑。尽管可以在道德层面对一般伦理事项进行约束,但是难免发生约束力不足甚至出现背道而驰的情况,在这种情况下,法律强制性的执行就很有必要。在合理的框架下,

还需要管理与监督制度的严格实施与落实,并随着技术的不断发展,及时进行自我矫正,从而保障DNA数据存储技术能够在科技伦理治理“软硬兼施”路径中实现健康发展。

在政策层面,加强DNA数据存储产业发展和伦理治理的政策供给。可分为两种路径:一是在中央和地方层面制定支持DNA数据存储技术创新和创新治理的专门政策,强调政策支持的体系性和权威性;二是从降低制度成本的角度出发,将DNA数据存储相关的政策支持嵌入政府的生物技术或数据科学发展政策中,在相关技术和产业发展规划中专门设置DNA数据存储相关内容。

在法律层面,需要明确国家和地方各层级科技伦理委员会的法律地位和职责范围,加深公众对科技伦理委员会的了解,以加强其在DNA数据存储治理领域的透明度和权威性。同时,科技伦理委员会应与不同领域专家相互合作互补,促进技术的健康快速发展。结合DNA数据存储技术的科学特征和社会影响,从数据科学和合成生物学两方面同步完善DNA数据存储相关法律监管规则,及时推动成熟的DNA数据伦理治理规范上升为国家法律法规。

7.2 安全层面

7.2.1 技术与制度并举,健全DNA数据存储全流程数据安全监管规则

针对DNA数据存储的信息安全问题,要坚持技术发展与安全监管制度并行。DNA数据存储行为在法律性质上属于数据处理活动,介质安全直接影响其所存储数据的安全,应当坚持总体国家安全观,从数据安全治理的角度,提高数据安全保障能力。

DNA数据存储的安全治理首先要不断提升数据安全技术,分别针对数据自身安全、数据存储介质安全以及数据传输安全研发相应技术。在数据自身安全方面,可以类比计算机存储系统开发出属于DNA存储系统的身份认证环节能够极大提升存储数据的自身安全程度;在数据存储介质安全方面,从数据错误恢复、体外存储的保护材料及体内存储的宿主细胞3个层面设计通用化的

DNA存储设施保护体系^[45];在数据传输安全层面,DNA合成与测序在以深度学习为代表的人工智能算法的加持下可以实现对恶意序列的精准检测,应加大此类技术研发以保障计算机存储系统与DNA存储系统间的数据传输安全^[46]。

在制度层面,遵循《数据安全法》等法律规范开展DNA数据存储的技术创新和商业化运用,健全DNA数据存储全流程安全管理规则。首先,根据《数据安全法》第八条和第二十八条的规定,DNA数据存储相关活动必须要遵守法律、法规,尊重社会公德和伦理,相关主体积极履行数据安全义务。其次,根据《数据安全法》第十条的规定,可推动成立DNA数据存储行业组织,并引导行业组织按照章程依法制定数据安全行为规范和团体标准,加强行业自律。同时,行业组织应指导成员加强DNA数据存储的数据安全保护。其次,DNA数据存储技术科研人员以及应用主体应当加强数据安全风险监测,如果发现设施安全以及信息安全等情况,应当立即处置并采取补救措施。同时,及时形成安全处置报告,向数据安全监管部门和科技伦理委员会报告。最后,当DNA数据存储技术被用于存储重要数据或者核心数据时,创新主体应当在按年度进行风险评估,并向数据安全监管部门和科技伦理委员会报送风险评估报告。风险评估的内容应包括所存储数据的基本情况,以及DNA数据存储创新主体面临的数据安全风险及其应对措施等。

7.2.2 守住安全底线,提升DNA数据存储生物安全防控水平

DNA数据存储技术的创新发展必须坚持底线思维,在技术研究、开发与应用时应当加强生物安全防控。《生物安全法》规定了生物安全法治领域的基本要求,具有框架性和基础性特征。我国目前尚缺乏专门的DNA数据存储生物安全治理规范,应结合技术发展特征和产业发展需求提出更为具体的治理规范。

第一,建立健全伦理审查机制。《生物安全法》第三十四条规定,从事生物技术研究、开发与应用活动,应当符合伦理原则。无论是DNA数据存储的技术研究,还是商业化应用,都需要符合伦理原则。这既是DNA数据存储生物安全防控

的要求,也是数据安全保障的要求。符合伦理审查原则成为DNA数据存储数据安全治理和生物安全治理的制度联结点,并成为DNA数据存储安全治理的底层基石。

第二,建立完善全流程生物安全风险管理制度。从事DNA数据存储技术开发和应用的单位是生物安全的第一责任人,必须建立内部的生物安全风险处置机制。同时,单位还需要加强岗前培训,培训内容主要包括DNA数据存储的生物安全风险识别、检查、处置以及报告等。此外,应对介质安全可能造成的威胁,对引进的外来设备与设施进行严格检查并在其与核心系统之间设置隔离,准备应急预案。

第三,统筹生物安全与数据安全,提升DNA数据存储技术安全治理水平。DNA数据存储技术的生物安全治理和数据安全治理在总体国家安全观框架下具有一致性,相关活动应符合伦理原则。对于DNA数据存储技术而言,可通过伦理审查、跨境转移监管、风险监测、风险评估、风险调查以及风险报告等制度环节实现生物安全与数据安全的统筹治理。

7.3 知识产权层面

7.3.1 完善专利保护规则,激励DNA数据存储技术创新

我国现行法律法规对DNA合成技术和测序技术领域智力成果的保护范围界限不明,保护力度亟待加强。可以从技术成果分类保护、技术成果的保护力度以及技术成果的专利审查三个方面促进DNA数据存储技术的专利保护。

第一,有效实施DNA数据存储技术成果分类保护。所谓“分类保护”具有双重含义,第一层是关于专利保护与商业秘密保护的分类,第二层是运用专利保护的情况下,根据DNA数据存储技术成果的特性,分别制定保护策略。于前者而言,对于那些明显无法获得专利保护,但又有巨大商业价值的价值成果,要及时采取保密措施,避免因专利申请而造成技术公开流动。通过内部的技术成果分流机制,充分利用技术成果的商业价值,及早进行专利保护或商业秘密保护布局。于后者

而言,针对DNA数据存储技术涉及的不同技术成果,分别明确其是否具有可专利性的关键性决定因素。具体而言,一方面,要注意DNA数据存储技术成果,特别是DNA介质以及微生物相关成果,与《专利法》所称的“科学发现”的差异点,并作出针对性的技术布局;另一方面,根据《专利法》第五条的规定,对依赖遗传资源完成的DNA数据存储技术成果,必须要符合获取或者利用遗传资源相关法律、行政法规的规定。

第二,在保护力度上,既不能因为保护范围过小打击研发者开发的动力,抑制技术发展;也不能因为保护范围过大导致行业市场上的垄断,损害公众利益。根据DNA数据存储技术发展的不同阶段制定不同的专利保护政策,在技术和产业发展初期,为了激励技术创新和知识生产,应当强化专利保护强度;在技术和产业发展繁荣期,为了平衡公共利益,应适当弱化专利保护强度,将其调整至与其他技术领域相同的保护强度。专利保护力度可以从保护的长度和宽度两个维度理解,前者主要通过专利保护期实现,后者主要通过可专利性范围实现,并通过专利审查机制进行补充。在专利保护期不变的情况下,专利保护力度的调整主要通过调整专利保护的宽度实现。具体说,可以从以下几个方面考虑强化DNA数据存储技术的专利保护:一是对于DNA介质类技术成果,在判断其是否可专利性问题时,对其是否能够被确切的表征以及是否具有工业用途等,可以采取更为宽松的认定基准;二是对于依赖遗传资源完成的DNA数据存储技术成果,如果出现没有严格按照法律、行政法规的规定获取和利用遗传资源的情形,专利主管部门虽然可以直接做出不授予专利的决定,但也可以适当考虑给予发明申请人进行补救的机会。

第三,在专利审查上,深刻认识技术的不可预测性与技术发明效果的不可预期性。积极克服DNA数据存储技术具有的不可预期性技术效果,把握技术的不可预测性特征,在专利审查体系中建立技术信息披露机制,以完善具有不可预期性技术效果的发明专利审查规则。

7.3.2 优化知识产权法治环境,激励DNA数据存储技术持续创新

专利规则的持续完善是DNA数据存储技术产

权保护的重要基础，而法治环境持续优化是其关键支撑。构建更加适应DNA数据存储技术创新与产业发展的知识产权法治环境，可从以下两个方面展开：

第一，强化顶层设计，加大DNA数据存储科技创新和产业创新的政策供给。一个领域的发展离不开国家相关政策的支持。DNA数据存储技术在我国作为一个新兴领域，其公众认知不足、政策供给滞后。建议对该技术领域做出合理性预测与战略性评价，适时纳入国家和地方科技发展规划。对于DNA数据存储技术未来的发展方向，比如生物硬盘、基于DNA存储介质的新型数据库技术等创新领域加大投资和支持力度，推进形成具有全球竞争力的开放创新生态。

第二，优化服务供给，推进DNA数据存储技术专利布局指导和快速审查、集中审查服务。DNA数据存储技术成果的专利保护面临可专利性挑战以及专利审查授权中的不可预期性技术效果的处理等问题，这需要加强知识产权法治环境建设，提升创新主体的知识生产效率和高质量专利产出能力。具体而言，一是加强专利审查员的培训，建议组织DNA数据存储技术领域专利审查培训专班，提升专利审查员审查效率和水平；二是依托专利审查机构和知识产权保护平台采取专利预审、快速审查、集中审查等措施，显著缩短DNA数据存储技术成果专利授权周期，提升DNA数据存储技术成果的知识产权保护水平，推进DNA数据存储技术创新和产业发展。

8 结 语

“我们正从认识生命、改造生命走向合成生命、设计生命，在给人类带来福祉的同时，也带来生命伦理的挑战。”面对新兴技术发展带来的挑战，应做好全面布局和充分准备。DNA数据存储以其存储密度高、存储时期长、稳定、安全等特点，有望成为当下快速增长的数据存储需求的解决方案。DNA数据存储技术在海量冷数据库以及生物计算机等方面具有广阔的运用场景，但新兴技术的发展需要相应法律治理议题的识别、破解与回应。本文基于人权、安全和知识产权的风险

评估框架，分析了DNA数据存储技术发展可能引发的法律治理议题。在人权方面，存在人的尊严面临挑战以及数字鸿沟等议题；在安全层面，面临信息安全和生物安全双重治理议题；在产权层面，分析不同类型的DNA数据存储技术成果面临的专利保护问题。在此基础上，在人权方面提出要完善DNA数据存储伦理治理框架上的政策法律体系；在安全方面提出要强化信息安全和生物安全维度加强DNA数据存储的安全治理；在知识产权方面提出从完善专利保护规则和优化知识产权法治环境两个维度，加强DNA数据存储技术成果的知识产权保护。相较于传统存储技术，DNA数据存储技术的“会聚性”集中体现于信息技术与生物技术的深度交叉融合，其引发的法律挑战呈现多维性、复杂性、嵌套性特征，法律治理应契合科技伦理治理框架，并平衡好发展与安全的关系。

参 考 文 献

- [1] 中国信息通信研究院. 大数据白皮书(2020年)[EB/OL]. [2024-03-02]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202012/t20201228_367162.htm.
The China Academy of Information and Communications Technology. Big data white paper (2020) [EB/OL]. [2024-03-02]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202012/t20201228_367162.htm.
- [2] ZHIRNOV V, ZADEGAN R M, SANDHU G S, et al. Nucleic acid memory[J]. Nature Materials, 2016, 15: 366-370.
- [3] GODA K, KITSUREGAWA M. The history of storage systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(Special Centennial Issue): 1433-1440.
- [4] PANDA D, MOLLA K A, BAIG M J, et al. DNA as a digital information storage device: hope or hype?[J]. 3 Biotech, 2018, 8(5): 239.
- [5] WILLIAMS E D, AYRES R U, HELLER M. The 1.7 kilogram microchip: energy and material use in the production of semiconductor devices[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(24): 5504-5510.
- [6] EXTANCE A. How DNA could store all the world's data[J]. Nature, 2016, 537(7618): 22-24.
- [7] ERLICH Y, ZIELINSKI D. DNA Fountain enables a robust and efficient storage architecture[J]. Science, 2017, 355(6328): 950-954.
- [8] BORNHOLT J, LOPEZ R, CARMEAN D M, et al. A DNA-

- based archival storage system[C/OL]// ASPLOS '16: Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. 2016: 637-649[2024-02-01]. <https://doi.org/10.1145/2872362.2872397>.
- [9] CHURCH G M, GAO Y, KOSURI S. Next-generation digital information storage in DNA[J]. *Science*, 2012, 337(6102): 1628.
- [10] GOLDMAN N, BERTONE P, CHEN S Y, et al. Towards practical, high-capacity, low-maintenance information storage in synthesized DNA[J]. *Nature*, 2013, 494(7435): 77-80.
- [11] ORGANICK L, ANG S D, CHEN Y J, et al. Random access in large-scale DNA data storage[J]. *Nature Biotechnology*, 2018, 36(3): 242-248.
- [12] 李彦敏, 钟云鹏, 祁姗姗, 等. 基于合成DNA的数字信息储存和读取系统[J]. *中国科学: 生命科学*, 2018, 48(1): 102-104.
LI Y M, ZHONG Y P, QI S S, et al. A new digital information storing and reading system based on synthetic DNA[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2018, 48(1): 102-104.
- [13] HAKAMI H A, CHACZKO Z, KALE A. Review of big data storage based on DNA computing[C]// 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering. IEEE, 2015: 113-117.
- [14] DAVIS J. Microvenus[J]. *Art Journal*, 1996, 55(1): 70.
- [15] BANCROFT C, BOWLER T, BLOOM B, et al. Long-term storage of information in DNA[J]. *Science*, 2001, 293(5536): 1763-1765.
- [16] BLAWAT M, GAEDKE K, HÜTTER I, et al. Forward error correction for DNA data storage[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 80: 1011-1022.
- [17] YIM S S, MCBEE R M, SONG A M, et al. Robust direct digital-to-biological data storage in living cells[J]. *Nature Chemical Biology*, 2021, 17(3): 246-253.
- [18] 史越, 贾李佳, 刘翟. DNA数据存储: 机遇与挑战[J]. *集成技术*, 2024, 13(3): 128-142.
SHI Y, JIA L J, LIU D. DNA-based data storage — opportunities and challenges[J]. *Journal of Integration Technology*, 2024, 13(3): 128-142.
- [19] Amazon. DNA Drive [EB/OL]. [2024-06-11]. <https://www.amazon.in/Helixworks-dsDNA300750hw-DNADrive/dp/B01IVSH4OM>.
- [20] TRUEMAN C. Biomemory launches first commercially available DNA storage solution [EB/OL]. (2023-12-06) [2024-06-11]. <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/biomemorylaunches-first-commercially-available-dna-storage-solution/>.
- [21] 袁芳, 郑彦宁, 郑佳, 等. DNA存储技术的中美对比研究[J]. *全球科技经济瞭望*, 2019, 34(4): 71-76.
YUAN F, ZHENG Y N, ZHENG J, et al. A comparative study between China and the United States in the field of DNA storage technology[J]. *Global Science, Technology and Economy Outlook*, 2019, 34(4): 71-76.
- [22] 张淑芳, 彭康, 宋香明, 等. DNA数据存储技术研究进展[J]. *计算机科学*, 2019, 46(6): 21-28.
ZHANG S F, PENG K, SONG X M, et al. Research progress on DNA data storage technology[J]. *Computer Science*, 2019, 46(6): 21-28.
- [23] MEYER M. Taking responsibility, making irresponsibility: Controversies in human gene editing[J]. *Social Studies of Science*, 2022, 52(1): 127-143.
- [24] 焦洪涛, 李家杭. 合成生物学风险治理的法律之维: 风险审辨与框架构建[J]. *科技与法律*, 2019(5): 60-67.
JIAO H T, LI J H. The legal dimension of synthetic biology risks governance — risks identification and framework construction[J]. *Science Technology and Law*, 2019(5): 60-67.
- [25] TUCKER J B, ZILINSKAS R A. The promise and perils of synthetic biology[J]. *New Atlantis*, 2006, 12: 25-45.
- [26] 雷瑞鹏, 冀朋. 合成生物学的知识伦理问题初探[J]. *自然辩证法通讯*, 2019, 41(2): 101-107.
LEI R P, JI P. A preliminary research on the problem of the ethics of knowledge of synthetic biology[J]. *Journal of Dialectics of Nature*, 2019, 41(2): 101-107.
- [27] GEHRKE L M. Is gene editing patentable?[J]. *AMA Journal of Ethics*, 2019, 21(12): E1049-E1055.
- [28] 陈大明, 张学博, 刘晓, 等. 从全球专利分析看DNA合成与信息存储技术发展趋势[J]. *合成生物学*, 2021, 2(3): 399-411.
CHEN D M, ZHANG X B, LIU X, et al. A global patent analysis: trends in DNA synthesis and information storage[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2021, 2(3): 399-411.
- [29] 中国科学院武汉文献情报中心, 材料科学战略情报研究中心. 材料发展报告: 新型与前沿材料[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 107-123.
Wuhan Document Information Center, Chinese Academy of Sciences, Strategic Information Research Center for Materials Science. *Landscape of material development*[M]. Beijing: Science Press, 2014: 107-123.
- [30] 田德桥, 陆兵. 中国生物安全相关法律法规标准选编[M]. 北京: 法律出版社, 2017: 1-153.
TIAN D Q, LU B. *Collection of laws regulations and standards of the People's Republic of China on biosafety and biosecurity* [M]. Beijing: Law Publishing House, 2017: 1-153.
- [31] 崔光照, 刘玉琳, 张勋才. 数据存储新方向: DNA分子存储技术[J]. *计算机工程与应用*, 2006, 42(26): 29-32, 35.
CUI G Z, LIU Y L, ZHANG X C. New direction of data storage: DNA molecular storage technology[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(26): 29-32, 35.
- [32] 吕之品. DNA: 精妙的信息存储体[J]. *大科技(科学之谜)*, 2013(8): 36-38.
LÜ Z P. DNA: an exquisite information storage body[J]. *Super*

- Science, 2013(8): 36-38.
- [33] 周谷成, 范艳艳, 肖义军. DNA 存储技术的研究概述[J]. 生物学通报, 2018, 53(8): 10-12.
ZHOU G C, FAN Y Y, XIAO Y J. Review on the research of DNA storage technology[J]. Bulletin of Biology, 2018, 53(8): 10-12.
- [34] 黄小罗, 戴俊彪. 人工 DNA 合成技术: DNA 数据存储的基石[J]. 合成生物学, 2021, 2(3): 335-353.
HUANG X L, DAI J B. DNA synthesis technology: foundation of DNA data storage[J]. Synthetic Biology Journal, 2021, 2(3): 335-353.
- [35] 肖琳芬. 欧阳院士: DNA 数字存储的现状与未来[J]. 高科技与产业化, 2022, 28(11): 12-15.
XIAO L F. Academician Ouyang Qi: the present and future of DNA digital storage[J]. High-Technology & Commercialization, 2022, 28(11): 12-15.
- [36] GREEN A A, KIM J M, SILVER P A, et al. Complex cellular logic computation using ribocomputing devices[J]. Nature, 2017, 548(7665): 117-121.
- [37] APPUSWAMY R, LEBRIGAND K, BARBRY P, et al. OligoArchive: Using DNA in the DBMS storage hierarchy [C/OL]// Biennial Conference on Innovative Data Systems Research (CIDR 2019). 2019: 98[2024-02-01]. <https://www.cidrdb.org/cidr2019/papers/p98-appuswamy-cidr19.pdf>.
- [38] 郑玉双. 基因科技伦理的法理划界: 以人权为中心展开[J]. 当代法学, 2023, 37(3): 70-83.
ZHENG Y S. Legal delimitation of gene technology ethics: a human rights perspective[J]. Contemporary Law Review, 2023, 37(3): 70-83.
- [39] 冯烨. HET 技术对人尊严的矛盾效应及其扬弃[J]. 自然辩证法通讯, 2024, 46(3): 21-30.
FENG Y. The contradictory effects of HET on human dignity and their transcendences[J]. Journal of Dialectics of Nature, 2024, 46(3): 21-30.
- [40] 张燕. 科技时代的权利、能力与尊严: 以老年人的“数字鸿沟”问题为例[J]. 道德与文明, 2023(3): 145-151.
ZHANG Y. Rights, capability and dignity in the age of science and technology: a case study on the “digital divide” of the elderly[J]. Morality and Civilization, 2023(3): 145-151.
- [41] 宋琪, 丁陈君, 吴晓燕, 等. DNA 存储技术国际发展态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2021, 43(1): 24-42.
SONG Q, DING C J, WU X Y, et al. Analysis on the development strategies and trends of DNA storage technology [J]. World Sci-Tech R & D, 2021, 43(1): 24-42.
- [42] TURK G, LEVOY M. Zipped polygon meshes from range images[C/OL]// SIGGRAPH '94: Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, 1994: 311-318[2024-02-01]. <https://doi.org/10.1145/192161.192241>.
- [43] 梅亮, 陈劲. 责任式创新: 源起、归因解析与理论框架[J]. 管理世界, 2015, 31(8): 39-57.
MEI L, CHEN J. Responsibility innovation: origin, attribution analysis and theoretical framework[J]. Journal of Management World, 2015, 31(8): 39-57.
- [44] 王奇才. 论科技领域的公序良俗[J]. 政法论坛, 2024, 42(4): 145-155.
WANG Q C. Public order and good morals in the era of science and technology[J]. Tribune of Political Science and Law, 2024, 42(4): 145-155.
- [45] 刘德霖, 沈玥, 平质. DNA 存储技术的数据安全研究进展[J]. 集成技术, 2024, 13(3): 74-88.
LIU D R L, SHEN Y, PING Z. Research progress on data security of DNA storage technology[J]. Journal of Integration Technology, 2024, 13(3): 74-88.
- [46] ISLAM M S, IVANOV S, AWAN H, et al. Using deep learning to detect digitally encoded DNA trigger for Trojan malware in Bio-Cyber attacks[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 9631.



通讯作者及第一作者: 焦洪涛 (1974—), 男, 华中科技大学科技法研究所执行所长、华中科技大学生命伦理学研究中心特聘研究员。主要研究方向为科技法与知识产权法、生命伦理与法律。
E-mail: jiaohongtao@hust.edu.cn