

镜像分子与镜像生命的本体论分野

——两用生物技术的伦理校准与差异化治理

The Ontological Divide Between Mirror Molecules and Mirror-Lives: Ethical Calibration and Differentiated Governance of Dual-Use Biotechnology

成家桢 / CHENG Jiazhen

(苏州大学政治与公共管理学院, 江苏苏州, 215123)
(School of Politics and Public Administration, Soochow University, Suzhou, Jiangsu, 215123)

摘要: 镜像生物学作为合成生物学前沿领域, 始终存在收益预期与风险焦虑的张力, 其核心症结在于混淆镜像分子与镜像生命的本体论差异, 导致伦理判断失焦与治理资源错配。历史考察显示, 将巴斯德分子非对称性研究归为研究起点, 是对科学史的回溯式投射, 遮蔽了本体论差异。依据严格定义, 镜像分子作为工具性构件风险局部可控, 而镜像生命若实现则将引发生态演化不可逆冲击。伦理反思应超越“扮演上帝”的形而上学诘问, 转向生态责任框架, 对镜像分子实施“分级监管+负责任创新”闭环治理, 对镜像生命建立“前瞻性评估+全球协作”审慎机制。该差异化策略契合我国新质生产力与伦理治理协同语境, 为两用生物技术规范化提供了兼具哲学辩护与可操作性的中国方案。

关键词: 镜像生命 镜像分子 两用生物技术 本体论区分 生态责任

Abstract: As a cutting-edge field of synthetic biology, mirror biology has always been characterized by the tension between benefit expectations and risk anxiety. The core crux lies in the confusion of the ontological differences between mirror molecules and mirror life, which leads to out-of-focus ethical judgments and governance resource mismatch. Historical investigation shows that the framing of Pasteur's research on molecular asymmetry as the starting point of mirror biology constitutes an anachronistic projection onto scientific history, obscuring ontological divergence between mirror molecules and mirror lives. Based on a rigorous definition of life, mirror molecules, as instrumental components, present locally controllable risks; in contrast, the realization of mirror life would trigger irreversible ecological and evolutionary impacts. Therefore, ethical reflection should transcend the metaphysical questioning of “playing God” and shift toward an ecological responsibility framework about implementing a closed-loop governance of “hierarchical supervision + responsible innovation” for mirror molecules and establishing a prudent mechanism of “prospective assessment + global collaboration” for mirror life. This differentiated strategy aligns with China's context of synergizing new quality productive forces with ethical governance, and provides a solution with Chinese characteristics, a solution with both philosophical justification and operability for the normalization of dual-use biotechnology.

Key Words: Mirror life; Mirror molecules; Dual-use biotechnology; Ontological divide; Ecological responsibility

中图分类号: Q-1; N031 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.11.003 CSTR: 32281.14.jdn.2026.11.003

基金项目: 国家重点研发计划项目“针对两用生物技术的甄别及应对关键技术研究”(项目编号: 2025YFC2608200)。

收稿日期: 2026年3月6日

作者简介: 成家桢(1994-)男, 江苏苏州人, 苏州大学政治与公共管理学院讲师, 研究方向为生物学哲学、人类学、社会学。Email: 15995721126@163.com

一、问题的提出： 两用生物技术伦理争议的范畴误用

生物技术自诞生起就在其双重用途（dual-use）中摇摆不定。如德布鲁（Claude Debru）指出的那样，此类技术的潜在危险不仅在于具体危害，更在于它把人类和自然拉入了新演化（neo-evolution）的动力学之中：生物技术不只是人类控制一切的欲望，也是地球生命对新环境的适应，它扰乱了生命演化历史中“可能性与现实性”的固有配置。（[1], pp.2-5）近年来，合成生物学的突破已从改造既有生命迈向重构生命基本结构，其中围绕分子手性的“镜像系统”研究最具争议：它试图构建与地球生命同构异向的镜像分子乃至镜像生命，既承载着药物研发、材料科学的突破性前景，也引发了生态安全的深层忧虑。

清华大学朱听团队的系列研究推动了镜像生命研究的关键进展：2016年首次化学合成由D型氨基酸构成的镜像DNA聚合酶（非洲猪瘟病毒聚合酶X的镜像版本），实现L型DNA（镜像DNA）的复制与转录；^[2] 后续逐步升级工具链，合成长链基因、巨型聚合酶等复杂组件，^[3] 使“镜像生命”从理论构想走向技术实践。然而，这一进展迅速引发分歧：2024年多位科学家在《科学》（*Science*）发出联名警告，对所谓“镜像生命”可能带来的生态风险与不可逆后果表示高度警惕，呼吁在技术推进之前进行更为审慎的伦理评估。^[4] 朱听则回应称镜像分子及相关体系在药物研发、材料科学与生物技术中具有潜在价值，过度限制可能阻碍科技进步。^[5] 相关争论在制度层面亦有反映：我国“十五五”规划虽未点名镜像生物学，但明确提出“加强生命科学前沿技术伦理治理”；^[6] 巴斯德研究所（Institut Pasteur）于2025年6月召开首个国际专题会议，将镜像生命研究纳入全球科学治理议程。^[7] 这些动向共同表明，镜像生物学等两用生物技术由于其巨大收益和潜在风险，正在成为一个需要被制度性评估与规范性引导的现实议题。在此，中外治理策略的差异也已初现端倪。

然而，现有讨论存在一个未被澄清的核心问题：无论是学术争议、公众传播还是政策讨论，均未严格区分镜像分子与镜像生命的本体论差异，而是将二者视为同一技术进程的不同阶段，因而套用同一套风险评估与治理模板。这种范畴误置导致双重后果：一方面，将镜像分子的工具性风险夸大为生态性风险，引发不必要的恐慌；另一方面，将镜像生命的系统性风险简化为技术可控风险，低估其对生物圈的潜在冲击。根本上，这一混淆源于对生命本质定义的模糊，以及对技术演进中量变与质变的忽视。因此，本文的核心任务是通过历史认识论澄清镜像生命研究的概念谱系，以本体论分析区分镜像分子与镜像生命的存在形态，结合国际治理比较与本土案例实证，构建适配其风险结构的差异化治理策略。这既是回应两用生物技术伦理争议的关键，也是科技伦理治理从笼统规范走向精准施策的必然要求。

二、概念溯源： 镜像生物学的历史认识论澄清

在当前的镜像生物学自我叙事中，巴斯德关于酒石酸盐晶体非对称性的研究普遍被视为理论起点。这一追溯在2024年《镜像细菌技术报告：可行性和风险》（*Technical Report on Mirror Bacteria: Feasibility and Risks*）与2025年巴斯德研究所专题会议中被反复强调，似乎构成了镜像生命研究的“合法性溯源”。但通过历史认识论分析可见，这种回溯式叙事存在双重误解：既混淆了不同历史时期的科学概念框架，也遮蔽了巴斯德研究的形而上学内核与当代镜像生物技术的工程化导向之间的根本差异。

在巴斯德之前，旋光现象研究已形成清晰脉络。马吕斯（Etienne-Louis Malus）奠定偏振光研究的基础，阿拉戈（François Arago）发现石英旋光色散，毕奥（Jean-Baptiste Biot）定量揭示旋光角与介质的关系，并首次指出有机物旋光性源于分子固有结构，赫歇尔（John

Herschel)进一步建立晶体偏形几何与旋光方向的稳定对应关系。([8], pp.316-320)巴斯德的核心贡献在于,通过晶体分拣实验揭示了分子非对称性与旋光现象的因果关联,并总结出三条规律:1. 分子非对称性是晶体宏观非对称性的微观根源;2. 分子非对称性是旋光现象的微观结构基础;3. 互为镜像的对映体在非手性环境中化学性质一致。([8], p.328)这些成果为分子手性研究奠定了实验基础,但将其视为镜像生命研究起点的判断忽视了两个关键的历史约束。

其一,概念框架的时代局限。巴斯德所处的19世纪中叶,立体化学尚未成形,“手性”(chirality)概念直到19世纪末才由开尔文勋爵明确提出。^[9]在缺乏这一核心概念的情况下,巴斯德无法精准界定镜像分子的结构特征,更无法构想镜像生命,因为后者以分子空间构型的系统性反转和生物大分子的复制机制为前提,而这些都是20世纪分子生物学诞生后才可能的知识。巴斯德研究的本质是对分子结构及其物理性质的经验性探索,而非对生命形态进行重构的技术想象。

其二,生命观的本质差异。巴斯德是自然发生说的坚定反对者,通过鹅颈瓶实验论证“生命只能源于生命”,强调生命具有区别于无机世界的本体论特殊性。^[10]在这一生命观下,制造生命本身就是不可想象的,更谈不上通过技术手段构建镜像生命。相反,巴斯德把分子非对称性视为生命与非生命的本质区别,([8], p.329)并试图将其根源追溯到宇宙性因素(如光、电、磁、地球运动)。([8], p.341)这种形而上学倾向与当代镜像生物学的工程化、工具化导向形成鲜明对比。

真正构成当代镜像技术理论起点的,是开尔文之后逐步形成的立体化学与分子工程传统。在这一谱系中,“手性”不再被赋予形而上学意义,而是被视为可设计、可合成、可利用的结构特性。以2016年诺贝尔化学奖得主费林加(Ben Feringa)为代表的分子机器研究,正是通过精准控制手性结构,实现了纳米尺度的定向运动与功能转换——例如,光驱分子马

达中,手性是实现单向旋转与催化立体选择性的核心机制。^[11]这一传统的核心导向是技术应用:从不对称催化、药物合成到信息存储,手性结构被转化为可利用的工程资源。正是在这一框架下,当代镜像生物学研究才获得了现实意义:它本质上是分子手性研究的延伸,以功能优化和可控应用为目标,与巴斯德最终的形而上学思考属于完全不同的科学范式。

总而言之,镜像生物学的概念谱系存在明确的断裂:巴斯德的非对称性研究最终归于生命本质的形而上学探索,当代镜像分子研究属于分子结构的工程问题,镜像生命构想则是以后者为基础的对生命形态的彻底重构。将三者纳入同质的历史叙事,是对科学史的时代错置,其后果是模糊镜像分子与镜像生命的本体论差异,而这正是当前伦理争议失焦的根源所在,也导致不同治理路径在选择上陷入非此即彼的困境。

三、本体论区分:镜像分子与镜像生命的存在形态与风险结构

要澄清镜像技术的伦理争议,核心是依据生命的基本定义,区分镜像分子与镜像生命的存在形态,进而识别其风险结构的根本差异。分子生物学家莫朗热(Michel Morange)在整合生命起源研究、地外生物学与人工生命研究的基础上,给出了一个兼具整体性和灵活性的规定:生命体具有复杂分子结构,以特异且持续的方式进行新陈代谢活动,能够进行非精确的繁殖,且这三个特征相互依赖,共同构成作为过程本身的生命。([12], p.215)该定义的核心在于强调系统性,即生命并非分子的简单集合,而是“代谢-复制-结构稳定性”的有机统一体。以此为标准,镜像分子与镜像生命呈现出截然不同的本体论特征。

1. 镜像分子:工具性存在与局部可控风险

镜像分子的核心特征是手性反转的生物大分子,如镜像DNA和镜像蛋白质等。其本质是被工程化改造的工具性构件,而非独立的生命系统。即使是朱昕团队合成的镜像DNA聚

合酶,也仅能在人工控制条件下完成特定反应,无法自主实现新陈代谢与繁殖。从莫朗热的生命定义来看,镜像分子仅满足复杂分子结构这一单一条件,缺乏代谢-复制的系统闭环,因此在本体论上属于非生命存在。由此,镜像分子的风险结构呈现局部可控性特征。其一,风险来源是应用场景中的外溢,而非自身的自主性扩散。例如,镜像分子可能作为药物载体引发免疫反应,或作为污染物进入环境,但这种风险依赖于人类的应用行为,而非其自身的生命活动;其二,风险影响范围是局部性的,而非生态系统性的。即使出现风险事件,也可通过技术手段(如环境净化、免疫干预)加以遏制,不具备不可逆的扩散能力;其三,风险性质是技术风险,而非演化风险。其核心危害在于对特定个体或局部环境的伤害,而非对生物圈结构、生命演化路径的冲击。

我国现有研究进展和监管措施表明,在确保风险可控的前提下,镜像分子研究具有可行性。新近提出的化学蛋白质合成方法能有效解决镜像蛋白质制备中的关键问题,在以人工智能驱动的蛋白质设计为代表的计算方法的辅助下,镜像蛋白药物候选物的发现与优化拥有巨大的临床治疗潜力;^[13]而一旦该药物进入产业化阶段,通过国家药监局建立的“生产-流通-使用”追溯系统,能够得到风险的全链条管控。^[14]相比之下,美国更加愿意承担创新风险,但容易弱化伦理审查的预见性功能,而欧盟则更强调风险防范,对两用生物技术应用限制较多,容易导致错失技术转化的黄金窗口。^[15]

然而,这并不意味着我们可以忽视潜在的伦理风险。镜像分子虽不像镜像生命那样因具有自主性而造成风险的不可控性,但有毒、致病或成为污染物的镜像分子依然具有危害性。^[5]朊病毒的案例警示我们,即使是非生命的分子,若具备结构性复制能力(如诱导同类蛋白质错误折叠),也可能引发多路径传播的风险:例如,朊病毒可通过动物排泄、尸体分解等途径进入土壤,与土壤组分结合,不同组分与朊病毒的结合差异明显,且这些作用同时发生、相互影响,共同决定了朊病毒在土壤中的传播。

^[16]因此,镜像分子由于对天然酶的耐受性和更高的结构稳定性,其潜在的环境滞留与积累风险需要被审慎评估。但关键在于,这类风险仍属于工具性技术的可控风险,可通过实验室生物安全规范、应用场景的风险-收益评估、分级监管等手段加以治理。

2. 镜像生命:系统性存在与生态不可逆风险

镜像生命的本体论特征是以镜像分子为基础,具备完整代谢-复制-结构稳定性的生命系统。与镜像分子不同,它不再是依赖人类控制的工具,而是具有自身存续逻辑的新型生命形态。现有研究表明,镜像生命能在多种条件下生存,它们可利用无手性,或在工程改造后利用手性营养物质生长,通过宿主或环境传播,甚至在自然环境中形成稳定种群,从而造成严重后果。^[4]由此,从莫朗热的定义来看,镜像生命完全符合生命的本质定义,且属于同地球生命同构异向的独立生命系统,这使它们与既有生物之间的关系将不可逆地进入生态与演化的宏观尺度。

这一本体论特征决定了镜像生命风险结构是生态系统性和不可逆性。其一,风险来源是生命自身的演化逻辑。镜像生命一旦被创造,便会遵循“生存-繁殖-演化”的生命规律,其行为不再受人类主观控制——例如,为适应环境而产生的基因突变,可能使其获得降解天然生物分子的能力,从而打破现有生态平衡;其二,风险影响范围是生物圈尺度。镜像生命与地球生命共享生态位,但缺乏天然的制约因素,因而可能通过竞争资源、传播未知病原体等方式,对现有生态网络造成结构性冲击;其三,风险后果具有不可逆性。生命演化是一个路径依赖的过程,一旦镜像生命融入生物圈,其对演化路径的改变将不可逆转,甚至可能导致部分物种灭绝、生态系统崩溃。

因此,缺乏对镜像生命风险的前瞻性认知,可能导致技术探索越出伦理边界。而我国在相关政策中明确将创造这类新物种合成研究列为高风险前沿技术,要求任何相关研究必须经过国家级伦理审查,提供了从源头上遏制风险扩散的可能性,^[17]体现了治理的前瞻性优势。

但需要澄清的是,镜像生命的高风险并不等同于高可行性。当前技术条件下,构建一个完整的镜像生命系统仍面临几乎不可逾越的理论与工程障碍:一是合成难度大:合成长多肽和膜蛋白困难,合成简化镜像核糖体多年未成功,成功后的核糖体功能也有限;二是组装难题:即使合成出简单细菌的镜像分子,也需正确折叠和精准组装才能形成功能复杂的镜像细菌;三是策略缺乏可行性:虽提出其他创造镜像生命策略,但无足够证据支持其可行性(如逐步将天然手性细胞转化为镜像细胞)。^[5]因此,当前对镜像生命的风险评估,并非为了应对现实威胁,而是旨在防范潜在可能性。这种前瞻性风险预警的本质是对生命演化边界的重视,而非对技术现实的过度焦虑。

3. 伦理资源错配的根源:本体论差异的忽视

镜像分子与镜像生命的本体论差异,决定了其风险结构、影响范围、可控程度的根本不同。但现有讨论的核心问题在于,将二者纳入同一伦理框架,导致伦理资源的系统性错配。

一方面,对镜像分子进行过度伦理评估。将其工具性风险夸大为生态性风险,导致治理资源向“禁止性规范”倾斜,忽视了其在药物研发等领域的潜在价值。例如,镜像分子作为药物载体,可显著提升药物稳定性、降低免疫反应,在癌症治疗、罕见病干预中具有重要应用前景,^[3]过度限制可能阻碍医疗技术进步。另一方面,对镜像生命的伦理评估过于简化。将其系统性风险简化为技术可控风险,试图通过加强实验室安全 and 提高监管等级等方式加以应对,忽视了对生物圈的根本冲击。这种简化实际上是对生命本质的认知不足,将新型生命等同于中性工具,低估其生命演化的不确定性与不可逆性。

更严重的是,这种错配会导致治理策略陷入非此即彼的困境:要么因恐惧镜像生命的风险而全面限制镜像生物学研究,要么因重视镜像分子的价值而放松对镜像生命的警惕。从根本上看,这是科技伦理治理中耽于笼统规范的常见问题——缺乏对技术对象本体论特征的精准把握,导致规范无法适配风险结构。因此,

突破这一困境的关键,是实现伦理评估的本体论校准,即依据镜像分子与镜像生命的存在形态,构建差异化的伦理框架与治理策略。

四、伦理转向:从“扮演上帝”到生态责任的差异化治理

要构建差异化治理策略,首先需要澄清当前科技伦理争议中的核心规范性话语“扮演上帝”。这一隐喻在合成生物学伦理讨论中被广泛使用,其核心诉求是:生命具有神圣性与特殊性,人类通过技术手段创造或重构生命,是对自然秩序的僭越。但这一论证在镜像技术的伦理评估中是无效的,它必须被生态责任框架所替代。

“扮演上帝”论证的失效,首先源于其宗教保守主义根源。美国主流生命伦理学的四原则框架(自主、不伤害、行善、正义),深深嵌入新教与天主教的宗教语境,其“诉诸自然”的论证逻辑在概念、形而上学、伦理层面均站不住脚。^[18]将这一框架应用于镜像技术,本质是将宗教性的神圣秩序转化为世俗性的伦理规范,忽视了技术演进中自然与人工的辩证关系。正如德布鲁所言,自然本身就蕴含着可延伸性,生物技术并非对抗自然,而是自然演化的延续和修补。([1], p.412) CRISPR/Cas9 技术源于大肠杆菌的防御系统,镜像技术基于生命的手性特征,均是对自然规律的利用与拓展。因此,“扮演上帝”的隐喻无法为镜像技术的伦理评估提供有效标准:它既不能说明为何镜像分子的应用是可接受的,也不能回答为何镜像生命的创造是不可接受的。

其次,这一论证无法转化为治理实践。即使承认其表达的道德不安,也难以将其转化为具体的治理标准。我们无法通过“是否僭越自然”来判断一项技术的风险等级,更无法据此制定监管措施。镜像生物学的伦理核心,并非人类是否有权创造生命,而是技术行动是否会导致不可逆的生态后果。这意味着,伦理评估的重心必须从形而上学的神圣性辩护转向面向未来的责任性考量——这正是约纳斯(Hans

Jonas)“责任原理”的核心主张:当技术行动可能改变生命存在的基本条件时,伦理的首要要求是“保护未来世代的生存可能性”。^[19]

针对这一伦理转向,需结合其本体论差异与国际治理比较,构建生态责任导向的差异化治理策略。这一策略既能契合我国新质生产力与伦理治理协同发展的本土语境,也可通过规避目前取得部分共识的所具有的单一化缺陷,展现中国方案的独特优势。

1. 镜像分子的治理:负责任创新与分级监管的闭环

镜像分子的工具性本质与局部可控风险,决定了其治理应遵循鼓励创新与风险可控相结合的原则,核心是构建负责任创新的闭环体系。^[20]

第一,建立阶段化评估+动态调整的监管机制。依据镜像分子的研发阶段(基础研究、应用研究、产业化应用)制定分级标准:基础研究阶段侧重实验室生物安全规范(如BSL-2级防护),重点防范样本泄露;应用研究阶段开展风险-收益评估,明确适用场景的安全边界(如药物研发需通过临床试验验证安全性);产业化应用阶段建立追溯系统,对生产、流通、使用全链条进行监管。这种分级监管既避免了“一刀切”的限制,也确保风险在可控范围内。

第二,强化科研主体+监管机构的协同责任。科研机构需建立内部伦理审查机制,对镜像分子的潜在风险进行前瞻性评估,并将风险防控方案纳入研究设计;监管机构(如国家卫健委、生态环境部)需制定专门的镜像分子安全标准,明确检测方法、排放标准与应急处置预案。同时,鼓励行业协会自主制定规范,形成“自我监管+行政监管”的双重保障。

第三,坚守“首次组装天然手性自我复制细胞”的红线。朱听团队提出的这一检查点,^[5]本质是划定了镜像分子研究的不可逾越边界。任何研究不得试图构建具备自主代谢和复制能力的生命系统,一旦触及这一红线,需立即启动最高级别伦理审查与监管干预。这一红线既为镜像分子的创新留出空间,也防止其向镜像生命的方向越界。

2. 镜像生命的治理:前瞻性评估与全球协作的审慎机制

镜像生命的系统性本质与生态不可逆风险,决定了其治理应遵循审慎克制与全球协同相结合的原则,其核心是构建前瞻性评估+禁止性底线的防护体系。

第一,明确“技术可行性不等于伦理可接受性”的原则。即使未来技术突破使镜像生命的创造成为可能,也不能将技术可行作为推进研究的理由。因此,需建立以生态影响为核心的前瞻性评估机制,组织跨学科团队(生物学、生态学、伦理学)评估其对生物圈的潜在冲击,包括生态位竞争、病原体传播、演化路径改变等。只有在评估结果表明风险可控(需有严格的验证标准),才能考虑有限度的基础研究。

第二,在强调人际关系与集体责任的共济原则下,^[21]设立全球协作+多边监管的治理框架。镜像生命的风险具有全球性,单一国家的监管无法有效应对。这一情况类似于生物技术武器化的潜在威胁,因此可在参考《禁止生物武器公约》的基础上,^[22]构建专门的镜像生命治理国际机制,如建立全球镜像生命研究数据库,强制科研机构报备相关研究计划;成立国际伦理审查委员会,对跨国合作的镜像生命研究进行统一评估;制定具有法律约束力的禁止性条款,禁止任何旨在构建可在自然环境中存续的镜像生命的研究。

第三,强化科学传播+公众参与的公共教育和认知共识。镜像生命的伦理争议涉及公众对生命本质和生态安全的认知,需通过科学传播消除误解。一方面,向公众澄清镜像分子与镜像生命的差异,避免不必要的技术恐慌;另一方面,通过公众听证会、科普论坛等形式,吸纳公众对镜像生命治理的意见,形成科学共同体、公众、政策制定者的三方共识。这既是提升治理合法性的需要,也是防范技术滥用的重要保障。如莫朗热所言,生物技术的风险不仅源于技术本身,也源于科研与公众的认知落差,而科学伦理的一大任务就在于解释性工作,^[23]这是统计数据和政策建议所无法覆盖的领域。

结 语

镜像生物学的伦理争议,本质上是技术演进与伦理认知不同步的体现。当技术实际上明确区分了镜像分子与镜像生命的实践边界时,伦理与治理仍停留在笼统规范的层面。本文通过历史认识论澄清了镜像生物学的概念谱系,以本体论分析区分了镜像分子与镜像生命的存在形态,结合国际治理与本土政策,构建了适配其风险结构的差异化治理策略。由此,我们可总结出如下核心观点,并为所有两用生物技术的伦理治理提供一般参考。

第一,镜像分子与镜像生命的本体论差异是伦理评估的基础。镜像分子是工具性技术构件,风险局部可控;镜像生命是整体性生命形态,生态风险不可逆。二者并非同一技术进程的连续发展阶段,而是具有本质区别的存在形态,因此不能套用同一伦理框架。这一区分是破解国际治理中目前仍普遍存在的创新与风险对立困境的关键。

第二,科技伦理治理需实现本体论校准。摆脱“扮演上帝”的形而上学诘问,转向“生态责任”的实践导向,使伦理规范从笼统禁止走向精准适配。明确两用生物技术的伦理责任具有未来导向、集体性质,与生态考量,是此处科技伦理治理从形式化走向实质化的关键。我国的治理策略正是基于这一校准,既避免了美国“创新优先”的弱约束性,也克服了欧盟“风险至上”的创新抑制,其后续工作应围绕各类问题制定具有针对性的措施。

第三,差异化治理是两用生物技术规范化的必然路径。镜像分子的“负责任创新+分级监管”与镜像生命的“前瞻性评估+全球协作”,既兼顾了创新激励与风险防控,也契合我国生物技术治理的本土语境与国际社会的共同诉求。与国际同类治理方案相比,此处提出的差异化治理策略具有坚实的生物学哲学基础,以及对生态责任的审慎考量,因而为全球两用生物技术治理提供了兼具灵活性与稳定性的中国方案。

第四,强化科学研究的解释能力。镜像生物学乃至两用生物技术引发的风险不仅源于技术自身,也源于科研、政策与公众之间的认知落差。因此,遵循加强相关领域治理与协作能力建设的要求,^[24]进一步将系统的科学解释与负责任的风险沟通纳入治理能力建设,明确技术对象在生物学本质和风险结构方面的差异至关重要。

最后,从更广阔的视角看,镜像技术的伦理治理也为两用生物技术提供了一个重要范本。科技伦理治理的核心,不在于限制技术,而在于澄清技术的存在形态与风险结构,通过精准的本体论分析与伦理校准,实现创新与规范的动态平衡。这既是应对前沿科技伦理挑战的有效路径,也是构建负责任的科技发展体系的核心要义。

[参考文献]

- [1] Debru, C. *Le Possible et Les Biotechnologies* [M]. Paris: Presses Universitaires de France, 2003.
- [2] Wang, Z., Xu, W., Liu, L., et al. 'A Synthetic Molecular System Capable of Mirror-Image Genetic Replication and Transcription' [J]. *Nature Chemistry*, 2016, 8: 698-704.
- [3] Sems, A. 'Mirror Life: Chirality in Biology and the Quest for a "Looking-Glass" Organism' [J]. arXiv preprint, arXiv: 202509.2452. 2025.
- [4] Adamala, K. P., Agashe, D., Belkaid, Y., et al. 'Confronting Risks of Mirror Life' [J]. *Science*, 2024, 386: 1351-1353.
- [5] Zhu, T. 'Should Research on Mirror-Image Molecular Biology Be Stopped?' [J]. *Nature*, 2025, 645: 588-591.
- [6] 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议 [EB/OL], https://www.gov.cn/zhengce/202510/content_7046050.htm. 2025-10-28.
- [7] 'Mirror Life: Inside the Discussion' [EB/OL]. <https://www.pasteur.fr/en/research-journal/news/mirror-life-inside-discussion>. 2025-07-22.
- [8] Pasteur, L. 'Recherche Sur la Dissymétrie Moléculaire des Produits Organiques Naturels' [A], Vallery-Radot, P. (Ed.) *Oeuvres de Pasteur (tome 1)* [C], Paris: Masson&Cie, 1922.
- [9] Gal, J. 'Louis Pasteur, Language, and Molecular Chirality. I. Background and Dissymmetry' [J]. *Chirality*, 2011, 23(1): 1-16.
- [10] Morange, M. *Pasteur* [M]. Paris: Gallimard, 2022, 232-

- 233.
- [11] Wang, J., Feringa, B. L. 'Dynamic Control of Chiral Space in a Catalytic Asymmetric Reaction Using a Molecular Motor' [J]. *Science*, 2011, 331(6023): 1429–1432.
- [12] Morange, M. *La Vie Expliquée?* [M]. Paris: Odile Jacob, 2010.
- [13] 任宇祥、韩东阳、石巍巍. 镜像蛋白质药物的开发: 化学合成、镜像噬菌体展示和计算设计 [J]. 化学进展, 2025, 37 (9) : 1261–1273.
- [14] 国家药监局关于药品信息化追溯体系建设的指导意见 [EB/OL], <https://www.nmpa.gov.cn/directory/web/nmpa/xxgk/fgwj/gzwj/gzwjyp/20181101100801272.html>. 2018–11–01.
- [15] 瞭望周刊社. 技术镜像下的伦理校准 [EB/OL], <http://lw.xinhuanet.com/20260224/96c3df430b6c47478d79372d42048c0d/c.html>. 2026–02–24.
- [16] 许欣怡、孙浩、吴桐 等. 土壤中朊病毒的传播与控制 [J]. 中国环境科学, 2025, 45 (6) : 3411–3419.
- [17] 关于印发《科技伦理审查办法 (试行) 》的通知 [EB/OL], https://www.most.gov.cn/xxgk/xinxifenlei/fdzdgknr/fgzc/gfxwj/gfxwj2023/202310/t20231008_188309.html. 2023–10–08.
- [18] 雷瑞鹏. 合成生物学研究和应用的伦理学论证——对“诉诸自然”论证的批判 [J]. 伦理学研究, 2022, (5) : 111–118.
- [19] 约纳斯. 责任原理: 现代技术文明伦理学的尝试 [M]. 方秋明 译, 香港: 世纪出版有限公司, 2013, 52–54.
- [20] 马诗雯、王国豫. 合成生物学的“负责任创新” [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35 (6) : 751–762.
- [21] 冀朋、雷瑞鹏、胡翌霖. 共济: 合成生物学安全伦理治理的原则和策略 [J]. 长沙理工大学学报(社会科学版), 2024, 39 (3) : 36–44.
- [22] 'The Security Implications of Developments in Biotechnology' [EB/OL]. <https://www.iiss.org/research-paper/2025/02/the-security-implications-of-developments-in-biotechnology/>. 2025–02–20.
- [23] Morange, M. *Contre les Vaccins?* [M]. Paris: Belin Éducation, 2024, 141–158.
- [24] 冀朋、雷瑞鹏. 镜像生命的创造: 科学、伦理与治理 [J]. 科学, 2025, 77 (5) : 44–48; 69.

[责任编辑 王巍 谭笑]