

镜像生物学的伦理前沿问题

Frontier Ethical Issues in Mirror Biology

冀朋 /JI Peng 雷瑞鹏 /LEI Ruipeng

(电子科技大学人文社科高等研究院, 四川成都, 611731)
(Advanced Institute of Humanities and Social Sciences, University of
Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan, 611731)

摘要: 镜像生物学作为前沿生物技术的最新发展,在医药、材料、食品、外太空探索等领域具有广泛应用前景。但2025年以来也引发了激烈的伦理争论,集中体现为镜像生物学的概念性伦理问题 and 安全性伦理问题。概念性伦理问题包括:创造新生命形式的价值问题、镜像生命的本体论和道德地位问题;安全性伦理问题包括:镜像生物导致的公共健康风险问题、生物安保和生态风险问题。研究表明,目前无论是出于伦理价值权衡,还是从产生的不确定性后果考量,镜像生物学关于镜像生命的研究都得不到伦理辩护。对于已实现或具有潜在利益的一般镜像分子研究,则需要进行审慎的判断和持续的风险评估,而不是过早地下结论,从而确保科技创新与负责任研究之间的平衡。

关键词: 镜像生物学 道德地位 公共健康 生物安保 生态风险

Abstract: As a cutting-edge development in biotechnology, mirror biology holds broad application prospects in fields such as medicine, materials, food, and space exploration. However, over the past year, it has also sparked intense ethical debates, primarily centered on conceptual ethical issues and safety ethical issues in mirror biology. Conceptual ethical issues include the value of creating new life forms, as well as the ontological and moral status of mirror life. Safety ethical issues involve public health risks posed by mirror organisms, as well as biosecurity and ecological risks. Research indicates that, whether from the perspective of ethical value trade-offs or consideration of the uncertain consequences, current studies on mirror life within mirror biology are not ethically justifiable. As for general mirror molecule research that has already been realized or holds potential benefits, a prudent judgment and continuous risk assessment are necessary, rather than drawing premature conclusions, so as to ensure a balance between technological innovation and responsible research.

Key Words: Mirror Biology; Moral status; Public health; Biosecurity; Ecological risks

中图分类号: B82-05; Q81-05 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2026.11.002 CSTR: 32281.14.jdn.2026.11.002

从人类基因组计划实施以来,人类解读、编写和制造生命日益成为生物学的研究主题。基因测序致力于解读基因这一生命密码本,基因编辑致力于编写和重构基因组,合成生物学致力于从头设计和制造生命体。镜像生物学

(Mirror Biology)^[1]在此基础上更进一步,创造与天然生命互为镜像的生物分子和生命系统。镜像生物学的研究被认为将在医学、材料、食品、外太空探索等领域具有不可替代的优势和广泛的应用前景。2024年12月《科学》

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: 2025年6月28日

作者简介: 冀朋(1989-)男,江苏兴化人,电子科技大学人文社科高等研究院特聘副教授,研究方向为科技伦理学、科技哲学。Email: pengji@uestc.edu.cn

雷瑞鹏(1973-)女,河南洛阳人,电子科技大学人文社科高等研究院教授,研究方向为生命伦理学、科技哲学。Email: lxp73615@163.com

(*Science*) 的一篇论文则打破了这一新兴研究领域的美好愿景,来自9个国家的38位领军科学家联合署名发表的4页论文和随附的299页技术风险评估报告指出,“善意的科学和技术发展很可能会最终导致镜像细菌的创造”,^[2]而镜像细菌这样的镜像生命(mirror life)“可能对人类、其他动物、植物和环境造成严重且广泛的潜在风险”。^[3]这一率先来自科学家群体的担忧无疑体现了科学自治下的负责任创新精神。但也有少数人表示,过分担忧和限制刚刚起步的研究不利于科学自由和创新,且忽视了该研究给人类提供的经济和健康价值等。

2025年以来,众多科学家、政策制定者、伦理学家及其他利益相关方就镜像生物学的伦理问题召开了多轮全球会议。本文将就2025年以来,全球关于镜像生物学伦理前沿问题的研讨进行介绍,并论证目前镜像生命研究及其前驱性技术的开发无法获得伦理辩护:在概念性伦理问题方面,镜像生命的创造不符合人类的理性判断和价值选择,目前难以界定镜像生物是否属于“自然类”(Natural kind)以及是否具有道德地位,人们尚未做好思想准备面对这一全新的存在形式;在安全性伦理问题方面,以镜像细菌为代表的镜像生物对人类公共健康和生命安全造成极大威胁,其特殊的手性(Chirality)结构容易被军事机构和恐怖组织利用以及可能导致毁灭性的生态灾难和物种灭绝,而人类目前尚无有效的防护手段以避免这些风险。

一、问题的提出

镜像生物学的伦理前沿问题源于镜像生物研究的出现和快速发展。尤其在人工智能和合成生物学赋能下,生命研究的数据积累和高通量筛选能力极大提升,改造天然生命形式和创造新生命形式的迭代周期快速缩短。这不仅推动了生物学研究范式的转变,让实验室生命研究提效降本,而且激发了科学家加速“生物可能性”^[4](biological possibility)的探究。生物可能性问题研究的不再是天然生命的解

释、修饰和复制问题,而是致力于地球上未被发现、宇宙中可能存在或根本未曾存在过的新物种形式。镜像生物学便是这种以探索“生物可能性”为目标的新兴研究领域。

1. 镜像生物学的出现

自然界所有已知生命都共享一组手性分子,这是一个长期的科学共识。所谓手性,是指同类生命分子基本都遵循相同的左旋或右旋(取譬于人握紧左右手时大拇指各自所指的方向),例如所有DNA和RNA都是右旋,而构成蛋白质的20种氨基酸中有19种都是左旋。相反手性的分子无法同向重叠,正如人的左右手或照镜子时人与影像的关系。^[5]因此,与天然手性相反的生物分子被称为镜像生物分子,由所有与天然手性相反的生物分子构建的生命被称为镜像生命。最早发现手性这一特征的是法国科学家巴斯德。1848年,还是巴黎高等师范学院年轻助教的他在研究酒石酸的双钠铵盐晶体时发现“每个晶体的一个棱上都有一个微小晶面,有时朝向右边,有时朝向左边,他用镊子将它们分开了”,完成了科学史上第一次人工手性拆分。^[6]第一次真正制造出相反手性的生物分子是在1993年,当时约翰霍普金斯大学的研究人员报告称,他们制造出了典型的左旋红氧还蛋白(Rubredoxin)的右旋版本。^[7]但那时,科学家们还不清楚制造的这些相反手性生物分子有何作用以及具有怎样的价值或风险,只知道制造它们的工序极其复杂、成本极其高昂。直到近年来,AI和合成生物技术的赋能,让成本和技术难题不再是横亘这一领域的鸿沟。2019年,美国国家科学基金会为启动镜像细胞研究提供了科研资助。2022年,科学家成功制造出镜像T7 RNA聚合酶。现在,镜像DNA、RNA的制造已经实现,关于镜像分子生物学中心法则的构建也在进行中。^[3]

2. “隐形”的镜像生命

著名遗传学家沃恩·库珀(Vaughn Cooper)假设了一个镜像细菌“隐形”繁殖、扩散和感染的未来场景:2036年,科学家们正在研究一类新型药物——用于对抗疾病的分子的镜像版本。其优点是作为反向化合物,它在人体内的

持续时间更长,因为破坏性酶无法识别并消灭它们。这些化合物能有效对抗入侵的微生物,临床试验前景乐观,团队渴望扩大生产规模。于是,研究人员转向工程镜像细菌(由反向分子组成的单细胞)来完成这项工作,正如当前制药公司使用细菌来生产用于糖尿病患者的合成胰岛素。出于对镜像细胞是否能以类似方式使用的好奇,科学家们对常见细菌大肠杆菌的镜像版本进行了实验。不幸的是,一位研究人员忘记戴上手套,不小心触摸到这些镜像细菌,细菌快速进入了她的血液。通常情况下,她的免疫细胞会杀死入侵者,但它们无法识别镜像细菌的镜像蛋白,因此无法做出反应。于是,这些镜像细菌开始在她体内繁殖。在家待了几天后,这位科学家病情加重。被送往医院后,医生给她服用了抗生素,但这些抗生素无法挽救她严重衰竭的免疫系统。三天后,她去世了。更糟糕的是,当她在家时,镜像细菌已传播到周围环境。她的猫把一些镜像细菌带到花园里,让它们生长在土壤里,而被感染的蠕虫和昆虫则将镜像细菌传播到整个社区。她的孩子们也将镜像细菌带到了学校,越来越多的人患病并开始死亡。随着人和动物的不停流动,新的疫情在其他地方逐一爆发。一个指数级的、不可逆转的镜像细菌扩散过程已经开始,不久之后将扩散至全球。^[8]

库珀认为这个场景不是科幻电影,而更接近现实。当越来越复杂的镜像生物分子被创造出来,常规的细菌细胞实现从头开始构建,以及前沿技术的快速会聚融合,极可能导致未来10-30年出现镜像细菌。但正如假设的场景所揭示,镜像生命具有反向结构,犹如穿了一身隐身衣,无法被现有地球生物的免疫系统识别和消灭。这种新的物种形式无疑对地球生命是一种降维打击,甚至是毁灭性灾难。对此,我们亟需进行伦理反思。

二、概念性伦理问题

镜像生物学研究为人类打开了一扇未知的天窗,这扇天窗有着双重含义,冲击着人类的

精神和身体。在精神层面,人类面临是否应该创造不属于地球的镜像生命的道德拷问?面对镜像生物分子及镜像细菌这类“手性”相反的存在形式,我们如何界定它的本体论和道德地位?我们称之为概念性伦理问题。在身体层面,“隐形”的镜像生命对人类生命健康和地球生物系统的威胁存在巨大的未知和不可控制性,并且这种威胁将延续给后代及其他物种,我们应该如何做出抉择?我们称之为安全性伦理问题。这两类问题皆涉及人类关乎镜像生物学研究和应用的价值思考与最终选择。

1. 人类应该创造镜像生命吗?

虽然目前大多数科学家都反对创造镜像生命,但也有极少数人保持一种开放或怀疑态度。例如,正在致力于研发治疗性镜像RNA的德国阿普塔里翁生物技术公司(Aptarion Biotech AG)创始人兼首席执行官斯文·克卢斯曼(Sven Klussmann)认为目前不应过早地限制镜像生命研究。^[9]其立场显而易见与背后的巨大利益不无相关。中国镜像生物学先驱朱昕反对抹杀镜像生物学的所有研究,认为创造镜像生命形式是一个“遥远的地平线”,我们应该区分清楚镜像分子生物学与镜像生命的研究,反对后者的基础研究和资助毫无疑问,但对于后者“除了考虑假设情境的风险(指创造镜像生命)之外,重要的是要牢记已经在进行的镜像分子生物学研究已实现的和潜在的好处”。^[10]另一方面,从基因重组技术、辅助生殖技术、克隆技术到基因编辑技术等,无一不在开始出现时就引发担忧和反对,对有些生物学家而言,这次关于镜像生命研究的反对似乎没有本质不同。然而,有一个事实不容忽略,即过往技术对生命的修饰、改造乃至合成,是因为人们清楚它的结构和功能——对天然生命的复制和有限修饰,其风险是可控的。这类研究不仅有积极的现实用途,还能帮助我们更好地理解天然生命。但正如对所有不甚了解和不知道如何控制的新鲜事物保持警惕与恐惧一样,人们对镜像生命的出现则天然地存在恐惧心理。即使科学家可以根据现有的生命知识推断镜像生命的结构和功能,但对于其可能的风险不可控这一点,足

以令人望而却步,更何况还存在那些未知的、不确定的风险。这种恐惧,不仅是人类本能的心理反映、对不能承受的罪责下的理性约束,更是对守护未来和其他生命存在的价值选择。

2. 镜像生物属于“自然类”吗?

关于镜像生物,更深层次的问题是一直未能引起哲学界反思的一个根本性问题——镜像生物究竟是什么?科学家们冠以镜像分子、镜像生物或镜像生命。但事实上,除了一些极少数镜像分子在地球上仍然存在,镜像生物或镜像生命至今并未出现在地球上,它似乎不遵循自然界的选择和进化机制,或者是最初就被淘汰掉的异类物种。我们通常将不属于某生态域的物种称之为外来物种,他们往往表现出入侵者的特征,造成本来稳定的生态域失衡,大量本地物种因此减少或灭绝。但这些入侵者至少是地球生命,我们有足够的知识了解或识别它们,清楚地知道它们是什么,从而进行生物或物理防控。生态域中的生物也会很快识别到它们而做出斗争的选择。不管怎样,它们同属于地球上的“自然类”。^[11]镜像生物或镜像生命则超出了人类的认知。即使在最普遍的意义上,我们也无法给予它一个“自然类”的本体论地位。镜像世界的生命与自然界的生命之间将长期隔着一层叫做未知的“镜子”,它能激发科学家极大的好奇心和探索欲,而当它穿越镜像世界来到我们面前时,我们只能慌张地发现,生命世界没有它的位置。这或许比穿越平行世界面对面地撞见另一个自己更让人困惑和恐慌。尽管“镜子”的隐喻也用于物理学家关于平行世界的叙事,但镜像生物学家深知,相比平行世界,镜像世界已是掌握在人类手中的潘多拉魔盒,打开它只是迟早的问题。现有的镜像生物学知识告诉我们,镜像生物应该与自然生物具有相似的演化特征,它们遵循镜像分子生物中心法则。这种描述指向了一种观点,即将镜像生物视为生物体的存在,从而模糊了它与自然生物的差别。然而,这种未加审视的本体论承诺无疑过早,只会导致一些人忽略镜像生物潜在的风险和巨大的不确定性。

3. 镜像生物有道德地位吗?

尽管镜像生命短期内不会出现,但镜像生物分子已经真实地出现在科学家的实验室里。由于现在镜像生物的本体论地位不明,我们很难界定是否应该予以镜像生物或镜像生命相适应的道德地位。现有的讨论基本上反对创造镜像生命,但正如贺建奎可以无视国内外关于禁止基因编辑技术用于非医疗的生殖系基因试验,创造出世界上首例“基因编辑婴儿”^[12]双胞胎,我们也有理由担心,在不久的将来,无视禁令和处罚的创造镜像生命行为的出现,它可能不会出现在中国、美国、英国等伦理与法治相对健全的国家,但因为恶意的“伦理倾销”(Ethics Dumping)^[13]很有可能出现在非洲的布基纳法索、东南亚的金三角地区等。如果未来真的创造出镜像生命,我们该如何对待它?当作入侵的外敌进行“扑杀”,还是当作宠物进行“豢养”,或者当作新型生物机器帮助我们研发药物、改进治疗效果?对于镜像细菌这样的物种,将它视作外敌或生物工具是目前主流的观点。但如果是一个镜像动物或“镜像人”呢?联名发表前述《科学》论文并呼吁“直面镜像生命风险”的著名遗传学家乔治·丘奇(George Church)早在2012年所著《再创世纪:合成生物学将如何重新创造自然和我们人类》一书中曾提出“镜像人”的设想。他指出,在过渡期内镜像人将与自然人并存,并估计“如果镜像病原体也出现的话,那么这两个物种之间将会趋于平衡”。^[14]那时他还未曾想到镜像生命今天被如此视作“大敌”,同样他也未考虑过如果镜像人出现,人类将如何对待他们,他们是否与人类一样具有同等的道德地位。这个棘手的问题恐怕比当初因担心克隆人的出现所引起的争论更加难以解决。因为克隆人毕竟源于自然人,差异总归有限,而镜像生命则不然。

三、安全性伦理问题

镜像生物学作为新兴的两用生物技术,与过去所有生物技术存在明显不同之处——巨大的不确定性和不可控制性,这主要体现在对人

类的健康和生命安全造成巨大威胁、严重扰乱和破坏现有生态系统稳定以及损害其他物种利益等安全性伦理问题方面。2026年5月,联合国秘书长科学顾问委员会发布的简报中建议各成员国“在镜像生命成为现实之前,采取主动的多边治理行动——包括设全球论坛、划红线、加强安全监测、建立负责任的监管政策”,^[15]将镜像生物学安全性伦理问题的重要性提升至不亚于核武器扩散、全球疫病大流行等全球关键议题。

1. 公共健康风险问题

在《镜像细菌技术报告:可行性与风险》中,报告以镜像细菌为例,提出了对人类健康造成威胁的五个方面:^[3]一是人类先天免疫系统对镜像细菌的检测能力可能会显著受损;二是镜像细菌很可能对大多数先天免疫反应具有抗性;三是人体对镜像细菌的适应性免疫可能会受损;四是镜像细菌有可能穿透屏障表面并迁移到人体血液和组织中;五是镜像细菌有可能在血液中复制并引起致命的全身感染。其主要原因是,在几百万年的人类进化过程中,我们的免疫系统已经进化出对细菌复杂且分层的免疫反应,能够识别许多细菌共有的分子特征,并触发免疫反应以限制它们的入侵,但是我们的身体不太可能发现分子结构相反的入侵者——镜像细菌。因为我们的免疫机制有许多免疫防御手段也依赖于手性相互作用,这好比用错误的钥匙永远插不进锁孔。这意味着,科学家在实验室里创造出镜像细菌、有毒或致病的或因为“太有用而成为污染物的镜像分子”,^[10]一旦因为管理、防护不当或意外逃逸、恶意滥用,便会出现前文沃恩假设的未来场景。事实上,即使是在安全等级最高的实验室(如BSL-4实验室)里进行相关研发,也难以完全避免事故风险。过去已有多起相关事故被报道,例如美国发生过数次生物实验室安全事故。^[16]因此,有理由担心,镜像生命的出现会导致人类生存空间更不安全,一场比新冠病毒(SARS-CoV-2)更加致命的全球大流行将可能带走数以亿计的生命。在镜像生命研究如此巨大的风险面前,其给人类带来的利益再多,也显然得不

偿失,自然也得不到伦理辩护。

2. 生物安保问题

镜像生命难以识别的反向结构,天然地容易被视为绝佳的“隐形”生物武器,因此不仅在医疗上颇受青睐,也极易被军事机构和恐怖组织用作“杀手锏”,从而构成战争或勒索威胁。在二战期间,臭名昭著的日德法西斯曾在侵略战争中多次发动过细菌战,并进行惨无人道的活人体实验。即使在《1972年生物武器公约》发布后明确禁止一切进攻性生物武器的开发,仍有多个国家秘密非法开展过相关计划,包括萨达姆统治下的伊拉克、种族隔离时期的南非等,而尝试研发生物武器的恐怖组织就更多了,例如基地组织、奥姆真理教,等等。^[3]这些恶意滥用生物技术的行为明显违背不伤害的伦理原则。尽管科学家声称,现在距离创造一个完整的镜像细菌还需10-30年,但一旦创造出第一个镜像细菌,依靠现有基因工程技术,去复制更稳健、更具多样性的镜像细菌将相对容易很多,而且这些镜像细菌如果实现接触还可能自动发生基因交换,导致实验室生物防护策略完全失效(如营养基因缺陷型镜像细菌通过彼此基因交换不再具有该缺陷,从而摆脱生存脆弱性)。当镜像细菌一旦进入自然环境,自然进化也可能导致意想不到的风险。这表明无论是通过人类现有技术,还是依靠其自身和环境,关于镜像细菌的知识与技术工具箱就如同“潘多拉的盒子”,一旦打开便不可控制。2025年巴黎镜像生命风险会议报告已得出结论:目前还没有已知的物理或生物遏制策略可以完全确保镜像细菌免遭故意释放。^[17]

3. 生态风险问题

镜像生物因为相反的手性,不仅无法被人体免疫系统识别和攻击,也同样无法被自然界其他物种识别和消灭。地球上所有的动植物基本上都依赖于手性作用机制保持生存率和死亡率的平衡与稳定。在自然作用下的物种灭绝进程缓慢,但人类干预自然选择和进化的行为已然加速诸多物种灭绝或濒临灭绝,创造镜像生命无疑是雪上加霜。镜像生物一旦逃逸或释放到自然中,几乎没有天敌。^[18]最初的镜像生物

可能因为只能依赖非手性营养物质,不会快速繁殖,但自然进化影响和人类技术干预,可能导致镜像生物这一缺陷逐渐消失(只要在此期间其繁殖率大于死亡率),从而成为地球上其他物种的灾难。它们无法被消灭,但它们不仅寄生、感染和杀死其他物种,而且掠夺其他物种的生存资源以扩大繁殖,最终打破食物链结构平衡,站到食物链顶端,进一步加剧地球物种灭绝和生态系统紊乱。^[19]由此,在关于镜像生物研究和应用方面,人类的决策除了出于自身利益的优先考虑,还应当负有保护自然环境及其他物种一定生存利益的义务,这不仅是生态伦理的原则要求,其实也是关乎人类自身生存和发展的内在要求。因为生态一旦破坏,必将反噬人类自身。然而,如前所述,人类在面临镜像生命的防护方面并无可靠应对之策,甚至对它们知之甚少。一个连自己都不知道是什么的、且不可控制、存在巨大不确定性的存在形式,人类将它实体化的结果不仅将戕害自身,还将破坏生态环境和灭绝其他物种,这种“损人不利己”的行为显然不合乎伦理要求。

结 语

镜像生物与自然生物存在手性上的相反结构,其出现不仅挑战人类关于生命的认知,引发是否应该创造镜像生命的道德难题和镜像生物在本体论、道德地位上的争议,而且将对地球生态和包括人在内的所有物种构成不可控制、难以防护的巨大威胁。尽管镜像生物学可能推动新一轮生物经济变革,将给医疗制药、能源材料、外太空探索等诸多领域带来创新价值,但就其巨大风险与潜在受益相比,当前禁止镜像生命研究无疑是明智且合乎伦理的选择。但正如德国生物学家扬-沃尔夫哈德·凯尔曼(Jan-Wolfhard Kellmann)所言:“创造知识意味着:进行试验。这包括设计并批准相关实验,以便能够进行必要的安全性评估”,而“面向社会意味着:在考虑可能出现的风险的同时,也要审视机遇,并在兼顾国民经济和自然保护利益的前提下利用这些机遇”。^[20]镜像生命研

究固然存在巨大的不确定性、不可控制性和高风险性,但也应该看到并非镜像生物学所有研究都是如此,我们需要将镜像生命研究包括镜像细菌、有毒或致病的镜像分子研究与一般镜像分子生物学研究区别开来,因为后者已实现或潜在的益处远远大于其风险。^[21]此外,致力于安全防护的镜像生命相关研究也应该提早考虑,否则一旦出现镜像细菌,我们将没有任何抵御的能力。所以,当前最重要的是谨慎划定研究禁区,对相关研究进行更为审慎的判断和持续的评估,而不是过早地下结论,从而确保科技创新与负责任研究之间的平衡。

[参考文献]

- [1] Zhang, G., Zhu, T. 'Mirror-image Trypsin Digestion and Sequencing of D-proteins'[J]. *Nature Chemistry*, 2024, 16: 592-598.
- [2] Adamala, K. P., Agashe, D., Belkaid, Y., et al. 'Confronting Risks of Mirror Life'[J]. *Science*, 2024, 386(6728): 1351-1353.
- [3] Adamala, K. P., Agashe, D., Binder, D., et al. 'Technical Report on Mirror Bacteria: Feasibility and Risks'[EB/OL]. <https://doi.org/10.25740/cv716pj4036>. 2024-12-12.
- [4] Simons, M. 'The Diversity of Engineering in Synthetic Biology'[J]. *NanoEthics*, 2020, 14(1): 71-91.
- [5] 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.
- [6] Vantomme, G., Crassous, J. 'Pasteur and Chirality: A Story of How Serendipity Favors the Prepared Minds'[J]. *Chirality*, 2021, 33(10): 597-601.
- [7] Zhao, L., Lu, W. 'Mirror Image Proteins'[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2014, 22: 56-61.
- [8] Cooper, V. S. 'Deadly "Reverse" Cells Can Destroy Us Unless Scientists Stop Them'[EB/OL], *Scientific American*, <https://www.scientificamerican.com/article/lifes-evil-twins-mirror-cells-could-doom-earth-if-scientists-dont-stop-them/>. 2026-01-20.
- [9] 王方. “镜像生命”研究红线应划在何处? 专家们忧心忡忡[N]. *中国科学报*, 2025-09-18(1).
- [10] Zhu, T. 'Should Research on Mirror-image Molecular Biology Be Stopped?'[J]. *Nature*, 2025, 645(8081): 588-591.
- [11] 陈明益、李佐. 分类多元论会导致类概念的消去论吗? ——以物种和自然类为例[J]. *系统科学学报*,

- 2026, (4) : 77–83.
- [12] Lei, R., Zhai, X., Zhu, W., et al. 'Reboot Ethics Governance in China'[J]. *Nature*, 2019, 569(7755): 184–186.
- [13] Bélisle-Pipon, J., Victor, G. 'Ethics Dumping in Artificial Intelligence'[J]. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 2024, 7: 1–9.
- [14] 乔治·丘奇、艾德·里吉西. 再创世纪: 合成生物学将如何重新创造自然和我们人类[M]. 周东 译, 北京: 电子工业出版社, 2017, 16.
- [15] SAB. 'Mirror Life: Brief of the Scientific Advisory Board'[EB/OL]. https://www.un.org/scientific-advisory-board/sites/default/files/2026-03/Mirror_Life_Brief_English-18.pdf. 2026–09–18.
- [16] 张梦旭. 美国科学家长期研究人工冠状病毒合成技术[N]. 人民日报, 2021–08–18 (16).
- [17] Agashe, D., Cai, P. Y., Chang, M., et al. 'Paris Conference on Risks from Mirror Life: Meeting Report'[EB/OL]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17080675>. 2025–09–09.
- [18] 季时冬. 镜像生命的故事: 从迷人构想到空前威胁[J]. 世界科学, 2025, (6) : 31–34.
- [19] Li, Y., Moradialvand, M., Asbridge, L. A., et al. 'Mirror Life: Bridging Chirality, Ethics, and the Foundations of Life Creation'[J]. *Advanced Materials*, 2025, 38(3): e10791.
- [20] Kellmann, J. W. 'Synthetische Biologie: Mirror Life-spiegelverkehrtes Leben?'[J]. *BIOspektrum*, 2026, 32(1): 3.
- [21] Jin, Z., Wang, Y., Cui, S., et al. 'Effects of Mirror-image Nucleosides on DNA Replication and Transcription in Human Cells'[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 2024, 301(2): 1–14.

[责任编辑 李斌]