

引用格式: 马征远, 熊燕, 陈大明. 数字化驱动的生物经济发展[J]. 世界科技研究与发展, 2024, 46(1): 36-44.

数字化驱动的生物经济发展^{*}

马征远^{1,2} 熊燕^{*,1} 陈大明^{*,*,1}

(1. 中国科学院上海生命科学信息中心, 中国科学院上海营养与健康研究所, 上海 200031;
2. 上海WTO事务咨询中心, 上海 200336)

摘要: 生物经济是继农业经济、工业经济和信息经济之后的一种新经济形态, 以生命科学和生物技术的创新与进步为驱动力, 以生物资源的保护与利用为基础, 以深度融合健康、医药、农业、能源、环保、材料等产业为特征。生物经济也是典型的知识密集型经济, 数字化赋能打通了生物经济从“数据→信息→知识→应用”的转化链条, 能提升复杂生物系统的测量与解析、调控与干预、设计和创造能力, 促进生物技术向可定量、可计算、可调控、可预测的方向跃升, 提高生物资源的保护和利用效率, 并激活生物经济发展的新动能。本文在解析生物经济形态的生产要素、生产力和生产关系特征的基础上, 探讨了数字化驱动生物经济发展的路径, 研究了生物经济发展的挑战及可能的数字化治理策略, 并提出针对性的策略建议。

关键词: 生物技术; 生物经济; 数字化; 知识

DOI: 10. 16507/j. issn. 1006-6055. 2023. 05. 001

Development of Digital-driven Bioeconomy^{*}

MA Zhengyuan^{1,2} XIONG Yan^{*,1} CHEN Daming^{*,*,1}

(1. Shanghai Information Center for Life Sciences, Shanghai Institute of Nutrition and Health, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 200031, China; 2. Shanghai WTO Affairs Consultation Center, Shanghai, 200336, China)

Abstract: Bioeconomy is a new economic form after agricultural economy, industrial economy, and digital economy. Its driving force mainly includes the use of biological resources, the coupling of biological data, and the innovation of biotechnology. Among them, the introduction of digitalization, because it opened up the “data → information → knowledge → application” transformation of the knowledge-intensive bioeconomy, improved the protection and utilization efficiency of biological resources, and enhanced the measurement and analysis, regulation and intervention, design and creative capabilities of complex biological systems. It promoted the direction of biotechnology towards quantitative, computing, regulatory, and predictable, and activated the kinetic energy of biological economy. Based on the analysis of the production factors, production relations and productivity characteristics of bioeconomy, this article has explored the developing path of a digital-driven bioeconomy, studied the challenges of bioeconomy development and possible digital governance strategies, and proposed targeted suggestions.

Keywords: Biotechnology; Bioeconomy; Digitalization; Knowledge

^{*} 中国科学院青年创新促进会人才项目(2020275), 中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项“生命与健康-重大创新领域战略规划研究(人口健康)” (GHJ-ZLZX-2021-08)

^{**} E-mail: yxiong@sihs. ac. cn

^{***} E-mail: chendaming@sihs. ac. cn

面对人口与健康、资源与环境、农业与食品、能源与信息等重大社会需求,利用生物资源、整合生物数据、创新生物技术、开发生物产品、提供生物服务、保障生物安全,已成为实现社会和经济可持续发展的关键路径。在生命科学不断发展、生物技术迭代突破的驱动下,生物经济作为继农业经济、工业经济、信息经济后的新经济形态,成为各国(地区)竞相布局和发展的战略重点。生物经济是典型的知识密集型经济,如何发现知识、挖掘知识、更新知识、利用知识,成为生物经济发展的核心和基础。要实现这一目标,离不开从数据到知识的转化:通过生物资源的研究和开发,结合生物技术和数字技术获得信息;利用生命科学与人工智能等的交叉融合,深入理解生命活动的基本规律;遵循生命活动规律的本质特征,形成不同层级、应用于各类场景的知识体系,进而驱动生物经济的迭代发展。由此,从数据到信息、从信息到知识、从知识到应用的转化链条,构成了生物经济的核心价值链,其中数字化(digitalization)成为重要驱动力。

可以说,数字化驱动已成为生物经济发展的重要动力,与生命科学知识的系统化进程,共同构成生物经济源头创新发展的“双螺旋”,驱动生命科学研究新范式、生物技术新体系的形成,加速生物产业发展新模式的演进,促成从“万物互联”到“万物共生”的跃迁。作为信息处理及转化的革命,数字化在以系统地认识生命、精准地调控生命、高效地改造生物体、有序地设计人工生物体系的进程中发挥着重要作用,能提高生物经济的生产要素整合利用效率,重构生物经济的生产关系,促成从原先的“碎片化”研发和应用形态向“系统化”形态的转变,并极大提升生物经济的生产力,深化生物经济的内涵和外延。在这样的时代背景下,

深入探讨如何以数字化赋能为基础,以“数据→信息→知识→应用”的转化提升为纽带,提升生物技术与数字技术的“会聚”能级,驱动生物经济与农业经济、工业经济和信息经济的协同发展,具有重要的现实意义。为此,本文以生物技术与数字技术的交叉融合为主线,梳理了数字化驱动下的生物经济发展场景,探讨了治理的策略和方案,以期为我国生物经济的高质量发展提供参考。

1 生物经济与数字化驱动的特征

1.1 生物经济概念的发展历程及特征

20 世纪下半叶以来, DNA 双螺旋结构的发现、基因克隆技术及基因测序等技术的突破,推动了生命科学和生物技术的快速发展和应用,为生物经济的发展奠定了基础。20 世纪末,美国率先发布《开发和推进生物基产品和生物能源》报告,提出“以生物为基础的经济(Biobased Economy)和生物基产品(Biobased Products)”^[1],生物经济相关的理念开始进入全球视野。2000 年,美国管理咨询专家 Stan Davis 和 Christopher Meyer 首次明确提出“生物经济(Bio-economy)”概念,认为人类正处在信息经济时代的中期,该时代大约到 21 世纪 20 年代结束,接着将迎来生物经济时代^[2]。虽然在当时,生物经济尚未形成明确的定义,但这种新的经济发展模式引起了国内外不少学者的重视^[3-6]。此后,一些国家(地区)相继对生物经济的内涵及范畴予以界定^[7-14]。

例如,经济合作与发展组织(Organization for Economic Co-operation and Development, OECD)在其 2004 年发布的《可持续增长与发展的生物技术》报告中,将生物经济定义为“利用可再生生物资源、高效生物过程以及生态产业集群来生产可持续生物基产品、创造就业和收入的一种经济形

态”。2005 年,美国兰德公司提出“信息技术将让位于生物技术,生物技术将引领新科技革命”。同年,欧洲将生物经济概括为“以知识为基础的生物经济”(简称“生物经济”),其含义是:生物经济是一个浓缩性的术语,它能够描述在能源和工业原料方面不再完全依赖于化石能源的未来社会;也有的理解为“将生命科学知识转化为新的、可持续、生态高效并具竞争力的产品”^[7]。2022 年,美国拜登总统发布的《关于推进生物技术和生物制造创新以实现可持续、安全和有保障的美国生物经济行政令》对生物经济的界定有了进一步延伸:生物经济是指源于生命科学的经济活动,尤其是在生物技术和生物制造的相关延伸领域,囊括了其相关产业以及劳动力、衍生产品和服务^[15]。相较而言,我国有关生物经济范畴的界定也经历了不断完善的过程。2005 年以来,中国政府先后出台多项促进“生物产业”“生物技术”发展的相关政策文件^[13],2022 年国内首部《“十四五”生物经济规划》出台^[14],对生物经济内涵延伸至生物医药、生物农业、生物制造、生物能源、生物材料、生物资源、生物安全、生物服务与生命科学等数十个领域,成为国际上生物经济涉及范畴最广泛的国家之一。

总体来看,尽管各国(地区)在不同阶段、不同场景下对生物经济概念及内涵的理解不尽相同,但其前提与基础都离不开对生物资源的开发与利用,生物技术是生物经济发展的重要引擎与推动力,其应用场景涉及生物产品与服务的研发、生产、流通、消费、贸易等各环节。此外,多国对生物技术引领下的变革式发展寄予厚望,几乎所有生物强国都已制定生物经济国家战略,尤其是美国、德国、芬兰等国家还对本国生物经济发展政策进行了持续更新与不断调整,以期最大化地发挥

生物经济在宏观经济中的引领作用^[16]。总结这些国家(地区)的发展战略,可以发现,从传统资源密集型经济向知识密集型演进,是“生物经济”作为新经济形态备受重视的重大背景。正是由于生物经济具备知识密集型经济的特点,各国(地区)都将数字技术与生物技术的融合发展作为重要的战略支点加以布局,生物经济与数字经济在时代发展进程中呈现出高度重叠的周期性特征。与消费等领域的应用场景等不同,生物经济的发展高度依赖“数据→信息→知识”的转化链条,因而在将数字技术作为生物经济发展的底层技术的同时,生物经济又有其明显的知识系统化、技术耦合化、治理协同化等特征。这就需要在经济发展与治理模式的视角下,深入探讨数字经济及与生物经济融合发展的内涵和框架,进而为阐明发展路径提供基本依据。

1.2 数字化驱动的生物经济发展框架

近年来,随着信息经济的深入发展,数字技术的快速发展和广泛应用衍生出数字经济,人类社会进入后信息化时代。其典型特征是以数字化的知识和信息作为关键生产要素,以数字技术为核心驱动力,以现代信息网络为重要载体,通过大数据的“识别—选择—过滤—存储—使用”,引导资源的快速优化配置与再生,驱动科技创新的演变、社会生产方式的改变及生产效率的提升,从而加速重构经济发展与治理模式。从数字经济的内涵及主要形态看,主要包括四部分内容^[17]:一是数字产业化,即信息通信产业;二是数据价值化,当前数据已成为现代化经济体系的关键生产要素,任何新兴技术及高科技产业的发展均离不开通畅的数据供应链,通过数字化技术的引入,在数据采集、数据标准、数据确权、数据定价、数据交易、数据流转及保护等过程对新兴业态的生产要素予以

进一步提炼与规范;三是产业数字化,即传统产业应用数字技术所带来的产出增加和效率提升部分,通过数字技术在农业、工业、服务业等的应用,对各产业进行智能化“赋能”;四是数字化治理,重点通过“数字技术+治理”的技管结合,为经济形态中的多元化参与主体提供协同的治理架构,从而达到优化与重塑生产关系的目的(图1)。

当前生物经济已进入知识密集型发展阶段,其中现代测量与解析等技术的发展促进多组学、多尺度、多层次的生命数据的识别,分析与模拟等技术的发展推动分子、细胞、组织、器官、个体层面的生物信息的筛选与集成,调控与构建等技术的发展催生了生物知识的产业化应用,数字化的知

识和信息成为必不可少的要素。美国国家科学院2019年在对生物经济发展的系统评估中指出,“美国生物经济是由生命科学和生物技术的研究与创新驱动,并由工程、计算与信息科学的技术进步实现的经济活动”,明确将数字技术相关要素视为驱动生物经济发展的四大决定性因素之一^[18]。综合来看,生物经济需要打通“资源→数据→信息→知识→应用”的价值转化链条,其生产要素的开发过程离不开数据要素的融合和信息集成,其转化过程需要知识驱动,其面向产业化的应用及流程监管过程需要数字技术的支撑与赋能。数字技术作为现代化经济体系的重要组成部分,必将在生物经济的数据价值化、产业数字化以及数字化治理

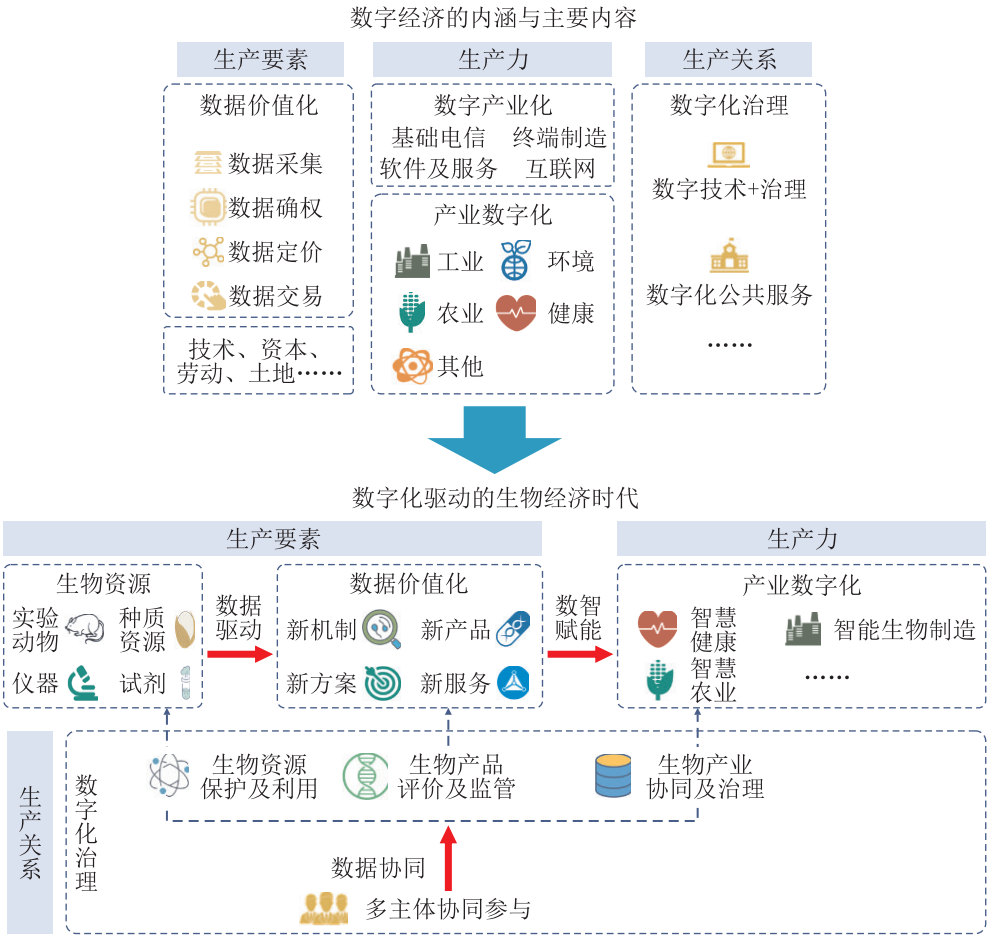


图1 数字化驱动下的生物经济内涵

Fig.1 The Connotation of Digital-driven Bioeconomy

等多个环节中起到重要的支撑作用,为生物经济的发展提供了关键性的驱动力。

2 数字化驱动生物经济发展的路径

在生物经济的创新链和价值链发展中,数字化驱动的效应突出体现在生物技术创新环节的加速迭代,生物产业应用环节的智能化变革,以及生物经济治理过程中的统筹决策。在这些核心环节中,数字技术作为关键内源性动力,在生物经济的发展中起着“承上启下”的作用,驱动了研究范式向数据密集型和知识密集型的方向转化,重构了生物技术研发和生物产业的组织模式,促进了生物技术与其他技术在生产要素、生产方式、流通监管及治理模式等层面的交叉渗透,带动新型经济范式的加速构建,从而实现生物经济的效率提升与价值升级。

2.1 基于“数据驱动”的生物技术创新

人类基因组计划实施以来,生命科学开始向数据密集型的研究范式演进,组学技术、单分子技术、单细胞技术、分子影像等新技术和新工具的不断涌现,使得生物数据的采集和分析朝着高精度、高效率、高通量方向发展。数字化技术的进步,为生命科学知识体系的爆炸性扩张创造了条件,由此助力科学家得以从系统化的视角去揭示生命活动的基本规律。近年来,以系统生物学为代表的系统化研究、以合成生物学为代表的工程化研发相辅相成,进而将生物技术的创新推至前所未有的新高度^[19]。

从生物技术的创新起点看,海量生物数据的增长,推动了“数据驱动”与“假说驱动”两种研究范式的融合,提升了人类对于生命本质的系统性认知,为知识密集型的生物经济发展奠定了基础。在此过程中,对生命现象的连续化、动态化、

系统化解析,使得系统刻画生命的物质转化、能量代谢、信息传递机制成为可能。此外,机器学习等先进大数据技术正在显著提高人类在大型复杂数据集中观察非明显模式的能力。生物数据集不仅可与医学临床观察结果、植物育种记录、家庭历史记录、工作场所暴露数据等不同来源的数据配对,人工智能更进一步加深了对其中因果关系、基因型及表型相互关系的认识及理解,催生了新的机制学说的涌现。

从生物产品的研发流程看,得益于系统化数字思维的引入,生物设计自动化(BioCAD)、全细胞模型等方面的分析工具得以发展,生物3D打印、器官芯片等新型产品得以开发,极大地扩展了生物产品的试验范围与应用领域。在临床试验、田间试验、工业小试和中试等相关测试场景中,试验效率得以大幅提升。从生物数据集采集端看,简便、灵敏、准确的数据采集提升了试验的标准化水平和采集效率,并通过精确、深度、实时的数据分析,有效提高了试验操控的能力。近年来,伴随着系统化的数据平台构建,有效驱动了一体化的生物样本和生物数据的处理能力提升,使得智能化、个性化的生物设计方案成为可能,为更多生物创新新产品、新服务的诞生奠定了基础。

2.2 基于“数智赋能”的生物产业变革

数据要素的全面运用,使生物技术的工程化开发具备了强有力的工具支撑,从而带来生物产业多业态场景下的变革与提升。由此,生物产业加快向数字化、智能化的方向迈进,极大地改变健康、工业、农业、信息、环境、国防等领域的应用态势,催生智慧健康、智能生物制造、智慧农业等新业态,驱动新一轮的产业变革。

在智慧健康领域,数字化驱动了传统医疗诊治方案及服务理念的全面变革,通过更精细、更准

确的疾病分类及临床转化试验,提供更精确的诊断和治疗,为数字健康监测、智能诊断、电子处方、移动医疗、远程医疗等新模式的发展提供了可能。这些转型和变革,在为人们的健康管理和疾病诊疗提供便利的同时,也使得医疗健康数据的获取、存储及传输日益规范化、体系化、规模化,推动了系统性的转变^[20]。

在生物制造领域,数字化的发展为生物系统的开发制造提供了基础,人类利用基因操纵、计算模拟、化学合成等为技术与方法,对生物体进行有目标的设计、改造乃至重新合成,推动了生物化学品、生物材料等向绿色低碳、无毒低毒、可持续发展模式转型。在创造人工生物系统的基础上,计算生物学、合成生物学、系统生物学等方面的融合,为食品、药物、化学品和材料等方面带来了高效率的解决方案^[21]。

在生物农业领域,通过农业全要素、全系统、全过程的数字化,实现农业科学决策和数字化管理,从而推动以种源农业、智慧农业、绿色农业等为特色的农业新体系的建构,促进生物质资源利用向集约化、可持续化、循环化过渡。其中,物联网、大数据、云计算、卫星遥感、人工智能等新一代信息技术,与新兴生物技术的整合,为提升农业的固氮、固碳和抗逆效率提供了新解决方案^[22]。

2.3 基于“数据协同”的生物经济治理

生物经济不简单等同于生物技术及其生物产业,其场景覆盖医药、农业、食品、健康、能源、环保等多领域。从具体属性看,生物产品的开发及利用涉及全社会的科技研发、工业生产、法制伦理、公共安全等多环节,且存在日益复杂化、专业化、精细化的趋势,对生物经济的治理历来是各国经济体系中的重要部分。

从具体对象看,生物经济的治理首先体现在

对生物资源的保护利用层面。人类对生物资源的利用由来已久,从古代的农耕文明,到现代的细胞治疗药物、生物 3D 打印等产品的开发,都离不开生物资源的提取及再加工。生物资源作为人类生存和社会发展的物资基础,是现代社会国民经济可持续发展的战略性资源。纵观发达国家生物资源的保护实践,利用数字地图、遥感影像、试验观测、数字建模等多种手段,对植物园、国家标本馆进行数字化管理成为大势所趋。能否建立集物种保育、资源管理、科普教育和信息共享于一体的数字化平台,成为衡量国家生物资源保护及利用能力的重要指标。我国《“十四五”生物经济发展规划》明确提出,要加快构建基于先进信息技术的生物资源开发、利用、追踪体系,实现生物资源全品类、全地域、全流程监管。夯实生物资源保护的数字技术基础对提升我国生物经济总体实力具有深远意义^[11]。

此外,对生物产品的评价及流通监管是生物经济治理的重要内容。在长期实践中,人类在对食品、药品等相关产品的监管过程中,逐步演化形成以安全性、有效性、一致性和/或稳定性为主要参考的评价体系,生物产品的监管也逐步从上市后质量监管前推至上市前评价。近年来,随着基因编辑、合成生物学等新兴技术的发展和应用,生物产品的种类日益多样,生产工艺不断精细化,应用场景趋于多样化,全过程中信息追溯成为重大需求,以数据标准化、系统化来推动监管体系的整体提升已经势在必行。在此过程中,需要数字化的引入,驱动形成标准的、规范、清晰的产品监管路径,明确监管主体、完善监管细节、推动监管优化、促进监管协同,进而推动生物产品准入与质量效率的提升。考虑到生物产品的应用场景具有特殊性,先进的生物工具及产品既可用于一般的民用领域,又能广

泛地用于军事领域,同时发达国家往往通过“出口管制”或“供应链保护”等相关政策对一些重要生物产品的流通施加更加严格的监管。如,2022 年 9 月,拜登政府出台《生物经济行政令》,要求美国政府尽快发起生物经济数据计划,对内建立涵盖国土安全、情报局、商务部、卫生、农业、能源、科学基金等部门的产品监管平台与系统性协调机制,可见数字化手段的运用已成为掌握生物经济关键产品话语权及规则主导权的必要支撑^[15]。

综合近年来全球生物经济发展实践看,数字化革命的渗透从根本上重塑了生物经济的生产结构及生产关系,通过“数据+算法”的赋能,将政府、市场、社会及个人以数据化方式动态关联起来,使得生物经济各参与主体凭借“智慧决策体系”,更全面地掌握信息、明晰发展定位,形成多元互动、协同合作的生物经济治理共同体,有序统筹了生物经济各维度要素。早在 2017 年,芬兰即围绕数字化驱动下的生物经济,研判了生物经济协同发展的三条路径^[23]:第一是“智能生物质流管理”,强调通过数字技术的应用实现对生物资源的高效分配及价值提升;第二是“基于数据的生物经济学”,强调将生物资源数据纳入各方决策过程,以强化生物经济框架下各参与主体的主动决策能力;第三是“网络化和协同性生物经济”,强调统一的数字化管理平台对生物经济的产业链协同及资源管理所带来的巨大价值。在当前技术水平下,上述探索既阐明了数字化驱动下的生物经济的协同治理脉络,也展现了两融合驱动下生物经济发展的广阔前景。

3 促进生物经济数字化发展的建议

数字经济的融合能为生物经济的发展注入新的活力与发展动能,催生生物产业多业态场景下

的变革与提升,强化生物经济相关产品的统筹监管,并促进生物经济框架内各参与主体的协同发展。面对当前两类经济融合发展的重大机遇,建议从以下三个方面入手,促进我国生物经济高质量的发展。

3.1 数据赋能,驱动生物技术开放式创新

把握数字化发展带来的机遇,以生物技术的兼容性和互操作性提升为切入点,驱动生物技术的开放式创新。一方面,利用好生物实验自动化水平不断上升等机遇,在标准化和自动化开发体系中,构建标准化的生物设计、构建、测试、分析工具,提升生命科学数据的系统化水平。另一方面,完善生物数据的采集、存储、转移、调用、汇交、管理的指南和标准,促进数据产生者、分发者、利用者及其他相关方的规范,提升包括伦理审查、隐私保护、知识产权管理和运营等多方面的协同治理水平。

在标准化及数据安全的基础上,面向生命科学研究和生物技术创新过程中的数据价值转化,构建技术高度融合、资源高度共享、平台高效赋能的集中式或分布式研究网络,使得开创式创新的专业化队伍不断壮大,跨学科的交叉研究群体得以高效协同。

3.2 善用工具,加速生物数据向知识转化

围绕生物经济研究开发和应用需求的广阔场景,以专业化的生物设计自动化、生物测试自动化、生物数据智能分析工具等为支撑,以生物安全与生物产业政策法规为导向,努力构建满足研究、开发、产业应用需求的工具体系。

在专业化工具的开发基础上,积极推动多类型生物数据融合发展、实验室研究和真实世界研究的融合、多维度和多类型的生物数据融合,促进生物经济“数据→信息→知识”的价值链转化,构建专业的知识库、知识图谱,促进生物知识的术

语、分类和编码的整理和统一,有序可控地实现并逐步扩大知识共享的范围与层次,鼓励社会各方协同开发、挖掘知识,提升知识利用的层次。

3.3 完善生态,推动产业与经济协调发展

从生物经济所需的创新与应用需求出发,完善生物经济的前瞻化布局,优化关键仪器、软件、设备、试剂的开发生态,合理调整和优化产品准入和应用推广管理的评价方法、工具和程序,完善生物技术在各类场景应用中所需的、法律、法规与安全、质量监管体系,积极参与和引领国际生物技术与产品标准制定。

同时,建立和优化生物经济统计机制,梳理生物产品分类目录,定期开展生物经济统计和分析,形成生物经济发展的定期监测、分析和研判机制,促进生物经济新兴业态的集聚化发展。

参考文献

- [1] WILLIAM J C. Executive Order 13134—Developing and Promoting Biobased Products and Bioenergy, The American Presidency Project [EB/OL]. (1999-08-12). <https://www.presidency.ucsb.edu/node/227963>.
- [2] STAN D, CHRISTOPHER M. What will Replace the Tech Economy [J]. Time, 2000(21): 76-77.
- [3] 刘斌. 面对即将来临的生物经济时代的思考——生物技术发展趋势的分析与我国应对策略的探讨[J]. 中国生物工程杂志, 2001(3): 8-12. (LIU Bin. Reflections on the Coming Bioeconomy Era: Analysis of the Development Trend of Biotechnology and Discussion of Coping Strategies [J]. China Biotechnology, 2001(3): 8-12.)
- [4] 邓心安, 延吉生. 谁将取代信息经济: 知识经济还是生物经济[J]. 全球科技经济瞭望, 2001(1): 7-8. (DENG Xinan, YAN Jisheng. Which will Replace the Information Economy: the Knowledge-economy or the Bioeconomy [J]. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2001(1): 7-8.)
- [5] 王宏广. 生物产业与生物经济[J]. 创业投资与高科技, 2004(6): 42-45. (WANG Hongguang. Bio-industry and Bio-economy [J]. China Venture Capital, 2004(6): 42-45.)
- [6] 封颖, 武夷山. 从“信息经济”到“生物经济”: 变与不变[J]. 科技导报, 2007(18): 85. (FENG Ying, WU Yishan. From the “Information Economy” to the “Bioeconomy”: To Change or not to Change [J]. Science & Technology Review, 2007(18): 85.)
- [7] OECD. Biotechnology for Sustainable Growth and Development [EB/OL]. (2004). <https://www.oecd.org/science/emerging-tech/33784888.pdf>.
- [8] AGUILAR A, BOCHEREAU L, MATTHIESSEN L. Biotechnology as the Engine for the Knowledge based Bio-economy [J]. Biotechnology and Genetic Engineering Reviews, 2009, 26(1): 371-388.
- [9] The White House. National Bioeconomy Blueprint [EB/OL]. (2012-04-26). <https://obamawhitehouse.archives.gov/administration/eop/ostp/library/bioeconomy>.
- [10] BEIS UK. Growing the Bioeconomy: A National Strategy to 2030 [EB/OL]. (2018-12-05). https://irp.cdn-website.com/62fc5e0c/files/uploaded/181205_BEIS_Growing_the_Bioeconomy_Web_SP_.pdf.
- [11] G20. Bioeconomy: A Sustainable Development Strategy [EB/OL]. (2022-02). https://www.biooekonomierat.de/media/pdf/arbeitspapiere/Bioeconomy_Shaping_a_sustainable_future_together.pdf?m=1647441088&.
- [12] HODGSON A, MAXON M E, ALPER J. The US Bioeconomy: Charting a Course for a Resilient and Competitive Future [J]. Industrial Biotechnology, 2022(18): 115-136.
- [13] 国家发展和改革委员会. 发展改革委印发《“十三五”生物产业规划》(National

- Development and Reform Commission. National Development and Reform Commission Issued the “13th Five-Year Plan” for the Development of the Biological Industry [EB/OL]. (2017-01-12). http://www.gov.cn/xinwen/2017-01/12/content_5159179.htm.
- [14] 国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发《“十四五”生物经济发展规划》的通知 (National Development and Reform Commission. Notice of National Development and Reform Commission on the Issuance of the “14th Five-Year” Plan for the Development of the Bioeconomy) [EB/OL]. (2022-05-10). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/10/content_5689556.htm.
- [15] The White House. Executive Order on Advancing Biotechnology and Biomanufacturing Innovation for a Sustainable, Safe, and Secure American Bioeconomy [EB/OL]. (2022-09-12). <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/presidential-actions/2022/09/12/executive-order-on-advancing-biotechnology-and-biomanufacturing-innovation-for-a-sustainable-safe-and-secure-american-bioeconomy>.
- [16] 邓心安, 万思捷, 朱亚强. 国际生物经济战略政策格局、趋势与中国应对 [J]. 经济纵横, 2020(8): 77-85. (DENG Xinan, WAN Sijie, ZHU Yaqiang. The Situation and Trends of International Bioeconomy Strategic Policy and Corresponding Countermeasures of China [J]. Economic Review Journal, 2020(8): 77-85.)
- [17] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展报告 (2022) (The China Academy of Information and Communications Technology. Report on China's Digital Economy Development (2022)) [EB/OL]. (2022-07). <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202207/P020220729609949023295.pdf>.
- [18] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Safeguarding the Bioeconomy [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2020.
- [19] 刘晓, 王跃, 毛开云, 等. 生物技术与信息技术的融合发展 [J]. 中国科学院院刊, 2020(35): 34-42. (LIU Xiao, WANG Yue, MAO Kaiyun, et al. Converge Development of Biotechnology and Information Technology [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020(35): 34-42.)
- [20] 陈运奇, 周琳, 杨庭树, 等. 论数字时代人类主动健康与老龄化科技应对 [J]. 中国老年保健医学, 2021(6): 6-7. (CHEN Yunqi, ZHOU Lin, YANG Tingshu, et al. On Human Active Health and Scientific Response to Aging in Digital Age [J]. Chinese Journal of Geriatric Care, 2021(6): 6-7.)
- [21] 马延和. 生物制造产业是生物经济重点发展方向 [J]. 中国生物工程杂志, 2022(5): 4-5. (MA Yanhe. The Biomanufacturing Industry is the Key Development Direction of the Bioeconomy [J]. China Biotechnology, 2022(5): 4-5.)
- [22] 赵春江. 智慧农业的发展现状与未来展望 [J]. 华南农业大学学报, 2021(6): 1-7. (ZHAO Chunjiang. Current Situations and Prospects of Smart Agriculture [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021(6): 1-7.)
- [23] ALA-ILOMÄKI J, ARVAS M, BACKMAN J, et al. Bits and Biomass: A Roadmap to the Digitalisation-empowered Bioeconomy [R/OL]. (2018). <https://publications.vtt.fi/pdf/visions/2018/V12.pdf>.

作者贡献说明

马征远: 整理资料, 撰写文章初稿;

熊 燕: 设计文章框架;

陈大明: 提供研究思路, 修改定稿。