

▶ 前沿交叉研判



代谢生物学 发展战略研究报告

代谢生物学发展战略研究项目 项目组

国家自然科学基金委与中国科学院联合资助

2024

报告撰写组

撰写组组长：

宋保亮 武汉大学

成员：

史熊杰 武汉大学

许琛琦 中国科学院分子细胞科学卓越创新中心

李小英 复旦大学

李 佳 中国科学院上海药物研究所

王 茹 上海体育大学

刘志华 清华大学

谢道昕 清华大学

闫建斌 中国农业科学院深圳农业基因组研究所

罗 杰 海南大学

刘天罡 上海交通大学

仰大勇 复旦大学

吕雪峰 中国科学院青岛生物能源与过程研究所

王二涛 中国科学院植物生理生态研究所

周 欣 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院

朱正江 中国科学院上海有机化学研究所

赖剑菲 武汉大学

王 琰 武汉大学

摘要

代谢生物学是整合生物化学、生理学、遗传学、医学等多领域的前沿交叉学科，旨在揭示生命活动的核心代谢机制、生理病理条件下的代谢变化规律以及生物体与环境的互作。随着基因组学、蛋白质组学、代谢组学等技术发展，该领域研究成果显著增长，已从传统生物学、医学拓展至化学、食品科学、环境科学及农林渔业、工程等多行业，展现出强大的多学科交叉特性和应用潜力。中国已成为该领域重要研究力量，并显示出巨大发展潜力。代谢生物学对解决人类健康、粮食安全、能源、环境等重大问题具有重要战略意义。

当前，代谢生物学研究聚焦于多个关键领域。在"代谢与疾病"方面，重点研究代谢紊乱（如肥胖、糖尿病、心血管疾病）的分子机制，挖掘遗传易感基因与关键调控靶点，开发新诊疗策略。"代谢与新药研发"核心是加强"从 0 到 1"的基础研究，发现新靶标，理解代谢紊乱在重大慢性疾病中的病理机制，推动创新药物研发。此外，代谢生物学还涵盖"代谢与主动健康"，探索生活方式干预代谢的分子机制；"人体共生微生物代谢"，解析微生物-宿主代谢网络作用；"代谢与农业"，改良作物代谢以提升产量和抗逆性；"代谢与合成生物学"，设计改造微生物高效生产有价值化合物；"代谢与生物材料"，优化生物材料的生物相容性；"代谢与生物质能源"及"代谢与碳中和"，利用代谢工程促进可再生能源生产和 CO₂生物固定；以及"新技术开发与代谢组学"，发展高灵敏度、高通量分析技术。

为推动我国代谢生物学跨越式发展，建议国家层面加强顶层设计与资源整合，设立代谢相关研究重点专项，建立国家代谢生物学研究科技中心或全国重点实验室等国家级平台。重点专项通过多维度策略支持重大科学问题探索和关键技术突破，促进基础研究与产业应用衔接。国家级平台致力于搭建先进仪器共享平台，建立国家级代谢疾病资源库和特色天然产物库，开发人工智能系统解析代谢网络，培养高水平人才，攻克关键检测仪器和数据库等问题。通过这些举措，将提升我国代谢生物学研究的原始创新能力，推动相关产业健康发展，为国民健康和经济发展提供有力支撑。

Abstract

Metabolic biology represents a cutting-edge interdisciplinary field that integrates biochemistry, physiology, genetics, medicine, and other domains, aimed at elucidating the core metabolic mechanisms underlying life activities, the patterns of metabolic changes under physiological and pathological conditions, and the interactions between organisms and their environment. With the advancement of genomics, proteomics, metabolomics, and related technologies, research achievements in this field have grown substantially, expanding from traditional biology and medicine to encompass chemistry, food science, environmental science, agriculture, forestry, fisheries, and engineering sectors, demonstrating remarkable interdisciplinary characteristics and application potential. China has emerged as one of the core research forces in this field and exhibits tremendous development potential. Research in this domain holds significant strategic importance for addressing major challenges in human health, food security, energy, and environmental sustainability.

Currently, metabolic biology research focuses on several key areas. In "Metabolism and Disease," emphasis is placed on elucidating the molecular mechanisms of metabolic disorders (such as obesity, diabetes, and cardiovascular diseases), identifying genetic susceptibility genes and key regulatory targets, and developing novel diagnostic and therapeutic strategies. The core of "Metabolism and Drug Development" lies in strengthening fundamental research "from zero to one," discovering new targets, understanding common pathological mechanisms of metabolic disorders in major chronic diseases, and advancing innovative drug development. Additionally, research encompasses "Metabolism and Proactive Health," exploring molecular mechanisms of lifestyle interventions; "Human Symbiotic Microbial Metabolism," analyzing microbe-host metabolic network interactions; "Metabolism and Agriculture," improving crop metabolism to enhance yield and stress resistance; "Metabolism and Synthetic Biology," designing and engineering microorganisms for efficient production of valuable compounds; "Metabolism and Biomaterials," optimizing biocompatibility of biological

materials; "Metabolism and Biomass Energy" as well as "Metabolism and Carbon Neutrality," utilizing metabolic engineering to promote renewable energy production and CO₂ biological fixation; and "New Technology Development and Metabolomics," advancing high-sensitivity, high-throughput analytical technologies.

To drive the strategic development of metabolic biology in China, it is recommended that the national level strengthen top-level design and resource integration, establish a key special program for metabolic biology, and construct a National Center for Metabolic Biology Science and Technology. The key special program shall support exploration of major scientific questions and breakthrough of critical technologies through multi-dimensional strategies, facilitating the integration of basic research with industrial applications. The National Science and Technology Center is committed to establishing advanced instrument-sharing platforms, building national-level metabolic disease resource banks and distinctive natural product libraries, developing artificial intelligence systems for metabolic network analysis, cultivating high-level talent, and addressing bottleneck issues in key detection instruments and databases. Through these initiatives, China's original innovation capacity in metabolic biology research will be enhanced, the healthy development of related industries will be promoted, and robust support will be provided for national health and economic development.

目录

摘要	I
Abstract	II
第一章 代谢生物学概述	1
第二章 代谢生物学主要内容、现状及关键科学问题	2
2.1 代谢与疾病	2
2.2 代谢与新药研发	4
2.3 代谢与主动健康	5
2.4 人体共生微生物代谢	7
2.5 代谢与农业	10
2.6 代谢与合成生物学	12
2.7 代谢与生物材料	13
2.8 代谢与生物质能源	15
2.9 代谢与碳中和碳达峰	17
2.10 新技术开发与代谢组学	18
第三章 我国在相关领域的发展思路与政策建议	21
3.1 建立代谢生物学重点专项	21
3.2 建立国家代谢生物学科技中心	23

第一章 代谢生物学概述

代谢是指生物体内为维持生命活动而发生的一系列有序的化学反应。它是所有生物过程的核心和基础。代谢生物学是集生物化学、生理学、病理学、药理学、新药研发、微生物学、动物学、植物学、遗传学、合成生物学、生物信息学等于一体的交叉学科领域。代谢生物学揭示代谢的基本机制，阐明生理病理条件下代谢的改变特征，发现生物体与环境互作的规律，并有助加以改造和利用。近年来，基因组学、蛋白质组学、代谢组学及相关技术的快速发展，推动生命科学进入大数据时代。

近十年来，国内外代谢生物学研究均呈逐年增长趋势。特别是近五年，研究成果显著增长，表明代谢生物学正处于明显的上升发展期，表现出以下几个特点：一、研究突破了生物学、医学、药学等传统学科，已广泛扩展到化学、食品科学和环境科学等多学科，以及农、林、渔业、工程等多行业；二、研究方法和结果显示出越来越显著的跨学科性和较强的针对性，并与工业应用相结合；三、中国高校和科研院所同时发力，在该领域取得了可观的成绩。目前，中国和欧美发达国家已成为该研究领域的核心力量。我国正处于研究的快速增长期，在该领域显示出巨大的发展潜力。

为了更好地聚焦和规划布局未来我国代谢学科发展，本战略研究报告从**代谢与疾病**，**代谢与新药研发**，**代谢与主动健康**，**人体共生微生物代谢**，**代谢与农业**，**代谢与微生物工程**、**合成生物学**，**代谢与生物材料**，**代谢与生物质能源**，**代谢与碳中和**、**碳达峰**，**新技术开发与代谢组学**十个领域，调研我国及国际研究态势，总结关键科学、技术问题，凝练相关领域的发展思路和政策建议，推动代谢领域基础科研和相关应用产业的高速发展。

第二章 代谢生物学主要内容、现状及关键科学问题

2.1 代谢与疾病

2.1.1 战略价值

随着我国经济增长、生活方式改变和人口老龄化，肥胖、糖尿病、非酒精性脂肪性肝病、心脑血管疾病等代谢性疾病的发生率逐年升高，已成为严重威胁国人健康的重大公共卫生问题，同时极大增加了社会经济负担（图 1）。目前中国约有 3.3 亿心血管疾病患者，2 亿脂肪肝患者，1.3 亿糖尿病患者。此外，中国有 1090 万男性和 4930 万女性患有骨质疏松症。上述代谢性疾病除自身危害外，还往往与肿瘤、神经退行性疾病、认知障碍、免疫性疾病等密切相关，严重影响患者的生活质量。

代谢紊乱是上述复杂疾病的共性病理机制。对代谢紊乱共性病理机制的认识不足是制约原创新药研发的主要瓶颈。因此，研究疾病发生发展过程中代谢紊乱发生的遗传及微环境因素，在微观和宏观层面研究揭示细胞代谢及其与微环境的互作、及不同代谢器官之间的互作调控，阐明代谢紊乱的关键分子机制及调控网络，有助于揭示疾病的病理调控机制，挖掘原创的代谢调控靶点，为代谢性疾病的药物靶标研发和防治策略制定提供有力证据。提高代谢性疾病的防治水平，不仅能改善国民健康，而且能切实有效的减少国家医疗支出和经济负担，具有重要的科研价值和战略意义，也与中共中央国务院印发的《“健康中国 2030”规划纲要》高度契合。



图 1 2000-2018 年中国成人超重率和肥胖率变化趋势（中国居民膳食指南 2021）

2.1.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

- (1) 如何挖掘代谢性疾病的遗传易感基因和关键调控基因？
- (2) 在检测疾病发生发展过程中，如何检测代谢组织微环境中细胞代谢的异质性？
- (3) 如何鉴定代谢性疾病特异性的代谢物，并找出潜在药物靶点和诊疗技术？
- (4) 如何建立覆盖人群遗传变异和人类代谢特征的大规模高通量组织类器官分析平台？

2.1.3 我国及国际的研究基础与条件

一个世纪前，人们就发现代谢失衡和紊乱在各种病理过程中普遍存在。环境因素的改变会重塑机体的代谢网络，从而影响免疫/炎症状态、胰岛素敏感性、肠道菌群稳态等，导致代谢失衡和紊乱，引发代谢性疾病。针对营养物质的摄取失调、代谢通路重塑、代谢物驱动基因表达调控改变、代谢物改变微环境的组成等已开发出多种代谢疾病治疗策略：(1)调控营养物质摄取，如靶向 SGLT2 抑制剂和 GLUT1 抑制剂或 ASCT2 拮抗剂可分别用于糖尿病和抗肿瘤治疗；(2)调控营养物质代谢，如肿瘤细胞中的原癌基因活化会增加糖酵解途径代谢酶的表达，可作为肿瘤治疗的靶点；(3)调控细胞代谢物的含量影响细胞的表观遗传，如乙酰辅酶 A 和 S-腺苷甲硫氨酸参与乙酰化和甲基化， α -KG 参与 DNA 去甲基化。

然而，大多数代谢性疾病（如糖尿病、肥胖、脂肪肝、心血管疾病等）研究仍停留在简单的遗传相关性层面，未深入探究机体生理、病理和药理生物学。机体代谢需要多个组织器官协同运作，因此对慢性疾病的代谢研究不能局限于孤立的器官，应关注细胞与微环境、微环境与组织器官、器官之间的代谢互作。通过建立活体代谢示踪体系，如同位素示踪结合二维成像、多组学等技术，可在空间层面上研究病变器官的代谢特征，对于未来发现全新的代谢调控靶点和提出原创理论都至关重要。

2.2 代谢与新药研发

2.2.1 战略价值

我国人口寿命相较于 1970 年，已经增加了 18 岁。预计 2010 年到 2040 年，我国 60 岁人口比例将从 12.4%（1.68 亿）增加到 28%（4.02 亿），即将从轻度老龄化进入重度老龄化。随着老龄化社会的加剧，各类慢性疾病的患病率均显著增加，如糖尿病、非酒精性脂肪性肝病、心血管疾病、器官纤维化、自身免疫性疾病、神经系统疾病以及肿瘤等重大慢性疾病，一方面给国民生命健康带来巨大威胁，另一方面也给国家经济造成沉重负担。近几十年来，国内新药研究发展迅速，但仍无法满足国民对健康的需求，亟待大力推动新药研发。目前，我国已成为全球第二大药品市场，仅次于美国，但我国产出的药品中仿制药达 95%。我国研发的大部分新药仍为国外已有新药的跟进，多为快速模仿创新品种，自主发现的药物作用新机制和在此基础上发展的原创新药基本空白。国家“十四五”规划对科技事业发展提出“四个面向”的新要求，创新药物研发既是世界科技前沿、也是国家重大需求、更是人民生命健康的重要保障，已经刻不容缓。

2.2.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

（1）如何加强“从 0 到 1”的基础研究开辟新领域、提出新理论、研发新方法，并在这一过程中发现并提出新的药物靶标？

（2）代谢紊乱是如何作为一种共性病理机制影响代谢性疾病、心血管疾病、自身免疫性疾病、神经系统疾病以及肿瘤等重大慢性疾病的发生和发展的，并且其机制的深入理解如何成为创新药物研发的关键科学问题？

（3）如何通过深入研究疾病机制和药物的精准设计来加强靶向代谢紊乱调控的药物研发，并开发出具有更好疗效和更低副作用的靶向药物？

（4）新型疗法如蛋白质多肽药物、抗体药、小核酸药物、mRNA 药物、疫苗、细胞治疗、基因治疗、基因编辑、异种器官移植、微生物疗法等在代谢性疾病中的应用前景如何，并且如何加强这些新型疗法的研发与风险评估与防控？

2.2.3 我国及国际的研究基础与条件

代谢功能紊乱会引发包括肥胖、糖尿病、高血压等多种疾病，并增加抑郁症、痴呆和阿尔茨海默病的风险。代谢重编程也是肿瘤和免疫性疾病的致病因素。因此，通过靶向代谢紊乱可能是一种潜在的有效治疗策略。2022 年美国食品药品监督管理局（Food and Drug Administration, FDA）共批准上市药物 37 种，其中靶向代谢调控的药物有 5 种，多为罕见病的治疗，2022 年我国批准的上市国内新药 18 种，靶向代谢调控的药物仅有 1 种。靶向代谢调控已在罕见病领域取得一定进展，但在重大慢性疾病治疗方面还相对缺乏。

药物靶标是与疾病过程相关且可被药物作用的生物大分子。代谢酶和受体是主要的代谢调控靶点，但其在疾病中的作用尚不清楚。代谢紊乱相关疾病的病理机制需要深入研究，并重视原创理论和技术突破，发现新的药物靶标。新靶标的确证往往催生“重磅炸弹式”药物产生。例如靶向 HMG 辅酶 A 还原酶的阿托伐他汀巅峰年销售额 128 亿美元，是首个百亿美元“重磅新药”。此外，调控胆固醇吸收与代谢关键分泌蛋白 PCSK9 在 2003 年发现，同时被证实可显著下调低密度脂蛋白胆固醇的水平，相关药物于 2017 年被 FDA 和欧洲药品管理局（European Medicines Agency, EMA）批准上市，其年销售额在 10 亿美元左右；此外，在治疗性抗体药物激烈竞争的同时，siRNA 药物也在 20 世纪初开启了自己的时代。诺华公司研制的一款靶向 PCSK9 的 siRNA 药物于 2020 年 12 月在欧洲获批，2021 年落地海南博鳌。

2.3 代谢与主动健康

2.3.1 战略价值

主动健康是中国在健康领域提出的原创概念，首次正式出现在 2017 年科技部等联合印发的《“十三五”卫生与健康科技创新专项规划》当中。2022 年，发展新型主动健康技术和模式作为六大战略任务之一，被纳入《“十四五”卫生与健康科技创新专项规划》。

（1）主动健康是保障人民生命健康的有效手段：随着代谢疾病人群规模的不

断扩大和人口老龄化社会的持续加剧，传统医疗卫生健康服务无法满足人民群众日益增加的健康需求。运动、营养和睡眠等生活方式干预是主动健康的重要组成部分。研究证实，规律运动可以减少疾病危险因素，使 2 型糖尿病、心血管疾病和代谢综合征等疾病发生风险降低 41%~59%，使全因死亡风险和心血管疾病死亡风险降低 30%~45%。合理膳食模式，比如低胰岛素饮食、低炎症饮食和糖尿病风险降低饮食，可以显著降低 2 型糖尿病发生风险 44%~65%和心血管疾病发生风险 27%~32%。

(2) 主动健康是推进健康中国建设的必然要求：健康中国战略立足全人群和全生命周期两个着力点，以人民健康为中心，强调预防为主，推行健康生活方式，主动健康应运而生。主动健康强调“以治病为中心”向“以健康为中心”的转变，倡导每个人是自己健康的第一责任人，并通过对机体施加运动、营养等生活方式干预，增强机体防病抗病的能力。

(3) 主动健康是实现健康产业发展的关键举措：当前，我国健康产业表现出交叉融合发展态势，健康咨询、康养服务等健康医疗服务新业态初具规模，预计 2030 年健康服务业总规模达到 16 万亿元。主动健康模式下，运动健康促进、精准营养调控等技术的创新，以及穿戴式健康监测设备、健康风险预警模型和智能康复辅具等的研发有望成为健康产业新的经济增长点。

2.3.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

(1) 运动、节食、睡眠、心理等是促进人体健康的分子机制？如：哪些关键响应因子和信号通路在促进代谢稳态中起着决定性作用？能否绘制出运动、节食、睡眠、心理等引起的生物分子反应图谱？各个器官间的交互对话作用机制是什么？

(2) 什么样的“剂量-效应”关系能够界定运动、节食、睡眠、心理对于改善慢性病的安全性和有效性？如何设计出既安全又有效的慢病改善精准化运动方案？

(3) 如何创新示踪技术以探索不同行为方式过程中糖、脂肪和蛋白质等物质的代谢途径？这些代谢过程的时序性和适应性变化特征如何？

(4) 如何利用多源智能穿戴式设备协同感知并快速精准地测量分析不同行为方式下的代谢改变？基于这些因素，能否建立一个精准评估体系？

(5) 现代信息技术和人工智能如何助力在上述研究？

2.3.3 我国及国际的研究基础与条件

1968 年体医融合领跑者 Kenneth H. Cooper 率先提出“运动是良药”，目前已普及全球，且已投入大量的人财物开展相关研究。饮食在调节代谢方面发挥关键作用，节食可调控代谢延长寿命。合理的睡眠对心血管疾病、阿尔海默氏病等的发生也影响巨大。体育锻炼结合节食更能够改善衰老和代谢相关疾病。2016 年美国国立卫生研究院（National Institutes of Health，后简称 NIH）投入 1.7 亿美元，成立了 5 个中心，聚集了若干世界知名大学和研究机构，包括斯坦福大学、梅奥诊所等，协同攻关运动和节食改善衰老和代谢相关疾病作用机制。2012 年我国引进美国运动医学会“运动是良医”的理念，提出“体医融合”方针。多年来运动科学积极地为体育与医学的结合做出很多探索和研究，如上海体育大学王茹团队系统总结了 26 种不同疾病的运动和饮食干预方法，并基于千人运动员队列揭示肠道菌群介导运动缓解糖尿病的潜在机制；北京大学李立明团队通过对 46 万余名成年人进行 10 年随访发现积极参与体力活动可能有助于预防肝胆疾病；第四军医大学高峰团队研究了志愿者长期运动后衍生的循环外泌体 microRNA 的心脏保护作用等。但是，体系化、针对性的体育与医学实施细则以及配套政策法规还未颁布，使得体医融合在实践中难以操作和全面深入推进，有限的资源也不能实现精准投入和最优配置。表现为，近三年我国资助相关项目数为 69 项，而美国 NIH 资助相关项目数为 573 项，其资助力度远高于我国，这可能是目前我国在该领域研究水平尚落后于美国等发达国家的原因之一。

2.4 人体共生微生物代谢

2.4.1 战略价值

微生物与人类健康关系密切，病原微生物至今仍是威胁公众健康的最主要因素之一，而新兴的微生物组则对人体健康具有重大影响。病毒、细菌、真菌和寄生虫等病原微生物引发的感染性疾病每年造成超过千万人死亡，约占全球每年死亡总人数的五分之一。从百年前的西班牙流感病毒到尚未得到有效解决的结核病、疟疾、艾滋病、乙肝等，时刻挑战着全球公共卫生体系。我国是人口大国，医疗卫生

条件相对落后，加之病毒病原体的高频率突变、日益严峻的细菌耐药性、药物研发的漫长周期，每年感染性疾病都造成严重的社会负担，并且将可能成为我国又一个“卡脖子”领域。因此，深入研究病原微生物对我国生物安全、社会稳定和国民经济都具有极其深远的战略价值。

微生物组是指一个特定生态环境中微生物群体及其遗传信息的集合。近十余年来，微生物组相关研究受到高度关注。美国、欧盟等先后出台多个科技计划支撑微生物组研究。其中，以肠道微生物组为典型代表的人体微生物组研究是当前国际生物医学研究的热点领域。微生物组作为人类第二基因组，具有巨大的代谢潜能，并与机体的代谢交织在一起。大量的研究证实了肠道微生物组与人类代谢性疾病有着强相关性。另外，病原微生物、共生微生物与宿主健康关系复杂。感染性疾病依赖病原微生物的代谢适应和宿主代谢及免疫响应，而肠道微生物与宿主代谢相互关联，影响代谢性疾病等诸多疾病发展。系统解析微生物-宿主代谢网络关联及其作用机制，对推进基础科学研究和医学转化产业，降低疾病负担、医疗成本，提高人民健康水平，具有重大意义。

2.4.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

- (1) 病原微生物与宿主的代谢调节机制是什么？
- (2) 病原-宿主如何相互调控代谢过程进而影响感染性疾病的发生和发展？
- (3) 人体菌群影响宿主代谢的模式及其代谢免疫调控机制是什么？
- (4) 人体菌群及其代谢产物如何调控代谢性疾病的发生发展？

2.4.3 我国及国际的研究基础与条件

近年来，以欧美为主的发达国家在病原微生物-宿主代谢互作领域取得了值得借鉴的科学突破。宿主在感染中各种组织和细胞都发生一系列的代谢变化，对宿主产生或正或负的影响。宿主的细胞在感染的炎症影响下，可改变细胞质膜的胆固醇代谢，增强糖酵解等。宿主通过多种途径限制微量元素对抗病原微生物的感染。病原菌与宿主对微量元素铁的竞争甚至成为了感染病程的决定因素。感染进程中，能量对于宿主和病原都至关重要，宿主多个组织协同维持血糖平衡，可增强宿主对败血症的耐受性。此外，一些病原菌适应宿主的代谢而降低自身毒力因子的表达，

提高宿主对感染的耐受。高通量代谢组学揭示了感染进程中代谢分子变化的进程与新型冠状病毒肺炎（Corona Virus Disease 2019， COVID-19）感染严重程度密切相关。因此，通过代谢调控而耐受传染性疾病成为了一个令人兴奋的新兴研究领域。

国内研究人员经过多年努力，在感染性疾病领域取得了长足的进步，逐渐从流行病学监测、耐药性筛查和临床菌株资源整合，过渡到分子流行病学、致病机理、抗感染免疫学和新型疫苗/药物的研发等高新技术方向。SARS-CoV-2 的国产疫苗和高亲和力抗体的成功研发，充分展现了我国自主科研能力的飞速进步。然而，我国在病原-宿主代谢互作领域仍然处于相对落后的位置。我国科学家发现了肺炎链球菌在鼻腔定植的关键代谢调节因子 MetR；发现了肺炎链球菌响应宿主体内不同的生理环境调节其细胞壁的相转变；我国科研团队持续关注 COVID-19 患者的肾脏代谢指标，为 COVID-19 康复者预后的急性肾损伤预防性治疗提供了参考。以上代表性研究成果为我国感染性疾病的防治工作打下了一定的基础，开辟了新的方向。

通过多年努力，我国科学家在肠道菌群与代谢性疾病的研究中也取得了可喜的成绩。研究发现多种膳食纤维的组合促进产短链脂肪酸的肠道细菌富集，从而改善 2 型糖尿病。多形拟杆菌通过减少谷氨酸，在袖状胃切除术后的患者减重中起到积极作用。肠道微生物产生的乙醇诱导脂肪性肝病的发生发展。次级胆汁酸 GDCA 激活 TGR5 受体，促进肠道 3 型天然淋巴样细胞分泌 IL-22，改善多囊卵巢综合征；胆汁酸 GUDCA 抑制肠上皮 FXR，降低神经酰胺生成，改善代谢性疾病；猪胆酸 HCA 靶向肠 FXR 与 TGR5，促进 GLP-1 的分泌，改善血糖稳态。宿主肠上皮 HIF-2 α 通过乳酸诱导肠道普通拟杆菌与扭链瘤胃球菌稳态失衡、降低胆汁酸水平和抑制白色脂肪棕色化加重肥胖相关代谢性疾病；木聚糖拟杆菌可高效降解肠道尼古丁从而改善代谢性疾病；肽聚糖成分在胰岛 β 细胞中调控胰岛素分泌和血糖平衡，并在肾上腺嗜铬细胞中促进肾上腺素分泌以调控应激反应。我国科学家系列性研究工作揭示了肠道菌群-宿主代谢交互调控的新范式，为代谢性疾病的防治提供了新方向与新策略。

2.5 代谢与农业

2.5.1 战略价值

植物代谢产物对植物生长发育及逆境响应具有重要意义，同时也为人类营养、健康提供重要的物质来源。代谢物作为作物产量抗性、品质的物质基础，关乎粮食安全和农民经济效益，代谢生物学研究是实现二十大报告“确保中国人的饭碗牢牢端在自己手中”的重要方面。作物代谢生物学研究将在保障作物高产稳产，提升农业经济效益方面发挥重要作用，也是“可持续发展观”和“尊重自然、顺应自然、保护自然”等理念的重要体现。

随着我国经济快速发展和国民生活水平逐步提升，食物消费已从“吃得饱”向“吃得好”转变，对高营养、高健康功能成分的作物产品需求不断增加。根据世界卫生组织报告，我国“亚健康”人群的比例已经高达70%。作物来源的营养素是人类健康饮食的重要源头，提高作物营养代谢物含量是从源头入手改善全民健康水平和解决“隐性饥饿”危机最经济高效的方案。同时，来源于药用植物的天然产物也在保障国民健康中发挥不可或缺的作用。特别是新冠疫情时期，包括中药材在内的药用植物作为医药和保健的重要来源和保障，得到进一步重视。

总之，植物代谢生物学对于保障国家粮食安全、生物安全、生态安全，提升国民营养和健康水平，推动农业农村现代化和国家经济可持续高质量发展都具有重要意义。

2.5.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

- (1) 植物重要代谢途径的解析？
- (2) 植物在发育和逆境响应中如何进行代谢重编程？
- (3) 植物代谢多样性的自然变异是如何发生的，以及其演化模式是什么？
- (4) 植物功能代谢组中代谢物的生理作用及其机理是什么？
- (5) 如何利用高通量、高灵敏、高时空分辨率的技术来鉴定植物代谢物，并建立代谢物共享数据库？

2.5.3 我国及国际的研究基础与条件

对于代谢物合成、修饰、分解、转运及其调控的解析和利用一直是植物代谢生物学的前沿和热点，而涉及植物天然产物高效生物制造的代谢工程和合成生物技术是世界各国竞相争夺的技术高地。

近年来，随着基因组、代谢组等生物组学的发展，植物代谢生物学在研究深度和广度方面得到进一步发展，我国及国际的研究团队在多个领域取得了重大科学突破。在农作物重要代谢产物合成途径解析方面，我国团队鉴定了控制水稻营养品质及逆境生理的主效基因，克隆并鉴定了水稻中控制生物及非生物逆境抗性相关途径的主效基因及其在环境适应过程中的作用；中国和以色列团队分别解析了黄瓜及番茄中调控苦味物质合成及调控途径，为进一步的育种改良奠定了基础；英国研究团队系统解析了植物三萜合成基因簇，揭示了植物利用三萜调控土壤微生物的机制；我国科研团队深入解析了棉酚生物合成途径及调控机制，创制了种子特异低酚转基因棉花材料，为全面解析棉酚生物合成途径奠定了基础。同时，在植物天然产物合成途径解析方面，中国和德国研究团队先后报道了红豆杉中抗癌明星分子紫杉醇生物合成途径的缺失基因，打通了紫杉醇生物合成途径，为紫杉醇的低成本生物合成奠定了基础；美国和中国科研团队分别解析了莨菪碱/东莨菪碱合成途径关键基因，并实现了东莨菪碱的微生物异源合成；英国研究团队阐明了皂皮树皂素佐剂的生物合成途径，使得利用合成生物学生产疫苗佐剂为可能，并为获取和设计天然和新的自然免疫刺激剂开辟了新的途径；德国科研团队深入解析了长春花碱的生物合成途径，并在利用植物和微生物底盘生产方面取得重大进展；美国研究团队解析了薯蓣皂苷元的合成途径，为大量合成甾体类化合物奠定了基础。

在深入解析植物代谢物合成途径和调控网络的基础上，国内外科研团队进一步利用转基因及基因编辑技术等创制营养强化的新材料和新品种。例如日本科学家创制的富含 γ -氨基丁酸的番茄新品种获得日本政府的批准上市，成为全世界第一个上市的基因编辑食品；美国科研团队实现了在大豆中同时强化维生素 A 和维生素 E 的合成，而且创制的富含花青素的紫色西红柿新品种获得美国农业部（USDA）批准上市；比利时团队通过强化叶酸合成基因的表达，创制了富含叶酸的土豆；英国科研团队，基于代谢调控理论，创制了维生素 D、多巴胺等含量提升

的番茄新种质；而我国团队也创制了一系列风味、营养强化的新材料和新品种，如籽粒中富含叶酸、硫胺素、花青素和虾青素的水稻，以及果实中富含维生素 D 和 γ -氨基丁酸、花青素、类胡萝卜素的番茄等。

2.6 代谢与合成生物学

2.6.1 战略价值

微生物工程与合成生物学是一门通过人工设计和改造生物系统来实现高效生产目标产物的应用学科，具有革命性创新潜力，能够引发科技与产业变革。在过去 30 年里，微生物工程与合成生物学发生深度的交叉融合，极大地促进了生物技术进步和生物产业的升级。它可以优化现有的生化反应和代谢途径，引入外源代谢途径，甚至创建自然界不存在的代谢途径，突破自然生物体合成功能与范围的局限。

微生物工程与合成生物学通过系统设计和改造实现产品制造生物路线对化学路线的逐步替代，能够解决一些传统方法工艺中存在的成本高昂、量产困难、碳排放大等痛点，具有绿色、高效、低能耗的优势。这使得合成生物学方法能够打破大企业构建起的“强者恒强”的固有格局，为后来企业提供超越成长的机会，对行业是颠覆性的存在，目前已被广泛应用于生物医学、材料化工、农业、食品、能源、环境保护等多个领域。

2.6.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

(1) 如何深度解析高价值天然产物生物合成基因簇，挖掘关键代谢分子和活性天然产物的生物合成机制，清晰表征生物合成元件？

(2) 如何系统解析并建立生产菌株的代谢及调控网络，对其进行理性设计和预测，发现共性的高产机制？

(3) 在工业发酵过程中，如何解析工业菌种的细胞代谢动态变化，以找出新的菌株改造靶点和过程优化控制点，加速其可量产进程？

(4) 微生物工程产品在传统化工行业中有何可替代作用？如何推进生物基产品的高价值衍生应用，实现生物制造产业链的形成？

2.6.3 我国及国际的研究基础与条件

基于合成生物学改造的微生物平台，能够实现从可再生原料中生产能源、化学品及药品等高附加值化合物。一旦微生物工程产品突破“可量产”的限制并实现产业化生产，往往会对传统合成工艺展现出竞争性优势乃至根本性替代，从而导致整个行业的颠覆性变革。美国合成生物学家在酿酒酵母中实现了青蒿酸的高效合成，并以此为基础，完成了抗疟疾药物青蒿素的化学半合成，是合成生物学的重要应用典范。而我国科学家利用在酵母中高产的法尼烯，实现了异植物醇的化学合成，最终完成了维生素 E 的化学半合成，成功打破国外垄断。除此之外，我国也有企业完成了长链二元酸、L-丙氨酸的生物法发酵工艺，二者都完全替换了此前的传统生产方式，并成功占据全球市场份额的半壁江山。

不过目前更多高价值活性化合物还只停留在突破高产的阶段，无法在产率上实现对传统工艺的绝对性优势，同时国内相关法律法规的限制，导致迟迟无法实现产业化，如番茄红素、人参皂苷、诺卡酮等利用微生物工程来生产的各种植物源天然产物，这亟待后续的研究投入和相应的政策扶持。

为了实现高价值活性化合物的“可量产”和“可合成”，除了传统的个性化改造策略，如酶工程改造、调节全局代谢网络、发酵及提取工艺优化等，我国科学家也逐渐开发了一些能够提高产率、加速进程的通式。如利用多酶自组装策略，解决人工构建的合成体系中存在的低效率、代谢流失衡等问题；利用基于“定向合成代谢”搭建的高效前体供给平台，实现对特定酶、功能酶库以及基因簇的高通量挖掘，完成从点及面的全面探索；利用逆生物合成预测的策略，开拓发现异源生物合成的新途径，突破天然途径的瓶颈。

2.7 代谢与生物材料

2.7.1 战略价值

生物材料是一种具有特定形态，通过与生命体相互作用，直接影响诊断或治疗进程的新型高科技材料。生物材料在临床中的应用推动了当代医疗技术的发展和革新。生物材料在与人体组织、体液和血液相互作用时，应具有良好的生物相容性

和生物安全性，可制造成具有维护生命功能、修复、替换或补偿人体器官功能的医用产品。生物材料的发现和发展挽救了无数人的生命，提高了生命质量，而且随着材料工业的发展和人工器官的广泛应用，创制新型生物材料已经成为新技术革命的重要组成部分。研究生物材料在生物体内代谢机理，研制对人体无毒性、无致敏性、无刺激性、无遗传毒性和无致癌性等不良反应的生物材料具有重大科学和现实意义。

2.7.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

(1) 如何借助代谢生物学研究方法，深入理解生物材料与生命体的相互作用机理，并发现生物材料对生命体影响的关键代谢通路和代谢产物？

(2) 如何利用生物材料与生命体的相互作用机理和关键代谢通路，完成对生物材料的设计与合成的深度优化，以实现各类生物材料功能的生物化？

(3) 如何结合生物学、材料学、工程学和人工智能等多学科交叉方法，模拟各种材料与生物体在代谢层面的相互作用，以阐述实现特定功能生物材料的生物学机制？

(4) 如何借助特定功能的生物材料的代谢特性，通过对应功能的生物材料的高通量筛选，挖掘具有应用潜力的生物材料？

(5) 如何结合生物材料和疾病标志物的研究，建立代谢性疾病的早期检测预警方法？

2.7.3 我国及国际的研究基础与条件

自 20 世纪 70 年代开始，国家在政策和科研投入上对生物材料基础研究给予持续大力支持，相关研究实力大幅提升，生物产业已初具规模。据统计，在 2015-2022 年间，生物材料领域学术论文发表超过 21 万篇；其中，中国学者发文总量约 7 万篇，占比约 32%，位居全球第一。同时，我国已建成门类齐全、独立完整的产业体系，成为世界制造大国。在国际同等技术条件下，“中国制造”成本低、性价比高、市场竞争空间巨大，我国具备了生物材料产业加速发展所需的研发基础、工业基础和市场空间。2020 和 2021 年我国生物医用材料产业市场规模分别高达 4000 亿元和 4800 亿元。但必须指出，当前国内多数生物医用材料研发仍然停留在基础

研究阶段，国内大部分的生物材料市场仍然被国外产品占据。特别是在高端生物材料产品领域，国外产品甚至占据 90%以上的市场份额。虽有部分初创公司开展生物材料的早期研发，但是其中多数依靠引进国外知识产权，缺乏独立自主可控性。因此，对我国自主研发的生物材料开展代谢特性研究，并在此基础上与生物医用需求相结合，可为我国生物材料的基础研究和产业制造之间搭建起一座桥梁。

2.8 代谢与生物质能源

2.8.1 战略价值

能源是社会发展的基础和动力，关系国家安全与社会稳定。以石化资源为基础的现行能源结构，其发展具有明显的不可持续性；可再生能源是指在自然界中不会随人类利用而减少、能够循环再生的能源，具有清洁、低碳的特点，是能源技术发展的重要方向。生物能源是指来源于生物质的能源，是可再生能源的重要形式；生物质是地球上唯一可再生的碳资源。

生物能源开发利用过程包括生物质的生产、采集、处理和转化，首先以植物光合作用将太阳能转化为化学能，储存于生物质中；生物质可以通过燃烧释放化学能，用以供热或发电；可以通过化学催化实现碳链重整，制备航油、柴油等生物燃料；更可以在预处理后，通过生物发酵和转化进行醇、萜、烃、脂等高能量密度物质/燃料的制造。本质上，生物能源技术是以生物（植物、微生物）为平台，通过时空尺度压缩，将低能量密度的太阳能转化为高能量密度的燃料、电和热，物质层面则伴随低能态二氧化碳分子向高能态多碳分子的转化，而该过程则是通过反应、途径、细胞、个体、群体层面的生命代谢活动驱动的，发展生物能源技术，需要代谢生物学与技术在多环节、多维度上的系统支撑。

2.8.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

(1) 如何研究木质纤维素类生物质的复杂结构与调控层级，以阐明影响木质纤维素生物解聚效率的关键制约机制，并探索生物质与酶、微生物、微生物组之间的适配关系？

(2) 如何突破能源植物基因递送与编辑屏障，通过细胞壁工程和多性状聚合

培育高产、速生、抗逆、易处理的能源植物，并建设“生态能源农场”以利用边际土地生产高品质生物质资源？

(3) 结合植物生物质的结构和组成，如何解析酶和微生物对生物质大分子与复合体的亲和、识别和剪切模式，并开发高效降解纤维素酶系和微生物/微生物组以实现生物质向可发酵糖的低成本、高效率转化？

(4) 如何解析微生物细胞和生物燃料电池工厂对多元胁迫因素的响应和适应机制，并开发高原子经济性的先进生物燃料合成路线，提升生物燃料电池工厂对生物质糖的利用能力和转化效率？

2.8.3 我国及国际的研究基础与条件

历经数十年实践，以燃料乙醇为代表的生物能源技术和产业取得长足发展。特别是以玉米等粮食作物或甘蔗等高糖作物为原料的第一代生物燃料技术，已经在部分国家能源供应结构中占据重要位置，如巴西和美国的汽油中的乙醇比例分别达到 20%和 10%以上；我国也累计调和和使用燃料乙醇逾 3 亿吨，在系列政策支持下，有望在国家能源结构中起到更重要的支撑作用。

然而，以粮食/高糖作物为原料的生物燃料技术，其发展在根源上存在“与人争粮、与粮争地”的弊端，在全球粮食危机加剧的背景下，其发展空间面临极大限制，发展以非粮生物质、能源植物生物质为原料的新型生物能源制造技术势在必行。因此，目前国际生物能源技术研发的主要方向包括：在供应端以非粮能源作物替代粮食作物、以盐碱地和滩涂等边际土地替代农田进行能源生物质生产，在生产端则以一站式、低成本的生物质降解糖化技术替代复杂、高成本的预处理环节，进而实现多元化生物燃料产品的高效合成。在此过程中，“高品质能源生物质资源创制”“生物质高效解聚与分离”“生物质高效转化和生物燃料定向合成”等技术的发展将起到至关重要的作用，同样，也离不开生物细胞物质-能量代谢机制研究领域所取得的重大科学发现和理论突破。

2.9 代谢与碳中和碳达峰

2.9.1 战略价值

碳达峰指二氧化碳排放量在某一年达到了最大值，之后进入下降阶段；碳中和则指一段时间内，特定组织或整个社会活动产生的二氧化碳，通过植树造林、海洋吸收、工程封存等自然、人为手段被吸收和抵消掉，实现人类活动二氧化碳相对“零排放”。增加二氧化碳固定碳和减少二氧化碳排放才能实现碳中和、碳达峰。通过以氮促碳、提升植物光合作用能力和合成生物学固碳是平衡二氧化碳的重要途径。

“双碳”目标规划中的重要一环是持续巩固提升生态系统碳汇能力。在中国，森林、农田和灌木林三个最大碳汇源在 2001-2010 年间的固碳量相当于期间化石燃料碳排放量的 14.1%。将代谢生物学的理念和设计能力应用于二氧化碳转化利用，是实现我国“双碳”目标的创新性解决方案。可构建从二氧化碳到燃料、材料、化学品的生物路线，创建药物、食物等高效合成的新型工业途径，从而建立清洁、绿色、可持续的新物质供给模式。

2.9.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

(1) 如何开发多尺度高光效系统设计模型，以挖掘和设计关键高光效基因，并整合高效光反应及碳代谢特征、蛋白结构生物学基础与分子遗传调控策略？

(2) 基于氮素促进的植物固碳效率，如何挖掘和设计关键元件以共生固氮调控植物光合固碳的机制，并高效创制碳封存植物根系？

(3) 在设计人工固碳生物系统时，关键问题包括如何设计和重构固碳生物代谢与调控网络，组装与适配人工固碳元件和功能模块，以构建高效实用的人工固碳系统？

2.9.3 我国及国际的研究基础与条件

提高植物碳汇能力的关键是提高植物光合效率。2013 年，比尔-梅琳达·盖茨基金会、美国粮食与农业研究基金会和英国政府国际发展部联合成立资助高光效实现项目 (Realizing Increased Photosynthetic Efficiency, RIPE)；同时，盖茨基金会

也启动 C4 国际水稻项目，旨在研究将 C3 作物改造成为 C4 光合的技术。以 RIPE 和国际 C4 水稻项目等为支点，国际上已经建立起多个光合作用合成生物学研究高地，搭建了高度合作的国际研究团队，创建了开展光合作用合成生物学研究的关键工具、生物资源和研究平台，促使植物光合成生物学取得一系列重要进展。与此同时，美国 SALK 研究所建立了项目，其目标是结合光合效率提高与根系改造，改造根系组分，创造深根系，增加植物固碳并延长所固定的碳在土壤中的存留时间，进而提升植物碳汇能力。

我国在光合作用改良的不同领域发展很不平衡。在光合作用系统生物学领域，我国研究在国际上处于领先地位。在光合作用分子改造领域，我国在光呼吸支路创制、光抑制及光合效率自然变异的遗传控制等研究领域做出系统性研究。在以氮促碳固定方面，我国在氮素营养吸收和共生固氮方向已做出重要贡献。但是，在光保护机制及其应用潜力方面，我国研究在国际上处于跟跑水平。而在根系组分改造方面，国际国内均处于起步阶段。

尽管我国科学家近年来在二氧化碳等一碳资源的人工生物转化、固碳线路设计构建及应用等方面取得了重要进展，但与国际先进水平相比，在基础理论、使能技术、核心体系、产业技术进展等方面尚存在一定差距。因此加强合成生物学在碳中和及能源转化中的应用是我国目前面临的重大科技任务。

2.10 新技术开发与代谢组学

2.10.1 战略价值

代谢物的变化可直接反映生命体的生理和病理状态，是连接基因和生物表型的桥梁。代谢组学主要研究生命体内小分子代谢产物的含量、分布、动态变化规律，是在组学层面研究代谢稳态、紊乱和代谢调控机制的重要技术手段之一。代谢组学是一门交叉学科，其与生物科学、分析化学、化学计量学、微生物学、合成生物学以及生物信息学等多学科密切相关。代谢组学数据和基因组、转录组、蛋白质组、表型组、微生物组等不同水平的组学数据进行整合，可以相互验证和补充，有助于更全面地了解生命过程和疾病发生发展机理，促进基础生物学研究及诸多与人类健康、疾病相关的科学研究。

代谢组学研究的发展离不开各种新技术和新方法的进步。目前还没有一种技术能够一次性检测生物样本中所有的代谢物。因此，代谢组学研究目前还处于快速发展期，仍有许多亟待解决的技术问题。发展基于核磁共振与质谱的各种新技术和新方法用于代谢物精准定性定量分析迫在眉睫。

2.10.2 关键科学问题或核心技术背后的科学问题

(1) 如何开发适用于高度复杂生物系统的分析方法，以实现生物体内小分子代谢物（包括已知和未知代谢物）的大规模、高效率解析？

(2) 在不同尺度（单细胞和细胞器）及维度（时间和空间）上，如何大规模跟踪生物体内代谢物的代谢反应路径，以测定其时空动态变化规律？

(3) 如何高效率地发现功能代谢物，并能直接、准确地研究其在生理和病理中的调控作用机制？

(4) 如何利用功能代谢物实现疾病的早期预防、诊断和治疗，以推进代谢组学的发展？

2.10.3 我国及国际的研究基础与条件

核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance, NMR）技术在生物样本的无损检测、高通量分析和组织样本的原位检测方面有不可替代的优越性。NMR 波谱仪主要被国外 Bruker 公司垄断，但国产谱仪的逐渐崛起为我国科技创新提供了强有力的支持。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院的高场 NMR 波谱仪等已产业化，自 1990 年代开始研发新一代 NMR 仪器，如动态核极化（Dynamic Nuclear Polarization, DNP）仪器。DNP 技术可使 NMR 检测灵敏度提高 3-5 个数量级，是代谢物成像等前沿领域亟需的新技术。目前，刘买利院士团队已完成了液体 DNP 的工程样机开发，成功实现了多种杂核的检测，为国内代谢生物学以及相关技术的发展提供了重要的技术支撑。周欣团队自主研发成功的肺部超极化气体磁共振成像（Magnetic Resonance Imaging, MRI）装备，在国际上首次实现了新冠肺炎出院患者的肺部微结构和通气、气血交换功能的定量和可视化评估，为相关领域的发展突破提供了新契机。

代谢组学研究所需的质谱仪主要厂商均为国外公司，包括美国的赛默飞、安捷

伦、爱博才思、德国的布鲁克和日本的岛津等。目前仅三重四级杆质谱仪能够实现国产替代，但是性能仍然落后于国外尖端产品性能 10-20 年左右。在高分辨质谱上（如 Orbitrap 和离子淌度质谱等尖端领域），国内缺少相应的替代产品，相关基础研究也较少，目前清华大学、宁波大学、西北核技术研究所、中国科学院大连物理化学研究所等在开展少量的前沿研究。禾信仪器在 2023 年实现了快速液相色谱串联四极杆飞行时间质谱自主产品的量产，但在稳定性方面尚需要时间考证。

在数据分析方面，目前代谢组学原始质谱数据分析和代谢物大规模定性分析主要依赖国外的软件和数据库。国内的研究人员只能登录国外的网站进行有限的使用。近十年，国内科研人员正在进行相关自主研发，如中国科学院的许国旺团队和朱正江团队在各自发展具有自主知识产权的代谢组学数据分析软件和数据库（如 MetDNA 和 Met4DX 等）。

近十年来，我国已逐步扩大对代谢组学研究的支持和投入，通过购置先进的质谱仪器和引进多位在代谢组学领域的一线核心科研人员回国组建相关平台，极大地推动了我国在该领域的技术发展。其中多个研究团队已具有一定的国际影响力，并已取得重要进展。

第三章 我国在相关领域的发展思路与政策建议

代谢生物学与其他多个学科的交叉融合，对国民健康、粮食安全、新兴产业开发以及生态环境保护等国民经济的重要领域产生了深远影响。近十年来，得益于国家在政策和科研方面对代谢生物学的长期稳定支持，我国相关研究实力得到大幅提升，生物产业也初具规模。

然而，我国代谢生物学领域仍然存在一些亟待解决的问题和挑战。首先，原始创新成果较少，高端产品的市场份额偏低；其次，研究资源分散，缺乏有效整合；再者，关键检测仪器和数据库严重依赖国外，存在被“卡脖子”的风险。

为了进一步推动我国代谢生物学的发展，促进其在国民经济中发挥更大作用，我们建议国家制定并实施代谢生物学重点专项和建立国家代谢生物学科技中心。通过在国家层面合理布局、整合资源，明确研究方向和重点任务，引领基础研究聚焦于国民健康、经济发展中的关键科学问题；同时，鼓励产学研联合，积极探索代谢生物学在相关产业中的应用；推动建立完备的仪器产品链，打造拥有自主知识产权的数据库，为人工智能和精准医疗的发展提供有力支撑。

3.1 建立代谢生物学重点专项

通过集中资金支持，倡导自由探索、顶层规划和市场需求导向的多维度策略。实现在代谢生物学重大科学问题探索和关键技术突破方面的前瞻性进展，促进从基础科学研究到产业化应用的无缝对接，加速代谢生物学领域的创新发展和技术成果转化，推动相关产业的健康、持续发展。

3.1.1 建立多维度研究平台，推进代谢性疾病的精准防治

需要建立高通量研究平台，包括利用个体化细胞模型和类器官体系，结合多组学技术和药物筛选平台，系统研究致病遗传变异和关键基因调控网络；发展新技术研究组织微环境细胞代谢异质性；探索靶向特定细胞改善代谢性疾病的新策略。同时，开发活体成像技术绘制代谢图谱，推动灵长类动物模型在疾病研究中的应用，最终建立基于中国人群数据的精准疾病防治体系。

3.1.2 深化基础研究与临床研究的结合，开拓代谢性疾病诊疗新途径

综合利用临床队列、疾病动物模型、多组学研究方法以及分子生物学和化学生物学手段，加强与临床相结合的基础研究，建立多层次、多角度的集成化活性筛选体系和能够更好模拟人代谢过程的研究模型，研发代谢疾病标志物，并关注不同人群和个体的遗传特征，开展精准医疗与药物研发，为代谢紊乱相关疾病提供创新治疗和干预方案。

3.1.3 构建“代谢—主动健康”综合管理新模式

建立“代谢—主动健康”综合干预平台，通过跨学科合作深入研究代谢与健康的关键要素及其相互作用，发展精准化干预方案和个性化健康指导，促进代谢健康管理的创新与实践，为社会大众提供全面、高效、个性化的代谢健康管理服务，提升公众健康水平和生活质量。

3.1.4 多维度探索微生物代谢网络,开启疾病防治新篇章

通过跨学科研究揭示疾病相关微生物及其代谢物的作用，建立关键技术平台，利用人工智能系统分析微生物代谢网络，探明疾病过程中微生物及其代谢物的动态变化，解析微生物与宿主代谢的交叉网络，发现新的疾病健康相关微生物及关键基因，为重大疾病的防治提供新靶点和策略。

3.1.5 推动植物代谢生物学研究与产业发展

建议重点支持的研究方向为植物代谢物的生物合成与调控、生理作用及其机理，植物发育及逆境响应中的代谢重编程机制，植物代谢多样性的自然变异及其演化模式。加强国家级研发平台和基础设施建设，引导企业设立相关基金，同时创造良好的软硬件环境，推动高校、研究所与企业联合攻关，形成产业化开发的研发创新链，建立相关标准、识标注体系及市场准入退出机制。

3.1.6 布局生物材料、生物能源和生物固碳的基础和产业共发展

构建高光效元件库和表型筛选平台，组建国家级一碳气体生物转化研发中心，

加强代谢生物学在生物能源制造中的应用，开发定制化生物材料，推动生物材料在精准医疗等领域的进步，加强原创性引领性生物材料攻关，支持基础研究成果的市场化和产业化。

3.1.7 自主创新,推进下一代代谢组学技术研发

加快发展具有自主知识产权的核磁共振仪和质谱仪，突破关键核心技术，实现国产替代；同时布局下一代代谢组学技术，包括空间代谢组学、单细胞/亚细胞器代谢组学、未知代谢物结构鉴定、活细胞或动物多种不同代谢途径示踪以及蛋白质新型修饰的组学检测等，促进代谢物的高精准、高覆盖、实时定量分析，为未来的药物研发和治疗策略提供重要的科学依据。

3.2 建立国家代谢生物学科技中心或全国重点实验室

国家代谢生物学科技中心或全国重点实验室可以提供先进的仪器设备、数据库资源和分析工具，为研究人员提供必要的支持，推动代谢生物学研究的发展。其次，代谢生物学是一个涉及生物学、化学、医学等多个领域的交叉学科，科学中心可以搭建不同学科之间的合作平台，促进学科交叉融合，催生新的研究方向和突破点。再者，科技中心可以建立统一的实验平台和数据标准，减少重复建设和资源浪费，提高研究效率，通过共享数据和经验，可以加速研究进程，避免无谓的探索。最后，科技中心可以吸引和培养代谢生物学领域的优秀人才，通过提供良好的科研环境和发展平台，鼓励青年人才脱颖而出，为国家储备高水平的科技人才。

3.2.1 在国家层面集中力量建立代谢仪器分析平台

建立国家代谢仪器分析中心,配备国际先进水平的质谱、核磁共振等大型仪器设备,提供高通量、高质量的分析测试服务。基于代谢特征的报告体系,实现高通量代谢的动态实时监测,搭建药物筛选平台。开展联合攻关,加强人才队伍建设,促进国际交流合作,突破代谢物检测、数据解析等核心技术瓶颈,提升我国代谢研究的原创能力。最终形成布局合理、资源共享、技术先进、服务高效的平台体系,为推动我国代谢研究和相关产业发展提供有力支撑。

3.2.2 建立国家级代谢疾病资源库

对标国际先进的生物医学资源库，如英国的 UK BioBank，建立具有中国自主知识产权的代谢疾病致病基因、治疗及预防信息资源库，并提供便捷高效的数据检索、分析和共享平台。为我国科研人员提供重要的研究工具和数据支撑，加快代谢性疾病发病机制的阐明、新药研发和精准医疗的实现。同时，这个资源库的建设也有助于促进多学科交叉融合，推动生物信息学、人工智能等新兴技术在代谢疾病研究中的应用。也可以增强我国在该领域的国际话语权和影响力，加强与国际同行的交流合作。

3.2.3 建立有我国特色的新型天然产物结构文库

系统收集和整理我国各地特有的动植物、微生物等资源，建立天然代谢产物来源的数据库，为新型化合物的发现提供基础。创新分离纯化技术，建立结构解析平台，开展系统的生物活性评估，加强产学研合作，完善知识产权保护。通过这些措施，可以建立具有自主知识产权、结构新颖、功能明确的天然代谢产物结构文库，为天然代谢产物的研究和产业化应用提供支撑，推动我国天然代谢产物资源的可持续利用和生物医药产业的发展。

3.2.4 开发人工智能系统，解析代谢网络、发现人群和个体代谢特征

整合机器学习算法、深度学习模型、网络分析方法、多组学数据整合、知识图谱挖掘、因果推断模型和转化医学应用等，综合运用这些方法从多维度、多层次解析人群和个体的代谢网络和代谢特征，为代谢组学研究和精准医疗应用提供新的思路和工具。改变我国在这一基础研究领域严重依赖国外的落后现状。

开发虚拟细胞与数字模型，整合生命科学、数学、计算科学等学科，分别建立模块模型，整合创建整体模型，开展基于虚拟细胞和数字生物的各类应用所需要的算法、软件开发。