

**美国工程生物学研究联盟**

**微生物组工程：下一代生物经济研究路线图**

中国科学院上海营养与健康研究所

上海生命科学信息中心

上海市生物工程学会

2020年11月

## 美国工程生物学研究联盟

### 微生物组工程：下一代生物经济研究路线图

编者按：2020 年 10 月，美国工程生物学研究联盟（EBRC）发布《微生物组工程：下一代生物经济研究路线图》（Microbiome Engineering: A Research Roadmap for the Next - Generation Bioeconomy）。这是继 2019 年工程生物学路线图后，EBRC 发布的第二份研究路线图。路线图聚焦微生物组与合成/工程生物学交叉融合后的技术研发与应用，将该领域分为 3 个技术主题（时空控制、功能生物多样性、分布式代谢），阐明了 3 个技术领域未来 20 年的发展目标，以及 5 个应用领域（工业生物技术、健康与医药、食品与农业、环境生物技术、能源）如何利用微生物组工程的进步解决目前面临的广泛社会挑战。本期快讯梳理了路线图的主要内容，并在附录中介绍了 3 个微生物组工程的技术领域未来 2 年、5 年、10 年和 20 年的研究路线图。

#### 1. 路线图概述

美国工程生物学研究联盟（EBRC）发布的《微生物组工程：下一代生物经济研究路线图》，是 2019 年《工程生物学：下一代生物经济研究路线图》的后续，是对微生物工程的现状及未来 20 年的研究与开发领域进行的重要评估。同时，路线图还详细阐明了这些科学进步能够以何种方式应用于不同的产业领域。该路线图旨在为致力于微生物组工程领域的科学家和该领域的政策制定者提供一个“前向”的参考。微生物组工程的技术领域（技术主题）详细介绍了如何利用这些研究成果开发针对特定应用的工程化微生物（应用主题）。

EBRC 旨在通过路线图全面了解微生物组工程的现状，帮助制定该领域的长期目标，从而推动该领域的发展。2019 年底到 2020 年上半年，EBRC 技术路线图工作组协助制定了该路线图的框架和内容。通过电话会议和现场研讨会，对路线图的内容做了进一步补充。SARS-CoV-2/COVID-19 大流行后，工作组重新召开了研讨会和相关咨询，邀请了 40 多位政策工作者、行业专家、博士后学者和研究生等，对路线图内容进行调整和完善（图 1）。

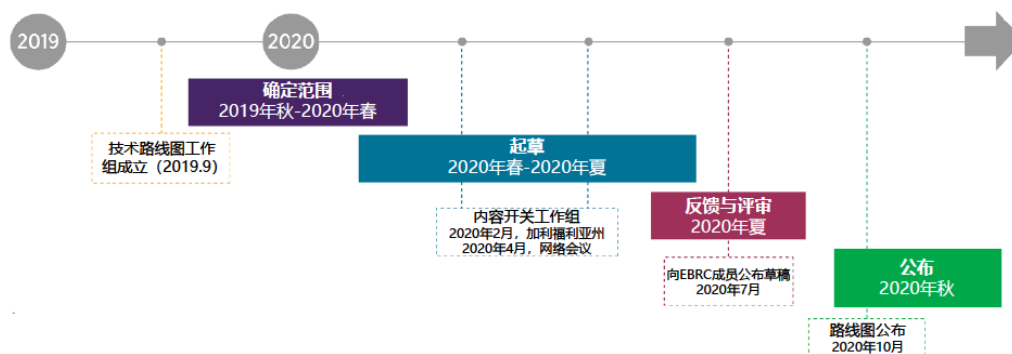


图 1 微生物组工程研究路线图制定的时间线

### 1.1 技术主题

微生物组工程的路线图由 3 个技术主题组成：时空控制（Spatiotemporal Control）、功能生物多样性（Functional Biodiversity）和分布式代谢（Distributed Metabolism）（图 2）。时空控制考虑如何设计微生物组，使其随着空间和时间的推移能够精确、可预测的定位和发挥作用。功能生物多样性讨论了如何根据功能相似但分类不同的有机体来设计微生物群落，从而提高工程化微生物在不同环境中的互动。最后，分布式代谢侧重于设计利用单一微生物物种或具有独特代谢能力的某一类微生物组或微生物群落共同产生和/或降解特定化合物。

3 个技术主题都围绕能够显著提高微生物组工程的突破性能力而构建的。突破性能力进一步被划分为 2022 年、2025 年、2030 年和 2040 年（分别是未来 2 年、5 年、10 年和 20 年）能够实现研究里程碑的路径。2022 年和 2025 年的短期里程碑计划可以通过现有项目、基础设施等实现。2030 年和 2040 年的长期里程碑可能需要在技术上、经济上的长期支持。

在路线图制定过程中，工作组也发现了几个广泛适用并且是 3 个技术主题都面临的技术挑战。这些挑战可以通过变革性工具和技术的进步得到解决或改善，也将成为推进微生物组工程最关键的研究领域，尤其是在完善微生物模型、细胞信号和通信，以及预测微生物群设计、生长和功能的计算模型等方面。

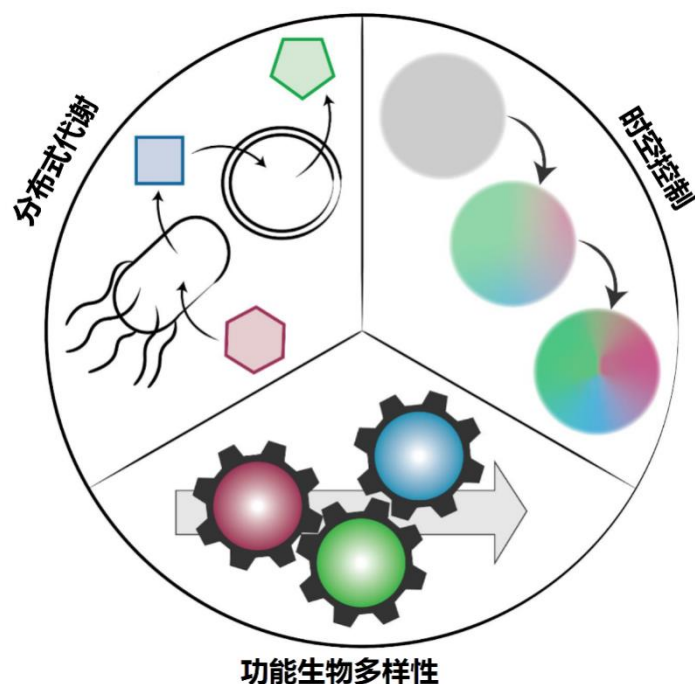


图 2 微生物组工程的技术主题

路线图在 3 个不同技术主题下探讨了微生物组工程的未来发展。每个主题都涉及微生物组工程的各个方面，需要技术的推进从而充分实现工程化菌群的潜力。时空控制讨论了在微生物组中随着时间的推移调控细胞和物种所需的进展；功能生物多样性探讨了如何使用不同的、基因无关的生物体来进行功能性冗余的改造，从而随着条件的变化来提高微生物组的稳定性；分布式代谢详细说明了如何在一个微生物群落中实现多个有机体的化学转化。

## 1.2 应用领域

路线图的应用领域来源于工程生物学路线图（2019）：工业生物技术、健康与医药、食品与农业、环境生物技术以及能源。在各个领域，主要聚焦微生物组工程的进展如何帮助解决广泛的社会挑战。微生物组工程的社会挑战与工程生物学存在交叉。技术开发成果将有助于解决这些社会挑战，证实微生物组工程的潜在应用。工程化微生物个体已经应用于很多领域，开发类似应用的微生物组或微生物群落将有助于降低成本、扩展功能并实现更大的可访问性和可用性。在某些情况下，微生物组工程还将实现单一微生物无法实现的全新功能。因此，微生物组工程的发展将对现有技术的应用产生短期影响，也将对人类与微生物世界的相互作用产生更具变革性的长期影响。

## 2. 微生物组工程化

微生物组或微生物群落在自然界中无处不在，地球上几乎每个环境中都有微生物的存在。成千上万种微生物生活在人体肠道中，帮助分解食物、训练人们的免疫系统并能够通过人们尚且不完全清楚的方式影响健康。微生物在地球的温泉、冰川、深海等任何地方都形成了群落。微生物群落的研究已经进行了二十多年，它们对世界的影响也已经被人们所认识。诸如美国国立卫生研究院（NIH）的人类微生物组项目等大型科学项目也在试图记录人类微生物组的多样性，利用 DNA 测序的新进展观察微生物组在人与人之间以及身体各部位之间的转变。然而，即使现在已经认为微生物组在许多不同的环境中发挥着重要功能，迄今为止，关于微生物组的大多数研究都局限于相关结论而不是对机制的认识。

将过去研究的相关性拓展到不同的遗传元件、蛋白质组学或代谢工艺，可以定向设计或改变微生物组，进而诱导特定微生物组的功能，这将需要对微生物组进行更多的微调和控制。在过去的十年里，科学家们已经建立了一些创造人工微生物组或调控自然微生物组的工具。随着这些工具变得更可靠、更具体、具有更高的通量，人们能更多地从机制角度理解天然微生物组的功能，并使工程学的新功能成为一个可行的目标。然而，仍然需要继续开展可编程细菌素和抗菌肽之类等更多工具的研发，以便更好地协调微生物组的研究框架。微生物组工程路线图旨在对该领域的短期和长期需求进行前瞻性探索，从而帮助科学家和政策制定者充分利用微生物组工程。

## 3. 在工程微生物组中整合社会因素和公众价值观

EBRC 路线图中所呈现的挑战和成就不是与世隔绝的。工程生物学的推进需要进行重大的并行、非技术性工作，从而应对社会、法律和监管的挑战。工作组也探索了一些需要广泛考虑的因素，从而确保微生物组工程的新技术能够发挥对社会最有益的作用。

### 3.1 微生物组工程的监管挑战

微生物组工程的主要障碍之一将是工程学微生物组在实验室以外应用的监管壁垒，例如，在治疗和诊断，或在农田开放环境中的应用等。许多交叉因素造成了工程化微生物组或者天然微生物组工程化方法广泛应用面临的挑战。在美国

的监管水平上，联邦和州级别的多个机构可能对转基因生物拥有管辖权，具体取决于其构建和应用的方式。目前，美国农业部（USDA）、食品药品监督管理局（FDA） and 环境保护署（EPA）都可能对同一工程生物体拥有监管权。如果在美国境外应用这些生物体，为了符合当地法规，还需要遵循其他的指南系统。政策制定者和监管者应该积极在这些框架中引导科学家和生物技术公司，并且简化用于审查和批准新技术的流程。

微生物组工程还需要政府、工业界和学术界之间的大力合作，从而在工艺研发的多个环节上分担风险。由于额外的监管障碍和其他可能的技术障碍，工程化微生物组是生物技术公司的高风险领域之一。此外，微生物生态学还存在许多未知方面，这使对释放工程化生物体到自然环境中的影响很难预测。加强政府、工业界和学术界之间的合作可以鼓励在整个研究和开发过程中的交流，在技术进入市场前充分了解潜在的障碍，例如，监管要求。随着微生物组工程研究的推进，通过完备的措施来确保安全，同时不会造成妨碍公司开发高风险、高回报技术的法律和监管障碍，将具有重要意义。

### 3.2 微生物组工程的政策支持

尽管与微生物组工程相关的成本将有不同程度的降低，但重要的是要认识到，实验的总成本实际上可能会随时间增加。全面的多组学研究需要足够数量的样品和足够数量的样本，以评估微生物群落动力学并使其具有实际统计意义。此外，重要技术的挑战还有提高数据的再现性，特别是能更好地将在对照环境中获得的数据转换为对天然微生物群落的预期结果。由于科学家们对提高研究重复性的关注，像国家标准技术研究所这样的机构也开始着手参与微生物测评方法的研究。

应对这些挑战，可能需要资助机构将支持转向具有此类专业技术能力和基础的设施，这些设施与研究人员有合作并为其服务。能源部的联合基因组研究所可能是一种典型的集中化研究中心的模式，但这种集中化的基础研究设施很大程度上也可能会偏离目前的生物学实践；然而，它让人想起实验物理学领域曾经出现过的国家和国际合作，当时实验所需的设施规模迫使多个组织之间必须进行相互协调。

### 3.3 微生物组滥用的安全考量

微生物组工程将对环境、现有天然微生物群落、动植物和人类带来新的生物

安全风险。如果使用得当，工程化的微生物群落可以帮助解决人们在应用方面发现的许多社会问题。然而，同样的技术，既能利用微生物组改善农业土壤或改进疾病疗法，同时也具有滥用的可能。尽管工程 DNA 的合成和使用已经非常普遍，但针对人工 DNA 序列风险评估的政府指南却远落后于技术的进步，仍然将决策过程留给行业、实验室和企业自行负责。微生物组工程将更具挑战性，因为同一种微生物群落在一组给定的环境条件下可能被认为是安全的，然而当变换到不同的生态系统或不同的条件后，该群落可能会有不同的功能，甚至有可能致病。因此，大力推进用于评估、预测和监测微生物组工程，以及对生态系统和生物体可能产生的意外后果的工具和方法，是非常有意义的。

政府机构、资助机构、研究人员和行业合作伙伴需要共同努力来解决这一挑战。科学家需要证明，微生物组在意外或蓄意释放到错误的环境中后不会造成伤害，或者在被喂食不同的化学前体后不会产生有害或非法的化学物。此外，即使在正确的环境中释放，工程微生物组也不能对更广泛的外围生态系统产生不利影响（例如，可改善作物长势，但会损害传粉媒介的微生物组）。因此，为田间试验（特别是农业微生物组试验）提供额外资金和行政支持，对于理解微生物组工程是如何出错的将具有重要意义。这些研究不仅对更好地了解工程微生物组如何发挥作用，还可以提高安全性。资助机构应提供资金支持，在开发缓解技术和遏制方法的同时，培训科学家以减少他们的成果被滥用的可能性。

刘晓 熊燕 编译自  
EBRC

## 附录：微生物组工程的技术主题路线图

### 1. 时空控制

目标 | 突破能力 | 里程碑

#### 微生物组空间特征的工程化

##### 开发用于改造微生物组空间特性的工具

通过纯培养中获得确定基本生理学指标的标准化方法（例如生长速度、死亡率、动力学特征、代谢能力），以及与之相关的原位微生物组测量（例如基因组比率的复制率）	创建原位微生物组的大型 3D 图像数据库（例如以地球物理化学和生物学特性为特征的沉积柱高分辨率剖面、组织有机物和体内微生物组），帮助预测新型微生物组的特征	能够减少或预防微生物组中基因水平转移的工程学工具，防止其重新获得提高空间传播性的基因	利用工程化改造，能够在自然环境中迅速和稳健地降低微生物组的基因组大小的技术，从而限制其传播性
在宿主中追踪等位基因水平的遗传变化和可移动元件的转移（例如质粒、噬菌体），测量微生物组的数量、动力学、基因组进化和遗传交换	设计识别基因位点或网络的计算工具，这些基因位点或网络可以在不影响生物体生长或生存能力的情况下被移除	设计能够限制微生物组生长的机制，这些机制能够与其营养限制正交	
通过移除在多种环境中持续存在的关键基因来限制环境生态位（例如消除生物膜形成或碳利用功能）			

##### 设计能够根据环境改变规模的微生物组

在米级水平以 x-y 形式改造结构化微生物群落，以应对合成信号（例如工程化代谢、噬菌体）	工程化微生物组，可以在指定区域生长（x-y 空间），或可以在空间中形成特定图案或分布	对微生物组进行工程化改造，使其根据特定环境线索确定生长和模式（例如表面结构变化、化学或营养环境）	对微生物组进行工程化改造，根据特定的环境线索确定生长和模式（例如表面结构变化，化学或营养环境）
--	--	--	---

##### 工程化改造空间自组装群落（例如组织是模板化的，而不是环境塑造的）

工程化微生物组，能够用于在 2D 表面进行重复生长模式	在可控环境中设计 3D 结构的微生物组	工程化微生物组，能够在复杂环境中自我定位（例如土壤、人体肠道），能够在难以接近的位置定植	工程化微生物组，具有天然图灵模式，从而构建所需结构的
	工程化微生物组，生长到特定规模后停止生长		工程化微生物组，能够创建可相互作用并共同工作的特定复杂三维结构

2022

2025

2030

2040



设计能够改变细胞外环境的微生物组			
设计生物膜或其他能够将微生物群落固定在特定空间的固定结构	能够向天然生物膜拓展的、不同类型的结构化环境	创建具有自动化结构功能的生物膜	
	建立可控制的生物膜，形成程序性、非均匀的结构		

### 控制工程化微生物组的空间动态

确定微生物组随着时间的物理动力学			
通过不同环境测量营养和流向（例如土壤、土壤到植物，体内）及高通量群落（例如病毒、细菌、真菌）	创建高通量、多路径及自动化系统来量化可控环境中的微生物组的生理参数	衡量环境分布以及不同环境中微生物、噬菌体和化学物质的漂移，从而帮助预测生态模型	在复杂天然环境中迅速、高通量量化生成生理参数、的方法

设计随着时间来控制微生物组生长或传播的机制			
工程化微生物组，将程序性自我毁灭与细胞振荡器整合起来，因此死亡是基于时间而不是细胞密度	在单一时间点使用原位测量方式来预测微生物组的未来限制因素（例如空间、营养、特定微量金属、必需氨基酸）	工程化微生物组，含有在达到功能性终点后能够引发自我毁灭机制的“通用闹钟”	设计微生物组，能够在多重时间尺度上实现多种复杂功能（例如可以蛰伏几个月，在秒或分钟时间尺度上发挥功能）
	工程化细胞-细胞通路，在达到特定细胞分裂数后能够杀死技术菌株以及微生物组附近的物种		

设计在进化的短期时间内能够保持功能的微生物组（例如数月或数年）			
对微生物组工程的适应性影响进行建模，确定其对逃避频率和竞争优势的影响	设计和建立与传统遗传相比，对突变或损失有更高稳健性的遗传组分当应用微生物组（包括长期持续性培养）的多重压力抵消时制定进化图，并设计能够预防所需功能进化的弹性有机体或组合控制	设计能够移除或失去其工程化功能的微生物组	设计能够在环境中影响未来连续动态学的生物体（例如生态位构建、生态位抢占以及优先效应），使得微生物对周围环境的影响超过其时间范围



## 2. 功能生物多样性

目标    突破能力    里程碑

### 在共位群水平确定并调控微生物组的功能组成（例如自上而下的工程）

描述任何微生物组的功能性共位群组成			
根据宏基因组数据和活动地图（例如宏转录组数据、稳定同位素探针、代谢组学）确认一致的功能亚单位	在引入或清除新成员之前，迅速进行现有共位群的表征（即确认共位群中的微生物组成员及其相互作用，表征其他微生物可能与现有成员之间的相互作用）	制定功能性共位群代谢路线图以及生长、定植和合成代谢的依赖性 表征功能性共位群组成及其功能的非结构性技术（即避免不必要的组学，发现降低时间、空间及细胞间活动的方式）	在天然微生物群落中，以原位及高空间分辨率来迅速表征所有物种及其相互作用
移除或修改功能性共位群，从而消除其在微生物群中的作用			
靶向或杀伤在可控或自然环境中的单一微生物物种	通过改变或消除可控微生物群中的基因或代谢组来消除其功能（例如抑制氨基酸合成以获得营养缺陷型）	通过遗传性移除功能或杀伤具有功能的有机体，从一种天然微生物群中除去整个功能共位群	创建迅速和稳健的计算方法以合理设计 cocktails（例如噬菌体、噬菌体尾巴状的细菌素、抑制剂、CRISPR），从而消除所需的功能性共位群
向微生物群落中添加功能性共位群，从而引入新型功能或修饰现有功能			
设计能向受控的微生物组引入新功能的共位群	设计在受控微生物组中能改变现有功能的共位群	充分编辑一种天然微生物组，为引入的新共位群创造生态位	在天然微生物群中原位调控任何“天然”物种，并超越培养模式有机体或模式系统
在微生物群中随意操作特定微生物群或共位群			
扩大现有 DNA 载体的宿主范围，在不同环境条件下精确定义宿主的宽度和效率	进一步进行载体的功能化，从而实现其他生物分子的运输，例如 RNA 或蛋白质 实现微生物群落的体内遗传调控 在微生物群中添加 DNA 调控 DNA 的定位	结合功能，对微生物群落进行更复杂的改造，或建立能够传送新型细菌并知晓宿主范围的路径	使用计算模型引导的多个模式（例如核酸调控、蛋白质工程以及新微生物物种的引入），以在特定应用中对天然和结构化群落进行合理修饰

2022

2025

2030

2040



### 根据组成的有机体或物种（例如自下而上的工程）来设计用于任何功能或环境的微生物组

#### 通过添加或修饰独立的微生物物种来设计并工程化改造功能性微生物组

创建 2-5 个表征物种的合成微生物组（具有不同的功能性共位群），在天然群落中模拟功能	在由 2-5 个表征物种（具有不同的功能性共位群）构成的合成微生物群中，调控群落功能性动态（例如充足的物种和/或表达）	构建有部分冗余的共位群成员组成的群落，能够针对环境或群落变化发挥作用	
---	---	------------------------------------	--

#### 预测并工程化微生物组中不同物种之间的相互作用

从生物学角度确认在任 何环境中，何种代谢物 适用何种微生物群的方法（例如可以用怎样的 微生物进行生长）	根据宏基因组数据，确 认具有相关或一致功能 的个体微生物物种	对微生物进行工程化或 优化，使功能性共位群 和物种中需要相互作用 的位置进行突变	建立预测性模型和实验 框架，工程化改造具有 特定物种组成和相互作 用的微生物组
--	--------------------------------------	---	--

#### 预测并工程化改造微生物组和环境之间的相互作用（例如温度、氧含量、pH、小分子或药品、饮食成分）

对非模式微生物物种进 行工程化改造从而激活 遗传应对单一环境扰动	建立和确认试验框架， 从而改造负责应对所需 环境扰动的微生物组	设计用于应对多种环境 干扰的微生物组	通过所需功能的环境扰 动因素，在微生物组中 “常规”预测并调控微 生物
--	---------------------------------------	-----------------------	--

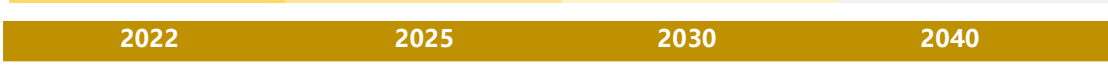
#### 为自下而上的微生物组工程建立设计-构建-测试-学习循环，从培养标准到遗传工具到受控和天然微生物组的“部署”

为微生物组的维持和繁 衍制定标准方案	拓展高通量平台的使用 和容量，提高试验再现 性和准确度	在对样本认知有限的情 况下，设计实现微生物 组完全自动化表征的方 法（例如在培养物中的 生长、代谢）	在通过测序进行初步鉴 定后，迅速开发能够控 制有机体的工具（例如 识别培养条件、遗传操 控、空间定位），包括 非培养的有机体
计算预测微生物个体在 群系中的行为并确定最 少的营养需求			
设计无标记的筛选方 式，实现工程化菌株在 群落中的稳定性			

### 工程化改造对进化和环境压力具有稳健性的微生物组

#### 工程化改造对进化和环境压力有抗性的微生物组（例如环境变化、分散力、营养剥夺）

工程化改造高通量系 统，并随时间测量共位 群的共同进化	由 2-5 个表征物种组成 的（有多种功能的共位 群）合成微生物组控制 群落的功能性动态（例 如物种丰富度/或表达）	工程化改造微生物组从 而杀死能够从共位群中 分散出去的细胞（例如 生产特定的代谢物、降 解特定化合物）	工程化改造包含多种功 能的共位群（例如每个 共位群的多个物种）， 并能在自然环境中维持 其功能的微生物组
在特定环境中使用模式 微生物组，检验已充分 研究的生态压力应对 （例如温度变化、湿度 梯度、紫外线暴露）	工程化改造能够应对环 境压力以维持功能的共 位群（例如环境中应对 pH 改变的缓冲液，应对 掠夺者的抗生素/抗病毒 物质，应对减量的“营养 清除分子”）	工程化改造能够通过生 产生物膜或其他材料来 帮助微生物抵抗分散力 的物种	工程化改造能够以环境 条件或营养可用性来引 导进化的共位群，在进 化后仍可延续最优功能



### 3. 分布式代谢

目标    突破能力    里程碑

#### 使用多物种微生物组来生产天然或非天然化合物

使用多物种微生物组进行分布式化合物的生物合成			
对微生物组中实现化合物中间体运动的转运因子、传感器和/或细胞外酶进行识别和工程化	对物种进行工程化改造，将通用的生物中间体或电子携带者（例如醋酸盐、甲酸盐、丁酸盐、乙醇）转移到更高价值的前体分子中，并进一步转化  使用多种微生物来生产额外的化合物以催化反应（例如新增的多功能组）	工程化改造在多种有机体中分布的多步骤合成通路，从而降低毒性中间体的积累	不同的催化环境中的群落的空间性分布，从而促进更高效及特异性的生物合成

使用支持基础生产菌株的群落来进行化合物生物合成			
工程化改造微生物组以移除抑制性化合物(例如含氢或硫的化合物)，从而在基础菌株中刺激催化	工程化改造微生物组，在当地环境中维持稳态，确保当地环境中基础生产菌株在原位的最高效率	使用现有的微生物来产生具有附加价值的化合物（例如将植物生物量转化为乙醇、酸和氢气的厌氧真菌。产甲烷菌将氢气作为电子来源，生产更有价值的物质，例如甲烷）	设计使用多种碳源的有机体群落，可将其能力转移给一种或多种生产者进行生物合成的通用载体（例如微生物种、细胞外蛋白、小分子）

迅速设计能够作为现有天然微生物群落的补充来发挥作用的工程化微生物组			
开发适用于多种环境生态位的样品和分析方法	识别基于已存在自然群落中的宏基因组、宏转录组和代谢组的“可用”环境生态位	设计能够在特定环境中侵入天然群落并生产特异性代谢产物的微生物组	生产具有支持所需环境生态位特定功能的微生物分子工具（例如提供化合物抗性、产生特异性产品或副产品）

#### 工程化改造能将难以控制的材料转化为有用产品的微生物组

设计用于捕获或降解难以控制的材料代谢群落			
开发识别特定反馈组成的互作微生物的工具	对于已知的化合物，设计能进行降解并试验性证实化合物部分降解的微生物组	开发可以合理设计微生物组，使其能够高效生物降解非天然组分	工程化改造动态群落的稳定性



**使用常规的不相容性化学反应对输入进行平行降解（例如结合厌氧和好氧工艺）**

识别能够独立降解一种化合物不同组分的有机体（例如一种有机体能够进行上游的厌氧，第二种有机体能够进行下游的厌氧）	工程化改造能够创造并维持不同微环境的微生物组（例如厌氧反应小泡、酸性微室）	设计产生微环境的微生物组，结合相关降解有机体，实现每个有机体周围的同步降解（例如，不需要在各层之间扩散）	在不兼容的物种之间创建物理连接或其他密切的连接，使得它们相互依赖而生存
---	---------------------------------------	--	-------------------------------------

**设计专门用于养分再回收和再循环的微生物组，实现输入最小化并创造自给自足的环境**

设计从生物反应器废弃物中识别“可使用”的代谢产物的方法	展示从完整的生物合成中获取“可再次利用”的材料，以作为新型生物合成运行的原料（例如生物反应器中分离剩下的产物）	创建循环利用死亡生物量的方式	设计复杂的微生物组，使其能够在循环利用死细胞生物量，可在自我维持的生态系统中生存并能够将投入转化为产品
-----------------------------	---	----------------	---

**设计用于光合作用、化学合成电子和工程化生物过程中碳捕获的合成微生物组**

**产生可以合成具有附加值的生物化学物的稳定光自养或岩石自养微生物组**

概念验证生成能够稳定生产具有附加值的生物化学物质的光/岩石自养微生物组	在光/岩石自养微生物组中提高能量捕获效率	开发能够为生物合成吸收多种形式碳的光自养群落	对微生物组驱动的工业生物过程进行工程化改造，利用浓缩的二氧化碳或碳酸氢盐流获得非化学能量，从而生产具有附加值的生物物质
	在光/岩石自养群落中使用两相生长模式控制生物量的特异性生产		使用大气中的二氧化碳（~500ppm）创建实现光/岩石自养的中试规模的工艺流程

**控制进入微生物组以及微生物群中的电子流，为特定的化学反应增加外源还原能量**

设计由外部电子来源驱动的微生物组（例如电发酵和外部醋酸氢供应），将电子能量获取与生物转化联系起来	确定定义模式微生物组关键功能的试验或模型，提高效率和生物转化率	在实验室到中试水平，设计能够根据需求从微生物组来源获得能量和电子提取的方式	设计由光或电子作为能量来源的微生物组，可进行高效的生物转化
--	---------------------------------	---------------------------------------	-------------------------------

