

观点

DOI: 10.12211/2096-8280.2026-040

城市智能代谢及生物制造体系：重塑未来城市生态与绿色经济

曾安平^{1, 2, 3}, 马成伟^{1, 2, 3}, 关傲聪^{1, 2, 3}, 聂磊^{1, 2, 3}, 李昕^{1, 2, 3}, 战春君^{1, 2, 3}, 刘建明^{1, 2, 3}

(¹ 西湖大学合成生物学与生物智造中心, 浙江 杭州, 310030; ² 浙江省全省智能低碳生物合成重点实验室, 浙江 杭州, 310030; ³ 西湖大学工学院合成生物学与生物工程实验室, 浙江 杭州, 310030)

摘要：“十五五”时期，我国推进现代化产业体系的重要目标之一是实现经济社会的全面绿色转型。生物制造因原料可持续、加工过程绿色、产业潜力巨大，被四中全会再次强调为高技术绿色发展的未来关键产业。目前，生物制造主要应用于医药、化工、能源、材料、农业和食品领域，但其大规模应用受限于原料和能源供给。绿色能源转型同样是“十五五”的重要目标，但存在如何解决“发得出、接得住、用得好”的难题。另一方面，我国城市化发展迅速，面临环境、就业和空间结构等多重压力。生物制造与绿色能源、城市化融合，可拓展应用边界、优化能源利用，同时缓解城市生态，人口就业压力，为绿色智慧城市和城市工业提供动力，加速生产生活方式的绿色低碳转型。因此，我们提出建设“城市智能代谢及生物制造体系”，打造了其技术示范空间，作为未来城市生活与社会经济绿色低碳发展的新范式。本文将介绍该体系的背景与核心内容，综述其关键技术，并以千万人口城市为例，展示通过构建城市智造代谢空间，每年可形成千亿元规模的就地生产，就地消费的城市生物制造产业。依托生物制造，未来城市将成为兼顾高效空间利用、零碳经济发展、就业提升与宜居舒适的“智能代谢空间”。

关键词：城市智能代谢；生物制造；绿色低碳；循环经济；城市工业

中图分类号：Q939.9; Q789 **文献标志码：**A

Urban intelligent metabolism and biomanufacturing system: reshaping the future of urban ecology and green economy

ZENG Anping^{1, 2, 3}, MA Chengwei^{1, 2, 3}, GUAN Aocong^{1, 2, 3}, NIE Jinglei^{1, 2, 3}, LI Xin^{1, 2, 3},
ZHAN Chunjun^{1, 2, 3}, LIU Jianming^{1, 2, 3}

(¹ Center for Synthetic Biology and Integrated Bioengineering, Westlake University, Hangzhou 310030, Zhejiang, China; ² Zhejiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Low Carbon Biosynthesis, Hangzhou 310030, Zhejiang, China; ³ Laboratory of Synthetic Biology and Bioengineering, School of Engineering, Westlake University, Hangzhou 310030, Zhejiang, China)

Abstract: During the 15th Five-Year Plan period, one of China's key objectives in building a modern industrial

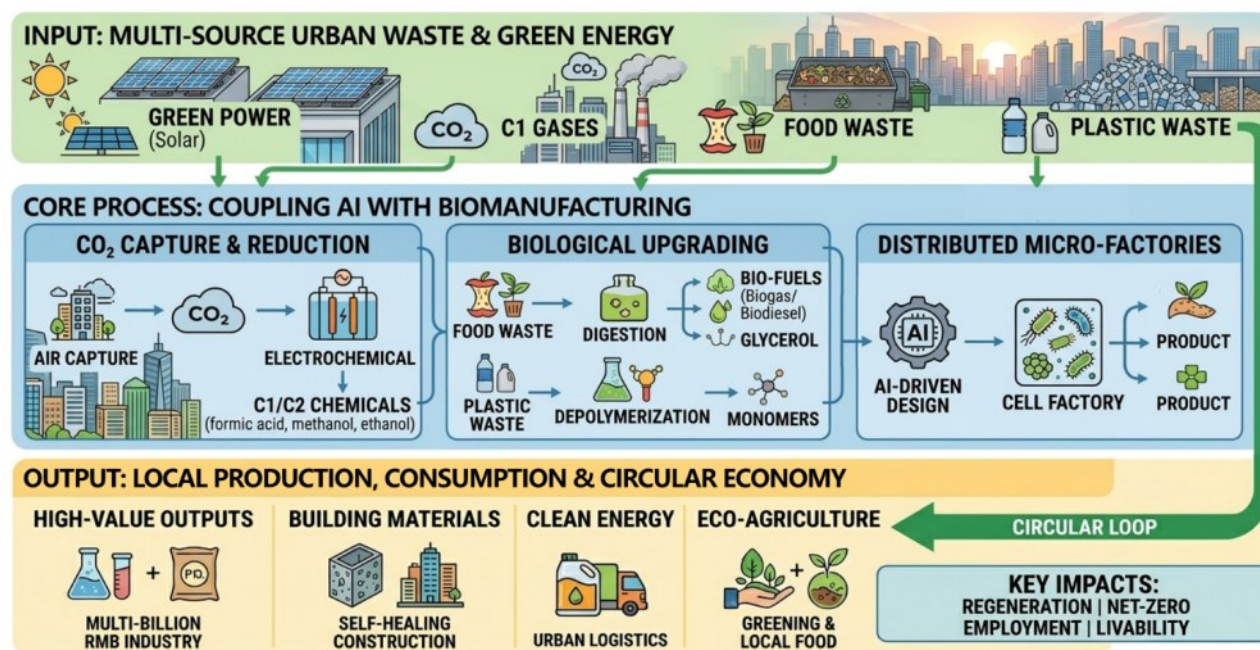
收稿日期: 2026-05-08 修回日期: 2026-05-31

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFA09012000); 浙江省“尖兵领雁计划” (2025C01094), 中央引导地方科技发展资金 (2024ZY01025)

引用本文: 曾安平, 马成伟, 关傲聪, 聂磊, 李昕, 战春君, 刘建明. 城市智能代谢及生物制造体系: 重塑未来城市生态与绿色经济[J]. 合成生物学, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-040

Citation: ZENG Anping, MA Chengwei, GUAN Aocong, NIE Jinglei, LI Xin, ZHAN Chunjun, LIU Jianming. Urban intelligent metabolism and biomanufacturing system: reshaping the future of urban ecology and green economy[J]. Synthetic Biology Journal, 2026, 7. DOI: 10.12211/2096-8280.2026-040

system is to achieve a comprehensive green transformation of the economy and society. Biomanufacturing, recognized for its sustainable feedstocks, green processing, and significant industrial potential, has been reaffirmed as a future-oriented key industry for high-tech green development in China. Currently, biomanufacturing is primarily applied in the areas of pharmaceuticals, chemicals, energy, materials, agriculture, and food, yet its large-scale deployment remains constrained by feedstock and energy supply. The green energy transition is another major goal of the 15th Five-Year Plan, but it faces challenges in effectively matching "generation, storage, and utilization." Meanwhile, rapid urbanization in China has intensified pressures on the environment, employment, and spatial layout. The integration of biomanufacturing with green energy and urbanization could expand the application scope of biomanufacturing, optimize energy use, and simultaneously alleviate urban ecological and employment pressures, thereby revitalizing green smart cities and urban industries and accelerating the green and low-carbon transformation of production and lifestyles. To this end, we propose the concept of an "Urban Intelligent Metabolism and Biomanufacturing System" as a new paradigm for the green and low-carbon development of future urban life and socio-economic activities. This article introduces the background and core elements of this system, reviews its key technologies, and illustrates how constructing an urban intelligent "metabolic space" in a megacity could generate a locally produced and consumed biomanufacturing industry worth hundreds of billions of RMB annually. Leveraging biomanufacturing, future cities are envisioned as "intelligent metabolic spaces" that combine efficient space utilization, zero-carbon economic growth, enhanced employment, and livability.



Keywords: urban intelligent metabolism; biomanufacturing; green and low-carbon; circular economy; urban industry

“十五五”时期（2026—2030年）是我国全面建设社会主义现代化国家、加快形成新质生产力体系的关键阶段，也是实现“双碳”目标与推动高质量发展的战略窗口期。根据四中全会及国家

发布的相关规划与政策要点，“十五五”发展的总体目标是：经济保持中高速增长，创新能力显著增强，科技自立自强取得实质性突破，现代化产业体系与数字经济体系基本形成。与此同时，绿

色低碳转型被提升至国家发展核心位置，生态文明建设将取得决定性进展，非化石能源占比稳步提升，绿色制造、循环经济与资源再生成为经济增长的新动能。其中，生物制造被列为6大未来产业之一，具有重要战略意义。合成生物学是生物制造的科学基础，是国家科技自主创新的前沿方

向。合成生物学及生命科学的新发现与技术突破正在催生新一代生物制造技术，在医药，化工，能源，材料，农业，食品，环境等领域展现出广阔应用前景（图1）。据预测，生物制造到本世纪末，有望占全球制造业1/3的规模，达到30万亿美元市场规模^[1]。

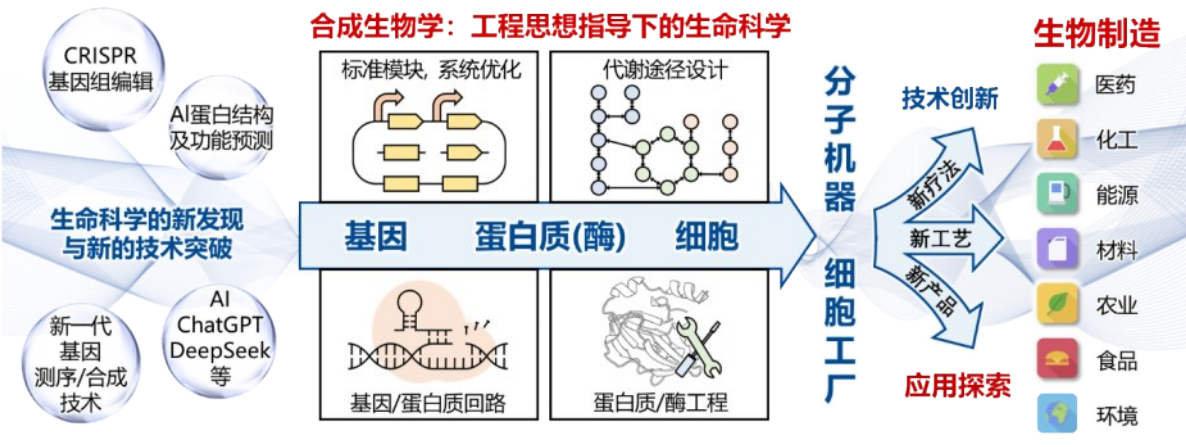


图1 合成生物学与生物制造。合成生物学被称为“第三次生物技术革命”，正在引领产业变革，催生新一代生物制造技术

Fig.1 Synthetic Biology and Biomanufacturing. Synthetic biology, known as the "third biotechnology revolution," is leading industrial transformation and giving rise to a new generation of biomanufacturing technologies

另一方面，“十五五”时期我国也要应对城市化进入深水区带来的系统性挑战。当前，城市人口持续集聚、劳动力结构失衡、空间资源利用率偏低、环境与碳排放压力加剧等问题日益突出。而生物制造、绿色能源、人工智能等技术的突破，为破解传统城市发展瓶颈提供了新的可能路径，尤其为实现城市尺度的碳闭环提供了关键技术支撑。例如，通过设计人工代谢通路与高效细胞工厂，可将CO₂及有机废弃物转化为高值生物基产品。工程化微生物可将CO₂电催化衍生的C1/C2中间体转化为1,3-丙二醇等生物基单体，最终制成绿色材料反哺城市社会。与此同时，厌氧消化与发酵技术将厨余垃圾、废油脂等转化为生物甲烷、生物柴油及可降解塑料。这些产物最终回用于城市交通、材料与日化消费，形成“排放—捕集—转化—消纳”的闭环系统，在削减城市净碳排放的同时构建自组织的循环经济新生态。

在此，我们提出“城市智能代谢及生物制造体系”这一创新概念，旨在拓展合成生物学与生物制造的应用边界，优化城市有机废物与可再生

电力的协同利用；该体系代表了一个将生物制造与绿色能源、城市空间结构深度融合，缓解生态环境压力并培育本地化绿色就业的新型城市发展范式。

1 现代城市发展趋势与面临的未来挑战

截至2024年底，我国城市化率已达66.2%，城镇常住人口约9.4亿人^[2]，城市基础设施与公共服务供给增长滞后于人口规模扩张，传统“增量扩张”模式难以为继，需转向“内涵提质”。在空间层面，城市建成区中约12%—15%的空间资源处于低效或闲置状态^[3]，主要包括楼顶空间（仅约30%得到功能化利用^[4]）、地下空间（综合开发率不足25%，而发达国家平均水平超50%^[5]）以及老旧工业区与过渡地带（约4.5亿平方米工业建筑处于停用或半停用状态^[3]），通过分布式、模块化、智能化的绿色制造设施对这些空间进行再利用，将显著释放城市内部增长潜能。

导致城市增长、能源生产与废物排放的技术—社会经济过程^[9-10]。但该表述主要用于物质/能量流核算，没有提出“如何就地高值转化”的问题。2015年瑞典皇家理工学院的Shahrokni等提出融合ICT与智慧城市技术，实现实时、高分辨率的城市代谢监测与调控^[11]。此外，循环经济和循环城市理念强调减量、再利用和再循环，这些理念多以3R（Reduce、Reuse、Recycle）治理和商业模式为核心^[12-13]；“城市矿产”偏重从城市存量中回收金属和材料^[14]，生物炼制强调将生物质转化为燃料、化学品和材料^[15]，分布式能源系统偏重近用户供能与能源效率^[16]。

在实践层面，丹麦哥本哈根构建了一套“城乡代谢”闭环系统：城市有机垃圾回收网络将厨余垃圾输送至厌氧消化厂，在严格控制的缺氧环境中，微生物分解有机物产生原始沼气。通过升级提纯技术，去除杂质与硫化物，使其达到车用天然气标准。这种生物甲烷被压缩后直接注入5C公交线路，驱动引擎运转。整个过程不仅消除了垃圾填埋产生的温室气体泄漏，更通过热电联产回收消化过程中的余热，实现了从“废弃垃圾”到“零碳动能”的高能效物质流循环。日本爱知县丰桥市构建了一个以污水处理厂为核心的“城市有机废弃物-生物甲烷-能源利用”闭环系统。该项目以丰川净化中心为平台，将下水道污泥和厨余垃圾通过微生物进行协同厌氧消化，并结合水热预处理方式提高有机质可溶化程度，产生的沼气用于发电，发电过程释放的热量和CO₂进一步用于温室番茄栽培、海藻培养和消化残渣肥料化，形成一条“废弃物-沼气-电/热-CO₂再利用-农业”的生态循环链条。在国内，上海老港生物能源再利用中心是上海市推进垃圾分类和无废城市建设的重要末端处置设施，位于浦东新区老港生态环保基地内。该项目主体工艺采用干湿协同实现有机物料的“全量厌氧消化”，辅以三相固渣生物养殖、沼渣堆肥、沼液提氨、沼气提纯、油脂回收等多元深度资源化技术。湿垃圾经处理后产生的沼气可用于发电或提纯为生物天然气；油脂可回收利用；沼渣可加工为土壤改良剂或碳基有机肥。然而，这些系统多侧重于废弃物的末端处理或单一能源转化，或局限在金属回收、电力供应等

单一维度，缺乏对多源有机废物与可再生电力协同利用的系统性整合，也缺少基于实时数据的动态调控能力，更未能在城市尺度实现产物就近闭环利用，因而在提升城市整体资源效率与韧性的层面仍存在显著局限。

近年来，人工智能的迅速发展可从多个关键节点深度赋能城市代谢与生物制造。在原料端，AI通过分析气象数据、居民消费习惯与供应链波动，可提前预测厨余组分、生物质产率及CO₂浓度等动态特征，实现原料的智能分类与调度。在生物转化过程中，机器学习模型能够实时解析传感器数据，动态调控pH、温度与营养流加策略，进而提升产物转化效率与批次稳定性。在酶设计层面，基于深度学习的蛋白质结构预测与定向进化工具可快速筛选并改造高活性、高稳定性的生物催化剂，缩短从基因挖掘到催化应用的整体周期。不仅如此，人工智能与生物制造、新能源、CO₂捕集与转化以及低空经济等前沿技术的融合为应对城市未来面临的系统性挑战提供了全新的技术路径。具体而言，通过“AI+分布式资源与能量吸收+微生物工厂+低空运输”构建“城市地空智能代谢工厂”，可将城市中被视为“问题”的废弃碳资源重新纳入物质循环，生成食品、材料、绿化与环保用品等城市运行所需产品，实现城市资源再生与价值闭环。因此，我们提出“城市智能代谢及生物制造体系”这一集成化新理念（图2）。该体系以AI为智能调控中枢、以生物制造为代谢器官，是一种面向未来的城市工业系统创新模式，其核心特征包括：

- 原创性与系统性：首次提出从城市整体物质与能量循环出发，建立元素流的数字化映射系统，通过生物转化，实现城市资源的全周期再利用；

- 智能化驱动：通过AI算法对代谢通路、能耗和碳排放进行实时学习和自适应优化，构建可自调节的城市级“代谢神经系统”；

- 空间再生能力：模块化技术装置可在楼宇、地下空间、工业边角地部署，成为“城市新型微工厂网络”；

- 社会共益价值：创造新型绿色就业岗位，提升城市劳动力再利用效率，推动形成绿色消费文化，更为舒适宜居的城市新生态文明。

与现有的理念与实践相比,本文提出的“城市智能代谢及生物制造体系”是一种将生物制造与绿色能源、城市空间结构深度融合的新型发展范式。该体系不仅拓展了生物制造在城市系统中的应用边界,更强调三大核心优势:一,实现多源有机废物以及空气(二氧化碳)与可再生电力的动态协同转化,突破单一原料或能源输入的局限;其二,构建基于数字孪生与人工智能的实时调度优化机制,提升系统响应能力与资源匹配效率;其三,推动产物在城市尺度的“就地生产、就地消纳”,形成闭环、自组织的城市生物制造新生态。因此,“城市智能代谢及生物制造体系”不仅是一项科学技术创新,更是一种新型城市工业发展与治理模式,其目标是构建城市级要素流的数字化映射和全周期再利用体系,是未来零碳城市经济、社会与生态协同发展的基础平台,与“AI+新能源+生物制造”的“十五五”国家发展战略高度契合。

3 相关关键技术及国内外现状

3.1 低碳生物合成与城市碳资源化:从全球趋势到中国引领

3.1.1 国际趋势:碳资源生物利用进入产业化时代

在全球“碳中和”目标驱动下,CO₂正逐步从温室气体排放物转变为可循环利用的战略性碳资源。围绕“捕集—纯化—转化—产品应用”的碳资源化(Carbon Capture and Utilization, CCU)路径,近年来在工业尾气生物转化、电化学转化与合成燃料等方向出现了从中试向示范及商业化过渡的趋势。

以工业尾气生物转化为代表的路线中,美国LanzaTech公司是全球最早实现工业级CO₂和合成气生物转化的企业之一。其核心技术基于厌氧产乙醇梭菌,可直接将钢铁、化工等工业尾气中富含的CO、CO₂和H₂转化为乙醇、乙酸等基础化学品^[17],其技术通过北京首钢泽公司已在多个工业场景实现万吨级规模化运行与长期稳定生产。在航空减排与可持续航空燃料(SAF)方向,LanzaTech相关方于2020年宣布成立专注“乙醇—

航空燃料(Alcohol-to-Jet, ATJ)”路线的公司,推动从乙醇到航空燃料的产业化,实现了“碳尾气→液体燃料→生物制造原料”的产业闭环^[18]。目前,LanzaTech已与壳牌(Shell)、联合航空(United Airlines)、丰田(Toyota)等国际企业建立合作,推进CO₂制航空燃料的商业化应用,其技术路线被认为是当前成熟度(TRL)最高的生物碳利用方案之一。

在政策层面,欧盟通过“创新基金”构建了全球最系统的碳资源化支持体系。自2020年以来,该基金已累计投入超过18亿欧元,用于支持CO₂捕集与利用(CCU)及低碳燃料项目,重点方向包括CO₂制航空燃料、合成甲醇、乙酸以及生物基聚合物等^[19]。在西班牙、丹麦、荷兰等国家,多个年产10万吨级CO₂制燃料和化学品示范工厂正在建设或投运,标志着欧洲正在以“政策引导+资本投入”双轮驱动的方式,打造新一代“碳资源工业体系”。

除气体发酵外,国际上还积极探索微生物电合成(MES)以及直接空气捕集(DAC)耦合生物转化等新型技术路径^[20],这些技术有望进一步提高CO₂向多碳化学品转化的效率和灵活性。

3.1.2 中国的优势与机遇:从“并跑”到“领跑”

我国在碳资源化利用领域起步相对较晚,但在“双碳”战略推动下发展迅速,已在多个关键环节实现技术并跑,部分方向具备领跑潜力。

在产业示范方面,首钢朗泽合成气发酵项目是中国低碳生物合成领域的标志性工程。该项目依托首钢京唐钢铁基地高炉及转炉尾气资源,利用含CO、CO₂和H₂的工业废气作为碳源,将工业尾气直接转化为燃料乙醇,并联合产梭菌微生物蛋白。项目采用连续搅拌式气体发酵反应器(CSTR),配套尾气净化与气体组分动态调控系统,实现了工业波动气源条件下的稳定运行,是全球首批实现商业化运行的“工业尾气制生物燃料”项目之一^[21]。该项目不仅验证了工业尾气资源化利用的工程可行性,也为我国钢铁、焦化、水泥等高排放行业提供了可复制、可推广的技术路径。在政策与产业协同层面,该模式探索了“碳减排责任+生物制造增值收益”双重驱动机制,为未来碳交易与绿色燃料认证体系衔接奠定

了基础。

在基础研究及关键技术布局方面，国内多所科研机构和企业围绕 CO₂ 生物固定、人工碳同化途径构建、气体发酵优化以及电-生物合成系统集成等前沿方向开展了系统研究。值得一提的是，以西湖大学曾安平团队为代表，在“化学-酶法 (Chemoenzymatic)”与“电-生物 (Electrobiosynthesis)”耦合系统的基础机理与底层技术突破上，正加速推动我国低碳生物合成迈向“局部领跑”，该团队在二元醇、氨基酸等高值化学品的颠覆性合成路线上取得了多项具备国际影响力的技术突破。

(1) 突破能量和还原力瓶颈的无辅酶依赖固碳途径 (合成氨基酸及丙酮酸) 传统生物固碳面临高度依赖能量分子 ATP 和 NAD(P)H 等昂贵辅酶、且热力学驱动力不足的瓶颈。我国学者首创了无 ATP/NAD(P)H 依赖的化学-酶耦合系统，通过重构甘氨酸裂解系统 (GCS)，利用化学还原剂二硫苏糖醇 (DTT) 替代依赖 NAD(P)H 的 L 蛋白，不仅显著提升了热力学驱动力、决定了反应方向，还避免了限速酶的聚合。该系统成功从甲醇和空气捕获的 CO₂ 中实现了克级/升 (g/L) 水平的甘氨酸、丝氨酸和丙酮酸的合成^[22]。为解决系统中 DTT 的绿色再生问题，研究团队进一步开发了基于共价官能化 1T'-MoS₂ 高活性电催化剂的 DTT 电化学再生系统，将电催化与下游化学-酶级联无缝整合，打通了 C1 原料向甘氨酸的高效电酶转化绿色通道^[23]。

(2) 安培级电化学与 AI 辅助生物合成协同的极速碳链延伸 (合成 C3-C4 二醇) 将 CO₂ 直接转化为具有重要工业价值的 C3 以上二醇一直是国际公认的难题。西湖大学团队开发了一种极高生产率的负碳电化学-生物合成级联平台，直接从 CO₂ 合成 1,3-丙二醇 (1,3-PDO) 和 1,3-丁二醇 (1,3-BDO)^[24]。在前端，CuZn 催化的电化学反应器能在安培级电流密度 ($-1,100 \text{ mA cm}^{-2}$) 下运行，乙醇生成速率接近 $1,200 \mu\text{mol h}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ；通过定制设计的 J-T 膜防止乙醇交叉，使底物积累速率达到 $4.6 \text{ g L}^{-1} \text{ h}^{-1}$ 。在后端，结合 AI 定向进化的极端嗜热菌 DERA 酶及体外合成生物学手段，大幅提升了 C-C 键的延伸效率。这一电化学与生物合成协同系统在转化速率与碳利用效率上均实现了颠覆性

突破。

基于上述成果，团队打造了“城市尾气 CO₂—C1/C2 中间体—PDO—城市新材料”这一零碳微循环，可操作的城市生物制造案例。在城市智能代谢框架下，城市密集人群及楼宇运转产生的高浓度 CO₂ 被重新定义为可循环利用的战略性碳资源。首选利用分布式微工厂，可从城市建筑通风系统及垃圾焚烧尾气中捕集高纯度 CO₂。然后通过电-生物级联转化将捕集的 CO₂ 或转化为甲酸、甲醇等 C1 化合物，或转化为乙醇等 C2 化合物。然后利用上述乙醇途径，或者其它人工设计的全新合成途径实现 PDO 的合成，理论碳转化率可达 100%。这一协同系统在转化速率与碳利用效率上均实现了颠覆性突破并最终实现价值闭环与城市反哺：由城市尾气 CO₂ 转化而来的 PDO，被进一步加工为 PTT 等可降解生物材料、纺织品或环保日化用品，重新投入城市居民的日常消费之中^[25]。

为加速低碳生物制造研究，西湖大学于 2024 年组建了浙江省全省智能低碳生物合成重点实验室，围绕低碳生物制造与人工智能融合开展系统创新，构建了“绿电低碳”、“低碳合成”与“AI 赋能”的三大协同攻关体系，并在钙钛矿光电材料与 AI 前沿算法等核心领域取得了重大突破。在绿电低碳方向，实验室创制了基于苣荬母核的新型空穴选择接触材料 (Py3)，去除了传统结构的杂原子以提升分子稳定性，成功将倒置钙钛矿太阳能电池的光电转换效率提升至 26.1%，拟合运行寿命突破 10000 小时，有效解决了器件高效与稳定不可兼得的难题，大幅提升了规模化组件的长期太阳能转化性能^[26]。在 AI 赋能方面，实验室开发了融合多模态数据的蛋白质语言大模型^[27-28]，依托这些 AI 大模型，实验室精准定位了关键酶的重要突变改造位点，显著提升了催化效率，成功创制了低碳基氨基酸和二元醇高效合成路线^[24]。最终，结合钙钛矿绿电技术与 AI 设计的生物元件，实验室在城市建筑物顶搭建了用于生物合成的光伏发电、从空气/建筑物排放废气中捕捉二氧化碳、电催化二氧化碳还原与生物合成及应用深度耦合的一体化中试装置 (图 3)，该系统打通了城市分布式“光能—电能—二氧化碳—生物合成”的转化全链路，为城市代谢及绿色生物制造奠定了核心技术基础。



图3 从空气/建筑物排放废气中捕捉二氧化碳、电催化二氧化碳还原与生物合成及应用耦合一体化中试装置（西湖大学）。（该装置包含钙钛矿太阳能电池模块、二氧化碳吸附模块、电催化模块以及生物合成模块。其中，“绿电低碳”利用绿电及化学催化将二氧化碳转化为甲酸、甲醇、乙酸、乙醇等基础原料，实现碳资源的再生与循环利用；“低碳合成”依托高稳定性催化剂和基因编辑技术构建高效细胞工厂，将上述低碳基原料转化为高附加值化学品和其它物质；“AI赋能”是借助人工智能蛋白质大语言模型与高通量自动化实验平台，实现酶元件设计、代谢通路优化及合成速率提升的智能化，加速城市代谢与生物制造产业的落地）

Fig. 3 An integrated pilot system for CO₂ capture from building/waste gas, electro-biological coupling for carbon resource utilization at Westlake University. The system comprises a perovskite solar cell module, a carbon dioxide capture module, an electrocatalysis module, and a bioreactor module. Among them, "green electricity for low carbon" utilizes renewable electricity to drive (electro)chemical catalysis for converting CO₂ into basic feedstocks (e.g., formic acid, methanol, acetic acid, ethanol), enabling the regeneration and recycling of carbon resources. "Low-carbon synthesis" relies on highly stable catalysts and gene-editing technologies to construct efficient cell factories, which further convert these low-carbon feedstocks into high-value-added chemicals and other products. "AI empowerment" leverages artificial intelligence, including protein large language models and high-throughput automated experimental platforms, to achieve intelligent design of enzyme elements, optimization of metabolic pathways, and enhancement of synthesis rates, thereby greatly accelerating the industrialization process of urban metabolism and biomanufacturing

总体来看，我国在低碳生物制造工业示范与基础研究两个层面已形成强大的协同推进格局：一方面通过首钢等大型尾气转化项目验证了超大规模低碳生物制造工程的可行性；另一方面，在绿电利用、人工固碳途径设计、无辅酶依赖体系、安培级电-生物级联转化、AI赋能等核心科学问题和关键技术指标上持续刷新世界纪录，这种“工程示范验证与前沿基础突破双轮驱动”的模式，充分彰显了中国在城市代谢与颠覆性低碳生物制造技术相结合上实现“领跑”的底气与实力。

3.2 塑料代谢与微生物循环利用：突破城市固废再生的“最后难题”

3.2.1 塑料污染的规模、治理现状与关键瓶颈

塑料污染已经从末端环境问题演变为覆盖生产、消费、废弃、环境泄漏与气候影响的全生命

周期问题。联合国经济合作与发展组织《Global Plastics Outlook》情景分析表明，在当前政策延续路径下，全球塑料产量将从2019年的约4.60亿吨增长至2060年的约12.31亿吨，同期塑料废弃物总量预计由3.53亿吨增至约10.14亿吨^[29]。尽管部分地区回收体系逐步完善，但全球塑料废弃物管理结构改善有限，回收比例预计仅从约9%提升至约17%，而填埋与焚烧仍将分别占约50%与18%左右，显示末端处置仍是主导路径^[29]。与此同时，未得到有效管理的塑料废弃物仍将持续存在，并在部分地区维持较高比例，表明当前以“收集—填埋/焚烧”为主的治理模式仍难以从根本上改变塑料生命周期的线性结构特征。

中国塑料污染治理已由“限塑”逐步转向“减量、替代、回收、末端处置”并重的全链条治理阶段。从回收端看，国家智库报告显示，2021年我国废塑料材料化回收量约1,900万吨，材料

化回收率约31%，均高于全球平均水平^[30]。但从污染治理角度看，塑料回收率提升并不等同于污染问题解决：一方面，低值薄膜、多层复合包装、受污染塑料和混杂塑料仍是回收体系中的“薄弱环节”；另一方面，微塑料、添加剂迁移以及环境残留已成为机械回收统计口径之外的长期风险^[31]。现有塑料治理技术大致可分为机械回收、化学回收和生物回收三类。机械回收工艺成熟、成本相对较低，但高度依赖前端分选质量，且多次热加工后材料性能下降，往往只能实现降级利用；化学回收可通过解聚、醇解、糖解、热裂解或催化裂解将塑料转化为单体、油品或平台化学品，但能耗、设备投资和产品纯化成本仍然较高，且对混合塑料和含卤塑料体系并不总是经济可行^[32-33]。生物回收近年来发展迅速，尤其是在聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）等聚酯塑料领域。自微生物 *Ideonella sakaiensis* 及其PET降解酶PETase被发现以来，PET定向酶解已从概念验证走向中试放大，工程化PET-depolymerase可在较温和条件下实现高结晶PET瓶片的高效解聚，并在闭环再生中表现出工业潜力^[34]。然而，生物法当前仍主要适用于PET、聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）等可酶解聚酯，对聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）以及聚氯乙烯（PVC）等惰性或含卤塑料的规模化处理能力仍明显不足^[35]。

因此，当前塑料治理的核心矛盾并不是“有没有技术”，而是不同塑料品类、不同污染程度和不同回收价值之间存在显著错配。对于城市生活垃圾体系而言，真正的短板在于：其一，低值混合塑料的收运与分选成本高于再生材料收益；其二，微塑料与添加剂风险难以通过传统回收指标反映；其三，末端技术路线与前端分类体系常常脱节，导致可生物降解塑料、可回收塑料和不可回收塑料在收运端被重新混合，削弱后续资源化效率。因此，塑料治理需要从“单一回收技术优化”转向“材料设计—分类收运—多路径资源化—环境风险控制”一体化治理框架。

3.2.2 生物法的突破方向及其在城市代谢体系中的定位

从城市代谢与生物制造耦合的视角看，生物法的价值不在于替代一切塑料回收方式，而在于补齐传统物理和化学路线难以处理的关键环节。

第一类应用场景是针对PET等聚酯塑料的高纯度闭环再生。与机械回收相比，酶法解聚能够在更低温度下获得高纯度对苯二甲酸和乙二醇，为食品级和材料级再聚合提供可能；与热裂解相比，其更适合城市中来源稳定、组分相对单一的饮料瓶和纺织PET流^[34]。第二类应用场景是将塑料解聚产物如甲酸进一步导入微生物代谢网络，合成为PHA、表面活性剂、有机酸等高附加值产物，从而将“塑料回收”扩展为“塑料—生物制造”耦合过程^[36]。第三类应用场景是难降解塑料的生物学启发式治理，即通过新菌株筛选、人工酶系改造和群落协同作用，为PVC、聚烯烃等高难度体系提供前处理或选择性断键的新路径。在这方面，国内已有具有代表性的原创工作。西湖大学鞠峰团队报道了来源于昆虫幼虫肠道的菌株对PVC的黏附、表面氧化和后续降解潜力，首次在实验层面为PVC生物降解提供了较系统的多组学证据^[37-38]。另有研究表明，微塑料和纳米塑料可显著扰动人工湿地中的微生物群落与氮去除功能，说明塑料问题不仅是固废问题，也会反过来影响城市污水处理和生态修复系统的运行稳定性^[39]。这些结果提示：塑料污染治理与城市代谢系统中的污水处理、土壤修复、材料循环及生物制造不应彼此割裂，而应在同一资源—环境—产业框架下统筹考虑。

总体而言，未来更可行的技术路线不是以单一路径“吃掉全部塑料”，而是建立分层分类的城市塑料循环体系：高纯PET流优先进入闭环机械/酶法回收；混合聚烯烃流优先采用机械回收与催化裂解协同；含氯、含添加剂或高度污染塑料则需要更严格的前处理、风险控制和定向资源化策略。生物法在这一体系中的优势，在于以较低温和条件实现选择性断键、提高高值产物收率，并与下游生物制造天然衔接；其瓶颈则在于底物范围、酶稳定性、传质效率以及规模化经济性。将其纳入城市固废系统时，应将“高值聚酯流闭环回收”和“塑料解聚产物生物升级利用”作为近期重点，而不宜将其表述为对所有塑料类型均已成熟适用的通用方案。

3.3 厨余垃圾的高值转化

3.3.1 厨余垃圾的规模、环境压力与资源属性

与塑料污染相比，厨余垃圾的突出特征不是

长期累积性,而是高含水、高有机质、快速腐烂和高温温室气体排放潜力。联合国环境规划署《Food Waste Index Report 2024》显示,2022年全球零售端、餐饮服务端和家庭端共产生食物废弃物10.5亿吨,其中家庭端占6.31亿吨(60%),餐饮服务端占2.90亿吨(28%),零售端占1.31亿吨(12%);折算后约19%的可供消费者消费的食物被浪费^[40]。食物废弃不仅造成资源损失,也通过甲烷排放、渗滤液和臭气问题放大其环境负荷。中国城市生活垃圾中易腐有机组分长期占主导地位。基于2021年31省市数据的综述表明,我国生活垃圾平均产生强度约为0.73 kg/人/日,其中食物垃圾平均占比约47.7%,且在南方和东部城市通常更高^[41]。针对南方城市的实测研究进一步显示,厨余垃圾占生活垃圾的比例约为39.8%-53.3%,塑料橡胶占比约为16.5%-33.4%,说明在高湿热、高餐饮密度地区,厨余垃圾仍是决定城市垃圾含水率、臭气和渗滤液特征的关键组分^[42]。从消费端看,最新研究估计中国城市食物废弃量约为1.37亿吨/年,约占总消费量的26%,其中餐馆和食堂是可食部分浪费的主要来源,而家庭则贡献了总体食物废弃的重要份额^[43]。这意味着,厨余垃圾治理既涉及末端资源化技术,也涉及餐饮供给链、消费行为和源头减量治理。不过,厨余垃圾同时也是最具生物炼制潜力的城市有机碳源之一。其含水率通常可达70%以上,富含淀粉、蛋白质、脂类和可发酵糖类,既适合厌氧消化制沼气,也可经过预处理后用于生产挥发性脂肪酸、有机酸、单细胞蛋白、昆虫蛋白和生物基材料^[44]。因此,厨余垃圾的关键不在于“有没有资源属性”,而在于如何在收运体系、杂质控制、产物路线和终端市场之间形成闭环。

3.3.2 现有资源化路径、现实瓶颈与高值转化方向

目前,厌氧消化仍是厨余垃圾工程化最成熟的路线,优势在于技术成熟、减量化效果明确,并可回收沼气和沼渣沼液;但其主要问题在于单位产值较低,对原料均质性、油脂含量和氨抑制较为敏感,且若前端分类质量不足,塑料、盐分和清洗剂残留会显著影响系统稳定性^[45]。堆肥技术适合园林土壤改良和有机肥生产,但在城市高密度空间中常受臭气控制、场地需求和产品稳定性约束。相比之下,以生物炼制为核心的高值转

化路径-例如生产乳酸、乙醇、PHA、挥发性脂肪酸、单细胞蛋白和昆虫蛋白-可以显著提高单位碳源价值,但其前提是原料预处理、灭菌/抑菌、营养盐平衡及连续供料体系必须足够稳定^[46]。厨余垃圾高值化面临的首要问题是异质性和波动性。餐厨废弃物、家庭厨余、果蔬垃圾和农贸市场垃圾在含水率、油脂含量、盐分、骨渣和包装混入率方面差异很大,导致同一工艺在不同城市之间难以简单复制。第二个问题是杂质污染。塑料袋、一次性餐具、纸塑复合包装及调味料残留会抬高预处理成本并影响后续发酵、膜分离和产品纯化。第三个问题是路径选择与终端市场匹配不足。若终端只能销售沼气或低值肥料,则前端分类和专门收运的额外成本难以被覆盖;相反,若要进入饲料蛋白、功能化学品或材料市场,则必须同步满足卫生安全、法规准入和产品标准要求。

因此,更具可行性的表述是:厨余垃圾的资源化利用应当遵循“源头减量—分类收运—分级利用—高值优先”的技术路线。对于高含油、高蛋白且相对洁净的餐饮厨余,可优先考虑油脂回收、生物柴油和发酵底物制备;对于混合度较高的家庭厨余和农贸市场垃圾,可优先采用厌氧消化-沼气利用-残渣资源化的稳健路线;对于成分稳定的集中收运流,则可进一步耦合微生物蛋白、PHA或有机酸发酵。换言之,城市厨余垃圾并不适合被单一路径“统包处理”,而更适合按照原料品质进入不同的代谢与资源化通道。

3.3.3 “厨余废弃物—生物柴油/甘油—PDO”的城市能量与物质再生

在城市代谢系统中,废弃食用油可首先被集中回收并转化为生物柴油,作为清洁能源供给城市物流与低空交通体系使用。在此转化过程中,约可产生占油脂质量8%–12%的副产物甘油。这些来源于城市废弃物的甘油,不再作为低值工业废液处理,而是作为下一级生物制造的优质底物。为此,作者团队开发出基于巴氏梭菌的新型PDO生产技术,具有“三非四无”的突破性技术^[47]。三非:非粮原料(粗甘油),非转基因菌株(巴氏梭菌),非致病菌发酵;四无:无通气(厌氧发酵省去压缩空气系统),无强搅拌、完全无洁净处理以及无酵母粉培养基的条件下进行PDO生产,大幅降低原料成本。目前已在山东济南建成全球唯

一“三非”生物基1,3-丙二醇(PDO)生产基地,年产能达15000吨。该技术还可将大于99.9%的氢气和二氧化碳回收,使得PDO生产的碳排放大为降低,每公斤PDO减排1.2kg CO₂,年减碳量达18000吨。

3.4 生物制造与城市新型建筑及医用材料

在城市代谢的框架下,废弃物不再是终点,而是新资源的起点。传统的建筑与材料制造过程高度依赖化石能源、排放大量二氧化碳,且难以融入城市的物质循环体系。生物制造的介入,为解决这一困境提供了全新的可能性。本节将聚焦三种典型的生物制造路径:自修复建材通过微生物代谢实现基础设施的自主修复;生物砖块在室温下利用细菌或真菌将农业与工业废弃物转化为承重结构材料;生物3D打印材料则以废弃碳源为原料,通过合成生物学手段制备高附加值的可降解聚合物与水凝胶。三者共同体现了城市代谢的核心逻辑——将废物流转化为资源流,推动建筑环境从线性消耗向循环再生的生物制造模式转型。

3.3.1 自修复建材

自修复建材体现了将“废物流”转化为“修复资源”的核心思路。以自修复混凝土为例,其关键技术——微生物诱导碳酸钙沉淀,通过微生物代谢活动实现裂缝的自主修复^[48]。尿素依赖型系统利用耐碱细菌(如 *Bacillus subtilis*, *Bacillus sphaericus*),在裂缝渗入水分和氧气后被激活,代谢预混的尿素底物并诱导碳酸钙晶体沉淀,完成物理封堵;非尿素依赖型系统则采用丝状真菌(如少根根霉 *Rhizopus oryzae*、里氏木霉 *Trichoderma reesei* 以及尖孢镰刀菌 *Fusarium oxysporum*),通过分泌有机酸溶解难溶性钙盐,在代谢过程中诱导碳酸钙沉淀,可将含钙建筑废料或工业副产物转化为修复资源。微生物的长期存活是自修复性能的关键,鉴于混凝土内部高碱、低氧等极端条件,需选用耐碱耐温、具备孢子形成能力的微生物,并借助微胶囊、水凝胶等生物相容性载体提供保护,使其持续服务于城市基础设施的自适应循环代谢。

3.3.2 生物砖块

生物砖块代表了将废弃物转化为建筑资源的低碳路径。传统砖块制造消耗大量化石燃料并排放大量二氧化碳,而生物砖则在室温下通过生物学过程“生长”或结合废弃生物质压制而成^[49]。基于仿生学原理,可利用特定细菌(如巴氏孢八叠球菌 *Sporosarcina pasteurii*)将沙子、尿素和钙源转化为碳酸钙晶体,作为天然胶水粘合松散骨料;也可将真菌孢子接种于农业或工业废弃物(如锯末、稻糠、咖啡渣)中,通过菌丝网络的纠缠与降解作用形成坚固的三维复合材料,并经加热或干燥处理固化成型;此外,还可将粉碎的农业废弃物(如花生壳碎屑)与少量水化石灰和水泥在常温下压制,制成抗压强度稳定在10 N/mm²左右、符合A级承重砖规范的新型砖块。这些方法共同体现了城市代谢中“废弃物—建材”的资源循环理念,推动建筑行业向低碳、可再生的生物制造模式转型。

3.3.3 生物3D打印材料

在城市代谢生物制造的视角下,生物3D打印材料体现了将废弃碳源转化为高附加值构建材料的循环利用路径。当前主流材料主要包括以聚乳酸(PLA)、聚羟基丁酸酯(PHB)为代表的热塑性高分子,以及以甲基丙烯酰化明胶(GelMA)等为代表的生物水凝胶体系^[50-51]。PLA可通过微生物细胞工厂,利用玉米淀粉、甘蔗乃至农业废弃物中的碳水化合物发酵生产乳酸单体并进一步聚合而成,具有较低的熔点和良好的打印成型性能。PHB则是微生物在细胞内直接合成的储能聚酯,通过添加植物油、废弃餐厨油脂等混合碳源,可诱导合成共聚物(如PHB-co-HV),改善纯PHB易结晶收缩、翘曲和粘合不良等问题,提升打印适性与材料弹性。用于3D生物打印的水凝胶能够提供高度仿生天然细胞外基质的微环境,可将活体细胞直接混入墨水中进行打印;其中,GelMA与海藻酸钠复合而成的生物墨水具有剪切变稀特性,无需高温熔融即可成型,有效保障细胞存活率,已应用于人造骨骼支架、骨骼肌组织及癌症模型等生物制造领域。这些材料与技术共同推动了城市代谢中“废弃物—生物基材料—增材制造”的闭环发展,助力建筑与医疗等行业向低碳、可再

生方向转型。

3.5 生物制造与城市作物栽培打造城市绿色空间

3.5.1 城市绿化及城郊农业的环境污染与健康风险

在城市绿化及城郊农业生产过程中,为追求高效与高产,化学杀虫剂、除草剂及化学肥料被广泛使用。然而,化学投入品的长期或过量使用已对生态环境与人类健康造成多方面潜在风险。首先,化学农药的大量施用会导致土壤微生物群落结构失衡,抑制有益微生物活性,降低土壤生物多样性,从而影响土壤生态系统功能。部分农药具有较强的环境持久性,可在土壤和水体中长期残留,并通过食物链富集,增加生态系统风险。例如,有机磷类农药在城市绿地和屋顶农业系统中使用后,可能通过雨水径流进入城市水体,对水生生物产生毒性影响^[52]。

其次,除草剂的广泛使用同样带来生态隐患。以草甘膦为代表的广谱除草剂虽然在农业生产中具有较高效率,但其在环境中的残留问题及潜在健康风险近年来备受关注^[53]。研究表明,长期接触某些除草剂可能与内分泌干扰、神经毒性以及潜在致癌风险相关^[54]。在城市环境中,由于人口密度较高,居民更容易通过空气飘移、食物残留或皮肤接触等途径暴露于这些化学物质。

此外,化学肥料的大量施用会导致氮、磷等营养元素在土壤中累积,并通过地表径流进入河流湖泊,引发水体富营养化问题。城市农业系统若缺乏科学管理,易造成硝酸盐在地下水中的积累,进而通过饮用水途径危害人体健康,增加高铁血红蛋白症等疾病风险^[55]。同时,氮肥在土壤中转化过程中还会产生氧化亚氮等温室气体,加剧气候变化问题^[56]。

从公共健康角度看,农药和化肥残留通过蔬菜、水果等农产品进入人体后,可能对神经系统、免疫系统和内分泌系统产生慢性影响。儿童、孕妇及老年人等敏感人群更易受到影响。随着城市居民对食品安全和生态健康关注度的提升,减少化学投入品使用、推广生物防控和有机肥替代技术已成为城市农业可持续发展的重要方向。因此,

在现代城市作物栽培体系中,应加强绿色防控技术、生物农药和微生物肥料的研究与应用,通过生物制造等技术路径降低对传统化学投入品的依赖,实现生态友好型城市农业发展模式。

3.5.2 生物制造在城市绿化及栽培体系中的应用

生物制造技术在城市作物栽培及绿化体系中的应用,正在从单一技术应用向系统化、集成化方向发展。总体而言,其技术逻辑可概括为五个层面:作物遗传改良、微生物生物肥料构建、植物生长调节、生物源病虫害防控以及功能性品质强化。这一体系构建了“遗传优化—微生态调控—生长调节—绿色防控—品质提升”的绿色生产路径。与此同时,城市树木与花卉的日常维护(包括抗逆性提升、生长势恢复、病虫害防治及花期调控等)同样可借助生物制造技术实现绿色化转型,从而降低城市绿化管理对化学投入品的依赖。

首先,在作物遗传改良层面,基因编辑与合成生物学技术为城市农业提供了适应设施环境的专用品种。利用CRISPR/Cas9等基因编辑工具,可精准调控植物抗病基因、抗逆基因及代谢通路,使作物更适应高密度立体栽培和人工光源环境。通过调节光合效率相关基因或生长周期相关因子,还可缩短生长周期、提高单位面积产量,从源头提升城市农业系统效率^[57]。

其次,在微生物生物肥料构建方面,促生根际细菌(PGPR)、固氮菌和解磷菌等微生物通过固氮、溶磷、分泌有机酸及植物激素等机制改善根际微生态环境,提高养分利用率^[58]。在城市绿地、屋顶农业及设施栽培系统中,生物肥料可有效减少化学肥料施用量,降低氮磷流失和水体富营养化风险,同时维持土壤微生物多样性。通过合成生物学改造工程菌株,还可提高其环境适应性和稳定性,实现定向功能强化。

第三,在植物生长调节层面,生物制造技术可实现天然植物激素的可控生产与精准释放。吲哚-3-乙酸(IAA)作为重要的生长素,在促进根系发育和细胞分裂方面具有核心作用^[59]。部分根际微生物能够分泌IAA,在根际形成有利于植物生长的微生态调节环境。在城市水培或基质栽培系统中,利用工程菌定向合成IAA,可增强作物根系结

构,提高水肥吸收效率,从而提升整体产量和品质。同时,通过构建可控表达系统,可避免激素过量带来的生理抑制效应。

第四,在病虫害绿色防控方面,生物源活性代谢物为替代化学农药提供新路径。例如,乳酸菌产生的 Reuterin (3-羟基丙醛)具有广谱抑菌活性,在一定浓度下可抑制部分植物病原微生物及杂草种子萌发^[60]。与传统化学杀虫剂和除草剂相比,生物来源代谢物通常具有环境可降解性强、残留风险低和生态毒性较小等优势,更适合在城市高人口密度环境中应用。通过工程化微生物发酵体系,可实现此类天然活性物质的规模化生产和精准应用。

最后,在功能性品质强化方面,生物制造技术可通过调控植物次生代谢通路,增强抗氧化物质、维生素及功能性营养成分的合成^[61]。功能强化型城市作物不仅满足居民对健康食品的需求,还可提高城市农业附加值,增强经济可持续性。

总体而言,生物制造在城市作物及绿化体系中的应用可形成以“遗传层面优化—根际微生态调控—生理调节增强—绿色防控替代—功能品质提升”为核心的综合技术框架。这一体系不仅可减少传统化学投入品的依赖,还降低了环境与健康风险,并为城市树木健康维护、花卉景观品质提升提供了绿色、可持续的技术路径,是构建生态友好型城市农业与绿化空间的重要系统化支撑。

4 技术路线案例及经济潜力评估

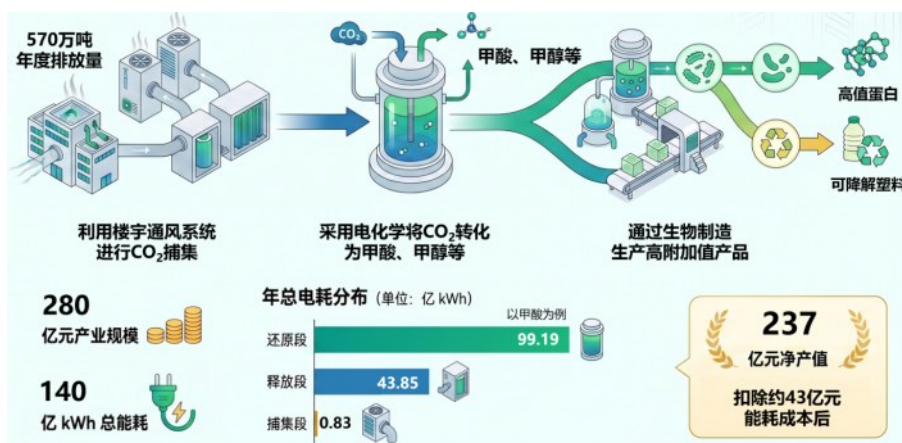
本节在以1000万人口城市为研究对象的城市代谢框架下,分别对楼宇CO₂排放、废塑料资源化、厨余垃圾循环利用以及城市绿地与农业绿色替代等典型路径进行系统潜力评估(图4)。在此基础上,综合揭示城市智能代谢与生物制造技术耦合条件下的资源转化潜力、碳减排效应与产业化价值,从而为城市级碳循环生物利用体系构建与新型绿色产业发展提供量化依据与决策参考,具体计算过程参考附录(在线补充材料)。需要指出的是,本评估所涉及的关键参数,如楼宇二氧化碳浓度、废塑料的组分构成、厨余垃圾的含水

率等,均具有显著的地理区域、季节变化及居民生活习惯依赖性。因此,计算模型对这些参数的变化高度敏感,可能导致评估结果存在一定的不确定性。此外,模型中采用的各项假设条件,在不同文献中的取值差异显著,缺乏统一的基准。鉴于以上原因,本研究仅可视为技术经济层面的示意性评估,旨在揭示系统的基本可行性与潜在趋势,而非提供精确数值。

首先,基于标准通风工况测算,千万级人口城市建筑每年通过新风系统外排的空气总量高达40亿吨,其中蕴含的CO₂近600万吨。若采用液相捕集与电化学再生耦合技术,在常规捕集与释放效率下,每年可从建筑排风中回收高纯度CO₂近300万吨,进一步经电催化转化可制得甲酸超过200万吨。将这些甲酸用于生物制造,按80%利用率估算,可撬动生物基产品年产值约280亿元。系统运行所需年电耗折合电力成本约40余亿元,扣除后年净产值仍可超过230亿元,展现出显著的规模经济性。随着可再生电力成本的持续下降,该路径的经济优势将更加突出。需要强调的是,与工业烟道气捕集的CO₂不同,建筑排风中的CO₂源于自然空气,通常被认定为可再生的“绿碳”。以之为原料制造的产品,在全生命周期碳足迹核算中具有独特优势,有助于我国突破国际(如欧盟)绿色贸易壁垒,提升出口产品的绿色竞争力。

在城市固体废弃物体系中,生活垃圾年产生量达300万吨量级,其中废塑料占比可观,对应资源量约为每年50万至100万吨^[42]。按可降解塑料(如PET)约占20%计算,进入资源化系统的原料量约为每年10万至20万吨。以中值估算,经酶解转化与微生物发酵后,可制得可降解塑料约6万余吨,按当前产品附加值计算,年产值接近10亿元。与此同时,该路径可实现数万吨规模的CO₂当量减排,体现出废塑料闭环利用在减碳与高值材料生产中的协同效应。随着塑料降解技术的不断成熟,可降解塑料占比有望提升至八成,届时年产值可增至约38亿元,减排规模亦同步扩大,展现出显著的产业升级潜力。

城市厨余垃圾年产生量约150余万吨^[41],考虑资源化比例后,有效进入系统的原料约为每年90万至120万吨^[62-63]。在多路径协同转化框架下,



(a) 针对千万级人口城市的楼宇CO₂排放, 通过电化学转化将CO₂转化为甲醇、甲酸等平台化学品, 并进一步结合生物制造生产高附加值产品
(a) Targeting CO₂ emission from buildings in a megacity with a population over ten million, electrochemical conversion can be used to transform CO₂ into platform chemicals such as methanol and formic acid, which are then further processed via biomanufacturing to produce high-value-added products



(b) 依托生物技术将城市废塑料由“白色污染”转化为可循环利用的生物基材料, 推动形成“绿色财富”路径 (按可降解塑料占比80%计算)
(b) Leveraging biotechnology, urban plastic waste can be converted from "white pollution" into recyclable bio-based materials, promoting a "green wealth" pathway (calculated based on 80% of degradable plastics)



(c) 面向厨余垃圾, 构建以能源回收 (如沼气) 与高值化生物发酵 (如有机酸、PHA 及微生物蛋白) 为核心的多路径资源化体系
(c) For food waste, a multi-pathway resource utilization system is envisaged, centered on energy recovery (e.g., biogas) and value-added biofermentation (e.g., organic acids, PHA, and microbial protein)



(d) 在城市绿地及周边农业系统中，通过生物农药替代传统化学农药，实现减碳与生态安全协同提升，体现生物制造的综合价值
(d) In urban green spaces and surrounding agricultural systems, bio-pesticides can be used to replace traditional chemical pesticides, achieving synergistic improvements in carbon reduction and ecological security, thereby demonstrating the comprehensive value of biomanufacturing

图4 生物制造赋能城市代谢的典型路径与示意性经济评估

Fig.4 Typical paths of biomanufacturing-enabled urban metabolism and indicative economic estimation

该体系呈现显著的多产品并行输出特征：厌氧消化制甲烷、废油制生物柴油与甘油、有机酸发酵、PHA生物塑料以及微生物蛋白等路径并行发展，产值区间覆盖从每年2亿元至14亿元不等。整体而言，厨余垃圾不再被视为末端处理对象，而是成为连接能源、材料与蛋白供给的高耦合生物制造网络的核心节点，实现了有机废弃物向多元化高值产品的系统性跃迁。

在城市生态系统中，基于绿地面积与农药使用量测算，若实现80%生物农药替代，每年可减少化学农药使用约40吨，同时减排CO₂约600吨，对应经济价值约400万元。将视角拓展至城市所依托的农业系统，约80万公顷耕地年农药使用量达4000吨，同样以80%替代率计算，每年可减少化学农药3200吨，减排CO₂近5万吨，生物农药市场规模可达3.2亿元。上述路径不仅带来显著的减碳效益，更在绿色农业投入品领域孕育出可观的产业化潜力，为城市与区域协同减污降碳提供了可行抓手。

5 结 语

“城市智能代谢生物制造体系”不仅是一项科

技创新，更是一种面向未来的城市发展新范式。它让城市从被动消耗资源、产生废弃物的“碳排放终端”，转变为能主动吸收、转化并再生资源的“生命体系统”；让能源、物质与信息在城市内部实现循环流动与智能调控，形成可持续的“人工生态循环”。

未来，随着政策协同、产业布局与社会共识的逐步形成，城市智能代谢体系有望成为推动绿色经济增长的新引擎。它将引领新能源、生物制造、工业农业、可再生材料等多产业融合，形成“科技创新—城市工业—绿色文明—”三位一体的全新格局。

参 考 文 献

- [1] MCKINSEY & COMPANY. The bio revolution: innovations transforming economies, societies, and our lives[R]. 2020.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
NATIONAL BUREAU OF STATISTICS OF CHINA. China Statistical Yearbook 2024[M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国城市出版社, 2024.
MINISTRY OF HOUSING AND URBAN-RURAL

- DEVELOPMENT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. China Urban Construction Statistical Yearbook 2023 [M]. Beijing: China City Press, 2024.
- [4] 莫正玺. 我国存量建设空间利用的政策、理论与实践演进脉络[J]. 经济地理, 2022, 42(6): 156-167.
- MO Z X. Policy, Theory and Practical Evolution of Existing Construction Space Utilization in China[J]. Economic Geography, 2022, 42(6): 156-167.
- [5] ADMIRAAL H, CORNARO A. Systems approaches to urban underground space planning and management—A review[J]. Underground Space, 2020, 5(2): 144-166.
- [6] 中华人民共和国生态环境部. 2023年中国生态环境统计年报[Z]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2024.
- MINISTRY OF ECOLOGY AND ENVIRONMENT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. China Ecological and Environmental Statistics Annual Report 2023[Z]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2024.
- [7] 普华永道. 2025年消费者之声全球调研报告[R]. 上海: 普华永道中国, 2025.PWC. 2025 Voice of the Consumer Global Survey Report[R]. Shanghai:PwC China, 2025.
- [8] GRAND VIEW RESEARCH. Green packaging market size, share & trends analysis report 2025 – 2035[R]. San Francisco: Grand View Research, 2025.
- [9] WOLMAN A. The metabolism of cities[J]. Scientific American, 1965, 213(3): 179-190.
- [10] KENNEDY C, CUDDIHY J, ENGEL-YAN J. The changing metabolism of cities[J]. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11(2): 43-59.
- [11] SHAHROKNI H, LAZAREVIĆ D, BRANDT N. Smart urban metabolism: towards a real-time understanding of the energy and material flows of a city and its citizens[J]. Journal of Urban Technology, 2015, 22(1): 65-86.
- [12] GEISSDOERFER M, SAVAGET P, BOCKEN N M P, et al. The circular economy: A new sustainability paradigm? [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 143: 757-768.
- [13] PRENDEVILLE S, CHERIM E, BOCKEN N. Circular cities: Mapping six cities in transition[J]. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2018, 26: 171-194.
- [14] BRUNNER P H. Urban mining: A contribution to reindustrializing the city[J]. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(3): 339-341.
- [15] CHERUBINI F. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(7): 1412-1421.
- [16] ALANNE K, SAARI A. Distributed energy generation and sustainable development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(6): 539-558.
- [17] HANDLER R M, SHONNARD D R, GRIFFING E M, et al. Life cycle assessments of LanzaTech ethanol production: anticipated greenhouse gas emissions for cellulosic and waste gas feedstocks[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(12): 3253-3261.
- [18] LANZATECH GLOBAL, INC. Sustainable aviation fuel (SAF) and alcohol-to-jet (ATJ) technology development and LanzaJet spin-out[R]. Skokie: LanzaTech, 2020.
- [19] EUROPEAN COMMISSION. Innovation Fund: financing innovative low-carbon technologies[R]. Brussels: European Commission, 2024.
- [20] CHUNG T H, DHILLON S K, SHIN C, et al. Microbial electrosynthesis technology for CO₂ mitigation, biomethane production, and ex-situ biogas upgrading[J]. Biotechnology Advances, 2024, 77: 108474.
- [21] 首钢集团有限公司. 首钢股份2021年度社会责任报告[Z]. 北京: 首钢集团有限公司, 2022.
- SHOUGANG GROUP CO., LTD. Shougang Shares 2021 Annual Social Responsibility Report[Z]. Beijing: Shougang Group Co., Ltd., 2022.
- [22] LIU J, ZHANG H, XU Y, et al. Turn air-captured CO₂ with methanol into amino acid and pyruvate in an ATP/NAD(P)H-free chemoenzymatic system[J]. Nature Communications, 2023, 14: 2772.
- [23] ZHAO Z, LIU J, CHEN J, et al. Electroenzymatic C₁ fixation to glycine via dithiothreitol regeneration on functionalized 1T'-MoS₂[J]. Journal of the American Chemical Society, 2026.
- [24] LI Y, ZHANG B, WU Y, et al. Ultrafast conversion of CO₂ into C₃ – C₄ diols in a synergistic electrochemical and AI-assisted biosynthesis system[J]. Journal of the American Chemical Society, 2025.
- [25] LIU YONGFEI, ZHANG CHIJIAN, ZENG AN-PING. Advances in biosynthesis and downstream processing of diols [J]. Biotechnology Advances, 2024, 77: 108455.
- [26] ZHAO K, LIU Q, YAO L, et al. peri-Fused polyaromatic molecular contacts for perovskite solar cells[J]. Nature, 2024, 632(8024): 301-306.
- [27] SU J, HE Y, YOU S, et al. A trimodal protein language model enables advanced protein searches[J]. Nature Biotechnology, 2025.
- [28] SU J, LI Z, TAO T, et al. Democratizing protein language model training, sharing and collaboration[J]. Nature Biotechnology, 2025.
- [29] OECD. Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options[R]. Paris: OECD Publishing, 2022.
- [30] 国家发展改革委宏观经济研究院经济体制与管理研究所, 中国社会科学院数量与技术经济研究所. 中国塑料污染治理理念与实践[R]. 2022.
- INSTITUTE OF ECONOMIC SYSTEM AND MANAGEMENT,

- MACROECONOMIC RESEARCH INSTITUTE, NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION; INSTITUTE OF QUANTITATIVE AND TECHNOLOGICAL ECONOMICS, CHINESE ACADEMY OF SOCIAL SCIENCES. Concept and Practice of Plastic Pollution Control in China[R]. 2022.
- [31] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Turning off the tap: how the world can end plastic pollution and create a circular economy[R]. Nairobi: UNEP, 2023.
- [32] HOPEWELL J, DVORAK R, KOSIOR E. Plastics recycling: challenges and opportunities[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364: 2115-2126.
- [33] WEI R, ZIMMERMANN W. Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics: how far are we?[J]. *Microbial Biotechnology*, 2017, 10: 1308-1322.
- [34] TOURNIER V, TOPHAM C M, GILLES A, et al. An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles[J]. *Nature*, 2020, 580: 216-219.
- [35] ABID U, SUN G, SOONG Y H V, et al. Evaluation of enzymatic depolymerization of PET, PTT, and PBT polyesters [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2023, 199: 109074.
- [36] DE LORENZO V, PRATHER K L J, CHEN G Q, et al. The power of synthetic biology for bioproduction, remediation and pollution control[J]. *EMBO Reports*, 2018, 19: e45658.
- [37] ZHANG Z, PENG H R, YANG D C, et al. Polyvinyl chloride degradation by a bacterium isolated from the gut of insect larvae[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 5727.
- [38] ZHANG Z, PENG H R, YANG D C, et al. Addendum: polyvinyl chloride degradation by a bacterium isolated from the gut of insect larvae[J]. *Nature Communications*, 2025, 16: 1123.
- [39] YANG X, CHEN Y, JU F, et al. Micro- and nanoplastic pollution effects on constructed wetland microbial communities and nitrogen removal[J]. *Water Research*, 2022, 222: 118430.
- [40] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Food waste index report 2024[R]. Nairobi: UNEP, 2024.
- [41] ZHU Y, ZHANG Y, LUO D, et al. A review of municipal solid waste in China: characteristics, compositions, influential factors and treatment technologies[J]. *Environmental Development and Sustainability*, 2021, 23: 6603-6622.
- [42] ZHANG H L, LI X P, QI J Y, et al. Analysis of composition characteristics of municipal solid waste in south China[J]. *Huan Jing Ke Xue*, 2015, 36(1): 325-332.
- [43] SONG Y, LIU D, ZHU F, et al. Urban food waste and socioeconomic drivers in China[J]. *Earth Critical Zone*, 2024, 1 (1): 100015.
- [44] LI X, SONG G, LIU G. Wasted food, wasted resources? A critical review of environmental impact analysis of food loss and waste generation and treatment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(17): 7240-7255.
- [45] PILARSKA A A, KULUPA T, KUBIAK A, et al. Anaerobic digestion of food waste—A short review[J]. *Energies*, 2023, 16 (15): 5742.
- [46] CHAVAN S, YADAV B, ATMAKURI A, et al. Bioconversion of organic wastes into value-added products: A review[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126398.
- [47] 刘建明, 张焱坚, 张冰, 曾安平. 巴氏梭菌作为工业底盘细胞高效生产1,3-丙二醇——从代谢工程和菌种进化到过程工程和产品分离. *合成生物学*[J], 2024, 5(6): 1386-1403
- LIU Jianming, ZHANG Chijian, ZHANG Bing, ZENG Anping. *Clostridium pasteurianum* as an industrial chassis for efficient production of 1, 3-propanediol: from metabolic engineering to fermentation and product separation. *Synthetic Biology Journal*[J], 2024, 5(6): 1386-1403
- [48] SEIFAN M, SAMANI A K, BERENJIAN A. Bioconcrete: next generation of self-healing concrete[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, 100(6): 2591-2602.
- [49] RAUTRAY P, ROY A, EISENBART B. Application of bio-bricks & its benefits[C]. *Proceedings of the Design Society*. Cambridge: Cambridge University Press, 2023, 3: 603-612.
- [50] TORRABI H, MCGREAL H, ZARRIN H, et al. Effects of rheological properties on 3D printing of poly(lactic acid) (PLA) and poly(hydroxy alkenoate) (PHA) hybrid materials[J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2023, 5(6): 4034-4044.
- [51] TANG T C, AN B, HUANG Y, et al. Materials design by synthetic biology[J]. *Nature Reviews Materials*, 2021, 6(4): 332-350.
- [52] MEHLER W T, LI H, LYDY M J. Urban-use pyrethroid insecticides in sediments of South China: sources and ecological risk[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(5): 1812-1819.
- [53] AHUJA M, KUMAR L, KUMAR K, et al. Glyphosate: a review on its widespread prevalence and occurrence across various systems[J]. *Environmental Science: Advances*, 2024, 3: 1030-1038.
- [54] SHEKHAR C, KHOSYA R, THAKUR K, et al. A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts[J]. *Toxicology Reports*, 2024, 13: 101840.
- [55] WARD M H, JONES R R, BRENDER J D, et al. Drinking water nitrate and human health: an updated review[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(7): 1557.
- [56] BUTTERBACH-BAHL K, BAGGS E M, DANNENMANN

M, et al. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls?[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2013, 368(1621): 20130122.

[57] SOUTH P F, CAVANAGH A P, LIU H, et al. Synthetic biology for improving photosynthesis and crop yield[J]. Trends in Plant Science, 2019, 24(10): 895-898.

[58] 李笑淳, 宋凯, 陈博, 等. 植物根际促生菌:作用机制与未来[J]. 激光生物学报, 2024, 33(3): 193-202.

LI X C, SONG K, CHEN B, et al. Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Mechanisms and Future Perspectives[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2024, 33(3): 193-202.

[59] LJUNG K. Auxin metabolism and homeostasis during plant development[J]. Development, 2013, 140(5): 943-950.

[60] ASARE P T, ZURFLUH K, GREPPI A, et al. Reuterin demonstrates potent antimicrobial activity against a broad panel of Campylobacter spp. isolates[J]. Microorganisms, 2020, 8(1): 78.

[61] ZHU X, LIU X, LIU T, et al. Synthetic biology of plant natural

products: from pathway elucidation to engineered biosynthesis in plant cells[J]. Plant Communications, 2021, 2(5): 100229.

[62] WANG H X, XU J L, SHENG L X. Study on the comprehensive utilization of city kitchen waste as a resource [J]. Energy, 2019, 173: 263-277.

[63] ZHANG D, HUANG G, XU Y, et al. Anaerobic digestion based waste-to-energy technologies can halve the climate impact of China's fast-growing food waste by 2040[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123490.



通讯作者: 曾安平(1963—),男,德国工程院院士,西湖大学合成生物学与生物工程讲席教授,博士生导师。研究方向为合成生物学及生物制造,生物化工,生物医药与健康;研究重点为细胞工厂构建,CO₂等一碳化合物生物转化、电驱动生物技术及其应用、智能生物材料及能量代谢分子等。

E-mail: zenganping@westlake.edu.cn

附录：技术路线案例及经济潜力评估基础与计算

为展示城市代谢生物制造体系的基本可行性与潜在趋势，附录以1000万人口城市为例，分别对楼宇CO₂排放、废塑料资源化、厨余垃圾循环利

用以及城市绿地与农业绿色替代等典型路径进行经济潜力评估（附表1）。

附表1 城市代谢生物制造经济潜力评估表（1000万人口城市为例）

Supplementary Table S1 Summary of economic potential assessment for urban metabolic biomanufacturing (10-million-population city)

板块	主要原料/来源	年可利用/处理量	年产业产值 (亿元)	年碳减排/环境效益
楼宇CO ₂ 捕集利用	建筑排风CO ₂	捕集CO ₂ :399万吨转化高纯CO ₂ : 279.3万吨	280.19(扣除电力成本后约237)	回收CO ₂ 约570万吨/年
塑料回收利用	城市废塑料(PET等可降解部分)	可回收废塑料:15万吨/年(按可降解塑料占比20%计算)	9.56	减少CO ₂ 排放:3-7.5万吨/年
厨余垃圾利用	厨余/食物垃圾	进入资源化系统:90.9-121.2万吨/年	路线① 2.3-4.4 路线② 2.0-8.3 路线③ 2.3-7.3 / 2.5-12.1 / 1.6-14.5	替代化石能源、减少填埋/焚烧CH ₄ 排放
城市绿地与绿色农业	城市绿地+周边农田	化学农药替代量:• 绿地:40.8吨/年• 农业:3200吨/年	0.0408(绿地)3.2(农业)	减少CO ₂ 排放:• 绿地:612吨/年• 农业:4.8万吨/年

具体计算过程如下：

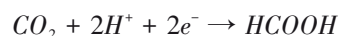
1 楼宇CO₂捕集利用

对于一个约1000万人口的城市，可按建筑通风设计中常用的人均新风量进行估算。依据中国规范

GB 50736-2012，住宅与办公混合场景下人均通风量通常取30-50 m³/h·人，取中间值40 m³/h·人，则全市总排风量为107×40=4×10⁸m³/h，全年按8760小时计为约3.5×10¹²m³，对应空气质量（按1.2 kg/m³）约为42亿吨。在此基础上，若按典型室内CO₂浓度900 ppm（即体积分数9×10⁻⁴），并结合CO₂与空气分子量比值44/29换算为质量分数

(约 1.36×10^{-3})，则全年随建筑排风排出的 CO_2 总量为 $4.2 \times 10^9 \times 1.36 \times 10^{-3} \approx 5.7 \times 10^6$ 吨，即约 570 万吨。

对于液相法 CO_2 捕集，根据文献和中试工厂数据^[64]，假设 CO_2 捕集效率为 70%，则实际被吸收进入液相的 CO_2 为 399 万吨/年；捕集后的 CO_2 通过电化学再生释放高浓度 CO_2 ，假设电化学释放效率为 70%^[65]，则可得到高纯 CO_2 279.3 万吨/年。高纯 CO_2 进入电催化反应体系转化为甲酸，电还原反应为：



理论上，44 吨 CO_2 可生成 46 吨甲酸，即：

1 吨 $\text{CO}_2 \rightarrow 1.045$ 吨甲酸但在实际过程中需考虑转化率。取当前较先进水平转化率 80%^[66-68]，则实际产率为：

$$1.045 \times 0.8 = 0.836 \text{ 吨甲酸/吨 } \text{CO}_2$$

因此年产甲酸为：

$$279.3 \text{ 万吨} \times 0.836 = 233.49 \text{ 万吨甲酸}$$

进一步考虑将甲酸用于生物制造，生产微生物蛋白、可生物降解塑料 (PHA) 或其他高附加值化学品，附加值可达 1 - 2 万元/吨。假设 80% 的碳源进入生物制造环节，取附加值 1.5 万元/吨，则可创造产业规模为：

$$233.49 \times 10^4 \times 0.8 \times 1.5 \times 10^4 = 280.19 \text{ 亿元}$$

从能耗的角度， CO_2 资源化利用的能耗主要包括捕集、释放（电化学再生）、电还原以及后续发酵与分离等环节，其单位能耗分别为：风机能耗 61 kWh/t- CO_2 ^[64]，接触器流体泵能耗 21 kWh/t-

CO_2 ^[64]。由于捕集与建筑内部风机偶联可节省风机能耗，因此 CO_2 捕集总电耗为 21 kWh/t- CO_2 。此外， CO_2 释放耗能 1570 kWh/t CO_2 ^[65]、电还原 4248 kWh/t 甲酸^[66-68]。据此可得各单元年总电耗：

捕集段总电耗 = $399 \times 10^4 \times 21 = 8.379 \times 10^7$ kWh/年，即 0.83 亿 kWh/年；

释放段总电耗 = $279.3 \times 10^4 \times 1570 = 4.385 \times 10^9$ kWh/年，即 43.85 亿 kWh/年；

CO_2 还原段总电耗 = $233.49 \times 10^4 \times 4248 = 9.919 \times 10^9$ kWh/年，即 99.19 亿 kWh/年；

因此，该系统从楼宇分散 CO_2 捕集到甲酸生产的总电耗为：

$$\text{总电耗} = 143.87 \times 10^8 \text{ kWh/年。}$$

即约 143.87 亿 kWh/年。若电力全部来自太阳能，按 0.3 元/kWh 计算，则年电力成本为：

$$143.87 \times 10^8 \times 0.3 = 43.161 \text{ 亿元}$$

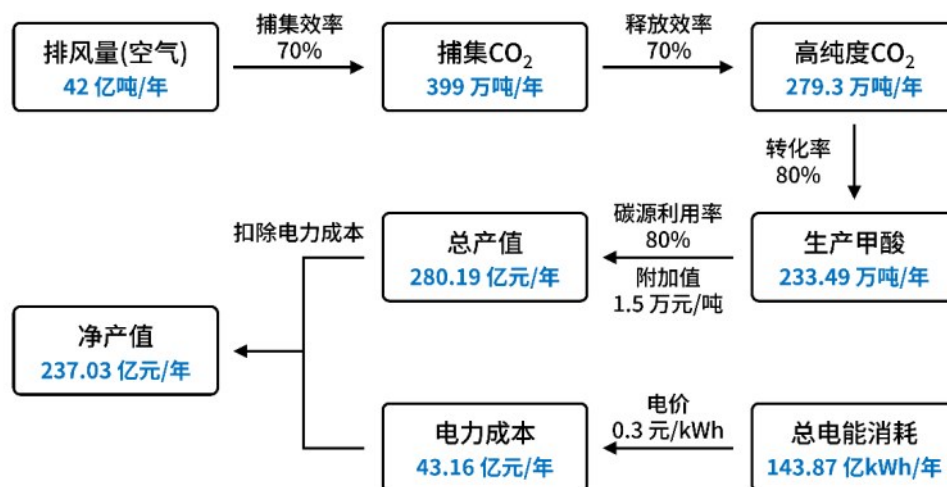
扣除电力成本后，产值约为：

$$280.19 - 43.161 = 237.029 \text{ 亿元}$$

路线图及关键假设，参数及计算结果见附图 1。

2 塑料回收利用

以 1000 万人口城市为例，采用东部地区生活垃圾产生强度 0.87 kg/人/日，并以南方城市生活垃圾中塑料橡胶占比 16.5%-33.4% 估算^[41-42]，则城市



附图 1

(Supplementary Fig. S1)

废塑料产生量约为 52.4 万 - 106.1 万吨/年。若按 PET 等可降解塑料占比 20% 计算, 则可进入回收系统的废塑料量约为 10.48 万 - 21.23 万吨/年。

从可回收废塑料 15 万吨/年出发, 经过酶降解转化为单体, 转化率 85%, 可得到的单体总量为:

$$15 \text{ 万吨} \times 85\% = 12.75 \text{ 万吨/年}$$

这一步得到的主要塑料单体作为生物转化原料。

将 12.75 万吨单体进行微生物发酵转化为可降解塑料, 考虑发酵效率和工艺损耗为 50%, 则最终可降解塑料产量为:

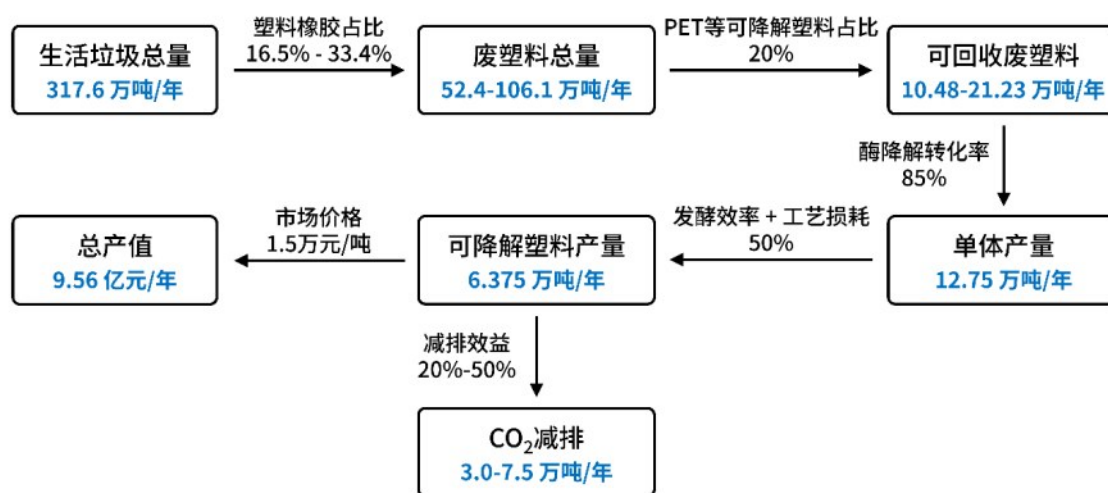
$$12.75 \text{ 万吨} \times 50\% = 6.375 \text{ 万吨/年}$$

按照市场价格 1.5 万元/吨 计算, 年产值为:

$$6.375 \text{ 万吨} \times 1.5 \text{ 万元/吨} = 9.56 \text{ 亿元/年}$$

此外, 废塑料资源化利用可有效替代焚烧或填埋过程中的碳排放。生命周期评价研究表明, 塑料回收可显著降低其全生命周期温室气体排放强度, 通常可实现约 20% - 50% 的减排效益^[69-70]。据此估算, 15 万吨废塑料资源化利用可减少约 3 - 7.5 万吨 CO₂ 排放, 可实现显著的环境减排效果。

路线图及关键假设, 参数及计算结果见附图 2。



附图 2

(Supplementary Fig. S2)

3 厨余垃圾利用

以 1000 万人口城市为例, 采用东部地区生活垃圾产生强度 0.87 kg/人/日、食物垃圾占比 47.7% 进行保守估算^[41], 则厨余/食物垃圾量约为 151.5 万吨/年。现有研究表明, 我国餐厨/厨余垃圾总体仍存在源头分出不足和资源化利用率偏低的问题, 餐饮端单独分出率不足 50%、资源化利用率不足 30%^[62]; 另一项研究指出, 中国食物垃圾中超过 90% 仍与生活垃圾混合后进入填埋或焚烧体系^[63]。因此, 将“60% - 80%”作为案例分析的情景区间。按此计算, 进入资源化系统的有效原料约为 90.9 万 - 121.2 万吨/年。在产值测算上, 分路径呈现如下:

路线① 厌氧消化—沼气/生物甲烷

适合高含水混合厨余, 其甲烷产率按文献数据约为 80 - 120 Nm³甲烷/吨湿基厨余^[71]。结合有效原料量, 可得千万人口城市的甲烷产值约为 2.3 亿 - 4.4 亿元/年, 计算方法如下:

年产值 = 有效原料量 (吨) × 甲烷产率 (Nm³/吨) × 2.8 - 3.0 元/Nm³ 这里只计算气体产品收入, 不含消纳服务费和沼渣利用^[71]。

路线② 废弃食用油—生物柴油

可回收油脂约占有效原料的 3% - 8%, 生物柴油收率约 90% - 95%, 副产甘油约为油脂质量的 8% - 12%^[72-73]。按此比例, 千万人口城市可回收废弃食用油约 2.7 万 - 9.7 万吨。结合生物柴油价格 7000 - 8500 元/吨, 甘油价格按 3000 - 5000 元/吨, 可估算参考产值约 2.0 亿 - 8.3 亿元/年。如果将副

产的甘油转化为1,3-丙二醇（转化率50%，价格2.5万元/吨），可额外增加约0.27 - 1.46亿元/年的产值。

路线③ 稳定组分生物发酵

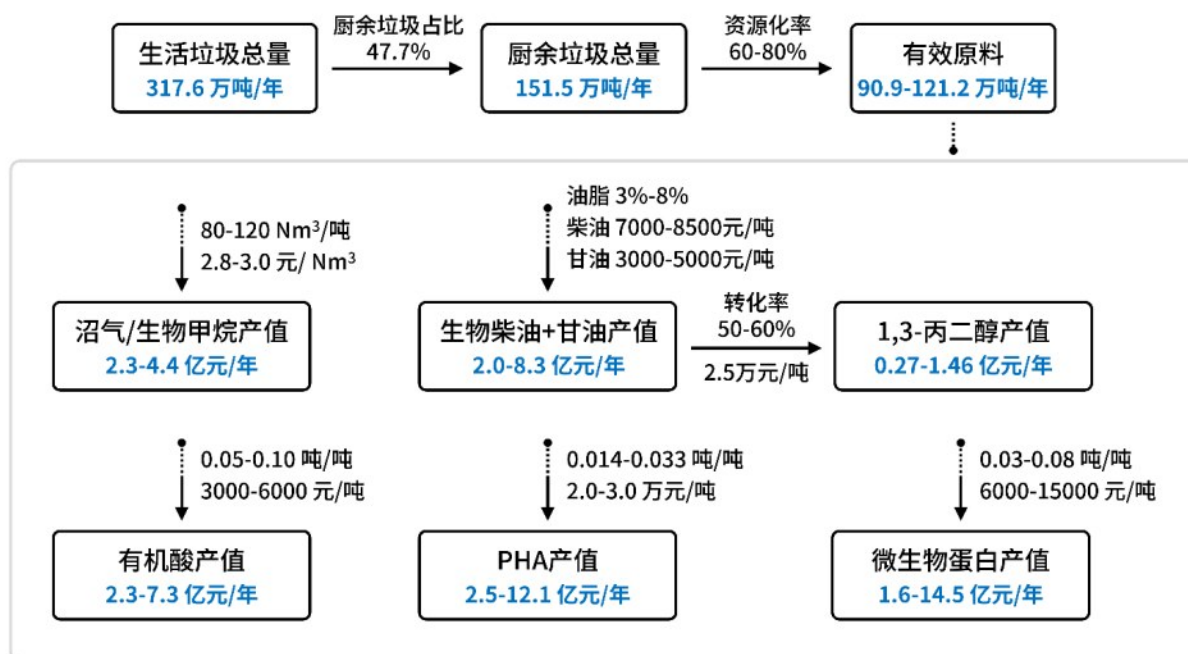
1) 有机酸：适合已分选、成分稳定的底物，产率约0.05 - 0.10吨混合有机酸/吨湿基厨余^[74-75]。按市场价格3000 - 6000元/吨计算，千万人口城市参考产值约2.3亿 - 7.3亿元/年。

2) PHA（聚羟基脂肪酸酯）：文献报道两阶段工艺可达13.9 - 33.2 g/kg湿基原料，即0.014 -

0.033吨/吨湿基厨余^[76]。按PHA价格2.0 - 3.0万元/吨估算，千万人口城市参考产值约2.5亿 - 12.1亿元/年，受纯化成本和产品等级影响显著。

3) 微生物蛋白：需预处理/水解以保证底物流稳定，现阶段更适合中长期高值化方向。产率约0.03 - 0.08吨/吨湿基厨余^[77-78]，按饲料级或功能蛋白价格6000 - 15000元/吨估算，千万人口城市参考产值约1.6亿 - 14.5亿元/年。

路线图及关键假设，参数及计算结果见附图3。



附图3

(Supplementary Fig. S3)

4 城市绿地与绿色农业

以杭州市政策为例，《杭州市绿地系统专项规划（2021-2035年）》提出至2035年杭州市人均公园绿地面积不低于17平方米、公园绿地服务半径覆盖率不低于95%、绿化覆盖率不低于43%的目标。按此规划，以1000万人口计算，则城市绿地总面积约为：

$$1000 \text{ 万人} \times 17 \text{ m}^2/\text{人} = 1.7 \times 10^8 \text{ m}^2 = 1.7 \times 10^4 \text{ 公顷} = 1.7 \text{ 万公顷}$$

城市绿地的化学农药使用量一般较低，约

3 kg/公顷·年（杀虫剂、除草剂等综合施用量），则城市绿地年农药总用量为：

$$1.7 \text{ 万公顷} \times 3 \text{ kg/公顷} = 5.1 \text{ 万 kg} = 51 \text{ 吨/年}$$

如果全部采用生物制造农药替代，假设可替代80%化学农药，则每年可减少化学农药使用量：

$$51 \text{ 吨} \times 80\% = 40.8 \text{ 吨/年}$$

农药作为重要农业投入品，其碳排放强度处于农业投入品较高水平。基于Ecoinvent数据库及相关LCA研究结果推算，其排放量级约为10 - 20吨CO₂/吨农药，按15吨计算，绿色替代可减少碳排放：

$$40.8 \text{ 吨} \times 15 \text{ 吨 CO}_2/\text{吨} = 612 \text{ 吨 CO}_2/\text{年}$$

产业产值方面,生物农药市场价格约10万元/吨,则城市绿地生物农药替代可产生经济价值:

$$40.8 \text{ 吨} \times 10 \text{ 万元/吨} = 408 \text{ 万元/年}$$

在满足人均粮食消费需求与当前单产水平条件下,人均粮食和农产品生产通常需要0.07-0.09公顷耕地(约0.08公顷/人)^[79]。因此该城市周边农业种植面积约为:

$1000 \text{ 万人} \times 0.08 \text{ 公顷} = 80 \text{ 万公顷}$ 我国农业平均化学农药使用量约为5 kg/公顷·年,则该区域每年的农药使用量为:

$$80 \text{ 万公顷} \times 5 \text{ kg/公顷年} = 400 \text{ 万 kg/年} = 4000 \text{ 吨/年}$$

若采用生物制造农药(生物源杀虫剂、微生物农药等)进行替代,假设可替代80%化学农药,

则每年可减少化学农药使用量:

$$4000 \text{ 吨} \times 80\% = 3200 \text{ 吨}$$

按15吨CO₂/吨农药的碳排放计算,则减少碳排放:

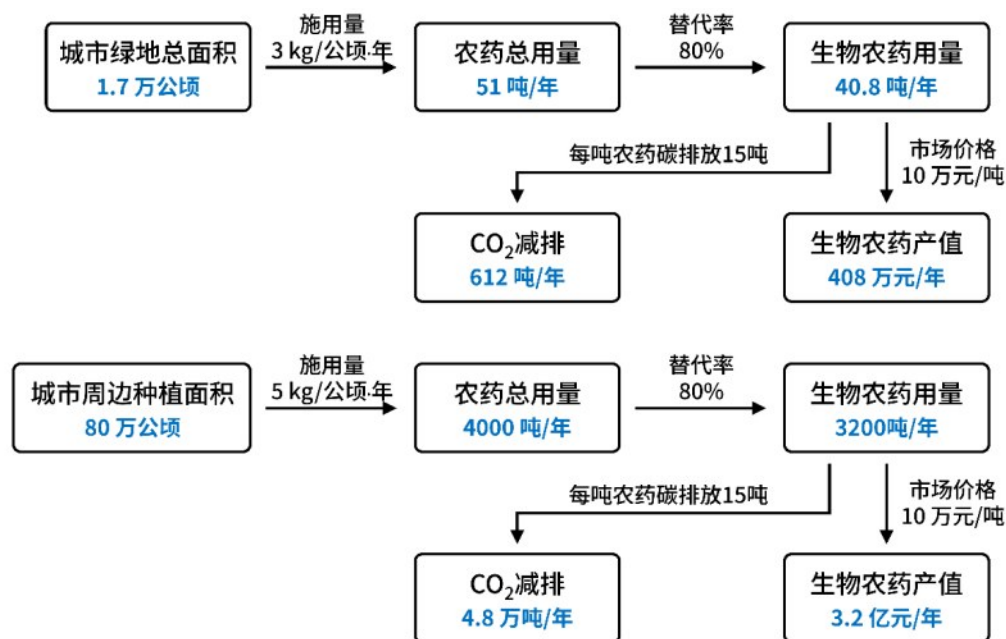
$$3200 \text{ 吨} \times 15 \text{ 吨 CO}_2/\text{吨} = 48000 \text{ 吨 CO}_2$$

$$\text{即约 } 4.8 \text{ 万吨 CO}_2/\text{年}.$$

在产业价值方面,生物制造农药(包括微生物杀虫剂、生物源防控剂和植物生长调节剂)的市场价格通常为8-12万元/吨,按10万元/吨估算,若完全由城市生物制造体系供应3200吨生物农药,则可形成产业产值:

$$3200 \text{ 吨} \times 10 \text{ 万元/吨} = 3.2 \text{ 亿元/年}$$

路线图及关键假设,参数及计算结果见附图4。



附图4

(Supplementary Fig. S4)

参 考 文 献

- [64] KEITH D W, HOLMES G, ST. ANGELO D, et al. A process for capturing CO₂ from the atmosphere[J]. Joule, 2018, 2: 1573-1594.
- [65] WANG P, PEI A, CHEN Z, et al. Integrated system for electrolyte recovery, product separation, and CO₂ capture in CO₂ reduction[J]. Nature Communications, 2025, 16: 731.
- [66] LI C, GUO M, YANG B, et al. Efficient and scalable upcycling of oceanic carbon sources into bioplastic monomers[J]. Nature Catalysis, 2025, 8: 1023-1037.
- [67] XIA C, ZHU P, JIANG Q, et al. Continuous production of pure liquid fuel solutions via electrocatalytic CO₂ reduction using solid-electrolyte devices[J]. Nature Energy, 2019, 4: 776-785.
- [68] JIA B, CHEN Z, ZHU K, et al. Gallium modulated tin oxide for continuous production of formic acid via durable acidic CO₂ electroreduction[J]. Science Advances, 2025, 11(34): eadw7326.
- [69] TONINI D, SCHRIJVERS D, NESSI S, et al. Carbon footprint of plastic from biomass and recycled feedstock:

- methodological insights[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021, 26(2): 221-237.
- [70] JIANG X, BATEER B. A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation[J]. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 2025, 43(8): 1159 – 1178.
- [71] MORALES-POLO C, CLEDERA-CASTRO M M, MORATILLA SORIA B Y. Reviewing the anaerobic digestion of food waste: From waste generation and anaerobic process to its perspectives[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(10): 1804.
- [72] ZHANG Y, DUBÉ M A, MCLEAN D D, et al. Converting waste cooking oil to biodiesel in China: Environmental impacts and economic feasibility[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 140: 110661.
- [73] ULUKARDESLER A H. Biodiesel production from waste cooking oil using different types of catalysts[J]. *Processes*, 2023, 11(7): 2035.
- [74] STRAZZERA G, BATTISTA F, GARCIA N H, et al. Volatile fatty acids production from food wastes for biorefinery platforms: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 226: 278-288.
- [75] YIN J, WANG K, YANG Y, et al. Improving production of volatile fatty acids from food waste fermentation by hydrothermal pretreatment[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 323-329.
- [76] COLOMBO B, FAVINI F, SCAGLIA B, et al. Enhanced polyhydroxyalkanoate (PHA) production from the organic fraction of municipal solid waste by using mixed microbial culture[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2017, 10: 201.
- [77] SEKOAI P T, ROETS-DLAMINI Y, O'BRIEN F, et al. Valorization of food waste into single-cell protein: An innovative technological strategy for sustainable protein production[J]. *Microorganisms*, 2024, 12(1): 166.
- [78] ZHU Z, WU Y, HU W, et al. Valorization of food waste fermentation liquid into single cell protein by photosynthetic bacteria via stimulating carbon metabolic pathway and environmental behaviour[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 361: 127704.
- [79] 赵晓宇, 孙春强, 崔荣国等. 基于粮食安全的中国耕地保护阈值研究[J]. *资源科学*, 2024, 46(12): 2355-2366.
- ZHAO X Y, SUN C Q, CUI R G, et al. Study on the Threshold of Cultivated Land Protection in China Based on Food Security [J]. *Resources Science*, 2024, 46(12): 2355-2366.