

## 观点

DOI: 10.12211/2096-8280.2024-072

## 生物制造的市本率（PC值）：定义与应用

张以恒<sup>1, 2, 3</sup>, 陈雪梅<sup>2, 3</sup>, 石婷<sup>1, 2, 3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院天津工业生物技术研究所, 低碳合成工程生物学全国重点实验室, 天津 300308; <sup>2</sup> 中国科学院天津工业生物技术研究所, 体外合成生物学中心, 天津 300308; <sup>3</sup> 国家合成生物技术创新中心, 天津 300308)

**摘要:** 生物制造是中国“十四五”战略性新兴产业之一。本文作者曾经提出“道法术器”对工业生物制造的哲学指导意义。为了深入阐述生物制造中“法以立本”的原则, 本文首次提出“市本率”这一创新性概念, 即产品市场价格与原料成本的比值, 英文全称是 Price to Cost-of-raw-materials Ratio, 简称PC值。市本率是一个衡量技术水平与经济价值的关键指标, 具有简单、公开、透明的属性, 提供了生物制造产品分类新方法, 有助于指导新技术增效和降本的发展路径, 预判生物产品未来制造成本及市场价格的趋势, 评估新兴生物技术的产业化潜力。市本率的计算与分析, 作为一种新方法学工具, 将为生物制造战略新兴产业的未来发展提供顶层设计的新视角, 深化对生物制造产品市场前景的理解, 推动生物经济高质量发展。

**关键词:** 生物制造; 生物经济; 市本率; 道法术器; 第一性原理; 大宗产品

中图分类号: Q81 文献标志码: A

## Price to Cost-of-raw-materials Ratio (PC) of biomanufacturing: definition and application

ZHANG Yi-Heng P. Job<sup>1, 2, 3</sup>, CHEN Xuemei<sup>2, 3</sup>, SHI Ting<sup>1, 2, 3</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Engineering Biology for Low-Carbon Manufacturing, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China; <sup>2</sup> In vitro Synthetic Biology Center, Tianjin Institute of Industrial Biotechnology, Chinese Academy of Sciences, Tianjin 300308, China; <sup>3</sup> National Center of Technology Innovation for Synthetic Biology, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** Biomanufacturing is one of the strategic emerging industries in China during the “14th Five-Year Plan” period. The author once proposed “Tao-Fa-Shu-Qi” for the industrial biomanufacturing and provided its philosophical guideline. Focusing on the “Fa” of biological manufacturing and further analyzing the concept of “Fa as rules” in biomanufacturing, the author first proposed the concept of “Price to Cost-of-raw-materials Ratio” (PC value), which is the ratio of product market price to cost with raw materials. Biomanufactured products can be categorized by PC value into high-value products, value-added products, biocommodity, and products for public good. The PC value is a key

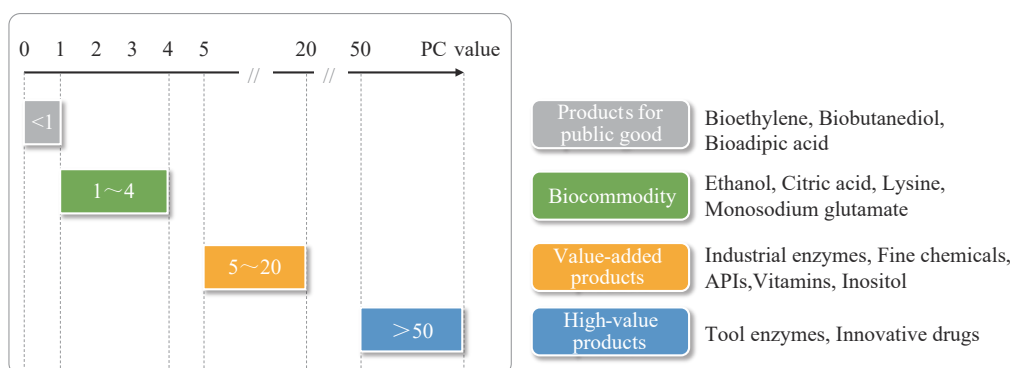
收稿日期: 2024-09-18 修回日期: 2024-11-26

基金项目: 国家重点研发计划“合成生物学”重点专项(2022YFA0912303); 国家自然科学基金面上项目(NSFC 32271544); 合成生物学海河实验室颠覆性创新项目(22HHSWSS000155); 天津市合成生物技术创新能力提升行动项目(TSBICIP-CXRC-067)

引用本文: 张以恒, 陈雪梅, 石婷. 生物制造的市本率(PC值): 定义与应用[J]. 合成生物学, 2025, 6(1): 8-17

Citation: ZHANG Yi-Heng P. Job, CHEN Xuemei, SHI Ting. Price to Cost-of-raw-materials Ratio (PC) of biomanufacturing: definition and application[J]. Synthetic Biology Journal, 2025, 6(1): 8-17

indicator for evaluating the technological capability and economic viability of biomanufactured products. It is simple, transparent, and publicly accessible, offering a new approach for categorizing biomanufactured products. This indicator aids in guiding new technologies towards pathways of efficiency enhancement and cost reduction, forecasting future manufacturing costs and market prices for bioproducts, and assessing the industrialization potential of emerging biotechnologies. This article focuses on the biomanufacturing of fructose syrup, fructose solution, crystalline fructose, allulose, myo-inositol, and tagatose as examples, analyzing pathways for developing new technologies and predicting their economic feasibility. The calculation and analysis of the PC value could provide a new methodological tool for the top-level strategic design of the future development of emerging biomanufacturing industries, and could effectively facilitate the high-quality development of the bioeconomy.



**Keywords:** biomanufacturing; bioeconomy; Price to Cost-of-raw-materials Ratio; Tao-Fa-Shu-Qi; first principles; biocommodity

生物经济 (bioeconomy) 是以生命科学与生物技术的研发与应用为基础的, 建立在生物技术和产业之上的经济, 是继农业经济、工业经济、信息经济之后的第四次产业浪潮<sup>[1-2]</sup>。2022年5月10日, 国家发展和改革委员会发布《“十四五”生物经济发展规划》(以下简称《规划》), 这是中国首部生物经济五年规划, 明确打造国家生物技术战略科技力量, 加快突破生物经济发展瓶颈, 实现科技自立自强<sup>[3]</sup>。根据不同的产业应用, 生物技术可以被形象地划分为多种“颜色”类别, 包括医药生物技术 (红色生物技术)<sup>[4]</sup>、工业生物技术 (白色生物技术)<sup>[5]</sup> 与农业生物技术 (绿色生物技术) 等<sup>[6]</sup>。

生物制造是基于生物技术, 利用生物体 (如植物、动物、微生物、细胞工厂、酶分子、多酶分子机器等) 的机能进行物质加工与合成以及能源转换的绿色生产方式, 将在能源、农业、化工和医药等领域改变世界工业制造格局<sup>[7-10]</sup>, 有望占

据未来工业制造业产出的60%以上。《规划》明确将生物制造作为生物经济战略性新兴产业发展方向, 提出“依托生物制造技术, 实现化工原料和过程的生物技术替代, 发展高性能生物环保材料和生物制剂, 推动化工、医药、材料、轻工等重要工业产品制造与生物技术深度融合, 向绿色低碳、无毒低毒、可持续发展模式转型”<sup>[9]</sup>。

2024年, 本文作者提出应用中国古代哲学的“道法术器”思想, “道以明向, 法以立本, 术以立策, 器以成事”, 对工业生物制造的道与法进行解释与剖析, 阐明顶层设计对生物制造的哲学指导意义<sup>[11]</sup>。为了深入阐释生物制造领域中“法以立本”的精髓, 作者创新性地引入了“市本率 (Price to Cost-of-raw-materials Ratio, PC值)”这一概念。通过PC值量化指标的独特视角, 可以更深刻地理解生物制造产品的技术演进, 预测其发展趋势, 并为其提供战略性的指导, 推动生物制造产业向更高效、更可持续的方向发展。

## 1 市本率（PC值）的定义与应用

利用可再生碳资源与能源替代石化资源是人类社会发展的重大变革。在市场规则下，生物制造产品的市场价格竞争力是实现变革的硬指标。产品的市场价格构成包括生产成本、流通费用、利润与税金四个要素，受到技术先进性、知识产权垄断性、市场准入、市场竞争态势等综合性影响。在工业生物制造领域，生产成本包括原料成本与制造成本。其中，原料成本取决于原料价格与实际得率，而原料价格又涉及资源稀缺性、运输成本、原料本身的制造成本等诸多因素；制造成本包括分离成本、动力成本、辅料成本、污水处理费用、人工成本、折旧费用等。显而易见，上述众多变量和复杂的参数体系为相关从业人员精确评估产品成本带来了显著挑战，增加了评估市场竞争力和商业可行性的不确定性。

化繁为简，作者在此提出一个创新的指标——“市本率”，即在生产制造端的产品市场价格与原料成本的比值，英文全称是 Price to Cost-of-raw-materials Ratio，简称PC值，其计算公式如下：

$$PC = \frac{\text{产品市场价格}}{\text{原料成本}} = \frac{\text{产品市场价格}}{\text{原料价格} \div \text{实际得率(质量比)}}$$

上述公式涉及的产品市场价格、原料价格及实际得率公开、透明，可以清晰计算PC值。产品市场价格整体上受主流技术及行业发展规律的约束，随着产品在其生命周期经历的各个阶段，从萌芽期、成长期、成熟期，最后步入衰退期，产品市场价格（制造端）与PC值往往呈现从高到

低，最终趋于稳定的趋势。

作者将产品生命周期与PC值结合分析，能够帮助认识生物制造产品的不同分类及技术特点，在一定程度上反映产品所处的技术发展阶段，并预测其终极生产成本，帮助分析产品技术的经济效益和产业化前景。

### 1.1 分类生物制造产品

市本率（PC值）的第一个关键应用是对生物制造产品的分类。根据PC值大小，可以人为地将生物制造产品划分为高值产品、增值产品、大宗产品和情怀产品。

本文作者首次提出基于PC值的生物制造产品分类准则（图1），旨在为行业提供一个清晰的框架，以评估和区分各类生物制造产品的市场定位。根据PC值划分的产品类别包括：①高值产品，即市本率超过50的高PC值产品，通常也是行业内的高附加值商品，如工具酶、创新药、新材料等；②增值产品，即市本率在5~20的中等PC值产品，如工业酶、精细化学品、活性药物成分（API）、维生素、肌醇等，它们的市场应用场景极为丰富；③大宗产品，即市本率在1~4之间的低PC值产品，如淀粉乙醇、柠檬酸、赖氨酸、谷氨酸钠等，它们占据着规模市场地位；④情怀产品，即市本率为1以下的超低PC值产品，如生物乙烯、生物丁二醇、生物己二酸等，它们可能在经济价值上并不突出，但承载着特殊的文化意义、情感价值或社会责任，比如代表着对可持续发展和环保理念的追求。

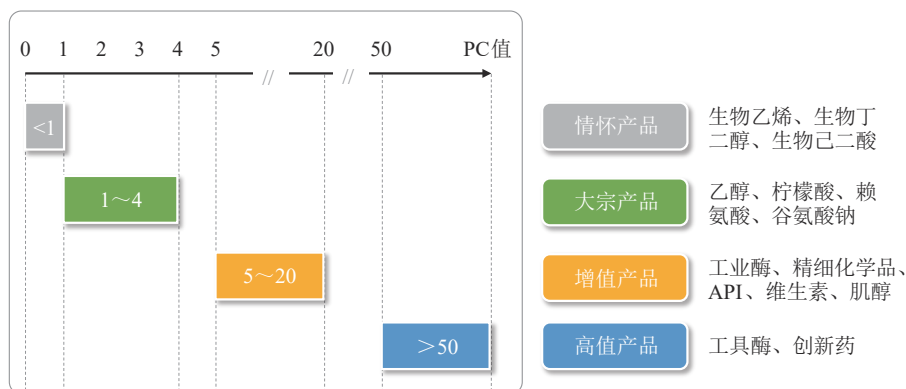


图1 基于PC值的生物制造产品分类

Fig. 1 Classification of biomanufactured products based on PC values

我们对众多代表性生物制造产品目前的主流技术、市场数据进行了梳理, 获得产品市场价格、原料价格与产品实际得率, 计算其相应PC值(表1), 并分析其产品技术发展特点以及市场前景。

对于高PC值产品, 它们往往已通过新产品专利、技术秘密或政策准入等确立了市场垄断地位, 从而获得定价权。这类产品通常具有附加值高、市场规模小的特点, 制造成本(特别是原料成本)的占比较小。在垄断权利丧失前, 企业本就缺少降低生产制造成本的动力; 对于存量市场而言, 低成本的制造技术甚至会导致市场价格或销售额

的整体下降, 如青霉素、维生素C和青蒿素。

对于中等PC值产品, 主要采用渐进性的生物制造技术降低制造成本, 在现有市场规模下寻求价格稳定, 利润提升; 随着应用场景拓展及需求端增强, 市场规模扩大的预期将吸引更多新兴技术涌入, 触发市场价格快速降低, 带动其演化为低PC值产品。

对于低PC值的大宗产品, 如能源、粮食、材料等, 生物制造水平决定现实生产成本极限, 原料成本决定未来生产成本极限, 新的竞争者必须开发出从更廉价原料替代到制造方法的全新技术

表1 代表性生物制造产品的PC值现状

Table 1 Current PC values of representative biomanufactured products

产品	产品市场价格 (元/吨)	原料	原料成本 (元/吨)	实际得率 (质量比)	PC值 <sup>①</sup>
情怀产品(PC≤1)					
脂肪醇	12000~15000	蔗糖	3000~6500	25%	0.71
乙烯	7000~8000	乙醇	5000~7000	58%	0.72
微生物蛋白	10000~13000	淀粉	2800~3200	25%	0.96
大宗产品(1<PC≤4)					
乙醇	6000~7500	淀粉	2800~3200	48%	1.08
果葡糖浆F42 (70%)	2500~3000	淀粉	2800~3200	96%	1.26
葡萄糖酸钠	4000~4500	葡萄糖	3000~4000	105%	1.27
谷氨酸钠	7000~9000	葡萄糖	3000~4000	74%	1.69
麦芽糖(75%)	2400~2700	淀粉	2800~3200	96%	1.71
柠檬酸	5000~6000	淀粉	2800~3200	95%	1.74
苏氨酸	10000~12000	葡萄糖	3000~4000	58%	1.82
果糖溶液	6000~7000	淀粉	2800~3200	94%	2.04
赖氨酸	9000~11000	葡萄糖	3000~4000	85%	2.43
结晶果糖	10000~12000	淀粉	2800~3200	90%	3.30
增值产品(5≤PC≤20)					
乳果糖(70%)	25000~40000	乳糖	5000~9000	80%	5.31
阿洛酮糖	15000~25000	淀粉	2800~3200	85%	5.67
法尼烯	90000~110000	葡萄糖	3000~4000	25%	7.14
纤维素酶	90000~110000	葡萄糖	3000~4000	33%	9.43
蛋白酶	90000~110000	葡萄糖	3000~4000	33%	9.43
塔格糖	40000~60000	淀粉	2800~3200	75%	12.50
肌醇	30000~50000	淀粉	2800~3200	85%	11.33
手性肌醇	800000~1000000	肌醇	30000~70000	80%	18.00
高值产品(PC≥50)					
L-核糖	90000~110000	D-木糖	10000~14000	80%	66.67
鲨肌醇	350000~450000	肌醇	30000~70000	80%	80.00
手性肌醇	800000~1000000	淀粉	2800~3200	80%	240.00

①PC值=产品市场价格中间值/(原料价格中间值/实际得率), 产品市场价格以折干价计算。

路线，才有望在红海市场中脱颖而出。

PC值低于1的情怀产品，通常意味着原料成本已经超过了产品的市场价格。纯经济角度而言，情怀产品的生物制造不具备商业意义，也无法改变市场格局。然而，有悖商业逻辑的情怀产品生物制造依然可能存在，例如，特定区域市场对可持续性和环保的重视，使得生物基产品可能实现相对石油基产品的溢价，如生物乙烯、绿色甲醇、生物丁二醇、生物乙二醇等；又如考虑到国家安全，必须能够自主生产关键化学品和燃料，如二战期间德国利用煤炭生产合成汽油，20世纪70年代南非利用煤炭合成石油等；此外，不同路径的生物制造技术也可作为战略储备，在非技术性因素触发产品市场价格上扬或原料价格降低时，储备技术能够快速实施。对于情怀产品，研发人员或投资者应当结合目标市场的社会、文化、资源等因素，更加谨慎、长远地做出综合判断。

## 1.2 指导技术发展路径——增效与降本

市本率（PC值）的第二个关键应用是评估技术发展阶段并预测终极制造成本。PC值分析将能指导新技术发展路径——增效和/或降本。其中，

增效技术是生物制造的渐进性技术，可通过不断趋近理论得率来降低制造成本，在原有市场价格体系中具备竞争力；降本技术则是生物制造的颠覆性技术，通过革新合成方法来提升理论得率（如好氧发酵转为厌氧发酵），或探索低成本原料的替换路线，以更大幅度地降低原料成本，确保足够利润空间，使产品能够应对市场价格下行压力，避免受到经济规律影响，彻底重塑行业格局。

关于增效技术，以淀粉为原料生产果葡糖浆F42（70%）、果糖溶液、结晶果糖、阿洛酮糖、肌醇以及塔格糖为例，它们都是葡萄糖的同分异构体。目前，果葡糖浆F42（70%）、果糖溶液、结晶果糖、阿洛酮糖、肌醇以及塔格糖的价格约为每吨2750元、6500元、11000元、20000元、40000元、50000元，对应PC值分别是1.26、2.04、3.30、5.67、11.33、12.50（表2）。果葡糖浆F42（70%）、果糖溶液、结晶果糖属于低PC值的大宗产品，制造工艺十分完善，增效技术空间有限，价格利润空间很小；阿洛酮糖、肌醇以及塔格糖则属于增值产品，其增效潜力十分乐观。阿洛酮糖、肌醇和塔格糖具有广泛的应用场景，市场规模的增长潜力足以支持市场价格持续下探，随着制造技术持续进步，这些产品有望从增值产品转

表2 大宗产品未来制造技术及成本的猜测

Table 2 Speculations on future manufacturing technologies and costs for biocommodity

目标产品	当前阶段					发展阶段			终极阶段	
	原料	原料价格 /(元/吨)	实际得率 (质量比)	理论得率 (摩尔比)	PC-1 <sup>①</sup>	产品市场价格 /(元/吨)	PC-2 <sup>②</sup>	产品市场价格 /(元/吨) <sup>③</sup>	PC-3 <sup>④</sup>	产品市场价格 /(元/吨) <sup>⑤</sup>
果葡糖浆F42	淀粉	3000	96%	100%	1.26	2750	1.26	2640	1.26	2640
果糖溶液	淀粉	3000	94%	100%	2.04	6500	2.04	6110	2.04	6110
结晶果糖	淀粉	3000	90%	100%	3.30	11000	3.30	9900	2.04	6120
阿洛酮糖	淀粉	3000	85%	100%	5.67	20000	3.30	9900	2.04	6120
肌醇	淀粉	3000	85%	100%	11.33	40000	3.30	9900	2.04	6120
塔格糖	乳糖	7000	40%	50%	2.86	50000	2.86	40000	2.04	28560
	果糖	6500	NA	100%	NA	50000	3.30	21450	2.04	13260
	淀粉	3000	75%	100%	12.50	50000	3.30	9900	2.04	6120

① PC-1=当前阶段产品市场价格/(原料价格/实际得率)，当前产品市场价格以折干价计算。

② 以结晶果糖的PC-1（即3.30）作为市场发展阶段的参考PC值，当目标产品的PC-1<3.30，则预测目标产品发展阶段的PC-2与其PC-1保持一致；当目标产品PC-1>3.30或未知，则预测产品发展阶段的PC-2为3.30。

③ 猜测发展阶段产品的最低市场价格=PC-2×原料价格/理论得率，市场价格以折干价计算。

④ 以果糖溶液的PC-1（即2.04）作为市场终极阶段的参考PC值，当目标产品的PC-2<2.04，则预测目标产品终极阶段的PC-3与相应PC-2保持一致；当目标产品PC-2>2.04，则预测产品终极阶段的PC-3为2.04。

⑤ 猜测终极阶段产品的最低市场价格=PC-3×原料价格/理论得率，市场价格以折干价计算。

⑥ NA表示无数据。

型为大宗产品。我们猜测，阿洛酮糖、肌醇和塔格糖的市场达到结晶果糖发展阶段时 (PC= 3.30)，价格能够降低到 10000 元/吨以下；发展到果糖溶液的成熟阶段时 (PC = 2.04)，终极价格甚至能降到 6500 元/吨以下 (图2和表2)。

降本技术可能颠覆增效技术已经近乎完美的产品，具体包括廉价原料的替换、产品得率的提升等方式。以塔格糖生物制造技术发展历程为例：1992年，卡夫食品有限公司 (Kraft Foods Inc.) 首次提出了以半乳糖为原料，通过阿拉伯糖异构酶催化异构生产塔格糖 [12]，但由于原料价格昂贵，塔格糖市场价格居高不下；2013年，三养集团 (Samyang Corp.) 开发了以果糖为原料，通过果糖 4-差向异构酶催化异构生产塔格糖的方法 [13]；

2015年，作者提出以淀粉或其衍生物作为底物，经多酶级联催化方法制备塔格糖的体外多酶分子机器合成途径 [14]。目前，塔格糖市场价格约 5 万元/吨，乳糖、果糖、淀粉的原料价格分别为 12000 元/吨、11000 元/吨、3000 元/吨，乳糖制塔格糖 PC 值为 2.86，技术已基本成熟，降价空间很小；果糖制塔格糖的理论 PC 值最高 7.69，淀粉制塔格糖目前 PC 值为 12.5 (表 2)，显然这两个新兴技术发展潜力较大，具有明显的市场价格竞争力，目前已成为生物制造投资领域关注的热点。

以有百年发酵历史的柠檬酸发酵为例。第一次世界大战阻止了意大利的柠檬出口，科学家开始研究霉菌发酵生产柠檬酸，其中黑曲霉的产酸能力最强。1923年，美国辉瑞公司建造了世界上

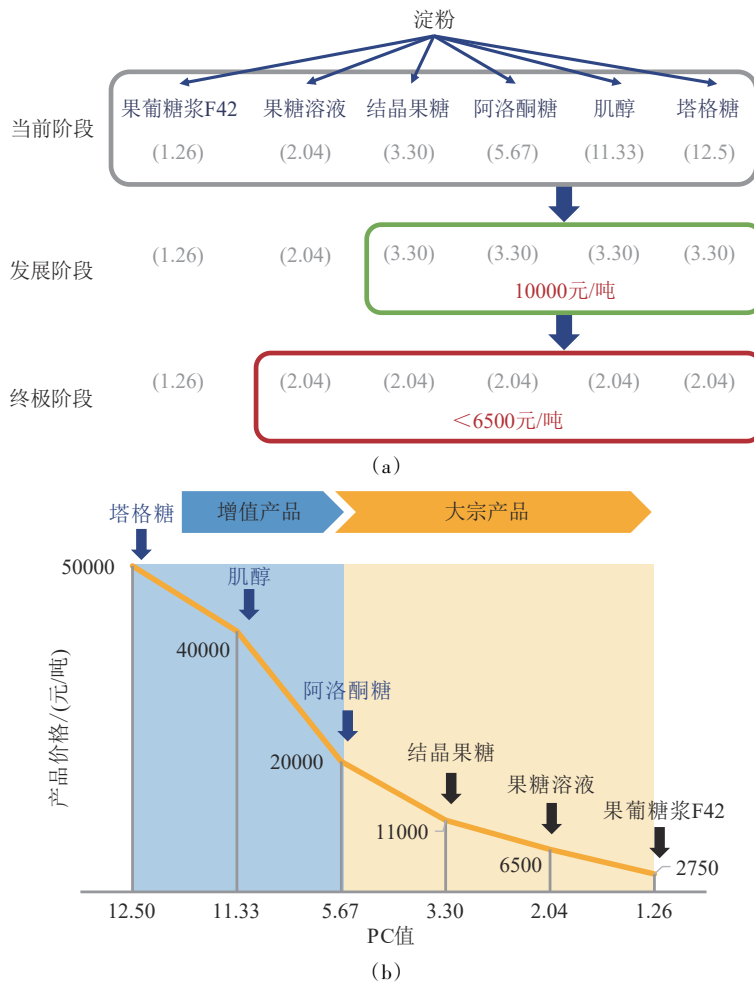


图2 淀粉为原料生产多种产品的PC值比较 (a) 以及猜测产品未来制造成本 (b)

Fig. 2 Comparison of PC values for various products produced from starch (a) and their prices in the middle and long term, respectively(b)

第一家以黑曲霉浅盘发酵法生产柠檬酸的工厂，柠檬酸发酵法从此在产业上逐渐替代柑橘提取法。1952年，美国公司进一步开发深层好氧发酵法（类似青霉素发酵新方法）生产柠檬酸，发酵周期短、产率高、占地面积小，再次改变了柠檬酸的产业格局。目前，以淀粉为原料，深层好氧发酵法生产柠檬酸仍是最好的生物制造办法，理论得率是106.7%（即1 mol葡萄糖生产1 mol柠檬酸），考虑到合成其他杂酸与菌体生长消耗因素，实际得率约为95%，柠檬酸PC值是1.74 [图3(a)]，好氧发酵及产品分离制备工艺几乎接近完美，增效空间有限。

作者创新性地提出了一种柠檬酸生物合成的新方法——厌氧固碳发酵技术。该方法利用3 mol葡萄糖和6 mol二氧化碳，经过一系列生化反应，最后合成4 mol柠檬酸，理论得率可以提升至142%，PC值为2.6，相较现有水平提升了49%。在当前市场的产品价格体系下，这一技术有望显著提升利润空间。即便面对行业竞争加剧，PC值可能再度下探至1.74，柠檬酸市场价格降低到约3700元/吨 [图3(b)]，仍可维持合理利润。厌氧固碳发酵技术可能彻底颠覆现有柠檬酸生物制造产业，引领行业向更高效、更经济、更环保的生产方式迈进。

### 1.3 预测新技术产业化前景

市本率的第三个应用在于评估新技术的经济

可行性。在这一过程中，关键在于密切关注初始PC值、PC值演变趋势以及关键中间产品的PC值。通过对这些关键指标的细致考察，可以更准确地预测新技术在商业化过程中的潜在价值和成本效益，揭示可能的风险点，有助于有效地分配和利用资源要素。

首先，根据第一性原理，任何产品新制造技术的初始PC值都不应低于1，即原料成本不应大于产品市场价格，否则不具备经济可行性。然而，在实践中，许多企业与科学家并未深刻理解这一基本原则，仍投入大量资源研发新技术。例如，Amyris公司通过好氧发酵工艺，使用葡萄糖（或蔗糖）作为原料生产生物燃料脂肪醇<sup>[11, 15-16]</sup>；Genomatica公司直接从葡萄糖发酵生产生物丁二醇<sup>[17]</sup>；DuPont开发了微生物橡胶工艺；可口可乐涉足乙醇生产乙烯等技术研发。以饲料蛋白为例，已知淀粉生产微生物蛋白的最大理论得率为25%，即4千克淀粉可生产1千克微生物蛋白。目前，淀粉原料价格约为3000元/吨，即微生物蛋白的生产成本将超过1.2万元/吨，可以预见其产品市场价格将难以与大豆蛋白（1万元/吨）竞争。基于现有产品价格、原料价格以及生产技术，淀粉生产微生物蛋白的PC值低于1，属于典型情怀产品，远不如从淀粉生产（分泌）氨基酸产品具备经济可行性。

其次，初始PC值超过1的新制造技术具备基

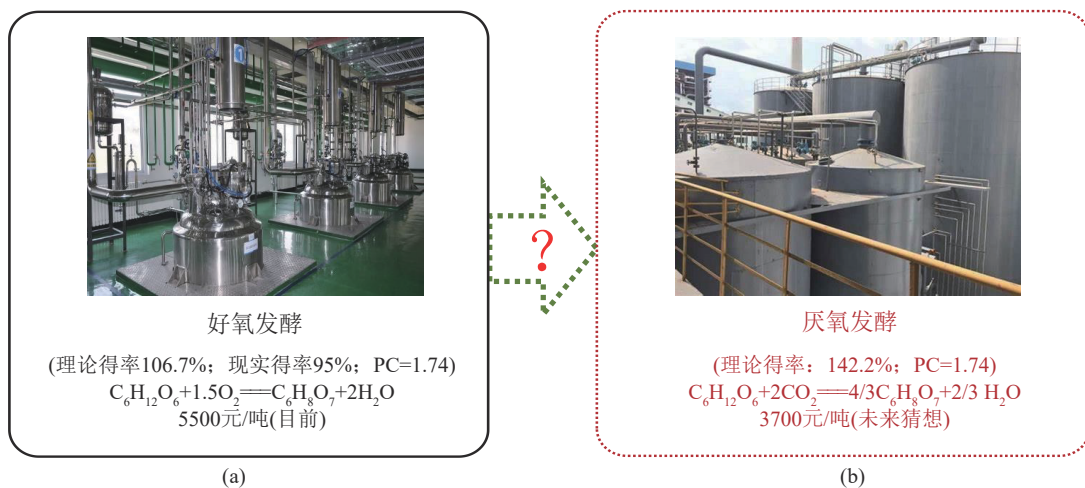


图3 柠檬酸生产方法的猜想与比较：柠檬酸的现有生产方法（好氧发酵）(a)和柠檬酸未来生产方法及制造成本的猜想（厌氧固碳发酵）(b)

Fig. 3 Comparison of citric acid production with current production method (aerobic fermentation) (a) and hypothetical production method (anaerobic carbon fixation fermentation) (b) and their estimated manufacturing costs

本的经济可行性，但新技术并不必然拥有光明的产业化前景。这是因为原料成本决定了成本底线（ $PC = 1$ ），也是新技术发展的生死线。在生物制造领域，不存在摩尔定律所描述的指数级成本下降，技术演进推动制造成本线性下降才是普遍共识。产品市场规模扩大，竞争加剧，也引发市场价格不断走低。在生物制造领域，竞争者初始PC值越高，就越有可能穿越行业周期，直至技术成熟、市场竞争格局稳定，在此期间PC值低于1的技术将被淘汰出局（图4）。高PC值的高值产品、增值产品有更多技术发展路径并行的可能性，这些技术可以在原料成本与制造成本中寻求平衡，突破更快、成本更低的制造工艺技术也有可能弥补原料成本相对高的缺点，进而抢占市场份额。低PC值的大宗产品通常已构建稳定、完整的产业链，新的竞争者对廉价原料替换、得率提升等在原料端革新势在必行，仅依靠改进制造过程的工艺技术几乎不可能存在现实的产业化前景。

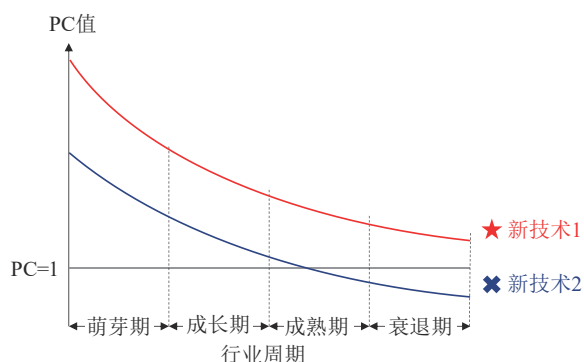


图4 预测新技术产业化前景

Fig. 4 Assessing the commercialization potential of a new technology

最后，市本率同样关注生物制造过程中的关键中间产品。以作者开发的淀粉制备葡萄糖二酸的体外生物转化（ivBT）方法为例，该过程首先利用四种嗜热酶（ $\alpha$ -葡聚糖磷酸化酶、磷酸葡萄糖变位酶、肌醇1-磷酸合成酶和肌醇单磷酸酶）催化淀粉合成中间产物肌醇，再通过三种中温酶（肌醇氧化酶、尿酸脱氢酶和NADH氧化酶）将肌醇高效转化为葡萄糖二酸<sup>[18]</sup>。目前，葡萄糖二酸尚未实现大规模产业化，作为高端保健品的市场价格高达20万元/吨，而原料淀粉价格仅为3000元/吨，计算PC值高达67，属于典型高值产品。中间产品

肌醇已实现大规模产业化，淀粉制肌醇技术是全球第一个体外合成生物学的工业化成功范例<sup>[19]</sup>，其PC值为11.33，预期长期稳定的市场价格约为4万元/吨。考虑到肌醇制备葡萄糖二酸的理论得率为100%，其PC值计算结果为5，即目前直接利用市售肌醇制备葡萄糖二酸的技术同样具备产业化的潜力。

假设葡萄糖二酸制造工艺技术发生革命性突破，PC值降至原来的1/10，即6.7，将使其转变成典型的增值产品。如果葡萄糖二酸市场价格下降到2万元/吨，低价葡萄糖二酸的应用有望扩展至多个领域，如生物螯合剂、可降解表面活性剂、洗涤剂、除冰剂、金属表面处理剂、净水剂，采油剂、塑化剂等，从而显著提升市场规模，展现出可观的经济前景。然而，假设此时再直接利用4万元/吨的肌醇生产2万元/吨葡萄糖二酸，其PC值将低于1，显然经济上已不再可行。因此，以淀粉为原料，经过中间产品肌醇制备葡萄糖二酸的技术也将随之失去意义，应当寻找更有潜力的全新合成途径。

## 2 讨论

市本率（PC值）与美国企业家埃隆·马斯克（Elon Musk）提出的白痴指数（Idiot index）以及股票市场中的市销率（Price-to-Sales Ratio, PS）在概念上有相似之处。这些以关键的财务和/或技术参数作为基础的极简量化指标，都可直观、有效地用于技术投资、企业估值及市场分析等。

在工业制造领域，埃隆·马斯克在2002年访问俄罗斯后，提出了一个创新的概念——“白痴指数”。这一指标衡量一个零部件的总成本与其原材料成本的比值。马斯克认为，如果一个产品的白痴指数过高，那么通过精心的规划和设计，采用更高效的制造技术，就有可能显著降低其成本。他以火箭制造为例，通过计算碳纤维、金属、燃料和其他材料的成本，指出成品的成本比材料成本至少高50倍。到了2021年，马斯克依据白痴指数的理念，制定了一份明确的路线图，目标是在12个月内将猛禽发动机的成本从200万美元降低至20万美元<sup>[20]</sup>，也表明了该指数在工业制造领域的

应用价值。本文提出的市本率(PC值)与白痴指数类似,同样聚焦成品与原料的价格比,可用于预测技术突破的空间,评估生物制造产品的成本效益,识别成本节约的机会,为生物制造产品的研发方向提供有效指导。

在金融投资领域,市销率(Price-to-Sales Ratio, PS)是一个备受推崇的财务指标。这一指标通过比较公司的市值与销售收入,为投资者提供了一个评估公司相对于其销售收入的估值视角,反映了投资者愿意为该公司每1元的销售额支付的价格<sup>[21]</sup>。市销率的优势在于稳定、可靠,不容易受到操控,且对价格政策和企业战略变化敏感,但具有不能反映企业成本变化的局限性<sup>[22]</sup>。市销率特别适用于评估初创型、潜在高增长公司,或者那些在周期性行业中没法显示年度净利润的公司。在应用市销率时,投资者需要综合考虑行业特性、公司的增长潜力和盈利能力,以确保对该指标的全面理解和正确应用<sup>[21]</sup>。

通常而言,市销率越低,说明该公司股票的投资价值越大。在某些技术快速革新的高科技行业,投资机构倾向于接受较高的市销率,例如,半导体行业合理的市销率可能超过5,这体现了市场对企业高速增长的预期。相对而言,对于那些技术成熟、竞争充分的行业,市销率通常保持在较低水平,如化工行业合理的市销率通常为1左右,这表明市场对这些行业的增长预期较为保守。

本文作者提出的市本率(PC)概念,在企业估值方面与市销率具有相似的逻辑,尤其适用于评估处于早期阶段、尚未实现收入和销售额的科技型初创企业。从投资角度来看,选品对于科技型初创企业至关重要。初创公司产品的市本率越高,意味着更大的降本增效空间,表明公司具有更多成长潜力,估值更具吸引力;反之,企业选品的市本率越低,甚至低于1,则往往预示着无效研发及企业估值泡沫的风险。显然,在同一行业、同一发展阶段,高市本率、低市销率的生物制造企业,意味着更乐观的投资机会。

最后,需要指出,市本率(PC值)虽是一个有力的方法学分析工具,但它并不是衡量生物制造及相关产品价值的唯一标准,也不一定是最佳指标,其更为适用市场较为成熟,对原料成本、

制造成本更为敏感的产品,而以高附加值的特种酶、生物药(诊断、治疗用蛋白、细胞或RNA、DNA等)、天然活性分子等为代表的新产品,原料成本占比较低,PC值的意义主要在于分类。

### 3 结 论

基于第一性原理衡量产品市场价格与原料成本,提出制造端的市本率(PC值)指标,有着简单、公开、透明的属性,是生物制造领域顶层设计的新方法学工具,可以用于分类工业生物制造产品,指导增效降本的技术发展路径,预测新技术的产业化前景,将为生产要素的创新性配置提供明确指导,更有效地推动生物制造产业深度转型升级,实现生物经济的规模化高质量发展。

### 参 考 文 献

- [1] 邓心安. 生物经济时代与新型农业体系[J]. 中国科技论坛, 2002(2): 16-20.  
DENG X A. Bio-economic era and new agricultural system[J]. Forum on Science and Technology in China, 2002(2): 16-20.
- [2] 谭天伟, 陈必强, 张会丽, 等. 加快推进绿色生物制造 助力实现“碳中和”[J]. 化工进展, 2021, 40(3): 1137-1141.  
TAN T W, CHEN B Q, ZHANG H L, et al. Accelerate promotion of green bio-manufacturing to help achieve “carbon neutrality” [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(3): 1137-1141.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. “十四五”生物经济发展规划[EB/OL]. (2021-12-20)[2024-08-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202205/P020220920619611864364.pdf>. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. 14th Five Year Plan for the Development of Bioeconomy[EB/OL]. (2021-12-20)[2024-08-01]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202205/P020220920619611864364.pdf>.
- [4] GRACIANO R C D, RIBEIRO J A T, MACÊDO A K S, et al. Recent patents applications in red biotechnology: a mini-review [J]. Recent Patents on Biotechnology, 2019, 13(3): 170-186.
- [5] LORENZ P, ZINKE H. White biotechnology: differences in US and EU approaches?[J]. Trends in Biotechnology, 2005, 23(12): 570-574.
- [6] CAIRNS T C, ZHENG X M, ZHENG P, et al. Turning inside out: filamentous fungal secretion and its applications in biotechnology, agriculture, and the clinic[J]. Journal of Fungi,

- 2021, 7(7): 535.
- [7] 石婷, 宋展, 宋世怡, 等. 体外生物转化(ivBT):生物制造的新前沿[J]. 合成生物学, 2024, 5(6): 1437-1460.  
SHI T, SONG Z, SONG S Y, et al. *In vitro* BioTransformation (ivBT): a new frontier of industrial biomanufacturing[J]. *Synthetic Biology Journal*, 2024, 5(6): 1437-1460.
- [8] ZHANG Y H P, SUN J B, MA Y H. Biomanufacturing: history and perspective[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2017, 44(4/5): 773-784.
- [9] 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, 42(5): 4-5.  
MA Y H. Bio-manufacturing industry is the key development direction of bio-economy[J]. *China Biotechnology*, 2022, 42(5): 4-5.
- [10] 李寅. 合成生物制造 2022[J]. 生物工程学报, 2023, 39(3): 807-841.  
LI Y. Biomanufacturing driven by engineered organisms(2022) [J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2023, 39(3): 807-841.
- [11] 张以恒. 中国哲学思想“道法术器”对生物制造的启示[J]. 合成生物学, 2024, 5(6): 1231-1241.  
ZHANG Y H P J. The enlightenment of the Chinese philosophy “Tao-Fa-Shu-Qi” to industrial biomanufacturing [J]. *Synthetic Biology Journal*, 2024, 5(6): 1231-1241.
- [12] IBRAHIM O O, SPRADLIN J E. D-tagatose production by isomerization of D-galactose with L-arabinose isomerase: US6057135A[P/OL]. (1993-01-15) [2024-12-01]. <https://patentimages.storage.googleapis.com/e6/70/cc/658584fab2e589/US6057135.pdf>.
- [13] KIM H J, HEO J S, PARK J J, et al., Production of tagatose from fructose using L-ribulose 5-phosphate 4-epimerase: KR101610911B1[P/OL]. (2013-05-09) [2024-12-01]. <https://patentimages.storage.googleapis.com/10/b9/a7/5da78b958bdde1/KR101610911B1.pdf>.
- [14] WICHELECKI D J, ZHANG Y H P. Enzymatic synthesis of D-tagatose: US62236226[P/OL]. (2015-10-02) [2024-12-01]. <https://globaldossier.uspto.gov/details/US/62236226/P/83813>.
- [15] HUANG W D, ZHANG Y H P. Analysis of biofuels production from sugar based on three criteria: thermodynamics, bioenergetics, and product separation[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(3): 784-792.
- [16] PERALTA-YAHYA P P, ZHANG F Z, DEL CARDAYRE S B, et al. Microbial engineering for the production of advanced biofuels[J]. *Nature*, 2012, 488(7411): 320-328.
- [17] YIM H, HASELBECK R, NIU W, et al. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for direct production of 1,4-butanediol[J]. *Nature Chemical Biology*, 2011, 7(7): 445-452.
- [18] LI Y, YOU C, ZHANG Y H P J. *In vitro* biotransformation of high-titer D-glucarate by stepwise-added enzyme cocktails[J]. *Organic Process Research & Development*, 2024, 28(2): 478-486.
- [19] 欧阳平凯. 我国工业生物技术发展回顾及展望[J]. 生物工程学报, 2022, 38(11): 3991-4000.  
OUYANG P K. The industrial biotechnology in China: development and outlook[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2022, 38(11): 3991-4000.
- [20] 沃尔特·艾萨克森. 埃隆·马斯克传[M]. 孙思远, 刘家琦, 译. 北京: 中信出版集团, 2023.  
ISAACSON W. Elon Musk[M]. SUN S Y, LIU J Q, translated. Beijing: CITIC Publishing Group, 2023.
- [21] KOLLER T, GOEDHART, M, WESSELS D. Valuation: measuring and managing the value of companies[M/OL]. 7th ed. New York, USA: John Wiley & Sons, 2020[2024-08-01]. <https://www.wiley.com/en-cn/Valuation%3A+Measuring+and+Managing+the+Value+of+Companies%2C+University+Edition%2C+7th+Edition-p-9781119611882>.
- [22] 杨岫. 财务分析[M]. 上海: 立信会计出版社, 2017.  
YANG C. Financial analysis[M]. Shanghai: Lixin Accounting Publishing House, 2017.



**通讯作者及第一作者:** 张以恒 (1971—), 男, 研究员, 博士生导师, 低碳合成工程生物学全国重点实验室主任, 中国科学院天津工业生物技术研究所体外合成生物学中心主任。创建体外生物转化(ivBT)技术平台, 设计与构建多酶分子机器。在秸秆制粮、人工呼吸作用(糖水产氢)、健康糖与肌醇合成等生物制造领域取得了一系列原创性突破。

E-mail: zhang\_xw@tib.cas.cn