

生物塑料：面向可持续未来的绿色材料

作者：

薛文超，副教授，亚洲理工学院（AIT）土木与环境工程学院，泰国巴吞他尼。



传统塑料的大规模生产与广泛使用，持续威胁着有限的化石燃料资源和生态环境。为应对日益严峻的生态挑战，各类可持续解决方案正不断涌现。其中，一项长期方案是以生物塑料及其他环境友好型材料替代化石基塑料。生物塑料是指全部或部分由生物质制成、或具有生物降解性，或同时具备这两种属性的塑料材料。此类替代塑料的生产既考虑消费者对产品的需求，也回应可持续发展要求，能够降低对化石燃料的依赖，并缓解塑料废弃物过度消费与管理不善造成的环境负担。未来数十年，材料创新有望在废物管理中发挥重要作用，并吸引产业界的大量投资。

1. 不容忽视的塑料问题

在一个寻常的早晨，人们尚未出门，往往已经在不经意间接触了数十次塑料。洗手池旁的牙刷、早餐的包装、手中的手机、衣物中的合成纤维——塑料已悄然融入现代生活。塑料之所以成功，在于其用途广泛：质量轻、耐久、成本低，并且具有极强的可设计性。

然而，这种便利也付出了代价，而其后果直到今天才逐渐充分显现。塑料主

要源自化石燃料，其曾经备受推崇的耐久性如今已转化为长期环境负担（图 1）[1]。一个仅使用十分钟的塑料袋，可能在环境中存留数百年。随着时间推移，大型塑料制品在阳光、热和机械作用下发生碎裂，逐步形成微塑料——这些微小颗粒如今已循环于河流、海洋、土壤，甚至我们呼吸的空气之中（参见 Plastic pollution at sea: the seventh continent）。

这些微塑料已不再局限于遥远的海洋。研究已在海产品（参见 The oyster, the sentinel of a coastline to be preserved）、饮用水和农田土壤中检测到微塑料，由此引发了人们对其长期生态影响和人体健康影响的担忧。与此同时，全球塑料产量仍在增长，年产量已超过 4 亿吨，而得到有效回收的比例仅约 9% [2]。

面对日益加剧的危机，科学界与产业界正在重新审视一个根本问题：能否设计出兼具塑料优点、又不会留下如此持久环境足迹的材料？一种富有前景的答案，正是快速发展的新型材料——生物塑料[3]。

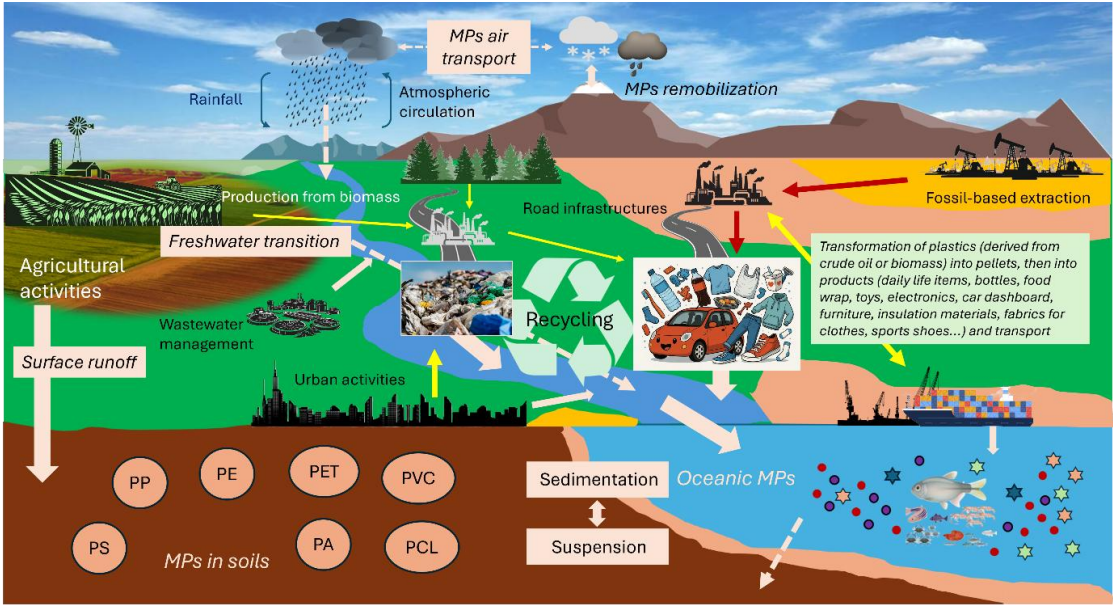


图 1. 微塑料（MPs）的来源、迁移路径及环境循环。聚乙烯（PE）、聚丙烯（PP）、聚苯乙烯（PS）、聚氯乙烯（PVC）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）、聚酰胺（PA）、聚（ ϵ -己内酯）（PCL）。[Source: figure inspired in part from ref. [1], created by EEnv using elements with Creative commons rights, and AI-generated (Grok) image].

2. 生物塑料：新一代材料

乍看之下，“生物塑料”似乎是一个直观的概念，即由生物来源制成的塑料。事实上，它所指的是一个更为复杂且多样的材料家族。生物塑料并非由某一种单

一属性界定，而是一个更宽泛的概念：它们是源自可再生生物资源、或被设计为可生物降解，或同时具备这两种属性的塑料（图 2）[4]。

这一区分至关重要。一些生物塑料由玉米、甘蔗或木薯等植物制成，以可再生原料取代化石基原料，更准确地称为生物基塑料。另一些塑料则经过专门设计，可在特定环境条件下经微生物作用分解为二氧化碳、水和生物质等天然物质，这类塑料称为可生物降解塑料。第三类材料则兼具上述两种特征，既来源于可再生资源，又具有生物降解性。

然而，这些类别往往彼此交叉，即使对相关知识有所了解的消费者也容易产生混淆。例如，生物基塑料如果未被设计为可降解材料，其行为可能与传统塑料完全相同，并长期存留于环境中。反之，一些可生物降解塑料仍源自化石燃料，但经过设计后可在适宜条件下分解。

理解这一细微差别十分重要。它提醒我们，生物塑料并不是单一的“绿色”解决方案，而是由多种材料构成的连续谱系；每种材料都有自身的环境权衡与潜在效益。

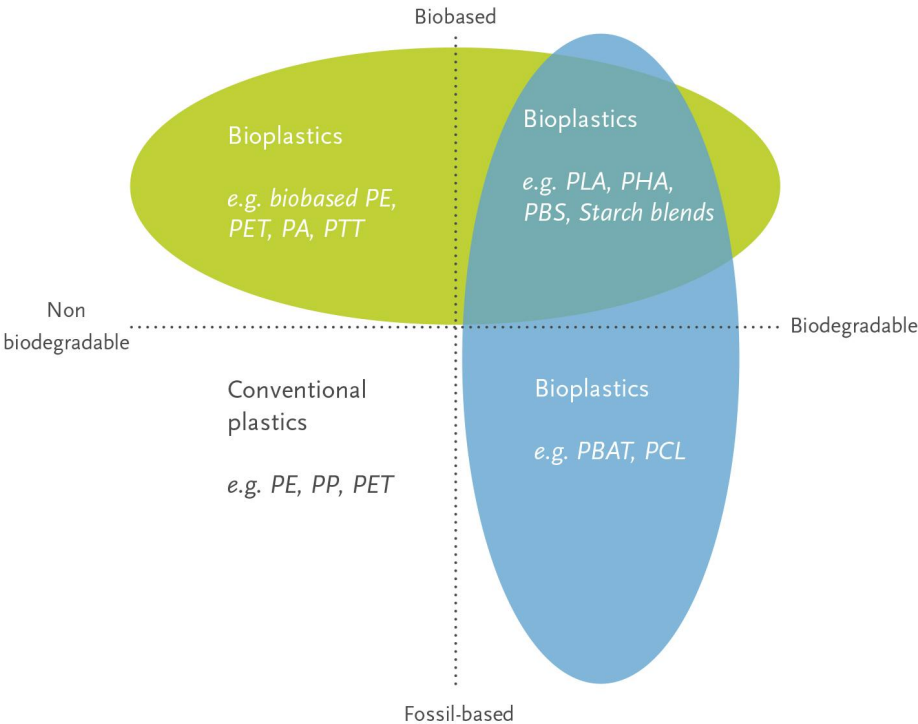


图 2. 基于原料来源和生物降解性的塑料材料分类体系。[Source: figure from European Bioplastics ref. [4]]

3. 为何需要生物塑料？推动可持续替代材料发展的动力

全球对传统塑料的依赖与化石燃料开采密切相关。从资源开采到生产和废弃物处置，每一种塑料制品都具有难以察觉的碳足迹。随着需求持续增长，不可再生资源 and 废物管理系统所承受的压力也不断加剧。

在快速城市化地区，这一挑战尤为突出。废物管理系统往往难以跟上发展速度，管理不善的塑料废物因而泄漏至河流和海洋。与此同时，公众对塑料污染的认识显著提高，进一步推动了对可持续替代材料的需求。

生物塑料已成为向循环经济广泛转型的一部分。循环经济旨在尽可能减少废物、重复利用材料并回收其价值。生物塑料的潜力不仅在于替代化石资源，也在于重新审视材料的整个生命周期。

例如，研究表明，以生物基材料取代相当比例的传统塑料，每年可减少数亿吨二氧化碳当量的温室气体排放。这说明生物塑料不仅可能有助于减少废物，也可在减缓气候变化方面发挥作用。

不过，生物塑料并非旨在取代所有传统塑料。相反，它被视为整体解决方案中的一环，与回收利用、废物减量和更合理的产品设计相互补充。

4. 如何利用生物质制造生物基塑料

要理解生物塑料，不妨从材料科学家的视角出发。塑料的本质并不取决于其来源，而取决于其分子结构。无论源自石油还是植物，所有塑料都是聚合物，即由重复分子单元组成的长链；其结构决定了材料的强度、柔韧性、透明度和耐久性。

生物基塑料遵循相同的基本原理，但其起点截然不同：不是炼油厂，而是生命系统。

这一过程始于生物质——植物、藻类等通过光合作用从大气中捕获二氧化碳。碳随后以淀粉、纤维素和木质素等天然聚合物，或以单糖的形式储存。

从材料角度看，这些物质富含羟基（-OH）和羧基（-COOH）等官能团，

因而具有较高的化学反应活性，适合转化为聚合物前体。与相对惰性的化石烃类不同，生物质为新材料设计提供了化学性质丰富且灵活的平台。

在这一阶段，挑战并非原料是否充足，而是如何实现转化：即如何将这些天然分子转变为结构可控、性能可预测的材料。如图 3 所示，这一转化可通过三条生产路径[5][6]完成。下文将分别讨论这些路径所代表的不同分子结构干预程度。

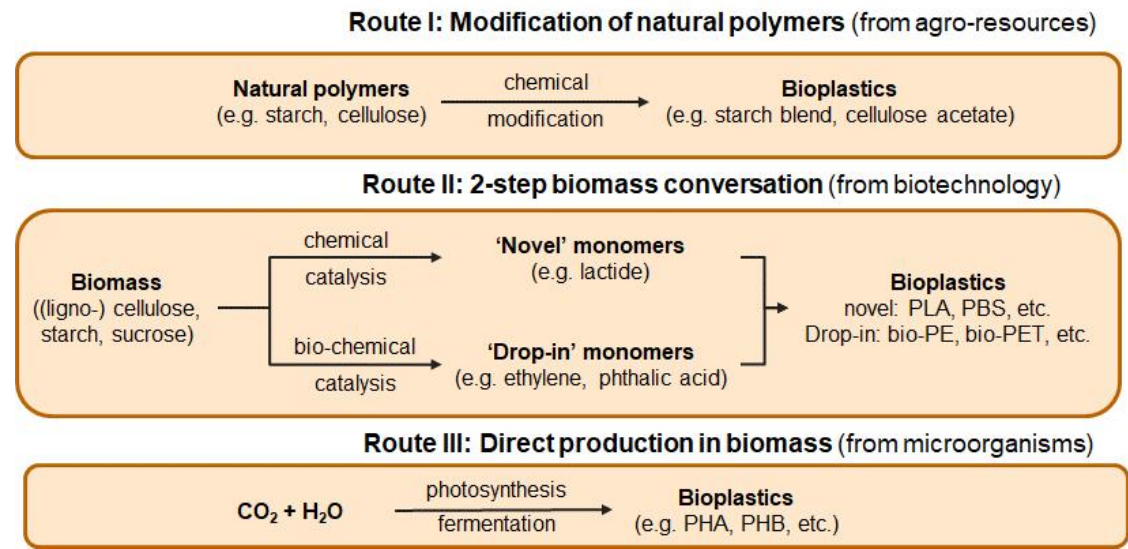


图 3. 按生产路径划分的生物基聚合物分类。[Source: adapted by the author from refs [5 & 6]].

4.1. 天然聚合物的直接利用与改性

最简单的方法是从自然界已有的聚合物入手（图 4），其中应用最广泛的是淀粉和纤维素。

然而，天然聚合物通常不能直接满足多数应用要求。例如，淀粉具有由直链淀粉和支链淀粉构成的半结晶结构，因而质脆且对水分敏感。要将其转化为可用塑料，必须进行物理和化学改性，常见方法是加入甘油等增塑剂。这些小分子可插入聚合物链之间，削弱分子间作用力并提高材料柔韧性。

这一过程可制得热塑性淀粉（TPS），该材料能够采用挤出或注塑成型等传统塑料加工技术进行加工。

同样，纤维素是地球上储量最丰富的天然聚合物之一。其广泛的氢键作用和高度结晶结构赋予材料优异的机械强度与刚度，但其加工性能较差。通过化学改

性制得醋酸纤维素等衍生物后，纤维素可加工成薄膜、纤维和模塑制品。

从材料科学角度看，这条路径的核心是调控分子间相互作用与结晶度，以调整材料的力学性能。

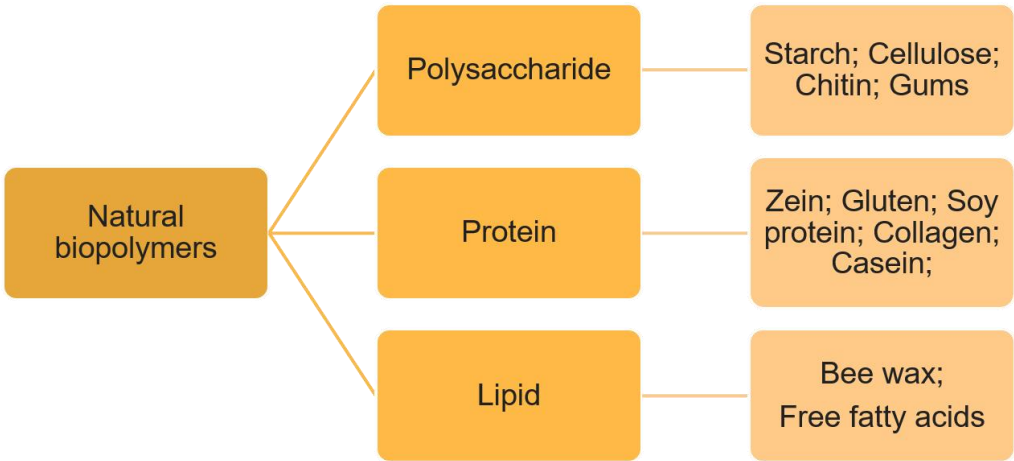


图 4. 用于生物塑料生产的天然生物聚合物。[Source: ref. [3]]

4.2. 单体转化并重新聚合

一种适用范围更广且广泛采用的方法，是先将生物质分解为较小的分子（单体），再将其重新构建为具有目标性能的新型聚合物。

聚乳酸（PLA）是其中最重要的实例之一，也是商业化最成功的生物塑料之一（图 5）。该过程始于从玉米、甘蔗或木薯等可再生原料中提取糖类。微生物发酵这些糖类后生成乳酸；乳酸是一种同时含有羟基（-OH）和羧基（-COOH）官能团的小分子。随后，乳酸经脱水过程转化为丙交酯，再通过聚合反应（最常采用开环聚合）生成高分子量 PLA。

所得材料具有与 PET 等传统塑料相似的性能，包括透明、刚性和表面光亮，因而适用于多种包装用途。PLA 的玻璃化转变温度较低（约 60° C），因此耐热性相对有限，但可通过聚合物改性、共混合纤维增强提高其性能。目前，PLA 广泛用于一次性食品包装、水瓶、杯子、农用薄膜、购物袋、卫生用品和 3D 打印材料。此外，PLA 被认为是最易发生生物降解的热塑性塑料之一，进一步巩固了其作为传统化石基塑料可持续替代材料的地位。

这条路径体现了生物塑料的一项重要优势，即分子设计的灵活性。通过控制

单体组成、立体化学和分子量，科学家可以针对具体应用设计聚合物。

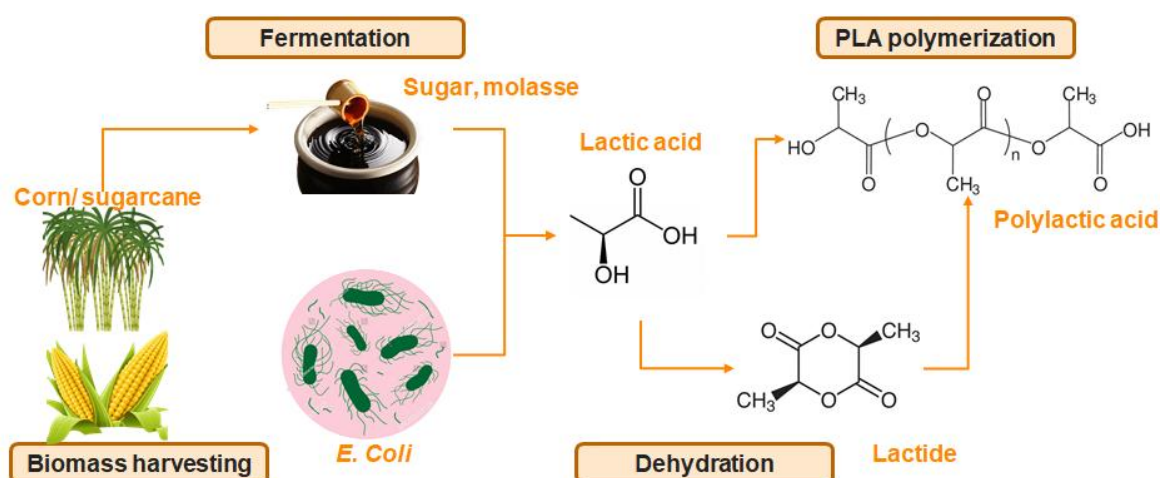


图 5. 聚乳酸（PLA）制备过程示意图。[Source ref. [3]].

另一个重要实例是生物基聚乙烯（bio-PE）。其生产过程先将糖发酵产生的生物乙醇转化为乙烯，再进行聚合。值得注意的是，bio-PE 与化石基 PE 的化学结构完全相同，这表明无需改变材料性能也可以实现可持续性。

4.3. 聚合物的微生物转化

与生物过程结合最紧密的方法，是将微生物用作“细胞工厂”。某些细菌能够天然合成聚羟基脂肪酸酯（PHA）等聚合物，作为能量储存物质。

在营养受限而碳源过量的条件下，这些微生物会在细胞内积累 PHA。随后可提取这些聚合物，并将其加工为塑料材料。

从材料科学角度看，PHA 尤具吸引力，因为它兼具生物降解性、生物相容性和可调控的力学性能。根据单体组成的不同，PHA 可表现为刚性塑料或柔性塑料[7][8][9]。

5. 环境效益与局限性

生物塑料描绘了一个颇具吸引力的应用前景：使材料更好地契合自然循环。通过使用可再生资源，生物塑料可以降低对化石燃料的依赖。在某些情况下，其

生产过程产生的温室气体排放更低，尤其是当生物质在生长过程中吸收二氧化碳时。

生物塑料在生命终结阶段也可具有更灵活的处理方式。某些生物塑料专为堆肥处理而设计，可在受控条件下分解为天然组分。另一些生物塑料则可纳入现有回收体系，特别是化学结构与传统塑料相同的“即用型”生物塑料。

然而，这一愿景也伴随着一定的局限性。生物降解性并非所有生物塑料共有的属性，也不会在任何条件下都发生。许多可生物降解塑料需要工业堆肥环境，即特定的温度、水分和微生物活性，才能有效分解。在海洋或土壤等自然环境中，其降解速度可能慢得多。

此外，还存在更广泛的可持续性问题。部分原料依赖于集约化农业生产，因此不可避免地与土地利用、水资源配置及粮食生产等形成竞争关系，进而引发资源配置不合理等问题。另外，生物塑料的成本仍高于传统塑料，而现有废物管理系统尚不能充分处理种类多样的生物塑料废物流（图 6）[10]。例如，尽管 PLA 广泛用于可生物降解包装，但多数现有回收设施是针对 PET 等传统塑料设计的。当 PLA 进入 PET 回收流时，会污染再生材料并降低产品质量，这表明当前废物管理系统处理多样化生物塑料废物的能力仍然有限[11]。

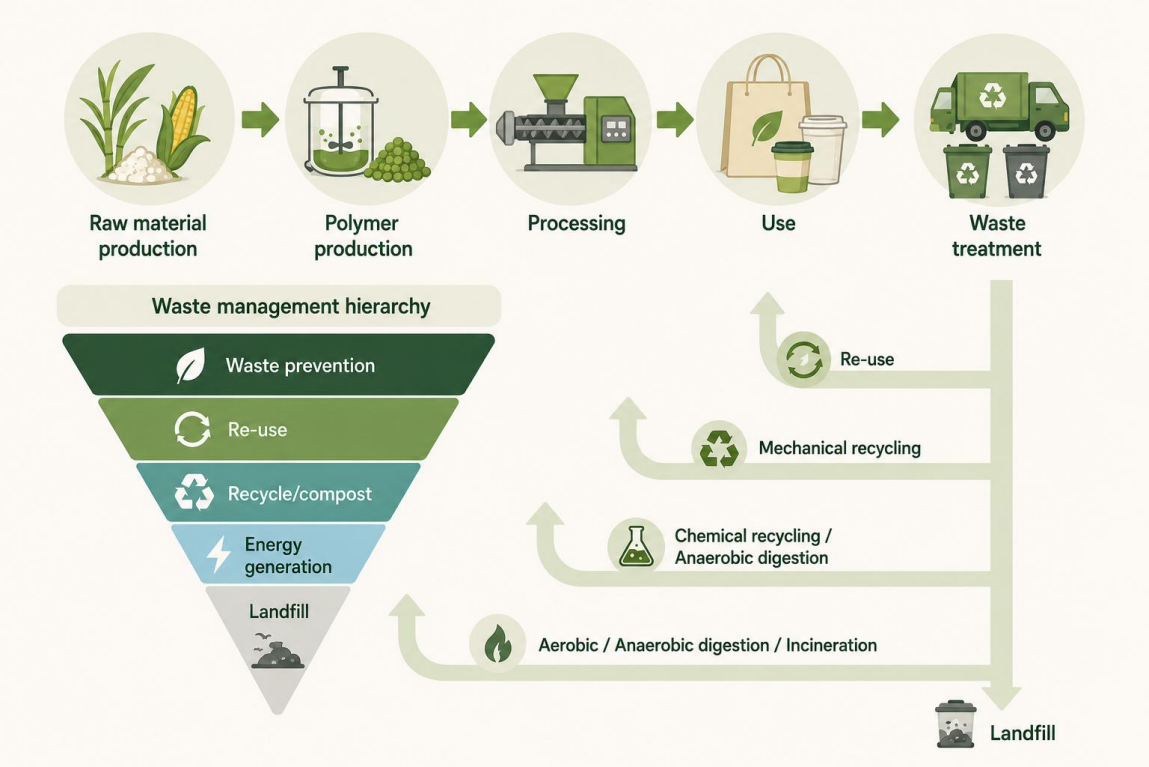


图 6. 废物管理层级体系中的生物塑料废物管理方案。[Source: AI-generated figure by the author using ChatGPT, adapted from ref. [10]]

简而言之，生物塑料前景可期，但并非完美。其环境绩效在很大程度上取决于生产、使用及生命终结阶段的管理策略。

6. 生物塑料目前的应用领域

尽管面临上述挑战，生物塑料已经进入日常产品。包装仍是最主要的应用领域，约占全球生物塑料产量的一半。从食品容器和薄膜到一次性餐具，生物塑料尤其适用于废物产生量较高的短寿命塑料制品。

在农业领域，可生物降解地膜有助于减少塑料在土壤中的累积。在医疗领域，生物塑料可用于可吸收缝合线和药物递送系统；其能够在体内安全降解，是一项重要优势。

材料创新也在不断拓展应用边界。由海藻制成的可食用包装可替代一次性包装材料；以鳄梨种子制成的生物塑料吸管可将食品废物转化为实用产品。甚至一些实验性项目——从可生物降解的 3D 打印材料，到 COVID-19 疫情期间以生物塑料制造的个人防护装备——也体现了这类材料的多用途特性。

这些实例说明了一个关键问题：生物塑料并不局限于小众应用。在环境需求和技术进步的共同推动下，其应用正逐步拓展至多个领域。



图 7. 生物塑料的多种应用。[Source: adapted from ref. [3]]

7. 迈向生物塑料未来所面临的挑战

向生物塑料转型并非简单更换材料，而是需要系统性变革（图 8）。

一项关键挑战在于，生物塑料目前尚不能全面替代传统塑料。在许多应用中，生物塑料仍无法达到传统塑料经过数十年技术优化后形成的强度、耐久性、柔韧性和耐热性的综合平衡。因此，生物塑料是否适用取决于各类应用的具体要求。

废物管理基础设施是另一项主要障碍。许多地区缺乏工业堆肥设施，也没有将生物塑料与传统塑料有效分离的系统。两类材料混合后，可能干扰传统的回收系统。

信息沟通同样面临挑战。“可生物降解”“可堆肥”等标签常被误解或误用，容易引发消费者混淆，甚至在某些情况下成为“漂绿”行为的工具。科学研究表明，生物降解取决于特定条件；若缺乏这些条件，即使是可生物降解塑料也可能长期存留于环境中。

经济因素也发挥着作用。化石基塑料受益于数十年来形成的基础设施、规模效应和成本效率。相比之下，生物塑料仍处于发展阶段，其生产成本往往更高。政策框架和行业标准正在不断演进，但监管、认证和全球协同方面仍存在缺口。

应对这些挑战，需要科学界、产业界和政府之间开展协作，同时也需要消费者的知情和参与。

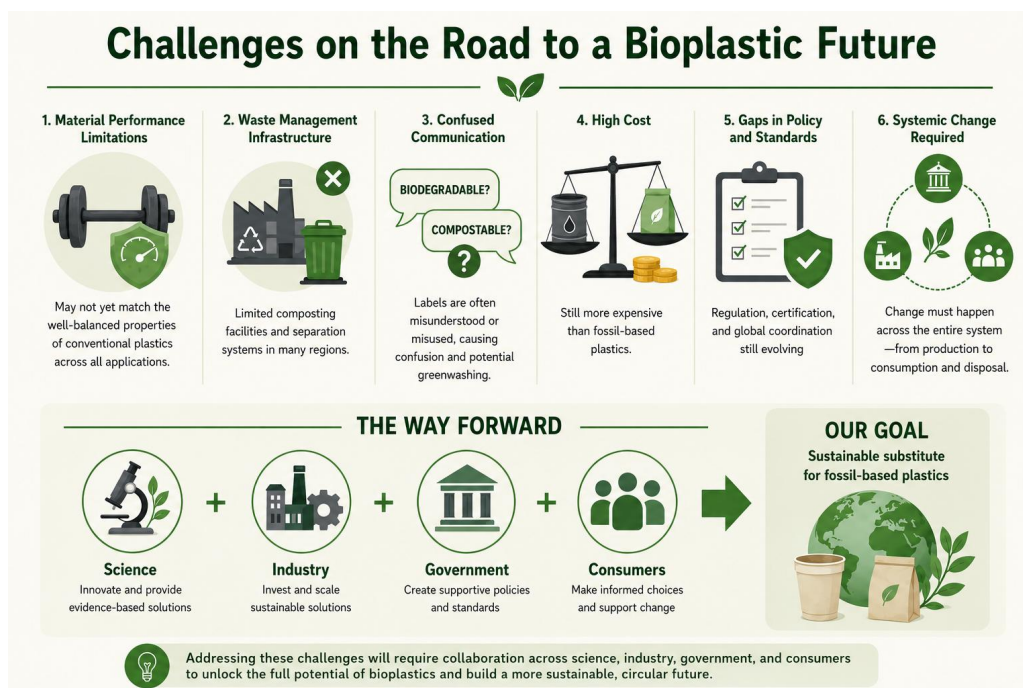


图 8. 迈向生物塑料未来所面临的挑战。[Source: AI-generated figure by the author using ChatGPT]

8. 未来展望：重新审视我们与材料的关系

生物塑料的发展仍在继续，而快速创新正在塑造其未来。研究人员正在开发强度和耐热性更高的新型聚合物。生物技术进步使利用微生物和酶更高效、更可持续地生产塑料成为可能。

最富前景的变化或许是将生物塑料纳入资源循环系统。未来的材料可能从设计之初就考虑重复使用、回收或安全生物降解，以取代“获取—制造—丢弃”的线性模式。原料也可能越来越多地来自废物流，甚至来自捕集的二氧化碳，从而进一步降低环境影响。

与此同时，产业投资不断增长，显示出市场对可持续材料长期潜力的信心。

生物塑料展示了另一种未来图景：材料设计不仅考虑使用性能，也考虑其在自然系统中的归宿。它有望减少对化石燃料的依赖、降低排放，并重塑我们对塑料废物的认知。

然而，生物塑料并非万能方案。塑料污染危机十分复杂，任何单一方案都不足以解决。真正可持续的未来将依赖多种策略协同推进，包括减少不必要的塑料

使用、改善废物管理、遵循循环经济原则重新设计产品，以及持续推动材料科学创新。

归根结底，向生物塑料转型并不只是用一种材料替代另一种材料，而是要重新构建我们与所依赖材料之间的关系，并认识到当下的便利不应以牺牲未来为代价。

9. 核心要点

- 传统塑料的成功也正是其弊端所在：凭借极强的通用性和耐久性，传统塑料已遍及日常生活；但其化石燃料来源和持久性造成了严重污染，尤其是已广泛扩散的微塑料，而目前仅约 9% 的塑料得到有效回收。
- 微塑料污染是一项日益严重的威胁，其范围从遥远海洋延伸至饮用水和农田土壤，引发了人们对长期生态影响和人体健康影响的担忧。
- “生物塑料”可提供部分解决方案。该术语描述一个复杂多样的材料家族，其成员可由生物体来源原料制成（生物基）、具有生物降解性，或兼具二者。
- 生物塑料可应对若干核心问题：降低对化石燃料的依赖，显著减少温室气体排放，支持循环经济，并较传统塑料提供更灵活的寿命终结处理方式，如堆肥、回收或安全降解。
- 生物基塑料可通过三条主要路径生产：天然聚合物的直接利用与改性、转化为单体后聚合，以及微生物生产。
- 生物塑料已经进入日常产品，相关技术创新正在快速推进。
- 生物降解需要特定环境，同时必须相应调整废物管理程序。
- 生物塑料前景可期，但并非完美：其优势包括可再生性和较低的碳足迹；但仍存在局限——生物降解往往需要工业条件，部分原料可能与粮食生产竞争，成本较高，而现有废物系统难以妥善管理此类材料，并存在污染回收物流的风险。

- 真正可持续的未来将依赖多种策略协同实施：减少不必要的塑料使用、改善废物管理，并按照循环原则重新设计产品。

注释与参考文献

封面图片：生物塑料的一些来源。[来源：图片由以下图像组成：玉米（Photo © Jeremy Keith from Brighton & Hove, United Kingdom, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons）、向日葵（Photo © T. Voekler, CC BY-SA 3.0, via Wikimedia Commons）、大肠杆菌（Photo © Photo by Eric Erbe, digital colorization by Christopher Pooley, both of USDA, ARS, EMU., Public domain, via Wikimedia Commons）和生物塑料颗粒（AI-generated image using Grok）]。

- [1] Zhao, YX., Song, KW., Li, WJ. et al., 2026, Migration, transformation, and ecological effects of microplastics in aquatic ecosystems. *Ecol Process* 15, 28. <https://doi.org/10.1186/s13717-026-00681-w>
- [2] Houssini, K., Li, J., & Tan, Q., 2025. Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 257.
- [3] Xue, W., 2023. Bioplastics: potential substitution to fossil-based plastics. *Marine Plastics Abatement*, 371–431.
- [4] European Bioplastics, 2020. What are bioplastics? [WWW Document]. URL <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/> (accessed 10.6.21).
- [5] Brodin, M., Vallejos, M., Opedal, M.T., Area, M.C., Chinga-Carrasco, G., 2017. Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics – A review. *J. Clean. Prod.* 162, 646–664. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.209>
- [6] Storz, H., Vorlop, K.-D., 2013. Bio-based plastics: status, challenges and trends. *Landbauforsch. Appl. Agric. For. Res.* 4, 321–332. https://doi.org/10.3220/LBF_2013_321-332
- [7] Mannina, G., Presti, D., Montiel-Jarillo, G., Carrera, J., Suárez-Ojeda, M.E., 2020. Recovery of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from wastewater: A review. *Bioresour. Technol.* 297, 122478. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122478>
- [8] Bhatia, S.K., Otari, S. V., Jeon, J.M., Gurav, R., Choi, Y.K., Bhatia, R.K., Pugazhendhi, A., Kumar, V., Rajesh Banu, J., Yoon, J.J., Choi, K.Y., Yang, Y.H., 2021. Biowaste-to-bioplastic (polyhydroxyalkanoates): Conversion technologies, strategies, challenges, and perspective. *Bioresour. Technol.* 326, 124733. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.124733>
- [9] Chong, J.W.R., Khoo, K.S., Yew, G.Y., Leong, W.H., Lim, J.W., Lam, M.K., Ho, Y.-C., Ng, H.S., Munawaroh, H.S.H., Show, P.L., 2021a. Advances in production of bioplastics by microalgae using food waste hydrolysate and wastewater: A review. *Bioresour. Technol.* 342, 125947. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125947>
- [10] Saalah, S., Saallah, S., Rajin, M., & Yaser, A. Z., 2020. Management of biodegradable plastic waste: A review. *Advances in Waste Processing Technology*, 127-143.
- [11] Niaounakis, M., 2019. Recycling of biopolymers—the patent perspective. *European Polymer*

Journal, 114, 464-475.

[12] Barrett, A., 2018a. Vegan, Biodegradable and Compostable Glitter. Bioplastics News; Barrett, A., 2018b. Lactips is a Milk-Based Biodegradable and Water-Soluble Packaging. Bioplastics News; Barrett, A., 2018c. First House on Mars will be Made from Bioplastics.

[13] Patel, P., 2020. The time is now for edible packaging. Chem. News.

[14] Carlson, C., 2020. Alice Potts makes bioplastic face shields from food waste. dezeen.

[15] Ye, C., Voet, V.S.D., Folkersma, R., Loos, K., 2021. Robust Superamphiphilic Membrane with a Closed-Loop Life Cycle. Adv. Mater. 33, 2008460.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202008460> ; Ye, Y., 2021. Chinese PPE makers become greener, trying to limit pollution. Global Times.