



# PHA生物可降解塑料 产业白皮书



普华永道



Bluepha  
蓝晶微生物



# 目录

|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 前言                            | 2         |
| 白皮书简介                         | 3         |
| 蓝晶微生物简介                       | 3         |
| <b>1. 宏观环境：生物可降解材料是大势所趋</b>   | <b>4</b>  |
| 1.1. 气候风险与碳中和战略               | 5         |
| 1.2. 双碳目标日益明晰，降低对石油的依赖成关键     | 6         |
| 1.3. 碳中和战略为生物可降解材料提供发展机遇及产业机会 | 11        |
| <b>2. PHA：最具前景的生物可降解材料</b>    | <b>18</b> |
| 2.1. 降解性：PHA在可降解塑料中降解性更优      | 19        |
| 2.2. 应用面：作为系列聚合物，综合性能好，应用范围广  | 23        |
| 2.3. PHA市场潜力巨大                | 25        |
| <b>3. PHA行业综述</b>             | <b>30</b> |
| 3.1. PHA行业发展历程                | 31        |
| 3.2. PHA主要企业概览                | 33        |
| 3.3. PHA生产成本与售价               | 35        |
| 3.4. PHA类型及材料应用               | 36        |
| 3.5. PHA材料制备难点                | 39        |
| <b>4. 产业链价值：中短期内集中在中游供应</b>   | <b>40</b> |
| 4.1. 定义PHA产业链                 | 41        |
| 4.2. 相似产业链的价值分配               | 42        |
| 4.3. PHA产业链的价值逻辑              | 44        |
| <b>5. 行业终局：趋向高集中度，将诞生巨头</b>   | <b>45</b> |
| 5.1. 对标行业及公司                  | 46        |
| 5.2. PHA行业具备产生巨头的底层逻辑         | 48        |
| 附录                            | 49        |
| 参考文献                          | 53        |









## 白皮书简介

近年来，在碳中和、能源转型以及环保领域的政策推动下，生物可降解塑料作为传统塑料的最佳替代，其使用和推广得到政策大力支持。

聚羟基脂肪酸酯(polyhydroxyalkanoate, PHA)是生物可降解材料的一种，是一系列由微生物合成的天然高分子聚合物，能够在有氧和无氧条件下实现生物降解。由于PHA具有类似塑料的物理机械性能和加工性能，工业上可以采用微生物批量生产这种聚合物并以此替代传统塑料。

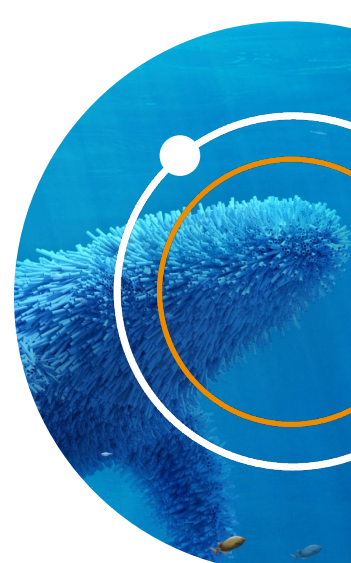
PHA优秀的降解与物理性能、日渐成熟的生产技术、不断扩大的市场规模等，都为PHA的成长提供强劲的驱动力，使其成为最具成长潜力的生物可降解材料。预计在未来3-5年内，PHA市场规模将达到629亿人民币，主要市场集中在不便于回收的强需求场景，如一次性包装材料、一次性餐饮具等。

本白皮书通过梳理PHA产业，深入分析宏观环境、技术特点、行业特性、产业链价值以及行业竞争格局，为国内PHA行业把握市场机遇、实现高速发展提供重要参考。白皮书第一章分析了PHA发展的宏观环境，并总结梳理了国内外相关支持政策。第二章说明了PHA的技术特性，并重点分析了短、中、长期的市场规模及发展趋势。第三章介绍了PHA的行业现状，并集中讨论了生产成本、PHA类型及材料应用以及PHA材料制备难点等话题。第四章阐明了PHA的产业链价值，并从相似产业链的价值分配总结梳理出PHA产业链的价值逻辑。第五章主要对标了与PHA发展相似的行业及行业内的头部公司发展情况。

## 蓝晶微生物简介

蓝晶微生物致力于设计、开发、制造和销售新型生物基分子和材料，其中包括海洋可降解材料 PHA、再生医学材料、美妆新功能成分、益生菌产品等，从而帮助消费品、食品、医疗、农业和工业等众多行业的 B 端客户在行业内开展差异化竞争。

在PHA领域，蓝晶微生物拥有10项PHA授权专利，在技术领域处于领先地位。同时，蓝晶微生物对PHA产业化建设具有充足的资金储备，截至2022年1月，先后完成了总额超15亿人民币的融资。此外，蓝晶微生物的PHA一期工厂即将建成，是国内首个5,000吨及以上产能的PHA项目。







宏观环境：  
生物可降解材料是大势所趋





## 1.1 气候风险与碳中和战略

当前全球气候变暖问题愈发棘手，气候变化引发的危机事件已然对生态环境和人类社会造成负面影响，并构成了巨大威胁，包括极端灾害事件频发、生态系统遭受破坏、社会经济负担加重等等，如若不全力以赴加以应对，至21世纪末，全球气温将上升5°C，粮食减产将达50%，75%的物种将面临灭绝<sup>[1]</sup>。2015年12月12日，178个国家在第21届联合国气候变化大会上通过了《巴黎协定》

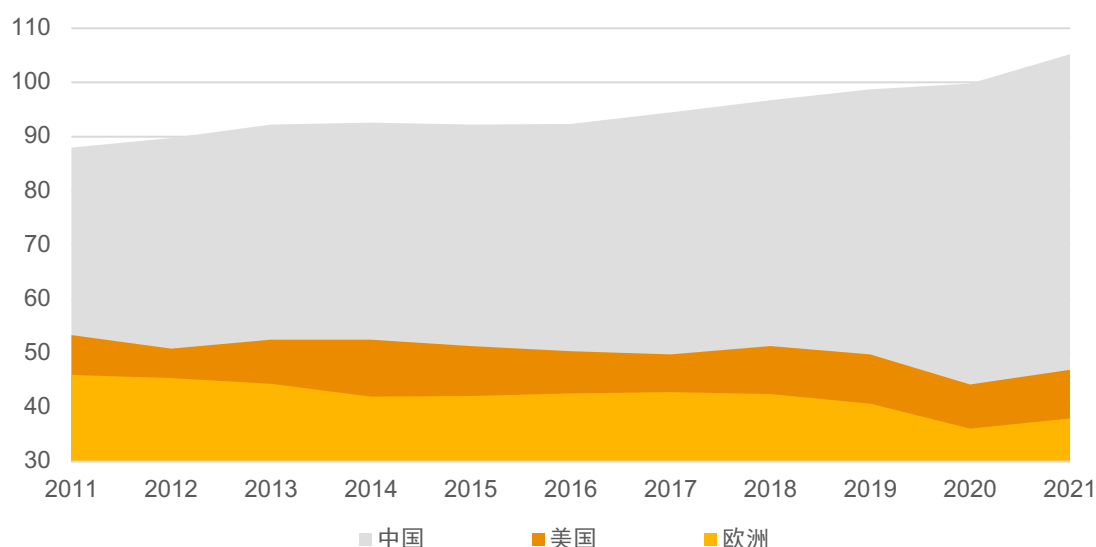
(The Paris Agreement)，该协定对2020年后全球应对气候变化做出了行动安排，旨在将21世纪全球平均气温升幅较工业化时期水平控制在2°C以内，并努力将温度升幅限制在1.5°C以内，以减缓全球变暖的趋势。2021年11月，在英国格拉斯哥举行的第26届联合国气候变化大会对此前的气候治理做出评估和总结，缔约国在加大减排力度和速度上做出承诺，并探讨了碳交易机制、新能源使用等议题。截止至今，已有58个国家承诺将在2050年实现碳中和，总排放量占全球温室气体排放量的一半以上。

**面临严峻形势，我国于2020年提出“碳中和战略”，并将其上升为国家战略**

中国作为《巴黎协定》的缔约国之一，于2020年9月22日在第七十五届联合国大会上提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的目标。2021年，全国两会政府工作报告中指出了要扎实做好碳达峰、碳中和各项工作，优化产业结构和能源结构，并制定2030年前碳排放达峰行动方案，开启了碳达峰及碳中和相关措施的执行。2022年，《中国碳达峰碳中和战略及路径》具体提出实现碳达峰及碳中和的非化石能源替代战略、固碳战略等八大战略。近期的二十大报告也再次提及上述概念，强调我国将要积极稳妥推进碳达峰碳中和，立足国内能源资源禀赋，有计划分步骤实施碳达峰行动，深入推进能源革命，加快规划建设新型能源体系，积极参与应对气候变化全球治理。

2021年，我国碳排放量较上年增加了5.8%，在全球碳排放总量中的份额增加至31.1%<sup>[2]</sup>。作为最大的发展中国家，我国从承诺达到“碳达峰”到实现“碳中和”的时间窗口仅有30年，所面临的能源和产业转型任务更加紧迫，低碳转型道路任重道远。

二氧化碳排放量（单位：亿吨）



来源：BP Company

<sup>[1]</sup> 《中国碳中和通用指引》，BCG

<sup>[2]</sup> 《Statistical Review of World Energy 2022》



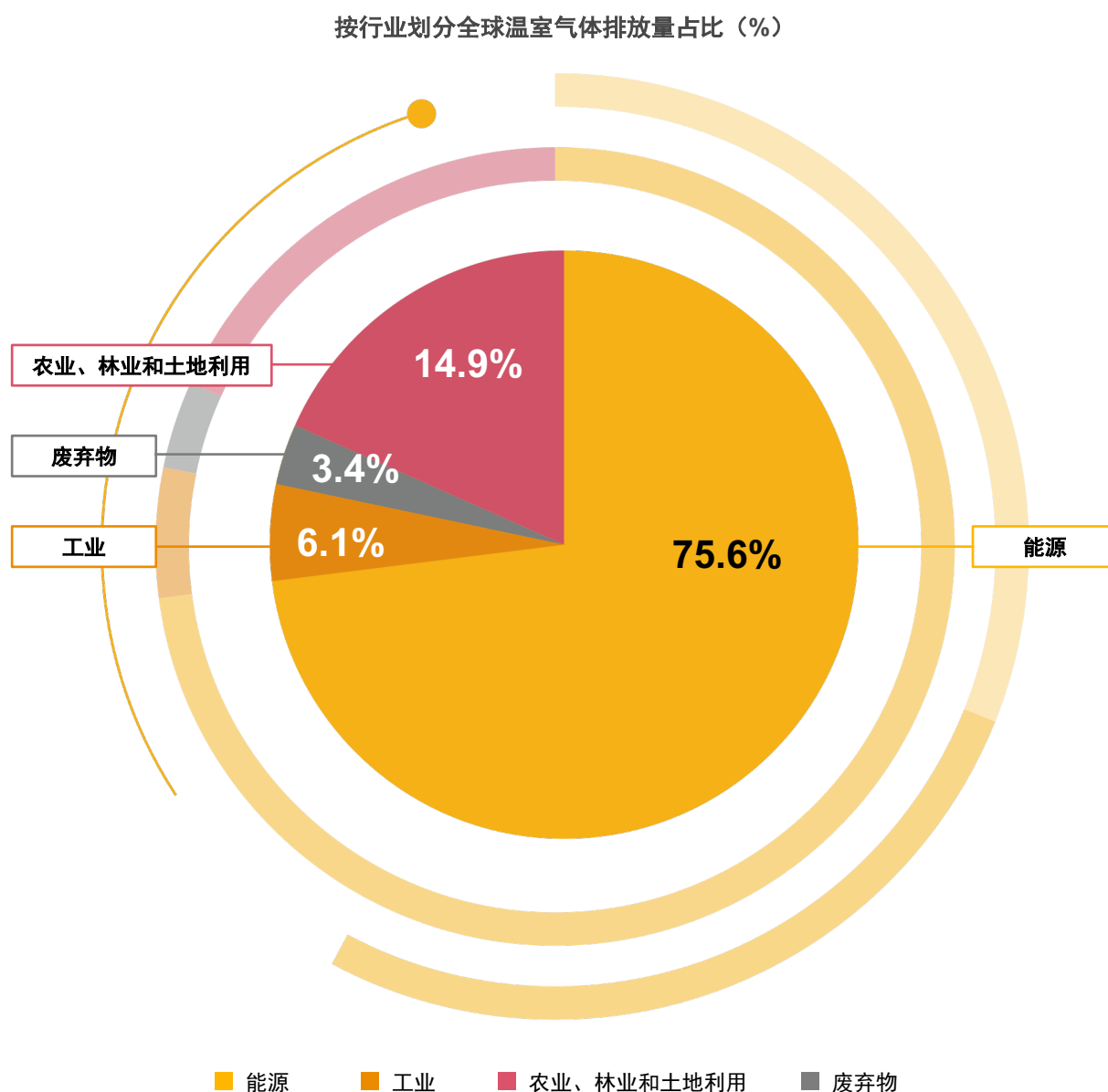


## 1.2 双碳目标日益明晰，降低对石油的依赖成关键

### 1.2.1 当前世界能源结构与碳排放现状

据世界资源研究所统计，全球二氧化碳排放的主要来源是化石燃料的燃烧，占碳排放总量的75.6%<sup>[3]</sup>。

《2050年净零排放：全球能源部门路线图》指出，要想实现2050年全球净零碳排放的目标，就必须停止对化石能源的投资<sup>[4]</sup>。2021年，中共中央、国务院印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》指出，到2030年，我国非化石能源消费比重应达到25%左右，2060年达到80%以上<sup>[5]</sup>。



来源：World Resources Institute

<sup>[3]</sup> World Resources Institute

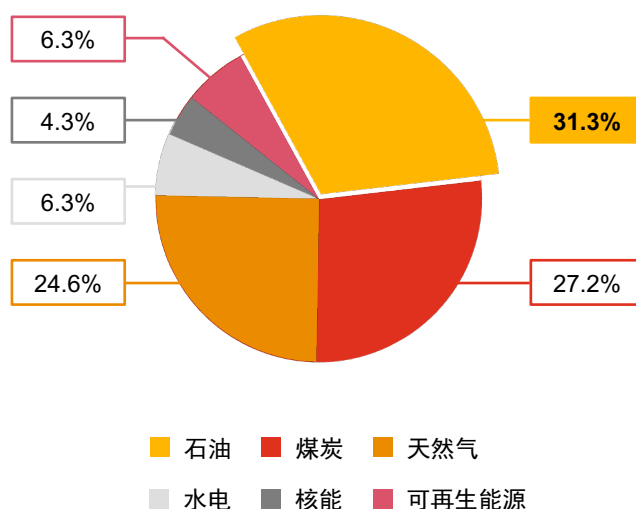
<sup>[4]</sup> 《2050年净零排放：全球能源部门路线图》，IEA

<sup>[5]</sup> 《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，中国政府网



而石油作为化石能源的重要组成部分，其消费量在2021年全球能源消费结构中占比高居榜首，达到31.3%<sup>[2]</sup>。中国石油日消费量由2020年的1,441万桶增加至2021年的1,544万桶，增加量占全球石油消费增加量的20%，减少我国石油等化石能源的使用对降低温室气体排放十分关键。

全球能源消费结构占比（%）



来源：BP Company



随着我国石油需求量暴涨，在本土原油产量无法满足国内能源需求的情况下，原油对外依存度持续上升：中国石油对外依存度由2010年的54%逐渐上升至2021年的72%左右，石油进口量位居全球首位<sup>[6]</sup>。同时，受石油美元体系的影响，进口石油使用美元进行交易结算使得中国短时间内难以摆脱对美元的依赖，加大了美元对我国经济的影响。

近年来，中国约有59%的石油进口量来自地缘政治不稳定的国家或地区（俄罗斯、沙特、安哥拉、伊拉克），区域性战争冲突或地缘政治动荡加大了我国石油海外供应的不确定性，从而影响国家能源战略安全。同时，由于全球经济增速减缓、清洁能源技术发展以及能源低碳化趋势等原因，2001年到2021年间，一次能源结构中石油占比从38%降低至31%<sup>[2]</sup>，石油的投资规模呈减少趋势。长期来看，石油供给端的不稳定性以及投资规模缩减势必对中国能源安全带来挑战。

<sup>[6]</sup> 《中国能源大数据报告（2022）》，中能传媒研究院





### 1.2.2 碳中和的战略意义

“碳中和”战略的落地，将极大地推动中国风、光、水、核等清洁能源发展，降低我国对石油资源的依赖，并减少对美元的需求。同时，通过调整能源结构向可再生能源倾斜，不断提升国家能源安全。另外，“碳中和”战略也加快推动新能源和生物制造等相关领域的新兴产业落地，例如新能源汽车、光伏、风电、特高压、生物基可降解塑料、生物燃料、生物医药等，助力中国经济结构转型，为国家未来发展提供新的经济增长点。

在“碳中和”战略的推动下，中国的碳金融领域也将承担起帮助人民币实现国际化的重任。在碳中和战略的引导下，我国不断规范碳排放交易所管理机制，推进碳远期、碳期权等多种金融产品的发展；同时，不断扩大市场交易主体，推动碳交易市场的流动性。通过构建一个更加开放、健全的碳金融市场，为流出去的人民币提供更加安全且能盈利的栖息地，以此推动人民币的回流，建立境内外人民币的双向循环机制。与此同时，在与“一带一路”等国家和地区开展新能源贸易与技术转移等合作过程中，不断扩大人民币的使用场景也将进一步提升人民币的国际影响力。



## 1.2.3 碳中和战略催生的新兴制造产业，成为应对气候变化的新利器

### 1.2.3.1 从“新能源”维度降低对石油依赖的产业

**新能源汽车产业：**全球交通运输行业所需能源的95%来自石油，因此多个国家地区都在大力出台相关政策以减少燃油车的使用，例如英国宣布在2030年全面禁售燃油车、欧盟及美国加州自2035年起禁售燃油车等。各大车企也明确表示将停售燃油车，例如沃尔沃、福特、奔驰等6家企业承诺将于2040年前停售燃油车。我国政府自2009年以来推出新能源汽车补贴政策以推动新能源汽车对燃油车的替代，截至目前补贴累计投入将近1,500亿元，全国充电设施规模达到262万台，换电站1,298座，服务近800万辆新能源汽车<sup>[7]</sup>。目前，中国已成为全球最大的电动汽车市场，同时也是全球范围内电动出行商业模式创新最为活跃的地区。

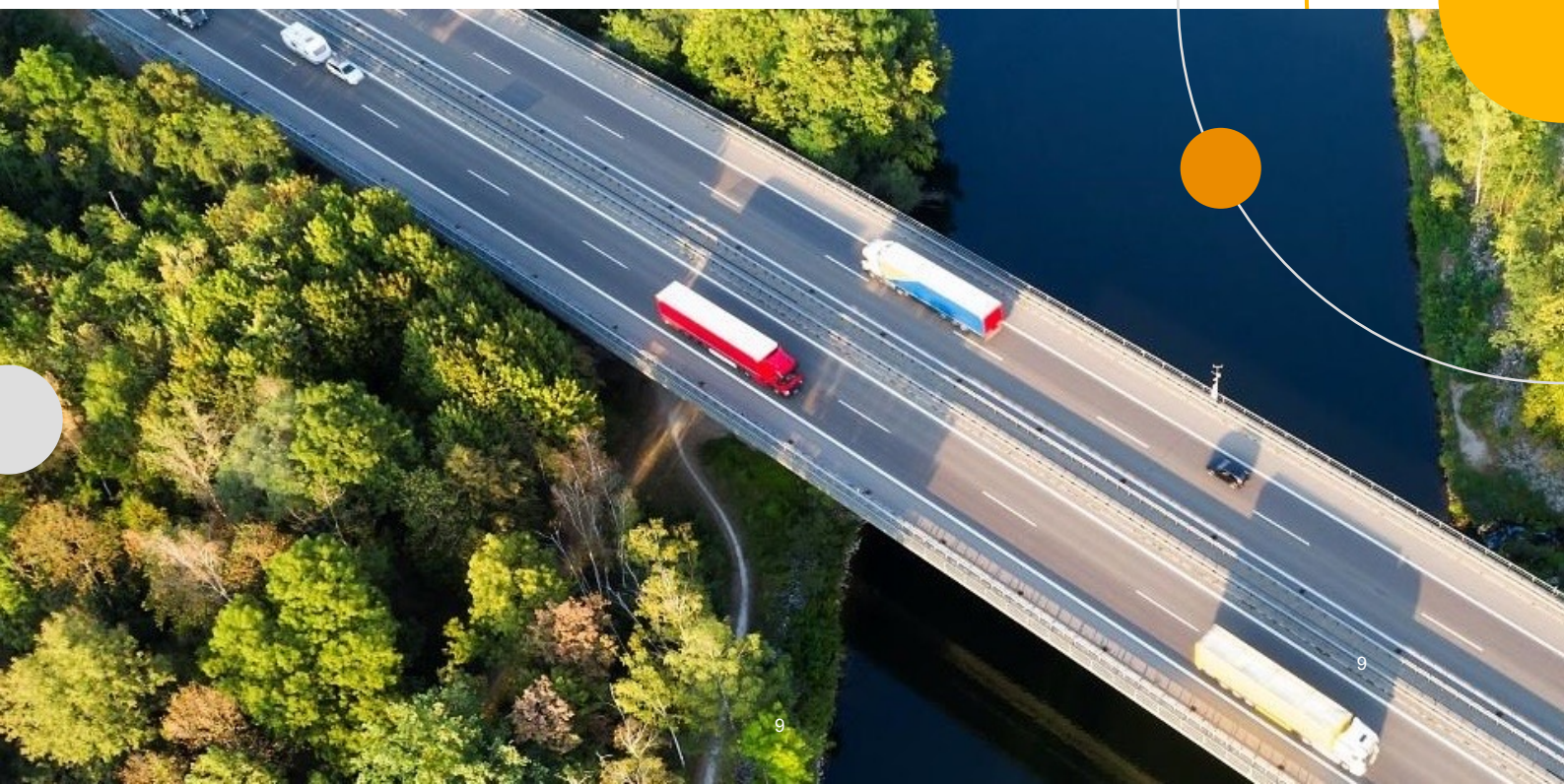
**锂电产业：**对于新能源汽车而言，电池是最为关键的部件，约占总成本的40%。新能源汽车产业的市场增速也带动了上游锂电产业的高速发展。中国已连续五年成为全球最大的锂电池消费市场。2021年，全球锂离子电池市场规模达到545GWh，其中，中国锂离子电池市场规模约324GWh，约占全球市场的59.4%，而中国锂电企业销量（含出口与国外分公司）合计达382GWh，中国企业在全球市场的占有率达到70%<sup>[8]</sup>。2021年中国锂电全行业总产值突破6,000亿元，并诞生了宁德时代这样万亿市值的超级行业巨头<sup>[9]</sup>。

**光伏产业：**光伏发电作为清洁电能来源之一，比核能技术更成熟安全、比水电对当地环境负面影响更小、比风电的应用场景更广泛，因此光伏成为当下实现“碳中和”目标的重要抓手。我国自2008年起出台了大量光伏产业扶持政策，2012至2019年间全国光伏（分布式+集中式光伏）补贴需求总量累计达到近1,080亿元。在国家的大力扶持下，我国光伏产业发展趋于成熟，全球前10的光伏组件企业中，中国占据7席，产量占据全球70%左右的水平，且不断突破高效电池转换效率的世界纪录。中国光伏产业经过多年发展，产业链完整，制造能力和市场占比均居全球第一，太阳能光伏产品也成为中国的一项重要出口。

<sup>[7]</sup> 《国家发展改革委等部门关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见》，中国政府网

<sup>[8]</sup> 《2021年锂离子电池行业运行情况》，中华人民共和国工业和信息化部

<sup>[9]</sup> 《2021中国锂电产业发展指数》，赛迪顾问

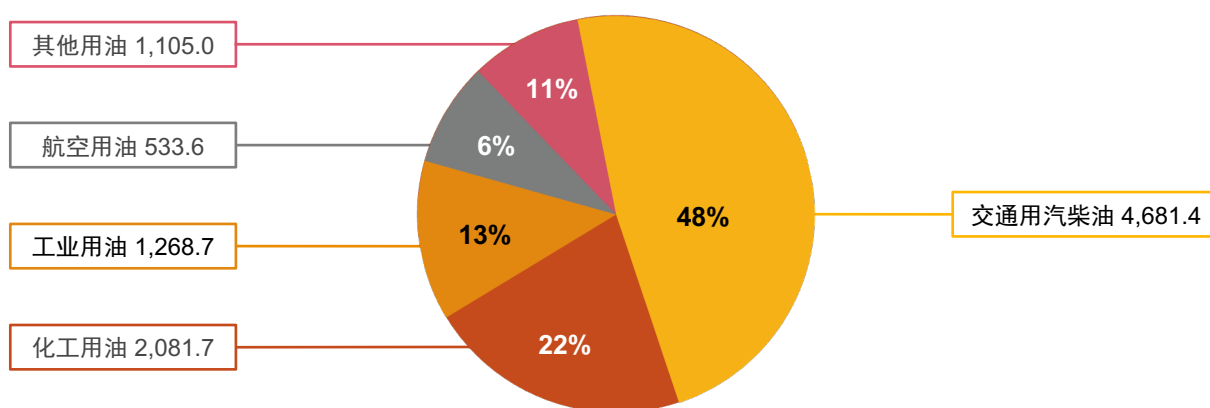




### 1.2.3.2 从“生物制造”维度降低对石油依赖的产业

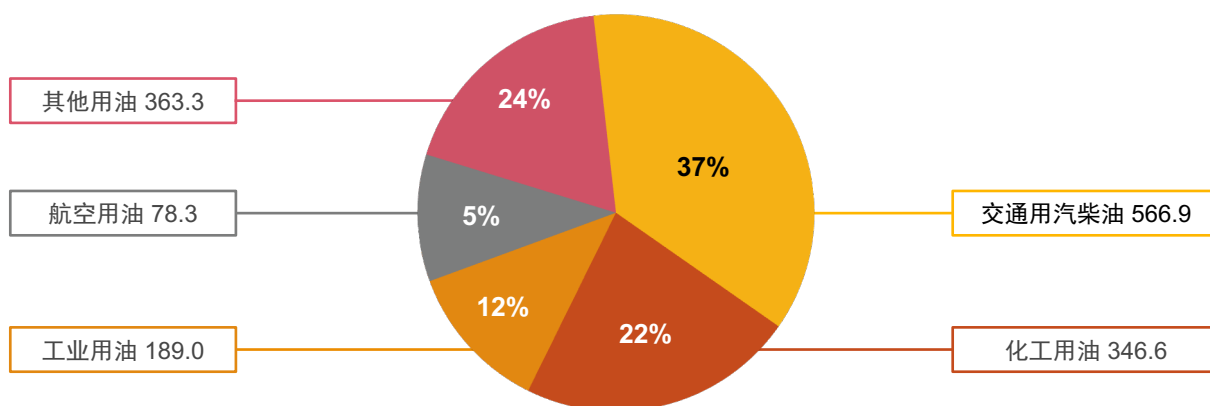
石化行业消耗的石油总量位居第二，仅次于传统能源领域：2021年全球石油消耗的产业占比中，交通用汽柴油的石油消耗量最大达到48%；其次是化工用油，石油消耗量占比22%<sup>[10]</sup>。中国的石油消费结构也呈现类似特征。为了降低石油化工产业对石油储量的消耗，国家发改委提出尝试以生物制造材料替代部分石化材料，从而降低石化产业的规模，减少石油能源的使用。

2021年全球终端用油消费占比（万桶/天，%）



来源：IEA，行业研究报告

2021年中国终端用油消费占比（万桶/天，%）



来源：BP Company，行业研究报告

如今，使用生物制造材料替代部分石化材料成为新趋势：国家发展改革委印发了《“十四五”生物经济发展规划》，明确将生物制造作为生物经济战略性新兴产业发展方向。预计未来十年，石油化工、煤化工产品的35%可被生物制造产品替代。生物制造是以工业生物技术为核心手段，通过改造现有制造过程或利用生物质、二氧化碳等可再生原料生产能源、材料与化学品，实现原料、过程及产品绿色化的新模式。在原料来源方面，可以利用二氧化碳、工业尾气、秸秆转化糖、玉米、植物油等多种碳源。在产品方面，通过生物技术可以将以上原料转换为应用在不同领域的高附加值产品，例如生物柴油、可降解塑料、生物尼龙、生物橡胶、生物制药、生物化肥等等。最终充分发挥“生物造万物”的巨大价值，实现材料、轻工、医药、化工等重要工业领域的绿色低碳可持续发展。

<sup>[10]</sup> 《2022-2060全球及中国原油需求展望（何时达峰？）》，行业研究报告





## 1.3 碳中和战略为生物可降解材料提供发展机遇及产业机会

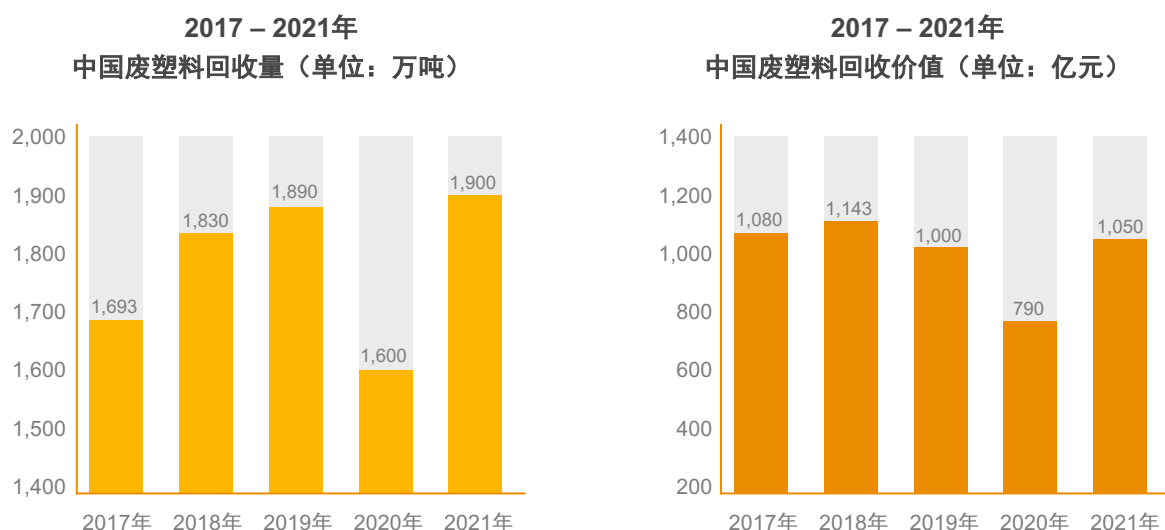
### 1.3.1 市场概述：生物可降解材料 — 生物基材料中最具市场前景的材料

塑料作为石化产业重要的下游产业之一，其制造所需要的石油消耗量占据全球石油产量的8%<sup>[11]</sup>。据自然资源保护协会（NRDC）预测，如果按照目前的趋势发展，2050年全球塑料将消耗全世界20%的石油。

根据欧洲塑料制造商协会（Plastics Europe）的数据，2021年，全球塑料产量较2018年增长了6.9%。预计到2035年，塑料产量将增加一倍，到2050年产量将增加两倍<sup>[12]</sup>。以中国为例，2021年中国废塑料的产生量大概有6,200万吨，其中材料化回收用量是1,900万吨，材料化回收率达到31%，尽管其余69%的材料采取填埋焚烧处理或直接遗弃的方式处理，但中国的材料化回收率是全球废塑料平均材料化回收率的近1.74倍，回收利用的整个产能占全球的70%<sup>[13]</sup>。同一时期美国<sup>[14]</sup>、2020年欧盟<sup>[12]</sup>和日本<sup>[15]</sup>的材料化回收率分别是5%、35%和24%，且这些国家仍然大量地向其他国家出口一些废塑料。废塑料的回收仍面临巨大挑战。

塑料污染问题逐渐成为仅次于气候变化的全球第二大环境议题。塑料一旦泄漏到土壤、水体等自然环境中，便难以降解，会造成视觉污染、土壤污染、水体污染等各种环境破坏，处置方式不当还会影响温室气体排放，给脆弱的生态环境带来持久性危害。另外，微塑料进入食物链也可能会对人体健康带来严重危害。

中国正大力发展塑料循环经济，建立塑料污染治理体系，改进和创新塑料原料，致力于从源头预防和减少可能产生的塑料污染。



数据来源：中国物资再生协会再生塑料分会

<sup>[11]</sup> 《中国塑料的环境足迹评估》，北京石油化工学院、NRDC

<sup>[12]</sup> 《Plastics – the Facts 2022》，Plastics Europe

<sup>[13]</sup> 《中国再生塑料行业发展报告2021-2022》，中国物资再生协会再生塑料分会

<sup>[14]</sup> 《The Real Truth About the U.S. Plastics Recycling Rate》，Beyond Plastics

<sup>[15]</sup> Tokyo-based Plastic Waste Management Institute

### 1.3.2 机遇把握：限塑降塑政策及生物材料扶持政策为可降解材料发展提供驱动力

#### 中国限塑政策相继出台，促进生物可降解材料发展

2007年国务院办公厅出台首个“限塑令”，在全国范围内禁止生产、销售和使用超薄塑料袋，实行塑料袋有偿使用制度。但随着互联网的普及，电商和外卖行业快速兴起，对应的快递包装与一次性餐饮具需求猛增，为限塑带来了新压力。2017年，全生物降解材料入围国家“十三五”材料计划。2019年，国家发改委鼓励生物可降解塑料及其系列产品的开发、生产与应用。2020年，国家发改委、生态环境部公布《关于进一步加强塑料污染治理的意见》，提出了到2020，到2022，以及到2025年的分阶段实施目标，限制部分塑料制品的生产销售和使用，推广应用替代产品，加强塑料废弃物的回收和清运。2021年，各省市及其下属部门针对“十四五”对资源节约及环境保护方面的要求，不断完善地方限塑政策。2022年，国家积极出台政策鼓励生物可降解塑料的使用和推广，明确提出加强生物材料的研发力度，促进绿色低碳技术发展及可降解材料制品的替代应用。

| 序号 | 应用           | 2020年底                                       | 2022年底                      | 2025年底                  |
|----|--------------|----------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1  | 不可降解塑料袋      | 直辖市、省会、计划单列市的商场、超市、药店、书店等场所以及餐饮打包外卖服务和各类展会活动 | 扩大到地级以上城市                   | 扩大到集贸市场                 |
| 2  | 一次性塑料餐具      | 全国范围餐饮行业禁止使用不可降解一次性塑料吸管；地级以上城市的餐饮堂食服务        | 扩大到县城建成区、景区景点餐饮堂食服务         | 地级以上城市餐饮外卖领域餐具消耗强度下降30% |
| 3  | 宾馆、酒店一次性塑料用品 | -                                            | 全国范围星级宾馆、酒店等场所              | 扩大至所有宾馆、酒店、民宿           |
| 4  | 快递塑料包装       | -                                            | 北京、上海、江苏、浙江、福建、广东等省市的邮政快递网点 | 扩大到全国范围邮政快递网点           |

《意见》中还提出，我国将按照“禁限一批、替代循环一批、规范一批”的思路，加强塑料污染治理。生物可降解材料作为“替代循环一批”的重要解决方案，受到了政策的明确支持。近年来，相关部门也在积极出台政策鼓励生物可降解塑料的使用和推广。国家市监局、标准委制定并发布了《生物降解饮用吸管》、《生物降解塑料与制品降解性能及标识要求》，工业部等五部联合发布了《关于推动轻工业高质量发展的指导意见》，明确提出发展新材料、全生物降解地膜等材料低碳技术发展工程，以及可降解材料制品的绿色产品消费。



## 国内政策

2007年12月

国务院办公厅：《国务院办公厅关于限制生产销售使用塑料购物袋的通知》，从2008年6月1日起全国范围内禁止生产、销售和使用厚度小于0.025毫米的塑料购物袋，实行塑料袋有偿使用制度。

2016年12月

工信部、发改委、科技部、财政部：《新材料产业发展指南》，加快推动先进基础材料工业转型升级，大力推进材料生产过程中的智能化和绿色化改造，开发生物可降解材料。

2017年4月

科技部：《“十三五”材料领域科技创新专项规划》全生物降解材料入围。

2019年9月

中央全面深化改革委员会：《关于进一步加强塑料污染治理的意见》，有序禁止、限制部分塑料制品的生产、销售和使用，积极推广可循环易回收降解替代产品，增加绿色产品供给，规范塑料废弃物回收利用，建立健全各环节管理制度，有力有序有效治理塑料污染。

2019年10月

国家发展改革委：《产业结构调整指导目录》（2019年版），鼓励生物可降解塑料及其系列产品的开发、生产与应用。

2020年1月

国家发展改革委、生态环境部：《关于进一步加强塑料污染治理的意见》，分别提出到2020年、2022年以及2025年的分阶段目标，限制部分塑料制品的生产销售和使用。

2021年6月

国家机关事务管理局、国家发展和改革委员会：《关于印发“十四五”公共机构节约能源资源工作规划的通知》推动公共机构逐步停止使用不可降解一次性塑料制品。

2021年7月

国家发展改革委：《“十四五”循环经济发展规划》推进塑料源头减量，严格禁止生产超薄农用地膜、鼓励公众减少使用一次性塑料制品。

2022年

国家市监局、标准委、工信部：《生物降解饮用吸管》、《生物降解塑料与制品降解性能及标识要求》、《关于推动轻工业高质量发展的指导意见》，加强生物材料的研发力度，专门提出要发展面向绿色低碳的生物基替代应用。

## 国际上，欧美为首的全球各国也相继推出“限塑令”，限制塑料产品的使用

2015年12月，欧盟启动循环经济行动计划，主张构建可持续产品，确定了塑料作为七个关键产品领域之一，并明确推动废弃物减量增值，减少对境外废弃物处理的过度依赖。2018年1月，欧盟通过《欧盟塑料战略》，旨在改变欧盟塑料产品的设计、生产、使用和回收方式。2018年5月，欧盟提出关于一次性塑料（Single-Use-Plastics, SUP）的指令，旨在减少塑料浪费。2019年2月，荷兰、法国等国家联合欧洲80多个组织（政府、公司、非政府组织和商业协会等）发布《欧盟塑料公约》，并试图组织构建全球塑料公约网络。2020年8月，美国推出《美国塑料公约》。到2021年，全球塑料公约网络已有10个国家公约，2个地区公约。

## 国际政策

2015年12月1日

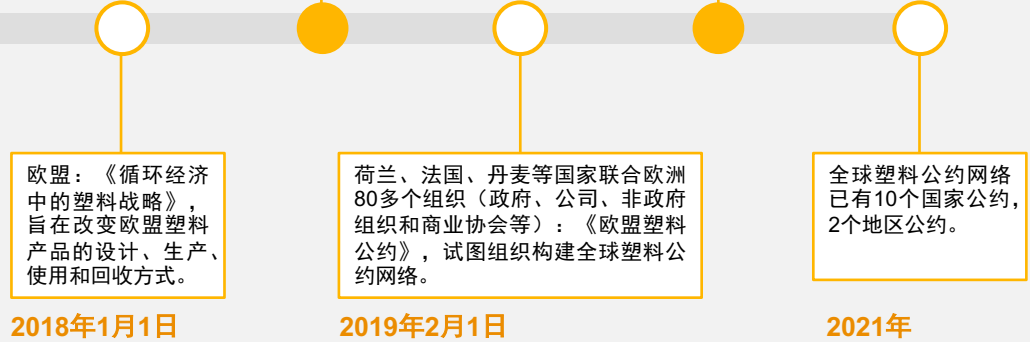
欧盟：循环经济行动计划，主张构建可持续产品。确定了塑料作为七个关键产品领域之一，并明确推动废弃物减量增值，减少对境外废弃物处理的过度依赖。

2018年5月1日

欧盟：关于一次性塑料（Single-Use-Plastics, SUP）的指令，旨在减少塑料浪费。

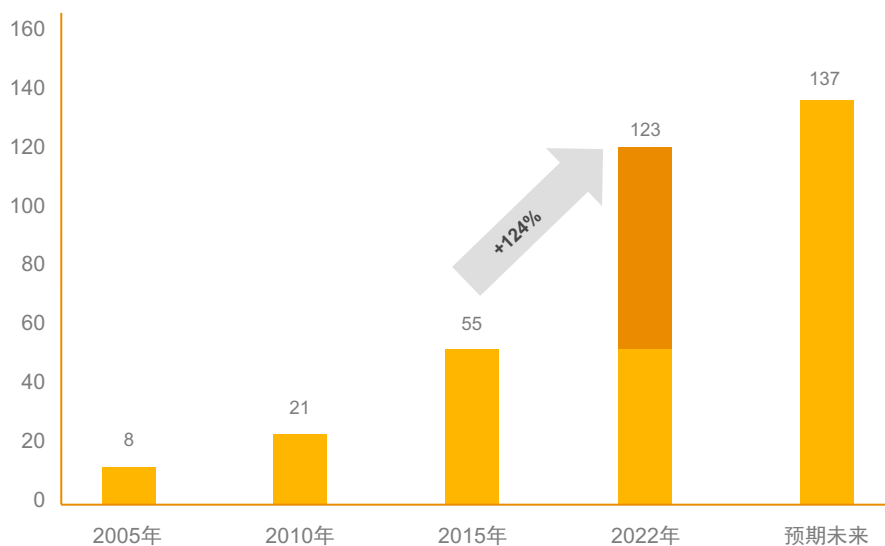
2020年8月1日

美国：《美国塑料公约》，迈向塑料循环经济。



除了欧洲和美国，其他国家和地区也在积极限制一次性塑料的使用。2015年时，有55个国家和地区对一次性塑料的使用进行了限制，到2022年，这一数字已经达到123家，增幅达124%<sup>[16]</sup>。2022年3月，第五届联合国环境大会上，175个国家和地区的代表通过了《终止塑料污染决议（草案）》，将在2024年底前完成首个全球“限塑令”。

2005 – 2022年累计限制一次性塑料的国家和地区数目（单位：个）



来源：The Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability

<sup>[16]</sup> The Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability

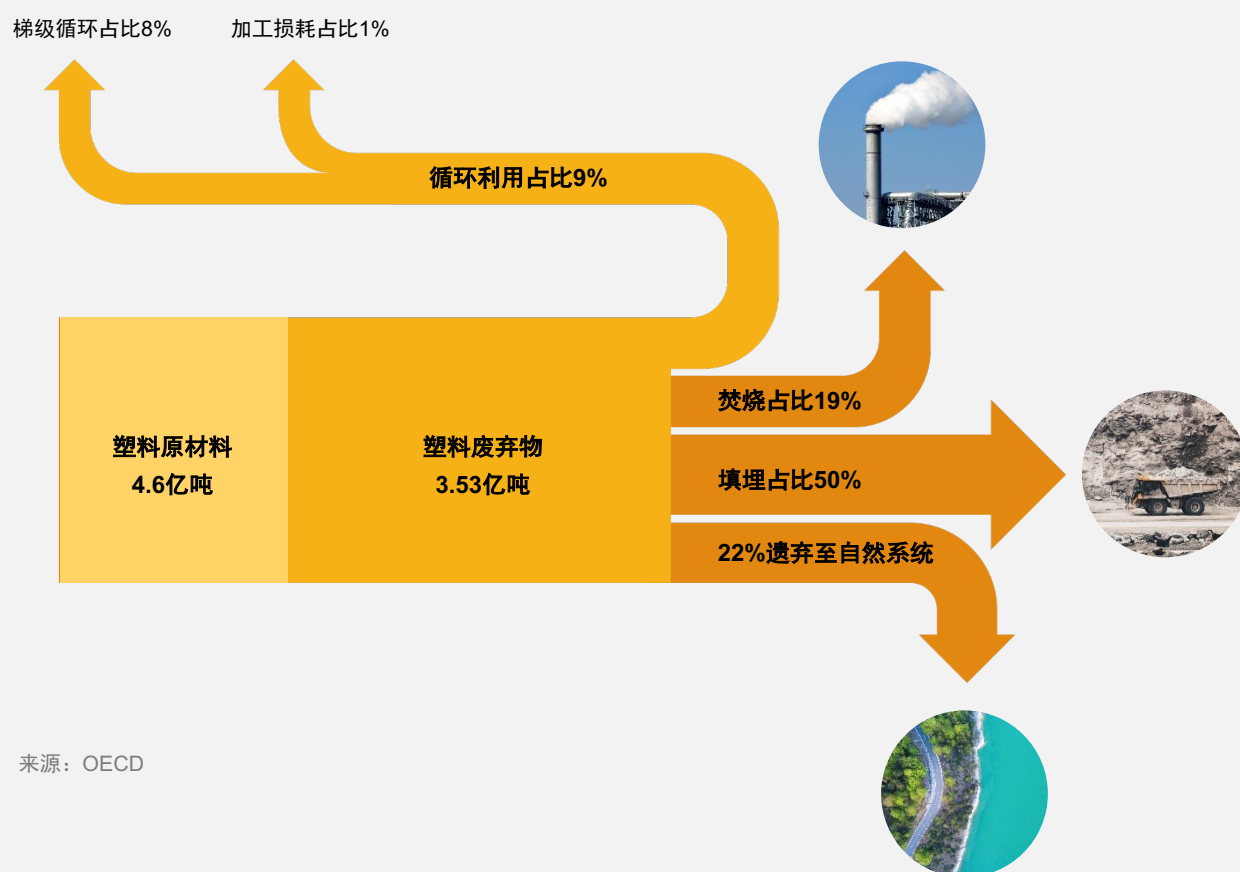


## 全球替代石油基塑料包装的需求明确，市场前景巨大

在全球限塑的大背景下，包装这一应用场景对于石油基塑料替代方案需求最为迫切<sup>[17]</sup>。

- 塑料用量方面，包装使用占塑料产量的40%。
- 回收利用方面，根据OECD《全球塑料展望报告》，2019年全球的塑料垃圾达3.53亿吨，其中仅有9%最终被回收利用，19%用于焚烧，近50%进入卫生填埋场。剩余22%被弃置在无人管理的垃圾场、露天燃烧或泄漏到环境中<sup>[18]</sup>。
- 经济损失方面，根据麦克阿瑟基金会数据，95%以上的塑料经过短暂使用后就失去了价值，每年因包装造成的损失达800亿-1,200亿美元，且使用后产生的负面外部成本加上生产过程中排放温室气体所造成的损失高达400亿美元，比塑料包装产业的总利润还多。

2019年塑料包装材料的流动情况



<sup>[17]</sup> 《中国塑料包装再生现状白皮书》，WWF

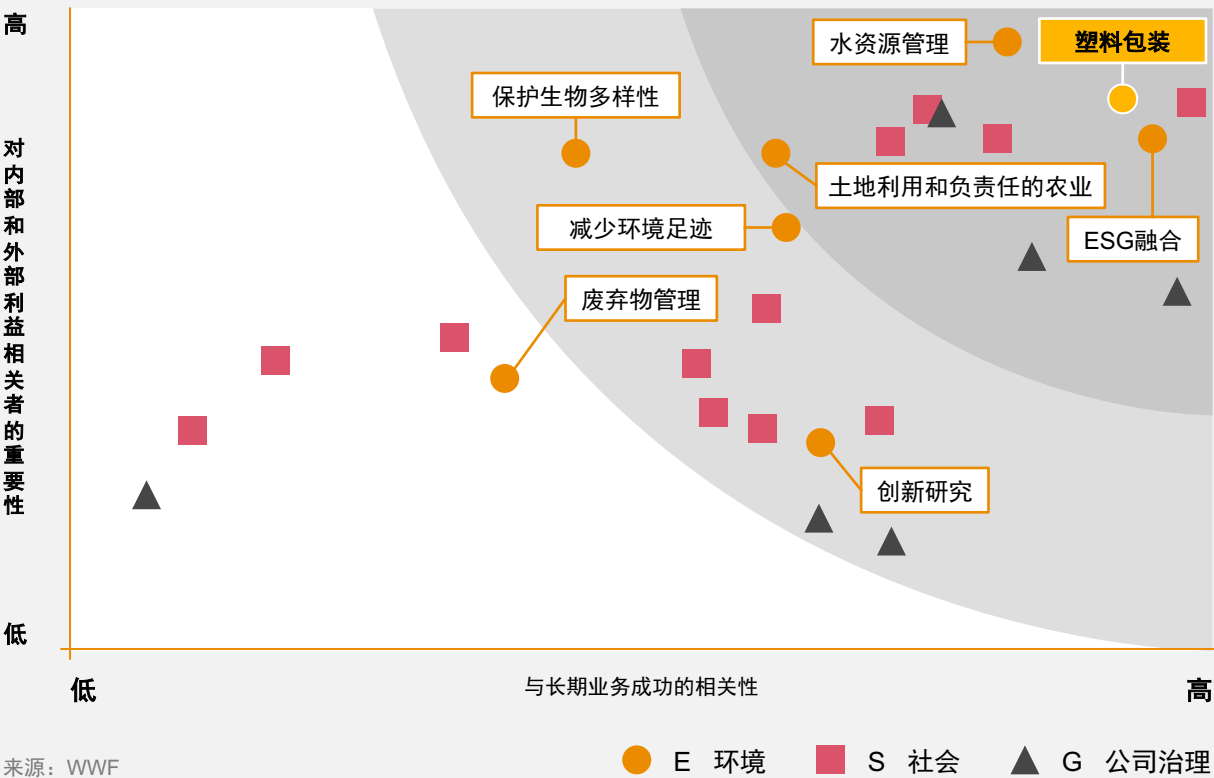
<sup>[18]</sup> 《Global Plastics Outlook Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options》，OECD

塑料污染治理和可循环包装应用也成为全球主要快速消费品公司亟待解决的重要ESG议题，这一议题不仅对内部、外部利益相关者均很重要，也与企业长期业务保持挂钩<sup>[19]</sup>。近年来生产塑料包装的头部公司开始重新思考他们的价值主张，并优化各自的商业模式以确保其竞争优势符合循环经济的原则。麦克阿瑟基金会牵头与联合国环境规划署合作发起了塑料循环经济的“全球承诺”，现在已有共计占全球塑料包装生产总量20%的500多个企业和组织加入支持“全球承诺”的共同愿景——致力于在2025年实现从源头解决塑料污染的目标，实现100%包装可重复使用、可回收或可堆肥。具备这一愿景的大型塑料包装企业、包装供应商和原料供应商构成了生物可降解塑料厂商的主要客户来源。

加入“全球承诺”的部分企业



塑料包装成为快消品公司最关注的ESG议题



<sup>[19]</sup> 《The Business Case for a UN Treaty on Plastic Pollution》， WWF



### 1.3.3 应用优势：生物可降解材料是传统塑料的最佳替代

目前，传统塑料的替代方案有传统非石化材料（如玻璃、陶器、金属、纸等）和生物可降解材料。生物可降解材料分为石油基和生物基，生物基可降解材料更具优势：

- **与传统非石化材料相比，生物可降解材料应用范围更广**

**传统替代方案有诸多限制：**玻璃和陶器较为厚重且更易碎，因此运输起来较麻烦；金属在制造过程中消耗的能源较多，且较容易受到腐蚀，并且只能用于有限范围的产品；纸的耐用性较差，容易受到水的破坏，并且在制作过程中会产生更多的排放物，还会大量消耗水资源；木制品制造成本高昂，存在过度砍伐森林的风险。相比之下，生物可降解材料具有类塑性，用于替代塑料的限制较少。

- **与石油基可降解材料相比，生物基可降解材料在上游原料、生产过程等方面具有优势**

**生物基可降解材料的原料更加可持续：**石油基可降解材料上游原料为石化资源，属于不可再生资源。以石油基可降解材料PBAT为例，其原料主要为对苯二甲酸（PTA），丁二醇（BDO），己

二酸（AA），均是石化来源材料。根据生物降解材料研究院，生产1吨PBAT消耗0.4吨PTA，0.43吨BDO，0.35吨AA<sup>[27]</sup>。其中，关于BDO的生产，当前国内95%的BDO生产装置大多采用电石炔醛法，生产消耗大量电能，属于高耗能产业。而生物基可降解材料所采用原料为可再生生物质（如糖类、植物油），而且全球每年产生大量非粮生物质，可以保证上游原料的长期稳定供应。

**生物基可降解材料生产过程更为安全：**石油化工材料生产过程中面临着诸多安全隐患，化学催化反应很多需要高温高压，事故风险高。以PBAT为例，其制备有三种酯化方式，需要140℃以上的高温条件，酯化后的缩聚反应更是需要240℃-255℃的高温才能进行。而生物发酵通常在常温常压下进行，事故风险较低。

生物基可降解材料具有类似塑料的物理和机械性能，结合了传统塑料的优点，同时又兼备白色污染难降解，增排温室气体这两个传统塑料最容易被诟病之处的解决方案——可降解，生物基来源。与其他塑料替代方案相比，应用范围更广；与石油基可降解材料相比，上游原料更加可持续，生产过程更加安全。生物基可降解材料当之无愧成为传统塑料最重要的替代方案。







## PHA: 最具前景的生物可降解材料

相对于其他可降解材料，PHA在降解性及应用面上均更优：降解性能上，PHA的降解范围更广，可以在淡水、海水、土壤、堆肥、甚至有机污泥中生物降解，还可以通过与其他材料共混来提高终产品的可降解性；物理性能上，PHA是系列聚合物，既可以对共聚物的单体结构进行选择搭配，亦可以与其他可降解材料复配，提升共混物的物理机械性能。

同时，PHA材料市场潜力巨大，供给保障充足，随着其生产成本的不断下探，有望在包装领域完全替代PP、PE，达到1.2万亿的市场规模。





## 2.1 降解性：PHA在可降解塑料中降解性更优

生物降解聚合物主要分为四类：① 生物质来源的聚合物，如淀粉，纤维素，脂肪，蛋白质等；② 微生物生产得到的聚合物，如PHA家族；③ 生物来源的单体经化学合成得到的聚合物，如PGA，PLA等；④ 石油来源的单体经化学合成得到的聚合物，如PBSA，PBAT等。

### • PHA及其他可降解材料的降解机理

PHA的生物降解过程如下，先由微生物分泌PHA解聚酶，将不溶于水的PHA水解成水溶性的形式，再由微生物吸收利用，生成二氧化碳和水。因此PHA可以在微生物活性较高的环境，如土壤、湖水、海水，甚至在污水、污泥中发生降解。

PLA是由生物来源的乳酸单体经化学合成所得到的聚合物，本质上不属于天然化合物。PLA在降解前，需通过吸水断裂大分子主链中的酯键，形成低聚物，再由微生物分解成二氧化碳和水。PLA在自然条件下难以水解，需在高温高湿的堆肥条件下进行水解反应，降解条件较为苛刻。

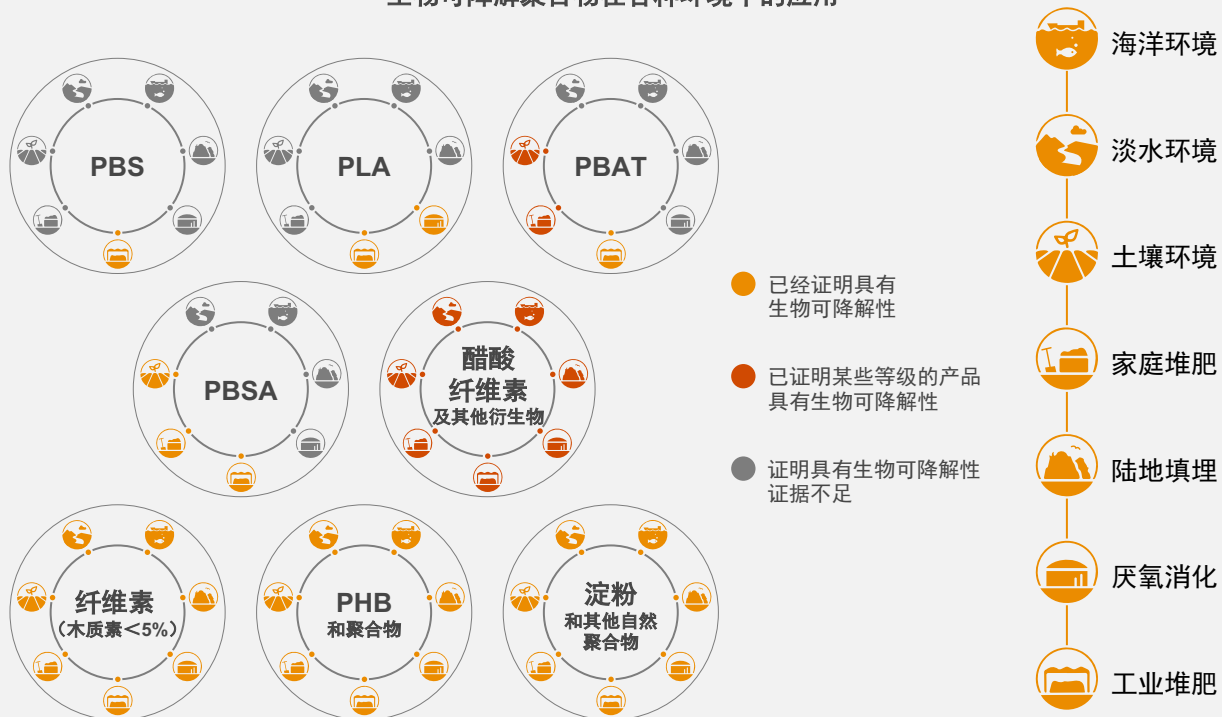
PBAT全名为聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯，降解时，先经水解生成对苯二甲酸一甲酯和对苯二甲酸，再进一步转化为二氧化碳和水。降解PBAT的主要微生物种类为嗜热放线菌，它们通常存在于土壤中，在水体中含量较少，因此PBAT难以在淡水或海洋条件下降解<sup>[20]</sup>。

### • PHA降解的条件范围更广

Nova Institute根据降解标准和认证主题，绘制了生物可降解聚合物的降解环境图谱：

- ① PLA仅能在工业堆肥与厌氧消化的条件下发生生物降解；
- ② PBAT仅能在部分土壤与庭院堆肥条件，以及工业堆肥条件下降解；
- ③ PHA（包含PHB及其聚合物）可以在土壤、淡水、海水、家庭堆肥、工业堆肥、厌氧消化等多种条件下进行降解。

生物可降解聚合物在各种环境中的应用



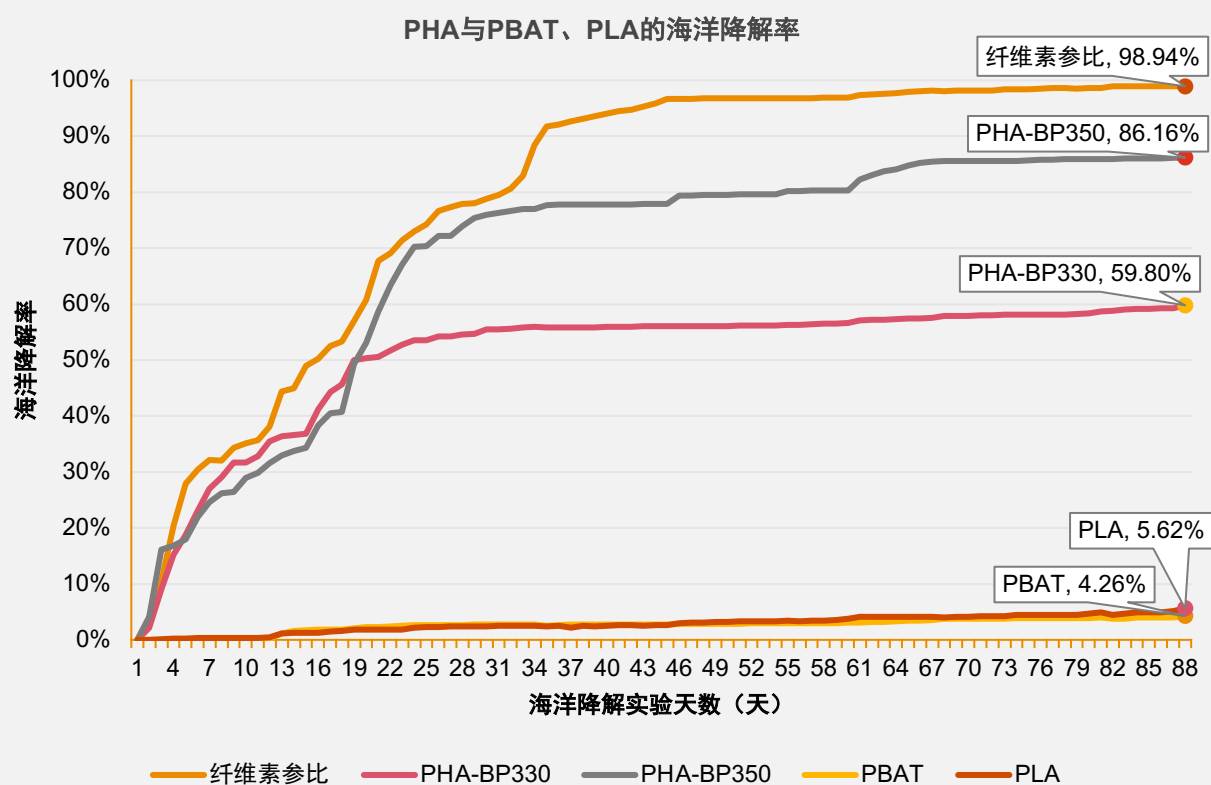
来源：Nova Institute

<sup>[20]</sup> 《Occurrence and Analysis of Thermophilic Poly(butylene adipate-co-terephthalate)-Degrading Microorganisms in Temperate Zone Soils》, Jana, et.al., Int J Mol Sci

### • PHA可以与其他材料共混实现更好的降解性能

由于PHA在各种自然及人工环境下均具有良好的降解性，生产其他各类可降解材料的企业正积极尝试将材料与PHA共混，以提升产品的降解性能。对此，蓝晶微生物与浦景化工进行合作，使用PBAT与PLA分别与PHA共混后进行海洋降解实验。经过87天的实验，双方得到如下实验结果：

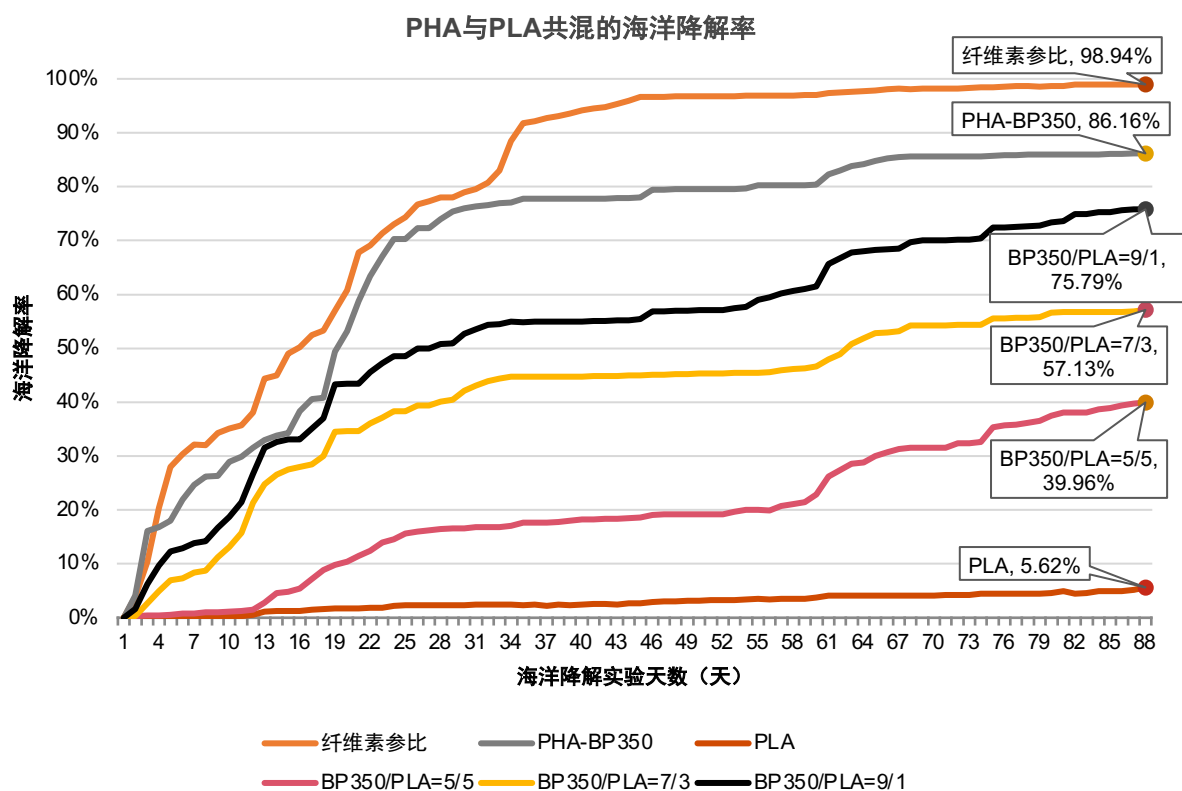
- ① PHA纯料在海水中降解率超过86%，而PBAT纯料的降解率仅4.3%，PLA纯料的降解率仅5.6%；
- ② 当PLA与PHA共混后，共混物最大降解率超75%；
- ③ 当PBAT与PHA共混后，共混物降解率超过65%。



注：实验所用材料中，PHA为蓝晶微生物牌号BP350，PLA为道达尔科比恩L175，PBAT为蓝山屯河TH801T

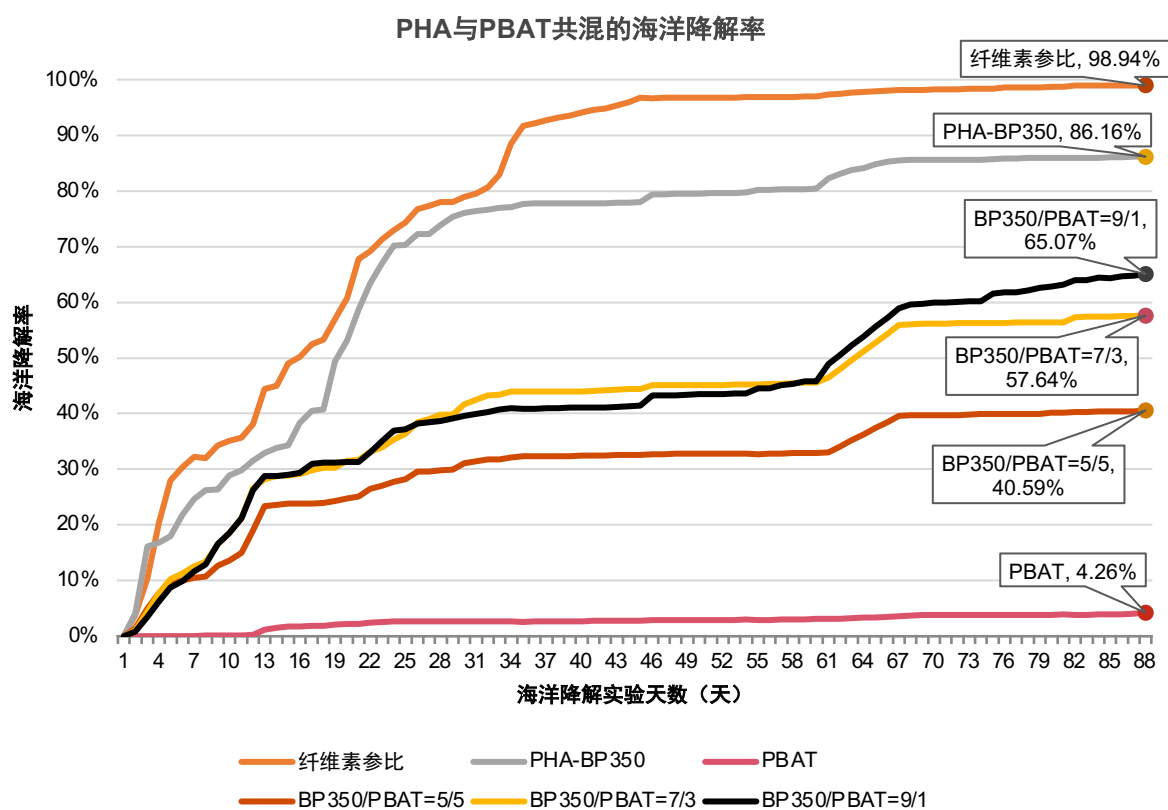
来源：蓝晶微生物，浦景化工





注：实验所用材料中，PHA为蓝晶微生物牌号BP350，PLA为道达尔科比恩L175，PBAT为蓝山屯河TH801T

来源：蓝晶微生物，浦景化工



PHA是除了木质素小于5%的纤维素、淀粉等天然大分子外，唯一能在多种条件下实现生物降解的聚合物。在日常生活中，塑料非常容易泄露到土壤、水体等自然环境中，对此，可在广泛的自然界实现降解的PHA是极佳的解决方案。

- **全国堆肥基础设施欠缺，使用PHA可降低塑料处理的压力**

其他可降解材料如PLA，需要工业条件的堆肥与厌氧发酵将其水解为低聚物，才能实现生物降解，而我国面临堆肥和厌氧发酵设施欠缺的问题。以生活垃圾处理为例，当前主要处理方式仍然为填埋，堆肥和厌氧发酵的处理量相对较少。据《中国生态环境统计年报》，2020年，我国生活垃圾总量2.7亿吨，填埋量2.2亿吨，堆肥量仅89.0万吨，厌氧发酵处理量356.9万吨，生物分解处理量94.9万吨。最适合进行堆肥与厌氧发酵处理的餐厨垃圾，占我国城市生活垃圾比重37%-62%，已超过现有堆肥与厌氧发酵处理设施的负荷<sup>[21]</sup>。

发展堆肥与厌氧发酵设施任重道远，困难重重。其一，堆肥与厌氧发酵成本更高，若想提高二者在垃圾处理中的比例，需要增大经济投入。其二，堆肥与厌氧发酵需要垃圾分类的广泛推行和严格实施，若堆肥垃圾中出现重金属等有害化学物质，反而会加重对环境的影响。其三，中国尚未建立起完善的堆肥标准与管理体系，在标准缺乏的状态下难以大规模建厂。

在这样的背景下，无需专门的堆肥或厌氧发酵处理即可降解的PHA无疑能大幅降低塑料处理的压力。

<sup>[21]</sup> 《2020年中国生态环境统计年报》，生态环境部





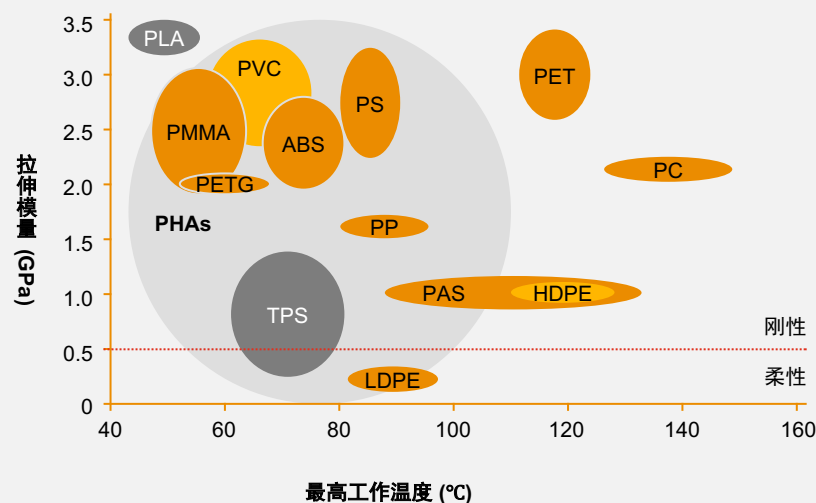


## 2.2 应用面：作为系列聚合物，综合性能好，应用范围广

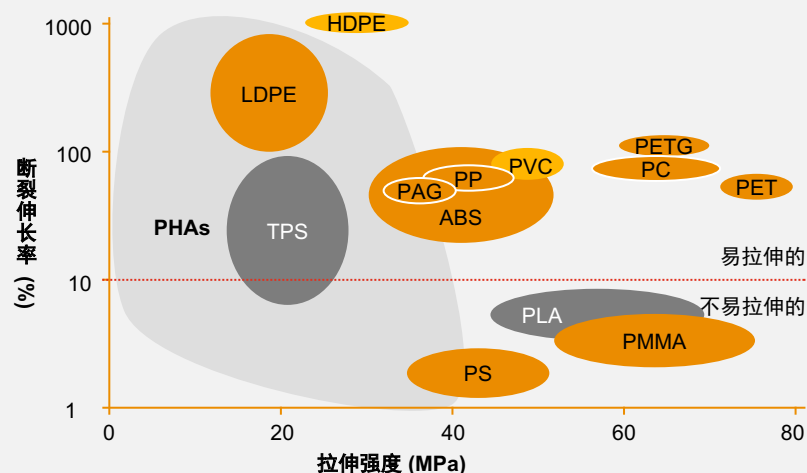
### • PHA物性指标区间广泛

PHA是微生物合成的一系列天然聚酯，目前已经发现其具有150多种不同的结构单元或单体。在实际应用中，PHA系列产品包括PHB、PHBV、PHBHHx（又称PHBH）等，各自具有不同的属性，据全球最大的PHA行业组织GO!PHA总结，PHA系列产品具有宽阔的物性指标区间<sup>[22]</sup>：

- 分子量在300,000-1,000,000kDa之间；
- 结晶型聚合物的熔融温度在60-170°C之间；
- 拉伸模量在10-1,000 MPa之间；
- 拉伸强度在1-45MPa之间；
- 伸长率在1%-1,000%之间。



相对于其他石油基或生物基热塑性材料，PHA的热机械设计区间更广（具有宽泛的使用温度区间和宽泛的拉伸模量区间）



相对于其他石油基或生物基热塑性材料，PHA可选择的机械性能设计区间更广（具有宽泛的拉伸强度与宽泛的断裂伸长率）

来源：Cambridge Consultants

<sup>[22]</sup> 《Polyhydroxyalkanoates (PHA) An emerging and versatile polymer platform》，Jan Ravenstijn，GO!PHA



宽阔的性能区间印证了PHA可作为系列聚合物，而非单一产品。

• PHA综合性能好

相较于改性淀粉、PBAT、PLA等可降解材料，PHA综合性能更好。

| 项目     | 淀粉基  | PBAT | PLA  | PHA       |
|--------|------|------|------|-----------|
| 资源利用   | 生物基  | 石油基  | 生物基  | 生物基       |
| 生产方法   | 化学改性 | 化学合成 | 化学合成 | 生物合成      |
| 材料主要性质 | 强度   | 一般   | 较高   | 高         |
|        | 韧性   | 差    | 好    | 差         |
|        | 阻隔性  | 差    | 差    | 一般        |
|        | 其他   | 不耐水解 | 柔软单一 | 透明性好，脆性较大 |
| 加工性能   | 差    | 较好   | 较好   | 生物相容，性能可调 |
| 储存性能   | 差    | 一般   | 差    | 较好        |
| 降解性能   | 堆肥   | √    | √    | √         |
|        | 土壤   | √    | ×    | ×         |
|        | 水体   | ×    | ×    | ×         |

• PHA系列产品应用场景广泛

PHA系列分子不同的属性指标意味着它们不仅可以用于不同的应用场景，如一次性制品、软质包装、纸塑复合等，还可以通过与不同结构的PHA（对应不同物理机械性能）及其他可降解材料的共混实现更好的物理机械性能，如与PLA共混提升其韧性、与PBAT共混提升其强度等。







## 2.3 PHA市场潜力巨大

本节对PHA行业不同发展阶段的市场规模进行测算，测算结果如下图所示。可见，PHA市场在短期、中期和长期的市场规模分别可以达到约629亿元、3,553亿元和1.2万亿元。

| PHA行业发展阶段            | 市场规模       | 测算相关说明                                                                                             |
|----------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 短期PHA市场<br>(2025年)   | 628.6亿元    | 该数据为根据中短期PHA市场测算逻辑及短期市场的部分假设测算的结果，部分数据来源同中期市场                                                      |
|                      | 440.0亿元    | 该数据为根据麦克阿瑟基金会统计的可堆肥材料需求量测算的结果                                                                      |
| 中期PHA市场<br>(2030年)   | 3,553.3亿元  | 该数据为根据中短期PHA市场测算逻辑及中期市场的部分假设测算的结果，部分数据来源为Statista、Grandviewresearch、Plasway、科学网、塑米城、海正上市招股书、行业研究报告 |
| 长期PHA终局市场<br>(2040年) | 12,507.4亿元 | 该数据为根据长期终局PHA市场测算逻辑一测算的结果，部分数据来源为Statista、National Graphic、Plastics the Fact 2019                  |
|                      | 12,422.0亿元 | 该数据为根据长期终局PHA市场测算逻辑二测算的结果，部分数据来源为Grandviewresearch、Statista、Research and Markets、Plasway           |

### 2.3.1 短期市场（2025年）

- 短期内，PHA生产成本仍将高于PLA，其市场需求主要为不便于回收、易泄露到环境中的场景，市场规模约629亿元。
- 2025年，仅麦克阿瑟基金会成员企业的PHA需求量可达125万吨，对应440亿元市场规模。

#### 2.3.1.1 短期PHA市场规模：629亿元

在未来3-5年的短期市场内，PHA的主要市场主要为不便于回收的强需求场景，如塑料袋、农用地膜、一次性餐饮具等，且PHA材料在可降解塑料中的渗透率相对较低。

本节沿用中期市场的测算逻辑对PHA短期市场规模进行测算，根据短期市场的情况调整的各项数据假设如下：

- ① 未来3-5年内，PHA生产成本将比PLA高出30%左右，售价将是PLA的1.5倍左右；
- ② 塑料袋、农膜、一次性餐饮具以及其他塑料包装膜材料中可降解塑料渗透率相对中期市场较低，假设分别为30%、20%、30%以及10%；
- ③ 塑料袋、农膜、一次性餐饮具以及其他塑料包装膜材料中的可降解塑料的PHA含量相对中期市场较低，假设分别为2%、5%、15%以及1%。

短期市场下，PHA销售单价为35,000元/吨。测算得出，未来3-5年内，PHA市场需求量约为180万吨，市场规模可达629亿元。



### 2.3.1.2 国际品牌商承诺2025年的需求规模：440亿

为了佐证市场规模的测算，本节根据麦克阿瑟基金会成员在2025年承诺100%包装可重复使用、可回收或可堆肥的愿景<sup>[23]</sup>，对其成员到2025年的可堆肥材料需求进行统计。具体测算逻辑是：

可堆肥材料需求量=（目前塑料使用量 - 塑料承诺绝对减少量）× [100%-2025年目标可回收塑料比重(%)-可重复使用塑料比重(%)]

根据此逻辑，测算得到2025年麦克阿瑟基金会成员对外公开披露的可堆肥材料的需求量为1,257万吨。PHA属于可堆肥材料的一种，若PHA在其市场中渗透率达到10%，则PHA市场需求量可达125万吨，对应440亿元市场规模。

### 2.3.2 中期PHA市场（2030年）

中期，PHA成本约达到1.5万元/吨，届时，PHA主要用于塑料袋、农用地膜、一次性餐饮具等领域，总市场规模约3,553亿元。

#### 2.3.2.1 中期PHA市场规模：3,553亿元

中期，综合考虑技术进步和原料多样化等因素，预测PHA成本将达到约1.5万元/吨，仍然高于PP、PE等传统塑料。因此，其销售将主要在于对可降解塑料有强需求的市场，如塑料袋、农用地膜、一次性餐饮具等，以及一部分除塑料袋以外的塑料包装膜市场。其中，塑料袋领域所使用的传统塑料主要为LDPE和LLDPE，农用地膜主要采用LLDPE，一次性餐饮具主要采用PP。

本节将基于以上PHA的主要应用场景分别计算各个场景的塑料材料需求量，进而推算中期市场的PHA市场规模，测算的各项数据假设如下：

- ① 以2020年各个应用场景的塑料材料市场规模及使用量为基础进行测算；其中全球塑料袋使用规模为220亿元，市场单价为10,000元/吨；全球农膜使用量通过我国农膜使用量数据及我国农膜使用量占全球比例3/4计算得出；
- ② 假设塑料袋、农膜、一次性餐饮具以及其他塑料包装膜材料中可降解塑料渗透率分别为60%、50%、60%以及30%；
- ③ PHA适用于软质材料，预计在塑料袋中的PHA添加比例较高；农膜对价格比较敏感，而PHA添加量的增大会导致价格上升。假设塑料袋、农膜、一次性餐饮具以及其他塑料包装膜材料中的PHA添加量分别为40%、10%、45%以及15%；
- ④ 中期市场下，PHA销售单价为25,000元/吨。

测算得出，PHA中期市场的市场需求量为1,421.3万吨，对应PHA市场规模为3,553.3亿元。

<sup>[23]</sup> ELLEN MACARTHUR FOUNDATION





### 2.3.3 长期PHA终局市场（2040年）

经测算，未来PHA极限成本可降至1万元左右。届时，PHA可以替代PP、PE作为包装材料，终局市场规模可超1.2万亿元。

#### 2.3.3.1 成本下探：极限成本1万元左右

PHA原料供应属于制造业，原材料成本占生产成本的比例较大，达50%。从原材料的选取和利用出发，未来成本下降的空间主要在于 ① 降低碳源单位成本，如采用毛棕榈油或更加便宜的均一化处理后的地沟油；② 通过生产工艺优化，如固定CO<sub>2</sub>降低发酵热，提高发酵转化率和提取得率，降低单位能耗，或通过提高单台发酵罐装液量等方式优化储存。

以棕榈油为原料生产PHA为例，通过菌株改造提高发酵转化率与提取得率，可以将每吨PHA生产消耗的棕榈油控制在1.2吨。通过在棕榈种植园当地建炼油厂，每吨棕榈油成本降低至4,000元/吨左右。加上规模效应下制造费用、单位人工成本的有效优化，每吨PHA生产成本可以降至1万元左右，与其他可降解材料从成本上相比处于中间位置。

| 生产成本（元/吨） | PBAT  | PHA    | PLA    |
|-----------|-------|--------|--------|
| 直接材料（含辅料） | 7,030 | 4,234  | 8,750  |
| 制造费用      | 1,272 | 4,552  | 1,987  |
| 直接人工      | 200   | 1,787  | 756    |
| 总计        | 8,502 | 10,573 | 11,493 |

来源：海正上市招股书、蓝晶微生物、行业研究报告等

### 2.3.3.2 终局市场规模：超1.2万亿

与PP、PE塑料相比，PHA具有类似的性能，尽管短期成本较高，长期来看PHA成本有望下探到1万元左右，售价与塑料PP、PE价格相比向上浮动20%，结合其环境保护价值，合理预测终局场景下，PHA将完全替代PP、PE材料作为包装主要用材料。

本节对PHA的终局市场规模进行具体测算，为确保测算结果可靠，使用两种测算逻辑进行测算。

#### • 测算逻辑一：

终局场景下，PHA替代PP、PE的包装用途。测算全球用于包装的塑料消费量，根据包装用塑料中PP、PE的占比，得到PP、PE包装用途的消费量，即为PHA市场需求量。结合PHA终局市场单价，得到终局市场规模。

#### • 测算的各项数据假设如下：

- ① 考虑到PP、PE塑料行业较为成熟，未来增长空间比较小，因此本节在利用PP、PE塑料行业的市场规模来测算PHA终局市场规模时，不考虑市场的增长，以2020年全球塑料产量为基础进行测算；
- ② 根据《国家地理》杂志统计，全球塑料消费量中占比最大的为塑料包装，占比约为40%；
- ③ PP和PE作为塑料包装中的主要材料，在包装材料中占比约71%；
- ④ 在终局市场下，PHA完全替代PP、PE材料应用于包装中，即PHA市场需求量等同于PP、PE包装材料需求量；
- ⑤ PHA在终局市场的单价为12,000元/吨。

测算得出，全球用于PP、PE包装的塑料产量约10,422.8万吨，PHA终局市场规模将达12,507.4亿元。

#### • 测算逻辑二：

终局场景下，PHA替代PP、PE的包装用途。PE分为LDPE、LLDPE、HDPE三种。PP、PE包装材料使用量可以细分为PP包装用量、LDPE包装用量、LLDPE包装用量、HDPE包装用量。各自的包装用量等于材料产量与对应材料应用于包装材料比例的乘积，通过加总可以得到对应的PP、PE包装材料使用量，即为PHA市场需求量。结合PHA终局市场单价，得到终局市场规模。

#### • 测算的各项数据假设如下：

- ① 同测算逻辑一，以2020年PP、PE各细分材料的全球市场规模为基础进行测算；
- ② 根据Plastic The Fact，在所有PP材料中，应用于包装材料的占比为44%；在所有HDPE、LDPE、LLDPE材料中，应用于包装材料的占比分别为60%、70%、70%；
- ③ PP材料的市场单价10,000元/吨；HDPE、LDPE、LLDPE材料的市场单价分别为10,000元/吨，12,500元/吨，9,400元/吨；
- ④ 在终局市场下，PHA完全替代PP、PE材料应用于包装中，即PHA市场需求量等同于PP、PE包装材料需求量；
- ⑤ PHA在终局市场的单价为12,000元/吨。

测算得出，全球PP、PE包装市场需求量为10,351.7万吨，PHA终局市场规模12,422亿元。

综上，在两种测算逻辑下，PHA全球市场需求超1亿吨，终局市场规模超1.2万亿元。



2.3.3.3 生物质可充分满足供给

长期来看，地球生物质供给可以满足PHA终局市场规模需求，不仅可以使使用植物油作为原料，还可以使用第二代碳源（秸秆、废弃烹饪油）、第三代碳源（甲烷、二氧化碳），确保PHA的供应稳定。

长期来看，得益于提取技术的进步和原料损耗的减少，以棕榈油为例，未来生产单吨PHA消耗的棕榈油可以降低至1.2吨。目前全球油棕大约1,900万公顷，产量约8,100万吨棕榈油，对应PHA最大产量为6,750万吨，已经可以产生较大的供应量。此外，玉米也可作为原料被利用，可通过将玉米分解为葡萄糖，再以葡萄糖为原料生产PHA。当前全球玉米产量为10.5亿吨，除去食品用途（11%）、饲料用途（53%）、生物燃料和其他用途（14%），仍有22%可利用，对应PHA最大产量为4,200万吨。

秸秆资源化是可持续发展农业的大势所趋，中国约有一半的秸秆待资源化利用。秸秆主要成分为纤维素，可通过纤维素和半纤维素水解制糖，再以葡萄糖为原料生产PHA。满足1亿吨PHA的需求约需要6.5亿吨秸秆，仅占全球秸秆产能不到20%，可以充分满足PHA终局市场的需求规模。

此外，除了生物质原料，PHA还可以通过固定甲烷、二氧化碳等无机碳源进行生产。未来PHA原料多元化将增强PHA材料的供应稳定性。以下列出不同类型的碳源及其特点，此处的碳源分代定义适用于所有的生物制造过程。

不同碳源的分类与特点

| 碳源代数  | 类型    | 代表碳源              | 特点                                      |
|-------|-------|-------------------|-----------------------------------------|
| 第一代碳源 | 传统生物质 | 玉米淀粉，大豆油，菜籽油      | 易获得，供应稳定，部分存在与人争粮问题                     |
| 第二代碳源 | 非粮生物质 | 秸秆，废弃烹饪油，有机废水，咖啡渣 | 潜在供应量大，目前存在技术瓶颈或回收难度大，不存在与人争粮问题         |
| 第三代碳源 | 气体碳源  | 甲烷，二氧化碳，工业尾气      | 潜在供应量庞大，目前存在技术瓶颈，更有效解决碳排放问题，可能需要额外的能量供给 |







## PHA行业综述

自1992年初次进行商业化探索至今，PHA行业已经有三十年的历史。本章将回顾PHA行业的发展历程，对主要PHA供应商如Kaneka、Danimer、CJ-Bio以及蓝晶微生物等的概况进行介绍。此外，还将讨论PHA的生产与出售、PHA类型及材料应用和PHA材料在制备上存在的难点：

- PHA的产业化历经波折，但在全球政策的助力下，PHA市场的巨大前景吸引着不少PHA企业将扩产计划提上日程。
- 从PHA生产来看，以油脂为原料比以糖类为原料的质量转化率更高。以棕榈油和葡萄糖为例，现阶段以棕榈油为原料生产PHA成本更低。从PHA出售来看，PHA产品目前由于供需矛盾突出，售价处于高点，未来有望随商业化后成本降低而下降。
- 从PHA类型来看，PHA具有PHB、PHBV、PHBH、P34HB等多种产品，有其各自的应用场景，但其中PHBH和P34HB的综合性能更好。
- 从PHA材料制备的难点来看，PHA材料工业化现状面临着产品纯度低带来的气味和颜色等问题，主要难点在于PHA与胞内、外杂质的分离，克服这一难点将是PHA制备技术的主要发展方向之一。





## 3.1 PHA行业发展历程

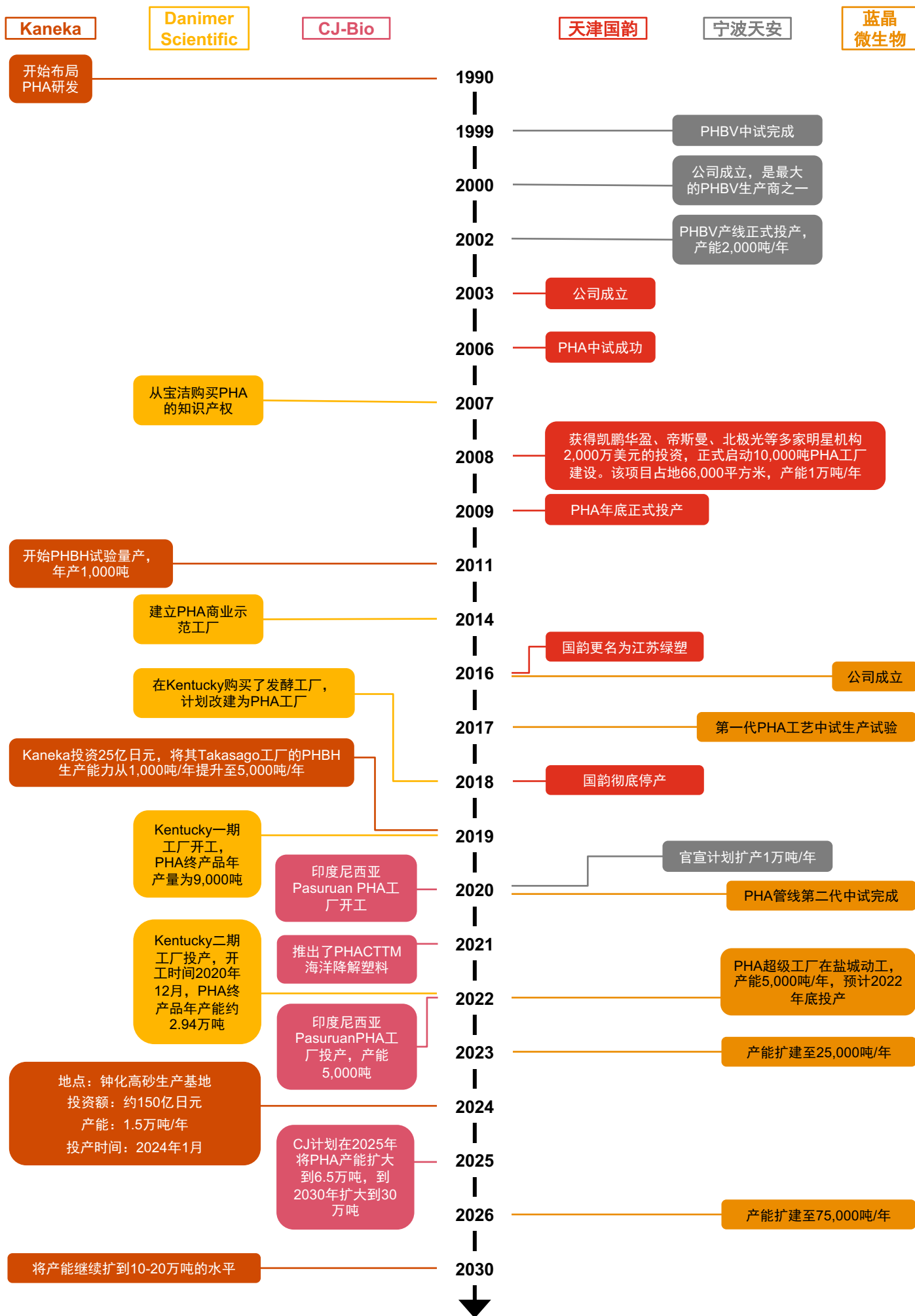


PHA的产业化过程历经波折。1992年是PHA产业化的开端，当时英国阿斯利康（AstraZeneca）希望建成首个产业化生产工厂，然而由于PHA材料的生产成本高达8-10美元/千克（约现在的17-21美元/千克，对应人民币118-146元/千克），比传统塑料成本要高一个数量级，建厂计划被迫停止。由于PHA材料同时具有生物基、类塑性、可降解的优良特性，厂商们对于PHA的商业化探索并未止步。

近三十年来，来自英、美、日、中等国的多家公司为PHA实现规模化生产做出了诸多尝试。随着合成生物学技术的发展，人们获得了更加高产的PHA生产菌株，极大提升了PHA产量，有效降低了PHA的生产成本。此外，在全球政策的助力下，PHA市场的巨大前景也越发清晰明朗，不少PHA企业将扩产计划提上日程。



# 部分PHA企业的发展历程







## 3.2 PHA主要企业概览

为了更好地了解PHA行业情况，我们对5,000吨/年以上生产规模的厂商情况进行了梳理：

### • Kaneka

Kaneka(カネカ)，脱身于钟渊纺织，是1949年在日本成立的化工企业，主营业务包括化成品、功能性树脂、发泡树脂、食品、医药品、医疗器械、电子材料、太阳能电池、合成纤维等，PHA是该企业旗下的新材料。Kaneka从上世纪90年代开始布局PHA研发，2011年实现1,000吨/年PHA中试生产。2019年底，Kaneka 5,000吨/年的PHA工厂投产。

### • Danimer

Danimer Scientific成立于2004年，以PLA改性加工起家。2007年，Danimer从宝洁购入PHA技术，扩大其生物基材料平台。目前，Danimer肯塔基一期、二期工厂已投入运营，合计PHA终产品（产品为改性料，除PHA外含其他成分）产能达38,500吨/年，是目前全球PHA产能最大的企业之一。2021年，Danimer收购Novomer公司，用以生产更多类型的PHA基聚合物材料。

### • CJ-Bio

CJ-Bio隶属于韩国希杰集团，集团经营范围覆盖食品与服务、生物科技、物流与新流通、娱乐与媒体四大行业。CJ于2016年收购Metabolix公司的PHA业务，并于2019年成立CJ-Bio事业部，基于Metabolix公司的技术进行PHA材料开发。2022年5月，CJ-BIO位于印尼巴苏鲁安的首个PHA工厂正式投入运营，产能5,000吨/年。

### • RWDC

RWDC是Roland Wee和Daniel Carraway共同在新加坡创立的PHA企业。创始人Daniel Carraway曾为Danimer股东。在美国佐治亚州雅典市已有5,000吨生产线，还有25,000吨产能正在建设中。

### • 蓝晶微生物

北京蓝晶微生物科技有限公司成立于2016年10月，是一家基于合成生物技术从事分子与材料创新的企业。公司的核心团队来自于清华、北大、中科院等顶尖科研院所和世界500强企业。主要产品类型为PHBH。现有5,000吨/年产能即将建成，预计2022年底投产，另规划到2026年产能扩建至75,000吨/年。

| 企业名称      | Kaneka                                                                                                                                 | Danimer                                                                              | CJ-Bio                                                     | RWDC                                                                         | 蓝晶微生物                    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| 建立PHA业务时间 | 1992                                                                                                                                   | 2007                                                                                 | 2016                                                       | 2015                                                                         | 2016                     |
| 所属国家      | 日本                                                                                                                                     | 美国                                                                                   | 韩国                                                         | 美国/新加坡                                                                       | 中国                       |
| PHA产品     | PHBH                                                                                                                                   | PHBH                                                                                 | P34HB,P4HB                                                 | PHBH复合物                                                                      | PHBH                     |
| 商标        | Green Planet                                                                                                                           | Nodax                                                                                | Phact                                                      | Solon                                                                        | Bluepha                  |
| 原料        | 植物油                                                                                                                                    | 植物油                                                                                  | 糖类                                                         | 植物油                                                                          | 植物油、糖类                   |
| 产能(吨/年)   | 5,000                                                                                                                                  | 19,700                                                                               | 5,000                                                      | 5,000                                                                        | 5,000                    |
| 认证情况      | FDA和EFSA食品接触认证<br>日本生物基认证，TÜV生物基，<br>工业堆肥，家庭堆肥认证，<br>日本工业堆肥认证，<br>BPI工业堆肥认证，<br>TÜV海洋可降解，淡水可降解<br>认证<br>ISO9001质量认证，<br>RSPO（原材料）供应链认证 | FDA和EFSA食品<br>接触认证<br>TÜV土壤可降解，<br>淡水可降解，海洋<br>可降解认证，<br>TÜV工业堆肥，家<br>庭堆肥，生物基<br>认证。 | TÜV可堆肥，<br>家庭可堆肥，<br>土壤可降解，<br>淡水可降解，<br>生物基认证，<br>OWS海洋降解 | FDA食品接 触<br>EFSA食品可接 触<br>TÜV生物基，<br>工业堆肥，家庭<br>堆肥，土壤可降<br>解，海洋可降解，<br>淡水可降解 | 生物基材料认证<br>欧盟食品接 触<br>材料 |

\*产能指纯料产能

其他生产规模的国外PHA厂商：

| 企业名称      | Bio-on                      | Full Cycle Bioplastics | Nafigate     | Newlight Technologies                                                                     | Biomer               | Mango Materials |
|-----------|-----------------------------|------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------|
| 建立PHA业务时间 | 2018                        | 2014                   | 2012         | 2003                                                                                      | 1994                 | 2012            |
| 所属国家      | 意大利                         | 美国                     | 捷克           | 美国                                                                                        | 德国                   | 美国              |
| PHA产品     | 主要生产 PHB, PHBV; 其他含有4HV的PHA | P3HB和PHBV              | P3HB         | PHB                                                                                       | P(3HB), P(3HB-co3HV) | P(3HB)          |
| 商标        | Minerv                      | -                      | Hydal        | AirCarbon                                                                                 | Biomer               | YOPP+           |
| 原料        | 糖类                          | 有机废水                   | 烹饪废弃油、咖啡渣    | 二氧化碳和甲烷                                                                                   | -                    | 甲烷              |
| 产能(吨/年)   | 已破产                         | -                      | 100-200      | -                                                                                         | 1,000                | 中试规模            |
| 认证情况      | TÜV淡水可降解<br>USDA生物基产品       | -                      | Brno大学海洋降解报告 | 负碳: ISO 14046-3<br>PAS2050:2008/2011<br>FCN 1754食品可接触<br>ASTM D6400工业堆肥<br>ASTMD6691海洋可降解 | -                    |                 |



其他生产规模的国内PHA厂商：

| 企业名称    | 宁波天安                                             | 国韵       | 意可曼                                    | 微构PHA-Builder | 麦得发                           | 中粮         |
|---------|--------------------------------------------------|----------|----------------------------------------|---------------|-------------------------------|------------|
| 建立时间    | 2000                                             | 2003     | 2008                                   | 2021          | 2019                          | 2021*      |
| 所属国家    | 中国                                               | 中国       | 中国                                     | 中国            | 中国                            | 中国         |
| PHA产品   | PHB、PHBV(2%HV)                                   | P34HB    | P34HB                                  | PHBH、P3HB4HB  | P34HB、P3HB                    | PHBH、P34HB |
| 商标      | ENMAT                                            | Greensol | Ecomann                                | -             | Machgreen, Machnoon, Machloom |            |
| 原料      | 糖类                                               | -        | -                                      | 糖类、植物油        | 糖类、植物油                        | 糖类、植物油     |
| 产能(吨/年) | 2,000                                            | 已破产      | -                                      | 1,000         | 1,000                         | 1,000      |
| 认证情况    | 欧盟REACH认证<br>BPI可堆肥认证<br>欧盟食品可接触认证<br>TÜV海洋可降解认证 |          | DIN<br>CERTCO<br>(Cert.No.:7<br>W0127) | -             | -                             | -          |





## 3.3 PHA生产成本与售价

### 3.3.1 不同原料路径下的PHA生产成本

一般来说，生产原料约占PHA生产成本的一半。目前PHA生产的主要原料为植物油和糖类，本节以棕榈油和葡萄糖为例，进行相关成本的测算：未来3-5年内，PHA生产成本将比PLA高出30%左右，售价将是PLA的1.5倍左右。

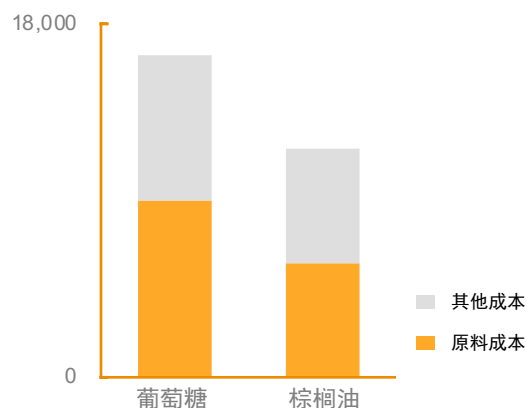
- 以葡萄糖为原料生产PHA，理论质量转化率为47.7%。在理论情况下，每生产1吨PHA，需要消耗葡萄糖2.1吨，按照市场价格4,300元/吨单价计算，得到每吨PHA的原料成本9,015元。
- 以棕榈油为原料生产PHA，理论质量转化率为137.5%。在理论情况下，每生产1吨PHA，需要消耗棕榈油0.73吨，按照市场价格8,000元/吨计算，得到每吨PHA原料成本5,839元。

按照以上计算过程，以棕榈油为原料比以葡萄糖为原料的每千克PHA原料成本低36%。成本差异的主要来源在于不同原料合成PHA的转化率不同，而转化率的差异则来源于不同原料到PHA的代谢途径不同。葡萄糖经过糖酵解途径会损失三分之一的碳原子（变为二氧化碳），而棕榈油经过 $\beta$ -氧化途径不会损失碳原子，因此理论转化率更高。虽然棕榈油路径的理论转化率比葡萄糖路径更高，但在具体生产场景中，使用何种原料、能达到多高的转化率，是由底盘菌种类及菌株改造能力决定的。

| 原料       | 葡萄糖      | 棕榈油         |
|----------|----------|-------------|
| 代谢途径     | 糖酵解      | $\beta$ -氧化 |
| 理论质量转化率  | 47.7%    | 137.5%      |
| 原料价格     | 4,300元/吨 | 8,000元/吨    |
| 理论单吨原料成本 | 9,015元   | 5,839元      |

\*以生产PHB为例

每吨PHA对应生产成本的理论极限（单位：元）



来源：单耗原料取自理论转化，原料单价取自市场价格

目前，领先企业正在探索更可持续的原料路径，例如以二氧化碳和有机碳源同时作为原料来进行PHA的商业化生产。有机碳源不仅可以使用的糖类、植物油，还可以使用其他可再生糖类及油类，如秸秆糖、动物油、地沟油等。未来，PHA的生产效率及生产过程的可持续性将进一步提升。

### 3.3.2 PHA售价

当前PHA与PLA、PBAT的单吨售价区间如下所示。短时间内，由于PHA发展阶段较短，PHA行业处于产业化初期，供给量有限，供需矛盾突出，PHA售价处于高点。未来随着PHA的商业化成熟，供应量上升，成本降低，PHA的售价将会明显下降。

| 材料类型 | 单吨售价区间（元）     |
|------|---------------|
| PHA  | 50,000-80,000 |
| PLA  | 22,000-24,000 |
| PBAT | 20,000-25,000 |

来源：中国塑料协会降解塑料专业委员会及生物降解材料研究院

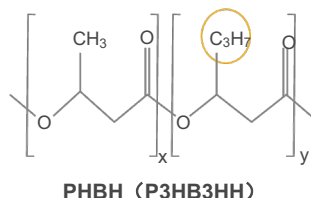
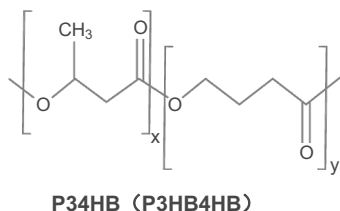
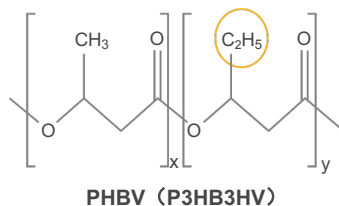
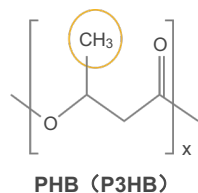


## 3.4 PHA类型及材料应用



### 3.4.1 PHA类型

目前市面上在售的PHA产品类型主要包括PHB、PHBV、P34HB以及PHBH等。虽然不同PHA产品类型的问世时间有先后顺序，但并不存在代际差异，在实际应用中各有优势。



注：市面上主要的PHA产品种类

#### • PHB

PHB是一种以3HB为单体的短链均聚物，属于结晶型材料，质硬，可用于注塑和纤维。PHB是最早商业化探索的PHA类型之一，然而熔点接近热分解温度导致PHB的热加工窗口比较窄，因此也有其他厂商通过增加第二单体的形式，提高材料综合性能。目前美国公司Newlight正在使用PHB生产制造一次性餐饮具、钱包、眼镜框等产品。

#### • PHBV

PHBV是一种结晶型的中链共聚物，质硬，可用于注塑，生产较为硬质的材料。天安为PHBV的主要厂商，荷兰生物聚合物公司Helian正在以天安的PHBV为主要原料探索仿PP的行李箱应用。另外，由于PHBV脆性较高，可以与无定型PHA产品如P4HB共混，中和结晶性，得到相容性更好的材料。

#### • P34HB

P34HB是一种短链共聚物，根据其4HB比例的不同，可以区分为结晶型和无定型。4HB单体比例在5-15%时，P34HB为结晶型；但在15%-60%之间，P34HB为无定型结构；4HB单体比例在60%及以上时，P34HB又为结晶型。PLA材料由于其固有的脆性和低延展性严重限制了其在包装中的应用，而无定型PHA如P34HB（4HB>50%时）与其共混，可以有效提高共混物的韧性。韩国公司CJ正在规模化生产无定型P34HB。

#### • PHBH

PHBH作为中链PHA共聚物，同样可以根据HH单体比例的差异区分为结晶型和无定型。结晶型PHBH既能提供一部分刚性，又具有一定柔韧度，可适用于咖啡胶囊等产品的生产。此外，已有供应商成功将PHBH应用于一次性餐具叉、勺、吸管、可降解塑料袋等产品。当HH比例大于30%时，PHBH为无定型材料，目前蓝晶微生物正在积极开发高HH比例的无定型PHBH。



3.4.2 不同PHA类型的机械与加工性能比较

从物理性能上看，PHBV与PHB强度较高，韧性相对较差，适用于注塑、纤维等应用；P34HB与PHBH的第二单体比例具有较高的灵活度，可以实现不同的强度与韧性，可应用于吹塑、流延、注塑、纤维等多种应用场景。

从加工性能上看，PHBV与PHB加工窗口相对较窄，加工性能较差或差；而PHBH、P34HB的加工窗口更宽，具有更好的加工性能。

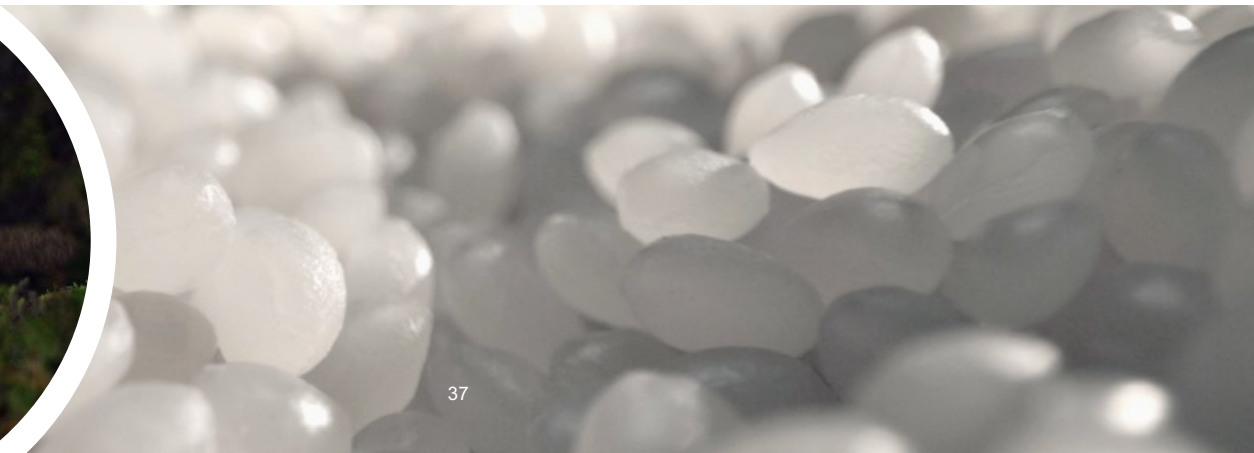
| 项目   | PHBH、P34HB  | PHBV  | PHB   |
|------|-------------|-------|-------|
| 强度   | 高低可调        | 较高    | 较高    |
| 韧性   | 高低可调        | 较差    | 差     |
| 应用   | 吹塑、流延、注塑、纤维 | 注塑、纤维 | 注塑、纤维 |
| 加工性能 | 较好          | 较差    | 差     |

3.4.3 材料专利对比

对PHA包装、薄膜、一次性餐具方面的不同材料的同族专利数量进行对比，可以看到PHBH和PHBV的同族专利数量占比明显高于其他PHA材料。

对国外企业具有的不同材料的同族专利份额占比进行对比，可以看到PHBV的研究主体相对较为分散，PHBH的研究主体则较为集中，其中Kaneka以PHBH为原材料的研究专利占以上应用方向比例高达66%。

| PHBH                 |        |    | PHBV    |        |    | P34HB   |        |    | PHB     |        |    |         |
|----------------------|--------|----|---------|--------|----|---------|--------|----|---------|--------|----|---------|
| 同族<br>专利<br>数量       | 155组   |    |         | 184组   |    |         | 42组    |    |         | 92组    |    |         |
|                      | 占比     |    |         | 32%    |    |         | 38%    |    |         | 8%     |    |         |
| 国外<br>企业<br>份额<br>占比 | Kaneka | CJ | Danimer | Kaneka | CJ | Danimer | Kaneka | CJ | Danimer | Kaneka | CJ | Danimer |
|                      | 66%    | 3% | 0       | 15%    | 5% | 0       | 33%    | 7% | 0       | 7%     | 4% | 0       |



同时，根据专利文献记载，PHBH在上述应用方向具有更好的物性优势。

| 产品    |      | 物性            | 参考专利文献                                     |
|-------|------|---------------|--------------------------------------------|
| 薄膜    | 延伸率  | PHBH>PHBV>PHB | JP2006045365A                              |
|       | 老化速度 | PHBH<PHBV     | US5254607A<br>US7208535B2<br>JP2005162884A |
| 吹塑制品  | 熔体粘度 | PHBH<P34HB    | JP2020122062A                              |
|       | 缩减时间 | PHBH<P34HB    | WO2019022008A1                             |
| 一次性制品 | 延伸率  | PHBH>PHBV>PHB | JP2006045365A                              |
|       | 老化速度 | PHBH<PHBV     | US5874040A                                 |

研究发现，PHB具有高结晶度，脆而硬，柔韧性极低；PHBV虽然在PHB的基础上改善了脆性，但两者的易老化性导致二者仍然难以在制备薄膜等制品上获得优势。而延伸率大于PHBV和PHB且老化速度小于PHBV的PHBH，在制备薄膜和一次性制品上更具有优势（参考JP2006045365A、US5254607A、US7208535B2、JP2005162884A）。

在通过吹塑工艺制备瓶、管以及硬质包装的过程中，调整树脂熔体粘度以及成型时间，是提高制备效率以及质量的重要参考指标；在选用PHBH与P34HB作为制备的原料时，PHBH比P34HB具有更低的粘度以及更短的成型时间，进而可以有效减少吹塑制品的粘连，同时提高加工效率（参考JP2020122062A、WO2019022008A1）。





## 3.5 PHA材料制备难点

### • PHA分离提取工艺进展较慢

生物产品的生产由上游的发酵工程和下游的分离工程两部分组成，发酵过程主要解决如何丰产的问题，而分离过程主要解决如何丰收的问题。随着合成生物技术、基因编辑、测序等技术的快速发展，菌株开发的速度正在大幅度加快；随着发酵通量的提升，发酵工艺开发、菌株测试的速度也在快速提升。但分离提取工艺的进步是较慢的，科研投入也较少，这也在一定程度上阻碍了合成生物产业的整体发展。PHA目前仍未能实现大规模量产，原因之一是其分离提取工艺进展较为缓慢。

### • 胞内PHA聚合物与杂质难以有效分离

生物反应的产物一般是由细胞、胞外代谢产物、胞内代谢产物、残留底物及其他成分组成的混合水溶液。部分材料如PLA、PBAT的生物基单体为胞外产物，对于这类材料而言，不仅要关注聚合工艺，还要高度重视生物基单体的分离纯化，单体纯度将直接决定聚合物的纯度。

与上述材料不同，PHA作为胞内产物，在细菌细胞内已经完成聚合，不需要经过先生成3-羟基丁酸单体再在体外聚合的流程。且随着合成生物技术的发展，细菌不仅能合成简单的PHB均聚物，而且可以合成其他均聚物以及短链中链共聚物，从而赋予PHA广阔的理化性质和用途。但胞内产物也为分离提纯增加了新的难点，即在工业条件允许及成本投入合理的情况下，如何将PHA与胞内、胞外的杂质有效分离。因为胞内外的杂质，尤其是有机杂质，在进行热加工时，可能会导致材料颜色变深和难闻气味释放，影响产品质量。PHA与杂质的分离难点困扰PHA研发人员几十年，是目前PHA生产以及量产的绊脚石。

### • PHA提取与除杂

PHA提取工艺按照使用溶剂类型可分为有机溶剂提取和水相提取，其中有机溶剂提取由于溶剂使用量大、要使用多种溶剂以及溶剂回收难度大等问题，现已基本被放弃。水相工艺主要包括细胞破碎、酶解、固液分离、干燥等工序，是当前各大公司使用的主要工艺。各家公司会根据上游发酵的情况来开发适用于自己的工艺流程，比如对于嗜盐菌为生产菌株的PHA生产企业来说，下游脱盐是一个必备步骤。

PHA提取工艺在实验室水平和工业水平有很大差别。一方面是固液分离的方法不同，在实验室条件下，可

以通过高速离心把料液两相彻底分离，而工业上通常使用工业级的分离设备，其本质是一个浓缩的过程，并不能将固液两相分开，若想要达到实验室水平，需要增加离心分离的次数并增加耗水量。另一方面是干燥方式的不同，实验室往往以简单的批次烘干为主，而工业生产则较多使用连续干燥。PHA提取的某些工艺在实验室水平和工业水平的不同，导致实验室的实验成果难以直接应用到工业生产中，需要通过更多的中试试验等进一步优化工业投产的工艺流程。

PHA除杂在工业生产中也很难达到实验室的效果，若在工业生产中无法有效控制有机杂质，其生产的PHA材料往往有气味和颜色问题。为了掩盖产品瑕疵，厂商可能会在粒料加工过程中加入各种各样的助剂来遮盖颜色和气味，但此方法治标不治本，反而会给下游的厂商或消费者带来较差的体验。

### • 关于解决PHA材料制备难点的案例

#### 蓝晶微生物

蓝晶微生物积极整合PHA研发领域的最新进展以及多年的自主创新成果，开发出一套具有完全自主知识产权的提取工艺，解决了PHA丰产不丰收，产品质量差，纯度低的问题，并且在独有的数字化中试平台上实现了全年无停歇的连续运行，并且该技术仍然在不断进化，各项技术指标仍然在不断提升。

#### 天安

天安所产的PHA种类主要为PHB和PHBV，年产量为1,500吨左右。理论上，大宗产品的成本往往具有较大的规模优势，天安的产量规模并不具备很大的优势，但能够从建厂至今屹立20年不倒，其独到之处一是开发了一种低成本高纯度提取工艺，二是找到了材料的独特应用。其中最为关键的就是这项提取技术，可见对于PHA厂商来说，能够解决PHA材料的难点对于其短期和长期的发展都具有重大意义。

#### 国韵

天津国韵公司也曾启动PHA的大规模量产工作，但最终失败告终。从中总结经验，失败的原因可能是商务上过于冒进和技术上不够成熟，其中技术上的不成熟主要表现在提取工艺的不稳定性，以及产品质量较差且不稳定。



## 产业链价值： 中短期内集中在中游供应

### • 与PHA相似的产业链价值

通过观察与PHA相似行业的产业链，例如石油化工（聚氨酯-MDI）、传统塑料、可降解塑料（PBAT、PLA）行业等，总结上述相似产业链的价值环节变迁过程：产业链前期价值环节集中在中游，行业集中度高且拥有对下游的较强议价能力；后期中游向上游延展整合（“中上游”），把控核心原材料供应，实现长期的价值链最大化。

### • PHA产业链的价值逻辑

中短期，技术突破使得PHA在产品质量和成本层面具备商业化可行性，进一步实现产品稳定供应将是行业早期发展的核心，因此中短期产业链价值将主要汇集在中游生产制造环节；长期，由于原料在生产成本中占一半以上比重，而技术迭代趋于成熟，成本的进一步下探依赖原材料一体化利用，长期PHA产业链价值将向上游原料延伸。





## 4.1 定义PHA产业链

生物降解塑料产业链的上游为原材料的生产。按照原料来源分类，塑料可分为生物基塑料和石油基塑料。PHA作为生物可降解材料，与传统石油基塑料在产业链上游存在差别，传统石油基塑料产业链的上游原料主要是不可再生资源，如原油加工得到的石脑油、蒸汽裂解煤等，而PHA的上游原料主要为可再生生物质。生物降解塑料的产业链结构如下：

### 产业链上游

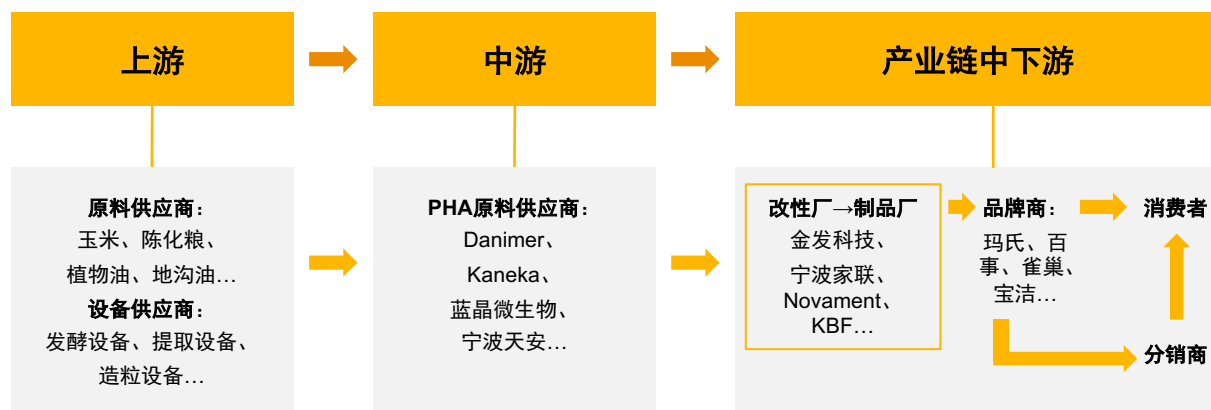
主要是各种可再生物质（包括糖类和油脂等）原料的供应商，以及中游发酵、提取、造粒等生产工艺所需设备的供应商。

### 产业链中游

主要是PHA供应商，由PHA供应商对上游原料进行微生物发酵，后经提取、造粒等工艺，得到PHA原料（粉末或粒子形态）并销售给产业链中下游，代表企业如日本Kaneka，美国Danimer，韩国CJ等。

### 产业链中下游

主要为改性厂、制品厂和品牌商等，其中，改性厂将原料与其他辅助添加剂混合，提高某种或某些特定的材料性能以满足生产需要，制品厂将材料直接加工成制品，品牌商得到制品后做成终产品向下游销售，最终到达消费者端。





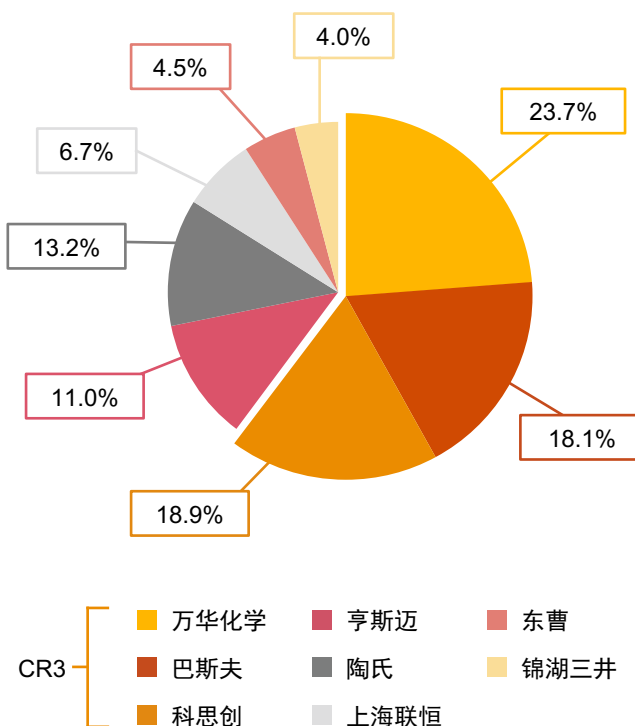
## 4.2 相似产业链的价值分配

- 聚氨酯（MDI）产业链的中上游价值最高，长期来看中游企业将向上下游延伸

**产业链格局：**聚氨酯（MDI）行业呈现出中上游寡头垄断、下游结构分化的总体趋势。在中上游环节，以产能维度计算的CR5达91%<sup>[24]</sup>，万华化学、科思创等少数厂家垄断MDI中上游供应，掌握着绝对的定价权。而产业链下游的企业主要生产各类聚氨酯细分产品，如软泡、硬泡、浆料等，集中度较低，厂商数量庞大，中小企业占比高达80%以上<sup>[25]</sup>。且下游的应用比较分散，因此对定价等方面的话语权较弱，例如在聚氨酯产业链中，在下游应用占比最大的建材行业仅占聚氨酯总需求的28.6%<sup>[26]</sup>。

**产业链价值环节变迁过程：**中短期拥有MDI技术和生产装置的中游企业具有寡头垄断性质和行业定价权。长期来看，中游企业趋向于向上下游延伸，实现全产业链布局，从而进一步降低成本。

2020年全球MDI企业产能分布情况

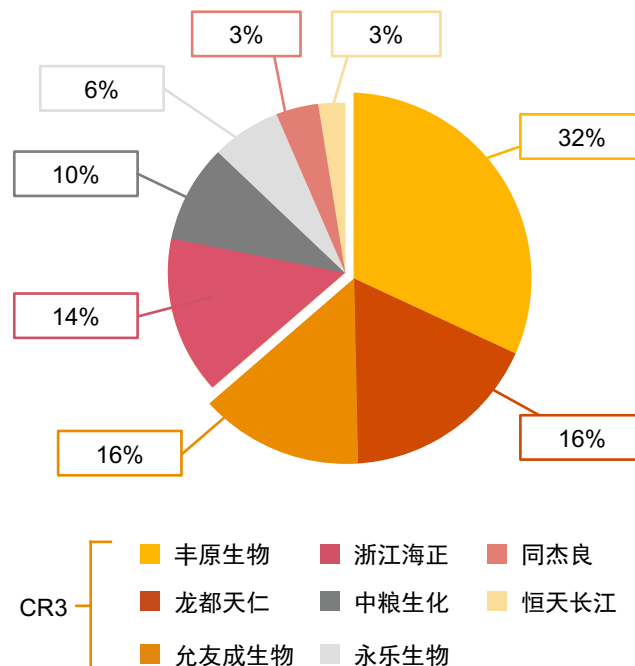


- 传统塑料产业链的中上游价值最高，中上游一体化实现产业链价值最大化

**产业链格局：**中国传统塑料产业的中上游行业集中度较高，主要为石化和煤化工企业，其中大型石油化工企业的产量占据塑料供应总量的80%以上。在石油化工企业中，中石化和中石油作为龙头企业，占据60%以上的份额，具有寡头垄断性质，议价能力较强，拥有该产业链上最大比例的利润。产业链下游较为分散，主要是品类繁多的各种塑料加工商。

**产业链价值环节变迁过程：**由于中国石化产业的原料端集中度高，传统塑料产业天然就存在中游塑料生产商与上游石油原料商整合为一体的现象，完成中上游一体化方能实现产业链价值最大化。

2020年中国PLA企业产能分布情况



[24] 《万华化学报告（二）：解析MDI行业运行规律》，行业研究报告

[25] 《MDI产业链梳理：供需格局如何？如何判断后期MDI价格？》，行业研究报告

[26] 《聚氨酯行业研究及万华化学深度解析》，行业研究报告

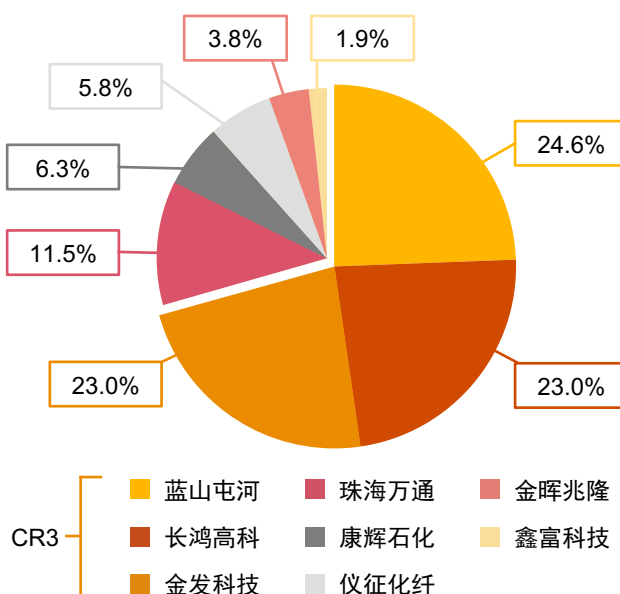


• 中短期内PLA产业链的中游价值最高，长期来看全产业链一体化是必然趋势

**产业链格局：**PLA行业当前集中度较高，行业CR3为64%。PLA产业链中上游供应商一般为PLA企业，其中有能力同时生产丙交酯和PLA且拥有核心生产技术及装置的厂商的议价能力较强。产业链下游主要为医疗、包装、工业等领域，结构较为分散，因此下游市场议价能力较弱。

**产业链价值环节变迁过程：**中短期内产业链价值位于生产丙交酯及PLA的中游企业。长期来看产业链价值环节将从中游向上游原料乳酸延展，全产业链一体化带来的成本优势将成为PLA企业的核心竞争力。

2021年国内PBAT企业产能分布情况

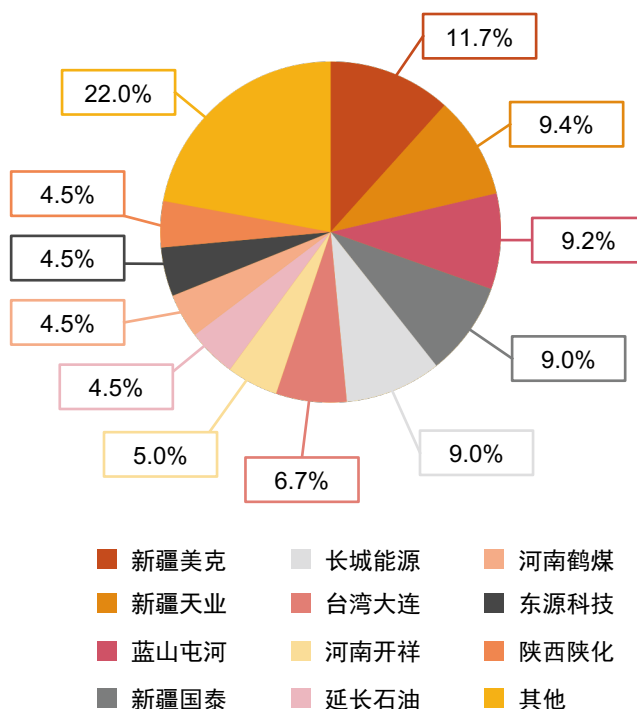


• PBAT产业链的中上游价值最高，中上游一体化体现企业核心竞争力

**产业链格局：**PBAT产能行业集中度高，截至2021年底，龙头新疆蓝山屯河化工股份有限公司PBAT产能为12.8万吨/年，产能全国乃至全球第一，国内产能占全国比重超过24%。排名第三的金发科技拥有PBAT产能12万吨/年，产能占比约为23%。下游消费市场主要是农用膜、包装、工业等领域，议价能力较弱。

**产业链价值环节变迁过程：**中短期内产业链中游仍会存在产能紧缺，因为上游原料BDO的产能扩张成为限速因素。长期产业链的价值环节将延展到PBAT原料端（BDO），实现中上游一体化将是企业核心竞争力的体现。目前行业龙头蓝山屯河已经布局PBAT中上游产业链，提高一体化水平，以降低生产成本。PBAT中上游一体化的产业格局已初步成形。

2020年国内BDO企业产能分布情况



综上，石油化工、传统塑料和可降解塑料行业的产业链价值分配的变迁具有共同的特征：前期价值环节集中在中游，后期通过向上游延伸整合，实现长期的价值最大化。通过比对发现，PHA行业在中短期由于产品供应稳定的重要性，产业链价值也集中在中游生产制造环节，长期将由于原料成本占比较大而发生中上游环节的整合，与上述几个行业有相似的产业链价值分配逻辑。下文将分析PHA产业的现状，并对其未来发展作出推演。



## 4.3 PHA产业链的价值逻辑

### 4.3.1 PHA产业现状

由于规模化厂商数目有限，PHA产业链下游难发展。自1992年以来，来自英、美、日、中等国的多家公司为PHA产业化做出了诸多尝试，但由于PHA生产成本明显高于传统石油基塑料，市场前景不明朗，部分企业选择退出PHA研发前线，如2006年宝洁将其PHA技术转让给Meredian（Danimer的前身），2016年Metabolix将其PHA管线出售给CJ。近年来，在国内外限塑令刺激下，PHA产业迈入快速发展期，其成本也在应用CRISPR基因编辑技术等前沿技术后明显下降。然而，由于大规模发酵生产的技术门槛较高，PHA量产技术仍然掌握在少数中游企业手中。在中游规模化厂商数目有限的条件下，下游没有充足的原料进行试料生产，因此发展受限。

### 4.3.2 PHA产业发展推演

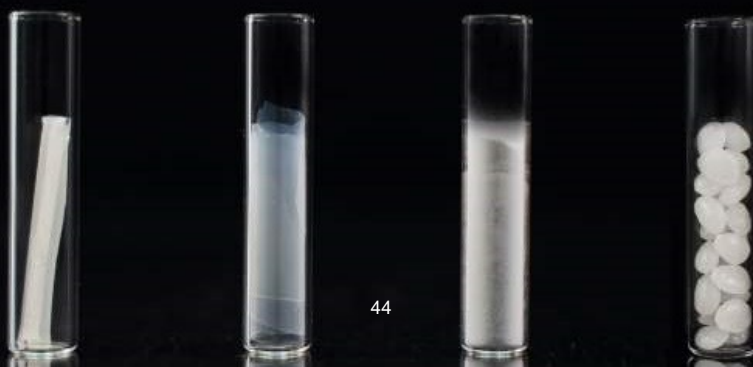
从长期看，PHA与塑料、可降解塑料等材料在物性、应用、产业构成上均具有高度的相似性，其产业发展也将遵循相似的规律。合理推测，随着产业的进一步发展，工艺和技术的进步驱动成本趋近最低，中游企业生产技术相对持平，届时实现中上游一体化、降低成本将成为行业趋势。因此，PHA产业发展大致可以分为以下两个阶段：

- **中短期：在成本、质量可商业化的基础上，规模化扩产，先到先得**

中短期市场对PHA材料的需求明确。以国内外限塑令为抓手，根据市场渗透率进行估计，预计PHA初期市场需求量为180万吨，而目前实际产能不足5万吨，供需矛盾明显。但目前由于PHA行业发展程度相对传统塑料行业较为早期，生产成本较高；而且PHA发酵与提取阶段，PHA与胞内、外杂质的分离情况影响着产品的色泽、气味，进而影响产品质量。因此，对PHA供应商来说，当下应通过技术突破使得产品质量和成本达到商业化可行性，实现快速规模化，越早投产，越能先受益。从中短期来看，PHA产业价值核心掌握在PHA供应商手中。

- **长期：控制原料，取得成本优势，掌握市场**

长期来看，至少会有4家30万吨规模以上的PHA企业，早期市场红利逐渐消退，企业逐渐开始成本竞争。在此阶段，两类企业会具备更多的竞争优势，一类是具有重大工艺变革的企业，一类是实现原料一体化生产的企业，这两类企业能够通过降低PHA销售价格吸引更多客户，挤压其他厂家的市场份额和生存空间。小规模厂商无力支撑长时间的价格战，在此过程中陆续出局，PHA产业集中度逐渐提升。而经过多次降价，PHA价格基本与PLA持平，需求增多且需求弹性下降。在此阶段，完成规模化和中上游一体化对企业的长期稳定发展举足轻重，控制可再生生物质原料是其中的关键。产业价值核心由中游逐渐向上游延伸。







行业终局：  
趋向高集中度，将诞生巨头



## 5.1 对标行业及公司

|           | MDI行业                                                                                                                                   | 光伏行业                                                                                                                                             | PVC行业                                                                                                                    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 与PHA行业相关性 | 行业性质相似：同属于材料产业，产业链构成相匹配。                                                                                                                | 发展路径相似：都承接碳中和政策，可以有效降低石油依赖，是现行方案下“更好的替代方案”，市场前景大。                                                                                                | 行业性质相似：同属于材料产业，产业链构成相匹配。                                                                                                 |
| 技术门槛高     | 高壁垒光气化技术导致MDI行业呈现出明显的寡占格局和长期高毛利率特征。作为MDI的主要生产工艺，液相光气法包括了缩合化反应、光化反应、分离反应等多道工序，不仅技术难度大，而且要有效控制所需的氯气与有毒光气，进入壁垒极高，目前我国仅有5家企业可以大量生产MDI。      | 技术门槛高：在电池片层面，以PERC 电池技术为代表的技术变革将P型太阳能电池转换效率从不足20%提升到近23%。2020年工信部将电池转换效率的标准提高到23%以上，进一步推动了P型电池朝着转换率更高的N型电池（TOPCon，HJT 技术）转变。只有掌握核心技术的企业才能吃到相关红利。 | 技术门槛低：在上世纪80年代中国市场的PVC制备技术便已经发展成熟。                                                                                       |
| 行业进入壁垒    | 规模化门槛高：投资金额大，投产周期长。从投资金额来看，MDI产线的投产资金成本和检修成本都较高。从投产周期来看，MDI生产装置从建设到满产至少需要6年时间（建设3年，投产到满产3年）。由于生产过程存在毒气污染等问题，因此MDI装置建设项目还需要通过环评以及2年环评公示。 | 规模化门槛高：投资金额大，投产周期长。从投资金额来看，硅料环节具备重资产属性，对资金投入要求较高，其产线单位投资金额达到了8-10亿元/万吨。从投产周期来看，硅料从建设产能到实现量产需耗费18-24个月，硅片从建设产能到实现量产的周期大约为12-18个月。                 | 规模化门槛低：投资金额较小，产业较为分散。                                                                                                    |
| 具备规模经济效益  | MDI行业具有化工行业典型的规模经济效益，行业巨头因而获得成本优势。随着MDI产能规模的持续提升，原辅材料利用率提高，单位成本及单位折旧降低，最终导致 MDI 的生产成本大幅降低。                                              | 光伏行业，尤其是在硅料和硅片环节存在明显的规模经济效益，龙头企业可以扩大产能规模从而拉低单位成本摊销，进而扩大市占率并挤压竞争对手生存空间。行业集中度越高，企业的毛利率水平越有优势。                                                      | PVC行业不具备规模效应。目前行业主要集中于低端PVC异型材领域，产品同质化现象严重，企业多为作坊式小企业，产能较大但相对分散。另外PVC企业大多受到地域因素限制，产品附加值和利润低，且产能和产品性能有限。同一地区范围内的行业竞争比较激烈。 |
| 2021年CR5  | 91%                                                                                                                                     | 硅原料87%、硅片84%、电池片54%、光伏组件63%                                                                                                                      | 23%                                                                                                                      |



## 行业巨头 某MDI头部企业

- 2005年至2010年，该企业通过技术改造、持续资本投入及政策扶持快速发展。技术改造使得MDI装置创造性地摒弃了间歇工艺，缩合、光气化和结晶分离装置实现了全连续，同时通过能量集成和工艺优化使装置公用工程消耗和原料消耗与国外处于同一水平。
- 该企业在产业链设计层面遵守着“尽量从行业产业链最上游开始生产”的原则，即采取向产业链上游延展实现一体化的措施，实现了MDI原料的自给自足。同时为自己的生产园区配套了热电厂，用以自供热力、蒸汽、电力等生产要素，进一步降低了生产成本。
- 经过20余年的发展，2021年该企业在全球MDI市场的占有率高达23%，其MDI产能从不到2万吨提升至265万吨，产能位居世界第一。

## 某光伏头部企业

- 该企业创始人经研究认准了光伏行业发展方向就是“实现度电成本最低”，因此选择了投入成本最高、技术难度最大的单晶技术路线。经过10余年的深耕布局，2011年晋升为全球最大的光伏级单晶硅片生产制造企业。
- 该企业于2014年底决定实施产业一体化战略，从专业单晶硅片生产商转型为单晶一体化解决方案提供商。一体化战略帮助企业在产业链多个环节（硅片、电池、组件等）赚取利润，从而避免了某单一环节市场形势下滑的风险，同时减少了各环节价格波动对组件生产成本造成的影响。企业的期间费用率低于行业水平，综合毛利率高于同行5%-10%。
- 2015年起，该企业大力推动了单晶技术变革，包括硅棒端的RCZ技术、硅片端的金刚线切割技术以及电池端的PERC电池技术。多种技术叠加在一起，实现了单晶硅技术路线的降本增效。
- 2021年该企业单晶硅片全球市占率约为43.6%，组件全球市占率达到了22.7%。依靠其组件产品的可靠性及稳定的质保能力，企业组件在全球的品牌认知度不断加强，并逐步形成全球化销售网络，占据市场份额。

综合来看，MDI和光伏行业对于研发技术要求较高，前期资金设备投入量较大，投产周期较长，只有具有一定经济与技术实力的企业才能进入行业。中后期随着MDI和光伏行业生产规模的增加以及生产技术的迭代升级，行业内少数优秀企业

实现降本增效，通过一体化策略进一步扩大成本优势，抢占市场份额，最终诞生出巨头企业。反之像PVC行业进入门槛低，行业格局分散，难以诞生巨头企业。





## 5.2 PHA行业具备产生巨头的底层逻辑

通过对PHA相似行业的分析可得，PHA具备产生巨头的行业特点：

- **行业进入壁垒高**

PHA行业的壁垒在于规模化生产和技术开发两方面。

PHA属于重资产、长周期的行业，规模化生产门槛高。根据PHA行业内部数据测算，每万吨级PHA产能至少需要4亿元建设资本开支。已有数据表明，从计划建设到实际投产（不含产能爬坡期）大约需要18个月左右的时间，这期间项目实际产生的营收几乎可以忽略不计。在PHA产品实际打通生产到销售的环节之前，如没有充足的现金流做支持，企业生存难以为继。

PHA研发链条长，涉及学科多，具有极高的技术壁垒。从菌株开发，到中试级发酵、提取工艺开发及优化，再到规模化生产，所涉及到的学科门类高达20多门（包括但不限于分子生物学、酶工程、代谢组学、蛋白质学、高分子材料学、工程设计、信息与自动化等等），目前掌握PHA规模化生产技术的企业不到5家。

- **长期技术迭代可带来持续的成本降低**

PHA行业规模效应与化工行业相比较不显著，但行业享有长期技术迭代积累带来的持续成本降低。PHA生产成本主要为原材料成本、制造成本、人工工资和折旧，其中原材料在生产成本中占比50%以上。通过菌株研发工艺优化，提高原料利用率，提高转化率，可以有效降低原料成本；还可以通过向产业链上游延伸，实现原料一体化从而降低原料成本。通过发酵提取工段工艺优化和工程合理设计，能够有效降低制造成本。

综上所述，PHA作为新兴生物可降解材料产业，具备与光伏和MDI等材料领域相似的行业要素，因此PHA行业趋向于高集中度，将形成寡头垄断的格局。

### 5.2.1 成为PHA行业巨头的要素

PHA行业乃至可降解塑料行业目前属于快速爆发期，到2025年，至少需要2,000万吨的可降解塑料产能。目前全球PHA商业化产能不足5万，新进入者发展到商业化规模至少需要3-5年时间。若想成为巨头，需在技术、资金乃至扩产速度上，都领先于新进入者。**从现在起到2027年，是PHA领先企业发展自身技术，降低PHA生产成本，扩大与竞争对手差距的重要窗口期。**

领先企业应重点构建四项竞争力，一是保持技术领先，通过菌株研发工艺优化，提高原料利用率，降低生产成本，并实现高质量产品的稳定供应；二是保持资金优势和高效的组织能力，进行快速大规模扩产；三是完成产业链向上游的延伸，实现原料生产和PHA生产一体化，进一步扩大成本优势；四是拓展PHA下游应用，探索材料的多样性。

[27] 《原材料价格大幅涨价后，现在PBAT到底挣不挣钱？》，行业研究报告





• 中短期市场规模测算公式及表格细节：

• 测算公式：

塑料材料使用量 = 全球市场规模 / 传统塑料市场单价

PHA市场需求量 = 塑料材料使用量 × 可降解塑料渗透率 × PHA添加量

| 短期市场规模测算                                                     | 典型应用场景        | 塑料袋          | 农用地膜  | 一次性餐饮具  | 其他塑料包装膜      | 总计（万吨）   |
|--------------------------------------------------------------|---------------|--------------|-------|---------|--------------|----------|
| 塑料材料使用量核心假设                                                  | 塑料材料主要种类      | LDPE, LLDPE  | LLDPE | PP      |              |          |
|                                                              | 全球市场规模（万元）    | 15,180,660.0 |       |         | 36,539,888.0 |          |
|                                                              | 传统塑料市场单价（元/吨） | 10,000.0     |       |         | 10,000.0     |          |
| 塑料材料使用量测算结果                                                  | 塑料材料使用量（万吨）   | 1,518.1      | 506.7 | 3,654.0 | 1,001.5      | 5,678.7  |
| PHA市场需求量核心假设                                                 | 可降解塑料渗透率      | 30%          | 20%   | 30%     | 10%          |          |
|                                                              | 可降解塑料需求量（万吨）  | 455.4        | 101.3 | 1,096.2 | 100.2        | 1,652.9  |
|                                                              | PHA添加量        | 2%           | 5%    | 15%     | 1%           |          |
| PHA市场需求量测算结果                                                 | PHA市场需求量（万吨）  | 9.1          | 5.1   | 164.4   | 1.0          | 179.6    |
| PHA市场规模核心假设                                                  | PHA单价（元/吨）    |              |       |         |              | 35,000.0 |
| PHA市场规模测算结果                                                  | PHA市场规模（亿元）   |              |       |         |              | 628.6    |
| 说明：小众场景不在此测算范围内                                              |               |              |       |         |              |          |
| 来源：Statista、Grandviewresearch、Plasway、科学网、塑米城、海正上市招股书、行业研究报告 |               |              |       |         |              |          |

| 中期市场规模测算                                                     | 典型应用场景        | 塑料袋          | 农用地膜  | 一次性餐饮具       | 其他塑料包装膜 | 总计（万吨）   |
|--------------------------------------------------------------|---------------|--------------|-------|--------------|---------|----------|
| 塑料材料使用量核心假设                                                  | 塑料材料主要种类      | LDPE, LLDPE  | LLDPE | PP           |         |          |
|                                                              | 全球市场规模（万元）    | 15,180,660.0 |       | 36,539,888.0 |         |          |
|                                                              | 传统塑料市场单价（元/吨） | 10,000.0     |       | 10,000.0     |         |          |
| 塑料材料使用量测算结果                                                  | 塑料材料使用量（万吨）   | 1,518.1      | 506.7 | 3,654.0      | 1,001.5 |          |
| PHA市场需求量核心假设                                                 | 可降解塑料渗透率      | 60%          | 50%   | 60%          | 30%     |          |
|                                                              | PHA添加量        | 40%          | 10%   | 45%          | 15%     |          |
| PHA市场需求量测算结果                                                 | PHA市场需求量（万吨）  | 364.3        | 25.3  | 986.6        | 45.1    | 1,421.3  |
| PHA市场规模核心假设                                                  | PHA单价（元/吨）    |              |       |              |         | 25,000.0 |
| PHA市场规模测算结果                                                  | PHA市场规模（亿元）   |              |       |              |         | 3,553.3  |
| 说明：小众场景不在此测算范围内                                              |               |              |       |              |         |          |
| 来源：Statista、Grandviewresearch、Plasway、科学网、塑米城、海正上市招股书、行业研究报告 |               |              |       |              |         |          |



• 终局市场测算逻辑一公式及表格细节：

• 测算公式如下：

PP、PE包装材料使用量 = 塑料产量 × 塑料消费量中包装用途比例 × 包装用途中PP、PE占比

PHA市场规模 = PHA市场需求量 / PHA市场单价 = PP、PE包装材料需求量 / PHA市场单价

|                                                       | 项目               | 数据       |
|-------------------------------------------------------|------------------|----------|
| PP、PE包装需求量核心假设                                        | 全球塑料产量（万吨）       | 36,700.0 |
|                                                       | 塑料消费量中包装用途比例     | 40%      |
|                                                       | 包装用途中PP、PE占比     | 71%      |
| PP、PE包装需求量测算结果                                        | PP、PE包装市场需求量（万吨） | 10,422.8 |
| PHA终局市场核心假设                                           | PHA终局市场单价（元/吨）   | 12,000.0 |
| PHA终局市场测算结果                                           | PHA终局市场规模（亿元）    | 12,507.4 |
| 说明：小众场景不在此测算范围内                                       |                  |          |
| 来源：Statista、National Graphic、Plastics - the Fact 2019 |                  |          |

• 终局市场测算逻辑二公式及表格细节：

• 测算公式如下：

PP、PE包装材料使用量 = PP产量 × 包装在塑料产量中的占比 +

LDPE产量 × LDPE用于包装材料的比例 +

LLDPE产量 × LLDPE用于包装材料的比例 +

HDPE产量 × HDPE用于包装材料的比例

|                                                            | 项目               | PP           | HDPE         | LDPE         | LLDPE        | 总计       |
|------------------------------------------------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| PP、PE包装需求量核心假设                                             | 全球市场规模（万元）       | 79,950,860.0 | 47,928,237.0 | 20,649,138.6 | 37,624,005.0 |          |
|                                                            | 单价（元/吨）          | 10,000.0     | 10,000.0     | 12,500.0     | 9,400.0      |          |
|                                                            | 全球市场使用量（万吨）      | 7,995.1      | 4,792.8      | 1,651.9      | 4,002.6      |          |
|                                                            | 材料应用于包装的比例       | 44%          | 60%          | 70%          | 70%          |          |
| PP、PE包装需求量测算结果                                             | PP、PE包装材料使用量（万吨） | 3,517.8      | 2,875.7      | 1,156.4      | 2,801.8      | 10,351.7 |
| PHA终局市场核心假设                                                | PHA终局市场单价（元/吨）   |              |              |              |              | 12,000.0 |
| PHA终局市场测算结果                                                | PHA终局市场金额（亿元）    |              |              |              |              | 12,422.0 |
| 说明：小众场景不在此测算范围内                                            |                  |              |              |              |              |          |
| 来源：Grandviewresearch、Statista、Research and Markets、Plasway |                  |              |              |              |              |          |

# 致谢

---

## 项目支持

蓝晶微生物联合创始人兼总裁 李腾先生

蓝晶微生物联合创始人兼CEO 张浩千先生

蓝晶微生物CFO 杜长江先生

## 主编人员

### 蓝晶微生物：

战略发展总监 李硕

未来材料部高级市场研究员 蒋彦舟

战略发展高级经理 刘思源

战略发展经理 简依敏

### 普华永道：

普华永道中国ESG可持续发展市场主管合伙人 倪清

普华永道中国气候变化与可持续发展合伙人 林伟

普华永道中国气候变化与可持续发展合伙人 张晓蕊



# 参考文献

1. 《中国碳中和通用指引》，BCG，<https://www.bcg.com/zh-cn/featured-insights/china-carbon-neutrality-guideline-book>
2. 《Statistical Review of World Energy 2022》，BP Company，<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
3. World Resources Institute，<https://www.wri.org/data/world-greenhouse-gas-emissions-2019>
4. 《2050年净零排放：全球能源部门路线图》，IEA，[https://iea.blob.core.windows.net/assets/f4d0ac07-ef03-4ef7-8ad3-795340b37679/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_Chinese\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/f4d0ac07-ef03-4ef7-8ad3-795340b37679/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_Chinese_CORR.pdf)
5. 《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，中国政府网，[http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content\\_5644613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm)
6. 《中国能源大数据报告（2022）》，中能传媒研究院，<https://esg.js.org/how/china-energy-grande-data-report-2022.pdf>
7. 《国家发展改革委等部门关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见》，中国政府网，[http://www.gov.cn/zhengce/2022-01/21/content\\_5669778.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2022-01/21/content_5669778.htm)
8. 《2021年锂离子电池行业运行情况》，中华人民共和国工业和信息化部，[https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/dzxx/art/2022/art\\_439f3c87f9d247ee85592682b0f9ef8e.html](https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/dzxx/art/2022/art_439f3c87f9d247ee85592682b0f9ef8e.html)
9. 《2021中国锂电产业发展指数》，赛迪顾问，<https://www.film-expo.com/content/dam/sitebuilder/rxch/quanchu/2022/8-22/2021%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E9%94%82%E7%94%B5%E4%BA%A7%E4%B8%9A%E5%8F%91%E5%B1%95%E6%8C%87%E6%95%B0.pdf.coredownload.611737456.pdf>
10. 《2022-2060全球及中国原油需求展望（何时达峰？）》，行业研究报告
11. 《中国塑料的环境足迹评估》，北京石油化工学院、NRDC，<http://www.nrdc.cn/Public/uploads/2020-12-28/5fe941e197b58.pdf>
12. 《Plastics – the Facts 2022》，Plastics Europe，<https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>
13. 《中国再生塑料行业发展报告2021-2022》，中国物资再生协会再生塑料分会，[http://www.chinacpra.org.cn/files\\_list.php?rid=78&cid=3](http://www.chinacpra.org.cn/files_list.php?rid=78&cid=3)
14. 《The Real Truth About the U.S. Plastics Recycling Rate》，Beyond Plastics，<https://www.ehso.com/recycling/The+Real+Truth+about+the+U.S.+Plastic+Recycling+Rate+2021+Facts+and+Figures+5-4-22.pdf>
15. Tokyo-based Plastic Waste Management Institute，<https://pwmi.or.jp/ei/index.htm>
16. The Nicholas Institute for Energy, Environment & Sustainability，<https://nicholasinstitute.duke.edu/plastics-policy-inventory>
17. 《中国塑料包装再生现状白皮书》，WWF，<https://webadmin.wwfchina.org/storage/files/1.%20%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%A1%91%E6%96%99%E5%8C%85%E8%A3%85%E7%89%A9%E5%9B%9E%E6%94%B6%E5%92%8C%E5%86%8D%E7%94%9F%E7%8E%B0%E7%8A%B6.pdf>
18. 《Global Plastics Outlook Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options》，OECD，[https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=1128\\_1128022-j5crhacc6w&title=Global-plastics-outlook-highlights](https://read.oecd-ilibrary.org/view/?ref=1128_1128022-j5crhacc6w&title=Global-plastics-outlook-highlights)
19. 《The Business Case for a UN Treaty on Plastic Pollution》，WWF，<https://www.wwf.or.th/?364955/The-Business-Case-for-a-UN-Treaty-on-Plastic-Pollution>
20. 《Occurrence and Analysis of Thermophilic Poly(butylene adipate-co-terephthalate)-Degrading Microorganisms in Temperate Zone Soils》，Jana, et.al., Int J Mol Sci，<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7660229/>
21. 《2020年中国生态环境统计年报》，生态环境部，<https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/sthjtjnb/202202/W02022018339925977248.pdf>
22. 《Polyhydroxyalkanoates (PHA) An emerging and versatile polymer platform》，Jan Ravenstijn, GO!PHA，<https://static1.squarespace.com/static/5fb2575cf94ec942fe192fb3/t/5fbf6ada2dd96f5918e76839/1606380251303/GO%21PHA+white+paper+%231+-+PHA+-+An+emerging+and+versatile+polymer+platform+-+May+2019.pdf>
23. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION，<https://ellenmacarthurfoundation.org/global-commitment/signatory-reports>
24. 《万华化学报告（二）：解析 MDI 行业运行规律》，行业研究报告，[https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202106171498420569\\_1.pdf?1623952668000.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202106171498420569_1.pdf?1623952668000.pdf)
25. 《MDI 产业链梳理：供需格局如何？如何判断后期 MDI 价格？》，行业研究报告，[http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202005071379413064\\_1.PDF](http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202005071379413064_1.PDF)
26. 《聚氨酯行业研究及万华化学深度解析》，行业研究报告，<https://www.vzkoo.com/read/c925711019f0f292fd3138fd61d48ee.html>
27. 《原材料价格大幅涨价后，现在PBAT到底挣不挣钱？》，行业研究报告，<https://xueqiu.com/6858362202/203528511>

## 重要信息

本白皮书是受北京蓝晶微生物科技有限公司委托、由普华永道管理咨询(深圳)有限公司北京分公司(“普华永道”)及北京蓝晶微生物科技有限公司委托共同撰写完成，数据信息来源于公开渠道收集及蓝晶微生物科技有限公司提供。本白皮书中的信息仅供一般参考之用，既不可视为详尽的说明也不构成由普华永道提供的法律、税务或其他专业建议，更不应用于替代专业咨询顾问提供的咨询意见。在根据本白皮书采取任何举措前，请阅读者咨询其专业顾问以获取针对其具体情况的专业意见。普华永道不就本白皮书所述信息的真实性、准确性与完整性提供任何明示或暗示的陈述或保证。在法律允许的范围内，普华永道管理咨询(深圳)有限公司北京分公司、其全体合伙人、雇员及代理人不对任何第三方（包括但不限于阅读者）承担或接受由本白皮书引起的任何责任，亦不承担任何由于第三方可能对本白皮书的使用而对其造成的损失、损坏或产生的费用的责任。本白皮书中的内容是根据当日可获得的资料于2022年10月21日编制而成的，普华永道没有责任在本白皮书发布后就其中所涉及的资料进行更新。