

BIODEGRADABLE 可降解塑料 应用效果评估综述

2022年2月



上海浦东益科循环科技推广中心

编者：蔡力萍 张淼

执行摘要

可降解塑料是一种新型聚合材料。它们通常具有与传统塑料相近的理化性能，同时在特定条件下可以在更短时间内发生降解，作为传统塑料的替代材料之一，被视为塑料污染的重要解决方案之一。

但可降解塑料的实际应用效果存在争议。首先市面上的可降解塑料有很多种类，其中有一些仅仅是通过添加剂使得传统塑料更容易分解成更小的碎片。而即便是其中最接近其字面含义的完全可生物降解塑料，它们的降解条件也不尽相同，只有周围环境满足了某种可生物降解塑料所需的特定降解条件（如相应的微生物群，和特定的温度、湿度范围等等）才可发生降解，而通常自然环境并不满足它们所需的降解条件，或者不是最合适的降解条件。

不同的自然环境（尤其是海洋）的环境条件差异巨大，有些可生物降解塑料在自然环境中可能难以发生降解。比如目前市场上最常见的可降解塑料之一 PLA 就是一个很好的实例，尽管 PLA 被视为一种环保的生物基可降解塑料，并被广泛运用于如一次性包装袋、杯子等日常生活用品上，但其仅能在工业堆肥或厌氧消化的环境条件下发生降解，在一般的自然环境中难以降解，且有研究证明 PLA 在海洋环境中几乎不会发生降解。

由于目前认证体系不够完善，科普宣传不足，无论是决策者、商家还是消费者，都一定程度上对可降解塑料存在理想化的误解，并没有从全生命周期的角度去衡量这一替代材料是否真正解决了相应的问题。例如可降解塑料被应用在吸管、塑料袋等一次性用品上，但是这些一次性用品最终很难进入到满足其降解条件的环境当中去，使得使用可降解塑料来替换传统塑料变成一种“无用功”。

本报告在查阅了大量报告和科研报告的基础上，对可降解塑料的相关概念进行了厘清，对常见的可生物降解塑料的降解条件进行了梳理。同时对目前国内相关的标准和政策法规，以及国内外的认证体系都进行了整理汇总。

更重要的是，通过对国内外科研报告的梳理，本报告重点对可生物降解塑料进入不同环境后的降解表现进行了初步评估。这其中我们最为关注的是可生物降解塑料进入到海洋环境后的降解情况，和可能对海洋生物造成的影响。通过已有的科研结论可以看到，由于目前市场上常见可生物降解塑料在进入海洋后，乃至进入海洋生物体内后，降解十分缓慢，甚至几乎不发生

降解，使用现有的可生物降解塑料替代传统塑料来解决海洋塑料污染问题，很可能是一厢情愿。

而另一个评估重点放在了农业地膜上。综合考虑目前可降解塑料应用的产品类型和废弃后最终去向，我们认为用于生产农业地膜可能是可降解塑料的一个最合理的应用方向。我国农业地膜使用十分普遍，由于农业地膜废弃后会对土壤造成污染，国家近年来也在加大力度解决废弃农膜污染问题，采用生物可降解地膜是近年来尝试的重要解决方案之一。目前农业农村部和许多科研机构及企业，都开展了大量的实验，探索可降解地膜的应用效果。从目前的研究来看，可降解地膜跟传统地膜一样能够起到增温保墒的作用，而且在特定的作物上，可降解地膜有着更好的表现。但是可降解地膜的降解速度受产品类型和当地气候条件的影响，且不同地域的经验很难照搬，在选择产品时需要综合考虑多种因素。

除了应用效果，本报告还关注了可降解地膜可能产生的污染问题。可降解农膜在完全降解之前，同样会有一个阶段以微塑料的形式存在；可降解农膜在生产时 also 与传统农膜一样会添加很多添加剂，这些添加剂是否会对农田产生污染尚且存疑。报告中对已有相关研究的成果进行了总结，但还需更多研究来给出一个更明确的结论。

基于对现有政策法规和研究的梳理，我们认为目前我国可降解塑料的应用上，应重点关注以下几个问题：

1. 相关主管部门应进一步完善相关标准和标识体系，并由工商部门严格检查，避免可降解塑料市场鱼龙混杂。建议在标识中，除标注品类名称和成分外，明确注明降解条件，更便于普通商家和消费者选择。
2. 对各种可降解塑料在不同应用场景进行相关的全生命周期评估，决策者可以基于评估结果科学地推广可降解塑料，让可降解塑料真正起到减少塑料污染、减少环境影响的作用。
3. 相关机构和组织应加强对公众的科普，让商家和消费者都对可降解塑料有清晰的认知，合理地选购可降解塑料产品。

目录

第一章 (生物) 可降解塑料背景介绍	1
1.1 可生物降解塑料的定义	2
表 1.1 与可生物降解塑料有关的术语的定义[8]	2
表 1.2. 部分可生物降解塑料的英语简称及其中英文全称	2
1.2 关于可生物降解塑料的常见误区	3
表 1.3 部分可降解和不可降解的生物基或化石基塑料[4, 12]	3
表 1.4 主要的商业可生物降解塑料的应用产品[14, 21 - 23]	4
第二章 可生物降解塑料的生命终期处置及其环境影响	5
表 2.1. 主要的商业可生物降解塑料的生命终期处置方案[24]	5
2.1 生物处置法	5
表 2.2. 生物处置方案 ^[3]	5
2.2 进入自然环境	7
表 2.3. 不同可生物降解塑料在土壤、海洋、淡水等不同环境中的生物降解率[22, 34, 35]	8
表 2.4. 常见的商业销售的可生物降解地膜的产品及其成分[63, 64]	11
表 2.5 国内部分关于对比可生物降解地膜与传统 PE 地膜的应用性能的田间试验。	13
表 2.6 常见的商业销售的可生物降解地膜的添加剂产品及其成分和功能[63, 64, 91 - 94]	18
表 2.7 可生物降解塑料地膜对植物的生长发育或土壤微生物的影响	19
表 2.9 部分可生物降解塑料对海洋生物的生态毒性或影响[116]	23
2.3 作为不可回收城市固废处置	24
2.4 传统的塑料回收处置法	25
第三章 我国推进 (生物) 可降解塑料的现状与困难	26
3.1 与可生物降解塑料相关的国家政策	26
3.2 目前推进可生物降解塑料发展的困难与瓶颈	26
表 3.1 近年来与可生物降解塑料发展相关政策	28
结语：应审慎科学地应用可生物降解塑料	29
附录	30
附 A. 可生物降解塑料的标准与标识	30
附 B 现行或即将实施的针对可降解塑料制品的国家标准	35
参考资料	36

第一章 （生物）可降解塑料背景介绍

塑料被广泛运用于各大领域，并与人们的日常生活密不可分，但与此同时由于大量的塑料垃圾未被妥善处置，在全球塑料造成的环境污染问题日益严峻。为了缓解塑料污染问题，可降解塑料被研发并推广以取代传统的不可降解塑料。

目前，我国对于可降解塑料尚缺乏全国统一的技术指导标准及文件，现行的标准、指南等对于可降解塑料的定义与分类略有出入，目前主要有以下两种标准及指南对此进行了定义及分类^[1]：

（1）GB/T 20197-2006《降解塑料的定义、分类、标志和降解性能要求》^[2]中将可降解塑料定义为：

“在规定的条件下，经过一段时间和包含一个或更多步骤，导致材料化学结构的显著变化而损失某些性能(如完整性、分子质量、结构或机械强度)和/或发生破碎的塑料。应使用能反映性能变化的标准试验方法进行测试，并按降解方式和使用周期确定其类别。”

另外GB/T 20197-2006将可降解塑料分类成以下四类：可生物降解塑料、可堆肥塑料、光降解塑料、热氧降解塑料。值得注意的是，光降解塑料或热氧降解塑料的原理为在传统的不可降解塑料中添加光敏剂或氧化催化剂，关于其降解能力有着较大的争议。因为这两种降解塑料无法完全降解，而是会破碎成微小的塑料碎片，其不但无法被环境完全吸收还会造成微塑料的污染，对自然环境尤其是海洋环境造成危害^[1,3,4]。欧盟于2019年发布了一次性塑料指令 Directive (EU) 2019/904，全面禁止了氧化降解塑料制成的一次性塑料产品在欧盟成员国的市场流通^[5]。并且在最新修订的国家标准《降解塑料的定义、分类、标志和降解性能要求(讨论稿)(计划号 20203542-T-469)》中也计划删去光降解、热氧降解塑料^[1]。

（2）《可降解塑料制品的分类与标识规范指南》（中轻联综合[2020]284号文）中将可降解塑料定义为：

“在自然界如土壤、沙土、淡水环境、海水环境、特定条件如堆肥化条件或厌氧消化条件下，由自然界存在的微生物作用引起降解，并最终完全降解变成二氧化碳或/和甲烷、水及其所含元素的矿化无机盐以及新的生物质(如微生物死体等)的塑料。”

此定义与标准GB/T 20197-2006中对于可生物降解塑料的定义相一致。另外，《可降解塑料制品的分类与标识规范指南》将可降解塑料分类成以下六类：可土壤降解塑料、可堆肥化降解(包括传统堆肥与可庭院堆肥)塑料、海洋环境降解塑料、淡水环境降解塑料、污泥厌氧消化降解塑料、高固态厌氧消化降解塑料^[1,6]。

本篇报告主要介绍了可生物降解塑料的种类、应用及其环境影响。

1.1 可生物降解塑料的定义

在特定条件下，可生物降解塑料在好氧环境中可以被微生物分解成二氧化碳、水、矿物盐以及新的生物质，或者在厌氧环境中被分解为二氧化碳、甲烷、矿物盐和新的生物质^[7]。为了避免对可生物降解塑料的概念产生误解，与其相关的概念与术语应当被明确释义，表 1.1 列举了与可生物降解塑料有关的术语的定义。另外，表 1.2 解释了部分可生物降解塑料的英语简称及其中英文全称。

表 1.1 与可生物降解塑料有关的术语的定义[8]

术语	定义
可生物降解塑料	在满足特定条件下，可在特定环境与媒介中以不同的时长进行生物降解的塑料。
可工业堆肥塑料	在满足工业堆肥或者有进行后续堆肥步骤的工业厌氧消化的条件下进行生物降解的塑料。
可家庭堆肥塑料	可以在被良好管理的温度低于工业堆肥的家庭堆肥桶内进行生物降解的塑料，其大多也可被进行工业堆肥。
生物基塑料	全部或者部分由生物原材料所制成的塑料，不同于由化石基材料（石油）的传统塑料。

表 1.2.部分可生物降解塑料的英语简称及其中英文全称

缩写简称	英语全称	中文
PBAT	Poly (butyleneadipate-co-terephthalate)	聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯
PBS	poly (butylene succinate)	聚丁二酸丁二醇酯
PCL	Polycaprolactone	聚己内酯
PVA	polyvinyl alcohol	聚乙烯醇
PHA	polyhydroxyalkanoates	聚羟基脂肪酸酯
PHB	Poly-hydroxybutrate	聚（3-羟基丁酸酯
PHBV	Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)	聚（3-羟基丁酸酯共-3-羟基戊酸酯）
PGA	Polyglycolide acid	聚乙交酯/聚乙醇酸
PLA	polylactic acid	聚乳酸
PPC	Polypropylene carbonate	聚碳酸亚丙酯
TPS	thermoplastic starch	热塑性淀粉

根据降解程度的不同，生物降解塑料可被分成两大类：完全可生物降解塑料和不完全可生物降解塑料。

(1) 完全可生物降解塑料：主要由天然高分子（如淀粉、纤维素等等）、或农副产品经由微生物发酵、或合成具有可生物降解性能的高分子制成。其包括微生物合成高分子（如 PHA、PHB 等等）、化学合成高分子（如 PCL 等等）、天然高分子及其共混物（如 TPS、木质素、纤

纤维素等等)和蛋白质等。完全可生物降解塑料技术可通过微生物将塑料垃圾完全分解后带回地球的物质循环系统,从而达成对塑料垃圾的完全循环利用^[9]。

(2) 不完全生物降解塑料:通常是指在传统不可降解塑料(如 PE、PP 和 PVC 等)中混入一定量的具有可生物降解性能的成分(如淀粉、纤维素、全生物降解塑料等),即生成填充型生物降解塑料,该种塑料在自然界中不能完全降解^[9,10]。

1.2 关于可生物降解塑料的常见误区

目前由于尚无对群众充分地进行关于可生物降解塑料的普及教育,人们往往对“可降解塑料”望文生义,存在认知偏差。其中需要特别注意的有以下几点:

(1) 可生物降解塑料不等于生物塑料:

生物塑料、生物基塑料和可生物降解塑料是三个不同的概念。生物塑料不是一个定义明确的词汇,一般认为生物塑料包括了生物基塑料和可生物降解塑料。生物基塑料表明的是塑料制备的原料全部或部分来源于生物质,不确定使用过程和使用后是否能降解;生物降解塑料则表明该塑料在使用过程或使用后会在一定条件下降解,但不代表该塑料制备是原料的来源。事实上并不是所有的生物基塑料都是可降解的,可生物降解塑料也可以分为生物基和化石基两类。据统计,在 2020 年全球生产的生物基塑料中约有 41.9%为不可生物降解的生物塑料^[11]。表 1.3 列举了部分可降解和不可降解的生物基或化石基塑料。

表 1.3 部分可降解和不可降解的生物基或化石基塑料[4,12]

	化石基	生物基
完全可降解	PBAT PBS PCL PVA	TPS PHA (PHB...) PLA 淀粉基混合物
不可降解	PE PP PET PVC PS PA EVOH	生物基 PE 生物基 PA 生物基 PET 生物基 PTT 醋酸纤维素 生物基聚异戊二烯

(2) 可生物降解塑料不代表该材料可在任何自然环境中降解

目前国家标准中可生物降解塑料的定义还不够全面,只要通过了堆肥降解检测认证的都可以称为可生物降解塑料,事实上不同可生物降解塑料的降解条件不尽相同,仅当周围环境满足了该条件(如微生物群、温度、湿度等等)后才可发生降解,不同的自然环境(尤其是海洋)

背景下的环境条件差异巨大，有些可生物降解塑料在自然环境中可能难以发生降解^[13,14]。比如 PLA 就是一个很好的实例，尽管 PLA 被誉为是一种环保的生物基可降解塑料，并被广泛运用于如一次性包装袋、杯子等日常生活用品上，但其仅能在工业堆肥或厌氧消化的环境条件下发生降解，在一般的自然环境中难以降解，且有研究证明 PLA 在海洋环境中几乎不会发生降解^[4, 12, 13, 15 - 19]。还需警惕人们因为误以为可生物降解塑料可以在环境中自然降解，就毫无顾忌地丢弃可生物降解塑料废物^[13, 14, 20]。

如今，可生物降解塑料广泛运用于日常生活、医学以及工业等领域上，表 1.4 列举了主要的商业可生物降解塑料的应用产品。另外，附录 A 中详细介绍了国内外可生物降解塑料及其制品的相关标准与标识。

表 1.4 主要的商业可生物降解塑料的应用产品[14,21-23]

聚合物名	产品应用
TPS、淀粉基混合物	食物包装袋、可堆肥袋及薄膜、一次性餐具
PLA、PLA 混合物	包装材料、医疗植入物、生物医疗应用、个人卫生产品、3D 打印、纺织品、电子产品
PHA	包装物、组织工程学、医用
PCL	PV 粘合剂、3D 打印、鞋类、生物医疗应用
PBS	农业地膜、食品包装薄膜、餐具、医用堆肥袋、渔网、汽车工业
PBAT、PBAT 混合物	食品保鲜膜、塑料袋、农业地膜、防水涂料

第二章 可生物降解塑料的生命终期处置及其环境影响

任何可生物降解塑料都需要满足一定条件才可发生降解，其降解速率受到各种生物和非生物因素的影响（如：氧气量、湿度、温度、存在特定微生物等等）。当可降解塑料被废弃后，不同处置方式会对环境造成不同的影响，因此选择合适的废物处置方案对减少环境负担至关重要。可降解塑料的生命终期处置方案是否合适主要取决于产品的材料、产品的市场流通量以及现有的收集处置该产品的基础设施等因素^[3]。

可降解塑料废物的主要处置方法可以分为两大类。第一类是用于处置不可降解塑料的传统废物回收处置技术，即物理回收、化学回收法等；第二类则是如堆肥和厌氧消化等生物处置法。其中生物处置法是目前为止对于可降解塑料废物最优的处置方案^[3,12]。表 2.1 列举了不同可降解塑料所适用的生命终期处置方案。

另外，由于现阶段我国对于可降解塑料产品的回收体系尚不完善，可降解塑料可能混入生活垃圾中被送去焚烧或填埋，或者被随意抛弃至环境中。

本章节对不同处置方法的原理及其产生的问题和现实情况进行综述及讨论。

表 2.1. 主要的商业可生物降解塑料的生命终期处置方案^[24]

聚合物名	产品生命终期的可持续处置方案
TPS、淀粉基混合物	家庭堆肥、工业堆肥、厌氧消化
PLA、PLA 混合物	工业堆肥、化学回收、物理回收
PHA	家庭堆肥、工业堆肥、厌氧消化、化学回收
PCL	家庭堆肥、工业堆肥、化学回收
PBS	工业堆肥、化学回收、酶解聚
PBAT、PBAT 混合物	工业堆肥、化学回收

2.1 生物处置法

从环保的角度出发，生物处置法对于可降解塑料而言最佳的生命终期处置方案，其中包括好氧堆肥（家庭或工业堆肥）和厌氧消化。生物降解和所处的环境息息相关，温度和环境中的微生物（即真菌和细菌）是影响生物降解的两大重要因素。表 2.2 总结了不同生物处置法的运行条件^[3]。而不同的可降解塑料适用的生物处置方法不尽相同，仅有少部分的可降解塑料可以在所有四种条件下由生物处置法进行降解^[12,25]。

表 2.2. 生物处置方案^[3]

条件	废物处置法	分解可降解塑料所需的微生物	温度
好氧	堆肥	真菌、细菌和放线菌	家庭堆肥：≤35 °C
			工业堆肥：50—60 °C
厌氧	厌氧消化	细菌（无真菌）	中温消化：≤35 °C
			高温消化：50—60 °C

2.1.1 堆肥处置

堆肥法是对可生物降解塑料进行生物处置的方法之一。堆肥是指在好氧且潮湿的环境下通过混合微生物种群对有机垃圾进行受控的生物转化的过程，通过该转化过程有机物被降解为矿物质、生物质以及腐殖质等土壤改良产品，同时释放出二氧化碳、水和热能^[3,12,26]。

可进行堆肥处置的可降解塑料应当满足以下四个标准^[7,12]：

1. 化学特性：重金属不超标。
2. 生物降解：在受控的堆肥条件下，该产品在六个月内需达到 90% 的降解率。
3. 崩解：该产品以其进入市场时的形态在受控的条件下进行堆肥，经过 12 周后，其应当充分碎裂成通过视觉无法察觉的成分（<2mm）。
4. 生态毒性：在堆肥结束时，含有该产品中残渣的堆肥产物应当不会对植物的发芽及生长产生任何负面影响（或也包括对蚯蚓的影响）。

▪ 家庭堆肥 vs 工业堆肥

堆肥法可分为工业堆肥和家庭堆肥，主要区别在于工业堆肥的温度要远高于家庭堆肥并且基本保持稳定，而家庭堆肥的温度不仅低于工业堆肥也常受到如气候等多种因素的影响而不稳定^[3,27]。另外，家庭堆肥的过程要远慢于工业堆肥并且处理量小，而且对家庭堆肥进行标准化较困难因此缺乏监管。如果处理不当，家庭堆肥会产生温室气体排放、可家庭堆肥塑料袋降解失败等问题。因此适用于工业堆肥的可降解塑料不一定适用于家庭堆肥。但因为在家庭堆肥的过程中是由终端消费者来负责垃圾的分类及处置，因此也有着可以为市政减少垃圾收集及处置费、减少待处理的混合塑料垃圾量的优点^[27]。

2.1.2 厌氧消化

厌氧消化是一种在无氧环境下通过由细菌组成的微生物种群将有机废物转化为富含甲烷的沼气、沼渣和沼液的生物化学过程。虽然比起堆肥，厌氧消化系统更复杂且成本高，但是不仅可以生产土壤改良剂和肥料，厌氧消化产生的沼气还可以被直接被利用于发电，有回收能源的优势^[3,4,26,28,29]。目前尚无关于可被用于厌氧消化的可生物降解塑料产品的明确定义与标准，关于对可生物降解塑料进行厌氧消化的讨论及标准化仍处于初始阶段而有待进一步的研究^[4,28]。

按照进行发酵的有机废物的含水率，厌氧消化可分为干法厌氧消化（含水率<85%）和湿法厌氧消化（含水率>85%）。根据处理技术的不同，在厌氧消化之前对可降解塑料进行预处理的技术条件也有区别。在干法厌氧消化中，可降解塑料应当被处理成颗粒尺寸后才可进行消化，并且在处理的最后需要进行再筛分以让其在厌氧消化（以及后续的好氧堆肥阶段）时可以得到更充分的生物降解及分解。在湿法厌氧消化中，除非该生物降解塑料可以快速溶解及分散，否则需要对可降解塑料进行粉碎的预处理，不然其可能在进入消化阶段前就因浮选和沉淀而被移除^[28]。

不同的可生物降解塑料在好氧堆肥和厌氧消化中的降解表现不同，有些可堆肥塑料并不能进行厌氧消化处置或在厌氧消化的处置中的降解速度十分缓慢。另外，可降解塑料的种类以及

厌氧消化系统的类型会影响进行厌氧消化处置的效果，并且预处理是影响可生物降解塑料在厌氧消化时的可处理性的重要因素之一^[28]。

2.1.3 可生物降解塑料的生物处置的现实困难

根据国际标准 ISO 15270:2008（国家标准 GB/T 30102-2013）“塑料-塑料废弃物的回收和再循环指南”^[30]，对符合生物降解标准的塑料废物进行生物处置时，通常不需要分离其中可生物降解的污染物，如塑料上的食物或者蔬菜残渣。因此，可以直接对被有机物污染的可降解塑料废物（如食品包装袋、保鲜膜等等）进行堆肥或厌氧消化是生物处置的一大优势。

若要对可生物降解塑料进行有效可行的堆肥或者厌氧消化，需要在源头分类时将大多数其他不可降解杂质（传统塑料，玻璃，金属等等）从可生物降解塑料中分离去除，否则在完成堆肥或厌氧消化后应当对处置后的产品进行筛分去除其中的不可降解杂质。然而大多数情况下，可生物降解塑料往往和非可生物降解塑料进行混合收集，并且在筛分过程中与不可降解塑料一起被移除，因此许多可生物降解塑料并没有得到妥善处置。虽然可以通过安装红外探测技术的设备来有效地将可生物降解塑料从废物流中分类出来，但是其成本相当昂贵^[4,12,31]。

2.2 进入自然环境

目前塑料垃圾对自然环境造成的污染是一个全球瞩目的话题，而可生物降解塑料被视为取代传统不可降解塑料的环保材料之一，但若非将其废物单独进行分类收集，仍可能与传统塑料垃圾混合收集处置。有报告显示从 1950 年至 2015 年间产生的塑料垃圾中约有 79% 被填埋处置或丢弃于自然环境之中^[32]。因此，若不妥善处置可生物降解塑料，其可能会随着传统塑料垃圾一起被填埋或泄露到自然环境中。

由于可生物降解塑料需要满足特定条件才能完成充分降解，因此其进入不同类型的自然环境中的降解情况也不尽相同。会发生最强烈的降解反应的环境是堆肥，然后依次为土壤、淡水、海洋。决定因素主要是温度和环境中的微生物群^[3,12,25]。除了以上两个决定因素外，相对湿度、含氧量也是影响可生物降解塑料的降解程度的主要因素。但是这些环境因素往往会被忽略，因此造成了大众对于可生物降解塑料可以在自然环境中被降解的误解^[33]。对于特定可生物降解塑料，达到工业堆肥的高温条件是促成其降解的重要因素。比如 PLA 的降解条件之一是环境温暖度需要高于其玻璃化转化温度，而在其他较低温的环境中，PLA 则不会完成生物降解。表 2.3 摘选了部分目前关于不同可生物降解塑料在土壤、海洋、淡水等不同环境中的生物降解率的相关研究结果。

值得注意的是，目前用于测试聚合物的生物降解性的环境主要基于模拟合成的情况，而非动态开放的自然生态系统，因此测试结果可能会低估了聚合物在自然环境中降解所需的时长。通过现有评估塑料生物降解性能的测试方法的产品，可能在真实环境中无法降解^[22,34]。

表 2.3. 不同可生物降解塑料在土壤、海洋、淡水等不同环境中的生物降解率[22, 34, 35]

塑料名		降解环境	降解条件	降解率 (%)	降解时长 (天)	文献来源
PHA 基	PHB	土壤	真实环境 (越南热带土壤)	98	300	[40]
	PHA		35° C	35	60	[41]
	PHB/米糠 (60/40%)		35° C	>90	60	
	PHA 薄膜		20° C, 60%湿度	48.5 70	280 660	[42]
	PHBV 薄膜 (12%HV)		23-25° C, 20%湿度	35	200	[43]
	PHBV 粉末 (2%HV)		25° C	70	350	[44]
	PHB	海水	25° C	80	14	[45]
	PHB		静态培养, 21° C	99	49	[46]
	PHB		动态培养, 12-21° C, pH 7.9-8.1	30	90	
	PHBV		静态培养, 21° C	99	49	
	PHBV		动态培养, 12-21° C, pH 7.9-8.1	30	90	
	PHB		平均温度 28.75° C, pH 7-7.5	58	160	[17]
	PHBHx 薄膜 (6.5% HV)		23° C	89	148	[47]
	PHBHx 薄膜 (7.1% HV)		23° C	55	195	
	PHBHx 薄膜 (11% HV)		27° C	35	28	[48]
	PHB 薄膜		25° C 恒温人工海水	6	365	[39]
	PHBV 粉末 (8% HV)	海水 +海 滩沙 子	25° C	90	210	[49]
	PHB	河水	真实环境 ~20° C	43	42	[50]
	PHBV 薄膜		25° C	90	90	[44]
	PHB 薄膜	淡水	25° C 恒温人工淡水	8	365	[39]
	PHB	微咸 水沉 积物	32° C, pH 7.06	100	56	[51]

续表 2. 3. 不同可生物降解塑料在土壤、海洋、淡水等不同环境中的生物降解率^[22,34,35]

塑料名		降解环境	降解条件	降解率（%）	降解时长（天）	文献来源
PLA基	PLA	土壤	30%湿度	10	98	[36]
	PLA/剑麻纤维（60/40%）		30%湿度	>60	98	
	PLA（粉末）		25° C, 60%湿度	13. 8	28	[37]
	PLA/NPK（62. 5/37. 5%）		30° C, 80%湿度	37. 4	56	[38]
	PLA/NPK/EFB（25/37. 5/37. 5%）		30° C, 80%湿度	43	56	
	PLA 薄膜	淡水	25° C 恒温人工淡水	<0. 8	365	[39]
海水	25° C 恒温人工海水					
淀粉基	淀粉基塑料	土壤	20 ° C, 60%湿度	14. 2	110	[42]
	Mater-Bi 生物塑料	海水+沉积物	室温	68. 9	236	[52]
PA 基	尼龙 4（聚酰胺，生物基）	海水	25° C	80 30	25 21	[45]
PBS基	PBS 薄膜	土壤	25 ° C, 60%湿度	1	28	[37]
	PBS 粉末		25 ° C, 60%湿度	16. 8	28	
	PBS/淀粉（薄膜）		25 ° C, 60%湿度	7	28	
	PBS/淀粉（粉末）		25 ° C, 60%湿度	24. 4	28	
PCL	PCL 薄膜	淡水	25° C 恒温人工淡水	<2	365	[39]
	海水	25° C 恒温人工海水				
PBAT	Ecoflex	淡水	25° C 恒温人工淡水	<1. 8		
		海水	25° C 恒温人工海水			
PLGA	PLGA 薄膜	淡水	25° C 恒温人工淡水	100	270	[39]
		海水	25° C 恒温人工海水			

2. 2. 1 露天或土壤 (农田) 环境

塑料垃圾可能会被随意丢弃于露天或者土壤等自然环境中。在露天的环境中, 由于缺少丰富的微生物, 光降解是主要的塑料降解方式。而在土壤环境中, 由于存在丰富的微生物, 生物降解是主要的降解方式。

有对 PPDO、PLA 及 PBAT 的研究表明, 仅有 PPDO 在被置于空气和土壤环境中 6 个月后达到了约 60% 的降解率, 而 PLA 与 PBAT 的降解率均小于 10%。PLA 混合物 (50%PLA+50%PE) 以及 PBAT 混合物 (90%PBAT+10%PLA) 的降解能力均劣于纯 PLA 材料和纯 PBAT 材料^[53]。该研究表示除了 PPDO 以外, PLA、PBAT 及其混合物在自然环境中的降解表现均无法实现 60% 降解率的可生物降解塑料的降解标准^[22,53]。目前对可生物降解塑料的国际测试标准主要基于堆肥条件, 因为

堆肥条件下的高温、高含水量以及丰富的微生物群可加速可降解塑料的快速降解，然而现实的露天或土壤自然环境中的条件很难达到该标准^[53]。因此，即使通过了实验测试标准的可降解塑料，其若未被妥当处置而成为露天或土壤中的垃圾，也可能并不能快速降解而长期存在与该环境之中。

■ 可降解农膜

农膜在农业生产中被大量应用，帮助提高农业产量。然而废弃农膜的碎片遗留在土壤中，也会对农田造成污染和破坏。近年来，可降解塑料开始应用到农膜当中，希望可以解决塑料残留的问题。而降可降解农膜的主要应用为地膜，通常不被作为棚膜使用。

■ 可降解农膜的类型

可降解地膜根据其引发降解的客观条件和机理可被分类为光降解地膜、生物降解地膜以及光/生物降解地膜^[54, 55]。

光降解地膜 原理为在高分子链中引入光敏基团或光敏性物质，而后通过吸收紫外线（通常是日光）来引发塑料的光氧化降解，但当其被埋于土中或者被农作物覆盖时将难以照射到足够的紫外线从而导致部分地膜无法得到光降解，从而有着对自然环境造成污染的风险，另外光降解地膜的降解速率很难控制，其只适合应用于光照充足地区，因而应用范围狭窄^[55-59]。另外，光降解地膜的主要成分是聚烯烃类树脂，无法被完全降解，且有些光敏剂成分为重金属，因而有着造成环境污染的风险，无法达到环保要求^[59]，因此本报告未将光降解农膜列入此次的讨论范围内。

生物降解地膜 是通过自然界中的微生物活动进行降解的一种地膜^[55]。可生物降解地膜可以用于取代传统的非可生物降解塑料地膜以减少对农地的塑料污染，被宣传的优势主要是在其生命终期可直接降解于到农田中，而不需要被清除，因此不仅可以减少塑料污染，也可以减少垃圾处置的劳动力和成本^[60-62]。根据主要原料，可生物降解塑料地膜可分为生物基和石油基塑料，其中最常见的生物基可生物降解塑料主要为淀粉基、PLA 和 PHA，而最常见的石油基可降解生物塑料主要为 PBAT、PBS、PCL 以及 BPSA^[63, 64]。表 2.4 列举了常见的商业销售的可生物降解地膜的产品及其成分。

光/生物降解地膜 是在通用高分子材料中（如 PE）加入了光敏剂、自动氧化剂、抗氧剂以及生物降解助剂制成，同时具有光与生物降解的功能，目前使用淀粉作为生物降解助剂的技术比较普遍。光/生物降解地膜仅仅是加速了地膜中可降解部分的降解过程，并没有实质性解决光降解地膜的问题，添加剂可使光/生物降解地膜降解破碎成大量难以清除的小颗粒，完全降解效果不佳，可能会对环境带来更严重的潜在污染^[55, 58, 59]。

按照降解的机理和破坏形式，可生物降解地膜可以被分为添加型不完全生物降解地膜和完全生物降解地膜^[55]。

添加型不完全生物降解地膜 是在不具有降解特性的通用塑料（如 PE、PP 和 PVC 等）中添加具有生物降解特性的天然或合成聚合物（如淀粉、脂肪族聚酯或聚羟基丁酸酯等）制成，其中以淀粉为最普遍的易生物降解添加物，该类型地膜中留存的 PE 或者聚酯无法被完全生物降解^[9,69]。

完全生物降解地膜 指可在自然环境中通过微生物活动达到 100%降解的一类地膜，该种地膜可保持接近于常规塑料的物理力学性能，而在被废弃后最终将被自然界中的微生物（细菌、真菌等）分解成二氧化碳和水^[9,70]。完全生物降解地膜可进一步被分为合成型生物降解地膜（如 PHA、PHB、PLA、PBS、PCL、PBAT 等等）和天然生物聚合型可生物降解地膜（如淀粉、蛋白质、纤维素、壳聚糖以及果胶等^[70]。

表 2.4. 常见的商业销售的可生物降解地膜的产品及其成分^[63, 64]

商品名	聚合物/共混聚合物
Bio360	Mater-Bi (淀粉混合材料)+PBAT
BioAgri	Mater-Bi (淀粉混合材料)+PBAT
Biocycle	蔗糖/PHA 混合材料
Bio-Flex	PLA/共聚酯
Biomax TPS	淀粉+TPS
Biomer L	PHA
Biopar	淀粉共聚酯
Biosafe	PBAT/淀粉混合物；PBS；PBSA
Ecoflex	PBAT
Ecovio	PLA+PBAT
Envio	PBAT+PLA+淀粉混合材料
GreenBio	PHA
Ingeo	淀粉+PLA；PBS+PLA
Mater-Bi	淀粉混合材料（根据不同等级的混合材料不同） Mater-Bi® Z: 淀粉+PCL 混合材料 ^[65-68] Mater-Bi® N: 淀粉+PBAT 混合材料 ^[65-67]
Naturecycle	淀粉
Paragon	淀粉+TPS
ReNew	PHA

■ 可生物降解地膜在国内的应用效果评估

为了解可生物降解地膜在实际应用中的效果，我们查阅了相关研究报告，对结果进行了综述。我国的相关科研机构 and 农业推广机构 2010 年以来开始与日本、德国和法国的相关企业进行合作，重点在西北、西南及华北等部分地区进行可生物降解地膜的实验和推广示范，应用的作物有棉花、玉米、烟草、马铃薯和蔬菜等^[69,71]。在我国农业部的支持下，中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所于 2011 年以来与国内外相关企业合作，在我国多个地区建立了生

物降解地膜适宜性评价基地，对国内外主要的生物降解地膜产品的应用进行综合评价并对其配方进行改进和完善^[69]。

2015 年，我国相关部门为开展全国生物降解地膜实验评价设立了专项资金，择取 20 多家公司的不同生物降解地膜，对其在东北、华北、西北和西南四大区域的 11 个省市 23 个区县 7 作物上的应用展开了实验评估。该评估结果表明大多数生物降解地膜在如烟草和花生等所需要覆膜的时间较短的作物上的应用表现较好，而对于那些需要覆膜的时间较长的作物的应用表现较差。并且在区域性的应用表现上也存在着差异，生物降解地膜于华北西南地区的应用适宜性要高于西北地区，尤其是西北内陆地区对生物降解地膜有相对较高的要求^[69]。

国内有研究者对不同的可生物降解地膜与传统的不可降解 PE 地膜的应用性能进行了田间试验比对，表 2.5 列举了部分国内对比可生物降解地膜与传统 PE 地膜的性能的田间试验的结果。这些田间试验均表明应用可生物降解地膜的与普通 PE 地膜一样，具有保温、保墒和保水等作用，均比不覆盖地膜更有利于农业种植。其中，表 2.5 中的一些田间试验表明可生物降解地膜在维持土壤性状与促进作物生长方面与传统 PE 地膜相似，也有部分试验表明有些可生物降解塑料相对于 PE 地膜对土壤的性状与作物生长方面有劣势，取代 PE 地膜有一定的局限性。但是，不同材料与性状的生物降解地膜、不同的作物生长特性、不同的种植地区与自然环境以及不同的地膜生产商等因素均会影响地膜的应用效果，因此应当因地制宜，针对应用地区与作物的情况来选择合适的可生物降解地膜^[70, 72, 73]。

表 2.5 国内部分关于对比可生物降解地膜与传统 PE 地膜的应用性能的田间试验。

地膜成分 (膜厚)	地膜 生产商	应用作物	实验 地点	结果	文献
PLA/PBAT (0.012mm) ; PE (0.008mm)	广州市施威 特经济技术 开发公司;	冬种马铃薯; 稻米 (用于评 估 土 壤 中 PLA/PBAT 地膜 残 留 物 的 影 响)	广 东 惠 州 博 罗 县	(1) PLA/PBAT 地膜在马铃薯的生 长期就开始降解, 因此造成在马铃 薯生长后期阶段的土壤温度与保水 效果与 PE 地膜有差异。 (2) 使用 PLA/PBAT 地膜马铃薯茎 块产量和水分利用效率与使用 PE 地 膜的并无显著不同。 (3) 种植在埋有 PLA/PBAT 地膜残 留物的土壤中的稻米的产量比起种 植于无地膜残留物的土壤中的产量 有所增加。并且在收割稻米后, 土 壤中的剩余地膜残留物微乎其微。 (4) PLA/PBAT 地膜残留物改善了土 壤健康	[74]
PBSA (0.009mm) ; PBSA (0.006mm) ; PBSA (0.009mm) ; PE (0.008)	日本昭和电 工株式会 社; 施威特公 司; 施威特公 司; 施威特公 司;	甘蔗	广 东 省 湛江市	(1) 覆盖 PBSA 地膜处理的甘蔗 萌芽率、分蘖率与覆盖 PE 地膜的基 本相同。 (2) PBSA 地膜具有 PE 地膜的增 温、保水作用。 (3) 覆盖 0.009 mm 的 PBSA 地膜 的萌芽率和产量高于 0.006 mm 的 PBSA 地膜 (4) 覆盖 PBSA 地膜处理的苗数均 低于覆盖 PE 地膜 (5) 两个不同公司生产的 PBSA 地 膜的应用效果基本相同。	[75]
透 明 PBAT (0.01mm) ; 透 明 PE (0.01mm) ; 黑 色 PBAT (0.01mm)	新疆蓝山屯 河科技股份 有限公司	玉米; 棉花	新 疆 维 吾 尔 自 治 区 二 六工镇	(1) 种 PBAT 的地膜的应用效果和 PE 地膜相当, 均显著增加了作物高 度、茎粗、叶面积、作物生物量及 产量。 (2) PBAT 地膜和 PE 地膜均显著提 高了作物的水利用效率且效果相 当。 (3) PBAT 地膜的降解能力远高于 PE 地膜。	[76]

续表 2.5 国内部分关于对比可生物降解地膜与传统 PE 地膜的应用性能的田间试验。

地膜成分 (膜厚)	地膜 生产商	应用作物	实验地 点	结果	文献
透明淀粉高分子塑料 (0.01mm) ; 透明 PBSA (0.01mm) 白色 PBAT (0.01mm) 透明 PBAT (0.012mm) 透明 PE (0.008mm)	新疆绿丰塑业有限公司; 新疆天业有限公司; 广州金发科技股份有限公司; 广州金发科技股份有限公司; 新疆天业有限公司;	棉花	新疆石河子市	(1) 可生物降解农膜的积累的残余地膜显著少于 PE 地膜。 (2) 可生物降解塑料可以有效地控制土壤盐分以及湿润土壤。 (3) 由于可生物降解地膜在 40-60 天后会开始降解, 因此其调节土壤水分与盐分的作用劣于 PE 地膜。 (4) 在土壤表面时, PBAT 的降解过程要慢于 PBSA, 但其被埋于土壤中后可被更完整地降解。 (5) 覆盖较厚的 PBAT 地膜 (0.012mm) 的棉花产量与 PE 地膜的相差甚微。 (3) 覆盖可生物降解地膜的作物 的水利用力显著地低于 PE 地膜。	[77]
PBS; PLA; PBSA; PE	未知	棉花	新疆石河子市	(1) 3 种可生物降解地膜覆盖下的土壤温度相较于覆盖 PE 地膜覆盖下的温度都要低。 (2) 3 种可生物降解地膜覆盖下的土壤含水量和产量均显著低于 PE 地膜。 (3) 虽然 3 种可生物降解地膜均具有保墒、压盐的效果, 但由于其过早的降解, 土壤水分蒸发速度明显过快, 盐分向地表大量的聚集, 地膜裂解后杂草旺长, 与棉花竞争水分以及养分, 影响棉花的生长。	[78]
PBS (0.01mm) ; PE (0.01mm)	日本三菱公司; PE 地膜生产商未知	冬小麦	甘肃省镇原县上肖乡	(1) PBS 地膜覆盖具有较好的增温保墒功能, 相较于 PE 地膜, 冬小麦产量和水分利用效率略低, 但差异不显著。 (2) PBS 地膜在夏季休闲期翻耕 90 天降解 80% 以上, 135 天完全降解。	[81]

续表 2.5 国内部分关于对比可生物降解地膜与传统 PE 地膜的应用性能的田间试验。

地膜成分 (膜厚)	地膜 生产商	应用作物	实验地 点	结果	文献
黑 色 PBAT (0.0092mm) ; 黑 色 PBAT (0.0098mm) ; 黑 色 PBAT (0.0068mm) ; 黑 色 PE (0.01mm)	蓝山屯河; 山东清田; 山东天野; PE 地膜生产 商未知	番茄	新 疆 维 吾 尔 自 治 区 昌 吉 回 族 自 治 州 昌 吉 市 下 巴 湖 农 场	(1) 厚度 0.008 左右的 PBAT 地膜 能满足机械作业的要求, 覆膜效 果与 PE 地膜相同。 (2) 3 种生物降解地膜产品虽然在 增温和保水性 能上略次于 PE 地 膜, 但可基本满足作物的生长发育 需求。在采收作物时, 50%~70% 生 物降解地膜破裂并降解, 避免了地 膜缠绕、采收机绞轮等情况, 提高 了作物采收效率以及商品率。 (3) 3 种 PBAT 地膜的透湿率均远低 于全生物降 解地膜国家标准。 (4) 与 PE 地膜处理相比, 山东清 田与蓝山屯河 PBAT 地膜处理加工作 物产量略有增加, 但山东天野生物 PBAT 地膜的处理产量减产 13.3%。 (5) 蓝山屯河和山东清田 2 种 PBAT 地膜覆盖的作物产量、产值和 纯利润与 PE 地膜持平, 无明显差 异。	[79]
玉 米 淀 粉 20%、油 脂 6%、PCL70%、 各种助剂 5% (0.02 ~ 0.025mm) ; 无 机 填 料 30%、PCL60%、 油脂 4%、各种 助 剂 9% (0.02 ~ 0.025mm) ; 淀粉 14%、填 料 18%, 降解 树脂 54%、油 脂 5%、多羟基 聚酯 2%, 各种 助 剂 7% (0.02 ~ 0.025mm) ; PE (0.008mm)	广东上九生 物降解塑料 有限公司; PE 地膜生产 商未知	棉花	河 北 成 安; 新 疆 石 河子市	(1) 3 中可降解生物地膜的增温保 墒性能存在区域性差异, 在河北试 验点的降解速率显著快于新疆试验 点。 (2) 3 种地膜降解速率过快, 显著 地影响了增温保墒性能, 覆盖 3 种 地膜的土壤温度和水分均相较于覆 盖 PE 地膜要低, 尤其前 2 种地膜的 较 PE 地膜的差距更明显。 (3) 覆盖第 1 与第 2 种地膜的作物 产量与 PE 地膜相比呈现减产趋势, 在河北试验点减产 5%, 在新疆试验 点减产 20%以上。而覆盖第 3 种地膜 的作物产量与 PE 地膜产量接近。	[80]

续表 2.5 国内部分关于对比可生物降解地膜与传统 PE 地膜的应用性能的田间试验。

地膜成分 (膜厚)	地膜 生产商	应用作物	实验地 点	结果	文献
白色 PBAT(0.01mm) ; 黑色 PBAT(0.01mm) ; 白色 PE (0.01mm)	广州金发科技 公司; PE 地膜生产 商未知	谷子	山西中 部	(1) 黑色和白色 PBAT 地膜均与 PE 地膜的增温保墒效果接近。 (2) 黑色和白色 PBAT 地膜处理时的土壤平均含水率较 PE 地膜处理要低, 而黑色 PBAT 相较于白色 PBAT 处理的土壤含水率更高。 (3) 黑色 PBAT 地膜覆盖时的作物产量、杂草防除效果和水分利用效率最优。	[82]
PBAT(0.01mm); PBAT(0.012mm) ; PE(0.008mm);	广州金发科技股份有 限公司; 广州金发科技股份有 限公司; 新疆天业有 限公司;	棉花	新疆石 河子市 西郊	PBAT 地膜与 PE 地膜对土壤的保水增墒效果相似。	[83]
黑色玉米淀粉 聚 酯 (0.01mm); 白 色 PE(0.006mm)	法国利马格 兰 (biolice 可 降 解 地 膜); PE 地膜生产 商未知	烤烟	昆明寻 甸	相较于 PE 地膜, 覆盖 biolice 地膜的土壤保水性能不足, 不利于烟珠的早生快发, 致使烟珠的生育期有所推迟以及烟珠主要农艺性状的生长发育受到一定限制。	[84]
PBAT/PLA (0.008mm); PBAT/PLA (0.01mm); PE(0.008mm)	广州金发科技股份有 限公司; 广州 金发科技股 份 有 限 公 司; 北京鑫同利 塑料厂	茶菊	北京延 庆区旧 县镇羊 房村	覆盖此 2 种可生物降解地膜对茶菊的抑草效果以及增产效果与 PE 地膜接近。	[85]

综合各项研究的结果来看, 可生物降解地膜同样能够起到增墒、保水的作用, 相比于不使用地膜, 可以起到提高产量的作用, 但部分可生物降解地膜的增墒保水效果不如传统地膜。在一些作物上, 选择可生物降解地膜效果更好, 例如花生由于在生长后期果针要下针到土里才能结出果实, 可生物降解地膜在这个阶段已经开始分解, 相对于传统地膜就更有利于下针。在选择可生物降解地膜时, 需要综合考虑作物的生长周期、生长特性, 和当地气候条件下可生物降解地膜的降解速度。在大规模作业时, 地膜的强度是否适合机械化覆膜也是需要考虑的因素之一。

■ 可生物降解地膜的潜在环境问题

可生物降解塑料尽管在可降解性能上具有优势，但同样可能释放微塑料，而且其中的添加剂更容易释放，所以也可能会对环境造成负面影响^[86]。

微塑料：有证据显示可生物降解塑料也可能会像传统不可降解石油基塑料一样于自然环境中产生微塑料，并且由于可降解塑料更为脆弱，其可能在相同时间内比传统不可降解塑料产生更多的微塑料，短时间可能会在土壤生态系统中导致更严重的微塑料污染^[39, 86-88]。生物降解塑料形成微塑料后理论上可以在随后的时间逐渐降解，不过降解速率会受到季节变化、温度和湿度等环境影响^[86]。目前关于微塑料的污染的研究主要集中在不可降解塑料上，对可生物降解塑料产生的微塑料可能导致的潜在危害缺乏研究^[87]。

可生物降解地膜的添加剂：生产可生物降解地膜使用的是生产传统不可降解塑料地膜的加工技术，在其生产过程中会使用少量的添加剂，而具体浓度和特性为地膜制造商专有信息因此难以确定相关数据^[63, 64, 89]。虽然目前有地膜在生产时使用低毒性的可生物降解添加剂来取代油性、合成添加剂，但是可生物降解地膜常使用的添加剂仍与传统不可降解地膜所使用的类似^[90]。表 2.6 列举了塑料地膜所使用的最常见的添加物，这些添加物的主要作用是帮助建立及控制材料的物理性质（如弹性）、帮助地膜在作物周期中达到有效的功能特性（如地膜稳定性）、赋予地膜某些特定特征（如颜色）以及帮助地膜在被废弃后能就地生物降解至土壤中^[63, 90]。

可生物降解地膜的生态毒性：和传统的不可降解塑料地膜不同，可生物降解地膜会完全进入到农业土壤中，其含有的所有物质都会被释放到土壤中并与土壤中的天然微生物以及农耕的植物进行直接的接触。有对 Mater-Bi, Ecovio, Bio-Flex 和 BioFilm 四种商业可生物降解地膜产品的研究表明，其在遇水后便会释放可溶性化合物，证明了可生物降解地膜可受环境的影响而在开始生物降解之前便向环境中释放其所含的化合物，并有对环境造成负面影响的潜在可能性^[87, 95]。为了避免对环境和健康造成危害，有必要对可销售的可生物降解地膜进行生态毒性的评估。但是目前该领域的研究仍处于初期阶段，仅有少量已发表的论文测试了可生物降解地膜对一小部分植物种类及土壤微生物的影响，表 2.7 和表 2.8 列举了部分研究结果。

表 2.6 常见的商业销售的可生物降解地膜的添加剂产品及其成分和功能[63,64,91-94]

添加剂		功能
滑爽剂	脂肪酸酰胺*	减少聚合物的表面摩擦力以辅助加工。
	甘油油酸酯/硬脂酸*	起到润滑作用，避免地膜在存储过程中粘附于表面上或者自粘。
	皂化的脂肪酸*	
稳定剂	HALS（受阻胺光类稳定剂）	在紫外线和大气条件下保护地膜。
	含酚物	紫外线可以使聚合物产生高活性的自由基，与大气中的氧原子一起可以造成称薄膜的破碎。
	有机磷酸酯类	
	苯甲酮*	紫外线屏蔽和吸收是最常见的光保护机制。
染料	碳黑（黑色）	碳黑、二氧化钛和氧化铁有着紫外线屏蔽的功能因此也可以作为稳定剂。
	二氧化钛（白色）	深色可以抑制塑料地膜下的杂草的生长。
	氧化铁（红色）	白色和透明的颜色比起深色的地膜可以提供地膜更强的土壤加温，但是对于抑制杂草的生长的能力较差。
	碳酸钙（白色）	其他颜色或者颜色的组合主要用于特殊用途（比如绿色是为了美观的目的）
填充剂	粘土	以低成本增加塑料地膜的提及和增加多元化的性能，主要是硬度、热和光稳定性以及耐磨性。 例如：碳黑用于交叉连接、滑石粉用于改善硬度和抗张强度。
	碳黑	
	硅酸盐	
	玻璃	
	碳酸钙和滑石粉	
	聚合物（如淀粉）*	
增塑剂	邻苯二甲酸酯类	减少一些聚合物的脆性以改善加工性能。
	甘油*	改善塑料地膜的弹性和提高耐冲击性。
	山梨醇*	
	柠檬酸三乙酯*	
	低聚物	
成核剂和澄清剂	苯甲酸钠	通过促使聚合物以球晶的方式结晶化来改善其机械性能。
	二氧化钛	
	碳酸钙	
	酰胺化合物	
	磷酸金属盐	
	碱性无机铝化合物	
	山梨糖醇衍生物*	

* 表示生物基添加剂

表 2.7 可生物降解塑料地膜对植物的生长发育或土壤微生物的影响

地膜材料 (共混聚合物/化合物) 浓度	试验	植物/土壤 微生物种类	暴露时间	主要影响	文献
地膜碎片 (聚(酯-酰胺)) 2% w/w	盆栽实验, 塑料 埋于土壤中	油菜 水芹 小小米	约 2 个月	减少了油菜、水芹 以及小米的生物量	[96]
含 8mm×8mm 地膜碎片的 MS 液体培养基提取物 (PBAT, PBAT-PLA, PBAT-淀粉, PHB) 1.6%w/v	离体培养	生菜 番茄	生菜 4 周 番茄 3 周	生菜: 发芽和芽生 物量有些许减少, 改变了根系发育。 番茄: 植物生物量 和叶绿素含量有些 许减少, 改变了根 系发育。 增加了叶子中的脯 氨酸。	[97]
MS 培养基溶液 (含可降解塑料地膜中常 见的化学成分: 乳酸、己 二酸) 5-500mg/L	离体培养	生菜 番茄	生菜 4 周 番茄 3 周	生菜: 发芽减少 (500mg/L 己二 酸); 生长减慢 (乳酸和己二 酸)。 番茄: 生长减慢 (50 和 500mg/L 己 二酸); 生长增快 (乳酸和 1,4 -丁 二醇)	[98]
微型碎片 (PLA) 0.1%w/w	盆栽实验, 塑料 埋于土壤中	多年生黑麦草	1 个月	发芽、苗高减少。 增加了叶绿素 a-b 比	[99]
微型碎片 (PLA) 0.1-10%w/w	盆栽实验, 塑料 埋于土壤中	玉米	1 个月	植物生物量、叶绿 素含量减少。	[100]
地膜碎片 2×2cm (PBSA) 4 片/40 克土壤	有盖培养皿实 验, 塑料埋于土 壤中	土壤真菌	4 周	增加了降解 PBSA 的 真菌以及酯酶活性	[101]
10×14cm 地膜碎片 (PBSA 和 PBS) 1 块碎片/70g 土壤	塑料地膜覆盖于 土壤表面	土壤真菌	1 个月	增加了丝状土壤真 菌和棘阿米巴属。	[102]
7×7cm 地膜碎片 (PBAT, PBAT-PLA, PBAT-淀粉, PHB) 3 块碎片/400g 土壤	广口瓶, 塑料填 埋于农用土壤中	土壤微生物水 解活性	6 个月	提高了微生物活性	[103]

续表 2.7 可生物降解塑料地膜对植物的生长发育或土壤微生物的影响

地膜材料 (共混聚合物/化合物) 浓度	试验	植物/土壤 微生物种类	暴露时间	主要影响	文献
2×2cm 薄膜碎片 (PBAT) 0.6%w/w	盆, 塑料填埋于 农用土壤中	从非根际土壤 和塑料表面附 近的土壤中的 细菌和真菌	7 个月	细菌: 在塑料表面 附近的土壤中出现 了 <i>Caenimonas</i> 菌和 生丝微菌群。 真菌: 塑料表面上 富含子囊菌门并且 真菌多样性少于非 根基土壤。 检测到植物病原 菌。	[104]
地膜薄膜 (PBAT-PLA) 1 张膜薄	塑料填埋在农田 中	土壤细菌	7 个月	改变了鞘氨醇单胞 菌属、芽孢杆菌属 和链霉菌属的丰 度。	[105]
地膜薄膜 (PBAT-淀粉, PLA) 103cm ²	填埋于农地中	土壤微生物	18 个月	增加了微生物生物 量。 降低了土壤质量指 数。	[106]
土地地膜 (PBAT-淀粉, 淀粉和聚 酯混合物, PLA-PBAT, PLA-PHA 等五种地膜) 每年换一次新地膜	分别在两块种植 西葫芦的农地进 行实地地膜覆 盖, 并在收获果 实后将地膜埋于 地下	土壤细菌和真 菌	2 年	两块农地内的细菌 丰度均被增加。 其中一块农地中的 NAG 酶活性被降 低。	[107]

表 2.8 可生物降解塑料地膜中的增塑剂对植物的生长发育或土壤微生物的影响

地膜材料 (共混聚合物/化合物) 浓度/尺寸/数量	试验	植物/土壤微生物种类	暴露时间	主要影响	文献
增塑剂 (含有常见的邻苯二甲酸酯类增塑剂 DEHP) 117±5.2mg/kg 土壤	盆栽实验, 掺入 DEHP 的土壤	苜蓿、黑麦草、墨西哥类蜀黍玉米 (7 个不同品种)	40 天	所有植物吸收了 DEHP	[108]
增塑剂 (含有常见的邻苯二甲酸酯类增塑剂 DEHP 和 DBP) 1-500mg/kg 土壤	有盖培养皿, 掺入 DEHP 和 DBP 的土壤	油菜	14 天	DEHP 和 DBP 都降低了植物生物量、根和芽的伸长率。脯氨酸和抗坏血酸过氧化物酶活性增加。	[109]
增塑剂 (含有常见的邻苯二甲酸酯类增塑剂 DEHP 和 DBP) 5-500mg/kg 土壤	有盖培养皿, 掺入 DEHP 和 DBP 的土壤	小麦 燕麦 萝卜 黄瓜 洋葱 苜蓿 多年生黑麦草	14 天	所有物种: DBP 抑制了根伸长、幼苗生长和生物量。 苜蓿: DEHP 抑制了根伸长、幼苗生长和生物量。 除苜蓿、洋葱和黑麦草外的所有物种: DEHP 和 DBP 都增加了其丙二醛含量。 苜蓿、萝卜和洋葱: DEHP 和 DBP 改变了它们的叶绿素含量。	[110]
增塑剂 (含有常见的邻苯二甲酸酯类增塑剂 DBP) 50-500mg/kg 土壤	掺有 DBP 的土壤的盆栽	油菜籽	1 个月	DBP 积累在植物组织中并且降低了植物的高度和重量。随着 DBP 浓度的增加, 硝酸盐含量增加并且可溶性糖含量降低。叶围微生物 (细菌和真菌) 发生改变。	[111, 112]
增塑剂 (含有常见的邻苯二甲酸酯类增塑剂 DBP) 50-500mg/kg 土壤	掺有 DBP 的土壤和栽培植物的盆栽	土壤细菌 土壤真菌	1 个月	细菌: 增加了丰度, 改变了 α -多样性和群落结构。 真菌: 改变了 α 和 β 多样性和群落构成。分子生态网络结构失衡, 不利于共生关系。	[111, 112]

2.2.2 自然水环境

根据以前的研究，可降解塑料在水环境中生物降解时常会随着周围的环境产生显著的改变。在欧洲，目前由 Vincotte 开发并由奥地利技术监督协会集团（TÜV 奥地利）管理的“OK 淡水可降解”和“OK 海水可降解”的认证体系是被最广泛使用的用于评估可降解塑料在海水和淡水中的可生物降解性能的认证^[113]。但是这两个认证仅仅是由该评估机构开发的体系而非国际性或区域性标准，“OK 淡水可降解”的评估体系基于欧洲标准 EN 13432/ EN 14995、EN 14987 以及国际标准 ISO 14851/ISO 14852，而这些标准主要适用于采用活性污泥、堆肥以及土壤作为接种物的测试，并非针对非受控的自然淡水环境^[34]。“OK 海水可降解”的评估体系基于美国标准 ASTM D6691，该标准主要适用于测试塑料在海洋微生物菌种或水柱中的好氧生物降解，然而海洋由不同的环境区域组成（比如水柱和海底等），因此该标准仅仅考虑了一小部分的海洋环境而其测试的条件与真实的海洋环境大相径庭^[113]。

目前，关于塑料在非受控的自然水环境中的可降解性的知识和标准存在以下缺口及问题^[34]：

1. 实验室数据与自然的自然水环境中的生物降解模式的相关性尚有争议。目前的测试程序尚不足以模拟自然水环境中的真实情况，无法还原自然水环境在季节性和地理学上的条件差异。
2. 尚缺乏对于塑料在非受控的自然水环境中的可降解性标准以及测试方法。
3. 尚缺乏关于塑料在多种水环境中的降解能力的更宽泛的实验室及实地研究。
4. 缺少评测可生物降解塑料垃圾对于水环境中的生态系统的广泛影响的毒性测试。

● 可降解塑料在海洋环境的降解情况

即使是在海洋中有旺盛生命活动的生物区域，可生物降解塑料的降解率依旧低于其在陆地或受控环境中的降解率^[33]。

在海洋环境中，塑料废物可能沉积并发生降解的地点可以主要被分为以下 6 个区域^[114]：

- 1) 岸上：（部分）被埋于岸上的沉积物/沙子中而未被暴露于潮汐中
- 2) 沿岸带：（部分）被埋于岸上的沉积物/沙子中且经常被潮水打湿
- 3) 海面上：在海面上漂浮
- 4) 远洋带：在开放海洋水域自由漂移
- 5) 海底上：沉积在（a）浅海地带或（b）深海地带的海底之上
- 6) 海底下：被埋于（a）浅海地带或（b）深海地带的海底之下

测试塑料在海洋环境中的生物降解能力的要求十分特殊，为了评估塑料在各种不同海洋区域中的生物降解和分解能力，应当将不同的环境条件的影响反映在测试中（如是否有沉积物，是厌氧或好氧，营养盐的可用性，光，温度，压强以及微生物群等等）^[4,114]。然而目前尚未有妥当定义塑料在海洋中生物降解的国际性标准，不同海洋区域的物理和化学条件有着显著的差异，现有的技术标准仅仅考虑了好氧环境中的一小部分而忽视了深海、厌氧环境、海洋栖息地、有氧沙质沉积物以及海水-沉积物交界面等环境^[34,113,115]。因此即使是符合现有已发布的海洋生物降解标准的产品，在现实海洋环境中的降解情况可能不尽相同，并不能被视为解决海洋塑料垃圾的方案^[4,114-116]。根据现有的研究表示 PLA 在海洋中几乎无法降解^[4,16-19]，而 PBAT 在海洋中的降解率仅略优于 PLA^[39,117]。

表 2.9 部分可生物降解塑料对海洋生物的生态毒性或影响[116]

海洋生物	聚合物	结果	文献
硬突小齐海鞘	PLA 碎片 (200-500 微米)	减少受精率； 碎片在成年海鞘体组织中积累	[118]
欧洲平牡蛎	PLA 粉末 (0.6-363 微米)	提高了牡蛎的呼吸率； 减少牡蛎栖息地的大型底栖动物群落的丰度	[119]
海蚯蚓	PLA 粉末 (1.4-707 微米)	减少了海蚯蚓栖息的沉积物的初级生产力； 减少了沉积物的微藻类生物量； 提高了海蚯蚓的呼吸率及代谢率	[120]
梭鱼	PHB 粉末	加快梭鱼的生长率及体重增加； 提高了梭鱼的抗氧化酶活性； 提高了梭鱼的免疫基因表达； 改变了梭鱼的肠道微生物群	[121]
贻贝	PHB 悬浮在丙酮中 (10-90 微米)	改变了贻贝的氧化应激标志物	[122]
凡纳滨对虾	PHB 溶解于氯仿中	对凡纳滨对虾的肠道微生物群有益	[123]
杜氏盐藻； 普通海胆； 鲈鱼	Mater-Bi 薄膜 (成分为淀粉、可生物降解型聚酯，天然增塑剂)	对杜氏盐藻无抑制增长率作用； 对普通海胆无/低胚胎毒性； 不会导致鲈鱼的脂质过氧化和微核蚀刻	[124]
底栖海底无脊椎动物	可生物降解塑料袋 (成分为玉米淀粉)	显著减少了海底动物的丰度； 造成了塑料袋下的海洋沉积物的缺氧环境，减少了沉积物的初级生产力及其中的有机物质	[125]
小海王星海草和矮鳗草	Novamont 生物袋 (成分为植物油和玉米淀粉)	增加了植物种内/种间竞争； 改变了海洋沉积物的地球化学特性	[126]
费氏弧菌	PLA, PHA, PBS, PBAT, 植物基 (淀粉, 纤维素, 竹子) 塑料的化学提取物	减少了费氏弧菌的生物发光； 改变了费氏弧菌的氧化应激反应	[127]
明亮发光杆菌	PLA, PCL, PGA, POE 粉末	减少了明亮发光杆菌的生物发光	[128]

● 可降解塑料在淡水环境的降解情况

淡水环境主要包括江河、溪流、湖泊以及湿地，而目前尚无有效的关于在这些淡水环境中的水柱和沉积物下的可降解性的国际或区域性标准^[34]。虽然 Vincotte 开发了“OK 可淡水降解”的产品标志，但其评估产品的体系主要基于采用活性污泥、堆肥以及土壤作为接种物的测试标准，并非是基于实际非受控自然淡水环境中的情况。另外，有研究表明 PHBV 的瓶子在 85 米深，6° C 的湖底沉积物的表层上需要 5 至 10 年才能完全降解，并且其降解速率随着湖水的深度而降低，在 85 米深的沉积物表层上的降解速率约为 20 米深的湖水中的速率的一半^[34, 129]。

● 在水环境中的生态危害

如表 2.3 所示，即使是在海洋中的降解能力最好的 PLGA 和 PHA 基塑料，也需历时几十甚至上百天才能完全或部分降解，降解周期长意味着存在对海洋生物造成伤害的潜在风险，即使这种潜在风险在长远看来可以被降低^[4, 16, 46, 130]。有研究测试了非转基因淀粉制成的可生物降解塑料袋在海豚肠胃液中的降解率，结果显示在 49 天后该塑料袋仅降解了 3%至 9%，意味着在被海洋生物误食后其降解率可能较为缓慢，而不能避免致病风险^[131]。另外，有研究表明 PLA、PBAT 以及 PCL 在淡水和海水中几乎无法降解或降解较慢^[39, 117]，这意味着存在于自然水环境中的 PLA、PBAT 以及 PCL 的塑料垃圾的生态危害可能长期存在。目前关于可生物降解塑料对于水环境中的生态毒性的研究仍很有限，且被研究也主要局限于部分聚合物种类，表 2.9 简要总结了目前关于部分可生物降解塑料对海洋生物的生态毒性或影响的研究^[116]。

2.3 作为不可回收城市固废处置

目前，受限于我国城市垃圾的处理方式，可降解塑料袋废物仍被作为普通干垃圾进行处置。虽然理论上可堆肥塑料袋能作为湿垃圾进行处置，但是实际上由于可堆肥塑料袋与湿垃圾并不能进行同步降解，其在工业堆肥的条件下需要 1 至 2 个月的时间才能完全降解，耗时远长于工业堆肥湿垃圾的时长，因此对其进行工业堆肥比较困难^[132, 133]。基于目前国内对可生物降解塑料废物处置尚无有效的管理政策，且可降解塑料垃圾被作为干垃圾处置，那么对可降解塑料袋进行焚烧或填埋处置的环境影响也不容忽视，本章节回顾了部分相关研究。

2.3.1 焚烧

可生物降解塑料所含的能量容量和传统不可降解塑料相接近，其总热值基本接近于甚至高于木头和纸，因此也可被焚烧处置^[4, 134 - 136]。但不同的是焚烧生物基聚合物是一个闭环过程，因为其焚烧后被释放入大气中的 CO₂ 为植物生长过程中所固定的 CO₂，而与释放化石源 CO₂ 的石油基聚合物相反^[4]。另外，焚烧可堆肥塑料的环境影响可能相对较小，因为对可堆肥塑料的鉴定标准中对其所含的重金属和其他有害生态的物质有严格的限制^[4, 135, 137]。有来自剑桥大学的研究者在对以往的文献进行了回顾总结后得出，如果对可生物降解的生物聚合物进行焚烧处置的能源回收效率足够高，那么焚烧导致的碳排放将大幅减少并优于那些进行生物降解的生命终期处置方案^[4, 138, 139]。

2.3.2 填埋

可降解塑料并不适合填埋处置^[134]。在符合标准的垃圾填埋场中，垃圾的降解十分缓慢，因此在填埋场中的可生物降解塑料的降解表现应与不可降解塑料无明显差别。然而在不合标准的填埋场中，可生物降解塑料会加剧填埋场中垃圾的生物降解并且产生高强度的渗滤液以及填埋气，从而导致地下及地表水受到更严重的污染，以及恶化附近的环境问题^[134, 140]。虽然在填埋场中安装气体收集系统并将甲烷进行收集以作为替代能源可以增加环境收益，但是许多填埋场没有气体收集系统，因此产生的甲烷会被直接排入大气中造成环境污染。另外，若石油基的可生物降解塑料被填埋并最终发生厌氧降解，那么其产生的环境影响可能会更甚于填埋传统不可降解塑料，因为降解会将石油基塑料中的化石碳排放入环境之中^[12]。

2.4 传统的塑料回收处置法

传统塑料的回收处置方法可分为机械回收和化学回收^[141]。由于可生物降解聚合物的成分非常不同于传统的石油基塑料，并且它们是被设计成在被使用过后会发生降解的产品，因此比起传统的机械或化学回收，其更适用于通过堆肥等方式进行处置^[142]。虽然理论上对如淀粉基、PHA 和 PLA 等可生物降解塑料进行机械回收是可行的，但要现实中真正实现回收“可盈利”以及“有足够多的回收材料”也是非常重要的条件^[4, 143]。缺少持续、可靠且足够大量的可生物降解塑料提供源导致对其进行回收处置在经济上缺乏吸引力^[143]。对可生物降解塑料进行回收处置的研究仍是较新的课题，而影响其回收的性能、经济性和可持续性的因素仍不清晰^[4, 25]。

进入城市废物流之中的可生物降解塑料可能会造成现有的塑料回收系统的混乱，并引起新的处置及质量问题^[12, 144]。由于可降解塑料与传统塑料的基础聚合物以及添加混合物不同，因此当其混入传统塑料的回收系统是会增加输入物的异质性以及降低再生塑料的质量、并损害其强度及持久度等特性^[140]。但是用于垃圾分离的光学系统并不能区分传统的塑料和可生物降解塑料，并且传统塑料及可生物降解塑料的质量及密度相似因此难以使用机械分选，因此需要采用如近红外线光谱等新技术来对塑料垃圾进行分类，但是这些系统目前仍存在着技术及经济上的挑战^[145]。

第三章 我国推进（生物）可降解塑料的现状与困难

早在 2008 年，国务院发布了《国务院办公厅关于限制生产销售使用塑料购物袋的通知》正式启动了“限塑令”，到了 2020 年，国家发改委联合生态环境部发布《关于进一步加强塑料污染治理的意见》（简称《意见》），明确了禁止使用一次性不可降解塑料产品的时间表、禁塑目录以及各个行政区划级别的相关指南^[146]。随着禁/限塑的政策收紧，可生物降解塑料作为传统不可降解塑料的替代品，其产业发展迅速但仍处于初级阶段，依然存在着一些问题亟需解决。本章节整理了与可生物降解塑料相关的主要国家政策、发展现状与困难等。

3.1 与可生物降解塑料相关的国家政策

为了推进可生物降解塑料市场的发展，我国陆续出台了支持可生物降解行业的政策，表 3.1 列举了近年来与可生物降解塑料发展的相关政策^[147]。可以看到，在过去几年大部分的政策是倾向于鼓励可生物降解塑料的应用，尤其是新版禁塑令的发布，由于强调禁用不可降解塑料的使用，变相地为包含可生物降解塑料在内的替代材料打开了市场空间。但是 2021 年 9 月，在国家发改委和生态环境部最新发布的《“十四五”塑料污染治理行动方案》中，对包含可降解塑料在内的替代材料的应用有了更加审慎的态度，强调了要更科学稳妥地推广，并要充分考虑全生命周期的环境影响。

3.2 目前推进可生物降解塑料发展的困难与瓶颈

我国可生物降解塑料虽然发展迅速、前景广阔，但是由于尚处于产业化初期，仍有诸多问题待解决。我们总结了以下几点。

1) 监管不足，产品鱼龙混杂

由于现在尚未完善统一的标准体系、生产监管、检测认证制度，部分厂家存在着夸大甚至虚假宣传、将部分可降解塑料伪装成完全可降解等虚标、伪标等不法行为。利用“可降解”、“生态降解”、“环保降解”等环境声明误导消费者，导致市场上的可降解塑料产品鱼龙混杂，不少“伪降解”产品打着可降解的名号在市场上流通或在电商平台上被出售^[1, 155, 156]。

2) 标准滞后、缺失

由于我国对可降解塑料的标准化工作起步较晚，前期的标准主要是以国外先进的标准作为蓝本进行修改，或者使用翻译法直接等效采用国外的标准（如国内标准 GB/T 16716—2012 和 GB/T 28206—2011 分别采用了国外标准 EN 13432:2000 和 ISO 17088:2008），目前这些标准已经滞后陈旧^[156, 157]。比如，目前现行的国内标准 GB/T 20197-2006 规定了降解塑料的术语和定义、分类和标志、降解性能要求、试验方法，但是该标准已经有近 15 年的历史，已与国际先进标准脱节。GB/T 20197-2006 将生物降解塑料、光降解塑料、氧降解塑料等均列为可降解塑料，但由于氧降解塑料不能完全降解且会形成微塑料，其已于 2019 年被欧盟全面禁止^[5, 156]。但值得注意的是，国家市场监督管理总局、中国国家标准化管理委员会已于 2021 年 11

月 26 日发布了 GB/T 41010-2021《生物降解塑料与制品降解性能及标识要求》，明确定义了可生物降解塑料制品的标识，并将于 2022 年 6 月 1 日起正式实施。

另一方面，我国尚未有健全、统一、强制性的可降解塑料标准、认证体系，虽然目前已有国际标准和行业标准，但是各标准的使用条件不尽相同，缺失唯一且容易辨识的可降解塑料的标识，因而市场较为混乱^[1,158]。塑料产品上的“可降解”、“可生物降解”、“可堆肥”等环境说明不够精确、含糊不清，没有附有降解所需的环境条件和时间范围等在内的充分的限定性说明，容易对消费者产生误导。虽然我国则采用了 ISO 14020:1998、ISO 14024:1999、ISO 14021:1999、ISO 14025:2006 等四部国际标准作为推荐性国家标准，以区分不同的环境声明，但是缺乏具有法律属性的强制性标准^[156]。

3) 缺乏面向公众的普及教育

目前，我国对于群众尚未实施相关于可降解塑料的普及性教育，在缺乏可靠的信息的情况下，消费者可能因为望文生义对可降解塑料产品有理想化的理解，在丢弃的时候反而更加的随意^[156,159-161]。由环保组织“摆脱塑缚”对 2086 名公众进行的一项调查显示，仅有 20%左右的公众能够认识到“如果一款塑料产品宣称可降解，并不代表其可以无条件地快速降解”^[162]。因此需要推广相关教育以指导消费者来选择合适的可降解塑料产品并以合适的方式丢弃相应的产品废物。

可降解塑料需要在特定环境和条件下才能完全降解，但在目前产品认证、监管以及公众教育还不完善的情况下，不同使用场景、不同原材料、不同产品类别的可降解塑料制品，在废弃后是否会进入到满足其降解条件的环境或处置设施当中还存疑。^[156,163]例如在现阶段，受限于我国城市垃圾的处理方式，可降解塑料袋废物仍被作为普通干垃圾进行处置，虽然理论上可堆肥塑料袋能被作为湿垃圾进行处置，但是实际上由于可堆肥塑料袋与湿垃圾并不能进行同步降解，其在工业堆肥的条件下需要 1 至 2 个月的时间才能完全降解，耗时远长于工业堆肥湿垃圾的时长，对其进行工业堆肥比较困难，因此目前垃圾处理厂不接受将可降解塑料产品与湿垃圾一同处理^[132,133,156]。

4) 生产成本与售价高昂

目前可降解塑料的生产工艺与加工设备并未像传统塑料那样成熟、通用，加上国内的可降解塑料产量与产能不能满足各方面的需求，因此可降解塑料的成本与售价远高于传统的 PE、PP 等不可降解塑料，因此大规模使用受限。在如农用地膜等低端产品的应用领域上，消费者对于产品的价格敏感度度高，因此难以被推广^[158,164]。

表 3.1 近年来与可生物降解塑料发展相关政策

发布时间	政策名称	可生物降解塑料相关的内容
2012 年 2 月	《石化和化学工业“十二五”发展规划》 ^[148]	将聚乳酸、聚丁二酸丁二醇酯（PBS）可降解塑料、CO ₂ 降解塑料等可降解材料列为“十二五”高端石化化工产品发展重点。
2013 年 2 月	《产业结构调整指导目录（2011 年本）》（2013 年修正） ^[149]	将可生物降解塑料及其系列产品开发、生产与应用列为鼓励类。
2016 年 8 月	《轻工业发展规划（2016—2020 年）》 ^[150]	将全生物降解材料及产品列为发展与研发的重点任务之一；将加快完全生物降解地膜列为主要行业发展方向；重点发展生物基塑料。
2019 年 1 月	《“无废城市”建设试点工作方案》 ^[151]	将扩大可降解塑料产品应用范围列为重点任务。
2020 年 1 月	《关于进一步加强塑料污染治理的意见》 ^[152]	要求推广应用可降解塑料及其相关产品以替代不可降解塑料产品的；要求加大可循环、可降解材料关键核心技术攻关和成果转化，提升替代材料和产品性能。以降解安全可控性、规模化应用经济性等为重点，开展可降解地膜等技术验证和产品遴选。要求制修订可降解材料与产品的标准标识。
2020 年 8 月	《商务部办公厅关于进一步加强商务领域塑料污染治理工作》 ^[153]	要求推动商务领域塑料减量化新模式、新业态发展。引导商场、超市等场所，通过积分奖励等激励手段推广使用环保布袋、纸袋等非塑料制品和可降解塑料袋，鼓励设置自助式、智能化投放装置，推广使用生鲜产品可降解包装膜（袋）。加快建立集贸市场购物袋集中购销制度。在餐饮外卖领域推广使用符合性能和食品安全要求的秸秆覆膜餐盒等生物基、可降解塑料袋等替代产品。加强电商、外卖等平台企业入驻商户管理，制定一次性塑料制品减量替代实施方案，推广可循环、易回收、可降解替代产品。
2021 年 9 月	《“十四五”塑料污染治理行动方案》 ^[154]	科学稳妥推广塑料替代产品。充分考虑竹木制品、纸制品、可降解塑料制品等全生命周期资源环境影响，完善相关产品的质量和食品安全标准；开展不同类型可降解塑料降解机理及影响研究，科学评估其环境安全性和可控性；健全标准体系，出台生物降解塑料标准，规范应用领域，明确降解条件和处置方式；加大可降解塑料关键核心技术攻关和成果转化，不断提升产品质量和性能，降低应用成本；推动生物降解塑料产业有序发展，引导产业合理布局，防止产能盲目扩张；加快对全生物降解农膜的科学研究和推广应用；加大可降解塑料检测能力建设，严格查处可降解塑料虚标、伪标等行为，规范行业秩序。

结语：应审慎科学地应用可生物降解塑料

虽然可生物降解塑料可以通过如堆肥、厌氧消化等生物处置法来将其废物进行再生及资源利用，但其仅是解决塑料污染的方案的一部分，并不能被视为可生物降解用于解决最终问题的“万能药”^[165]。尤其在解决海洋塑料垃圾方面，由于目前的可生物降解塑料无法在海洋中快速降解，因此仍可能持续造成海洋塑料污染，并不能被作为解决海洋塑料垃圾的主要手段^[115]。然而，由于对可降解塑料的知识普及不足，群众对可降解塑料的误解现象普遍。诸如 UNEP 等机构的研究结果发现，群众对“可降解”性能的过度理想化，有可能会使其将可降解塑料作为一种解决污染的最终技术手段，担心会因此降低其妥善处理塑料垃圾的责任感，致使更多的塑料垃圾的产生^[13,14]。有一份对洛杉矶年轻人的调查显示（应引用超市使用前后或几年的数据，而不是对有特定想法人群的调查数据。），塑料产品上的“可降解”标识是诱发随意丢弃塑料垃圾的因素之一^[166]。

对可生物降解塑料的妥善处置应当建立在针对不同类型可降解塑料的妥善分类收集以及正确的终端处置之上。但由于目前我国对于可降解塑料的回收处置系统尚不完善，后端处置链滞后等问题，可降解塑料尚不能被妥善处置，极可能被最终焚烧填埋处置，如此便不能发挥其生物处置的优势，甚至导致严重的环境污染。并且，目前可生物降解塑料的市场较为混乱，不少消费者无法正确辨识可降解塑料，若错误地将可生物降解塑料和传统塑料一起进行回收则可能会造成现有的塑料回收系统的混乱，并引起新的处置及再生塑料的质量问题^[12,144]。

目前针对可降解塑料的降解性的测试结果主要是基于工业堆肥集中处理环境条件下，而实际的应用环境可能不同于测试环境，因而其最终的实际应用效果可能与测试结果大相径庭，尤其是在未受控的完全自然环境下的降解效果还需要进一步被验证^[167]。有研究报告显示，仅有 TPS 和 PHB 在所有受控环境（工业堆肥、家庭堆肥、厌氧消化）及非受控自然环境（海洋、淡水、水厌氧生物降解、土壤）下的降解能力均可满足相应的 IOS 及 ASTM 标准，而 PHO 和 PBS 仅在工业堆肥的环境下才能满足相应的降解标准^[168]。另外，可降解塑料中的添加剂对环境和生态的潜在危害也仍需要被进一步验证。

综上所述，目前关于可生物降解塑料的应用仍存在较多技术及政策短板，解决塑料污染问题不能过于依赖可生物降解塑料的技术，对于塑料的源头减量才是重中之重。

附录

附A. 可生物降解塑料的标准与标识

目前国内外出台了多种标准以对可降解塑料产品进行评价及认证，在通过使用定义明确且公认的测试方法进行测试后，若某塑料产品被证实可以满足某特定的标准或规范，那么该产品则会被官方认证为可以在该特定标准定义的环境条件下进行降解，并被允许使用相应的产品标识^[3]。这些标识就如同身份证一样，便于人们明确区分不同塑料制品的种类以及材质^[1,157,169]。

下方分不同的降解环境，列举了其他国家和地区主要的可生物降解塑料的标志及认证标准^[3,8,170]。

1. 工业堆肥可降解塑料相关认证

(1)

认证机构：TÜV AUSTRIA Belgium (原 Vinçotte)

评定标准：EN 13432

国家/地区：比利时



(2)

认证机构：美国可生物降解产品协会

评定标准：ASTM D6400

国家/地区：美国



(3)

认证机构：意大利堆肥协会

评定标准：EN 13432

国家/地区：意大利



(4)

认证机构：TÜV Rhineland/ DIN CERTCO

评定标准：EN 13432

国家/地区：德国



(5)

认证机构：澳大利亚生物塑料协会/DIN CERTCO

评定标准：AS 4736

国家/地区：澳大利亚



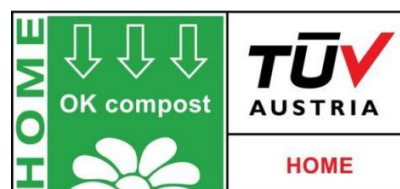
2. 家庭堆肥可降解塑料相关认证

(1)

认证机构：TÜV AUSTRIA Belgium (原 Vinçotte)

评定标准：TÜV AUSTRIA Belgium 自定的标准体系

国家/地区：比利时



(2)

认证机构：TÜV Rhineland/ DIN CERTCO

评定标准：NF T51-800; AS 5810

国家/地区：德国



(3)

认证机构：澳大利亚生物塑料协会/ DIN CERTCO

评定标准：AS 5810

国家/地区：澳大利亚



3. 土壤环境可降解塑料相关认证

(1)

认证机构: TÜV AUSTRIA Belgium (原 Vinçotte)

评定标准: EN 17033

国家/地区: 比利时



(2)

认证机构: TÜV Rhineland/ DIN CERTCO

评定标准: EN 17033

国家/地区: 德国



4. 淡水环境可降解塑料相关认证

(1)

认证机构: TÜV AUSTRIA Belgium (原 Vinçotte)

评定标准: TÜV AUSTRIA Belgium 自定的标准体系

国家/地区: 比利时



5. 海洋环境可降解塑料相关认证

(1)

认证机构: TÜV AUSTRIA Belgium (原 Vinçotte)

评定标准: 以 ASTM D7081(该标准已被撤销)为基准的
TÜV AUSTRIA Belgium 自定的标准体系

国家/地区: 比利时



2021 年 11 月 26 日，国家市场监管总局/国家标准化管理委员会发布了 GB/T 41010-2021《生物降解塑料与制品降解性能及标识要求》，该标准将于 2022 年 6 月 1 日起正式实施，以对可降解塑料进行统一标识。该《要求》规定可降解塑料标识由文字标识和图形标识组成：

• 文字标识

生物降解塑料与制品的文字标识应包括下列内容：

- a) 材质；
- b) 降解环境条件；
- c) 依据产品标准或降解测试方法标准及产品名称。

• 图形标识

生物降解塑料与制品的降解标识如附图 1.1 所示



附图 1.1 《生物降解塑料与制品降解性能及标识要求》中规规定的生物降解塑料与制品的降解标识

附图 1.2~1.4 分别示例了不同生物降解塑料制品的标识。



>PBAT70+CaCO₃ 30<

可土壤降解;可堆肥化降解;
海洋环境降解;淡水环境降解

GB/T 38082—2019 非食品接触用生物降解塑料购物袋

附图 1.2 PBAT 和 CaCO₃ 制备的非食品接触用生物降解塑料购物袋的标识



>PLA<

可堆肥化降解;高固态厌氧消化
GB/T 18006.3—2020 生物降解勺

附图 1.3 PLA 制备的生物降解勺的标识



>PBAT70+PLA30<

可土壤降解;可堆肥化降解;污泥厌氧消化;高固态厌氧消化
GB/T 38082—2019 生物降解塑料购物袋

附图 1.4 PBAT+PLA 共混材料制备的生物降解购物塑料袋的标识

附B 现行或即将实施的针对可降解塑料制品的国家标准

附表 2 目前现行或即将实施的针对可降解塑料制品的国家标准

标准号	标准名	发布日期	实施日期	发布单位
GB/T 41008-2021	生物降解饮用吸管	2021-11-26	2022-06-01	国家市场监督管理总局、 中国国家标准化管理委员会
GB/T 41010-2021	生物降解塑料与制品降解性能及标识要求	2021-11-26	2022-06-01	国家市场监督管理总局、 中国国家标准化管理委员会
GB/T 18006.3-2020	一次性可降解餐饮具通用技术要求	2020-11-09	2020-12-31	国家市场监督管理总局、 中国国家标准化管理委员会
GB/T 38727-2020	全生物降解物流快递运输与投递用包装塑料膜、袋	2020-03-24	2020-10-01	国家市场监督管理总局、 中国国家标准化管理委员会
GB/T 38082-2019	生物降解塑料购物袋	2019-10-18	2020-05-01	国家市场监督管理总局、 中国国家标准化管理委员会
GB/T 35795-2017	全生物降解农用地面覆盖薄膜	2017-12-29	2018-07-01	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国 国家标准化管理委员会
GB/T 32366-2015	生物降解聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯 (PBAT)	2015-12-31	2017-01-01	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国 国家标准化管理委员会
GB/T 32163.2-2015	生态设计产品评价规范 第2部分：可降解塑料	2015-10-13	2016-05-01	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国 国家标准化管理委员会
GB/T 29646-2013	吹塑薄膜用改性聚酯类生物降解塑料	2013-09-06	2014-01-31	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国 国家标准化管理委员会
GB/T 16716.7-2012	包装与包装废弃物 第7部分：生物降解和堆肥	2012-11-05	2013-05-01	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国 国家标准化管理委员会
GB/T 27868-2011	可生物降解淀粉树脂	2011-12-30	2012-09-01	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国 国家标准化管理委员会
GB/T 20197-2006	降解塑料的定义、分类、标识和降解性能要求	2006-03-08	2007-01-01	中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国 国家标准化管理委员会

参考资料

- [1] 石鑒杰, 朱佳欢, 施均等. 可降解塑料产品的分类与标识的现状与展望[J]. 塑料助剂, 2021(03): 1-5.
- [2] 全国塑料制品标准化技术委员会. 降解塑料的定义、分类、标识和降解性能要求: GB/T 20197-2006[S] 中国轻工业联合会, 2006.
- [3] HAVSTAD M R. Biodegradable plastics[G]//Plastic Waste and Recycling. Elsevier, 2020: 97-129.
- [4] DILKES-HOFFMAN L S, PRATT S, LANT P A等. 19 - The Role of Biodegradable Plastic in Solving Plastic Solid Waste Accumulation[G]//AL-SALEM S M B T-P to E. Plastics Design Library. William Andrew Publishing, 2019: 469-505.
- [5] EUROPEAN PARLIAMENT. Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment[EB/OL]. (2019)[2021-09-02]. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/904/oj>.
- [6] 赵春晓. 可降解塑料制品分类和标识指南发布[J]. 朱月红. 中国日报, 2019.
- [7] DECONINCK S, DE WILDE B. Final report benefits and challenges of bio-and oxo-degradable plastics a comparative literature study[J]. 2013.
- [8] EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Biodegradable and compostable plastics — challenges and opportunities[EB/OL]. (2020)[2021-09-08]. <https://www.eea.europa.eu/publications/biodegradable-and-compostable-plastics/biodegradable-and-compostable-plastics-challenges>.
- [9] 唐新德, 周经纶, 王加宁等. 可降解塑料的研究进展[C]//.
- [10] 李铁骑, 齐昆. 淀粉填充塑料研究的进展[J]. 高分子通报, 1994, 000(004): 241-247.
- [11] EUROPEAN BIOPLASTICS E.V. Bioplastics market data[EB/OL]. (2020)[2021-09-09]. <https://www.european-bioplastics.org/market/>.
- [12] RUJNIC-SOKELE M, PILIPOVIĆ A. Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review[J]. Waste Management & Research, SAGE Publications Sage UK: London, England, 2017, 35(2): 132-140.
- [13] KLÖCKNER C A. A comprehensive model of the psychology of environmental behaviour—A meta-analysis[J]. Global Environmental Change, 2013, 23(5): 1028-1038.
- [14] KERSHAW P J. Biodegradable Plastics & Marine Litter: Misconceptions, Concerns and Impacts on Marine Environments[M]. UNEP GPA, 2015.
- [15] KARAMANLIOGLU M, PREZIOSI R, ROBSON G D. Abiotic and biotic environmental degradation of the bioplastic polymer poly(lactic acid): A review[J]. Polymer Degradation and Stability, 2017, 137: 122-130.
- [16] GREENE J. PLA and PHA Biodegradation in the Marine Environment[J]. Department of Resources Recycling and Recovery: Sacramento, CA, USA, 2012.
- [17] VOLOVA T G, BOYANDIN A N, VASILIEV A D等. Biodegradation of polyhydroxyalkanoates (PHAs) in tropical coastal waters and identification of PHA-degrading bacteria[J]. Polymer Degradation and Stability, 2010, 95(12): 2350-2359.
- [18] ACCINELLI C, SACCÀ M L, MENCARELLI M等. Deterioration of bioplastic carrier bags in the environment and assessment of a new recycling alternative[J]. Chemosphere, 2012, 89(2): 136-143.
- [19] GREEN J. Report Topic: PLA and PHA biodegradation in the marine environment[J]. CalRecycle: California Department of Resources Recycling and Recovery, 2012, 38.
- [20] CHOE S, KIM Y, WON Y等. Bridging Three Gaps in Biodegradable Plastics: Misconceptions and Truths About Biodegradation[J]. Frontiers in Chemistry, Frontiers Media SA, 2021, 9.
- [21] HATTI-KAUL R, NILSSON L J, ZHANG B等. Designing biobased recyclable polymers for plastics[J]. Trends in biotechnology, Elsevier, 2020, 38(1): 50-67.
- [22] KJELDSSEN A, PRICE M, LILLEY C等. A Review of Standards for Biodegradable Plastics[J]. Ind. Biotechnol. Innov. Cent. IBioIC, 2018, 33.
- [23] 朱亚凯, 蔡文彬. 可降解塑料产业发展概述[J]. 塑料包装, 2021, 31(03): 19-21.

- [24] RAMESHKUMAR S, SHAIJU P, O' CONNOR K E. Bio-based and biodegradable polymers-State-of-the-art, challenges and emerging trends[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Elsevier, 2020, 21: 75-81.
- [25] DEWILDE B. Experiences on 20 years of biopolymer testing and certification: Challenges and new developments[C]//3rd international PLASTiCE conference, COBRO-Packaging Research Institute, Warsaw. 2013: 1-2.
- [26] 时朝辉. 餐厨垃圾微生物减量化处理研究[D]. 2017.
- [27] EUROPEAN BIOPLASTICS E. V. FACT SHEET HOME COMPOSTING[EB/OL]. (2015) [2021-09-10]. https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_Home_composting.pdf.
- [28] EUROPEAN BIOPLASTICS E. V. FACT SHEET ANAEROBIC DIGESTION[EB/OL]. (2015) [2021-09-08]. https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_Anaerobic_digestion.pdf.
- [29] MEEGODA J N, LI B, PATEL K等. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion[J]. *International journal of environmental research and public health*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018, 15(10): 2224.
- [30] (THE INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 15270:2008 Plastics — Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste[EB/OL]. (2008) [2021-09-12]. <https://www.iso.org/standard/45089.html>.
- [31] KÖRNER I, REDEMANN K, STEGMANN R. Behaviour of biodegradable plastics in composting facilities[J]. *Waste management*, Elsevier, 2005, 25(4): 409-415.
- [32] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782.
- [33] BARRON A, SPARKS T D. Commercial Marine-Degradable Polymers for Flexible Packaging[J]. *Iscience*, Elsevier, 2020: 101353.
- [34] HARRISON J P, BOARDMAN C, O' CALLAGHAN K等. Biodegradability standards for carrier bags and plastic films in aquatic environments: a critical review[J]. *Royal Society open science*, The Royal Society Publishing, 2018, 5(5): 171792.
- [35] MEEREBOER K W, MISRA M, MOHANTY A K. Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites[J]. *Green Chemistry*, Royal Society of Chemistry, 2020, 22(17): 5519-5558.
- [36] WU C-S. Preparation, characterization, and biodegradability of renewable resource-based composites from recycled polylactide bioplastic and sisal fibers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, John Wiley & Sons, Ltd, 2012, 123(1): 347-355.
- [37] ADHIKARI D, MUKAI M, KUBOTA K等. Degradation of bioplastics in soil and their degradation effects on environmental microorganisms[J]. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, Scientific Research Publishing, 2016, 5(01): 23.
- [38] HARMAEN A S, KHALINA A, AZOWA I等. Thermal and biodegradation properties of poly(lactic acid)/fertilizer/oil palm fibers blends biocomposites[J]. *Polymer Composites*, John Wiley & Sons, Ltd, 2015, 36(3): 576-583.
- [39] BAGHERI A R, LAFORSCH C, GREINER A等. Fate of so-called biodegradable polymers in seawater and freshwater[J]. *Global Challenges*, Wiley Online Library, 2017, 1(4): 1700048.
- [40] BOYANDIN A N, PRUDNIKOVA S V, KARPOV V A等. Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates in tropical soils[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 83: 77-84.
- [41] WU C-S. Preparation and Characterization of Polyhydroxyalkanoate Bioplastic-Based Green Renewable Composites from Rice Husk[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2014, 22(3): 384-392.
- [42] GÓMEZ E F, MICHEL JR F C. Biodegradability of conventional and bio-based plastics and natural fiber composites during composting, anaerobic digestion and long-term soil incubation[J]. *Polymer Degradation and Stability*, Elsevier, 2013, 98(12): 2583-2591.
- [43] MUNIYASAMY S, OFOSU O, JOHN M J等. Mineralization of poly (lactic acid) (PLA), poly (3-hydroxybutyrate-co-valerate) (PHBV) and PLA/PHBV blend in compost and soil environments[J]. *Journal of Renewable Materials*, Tech Science Press, 2016, 4(2): 133-145.
- [44] CHEN H. Assessment of Biodegradation in Different Environmental Compartments of Blends and Composites Based on Microbial Poly (hydroxyalkanoate) s[J]. University of Pisa, 2012.

- [45] TACHIBANA K, URANO Y, NUMATA K. Biodegradability of nylon 4 film in a marine environment[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2013, 98(9): 1847-1851.
- [46] THELLEN C, COYNE M, FROIO D等. A Processing, Characterization and Marine Biodegradation Study of Melt-Extruded Polyhydroxyalkanoate (PHA) Films[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2008, 16(1): 1-11.
- [47] WANG S, LYDON K A, WHITE E M等. Biodegradation of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) Plastic under Anaerobic Sludge and Aerobic Seawater Conditions: Gas Evolution and Microbial Diversity[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 52(10): 5700-5709.
- [48] SASHIWA H, FUKUDA R, OKURA T等. Microbial degradation behavior in seawater of polyester blends containing poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) (PHBHHx) [J]. *Marine drugs*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2018, 16(1): 34.
- [49] DEROINÉ M, CÉSAR G, LE DUIGOU A等. Natural degradation and biodegradation of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) in liquid and solid marine environments[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, 2015, 23(4): 493-505.
- [50] VOLOVA T G, GLADYSHEV M I, TRUSOVA M Y等. Degradation of polyhydroxyalkanoates in eutrophic reservoir[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2007, 92(4): 580-586.
- [51] SRIDEWI N, BHUBALAN K, SUDESH K. Degradation of commercially important polyhydroxyalkanoates in tropical mangrove ecosystem[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2006, 91(12): 2931-2940.
- [52] TOSIN M, WEBER M, SIOTTO M等. Laboratory Test Methods to Determine the Degradation of Plastics in Marine Environmental Conditions[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, 3: 225.
- [53] LIAO J, CHEN Q. Biodegradable Plastics in the Air and Soil Environment: Low Degradation Rate and High Microplastics Formation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, 2021: 126329.
- [54] SCOTT G, GILEAD D. *Degradable Polymers, Principles and applications*[M]. Chapman & Hall: London, UK, 1995.
- [55] 刘敏. 可生物降解地膜的应用效果及其降解机理研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2011.
- [56] KYRIKOU I, BRIASSOULIS D. Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, Springer, 2007, 15(2): 125-150.
- [57] 赵燕, 李淑芬, 吴杏红等. 我国可降解地膜的应用现状及发展趋势[J]. *现代农业科技*, 2010(23): 105-107.
- [58] 王朝云, 吕江南, 易永健等. 环保型麻地膜的研究进展与展望[J]. *中国麻业科学*, 2007, 29(02): 380-384.
- [59] 徐明双, 李青山, 刘冬. 可降解塑料的研究进展[J]. *塑料制造*, 2009(05): 81-85.
- [60] SINTIM H Y, FLURY M. Is Biodegradable Plastic Mulch the Solution to Agriculture's Plastic Problem?[J]. *Environmental Science & Technology*, American Chemical Society, 2017, 51(3): 1068-1069.
- [61] SCARINGELLI M A, GIANNOCARO G, PROSPERI M等. Adoption of biodegradable mulching films in agriculture: is there a negative prejudice towards materials derived from organic wastes?[J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2016, 11(2 SE-Original Articles): 92-99.
- [62] HANS J E, ANDREA S R. *Engineering Biopolymers: Markets, Manufacturing, Properties and Applications*[J]. Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, Germany, 2011.
- [63] GHIMIRE S, HAYES D, DEVETTER L W等. Biodegradable plastic mulch and suitability for sustainable and organic agriculture[J]. Pullman, Washington: Washington State University Extension, 2018.
- [64] MILES C, DEVETTER L, GHIMIRE S等. Suitability of biodegradable plastic mulches for organic and sustainable agricultural production systems[J]. *HortScience*, American Society for Horticultural Science, 2017, 52(1): 10-15.
- [65] ALDAS M, PAVON C, FERRI J M等. Films Based on Mater-Bi® Compatibilized with Pine Resin Derivatives: Optical, Barrier, and Disintegration Properties[J]. *Polymers*, 2021, 13(9).
- [66] ELFEHRI BORCHANI K, CARROT C, JAZIRI M. Biocomposites of Alfa fibers dispersed in the Mater-Bi® type bioplastic: Morphology, mechanical and thermal properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 78: 371-379.
- [67] ALDAS M, RAYÓN E, LÓPEZ-MARTÍNEZ J等. A Deeper Microscopic Study of the Interaction

- between Gum Rosin Derivatives and a Mater-Bi Type Bioplastic[J]. *Polymers*, 2020, 12(1).
- [68] BASTIOLI C. Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials[J]. *Polymer Degradation and Stability*, Elsevier, 1998, 59(1-3): 263-272.
- [69] YAN C, HE W, XUE Y等. Application of biodegradable plastic film to reduce plastic film residual pollution in Chinese agriculture[J]. *Sheng wu gong cheng xue bao= Chinese journal of biotechnology*, 2016, 32(6): 748-760.
- [70] 薛颖昊, 孙占祥, 居学海等. 可降解农用地膜的材料研究与应用现状[J]. *中国塑料*, 2020, v. 34;No. 31(05): 90-99.
- [71] 余旺, 王朝云, 易永健等. 国内生物降解地膜研究进展[J]. *塑料科技*, 2019, v. 47;No. 33(12): 161-170.
- [72] SINTIM H Y, BARY A I, HAYES D G等. In situ degradation of biodegradable plastic mulch films in compost and agricultural soils[J]. *Science of The Total Environment*, Elsevier, 2020, 727: 138668.
- [73] 梁志虎. 不同可降解农用地膜对土壤环境的影响研究[J]. *中国水土保持*, 2018, 000(007): 31-33.
- [74] GAO X, XIE D, YANG C. Effects of a PLA/PBAT biodegradable film mulch as a replacement of polyethylene film and their residues on crop and soil environment[J]. *Agricultural Water Management*, Elsevier, 2021, 255: 107053.
- [75] 杨友军, 谢东, 陈明周等. 完全生物降解地膜应用于甘蔗种植的研究[J]. *广东农业科学*, 2013(01): 19-20.
- [76] DENG L, YU Y, ZHANG H等. The effects of biodegradable mulch film on the growth, yield, and water use efficiency of cotton and maize in an arid region[J]. *Sustainability, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2019, 11(24): 7039.
- [77] WANG Z, WU Q, FAN B等. Testing biodegradable films as alternatives to plastic films in enhancing cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under mulched drip irrigation[J]. *Soil and Tillage Research*, Elsevier, 2019, 192: 196-205.
- [78] 刘晓伟, 何文清, 吕军等. 不同材料的可降解地膜对土壤温度, 水分, 盐分及棉花产量的影响[J]. *陕西农业科学*, 2016, 62(3): 52-56.
- [79] 苏海英, 宝哲, 刘勤等. 新疆加工番茄应用 PBAT 全生物降解地膜可行性[J]. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 615-622.
- [80] 何文清, 赵彩霞, 刘爽等. 全生物降解膜田间降解特征及其对棉花产量影响[J]. *中国农业大学学报*, 2011(03): 31-37.
- [81] 赵刚, 樊廷录, 党翼等. 旱塬区全生物降解地膜覆盖对冬小麦生长发育的影响[J]. *干旱区研究*, 2019(2): 339-347.
- [82] 郭大辛, 郭平毅, 原向阳等. 不同地膜覆盖对土壤水温及谷子水分利用和产量构成的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 10(v. 22): 61-69.
- [83] 邬强, 郑旭荣, 王振华等. 完全生物降解地膜覆盖对膜下滴灌棉花土壤温度及水分的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2016(8): 133-136.
- [84] 杨龙祥, 徐兴阳, 刘永等. 法国进口生物降解地膜在烤烟生产上的应用效果研究[J]. *昆明学院学报*, 2012(06): 38-41+53.
- [85] 杨林, 朱莉, 李琳等. 覆盖可生物降解地膜对茶菊抑草效果及生长的影响[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(4): 623-626.
- [86] FOJT J, DAVID J, PŘIKRYL R等. A critical review of the overlooked challenge of determining micro-bioplastics in soil[J]. *Science of the Total Environment*, Elsevier, 2020, 745: 140975.
- [87] QIN M, CHEN C, SONG B等. A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: Another ecological threat to soil environments?[J]. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 2021: 127816.
- [88] SHRUTI V C, KUTRALAM-MUNIASAMY G. Bioplastics: Missing link in the era of Microplastics[J]. *Science of The Total Environment*, Elsevier, 2019, 697: 134139.
- [89] HAYES D G, DHARMALINGAM S, WADSWORTH L C等. Biodegradable agricultural mulches derived from biopolymers[J]. *Degradable Polymers and Materials: Principles and Practice* (2nd Edition), ACS Publications, 2012: 201-223.
- [90] SERRANO-RUIZ H, MARTIN-CLOSAS L, PELACHO A M. Biodegradable plastic mulches: Impact on the agricultural biotic environment[J]. *Science of The Total Environment*, Elsevier, 2021, 750: 141228.

- [91] VIEIRA M G A, DA SILVA M A, DOS SANTOS L O等. Natural-based plasticizers and biopolymer films: A review[J]. *European Polymer Journal*, 2011, 47(3): 254 - 263.
- [92] AMBROGI V, CARFAGNA C, CERRUTI P等. 4 - Additives in Polymers[G]//JASSO-GASTINEL C F, KENNY J M B T-M of P P. William Andrew Publishing, 2017: 87 - 108.
- [93] HAHLADAKIS J N, VELIS C A, WEBER R等. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 179 - 199.
- [94] HAYES D G, ANUNCIADO M B, DEBRUYN J M等. Biodegradable Plastic Mulch Films for Sustainable Specialty Crop Production BT - Polymers for Agri-Food Applications[G]//GUTIÉRREZ T J. Cham: Springer International Publishing, 2019: 183 - 213.
- [95] SERRANO-RUÍZ H, ERAS J, MARTÍN-CLOSAS L等. Compounds released from unused biodegradable mulch materials after contact with water[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2020, 178: 109202.
- [96] FRITZ J, SANDHOFER M, STACHER C等. Strategies for detecting ecotoxicological effects of biodegradable polymers in agricultural applications[J]. *Macromolecular Symposia*, John Wiley & Sons, Ltd, 2003, 197(1): 397 - 410.
- [97] SERRANO-RUÍZ H, MARTÍN-CLOSAS L, PELACHO A M. Application of an in vitro plant ecotoxicity test to unused biodegradable mulches[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 158: 102 - 110.
- [98] MARTÍN-CLOSAS L, BOTET R, PELACHO A M. An in vitro crop plant ecotoxicity test for agricultural bioplastic constituents[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2014, 108: 250 - 256.
- [99] BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of Microplastics in Soil Ecosystems: Above and Below Ground[J]. *Environmental Science & Technology*, American Chemical Society, 2019, 53(19): 11496 - 11506.
- [100] WANG F, ZHANG X, ZHANG S等. Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2020, 254: 126791.
- [101] YAMAMOTO-TAMURA K, HIRADATE S, WATANABE T等. Contribution of soil esterase to biodegradation of aliphatic polyester agricultural mulch film in cultivated soils[J]. *AMB Express*, 2015, 5(1): 10.
- [102] KOITABASHI M, NOGUCHI M T, SAMESHIMA-YAMASHITA Y等. Degradation of biodegradable plastic mulch films in soil environment by phylloplane fungi isolated from gramineous plants[J]. *AMB Express*, 2012, 2(1): 40.
- [103] BARRAGÁN D H, PELACHO A M, MARTÍN-CLOSAS L. Degradation of agricultural biodegradable plastics in the soil under laboratory conditions[J]. *Soil Research*, 2016, 54(2): 216 - 224.
- [104] MUROI F, TACHIBANA Y, KOBAYASHI Y等. Influences of poly(butylene adipate-co-terephthalate) on soil microbiota and plant growth[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, 129: 338 - 346.
- [105] ZHANG M, JIA H, WENG Y等. Biodegradable PLA/PBAT mulch on microbial community structure in different soils[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 145: 104817.
- [106] LI C, MOORE-KUCERA J, LEE J等. Effects of biodegradable mulch on soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 79: 59 - 69.
- [107] BANDOPADHYAY S, SINTIM H Y, DEBRUYN J M. Effects of biodegradable plastic film mulching on soil microbial communities in two agroecosystems[J]. *PeerJ*, PeerJ Inc., 2020, 8: e9015.
- [108] LI Y-W, CAI Q-Y, MO C-H等. Plant Uptake and Enhanced Dissipation of Di(2-Ethylhexyl) Phthalate (DEHP) in Spiked Soils by Different Plant Species[J]. *International Journal of Phytoremediation*, Taylor & Francis, 2014, 16(6): 609 - 620.
- [109] MA T, CHRISTIE P, TENG Y等. Rape (*Brassica chinensis* L.) seed germination, seedling growth, and physiology in soil polluted with di-n-butyl phthalate and bis(2-ethylhexyl) phthalate[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(8): 5289 - 5298.
- [110] MA T, TENG Y, CHRISTIE P等. Phytotoxicity in seven higher plant species exposed to di-n-

- butyl phthalate or bis (2-ethylhexyl) phthalate[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 9(2): 259 - 268.
- [111] KONG X, JIN D, JIN S等. Responses of bacterial community to dibutyl phthalate pollution in a soil-vegetable ecosystem[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 353: 142 - 150.
- [112] KONG X, JIN D, WANG X等. Dibutyl phthalate contamination remolded the fungal community in agro-environmental system[J]. *Chemosphere*, 2019, 215: 189 - 198.
- [113] VIERA J S C, MARQUES M R C, NAZARETH M C等. Are biodegradable plastics an environmental rip off?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, 2021, 416: 125957.
- [114] WEBER M, LOTT C, VAN EEKERT M等. Review of current methods and standards relevant to marine degradation[J]. *Open-Bio-Deliverable*, 2015, 5.
- [115] EUROPEAN BIOPLASTICS E. V. MARINE LITTER - European Bioplastics Documents[EB/OL]. (2016) [2021-09-21]. https://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/pp/EUBP_pp_marine_litter.pdf.
- [116] MANFRA L, MARENGO V, LIBRALATO G等. Biodegradable polymers: A real opportunity to solve marine plastic pollution?[J]. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, 2021, 416: 125763.
- [117] WANG G, HUANG D, JI J等. Seawater - Degradable Polymers—Fighting the Marine Plastic Pollution[J]. *Advanced Science*, Wiley Online Library, 2021, 8(1): 2001121.
- [118] ANDERSON G, SHENKAR N. Potential effects of biodegradable single-use items in the sea: Polylactic acid (PLA) and solitary ascidians[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115364.
- [119] GREEN D S. Effects of microplastics on European flat oysters, *Ostrea edulis* and their associated benthic communities[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 216: 95 - 103.
- [120] GREEN D S, BOOTS B, SIGWART J等. Effects of conventional and biodegradable microplastics on a marine ecosystem engineer (*Arenicola marina*) and sediment nutrient cycling[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 208: 426 - 434.
- [121] QIAO G, SUN Q, ZHANG M等. Antioxidant system of soiny mullet (*Liza haematocheila*) is responsive to dietary poly- β -hydroxybutyrate (PHB) supplementation based on immune-related enzyme activity and de novo transcriptome analysis[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 95: 314 - 327.
- [122] MAGARA G, KHAN F R, PINTI M等. Effects of combined exposures of fluoranthene and polyethylene or polyhydroxybutyrate microplastics on oxidative stress biomarkers in the blue mussel (*Mytilus edulis*) [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, Taylor & Francis, 2019, 82(10): 616 - 625.
- [123] DUAN Y, ZHANG Y, DONG H等. Effects of dietary poly- β -hydroxybutyrate (PHB) on microbiota composition and the mTOR signaling pathway in the intestines of *litopenaeus vannamei* [J]. *Journal of Microbiology*, 2017, 55(12): 946 - 954.
- [124] CAMPANI T, CASINI S, CALIANI I等. Ecotoxicological Investigation in Three Model Species Exposed to Elutriates of Marine Sediments Inoculated With Bioplastics[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7: 229.
- [125] GREEN D S, BOOTS B, BLOCKLEY D J等. Impacts of Discarded Plastic Bags on Marine Assemblages and Ecosystem Functioning[J]. *Environmental Science & Technology*, American Chemical Society, 2015, 49(9): 5380 - 5389.
- [126] BALESTRI E, MENICAGLI V, VALLERINI F等. Biodegradable plastic bags on the seafloor: A future threat for seagrass meadows?[J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 605 - 606: 755 - 763.
- [127] ZIMMERMANN L, DOMBROWSKI A, VÖLKER C等. Are bioplastics and plant-based materials safer than conventional plastics? In vitro toxicity and chemical composition[J]. *Environment International*, 2020, 145: 106066.
- [128] TAYLOR M S, DANIELS A U, ANDRIANO K P等. Six bioabsorbable polymers: In vitro acute toxicity of accumulated degradation products[J]. *Journal of Applied Biomaterials*, John Wiley & Sons, Ltd, 1994, 5(2): 151 - 157.
- [129] BRANDL H, PÜCHNER P. Biodegradation of plastic bottles made from ‘Biopol’ in an aquatic ecosystem under in situ conditions[J]. *Biodegradation*, Springer, 1991, 2(4): 237 - 243.
- [130] O’ BRINE T, THOMPSON R C. Degradation of plastic carrier bags in the marine

- environment[J]. Marine pollution bulletin, Elsevier, 2010, 60(12): 2279 - 2283.
- [131] MÜLLER C, TOWNSEND K, MATSCHULLAT J. Experimental degradation of polymer shopping bags (standard and degradable plastic, and biodegradable) in the gastrointestinal fluids of sea turtles[J]. Science of The Total Environment, 2012, 416: 464 - 467.
- [132] 许琦敏, 罗沛鹏. “限塑令”推行, 可降解塑料袋该扔哪类垃圾桶? [EB/OL]. 文汇报, 2021. (2021) [2021-06-16]. http://sh.xinhuanet.com/2021-02/01/c_139711946.htm.
- [133] 胡渝. 可降解塑料怎么分类? 纸吸管真的更环保吗? 看专家为你解答! [EB/OL]. 央视新闻, 2021. (2021).
- [134] REN X. Biodegradable plastics: a solution or a challenge?[J]. Journal of Cleaner Production, 2003, 11(1): 27 - 40.
- [135] ENDRES H-J, SIEBERT-RATHS A. End-of-life options for biopolymers[J]. Engineering Biopolymers, Carl Hanser Verlag GmbH & Co KG, Munich, 2011: 225 - 243.
- [136] SAALAH S, SAALLAH S, RAJIN M等. Management of Biodegradable Plastic Waste: A Review BT - Advances in Waste Processing Technology[G]//YASER A Z. Singapore: Springer Singapore, 2020: 127 - 143.
- [137] EUROPEAN BIOPLASTICS. Fact Sheet: Energy Recovery[EB/OL]. European Bioplastics, 2015. (2015) [2021-08-20]. https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_Energy_recovery.pdf.
- [138] YATES M R, BARLOW C Y. Life cycle assessments of biodegradable, commercial biopolymers—A critical review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2013, 78: 54 - 66.
- [139] HERMANN B G, DEBEER L, DE WILDE B等. To compost or not to compost: Carbon and energy footprints of biodegradable materials' waste treatment[J]. Polymer Degradation and Stability, Elsevier Ltd, 2011, 96(6): 1159 - 1171.
- [140] GREENE K L, TONJES D J. Degradable plastics and their potential for affecting solid waste systems[J]. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2014, 180: 91 - 102.
- [141] CORNELL D D. Biopolymers in the existing postconsumer plastics recycling stream[J]. Journal of Polymers and the Environment, Springer, 2007, 15(4): 295 - 299.
- [142] DAVIS G, SONG J H. Biodegradable packaging based on raw materials from crops and their impact on waste management[J]. Industrial crops and products, Elsevier, 2006, 23(2): 147 - 161.
- [143] SONG J H, MURPHY R J, NARAYAN R等. Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics[J]. Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences, The Royal Society, 2009, 364(1526): 2127 - 2139.
- [144] LA MANTIA F P, BOTTA L, SCAFFARO R. The effects of PLA in PET recycling systems[J]. Macplas International at K, 2013.
- [145] MUDGAL S, MUEHMEL K, HOA E等. Options to improve the biodegradability requirements in the Packaging Directive[EB/OL]. DG Environment - European Commission, 2012. (2012) [2021-08-30]. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/packaging/options_to_improve_biodegradability_in_ppwd_2012.pdf.
- [146] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 最严“限塑令”下 上游助推中下游企业转型[EB/OL]. (2021) [2021-09-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/slwrzlxzd/gzdt01/202103/t20210331_1271408.html?code=&state=123.
- [147] 王红秋, 付凯妹. 可降解塑料行业发展需解决三大问题[J]. 中国石化, 2020(12): 27 - 30.
- [148] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于印发《石化和化学工业“十二五”发展规划》的通知[EB/OL]. (2012) [2021-09-15]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/ghzc/art/2020/art_637942db261e40888bb6b25ec8641025.html.
- [149] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国家发展和改革委员会令 第21号[EB/OL]. (2013) [2021-09-15]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/fzggwl/201302/t20130226_960754.html?code=&state=123.
- [150] 中华人民共和国中央人民政府. 《轻工业发展规划(2016—2020年)》正式发布[EB/OL]. (2016).
- [151] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于印发“无废城市”建设试点工作方案的通知 国办发(2018)128号[EB/OL]. (2019) [2021-09-15]. <http://www.gov.cn/zhengce/content/2019->

- 01/21/content_5359620.htm.
- [152] 中华人民共和国中央人民政府. 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 发改环资〔2020〕80号[EB/OL]. (2020) [2021-09-15]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-01/20/content_5470895.htm.
- [153] 中华人民共和国中央人民政府. 商务部办公厅关于进一步加强商务领域塑料污染治理工作的通知 商办流通函〔2020〕306号[EB/OL]. (2020).
- [154] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委 生态环境部关于印发“十四五”塑料污染治理行动方案的通知 发改环资〔2021〕1298号[EB/OL]. (2021) [2021-09-15]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/16/content_5637606.htm.
- [155] 冯雅君. 禁限塑新规推行“可降解”暗藏“伪降解”[J]. 人民周刊, 2021(01): 60 - 61.
- [156] 黄松伟, 舒妍玉. 可降解塑料应用推广: 现状, 难题及对策[J]. 中华环境, 2020.
- [157] 朱佳欢、夏铭德、韦存茜、孙梦捷. 国内绿色塑料产品标识和评价标准[J]. 上海包装, 2020, No. 307(08): 67 - 69.
- [158] 孙伟娜, 刘国辉, 吴宗泽等. 浅析生物基可降解塑料的生产改进工艺和应用现状[J]. 信息记录材料, 2020.
- [159] NAZARETH M, MARQUES M R C, LEITE M C A等. Commercial plastics claiming biodegradable status: Is this also accurate for marine environments?[J]. Journal of hazardous materials, Elsevier, 2019, 366: 714 - 722.
- [160] KUBOWICZ S, BOOTH A M. Biodegradability of plastics: challenges and misconceptions[J]. ACS Publications, 2017.
- [161] GOEL V, LUTHRA P, KAPUR G S等. Biodegradable/bio-plastics: myths and realities[J]. Journal of Polymers and the Environment, Springer, 2021: 1 - 26.
- [162] 摆脱塑缚. “馅饼”还是“陷阱”——生物可降解塑料十问十答[EB/OL]. (2020) [2021-10-11]. http://www.plasticfreechn.org.cn/article/22_20.html.
- [163] 王立, 李林林, 郝丹等. 可降解塑料产业现状及发展瓶颈浅析[J]. 绿色包装, 2021(4): 30 - 33.
- [164] 陶怡, 柯彦, 李俊彪等. 我国生物可降解塑料产业发展现状与展望[J]. 化工新型材料, 2021, 48(12): 1 - 4.
- [165] SHEN M, SONG B, ZENG G等. Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution?[J]. Environmental Pollution, Elsevier, 2020, 263: 114469.
- [166] KEEP LOS ANGELES BEAUTIFUL. Littering and the iGeneration: City-wide intercept study of youth litter behaviour in Los Angeles[C]//Session paper at XIII Environmental Psychology Conference Granada. klan2015: 2015.
- [167] 陶怡、柯彦、李俊彪、步学朋、王强、田华. 我国生物可降解塑料市场现状[J]. 化工管理, 2020, No. 576(33): 126 - 127.
- [168] NARANCIC T, VERSTICHEL S, REDDY CHAGANTI S等. Biodegradable plastic blends create new possibilities for end-of-life management of plastics but they are not a panacea for plastic pollution[J]. Environmental science & technology, ACS Publications, 2018, 52(18): 10441 - 10452.
- [169] 李颖, 张静, 郭莉等. 食品包装用塑料标识的现状与改进的必要性[J]. 塑料科技, 2013, 41(006): 79 - 82.
- [170] AUSTRALIAN BIOPLASTIC ASSOCIATION. THE SEEDLING LOGO[EB/OL]. (2019) [2021-12-12]. <https://bioplastics.org.au/certification/the-seedling-logo/>.

关于益科

上海浦东益科循环科技推广中心是一家循环经济领域的小型 NGO，于 2018 年 10 月 31 日正式登记成立，业务主管单位为浦东新区科协。本机构致力于通过具有原创性和洞察力的调研寻找目前中国资源循环各环节中的“痛点”，并通过连接和粘合资源循环链条上的一些关键的参与方，解决这些痛点。同时机构也扮演循环经济的传播者角色，计划通过网站、社交媒体等渠道讲吸引人的循环经济故事，塑造循环经济议题的公共性，让更多受众对循环经济感兴趣、愿参与、齐讨论。

机构官网：<https://www.ecocycle.org.cn/>

本报告基于桌面调查编写，欢迎提出意见或建议帮助完善。如对本报告有任何意见、建议或疑问，请发邮件至 zhangmiao@ecocycle.pro

本项目由广东省千禾社区公益基金会资助



千禾社区基金会
Harmony Community Foundation
