

环境中传统塑料的可生物降解和可堆肥替代品

哈里·奥奈、乔伦·德米雷尔、罗纳德墨菲、图尔古特歌、布拉克纳拉扬
英国布鲁内尔大学环境工程系

摘要: 包装废物是城市固体废物的的重要组成部分, 并引起了越来越多的环境问题, 导致旨在减少产生量的各种法规得到加强。在其他材料中, 目前在包装应用中使用范围广泛的油基聚合物。这些实际上都是不可生物降解的, 并且由于是具有不同程度污染的复杂复合材料, 有些难以回收或再利用。最近, 可生物降解塑料的开发取得了重大进展, 主要来自可再生自然资源, 以生产具有与油基聚合物相似功能的可生物降解材料。这些生物基材料的扩展对温室气体平衡和整个生命周期的其他环境影响以及可再生资源而非有限资源的使用具有多项潜在好处。旨在使用可生物降解材料将有助于可持续性和减少与处置油基聚合物相关的环境影响。

可生物降解材料的多样性及其不同的特性使得很难做出简单、通用的评估, 例如可生物降解的产品都是“好”的, 或者石化产品都是“坏的”。本文讨论了可生物降解包装材料的潜在影响及其废物管理, 特别是通过堆肥。它提出了关键问题, 这些问题为判断这些材料相对于传统的、基于石化的对应物的优势提供了依据。有关模拟“家庭”堆肥系统中生物降解性的新研究给出了具体示例。作者认为, 可生物降解的包装材料最适合一次性应用, 消费后的废物可以就地堆肥。

关键词: 可生物降解、可堆肥、生物聚合物、包装、环境、废物管理

Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics in environments

Harry Onay, Jorren Demirel, Ronald Murphy, Turgut Song, Burak Narayan
Department of Environment Engineering, Brunel University, UK

Abstract: Packaging waste forms a significant part of municipal solid waste and has caused increasing environmental concerns, resulting in a strengthening of various regulations aimed at reducing the amounts generated. Among other materials, a wide range of oil-based polymers is currently used in packaging applications. These are virtually all non-biodegradable, and some are difficult to recycle or reuse due to being complex composites having varying levels of contamination. Recently, significant progress has been made in the development of biodegradable plastics, largely from renewable natural resources, to produce biodegradable materials with similar functionality to that of oil-based polymers. The expansion in these bio-based materials has several potential benefits for greenhouse gas balances and other environmental impacts over whole life cycles and in the use of renewable, rather than finite resources. It is intended that use of biodegradable materials will contribute to sustainability and reduction in the environmental impact associated with disposal of oil-based polymers.

The diversity of biodegradable materials and their varying properties makes it difficult to make simple, generic assessments such as biodegradable products are all ‘good’ or petrochemical-based products are all ‘bad’. This paper discusses the potential impacts of biodegradable packaging materials and their waste management, particularly via composting. It presents the key issues that inform judgements of the benefits these materials have in relation to conventional, petrochemical-based counterparts. Specific examples are given from new research on biodegradability in simulated ‘home’ composting systems. It is the view of the authors that biodegradable packaging materials are most suitable for single-use disposable applications where the post-consumer waste can be locally composted.

Keywords: biodegradable, compostable, biopolymers, packaging, environment, waste management

引言

传统塑料的广泛生产及其在不同商业应用中的使用对化石燃料来源和环境都构成了重大威胁。在可再生资源的开发过程中, 出现了称为生物塑料的替代品。利用农业废弃物(而不是石油资源)等可再生资源及其在不同环境中的生物降解性, 使这些聚合物比传统塑料更容易被接受。生物塑料的生物降解性受其物理和化学结构

的影响很大。另一方面, 它们所处的环境在它们的生物降解中起着至关重要的作用。

塑料被认为是我们日常生活中使用最广泛的聚合物, 尤其是在包装应用中。2015年石油基塑料年产量超过3亿吨。这种石油基塑料的过度生产需要来自可再生资源的可持续替代品。此外, 由于其不可生物降解性, 二氧化碳(CO₂)排放及其在环境中的长期积累等不利环

境影响是使用不可生物降解塑料的重大缺点。事实上,全世界每年产生 3400 万吨塑料垃圾,其中 93% 被丢弃在垃圾填埋场和海洋中。尽管欧盟 (EU) 的一些成员国已经禁止垃圾填埋应用,但仍有大约 50% 的塑料垃圾被填埋处理。德国、荷兰、瑞典、丹麦和奥地利等国家成功地实现了 80-100% 的塑料废物回收率,但平均只能回收 28%。尽管,欧盟试图解决塑料废弃物的处理问题并改善再利用和回收应用,但发展中国家仍然依赖传统的填埋方式。据报道,由于城市化和经济发展速度加快,发展中国家的塑料消费量超过了世界平均水平。例如,据报道,包括中国、印度尼西亚、菲律宾、斯里兰卡和越南在内的发展中国家在海洋环境中产生了全球 50% 以上的塑料污染。尽管回收塑料废物的技术已经得到改进,但到 2050 年世界人口将增加到约 90 亿,这需要对塑料生产提出更高的要求,并最终增加塑料废物的数量。塑料垃圾的焚烧在欧洲国家也得到了特别的应用,例如焚烧率最高 (76%) 的丹麦。尽管按照标准建设焚烧厂,但在此过程中仍会遇到一些环境问题。从塑料废物中回收能量可能会增加二氧化碳的净排放量。

具有与传统石化基塑料相当的功能和可加工性的可生物降解塑料 (Bioplastics 07/08) 已被开发用于包装应用 (例如 www.european-bioplastics.org)。通常,它们由可再生原料制成,例如淀粉或纤维素。对可生物降解塑料包装的兴趣主要来自于它们使用可再生原材料 (农作物而不是原油) 和通过堆肥或厌氧消化减少垃圾填埋的报废物管理。鉴于最近对废物产生和管理的关注是当今社会重要的环境方面,包装材料的处理尤为重要。

除了性能和价格之外,可生物降解塑料还必须为废物管理系统提供优势,以实现整体效益。本文讨论了可生物降解塑料的潜在影响,特别是包装以及通过垃圾填埋场、焚烧、回收/再利用和堆肥进行的废物管理。它提供了关键生命周期问题的概述,这些问题为判断此类材料相对于传统的、基于石化的同类材料的优势提供了依据。有关模拟“家庭”堆肥系统中生物降解性的新研究给出了具体示例。

一、传统塑料的可生物降解替代品

可生物降解聚合物 (BDP) 或可生物降解塑料是指“能够分解成二氧化碳、甲烷、水、无机化合物或生物质的聚合物材料,其中主要机制是微生物的酶促作用,可以通过标准化方法测量在指定的时间段内进行测试,反映可用的处置条件” (ASTM 标准 D6813)。BDP 的一个子集也可能是可堆肥的,具体参考它们在堆肥系统中的生物降解,并且这些必须证明它们“能够作为可用程序的一部分在堆肥场地进行生物分解,这样塑料就不会在视觉上可区分并分解成二氧化碳、水、无机化合物和生物质,其分解速率与已知的可堆肥材料 (例如纤维素) 一致” (ASTM 标准 D996,另请参阅 D6400)。初始步

骤可能涉及非生物 (热、光) 和生物过程,以在合适的条件下将聚合物降解为低分子量物质。然而,所产生的分解碎片必须被微生物完全利用;否则可能会对环境和健康造成影响。工业堆肥过程 (通常为 12 周,温度超过 50° C) 的产品必须符合质量标准,例如重金属 (受监管) 含量、生态毒性和没有明显可区分的聚合物残留物。

根据其来源,BDP 可分为生物基或石化基。前者大部分是自然可生物降解的,由天然来源 (植物、动物或微生物) 生产,例如多糖 (例如淀粉、纤维素、木质素和几丁质)、蛋白质 (例如明胶、酪蛋白、小麦面筋、丝绸和羊毛) 和脂质 (例如植物油和动物脂肪)。天然橡胶以及由微生物/植物生产的某些聚酯 (例如聚羟基链烷酸酯和聚 3-羟基丁酸酯) 或由生物衍生单体 (例如聚乳酸 (PLA)) 合成的都属于此类。脂肪族聚酯 (如聚乙醇酸、聚丁二酸丁二醇酯和聚己内酯 (PCL))、芳香族共聚酯 (如聚丁二酸丁二醇对苯二甲酸丁二醇酯) 和聚 (乙烯醇) 等石化类 BDPs 是由石化精炼的单体合成而成,具有一定的固有生物降解性的程度。这种分类区分了可再生 (生物基) 和不可再生 (石化基) 资源,但应该注意的是,许多商业 BDP 配方结合了两类材料以降低成本和/或提高性能。

因此,可生物降解塑料通常包含聚合物共混物,这些共混物含有部分源自生物质的生物 (可再生) 碳和部分石化碳。塑料或聚合物产品中存在的生物碳百分比可以很容易地从产品的 C-14 特征中计算出来。大气中的二氧化碳 (CO₂) 与放射性 ¹⁴CO₂ 处于平衡状态。放射性碳是通过宇宙射线中子对 ¹⁴N 的作用在高层大气中形成的。它被迅速氧化成具有放射性的 ¹⁴CO₂,并通过光合作用和食物链进入地球的动植物生命中。在生物食物链中使用碳的植物和动物在其一生中会吸收 ¹⁴C。它们与大气中的 ¹⁴C 浓度处于平衡状态,即 C-14 原子和非放射性碳原子的数量随时间保持大致相同。一旦植物或动物死亡,它们就会停止吸收碳的代谢功能;没有放射性碳的补充,只有衰变。由于碳的半衰期约为 5730 年,因此经过数百万年形成的石化原料将没有 ¹⁴C 特征。生物基含量的数量可以通过在氧气存在下燃烧聚合物中的测试材料并分析放出的 CO₂ 气体以提供其 ¹⁴C/¹²C 含量相对于现代材料的测量来确定 (ASTM 标准 D-6866) 碳基草酸放射性碳标准参考物质 (SRM) 4990c (简称 HOxII)。

在 1990 年代的早期试点工厂阶段之后,自 2000 年以来,小型专业公司和老牌公司的可生物降解 (生物) 塑料生产的后续升级现已达到工业规模,并且相当大比例的老牌和新兴可生物降解塑料现在具有可再生而不是石化起源 (www.european-bioplastics.org; www.bioplastics24.com)。有关用于包装的各种生物塑料的化学成分、生产、加工、结构和特性的详细信息可以在文

献的其他地方找到（纸基产品传统上被视为一个单独的材料组）。目前全球可生物降解塑料的产能约为 35 万吨 (Bioplastics 07/08)，占石化塑料的不到 0.2%，约为 2.6 亿吨。然而，仅凭环境性能优势不足以使生物塑料聚合物作为传统塑料的替代品得到更广泛的应用。它们还需要具有成本效益，适合用途，并且理想情况下，在使用中提供独特的好处。因此，生物塑料聚合物尚未充分发挥其潜力。

生物塑料聚合物的成本通常仍远高于其传统塑料对应物。大多数落在 $2-5 \text{ € kg}^{-1}$ 范围内（生物塑料 07/08）（相比之下，主要石化聚合物约为 1.2 € kg^{-1} ），这是更广泛使用的主要限制。然而，在过去十年左右的时间里，产品产能取得了显著的增长。在性能和成本改进、使用可再生（生物）资源的好处、油价上涨和环保意识提高等多种因素的共同推动下，当达到临界质量时，生物塑料聚合物预计将作为商品材料定价影响和相关立法。

最近对各种商业生物塑料聚合物的加工参数和技术特性进行了审查 (Bioplastics 07/08)。许多生物塑料现在具有与其传统对应物（例如聚丙烯 (PP)、聚苯乙烯和聚乙烯 (PE)）相当的机械性能，并且可以使用聚合物行业广泛使用的技术（例如复合、薄膜加工和模塑）进行加工。它们已用于许多使用寿命短的应用，其中生物降解性是一个关键的优势特征 (www.european-bioplastics.org)，包括消费品包装（例如食品包装中的托盘、罐、薄膜和瓶子）、一次性方便食品（例如餐具/餐具）、袋子（购物、花园或生活垃圾）、农用地膜、个人护理用品（例如尿布）甚至高尔夫球座。生物塑料聚合物还被用于更耐用的应用，例如纺织品、消费品、汽车零部件以及建筑和施工，其中重点是使用可再生（生物）资源，任何固有的生物降解特性都需要通过谨慎的方式加以抑制或控制设计。

生物基与可生物降解：重要的是要认识到并非所有生物基聚合物材料都是可生物降解的，反之亦然。同样，重要的是要认识到给定聚合物的生物降解性等属性需要与适当的废物管理有效结合，以获取最大的环境效益。对于出于性能、安全和产品寿命的原因，生物降解性不是必需元素的耐用产品，需要确定替代处理方法，如将废物转化为能源或回收利用。这种耐用的生物基聚合物的例子是用于汽车和农用车辆的基于来自植物油的多元醇的生物聚氨酯，用于工业和汽车应用的生物纤维复合材料，以及最近开发的从甘蔗通过乙醇转化为乙烯的生物聚乙烯。

二、BDPS 的废物管理方案

有许多技术可用于处理生活垃圾中的传统塑料包装垃圾，包括：综合收集和焚烧与能量回收、高热值塑料的选择性燃烧（例如在水泥窑中）以及在鼓风机中用作还原剂或作为回收原料。

英国每年产生约 100 万吨非瓶装国内混合塑料包装废物，估计每年增加 2% 至 5%。英国政府提出的“废物等级制度”作为选择方案的指导，以尽量减少废物的影响，将减少和再利用视为最有利的选择，其目的是最大限度地减少材料消耗或从废物流中转移材料。

可生物降解的生物塑料在进入废物流并通过当前可用的选择（回收、焚烧和填埋）处理时的影响在下面进行了简要评估。由于 BDP 为通过堆肥处理废物提供了一个潜在的选择，作为一种回收材料和生产有用产品作为堆肥的方法，因此将特别关注堆肥生物聚合物。

回收

进入城市废物流的可生物降解塑料可能会给现有的塑料回收系统带来一些并发症。例如，在传统聚合物中添加淀粉或天然纤维会使回收过程复杂化。尽管在不显著降低性能的情况下机械回收一些生物塑料聚合物（例如 PLA）几次是可行的，但目前缺乏大量持续可靠的生物塑料聚合物废物供应，使得回收在经济上不如传统塑料有吸引力。最后，对于某些应用，例如食品包装（例如肉类产品的气调包装），可能需要不同生物聚合物的多层层压以增强阻隔性能，就像传统塑料一样，这将损害包装制造过程中废料的可回收性和消费后废物。在本卷的其他地方更详细地考虑了塑料的回收。

能量回收焚烧

大多数商品塑料的总热值 (GCV) 与煤炭相当或更高。因此，在去除所有可回收元素后，焚烧和能量回收是一个潜在的好选择。有人认为，已经具有高价值用途的石化碳再次用作焚化燃料时，代表了一种比直接燃烧石油更具生态效率的选择。

英国议会环境委员会的报告支持这样一种观点，即对某些类型的家庭塑料废物进行能源回收是一种可接受的废物管理选择。英国塑料联合会进行的试验表明，现代垃圾焚烧发电厂能够燃烧塑料垃圾，即使是那些含有氯化化合物（如 PVC）的垃圾，也不会释放危险或潜在危险的二恶英和呋喃排放物。2005/2006 年，约 8%（约 300 万吨）的英国城市垃圾通过 15 个焚烧设施进行处理 (www.defra.gov.uk/environment/statistics/waste)，超过 4000 万吨在英国境内被焚烧欧盟在大约 230 个焚烧设施中。据设想，除非公众确信焚烧的安全性及其对可再生能源供应的贡献，否则焚烧将在英国面临持续的阻力。

通过焚烧回收能量被认为是所有生物塑料聚合物的合适选择，生物塑料聚合物产品中的可再生（生物）资源被认为在焚烧时提供可再生能源 (www.european-bioplastics.org)。天然纤维素纤维和淀粉的 GCV 比煤低，但与木材相似，因此仍有相当大的焚烧价值。此外，纤维和淀粉材料的生产首先消耗的能源要少得多，因此对生命周期中的整体能量平衡有积极贡献。目前，由于缺乏关于生物塑料聚合物的 GCV 的科学数据（例如水分

含量 (MC) 的相对重要性等), 因此很难准确确定其通过焚烧回收能量的价值——需要在该领域进行进一步的研究。

垃圾填埋场

废塑料填埋场是英国垃圾分级制度中最不受欢迎的选择。它在历史上很有吸引力, 因为它非常简单且便宜, 无需必要的分离、清洁或处理。1999 年, 西欧将家庭垃圾中可回收塑料总量的 65% (每年 840 万吨) 送往垃圾填埋场。然而, 欧洲各地适合填埋的地点正在耗尽, 公众越来越担心垃圾填埋场对环境和环境的影响。填埋的城市垃圾中的有毒物质数量及其可能从垃圾填埋场渗出对健康的影响。减少最终进入垃圾填埋场的废物量已成为英国明确的政府政策 (例如垃圾填埋场指令欧盟委员会 1999/31/EC), 并且是一项特别难以实现的任务 (例如英国约 60% 的城市垃圾是与法国约 37% 和德国约 20% 相比, 仍被填埋)。

包括生物塑料聚合物、花园和厨房垃圾在内的可生物降解材料的填埋场提出了一个特殊的问题, 即在厌氧条件下可能会产生甲烷, 这是一种温室气体, 其影响是二氧化碳的 25 倍。虽然这种“垃圾填埋场气体”可以并且被捕获并用作能源, 但垃圾填埋场指令 (99/31/EC) 力求在三个连续阶段减少填埋场可生物降解城市垃圾 (BMW) 的总量, 最终达到到 2020 年, 宝马 1995 年总量的 35%。

生物废物处理: 堆肥或厌氧消化

与传统的石化聚合物不同, 可生物降解和可堆肥的生物塑料聚合物可以堆肥。这可以通过有氧废物管理系统来实现, 例如堆肥以产生富含碳和营养的堆肥以添加到土壤中。在英国, 现在有 300 多个堆肥场, 每年总共堆肥约 200 万吨垃圾 (其中大约 75% 是家庭垃圾, 5% 是城市非家庭垃圾, 20% 是商业垃圾: <http://www.organics-recycling.org.uk/>)。因此, 好氧生物降解系统对于 BDP 至关重要, 本文的下一节将对其进行详细介绍。

某些 BDP 也适用于厌氧消化池, 生物废物可以在其中转化为甲烷, 甲烷可用于驱动发电机进行能源生产。关于可生物降解生物塑料的厌氧消化率的已发表报告相对较少, 这些系统在此不作进一步讨论。

三、生物降解性和可堆肥性

如果产品在客户使用后没有最终进入使用生物降解特性的废物管理系统, 那么制造或称产品可生物降解就没有内在价值。

堆肥的原理和概念

堆肥有可能将可生物降解的废物 (包括可生物降解的塑料) 转化为有用的土壤改良剂产品。堆肥是混合微生物种群在受控条件下潮湿、温暖、有氧的环境中加速降解异质有机物。这种天然材料的生物降解将产生有

价值的堆肥, 作为主要产品以及水和二氧化碳。产生的二氧化碳不会增加温室气体, 因为它已经是生物碳循环的一部分。堆肥也是一种重要的处置基础设施, 因为除了可生物降解的塑料之外, 它还可以接收其他生物基废物——例如, 超过 50% 的 MSW 流通常是花园和食物垃圾以及不可回收的纸制品。

可降解与可生物降解

市场上的许多聚合物都被设计成可降解的, 即它们会碎裂成更小的碎片, 甚至可能降解成肉眼看不见的残留物。虽然假设分解产物最终会生物降解, 但没有数据证明在相当短的时间内 (例如每年一个生长季节) 完全可生物降解。因此, 疏水性、高表面积塑料残留物可能会迁移到水和生态系统的其他部分。在最近的一篇科学文章中, 汤普森等人报告说, 全球范围内的塑料碎片会被侵蚀 (降解) 并最终变成微小的颗粒状或纤维状碎片, 并且这些碎片一直在海洋中不断积累。他们的实验表明, 海洋动物会消耗微小的塑料碎片, 就像在片脚类动物的消化道中看到的那样。Algalita 海洋研究基金会 (参见 www.algalita.org/pelagic_plastic.html) 报告说, 降解的塑料残留物可以吸引和保持疏水元素, 例如多氯联苯 (PCB) 和二氯二苯基三氯乙烷 (DDT), 其浓度高达背景水平的 100 万倍。多氯联苯和滴滴涕在土壤中处于背景水平, 并被稀释, 以免造成重大风险。然而, 具有这些高表面积的可降解塑料残留物会浓缩这些化学物质, 从而导致可能对环境构成风险的有毒残留物。日本研究人员同样报告说, 在从日本四个海岸收集的降解 PP 树脂颗粒中, 可以检测到高浓度的 PCB、DDE 和壬基酚 (NP)。这项工作表明, 塑料残留物可能是海洋环境中有毒化学物质的运输介质。

因此, 将 PE 等疏水性聚烯烃塑料设计为可降解, 但不能确保降解碎片在短时间内被处置基础设施中的微生物种群完全同化, 与不使其可降解相比, 对环境的危害更大。热、湿气、阳光和 / 或酶会缩短和削弱聚合物链, 导致塑料断裂和一些交联, 从而产生更难处理的持久性残留物。以可控的方式加速塑料的分解以产生这些碎片是可能的, 其中一些碎片可能是微观的, 肉眼是看不见的, 正如文献中所报道的那样, 已经进行了一些优雅的化学反应来实现这一点。然而, 这种降解 / 破碎本身并不是生物降解, 这些降解的疏水性聚合物碎片在环境中构成潜在风险, 除非它们在相对较短的时间内被处理系统中存在的微生物种群完全同化。

堆肥实践

现在, 世界上许多地方都认为通过堆肥处理可生物降解塑料是一种适当的材料回收形式。在英国, 这是 1997 年修订的生产者责任 (包装废物) 条例中指定的允许回收选项。

在 2001 年 3 月德国卡塞尔的一项大规模研究中,

BDP 包装被引入当地零售业。该计划的目的是引入可生物降解的包装,并由住户管理其源头分类,以便将其与有机废物流一起收集起来生产堆肥。该计划在启动前需要大量规划,以确保公众获得有关 BDP、它们的标签、分离和收集的足够信息。混合包装和有机废物在全面堆肥场进行堆肥,并在商业层面进行。对堆肥原料进行监测,以确保按重量计算,一种塑料与 99 份有机废物的比例相对较低。与仅包含绿色废物(无 BDP)的常规堆肥相比,所产生的堆肥在质量参数方面没有差异,并且对土壤和植物特性具有相同的积极影响。

住户调查表明,卡塞尔 82% 的人口可以清楚地识别印在可堆肥聚合物上的标志,90% 的人支持用可堆肥包装代替传统塑料包装。该计划的成功创造了对更多产品的需求,这些产品可以像“传统”有机废物一样被消化/降解。这样做的好处是双重的:(i) 提高分离和收集效率(家庭或集中式)和(ii) 减少填埋或焚烧的废物量。

然而,一些立法对堆肥行业施加了一些限制。2003 年 5 月,动物副产品法规(ABPR)开始在英国实施欧盟法规。ABPR 将动物副产品分为三类,并规定了每一类的收集、运输、储存、装卸加工和使用或处置的方式:第一类,风险最高的材料,如感染疯牛病、痒病等的尸体;第 2 类,还有高风险材料,例如在农场死亡的动物和不适合人类食用的动物;和第 3 类,适合(但不打算)供人类消费的材料,例如鱼、牛奶、屠宰动物的部分等。肉类或非肉类)归入第 3 类。第 2 类和第 3 类材料可以按照对处理、温度和保留时间的严格要求通过厌氧消化进行堆肥或处理。

尽管 ABPR 不适用于仅接受绿色植物园废物的场所,但许多英国地方当局已经开始收集混合有机废物(花园和厨房)或正在考虑混合收集以满足立法目标。对于混合有机废物收集,收集的大部分材料来自植物来源;但是,由于存在厨房/餐饮垃圾,所有垃圾都必须在容器内进行堆肥以满足要求。地方当局可以将有机植物废物与厨房产生的废物分开收集,但这存在广泛的后勤和成本问题(单独的车辆、人员和堆肥设施)。容器内堆肥比英国通常采用的纯“绿色废物”的露天堆肥方法成本更高。这导致每吨堆肥成本增加,向地方当局收取门费,并降低船内堆肥相对于其他处理和处置方案(如垃圾填埋场)的竞争力。

对降解产物潜在生态毒性的担忧导致制定和采用适用于可堆肥聚合物产品的国际标准。例如,EN 13432 要求可堆肥聚合物材料必须满足欧洲或在不存在国家堆肥性要求的情况下。2003 年 12 月,英国堆肥协会启动了可堆肥包装认证计划,以协助英国地方当局选择用于收集有机废物的麻袋。由于目前没有关于堆肥质量的欧洲标准(除了获得欧盟生态标签的生态标准),英国于 2002 年 11 月采用了 BSI PAS 100。其他标准如 ASTM D6400 和 ISO 17088 也定义了产品堆肥的分类和要求。

家庭堆肥

在英国,家庭堆肥已被内阁办公室战略部门确定为降低家庭垃圾增长率的五项关键措施之一。除了厨房和花园垃圾,可生物降解包装材料的家庭堆肥可以从市政收集系统转移垃圾,并补充工业堆肥。必须指出的是,家庭堆肥很难监管,在管理不善的系统中出现的厌氧堆肥条件会导致甲烷的产生。此外,与工业堆肥相比,使用堆肥箱或堆肥的家庭堆肥变化更大,优化程度更低,所达到的温度很少比环境温度高出几°C。在这种情况下,某些经过工业堆肥认证(EN13432)的可堆肥材料可能无法充分生物降解。“OK Compost Home”标准在环境温度下重复 EN13432 测试协议,如表 1 所示,由布鲁塞尔的 AIB-VINÇOTTE (www.aib-vincotte.com) 制定。这些温度条件并没有反映真正的堆肥工艺原理,根据定义,这些原理要求它们经历可能持续几天到几个月的高温阶段(55-65°C),具体取决于堆肥量。堆肥的高温阶段对于确保破坏对热敏感的人类和植物病原体、苍蝇幼虫和杂草种子非常重要。美国环境保护署的规定规定,为了在堆肥过程中显着减少病原体,堆肥应在 40°C 的最低操作条件下保持 5 天,在此期间温度超过 55°C 至少 4 小时。

一些生物塑料聚合物,特别是用作园艺或垃圾收集袋应用的袋子和盆,已通过 OK Compost Home 计划的认证,而其他生物塑料聚合物仅通过了工业堆肥的“OK Compost”标准(<http://www.aib-vincotte.com/data>),不适合家庭堆肥。这种区别很重要,而且向公众传达明确的指导至关重要,否则公众可能会认为在众多认证体系下标有“可生物降解”、“可堆肥”或“生态”的任何产品都可以简单地放入他们的家中或花园堆肥箱。这些不太可能达到某些材料的适当降解和实现消毒所需的嗜热堆肥温度。

下文简要介绍了在英国典型的模拟家庭堆肥中处理一系列可生物降解或潜在可生物降解的包装材料时,表征生物降解程度的新研究。目的是确定潜在可生物降解的包装材料在与绿色花园垃圾一起暴露于“典型”家庭堆肥条件(非嗜热)时是否会表现出适当的生物降解水平。12 种生物基材料的小样本(6 种来自商业使用的材料,6 种来自设计为可生物降解的开发材料)在东南部 11 月至 5 月的 24 周冬季/春季期间被评估为材料重量损失英国的。由三种材料制成的完整食品包装单元(托盘/盘子)也在相同条件下进行了评估,但直接混合到堆肥基质中。

堆肥是在室外的家庭堆肥机中进行的,带盖的“锥形”系统充满了“基础混合物”,其中约 60% 的绿色草本植物和草屑以及 40% 来自当地的免费切碎的“木质”草本植物材料杀虫剂或除草剂,之前已堆肥 30 天以建立活跃的微生物群落/动物群。将 12 种包装材料(约 25 × 25 毫米纸)单独固定在尼龙网袋中,并将复制样

本放入不锈钢架中以便于检索。将样品架插入堆肥箱中间的基础混合物层之间（堆肥混合物表面下方约 600 毫米）。建立了三个复制堆肥单元，每个堆肥每个采样时间从每个堆肥器中取出每种材料的三个复制样本。设置了另外六个堆肥箱，每个箱子中有两个具有 6.4 wt% 的三种主要包装材料之一（马铃薯淀粉托盘、PLA 托盘和纸盘）作为一个整体与绿色废物基础混合物混合。另外两个仅包含堆肥基础混合物且未添加可生物降解包装材料的堆肥箱用作后续种子发芽比较的对照。

从 11 月到 5 月，每月对堆肥器进行取样，以确定样本质量损失和 MC (od 基础)、温度和整体堆肥体积减少。在每个采样间隔中取出小测试材料或整个单元的复制样品。堆肥的“翻动”仅在这些情况下进行。

还根据“堆肥材料规范”对来自整个包装单元测试和对照堆肥的堆肥进行了生物测定。F1 番茄种子（品种 Shirley, Sutton Seeds, 英国）被放置在种子托盘中泥炭基生长培养基 (PBG) 和测试堆肥（堆肥与 PBGM 基础混合物的体积比为 1:2）的规定混合物中并保持 2005 年初夏，在 20–25° C 的自然光温室中定期浇水，为期 28 天。根据 PAS 100 记录种子发芽、新鲜植物质量、异常和杂草出现。

堆肥箱系统在实验开始时的 11 月充当 15° C 至 18° C 的低温堆肥环境。温度在 1 月/2 月/3 月降至约 8–10° C 的低点，然后在 5 月再次升至约 14° C。堆肥箱温度远低于 OK Compost Home 标准中指定的温度 (20–30° C)，但反映了英国东南部典型的季节性温度。在堆肥期间，所有堆肥箱的生物量减少量都在可接受的水平（约 50%）。在整个研究过程中，垃圾箱的温度曲线及其内容物的降解情况基本一致。

视觉评估表明，在堆肥 90 天后，淀粉托盘完全分解并融入堆肥基质中。纸盘材料在堆肥期间也被广泛分解，尽管在 180 天后可以区分原始盘材料的元素，尽管它们已严重变色且缺乏结构完整性。PLA 聚合物在 180 天后没有显示出微生物分解的视觉证据，尽管一些碎片已经从托盘上脱落。这不被认为是生物降解导致的分解，而是归因于垃圾箱的干扰和取回样品时的机械损坏。

图 4 显示了作为小样本的所有材料类型的质量损失（作为生物降解的指标）数据，图 5 显示了整个单元的质量损失数据。从大约 90 天的暴露时间来看，可以清楚地地区分三组材料：

快速降解剂（淀粉基聚合物和植物纤维基银草）表现出大约 80% 的质量损失。

中等降解物（木纤维纸和椰子纤维）质量损失约为 40%。

质量损失可忽略不计 <5% 的缓慢降解剂（PLA、含添加剂的 PP 和淀粉/PCL）。

然后在 180 天时将这三组的差异保持到实验结束。快速降解剂损失了大约 90 wt%，并且在视觉上与密封包

装无法区分；中等降解剂损失了大约 50 wt%，并且在仔细检查时仍然可以辨认出来。缓慢降解剂的损失通常小于 5 wt%，并且可以清楚地识别出来。

MC 评估的结果表明，快速和中等降解剂在堆肥过程中很容易吸收水分，在 30 到 180 天的时间内，淀粉和纤维材料通常吸收 100% 到 300% 的水分。缓慢降解剂的吸湿性非常低，淀粉/PCL、PP/淀粉和 PLA 通常低于 10%，PP/改性剂低于 1%。

PAS 100 生物测定的结果（数据未显示）表明，来自含有完整包装单元（淀粉、纸和 PLA）的堆肥和来自对照的堆肥与相比具有相同或更高的种子发芽率以及相同或更好的鲜苗重量仅生长培养基基（一个例外是一个 PLA 堆肥箱，它的幼苗鲜重减少了 21%）。所有修改后的堆肥均未达到 PAS 100 的杂草标准，但这是意料之中的，因为低温堆肥系统无法对杂草种子进行灭菌。

这项研究表明，在非嗜热条件（嗜温微生物占主导地位的制度）下运行的模拟家庭堆肥系统中，可生物降解的包装材料表现出广泛的生物降解特性。很明显，这种常温家庭堆肥条件可能不如某些标准中规定的那样有利于生物降解。例如，本研究使用的家庭堆肥系统在大约 5–18° C 的温度范围内运行，而不是 OK Compost Home 标准中指定的 20–30° C 范围。主要基于高含量淀粉和草纤维/淀粉复合材料的快速降解生物塑料很容易在家庭堆肥系统中生物降解。基于木材或椰子纤维的介质降解剂在堆肥期间表现出大约 50% 的质量损失。在 180 天的期限结束时，残留材料的易碎性使中等降解剂能够很容易地掺入堆肥基质中，我们得出结论，中等降解剂在分解方面是可以接受的。然而，这些材料的生物降解程度在 BS EN 13432 的 180 天内未能满足 >90% 的要求。如果测试延长到 360 天（如 OK Compost Home 标准），这可能会发生什么变化，以及是否这可以减轻（至于农场堆肥中的纤维素残留物）仍有待进一步研究。慢速降解剂（例如结合淀粉/可生物降解的聚酯配方和 PLA），包括在 EN 13432 条件下认证为可堆肥的生物塑料聚合物，在堆肥期间没有或表现出非常低的生物降解和碎裂水平。尽管在更长的时间（例如扩展到 360 天）下可以实现更大的降解，但 60° C 左右的高温已被证明是一个关键参数，能够诱导 PLA 等聚合物的生物降解。这种温度在所模拟类型的家庭堆肥系统中显然是缺乏的。种子发芽研究表明，由绿色废物制成的堆肥含有约 6% 的家庭堆肥淀粉或纸盘，可提供支持良好种子发芽和幼苗发育的生长介质。尽管混合非生物降解 PLA 材料的堆肥也取得了类似的结果，但必须注意的是，使用 PLA 托盘的堆肥将无法达到 OK Compost Home 中设定的分解要求，因为 PLA 托盘几乎完好无损。在含有可降解 PE 的堆肥中抑制幼苗发育，并控制来自开放式堆肥系统的堆肥。

从这项研究中可以清楚地看出，几种可生物降解的

包装材料可以在家庭堆肥系统中进行处理, 并产生适合植物生长的堆肥材料。这种能力将使这些材料能够在运行良好的家庭堆肥系统中进行处理, 并导致废物从城市废物流中转移。然而, 我们还证明, 许多通常在工业、嗜热高温堆肥系统中生物降解良好的包装材料在低温、嗜温环境下的家庭堆肥环境中无法充分生物降解。

在实践层面上, 这些结果表明, 明确区分可预期在英国家庭堆肥系统中常见的环境、常温条件下生物降解的可生物降解包装材料与在完全嗜热-常温条件下生物降解的材料是至关重要的(55-65 °C)工业堆肥系统的制度。标签计划以及消费者教育和信息应该支持这种区分。

结论:

许多研究旨在调查生物塑料在不同环境条件下的生物降解性, 例如土壤、堆肥、海洋和其他水生环境。在这些环境条件中, 由于微生物多样性高, 主要考虑了土壤和堆肥。虽然大部分塑料垃圾都被填埋处理, 但生物塑料在垃圾填埋场的生物降解研究还不多。未来, 可生物降解的聚合物将在包装领域发挥更大的作用。使用后的可生物降解塑料和其他生物垃圾, 如纸张、食物和花园垃圾, 通常不适合填埋, 因为它们可能在厌氧条件下释放甲烷, 并且通过这种方法处理它们不符合欧盟垃圾填埋指令等政策。可生物降解的生物塑料最适合通过工业和/或家庭堆肥进行生物废物处理, 并且有待进一步论证, 可能用于厌氧消化系统。理想情况下, 它们应该在家庭层面与其他不可生物降解的材料分开, 并与有机废物(包括食物垃圾)一起收集。通过使用这些生物处理方法, 送往垃圾填埋场的废物总量减少, 产生的堆肥可用作有价值的土壤改良剂。

对可生物降解的生物塑料的发展范围实施有效的生物处理需要明确的认证和标签计划的支持。通过相关可堆肥标准的可生物降解塑料将在工业堆肥系统中很好地生物降解。然而, 正如所讨论的, 只有一些塑料在英国家庭堆肥机典型的环境、中温状态下也能充分生物降解, 这种区别需要有效地传达给更广泛的公众。

生物塑料聚合物在促进材料回收、减少垃圾填埋场和使用可再生资源方面具有巨大潜力。公众对这些材料的广泛认识以及严格控制认证、收集、分离和堆肥的有效基础设施对于充分获得这些好处至关重要。

参考文献:

Agarwal M., Koelling K., Chalmes J. 1998 Characterization of the degradation of polylactic acid polymer in a solid substrate environment. *Biotechnol. Prog.* 14, 517 - 526 (doi:10.1021/bp980015p)

Andrady A. L., Neal M. A. 2009 Applications and societal benefits of plastics. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1977 - 1984 (doi:10.1098/rstb.2008.0304)

APME 2002 Using waste plastic as a substitute for coal. *Warmer Bulletin*. no. 83, March 2002, pp. 20 - 21

ASTM 2002 Standard specification for compostable plastics (Designation: D 6400-99), ASTM International, 100 Barr Harbour Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-12959, USA.

Barnes D. K. A., Galgani F., Thompson R. C., Barlaz M. 2009 Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364, 1985 - 1998

Bioplastics 07/08 Processing parameters and technical characteristics—a global overview, *Bioplastics24.com.*, ISSN 1863-7299

BPF 1993 SELCHP trials: summary report—energy recovery from plastic waste. British Plastics Federation and the Industrial Films Association. London and Nottingham, UK

BS EN 13432 2000 Packaging. Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation. Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging. London, UK: British Standards Institution

BSI 2002 Publicly available specification 100 (PAS 100)—specification for composted materials (BSI PAS 100). ICS codes: 65.020.20: 65.080

Claesen C. 2005 Hycail—more than the other PLA producer, presentation at RSC Symposium sustainable plastics: biodegradability vs recycling.