

寒冷海洋生境中塑料和塑料降解细菌的降解

阿内塔·里莫维奇、瓦尔德马尔·米隆丘克、亚历山德拉·乌尔班内克
波兰弗罗茨瓦夫环境与生命科学大学生物系统工程系

摘要: 日常材料中存在的合成塑料构成了进入地球海洋的主要人为碎片。海洋提供重要且宝贵的资源, 例如食物、能源和水。它们也是国际贸易的主要方式和气候的主要稳定器。因此, 由塑料污染等人为影响引起的海洋生态系统变化可能在全球范围内产生巨大影响。尽管塑料问题仍未解决, 但人们正在考虑采用不同的方法来减少它们对环境的影响。其中之一是使用能够降解塑料的微生物。一个特别有趣的领域是应用从寒冷地区分离的微生物, 因为它们具有独特的特性。尽管如此, 塑料和微生物之间的相互作用仍然知之甚少。在这里, 我们回顾了当前关于寒冷海洋栖息地中塑料降解和塑料-微生物相互作用的知识。此外, 我们强调了从这种环境中分离出的微生物在消除生态系统中的塑料废物方面的优势。

关键词: 塑料废弃物、生物膜、微生物、寒冷的海洋环境、生物降解

Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats

Aneta Rymowicz, Waldemar Mirończuk, and Aleksandra Urbanek

Department of Biosystems Engineering, Wrocław University of Environmental and Life Sciences, Poland

Abstract: Synthetic plastics present in everyday materials constitute the main anthropogenic debris entering the Earth's oceans. The oceans provide important and valuable resources such as food, energy, and water. They are also the main way of international trade and the main stabilizer of the climate. Hence, changes in the marine ecosystem caused by anthropogenic influences such as plastic pollution can have a dramatic impact on a global scale. Although the problem of plastics still remains unsolved, different ways are being considered to reduce their impact on the environment. One of them is to use microorganisms capable of degradation of plastic. A particularly interesting area is the application of microorganisms isolated from cold regions in view of their unique characteristics. Nevertheless, the interactions between plastic and microorganisms are still poorly known. Here, we present a review of current knowledge on plastic degradation and plastic-microorganism interactions in cold marine habitats. Moreover, we highlight the advantages of microorganisms isolated from this environment for eliminating plastic waste from ecosystems.

Keywords: Plastic wastes, Biofilm, Microorganisms, Cold marine environment, Biodegradation

引言

合成塑料在我们当前的生活方式中至关重要, 因此, 它的积累是环境和人类健康的主要关注点。石油衍生的(石油)聚合物, 如聚乙烯(PE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚氨酯(PU)、聚苯乙烯(PS)、聚丙烯(PP)和聚氯乙烯(PVC)对自然生物降解途径极为顽固。一些能够在体外条件下降解石油聚合物的微生物已经被分离和表征。在某些情况下, 这些微生物表达的酶已被克隆和测序。聚合物生物降解的速率取决于几个因素, 包括化学结构、分子量和结晶度。聚合物是具有规则晶体(结晶区)和不规则基团(无定形区)的大分子, 后者为聚合物提供了柔韧性。高度结晶的聚合物, 如聚乙烯(95%), 是刚性的, 抗冲击能力低。PET基塑料具有高结晶度(30-50%), 这是其微生物降解率低的主要原因之一, 预计在自然环境中完全降解需要50年以上, 并且如果被丢弃到海洋中数百年, 因为它们的温度和氧气含量较低。酶促降解分两个阶段发生: 酶在聚合物表面的吸附, 然

后是关键加氢过氧化/水解。塑料降解酶的来源可以在来自各种环境的微生物以及一些无脊椎动物的消化道中找到。废石油塑料的微生物和酶促降解是一种很有前途的策略, 可以将废石油塑料解聚成聚合物单体进行回收, 或者通过矿化将废塑料转化为更高价值的生物产品, 例如可生物降解的聚合物。

合成塑料生产是全球工业中发展最快的领域之一。尽管塑料在日常生活中的使用已有100年的历史, 但大规模生产的开始可以追溯到1950年。塑料的众多特性使其在许多应用中优于其他材料, 导致塑料的使用量增加了20倍。自1964年以来的50年里, 塑料生产规模每年超过3亿吨, 2015年达到3.35亿吨。此外, 预计塑料产量将在未来20年翻一番, 到2050年几乎翻两番。约80%全球塑料总使用量的10%是石化塑料, 如聚氯乙烯(PVC)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)。尽管塑料材料构成了全球经济不可或缺的一部分, 但与其广泛应用相关的问

题也不容忽视。塑料垃圾的堆积主要发生在海洋环境中,很难找到不受人类影响的区域。在五个亚热带环流中的每一个的汇合带中,经常会发现世界范围内塑料在公海表面的堆积。然而,在格陵兰海和巴伦支海发现了高浓度的塑料碎片(每平方公里数十万件)。此外,在南极海洋系统(南大洋)中,在地表和深海沉积物中发现了塑料碎片。在这些区域,主要发现了微塑料($< 5\text{ mm}$)和中间塑料($< 5\text{ cm}$)。据估计,每年有 10 至 2000 万吨塑料泄漏到海洋中。自 2015 年以来,已产生约 63 亿吨塑料废物,其中很大一部分由于不受控制地倾倒入环境。传统石油基塑料的主要局限性在于它们在非生物因素(紫外线辐射、温度、物理压力)下长期破碎,在生物降解过程中不能被微生物(生物因素)完全分解和同化。塑料耐生物降解的关键特性包括长链聚合物结构、高分子量(MW)、缺乏有利的官能团、疏水性和结晶度。高 MW 是一个关键的障碍,因为大的化合物不能穿过微生物的细胞膜。因此,长链聚合物必须首先解聚成较小的单体才能穿过细胞膜。接下来,单体可以穿过细胞膜,然后被细胞内代谢同化。由于大多数石化塑料是不可生物降解的,因此开发了新型可生物降解塑料(BPs),其中一些已经推向市场。如今,有许多产品(瓶子、包装)由可生物降解的塑料制成,例如聚乳酸(PLA)、聚(ϵ -己内酯)(PCL)、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)或聚(丁二酸丁二醇酯-共-己二酸丁二醇酯)(PBSA)。可生物降解塑料可分为生物基或石化基塑料,可通过微生物以生态友好的方式降解,通过微生物酶活性和键断裂导致材料碎裂。

由于塑料废物在河流和海洋中的积累,塑料废物可能对自然环境造成危险,塑料岛(例如大太平洋垃圾带)的形成已得到证实。此外,由于紫外线辐射、氧气、温度和物理压力引起的传统塑料非生物降解,缓慢降解的大型塑料制品会产生微塑料颗粒,这些颗粒可以通过风力驱动的海洋表层环流传播很远的距离。因此,远离污染源的地方会受到塑料垃圾的影响。人们还担心塑料是多氯联苯或邻苯二甲酸盐和双酚 A 等有毒化学物质的来源。由于缠绕、窒息和破坏鸟类、鱼类、哺乳动物的消化,这些污染物对海洋动物也有重大影响,和海龟。根据阿尔弗雷德韦格纳研究所亥姆霍兹极地和海洋研究中心的研究,有 1506 个物种受到垃圾的影响。

在本研究中,我们关注寒冷地区尤其是海洋环境中的塑料污染问题。需要了解的是,海洋不仅会在某些地方积累塑料,还会将它们转移到遥远的处女地,例如北极和南极。此外,我们试图解释海洋微生物与漂浮在海洋中的塑料垃圾之间的相互作用。根据目前的知识,我们收集了有关寒冷海洋栖息地中塑料降解细菌的信息,并解释了寻找它们的优势。

一、寒冷海洋环境中的塑料垃圾

海洋环境中合成塑料废物的主要来源是沿海旅游、渔业、海洋工业和塑料制品制造产生的废物,这些废物对海洋有直接影响。此外,塑料分散到海洋环境中的间接途径也很重要。来自化妆品行业或家庭的污染物首先进入河流和排水系统,然后到达海洋,这可能与沿海和河口附近的塑料浓度较高有关。应该注意的是,直接进入环境(例如来自洗面奶和化妆品)的直径小于 5 毫米的塑料碎片被称为初级微塑料,而由于较大物品的碎片而形成的颗粒被称为次生微塑料。大塑料碎片的缓慢降解和微塑料的产生是由紫外线辐射和机械力引起的,是塑料长距离转移的促进因素。根据其密度,塑料在中央汇聚区的水柱中积聚,并在加载生物和非生物溶解化合物后漂浮在水面或沉入海底。同时,漂浮塑料上的生物质会发生沉降,称为生物污垢。海洋生物污垢是指生物和非生物因素、微生物、植物和动物在海水中淹没的人造产品(包括塑料)的定殖。生物污垢涉及五个主要阶段:吸附、固定、固结、微污垢和大污垢。细菌对于生物污垢至关重要,因为它们参与初级微污垢过程中参与了表面的初级定植。微污垢经历两个步骤,初级(初级定殖者、细菌和硅藻)和二级定植。由于颗粒的密度不同和运输的可能性,塑料废物可以从人口稠密的纬度收集,导致在寒冷的海域和极地地区堆积。

第一份关于北大西洋近海盆地塑料污染的报告发表于 1970 年代。当时注重塑料的集中度和特性,达到每平方公里 3500 个。颗粒状、直径不超过 5mm 的颗粒被硅藻和水螅附着。一项关于微塑料污染范围的最新研究是在北海南部和西北欧海面的沉积物中进行的。漂浮浓度达到 0-1.5 个微塑料颗粒/立方米,而沉积物中的微塑料浓度在 0-3146 个颗粒/千克干重沉积物范围内变化。这一观察可以支持沉积物中的垃圾可以持续很长时间的理论,因为与低环境温度($0-4^{\circ}\text{C}$)、低能量输入和没有阳光相比,降解率可能较低存在于地表水中的塑料更容易降解。特别是,由于在氧化过程的启动中起着关键作用,紫外线传输的减少可能会产生最大的影响。此外,深海沉积物中的氧气含量可能很低,也可能完全缺氧。因此,在这些条件下不太可能发生烃类聚合物降解所必需的氧化分解代谢活动。有趣的是,另一项研究表明,英国排放的塑料垃圾到达巴伦支海和北极需要 2 年时间。应该注意的是,与影响鱼类和鸟类的大塑料颗粒相比,微塑料碎片可能对浮游动物和贻贝等较低营养水平的生物构成威胁,具体取决于浓度。漂浮的微塑料($< 1\text{ mm}$)可以很容易地被浮游动物摄入,因此与它们的粪便颗粒一起被消化。这些颗粒是海洋生物的食物来源,构成了更快垂直运输的载体。

二、寒冷海洋生境中微生物与塑料的相互作用

微生物能够在各种条件下生存,许多寒冷的地方,如永久冰封的湖泊、海冰、雪、永久冻土、云滴、岩石

环境或冰川冰, 已被发现是细菌的栖息地。海洋生态系统中微生物的丰度在一克潮湿的海洋沉积物中高达数亿个细菌细胞。此外, 假设海洋环境中的任何表面都被宏观和微生物定殖。因此, 沉没或漂浮的塑料垃圾并非没有微生物的影响。尽管微生物可以在所有进入海洋环境的塑料中定殖, 但关于塑料和海洋微生物群之间相互作用的研究数量有限。不幸的是, 细菌附着在塑料表面的确切机制知之甚少。附着在表面和生物膜的发展是细菌在海洋环境中的各种条件下生存的众所周知的策略, 包括形成稳定的聚生体的能力、水平基因交换、营养物质的积累和对有毒物质的保护。在海水中, 细菌几乎立即开始在塑料材料上定殖。在几个小时内, 微生物能够形成微生物组合并覆盖在塑料表面, 这被定义为附着。

在此阶段, 微生物组合可能会催化代谢反应, 导致微塑料相关化合物的吸附、解吸和碎裂, 甚至碎片本身的分解。构建生物膜为微藻类(包括硅藻、鞭毛虫、原生生物)和微观真菌等其他生物的稳定居提供了合适的平台。这些生物之间的丰度比可能不同; 白海聚合物板上细菌/硅藻/鞭毛虫的细胞比例为 640:4:1, 而其他生物的比例约为 0.15%。由于系统发育、功能和生态多样性, 生物膜被称为微生物组合、生物污垢群落或附生生物, 此外, 由于与周围的水不同, 它们也被称为“塑料圈”。生物污垢增加了颗粒的密度, 因此, 它可能沉入海底。预计生物污染材料可以吸引能够以塑料居民为食的无脊椎动物, 同时增加生物污染率。生物污染材料传输的结果是非本地或“外来”物种的传输。自然存在于一部分海洋垃圾中的微生物可以在新的独特栖息地中找到, 这可能对海洋生态系统产生负面影响。将非本地或入侵物种转移到新环境中将如何引起原始生态系统的变化仍然未知。然而, 塑料垃圾与冷海栖息地之间的大多数相互关系应该得到更精确的研究。

三、塑料(生物)降解过程

生物降解是微生物(主要是细菌和真菌)转化或改变(通过代谢或酶促作用)引入环境的化学物质结构的过程。如前所述, 一旦塑料废物进入海洋环境, 塑料的大颗粒首先会破碎, 形成微塑料或纳米塑料颗粒。这个多阶段过程受到各种生物和非生物因素的影响。这意味着微生物在表面的附着和生物膜的形成不仅取决于微生物的能力, 还取决于材料的性质和表面结构, 如表面粗糙度、形貌、表面自由能、表面静电相互作用和表面疏水性。此外, 与环境条件相关的各种因素, 如盐度、温度、氧气水平和光的限制, 都会影响生物膜的形成。特别是, 通过提高温度和湿度来提高降解率可能是至关重要的。由于化学反应的加速或抑制, 预计海水温度的不同变化会影响塑料降解的速度。因此, 受不同表面特征和环境条件影响的污染群落的生物量并不总是相同的。有人提出, 细菌对塑料表面的粘附取决于物理化学表面和细菌

特性, 而不是生物过程。同时, 生物和非生物因素对释放产物有影响。

此外, 已证明风化过程是塑料降解的重要因素。物理完整性的丧失导致微生物定殖的表面可用性增加。海洋环境中的退化机制尚不清楚。北大西洋研究的作者观察了塑料表面凹坑中的微生物细胞, 这导致他们将塑料相关微生物与塑料表面的潜在降解联系起来。如上所述, 附着是降解的关键启动过程。然而, 有人指出, 尽管细菌很容易在塑料上定殖, 但没有证据表明在早期附着过程中可能会发生降解。尽管如此, O'Brine 和 Thompson 观察到四种塑料表面出现生物膜: 可氧化生物降解的 d2w 和 EPI 聚乙烯袋、可堆肥 BioBag 袋和标准聚乙烯袋。在北海浅水区暴露 4 周后形成生物膜。此外, 据观察, 可生物降解袋的降解率高于聚乙烯(PE)袋, 可堆肥材料在 16 至 24 周内降解 100%。反过来, Eich 等人。注意到在暴露于海洋环境 15 天后, 塑料袋表面形成了生物膜。分发到浅海和远洋栖息地的聚乙烯和可生物降解塑料袋在 33 天内生物膜的数量显著增加。由于在不同环境中两种塑料类型上观察到的生物膜群落之间存在差异, 作者认为早期生物膜的形成和组成受塑料类型和栖息地的影响。不幸的是, 在他们的研究中, 机械测试并未显示两种塑料类型在暴露后 1 个月内的拉伸性能下降。然而, 扫描电子显微镜分析显示可生物降解塑料的表面发生了变化。

他们注意到, 材料性能没有明显变化可能是由于进行实验的时间太短造成的。Lobelle 和 Cunliffe 指出, 生物膜的形成可能在 1 周内可见。在持续 3 周的实验中, 淹没在安妮女王炮台(英国)海边的聚乙烯塑料食品袋的疏水特性发生了变化, 但他们没有观察到聚乙烯降解生物。此外, 他们的研究表明, 从塑料中去除可见的生物膜会逆转其物理化学性质。在最近的一项研究中, 研究了 PS 和 PE 上的生物膜形成。结果发现, 在寒冷的海水(波罗的海沿岸)中孵育 2 周后, 微塑料被组合物覆盖, 并且在微塑料上发现了红杆菌属的细菌。该属细菌以其利用多环芳烃(PAH)的能力而闻名。因此, 有人提出, 红杆菌属成员可能能够降解与塑料相关的多环芳烃。尽管关于微生物在寒冷栖息地降解塑料的知识很少, 但 De Tender 等人。研究了塑料表面上的生物膜发展, 并建议对生物膜进行建模的因素可能有助于识别可能参与生物降解的物种。

这些观察结果表明, 迄今为止, 海洋环境中的退化过程尚未得到充分研究。

四、从寒冷的海洋环境中分离出来的微生物具有降解塑料的能力

到目前为止, 只有少数研究调查了塑料在寒冷栖息地的降解情况。目前的研究更侧重于深海环境等海洋生态系统与其微生物居民之间的相互作用, 或者海洋微

生物与一般塑料之间的关系。尽管某些微生物能够降解塑料,但通常认为生物降解性很低。然而,一些研究表明分离的冷海洋细菌具有降解塑料的潜力。不幸的是,这项研究的主要问题是即使确认了这种活动,也要鉴定分离出的微生物。在大多数研究中回收的 16s rRNA 序列揭示了主要未知生物体的存在,这些生物体与已知分离株只有远缘关系。降解微生物的研究主要集中在温度降至 4℃ 以下的深海沉积物中寻找它们(以 90% 的海底为例)。从富山湾 320 米深处的深海中分离出两种 PCL 降解细菌。分离的菌株被鉴定为假单胞菌属,并且能够在 4° C 下降解 PCL。此外, Sekiguchi 等人。从 5000-7000 米深处获得的深海沉积物样本中分离出属于 *Shewanella*、*Moritella*、*Psychrobacter* 和 *Pseudomonas* 属的细菌。六种分离的菌株显示出对可生物降解的聚酯 PCL 的降解能力。作者还测试了其他可生物降解塑料,如 PLA、PBSA、PBS 和聚羟基丁酸酯 (PHB),但未观察到任何活性。然而,在下一份报告中,指出 PCL、PHB 和 PBS 纤维尽管温度低,但在深海中仍可降解。接下来,从深水(320-650 米深)中分离出另外五种 PCL 降解菌株,鉴定为来自假单胞菌属、嗜熔菌属和坚韧杆菌属的细菌。其中两个,假单胞菌属。发现菌株 RCL01 和 TCL04 适应低温(4° C)和高静水压力条件。拉古尔等人。观察到聚乙烯醇-低线性密度聚乙烯(PVA-LLDPE)共混膜与从不同海洋环境底栖带分离的溶藻弧菌和副溶血弧菌组成的细菌群孵育 15 周后,表面出现可见的裂缝和凹槽深度为 8 m。在最近的一项研究中,从北极地区分离出具有降解生物塑料能力的细菌和真菌菌株。在该研究中,测试了针对 PLA、PCL、PBS 和 PBSA 的微生物活性。对于鉴定为 *Clonostachys rosea* 和 *Trichoderma* sp. 的真菌菌株,以及属于假单胞菌属和红球菌属的细菌菌株,观察到最高活性。PCL 薄膜在 30 天的孵育期间降解了 53% (w/w)。此外,观察到 PLA 薄膜上的大量生长,这可能表明在某些条件下 PLA 降解的能力。

五、海洋细菌作为塑料废物生物降解的潜在候选者

我们星球的大部分地区永久寒冷(< 5° C)并且无人居住。原因是地球 70% 以上被海水覆盖,其中大部分是深海,其中三分之二的温度非常恒定,约为 2° C。然而,细菌可以在这些不利条件下存在。对这种条件有抵抗力的微生物群落可能表现出许多独特的特征。在寒冷地区的众多微生物能力中,分解塑料的能力被越来越多地提及。据推测,越来越多的塑料废物泄漏到海洋可能为底栖生物提供新的基质。结果表明,在海水中,塑料释放溶解的有机碳,刺激异养微生物的活动。适应新的碳源可以创造微生物的新特征,特别是在冷活性酶的生产中。极地微生物独特的冷适应酶为生物技术开发提供了无数机会,并为塑料污染等广泛的应用问题提供了新的见解。目前,由于不断尝试减少能源需求,来自嗜

冷微生物的酶正在引起许多工业应用的兴趣。由于减少了用于加热的电能,因此保持酶活性的生长所需的较低温度可能是降解过程中的一个巨大优势。因此,来自寒冷栖息地的潜在微生物可以用于开放区域垃圾填埋场。在用于生物降解的突出微生物制剂中,最常提到的属于假单胞菌属、链霉菌属、棒状杆菌属、节杆菌属、微球菌属和红球菌属的物种;在寒冷的环境中也发现了微生物。

除了假单胞菌和微球菌外,从位于斯匹次卑尔根西北部的三个冰川的低温岩中分离出来自 *Polaromonas*、*Micrococcus*、*Subtercola*、*Agreia*、*Leifsonia*、*Cryobacterium* 和 *Flavobacterium* 的细菌分离物。此外,12 种分离的菌株能够产生脂肪酶,这是一种水解脂质和某些聚酯中酯键的酶。在从加拿大盆地的北极海冰中分离出的微生物菌株中也检测到细胞外脂肪酶活性。在这里,微生物被鉴定为属于 *Colwellia*、*Marinomonas*、*Pseudoalteromonas*、*Pseudomonas* 和 *Shewanella* 属。有趣的是,在 0° C 时,仍然分别在 20-40% 和 10-30% 的嗜冷和耐冷菌株中检测到相对脂肪酶活性。鉴于生物降解过程,发现具有脂肪酶活性的冷适应细菌菌株可能很重要,因为几种脂肪酶会水解聚酯,例如 PCL。此外,可以预期从寒冷环境中分离出来的细菌分泌的其他酶将显示出可生物降解的活性。可被描述为可生物降解的潜在酶包括上述脂肪酶、解聚酶(PHA 解聚酶、PHB 解聚酶、PLA 解聚酶、PCL 解聚酶)、酯酶、蛋白酶(针对 PLA 的蛋白酶 K)、角质酶、脲酶和脱水酶。通过向聚合物补充影响其热敏感性和紫外线吸收能力的添加剂,可以提高生物降解率。化学敏感的聚合物更容易被微生物附着。结果表明,能够在 -1° C 下生长的细菌会释放出大量的蛋白酶,这证明了极地细菌具有巨大的酶生产潜力。尽管有这些事实,我们仍然缺乏关于石化塑料(如 PCV 或 PET)生物降解可能性的信息。然而,在最近的一项研究中,一种由 *Ideonella sakaiensis* 产生的新酶 PETase 得到了表征。因此,它清楚地表明我们仍然缺乏关于塑料降解微生物潜力的完整信息。

结论:

1970 年代首次报道了塑料垃圾造成的环境污染。越来越多的塑料垃圾已成为全球关注的问题。尽管通过分类收集和回收处理来减少塑料废物的努力越来越多,但仍有相当数量的塑料固体废物被填埋。漂浮的塑料垃圾对海洋物种和生态系统有负面影响。然而,人们对塑料在海洋中的数量、来源、运输、积累和作用等仍缺乏准确的认知。幸运的是,科学界和公众对塑料作为全球威胁的认知正在提高。许多行动通过鼓励消费者、生产者、行业 and 公司的积极参与来解决塑料堆积问题。2016 年,回收利用的塑料包装垃圾首次超过填埋量(欧盟/挪威/瑞士地区)。不幸的是,在许多国家,垃圾填埋场仍然

是处理塑料垃圾的首选。因此,需要寻找新的解决方案。除了每个人都知道的 3R 战略——减少、再利用和回收塑料废物之外,还应该考虑另外两个 R: 能量回收和分子重新设计。值得注意的是,后者被视为该战略的一个新兴且非常重要的要素。新型生物塑料材料的开发及其广泛应用将有助于减少塑料对环境的影响。通常情况下,可再生原料而不是原油用于生产,这节省了宝贵的化石资源,并使它们更容易通过堆肥或厌氧消化进行废物管理,以减少对环境的输入。该研究适用于 BP 和传统塑料,重点关注与海洋环境中塑料表面生物膜形成相关的微生物活动。由于对生物污染群落的影响知之甚少,因此迫切需要研究塑料与微生物之间的相互作用。由于极地海洋的环境条件不同于其他海洋生态系统,北极微生物可能具有独特的潜力。来自这些地区的细菌对不断变化的环境模式做出快速反应。因此,越来越多的塑料垃圾可能会迫使微生物适应新的底物。尽管存在这种可能性,但我们星球的未来取决于我们自己以及我们对塑料废物问题的责任。微生物的自然适应可能需要太多时间,因此自然环境中的垃圾可能是不可逆转的。

参考文献:

- Artham T, Sudhakar M, Venkatesan R, Madhavan Nair C, Murty KVG, Doble M. Biofouling and stability of synthetic polymers in sea water. *Int Biodeterior Biodegradation*. 2009;63:884 - 890. doi: 10.1016/j.ibiod.2009.03.003.
- Austin HP, Allen MD, Donohoe BS, Rorrer NA, Kearns FL, Silveira RL, Pollard BC, Dominick G, Duman R, El Omari K, Mykhaylyk V, Wagner A, Michener WE, Amore A, Skaf MS, Crowley MF, Thorne AW, Johnson CW, Woodcock HL, McGeehan JE, Beckham GT. Characterization and engineering of a plastic-degrading aromatic polyesterase. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2018;115:E4350 - E4357. doi: 10.1073/pnas.1718804115.
- Bergmann M, Klages M. Increase of litter at the Arctic deep-sea observatory HAUSGARTEN. *Mar Pollut Bull*. 2012;64(12):2734 - 2741. doi: 10.1016/j.marpolbul.2012.09.018.
- Bryant JA, Clemente TM, Viviani DA, Fong AA, Thomas KA, Kemp P, Karl DM, White AE, DeLong EF. Diversity and activity of communities inhabiting plastic debris in the North Pacific Gyre. *mSystems*. 2016;1(3):e00024 - e00016. doi: 10.1128/mSystems.00024-16.
- Cameron KA, Hodson AJ, Osborn AM. Structure and diversity of bacterial, eukaryotic and archaeal communities in glacial cryoconite holes from the Arctic and the Antarctic. *FEMS Microbiol Ecol*. 2012;82(2):254 - 267. doi: 10.1111/j.1574-6941.2011.01277.x.
- Cole M, Lindeque PK, Fileman E, Clark J, Lewis C, Halsband C, Galloway TS. Microplastics alter the properties and sinking rates of zooplankton faecal pellets. *Environ Sci Technol*. 2016;50:3239 - 3246. doi: 10.1021/acs.est.5b05905.
- Cózar A, Echevarría F, González-Gordillo JI, Irigoien X, Ubeda B, Hernández-León S, Palma AT, Navarro S, García-de-Lomas J, Ruiz A, Fernández-de-Puelles ML, Duarte CM. Plastic debris in the open ocean. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2014;111(28):10239 - 10244. doi: 10.1073/pnas.1314705111.
- Cózar A, Martí E, Duarte CM, García-de-Lomas J, van Sebille E, Ballatore TJ, Eguluz VM, González-Gordillo JI, Pedrotti ML, Echevarría F, Troublè R, Irigoien X. The Arctic Ocean as a dead end for floating plastics in the North Atlantic branch of the Thermohaline Circulation. *Sci Adv*. 2017;3(4):e1600582. doi: 10.1126/sciadv.1600582.
- Dash HR, Mangwani N, Chakraborty J, Kumari S, Das S. Marine bacteria: potential candidates for enhanced bioremediation. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2013;97(2):561 - 571. doi: 10.1007/s00253-012-4584-0.
- De Tender CA, Devriese LI, Haegeman A, Maes S, Ruttink T, Dawyndt P. Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea. *Environ Sci Technol*. 2015;49(16):9629 - 9638. doi: 10.1021/acs.est.5b01093.