



減塑，勢在必行！

本刊取得美國麻省理工學院Technology Review期刊圖文授權
Technology Review,
Published by MIT.
TECHNOLOGY REVIEW
internet URL: www.
technologyreview.com

**MIT
Technology
Review**

還以為回收就能解決塑膠問題嗎？那就錯了！

撰文／曼恩 (Douglas Main)

插圖／白爾斯 (Michael Byers)

翻譯／連育德

去年夏天某個周六，我隨著康乃狄克州一群在地民眾從海岸出發，趁漲潮之際從河流泛舟而上，準備展開淨河活動。大藍鷺與白鷺在淺灘覓食，魚鷹捉著剛捕獲的魚盤旋天際，河面被風吹拂起片片漣漪，午後陽光彷彿散落成千百萬顆鑽石。從我們這頭看過去，眼前的濕地自然又原始。

再往內陸前進，我們離開主要河道，划進泥濘的沼澤中心，這時開始注意到各種塑膠廢棄物，先是比較大的垃圾，像是纏繞在蘆葦中的洋芋片空包裝、河面下的購物袋、沾滿泥土的保麗龍托盤、跟其他垃圾混在一起的塑膠瓶。

划經沼澤，我們看到更多更小的塑膠，不只是吸管、打火機、梳子、釣魚線而已，還有很多無法辨識、彷彿無止無盡的塑膠碎片，有的跟我的手掌一樣大，有的細小如沙粒。如果留在內陸撿垃圾，可能永遠也離不開。這裡是東岸污染相對不嚴重的地區，市區又有廢棄物管理規劃與回收系統，但即便如此，陸地與河流仍舊充斥著塑膠垃圾。

塑膠製品與垃圾在日常生活中無所不在，但我們可能視若無睹，很少質疑它的存在。但仔細探究現實狀況，可能會有驚人發現。

垃圾問題之大，恐怕一時難以消化。根據

《自然》(Nature) 期刊在2020年發表的一份研究報告，人類至今製造出的塑膠約110億噸，超過所有陸地與海洋動物的生物質總和。

再觀察聯合國環境規劃署 (UNEP) 的數據，全球目前每年約生產4.3億噸塑膠，遠高於所有人類的重量總和。其中，有三分之一的產量為一次性塑膠，民眾只經手幾秒、幾分鐘就拋棄。

顧問公司麥肯錫的一項報告指出，有95%的包裝用塑膠用過一次後就被丟掉，每年造成經濟損失高達1,200億美元——包裝用塑膠占有塑膠產量略高於四分之一。三分之一的包裝不會經過回收，形成污染，「降低海洋等重要天然系統的生產力，進而帶來龐大的經濟成本」。報告指出損失至少達400億美元，高出包裝產業的「利潤池」。

這些數據讓人難以消化，並不意外，但即使是單一公司的規模也很嚇人，例如可口可樂在2017年生產3百萬噸的塑膠包裝，相當於每分鐘製造20萬罐瓶子。

值得注意的是，塑膠若不重複使用或回收再利用，並不會化學降解，只會分解形成直徑不到5公釐的塑膠微粒，永遠存在於這個世界。過去幾年，科學家已在各種環境找到大量塑膠微粒，







包括：更深的深海地區；全球原始地帶的積雪與降雨；我們呼吸的空氣；人類的血液、結腸、肺部、靜脈、母乳、胎盤與胎兒。

有項研究論文估計，一般人每星期會吞下5公克的塑膠（主要是喝水）；美國約95%的自來水出現污染。塑膠微粒也常見於啤酒、鹽巴、貝類和其他人類食品。義大利最近一項研究發現，常見蔬果也開始含有大量塑膠微粒。

也就是說，我們這樣泛舟撿拾塑膠垃圾，保護在地環境，雖然確實是我為人人的表現，但只是解決問題的症狀罷了。

解方位於更上游，也就是要解決塑膠污染的問題，生產塑膠的業者必須為損害付出代價，全世界也要降低塑膠製造。我們必須研發出更好、更方便回收再利用的產品，也要找出符合永續理念的替代品，提高生態學家所謂的循環模式，亦即盡可能延長產品的使用時間，後續也要設法再利用。

這些做法雖然稱不上新聞，但再度受到全球各地的關注，包括決策機關、創新人士、力求兼顧永續與獲利的企業等。

減少塑膠產量是首要的目標，卻也高度碰觸政治敏感神經，牽動著塑膠業者的龐大獲利與政治權力。「怎麼做最能管理廢棄物？」喬治亞大學（University of Georgia）的環境工程專家簡貝柯（Jenna Jambeck）說：「就是一開始就不要生產。」

數據會說話。根據經濟合作暨發展組織（OECD）在2022年的報告，高達72%的塑膠產量最終會進入垃圾掩埋場或環境，只有9%會回收、19%會焚化。有些塑膠垃圾會流入大海，每年估計達800萬到1,100萬噸。根據美國國家科學院（National Academy of Sciences），這樣的數量

等於每分鐘把一輛垃圾車的塑膠倒進大海裡。

「全球大浩劫」

塑膠產量近年大幅成長，目前存在於地球的塑膠有半數產於過去20年。塑膠產量預計以每年5%的速度攀升，倘若目前的趨勢不變，人類在2050年前將生產340億噸塑膠，比目前總數高出2倍。

被法國總統馬克宏（Emmanuel Macron）稱為「全球大浩劫」的塑膠污染，衝擊最深的族群正好是最無力因應的人。聯合國環境規劃署指出，塑膠產業每年營收超過7千億美元，卻也「為人類健康與環境退化造成嚴重負擔，收入最低的社會階層面臨最大的衝擊，卻不是造成塑膠過度消費與塑膠垃圾的族群。」

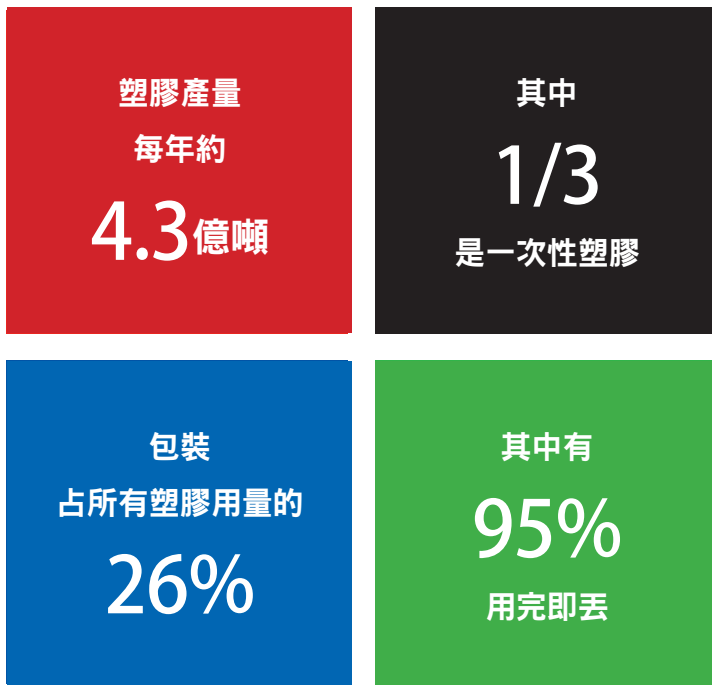
這個現象放諸塑膠的生命週期各階段皆準。塑化工廠集中在有色人種地區，例如沿著路易斯安那州密西西比河的「癌症地帶」（Cancer Alley），這裡坐落著將近150家煉油廠、塑膠廠與化學廠，排放空污，導致罹患癌症與其他疾病的機率增加。聯合國人權專家小組指出，這個情況相當於「環境的種族歧視，對占當地民眾多數的非裔美國人構成嚴重且不成比例的威脅。」

塑膠污染亦嚴重衝擊不產塑膠的貧窮與開發中國家，例如非洲、太平洋地區等地的國家。

五大環流研究所（5 Gyres Institute）以研究塑膠污染為主，其海洋科學家與創辦人艾立克森（Marcus Eriksen）說，回收與重複使用等措施無法應付這麼多廢棄塑膠。「塑膠產量必須大幅度降低。」他說，尤其是一次性塑膠。

包括聯合國、國家科學院與皮尤慈善信託基金會（Pew Charitable Trusts）在內等機構發表的數十篇研究與報告，均得出相同結論：倘若原生塑膠的

「我們必須大幅減少塑膠產量，其餘都是次要。」



產量持續增加，未來的減塑行動將無濟於事。

一方面有感於相關數據堪憂，一方面受到民眾意識提高的鼓舞，聯合國環境大會（United Nations Environment Assembly）在2022年3月開會決議，將著手研擬終結塑膠污染的全球條約，組成跨政府協商委員會，以期達成目標。該小組已召開2次會議，後續還將會面3次，條約將於2024年底拍版定案。各方共識是條約將具有法律約束力，也會提出各類強制與自願的策略。有些人認為減塑條約的重要性不輸聚焦在氣候變遷的《巴黎協議》。

目前尚無具體細節出爐，但多數國家都認為，減塑是避免塑膠污染環境的主要方式。

湯格理（Neil Tangri）是加州大學柏克萊分校的研究人員，亦是非正式諮詢小組「有效塑膠條約的科學家聯盟」（Scientists' Coalition for an Effective Plastics Treaty）的成員，他強烈認為：「我們必須大幅減少塑膠產量，其餘都是次要。」

今年夏天在巴黎舉辦第二輪會談時，國際領導人明確表達這份期望。馬克宏說，人類有責任開始「降低塑膠生產，盡快禁用污染最嚴重的產品。」包括來自迦納、模里西斯、挪威等多個國家的代

表，亦提出相同論點。

然而，盤點尚未支持塑膠限產的國家，中國與美國等生產大國赫然在列，不過也正在參與協商過程。

美國國務院負責協調出席聯合國會議的代表團，其中一名不願具名的成員指出，各界現階段不考慮採限產或徵稅的措施。

「我們有必要設法讓各方動起來。」該名成員說，「供應端」倘若出現這樣的變動，某些國家可能無法接受。「我們希望凝聚共識，決定出最有力、最有企圖心的責任義務。」

代表塑膠業者的貿易組織美國化學工業協會（American Chemistry Council），同樣尚未接受這類政策。限產或徵稅可能「衝擊經濟各個層面」，「為最無力負擔的族群帶來許多意想不到的衝擊。」該協會的全球塑膠政策資深總監哈里斯（Stewart Harris）說。

向大自然取經

如何減少塑膠產量，解決已經存在的塑膠污染呢？循環模式（Circularity）或許是最有發展潛力的答案。循環經濟可以是塑膠製品的重複使用或回收，也可以是採用能夠重複使用或回收的替代品。支持者經常說這個概念就像模仿大自然，沒有浪費，萬事萬物都有用途。

包契（Oliver Boachie）帶領非洲協商小組（African Group of Negotiators）參與聯合國條約擬定過程，亦是迦納政府的國策顧問，他說，迦納與其他幾個國家正在努力打造國內的塑膠循環經濟，包括逐漸禁用不具再利用價值的一次性塑膠（例如食品包裝的塑膠薄膜），以及採取嚴謹的收集、重複利用與回收措施。

許多現行的廢棄物管理技術已做出成效，能夠減輕塑膠污染與降低塑膠需求，但費時費力。

以坦尚尼亞為例，奈發吉奧組織（Nipe



Fagio；斯瓦希里語的「給我掃把」之意）經營廢棄物管理與回收系統，已經為幾個城市的社區降低75%到80%的掩埋場垃圾。回收隊員每周挨家挨戶收集四大類垃圾，運回收集中心，由工作人員進一步挑出可供出售的回收材料，有機垃圾做成堆肥與雞飼料，其餘的再送到垃圾掩埋場。

為了資助奈發吉奧這類方案與擴大方案規模，許多國家把眼光看向「生產者責任延伸」（Extended Producer Responsibility；ERP）計畫，亦即要求瓶子、包裝等塑膠製品業者提供部分資金，資助塑膠製品用完後的管理事宜。幾乎每個歐洲國家都有EPR計畫，迦納亦致力於建立起一套國家級制度。

但現階段而言，ERP計畫的影響力有限，因為支持這項政策最力與資助最多的業者是裝瓶商與飲料等產品的製造商，也就是中游業者。

為了發揮更大的影響力，ERP計畫必須納入上游業者，包括製造原生塑膠與聚合物的公司如埃克森美孚（Exxon）、陶氏化學（Dow）、中國石化與沙烏地阿拉伯國家石油公司（Saudi Aramco）。以化石燃料製成的塑膠產品占總產量高達98%，而塑膠生產與使用占人類碳排的3.4%。許多大型塑膠生產商（例如全球最大的埃克森美孚）都跟石油巨頭關係密切。「塑膠不但是實際的污染危機，也正在醞釀成能源危機。」美國國家再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory）的聚合物科學家柯諾兒（Katrina Knauer）：「地球的塑膠數量太多了，就像發生超大型的漏油事件。」

儘管如此，這些企業目前卻不必為塑膠污染的下場付出代價。包契補充說：「全球塑膠製品



無所不在，我們認為聚合物與原生塑膠製造商必須付最大責任，應該提供資金給其他國家管理塑膠垃圾。」

加納已向聯合國提議讓「污染者付費」也適用於聚合物製造商，包契認為這項提議的幾點精神會受到最終條約所採用，這樣「能讓我們動員大量資源，為所有國家握有管理塑膠垃圾的工具。」

然而，坦尚尼亞奈發吉奧組織的執行董事羅夏（Ana Lê Rocha）認為，廢棄物管理其實無法解決污染危機，只是治標不治本。「我們不能忘

記最重要的議題是降低產量，這才是聯合國條約的目標。」她說。

循環模式的障礙

重複使用是最具節能效益的循環模式。收集、清潔與重新填裝玻璃瓶曾是常見而普遍的做法，至今在許多國家經濟的比重不大，卻仍舊重要。此外，拿可重複使用的袋子大量採買食物與運輸，在許多地方也是常態。

然而，恆久公司（Perpetual）執行長莫絲（Ellie Moss）說，缺乏基礎建設是循環經濟的一大障礙。她的公司「希望打造完整的重複使用生態系統，規模有如小城市」，改變現況。已有4座城市試辦，包括德州的加耳維斯敦（Galveston）、夏威夷的希洛（Hilo）、密西根州的安納保（Ann Arbor）、喬治亞州的沙凡那（Savannah）。恆久公司在加耳維斯敦的進展最快，目前正在建立一套系統，讓許多在地餐廳能夠重複使用金屬飲料容器，節省大量塑膠，創造出新的綠色工作機會。該公司希望延攬其他企業，在2024年前啟動計畫。

「要達成重複使用，就必須大規模執行，而且在地社區對於系統的建立方式必須有發言權。」莫絲說。

其他企業也在探索填裝與重複使用計畫。成立於2013年的智利公司艾葛莫（Algramo）擁有為數眾多的填裝站，消費者拿著可重複使用的瓶子，就能到填裝站購買洗髮精、洗衣劑與肥皂等各種液體產品。艾葛莫的目標很明確，就是要消除「貧窮稅」，讓無力大量採買的中低收入者不必多付錢，每項產品以單價付費，價格不因購買數量多寡而變動。艾葛莫（西班牙文的「以公克計」）已拓展到智利各地，目前也在英國展店。

上述這類計畫可視為是一種系統再設計，需要顛覆既有的基礎建設與行為。在美國國家標準暨技術研究院（National Institute of Standards and Technology）主持循環經濟促進計畫的聚合物化學家畢爾絲（Kathryn Beers）指出，我們花了將近一百年的時間，「針對這些原物料建立異常複雜的線性經濟」，卻從未「建立起這套系統的第二部分」，無法連貫成循環經濟。「這個工作的複雜程度不輸前半部，需要時間。」

群眾意識有助於推動這項轉變，例如2017年網路流傳一支海龜鼻子插著吸管的影片，公認是紙吸管或環保吸管需求大幅增加的原因。但為了推動實質轉變，政策必不可少，包括禁令、費用與課稅等。研究顯示，這些措施都有助於大幅減少塑膠垃圾。

聯合國環境規劃署執行主任安黛森（Inger Andersen）在第二次會議開幕致詞時表示，重新設計產品是另一個關鍵，產品要降低塑膠用量，而且更容易重複使用或回收。「企業不研發可重複使用的瓶子和包裝、不提供回收服務，真的有充分理由嗎？當然沒有！」她說。

有些製造商在產品減塑方面已有相當進展。這些小改變固然有幫助，但還不夠。

化學研究人員法蘭克林（Imari Walker-Franklin）年初在麻省理工學院出版社（MIT Press）出版一本塑膠主題書籍，他說，為了解決塑膠污染危機，必須淘汰許多「不必要與有問題的塑膠，例如聚氯乙烯（PVC），用更永續的材質替代」。PVC常用於生產水管與其他材料，會分解成含氯成分，無法回收再利用。

最值得期待的替代品是聚羥基烷酸酯（PHA），這是一種生物聚酯，由糖與脂質經過細菌發酵製成。「我們希望看到一個全是PHA塑膠的

「地球的塑膠數量太多了，就像發生超大型的漏油事件。」



未來。」國家再生能源實驗室的柯諾兒說，因為這種塑膠幾個月就能分解成無毒成分。

但值得注意的是，要生產更永續的塑膠並不容易，市面上多數「生物可分解」與「可堆肥」塑膠只能在工業級反應器分解。以工業堆肥機來說，過程需要高溫，一般民眾在住家做不到。此外，瑞典哥德堡大學（University of Gothenburg）的生態毒理學家安諾絲（Bethanie Almroth）說，這些材料的毒性其實很多都不亞於傳統塑膠。

「生質塑膠還是塑膠，通常非常有害。」羅夏頗有同感。

正因為如此，生質塑膠不宜拿來當成替代品。

「最好的替代方案是可重複使用的系統，因為如果使用一次性生質塑膠取代一次性傳統塑膠，問題還是不變。」參與聯合國協商過程、在厄瓜多基多市（Quito）推廣零廢棄系統的雷瑪（Andrea Lema）說。

放眼長期，最具發展潛力的可能是非塑膠替代品，例如以真菌、大麻與其他環保材質製造的包裝，但短期通常不具經濟效益，畢竟塑膠成本非常低廉。如果有正確的前瞻政策與經濟誘因，情況可能不同。

究竟有多少塑膠經過回收再利用？

美國每年回收的塑膠只占總量約5%到6%，少得可憐。跟重複使用的道理一樣，若能提高回收率，預計能降低原生聚合物的需求。美國塑膠回收協會（Association of Plastic Recyclers）政策長貝莉（Kate Bailey）說，最大的問題是缺乏必要的高成本基礎設施。

離大城市愈遠，回收率就愈低，因為鄉村地區

負擔不起，柯諾兒說：「我們需要州政府與聯邦政府提供更多誘因，興建收集廢棄物的基礎設施。」

回收再利用主要是將碾磨塑膠、融化、再重新塑形的過程。進行這類機械式回收，需要切實將材料分類與清洗，可能費時又昂貴。此外，許多種類的塑膠經過回收再利用一次以上，材質很難或不可能沒有缺陷或污染物。安諾絲說，許多回收材料通常含有大量非必要毒素。

在地政策能夠扮演鼓勵回收的重要角色。貝莉說，緬因州與奧勒岡州斥資推出回收計畫後，高達8成的聚對苯二甲酸乙二醇酯（PET）瓶子被回收。反觀南部幾州，回收率只有個位數。美國的平均回收率達30%，貝莉覺得很可惜，因為PET瓶可以百分之百回收。

有幾州的政策更是走回頭路。在產業遊說力道愈來愈大之下，州政府制訂不得禁用或限制使用塑膠製品（尤其是塑膠袋）的法律。目前有十幾州訂有優先效力法（Preemptive Law），避免日後出現限塑的法令，所幸有些州同時亦設法通過反優先效力法。

法蘭克林說，想要改善回收率，進而避免身體危害與環境問題，可以將塑膠政策簡化與標準化。聯合國環境規劃署指出，塑膠製程目前用到1萬多種化學物質，其中超過3,200種「具有一種或多種令人堪憂的有害特性」，可能危害人類與野生動物。另外幾千種化學物質的健康影響或基本特性，學界還所知不多。

想要改善回收率，也可以設法將混合聚合物加工，製成實用材料，而不必一開始分類。2020年10月，時任麻省理工學院研究員的蘿樂（Julie Rorrer）在與人合著的研究報告中提出，能夠透過一項技術將聚丙烯與聚乙烯加工成丙烷，後續發展值得期

**追根究柢，要化解塑膠污染危機，社會必須解決根本問題：
塑膠利潤高得嚇人，成本卻很低廉。**

待。同月發表於《科學》期刊的一項研究亦提到另一種製程，能夠分解混在一起的常見塑膠製品，重新塑形成生質塑膠，過程會用到人造土壤細菌。

其他專家則期望，未來能利用微生物來回收或分解塑膠垃圾。2021年9月，法國生技公司卡比歐斯（Carbios）啟用分解與回收PET的試辦工廠，用的是改造自最初在堆肥發現的酵素。該公司目前正在興建規模完整的工廠，預訂在2025年啟用。理論上，這類回收可以達到真正的循環經濟，因為過程不需要高溫，不會造成傳統回收塑膠的降解問題。

日本在2016年發現一種稱為「大阪堺菌」（*Ideonella Sakaiensis*）的微生物，能夠產生另外2種酵素來分解PET。大阪堺菌特別有意思，因為它是學界發現第一個只把塑膠當食物的微生物。麻省理工學院研究員鍾琳達（Linda Zhong-Johnson；音譯）正在修改微生物基因，希望提高這些酵素的效率。她目前已找到一個突變，酵素的效率比原始野生菌種高出30%。

降低需求

追根究柢，要化解塑膠污染危機，社會必須解決根本問題，那就是，聚合物生產商造成龐大損害，卻不必付出代價，這樣的現象使得塑膠利潤高得嚇人，成本卻很低廉。無論解決方案為何，都需要大大小小的政策與行為轉變。

以政策面為例，華府在2010年制訂法規，規定消費者若需要塑膠袋，必須付5美分購買。據估計，政策上路幾個月後，塑膠袋使用量便迅速減少逾半，當地水道發現的塑膠袋數量亦降低3到7成。如此轉變看似微不足道，但日積月累卻能降低需求與污染。此外，若能推出全球性的EPR計畫，代表各界心態已大幅轉變，而聯合國協商過程也在探討改變現狀的重大做法。

轉變當然不容易，卻能在不衝擊企業的情況下逐步落實。包契說：「我會這麼期望，是因為現在討論的做法並不會阻礙任何企業成長與成功，」反而能催生出替代方案，鼓勵

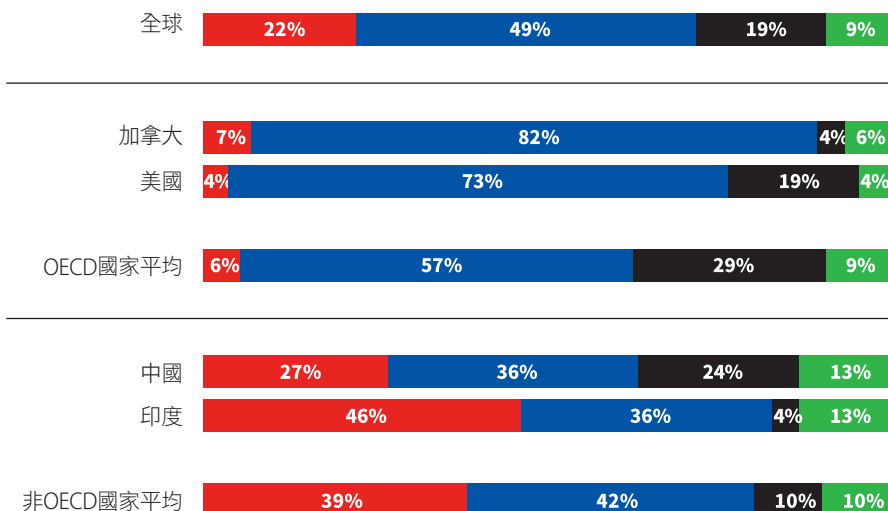
創新與打造新的工作機會。

回到康乃狄克州的鹽沼，要逆轉我眼前的情景，勢必需要許多創新做法。我們一度看到幾個魚鷹鳥巢穿插著塑膠線，想必是魚鷹築巢時收集來的。我們後來還發現有條乙烯消防水帶硬卡在牡蠣之間，我拔也拔不起來，拿小刀也切不開。無奈之下，一行人只好把它留在大自然。■

按廢棄物管理類別處理過的塑膠比例（已處理回收殘留物與其他垃圾），2019年

搶在聯合國針對減少塑膠垃圾協商如何採取國際行動前，經濟合作暨發展組織發表首份《全球塑膠展望》（Global Plastics Outlook），內容顯示，隨著人口增加與所得成長，塑膠的使用量與廢棄量大幅增加，卻欠缺充分的防治政策，難以防堵塑膠垃圾污染環境。

- 管理不善與未經收集的垃圾
- 垃圾掩埋
- 焚化
- 回收



曼恩（Douglas Main）是一名記者，曾任《國家地理雜誌》資深編輯與撰稿人。

Copyright©2023, Technology Review.
All Rights Reserved.