

塑料无处不在。由于塑料使用方便、成本低，在被快速处理之前，它被用于许多场合。不幸的是，大部分塑料进入了我们的海洋，在那里造成了严重破坏，导致海洋生物数量下降。不可否认，一次性塑料很方便，但我们必须在效益和环境成本之间取得平衡。如何量化额外消耗一单位塑料对环境的影响呢？在本文中，我们将预测的未来海鸟数量作为评估我们当前塑料生产未来影响的指标。我们通过考虑由于与塑料碎片相互作用而导致的出生、自然死亡和拟人化死亡来模拟海鸟种群动态。因此，海鸟数量被表示为时间和给定时间内累积塑料体积的函数。我们决定使用海鸟作为海洋环境健康状况的代表，这一决定得到了科学文献的支持，这些文献确立了海鸟作为生物指标的有用性。

使用这一种群模型，我们预测，如果全球塑料生产继续以其

按照目前的速度，海鸟将在 2056 年濒临灭绝，到 2062 年将成为极度濒危物种。由此，我们可以看到，我们目前的塑料生产趋势正在造成我们海洋生态系统的快速退化，这更强调了对塑料产品的生产和管理制定新政策的必要性。我们将这些政策描述为随着时间的推移而积累的塑料的函数。各种政策的环境影响是通过模拟海鸟种群模型来评估的，该模型的塑料水平由政策函数决定，而不是目前的趋势。每项政策的经济成本是通过考虑实现该政策所需的塑料消耗减少的总幅度，以及该政策诱导的塑料减少率来确定的。我们确定，一个合适的全球政策是每年以恒定的数量减少累积的塑料，直到剩余的塑料量低于 37.5 亿吨。这一政策将使海鸟数量得以恢复，同时给社会带来最低的经济成本。

在找到全球政策后，我们制定了一种公平的分配方法

在不同国家之间实现最优政策目标的成本。考虑到每个国家的收入、人口和累积的塑料产量，对海鸟种群的责任在各国之间进行了划分。减少塑料的负担更沉重地落在了目前塑料产量超过所需数量的国家身上。通过上述方法，我们的报告总结了我们对减少塑料政策类型及其对保护海洋环境的影响的分析。

内容

1 介绍	2
2 模型	3.
2.1 环境健康. ....	3.
2.1.1 参数估计. ....	4
2.2 塑料生产 ....	5
2.2.1 塑料生产政策建模。。	5
2.2.2 塑料生产政策的成本...	6
2.3 国别细目. ....	6
3 预测不可逆损害的点	7
4 全球塑料政策评估	9
4.1 政策类型 1:减少或终止塑料生产，不做清理工作 9 .	
4.2 政策类型 2:彻底清理后终止塑料生产。9	
4.3 政策类型 3:终止不完全清理的塑料生产. .11 5 政策划分跨国家 13 .	
5.1 政策部门过程 ....15	
5.2 政策部门的结果 ....16	
6 案例研究	16
6.1 美国 ....	17
6.2 中国 ....	17
6.3 索马里 ....	18
7 优劣势评估	18
7.1 优势 ....	18
8 的结论	19
附录 9	21
9.1 备忘录 ....	日

有道文档翻译  
pdf.youdao.com



关注数学模型  
获取更多资讯

# 1 介绍

自从 20 世纪 50 年代开始大规模生产一次性塑料以来，塑料垃圾就在环境中积累，尤其是我们的海洋[1]。虽然很多享受着使用一次性塑料产品的好处的人没有注意到这种塑料污染的累积，但我们海洋生态系统中的动物居民肯定感受到了有害的影响。据估计，每年有 400 - 1200 万吨塑料垃圾流入海洋[2]。雪上加霜的是，塑料的降解速度非常慢，所以如果人类不采取行动，添加到海洋中的塑料会永久留在海洋中[4]。当海洋动物在栖息地遇到塑料碎片时，它们的生命就会受到威胁。在某些情况下，这些遭遇会导致死亡。能够在使用一次性塑料的便利性与因此对海洋环境造成的破坏之间取得平衡是很重要的。

在本报告中，我们提出了一个模型来评估当前塑料垃圾增长的趋势，并建议全球政策的适当变化，以有效地减少塑料垃圾，保护我们的环境。为实现这一目标，我们采取了以下措施：

- 创建一个指标来评估海洋环境健康，这是全球塑料生产在任何给定时间的直接结果。
- 估计自 1950 年以来的塑料累积量，并评估当前的塑料生产和消费趋势，以预测未来几十年的塑料累积量。
- 通过确定每项政策的相关环境影响和社会成本，调和各种塑料生产政策的相互冲突的经济和环境激励。
- 建议对全球政策进行调整，以便在每个国家有效地分散减少塑料垃圾的责任，而不会给任何一个国家造成过重的负担。



关注数学模型  
获取更多资讯

## 2 模型

我们模型的总体目标是(1)预测一次性塑料垃圾造成的损害变得不可挽回的点, (2)评估减少塑料生产政策的环境影响, 以及(3)确定各国塑料监管成本的公平分配。

我们以海鸟数量作为代理来量化环境的健康状况。海鸟是海洋生态系统的重要组成部分, 被视为评估干扰(如塑料污染)对环境的影响的有效生物指标[5]。因此, 我们使用预测的未来海鸟数量作为我们评估潜在政策有效性的指标。在本报告中, 政策以随着时间的推移而产生的塑料数量表示, 以百万公吨(Mt)为单位。为了量化政策的成本, 我们考虑了实现政策所需的塑料消费减少的总幅度, 以及为了实现政策, 塑料消费水平必须以多快的速度改变。我们随后将全球政策划分为针对每个国家的政策。由于一些国家可能会因为塑料减少而承担更高的经济成本, 因此相对收入、人口和目前的人均塑料产量可以作为评估每个国家减少塑料消费能力的指标。

### 2.1 环境卫生

**假设:**海鸟种群  $S(t)$  是估计  $t$  时刻全球海洋环境健康的有用代理。

**备注:**海鸟是一种依靠海洋及周边地区生存的水禽。由于海鸟与海洋环境融合良好, 对海洋环境的变化十分敏感。海鸟已被证明是海洋环境状况的可靠生物指标, 原因有很多, 包括它们的栖息地范围广, 以及它们对环境变化的迅速反应。

海鸟除了能很好地反映海洋环境健康的一般状态外, 本身也值得保护。海鸥作为顶级掠食者, 在调节海洋物种的种群动态方面发挥着重要作用, 对海洋生态系统的正常运作[6]至关重要。海鸟数量的减少有可能导致食物链下层的级联效应, 这可能对环境产生灾难性和深远的影响[7]。

研究表明, 海鸟的数量受到了塑料垃圾的显著影响。海鸟有可能不小心摄入在海水中遇到的塑料, 这可能会对健康产生不利影响, 甚至可能导致死亡。随着塑料产量的增加, 越来越多的塑料最终流入海洋, 这增加了海鸟面临的风险。

**假设:**海鸟种群随时间的变化决定了出生率、自然死亡率, 以及海鸟与海洋塑料污染相互作用造成的死亡。



关注数学模型  
获取更多资讯

我们可以用下面的微分方程对海鸟种群  $S$  进行建模:

$$\frac{dS}{dt} = (b - d_n)S - d_p S P_{trend}(t),$$

其中  $b$  为海鸟出生率,  $d_n$  海鸟自然死亡率,  $d_p$  每只海鸟每 Mt 塑料造成的海鸥死亡数量是多少  $P_{trend}(t)$  为全球已生产塑料的累计数量。

我们可以解析求解这个微分方程, 得到一个封闭形式的解( $P(t)$ 是一个可积函数):

$$S(t) = S(0) \exp \left( (b - d_n)t - d_p \int_0^t P(t') dt' \right)$$

2.1.1 参数估计

为了使用我们的海鸟种群模型作为环境健康的具体度量, 我们检查了科学文献来估计模型参数, 这使我们能够在给定的塑料生产趋势的情况下提供海鸟种群的具体估计。我们选择了剃刀鸟作为我们的参考海鸟, 因为繁殖和存活率以及摄食行为是平均海鸟的代表。剃刀鸟的保护地位为“近危”, 由于它们以海洋为觅食地, 因此有与海洋塑料垃圾[9]相互作用的风险。

我们使用以下参数值:

- $b = 0.326$ , 表示每只海鸟的出生数量。这是通过将每对海鸟的生产力(0.895)乘以通过观察确定的处于繁殖年龄的海鸟的分数(约 8/13)得到的研究[10]。
- $d_n = 0.146$ , 代表海鸟死亡的比例。这是用 1 减去幼海鸟(0.630)和成年海鸟(0.895)存活率的平均值, 以幼海鸟(约 2/13)或成年海鸟(约 11/13)的种群比例[10]加权计算得出的。
- $d_p = 8.395e-06$ , 这是每 100 万吨累积塑料生产中每只海鸟因塑料而死亡的海鸟数量。这个数值是通过分解  $d_p$  作为

鸟类死亡数量

$d_p$

误食塑料的鸟类数量

\*

#食用塑料的鸟

Mt 累积塑料\*海鸟种群

Roman et al.(2019)发现 32.1%的海鸟摄入过塑料碎片, 20.4%的海鸟在摄入一片塑料[11]后死亡。在进行研究的前后, 塑料总产量约为 8300 Mt[12]。  $d_p$  计算为 0.321(0.204)/8300。





• $S(51) = 10e6$ 。为了方便起见，我们选择  $t = 0$  来对应 1950 年。Chapdelaine 等人 2001 年的一项研究表明，在研究进行时，全球剃刀鸟的数量约为 100 万只，因此我们估计在 2001 年( $t = 51$ ，有 100 万只剃刀鸟[13])。以此作为我们的条件，我们可以解出  $S(0)$ ，即 1950 年的剃刀鸟种群。

值得注意的是，尽管剃刀嘴被选为我们的参考物种，但我们的模型可以很容易地适应于预测其他海鸟物种甚至其他动物的种群大小，只需简单地替换  $b$ ,  $d_n$ ，和  $d_p$  带有适合所选物种的值。

2.2 塑料生产

假设:在没有新的塑料生产政策的情况下，塑料生产将继续沿着目前的趋势发展，这超过了维持海鸟数量所需的水平。因此，需要全球政策限制全球范围内的塑料生产。

注:由于 1950 年代以前生产的塑料总量可以忽略不计，为了方便起见，我们选择 1950 年对应  $t = 0[2]$ 。

2.2.1 塑料生产政策建模

假设:  $P$  政策下塑料的全球累积  $P_{policy}(P_{trend}P_r, t)$  可以用一个分段可微函数来建模，该函数既包含塑料  $P$  的总无阻碍累积量  $P_{trend}(t)$ (即。当前趋势下的累积塑料产量)和时间  $t$ 。

假设:在政策激活时间( $T_a$ )，各国对降低累积的全球塑料水平没有贡献，即：

$$P_r(T_a) = 0 \rightarrow P_{policy}(T_a) = P_{trend}(T_a)$$

注:我们的全球政策模型有两个主要目标:(1) 考虑政策激活的时间( $T_a$ )和(2)易于转化为世界各国政府减少塑料建议的基准。我们首先定义函数  $P_{policy}(P_{trend}P_r, t)$ ，是表示减塑政策  $P$  下全球塑料累积量的函数  $P_r(t)$ 。在政策激活时间  $t$  之前  $P_{policy}$  等于  $P_{trend}$ 。后  $T_a$ ，当减塑方案  $P_r$  已经生效，我们表示  $P_{policy}$   $P_{trend}$  塑料的累积减量定义为  $P_r$ ，或  $P_{policy} = P_{trend} - P_r$ 。因此，我们得出的  $P_{policy}$  的分段形式如下：

$$P_{policy}(P_{trend}(t), P_r(t), t) = \begin{cases} P_{trend}(t) & \text{if } t < T_a \\ P_{trend}(t) - P_r(t) & \text{if } t \geq T_a \end{cases}$$

为了计算理想的  $P_r$  为了恢复环境(即海鸟数量)，我们将首先确定一个  $P_{policy}$  它保证了海鸟在极限情况下( $t \rightarrow \infty$ )的生存。在找到一个令人满意的  $P_{policy}$ ，我们就可以确定  $P_r$  通过计算如下：

$$P_r(t) = P_{trend}(t) - P_{policy}(t)$$



关注数学模型  
获取更多资讯

2.2.2 塑料生产政策成本

假设:国家将更容易接受这样一种政策,即最大限度地减少(1)从海洋中累积节省的塑料数量和(2)塑料生产减少的速度。

备注:国家已被证明采用及颁布易于实现且随时间变化不大的减塑政策[3]。我们制定了特定塑料减少政策在一段时间间隔内的成本  $C[t_0, t_f]$ , 即从海洋中拯救的塑料总量( $p$  趋势  $(t_f) - P_{policy}(t_f) = Pr(t_f)$ )和塑料逐年最大减少量( $dtd Pr$ )之和。因此,制定减少塑料生产的成本  $P_r(t)$ 从  $t = t_0$  到  $t = t_f$  定义为

$$C_{t_0, t_f}(P_r) = P_r(t_f) + \lambda \max_{[t_0, t_f]} \left\{ \frac{d}{dt} P_r \right\}$$

其中  $\lambda$  是一个常数,代表一个国家对每年塑料生产水平极端变化的敌意。

2.3 国别细目

假设:可以使用与全球层面动态相同的框架对国家层面动态进行建模。

备注:为了进一步描述全球塑料积累趋势,我们深入研究了各个国家的塑料产量。我们可以将累积的全球塑料,  $P_{trend}(t)$ , 并将其表示为跨越累积塑料  $P$  的和  $i(t)$ 每个国家  $i$  在时间  $t$ 。每年对  $p$  趋势  $(t)$  的贡献表示为  $\Delta p$  趋势  $(t)$ , 使  $p$  趋势  $(t+1) = p$  趋势  $(t) + \Delta p$  趋势  $(t)$ 。  $\Delta P_{trend}(t)$  对应于第  $t$  年全球塑料产量。同样,每年对  $P$  的贡献  $i(t)$ 为第  $i$  国累计生产的塑料量,记为  $\Delta p_i(t)$ 令  $P_i(t + 1) = P_i(t) + \Delta p_i(t)$   $\Delta P_{trend}(t)$ 对应第  $I$  国在第  $t$  年生产塑料的体积。

在缺乏全球政策的情况下,国家作为个体理性主体,生产维持当地经济在最优水平运行所需的塑料量。由于一国的经济产出在市场均衡时最大化,因此一国的塑料供给量  $\Delta p_{i,t}(t)$  必须等于该国消费者对塑料的需求量。然而,对于许多国家来说,  $p \Delta p_i(t)$  远高于环境保护的适当水平。  $\Delta p$  趋势  $(t) = \sum_i \Delta p_i(t)$  贡献了更大的全球累积塑料量  $P_{trend}(t)$  以及由此导致的海鸟数量减少  $S(P_{trend}, t)$ 。虽然每个国家都在追求本国经济的最大利益,但它们在保护全球海洋环境方面负有集体责任。问题在于,各国目前忽视了这一责任。如果要解决这个问题,就必须制定全球政策,作为各国达成的协议,适当限制全球塑料生产,并增加塑料清理。在第 5.2 节中,我们探讨了如何通过要求  $\Delta p$  较大的国家公平分配塑料减少和清理的成本  $i(t)$  贡献更多



关注数学模型  
获取更多资讯



致这些努力。

### 3.预测不可逆损害的发生点

在本节中，我们将回答这个问题:如果我们不改变当前的塑料生产政策，我们对环境造成的破坏何时会达到不可逆转的水平？

未来累积塑料量(单位为 Mt)可以通过拟合四次多项式来估计最近的塑料数据(图 1)，趋势线的方程为

$$P_{trend}(t) = 0.000262t^4 + 0.001772t^3 + 0.6967t^2 - 4.123t + 10.83;$$

带字母  $R^2$  值为 0.9999。我们选择使用四次多项式拟合，有两个原因。第一个原因是指数曲线不适合( $R^2 = 0.9936$ )，趋势线与数据尾部之间存在显著偏差。第二个原因是，我们绘制了塑料年产量随时间变化的曲线，发现它是立方的。由于累积塑料产量是每年塑料产量的积分，自然得出累积塑料产量应该是四次。

使用  $P_{trend}(t)$ ，如果按照现有塑料生产政策决定的当前趋势，我们可以预测未来的累积塑料产量。

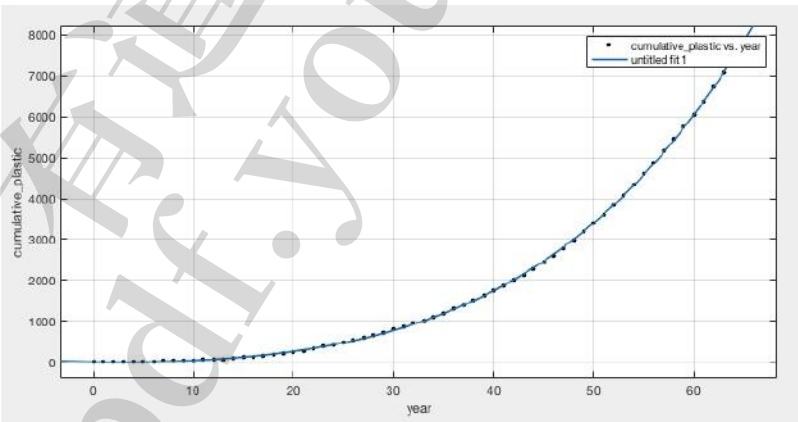


图 1:过去和预测 的全球累积塑料产量的图表

假设塑料生产继续以目前的速度进行，我们可以通过设置  $P_{trend}(t) = P_{trend}(t)$  在我们上面推导的  $S(t)$  方程中。因此，假设我们遵循当前塑料生产趋势，预测的海鸟数量可以写成

$$S^{trend}(t) = S(0)\exp\left((b - d_n)t - d_p \int_0^t P_{trend}(t')dt'\right)$$



关注数学模型  
获取更多资讯

绘制年代  $trend(t)$  对于 1950 年至 2150 年，我们看到海鸟的数量在 20 世纪 50 年代塑料生产首次起飞时有所增加，但在 2000 年左右达到峰值，此后一直处于稳步下降状态(图 2)。最初的增加是由于自然种群动态。由于出生率大于死亡率( $b > d_{in}$ )，海鸟的数量有指数增长的自然趋势。然而，塑料垃圾的危害给鸟类数量带来了下降的压力。随着时间的推移，越来越多的塑料堆积在海洋中，塑料对海鸟的威胁也越来越大。根据我们的模型，我们现在正处于自然死亡人数和塑料造成的死亡人数之和大于出生率的时刻，因此海鸟的数量正在下降。

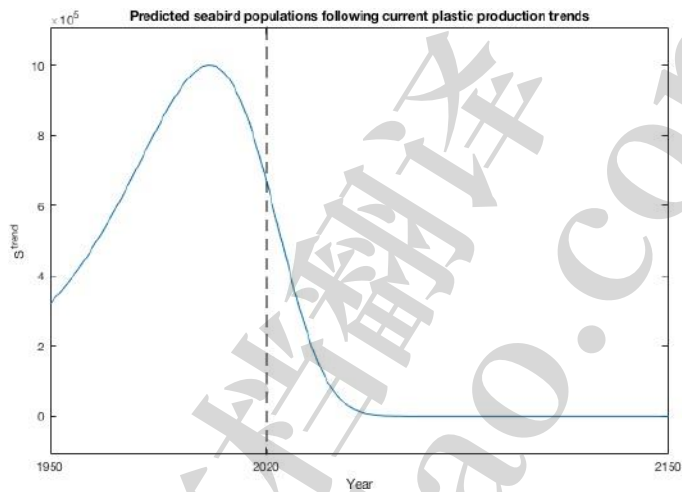


图 2:在全球塑料产量遵循当前趋势的情况下，预计的海鸟数量。

根据国际自然保护联盟(IUCN)的说法，如果一个物种的种群规模估计不到 2500 只成熟个体，并且预计种群数量将继续下降，那么这个物种就被认为是濒危物种。我们的模型预测，我们的参考海鸟种群——剃刀鸟(razorbills)将不迟于 2056 年成为濒危物种。这稍微高估了剃刀鸟濒临灭绝所需的时间，因为当我们的模型预测有 2500 只海鸟时，实际上只有不到 2500 只成熟的海鸟，因为这 2500 只鸟中有一些是幼鸟。因此，剃刀鸟大多会在 2056 年之前达到 2500 只成熟个体的阈值。

此外，IUCN 认为，如果一个物种的成年个体数量少于 250 只，并且预计其数量将继续下降，那么该物种就属于极度濒危物种。根据我们的模型，我们的参考海鸟种群将不迟于 2062 年达到这一阈值。

假设目前的塑料生产趋势继续下去，到 2056 年，塑料累积产量将约为 42,600 公吨，比目前的塑料累积水平增加 34,800 公吨。到 2062 年，塑料的累计产量将会



关注数学模型  
获取更多资讯

已经达到了大约 53,100 公吨。

## 4.全球塑料政策评估

我们可以考虑各种各样的政策来控制塑料生产。第一种政策是我们减少或终止塑料生产，但不进行额外的清理工作。如果我们想要拯救我们的环境免受不可逆转的破坏，我们将证明这种类型的政策是不够的。第二类政策要求在所有塑料被清理干净之前，净减少累积的塑料产量。第三类政策要求净减少塑料累积量，直到塑料量低于计算阈值。第二种和第三种政策都会导致海鸟数量的恢复，但第三种政策执行起来更现实。

### 4.1 政策类型一:减少或终止塑料生产与 No.

#### 清理工作

人们经常提出的一种政策是允许继续生产塑料，但要减少塑料生产。这类政策的例子是要求塑料公司每年减少一定比例的产量的法规，或者对可生产的最大塑料量设置上限的法规。然而，这类政策不足以拯救环境。

事实上，即使立即停止生产塑料，也不足以拯救海鸟，如图 3 所示。终止塑料生产延长了海鸟种群的生存时间，政策线下的种群(蓝线)在几十年内略高于没有政策线的种群(橙线)，但这些线最终收敛到相同的值，即种群规模为零。之所以会出现如此惨淡的结果，是因为我们海洋中累积的塑料垃圾数量已经非常之多，如果不采取清理措施，海鸟的死亡速度将继续达到惊人的水平。

由于没有清理行动的政策被证明对全球塑料危机毫无用处，我们将不计算它们的成本  $C$ ，因为它们无法与下面的政策进行有意义的比较。

### 4.2 政策类型 2:通过彻底清理终止塑料生产

我们在上面展示过，仅仅停止塑料生产不足以拯救海鸟。为了恢复环境的健康，必须采取清理措施。在本节中，我们模拟了一项政策的影响，该政策既终止塑料生产，又要求每年清理固定数量的塑料废物(例如，每年必须从海洋中清理 10 公吨塑料)。



关注数学模型  
获取更多资讯

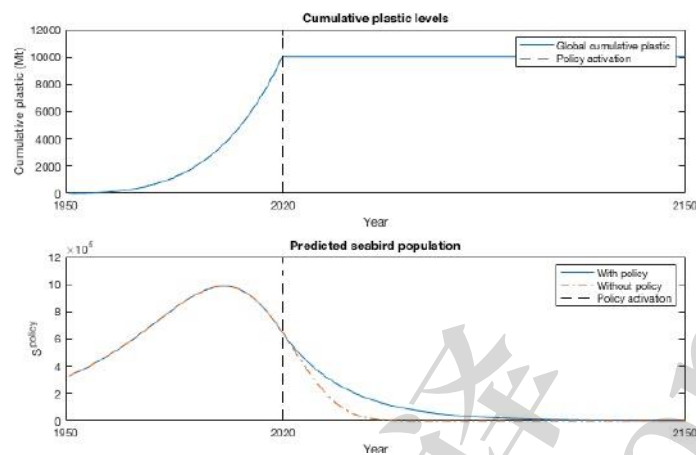


图 3:(上)假设全球塑料生产立即终止，累积的塑料水平。(下)蓝线是这些政策导致的预测海鸟数量，橙色虚线是没有政策情况下的预测海鸟数量。

图 4 显示了停止塑料生产和开展清理工作对环境的影响，这些工作减轻了以前生产的 100 公吨塑料对环境的影响(例如，如果前几年每生产 100 公吨塑料，就有 30 公吨最终进入海洋，这项政策将要求今后每年从海洋中清理 30 公吨塑料)。假设这些清理工作将持续下去，直到所有塑料垃圾从环境中清除。我们看到，一旦塑料生产停止，清理工作开始，海鸟数量的下降就会开始放缓，并最终开始恢复。我们的模型预测，到下个世纪初，海鸟的数量将会激增。

应该注意的是，预测鸟类数量的尾端行为应该谨慎解释。由于我们的海鸟模型是为了模拟近濒危海鸟种群与塑料垃圾的相互作用而创建的，因此它并不能精确地模拟大种群的海鸟种群动态(例如，该模型没有考虑海洋环境的承载能力)。重要的结论是，塑料生产的终止会导致海鸟数量的恢复，但这种增加的程度可能无法被我们的模型准确反映。

此外，要知道完全停止塑料生产并不一定是实现上述效果所必需的，这是有用的。如果人们希望继续生产和消费塑料，他们可以这样做，只要他们参与额外的清理工作，抵消他们消费所造成的环境破坏。

由于制定这样一项政策需要付出巨大的努力，停止塑料生产并逐步完全清除现有塑料的做法实际上永远不会被任何国家所采用。然而，量化这一政策的成本，以便未来与更现实的计划进行比较，仍然很重要。



关注数学模型  
获取更多资讯

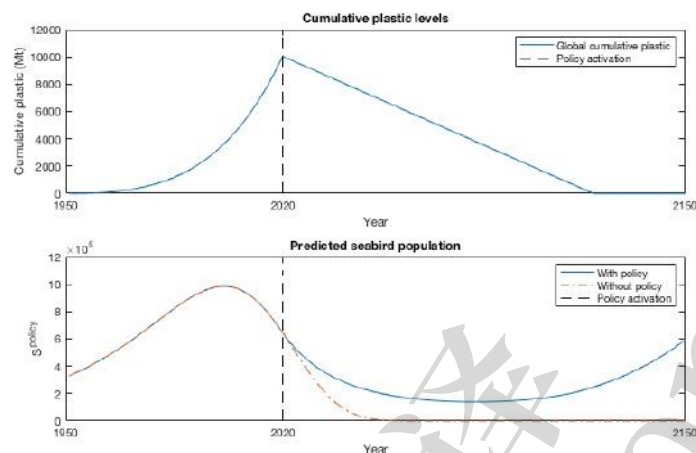


图 4:(上图)累积塑料水平，因为全球塑料生产立即终止，每年从环境中清除相当于 100 公吨以前生产的塑料，直到塑料污染完全消除。(下)蓝线是这些政策导致的预测海鸟数量，橙色虚线是没有政策情况下的预测海鸟数量。

我们计算成本  $C$  随时间间隔的变化 $[T_a T_f]$ 这项政策， $P_{aggressive}$ ，该政策削减了所有塑料产量，并以每年恒定的数量消除了全球所有累积塑料：

$$P_{aggressive}(t) = P_g(t) - P_g(T_a) - \frac{P_g(T_a)}{T_f - T_a}t$$

我们选择了线性减少政策，因为任何更高的多项式或指数减少政策都会引入更高幅度的最大导数。我们惩罚最大导数，是因为生产水平的更突然的变化会给社会带来更大的困难，因为人们被迫更快地适应。

$$C_{T_a,T_f} = P_g(T_f) + \lambda \left( \frac{P_g(T_a)}{T_f - T_a} \right)$$

通过设置间隔为 $[2020,2150]$ (在 130 年内消除塑料)，我们发现  $C_{2020,2150} = 1.6902e5 + \lambda 77.188$ 。

### 4.3 政策类型 3:不完全清理的塑料生产终止

我们在上面看到，终止塑料生产与彻底清理塑料相结合，导致了海鸟数量的恢复。然而，由于污染清理技术的限制，彻底清理塑料可能是不现实的。在这里，我们表明，彻底的塑料清理并不是拯救环境的必要条件，即使海洋中仍有一定数量的塑料，环境仍然能够恢复。



关注数学模型  
获取更多资讯



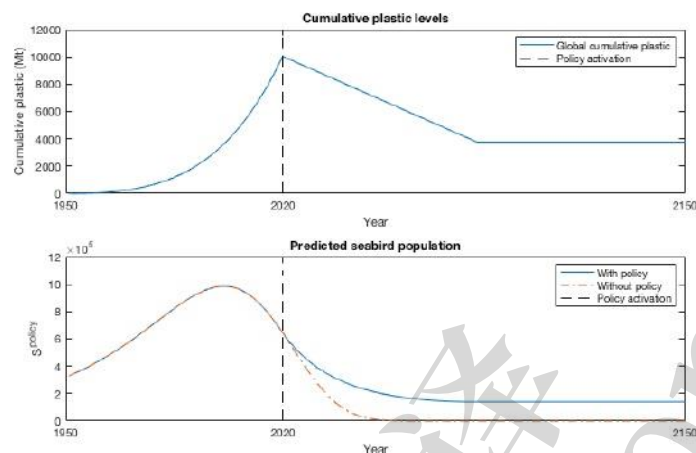


图 5:(上)累积塑料水平，因为全球塑料生产立即终止，每年从环境中清理相当于 100 公吨以前生产的塑料，直到塑料水平达到 3753.7 公吨。(下)蓝色线是这些政策导致的预计海鸟数量，橙色点线是没有政策的情况下的预计海鸟数量。

此外，我们计算了在不杀死海鸟种群的情况下，可以保持不被清理的塑料的最大水平。

通过设置  $\frac{dS}{dt}$  从海鸟种群模型到 0，我们可以求解最大 al-

低水平的塑料  $P_{min}$  这不会对海鸟造成任何威胁(例如，海鸟的数量将不再下降):

$$0 = (b - d_n)S - Sd_pP_{min}$$
$$P_{min} = \frac{b - d_n}{d_p}$$

如果全球累积的塑料量减少到等于  $P_{min}$  海鸟的数量将停止下降并稳定下来。如果全球塑料的数量减少到  $P_{min}$  海鸟的数量就会停止下降，稳定下来，然后再次开始增长。

图 5 显示了终止塑料生产并对塑料垃圾进行不完全清理的结果。清理工作将塑料污染降低到对海鸟造成致命伤害的水平，但这种伤害是最小的。在这种情况下，海鸟的数量达到了平衡，因为自然死亡率和致命塑料摄入死亡率的总和等于出生率。

现在我们来计算一下这种不那么激进的政策成本。将目标整体塑性水平  $P_{target}$  定值为  $\leq P_{min}$ ，通过时间变换实现。如前所述，如果  $P_{target}=P_{min}$ ，海鸟种群将稳定(但不会增长)。如果  $P_{target} < P_{min}$ ，海鸟种群



关注数学模型  
获取更多资讯



会稳定成长。现在可以制定政策  $P$  了  $_{feasible}$  停止所有生产，并将全球塑料水平线性降低到  $P_{target}$  到时间  $T_f$ ：

$$P_{feasible} = P_g(t) - P_g(T_a) - \left( \frac{P_g(T_a) - P_{target}}{T_f - T_a} \right) t$$

我们计算的成本在相同的时间间隔之前( $C_{2020,2150}$ )，以便进行比较：

$$C_{2020,2150} = P_g(2150) + \lambda \left( \frac{P_g(2020) - P_{target}}{2150 - 2020} \right) = 8.9972e4 + \lambda \left( 77.1882 - \frac{P_{target}}{130} \right)$$

因为我们知道  $\lambda$  是正的，并且  $0 < P_{target} \leq P_{\min}$ ，我们知道这个  $C$  值小于为  $P$  计算的  $_{aggressive}$  值，不出所料。由于策略类型 3 的  $C$  值最小，我们得出最优策略将是这种形式(即。)，最优政策将要求累积的塑料持续净减少，直到我们低于不会导致海鸟数量进一步下降的最大体积)。

## 5.各国的政策分歧

我们希望通过评估每个国家生产塑料的适当数量，按比例在各国划分实施政策的成本负担。由于每个国家在减少塑料消费和清理塑料垃圾方面的能力不同，我们会根据每个国家的人口和收入水平来限制其塑料生产。为了简化对一国一年内塑料总使用量的解释，我们将该国塑料消费量除以该国人口，得出每年人均塑料使用量。此外，我们将每个国家分成四个相对收入阶层：高收入、高中等收入、低中等收入、低收入。这样，我们就可以评估每个国家相对于其收入阶层，每人应该生产多少塑料。

考虑到实施政策  $P$  的成本负担  $_{policy}$  以累积成本  $C(P_r)$ ，各国更愿意随着时间的推移来检查其自身成本的细目。因此，我们定义如下：

$$\Delta p_{policy} = \frac{d}{dt}(P_{policy}), \Delta p_{trend} = \frac{d}{dt}(P_{trend}), \Delta p_r = \frac{d}{dt}(P_r)$$

注意， $\Delta p_{policy}(t) = \Delta p_{trend}(t) - \Delta p_r(t)$  由可微算子的线性。通过研究累积政策的增量变化，我们可以随着时间的推移在不同国家之间动态地转移成本负担。

为了进一步量化全球塑料生产的整体变化，我们将  $\alpha$  定义为：

$$\alpha(t) = \frac{\Delta p_{policy}(t)}{\Delta p_{trend}(t)} = \frac{\Delta p_{trend}(t) - \Delta p_r(t)}{\Delta p_{trend}(t)} = 1 - \frac{\Delta p_r(t)}{\Delta p_{trend}(t)}$$



关注数学模型  
获取更多资讯

请注意，由于它是一个无量纲的比率， $\alpha$  的定义比例可以在单位之间互换使用，用于定义给定政策下的塑料减少量和给定政策下的人均塑料减少量。我们还可以看到， $\alpha(t)$  在此后的所有时间  $t$  中都  $< 1$

$$\Delta p_r(t) < \Delta p_{trend}(t).$$

通过乘以当前全球塑料生产趋势  $\Delta p_{trend}(t)$  乘以  $\alpha$  的因子，我们就得到了全球塑料产量减少量  $\Delta p_{policy}(t)$  由政策决定。四个收入阶层中的每一个都将分担减少其人均塑料消费量  $\alpha$  的负担。我们将  $X$  定义为所有国家在任何政策出台之前的人均塑料消费量。此外，为了满足政策设定的目标，我们定义了  $X_e = \alpha X$  为政策出台后所有国家的人均塑料消费量。

—

让  $\bar{x}_{HI}, \bar{x}_{UMI}, \bar{x}_{LMI}, \bar{x}_{LI}$  是高收入、中上收入、中下收入和低收入阶层每年人均塑料的平均值。由于这四个收入阶层平均分担成本负担，我们可以定义转移的平均数  $\tilde{x}_{HI}, \tilde{x}_{UMI}, \tilde{x}_{LMI}, \tilde{x}_{LI}$ ：

$$\tilde{x}_{HI} = \alpha \bar{x}_{HI}, \quad \tilde{x}_{UMI} = \alpha \bar{x}_{UMI}, \quad \tilde{x}_{LMI} = \alpha \bar{x}_{LMI}, \quad \tilde{x}_{LI} = \alpha \bar{x}_{LI}$$

请注意，通过  $\alpha$  移动每一个类别均值保持了自  $(p_{policy}(t))$  以来的全球生产均值

$$\bar{X} = p_{HI} \bar{x}_{HI} + p_{UMI} \bar{x}_{UMI} + p_{LMI} \bar{x}_{LMI} + p_{LI} \bar{x}_{LI}$$

此外，我们可以两边乘以  $\alpha$  来实现

$$X = p_{HI} \tilde{x}_{HI} + p_{UMI} \tilde{x}_{UMI} + p_{LMI} \tilde{x}_{LMI} + p_{LI} \tilde{x}_{LI}$$

$p_{HI}, p_{UMI}, p_{LMI}, p_{LI}$  为 192 个国家在各收入阶层中所占比例， $p_{HI} + p_{UMI} + p_{LMI} + p_{LI} = 1$ 。

实现  $\tilde{x}_k$  对于四个收入阶层中的每一个 ( $k \in \{1,2,3,4\}$ )，我们必须进一步考虑每个收入阶层内国家间的成本分担。我们考虑  $\tilde{x}_k$  是每个收入阶层  $k$  的人均塑料的理想水平。然而，肯定会有国家产量高于  $\tilde{x}_k$  和低于  $\tilde{x}_k$  的国家  $k$ 。如果一个国家打算以低于  $\tilde{x}_k$ ，那么这个国家不应该受到全球政策的影响。相反，如果一个国家打算将人均塑料产量提高到  $\tilde{x}_k$ ，那么就需要实施适当的限制。

具体国家的限制以乘法因子  $\beta$  的形式出现  $\beta_{k,i}(t)$  其中  $\beta_{k,i}$  为每个国家  $i$  计算实现  $\tilde{x}_k$  每个收入阶层  $k$  在时间  $t$ 。由于国家的人均塑料产量  $x_i < \tilde{x}_k$  都未动， $\beta_{k,i} = 1$  对于这些国家。然而对于人均塑料产量为  $x_i > \tilde{x}_k$ ， $\beta_{k,i}$  将需要



关注数学模型  
获取更多资讯

有道文档翻译  
pdf.youdao.com

对每个收入阶层  $k$  进行计算，以达到  $x \sim_k$ 。更具体地说， $\beta_{k,i}$  可以为每个收入阶层定义如下：

$$\beta_{k,i}(t) = \begin{cases} \frac{\tilde{x}_k(t) - \sum_i \mathbb{1}\{x_i(t) \leq \tilde{x}_k(t)\} x_i(t)}{\sum_i \mathbb{1}\{x_i(t) > \tilde{x}_k(t)\} x_i(t)} & \text{if } x_i(t) > \tilde{x}_k(t) \\ 1 & \text{if } x_i(t) \leq \tilde{x}_k(t) \end{cases}$$

其中每个和都是在收入阶层  $k$  的所有国家  $i$  中取的。从  $x$  开始  $i(t)$  和  $x \sim_k(t) = \alpha(t)^{-} x_k(t)$  是时间的函数， $\beta_{k,i}(t)$  也必须随时间波动，并允许国家之间在时间  $t$  上动态分担成本。

5.1 政策划分程序

使用从 Jambeck 等人[1]获得的数据集，我们进行了以下步骤，以评估每个国家在给定某个增量塑料政策的情况下，在时刻  $t$  时  $\Delta \text{ppolicy}(t) = \Delta \text{ptrend}(t) - \Delta \text{pr}(t)$ ：

- 1.将世界 192 个国家分成四个相对收入阶层:高收入、高中等收入、低中等收入和低收入。
- 2.计算每个国家每人每年产生的塑料垃圾数量。
- 3.对于四个收入阶层中的每一个，计算该收入阶层中所有国家每人每年产生的塑料垃圾的平均数量。让这些平均值用  $\bar{x}$  来表示  $_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \bar{x}_4$ 。
- 4.确定每个国家  $x$  的偏差  $_i$  从其收入阶层内的计算平均值。根据这些偏差对这些国家进行排名。
- 5.对每个收入阶层进行加权意味着通过该阶层内国家总数的比例来计算所有国家的全球平均值。 $X = p_1 \bar{x}_1 + p_2 \bar{x}_2 + p_3 \bar{x}_3 + p_4 \bar{x}_4$   $p_k$  表示收入阶层  $k$  的国家总数的比例。
- 6.将全球均值  $X$  乘以某个常数  $\alpha$ ，得到对增量塑性政策约束  $\Delta \text{ppolicy}(t)$ 。
- 7.将四个收入阶层的平均值乘以  $\alpha$ ，以使全球平均值减去  $\alpha$ 。定义  $\tilde{x}_k = \alpha^{-} x_k$  对于每个收入阶层  $k$ ，其中  $X_e = p_1 \tilde{x}_1 + p_2 \tilde{x}_2 + p_3 \tilde{x}_3 + p_4 \tilde{x}_4$ 。
- 8.对于每一个收入阶层  $k$ ，计算适当的  $\beta_i$  对于每个国家  $i$ 。
- 9.限制  $i$  生产  $x \sim_k$  以上的国家  $k$  ( $x_i > \tilde{x}_k$ )  $\beta_{k,i} x_i k$ 。请注意，由于我们不想惩罚处于或低于平均值的国家，因此在其收入阶层中高于平均值的国家必须为低于平均值的国家处理塑料减量的负担。因此，只有  $k$  类的一些子集国家会被常数量  $\beta$  减少  $_{k,i}$  而不是整个收入阶层。



关注数学模型  
获取更多资讯

有道文档翻译  
pdf.youdao.com

10.在边缘情况下， $\beta_{k,i}x_i < \tilde{x}_k$  对于某些国家  $I$  where  $x_i$  是  $\tilde{x}_k$ ,  $x_i$  设置为平均值  $\tilde{x}_k$  为了国家  $i$ .  $\beta_{k,i}$  的利益  $\tilde{x}_k$  为收入等级  $k$  内的其余国家重新计算。

注: 请注意，此数据集仅包含 2010 年的数据，因此假定国家及其收入阶层之间的推导关系随时间保持不变。

5.2 政策划分结果

使用上述程序来描述 192 个国家中的每个国家，我们得出了 2010 年每个收入阶层的以下结果:

收入阶层标签(k)	李	LMI	UMI	HI
收入阶层(192 人中)	21	44	53	74
收入阶层比例( $p_k$ )	0.109	0.229	0.0156	0.385
以公吨( $\bar{x}_k$ )	1.98 e-8	6.17 e-8	4.79 e-8	1.08 e -

下面我们给出了针对每个收入阶层的额外结果:

- 年人均消费超过  $\bar{x}_k$  的低收入国家  $L_I$  包括:科摩罗、海地、利比里亚、缅甸和柬埔寨
- 年人均塑料消费量低于  $\bar{x}_k$  的低收入国家  $L_I$  包括:莫桑比克、马达加斯加、坦桑尼亚、肯尼亚和几内亚
- 年人均塑料消费超过  $\bar{x}_k$  的中低收入国家  $L_{MI}$  包括:圭亚那、斯里兰卡、马尔代夫、瓦努阿图和危地马拉
- 低中等收入国家，人均年塑料消费量低于  $\bar{x}_{LMI}$  包括:印度、加纳、喀麦隆、印度尼西亚和安哥拉
- 年人均塑料消费超过  $\bar{x}_k$  的中等偏上收入国家  $U_{MI}$  包括:圣基茨和尼维斯、圣卢西亚、塞舌尔、格林纳达和哥斯达黎加
- 中等偏上收入国家，年人均塑料消费量低于  $\bar{x}_{UMI}$  包括:牙买加、罗马尼亚、加蓬、墨西哥和古巴
- 年人均塑料消费量超过  $\bar{x}_k$  的高收入国家  $H_I$  包括:特立尼达和多巴哥、科威特、安提瓜和巴布达、巴巴多斯和德国
- 年人均塑料消费量低于  $\bar{x}_k$  的高收入国家  $H_I$  包括:文莱、丹麦、瑞典、比利时和阿曼

6 个案例研究

在这里，我们研究了上述全球塑料政策在三个不同收入阶层的样本国家的应用。





关注数学模型  
获取更多资讯

有道文档翻译  
pdf.youdao.com

6.1 美国

美国是 74 个高收入阶层(HI)国家之一。它每年人均生产  $1.2195e-7$  公吨塑料，超过  $\bar{x}_{HI} = 1.08e-7$ 。我们完全从这一信息中知道，美国将不得不减少每年的塑料消费人均  $\beta_{HI, US} < 1$  因为  $\tilde{x}_{HI} < \bar{x}_{HI}$ 。因此， $x_{US} > \tilde{x}_{HI}$  用于任何政策。

考虑到第 5.1.2 节和 5.1.3 节中详细介绍的完整和不完整的清理政策，我们可以检查  $t = t_a$  时美国的成本负担  $a = 70$  使用上面详述的框架。

目前的趋势  $P_{trend}(t) = 0.000262t^4 + 0.001772t^3 + 0.6967t^2 - 4.123t + 10.83$ 。在没有任何全球政策的情况下， $4.123t + 10.83$ 。我们可以计算：

$$\Delta p_{trend}(t) = \frac{d}{dt}(0.000262t^4 + 0.001772t^3 + 0.6967t^2 - 4.123t + 10.83)$$
$$\Delta p_{trend}(70) = 0.001048(70)^3 + 0.005316(70)^2 + 1.3934(70) - 4.123 = 478.927$$

所需的全局清理策略为  $P_{policy}(t) = -100t + 10,034$ 。我们可以计算

$$\Delta p_{policy}(t) = \frac{d}{dt}(-100t + 10,034) = -100.$$

使用这些值，我们可以计算  $\alpha = 478.927 - 100 = 378.927$ ，并计算出高收入阶层  $\tilde{x}_{HI}$  的新的人均平均塑料  $\tilde{x}_{HI} = \alpha \bar{x}_{HI} = 378.927(1.08e-7) = 4.092e-5$ 。

请注意，由于没有国家在实施这一政策之前清理垃圾，所有 192 个国家现在都将不得不改变他们的政策，以清理比他们制造的垃圾更多的垃圾。为了计算美国对这一政策的贡献，我们必须确定  $\beta_{HI, US}$ 。

$$\beta_{HI, US} = \frac{\tilde{x}_{HI}}{\sum_i x_i} = \frac{\alpha \bar{x}_{HI}}{74 \bar{x}_{HI}} = \frac{\alpha}{74} \approx -0.002822$$

我们可以看到分子还原为  $\tilde{x}_{HI}$  因为目前没有  $x_i \leq \tilde{x}_{HI}$ 。同样地，因为所有  $x_i > \tilde{x}_{HI}$ ，分母减为各国之和。因此，每个高收入阶层的国家都会有相同的  $\beta_{HI, i} \approx -0.002822$  在  $t = t_a$  时  $a = 70$ 。

具体到美国， $(\beta_{HI, US})(x_{US}) = (-0.002822)(1.2195e-7) = -3.441e-10$ 。由于  $-3.441e-10$  百万公吨相当于  $-0.3441$  公斤，因此到 2020 年底，美国每个人至少要多捡 0.3441 公斤的塑料垃圾，才能实现这一政策设定的年度目标。

6.2 中国

中国是 53 个中上收入阶层(UMI)国家之一。它每年人均生产  $4.396e-8$  公吨塑料，低于  $\bar{x}_{UMI} = 4.79e-8$ 。由于人均塑料产量低于平均值，目前尚不清楚  $\beta_{UMI, Ch} < 1$ ，因为这取决于  $\tilde{x}_{UMI}$  的值。这个值可以通过计算给定的  $\alpha$  来确定



关注数学模型  
获取更多资讯

有道文档翻译  
pdf.youdao.com

政策。

在  $t = t$  时使用相同的完全和不完全清理策略  $\alpha = 70$ ，我们可以计算  $\beta_{HI,Ch} = \alpha / 53 = -0.00394$  和  $(\beta_{HI,Ch})(x)_{Ch} = -(1.887e-10)$ 。由于  $-(1.887e-10)$  万公吨相当于  $-0.1887$  公斤，因此，到 2020 年底，中国每人至少要多捡 0.1887 公斤的塑料垃圾，才能实现这一政策设定的年度目标。

6.3 索马里

索马里是 21 个低收入阶层国家之一。该国每年人均塑料产量为  $1.96e-8$  Mt，低于  $\bar{x}_{LI} = 1.98e-8$ 。由于人均塑料产量低于平均值，目前尚不清楚  $\beta_{LI,Som} < 1$ ，因为这取决于  $\bar{x}$  的值  $LI$ 。这个值可以通过计算给定某个策略的  $\alpha$  来确定。

在  $t = t$  处使用相同的完全和不完全清理策略  $\alpha = 70$ ，我们可以计算  $\beta_{LI,Som} = \alpha / 21 = -0.009943$  和  $(\beta_{LI,Som})(x)_{Som} = -(1.949e-10)$ 。由于  $-(1.949e-10)$  万公吨相当于  $-0.1949$  公斤，到 2020 年底，索马里每个人至少需要比他们产生的塑料废物多捡 0.1949 公斤，才能实现该政策确定的年度目标。

7 优势和劣势的评估

7.1 优势

我们的模型提供了以下优势：

- 1.环境健康的可解释指标。自然环境是极其复杂的，因为它由不可计数的动物、植物和其他自然现象组成。我们成功地将评估环境健康的复杂性提炼为一个单一的指标:海鸟数量。我们将海鸟数量作为生物指标的使用得到了科学文献的验证。使用海鸟种群指标具有可解释性的优势，因为它可以直接理解在某个时间点预测的未来鸟类种群的含义。
- 2.对当前行为造成的未来损害的处罚。对环境造成如此大伤害的一个原因是，当人们做决定时，他们只考虑他们的决定的当前利益和/或成本。当一个人使用一次性水战时，他们不会考虑他们的行为将导致的环境破坏。然而，通过我们的海鸟种群模型，我们能够量化当前塑料消费将对未来造成的危害。通过提供对未来成本的具体预测，政府和人民可以对他们的塑料消费做出更明智的决策
- 3.如果不采取新政策，预测结果。通过将我们的模型与 1950 年以来的塑料生产数据进行拟合，我们能够预测环境影响



允许塑料生产继续沿着目前的趋势发展。如果不出台新的塑料法规，我们的模型显示，海鸟种群将迅速灭绝。这凸显出，如果我们想防止环境破坏达到不可挽回的程度，就迫切需要采取新的塑料垃圾管理政策。

- 4.塑料生产调控的社会成本评估。通过制定我们的成本指标，使其依赖于任何特定政策的塑料总量减少和逐年减少率，我们能够确定各国更有可能采取哪些政策。对总成本的依赖使我们能够对政策所设定的塑料目标水平的整体可行性进行建模。这考虑了塑料对国家的总经济负担——塑料行业的利润损失，以及国家公民必须在塑料替代品上花费的额外资金。对年度比率的依赖使我们能够模拟一个国家为达到目标塑料水平而花费资源的意愿，以及该国对改变企业和消费者行为的抗拒程度。因此，我们能够确定对一个国家造成最小经济和社会负担的最低政策——从目标塑料水平到 $P_{min}$  通过每年不断减少全球塑料水平来达到这一目标。
- 5.公平分配塑料减产责任。并非所有国家都能平等地为全球减少塑料产量做出贡献。因此，我们的模型根据人口规模和收入为每个国家分配了个性化的塑料减少上限。通过将国家划分为收入阶层，我们的模型有效地评估了相对于相同收入阶层的其他国家，每个国家能够减少多少。相对于其收入阶层，人均塑料产量较高的国家受到严格的塑料减排要求，而人均塑料产量较低的国家则面临宽松得多的要求。

7.2 弱点和进一步改进

我们的模型有以下局限性：

- 1.不精确预测海鸟种群何时会变大。因为我们的模型是为了预测海鸟处于危险中时的种群动态而创建的，所以我们选择不专注于在种群变大、不再处于危险中对海鸟的种群动态进行精确建模。因此，我们选择不通过在海鸟种群模型中包含承载能力来引入额外的复杂性，因为这与我们模型的目标无关。然而，这一决定的一个后果是，在海鸟种群能够恢复的情况下，我们的模型高估了种群的长期增长，因为我们没有考虑物种间竞争的影响。
- 2.假设最终进入海洋的塑料所占的比例保持不变。我们假设，每生产一吨塑料，就有一小部分会成为海洋污染，并会增加海鸟摄入塑料的风险。此外，



关注数学模型  
获取更多资讯

我们假设这个分数随时间保持不变。通过分析改变这一比例的政策的影响(例如，对公司如何处理塑料垃圾实施严格的规定)，我们的政策建议可以进一步改进。

- 3.成本度量缺乏可解释的单位。虽然我们的成本指标能够比较一种潜在的塑料减少政策与另一种政策的“可接受性”，但没有任何有意义的单位可以分配给实际功能。因此，它只在比较上下文中有用。
- 4.我们可以。虽然我们的政策成本指标确定，每年不断减少是最可采用的政策，但我们还没有完全定义关于该政策的每一个具体细节，给定任意的  $P_{target}$ 。这是可能的，给定一个任意的  $P_{target}$ ，来确定一个尽可能最小化成本的时间轴——使用我们的海鸟模型，我们可以定义一个尽可能长的时间间隔，仍然稳定海鸟种群。然而，我们没有时间计算这一指标，并决定使用[2020,2150]区间，该区间能够用  $P_{target} = P_{min}$  代替。
- 5.在按国家评估限额时，国家的实际大小可能是一个混淆因素。虽然按收入对国家进行分层有助于计算适当的人均塑料水平，但我们认为，仅凭这一分析可能不足以全面评估每个国家的经济能力。我们指出，国家的实际大小是一个混杂因素，因为相对于同一收入阶层的大国，较小的国家的人均塑料量往往更大。更具体地说，较小的国家更有可能拥有更少的人口，这就提高了每年的人均塑料消费量。

## 8 结论

利用海鸟数量作为环境健康的代表，我们确定，如果塑料消费水平以目前的速度增长，到2056年将对环境造成不可逆转的破坏。然而，通过采取新的政策来管理塑料生产和清理目前存在于环境中的塑料垃圾，这是可以避免的。我们确定，一项有效的政策是每年以恒定的数量减少累积的塑料，直到环境中残留的塑料量低于37.5亿吨。这一政策对社会造成的损失最小，同时还能让海鸟数量恢复。最后，我们将这一全球政策分解为具体国家的政策。由于在所有国家平均分配经济成本可能会导致某些国家负担更重，我们按收入阶层对每个国家进行分层，并根据每个国家的人均塑料产量手动评估每个国家的支付能力。通过对海鸟数量的估计，对全球政策的环境评估，以及对各国成本的有效分摊，我们将这份报告作为海洋环境的有效解决方案

危机。



关注数学模型  
获取更多资讯



## 9 附录

### 9.1 备忘录

致国际塑料废物管理理事会(ICM):

随着海洋环境的持续恶化，世界面临着解决全球塑料垃圾堆积的艰巨任务。在过去的 70 年里，塑料垃圾进入海洋环境产生了严重的影响，对海洋动物造成了重大伤害。由于塑料不容易自然分解，很少有塑料产品得到适当的回收，人类对这一不断升级的环境危机的干预早该出现了。我们意识到，如果我们不适当地解释造成这种情况的复杂经济激励因素，制定有效的政策是极其困难的。考虑到这一点，我们将这份报告作为适当评估现状的一种手段，并提供了一项计划，以经济有效地将塑料垃圾水平从未来 130 年的约 10 亿吨降至 37.5 亿吨，以保护海洋环境。

为了适当量化塑料垃圾积累在任何给定时间对环境的影响，我们引入了剃刀鱼种群作为估算海洋环境健康状况的代理。Razorbills 是许多海鸟物种之一，被证明是海洋环境状况的有效生物指标。越来越多的塑料垃圾堆积导致了包括海鸟在内的海洋生物的不幸遭遇和随后的死亡。在过去的几十年里，由于塑料消费量的增加导致海鸟的死亡率上升，海鸟的总体数量大幅减少。当海鸟总体数量旺盛时，我们将海洋环境描述为良好状态。同样，一旦海鸟数量下降到低于 2500 只，即国际自然保护联盟确定的濒危极限，我们就将海洋环境描述为无法挽救。

在我们的报告中，我们提出了一项计划，在未来 130 年慢慢减少塑料的积累，并保证海鸟种群的生存。虽然减少塑料累积量对整体海鸟种群有利，但它与利润最大化国家的经济激励相抗衡。从单个国家的角度来看，采取减少塑料的政策会产生经济成本。这种成本的形式往往是，如果没有政策，本应生产的塑料量减去政策实施后的塑料产量。这与采用全球政策的机会成本是同义词。因此，在很长一段时间内，缓慢的政策所产生的经济成本较低，是解决这场环境危机的最佳选择。

即使在制定最优的全球政策时，如何最好地分配责任负担的复杂问题也成为了问题。某些国家的人口和收入水平不同，这可能会影响这些国家相对于其他国家为减少塑料做出贡献的能力。因此，我们的模型通过将各国划分为收入阶层，并评估其实现一定人均塑料产量的能力，来解释各国的成本分配。这使我们的模型具有高效划分成本的灵活性



关注数学模型  
获取更多资讯

确保没有一个国家的收入和人口比其他国家面临更大的经济负担。

如果开发出新技术，让我们能够更快地清理塑料垃圾，预计的时间表可以加快。如果引入环境退化的外部来源，恢复环境健康的时间表可能会受到阻碍。例如，如果全球变暖加速，海鸟种群和其他海洋物种的下降压力将会增加。因此，需要更长的时间和更大的清理工作，才能使海鸟数量恢复到可以自我维持的水平。

有道文档翻译pdf.youdao.com



关注数学模型  
获取更多资讯

## 参考文献

- [1] Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... 劳, K. L.(2015)。塑料垃圾从陆地进入海洋。科学杂志, 347(6223), 768-771
- [2] Geyer, R., Jambeck, J. R., Law, K. L.(2017)。有史以来所有塑料制品的生产、使用和命运。科学进展, 3(7), e1700782。
- [3] Hepburn, C.(2010)。环境政策、政府和市场。《牛津经济政策评论》, 26(2), 117-136。
- [4] Gewert, B., Plassmann, M., MacLeod, M. (2015)。漂浮在海洋环境中的塑料聚合物的降解途径。《环境科学:过程影响》, 17(9), 1513-1521。
- [5] Rajpar, M. N., Ozdemir, I., Zakaria, M., Sheryar, S., Rab, A.(2018)。海鸟作为海洋生态系统的生物指标。海鸟,47 - 65。
- [6] Clarke, A., Harris, C. M.(2003)。极地海洋生态系统:主要威胁和未来变化。环境保护, 30(1), 1-25。
- [7] Estes, J. A., Terborgh, J., Brashares, J. S., Power, M. E., Berger, J., Bond, W. J., ... 马奎斯, R. J.(2011)。地球的营养降级。科学, 333(6040), 301- 306。
- [8] Wilcox, C., Van Sebille, E., Hardesty, B.(2015)。塑料污染对海鸟的威胁是全球性的、无处不在的, 而且越来越严重。美国国家科学院院刊, 112(38), 11899-11904。
- [9] 国际鸟盟 (2017)Alca torda.;2017 年 IUCN 濒危物种红色名录  
e.T22694852A110637027  
<https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016.RLTS.T22694852A110637027.en>。2017 年 12 月 09 日下载
- [10] Horswill, C., Robinson, R. A.(2015)。海鸟人口统计率和密度依赖的综述。JNCC 报告 no.;552.
- [11] 罗曼, L., 哈德斯蒂, B. D., 辛德尔, M. A., 威尔科克斯, C.(2019)。将海鸟死亡率与海洋碎片摄食联系起来的定量分析。科学报道, 9(1), 1-7。
- [12] 盖尔, R Jambeck, 法律, k. l. j. R. (2017)。有史以来所有塑料制品的生产、使用和命运。科学进展, 3(7), e1700782。
- [13] Chapdelaine, G. Diamond, Tony Elliot, R.D. Robertson, Gregory。(2001)。北美东部 Razorbill 的现状和种群趋势。加拿大野生动物服务局临时论文, 3-20。
- [14] 国际自然保护联盟自然资源, Iucn 物种生存委员会, 国际自然保护联盟自然资源。物种生存委员会。(2001)。IUCN 濒危物种红色名录的类别和标准。IUCN。



关注数学模型  
获取更多资讯