

一、历史上发达国家向海洋排放了大量塑料垃圾,中国为他们的塑料垃圾处置做出重大贡献

世界塑料工业的飞速发展始于20世纪60年代前后,在1970年世界塑料年产量已高达3000万吨,80年代中后期就已经突破了1亿吨,90年代中期超过两亿吨。由于塑料的用途多样,价格廉价,回收利用价值低,人们环保意识差,塑料垃圾也随之从60年代前后产生。80年代以前产生的塑料垃圾几乎全部遗弃,90年代中期更超过1亿吨。这些被遗弃的塑料垃圾中,除部分填埋外,相当一部分排入了海洋环境。

早在20世纪70年代初,美国科学家就先后发现美国东部新英格兰近海及马尾藻海中分布着塑料垃圾,这表明70年代以来,西方发达国家特别是欧美国家,向海洋排放塑料垃圾的数量已经相当惊人。到20世纪80年代,美国科学家又报告了美国西部的太平洋海域环流区域有大量漂浮塑料垃圾。直到1997年美国查理斯·摩尔船长发现了著名的北太平洋垃圾环流带,海洋塑料问题才受到全球关注。

至此,西方发达国家在20世纪60年代到90年代,再到21世纪,已经向环境中排放了大量的塑料垃圾,累计高达几十亿吨。以美国为例,二战之后,塑料开始被大量生产。据统计,美国的塑料年产量在1941年仅为231吨,1945年猛增到84万吨。80年代前期,美国塑料产量就已达2000万吨之多,1986年增至2310万吨,占全球总产量的28.5%。此后美国塑料产量继续呈现稳定增长之势,1988年、1990年、1992年、1994年、1996年和1998年分别增加到2710万吨、2810万吨、3010万吨、3410万吨、4000万吨和4360万吨。从1996年起,其塑料产量占世界总产量的比例就提高到30%以上,1996年以后便一直在4000万吨以上,而且长期居于世界首位,相应产生的进入环境的未合理管控的塑料垃圾也是如此。

据报道,甚至到2016年,美国该年仍产生4200万吨塑料垃圾,位居全球首位。尽管美国环境保护署一直对外地公布其塑料废物被100%处理,但最新的研究表明,事实并非如此,2016年美国仅有9%的塑料垃圾得以回收利用,而未合理管控的塑料垃圾则可高达5%。据此估算,2016年美国排向环境中的塑料垃圾可高达225万吨,其中145万吨分布在沿海地区,并可进入海洋。因此,历史上美国累计向海洋排放的塑料垃圾数量极其巨大。

在中国,60年代末全国塑料总产量仅为年产10万吨左右,与世界发达国家相比微不足道。此后的70年代,由于北京燕山石油化工有限公司、辽阳石油化纤公司和上海石化总厂等几家大型石油化工企业陆续投产,到80年代初中国合成树脂的年产量才达到100万吨水平,仍然大大落后于西方发达国家1983年年产量高达7200万吨的水平。中国到2000年塑料产量才达到1000万吨水平,是美国的1/4,而此时全球塑料产量已经超过两亿吨,中国产量仅是其1/20。整个80年代到90年代中期,塑料在中国都是宝贵工业材料,大部分用于生产化学合成纤维和工业产品,作为包装等日用消费品占比较低,产生的塑料垃圾基本被回收利用,仍不能满足回收产业消化的需求。同时,进入21世纪,中国开始少量进口塑料垃圾。2004年受伊拉克战争影响,国际油价突破40美元,持续上涨,塑料原料价格随之大幅上涨,为塑料废品回收利用打开了价格空间,中国开始逐渐大量进口塑料废品进行循环再利用。可以说在21世纪以前,中国向海洋排放塑料垃圾极少。

由于中国回收产业发达,20世纪90年代中期以来,进口处理了世界上主要发达国家的大量废弃塑料,如美国、日本、英国、德国等。中国进口的废弃塑料垃圾从2000年的100万吨左右,快速增长到2006年的600万吨以上。以后平均每年进口塑料垃圾约700万吨左右,最高时接近900万吨,金额超过40亿美元,约占世界塑料进口量的60%以上,数量巨大。其中美国出口至中国的塑料垃圾占其总塑料垃圾出口量的80%以上(中国大陆及香港2016年)。2017年中国人均垃圾产量25.9吨/年,生产约84.3亿吨/年垃圾,其中塑料垃圾占13%左右,美国是世界第一大废弃塑料出口国,中国是进口美国塑料垃圾最多的国家(Raconteur, International Trade

对我国海洋塑料垃圾问题的新认识

李道季

Center / UN Comtrade 2017)。

中国在为美国等西方国家处理这些进口垃圾的同时,废料产生率(即回收塑料中不可回收物的污染率)达20%-25%,有些高达40%,并留在了中国,中国为此付出巨大的环境代价。西方发达国家却节省了大量废弃垃圾处理政府的财政投入。不仅如此,垃圾的回收和出口也为他们创造了大量的就业机会和收入。据统计,2016年,中国共进口了价值近180亿美元的固体废物,其中包括大量塑料垃圾,美国废弃物出口给美国创造超过15.5万个工作岗位。中国为处理他们国家产生的垃圾做出了巨大贡献。

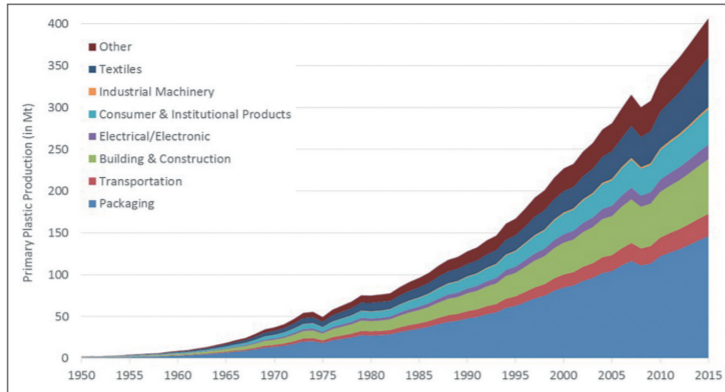
二、我国海洋塑料垃圾排放量被大大高估,已获国际上公认

2015年美国学者Jambeck等人在科学杂志发表研究论文,依据其模型和假设,把中国列为2011年世界上最大的海洋塑料垃圾排放国,在全球影响广泛。文章估测2010年全球有480万-1270万吨的塑料垃圾进入海洋。文章是基于海岸线50km范围内的人口计算的各国排入海洋的塑料垃圾量,结果显示2010年中国是海洋塑料垃圾排放量最大的国家,把中国排入海洋的塑料垃圾量,结果显示2010年中国是海洋塑料垃圾排放量最大的国家,把中国排入海洋的塑料垃圾量列全球第一(印尼第二,美国第20位),产生了超过500万吨的未合理管制塑料垃圾,进而造成132万吨-353万吨的海洋塑料垃圾。

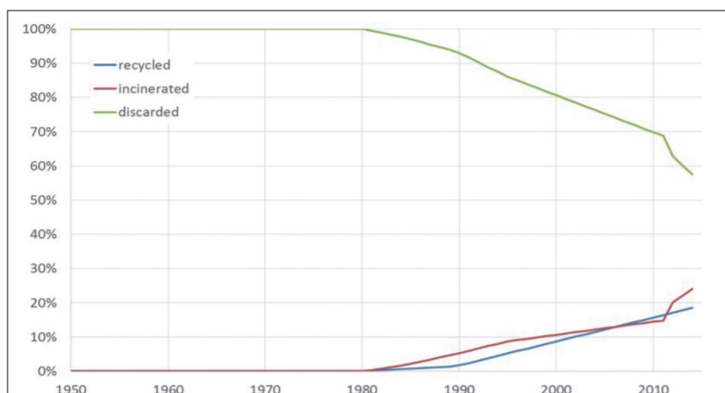
根据我们对历史数据的利用物质流模型和实地调查数据研究发现,中国2011年未合理管制塑料垃圾年产量大约在56万吨,大大低于这一估算结果。笔者2017年11月22日在泰国召开的东盟国家消减东盟区域海洋垃圾大会上见到Jenna Jambeck女士,对她的结果也提出了质疑。实际上据笔者了解,世界上许多国家海洋塑料研究方面的专家对此有质疑。2019年中国生态环境部召集的中美两国学者关于海洋塑料垃圾入海问题的研讨会,也进一步指出这并不符合事实。世界各国学者对全球塑料垃圾入海量有各种不同估算结果,而且基于不同模型的假设和条件都不一样,因此估算出的世界各国塑料垃圾排放量也出入很大。因为没有实测数据校正,对全球的塑料垃圾入海量也非常粗略,大约400万吨-2000万吨之间,而对中国的塑料垃圾入海量估算更是差异大得惊人,在50万吨-350万吨之间,包括2015年Jambeck等人估算的132万吨-353万吨等。

值得一提的是,2020年9月18日由美国12家权威塑料垃圾研究机构参与,来自美国、加拿大、澳大利亚、荷兰、英国、印度和印度尼西亚20位科学家在美国《科学》杂志联合刊文(其中也包括2015年Jambeck等人文章的部分作者)。基于各国人口、人均塑料使用量,废物处理和管理水平等数据,重新计算了全球173个国家向水环境中排放塑料垃圾的总量,并进一步使用模型预估了到2030年不同模式下各国向环境中排放塑料垃圾的总量。美国科学家Stephanie B. Borrelle博士领导这项研究。研究表明,尽管中国人口世界第一,但人均塑料垃圾产生量不到欧美等发达国家的1/6。2016年中国向海洋、湖泊和河流水环境的塑料垃圾排放总量仅排在世界第四位,第一位俄罗斯,第二位印度,第三位印度尼西亚。同时,根据研究模型预测,在全球排放塑料垃圾目标限制在800万吨的阈值模式下,到2030年,中国塑料垃圾排放将进一步减少,排在世界第24位。根据这个结果,如果排除我国滞留在湖泊和河流环境的塑料垃圾,向海洋排放的塑料垃圾更少。研究也进一步表明上述著名国际学者已经公开承认他们过去的研究大大高估了中国海洋塑料垃圾排放量。

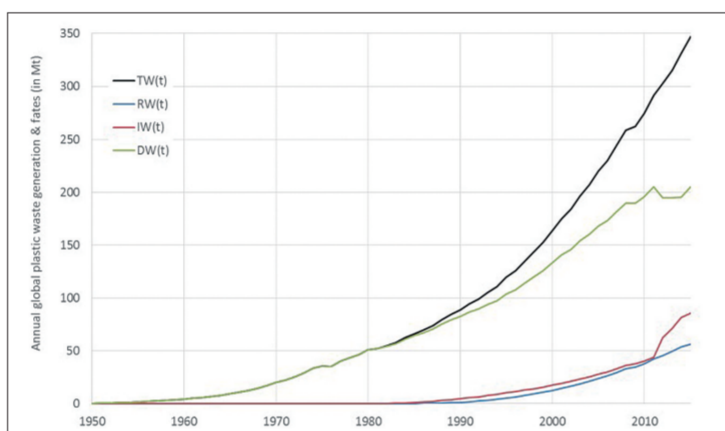
重新估算的全球各国向水环境中排放塑料垃圾的研究结果,认为2016年中国向水环境(江、河、湖、海)排放的塑料垃圾总量为140.5万吨-174.2万吨,但即使如此,仍然大大被高估。研究中的主要估算方法与Jambeck et al. (2015)中所用思路一致,如下:
$$Ec,t,s = P_c t W_c t \beta c,t R_c$$



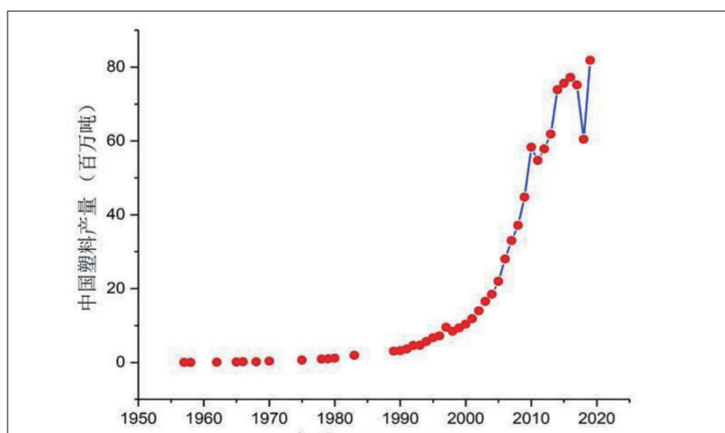
全球塑料产量(百万吨)(1950-2014)(引自Stephanie B. Borrelle等,2020)



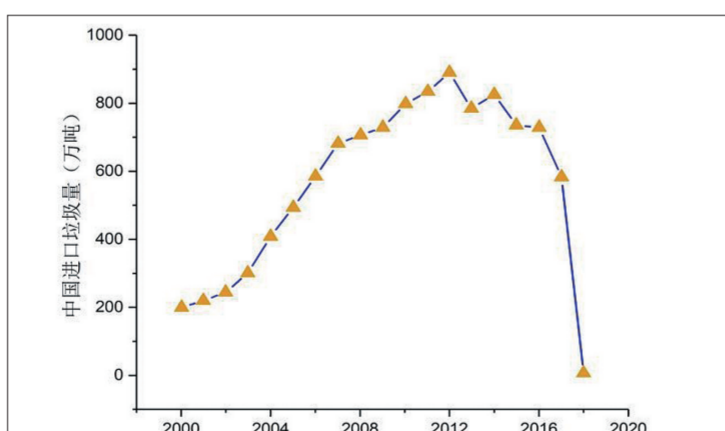
全球塑料垃圾(非纤维)循环、焚烧和遗弃比例估算(1950-2014)(引自Stephanie B. Borrelle等,2020)



全球塑料垃圾产量、循环利用量、焚烧量和遗弃量(百万吨)(引自Stephanie B. Borrelle等,2020)



中国塑料制品产量(百万吨)(1989-2019)



中国进口废塑料量(万吨)(2000-2018)

$$tMc,t,s(1-p,c,t,s)(1-\phi,c,t,s)$$

其中P为人口数量,W为人均垃圾产生量, β 为垃圾中塑料垃圾的比例,R为排放比例,M为不当处理垃圾比例,c为国家,t为年份,s为情景。随着关注的增加,总塑料垃圾的产量会减少(ρ),不当处理垃圾比例也会变化,排放到环境中的比例也会变化(ϕ)。在以上数据中,人口数量较为明确,来自世界银行数据。人均垃圾产量、垃圾中塑料垃圾比例、不当处理垃圾比例主要获取自世界银行报告。向环境中的排放比例则是依据各国单位陆地距离水环境的距离估算所得。各参数中,以中美两国为例,我国与美国在全球中的水平如下:首先,人口数据较为明确,中国人口居全球第一。其次,人均塑料垃圾产生

量我国人均居于世界较低水平(0.43公斤/天),显著低于美国(2.23公斤/天)。第三,塑料垃圾比例我国处于中等偏下水平,为10%,低于美国的13%。第四,垃圾进入环境中的比例,我国处于世界偏中下水平,低于美国。最后,不当垃圾处理比例,这一研究引用世界银行的报告,我国为23%加2%,该比例被修正后,显著低于Jambeck et al. (2015)文中的74%加2%。依据我们的研究,此数据对我国仍然存在较高的估计。根据我国住建部发布的《2017年全国城乡建设统计年鉴》,我国城市和县级市垃圾未处置率分别为1.00和3.89,基本上接近欧美国家水平。建制镇和乡分别为12.81和27.01,但覆盖人口相对较少。另外,我国的自由拾荒者未被考虑在内,所以建制镇和乡

也应该低于统计年鉴中的比率。因此,我国城乡平均垃圾未处置率应该大大低于26%的水平。根据全国城乡人口比率,估算合理的全国城乡垃圾未处置率应该在3%-8%之间,如果我们把不当垃圾处理比率合理设定为7%左右,则2016年中国向水环境(江、河、湖、海)排放的塑料垃圾总量为37.83万吨-46.90万吨,均值为42.43万吨。扣除江、河、湖的滞留,进入海洋的不足其1/3,即不到15万吨。而且,目前中国的垃圾收集、处置水平不断提高,排海塑料垃圾已经大大削减,处于较低水平。

2020年10月30日美国科学家Kara Law等最新发表在美国科学杂志子刊《科学—进展》论文中又提供新的数据。按美国2016年末管控固体垃圾比率2.98%、其中塑料垃圾13.1%计算,2016年美国是世界上产生塑料垃圾数量最多的国家,达到4200万吨。按美国沿海地区人口1.1794亿人计算,排入海洋环境中未合理管制塑料垃圾可能高达145万吨,排在世界第三位。第一位是印度尼西亚,第二位是印度,第四位是泰国。中国被排在了第五位,产生107万吨未合理管制塑料垃圾,这也大大高估了我国沿海地区塑料垃圾的排放。

总而言之,由于中国的未管制塑料垃圾组成与国外有很大不同,而且自由拾拾者收集了大部分的塑料瓶等易回收塑料,因此,中国未合理管制塑料垃圾中此类塑料垃圾数量较小。同时,中国沿海地区是中国最发达的地区,城市化水平高,据我国统计年鉴数据和沿海地区城市人口与农村人口比例,估算中国沿海地区未合理管制塑料垃圾比例在4.3%左右。我们根据Kara Law等的模型,按中国沿海2.7094亿人口计算,未合理管制塑料垃圾比例为4.3%,未合理管制塑料垃圾量18.3万吨。如果按照我国未合理处置垃圾比例7%为依据估算,中国沿海未合理管制塑料垃圾量为29.8万吨,仅排在世界第15位。

三、我国河流塑料垃圾实际排放量远低于模型估算

关于中国陆源河流排放海洋塑料垃圾的问题,主要由于以下三篇在国际刊物上发表的论文,而引起世界关注,并被大量引用。最具影响力的是前面提到的Jenna Jambeck等2015年在Science发表的论文“Plastic waste inputs from land into the ocean”。虽然不是直接讲的河流塑料垃圾排海问题,但当时人们普遍认为河流塑料垃圾是海洋塑料垃圾的主要输入源。因此,国际上认为中国主要河流入海塑料垃圾通量一定世界最高。

2017年,Laurent C. M. Lebreton等人在Nature Communications发表论文“River plastic emissions to the world's oceans”,利用模型的方法,估算了全球前20条输送海洋塑料垃圾最多的河流,我国本土河流占7条。估测西江、东江、长江和珠江年度总计会输送43.6万吨的塑料和微塑料垃圾,长江以每年输送31万吨-48万吨的数量,成为全球输送塑料垃圾量最大的河流。随后,另一篇由Schmidt C等人估算河流输送塑料垃圾量的文章“Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea”2017年发表在Environmental Science & Technology上,估算了全球塑料垃圾通量最大的前十条河流,我国河流有4条,长江输送量为15万吨-154万吨每年,输送通量也是全球最高,而且最低量到最高量差距巨大,令人质疑。

在具体各国排放塑料垃圾量没有进行实测的情况下,仅凭文献调研得到的数据结合模型进行估算,结果是不可信的。以上这些结果从科学角度而言,都是有漏洞的,估算值缺乏科学性,是不准确且严重高估的,给世界造成了中国与全球海洋环境持续恶化有关的印象。笔者认为,在具体各国排放塑料垃圾量没有进行实测的情况下,加之当时的监测方法也不成熟,仅凭模型的估算,结果肯定不能令人信服。因为这类研究是基于文献数据和模型对全球河流入海的塑料垃圾排放量进行估算,他们依靠很多复杂环境参数的假设条件的成立。然而模

型中的这些条件与实际环境状况存在着不同程度的偏差。其模型假设的主要问题在于:

一是上述研究均基于研究区域的不当垃圾处置量,来推测研究区域入海塑料垃圾含量。然而这些不当垃圾的塑料含量及其中输入海洋塑料垃圾的比例在不同地区和国家都会不同。

二是塑料垃圾输入河流的随季节而异很大,长江口这种半日潮河口,由于咸淡水相互交换,其水文条件在四季的变化十分复杂,海源塑料垃圾对河口内的贡献势必对塑料垃圾量的估算有较大影响。然而文中的模型仅简单将一年不同时段的水体通量比例等同于不同季节河流中塑料垃圾比例。例如长江口的塑料通量是根据7月份做的一次微塑料检测含量和水体通量来推测全年其他月份的微塑料含量(Zhao et al.2014),这种假设太过简单,本身也存在方法学问题。如当时是用32微米滤膜过滤了20升水,其中过滤出了大量衣物纤维,而这些纤维与大的塑料垃圾没有任何直接关系。

三是模型计算数据引用研究文献的采样方法十分繁杂。例如管控塑料垃圾,这也大大高估了我国沿海地区塑料垃圾的排放。总而观之,由于中国的未管制塑料垃圾组成与国外有很大不同,而且自由拾拾者收集了大部分的塑料瓶等易回收塑料,因此,中国未合理管制塑料垃圾中此类塑料垃圾数量较小。同时,中国沿海地区是中国最发达的地区,城市化水平高,据我国统计年鉴数据和沿海地区城市人口与农村人口比例,估算中国沿海地区未合理管制塑料垃圾比例在4.3%左右。我们根据Kara Law等的模型,按中国沿海2.7094亿人口计算,未合理管制塑料垃圾比例为4.3%,未合理管制塑料垃圾量18.3万吨。如果按照我国未合理处置垃圾比例7%为依据估算,中国沿海未合理管制塑料垃圾量为29.8万吨,仅排在世界第15位。

为了更准确地估算我国河流入海塑料垃圾通量,我国在2017年-2018年,对长江口及邻近海域开展了连续3个季节的悬浮微塑料监测,并在2019年洪季对长江口、珠江口、黄河口、钱塘江口、辽河口、海河口、灌河口、椒江口、甌江口、闽江口、九龙江口进行了悬浮微塑料的监测。在2019年7月10日-21日的长江河口微塑料观测中,考虑到河口内的水密度分层强度与微塑料浓度显著相关,潮汐作用显著影响微塑料浓度,采用了多船同步、大小全潮、多要素、全水深、多方法联合长江入海大型塑料和微塑料通量联合观测,期间正值长江第一次洪峰经过,获得了大量宝贵数据。该航次在长江口进行的各种体积、孔径的塑料垃圾和微塑料全面密集观测,是国际上河流塑料垃圾通量研究中首次开展最全面通量研究,可以精确度量河流塑料垃圾和微塑料通量,并建立这些塑料间的浓度关系,同时在方法学方面进行验证,为河流通量观测方法学确立和制定未来标准研究方奠定基础。

估算结果显示,2017-2018年三个季节长江表层(30厘米水层,60微米孔径过滤)微塑料通量每年有1.6亿-2.0万个微塑料颗粒通过长江表层进入海洋,总重量约为814.6-1013.0吨/年。而依据Lebreton et al.2017(Nature Communication)的模型计算长江口表层30cm的微塑料年入海量为1878.8-2909.1吨/年,如果以大型塑料与微塑料的重量比为2.2%估算(Lincoln Fok 2017),2017-2018年我国长江年输送塑料垃圾量3.70-4.60万吨。由于衣物纤维包括在内,所以这个数据仍然偏高。

2019年洪季,我们采用Manta实测长江口30厘米水层采样,考虑到潮汐过程的影响,分析结果为每天16.90吨,进一步估算全年水层年通量0.62万吨。2020年夏季长江流域遭遇特大洪水,更多塑料随洪水冲入河流。我们根据2020年洪季表层5米水层的多网实测数据计算,考虑到潮汐过程的影响,长江口超大洪水期(7月)塑料垃圾5米水层年通量在60.58吨,进一步估算全年水层长江口塑料垃圾年通量不会超过2.21万吨。同时,我们采

用Manta作为对比观测,考虑到潮汐过程的影响,长江塑料垃圾日通量为68.74吨,进一步估算全年水层长江口塑料垃圾年通量不会超过2.52万吨。

在2019年夏季,我们同时对中国的辽河、海河、黄河、淮河、钱塘江、椒江、甌江、闽江、九龙江等10条河流的河口微塑料采样,分别在河口内、河口处、河口外采样,并计算微塑料入海量。由于珠江经由多条水道入海,珠江微塑料排放量是采集珠江各个口内微塑料获得浓度信息,根据每个口门流量占珠江流量比例分别计算出珠江各口门排入海洋中的微塑料量,各口门数据相加获得珠江微塑料总排放量。结果显示,中国的10条河流微塑料年入海量大约为126.40吨-167.41吨,塑料垃圾的年入海量在0.575万吨-0.76万吨。实测结果充分表明我国河流塑料垃圾实际排放量远远低于西方学者根据模型的不恰当估算,也从另一个侧面印证了我国塑料垃圾总体入海量被大大高估的事实。

四、中国负责任有担当,新政策措施建议的实施,将大大消减中国的塑料垃圾量

中国正在开始大幅消减各种沿海渔业生产活动和船舶运输等产生的塑料垃圾,当然也包括河流、湖泊的渔业和运输活动,并制定相关塑料垃圾管控政策和措施,严格执法;完善中国城市、乡村的垃圾收集分类管理;设计、生产和使用更加环保的塑料制品,限制一次性塑料制品的使用等。

同时,今年1月19日,国家发展改革委、生态环境部公布《关于进一步加强塑料污染治理的意见》,明确到2020年,率先在部分地区、部分领域禁止、限制部分塑料制品的生产、销售和使用。中国将按照“禁限一批、替代循环一批、规范一批”的思路,加强塑料污染治理工作。接着,国家发展改革委、生态环境部等九部委联合发出《关于扎实推进塑料污染治理工作的通知》,至此,一场遍及中国各省市各部委的塑料污染治理行动拉开了新的序幕,这将大大加速中国塑料垃圾量的消减。预计在2020年,中国海洋塑料垃圾将减少到10万吨以下。

五、中国积极开展和促进消减海洋塑料垃圾方面的国际合作

中国在塑料垃圾污染比较严重的亚太区域,与亚太国家一道持续在应对海洋塑料垃圾和微塑料污染方面开展有效合作。2017年4月,中国与亚太国家科学家一起发起了全球首个海洋微塑料区域国际合作研究项目“联合国教科文组织政府间海洋科学委员会西太平洋区域海洋微塑料来源、运输和归趋研究项目”,与亚太十余个国家科学家团队开展海洋塑料污染联合研究。通过发挥区域协同作用,目前已取得了诸多重要成果。

中国举办了一系列应对海洋塑料和微塑料污染的国际性学术和培训会议,让国际学者了解中国海洋塑料垃圾污染的实际状况,并倡导制定海洋微塑料监测方法,极大推动了亚太国家海洋微塑料污染监测、研究和应对。同时,中国也与亚太各国一道,积极赞同在IOC/WSETPAC成立工作组,合作开展亚洲和西太平洋地区国家海洋塑料垃圾通量研究,全面掌握亚太区域主要河流真实的塑料垃圾输出入海通量,而不是依赖估算的结果。2019年生态环境部组织中美两国科学家就海洋塑料垃圾入海量问题进行研讨,让美方了解了我国在消除海洋塑料垃圾方面的努力和我国真实的海洋塑料污染状况。

2019年4月,中国在华东师范大学成立了“联合国教科文组织政府间海洋科学委员会海洋塑料垃圾和微塑料区域培训与研究项目”,目的是进一步提升亚太地区国家海洋塑料污染问题的研究水平和能力建设,服务联合国环境规划署委托承担“海洋垃圾热点评估方法”的编制,并应邀在联合国第四届环境大会向全球介绍,计划在2021年开展亚太区域国家海洋塑料垃圾热点评估试点工作。我国还在UNEP、UNEA、UNESCO-IOC/WSETPAC、APES等国际组织开展各种消减海洋塑料垃圾的国际合作。这些都是推进中国与国际社会在消减海洋塑料垃圾方面制定进一步行动计划的努力,以达成未来全球海洋塑料垃圾零排放的愿望。

作者单位:华东师范大学海洋塑料研究中心