

论海洋塑料垃圾污染的研究方法

——以江苏省为例

师薪淇

辽宁省自然资源事务服务中心(辽宁省地理空间成果应用中心), 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年8月30日; 录用日期: 2024年10月26日; 发布日期: 2024年11月5日

摘要

海洋塑料垃圾污染是近年来被不断关注的热点问题之一, 严重程度超过预期, 对全球海洋生态构成严重的威胁。本文使用了一个二维模型, 对漂浮在海表的微塑料进行了讨论分析, 并在水动力流场的基础上, 以点源、面源释放两种形式, 讨论了季节、潮汐带来的影响, 因此在模型中和以点源、面源释放两种形式, 考虑这些过程可能会带来新的结论, 这是在之后的研究中需要进一步讨论的。

关键词

塑料污染, 数值模型, 迁移特征

Research Methods of Marine Plastic Waste Pollution

—Taking Jiangsu Province as an Example

Xinqi Shi

Liaoning Natural Resources Affairs Service Center (Liaoning Geospatial Achievement Application Center),
Shenyang Liaoning

Received: Aug. 30th, 2024; accepted: Oct. 26th, 2024; published: Nov. 5th, 2024

Abstract

Marine plastic waste pollution is one of the hot issues in recent years, which is more serious than expected, and poses a serious threat to the global marine ecology. In this paper, a two-dimensional model is used to discuss and analyze the microplastics floating in the sea surface, and the effects of seasons and tides are discussed in the form of point source and point source release on the basis of hydrodynamic flow field. Therefore, considering these processes in the model and in the form of

文章引用: 师薪淇. 论海洋塑料垃圾污染的研究方法[J]. 自然科学, 2024, 12(6): 1186-1192.

DOI: 10.12677/ojns.2024.126129

point source and point source release may bring new conclusions. This is something that needs to be further discussed in future studies.

Keywords

Plastic Pollution, Numerical Model, Migration Characteristics

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋塑料垃圾污染是近年来被不断关注的热点问题之一,严重程度超过预期,作为人类活动的产物,其污染影响范围不仅在沿岸、近海区域,借助各海洋水动力过程,海洋塑料垃圾具有向深远海、极地、海底渗透的趋势,对全球海洋生态构成严重的威胁[1]。据调查全球塑料制品产量达到了 3.9×10^8 吨以上,较低的回收率(仅 9.83%)导致全球入海垃圾中塑料废弃物占到了 60%~80%,在部分地区甚至超过 90%。全球河流塑料垃圾入海通量不断增长,预计将在 2028 年达到峰值。

通常将海洋中的尺寸小于 5 毫米的塑料碎屑称为微塑料(Microplastics, MPs),最早由 Thompson 在描述小尺寸海洋塑料及其对海洋生态的影响时提出[2]。海洋微塑料主要来自直接生产的小尺寸微塑料,以及大尺寸塑料废弃物在环境中碎片化后形成的次生微塑料。微塑料密度较小,在海洋中会通过复杂的海洋水动力过程发生扩散、长距离运输,多年来已有大量的现场观测数据证明在海湾、大洋水柱、极地海冰、沉积物中的微塑料存在。微塑料具有比表面积大、强烈的疏水特性和抗生物降解等特点,能长时间存在于环境中,容易吸附水体中的有害物质(重金属、持久性有机污染物、细菌、病毒等),被海洋生物误食后进入食物链,可能最终出现在人们的餐桌上[3]。

2. 数值模型及研究方法

2.1. 研究区域

基于本文研究区域为沿岸近海区域,故选择计算海洋、海岸、河口环境水动力条件具有优势的 MIKE3 三维水动力模型软件作为本文研究的主要方法。本文选择 $119^\circ\text{E}\sim 122.5^\circ\text{E}$ 、 $30.7^\circ\text{N}\sim 35.5^\circ\text{N}$ 作为研究区域(图 1)。江苏省位于我国东部沿海,海岸线从北部苏鲁交界至南部长江口北岸,全长 953.9 km,沿海分布着连云港、盐城和南通三市,多工农业、海上运输业[4],容易对近海造成环境压力。江苏近岸海域以潮流明显、淤泥质海岸、岸外辐射沙洲著称。江苏入海的河流虽然数量较多,但整体入海流量均较小,在南侧长江的输入影响下,这些径流对近岸海域的海流影响可以忽略。海域海流特征明显,外侧在 40 m 等深线附近存在终年向南的黄海沿岸流;内侧江苏北部沿岸水存在季节性变化,但有研究表明在强烈的潮汐作用下冬季可能出现逆风北向的运输[4]。

江苏省海岸线数据利用 Google Earth 地图的坐标点选取功能,手动描绘了地图上的江苏省岸线及长江口轮廓,共提取 759 个岸线坐标点。模型在水平方向上采用了从海岸到开阔海域渐变的非结构化三角网格,沿岸区域具有最高的分辨率,约 700 m,在开阔海域边界处约 8000 m,共 25,996 个网格。垂向上采用 sigma 网格划分 30 层,在海表和海底具有较密的网格。水深数据使用了 TOPEX 全球水深及地形数据,分辨率为 15 分。

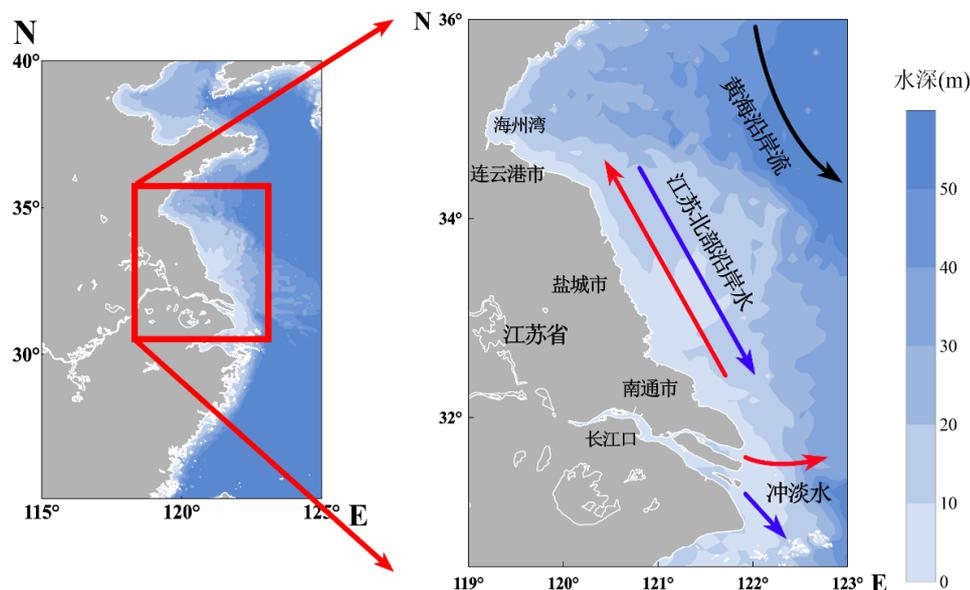


Figure 1. Study area. The red line on the right shows the summer flow, and the blue shows the winter flow

图 1. 研究区域。右图中红线表示夏季流向，蓝色表示冬季流向

2.2. 初始场及边界条件设置

模式的初始场条件包括整个研究海域内的海平面高度、三维温盐、水平方向上的流速，这些数据来自 $1/12^\circ$ 的 HYCOM 再分析数据。模型设置了北侧、东侧和南侧三个开边界和长江一个径流输入的开边界，其余边界均为陆地边界，海水在陆地边界处的法向速度为 0。边界输入的数据为随位置、时间变化的三维温盐、水平流速数据，时间分辨率为 1 小时。模型上边界仅使用风场数据，为 ERA-5 逐小时再分析数据，分辨率为 $1/4^\circ$ ，包括了海表大气压强和 10 m 的 u 、 v 风速分量。

2.3. 水动力模型检验

2.3.1. 流场基本特征

图 2 为包含潮汐信息的 7、12 月某一时刻的流场及密度分布情况。7 月份江苏近海流速最大的区域为长江口，在涨落潮时可达 ~ 1.9 m/s；涨落潮时流速最小的区域则在东北侧边界附近，大小约 0.2 m/s；海水在沿岸区域的流速整体较高。12 月份由于径流通量的减少，长江口流速相 7 月降低，在涨落潮时达到 ~ 1.6 m/s。密度分布上，7 月和 12 月的东北侧开阔海域均为密度最高值，7 月沿岸存在密度较低的海水，12 月海域的密度整体比 7 月份偏高。

2.3.2. 潮位检验

潮汐检验主要将 MIKE3 模式结果与 Tide Modal Driver 工具箱在长江口附近的余山验潮站进行潮差对比。根据 MIKE3 模型结果得到的研究区域内 M_2 分潮的同潮图，显示在连云港市东侧海域上存在一个旋转潮波系统，相位以逆时针方向增加，同潮图分布特征与 Liu 等人研究中的 Figure 3 基本一致。余山站 2022 年七月份的大潮时期潮差约 4.4 m，小潮时期潮差约 1 m，同年十二月大潮时期潮差约 4.3 m，小潮时约 1.1 m。模拟结果整体与 TMD 的潮汐预测能够较好地匹配潮差。因此认为水动力模拟结果可以较真实地体现出研究区域的潮位变化。

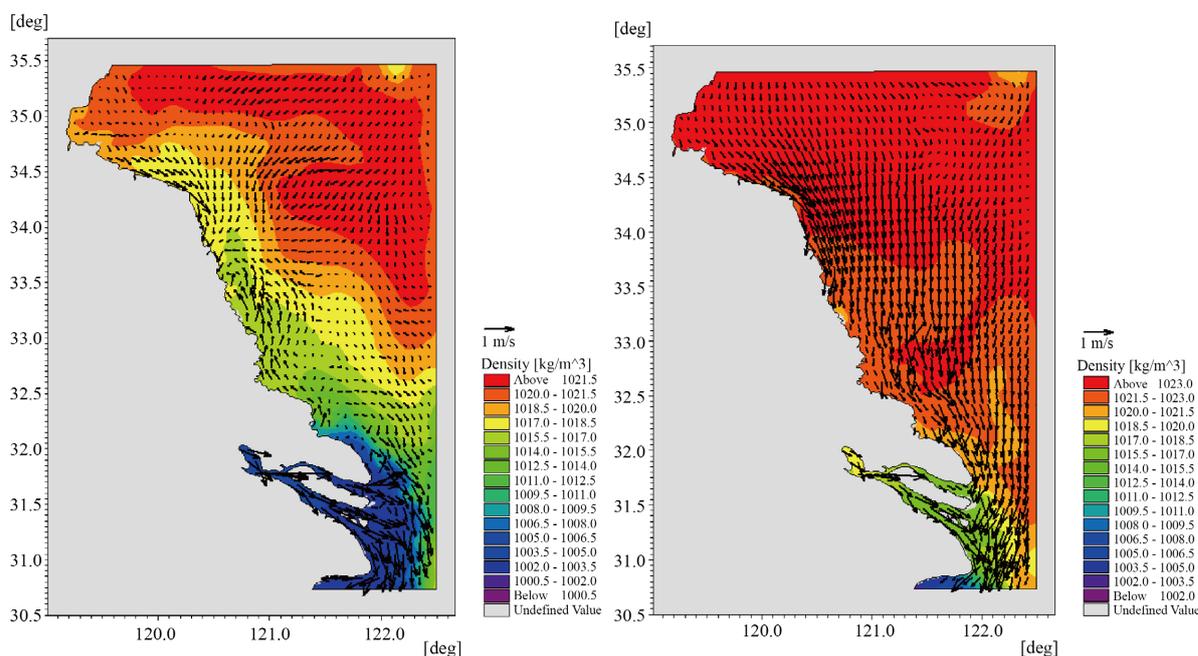


Figure 2. Distribution of sea surface density and velocity at a certain time in offshore Jiangsu in July (left) and December (right) (black arrow)

图 2. 7 月(左)和 12 月(右)江苏近海海表密度及某时刻流速分布(黑色箭头)

2.3.3. 温度检验

温度的检验主要比较海表的 MIKE3 模拟结果与哥白尼海洋服务网站(<https://marine.copernicus.eu/>)提供的全球海洋再分析位温数据。夏季 7 月 MIKE3 的模拟结果显示, 东北侧海域存在南向的黄海沿岸流, 温度相对偏低约 2°C , 这与原始数据 HYCOM 的结果偏低有一定的关系, 在长江口附近温度偏高约 4°C , 这是由于哥白尼海洋服务网站的结果可能缺乏径流数据, 而本研究中提供的夏季长江径流实际水温接近 30°C , 因此造成南侧较高的水温, 另外两个数据结果存在相同点, 即沿岸存在一股偏暖的水向北延伸。对比冬季 12 月的结果后发现两者基本一致, 沿岸温度均向东逐渐增加, 范围在 10°C 至 13°C , 在北侧海域存在一股偏暖的海水, 温度在 14°C 左右。综上所述, MIKE3 的温度结果与现有产品的温度结果具有相似的空间分布, 因此认为模型的结果具有合理性。

3. 漂浮型微塑料迁移特性

3.1. 潮汐对漂浮微塑料迁移的影响

江苏省分布着宽广且呈不断淤涨的潮滩, 水深较浅, 潮汐作用明显。往外海方向虽然有江苏北部沿岸水、黄海沿岸流这些主要区域环流系统, 但入海微塑料在借助这些洋流迁移之前, 首先要通过近岸的强潮区。在本节中, 通过设置虚拟粒子始终漂浮在海表, 在江苏沿岸选择 7 个陆源微塑料释放点, 在 7 月流场条件下以持续输入的方式每秒释放 4000 毫克的微塑料, 同时每计算步长释放 5 个虚拟粒子来刻画释放后的微塑料主要运动轨迹和影响区域。释放源由北向南标注为 P1~7, 表 1 为具体坐标。

北部输入的微塑料迁移特征

连云港是位于江苏海岸线最北端的城市, 本研究在该段海岸线设置了临洪河(P1)与灌河(P2)两个陆源输入。潮汐最主要的特征就是周期性的往复运动, 它首先会影响微塑料在沿岸的停留时间。陆源释放的漂浮型微塑料主要分布在连云港沿岸的海域内, P1 点位释放的微塑料会大量堆积在海州湾内, 有无潮汐

Table 1. Location of the release point
表 1. 释放点地理位置

	释放源	经度(°E)	纬度(°N)
P1	临洪河	119.2612	34.8166
P2	灌河	119.8327	34.5190
P3	射阳河	120.5113	33.8285
P4	四卯酉河	120.7732	33.1617
P5	北凌新闸	120.9756	32.6141
P6	通州湾	121.4637	32.1855
P7	长江	121.0781	31.7684

条件两种情况下，微塑料均能分布整个海州湾，表明海州湾的水交换能力偏弱。P2 释放的微塑料结果显示潮汐延长了微塑料进入海州湾的时间，表明仅依靠江苏北部沿岸水的驱动，海州湾容易受到其它区域的微塑料污染。

通过观察微塑料空间分布随时间的演变后，以迁移轨迹末端的 P1 点位为例，约 73% 的微塑料在一个月后仍留在海州湾，在海湾附近逗留约 12 天后，这些来自各处的微塑料会向江苏 - 山东边界、向外海迁移，最后随着黄海沿岸流往东南方向扩散离开计算区域，逐渐进入东海的开阔海域，在潮汐影响下 P1、P2 释放的微塑料几乎都在海州湾附近做螺旋式的水平输运。虽然该段沿岸区域的水体交换较慢，潮汐又进一步限制了微塑料的扩散，但江苏北部沿岸水依旧是连云港段沿岸微塑料离岸输运的主要助力。

3.2. 中部输入的微塑料迁移特征

盐城市位于江苏海岸线的中段，本研究在该段布设了射阳河(P3)、四卯酉河(P4)两个输入源。从结果上看，P3、P4 点位释放的微塑料贴着陆边边界迁移向海州湾移动，同样在去掉潮汐条件后，螺旋式输运轨迹边“打转”边前进的现象也不见了，没有潮汐的往复运动，微塑料达到海州湾附近海域的时间也提早两天左右，但潮汐能帮助微塑料更快靠近海州湾的陆地边界。

潮汐对 P3 与 P4 点位的微塑料输运也造成了不同的影响：P3 点位在两种流场下微塑料均是直接向北输运，只是在潮汐作用下，当微塑料达到岸线向西凹进去的连云港段时，微塑料的输运轨迹呈西北向，而没有潮汐作用时，微塑料的输运轨迹则是接近北向，两种情况大致相似；但对于 P4 点，江苏北部沿岸水驱动微塑料直接向北输运，但赋予潮汐条件后，除了直接向北输运的路线，微塑料还会先向东离岸输运了一段距离后再以螺旋式的轨迹向北输运的同时靠近陆地边界。造成这种差异的原因在于盐城市沿岸的辐射沙洲地形，较浅的水深及沟壑状的分布对靠近沙洲的 P4 点造成了影响，这一现象在南通段释放的微塑料输运轨迹上更加明显。

3.3. 南部及长江口输入的微塑料迁移特征

南通市位于江苏海岸线的最南侧，靠近长江口，因此本研究在该区域内设置了南通北凌新闸入海口(P5)、通州湾(P6)和长江入海口(P7)三个输入源。首先是位于江苏省沿岸的 P5、P6，不同于前两节的点位，无潮条件下，它们北向输运的主要路径覆盖的区域更广。这种不同的输运轨迹，除了 7 月江苏北部沿岸水北向流速较大的影响，还有该处辐射沙洲地形带来的影响。辐射沙洲在多年的淤积和潮流冲刷下形成了较为稳定的沙脊。这些沙脊如同一道道堤坝又会反过来影响海水的运动，在涨潮时，海水会从向辐射沙洲的中心流动，落潮时海水从沙洲中心区域向外辐射。若不考虑潮汐，7 月北向流动的江苏北部沿岸水

在经过辐射沙洲这片区域时，较浅的水深也会让海水朝东北方向流动，阻碍沿岸的微塑料输运。辐射沙洲的地形与潮汐的共同影响，造成了 P3、P4 和 P5、P6 之间的差异：P3、P4 大致位于辐射沙洲中心的北侧，P5 靠近沙洲中心，P6 则位于南侧，在 7 月北向流动的江苏北部沿岸水驱动下，南侧的 P5、P6 在经过辐射沙洲附近会往东扩散，沙洲北侧释放微塑料在北向输运时则没有这种阻碍。潮汐影响了微塑料在跨岸方向(东西方向)上的扩散，使微塑料的输运轨迹更靠近陆地，输运时间更长，在沿岸区域对微塑料输运的影响十分明显。

在长江口 P7 点位释放的微塑料轨迹分为多个方向，在潮汐的往复作用下，长江输入的微塑料约 92% 逗留在长江口，东海可能是微塑料离岸后的最终去向。这表明长江虽然径流大、水体微塑料丰度高，由于长江北支冲淡水的主体扩散方向并不是直接沿岸流动的，而是东、东北向的，仅~2%的微塑料向江苏沿岸运动，表明瞬时的微塑料释放并不会对江苏沿岸造成严重的污染，更多的影响可能是长江大径流高微塑料丰度的水体持续输入，通过积累的形式污染江苏沿海。

4. 微塑料迁移特征

4.1. 北部输入的微塑料迁移特征

冬季季风与江苏北部沿岸水的方向改变对微塑料输运影响是明显的，流场的变化首先导致了夏季沿岸向北输运的整体趋势变成了沿岸向南输运，海州湾及附近的海域不再成为微塑料停留的区域。同时区别于夏季偏弱的江苏北部沿岸水，冬季 12 月南向的沿岸水明显在该处明显更强，海州湾在无潮汐条件下的水交换能力明显增强，有助于夏季容易汇集微塑料的海州湾及其附近区域的海水净化。连云港市的 P1、P2 点位释放的微塑料在 7 月长期停留在海州湾附近，但在 12 月能够往南输运到盐城市周边海域。7 月的季风从研究区域的陆地吹向海洋，而岸界为西北 - 东南走向，在没有潮汐的作用时，微塑料的输运路径会比较广，而到了 12 月，季风从海洋吹向陆地，即使不考虑潮汐，微塑料的输运轨迹同样贴近陆地，潮汐的影响减弱，但对输运时间的影响依旧存在，在潮汐往复运动影响下 P1 释放的微塑料依旧在海州湾内会停留。在没有潮汐条件的流场下，其释放的微塑料从海州湾附近海域向北扩散至江苏 - 山东边界需要花费的时间从大约 12 天缩短至大约 8 天。去掉潮汐的影响后，微塑料在黄海沿岸流附近的海域也出现大面积分布的现象，虽然由于扩散、稀释的原因，浓度值偏低，但实际上离开海州湾附近海域的微塑料占比高达 35%。

4.2. 中部输入的微塑料迁移特征

12 月的微塑料输运情况也存在和 7 月相似的地方。在冬季沿岸水流向改变后，辐射沙洲依然起着阻碍微塑料在江苏中段沿岸输运的作用，北侧来自 P2、P3 的微塑料途径辐射沙洲时依然会往东扩散，与 7 月 P5、P6 在该处绕路的情况类似。在没有潮汐的“收束”影响时，P3 的轨迹(红线)明显向东输运后越过了辐射沙洲，导致微塑料的空间分布偏南侧一些，上一节 P2 的轨迹(红线)也能观察到明显的向东扩散的趋势。P3 和 P4 释放的微塑料在抵达苏 - 沪边界时开始转为向东扩散，表明冬季南通市可能会是明显的富集区。

4.3. 南部及长江口输入的微塑料迁移特征

P5 和 P6 的结果同样显示了大量微塑料在苏 - 沪边界停留。与夏季情况相比，长江口会明显受到来自江苏沿岸释放的微塑料污染，在崇明岛附近出现较高值。径流量的减少导致密度锋面存在于长江口北支附近，阻碍微塑料进一步向南输运，不过淡水量偏少，P6 释放的微塑料依然有较大一部分达到长江口，随冲淡水向东扩散离开研究区域。由于冬季长江进入枯水期，P7 释放的微塑料几乎不再对江苏沿岸造成

影响。该处潮汐在冬季的影响也和夏季的“收束”作用有所不同，在辐射沙洲区域潮汐反而拓宽了微塑料的迁移轨迹，在长江口区域潮汐的作用也不如夏季明显。

5. 结束语

本文在水动力流场的基础上，以点源、面源释放两种形式，讨论了季节、潮汐带来的影响。季节变换的影响体现在季风风向和江苏北部沿岸水流向变化上，漂浮型微塑料的运动受流场驱动，夏季呈向北输运，冬季向南，同时潮汐的往复作用“收束”了微塑料的输运路线，贴着海岸边界输运。海水以辐射沙洲中心发生辐聚辐散，沟壑状的地形令微塑料并不能直接沿岸输运。7月和12月，江苏沿岸均会出现较多的微塑料分布，Wang等人通过实地采样也发现了微塑料丰度从沿岸向外递减的现象[5]。

同时也使用了一个二维模型，对漂浮在海表的微塑料进行了讨论分析。不过，微塑料在垂直方向上的迁移同样需要重视，例如沉降、生物淤积等等常见的现象，实际海洋中，海水也是三维运动的，存在垂直方向上的上升或下沉流，即使它们的尺度较小，但随着微塑料在海水中停留的时间增加，其影响可能也会逐渐明显，因此在模型中考虑这些过程可能会带来新的结论，这是在之后的研究中需要进一步讨论的。

参考文献

- [1] 王金平, 吴秀平, 曲建升, 等. 国际海洋科技领域研究热点及未来布局[J]. 海洋科学, 2021, 45(2): 152-160.
- [2] 武芳竹, 曾江宁, 徐晓群, 等. 海洋微塑料污染现状及其对鱼类的生态毒理效应[J]. 海洋学报, 2019, 41(2): 85-98.
- [3] 金浩波, 黄卫. 江苏沿海地区水污染现状及防治对策[J]. 环境导报, 2001(1): 42-44.
- [4] Tozer, B., Sandwell, D.T., Smith, W.H.F., *et al.* (2019) Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec: SRTM15. *Earth and Space Science (Hoboken, N.J.)*, **6**, 1847-1864. <https://doi.org/10.1029/2019EA000658>
- [5] 孙逸宸. 东海及长江口微塑料污染数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.