

广东省海洋垃圾污染特征、来源及风险评价

邓炜华, 唐俊逸, 罗育池, 陈辉, 曾丹娜, 叶匡旻

(广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045)

摘要:本研究以 2023 年广东省 11 处海域(岸滩)垃圾的采样调查结果为基础,将海滩垃圾、海面垃圾和海底垃圾分别划分为城市、乡郊、渔业;沿岸、潟湖;基岩、砂泥和建设等类型,分析了海洋垃圾密度、分布和来源,利用海滩质量指数评估了海洋垃圾风险。结果显示,海滩垃圾、海面漂浮垃圾和海底垃圾数量密度分别为 43178 个/ km^2 、5634 个/ km^2 和 2747 个/ km^2 ,丰、枯水期差异明显,海洋垃圾主要来源于人类海岸活动和航运/捕鱼活动,调查海滩的清洁度为“非常清洁”,安全程度为“安全”或“适度安全”,健康状况为“良好”。

关键词:海洋垃圾;污染特征;来源分析;风险评估

中图分类号:X820.4;X834

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2024)05-0696-11

Pollution characteristics, sources and risk assessment of marine litter in Guangdong province

DENG Weihua, TANG Junyi, LUO Yuchi, CHEN Hui,
ZENG Danna, YE Kuangmin

(Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: Based on the sampling and survey results of 11 marine areas (shoals) in Guangdong province in 2023, the beach, surface and submarine litter were divided into urban, rural, fishery, coastal, lagoon, bedrock, sand and mud, and construction types respectively. The density, distribution and source of marine litter were analyzed, and the risk of marine litter was assessed using the beach quality index. The results showed that the density of beach litter, floating litter on the sea surface and seabed litter was 43178 items/ km^2 , 5634 items/ km^2 and 2747 items/ km^2 , respectively. There were significant differences between rainy and dry seasons. Marine litter mainly came from human coastal activities and shipping/fishing activities, and the cleanliness of the beaches surveyed was “very clean”, the safety level was “safe” or “moderately safe” and the health status was “good”.

Key words: marine litter; pollution characteristics; source analysis; risk assessment

海洋垃圾是指在海洋或海岸环境中具持久性的、人造的或经过加工的固体废弃物,包括海滩垃圾、海面漂浮垃圾和海底垃圾^[1],其数量和分布不仅受河流、地形、洋流、潮汐及季风等自然因素的影响,还受沿海地区人口密度、旅游活

动及渔业活动等社会经济因素的影响^[2-3]。据统计,全球每年约有 640 万吨、每天约有 800 万件垃圾进入海洋^[4]。联合国环境规划署(UNEP)报告指出,塑料类海洋垃圾占比可达到 85%,预计到 2040 年,将有 2300 万吨~3700 万吨塑料类

收稿日期:2024-02-18, 修订日期:2024-05-13

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B1111020004);广东省环保专项资金项目(粤财预[2023]6号)

作者简介:邓炜华(1993—),男,广东江门人,助理工程师,硕士,主要从事海洋生态环境保护工作, E-mail: whdeng262@163.com

通信作者:唐俊逸,高级工程师,主要从事海洋生态环境保护和污染物总量控制研究, E-mail: kens_i@163.com

垃圾排入海洋^[5]。海洋垃圾不仅会对海洋景观造成视觉污染,阻碍海上交通,影响航行安全,对海洋经济产生负面效应^[4],还会对海洋生态系统造成损害,甚至会通过食物链危害人类健康^[6]。由于环境降解难、迁移距离长,海洋垃圾在海洋环境中广泛分布和不断累积,成为遍布最广、最困扰世界各国的海洋环境污染问题之一^[7]。

自2007年开始,我国持续组织沿海各省、自治区、直辖市及计划单列市开展近岸海域海洋垃圾监测,强化海洋垃圾污染防治管理。广东省是海洋大省,海域面积41.9万平方千米,沿海旅游、航运、水产养殖等涉海产业发达,海洋垃圾污染不容小觑。根据《中国海洋生态环境状况公报》^[8]和《广东省生态环境状况公报》^[9],2022年,广东省14个区域海滩垃圾和海面漂浮垃圾数量密度分别为62523个/km²、1598个/km²,泡沫碎片、塑料瓶和塑料袋等塑料类垃圾占比最高。

但由于全省海岸线绵长,分布有大小海湾510多个,已开展的调查工作不足以表征广东省海洋垃圾污染的整体情况。因此,本研究补充选取11个区域开展了丰、枯水期海洋垃圾调查,旨在进一步了解广东省近岸海域海洋垃圾数量、组成、分布、来源和风险状况,以期为针对性制定海洋垃圾污染治理和监管对策措施、切实改善海洋生态环境提供数据和支持。

1 材料与方法

1.1 调查区域

本研究以入海河口、沿海城镇、水产养殖区等为重点,共选取11处海域(岸滩)调查区域,分别在2023年8月16日—8月31日(丰水期)和2023年10月23日—11月5日(枯水期)开展了调查,调查内容包括海滩垃圾、海面漂浮垃圾和海底垃圾的种类、数量密度及质量密度。调查区域分布见表1。

表1 调查区域基本信息一览表
Tab.1 List of basic information on survey areas

调查区域	位置	调查海滩经纬度范围	调查海域经纬度范围	周边海洋功能区
潮州海山岛	潮州市饶平县	116.9962°E—117.0033°E; 23.5144°N—23.5404°N	/	海山岛东部旅游休闲娱乐区、 汕头港—大埕湾农渔业区
汕头妈屿岛	汕头市龙湖区、 金平区和濠江区	/	116.5628°E—117.7785°E; 23.3176°N—23.3864°N	牛田洋农渔业区、牛田洋保留区、 达濠岛北部港口航运区、新津工业与 城镇用海区
揭阳资深港	揭阳市惠来县	16.5180°E—116.5443°E; 22.9837°N—23.0043°N	116.4832°E—116.5910°E; 22.9166°N—23.0159°N	靖海港口航运区、田尾山—石碑山 农渔业区、珠海—潮州近海农渔业区
深汕红泉沙滩	深汕特别合作区	115.0497°E—115.1002°E; 22.7818°N—22.7962°N	/	红海湾农渔业区、鲘门旅游休闲娱乐区
东莞交椅湾	东莞市滨海湾新区	/	113.7009°E—113.7538°E; 22.7202°N—22.7567°N	交椅湾工业与城镇用海区
珠海香炉湾	珠海市香洲区	113.5817°E—113.5872°E; 22.2598°N—22.2710°N	/	九洲旅游休闲娱乐区
阳江十里银滩	阳江市江城区	111.8682°E—111.9118°E; 21.5643°N—21.5987°N	111.7910°E—112.0457°E; 21.5358°N—21.6443°N	海陵岛旅游休闲娱乐区、 湛江—珠海近海农渔业区
阳江珍珠湾	阳江市阳东区	112.2044°E—112.2177°E; 21.7399°N—21.7435°N	/	平岗—东平农渔业区
茂名水东湾	茂名市电白区	/	111.0019°E—111.0923°E; 21.4689°N—21.5360°N	水东湾旅游休闲娱乐区、 水东湾海洋保护区
湛江金沙湾	湛江市赤坎区	110.3936°E—110.3967°E; 21.2614°N—21.2670°N	/	湛江港港口航运区
湛江东海岛	湛江市经济技术开发区	110.5321°E—110.5343°E; 20.9292°N—20.9825°N	110.5324°E—110.5555°E; 20.9292°N—20.9825°N	东海岛旅游休闲娱乐区、 湛江—珠海近海农渔业区

注:/代表未开展调查

1.2 调查方法

参照《海洋垃圾监测与评价指南(试行)》^①中的调查方法进行断面布设、采样分类和尺寸规格统计。海滩调查断面宽度为 100 m, 长度为低潮时自浸水边际线至特大高潮线或天然/人工屏障处的距离, 通过人工采集法(两人一组、组间 2 m 行走)采集海滩垃圾样品。海域调查断面宽度为 1~100 m, 长度为 1000 m, 通过海上目视调查法记录有效观测宽度(100 m)内的漂浮垃圾信息, 同时采用表层水体拖网法(矩形网框、网口宽度 1 m)采集海面漂浮垃圾样品, 通过底拖网法(渔业用底拖网、网口宽度 4 m)采集海底垃圾样品。对采集的垃圾样品进行清洗、晾干、分类、称量和计数。垃圾分类按照材料类型分为塑料类、玻璃类、金属类、橡胶类、织物类、木制品类和纸类。

本研究采用西北太平洋组织(NOWPAP)的统计方法进行海洋垃圾源解析, 按人类海岸活动、航运/捕鱼活动、吸烟用品、医疗/卫生用品、其他弃置物等 5 类来源(表 2)进行统计^[7]。

表 2 海洋垃圾来源分类表	
Tab.2 Classify category of the marine debris sources	
垃圾来源	垃圾种类
人类海岸活动	塑料瓶、快餐盒、饮料罐、报纸、塑料袋等
航运/捕鱼活动	废弃渔网及碎片、鱼线、浮漂等
吸烟用品	烟头、烟盒、打火机等
医疗/卫生用品	注射器、卫生巾、尿布等
其他弃置物	轮胎、荧光灯管、窗纱、电线、灯泡、玻璃片等

1.3 数据处理方法

1.3.1 密度

某类海洋垃圾 i 数量密度或质量密度计算方法公式如下:

$$D_i = \frac{n_i}{L \times W} \tag{1}$$

式中: D_i 为某类海洋垃圾 i 的数量密度或质量密度(个/km² 或 kg/km²); L 为调查断面实际长度(km); W 为调查断面实际宽度或拖网有效宽度(km); n_i 为调查断面内某类海洋垃圾 i 的数量

或质量(个或 kg)。

1.3.2 分担率

根据赵蓓等^[10]、孙伟等^[11]关于污染物分担率概念, 某类海洋垃圾 i 的分担率为其在所有垃圾中的比率, 计算公式如下:

$$K_i = \frac{n_i}{n} \times 100\% \tag{2}$$

式中: K_i 为某类海洋垃圾 i 的数量或质量分担率(%); n 为调查断面内海洋垃圾数量或质量总和(个或 kg); n_i 为调查断面内某类海洋垃圾 i 的数量或质量(个或 kg)。按大小顺序排列数量分担率, 将累计百分比大于 80% 的垃圾作为海洋垃圾的主要组分。

1.3.3 海滩质量指数

参考 M.Mugilarasan 等^[11]、Nelson Rangel-Buitrago 等^[12]使用的海滩质量指数(beach quality indices, BQI)评估海滩环境安全健康, 确定垃圾对环境的影响, 包括海滩清洁综合指数(general index, GI)、海滩垃圾危害人体健康指数(hazardous anthropogenic beach litter index, $HABLI$)和环境状况指数(environmental status index, ESI)。

(1)海滩清洁综合指数(GI)

使用 GI 评估海滩的清洁度(无垃圾状态), 计算公式如下:

$$GI = \frac{Q}{S} \times k \tag{3}$$

式中: Q 为海滩垃圾数量总和(个); S 为调查断面实际面积(m²); k 为统计常数, $k=20$ 。根据 GI 将海滩的清洁度分为 5 个不同类别(表 3)。

表 3 海滩清洁综合指数分级		
Tab.3 Clean coast general index (GI) classification		
GI	类别	描述
≤2.00	非常清洁	没有垃圾
>2.00且≤5.00	清洁	大面积未见垃圾
>5.00且≤10.00	适度清洁	可以检测到垃圾
>10.00且≤20.00	不清洁	滩上有很多垃圾
>20.00	非常不清洁	绝大部分区域被垃圾覆盖

(2)海滩垃圾危害人体健康指数($HABLI$)

$HABLI$ 是根据可能对海滩游客造成间接或

① 国家海洋环境监测中心,《关于印发〈2022 年全国海洋生态环境监测工作实施方案〉和〈2022 年全国海洋生态环境监测质量保证和质量控制方案〉的通知》,海环监〔2022〕13 号.

直接健康风险的尖锐、穿刺(如碎金属)等危险有害垃圾来评估海滩安全质量。计算公式如下:

$$HABLI = \frac{\sum Q_H / \log_{10} \sum Q}{S} \times k \quad (4)$$

式中: Q_H 为危险有害垃圾数量(个), 包括玻璃类、金属类和木制品类; Q 为海滩垃圾数量总和(个); k 为统计常数, $k=20$ 。根据 $HABLI$ 可将海滩的安全程度分为 5 个等级(表 4)。

表 4 海滩垃圾危害人体健康指数分级

Tab.4 Hazardous anthropogenic beach litter index ($HABLI$) classification

$HABLI$	等级	类别	描述
<0.10	I	安全	没有危险有害垃圾
≥ 0.10 且 ≤ 1.00	II	适度安全	大面积可见一些危险有害垃圾
> 1.00 且 ≤ 4.00	III	不安全	可见相当数量危险有害垃圾
> 4.00 且 ≤ 8.00	IV	危险	可见大量危险有害垃圾
> 8.00	V	极危险	绝大部分区域被危险有害垃圾覆盖

表 5 海滩垃圾丰度得分及其权重

Tab.5 Abundance scores and corresponding weights of beach litter

类型	海滩分类(xi —丰度得分值)				权重值
	良好(1)	一般(2)	不满意(3)	糟糕(4)	
塑料类	≤ 77	78 ~ 229	230 ~ 511	≥ 512	1.5
玻璃类	0 ~ 2	3 ~ 6	7 ~ 11	≥ 12	1.0
金属类	0 ~ 1	2 ~ 5	6 ~ 9	≥ 10	1.0
橡胶类	≤ 5	6 ~ 15	16 ~ 25	≥ 26	1.5
织物类	0	1	2 ~ 3	≥ 4	1.5
木制品类	0 ~ 1	2 ~ 4	5 ~ 7	≥ 8	1.0
纸类	0	1 ~ 2	3 ~ 4	≥ 5	1.0

2 结果与讨论

2.1 分布特征

2.1.1 密度情况

根据本研究调查结果, 广东省海滩垃圾数量和质量均相对较低, 其中海滩垃圾数量密度为 43178 个/ km^2 , 与 2019—2022 年《中国海洋生态环境状况公报》结果(表 6)相比, 低于 2022 年全国海滩垃圾平均水平(54772 个/ km^2), 高于浙江、河北、福建、辽宁。2019—2023 年广东省海滩垃圾数量密度呈现先升高后持续下降的趋势, 在 2020 年达到最高值(图 1); 海滩垃圾质量密度

(3) 环境状况指数(ESI)

ESI 是通过给可能直接或间接对以海滩为栖息地的生物健康造成损害的海滩垃圾赋予权重, 以加权平均值来评估海滩健康状况的方法。计算公式如下:

$$ESI = \frac{\sum_{i=1}^n wi \times xi}{\sum_{i=1}^n wi} \quad (5)$$

式中: wi 为某类海滩垃圾 i 的权重; xi 为某类海滩垃圾 i 的丰度(个/ m^2)得分。根据 Marcus Schulz 等^[13]、Nelson Rangel-Buitrago 等^[12]、M.Mugilarasan 等^[11] 的研究, 造成间接损害但没有直接风险的海滩垃圾权重值为 1.0, 造成直接影响(因缠绕或误食等)的则其权重值为 1.5, 不同类型垃圾的丰度得分值及其权重值见表 5。根据 ESI 将海滩的健康状况分为 4 个级别, 分别为“良好”(<2.00)、“一般”(≥2.00 且 <3.00)、“不满意”(≥3.00 且 <4.00)和“糟糕”(≥4.00)。

为 1770.05 kg/km^2 , 低于 2022 年全国平均水平(2506 kg/km^2)。

广东省海面漂浮垃圾数量高但质量相对较低, 其中海面漂浮垃圾数量密度为 5634 个/ km^2 , 高于 2022 年全国海面漂浮垃圾平均水平(2924 个/ km^2), 低于广西、山东和福建。2019—2022 年广东省海面漂浮垃圾数量密度呈现先升后降的态势, 2023 年由于调查区域离岸距离更近, 海面漂浮垃圾数量密度更高。国峰等^[7] 研究表明, 沿岸海域海面漂浮垃圾主要来自陆地, 推断可能是陆地垃圾沿径流进入海洋或海边弃置

表 6 2022 年全国海洋垃圾数量密度				
Tab.6 The quantity density of marine litter in China in 2022				
地区	监测区域/ 个	海滩垃圾/ 个·km ⁻²	海面漂浮 垃圾/个·km ⁻²	海底垃圾/ 个·km ⁻²
辽宁	5	18754	899	454
河北	4	28201	1123	/
天津	3	/	247	/
山东	7	56491	8255	/
江苏	4	87619	1499	/
上海	1	/	5698	12037
浙江	4	40166	1158	855
福建	10	18890	12749	/
广东	14	62523	1598	/
海南	3	133855	918	3109
广西	3	66303	6622	/
全国	58	54772	2924	2947

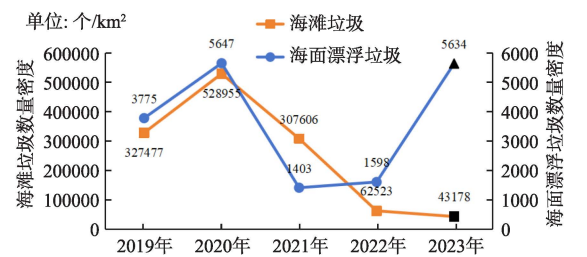


图 1 2019—2023 年广东省海洋垃圾数量密度变化

Fig. 1 The quantity density of marine litter in Guangdong province from 2019 to 2023

垃圾直接进入海洋;海面漂浮垃圾质量密度为

2.87 kg/km²,与 2022 年全国平均水平(2.8 kg/km²)基本持平,漂浮垃圾以数量大而质量小的泡沫塑料类居多。

广东省海底垃圾数量略低但质量相对较高,其中海底垃圾数量密度为 2747 个/km²,低于 2022 年全国海底垃圾平均水平(2947 个/km²),高于浙江和辽宁;海底垃圾质量密度为 97.76 kg/km²,高于 2022 年全国平均水平(54.7 kg/km²),质量较大的木制品类和织物类垃圾是其主要组分。

2.1.2 组成状况

根据本研究调查结果,广东省海滩垃圾主要组分为塑料类、木制品类、玻璃类和纸类(表 7),累计数量分担率为 80.65%,塑料类垃圾数量分担率最高(46.85%),其中六成以上是聚苯乙烯泡沫塑料类,然后依次为木制品类(13.25%)、玻璃类(10.30%)和纸类(10.25%)。海面漂浮垃圾主要组分为塑料类,其中近七成是聚苯乙烯泡沫塑料类。海底垃圾主要组分为塑料类、织物类、木制品类和纸类,累计数量分担率为 86.77%,塑料类垃圾数量最多(60.29%),然后依次为织物类(10.45%)、木制品类(8.19%)和纸类(7.84%)。这与赵肖等^[14]对全国海滩垃圾、潘永珩等^[2]对深圳大铲湾海滩垃圾、国峰等^[7]对东海沿岸海域海面漂浮垃圾和海底垃圾,以及周鹏等^[15]对南海北部沿岸海域海面漂浮垃圾和海底垃圾主要组分的研究结论相似。

表 7 广东省海洋垃圾组成						
Tab.7 Composition of marine litter in Guangdong province						
垃圾类型	海滩垃圾		海面漂浮垃圾		海底垃圾	
	数量/个·km ⁻²	占比/(%)	数量/个·km ⁻²	占比/(%)	数量/个·km ⁻²	占比/(%)
塑料类	20229	46.85	5578	99.00	1656	60.29
玻璃类	4447	10.30	/	/	152	5.52
金属类	3980	9.22	9	0.15	183	6.66
橡胶类	2211	5.12	3	0.06	29	1.05
织物类	2163	5.01	3	0.05	287	10.45
木制品类	5721	13.25	37	0.65	225	8.19
纸类	4428	10.25	5	0.09	215	7.84

2.1.3 时空分布

不同时期海洋垃圾数量密度、类型和数量分担率存在差异(表 8 和图 2)。丰水期海洋垃

圾数量高于枯水期,其中海滩垃圾、海面漂浮垃圾和海底垃圾数量密度分别为 52095 个/km²、8006 个/km²、4483 个/km²,是枯水期(34262 个/km²、

3263 个/ km^2 、1012 个/ km^2) 的 1.52 倍、2.45 倍、4.43 倍。丰、枯水期海滩垃圾类型相同, 丰水期主要组分为塑料类、木制品类、纸类、玻璃类和金属类等 5 类, 枯水期为塑料类、木制品类、纸类和玻璃类等 4 类, 枯水期塑料类垃圾数量分担率较丰水期高, 其他类型垃圾较丰水期低。丰水期海面漂浮垃圾类型为塑料类、木制品类、金属类和纸类等 4 类, 枯水期为塑料类、木制品类、

金属类、橡胶类和织物类等 5 类, 丰、枯水期主要组分均为塑料类, 枯水期塑料类垃圾数量分担率较丰水期低, 其他类型垃圾较丰水期高。丰、枯水期海底垃圾类型相同, 丰水期主要组分为塑料类、织物类、木制品类和纸类等 4 类, 枯水期为塑料类、织物类和玻璃类等 3 类, 枯水期塑料类、玻璃类和橡胶类垃圾数量分担率较丰水期高, 其他类型垃圾较丰水期低。

表 8 广东省丰、枯水期海洋垃圾数量分担率

Tab.8 Quantity sharing rate of marine litter in high and low water periods in Guangdong province

垃圾类型	丰水期/(%)			枯水期/(%)		
	海滩垃圾	海面漂浮垃圾	海底垃圾	海滩垃圾	海面漂浮垃圾	海底垃圾
塑料类	42.75	99.53	58.25	53.09	97.70	69.34
玻璃类	11.12	/	5.42	9.06	/	5.95
金属类	10.32	0.13	7.51	7.53	0.22	2.86
橡胶类	5.75	/	0.23	4.16	0.20	4.69
织物类	5.13	/	10.46	4.83	0.16	10.41
木制品类	13.56	0.22	9.06	12.77	1.72	4.35
纸类	11.36	0.12	9.06	8.57	/	2.40

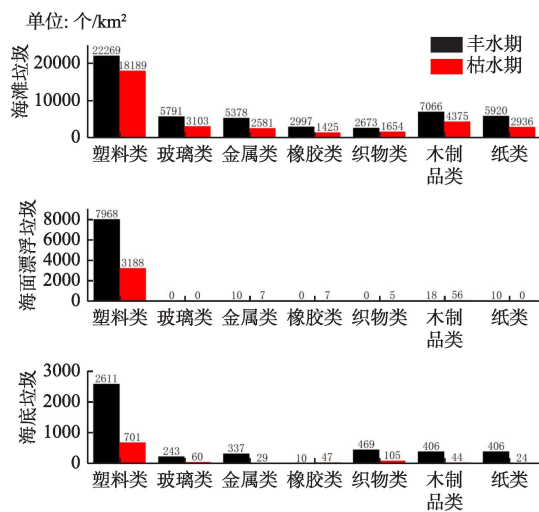


图 2 广东省丰、枯水期海洋垃圾数量

Fig. 2 Quantity of marine litter in high and low water periods in Guangdong province

从不同区域海洋垃圾数量密度来看(图 3), 海滩垃圾以湛江东海岛数量密度最大, 为 82211 个/ km^2 , 其次是潮州海山岛, 为 78299 个/ km^2 , 其余海滩垃圾数量密度均低于平均值(湛江东海岛>潮州海山岛>深汕红泉沙滩>揭阳资深港>阳江珍珠湾>珠海香炉湾>阳江十里银滩>湛江金沙

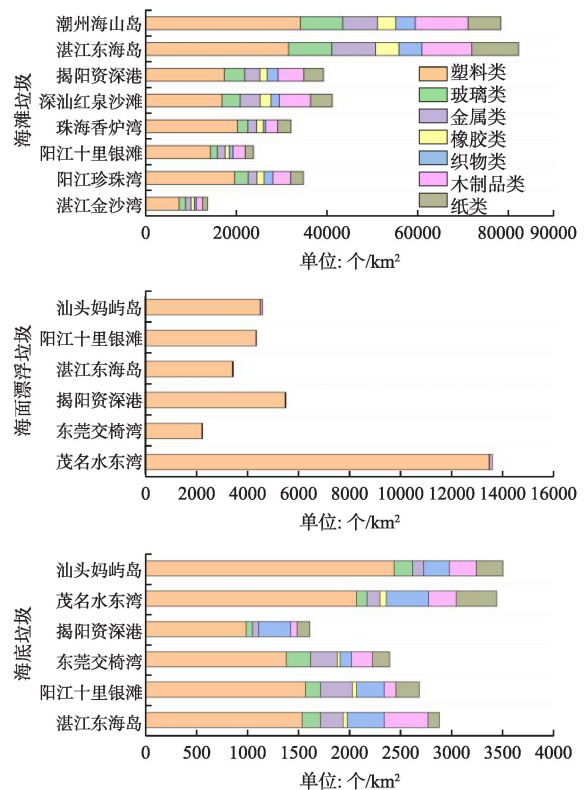


图 3 调查区域海洋垃圾数量密度及类型分布情况

Fig. 3 Investigate the quantity density and type distribution of marine litter on survey areas

湾)。海面漂浮垃圾以茂名水东湾数量密度最大,为 13580 个/ km^2 ,其余海面漂浮垃圾数量密度均低于平均值(茂名水东湾>揭阳资深港>汕头妈屿岛>阳江十里银滩>湛江东海岛>东莞交椅湾)。海底垃圾以汕头妈屿岛数量密度最大,为 3500 个/ km^2 ,其次是茂名水东湾和湛江东海岛,分别为 3438 个/ km^2 和 2875 个/ km^2 ,其余海底垃圾数量密度均低于平均值(汕头妈屿岛>茂名水东湾>湛江东海岛>阳江十里银滩>东莞交椅湾>揭阳资深港)。

为了解同一区域海滩、海面及海底垃圾的空间分布情况,本研究对毗邻入海河流、水产养殖区的揭阳资深港、阳江十里银滩、湛江东海岛等

3 个区域进行了分析(表 9 和图 4)。结果表明,近岸海域海洋垃圾以海滩垃圾为主,其占总数的 87.63%(77.20%~92.84%),其次是海面漂浮垃圾,约占 8.05%(3.92%~14.14%),海底垃圾最少,占 4.32%(3.25%~8.67%)。康斌等^[16]研究表明,2007—2018 年我国海滩垃圾、海面漂浮垃圾和海底垃圾的数量平均占比分别为 90.6%、6.9%和 2.5%,这与本研究结论相似。从不同类型的垃圾空间分布来看,塑料类垃圾在海滩、海面和海底的分布比例为 79:16:5,玻璃类垃圾仅分布在海滩和海底,比重为 98:2,其他类型垃圾均主要分布在海滩,占比为 90%~98%,其次分布在海底(2%~10%),海面漂浮垃圾最少(0%~1%)。

表 9 3 个调查区域海洋垃圾空间分布
Tab.9 Spatial distribution of marine litter at 3 survey areas

调查区域	海滩		海面		海底	
	数量/个· km^{-2}	占比/(%)	数量/个· km^{-2}	占比/(%)	数量/个· km^{-2}	占比/(%)
揭阳资深港	39255	84.63	5523	11.91	1604	3.46
阳江十里银滩	23842	77.20	4366	14.14	2677	8.67
湛江东海岛	82211	92.84	3467	3.92	2875	3.25
平均	48436	87.63	4452	8.05	2385	4.32

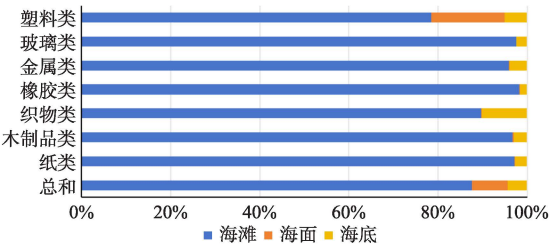


图 4 各类垃圾空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of all kinds of litter

2.1.4 区域分类

使用 Origin 2021 的系统聚类分析对 11 个区域海洋垃圾数量密度进行聚类分组,聚类方法选择类间平均连接,距离类型选择平方欧式距离测量,形成系统聚类分析的树状图(图 5)。聚类结果表明,海滩垃圾调查区域可分为 3 组,分别为城市类型(A 组)、乡郊类型(B 组)和渔业类型(C 组)。其中 A 组为阳江十里银滩、阳江珍珠湾、珠海香炉湾和湛江金沙湾,海滩垃圾数量密度分别为 23842 个/ km^2 、34836 个/ km^2 、

32091 个/ km^2 、13710 个/ km^2 ,4 个海滩均位于城市,靠近商业发展和公共服务完善的地区,保洁机制较为完善,垃圾数量相对较少;B 组为揭阳资深港和深汕红泉沙滩,海滩垃圾数量密度分别为 39255 个/ km^2 、41184 个/ km^2 ,2 个海滩位于乡郊,海滩开发利用程度不高;C 组为潮州海山岛和湛江东海岛,海滩垃圾数量密度分别为 78299 个/ km^2 、82211 个/ km^2 ,2 个海滩位于海水养殖区,保洁机制有待完善,受渔业活动影响,垃圾数量相对较多^[11]。

海面漂浮垃圾调查区域可分为 2 组,分别为沿岸类型(D 组)和潟湖类型(E 组)。其中 D 组为阳江十里银滩、湛江东海岛、汕头妈屿岛、揭阳资深港和东莞交椅湾,海面漂浮垃圾数量密度分别为 4366 个/ km^2 、3467 个/ km^2 、4605 个/ km^2 、5523 个/ km^2 、2266 个/ km^2 ,5 个区域均为相对开阔海域,水体流动性较好,漂浮垃圾数量相对较少;E 组为茂名水东湾,海面漂浮垃圾数量密度为 13580 个/ km^2 ,由于水东湾为潟湖,水动力条

件较弱,因而漂浮垃圾数量相对较高。

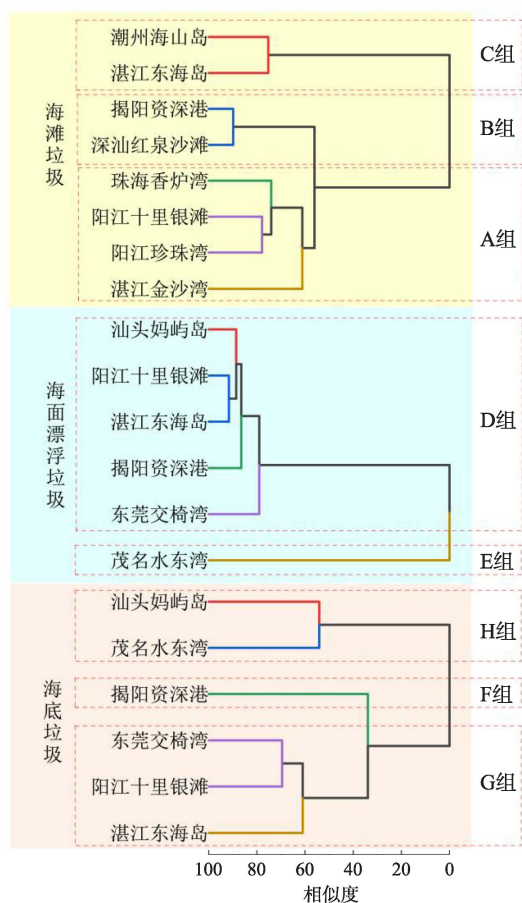


图5 调查区域聚类分析结果

Fig. 5 Results of cluster analysis on survey areas

海底垃圾调查区域可分为3组,分别为基岩类型(F组)、砂泥类型(G组)和建设类型(H组)。其中F组为揭阳资深港,海底垃圾数量密度为1604个/ km^2 ,其海洋开发利用程度不高,海底垃圾数量相对较低;G组为东莞交椅湾、阳江十里银滩和湛江东海岛,海底垃圾数量密度分别为2389个/ km^2 、2677个/ km^2 、2875个/ km^2 ,可能是由于河口泥沙淤积较多或为砂质土壤,在海水回流作用下,垃圾容易混合泥沙沉积于海底;H组为汕头妈屿岛和茂名水东湾,海底垃圾数量密度分别为3500个/ km^2 、3438个/ km^2 ,可能与沿岸开发强度有关。

2.2 来源分析

2.2.1 总体情况

海洋垃圾主要来源于人类海岸活动和航运/捕鱼活动,占比达82%~86%,其次是其他弃置

物,占12%~18%,医疗/卫生用品和吸烟用品相对较少,且仅存在于海滩,分别为2%和0.4%(图6)。其中,海滩垃圾、海底垃圾分别约84%、74%来源于人类海岸活动,可能为徒步、戏水、露营、摆摊等岸边生活形成的废弃物,以及沿岸水产养殖排放的废弃物。海面漂浮垃圾分别有44%和38%来源于航运/捕鱼活动和人类海岸活动,可能为货物航运、渔民捕捞、网箱养殖、水上娱乐等活动产生的海上抛弃物。

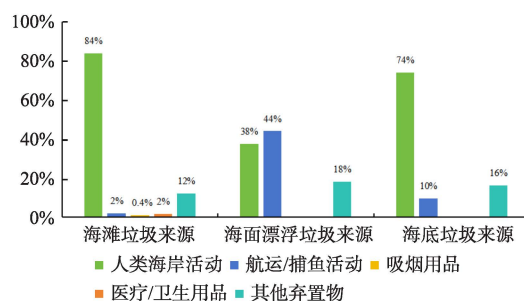


图6 广东省海洋垃圾来源分析结果

Fig. 6 Analysis results of marine litter sources in Guangdong province

2.2.2 区域统计

区域分类统计表明不同类型海域(岸滩)的海洋垃圾来源有所差异(表10)。各类型海滩垃圾均主要来源于人类海岸活动,城市、乡郊、渔业类型的比例分别为85.10%、84.35%、83.47%。各类型海面漂浮垃圾较多来源于航运/捕鱼活动,潟湖、沿岸类型的比例分别为50.27%、42.33%。各类型海底垃圾均主要来源于人类海岸活动,建设、砂泥、基岩类型的比例分别为76.22%、73.96%、64.10%。这可能与沿海各地经济发展状况、海岸利用程度以及监测区邻近海域的功能区类型有关。

结合广东省海洋环境功能区分布情况,潮州海山岛海滩垃圾可能主要来源于周边的旅游休闲娱乐活动;汕头妈屿岛海面漂浮垃圾可能主要来源于附近的农渔业和港口航运活动,海底垃圾可能主要来源于附近的工业与城镇用海活动;揭阳资深港海洋垃圾可能主要来源于毗邻海域的农、渔业活动;深汕红泉沙滩海滩垃圾可能主要来源于周边的旅游休闲娱乐活动;东莞交椅湾海面及海底垃圾可能主要来源于临近的工业与城

表 10 不同类型海域(岸滩)海洋垃圾来源(单位:%)
Tab.10 Sources of marine litter in different types of sea areas (shoals) (unit: %)

垃圾来源	海滩			海面		海底		
	城市类型	乡郊类型	渔业类型	沿岸类型	潟湖类型	基岩类型	砂泥类型	建设类型
人类海岸活动	85.10	84.35	83.47	39.38	31.35	64.10	73.96	76.22
航运/捕鱼活动	2.48	2.20	1.61	42.33	50.27	17.95	8.33	9.73
吸烟用品	1.06	0.36	0.21	/	/	/	/	/
医疗/卫生用品	0.79	1.91	1.81	/	/	/	/	/
其他弃置物	10.57	11.18	12.90	18.29	18.38	17.95	17.71	14.05

镇用海活动;珠海香炉湾海滩垃圾可能主要来源于周边的旅游休闲娱乐活动;阳江十里银滩海滩及海底垃圾可能主要来源于附近的旅游休闲娱乐活动,海面漂浮垃圾可能主要来源于近海的农、渔业活动;阳江珍珠湾海滩垃圾可能主要来源于附近的农、渔业活动;茂名水东湾海面及海底垃圾可能主要来源于周边的旅游休闲娱乐活动;湛江金沙湾海滩垃圾可能主要来源于附近的

港口航运活动;湛江东海岛海滩及海底垃圾可能主要来源于附近的旅游休闲娱乐活动,海面漂浮垃圾可能主要来源于毗邻海域的农、渔业活动。

2.3 风险评价

对调查的 8 个海滩进行质量评估,并将其划分为海滩清洁综合指数(*GI*)、海滩垃圾危害人体健康指数(*HABLI*)以及环境状况指数(*ESI*)中的相应类别(表 11)。

表 11 广东省海滩质量评估结果
Tab.11 Results of beach quality assessment in Guangdong province

调查海滩	<i>GI</i>	<i>GI</i> 类别	<i>HABLI</i>	<i>HABLI</i> 类别	<i>ESI</i>	<i>ESI</i> 类别
潮州海山岛	1.57	非常清洁	0.13	(Ⅱ)适度安全	1.00	良好
揭阳资深港	0.79	非常清洁	0.06	(Ⅰ)安全	1.00	良好
深汕红泉沙滩	0.82	非常清洁	0.07	(Ⅰ)安全	1.00	良好
珠海香炉湾	0.64	非常清洁	0.04	(Ⅰ)安全	1.00	良好
阳江十里银滩	0.48	非常清洁	0.03	(Ⅰ)安全	1.00	良好
阳江珍珠湾	0.70	非常清洁	0.05	(Ⅰ)安全	1.00	良好
湛江金沙湾	0.27	非常清洁	0.03	(Ⅰ)安全	1.00	良好
湛江东海岛	1.64	非常清洁	0.12	(Ⅱ)适度安全	1.00	良好
平均	0.86	非常清洁	0.07	(Ⅰ)安全	1.00	良好

根据 *GI* 结果,8 个海滩均属于“非常清洁”类别,但不同海滩之间清洁度存在差异,各海滩 *GI* 排序为湛江金沙湾<阳江十里银滩<珠海香炉湾<阳江珍珠湾<揭阳资深港<深汕红泉沙滩<潮州海山岛<湛江东海岛,潮州海山岛和湛江东海岛的海滩 *GI* 值相对较大,塑料类垃圾较多,深汕红泉沙滩略低于平均水平,其他 5 个海滩 *GI* 小于 0.8,湛江金沙湾和阳江十里银滩海滩清洁情况最好。这从侧面印证了广东省高度重视海洋垃圾污染防治,定期组织清滩、清漂行动,取得了一定成效,由 2019 年(*GI*6.55)的“适度清

洁”等级提升到“非常清洁”。

根据 *HABLI* 结果,8 个海滩平均安全程度为“Ⅰ级”,为安全海滩,未见危险有害垃圾。各海滩安全情况排序为湛江金沙湾=阳江十里银滩<珠海香炉湾<阳江珍珠湾<揭阳资深港<深汕红泉沙滩<湛江东海岛<潮州海山岛,其中有 6 个海滩(75%)为“Ⅰ级”,潮州海山岛和湛江东海岛为“Ⅱ级”,属于适度安全,在较广范围内可见一些可能对海滩游客造成间接和直接健康风险的尖锐、穿刺(如碎金属)等危险有害垃圾^[11-12,17]。

在 *ESI* 方面,8 个海滩各类垃圾的丰度均不

超过1个/m²,被调查的海滩环境状况均为“良好”,表明广东省海滩环境健康。

2.4 管理对策

综合本研究调查结果,从源头治理、存量清理、观测预警角度提出以下对策建议,以期有效治理和监管海洋垃圾。

一是强化源头减量,控制垃圾入海增量。通过强化垃圾分类投放、收集和运输,完善垃圾分类、收集、转运、处置机制,加强陆源垃圾塑料管理,在塑料生产和使用的上、下游环节采取多方协同的系统性干预措施,推动生活垃圾源头减量。在不影响防洪安全的情况下,可在入海河口设置多道垃圾拦截网,减少陆域垃圾入河下海。强化渔业垃圾监管,督促养殖户及时更新、维护养殖器具,杜绝渔排、浮筏脱落形成垃圾,支持养殖户开展网箱、浮球、浮筏等的环保改造,做好废旧设施集中上岸处置。严厉打击非法倾废,通过岸上堵、海上查、集中清、从严罚,及时发现并依法查处违法倾倒行为。

二是开展存量清理,减少海洋垃圾污染。以沿海城市海洋垃圾清理行动方案等文件为重点,分段分片排查清理辖区岸线和海域的已有存量垃圾,做到海岸线以下可视范围内无明显垃圾堆存。结合实际采取无人机巡查、水面打捞、岸边清理等方式,对养殖集中区、潮流回旋区、湾内港内、岛屿周边等容易堆积垃圾的重点区域进行定时打捞,对台风、天文大潮退后的受灾区域进行及时清理。加强分类处置,对塑料、木材、泡沫等垃圾以回收再利用为主,对无法再次利用的垃圾进行无害化处理。鼓励多元共治实施海洋塑料垃圾治理和资源化回收利用。

三是加大观测预警,提高污染防治能力。加强海洋塑料垃圾调查摸底工作,丰富监测站点设置,拓宽监测范围,运用无人机航拍等技术手段,动态掌握海洋垃圾污染情况,发现问题及时整改清理。推动开展广东省近海塑料垃圾和微塑料来源、输移通量及其生态环境影响研究,加强对海洋垃圾防治发展趋势的跟踪、预判,研究识别海洋垃圾重点监控区域,制定长期监测制度,构建智能识别和预警系统,实现海洋垃圾的智慧监管。

四是加强环保宣传,打造多元共治格局。海洋垃圾污染治理是一项系统性工程,为有效解决广东省海洋垃圾状况,应将地方宣传部门、新闻媒体及自媒体等紧密联合,开展宣传报道和舆论监督。积极联合民间组织开展环保公益活动,普及海洋垃圾处置方法,组织志愿者或社会团体开展海滩清洁行动。鼓励社会公众反映海洋垃圾问题。加大对参与海洋垃圾治理的社会主体的激励力度,充分发挥公众力量,全面调动广大民众的环保积极性。通过多元化的宣传方式与途径,加大对沿岸居民以及参观游客的宣传教育,全面提高公民海洋垃圾污染防治意识。

3 结论

(1)广东省海洋垃圾以塑料类为主,占总量的47%~99%。海滩垃圾数量密度为43178个/km²,主要组分为塑料类、木制品类、玻璃类和纸类。海面漂浮垃圾数量密度为5634个/km²,主要组分为塑料类。海底垃圾数量密度为2747个/km²,主要组分为塑料类、织物类、木制品类和纸类。

(2)与丰水期相比,枯水期海洋垃圾数量较少,海滩、海底垃圾类型相同但主要组分存在差异,海面漂浮垃圾类型不同但主要组分相同。海洋垃圾主要为海滩垃圾,占总数的87.63%。聚类结果表明,11处海域(岸滩)的海洋垃圾可分为城市、乡郊、渔业、沿岸、潟湖、基岩、砂泥和建设等类型。

(3)海洋垃圾82%~86%来源于人类海岸活动和航运/捕鱼活动,海滩垃圾、海底垃圾分别约84%和74%来源于人类海岸活动,海面漂浮垃圾分别约44%和38%来源于航运/捕鱼活动和人类海岸活动。海滩质量指数显示,被调查海滩的清洁度为“非常清洁”,安全程度为“安全”或“适度安全”,健康状况为“良好”。

参考文献:

- [1] 孙伟,李焕军,徐艳东,等. 2009—2017年山东省海滩垃圾时空分布特征与来源分析研究[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(1): 133-137.
- [2] 潘永珩,高郭平,张春玲,等. 中国典型海滩垃圾组成和时空变化特征[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(1): 142-148.
- [3] SALADIÉ Ò, BUSTAMANTE E. Abundance and composi-

- tion of marine litter on the seafloor of the gulf of Sant Jordi (western Mediterranean Sea)[J]. *Environments*, 2021, 8(10): 106.
- [4] 许林之. 我国海洋垃圾监测与评价[J]. *环境保护*, 2008(19): 67-68.
- [5] UNEP. From Pollution to Solution: a global assessment of marine litter and plastic pollution[R]. Nairobi: United Nations Environment Programme, 2021.
- [6] 孙承君, 蒋凤华, 李景喜, 等. 海洋中微塑料的来源、分布及生态环境影响研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2016, 34(4): 449-461.
- [7] 国峰, 周鹏, 李志恩, 等. 2011年东中国海沿岸海域海洋垃圾分布、组成与来源分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2014, 36(3): 193-200.
- [8] 中华人民共和国生态环境部. 中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. [2024-02-02]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/>.
- [9] 广东省生态环境厅. 广东省生态环境状况公报[EB/OL]. [2024-02-02]. <https://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/>.
- [10] 赵蓓, 唐伟, 周艳荣, 等. 黄河入海主要污染物特征研究[J]. *海洋环境科学*, 2008, 27(增刊2): 60-62.
- [11] MUGILARASAN M, KARTHIK R, ROBIN R S, et al. Anthropogenic marine litter: an approach to environmental quality for India's southeastern Arabian Sea coast[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161363.
- [12] RANGEL-BUITRAGO N, VELEZ-MENDOZA A, GRACIA C A, et al. The impact of anthropogenic litter on Colombia's central Caribbean beaches[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 152: 110909.
- [13] SCHULZ M, NEUMANN D, FLEET D M, et al. A multi-criteria evaluation system for marine litter pollution based on statistical analyses of OSPAR beach litter monitoring time series[J]. *Marine Environmental Research*, 2013, 92: 61-70.
- [14] 赵肖, 綦世斌, 廖岩, 等. 我国海滩垃圾污染现状及控制对策[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(10): 1560-1566.
- [15] ZHOU P, HUANG C G, FANG H D, et al. The abundance, composition and sources of marine debris in coastal seawaters or beaches around the northern South China Sea (China)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(9): 1998-2007.
- [16] KANG B, LIN L, LI Y, et al. Facing marine debris in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 184: 114158.
- [17] MUGILARASAN M, KARTHIK R, PURVAJA R, et al. Spatiotemporal variations in anthropogenic marine litter pollution along the northeast beaches of India[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 280: 116954.
- (本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 695 页)

- [28] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [29] TAN M X, PANG R M, LE Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection[C]//Proceedings of 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE, 2020: 10781-10790.
- [30] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot MultiBox detector[C]//Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision. Amsterdam: Springer, 2016: 21-37.
- [31] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: an incremental improvement[J]. *arXiv*: 1804.02767, 2018.
- [32] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: optimal speed and accuracy of object detection[J]. *arXiv*: 2004.10934, 2020.
- [33] WANG H B, WANG Y X. Improved glove defect detection algorithm based on YOLOv5 framework[C]//Proceedings of the IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Beijing: IEEE, 2022: 1192-1197.
- [34] ZHENG G, LIU S T, WANG F, et al. YOLOX: exceeding YOLO series in 2021[J]. *arXiv*: 2107.08430, 2021.
- (本文编辑: 胡莹莹)