

# 夏季三亚半山半岛帆船港附近海域 水质环境特征分析\*

骆丽珍, 庞勇

(海南省海洋与渔业科学院 海口 570125)

**摘要:** 三亚半山半岛帆船港是海南第一座世界级的帆船港, 是“沃尔沃”国际帆船赛亚洲唯一经停港, 位于三亚珊瑚礁国家自然保护区实验区的北部边缘。为了解帆船港运营以来对附近海域的水质环境影响, 根据三亚半山半岛帆船港附近海域 2013 年 6 月的水质调查资料, 对该海域环境质量状况进行了分析, 运用单项水质参数法、水体有机污染指数法和富营养化指数法对三亚半山半岛帆船港附近海域水质进行分析和评价。结果显示: 帆船港附近海域水质主要受三亚河径流影响, 帆船港附近海域水质处于良好状态, 帆船港的运行未对附近海域的水质环境产生较大影响。采用主成分分析法得出影响海水富营养化的主要驱动因子, 结合历史资料分析, 提出对半山半岛帆船港水域环境质量的措施, 为相关部门提供管理的理论基础和技术支撑。

**关键词:** 半山半岛帆船港; 水质环境; 富营养化; 特征分析

中图分类号: P74; X824

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2015)11-0104-07

三亚湾地处海南岛最南端三亚市西南部, 平均水深约 15 m, 面积约 120 km<sup>2</sup>, 海水洁净。三亚半山半岛帆船港是海南第一座世界级的帆船港, 位于三亚湾东南方向, 三亚珊瑚礁国家自然保护区实验区的北部边缘, 是《三亚市城市总体规划》确定的旅游用地的集中区域, 也是三亚市生态旅游开发的重点区域。三亚半山半岛帆船港于 2011 年 11 月竣工, 是“沃尔沃”国际帆船赛亚洲唯一经停港。三亚半山半岛帆船港水上部分基础设施面积达 15 万 m<sup>2</sup>, 拥有 325 个全天候的泊位, 可以停靠 10~40 m 不等的船只, 并设有专门的小摩托艇停泊区域。根据 2013 年的水质调查结果, 运用单项水质参数法、水体有机污染指数法和富营养化指数法对三亚半山半岛帆船港附近海域水质进行了分析和评价, 同时采用主成分分析法得出影响海水富营养化的主要驱动因子, 并结合历史资料分析, 提出对半山半岛帆船港附近海域水质环境管理的措施, 为相关部门提供管理的理论基础和技术支撑。

## 1 材料和方法

### 1.1 样品采集与分析

2013 年 6 月对三亚半山半岛帆船港附近海域进行了水质环境的监测, 共设调查站位 22 个 (图 1)。

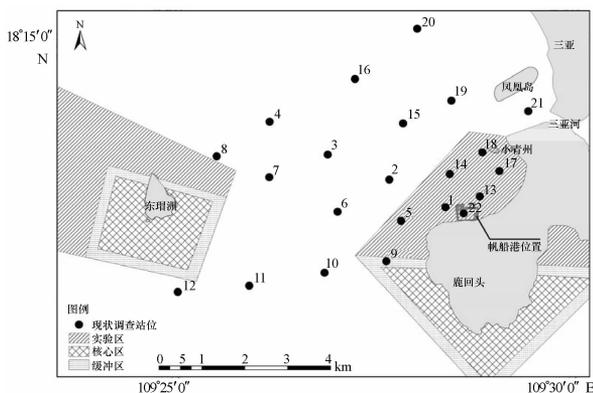


图 1 研究海域及站位

调查项目包括 pH、温度 (Tem)、盐度 (Sal)、溶解氧 (DO)、化学需氧量 (COD)、无机氮 (DIN)、

\* 基金项目: 海岸带主体功能区划分技术框架研究示范项目 (200905005-02); 国家海洋局公益性行业科研专项经费项目 (201005012-6)。

无机磷(DIP)、叶绿素 a(Chl-a)、石油类(Oil)、悬浮物(SS)、铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)和砷(As)等 16 项。

水质调查项目分别采集表层和底层水样进行监测,采样及其预处理与分析监测方法均根据《海洋监测规范》进行<sup>[1]</sup>。

## 1.2 评价方法

### 1.2.1 单项水质参数法

水质单因子污染指数计算公式为

$$S_i = \frac{C_i}{C_s} \quad (1)$$

式中: $S_i$  为某一水质要素的污染指数; $C_i$  为某一水质要素的实测值; $C_s$  为与  $C_i$  对应的水质要素的海水水质标准值。利用单因子水质参数法进行评价,水质评价因子的标准指数大于 1,则表明该项水质已超过了规定的水质标准。

### 1.2.2 水体有机污染指数法<sup>[2-4]</sup>

有机污染指数计算公式为

$$A = \frac{I_{\text{COD}}}{S_{\text{COD}}} + \frac{I_{\text{DIN}}}{S_{\text{DIN}}} + \frac{I_{\text{DIP}}}{S_{\text{DIP}}} + \frac{I_{\text{DO}}}{S_{\text{DO}}} \quad (2)$$

式中: $A$  为有机污染指数; $I_{\text{COD}}$ 、 $I_{\text{DIN}}$ 、 $I_{\text{DIP}}$ 、 $I_{\text{DO}}$  分别为化学需氧量、无机氮、无机磷及溶解氧的实测值; $S_{\text{COD}}$ 、 $S_{\text{DIN}}$ 、 $S_{\text{DIP}}$ 、 $S_{\text{DO}}$  分别为化学需氧量、无机氮、无机磷及溶解氧对应的海水水质标准。有机污染评价分级标准见表 1。

表 1 有机污染指数评价分级标准

A	污染程度分级	水质评价
<0	0	良好
0~1	1	较好
1~2	2	开始受到污染
2~3	3	轻度污染
3~4	4	中度污染
4~5	5	重度污染

### 1.2.3 富营养化指数法<sup>[3-4]</sup>

富营养化指数计算公式为

$$E = \frac{C_{\text{COD}} \times C_{\text{DIN}} \times C_{\text{DIP}}}{4 \ 500} \times 10^6 \quad (3)$$

式中: $E$  为富营养化指数; $C_{\text{COD}}$  为化学需氧量含量(mg/L); $C_{\text{DIN}}$  为无机氮含量(mg/L); $C_{\text{DIP}}$  为无机磷含量(mg/L)。当  $E > 1$  时,表明水体呈富营养化, $E$  值越高,水体富营养化程度越严重。

### 1.2.4 富营养化驱动因子的主成分分析法<sup>[5]</sup>

利用统计分析软件 SPSS 19.0 对海水水质进行主成分分析,对结果进行 KMO 检验以及 Bartlett 球形检验。当 KMO 检验数大于 0.6, Bartlett 球形检验显著性概率  $P < 0.05$  时,该组因子间相互独立,可以进行主成分分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要环境要素平面分布特征

根据监测结果,表层水温平均为 30.40℃,盐度平均为 33.345,pH 值平均为 8.10,化学需氧量含量的变化范围为 0.03~0.91 mg/L,最高值在 8 号站位表层,最低值在 3 号站位表层,靠近帆船港、三亚河河口及三亚湾浴场附近的站位化学需氧量相对较高。溶解氧含量变化范围为 6.35~8.80 mg/L,最高值在 21 号站位表层,最低值在 17 号站位表层,在三亚湾锚地区域及三亚河河口区域的溶解氧较高,鹿回头以南的站位溶解氧相对较低,较高区域主要受人类活动影响,尤其是锚地区,三亚湾主要的大型船舶均在该区域停泊。无机氮含量变化范围为 0.020~0.266 mg/L,最高值在 19 号站位表层,最低值在 12 号站位底层。无机磷含量变化范围为 0.0015~0.0072 mg/L,最高值在 19 号站位表层,最低值在 18 号站位底层。无机氮和无机磷的平面分布相似,主要受三亚河影响,从平面分布上看,在三亚河河口区及小青州至鹿回头沿岸区域的营养盐较高。个别站位的叶绿素 a 含量较高,19 号站位和 21 号站位表层测值较大,为 25.33 μg/L 和 17.66 μg/L,平均值为 2.95 μg/L;各测站表底测值有一定的差异,但是大都变化不大,从平面分布看,营养盐浓度高的区域叶绿素 a 的浓度也相应较高。表层油类含量变化范围为 0.008~0.019 mg/L,最高值在 21 号站位,最低值在 10 号站位,从油类的平面分布看,油类浓度较高的区域主要分布在三亚港航道区域,受往来船舶影响较大。

镉含量变化范围为 0.05~0.01 μg/L,最高值在 8 号站位底层,其中 1 号站位、5 号站位、11 号站位底层、12 号站位、13 号站位表层、14 号站位、16 号站位底层、17 号站位表层、19 号站位表层、20 号表层、21 号站位均未检出重金属镉,从平面分布看,帆船港南部的镉的含量较高,较高

的海域日常停靠较多的大型船舶,对该区的水质环境有一定的影响。铅含量变化范围为 0.07~0.90  $\mu\text{g/L}$ ,最高值在 12 号站位底层,最低值在 4 号站位表层,在三亚湾—小青州—帆船港沿岸一带含量较高,主要受游船影响较多。铜含量变化范围为 1.26~3.89  $\mu\text{g/L}$ ,最高值在 11 号站位底层,最低值在 13 号站位底层,主要在小青州—帆船港沿岸及锚地区含量相对较高。汞含量变化范围为 0.012~0.047  $\mu\text{g/L}$ ,最高值在 16 号站位底层,最低值在 9 号站位表层和 10 号站位底层;砷含量变化范围为 0.51~0.82  $\mu\text{g/L}$ ,最高值在 21 号站位底层,其中 2 号站位表层、3 号站位底层、6 号站位、7 号站位表层、9 号站位底层、10 号站位、11 号站位、18 号底层、20 号站位、22 号站位底层均未检出砷,汞和砷主要分布在三亚河河口及帆船港附近海域,受三亚河影响较大。

## 2.2 评价结果

### 2.2.1 单项水质评价结果

根据《海南省海洋功能区划》(2011—2020)和《海水水质标准》GB3097—1997 等相关要求,单项水质评价指数特征值见表 2,除了无机氮在三亚河河口超标外,其他站位均符合相应执行的标准。各评价因子的污染指数平均值最大为无机氮,其次是铜,最小值为砷,可见,半山半岛附近海域受三亚河影响较大,无机氮受径流影响尤其严重。根据单因子评价结果,超标因子无机氮主要分布于三亚河河口区域及小青州附近海域,主要超标原因是三亚河径流带来大量的无机氮。总体上看,三亚半山半岛帆船港附近海域水质处于良好的状态。

表 2 单项水质评价指数特征值

项目	COD	DO	DIN	DIP	Oil
污染指数最大值	0.30	0.77	1.25	0.36	0.32
污染指数最小值	0.01	0.00	0.08	0.05	0.03
污染指数平均值	0.09	0.23	0.34	0.15	0.17
超标站位数/个	0	0	1	0	0
站位超标率/%	0	0	4.54	0	0
项目	Cd	Zn	Cu	Hg	As
污染指数最大值	0.08	0.9	0.66	0.72	0.03
污染指数最小值	0.01	0.01	0.04	0.06	0.01
污染指数平均值	0.03	0.18	0.30	0.21	0.02
超标站位数/个	0	0	0	0	0
站位超标率/%	0	0	0	0	0

### 2.2.2 有机污染评价结果

根据有机污染评价分级标准,帆船港附近海域水质的有机污染指数计算结果见表 3,仅在 17 号站位及 18 号站位的表层有机污染指数在 0~1 之间,其他站位有机污染指数均小于零,可见,帆船港附近海域的水质有机污染程度较低,海水质量良好。

表 3 有机污染指数计算结果

站位/层次	A	站位/层次	A
1/表	-0.155	12/表	-0.558
1/底	-0.527	12/底	-0.940
2/表	-1.582	13/表	-0.045
2/底	-1.541	13/底	-0.382
3/表	-1.075	14/表	-0.845
3/底	-1.263	14/底	-0.512
4/表	-1.160	15/表	-1.289
4/底	-0.998	15/底	-1.434
5/表	-0.495	16/表	-1.017
5/底	-0.590	16/底	-0.623
6/表	-1.542	17/表	0.007
6/底	-1.708	17/底	0.183
7/表	-1.245	18/表	0.393
7/底	-1.041	18/底	-0.323
8/表	-1.083	19/表	-1.048
8/底	-1.298	19/底	-1.602
9/表	-0.462	20/表	-0.897
9/底	-0.598	20/底	-0.779
10/表	-1.432	21/表	-1.578
10/底	-1.454	21/底	-1.571
11/表	-1.458	22/表	-0.500
11/底	-1.475	22/底	-0.415

### 2.2.3 富营养化评价结果

研究海域富营养化指数计算结果见表 4,所监测站位中富营养化指数  $E$  值最大值为 0.285,最小值为 0.001,所有站位  $E$  值均小于 1,表明该海域海水水质良好。

表 4 富营养化指数计算结果

站位/层次	$E$	站位/层次	$E$
1/表	0.039	12/表	0.008
1/底	0.005	12/底	0.000

续表

站位/层次	E	站位/层次	E
2/表	0.009	13/表	0.039
2/底	0.011	13/底	0.012
3/表	0.002	14/表	0.002
3/底	0.004	14/底	0.002
4/表	0.011	15/表	0.028
4/底	0.013	15/底	0.007
5/表	0.007	16/表	0.012
5/底	0.005	16/底	0.016
6/表	0.003	17/表	0.048
6/底	0.003	17/底	0.036
7/表	0.002	18/表	0.036
7/底	0.007	18/底	0.006
8/表	0.011	19/表	0.285
8/底	0.001	19/底	0.002
9/表	0.015	20/表	0.056
9/底	0.005	20/底	0.018
10/表	0.010	21/表	0.072
10/底	0.011	21/底	0.014
11/表	0.007	22/表	0.008
11/底	0.006	22/底	0.014

## 2.3 历史资料比较分析

三亚湾作为海南最南边的海湾,有其独特的海洋资源,近年来随着国际旅游岛的建设,三亚湾海洋环境质量逐渐受到大众的关注。

在 2001—2003 年期间,王汉奎等对三亚湾营养盐进行了研究<sup>[7]</sup>,无机氮的范围在 0.017~0.036 之间,无机磷的范围在 0.002~0.005 之间,营养化程度相对较弱;李巧香等对 2004—2008 年三亚湾海水水质进行了研究<sup>[8]</sup>,化学需氧量的变化范围在 0.080~1.380 之间,平均水平在 0.1~0.4 之间,最大值分布在三亚河河口区域,而溶解氧的水平基本上保持一致,没有较大的变化,营养盐年际水平变化不大,个别较大值主要分布在三亚河河口区域(表 6)。宋星宇等 2006 年夏季对三亚湾水质环境进行了调查<sup>[9]</sup>,海水表层水温平均为 28.12℃,表层盐度平均为 33.530, pH 值平均为 8.14,无机氮平均为 0.043 mg/L,最大值为 0.165 mg/L,无机磷平均为 0.005 mg/L,最大值为 0.017 mg/L。车志伟等在 2005—2008 年对三亚湾海水水质进行了研究<sup>[10-11]</sup>(表 6),主要的污染因子为油类、化学需氧量、无机氮和无机磷,其中个别区域的油类为四类海水水质标准,化学需氧量和无机氮为二类海水水质标准,无机磷超过了四类海水水质标准,水质较差的区域均位于三亚河河口区域。王慧棋等对 2009—2011 年三亚湾氮磷营养盐进行了研究<sup>[12]</sup>,个别站位的氮营养盐均超三类海水水质标准,无机氮最大值达到了 0.412 mg/L,无机磷最大值达到了 0.028,也超过一类海水水质标准。

综合各评价结果,结合何雪琴等<sup>[6]</sup>在 1998—1999 年对三亚湾水质状况的评价结果,三亚湾的水质状况主要受降雨和径流影响较大,尤其受三亚河影响,在三亚河口及三亚港港区测值均较高,河口水质接近严重污染,本文中单因子评价中仅在河口区域的站点 DIN 超标,可见,三亚湾海域水质受三亚河径流影响较大,而帆船港对附近海域水质的影响并不明显。

表 5 调查海域水质情况与历史资料的比较<sup>[8]</sup>

调查年份	范围/均值	COD	DO	DIN	DIP
2004	范围	0.080~0.320	6.300~6.490	0.030~0.047	0.004~0.040
	平均	0.176	6.404	0.036	0.013
2005	范围	0.110~1.380	6.760~7.490	0.037~0.066	0.003~0.006
	平均	0.396	6.977	0.045	0.005
2006	范围	0.220~0.270	6.400~6.510	0.015~0.058	0.006~0.015
	平均	0.253	6.458	0.027	0.009
2007	范围	0.140~0.260	6.350~6.760	0.023~0.036	0.002~0.014
	平均	0.194	6.549	0.027	0.005

mg/L

续表

调查年份	范围/均值	COD	DO	DIN	DIP
2008	范围	0.080~0.320	6.120~6.590	0.027~0.205	0.001~0.015
	平均	0.166	6.454	0.059	0.004
2013.6	范围	0.03~0.91	6.35~8.80	0.020~0.266	0.002~0.007
	平均	0.27	7.28	0.088	0.003

注:2004—2008 年数据来源于参考文献[8];2013 年数据来源于本研究。

表 6 调查海域水质情况与历史资料的比较<sup>[10-11]</sup>

mg/L

调查时间	范围/均值	Oil	Sal	pH	COD	DO	DIN	DIP
2005.4	范围	0.022~0.209	33.336~33.713	8.13~8.19	0.22~0.38	6.73~7.20	0.007~0.092	0.004~0.133
	平均	0.086	33.529	8.17	0.29	6.91	0.037	0.048
2005.9	范围	0.030~0.305	18.870~33.748	7.88~8.13	0.03~2.96	5.74~7.09	0.036~0.255	0.006~0.417
	平均	0.084	31.277	8.06	0.70	6.73	0.084	0.066
2006.4	范围	0.003~0.230	34.121~34.717	8.04~8.16	0.14~1.46	6.14~8.02	0.008~0.135	0.001~0.090
	平均	0.065	34.206	8.08	0.65	7.55	0.053	0.015
2006.9	范围	0.025~0.302	32.790~33.849	8.11~8.17	0.09~1.54	6.63~6.82	0.006~0.105	0.001~0.080
	平均	0.083	33.572	8.12	0.88	6.74	0.027	0.013
2008.4	范围	0.013~0.037	31.253~33.586	8.03~8.13	0.23~0.66	6.28~6.91	0.021~0.101	0.001~0.010
	平均	0.021	32.377	8.07	0.46	6.69	0.050	0.004
2013.6	范围	0.008~0.019	32.015~33.598	8.01~8.18	0.03~0.91	6.35~8.80	0.020~0.266	0.002~0.007
	平均	0.012	33.345	8.10	0.27	7.28	0.088	0.003

注:2004—2008 年数据来源于参考文献[10-11];2013 年数据来源于本研究。

本研究主要污染因子无机氮,结合历史资料分析可知,主要的超标区域位于三亚河河口区域,根据近 10 年的数据分析,三亚河径流带来的大量营养物质,是三亚湾营养盐超标的主要原因,而半山半岛帆船港的建设及运营,并未直接对其附近海域的水质环境产生影响。

### 3 讨论

海洋环境中各种因子之间关系复杂,现场调查的环境因子较多,数据量大,要从大量数据中找出一定的规律,了解海区的实际情况,必须对各种因子进行选择取舍,采用多元统计分析方法是一种可行性较高的分析方法。其中,主成分分析方法就是以去掉冗繁多余信息来提高分析的准确性为目的的方法,这也是目前环境因子综合分析的常用方法。三亚湾水质环境受到多种环境因子的共同制约,因此,主成分分析法可以从众多环境因子中找到影响三亚湾水质环境的主

要因子。选择温度(Tem)、盐度(Sal)、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、油类(Oil)、无机氮(DIN)和无机磷(DIP)等可能影响到三亚湾水质的环境因子进行综合分析,筛选出影响帆船港附近海域水质环境的主要因子。KMO 的统计量为 0.6, Bartlett 球形检验的  $P=0.04$ ,因而可以做因子分析。

根据特征值大于 1 的原则,从原来的 7 个变量中共提取了 3 个主成分,原来的 7 个变量重新组合后变成 3 个变量,方差的积累贡献率达 68.721%,因此,这 3 个主成分能够比较全面地反映原来的 7 个环境因子的信息(表 7)。第一主成分 F1 的方差贡献率最高,达到 30.446%,第二主成分(F2)和第三主成分(F3)的方差贡献率分别为 24.241%和 14.034%。从各因子的载荷矩阵得知,盐度、化学需氧量、溶解氧、温度和油类在第一主成分上有较高载荷,其中温度和盐度的

相关系数较高,超过 0.7。pH 和无机氮在第二主成分上有较高的载荷,相关系数均大于 0.6。无机磷在第三主成分上具有较高的载荷,相关系数也超过了 0.6。

对提取出来的 3 个主成分进行进一步的分析,F1 中盐度、温度和化学需氧量占的荷载较大。根据相关分析(表 8)。盐度与温度、溶解氧、化学需氧量、油类、无机氮和无机磷均呈显著负相关,而盐度主要受三亚河径流影响,径流携带陆源污染物,能间接反映海域的初级生产力水平和浮游植物量,因此,在 F1 中主要反映径流对海域环境的影响状况;F2 中,占主导作用的是 pH,无机氮也有较高荷载,pH 与海洋酸碱度有直接关系,而海洋中酸碱度主要受降雨、沿岸酸性污染,由此可知,F2 主要是反映降雨和沿岸污染对帆船港附近海域环境的影响。F3 中占主导作用的是无机磷,无机磷能够反映生活污水排放对海域环境的影响状况。根据各主成分的贡献率可知,帆船港附近海域的水质环境主要受三亚河径流和沿岸生活污水排放的影响。

根据因子载荷矩阵,结合特征值,利用  $A = B/\text{SQR}(I_0)$ 。  $I_0$  为相应的特征值,可以得到因子的特征向量矩阵,再结合主成分的方差贡献率,得到考虑方差贡献率的特征向量矩阵,因此,帆船港附近海域影响海洋环境质量的主要影响因

子由大到小依次为:无机磷、油类、pH、溶解氧、盐度、无机氮、温度、化学需氧量。

表 7 主成分分析结果—因子载荷和解释方差

参数	主成分 1	主成分 2	主成分 3
COD	0.609	0.311	-0.304
DO	0.551	-0.525	0.431
DIP	0.208	0.256	0.694
Tem	0.702	0.546	-0.048
Sal	-0.857	0.042	0.077
pH	0.377	-0.783	0.232
Oil	0.508	-0.397	-0.499
DIN	0.301	0.656	0.229
特征值	2.436	1.939	1.123
方差贡献率/%	30.446	24.241	14.034

由以上分析可知,三亚河径流和沿岸生活污水排放对帆船港附近海域的水质环境状况影响最为显著。近年来,随着国际旅游岛建设的不断推进,三亚作为海南的旅游胜地,吸引了大量的外来游客,由此给三亚海洋环境带来巨大的压力,同时由于城市基础设施落后经济的发展,导致大量的污染物无序排放,使近海海洋环境面临着巨大挑战。

表 8 环境因子的相互关系

参数	概率	COD	DO	DIN	DIP	Oil	Tem	Sal	pH
COD	P.	1.000							
DO	P.	0.053	1.000						
DIN	P.	0.181	-0.003	1.000					
DIP	P.	0.155	0.120	0.227	1.000				
Oil	P.	0.154	0.094	-0.208	-0.118	1.000			
Tem	P.	0.466(*)	-0.083	0.606(**)	0.244	0.087	1.000		
Sal	P.	-0.105	-0.124	-0.458(*)	-0.292	-0.248	-0.430(*)	1.000	
pH	P.	-0.227	0.634(**)	-0.215	0.017	0.309	-0.147	-0.025	1.000

注: \*\* Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed); \* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

#### 4 结论及建议

(1) 三亚半山半岛帆船港附近海域水质处于良好的状态,帆船港的运营未对附近海域的水质环境产生较大影响,该海域水质主要受三亚河径流影响。

(2) 为确保帆船港运营中保持周边良好的水质环境,需加强管理,制定码头调度和运行的规章制度,并不断持续改进,不断完善;及时配备各项安全生产设备、设施,完善废水收集系统,包括生活污水、船舶含油废水收集、处理及达标处置,

严禁污水直排入海;做好环保宣传和员工的技术、素质培训,增强员工的生态保护意识;制定污染事故应急预案,防止污染物外排、溢油等事故造成海洋环境污染。

(3)帆船港位于三亚国家级珊瑚礁自然保护区范围内,属于非常敏感的区域,建议定期对帆船港及附近海域开展环境监测,了解港口及附近海域海洋环境状况,减小对周边环境影

## 参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局和国家标准化管理委员会. GB 17378—2007 中华人民共和国国家标准:海洋监测规范[M]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [2] 杨新梅,陈志宏,焦亦平,等. 大连湾海水环境质量状况分析[J]. 海洋环境科学,2001,20(4):18—20.
- [3] 邹景忠,董丽萍,秦保平. 渤海湾富营养化与赤潮问题的初步探讨[J]. 海洋环境科学,1983,2(2):41—54.
- [4] 于子江,崔文林,杨建强. 青岛奥运帆船赛区及邻近海域海水环境质量分析与评价[J]. 城市环境与城市生态,2004,17(3):25—26.
- [5] 韩秀荣. 长江口及邻近海域浮游植物生长的多环境效应因子影响解析研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2009.
- [6] 何雪琴,温伟英,何清溪. 海南三亚湾海域水质状况评价[J]. 台湾海峡,2001,20(2):165—170.
- [7] 王汉奎,董俊德,王友绍,等. 三亚湾近3年营养盐含量变化及其输送量的估算[J]. 热带海洋学报,2005,24(5):90—95.
- [8] 李巧香,周永召,李鹏山. 夏季三亚湾近岸海域海水水质状况分析与评价[J]. 海洋湖沼通报,2010,3:100—106.
- [9] 宋星宇,谭焯辉,黄良民. 三亚湾春夏季初级生产力的分布特征及环境影响研究[J]. 海洋环境科学,2011,30(1):19—23.
- [10] 车志伟. 三亚湾海域关键水质因子的监测与评价[J]. 海南大学学报:自然科学版,2007,25(3):297—304.
- [11] 车志伟,车志胜,李刚. 三亚湾海域环境质量现状调查与评价[J]. 海南大学学报:自然科学版,2009,22(1):70—72.
- [12] 王慧棋,潘剑宇,车志伟. 三亚湾海水中无机氮、无机磷的时空分布和氮磷比值变化研究[J]. 科技传播,2012,9(1):99—100.

\*\*\*\*\*  
(上接第97页)

## 参考文献

- [1] VALDES J, VARGAS G, SIFEDDINE A, et al. Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23°S), Northern Chile; geochemical and statistical approach[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005,50:1558—1568.
- [2] SIN S N, CHUA H, LO W, et al. Assessment of heavy metal cations in sediment of Shing Mun River, Hong Kong[J]. Environmental International, 2001,26:297—301.
- [3] 陈静生,邓宝山,陶澍,等. 环境地球化学[M]. 北京:海洋出版社,1990:196—235.
- [4] BRICH G F, TAYLOR S E, MATTHAI C, et al. Small-scale spatial and temporal variance in the concentration of heavy metals in aquatic sediment: a review and some new concepts[J]. Environmental Pollution, 2001,113:357—372.
- [5] GB17378.5—2007, 海洋监测规范—第5部分:沉积物分析[S].
- [6] 甘华阳,梁开,郑志昌. 珠江口沉积物的重金属背景值及污染评价分区[J]. 地球与环境,2010,38(3):344—350.
- [7] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control—a sediment logical approach[J]. Water Res., 1980,14:975—1001.
- [8] 国家技术监督局. GB 18668—2002 海洋沉积物质量[S]. 北京:中国标准出版社,2002.
- [9] 张际标,刘加飞,张才学,等. 湛江表层沉积物重金属分布及污染评价[J]. 海洋环境科学,2012,31(5):644—648.
- [10] 左平,汪亚平,程珺,等. 深圳湾近岸海域表层沉积物中重金属污染评价[J]. 海洋通报,2009,28(1):50—54.
- [11] 罗先香,张蕊,杨建强,等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报,2010,19(2):262—269.
- [12] 张玉凤,王立军,霍传林,等. 锦州湾表层沉积物中重金属污染状况评价[J]. 海洋环境科学,2008,27(3):258—260.
- [13] ZHOU Feng, GUO Huaicheng, HAO Zejia. Spatial distribution of heavy metals in Hong Kong's marine sediments and their human impacts: A GISP-based chemometric approach[J]. Marine Pollution Bulletin, 2007,54:1372—1384.
- [14] TRANCHINA L, BASILE S, BRAL M, et al. Distribution of heavy metals in marine sediments of Palermo Gulf (Sicily, Italy) [J]. Water Air Soil Pollut, 2008,191:245—256.
- [15] 陈旭英,何增耀,吴建平. 土壤中铬的形态及其转化[J]. 环境科学,1994,15(3):53—57.
- [16] 刘芳文,颜文,黄小平,等. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征[J]. 热带海洋学报,2003,22(5):16—24.
- [17] ADAMO P, ARIENZO M, IMPERATO M, et al. Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port[J]. Chemosphere, 2005,61:800—809.