

大丰近岸海域水质污染特征及来源

艾洋漪¹, 徐 敏², 丁言者³, 徐文健²

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

(2. 南京师范大学海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

(3. 国家海洋局南通海洋环境监测中心站, 江苏 南通 226002)

[摘要] 依据大丰海域 20 个采样站位 12 种水质要素含量(盐度、化学需氧量、溶解氧、活性磷酸盐、无机氮、石油类、Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 As), 采用单因子指数法评价水质污染水平, 应用聚类分析法识别水质污染分区, 通过主成分分析法解析水质污染来源。结果表明: 大丰海域水质环境总体良好, 无机氮和磷酸盐是主要超标因子; 空间聚类分析显示, 大丰海域水质污染分布整体表现为南低北高、由岸向海逐渐升高的特征; 主成分分析结果显示, 研究区水质污染来源包括陆源污染的输入(营养盐、Cd、As)、海水养殖污染(营养盐、Cu)、港口污染(石油类、Zn、Pb、Hg)。

[关键词] 海水水质, 营养盐, 重金属, 大丰海域

[中图分类号] X82 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2019)04-0153-09

Characteristics and Sources of Water Pollution in the Coastal Waters of Dafeng, Jiangsu Province, China

Ai Yangyi¹, Xu Min², Ding Yanzhe³, Xu Wenjian²

(1. School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. College of Marine Science and Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3. Nantong Marine Environmental Monitoring Center, Nantong 226002, China)

Abstract: According to the content of 12 water quality elements (salt, COD, DO, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, inorganic nitrogen, oil, Cu, Pb, Zn, Cd, Hg, As) in 20 sampling stations in Dafeng sea area, the single factor index method was used to evaluate the water pollution level, the clustering method was used to identify the pollution area, and the source of pollution was analyzed by principal component analysis. The results show: The water quality environment in Dafeng Sea is generally good, and inorganic nitrogen and phosphate are the main over-standard factors; The overall spatial distribution of pollution is characterized by a low south and a high north and a gradual increase from the shore to the sea; Principal component analysis results display, sources of pollution include the input of terrestrial pollution in Dafeng District (nutrient salts, Cd, As), the effects of marine aquaculture (nutrient salts, Cu), port pollution (oil, Zn, Pb, Hg).

Key words: sea water quality, nutrients, heavy metals, Dafeng sea area

近岸海域作为海洋与陆地的过渡地带, 有着优越的自然条件和丰富的资源, 是区域经济繁荣区和人口集中地, 其生态系统受人为活动、水动力条件及咸淡水交换等诸多因素影响^[1]。随着近岸海域聚拢效应日趋显著, 一系列海洋开发活动加速推进, 使近岸海域面临的压力越来越大^[2]。沿海人口增长和经济活动导致大量营养盐以及重金属元素等陆源污染物质输入近岸海域^[3-4], 滩涂养殖业、港口航运业等海上产业更是直接加重近岸海域生态环境污染^[5]。近岸海域作为受纳体, 海洋生态系统与资源开发的矛盾日益突出^[6]。江苏沿海正处于高速工业化、城市化以及围垦开发的进程中, 资源可持续利用能力逐渐丧失, 许多方面的承载力已达到饱和^[7]。《2017 年江苏省海洋环境质量公报》显示, 虽然江苏近海域环境总体良好, 但在重点排污口邻近海域环境污染依然严重, 劣于四类海水水质标准的海域面积占全省海域总面积的

收稿日期: 2019-05-12.

基金项目: 国家自然科学基金(41373112).

通讯联系人: 徐敏, 教授, 博士生导师, 研究方向: 海洋资源与环境. E-mail: xumin0895@njnu.edu.cn

6.12%, 主要超标物为无机氮, 含量年均值为 0.257 mg/L^[8].

大丰海域位于江苏省沿海的中部, 拥有江苏苏北沿海三大深水港区之一的大丰港, 且大丰沿海滩涂是亚洲东方最大的湿地, 面积广袤、物种资源丰富, 具有重要的生态价值和经济价值^[9]. 在“海上盐城”的战略决策下, 大丰区大力实施产田改造、垦荒、匡围、潮间带四大工程的建设^[10], 伴随港区的发展与运营及周边滩涂湿地的开发利用, 污染物源源不断地输入, 严重影响大丰海域生态环境的健康. 张晓昱于 2013 年针对大丰港海域春秋富营养化进行了研究, 结果显示大丰港海域富营养化程度较高, 水质状况较差^[11]. 本文以大丰近岸海域为研究区域, 结合聚类分析法和主成分分析法, 对近岸海水水质的污染特征及污染来源作剖析, 旨在为大丰海域污染防治提供科学参考依据, 对维护区域的生态系统健康及可持续发展具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大丰海域位于江苏苏北沿海的辐射沙洲区, 北侧有射阳港区, 东侧有小阴沙作为掩护, 南侧是江苏省盐城珍禽自然保护区, 西侧分布有四卯西河、王港河、竹港河等入海河流. 大丰海域海岸平直, 走向 NNW-SSE, 属堆积型粉砂淤泥质海岸. 岸外的西洋水道是江苏沿海辐射沙洲群中最北面及距岸最近的一条深水潮汐水道. 潮流特征整体表现为涨潮流偏南, 落潮流偏北. 2005 年大丰港区开港运营, 目前已建 31 个泊位, 港区西侧 8 万 km² 的匡围工程于 2002 年完成, 用于发展临港工业. 研究区养殖活动主要为围海养殖和开放式养殖. 沿海经济的发展给研究区带来了机遇, 也带来源源不断的污染物质, 海洋生态环境面临着巨大压力.

1.2 样品采集和处理

2015 年 11 月 14~15 日在研究区进行了一个航次的水质调查采样, 共布设 20 个采样站位(图 1). 调查当日天气晴朗, 海况 2~3 级, 20 个站位水深范围为 2.4~18.0 m, 平均水深 10.1 m. 调查要素共 12 个, 分别为盐度、化学需氧量、溶解氧、磷酸盐、石油类、无机氮、汞、锌、铅、镉、铜、砷.

油样品的采集均只采表层样, 采样深度 0.1~1 m, 采用抛浮式采油器采集. 其他水样使用卡盖式采水器分层进行采集, 测定水层分为表层和底层, 采水量为 20 L. 水样采上船甲板后, 严格按照《海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析》(GB 17378.4—2007)^[12] 要求, 按已标号顺序进行分装、预处理及封装, 外业结束后将样品放置聚乙烯材质运输箱装箱运回南通海洋监测中心站实验室进行分析.

参照《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)^[13] 的标准要求, 样品测试分析时, 盐度采用实验室盐度计

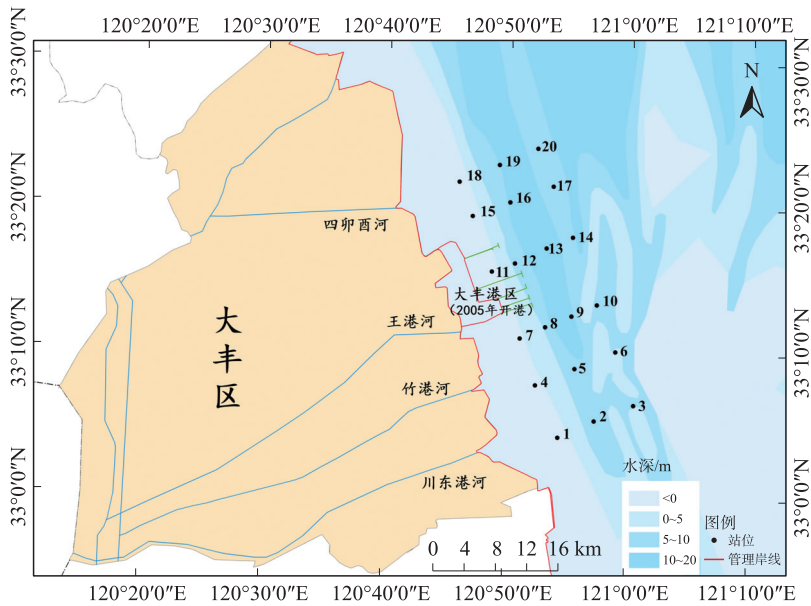


图 1 采样站位图

Fig. 1 Location of sample sites

法;化学需氧量采用碱性高锰酸钾法;溶解氧采用碘量法;活性磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法;石油类采用荧光分光光度法,分析仪器为 WFY-28 型荧光分光光度计;N 元素利用锌镉还原法、萘乙二胺分光光度法和次溴酸盐氧化法分别测定;Hg 和 As 采用原子荧光法,分析仪器为 XGY-1011A 型原子荧光光度计;Zn 采用火焰原子吸收分光光度法,测试仪器为普析 TAS-986FG 原子吸收光谱仪;Cu、Pb 和 Cd 均采用无火焰原子吸收分光光度法,测试仪器为 PinAAcle 900T 型原子吸收分光光度计。在水质的分析过程中均使用标准物质配备溶液,并利用平行样严格质控,双样平行的相对偏差 $\leq 30\%$,在要求范围内,合格率为 100%。

1.3 主要方法

(1) 单因子指数评价法

水质现状采用单因子指数法进行质量评价,单因子评价法是当前我国水质评价的主要方法^[14],将各水质指标监测结果与规范规定的水质类别目标值作对比,以最差指标对应的水质类别作为所评价水体的水质类别^[15]。计算公式如下^[14]:

$$S_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{is}}, \quad (1)$$

式中, S_{ij} 为第 i 站评价因子 j 的标准指数; C_{ij} 为第 i 站评价因子 j 的测量值; C_{is} 为评价因子 j 的评价标准值。

DO 评价指数如下^[14]:

$$P_{DO} = \frac{|DO_f - DO|}{DO_f - DO_s}, \quad DO \geq DO_s, \quad (2)$$

$$P_{DO} = 10 - 9 \frac{DO}{DO_s}, \quad DO < DO_s, \quad (3)$$

其中, DO_f 为饱和溶解氧的浓度, $DO_f = \frac{468}{31.6 + T}$, T 为水温($^{\circ}\text{C}$)。DO 为溶解氧的实测浓度, DO_s 为溶解氧的评价标准值。

(2) 主成分分析法

主成分分析法(PCA)能够从众多变量中筛选出主要独立的综合因子^[16],在保留原始主要信息的同时,使彼此之间不相关,比原始变量具有优势,目前已被广泛应用于海水污染分析和研究中^[17-20]。本文采用数理统计软件 SPSS21.0 系统,将实验数据导入 SPSS21.0 系统中,执行命令:分析-描述统计-描述,得到标准化处理的数据;对标准化数据执行:分析-相关-双变量命令,即得变量相关系数矩阵;并依据元素矩阵 KMO 值均大于 0.6 和 Bartlett 球形检验 P 值小于 0.05 的要求,确认原始数据之间是否具有相关性,从而判定是否适合主成分分析。按照特征值 >1 和累积方差贡献率 $\alpha \geq 80\%$ 的主成分原则提取主成分。根据主成分分析结果,运用 ArcGIS10.2 插值法绘制空间分布图。

(3) 聚类分析方法

聚类分析是将研究的对象按特性进行分类,目的是辨认在某些特征上相似的事物,并将其划分成若干类,使得同一类事物具有高度共质性,而不同类的具有高度相异性^[21]。

本文利用数理统计软件 SPSS21.0,以主成分得分为原始数据,执行命令:分析-分类-系统聚类,类与类间距离选择组间连接法,得到计算结果以便进一步分析。

2 结果与分析

2.1 含量特征

研究区 20 个站位的水质调查要素含量特征如表 1 所示。根据《海水水质标准》(GB 3097—1997),无机氮 30% 站位劣于四类海水水质标准,所有站位磷酸盐均符合第四类海水水质标准,化学需氧量符合第二类标准,溶解氧、石油类、汞、砷、铜、铅、锌、镉均符合第一类海水水质标准。总体来看,大丰海域水质情况良好,主要超标因子为磷酸盐和无机氮。与 2015 年江苏省近岸海域水质因子平均水平比较,大丰海域的无机氮和磷酸盐的值要远远高于平均值;与其他海域对比,大丰海域重金属含量值低于烟台港和海湾湾,其他因子差异较小。各项水质调查要素变异系数值变化在 2.1%~45.2%,说明大丰海域水质元素离散型相

对较小,分布较均匀.

表 1 水质调查要素含量特征表
Table 1 Concentration of water quality factors

调查要素	单位	最大值	最小值	平均值	变异系数	一类标准	所属类别	海州湾 (2009) ^[22]	江苏省近岸 (2015 年) ^[23]	烟台港 (2015 年) ^[24]
盐度	‰	28.562	26.575	27.600	2.1%	—	—	27.81	—	—
溶解氧	mg/dm ³	8.680	7.928	8.460	2.2%	6	一类	10.08	7.90	8.21
化学需氧量	mg/dm ³	2.280	1.195	1.570	18.5%	2	二类	1.85	0.97	0.79
石油类	mg/dm ³	0.048	0.033	0.040	9.5%	0.05	一类	—	0.016	0.036
磷酸盐	μg/dm ³	33.00	17.85	24.31	16.7%	15	四类	19.98	14	36.0
无机氮	μg/dm ³	746.32	249.54	439.00	28.3%	200	劣四类	490.95	329	401
汞	μg/dm ³	0.05	0.01	0.03	37.7%	0.05	一类	0.07	0.025	—
砷	μg/dm ³	2.70	0.89	1.43	42.1%	20	一类	—	2.41	—
铜	μg/dm ³	4.51	2.09	3.07	22.7%	5	一类	3.30	2.6	5.0
铅	μg/dm ³	0.97	0.21	0.57	34.6%	1	一类	3.96	1.09	1.1
锌	μg/dm ³	16.7	7.76	11.76	24.8%	20	一类	18.15	14.16	20
镉	μg/dm ³	0.19	0.04	0.07	45.2%	1	一类	—	0.10	2.0

《海水水质标准》(GB 3097—1997)

2.2 污染分区

通过对 20 个站位调查水质要素进行聚类分析,根据污染环境相似程度划分成多个类群. 聚类分析中“距离”表示量化后样本间的相似程度. 为了将站位进行合理分类使分区特征更明显,并给予详细的解释说明,本文分别对距离系数 10 和距离系数 20 的分类结果进行分析. 选取距离系数 10 作为阈值(图 2 实线表示),20 个站位可分为 6 类. 第 1 类包括站位 18(四卯西河口);第 2 类包括站位 7、11、12(王港河口);第 3 类包括站位 1、4、15(四卯西河口、竹港河口、川东港河口);第 4 类包括站位 3、5、6、8、9、10、14(大丰港区南侧外部海域);第 5 类包括站位 2、16、19、20(川东港河口外侧、四卯西河口外侧);第 6 类包括站位 13、17(四卯西河、王港河外侧海域). 将距离系数设为 20 时(图 2 虚线表示),可将站位分为 3 类. 第 1、4、7、11、12、15(大丰港区近岸海域)可以归为第一类;站位 3、5、6、8、9、10、14(大丰港区南侧外部海域)归为第二类;站位 2、13、16、17、18、19、20(大丰港区北侧外部海域)归为第三类. 由聚类分区图(图 3)直观显示,大丰海域水质污染表现出明显的空间差异,主要呈现为南北区域差异(南高北低)、河口和远岸的区域差异(由岸向海逐渐增大),并且四卯西河口(18 号站位)与其他站位存在明显差异性.

2.3 污染源解析

采用数理统计软件 SPSS21.0 对各调查要素进行运算和分析,将数据进行标准化后计算出相关系数矩阵,结果见表 2. 原始数据中化学需氧量和盐度的相关系数绝对值为 0.672,和无机氮、磷酸盐的相关系数绝对值分别为 0.653、0.640,磷酸盐和无机氮的相关系数为 0.702,Cu 和无机氮的相关系数为 0.678,Cd 和 Cu、Zn 的相关系数为 0.619、0.682,这些系数均大于 0.5,说明这些指标之间存在较强的相关性. 由 KMO-巴特利特球形检验,KMO 检验值为 0.607(大于 0.5),趋近于 1,并且 Bartlett 球形度检验中 sig 值为 0.000,小于 0.05. 综合以上内容,说明变量之间存在相关性,不相互独立,满足主成分分析的要求^[25].

以海水水质调查要素为变量作主成分分析,按照特征值>1 的主成分原则,研究区 12 种调查要素中共提取了 4 个主成分(表 3),主成分方差累积贡献率为 80.771%(大于 80%),能够反映原始数据的大部分信息.

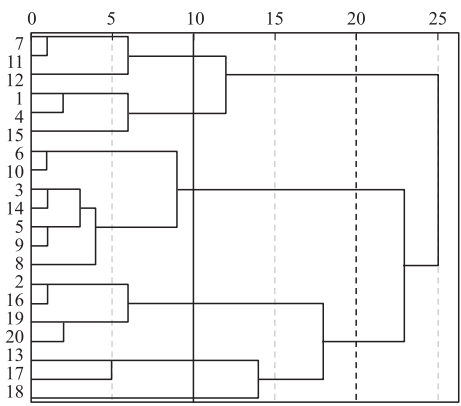


图 2 20 个站位调查要素聚类树状图
Fig. 2 20 station survey elements clustering tree

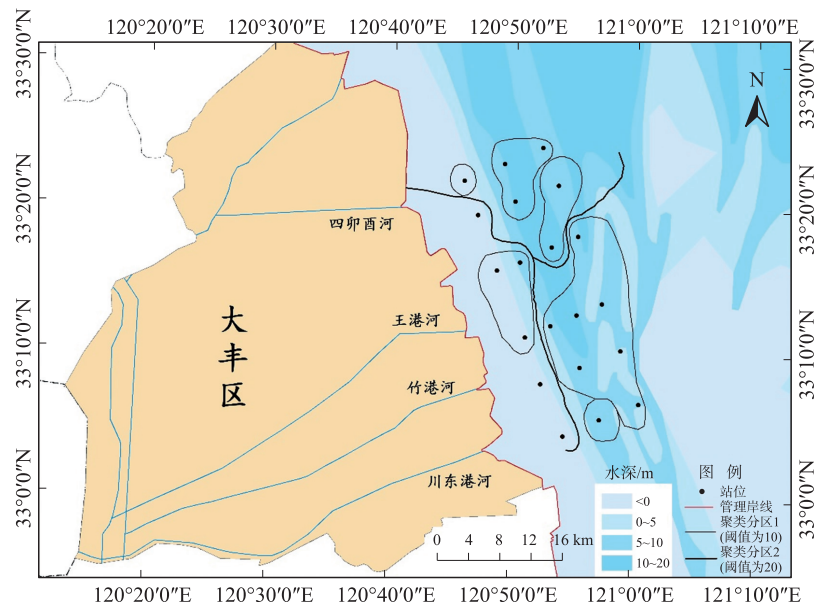


图 3 调查站位聚类分区

Fig. 3 Survey station clustering partition

表 2 站位各调查要素相关系数矩阵

Table 2 Correlation coefficient matrix of each survey element of station

指标	化学 需氧量	盐度	石油类	磷酸盐	无机氮	溶解氧	汞	砷	铜	铅	锌	镉
化学需氧量	1											
盐度	-0.672	1										
石油类	0.559	-0.619	1									
磷酸盐	0.640	-0.560	0.567	1								
无机氮	0.653	-0.222	0.335	0.702	1							
溶解氧	-0.175	-0.098	-0.176	-0.138	-0.290	1						
汞	0.095	-0.149	0.210	0.452	0.215	-0.230	1					
砷	0.402	0.005	0.151	0.297	0.580	-0.077	-0.174	1				
铜	0.294	0.012	0.102	0.403	0.678	-0.407	0.143	0.600	1			
铅	0.013	0.094	-0.200	0.116	0.095	-0.108	0.379	0.231	0.024	1		
锌	0.235	0.183	-0.182	0.118	0.358	0.071	-0.097	0.742	0.450	0.239	1	
镉	0.583	-0.042	0.142	0.237	0.596	-0.425	-0.188	0.737	0.619	0.074	0.682	1

F1(第 1 主成分)贡献率最大,为 37.149%,涉及调查要素有无机氮、磷酸盐、化学需氧量、Cd、As 和 Cu,均与其呈正相关,其中无机氮的载荷值最高为 0.872. 无机氮和磷酸盐作为营养盐的主要因子,F1 主要表现为营养盐污染和重金属污染. 根据调查要素各主成分得分系数矩阵和原始数据计算得到各站位主成分得分(表 4),各站位主成分空间分布如图 4 所示. F1 空间分布(图 4(a))整体表现为南低北高,高值区集中于四卯西河口和王港河口海域,反映 F1 主要为来自于四卯西河口、王港河口等陆源污染物的输入. 四卯西河与王港河是大丰区重要排污口,接纳两岸农田和乡镇的污水,河口附近分布有海水养殖区域,北侧是江苏大丰麋鹿国家级自然保护区^[26]. 《2017 年江苏省海洋环境质量公报》显示,王港排污区排污口在全年的 4 次监测中均表现为超标排放^[8],

表 3 初始因子载荷矩阵

Table 3 Initial factor load matrix

调查要素	主成份			
	F1	F2	F3	F4
无机氮	0.872	-0.013	0.086	-0.053
化学需氧量	0.792	-0.345	-0.243	0.097
镉	0.786	0.438	-0.185	-0.172
砷	0.737	0.487	-0.165	0.200
磷酸盐	0.730	-0.482	0.160	0.166
铜	0.725	0.306	0.151	-0.289
盐度	-0.386	0.737	0.282	-0.224
石油类	0.481	-0.665	-0.193	-0.126
锌	0.529	0.662	-0.088	0.353
汞	0.193	-0.404	0.788	0.115
铅	0.153	0.201	0.668	0.500
溶解氧	-0.361	-0.036	-0.419	0.737
特征根	4.458	2.502	1.544	1.189
贡献率/%	37.149	20.848	12.863	9.911
累积贡献率/%	37.149	57.997	70.860	80.771

入海河流污染程度加剧会直接影响海域水体的环境质量. 农业活动为农作物提供肥料的同时, 也加剧了海水营养盐污染. 农业生产过程常用到的杀虫剂、除草剂中含有重金属 As 元素^[27]; 化肥是重金属 Cd 的主要来源, 因此化肥的生产和使用也会导致水质中 Cd 的含量增加^[28-29]. 据 2016 年《中国渔业生态环境状况公报》数据显示, 水产养殖过程中会有大量的饲料、渔用药物等的使用, 也会导致水体无机氮、磷酸盐和 Cu 等因子含量明显升高^[30]. 此外, 畜禽粪便也是重金属元素 Cu 和 Cd 的主要来源之一^[31]. 因此, F1 可表示为大丰近岸海域水质污染受河流输入陆源物质及海水养殖的影响.

表 4 调查站位主成分得分及综合得分

Table 4 Principal component score and comprehensive score of survey station

站位	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分	综合得分	污染程度排名(由轻到重)
1	-0.177	-2.114	-2.207	0.230	-0.768	5
2	-1.121	-0.719	-2.282	-1.262	-0.985	2
3	-3.131	0.632	-0.440	0.440	-1.044	1
4	-0.678	-2.226	-1.508	0.364	-0.874	4
5	-0.247	0.231	0.505	0.370	0.058	11
6	-1.940	0.128	1.924	-1.006	-0.546	7
7	1.868	-3.269	1.117	-0.290	0.127	12
8	-1.863	-0.705	-1.054	0.169	-0.958	3
9	-1.445	0.035	0.291	0.350	-0.457	8
10	-2.133	-0.287	1.806	-1.143	-0.733	6
11	1.670	-1.552	1.097	0.297	0.468	16
12	0.651	-1.035	1.930	1.790	0.452	15
13	-0.356	-0.371	-0.129	-0.902	-0.315	10
14	-2.092	1.279	0.374	0.696	-0.393	9
15	3.152	0.577	-0.221	1.819	1.443	19
16	1.746	1.746	-0.385	1.565	1.118	18
17	-0.284	1.763	0.662	-1.771	0.172	13
18	5.843	0.757	-0.428	-2.096	2.066	20
19	0.842	2.120	0.051	0.106	0.772	17
20	-0.306	3.011	-1.104	0.275	0.399	14

F2(第 2 主成分)贡献率为 20.848%, 包含盐度、石油类和 Zn. 盐度和 Zn 与 F2 呈正相关性, 而石油类与 F2 呈负相关性. 由图 4(b)可知, F2 表现为由岸向海逐渐增大的趋势, 而石油类的分布与之相反, 是由岸向海逐渐减小的趋势. 油类污染在中国沿海都是比较严重的现象, 会通过物理窒息和化学毒性反应对海洋环境造成严重的危害^[32]. 通过对大丰海域进行调研, 至 2015 年底大丰港区共拥有泊位 15 个, 港区后方陆域形成大型经济产业园, 且大丰港区深水航道一期工程于 2015 年 11 月开工建设^[26], 因此港口的开发建设是近岸石油污染最直接、最主要的原因之一. 另外还需注意, 渔船的石油排放量不容小觑, 许多不合规的渔船具有极大的溢油风险, 且渔船属于线源排放, 污染面更广^[33]. F2 主成分反映了港口建设对海水水质污染产生的影响.

F3(第 3 主成分)贡献率为 12.863%, 主要支配着重金属 Hg 和 Pb 的来源, 均与其呈正相关. 从 F3 空间分布图(图 4(c))来看, 富集区位于大丰港区. 大丰港区分布有锚地和航道, 是船舶集中区. 船舶污染是重金属 Pb 的主要来源, 进出和停泊的船只使用含铅柴油, 燃烧废气导致近岸海域中 Pb 含量升高^[34]. 水体中的汞与沉积物中的汞存在相互联系, 海水中汞含量相对较高的地方, 沉积物中汞含量也随之较高^[35]. 袁红明在大丰海域沉积物重金属污染的研究中指出, 大丰港一期码头附近 Hg 元素呈高度污染程度^[36]. 因此, 大丰港区的 Hg 和 Pb 含量远高于其他区域. F3 解释了船舶污染及沉积物污染对水质的影响.

F4(第 4 主成分)贡献率为 9.911%, 支配溶解氧的来源. 如图 4(d)所示, F4 高值区分布相对散乱, 主要集中在港区. 溶解氧是评价水体溶氧量的主要因子, 当水体溶氧量低于生物呼吸所必需时, 会引发水生生物呼吸受阻甚至大面积窒息死亡^[37]. 对 F4 污染来源特征有待进一步研究.

根据综合得分空间分布图(图 4(e))显示, 大丰海域污染程度南低北高, 高值区集中于四卯西河口海域和大丰港区海域, 这一空间反映与调查站位空间聚类分区表现出极大的一致性. 水体污染来源较为复杂, 除上述河流输入、养殖污染和港口污染之外, 在一定程度上水动力也是污染来源之一. 大丰海域东侧

是辐射沙洲的北翼西洋水道,受西洋水道潮流的影响,大丰海域内水体总体存在向北输运的趋势,且越往北水质点位移距离越小。西洋水道具有显著的落潮水道特性,相邻海域内的水体会向西洋水道输运^[38],因此,水动力条件也会导致大丰海域成为污染物的汇集之地,越靠近北侧污染程度越高。

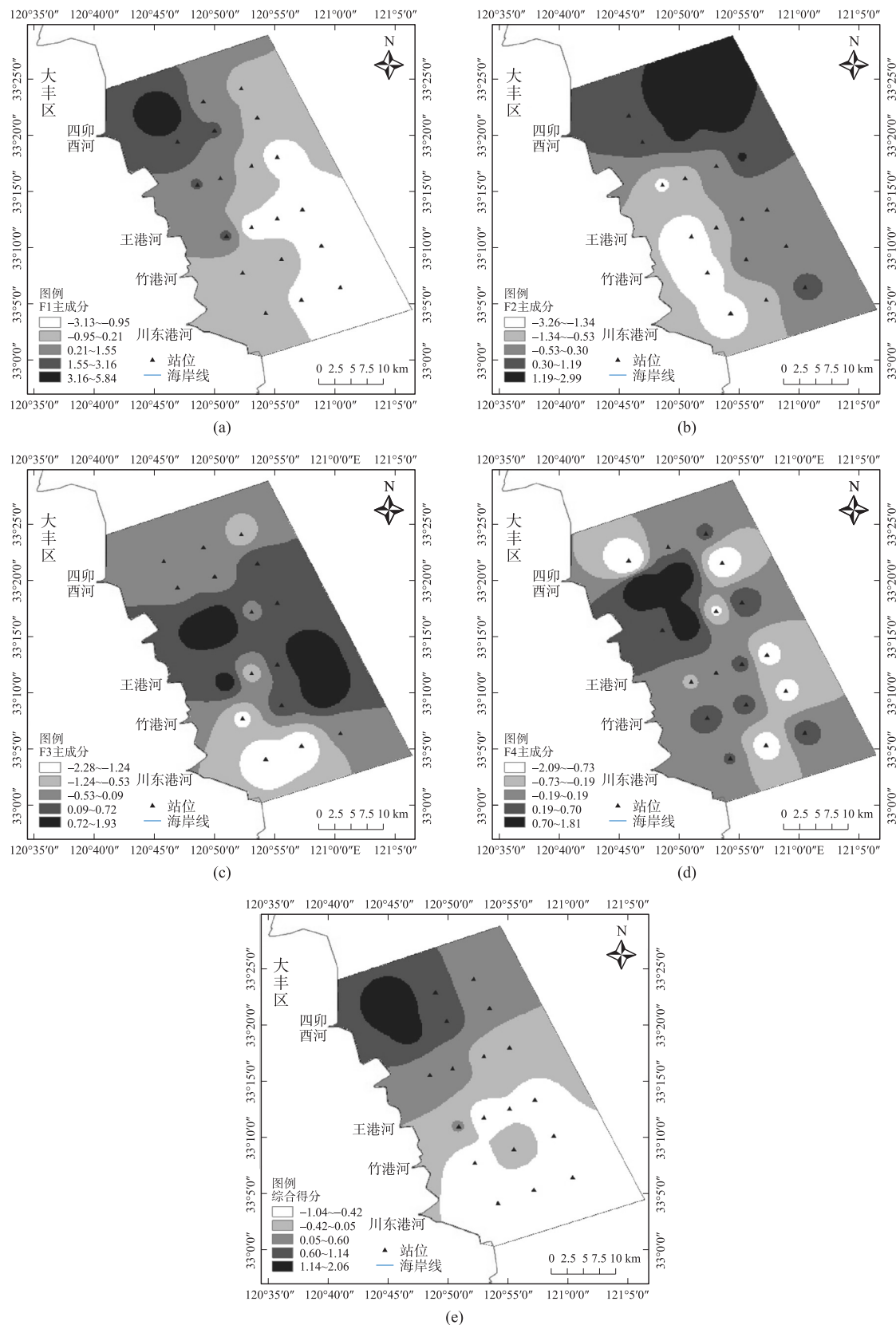


图4 主成分得分及综合得分空间分布图

Fig. 4 Principal component score and comprehensive score spatial distribution

沉积物作为水环境中的重要组成部分,对于水体中污染物的迁移、转化和富集有着非常重要作用.李飞在江苏港口海域沉积物重金属污染研究中指出,大丰港海域沉积物重金属呈现污染趋势^[39].涂春超研究发现,大丰港海域沉积物重金属组合高值区主要分布在王港河入海口^[40].沉积物污染分布特征与水体相似,进一步印证了研究结果.

3 结论

(1)2015年11月研究区水质情况总体良好,各站位盐度、溶解氧、化学需氧量、石油类、磷酸盐、无机氮、Hg、As、Cu、Pb、Zn、Cd的平均值含量依次为27.600‰、8.460 mg/dm³、1.570 mg/dm³、0.040 mg/dm³、24.31 μg/dm³、439.00 μg/dm³、0.03 μg/dm³、1.43 μg/dm³、3.07 μg/dm³、0.57 μg/dm³、11.76 μg/dm³、0.07 μg/dm³.溶解氧、石油类、重金属(Hg、As、Cu、Pb、Zn、Cd)均能达到第一类海水水质标准,化学需氧量可以达到第二类标准,活性磷酸盐满足第四类标准.然而,无机氮出现了超标现象,且超标站位达到所有站位的30%.

(2)研究区污染状况呈现为南低北高趋势,污染高值区位于四卯西河口及大丰港区海域.空间聚类分析将研究区大致分为3类,四卯西河口、王港河口、竹港河口、川东港河口站位归为一类,以王港河口为界,南北两侧站位各归属于一类,与综合得分空间分布相一致.

(3)通过主成分方法分析,研究区营养盐污染程度较重,主要受人为活动影响,河流输入与海水养殖污染是主要原因;重金属(Cu、As、Zn、Cd、Pb、Hg)和石油类污染受港口建设等海洋工程的开发活动影响,船舶污染也是重金属的一大污染源.因此,大丰海域水质污染主要来源为陆源输入、养殖污染和港口污染等.

[参考文献]

- [1] JICKELLS T D. Nutrient biogeochemistry of the coastal zone[J]. Science, 1998, 281(5374): 217–222.
- [2] 崔力拓,李志伟. 河北省沿海开发活动的生态环境效应评估[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2063–2070.
- [3] LEE D I, CHOI J M, LEE Y G, et al. Coastal environmental assessment and management by ecological simulation in Yeosu Bay, Korea[J]. Estuarine, coastal and shelf science, 2008, 80(4): 495–508.
- [4] PERTSEMLI E, VOUTSA D. Distribution of heavy metals in Lakes Doirani and Kerkini, Northern Greece[J]. Journals of hazardous materials, 2007, 148(3): 529–537.
- [5] NIXON S W. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes and future concerns[J]. Ophelia, 1995, 41: 199–219.
- [6] OVIAT C A. Impacts of nutrients on Narragansett Bay productivity: a gradient approach[J]. Science for ecosystem-based management, 2008, 22: 523–543.
- [7] 李亚丽. 江苏海洋资源开发的综合效益研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2015.
- [8] 江苏省海洋与渔业局. 2017年江苏省海洋环境质量公报[R]. 2018.
- [9] 顾进伟. 大丰沿海滩涂演变及驱动力研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [10] 张建功. 盐城市沿海滩涂开发战略研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2006.
- [11] 张晓昱, 花卫华, 袁广旺, 等. 春秋季大丰港海域富营养化评价及趋势分析[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(8): 101–106.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17378—2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763—2007 海洋调查规范 第4部分: 海水化学要素调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] 国家环境保护局环境工程评估中心. 环境影响评价技术方法[M]. 北京: 中国环境出版社, 2018.
- [15] 郑琨, 张蕾, 薛晨亮. 单因子指数法在水质评价中的应用[J]. 地下水, 2018, 40(5): 79–80.
- [16] 冯利华. 环境质量的主成分分析[J]. 数学的实践与认识, 2003, 33(8): 32–35.
- [17] 周斌, 王悠, 王进河, 等. 山东半岛南部近岸海域富营养化状况的多元评价研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 128–138.
- [18] 杨丽原, 沈吉, 张祖陆, 等. 南四湖表层底泥重金属和营养元素的多元分析[J]. 中国环境科学, 2003, 23(2): 206–209.
- [19] 樊庆铨, 杨先兴, 邱徽. 松花江哈尔滨段城市水环境质量评价[J]. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2292–2298.
- [20] PERKINS R G, UNDERWOOD G J C. Gradients of chlorophyll a and water chemistry along an eutrophic reservoir with deter-

- mination of the limiting nutrient by in situ nutrient addition[J]. Water research,2000,34(3):713-724.
- [21] 袁连新,余勇. 聚类分析方法及其环境监测(水质分析)中的应用[J]. 环境科学与技术,2011,34(Suppl 2):267-270.
- [22] 李飞,徐敏. 海州湾水质污染空间分布及来源[J]. 生态学杂志,2014,33(7):1888-1894.
- [23] 矫新明,周超凡,花卫华,等. 江苏海涂海域表层海水水质变化特征分析[J]. 淮海工学院学报(自然科学版),2017,26(3):75-80.
- [24] 戚玮真,李金庆,朱董楠,等. 烟台港港池水质状况调查及评价[J]. 环境监测管理和技术,2018,30(4):42-45.
- [25] JAIN C K. A hydro-chemical study of a mountainous watershed;the Ganga,India[J]. Water research,2002,36(5):1262-1274.
- [26] 杜雯. 港口海域生态系统健康动态研究[D]. 南京:南京师范大学,2017.
- [27] 罗万次,苏搏,刘熊,等. 广西北仑河口红树林保护区表层海水溶解态重金属时空分布及其影响因素[J]. 海洋通报,2014,33(6):668-675.
- [28] 易志全,杨艺文,张际标,等. 湛江港海水中铜、锌、铅、镉的周年变化与水质评价[J]. 广东海洋大学学报,2011,31(1):73-79.
- [29] 魏大成. 环境中砷的来源[J]. 国外医学(医学地理分册),2003(4):173-175.
- [30] 中华人民共和国农业部,中华人民共和国环境保护部. 中国渔业生态环境状况公报(2000—2015)[R]. 2016.
- [31] 王美,李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(2):466-480.
- [32] 鲁如坤,时正元,熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其对生态环境影响的评价[J]. 土壤学报,1992(2):150-157.
- [33] 刘亮,王菊英,胡莹莹,等. 渤海近岸海域石油类污染变化趋势[J]. 海洋与湖沼,2014,45(1):88-93.
- [34] 吕建树,张祖陆,刘洋,等. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. 地理学报,2012,67(7):971-984.
- [35] 李月,谭丽菊,王江涛. 山东半岛南部近海表层海水中镉、铅、汞、砷的时空变化[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(Suppl 1):179-184.
- [36] 袁红明,赵广明,李雪,等. 江苏盐城大丰滨海湿地表层沉积物重金属空间分布特征及潜在生态风险评价[J]. 海洋地质前沿,2018,34(9):51-59.
- [37] 王秋璐,许艳,黄海燕,等. 基于时空矩阵方法对福建省海湾水质变化特征分析[J]. 海洋学报,2019,41(2):134-144.
- [38] 吴国栋. 南黄海辐射沙洲内缘区水环境承载力研究[D]. 南京:南京师范大学,2017.
- [39] 李飞,徐敏. 江苏港口海域沉积物重金属污染状况[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(9):1275-1282.
- [40] 涂春超. 江苏中部近岸海域表层沉积物重金属分布特征与污染评价[D]. 南京:南京师范大学,2018.

[责任编辑:丁 蓉]