

渤海中部海区水域夏季环境质量综合评价

徐勇^{1,2} 曲克明^{1①} 赵俊¹ 崔正国¹ 夏斌¹

(1. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室 中国水产科学研究院
黄海水产研究所 青岛 266071; 2. 中国海洋大学化学化工学院 青岛 266100)

摘要 基于 2012 年夏季渤海中部海域 21 个站点的调查数据, 采用内梅罗(Nemerow)指数、富营养指数(EI)和潜在富营养化法对渤海中部海域水体环境质量现状进行了评价。内梅罗指数评价结果显示, 对参与评价的酸碱度、溶解氧、无机氮、活性磷酸盐、化学耗氧量、石油类、重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As)等 12 项指标而言, 表层、10 m 层、底层受污染站位比例分别为 57.1%、33.3%、23.8%。表层海水石油类浓度超标率为 57.1%, 10 m 层水体超标率为 42.9%, 底层水体超标率为 14.3%, 石油类是主要污染因素。从分布位置看, 受污染站位主要集中在调查区域的西南部, 中部海域水质等级较高。海水环境质量呈现出由沿岸水域向中央海盆逐渐升高的趋势。渤海中部海域无明显富营养化状态, 除表层 13 号站位外, 表层、10 m 层、底层海水富营养状态指数法 EI 均小于 1, 表现为贫营养级水平。绝大部分海域氮磷比值高于 Redfield 比值, 但未呈现富营养化水平, 无机氮浓度升高, 活性磷酸盐浓度降低, 渤海中部水域营养盐结构由氮限制向磷限制转变, 已经开始转变成磷限制中度营养状态。

关键词 渤海中部; 水质; 环境质量评价; 富营养化

中图分类号 S938 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)02-0008-08

渤海为半封闭的陆架边缘海, 面积为 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 平均水深为 18 m, 包括辽东湾、渤海湾、莱州湾及中央海区(李淑媛等, 1995)。沿岸黄河、海河、辽河、滦河等 40 余条河流携带大量淡水与营养盐汇入渤海。与此同时, 也将沿河两岸大量的工农业废水、生活污水和有害物质带到了渤海, 超过 36% 的中国大陆陆地污水排入渤海(Wang *et al.*, 2009), 被认为是中国污染最严重的海洋区域之一(吴光红等, 2007)。近年来, 渤海的生态环境日趋恶化, 渔业资源衰退, 赤潮暴发次数增多, 以致出现“荒漠化”警告。众多研究通过水体(于春艳等, 2013; 聂洪涛等, 2008; 秦昌波等, 2006)、沉积物(林秀梅等, 2005)、生物生态(许思思等, 2011; 杨小玲等, 2006; Liu *et al.*, 2014)等不同途径来探讨渤海环境问题, 但关于渤海中部区域水质环境质量综合评价的相关研究尚不多见(王伟伟等, 2013)。

渤海中部为西向东倾斜的盆地, 此海区既是渤海重要水产生物的洄游地, 又是其越冬场, 同时拥有丰富的油气、海砂等资源, 在整个渤海生态环境中占有重要的地位。2011 年渤海蓬莱“19-3”油田发生溢油事故, 导致油田周边及其西北部海域受到严重污染, 其中劣四类严重污染海水面积达到 840 km^2 , 三、四类污染海域面积约 3400 km^2 。因此, 开展这一区域水质状况的综合研究, 不仅对于了解该受损海域的生态环境的变化状况有重要意义, 并且可以为渤海生态环境的保护与修复提供依据。

1 调查区域与评价方法

1.1 调查区域

调查区域为渤海中部海域, 具体位置为

* 农业部专项“渤海生态环境监测评估”(13-Q52201302)资助 [This work was supported by Special Project of Ministry of Agriculture (Monitoring and Evaluation on Bohai Sea Ecological Environment) (13-Q52201302)] 徐勇, E-mail: xuyong@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 曲克明, 研究员, E-mail: qukm@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-10-21, 收修改稿日期: 2016-01-29

119.25°–120.50°E、38.0°–39.5°N 之间, 共设置监测点位 21 个, 监测点位置如图 1 所示。

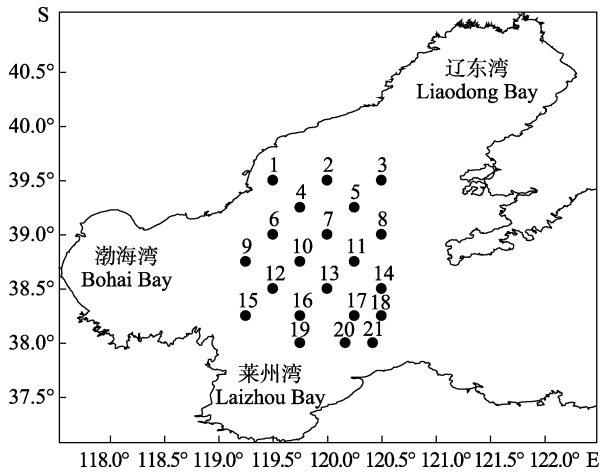


图 1 渤海中部海域调查站位

Fig.1 Surveyed sites in the central region of the Bohai Sea

1.2 样品采集与分析

2012 年 6 月对渤海中部 21 个站位进行取样, 每个站位分别取表层(0.5–1 m)、10 m 层、底层(离海底 2 m 处) 3 个层次的水样。样品采集与分析均严格按照《海洋监测规范》(GB17378-2007)相关方法进行。测定水体水温、盐度、溶解氧、pH、无机氮、活性磷酸盐、化学需氧量、重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Hg 和 As)、石油类含量。

1.3 评价方法

1.3.1 海水环境质量评价 利用内梅罗指数(Nemerow, 1974)评价方法对调查海域水体 12 个指标进行综合评价。此次调查主要研究蓬莱“19-3”油田溢油对渤海中部海域渔业生态环境的影响, 因而采用《海水水质标准》(GB3097-1997)中的二类标准作为水质评价标准, 其公式如下:

$$P = \sqrt{\frac{P_{max}^2 + P_{avg}^2}{2}}$$

式中, P 为内梅罗综合指数, P_{max} 、 P_{avg} 分别为单因子污染指数 P_i 的最大值与平均值。具体等级划分标准见表 1。

单因子污染指数(P_i)计算公式:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

式中, C_i 为第 i 类污染物的实测质量浓度, S_i 为第 i 类污染物的评价标准, 均采用《海水水质标准》(GB3097-1997)中二类评价标准对水质状况进行评价。

其中, pH、溶解氧的单因子污染指数按下列公式进行计算:

$$\text{pH: } P_i = \frac{|pH_i - pH_{sm}|}{DS}$$

$$pH_{sm} = \frac{pH_{su} + pH_{sd}}{2}$$

$$DS = \frac{pH_{su} - pH_{sd}}{2}$$

式中, pH_i 、 pH_{su} 、 pH_{sd} 分别为海水 pH 的实测值、标准上限、标准下限。

溶解氧:

$$P_i = 0 \quad (\text{溶解氧} \geq 8 \text{ mg/L})$$

$$P_i = 1 - \frac{C_i - C_{oi}}{C_{oi}} \quad (\text{溶解氧 } 4\text{--}8 \text{ mg/L})$$

$$P_i = 1 + \frac{C_{oi} - C_i}{C_{oi}} \quad (\text{溶解氧} \leq 4 \text{ mg/L})$$

式中, C_i 为溶解氧含量实测值, $C_{oi}=5 \text{ mg/L}$ 。

1.3.2 海水富营养化评价 根据邹景忠等(1983)的营养状态指数法对海水富营养化程度进行评价, 公式如下:

$$EI = \frac{\text{COD}(\text{mg/L}) \times \text{DIN}(\text{mg/L}) \times \text{DIP}(\text{mg/L})}{4500} \times 10^6$$

EI、COD、DIN、DIP 分别代表营养指数、化学需氧量(mg/L)、无机氮含量(mg/L)、活性磷酸盐含量(mg/L)。当 $EI < 1$ 时, 水体低于富营养化水平; 当 $EI \geq 1$ 时, 表现为富营养化状态, 营养指数越大, 富营养化程度越高。同时, 利用郭卫东等(1998)的潜在性富营养化评价模式, 对富营养化情况进行分级。营养级划分原则见表 2。

2 结果与讨论

2.1 渤海中部海域海水质量评价

根据渤海中部水域溶解氧、营养盐、化学需氧量、重金属等 12 项指标测定结果, 并利用内梅罗指数法综合评价该水域环境质量状况。结果显示(表 3), 渤海中部海域表层水体中 5、15、21 号站位水质等级为 IV 级, 处于中度污染水平; 4、11—14、16、18、19、20 号站位水质等级均为 III 级, 处于轻度污染水平, 其他站位为较清洁及以上水平。10 m 层水体中 15 号站位水质等级为 IV 级, 即中度污染水平; 4、13、14、18、19、20 号 6 个站位水质等级为 III 级, 处于轻度污染水平, 其他站位均为 II 级或 I 级污染水平。对底层水体而言, 17 号站位水质等级为 V 级, 重度

表1 内梅罗污染指数划分水体污染等级

Tab.1 Water pollution degrees based on the Nemerow pollution index

污染水平 Pollution degree	清洁 I Clean	较清洁 II Relatively clean	轻度污染 III Mild pollution	中度污染 IV Moderate pollution	重度污染 V Severe pollution
P	$P \leq 0.6$	$0.6 < P \leq 1.0$	$1 < P \leq 2.6$	$2.6 < P \leq 5$	$P > 5$

表2 潜在性富营养化评价模式对营养级的划分

Tab.2 The classification of the nutrient level by using the potential eutrophication assessment model

等级 Level	营养级 Nutrient salt level	无机氮 IN ($\mu\text{g/L}$)	无机磷 IP ($\mu\text{g/L}$)	氮磷比 N/P
I	贫营养 Poor nutrient	<200	<30	8-30
II	中度营养 Medium nutrient	200-300	30-45	8-30
III	富营养 Rich nutrient	>300	>45	8-30
IV _P	磷限制中度营养 Medium nutrient with phosphorous limiting	200-300	/	>30
V _P	磷中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium phosphorous limiting	>300	/	30-60
VI _P	磷限制潜在性富营养 Potential eutrophication with phosphorous limiting	>300	/	>60
IV _N	氮限制中度营养 Medium nutrient with nitrogen limiting	/	30-45	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium nitrogen limiting	/	>45	4-8
VI _N	氮限制潜在性富营养 Potential eutrophication with nitrogen limiting	/	>45	<4

表3 内梅罗指数评价法水质评价结果

Tab.3 Evaluation results of the water quality by using the Nemerow pollution index

站位 Stations	表层水体 Surface water		10 m层水体 10 m water		底层水体 Bottom water	
	P	等级 Pollution degree	P	等级 Pollution degree	P	等级 Pollution degree
1	0.38	I	0.31	I	0.31	I
2	0.36	I	0.52	I	0.38	I
3	0.32	I	0.33	I	0.62	II
4	1.83	III	1.15	III	0.49	I
5	2.99	IV	0.42	I	0.63	II
6	0.56	I	0.89	II	0.60	I
7	0.73	II	0.45	I	0.41	I
8	0.57	I	0.59	I	0.58	I
9	0.27	I	0.50	I	1.32	III
10	0.74	II	0.39	I	0.40	I
11	1.52	III	0.37	I	0.45	I
12	1.52	III	0.48	I	2.67	IV
13	2.43	III	2.08	III	0.51	I
14	1.84	III	2.39	III	1.67	III
15	2.82	IV	3.82	IV	0.54	I
16	1.30	III	0.27	I	0.30	I
17	0.87	II	1.97	II	5.48	V
18	1.17	III	2.39	III	0.41	I
19	1.17	III	2.03	III	0.85	II
20	2.04	III	2.42	III	2.66	IV
21	2.69	IV	0.57	I	0.56	I

污染水平, 12、20 号站位水体为中度污染水平, 9、14 号 2 个站位为轻度污染水平。由此可见, 渤海中部海域表层水体被污染站位数量占总调查站位的 57.1%, 受污染的 10 m 层水体站位比例达到 33.3%, 底层水体受污染比例为 23.8%, 其中, 表层、10 m 层、底层水体中重度污染站位比例分别为 14.3%、4.8%、14.3%。

从污染站位分布来看, 渤海中部受污染区域主要位于渤海湾、莱州湾、辽东湾湾口位置, 越靠近中间海域, 污染越低。黄河、滦河、海河、辽河等 40 余条河流汇入渤海, 这些径流也将沿河的工农业废水、生活污水及其他有毒有害物质注入渤海, 因而导致海湾较近的站位污染程度较重。刘学海(2010)发现, 辽东湾北部 10 m 等深线内 80%以上水域受重金属、无机氮污染, 河口附近水域无机氮和石油类严重超标。陆源输入、养殖业、船舶运输以及石油开发是渤海海域污染物的主要来源, 其中, 陆源污染物占渤海污染物来源的首位(王修林等, 2006)。

在所有污染物中, 污染贡献程度最高的是石油类(表 4), 表层海水石油类浓度超标率(单因子污染指数

大于 1)为 57.1%, 10 m 层、底层海水石油类超标率分别为 42.9%、14.3%, 部分站位石油类含量甚至接近《海水水质标准》(GB3097-1997)三类标准。石油类高污染区域主要集中在调查区域的西南部, 这里不仅是黄河入海口, 而且紧邻莱州湾与渤海湾, 同时蓬莱“19-3”油田、渤中“34-2/4”油田也在该区域, 也是 19-3 油田溢油污染最为严重的区域, 因而在该调查区域石油类污染较为严重。王修林等(2006)研究发现, 渤海水体石油类含量超过二类海水水质标准的站位比例达 34.2%, 其平均浓度居中国沿海海域之首。陆源输入是渤海石油类污染的主要来源, 所占比例为 84%, 相对于陆源排放而言, 河流携带污染物所占比例达到 67%, 高于渤海沿岸排污口输入量。

渤海为半封闭的浅海, 水体交换能力较弱, 且不同海域交换能力相差较大。莱州湾、渤海湾、辽东湾、中央海域的海水半交换期分别为 0.5 a、300 d、3 a、1.5 a(魏皓等, 2002), 这也是蓬莱 19-3 油田附近海域海水污染较重的一个原因。因而, 在无外界环境因素改变的情况下, 蓬莱 19-3 油田溢油对其附近海域的影响还将持续较长时间。

表 4 单因子污染指数计算结果

Tab.4 Evaluation results of the water quality by using single-factor contaminant index

站位 Station	表层水体 Surface water			10 m 层水体 10 m water			底层水体 Bottom water		
	石油类 TPHs	范围 Range	平均值 Average	石油类 TPHs	范围 Range	平均值 Average	石油类 TPHs	范围 Range	平均值 Average
1	0.33	0-0.52	0.15	0.41	0-0.41	0.16	0.41	0-0.41	0.17
2	0.46	0-0.48	0.18	0.71	0-0.71	0.20	0.38	0.01-0.49	0.21
3	0.42	0-0.43	0.14	0.30	0-0.43	0.17	0.38	0.02-0.83	0.27
4	2.57	0-2.57	0.37	1.59	0.02-1.59	0.30	0.23	0-0.65	0.23
5	4.20	0-4.20	0.52	0.48	0-0.52	0.28	0.35	0-0.83	0.34
6	0.28	0-0.74	0.30	1.21	0.01-1.21	0.34	0.23	0-0.80	0.28
7	1.00	0-1.00	0.25	0.50	0-0.58	0.25	0.33	0-0.54	0.22
8	0.78	0-0.78	0.20	0.77	0.01-0.77	0.30	0.74	0-0.78	0.26
9	0.28	0-0.34	0.18	0.19	0-0.69	0.17	1.82	0-1.82	0.37
10	1.01	0-1.01	0.27	0.21	0-0.50	0.22	0.38	0-0.51	0.25
11	2.11	0-2.11	0.41	0.34	0-0.49	0.17	0.61	0-0.61	0.17
12	2.11	0-2.11	0.38	0.33	0-0.64	0.22	0.23	0-3.74	0.48
13	2.19	0-3.38	0.62	2.89	0-2.89	0.50	0.67	0-0.67	0.26
14	2.54	0-2.54	0.58	3.35	0-3.35	0.45	2.32	0-2.32	0.47
15	0.46	0-3.94	0.56	5.36	0.02-5.36	0.67	0.71	0-0.71	0.27
16	1.80	0-1.80	0.34	0.26	0-0.36	0.12	0.20	0-0.39	0.15
17	0.29	0-1.16	0.41	2.74	0-2.74	0.51	0.44	0-7.69	0.99
18	1.61	0-1.61	0.38	3.35	0-3.35	0.47	0.29	0-0.55	0.17
19	0.42	0-1.62	0.32	2.82	0.05-2.82	0.55	0.83	0-1.10	0.47
20	2.86	0-2.86	0.44	3.35	0.01-3.35	0.68	3.71	0-3.71	0.67
21	3.75	0-3.75	0.58	0.70	0-0.74	0.31	0.39	0-0.71	0.36

2.2 渤海中部水体富营养化程度评价

渤海中部海域表层 13 号站位水体 $EI > 1$, 呈现富营养化状态; 10 m 层、底层水体中所有站位 $EI < 1$, 即未表现出富营养化水平。从各层平均富营养化指数来看, 表层 > 10 m 层 > 底层, 表层水体比 10 m 层、底层更容易出现富营养化。从整个调查区域来看, 氮、磷营养盐含量较低, 未表现出明显富营养化。渤海自身的水动力输运特征形成的湍流扩散及对流迁移(王修林等, 2006), 会将径流输入占主导地位的化学需氧量、营养盐等陆源性富营养化物质固定在近岸海域, 难以到达渤海中央海盆地区, 从而导致渤海水体的富营养化指数自沿岸、河口区域向中部水域递减的分布特征。魏皓等(2003)通过对渤海浮游植物生物量变化的分析发现, 陆源输入只会影响局部水域营养盐含量, 沿岸水域的富营养化将消耗大量的营养盐, 从而使中部海域水质保持良好。

表 5 渤海中部水体潜在性富营养化评价结果

Tab.5 Assessment results of the potential eutrophication of waters in the central region of the Bohai Sea

站 位 Stations	富营养化指数 Eutrophication index		
	表层水体 Surface water	10 m 层水体 10 m water	底层水体 Bottom water
1	0.03	0.12	0.22
2	0.10	0.16	0.16
3	0.01	0.05	0.08
4	0.16	0.08	0.16
5	0.27	0.24	0.14
6	0.46	0.23	0.06
7	0.08	0.07	0.12
8	0.02	0.18	0.08
9	0.17	0.37	0.20
10	0.38	0.14	0.18
11	0.22	0.14	0.02
12	0.15	0.25	0.35
13	2.78	0.27	0.20
14	0.27	0.07	0.04
15	0.19	0.34	0.12
16	0.22	0.03	0.11
17	0.40	0.09	0.09
18	0.24	0.17	0.06
19	0.21	0.38	0.40
20	0.14	0.24	0.25
21	0.29	0.61	0.85
平均值 Average	0.32	0.20	0.19

2.3 渤海中部海域潜在性富营养化评价

因水体中营养盐的限制, 必然有一部分氮或磷相对过剩。理论上, 过剩的氮或磷会促使水域营养化程度上升, 从而表现为富营养化水平。然而, 研究发现, 浮游植物并不能完全吸收这些过剩的氮、磷元素。因此, 营养盐的过剩可以认为是形成水体富营养化的必要而不充分条件, 郭卫东等(1998)将这种现象称为潜在性富营养化。当水体中氮磷比值接近 Redfield 值 ($N/P=16$) (Redfield, 1958) 时, 其才成为富营养化形成的必要条件。评价结果(表 6)表明, 渤海中部海域 13 号站位为氮限制潜在性富营养, 4、13-15、19-21 号 7 个站位处于磷限制中度营养状态, 其余表层海水大多都处于贫营养状态。10 m 层水域 4、5、7、17-19、21 号 7 个站位为磷限制中度营养状态, 底层水域中 4-6、15、18、20 号 6 个站位为磷限制中度营养状态, 其他站位均为贫营养状态。渤海中部海域只有 1 个站位表层水体呈氮限制潜在性富营养, 与 20 世纪 90 年代相比(于志刚等, 2000), 氮限制的状况正在逐步改变。

N/P 值作为海水营养盐结构的重要指标, 通常以 Redfield 值为开阔海区的适宜值。20 世纪 60-80 年代中期, 渤海水体 N/P 值维持在 3 左右; 20 世纪 90 年代中期, N/P 值虽然逐渐增加但仍低于 Redfield 比值(王修林等, 2006)。随着渤海中无机氮含量的增加, N/P 值开始快速升高并超过 Redfield 值, 呈现出磷限制。本研究发现, 渤海中部海域表层 N/P 平均值为 24, 10 m 层与底层 N/P 平均值分别为 24 和 21, 这也印证了渤海中部海域的 N/P 值近 20 年来呈不断上升的趋势(于志刚等, 2000), 其主要由无机氮的升高所致。近 20 年(1982-1999 年)来, 渤海中部水域氮、磷、硅酸盐浓度均发生了显著变化, 无机氮浓度升高, 硅酸盐、活性磷酸盐浓度降低, 从而导致氮磷比值升高, 硅氮比值下降(于志刚等, 2000)。渤海中部海域营养盐结构, 正从氮限制改变为硅酸盐、磷限制。虽然调查区域表现为磷限制中度营养状态的站位比例较低, 但也证明了这一趋势。

3 结论

通过内梅罗指数法对渤海中部海域水环境质量进行综合评价发现, 表层、10 m 层、底层受污染站位比例分别为 57.1%、33.3%、23.8%, 石油类污染是主要因素。从分布位置看, 受污染站位主要集中在调查区域的西南部, 中部海域水质等级较高。蓬莱“19-3”油田附近海域水体污染等级较高, 石油类污染为其主要污染因素。整体上, 海水环境质量呈现由沿岸水域

表 6 渤海中部水体氮磷比评价结果

Tab.6 Assessment results of the N/P ratio of waters in the central region of the Bohai Sea

站位 Stations	表层水体 Surface water			10 m 层水体 10 m water			底层水体 Bottom water		
	氮磷比 N/P	等级	Pollution degree	氮磷比 N/P	等级	Pollution degree	氮磷比 N/P	等级	Pollution degree
1	13		I	24		I	22		I
2	16		I	19		I	12		I
3	5		I	15		I	25		I
4	31		IV _P	41		IV _P	31		IV _P
5	21		I	47		IV _P	42		VI _N
6	9		I	16		I	3		VI _N
7	28		I	40		IV _P	16		I
8	7		I	8		I	9		I
9	18		I	9		I	26		I
10	14		I	9		I	19		I
11	9		I	14		I	1		I
12	30		I	11		I	18		I
13	3		VI _N	12		I	13		I
14	46		IV _P	39		IV	15		I
15	40		IV _P	21		I	32		IV _P
16	10		I	6		I	13		I
17	18		I	32		IV _P	22		I
18	28		I	35		IV _P	32		IV _P
19	49		IV _P	35		IV _P	26		I
20	46		IV _P	29		I	34		IV _P
21	58		IV _P	37		IV _P	25		I
平均值 Average	24		I	24		I	21		I

向中央海盆逐渐降低的趋势。

渤海中部海域无明显富营养化, 除表层 13 号站位外, 表层、10 m 层、底层海水富营养状态指数 EI 均小于 1。各层平均营养状态指数来看, 表层>10 m 层>底层, 表层水体更容易出现富营养化。

绝大部分海域氮磷比值高于 Redfield 比值, 处于贫营养级。渤海中部海域氮限制的状况正在逐步改变, 活性磷由供给充分演变为磷限制的临界, 其营养盐结构已经开始转变成磷限制中度营养状态。

参 考 文 献

- Guo WD, Zhang XM, Yang YP, *et al.* Potential eutrophication assessment for Chinese coastal waters. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1998, 17(1): 64–70 [郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价. 台湾海峡, 1998, 17(1): 64–70]
- Li SY, Miao FM, Liu GX, *et al.* A preliminary study on the environmental background values of heavy metals in the sediments of Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 1995, 17(2): 78–85 [李淑媛, 苗丰民, 刘国贤, 等. 渤海底质重金属环境背景值初步研究. 海洋学报, 1995, 17(2): 78–85]
- Lin XM, Liu WX, Chen JL, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments from Bohai Sea, China. *Acta Science Circumstantiae*, 2005, 25(1): 70–75 [林秀梅, 刘文新, 陈江麟, 等. 渤海表层沉积物中多环芳烃的分布与生态风险评估. 环境科学学报, 2005, 25(1): 70–75]
- Liu JH, Cao L, Huang W, *et al.* Zinc and copper bioaccumulation in fish from Laizhou Bay, the Bohai Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 32(3): 491–502
- Liu XH. Analysis on environment situation of coastal areas of Bohai Sea. *Environmental Protection Science*, 2010, 36(1): 14–18 [渤海近岸水域环境污染状况分析. 环境保护科学, 2010, 36(1): 14–18]
- Nemerow NL. *Scientific stream pollution analysis*. Mc Graw Hill, 1974
- Nie HT, Tao JH. Impact of coastal exploitation on the eco-environment of Bohai Bay. *Ocean Engineering*, 2008, 26(3): 44–50 [聂红涛, 陶建华. 渤海湾海岸带开发对近海水环境影响分析. 海洋工程, 2008, 26(3): 44–50]
- Qin CB, Zheng BH, Qin YW, *et al.* Gray correlation assessment

- of water environment quality for Tianjin coastal zone in Bohai Bay. *Research of Environment Science*, 2006, 19(6): 94–99 [秦昌波, 郑丙辉, 秦延文, 等. 渤海湾天津段海岸带水环境质量灰色关联度评价. *环境科学研究*, 2006, 19(6): 94–99]
- Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46: 561–600
- Sea water quality standard(GB3097-1997). Beijing: China Environmental Science Press, 1997 [海水水质标准(GB3097-1997). 北京: 环境科学出版社, 1997]
- Specification for Marine Monitoring(GB17378.4-2007). Beijing: China Standards Press, 2000 [海洋监测规范(GB17378.4-2007). 北京: 中国标准出版社, 2000]
- Wang WW, Fu YB, Li ST, *et al.* Distribution on surface sediment and sedimentary divisions in the middle part of Bohai Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(3): 478–490 [王伟伟, 付元宾, 李树同, 等. 渤海中部表层沉积物分布特征与粒度分区. *沉积学报*, 2013, 31(3): 478–490]
- Wang XL, Cui ZG, Guo Q, *et al.* Distribution of nutrients and eutrophication assessment in the Bohai Sea of China. *Chinese Journal of Oceanography and Limnology*, 2009, 27(1): 177–183
- Wang XL, Li KQ. Marine environmental capacity of pollutants in Bohai Sea. Beijing: Science Press, 2006 [王修林, 李克强. 渤海主要化学污染物海洋环境容量. 北京: 科学出版社, 2006]
- Wei H, Tian T, Zhou F, *et al.* Numerical study on the water exchange of the Bohai Sea: Simulation of the half-life time by dispersion model. *Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Science Edition)*, 2002, 32(4): 519–525 [魏皓, 田恬, 周锋, 等. 渤海水交换周期的数值研究——水质模型对半交换时间的模拟. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(4): 519–525]
- Wei H, Zhao L, Yu ZG, *et al.* Variation of the phytoplankton biomass in the Bohai Sea. *Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Science Edition)*, 2003, 33(2): 173–179 [魏皓, 赵亮, 于志刚, 等. 渤海浮游植物生物量时空变化初析. *青岛海洋大学学报(自然科学版)*, 2003, 33(2): 173–179]
- Wu GH, Li WQ, Zheng HQ. Water pollution characteristics in Tianjin sea area of the Chinese Bohai Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(2): 143–149 [吴光红, 李万庆, 郑洪起. 渤海天津近岸海域水污染特征分析. *海洋学报*, 2007, 29(2): 143–149]
- Xu SS, Song JM, LI XG, *et al.* Modeling of fishing effects on fishery resources and ecosystems of the Bohai Sea. *Resources Science*, 2011, 33(6): 1153–1162 [许思思, 宋金明, 李学刚, 等. 渔业捕捞对渤海渔业资源及生态系统影响的模型研究. *资源科学*, 2011, 33(6): 1153–1162]
- Yang XL, Yang RQ, Jiang GB, *et al.* Using *Mytilus edulis* and *Perna viridis* as bioindicators to monitor butyltins pollution along the Bohai coastal sites. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(1): 88–91 [杨小玲, 杨瑞强, 江桂斌, 等. 牡蛎作为生物指示物监测渤海近岸水体中的丁基锡污染物. *环境化学*, 2006, 25(1): 88–91]
- Yu CY, Liang B, Bao CG, *et al.* Study on eutrophication status and trend in Bohai Sea. *Marine Environment Science*, 2013, 32(2): 175–177 [于春艳, 梁斌, 鲍晨光, 等. 渤海富营养化现状及趋势研究. *海洋环境科学*, 2013, 32(2): 175–177]
- Yu ZG, Mi TZ, Xie DB, *et al.* Changes of the environmental parameters and their relationship in recent twenty years in the Bohai Sea. *Marine Environment Science*, 2000, 19(1): 15–19 [于志刚, 米铁柱, 谢宝东, 等. 二十年来渤海生态环境参数的演化和相互关系. *海洋环境科学*, 2000, 19(1): 15–19]
- Zou JZ, Dong LP, Qin BP. Preliminary discussion on eutrophication and red tide problem in Bohai Bay. *Marine Environmental Science*, 1983(2): 41–55 [邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. *海洋环境科学*, 1983(2): 41–55]

(编辑 冯小花)

Assessment of Environmental Water Quality in the Central Region of the Bohai Sea in Summer

XU Yong^{1,2}, QU Keming^{1①}, ZHAO Jun¹, CUI Zhengguo¹, XIA Bin¹

(1. *Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Shandong Province Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-environment, Yellow Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071;*

2. *College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100*)

Abstract Based on the investigation data from 21 sampling stations in the central region of the Bohai Sea in 2012, and by using Nemerow index, eutrophication index (EI), and potential eutrophication assessment model, an assessment was conducted on the environmental quality of water body in the Bohai Sea area. According to the Nemerow index assessment on the 12 indicators including pH, dissolved oxygen (DO), dissolved inorganic nitrogen (DIN), dissolved inorganic phosphorous (DIP), chemical oxygen demand (COD), total petroleum hydrocarbons (TPHs), Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, and As, 57.1% of the surface water quality was at slight pollution level or more serious pollution level, 33.3% of the ten meter water quality was at slight and moderate pollution level, 23.8% of the bottom water quality was at slight or more serious pollution level. TPHs was the most important factor in all the contamination factors. Among the 21 surface sea water samples, 12 (corresponding to 57.1%) were above the second marine water quality standards when evaluated with single factor index method. The standard-exceeding rates of ten-meter water and bottom water were 42.9% and 14.3% respectively. The polluted area was located in the southeast of survey area, next to the Bohai Bay and the Laizhou Bay. The horizontal distribution of sea water quality showed an increasing trend from the coastal area to the middle area. The sea water EI value of the central region of the Bohai Sea except 13 stations in the surface water was less than 1, the results showed that most of the seawater quality in the investigated area was at the poorly eutrophication level. The ratios of N/P in most of the sea water were much higher than Redfield ratios, and the situation of nitrogen limiting in the central Bohai Sea was gradually changing to that of relative lack of phosphate. The nutrients structure has changed into potential eutrophication of phosphorus limiting.

Key words Central region of Bohai Sea; Water quality; Environmental quality assessment; Eutrophication

① Corresponding author: QU Keming, E-mail: qukm@ysfri.ac.cn