

# 环渤海主要城市近岸海域水质状况综合评价

张广帅<sup>1,2</sup>, 闫吉顺<sup>1,2</sup>, 吴婷婷<sup>3</sup>, 王权明<sup>1,2</sup>, 蔡悦荫<sup>1,2</sup>, 李滨勇<sup>1,2</sup>, 商井远<sup>4</sup>, 于永海<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023;

2. 国家环境保护海洋生态环境整治修复重点实验室, 辽宁 大连 116023;

3. 大连指南针海洋工程咨询有限公司, 辽宁 大连 116023;

4. 葫芦岛市生态环境保护服务中心, 辽宁 葫芦岛 125000)

**摘要:**为评价环渤海13个城市近岸海域水质状况,基于渤海195个监测站位2020年3月和5月的实测水质数据,选取化学需氧量、无机氮、总氮、活性磷酸盐、总磷和石油类物质作为评价因子,采用雷达图指数、内梅罗指数和主成分指数对环渤海主要城市近岸海域水质状况进行了综合评价和等级划分。结果显示,渤海近岸海域主要污染物为无机氮和总磷,其次为石油类物质;葫芦岛、秦皇岛、大连和烟台的近岸海域水质状况较好,而位于辽东湾北岸辽河口附近的盘锦、锦州、营口以及位于莱州湾西侧的滨州近岸海域水质状况较差;3类水质综合指数对海水中盐度和悬浮物浓度敏感性较强,且相互之间及其与水质优良面积比例存在显著相关性,表明所选择的3类水质指数能够真实反映渤海近岸海域水质状况。研究结果可为渤海水质评价与综合治理成效评估提供借鉴。

**关键词:**水质评价;雷达图指数;内梅罗指数;主成分分析;渤海海域

**中图分类号:**X824      **文献标志码:**A      **文章编号:**1674-3075(2022)04-0063-08

海水水质评价是海洋综合治理成效评估和海洋生态系统适宜性管理的重要基础(Akinbile & Omoniyi, 2018)。当前,国内外多采用单因子指数、内梅罗指数和主成分分析法等进行海水水质状况综合评价(Alves et al, 2018; Gianello et al, 2019; 张广帅等, 2020);这些方法虽然能够对多水质参数进行有效降维,客观反映水体环境的综合质量,但由于结果以单一数值呈现,使具体的水质污染因子信息缺失(党二莎等, 2019)。雷达图作为一种能够直观呈现多维数据特征及其变化趋势的量化评估方法,在对对象进行整体和全局评价的基础上,最大程度地保存了多维数据的原始信息,并被逐渐应用于河流和湖泊的水质评价中(王德青等, 2010)。

渤海是我国唯一的半封闭型内海,具有独特的自然生态特征和突出的战略地缘优势,也是我国实施“海洋强国”和“陆海统筹”战略的重要前沿阵地。长期以来,高强度的陆源污染排放和粗放式的海洋

资源开发利用,使渤海生态环境面临严重威胁。研究表明,沿岸附近的工业废水、生活污水排放以及港口的密集布局是渤海近岸海域水质污染的主要原因(王召会等, 2016)。近年来,国家在渤海海域相继开展了一系列海洋综合治理工程,一定程度上改善了海域水质,尤其是渤海综合治理攻坚战实施以来,其水质呈稳中向好趋势(生态环境部, 2020)。目前,针对渤海海域水质状况的评价分析多依据2018年之前的监测数据,且主要集中在辽东湾和渤海湾区域(阚文静等, 2016; 于大涛等, 2016a),评价对象主要以单个水质参数或生物生态指标为主,近2年渤海实施综合治理以来,对整个近岸海域水质态势的总体评价鲜有报道,其评价方法的研究更是不足。

根据《渤海综合治理攻坚战行动计划》,通过3年综合治理,到2020年底,渤海近岸海域水质应得到显著提升。本文以2020年3月和5月渤海近岸海域水质调查数据为基础,采用雷达图指数、内梅罗指数和主成分分析法,对环渤海3省1市共13个城市的近岸海域水质进行系统综合评价与水质级别划分,分析3类水质综合指数对其他环境因子的敏感性,并建立水质综合评价指数与近岸海域水质优良面积比例之间的定量经验模型,旨在为近岸海域水质优良面积比例的快速判定提供有效技术手段,拓展水质综合指数在海洋环境评价中的应用,以为渤海综合治理成效评估与生态环境保护提供参考。

收稿日期:2020-10-26      修回日期:2022-04-19

**基金项目:**国家海洋环境监测中心博士启动基金(2019-A-03);阿拉善SEE青年学者资助项目(ST202002015);辽宁省博士科研启动基金(2019-BS-091)。

**作者简介:**张广帅,1989年生,男,博士,助理研究员,主要从事海洋生态修复、生态补偿与评估研究。E-mail:zgs1989eco@outlook.com

**通信作者:**王权明,1977年生,男,博士,正高级工程师,主要从事海洋资源管理、海洋空间规划研究。E-mail:qmwang@nmemc.org.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 数据采集与处理

为全面掌握渤海近岸海域水质环境现状,国家海洋环境监测中心在渤海近岸海域设置了 195 个水质调查站位(图 1),并分别于 2020 年 3 月和 5 月开展连续 2 次调查。本研究选取的评价指标参数包括化学需氧量(COD)、总无机氮(TIN)、总氮(TN)、活性磷酸盐(SRP)和石油类物质(Oil),其他水环境因子还有 pH、盐度和悬浮物,5 月还补充调查了海水中的叶绿素 a 浓度。各监测指标样品的采集和分析方法均严格按照《海洋调查规范》(GB/T12763.4-2007)与《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)进行(国家海洋局,2008a;2008b)。

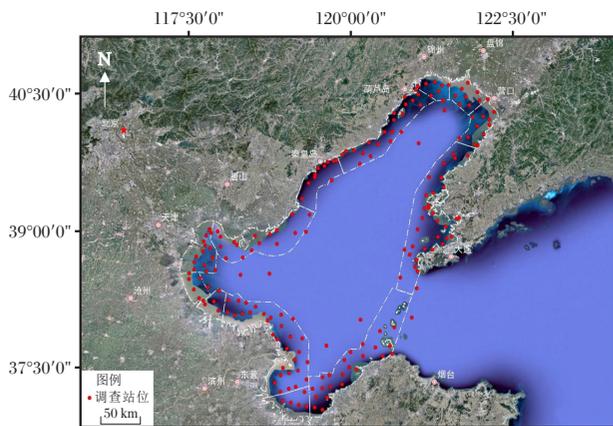


图 1 渤海近岸海域采样站位分布

Fig.1 Location of the sampling sites in Bohai Sea

### 1.2 水质状况评价

**1.2.1 雷达图生成与雷达图水质指数计算** 雷达图中 6 条坐标轴代表本研究选取的 6 个水质因子参数,由中心原点向外等夹角辐射分布。坐标轴上等距离设置 5 个刻度,从原点向外分别代表 I~劣 VI 类共 6 个水质类别,其中化学需氧量、总无机氮、活性磷酸盐和石油类物质分级标准依据《海水水质标准》(GB3097-1997)(国家质量技术监督局,2008),海水总氮和总磷分级标准参考《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)(国家环境保护总局,2002)中的 I~VI 类分级。根据单因子水质指数法(林晓娟等,2018)计算每项水质参数实测值对应的坐标轴长。具体方法参考刘玲玲等(2020):

$$RI_i = (C_{ik上} - C_i) / (C_{ik上} - C_{ik下}) + k - 1 \quad (1)$$

式中:  $RI_i$  为第  $i$  项水质参数的坐标轴长,  $C_i$  为第  $i$  项水质浓度的实测值,  $C_{ik上}$  为第  $i$  项水质参数在  $k$  类水质标准区间的上限值,  $C_{ik下}$  为第  $i$  项水质参数在

$k$  类水质标准区间的下限值。当水质参数为 I 类,且未达到上限值时,其下限值取 0 用于计算  $RI_i$  值;当水质参数劣于 VI 类时,  $RI_i = 5$ 。

将 6 项水质因子的坐标轴长在相对应坐标轴上标记,然后连接成闭合多边形平面。多边形区域的大小和形状能直观反映监测站位的水质状况。当各项水质因子均为 I 类时,多边形区域半径小于 1;反之,当各项水质因子均为劣 VI 类时,多边形区域的半径为 5。各项水质因子坐标轴长度的总和可以表征多边形区域的大小,即作为基于雷达图的水质指数,计算方法如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n RI_i \quad (2)$$

式中:  $RI$  为雷达图水质指数,  $RI_i$  为第  $i$  项水质因子的坐标轴长,  $n$  为所选取水质因子的个数。  $RI$  的变化范围为 (0,30], 数值越小,表明水质综合状况越好。

**1.2.2 内梅罗水质指数计算** 内梅罗指数法能够兼顾水质因子中的极值与均值,其计算方法如下(Brady et al, 2015):

$$NI = \sqrt{\frac{\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\max}^2 + \left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (3)$$

式中:  $NI$  为内梅罗指数,  $C_i$  为水质参数  $i$  的实测值,  $S_i$  为水质参数  $i$  的最大容许浓度,本研究中选择 II 类水质标准,  $\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\max}$  为所有水质参数  $C_i/S_i$  值中的最大值,  $\left(\frac{C_i}{S_i}\right)_{\text{ave}}$  为所有水质参数  $C_i/S_i$  的平均值。

**1.2.3 主成分水质指数计算** 主成分分析法能够通过有效降维,把多水质参数变量转变成少数代表性的变量,具体方法参见褚帆等(2015)。

### 1.3 数据分析

渤海海域主要城市海水水质综合评价指数的对比分析采用单因素方差分析及 LSD 多重比较,不同城市海水水质等级划分采用主坐标分析和聚类分析,水质评价指数与其他水质环境因子之间的关系采用皮尔逊相关分析,采用 Kriging 空间内插法对渤海近岸海域水质综合状况进行空间异质性分析,并通过回归分析定量判别水质综合指数与空间位置及水质优良面积比例之间的关系;其中,水质优良面积比例采用单因子指数法结合空间插值计算得到。数据分析在 SPSS 18.0 中进行,空间异质性制图采用 Arc Gis 10.0,主坐标分析在 Canoco 5.0 中进行,雷达图绘制采用 Origin Pro 8。

## 2 结果与分析

### 2.1 主要城市水质评价

环渤海13个主要城市的水质平均值雷达图中,多边形区域的形状和面积大小具有显著不同(图2)。盘锦、锦州、营口、滨州和东营雷达图中,多边形面积相对较大,说明水质整体水平较其他城市差;葫芦岛、大连、秦皇岛和唐山多边形面积相对较小,表明水质整

体水平较好。营口、盘锦、滨州显示出相对较高的无机氮和总磷含量,其中盘锦和营口的无机氮平均浓度显示达到了劣Ⅵ类。除了受无机氮和总磷影响外,天津和东营的平均水质状况还受到海水中石油类物质的影响,其中东营近岸海域石油类物质接近Ⅱ类水质的上限,存在潜在污染风险。总体上看,无机氮和总磷是环渤海城市近岸海域水体的主要污染物,而活性磷酸盐和化学需氧量的污染效应相对不明显。

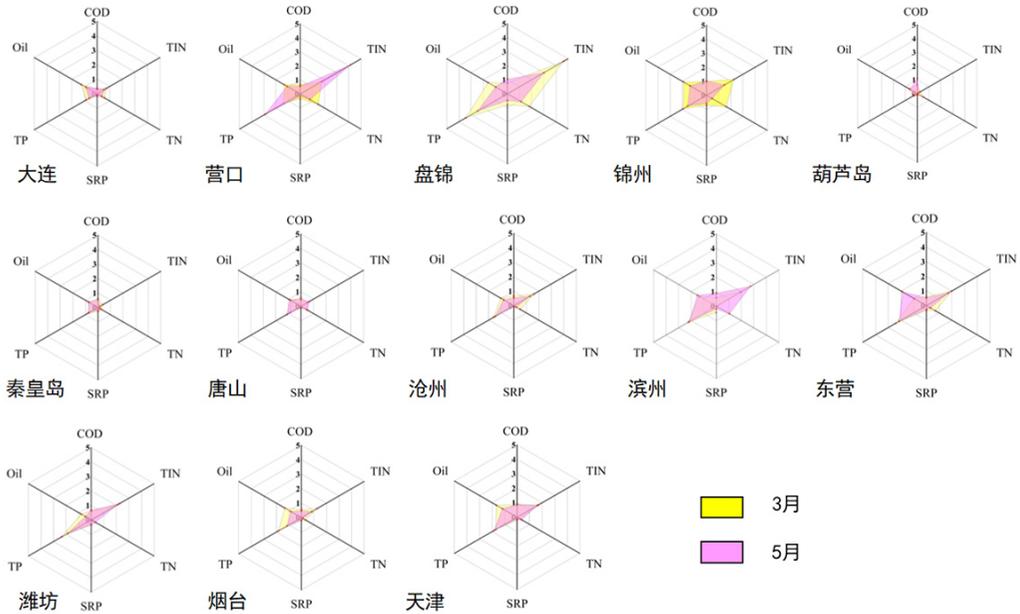


图2 渤海海域主要城市海水水质变化

Fig.2 Water quality radar charts for the nearshore areas of the primary cities around Bohai Sea

渤海近岸海域3月雷达图指数变化为0.99~21.30,平均值为5.46;内梅罗指数变化为0.11~9.55,平均值为0.72;主成分指数变化为-1.20~7.09,平均值为0。5月雷达图指数变化为1.21~15.80,平均值为4.90;内梅罗指数变化为0.13~2.73,平均值为0.61;主成分指数变化为-0.73~2.00,平均值为0.01(表1)。

从雷达图指数(RI)来看,3月的葫芦岛、秦皇岛、大连、唐山水质指数显著低于其他城市( $P<0.05$ ),而盘锦、锦州和东营水质指数显著高于其他城市( $P<0.05$ );5月的葫芦岛水质指数显著最低( $P<0.05$ ),而营口、盘锦和滨州水质指数显著最高( $P<0.05$ )。

从内梅罗指数(NI)来看,3月的葫芦岛、秦皇岛、大连和唐山水质指数显著较低( $P<0.05$ ),营口和盘锦水质指数显著较高( $P<0.05$ );5月的大连和秦皇岛水质指数显著最低( $P<0.05$ ),营口、盘锦和滨州水质指数显著最高( $P<0.05$ )。

从主成分指数(PI)来看,3月的葫芦岛水质指数显著最低( $P<0.05$ ),盘锦、锦州和营口水质指数显著

最高( $P<0.05$ );5月的大连、秦皇岛和烟台水质指数显著最低( $P<0.05$ ),而盘锦、锦州、滨州、营口、潍坊水质指数显著最高( $P<0.05$ )。

总体上,渤海近岸海域水质综合指数高值区域主要分布在辽东湾北部的辽河口附近海域,其次为莱州湾西侧的黄河入海口附近海域(图3)。

### 2.2 渤海主要城市海水水质等级划分

对渤海主要城市3类水质指数进行主坐标分析(图4)。结果表明,3月,第1、2排序轴累积解释了水质综合指数空间分异的84.68%;5月,累积解释了水质综合指数空间分异的82.69%。沿第1主坐标轴从左向右水质状况呈向好趋势。3月,环渤海13个主要城市整体上可以分为5个群组,第Ⅰ群组为葫芦岛,第Ⅱ群组为大连、唐山和秦皇岛,第Ⅲ群组为沧州、烟台、天津、潍坊、滨州和东营,第Ⅳ群组为营口和锦州,第Ⅴ群组为盘锦;5月,整体上可以分为4个群组,第Ⅰ群组为葫芦岛,第Ⅱ群组为秦皇岛、大连、烟台、唐山和沧州,第Ⅲ群组为天津、东营、潍坊和锦州,第Ⅳ群组为营口、滨州和盘锦。

表 1 渤海海域主要城市海水水质综合评价结果

Tab.1 Water quality assessment of nearshore areas for the primary cities around Bohai Sea

城市	3月			5月		
	雷达图指数	内梅罗指数	主成分指数	雷达图指数	内梅罗指数	主成分指数
大连	3.87±1.49 <sup>ab</sup>	0.40±0.28 <sup>a</sup>	-0.56±0.44 <sup>abc</sup>	2.92±2.59 <sup>ab</sup>	0.30±0.42 <sup>a</sup>	-0.41±0.49 <sup>a</sup>
锦州	9.37±3.20 <sup>d</sup>	1.06±0.43 <sup>ab</sup>	1.40±0.99 <sup>ef</sup>	6.44±1.65 <sup>d</sup>	0.70±0.15 <sup>bcd</sup>	0.67±0.45 <sup>ef</sup>
营口	6.90±4.44 <sup>c</sup>	1.39±2.59 <sup>b</sup>	0.58±2.14 <sup>de</sup>	9.59±2.44 <sup>f</sup>	1.56±0.65 <sup>f</sup>	0.50±0.57 <sup>de</sup>
盘锦	12.97±2.90 <sup>e</sup>	2.92±1.65 <sup>c</sup>	2.23±1.69 <sup>f</sup>	9.08±3.07 <sup>ef</sup>	1.20±0.58 <sup>c</sup>	0.94±0.56 <sup>f</sup>
葫芦岛	2.45±1.36 <sup>a</sup>	0.34±0.13 <sup>a</sup>	-0.63±0.48 <sup>a</sup>	2.22±0.63 <sup>a</sup>	0.49±0.09 <sup>abc</sup>	-0.16±0.16 <sup>abc</sup>
唐山	3.35±1.38 <sup>ab</sup>	0.38±0.12 <sup>a</sup>	-0.57±0.38 <sup>ab</sup>	3.75±1.25 <sup>ab</sup>	0.39±0.14 <sup>ab</sup>	-0.22±0.21 <sup>ab</sup>
秦皇岛	2.95±1.09 <sup>a</sup>	0.38±0.16 <sup>a</sup>	-0.52±0.51 <sup>abc</sup>	2.51±0.86 <sup>ab</sup>	0.29±0.06 <sup>a</sup>	-0.31±0.26 <sup>a</sup>
沧州	5.46±1.22 <sup>bc</sup>	0.66±0.09 <sup>ab</sup>	-0.19±0.42 <sup>abcd</sup>	4.39±0.84 <sup>bc</sup>	0.58±0.07 <sup>abc</sup>	-0.19±0.17 <sup>abc</sup>
东营	6.98±1.24 <sup>cd</sup>	0.78±0.20 <sup>ab</sup>	0.31±0.40 <sup>cd</sup>	6.85±0.90 <sup>de</sup>	0.72±0.12 <sup>bcd</sup>	0.20±0.19 <sup>cd</sup>
烟台	5.40±1.27 <sup>bc</sup>	0.55±0.20 <sup>ab</sup>	-0.12±0.33 <sup>abcd</sup>	3.60±1.31 <sup>ab</sup>	0.41±0.17 <sup>ab</sup>	-0.23±0.32 <sup>a</sup>
潍坊	6.35±1.81 <sup>c</sup>	0.88±0.49 <sup>ab</sup>	0.01±0.45 <sup>abcd</sup>	5.77±1.25 <sup>cd</sup>	0.79±0.30 <sup>cd</sup>	0.28±0.13 <sup>de</sup>
滨州	6.57±0.18 <sup>c</sup>	0.76±0.07 <sup>ab</sup>	0.22±0.18 <sup>abcd</sup>	8.53±1.18 <sup>ef</sup>	0.97±0.08 <sup>de</sup>	0.55±0.23 <sup>def</sup>
天津	6.30±1.27 <sup>c</sup>	0.73±0.19 <sup>ab</sup>	0.27±0.30 <sup>bcd</sup>	5.96±1.00 <sup>cd</sup>	0.68±0.13 <sup>bcd</sup>	0.17±0.29 <sup>bcd</sup>
最大值	21.3	9.55	7.09	15.8	2.73	2.00
最小值	0.99	0.11	-1.20	1.21	0.13	-0.73
平均值	5.46	0.72	0.00	4.90	0.61	0.01
F	22.90*	8.28*	13.41*	21.23*	28.43*	18.54*

注:\*表示在0.05水平上具有显著差异;同列不同字母表示不同城市各评价指标在0.05水平上具有显著差异。

Note: \*significant difference at 0.05 level; Different lowercase letters indicate significant differences among different cities.

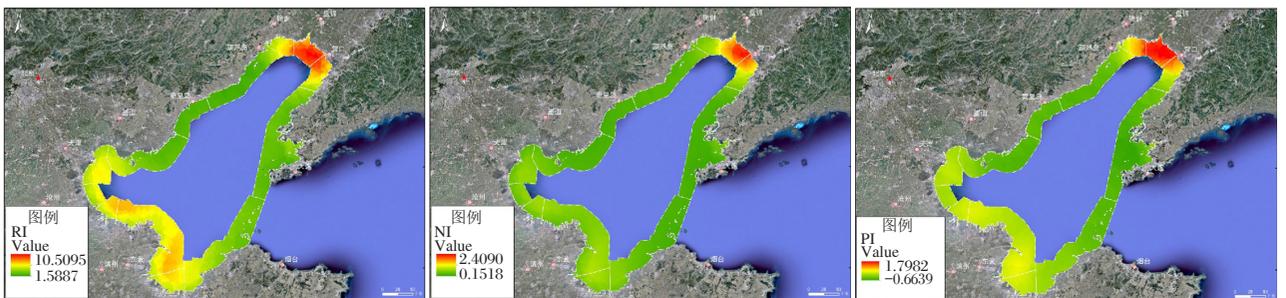


图 3 渤海近岸海域水质指数空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of water quality indices for the nearshore area of Bohai Sea

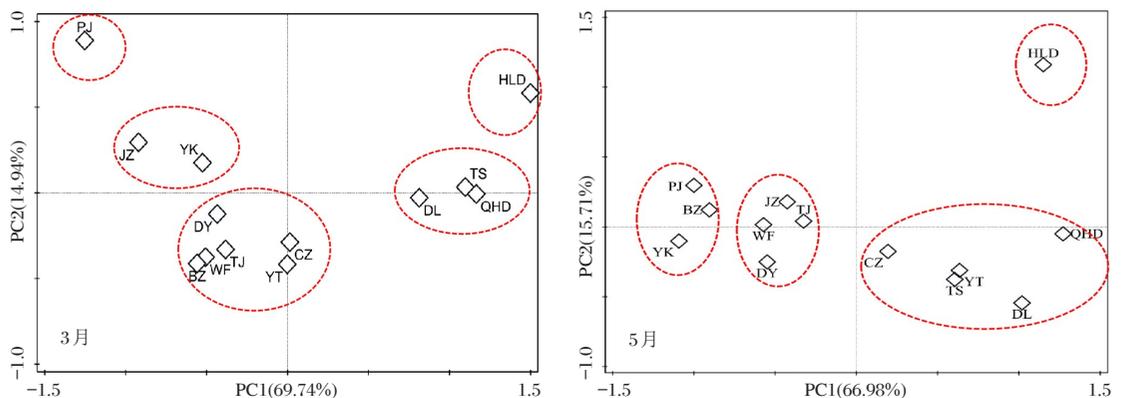


图 4 渤海近岸海域水质主坐标分析排序

Fig.4 Principal component analysis of nearshore water quality in Bohai Sea

根据渤海近岸海域3月和5月水质综合评价指数,对13个主要城市进行聚类分析(图5)。结果表明,环渤海13个主要城市根据聚类距离不同可以分为两大类。第I大类主要包括大连、秦皇岛、唐山、葫芦岛、沧州和烟台;第II大类又可以分为5个亚类,包括东营、天津、潍坊以及滨州、锦州、营口、盘锦。第I大类主要位于渤海湾和渤海外围近黄海区域,这一区域主要城市近岸海域水质较好;第II大类主要位于莱州湾和辽东湾,这一区域主要城市近岸海域水质较差。

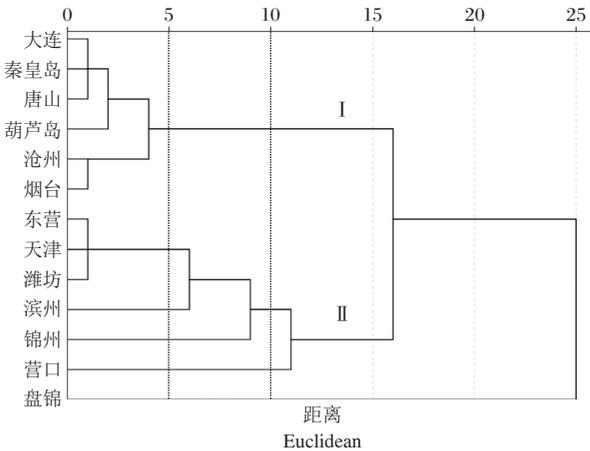


图5 渤海海域主要城市海水水质聚类分析

Fig.5 Cluster dendrogram of coastal water quality for the primary cities around Bohai Sea

### 2.3 水质评价指数对环境因子的敏感性

水质评价指数与环境因子的相关性见表2。

3月,渤海近岸海域各水质参数及水质评价指数与盐度呈极显著负相关性,与悬浮物浓度呈极显著正相关性;经度与化学需氧量呈极显著负相关性,而与活性磷酸盐呈极显著正相关性,与无机氮浓度和内梅罗指数呈显著正相关性;纬度与活性磷酸盐呈

极显著正相关性,与内梅罗指数呈显著正相关性,而与总氮浓度呈极显著负相关性;pH与无机氮和内梅罗指数呈极显著负相关性,与总磷和主成分指数呈显著负相关性。

5月,除活性磷酸盐外,各水质参数及评价指数均与盐度呈极显著负相关性;除总磷外,均与悬浮物浓度呈极显著正相关性;经度与总磷呈极显著负相关性,纬度与化学需氧量呈极显著正相关性,与内梅罗指数和主成分指数呈显著正相关性,而与总磷呈极显著负相关性;pH与化学需氧量呈极显著正相关性而与活性磷酸盐呈极显著负相关性;叶绿素a主要与化学需氧量呈显著正相关性与总磷呈极显著负相关性。

### 2.4 水质综合指数与优良面积的比例

雷达图指数、内梅罗指数及主成分指数三者之间及其与近岸海域水质优良面积比例均存在显著相关性( $R^2>0.5, P<0.001$ )(图6)。说明3类水质指数评价结果之间及其与水质优良面积比例具有很好的一致性。根据水质评价指数与优良面积比例拟合模型,当 $RI>1.88, NI\geq 2.25, PI\geq 1.81$ 时,近岸海域水质优良面积比例将近似为0;当 $RI\leq 3.16, NI\leq 0.37, PI\leq -0.55$ 时,近岸海域水质优良面积比例接近100%。

## 3 讨论

### 3.1 渤海近岸海域水质综合评价

渤海近岸海域水质环境总体上呈稳中向好趋势。田思瑶等(2019)对辽东湾中部近岸海水的研究发现,2016年春季辽东湾中部化学需氧量均值为1.84 mg/L,石油类物质平均浓度为0.025 mg/L;而本研究表明,辽东湾中部化学需氧量和石油类物质平均浓度分别为1.53 mg/L和0.20 mg/L,与2016年同

表2 水质评价指数与其他环境因子的相关性分析

Tab.2 Correlation between water quality indices and environmental factors

参数	3月					5月					
	经度	纬度	pH	盐度	悬浮物	经度	纬度	pH	盐度	悬浮物	叶绿素a
COD	-0.27**	0.20	0.09	-0.42**	0.21**	-0.06	0.38**	0.33**	-0.21**	0.37**	0.18*
SRP	0.43**	0.43**	-0.11	-0.20**	0.32**	0.04	0.11	-0.27**	-0.07	0.23**	0.09
TIN	0.15*	0.12	-0.19**	-0.49**	0.40**	0.06	0.03	-0.09	-0.28**	0.18**	0.01
TN	-0.08	-0.22**	-0.10	-0.39**	0.46**	-0.05	-0.05	-0.07	-0.32**	0.23**	-0.03
Oil	0.09	0.09	-0.12	-0.22**	0.30**	0.11	0.03	0.03	-0.25**	0.43**	0.04
TP	0.09	0.11	-0.17*	-0.22**	0.26**	-0.26**	-0.30**	-0.01	-0.53**	-0.01	-0.23**
RI	0.05	-0.01	-0.14	-0.41**	0.49**	-0.04	0.00	-0.08	-0.50**	0.28**	0.01
NI	0.17*	0.17*	-0.20**	-0.50**	0.40**	0.12	0.18*	0.00	-0.30**	0.22**	0.01
PI	0.10	0.12	-0.15*	-0.44**	0.45**	0.01	0.15*	0.04	-0.36**	0.44**	0.08

注:\*\*表示在0.01水平上显著相关;\*表示在0.05水平上显著相关。

Note: \*\* extremely significant correlation at 0.01 level; \*significant correlation at 0.05 level.

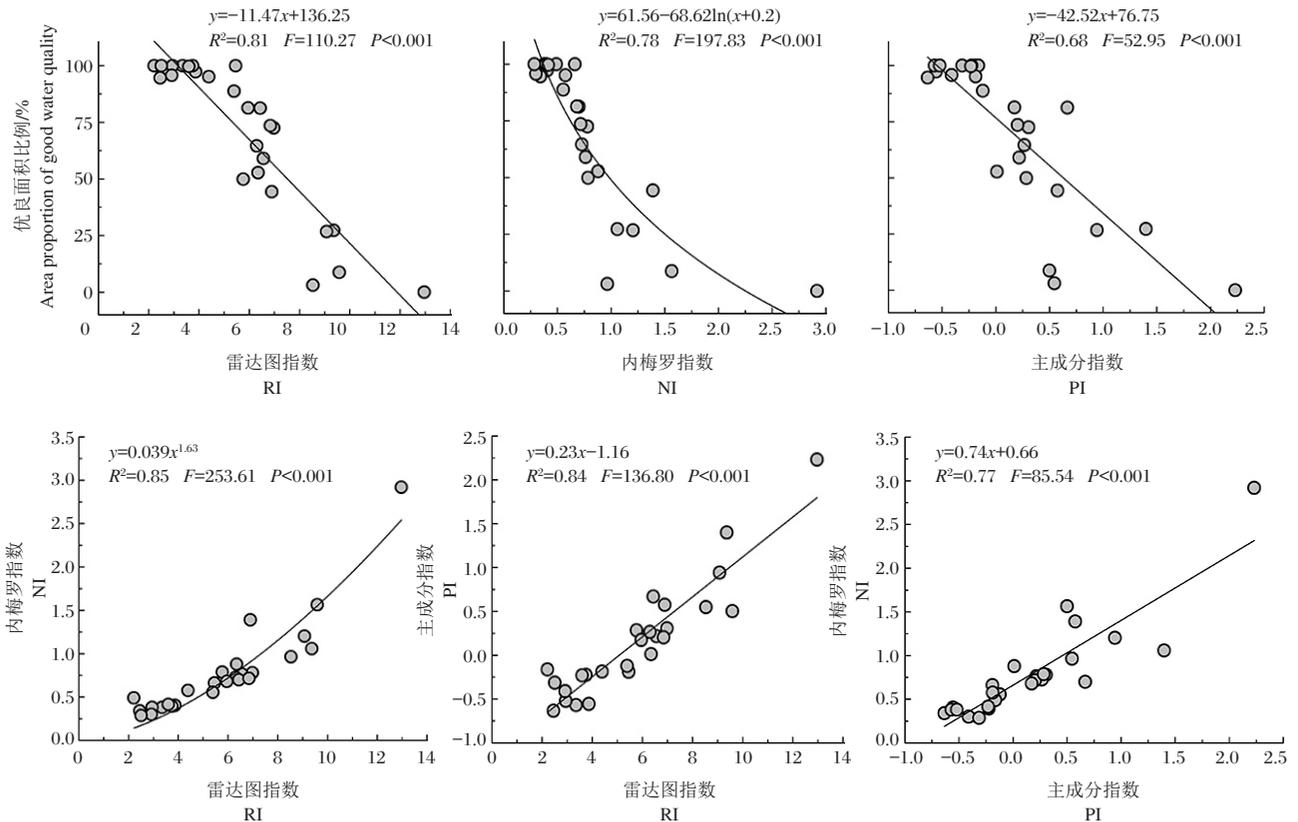


图 6 雷达图指数、内梅罗指数、主成分指数与水质优良面积比例的相关性

Fig.6 Regression analysis of radar chart, Nemerow index and principal component index and the ratio of good water quality area

期相比均有所降低。2012年夏季渤海湾天津近岸海水化学需氧量均值为2.04 mg/L,无机氮平均浓度为0.70 mg/L,活性磷酸盐平均浓度为19.0  $\mu\text{g/L}$ (阚文静等,2016)。本次研究表明,天津近岸海水化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐平均浓度分别为1.69 mg/L、0.26 mg/L和4.0  $\mu\text{g/L}$ ,与2012年相比,均有较大幅度的降低;赵玉庭等(2016)研究发现,2013年6月莱州湾近岸海水化学需氧量均值为1.45 mg/L,无机氮平均浓度为0.42 mg/L,活性磷酸盐平均浓度为3.50  $\mu\text{g/L}$ 。本研究中,莱州湾海域海水化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐平均浓度分别为1.12 mg/L、0.25 mg/L和6.0  $\mu\text{g/L}$ ,与2013年相比,化学需氧量和无机氮浓度明显降低,而活性磷酸盐浓度有所升高。

本研究中,雷达图指数、内梅罗指数和主成分指数对盐度和悬浮物浓度具有较为显著的敏感性,说明虽然只选择了化学需氧量、无机氮、总氮、总磷,活性磷酸盐和石油类物质6个水质参数,但这些因子与其他水质参数具有较强的共线性,因此本研究得到的3类水质指数完全能够客观表征水质环境的总体情况。雷达图指数、内梅罗指数和主成分指数之间

存在显著的相关性,表明三者评价结果一致,但3类指数在有些城市近岸海域之间也存在差异,主要是因为其对不同水质因子赋予的权重不同。总体上,这3类指数都能客观、准确地反映渤海近岸海域的水质状况,并且与近岸海域水质优良面积比例具有极显著的相关性,相关性程度为雷达图指数>内梅罗指数>主成分指数。因此,可以通过计算海水水质指数来粗略估算城市近岸海域的水质优良面积比例,进而快速评估海洋生态环境治理成效。

### 3.2 近岸海域水质空间分异影响因素

无机氮和总磷是渤海近岸海域的主要污染物,尤其是辽东湾北岸的盘锦、营口无机氮浓度达到了劣VI类水平。入海河流与近海养殖业所产生的营养物质输入是此区域氮磷浓度较高的主要原因(于大涛等,2016b)。有研究表明,辽东湾近岸海域污染物主要来源于辽河、大辽河、大凌河和小凌河4条主要入海河流,其中氮、磷主要来自于大辽河流域(王焕松等,2011)。因此,富营养化程度严重的区域主要出现在大辽河口、辽河口及其近岸海域;此外,河口、海湾的水动力环境也是影响近岸海域水质的重要因

素,辽东湾无机氮浓度在空间上总体呈现河口处高、外海海域低,由东北向西南递减的分布态势(李卫卫等,2019);这也是盘锦、营口等城市近岸海域水质指数较高的主要原因。李斌等(2018)研究发现,莱州湾及其邻近海域主要水质类别为Ⅰ、Ⅱ类,超标参数主要为石油类和总无机氮,尤其是莱州湾西北部石油类浓度值相对较高,与本研究中东营、滨州等城市水质雷达图所呈现的结果一致。滨州、东营水环境质量较差的原因,一方面是黄河和小清河等入海河流携带输入的各种污染物在莱州湾西岸海域长期滞留;另一方面是由于这一区域海水养殖和农业生产大规模聚集,农业非点源污染和渔业养殖尾水排放环境影响显著。海岸带滩涂围垦所引起的水动力条件变化是影响渤海湾污染物分布的主要原因。研究表明,渤海湾无机氮和无机磷的分布主要集中在北塘口和大沽口附近海域,并向东北部曹妃甸填海区扩散(秦延文等,2012)。因此,渤海湾海域天津近岸海水水质指数最高,主要污染物为无机氮和总磷。由于葫芦岛、秦皇岛位于渤海湾东北侧相对开阔的海域,而大连和烟台分别位于辽东湾和莱州湾东侧开阔海域,水动力条件较好,污染物迁移自净能力较强,因此水质综合评价指数较低,海水环境质量较好。主坐标分析和聚类分析均显示,葫芦岛、秦皇岛、大连和唐山的水质环境最好,盘锦、营口、锦州和滨州水质环境最差,主要是由于其所处海湾、河口区域的差异性特征所决定的。

#### 参考文献

- 褚帆,刘宪斌,刘占广,等,2015. 天津近岸海域海水富营养化评价及其主成分分析[J]. 海洋通报, 34(1):107-112.
- 党二莎,唐俊逸,周连宁,等,2019. 珠江口近岸海域水质状况评价及富营养化分析[J]. 大连海洋大学学报,34(4):121-128.
- 国家海洋局,2008a. 海洋调查规范:GB 12763.4-2007 第4部分:海水化学要素调查[S]. 北京:中国标准出版社.
- 国家海洋局,2008b. 海洋监测规范:GB 17378.4-2007 第4部分:海水分析[S]. 北京:中国标准出版社.
- 国家环境保护总局,2002. 地表水环境质量标准:GB3838-2002[S]. 北京:中国环境科学出版社.
- 国家质量技术监督局,2008. 海水水质标准:GB3097-1997[S]. 北京:中国标准出版社.
- 阙文静,范德江,张秋丰,等,2016. 渤海湾天津近岸海域水质特征及评价[J]. 海洋湖沼通报,38(1):25-29.
- 李斌,邓雪,衣秋蔚,2018. 2017年夏季莱州湾及其邻近海区水质分析与评价[J]. 海岸工程,37(4):44-52.
- 李卫卫,孙昭晨,梁书秀,2019. 辽河口区径流对污染物漂移扩散的影响[J]. 海洋环境科学,38(2):294-302.
- 林晓娟,高姗,仇天宇,等,2018. 海水富营养化评价方法的研究进展与应用现状[J]. 地球科学进展,33(4):373-384.
- 刘玲玲,阳文静,游清徽,等,2020. 基于雷达图的鄱阳湖湿地水质评价[J]. 水生态学杂志,41(4):1-8.
- 秦延文,张雷,郑丙辉,等,2012. 渤海湾岸线变化(2003—2011年)对近岸海域水质的影响[J]. 环境科学学报, 32(9): 2149-2159.
- 阙文静,范德江,张秋丰,等,2016. 渤海湾天津近岸海域水质特征及评价[J]. 海洋湖沼通报,38(1):25-29.
- 生态环境部,2020. 中国海洋生态环境状况公报[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部.
- 田思瑶,于晓彩,塔荣凤,等,2019. 辽东湾中部近岸海域 COD、石油类、叶绿素分布特征及富营养化状态评价[J]. 大连海洋大学学报,34(5):739-745.
- 王德青,万永波,王翔,等,2010. 基于主成分的改进雷达图及其在综合评价中的应用[J]. 数理统计与管理,29(5): 883-889.
- 王焕松,雷坤,李子成,等,2011. 辽东湾北岸主要入海河流污染物入海通量及其影响因素分析[J]. 海洋学报, 33(6):110-116.
- 王召会,吴金浩,胡超魁,等,2016. 辽东湾水体中石油类的时空分布特征和污染状况[J]. 渔业科学进展,37(3): 20-27.
- 于大涛,高范,姜恒志,2016a. 辽东湾西北部近岸海域水质现状调查及污染特征分析[J]. 海洋环境科学,35(4):540-550.
- 于大涛,李世龙,王紫竹,等,2016b. 辽东湾北部海区秋季海水富营养化程度分析[J]. 环境科学与技术,39(S2):402-406.
- 张广帅,闫吉顺,张全军,等,2020. 基于主成分分析法近岸海水环境质量与空间异质性研究——以庄河港近岸海域为例[J]. 海洋环境科学,39(2):244-252.
- 赵玉庭,苏博,李佳蕙,等,2013年春季莱州湾海域理化环境与水质状况分析[J]. 渔业科学进展,47(4):74-80.
- Akinbile C O, Omoniyi O, 2018. Quality assessment and classification of Ogbese river using water quality index (WQI) tool[J]. Sustainable Water Resources Management, 4(4): 1023-1030.
- Alves R I S, Machado C S, Beda C F, et al, 2018. Water quality assessment of the Pardo River Basin, Brazil: A multivariate approach using limnological parameters, metal concentrations and indicator bacteria[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 75(2):199-212.
- Brady J P, Ayoko G A, Martens W N, et al, 2015. Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 187(5):1-14.
- Gianello D, Ávila-Hernández E, Aguer I, et al, 2019. Water quality assessment of a temperate urban lagoon using physicochemical and biological indicators[J]. SN Applied Sciences,1(5): 470.

## Water Quality Assessment of Nearshore Waters of the Primary Urban Areas Around Bohai Sea

ZHANG Guang-shuai<sup>1,2</sup>, YAN Ji-shun<sup>1,2</sup>, WU Ting-ting<sup>3</sup>, WANG Quan-ming<sup>1,2</sup>, CAI Yue-yin<sup>1,2</sup>,

LI Bin-yong<sup>1,2</sup>, SHANG Jing-yuan<sup>4</sup>, YU Yong-hai<sup>1,2</sup>

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, P.R. China;

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Marine Ecosystem Restoration, Dalian 116023, P.R. China;

3. Dalian Compass Ocean Engineering Consulting Corporation Ltd., Dalian 116023, P.R. China;

4. Huludao Ecological Environment Protection Service Center, Huludao 125000, P.R. China)

**Abstract:** Based on the water quality assessment of nearshore waters for 13 cities around Bohai Sea, we conducted a comprehensive water environmental evaluation using radar charts, Nemerow index and principal component index. Based on the evaluation results, the status of nearshore coastal water quality was clarified and the sensitivity of the three evaluation indices to assessment parameters was analyzed. The aim was to apply comprehensive water quality indices to marine environmental assessment, and provide a reference for effectively assessing the comprehensive treatment and ecological conservation of Bohai Sea. The radar chart was created and the Nemerow and principal component indices were calculated based on six seawater quality variables obtained at 195 sampling sites in the nearshore area of Bohai Sea in March and May of 2020. The variables included chemical oxygen demand (COD), inorganic nitrogen (TIN), total nitrogen (TN), soluble reactive phosphate (SRP), total phosphorus (TP) and oil. Results show that the primary pollutants in the nearshore water of Bohai Sea were inorganic nitrogen and total phosphorus, followed by oil. Water quality in the nearshore areas of Huludao, Qinhuangdao, Dalian, and Yantai was significantly good, while water quality in the nearshore areas of Panjin, Jinzhou and Yingkou, located in northern Liaodong Bay, and Binzhou city in western Laizhou Bay were significantly poor. The three seawater quality indices used in this study were all sensitive to the salinity and suspended matter concentration of the water and correlated significantly with each other. Regression analysis also shows a close relationship between the three water quality indices and good water quality ratios in nearshore areas, indicating that the radar chart and both indices accurately reflect the water quality status of the nearshore water of Bohai Sea. Thus, these methods are appropriate for rapid seawater quality assessment in the nearshore area of Bohai Sea, and for quickly comparing the water quality of different urban nearshore areas.

**Key words:** water quality assessment; radar chart; Nemerow index; principal component analysis; Bohai Sea