

2014 年春季和冬季渤海海水营养盐时空 变化特征及富营养化评价*

隋 琪^{1,2} 夏 斌² 谢寒冰³ 崔 毅^{2①}
陈碧鹃² 崔正国² 丁东生²

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室
中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071; 3. 青岛市食品药品检验检测中心 青岛 266000)

摘要 根据 2014 年春季和冬季对渤海营养状况调查结果, 分析了该水域营养盐含量的变化和分布, 并对该水域营养水平状况进行了评价。结果显示, 2014 年春季无机氮含量水平高于冬季, $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均含量分别是冬季的 1.94、3.49 倍, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的平均含量相差不明显, 而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 平均含量低于冬季, 约为冬季的 80%。与海水水质标准相比, 冬季无机氮含量总体水平低于海水一类标准, 活性磷酸盐含量略高于海水一类标准值。春季无机氮含量总体水平低于海水一类标准值, 活性磷酸盐含量低于海水一类标准值。从水平分布来看, DIN 含量基本呈近岸高于中部的分布趋势, 而 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量呈近岸低于中部的分布趋势, 受黄河口径流的影响, 莱州湾 DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等值线较为密集。2014 年冬季 N/P 比值略低于 Redfield 比值, 而春季 N/P 比值高于 Redfield 比值, 春季无机磷相对缺乏。根据潜在性富营养化评价模式, 2014 年冬季(2 月)和春季(5 月)渤海水域营养水平较低, 均属贫营养水平。冬季有机污染指数 A 值为 0.66, 属有机污染程度 I 级, 水质较好, 春季有机污染指数 A 值为 1.05, 属有机污染程度 II 级, 水质开始受到污染。

关键词 渤海; 营养盐; 评价; 富营养化

中图分类号 X821 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)02-0010-06

渤海为半封闭性的内海, 几乎完全为大陆所环绕, 仅东南部有宽 50 n mile 余的渤海海峡与黄海相通, 平均水深为 18 m, 面积为 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, 封闭性较强。沿岸人口集中, 工农业发达, 并且有许多大小河流入海, 饵料丰富, 是黄、渤海许多经济鱼虾的产卵场和索饵肥育场, 在黄、渤海渔业生产中占有极其重要的地位。

海洋中的营养物质是浮游植物生长的重要生源要素, 不同时间、不同地点营养物质的含量和分布差异明显, 这些差异与海区内生物的生命、活动规律和人文条件有着密切的联系。因此, 了解海水中营养要素的含量水平和分布规律, 科学地估算和预报渤海的

生产能力, 制定增养殖措施及控制环境质量是十分必要的。

1 材料与方法

1.1 水样采集

2014 年 2 月(冬季)和 5 月(春季)对渤海进行调查, 调查站位遍及整个渤海, 共 50 个站位(图 1)。水样采用 Niskin 采水器采集, 采样层次为表层和底层。

1.2 分析方法

测定参数包括溶解氧(DO)、硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚

* 国家海洋局项目[DOME(P)(MEA)-01-01、DOME(P)(MEA)-02]资助。隋 琪, E-mail:sqsq78@163.com

① 通讯作者: 崔 毅, 研究员, E-mail:cui@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-03-09, 收修改稿日期: 2015-05-19

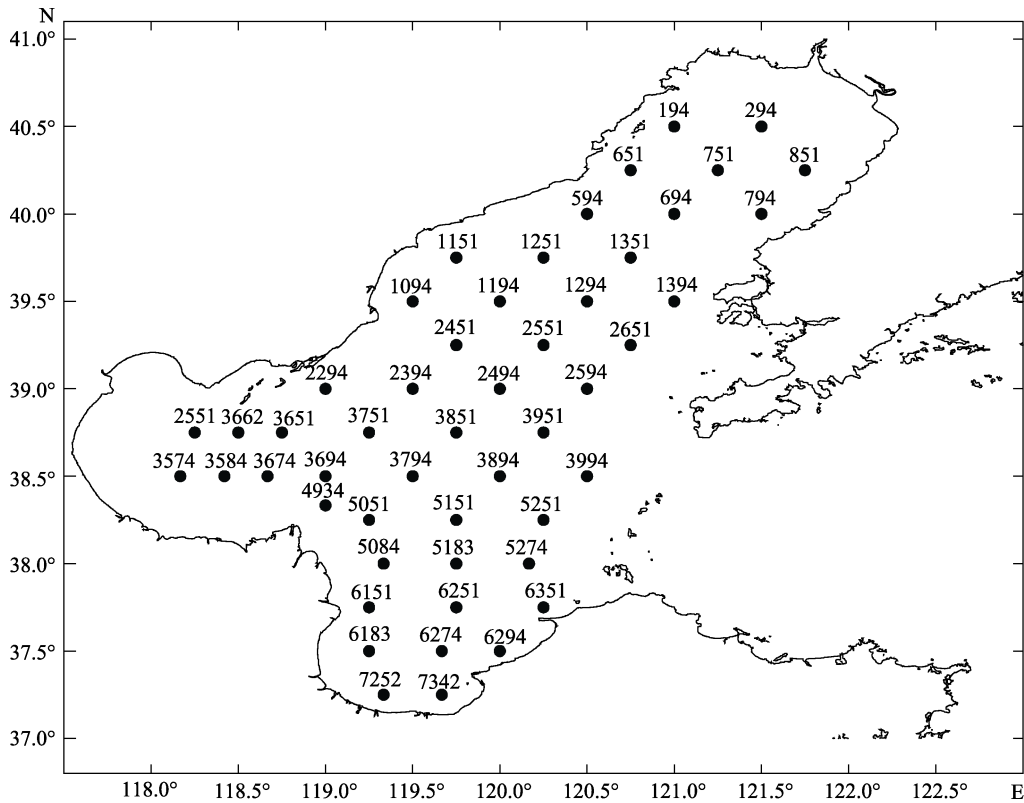


图 1 渤海调查站位

Fig.1 Sampling stations in the Bohai Sea

硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)和化学需氧量(COD)。DO 采用碘量法测定, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用镉柱还原法测定, $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用萘乙二胺分光光度法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用次溴酸盐氧化法测定, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用磷钼蓝分光光度法测定。DIN 是 $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 之和。样品采集及分析方法均按《海洋监测规范》(GB 17378.4-2007)所规定的方法进行(国家质量技术监督局, 2007)。

2 结果与讨论

2.1 营养盐时空分布特征

整个渤海水域来讲, 春季表层和底层 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均浓度分别为 8.03、71.57、69.94、12.51 $\mu\text{g/L}$; 冬季表层和底层 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均浓度分别为 4.14、74.53、20.04、

表 1 2014 年春、冬季渤海营养盐平均含量

Tab.1 The contents of nutrients in the Bohai Sea in Spring and winter of 2014 ($\mu\text{g/L}$)

季节 Season	水层 Water-course	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	IN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$
冬季 Winter	表层 Surface	4.60 (0.65–18.98)	80.55 (19.96–234.03)	25.48 (0.59–114.44)	110.63 (27.05–327.93)	15.29 (3.17–25.72)
	底层 Bottom	3.67 (0.93–16.76)	68.50 (3.20–162.07)	14.60 (0–97.20)	86.77 (6.52–266.41)	15.93 (1.66–27.23)
春季 Spring	表层 Surface	7.77 (2.04–20.37)	74.36 (11.42–217.44)	48.96 (9.68–152.29)	131.09 (51.92–262.53)	13.18 (6.79–76.59)
	底层 Bottom	8.28 (1.49–47.59)	68.77 (2.64–217.44)	90.91 (41.18–172.58)	167.96 (73.36–292.47)	11.84 (3.10–54.25)

注: 括号内数据为变化范围

Note: Data in bracket denoted the range

15.61 $\mu\text{g/L}$ 。由表 1 可以看出,春季整个渤海水域 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均含量高于冬季,分别是冬季的 1.94 倍、3.49 倍, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的平均含量相差不明显,而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均含量低于冬季,约为冬季的 80%。冬季和春季两次调查 $\text{NO}_3\text{-N}$ 为溶解无机氮的主要存在形式,所占比例分别为表层的 72.8% 和 56.7%、底层的 78.9% 和 40.9%; $\text{NH}_4\text{-N}$ 冬季和春季表层分别占无机氮的 23.0%、37.3%, 底层分别占 16.8%、54.1%; $\text{NO}_2\text{-N}$ 冬季和春季表层分别占无机氮的 4.2%、5.9%, 底层分别占 4.2%、4.9%。

与海水水质标准相比较可以看出,冬季(2月)无机氮总体水平低于海水一类标准值(200 $\mu\text{g/L}$)。其中,表层有 4 个测站无机氮含量超过海水一类标准值,底层有 3 个测站无机氮含量超过海水一类标准值,超标率分别为 7.8%、5.9%; 活性磷酸盐总体水平略高于海水一类标准值(15 $\mu\text{g/L}$), 表层有 26 个测站活性磷酸盐含量超过海水一类标准值, 底层有 24 个测站活性磷酸盐含量超过海水一类标准值, 超标率分别为 53.1%、49.0%。

春季(5月)无机氮总体水平低于海水一类标准值(200 $\mu\text{g/L}$)。其中,表层有 7 个测站无机氮含量超过海水一类标准值, 底层有 12 个测站无机氮含量超过海水一类标准值, 超标率分别为 14.3%、24.0%; 而各测站活性磷酸盐含量均低于海水一类标准值(15 $\mu\text{g/L}$)。

2.2 营养盐水平分布特征

由图 2 可以看出, DIN 冬季表、底层分布趋势基本一致, 呈近岸高中部低趋势。表层 DIN 在渤海中部有一个较密集闭合区, 并由中心向外逐渐降低。莱州湾底层 DIN 等值线较密集, 由南向北呈逐渐降低趋势, 其他水域分布较为均匀; 春季表层 DIN 在渤海中部有一个较密集闭合区, 并由中心向外逐渐增加。辽东湾和莱州湾黄河口附近水域等值线较密集, 并逐渐向中部呈递减趋势, 底层 DIN 分布趋势与表层相反, 各湾分布趋势均呈逐渐向渤海中部递减趋势。冬季 $\text{PO}_4\text{-P}$ 表、底层分布基本一致, 在渤海中部有一个较为密集等值线闭合区, 由中心向外呈逐渐降低趋势。莱州湾等值线分布较为明显, 由南向北呈逐渐升高趋势, 春季表层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在莱州湾东北部和辽东湾北部水域有一个较密集闭合区, 并由中心向外呈逐渐降低趋势, 与赵亮等(2002)研究基本一致。原因是春季浮游生物的快速生长导致近岸 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的减少, 而渤海中部的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量较高成密集等值闭合区, 其靠近莱州湾受水平运输影响, 莱州湾对流是向外运输, 导致在莱州湾东北部出现较大范围等值线密

集区。其他水域水平变化不明显, 含量分布较为均匀, 春季底层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在渤海中部有一个较大范围等值线密集区, 并由中心向外呈逐渐递减趋势。

2.3 营养盐结构

N/P 比(原子比)是氮和磷两元素对水体富营养化的重要性指标。一般海水中正常 N/P 比值为 16 : 1 (Pilson, 1985), 浮游植物从海水中摄取的 N/P 比值也约为 16 : 1(郑重, 1986), 偏离过高或过低都可能引起浮游植物的生长受到某一相对低含量元素的限制 (Redfield *et al*, 1963)。根据 2014 年渤海冬季和春季调查结果表明(表 2), 从整个渤海近岸水域来看, 冬季表层 N/P 比值与 Redfield 比值基本一致, 底层 N/P 比值低于 Redfield 比值, 冬季营养盐结构总体水平略低于 Redfield 比值, 无机氮显得相对紧缺。而春季表层和底层 N/P 比值均较高于 Redfield 比值, 分别比正常 N/P 比值高 1.38、1.96 倍, 春季无机磷显得相对缺乏, 为渤海浮游植物生长的限制因子, 与蒋红等(2005)的研究结果一致。N/P 比值的升高主要是总无机氮含量升高较大所致, 渤海无机氮呈明显递增趋势, 春季最为显著, 与唐启升(2012)研究结果相一致。

2.4 营养类型分析

水中营养状况是由营养物质进入水体的多寡所决定, 如果进入水体中的营养盐大于所消耗量, 就会破坏水生生态系统平衡, 产生营养过剩的现象。目前, 国内外对海水富营养化尚未有统一的评价标准或模型(日本机械工业联合会等, 杨祯奎等译, 1987; 林荣根, 1996; 熊德琪等, 1993)。本研究根据郭卫东等(1998)提出的潜在性富营养化评价模式进行评价。营养级的划分见表 3。

运用上述评价模式, 对渤海 2014 年冬季和春季总体富营养化水平进行评价, 结果显示, 2014 年冬季和春季渤海水域营养水平较低, 均属贫营养水平(表 4)。

2.5 有机污染状况分析

采用有机污染综合指数法进行评价(蒋岳文等, 1991), 有机污染分级见表 5。

$$A = \frac{COD_i}{COD_s} + \frac{IN_i}{IN_s} + \frac{IP_i}{IP_s} - \frac{DO_i}{DO_s}$$

式中, A 为有机污染指数; COD_i 、 IN_i 、 IP_i 、 DO_i 分别为化学需氧量、无机氮、无机磷和溶解氧的实测值; COD_s 、 IN_s 、 IP_s 、 DO_s 分别为一类海水水质标准, 分别为 2.0、0.2、0.015、6.0 mg/L 。

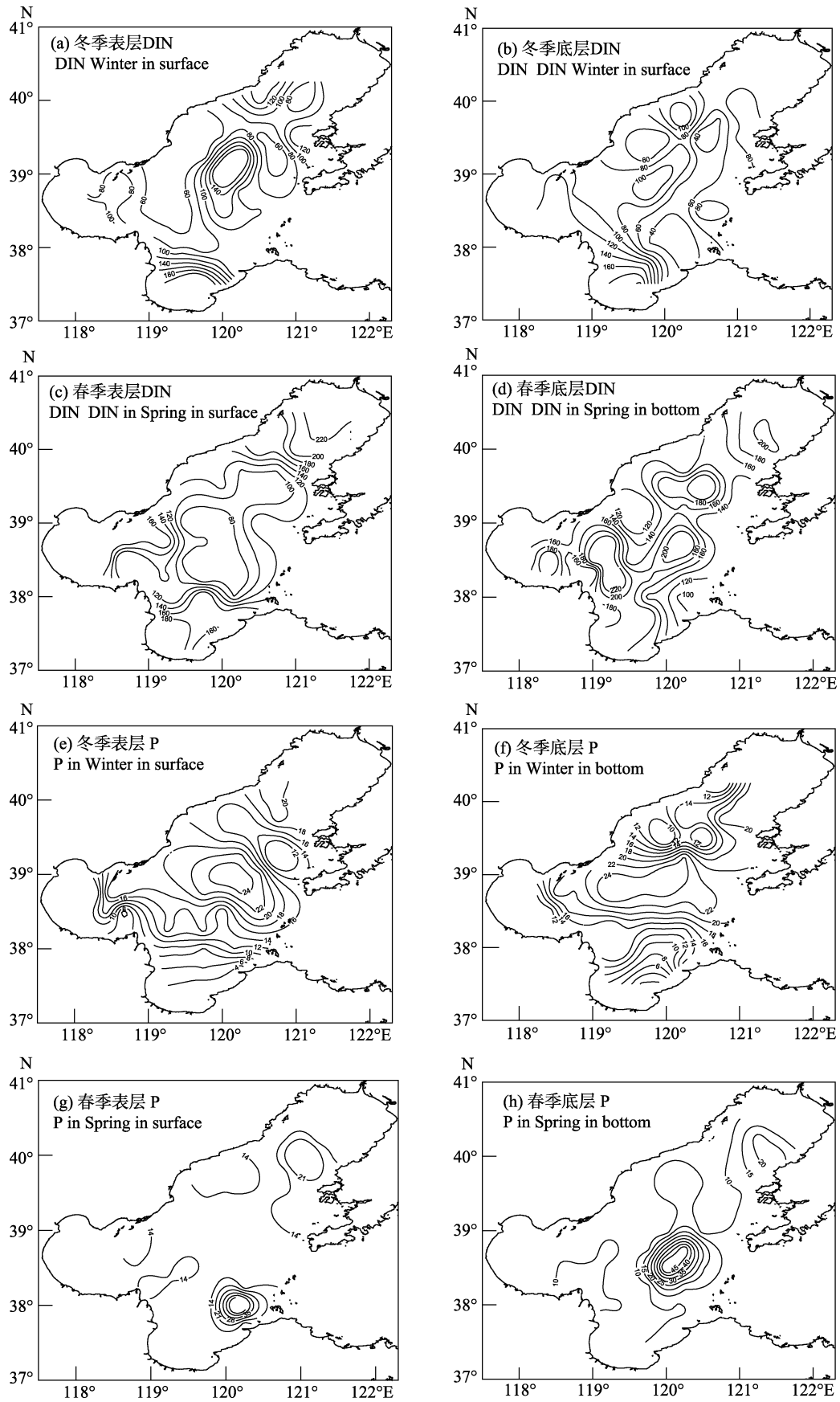


图 2 2014 年渤海海域冬季和春季 DIN, PO_4^{3-} -P 平面分布

Fig.2 Distribution of DIN and PO_4^{3-} -P in the Bohai Sea in winter and spring of 2014 ($\mu\text{g/L}$)

表2 2014年渤海水域营养盐相对组成
Tab.2 The relative composition of nutrients
in the Bohai Sea in 2014

月 Month	水层 Layer	原子比 N/P
2月 Feb.(Winter)	表层 Surface 底层 Bottom	16.13 12.15
5月 May (Spring)	表层 Surface 底层 Bottom	22.02 31.41

通过计算A值的结果与表5相比,相对于整个渤海水域来讲,2014年冬季(2月)A值较小,为0.66,属有机污染程度I级,水质较好;春季(5月)A值为1.05,属有机污染程度II级,水质开始受到污染。

3 结论

(1) 渤海2014年春季无机氮含量水平高于冬季,

表3 潜在性富营养化评价标准

Tab.3 The evaluation standards for potential eutrophication

级别 Grade	营养级 Nutrient level	DIN (mg/L)	IP (mg/L)	原子比 N/P
I 贫营养 Poor nutrition		< 0.2	< 0.03	8-30
II 中度营养 Medium nutrition		0.2-0.3	0.030-0.045	8-30
III 富营养 Rich nutrition		> 0.3	> 0.045	8-30
IV _P 磷限制中度营养 Medium nutrition with limited phosphorus		0.2-0.3	-	> 30
V _P 磷中等限制潜在性富营养 Potential rich nutrition with medium limited phosphorus		> 0.3	-	30-60
VI _P 磷限制潜在性富营养 Potential rich nutrition with limited phosphorus		> 0.3	-	> 60
IV _N 氮限制中度营养 Medium nutrition with limited nitrogen		-	0.030-0.045	< 8
V _N 氮中等限制潜在性富营养 Potential rich nutrition with medium limited nitrogen		-	> 0.045	4-8
VI _N 氮限制潜在性富营养 Potential rich nutrition with limited nitrogen		-	> 0.045	< 4

表4 2014年渤海水域营养类型评价
Tab.4 Assessment on the nutrition style in the
Bohai Sea in 2014

月份 Month	DIN (mg/L)	IP (mg/L)	原子比 N/P	营养级 Nutrition level
2月 Feb.	0.099	0.016	14.13	I
5月 May	0.150	0.013	25.55	I

注:表中数据为表、底层平均
Note: Data obtained from the cuerage of surface and bottom

表5 有机污染评价分级
Tab.5 Evaluation and ranking of organic pollution

A值 A value	有机污染程度分级 Organic pollution classification	水质质量评价 Water quality evaluation
< 0	0	良好 Fine
0-1	1	较好 Better
1-2	2	开始受污染 Getting polluted
2-3	3	轻度污染 Slight pollution
3-4	4	中度污染 Medium pollution
4-5	5	严重污染 Severe pollution

NO₂-N、NH₄⁺-N平均含量分别是冬季的1.94、3.49倍,NO₃⁻-N的平均含量相差不明显,而PO₄³⁻-P平均含量低于冬季,约为冬季的80%。与海水水质标准相比,冬季(2月)无机氮含量总体水平低于海水一类标准值(200 μg/L),活性磷酸盐含量总体水平略高于海水一类标准值(15 μg/L)。春季(5月)无机氮含量总体水平低于海水一类标准值(200 μg/L),活性磷酸盐含量各测站低于海水一类标准值(15 μg/L)。

(2) 从水平分布来看, DIN含量基本呈近岸高于中部的分布趋势,而PO₄³⁻-P含量呈近岸低于中部的分布趋势,受黄河口径流的影响,莱州湾DIN和PO₄³⁻-P等值线较为密集。

(3) 2014年渤海冬季营养盐结构总体水平略低于Redfield比值,而春季N/P比值较高于Redfield比值,春季无机磷为渤海浮游植物生长的限制因子。

(4) 运用潜在性富营养化评价模式表明,2014年冬季和春季渤海水域营养水平较低,均属贫营养水平。

(5) 2014年冬季(2月)有机污染指数A值为0.66,属有机污染程度I级,水质较好;春季(5月)有机污染指数A值为1.05,属有机污染程度II级,水质开始受到污染。

参 考 文 献

- 日本机械工业联合会. 杨祯奎, 等译. 水域的富营养化及其防治对策. 北京: 中国环境科学出版社, 1987, 271
- 林荣根. 海水富营养化水平评价方法浅析. 海洋环境科学, 1996, 15(2): 28–31
- 国家海洋局. 海洋监测规范. 北京: 海洋出版社, 1990
- 郑重. 海洋浮游生物生态学文集. 厦门: 厦门大学出版社, 1986, 106
- 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
- 赵亮, 魏皓, 冯士桢. 渤海氮磷营养盐的循环和收支. 环境科学, 2002, 23(1): 78–82
- 唐启升. 中国区域海洋学——渔业海洋学. 北京: 海洋出版社, 2012, 46
- 蒋红, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 渤海近 20 年来营养盐变化趋势研究. 海洋水产研究, 2005, 26(6): 61–67
- 蒋岳文, 王永强, 尚龙生. 大连湾海水营养盐的含量及有机污染状况的分析. 海洋通报, 1991, 10(1): 100–103
- 熊德琪, 陈守煜. 海水富营养化模糊评价理论模式. 海洋环境科学, 1993, 12(3–4): 104–110
- Pilson MEQ. Annual cycles of nutrients and chlorophyll in Narragansett Bay, Rhode Island. *J Mar Res*, 1985, 43(4): 849–873
- Redfield AC, Ketchum BH, Richards FA. The influence of organisms on the composition of sea water. In: Hill, MN(ed), *The Sea*. London: Wiley Interscience, 1963: 26–77

(编辑 陈严)

Study on Temporal and Spatial Variation of Nutrients and Evaluation on Eutrophication in the Seawater of the Bohai Sea in Winter and Spring of 2014

SUI Qi^{1,2}, XIA Bin², XIE Hanbing³, CUI Yi^{2①}, CHEN Bijuan², CUI Zhengguo², DING Dongsheng²

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 3. Qingdao Center for Food and Drug Control, Qingdao 266000)

Abstract In this study we evaluated the level and distribution of nutrients in the Bohai Sea based on the survey in the spring and winter of 2014. We found that compared to winter of 2014, the level of inorganic nitrogen was higher in the spring, and the average contents of $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were 1.94 and 3.49 times higher in the spring respectively. However, the average content of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in spring was about 80% of that in winter. According to the seawater quality standard, in winter the inorganic nitrogen content was lower than the first-level seawater standard, and the active phosphate content was slightly higher than the standard; in spring the inorganic nitrogen content was lower than the standard, and the active phosphate content was lower too. In terms of horizontal distribution, the coast area had higher DIN but lower $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ than the central area. Due to the effects of runoff river estuary the isolines of DIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ were dense in the Laizhou Bay. In winter of 2014 the N/P ratio was slightly lower than Redfield ratio, but in spring the former was higher than the latter and there was a relative lack of inorganic phosphorus. According to the potential eutrophication assessment model, the nutrition level was poor in both winter and spring of 2014. In winter the organic pollution index A value was 0.66 and the organic pollution level was 1, indicating good water quality. In spring the organic pollution index A value was 1.05 and the organic pollution grade was 2, which meant the water body started to be polluted.

Key words Bohai Sea; Nutrient; Evaluation; Eutrophy

① Corresponding author: CUI Yi, E-mail: cui@ysfri.ac.cn