



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20140061

天津近岸海域营养盐变化特征及富营养化概况分析

尹翠玲, 张秋丰, 阚文静, 张亚楠
(国家海洋局天津海洋环境监测中心站, 天津 300450)

摘要: 根据 2004—2012 年在渤海湾进行的连续监测结果, 分析、探讨了渤海湾近年来营养盐的变化特征及富营养化概况。结果表明: 近年来, 渤海湾海水中 DIN 含量升高, DIP 含量有所降低, 与 1978—1980 年相比, DIN 增加 1.18 倍, DIP 降低 62.1%; 从空间分布上看, 北塘和汉沽断面的营养盐含量高于其他断面; 从时间分布上看, 枯水期的营养盐含量低于丰水期; 从无机氮的结构特征上看, $\text{NO}_3\text{-N}$ 占无机氮含量的 40.4%~81.5%, 三态无机氮之间基本处于热力学平衡状态; 从 N/P 比值、Si/N 比值和 Si/P 比值上看, 近年来渤海湾 N/P 比值升高, 该海域已由原来的高磷低氮转换为低磷高氮的状态; 富营养化评价结果是, 2008—2012 年渤海湾近岸海域 NQI 指数变化范围为 3.24~4.28, 平均值为 3.71, 全部处于富营养化状态。

关键词: 渤海湾; 营养盐; 变化特征; 富营养化

中图分类号: P734.4⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2015)01-0056-06

Nutrient Variation and Eutrophication Assessment of Bohai Bay in Tianjin

YIN Cuiling, ZHANG Qiufeng, KAN Wenjing, ZHANG Yanan

(Tianjin Oceanic Environmental Monitoring Central Station, SOA, Tianjin 300450, China)

Abstract: Variation characteristics of nutrients and eutrophication overview of Bohai Bay in Tianjin were analyzed in accordance with the results of the continuous monitoring carried out from 2004 to 2012 in Bohai Bay. The results showed that the DIN content increased while the DIP content decreased in recent years in Bohai Bay. Compared with the data in 1978 and 1980, DIN increased 1.18 times and DIP decreased 62.1%. From the spatial distribution point of view, the nutrient contents in the waters of Beitang and Hangu sections were higher than those in other sections. From temporal distribution point of view, the nutrient contents in the wet period were lower than those in the dry season. The structural characteristics of the inorganic nitrogen show that $\text{NO}_3\text{-N}$ makes up 40.4% to 81.5% of the inorganic nitrogen which was basically in a state of thermodynamic equilibrium. As to the N/P, Si/N and Si/P ratios, N/P ratio increased and the waters changed from the status of high phosphorus low nitrogen to low phosphorus and high nitrogen in recent years in Bohai Bay. The results of eutrophication assessment showed that the NQI index range was from 3.24 to 4.28, with an average of 3.71, and all the waters were in the state of eutrophication from 2008 to 2012 in Bohai Bay.

Key words: Bohai Bay; nutrient; change characteristics; eutrophication

渤海湾为封闭的内湾, 是蓟运河、潮白新河、永定新河、海河、独流减河、子牙新河和捷地减河等河流的入海处, 湾内饵料丰富, 在渤海渔业中占有极其重要的地位。天津市土地总面积为 11 916.85 km², 所辖海域面积约 3 000 km², 海岸线长 153.669 km, 潮间带面积 370.32 km²[1]。天津市经济发展迅速, 仅 2011 年国内生产总值(GDP)就达到 11 190.99 亿元, 但随

着经济的发展, 渤海湾的生态环境遭到了严重破坏, 海水富营养化严重, 赤潮频发, 尤其是营养盐的污染日趋严重。

目前, 关于渤海湾营养盐及富营养化状况已有研究[2-15]。研究表明, 渤海湾天津近岸海域水体中的氮污染比较严重, 磷为渤海湾浮游植物生长的限制因子[14-15], 海水呈现富营养化状态[11,13]。但以前的研

收稿日期: 2014-04-17; 修回日期: 2014-09-18

基金项目: 国家海洋局北海分局科技处项目(2013B14)

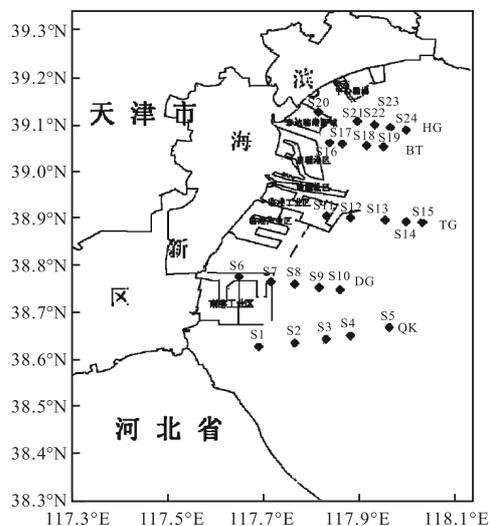
作者简介: 尹翠玲(1980—), 女, 山东平度人, 工程师, yiyi18913@163.com.

究往往仅局限于 1~3 年的调查结果,不能很好地评价渤海湾营养盐的长期变化趋势以及富营养化的增长状况.本文根据 2004—2012 年的监测资料,阐述了渤海湾无机氮、活性磷酸盐和硅酸盐等的变化特征,分析了目前渤海湾的富营养化概况,以期为今后天津市的赤潮防灾减灾工作提供参考.

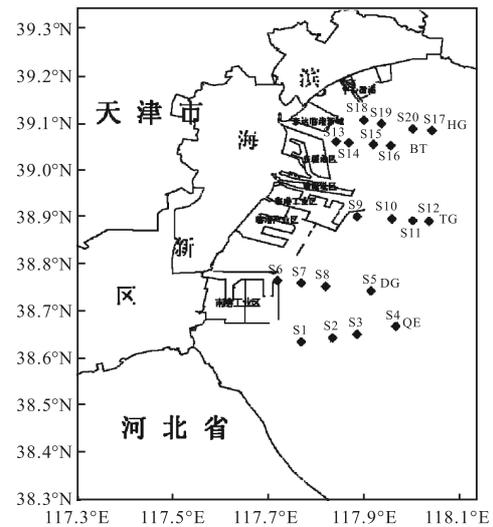
1 调查范围及分析方法

2004—2007 年调查的范围在 $38^{\circ}37'04''\text{N} \sim 39^{\circ}06'57''\text{N}$, $117^{\circ}39'00''\text{E} \sim 118^{\circ}02'00''\text{E}$,共布设 30 个站位.由于围填海的原因,2008—2009 年的调查站位进行了稍微变动,调查的范围在 $38^{\circ}37'3.72''\text{N} \sim 39^{\circ}06'57''\text{N}$, $117^{\circ}39'00''\text{E} \sim 118^{\circ}01'59''\text{E}$,共布设 24 个站位.2010—2012 年调查的范围在 $38^{\circ}39'25''\text{N} \sim 39^{\circ}05'48''\text{N}$, $117^{\circ}46'00''\text{E} \sim 118^{\circ}04'00''\text{E}$,共布设 20 个站位.2008—2012 年各站位的布设见图 1.

监测时间段为 2004—2012 年的丰水期和枯水期.监测项目主要包括硝酸盐氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、活性磷酸盐(DIP,以 PO_4^{3-} 计)、硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)、叶绿素 a(chl-a)和化学需氧量(COD).用卡盖氏有机玻璃采样器采集海水样品,经 T6 新世纪紫外分光光度计测定,按 GB 17378.4—2007《海洋监测规范》的方法进行分析.其中: $\text{NO}_3\text{-N}$ 用铈-镉还原比色法, $\text{NO}_2\text{-N}$ 用盐酸奈乙二胺比色法, $\text{NH}_4\text{-N}$ 用次溴酸盐氧化法,DIP 用磷钼蓝分光光度法, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 用硅钼黄分光光度法,叶绿素 a 用紫外分光光度法,COD 用碱性高锰酸钾法.



(a) 2008—2009 年



(b) 2010—2012 年

HG 为汉沽断面; BT 为北塘断面; TG 为塘沽断面; DG 为大港断面; QK 为歧口断面

图 1 2008—2012 年渤海湾营养盐调查站位

Fig. 1 Sampling stations in Bohai Bay from 2008 to 2012

2 结果与讨论

2.1 营养盐污染现状

2.1.1 营养盐年平均含量

近年来渤海湾海水中营养盐的枯水期(5 月份)和丰水期(8 月份)的含量见表 1. DIN 在枯水期的变化范围为 $301 \sim 741 \mu\text{g/L}$,平均值为 $503 \mu\text{g/L}$,在丰水期的变化范围为 $352 \sim 1004 \mu\text{g/L}$,平均值为 $650 \mu\text{g/L}$.近年 DIN 大体呈先升高后降低的趋势,与 2004 年相比,2012 年的枯水期和丰水期 DIN 含量均有所升高,分别比 2004 年升高 21.5%和 84.7%. DIP 在枯水期的变化范围为 $4.31 \sim 50.7 \mu\text{g/L}$,平均值为 $17.4 \mu\text{g/L}$,在丰水期的变化范围为 $8.88 \sim 41.2 \mu\text{g/L}$,平均值为 $21.5 \mu\text{g/L}$.近年 DIP 大体呈先降低后升高的趋势,与 2004 年相比,2012 年的枯水期 DIP 降低 65.7%,丰水期 DIP 升高 38.7%. 硅酸盐在枯水期的变化范围为 $222 \sim 550 \mu\text{g/L}$,平均值为 $364 \mu\text{g/L}$,在丰水期的变化范围为 $538 \sim 908 \mu\text{g/L}$,平均值为 $765 \mu\text{g/L}$.近年硅酸盐在枯水期和丰水期大体均呈先升高后降低的趋势,与 2005 年相比,2009 年的枯水期硅酸盐增加 64.0%,丰水期降低 10.5%. 总体来看,近年来渤海湾海水中 DIN 含量升高,DIP 含量有所降低.与 1978—1980 年渤海湾的营养盐调查数据相比^[2],近年 DIN 增加了 1.18 倍,DIP 降低了 62.1%. DIP 的下降可能与近年来含磷洗涤产品的禁用有

关. DIN 升高可能与近年来渤海湾沿岸工业、城市生活污水排放大量增加有关.

根据本单位对天津市入海排污口的监测数据可知:2005 年北塘口、大沽排污河口、海河河口、子牙新河河口和独流减河河口的氨氮年入海排放量分别为 1 960、905、1 338.8、744.5、25.6 吨, COD 年入海排放量分别为 135、52.7、38.5、35.7、2.64 万吨, 活性磷酸盐年入海排放量分别为 389.8、76.6、24.86、105.1、0.756 吨, 悬浮物年入海排放量分别为 14.4、2.35、2.2、1.03、0.542 万吨, 2005 年天津市 5 个主要

入海排污口的主要污染物排海量为 285.6 万吨. 据历史资料统计^[16-17]: 2009 年^[16]通过天津市主要排污口排入海的污水总量约为 17.9 亿吨, 其中, 氨氮约 0.437 万吨; 2011 年^[17]天津市境内 83 个人河排污口排放量为 9.36 亿立方米^[17], 其中蓟运河为 5 781.4 万立方米, 永定新河为 2 532.22 万立方米. 从 2005、2009 和 2011 年的排污量变化上看, 近年来天津市的污水排放量呈增加趋势, 大量的污水为渤海湾天津近岸海域带来了大量的营养盐.

表 1 2004—2012 年渤海湾枯水期和丰水期营养盐变化

Tab. 1 Nutrient changes in the dry season and wet season from 2004 to 2012 in Bohai Bay

营养盐	月份	营养盐含量/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)									
		2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	平均值
DIN	5 月	414	417	453	515	681	—	—	301	741	503
	8 月	352	1004	895	648	773	526	436	555	658	650
DIP	5 月	50.7	12.0	15.7	4.31	6.52	—	—	8.78	23.5	17.4
	8 月	15.5	41.2	37.2	18.1	20.8	8.88	17.8	19.2	15.0	21.5
SiO ₃ -Si	5 月	—	222	550	321	—	—	—	—	—	364
	8 月	—	855	788	737	908	538	—	—	—	765

注: “—”表示缺少数据; 2008 年 5 月份 DIP 含量与文献[13]中结果不一致, 在此进行订正.

2.1.2 营养盐分布差异

近年渤海湾天津近岸海域的营养盐监测主要分为 5 个断面, 从北到南依次是汉沽断面、北塘断面、塘沽断面、大港断面和歧口断面. 图 2 分析了各个断面的营养盐分布情况.

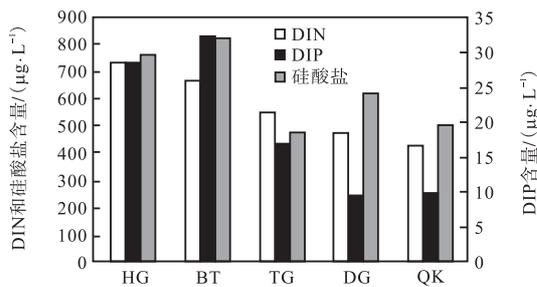


图 2 各个断面营养盐平均含量

Fig. 2 Nutrients' sectional distribution in the coastal waters of Bohai Bay

图 2 结果表明: DIN 在各个断面的分布情况为 $\text{HG} > \text{BT} > \text{TG} > \text{DG} > \text{QK}$, DIP 在各个断面的分布情况为 $\text{BT} > \text{HG} > \text{TG} > \text{QK} > \text{DG}$, SiO₃-Si 在各个断面的分布情况为 $\text{BT} > \text{HG} > \text{DG} > \text{QK} > \text{TG}$. 综合来看, 北塘和汉沽断面的营养盐含量较高. 分析可能原因是由于汉沽存在增养殖区, 贝类、鱼类的养殖造成北塘和汉沽周围海域的营养盐含量升高. 历史资料显示^[18], 1990 年 8—9 月天津塘沽至河北黄骅沿海发生

大规模赤潮的一个重要成因是由大量虾池排放水造成的. 另外, 在北塘和汉沽存在潮白新河、蓟运河和永定新河 3 条主要的入海河流(图 3), 根据调查数据(本研究单位“入海江河污染物调查”), 2012 年此 3 条河流中氨氮最高达 7.99 mg/L, 总氮最高达 2.33 mg/L, 总磷最高达 5.35 mg/L.

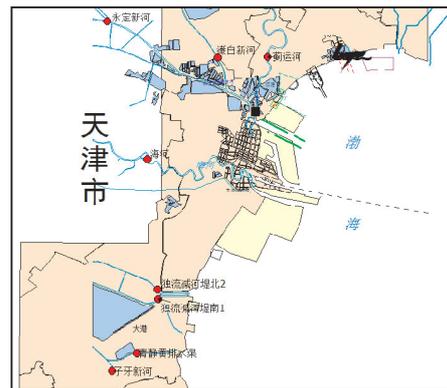


图 3 天津近岸主要入海河流

Fig. 3 The major rivers into coastal waters in Tianjin

表 1 分析了近年渤海湾枯水期和丰水期营养盐的变化, 结果表明, 枯水期的 DIN、DIP 和 SiO₃-Si 的平均含量均明显低于丰水期, 因为天津属于温带季风气候, 8 月份的降水量要明显高于 5 月份, 这也充分说明渤海湾天津近岸海域的营养盐输入与径流量呈

正相关,因为在丰水期,大量降水导致许多河口排洪放闸,大量营养物质的输入导致丰水期营养盐含量急剧升高,此结论与历史研究结果相符^[7]。

2.1.3 无机氮结构特征

在氮循环中,有机氮 \rightarrow NH₄-N \rightarrow NO₂-N \rightarrow NO₃-N,当达到热力学平衡时,N最终转化为NO₃-N.表2分析了近10年来NO₂-N、NO₃-N和NH₄-N分别占DIN的比例,其中,NO₃-N是无机氮的主要存在形式,NO₃-N/DIN比值在40.4%~81.5%范围,平均值为68.00%,这一结果与以前的研究结果相符^[15].与1982—1998年的平均比例相比^[4],NO₂-N在无机氮中所占的比例有所升高,增加了1.17倍;NO₃-N所占比例无明显变化,仅增加了2.51%;NH₄-N所占比例则明显下降,下降了41.9%.亚硝酸盐比例的增加,反映了陆源径流对无机氮含量的影响,同时也说明目前农业化肥使用主要是以氮肥为主,过量的氮肥随着农田排灌或雨水冲刷而大量流失^[4].NH₄-N比例的下降,则说明NH₄-N已被大部分转化为NO₃-N,三态无机氮之间基本处于热力学平衡状态。

表2 2004—2012年渤海湾无机氮的结构特征

Tab.2 Inorganic nitrogen structural features of Bohai Bay from 2004 to 2012

时间	无机氮平均比例/%		
	NO ₂ -N/DIN	NO ₃ -N/DIN	NH ₄ -N/DIN
2004—2012年	17.00	68.00	15.00
1982年 ^[4]	5.66	52.20	42.14
1992年 ^[4]	10.00	72.00	18.00
1998年 ^[4]	7.86	74.76	17.38

2.1.4 营养盐比例变化

氮元素和磷元素是浮游植物细胞原生质的重要组成部分,浮游植物对其的吸收通常是按照一定比例进行的,偏高或偏低都会对浮游植物的生长起到一定的限制作用^[19-20].研究表明,适合硅藻生长的 $n(C):n(Si):n(N):n(P)$ 比例为106:16:16:1^[21],浮游植物的细胞大小和群落组成也会受到营养盐比例的影响^[22-23].近年来渤海湾海水中的N/P比值($n(N)/n(P)$)、Si/N比值($n(Si)/n(N)$)和Si/P比值($n(Si)/n(P)$)见图4(该结果为根据5月份与8月份平均值计算得到)。

N/P比值在25.6~131,平均值为78.6;Si/N比值在0.38~0.62,平均值为0.49;Si/P比值在22~74,平均值为49.3个比值基本呈现先升高后降低的趋势,其中,Si/N比值和Si/P比值均在2008年达到最高值,N/P比值在2009年达到最高值,这一监测结果

与渤海湾营养盐的年平均含量结果相符。

与适合硅藻生长的C:Si:N:P比例相比^[19],N/P比值升高,且已远远超出适合浮游植物生长的Redfield比值(16:1);从Si/P比值来看,由于活性磷酸盐的含量相对较低,导致Si/P的比值在近几年均大于16:1,Si/N比值小于1,因此,近年来渤海湾的无机氮含量升高,无机磷含量降低,浮游植物生长繁殖的主要限制因子为活性磷酸盐,这与以前的研究结果相符^[3].而从Si/N的比值来看,营养盐硅也受到轻微限制,这与“虽然目前硅藻在渤海的浮游植物群落中仍然处于优势地位,但甲藻也在逐渐兴起”的结论相符^[24]。

比较渤海湾历年来的营养盐比例变化^[4],1982年N/P比值为1.3,Si/N比值为25.5,Si/P比值为34.4;1992年N/P比值为19.6,Si/N比值为2.1,Si/P比值为41.0;1998年N/P比值为24.8,Si/N比值为2.7,Si/P比值为56.2;近年渤海湾N/P比值升高,该海域已由原来的高磷低氮转换为低磷高氮的状态,分析原因,一是可能与含磷洗涤用品的禁用有关,二是可能与天津近岸工业、城市生活污水排放大量增加有关,具体原因还有待进一步深入研究。

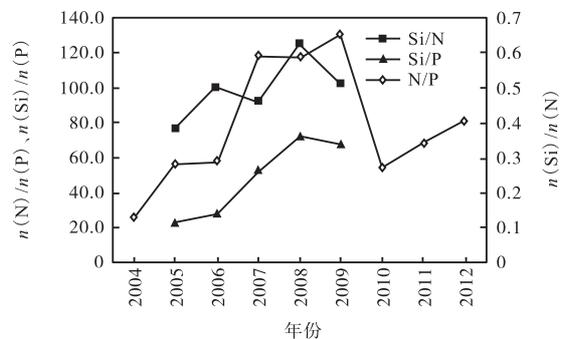


图4 2004—2012年渤海湾营养盐比值变化

Fig.4 Nutrient ratio changes of Bohai Bay from 2004 to 2012

2.2 富营养化分析

在一定条件下,海水中的氮、磷等营养盐的供给和消耗会达到一个动态平衡,而当营养盐的供给大于消耗时,海水就会出现富营养化^[4].目前,国内外对富营养化的评价标准不统一,有的学者从DO、BOD和叶绿素角度去分析海区的富营养化状况^[25-29],还有学者主要从COD和富营养化指数进行分析^[2].综合各方面考虑,本文引用目前国内比较常用的一种方法进行富营养化评价,该方法根据欧盟OSPAR的“综合指数法”^[30-31]中的营养状态质量指数法(NQI

指数法)^[32-35]进行了富营养化评价,计算公式为

$$NQI = \frac{COD}{COD'} + \frac{\rho(DIN)}{\rho'(DIN)} + \frac{\rho(PO_4-P_s)}{\rho'(PO_4-P_s)} + \frac{\rho(chl-a)}{\rho'(chl-a)}$$

式中: COD、 $\rho(DIN)$ 、 $\rho(PO_4-P_s)$ 、 $\rho(chl-a)$ 代表实测值; COD'、 $\rho'(DIN)$ 、 $\rho'(PO_4-P_s)$ 、 $\rho'(chl-a)$ 分别为各自的营养状况分析标准, COD' = 3.0 mg/L, $\rho'(DIN)$ = 0.3 mg/L, $\rho'(PO_4-P_s)$ = 0.03 mg/L, $\rho'(chl-a)$ = 5 mg/m³. NQI > 3 时为富营养化状态, 2 < NQI < 3 时为中等营养状态, NQI < 2 时为贫营养状态.

近年渤海湾的 NQI 指数变化见图 5. 2008—2012 年渤海湾近岸海域 NQI 指数变化范围为 3.24 ~ 4.28, 平均值为 3.71, 全部处于富营养化状态. 其中, 以 2012 年 NQI 指数最高, 富营养化程度最高, 这一研究结果与“渤海沿岸区域经常处于富营养化状态”的结论相符^[36].

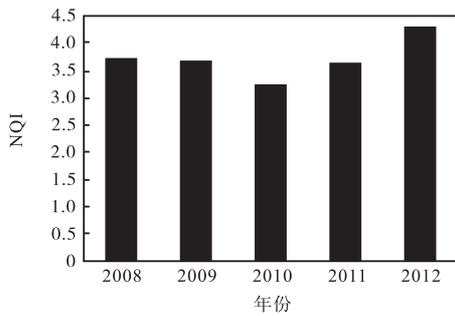


图5 2008—2012年渤海湾富营养化指数变化

Fig. 5 Eutrophication index changes in Bohai Bay from 2008 to 2012

3 结论

(1) 近年来, 渤海湾近岸海域海水中 DIN 和活性硅酸盐含量升高, DIP 含量有所降低, 与 1978—1980 年相比, DIN 增加了 1.18 倍, DIP 降低了 62.1%, N/P 比值比 1982—1998 年明显升高, 且已远远超出适合浮游植物生长的 Redfield 比值(16 : 1).

(2) 近年来, 渤海湾近岸海域海水中的 DIN 在各个断面的分布情况为 HG > BT > TG > DG > QK, DIP 在各个断面的分布情况为 BT > HG > TG > QK > DG, SiO₃-Si 在各个断面的分布情况为 BT > HG > DG > QK > TG; 其中, 北塘和汉沽断面的营养盐含量较高, 分析主要原因是由于汉沽存在增养殖区, 再加上在北塘和汉沽存在潮白新河、蓟运河和永定新河 3 条主要的入海河流所致.

(3) 时间分布表明, 枯水期的 DIN、DIP 和 SiO₃-Si 含量均明显低于丰水期, 这也充分说明渤海湾天津近岸海域的营养盐输入与径流量呈正相关.

(4) NO₃-N 是无机氮的主要存在形式, NO₃-N/DIN 比值变化范围为 40.4% ~ 81.5%, 平均值为 68.00%, 三态无机氮之间基本处于热力学平衡状态.

(5) 近年来渤海湾无机氮含量升高, 无机磷含量降低, 活性硅酸盐含量基本无变化, 浮游植物生长繁殖的主要限制因子为活性磷酸盐; 分析原因, 可能与含磷洗涤用品的禁用有关, 也可能与天津近岸工业、城市生活污水排放大量增加有关, 具体原因有待进一步深入研究.

(6) 运用 NQI 指数法进行富营养化评价结果表明, 2008—2012 年渤海湾近岸海域 NQI 指数变化范围为 3.24 ~ 4.28, 平均值为 3.71, 全部处于富营养化状态. 其中, 以 2012 年的 NQI 指数最高, 富营养化程度最高.

参考文献:

- [1] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 2012 年天津市统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012: 28.
- [2] 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[J]. 海洋环境科学, 1983, 2(2): 41-55.
- [3] 崔毅, 宋云利. 渤海海域营养现状研究[J]. 海洋水产研究, 1996, 17(1): 57-62.
- [4] 蒋红, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 渤海近 20 年来营养盐变化趋势研究[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(6): 61-67.
- [5] 沈志良. 渤海湾及其东部水域的水化学要素[J]. 海洋科学集刊, 1999, 41: 51-59.
- [6] 石强, 陈江麟, 李崇德. 渤海硝酸盐氮和亚硝酸盐氮季节循环分析[J]. 海洋通报, 2001, 20(6): 32-39.
- [7] 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[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(1): 15-19.
- [8] 李清雪. 渤海湾浮游生物氮吸收动力学研究[J]. 河北建筑科技学院学报, 2001, 18(2): 1-4.
- [9] 赵亮, 魏皓, 冯士管. 渤海氮磷营养盐的循环和收支[J]. 环境科学, 2002, 23(1): 78-81.
- [10] 赵骞, 田纪伟, 赵仕兰, 等. 渤海冬夏季营养盐和叶绿素 a 的分布特征[J]. 海洋科学, 2004, 28(4): 34-39.
- [11] 秦延文, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾水环境氮、磷营养盐分布特点[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 172-176.
- [12] 郭全, 王修林, 韩秀荣, 等. 渤海海区 COD 分布及对海水富营养化贡献分析[J]. 海洋科学, 2005, 29(9): 71-

- 75.
- [13] 阚文静,张秋丰,胡延忠,等. 渤海湾水体富营养化与有机污染状况初步评价[J]. 海洋通报,2010,29(2):172-175.
- [14] 阚文静,张秋丰,石海明,等. 近年来渤海湾营养盐变化趋势研究[J]. 海洋环境科学,2010,29(2):238-241.
- [15] 石海明,尹翠玲,张秋丰,等. 近年来渤海湾赤潮监控区营养盐变化及其结构特征分析[J]. 海洋环境科学,2010,29(2):246-249.
- [16] 天津市海洋局. 2009年天津市入海排污口及其邻近海域环境监测与评价报告[R]. 天津:天津市海洋局,2009.
- [17] 闫凤冬. 天津市入河排污口调查及水量平衡分析[J]. 现代水务,2012(3):11-14.
- [18] 张朝贤,邹淑美. 赤潮的监测和防治简介[J]. 黄渤海海洋,1991,9(2):63-68.
- [19] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of seawater[M]//Hill M N. The Sea. New York: Interscience, 1963:26-77.
- [20] Olausson E. Chemistry and Biogeochemistry of Biogeochemistry of Estuaries[M]. New York: J W&S, 1980:147.
- [21] 夏平,陆斗定,朱德弟,等. 浙江近岸海域赤潮发生的趋势与特点[J]. 海洋学研究,2007,25(2):47-56.
- [22] Paatsch J, Radach G. Long-term simulation of the eutrophication of the North Sea: Temporal development of nutrients, chlorophyll and primary production in comparison to observations[J]. Journal of Sea Research, 1997, 38(3):275-310.
- [23] Egge J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations?[J]. Journal of Marine Systems, 1998, 16(3):191-198.
- [24] 孙军,刘东艳,王威,等. 1998年秋季渤海中部及其临近海域的网采浮游植物群落[J]. 生态学报,2004,24(8):1644-1656.
- [25] Bach H K, Orhon D, Jensen O K, et al. Environmental model studied for the Istanbul master plan. Part II: Water quality and eutrophication[J]. Water Science and Technology, 1995, 32(2):149-158.
- [26] Orhon D. Evaluation of the impact from the black sea on the pollution of the marmara sea[J]. Water Science and Technology, 1995, 32(7):191-198.
- [27] Theodorou A J. An assessment of water quality in a coastal embayment (Phaleron Bay, Greece) [J]. Water Science and Technology, 1995, 32(7):25-32.
- [28] Rosenberg R, Cato I, Forlin L, et al. Marine environment quality assessment of the Skagerrak-Kattegat[J]. Journal of Sea Research, 1996, 35(1/2/3):1-8.
- [29] Ruley J E, Rusch K A. An assessment of long-term post-restoration water quality trends in a shallow, subtropical, urban hypereutrophic lake[J]. Ecological Engineering, 2002, 19(4):265-280.
- [30] Jiang P, Wang J F, Cui Y L, et al. Molecular phylogenetic analysis of attached Ulvaceae species and free-floating Enteromorpha from Qingdao coasts in 2007[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2008, 26(3):276-279.
- [31] 霍元子,田千桃,徐栅楠,等. 浒苔对米氏凯伦藻生长的克生作用[J]. 海洋环境科学,2010,29(4):496-499.
- [32] Morand P, Briand X. Excessive growth of macroalgae: A symptom of environmental disturbance[J]. Botanica Marina, 1996, 39:491-516.
- [33] Liu D Y, Keesing J K, Dong Z J, et al. Recurrence of the world's largest green-tide in 2009 in Yellow Sea, China: Porphyra yezoensis aquaculture rafts confirmed as nursery for macroalgal blooms[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(9):1423-1432.
- [34] Sun S, Wang F, Li C L, et al. Emerging challenges: Massive green algae blooms in the Yellow Sea[J/OL]. Nature Precedings. (2008-09-07) [2014-04-17]. <http://precedings.nature.com/documents/2266/version/1>.
- [35] Jeong J H, Jin H J, Sohn C H, et al. Algicidal activity of the seaweed *Corallina pilulifera* against red tide microalgae[J]. Journal of Applied Phycology, 2000, 12(1):37-43.
- [36] 徐贵义,孙树琪. 氨碱厂的废液对渤海湾的环境污染[J]. 纯碱工业,1996(4):23-29.