

近年渤海中部海域活性磷酸盐的时空变化特征*

陈聚法[#] 赵俊[#] 过锋 曲克明 崔正国
孙雪梅 朱建新 丁东生 刘传霞

(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)

摘要 渤海封闭性强,水动力条件和自净能力较弱,其生态系统较为敏感和脆弱。2011年位于渤海中部的蓬莱 19-3 油田发生重大溢油事故,对渔业生态环境和渔业资源造成了严重影响。为了解和掌握该起溢油污染事故发生后渔业生态环境的变化状况,分别于 2012–2014 年在渤海中部海域进行了 9 个航次的生态环境跟踪调查。利用其中部分调查资料,作者对渤海中部活性磷酸盐的时空变化特征及其影响因素进行了分析探讨。结果显示,(1) 2012–2014 年春季和夏季渤海中部海域活性磷酸盐含量符合第二类海水水质标准要求,秋、冬季部分海域已受到活性磷酸盐的污染。(2) 不同季节渤海中部海域活性磷酸盐的平面分布趋势各异,垂直分布也存在季节差异。春季和夏季活性磷酸盐呈现由表层至底层递减的趋势,秋季和冬季接近呈垂直分布均匀状态。(3) 渤海中部海域活性磷酸盐平均含量季节变化明显,其含量顺序由高到低依次为冬季、秋季、春季、夏季,冬季明显高于夏季。2014 年渤海中部海域活性磷酸盐含量低于 2013 年,呈逐年降低趋势。(4) 渤海中部海域活性磷酸盐时空变化受到诸多因素的影响,营养盐的外源补充、内源再生和生物消耗是影响活性磷酸盐时空变化的最重要因素。

关键词 活性磷酸盐; 时空变化; 影响因素; 渤海中部海域

中图分类号 X824 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2016)04-0028-08

渤海为我国半封闭的内海,三面环陆,仅东部通过渤海海峡与黄海相通。渤海海域面积为 77284 km²,大陆海岸线长 2668 km,平均水深 18 m。渤海沿岸有人海河流 100 余条,其中主要入海河流 40 余条,较大河流包括黄河、小清河、海河、滦河、大辽河等,形成渤海沿岸三大水系和三大海湾生态系统。渤海封闭性较强,水动力条件和自净能力不强,其生态系统较为敏感和脆弱。一旦受到污染,渤海生态系统受损程度要重于水动力条件强的开阔海域,受损生态系统的恢复也需要更长的时间。

从 2011 年 6 月 4 日开始,位于渤海中部的蓬莱 19-3 油田发生重大溢油事故,事故持续时间之长,影

响范围之广在渤海前所未有的,对渔业生态环境和渔业资源造成了严重影响。为了解和掌握该起溢油污染事故发生后渔业生态环境的变化状况,分别于 2012 年春季、2013 年和 2014 年春、夏、秋、冬四季在渤海中部海域进行了 9 个航次的生态环境跟踪调查。作者利用海水中活性磷酸盐的调查结果,对渤海中部活性磷酸盐的时空变化特征及其影响因素进行了分析探讨,既可实时了解研究海域营养盐的现状,又可评估蓬莱 19-3 油田溢油事故对污染海域生态环境的短期和中期影响。本研究内容属于海洋溢油生态影响研究的范畴,也是溢油污染海域生态修复研究的基础。

有关渤海海域海水营养盐的分布变化特点与营

*农业部溢油专项“渤海生态环境监测与评估”(农办渔[2012]117号)和“应对溢油关键技术专项研究”(2012-NZ-5739)共同资助

[#] 共同第一作者: 陈聚法, 研究员, E-mail: chenjf@ysfri.ac.cn; 赵俊, 研究员, E-mail: zhaojun@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2015-05-27, 收修改稿日期: 2015-08-10

养状况已有诸多分析研究结果(于春艳等, 2013; 石强 2013; 张乃星等, 2011; 张继民等, 2008; 蒋红等, 2005; 赵骞等, 2004; 赵亮等, 2002; 崔毅等, 1996; 陈淑珠等, 1991; 林庆礼等, 1991; 吕小乔等, 1985), 但近年对渤海中部海水营养盐的系统研究未见报道。作者通过分析 2012–2014 年渤海中部活性磷酸盐调查资料, 对该海域活性磷酸盐的时空变化进行了研究, 对于渤海生态环境的保护和受损生态系统的恢复具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 调查方法

1.1.1 调查区域与站位设置 调查区域为渤海中部海域(图 1), 设置生态环境调查站位 41 个, 水样采集层次为表层、10 m 层、底层。调查时间分别为 2012 年春季; 2013 年春季、夏季、秋季、冬季; 2014 年春季、夏季、秋季、冬季, 共计 9 个航次。

1.1.2 调查项目与分析方法 调查项目包括水温、盐度、pH、DO、COD、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、氨氮、无机氮、活性磷酸盐、石油类、重金属(铜、锌、铅、镉、汞)、砷等。本研究仅对活性磷酸盐数据进行分析。活性磷酸盐样品的采集、处置和检测均按《海洋监测规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2007)的规定和要求进行。

1.2 评价方法

采用单因子污染指数法, 单因子污染指数计算公式: $P_i = C_i / C_{i0}$ 。式中, P_i 为某项因子的污染指数, C_i 为某项因子的实测值, C_{i0} 为某项因子的评价标准值。

以污染指数值 1.0 作为该因子是否对海水产生污染的基本界线, 大于 1.0 说明海水已被该因子污染。

依据《海水水质标准》(国家环境保护局等, 1997)中的第一类标准(活性磷酸盐 ≤ 0.015 mg/L)和第二类标准(活性磷酸盐 ≤ 0.030 mg/L), 分别对调查海域活性磷酸盐的污染状况进行评价。

2 结果与分析

2.1 近年渤海中部海域活性磷酸盐的含量与空间分布

2.1.1 活性磷酸盐的含量状况 对 2012–2014 年 9 个航次活性磷酸盐调查结果进行统计分析。结果显示, 2012 年春季渤海中部海域活性磷酸盐含量范围为 4.43–22.07 $\mu\text{g/L}$, 表层、10 m 层和底层的含量平均值分别为 11.12、10.94、10.45 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。

2013 年春季渤海中部海域活性磷酸盐含量范围为 4.52–19.96 $\mu\text{g/L}$, 表层、10 m 层和底层含量平均值分别为 11.03、11.09、10.51 $\mu\text{g/L}$; 夏季活性磷酸盐含量为 2.12–9.70 $\mu\text{g/L}$, 表层、10 m 层和底层含量平均值分别为 5.51、4.97、4.77 $\mu\text{g/L}$; 秋季活性磷酸盐含量范围为 3.03–47.35 $\mu\text{g/L}$, 表层、10 m 层和底层含量平均值分别为 23.57、25.05、26.16 $\mu\text{g/L}$; 冬季活性磷酸盐含量为 8.57–38.12 $\mu\text{g/L}$, 表层、10 m 层和底层含量平均值分别为 22.33、23.25、22.19 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。2014 年春季渤海中部海域活性磷酸盐含量为 1.20–24.93 $\mu\text{g/L}$, 表层、10 m 层和底层含量平均值分别为 9.13、8.25、8.99 $\mu\text{g/L}$; 夏季活性磷酸盐含量为 0.45–18.23 $\mu\text{g/L}$, 表层、10 m 层和底层含量平均值分

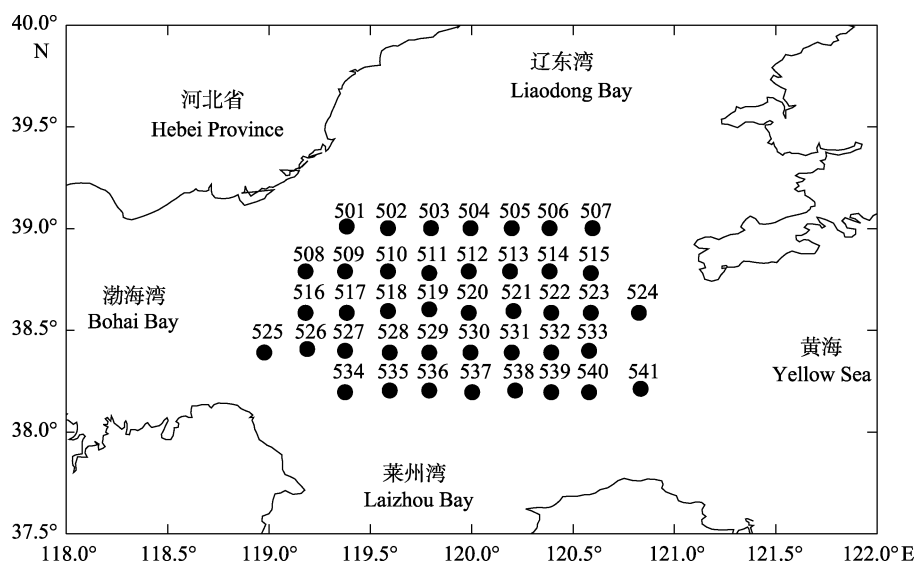


图 1 调查海域和站位分布

Fig.1 Surveyed areas and sampling stations

别为 3.26、3.04、2.90 $\mu\text{g/L}$ ；秋季活性磷酸盐含量在 4.14–33.36 $\mu\text{g/L}$ ，表层、10 m 层和底层含量平均值分别为 15.00、13.52、15.64 $\mu\text{g/L}$ ；冬季活性磷酸盐含量为 18.75–55.27 $\mu\text{g/L}$ ，表层、10 m 层和底层含量平均值分别为 33.85、32.87、32.63 $\mu\text{g/L}$ (表 1)。

2012–2014 年各个调查航次渤海中部海域表层、10 m 层和底层活性磷酸盐含量范围列入表 1。

2.1.2 活性磷酸盐的空间分布 平面分布趋势：渤海中部海域表层、10 m 层和底层活性磷酸盐的平面分布趋势相似，作者以表层为例来分析其平面分布趋

势。春季调查海域表层活性磷酸盐高含量区主要位于渤海湾湾口附近和 38.5°N 附近的東西向带状区域，其他区域活性磷酸盐含量相对较低。夏季表层活性磷酸盐高含量区主要集中在调查海域的西北部，其他区域活性磷酸盐含量相对较低。秋季表层活性磷酸盐高含量区主要集中在调查海域的北部，其他区域活性磷酸盐含量相对较低。冬季表层活性磷酸盐高含量区主要集中在调查海域的东北部，调查海域东南角和西南角也存在活性磷酸盐高含量区，其他区域活性磷酸盐含量相对较低(图 2)。垂直分布趋势：春季和夏季渤海

表 1 2012–2014 年渤海中部海域活性磷酸盐含量状况

Tab.1 Concentrations of active phosphate in the central Bohai Sea during 2012–2014

调查时间 Survey time	含量范围 DIP scope ($\mu\text{g/L}$)		
	表层 Surface	10 m 层 10 m depth	底层 Bottom
2012 年春季 Spring, 2012	4.43–22.07	4.43–20.60	5.90–19.13
2013 年春季 Spring, 2013	5.93–18.56	4.52–18.59	4.52–19.96
2013 年夏季 Summer, 2013	2.12–9.70	2.12–8.70	2.12–8.18
2013 年秋季 Autumn, 2013	3.03–38.12	8.57–39.96	8.57–47.35
2013 年冬季 Winter, 2013	14.11–36.27	8.57–32.57	8.57–38.12
2014 年春季 Spring, 2014	1.20–22.14	1.20–17.95	1.20–24.93
2014 年夏季 Summer, 2014	0.45–18.23	0.45–17.12	0.45–8.23
2014 年秋季 Autumn, 2014	4.14–33.36	4.14–24.59	7.06–23.13
2014 年冬季 Winter, 2014	27.51–39.20	27.51–43.59	18.75–55.27

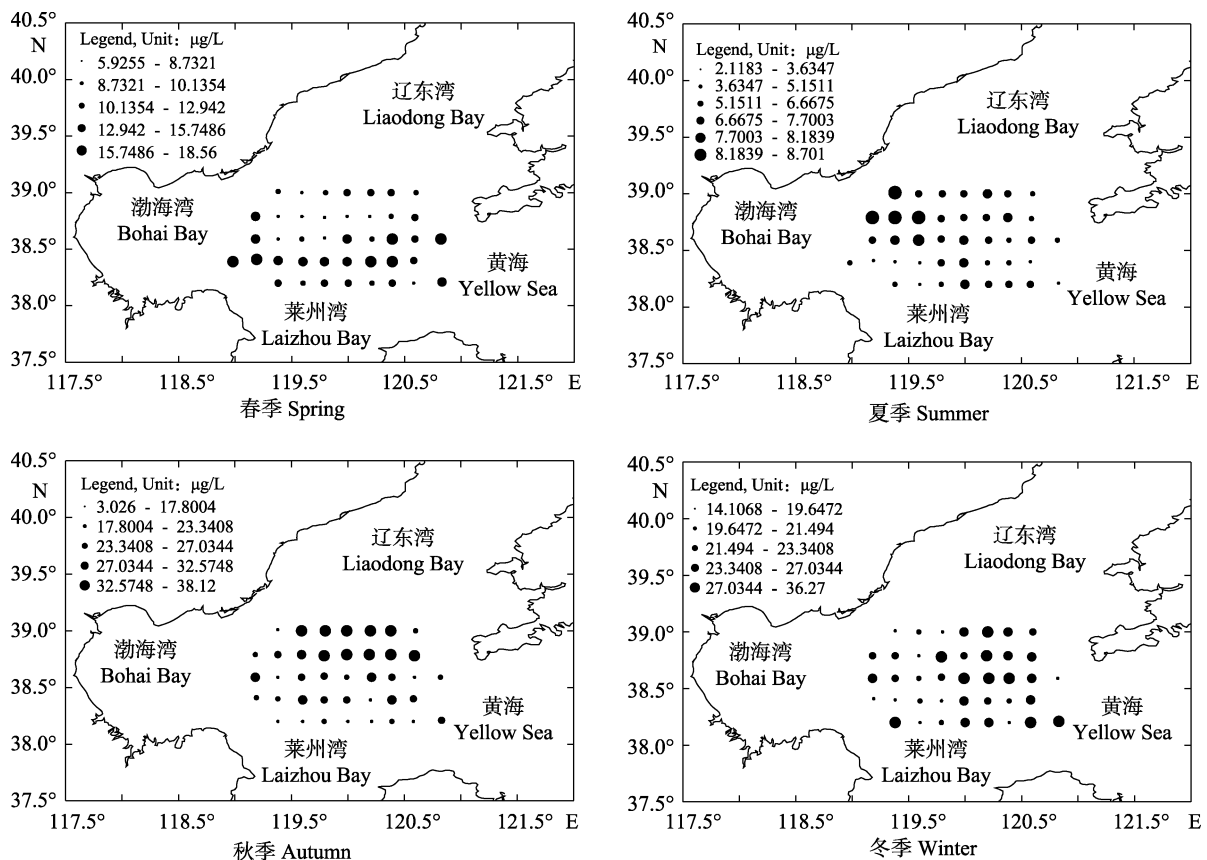


图 2 渤海中部海域表层活性磷酸盐平面分布

Fig.2 Horizontal distribution of active phosphate concentration in the surface layer of the central Bohai Sea ($\mu\text{g/L}$)

中部海域活性磷酸盐平均含量以表层最高, 10 m 层次之, 底层最低, 呈由表层至底层递减的变化趋势。秋季渤海中部海域活性磷酸盐平均含量表层至 10 m 层分布均匀, 10 m 层至底层呈现增高趋势。冬季渤海中部海域活性磷酸盐平均含量接近呈现垂直分布均匀状态(表 2)。

表 2 渤海中部海域不同层次活性磷酸盐含量变化
Tab.2 Variation of active phosphate concentration at different depths in the central Bohai Sea

季节 Season	平均含量 Average of concentration/ $\mu\text{g/L}$		
	表层 Surface	10 m 层 10 m depth	底层 Bottom
春季 Spring	10.43	10.09	9.98
夏季 Summer	4.39	4.01	3.84
秋季 Autumn	19.29	19.29	20.90
冬季 Winter	28.09	28.06	27.41

2.2 渤海中部海域活性磷酸盐的时间变化特征

2.2.1 活性磷酸盐的季节变化 调查结果显示, 渤海中部海域活性磷酸盐平均含量季节变化明显。表层、10 m 层和底层活性磷酸盐含量季节变化趋势相同, 3 个层次其含量顺序均为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 冬季明显高于夏季(图 3)。

2.2.2 活性磷酸盐的年际变化 调查和分析结果显示, 2014 年渤海中部海域表层、10 m 层和底层活性磷酸盐平均含量均低于 2013 年, 呈下降趋势(图 4)。

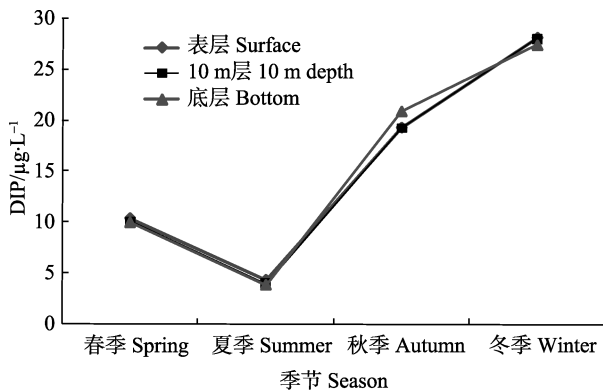


图 3 渤海中部海域活性磷酸盐季节变化

Fig.3 Seasonal variation of active phosphate concentration in the central Bohai Sea

2.3 渤海中部海域活性磷酸盐的污染状况

依据单因子污染指数法对调查海域活性磷酸盐的含量状况进行评价, 按照第一类海水水质标准计算得出的污染指数和超标率列入表 3, 按照第二类海水水质标准计算得出的污染指数和超标率列入表 4。

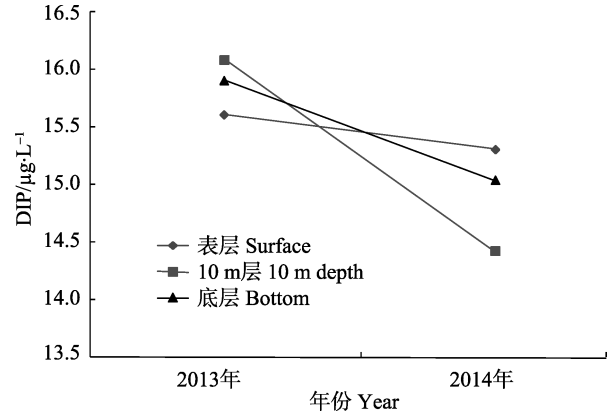


图 4 渤海中部海域活性磷酸盐年际变化

Fig.4 Inter-annual variation of active phosphate concentration in the central Bohai Sea

评价结果显示, 2012 年春季渤海中部调查海域全部站位活性磷酸盐含量均符合第二类海水水质标准(表 4), 部分站位超过第一类海水水质标准, 表层、10 m 层和底层超标率分别为 28.57%、19.05%和 9.52%(表 3)。

2013 年春季渤海中部调查海域全部站位活性磷酸盐含量均符合第二类海水水质标准(表 4), 部分站位超过第一类海水水质标准, 表层、10 m 层和底层超标率分别为 14.63%、14.63%和 17.07%(表 3)。

2013 年夏季渤海中部调查海域全部站位活性磷酸盐含量均符合第一类海水水质标准, 无超标情况出现(表 3 和表 4)。

2013 年秋季渤海中部调查海域大部分站位活性磷酸盐含量符合第二类海水水质标准, 少部分站位超过第二类海水水质标准, 表层、10 m 层和底层超标率分别为 29.27%、26.83%和 29.27%(表 4); 调查海域少部分站位活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准, 大部分站位超过第一类海水水质标准, 表层、10 m 层和底层超标率分别为 82.93%、87.80%和 92.68%(表 3)。

2013 年冬季渤海中部调查海域大部分站位活性磷酸盐含量符合第二类海水水质标准, 少部分站位超过第二类海水水质标准, 表层、10 m 层和底层超标率分别为 7.32%、9.76%和 4.88%(表 4); 调查海域少部分站位活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准, 大部分站位超过第一类海水水质标准, 表层、10 m 层和底层超标率分别为 90.24%、92.68%和 87.80%(表 3)。

2014 年春季渤海中部调查海域全部站位活性磷酸盐含量均符合第二类海水水质标准(表 4), 部分站位超过第一类海水水质标准, 表层、10 m 层和底层超标率分别为 12.20%、12.20%和 14.63%(表 3)。

2014 年夏季渤海中部调查海域全部站位活性磷酸盐含量均符合第二类海水水质标准(表 4), 个别站位

表3 2012–2014年渤海中部海域活性磷酸盐污染指数与超标率

Tab.3 Pollution index and exceeding limit rate of active phosphate in the central Bohai Sea during 2012–2014

调查时间 Surveyed time	表层 Surface		10 m层 10 m depth		底层 Bottom	
	P_i 范围	超标率	P_i 范围	超标率	P_i 范围	超标率
	P_i scope	Exceeding limit rate (%)	P_i scope	Exceeding limit rate (%)	P_i scope	Exceeding limit rate (%)
2012年春季 Spring, 2012	0.30–1.47	28.57	0.30–1.37	19.05	0.39–1.28	9.52
2013年春季 Spring, 2013	0.40–1.24	14.63	0.30–1.24	14.63	0.30–1.33	17.07
2013年夏季 Summer, 2013	0.14–0.65	0	0.14–0.58	0	0.14–0.55	0
2013年秋季 Autumn, 2013	0.20–2.54	82.93	0.57–2.66	87.80	0.57–3.16	92.68
2013年冬季 Winter, 2013	0.94–2.42	90.24	0.57–2.17	92.68	0.57–2.54	87.80
2014年春季 Spring, 2014	0.08–1.48	12.20	0.08–1.20	12.20	0.08–1.66	14.63
2014年夏季 Summer, 2014	0.03–1.22	2.44	0.03–1.14	2.44	0.03–0.55	0
2014年秋季 Autumn, 2014	0.28–2.22	41.46	0.28–1.64	36.59	0.47–1.54	53.66
2014年冬季 Winter, 2014	1.83–2.61	100.00	1.83–2.91	100.00	1.25–3.68	100.00

注：按照第一类海水水质标准计算

Note: The P_i value was calculated according to the first class limit of sea water quality standard

超过第一类海水水质标准，表层、10 m层和底层超标率分别为2.44%、2.44%和0(表3)。

2014年秋季渤海中部调查海域大部分站位活性磷酸盐含量符合第二类海水水质标准，仅个别站位超过第二类海水水质标准，表层、10 m层和底层超标率分别为4.88%、0、0(表4)；调查海域部分站位活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准，部分站位超过第一类海水水质标准，表层、10 m层和底层超标率分别为41.46%、36.59%、53.66%(表3)。

2014年冬季渤海中部调查海域大部分站位活性磷酸盐含量符合第二类海水水质标准，少部分站位超过第二类海水水质标准，表层、10 m层和底层超标率分别为26.83%、21.95%和17.07%(表4)；调查海域全部站位活性磷酸盐含量超过第一类海水水质标准，表层、10 m层和底层超标率均为100%(表3)。

由此可见，虽然调查海域地处渤海中部、非近岸海域，受陆源污染的影响较小，但秋、冬季部分海域活性磷酸盐含量仍然超过第二类海水水质标准。该调查区域为进出渤海的主要航道，船舶生活污水和压舱水的大量排放应该是导致该海域活性磷酸盐超标的原因之一。

3 讨论

海水中的营养盐是海洋浮游植物生长繁殖所必需的营养物质，氮和磷是组成生物细胞原生质的重要元素，而硅则是硅藻等海洋浮游植物的骨架和介壳的主要组成部分。它们在控制海洋植物的生长和海洋初级生产力等方面起着相当重要作用。大量的研究表明，海水中的氮、磷、硅等营养盐的水平及其结构极大地影响着浮游植物的初级生产水平及生态系统结构(Lagus *et al.*, 2004)。由于这些元素参与生物生命活动的整个过程，他们的存在形态与分布受到生物的制约，同时受到化学、地质和水文等因素的影响(张乃星等, 2011)，因此，研究营养盐的分布变化规律对于海洋生态环境保护具有重要的意义。

3.1 影响渤海中部活性磷酸盐空间分布的主要因素

影响渤海中部海域活性磷酸盐平面分布的因素众多，影响机制错综复杂，沿岸径流携带营养盐入海、浮游植物的生长繁殖、海水层化的区域差异、环流场的分布、研究海域与莱州湾、渤海湾、辽东湾以及黄海

表4 2012–2014年渤海中部海域活性磷酸盐污染指数与超标率

Tab.4 Pollution index and exceeding limit rate of active phosphate in the central Bohai Sea during 2012–2014

调查时间 Surveyed time	表层 Surface		10 m 层 10 m depth		底层 Bottom	
	P_i 范围 P_i scope	超标率 Exceeding limit rate (%)	P_i 范围 P_i scope	超标率 Exceeding limit rate (%)	P_i 范围 P_i scope	超标率 Exceeding limit rate (%)
2012年春季 Spring, 2012	0.15–0.74	0	0.15–0.69	0	0.20–0.64	0
2013年春季 Spring, 2013	0.20–0.62	0	0.15–0.62	0	0.15–0.67	0
2013年夏季 Summer, 2013	0.07–0.32	0	0.07–0.29	0	0.07–0.27	0
2013年秋季 Autumn, 2013	0.10–1.27	29.27	0.29–1.33	26.83	0.29–1.58	29.27
2013年冬季 Winter, 2013	0.47–1.21	7.32	0.29–1.09	9.76	0.29–1.27	4.88
2014年春季 Spring, 2014	0.04–0.74	0	0.04–0.60	0	0.04–0.83	0
2014年夏季 Summer, 2014	0.02–0.61	0	0.02–0.57	0	0.02–0.27	0
2014年秋季 Autumn, 2014	0.14–1.11	4.88	0.14–0.82	0	0.24–0.77	0
2014年冬季 Winter, 2014	0.92–1.31	26.83	0.92–1.45	21.95	0.62–1.84	17.07

注: 按照第二类海水水质标准计算

Note: The P_i value was calculated according to the second class limit of sea water quality standard

北部海域营养盐的交换; 水动力因子和生物扰动作用下海水–沉积物界面营养盐的交换、生物的代谢等因素均对活性磷酸盐的平面分布产生影响(张乃星等, 2011; 蒋红等, 2005; 崔毅等, 1996)。

渤海中部海域活性磷酸盐垂直分布结构主要受到渤海沿岸入海径流、海水层化、垂直对流作用、涡动混合作用和海水–沉积物界面交换等因素的影响。富含氮、磷营养盐的陆源径流入海, 首先作用于上层海水, 使上层海水中活性磷酸盐含量增高。春季和夏季海水层化现象明显, 受跃层的阻隔, 上下层海水混合强度较弱, 使磷酸盐含量较高的上层海水难以交换至下层, 再加上春、夏季风浪较小、表层沉积物难以悬浮进入水体, 通过海水–沉积物界面释放至底层海水中的营养盐很少, 因此, 形成春、夏季表层至底层活性磷酸盐递减的变化趋势。与夏季相比, 秋季陆源径流入海量减少, 海水层化现象逐渐消失, 浪流作用下的沉积物再悬浮强度加大, 通过海水–沉积物界面释放至底层海水中的营养盐增多, 因此, 形成秋季活性磷酸盐的这种垂直分布格局。冬季水温下降, 表层海水密度变大下沉, 海水垂直对流作用加强, 再加上冬季大风过程的影响, 风生涡动的混合作用强烈

(鲍献文等, 2004), 上下层海水充分混合, 使得冬季渤海中部海域活性磷酸盐含量近呈垂直分布均匀状态(张乃星等, 2011; 赵骞等, 2004)。

3.2 影响渤海中部活性磷酸盐时间变化的主要因素

影响渤海中部海域活性磷酸盐季节变化的主要因素包括受到渤海沿岸入海径流量、浮游植物生长繁殖和海水垂直混合作用等因素的影响。春季, 随着光照时间的延长, 水温的回升, 浮游植物的光合作用加强。在经历了春季浮游植物的生长高峰后, 海水中的营养盐被大量消耗。到了夏季, 海水中的营养盐含量显著降低。之后随着水温下降和光照时间缩短, 浮游植物繁殖能力减弱, 再加上径流输入的补充, 秋季营养盐水平逐步回升(赵骞等, 2004; 赵亮等, 2002)。冬季, 水温降至一年中的最低值, 光照差, 不利于浮游植物的生长繁殖, 对营养盐的消耗大幅减少, 此时营养盐的再生补充较为充分(张乃星等, 2011), 使得冬季渤海中部海域活性磷酸盐含量达到最高。虽然冬季随陆源径流入海的营养盐减少, 但沉积物再悬浮强度达到最大, 通过海水–沉积物界面释放至海水中的营养盐明显增多, 部分抵消了营养盐入海量减少对磷酸盐含量的影

响。2013年春、夏、秋、冬季渤海中部海域浮游植物调查结果显示,浮游植物种类数以春季最多(67种),夏季次之(63种),秋季第三(59种),冬季最少(48种);浮游植物丰度以春季最高($200.14 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$),夏季次之($16.32 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$),秋季第三($12.77 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$),冬季最低($7.43 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$)。调查海域浮游植物种数和丰度的这种季节变化趋势证实了浮游植物生长繁殖是影响活性磷酸盐季节变化的主要因素之一。

造成渤海中部海域活性磷酸盐含量年际变化的原因错综复杂,沿岸入海径流变化、浮游植物丰度变化、环流特征变化、气象条件变化、温度、盐度和pH值变化等均对研究海域活性磷酸盐年变化产生影响。《2013年中国海洋环境状况公报》(国家海洋局,2014)和《2014年中国海洋环境状况公报》(国家海洋局,2015)(以下简称公报)显示,2013年渤海主要入海河流黄河、小清河、大辽河和双台子河径流携带入海的总磷量为3708 t,而2014年上述4条河流径流携带入海的总磷量为2842 t,比2013年下降866 t,降幅达到23.35%。2014年渤海中部海域活性磷酸盐含量低于2013年,与渤海沿岸主要河流径流携带入海的总磷量大幅下降明显相关。另外,浮游植物调查结果显示,2013年渤海中部四季调查共鉴定出浮游植物87种,2014年调查海域浮游植物种类数与2013年基本持平(85种);2014年浮游植物平均丰度由2013年的 $59.16 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$ 增至 $65.45 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$,生物多样性指数均值由2013年的1.76增至2.02。由此可见,与2013年相比,2014年调查海域浮游植物平均丰度和生物多样性增加也是造成2014年渤海中部海域活性磷酸盐含量低于2013年的重要原因之一。

3.3 渤海中部活性磷酸盐的长期变化

蒋红等(2005)研究了渤海1982–1998年营养盐的变化趋势,结果显示,20世纪90年代渤海中部海域活性磷酸盐含量比80年代显著下降,由1982年的 $30.97 \mu\text{g/L}$ 降至1998年的 $9.92 \mu\text{g/L}$ 。本研究结果显示,2013年和2014年渤海中部海域活性磷酸盐含量分别为 15.87 、 $14.92 \mu\text{g/L}$,比1998年有所增高,但仍处于较低水平,磷有可能成为研究海域浮游植物生长繁殖的限制因子。

3.4 本研究结果与其他研究结果的比较

赵亮等(2002)在研究渤海氮磷营养盐的循环和收支时发现,渤海4–9月为营养盐消耗期,10月到翌年3月为营养盐补充期,这与本研究关于渤海中部海域活性磷酸盐季节变化趋势的分析结果一致。

2013年公报显示,2013年夏季渤海中部调查海域活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准,与本研究评价结果一致。

2014年公报显示,2014年春季渤海中部调查海域活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准。本研究评价结果为大部分站位活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准,少数站位活性磷酸盐含量超过第一类海水水质标准,表层、10 m层和底层超标率分别为12.20%、12.20%和14.63%,二者存在一定差异。

公报显示,2014年夏季渤海中部调查海域活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准。本研究评价结果为绝大部分站位活性磷酸盐含量符合第一类海水水质标准,仅个别站位活性磷酸盐含量超过第一类海水水质标准,表层、10 m层和底层超标率分别为2.44%、2.44%和0,二者基本一致。

公报显示,2014年秋季渤海中部的东北部海域活性磷酸盐含量符合第二、三类海水水质标准,无第四类水质海域。本研究评价结果为绝大部分站位活性磷酸盐含量符合第二、三类海水水质标准,仅个别站位活性磷酸盐含量超标,表层、10 m层和底层超标率分别为4.88%、0和0,二者基本一致。

4 结语

(1) 2012–2014年春季和夏季渤海中部海域活性磷酸盐含量符合第二类海水水质标准要求,秋、冬季部分海域已受到活性磷酸盐的污染。

(2) 不同季节渤海中部海域活性磷酸盐的平面分布趋势各异,垂直分布也存在季节差异。春季和夏季活性磷酸盐呈由表层至底层递减的趋势,秋季和冬季近呈垂直分布均匀状态。

(3) 渤海中部海域活性磷酸盐平均含量季节变化明显,其含量为冬季>秋季>春季>夏季,冬季明显高于夏季。2014年渤海中部海域活性磷酸盐含量低于2013年,呈降低趋势。

(4) 渤海中部海域活性磷酸盐时空变化受到诸多因素的影响,外源补充、内源再生和浮游植物吸收消耗是影响活性磷酸盐时空变化的最重要因素。

参 考 文 献

- 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
- 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.海洋监测规范—第4部分:海水分析(GB17378.4–2007).北京:中国标准出版社,2007
- 石强.渤海夏季海水磷酸盐年际时空演变.海洋通报,2013,

- 32(4): 395–402
- 吕小乔, 祝陈坚, 张爱斌, 等. 夏季渤海西南部及黄河口海域营养盐分布特征. 山东海洋学院学报, 1985, 15(1): 146–158
- 张乃星, 任荣珠, 吴凤丛, 等. 渤海海峡冬季营养盐的分布特征及影响因素. 海洋通报, 2011, 30(6): 607–614
- 张继民, 刘霜, 张琦, 等. 黄河口附近海域营养盐特征及富营养化程度评价. 海洋通报, 2008, 27(5): 65–72
- 陈淑珠, 顾郁翘, 刘敏光, 等. 黄河口及其邻近海域营养盐分布特征. 中国海洋大学学报(自然科学版), 1991, 21(1): 32–41
- 林庆礼, 宋云利, 杨琴芳, 等. 渤海增殖水化学环境. 海洋水产研究, 1991(12): 11–30
- 国家环境保护局, 国家技术监督局. (GB3097–1997). 海水水质标准. 北京: 中国标准出版社, 1997
- 国家海洋局. 2013 年中国海洋环境状况公报. 2014
- 国家海洋局. 2014 年中国海洋环境状况公报. 2015
- 赵亮, 魏皓, 冯士筭. 渤海氮磷营养盐的循环和收支. 环境科学, 2002, 23(1): 78–81
- 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. 海洋科学, 2004, 28(4): 34–39
- 崔毅, 宋云利. 渤海海域营养现状研究. 海洋水产研究, 1996, 17(1): 57–62
- 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
- 鲍献文, 万修全, 吴德星, 等. 2000 年夏末和翌年初冬渤海海水水文特征. 海洋学报, 2004, 26(1): 14–24
- Lagus A, Suomela J, Weithhoff G, *et al.* Species-specific differences in phytoplankton responses to N and P enrichments and the N:P ratio in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea. *J Plankton Res*, 2004, 26(7): 779–798

(编辑 江润林)

Recent Temporal and Spatial Variation in Active Phosphate Concentration in Seawater of the Central Bohai Sea

CHEN Jufa[#], ZHAO Jun[#], GUO Feng, QU Keming, CUI Zhengguo, SUN Xuemei, ZHU Jianxin, DING Dongsheng, LIU Chuanxia

(Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment; Yellow Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract The Bohai Sea is a semi-closed gulf with weak hydrodynamic condition and self-purification capacity. Therefore its eco-system is more sensitive and fragile than open seas. A serious oil spill accident occurred in the Penglai 19-3 oil field located in the central Bohai Sea in 2011, which severely affected the marine ecological environment and fishery resources. To determine the aftermath in fishery ecological environment, nine surveys were carried out in the central Bohai Sea in 2012–2014. Based on part of the survey data, we analyzed the temporal and spatial variation in active phosphate and the corresponding factors in the central Bohai Sea. The results showed that the levels of active phosphate met the second class of sea water quality standard in spring and summer from 2012 to 2014, but the pollution caused by active phosphate was observed in part of the survey in autumn and winter; the horizontal and vertical distribution of active phosphate varied in different seasons, and in spring and summer the concentration of active phosphate gradually decreased along with the increase in depth, while in autumn and winter it was almost constant from the surface to the bottom; the seasonal mean concentration of active phosphate followed the order winter>autumn>spring>summer, and it was obviously higher in winter than in summer, plus the mean concentration was lower in 2014 than in 2013; The distribution and variation of active phosphate in the central Bohai Sea was affected by many factors, and key ones included exogenous supplement, endogenous release of nutrients, and biological consumption.

Key words Active phosphate; Temporal and spatial variation; Influencing factors; Central Bohai Sea

[#] Joint first author: CHEN Jufa, E-mail: chenjf@ysfri.ac.cn; ZHAO Jun, E-mail: zhaojun@ysfri.ac.cn