

2012 年春季渤海中部及邻近海域叶绿素 *a* 与环境因子的分布特征

刘丽雪^{1,2}, 王玉珏¹, 邸宝平¹, 刘东艳¹

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 分析了 2012 年春季渤海中部及其邻近海域 32 个站点叶绿素 *a* 和环境因子的空间分布特征及其相互关系。结果发现: 渤海中部靠近黄河口邻近水域相对于其他水域, 呈现出相对较高的水温和较低的盐度, 这与黄河淡水输入以及近岸水深相对较浅有密切关系。营养盐浓度在空间分布上表现为黄河口附近海域较高, 在垂直分布上表现为中、底层高于表层, 显示出黄河水输入与沉积物营养盐再释放的影响; 此外, 营养盐浓度与结构显示, 渤海海域存在明显的磷和硅限制, 磷限制尤其严重。叶绿素 *a* 浓度的空间分布显示, 表层叶绿素 *a* 浓度的高值区出现在渤海湾湾口处, 而中层与底层的叶绿素 *a* 浓度高值区出现在渤海中部。主成分分析结果表明, 磷酸盐和温度是影响表层叶绿素 *a* 浓度的重要因素, 而中、底层叶绿素 *a* 浓度主要受磷酸盐的影响。

关键词: 渤海; 叶绿素 *a*; 环境因子; 主成分分析

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)12-0008-08
doi: 10.11759/hyhx20140123002

渤海是我国唯一的内海, 具有丰富的生物多样性与资源, 是我国发展捕捞与养殖, 实现国家中长期战略目标的重要区域^[1-2]。近年来, 随着环渤海地区经济的快速发展, 沿岸各种人类活动产生的大量污染物通过河流输送和大气沉降进入海洋^[3-5], 已经显著影响到近海的生源要素与污染物分布, 并通过物质循环和能量流动作用于整个食物网, 不仅严重影响到海洋环境质量, 而且引起渤海生态系统衰退^[6-8]。

已有研究表明, 渤海存在严重的富营养化问题, 营养盐结构较以往已发生显著改变^[9-10]。由于黄河断流减少了硅的入海量, 且农用氮肥流失量只增不减, 渤海已出现明显的磷限制与硅限制现象^[11-12]。海水中营养盐是浮游植物生长的必要条件, 营养盐的浓度和结构在一定程度上可以控制浮游植物的生长, 引起种群数量的变动^[11-15]。因此, 通过研究叶绿素 *a* 和营养盐及其他环境因子的关系, 有助于了解浮游植物对周围环境变化的响应关系。

本研究对 2012 年春季渤海中部及其邻近海域的叶绿素 *a* 和环境因子的空间分布进行了分析, 并通过主成分分析探讨了渤海叶绿素 *a* 浓度与环境因子的相关性, 以期渤海的相关生态学研究提供基础

资料。

1 研究区域和方法

本研究于 2012 年 5 月搭乘国家基金委航次在渤海开展了叶绿素与营养盐样品的采集工作, 调查区域涵盖渤海中部以及三大湾口, 平均水深 23 m, 最深处为 38 m 左右, 本次调查共采集了 32 个站点的表层、中层与底层水样(图 1)。

温度和盐度数据来自于船上的 CTD(Seabird 911)测定结果。水样从 CTD 采水器中获取, 用于叶绿素 *a* 与营养盐的分析。其中, 1 L 水样经 GF/F 滤膜(Whatman)过滤后, 滤膜于 -20 °C 下避光冷冻保存, 用于叶绿素 *a* 测定, 每个采样点取三个平行样, 结果取其平均值。取 250 mL 水样 0.45 μm 醋酸纤维滤膜滤后, 滤液用于营养盐的测定。

叶绿素 *a* 在实验室内用分光光度法测定: 将滤

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-04-15

基金项目: 中国科学院战略先导研究项目(XDA11020405); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 国家自然科学基金面上项目(41376121)

作者简介: 刘丽雪(1989-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: liulixue77@163.com; 刘东艳, 通信作者: 研究员, 博士, E-mail: dyliu@yic.ac.cn

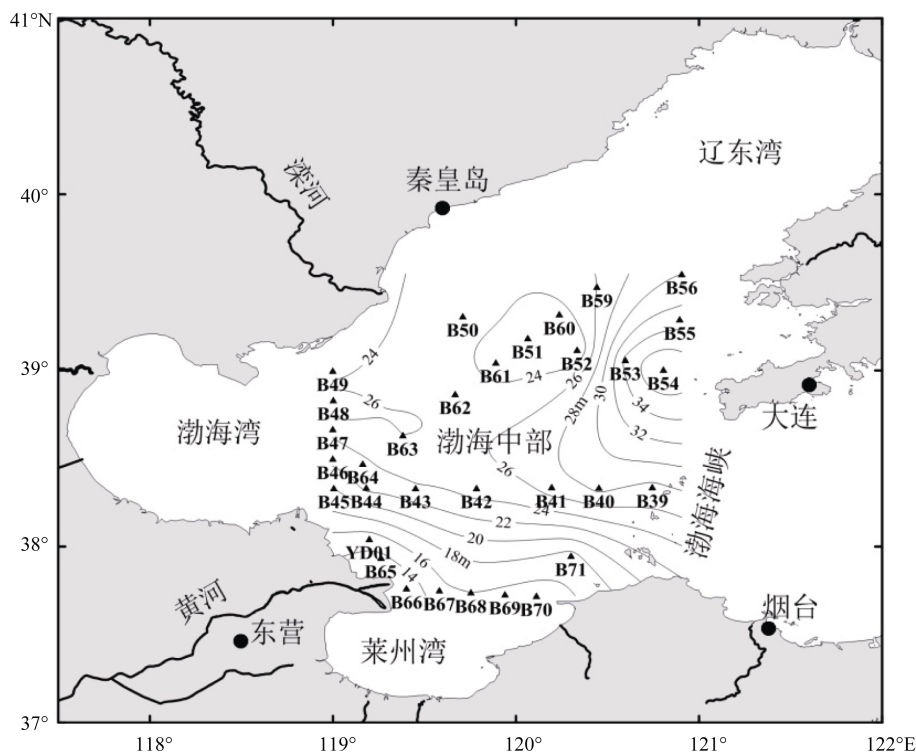


图 1 调查站点

Fig. 1 The sampling sites in the central Bohai Sea

膜用 90%丙酮 4 °C 条件下提取 24 h 后, 在 4 000 r/min 转速下离心 10 min, 取上清液用紫外-可见分光光度计分别在波长 750、664、647、630 nm 下测定其吸光值, 利用公式(1)^[16-17]计算叶绿素 *a* 浓度:

$$\text{Chl } a \text{ (}\mu\text{g/L)} = [11.85(E_{664} - E_{750}) - 1.54(E_{647} - E_{750}) - 0.08(E_{630} - E_{750})] \times V_{\text{丙酮}} / V_{\text{水样}} \quad (1)$$

其中, E_{750} , E_{664} , E_{647} , E_{630} 分别是各波长下的吸光值, $V_{\text{丙酮}}$ 为丙酮萃取液的体积(mL); $V_{\text{水样}}$ 为过滤海水的体积(L)。

溶解态无机营养盐利用营养盐自动分析仪(AA3, Bran+Luebbe, German)测定, 铵盐($\text{NH}_4^+\text{-N}$)采用水杨酸钠显色法测定, 其他营养盐的测定方法主要参照《海洋调查规范》(GB/T 12763.4-2007)^[18]: 硝酸盐($\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用铜镉还原后重氮-偶氮显色法, 亚硝酸盐($\text{NO}_2^-\text{-N}$)采用重氮-偶氮显色法, 活性磷酸盐(DIP)采用磷钼蓝法, 硅酸盐(DSi)采用硅钼蓝法。溶解无机氮(DIN)为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度之和。

叶绿素 *a* 与环境因子的相关性分析采用主成分分析方法^[19]。主成分分析可以将多个变量纳入同一系统进行定量化研究, 它不仅可以简化筛选出几个重要变量, 也可以阐释变量之间的关系。渤海叶绿素 *a* 和其他环境因子均为数量型环境因子, 因此可以通

过进行主成分分析来辨析它们之间的关系。本文对渤海 30 个站点(YD01 和 B45 站点因营养盐数据缺失去除)3 个水层的叶绿素 *a* 和环境因子数据进行了主成分分析, 得到的前两个主成分轴均可解释总体变量的 50%以上, 最后依据前两个轴作出三个水层主成分分析排序图。

2 结果和讨论

2.1 温度与盐度的空间分布特征

图 2a~图 2c 给出了海水温度表、中、底层的分布特征。结果表明: 调查区域海水温度范围为 6.01~16.7 °C; 靠近辽东湾与渤海海峡的海水温度明显低于莱州湾口附近; 渤海中部偏渤海湾方向水温的垂直变化较大, 最高温差可达 5.7°C。调查海区的温度明显随水深的增加而减小, 春季陆地升温比海水快是造成近岸水温高于中部的的主要原因。

图 2d~图 2f 给出了海水盐度表、中、底层的分布特征。结果表明: 调查区域海水盐度范围为 28.05~31.29; 海水盐度呈现由西南向东北盐度逐渐增加的趋势, 显示了黄河淡水输入的影响; 并且表层盐度值低于 30 的海域大于中层和底层, 表明黄河淡水对表层海水的影响更明显。

2.2 营养盐浓度的空间分布特征

图 3a~图 3c 给出了 DIN 浓度的空间分布特征。结果表明: DIN 在调查海区的浓度范围为 2.37~9.05 $\mu\text{mol/L}$; 高值区主要出现在莱州湾口断面邻近的海域, 尤其是靠近黄河口附近的海域, 最大值可达 9.05 $\mu\text{mol/L}$; 大部分站点中底层 DIN 浓度略高于表层。

图 3d~图 3f 给出了 DIP 浓度的空间分布特征。结果表明: DIP 在调查海区的浓度范围低于检出限 $-0.25 \mu\text{mol/L}$; 出现了两个高值区, 分别位于渤海湾口靠近黄河口处与渤海海峡口附近, 最大值分别为 0.25 $\mu\text{mol/L}$ 和 0.14 $\mu\text{mol/L}$; 多数站位表层 DIP 浓度低于中底层。

图 3g~图 3i 给出了 DSi 浓度的空间分布特征。

结果表明: DSi 在调查海区的浓度范围为 0.12~8.36 $\mu\text{mol/L}$; 黄河口附近出现了一个明显高值区 (1.21~8.36 $\mu\text{mol/L}$), 这一结果与盐度的分布特征类似, 显示了黄河水输入是硅酸盐的一个重要来源; 此外, 在渤海湾口南部和莱州湾口处的中底层 DSi 浓度高于表层, 其他海区则无明显差别。

3 种营养盐均在黄河口附近海域有较高的浓度, 充分表明黄河水输入是渤海水体中营养盐的重要来源。并且中层和底层营养盐浓度略高于表层, 尤其是磷酸盐, 说明沉积物中营养盐的再释放可能对上层水体中营养盐有所补充。李玲伟等^[20-21]通过对渤海沉积物-水界面营养盐交换通量的研究表明, 渤海沉积物向上覆水体中释放一定比例的营养盐, 尤其是磷酸盐的释放可以弥补上层水体中磷酸盐的不足。

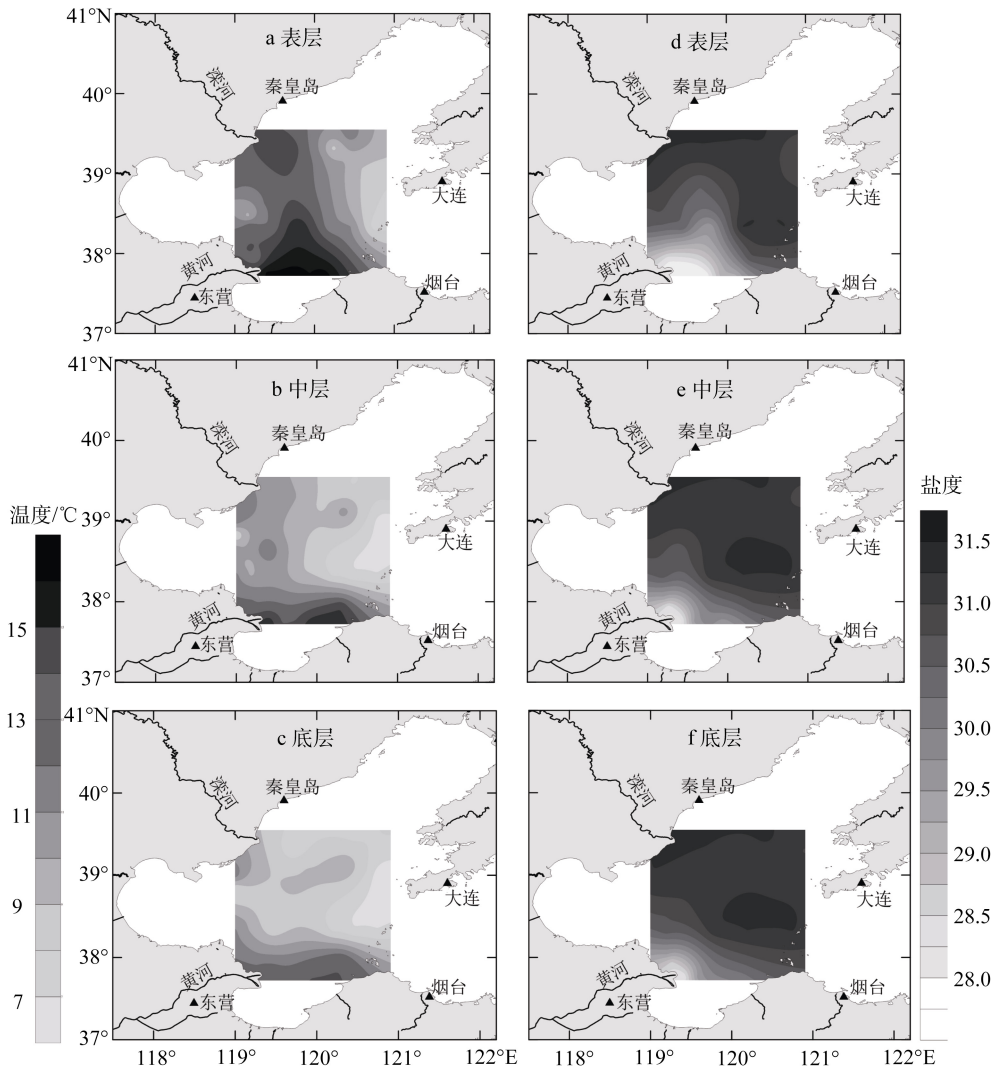


图 2 调查海区水温与盐度的空间分布特征

Fig.2 The spatial distribution of temperature and salinity in the studied areas

2.3 营养盐对浮游植物生长的可能限制作用

Justić 等^[14]提出的浮游植物生长的化学计量和可能营养盐限制因素标准见表 1。依据该标准, 调查期间海区 97%的站点存在磷酸盐的绝对限制, 87%站点存在硅酸盐的绝对限制。

表 1 营养盐限制因素标准^[14]
Tab. 1 The limitation criterion of nutrients^[14]

营养盐限制因子	绝对限制	相对限制		
		DIN/DIP	DSi/DIN	DSi/DIP
氮	DIN < 1 μmol/L	< 10	> 1	
磷	DIP < 0.1 μmol/L	> 22		> 22
硅	DSi < 2 μmol/L		< 1	< 10

营养盐结构在解释富营养化与浮游植物生物量及其种群结构变化中, 具有重要意义。因此对调查海区营养盐结构进行了分析(表 2)。结合表 1 中的营养

盐限制标准, 得出调查海区 71%的站点存在磷酸盐的相对限制; 13%的站点存在硅酸盐的相对限制。结合磷酸盐和硅酸盐绝对浓度限制分析, 表明海区在调查期间同时存在磷酸盐和硅酸盐的限制, 且磷酸盐限制更为严重。

营养盐结构空间分布特征如图 4, 其中 B43 站点由于其底层 DIN/DIP 太高, 为 1287.11, 故在作图时去除该站点。结果表明, 整个调查海区 DIN/DIP 较高而 DSi/DIN 较低, 主要原因是 DIP 与 DSi 浓度较低, 而 DIN 浓度相对较高, 可能是春季浮游植物生长高峰期消耗了大量的营养盐^[9], 但由于污水排放、氮肥流失等向渤海输入较多的 DIN, 而 DIP 的输入较少, 并且近年来黄河入海流量减少限制了主要由风化过程产生的硅的入海量^[10-11], 因此造成营养盐结构比例失衡。这一研究结果进一步证实了目前已有的认识, 渤海自 20 世纪 90 年代以来, 已经由原来

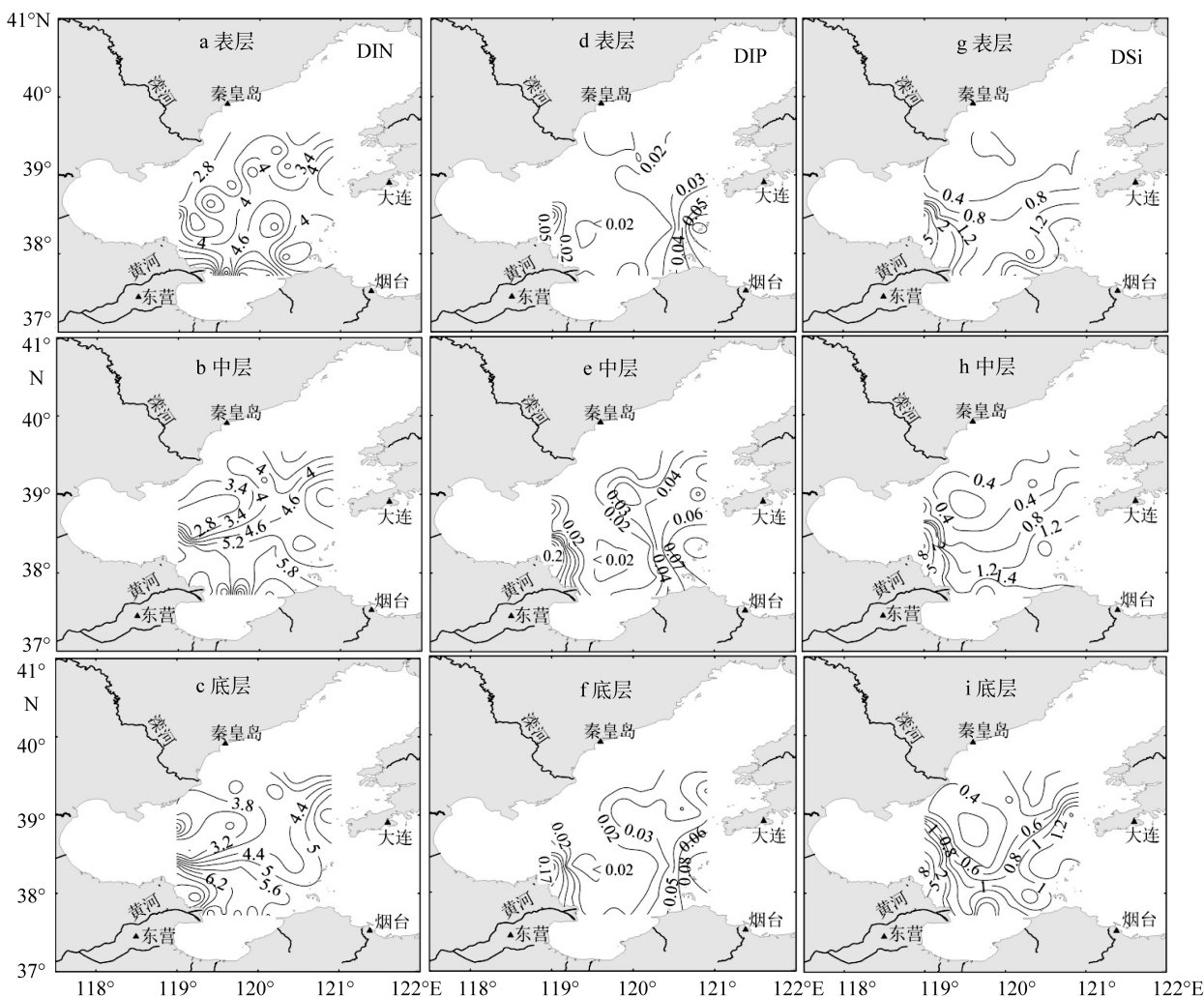


图 3 调查海区营养盐的空间分布特征

Fig.3 The spatial distribution of dissolved inorganic nutrients in the studied areas

表 2 调查海域营养盐结构特征

Tab. 2 The structures of nutrients in the studied areas

项目		DIN/DIP	DSi/DIN	DSi/DIP
表层	范围	42.87~602.60	0.04~1.15	4.58~263.33
	平均值	238.64 ± 133.87	0.28 ± 0.27	63.29 ± 64.63
中层	范围	25.29~574.45	0.04~1.31	4.31~197.12
	平均值	194.46 ± 137.48	0.30 ± 0.31	45.76 ± 42.29
底层	范围	35.10~1287.11	0.03~1.34	4.96~208.02
	平均值	236.68 ± 222.73	0.29 ± 0.32	51.10 ± 45.60

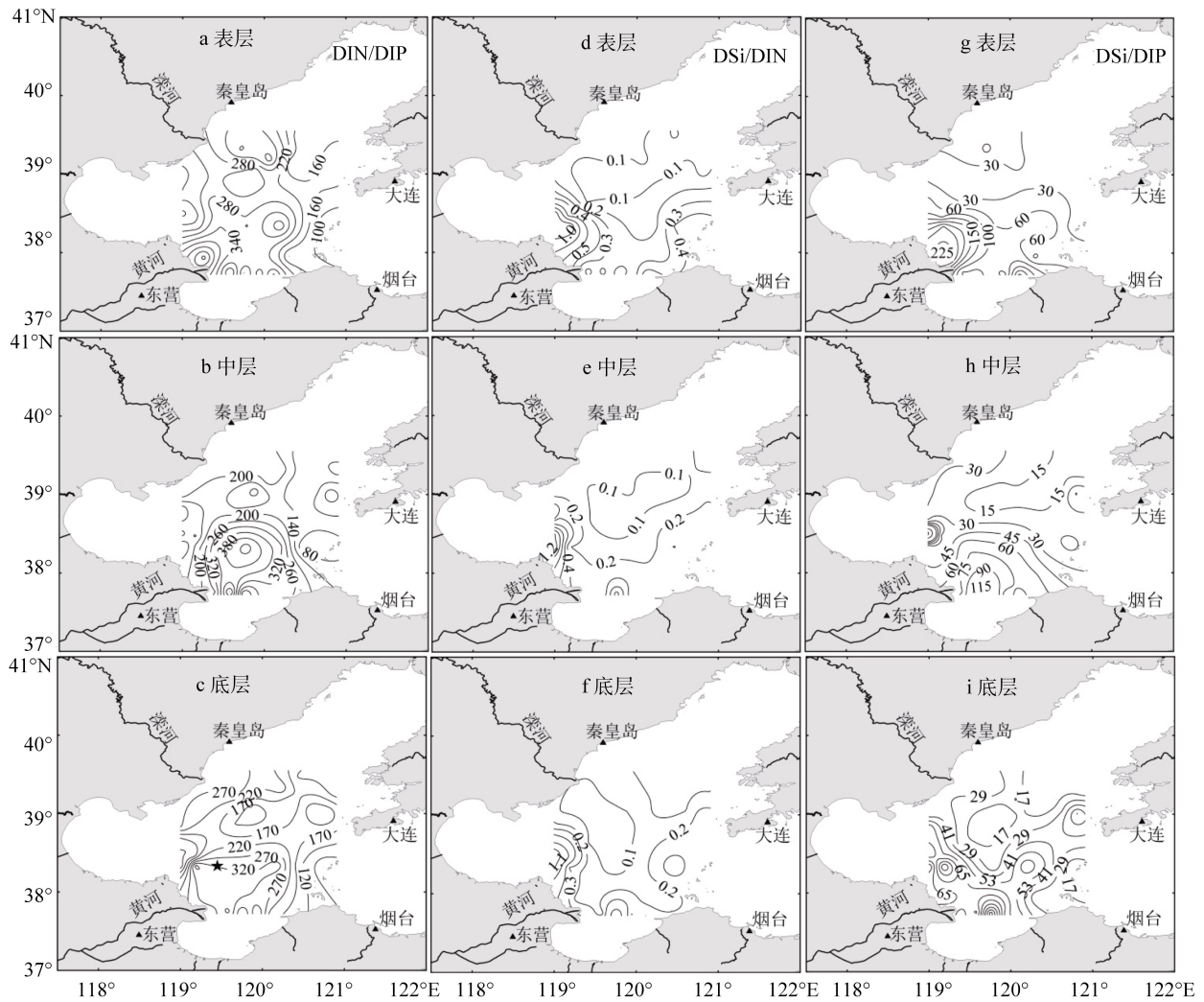


图 4 调查海区 DIN/DIP, DSi/DIN 与 DSi/DIP 的空间分布(c 中“★”表示 B43 站点)

Fig.4 The spatial distribution of DIN/DIP, DSi/DIN and DSi/DIP in the studied areas (“★” in figure c represents B43)

的氮限制逐步转为磷限制, 并且在 20 世纪末, 渤海存在磷限制与硅限制加剧的趋势^[10-12, 22-23]。

2.4 叶绿素 *a* 的空间分布特征及其与环境因子的相关性分析

图 5a~图 5c 给出了调查海区表、中、底三个水

层叶绿素 *a* 的空间分布特征, 结果表明: 表层叶绿素 *a* 浓度范围是 0.63~3.75 μg/L, 高值区位于渤海湾口, 浓度均在 2 μg/L 以上, 该研究结果与以往研究中春季表层叶绿素浓度分布类似^[24-25]; 中层和底层叶绿素 *a* 显示了相同的分布特征(图 5b~图 5c), 浓度范围分别为 0.57~5.31 μg/L 与 0.75~8.35 μg/L, 在渤海中部靠近

渤海湾口处出现了一个明显的叶绿素高值区。

表层叶绿素 *a* 与营养盐浓度高值区相近, 而中、底层明显不同, 可能原因为春季浮游植物生长消耗了大量营养盐, 而表层受淡水输入影响, 在渤海湾口靠近黄河口处有较多的营养盐补充。对比三个水层不同海区的叶绿素 *a* 浓度发现, 渤海中部靠近渤海湾口海区中底层叶绿素 *a* 浓度明显高于表层, 而在其他海域均为表层叶绿素 *a* 浓度相对较高, 造成这种现象的原因可能是该海域沉积物释放的营养盐促进了中、底层浮游植物的生长。

将叶绿素 *a* 浓度与温度(T)、盐度(S)及营养盐的浓度数据进行了主成分分析(图 6a~图 6c)。排序图结果表明: 表层水体中与叶绿素 *a* 强相关的因子为磷酸盐和温度(图 6a); 中层和底层与叶绿素 *a* 强相关的因子为磷酸盐(图 6b~图 6c)。该结果进一步证实磷酸盐已经成为影响该海区浮游植物生长的主要因素, 这与磷酸盐是影响该海区浮游植物生长的主要限制因子相对应。并且中底层叶绿素 *a* 与磷酸盐的负相关性高于表层, 这也对应于该部分水体中底层叶绿素 *a* 浓度明显高于表层而磷酸盐整体偏低的趋势。

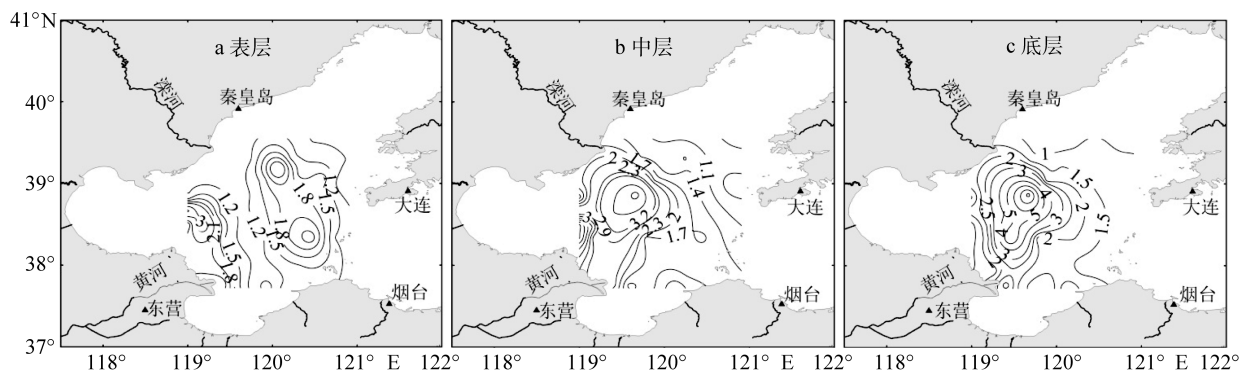


图 5 调查海区叶绿素 *a* 的空间分布特征

Fig.5 The spatial distribution of chlorophyll *a* in the studied areas

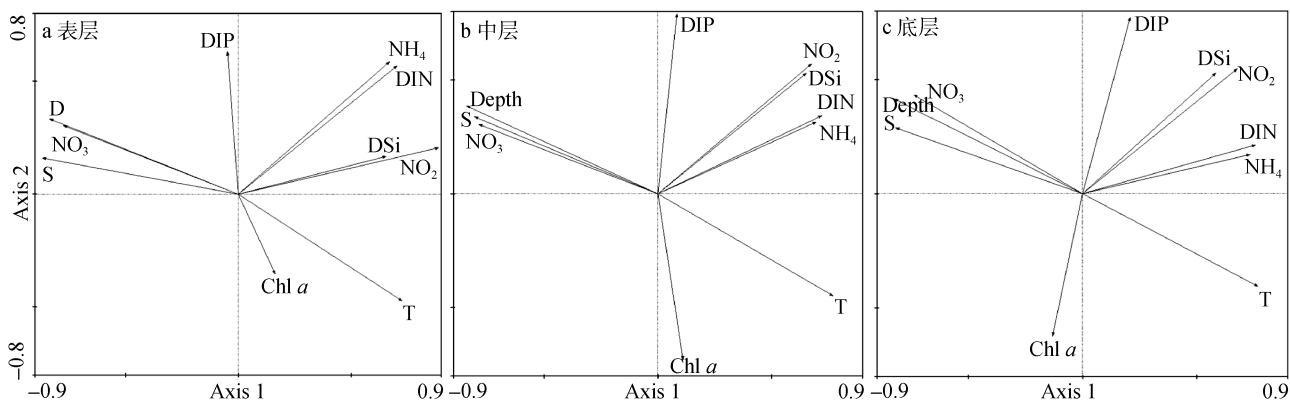


图 6 PCA 排序图

Fig.6 The scatter diagrams of PCA

对比三个水层的主成分分析结果发现, 温度与叶绿素 *a* 的相关性由高到低分别为: 表层、中层、底层, 而磷酸盐与叶绿素 *a* 的相关性高低趋势则相反。说明表层叶绿素 *a* 浓度主要受温度和磷酸盐的影响, 而磷酸盐为中、底层叶绿素 *a* 浓度的主要影响因素。

3 结论

综上, 2012 年春季黄河口附近海域为高温低盐区, 而渤海东北部海域则为低温高盐区, 符合往年

春季的温盐分布调查, 影响温度分布的主要因素是陆地气候, 黄河冲淡水对盐度有显著影响。

靠近黄河口的渤海湾口和莱州湾口为营养盐的高值区, 而中部和辽东湾口营养盐浓度偏低, 表现出黄河水输入对渤海营养盐浓度的影响。底层营养盐浓度高于表层, 说明沉积物中营养盐的释放也是一个重要来源。在研究期间调查海区的浮游植物生长同时受磷限制和硅限制的影响, 磷限制尤其明显。

叶绿素 *a* 在表层的高值区位于渤海湾口处, 而

中底层的高值区位于渤海中部。主成分分析结果表明磷酸盐和温度是影响表层浮游植物生长的主要因素,磷酸盐是影响中层和底层浮游植物生长的主要因素。

致谢:感谢“东方红2号”科考船对海上作业的支持;感谢基金委共享航次(41249901)为本文提供的温盐数据支持;感谢全体采样和测定人员及其提供的帮助。

参考文献:

- [1] 王俊,李洪志.渤海近岸叶绿素和初级生产力研究[J].海洋水产研究,2002,23(1):23-28.
- [2] 方国洪,王凯,郭丰义,等.近30年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系[J].海洋与湖沼,2002,33(5):515-523.
- [3] 崔正国.环渤海13城市主要化学污染物排海总量控制方案研究[D].青岛:中国海洋大学博士学位论文,2008.
- [4] 董彬.渤海污染的现状与对策分析[J].生态科学,2012,31(5):596-600.
- [5] 刘学海.渤海近岸水域环境污染状况分析[J].环境保护科学,2010,36(1):14-18.
- [6] 魏皓,赵亮,于志刚,等.渤海浮游植物生物量时空变化初析[J].青岛海洋大学学报(自然科学版),2003,33(2):173-179.
- [7] Wang X L, Cui Z G, Guo Q, et al. Distribution of nutrients and eutrophication assessment in the Bohai Sea of China [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(1): 177-183.
- [8] 吕瑞华,夏滨.渤海水域初级生产力10年间的变化[J].黄渤海海洋,1999,17(3):80-86.
- [9] 赵亮,魏皓,冯士筭.渤海氮磷营养盐的循环和收支[J].环境科学,2002,23(1):78-81.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Xu S S, Song J M, Li X G, et al. Changes in nitrogen and phosphorus and their effects on phytoplankton in the Bohai Sea [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(4): 945-952.
- [13] Justić D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995a, 30(1): 41-46.
- [14] Justić D, Rabalais N N, Turner R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995b, 40(3): 339-356.
- [15] 邹立,张经.渤海春季营养盐限制的现场实验[J].海洋与湖沼,2001,32(6):672-678.
- [16] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations [J]. Limnology and Oceanography, 1967, 12(2): 343-346.
- [17] Jeffrey S W, Humphrey G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*1 and *c*2 in higher plants, algae and natural phytoplankton [J]. Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 1975, 167(19): 191-194.
- [18] 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.GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查[S].北京:中国标准出版社,2007:16-23.
- [19] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [20] 李玲伟.沉积物-水界面交换和黄河输入对渤海营养盐的影响[D].青岛:中国海洋大学硕士学位论文,2010.
- [21] Liu S M, Li L W, Zhang Z N. Inventory of nutrients in the Bohai [J]. Continental Shelf Research, 2011, 31(16): 1790-1797.
- [22] Liu H, Yin B S. Numerical investigation of nutrient limitations in the Bohai Sea [J]. Marine Environmental Research, 2010, 70(3): 308-317.
- [23] 谢琳萍,孙霞,王保栋,等.渤黄海营养盐结构及其潜在限制作用的时空分布[J].海洋科学,2012,36(9):45-53.
- [24] 孙军,刘东艳,柴心玉,等.1998-1999年春秋季节渤海中部及其邻近海域叶绿素*a*浓度及初级生产力估算[J].生态学报,2003,23(3):517-526.
- [25] 邹斌,邹亚荣,金振刚.渤海海温与叶绿素季节空间变化特征分析[J].海洋科学进展,2005,4(23):487-492.

Spatial distribution of chlorophyll *a* and environmental factors in the Bohai Sea in spring of 2012

LIU Li-xue^{1, 2}, WANG Yu-jue¹, DI Bao-ping¹, LIU Dong-yan¹

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Dec., 30, 2013

Key words: Bohai Sea; chlorophyll *a*; environmental factors; Principal Components Analysis

Abstract: Based on the data collected from the Bohai Sea in May 2012, the spatial distribution and correlations between chlorophyll *a* (Chl-*a*) and environmental factors were studied. Compared with the central Bohai Sea, higher temperature and lower salinity were examined in seawaters close to the sea area of the Yellow River mouth, indicating the impact of freshwater input and shallower water depth in coastal waters. Spatial distribution of nutrients showed relatively higher concentrations close to the Yellow River mouth as a result of the nutrient loadings of Yellow River. Vertical variations displayed that nutrient concentrations in the bottom and middle water layers were generally higher than those in surface water layer, indicating the impact of the sediment release. Phosphate and silicate were identified as limiting factors at most sites, based on the analysis of nutrient concentrations and structures, and phosphate limitation was particularly serious. Concentrations of Chl-*a* in surface water were higher at the adjacent area of the Bohai Bay, but in middle and bottom water layers, the relatively higher concentrations of Chl-*a* occurred in the central of the Bohai Sea. The results of principal components analysis indicated that phosphate and temperature were major factors controlling the spatial distribution of Chl-*a* in the surface water layer, and phosphate was key factor in the middle and bottom water layers.

(本文编辑: 康亦兼)