

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2016.05.011

# 2013 年夏季渤海环境因子与叶绿素 *a* 的空间分布特征及相关性分析

张莹<sup>1,2</sup>, 王玉珏<sup>1</sup>, 王跃启<sup>1</sup>, 刘东艳<sup>1</sup>

(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:**通过对 2013 年 7 月渤海海域 26 个站点温度、盐度、营养盐及叶绿素 *a* (Chl *a*) 浓度的空间分布特征及其相关性进行了分析, 发现: 受渤海水深和夏季陆源河流输入影响, 近岸水域表现出明显的高温、低盐与高营养盐特征, 且垂直变化特征不显著; 在水深较深的辽东湾湾口和渤海海峡, 海水呈现明显的层化现象, 表层水温高于中底层, 而表层盐度与营养盐浓度则低于中底层。营养盐结构分析表明, 渤海夏季磷酸盐浓度存在显著的绝对与相对限制, 而受河流输入影响, 硅酸盐的相对限制得到显著缓解。表层 Chl *a* 浓度的高值区位于滦河及复州河河口附近海区, 中层与底层的高值区则出现在滦河与黄河河口附近。Chl *a* 浓度与环境因子的相关性分析表明, 盐度、磷酸盐与硅酸盐的浓度、氮磷比、氮硅比是影响 Chl *a* 浓度空间分布的重要因素, 且温度还影响到 Chl *a* 浓度的垂直分布。

**关键词:** 渤海; 叶绿素 *a*; 环境因子; 主成分分析

中图分类号: P734.4<sup>3</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2016)05-0571-08

## Spatial distribution and correlation of environmental factors and chlorophyll *a* concentrations in the Bohai Sea during the summer of 2013

ZHANG Ying<sup>1,2</sup>, WANG Yu-jue<sup>1</sup>, WANG Yue-qi<sup>1</sup>, LIU Dong-yan<sup>1</sup>

(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)

**Abstract:** Spatial distribution of seawater temperature, salinity, nutrient concentrations and Chlorophyll *a* (Chl *a*) concentrations from 26 stations in the Bohai Sea during July of 2013 were analyzed. The results showed that the water depth and river discharge in summer resulted in the high seawater temperature, low salinity and high nutrient concentrations together with the unobvious vertical variations in the coastal area of the Bohai Sea. However, in the deeper area such as the Liaodong Bay and the Bohai Strait, vertical gradients in the seawater were found with higher seawater temperature, lower salinity and nutrient concentrations in the surface water compared with the middle and lower water. The nutrient structure showed obvious absolute and relative limitation of phosphate in the Bohai Sea in summer. The supplement of silicate from river discharge relieved the relative limitation of silicate. High Chl *a* concentrations of the surface seawater were found close to the Luan River and the Fuzhou River mouth, and high Chl *a* concentrations of the middle and lower water were found close to the Luan River and the Yellow River mouth. The correlation analysis between Chl *a* concentrations and environmental factors indicated that salinity, phosphate and silicate concentrations, ratios of dissolved inorganic nitrogen (DIN) to phosphate, and ratios of DIN to silicate were factors related to the spatial distribution of Chl *a* concentrations. Seawater temperature also could affect the vertical

收稿日期: 2015-06-11; 修订日期: 2015-10-27

基金项目: 中国科学院战略先导研究项目 (XDA11020405); 国家自然科学基金面上项目 (41376121); 山东省自然科学基金杰出基金 (JQ201414); 国家基金委共享航次基金 (41249901)。

作者简介: 张莹 (1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋藻类生态学研究, 电子邮箱: zhying0825@163.com。

通讯作者: 刘东艳, 研究员, 理学博士, 电子邮箱: dyliu@yic.ac.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

variations of Chl *a* concentration.

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

渤海是我国唯一的内海, 曾经是多种鱼、虾、蟹、贝类的产卵、索饵与育幼场所, 但在区域性气候变化和高频度人类活动叠加产生的多重压力影响下, 渤海生态系统发生了令人担忧的变化, 整体生态“荒漠化”趋势加重, 严重影响了其服务功能和可持续性 (Lin et al, 2001; Ning et al, 2010; 侯玉忠, 2003; 唐启升, 2006)。

已有的研究表明, 大量的氮营养盐输入, 使得渤海富营养化问题严重, 营养盐结构呈现显著变化, 磷酸盐与硅酸盐的限制加重 (Yu et al, 2001; Liu et al, 2011)。在高氮磷比或高氮硅比条件下, 甲藻对硅藻具有明显的竞争优势, 从而可能导致浮游植物群落结构从硅藻占优, 转变为硅藻甲藻联合优势 (孙军等, 2002; 郭术津等, 2014), 进而引起有害甲藻赤潮的增多。如: 根据国家海洋局海洋环境状况公报, 仅 2013 年, 渤海就发生 13 次赤潮, 累计面积多达 1 880 km<sup>2</sup>, 其中甲藻赤潮 9 次 (中国国家海洋局, 2013)。此外, 近年来的观测显示, 受河流输入和气候变化的影响, 渤海夏季温盐结构较历史资料发生较大变化, 盐度有升高趋势 (吴德星等, 2004)。这些环境因子的综合变化, 都可能成为夏季赤潮频发的诱因。

因此, 综合分析渤海夏季浮游植物与环境因子的空间分布关系, 并与历史资料形成比较, 对于及时了解浮游植物与环境变化的响应关系具有重要意义。本研究通过搭乘 2013 年基金委渤海夏季公开航次, 利用反映浮游植物现存量的指标叶绿素 *a* (Chl *a*), 以及海水温盐与营养盐数据, 综合分析了叶绿素 *a* 浓度与环境因子的时空分布特征及相互关系, 以期对渤海夏季赤潮高发现象提供研究思路与资料。

## 1 研究区域和方法

2013 年 7 月搭乘国家基金委公开航次在渤海开展了温度、盐度、营养盐和 Chl *a* 的取样调查工作。调查区域涵盖了渤海中部、渤海海峡、辽东湾湾口、渤海湾湾口及莱州湾湾口 5 个断面共计 26 个站点的表层、中层与底层水样, 具体站点布设如

图 1 所示。

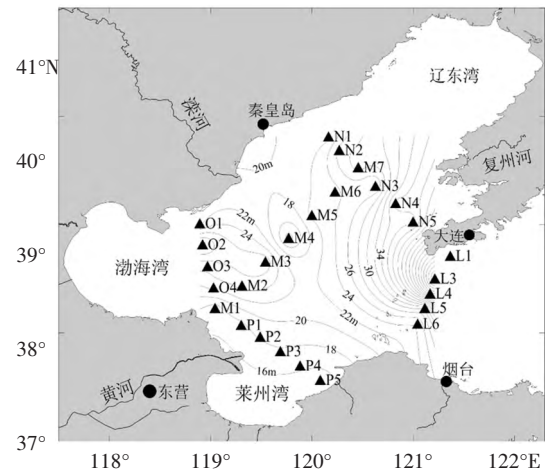


图 1 调查站点及水深

温度和盐度的数据来自船载 CTD (Seabird 911)。每个站位设表、中、底 3 层, 表层水样取自水深 3 m 左右海水, 中、底层依据实际水深设定。CTD 采集的水样分别用于 Chl *a* 和营养盐浓度的测定。其中, 3 个 1 L 的平行水样经 GF/F 滤膜 (Whatman, 47 mm) 过滤后, 滤膜避光冷冻保存于 -20 °C 下, 用于 Chl *a* 浓度的测定, 结果取平均值。另取 250 mL 水样经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤, 滤液于 -20 °C 下冷冻保存, 用于营养盐浓度的测定。航次结束, 样品带回实验室后即进行相关测定工作。

Chl *a* 浓度的测定采用紫外-可见分光光度法。将滤膜剪碎, 用 90 % 的丙酮在 4 °C 下提取 24 h, 4 000 r 转速下离心 10 min, 取其上清液用于 Chl *a* 浓度测定。用紫外-可见分光光度计 (TU-1810), 分别于波长 750 nm、664 nm、647 nm、630 nm 下测定其吸光值。Chl *a* 的浓度计算方法采用公式 (1) (Lorenzen, 1967; Jeffrey et al, 1975) 最终结果以 μg/L 表示。

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

其中,  $E_{750}$ 、 $E_{664}$ 、 $E_{647}$ 、 $E_{630}$  分别代表 750 nm、664 nm、647 nm 和 630 nm 波长下的吸光值,  $V_{\text{丙酮}}$  代表萃取剂 90 % 丙酮的体积 (mL),  $V_{\text{水样}}$  代表海

水的过滤体积 (L)。

溶解态无机营养盐浓度利用营养盐自动分析仪 (AA3, Bran+Luebbe, German) 测定, 包括硝酸盐 (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、亚硝酸盐 (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)、氨氮 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、磷酸盐 (DIP) 和硅酸盐 (DSi)。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用水杨酸钠显色法, 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) (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, 2007): NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 经铜镉还原后采用重氮-偶氮显色法; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 采用重氮-偶氮显色法; DIP 采用磷钼蓝法; DSi 采用硅钼蓝法。溶解无机氮(DIN)经计算而得, 为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 之和。

对渤海表层 25 个站点、中层 24 个站点、底层 23 个站点 (其他站点因部分因子缺失去除) 的 Chl a 浓度和环境因子数据进行了主成分分析 (PCA) (Lepš et al, 2003), 所得结果的前 2 个主成分轴均可解释总体变量的 85 % 以上, 据此分别得到表、中、底层的 PCA 排序图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度(T)与盐度(S)的空间分布特征

图 2a-c 为渤海水温空间分布特征。调查期间水温范围为 5.57 °C~24.9 °C; 其中, 表层平均水温为 20.8 °C, 中层为 16.6 °C, 底层为 15.1 °C。渤海水温的空间变化与地形和水深有密切关系, 多数研究资料表明 (黄大吉 等, 1996; 周峰 等, 2009), 夏季在渤海海峡、辽东湾湾口可以形成层化现象 (水深>30 m)。研究也证实了这一特点: 莱州湾湾口及渤海中部水深较浅处, 水温垂直变化较小; 而渤海海峡、渤海湾湾口及辽东湾湾口水深较深, 水温垂直变化显著。同时, 夏季陆地气温及径流水温高, 径流输入导致黄河口和滦河口附近海区水温明显高于其他海区。

图 2d-f 为渤海盐度的空间分布特征。调查区域内盐度范围为 25.1~31.5; 其中, 表层平均盐度值为 29.4, 中层为 30.0, 底层为 30.2。黄河入海口附近呈现出一个向东北方向延伸的低盐水舌, 表层

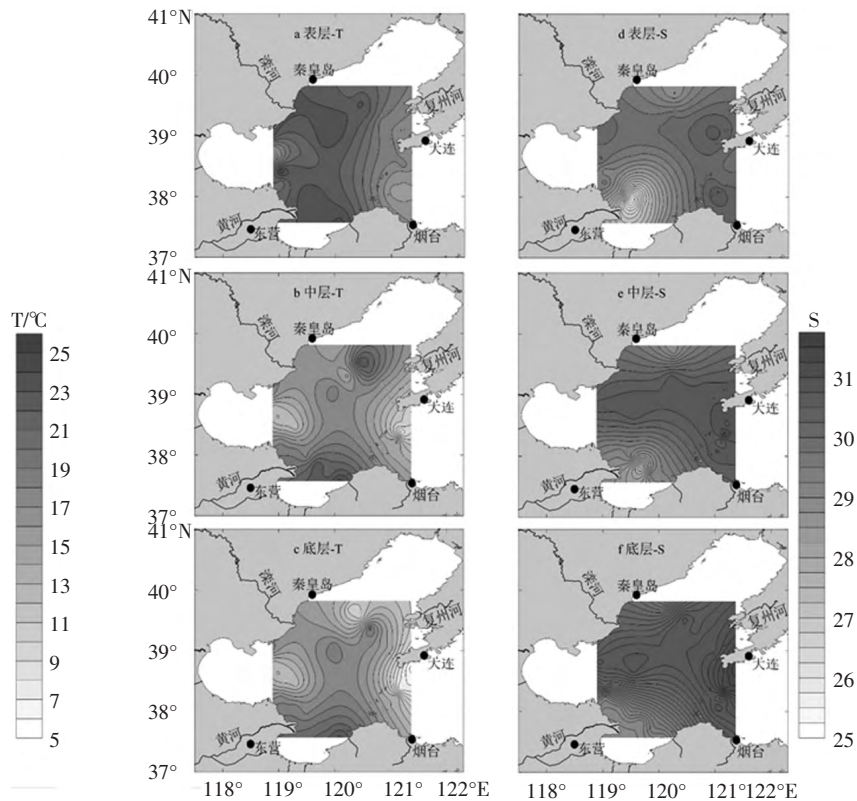


图 2 调查海区海水温度 (T) 和盐度 (S) 的空间分布特征 (a 表层-T; b 中层-T; c 底层-T; d 表层-S; e 中层 S; f 底层-S)



尤为明显,显示了夏季黄河淡水输入对该区域盐度的影响;渤海海峡附近的盐度较高,显示了此处受到黄海高盐水的影响(魏泽勋等,2004)。

## 2.2 营养盐浓度的空间分布特征

图 3a-c 为 DIN 浓度的空间分布特征。调查区域内 DIN 浓度范围为 1.05~17.1  $\mu\text{mol/L}$ ;其中,中(6.27  $\mu\text{mol/L}$ )、底层(6.29  $\mu\text{mol/L}$ )平均浓度高于表层(5.80  $\mu\text{mol/L}$ )。在水平分布上,DIN 浓度呈现出渤海中部偏渤海湾与莱州湾侧高于辽东湾口与渤海海峡的特点。

图 3d-f 所示为 DIP 浓度的空间分布特征。调查区域内 DIP 浓度最低值低于检出限,最高值为

0.11  $\mu\text{mol/L}$ ;其中,底层(0.04  $\mu\text{mol/L}$ )平均浓度略高于表层(0.03  $\mu\text{mol/L}$ )与中层(0.03  $\mu\text{mol/L}$ ),垂直变化不显著。在水平分布上,底层高值区位于辽东湾湾口东部海区及渤海海峡附近;表层高值区位于莱州湾湾口东部海区,最高值可达 0.09  $\mu\text{mol/L}$ ;中层分布相对均匀,渤海西北部海区浓度略高。

图 3g-i 所示为 DSi 浓度的空间分布特征。调查区域内 DSi 浓度范围为 0.22~2.54  $\mu\text{mol/L}$ ;其中,底层平均浓度(0.98  $\mu\text{mol/L}$ )高于中层(0.84  $\mu\text{mol/L}$ )与表层(0.82  $\mu\text{mol/L}$ )。水平分布上,3 层 DSi 浓度高值区均集中在黄河口附近,而渤海海峡附近海区浓度较低。

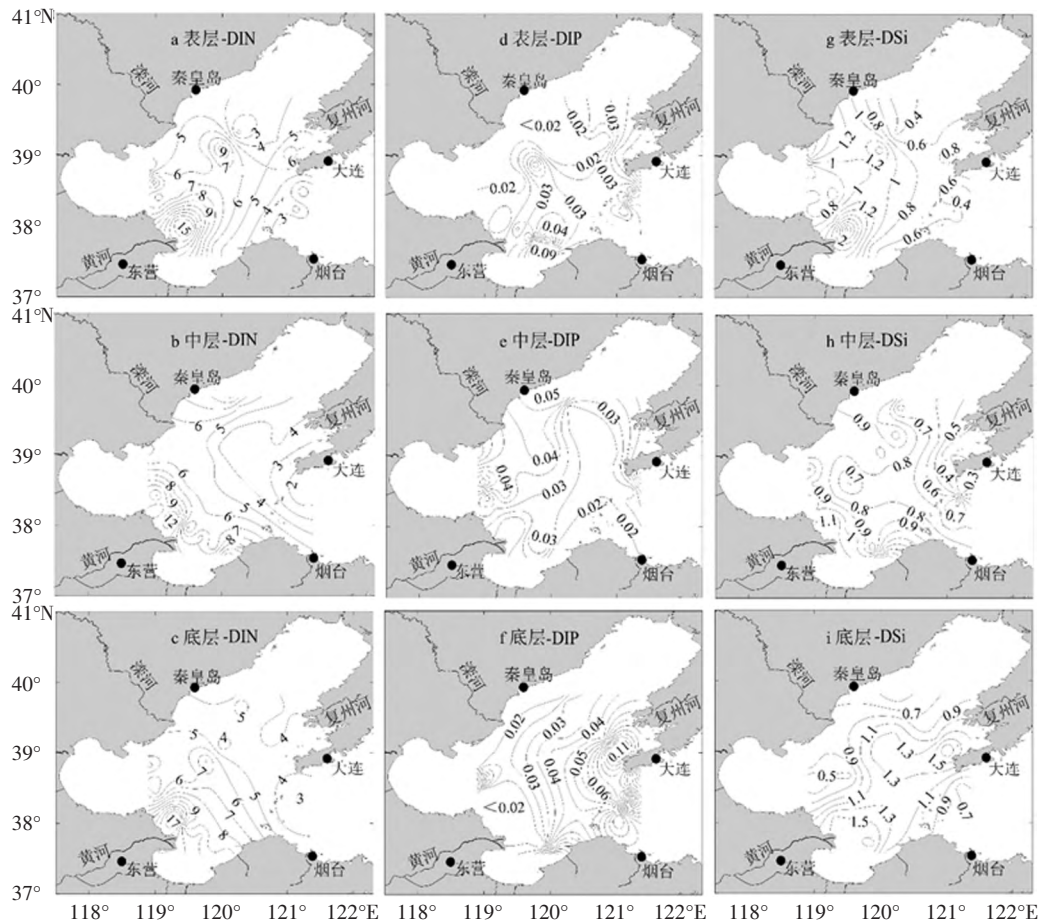


图 3 调查海区溶解无机氮(DIN)、磷酸盐(DIP)和硅酸盐(DSi)的空间分布特征

(a 表层-DIN; b 中层-DIN; c 底层-DIN; d 表层-DIP; e 中层-DIP; f 底层-DIP; g 表层-DSi; h 中层-DSi; i 底层-DSi) (单位:  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )

本次调查中,营养盐的空间分布特征与以往调查相似,夏季河流输入,尤其黄河水输入对海区营养盐有重要补充作用,是渤海氮和硅的重要来源(Yu et al, 2001; Zhang et al, 2004)。3 种营养盐浓度均呈现出中、底层平均浓度高于表层的特征,

说明渤海沉积物向上覆水中释放出一定比例营养盐。Liu 等(2011)研究发现,渤海沉积物中营养盐的释放在全年可达到河流输入的 2~3 倍。然而,在夏季,沉积物向上层水体的输入受海水层化的影响,垂直交换速度可能慢于冬季。

本次调查结果显示 DIP 浓度较以往结果 (Wang et al, 2009; 石强等, 2013; 王文涛等, 2013) 偏低, 而同期研究结果 (王丽莎等, 2015) 也表明 2013 年夏季渤海中部呈现低 DIP 浓度的特征, 尤其是表层海水 ( $<0.1 \mu\text{mol/L}$ )。分析其原因可能为: 一方面, 黄河输入对渤海 DIP 补给少, 陈沛沛等 (2013) 研究发现黄河下游水域中 DIP 的浓度不高 ( $<0.1 \mu\text{mol/L}$ ), 可以推断黄河水输入对渤海 DIP 浓度的贡献相对较小; 另一方面, 可能与浮游植物生长大量消耗有关, 结合 2.4 部分分析也发现 Chla 与 DIP 呈显著负相关, 同时对比以往同期研究 (赵骞等, 2004; 郭全, 2005), 发现 2013 年夏季 Chla 浓度 ( $3.04 \mu\text{g/L}$ ) 显著高于 2000 年夏季 ( $0.96 \mu\text{g/L}$ ) 及 2002 年夏季 ( $1.53 \mu\text{g/L}$ ), 因此高 Chla 值对应的高浮游植物生物量对海区 DIP 消耗也可能是造成 DIP 低值的重要因素; 再者, 沉积物中 DIP 再释放是一个缓慢过程 (Liu et al, 2011), 这也可能是导致海区低 DIP 浓度的一个重要原因。

### 2.3 营养盐对浮游植物生长的可能限制作用

海水营养盐结构在控制海洋浮游植物的生长和海洋初级生产力等方面起着相当重要的作用 (Patsch et al, 1997)。近年来渤海营养盐水平及结构发生了很大变化, DIN 含量上升, DIP 及 DSi 含量下降, 并由此引起磷限制与硅限制的现象 (蒋红等, 2005; 于志刚等, 2000; 阚文静等, 2010; 谢琳萍等, 2012)。本研究依据 Redfield (1958)、Nelson 等 (1990)、Justic 等 (1995b) 提出的浮游植物生长化学计量和可能的营养盐限制因素参考值 (表 1), 对渤海营养盐限制状况进行了判断。

表 1 营养盐限制因素判定参考值

营养盐限制因子	绝对限制	相对限制		
		DIN/DIP	DSi/DIN	DSi/DIP
N 限制	$\text{DIN} < 1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$< 10$	$> 1$	
P 限制	$\text{DIP} < 0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$> 22$		$> 22$
Si 限制	$\text{DSi} < 2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$		$< 1$	$< 10$

结果如表 2 和图 4 所示 (其中表层 P1、M5, 中层 P5, 底层 P1 站点处 DIN/DIP 值过高, 均大于 1000, 已在图中用 ▲ 单独标明)。参照营养盐相对限制判定标准, 调查区域存在 DIP 与 DSi 的绝对限制与相对限制, 但是不存在 DIN 限制。在调查的

26 个站位中, 表层有 13 个站点存在 DIP 相对限制, 有 2 个站点存在 DSi 相对限制; 中层有 15 个站点存在 DIP 相对限制, 有 1 个站点存在 DSi 相对限制, 底层有 16 个站点存在 DIP 相对限制, 有 2 个站点存在 DSi 相对限制。对比 2012 年春季调查结果 (刘丽雪等, 2014), 发现夏季硅限制情况较春季有所缓解, 这可能是因为夏季丰水期陆源输入补充了海区的 DSi 含量, 从而缓解了海区的硅限制状况。尽管依据化学计量营养盐判定参考值, 发现调查海区不存在 DIN 的限制, 但确切的结论尚需进一步结合相关培养实验确定。例如, 1998–1999 年对胶州湾的研究中发现, 根据判定标准 (表 1), 表层水体不存在 DIN 限制, 但现场添加实验发现同时添加氮与磷的实验组浮游植物生长情况最好, 表明 DIN 对浮游植物生长可能存在实际限制 (王勇等, 2002)。在渤海湾的加富实验研究也表明, 尽管调查海区不存在 DIN 限制, 但增加硝酸盐含量仍造成了 Chl a 浓度和浮游植物细胞密度的升高 (穆迪等, 2012)。

表 2 调查海区营养盐限制状况

水层	$n_{\text{总}}$	N 限制		P 限制		Si 限制	
		$n_{\text{绝}}$	$n_{\text{相}}$	$n_{\text{绝}}$	$n_{\text{相}}$	$n_{\text{绝}}$	$n_{\text{相}}$
表层	26	0	0	25	13	25	2
中层	26	0	0	24	15	24	1
底层	26	0	0	23	16	25	2

( $n_{\text{总}}$  为总站位数,  $n_{\text{绝}}$  为绝对限制站位数,  $n_{\text{相}}$  为相对限制站位数)

### 2.4 Chl a 浓度的空间分布特征及环境因子的相关性分析

图 5a–c 所示为调查海区内 Chl a 的空间分布特征。调查海域内 Chl a 的浓度范围为  $0.96\text{--}7.75 \mu\text{g/L}$ ; 其中, 表层 Chl a 平均浓度 ( $3.53 \pm 1.74 \mu\text{g/L}$ ) 高于中 ( $3.01 \pm 1.42 \mu\text{g/L}$ )、底层 ( $2.60 \pm 1.44 \mu\text{g/L}$ )。高值区位于滦河及复州河河口附近海区, 表明了陆源河流的营养盐输入和低盐度对海区浮游植物生长的促进作用 (孙军等, 2003; 傅明珠等, 2009); 黄河河口附近 Chl a 浓度并非最高, 其原因可能是由于夏季调水调沙导致该海区呈高浑浊度, 浮游植物的生长受光限制所致 (毕乃双等, 2010; 刘晓彤等, 2012); 低值区位于渤海中部及渤海海峡。Chl a 浓度的垂直分布明显受到水深的影响。在水深较深的辽东湾口与渤海海峡, 底层 Chl a 浓度明显低于表层, 显示了光限制的影响 (郑国侠等, 2006; 沈



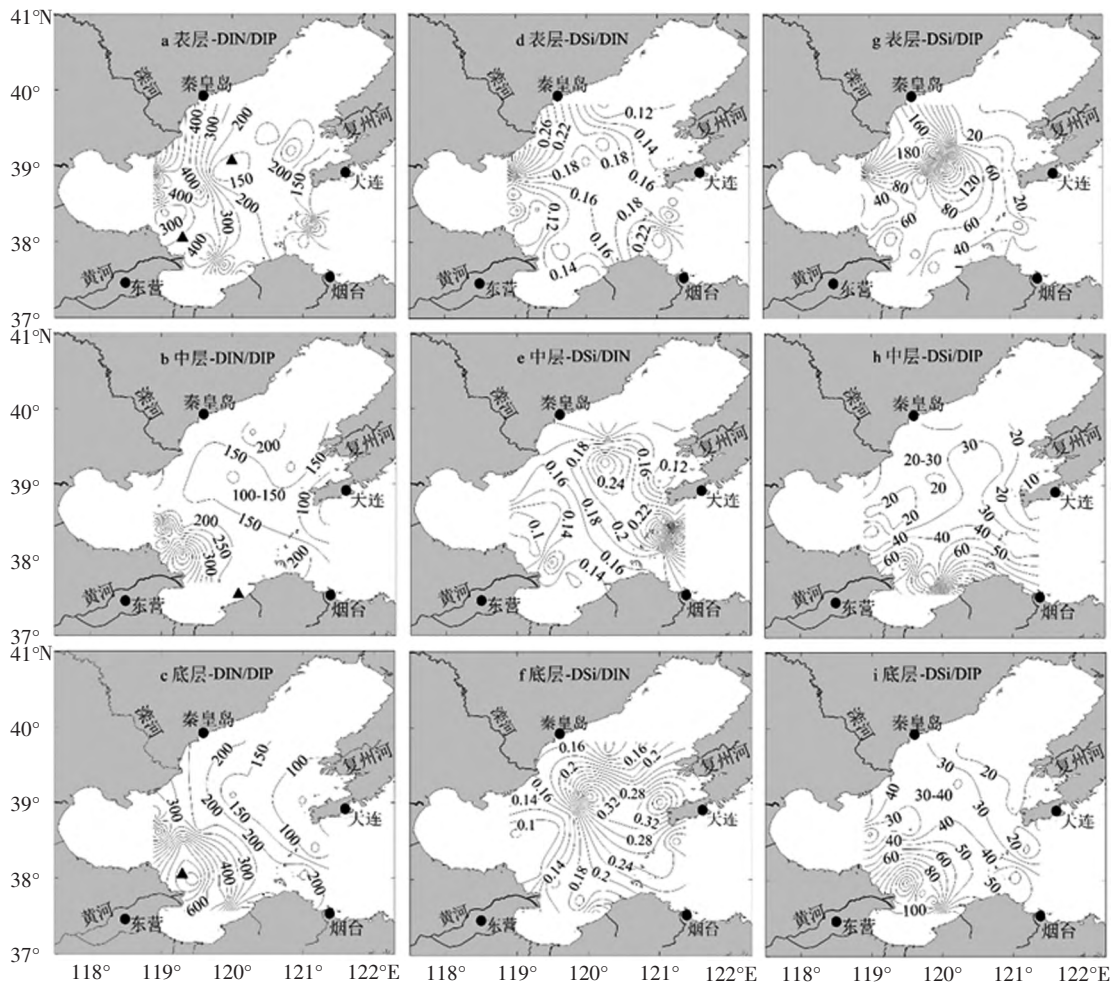


图 4 调查海区 DIN/DIP, DSi/DIN 与 DSi/DIP 的空间分布

(a 表层-DIN/DIP ; b 中层-DIN/DIP ; c 底层-DIN/DIP ; d 表层-DSi/DIN ; e 中层-DSi/DIN ; f 底层-DSi/DIN ; g 表层-DSi/DIP ; h 中层-DSi/DIP ; i 底层-DSi/DIP)

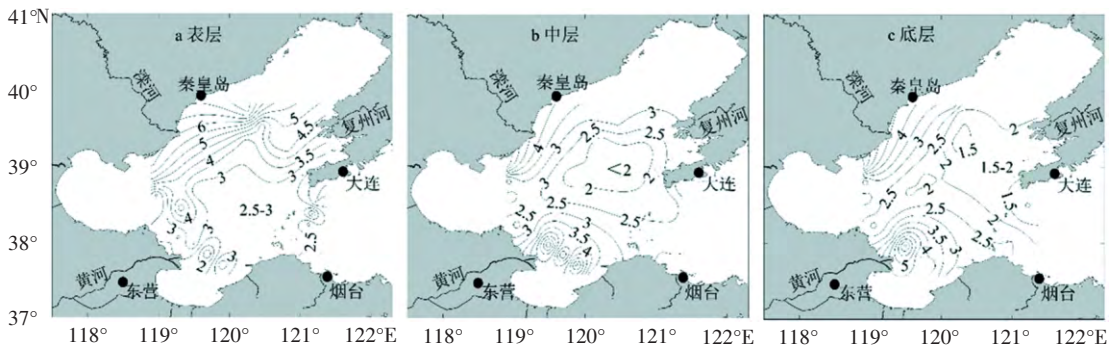


图 5 调查海区 Chl a 的空间分布特征

(a 表层 ; b 中层 ; c 底层) (单位:  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )

国英等, 2010)。

图 6a-c 所示为将 Chl a 浓度与 T、S、DIN、DIP 及 DSi 的浓度及结构数据进行主成分分析 (PCA) 的结果。排序图结果表明: 表层盐度与 Chl a 呈正相关, 中、底层水体中盐度与 Chl a 浓度空间

分布呈显著负相关关系。表层结果可能受到黄河口附近低盐度与低 Chl a 特征的影响, 但整体来看, 夏季渤海河流输入与 Chl a 浓度呈正相关关系。张志峰等(2012)对渤海营养盐与赤潮发生的时空耦合分析也表明, 夏季河流携带营养盐入海通量的高低

与赤潮发生的面积及频率呈显著正相关。在中、底层，Chl *a* 浓度显示了与 T 的正相关关系，表明夏季层化区域对下层浮游植物生长有限制作用。

此外，3 层水体中的 Chl *a* 浓度均与营养盐的结构或浓度表现出显著相关。相对于 DIN 和 DSi，Chl *a* 浓度与 DIP 均呈显著负相关，表明 DIP 的供应不能满足夏季浮游植物的快速生长，DIP 始终处于快速消耗状态。张志峰等 (2012) 特别指出江河输入的 DIP 总量影响了渤海赤潮发生的空间和规

模。对比近年来在渤海夏季开展的调查 (赵蓍等, 2004; 郭全, 2005; 谢琳萍等, 2012)，也证实磷酸盐的限制作用在夏季明显大于硅酸盐。

### 3 结论

2013 年夏季渤海海区的综合调查表明，夏季河流输入对渤海温盐结构、营养盐与 Chl *a* 浓度有显著影响。盐度、营养盐浓度与结构是控制渤海 Chl *a* 浓度时空分布的主要因素。夏季河流输入对硅酸盐的补充显著，缓解了其对浮游植物的生长限制，但对磷酸盐的补充作用不明显。

致谢：感谢“东方红 2 号”科考船对海上作业的支持；感谢 2013 年夏季基金委共享航次 (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

Jeffrey S W, Humphrey G F, 1975. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie and Physiologie der Pflanzen*, 167 (19) : 191-194.

Justic D, Rabalais N N, Turner R E, et al, 1995b. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 40 (3) : 339-356.

Lepš J, Šmilauer P, 2003. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. Cambridge: Cambridge University Press.

Lin C L, Su J L, Xu B R, et al, 2001. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem. *Progress in Oceanography*, 49: 7-19.

Liu S M, Li L W, Zhang Z N, 2011. Inventory of nutrients in the Bohai. *Continental Shelf Research*, 31: 1790-1797.

Lorenzen C J, 1967. Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: spectrophotometric equations. *Limnology and Oceanography*, 12 (2) : 343-346.

Nelson D M, Brezinski M A, 1990. Kinetics of silicate acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf and stream warm-core rings. *Marine Ecology Progress Series*, 62: 283-292.

Ning X R, Lin C L, Su J L, et al, 2010. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960-1996. *Deep-Sea Research*, 57: 1079-1091.

Patsch J, Radach G, 1997. Long-term simulation of the eutrophication of the North Sea-Temporal development of nutrients, chlorophyll and primary production in comparison to observations. *Journal of Sea Re-*

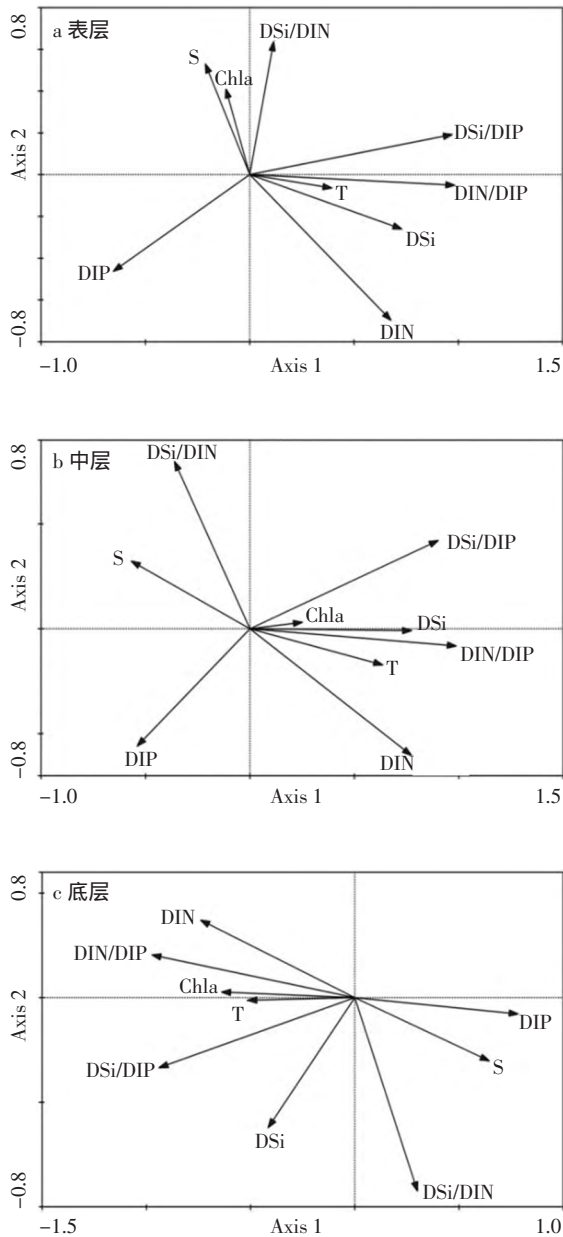


图 6 PCA 排序图

- search, 38: 275-310.
- Redfield A C, 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 46: 205-222.
- Wang X L, Cui Z G, Guo Q, et al, 2009. Distribution of nutrients and eutrophication assessment in the Bohai Sea of China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27 (1) : 177-183.
- Yu Z G, Mi T Z, Yao Q Z, et al, 2001. Nutrients concentration and changes in decade-scale in the central Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 20 (1) : 65-75.
- Zhang J, Yu Z G, Raabe T, et al, 2004. Dynamics of inorganic nutrient species in the Bohai seawaters. *Journal of Marine Systems*, 44: 189-212.
- 毕乃双, 杨作升, 王厚杰, 等, 2010. 黄河调水调沙期间黄河入海水沙的扩散与通量. *海洋地质与第四纪地质*, 30 (2) : 27-34.
- 陈沛沛, 刘素美, 张桂玲, 等, 2013. 黄河下游营养盐浓度、入海通量月变化及“人造洪峰”的影响. *海洋学报*, 35 (2) : 59-71.
- 傅明珠, 王宗灵, 孙萍, 等, 2009. 2006 年夏季南黄海浮游植物叶绿素 a 分布特征及其环境调控机制. *生态学报*, 29 (10) : 5366-5375.
- 郭全, 2005. 渤海夏季营养盐和叶绿素分布特征及富营养化状况分析. 青岛: 中国海洋大学硕士学位论文.
- 郭术津, 李彦翘, 张翠霞, 等, 2014. 渤海浮游植物群落结构及与环境因子的相关性分析. *海洋通报*, 33 (1) : 95-105.
- 侯玉忠, 2003. 渤海渔业资源下降原因及修复建议. *中国海洋报*.
- 黄大吉, 苏纪兰, 陈宗镛, 1996. 三维陆架海模式在渤海中的应用. *海洋学报*, 18 (6) : 8-17.
- 蒋红, 崔毅, 陈碧鹃, 等, 2005. 渤海近 20 年来营养盐变化趋势研究. *海洋水产研究*, 26 (6) : 61-67.
- 阚文静, 张秋丰, 胡延忠, 等, 2010. 渤海湾水体富营养化与有机污染状况初步评价. *海洋通报*, 29 (2) : 172-175.
- 刘丽雪, 王玉珏, 邸宝平, 等, 2014. 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. *海洋科学*, 38 (12) : 8-15.
- 刘晓彤, 刘光兴, 2012. 2009 年夏季黄河口及其邻近水域网采浮游植物的群落结构. *海洋学报*, 34 (1) : 153-162.
- 穆迪, 李清雪, 陶建华, 等. 渤海湾西南部典型站位营养盐限制特性的加富培养实验研究. *海洋通报*, 31 (6) : 680-688.
- 沈国英, 黄凌风, 郭丰, 等, 2010. *海洋生态学*. 北京: 科学出版社, 50-53.
- 石强, 2013. 渤海夏季海水磷酸盐年际时空演变. *海洋通报*, 32 (4) : 395-402.
- 孙军, 刘东艳, 柴心玉, 等, 2003. 1998-1999 年春秋渤海中部及其邻近海域叶绿素 a 浓度及初级生产力估算. *生态学报*, 23 (3) : 517-526.
- 孙军, 刘东艳, 杨世民, 等, 2002. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究. *海洋与湖沼*, 33 (5) : 461-471.
- 唐启升, 2006. *中国专属经济区海洋生物资源与栖息环境*. 北京: 科学出版社.
- 王丽莎, 张传松, 王颢, 等, 2015. 夏季黄渤海生源要素的平面分布特征. *海洋环境科学*, 34 (3) : 361-366.
- 王文涛, 杨桂朋, 于娟, 等, 2013. 夏季黄海和渤海微表层和次表层海水中营养盐的分布特征. *环境科学*, 34 (8) : 2983-2991.
- 王勇, 焦念志, 2002. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系. *海洋科学*, 26 (4) : 8-13.
- 魏泽勋, 李春雁, 方国洪, 等, 2003. 渤海夏季环流和渤海海峡水体运输的数值诊断研究. *海洋科学进展*, 21 (4) : 454-464.
- 吴德星, 万修全, 鲍献文, 等, 2004. 渤海 1958 年和 2000 年夏季温盐场及环流结构的比较. *科学通报*, 49 (3) : 287-292.
- 谢琳萍, 孙霞, 王保栋, 等, 2012. 渤海黄海洋营养盐结构及其潜在限制作用的时空分布. *海洋科学*, 36 (9) : 45-53.
- 于志刚, 米铁柱, 谢宝东, 等, 2000. 二十年来渤海生态环境参数的演化和相互关系. *海洋环境科学*, 19 (1) : 15-19.
- 张志峰, 贺欣, 张哲, 等, 2012. 渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性. *海洋环境科学*, 31 (4) : 465-468.
- 赵骞, 田纪伟, 赵仕兰, 等, 2004. 渤海冬夏季营养盐和叶绿素 a 的分布特征. *海洋科学*, 28(4) : 34-39.
- 郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 等, 2006. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度. *海洋学报*, 28 (3) : 109-118.
- 中国国家海洋局, 2013. *中国海洋环境状况公报*. <http://www.coi.gov.cn/gongbao/>.
- 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, 2007. GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范第 4 部分: 海水化学要素调查. 北京: 中国标准出版社, 16-23.
- 周峰, 黄大吉, 苏纪兰, 2009. 夏季渤海温跃层下的双中心冷水结构的数值模拟. *科学通报*, 54 (11) : 1591-1599.

(本文编辑: 袁泽轶)