

2008 年秋季胶州湾两航次生源要素的分布特征及其来源初步探讨

丁东生^{1,2}, 石晓勇¹, 曲克明², 李富强¹, 崔正国²

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东青岛 266100; 2. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东青岛 266071)

摘要: 利用 2008 年秋季胶州湾两个航次的调查结果, 对该海域营养盐等生源要素的分布特征进行了分析, 并通过相关性分析及陆海同步调查数据对其来源做了初步探讨。结果表明, 胶州湾秋季两个航次的叶绿素、营养盐、化学需氧量、温度、光照、盐度、溶解氧等各调查要素相应的平面分布趋势基本相同, 除盐度和温度外均表现出由河口向离岸逐渐降低的趋势。秋季可能成为胶州湾浮游植物生长限制因子的要素与叶绿素 a 相关性强弱顺序如下(“**”和“*”分别代表置信水平 $P=0.01$ 和 $P=0.05$): 活性磷酸盐: 0.889(**)、溶解无机氮: 0.724(**)、溶解有机氮: 0.549(**)、溶解有机磷: 0.523(**)、颗粒态氮: 0.474(**)、温度: -0.696(**)、活性硅酸盐: 0.410(*), 颗粒态磷: -0.191、浊度: -0.096。由相关性分析结果及陆海同步调查结果可初步得出与叶绿素 a 相关性较强的各要素来源如下: 化学需氧量、盐度、溶解无机氮、活性磷酸盐、溶解有机氮、溶解有机磷具有明显的陆源输入特征, 颗粒态氮以浮游植物新陈代谢产生为主。

关键词: 胶州湾; 秋季; 生源要素; 分布; 来源

中图分类号: R962; O636.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)01-0035-07

胶州湾位于黄海西部, 山东半岛南岸, 是典型的半封闭海湾, 水域面积约 320 km²。青岛市坐落于胶州湾畔, 其行政区内的大沽河、白沙河、洋河、海泊河、李村河等十几条河流汇入胶州湾, 其中除大沽河保有自然径流外, 其余河流下游多已成为工业废水、城市生活污水等的主要排污通道^[1]。随着化学污染物排海总量的不断增加, 胶州湾生态环境问题已经成为青岛市社会经济可持续发展的制约因素。目前对于胶州湾营养盐现状及变化^[2]、胶州湾叶绿素浓度、分布特征及其周年变化^[3]、胶州湾营养盐结构变化及其对生态环境影响的研究^[4]均较多, 营养盐等水环境因子与叶绿素 a 的相关性^[5]及营养盐来源^[6]等在其他海区已有一些研究, 但是对胶州湾海区, 尤其是直接基于陆海“准同步”现场观测数据的研究结果目前尚无相关报道。本文利用 2008 年秋季胶州湾两个航次陆海同步调查数据给出了胶州湾秋季营养盐、溶解氧等的分布特征及其与叶绿素 a 的相关性分析结果, 初步探讨了各项营养盐的来源以及秋季胶州湾浮游植物的生长限制因子。

1 材料与方法

于 2008 年 9 月 22~24 日和 2008 年 10 月 14~15 日在胶州湾进行了两个航次的现场调查, 调查设置 26 个站位(站位设置如图 1 所示, 其中“陆上站”是指在河口所设站位), 其中 16 个综合站进行水样采集和水文观测, 10 个水文站仅进行水文观测。现场使用 Niskin(10L)采水器分别采集表层、中层(站位水深的一半)和底层水样, 其中营养盐水样经 GF/F 滤膜(450 灼烧 4 h)过滤, 于 -20℃ 下冷冻保存水样和滤膜。现场海水的温度和盐度等参数应用 HydroLab 多参数分析仪现场测定。

在陆地实验室应用 Technicon AAII 营养盐自动分析仪测定溶解无机态营养盐(含 PO₄-P、NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N 和 SiO₃-Si)^[7], 其测量精度分别是: PO₄-P 为 98.02%, NO₃-N 为 99.41%, NO₂-N 为

收稿日期: 2012-05-22; 修回日期: 2012-06-02

基金项目: 青岛市科技发展项目(06-2-2-7-nsh)

作者简介: 丁东生(1982-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境容量、营养盐动力学, E-mail: beedds@sina.com; 石晓勇, 通信作者, E-mail: shixy@mail.ouc.edu.cn

99.05%, $\text{NH}_4\text{-N}$ 为 99.69%, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 为 99.05%。总溶解氮(DTN)、总溶解磷(DTP)、总氮(TN)和总磷(TP)采用碱性过硫酸钾消化^[8-9], Technicon AAI 营养盐自动分析仪测定。根据上述测定结果可计算总溶解无机氮 $\text{DIN}=\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}+\text{NH}_4\text{-N}$, 溶解有机氮 $\text{DON}=\text{DTN}-\text{DIN}$, 溶解有机磷 $\text{DOP}=\text{DTP}-\text{PO}_4\text{-P}$, 颗粒态氮 $\text{PN}=\text{TN}-\text{DTN}$ 和颗粒态磷 $\text{PP}=\text{TP}-\text{DTP}$ 。

数据处理: 参考实验室历年调查数据及文献值, 剔除异常值后采用统计软件 spss11.5 对得到的 34 组数据进行相关性分析。相关性系数选用 pearson 系数, 相关系数检验采用软件自身携带的双侧检验。标有“**”者显著性概率水平为 0.01, 即两者显著相关。标有“*”者表示显著性概率水平为 0.05。用皮尔逊相关性分析方法进行分析, 皮尔逊相关系数是在-1 到 +1 之间, 绝对值越大, 表示相关程度越高, 绝对值越小, 相关程度越低。两个变量的相关系数为负值, 称为负相关。用相关系数的大小表示变量间的密切程度时, 一般认为, 相关系数的绝对值在 0.2 以下为弱相关或不相关; 0.4 以上为低相关; 0.6 左右为中相关; 0.8 以上为高(或强)相关, 1 为完全相关。

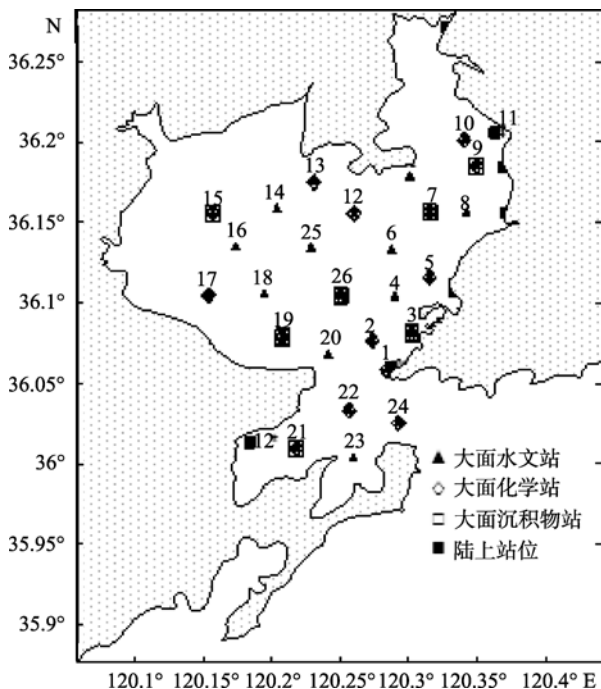


图1 胶州湾 2008 年秋季调查站位设置图

Fig. 1 Stations of survey in Jiaozhou Bay in autumn, 2008

2 结果与讨论

2.1 营养盐、叶绿素等的平面分布特征

图2为调查海区9月和10月两个航次营养盐浓

度(包括 DIN、DON、PN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DOP、PP、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$)、叶绿素浓度(Chl-a)、化学需氧量(COD)、温度(TEM)、浊度(TURB)、盐度(S)、溶解氧(DO)的平面分布, 经过对其综合分析可知, 两个航次各调查要素相应的平面分布趋势基本相同, 除盐度和温度外均表现为河口区高、中央海区区和湾口低, 沿岸向离岸方向呈逐渐降低的特点。具体如下:

DIN、COD、DOP 均在东北角、大沽河口以及镰湾河口出现高值区; DON 在东北角出现高值; PN 9 月份高值区出现在东北角, 10 月份则出现在大沽河口; $\text{PO}_4\text{-P}$ 、PP、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 均在东北角以及大沽河口出现高值; Chl-a 在大沽河口和胶州湾东北角均出现高值区, 其中 9 月大沽河口的高值区偏向河口西侧, 10 月份则偏向东北侧, 这可能是由径流量的变化及入海径流对营养盐的携带能力变化所致, 高值区 9 月在东北角较为明显, 而 10 月则因东北角的浓度降低幅度较大而使得大沽河口高值区更为明显, 另外在 8 号港出口处也出现一高值区, 但此高值区浓度绝对值较低; TEM 9 月份在东北角出现高值区, 胶州湾中部则低于湾口, 10 月份则由河口区向湾口逐渐升高, 这主要是由河流输入水的温度与海水温度差异所致; DO 9 月份分别在大沽河口东、西以及海泊河口出现高值区, 10 月份则在东北角、海泊河口以及大沽河口东边出现高值区; TURB 在大沽河口东侧出现高值, 西侧以及东北角则出现低值; 盐度呈现出由河口区向湾口增大的趋势。

表1为调查海区9月和10月两个航次叶绿素浓度、营养盐浓度、化学需氧量、温度、浊度、盐度、溶解氧的均值。其中, DON、DOP、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、TEM、DO、COD 9 月稍高, Chl-a、DIN、PN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、PP、S、TURB 和 COD 10 月略高。

2.2 叶绿素、营养盐、温度、光照、盐度、溶解氧等的相关性分析

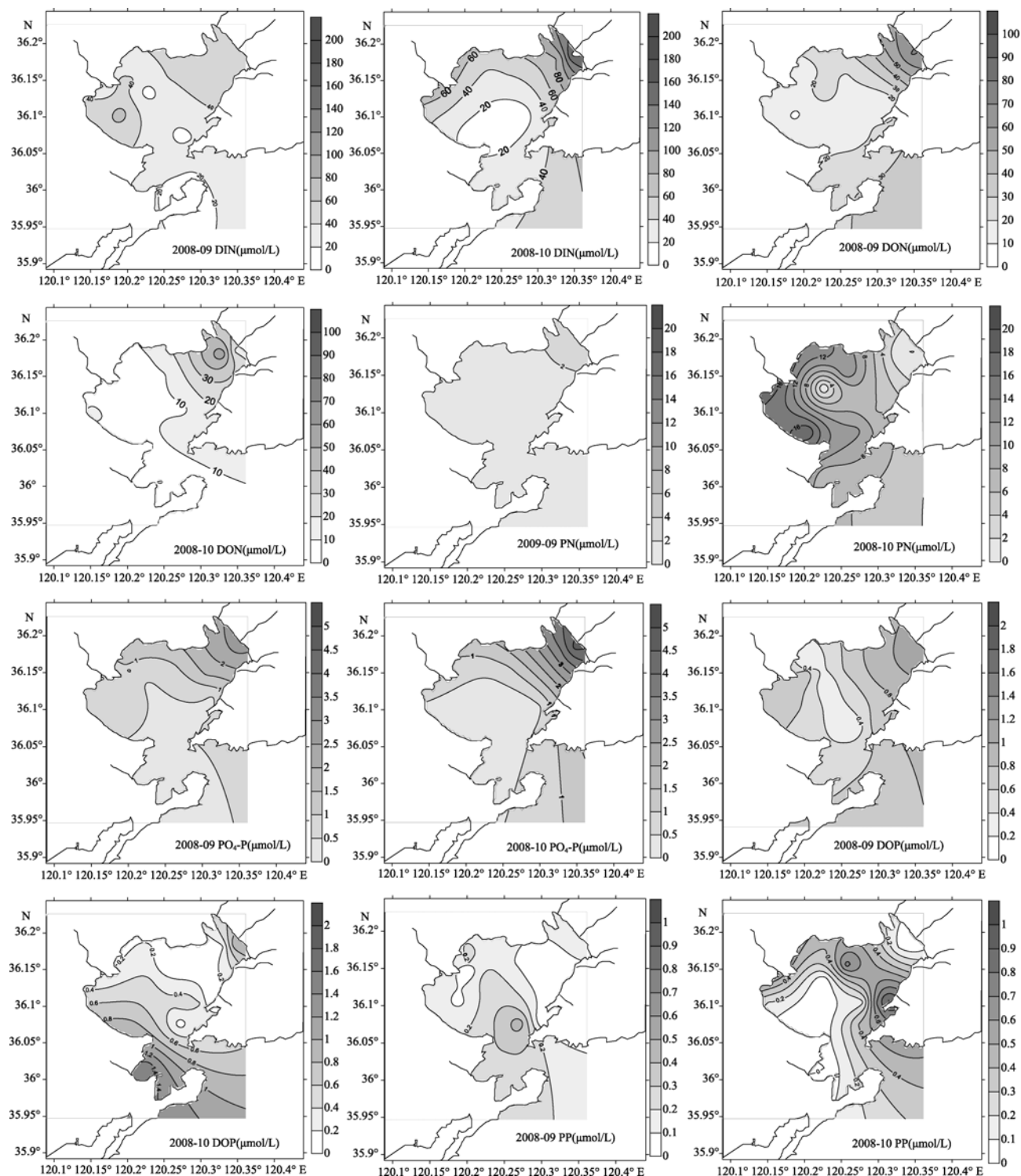
表2、表3、表4分别为2008年9月、10月两个航次 DIN、DON、PN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DOP、PP、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 、COD、TEM、TURB、S、DO 和 Chl-a 的相关性分析结果。具体如下:

由相关性分析结果可以看出: 两航次的 COD 和 S(强负相关)均与 Chl-a 强相关; 9 月 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、DON、DOP 和 PN 都与 Chl-a 强相关, 10 月温度则与 Chl-a 强相关(负相关)。COD、DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 S 均体现了陆源输入的影响: 前三者是对陆源排放-河流输

入的直接响应, 而盐度负相关则体现了 S 对河流淡水输入的负反馈。10 月份温度与浮游植物生物量 (Chl-a 表示) 的强相关是由于此时温度已成为浮游植物生长的限制因子^[5]: 平均温度 10 月比 9 月份低 4 $^{\circ}\text{C}$ 。

DON 可被浮游植物直接利用, 其来源可能为陆源输入(如尿素随河流入海), 也可能为浮游植物二次

代谢产生, DOP、PP 和 PN 同样存在陆源和浮游植物二次代谢两类源, 故 DON、DOP、PN 的源有待进一步确定。海陆同步调查 DON、DOP 和 PN 均值(单位均为 $\mu\text{mol/L}$)如下: 陆上站位(河口)9 月份分别为 324.44、8.38 和 0.00, 10 月份分别为 276.42、5.81 和 356.23; 海域 9 月份分别为 20.93、0.60 和 8.06, 10



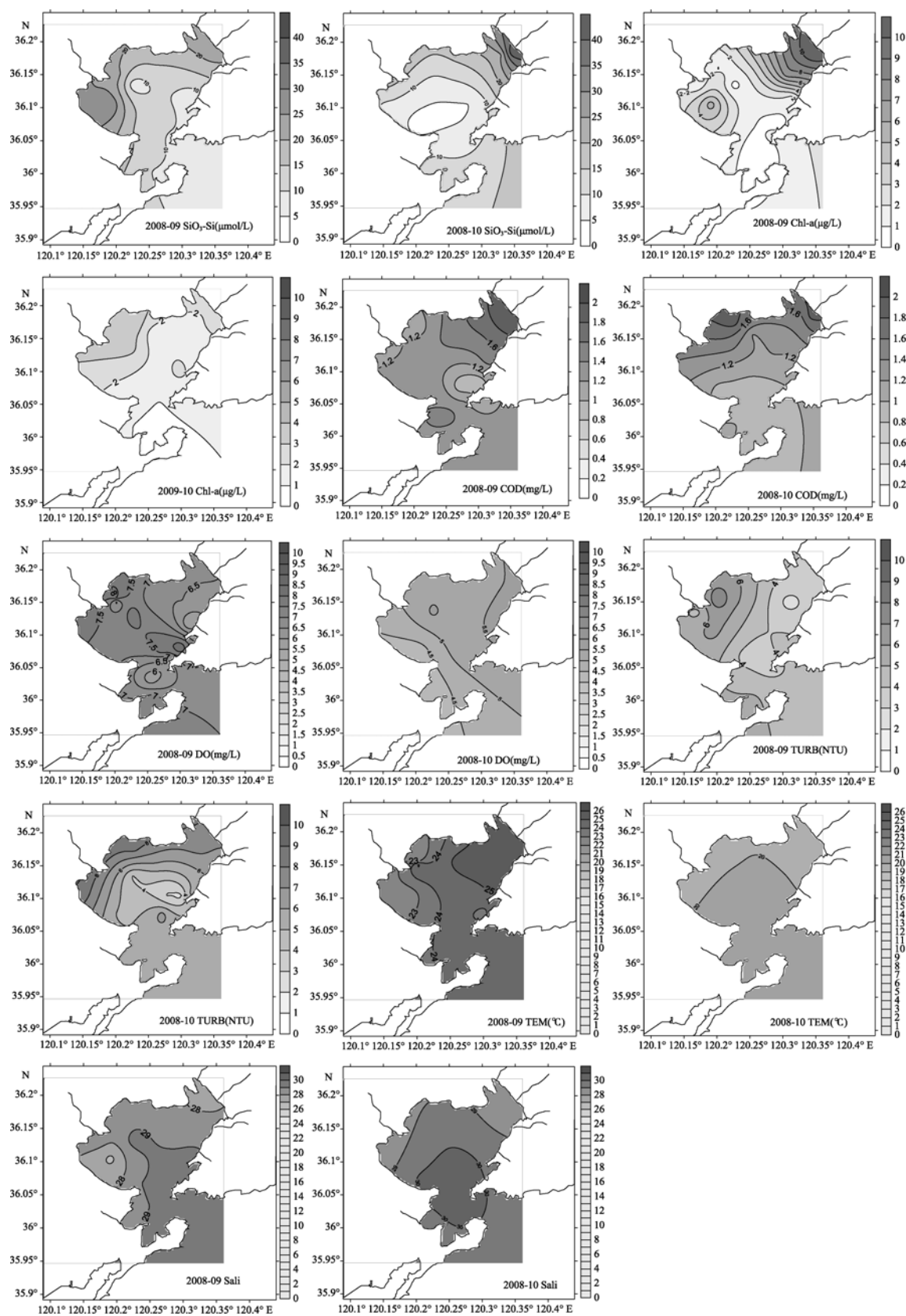


图2 2008年9月下旬及10月中旬调查结果

Fig. 2 Survey results in the last ten days of September and middle ten days of October, 2008

调查时间为2008年9月22日至9月24日;2008年10月14日至10月15日

Survey had been taken during 22th and 24th, September, 2008 and 14th to 15th, October, 2008

表 1 2008 年 9、10 月两个航次调查的叶绿素 a 等的均值

Tab. 1 Average values of Chl-a et al. in surveys during September and October, 2008

时间	Chl-a ($\mu\text{g/L}$)	DIN ($\mu\text{mol/L}$)	DON ($\mu\text{mol/L}$)	PN ($\mu\text{mol/L}$)	PO ₄ -P ($\mu\text{mol/L}$)	DOP ($\mu\text{mol/L}$)	PP ($\mu\text{mol/L}$)
9 月	1.60	28.83	20.93	8.06	0.55	0.60	0.18
10 月	1.82	36.83	13.29	9.04	0.76	0.39	0.32
时间	SiO ₃ -Si ($\mu\text{mol/L}$)	TEM($^{\circ}\text{C}$)	S	TURB (NTU)	DO(mg/L)	COD (mg/L)	
9 月	13.53	24.34	29.06	6.38	6.50	1.31	
10 月	10.44	20.29	29.67	6.64	6.00	1.28	

表 2 各因子与叶绿素 a 的相关性分析结果

Tab. 2 Results of correlation between essential factors and Chl-a

	强相关	一般	弱相关
9 月	PO ₄ -P: 0.889(**)、COD: 0.763(**)、S: -0.743(**)、 DIN: 0.724(**)、DON: 0.549(**)、DOP: 0.523(**)、PN: 0.474(**)	无	TEM: 0.290、SiO ₃ -Si: 0.243、PP: -0.191、 TURB: -0.096、DO: 0.053
10 月	COD: 0.769(**)、TEM: -0.696(**)、S: -0.629(**)	DIN: 0.472(*)、 SiO ₃ -Si: 0.410(*)	PO ₄ -P: 0.294、DO: 0.281、DON: -0.070、 DOP: 0.037、PN: 0.030、TURB: -0.024、 PP: 0.016

注: *表示置信水平 $P=0.05$; **表示置信水平 $P=0.01$, 表 3, 表 4 同

表 3 各因子与 COD 的相关性分析结果

Tab. 3 Results of correlation between essential factors and COD

	强相关	一般	弱相关
9 月	Chl-a: 0.763(**)、PO ₄ -P: 0.664(**)、 DO: -0.665(**)、DOP: 0.651(**)	DIN: 0.625(*)、DON: 0.630(*)、TEM: 0.613(*)	S: -0.469、SiO ₃ -Si: 0.209、PN: 0.173、PP: -0.261、TURB: -0.180
10 月	TEM: -0.862(**)、S: -0.771(**)、 Chl-a: 0.769(**)、SiO ₃ -Si: 0.714(*)	DIN: 0.705(*)、PO ₄ -P: 0.686(*)	PN: -0.428、PP: -0.225、DON: 0.252、DO: 0.483、DOP: -0.004、 TURB: -0.180

表 4 各因子与盐度的相关性分析结果

Tab. 4 Results of correlation between essential factors and Salinity

	强相关	一般	弱相关
9 月	DIN: -0.812(**)、Chl-a: -0.743(**)、 PO ₄ -P: -0.669(**)	PN: -0.415(*)、 SiO ₃ -Si: -0.419(*)	TEM: 0.139、DOP: -0.298、COD: -0.469、PP: 0.230、 TURB: -0.077、DO: -0.165、DON: -0.177
10 月	TEM: 0.951(**)、DIN: -0.838(**)、 SiO ₃ -Si: -0.777(**)、COD: -0.771(**)、 Chl-a: -0.629(**)、PO ₄ -P: -0.705(**)	无	PN: 0.001、DOP: -0.032、PP: 0.006、TURB: -0.131、 DO: -0.235、DON: -0.270

月份分别为 13.29、0.39 和 9.04。分析可知, 与 9 月相比, PN 河流输入增加显著, 而海域均值却并未相应显著升高, 可知 PN 主要是浮游植物二次代谢产生; DON、DOP 海域浓度均值变化趋势与陆源输入浓度变化趋势高度一致, 可知二者主要受陆源输入影响。SiO₃-Si 在两个航次中均未表现出与 Chl-a 的强相关性, 这虽与杨东方等早期研究结论“在整个胶州湾不存在 N 和 P 的限制, 在胶州湾有些海域的浮游植物生长一年四季都受到营养盐硅的限制”^[10-11]不一致, 但

与其近期研究结果一致: 胶州湾硅限制主要时间段为 11 月至次年 5 月的非雨季^[12]。在胶州湾内一年中的光照基本上是充足的^[13], 故 TURB 与 Chl-a 相关性较弱。DO 与 PP 浓度均同时受浮游植物自身生长消耗量与新陈代谢新产生量(PP 同时受陆源输入量的影响)等的影响, 而这几方面的变化关系相对独立, 故 DO 和 PP 与 Chl-a 的相关性较弱。

COD 具有典型的陆源输入特征, 与之相关性较强的 S: -0.771(**)、PO₄-P: 0.664(**)、DIN: 0.625(*),

SiO₃-Si:0.714(*)等也均具有典型的陆源输入特征; DO: -0.665(**)是 COD 降解作用对溶解氧消耗的反馈, DOP: 0.651(**)、DON: 0.630(*)二者与 COD 强相关, 间接证明了其来源主要为陆源。9 月份调查期间风浪因素(9 月 22 日晚上胶州湾有 7 级大风, 导致采样中断, 24 号采样时重复做了三个站位予以矫正)可能是两个航次的分析结果不太一致的原因之一。

与盐度的相关性强弱是反映其受陆源输入影响大小的另一个佐证: DIN: -0.812(**)、Chl-a: -0.743(**)、PO₄-P: -0.669(**)、TEM: 0.951(**)、DIN: -0.838(**)、SiO₃-Si: -0.777(**)、COD: -0.771(**)、Chl-a: -0.629(**)、PO₄-P: -0.705(**)与盐度强相关, PN: -0.415(*), SiO₃-Si: -0.419(*)与盐度的相关性次之。

3 结论

2008 年秋季 9 月和 10 月航次胶州湾各调查要素(叶绿素、营养盐、化学需氧量、温度、光照、盐度、溶解氧等)相应的平面分布趋势基本相同: 均表现为河口区高、中央海区和湾口低, 沿岸向离岸方向呈逐渐降低趋势的特点(盐度和温度表现出相反的趋势), 说明胶州湾以上各要素主要受陆源输入的影响。

胶州湾秋季可能成为浮游植物生长限制因子的要素与叶绿素 a 相关性强弱顺序如下: PO₄-P: 0.889(**)、DIN: 0.724(**)、DON: 0.549(**)、DOP: 0.523(**)、PN: 0.474(**)、TEM: -0.696(**)、SiO₃-Si: 0.410(*), PP: -0.191、TURB: -0.096。

由相关性分析结果以及陆海同步调查数据中海上数据对陆上站位的响应程度, 可初步给出各要素来源: COD、S、DIN、PO₄-P、DON 和 DOP 具有明显的陆源输入特征, PN 主要是浮游植物二次代谢产生, 而 DO 以及 PP 两者的来源则需在机理分析的基础上进一步确定。

参考文献:

[1] 王修林, 李克强, 石晓勇, 等. 胶州湾主要化学污染

物海洋环境容量[M]. 北京: 科学出版社, 2006.

- [2] 沈志良. 胶州湾营养盐现状及变化[J]. 海洋科学, 1997, 1: 6, 16, 60-63.
- [3] 李超伦, 张芳, 申欣, 等. 胶州湾叶绿素的浓度、分布特征及其周年变化[J]. 海洋与湖沼, 2005, (06): 499-506.
- [4] 沈志良. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响[J]. 海洋与湖沼, 2002, (03): 322-332.
- [5] 徐效军, 张鹰, 刘吉堂, 等. 海州湾叶绿素 a 与水环境因子的多元分析[J]. 水利渔业, 2007, 27(2): 79-81.
- [6] 沈志良. 沿岸近海营养物质收支动力学[J]. 海洋科学, 1999, 3: 39-42.
- [7] Pérez F F, Ryos A F, Castro C G, et al. Mixing analysis of nutrient, oxygen and dissolved inorganic carbon in the upper and middle North Atlantic ocean east of the Azores[J]. J Mar Systems, 1998, 16: 219-233.
- [8] 谭加强, 于志刚, 林桂炽, 等. 过硫酸盐氧化法测定海水中溶解总磷[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 1-6: 256-263.
- [9] Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M. Methods of Sea-water Analysis. Third Edition[J]. Weinheim: Wiley Press, 1999: 203-223.
- [10] 杨东方, 高振会, 孙培艳, 等. 2006 胶州湾水温 and 营养盐硅限制初级生产力的时空变化[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(3): 201-207.
- [11] 杨东方, 李宏, 张越美, 等. 浅析浮游植物生长的营养盐限制及其判断方法[J]. 海洋科学, 2000, 24(12): 47-50.
- [12] 杨东方, 苗振清, 石强, 等. 北太平洋生态系统的动力——以胶州湾为例[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(2): 201-207.
- [13] 郭玉洁, 杨则禹. 胶州湾的生物环境初级生产力[C]//刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源. 北京: 科学出版社, 1992: 110-125.

Study of distribution and source of biogenic elements in the Jiaozhou Bay in autumn 2008

DING Dong-sheng^{1,2}, SHI Xiao-yong¹, QU Ke-ming², LI Ke-qiang¹,
CUI Zheng-guo²

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: May, 22, 2012

Key words: Jiaozhou Bay; autumn; biogenic elements; distribution; source

Abstract: In this paper, the distribution and sources of biogenic elements were studied through the analysis of relevance between them based on the investigation results taken in the Jiaozhou Bay during autumn 2008. The results showed that the distribution trends of chlorophyll concentration, nutrients, chemical oxygen demand, temperature, light, salinity, dissolved oxygen in the two voyage were basically the same which showed the gradual lowering trend from the outfall to offshore with the exception of salinity and temperature. Potential limiting ones of the phytoplankton growth factors in autumn in Jiaozhou Bay associated with the chlorophyll exhibited the following order(** and * refers to the confidence level(P) of 0.99 and 0.95 respectively): labile phosphate: 0.889(**), dissolved inorganic nitrogen: 0.724(**), dissolved organic nitrogen: 0.549(**), dissolved organic phosphorus: 0.523(**), particulate nitrogen: 0.474(**), temperature: -0.696(**), labile silicate: 0.410(*), particulate phosphorus: -0.191, turbidity: -0.096. Correlation analysis results and results of the river investigation which had been done at the same time of the two voyage can give a preliminary conclusion about the sources of the elements which had tight correlation with the chlorophyll: chemical oxygen demand, salinity, dissolved inorganic nitrogen, labile phosphate, dissolved organic nitrogen and dissolved organic phosphorus were input from land-based sources and particulate nitrogen is mainly from phytoplankton metabolism.

(本文编辑: 张培新)