网络出版时间：2015-04-13 13:43
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2055.P.20150413.1343.010.html

第 37 卷 第 4 期 海 洋 学 报 Vol. 37, No. 4
2015 年 4 月 Haiyang Xuebao April 2015

王玉珏，刘哲，张永，等. 2010－2011 年胶州湾叶绿素 *a* 与环境因子的时空变化特征[J]. 海洋学报，2015，37(4)：103—116，doi：10.3969/j.issn.0253-4193.2015.04.010

Wang Yujue, Liu Zhe, Zhang Yong, et al. Temporal and spatial variations of chlorophyll *a* and environmental factors in Jiaozhou Bay in 2010－2011[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(4): 103—116, doi: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.04.010

2010－2011 年胶州湾叶绿素 *a* 与环境因子的时空变化特征

王玉珏[1]，刘哲[2]，张永[1]，汪岷[3]，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. 中国海洋大学 环境科学与工程学院，山东 青岛 266100；3. 中国海洋大学 海洋生命学院，山东 青岛 266100)

摘要：2010 年 4、6、8、10 月和 2011 年 1、3 月在胶州湾开展了 6 个航次的综合调查，研究了表层海水温度、盐度、营养盐和叶绿素 *a* 浓度的时空变化特征。调查期间，总无机氮(DIN)、磷酸盐(PO_4)和硅酸盐(SiO_3)多呈现东北部湾边缘高，而湾内和湾口低的空间分布特征。季节变化表明，DIN 和 PO_4 主要受养殖排放、河流径流输入和浮游植物生长消耗的影响，呈现初夏和秋季高，夏末和冬季低的特点；而 SiO_3 主要受河流径流输入和浮游植物消耗的影响，呈现夏、秋高，而冬、春低的特点。营养盐浓度和结构分析表明，胶州湾存在 PO_4 和 SiO_3 的绝对和相对限制；SiO_3 限制尤其严重，是控制胶州湾浮游植物生长的主要环境因子。SiO_3 和 PO_4 的限制主要表现在冬季，几乎遍布整个海湾；夏季降水可有效缓解海域的 SiO_3 限制。叶绿素 *a* 浓度呈现春、夏季高，秋、冬季低的季节分布，温度、营养盐浓度与结构和季节性贝类养殖活动是控制胶州湾叶绿素 *a* 浓度时空分布的关键因素。

关键词：胶州湾；叶绿素 *a*；营养盐；时空变化

中图分类号：Q948.8 **文献标志码：**A **文章编号：**0253-4193(2015)04-0103-14

1 引言

受工农业生产等人类活动的影响，近岸海域的各种环境问题越来越突出。其中，大量氮输入引起的水体富营养化是影响近海初级生产力和生态系统结构与功能的突出环境问题[1—3]。例如，2012 年我国近海富营养化面积达 9.8×10^4 km^2，近海赤潮暴发 73 次，总面积达 7.971×10^3 km^2[4]。胶州湾(35°54′～36°18′ N，120°04′～120°24′ E)位于黄海之滨、山东半岛南部，为一扇形半封闭海湾，湾口最窄处 2.5 km。湾内岸线长 163 km，总水域面积约为 390 km^2，平均水深为 6～7 m，最大水深位于湾口处，深度为 64 m。主要入海河流有大沽河、洋河、墨水河、白沙河、李村河和海泊河，大沽河流量最大[5—8]。已有的研究表明，近 50 年来，伴随着胶州湾海洋经济的快速发展和沿岸污水排放的急剧增加，胶州湾海域营养盐浓度不断增加，2002 年湾内大部分水域已呈现中度营养和富营养化状态，赤潮暴发频繁；营养盐结构也发生了明显变化，出现了显著的季节性硅限制[9—11]。2008 年奥运会后，青岛市人大通过了“环湾保护、拥湾发展”的战略规划，结合蓝色经济区建设以及青岛市“十二五”发展规划等多项政策，对胶州湾环境保护和生态环境

收稿日期：2014-07-17；**修订日期：**2014-12-24。

基金项目：中国科学院先导专项 (XDA11020405)；中国科学院科技创新交叉与合作团队；国家自然科学基金(41106101，41376121)。

作者简介：王玉珏(1978—)，女，山东省昌乐县人，助理研究员，博士，主要从事藻类营养盐生理生态学研究。E-mail：yjwang@yic.ac.cn

* **通信作者：**刘东艳，研究员，主要从事海洋藻类生态学研究。E-mail：dyliu@yic.ac.cn

展开整治。2010－2011 年期间，为全面了解胶州湾的水质环境现状，持续跟踪海湾的水质环境变化，针对水体的叶绿素 *a*、营养盐和温、盐要素开展了 6 个航次的综合调查，以期为胶州湾环境管理、健康评价及可持续发展提供资料支持。

2 材料与方法

2.1 样品采集

分别于 2010 年 4、6、8、10 月和 2011 年 1、3 月在胶州湾 15 个大面站点开展了综合调查(图 1)。调查涵盖了 4 个季节，即春季(2010 年 4 月和 2011 年 3 月)、夏季(2010 年 6 月和 8 月)、秋季(2010 年 10 月)和冬季(2011 年 1 月)。其中，2010 年 8 月的调查站位略有调整(图 1)。调查期间，对表层水体的温度、盐度、营养盐和叶绿素 *a* 浓度进行分析。

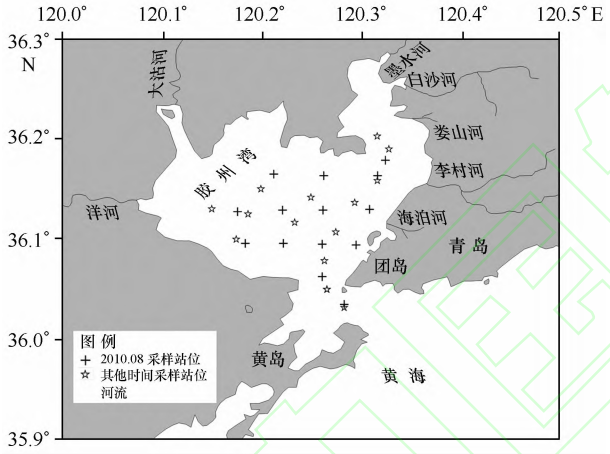

图 1 胶州湾采样站位

Fig. 1 Sampling sites in Jiaozhou Bay

表层海水的温度和盐度用加拿大 RBR－XR620 型多参数水质监测仪现场测得。用 5 L 的卡盖式采水器(国家海洋技术中心)采集表层水样分别用于营养盐和叶绿素 *a* 浓度的分析。其中，1 000 mL 水样经 GF/F 滤膜(Whatman)现场过滤后，滤膜于－20℃下避光并冷冻保存，在实验室进行叶绿素 *a* 浓度的测定，每个采样点取 3 个平行样，结果取其平均值。取 250 mL 水样现场经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后，置于－20℃保存，在实验室对水体营养盐浓度进行测定。

2.2 样品测定

营养盐浓度利用德国 Bran＋Luebbe AA3 营养盐自动分析仪测定，包括溶解无机氮(DIN，为 NO_3^-、NO_2^- 和 NH_4^+ 之和)、磷酸盐(PO_4)和硅酸盐(SiO_3)。其中硝酸盐(NO_3)采用镉-铜还原后再用盐酸-萘乙二胺比色法测定；亚硝酸盐(NO_2)采用盐酸-萘乙二胺比色法测定；氨氮(NH_4)采用水杨酸钠法测定；磷酸盐(PO_4)采用磷钼蓝法测定；硅酸盐(SiO_3)采用硅钼蓝法测定。

叶绿素 *a* 浓度采用分光光度法测定[12]。保存叶绿素 *a* 的滤膜先用 90%的丙酮在 4℃ 避光条件下萃取 24 h，在 4 000 r/min 转速下离心 10 min 后用紫外-可见分光光度计(TU－1810)在波长 750 nm、664 nm、647 nm、630 nm 处测定上清液吸光值(90%丙酮作空白)，将所得数据用以下公式换算成叶绿素 *a* 的浓度：

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

其中，$C_{\mathrm{Chl}\,a}$ 为 Chl *a* 浓度，单位：μg/L；E_{750}、E_{664}、E_{647} 与 E_{630} 分别是各波长下的吸光值；$V_{丙酮}$ 为丙酮萃取液的体积，单位：mL；$V_{水样}$ 为过滤海水的体积，单位：L。

2.3 统计分析

使用 SPSS 13.0 软件对温度、盐度、营养盐与叶绿素 *a* 浓度的相关性进行分析，获得每对变量的 Pearson 相关系数和显著性水平 *p* 值。$p<0.05$ 对应置信区间为 95%，$p<0.01$ 对应置信区间为 99%。

3 结果与讨论

3.1 表层海水温度和盐度的空间分布和季节变化特征

胶州湾及其邻近海域均属于温带季风型气候，表层海水温度(SST)具有明显的季节变化特征(见表 1，图 2)。调查期间，春季(2010 年 4 月，2011 年 3 月)SST 在 3～10℃ 左右；夏季水温较高，8 月份达到最大值，SST 在 24℃ 左右；冬季水温最低(2011 年 1 月)，SST 在－0.5～4℃ 左右。SST 的平面分布明显受到水深的影响。湾边缘较浅的区域，受太阳辐射与陆地气候影响显著，春、夏季节水温明显高于湾口水域，而秋、冬季节水温则低于湾口的深水区域。

调查期间，胶州湾表层海水平均盐度(SSS)的变化范围为 29.7～31.4，呈现冬季高、夏季低的特点(见表 1，图 3)。SSS 的变化明显受到夏季降雨的影响，据 1899－1987 年计 89 年气象降水记录统计，青岛地区夏季降水量占全年总降水量的 58%，而冬季降水量仅占全年的 5%[13]。调查结果显示，夏季(2010 年 8月)雨水丰沛期，SSS多低于30(见图3)。比较而

表 1　调查期间胶州湾表层海水温度、盐度、叶绿素 *a* 和营养盐浓度与结构的变化特征

Tab. 1　The characteristics of temperature, salinity, Chlorophyll *a* concentrations, nutrient concentrations and structures of surface water in Jiaozhou Bay during the survey

时间	参数	温度/℃	盐度	叶绿素 *a*/ $\mu g \cdot L^{-1}$	DIN/ $\mu mol \cdot L^{-1}$	PO_4/ $\mu mol \cdot L^{-1}$	SiO_3/ $\mu mol \cdot L^{-1}$	DIN/ PO_4	SiO_3/ DIN	SiO_3/ PO_4
2010 年 4 月	范围	7.06～10.67	29.69～31.75	1.47～16.42	5.33～96.06	0.05～1.01	0.32～8.23	21.4～312.9	0.03～0.16	2.66～33.5
	平均值	8.73±1.26	31.31±0.58	3.80±3.94	25.79±30.65	0.28±0.30	2.22±2.57	111.8±75.0	0.10±0.04	9.60±7.62
2010 年 6 月	范围	17.60～22.24	28.81～31.49	1.29～5.74	2.74～129.18	0.14～2.60	0.91～16.31	14.3～76.3	0.05～0.33	1.84～11.83
	平均值	20.18±1.76	30.98±0.74	3.10±1.42	35.17±42.18	0.72±0.84	4.11±4.85	45.1±18.3	0.17±0.08	6.86±2.66
2010 年 8 月	范围	24.13～24.75	28.23～30.81	1.49～10.83	5.76～28.99	0.12～0.65	2.19～17.52	15.0～200	0.24～0.60	7.71～120.7
	平均值	24.32±0.15	29.67±0.74	3.65±2.77	13.62± 6.98	0.34±0.15	5.58±4.09	53.8±52.8	0.39±0.08	23.5±30.4
2010 年 10 月	范围	12.95～18.35	29.01～30.97	0.47～1.57	5.85～65.61	0.04～1.70	0.99～8.39	31.2～151.8	0.10～0.21	3.07～7.99
	平均值	15.58±2.04	30.44±0.66	1.02 ±0.28	21.89±18.83	0.51±0.49	2.94±2.45	54.8±34.5	0.14±0.03	8.00±7.36
2011 年 1 月	范围	－0.49～3.88	30.41～31.56	0.06～3.22	3.86～27.87	0.03～0.13	0.00～0.18	81.0～503.1	0.00～0.03	0.10～3.23
	平均值	1.71±1.60	31.35±0.33	1.64±0.81	11.13±8.21	0.05±0.02	0.09±0.06	224.1±144.3	0.01±0.01	1.65±1.11
2011 年 3 月	范围	3.78～5.78	30.16～31.59	0.61～12.82	4.79～45.59	0.07～0.73	0.16～4.18	41.6～181.1	0.01～0.09	1.23～12.6
	平均值	4.59±0.63	31.24±0.42	3.88±3.49	13.47±13.13	0.24±0.19	1.00±1.19	71.2±40.9	0.05±0.02	3.67±2.92

言，在干燥的冬季，则 SSS 相对较高，如：2011 年 1 月（表 1，图 3）。在空间上，SSS 基本呈现从湾口向湾边缘逐渐降低的趋势（见图 3）。然而，这种空间变化在夏季比较明显，显示了降雨导致河流淡水输入增多对湾边缘海域的影响（如：2010 年 8 月）；而在冬、春季，空间的差异并不显著，显示了淡水输入减少下黄海水交换的控制作用（如：2011 年 1 月、3 月）。

3.2　营养盐的空间分布和季节变化特征

3.2.1　营养盐浓度的时空变化特征

胶州湾 DIN、PO_4 和 SiO_3 的空间变化如图 4～6 所示。研究期间，除 2010 年 8 月和 2011 年 1 月外，其他月份 3 种营养盐的浓度均呈现从湾内向湾口下降的空间变化。营养盐的浓度与胶州湾海水养殖与河流输入表现出明显的空间关系。胶州湾东北部海域是典型的养殖区（以虾、蛤蜊为主），水深较浅，有机物丰富[14—16]。据统计，该海域对虾养殖过程中每年大约需投入千吨饵料，其中 60%以上的氮、磷养殖废水直接排入近海[17—18]，且菲律宾蛤仔的养殖过程可促使沉积物中氮、磷和硅的转化和释放[14,19—20]。因此，养殖带来的废水、饵料残留和沉积物的释放是导致养殖区海水中高 DIN 和 PO_4 浓度的重要原因[21]。同时，沿岸工农业和生活污水经海泊河、墨水河、白沙河、李村河等径流入海，增加了该区域 DIN 与 PO_4 的浓度。SiO_3 的空间分布表明河流径流输入是海区 SiO_3 输入的主要途径。2010 年 8 月西南部存在 DIN 和 SiO_3 的高值区，对应于同时间该海区水体相对其他海区呈现的高温低盐的特点，认为夏季降水带来的洋河和大沽河的径流输入是造成高 DIN 和 SiO_3 浓度的主要原因。本研究中，营养盐浓度的空间分布模式与以往调查结果一致[15,22—28]，表明自 20 世纪 90 年代以来胶州湾营养盐来源主要受控于陆源输入和养殖活动。

调查期间，海区营养盐浓度表现出明显的季节变化。受养殖活动、河流径流输入和浮游植物生长消耗的影响，DIN 和 PO_4 基本呈现初夏（2010 年 6 月）和秋季（2010 年 10 月）高，夏末（2010 年 8 月）和冬季（2011 年 1 月）低的变化特点（见表 1，图 4 和图 5）；而 SiO_3 主要受河流径流输入和浮游植物消耗的影响呈现夏、秋高，冬、春低的季节变化规律（见表 1，图 6）。冬季（2011 年 1 月）河流结冰与降雨量的减少可以显著降低径流量，导致营养盐输入减少。初春和夏末（8－9 月）浮游植物的大量生长消耗使得海湾呈现营养盐浓度偏低的现象，叶绿素 *a* 浓度的季节分布规律（见表 1，图 7）进一步证明了该影响。4－6 月持续增加的降水、河流输入与养殖活动可以快速增加水域营养盐浓度，同时，浮游动物的大量生长带来的摄食压力降低了浮游植物对营养盐的消耗，导致海域出现营养盐浓度升高的现象。秋季（10 月）养殖和降水的输入以及浮游植物死亡再释放使得湾内营养盐浓度再次呈现高值。

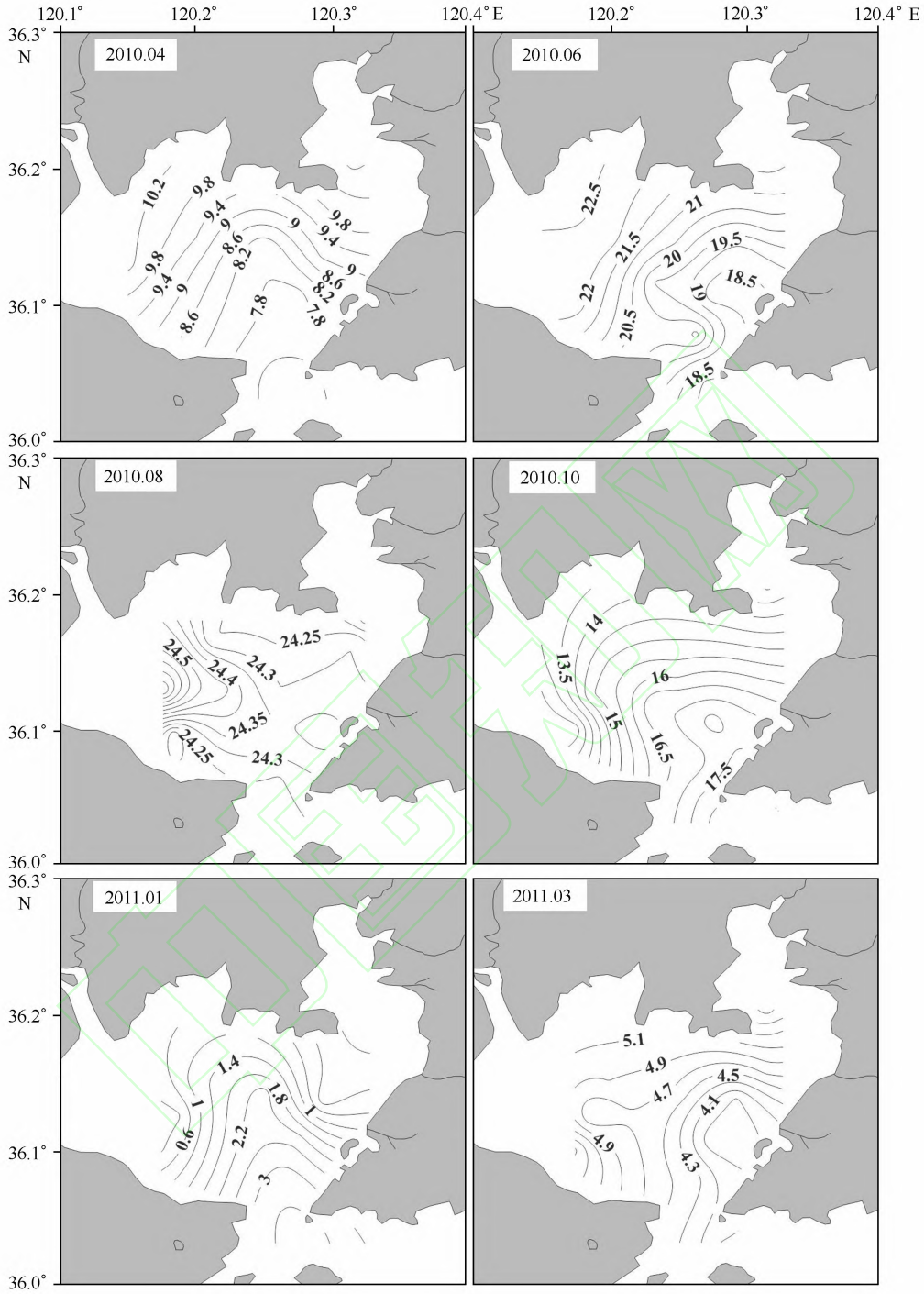

图 2 调查期间表层海水温度(℃)的时空变化特征

Fig. 2 The temporal and spatial variations of surface seawater temperature (℃) during the survey

将 DIN、PO_4 和 SiO_3 的季节变化与前人的研究结果进行对比表明，2010 年 10 月 DIN 的高浓度与 20 世纪 90 年代以来的研究结果一致[16,20,27,29]。而 8 月 DIN 浓度的差异较大，1983、2003、2006 年和本研究中 8 月胶州湾 DIN 呈现低浓度，但 1962－1998 年，2004－2008 年期间，胶州湾 DIN 浓度在 8 月多为高值[25,29]。不同时间季节变化的差异性表明除生物活动影响外，降雨等

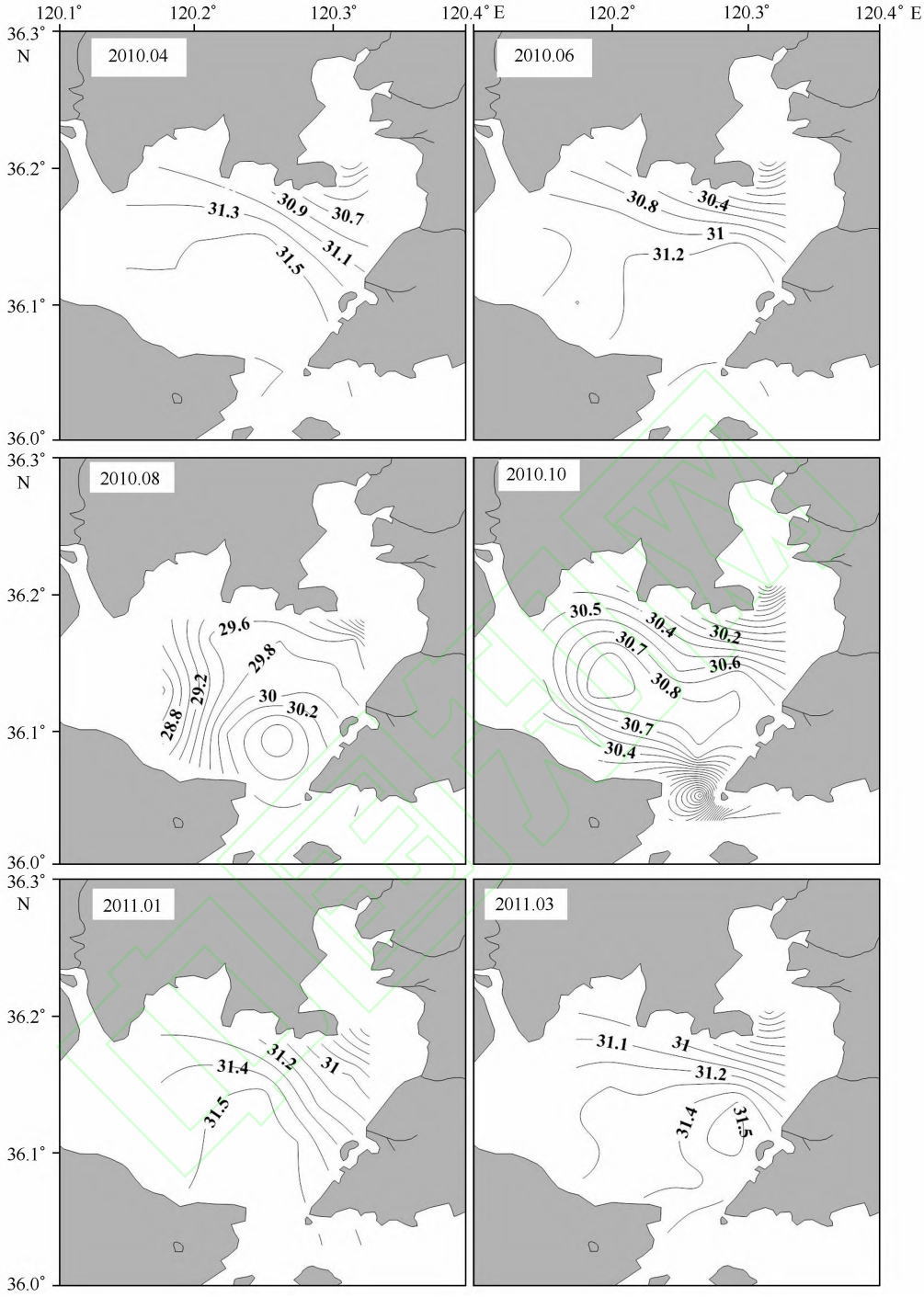

图 3　调查期间表层海水盐度(SSS)的时空变化特征

Fig. 3　The temporal and spatial variations of surface seawater salinity during the survey

影响因素导致外源 DIN 输入存在着不稳定性。2010 年 6 月磷酸盐的高浓度现象与 20 世纪 60 年代以来对胶州湾营养盐的研究结果一致[20,29—31]。而秋季(2010 年 10 月)PO_4 的高值则主要发生在 2004 年后[20,24,26,29—30]，表明养殖和河流输入对胶州秋季 PO_4 的贡献在 2004 年后更加明显。本研究中 SiO_3 的季节变化规律与沈志良[31]在 1985—1998 年的研究和孙晓霞等[20,30]在 1983—1986 年、2004—2008 年的研究结果一致，表明自 1985 年起，胶州湾 SiO_3 的来源和影响因素的稳定性。

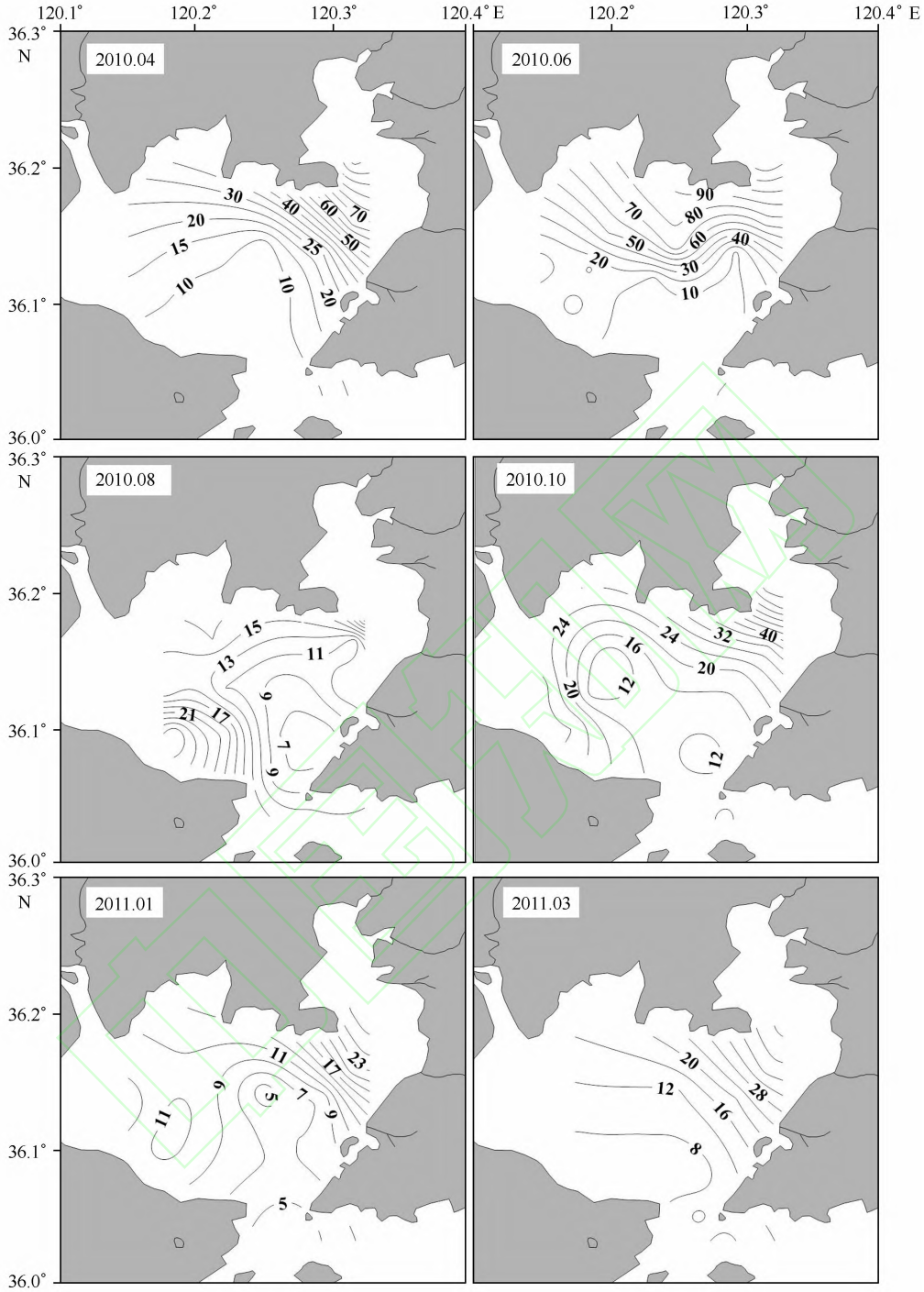

图 4 调查期间表层海水 DIN(μmol/L)的时空变化特征

Fig. 4 The temporal and spatial variations of DIN concentrations (μmol/L) during the survey

3.2.2 胶州湾营养盐限制分析

营养盐结构变化影响着浮游植物营养动力学,生物碳传递,生物量以及群落演替[32—34],甚至进一步影响整个食物网系统[35]。以往研究显示,近 50 年来,胶州湾水域的营养盐结构发生了明显变化[15—16,23,36—39]。从 20 世纪 60 年代到 80 年代中期的 DIN 限制为主转变为 90 年代至今逐渐增加的 PO_4 和 SiO_3 限制。因此,有必要对胶州湾水域的营养盐限制现状进行分析(见表 1,表 2)。

根据 Nelson 和 Brezinski[40]、Justic 等[41]提出的

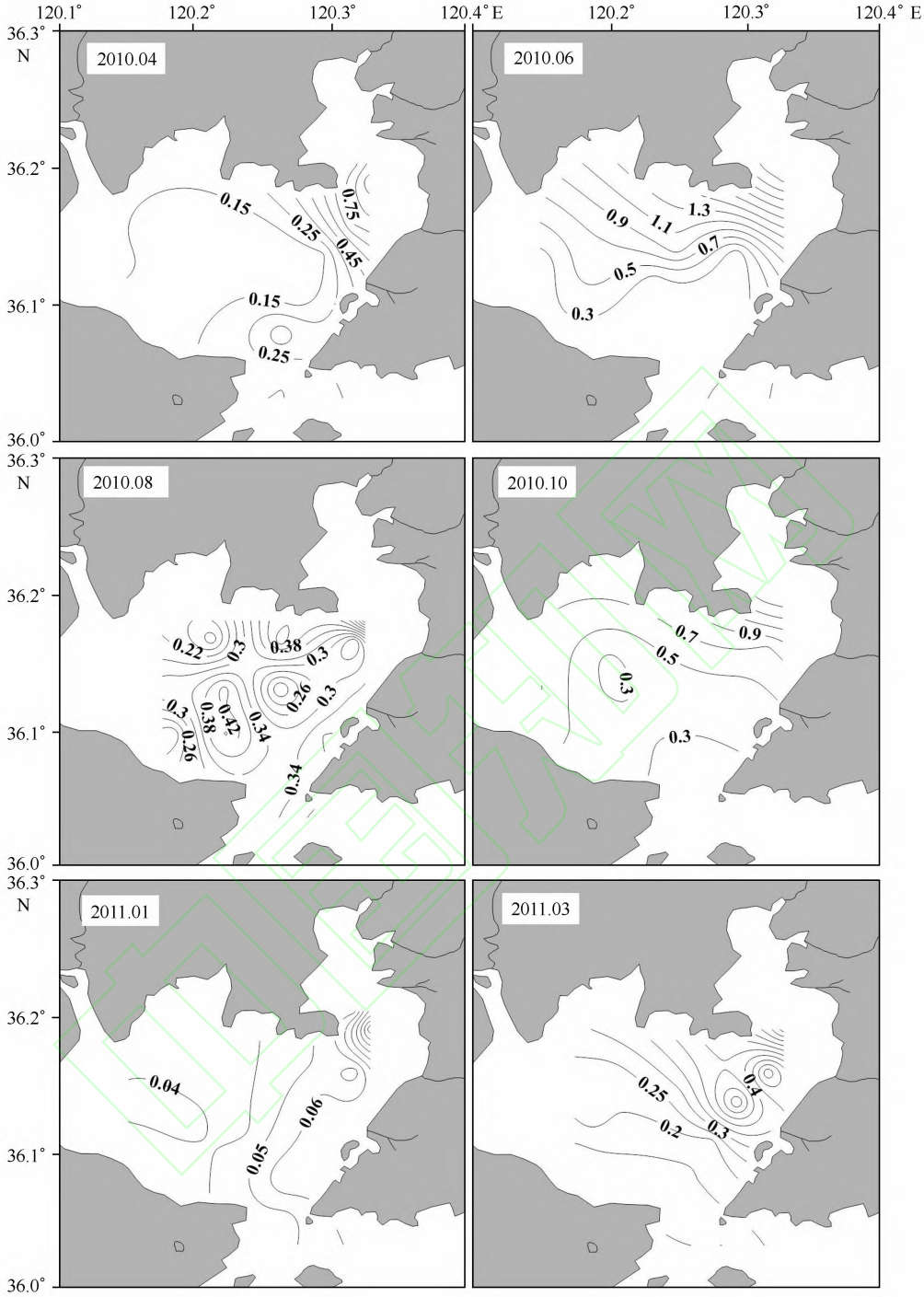

图 5　表层海水 PO_4（μmol/L）的时空变化特征

Fig. 5　The temporal and spatial variations of PO_4 concentrations (μmol/L) during the survey

浮游植物生长化学计量和可能的营养盐限制因素标准对研究期间胶州湾营养盐限制状况进行判断表明，海湾 SiO_3 和 PO_4 均存在相对 DIN 的限制，而 SiO_3 限制相对于 PO_4 更加显著。对 Si/P 比的分析表明，除 2010 年 4 月（1 个站点 Si/P 比高于 22）和 8 月（3 个站点 Si/P 比小于 22）外，其他月份整个海湾 SiO_3 相对 PO_4 存在不足。进一步结合营养盐限制因子的出现几率（见表 2），表明 SiO_3 为胶州湾主要限制因子，其次是磷酸盐，这与已有研究结果基本一致[16,23]。SiO_3 和 PO_4 的限制在冬季尤其显著，且限制几率最高，93.3%的研究站点存在 PO_4 的绝对限制，整个海湾存在 SiO_3 的相对和绝对限制。夏季降水带来的 SiO_3

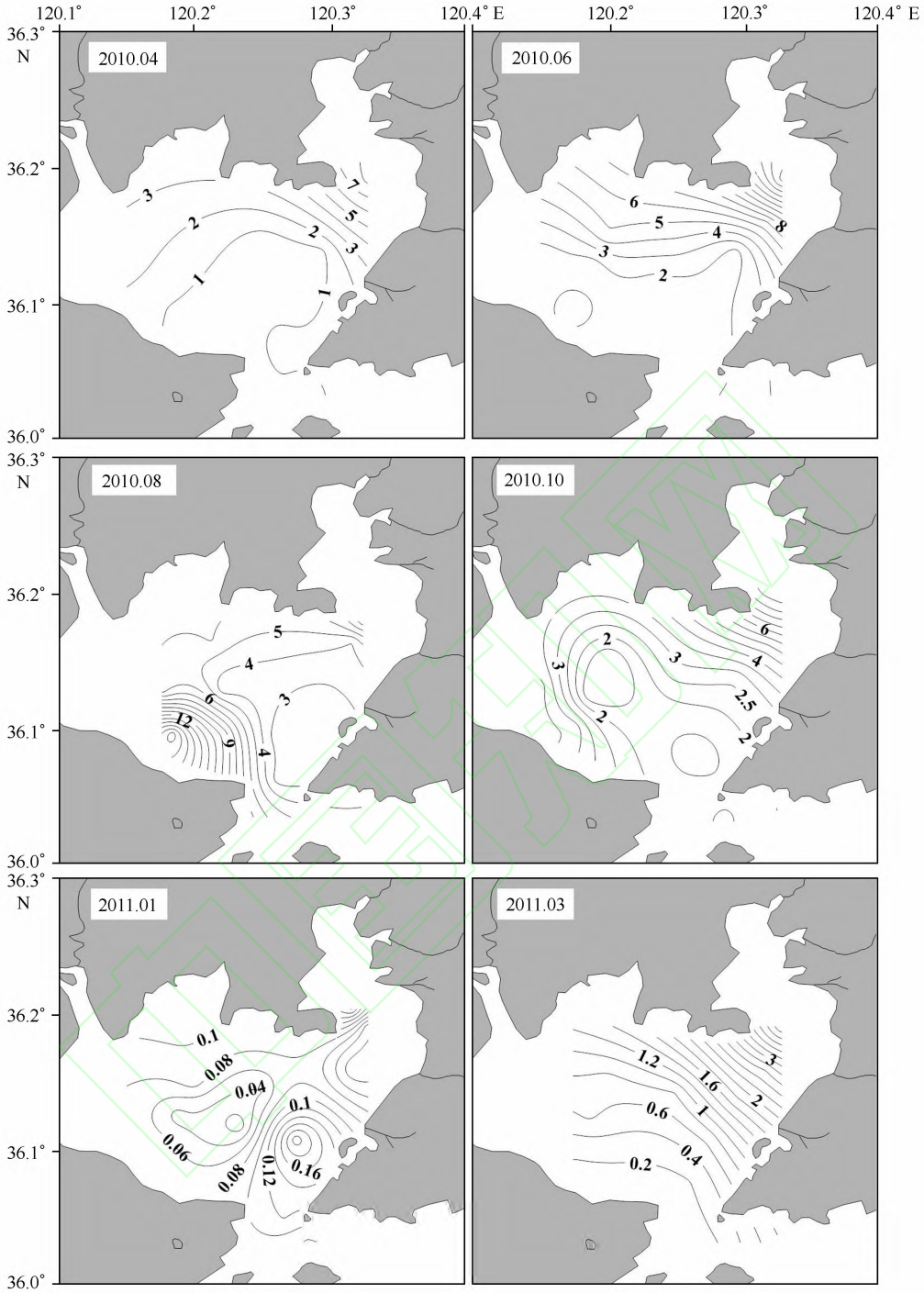

图 6 表层海水 SiO_3 (μmol/L) 的时空变化特征

Fig. 6 The temporal and spatial variations of SiO_3 concentrations (μmol/L) during the survey

补充使得海湾不存在 SiO_3 的绝对限制，相对限制也得到缓解(见表 2)。我们的结果进一步证实了自 20 世纪 80 年代以来胶州湾硅限制持续加剧的状况和降水、河流径流输入对硅酸盐限制的影响[16,23—24,29]。尽管本文根据化学计量营养盐判定标准，发现胶州湾不存在 DIN 的限制，但确切的结论尚需进一步结合相关的培养实验确定。如根据 Nelson 和 Brezinski[40]、Justic 等[41]的判定标准，1998 年 2 月、8 月和 1999 年 2 月胶州湾表层水体不存在 DIN 限制，但现场添加实验发现同时添加氮磷实验组浮游植物生长情况最好，表明在浮游植物生长旺季 DIN 可能存在实际限制[42]。

表 2　胶州湾营养盐限制因子出现几率分析

Tab. 2　Analyzing the opportunity of nutrient limitation in Jiaozhou Bay

时间		营养盐限制因子	限制因子出现几率/%
2010 年 4 月	N 为限制因子	N/P<10，Si/N>1	0
		DIN<1 μmol/L	0
	P 为限制因子	N/P>22，Si/P>22	0
		PO_4<0.1 μmol/L	26.7
	Si 为限制因子	Si/P<10，Si/N<1	73.3
		SiO_3<2 μmol/L	60.0
2010 年 6 月	N 为限制因子	N/P<10，Si/N>1	0
		DIN<1 μmol/L	0
	P 为限制因子	N/P>22，Si/P>22	0
		PO_4<0.1 μmol/L	0
	Si 为限制因子	Si/P<10，Si/N<1	87
		SiO_3<2 μmol/L	53.3
2010 年 8 月	N 为限制因子	N/P<10，Si/N>1	0
		DIN<1 μmol/L	0
	P 为限制因子	N/P>22，Si/P>22	20
		PO_4<0.1 μmol/L	0
	Si 为限制因子	Si/P<10，Si/N<1	40
		SiO_3<2 μmol/L	0
2010 年 10 月	N 为限制因子	N/P<10，Si/N>1	0
		DIN<1 μmol/L	0
	P 为限制因子	N/P>22，Si/P>22	6.7
		PO_4<0.1 μmol/L	6.7
	Si 为限制因子	Si/P<10，Si/N<1	86.7
		SiO_3<2 μmol/L	46.7
2011 年 1 月	N 为限制因子	N/P<10，Si/N>1	0
		DIN<1 μmol/L	0
	P 为限制因子	N/P>22，Si/P>22	0
		PO_4<0.1μmol/L	93.3
	Si 为限制因子	Si/P<10，Si/N<1	100
		SiO_3<2 μmol/L	100
2011 年 3 月	N 为限制因子	N/P<10，Si/N>1	0
		DIN<1 μmol/L	0
	P 为限制因子	N/P>22，Si/P>22	0
		PO_4<0.1 μmol/L	14.3
	Si 为限制因子	Si/P<10，Si/N<1	92.3
		SiO_3<2 μmol/L	84.6

3.3　叶绿素 *a* 浓度的空间分布和季节变化特征

调查期间，叶绿素 *a* 浓度季节变化的高值主要出现在春季（2010 年 4 月和 2011 年 3 月）和夏季（2010 年 8 月）（见表 1，图 7）。对胶州湾多年的调查表明，叶绿素 *a* 浓度的峰值主要出现在 1－3 月与 8－9 月[5,43－48]，季节峰值在不同年份出现的差异与气候的年际变化有重要关系。如：冬、春季显著的低温结冰现象可以降低营养盐循环，并推迟浮游植物峰出现的时间；夏季降雨量的多少、台风等天气因素则可以改变夏季浮游植物峰值出现或者持续的时间。这些特征在胶州湾都有体现，如潘友联等对 1983 年 11 月－1985 年 11 月胶州湾叶绿素 *a* 的分析表明，叶绿素 *a* 冬季峰值出现在 3－4 月[48]；姚云和沈志良[16]与李超伦等[46]2003－2004 年的研究均表明，叶绿素 *a* 的冬季峰值出现在 2 月，1 月叶绿素 *a* 呈现低浓度；而孙晓霞等在 2008 年的调查中，发现的叶绿素 *a* 的冬季峰值出现在 1 月[30]。本研究中 3、4 月份胶州湾叶绿素 *a* 的浓度明显高于 1 月份，但由于缺乏 2 月份的数据，尚不确定冬季峰是否发生推迟。2010 年 8 月，叶绿素 *a* 浓度的高值与前人的研究结果一致。

叶绿素 *a* 浓度的空间分布特征与以往研究结果一致[5,30,43－47]，春季叶绿素 *a* 浓度的高值区主要出现在湾东北部，向湾口逐渐降低；8 月份叶绿素 *a* 浓度的高值区则出现在湾西部，其余月份的叶绿素 *a* 浓度分布相对均匀，高值区不明显（见图 7）。

研究表明，环境因子（如温度、盐度、透明度、溶解氧、营养盐）与摄食压力的变化等均是影响胶州湾叶绿素 *a* 的浓度和分布的因素的主要因素[5,39,47,49－50]。本文通过对叶绿素 *a* 浓度与环境因子的相关性分析进一步证实了这点（见表 3）。2011 年 3 月叶绿素 *a* 浓度与水体温度，营养盐浓度均呈现明显的正相关性，与盐度呈显著负相关，显示春季河流融冰之后，生源要素大量输入对叶绿素 *a* 浓度的影响。2010 年 8 月份叶绿素 *a* 浓度与盐度的关系表现为负相关性，而与 SiO_3 浓度，Si/N 和 Si/P 比表现为正相关，说明季节性河流输入的影响。2010 年 6 月，海湾营养盐相对丰富，且平均叶绿素 *a* 浓度较高，但湾东北部未出现叶绿素 *a* 浓度的高值区，这可能主要与滤食性贝类的摄食有关。贝类养殖海区主要在海湾东北部，养殖时间主要为 4－9 月，春季和秋季是蛤仔的生长旺季[14]，贝类的滤食可能是使得海湾东北部在 2010 年 6 月和 2010 年 8 月呈现低值的主要原因，该结果与孙晓霞等对胶州湾叶绿素 2008 年的研究结果一致[30]。此外，2011 年 1 月，叶绿素 *a* 浓度与温度之间存在明显的正相关性，表明低温是影响 1 月份浮游植物生长的重要因素。

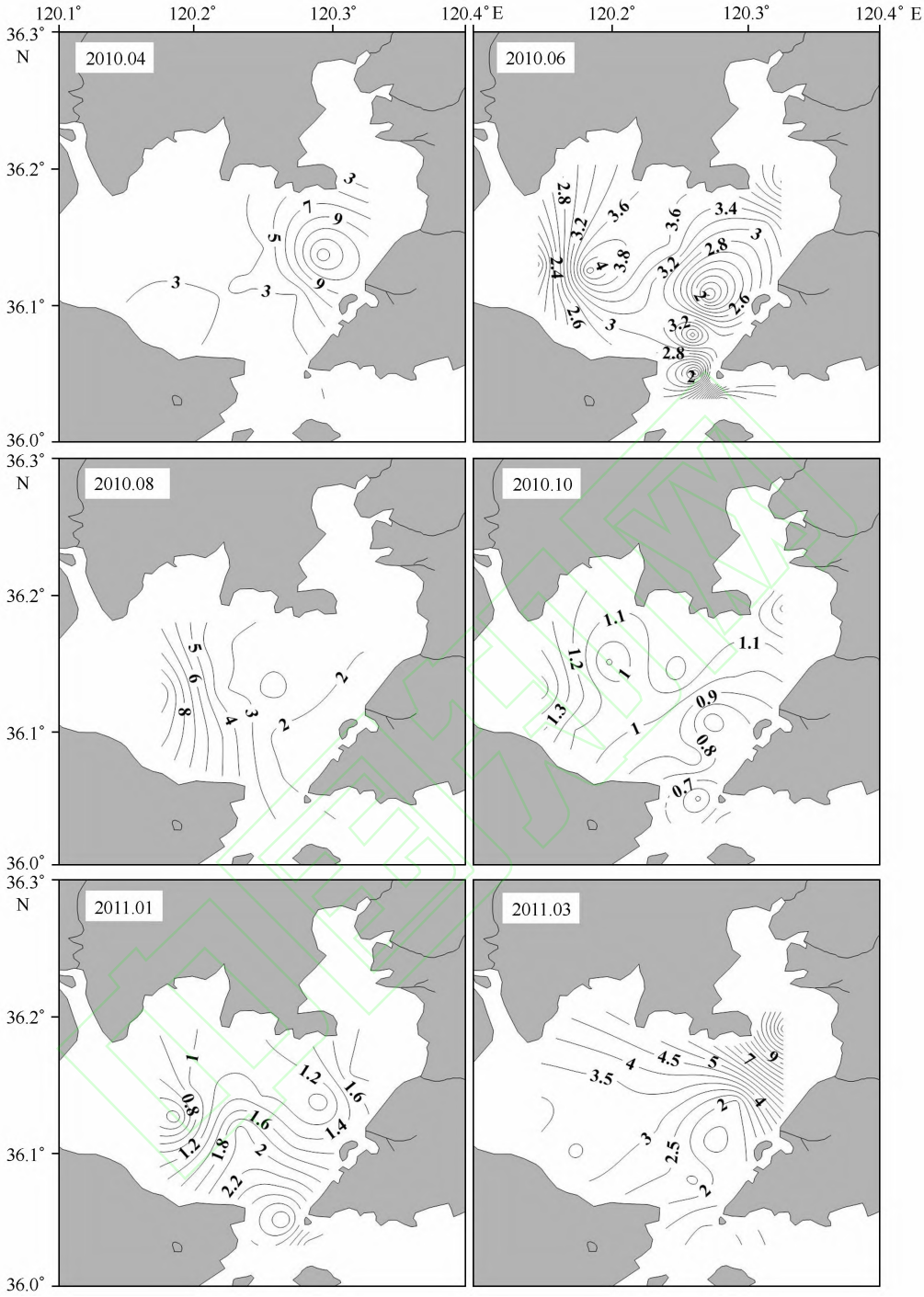

图 7 表层海水叶绿素 a(μg/L)的时空变化特征

Fig. 7 The temporal and spatial variations of Chl a concentrations (μg/L) during the survey

表 3 胶州湾叶绿素 a 浓度与环境因子的相关性分析(Pearson 相关系数)

Tab. 3 The correlation analysis between Chl a concentrations and environmental factors in Jiaozhou Bay (Pearson correlation index)

时间	SST	SSS	DIN	PO_4	SiO_3	N/P	Si/N	Si/P
2010 年 4 月	0.166	−0.121	0.109	0.027	−0.092	0.219	−0.580*	−0.224
2010 年 6 月	0.205	−0.397	0.422	0.488	0.431	0.055	−0.502	−0.395
2010 年 8 月	0.494	−0.628*	0.476	−0.206	0.617*	0.479	0.667**	0.556*

续表 3

时间	SST	SSS	DIN	PO_4	SiO_3	N/P	Si/N	Si/P
2010 年 10 月	－0.723**	0.044	0.514	0.527	0.523	－0.358	－0.316	－0.106
2011 年 1 月	0.642*	0.073	－0.141	0.151	0.257	－0301	0.526	0.273
2011 年 3 月	0.779**	－0.941**	0.898**	0.669*	0.900**	0.227	0.733**	0.566*

注：显著性为双尾检验：** 在 0.01 水平上显著相关；* 在 0.05 水平上显著相关。

4　结论

以上研究结果表明：胶州湾营养盐浓度多数月份呈现从湾边缘向湾口逐渐升高的空间变化特征，体现了河流输入、贝类养殖等的影响。季节变化上，冬季相对较低，表现出显著的 PO_4 和 SiO_3 的相对与绝对限制；而夏季和秋季浓度相对较高，明显受到养殖、径流量与浮游植物生长消耗的影响。胶州湾表层水体叶绿素 *a* 的浓度在季节变化上，受到气候（温度、降雨量）、人类活动（养殖活动、排污）与浮游动物摄食压力的共同影响；在空间变化上，人类活动（养殖活动、排污）则扮演更重要的角色，湾东北部在大多数月份出现高值。与近年来的调查资料比较，本次研究结果并无显著差异，表明胶州湾水体环境仍显著受到人类活动的影响。

参考文献：

[1] Smith V H. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems a global problem[J]. Environmental Science and Pollution Research，2003，10：126－139.

[2] Seitzinger S P，Harrison J A，Dumount E，et al. Sources and delivery of carbon，nitrogen，and phosphorus to the coastal zone：an overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application[J]. Global Biogeochem Cycles，2010，19：GB4S01.

[3] Hong J Q，Carolien K. Past and future trends in nutrients export by rivers to the coastal waters of China[J]. Science of the Total Environment，2010，408：2075－2086.

[4] 国家海洋局. 中国海洋环境质量公报[R]. 北京：国家海洋局，2012.
State Oceanic Administration. Bulletin of Marine Environmental Quality of China[R]. Beijing：State Oceanic Administration，2012.

[5] 董金海，焦念志. 胶州湾生态学研究[M]. 北京：科学出版社，1995.
Dong Jinhai，Jiao Nianzhi. Ecology studies in Jiaozhou Bay[M]. Beijing：Science Press，1995.

[6] 刘瑞玉. 胶州湾生态学和生物资源[M]. 北京：科学出版社，1992.
Liu Ruiyu. Ecology and Biological Resources in Jiaozhou Bay[M]. Beijing：Science Press，1992.

[7] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志－第四分册：山东半岛南部和江苏省海湾[M]. 北京：海洋出版社，1993：157－258.
China Bays Compiling Committee. Records of Bays in China，Volume 4：Bays in South of Shandong Peninsula and Jiangsu[M]. Beijing：China Ocean Press，1993：157－258.

[8] 刘素美. 胶州湾富营养化的研究现状[M]// 张经. 胶州湾集水盆地生源要素的流失与海湾的富营养化演变. 北京：海洋出版社，2013：66－75.
Liu Sumei. Research of eutrophication in Jiaozhou Bay[M]// Zhang Jing. Eutrophication in Jiaozhou Bay Catchment Basin Evolution of Biogenic Elements and the Gulf of Loss. Beijing：China Ocean Press，2013：66－75.

[9] 姚云，沈志良. 胶州湾海水富营养化水平评价[J]. 海洋科学，2004，28(6)：14－17.
Yao Yun，Shen Zhiliang. Assessment of seawater eutrophoication in the Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences，2004，28(6)：14－17.

[10] 姚云，郑世清，沈志良. 胶州湾营养盐及富营养化特征[J]. 海洋通报，2007，26(4)：91－99.
Yao Yun，Zheng Shiqing，Shen Zhiliang. Study on the mechanism of eutrophication in the Jiaozhou Bay[J]. Marine Science Bulletin，2007，26(4)：91－99.

[11] 杨东方，高振会，孙培艳，等. 胶州湾水温和营养盐硅限制初级生产力的时空变化[J]. 海洋科学进展，2006，24(2)：203－212.
Yang Dongfang，Gao Zhenhui，Sun Peiyan，et al. Spatial and temporal variations of the primary production limited by nutrient silicacon and water temperature in the Jiaozhou Bay[J]. Advances in Marine Science，2006，24(2)：203－212.

[12] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and phaeopigments：spectrophotometric equations[J]. Limnology and Oceanography，1967，12：343－346.

[13] 青岛市史志办公室. 青岛市志·气象志[M]. 北京：新华出版社，1997.
The Annals Office of Qingdao. Record Book of Qingdao City·Climography[M]. Beijing：Xinhua Press，1997.

[14] 张继红，方建光，孙松，等. 胶州湾养殖菲律宾蛤仔的清滤率、摄食率、吸收效率的研究[J]. 海洋与湖沼，2005，36(6)：548－555.
Zhang Jihong，Fang Jianguang，Sun Song，et al. Clearance rate，ingestion rate and absorption efficiency of cultivated clam *Ruditapis Philippinarum*

in Jiaozhou Bay,China[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2005,36(6): 548－555.

[15] 宋秀贤,俞志明. 胶州湾东北部养殖海域夏季营养盐分布特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖沼,2007,38(5): 446－452.
Song Xiuxian,Yu Zhiming. Nutrient effect on phytoplankton in typical mariculture waters in summer in the northeast of the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2007,38(5): 446－452.

[16] 姚云,沈志良. 胶州湾东北部营养盐的季节和多年变化[J]. 水科学进展,2007,18(3): 379－385.
Yao Yun,Shen Zhiliang. Seasonal and longterm variations in nutrients in north-eastern of Jiaozhou Bay,China[J]. Advances in Water Science,2007,18(3): 379－385.

[17] 齐振雄,李德尚,张曼平,等. 对虾养殖池塘氮磷收支的实验研究[J]. 水产学报,1998,22(2): 124－128.
Qi Zhenxiong,Li Deshang,Zhang Manping,et al. Experimental studies on nitrogen and phosphorus budgets of shrimp culture pond[J]. Journal of Fisheries of China,1998,22(2): 124－128.

[18] 杨逸萍,王增焕,孙建,等. 精养虾池主要水化学因子变化规律和氮的收支[J]. 海洋科学,1999,1: 15－17.
Yang Yiping,Wang Zenghuan,Sun Jian,et al. The variation low of aqueous chemical factors and the budgets of nitrogen in the intensive shrimp ponds[J]. Marine Sciences,1999,1: 15－17.

[19] 杨红生,周毅. 滤食性贝类对养殖海区环境影响的研究进展[J]. 海洋科学,1998,2: 42－44.
Yang Hongsheng,Zhou Yi. Progress in studies on effect of filter-feeding bivalve on environment of mariculture area[J]. Marine Sciences,1998,2: 42－44.

[20] 孙晓霞,孙松,赵增霞,等. 胶州湾营养盐浓度与结构的长期变化[J]. 海洋与湖沼,2011,42(5): 662－669.
Sun Xiaoxia,Sun Song,Zhao Zengxia,et al. Long-term changes in nutrient concentration and structure in the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2011,42(5): 662－669.

[21] 李学刚,宋金明,李宁,等. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征[J]. 海洋与湖沼,2005,36(6): 562－571.
Li Xuegang,Song Jinming,Li Ning,et al. Source and biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in Jiaozhou Bay sediments[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2005,36(6): 562－571.

[22] 沈志良. 胶州湾营养盐的现状和变化[J]. 海洋科学,1997,21(1): 60－63.
Shen Zhiliang. The present and variations of nutrients in Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences,1997,21(1): 60－63.

[23] Liu S M,Zhang J,Chen H T,et al. Factors influencing nutrient dynamics in the eutrophic Jiaozhou Bay,North China[J]. Progress in Oceanography,2005,66: 66－85.

[24] 高元鹏. 胶州湾营养盐与浮游植物粒级结构时空变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学,2010.
Gao Yuanpeng. Temporal and spatial variation of nutrient and phytoplankton grain structure in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China,2010.

[25] 孙丕喜,王宗灵,战闰,等. 胶州湾海水中无机氮的分布与富营养化研究[J]. 海洋科学进展,2005,23(4): 466－472.
Sun Pixi,Wang Zongling,Zhan Run,et al. Study on dissolved inorganic nitrogen distributions and eutrophication in the Jiaozhou Bay[J]. Advances in Marine Science,2005,23(4): 466－472.

[26] 潘胜军. 胶州湾浮游植物营养盐结构的初步研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所,2009.
Pan Shengjun. Research on phytoplankton nutrient structure in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Institute of Oceanology,Chinese Academy of Sciences,2009.

[27] 丁东生,石晓勇,曲克明,等. 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[J]. 海洋科学,2013,37(1): 35－42.
Ding Dongsheng,Shi Xiaoyong,Qu Keming,et al. Study of distribution and source of biogenic elements in the Jiaozhou Bay in autumn 2008[J]. Marine Sciences,2013,37(1): 35－42.

[28] 陈晨,杨桂朋,高先池,等. 胶州湾微表层和次表层海水中营养盐的分布特征及富营养化研究[J]. 环境科学学报,2012,32(8):1856－1865.
Chen Chen,Yang Guipeng,Gao Xianchi,et al. Nutrients distributional characteristics and eutrophication in the sea-surface microlayer and subsurface water in the Jiaozhou Bay[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2012,32(8):1856－1865.

[29] 张哲,王江涛. 胶州湾营养盐研究概述[J]. 海洋科学,2009,33(11): 90－95.
Zhang Zhe,Wang Jiangtao. Overview on the nutrients of Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences,2009,33(11): 90－95.

[30] 孙晓霞,孙松,张永山,等. 胶州湾叶绿素 *a* 及初级生产力的长期变化[J]. 海洋与湖沼,2011,42(5): 654－661.
Sun Xiaoxia,Sun Song,Zhang Yongshan,et al. Long-term changes of chlorophyll *a* concentration and primary productivity in the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2011,42(5): 654－661.

[31] 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,2002,33(3): 322－331.
Shen Zhiliang. Long-term changes in nutrient structure and its influences on ecology and environment in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2002,33(3): 322－331.

[32] Dortch Q,Rabalais N N,Turner R E,et al. Impacts of changing Si/N ratios and phytoplankton species composition[M]// Rabalais N N,Turner R E. Coastal Hypoxia: Consequences for Living Resources and ecosystems. American Geophysical Union,Washington,D. C. ,2001:37－48.

[33] Dortch Q,Whitledge T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions?[J]. Continental Shelf Research,1992,12: 1293－1309.

[34] Turner R E,Rabalis N N. Nitrogen and phosphorus phytoplankton growth limitation in the northern Gulf of Mexico[J]. Aquatic Microbial Ecolo-

gy,2013,68: 159－169.

[35] Humborg C,Ittekkot V,Cociasu A,et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure[J]. Nature,1997,386: 385－388.

[36] 张均顺,沈志良. 胶州湾营养盐结构变化的研究[J]. 海洋与湖沼,1997,28(5): 529－535.
Zhang Junshun,Shen Zhiliang. A study of changes in nutrient structure of Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,1997,28(5): 529－535.

[37] Yang D F,Gao Z H,Chen Y,et a1. Examination of silicate limitation of primary production in Jiaozhou Bay,China Ⅱ:Critical value and time of silicate limitation and satisfaction of the phytoplankton growth[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2003,21(1): 46－63.

[38] Yang D F,Gao Z H,Chen Y,et al. Examination of silicate limitation of primary production in Jiaozhou Bay,China Ⅲ:Judgment method,rules and uniqueness of nutrient limitation among N,P,and Si[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2003,21(2): 114－133.

[39] Yang D F,Zhang J,Lu J B,et a1. Examination of silicate limitation of primary production in Jiaozhou Bay,China Ⅰ: Silicate being a limiting factor of phytoplankton primary production[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology,2002,20(3):208－225.

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

[41] Justic D,Rabalais N N,Turner R E,et al,1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,40: 339－356.

[42] 王勇,焦念志. 胶州湾浮游植物对营养盐添加的响应关系[J]. 海洋科学,2002,26(4): 8－13.
Wang Yong,Jiao Nianzhi. Response of phytoplankton to nutrient addition in Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences,2002,26(4): 8－13.

[43] 刘东艳. 胶州湾浮游植物群落结构演替及其百年沉积物中的硅藻[D]. 青岛: 中国海洋大学,2004.
Liu Dongyan. Community structure succession study of phytoplankton and sediment diatom in Jiaozhou Bay[D]. Qingdao: Ocean University of China,2004.

[44] 刘东艳. 胶州湾浮游植物研究的历史回顾[M]// 张经. 胶州湾集水盆地生源要素的流失与海湾的富营养化演变. 北京: 海洋出版社,2013: 129－140.
Liu Dongyan. A review of the history of phytoplankton study in Jiaozhou Bay[M]// Zhang Jing. Eutrophication in Jiaozhou Bay Catchment Basin Evolution of Biogenic Elements and the Gulf of Loss. Beijing: China Ocean Press,2013:129－140.

[45] 刘东艳. 胶州湾浮游植物群落结构演替[M]// 张经. 胶州湾集水盆地生源要素的流失与海湾的富营养化演变. 北京: 海洋出版社,2013: 274－305.
Liu Dongyan. Succession of phytoplankton structure in Jiaozhou Bay[M]// Zhang Jing. Eutrophication in Jiaozhou Bay Catchment Basin Evolution of Biogenic Elements and the Gulf of Loss. Beijing: China Ocean Press,2013: 274－305.

[46] 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,2005,36(6): 499－506.
Li Chaolun,Zhang Fang,Shen Xin,et al. Concentration,distribution and annual fluctuationof chlorophyll *a* in the Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2005,36(6): 499－506.

[47] 吴玉霖,孙松,张永山,等. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究[J]. 海洋与湖沼,2004,35(6): 518－532.
Wu Yulin,Sun Song,Zhang Yongshan,et al. Quantitative study on long-term variation of phytoplankton in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,2004,35(6): 518－532.

[48] 潘友联,郭玉洁,曾呈奎. 胶州湾口内海水中叶绿素浓度的周年变化和垂直分布[J]. 海洋与湖沼,1995,26(1): 21－27.
Pan Youlian,Guo Yujie,Zeng Chengkui. Vertical and seasonal variations of chlorophyll oncentrations in the inlet of Jiaozhou Bay,Qingdao[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,1995,26(1): 21－27.

[49] 郝建华,霍文,俞志明. 胶州湾增养殖海域营养状况与赤潮形成的初步研究[J]. 海洋科学,2000,24(4): 37－41.
Hao Jianhua,Huo Wen,Yu Zhiming. Preliminary study on red tide occurrence in relation to nutritional condition in aquaculature seawater of Jiaozhou Bay[J]. Marine Sciences,2000,24(4): 37－41.

[50] Yao P,Yu Z G,Deng C M,et al. Spatialetemporal distribution of phytoplankton pigments in relation to nutrient status in Jiaozhou Bay,China[J]. Estuarine,Coastal and Shelf Science,2010,89: 234－244.

Temporal and spatial variations of chlorophyll *a* and environmental factors in Jiaozhou Bay in 2010—2011

Wang Yujue[1], Liu Zhe[2], Zhang Yong[1], Wang Min[3], Liu Dongyan[1]

(1. *Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai* 264003, *China*; 2. *College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *China*; 3. *College of Marine Life Science, Ocean University of China, Qingdao* 266100, *China*)

Abstract: Temporal and spatial variations of surface seawater temperature (SST), salinity (SSS), nutrient concentrations and chlorophyll *a* concentrations were studied in April, June, August and October 2010 and January and March 2011 in Jiaozhou Bay. Spatial distributions showed that dissolved inorganic nitrogen (DIN), phosphate (PO_4) and silicate (SiO_3) concentrations were higher in the northeast edge and decreased gradually towards the inner and the mouth of Jiaozhou Bay during most time of study. DIN and PO_4 were relatively higher in early summer and autumn but lower in winter and late summer as a result of the effects from aquaculture, exogenous nutrients input and phytoplankton consumption. SiO_3 concentrations were mainly affected by phytoplankton consumption and river loadings and were higher in summer and autumn and lower in spring and winter. The analysis on concentrations and structures of nutrients of Jiaozhou Bay during the study period indicated that PO_4 and SiO_3 were both absolute and relative limitations, and SiO_3 limitation was more serious and acted as the important factor which controlled the growth of phytoplankton all over the year. The most serious limitation of SiO_3 and PO_4 occurred in winter and was found in the whole bay. The nutrient loadings as a result of rainfall in summer, however, relieved SiO_3 limitation. The chlorophyll *a* concentrations were higher in spring and summer and lower in autumn and winter. Temperature, nutrients and the ingestion of filter mussels were the dominant effect factors of the concentrations and distribution of chlorophyll *a*.

Key words: Jiaozhou Bay; chlorophyll *a*; nutrients; temproal; spatial variations