

琼东海域冬季、夏季营养盐结构特征及其对浮游植物生长的影响

曾 珍, 陈法锦, 孟亚飞, 黄亚楠

(广东海洋大学海洋与气象学院 // 广东省近海海洋变化与灾害预警技术重点实验室, 广东 湛江 524088)

摘 要: 研究了琼东海域冬季(2012年12月)和夏季(2013年8月)表层水体营养盐结构特征和营养盐对浮游植物生长的限制情况。结果表明:2012年冬季,调查海域除了北部站位 DIN、 SiO_3^{2-} 浓度和 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值较高之外,其余站位营养盐浓度和比值整体比较低且分布比较均匀,这是由于北部站位受到了具有高浓度 DIN、 SiO_3^{2-} 和低浓度 PO_4^{3-} 的广东沿岸流的影响;2013年夏季,由于夏季河流径流量大,琼东近岸海域受到具有低浓度 DIN、 PO_4^{3-} 和高浓度 SiO_3^{2-} 特征的河流影响,同时夏季近岸生物量增大和层化作用增强,因此 DIN 和 PO_4^{3-} 浓度分布比较均匀, SiO_3^{2-} 浓度和 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值呈近岸高离岸低的分布特点。进一步分析该海域营养盐对浮游植物生长的可能限制因子发现,表层水体冬季呈现明显的硅限制,其限制因子几率为 58.83%,夏季呈现氮-硅协同限制的可能性。由于生物利用、季节性的河径流量、广东沿岸流以及层化作用的影响,使得营养盐限制因子由冬季的硅限制转变为夏季的氮和硅共同限制。

关键词: 琼东海域; 营养盐; 营养盐结构; 限制因子

中图分类号: P734

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159(2015)03-0070-08

Nutrient Structure and Its Influence on Phytoplankton Growth in the Qiongdong Sea During Winter and Summer

ZENG Zhen, CHEN Fa-jin, MENG Ya-fei, HUANG Ya-nan

(Guangdong Province Key Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction Technologies, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;)

Abstract: The spatial distribution of nutrients structure and its controlling factors indicated by the dissolved inorganic nitrogen ($\text{DIN} = \text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$), phosphate (PO_4^{3-}), silicate (SiO_3^{2-}) were studied, on the basis of two cruises in the Qiongdong sea during the winter of 2012 and the summer of 2013. The results indicated that during winter the high DIN, SiO_3^{2-} , and the ratio of DIN to P, and Si to P appeared in the north of the surveyed sea. The nutrient concentration and ratio in the other stations were low and smoothly distributed. The reason for the phenomenon might be that the nutrient in the northern of survey sea were affected by Guangdong coastal current with high DIN, SiO_3^{2-} and low PO_4^{3-} . In the summer, the distribution of DIN and PO_4^{3-} were similar to winter with a uniform distribution, while the SiO_3^{2-} and ratio of Si to DIN, and Si to P were high in nearshore and low in the offshore. This was because of the near shore was affected by Hainan runoff with low DIN, PO_4^{3-} and high SiO_3^{2-} . It was also influenced by the high biomass and enhanced stratification in the near shore. Further analysis of the

收稿日期: 2014-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(41476066, 91128212); 广东省高等学校优秀青年教师培养计划项目(Yq2014004); 广东海洋大学创新强校项目(GDOU2014050229); 广东海洋大学校选项目(1312437)

第一作者: 曾 珍(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事海洋生物地球化学方面的研究。E-mail: zengzhen12@126.com

通信作者: 陈法锦, 男, 副教授。E-mail: fjchen04@163.com

nutrients limitation for phytoplankton growth showed that in surface water there was an obviously Si limiting in winter, the relative frequency (%) of silicon is 58.83%. Similarly, it showed a coupling of N and Si limiting in summer. This might be related to the Biological needs, Seasonal river runoff, Guangdong coastal current and stratification, the limiting factor from Si change to Si and N.

Key words: Qiongdong sea; nutrients; nutrients structure; nutrients limitation

营养盐是浮游植物生长的物质基础,在光合作用过程中,这些营养元素被浮游植物所摄取,构成其重要组成部分^[1]。近年来,随着沿海经济快速的发展和人民生活水平的提高,大量富含营养物质的废水被排放入海导致营养盐含量的改变,甚至引起营养盐结构的改变^[2]。营养盐结构的变化不仅反映了营养盐状况的变化,同时反映了海水中营养盐的再生、循环机制的改变,对海区生态环境会产生较大的影响,甚至改变浮游植物的群落结构,引发赤潮^[3-4]。但营养盐结构时空分布复杂多样^[5-6],对浮游植物生长的限制也不一样^[7-8],因此,研究营养盐结构及其对浮游植物生长的限制情况,对于认识富营养化发展和赤潮防治等问题具有重要意义。

琼东海域处于南海暖流的最西端,属于亚热带季风区,夏季盛行暖湿的西南季风,冬季盛行干冷的东北季风^[9-10]。同时,琼东海域位于南海北部大陆架西南缘,海底地形坡度较大,等深线分布密集且大致与海岸线平行。季风和地形的共同作用造成琼东存在明显的季节性上升流^[11-12]。加之海南岛东部近岸海域受到沿岸一系列断续相间的潟湖水域水体交换的影响,造成琼东海域营养盐结构与其他

海域有所不同^[10]。目前,对琼东海域营养盐的研究主要集中在河口及近岸^[10,13-14],且主要是对营养盐含量及分布情况的报道^[13-16],而针对营养盐结构与限制的研究还鲜有报道。本研究根据2012年12月中旬和2013年8月初对琼东海域的现场调查资料,对调查海域冬季和夏季营养盐结构特征和营养盐对浮游植物生长的可能限制状况进行分析和讨论,以期揭示琼东海域营养盐结构现状及其对浮游植物生长的影响,为琼东海域生态系统研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 采样站位

2012年12月中旬和2013年8月初分别对琼东海域进行了2个航次的调查。其中2012年12月是南海开放航次,该航次布设了4条断面、共17个站位,2013年8月是广东海洋大学开放航次,该航次布设了5条断面、共28个站位。具体采样站位如图1所示。

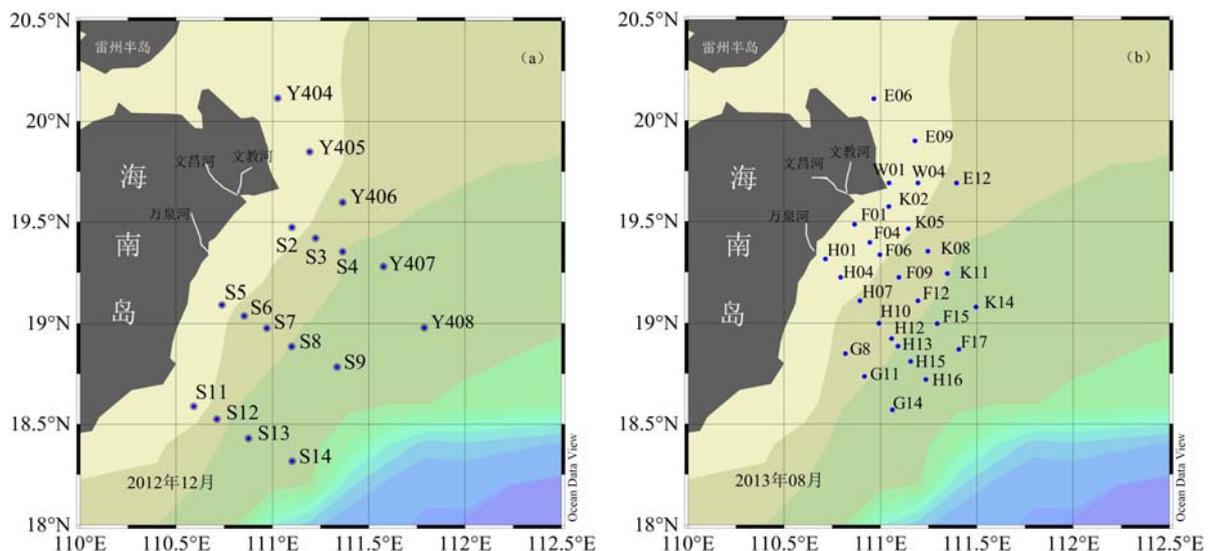


图1 采样站位

Fig.1 Sampling locations

1.2 样品的采集与分析方法

海水的温度和盐度数据由 SBE19plus 海鸟直

读式 CTD(美国 Sea-Bird Electronics, Inc.)进行现场测定和直接读取。营养盐样品现场用预洁净的醋酸

纤维膜(孔径 0.45 μm)过滤,采集约 100 mL 过滤水样带回实验室使用 Skalar 营养盐自动分析仪测定,根据《海洋调查规范-海水化学要素观测》^[17]和《SKALAR SAN++营养盐自动分析仪操作手册》进行水样分析,其中硝酸盐+亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐分别采用镉铜柱还原-重氮偶氮法、磷钼蓝法和硅钼蓝法测定。DIN ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$)、 SiO_3^{2-} 、 PO_4^{3-} 检测限分别为 0.1 $\mu\text{mol/L}$ 、0.1 $\mu\text{mol/L}$ 和 0.03 $\mu\text{mol/L}$ 。叶绿素 a (Chl a) 样品现场采集 1000 mL 水样经玻璃纤维膜(孔径 0.65 μm)过滤,滤膜用锡箔纸包裹起来冷冻保存,带回实验室后滤膜用 90% 的丙酮萃取,放于低温 (-20 $^\circ\text{C}$) 冰箱中萃取 24 h 后,取萃取液在唐纳荧光仪 10AU (Turner Designs Fluorometer, Model 10AU) 上进行测定^[18]。

2 结果与讨论

2.1 营养盐结构的时空分布特征

图 2、图 3 和图 4 分别为冬季和夏季调查海域表层水体温度、盐度、叶绿素 a 分布图、营养盐 (DIN 、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-}) 分布图以及 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 分布图。由图 3 可知,冬季 DIN、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 浓度范围分别为 0.77~8.51 $\mu\text{mol/L}$ 、0.15~0.41 $\mu\text{mol/L}$ 、0.94~9.20 $\mu\text{mol/L}$,夏季 DIN、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-} 浓度范围分别为 0.37~6.42 $\mu\text{mol/L}$ 、0.12~0.36 $\mu\text{mol/L}$ 、0.92~7.69 $\mu\text{mol/L}$ 。由图 4 可以看出,冬季 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值范围分别为 4.73~29.34、0.56~1.50、4.22~31.72,夏季 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值范围分别为 2.31~37.76、0.24~13.49、5.90~45.23。总体上,DIN、 PO_4^{3-} 浓度表现为冬季高于夏季, SiO_3^{2-} 浓度表现为夏季略高于冬季, $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 和 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值表现为冬季明显高于夏季。这显然与水文条件与生物需求的季节性差异有关。

2012 年冬季,营养盐浓度和 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值分布比较均匀(图 3,图 4),DIN、 SiO_3^{2-} 浓度和 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值除了北部站位比较高之外,其余站位都比较低。这可能是由于冬季盛行东北季风,西南流影响显著,广东沿岸流(温度 <23 $^\circ\text{C}$,盐度 <32)由东北流向西南,至雷州半岛东岸受阻而分成两支,其中一支沿海南岛东岸南流^[19],这支沿岸流具有高浓度 DIN、 SiO_3^{2-} 和低浓度 PO_4^{3-} 的特征^[10],从而使得该海域北部站位出现低温、低盐、高浓度 DIN、 SiO_3^{2-} 和低浓度 PO_4^{3-} 的特征,即高 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值特征(图 4)。另外, $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$

比值(图 4)除了近岸几个站位外,总体上都低于 Redfield 比值,且呈现由近岸向外海逐渐降低的趋势。这可能是由于冬季河流径流量小,海南岛的河流带来的 SiO_3^{2-} 浓度较低(水体中 SiO_3^{2-} 主要源于地表岩石风化和土壤中硅酸盐的风化和侵蚀,与河水流流量等密切相关^[20]),而 DIN 主要来自于农业、工业生产等排放,调查海域靠近海南省,受人类活动影响明显,DIN 浓度较 SiO_3^{2-} 高,因此,调查海域 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 比值基本低于 Redfield 比值。但由于 S2、S3、S4 站位离文教/文昌河比较近,S5 站位离万泉河比较近,这几个站位 SiO_3^{2-} 浓度受河流影响较外海明显,因此, $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 比值在这几个站位略高于 Redfield 比值。

2013 年夏季,DIN 和 PO_4^{3-} 浓度与冬季分布相同,总体分布比较均匀,而 SiO_3^{2-} 浓度和 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值则呈近岸高离岸低的分布趋势(图 3、图 4)。结合本航次的温盐数据(图 2)分析发现近岸站位受到了海南岛东部河流的影响,其中,文昌/文教河和万泉河中 DIN 和 PO_4^{3-} 浓度较低,万泉河 SiO_3^{2-} 浓度远高于世界河流的平均含量^[13],同时近岸生物量大,河流带来的营养物质被大量消耗,且夏季层化作用较强,表层水体得不到深层营养盐的补充^[21]。因此,近岸由河流带来的低浓度 DIN 和 PO_4^{3-} 被生物利用完全而表现为总体分布比较均匀,由河流带来的高浓度 SiO_3^{2-} 被生物利用不完全而表现为近岸高离岸低的分布特点,同时由于近岸 DIN、 PO_4^{3-} 浓度较 SiO_3^{2-} 浓度低,因此 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值呈近岸高离岸低的分布趋势。另外,DIN(图 3)和 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 比值(图 4)在 H 断面近岸出现了一个低值区,而该低值区刚好对应着 Chla 的高值区(图 2₁),表明近岸 DIN 和 $n_{\text{DIN}}/n_{\text{P}}$ 比值低值区是由于夏季生物量增大,浮游植物大量吸收营养物质,且夏季层化作用较强,表层水体得不到深层营养盐的补充^[21]而造成的。

由以上分析可知,冬季除了调查海域北部受到广东沿岸流影响营养盐浓度和比值较高之外,其余站位由于冬季河流径流量小,近岸没有得到过多营养盐的补充,因此近岸和离岸营养盐浓度和比值整体分布比较均匀。夏季调查海域近岸受到具有低浓度 DIN、 PO_4^{3-} 和高浓度 SiO_3^{2-} 特征的河流影响,同时夏季近岸生物量增大和层化作用增强,因此 DIN 和 PO_4^{3-} 浓度由于近岸生物利用增大和层化作用影响分布比较均匀, SiO_3^{2-} 浓度和 $n_{\text{Si}}/n_{\text{DIN}}$ 、 $n_{\text{Si}}/n_{\text{P}}$ 比值由于河流量增大的影响呈近岸高离岸低的分布。

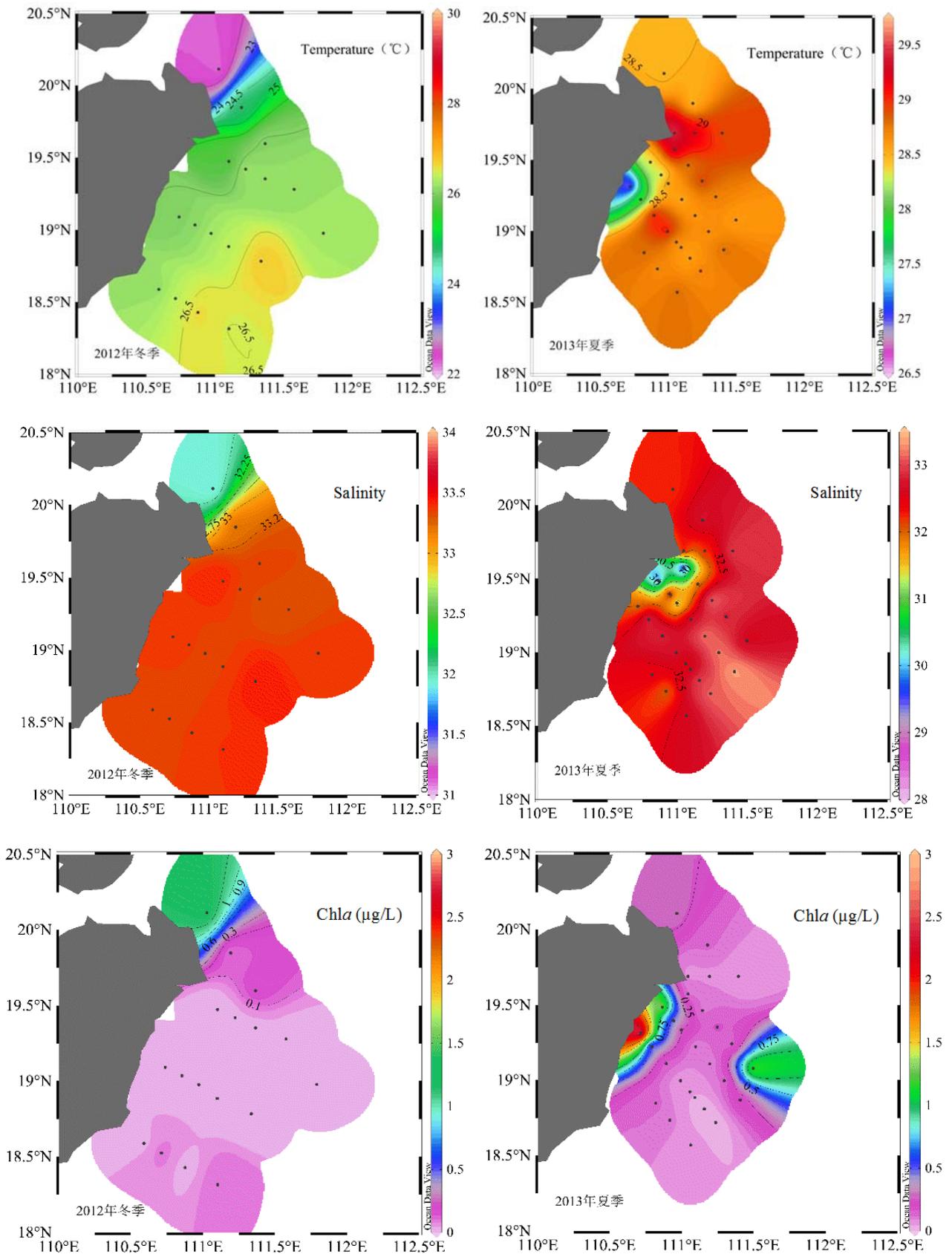


图2 研究海域2012年冬季和2013年夏季表层水温度、盐度和Chla分布
Fig. 2 The distribution of Temperature, Salinity and Chla in the winter of 2012 and in the summer of 2013

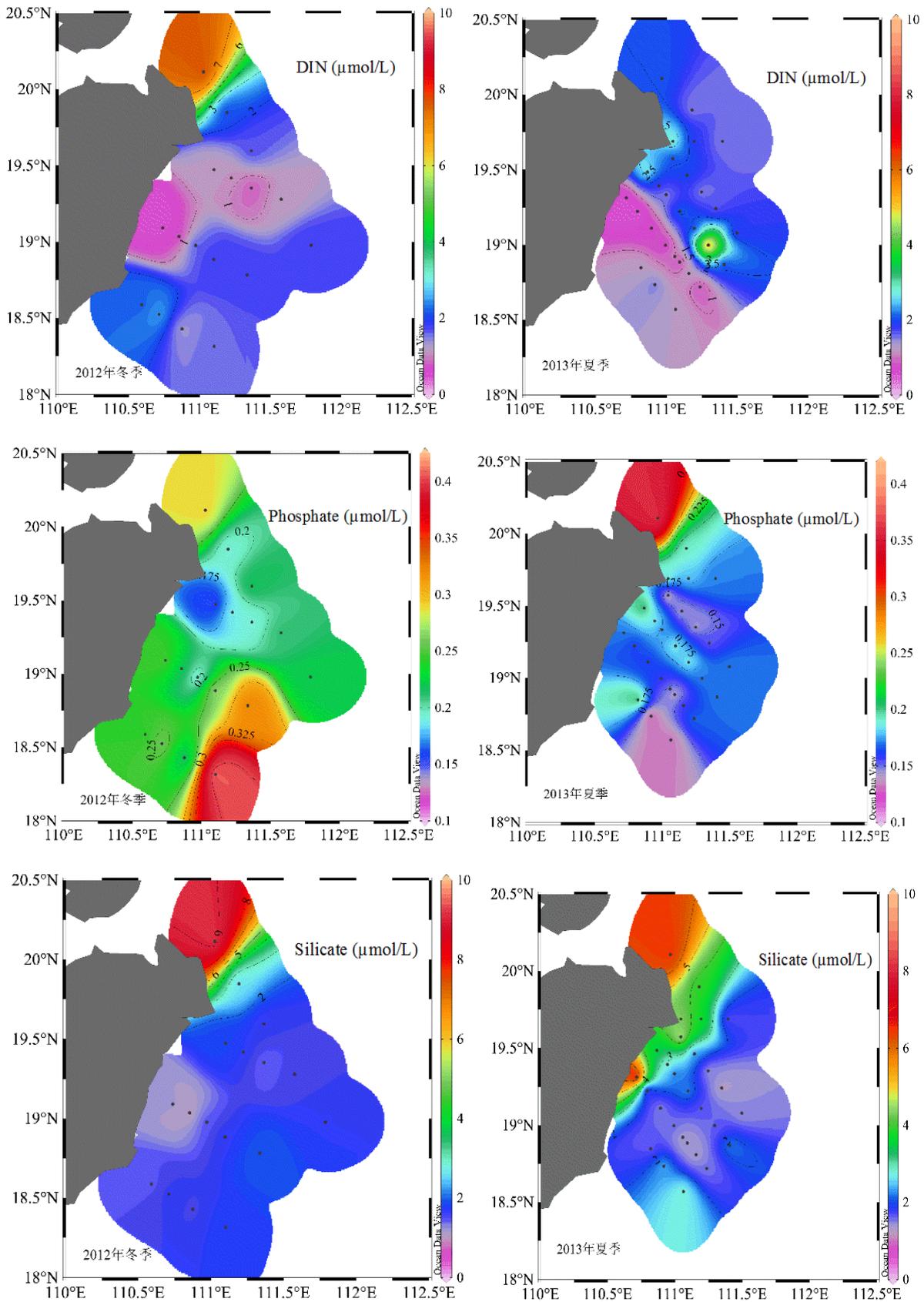


图3 研究海域2012年冬季和2013年夏季表层水营养盐(DIN、 PO_4^{3-} 、 SiO_3^{2-})分布
Fig. 3 The distribution of nutrient (DIN, PO_4^{3-} , SiO_3^{2-}) in the winter of 2012 and in the summer of 2013

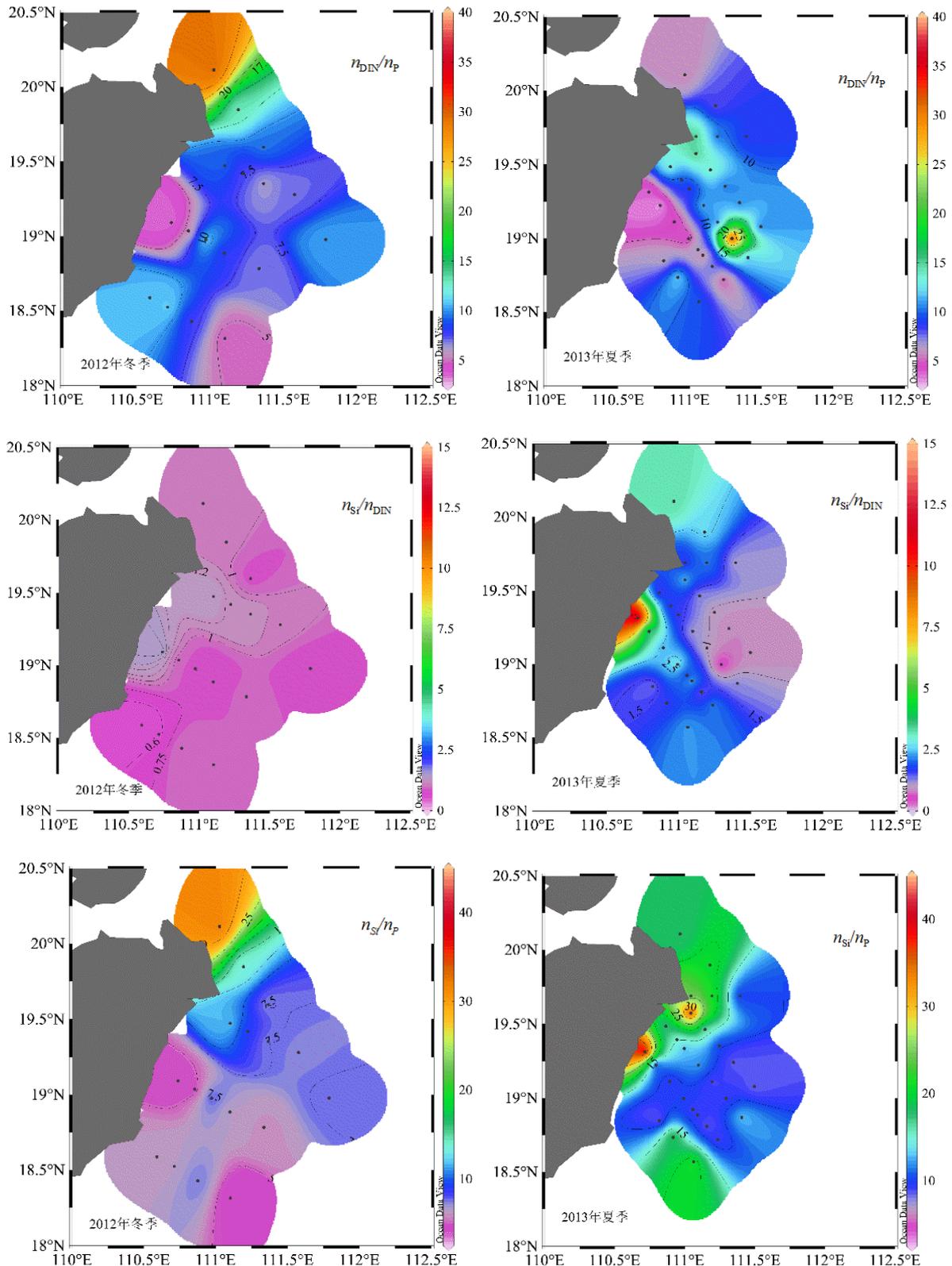


图4 研究海域2012年冬季和2013年夏季表层水 n_{DIN}/n_P 、 n_{Si}/n_{DIN} 和 n_{Si}/n_P 分布

Fig.4 The distribution of DIN/P , Si/DIN , Si/P in the winter of 2012 and in the summer of 2013

2.2 营养盐对浮游植物生长的可能限制作用

营养盐含量和组成结构对浮游植物生长和群落结构具有重要的影响，不同海域浮游植物生长的

限制因素存在很大差异。较早由 Redfield 等^[22]提出化学计量的营养盐限制标准主要是针对硅藻的营养需求，即各种营养盐的原子比为 $n_{DIN} : n_{Si} : n_P =$

16 : 16 : 1。后来通过各种藻类对营养盐吸收动力学研究, 又有研究者提出了浮游植物生长所需要的溶解态营养盐原子比和最低阈值。Justić 等^[23]和 Dortch 等^[24-25]在总结前人研究的基础上, 建立了评估某一种营养盐的化学计量限制标准。根据 Justić 等的限制标准, 研究者对胶州湾、珠江口、深圳湾和香港近岸海域的营养盐结构特征及营养盐对浮游植物生长的可能限制作用进行分析研究^[26-29]。

表1 琼东海域表层水体冬季与夏季各种营养盐作为单一限制因子出现几率
Table 1 The relative frequency of nitrogen, phosphorus and silicon limitation in surface of Qiongdong sea during winter and summer

营养盐限制因子	限制因子出现的几率/%		
	2012年冬季 (n=17)	2013年夏季 (n=28)	
N 为限制因子	$n_{DIN} : n_P < 10, n_{Si} : n_{DIN} > 1$	29.40	53.57
	$c_{DIN} < 1 \mu\text{mol/L}, n_{DIN} : n_P < 10, n_{Si} : n_{DIN} > 1$	0	21.43
P 为限制因子	$n_{Si} : n_P > 22, n_{DIN} : n_P > 22$	0	0
	$c_P < 0.1 \mu\text{mol/L}, n_{Si} : n_P > 22, n_{DIN} : n_P > 22$	0	0
Si 为限制因子	$n_{Si} : n_P < 10, n_{Si} : n_{DIN} < 1,$	58.83	21.43
	$c_{Si} < 2 \mu\text{mol/L}, n_{Si} : n_P < 10, n_{Si} : n_{DIN} < 1,$	58.83	21.43

由表1统计结果可知, 该海域表层水体中冬季浮游植物生长受控于各种单一营养盐限制因子出现几率最高的是硅酸盐 (58.83%), 溶解无机氮次之, 为 29.40%, 磷酸盐的限制几率为 0; 当考虑各种营养盐最低阈值时, 受硅酸盐、溶解无机氮和磷酸盐的限制几率分别为 58.83%、0 和 0。夏季浮游植物生长受控于各种单一营养盐限制因子出现几率以溶解无机氮最高, 为 53.57%, 硅酸盐次之, 为 21.43%, 磷酸盐的限制几率为 0; 当考虑各种营养盐最低阈值时, 受硅酸盐、溶解无机氮和磷酸盐的限制几率分别为 21.43%、21.43%和 0。进一步分析发现, 无论是作为单一限制因子还是考虑最低阈值, 该海域冬季都表现为显著的硅限制, 溶解无机氮作为单一限制因子的几率较大, 但 DIN 相对浮游植物生长的最低阈值比较丰富, 所以对浮游植物的生长基本不存在制约因素^[29], 磷酸盐不成为限制因子, 因此冬季主要受硅酸盐限制。这可能是由于冬季琼东海域盛行干冷的东北季风, 降雨量小^[11], 河径流对硅酸盐含量贡献较小, 硅酸盐含量普遍较低。而溶解无机氮和磷酸盐主要来自于农业和工业生产等的排放, 调查海域靠近海南省, 受人类活动影响明显, 生活污水、工业废水和化肥等陆源排污以及海水养殖等海上排污都会带来大量的无机氮和磷酸盐^[13], 溶解无机氮和磷酸盐含量较硅酸盐含量高, 所以硅酸盐是限制该海域浮游植物生长的营养因子。2013年夏季, 无论是作为单一限制因子还

由于 Redfield 等提出的营养盐限制标准仅基于硅藻的营养需求, 而 Justić 等提出的限制标准考虑了各种藻类对营养盐吸收, 并且, Justić 等的限制标准已被相关研究者广泛接受和使用^[26-29]。因此, 本文根据 Justić 等建立的限制标准, 研究该海域表层水体营养盐结构对浮游植物生长的可能限制因子(见表1)。

是考虑最低阈值, 该海域都表现为氮-硅共同限制的可能性, 磷酸盐不成为限制因子。这可能是由于生物量夏季高于冬季(图2), 营养盐被浮游植物大量消耗, 且夏季层化作用增强, 表层海水又不能得到深层海水的补充, 容易形成表层缺营养盐的状态^[21]。因此, 夏季溶解无机氮和硅酸盐共同限制了琼东海域浮游植物的生长。同时, Si 为限制因子的几率较冬季有所下降, 主要是因为夏季河径流量增大, 硅酸盐含量较冬季增大, 所以 Si 限制几率下降。

3 结 论

1) 对营养盐结构的时空分布特征分析表明, 冬季调查海域营养盐结构主要受到了广东沿岸流和河流径流量的影响。除了调查海域北部受到广东沿岸流影响营养盐浓度和比值都比较高之外, 其余站位由于冬季河流径流量小近岸没有得到过多营养盐的补充, 因此近岸和离岸营养盐浓度和比值整体分布比较均匀。夏季调查海域营养盐结构主要受到河流径流、生物利用以及层化作用的影响。由于近岸受到具有低浓度 DIN 、 PO_4^{3-} 和高浓度 SiO_3^{2-} 特征的河流影响, 因此 DIN 和 PO_4^{3-} 浓度由于近岸生物利用增大和层化作用影响分布比较均匀, SiO_3^{2-} 浓度和 n_{Si} / n_{DIN} 、 n_{Si} / n_P 比值由于河流量增大的影响呈近岸高离岸低的分布。

2) 对浮游植物生长的营养盐限制因素分析表

明, 该海域表层水体冬季呈现明显的硅限制其限制因子几率为 58.83%, 夏季呈现氮-硅协同限制的可能性。这主要是由于生物作用、季节性的河流径流量以及层化作用的影响, 使得营养盐限制因子由冬季的硅限制转变为夏季的氮和硅共同限制。

感谢国家海洋局第二海洋研究所的庄燕培、杨志和朱庆梅等同志在营养盐含量测定时给予的帮助。

参 考 文 献

- [1] 袁梁英. 南海北部营养盐结构特征[D]. 厦门: 厦门大学, 2005.
- [2] 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): 446-451.
- [3] 蒲新明, 吴玉霖, 张永山. 长江口区浮游植物营养限制因子的研究 II. 春季的营养限制情况[J]. 海洋学报, 2001, 23(3): 57-65.
- [4] 高生泉, 林以安, 金明明, 等. 春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构[J]. 东海海洋, 2004, 22(4): 38-50.
- [5] 赵卫红, 王江涛, 李金涛, 等. 长江口及邻近海域冬季浮游植物营养限制及其比较[J]. 海洋学报, 2006, 28(3): 119-126.
- [6] 李京. 东海赤潮高发区营养盐结构及对浮游植物优势种演替的作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [7] 胡明辉, 杨逸萍, 徐春林, 等. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 439-443.
- [8] 谢 冕. 海州湾南部近岸海域氮、磷营养盐变化规律及营养盐限制状况[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2013.
- [9] Tang Dan-Ling, Kawamura Hiroshi, Lee Ming-An, et al. Seasonal and spatial distribution of chlorophyll-a concentrations and water conditions in the Gulf of Tonkin, South China Sea[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85: 475-483.
- [10] Song Xingyu, Lai Zhigang, Ji Rubao, et al. Summertime primary production in northwest South China Sea: Interaction of coastal eddy, upwelling and biological processes[J]. Continental Shelf Research, 2012, 48: 110-121.
- [11] 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等. 2006 年夏季琼东、粤西沿岸上升流研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(4): 11-18.
- [12] 谢玲玲, 张书文, 赵 辉. 琼东上升流研究概述[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(4): 35-41.
- [13] 李瑞环. 海南东部近海地区营养盐动力学的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [14] 李延伟. 海南东部近海地区磷和硅的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [15] Krumme Uwe, Herbeck L S, Wang Tianci. Tide- and rainfall-induced variations of physical and chemical parameters in a mangrove-depleted estuary of East Hainan (South China Sea)[J]. Marine Environmental Research, 2012, 82: 28-39.
- [16] Li Y, Wang D R, Su J, et al. Impact of monsoon-driven circulation on phytoplankton assemblages near fringing reefs along the east coast of Hainan Island, China[J]. Deep-sea research II, 2013, 96: 75-87.
- [17] GB/T12763. 4-2007. 海洋调查规范第 4 部分: 海水化学要素调查[S]. 2007.
- [18] GB/T12763. 6-2007. 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 2007.
- [19] 尹健强, 黄良民, 李开枝, 等. 南海西北部陆架区沿岸流和上升流对中华哲水蚤分布的影响[J]. 海洋学报, 2013, 35(2): 143-153.
- [20] Zhang J, Ren J L, Liu S M, et al. Dissolved aluminum and silica in the Changjiang (Yangtze River): impact of weathering in subcontinental scale[J]. Global Biogeochem Cycles, 2003, 17(3): 1 077.
- [21] 马 威. 南海北部浮游植物群落的生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [22] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of seawater[M]. New York: Hill M N the sea V 12 J wiley, 1963 :26-77B.
- [23] Justic D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometry nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30: 41-46.
- [24] Dortch Q, Packard T T. Differences in biomass structure between oligotrophic and eutrophic marine ecosystems [J]. Deep-sea research, 1989, 36(2A): 223-240.
- [25] Dortch Q, Whitedge 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.
- [26] 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.
- [27] 董燕红, 蔡建东, 钱宏林. 珠江口海域营养盐比及与浮游植物的关系[J]. 2009, 28(1): 3-10.
- [28] 张 静, 张瑜斌, 周 凯, 等. 深圳湾海域营养盐的时空分布及潜在性富营养化程度评价[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 253-261.
- [29] 宋秀贤, 俞志明, 殷克东, 等. 香港近岸海域营养盐结构特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(4): 846-852.

(责任编辑: 任万森)