

DOI: 10.5846/stxb201308262158

张伟,孙健,聂红涛,姜国强,陶建华.珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响.生态学报,2015,35(12):4034-4044.

Zhang W, Sun J, Nie H T, Jiang G Q, Tao J H. Seasonal and spatial variations of nutrient and the response of phytoplankton in PRE and Adjacent Sea Areas. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(12):4034-4044.

珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响

张 伟^{1,4}, 孙 健², 聂红涛^{1,*}, 姜国强³, 陶建华¹

1 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072

2 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 水利水电工程系, 北京 100084

3 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655

4 天津市市政工程设计研究院, 天津 300051

摘要:基于 2006 年 7 月(夏季), 10 月(秋季)和 2007 年 3 月(春季)的现场调查数据,对珠江口及毗邻海域中的营养盐和叶绿素 a 等环境生态因子的时空分布特性进行了对比分析,研究了氮磷比与叶绿素 a 含量和种群多样性之间的联系,探讨了该海域营养盐对于浮游植物生长的影响。结果表明:(1)研究海域营养盐表现出较强的季节和空间差异性,总氮(TN)和总磷(TP)浓度均值春季(1.545 mg/L, 0.056 mg/L)和夏季(1.570 mg/L, 0.058 mg/L)均大于秋季(1.442 mg/L, 0.034 mg/L),且春夏季浓度空间差异更明显。(2)调查期间海域营养盐含量超标现象突出,夏季尤为明显。无机氮(DIN)总体均值 0.99 mg/L,超四类海水标准限值 1 倍,活性磷酸盐(PO₄-P)总体均值 0.021 mg/L, DIN:PO₄-P 平均值为 130;叶绿素 a 浓度与营养盐、pH、温度有较显著的相关性。(3)叶绿素 a 浓度较高的站位,具有较高的 DIN:PO₄-P 值,但浮游植物多样性指数偏低,优势种明显,主要为中肋骨条藻。氮磷比的改变会影响不同生长特性的浮游植物间的竞争和种群结构的改变;今后海洋污染治理中,在控制氮、磷污染时要注意氮磷比的改变可能造成的浮游生态影响。

关键词:珠江口;营养盐;浮游植物;氮磷比;种群多样性

Seasonal and spatial variations of nutrient and the response of phytoplankton in PRE and Adjacent Sea Areas

ZHANG Wei^{1,4}, SUN Jian², NIE Hongtao^{1,*}, JIANG Guoqiang³, TAO Jianhua¹

1 School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2 State key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3 South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, China

4 Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin 300051, China

Abstract: The seasonal-spatial variations of nutrient and Chlorophyll-a around the Pearl River Estuary (PRE) and adjacent coastal waters were investigated based on the survey data collected at 25 stations in July, October 2006 and March 2007. The relationship were examined between the ratio of nitrogen to phosphorus (DIN:PO₄-P and TN:TP), the Chlorophyll-a concentration and the diversity of phytoplankton species, and the effects of nutrient limitation on the phytoplankton growth were taken into account. The results indicated that: 1) the concentrations of nutrients and Chlorophyll-a had a strong seasonal and spatial variation. Seasonally, the mean concentrations of TN and TP in March (spring) and July (summer) were higher than those in October (autumn), and an obvious special variation of nutrient concentrations had been found in summer and spring, while it were more even in autumn. Spatially, much lower nutrient concentrations in Daya Bay and

基金项目:国家科技支撑计划项目(2010BAC68B04);国家自然科学基金(11002099);水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室开放基金(2012SS03)

收稿日期:2013-08-26; 网络出版日期:2014-08-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: htNie@tju.edu.cn

Guanghai Bay were found in comparison with the high nutrient concentrations in Pearl River Estuary. 2) The nutrient concentrations in the study area were rather high, and exceed the China national seawater water quality standards remarkably, especially in summer. The mean DIN concentration was about 0.99 mg/L, which was more than twice of the water quality standard Category 4, the mean $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration was about 0.021 mg/L, and the mean ratio of DIN : $\text{PO}_4\text{-P}$ was about 130 far above the Redfield ratio (16:1), which is the optimum value of phytoplankton nutrient requirements. With a significant enrichment of nitrogen relative to P, there was excess of N and potentially P limitation in coastal waters of PRE and nearby seas. Chlorophyll-a concentration showed a better correlation with nutrients, pH, and temperature in this region. 3) During the investigation in spring and summer, phytoplankton density distribution was variable, with major dominant species (*Skeletonema costatum*). The phytoplankton biomass were high at the stations where the N:P ratio was high while the diversity index was usually low. Thus, the growth of phytoplankton wasn't inhibited in the high N:P ratio area. In that area, the phytoplankton biomass distinctly increased due to the emergence and growth of dominant species. It was shown that the demand for nitrogen and phosphorus nutrient might vary greatly with the different types of phytoplankton; as a result, the variation of the ratio of nitrogen to phosphorus might cause the differential responses between growth rates of various phytoplankton species, resulting in a change in phytoplankton community structure. The effect of N:P ratio on phytoplankton should be taken into account in the further water management.

Key Words: Pearl River Estuary (PRE); nutrients; phytoplankton; N:P ratio; phytoplankton species diversity

近年来珠江三角洲的经济和城市化迅速发展,大量磷、氮和有机污染物通过八大口门和污水直排口进入珠江口及毗邻海域;过量的营养盐破坏了海水中原有的生态平衡,造成富营养化现象,并多次引发赤潮,严重威胁渔业资源^[1]。全面认识和有效地解决珠江口及毗邻海域水体富营养化问题,对于促进珠三角地区经济社会的全面、协调和可持续发展具有重要意义。

氮和磷是浮游植物生长所必需的营养元素,叶绿素 a 是浮游植物体的重要组成部分,是表征其现存量的重要指标之一^[2]。研究水体中氮、磷营养盐和叶绿素的分布特征及相互联系^[3-4]对于认识水体富营养化具有重要的意义。一般认为,浮游植物吸收氮、磷营养盐是按照 Redfield (16:1) 比进行吸收^[5-7]。研究表明珠江口海域营养盐存在氮营养过量而磷不足的状况,过高的氮磷比会影响浮游植物对于营养物质的吸收,限制浮游植物的生长^[8-10]。目前,对于珠江口特定海域的营养盐和叶绿素 a 分布及生态结构有一定研究^[11-13],但是对于珠江口、大亚湾和广海湾及相邻海域的整体研究较缺乏,关于营养盐浓度与比例的变化对浮游植物量及其结构的影响机制尚不明确。本文基于 2006 年 7 月(夏季)、10 月(秋季)和 2007 年 3 月(春季)3 次不同季节的调查数据,对珠江口及毗邻海域氮、磷营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征进行分析,综合探讨不同季节该区域主要环境因子、营养盐浓度、叶绿素 a 浓度、两种形式的氮磷比、浮游植物优势种和多样性指数之间的相互联系,研究氮磷营养盐及氮磷比对浮游植物生长的影响。

1 材料和研究方法

1.1 调查范围和方法

研究范围为珠江口及毗邻海域,包括珠江八大口门近岸海域、大亚湾海域和广海湾海域,调查站位如图 1 所示。调查时段为:2006 年 7 月 5—16 日,开展夏季调查;2006 年 10 月 17—24 日开展秋季调查;2007 年 3 月 14—25 日,开展春季调查。在对珠江口及毗邻海域理化因子进行调查时,样品采集、运输、预处理及分析、鉴定方法按照《海洋监测规范》(GB17378—1998)进行。通过 10 升 Go-Flow 取水器采取水面下 0.5m 水样后检测。采样后立即放入冷藏箱冷冻保存,带回实验室进行测定。浮游植物的样品采集和处理均按照《海洋调查规范》(GB12763—1991)进行;用标准浮游生物 III 型浅水网由底到表层垂直拖拽采集,采用 5% 福尔马林溶液固定后带回实验室进行鉴定计数。

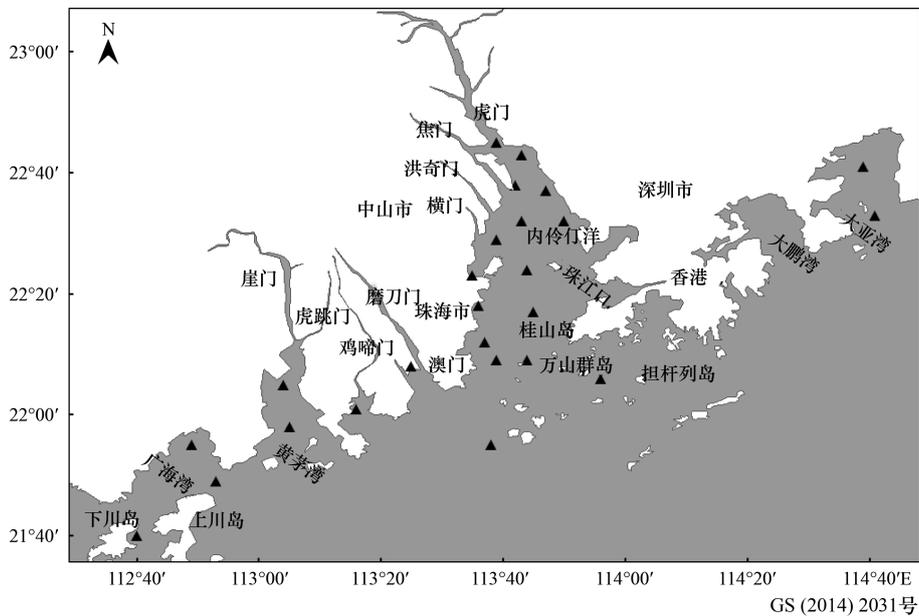


图1 珠江口及毗邻海域生态环境调查站位分布

Fig.1 Sampling Stations of Pearl River Estuary and its adjacent sea areas

1.2 数据分析方法

为了研究营养盐和叶绿素 a 等生态环境因子的空间分布特性,本文采用 Kriging 方法对测点数据进行空间插值。Kriging 方法是一种局部加权平均的插值方法,通过半方差图分析获取各点权重,再通过图形来表示变量的空间变化和分布,常用于具有地理特征的等值线和等值面的处理^[14]。

浮游植物的种群多样性应用 Shannon-Wiener 多样性指数公式进行计算和分析:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

式中, H' 为多样性指数, P_i 为该站中第 i 种的个体数目与该站总个体数目的比值。当水体受污染时,浮游植物群落中敏感种类减少,而耐污种类的个体数增加,多样性指数下降。依据多样性指数 H' 与水质污染程度对应关系有^[15]:轻度污染 ($H' > 3$),中重度污染 ($1 < H' < 3$),和重度污染 ($H' < 1$)。

叶绿素 a 浓度与环境因子之间相关性采用 Pearson 相关分析,统计软件采用 SPSS 18.0。文中 $\text{DIN}:\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{TN}:\text{TP}$ 均采用摩尔比。

2 结果与分析

2.1 氮磷营养盐时空变化特征

2.1.1 总氮(TN)和总磷(TP)

调查海域 TN 和 TP 浓度的季节空间分布如图 2 所示,其中春季 3 月的 TN 浓度变化范围 0.30—3.53 mg/L,夏季 7 月 0.58—3.40 mg/L,秋季 10 月 0.47—3.41 mg/L,浓度均值分别为 1.545、1.570 和 1.442 mg/L。TP 浓度范围 3 月为 0.010—0.266 mg/L,7 月为 0.011—0.153 mg/L,10 月为 0.010—0.107 mg/L。3 次调查均值分别为 0.056、0.058 和 0.034 mg/L。可见,3 月春季和 7 月夏季 TN、TP 浓度均值高于 10 月秋季。总体上看,珠江口海域从虎门到珠海港沿岸的总氮(TN)和总磷(TP)均显示出较高浓度,在外海水稀释作用下 TN 和 TP 均呈现近岸向远海逐渐减少的趋势,黄毛海海域夏季和春季由鸡啼门和磨刀门向远海也有递减趋势,表明珠江口毗邻海域营养盐主要来自陆源口门的排放。从区域来看,大亚湾和广海湾的 TN 和 TP 浓度明显比珠

江口区域低。其主要原因可能有:1)地理特性方面珠江口相对于大亚湾和广海湾开口狭窄,与外海水交换能力弱,所以陆源污染短时间不易排出,导致污染物蓄积,浓度较高;而大亚湾和广海湾开阔与外界水交换情况较好,污染物很快交换到外海。2)珠江口及毗邻海域的陆源污染大量集中于虎门、焦门、洪奇门和横门4个口门排放,而这4个口门位于珠江口内部,相对大亚湾和广海湾海域,珠江口海域接受的陆源污染负荷更大^[16]。此外,3月和7月TN和TP浓度存在明显的空间梯度变化,相比之下,10月各测站的浓度更趋于平均,此现象可能是珠江口海域具有季节性差异的径流量、降雨量、大气沉降量共同作用所导致^[10,17]。

2.1.2 无机氮(DIN)和活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)

DIN 3次调查总体均值 0.99 mg/L,大幅度超出四类海水水质标准限值,其中 81.3%的水样超二类海水标准,最大值达 2.45 mg/L,超过二类海水水质标准限值的 8.2 倍。相比 DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的超标程度较低,总体均值为 0.021 mg/L,仅 24%的水样超二类海水标准,其最大值达 0.068 mg/L,超过二类海水标准限值 2.2 倍。DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 季节差异性与 TN 和 TP 表现出一致特征。DIN 3月、7月和 10月浓度均值为 1.125、1.104、0.832 mg/L, $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度均值分别为 0.024、0.020、0.015 mg/L。可见,3月和7月 DIN 和 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度均值高于 10月。图 3 所示 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 空间分布,灰度间隔按照《海水水质标准》(GB 3097—1997)进行划分。可见,DIN 3个季度都以虎门口近岸海域浓度最高,部分海域已大幅度超出四类海水水质标准限值,其中尤其以 7月夏季和 3月春季的最为明显。7月,从虎门口、深圳湾海域延伸到广海湾海域 DIN 浓度均已超过四类海水水质标准;10月和 3月份,从崖门口到深圳湾、黄茅海海域 DIN 浓度超过四类海水水质标准。3次调查期间,广海湾、担杆列岛、大亚湾一带海域的 DIN 浓度相对较低,其中 3月和 10月基本处于一到三类海水水质。相比 DIN, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度相对较低,除深圳湾、虎门口附近海域含量相对较高处于四类 and 劣四类水质,其余大部分海域都处于一二类水质。

2.1.3 盐度

调查海域盐度空间分布如图 4 所示,基本呈现出由口门处向外海增加、并由西部海域向东部增大的趋势。海域盐度空间分布明显受到上游入海径流和海洋潮汐的影响;从海区分布上看,大亚湾海域由于没有大型河流注入,湾内盐度比珠江口海域及广海湾海域高。从季节来看,盐度分布总体上具有“7月夏季<10月秋季<3月春季”的特征。7月为丰水期,降雨量充沛,10月为平水期,而 3月为枯水期,不同季节珠江流域入海淡水流量^[18]和降雨量^[10]不同所造成的其毗邻海域不同季节盐度分布差异,尤其在八大口门附近海域及珠江口内部海域更显著。统计 3次调查,盐度与氮磷营养盐存在一定负相关性,且与 DIN 的负相关性较显著($R=-0.703$, $P<0.001$),与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 相对要弱一些($R=-0.449$, $P=0.015$),这可能与近海域水体中对磷的吸附和蓄积作用有关^[19]。

2.2 叶绿素 a 和种群多样性

2.2.1 环境因子与叶绿素 a 的相关性

图 5 显示叶绿素 a 浓度和各环境因子间的 Pearson 相关性,可以看出,夏季调查中叶绿素 a 浓度与 TN:TP 和 pH 呈极显著正相关,与 TP、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、 COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈显著负相关,和盐度、DIN: $\text{PO}_4\text{-P}$ 呈显著正相关。春季调查中与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 呈极显著负相关,与 pH、TN:TP 呈显著正相关,与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、DIN 呈显著负相关。3次调查时间分别于 2006 年 7 月、2006 年 10 月和 2007 年 3 月,在此期间季节性差异的温度、光照时间、径流入海量的不同所带来的营养盐陆源输入的差异,以及海洋动力过程乃至不同季节浮游植物的生长状态都会影响到环境因子与叶绿素 a 的相关性。综合春夏季调查,温度、pH、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、TN:TP 与叶绿素 a 有非常显著的相关性。研究表明,水中温度不同会对浮游植物细胞代谢、酶活性、营养盐吸收效率及繁殖生长造成一定影响,而水温的增加更有利于藻类的生长^[20];pH 与浮游植物光合作用密切相关,利用 pH 与藻类数量间明显的相关性可对藻类的“水华”现象进行检测与预报^[21]。与温度和 pH 存在较显著的正相关,这可能由于温度越高越有利于植物的光合作用,同时叶绿素 a 浓度越高,藻类数量越多,光合作用越强,同时消耗 CO_2 越多,导致环境水体 CO_2 含量降低而使得水体 pH 值升高。叶绿素 a 浓度与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 有较显著的负相关性,这是由于叶绿素 a 浓度高的区域,

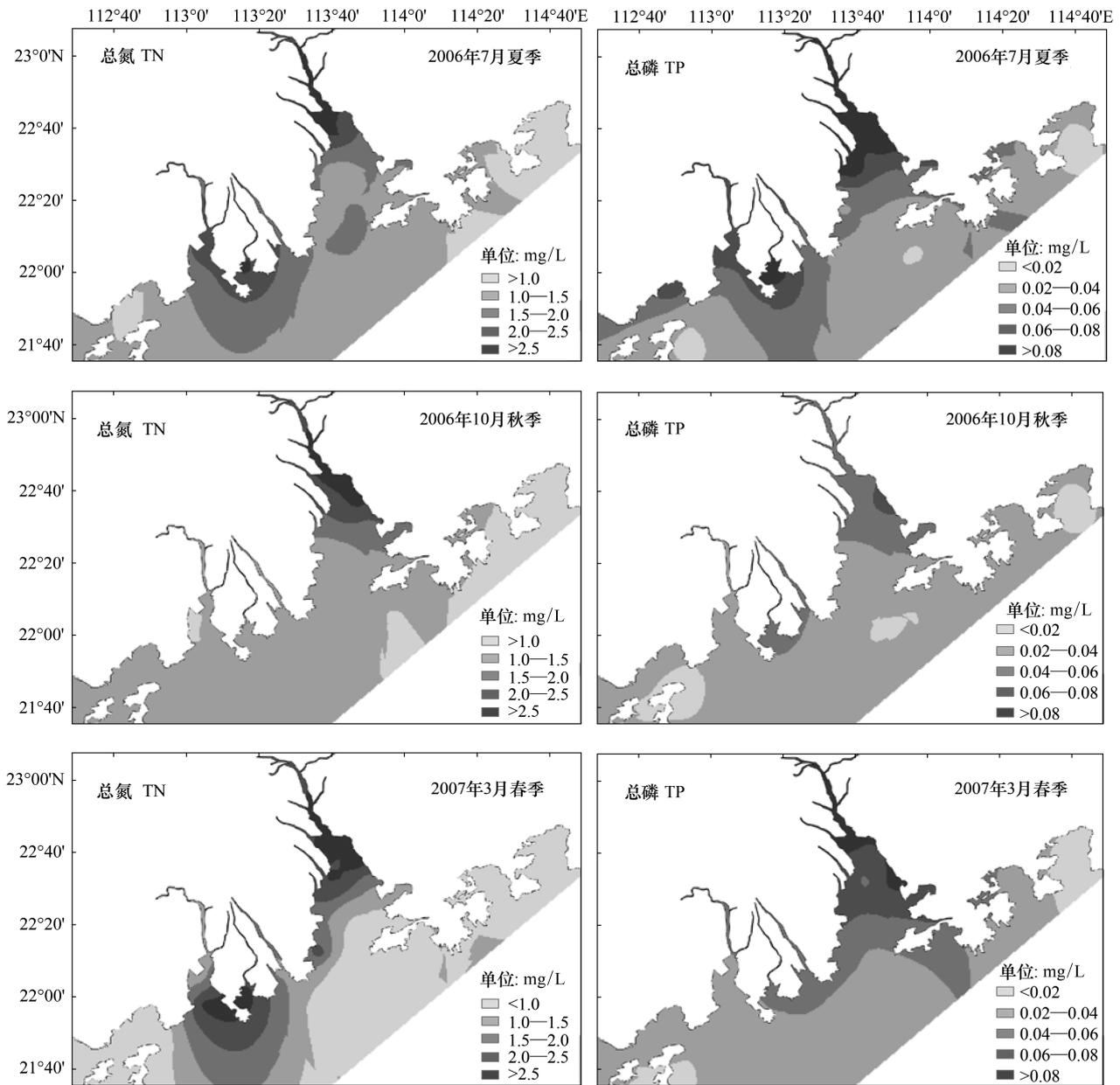


图2 珠江口及毗邻海域总氮、总磷浓度不同季节空间分布

Fig.2 Spatial distribution of TN and TP in PRE and its adjacent area in different seasons

浮游植物生长代谢旺盛,吸收营养盐的量很大,营养盐被高度利用而得不到及时的补给,从而使 $PO_4\text{-P}$ 和叶绿素 a 呈现负相关关系^[22];与磷酸盐浓度之间的明显负相关性也表明磷可能成为珠江口海域浮游植物生长的限制因子。刘玉等^[23]也曾发现,藻类生长与珠江口外滩水域中活性磷酸盐、硝酸盐则呈负相关关系,与本调查结果相符。叶绿素 a 浓度与氮、磷营养盐的关系中还可以看出,与 $PO_4\text{-P}$, TP 的相关性较 $NO_3\text{-N}$, $NO_2\text{-N}$, DIN, TN 的相关性要显著,表明珠江口海域浮游植物生长对于磷营养盐的响应要优于氮营养盐,这可能由于海域氮营养盐过量,磷营养相对不足有关,相对过量的氮营养盐,磷对于浮游植物生长的控制作用要更明显。本次调查中,非营养盐的环境因子 COD_{Mn} , 盐度, DO, 悬浮物 ss 与叶绿素 a 之间的相关性不显著。 COD_{Mn} 多考虑为多种生物过程的结果,而大气复氧、河水的流入及降雨等都会影响近岸水体中 DO 含量,多方面的影响也使它们与叶绿素 a 相关性不明显。叶绿素 a 与悬浮物 ss 的关系则较复杂,在高浊度的区域,过高的 ss 会降低水体透明度而影响植物对光的吸收;而在浊度相对低的区域,光限制作用则并不明显。可见,相比其他环境因

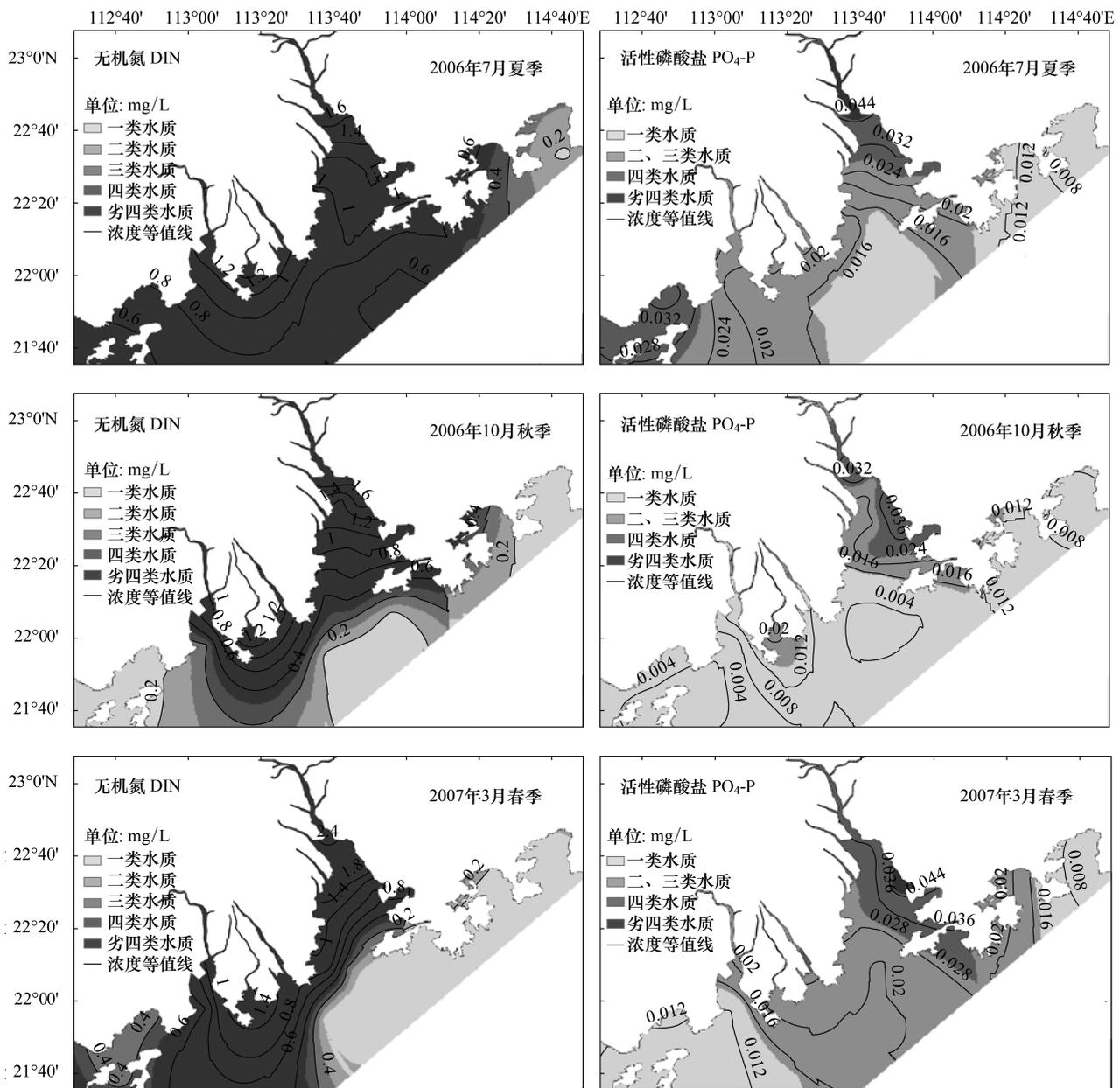


图3 珠江口及其毗邻海域无机氮、活性磷酸盐不同季节空间分布

Fig.3 Spatial distribution of DIN and PO₄-P in PRE and its adjacent area in different seasons

子,营养盐与叶绿素 a浓度的联系要更为显著些,它是珠江口海域浮游植物生长的重要影响因子。

2.2.2 营养盐与叶绿素 a

海域调查期间 DIN 均值 0.99mg/L,PO₄-P 均值 0.021mg/L。依据《海洋赤潮监测技术规程》中单项富营养化的阈值,DIN 为 0.2—0.3mg/L,PO₄-P 为 0.045mg/L,DIN 富营养化程度要高于 PO₄-P。由图 3 也可看出,3 次调查大部分近岸海域 DIN 浓度处于富营养化状态,而 PO₄-P 仅是在夏季虎门口,春季深圳湾附近处于富营养化状态。Redfield^[5,6] 提出,满足海洋浮游植物对营养物质需求的碳、氮、磷原子比为 106:16:1,这一比值被称为 Redfield 比值。Redfield 比值代表了浮游植物吸收利用营养物质时最适宜比例的平均值,在海洋浮游植物营养盐限制性的研究中已经广泛应用,海水中的氮磷比大于 22:1,认为存在磷限制,小于 10:1 时存在氮限制^[24],图 6 可以看出调查海域的 DIN:PO₄-P 比值远远超越 22:1。可见,珠江口地区营养盐比例严重失调,氮营养过量,存在潜在的磷限制作用。此外,DIN:PO₄-P 与叶绿素 a 相关性不显著($R=0.122,P=0.429$),其值

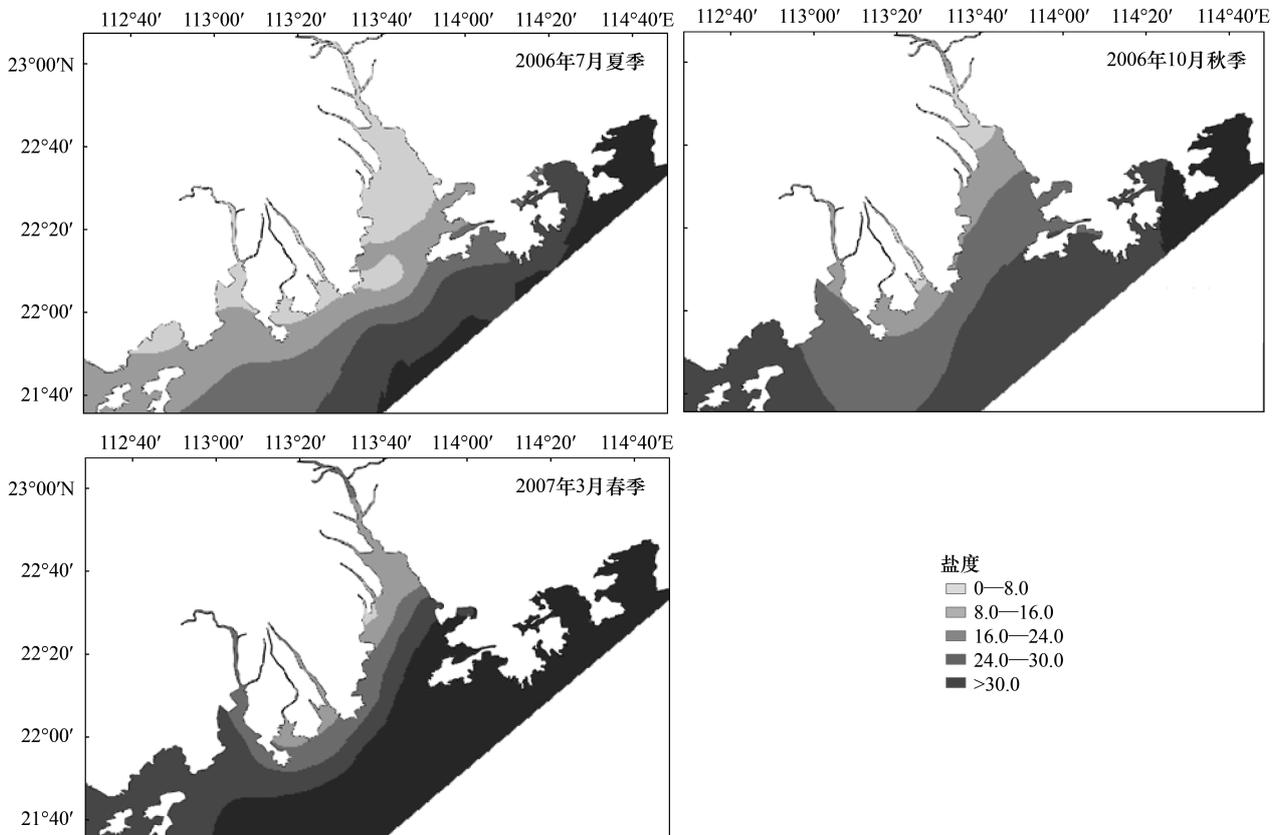


图4 珠江口及毗邻海域盐度不同季节空间分布

Fig.4 Spatial distribution of salinity in PRE and its adjacent area in different seasons

高于 22:1 的站位,叶绿素 a 浓度却有高值出现;而 TN:TP 比值与叶绿素 a 含量有相对较好的关联性(图 6)。Redfield 比描述的是浮游植物对营养盐需求的比,因为无机氮和活性磷酸盐可以被植物直接吸收利用,所以在实验室研究氮磷比时往往用 $DIN:PO_4-P$ 为标准,但是其作为室外环境水体中营养盐限制因子的判断工具却忽略了浮游植物细胞对氮、磷营养盐的贮存的问题,同时也未考虑植物在水体无机磷限制情况下通过合成碱性磷酸酶对与有机磷的吸收作用^[25-26]。可见。而 TN:TP 不仅考虑了水体中可以直接被浮游植物吸收生长所利用的无机形态营养盐,同时可考虑水体中其他形式的氮、磷营养盐向无机态的转化或者直接被浮游植物吸收利用^[27-28],体现了海域所有可能被浮游植物所吸收利用的营养盐的总量。

由图 7 可见,夏季(7 月)叶绿素 a 浓度明显高于春季(3 月)叶绿素 a 的浓度。2006 年 7 月的叶绿素 a 最高浓度并没有出现在高营养盐浓度的内伶仃洋海域,却出现在珠海香港海域内万山群岛、桂山岛处和大亚湾内部,而内伶仃洋的叶绿素 a 浓度却处于最低值。叶绿素 a 浓度处于高值的区域(珠海香港海域和大亚湾内部),氮磷营养盐浓度并不高;2007 年 3 月广海湾的上川岛、下川岛处的叶绿素 a 浓度最高,此处氮磷浓度也很低, TN 浓度大约 1 mg/L, TP 约 0.02 mg/L, DIN 约 0.6 mg/L, PO_4-P 约 0.012 mg/L(图 2 和图 3)。Guildford 等^[29]曾提出在海洋中普遍存在磷限制的现象,相比 $DIN:PO_4-P$, TN:TP 的大小也可以指示海洋和湖泊中氮磷营养限制作用,并提出营养物限制性分类标准: TN:TP 大于 50 为磷限制状态,而 TN:TP 小于 20 为氮限制状态。按照此标准,珠江口的整体区域也都处于磷限制的状态,且两次调查 TN:TP 处于 80:1—90:1 的区域的叶绿素 a 浓度都表现出较高的测值。此外,内伶仃洋是污染物直排入海区域,虽然营养盐浓度较高,但近岸区水体不稳定且垂流明显,会影响水体表面的浮游植物的生长;同时由于陆源排放含悬浮颗粒物较多,水体浊度高,这会影响植物对光的吸收,光限制作用也会导致叶绿素 a 浓度处于低位^[10]。

2.2.3 种群多样性

图 8 显示了调查期间浮游植物种群多样性指数、 $DIN:PO_4-P$ 和叶绿素 a 浓度之间的关系。珠江口海域多

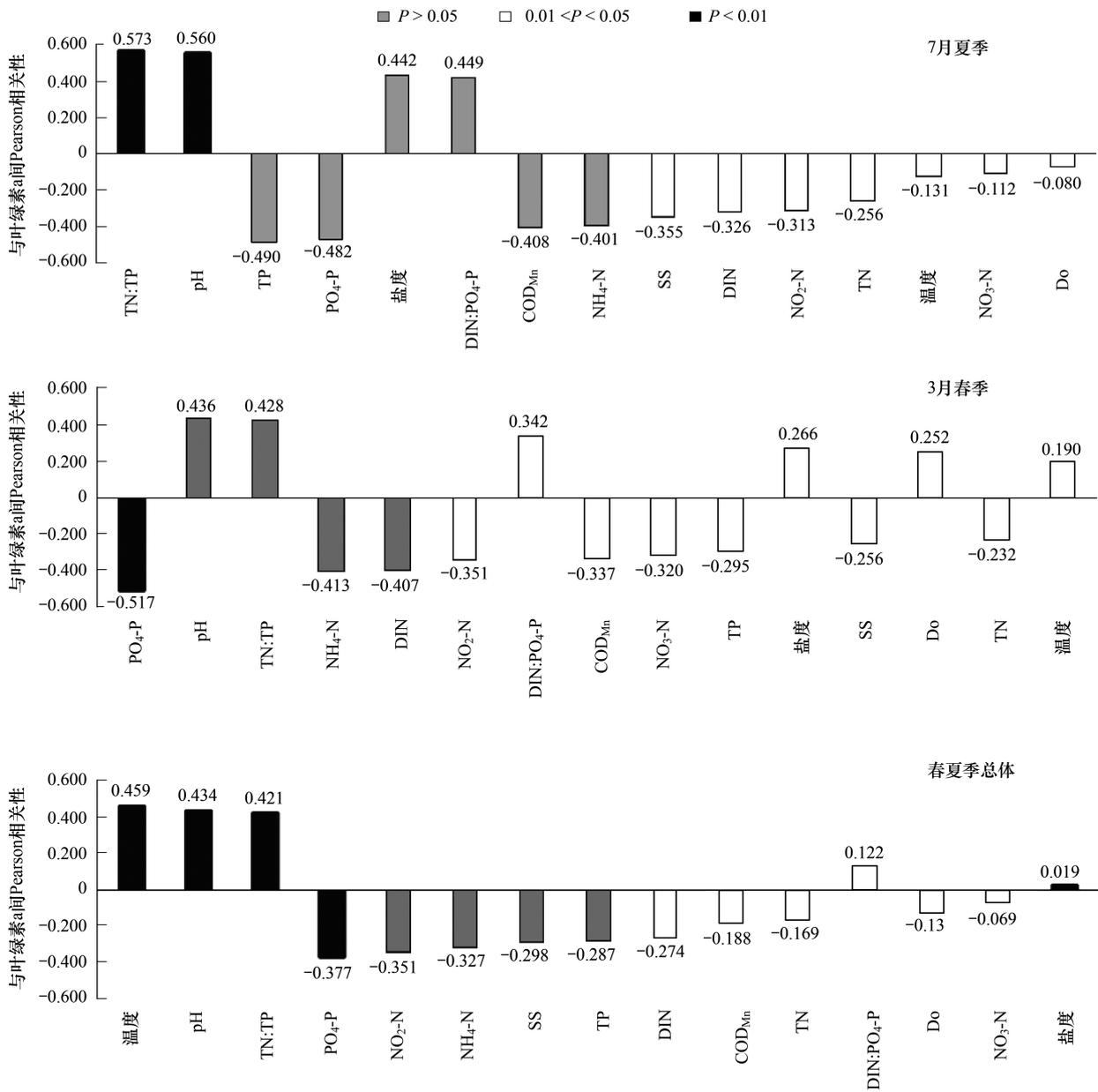


图 5 春夏调查各环境因子与叶绿素 a 之间相关性

Fig.5 Correlation coefficients between chlorophyll a and main environmental factors during spring and summer survey

P 为显著性检验结果, P < 0.01 极显著相关, 0.01 < P < 0.05 显著相关, P > 0.05 不显著

样性指数总体偏低,多属于中重度和重度污染。并且多样性指数和叶绿素 a、DIN:PO₄-P 之间有一定联系:

1) 多样性指数和叶绿素 a 浓度成负相关关系 ($R = -0.4274, P = 0.003$)。多样性指数越高,相对污染程度越低的站点叶绿素 a 浓度越低,而重度污染站位的叶绿素 a 的浓度大体要高于轻度及中重度污染站点。这是由于种群多样性指数越低,优势种越明显,优势种的过量生长使浮游植物生物量增加,相应的叶绿素 a 浓度处于高位。

2) DIN:PO₄-P 上限随着多样性指数增高有所降低;轻度污染和中重度污染区的 DIN:PO₄-P 上限略低于重度污染区域。不同营养盐水平及营养盐之间的比例不但对浮游植物吸收利用营养盐起到潜在限制作用,而且对浮游植物种群生态结构有一定调控作用^[30-33]。不同种类植物细胞元素的组成不同^[31],当研究海域营养盐含量对于浮游植物未达到完全饱和时,某一些浮游植物会由于某种营养盐缺乏而生长受限,而另一些对该

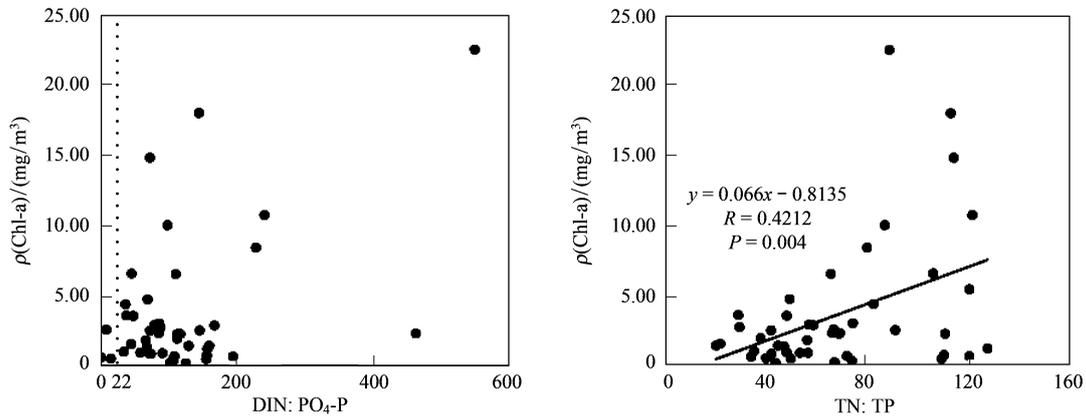


图 6 春夏调查站位叶绿素 a 的浓度与氮磷比的关系

Fig.6 The relations of chlorophyll-a concentration and N:P during spring and summer survey

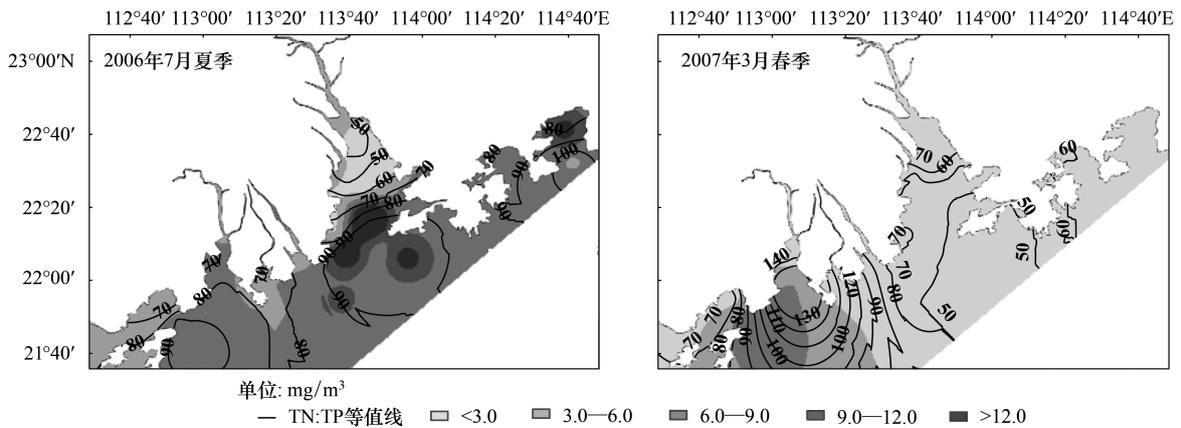


图 7 春、夏调查珠江口及其毗邻海域叶绿素 a 浓度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of chlorophyll-a concentration in PRE and its adjacent area during spring and summer survey

营养盐需求相对低的浮游植物则可以快速生长,形成优势种。同一营养水平下不同种浮游植物之间存在竞争^[33]。海洋水域中营养盐构成,尤其是氮磷比的变化会引起浮游植物间的竞争和种群结构的改变^[34-35]。也就是说,在珠江口海域,水体中氮过量磷不足的情况下,对于磷利用率差的浮游植物逐渐衰亡减少,而对于适于在高 $DIN:PO_4-P$ 情况下生长生存,磷利用率高的浮游植物将会快速生长,形成优势种群,这将导致多样性指数下降。已有实验结果表明氮磷比偏离 Redfield 比(16:1)越远,种群多样性指数越低^[36],这与本次调查结果一致。当然,海洋生态系统是一个动态过程,除氮磷比外,氮磷的绝对浓度、光照、PH、捕食关系等因素都会对浮游植物群落结构和演替产生影响。而且通过氮磷比了解哪种营养盐存在潜在限制趋势的同时,也应该考虑浮游植物的氮磷吸收过程对于氮磷比的反馈影响。氮磷比亦可看成浮游植物利用后留下的氮磷结果,反映了以前的浮游植物利用氮磷的效率。此外,春、夏季浮游植物种类调查结果发现,绝大多数站位的优势种为中肋骨条藻。中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)是属于海洋硅藻中分布较广具有代表性的物种,是最常见的赤潮生物之一。2000—2009 珠江口海域发生的赤潮统计分析表明:近年珠江口西部珠海沿岸海域赤潮多发种为中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)^[1]。已有实验表明:环境中不同氮磷比会影响中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)比生长率和细胞状态,氮浓度对它们的生长制约作用要大于磷浓度的影响;氮限制($N:P < 16:1$)条件下的细胞数量和比生长率远低于磷限制条件($N:P > 16:1$)^[37-39]下的情况。中肋骨条藻可以在无机磷限制的条件下,吸收利用有机磷化合物^[40]。这与本次调查结果相符,中肋骨条藻在氮磷比高的水体中的生长状态要优于氮磷比低的水体,即在珠江口海域较高氮磷比的水质情况下,也能很好生长。

3 结论

(1) 珠江口及毗邻海域营养盐含量超标现象较为严重,大面积水体处于劣四类水质,尤其夏季最为明显。DIN 总体均值 0.99 mg/L,超出四类海水标准,PO₄-P 总体均值 0.021 mg/L,未超出二类标准,DIN:PO₄-P 均值 130,远高于浮游植物吸收营养盐适宜的 Redfield 比,珠江口近海存有潜在的磷限制特性。此外,海水中氮磷营养盐表现出较强的季节和空间差异特性,春夏季营养盐浓度高,且空间梯度变化明显;空间分布上大亚湾和广海湾的营养盐浓度明显比珠江口区域低。叶绿素 a 浓度与温度、pH 和营养盐相关性显著,它们是珠江口海域浮游植物生长的主要影响因子。

(2) 海域浮游植物数量与分布不均匀,优势种明显,最主要的优势种为中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*);优势种明显是导致站位浮游植物多样性指数低的重要原因。DIN:PO₄-P 值上限随多样性指数增高而有所下降,而在种群多样性指数偏低,优势种群明显的站位,往往有较高的叶绿素 a 浓度。

(3) 面对海域氮过量、磷不足,高氮磷比的水质状况,已有的一些观点认为,因为水体磷限制的特性会抑制浮游植物生长,故将减排重点放在削减磷营养盐的排放上,这种观点在一定程度上具有积极的意义。但过高的氮磷比在限制浮游植物对于营养盐吸收的同时,也会引起浮游植物群落结构发生改变,多样性降低,形成优势种,而优势种的过量繁殖,严重时会引起赤潮。所以,在制定污染消减控制方案时,应更加注重对于氮、磷营养盐的协同控制,以有效降低水体氮磷比,保护水体中浮游植物的多样性,限制优势种的生长,降低出现赤潮的可能。

参考文献 (References):

- [1] 韦桂秋, 王华, 蔡伟叙, 易斌. 近 10 年珠江口海域赤潮发生特征及原因初探. 海洋通报, 2012, 31(4): 466-474.
- [2] Lorenzen C J. Determination of chlorophyll and pheopigments: spectrophotometric equations. Limnology and Oceanography, 1967, 12(2): 343-346.
- [3] 方涛, 贺心然, 冯志华, 陈斌林. 灌河口邻近海域春季浮游植物的生态分布及其营养盐限制. 生态学报, 2013, 33(15): 4567-4574.
- [4] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 朱刚, 汪琴, 张锦平. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析. 湖泊科学, 2011, 23(1): 67-72.
- [5] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. American Scientist, 1958, 46(3): 203A, 205-221.
- [6] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea-water // Hill M N. The Sea. vol. 2. New York: Interscience, 1963: 26-77.
- [7] Klausmeier C A, Litchman E, Daufresne T, Levin S A. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton. Nature, 2004, 429(6988): 171-174.
- [8] Yin K D, Harrison P J. Nitrogen over enrichment in subtropical Pearl River estuarine coastal waters: Possible causes and consequences. Continental Shelf Research, 2008, 28(12): 1435-1442.
- [9] Ho A Y T, Xu J, Yin K D, Yuan X C, He L, Jiang Y L, Lee J H W, Anderson D M, Harrison P J. Seasonal and spatial dynamics of nutrients and phytoplankton biomass in Victoria Harbour and its vicinity before and after sewage abatement. Marine Pollution Bulletin, 2008, 57(6/12): 313-324.
- [10] Xu J, Ho A Y T, Yin K D, Yuan X C, Anderson D M, Lee J H W, Harrison P J. Temporal and spatial variations in nutrient stoichiometry and regulation of phytoplankton biomass in Hong Kong waters: Influence of the Pearl River outflow and sewage inputs. Marine Pollution Bulletin, 2008, 57(6/12): 335-348.

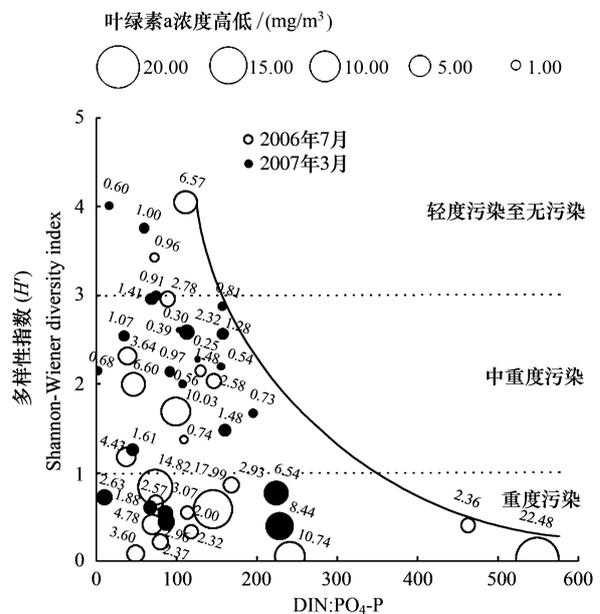


图 8 浮游植物种群多样性指数、DIN:PO₄-P 和叶绿素 a 浓度关系图

Fig.8 The relations of phytoplankton diversity index, DIN:PO₄-P and chlorophyll-a concentration

- [11] 张霞, 黄小平, 施震, 叶丰, 刘庆霞. 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系. 生态学报, 2013, 33(7): 2200-2211.
- [12] 黄云峰, 江涛, 冯佳和, 江天久. 珠江口广州海域叶绿素 a 分布特征及环境调控因素. 海洋环境科学, 2012, 31(3): 379-384.
- [13] 袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 于秀娟, 唐玲, 严岩. 珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构. 生态学报, 2012, 32(19): 5962-5971.
- [14] Oliver M A, Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. International Journal of Geographical Information Systems, 1990, 4(3): 313-332.
- [15] 孔繁翔. 环境生物学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 162-163.
- [16] Zhang Q, Xu C Y, Chen Y Q D, Yang T. Spatial assessment of hydrologic alteration across the Pearl River Delta, China, and possible underlying causes. Hydrological Processes, 2009, 23(11): 1565-1574.
- [17] 王茜, 王雪梅, 钟流举, 林文实. 珠江口无机氮湿沉降规律及大气输送的研究. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1156-1163.
- [18] Sun J, Lin B L, Li K M, Jiang G Q. A modelling study of residence time and exposure time in the Pearl River Estuary, China. Journal of Hydro-Environment Research, 2014, 8(3): 281-291.
- [19] 林以安, 苏纪兰, 扈传显, 张美, 李炎, 管卫兵, 陈介中. 珠江口夏季水体中的氮和磷. 海洋学报, 2004, 26(5): 63-73.
- [20] 陈桥, 韩红娟, 翟水晶, 胡维平. 太湖地区太阳辐射与水温的变化特征及其对叶绿素 a 的影响. 环境科学学报, 2009, 29(1): 199-206.
- [21] 黄岁樑, 臧常娟, 杜胜蓝, 吴敏, 高峰, 林超, 郭勇, 罗阳. pH、溶解氧、叶绿素 a 之间相关性研究 II: 非养殖水体. 环境工程学报, 2011, 5(8): 1681-1688.
- [22] 李丽, 江涛, 吕颂辉. 大亚湾海域夏、秋季分粒级叶绿素 a 分布特征. 海洋环境科学, 2013, 32(2): 185-189.
- [23] 刘玉, 李适宇, 吴仁海, 陈新庚. 珠江口近岸水域浮游藻类及其与关键水质因子分析. 生态科学, 2001, 20(4): 21-25.
- [24] Justić D, Rabalais N N, Turner R E, Dortch Q. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1995, 40(3): 339-356.
- [25] Piehler M F, Twomey L J, Hall N S, Paerl H W. Impacts of inorganic nutrient enrichment on phytoplankton community structure and function in Pamlico Sound, NC, USA. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 61(2): 197-209.
- [26] Huang B Q, Hong H S. Alkaline Phosphatase activity and utilization of dissolved organic phosphorus by algae in subtropical coastal waters. Marine Pollution Bulletin, 1999, 39(1/12): 205-211.
- [27] 金杰, 刘素美. 海洋浮游植物对磷的响应研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(2): 253-261.
- [28] Björkman K, Karl D M. Bioavailability of inorganic and organic phosphorus compounds to natural assemblages of microorganisms in Hawaiian coastal waters. Marine Ecology Progress Series, 1994, 111: 265-273.
- [29] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship?. Limnology and Oceanography, 2000, 45(6): 1213-1223.
- [30] Flynn J K. How critical is the critical N:P ratio?. Journal of Phycology, 2002, 38(5): 961-970.
- [31] Hodgkiss I J, Lu S H. The effects of nutrients and their ratios on phytoplankton abundance in Junk Bay, Hong Kong. Hydrobiologia, 2004, 512(1/3): 215-229.
- [32] Rhee G Y. Phosphate uptake under nitrate limitation by *Scenedesmus* sp. and its ecological implications. Journal of Phycology, 1974, 10(4): 470-475.
- [33] Tilman D. Tests of resource competition theory using four species of Lake Michigan algae. Ecology, 1981, 62(3): 802-815.
- [34] Hodgkiss I J, Ho K C. Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms?. Hydrobiologia, 1997, 352(1/3): 141-147.
- [35] 黄伟, 朱旭宇, 曾江宇, 陈全震, 徐晓群, 廖一波, 刘晶晶, 杜萍. 氮磷比对浙江近岸浮游植物群落结构影响的实验研究. 海洋学报, 2012, 34(5): 128-138.
- [36] 曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 辛福言. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究. 应用生态学报, 2000, 11(3): 445-448.
- [37] 刘皓, 高永利, 殷克东, 袁翔城, 徐杰, Harrison P J. 不同氮磷比对中肋骨条藻和威氏海链藻生长特性的影响. 热带海洋学报, 2010, 29(6): 92-97.
- [38] 刘东艳, 孙军, 陈宗涛, 魏天迪. 不同氮磷比对中肋骨条藻生长特性的影响. 海洋湖沼通报, 2002, (2): 39-44.
- [39] 王金花, 唐洪杰, 杨茹君, 王修林. 氮磷营养盐对中肋骨条藻生长及硝酸还原酶活性的影响. 海洋科学, 2008, 32(12): 64-68.
- [40] 赵艳芳, 俞志明, 宋秀贤, 曹西华. 不同磷源形态对中肋骨条藻和东海原甲藻生长及磷酸酶活性的影响. 环境科学, 2009, 30(3): 693-699.