

夏季外海水入侵对大亚湾浮游植物群落结构的影响

杨 熙^{1,2,3}, 谭焯辉^{1,2}

(1. 中国科学院 南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家海洋局 南海环境监测中心, 广东 广州 510300)

摘要: 夏季大亚湾存在由粤东沿岸上升流引起的外海水入侵现象, 且入侵强度存在年际差异, 作者利用大亚湾 2004~2017 年历年夏季航次调查数据, 将弱入侵年份与强入侵年份进行对比分析, 以探讨外海水入侵对大亚湾浮游植物群落结构的影响。结果显示, 当外海水入侵由弱变强时, 湾内水体理化特征发现显著变化, 水体由高温低盐转变为低温高盐, N、P 等营养盐含量出现下降。海水理化性质的改变导致了浮游植物群落结构的变化, 硅藻、甲藻种类数以及浮游植物 Shannon-wiener 指数均出现升高; 浮游植物总丰度和硅藻丰度下降, 甲藻丰度变化不明显; 常见浮游植物种类伪菱形藻属 (*Pseudo-nitzschia* sp.)、角毛藻属 (*Chaetoceros* sp.) 和叉角藻 (*Ceratium furca*) 丰度出现下降, 而中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 和菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*) 丰度出现升高; 优势种由单一硅藻种类向硅藻和甲藻共为优势转变。此外, 外海水入侵还会通过改变海水理化因子的空间分布以及湾内上层水体流向来影响浮游植物群落结构的分布。

关键词: 大亚湾; 外海水入侵; 浮游植物; 营养盐

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2019)07-0096-10

DOI: 10.11759/hyxx20190321003

海湾处于陆地和海洋之间的交汇地带, 因其独特的自然条件, 拥有区位、环境、资源等诸多优势, 成为海陆交通枢纽。大亚湾是中国南海北部沿岸一较大的山地溺谷型半封闭海湾, 面积约为 600 km², 水深较浅, 在 6 m~16 m, 其周边经济发达, 人口众多, 著名的大亚湾核电站位于该湾的西岸。大亚湾夏季水体受粤东沿岸上升流的影响, 上升流所带来的深层冷水能入侵进入大亚湾内部^[1-3]。夏季大亚湾外海水入侵起始于 7 月初至 7 月中旬, 至 9 月上旬和 9 月中旬迅速消亡, 整个过程持续时间为两个月左右, 其入侵强度存在明显的年际差异^[4], 入侵强的时候高盐冷水能够深入大亚湾内部达到湾顶部^[5]。

海洋浮游植物是海洋最重的初级生产者, 在海洋生态系统物质循环和能量流动中起着重要作用, 沿岸上升流所引起的外海水入侵会使海水理化性质发生变化从而影响浮游植物群落结构^[6]。关于大亚湾浮游植物群落结构变化影响因素的研究报道已较多见, 如全球气候变化引起大亚湾水温上升趋势, 导致某些种类浮游植物丰度增加和水体叶绿素 a 含量升高^[7]; 核电站温排水的长期影响导致周边海域浮游植物群落结构发生了由硅藻向甲藻的演替现象^[8];

人类活动(包括人口、工业和水产养殖等的大幅增加, 生活污水和养殖废水的排放)导致大亚湾由贫营养状态发展到中营养状态, 局部海域已出现富营养化的趋势, 营养盐限制因子由 20 世纪 80 年代的 N 限制过渡到 P 限制, 浮游植物群落出现小型化, 生物多样性降低^[9-12]。但浮游植物群落结构变化与海水动力过程的关系研究却鲜见报道, 国内外关于沿岸上升流所引起的外海水入侵对海湾浮游植物群落结构的影响相关报道也较少见。本研究利用 2004~2017 年大亚湾夏季历史调查数据, 将外海水分别处于弱入侵和强入侵两种状态时大亚湾海水的理化特征和浮游植物群落结构进行对比分析, 并通过分析浮游植物与环境因子的相关性来探讨外海水入侵对浮游植物群落结构的影响机制, 以期为认识海湾生态环境的影响因素和更好的保护海湾生态环境提供科学依据。

收稿日期: 2019-03-21; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家科技基础资源调查专项项目(2017FY201404)

[Foundation: Science & Technology Basic Resources Investigation Program of China, No. 2017FY201404]

作者简介: 杨熙(1989-), 男, 湖北监利人, 博士研究生, 主要从事海洋浮游生物生态学研究, 电话: 18620492127, E-mail: yang1209xi@163.com; 谭焯辉, 通信作者, 电话: 020-89021159, E-mail: tanyh@scsio.ac.cn

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

大亚湾位于珠江口东侧,被深圳市大鹏半岛、惠阳市南部沿海及惠东县平海半岛环绕,西南邻香港特别行政区,南接广阔的南海,是广东省最大的山地溺谷型半封闭海湾。湾内水面平静,水域宽阔,水体交换率较低,更新周期长,内有大小岛屿 50 多个,湾中部南北向分布的中央列岛断断续续将海湾分成东西两半,东部海岸相对较平直,而西部岸线曲折,汊湾深入陆地,如大鹏澳和哑铃湾等。大亚湾海洋生物资源与生物种类丰富,建有惠东港口海龟国家级自然保护区和大亚湾水产资源省级自然保护区,由于其位于中国改革开放的前沿,是广东省重要的经济增长点,以石油化工工业、港口航运业、海水养殖业和旅游业最为发达,导致其受人类活动影响较为显著。湾北岸为大亚湾石化基地,西岸有大亚湾和岭澳两座核电站运行,东岸有巽寮旅游度假区和平海电厂。由于地理环境的特殊性,大亚湾已成为社会关注和科学研究的热点区域。

1.2 样品的采集和分析

大亚湾调查站位分布见图 1,调查时间为 2004~2017 年夏季(7 月中旬至 8 月底)。其中水体温度、盐度采用 CTD 进行测定。所有站位均采集表层和底层水样,水体溶解氧(DO)、pH、无机营养盐(NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 和 PO_4^{3-} -P)浓度均依照海洋调查规范(GB12763.4-2007)进行分析。浮游植物采用标准的浅水 III 型浮游生物网(网长 140 cm、网口内径 37 cm、网口面积 0.1 m²、筛绢孔径 77 μm)从底层到表层进行垂直拖网采样,将样品装入 1 L 不透明广口塑料瓶中,加入甲醛缓冲溶液(最终浓度为 2.5%)保存样品,

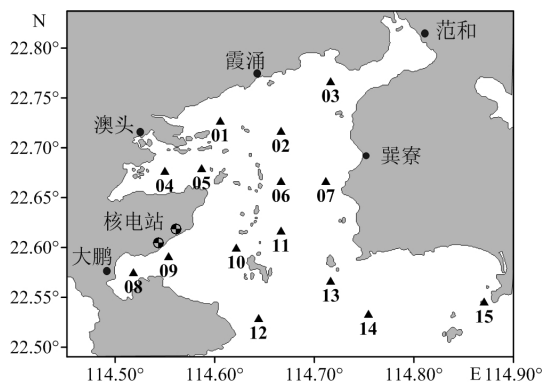


图 1 大亚湾调查站位分布图

Fig. 1 Location of study area and monitoring stations

浮游植物种类的鉴定参考《中国海洋生物名录》^[13],计数采用 Utermöhl 方法^[14]进行。

1.3 数据处理方法

由于外海水入侵会造成湾内水体温盐的变化,作者根据不同年度海水温盐的差异,将 2009、2008、2016 年归为弱入侵组,将 2011、2014、2004、2015、2017 年归为强入侵组。组间各参数的对比分析均采用组内所有年份的平均值;利用 Surfer 13.0 作图软件绘制各环境因子和浮游植物丰度的空间分布情况;由于 DCA 分析结果显示 4 个轴中梯度最大值小于 3,因此选择冗余分析(RDA)方法^[15]来分析浮游植物群落组成与环境变量之间的关系,其中浮游植物选取 4 种优势度和出现频率最高的硅藻和 4 种优势度和出现频率最高的甲藻,所有浮游植物种类丰度数据均经过 $\log(x+1)$ 加以转化,以降低优势种类对排序的影响。

2 结果

2.1 海水温盐特征

夏季大亚湾表层海水温度和盐度平均值的变化范围分别为 27.30℃~31.40℃、28.70‰~33.50‰;底层海水温度和盐度平均值的变化范围分别为 23.69℃~28.90℃、30.34‰~34.23‰,表层海水温度和盐度分布较为均匀,而底层海水温度和盐度分布差异性较大,图 2 和图 3 展示了历年夏季大亚湾底层海水温度和盐度的水平分布情况。由图可见,夏季大亚湾底层海水温盐分布特征呈现出由湾外低温高盐向湾内高温低盐发生转变,且不同的年份,底层低温高盐水体所影响的面积大小存在差异,这是由于夏季受粤东沿岸上升流的影响,外海深层高盐冷水团向湾内入侵^[3],且入侵强度存在年际差异所造成。多数年份可以看到明显的伸向湾内的高盐冷水水舌(温度 $\leq 24.5^\circ\text{C}$ 、盐度 $\geq 33\text{‰}$ 的水体),其中 2004 年、2014 年、2015 年和 2017 年的高盐冷水水舌甚至深入大亚湾内部达到湾顶。通过历年夏季调查航次海水温盐分布特征可以看出,大亚湾存在夏季外海水入侵的现象,且不同年度其入侵强度存在明显差异。

通过对各调查年份表、底层温度和盐度平均值进行聚类分析,将所有年份分为 3 类(图 4),其中第 I 类海水表现为高温低盐特征,代表外海水入侵弱的年份,第 II 类为海水表现为低温高盐特征,代表外海水入侵强的年份,第 III 类海水介于弱入侵和强入侵

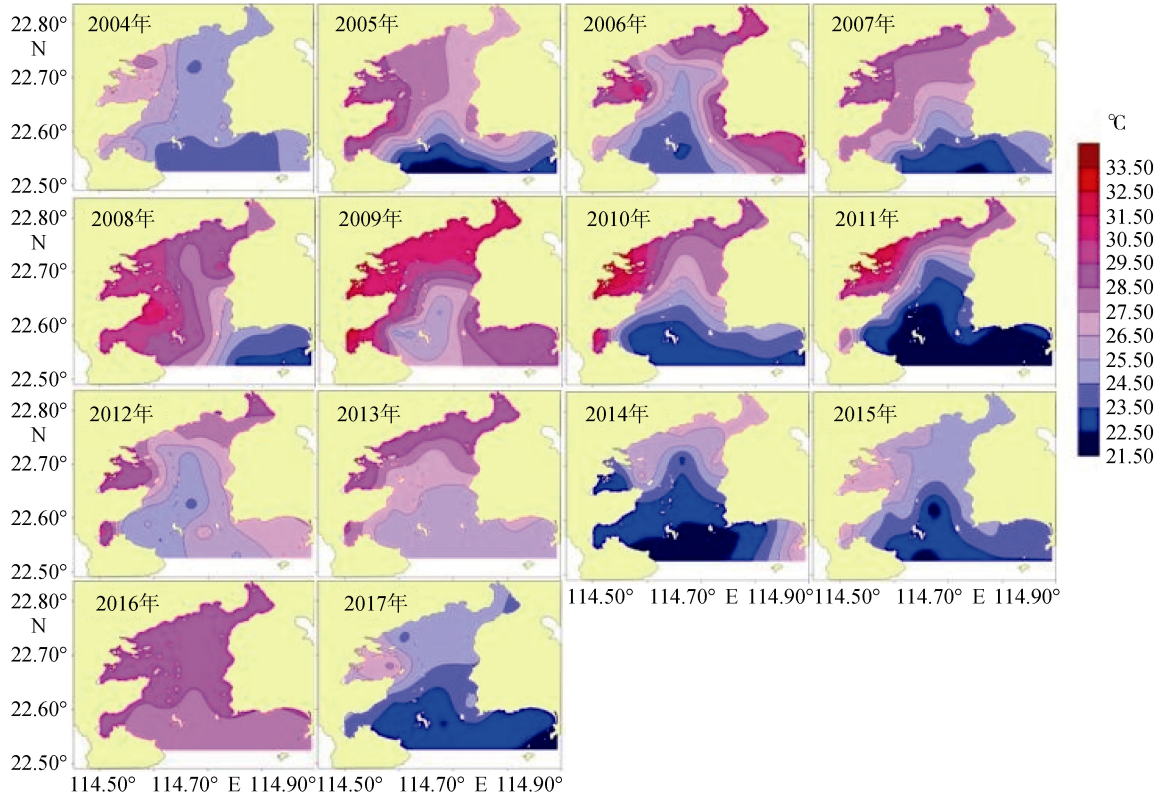


图 2 2004~2017 年大亚湾夏季海水底层温度水平分布图

Fig. 2 Horizontal distributions of summer bottom seawater temperature in Daya Bay from 2004 to 2017

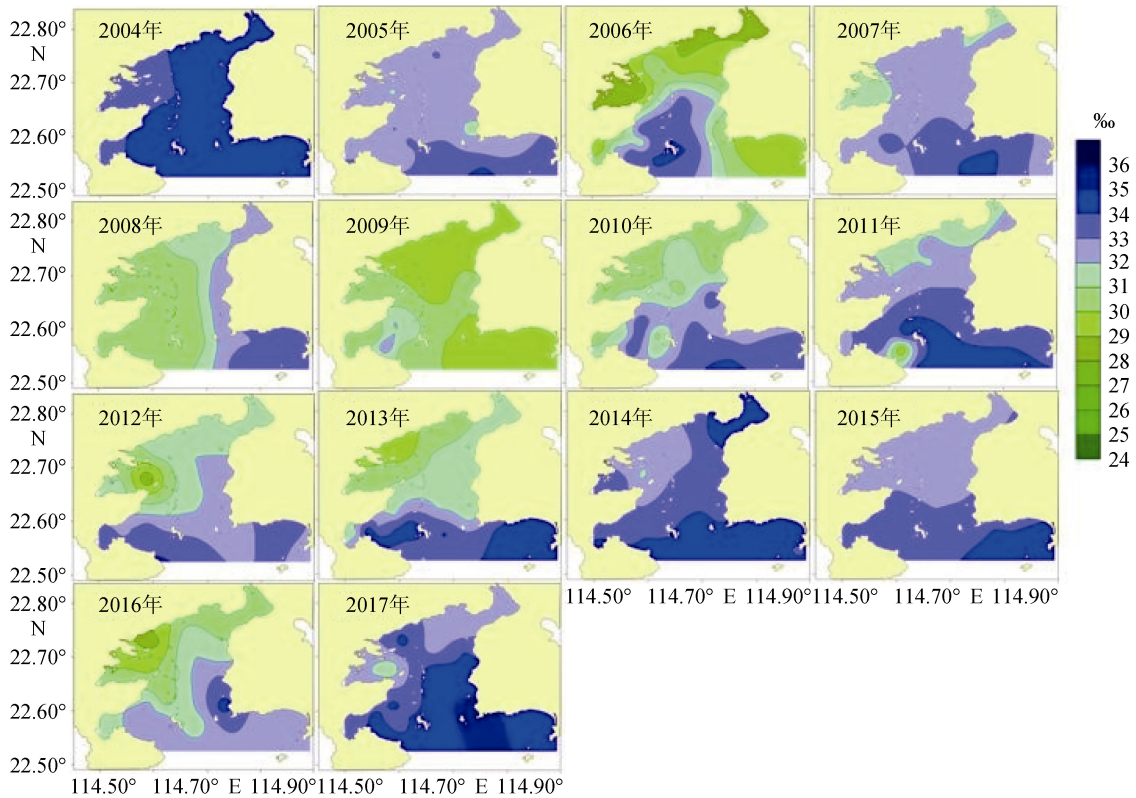


图 3 2004~2017 年大亚湾夏季海水底层盐度水平分布图

Fig. 3 Horizontal distributions of summer bottom seawater salinity in Daya Bay from 2004 to 2017

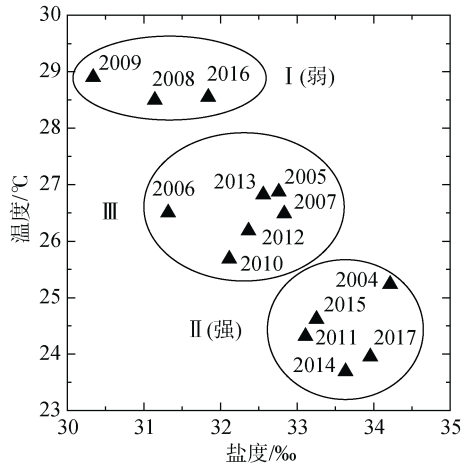


图4 温盐点聚图

Fig. 4 Temperature/Salinity correlation diagram

图中 I 类: 弱入侵年份, II 类: 强入侵年份, III 类: 入侵状态介于强弱之间的年份

I : years of weak intrusion; II : years of strong intrusion; III : years of moderate-intensity intrusion

表 1 海水理化因子对比

Tab. 1 Comparison of seawater physicochemical characteristics

	弱			强		
	最小值	最大值	平均值±SD	最小值	最大值	平均值±SD
温度(°C)	29.03	29.71	29.29±0.37	26.25	27.86	26.75±0.65
盐度(‰)	30.19	31.67	30.89±0.74	32.69	33.87	33.15±0.46
溶解氧(mg/L)	5.65	6.91	6.47±0.71	5.25	6.15	5.68±0.33
pH	8.33	8.43	8.38±0.05	8.15	8.24	8.18±0.04
DIN (µg/L)	42.84	203.21	105.2±85.92	35.53	135.22	75.01±37.66
NO ₃ ⁻ -N (µg/L)	10.13	192.39	84.93±95.42	14.99	100.59	39.08±35.04
NO ₂ ⁻ -N (µg/L)	4.98	11.76	7.24±3.91	2.84	43.93	12.87±17.54
NH ₄ ⁺ -N (µg/L)	5.54	27.73	13.03±12.73	14.66	36.33	23.09±10.2
PO ₄ ³⁻ -P (µg/L)	3.94	17.79	13.05±7.89	2.64	13.87	7.01±4.24
N/P	8.47	33.41	23.09±13.02	10.33	85.46	39.96±31.22

大亚湾海水理化因子水平分布情况见图 5。由图可见, 弱入侵时大亚湾水体整体表现为高温低盐; 强入侵时有明显的低温高盐水团由湾口伸入湾内, 达到湾顶, 大亚湾水体整体呈现低温高盐状态。营养盐水平分布方面, NH₄⁺-N 浓度在弱入侵和强入侵时高值区均位于喜洲岛西北部海域, 高值区以外的其他区域浓度分布均较均匀。无机氮(DIN)浓度在弱入侵时由东部向西部逐渐升高, 高值区位于喜洲岛西北部海域; 强入侵时其水平分布较为均匀。PO₄³⁻-P 浓度在弱入侵时呈现湾外高湾内低的现象, 且由湾外向湾内逐渐递减; 强入侵时其浓度表现为西部高东都低的特点, 高值区位于澳头海域。N/P 在弱入侵

之间, 可能为入侵由弱转强或由强转弱的过渡阶段, 由于其水体状态不明确, 因此, 本文只对弱入侵和强入侵两种情形进行对比分析, 以探讨外海水入侵对大亚湾海水理化特征, 以及浮游植物群落结构的影响。

2.2 海水理化特征对比

不同强度外海水入侵下, 大亚湾海水理化因子总平均值见表 1。由表 1 可见, 随着外海水入侵的加强, 湾内水体温度下降, 盐度上升, 海水 pH 和 DO 均出现下降。营养盐方面, 总无机氮浓度随入侵强度增加而降低(由 105.2 µg/L±85.92 µg/L 降为 75.01 µg/L±37.66 µg/L), 其中占比最大的 NO₃⁻-N 浓度随着入侵强度增加而降低, 而 NO₂⁻-N 和 NH₄⁺-N 浓度均随着入侵强度增加而升高; PO₄³⁻-P 浓度随着入侵强度增加而降低(由 13.05 µg/L±7.89µg/L 降至 7.01 µg/L±4.24 µg/L); N/P 随着入侵强度增加而增加, 但无论入侵强度是弱是强, 湾内水体均表现为 P 限制。

时高值区位于喜洲岛西北部海域, 中心区域甚至超过了 100; 强入侵时表现为湾外高于湾内的特点。

2.3 浮游植物群落结构特征对比

2.3.1 种类数和多样性的差异

大亚湾夏季浮游植物种类数随着外海水入侵的加强而增加(由 72 种增加至 82 种), 其中硅藻、甲藻和其他门类种类数均有所增加, Shannon-wiener 指数和均匀度指数也均表现为上升(表 2)。

2.3.2 浮游植物总丰度和常见种丰度差异

夏季大亚湾浮游植物丰度中硅藻占绝对优势, 浮游植物总丰度和硅藻丰度非常接近, 变化也较一致。随着外海水入侵由弱变强, 总丰度和硅藻丰度出

现下降, 高值区由湾中部和湾口向湾东西两侧转移。在外海水入侵较弱时甲藻丰度高值区出现在湾内和

湾中部, 而当外海水入侵变强时, 湾内和湾中甲藻丰度大幅下降, 而在湾口处出现大幅上升(表 3 和图 6)。

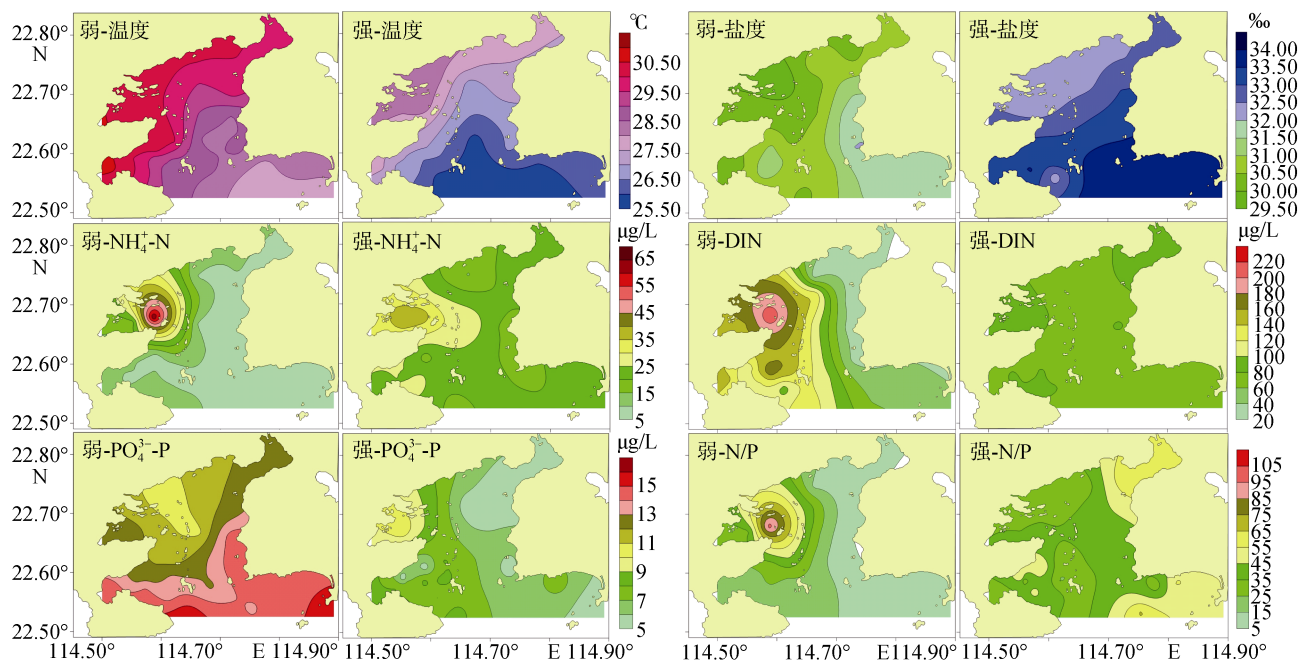


图 5 海水理化因子水平分布

Fig. 5 Horizontal distributions of seawater physicochemical characteristics

表 2 浮游植物种类数和多样性指数对比

Tab. 2 Comparison of species richness, Shannon-Wiener Index, and Pielou's evenness index

	弱	强
总种类数	72±12	82±14
硅藻种类数	56±14	61±12
甲藻种类数	15±3	19±6
其他种类数	2±1	3±1
H'	1.66±0.59	2.21±0.82
J	0.35±0.13	0.48±0.17

此外, 列举了 8 种大亚湾代表性种类的丰度和占比变化(表 3), 并分析了硅藻代表性种类伪菱形藻属(包含伪菱形藻所有种类)、中肋骨条藻和菱形海线藻, 甲藻代表性种类叉角藻的水平分布情况(图 6)。结果显示, 随着外海水入侵由弱变强, 硅藻中的伪菱形藻属和角毛藻属丰度和占比均出现下降, 其中伪菱形藻属的降幅最大, 而中肋骨条藻和菱形海线藻丰度和占比明显增加; 甲藻的种类丰度和占比均较低, 其中除原多甲藻属丰度有所升高外, 其他甲藻(叉甲藻、纺锤甲藻和三叉角藻)丰度和占比均有所下降。水平分布上, 伪菱形藻属丰度水平分布在弱入侵时与硅藻总丰度较一致, 在强入侵时呈现由湾内

向湾外逐渐升高的趋势; 中肋骨条藻和菱形海线藻在弱入侵时呈现相似的分布特征, 表现为西部低东部高, 强入侵时表现为两侧高中部低; 叉角藻在弱入侵时呈现湾外低湾内高的分布, 随着外海水入侵变强, 低丰度区域扩大, 湾内叉角藻丰度出现明显下降。

2.3.3 优势种的变化

在弱入侵时海域优势种全为硅藻类(表 4), 而强入侵时除了常见硅藻优势种(旋链角毛藻、柔弱伪菱形藻、中肋骨条藻和菱形海线藻等)仍然保持优势外, 还出现了甲藻优势种(叉角藻、三叉角藻和锥状斯氏藻)。

2.4 相关性分析

从硅藻和甲藻总丰度与环境因子的相关性可以看到, 硅藻适应高温低盐的环境, 而甲藻与温盐的相关性不明显, 而较适应低磷酸盐环境。从各代表性种类与环境因子的相关性可以看到, 硅藻中的伪菱形藻属和角毛藻属喜好高温低盐环境, 与 DIN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈正相关, 与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 呈负相关; 中肋骨条藻和菱形海线藻喜好低温高盐环境, 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 呈正相关, 与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 DIN 呈负相关。甲藻中的三叉角藻喜好高温低盐高无机氮营养环境, 而叉角藻、纺锤角

藻和原多甲藻属(*Protoperdinium* sp.)与温盐的相关性不明显,但较能适应低无机磷环境。其中 pH、

PO_4^{3-} -P、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、盐度和 DIN 等环境因子与浮游植物呈显著相关(图 7, $P < 0.05$)。

表 3 浮游植物丰度和占比对比

Tab. 3 Comparison of phytoplankton abundance and proportion

种类	弱		强	
	丰度($\times 10^4$ cells/m ³)	占比(%)	丰度($\times 10^4$ cells/m ³)	占比(%)
总丰度	9196.95	—	8781.14	—
硅藻	9139.02	99.37	8715.73	99.26
甲藻	57.19	0.62	62.73	0.71
伪菱形藻属(<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.)	6583.66	71.59	2353.71	26.80
角毛藻属(<i>Chaetoceros</i> sp.)	492.70	5.36	412.62	4.70
中肋骨条藻(<i>Skeletonema costatum</i>)	1291.01	14.04	5546.70	63.17
菱形海线藻(<i>Thalassionema nitzschioides</i>)	38.00	0.41	119.45	1.36
叉角藻(<i>Ceratium furca</i>)	41.67	0.45	14.58	0.17
纺锤角藻(<i>Ceratium fusus</i>)	1.90	0.02	1.76	0.02
三叉角藻(<i>Ceratium trichoceros</i>)	4.86	0.05	3.18	0.04
原多甲藻属(<i>Protoperdinium</i> sp.)	2.01	0.02	3.87	0.04

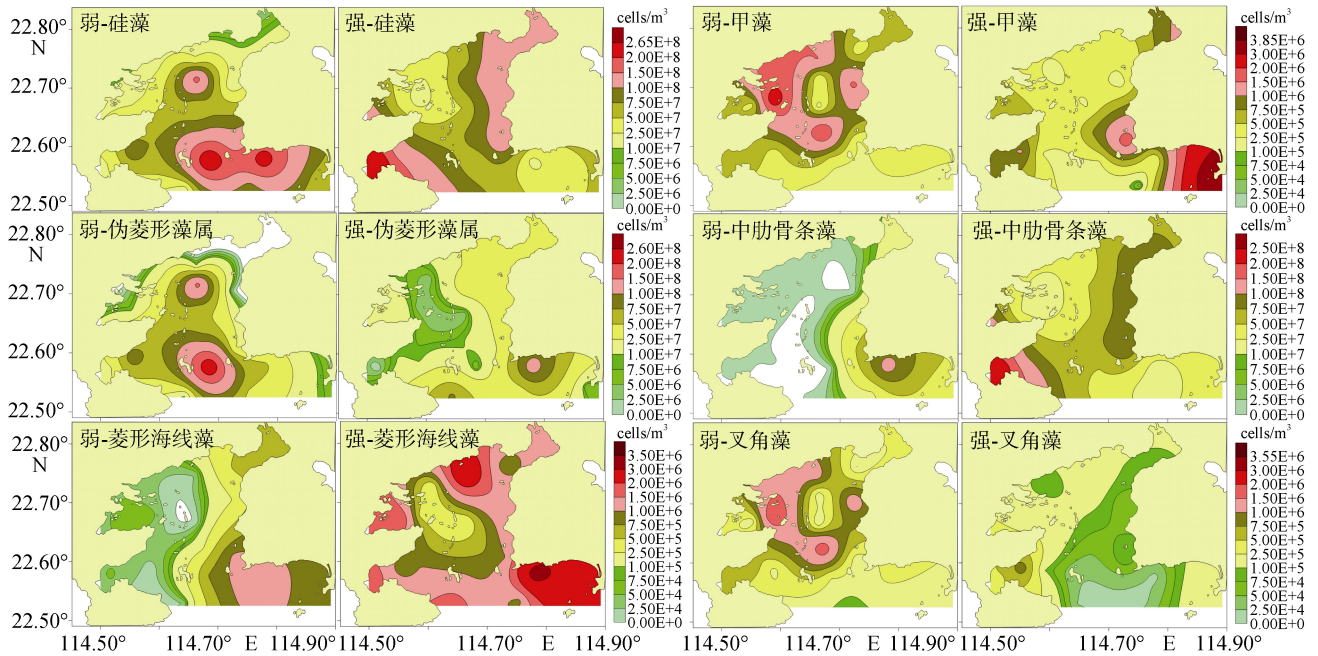


图 6 浮游植物丰度水平分布

Fig. 6 Horizontal distributions of phytoplankton abundance

3 讨论

3.1 夏季外海水入侵对大亚湾海水理化特征的影响

大亚湾夏季经常会会出现湾外高盐冷水入侵的现象,这股入侵海水源自夏季粤东上升流水系,其主要来自于南海北部陆架区 50 m~100 m 深处的海水,

具有低温高盐特征,其入侵强度存在明显的年际差异^[4],入侵强的时候高盐冷水能够深入大亚湾内部达到湾顶部^[5]。这一入侵过程显然控制了大亚湾夏季的海水理化条件,因而直接影响着其生态环境^[1-3]。本文通过分析大亚湾 2004~2017 年各夏季调查航次水体温盐数据,发现大亚湾夏季存在着明显的外海水入侵现象,且不同航次入侵强度存在明显差异。

表 4 各类群浮游植物优势种对比

Tab. 4 Comparison of dominant phytoplankton species

类群	种名	弱	强
	日本星杆藻(<i>Asterionella japonica</i>)	+	
	海洋角管藻(<i>Cerataulina pelagica</i>)	+	
	旋链角毛藻(<i>Chaetoceros curvisetus</i>)	+	+
	柔弱角毛藻(<i>Chaetoceros debilis</i>)		+
	并基角毛藻(<i>Chaetoceros decipiens</i>)	+	
硅藻	中心圆筛藻(<i>Coscinodiscus centralis</i>)	+	
	薄壁半管藻(<i>Hemiaulus membranaceus</i>)	+	
	北方劳德藻(<i>Lauderia borealis</i>)	+	
	柔弱伪菱形藻(<i>Pseudonitzschia delicatissima</i>)	+	+
	中肋骨条藻(<i>Skeletonema costatum</i>)	+	+
	菱形海线藻(<i>Thalassionema nitzschioides</i>)	+	+
	叉角藻(<i>Ceratium furca</i>)		+
甲藻	三叉角藻(<i>Ceratium trichoceors</i>)		+
	锥状斯氏藻(<i>Scrippsiella trochoidea</i>)		+

注：“+”表示有出现，空白表示没有出现

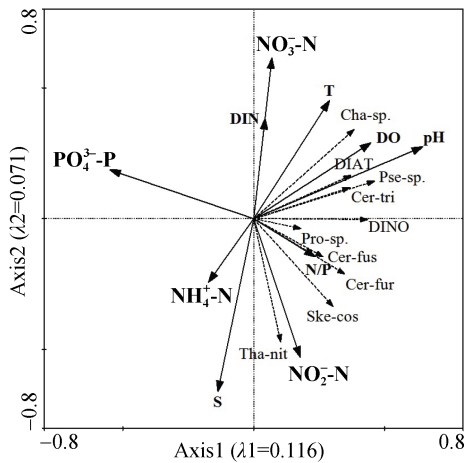


图 7 浮游植物群落结构与环境因子的 RDA 分析

Fig. 7 Redundancy analysis (RDA) ordination plots for environmental parameters and phytoplankton communities

图中浮游植物名称缩写表示如下: DIAT-硅藻、DINO-甲藻、Pse-sp.-伪菱形藻属、Cha-sp.-角毛藻属、Ske-cos-中肋骨条藻、Tha-nit-菱形海线藻、Cer-fur-叉角藻、Cer-fus-纺锤角藻、Cer-tri-三叉角藻、Pro-sp.-原多甲藻属

Phytoplankton species are abbreviated as follows: DIAT-Diatom, DINO-Dinoflagellate, Pse-sp.-*Pseudo-nitzschia* sp., Cha-sp.-*Chaetoceros* sp., Ske-cos-*Skeletonema costatum*, Tha-nit-*Thalassionema nitzschioides*, Cer-fur-*Ceratium furca*, Cer-fus-*Ceratium fusus*, Cer-tri-*Ceratium trichoceros*, Pro-sp.-*Protoperdinium* sp.

入侵外海水具有低温高盐、低 pH 和低 DO 的特征，其由底部入侵湾内与湾内底层水体混合，并使得部分湾内水体由表层自湾口向外海涌出，这种混合和取代过程导致了湾内海水出现明显的温度下降、盐度

上升、pH 下降和 DO 下降的现象，这种现象在底层最为明显。

湾外高盐冷水水团入侵会导致大亚湾水体营养盐含量的变化^[16, 17]。入侵水团无机营养盐浓度表现为: NO₃-N 浓度在 2.80 μg/L~21.00 μg/L, NO₂-N 浓度在 2.10 μg/L 左右, NH₄⁺-N 浓度在 8.26 μg/L 左右, PO₄³⁻-P 浓度在 3.10 μg/L~6.20 μg/L^[18-21]。而大亚湾湾内水体已由早期的贫营养状态发展到当前的中营养状态且局部海域已出现富营养化，其营养盐已由 N 限制转变为 P 限制^[9, 22]，通过对比入侵水团和湾内水体的营养盐浓度，发现入侵水体各营养盐组分浓度均低于湾内水体。本研究通过对比不同强度外海水入侵情况下湾内水体营养盐浓度的变化，发现随着外海水入侵由弱变强，海水 DIN、NO₃-N 和 PO₄³⁻-P 浓度均降低，这是由于营养盐浓度相对较低的外海水入侵至湾内，使得高营养盐浓度的湾内海水被稀释取代所导致。而其中 NH₄⁺-N 和 NO₂-N 浓度确出现升高，这可能与外海水入侵加速了沉积物中 NH₄⁺-N 和 NO₂-N 等营养盐的释放^[23-25]，以及水体氨化作用的加强有关^[26]。N/P 出现升高，这是由于外海水入侵使湾内水体 DIN 和 PO₄³⁻-P 浓度均出现下降，但 PO₄³⁻-P 浓度下降幅度要大于 DIN 下降幅度所致，但不管是弱入侵还是强入侵，大亚湾水体始终表现为 P 限制。

3.2 夏季外海水入侵对浮游植物群落结构的影响

大亚湾夏季入侵水体为南海北部上层水体，其营养盐含量较低，浮游植物丰度较湾内要低，生物多样性指数较高^[27-30]，其入侵湾内必然会导致浮游植物群落结构的变化。不同浮游植物种类对海水环境因子的适应性是不同的^[31]，研究表明，营养盐丰富(N、P 和 Si 充足)的海域，硅藻类群将占绝对优势，而在 P 或 Si 缺乏的海域，往往甲藻类占优势^[32, 33]，甲藻可以在 DIP 缺乏时，利用 DOP 进行生长^[34]。当夏季大亚湾水体处于弱入侵状态时，水体表现为高温低盐，此时由于生活污水、地表径流、核电站废水排放、海水养殖、珠江口水体等输入作用而没有外海水的稀释，使得大亚湾水体中 N、P 等营养盐含量处于较高水平，此时浮游植物中硅藻丰度占绝对优势，优势种均为硅藻类，此时硅藻中的伪菱形藻属一般会出现爆发性增殖成为绝对优势种，从而导致浮游植物种类数、生物多样性指数等降低。随着外海水入侵变强，湾内水体向低温高盐转变，N、P 等营

养盐含量均下降,此时,硅藻的生长受到限制,丰度和占比出现下降,其中由于中肋骨条藻和菱形海线藻更喜好低温高盐环境,且适应低无机磷环境,此两种藻的丰度和占比出现上升,有研究表明菱形海线藻和中肋骨条藻在上升流中心检出率较高,并能在上升流盛期形成水华,与下层水涌升密切相关^[35]。由于甲藻更能适应 DIP 缺乏的环境^[34],所以甲藻丰度维持稳定,占比有所上升。外海水的入侵虽然会稀释湾内海水而导致营养盐含量的下降,但其入侵过程是持续性的,其入侵过程中能够补充因浮游植物生长而消耗的氮源和磷源,使得营养盐维持在一个适中水平,此时硅藻和甲藻各种类生长较为均衡,种类数较多,生物多样性水平也较高。

此外,外海水入侵会影响浮游植物的水平分布。一是通过改变海水理化特征来影响浮游植物水平分布,受外海水入侵影响较强的区域,海水理化特征由原来的高温低盐高营养盐变为低温高盐低营养盐状态,由于不同浮游植物对环境因子的适应性不同,如伪菱形藻属和角毛藻属喜好高温低盐高营养盐环境,导致该区域它们的丰度出现下低;中肋骨条藻和菱形海线藻喜好低温高盐,且能适应低营养盐环境,因此该区域它们的丰度而出现升高。二是通过改变湾内水体流向来影响浮游植物水平分布,本研究中出现随着外海水入侵的加强,硅藻丰度高值区由湾中部向湾东西两侧转移,其中伪菱形藻属丰度高值区由湾内部向湾口转移。外海水由底层入侵至湾内,湾内水体则由上层向湾两侧和湾口推移,由于外海水浮游植物丰度低,导致被外海水占据的水域浮游植物丰度减少,而湾内水体浮游植物丰度高,导致大亚湾两侧和湾口出现浮游植物高值区。

致谢: 向国家海洋局南海环境监测中心和南海海洋研究所所有参与过相关航次样品采集和分析的工作人员致以衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 韩舞鹰, 马克美. 粤东沿岸上升流的研究[J]. 海洋学报(中文版), 1988, 10(1): 52-59.
Han Wuying, Ma Kemei. Study on offshore upwelling off eastern guangdong[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1988, 10(1): 52-59.
- [2] 张炳楷. 大亚湾 1987 年与 1989 年海水特征的差异[J]. 台湾海峡, 1992, 11(1): 35-41.
Zhang Bingkai. Difference of seawater characteristics in Daya Bay in 1987 and 1989[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1992, 11(1): 35-41.
- [3] Li L, Gang Z, Xu J D, et al. Phenomena of cold water invasion on to Daya Bay during summer 1987[C]//Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Collections of Papers on Marine Ecology in the Daya Bay(II). China Ocean Press, Beijing, 1990: 95-99.
- [4] 许金电, 蔡尚湛, 宣莉莉, 等. 粤东至闽南沿岸海域夏季上升流的调查研究[J]. 热带海洋学报, 2014, 33(2): 1-9.
Xu Jindian, Cai Shangzhan, Xuan Lili, et al. Observational study on summertime upwelling in coastal seas between eastern Guangdong and southern Fujian[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2014, 33(2): 1-9.
- [5] Su E J, Chuang W S, Hsueh R Y. Proceedings of the symposium on the physical and chemical oceanography of the china seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 58-68.
- [6] Brink K H, Jones B H, Leer J C V, et al. Physical and biological structure and variability in an upwelling center off Peru near 15°C during March[M]. Coastal Upwelling: American Geophysical Union, 2013.
- [7] Hao Y, Tang D, Boiceno L, et al. Environmental ecological response to increasing water temperature in the Daya Bay, Southern China in 1982-2012[J]. Natural Resources, 2016, 7(4): 184-192.
- [8] Li T, Liu S, Huang L M, et al. Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent[J]. Marine Ecology Progress, 2011, 424: 75-85.
- [9] Wang Y S, Lou Z P, Sun C C, et al. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004[J]. Marine Pollution Bulletin, 2008, 56(11): 1871-1879.
- [10] Wu M L, Wang Y S, Wang Y T, et al. Scenarios of nutrient alterations and responses of phytoplankton in a changing Daya Bay, South China Sea[J]. Journal of Marine Systems, 2017, 165: 1-12.
- [11] 丘耀文, 王肇鼎, 朱良生. 大亚湾海域营养盐与叶绿素含量的变化趋势及其对生态环境的影响[J]. 台湾海峡, 2005, 24(2): 131-139.
Qiu Yaowen, Wang Zhaoding, Zhu Liangsheng. Variation trend of nutrient and chlorophyll II contents and their effects on ecological environment in Daya Bay[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24(2): 131-139.
- [12] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(5): 85-95.
Wang Youshao, Wang Zhaoding, Huang Liangmin. Environment changes and trends in Daya Bay in recent 20 years[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(5):

- 85-95.
- [13] 刘瑞玉. 中国海洋生物名录[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 35-185.
Liu R Y. Checklist of Marine Biota of China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2008: 35-185.
- [14] Utermöhl H. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-Methodik[J]. *Mitteilungen Int Ver Limnol*, 1958, (9): 263-272.
- [15] Braak C J F T. Canonical community ordination. Part I: Basic theory and linear methods. *Ecoscience*[J]. *Ecoscience*, 1994, 1(2): 127-140.
- [16] Wang Y S, Lou Z P, Sun C C, et al. Multivariate statistical analysis of water quality and phytoplankton characteristics in Daya Bay, China, from 1999 to 2002[J]. *Oceanologia*, 2006, 48(2): 193-211.
- [17] Han W Y. Carbon Cycles of Daya Bay and the Preal River[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [18] Wong G T F, Pan X, Li K Y, et al. Hydrography and nutrient dynamics in the Northern South China Sea Shelf-sea (NoSoCS)[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 117: 23-40.
- [19] Xu J, Yin K, He L, et al. Phosphorus limitation in the northern South China Sea during late summer: Influence of the Pearl River[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2008, 55(10): 1330-1342.
- [20] 彭欣, 宁修仁, 孙军, 等. 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 3959-3968.
Peng Xin, Ning Xiuren, Sun Jun, et al. Responses of phytoplankton growth on nutrient enrichments in the northern South China Sea[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 3959-3968.
- [21] 袁梁英. 南海北部营养盐结构特征[D]. 厦门: 厦门大学, 2005: 43-57.
Yuan Liangying. Distribution and characteristics of nutrients in the northern south china sea[D]. Xiamen: Xiamen University, 2005: 43-57.
- [22] 彭云辉, 王肇鼎, 高红莲, 等. 大鹏澳养殖网箱水体的磷酸盐、硅酸盐[J]. *南海研究与开发*, 2002, 2: 30-36.
Peng Yunhui, Wang Zhaoding, Gao Honglian, et al. Phosphate and silicate in aquaculture cage of Dapeng Bay[J]. *Nanhai Yanjiu Yu Kaifa*, 2002, 2: 30-36.
- [23] 丘耀文, 王肇鼎, 高红莲. 大亚湾养殖海区沉积物中营养盐的解吸——吸附[J]. *热带海洋学报*, 2000, 19(1): 76-80.
Qiu Yaowen, Wang Zhaoding, Gao Honglian. Desorption-adsorption of nutrients in sediments of cultural sea area at Daya Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2000, 19(1): 76-80.
- [24] 丘耀文, 王肇鼎, 高红莲, 等. 大亚湾养殖水域沉积物-海水界面营养盐扩散通量[J]. *热带海洋学报*, 1999, 3: 83-90.
Qiu Yaowen, Wang Zhaoding, Gao Honglian. Diffusive fluxes of nutrients across sediment-seawater interface in cultural sea area at Daya Bay[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1999, 3: 83-90.
- [25] Waldron H N, Probyn T A. Short-term variability during an anchor station study in the southern Benguela upwelling system: Nitrogen supply to the euphotic zone during a quiescent phase in the upwelling cycle[J]. *Progress in Oceanography*, 1991, 28(1-2): 153-166.
- [26] 暨卫东, 黄尚高. 台湾海峡西部海域营养盐变化特征 I. 水系混合及浮游植物摄取对硅含量变化影响的统计分析[J]. *海洋学报(中文版)*, 1990, 12(1): 38-47.
Ji Weidong, Huang Shangao. Characteristics of nutrients-variation in the western Taiwan Strait I. Statistical analysis of the effects of water mixing and phytoplankton uptake on silicon content[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(1): 38-47.
- [27] 乐凤凤, 孙军, 宁修仁, 等. 2004 年夏季中国南海北部的浮游植物[J]. *海洋与湖沼*, 2006, 37(3): 238-248.
Le Fengfeng, Sun Jun, Ning Xiuren, et al. Phytoplankton in the northern south china sea in summer 2004[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(3): 238-248.
- [28] 马威, 孙军. 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(3): 621-632.
Ma Wei, Sun Jun. Characteristics of phytoplankton community in the northern South China Sea in summer and winter[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(3): 621-632.
- [29] 官相忠, 马威, 田伟, 等. 2009 年夏季南海北部的网采浮游植物群落[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(4): 48-54.
Gong Xiangzhong, Ma Wei, Tian Wei, et al. Net-phytoplankton community in the northern south china sea in summer 2009[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(4): 48-54.
- [30] 薛冰, 孙军, 李婷婷. 2014 年夏季南海北部浮游植物群落结构[J]. *海洋学报*, 2016, 38(4): 54-65.
Xue Bing, Sun Jun, Li Tingting. Phytoplankton community structure of northern South China Sea in summer of 2014[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(4): 54-65.
- [31] 林更铭, 杨清良. 台湾海峡小型浮游植物的物种多样性和分布特征[J]. *生物多样性*, 2007, 15(1): 31-45.
Lin Gengming, Yang Qingliang. Species diversity and the distribution of micro-phytoplankton in the Taiwan Strait[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(1): 31-45.
- [32] Egge J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations?[J]. *Journal of Marine Systems*. 1998, 16: 191-198.

- [33] Shen Z L. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2001, 52(2): 211-224.
- [34] Lin X, Zhang H, Cui Y, et al. High sequence variability, diverse subcellular localizations, and ecological implications of alkaline phosphatase in dinoflagellates and other eukaryotic phytoplankton[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2012, (3): 235-254.
- [35] Hong H S, Qiu S Y, Ruan W Q, et al. Minnan-Taiwan bank fishing ground upwelling ecosystem study[M]. Beijing: Science Press, 1991: 1-10.

Effects of shelf seawater intrusion on phytoplankton community structure in Daya Bay in the summer

YANG Xi^{1, 2, 3}, TANG Ye-hui^{1, 2}

(1. South China Sea Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. South China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China)

Received: March 21, 2019

Key words: Daya Bay; shelf seawater intrusion; phytoplankton; nutrients

Abstract: Summer seawater intrusion caused due to coastal upwelling off eastern Guangdong occurs in Daya Bay and exhibits annual variation in its strength. This study analyzed the effects of seawater intrusion on the phytoplankton community structure using summer survey data from 2004 to 2017 in Daya Bay. Results demonstrated that strong shelf seawater intrusion results in low-temperature and high-salinity water in Daya Bay. The concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) diluted by the intrusion water decreased, which thereby changed the phytoplankton community structure. The richness of diatoms and dinoflagellates and the Shannon–Wiener index of phytoplankton increased, whereas the total abundance of phytoplankton and diatoms, but not dinoflagellates, decreased. The abundance of regular species such as *Pseudo-nitzschia* sp., *Chaetoceros* sp., and *Ceratium furca* decreased, whereas that of *Skeletonema costatum* and *Thalassionema nitzschioides* increased. The dominant group changed from single diatoms to diatoms with coexistent dinoflagellates. Moreover, seawater intrusion also has the potential to change the horizontal distribution patterns of phytoplankton by affecting the horizontal distribution patterns of seawater physicochemical characteristics and the flow direction of upper water.

(本文编辑: 谭雪静)