

DOI: 10.3724/SP.J.1035.2012.00724

海南西部近岸浮游植物的周年变化及主要关联因素

王雨 林茂 陈兴群 林更铭

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

摘要: 报道了 2008—2009 年 4 季度海南西部近岸浮游植物群落的周年动态并探讨其主要关联因素。165 份样品经鉴定共有浮游植物 4 门 74 属 155 种(含 5 变型和 2 变种), 周年平均丰度为 $(6.36 \pm 4.75) \times 10^3$ cells/L。硅藻在物种组成和丰度上均占绝对优势, 其次为甲藻, 蓝藻(束毛藻)在 7 月增殖。主要优势种为菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、笔尖根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)、束毛藻(*Trichodesmium* spp.)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)等。物种组成的季节差异较大, 10 月浮游植物种类贫乏, 1 月次之, 4 月、7 月最丰富。丰度 10 月最高, 季节差异并不明显。束毛藻在 4 月、7 月呈斑块状群聚分布。浮游植物周年平均丰度并不高($< 1.0 \times 10^4$ cells/L)。不同季节优势种有明显的交错和变化, 菱形海线藻、奇异棍形藻、具槽帕拉藻为全年优势种。浮游植物物种多样性指数和均匀度都表现出较高的值, 均匀度与多样性指数的季节变化特点基本一致, 群落多样性高的季节物种均匀度也好。物种多样性指数指示调查区水体遭受污染程度低, 水质状况优。调查区各季节的浮游植物丰度与温度之间无显著的相关关系, 1 月丰度与盐度则呈密切负相关关系。10 月浮游植物丰度与无机氮(DIN)呈密切的正相关关系。7 月浮游植物丰度与活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)呈密切的负相关关系。浮游动物对浮游植物的摄食压力直接影响到后者的丰度变动, 并伴随着海区生态系统的相关复杂现象及生物学过程的作用。

关键词: 浮游植物, 群落结构, 周年变化, 环境因子, 海南西部近岸

中图分类号: Q145 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2012)04-0724-11

海洋浮游植物作为初级生产者和食物链基础环节, 对海洋渔业生产量和全球的气候变化产生重要影响。浮游植物和海洋环境之间有密切关系, 其种群结构、分布和变动反映了海洋环境的特征和状态^[1, 2]。因而, 渔业资源开发利用、海洋环境质量评价和水域生产力评估均须系统地了解海洋浮游植物群落状况。

长期以来, 对海南岛海域的生态环境全面、系统的调查研究并不多见^[3]。仅 1959 年的全国海洋综合调查和 1980—1986 年广东省海岸带和海洋资源综合调查对海南南部海域的资源环境做过较为详细的报道^[3-5]。1998—1999 年国家海洋勘测专项对海南南部海域进行了 4 个航次调查, 但该区域的浮游植

物资料至今几无报道可阅^[6]。至 2002 年后, 海南南部海域^[6]、三亚湾^[7-11]、榆林湾和红沙港^[12]、北部澄迈湾^[13]以及东部毗邻南海北部开阔海域^[14-16]的浮游植物调查研究才有一些报道产出, 而西部海域的浮游植物调查研究还没有公开发表的数据可考证。

随着海南国际旅游岛的开发建设, 国内外大量的投资涌入岛内, 新一轮的海洋开发热潮正在掀起。位于海南西部的昌江素有“矿产基地”、“水泥之都”之称, 又是海南西部毗邻北部湾的渔场所在, 并拥有成片珊瑚礁。目前, 港口建设、临港工业区及核电站等正火热在建, 给昌江近海海洋环境造成巨大压力, 海洋生物的保育显得十分迫切。本文依据

收稿日期: 2011-05-19; 修订日期: 2012-03-17

基金项目: 国家 908 专项成果集成(908-ZC-II-02); 科技部海洋公益性行业科研专项(200805064, 200905009-3); 国家海洋局青年海洋科学基金(2009130); 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务基金(海三科 2009031)资助

作者简介: 王雨(1981—), 男, 贵州长顺人; 助理研究员; 主要从事浮游生物生态的研究。E-mail: wy2007607@126.com

通讯作者: 林茂, E-mail: lm3011@126.com

2008—2009 年海南西部近岸昌江拟建核电选址附近海域的 4 季度海洋生态调查数据资料, 报道浮游植物群落结构、丰度分布及周年变动、优势种群组成及群落多样性, 讨论浮游植物与温度、盐度、营养盐及浮游动物摄食压力等的关联关系, 以期为海南西部海洋生物保育及拟建昌江核电工程的海域使用论证增添生态基线资料, 为海洋资源可持续利用与发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查站位和环境参数测定分析方法

2008 年 10 月(秋)、2009 年 1 月(冬)、4 月(春)和 7 月(夏)共 4 季度分别于海南西部昌江近岸(108.7°—109.2°E, 19.3°—19.7°N)布设 21 个浮游植物采样站位(图 1), 同期进行水文和化学调查。温度、盐度等环境参数用美国 YSI 水质监测系统现场测定。叶绿素 *a*、营养盐取样分析, 参照《海洋调查规范》(GB/T—2007)^[17]进行测定。

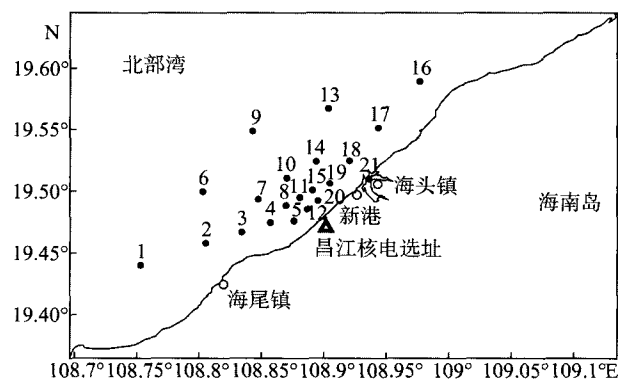


图 1 海南西部昌江近岸浮游植物采样站位

Fig. 1 Sampling stations of phytoplankton in Changjiang coastal water of western Hainan Island

1.2 浮游植物取样和分析方法

在上述站位分表层(离水面 0.5 m)和底层(离海底 1 m)各取 500 mL 水样, 样品用 1% 中性甲醛固定。实验室内分析样品经沉降浓缩至一定体积后, 抽取分样在光学镜下鉴定和计数, 并按种类计算丰度(cells/L)。物种多样性指数(H')、均匀度(J')、优势度

(Y)分别采用以下计算公式^[18]: $H' = -\sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$;

$J' = \frac{H'}{\log_2 S}$; $Y = \frac{n_i}{N} f_i$ 。式中 S 为样品中的种类数,

p_i 为第 i 种的细胞丰度与样品总丰度的比值, n_i 为第

i 种的细胞丰度, N 为每种出现的细胞丰度的总和, f_i 为第 i 种的测站出现率。

2 结果

2.1 种类组成及季节变化

海南西部昌江近岸海域 2008—2009 年 4 季度所获样品 165 份, 共鉴定浮游植物 155 种(含 5 个变型和 2 个变种), 分属于硅藻、甲藻、蓝藻和金藻 4 个门类。硅藻 124 种, 占有物种的 80.0%; 甲藻 27 种, 占有物种的 17.4%; 蓝藻和金藻各 2 种, 合占 2.6%。种类组成以近岸广温种居多, 占有物种的 67.3%, 暖水暖温种占有率为 23.5%, 体现较明显的热带、亚热带区系特性。这一结果与其他研究者对海南其他海区调查的研究结果一致^[6-9, 13]。

硅藻为浮游植物的主体, 对浮游植物种类组成与丰度变化均起决定作用, 成为浮游植物优势种的最主要构成者, 以圆筛藻(*Coscinodiscus*)、角毛藻(*Chaetoceros*)、根管藻(*Rhizosolenia*)为主要类群, 分别为 17 种、15 种和 9 种。幅杆藻(*Bacteriastrum*)、斜纹藻(*Pleurosigma*)、菱形藻(*Nitzschia*)也检出较多种类。甲藻以角藻(*Ceratium*)和原多甲藻(*Protoperidinium*)种类较丰富。硅藻主要种类有菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)、具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、洛伦菱形藻(*Nitzschia lorenziana*)、细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*)、佛氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)在水体两层均有较高检出率, 全年皆有。骨条藻(*Skeletonema*)、蜂腰双壁藻(*Diploneis bombus*)在近岸检出较多。此外, 柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)、平滑角毛藻(*Chaetoceros laevis*)和笔尖根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)等也较常见, 分布于 4、7 月的离岸水体。甲藻的丰度相对较低, 但种类较多, 大多为广温广布种, 譬如, 具尾鳍藻(*Dinophysis caudata*)、纺锤角藻(*Ceratium fusus*)、旋沟藻(*Gyrodinium spirale*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans*)、塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)等。此外, 有少数热带高盐种类, 如透镜翼藻(*Diplopsalis lenticula*)、掌状足甲藻(*Podolampas palmipes*)、三叉角藻(*Ceratium trichoceros*)、扁平原多甲藻(*Protoperidinium crassipes*)、喜高温高盐。蓝藻仅束毛藻 1 属, 四季皆有, 半数以上测站均检出, 7 月丰度较高, 成为优势种。

金藻检出在近岸, 丰度低, 无优势地位。

浮游植物物种构成的季节变化较大, 各季均以硅藻为主(表 1)。10 月浮游植物种类较贫乏, 而 4 月、7 月种类最丰富, 这与该季节南海暖流向北部湾内延伸^[19], 加之琼州海峡海流西行受阻造成沿岸上升流^[19-21]有关, 暖水和大洋性种类在此时节明显增多, 如在近岸海域一般不常见的热带种类: 平滑角毛藻 4 月检出率为 34.2%; 束毛藻(*Trichodesmium*)7 月检出率达 41.5%, 斑块状分布。甲藻在 10 月、1 月检出 20 种以下, 而 4 月、7 月则增加到最高 26 种。1 月浮游植物种类较 10 月丰富, 这与 1 月风浪较大, 出现较多的底栖性羽纹硅藻有关, 譬如, 斜纹藻、蜂腰双壁藻在 1 月检出率分别为 80.5%和 43.9%。4 季度均检出的种类有菱形海线藻、奇异棍形藻、具槽帕拉藻、细弱海链藻、笔尖形根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)、洛伦菱形藻、尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)、红海束毛藻(*Trichodesmium erythraeum*)等共 66 种, 占总种类的 35.5%。4 季度仅在个别站位(1—4 个站)检出的物种占总物种累计不到 16.0%, 而在半数以上站位均检出的物种为 60%以上, 说明浮游植物物种组成在空间站位分布上并无

显著差异。

2.2 浮游植物丰度的时空分布

调查区浮游植物丰度周年平均为 $(6.36 \pm 4.75) \times 10^3$ cells/L($n=165$), 比南部三亚湾 1998—1999 年网样浮游植物平均丰度^[7]低 3 倍; 比 2004 年三亚湾网样浮游植物^[9]高 9 倍; 较之北部澄迈湾水样浮游植物^[13]高 41 倍; 比南部红沙港水样浮游植物^[12]低 243 倍; 比 1998—1999 年海南以南海域大尺度的网样浮游植物^[6]高 206 倍(表 2)。在排除分析方法和采样方式的差别之外, 采样地域的空间差异较明显, 也可能是因为海南岛沿岸海水的磷酸盐和硅酸盐含量极低所致^[4, 6, 11]。海南西部昌江沿岸地处中热带海域, 10 月、1 月、4 月和 7 月表层平均水温分别为 28.06℃、23.58℃、28.17℃、30.14℃, 全年均适宜浮游植物生长, 营养盐消耗大, 而且河流补给营养物质有限, 浮游植物平均丰度并不高($<1.0 \times 10^4$ cells/L), 营养盐极可能成为浮游植物增殖的限制因子。

浮游植物丰度的周年变化 调查区浮游植物丰度季节变化小, 10 月、4 月丰度较多, 而 1 月、7 月丰度较少, 平均最高丰度(10 月)与最低丰度(7 月)相差不足 1 倍(表 3), 这与周伟华等^[10]对三亚湾以及

表 1 海南西部昌江近岸浮游植物类群的周年变化

Tab.1 Annual variation of major groups of phytoplankton in Changjiang coastal water of western Hainan Island

主要类群 Major Group	季节 Season			
	2008—10	2009—1	2009—4	2009—7
硅藻 Diatom	32 属 93 种	34 属 97 种	41 属 116 种	38 属 104 种
甲藻 Dinoflagellate	5 属 14 种	7 属 19 种	10 属 21 种	10 属 26 种
蓝藻 Cyanophyceae	1 属 1 种	1 属 2 种	1 属 2 种	1 属 2 种
金藻 Chrysophyceae	0	1 属 1 种	1 属 1 种	0

表 2 海南西部昌江和海南其他海域的浮游植物丰度、多样性和均匀度比较

Tab. 2 Comparison of cell abundance, diversity, evenness of phytoplankton between Changjiang coastal waters and other sea regions in Hainan Island

海域 Sea Regions	时间 Time	丰度 Abundance $\times 10^3$ cells/L	多样性指数 Diversity index (H')	均匀度 Evenness index (J')	分析方法 Method	文献出处 Reference
三亚湾 Sanya Bay	1998—1999 年	平均 15.65	平均 2.24	平均 0.74	网样分析	Huang, <i>et al.</i> , 2003
三亚湾 Sanya Bay	2004 年	0.065—1.65, 平均 0.88	1.92—4.76, 平均 3.76	0.60—0.74, 平均 0.69	网样分析	杨志浩等, 2007
红沙港 Hongsha Port	2006 年 5—6 月	153.90—4546.3, 平均 2269.53	0.48—2.10, 平均 0.88	0.17—0.58, 平均 0.39	水样浓缩	朱白婢等, 2007
澄迈湾 Chenmai Bay	2004 年 7 月	130.00—459.00, 平均 268.00	1.45—3.31, 平均 2.48	0.39—0.74, 平均 0.62	水样浓缩	周主光等, 2007
海南以南海域 Southern Hainan Waters	1998—1999 年	0.0012—0.32, 平均 0.032	0.31—4.97, 平均 3.41	0.07—0.93, 平均 0.81	网样分析	戴明等, 2007
海南西部近岸 Western Hainan Coast	2008—2009 年	0.93—25.72, 平均 6.36 $\pm$ 4.75	1.89—4.35, 平均 3.15	0.24—0.95, 平均 0.80	水样浓缩	本研究

戴明等^[6]对海南岛以南海域浮游植物时空分布特征的研究结果一致, 三亚湾和海南岛以南海域浮游植物丰度及生物量均以秋季最高, 且季节差异不大。调查区浮游植物丰度组成始终以硅藻占优势, 10月、1月硅藻丰度处绝对优势, 分别占有 91.46%和 95.27%; 4月、7月季硅藻丰度比例相对减小, 在夏季减少尤为明显, 分别为 81.94%和 75.69%; 而适温较高的蓝藻和甲藻丰度则大幅上升。甲藻丰度比例由 10月、1月的 5.80%和 1.86%上升到 4月、7月的 10.48%和 11.64%, 最大增幅约 5 倍; 蓝藻丰度比例由 10月、1月的 2.74%和 1.09%上升到 4月、7月的 6.35%和 12.08%。蓝藻丰度上升尤为明显, 其丰度比例最高较 1 月增大约 10 倍, 主要归因于束毛藻丰度在高温季节的迅速增殖, 这在海南以南海域以及三亚湾也有相同的观测结果^[6-9]。

海南沿岸毗邻南海和北部湾, 真光层水域蓝藻类群主要为来自外源性束毛藻, 且主要出现于南海季风转换期和西南季风控制期的 3—8 月^[7, 8, 22], 并在海南西北部的近岸水域呈现斑块分布^[22]。夏季北部湾多西南季风, 在其推动下, 南海水沿着湾的西侧北上, 湾内的水顺着湾的东边南下, 形成一个环流。南下的湾内水, 又受到来自琼州海峡自东向西流动的南海水的阻挡, 从而在海南岛北部和西部流速逐渐减慢^[19, 22]。因此, 海南西北部近岸水域蓝藻(主要为束毛藻)的斑块分布可能是海水的作用使得束毛藻在此形成群聚^[7, 8, 22]。同时, 硅藻丰度在高温低盐的夏季 7 月(30.14℃、31.22)明显减少, 束毛藻此时高丰度密集, 这是因为氮营养盐的含量变化不但使浮游植物丰度整体明显改变, 还影响 N/P 比值^[9-12], 造成浮游植物群落结构发生相应变化。

浮游植物丰度的平面分布 不同季节的浮游植物丰度分布有一定变化(图 2、表 3)。10 月浮游植物丰度介于 1.29×10^3 — 18.87×10^3 cells/L, 平均

7.01×10^3 cells/L。最大高值区位于离岸水域, 丰度大于 10.0×10^3 cells/L, 次高值区位于昌江核电近岸水域, 都是由于具槽帕拉藻密集所致。具槽帕拉藻的高值检出在离岸测站的底层, 在离岸形成高值区, 说明具槽帕拉藻既可在表层生活也可在底层生存。变异幅杆藻(*Bacteriastrum varians*)、蜂腰双壁藻、菱形海线藻对高值区丰度贡献也较大。1 月浮游植物丰度介于 1.05×10^3 — 17.90×10^3 cells/L, 平均 6.12×10^3 cells/L。在近岸水域形成高于 8.0×10^3 cells/L 的高值区, 位于昌江核电至海尾镇的近岸; 次高值区位于新港近岸, 总的分布趋势自离岸向近岸增长。菱形海线藻、细弱海链藻、洛伦菱形藻对高值区丰度贡献较大。4 月浮游植物丰度介于 1.30×10^3 — 25.72×10^3 cells/L, 平均 6.27×10^3 cells/L。高值区在新港近岸, 而离岸水域为小于 3.0×10^3 cells/L 的稀疏区, 总的分布趋势自离岸向近岸增长。奇异棍形藻、菱形海线藻丰度占浮游植物丰度的极高比例(31.44%、20.75%)对浮游植物丰度的平面分布起支配作用。此外, 束毛藻在近岸群聚, 呈群体生活, 许多细胞形成藻丝(trichome), 因此较其他单细胞藻类更容易受海流、风等的影响, 从而形成斑块分布^[22, 23]。7 月浮游植物丰度介于 0.93×10^3 — 15.92×10^3 cells/L, 平均 6.02×10^3 cells/L。最大高值区位于昌江核电至海尾镇近岸, 次高值区位于新港近岸, 由于笔尖形根管藻、束毛藻、菱形海线藻密集所致, 总体分布趋势自离岸向近岸增长。

海南西部昌江近岸是浅水性海域, 即便在冬春两季, 水体透明度仍较高, 平均分别为 4.1 m 和 3.4 m, 除 21 号测站外, 底层均有充足的阳光进行光合作用, 因而在任何季节里, 浮游植物都不出现“被带到临界深度下方”的情况, 有充足的光照, 在冬季也可持续生产^[24, 25], 光基本上不会成为浮游植物生长的限制性因子。此外, 6—7 月琼州海峡海流西行受

表 3 海南西部昌江近岸浮游植物丰度的周年变化($\times 10^3$ cells/L)
Tab. 3 Annual variation of phytoplankton abundance in Changjiang coastal water of western Hainan Island

季节 Season	均值 Mean	变幅 Range	硅藻 Diatom		甲藻 Dinoflagellate		蓝藻 Cyanophyceae		金藻 Chrysophyceae	
			丰度	%	丰度	%	丰度	%	丰度	%
2008.10	7.01	1.29—18.87	6.39	91.46	0.41	5.80	0.20	2.74	0	0
2009.1	6.12	1.05—17.90	5.81	95.27	0.11	1.86	0.10	1.09	0.06	1.01
2009.4	6.27	1.30—25.72	5.18	81.94	0.69	10.48	0.41	6.35	0.08	1.22
2009.7	6.02	0.93—15.92	4.71	75.69	0.63	11.64	0.73	12.08	0	0
平均 Mean	6.36	6.02—7.01	5.52	86.97	0.48	7.57	0.34	5.36	0.07	1.12

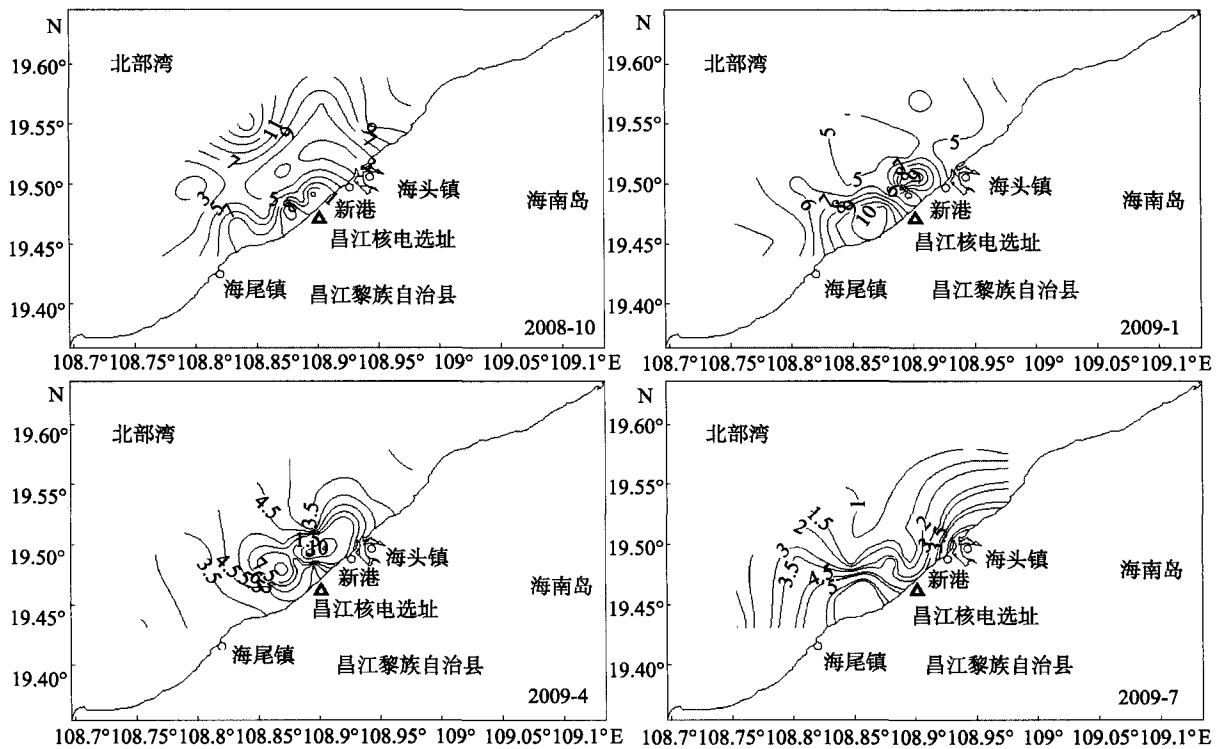


图 2 海南西部昌江近岸周年浮游植物平均丰度的平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of average abundance of phytoplankton in different seasons in Changjiang coastal water of western Hainan Island on data surveyed in 2008 and 2009

阻在海南西部形成近岸上升流区^[20, 21], 带来富含营养盐的下层水, 是造成近岸浮游植物高值区的主要原因。

2.3 优势种群的构成及周年变化

参考徐兆礼等^[26]对浮游动物优势种群的界定阈值, 并结合本次调查浮游植物丰度的种间分配情况, 本文选取优势度 $Y \geq 0.02$ 的种类作为浮游植物群落优势种。除束毛藻、海洋原甲藻外, 其余均为硅藻(表 4)。全部 14 种优势种有 1/3 在 3 个以上季节中出现, 菱形海线藻、奇异棍形藻、具槽帕拉藻为全年优势种, 多为链状硅藻, 其形态可以增加细胞表面积/体积比, 有利于营养盐的吸收, 长链细胞在下沉的过程中较短小的细胞有更大的细胞营养盐通量, 能长时间停留在真光层进行光合作用^[15, 27]。其次, 这些大而长的细胞或细胞群体不容易被摄食, 也是对浮游动物摄食压力的一种对抗。本次调查区检出了原多甲藻属的多个物种, 尽管它们可以摄食较小的链状硅藻细胞^[15, 28], 但由于其丰度较小, 所以对调查区浮游植物群落的影响较小。以上这些因素造成了调查区浮游植物优势类群以大细胞或小细胞的硅藻链状群体为主。此外, 调查区的 4、7 月, 束毛藻增

殖迅猛, 成为优势类群之一。束毛藻是一种具有固氮能力的丝状蓝藻, 长度大约为 0.15—3 mm, 细胞体内具有气泡, 能适度的调节浮力, 使其在水体垂直运动及生长时调节压力, 或在缓慢的生长下增加在真光层的停留时间, 并于表层形成水华^[29, 30], 一般分布在热带及亚热带的贫营养盐海域, 对海区的新生产力贡献很大^[22, 30]。

不同季节优势种有一定程度交错, 且变化较明显(表 4)。10 月水温较高, 优势种以广温广布种, 如菱形海线藻、具槽直链藻、奇异棍形藻为主。暖水暖温种, 如变异幅杆藻、柔弱角毛藻以及底栖性硅藻蜂腰双壁藻有一定优势度。1 月水温最低, 尽管该时节浮游植物丰度比较低, 但是其优势种类却不少, 优势度却不低。细弱海链藻、佛氏海线藻优势度较高, 菱形海线藻、旋链角毛藻、蜂腰双壁藻优势度较之 10 月上升; 底栖性的羽纹纲硅藻洛伦菱形藻、尖刺拟菱形藻成为优势种。4 月来自南海的高盐水自湾东部进入沿海南岛西岸北上, 北可达北纬 20°30', 而后朝向越南一侧, 向南流入南海^[19], 加之琼州海峡海流西行受阻造成沿岸上升流^[19-21], 使得暖水性和大洋性种类增多, 丰度增高, 因而浮游植

表 4 海南西部昌江近岸浮游植物优势种及优势度
Tab. 4 The dominant phytoplankton species and their dominance in Changjiang coastal water of western Hainan Island based on data surveyed in 2008 and 2009 ($Y \geq 0.02$)

优势种群 Dominants	2008.10	2009.1	2009.4	2009.7
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>	0.12	0.17	0.14	0.14
奇异棍形藻 <i>Bacillaria paradoxa</i>	0.05	0.05	0.10	0.03
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.29	0.02	0.02	0.02
细弱海链藻 <i>Thalassiosira subtilis</i>	—	0.11	—	0.03
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	0.01	0.05	0.03	—
尖刺拟菱形藻 <i>Pseudonitzschia pungens</i>	—	0.04	0.03	—
变异幅杆藻 <i>Bacteriastrium varians</i>	0.04	—	—	0.03
佛氏海线藻 <i>Thalassionema frauenfeldii</i>	—	0.10	0.01	—
柔弱角毛藻 <i>Chaetoceros debilis</i>	0.01	—	0.02	—
笔尖形根管藻 <i>Rhizosolenia styliformis</i>	0.01	—	0.05	0.17
洛伦菱形藻 <i>Nitzschia lorenziana</i>	—	0.04	0.02	—
蜂腰双壁藻 <i>Diploneis bombus</i>	0.03	0.07	—	—
束毛藻 <i>Trichodesmium</i> spp.	—	—	0.08	0.11
海洋原甲藻 <i>Procentrum micans</i>	0.02	—	0.04	—

注: —表示优势度 $Y < 0.01$
Note: — indicated Mcnaughton index $Y < 0.01$

物优势种类较多。该时节近岸广温广布种仍占优, 外海暖水种如束毛藻、海洋原甲藻、笔尖形根管藻成为优势种。7 月保持了 4 月外海暖水种类成为优势类群的特点, 且优势度上升大, 笔尖形根管藻、束毛藻是该时节最具优势的类群。这是由于束毛藻在夏季(6—7 月)主要集中在海南西部和北部水域, 尤其是海南西北部的近岸水域丰度最高, 在海南西北部外海也有零星分布^[22]。

2.4 群落物种多样性及周年变化

群落多样性是表征群落特征的群落稳定性的重要参数, 本文根据多样性指数对测度多样性的着重点、对样本的敏感程度以及使用的广泛程度等^[18]选用 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数, 来对调查区样品分析的数据进行多样性分析。

从多样性指数(H')季节分布来看, 调查区浮游

植物保持了较高的物种多样性, 其多样性指数随季节变化而变化(表 5)。10 月物种多样性指数变幅较小, 平均较低, < 3.0 , 由于具槽直链藻在该时节的高丰度和高检出率, 优势类群的构成过度集中为单一而导致物种多样性指数低。4 月多样性指数变幅较大。其他各季多样性指数平均 > 3.0 , 周年平均为 $3.15 > 3.0$, 表明浮游植物群落结构稳定^[31]。调查区均匀度(J')周年变幅为 $0.74—0.86$ (表 5), 整个海区年平均值为 0.80 。10 月均匀度均值最低, 因该时节各大类群丰度分配不均所致。均匀度与多样性指数的季节变化特点基本一致, 群落多样性高的季节或海域物种均匀度也好。

较之海南其他海域(表 2), 西部昌江近岸浮游植物物种多样性指数和均匀度都表现出较高的值, 高于南部红沙港、北部澄迈湾和南部三亚湾早期, 低

表 5 海南西部昌江近岸浮游植物多样性的周年变化
Tab. 5 Annual variation of diversity and evenness of phytoplankton in Changjiang coastal water of western Hainan Island

时间 Time	多样性指数 Diversity index (H')		均匀度指数 Evenness index (J')	
	均值 Mean	变幅 Range	均值 Mean	变幅 Range
2008.10	2.81	2.45—3.50	0.74	0.31—0.96
2009.1	3.08	2.19—3.14	0.79	0.45—0.80
2009.4	3.06	1.89—4.06	0.84	0.45—0.93
2009.7	3.59	2.42—4.35	0.86	0.24—0.96
周年平均 Annual Mean	3.15	2.75—3.62	0.80	0.55—0.98

于大尺度的海南以南海域。物种多样性指数能反映不同环境下浮游植物丰度和水体污染程度。均匀度代表群落内物种分布的均匀程度,是群落是否成熟和稳定的特征之一。一般认为,物种多样性指数值 H' 在 3—4 的为洁净区, 2—3 的为轻度污染区, 1—2 的为中度污染区, 小于 1 的为重污染区^[32]。本调查海区 4 季度各测站浮游植物种类多样性指数属中度污染区占 10.98%, 轻度污染区占 10.98%, 洁净区占 74.04%, 无重污染区, 表明调查海区目前遭受污染程度低, 水质状况优。保护海洋环境工作非常重要, 防患于未然, 避免走先污染后治理的老路。

3 讨论

通过对浮游植物丰度与环境因子(水文和营养盐资料由化学实验室提供)的 Pearson 相关性分析(表 6)表明, 调查区浮游植物丰度与盐度、叶绿素 a 、溶解无机氮(DIN)以及活性磷酸盐(PO_4 -P)有密切的相关关系, 与温度无相关关系体现。叶绿素 a 浓度是表征光能自养生物量和反映海水肥瘠程度的重要指标, 与浮游植物细胞丰度有良好的线性关系。通常叶绿素 a 浓度变大自然意味着浮游植物细胞丰度也增大, 反过来也成立, 因此二者是正反馈的关系, 但也非绝对, 叶绿素 a 浓度与浮游植物细胞丰度的变化都符合微生物生长的 S 型曲线, 二者在高细胞密度(水华)发生期间的线性关联才尤为明显^[33,34]。调查区 1 月浮游植物丰度与叶绿素 a 浓度的吻合程度不佳; 10 月浮游植物丰度与叶绿素 a 浓度呈相反的趋势, 这与 10 月溶解无机氮(DIN)对浮游植物丰度的正反馈作用有一定关联, 对浮游植物分布及丰度变动而言, 温度、盐度、营养盐以及浮游动物摄食等都与之密切关联。

3.1 水温、盐度与浮游植物分布及丰度变动的关系

本次调查海区水温在 23.42—29.04 之间波动, 平均盐度在 31—35 之间变化, 盐度夏季最低, 冬季最高, 而水温则恰好相反。周年浮游植物丰度与水温、盐度的相关分析表明, 调查海区各季节的浮游植物丰度与温度之间无显著的相关关系, 冬季 1 月丰度与盐度则呈密切负相关关系(表 6)。调查区处于热带海区, 海水温度较高, 4 季温度均高于 22℃, 温度与浮游植物丰度的相关性在 4 季均不显著, 水温不是控制浮游植物丰度变动及分布的因素。不过, 昌江核电建成运营后, 冷却水的排放使邻近海域水温升高, 对生态环境会有一定影响^[35], 温排水影响的程度要视其具体情况而言。拟建的昌江核电总功率为 4 组共 650 万 kW, 海洋生物与生态调查合作单位广东省水利水电科学研究所作数模计算和模拟试验结果显示, 核电站附近 4℃温升面积为 1.2—5.1 km², 3℃温升面积为 11—14 km², 2℃温升面积为 22—29 km², 就整个调查海域而言, 温扩散面积不大。但水温增升与浮游植物丰度之间存在十分明显的相关性, 并且该相关性因不同季节而呈明显差异^[36], 尤其在夏季(6—9 月)水温升高的影响较大^[37]。尽管拟建昌江核电站的总功率较大, 其每秒排水量较大, 但邻近水域的潮流流速快, 表层最大流速可达 45—123 cm/s。因而, 昌江核电站邻近水域开阔, 潮流流速快, 更有利于水体交换, 温排水效应可能降低。

3.2 营养盐与浮游植物分布及丰度变动的关系

秋季 10 月浮游植物丰度与无机氮呈密切的正相关关系, 由于处于近岸海域, 无机氮盐主要由陆源和海底沉积物提供, 因此无机氮盐丰富, 浮游植物丰度也很高^[6, 8, 10, 11]。夏季 7 月浮游植物丰度与活性磷酸盐(PO_4 -P)呈密切的负相关关系, 由于此时束

表 6 浮游植物丰度与环境因子的 Pearson 相关性
Tab. 6 Pearson correlation analysis between phytoplankton cell abundance and environmental factors

时间 Time	温度 Temperature	盐度 Salinity	叶绿素 a	溶解无机氮 DIN	活性磷酸盐 PO_4 -P
2008—10	-0.131, $P=0.415$, $n=42$	-0.136, $P=0.395$, $n=42$	-0.358*, $P=0.020$, $n=42$	0.401**, $P=0.001$, $n=42$	0.069, $P=0.667$, $n=42$
2009—1	-0.173, $P=0.279$, $n=41$	-0.411**, $P=0.008$, $n=41$	0.300, $P=0.053$, $n=42$	0.051, $P=0.751$, $n=41$	-0.180, $P=0.259$, $n=41$
2009—4	-0.151, $P=0.347$, $n=41$	-0.120, $P=0.455$, $n=41$	0.317*, $P=0.043$, $n=41$	0.080, $P=0.617$, $n=41$	0.120, $P=0.454$, $n=41$
2009—7	0.163, $P=0.308$, $n=41$	0.179, $P=0.263$, $n=41$	0.802**, $P=0.000$, $n=41$	-0.013, $P=0.634$, $n=41$	-0.422**, $P=0.006$, $n=41$

注: *相关的显著性水平是 0.05; **相关的显著性水平是 0.01

Note: * indicated P level was 0.05. ** indicated P level was 0.01

表 7 海南西部昌江近岸浮游植物丰度及分布与浮游动物的关系

Tab. 7 Relationship between phytoplankton abundance, distribution and zooplankton community in Changjiang coastal water of western Hainan Island

时间 Time	浮游植物平均丰度 Phytoplankton average abundance	浮游动物平均丰度 Zooplankton average abundance	浮游植物丰度高值区 Phytoplankton peak zone	浮游动物丰度高值区 Zooplankton peak zone
2008.10	7.01×10 ³ cells/L	314.85 ind/m ³	离岸水域, 次高值区在昌江 核电近岸	离岸水域
2009.1	6.12×10 ³ cells/L	526.18 ind/m ³	昌江核电至海尾镇近岸, 次 高值区在新港近岸	离岸水域
2009.4	6.27×10 ³ cells/L	200.75 ind/m ³	新港近岸	昌江核电至海尾镇近岸, 次 高值区在海头镇离岸水域
2009.7	6.02×10 ³ cells/L	146.05 ind/m ³	昌江核电至海尾镇近岸, 次 高值区在新港近岸	离岸水域

毛藻在近岸群聚, 束毛藻本身可以固氮, 所以不存在氮限制的问题, 磷限制的作用此刻便凸显出来(表 6)。但这并不意味着氮的含量对束毛藻的分布没有影响, 自然海区中束毛藻的生长为铁限制, 磷限制, 还是其他痕量元素限制? 目前尚无统一论定, 还需进一步寻找证据。再有, 夏季琼州海峡海流西行受阻造成沿岸上升流, 上升流强度的变动直接调控水体中磷的含量, 进而造成浮游植物丰度的波动。

3.3 浮游动物丰度及分布与浮游植物丰度变动的关系

浮游动物对浮游植物的摄食压力直接影响到后者的丰度变动, 浮游动物会在饵料(主要为浮游植物)丰富的海区觅食成长, 但并不表明浮游动物的丰度分布与浮游植物的丰度有显著的相关性。调查区浮游植物与浮游动物之间的周年变化态势相悖(表 7), 浮游动物平均丰度 10 月、1 月较高, 而 4 月、7 月较低。浮游植物丰度的分布态势自近岸向离岸逐渐减少, 高值区在近岸水域检出。而浮游动物除了秋季 10 月在离岸水域均检出高值区外, 其他季节二者的高值区交织错落, 呈镶嵌斑块分布, 这除了表示两者直接摄食关系外, 也反映了海区内生态系统的相关复杂现象及生物学过程。

4 结论

(1)海南西部近岸海域 4 季度的浮游植物主要以硅藻类为主, 甲藻在群落中占有较大比重, 蓝藻类束毛藻在 4—7 月成为局部海区最具优势的类群, 斑块状群聚分布。浮游植物生态类型多为近岸广温性类群和热带暖水性类群, 物种组成的季节变化较大。(2)调查区浮游植物优势种除束毛藻、海洋原甲藻外, 其余均为硅藻, 不同季节优势种有一定程度

交错。有 1/3 在 3 个以上季节出现, 菱形海线藻、奇异棍形藻、具槽帕拉藻为全年优势种。(3)调查区浮游植物周年平均丰度为(6.36±4.75)×10³ cells/L(n=165), 细胞丰度以硅藻占绝对优势, 甲藻次之, 蓝藻在 4—7 月激增。浮游植物丰度季节变化小, 10 月、4 月丰度较多, 而 1 月、7 月丰度较少。(4)不同季节的浮游植物丰度分布的高值区有一定变化, 总体态势是由近岸水域向离岸水域减少。(5)调查区浮游植物群落的多样性指数和均匀度都表现出较高的值, 表明调查海区目前遭受污染程度低, 水质状况优。(6)调查区各季节的浮游植物丰度与温度之间无显著的相关关系, 1 月丰度与盐度则呈密切负相关关系。10 月浮游植物丰度与无机氮呈密切的正相关关系。7 月浮游植物丰度与活性磷酸盐(PO₄-P)呈密切的负相关关系。(7)浮游动物对浮游植物的摄食压力直接影响到后者的丰度变动, 并伴随着海区内生态系统的相关复杂现象及生物学过程的作用。

以上初步的结果为海南西部海洋生物保育及拟建昌江核电工程的海域使用论证提供了基础资料, 是对核电站的生态可行性论证及研究工作的很好贯彻与实施, 核电站邻近水域的环境监测是今后需要加强的方面, 成为一项重要的环保研究工作之一。

参考文献:

[1] Pomeroy L R. The ocean's food web, a changing paradigm [J]. *Bioscience*, 1974, 24: 499—504

[2] Special Committee of Environmental Issues of Japan Ecology Committee. Environment and Indicating Organisms (Waters Column) [M]. Beijing: China Environment Science Press. 1987, 1—42 [日本生态学会环境问题专门委员会. 环境和指示生物(水域分册). 北京: 中国环境科学出版社. 1987, 1—42]

- [3] Comprehensive Oceanographic Survey Office of Ocean Group, Science and Technology Commission, P.R.C. Comprehensive Oceanographic Survey Report of Oceans of Bohai, Huanghai, Donghai and Nanhai (Eighth Part), on Plankton of China Inshore Zone [M]. Beijing: Science Press. 1964, 81—97 [中华人民共和国科学技术委员会海洋组海洋综合调查办公室. 全国海洋综合调查报告(第八册)——中国近海浮游生物的研究. 北京: 科学技术出版社. 1964, 81—97]
- [4] Group and Leading Team Office of Comprehensive Resource Investigation on the Littoral zone and Tidal Flat of Guangdong Province. The Report of Comprehensive Resource Investigation on the Littoral Zone and Tidal Flat [M]. Beijing: China Ocean Press. 1987, 195—200 [广东省海岸带和海涂资源综合调查领导小组办公室. 广东省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 中国海洋出版社. 1987, 195—200]
- [5] Zhang G X, Yin J Q. Chart set of plankton in Sanya Bay [A]. In: Chart Set of Comprehensive Resource Investigation on the Littoral Zone and Tidal Flat of Guangdong Province and Hainan Island [M]. Guangzhou: Guangdong Geology Press. 1989, 1—91 [张谷贤, 尹健强. 三亚港浮游动物图. 中国海岸带和海涂资源综合调查图集—广东海南岛分册. 广州: 广东地图出版社. 1989, 1—91]
- [6] Dai M, Li C H, Zhang H P, *et al.* Characteristics of phytoplankton community in the southern waters of Hainan Island [J]. *Biodiversity Science*, 2007, **15**(1): 23—30 [戴明, 李纯厚, 张汉平, 等. 海南岛以南海域浮游植物群落特征研究. 生物多样性, 2007, **15**(1): 23—30]
- [7] Huang L M, Tan Y H, Song X Y, *et al.* The status of the ecological environmental and a proposed protection strategy in Sanya Bay, Hainan Island, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, **47**: 180—186
- [8] Dong J D, Zhang Y Y, Wang Y S, *et al.* Species and community succession of marine cyanobacteria in Sanya Bay, South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2006, **25**(3): 40—46 [董俊德, 张燕英, 王友绍, 等. 南海三亚湾及邻近海域海洋蓝藻类群组成、分布及演替特征. 热带海洋学报, 2006, **25**(3): 40—46]
- [9] Yang Z H, Dong J D, Wu M L, *et al.* Structure characteristics of phytoplankton community at Sanya Bay [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, **26**(6): 62—66 [杨志浩, 董俊德, 吴梅林, 等. 三亚湾网采浮游植物群落结构特征分析. 热带海洋学报, 2007, **26**(6): 62—66]
- [10] Zhou W H, Wang H K, Dong J D, *et al.* Spatial-temporal variation of phytoplankton and bacterioplankton biomass and their environmental limiting factors in the Sanya Bay, Hainan Island [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **29**(6): 110—119 [周伟华, 王汉奎, 董俊德, 等. 海南岛三亚湾浮游植物和细菌生物量时空分布特征及环境制约因素研究. 海洋学报, 2007, **29**(6): 110—119]
- [11] Wang H K, Dong J D, Zhang C, *et al.* Distribution of N/P ratio and its limitation to growth of phytoplankton in Sanya Bay [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2002, **21**(1): 33—39 [王汉奎, 董俊德, 张偲, 等. 三亚湾氮磷比值分布及其对浮游植物生长的限制. 热带海洋学报, 2002, **21**(1): 33—39]
- [12] Zhu B B, Chen H, Li C Q, *et al.* Investigation on phytoplankton in sea area of Hainan Hongsha Harbor [J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2007, **35**(2): 484—485 [朱白婢, 陈宏, 李春强, 等. 海南省红沙港海水中浮游植物现状调查. 安徽农业科学, 2007, **35**(2): 484—485]
- [13] Zhou Z G, Wu G W. Marine biodiversity study in Chengmai Gulf of Hainan Province [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **30**(3): 32—34 [周祖光, 吴国文. 海南澄迈湾海洋生物多样性研究. 环境科学与技术, 2007, **30**(3): 32—34]
- [14] Li T, Liu S, Wang G F, *et al.* Species composition of phytoplankton and its distribution in the northern South China Sea in autumn 2004 [J]. *Journal of tropical oceanography*, 2010, **29**(2): 65—73 [李涛, 刘胜, 王桂芬, 等. 2004 年秋季南海北部浮游植物组成及其数量分布特征. 热带海洋学报, 2010, **29**(2): 65—73]
- [15] Le F F, Sun J, Ning X R, *et al.* Phytoplankton in the northern South China Sea in summer 2004 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, **37**(3): 238—248 [乐凤凤, 孙军, 宁修仁, 等. 2004 年夏季中国南海北部的浮游植物. 海洋与湖沼, 2006, **37**(3): 238—248]
- [16] Sun J, Song S Q, Le F F, *et al.* Phytoplankton in the northern South China Sea in winter 2004 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, **29**(5): 132—145 [孙军, 宋书群, 乐凤凤, 等. 2004 年冬季南海北部浮游植物. 海洋学报, 2007, **29**(5): 132—145]
- [17] State Bureau of Technical Supervise. The Specification for Oceanographic Survey-Marine Biological Survey (GB/T12736.6-2007) [S]. Beijing: China Standard Press. 2007, 30—35 [国家技术监督局. 《海洋调查规范》(GB/T12736.6-2007). 北京: 中国标准出版社. 2007, 30—35]
- [18] Sun J, Liu D Y. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **26**(1): 62—75 [孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. 海洋学报, 2004, **26**(1): 62—75]
- [19] Wang F. Summary and development blueprint of marine resource and environmental conditions in Beibu Gulf [J]. *Resource Industry*, 2000, (1): 37—41 [王芳. 北部湾海洋资源环境条件评述及开发战略构想. 资源产业, 2000, (1): 37—41]
- [20] Liu Z L, Ning X R, Cai Y M. Distribution characteristics of size-fractionated chlorophyll *a* and productivity of phytoplankton in the Beibu Gulf [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, **20**(1): 50—57 [刘子琳, 宁修仁, 蔡昱明. 北部湾浮游植物粒径分级叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征. 海洋学报, 1998, **20**(1): 50—57]
- [21] Cai Y M, Ning X R, Liu C G. Distribution characteristics of

- size-fractionated chlorophyll *a* and productivity of phytoplankton in the northern south China Sea and Beibu Gulf during august 1999 [J]. *Studia Marine Sinica*, 2002, **44**(5): 11—21 [蔡昱明, 宁修仁, 刘诚刚. 1999 年夏季南海北部和北部湾海域粒度分级叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征. 海洋科学集刊, 2002, **44**(5): 11—21]
- [22] Yang Q, Lin Y S, Zhou Q Q, *et al.* Abundance and Distribution of Cyanophyta in Beibu Gulf in Summer 2006 [A]. In: Hu J Y, Yang S Y. Collected Papers on Marine Science in Beibu Gulf [C]. Beijing: Ocean Press. 2008, 186—192 [杨青, 林元烧, 周茜茜, 等. 北部湾 2006 年夏季蓝藻的丰度和分布. 见: 胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集. 北京: 海洋出版社. 2008, 186—192]
- [23] Yang Q L. Characteristics of *Trichodesmium* distribution in waters over continental shelves of the South Huanghai Sea and the East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, **20**(5): 93—100 [杨清良. 南黄海和东海陆架区束毛藻的分布特征. 海洋学报, 1998, **20**(5): 93—100]
- [24] Song X Y, Huang L M, Shi Y R. Progress in research on primary production of estuaries and bays [J]. *Ecologic Science*, 2004, **23**(3): 265—269 [宋星宇, 黄良民, 石彦荣. 河口、海湾生态系统初级生产力研究进展. 生态科学, 2004, **23**(3): 265—269]
- [25] Shen G Y, Shi B Z. Marine Ecology (version II) [M]. Beijing: Science Press. 2002, 195—197 [沈国英, 施并章. 海洋生态学(第二版). 北京: 科学出版社. 2002, 195—197]
- [26] Xu Z L, Chen Y Q. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1989, **8**(4): 13—15 [徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲐鲷渔场的关系. 生态学杂志, 1989, **8**(4): 13—15]
- [27] Karp-Boss L, Boss E, Jumars P A. Nutrient fluxes to planktonic osmotrophs in the presence of fluid motion [J]. *Oceanography and Marine Biology an Annual Review*, 1996, **34**: 71—107
- [28] Jacobson D M, Anderson J M. The cateheterotrophic dinoflagellate feeding behaviour and mechanisms [J]. *Journal of Phycology*, 1986, **22**: 249—258
- [29] Walsby A E. The properties and buoyancy-providing role of gas vacuoles in *Trichodesmium* Ehrenberg [J]. *British Phycological Journal*, 1978, **13**: 103—116
- [30] Cap penter E J, Romans K. Major role of the cyanobacterium *Trichodesmium* in nutrient cycling in the North Atlantic Ocean [J]. *Science*, 1991, **254**: 1356—1358
- [31] Lei A P, Shi Z X, Wei Y X. Diversity of the phytoplankton in Donghu Lake, Wuhan [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2003, **27**(2): 179—184 [雷安平, 施之新, 魏印心. 武汉东湖浮游藻类物种多样性的研究. 水生生物学报, 2003, **27**(2): 179—184]
- [32] State Oceanic Administration. Technical Specification for Red Tide Monitoring (HY/T 069-2005) [S]. Beijing: China Standard Press. 2005, 50—52 [国家海洋局. 海洋赤潮监测技术规程(HY/T 069-2005). 北京: 中国标准出版社. 2005, 50—52]
- [33] Yu H Y, Zhou B, Hu Z Y, *et al.* Study on correlation between chlorophyll *a* and algal density of biological monitoring [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(6): 40—44 [于海燕, 周斌, 胡尊英, 等. 生物监测中叶绿素 *a* 浓度与藻类密度的关联性研究. 中国环境监测, 2009, **25**(6): 40—44]
- [34] Rakocovic-Nedovic J, Hollert H. Use of chlorophyll-Secchi disk relationships, phytoplankton community and chlorophyll *a* as trophic state indices of Lake Skadar (Montenegro, Balkan) [J]. *Environment Science and Pollution Research*, 2005, **12**(3): 146—152
- [35] Yu F, Zhang Y X. The review on the effects of thermal effluent from nuclear plants on the marine ecosystem [J]. *Radiation Protection*, 2008, **28**(1): 1—7 [於凡, 张永兴. 滨海核电站温排水对海洋生态系统影响的研究. 辐射防护通讯, 2008, **28**(1): 1—7]
- [36] Lu G S, Li P H, Tan Z S, *et al.* Analysis of eutrophication trend for douhe reservoir and remediation countermeasures [J]. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2001, (3): 22—25
- [37] Liao Y B, Chen Q Z, Zeng J N, *et al.* Thermal effect on the marine phytoplankton in Xiangshan Bay [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(9): 4203—4212 [廖一波, 陈全震, 曾江宁, 等. 海洋浮游植物的热效应. 生态学报, 2008, **28**(9): 4203—4212]

ANNUAL VARIATION ON PHYTOPLANKTON IN COASTAL WATERS OF WESTERN HAINAN ISLAND AND RELATED AFFECTING FACTORS

WANG Yu, LIN Mao, CHEN Xing-Qun and LIN Geng-Ming

(Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

Abstract: Annual variation of phytoplankton community in coastal waters at western Hainan Island and its related affecting factors were analyzed based on four cruise surveys of four seasons carried out in 2008 and 2009. A total of 155 species (including 5 forms and 2 varieties) belonging to 74 genera of 4 classes were identified in 165 samples, in which diatoms were predominant in the species composition and the cell abundance. Dinoflagellates contributed the second major group. Cyanobacteria abundance increased in July. The dominant species were *Thalassionema nitzschioides*, *Bacillaria paradoxa*, *Paralia sulcata*, *Chaetoceros curvisetus*, *Rhizosolenia styliformis*, *Trichodesmium* spp., *Prorocentrum micans*, etc. Among them, *Thalassionema nitzschioides*, *Bacillaria paradoxa* and *Paralia sulcata* were dominant in four seasons. The species composition showed a significant seasonal change while phytoplankton cell abundance did not. Phytoplankton species were lower in October than in January, while richer in April and July. The annual average cell abundance of phytoplankton was $(6.36 \pm 4.75) \times 10^3$ cells/L ($n=165$), and the peak cell abundance appeared in October. The phytoplankton abundance of each season reduced from near-shore waters to offshore. Patch distribution of *Trichodesmium* spp. were obvious in April and July. The diversity index was almost coincident with that of the Pielou evenness index. The high values of both index suggested that the phytoplankton community was in stability and the water quality was healthy in western Hainan Island. Pearson Correlate Analysis of phytoplankton cell abundance with environmental factors indicated that the phytoplankton abundance non-correlated to water temperature, correlated positively to the abio-nitrogen in October, and negatively correlated to the salinity in January and to the abio-phosphate in July. The feeding stress from zooplankton directly affected annual variation of the cell abundance of phytoplankton along with influences of biological relationship even of ecosystem components.

Key words: Phytoplankton; Community structure; Annual variation; Environmental factors; Coastal waters in western Hainan Island