

广西中华白海豚栖息地的浮游植物群落生态特征*

王雨 项鹏 叶又茵 林更铭 杨清良 林茂**

国家海洋局第三海洋研究所 厦门 361005

摘要 广西三娘湾是中华白海豚 (*Sousa chinensis*) 春、秋季的重要栖息地之一, 生境现状不容乐观. 根据2011年10月(秋)、2012年3月(春)在三娘湾近海15个测站获取的51份浮游植物样品, 分析该区浮游植物群落结构与变化, 对比毗邻海区分析讨论测区浮游植物与环境因子的关联关系, 并从浮游植物角度探讨中华白海豚的生存状态. 共鉴定浮游植物4门45属123种(不包括未定种), 群落组成以硅藻为主, 其次是甲藻. 两季共有优势种1种, 10月优势种为旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*)、丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*)、柔弱伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、尖刺伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*) 等多个物种; 3月则为几内亚藻 (*Guinardia*) 的3个物种完全占优势. 测区浮游植物平均丰度为 222.49×10^3 cells/L, 10月比3月约高1倍. 10月丰度的表底两层分布一致, 3月则不一致. 两季浮游植物物种多样性和均匀度总体较好, 群落结构处于较完整和稳定状态, 但3月群落状态相对较脆弱. 与广西毗邻海区相比, 本区总物种数目处于中等水平, 种类组成与其他海区相似, 相同季节的优势种却有大差别. 测区10月表层浮游植物丰度与磷酸盐浓度、叶绿素a浓度表现出显著正相关; 3月表、底两层的丰度均与水温呈现较好的正相关. 尖刺伪菱形藻、夜光藻 (*Noctiluca scintillans*) 等赤潮藻在三娘湾均可检出一定丰度, 一旦爆发藻华, 就可能危及中华白海豚生存. 因此为了长期保护濒危物种中华白海豚, 除了长期监测其种群外, 还应定期调查评估栖息地生境. 图2 表6 参30

关键词 浮游植物; 群落结构; 生态特征; 环境因子; 中华白海豚; 广西三娘湾

CLC Q178.53

Ecological characteristics of phytoplankton community in the habitat of *Sousa chinensis* at Sanniangwan Bay, Guangxi*

WANG Yu, XIANG Peng, YE Youyin, LIN Gengming, YANG Qingliang & LIN Mao**

The Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China

Abstract For a comprehensive understanding of the phytoplankton community structure, ecological status related to environmental factors of the habitat of *Sousa chinensis* needs to be investigated. This paper aimed to study the role of phytoplankton in the habitat of *Sousa chinensis* in Sanniangwan Bay of Guangxi Province, China. Based on 2 cruise surveys at 15 stations in 2011 and 2012, we analyzed the phytoplankton community in terms of species composition and cell density quantification, and compared it with that of adjacent area. We also determined the relationship between phytoplankton and environmental factors to evaluate the survival state of *Sousa chinensis* from the view-point of phytoplankton. A total of 123 species (excluding unknown taxa) belonging to 45 genera of 4 classes were identified in 51 samples, in which diatoms were predominant in both species composition and abundance. Dinoflagellates contributed the second major group. The dominant species were *Chaetoceros curvisetus*, *Leptocylindrus danicus*, *Pseudo-nitzschia delicatissima*, *P. pungens* and others in October, but mainly *Guinardia flaccida*, *G. striata*, and *G. delicatula* in March. *G. striata* was the only common dominant species in the two seasons. The average phytoplankton abundance was 222.49×10^3 cells/L, with that of October about two times greater than that of March. Significant difference existed for phytoplankton abundance between the surface layer and the bottom in March but not in October. Both Shannon-wiener diversity index and Pielou's evenness index were higher in October than in March, indicating an integrated and stable state of phytoplankton community in October but a relatively vulnerable one in March. Compared with the adjacent areas in Guangxi, the Sanniangwan Bay had medium level of richness of phytoplankton species, similar species composition but different dominant species of the same season. Pearson Correlation Analysis of phytoplankton abundance with environmental factors indicated that the phytoplankton abundance was positively correlated to the abio-phosphate and chlorophyll *a* content in the surface water of October, and to the temperature in both surface and

收稿日期 Received: 2015-01-05 接受日期 Accepted: 2015-05-03

*科技部基础专项 (GASI-01-02-04) 和科技部海洋公益性行业科研专项 (201005015) 资助 Supported by the Key Project of Basic Research Program of Ministry of Science and Technology (GASI-01-02-04), and the Marine Public Research Project of Ministry of Science and Technology (201005015)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: linmao@tio.org.cn)

bottom of March. The results showed that the biotope status of the Sanniangwan Bay of Guangxi Province is not at present a sound environment for the population reproduction of *Sousa chinensis*. Red tide algal species such as *P. pungens* and *Noctiluca scintillans* abound in Sanniangwan Bay, which may endanger the *Sousa chinensis* population if explosive proliferation of HAB species occurs. For better protection of endangered species of *Sousa chinensis*, long-term monitoring of the *Sousa chinensis* population and regular evaluation surveys for habitat environment are needed.

Keywords phytoplankton; community structure; ecological characteristics; environmental factors; *Sousa chinensis*; Sanniangwan Bay

生物多样性保护与生物资源的可持续利用近年来倍受关注,海洋生物资源多样性的调查、保护及管理亦越来越受到人们的重视^[1-2]。物种的保护不是一个静态的过程,濒危动物的种群及其栖息地是处于不断的变化之中,威胁物种生存的外部环境因子也时常发生改变^[3]。要达到对濒危物种长期保护和管理的目的,不仅需要对其种群进行长期的监测,还需要对栖息地生境进行定期调查评估。

广西三娘湾是中华白海豚的重要栖息地之一,春秋时节其种群常见于该海区觅食繁衍。近年来,广西沿海港口建设、“观豚旅游”等项目的开发在一定程度上对中华白海豚的栖息生存造成了潜在的威胁^[4]。目前对三娘湾中华白海豚的生存环境缺少必要的了解,如三娘湾的水质状况、污染情况、海洋初级生产力以及白海豚的饵料等情况都有待认识。

浮游植物群落结构与初级生产力沿食物链向上传递转化为渔业资源产量的效率密切相关,在海洋生物地球化学循环能量流动以及海洋渔业中具有重要的意义;浮游植物对环境变化敏感,可以指示海洋水体的质量^[5-6]。本文依据2011-2012年三娘湾近海的春秋两季海洋生态本底调查数据,分析浮游植物群落结构、丰度分布及季节变动、优势种组成及群落多样性,讨论浮游植物与温度、盐度、营养盐、叶绿素浓度的关联关系,并从浮游植物角度解析中华白海豚的生存现状,以期中华白海豚保育增添生态基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查站位和环境参数测定分析方法

2011年10月(秋)、2012年3月(春)共2个季度分别于广西三娘湾中华白海豚栖息地(108.7°-109.2°E, 19.3°-19.7°N)布设15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与营养盐分别取样分析,参照《海洋调查规范》(GB/T-2007)^[7]进行测定。

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,水深不及5 m仅取表层,样品用2%中性福尔马林固定。实验室内分析样品经沉降浓缩至一定体积后,使用Kolkwitz计数框于高倍倒置光学显微镜下鉴定和计数,并按种类计算丰度(cells/L)。浮游植物种名更改参照文献[8]。

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^[9]: $H' = -\sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$; $J = \frac{H'}{\log_2 S}$; $Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$ 。式中: S 为样品中的种类数目, 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。

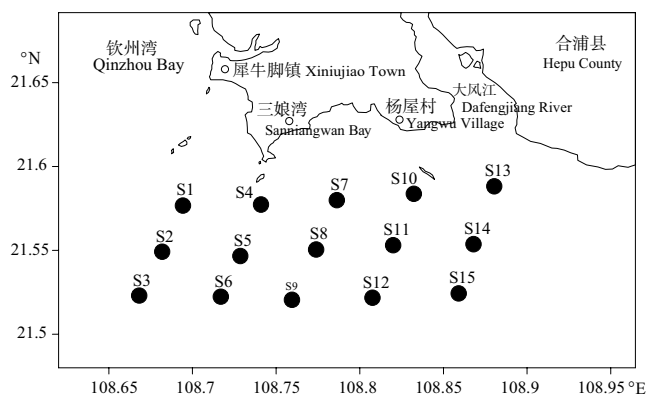


图1 广西三娘湾中华白海豚栖息地的浮游植物采样站位。

Fig. 1 Phytoplankton sampling sites in the habitat of *Sousa chinensis* in Sanniangwan Bay.

2 结果与分析

2.1 种类组成及两季变化

广西三娘湾海域2011-2012年2个季度获得样品51份,共鉴定浮游植物123种(不含未定种),分属于硅藻、甲藻、蓝藻和金藻4个门类(表1)。硅藻103种,占有物种的83.7%;甲藻17种,占13.8%;蓝藻2种,占1.6%;金藻1种。种类组成以广温种居多,占有物种的61.5%,暖水种占23.3%,体现较明显的亚热带区系特征,这与毗邻的广西北海^[10]、钦州湾^[11-12]、防城港^[13]、涠洲岛^[14-15]等海区的浮游植物群落生态特征相同。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,以角毛藻(*Chaetoceros*)、圆筛藻(*Coscinodiscus*)、根管藻(*Rhizosolenia*)为主要类群,分别为16种、13种和10种;盒形藻(*Odentella*)、斜纹藻(*Pleurosigma*)、菱形藻(*Nitzschia*)、几内亚藻(*Guinardia*)也检出较多种类。甲藻以原多甲藻属(*Protoperidinium*)种类较丰富。

从时间上看,春秋两季的种类数目分别为59和80,总种数目的两季差异与硅藻种类数目的两季变化趋势一致(表1)。两季种类组成均以硅藻种类最多,其次为甲藻、蓝藻、金藻。蓝藻和金藻在两季出现的种类相同。两季共有物种数目为39种,占有物种的31.7%。暖水性种物种数目以及出现率在10月高于3月。

从水层上看,表底两层出现的种类数目相当,无大差别(表1),而在站位空间上差别较大。10月各站种类数目较多,表层S1、S7、S9测站最多可有30种,S11测站最少有19种;底层

S1、S12测站最多可有31种, S9测站最少20种. 3月表层S2、S5、S10测站最多有13种, S15测站最少仅4种; 底层S6、S8测站最多有13种, S12测站最少7种.

10月, 各站中分布最广的种类旋链角毛藻 (*Chaetoceros curvisetus*)、丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus*)、柔弱伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*) 在每个测站的表底两层都有分布. 此外, 斯氏几内亚藻 (*Guinardia striata*)、尖刺伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*)、冰河拟星杆藻 (*Asterionella japonica*)、洛氏角毛藻 (*Chaetoceros lorenzianus*)、翼根管藻 (*Rhizosolenia alata*) 等种类亦分布较广. 3月, 几内亚藻 (*Guinardia*) 3个物种的分布最广, 在15个测站的表、底两层中均出现. 此外, 分布相对较广的种类还包括

夜光藻 (*Noctiluca scintillans*)、菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschiodes*) 和叉分角藻 (*Ceratium furca*), 其余种类零星出现.

2.2 浮游植物丰度的变化与分布

在2011-2012年调查的2个航次中, 10月浮游植物丰度比3月约高1倍. 10月平均为 283.98×10^3 cells/L, 表、底层分别为 268.57×10^3 cells/L和 304.99×10^3 cells/L, 表层丰度低于底层. 表层最高值出现在三娘湾西侧的S2测站, 毗连钦州湾外湾海域. 中部S8测站以及最东端的S15测站也检出高值, 离岸较远的站位丰度不高 (图2a). 底层最高值也出现在西侧S2测站, 其次为近岸的S1、S7测站, 除最东端的S15测站外, 离岸站位丰度不高 (图2b). 3月浮游植物丰度平均为 161.00×10^3 cells/L

表1 广西三娘湾浮游植物主要类群的季节变化
Table 1 Seasonal variation of major phytoplankton groups in Sanniangwan Bay coastal waters

主要类群 Major group	2011年10月 October, 2011		2012年3月 March, 2012		合计 Total
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	
硅藻 Diatom	24属57种 24 genera, 57 species	23属54种 23 genera, 54 species	17属33种 17 genera, 33 species	16属31种 16 genera, 31 species	33属103种 33 genera, 103 species
甲藻 Dinoflagellate	7属14种 7 genera, 14 species	5属10种 5 genera, 10 species	5属5种 5 genera, 5 species	4属4种 4 genera, 4 species	9属17种 9 genera, 17 species
蓝藻 Cyanophyta	2属2种 2 genera, 2 species	2属2种 2 genera, 2 species	1属1种 1 genus, 1 species	—	2属2种 2 genera, 2 species
金藻 Chrysophyta	—	1属1种 1 genus, 1 species	1属1种 1 genus, 1 species	1属1种 1 genus, 1 species	1属1种 1 genus, 1 species

—: 未检出. —: undetermined.

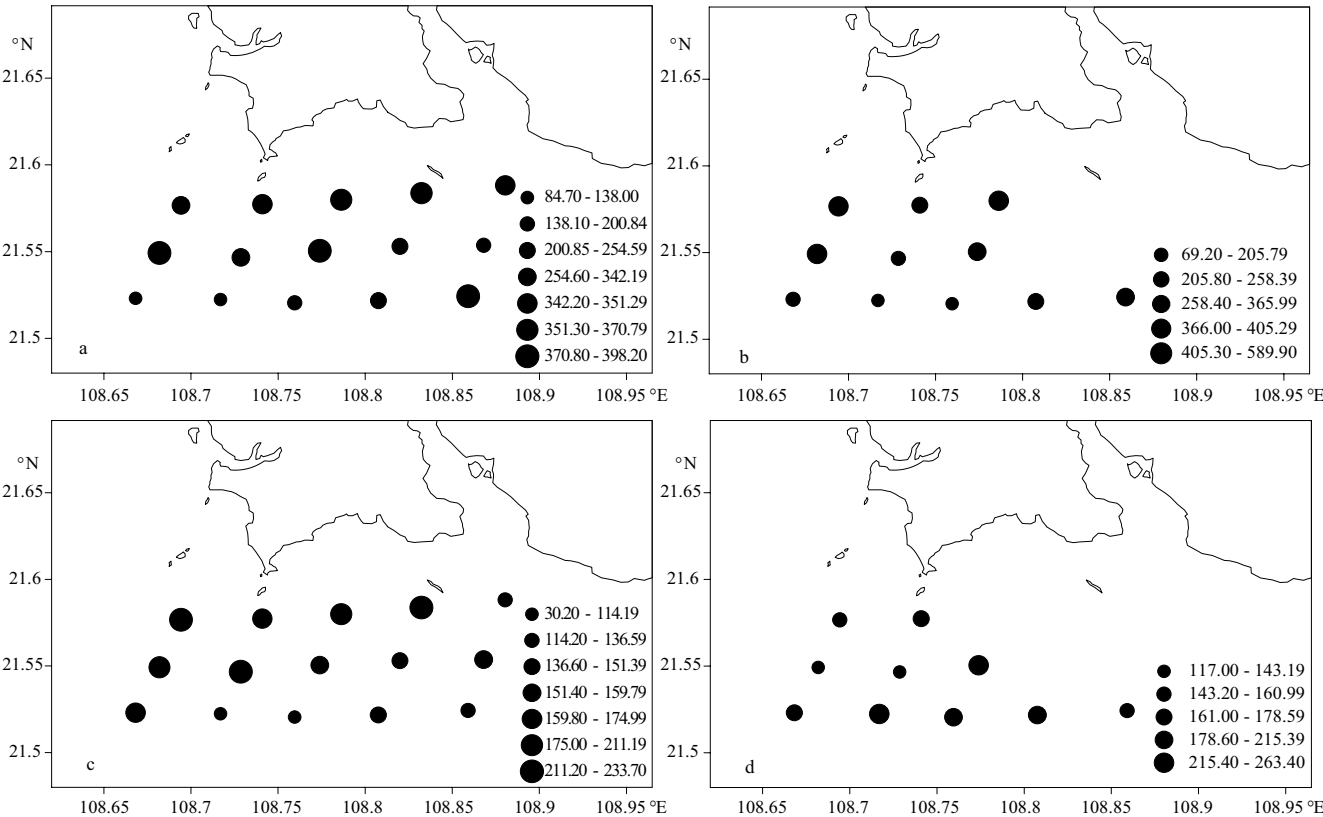


图2 广西三娘湾浮游植物丰度的平面分布 ($n/10^3$ cells L^{-1}). a: 秋季表层; b: 秋季底层; c: 春季表层; d: 春季底层.
Fig. 2 Horizontal distribution of phytoplankton abundance in Sanniangwan Bay coastal waters ($n/10^3$ cells L^{-1}). a: autumn surface; b: autumn bottom; c: spring surface; d: spring bottom.

表2 广西三娘湾浮游植物优势种及优势度(Y)的变化

Table 2 Variation of the dominant phytoplankton species and their dominance in Sanniangwan Bay coastal waters

优势种 Dominant	2011年10月 October, 2011		2012年3月 March, 2012	
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom
冰河拟星杆藻 <i>Asterionella japonica</i>	0.05	0.04	—	—
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	0.24	0.26	0.0001	—
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	0.22	0.21	0.001	0.003
柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	0.08	0.08	—	—
尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	0.08	0.04	—	—
柔弱几内亚藻 <i>Guinardia delicatula</i>	0.01	0.01	0.10	0.11
斯氏几内亚藻 <i>Guinardia striata</i>	0.04	0.05	0.30	0.33
萎软几内亚藻 <i>Guinardia flaccida</i>	0.01	0.002	0.56	0.50
环纹劳德藻 <i>Lauderia annulata</i>	0.03	0.02	—	—
脆根管藻 <i>Rhizosolenia fragilissima</i>	0.02	0.02	0.001	—
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	0.02	0.02	—	—

—: 未检出。—: undetermined.

L, 表层平均为 151.12×10^3 cells/L, 底层为 175.82×10^3 cells/L, 表底丰度相当。表层最高值出现在东侧近岸S10测站, 西侧S1、S5测站也分别达到了次高值, 离岸站位丰度不高, 西侧高于东侧(图2c)。底层最高值出现在中部S8测站, 次高值出现在离岸S6测站, 近岸站位丰度相对低, 与表层丰度分布截然不同(图2d)。

三娘湾西侧毗连钦州湾外湾海域, 鉴于蓝文陆等(2011)、王迪等(2013)报道了钦州湾浮游植物丰度在春、秋、冬三季均呈现内湾至外湾先逐渐增高, 自外湾至湾外又逐渐减少的趋势, 高丰度区出现在湾颈和外湾, 在夏季出现高丰度站位整体向南平移的现象, 高丰度区出现在湾口之外海^[11-12], 这与三娘湾春秋两季浮游植物丰度的西侧高值区地理位置重合, 并能扩展到东侧离岸海域(图2a, d), 离岸海域相对近岸环境变化较稳定, 水团环境相对较为稳定利于藻细胞的繁殖^[16]。同时, 三娘湾与钦州、北海等地理特性相同, 位于北部湾的内部, 沿岸流域营养物质输入充沛, 水交换条件缓慢而不畅, 并伴有海水养殖产业, 导致营养盐容易聚集, 进而丰富了浮游植物丰度^[11, 17-18]。

2.3 优势种的构成及变化

以优势度指数 $Y > 0.02$ 为判别标准, 春秋两季优势种均为硅藻, 10月优势种7种, 3月优势种3种, 共有优势种1种, 两季差别明显(表2), 各季第一优势种在15个测站表底两层均为优势种。10月主要优势种为旋链角毛藻、丹麦细柱藻, 二者优势度之和在表底分别为0.46、0.47, 二者在3月优势度极低。此外, 尖刺伪菱形藻、柔弱伪菱形藻、冰河拟星杆藻也占有一定的优势, 环纹劳德藻(*Lauderia annulata*)在表层占优, 成为优势类群之一。3月优势种集中为几内亚藻的3个物种, 三者优势度之和在表、底层高达0.96、0.91。萎软几内亚藻(*Guinardia flaccida*)优势度极大, 在表、底层占有0.56、0.50的优势度。斯氏几内亚藻次之, 并远高于其在10月的优势度水平。柔弱几内亚藻(*Guinardia delicatula*)最小, 其在10月并未成为优势种。这3个物种占有绝对的优势度, 其丰度占有明显大于其他藻类。优势种类数目及其丰度对群落结构的稳定性有重要影响, 优势种类数目越多且优势度越小, 则群落结构越复杂、稳定, 反之亦然^[19]。总体上, 两季优势类群丰度的分布态势与浮游植物丰度的分布趋势基本一致。

2.4 浮游植物多样性评价

物种多样性是衡量一定区域内生物资源丰富程度的一

个客观指标, 用于评价群落中物种组成的稳定程度及其数量分布的均匀程度和群落的组织结构特征。参照陈清潮等提出的热带海区生物多样性阈值范围^[20], 浮游植物多样性程度根据多样性指数的大小可分为5级: < 0.6 为差; $0.6-1.5$ 为一般; $1.6-2.5$ 为较好; $2.6-3.5$ 为丰富; > 3.5 为非常丰富。在本次调查中(表3), 10月表、底层浮游植物的多样性均值都在2.6-3.5, 且绝大多数测站的多样性均 > 3.0 , 除中部离岸S5、S11, 东部近岸S13测站表层以及西部近岸S4测站底层外。3月表底的多样性较低, 均值恰好介于1.5-1.7内, 表层除离岸西南部的S6、S2等个别测站外, 多数测站的多样性都在0.6-1.5; 底层反之, 除离岸南部的S12、S6测站外, 多数测站的多样性都在1.6-2.5。总的来说, 三娘湾浮游植物多样性应为较好级别, 而3月多样性比10月差, 且差异巨大。一般来讲, 群落中的单一或某几个物种优势度越明显, 种类的多样性就会受到影响而降低^[19]。三娘湾3月浮游植物物种多样性低的原因即是优势种集中为几内亚藻(*Lauderia*)的缘故。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。均匀度指数值越大, 表明多样性越高, 生态环境状况越好^[21], 较为稳定的群落一般具有较高的多样性和均匀度。从本研究的浮游植物均匀度分析结果来看, 调查期间三娘湾浮游植物均匀度指数为0.38-0.81, 与多样性指数相似, 3月均匀度低, 10月物种间丰度分配均匀, 其均匀度高。总之, 三娘湾两季浮游植物多样性和均匀度总体较好, 其群落结构处于较完整和稳定状态, 但3月的群落状态相对较脆弱。

3 讨论

3.1 本区与毗邻海区的比分析

与广西毗邻海区相比(表4), 本区种类组成与北海、钦州、防城等海区相似, 硅藻主导型群落, 甲藻次之, 蓝藻和金藻较少, 总物种数目处于中等水平, 接近防城港全年的物种数目^[13], 低于北海全年12个月的物种数目^[10]。因调查方法的不同, 不同海区浮游植物物种数目有较大差别, 种类组成则有细微不同。基于水样分析, 代表细胞粒径大于 $2 \mu\text{m}$ 的种类。基于网样分析, 代表细胞粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 的种类。我国早期对浮游植物细胞丰度的调查方法主要遵从《海洋调查规范》^[7]中网采的方法, 网目(Mesh size)大小多为 $76 \mu\text{m}$ 。通常认为, 网

表3 广西三娘湾浮游植物多样性指数 (*H'*) 和均匀度 (*J*) 的分布变化
Table 3 Variation of Shannon-Wiener diversity index and Pielou evenness index in Sanniangwan Bay coastal waters

站 位 Station	多样性指数 Diversity index (<i>H'</i>)				均匀度指数 Evenness index (<i>J</i>)			
	10月 October		3月 March		10月 October		3月 March	
	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom	表层 Surface	底层 Bottom
S1	3.55	3.16	1.49	1.71	0.73	0.66	0.47	0.57
S2	3.12	3.22	1.74	1.65	0.66	0.69	0.47	0.52
S3	3.46	3.10	1.65	1.68	0.75	0.67	0.55	0.49
S4	3.32	2.85	1.51	1.69	0.72	0.61	0.54	0.51
S5	2.99	3.23	1.64	1.60	0.63	0.70	0.46	0.45
S6	3.69	3.56	2.11	1.49	0.81	0.82	0.67	0.40
S7	3.72	3.14	1.41	—	0.76	0.67	0.50	—
S8	3.18	3.21	1.27	1.77	0.70	0.68	0.38	0.48
S9	3.54	3.06	1.24	1.56	0.72	0.71	0.53	0.47
S10	3.07	—	1.64	—	0.71	—	0.47	—
S11	2.61	—	1.41	—	0.61	—	0.55	—
S12	3.48	3.50	1.36	1.26	0.72	0.71	0.52	0.45
S13	2.91	—	1.39	—	0.64	—	0.46	—
S14	3.18	—	1.26	—	0.69	—	0.42	—
S15	3.64	3.55	1.33	1.84	0.76	0.74	0.66	0.61
均值	3.30	3.24	1.50	1.62	0.71	0.70	0.51	0.49

—: 未检出. —: undetermined.

表4 广西三娘湾与毗邻海域的浮游植物生态特征值比较
Table 4 Comparison of phytoplankton ecological characters between Sanniangwan Bay coastal waters and adjacent sea regions in Guangxi

海域 Sea region	时间 Time	物种数目 Species richness	平均丰度($n/10^3$ cells L^{-1}) Average abundance	站位数 Number of sites	调查区 Range of sites	方法 Method	文献出处 References
钦州湾 Qinzhou Bay	1983-1984	82	21.10	7	21.5°-21.9°N, 108.5°-108.7°E	网 Net	[30]
北海 Beihai	2003.6-2004.6	334	214.00	3	21.1°-21.2°N, 109.0°-109.1°E	水样 Water	[10]
涠洲岛 Weizhou Island	2006.3-11	103	31.61	6	21.0°-21.2°N, 109.0°-109.3°E	网样 Net	[14]
防城港 Fangcheng Gang Port	2007.3-12	138	387.70	9	21.1°-22.0°N, 108.1°-108.5°E	水样 Water	[13]
涠洲岛 Weizhou Island	2008.9	106	26.45	12	20.9° -21.2°N, 108.9°-109.3°E	网样 Net	[15]
钦州湾 Qinzhou Bay	2008-2009	131	5.59	15	21.3°-21.95°N, 108.3°-108.8°E	网样 Net	[12]
三娘湾 Sanniangwan Bay	2011.10-2012.3	123	222.49	15	19.3°-19.7°N, 108.7°-109.2°E	水样 Water	本研究 This study

采样不能将水体中全部粒径谱的浮游植物采收,从网中容易遗漏一些比网目小的种类,是一种半定量的方法,但此方法在寡营养水域及与历史资料参比方面还有一定优势,且相对于网具所能捕获的大型浮游生物(> 200 μm)来说,其分量是不明显的^[22-24].

由表4可见,本文分析水样的所得细胞丰度与网样分析的结果相比较低,与毗邻海区水样分析结果接近,无大差别;并且毗邻海区之间的网样分析结果自身差别也较大,这也进一步说明拖网方法会有部分样品的丢失,尤其是粒径小于网孔的浮游植物,以及拖网过程中倾角的变化也会影响过滤水柱体积的计算等因素^[22],会造成拖网分析结果是非准确和精确定量的.因而,受拖网网目(一般为76 μm)影响及拖网时倾角的变化会低估浮游植物丰度,诸如,表4中的广西沿海各海区浮游植物网样丰度均低于水样丰度.

此外,受调查季节和调查站位差异的影响,不同调查中浮游植物优势种的构成有一定的差异(表5).优势种在群落中起着主导作用,决定了群落内的物质循环和能量流动的方式,支配着群落的演替方向.如果一个优势种群从

群落内消亡,不仅群落结构要发生变化,群落内的生态环境也会发生较大的改变^[17, 25].本次调查的优势种较之毗邻海域相同季节,优势种构成明显与之不同(表5),中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、菱形海线藻、旋链角毛藻、丹麦细柱藻等沿岸性广温广盐种,可广布于外海高盐水团到沿岸低盐水团中^[26-27].几内亚藻、拟旋链角毛藻(*Chaetoceros pseudocurvisetus*)、棕囊藻(*Phaeocystis*)、翼根管藻、赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)等暖水性种也可繁盛.在广西近海春季,水体透明度仍较高,水温均适宜浮游植物生长^[10, 17, 28].本研究结果与毗邻海区相差较大,在排除调查方法、采样的偶然性等的差异外,这说明海区的生态环境和群落结构已经发生了较大变化.

3.2 浮游植物数量分布与环境因子的关系

浮游植物生态现状与环境因子中的温度、盐度和营养盐密切相关.对浮游植物丰度与环境因子的Pearson相关性分析(表6)表明,3月底两层丰度均与水温呈现较好的正相关关系,春季入海径流量较大,此时正值沿岸流域的春耕春种,径流带来了丰富的无机氮等营养物质,而水温的上

表5 广西三娘湾和毗邻海域相同季节的浮游植物优势种比较

Table 5 Comparison of phytoplankton dominants in Sanniangwan Bay coastal waters and adjacent sea regions at the same season

海域 Sea region	时间 Time	站位数 Number of stations	主要优势种 (按优势度从大到小列出) Dominants in order of Y	方法 Method	文献出处 Reference
北海 Beihai	2003.11	3	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	水样 Water	[10]
北海 Beihai	2004.3	3	翼根管藻 > 细长翼根管藻 <i>Rhizosolenia alata</i> > <i>R. alata</i> f. <i>gracillma</i>	水样 Water	[10]
涠洲岛 Weizhou Island	2006.3	6	球形棕囊藻 > 红海束毛藻 <i>Phaeocystis globosa</i> > <i>Trichodesmium erythraeum</i>	网样 Net	[14]
涠洲岛 Weizhou Island	2006.10	6	旋链角毛藻 > 球形棕囊藻 > 菱形海线藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i> > <i>P. globosa</i> > <i>Thalassionema nitzschioides</i>	网 Net	[14]
防城港 Fangcheng Gang Port	2007.3	9	中肋骨条藻 > 拟旋链角毛藻 > 透明辐杆藻 <i>S. costatum</i> > <i>C. pseudocurvisetus</i> > <i>Bacteriastrium hyalinum</i>	水样 Water	[13]
防城港 Fangcheng Gang Port	2007.9	9	菱形海线藻 > 赤潮异弯藻柱 > 柱状小环藻 <i>T. nitzschioides</i> > <i>Heterosigma akashiwo</i> > <i>Cyclotella stylum</i>	水样 Water	[13]
涠洲岛 Weizhou Island	2008.9	12	旋链角毛藻 > 菱形海线藻 > 洛氏角毛藻 <i>C. curvisetus</i> > <i>T. nitzschioides</i> > <i>C. lorenzianus</i>	网样 Net	[15]
钦州湾 Qinzhou Bay	2008.11	15	中肋骨条藻 > 笔尖根管藻 > 洛氏角毛藻 <i>S. costatum</i> > <i>R. styliformis</i> > <i>C. lorenzianus</i>	网样 Net	[12]
钦州湾 Qinzhou Bay	2009.4	15	旋链角毛藻 > 变异辐杆藻 > 洛氏角毛藻 <i>C. curvisetus</i> > <i>B. varians</i> > <i>C. lorenzianus</i>	网样 Net	[12]
三娘湾 San Niangwan Bay	2011.10	15	旋链角毛藻 > 丹麦细柱藻 > 柔弱伪菱形藻 <i>C. curvisetus</i> > <i>Leptocylindrus danicus</i> > <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	水样 Water	本研究 In this study
三娘湾 San Niangwan Bay	2012.3	15	萎软几内亚藻 > 斯氏几内亚藻 > 柔弱几内亚藻 <i>Guinardia flaccida</i> > <i>G. striata</i> > <i>G. delicatula</i>	水样 Water	本研究 In this study

表6 浮游植物丰度与环境因子的Pearson相关性

Table 6 Pearson correlation analysis between phytoplankton cell abundance and environmental factors

时间 Time	水层 Layer	温度 Temperature	盐度 Salinity	叶绿素a Chlorophyll a	溶解无机氮DIN	活性磷酸盐 PO ₄ -P
2011.10	表层 Surface	-0.283, <i>P</i> = 0.307, <i>N</i> = 15	-0.207, <i>P</i> = 0.459, <i>N</i> = 15	0.526*, <i>P</i> = 0.044, <i>N</i> = 15	0.152, <i>P</i> = 0.588, <i>N</i> = 15	0.667*, <i>P</i> = 0.038, <i>N</i> = 15
	底层 Bottom	-0.420, <i>P</i> = 0.119, <i>N</i> = 11	-0.153, <i>P</i> = 0.586, <i>N</i> = 11	0.597, <i>P</i> = 0.052, <i>N</i> = 11	0.256, <i>P</i> = 0.447, <i>N</i> = 11	-0.023, <i>P</i> = 0.935, <i>N</i> = 11
2012.3	表层 Surface	0.533*, <i>P</i> = 0.039, <i>N</i> = 15	-0.243, <i>P</i> = 0.383, <i>N</i> = 15	0.325, <i>P</i> = 0.237, <i>N</i> = 15	0.056, <i>P</i> = 0.843, <i>N</i> = 15	0.080, <i>P</i> = 0.786, <i>N</i> = 15
	底层 Bottom	0.863*, <i>P</i> = 0.047, <i>N</i> = 10	0.040, <i>P</i> = 0.887, <i>N</i> = 10	0.612, <i>P</i> = 0.060, <i>N</i> = 10	0.209, <i>P</i> = 0.454, <i>N</i> = 10	0.113, <i>P</i> = 0.700, <i>N</i> = 10

*相关的显著性水平是0.05. * *P* < 0.05.

升则更促使了浮游植物在该季大量繁殖^[11-13]. 在广西近海春季, 水体透明度仍较高, 水温适宜浮游植物生长^[10, 17, 28], 暖水种繁盛, 几内亚藻在3月春季的绝对优势度也从物种层面印证该结果. 10月表层浮游植物丰度还与磷酸盐浓度表现出显著性正相关, 10月整个调查海域表层磷酸盐浓度较高, 介于0.01-0.02 mg/L (相当于0.65 mol/L的水平), 并未出现样本低于检测下限的情形. 磷酸盐浓度的增加, 使得水体磷限制较大程度地缓解, 这为浮游植物大量生在提供了一定基础^[11, 13, 18], 正反馈作用明显.

将春秋两季浮游植物丰度与同期调查的叶绿素a浓度进行线性回归分析, 发现除10月表层丰度与之有较好的正相关外, 浮游植物丰度与叶绿素浓度的关系不显著 (表6). 由于水体中叶绿素a的组成不仅包括了浮游植物等初级生产者的活体叶绿素, 也包括了由于初级生产者被摄或其他原因死亡而产生的有机碎屑中的叶绿素, 因此当发生较强的浮游动物摄食行为时, 浮游植物现存量相对减少而含有叶绿素的有机碎屑相应增加, 使浮游植物细胞数量与水体叶绿素值相关性不显著. 另外, 由于我国对浮游植物丰度的调查方法主要遵从《海洋调查规范》^[7]中网采的方法, 网目大小多为76 μm, 一些个体微小的浮游植物没有全部采集上来, 这可能也是造成以往前期的报道中两者相关性不显著的另一重要原因.

3.3 从浮游植物角度解析中华白海豚的生存现状

中国近海引起赤潮的浮游植物众多^[29], 包括在本调查中的常见种如夜光藻、亚历山大藻 (*Alexandrium*)、裸甲藻 (*Gymnodinium*)、伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia*)、赤潮异弯藻、棕囊藻、定鞭金藻 (*Haptophytes*)、束毛藻 (*Trichodesmium*) 等, 这些主要赤潮藻在三娘湾海域均可见其踪迹, 并且个别物种的丰度并不低, 诸如在三娘湾10月秋季, 尖刺伪菱形藻优势度较高 (平均 $Y = 0.06$), 夜光藻在3月的出现率较高 (15个测站中有11个检出), 一旦爆发性增殖, 其发生赤潮的可能性较大. 再有, 伴有陆源磷酸盐和无机氮不断补充, 有机污染和富营养化程度不断加重, 使得发生赤潮的风险明显增加. 赤潮一方面可能破坏中华白海豚栖息的水质环境, 造成生态系统的亚健康或不健康状况, 从而可能致使中华白海豚意外死亡数量增加; 另一方面赤潮导致的水体缺氧将使部分水生生物窒息死亡, 减少了中华白海豚的食物; 严重的是, 有的赤潮生物能分泌毒素, 可能毒害和杀死海洋中的动植物, 中华白海豚也不可幸免. 此外, 养殖业的筏式养殖、网箱养殖、牡蛎吊养、珍珠养殖等迅猛发展, 占据沿岸海湾原本开阔的浅海水域, 从而缩小了中华白海豚的栖息水域.

4 结论

广西三娘湾是中华白海豚春、秋季的重要栖息地之一。本文基于2011-2012年三娘湾近海春、秋两季浮游植物采样分析,共鉴定4门45属123种(不包括未定种),群落组成以硅藻为主。两季共有优势种1种。两季浮游植物物种多样性和均匀度总体较好,群落结构处于较完整和稳定状态,但3月群落状态相对较脆弱。尖刺伪菱形藻、夜光藻等赤潮藻在三娘湾均可检出一定丰度,一旦爆发藻华,可能危及中华白海豚生存。为了达到对濒危物种中华白海豚长期保护和管理的目的,除了需要对中华白海豚种群进行长期的监测外,还需要对栖息地生境进行定期调查评估,包括三娘湾的水质状况、污染情况、海洋初级生产力以及中华白海豚的饵料等情况亟待加强。

参考文献 [References]

- 陈清潮. 中国海洋生物多样性的现状与展望[J]. 生物多样性, 1996, 4 (3): 21-27 [Chen QC. Current status and prospects of marine biodiversity in China [J]. *Chin Biodiv*, 1996, 4 (3): 21-27]
- 王斌. 中国海洋生物多样性的保护与管理对策[J]. 生物多样性, 1999, 7 (4): 347-350 [Wang B. Marine biodiversity and conservation strategies in China [J]. *Chin Biodiv*, 1999, 7 (4): 347-350]
- Scott MD, Wells RS, Irvine AB. Long-term Studies of Bottlenose Dolphins in Florida (IBI reports) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996, 6: 73-81
- 杨伯华, 邓超冰. 北部湾沿海的中华白海豚[J]. 中国水产, 2006, 10: 70-71 [Yang BH, Deng CB. The *Sousa chinensis* population in coastal waters of Beibu Gulf [J]. *Chin Fish*, 2006, 10: 70-71]
- Guseva VP, Chebotina MY. Changes in plankton abundance, biomass and chemical composition under the influence of the cooling system of the Belayarak Nuclear Power Plant [J]. *Ekologiya*, 2000, 31 (1): 28-35
- Díaz-Pardo E, Vázquez G, López-López E. The phytoplankton community as bioindicator of health conditions of Atezca Lake, Mexico [J]. *Aquat Ecosyst Health Manage*, 1998, 1 (3-4): 257-266
- 国家技术监督局. 《海洋调查规范-海洋生物》(GB/T12736.6-2007) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 30-35 [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]
- 孙军, 刘东艳. 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33 (3): 271-286 [Sun J, Liu DY. The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in China Sea waters [J]. *Oceanol Limnol Sin*, 2002, 33 (3): 271-286]
- 孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报, 2004, 26 (1): 62-75 [Sun J, Liu DY. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies [J]. *Acta Oceanol Sin*, 2004, 26 (1): 62-75]
- 赖廷和, 邱绍芳. 北海近岸水域浮游植物群落结构及数量周年变化特征[J]. 海洋通报, 2005, 24 (5): 27-32 [Lai TH, Qiu SF. Annual dynamic of the phytoplankton in the alongshore seawaters of Beihai [J]. *Mar Sci Bull*, 2005, 24 (5): 27-32]
- 蓝文陆, 王晓辉, 黎明民. 应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构[J]. 生态学报, 2011, 31 (13): 3601-3608 [Lan WL, Wang XH, Li MM. Phytoplankton community structure in Qinzhou Bay during flood season by analysis of HPLC photosynthetic pigment signatures [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31 (13): 3601-3608]
- 王迪, 陈丕茂, 逯晶晶, 马媛. 钦州湾浮游植物周年生态特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24 (6): 1686-1692 [Wang D, Chen PM, Lu JJ, Ma Y. Annual changes of phytoplankton's ecological features in Qinzhou Bay of South China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24 (6): 1686-1692]
- 庄军莲, 许铭本, 张荣灿, 姜发军, 王一兵, 何碧娟. 广西防城港湾浮游植物数量周年变化特征[J]. 广西科学, 2010, 17 (4): 387-395 [Zhuang JL, Xu MB, Zhang RC, Jiang FJ, Wang YB, He BJ. Anniversary variation of phytoplankton abundance in Fangchenggang Bay of Guangxi [J]. *Guangxi Sci*, 2010, 17 (4): 387-395]
- 刘国强, 史海燕, 魏春雷, 李武全. 广西涠洲岛海域浮游植物和赤潮生物种类组成的初步研究[J]. 海洋通报, 2008, 27 (3): 43-48 [Liu GQ, Shi HY, Wei CL, Li WQ. Preliminary studies on phytoplankton and red tide organism composition in the coastal water of the Weizhou Island, Guangxi [J]. *Mar Sci Bull*, 2008, 27 (3): 43-48]
- 王雨, 林茂, 林更铭, 项鹏. 广西涠洲海域的浮游植物跟踪监测与对比分析[J]. 生态科学, 2009, 28 (6): 516-522 [Wang Y, Lin M, Lin GM, Xiang P. Sequential monitoring and contrastive analyzing of phytoplankton in oil spillage ocean in Guangxi [J]. *Ecol Sci*, 2009, 28 (6): 516-522]
- 刘东艳, 孙军, 张利永. 胶州湾浮游植物水华期群落结构特征[J]. 应用生态学报, 2003, 14 (11): 1963-1966 [Liu DY, Sun J, Zhang LY. Structural characteristics of phytoplankton community during harmful algae bloom in Jiaozhou bay [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14 (11): 1963-1966]
- 高东阳, 李纯厚, 刘广锋, 张汉华. 北部湾海域浮游植物的种类组成与数量分布[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21 (3): 13-18 [Gao DY, Li CH, Liu GF, Zhang HH. The species composition and distribution of phytoplankton in the Beibu Bay [J]. *J Zhanjiang Ocean Univ*, 2001, 21 (3): 13-18]
- 韦蔓新, 何本茂. 钦州湾近20 a来水环境指标的变化趋势V. 浮游植物生物量的分布及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2008, 27 (3): 253-257 [Wei MX, He BM. Change trend of water environmental index in last 20 a of Qinzhou Bay V. Biomass distribution of phytoplankton and effect factors [J]. *Mar Environ Sci*, 2008, 27 (3): 253-257]
- 柳丽华, 左涛, 陈瑞盛, 王俊. 2004年秋季长江口海域浮游植物的群落结构和多样性[J]. 海洋水产研究, 2007, 28 (3): 112-119 [Liu LH, Zuo T, Chen RS, Wang J. Community structure and diversity of phytoplankton in the estuary of Yangtse River in Autumn [J]. *Mar Fish Res*, 2007, 28 (3): 112-119]
- 陈清潮, 黄良民, 尹建强, 张谷贤. 南沙群岛海区浮游动物多样性研究[M]//中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区海洋生物多样性研究. 北京: 科学出版社, 1994: 42-50 [Chen QC, Huang LM, Yin JQ, Zhang GY. Biodiversity of zooplankton in Nansha Islands [M]// The Multidisciplinary Oceanographic Expedition Team of Academia Sinica to Nansha Islands ed. Marine Biodiversity Research in Nansha Islands and Neighbouring Area. Beijing: Ocean Press, 1994: 42-50]
- 孟顺龙, 陈家长, 胡庚东, 瞿建宏, 吴伟, 范立民, 马晓燕. 太湖蠡湖浮游植物群落特征及其对水质的评价[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19 (1): 30-36 [Meng SL, Chen JC, Hu GG, Qu JH, Wu W, Fan LM, Ma XY. Phytoplankton community characteristics and its eco-assessment on water quality in Lihu Lake, Taihu Lake [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2010, 19 (1): 30-36]
- 孙军, 刘东艳, 钱树本. 一种海洋浮游植物定量研究分析方法——Utermöhl方法的介绍及其改进[J]. 黄渤海海洋, 2002, 20 (2): 105-112

- [Sun J, Liu DY, Qian SB. A quantitative research and analysis method for marine phytoplankton: An introduction to Utermöhl method and its modification [J]. *J Oceanogr Huanghai Bohai Seas*, 2002, **20** (2): 105-112]
- 23 Hensen V. über die Bestimmung des Planktonsoder desim Meeretreibenden Materials an Pflanzen und Thieren. Kommission zurwissenschaftlichen Untersuchung der deutschen Meere in Kiel , 1882-1886 [J]. *V Bericht Jahrgang*, 1887, **12-16**: 1-107
- 24 Lohmann H. Ueber das Fischenmit Netzen aus Müllergaze Nr 20 zu dem Zwecke quantitativen Untersuchungen des Auftrihs. Wissenschaftliche Meeresuntersuchungen [M]. Abteilung Kiel , Neue Folge, 1901, **5**: 46-66
- 25 张峰, 上官铁梁. 山西南方红豆杉 (*Taxus mariei*) 森林群落的生态优势度分析[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1988, **11** (3): 82-87 [Zhang F, Shangguan TL. Analysis on the ecological dominance of the *Taxus mairei* forest community in Shanxi [J]. *J Shanxi Uni (Nat Sci Ed)*, 1988, **11** (3): 82-87]
- 26 金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965: 63-64 [Jin DX, Chen JH, Huang KG. China Marine Planktonic Diatom [M]. Shang-hai: Shanghai Science and Technology Press, 1965: 63-64]
- 27 郭玉洁, 钱树本. 中国海藻志 (第5卷 硅藻门 第1册 中心纲) [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-493 [Guo YJ, Qian SB. China Sea-weed Records: Fifth Volume Bacillariophyta [M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-493]
- 28 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[J]. 海洋学报, 1998, **20** (1): 50-57 [Liu ZL, Ning XR, Cai YM. Distribution characteristics of size-fractionated chlorophyll *a* and productivity of phytoplankton in the Beibu Gulf [J]. *Acta Oceanol Sin*, 1998, **20** (1): 50-57]
- 29 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. 生命科学, 2001, **13** (2): 54-60 [Zhou MJ, Zhu MY, Zhang J. Status of harmful algal blooms and related research activities in China [J]. *Chin Bull Life Sci*, 2001, **13** (2): 54-60]
- 30 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第十二分册: 广西海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 255-256 [Compilation Committee of Records of Gulf and Bay in China. Records of Gulfs and Bays in China 12th Fascicule (The Gulfs and Bays in Guangxi) [M]. Beijing: Ocean Press, 1993: 255-256]