•研究报告•

福建6个港湾浮游植物多样性及其与水系的关系

叶又茵[#] 项 鹏[#] 王 雨 林 茂^{*}

(国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005)

摘要: 本文分析了2010年和2011年春季和秋季于福建宁德、莆田、湄洲、厦门、漳浦和东山等6个港湾采集的浮游植物样品和相关数据。6个港湾共记录浮游植物4门102属206种, 种数以硅藻最多, 甲藻次之, 金藻和蓝藻较少。6个港湾中, 种类数最多的为莆田(110种), 其次为东山(106种)、厦门(100种)、漳浦(95种)、湄洲(86种)、宁德最少(63种)。季节分析表明, 春季的浮游植物种数呈北部港湾高于南部的分布态势, 秋季反之; 春季的浮游植物细胞丰度分布大致为由北部港湾至南部港湾递减, 秋季相反。春季多样性指数变化范围在1.15–3.05, 最高值出现在东山, 最低值出现在宁德; 秋季多样性指数在2.55–3.65之间, 最高值在东山, 最低值在厦门。分析认为, 浮游植物多样性分布模式受不同水系消长的影响。与历史数据相比, 浮游植物总平均丰度较以往上升, 优势种排序出现变化, 适应高营养盐的种类成为主要优势种。

关键词: 浮游植物; 季节动态; 空间分布; 水系变化; 年际变化; 多样性指数

Phytoplankton diversity and its relationship with currents in the six bays of Fujian

Youyin Ye[#], Peng Xiang[#], Yu Wang, Mao Lin^{*}

Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen, Fujian 361005

Abstract: In this study, species composition, species abundance, and seasonal variation of phytoplankton were surveyed in six Fujian bays, including Ningde, Putian, Meizhou, Xiamen, Zhangpu, and Dongshan from 2010 to 2011. During these surveys, 206 species belonging to 102 genera were identified, and diatoms were the dominant species followed by dinoflagellate species. The bay with the most species was Putian (110), followed by Dongshan (106), Xiamen (100), Zhangpu (95), Meizhou (86), and the least number of species was found in Ningde. Using a seasonal analysis, the amount of phytoplankton species in northern bays was higher than that in the southern bays in the spring, and the reverse was true in the fall. Interestingly, the abundance of phytoplankton species was higher in northern bays than in southern bays in the spring and the reverse was found in the fall. The diversity index ranged from 1.15 to 3.05 in the spring, and was highest in Dongshan, and lowest in Ningde. In the fall, the highest diversity index value was found in Dongshan, and the lowest was found in Xiamen. The results indicated that phytoplankton diversity in this area was mainly controlled by the growth and decline of the Fujian-Zhejiang coastal current and the South China Sea warm current. Compared with historical data, the abundance of phytoplankton has increased, and the species which adapt to high nutrient concentrations become main dominant species.

Key words: phytoplankton; seasonal dynamics; spatial distribution; currents change; interannual variation; diversity indices

浮游植物是海洋生态系统的初级生产者, 是海洋食物网的基础环节, 对海洋生态系统中能量流动、物质循环和信息传递起关键作用。浮游植物物

种分布与海洋环境变化密切相关, 海洋环境的改变直接或间接地影响浮游植物的群落结构, 同时浮游植物物种分布的变化对环境的变化起着指示作用

收稿日期: 2016-11-03; 接受日期: 2017-02-17

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费(海三科 2015022)

[#] 共同第一作者 Co-first authors

^{*} 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: linmao@tio.org.cn

(Round et al, 1981)。因此, 研究浮游植物群落结构对于了解环境变化对海域生态系统产生的影响有着重要的理论和实际应用价值。

20世纪70年代以来, 我国学者陆续开展了台湾海峡浮游植物多样性和生态研究。程兆第(1997)、金德祥(1982)、杨清良(1995)、谢文玲等(2007)、林更铭和杨清良(2007)在对台湾海峡浮游植物群落结构进行分析时发现, 福建沿海浮游植物以广温种占优, 其次为暖水种和温带种; 黄加琪等(2000)在台湾海峡南部用改进的Manta型漂浮生物网采集浮游植物, 发现其数量具有一定的昼夜变化; 黄邦钦等(2003)分析了台湾海峡微微型浮游植物的时空分布及其调控机制, 发现微微型浮游植物不同类群在时空分布上存在“位移”现象, 与不同类群对温度敏感性和对光的利用能力的差异以及生存空间的互补性因素有关; 张壮丽等(2006)在对福建海区春夏两季浮游植物的分析中发现, 种类和数量分布变化与不同水流消长密切相关; 林更铭和杨清良(2007)在整合两岸学者有关台湾海峡的浮游植物物种多样性研究的基础上, 整理了福建沿海及台湾海峡小型浮游植物共620种; 王雨等(2011)对闽浙沿岸流消退时期福建北部海域的研究发现, 该时期浮游植物种类具有典型亚热带生物特点。对福建港湾浮游植物多样性和生态调查的报道较少, 林更铭等(1993, 1994)、杨清良等(2000)在对厦门岛周围海域浮游植物的调查分析中发现细胞总量年高峰在夏季, 次高峰在春季; 唐森铭和陈兴群(2006)对泉州湾的浮游植物分析发现, 底栖硅藻是生物量昼夜变化的重要部分, 并且在潮汐和昼夜变化综合作用下, 浮游植物的群落结构也发生相应变化; 江兴龙和宋立荣(2009)在对泉州湾赤潮常规检测中发现, 海域水质营养盐含量和组成结构的变化会引起赤潮藻类种群增殖竞争力间强弱的相对变化, 而种群增殖竞争力强的种类有可能迅速增殖取代原有的优势种而演替为新的优势种。

那么, 在较大空间尺度下(多港湾), 福建港湾浮游植物有什么分布模式? 空间的异质性是如何影响港湾浮游植物多样性的? 本研究依据2010–2011年春、秋季自北至南, 在宁德、莆田、湄洲、厦门、漳浦和东山6个港湾调查所获的浮游植物样品和收集的相关数据, 分析了浮游植物种类组成、类群特征、丰度分布等, 探讨了福建港湾浮游

植物多样性特征和空间分异格局及其多样性模式与生境条件的关联。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

2010年和2011年春秋两季在宁德(2010年5月、10月)、莆田(2011年5月、10月)、湄洲(2010年4月、2011年9月)、厦门(2011年5月、9月)、漳浦(2011年4月、9月)和东山(2011年4月、9月) 6个港湾区域开展浮游植物多样性调查(图1), 两季度共设置87个采样站位。6个港湾的地理位置北起宁德港湾, 南至东山港湾, 位于福建沿岸117.49°–120.40° E, 23.68°–27.07° N之间。受九龙江、闽江、漳江等大陆径流以及闽浙沿岸流、南海暖流等沿岸流季节变化的影响, 水系特征复杂。

1.2 取样和分析方法

参照GB/T 12373.6-2007, 分表层(离水面0.5 m)和底层(离海底1 m)各取500 mL水样, 个别站在某季节水深不足5 m时, 仅采集表层水样。样品用5%中性甲醛固定, 静止沉淀至少24 h, 再用细小虹吸管小心吸去上清液, 视样品浓度浓缩至一定体积。抽取分样于Olympus BH-2光学镜下用浮游植物计数板进行种类鉴定和计数, 并按种类计算细胞丰度(cells/dm³)。种名参照《中国海区常见浮游植物种名更改初步意见》(孙军和刘东艳, 2002)。

浮游植物群落按生态类群划分为广温种、暖水种和温带种。

物种丰度相似性采用多维尺度分析方法。

物种多样性采用Shannon-Wiener指数(H')计算(孙军和刘东艳, 2004): $H' = -\sum (n_i/N) \log_2(n_i/N)$ 。

均匀度采用Pielou均匀度公式计算(国家技术监督局, 2007): $J = H'/\log_2(S)$ 。

优势度 $Y = (n_i/N) f_i$ 。

上述各式中, N 为所有物种的个体总数, n_i 为第 i 种的个体总数, f_i 为该种在各样品中出现的频率。

2 结果

2.1 浮游植物种类组成和种数变化

6港湾共记录浮游植物206种, 隶属于4门102属, 其中, 硅藻89属174种, 甲藻10属26种, 金藻2属4种, 蓝藻1属2种。6港湾都以硅藻种类数最多, 甲藻次之, 蓝藻和金藻只出现在个别港湾中(图2)。春秋两季总种数以莆田最多, 为110种, 其次为东山(106种)、厦

图1 福建6个港湾调查站位的分布
Fig. 1 Phytoplankton sampling stations in the six bays of Fujian Province

图2 福建6个港湾浮游植物各类别种数
Fig. 2 The species number of phytoplankton groups in the six bays of Fujian

门(100种)、漳浦(95种)、湄洲(86种), 宁德最少(63种)(图3)。其中, 春季于莆田港湾发现的种类数最多(68种), 其次为湄洲和东山港湾(66种), 宁德港湾发现的种类数最少, 只有44种; 秋季港湾种类数呈由北往南递增的趋势, 东山港湾发现的种类数最多, 达到83种, 其次为漳浦(66种), 宁德港湾最少, 仅为41种。

从季节变化上来看, 处于福建海域北部的宁德、莆田、湄洲港湾春季种类数多于秋季, 而处于南部的厦门、漳浦和东山港湾则相反(图3)。

6港湾共记录优势种20种(附录1), 其中中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)被检出的频率最高, 除宁德、漳浦港湾的春季和东山港湾的秋季外, 在其余港湾皆是优势种; 其次为旋链角毛藻(*Chaetoceros*

图3 福建6个港湾浮游植物春秋季节种数

Fig. 3 The species number of phytoplankton in spring and autumn in the six bays of Fujian

curvisetus)和具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*); 星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphus*)、笔尖形根管藻(*Rhizosolenia syliformis*)、太平洋海链藻(*Thalassiosira pacific*)、圆海链藻(*T. rotula*)和伏氏海线藻(*Thalassionema frauenfeldii*)仅在单个港湾中的单个季节成为优势种。

2.2 浮游植物生态类群

由图4可知,两季皆以广温种为主。春季,广温种种类数最高值在莆田港湾检出(51种),次高值区集中在厦门和东山海域,宁德港湾检出最低值(29种);暖水种种类数于东山港湾最高(17种),次高值区集中在莆田和湄洲港湾;温带种种类数变化趋势与暖水种基本一致。秋季,广温种种类数变化趋势

与总种数一致,呈由北至南递增的趋势,最高值出现在东山港湾(54种),最低值在宁德港湾(33种);暖水种种类数高值区集中在南部的厦门和东山港湾,低值区在北部的宁德和湄洲港湾;温带种种类数最高值于东山港湾检出(9种),莆田次之(8种),宁德最低(2种)。

按各生态类群丰度占总丰度比例来看,两季各生态类群丰度组成皆以广温种占优(图5)。春季,除宁德、厦门港湾外,其余各港湾温带种丰度所占比例大于暖水种;秋季,除莆田、湄洲港湾外,其余港湾暖水种丰度皆远大于温带种。

2.3 浮游植物丰度时空分布

春季浮游植物细胞丰度高值区主要集中在中北部港湾,其中,最高值在宁德港湾检出,丰度达到 616.47×10^3 cells/dm³,于湄洲港湾检测出次高值(390.38×10^3 cells/dm³),最低值为厦门港湾(6.74×10^3 cells/dm³);秋季福建各港湾浮游植物细胞丰度值总体下降,丰度高值区向南部移动:东山港湾检测出最高值(53.40×10^3 cells/dm³),厦门次之(40.12×10^3 cells/dm³),莆田最低,仅为 4.63×10^3 cells/dm³(图6)。

2.4 浮游植物群落多样性指数和均匀度

春季浮游植物群落多样性指数在东山港湾最高($H' = 3.05$),次高值出现在湄洲港湾($H' = 3.02$),宁德港湾多样性指数最低($H' = 1.15$)。秋季各港湾多样性指数总体提升,中南部各港湾除厦门之外皆大于3.00,其中最高值为东山港湾($H' = 3.65$),湄洲次之($H' = 3.58$),厦门最低($H' = 2.55$)。可以看出,各港湾两季多样性指数大体呈现由南至北递减趋势(表1)。

图4 福建6个港湾春季(a)和秋季(b)浮游植物各生态类群物种数

Fig. 4 The species number of phytoplankton ecological groups in spring (a) and autumn (b) in the six bays of Fujian

图5 福建6个港湾浮游植物各生态类群丰度所占比例
Fig. 5 The proportion of abundance of phytoplankton ecological groups in the six bays of Fujian

图6 福建6个港湾浮游植物丰度($\times 10^3 \text{ cells/dm}^3$)
Fig. 6 The phytoplankton abundance in the six bays of Fujian ($\times 10^3 \text{ cells/dm}^3$)

由表1可以看出,各港湾均匀度指数(J)较高,空间变化趋势与多样性指数一致。春季均匀度指数最低值为宁德港湾($J = 0.28$),最高值出现在南部的厦门港湾(0.79),其余港湾差异不明显;秋季均匀度总体提升,最高值在湄洲港湾检出($J = 0.84$),东山港湾次之($J = 0.81$),厦门最低($J = 0.60$)。

2.5 浮游植物群落多维尺度分析

分别对春季和秋季各港湾物种丰度数据为基

础进行多维尺度分析,可以分别将两季浮游植物划分为5大类。春季划分为东山至漳浦类群、厦门类群、莆田类群、湄洲类群和宁德类群,且莆田和东山至漳浦类群相似度较为接近,宁德港湾沿岸和近海的类群有一定区别。秋季划分为东山类群、漳浦至厦门类群、湄洲类群、宁德类群和莆田类群(图7)。

浮游植物分布与空间异质性的关系分析表明,处于不同区域的港湾有较为独立的浮游植物群落结构,即使是同一个港湾,位于沿岸和近岸、近湾顶和近湾口的浮游植物群落也略有不同。

3 讨论

3.1 春秋季福建沿岸海洋水文特征

福建沿海位于台湾海峡以西,是南海暖流、闽浙沿岸流和粤东沿岸流流经之处。冬季伊始,低温($<15^\circ\text{C}$)低盐(≤ 30)的闽浙沿岸流经台湾海峡由东北向西南贴岸流动,海洋锋面集中在福建海域中、北部海域。春季,西南季风渐强,南海高温($>18^\circ\text{C}$)高盐(≥ 31)水逐渐北上,直至春末消退。秋季,西南季风渐退,在东北季风的推动下,闽浙沿岸流南侵入

表1 福建6个港湾浮游植物群落的Shannon-Wiener多样性指数(H')及Pielou均匀度(J)

Table 1 Diversity and evenness indices of phytoplankton in the six bays of Fujian		宁德 Ningde	莆田 Putian	湄洲 Meizhou	厦门 Xiamen	漳浦 Zhangpu	东山 Dongshan
H'	春季 Spring	1.15	2.31	3.02	2.39	2.68	3.05
	秋季 Autumn	2.83	2.58	3.58	2.55	3.22	3.65
J	春季 Spring	0.28	0.69	0.66	0.79	0.61	0.71
	秋季 Autumn	0.73	0.72	0.84	0.60	0.72	0.81

图7 春季(A)、秋季(B)福建6个港湾浮游植物群落多维尺度分析。N: 宁德; P: 莆田; M: 湄洲; X: 厦门; Z: 漳浦; D: 东山

Fig. 7 Multidimensional scaling of phytoplankton in spring and autumn in the six bays of Fujian. N, Ningde; P, Putian; M, Meizhou; X, Xiamen; Z, Zhangpu; D, Dongshan.

福建海域并达到平潭湾附近, 并随着东北季风的加强直至冬季基本控制福建海域(伍伯瑜, 1982; 肖晖等, 2002; 王雨等, 2011; 万小芳等, 2013)。因此, 研究区受湾内径流与湾外水文状况的影响。

3.2 水系对福建港湾浮游植物物种数的影响

春季, 南下的闽浙沿岸流与北上的南海暖流交汇于莆田、湄洲港湾附近的福建中北部(伍伯瑜, 1982; 肖晖等, 2002; 刘金芳等, 2002; 王雨等, 2011), 因此浮游植物种数于莆田、湄洲最多, 暖水种与温带种在其中占据较高比例(图5), 多样性指数也相应地处于较高值(表1); 秋季伊始, 南海暖流减弱, 闽浙沿岸水渐强, 水温由南至北呈现下降趋势(伍伯瑜, 1982; 肖晖等, 2002; 王雨等, 2011; 万小芳等, 2013), 各港湾浮游植物的种数亦表现出显著的由北至南递增的趋势, 特别是受高温高盐南海暖流以及营养盐较丰富的粤东沿岸水影响, 东山港湾浮游植物生长繁殖旺盛, 种类数达到高值, 暖水种

及温带种数量的激增导致东山港湾多样性指数于该季达到一个高值($H' = 3.65$)。因此, 研究区春季浮游植物种数呈北部港湾高于南部港湾的分布态势, 秋季浮游植物种数呈南部港湾高于北部港湾的分布态势。

3.3 水系对福建港湾浮游植物丰度分布的影响

长江口海域和浙江沿岸海域时常爆发大规模甲藻赤潮, 赤潮生物随着闽浙沿岸流进入福建北部海域, 一旦水域环境条件适宜, 就可能引起赤潮(蔡燕红等, 2002; 王金辉和黄秀清, 2003; 唐静亮等, 2005)。在本次调查中, 宁德港湾个别站位有大量具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)富集, 其丰度已达到赤潮阈值($\geq 1.0 \times 10^6$ cells/dm³), 导致该海域均匀度和多样性指数最低(表1)。这一区域时常爆发甲藻赤潮, 也可能是由于甲藻赤潮爆发后, 赤潮生物产生的孢囊沉积于海底, 在底泥团中作为细小的淤泥粒, 可被水流运输而逐渐集中至深水谷盆, 当底层水温等环境条件合适, 就又会发生同一赤潮(王金辉和黄秀清, 2003)。此外, 由于闽浙沿岸流及南海暖流在春季与福建中北部海域交汇, 形成营养盐和颗粒有机碳的高值区, 满足浮游植物大量繁殖的条件, 使得湄洲港湾丰度出现次高值。这与王雨等(2011)和林更铭等(2012)的研究结果一致。因此, 从丰度平面分布上来看, 春季最高值出现在宁德港湾, 湄洲次之, 莆田最低。

秋季丰度平面分布由北至南呈现显著的递增趋势, 于东山港湾处丰度达到最高值(47.18×10^3 cells/dm³)。根据林更铭、杨清良以及2011年生物生态近海调查等对台湾海峡浮游植物的分析(杨清良, 1995; 林更铭和杨清良, 2007; 唐森铭, 2011), 秋季浮游植物密集区往南推移, 密集中心在东山至厦门之间海域, 而平潭岛外局部站位丰度很低, 与本次调查结果一致。这是因为秋季随着闽浙沿岸流的增强, 南海暖流开始减弱, 全区水温、盐度普遍下降, 导致浮游植物丰度迅速下降。而此时, 由九龙江、韩江径流与外海水混和而成的粤东沿岸流影响该区(暨卫东和黄尚高, 1989), 由于水体中的营养盐含量比夏季更为丰富, 水温较高, 光照强, 东山港湾浮游植物繁殖生长旺盛, 相比其他海域丰度达到最高值(图6), 物种多样性同样显著提升(表1), 其中暖水种占据了很大的比例(图4, 5)。莆田港湾两季丰度

皆检出最低值,可能与调查海区环境及地形有关,有待进一步探讨。

3.4 水系对福建港湾浮游植物物种多样性及均匀度的影响

春季,仅湄洲和东山两个港湾的物种多样性指数高于3.00,其余港湾皆低于3.00,其中宁德港湾多样性指数最低($H' = 1.15$)(表1)。这是因为受闽浙沿岸流影响,该季部分站位具齿原甲藻繁盛,其丰度已达到赤潮阈值($\geq 1.0 \times 10^6$ cells/dm³),群落结构趋向简单化,导致浮游植物多样性降低。而受南海暖流影响的宁德以南港湾,物种多样性指数较高,在2.31–3.05之间,最高值出现于东山湾($H' = 3.05$),次高值出现于湄洲港湾($H' = 3.02$)。秋季福建海域温度高于春季,多样性指数总体上亦高于春季,变化趋势与春季基本一致。

物种多样性指数反映浮游植物种类丰富度和种间细胞数量关系,并与环境的异质性有关。均匀度代表群落内物种分布的均匀程度,是反映群落是否成熟和稳定的特征之一。综合上述群落特征指数,可见福建港湾两季异质性较高,种间分布在秋季较为均匀,种类多样性不丰富,浮游植物群落不稳定。这种不稳定在春季表现得尤为明显,这是因为初春还处于闽浙沿岸流强盛时期的末梢,底层水体较表层环境的异质性高,浮游植物种间分布不均匀(谢文玲等, 2007; 林更铭和杨清良, 2007)。这种现象的出现是由于初春近底层还有向北流动的南海暖水,海水涡动混合较为强烈的结果(伍伯瑜, 1983; 黄荣祥等, 1989; 谢文玲等, 2007)。

3.5 水系对福建港湾浮游植物优势种的影响

春季和秋季福建各港湾优势种以广温沿岸种为主(附录1)。春季,6港湾以广温广盐种以及广温低盐种为主,这些类群种类较多,个别种类细胞丰度较大,在福建海域颇为常见,是闽浙沿岸流的主要特征种类。初春闽浙沿岸流的低温低盐水在东北季风的推动下水舌范围可直达福建海域中北部(伍伯瑜, 1982; 暨卫东和黄尚高, 1989; 肖晖等, 2002),加之春季为福建梅雨季节,大量雨水及淡水径流的冲刷导致海水盐度不稳定,浮游植物群落以广温广盐种及低盐种为主导。但逐渐北上的南海高温高盐水也将暖水高盐种类带至福建海域中部,使得笔尖形根管藻、圆海链藻等在莆田、东山等海域占据一

定优势。秋季伊始,东北季风逐渐强劲,闽浙沿岸流南下影响到平潭海域附近,但此时南海高温高盐水仍控制着大部分福建海域,暖水性种类如有翼圆筛藻(*Coscinodiscus bipartitus*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)等在6个港湾依然有较大丰度,个别种类如洛氏角毛藻为东山的第一优势种(附录1)。

强烈的海水涡动混合会影响到海洋底部的生态环境,使得底栖生物种类受扰动而浮游于水体之中。如前文所述,春季闽浙沿岸流与南海暖水交汇于福建中北部海域,秋季南海暖流南缩,与粤东沿岸水、近岸及台湾浅滩涌升流形成混合水影响着东山港湾附近海域,复杂的水文环境使得具槽帕拉藻、派格棍形藻(*Bacillaria paxillifera*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)等底栖种大量浮游于水体中,在表层浮游植物群落中占据优势(附录1)。此外,湄洲和东山港湾底栖种出现在表层水体中也可能是与其半封闭式港湾的特殊地势有关(李孟国, 2001)。

3.6 港湾浮游植物多样性变化

与可比历史资料(附录2)对比发现,福建各港湾浮游植物细胞总平均丰度呈增长趋势,优势种排序出现变化,原先不占据优势的种类如中肋骨条藻、具槽帕拉藻等喜肥种成为主要优势种,这可能与近几年营养盐的增加有关(郑小宏, 2010; 邵留, 2014; 侯丽媛, 2014; 王臻, 2015)。这与王江涛和曹婧(2012)在长江口海域和吴玉霖(2004)对胶州湾浮游植物长期变化的研究结果基本一致。

参考文献

- Cai YH, Jiang XS, Huang XQ (2002) Studies on the red tide of *Prorocentrum dantatum* in Zhoushan archipelago sea area. Marine Environmental Science, 21(1), 30–45. (in Chinese with English abstract) [蔡燕红, 蒋晓山, 黄秀清 (2002) 舟山海域一次具齿原甲藻赤潮初探. 海洋环境科学, 21(1), 30–45.]
- Cheng ZD (1997) Planktonic diatoms in the southern region of Taiwan Strait, Fujian, China. Journal of Xiamen University (Natural Science), 18(4), 112–117. (in Chinese with English abstract) [程兆第 (1997) 福建南部海区的浮游硅藻及其季节变化. 厦门大学学报(自然科学版), 18, 112–117.]
- Hou LY, Hu AY, Yu CP (2014) Evaluation on spatial-temporal distribution of nutrients and potential eutrophication in surface waters of Jiulongjiang River and its Estuary. Journal of Applied Oceanography, 33, 369–378. (in Chinese with Eng-

- lish abstract) [侯丽媛, 胡安谊, 于昌平 (2014) 九龙江河口表层水体营养盐含量的时空变化及潜在富营养化评价. 应用海洋学报, 33, 369–378.]
- Huang BQ, Hong HS, Lin XJ, Chen JX (2003) Ecological study on picophytoplankton in the Taiwan Strait. 1. Spatial and temporal distribution and its controlling mechanism. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(4), 72–82 (in Chinese with English abstract) [黄邦钦, 洪华生, 林学举, 陈纪新 (2003) 台湾海峡微微型浮游植物的生态研究. 1. 时空分布及其调控机制. 海洋学报, 25(4), 72–82.]
- Huang JQ, Li SJ, Yu Y (2000) Phytoneuston in the southern Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica*, 22(4), 67–73. (in Chinese with English abstract) [黄加祺, 李少菁, 俞瑶 (2000) 台湾海峡南部漂浮植物. 海洋学报, 22(4), 67–73]
- Huang RX (1989) Characteristics of water temperature and salinity in North central Taiwan Strait. *Marine Sciences*, 6, 33–38. (in Chinese with English abstract) [黄荣祥 (1989) 台湾海峡中、北部海域温、盐度特征. 海洋科学, 6, 33–38.]
- Ji WD, Huang SG (1989) Relationship between nutrients, salinity and phytoplankton in Fujian coastal water. *Tropic Oceanology*, 8(2), 55–64. (in Chinese with English abstract) [暨卫东, 黄尚高 (1989) 福建海岸带海水营养盐消长与温、盐、浮游植物的关系. 热带海洋, 8(2), 55–64.]
- Jiang XL, Song LR (2009) The influence factors on dominant red-tide algal species succession in Quanzhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 40, 761–767. (in Chinese with English abstract) [江兴龙, 宋立荣 (2009) 泉州湾赤潮藻类优势种演替影响因子探讨. 海洋与湖沼, 40, 761–767.]
- Jin DX (1982) Ecological studies on diatoms from Taiwan strait. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1(1), 80–86. (in Chinese with English abstract) [金德祥 (1982) 台湾海峡硅藻类的特点. 台湾海峡, 1(1), 80–86.]
- Li MG (2001) Hydrographic and sediment analyses of Xinghua Bay. *Journal of Waterway and Harbour*, 22(4), 156–159. (in Chinese with English abstract) [李孟国 (2001) 兴化湾水文泥沙特征分析. 水道港口, 22(4), 156–159.]
- Lin GM, Yang QL (2007) Species diversity and the distribution of micro-phytoplankton in the Taiwan Strait. *Biodiversity Science*, 15, 31–45. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良 (2007) 台湾海峡小型浮游植物的物种多样性和分布特征. 生物多样性, 15, 31–45.]
- Lin GM, Yang QL, Lin JM (1993) Relationship between phytoplankton and environment factors in waters around Xiamen Island. *Marine Science Bulletin*, 12(6), 40–45. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良, 林金美 (1993) 厦门岛周围海域浮游植物与环境因子的关系. 海洋通报, 12(6), 40–45.]
- Lin GM, Yang QL, Lin JM (1994) Abundance and species composition of phytoplankton in waters around Xiamen Island. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 13, 353–358. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良, 林金美 (1994) 厦门岛周围海域浮游植物的种类组成及丰度. 台湾海峡, 13, 353–358.]
- Lin GM, Yang QL, Wang Y, Lin WH (2012) Species composition and distribution characteristics of phytoplankton in Northern sea of Fujian, China during withdraw of Zhe-Min Coastal current. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 18, 411–420. (in Chinese with English abstract) [林更铭, 杨清良, 王雨, 林维含 (2012) 福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游植物的种类组成与分布特征. 应用与环境生物学报, 18, 411–420.]
- Liu JF, Liu Z, Gu YY, Ren S, Zhang GY (2002) Analysis of the hydrographic elements features in Taiwan Strait. *Marine Forecasts*, 19(3), 22–32. (in Chinese with English abstract) [刘金芳, 刘忠, 顾翼炎, 任帅, 张国友 (2002) 台湾海峡水文要素特征分析. 海洋预报, 19(3), 22–32.]
- Round FE (1981) *The Ecology of Algae*. Cambridge University Press, London.
- Shao L, Yu KF, Wu HL, Huo YZ, He Q, Shen AL (2014) Annual analysis and evaluation of water quality in Sansha Bay, Fujian. *Journal of Shanghai Ocean University*, 23, 229–237. (in Chinese with English abstract) [邵留, 于克锋, 吴海龙, 霍元子, 何青, 沈盎绿 (2014) 三沙湾海域水质周年变化分析与评价. 上海海洋大学学报, 23, 229–237.]
- Sun J, Liu DY (2002) The preliminary notion on nomenclature of common phytoplankton in China seas waters. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33, 271–286. (in Chinese with English abstract) [孙军, 刘东艳 (2002) 中国海区常见浮游植物种名更改初步意见. 海洋与湖沼, 33, 271–286.]
- Sun J, Liu DY (2004) The application of diversity indices in marine phytoplankton studies. *Acta Oceanologica Sinica*, 26, 62–75. (in Chinese with English abstract) [孙军, 刘东艳 (2004) 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用. 海洋学报, 26, 62–75.]
- State Bureau of Technical Supervise (2007) *The Specification for Oceanographic Survey-Marine Biological Survey* (GB/T12736. 6-2007), pp. 30–35. China Standard Press, Beijing. [国家技术监督局 (2007) 《海洋调查规范》(GB/T12736. 6-2007), 30–35页. 中国标准出版社, 北京.]
- Tang JL, Mao HY, Guo MR (2005) Analysis of the red tide of *Prorocentrum dantatum* in the north of Zhejiang coastal water. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 24(4), 330–334. (in Chinese with English abstract) [唐静亮, 毛宏跃, 过美蓉 (2005) 浙江北部海域的具齿原甲藻赤潮分析. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 24(4), 330–334.]
- Tang SM (2011) *Harbour Biological Ecological Investigation Report*. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen. (in Chinese) [唐森铭 (2011) 港湾生物生态调查报告. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门.]
- Tang SM, Chen XQ (2006) Phytoplankton diel rhythm in the waters of Quanzhou Bay in Fujian, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(4), 129–137. (in Chinese with English abstract) [唐森铭, 陈兴群 (2006) 泉州湾水域浮游植物群落的昼夜变化. 海洋学报, 28(4), 129–137.]
- Wan XF, Pan AJ, Guo XG, Jing CS, Huang J (2013) Seasonal variation features of the hydrodynamic environment in the western Taiwan Strait. *Journal of Oceanography in Taiwan*

- Strait, 32, 156–163. (in Chinese with English abstract) [万小芳, 潘爱军, 郭小刚, 靖春生, 黄奖 (2013) 台湾海峡西侧水动力环境的季节变化特征. 台湾海峡, 32, 156–163.]
- Wang JH (2003) The HAB species *Prorocentrum dentatum* and its characteristics in East China Sea. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 22(2), 128–131. (in Chinese with English abstract) [王金辉 (2003) 东海赤潮生物具齿原甲藻及其特征. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 22(2), 128–131.]
- Wang JH, Huang XQ (2003) Ecological characteristics of *Prorocentrum dentatum* and the cause of harmful algal bloom formation in China Sea. Chinese Journal of Applied Ecology, 14, 1065–1069. (in Chinese with English abstract) [王金辉, 黄秀清 (2003) 具齿原甲藻的生态特征及赤潮成因浅析. 应用生态学报, 14, 1065–1069.]
- Wang JT, Cao J (2012) Variation and effect of nutrient on phytoplankton community in Changjiang Estuary during last 50 years. Marine Environmental Science, 31, 310–315. (in Chinese with English abstract) [王江涛, 曹婧 (2012) 长江口海域近50年来营养盐的变化及其对浮游植物群落演替的影响. 海洋环境科学, 31, 310–315.]
- Wang Y, Lin M, Lin GM, Xiang P (2011) Community structure of phytoplankton during the fading period of Zhe-Min coastal water in Taiwan Strait. Marine Science Bulletin, 30, 220–225. (in Chinese with English abstract) [王雨, 林茂, 林更铭, 项鹏 (2011) 浙闽沿岸流消退时期的浮游植物群落结构特征. 海洋通报, 30, 220–225.]
- Wang Z (2015) Preliminary research of the nutrient structure and restriction in Dongshan bay. Environmental protection science, 41, 93–97. (in Chinese with English abstract) [王臻 (2015) 东山湾营养盐结构及限制作用的初步研究. 环境保护科学, 41, 93–97.]
- Wu BY (1982) Some problems on circulation study in Taiwan Strait. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1(1), 1–7. (in Chinese with English abstract) [伍伯瑜 (1982) 台湾海峡环流研究中的若干问题. 台湾海峡, 1(1), 1–7.]
- Wu BY (1983) The current pattern and hydrologic character in the Taiwan straits and its adjacent waters. Marine Science Bulletin, 2(4), 1–8. (in Chinese with English abstract) [伍伯瑜 (1983) 台湾海峡及其邻近水域的流型和水文特征. 海洋通报, 2(4), 1–8.]
- Wu YL, Sun S, Zhang YS, Zhang F (2004) Quantitative study on long-term variation of phytoplankton in Jiaozhou Bay. Oceanologia et Limnologia Sinica, 35, 518–523. (in Chinese with English abstract) [吴玉霖, 孙松, 张永山, 张芳 (2004) 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究. 海洋与湖沼, 35, 518–523.]
- Xiao H, Guo XG, Wu RS (2002) Summarization of studies on hydrographic characteristics in Taiwan Strait. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 21, 126–138. (in Chinese with English abstract) [肖晖, 郭小刚, 吴日升 (2002) 台湾海峡水文特征研究概述. 台湾海峡, 21, 126–138.]
- Xie WL, Chen CP, Gao YH (2007) Diatom community in sea waters between middle north of Taiwan Strait and Nanji Archipelago in winter, 2005. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 26, 370–379. (in Chinese with English abstract) [谢文玲, 陈长平, 高亚辉 (2007) 台湾海峡中北部至南麂列岛海域2005冬季硅藻群落结构特征. 台湾海峡, 26, 370–379.]
- Yang QL (1995) Species composition and distribution of planktonic diatoms in west side of Taiwan Strait. Acta Oceanologica Sinica, 17, 99–107. (in Chinese) [杨清良 (1995) 台湾海峡西侧浮游硅藻类的种类组成与分布. 海洋学报, 17, 99–107.]
- Yang QL, Lin GM, Cai BJ (2000) Species composition and distribution of phytoplankton in eastern Xiamen waters. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 19, 337–343. (in Chinese with English abstract) [杨清良, 林更铭, 蔡秉及 (2000) 厦门东侧海域浮游植物的种类组成与分布. 台湾海峡, 19, 337–343.]
- Zhang ZL, Ye SZ, Ye QT (2006) The species composition and quantity distribution characteristics of phytoplankton in Fujian sea area. South China Fisheries Science, 5(10), 45–50. (in Chinese with English abstract) [张壮丽, 叶孙忠, 叶泉土 (2006) 福建海区浮游植物种类组成及数量分布特点. 南方水产, 5(10), 45–50.]
- Zheng XH (2010) Changes in nitrogen and phosphate and eutrophication character in Minjiang estuary. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 29, 42–46. (in Chinese with English abstract) [郑小宏 (2010) 闽江口海域氮磷营养盐含量的变化及富营养化特征. 台湾海峡, 29, 42–46.]

(责任编辑: 孙军 责任编辑: 时意专)

附录 Supplementary Material

附录1 福建6港湾浮游植物表底层优势种

Appendix 1 Dominant species in surface and bottom in the six bays of Fujian

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016315-1.pdf>

附录2 本次调查与历史数据比较

Appendix 2 Compare with this survey and historical records

<http://www.biodiversity-science.net/fileup/PDF/2016315-2.pdf>

附录1 福建6港湾浮游植物表底层优势种(S: 表层; B: 底层)

Appendix 1 Dominant species in surface and bottom in the six bays of Fujian

	宁德 Ningde		莆田 Putian		湄洲 Meizhou		厦门 Xiamen		漳浦 Zhangpu		东山 Dongshan	
	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季	春季	秋季
	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn	Spring	Autumn
	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.	S. B.
<i>Asterionellopsis glacialis</i>					√	√						
<i>Bacillaria paxillifera</i>					√	√	√	√				√
<i>Chaetoceros curvisetus</i>			√	√			√		√	√	√	√
<i>Chaetoceros lorenzianus</i>											√	√
<i>Coscinodiscus asteromphus</i>							√					
<i>Coscinodiscus granii</i>							√	√				
<i>Guinaridia striata</i>											√	√
<i>Leptocylindrus danicus</i>			√	√	√	√	√				√	
<i>Nitzschia closterium</i>						√	√					
<i>Paralia sulcata</i>			√		√	√	√		√	√	√	
<i>Pleurosigma acutum</i>						√	√					
<i>Prorocentrum dentatum</i>	√	√										
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>					√	√	√					
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>					√	√	√					
<i>Rhizosolenia styliformis</i>			√									
<i>Skeletonema costatum</i>		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
<i>Thalassionema nitzschioides</i>					√							
<i>Thalassiosira pacifica</i>									√			
<i>Thalassiosira rotula</i>											√	
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>					√							

附录2 本次调查与历史数据比较

Appendix 2 Compare with this survey and historical records

	种数 Species	优势种 Dominant species	丰度 Abundance (cells/dm ³)	文献 References
宁德 Ningde				
春季 Spring	51	纺锤角藻、夜光藻、旋链角毛藻、柔弱角毛藻 <i>Ceratium fusus</i> , <i>Noctiluca scintilans</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Chaetoceros debilis</i>	2.37×10 ³	林金美, 1995
	43	具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	616.47×10 ³	本次调查
秋季 Autumn	50	—	0.05×10 ³	林金美, 1995
	40	中肋骨条藻、具槽帕拉藻、有翼圆筛藻、叉分角藻、汉氏束毛藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Coscinodiscus bipartitus</i> , <i>Ceratium furca</i> , <i>Trichodesmium hildebrandtii</i>	7.09×10 ³	本次调查
莆田 Putian				
春季 Spring	98	奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i>	8.7×10 ³	杜庆红, 1996
	73	旋链角毛藻、丹麦细柱藻、笔尖根管藻、中肋骨条藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i> , <i>Rhizosolenia syliformis</i> , <i>Skeletonema costatum</i>	20.97×10 ³	本次调查
秋季 Autumn	118	中肋骨条藻、琼氏圆筛藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Coscinodiscus jonensianus</i>	0.17×10 ³	杜庆红, 1996
	50	具槽帕拉藻、中肋骨条藻、新月菱形藻 <i>Paralia sulcata</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Nitzschia closterium</i>	4.63×10 ³	本次调查
湄洲 Meizhou				
春季 Spring	30	笔尖形根管藻、并基角毛藻、密联角毛藻、钝根管藻半棘型、印度角毛藻 <i>Rhizosolenia syliformis</i> , <i>Chaetoceros decipiens</i> , <i>Chaetoceros densus</i> , <i>Rhizosolenia hebetata</i> f. <i>semispina</i> , <i>Chaetoceros indicus</i>	13.17×10 ³	林金美, 1991
	72	中肋骨条藻、柔弱几内亚藻、布氏双尾藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Guinardia delicatula</i> , <i>Ditylum brightwellii</i>	49.20×10 ³	唐森铭, 2011
	61	中肋骨条藻、尖刺伪菱形藻、派格棍形藻、丹麦细柱藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Leptocylindrus danicus</i>	390.38×10 ³	本次调查
秋季 Autumn	39	—	5.02×10 ³	林金美, 1991
	88	菱形海线藻、具槽帕拉藻、中肋骨条藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Skeletonema costatum</i>	13×10 ³	唐森铭, 2011
	51	派格棍形藻、新月菱形藻、中肋骨条藻、尖刺伪菱形藻、具槽帕拉藻 <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Nitzschia closterium</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Paralia sulcata</i>	23.76×10 ³	本次调查

漳浦 Zhangpu

春季	97	冰河拟星杆藻、并基角毛藻	57.50×10^3	许翠娅, 2008
Spring		<i>Asterionellopsis glacialis</i> , <i>Chaetoceros decipiens</i>		
	62	具槽帕拉藻、尖刺伪菱形藻、中肋骨条藻、锥状斯氏藻	32.67×10^3	本次调查
		<i>Paralia sulcata</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Scrippsiella trochiodes</i>		
秋季	56	长耳盒形藻、派格棍形藻、中肋骨条藻	0.22×10^3	许翠娅, 2009
Autumn		<i>Odentella aurita</i> , <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Skeletonema costatum</i>		
	66	中肋骨条藻、菱形海线藻、具槽帕拉藻、尖刺伪菱形藻	21.69×10^3	本次调查
		<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Paralia sulcata</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>		

东山 Dongshan

春季	64	菱形海线藻、笔尖形根管藻、派格棍形藻、伯氏根管藻、距端根管藻、粗根管藻、二齿双管藻、三叉角藻、纺锤梨甲藻、夜光藻、透明辐杆藻	0.41×10^3	林金美, 1996
Spring		<i>Thalassionema nitzschioides</i> , <i>Rhizosolenia syliformis</i> , <i>Bacillaria paxillifera</i> , <i>Rhizosolenia bergonii</i> , <i>Rhizosolenia calcar-avis</i> , <i>Rhizosolenia robusta</i> , <i>Amphisolenia bidentata</i> , <i>Ceratium trichoceros</i> , <i>Pyrocystis fusiformis</i> , <i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Bacteriolum hylanus</i>		
	—	—	214.56×10^3	唐森铭, 2011
	65	中肋骨条藻、圆海链藻、旋链角毛藻、丹麦细柱藻	31.10×10^3	本次调查
		<i>Skeletonema costatum</i> , <i>Thalassiosira rotula</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Leptocylin-drus danicus</i>		
秋季	74	粗刺角藻柔软变种、旋链角毛藻、菱形海线藻	32.38×10^3	林金美, 1997
Autumn		<i>Ceratium horridum</i> var. <i>molle</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Thalassionema nitzschioides</i>		
	—	—	51.92×10^3	唐森铭, 2011
	82	洛氏角毛藻、斯氏几内亚藻、旋链角毛藻、丹麦细柱藻	53.4×10^3	本次调查
		<i>Chaetoceros lorenzianus</i> , <i>Guinardia striata</i> , <i>Chaetoceros curvisetus</i> , <i>Leptocylin-drus danicus</i>		