

厦门港叶绿素的时空分布及其与水环境因子关系的多元分析

俞秀霞¹, 孙琳², 陈长平²

(1. 厦门市环境监测站 福建 厦门, 361000; 2. 厦门大学 生命科学学院 福建 厦门, 361102)

摘要: 叶绿素(Chl)是水体初级生产的重要指标, 随环境因素变化而波动, 因此, 周年持续的原位实时监测可以更准确地反映水体初级生产水平及受控因素。作者于 2017 年全年通过水质自动在线监测对厦门港海域的叶绿素及水温、溶解氧、pH、盐度等水环境因子进行了实时监测分析, 并基于多元分析研究了叶绿素含量时空分布与主要水环境因子之间的相关性。结果表明, 厦门港叶绿素含量年平均值为 $(3.89 \pm 7.76) \text{ mg/m}^3$, 最大值为 163.00 mg/m^3 , 出现在同安湾(夏季); 叶绿素含量具有北岸大于南岸的平面分布特点和夏秋季高、冬春季低的季节变化特点。一年中出现两次与浮游植物繁盛期一致的叶绿素含量高值, 分别为夏季(7 月, 10.34 mg/m^3)和冬季(2 月, 7.00 mg/m^3)。叶绿素含量存在显著的昼夜变化规律, 并在不同季节表现为不同的节律: 春季叶绿素含量正午最高; 夏季和秋季在白天降低, 中午达到最低值, 最高值出现在夜间; 冬季叶绿素含量白天上升, 夜晚降低。在聚类分析和 Pearson 相关性分析的基础上, 通过逐步回归建立了叶绿素含量与水环境因子的多元线性模型, 得到了与叶绿素含量关系最密切的环境因子是溶解氧饱和度和水温; 叶绿素含量与溶解氧饱和度和水温均呈显著正相关。

关键词: 厦门港; 叶绿素; 时空分布; 水环境因子; 多元分析

中图分类号: Q178 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)06-0049-14

DOI: 10.11759/hyxx20200108001

浮游植物是海洋生物食物链中必不可少的初级生产者, 具有生命周期短、对环境变化响应迅速的特点, 常被作为水环境状况的指示生物^[1]。光合色素(尤其是叶绿素(Chl))是浮游植物利用光合作用将无机碳转化为有机物质、释放氧气过程中的重要物质, 因此叶绿素含量的分布和变化可以一定程度反映出水体中浮游植物的生物量以及变化规律, 为评估海洋初级生产力提供参考^[2]。浮游植物中的叶绿素包括叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和叶绿素 *c*, 这 3 种叶绿素在不同的藻类种群中有明显的差异, 因此浮游植物群落的结构变化和生活状态会影响水体中叶绿素 *a*、*b*、*c* 所占的比例。硅藻和甲藻细胞中的主要色素是叶绿素 *a* 和 *c*, 其中叶绿素 *a* 通常多于叶绿素 *c*; 叶绿素 *b* 仅存在于绿藻纲(Chlorophyceae)、裸藻纲(Euglenophyceae)和绿枝藻纲(Prasinophyceae)中, 且这几个门类的海产种类较少^[3]。叶绿素 *a* 是叶绿素的主要组成部分, 因此海水中叶绿素 *a* 含量的变化趋势总体与叶绿素含量一致。

浮游植物的分布和生物量(以叶绿素表示)与水体环境的物理-化学因素的变化息息相关, 包括温

度^[4-5]、光照^[4]、悬浮颗粒^[6-7]、季风^[8]等物理过程以及氧气^[9-10]、pH^[1, 7]、盐度^[1, 5]和营养盐^[5, 7, 11]等化学因素。目前已有许多关于港湾海域的叶绿素含量及其与相关水环境因子的相关性的研究报道^[7-9, 12-16], 但由于各海区地形、水文和气候条件不同, 叶绿素的时空分布特征以及主导影响因子也存在差异。研究某个地区的叶绿素的时空分布及其影响因素, 有助于探究特定环境条件下浮游植物生物量变化和迁移及其形成机制。

厦门是中国东南部最为发达的区域之一。近数十年来, 随着厦门及附近地区的经济飞速发展的同时, 厦门岛周边海域也承受着前所未有的环境压力, 几乎每年春夏季都有发生赤潮的记录^[17]。蒋荣根^[18]在对厦门港及其临近海域近 30 年的富营养化相关指

收稿日期: 2020-01-08; 修回日期: 2020-12-14

基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2016YFA0601302)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2016YFA0601302]

作者简介: 俞秀霞(1972—), 女, 福建仙游人, 学士, 高级工程师, 主要从事海洋环境研究, 电话: 13696913619, E-mail: xmaxia@163.com; 陈长平, 通信作者, 电话: 0592-2184368, E-mail: chencp@xmu.edu.cn

标研究后发现,各指标均表现为波动剧烈、整体趋势上升的特点,富营养化压力与日俱增。因此,开展厦门港及其周边海域的水环境调查和分析成为了近年来的研究热点,可为厦门市水资源利用、港口运行、赤潮防治等提供参考。

关于厦门港以及邻近海域的叶绿素已有不少的研究报道。1983年陈世敢^[3]首次报道了厦门附近海域叶绿素含量的时空分布特征,包括九龙江口内侧大于外侧、港湾内部高于入口的平面分布特点和双峰型的季节变化特点。高亚辉^[19]等发现微型浮游生物贡献了厦门港70%以上的叶绿素 a 含量。周慈由^[20]报道了叶绿素 a 含量与浮游植物同化碳量、海水溶解总碳量之间的正相关关系。曹振锐^[21]等发现厦门海域叶绿素 a 的粒级结构具有季节变化和水平变化特征。彭国安^[6]等报道厦门海域叶绿素 a 含量的潮汐变化为高潮大于低潮。汤荣坤^[22]等对2005—2007年厦门周边海域叶绿素含量的年际变化分析后发现,叶绿素含量逐年上升,呈现出西北沿岸向东南递减的趋势。利用高效液相色谱(HPLC)和矩阵分解程序Chemtax分析厦门海域的光合色素后发现硅藻是优势门类,但秋季其优势度有所下降^[16]。厦门周边海域的叶绿素含量与其他水环境因子之间的相关性已有一些相关报道^[17, 20, 23-26],但已有研究报道多数局限在局部海域或是研究周期较短,而且近十多年来厦门海域环境发生了较大的变化,但未见全海域、周年持续的实时叶绿素监测和时空分布的研究报道。

本研究在厦门港共设立5个监测站点,分别投放了水质自动在线监测浮标,对其中的叶绿素含量以及相关环境因子进行了为期1年的持续实时监测,通过研究厦门港叶绿素的时空分布特征以及其主要影响因子,旨在了解厦门海洋环境状况,为环境治理和港湾资源合理开发利用提供科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

厦门港是个半封闭性港湾,是厦门经济特区的一部分;背靠泉州市和漳州市,面向东海,与中国台湾隔水相望;海岸线曲折,地形复杂,海域面积达275 km²;西为九龙江入海口,东南临金门、大担等岛屿,北有众多海堤。

1.2 研究数据来源

厦门海域投放的水质自动在线监测是美国 YSI

品牌的 EXO-2 型水质分析仪器,搭载的叶绿素探头型号为 599103-02,量程:0~400 $\mu\text{g/L}$ 叶绿素。水质自动在线监测数据质量的控制措施主要有:

安排资深专业技术人员专门负责每天浮标监测数据的接收,并对数据进行分析研判。当发现浮标运行异常时即使用备机更换系统相应模块或启动应急维修响应,并坚决剔除怀疑受到影响的相关监测数据;

正常情况下,每月维护和校准1次(夏季水温高时缩短为每2~3星期1次);

在每个维护与校准周期中段,进行1次连续比对测试,即在浮标附近与自动监测同时连续采集同水层水样6次以上,送回检测实验室采用与业务化监测相同的标准方法进行测定,以确保本文采用的浮标监测数据与业务化监测数据之间具有高可比性;

在实施业务化监测时,采集平行水样送回实验室用备用探头进行测定,并与业务化监测数据进行检测结果比对,以确保日后备用探头的监测质量。

本文研究数据来自2017年厦门港水质自动在线监测的监测数据。本研究选取了叶绿素含量、水温、盐度)、pH、溶解氧饱和度和溶解氧含量等因子,于2017年进行全年连续监测(其中,西海域的监测时期为8月14日至12月31日),每次监测的时间间隔为0.5 h。水质理化因子的分析按国家海洋局《海洋环境监测规范》^[27]中的分析方法进行。

根据海域的地理位置和自然环境将厦门港及邻近海域分为以下几个部分:(1)同安湾海域:五通道—澳头连线西北,厦门本岛北部;(2)东部海域:澳头—五通连线东南侧,厦门本岛东侧;(3)南部海域:鼓浪屿北侧—嵩屿象鼻嘴—龙海市打石坑连线以东,厦门岛白石炮台—青屿和岛美连线以西的厦门岛的南部海域;(4)九龙江口:嵩屿象鼻嘴至龙海市打石坑连线以西,龙海市紫泥乡浒茂洲、乌礁洲和玉枕洲以东的海域;(5)西海域:位于厦门岛西侧,高崎—集美海堤以西和杏林—集美海堤以南,嵩屿象鼻嘴—鼓浪屿北侧—厦港避风坞连线以北,厦门本岛西侧^[18]。各个海域设置的监测站点分布见表1、图1。

1.3 统计分析方法

数据统计分析和作图使用Excel软件、IBM SPSS Station 22 软件。简单的数据统计、分类整理和作图利用 Excel 软件进行,水平分布情况绘制利用 Surfer 13.0 进行,数据的多元统计分析及参数的显著性检验采用 IBM SPSS 22 软件进行。

表 1 水质监测站点分布

Tab.1 Water quality monitoring site distribution

站点	1#同安湾	2#东部海域	3#南部海域	4#九龙江口	5#西海域
纬度	24°34.90'N	24°29.11'N	24°25.26'N	24°25.84'N	24°32.47'N
经度	118°10.81'E	118°14.15'E	118°7.587'E	118°0.192'E	118°3.683'E

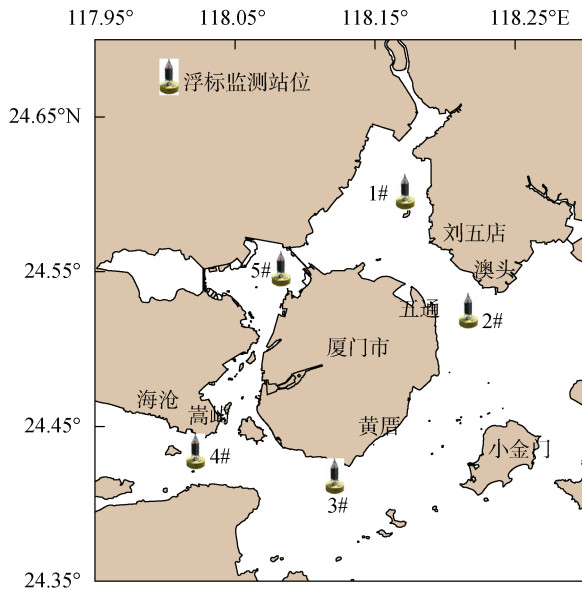


图 1 水质自动监测系统站位图

Fig. 1 Station map of the water quality automatic monitoring system

2 讨论

2.1 叶绿素的空间分布

2017 年厦门港水体中的叶绿素含量年平均值为

(3.89 ± 7.76) mg/m^3 , 与 2013 年的数值(各个海域年平均均值均在 $5.00 \text{ mg}/\text{m}^3$ 以上)相比有所降低^[18]。最高值 $163.00 \text{ mg}/\text{m}^3$ 出现在 7 月 5 日同安湾海域。与中国沿海各港口水域相比^[13-15, 28-32], 厦门港附近海域的叶绿素含量年平均值属中等水平, 低于赤潮多发区深圳湾及大鹏湾^[14, 29], 总体年变化范围较大, 原因是在观测期间发生了一次赤潮, 使叶绿素含量最高值达到了 $163.00 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

2017 年厦门港各海域的叶绿素含量年均值和变化范围如表 2。同安湾海域的叶绿素含量年平均值达到 $5.44 \text{ mg}/\text{m}^3$, 是 5 个海域之中最高的。各海域按叶绿素含量年平均值由大到小排列分别为: 同安湾($5.44 \text{ mg}/\text{m}^3$)>东部海域($4.67 \text{ mg}/\text{m}^3$)>南部海域($3.62 \text{ mg}/\text{m}^3$)>九龙江口($1.71 \text{ mg}/\text{m}^3$), 西海域由于监测时间不完整而未列入此排序。总体上, 叶绿素含量呈现由北岸向南岸方向递减的趋势, 与前人对厦门临近海域的研究结论一致^[3, 21, 22]。

九龙江口具有高营养盐、受潮汐影响大、盐度不稳定等特点, 但其叶绿素含量却是各海域中最低的。李荣欣^[33]等指出, 由于九龙江口浮游植物群落多样性较高, 叶绿素含量与浮游植物密度之间不具有显著相关性。因此本研究不能得出九龙江口的浮游植物密度最低的结论。

表 2 2017 年厦门港各海域叶绿素含量变化

Tab. 2 Changes in chlorophyll content in the sea areas of Xiamen Bay in 2017

海域	同安湾	东部海域	南部海域	九龙江口	西海域
均值 $\pm$ 标准差($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	5.44 ± 12.73	4.67 ± 6.24	3.62 ± 5.86	1.71 ± 2.17	4.38 ± 5.89
最大值($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	163.00	112.90	138.60	35.73	75.78
(出现时间)	(7 月 5 日)	(9 月 16 日)	(2 月 19 日)	(10 月 2 日)	(8 月 15 日)
最小值($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	—	0.2	—	—	0.57
(出现时间)	(3 月 3 日)	(12 月 15 日)	(11 月 20 日)	(9 月 12 日)	(10 月 6 日)

注: 表中“—”表示未检出

同安湾、东部海域和南部海域的叶绿素含量变化范围较大(均超过 $110 \text{ mg}/\text{m}^3$)。东部海域、南部海域和西海域的叶绿素含量年度峰值都较为异常, 这 3 个海域的年最高值出现的时间分别为 9 月 16 日、2 月 19 日和 8 月 15 日, 均为骤然上升并在 1~3 h 后恢复至原来的

水平。因本文中研究数据来源于水质自动在线监测浮标, 且在该时间段内水温、盐度、溶解氧和 pH 等水质因子无显著变化, 故可推测, 叶绿素含量骤升的原因是监测站点附近出现了小面积、短暂的藻类聚集现象。

根据相关研究报道^[3, 16, 20, 22-24, 34-41]的结果, 厦门港各海域历年叶绿素含量见图 2(2017 年数据来自本研究结果)。由图 2 可见, 厦门海域叶绿素含量存在明显的年际差异, 但没有明显的年际变化规律。根据

历年文献记录, 厦门海域全年平均叶绿素含量, 最低值出现于 2017 年, 该年厦门海域叶绿素含量为 3.89 mg/m^3 ; 最高值出现于 1980 年, 该年厦门海域叶绿素含量为 6.49 mg/m^3 ^[3]。

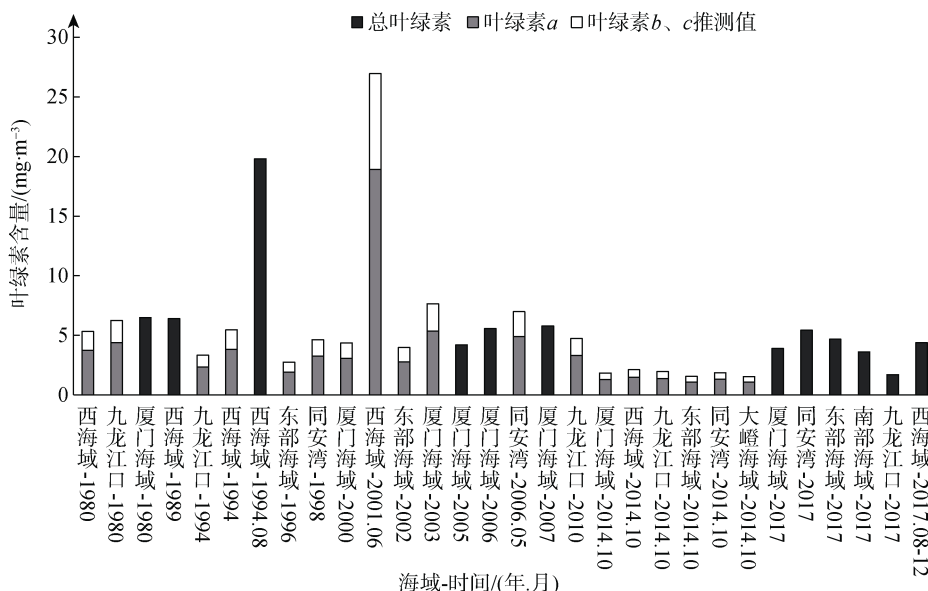


图 2 厦门港各海域历年叶绿素含量变化

Fig. 2 Changes in chlorophyll content over the years in the sea areas of Xiamen Bay

2.1.1 叶绿素的季节分布

2017 年厦门港各海域叶绿素含量的月平均值变化如图 3 所示。结果表明, 厦门港各海域的叶绿素含量的季节变

化总体上有相似性, 整体呈现出夏秋季高、冬春季低的季节变化趋势。厦门港叶绿素含量月平均值峰值(10.34 mg/m^3)出现在 7 月份, 谷值(1.01 mg/m^3)则出现在 3 月份。

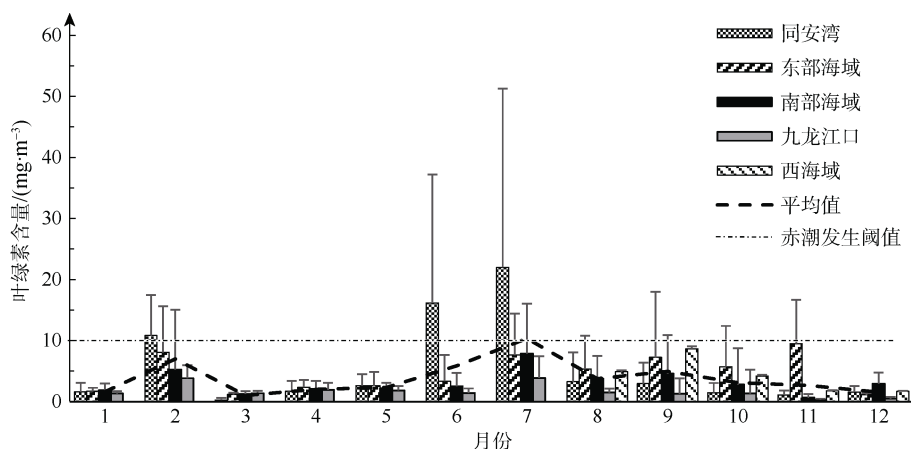


图 3 2017 年厦门港各海域叶绿素含量周年变化

Fig. 3 Monthly changes in chlorophyll content in the sea areas of Xiamen Bay in 2017

蒋荣根^[18]通过对厦门港 5 个海域叶绿素 a 的研究提出, 当叶绿素 a 含量高于 10 mg/m^3 时可能会发生赤潮现象。如图 3, 厦门港各海域的叶绿素含量月平均值大部分低于赤潮发生阈值, 同安湾个别月份

的叶绿素 a 理论含量超过阈值, 有赤潮暴发的潜在危险性。

厦门周边海域在各季节的叶绿素含量水平分布如图 4。其中, 由于西海域监测时间不完整, 仅有秋

季数据。由图 4 可见,春季和秋季叶绿素含量高值区都位于东部海域,厦门周边海域的叶绿素含量分布整体呈现出由东部向湾内递减的趋势;夏季和冬季,

厦门周边海域的叶绿素含量高值区在同安湾,其次东部海域,逐渐向西南方向递减,九龙江口的叶绿素含量最低。

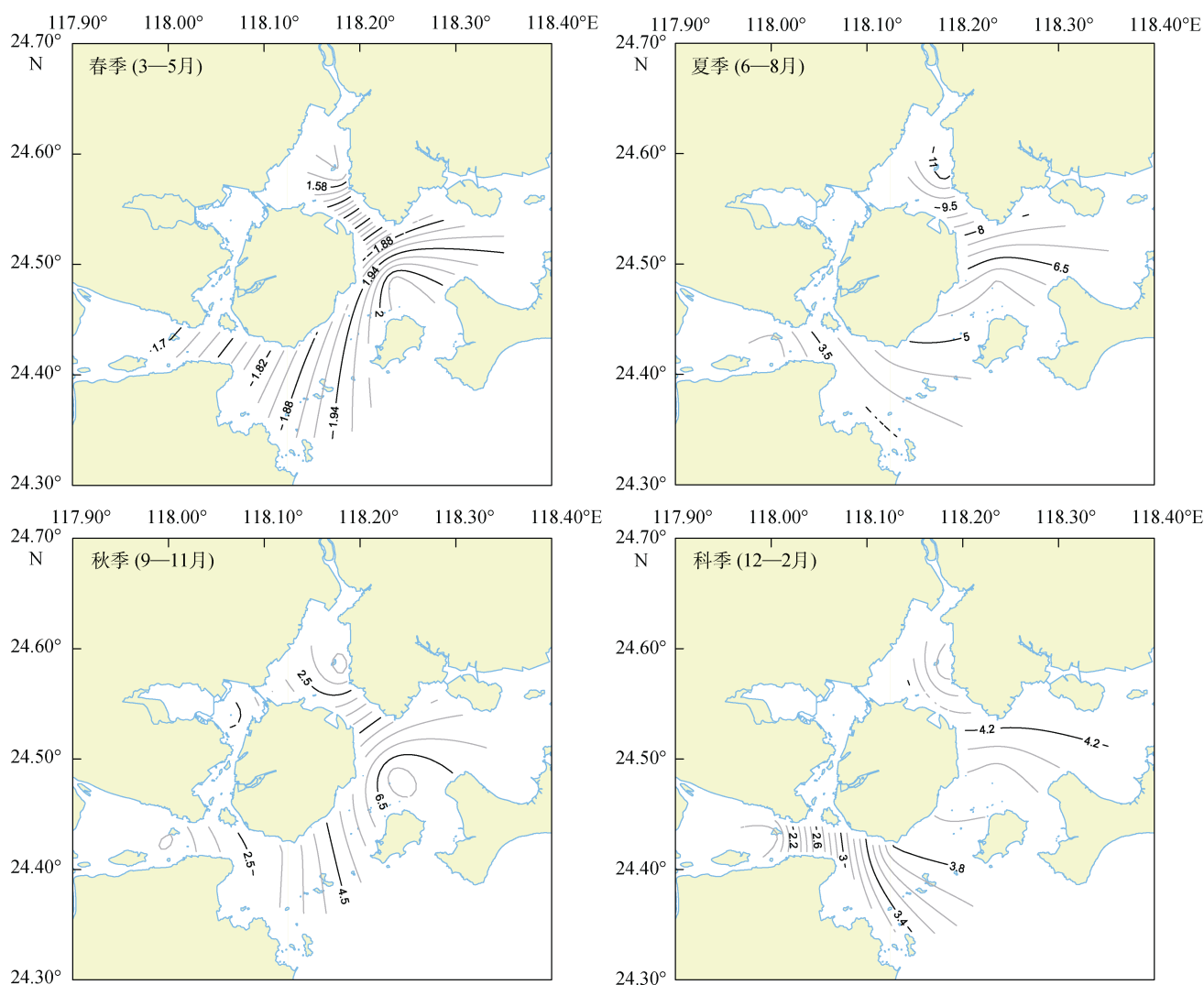


图 4 不同季节厦门港各海域叶绿素含量的水平分布(单位: mg/m^3)
Fig. 4 Distribution of chlorophyll content in the sea areas of Xiamen Bay (unit: mg/m^3)

秋季的 11 月,除东部海域出现较高的叶绿素含量($5.70 \text{ mg}/\text{m}^3$)之外,大部分海域的叶绿素含量普遍降至低值(平均值为 $0.96 \text{ mg}/\text{m}^3$)。立秋之后,随着太阳辐射强度减弱、光照时间缩短,并且东北季风对厦门海域的影响加强,因此海水温度骤然下降,10—11 月间全海区水体温度月平均值下降幅度达到 5.1°C ,因此浮游植物的生长、繁殖能力很大程度上受到抑制,尤其是夏季占优势的暖水性浮游藻类。

11 月之后进入冬季,水温继续下降,至翌年 2 月份温度降至最低(15.5°C),但各个海区叶绿素含量却从 12 月开始逐步上升,1—2 月之间全海区叶绿素含量

大幅度上升,呈现出冬季浮游植物繁盛期特征,2 月叶绿素平均含量为 $7.00 \text{ mg}/\text{m}^3$ 达到全年次高峰,同安湾海域以高达 $10.82 \text{ mg}/\text{m}^3$ 的叶绿素为各海区最高值。冬季浮游植物繁盛期的形成与水温、盐度、营养盐及海区浮游植物群落的结构特征等原因有着复杂的关系。冬季正值九龙江的枯水期,同时因东北季风影响,降水量大幅降低,使水体的盐度上升;又是浙闽沿岸流对本海区影响最大的季节,水体的强烈垂直混合作用带来全海区营养盐含量骤升^[42]。因此为相对适应较高盐度、较低水温的浮游植物提供了有利的环境条件。在全海区出现冬季繁盛期的同时,

还具有北岸高于南岸的叶绿素含量分布特征:从同安湾至东部海域,再到南部海域和九龙江口,浮游植物密度呈现出沿厦门岛顺时针降低的变化趋势。北高南低的分布趋势可能是由于南北岸大陆径流的大小差异,以及北进南出、底进上出的外海水环流等因素,补充了北岸海区的营养物质,促进了浮游植物的生长、繁殖^[3]。同安湾海域的叶绿素含量月平均值超过赤潮发生阈值,虽未观察到赤潮现象,考虑到近年来同安湾赤潮发生频率较高,因此需要提高对该海区的监管和整治力度。

3月,厦门开始进入春季,由于冬季浮游植物繁盛期后的衰退,全海区叶绿素含量急剧下降达到本年最低值(平均值 1.01 mg/m^3),呈现出非常均匀的平面分布特征。而随着太阳直射北移,太阳辐射变强、日照时间变长,海区表层水温上升,全海区的叶绿素含量在4月、5月均有小幅度上升。由于2月份同安湾的浮游植物最为繁盛,消耗了大量的营养盐,因此衰退现象最明显,其3月份叶绿素含量是各海域中的最低值(0.25 mg/m^3)。

6月,正式进入夏季,全海区的叶绿素含量继续上升,并于7月达到全年最高峰,全海域叶绿素平均含量为 10.34 mg/m^3 ,并在同安湾出现全年最高值 163 mg/m^3 。这主要是由于九龙江开始进入丰水期,为厦门港海区带来丰富的营养物质,促进了浮游植物的生长、繁殖,形成夏季浮游植物繁盛期。同安湾海域叶绿素含量月均值在6月和7月出现异常的高峰值,7月相比其他海区平均值(6.46 mg/m^3)高了240%,监测结果与2017年厦门海洋环境状况公报^[43]所公布的6—7月初在同安湾发生了两次赤潮现象符合。8月,由于营养盐的大量消耗,浮游植物繁盛期开始进入衰退,整个海区的叶绿素含量出现小幅下降趋势。

进入秋季,夏季浮游植物繁盛期结束。而东部海域和西海域却出现了叶绿素含量再次回升的现象。西海域是半封闭型区域,与外界水体交换动力差,并且周边人口密度较高,受到人类活动的影响较大,因此相对于其他海域有更多的营养来源。而东部海域周边人口密度低,受污染程度低,但由于秋季闽浙沿岸流对厦门岛附近海域的影响次于冬季,因此只有东部海域在其影响下,营养盐含量大大高于其他海域,导致东部海域叶绿素含量升高^[42]。其余海域的叶绿素含量持续下降。

2017年厦门港叶绿素含量总体上具有双高峰的

季节变化规律,其中高峰分别出现在冬季(2月)与夏季(7月),而3月和11月大部分海域的叶绿素含量处于低值。这一变化规律与陈世敢^[3]等报道的1980—1981年期间厦门海域的叶绿素含量年间变化规律相似,当时的高峰也出现在冬季(1月)与夏季(6月)。而高亚辉^[19]和曹振锐^[21]等的研究结果表明厦门港的叶绿素含量周年变化为单峰型,高峰仅出现于夏季(8月),与本文结果有较大差异。可见,厦门海域的叶绿素年际差别很大,但不排除由于先前的研究采样频率低的原因。图2中,一些研究仅报道了个别月份的叶绿素含量,同样也反映了厦门各海域的叶绿素含量在夏季(1995年8月^[39]、2001年6月^[16])高,秋季(2014年10月^[34])低的特点,与本研究结果一致。

2.1.2 叶绿素的昼夜时空分布

为研究厦门港各海域叶绿素含量的昼夜变化,从2017年中选取了具有代表性的4个昼夜:春分(3月20日),夏至(6月21日),秋分(9月23日)和冬至(12月22日)。如图5所示,厦门岛附近海域叶绿素含量呈现出较强的昼夜变化规律。

春分时节(3月20日),各海域的叶绿素含量整体较低,在 $0 \sim 1.51 \text{ mg/m}^3$ 之间浮动,同安湾的叶绿素含量最低。春分之日,厦门海域总体的叶绿素含量最高值出现在中午时段(9:00—15:00)。春季温度较低,中午温度最高、光照最强,有利于浮游植物的生长、繁殖。而在18:00进入夜晚后,温度进一步降低,而全海域的叶绿素含量上升。

厦门的夏至(6月21日)和秋分(9月23日)都处在高温之中,呈现出相似的变化趋势:中午至午后达到最低值,而最高值出现在夜间。光照可以促进藻类生长繁殖,但强光会加大藻细胞DNA受损的机率;夏季中午光照太强,温度过高,因此造成了光抑制作用^[44]。傍晚海水表层温度开始下降至浮游植物的适宜温度,叶绿素含量大幅度上升。在南海东北部也发现了夏季叶绿素最高值出现在夜间21:00的现象,研究认为这与该海域超微型光合生物的高细胞丰度有关^[44],而厦门海域的浮游植物以微型浮游植物为主^[21],夏、秋季厦门海域叶绿素含量在夜间出现高值可能与微型浮游植物的高细胞丰度有关。

冬至(12月22日),九龙江口和东部海域受径流和外海水影响,变化幅度较小;叶绿素在其他海域白天升高,傍晚时骤升至最高值,夜间持续下降,说明了光照和水温对于叶绿素积累的重要性。

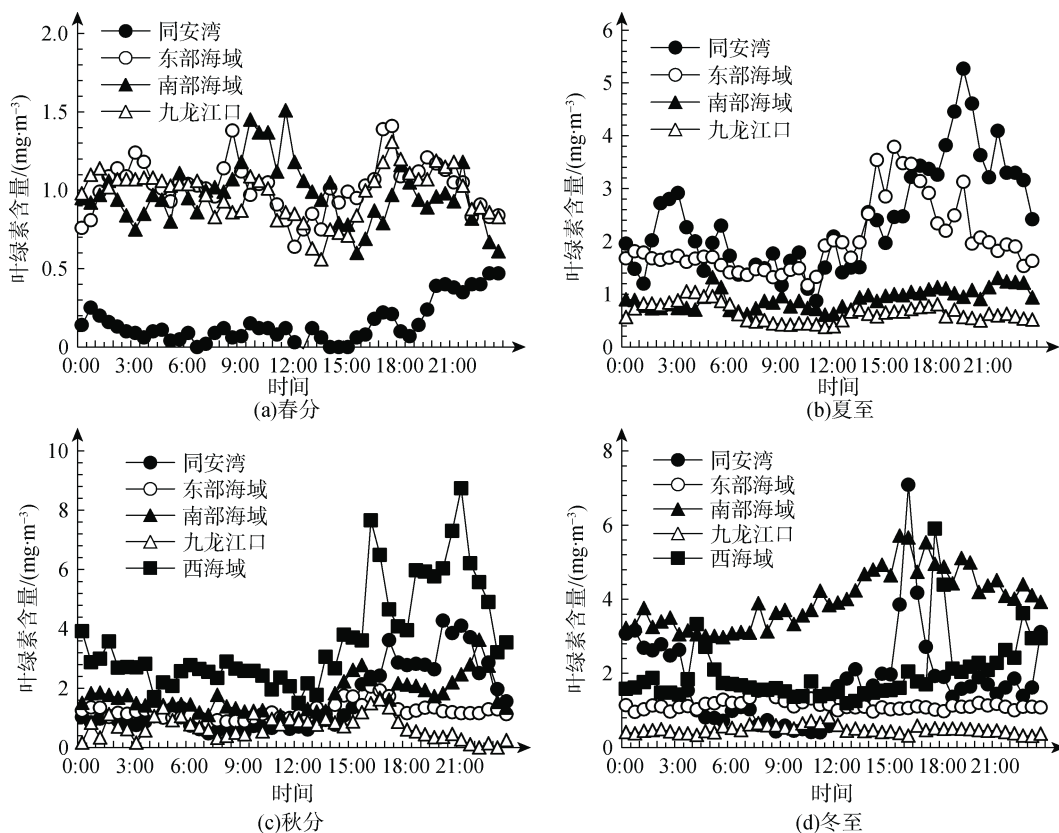


图 5 不同季节厦门港各海域叶绿素含量的昼夜变化

Fig. 5 Diurnal rhythm of Chlorophyll content in the sea areas of Xiamen Bay

白天和夜间的表层水体叶绿素含量之间的差异可能与浮游植物群落结构的变化有关。本研究的结果表明, 厦门海域夏、秋季的昼夜叶绿素含量差异显著($P < 0.05$), 冬、春季的昼夜变化则差别不大($P > 0.05$)。在对厦门海域附近的泉州湾表层水体浮游植物的研究中发现, 夏、秋季白天和夜间之间的多样性指数(H')差异显著大于冬、春季($P < 0.005$)^[32]。可以推测, 厦门海域的叶绿素含量昼夜规律与因昼夜的环境条件变化引起浮游植物群落结构变化有关。

2.2 叶绿素与水环境因子相关性的统计分析

叶绿素含量是反映水体初级生产力的重要指标, 而浮游植物是初级生产力的主要贡献者。浮游植物的生长和繁殖受许多环境因素影响, 如温度、盐度、pH 等。对于影响叶绿素含量的环境因子的研究已有大量报道^[13-15], 由于不同地区的浮游植物群落组成结构存在差异, 以及海水本身的物理性质也存在差异, 导致叶绿素含量与水环境因子之间具有复杂的相关性。

本研究获得到的 2017 年厦门周边海域水环境因子情况如表 3。各水环境因子的年变化趋势见图 6。各海域水温随季节变化明显, 但各海域之间水温差异不明显, 水温呈现夏秋季高、冬春季低的季节变化趋势, 与叶绿素含量的季节变化趋势一致; 盐度全年变化幅度不大, 总体来说, 夏季的盐度的最低, 而夏季的叶绿素含量最高。从地理分布来看, 靠近外海的东部海域盐度最高, 九龙江口则为盐度最低的站位, 同安湾、南部海域、西海域盐度在上半年盐度差别不明显, 而各海域叶绿素含量均值是同安湾>东部海域>西海域>南部海域>九龙江; 溶解氧含量和溶解氧饱和度均具有冬季高、夏秋季低的趋势特征, 与叶绿素含量的季节分布趋势相反, 各海域在 2 月份均出现溶解氧饱和度上升并且在 3 月份骤降的现象, 同安湾的溶解氧含量以及溶解氧饱和度均较高, 九龙江口的溶解氧指标在全年的大部分月份均为各海域最低; 各海域 pH 变化较为复杂, 2 月份和 7 月份各海域 pH 都出现上升并在次月下降的现象, 东部海域和南部海域的 pH 较高, 而九龙江口总体低于其他海域。

表 3 2017 年厦门港水环境因子情况

Tab. 3 Water environmental factors of xiamen bay in 2017

数值	水温/℃	盐度	溶解氧饱和度	溶解氧含量/(mg·L ⁻¹)	pH
均值 ± 标准差	23.10±5.63	27.34±5.03	96.19±16.28	7.13±1.50	7.96±0.18
最小值	13.44	0.01	33.35	2.15	6.98
最大值	33.64	34.26	247.2	15.56	8.79

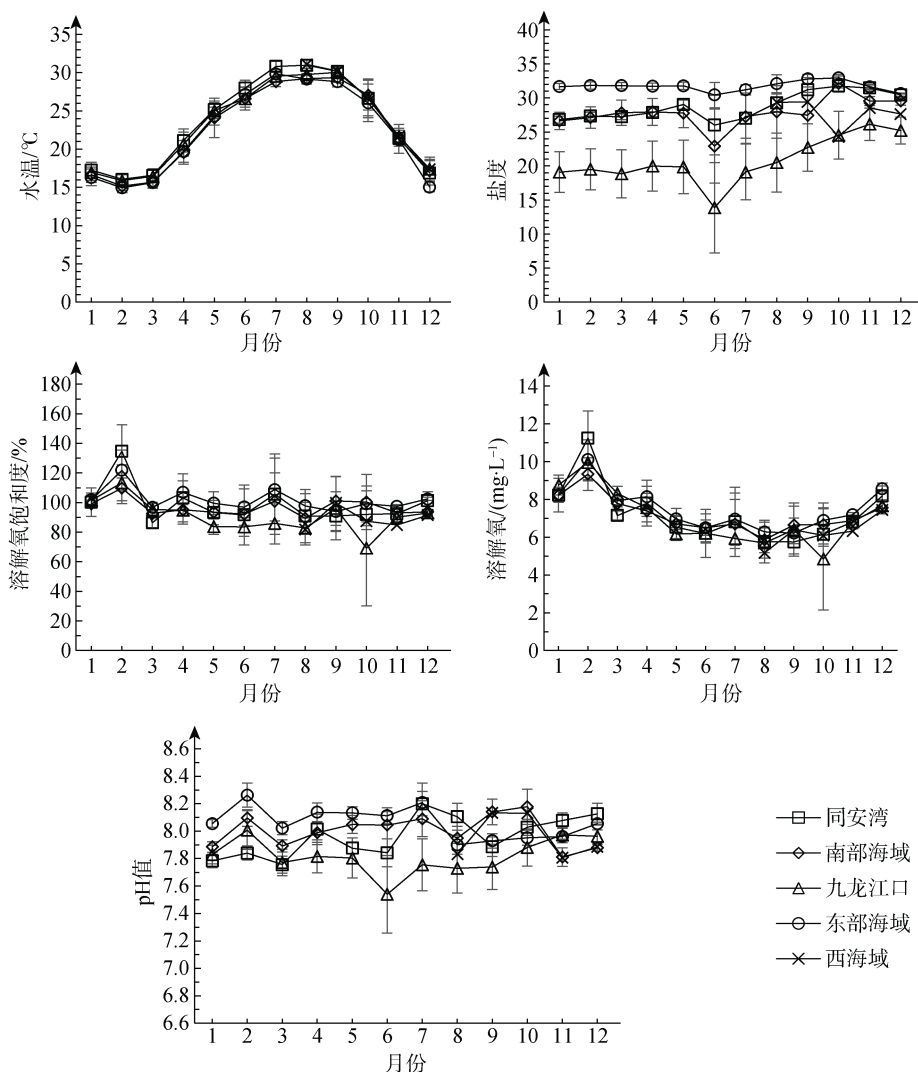


图 6 水环境因子年变化趋势

Fig. 6 Annual variations of water environmental factors

本文以厦门周边海域为研究对象, 对水环境因子进行聚类分析和相关性分析, 然后对叶绿素含量与水环境因子进行多元线性回归分析。

2.2.1 水环境因子聚类分析与相关性分析

由于得到的水质理化因子计量单位不同, 为避免量纲不同导致聚类分析得到不合理的结果, 在聚类分析时对原始数据进行 Z-score 标准化处理, 其变换公式为:

$$X_{ij}^* = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$$

其中: X_{ij}^* 表示标准化数据, $\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}$ 表示变量 j 的平均值, S_j 表示变量 j 的标准差。

对标准化后的各水环境因子进行聚类分析, 结果如图 7。聚类分析衡量了不同数据之间的相似性。依据聚类分析, 本研究中的水环境因子被分为 4 类。

第 1 类: 溶解氧含量(DO)、溶解氧饱和度(%DO); 第 2 类: 盐度(Sal); 第 3 类: pH; 第 4 类: 水温(*T*)。溶解氧含量与溶解氧饱和度是反映水体溶解氧的不同指标, 因此聚类分析结果将这两个因子归为一类, 与实际相符。

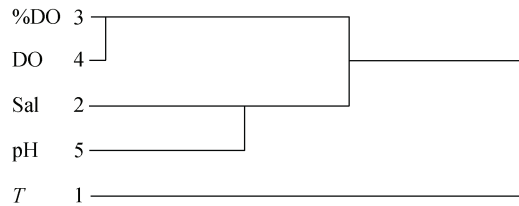


图 7 厦门港海域水环境因子聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of water environment factors in Xiamen Bay

通过聚类分析结果, 可以发现各水环境因子之

间不是独立的, 各个水环境因子对叶绿素含量的贡献也存在差异。通过 Pearson 相关分析可以进一步了解叶绿素含量以及各水环境因子之间的相关性。对厦门港附近海域 2017 年监测数据采用 Pearson 指数分析, 结果见表 4。厦门港附近海域的叶绿素含量与水温、盐度、pH、溶解氧饱和度和溶解氧含量各因子在 0.01 水平(双尾检验)上呈现显著相关, 其中盐度与叶绿素含量为负相关关系, 其余各水环境因子与叶绿素含量均为正相关关系。根据 Pearson 相关系数的大小可以判断, 叶绿素含量与溶解氧饱和度之间为强相关(Pearson 相关系数介于 0.6~0.8), 与 pH 之间为中等程度相关(Pearson 相关系数介于 0.4~0.6), 与水温、溶解氧含量之间属于弱相关(Pearson 相关系数介于 0.2~0.4), 而与盐度之间属于极弱相关(Person 相关系数介于 0~0.2)。

表 4 厦门港叶绿素含量和环境因子之间的 Pearson 相关系数

Tab. 4 Pearson correlation coefficient between chlorophyll content and environmental factors in Xiamen Bay

指标	Chl	水温	盐度	溶解氧饱和度	溶解氧含量	pH
Chl	1					
水温	0.256**	1				
盐度	-0.179**	0.090**	1			
溶解氧饱和度	0.602**	-0.255**	-0.088**	1		
溶解氧含量	0.282**	-0.731**	-0.176**	0.836**	1	
pH	0.539**	0.214**	0.310**	0.630**	0.292**	1

注: **表示在 0.01 水平(双尾检验)上显著相关

2.2.2 多元线性回归

根据聚类分析和 Pearson 回归分析的结果, 采用逐步回归法, 以水温、盐度、溶解氧饱和度、溶解氧含量、pH 为自变量对因变量 Chl 建立多元线性模型, 排除了水环境因子溶解氧含量和 pH 两个水环境因子以避免因各水环境因子之间相关性太高而引起严重共线性使回归模型不准确, 经过计算得到回归方程:

$$Y_{\text{Chl}} = 0.281x_{\text{饱和度}} + 0.404x_{\text{水温}} - 0.318x_{\text{盐度}} - 23.858$$

方程通过显著性 0.05 的 *F* 检验, 校正复相关系数为 0.565, 表明此回归模型可以解释因变量的大多数信息。各个自变量系数所有自变量的容错度大于 0.6, 说明自变量之间的共线性程度很低, 回归结果不受共线性影响而失真。厦门港的叶绿素含量与盐度呈负相关性, 与水温、溶解氧饱和度呈正相关性。模型的标准系数的绝对值反映了自变量对因变量的影响大小^[13], 这些水环境因子对叶绿素含量变化的影响由大到小排序为: 溶解氧饱和度(0.702)>水温

(0.449)>盐度(0.158)。溶解氧与厦门港的叶绿素含量关系最为密切, 其次为水温, 盐度与叶绿素含量之间的密切程度次之。

溶解氧是常用的水质指标, 它是浮游植物生长的必备条件, 也是影响浮游植物新陈代谢的重要因素。溶解氧是水体中各种生化过程的主要参与者, 浮游植物的生长、繁殖过程中能够产生溶解氧, 因此浮游植物的生态变化必然导致水体中溶解氧含量的变化。本研究得到叶绿素含量与溶解氧饱和度呈正相关关系, 与浮游植物光合作用释放氧气增加水中溶解氧的规律一致。据柴小平^[45]等 2014 年春季对浙江省近岸海域溶解氧的调查结果, 海区中溶解氧饱和度高值区与浮游植物丰度的高值区一致^[45], 而海区中浮游植物丰度影响叶绿素含量, 叶绿素含量高值与浮游植物高丰度有关^[44], 因此海域叶绿素含量高值区与溶解氧饱和度高值区一致, 呈正相关, 均与浮游植物丰度有关。

水温是影响浮游植物生长、繁殖的关键因素。本研究区域处于亚热带地区,夏季水温最高达 33.6 °C,较高的温度有利于本海域浮游植物主要类群的生长;冬季水温下降但不低于藻类生长适宜温度范围,适应在稍低温生长的浮游植物类群成为了优势群体。因此本海域的叶绿素含量与温度之间的关系密切,且呈正相关。朱敬萍^[46]等研究了浙江东极岛海域叶绿素 *a* 含量与环境影响因子的相关分析,相关分析表明,从全年来看,海域的水温与叶绿素 *a* 含量呈显著正相关。与本研究厦门港海域的分析结果一致。

叶绿素含量与盐度之间呈显著负相关关系,与王磊等^[47]对 2013 年 3—5 月巽他陆架和马六甲海峡表层海水浮游植物群落的研究结果一致,研究海区叶绿素 *a* 含量与水体盐度呈显著负相关($P < 0.05$)。与其他海湾的研究结果也类似^[13, 26]。沈新强等^[48]发现,在盐度低于 25~27 的水域中叶绿素 *a* 含量与盐度呈正相关关系,而盐度高于 27 的水域中二者呈负相关关系。厦门海域大部分区域盐度超过 27,而九龙江口区域盐度较低,因此叶绿素含量与盐度的关系较为复杂。

Otsuka 等^[1]在利用 PCA 分析巴西 Pernambuco 湾的叶绿素 *a* 及多个水环境因素后,发现溶解氧饱和度和温度为仅次于营养盐的第二组分。大量关于港湾水体的叶绿素含量的研究得到了其与溶解氧(DO)或溶解氧饱和度以及温度之间存在密切关系的结论^[14, 28, 49-50],与本研究结果一致。He 等^[16]报道了厦门港夏、秋季浮游植物生物量的变化与温度、溶解氧的变化是众多环境因素中最为耦合的,本研究结果再次证实了这一结果。而周毅频等^[29]报道了位于香港和深圳之间的大鹏湾海域的叶绿素 *a* 含量与溶解氧、温度相关性较低:大鹏湾温度终年高于厦门,该海域浮游植物对温度的敏感程度低于厦门周边海域;由于香港和深圳的大量陆源排放,排放物中的氨氮等还原性物质消耗了浮游植物产生的溶解氧,因此溶解氧与叶绿素含量的耦合程度比厦门海域弱。在纬度高于厦门港、水温终年不超过 30 °C 的舟山港,叶绿素 *a* 含量与水温之间呈负相关^[12],当地的浮游植物群落对温度较敏感,在表层海水有条件达到光饱和时,温度超过一定限度会限制浮游植物的生长。

3 结论

2017 年的监测结果表明,厦门港表层海水叶绿素均值为 3.89 mg/m³,根据年均值数据,各海域无

富营养化现象。全海域叶绿素年变化范围 0.00~163.00 mg/m³,高值出现于同安湾 7 月份赤潮时期。平面分布上,厦门港海域叶绿素含量分布呈现湾内大于湾外、北岸大于南岸的特点,陆源径流、海流和人类活动是重要的影响因素。

厦门港海域的叶绿素含量具有夏秋季高、冬春季低的季节变化特点。一年之中出现两次浮游植物繁盛期,分别为夏季(7 月)和冬季(2 月)。该海域叶绿素含量还有较强的昼夜变化规律:春季正午最高;夏季和秋季在白天降低,中午达到最低值,最高值出现在夜间;冬季,叶绿素含量白天上升,夜晚降低。

在聚类分析和相关性分析的基础上通过逐步回归建立了叶绿素含量与水环境因子的多元线性模型,得到了叶绿素含量与溶解氧和水温之间的关系最为密切。

参考文献:

- [1] OTSUKA A Y, FEITOSA F N, FLORESMONTES M J, et al. Dynamics of Chlorophyll *a* and oceanographic parameters in the coastal zone: Barra das Jangadas-Pernambuco, Brazil[J]. *Journal of Coastal Research*, 2016, 32(3): 490-499.
- [2] WESTBERRY T, BEHRENFELD M J, SIEGEL D A, et al. Carbon-based primary productivity modeling with vertically resolved photoacclimation[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(2): 1-18.
- [3] 陈世敢, 陈兴群, 詹秀美. 厦门附近海域叶绿素含量的分布及其周年变化[J]. *台湾海峡*, 1983, 2(1): 66-75. CHEN Shigan, CHEN Xingqun, ZHAN Xiumei. The distribution of chlorophyll content and its annual changes in the waters near Xiamen[J]. *Taiwan Strait*, 1983, 2(1): 66-75.
- [4] GEIDER R J. Light and temperature dependence of the carbon to chlorophyll *a* ratio in microalgae and cyanobacteria: implications for physiology and growth of phytoplankton[J]. *Proceedings of the Symposium on Computers and Automata*, 1987, 106: 1-34.
- [5] PENNINGTON J T, CHAVEZ F P. Seasonal fluctuations of temperature, salinity, nitrate, chlorophyll and primary production at station H3/M1 over 1989-1996 in Monterey Bay, California[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(5): 947-973.
- [6] 彭安国, 黄奕普, 陈敏, 等. 厦门湾水体中不同粒径颗粒物、Chl-*a* 和 ²³⁴Th 随潮汐的变化及其海洋学意义[J]. *应用海洋学学报*, 2004, 23(4): 403-409. PENG Anguo, HUANG Yipu, CHEN Min, et al. Changes of different size particles, Chl-*a* and ²³⁴Th in the water of

- Xiamen Bay with tides and their oceanographic significance[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2004, 23 (4): 403-409.
- [7] ZHANG J X, ZHANG Y B, SUN X L. The spatial and temporal distributions of Chlorophyll-*a* and its relationship with main environmental factors in Zhanjiang Bay in 2009[J]. *Advances in Marine Science*, 2012, 30(2): 236-243.
- [8] BALIARSINGH S K, LOTLIKER A A, SAHU K C, et al. Spatio-temporal distribution of chlorophyll-*a* in relation to physico-chemical parameters in coastal waters of the northwestern Bay of Bengal[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, 187(7): 481.
- [9] JAMSHIDI S, NOORDIN A B, YOUSEFI M. A study on concentrations of dissolved oxygen and chlorophyll-*a* in the coastal waters of Babolsar[J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2009, 6(10): 1860-1867.
- [10] SHULENBERGER E, REID J L. The Pacific shallow oxygen maximum, deep chlorophyll maximum, and primary productivity, reconsidered[J]. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 1981, 28(9): 901-919.
- [11] HÅKANSON L, EKLUND J M. Relationships between chlorophyll, salinity, phosphorus, and nitrogen in lakes and marine areas[J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 26(3): 412-423.
- [12] 赵祚美. 舟山港域叶绿素 *a* 含量分布及其影响因素[J]. *海洋环境科学*, 1991, 10(2): 34-43.
ZHAO Zuomei. The distribution of chlorophyll *a* content and its influencing factors in the Zhoushan port area[J]. *Marine Environmental Science*, 1991, 10(2): 34-43.
- [13] 徐效军, 张鹰, 刘吉堂, 等. 海州湾叶绿素 *a* 与水环境因子的多元分析[J]. *水生态学杂志*, 2007, 27(2): 79-81.
XU Xiaojun, ZHANG Ying, LIU Jitang, et al. Multivariate analysis of chlorophyll *a* and water environmental factors in Haizhou Bay[J]. *Journal of Water Ecology*, 2007, 27(2): 79-81.
- [14] 张瑜斌, 章洁香, 张才学, 等. 赤潮多发区深圳湾叶绿素 *a* 的时空分布及其影响因素[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1638-1643.
ZHANG Yubin, ZHANG Jiexiang, ZHANG Caixue, et al. The temporal and spatial distribution of chlorophyll *a* and its influencing factors in Shenzhen Bay, a red tide-prone area[J]. *Acta Eco-Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1638-1643.
- [15] 孙菲, 袁鹏, 程建光, 等. 宜兴市殷村港叶绿素 *a* 与影响因素的多元分析[J]. *环境工程*, 2017, 35(9): 53-57.
SUN Fei, YUAN Peng, CHENG Jianguang, et al. Multivariate analysis of chlorophyll *a* and influencing factors in Yincun Harbor, Yixing City[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(9): 53-57.
- [16] HE X J, PENG X Y. Spatial variability of summer and autumn phytoplankton community structure in Xiamen Western Bay based on pigment analysis[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(5): 165-175.
- [17] 林更铭, 项鹏, 杨清良, 等. 厦门海域水华期间浮游植物群落演替及其与环境因子的关系[J]. *应用与环境生物学报*, 2013, 19(1): 126-133.
LIN Gengming, XIANG Peng, YANG Qingliang, et al. Phytoplankton community succession and its relationship with environmental factors during the blooming period in Xiamen waters[J]. *Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(1): 126-133.
- [18] 蒋荣根. 厦门湾及其邻近海域富营养化特征分析与评价[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2014.
JIANG Ronggen. Analysis and evaluation of eutrophication characteristics of Xiamen Bay and its adjacent waters[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2014.
- [19] 高亚辉, 金德祥. 厦门港微型浮游生物叶绿素的分布和作用[J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(1): 87-93.
GAO Yahui, JIN Dexiang. The distribution and role of microplankton chlorophyll in Xiamen Port[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, 25(1): 87-93.
- [20] 周慈由. 厦门西海域二氧化碳体系[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1995, 34 (4): 659-663.
ZHOU Ciyu. Carbon dioxide system in the western sea area of Xiamen[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science Edition)*, 1995, 34(4): 659-663.
- [21] 曹振锐, 黄邦钦, 刘媛, 等. 厦门海域分粒级叶绿素 *a* 含量的分布特征[J]. *应用海洋学学报*, 2005, 24(4): 493-501.
CAO Zhenrui, HUANG Bangqin, LIU Yuan, et al. Distribution characteristics of chlorophyll *a* content in Xiamen sea area[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2005, 24(4): 493-501.
- [22] 汤荣坤, 贺青, 暨卫东, 等. 2005~2007 年厦门岛周边海域水体叶绿素含量的时空变化特征[J]. *应用海洋学学报*, 2010, 29(3): 342-351.
TANG Rongkun, HE Qing, JI Weidong, et al. Temporal and spatial variation characteristics of chlorophyll content in waters surrounding Xiamen Island from 2005 to 2007[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2010, 29(3): 342-351.
- [23] 李文权, 黄贤芒, 陈清花, 等. 厦门海沧沿岸水域初级生产力及其与环境的关系[J]. *热带海洋学报*, 1999, 18(3): 51-57.
LI Wenquan, HUANG Xianmang, CHEN Qinghua, et al. Primary productivity of the coastal waters of Haicang, Xiamen and its relationship with the environment[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1999, 18(3): 51-57.

- [24] 陈飞舟, 沈国英, 黄奕普, 等. 厦门湾上屿附近海域初级生产力及相关要素的时间系列[J]. 应用海洋学学报, 1999, 18(1): 33-41.
CHEN Feizhou, SHEN Guoying, HUANG Yipu, et al. Time series of primary productivity and related factors in the waters near Shangyu, Xiamen Bay[J]. Journal of Applied Oceanography, 1999, 18(1): 33-41.
- [25] 庄万金. 厦门港赤潮发生区溶解氧的时空变化与赤潮生物和环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 1991, 10(2): 19-25.
ZHUANG Wanjin. The relationship between spatial and temporal changes of dissolved oxygen in the red tide occurrence area of Xiamen Port and red tide organisms and environmental factors[J]. Marine Environmental Science, 1991, 10(2): 19-25.
- [26] 章洁香, 曾久胜, 张瑜斌, 等. 流沙湾叶绿素 *a* 的时空分布及其与主要环境因子的关系[J]. 海洋通报, 2010, 29(5): 514-520.
ZHANG Jiexiang, ZENG Jiusheng, ZHANG Yubin, et al. Temporal and spatial distribution of chlorophyll *a* in Liusha Bay and its relationship with main environmental factors[J]. Ocean Bulletin, 2010, 29(5): 514-520.
- [27] 国家海洋局. 海洋监测规范[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.
State Oceanic Administration. Marine monitoring specification[M]. Beijing: Ocean Press, 1991.
- [28] 王键, 陈岚, 陈凯, 等. 2009 年秋季闽江下游及闽江口水域叶绿素 *a* 含量的分布特征及其与环境因子的关系[J]. 应用海洋学学报, 2012, 31(3): 362-367.
WANG Jian, CHEN Lan, CHEN Kai, et al. Distribution characteristics of chlorophyll *a* content in the lower Minjiang River and Minjiang Estuary waters in autumn 2009 and its relationship with environmental factors[J]. Journal of Applied Oceanography, 2012, 31 (3): 362-367.
- [29] 周毅频, 李绪录, 夏华永, 等. 大鹏湾中叶绿素-*a* 的多年调查结果及其与环境因子的灰关联分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(12): 1886-1891.
ZHOU Yipin, LI Xulu, XIA Huayong, et al. Multi-year survey results of chlorophyll-*a* in Dapeng Bay and its gray correlation analysis with environmental factors[J]. Chinese Journal of Ecoenvironment, 2011, 20(12): 1886-1891.
- [30] 黄以琛, 李炎, 邵浩, 等. 北部湾夏冬季海表温度、叶绿素和浊度的分布特征及调控因素[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, 47(6): 856-863.
HUANG Yichen, LI Yan, SHAO Hao, et al. Distribution characteristics and control factors of sea surface temperature, chlorophyll and turbidity in the Beibu Gulf in summer and winter[J]. Journal of Xiamen University (Natural Edition), 2008, 47(6): 856-863.
- [31] 董开升, 王悠, 杨震, 等. 胶州湾夏、冬两季叶绿素 *a* 的分布特征研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, 37(s2): 127-130.
DONG Kaisheng, WANG You, YANG Zhen, et al. Distribution characteristics of chlorophyll *a* in Jiaozhou Bay in summer and winter[J]. Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition), 2007, 37(s2): 127-130.
- [32] 唐森铭, 陈兴群. 泉州湾水域浮游植物群落的昼夜变化[J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 129-137.
TANG Senming, CHEN Xingqun. Day and night changes of phytoplankton community in Quanzhou Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(4): 129-137.
- [33] 李荣欣, 王雨, 康建华, 等. 九龙江河口水体叶绿素 *a* 含量和初级生产力的时空变化[J]. 应用海洋学学报, 2011, 30(4): 551-558.
LI Rongxin, WANG Yu, KANG Jianhua, et al. Temporal and spatial changes of chlorophyll *a* content and primary productivity in Jiulong River Estuary water[J]. Journal of Applied Oceanography, 2011, 30(4): 551-558.
- [34] FU T, CHEN B, Ji W, et al. Size structure of phytoplankton community and its response to environmental factors in Xiamen Bay, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 734.
- [35] 莫钰, 林丽贞, 郑丽平, 等. 九龙江河-海系统夏季浮游植物磷胁迫研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(1): 241-248.
MO Yu, LIN Lizhen, ZHENG Liping, et al. Study on the phosphorus stress of phytoplankton in the Jiulong river-sea system in summer[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2013, 44(1): 241-248.
- [36] 陈朝华, 吴海燕, 陈克亮, 等. 近岸海域生态质量状况综合评价方法——以同安湾为例[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1841-1848.
CHEN Chaohua, WU Haiyan, CHEN Kelian, et al. Comprehensive evaluation method of coastal waters ecological quality status: A case study of Tong'an Bay[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(7): 1841-1848.
- [37] 林辉, 张元标, 陈金民. 厦门海域水体富营养程度评价[J]. 应用海洋学学报, 2002, 21(2): 154-161.
LIN Hui, ZHANG Yuanbiao, CHEN Jinmin. Evaluation of eutrophication degree of waters in Xiamen sea area[J]. Journal of Applied Oceanography, 2002, 21(2): 154-161.
- [38] 陈兴群, 陈其焕, 张明. 厦门东侧水道海域的初级生产力[J]. 应用海洋学学报, 2002, 21(2): 217-223.
CHEN Xingqun, CHEN Qihuan, ZHANG Ming. Primary productivity in the waterways east of Xiamen[J]. Journal of Applied Oceanography, 2002, 21(2): 217-223.
- [39] LI X, HONG H S, WANG H L, et al. The biogeochemistry of photosynthetic pigments in the Jiulong River estuary and Western Xiamen Bay[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2001, 19(2): 164-171.

- [40] 蔡清海, 卢振彬, 杜琦, 等. 福建省同安湾叶绿素的含量[J]. 海洋通报, 2000, 19(5): 87-91.
CAI Qinghai, LU Zhenbin, DU Qi, et al. Chlorophyll content in Tong'an Bay, Fujian Province[J]. Ocean Bulletin, 2000, 19(5): 87-91.
- [41] 许昆灿, 吴丽卿, 詹秀美. 厦门西港和九龙江口海水的汞浓度及其与叶绿素 *a* 含量的关系[J]. 应用海洋学学报, 1985, 4(2): 21-26.
XU Kuncan, WU Liqing, ZHAN Xiumei. The mercury concentration in the seawater of Xiamen West Port and Jiulongjiang Estuary and its relationship with chlorophyll *a* content[J]. Journal of Applied Oceanography, 1985, 4(2): 21-26.
- [42] 王翠, 郭晓峰, 方婧, 等. 闽浙沿岸流扩展范围的季节特征及其对典型海湾的影响[J]. 应用海洋学学报, 2018, 37(1): 1-8.
WANG Cui, GUO Xiaofeng, FANG Jing, et al. Seasonal characteristics of the extended range of Fujian-Zhejiang coastal currents and its impact on typical bays[J]. Journal of Applied Oceanography, 2018, 1: 1-8.
- [43] 厦门市海洋环境质量公报[EB/OL]. 厦门: 厦门市海洋与渔业局. http://hyj.xm.gov.cn/bmfw/hyhjxx/201806/t20180621_1887410.htm.
Xiamen Municipal Marine Environmental Quality Bulletin[EB/OL]. Xiamen: Marine and Fisheries Administration of Xiamen http://hyj.xm.gov.cn/bmfw/hyhjxx/201806/t20180621_1887410.htm.
- [44] 姜歆, 黄良民, 谭烨辉, 等. 南海东北部分粒级叶绿素 *a* 和超微型光合生物的周日变化[J]. 海洋通报, 2017, 36(6): 689-699.
JIANG Xin, HUANG Liangmin, TAN Yehui, et al. The diurnal changes of chlorophyll *a* and ultramicro photosynthetic organisms in the northeastern part of the South China Sea[J]. Ocean Bulletin, 2017, 36(6): 689-699.
- [45] 柴小平, 魏娜, 母清林, 等. 浙江近岸海域春季表层溶解氧饱和度分布及影响因素[J]. 中国环境监测, 2015, 31(5): 140-144.
CHAI Xiaoping, WEI Na, MU Qinglin, et al. Surface dissolved oxygen saturation distribution and influencing factors in Zhejiang coastal waters in spring[J]. China Environmental Monitoring, 2015, 31(5): 140-144.
- [46] 朱敬萍, 胡红美, 顾蓓乔, 等. 浙江东极岛海域叶绿素 *a* 含量及与环境影响因子的相关分析[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2014, 33(3): 257-261, 271.
ZHU Jingping, HU Hongmei, GU Beiqiao, et al. The content of chlorophyll *a* in the waters of Dongji Island in Zhejiang Province and its correlation analysis with environmental factors[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition), 2014, 33(3): 257-261, 271.
- [47] 王磊, 冷晓云, 孙庆杨, 等. 春季季风间期巽他陆架和马六甲海峡表层海水浮游植物群落结构研究[J]. 海洋学报, 2015, 37(2): 120-129.
WANG Lei, LENG Xiaoyun, SUN Qingyang, et al. Phytoplankton community structure on the Sunda shelf and the surface water of the Strait of Malacca during the spring monsoon interval[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2015, 37(2): 120-129.
- [48] 沈新强, 胡方西. 长江口外水域叶绿素 *a* 分布的基本特征[J]. 中国水产科学, 1995, 2(1): 71-80.
SHEN Xinqiang, HU Fangxi. The basic characteristics of chlorophyll *a* distribution in the waters off the Yangtze River Estuary[J]. Chinese Journal of Fishery Sciences, 1995, 2(1): 71-80.
- [49] 王菲菲, 章守宇, 林军. 象山港海洋牧场规划区叶绿素 *a* 分布特征研究[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(2): 266-273.
WANG Feifei, ZHANG Shouyu, LIN Jun. Study on the distribution characteristics of chlorophyll *a* in Xiangshan Port Marine Ranch Planning Area[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2013, 22(2): 266-273.
- [50] 宋普庆, 唐森铭, 王初升. 福建海域赤潮的分布特征及其与环境因子的关系[C]//青年海洋科学研讨会论文集. 厦门: 海洋局第三海洋研究所, 2011.
SONG Puqing, TANG Senming, WANG Chusheng. Distribution characteristics of red tides in Fujian sea area and its relationship with environmental factors[C]//青年海洋科学研讨会论文集. Xiamen: Third Institute of Oceanography, Bureau of Oceanography, Youth Ocean Science Seminar, 2011.

Chlorophyll content in Xiamen Bay—spatiotemporal distribution and relationship with water environmental factors

YU Xiu-xia¹, SUN Lin², CHEN Chang-ping²

(1. Xiamen Environmental Monitoring Station, Xiamen 361000, China; 2. Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Received: Jan. 8, 2020

Key words: Xiamen Bay; chlorophyll; spatial and temporal distribution; water environment factors; multivariate analysis

Abstract: Chlorophyll is an important indicator of water primary production and varies frequently with environmental factors. Therefore, annual continuous in-situ real-time monitoring can more accurately reflect the water primary production level and controlled factors. The chlorophyll content, water temperature, dissolved oxygen, pH value, and salinity of Xiamen Bay were monitored in 2017. The spatiotemporal distribution of the chlorophyll content was investigated, and the correlation between the chlorophyll content and main water environmental factors was studied through multivariate analysis. The results showed that the annual average chlorophyll content of Xiamen Bay was $3.89 \pm 7.76 \text{ mg/m}^3$, and the maximum value was 163.00 mg/m^3 that occurred in the Tongan Bay (summer). The chlorophyll content of the north coast was higher than that of the south coast, and the contents in summer and autumn were higher than those in winter and spring. There were two high levels of chlorophyll in the year, in summer (July, 10.34 mg/m^3) and winter (February, 7.00 mg/m^3), consistent with the phytoplankton proliferation period. In addition, the chlorophyll content presented a strong diurnal variation pattern and varied with seasons: In spring, the chlorophyll content was highest at noon; in summer and autumn, it decreased during the day and reached the lowest value at noon and the highest value at night; in winter, it rose during the day and decreased at night. On the basis of cluster analysis and Pearson correlation analysis, a multivariate linear model of chlorophyll content and water environmental factors was established through stepwise regression. The factors most closely related to chlorophyll content were dissolved oxygen saturation and water temperature. Chlorophyll content was significantly positive with both dissolved oxygen saturation and water temperature.

(本文编辑: 谭雪静)