

# 三门湾水体叶绿素 a 与相关环境因子的多元分析



鲁水, 叶林安\*, 任敏, 金余娣

自然资源部宁波海洋中心, 浙江宁波 315000

**摘要:** 三门湾是曲折度较大和地形复杂的海湾, 其滩涂面积广、生物等海洋资源丰富, 在中国东海近岸具有重要的经济意义和生态意义。本研究根据 2020 年 1 月至 2022 年 12 月期间对三门湾水体中叶绿素 a 进行的为期 3 年的逐月调查, 对水体中叶绿素 a (Chla) 与水温 (T)、总有机碳 (TOC)、化学需氧量 (COD)、总磷 (TP)、总氮 (TN)、溶解氧 (DO) 等相关环境因子进行了多元逐步回归分析, 发现了与叶绿素 a 显著相关的环境因子, 并建立了多元回归方程。此外, 还分析了叶绿素 a 浓度的时空分布情况。研究结果表明, 三门湾各监测站位叶绿素 a 浓度时空差异性较大, 在 0.1~100  $\mu\text{g/L}$  之间。叶绿素 a 质量浓度与水温、COD 和 TP 呈极显著正相关, 与 DO、TN 和 TN/TP 呈极显著负相关, 与 pH 无显著相关性。

**关键词:** 三门湾; 叶绿素 a; 环境因子; 多元逐步回归

**DOI:** [10.57237/j.wjese.2024.02.001](https://doi.org/10.57237/j.wjese.2024.02.001)

## Multianalysis Between Chlorophyll-a and Environmental Factors in Sanmen Bay

Lu Shui, Ye Lin-an\*, Ren Ming, Jin Yu-di

Ningbo Oceanographic Center, MNR, Ningbo 315000, China

**Abstract:** Sanmen Bay is a bay with a large degree of twists and turns and complex topography. With a large area of beaches and rich marine resources such as biological, it has important economic and ecological significance in the coastal area of the East China Sea. Based on a three-year monthly survey of chlorophyll a in the water body of Sanmen Bay from January 2020 to December 2022, a multiple stepwise regression analysis was conducted on chlorophyll a and related environmental factors such as water temperature (T), total organic carbon (TOC), chemical oxygen demand (COD), total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and dissolved oxygen (DO). Significant environmental factors related to chlorophyll a were found, and a multiple regression equation was established. In addition, the temporal and spatial distribution of chlorophyll a content was also analyzed. The results showed that the spatial and temporal differences of chlorophyll-a content in Sanmen Bay were large, ranging from 0.1 to 100  $\mu\text{g/L}$ . Chlorophyll a concentration was positively correlated with water temperature, COD and TP, negatively correlated with do, TN and TN / TP, but not with pH.

**Keywords:** Sanmen Bay; Chlorophyll-a; Environmental Factor; Multiple Stepwise Regression

基金项目: 自然资源部东海局青年科技基金 (202011); 自然资源部东海局青年科技基金 (202209).

\*通信作者: 叶林安, Yelinan2018@163.com

收稿日期: 2024-02-28; 接受日期: 2024-04-07; 在线出版日期: 2024-04-13

<http://www.wjese.com>

## 1 引言

三门湾位于浙东沿海，北靠象山半岛，与象山港相隔最短的蜂腰宽 10~13 公里，湾口东起南田岛，西至坡坝港牛头门，南部至湾北底部泗洲头，北部有三门岛、五子岛相扼，湾的东、北、西三面环山，深割象山半岛的南部海岸，是曲折度较大、地形复杂的海湾。其滩涂面积广、生物等海洋资源丰富，在中国东海近岸具有重要的经济意义和生态意义[1]。

湾口面向东南，以金柴门-三门岛的连线为界与东海相连，除了尖洋岛北面有石浦水道与外海相通外，三面环陆。同时，海涂广阔，属细粘土物质，湾内风浪小，可开发盐业和水产养殖。随着周边地区经济的高速发展，人和自然多种复杂动力因素形成的相互耦合作用，导致海湾生态系统的脆弱性增强[2]，致使三门湾水质呈高度富营养化，从而导致赤潮的频繁爆发[3]。水质中营养盐具有较为明显的年度分布变化与季节性分布变化[4-5]，而营养盐的影响着浮游植物藻类的繁殖生长[6]。叶绿素 a 是藻类重要的组成部分，水体中叶绿素 a 浓度反映了浮游植物生物量的高低，其浓度与水环境质量密切相关。因此，通过研究叶绿素 a 可以直观地描述赤潮爆发规模，持续时间等。

已有诸多学者对近海海域环境因子的影响进行研究[7-11]。陈丹琴等[6]通过研究 2014 年春、夏季三门湾生态环境调查数据，发现影响三门湾浮游植物群落结构的主要环境因子主要包括盐度、水温、无机氮和悬浮物和活性磷酸盐。谢彩琴等[12]利用 2012 年三门核电站周边海域 4 个季节的调查数据，发现细胞密度与水温、盐度的相关性并不显著而与 pH 值呈现正相关关系。而对三门湾水域中叶绿素 a 与相关环境因子的研究并不多。本研究利用 2020 年 1 月至 2022 年 12 月间的每月连续监测数据，运用多元逐步回归，找出与三门湾水域叶绿素 a 浓度显著相关的环境因子，以期三门湾相关生态环境管理部门对富营养化防控和管理提供科学依据。

## 2 站位设置和分析方法

### 2.1 站位设置

本研究依据宁波市海洋环境监测中心 2020 年 1 月-2022 年 12 月间调查数据，共设置 10 个采样点，如图 1 所示。

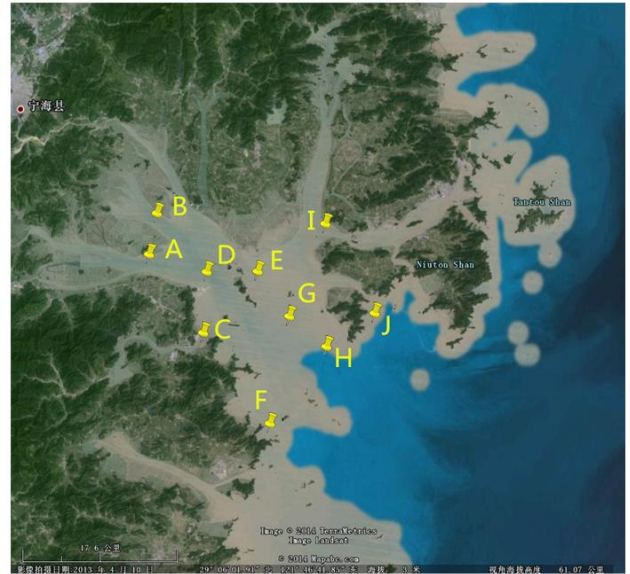


图 1 三门湾监测站位图

### 2.2 分析方法

采样、运输和分析方法按《海洋监测规范》(GB 17378-2007) [13, 14]进行，采样层次均采表层，分析项目有叶绿素 a (Chl-a)、水温 (T)、pH、盐度 (SAL)、总有机碳 (TOC)、溶解氧 (DO)、化学需氧量 (COD)、总磷 (TP)、总氮 (TN)，如表 1 所示。其中，水体的温度和盐度的测定主要用温盐深测量仪 CTD (EG&GMark III CTD)，进行现场测定和直接读取，每次航次前对 CTD 进行校准与标定。

表 1 监测指标分析方法

序号	监测指标	分析方法	依据标准
01	水温	颠倒温度计法	GB/T12763-2007
02	pH	pH 计法	GB17378.4-2007
03	盐度	盐度计分析法	GB17378.4-2007
04	溶解氧	碘量法/电极法	GB17378.4-2007
05	总磷	过硫酸钾氧化法	GB/T12763.4-2007
06	总氮	过硫酸钾氧化法	GB/T12763.4-2007
07	化学需氧量	碱性高锰酸钾法	GB17378.4-2007
08	TOC	TOC 分析仪法	GB17378.4-2007
09	叶绿素 a	荧光分光光度法	GB17378.6-2007

### 2.3 统计分析

利用多元统计分析技术 spss 软件计算相关系数，计算三门湾水体中叶绿素 a 与相关环境因子逐步回归统计结果。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 叶绿素 a 浓度时空分布

根据图 2 可知, 在 2020 年 1 月至 2022 年 12 月期间三门湾叶绿素 a 在每年的 7-8 月份达到最高, 其中 2020 年 8 月份、2021 年 8 月份、2022 年 7 月份的叶绿素 a 浓度明显较高, 分别为 39.1 μg/L、32.1 μg/L 和 26.7 μg/L, 远大于同年其他月份的叶绿素 a 浓度。从月变化上看, 具有先上升后下降的趋势, 均先上升到 7-8 月份达到最大值, 后又逐渐开始降低。年际变化上看, 2021 年三门湾叶绿素 a 平均浓度要比 2020 年要低, 2022 年三门湾叶绿素 a 平均浓度要比 2021 年和 2020 年也都有所降低。

结合每月各监测站位的叶绿素 a 浓度, 发现 2020 年 8 月份监测点 A 的叶绿素 a 浓度高达 73.8 μg/L, 2021 年 8 月份监测点 A 的叶绿素 a 浓度高达 54.5 μg/L,

2022 年 7 月份监测点 A 的叶绿素 a 浓度高达 49.3 μg/L。发现 A 站点的叶绿素 a 浓度均要高于其他站点。这可能与入海营养盐含量的大量输入导致植物出现大量繁殖有关。

有文献表明, 这与东海海域每年 7-8 月份左右出现

赤潮有关, 这与夏季的高温高月降雨量带来的大量营养物质有关。三年时间内最高值叶绿素 a 浓度是逐年降低的, 表示三门湾海域水况逐年趋好, “五水共治”在源头上解决问题, 避免了生活污水、工业废水所引发的赤潮现象[15]。总体上每年冬季期间叶绿素 a 浓度最低, 冬季水温较低导致初级生产力细胞膜内酶的活性降低从而造成生产力降低。

#### 3.2 叶绿素 a 浓度与环境因子的相关分析

三门湾各个监测点位的各个环境因子与叶绿素 a 的 Pearson 相关系数及其检验结果见表 2。由表 2 可知, 三门湾绝大部分监测点位叶绿素 a 与水温 T、pH 正相关, 与其他环境因子的相关性不大。

#### 3.3 叶绿素 a 与环境因子的逐步回归分析

在不同的监测站点, 各环境因子对叶绿素 a 浓度的影响作用不相同, 逐步回归分析可以筛选出相对重要的影响因子, 建立多元线性回归方程, 并可进行方程显著性检验。三门湾各监测站点叶绿素 a 浓度与环境因子的逐步回归分析结果见表 3。

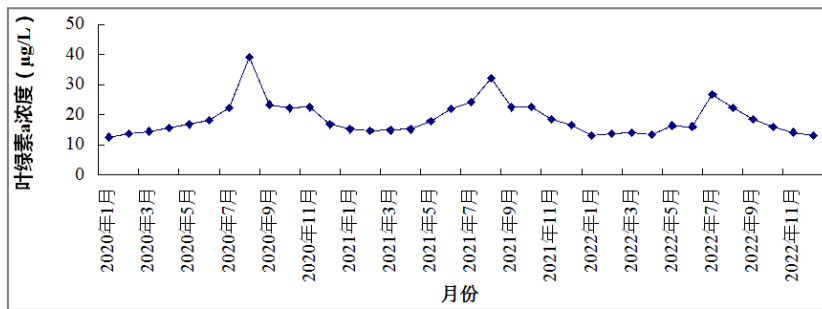


图 2 三门湾叶绿素 a 平均浓度月变化

表 2 三门湾各点位叶绿素 a 与环境因子的相关系数

点位	T	PH	SAL	TOC	TN	TP	COD	DO***
A	0.259	0.359*	-0.067	-0.007	0.129	-0.066	-0.248	0.031
B	0.349*	0.281	-0.074	-6	-0.071	-0.111	-0.298	0.054
C	0.376*	0.333*	0.045	0.074	-0.154	0.022	-0.292	0.048
D	0.292	0.254	-0.07	0.006	-0.028	-0.236	-0.422*	-0.058
E	0.471**	0.35	0.049	0.15	-0.111	-0.108	-0.115	0.05
F	0.434**	0.360*	0.015	0.055	-0.059	-0.145	-0.162	0.221
G	0.383*	0.327	0.124	0.151	0.007	-0.129	-0.068	0.086
H	0.435**	0.549**	-0.046	-0.007	-0.041	-0.196	-0.079	0.017
I	0.380*	0.324	0.103	0.01	-0.02	-0.199	-0.205	0.302
J	0.430**	0.305	0.13	0.028	-0.034	-0.075	0.003	0.085

\*. 在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关。  
 \*\*. 在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。  
 \*\*\*. 以水温为控制条件的偏相关系数

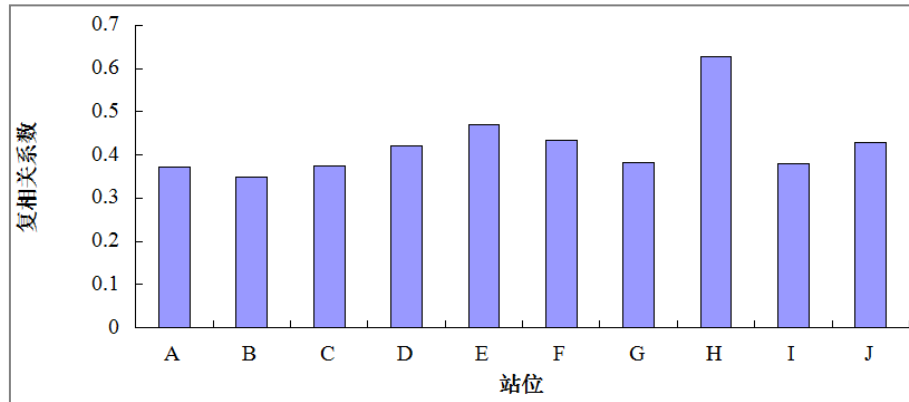


图3 三门湾叶绿素 a 年与环境因子的复相关系数统计

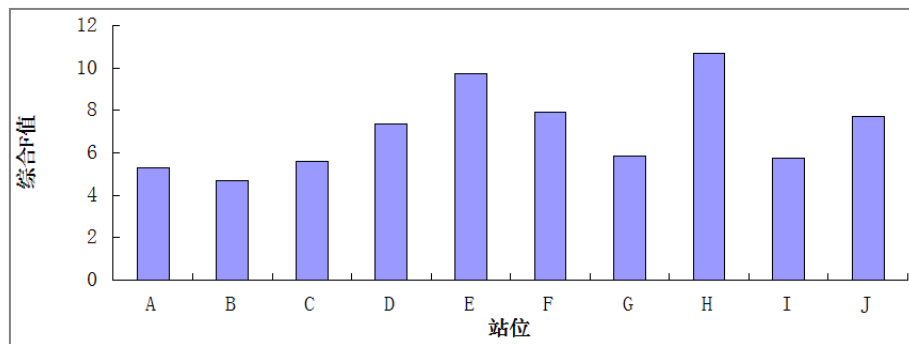


图4 三门湾叶绿素 a 年与环境因子的综合 F 值

表3 三门湾叶绿素 a 浓度与环境因子的逐步回归统计\*

站位	逐步回归公式	复相关系数	综合 F 值
A	$Chla = -353.289 + 44.671 T$	0.372	5.298
B	$Chla = -3.536 + 0.414 T$	0.349	4.717
C	$Chla = -2.896 + 0.343 T$	0.376	5.584
D	$Chla = 21.360 - 16.538 COD$	0.422	7.374
E	$Chla = -4.067 + 0.386 T$	0.471	9.718
F	$Chla = -2.091 + 0.282 T$	0.434	7.910
G	$Chla = -1.048 + 0.179 T$	0.383	5.836
H	$Chla = -220.709 + 27.116 pH + 0.238 T$	0.627	10.703
I	$Chla = -3.514 + 0.360 T$	0.380	5.741
J	$Chla = -1.553 + 0.192 T$	0.430	7.706

应用逐步回归统计筛选出对三门湾水域叶绿素 a 浓度的环境因子不尽相同,但水温是影响三门湾水体中叶绿素 a 浓度的主要环境因子且表现为正相关。化学需氧量在 D 站位表现为负相关;H 站位和水温与 pH 协同表现为正相关。水体中叶绿素 a 浓度与理化因子的关系比较复杂,在不同的监测点位,对藻类有显著影响的环境因子各不相同。研究发现叶绿素 a 质量浓度与水温、TOC、COD 和 TP 呈极显著正相关,与 DO、

TN 和 TN/TP 呈极显著负相关,与 pH 无显著相关性。张智渊等[16]在太湖布设了一个采样点,并对其进行原位监测,研究结果表明影响叶绿素 a 浓度变化的环境因子按其解释率排序为水温>风速>硝态氮,叶绿素 a 浓度与硝态氮浓度呈显著的线性相关,与本研究结果具有相似之处。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

2020 年 1 月至 2022 年 12 月连续三年的每月监测表明,三门湾水域叶绿素 a 浓度时空差异较大,在每年的夏季(7-8 月份)叶绿素 a 浓度明显升高,其他月份叶绿素 a 浓度变化不大。叶绿素 a 与环境因子的逐步回归分析表明,在三门湾不同的监测站位,对叶绿素 a 浓度有影响的环境因子各不相同。在筛选的环境因子中,叶绿素 a 质量浓度与水温、COD 和 TP 呈极显著正相关,与 DO、TN 和 TN/TP 呈极显著负相关,与 pH 无显著相关性。

## 4.2 展望

三门湾等重点港湾排污总量控制是防治陆源入海污染物的关键，迫切需要加强对陆源入海排污口的监测研究[17]，从源头加强污染控制，促进上游污染管控。通过三门湾海域每月的水体监测数据，进一步优化和完善减排监测工作方案，制定并实施主要排污入海口水质减排方案，落实各项海洋污染防治措施，使陆源污染物入海管理实现制度化、定量化和目标化。从根本上改善海洋生态环境，从而有效提高三门湾等海湾的生态多样性和渔业资源的可持续发展。

## 致谢

本研究数据经宁波海洋环境监测中心站工作人员多年来的现场采样、实验室分析及数据处理，特此致谢。

## 参考文献

- [1] 严润玄, 韩庆喜, 王晓波. 杭州湾和三门湾拖网大型底栖动物群落组成和多样性研究 [J]. 海洋与湖沼, 2020, 51(03): 484-493.
- [2] 廖一波, 寿鹿, 曾江宁, 高爱根. 三门湾大型底栖动物时空分布及其与环境因子的关系 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(09): 2424-2430.
- [3] 施晓来. 春秋三季三门湾表层海水氮磷营养盐等要素浓度的分布特征 [J]. 应用海洋学学报, 2013, 32(04): 461-467.
- [4] 叶林安, 徐清, 朱志清, 等. 2016 年象山港水质分布变化与主要污染因子分析. 科技通报, 2018, 34(12): 265-270.
- [5] YE L A, ZHANG H B, FEI Y J, et al. Nutrient distributions in the East China Sea and changes over the last 25 year. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18(1): 973-985.
- [6] 陈丹琴, 叶然, 魏永杰, 等. 三门湾浮游植物群落结构与环境因子的关系研究 [J]. 海洋环境科学, 2017, 36(01): 70-75+86.
- [7] 赵蹇, 田纪伟, 赵仕兰, 等. 渤海冬夏季营养盐和叶绿素 a 的分布特征 [J]. 海洋科学, 2004, 28(4): 34-39.
- [8] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 等. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析 [J]. 湖泊科学, 2011, 23(1): 67-72.
- [9] 金衍健, 卓丽飞. 舟山沿岸海域叶绿素 a 时空分布及与水质因子的相关分析 [J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2017, 36 (05): 21-27.
- [10] 戴明, 刘华雪, 吴凤霞, 等. 万山群岛海域网采浮游植物与环境因子的关系 [J]. 海洋环境科学, 2019(4): 540-547..
- [11] 刘祥, 陈凯, 陈求稳, 等. 淮河流域典型河流夏秋季底栖动物群落特征及其与环境因子的关系 [J]. 环境科学学报, 2016, 36(6): 1928-1938.
- [12] 谢彩琴, 艾为明, 彭欣, 陈少波, 谢起浪. 三门核电站周边海域浮游植物多样性与季节变化 [J]. 科技通报, 2015, 31(07): 222-228.
- [13] 中国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范: 第 3 部分样品采集、贮存与运输: GB17378.3-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [14] 中国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范: 第 4 部分海水分析: GB17378.4-2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [15] 王修林, 孙霞, 韩秀荣, 等. 2002 年春、夏季东海赤潮高发区营养盐结构及分布特征的比较 [J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(4): 323-331.
- [16] 张智渊. 太湖大气湿沉降氮、磷营养盐特征及其对浮游植物的影响 [D]. 中国环境科学研究院, 2018.
- [17] 叶林安, 费岳军, 王琼, 等. 象山港周边主要入海污染物特征研究 [J]. 海洋通报, 2022, 41(2): 215-223.

## 作者简介

### 鲁水

1989 年生, 助理工程师, 硕士. 研究方向为海洋环境监测与评价研究.

E-mail: 991850282@qq.com

### 叶林安

1990 年生, 博士, 高级工程师. 研究方向为生态环境监测与评价研究.

E-mail: Yelinan2018@163.com