2001—2023 年广东沿海赤潮灾害分级和时空分布特征研究

李峰杰[1],谢海平[2],李伯通[2],吴亚梅[2],吴健勇[1],黄建荣[1,3]

（1. 中山大学生命科学学院 广州 510275；2. 广东省农业技术推广中心 广州 510145；
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海） 珠海 519080）

摘要：文章采用自然断点法对 2001—2023 年广东沿海 237 次赤潮事件的面积、持续时间、危害类型及经济损失数据资料进行分级量化，并结合赤潮致灾生物种类和环境因子，分析了广东沿海赤潮灾害的演变规律和驱动机制。结果表明：（1）广东沿海赤潮以低等级灾害为主，其中Ⅰ级和Ⅱ级赤潮分别占总次数的 66.3％和 26.1％，但Ⅲ级赤潮造成的经济损失占总损失的 59.57％。（2）赤潮主要集中在春季，4 月为发生次数峰值，累计面积和持续时间的高峰分别出现在 3 月和 11 月。（3）湛江、深圳、珠海和惠州为赤潮高发区域，其赤潮发生次数和规模占总数的 78.67％和 73.28％。（4）引发赤潮的生物种类涵盖硅藻门、甲藻门、金藻门及原生动物门 44 种，其中甲藻引发的赤潮次数最多，而金藻的累计面积最大。（5）赤潮发生频次和规模呈年际波动，近年来高污染排放和水体富营养化显著影响赤潮高发区域的生物群落特征和灾害风险。

关键词：赤潮灾害；时空分布；灾害分级；广东沿海

中图分类号：X55；P7 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2025）09-0098-12

Classification and Spatiotemporal Distribution Characteristics of Coastal Red Tide Disasters in Guangdong Province from 2001 to 2023

LI Fengjie[1]，XIE Haiping[2]，LI Botong[2]，WU Yamei[2]，WU Jianyong[1]，HUANG Jianrong[1,3]

（1. Sun Yat-sen University School of Life Sciences，Guangzhou 510275，China；
2. Guangdong Provincial Agricultural Technology Extension Center，Guangzhou 510145，China；
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory（Zhuhai），Zhuhai 519080，China）

Abstract：The natural breakpoint method was applied to classify and quantify data on area，duration，hazard types and economic losses from 237 red tide events along the Guangdong coast between 2001 and 2023．Combined with data on causative organisms and environmental factors，the evolution patterns and driving mechanisms of red tide disasters along the Guangdong coastal region were analyzed．The results showed that：（1）Red tide in coastalGuangdong was

收稿日期：2025-02-27；**修订日期：**2025-08-13

基金项目：广东现代化海洋牧场渔业环境与水产品质量安全监测项目（71020238）；国家公益性科研院所专项资金（PM-zx097-201904-134）；南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）创新团队建设项目（311021004）.

作者简介：李峰杰，硕士研究生，研究方向为海洋生态学

通信作者：黄建荣，副教授，博士，研究方向为水生生物学

dominated by low-grade disasters，in which grade I and grade Ⅱ red tides accounted for 66.3 % and 26.1 % of the total number of times，respectively，but the economic losses caused by grade Ⅲ red tides accounted for 59.57 % of the total losses.（2）Red tide incidents were mainly concentrated in spring，with the peak number of occurrences in April. However，the peaks of cumulative area and duration occurred in March and November，respectively.（3）Zhanjiang，Shenzhen，Zhuhai and Huizhou were the areas with high incidence of red tide，and the number and scale of red tide occurred in 78.67% and 73.28% of the total.（4）There were 44 species of red tides caused by diatoms，dinoflagellates，golden algae and protozoa，among which dinoflagellates caused the largest number of red tides，and the cumulative area of golden algae was the largest.（5）The frequency and scale of red tide fluctuated interannually，and in recent years，high pollution discharge and eutrophication had significantly affected the characteristics of biological communities and disaster risks in areas with high red tide occurrence.

Keywords：Red tide disaster，Spatiotemporal distribution，Hazard classification，Guangdong coastal waters

赤潮是指海洋中微型浮游生物快速增殖与聚集，导致生态系统结构与功能失衡的生态异常现象[1]。国际上更多称之为有害藻华，包括海水、淡水以及各类藻类所引发的藻华现象[2]。赤潮生物暴发性增殖时，会消耗水体中大量溶解氧，严重降低海水透明度，使被遮蔽的海洋区域无法获取充足的阳光；同时，它们会产生黏液附着于鱼类、贝类等动物的鳃部，导致其窒息死亡。一些赤潮生物还会分泌有害毒素，这些毒素不仅导致多种海洋生物死亡，也会通过食物链传递，最终进入人体，危害人类健康并威胁生命安全[3]。总体而言，赤潮的发生不仅造成海洋渔业、水产养殖业和旅游业的经济损失，危害水体生态环境，还会通过海产品的食物链影响人体健康，甚至可能导致人员死亡[4]。

近年来，能够产生毒素及其他有害影响的赤潮发生频率显著增加，规模持续扩大，已对海洋生态安全构成严重威胁，并危及人类健康。中国是受赤潮灾害影响最为严重的国家之一，而广东省作为沿海省份，也是赤潮灾害的高发区域。广东沿海的赤潮生物以有毒有害种类为主，对养殖渔业的威胁尤为突出。据《广东省海洋环境质量公报》报道，赤潮灾害已成为威胁广东省渔业经济的主要因素之一[5]。研究广东沿海赤潮的时空分布特征，评估赤潮灾害风险，对于推动广东省海洋渔业环境建设、提升赤潮监测预警能力以及完善应急响应机制具有重要意义。

本文收集整理了 2001—2023 年广东省记录的赤潮事件数据[5-6]，采用自然断点法对广东沿海赤潮灾害进行分级评估[7]，对赤潮灾害的时间、规模及肇事种生物等特征进行了分析，揭示了广东近岸海域本世纪以来赤潮的时空特征及其演变规律，旨在为探讨有害赤潮的发生机制及制定科学的防治措施提供基础资料，同时为广东沿海赤潮高发区海水养殖业的可持续发展和海洋生态保护提供理论支持。

1　数据来源和研究方法

1.1　数据来源

本文统计数据来源于 2001—2023 年《广东省海洋环境质量公报》和《广东省海洋灾害公报》中记录的赤潮事件资料和监测数据，共收集整理了广东沿海发生的 237 次赤潮灾害过程。所收集的赤潮信息包括每次赤潮的发现与消亡时间、发生地点、最大成灾面积、赤潮发生的优势种类，以及造成的渔业直接经济损失。

1.2　研究方法

本文参考相关文献[7]，使用自然断点法，将赤潮各指标的分级和赋分量化。根据赤潮造成的损害影响，将赤潮灾害分等定级为灾变等级和灾度等级[8]；参考《赤潮监测技术规程》（HY/T 069—2005）[9]的等级划分（表 1）以及联合国人道主义事务部对自然灾害风险的定义和数学式：风险度 = 危险度 × 易损度（United Nations Department of Humanitarian Affairs，1991），最终对赤潮灾害指数的计算式可描述为：

$$R=(F^S+F^T)\times(F^H+F^L)$$

式中：R 为赤潮灾害指数；F^S 为面积等级分值；F^T 为持续时间等级分值；（F^S+F^T）为灾变指标分值；F^H 为赤潮危害种类等级分值；F^L 为渔业直接损失等级分值；（F^H + F^L）为灾度指标分值[9]。将历次赤潮事件的各指标等级分值代入数学表达式中，即可计算出全部赤潮事件的 R 值。根据其计算的灾害指数 R 情况判断其灾害级别（表 2），从低到高划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级 4 个灾害级别。

表 1 广东沿海赤潮各量化指标分级和赋分结果

Table 1 Classification and scoring results of each quantitative index of coastal red tide in Guangdong coast waters

指标分级	赤潮灾变指标				赤潮灾度指标			
	面积 /km²	分值 F^S	持续时间 /d	分值 F^T	危害类型	分值 F^H	渔业直接损失 / 万元	分值 F^L
低	（0，30］	1	（0，2］	1	基本无害	1	［0，300］	1
中等	（30，90］	2	（2，6］	2	对生态环境产生危害	2	（300，2 500］	2
较高	（90，150］	3	（6，10］	3	产生潜在毒性	3	（2 500，5 000］	3
高	（150，+ ∞）	4	（10，+ ∞）	4	对人身健康产生影响	4	（5 000，+ ∞）	4

表 2 赤潮灾害分级

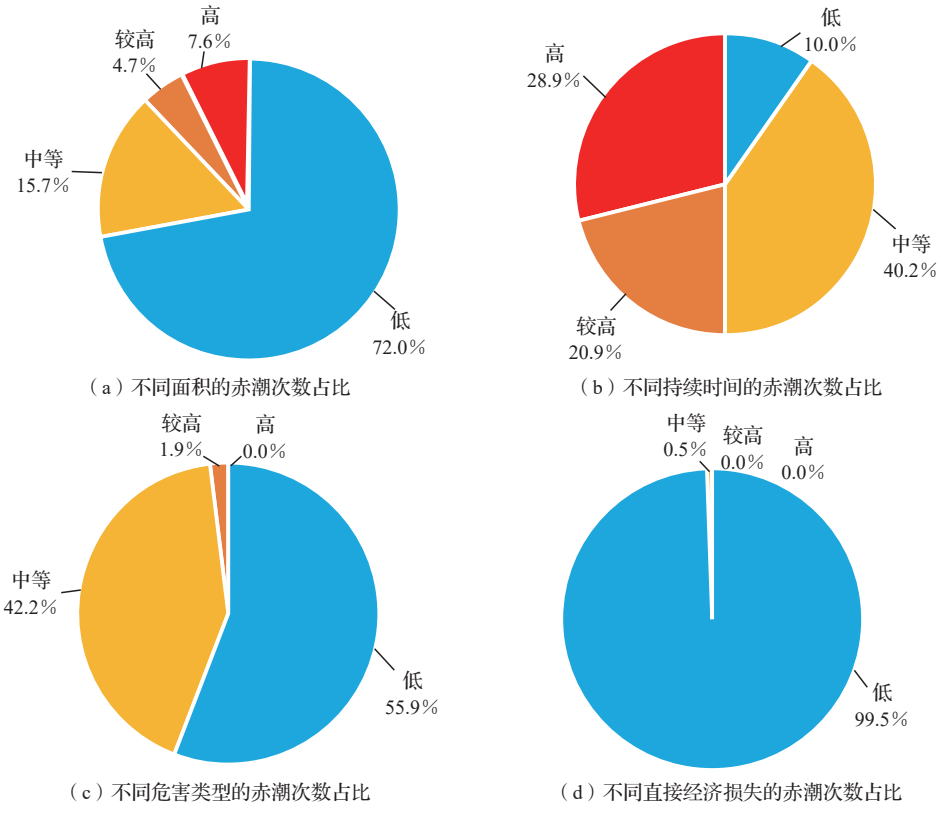
Table 2 Classification of red tide hazards

等级	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级
灾害指数 R	（0，12）	［12，20）	［20，30）	［30，+ ∞）

2 结果与讨论

2.1 广东省沿海赤潮分级

根据赤潮发生次数的指标分析（由于 2003 年和 2004 年发布的赤潮灾害报告仅提及赤潮发生次数和总面积，因此本文未统计上述两年 26 次赤潮未报道的相关指标），在 2001—2023 年广东沿海共发生了 237 次赤潮（除去 2003 年和 2004 年的 26 次赤潮灾害，本文主要以 211 次赤潮为总数统计各项指标）。其中（图 1），赤潮面积最小的为 0.001 km²，最大的达 700 km²。按照面积范围划分，面积为 0 ～ 30 km² 的赤潮发生 152 次，占总次数的 72.0%；30 ～ 90 km² 的赤潮发生 33 次，占 15.6%；90 ～ 150 km² 的赤潮发生 10 次，占 4.7%；150 km² 以上的赤潮发生 16 次，占 7.6 %。由此可见，广东沿海赤潮大部分以小面积为主，而大面积赤潮的占比较小。在持续时间方面（2003 年和 2004 年广东省发布的赤潮灾害报告未提及两年中共计 26 次赤潮发生的持续时间），持续时间为 0 ～ 2 d 的赤潮发生 21 次，占发生总次数的 10.0%；持续 2 ～ 6 d 的赤潮发生 85 次，占 40.3%；持续 6 ～ 10 d 的赤潮发生 44 次，占 20.9%；持续 10 d 以上的赤潮发生 61 次，占 28.9%。持续时间最长的一次赤潮发生在 2005 年 11 月 28 日至 2006 年 4 月 20 日，位于湛江徐闻附近海域，面积达 700 km²，由球形棕囊藻（*Phaeocystis globosa*）引发，持续时间长达 143 d。从危害类型来看，基本无害的赤潮发生 118 次，占发生总次数的 55.9%；对生态环境产生危害的赤潮发生 89 次，占 42.2%；产生潜在毒性的赤潮发生 4 次，占 1.9%；对人身体健康产生影响的赤潮未有记录。由此可见，广东沿海大部分赤潮为基本无害赤潮。在渔业直接经济损失方面，损失在 0 ～ 300 万元的赤潮发生 210 次，占 99.5%；损失在 300 万～ 2 500 万元的赤潮仅发生 1 次，占 0.5%；损失在 2 500 万元以上的赤潮未有记录。据上述统计，广东省发生的绝大部分赤潮造成的渔业经济损失在 0 ～ 300 万元之间，其中未造成渔业直接经济损失的赤潮为 206 次，占比达到 97.6%。渔业经济损失最大的一次赤潮发生在 2011 年 8 月 12 日至 8 月 25 日，位于珠海洪湾渔场、海滨浴场及九州岛东南至尖沙咀海域，由双胞旋沟藻（*Cochlodinium geminatum*）引发，面积达 89 km²，造成渔业直接经济损失 316 万元。



（a）不同面积的赤潮次数占比　（b）不同持续时间的赤潮次数占比

（c）不同危害类型的赤潮次数占比　（d）不同直接经济损失的赤潮次数占比

图 1　广东省沿海各级别指标赤潮发生次数占比

Fig.1　Proportion of red tide occurrence times by level indicators along the coastal areas of Guangdong Province

根据赤潮灾害分级指数结果显示（图 2），2001—2023 年广东省沿海Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级赤潮分别发生 140 次、55 次、16 次、0 次，分别占比 66.3 %、26.1 %、7.6 %、0.0 %。大部分赤潮灾害等级属于Ⅰ级和Ⅱ级，Ⅲ级仅有 16 次，在统计的年份内未发生Ⅳ级灾害。虽然低等级的灾害次数占比较多，但是发生Ⅲ级赤潮灾害造成的渔业直接经济损失占 23 年总损失的 59.57 %。

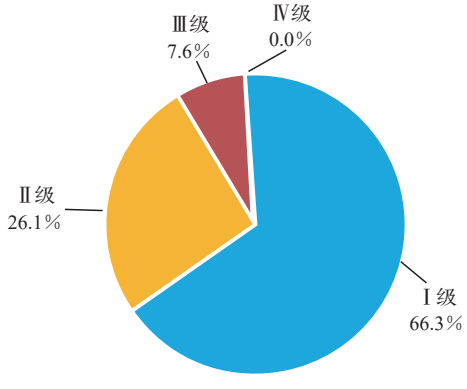


图 2　广东省沿海不同级别赤潮灾害事件占比

Fig.2　Proportion of different levels of red tide disaster events in the coastal areas of Guangdong Province

2.2　引发赤潮的生物种类

2001—2023 年，除去 2003 年和 2004 年引发赤潮灾害生物的报道数据，广东沿海赤潮灾害由 3 门 25 属 44 种生物引发（表 3）。其中，海链藻（*Thalassiosira* sp.）、角毛藻（*Chaetoceros* sp.）、双眉藻（*Amphora* sp.）、娄氏藻（*Lauderia* sp.）、骨条藻（*Skeletonema* sp.）、凯伦藻（*Karenia* sp.）、卡盾藻（*Chattonella* sp.）和棕囊藻（*Phaeocystis* sp.）为通过光学显微镜镜检而只是鉴定到属的物种。在 211 次赤潮事件中（除去 2003 年和 2004 年共 26 次赤潮灾害），有 29 次由两种或两种以上生物种共同引发，为多相型赤潮；其余 182 次为单相型赤潮。从每种引发赤潮生物的引发次数和累计面积统计得出，引发赤潮的物种以

硅藻门和甲藻门的种类为主，其中硅藻门 21 种，引发赤潮 64 次，累计面积达 1 982.58 km²；甲藻门 17 种，引发赤潮 123 次，累计面积达 2 841.13 km²；金藻门 5 种，引发赤潮 58 次，累计面积达 4 010.8 km²；原生动物仅包含 1 种，引发赤潮 5 次，累计面积为 175.5 km²。

表 3　广东省 2001—2023 年引发赤潮灾害的生物种类

Table 3　Species causing red tide disasters in Guangdong Province from 2001 to 2023

门类	赤潮致灾生物种类
硅藻门（Bacillariophyta）	双环海链藻（*Thalassiosira diporocyclus*）、海链藻（*Thalassiosira* sp.）、脆根管藻（*Rhizosolenia fragillisima*）、斯氏根管藻（*Rhizosolenia stolterfothii*）、丹麦细柱藻（*Leptocylindrus danicus*）、中肋骨条藻（*Skeletonema costatum*）、骨条藻（*Skeletonema* sp.）、柔弱菱形藻（*Nitzschia delicatissima*）、海洋角毛藻（*Chaetoceros pelagicus*）、旋链角毛藻（*Chaetoceros curvisetus Cleve*）、洛氏角毛藻（*Chaetoceros lorenzianus*）、柔弱角毛藻（*Chaetoceros debilis Cleve*）、角毛藻（*Chaetoceros* sp.）、日本星杆藻（*Asterionella japonica*）、双眉藻（*Amphora* sp.）、短角弯角藻（*Eucampia zodiacus*）、角状弯角藻（*Eucampia cornuta Grunow*）、柔弱拟菱形藻（*Pseudo-nitzschia delicatissima*）、尖刺拟菱形藻（*Pseudo-nitzschia pungens*）、拟菱形藻（*Pseudo-nitzschia* sp.）、娄氏藻（*Lauderia* sp.）
甲藻门（Pyrrophyta）	夜光藻（*Noctiluca scintillans*）、血红哈卡藻（*Akashiwo sanguinea*）、多纹膝沟藻（*Gonyaulax polygramma*）、具刺膝沟藻（*Gonyaulax spinifera*）、膝沟藻（*Gonyaulax* sp.）、锥状斯克里普藻（*Scrippsiella trochoidea*）、条纹环沟藻（*Gyrodinium instriatum*）、多环旋沟藻（*Cochlodinium polykrikoides*）、双胞旋沟藻（*Cochlodinium geminatum*）、旋沟藻（*Cochlodinium* sp.）、米氏凯伦藻（*Karenia mikimotoi*）、凯伦藻（*Karenia* sp.）、链状裸甲藻（*Gymnodinium catenatum*）、反曲原甲藻（*Prorocentrum sigmoides*）、利马原甲藻（*Prorocentrum lima*）、微小原甲藻（*Prorocentrum minimum*）、纺锤角藻（*Ceratium fusus Dujardin*）
金藻门（Chrysophyta）	赤潮异弯藻（*Heterosigma akashiwo*）、球形棕囊藻（*Phaeocystis globosa*）、棕囊藻（*Phaeocystis* sp.）、海洋卡盾藻（*Chattonella Marina*）、卡盾藻（*Chattonella* sp.）
原生动物门（Protozoa）	红色中缢虫（*Mesodinium rubrum*）

图 3 所示为 2001—2023 年，引发广东沿海赤潮灾害发生次数和累计面积排序前 10 的赤潮生物。其中，球形棕囊藻、夜光藻、血红哈卡藻、中肋骨条藻和锥状斯克里普藻这 5 种生物引发的赤潮次数均超过 20 次，总计 151 次，占赤潮总数的 71.56%。在赤潮面积方面（除去 2003 年和 2004 年的赤潮灾害累计面积），中肋骨条藻、血红哈卡藻和球形棕囊藻的赤潮累计面积较大，分别达到 1 151.97 km²（占比 12.78%）、942.16 km²（占比 10.46%）和 3 463.07 km²（占比 38.43%）。相比之下，由其他 441 种生物引发的赤潮灾害，其累计面积占比均低于 10%。

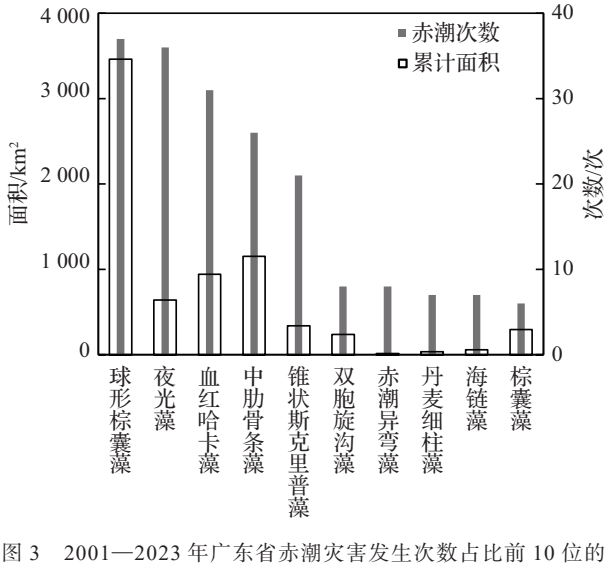


图 3　2001—2023 年广东省赤潮灾害发生次数占比前 10 位的赤潮致灾生物

Fig.3　Top 10 harmful algal bloom species by occurrence percentage in Guangdong Province from 2001 to 2023

夜光藻在广东大鹏湾的出现次数最多，其赤潮通常发生在近岸海域。这种分布模式主要有两个原因：一是近岸和表层水体中营养盐浓度较高，导致作为夜光藻饵料的浮游植物非常丰富；二是大鹏湾独特的潮流和潮汐特征（不规则半日潮）促进了夜

光藻在近岸表层水体中的聚集。这些因素可能是大鹏湾水域夜光藻种群密度波动较大、赤潮发生频繁的重要原因[10]。广东湛江海域以中肋骨条藻引发的赤潮灾害为主，赤潮多发于夏季。研究表明，中肋骨条藻能够在高温、低盐和富营养化的水体中引发藻华[11]。湛江港是该种藻华的主要发生区域。作为一个深入市区的海港，湛江港受到居民生活污水、工农业废水和交通运输废水的污染，同时水产养殖业也对其造成影响，使该海域处于中度富营养化水平[12]。此外，湛江港内除遂溪河外，还有 10 余条溪流注入，导致该海域盐度偏低[13]。这些因素为中肋骨条藻藻华的频繁发生提供了环境基础[14]。锥状斯克里普藻引发的赤潮主要发生在广东大亚湾。据研究表明，升温可能是锥状斯克里普藻赤潮发生及持续的重要原因[15]。大亚湾海域因受核电站温排水和全球变暖的共同影响，其海水升温速率由核电站建成前的 0.05 ℃ /a 上升至 0.09 ℃ /a。研究发现，核电站排水口附近表层水温自 1982 年至 2005 年上升了 6.8 ℃[16]。这些温升因素为锥状斯克里普藻赤潮的形成创造了条件。粤东汕头、汕尾海域及柘林湾，与粤西湛江海域，均为棕囊藻赤潮的高发区域。在柘林湾棕囊藻赤潮期间，监测发现海水中可溶性氮（DIN）浓度显著低于近外海非重灾区，可溶性氮浓度与棕囊藻细胞密度呈负相关关系，表明棕囊藻对氮的需求量较高[17]。同时，监测海域的铁（Fe）和锰（Mn）浓度明显偏高，比同期广东大亚湾和大鹏湾高出数十倍[18]。这些结果表明，棕囊藻赤潮的发生与海洋环境富营养化的加剧，尤其是氮输入的增加密切相关。

2.3　广东沿海赤潮发生时间特征

2.3.1　年际变化特征

2001—2023 年，广东沿海赤潮灾害的年均发生次数和年均发生面积分别为 10.3 次和 479 km²，表现出明显的年际波动（图 4）。在赤潮发生次数方面，2012 年赤潮次数最多，共发生 16 次；2003 年和 2014 年均发生 15 次，2010 年发生 14 次。相比之下，2019 年赤潮次数最少，仅为 3 次；2005 年、2013 年、2020 年和 2023 年也相对较少，各发生 6 次。在赤潮发生面积方面，2006 年灾害面积最大，达 1 792 km²；2003 年和 2017 年赤潮面积分别为 1 500 km² 和 1 017 km²，这 3 年赤潮发生面积超过 1 000 km²。2023 年赤潮发生面积最小，仅为 21 km²；2015 年的面积也较小，仅为 38 km²。值得注意的是，这两年赤潮灾害的面积不到历年年均赤潮发生面积（479 km²）的 10%。

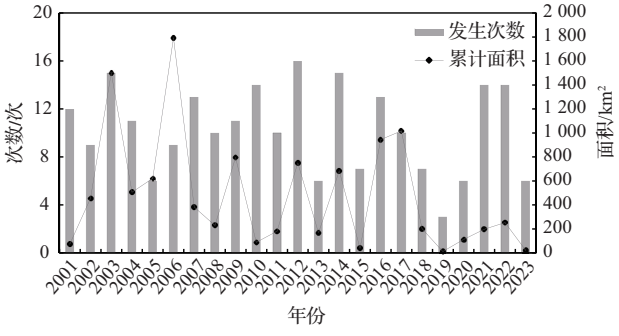


图 4　2001—2023 年广东省赤潮历年发生次数和累计面积

Fig.4　Annual occurrence times and cumulative area of red tides in Guangdong Province from 2001 to 2023

2001—2023 年，广东省赤潮灾害的年均持续时间为 100.1 d（由于 2003 年和 2004 年官方未公布赤潮灾害持续天数，数据有所缺失），年际变化明显（图 5）。其中，2006 年赤潮灾害持续时间最长，累计 231 d；2008 年、2009 年、2012 年、2014 年、2016 年、2017 年、2021 年和 2022 年的赤潮灾害持续时间也均超过 100 d，分别为 110 d、177 d、126 d、138 d、170 d、109 d、154 d 和 119 d。相较之下，2019 年累计赤潮灾害持续时间最短，仅 16 d；2020 年为 25 d。在赤潮灾害等级方面，2017 年是赤潮灾害最为严重的一年，共发生 4 次灾害等级为Ⅲ级的赤潮灾害。其次，2006 年发生了 3 次Ⅲ级赤潮灾害，2009 年和 2016 年分别发生 2 次Ⅲ级赤潮灾害。2011 年尽管赤潮灾害发生了 10 次，累计面积为 180.5 km²，其中仅有 1 次达到Ⅲ级，但其直接经济损失高达 316 万元，占 2001—2023 年赤潮灾害总损失（530.5 W）的 59.57%。值得注意的是，所有调查年份均未出现灾害等级为Ⅳ级的赤潮，但并非每年都发生Ⅲ级赤潮。例如，2003 年赤潮累计面积达到 1 500 km²，发生次数 15 次，分别是历年平均值的 3.13 倍和 1.46 倍，但官方报道显示该年的赤潮并未对渔业造成直接经济损失。2012 年赤潮灾害发生 16 次，累计面积为 750.62 km²，未

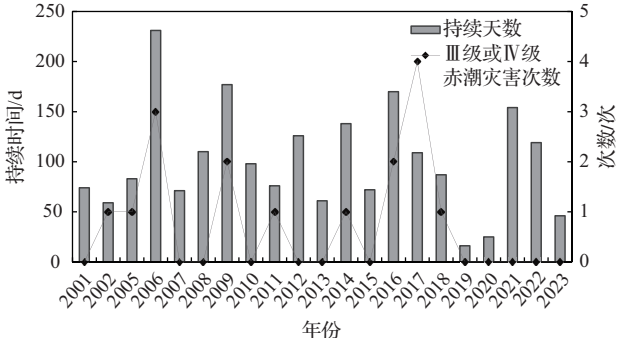


图 5 2001—2023 年广东省赤潮历年累计持续天数和Ⅲ级或Ⅳ级赤潮灾害次数

Fig.5 Accumulated duration of red tides and number of grade Ⅲ or grade IV disaster incidents in Guangdong Province from 2001 to 2023

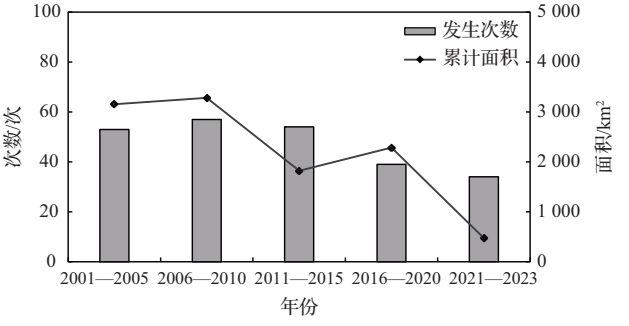


图 6 2001—2023 年广东省赤潮灾害各时间段变化情况

Fig.6 Changes in the occurrence of red tide disasters in Guangdong Province from 2001 to 2023 by time period

超过 1 000 km²；2014 年赤潮灾害发生 15 次，累计面积为 683.76 km²，也未超过 1 000 km²。这两年间的赤潮灾害分别以Ⅰ级和Ⅱ级为主，仅 2014 年发生 1 次Ⅲ级赤潮灾害，但均未对渔业造成直接损失。综上所述，广东沿海赤潮的发生次数与累计面积并非决定其危害程度的关键因素。相比之下，广东沿海赤潮的灾害等级更能有效表征赤潮对生态环境和经济的实际影响。

将 2001—2023 年广东省赤潮情况按照每 5 年为一个时间段进行分析（2021—2023 年单独作为一个时间段），各时间段的赤潮暴发次数和累计面积分别为：2001—2005 年 53 次，3 154.4 km²；2006—2010 年 57 次，3 284.92 km²；2011—2015 年 54 次，1 820.94 km²；2016—2020 年 39 次，2 286.47 km²；2021—2023 年 34 次，469.47 km²（图 6）。总体来看，赤潮暴发次数和累计面积均呈下降趋势。在赤潮发生次数方面，2001—2015 年的 3 个时间段变化不大，均超过 50 次；而在 2016—2023 年两个时间段，赤潮次数呈现明显下降趋势，分别为 39 次和 34 次。在累计面积方面，2001—2010 年的两个时间段变化较小，均超过 3 000 km²；2011—2015 年累计面积下降至 1 820.94 km²，呈现显著下降趋势。2016—2020 年累计面积回升至 2 000 km² 以上，但到了 2021—2023 年再次下降至 469.47 km²，为调查期间的最低值。

2001—2023 年（除去 2003 年和 2004 年共 26 次赤潮灾害），引发赤潮的生物种类和类别比例发生了显著变化（图 7）。在 2001—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年和 2021—2023 年 5 个时间段，由硅藻引发的赤潮次数分别为 10 次、11 次、16 次、8 次、19 次，累计面积分别为 205.48 km²、490.1 km²、984 km²、62.83 km² 和 240.17 km²；由甲藻引发的赤潮次数分别为 11 次、29 次、36 次、26 次、21 次，累计面积分别为 50.38 km²、741.72 km²、704.17 km²、1 136.62 km² 和 208.241 km²；由金藻引发的赤潮次数分别为 11 次、23 次、8 次、11 次、5 次，累计面积分别为 873 km²、1 903.1 km²、132.77 km²、1 086.92 km² 和 15.01 km²；由原生动物引发的赤潮次数分别为 3 次、1 次、0 次、0 次、1 次，累计面积分别为 19.5 km²、150 km²、0 km²、0 km² 和 6 km²。整体来看，由甲藻引发的赤潮次数最多，达 123 次；由金藻引发的赤潮累计面积最大，达 4 010.8 km²。在赤潮次数和累计面积方面，甲藻、硅藻和金藻引发的赤潮均呈现波动态势，无显著的上升或下降趋势。相比之下，由原生动物引发的赤潮在次数和累计面积上则呈现明显的下降趋势。在 2001—2010 年的 10 年间，由原生动物引发的赤潮发生 4 次，但在 2011—2020 年未再发生，仅在 2021—2023 年间记录了 1 次。从类别占比来看，2001—2010 年与 2011—2020 年，由甲藻引发赤潮的比例呈现上升趋势，在 2011—2020 年甚至超过 50%；硅藻引发赤潮的比例则表现出一定波动，但未呈现显著趋势；由金藻引发赤潮的比例持续下降。

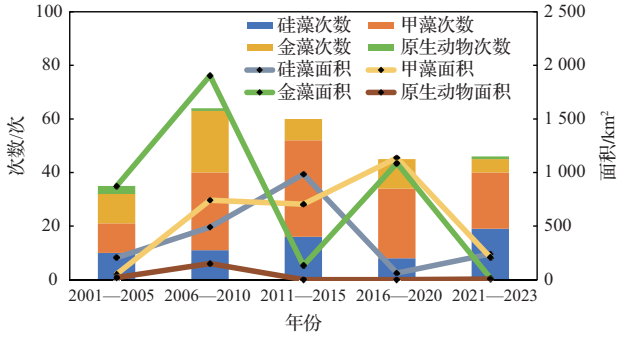


图 7　广东省赤潮生物时段变化

Fig.7　Temporal variation of red tide organisms in Guangdong Province

综上所述，不同生物类别引发赤潮的特征和变化趋势反映了赤潮发生机制的多样性与复杂性，同时揭示了环境条件变化对生物群体适应性与分布格局的深远影响。在引发赤潮的生物种类中，不同时间段出现了新的物种。2011—2015 年新增的引发赤潮生物种类包括短角弯角藻（*Eucampia zodiacus*）、微小原甲藻（*Prorocentrum minimum*）、双胞旋沟藻（*Cochlodinium geminatum*）、角状弯角藻（*Eucampia cornuta Grunow*）、柔弱伪菱形藻（*Pseudo-nitzschia delicatissima*）。2016—2020 年，新增的物种为尖刺拟菱形藻（*Pseudo-nitzschia pungens*）和斯氏根管藻（*Rhizosolenia stolterfothii*）。2021—2023 年新增的物种种类为柔弱角毛藻（*Chaetoceros debilis* Cleve）、海洋角毛藻（*Chaetoceros pelagicus*）、娄氏藻（*Lauderia* sp.）、旋链角毛藻（*Chaetoceros curvisetus* Cleve）、洛氏角毛藻（*Chaetoceros lorenzianus*）、骨条藻（*Skeletonema* sp.）、凯伦藻（*Karenia* sp.）、纺锤角藻（*Ceratium fusus Dujardin*）。

2.3.2　季节变化特征

对 2001—2023 年逐月赤潮发生的次数和累计面积统计结果显示（除去 2003 年和 2004 年共 26 次赤潮灾害），广东省赤潮主要集中在春季，秋、冬季的发生概率较低。自 1 月开始，广东进入赤潮高发期，4 月达到发生次数的顶峰，随后从 5 月开始明显下降。赤潮累计面积则呈波动性变化，在 3 月和 11 月达到一个峰值，随后逐渐下降（图 8）。对 2001—2023 年逐月赤潮累计天数及灾害等级Ⅲ级和Ⅳ级的出现次数统计显示，3 月的累计持续时间和灾害等级Ⅲ级、Ⅳ级的出现次数均达到最大值。具体而言，3 月共发生 28 次赤潮，累计面积达 1 937.21 km²，持续时间累计 355 d，分别占总体的 13.2%、21.5%和 16.9%。11 月的赤潮次数为 17 次，累计面积为 1 698.56 km²，持续时间 308 d，分别占总体的 8.1%、18.8%和 14.7%。2 月的赤潮次数为 24 次，累计面积 1 215.46 km²，持续时间 256 d，分别占总体的 11.4%、13.5%和 12.2%。4 月发生赤潮 32 次，为月度最高，但累计面积仅为 463.13 km²，持续时间 232 d，分别占总体的 15.2%、5.1%和 11.1%（图 9）。

相关分析表明，广东沿海赤潮发生次数、累计面积与累计持续时间之间并无显著相关性（$p > 0.05$）。例如，4 月虽然赤潮发生次数最多，但累计

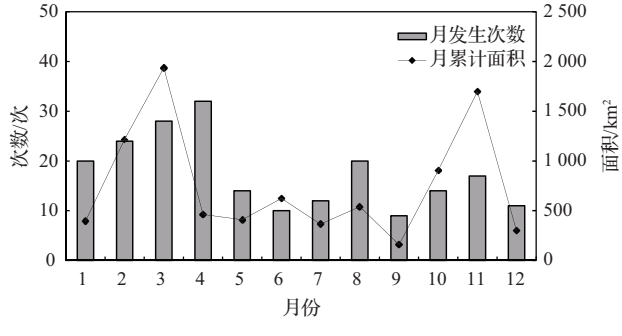


图 8　2001—2023 年广东省赤潮月发生次数和月累计面积

Fig.8　Monthly occurrence frequency and cumulative area of red tides in Guangdong Province from 2001 to 2023

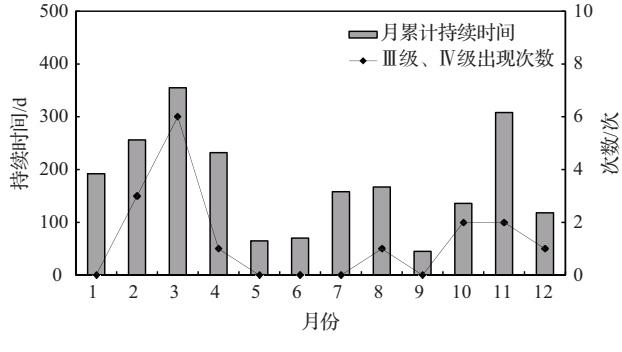


图 9　2001—2023 年广东省赤潮月累计持续时间和Ⅲ级、Ⅳ级出现次数

Fig.9　Monthly accumulated duration of red tides and occurrence counts of grade Ⅲ and grade Ⅳ in Guangdong Province from 2001 to 2023

面积未超过 1 000 km²；而累计持续时间最长的 3 月和 11 月，其赤潮发生次数并非最多，尤其是 11 月仅占总体的 8.1%。从赤潮灾害等级来看，3 月灾害最为严重，共发生 6 次Ⅲ级赤潮；1 月、5 月、6 月、7 月和 9 月则未出现灾害等级为Ⅲ级或Ⅳ级的赤潮。综合来看，2—4 月和 11 月是广东省赤潮灾害最为严重的时段。这 4 个月的赤潮次数占总体（除去 2003 年和 2004 年共 26 次赤潮灾害）的 47.9%，累计面积占总体的 59%，累计持续时间占总体的 54.8%，Ⅲ级和Ⅳ级赤潮灾害占总体的 75%。

2.4 广东沿海赤潮空间分布特征

广东沿海赤潮灾害的发生具有显著的空间分布不均衡特征。2001—2023 年（除去 2003 年和 2004 年共 26 次赤潮灾害），深圳、湛江、珠海和惠州沿海是赤潮灾害的高发区域，其发生次数和规模占比均较大（图 10），赤潮发生次数分别为 83 次、40 次、24 次和 19 次，4 个地区合计占广东省海域赤潮总次数的 78.67%。累计面积分别为 1 598.85 km²、3 585.1 km²、870.48 km² 和 547.91 km²，合计占全省赤潮累计面积的 73.28%。在累计持续时间和灾害等级方面，这 4 个沿海地区同样占据主导地位（图 11）。赤潮累计持续时间分别为 614 d（深圳）、638 d（湛江）、225 d（惠州）和 241 d（珠海），4 个地区合计占总体的 81.7%。灾害等级为Ⅲ级和Ⅳ级的赤潮出现次数分别为 2 次（深圳）、7 次（湛江）、2 次（惠州）和 3 次（珠海），总计占全省的 87.5%。相比之下，中山沿海区域的赤潮灾害发生

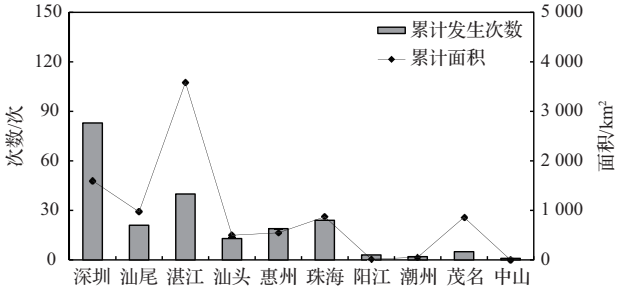


图 10 2001—2023 年广东省 10 个沿海城市赤潮累计发生次数和累计面积

Fig.10 Accumulative occurrence times and area of red tides in 10 coastal cities of Guangdong Province from 2001 to 2023

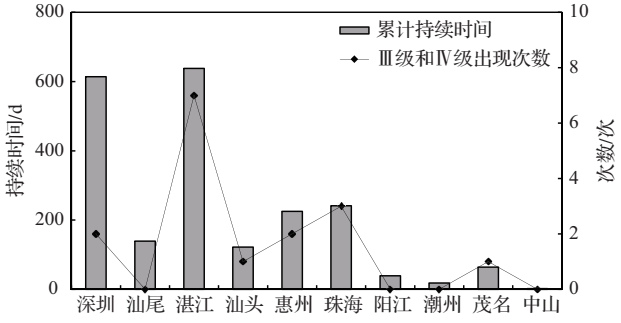


图 11 2001—2023 年广东省 10 个沿海城市赤潮累计持续时间及Ⅲ级和Ⅳ级出现次数

Fig.11 Cumulative duration of red tides and occurrence of grade Ⅲ and grade Ⅳ in 10 coastal cities of Guangdong Province from 2001 to 2023

比例最低。2001—2023 年，中山仅记录赤潮 1 次，累计面积为 0.1 km²，持续时间 2 d，未出现灾害等级为Ⅲ级或Ⅳ级的赤潮，其各项占比仅为 0.5%、0.001%、0.09%和 0%。

不同等级赤潮灾害的统计结果表明，湛江海域的赤潮灾害最为严重，共发生 7 次Ⅲ级赤潮灾害；其次为珠海海域，共发生 3 次Ⅲ级赤潮灾害，其中渔业直接经济损失达 316 万元，占 2001—2023 年广东沿海赤潮渔业直接经济总损失的 59.57%。相比之下，汕尾、阳江、潮州和中山海域的赤潮灾害等级均为Ⅰ级或Ⅱ级，但其中汕尾在历年数据中因赤潮导致渔业直接经济损失达 100 万元。深圳海域虽然在赤潮累计次数、发生面积和持续时间方面均居高位，但其Ⅲ级或Ⅳ级赤潮灾害的发生次数仅为 2 次，相对较低。这表明，赤潮的发生频率和面积并不一定与灾害等级和经济损失直接相关，而高等级赤潮灾害可能更多受生物种类、海域条件以及其他环境因素的影响。

广东省赤潮高发海域与近岸城市的污染排放存在一定关系。赤潮的形成、发展、维持和结束是多种因素综合作用的结果，包括海域的水文气象条件、物理化学环境以及生物特性，机制复杂。其中，营养盐和水文气象等外部因素是赤潮形成和发展的关键驱动因素。营养盐作为物质基础，水体富营养化或某种限制性营养元素的缺乏常是赤潮形成的直接诱因；而水温、盐度及降水等水文气象因

素，则决定了赤潮生物是否能够快速繁殖或稳定聚集[19-20]。

珠江口海域由于受到珠江水系径流的汇入，以及广东沿岸流、南海暖流和黑潮的共同影响，营养盐浓度较高。该海域的浮游植物多样性高，物种组成跨度大。在丰水期，以淡水种和广温广盐种为主；在枯水期，则以广温广盐种占优势[21]。然而，近年来珠江流域经济迅速发展，广东省城市人口急剧增加，大量工业和农业废水直接排入珠江口海域。这些废水中富含有机物、重金属、无机盐及其他污染物，导致海域污染日益严重。此外，大规模水产养殖活动也进一步增加了营养盐输入。尤其是含氮营养盐的显著增加，促使珠江口海域水体富营养化加剧，成为赤潮暴发的重要原因之一。

同时，珠江口海域还受到多种潜在促发赤潮的因素影响。例如，压舱水的排放可能引入外来有毒有害藻类，核电站的温排水可能改变海域水温条件，底层休眠孢囊的复苏也为赤潮的暴发提供了种源[22]。深圳湾海域因多条河流直接汇入而承受着较高的污染压力。深圳河、新洲河、大沙河及元朗河等大量排污直接进入湾内，使深圳湾的水质较差，富营养化程度较高。由于水体交换能力较弱，该海域为赤潮生物的生长和聚集提供了有利条件。根据 2018 年的监测数据，深圳湾海域在 3 月、5 月、8 月和 10 月的水质监测均为劣四类，显示出无机氮和磷酸盐浓度持续处于较高水平[23]。

3　结论

（1）根据赤潮灾害分级规则，可将 2001—2023 年广东沿海赤潮划分为Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级和Ⅳ级 4 个灾害等级。其中，Ⅰ级赤潮发生 140 次，占比 66.3%；Ⅱ级赤潮发生 55 次，占比 26.1%；Ⅲ级赤潮发生 16 次，占比 7.6%；统计年份内未记录Ⅳ级赤潮灾害。总体上，低等级赤潮（Ⅰ级和Ⅱ级）占据主导地位。尽管Ⅲ级赤潮灾害发生频次较低，但其造成的渔业直接经济损失占 2001—2023 年总损失的 59.57%。

（2）2001—2023 年广东沿海赤潮灾害的年均发生次数、累计面积和持续时间分别为 10.3 次、479 km^2 和 100.1 d，年际变化显著。尤其是Ⅲ级和Ⅳ级灾害的发生频次波动较大，2006—2010 年和 2016—2020 年赤潮灾害风险较高。

（3）广东沿海赤潮主要发生在春季，秋、冬季的发生概率较低。1 月开始赤潮进入高发期，4 月达到峰值，随后在 5 月逐渐下降。赤潮月累计面积表现出波动变化，在 3 月和 11 月达到峰值。综合分析表明，2—4 月及 11 月是广东沿海赤潮灾害最为严重的时段，这 4 个月的赤潮次数占总体的 47.9%，累计面积占 59%，持续时间占 54.8%，Ⅲ级和Ⅳ级灾害占总体的 75%。

（4）广东沿海赤潮灾害的空间分布具有显著的不均衡性。2001—2023 年，深圳、湛江、珠海和惠州沿海赤潮灾害的次数和规模占比较高，分别发生 83 次、40 次、24 次和 19 次，4 个地区合计占广东省海域赤潮总次数的 78.67%。珠江口附近的高污染排放是赤潮频发的重要原因。珠江流域经济的迅速发展导致大量工业和农业废水直接排入珠江口，海域富营养化趋势明显加剧，从而加剧了赤潮的频发。

（5）2001—2023 年，广东省沿海赤潮灾害由 4 门 25 属 44 种生物引发。其中，由甲藻引发的赤潮次数最多，达 123 次；由金藻引发的赤潮累计面积最大，达 4 010.8 km^2。甲藻、硅藻和金藻引发的赤潮在发生次数和累计面积上均呈波动态势，无显著的上升或下降趋势。相比之下，由原生动物引发的赤潮在发生次数和累计面积上均呈现明显下降趋势。

参考文献（References）：

[1] 俞志明，陈楠生．国内外赤潮的发展趋势与研究热点[J]．海洋与湖沼，2019，50(3)：474-486.
YU Zhiming，CHEN Nansheng．The development trends and research hotspots of red tides both domestically and internationally[J]．Oceanologia et Limnologia Sinica，2019，50(3)：474-486.

[2] WANG Pengbin．Harmful algal blooms[M]//Cui Weicheng，Fu Shixiao，Hu Zhiqiang．Encyclopedia of Ocean Engineering.

Singapore: Springer, 2022: 687-693.

[3] 詹慧玲，饶小珍. 赤潮的危害、成因和防治研究进展[J]. 生物学教学，2021，46(7)：66-68.
ZHAN Huiling, RAO Xiaozhen. Research progress on the harms, causes, and prevention and control of red tides[J]. Biology Teaching, 2021, 46(7): 66-68.

[4] 李丽. 广东沿海典型赤潮高发区海洋环境生态研究[D]. 广州：暨南大学，2009.
LI Li. Ecological study of marine environment in typical red tide-prone areas along Guangdong coast[D]. Guangzhou: Jinan University, 2009.

[5] 广东省海洋与渔业局. 广东省海洋环境质量公报[R]. 2001—2012.
Guangdong Provincial department of ocean and fisheries. Report on marine environmental quality of Guangdong Province[R]. 2001—2012.

[6] 广东省自然资源厅. 广东省海洋灾害公报[EB/OL]. [2025-01-05]. https://nr.gd.gov.cn/zwgknew/tzgg/gg/content/post_3145804.html.
Guangdong Provincial department of natural resources. Guangdong marine disaster bulletin[EB/OL]. [2025-01-05]. https://nr.gd.gov.cn/zwgknew/tzgg/gg/content/post_3145804.html.

[7] 何恩业，季轩梁，李晓，等. 2001—2020 年福建沿海赤潮灾害分级和时空分布特征研究[J]. 海洋通报，2021，40(5):578-590.
HE Enye, JI Xuanliang, LI Xiao, et al. Study on classification and spatiotemporal distribution characteristics of red tide disasters in Fujian coastal areas from 2001 to 2020[J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40(5): 578-590.

[8] 高文学，高庆华. 浅谈灾害评估[J]. 基建优化 1997，18(2)：15-17.
GAO Wenxue, GAO Qinghua. A brief discussion on disaster assessment[J]. Infrastructure Optimization, 1997, 18(2): 15-17.

[9] 国家海洋标准计量中心. 赤潮监测技术规程 :HY/ T 069—2005[S]. 北京：中国标准出版社，2005.
National Center of Ocean Standards and Metrology. Technical regulations for red tide monitoring: HY/ T 069—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.

[10] 黄长江，齐雨藻，杞桑，等. 大鹏湾夜光藻种群的季节变化和分布特征[J]. 海洋与湖沼，1996，27(5)：493-498.
HUANG Changjiang, QI Yuzao, QI Sang, et al. Seasonal variations and distribution characteristics of *Noctiluca scintillans* population in Dapeng Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1996, 27(5): 493-498.

[11] KONDO K, SEIKE Y, DATE Y. Relationships between phytoplankton occurrence and salinity or water temperature in brackish Lake Nakanoumi, 1979—1986[J]. Japanese Journal of Limnology, 1990, 51(3): 173-184.

[12] 路静，方和平，李开军，等. 湛江港湾海域水质状况调查及其评价[J]. 交通环保，2002，23(3)：16-18.
LU Jing, FANG Heping, LI Kaijun, et al. Investigation and assessment of water quality in Zhanjiang Bay sea area[J]. Environmental Protection in Transportation, 2002, 23(3): 16-18.

[13] 蒋城飞，付东洋，李强，等. 秋季湛江港和入海口温盐结构及生态特征[J]. 海洋学报，2016，38(11)：20-31.
JIANG Chengfei, FU Dongyang, LI Qiang, et al. Thermal and salinity structures and ecological characteristics in Zhanjiang port and its estuary in autumn[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(11): 20-31.

[14] LU Douding, QI Yuzao, GU Haifeng, et al. Causative species of harmful algal blooms in Chinese coastal waters[J]. Algological Studies, 2014, 145(1): 145-168.

[15] 李涛，刘胜，黄良民，等. 大亚湾一次赤潮生消期间浮游植物群落变化研究[J]. 热带海洋学报，2005，24(3):18-24.
LI Tao, LIU Sheng, HUANG Liangmin, et al. Study on phytoplankton community changes during the occurrence and dissipation of a red tide in Daya Bay[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2005, 24(3): 18-24.

[16] YU Jing, TANG Danling, YAO Lijun, et al. Long-term water temperature variations in Daya bay, china using satellite and in situ observations[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2010, 21(2): 393-399.

[17] 徐宁，齐雨藻，陈菊芳，等. 球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa* Scherffel) 赤潮成因分析[J]. 环境科学学报，2003，23(1):113-118.
XU Ning, QI Yuzao, CHEN Jufang, et al. Analysis of the causes of red tides in *Phaeocystis globosa* Scherffel[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(1): 113-118.

[18] 徐宁，陈菊芳，王朝晖，等. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析Ⅱ藻类水华与营养元素的关系研究[J]. 环境科学学报，2001，21(4):400-404.
XU Ning, CHEN Jufang, WANG Zhaohui, et al. Dynamical analysis of algal blooms in Daya Bay, Guangdong Ⅱ: Relationship between algal blooms and nutrient elements[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2001, 21(4): 400-404.

[19] QI Yuzao，CHEN Jufang，WANG Zhaohui，et al. Some observations on harmful algal bloom(HAB)events along the coast of Guangdong，southern China in 1998[J]. Hydrobiologia，2004，512：209-214.

[20] CHEN Yulin，ZHAO Linshuang，ZHOU Annan，et al. Evaluation of environmental impact of red tide around Pearl River estuary，Guangdong，China[J]. Marine Environmental Research，2023，185：105892.

[21] 徐姗楠，杨玉滔，粟丽，等. 珠江口南沙海域浮游植物群落结构特征[J]. 南方水产科学，2017，13(4):26-33.
XU Shannan，YANG Yutao，SU Li，et al. Structural characteristics of phytoplankton community in Nansha waters of the Pearl River Estuary[J]. South China Fisheries Science，2017，13(4)：26-33.

[22] 黄晓英. 珠江河口赤潮研究进展与防治对策[J]. 中国科技信息，2009(10):19-20.
HUANG Xiaoying. Research progress and prevention strategies of red tides in the Pearl River Estuary[J]. China Science and Technology Information，2009(10):19-20.

[23] 李丽，马方方，翟晓辉，等. 深圳湾海域赤潮生物演变及赤潮预警关键因子分析[J]. 生态科学，2022，41(3):82-89.
LI Li，MA Fangfang，ZHAI Xiaohui，et al. Evolution of red tide organisms and analysis of key factors for red tide warning in Shenzhen Bay waters[J]. Ecological Science，2022，41(3)：82-89.