丁光茂,张树峰. 2012 年三沙湾米氏凯伦藻赤潮的生态特征及成因分析[J]. 海洋学报,2018,40(6):104—112, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.06.010

Ding Guangmao, Zhang Shufeng. Ecological characteristics and the causes of *Karenia mikimotoi* bloom in the Sansha Bay in 2012[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(6):104—112, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2018.06.010

2012 年三沙湾米氏凯伦藻赤潮的生态特征及成因分析

丁光茂[1],张树峰[2*]

(1.福建省海洋环境与渔业资源监测中心,福建 福州 350003; 2. 厦门大学 环境与生态学院 近海海洋环境科学国家重点实验室,福建 厦门 361102)

摘要: 为了理清米氏凯伦藻赤潮形成与环境因素的关系,掌握其发生、发展规律,本文分析了 2012 年春末夏初三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮期间的气象、水文和营养盐情况,并结合室内模拟培养实验,探讨了米氏凯伦藻赤潮形成与各环境因素的相关性。结果显示米氏凯伦藻赤潮通常发生在温度为 20.5～25.0℃和盐度为 24.3～32.3 的海域,其细胞生长的最适温度和最适盐度分别为:22.0～25.0℃和 26.0～30.0;Pearson 相关性分析显示,米氏凯伦藻细胞密度与叶绿素 *a*、无机磷、化学需氧量呈极显著正相关,与透明度、氨氮呈显著负相关;另外,米氏凯伦藻对磷酸盐的需求较低,其赤潮的形成可能主要受水体中氨氮的影响。基于现场调查和模拟实验结果,综合分析认为稳定的水文和气象条件、发生前期降雨输入的无机氮,以及由于持续阴雨导致的较低光照条件是此次米氏凯伦藻赤潮形成和维持的重要条件。

关键词: 三沙湾;米氏凯伦藻;赤潮;环境因素;成因

中图分类号: Q948.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2018)06-0104-09

1 引言

米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)隶属甲藻纲(Dinophyceae)裸甲藻目(Gymnodiniales),凯伦藻属(*Karenia*),能够分泌溶血性毒素、鱼毒素、活性氧及部分细胞毒素,是我国典型的有毒、有害赤潮藻[1-2]。米氏凯伦藻赤潮在世界沿海广泛存在,常见于温带和热带浅海,澳大利亚、挪威、北爱尔兰、苏格兰、美国、日本、韩国、新加坡和中国沿海等均有报道[2-3]。米氏凯伦藻赤潮形成时,会导致一些贝类的清滤率下降、幼虫活力降低,甚至死亡,尤其对鲍鱼的"杀伤性"巨大[4-6];藻细胞分泌的毒素还会破坏鱼类鳃组织,最终导致鱼类无法正常呼吸而死亡[7];人类误食被毒素污染的水产品,还会引起人体中毒。米氏凯伦藻赤潮不仅直接影响海洋生态系统的稳定性,给水产养殖带来巨大损失,而且对人类健康造成严重威胁。因此,米氏凯伦藻赤潮的预报、预警一直是海洋科学研究的热点。

自 1986 年首次记录厦门西港发生米氏凯伦藻赤潮以来,我国沿海米氏凯伦藻赤潮发生频率逐渐增加、规模不断扩大,引起政府、研究人员和公众的高度关注[2,6,8]。如 2005 年春季,我国东海近岸水域发生上万平方千米的特大规模米氏凯伦藻赤潮,造成养殖区鱼类大量死亡[9];仅 2012 年 1 年,福建和浙江沿海

收稿日期: 2017-09-26;**修订日期:** 2017-11-28。

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1404800)。

作者简介: 丁光茂(1982—),男,福建省福州市人,主要从事海洋浮游植物研究。E-mail:haner1982@126.com

* **通信作者:** 张树峰,男,博士,主要从事海洋有害赤潮研究。E-mail:zhangshusss@163.com

就发生 14 起米氏凯伦藻赤潮,累积面积 643 km^2,导致贝类特别是鲍鱼大规模死亡,直接经济损失高达 20.15 亿元[8-9]。因此,理清米氏凯伦藻赤潮形成与环境因素之间的关系,对掌握米氏凯伦藻的生长特征、营养特性、环境适应性等生理生态特征,揭示米氏凯伦藻赤潮的形成机理和发生发展规律,以及提升该类赤潮的预报、预警能力都具有十分重要的意义。

赤潮的形成是一个非常复杂的过程,是气象、水文、化学、物理和生物等因素耦合作用的结果[10-11];除与赤潮生物自身的遗传特性密切相关外,特定的环境条件也是促使赤潮生物占据优势"生态位"并最终形成赤潮的重要原因。目前,研究人员通过实验室模拟研究对米氏凯伦藻的生理生态特性有了一定的认识[2-5],但对其赤潮形成的生态学和海洋学机制尚不清楚。由于米氏凯伦藻赤潮发生没有明显规律性,给米氏凯伦藻赤潮预报、预警、防灾减灾和应急处置带来极大的困难,许多研究人员将其称之为"异常的"赤潮[12]。本文通过对我国典型米氏凯伦藻赤潮事件——2012 年春末夏初三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮形成时环境因素的现场调查,分析了赤潮生物与各环境因素的变化特征及其相关性,探讨了米氏凯伦藻赤潮形成与环境因素之间的关系,以期为我国米氏凯伦藻赤潮生态学和海洋学机制研究及预报、预警提供数据积累和科学依据。

2　调查及取样方法

2.1　调查区域及取样方法

2012 年 5 月 18 日至 6 月 7 日,对三沙湾海域赤潮发生情况进行了连续监测(图 1),共布设 27 个调查站位,监测时间历时 21 天,监测要素包括气象、水文、营养盐及浮游植物等。气象和水文要素均现场直接测得;采集表层水样 50 mL,经 GF/F(Whatman,450℃灼烧 4 h)滤膜过滤后—20.0℃冷冻保存,用于无机磷、硝氮、亚硝氮、氨氮、硅酸盐等营养盐的测定;取 15 mL 表层水样,加入 1 mL Lugol's 固定,室温保存,用于浮游植物群落组成监测。样品的采集、保存和运输均严格遵守 GB 17378—2007《海洋监测规范》[13]。

2.2　样品测定

气温、风速、风向、气压、水温、盐度、溶解氧、叶绿素 a、无机磷、硝氮、亚硝氮、氨氮、硅酸盐、浮游植物种类和数量等参数的测定依据 GB 12763—2007《海洋调查规范》和 GB 17378—2007《海洋监测规范》[13-14]。无机磷(PO_4-P)采用磷钼蓝法,硝氮(NO_3-N)用镉铜还原法,亚硝氮(NO_2-N)用重氮偶氮比色法,氨氮(NH_4-N)采用次溴酸钠氧化法,硅酸盐(SiO_3-Si)采用硅钼蓝法[14-15]。

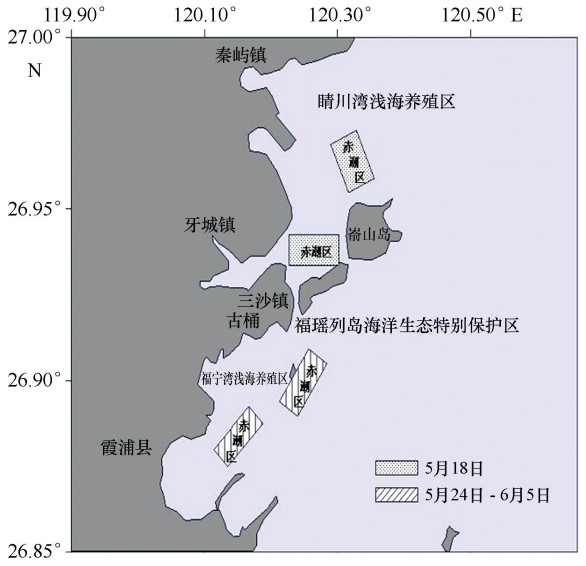


图 1　三沙湾赤潮监测海域

Fig.1　Red tide monitoring area in the Sansha Bay

2.3　室内培养实验

米氏凯伦藻藻株分离自 2012 年三沙湾米氏凯伦藻赤潮区,藻种保存于福建省海洋环境与渔业资源监测中心藻种室。采用 K 培养基培养藻种[16],日常培养温度为(22.0±1.0)℃,海水盐度为 28.0,光照强度为 3 000 lx,光暗比为 12 h∶12 h。培养用海水采自三沙湾非赤潮区,先后经 0.45 μm 及 0.22 μm 孔径的滤膜过滤,120.0℃高压蒸汽灭菌 20 min 后备用。

室内模拟培养实验设计见表 1。

表 1　室内培养实验设计

Tab.1　Laboratory experimental design

项　目	梯度设置
光照强度/lx	1 091、1 900、2 830、3 990、5 830
温度/℃	15.0、22.0、25.0
盐度	20.0、25.0、27.5、28.5、29.5、31.0、34.0

3　结果与讨论

3.1　赤潮发生情况

现场调查期间,三沙湾海域赤潮发生区域如图 1 所示。2012 年 5 月 18 日至 6 月 7 日,三沙湾海域发

生大面积东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)赤潮和米氏凯伦藻赤潮,共历时 21 天。

5 月 18 日,首先在嵛山岛至三沙古桶和嵛山岛至秦屿核电厂附近海域发现两处东海原甲藻赤潮(图 1),水体呈深褐色,以条状和块状分布,面积约 80 km^2,东海原甲藻细胞密度约为 9.30×10^5～1.03×10^7 cell/L。5 月 24 日,东海原甲藻细胞密度达到最高值,约为 1.51×10^7～2.17×10^7 cell/L,赤潮面积扩大到 109 km^2 左右,赤潮中心转移至霞浦和福鼎近岸海域(图 1 和表 2)。5 月 26 日,东海原甲藻细胞密度锐减至 3.78×10^6～5.00×10^6 cell/L,这可能与当天降雨有很大关系;此时开始伴生米氏凯伦藻,细胞密度为 6.10×10^5～1.15×10^6 cell/L,形成短暂双相赤潮,赤潮影响面积扩大至 130 km^2。5 月 28 日,米氏凯伦藻已占据绝对优势,形成大面积赤潮。5 月 30 日,米氏凯伦藻细胞密度达到 1 个小峰值,细胞密度约 8.58×10^6 cell/L,且伴生短暂夜光藻赤潮,之后 3 d 米氏凯伦藻赤潮面积明显缩小(约 60 km^2),细胞密度亦有所下降。6 月 5 日,米氏凯伦藻赤潮仍然存在,局部区域细胞密度高达 1.92×10^7 cell/L。6 月 7 日,监测海域米氏凯伦藻赤潮全部消散,水色基本恢复正常。

3.2 米氏凯伦藻赤潮与环境因素的关系

3.2.1 气象条件

气象因子如风、气温、气压、降水、光照等是赤潮形成、发展、维持和消亡的重要诱发条件[17]。2012 年春末夏初,三沙湾海域东海原甲藻和米氏凯伦藻赤潮发生期间,该海域风速较低,约 0.7～4.6 m/s(风力 0～3 级)(表 2)。米氏凯伦藻为裸甲藻,较大的风浪可能会造成其细胞受损或破裂,而较低的风速则有助于米氏凯伦藻形成赤潮。研究发现,球形棕囊藻(*Phaocystis globosa*)和三宅裸甲藻(*Gymnodinium mikimoloi*)等细胞较脆弱的藻类形成赤潮时的风速通常较低(0.2～4.3 m/s)[18];而像中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和无纹环沟藻(*Gyrodinium instriatum*)细胞有结实外壳保护,即使在风速较高的情况下也可以形成赤潮[19]。此次米氏凯伦藻赤潮和东海原甲藻赤潮期间的气压无明显差异,气压可能与该赤潮的发生没有直接关系。

每年 5 月份是季风转换的时候,季风转换直接影响了水体的垂直交换,将底层的营养盐带至表层,为赤潮生物生长提供了丰富的物质基础;风向还会影响赤潮生物的聚集。调查发现,2012 年 5 月份三沙湾海域较往年更盛行东北风,促使米氏凯伦藻不断向近岸聚集,加速了赤潮的形成;另外,许多零散分布的赤潮发生区域在东北风驱使下连成一大片,同时赤潮区域的细胞密度也会在细胞聚集过程中不断升高[9]。三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮形成前 1 天(即 5 月 25 日),监测海域有一个较强的降雨过程,且赤潮发生期间的天气以阴雨天气为主(表 2)。值得注意的是,2003 年 5 月末连江海域米氏凯伦藻赤潮发生期间的天气情况与 2012 年三沙湾发生赤潮时期相似,赤潮形成前均有较强的降雨过程,赤潮面积大、持续时间长,都给福建近海养殖业造成严重损失[20]。米氏凯伦藻赤潮的发生与降雨过程相关性明显,这可能是因为降雨会给海水带来丰富的氮磷等营养盐及微量元素,刺激了米氏凯伦藻细胞的生长[9, 20]。将从三沙湾海域分离到的米氏凯伦藻在不同光照强度条件下培养发现:低光强(1 091 lx)会抑制细胞的生长;较低光强(2 830 lx 和 3 990 lx)时细胞的生长速率和达到的细胞密度略高于高光强(5 830 lx)下的细胞;较低的光强(1 900 lx、2 830 lx 和 3 990 lx)更利于细胞高密度状态的维持(图 2)。上述实验结果与现场调查结果一致,三沙湾海域赤潮期间连续阴雨天气造成的低光照可能是此次赤潮持续时间较长的重要原因。

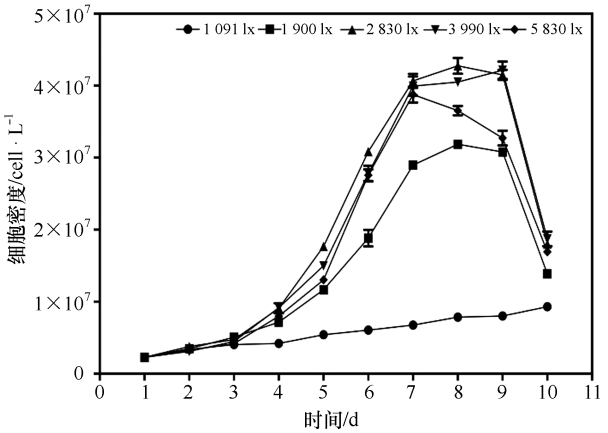


图 2 不同光照强度下米氏凯伦藻的生长曲线

Fig.2 Growth curve of *K. mikimotoi* under different light intensities

3.2.2 水文条件

水体稳定性、水体交换率、适宜的水温和盐度等是赤潮形成的必要条件[17]。良好的海况是米氏凯伦藻赤潮发生及维持的重要因素,风浪较大不利于米氏凯伦藻的生长。2012 年春末夏初,三沙湾米氏凯伦藻赤潮发生期间,该海域海况良好,仅有小波浪出现(表 2),利于米氏凯伦藻赤潮的发生和维持。温度作

为一切酶促反应的控制因子,水温的变化直接影响浮游植物的生长代谢,通常在达到最适温度前,浮游植物细胞的生长率会随温度的升高而增大[21]。现场调查结果显示,2012 年三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮期间的水温范围在 22.4～24.4℃,赤潮藻细胞密度达到峰值时的水温为 23.8℃(图 3a)。同一时期,福建福清、长乐海域米氏凯伦藻赤潮发生期间的水温范围在 22.4～25.0℃,细胞密度达到峰值时的水温为 23.4℃;平潭海域米氏凯伦藻赤潮期间的水温范围在 22.6～24.7℃,细胞密度峰值出现时水温为 23.1℃。我们将从三沙湾海域分离的米氏凯伦藻进行室内模拟培养发现,米氏凯伦藻在不同温度下生长速率差异明显,25.0℃时生长最快,22.0℃和 25.0℃时细胞都能达到较高的密度(图 3b),这一发现也与现场调查情况一致。龙华和杜琦[20]研究也表明米氏凯伦藻赤潮发生的适温范围为 20.5～24.0℃,最高的细胞密度出现在 23.0℃附近。由此可见,米氏凯伦藻赤潮可发生在水温为 20.5～25.0℃的海域,且赤潮发生时水温的变化范围非常窄小;米氏凯伦藻对温度的适应性不强,其生长最佳水温约为 22.0～25.0℃。稳定的气象条件促成稳定的水温,可能是 2012 年三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮持续时间较长的重要因素[22]。

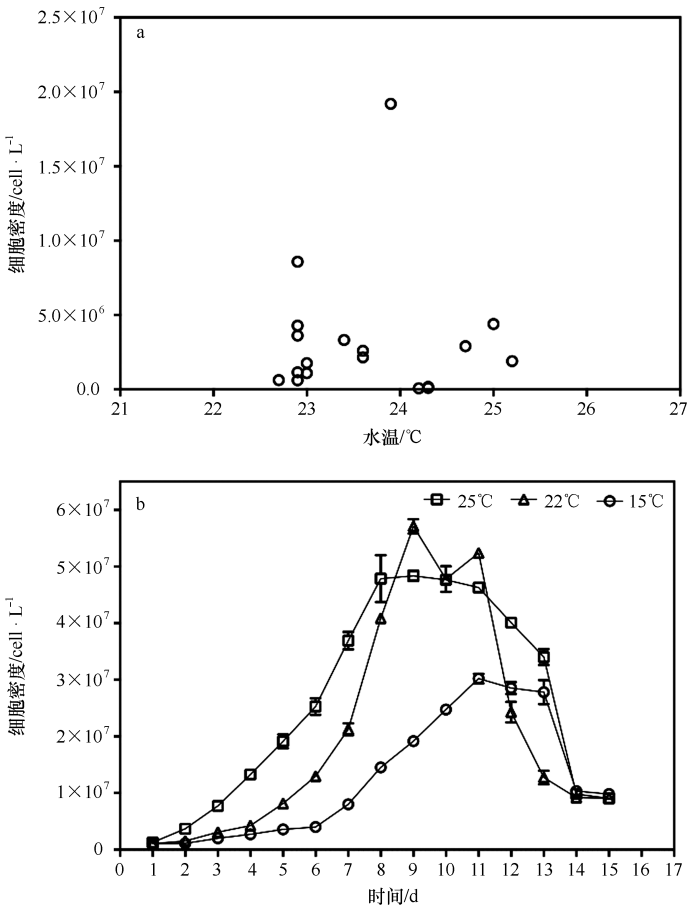


图 3　米氏凯伦藻的适应温度范围

Fig.3　The suitable temperature range of *K. mikimotoi*

a. 现场调查数据;b.实验室培养数据

a. Field survey data; b. laboratory data

海水的盐度直接影响着浮游植物细胞的渗透压。2012 年三沙湾海域现场调查结果显示,米氏凯伦藻赤潮在盐度 26.6～32.3 的水域均有发现,赤潮发生最严重区域的盐度为 28.7(图 4a)。同年,福州、福清、长乐海域米氏凯伦藻赤潮发生区域的盐度范围在 24.3～30.6 之间,赤潮严重区域的盐度约为 26.8;平潭海域米氏凯伦藻赤潮发生水域的盐度范围在 25.4～29.5 之间,赤潮严重区域的盐度约为 26.2。2003 年,连江海域米氏凯伦藻赤潮发生水域的盐度范围在 27.9～30.5,赤潮严重区域的盐度范围在 28.9～29.7[23]。室内培养实验发

现,米氏凯伦藻在盐度 27.5～29.5 时细胞可以长到较高的密度(图 4b),这也和现场结果一致。米氏凯伦藻赤潮可发生在盐度为 24.3～32.3 范围的海域,其细胞生长的最适盐度范围约为 26.0～30.0。相较于赤潮藻东海原甲藻(22.0～31.0)和中肋骨条藻(20.0～30.0)的适盐范围[24-25],米氏凯伦藻的适盐范围较窄,这可能与米氏凯伦藻细胞没有细胞壁,细胞膜直接裸露接触海水,对盐度变化敏感有较大关系[20]。

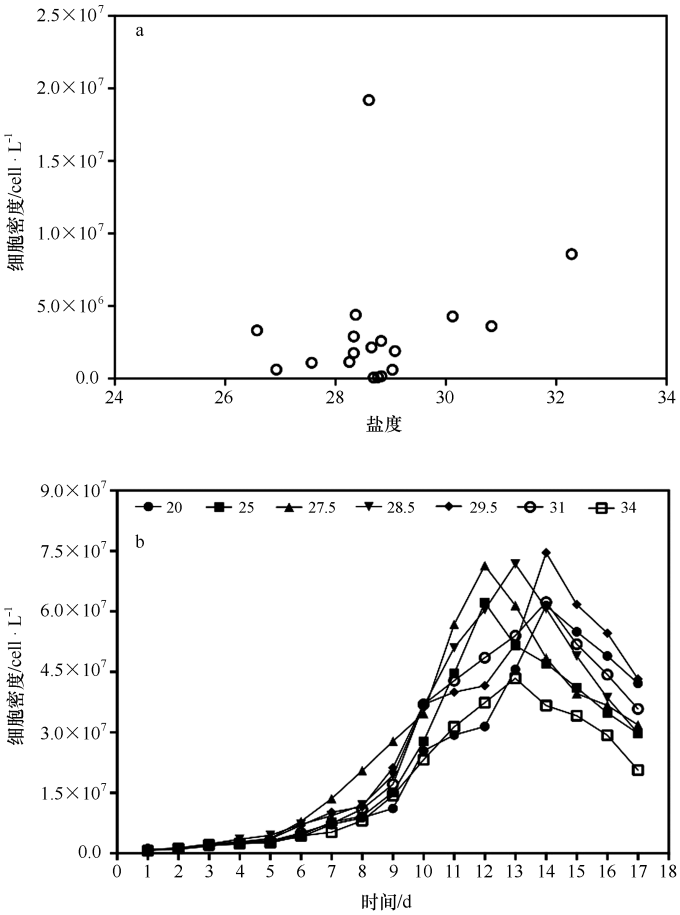


图 4 米氏凯伦藻的适应盐度范围

Fig.4 The suitable salinity range of *K. mikimotoi*

a. 现场调查数据;b.实验室培养数据

a. Field survey data; b. laboratory data

3.2.3 营养盐

营养盐的存在形态和浓度影响着赤潮生物的生长、繁殖和代谢,是赤潮形成和发展的物质基础[17]。2012 年春末夏初,三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮发生前曾发生东海原甲藻赤潮(表 2,图 5)。从营养盐浓度和形态分析来看,东海原甲藻赤潮期间海水中无机磷和无机氮浓度均处于较低的水平,分别为 0.003 3～0.014 1 mg/L 和 0.006～0.094 3 mg/L,其中无机氮以硝氮为主(图 5a)。5 月 26 日,三沙湾海域天气开始转为阴到阵雨,米氏凯伦藻赤潮发生,此时海水中氨氮含量占无机氮的比例高达 87%～94%,可能是由于降水带入大量的氨所导致,部分氨也可能来自于东海原甲藻赤潮消亡时细胞的分解释放(图 5b)。米氏凯伦藻赤潮发展时期,无机氮(尤其是氨氮)浓度基本上随着藻类密度的升高而降低,而无机磷浓度变化并不明显(图 5a)。米氏凯伦藻赤潮消亡时期,海水中氨氮含量不断升高,最高浓度约 0.224 mg/L,这可能是因为细胞裂解释放大量的氨所致(图 5b)。米氏凯伦藻赤潮发生期间,无机氮总体处于较低水平,0.001 9～0.120 8 mg/L;但是无机磷的浓度相对较高,最高值可达 0.103 mg/L,平均浓度约 0.047 mg/L(图 5a)。整个赤潮过程中,硅酸盐浓度在 0.579～0.872 mg/L 范围波动,无显著性变化。

综上所述,东海原甲藻赤潮发生期间,无机磷和无

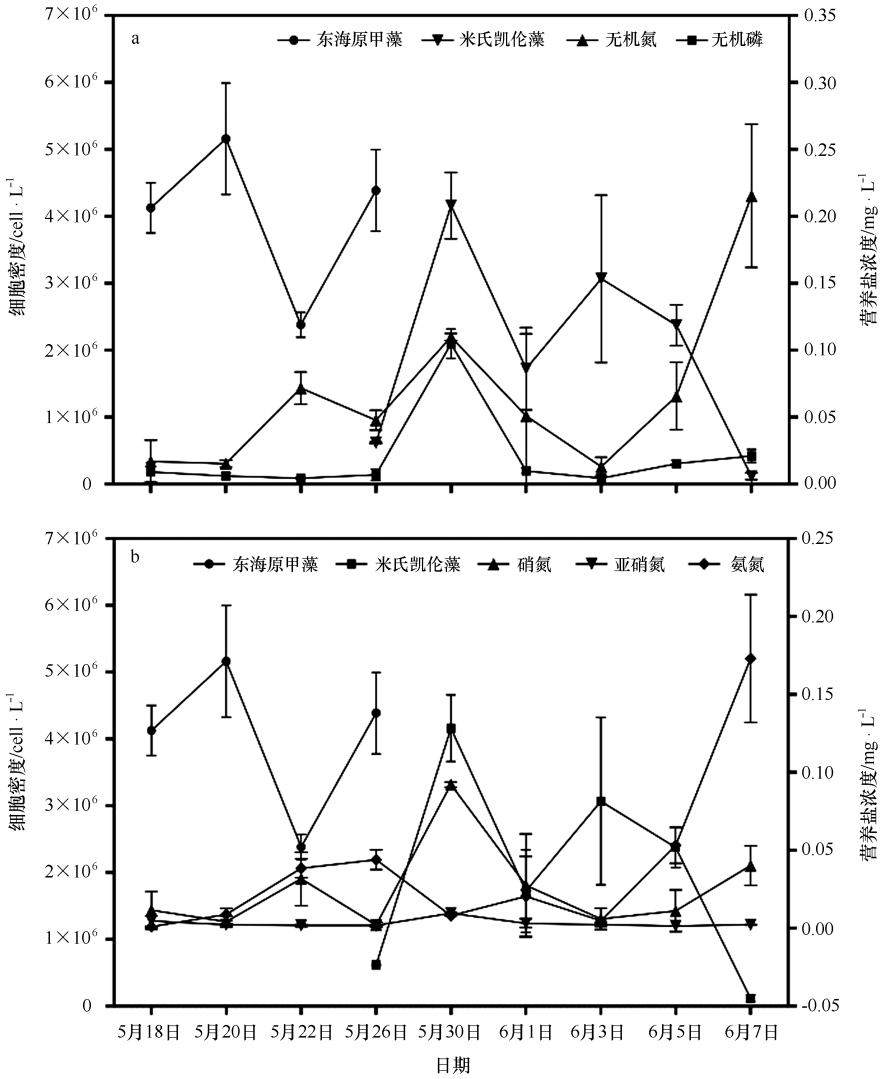


图 5　赤潮生物密度和营养盐浓度变化

Fig.5　Change of red tide biology density and nutrient concentration

机氮含量均较低,无机氮以硝氮为主,氮磷比值较高(平均 18.1);米氏凯伦藻赤潮发生前,水体中无机氮以氨氮为主,氨氮含量较高,发生期间,氮磷比值较低(平均 4.7),整个过程无机磷含量较高。2012 年三沙湾海域现场监测数据表明,米氏凯伦藻赤潮发生在东海原甲藻赤潮之后,并且后续发展成为优势种,推测其主要原因是前期的强降雨带入大量氨氮。在整个赤潮过程中,磷酸盐浓度相对较高,说明在米氏凯伦藻赤潮的发生过程中,磷酸盐不是营养盐的主控因子,而氨氮才是导致米氏凯伦藻赤潮发生的主要控制因子。

3.2.4　环境因子与米氏凯伦藻赤潮发生的相关性分析

运用统计软件 SPSS(Version 19)对 2012 年春末夏初三沙湾海域米氏凯伦藻赤潮发生期间米氏凯伦藻细胞密度、叶绿素 *a* 含量与气温、水温、透明度、溶解氧、无机磷、无机氮、硝氮、亚硝氮、氨氮等环境因素进行了相关性分析;此外,与该海域东海原甲藻赤潮与各环境因子的相关性进行了比较分析。结果显示(表 3),米氏凯伦藻细胞密度与叶绿素 *a*、无机磷浓度呈极显著正相关,与透明度、氨氮浓度呈显著负相关;叶绿素 *a* 也与无机磷浓度呈极显著正相关。结合现场调查结果,推测丰富的无机磷是米氏凯伦藻赤潮发生、发展和维持的必要条件,而氨氮可能是米氏凯伦藻赤潮形成的限制因子;而硝氮可能是东海原甲赤潮的限制因子(表 3,图 5b)。

表 2　2012 年 5 月至 6 月三沙湾海域主要指标监测结果

Tab.2　Results of major monitoring indicators in May and June, 2012

时间	天气	气温 /℃	风速 /m·s^{-1}	风向 /(°)	海况	气压 /hPa	优势藻种	细胞密度 /10^5 cell·L^{-1}		面积 /km^2	赤潮中心		区域
								最小	最大		纬度	经度	
5 月 18 日	晴	25.9	4.3	91	2	1 013.6	东海原甲藻	9.3	103.0	80	26.944 23°N	120.310 68°E	嵛山岛－古桶，嵛
5 月 20 日	晴	24.5	2.9	55	3	1 008.2	东海原甲藻	26.4	76.3	98	26.928 17°N	120.245 55°E	山岛－秦屿核电
5 月 22 日	晴	23.9	2.5	86	2	1 012.2	东海原甲藻	21.8	105.0	100	26.926 67°N	120.241 11°E	
5 月 24 日	晴	26.9	2.3	101	2	1 008.3	东海原甲藻	151.0	217.0	109	26.927 15°N	120.242 07°E	霞浦、福鼎海域
5 月 26 日	阵雨－阴	23.1	3.7	110	3	1 010.2	东海原甲藻	37.8	50.0	130	26.927 51°N	120.243 25°E	
							米氏凯伦藻	6.1	11.5				
5 月 28 日	阵雨－阴	22.9	4.0	135	2	1 013.7	米氏凯伦藻	5.9	28.5	115	26.928 333°N	120.245 00°E	
5 月 30 日	阴－中雨	25.6	0.7	177	2	1 007.3	米氏凯伦藻	36.1	85.8	106	26.930 83°N	120.243 33°E	
							夜光藻	0.013	4.4				
6 月 1 日	晴	24.8	4.6	82	2	1 012.1	米氏凯伦藻	10.9	33.2	65	26.930 64°N	120.238 25°E	
6 月 3 日	多云	23.2	4.4	78	2	1 008.6	米氏凯伦藻	19.0	43.9	64	26.928 33°N	120.244 17°E	
6 月 5 日	阴	25.4	1.7	103	2	1 005.2	米氏凯伦藻	21.6	192.0	61	26.927 00°N	120.248 25°E	
6 月 7 日	晴	26.2	0.7	268	2	1 003.5	米氏凯伦藻	0.767	1.7	0	26.929 44°N	120.239 17°E	

注：东海原甲藻赤潮基准密度：5.0×10^5 cell/L；米氏凯伦藻赤潮基准密度：1.0×10^6 cell/L。

表 3　细胞密度、叶绿素 *a* 与环境因子的 Pearson 相关性分析

Tab.3　Pearson's correlation analysis of cell density, chlorophyll *a* and environmental factors

	项目	细胞密度	叶绿素 *a*	气温	水温	透明度	盐度	溶解氧	无机磷	无机氮	硝氮	亚硝氮	氨氮
米氏凯伦藻	细胞密度	1.000	0.826**	0.158	0.012	−0.518*	0.260	0.080	0.781**	−0.369	0.427	0.072	−0.591*
	叶绿素 *a*	0.826**	1.000	0.045	−0.234	−0.593	0.374	0.397	0.613**	−0.283	0.297	0.020	−0.337
东海原甲藻	细胞密度	1.000	0.529	−0.521	0.215	−0.066	0.222	0.364	−0.107	−0.781**	−0.785**	−0.475	−0.220
	叶绿素 *a*	0.529	1.000	−0.303	0.736**	−0.105	−0.330	0.526	0.158	−0.176	−0.508	−0.240	0.361

注：** 表示极显著相关，$P < 0.01$；* 表示显著相关，$P<0.05$。

4　结论

2012 年春末夏初三沙湾米氏凯伦藻赤潮是我国有该类赤潮记录以来发生规模较大、持续时间最长和危害最严重的一次,理清米氏凯伦藻赤潮形成与环境因素的关系,有助于我们揭示米氏凯伦藻赤潮形成的生态学和海洋学机制,提高针对该类赤潮的预报、预警和防灾减灾能力。

米氏凯伦藻赤潮与环境因素密切相关,其中气象条件可能在米氏凯伦藻赤潮时期发挥重要的作用。良好的海况、赤潮前期的降雨和后续稳定的气温可能是米氏凯伦藻赤潮发生和维持的重要条件;连续的阴雨天气带来海水营养盐的补充,尤其是氨氮的补充,可能激发了米氏凯伦藻细胞的生长;另外,阴雨天气造成的低光条件可能更适合米氏凯伦藻细胞的生长。

米氏凯伦藻赤潮发生时,水体营养盐浓度总体处于较低的水平,而磷酸盐浓度在整个米氏凯伦藻赤潮发生过程中一直都维持在相对较高水平,无机氮则以氨氮为主;藻细胞密度与叶绿素 *a*、无机磷、化学需氧量呈极显著正相关,与透明度、氨氮呈显著负相关;以上分析表明米氏凯伦藻对磷酸盐的需求较低,其赤潮形成可能主要受水体中氨氮含量的调控。

参考文献:

[1] Yang Z B, Hodgkiss I J. Hong Kong's worst "red tide"—causative factors reflected in a phytoplankton study at Port Shelter station in 1998[J]. Harmful Algae, 2004, 3(2): 149—161.

[2] Lei Qiangyong, Lu Songhui. Molecular ecological responses of the dinoflagellate *Karenia mikimotoi* to phosphate stress[J]. Harmful Algae, 2011, 12: 39—45.

[3] Zhang Qingchun, Yu Rencheng, Song Jingjing, et al. Will harmful dinoflagellate *Karenia mikimotoi* grow phagotrophically? [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(4): 849—859.

[4] Matsuyama Y, Uchida T, Honjo T. Effects of harmful dinoflagellates, *Gymnodinium mikimotoi* and *Heterocapsa circularisquama*, red-tide on filtering rate of bivalve molluscs[J]. Fisheries Science, 1999, 65(2): 248—253.

[5] Davidson K, Miller P, Wilding T A, et al. A large and prolonged bloom of *Karenia mikimotoi* in Scottish waters in 2006[J]. Harmful Algae, 2009, 8(2): 349—361.

[6] 林佳宁, 颜天, 张清春, 等. 福建沿海米氏凯伦藻赤潮对皱纹盘鲍鳃组织抗氧化酶活性的影响研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(6): 17—22.
Lin Jianing, Yan Tian, Zhang Qingchun, et al. Effects of *Karenia mikimotoi* blooms on antioxidant enzymes in gastropod abalone, *Haliotis discus hannai*[J]. Marine Sciences, 2016, 40(6): 17—22.

[7] Brand L E, Campbell L, Bresnan E. *Karenia*: the biology and ecology of a toxic genus[J]. Harmful Algae, 2012, 14: 156—178.

[8] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报(1997—2016 年)[R]. 北京: 国家海洋局, 1997—2016.
The State Oceanic Administration. China marine disaster Bulletin (1997—2016)[R]. Beijing: The State Oceanic Administration, 1997—2016.

[9] 邓华, 管卫兵, 曹振轶, 等. 2012 年福建沿海大规模米氏凯伦藻赤潮暴发的水文气象原因[J]. 海洋学研究, 2012, 34(4): 28—38.
Deng Hua, Guan Weibing, Cao Zhenyi, et al. Analysis of hydrological and meteorological factors causing *Karenia mikimotoi* bloom in 2012 along Fujian coast[J]. Journal of Marine Science, 2016, 34(4): 28—38.

[10] 周名江, 朱明远. "我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治"研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 673—679.
Zhou Mingjiang, Zhu Mingyuan. Progress of the project "ecology and oceanography of harmful algal blooms in China"[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(7): 673—679.

[11] Gobler C J, Berry D L, Dyhrman S T, et al. Niche of harmful alga *Aureococcus anophagefferens* revealed through ecogenomics[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(11): 4352—4357.

[12] 李正锋. 米氏凯伦藻的磷营养生理生态研究[D]. 广州: 暨南大学, 2007.
Li Zhengfeng. The eco-physiological studies of phosphorus on the growth of *Karenia mikimotoi* Hansen[D]. Guangzhou: Ji'nan University, 2007.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 17378—2007, 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 17378—2007, The Specification for Marine Monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12763—2007, 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 12763 2007, Specifications for Oceanographic Survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[15] 王雪景, 石晓勇, 赵玉庭, 等. 2011 年春季东海赤潮高发区尿素分布特征及影响因素[J]. 海洋学报, 2015, 37(2): 65—74.
Wang Xuejing, Shi Xiaoyong, Zhao Yuting, et al. Distribution and concentration of urea in the East China Sea in spring of 2011[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(2): 65—74.

[16] Keller M D, Selvin R C, Claus W, et al. Media for the culture of oceanic ultraphytoplankton[J]. Journal of Phycology, 1987, 23(4): 633—638.

[17] 赵雪, 杨凡, 郭娜, 等. 2007 年 2 月汕头赤潮事件水文气象及海水理化因子影响分析[J]. 海洋预报, 2009, 26(1): 43—51.

Zhao Xue, Yang Fan, Guo Na, et al. Analysis of hydrological, meteorological and physical and chemical factors of red tide events in Shantou in February 2007[J]. Marine Forecast, 2009, 26(1): 43－51.

[18] 吴迪生, 黎广媚, 赵雪, 等. 广东沿海赤潮与海洋水文气象关系研究[J]. 海洋通报, 2005, 24(5): 16－22.
Wu Disheng, Li Guangmei, Zhao Xue, et al. The research on the relationship between red tide in the coastal Guangdong and marine hydrometeorolgy[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 24(5): 16－22.

[19] 吴迪生, 王文娟, 俞胜宾, 等. 2002 年广东沿海赤潮与海洋水文气象关系的研究[J]. 热带气象学报, 2011, 27(2): 271－277.
Wu Disheng, Wang Wenjuan, Yu Shengbin, et al. Study on relationship between red tide of year 2002 in Guangdong coastal water and the marine hydrometeorology[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(2): 271－277.

[20] 龙华, 杜琦. 福建沿海米氏凯伦藻赤潮的初步研究[J]. 福建水产, 2005(4): 22－26.
Long Hua, Du Qi. Primary research on *Karenia mikimotoi* bloom in Fujian coast[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2005(4): 22－26.

[21] Reynolds C S. The Ecology of Freshwater Phytoplankton[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

[22] 姚炜民, 潘晓东, 华丹丹. 浙江海域米氏凯伦藻赤潮成因的初步研究[J]. 水利渔业, 2007, 27(6): 57－58, 76.
Yao Weimin, Pan Xiaodong, Hua Dandan. Preliminary studies on the formation cause of red tide by *Karenia mikimotoi* in the Zhejiang sea area [J]. Reservoir Fisheries, 2007, 27(6): 57－58, 76.

[23] 刘志国, 王金辉, 蔡芃, 等. 米氏凯伦藻分布及其引发赤潮的发生规律研究[J]. 国土与自然资源研究, 2014(1): 38－41.
Liu Zhiguo, Wang Jinhui, Cai Peng, et al. Distribution of *Karenia mikimotoi* and rules of its causing red tide[J]. Territory & Natural Resources Study, 2014(1): 38－41.

[24] 霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 311－318.
Huo Wenyi, Yu Zhiming, Zou Jingzhong, et al. Outbreak of *Skeletonema costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 311－318.

[25] 王金辉, 黄秀清. 具齿原甲藻的生态特征及赤潮成因浅析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1065－1069.
Wang Jinhui, Huang Xiuqing. Ecological characteristics of *Prorocentrum dentatum* and the cause of harmful algal bloom formation in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1065－1069.

Ecological characteristics and the causes of *Karenia mikimotoi* bloom in the Sansha Bay in 2012

Ding Guangmao[1], Zhang Shufeng[2]

(1. *Monitoring Center of Marine Environment and Fishery Resources, Fujian Province, Fuzhou* 350003, *China*; 2. *College of the Environment and Ecology, State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen* 361102, *China*)

Abstract: In order to clarify the relationship between the formation of *Karenia mikimotoi* bloom and environmental factors, and grasp the rules of its occurrence and development, the meteorological, hydrological and nutrient conditions of the formation of *K. mikimotoi* bloom during the late spring and early summer of 2012 in the Sansha Bay were analyzed. Combined with laboratory experiment, the correlation between the formation of *K. mikimotoi* bloom and the environmental factors were discussed in this study. The results show that *K. mikimotoi* bloom usually occurs in the sea water with temperature and salinity ranging from 20.5－25.0℃ and 26.0－32.3, and the suitable temperature and salinity for *K. mikimotoi* are 22.0－25.0℃and 26.0－30.0, respectively. Pearson correlation analysis shows that the cell density of *K. mikimotoi* is positively correlated with chlorophyll *a*, inorganic phosphorus and chemical oxygen demand, and negatively correlated with transparency and ammonia nitrogen; *K. mikimotoi* cell has a low demand for phosphate, and the formation of bloom may be mainly affected by ammonia nitrogen in water. Based on field investigation and simulation results, comprehensive analysis shows that the stable hydrological and meteorological conditions, the inorganic nitrogen input during the early stage rainfall, as well as the lower light intensity due to continuous overcast and rainy conditions were the important conditions for the formation and maintenance of the red tide.

Key words: Sansha Bay; *Karenia mikimotoi*; red tide; environmental factor; causes of formation