

长江口及其邻近海域有害藻华的发生情况、 危害效应与演变趋势*

于仁成^{1, 2, 3} 张清春^{1, 2} 孔凡洲^{1, 2} 周正熙¹ 陈振帆^{1, 3} 赵越^{1, 3}
耿慧霞¹ 代丽^{1, 3} 颜天^{1, 2} 周名江¹

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 长江口及其邻近海域是我国近海有害藻华高发区之一。自 2000 年以来, 由东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)和亚历山大藻(*Alexandrium* spp.)等甲藻形成的大规模有害藻华连年暴发, 对海水养殖业、人类健康和生态安全构成了严重威胁。以往调查和研究工作表明, 长江口及其邻近海域藻华优势类群近年来已由硅藻逐渐转变为甲藻, 同时, 有害藻华原因种也表现出明显的年际变异特征和有毒有害藻种增多的态势, 亟待解析其演变机理、趋势和驱动因素。长江口及其邻近海域受长江径流影响, 富营养化问题突出, 是大规模有害藻华形成的重要原因。同时, 该海域也受到来自台湾东北部黑潮分支的影响, 但对其与有害藻华的关系所知甚少。在中国科学院战略性先导科技专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”支持下, 针对这一问题开展了较为系统的调查和研究工作, 本文对研究中得到的科学认识进行了初步总结。结果表明: 东海黑潮分支能够到达长江口及其邻近海域赤潮区, 影响该海域赤潮生物多样性状况; 黑潮分支对长江口及其邻近海域甲藻赤潮发生过程具有重要调控作用; 长江冲淡水和黑潮分支的共同作用决定了长江口及其邻近海域有害藻华的发生过程和演变趋势。在现有结果基础上进一步分析和讨论了未来长江口及其邻近海域有害藻华的研究方向, 以期为进一步解析有害藻华演变趋势、提升有害藻华的监测和预警能力提供依据。

关键词 长江口; 黑潮; 有害藻华; 演变

中图分类号 P735 **doi:** 10.11693/hyhz20170900247

海洋中的一部分藻类在短时间内快速增殖或聚集形成藻华后, 会带来一系列危害效应, 如鱼类大量死亡、海产品染毒, 甚至改变生态系统的结构和功能, 这一类藻华被称为有害藻华(harmful algal blooms, HABs)。有害藻华不仅包括由微藻形成的“赤潮”(red tide)或“褐潮”(brown tide), 也包括由大型藻类形成的“绿潮”(green tide)或“金潮”(golden tide)(Anderson *et al.*, 2012; Gobler *et al.*, 2012; Smetacek *et al.*, 2013)。在我国近海, 东海海域的有害藻华问题最为严重, 由硅

藻和甲藻形成的赤潮频繁暴发。近 20 年来, 东海海域有记录的赤潮次数已近千次, 占全国记录赤潮次数的一半以上(Wang *et al.*, 2009; 郭皓等, 2015)。其中, 长江口及其邻近海域是我国近海有害藻华多发区之一(周名江等, 2003)。自 2000 年以来, 长江口及其邻近海域大规模有害藻华连年发生, 影响海域面积可达上万平方公里(周名江等, 2006)。

大规模有害藻华的频繁暴发在一定程度上反映了海域生态系统的显著变化。在长江口及其邻近海域,

* 中国科学院战略性先导科技专项(A 类), XDA11020304 号; 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02 号; 国家自然科学基金委-山东省联合基金项目, U1606404 号; 科技部重点研发项目, 2017YFC1404304 号。于仁成, 博士生导师, 研究员, E-mail: rcyu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2017-09-29, 收修改稿日期: 2017-10-31

经由长江径流携带入海的大量营养盐导致海水中无机氮浓度上升, 营养盐结构发生显著变化, 海域富营养化状况持续加剧, 进而影响到浮游植物生物量和群落结构, 并引发有害藻华等生态灾害问题(Zhou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2014)。进入 21 世纪以来, 我国针对长江口及其邻近海域的有害藻华问题开展了大量研究工作, 先后组织实施了“我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”和“我国近海藻华灾害演变机制与生态安全”等国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(周名江等, 2006)。2013 年启动的中国科学院战略性先导科技专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”, 也将有害藻华作为近海研究部分中的一项重要内容。这些研究工作不仅有助于对有害藻华的监测、预警和防控, 也有助于理解近海生态系统在人类活动与全球变化影响下的演变机理和趋势。

1 长江口邻近海域的有害藻华及其危害效应

在长江口及其邻近海域, 很早就有关于赤潮现象的记录。1933 年, 费鸿年第一次记录了发生在浙江镇海—台州—石浦一带的夜光藻和骨条藻赤潮(中国海洋学会, 2015)。20 世纪 70 年代以后, 随着近海富营养化问题的出现和不断加剧, 在长江口及其邻近海域记录的赤潮次数也持续增加(图 1), 有记录的赤潮事件几乎每 10 年增加 3 倍(周名江等, 2001)。自 2000 年以来, 连年暴发的大规模甲藻赤潮成为长江

口及其邻近海域主要的有害藻华现象(周名江等, 2003; Zhou *et al.*, 2008)。甲藻赤潮主要发生在春季(图 2), 影响海域面积可达上万平方公里, 持续时间超过一个月。赤潮主要分布在受长江冲淡水影响的闽浙沿岸水中, 水深 30—50m 等深线附近海域, 其分布受到海水中营养盐浓度、浊度以及水体层化、锋面的影响。赤潮藻细胞通常位于水深 25m 以浅、温度和盐度跃层上方的冲淡水影响区, 赤潮发生期间表层水体中的藻细胞多呈斑块状分布, 密度可达 10^8 cell/L。

长江口及其邻近海域甲藻赤潮的原因种主要包括东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)和亚历山大藻(*Alexandrium* spp.)等(周名江等, 2003; Lu *et al.*, 2005; 邓华等, 2016), 其中东海原甲藻往往占有绝对优势。对于长江口及其邻近海域东海原甲藻赤潮的成因, 以往研究从生物学、生态学和海洋学角度给出了比较完善的解释(周名江等, 2006)。研究表明: 长江口及其邻近海域丰富的营养盐为甲藻赤潮的形成奠定了重要物质基础(Zhou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2014); 而东海原甲藻生长速率较高、具有垂直迁移能力, 能够利用有机态营养物质, 可以适应长江口邻近海域独特的富营养化特征而形成赤潮(李英等, 2005; Ou *et al.*, 2008; Hu *et al.*, 2012); 甲藻赤潮的分布和动态过程受到许多环境因素调控, 水温上升、水体层化、上升流加强、磷酸盐胁迫及浮游动物摄食压力降低等是促成甲藻赤潮形成的重要因素, 而硝酸盐浓度降低和水温过高则是导致甲藻赤潮衰退的重要原因(周名江等, 2006; Zhou *et al.*,

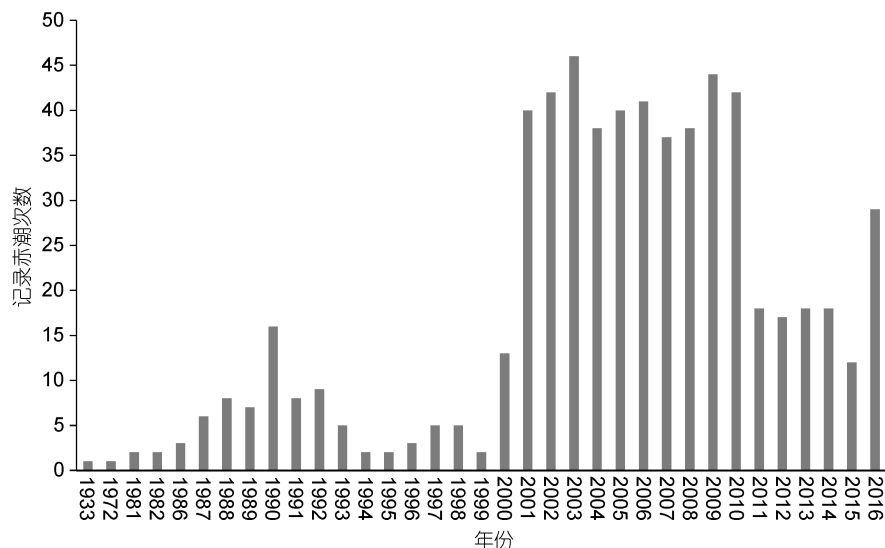


图 1 长江口邻近海域有记录的赤潮发生次数

Fig.1 Recorded red-tide events in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary

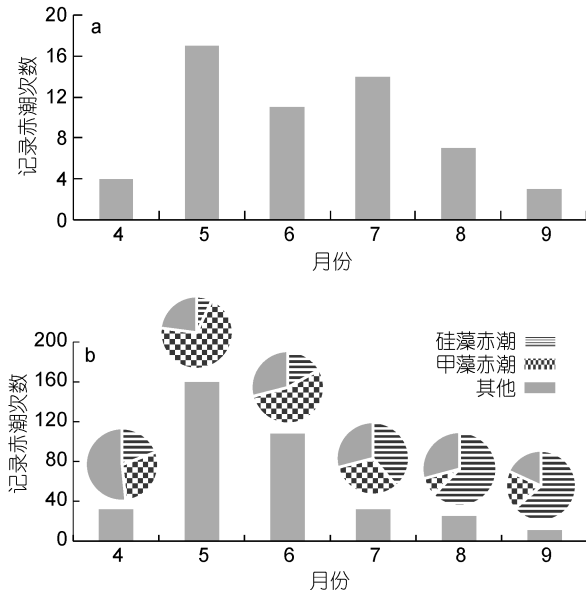


图2 长江口邻近海域不同月份赤潮发生情况对比(a: 1990—1999年; b: 2000—2009年)

Fig.2 Monthly variation of recorded red-tide events in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary (a: 1990—1999; b: 2000—2009)

2008)。但是,对于几种重要甲藻赤潮原因种的来源,目前的认识还不是非常清晰。长江口邻近海域存在较高丰度的亚历山大藻孢囊(顾海峰等,2003;王朝晖等,2003),应当是亚历山大藻赤潮形成的种床;但对于东海原甲藻和米氏凯伦藻,其来源一直未能完全阐明,它们是否像亚历山大藻那样存在孢囊阶段目前仍不确定,其营养细胞可能常年存在于长江口邻近海域,但也有可能自邻近海域输入(Dai *et al.*, 2013)。

长江口及其邻近海域的大规模甲藻赤潮具有显著的危害效应。在几种主要的赤潮原因种中,东海原甲藻没有明显的急性毒性,但室内模拟实验和野外调查都发现,在赤潮密度下,东海原甲藻对黄、东海浮游动物关键种中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)的繁殖具有显著抑制效应,能够降低中华哲水蚤产卵率,影响其种群丰度,有可能危及渔业资源(Lin *et al.*, 2014, 2015)。此外,甲藻赤潮区与长江口南侧低氧区的分布状况基本吻合(Chen *et al.*, 2017),赤潮后期藻细胞的沉降分解有可能加剧底层水体的缺氧问题。因此,由东海原甲藻形成的大规模甲藻赤潮是一类生态系统破坏性有害藻华(ecosystem disruptive algal bloom)。与东海原甲藻不同,米氏凯伦藻是一种典型的鱼毒性有害藻种,对于鱼类等养殖动物具有较高的急性毒性效应,能够对养殖业造成严重破坏(Li *et al.*, 2017)。

2005年春季,长江口及其邻近海域暴发了总面积超过10000km²的甲藻赤潮,米氏凯伦藻是赤潮早期阶段的主要优势种,赤潮造成了大量网箱养殖鱼类死亡,直接经济损失超过3000万元;2012年,福建近岸海域暴发米氏凯伦藻赤潮,导致大量养殖鲍死亡,经济损失超过20亿元。由于部分亚历山大藻藻种能够产生麻痹性贝类毒素,因此,亚历山大藻赤潮会危及海产品食品安全。在长江口及其邻近海域,2002年以来多次观察到亚历山大藻赤潮现象,藻细胞多呈斑块状分布,单个斑块面积最大可达400km²,细胞密度可达10⁵cell/L。赤潮期间,采集的浮游植物样品中能够检测到麻痹性贝类毒素(周名江等,2003;高岩等,2016)。应用分子生物学检测手段分析发现,太平洋亚历山大藻(*A. pacificum*,以往多基于形态学特征鉴定为链状亚历山大藻或塔玛亚历山大藻)是该海域麻痹性贝类毒素的主要产毒藻种(李冬融等,2014;高岩等,2016)。除麻痹性贝类毒素之外,在长江口及其邻近海域采集的浮游植物样品中还可以检测到大田软海绵酸(Okadaic acid)、鳍藻毒素1(Dinophysis toxin-1)、扇贝毒素2(Pectenotoxin-2)和虾夷扇贝毒素(Yessotoxin)等多类毒素,在贝类中也检出了相似的毒素成分(陈建华,2013)。对该海域贝类的长期监测结果表明,贝类样品中的毒素含量在春季大规模甲藻赤潮期间最高。2010年5月,闽浙近岸海域发生了一起由脂溶性藻毒素大田软海绵酸导致的腹泻性中毒事件,造成福建宁德和浙江宁波两地200多人中毒(Li *et al.*, 2012)。由于大规模甲藻赤潮造成的严重危害效应,其长期演变趋势和主要驱动因素受到高度关注。

2 长江口及其邻近海域有害藻华的演变趋势与驱动因素

在针对长江口邻近海域的研究中发现,有害藻华优势类群近期已由硅藻逐渐转变为甲藻。2000年之前,该海域的有害藻华多以硅藻赤潮和异养性的夜光藻(*Noctiluca scientillans*)形成的赤潮为主;2000年以后,由东海原甲藻、米氏凯伦藻和亚历山大藻等甲藻形成的赤潮开始占据优势,成为主要的有害藻华现象(Zhou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2014)。据统计,20世纪80—90年代骨条藻(*Skeletonema* spp.)在赤潮优势种中所占比例超过30%,到2000年其比例下降至24%;而原甲藻在20世纪80—90年代所占比例仅有10%左右,到2000年前后增加到36%。

研究发现, 长江口及其邻近海域有害藻华优势类群的演变与该海域春季硅、甲藻藻华的季节性演替密切相关(Zhou *et al.*, 2008; Zhou *et al.*, 2017c)。每年早春, 骨条藻、海链藻(*Thalassiosira* spp.)和拟菱形藻(*Pseudonitzschia* spp.)等硅藻丰度迅速升高, 甚至形成赤潮(李静等, 2015; Yang *et al.*, 2014); 随着海水温度上升和营养盐浓度逐渐下降, 浮游植物群落中的东海原甲藻、米氏凯伦藻和链状亚历山大藻开始逐渐替代硅藻成为优势种, 藻细胞密度不断上升并形成赤潮(周名江等, 2006)。这一现象出现的主要原因是硅藻适温范围较宽、对营养盐的吸收速率高、生长速度快, 因此能够在早春温度适宜时快速生长形成赤潮; 而甲藻适温范围较窄、对营养盐的吸收速率低、生长速度慢, 但具有对有机态营养物质的利用能力和垂直迁移能力, 适合于在无机态营养物质胁迫条件下生长, 因此, 常在硅藻赤潮后期形成赤潮。可见, 硅、甲藻赤潮的季节性演替过程在一定程度上反映了两类微藻之间的竞争策略及其对海域环境适应性的差别(Zhou *et al.*, 2017a, b)。因此, 海域环境的长期变化, 特别是营养盐浓度和结构的变动, 能够改变硅藻赤潮和甲藻赤潮的相对优势度, 从而导致甲藻赤潮的大规模暴发以及有害藻华优势类群由硅藻向甲藻的演变。2000 年以后长江口及其邻近海域大规模甲藻赤潮的出现, 是海域营养环境长期变化的结果。研究表明, 长江口海域硝酸盐浓度从 20 世纪 60 年代 $20.5\mu\text{mol/L}$ 升高至 80 年代的 $59.1\mu\text{mol/L}$, 到 21 世纪初上升到 $80\mu\text{mol/L}$, 浓度增加约 4 倍(Zhou *et al.*, 2008)。同期溶解无机磷浓度虽有上升, 但幅度不大, 而溶解硅酸盐浓度则有所下降。过量氮输入造成了该海域高氮、低磷的环境特征, 应当是驱动长江口邻近海赤潮优势类群由硅藻向甲藻演变的主要原因(Zhou *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2010, 2014)。

长江口及其邻近海域有害藻华除优势类群演变之外, 还表现出明显的年际变异特征和有毒有害藻种不断增多的态势。该海域甲藻赤潮通常以东海原甲藻为第一优势种, 但 2005 年和 2012 年, 甲藻赤潮优势种均以鱼毒性的米氏凯伦藻为第一优势种, 对养殖业造成了巨大破坏, 带来了严重的经济损失(邓华等, 2016)。多年来, 长江口邻近海域亚历山大藻赤潮发生的时间和规模也有明显的年际变化(未发表资料)。这些甲藻赤潮的年际变异会直接影响其危害效应, 应当给予高度关注, 但目前对于造成甲藻赤潮优势种年际变异的原因仍认识很少。此外, 在长江口及

其邻近海域还出现了有毒有害赤潮原因种不断增多的现象。以往赤潮多以单一藻种为优势种, 近年来由两种或两种以上的赤潮原因种共同形成的赤潮也开始出现, 且发生频次表现出上升趋势。另外, 在该海域记录了许多新的赤潮现象, 多环旋沟藻(*Cochlodinium polykrikoides*)、剧毒卡罗尔藻(*Karlodinium veneticum*)等以往在该海域没有记录的藻种近期都有形成赤潮的报道(Dai *et al.*, 2014; 王红霞等, 2014)。

以往对长江口及其邻近海域的研究发现, 在大规模甲藻赤潮形成之前, 甲藻首先在水体次表层“孕育”生长(周名江等, 2006), 这对于后期大规模甲藻赤潮的形成至关重要。早春(3—4 月)甲藻在次表层的生长过程与这一时段的底层暖水入侵有明显关系, 赤潮区底层暖水团水温在 $15\text{—}17^{\circ}\text{C}$, 而且富含磷酸盐, 是促使藻类生长和孢囊萌发的重要因素(Shi *et al.*, 2014)。因此, 赤潮区底层暖水出现的时间、强度有可能对赤潮形成过程具有调控作用, 是甲藻赤潮年际变异机制研究中一项不容忽视的因素。由此可见, 对长江口邻近海域赤潮的研究不能仅关注长江冲淡水的影响, 还应特别关注底层暖水来源及其对赤潮过程的影响。但是, 以往研究中对此所知甚少。2013 年以来, 在中国科学院战略性先导科技专项支持下, 针对这一方向进行了较为系统的研究。

3 专项研究取得的科学认识与未来研究展望

对长江口及其邻近海域的研究表明, 该海域受到长江径流、闽浙沿岸流和台湾暖流的显著影响, 环境条件复杂(周名江等, 2003)。台湾暖流是闽浙沿岸流东侧 50—100m 等深线附近的一支由西南流向东北的暖流(Guan, 1984), 在 28°N 附近分为内外两支(Su *et al.*, 1987), 其中近岸分支能够向北到达长江口邻近海域。研究表明, 台湾暖流常年存在, 但其来源却因季节变化而有所不同, 在这一方面以往还存在一些不同看法。近年来的研究多认为冬季台湾暖流以黑潮水为主(Lian *et al.*, 2016); 而夏季表层海水主要来自台湾海峡, 底层水中一部分则来自台湾东北部黑潮次表层水的入侵(Su *et al.*, 1987; Yang *et al.*, 2012), 形成黑潮入侵东海底部分支(以下简称黑潮分支)。黑潮次表层水在到达长江口邻近海域的同时, 能够将海水中丰富的营养盐输送到这一海域, 有利于缓解春、夏季该海域浮游植物的磷胁迫, 促进浮游植物生长(Zhang *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2013;

Shi *et al.*, 2014; Tseng *et al.*, 2014)。此外,黑潮水入侵也是驱动长江口邻近海域上升流形成的重要因素之一(赵保仁, 1993)。因此,黑潮分支有可能影响到赤潮区的温、盐结构、水体层化、上升流以及营养盐组成,从而影响赤潮生物多样性状况以及赤潮的分布、动态甚至危害效应(图 3)。针对这一问题,我们通过参与海洋先导专项在 2014—2015 年组织实施的四次黄、东海海域大面调查以及长江口邻近海域的逐月调查(图 4),综合应用浮游植物形态学鉴定、色素分析、环境样品扩增子高通量测序、流式细胞分析和毒素分析等手段,针对黑潮分支及其对长江口邻近海域甲藻赤潮分布和动态过程的影响开展研究,取得了一些新的认识和看法。

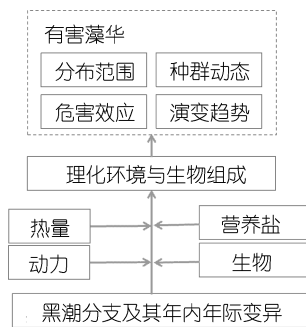


图 3 黑潮分支影响长江口及其邻近海域有害藻华的机制假设

Fig.3 Proposed mechanisms explaining impacts of the Kuroshio branch on harmful algal blooms in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary

研究证明,黑潮次表层水能够到达长江口及其邻近海域赤潮区,有可能影响海域赤潮生物多样性状况。专项的数值模拟结果较为精细地刻画出了春、夏季黑潮次表层水自台湾东北部沿海向长江口邻近海域赤潮区的入侵路径,并得到现场观测资料的支持和确认(Yang *et al.*, 2012; 杨德周等, 2017)。特别值得关注的是,以原绿球藻作为黑潮水指示生物,它在 2014 年春季海水中的分布状况能够很好地反映出黑潮次表层水从台湾东北部到达长江口邻近海域赤潮区的输入路径(图 5),与基于水文观测和化学要素分析得到的认识基本一致(Wang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017; 杨德周等, 2017)。这表明黑潮次表层水能够将藻类等生物携带到赤潮区,有可能影响到长江口邻近海域赤潮生物多样性状况。利用扩增子高通量测序法分析了该海区微型和微微型真核浮游生物多样性状况,发现赤潮区浮游生物中存在硅藻、甲藻、隐藻、青绿藻、定鞭藻、绿藻、海金藻类的微藻(图 6),其

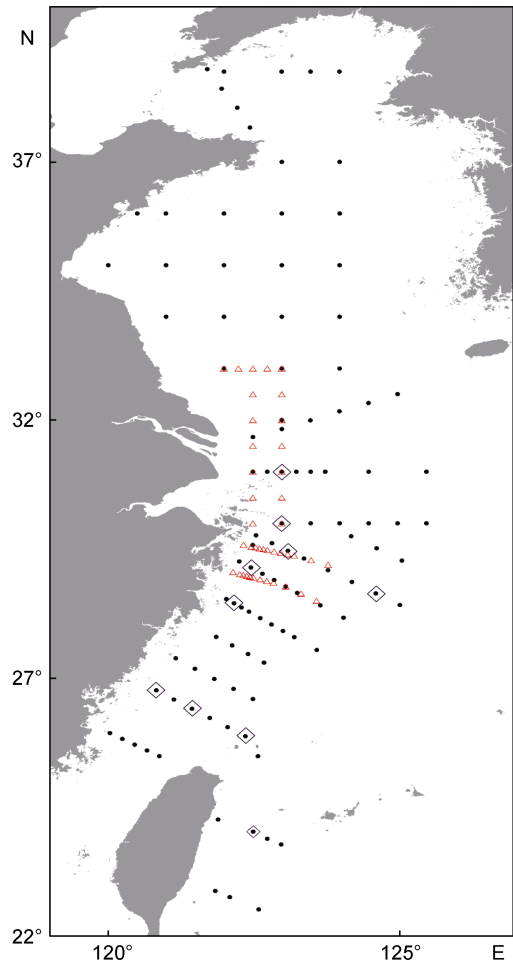


图 4 科学院先导专项调查站位设置图

Fig.4 Illustration of the samplings sites of the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Science
注:图中黑色圆点为黄、东海季节性大面调查站位,三角形为逐月调查站位,菱形为浮游植物样品扩增子高通量测序样品采集站位

中硅藻、甲藻、隐藻和青绿藻类占有较为突出的优势。对比长江口邻近海域赤潮区与台湾东北部黑潮主干区微型和微微型真核浮游生物组成情况可以看出,沿黑潮分支各站位采集的样品具有相似性存在相当数量的共性藻种,这也证明黑潮分支能够将藻种携带进入到赤潮区,其具体影响还有待于进一步分析。

研究发现,黑潮分支对长江口及其邻近海域甲藻赤潮发生过程具有重要调控作用。黑潮分支具有明显的季节变化,这一分支冬末春初开始出现,到夏季逐渐加强,秋季逐渐削弱并消失,而且存在显著的年际变异(Yang *et al.*, 2012; 杨德周等, 2017)。春季甲藻赤潮发生前,自底层入侵的黑潮次表层水水温较高,极有可能触发甲藻赤潮的形成。对多年的调查结果进行分析发现,长江口及其邻近海域亚历山大藻赤潮

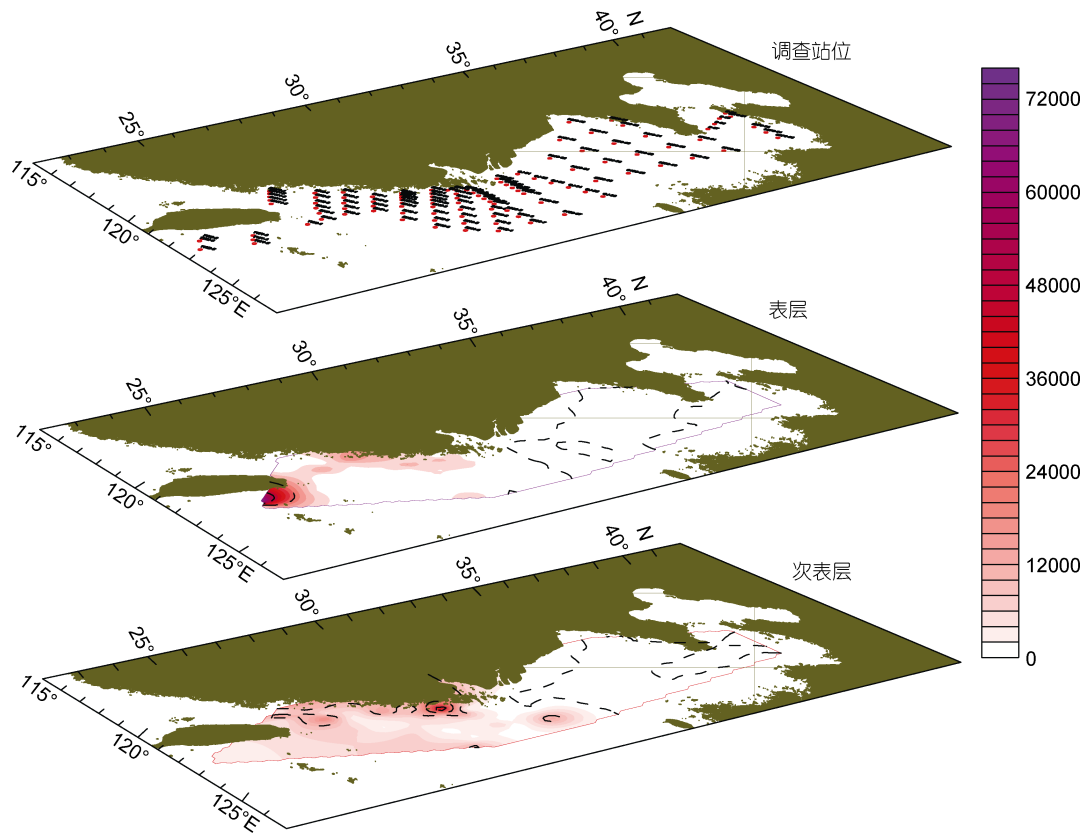


图 5 2014 年春季(5—6 月)黄、东海海域原绿球藻的分布状况

Fig.5 Distribution pattern of *Prochlorococcus* in the Yellow Sea and the East China Sea in spring of 2014
注: 上: 采样站位; 中: 表层原绿球藻分布; 下: 次表层原绿球藻分布

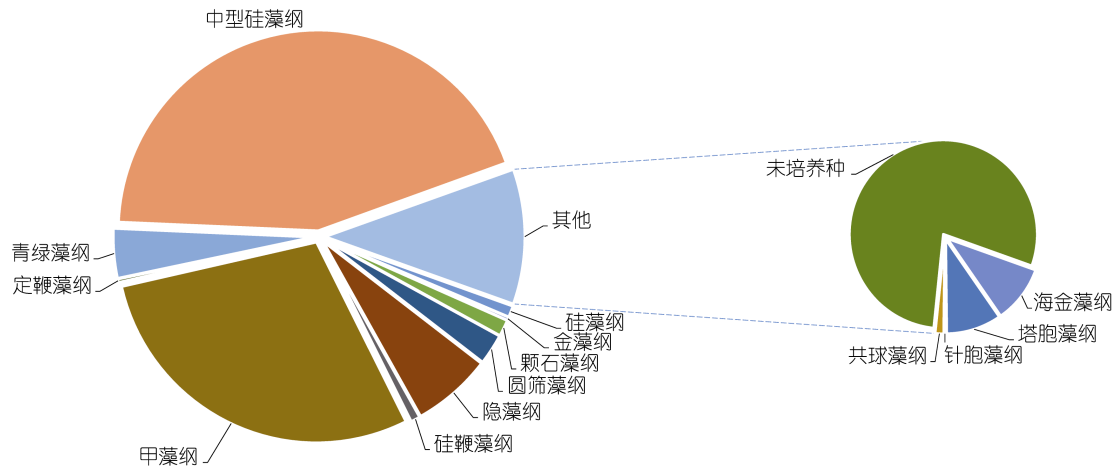


图 6 基于扩增子高通量测序方法得到的 2014 年春季长江口邻近海域赤潮区微型和微微型真核浮游生物中微藻多样性状况
Fig.6 Diversity of pico- and nano-sized phytoplankton groups in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary in spring 2014 based on high-throughput sequencing of targeted amplicons

出现的时间与底层高温水出现的时间具有较好的相关性。2015 年, 在长江口邻近海域开展的逐月调查表明, 黑潮水入侵从 2 月份前后开始逐渐出现, 而该年度甲藻赤潮出现时间也较早, 较大规模的东海原甲

藻赤潮在 4 月份就已出现, 明显早于往年(5—6 月份)。因此, 通过对黑潮次表层水入侵状况的监测, 有可能做到对甲藻赤潮的预警, 但这还需要更多的现场观测结果支持。

研究表明,长江冲淡水和黑潮分支的共同作用,决定了长江口及其邻近海域有害藻华的发生过程和演变趋势。长江口及其邻近海域既受到长江冲淡水影响,也受到黑潮分支的显著影响,但两者在赤潮形成和演变过程中的作用明显不同。通过对长江口邻近海域春季硅、甲藻赤潮与环境因子的统计分析发现,硅藻赤潮与长江冲淡水的关系密切,主要出现在长江冲淡水影响区,其消亡过程与海水中高氮磷比导致的磷胁迫有关;而甲藻赤潮受黑潮分支的调控作用更加明显,黑潮分支携带的高浓度磷酸盐能够通过上升流被输送到表层,有利于促进和维持甲藻的生长,与黑潮的影响更加密切(Kong *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2017b)。以往研究中曾发现甲藻赤潮区和上升流分布区基本吻合,甲藻赤潮的斑块状分布特征很可能是上升流影响的结果。从有害藻华演变角度来看,长江径流将巨量硝酸盐输入长江口赤潮区,因此带来的富营养化进程使得硅、甲藻赤潮优势度发生变化,是藻华优势类群从硅藻向甲藻演变的主导因素。而黑潮分支的年际变异应当是影响甲藻赤潮年际变异的重要因素,能够在很大程度上决定长江口及其邻近海域甲藻赤潮分布、动态乃至危害效应的年际变化。

可见,长江口及其邻近海域受到长江冲淡水和黑潮分支的双重影响,有害藻华的形成和演变不仅是陆源污染的“指示器”,也是反映黑潮分支年际变异的“效应器”。目前对于陆源污染与有害藻华的关系已经有了比较清晰的想法,但对于黑潮分支与有害藻华的关系,仍有许多问题尚需进一步解答。黑潮分支在多大程度上影响长江口及其邻近海域赤潮生物多样性状况?能否依据其年际变异对甲藻赤潮的发生情况做出预警预测?能否通过数值模型量化分析长江径流和黑潮分支对甲藻赤潮动态的影响?这些问题目前仍在研究之中,需要通过对专项采集样品和观测资料的深入分析来做出回答。已有的研究结果已经表明,黑潮分支对长江口及其邻近海域有害藻华的影响可能并不亚于长江径流,因此,要更好地理解有害藻华成因和演变趋势,对甲藻赤潮的形成过程做出科学的预测预警,必须关注黑潮分支的年际变异情况,这需要在未来的研究工作中逐渐深入。

4 结论

东海长江口邻近海域是我国近海有害藻华高发区之一,受长江径流和台湾暖流影响,环境条件复杂。本文通过对以往研究结果的综述和对中国科学院先导专

项相关研究结果的初步分析,可以得到如下结论:

(1) 长江口及其邻近海域的大规模甲藻赤潮对于海洋生态系统、海水养殖业发展和海产品食品安全具有显著危害,是一类典型的有害藻华现象。

(2) 长江口及其邻近海域有害藻华一方面表现出优势类群由硅藻向甲藻演变的趋势,另一方面还表现出明显的年际变异特征和有毒有害藻种不断增多的态势。

(3) 长江径流输入的过量营养盐是大规模甲藻赤潮暴发和藻华优势类群从硅藻向甲藻演变的主导因素。而黑潮次表层水的年际变异是影响甲藻赤潮年际变异的重要因素,能够在很大程度上决定长江口及其邻近海域甲藻赤潮分布、动态乃至危害效应的年际变化。

参 考 文 献

- 陈建华, 2013. 我国典型贝类增殖养殖海域藻毒素组成、分布状况及贝类染毒特征分析. 青岛: 中国科学院海洋研究所硕士学位论文
- 邓 华, 管卫兵, 曹振轶等, 2016. 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探讨. 海洋学研究, 34(4): 28—38
- 高 岩, 于仁成, 柳 阳等, 2016. 基于产毒基因 *sxtA* 的 qPCR 方法在长江口邻近海域有毒藻类检测中的应用初探. 海洋环境科学, 35(2): 279—287
- 顾海峰, 蓝东兆, 方 琦等, 2003. 我国东南沿海亚历山大藻休眠孢囊的分布和萌发研究. 应用生态学报, 14(7): 1147—1150
- 郭 皓, 丁德文, 林凤翔等, 2015. 近 20a 我国近海赤潮特点与发生规律. 海洋科学进展, 33(4): 547—558
- 李冬融, 陆斗定, 戴鑫烽等, 2014. 东海藻华高发区塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)的形态、分子及分布特征. 海洋与湖沼, 45(6): 1241—1250
- 李 静, 陈长平, 梁君荣等, 2015. 2010 年春季长江口南部硅藻种类组成和密度的时空变化. 应用海洋学学报, 34(3): 372—387
- 李 英, 吕颂辉, 徐 宁等, 2005. 东海原甲藻对不同磷源的利用特征. 生态科学, 24(4): 314—317
- 王朝晖, 齐雨藻, 2003. 甲藻孢囊在长江口海域表层沉积物中的分布. 应用生态学报, 14(7): 1039—1043
- 王红霞, 陆斗定, 何飘霞等, 2014. 东海多环旋沟藻的形态特征和系统进化分析. 海洋与湖沼, 45(4): 757—763
- 杨德周, 尹宝树, 侯一筠等, 2017. 黑潮入侵东海陆架途径及其影响研究进展. 海洋与湖沼, 48(6): 1196—1207
- 赵保仁, 1993. 长江口外的上升流现象. 海洋学报, 15(2): 108—114
- 中国海洋学会, 2015. 中国海洋学学科史. 北京: 中国科学技术出版社, 297
- 周名江, 颜 天, 邹景忠, 2003. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探. 应用生态学报, 14(7): 1031—1038
- 周名江, 朱明远, 2006. “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. 地球科学进展, 21(7): 673—679
- 周名江, 朱明远, 张 经, 2001. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. 生命科学, 13(2): 54—59
- Anderson D M, Cembella A D, Hallegraeff G M, 2012. Progress in understanding harmful algal blooms: paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual Review of Marine Science*, 4: 143—176
- Chen J Y, Pan D L, Liu M L *et al*, 2017. Relationships between long-term trend of satellite-derived chlorophyll-*a* and hypoxia off the Changjiang estuary. *Estuaries and Coasts*, 40(4): 1055—1065
- Dai X F, Lu D D, Guan W B *et al*, 2013. The correlation between *Prorocentrum donghaiense* blooms and the Taiwan Warm Current in the East China Sea—evidence for the “pelagic seed bank” hypothesis. *PLoS One*, 8(5): e64188
- Dai X F, Lu D D, Guan W B *et al*, 2014. Newly recorded *Karlodinium veneficum* dinoflagellate blooms in stratified water of the East China Sea. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 101: 237—243
- Gobler C J, Sunda W G, 2012. Ecosystem disruptive algal blooms of the brown tide species, *Aureococcus anophagefferens* and *Aureoumbra lagunensis*. *Harmful Algae*, 14: 36—45
- Guan B, 1984. Major features of the shallow water hydrography in the East China Sea and Huanghai Sea. *Elsevier Oceanography Series*, 39: 1—13
- Hu Z X, Mulholland M R, Duan S S *et al*, 2012. Effects of nitrogen supply and its composition on the growth of *Prorocentrum donghaiense*. *Harmful Algae*, 13: 72—82
- Kong F Z, Xu Z J, Yu R C *et al*, 2016. Distribution patterns of phytoplankton in the Changjiang River estuary and adjacent waters in spring 2009. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 34(5): 902—914
- Li A F, Ma J G, Cao J J *et al*, 2012. Toxins in mussels (*Mytilus galloprovincialis*) associated with diarrhetic shellfish poisoning episodes in China. *Toxicon*, 60(3): 420—425
- Li H M, Tang H J, Shi X Y *et al*, 2014. Increased nutrient loads from the Changjiang (Yangtze) River have led to increased Harmful Algal Blooms. *Harmful Algae*, 39: 92—101
- Li X D, Yan T, Lin J N *et al*, 2017. Detrimental impacts of the dinoflagellate *Karenia mikimotoi* in Fujian coastal waters on typical marine organisms. *Harmful Algae*, 61: 1—12
- Li Y, Li D J, Tang J L *et al*, 2010. Long-term changes in the Changjiang estuary plankton community related to anthropogenic eutrophication. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 13(1): 66—72
- Lian E G, Yang S Y, Wu H *et al*, 2016. Kuroshio subsurface water feeds the wintertime Taiwan Warm Current on the inner East China Sea shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7): 4790—4803
- Lin J N, Song J J, Yan T *et al*, 2015. Large-scale dinoflagellate bloom species *Prorocentrum donghaiense* and *Karenia mikimotoi* reduce the survival and reproduction of copepod *Calanus sinicus*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 95(6): 1071—1079
- Lin J N, Yan T, Zhang Q C *et al*, 2014. *In situ* detrimental impacts of *Prorocentrum donghaiense* blooms on zooplankton in the East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 88(1—2): 302—310
- Liu H C, Shih C Y, Gong G C *et al*, 2013. Discrimination between the influences of river discharge and coastal upwelling on summer microphytoplankton phosphorus stress in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 60: 104—112
- Liu W, Song J M, Yuan H M *et al*, 2017. Dissolved barium as a tracer of Kuroshio incursion in the Kuroshio region east of Taiwan Island and the adjacent East China Sea. *Science China Earth Sciences*, 60(7): 1356—1367, <http://dx.doi.org/10.1007/s11430-016-9039-7>
- Lu D D, Goebel J, Qi Y Z *et al*, 2005. Morphological and genetic study of *Prorocentrum donghaiense* Lu from the East China Sea, and comparison with some related *Prorocentrum* species. *Harmful Algae*, 4(3): 493—505
- Ou L J, Wang D, Huang B Q *et al*, 2008. Comparative study of phosphorus strategies of three typical harmful algae in Chinese coastal waters. *Journal of Plankton Research*, 30(9): 1007—1017
- Shi X Y, Li H M, Wang H, 2014. Nutrient structure of the Taiwan Warm Current and estimation of vertical nutrient fluxes in upwelling areas in the East China Sea in summer. *Journal of Ocean University of China*, 13(4): 613—620
- Smetacek V, Zingone A, 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478): 84—88
- Su J, Pan Y, 1987. On the shelf circulation north of Taiwan. *Acta Oceanologica Sinica*, 6(S1): 1—20
- Tseng Y F, Lin J, Dai M *et al*, 2014. Joint effect of freshwater plume and coastal upwelling on phytoplankton growth off the Changjiang River. *Biogeosciences*, 11(2): 409—423
- Wang J H, Wu J Y, 2009. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea. *Science of the Total Environment*, 407(13): 4012—4021
- Wang W T, Yu Z M, Song X X *et al*, 2016. The effect of Kuroshio Current on nitrate dynamics in the southern East China Sea revealed by nitrate isotopic composition. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(9): 7073—7087
- Yang S, Han X R, Zhang C S *et al*, 2014. Seasonal changes in phytoplankton biomass and dominant species in the Changjiang River estuary and adjacent seas: general trends based on field survey data 1959–2009. *Journal of Ocean University of China*, 13(6): 926—934
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z G *et al*, 2012. Numerical study on the pattern and origins of Kuroshio branches in the bottom water of southern East China Sea in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C2): C02014,
- Yang D Z, Yin B S, Sun J C *et al*, 2013. Numerical study on the origins and the forcing mechanism of the phosphate in upwelling areas off the coast of Zhejiang province, China in summer. *Journal of Marine Systems*, 123—124: 1—18
- Zhang J, Liu S M, Ren J L *et al*, 2007. Nutrient gradients from the eutrophic Changjiang (Yangtze River) Estuary to the oligotrophic Kuroshio waters and re-evaluation of budgets

- for the East China Sea Shelf. *Progress in Oceanography*, 74(4): 449—478
- Zhou M J, Shen Z L, Yu R C, 2008. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Continental Shelf Research*, 28(12): 1483—1489
- Zhou Y P, Zhang Y M, Li F F *et al*, 2017a. Nutrients structure changes impact the competition and succession between diatom and dinoflagellate in the East China Sea. *Science of the Total Environment*, 574: 499—508
- Zhou Z X, Yu R C, Zhou M J, 2017b. Resolving the complex relationship between harmful algal blooms and environmental factors in the coastal waters adjacent to the Changjiang River estuary. *Harmful Algae*, 62: 60—72
- Zhou Z X, Yu R C, Zhou M J, 2017c. Seasonal succession of microalgal blooms from diatoms to dinoflagellates in the East China Sea: A numerical simulation study. *Ecological Modelling*, 360: 150—162

STATUS, IMPACTS AND LONG-TERM CHANGES OF HARMFUL ALGAL BLOOMS IN THE SEA AREA ADJACENT TO THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY

YU Ren-Cheng^{1,2,3}, ZHANG Qing-Chun^{1,2}, KONG Fan-Zhou^{1,2}, ZHOU Zheng-Xi¹, CHEN Zhen-Fan^{1,3}, ZHAO Yue^{1,3}, GENG Hui-Xia¹, DAI Li^{1,3}, YAN Tian^{1,2}, ZHOU Ming-Jiang¹

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The sea area adjacent to the Changjiang (Yangtze) River estuary is the most notable region for harmful algal blooms in the coastal waters of China. Large-scale blooms of dinoflagellates *Prorocentrum donghaiense*, *Karenia mikimotoi*, and *Alexandrium* spp. started to occur from the year 2000, and posed significant threats to mariculture industry, the health of human beings, and marine ecosystems. Previous studies indicated significant changes of dominant blooming microalgae from diatoms to dinoflagellates, obvious inter-annual variations of blooming dinoflagellate species, and apparent increase of noxious or toxic species. However, the mechanisms, trend, and driving forces for the changes of harmful algal blooms yet need to be elucidated. The sea area adjacent to the Changjiang River estuary has a serious problem of eutrophication driven by excessive nutrients from the Changjiang River, which is the basis for the formation of large-scale dinoflagellate blooms. In addition, it is also affected by a branch of the Kuroshio from the sea area northeast to Taiwan Island, but the impacts on harmful algal blooms are poorly understood. Focusing on this issue, systematic investigations were organized in the East China Sea supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, and the primary findings of this project were summarized. It has been confirmed that the branch of Kuroshio could reach the “red-tide zone” in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary, and affect the diversity of bloom-forming microalgae. The variation of the Kuroshio branch has a strong regulative effect on the dynamics of dinoflagellate blooms. The combined effects of the Changjiang River diluted water and the Kuroshio branch together determined the occurrence and long-term changes of harmful algal blooms in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary. Based on these findings, the research perspectives were put forward to further resolve issues related to the prediction, early-warning, and long-term changes of harmful algal blooms in this region.

Key words Changjiang River estuary; Kuroshio; harmful algal bloom; succession