

长江口邻近海域春季藻华与水体层化的关系*

周正熙^{1,2} 于仁成^{1,3} 吕颂辉⁴ 管卫兵⁵ 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. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 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; 4. 暨南大学 水生生物研究所 广州 510632; 5. 国家海洋局第二海洋研究所 杭州 310012)

摘要 长江口邻近海域是我国近海有害藻华高发区之一。受长江冲淡水及台湾暖流影响, 海域环境条件复杂, 有可能影响到藻华的分布状况、动态过程和危害效应。本文利用“藻华 973 项目”2011 年的现场实测数据, 从水体层化状况与藻华的关系入手, 绘制出各要素的平面及剖面分布图, 对比分析了春季硅藻藻华和甲藻藻华期间的温、盐跃层及其变化情况, 探讨了硅、甲藻藻华的分布状况及其与温、盐跃层之间的关系。研究发现, 2011 年春季藻华期间该海域存在明显的温跃层和盐跃层。硅藻藻华期的温、盐跃层主要受到长江冲淡水影响; 而在甲藻藻华期, 受外海水入侵影响导致的温、盐跃层现象更加显著。藻华期间, 浮游植物生物量高值区均出现在跃层上方的长江冲淡水影响区, 其中硅藻藻华分布区与高强度跃层区基本一致, 而甲藻藻华则主要分布在层化强度相对较弱的近岸海区, 其分布可能受到上升流的影响。综合上述分析结果可以看出, 长江口邻近海域春季的硅藻藻华主要受到长江冲淡水影响, 而甲藻藻华的分布则在一定程度上受到外海水入侵及上升流影响。这一认识为进一步分析该海域春季硅、甲藻藻华演替过程及藻华优势种的长期演变趋势提供了新的思路 and 依据。

关键词 长江口邻近海域; 有害藻华; 叶绿素 *a*; 温跃层; 盐跃层

中图分类号 P735

doi: 10.11693/hyhz20160500115

长江口邻近海域是我国近海有害藻华(通常称为赤潮)(harmful algal bloom, HAB)高发区之一(Wang *et al.*, 2009; 郭皓等, 2015)。自 2000 年以来, 该海域几乎每年春季都会出现由东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)或米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)等甲藻形成的大规模有害藻华, 面积可达上万平方米。对该海域春季藻华过程的研究发现, 春季藻华期间存在从硅藻藻华向甲藻藻华的演替现象, 而近期大规模甲藻藻华的频繁发生使得该海域藻华优势种呈现出由以硅藻为主向以甲藻为主的演变趋势(Tang *et al.*, 2006; 周名江等, 2007)。长江口邻近海域受到长江冲淡水、浙江沿岸流及台湾暖流等影响, 环境条件复杂多变(Shi *et al.*, 2011; Qi *et al.*, 2014), 会直接或间接影

响藻华的分布状况、动态过程及其危害效应。该海区春季常常出现水体层化现象, 且温跃层与盐跃层这两个独立的层化体系在该海域均明显存在(周名江等, 2003)。

许多研究表明, 藻华的形成、维持和消退等动态变化过程不仅受到营养盐、光照和温度等环境因子调控(Zhou *et al.*, 2008; Ras *et al.*, 2013), 也与水体层化和上升流等海洋动力过程有关(周名江等, 2003)。其中, 水体层化对藻华的影响倍受关注, “全球有害藻华生态学与海洋学研究(Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB)”计划专门针对层化水体中的有害藻华问题设立了一项核心研究计划(GEOHAB, 2008)。目前, 有关水体层化对浮游植物

* 中国科学院先导专项(A类), XDA11020304号; 国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2010CB428700号; 国家自然科学基金, U1406403号。周正熙, 博士研究生, E-mail: zhouzhengxi11@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 于仁成, 博士生导师, 研究员, E-mail: rcyu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2016-05-30, 收修改稿日期: 2016-08-14

分布的影响研究主要依靠对现场调查资料的分析。Tyler 等(1978)研究发现, 美国 Chesapeake 湾微小原甲藻(*P. minimum*)藻华主要出现在层化水体中。Yin(2003)对香港附近海域的调查结果也表明, 该海域硅、甲藻藻华演替过程可能与水体层化现象的季节性变化有关。有研究表明, 东海原甲藻藻华的出现总是伴随着水体层化现象的加剧(戴鑫烽等, 2014)。李云等(2007)对 2005 年长江口邻近海域浮游植物的现场调查发现, 浮游植物分布状况的日变化与温、盐跃层密切相关。水体层化影响藻华分布的原因主要在于层化引起的浮游植物积累效应(GEOHAB, 2008)。此外, 海水的层化也能够通过对海水中营养盐分布的影响, 间接影响浮游植物的分布状况(朱建荣, 2004)。

本文采用 2011 年 3 月 29 日至 5 月 27 日期间多个航次的调查数据, 对春季藻华温、盐跃层状况进行了简要分析, 并结合硅、甲藻藻华的分布状况, 探讨了该海域不同类型藻华与水体层化的关系, 以期为深入研究长江口邻近海域有害藻华发生机理和演变趋势提供依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

本研究的目标海域为长江口邻近海域藻华高发

区(120.6°E—123.5°E、28.3°N—34.0°N), 采样站位分布如图 1a 所示。该海区受到长江冲淡水 and 台湾暖流的强烈影响, 也受到苏北沿岸水、闽浙沿岸水、黄海冷水团以及黑潮的间接影响(苏纪兰, 2001; 周名江等, 2003)。长江巨量径流形成的冲淡水舌存在明显的季节变化, 在枯水季冲淡水主体沿浙江沿岸向南扩展, 而在丰水季冲淡水主体转向东北。冲淡水转向现象出现在春季, 其偏转程度、伸展距离和扩展范围在夏季逐渐增强(毛汉礼等, 1963; Chen *et al*, 2008)。台湾暖流是一支来自台湾附近海域北上的暖流(管秉贤等, 1964; Guan *et al*, 1982), 是浙江沿海上升流形成的重要动力因子(胡敦欣等, 1980), 对长江冲淡水转向也有重要作用(赵保仁, 1991)。对台湾暖流来源的认识曾有不同看法, 大量观测资料表明, 春、夏季台湾暖流表层水主要来自台湾海峡, 具有高温、高盐、低磷酸盐和低硝酸盐的特征(石晓勇等, 2013), 而底层水则主要是来自台湾东北部的黑潮次表层水, 以高盐、高磷酸盐为特征(张以恩等, 1991)。近年来, Yang 等(2012)通过模式精细模拟了黑潮次表层水自台湾东北部进入东海的路径及其季节变化情况。基于上述认识绘制的研究海域春季环流状况如图 1b 所示。

1.2 数据来源与处理

本研究采用国家重点基础研究发展计划(973 计划)“我国近海藻华灾害演变机制与生态安全”项目

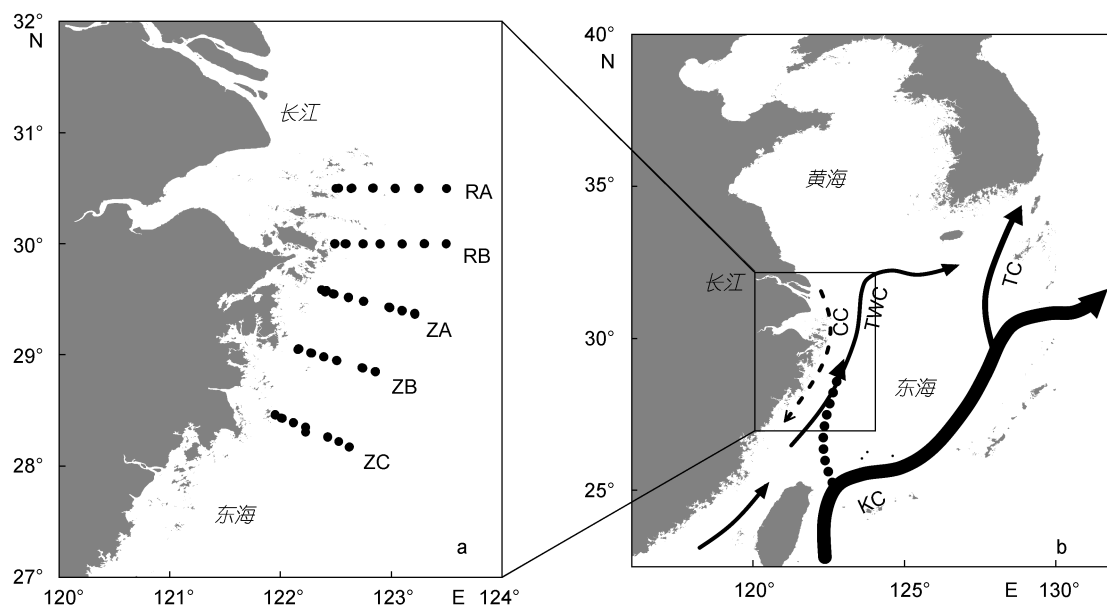


图 1 研究海域调查站位设置(a)与春季环流状况(b)

Fig.1 Illustration of the sampling sites of investigation in 2011(a) and the circulation pattern in spring in the East China Sea (b)
注: 本图根据周名江等(2003)和 Yang 等(2012)改绘; 图 a 中实心点代表综合调查站位, 断面名称位于断面右侧; 图 b 中 KC: 黑潮; TWC: 台湾暖流; CC: 沿岸流; TC: 对马暖流; 图中自台湾东北部黑潮分出的虚线指示自底层入侵的黑潮次表层水

2011年的现场观测数据。该项目于2011年3月29日至5月27日期间,通过多个航次对5个调查断面的32个站位(图1a)进行了采样分析。其中,浮游植物生物量用叶绿素 a (chl a)含量表示,样品按《海洋调查规范》要求进行采集,使用叶绿素荧光仪(Sigma, US)进行测定(周伟华等,2006)。目标海域的温度及盐度等水文要素资料采用船载SBE911 CTD观测获得。

调查过程中观察到明显的硅藻藻华和甲藻藻华现象。依据藻华原因种的种类组成(硅藻、甲藻),将2011年春季藻华期划分为硅藻藻华期(3月29日至4月20日)及甲藻藻华期(4月27日至5月27日)两个阶段。分别取两个阶段代表性航次的观测资料进行分析。其中,航次I-1(3月29日至4月2日)属于硅藻藻华期,航次II-4(5月13日至5月15日)和航次II-6(5月25日至5月27日)属于甲藻藻华期。

1.3 数据分析方法

分别以硅、甲藻藻华期间表层海水中chl a 含量及温、盐度观测资料绘制各要素的平面分布图,选择ZA断面作为典型断面绘制各要素的垂向分布图。另外,考虑到藻华主体可能分布在表层以下,也采用了各站位不同水层中chl a 含量的最大值及其所在深度绘制了藻华的平面分布图,以便与海区温、盐跃层状况进行对比。温跃层和盐跃层的判定采用垂向梯度法,即通过计算目标区域内海水温度和盐度在垂直方向上的梯度值来确定跃层分布情况。将调查站位的下层要素值与上层要素值之差除以两层间水深之差,计算得到该要素的单位深度变化值,视其为该要素的垂向梯度值,从而获得逐层、连续的温度与盐度梯度值(吴巍等,2001;郝佳佳等,2008)。将计算得到的温度与盐度梯度值与跃层判定标准对比,合并连续满足跃层临界值的深度为一个跃层区域,以该区域的顶部水深为跃层上界,该区域的厚度为跃层厚度。取各调查站位上温度、盐度的垂向梯度最大值为温跃层及盐跃层的强度,并记录强度值所在水深为跃层深度。跃层强度标准临界值采用中华人民共和国国家标准GB12763.7—91(国家技术监督局,1992)的建议值,温度跃层强度临界值为 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{m}$,盐度跃层临界值为 $0.10/\text{m}$ 。

2 结果与讨论

2.1 硅、甲藻藻华分布状况

2011年春季硅藻藻华期间,研究海域chl a 的平均含量为 $2.03\mu\text{g}/\text{L}$,最大值为 $17.99\mu\text{g}/\text{L}$ 。从表层chl a

含量的分布情况(图2a)来看,硅藻藻华期间浮游植物生物量的高值区集中在 29°N — 30°N 之间。调查区东侧的chl a 含量明显高于西侧,高值区呈东北-西南向分布。各站位chl a 含量最大值的平面分布状况与其所在水深情况如图2d、2g所示。可以看出,chl a 含量最大值的平面分布状况与表层chl a 含量基本一致,高值区出现在 122.8°E — 123.4°E , 29.2°N — 30°N 区域,水深约10m处。在调查区东南部,硅藻生物量相对较低,高值区出现在约20m以深水层。从断面ZA处chl a 的垂向分布来看(图5a),硅藻藻华期间浮游植物生物量分布也存在明显的层化现象,生物量高值区集中在 122.8°E 以东的表层水体中。

甲藻藻华期间,研究海域chl a 平均含量为 $4.51\mu\text{g}/\text{L}$,最大值($88.65\mu\text{g}/\text{L}$)约为硅藻藻华期间chl a 含量最大值的5倍。从平面分布状况(图2b、2c)来看,两次大面调查观察到的甲藻藻华呈现出明显的斑块状分布特征。在航次II-4期间,表层chl a 含量最大值出现在 122.9°E , 30°N 附近。航次II-6期间,藻华的斑块状分布特征更为明显。甲藻藻华期间,chl a 高值区与等深线基本平行。chl a 含量最大值的分布情况如图2e、2f所示,高值区分布状况与表层基本一致,出现在近岸水域表层以下至10m水深处(图2h、2i),其他区域的chl a 最大值对应的水深在10—25m左右。可以看出,甲藻藻华主体出现在水深25m以浅的水层中(图5b、5c)。与硅藻藻华相比,甲藻藻华的分布区更加集中。

2.2 藻华期间温、盐跃层分布状况

2.2.1 温度及温跃层状况 硅藻藻华期间,海域表层水温呈现出东高西低的分布趋势,等值线几乎与等深线平行(如图3a)。温度等值线在 122.8°E , 29.5°N 附近出现了向东侧弯曲的现象,可能与低温的沿岸水和高温的外海水在上述区域形成的锋面有关(李伟等,2012)。从垂向上来看(图5d),近岸水温等值线近似平行于海面,水深20m以深水体水温较高。在20m以浅的近岸区域存在明显的低温水团,使得水深20—25m范围内形成了明显的温跃层。从温跃层强度的变化情况(图3d、3g)可以看出,跃层强度高值区与低温水($<12^{\circ}\text{C}$)的分布范围基本一致,且在水深10—30m水域温跃层强度值更高。高强度的温跃层主要受到长江冲淡水的影响。

甲藻藻华期间的表层水温明显升高,弱化了表层各站位水温的差异,高值区主要出现在调查区东侧(如图3b、3c)。从断面ZA水温情况可以看出,在

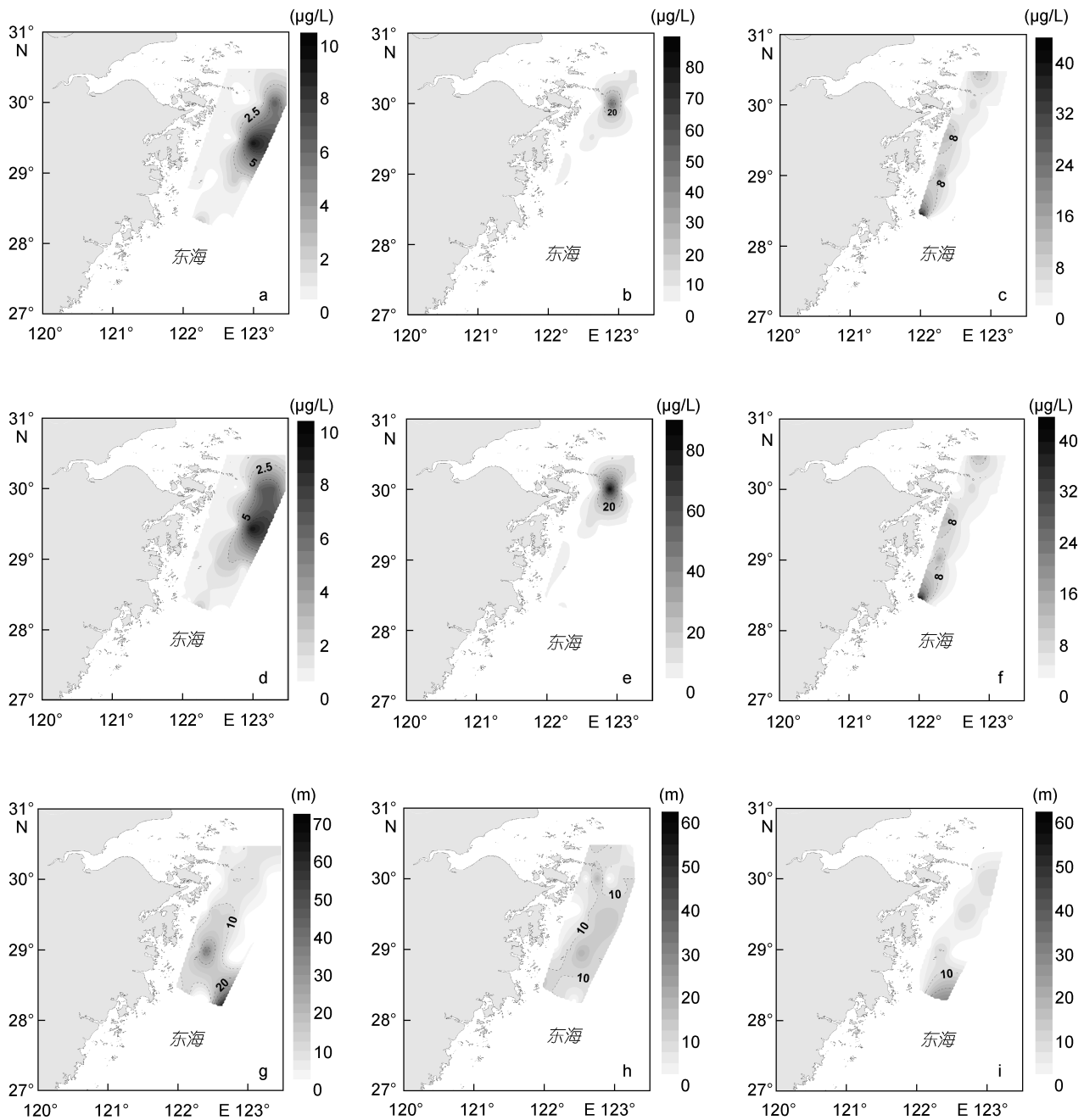


图2 2011年航次I-1(a, d, g)、II-4(b, e, h)以及II-6(c, f, i)期间表层chl *a*分布状况(a, b, c)、各站位chl *a*含量最大值的分布状况(d, e, f)及其所在水深情况(g, h, i)

Fig.2 Distribution patterns of chl *a* at the surface (a, b, c), the maximum value of chl *a* (d, e, f) and their depth (g, h, i) during the cruises I-1 (a, d, g), II-4 (b, e, h), and II-6 (c, f, i) in 2011

航次II-4期间(如图5e), 受表层海水增温和底层高温海水入侵影响, 在水深10—20m处出现了近似平行于海面的低温水夹层, 其影响范围自西向东一直延伸到123°E附近。这使得海区出现了双温跃层现象, 在20m等深线处存在一条狭窄的温度梯度正值带, 而其上方(10m等深线附近)出现了温度梯度为负值且厚度较大的温跃层。在航次II-6期间(如图5f), 高强

度温跃层主要出现在122.7°E以东海域, 该区域水深20m以浅为相对高温的台湾暖流表层水, 而底层水则受到相对低温、高盐的黑潮次表层水影响, 导致水深10—30m处出现明显的温度梯度负值区。甲藻藻华期间, 温跃层强度及其所在水深状况如图3e、3f、3h、3i所示。温跃层强度的高值区集中在调查海域东南部, 且对应水深较深(>25m)。结合ZA断面的温度梯度

情况可知, 该区域温跃层的形成受到来自台湾海峡的台湾暖流表层水与来自台湾东北部相对低温的黑潮次表层水影响。

通过对比硅、甲藻藻华期间水温情况可以看出, 伴随着甲藻藻华期间表层海水的明显升温, 以及长江冲淡水转向(Lie *et al.*, 2003; Chang *et al.*, 2014)和台湾暖流的加强(翁学传, 1985), 甲藻藻华期间垂向上水温变化情况与硅藻藻华期间恰好相反。同时, 硅藻

藻华期间由长江冲淡水南向扩展形成的近岸区较浅的高强度温跃层(出现在水深约 20m 处)在甲藻藻华期间逐渐弱化, 取而代之的是调查区东侧水深约 25m 处的高强度温跃层, 其分布区与底层黑潮次表层水的入侵路径基本吻合(Yang *et al.*, 2012)。综上可知, 硅藻藻华期间目标海域的温跃层受长江冲淡水影响较大; 至甲藻藻华后期, 高强度温跃层则主要出现在受黑潮次表层水影响较大的调查区东侧区域。

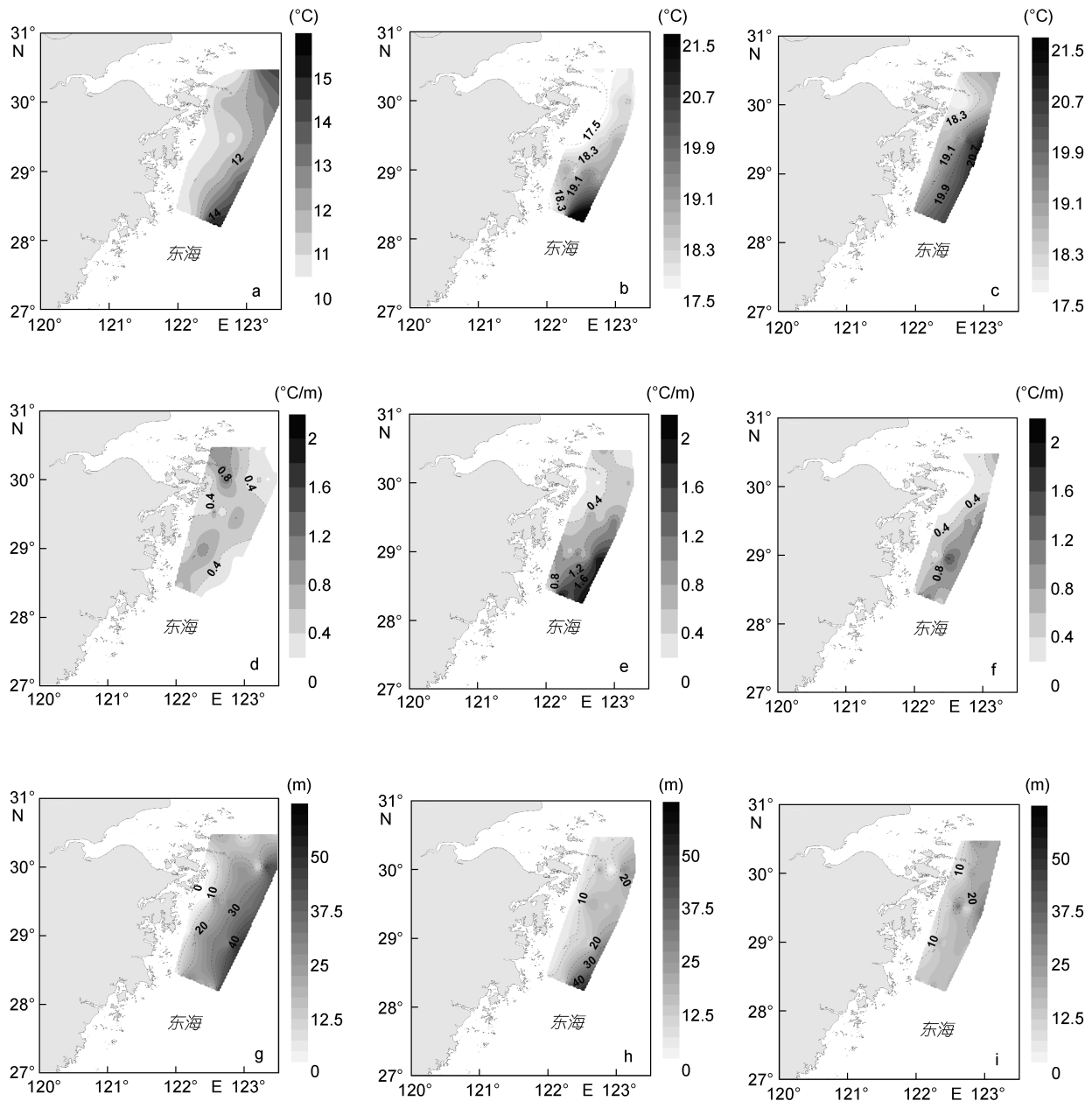


图3 2011年航次I-1(a, d, g)、II-4(b, e, h)以及II-6(c, f, i)期间调查海域表层海水温度(a, b, c)、温跃层强度(d, e, f)和温跃层深度(g, h, i)状况

Fig.3 Profiles of surface temperature (a, b, c), thermocline strength (d, e, f), and thermocline depth (g, h, i) during the cruises I-1 (a, d, g), II-4 (b, e, h), and II-6 (c, f, i) in 2011

2.2.2 盐度及盐跃层分布特征 硅藻藻华期间, 调查海域表层海水的盐度值也呈现出东高西低的变化趋势, 等值线几乎与岸线平行, 与水温情况基本一致(如图 4a)。在 29.5°N 附近存在盐度等值线外扩现象, 指示着长江冲淡水的羽状锋面。从断面 ZA 来看(图 5g), 高盐海水主要在 20m 以深区域, 盐度梯度高值区(>0.1/m)出现在水深 10—30m 范围内。盐跃层在 122.6°E 附近向上凸起, 表明该海区可能存在上升流。硅藻藻华期间, 盐跃层强度及其所在水深如图 4d、4g 所示, 盐跃层强度最大值出现在调查区北端(约 30.4°N, 122.9°E 附近), 高值区更靠近岸边且所在水深较浅(< 20m)。结合表层盐度分布情况可知, 硅藻藻华期间盐跃层主要受长江冲淡水影响。

甲藻藻华期间, 海水盐度平均值明显高于硅藻藻华期。表层盐度值低于 30 的海区面积明显缩小(如图 4b、4c), 表明长江冲淡水转向后对长江口南部海域的影响降低。从断面 ZA 的盐度情况可以看出, 航次 II-4 期间(图 5g), 低盐水在东-西向上分布范围较广, 盐度等值线近似与等深线平行。ZA 断面上 122.5°E 附近盐度等值线向上方凸起, 表明甲藻藻华期间存在上升流, 有可能导致盐跃层的削弱。其他区域的盐跃层较强, 且集中分布于水深 10—20m 之间。航次 II-6 期间(图 5h), 低盐水团的分布范围缩小至 122.7°E 以西, ZA 断面上盐度等值线呈辐射状分布, 盐跃层相对减弱。在断面西侧, 可以观察到盐度等值线上凸的现象, 指示着底层高盐水的涌升。从盐跃层强度及其所在水深的分布情况来看, 航次 II-4 期间(如图 4e、4h), 几乎整个目标海区内的盐跃层强度值均大于 0.2/m, 10—20m 水深范围内的盐跃层强度较大, 且呈条带状分布于调查区域东南侧。调查区东南部盐跃层强度相对较弱, 对应的水深也较深(> 20m)。航次 II-6 期间(如图 4f、4i), 近岸区域未出现明显的盐跃层, 而其他海区盐跃层强度均大于 0.2/m。盐跃层强度高值区域主要出现在 122.5°E, 28.9°N 附近以及调查海区东北角, 其对应水深在 15—20m 之间。近岸低盐水团的收缩及盐跃层深度变浅可能与甲藻藻华期间长江冲淡水转向造成的南向输送减弱有关(Qi *et al.*, 2014)。在调查海区东侧, 深层盐跃层高值区的分布与黑潮次表层水的路径较为一致(Guo *et al.*, 2006; Yang *et al.*, 2012), 高盐黑潮水沿着次表层向东海的入侵应当是甲藻藻华期间深层水体中盐跃层形成的主要原因(翁学传等, 1985)。

通过对比硅、甲藻藻华期间盐度以及盐跃层的变

化情况可以发现, 硅藻藻华期间盐跃层主要分布在调查区西北侧, 与长江冲淡水影响范围基本一致。而甲藻藻华期间高强度盐跃层主要出现在调查区东南侧, 与黑潮次表层水的影响区更为接近。这与 Wei 等(2015)报道的 2011—2013 年夏季台湾暖流表层水及黑潮次表层水在东海的入侵范围基本一致。对藻华期间盐跃层的分析可以看出, 在此期间应存在不同程度的上升流现象, ZA 断面硅藻藻华期间上升流出现在 122.7°E 附近, 而甲藻藻华期间出现在 122.5°E 附近。胡敦欣等(1980)指出, 该海域上升流现象的形成主要与黑潮北上余脉沿东海陆架海底的抬升有关。而在甲藻藻华后期, 伴随着外海水入侵以及海底地形对深层高盐水抬升作用的加强(赵保仁等, 2001), 台湾暖流形成的力偶促进了长江冲淡水的转向(朱德弟等, 2003)以及近岸上升流作用的强化(潘玉球等, 1985), 并导致盐跃层逐渐减弱。因此, 硅藻藻华期间的盐跃层分布受陆源冲淡水的影响较大, 甲藻藻华期间的盐跃层分布则主要受到深层外海水入侵的影响。

2.3 藻华分布与温、盐跃层的关系

从 2011 年春季藻华期间调查结果可以看出, 硅藻藻华分布范围较广, 主要出现在 25m 以浅水域, 甲藻藻华则呈斑块状分布, 分布区水深更浅。对比温、盐跃层情况可以看出, 硅藻藻华期间温、盐跃层情况比较接近, 而甲藻藻华期间二者则有明显差异, 但温、盐跃层所在深度情况基本相似。整个调查期间, 浮游植物生物量高值区始终分布在温、盐跃层上方的长江冲淡水影响区。

硅藻藻华期间, chl *a* 高值区与调查海域温、盐跃层强度高值区基本吻合, 且其所在水深与该区域温、盐跃层深度十分接近。进一步对比分析 ZA 断面各要素的垂向分布状况可以看出, 硅藻生物量高值区主要分布在温、盐跃层上方, 最大值出现在 122.8°E 以东海域。对长江口邻近海域的大量研究表明, 春季硅藻藻华主要出现在长江冲淡水的羽状锋区域(朱建荣, 2004)。由于长江冲淡水具有高温、低盐的特征, 容易导致明显的层化现象, 为广盐性的硅藻类提供了更具竞争力的环境条件(唐峰华等, 2010), 使得表层 chl *a* 含量较高(吴荣军等, 2004)。同时, 冲淡水中丰富的营养盐(Li *et al.*, 2014a)也为硅藻藻华的形成提供了重要的物质基础。而随着硅藻藻华过程中硅藻生物量的持续增加及其对营养盐的消耗, 海水中营养盐浓度也在逐渐下降, 由于长江水具有高氮磷比特征, 硅藻藻华后期的藻类生长容易受到低浓度磷酸盐限

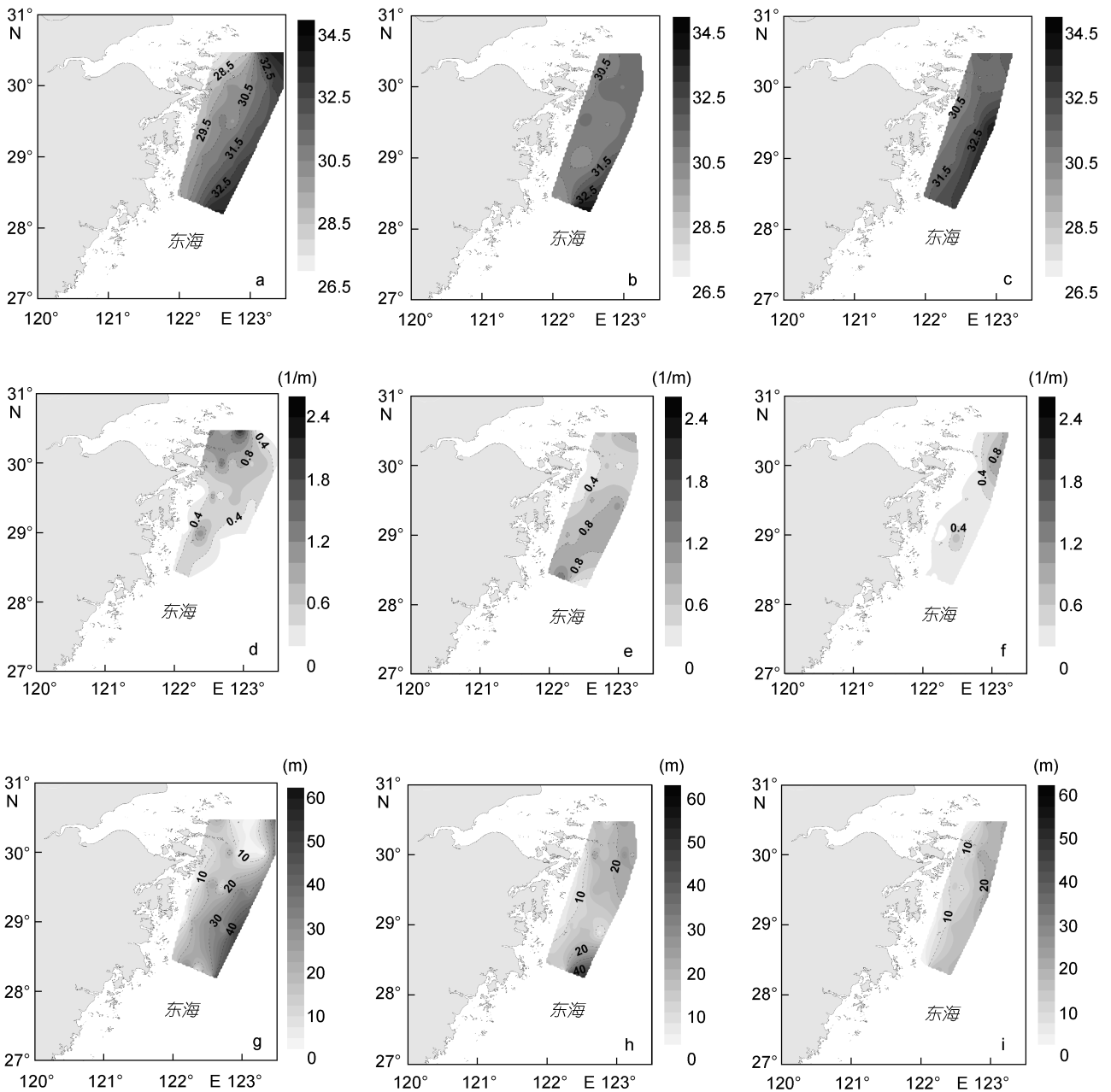


图4 2011年航次I-1(a, d, g)、II-4(b, e, h)以及II-6(c, f, i)期间调查海域表层海水盐度(a, b, c)、盐跃层强度(d, e, f)和盐跃层深度(g, h, i)状况

Fig.4 Profiles of surface salinity (a, b, c), halocline strength (d, e, f), and halocline depth (g, h, i) during the cruises I-1 (a, d, g), II-4 (b, e, h), and II-6 (c, f, i) in 2011

制, 从而导致硅藻藻华的消退(Liu *et al.*, 2014)。因此, 硅藻藻华的分布和动态变化在很大程度上受到长江冲淡水的影响和调控。

甲藻藻华期间, 浮游植物生物量的斑块状分布区与温、盐跃层强度高值区的分布情况并不完全一致。在此期间, 温、盐跃层强度高值区主要出现在调查区东部, 与黑潮次表层水流经区域较为吻合, 主要

受到台湾暖流表、底层不同性质水团的影响。甲藻藻华则主要分布在受长江冲淡水影响的闽浙沿岸水中, 因此与该海区高强度的温、盐跃层关系并不大。与以往认识有所不同的是, 甲藻藻华区温、盐跃层相对较弱, 这可能与甲藻藻华形成长江冲淡水作用减弱、上升流活跃有关(刘兴泉等, 2008), 而上升流的影响也可能是导致甲藻藻华呈斑块状分布的一个重要诱

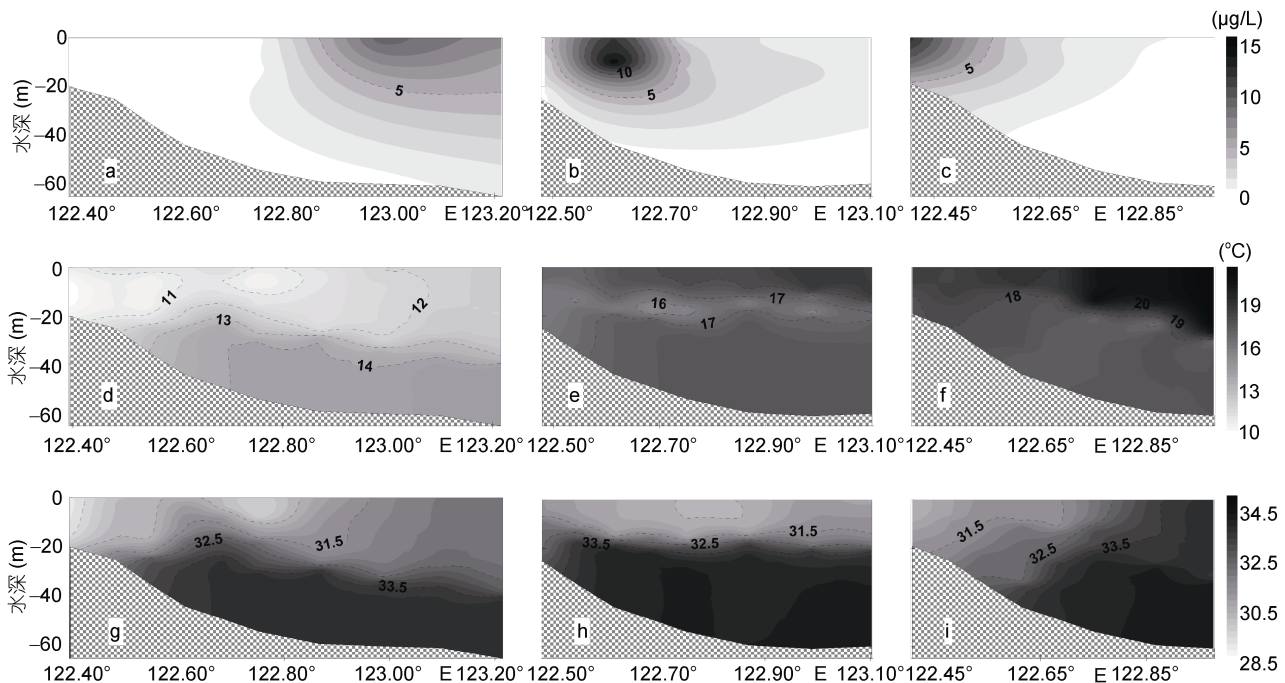


图5 2011年航次I-1(a, d, g)、II-4(b, e, h)以及II-6(c, f, i)期间ZA断面叶绿素a含量(a, b, c)、温度(d, e, f)、盐度(g, h, i)的剖面分布图

Fig.5 Vertical profiles of chl *a* (a, b, c), temperature (d, e, f) and salinity (g, h, i) on transect ZA during the cruises I-1 (a, d, g), II-4 (b, e, h), and II-6 (c, f, i) in 2011

因。以往研究表明,黑潮次表层水中含有丰富的磷酸盐(Yang *et al*, 2013; Li *et al*, 2014b), 上升流可以将底层的黑潮次表层水抬升到 10m 层以浅水域(赵保仁, 1993)。硅藻藻华后期, 浮游植物的生长已受到低浓度磷酸盐限制。甲藻具有利用有机态磷的能力和垂直迁移能力, 在磷酸盐限制条件下具有更强的竞争力, 因而能够形成藻华(Ou *et al*, 2008; Zhu *et al*, 2009); 而通过上升流补充的磷酸盐对于甲藻藻华的形成和维持同样具有重要作用(Liu *et al*, 2014; Shi *et al*, 2014)。此外, 有研究表明上升流还会改善上层冲淡水区域的光照条件及表层温度分布, 长江口邻近海域的上升流区与该海域甲藻藻华分布区也基本一致(楼琇林, 2010)。因此, 除长江冲淡水外, 由黑潮次表层水涌升导致的上升流也是影响长江口邻近海域甲藻藻华分布的重要因素。

3 结论

东海长江口邻近海域是我国近海有害藻华的高发区之一, 该海区受长江径流和台湾暖流影响, 环境条件复杂。本文通过对比 2011 年春季该海域硅、甲藻藻华期间浮游植物分布情况与温、盐跃层状况, 探讨了藻华分布与水体层化之间的关系, 得到如下

结论:

(1) 长江口邻近海域春季藻华主要出现在温、盐跃层上方长江冲淡水影响区, 其分布与水体层化密切相关。

(2) 春季硅藻藻华的分布与高强度温、盐跃层分布区基本一致, 在此期间海域温、盐跃层主要受到长江冲淡水的影响。甲藻藻华期间, 调查海域高强度的温、盐跃层主要受到台湾暖流表、底层不同性质水团的影响。而甲藻藻华出现在温、盐跃层相对较弱的近岸区, 与海域高强度的温盐跃层关系不大。甲藻藻华期间温、盐跃层的减弱主要受到长江冲淡水影响下降、上升流加强等因素影响, 和黑潮次表层水的输入密切相关。

(3) 硅藻藻华的分布和动态变化更多受到长江冲淡水影响, 而甲藻藻华的分布和动态变化在一定程度上受到黑潮次表层水入侵及其相关的上升流影响。

致谢 本研究使用的数据资料来自国家 973 项目“我国近海藻华灾害演变机制与生态安全”, 谨致谢忱。

参 考 文 献

毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳, 1963. 长江冲淡水及其混合问题的

- 初步探讨. 海洋与湖沼, 5(3): 183—206
- 石晓勇, 李鸿妹, 王 颢等, 2013. 夏季台湾暖流的水文化学特性及其对东海赤潮高发区影响的初步探讨. 海洋与湖沼, 44(5): 1208—1215
- 朱建荣, 2004. 长江口外海区叶绿素 *a* 浓度分布及其动力成因分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 34(8): 757—762
- 朱德弟, 潘玉球, 许卫忆等, 2003. 长江口外赤潮频发海区水文分布特征分析. 应用生态学报, 14(7): 1131—1134
- 刘兴泉, 尹宝树, 侯一筠, 2008. 长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究 II. 环流的基本特征. 海洋与湖沼, 39(4): 312—320
- 苏纪兰, 2001. 中国近海的环流动力机制研究. 海洋学报, 23(4): 1—16
- 李 伟, 王玉衡, 汪嘉宁等, 2012. 2011 年春、夏季黄、东海水团与水文结构分布特征. 海洋与湖沼, 43(3): 615—623
- 李 云, 李道季, 唐静亮等, 2007. 长江口及毗邻海域浮游植物的分布与变化. 环境科学, 28(4): 719—729
- 张以恩, 翁学传, 张启龙等, 1991. 台湾海峡的底层流. 海洋与湖沼, 22(2): 124—131
- 吴 巍, 方欣华, 吴德星, 2001. 关于跃层深度确定方法的探讨. 海洋湖沼通报, (2): 1—7
- 吴荣军, 吕瑞华, 朱明远等, 2004. 海水混合和层化对叶绿素 *a* 垂直分布的影响. 生态环境, 13(4): 515—519
- 国家技术监督局, 1992. GB12763.7—91 海洋调查规范 海洋调查资料处理. 北京: 中国标准出版社, 69—70
- 周名江, 于仁成, 2007. 有害赤潮的形成机制、危害效应与防治对策. 自然杂志, 29(2): 72—77
- 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
- 周伟华, 殷克东, 朱德弟, 2006. 舟山海域春季浮游植物生物量及东海原甲藻赤潮频发机制初探. 应用生态学报, 17(5): 887—893
- 赵保仁, 1991. 长江冲淡水的转向机制问题. 海洋学报, 13(5): 600—610
- 赵保仁, 1993. 长江口外的上升流现象. 海洋学报, 15(2): 108—114
- 赵保仁, 任广法, 曹德明等, 2001. 长江口上升流海区的生态环境特征. 海洋与湖沼, 32(3): 327—333
- 郝佳佳, 陈永利, 王 凡, 2008. 中国近海温跃层判定方法的研究. 海洋科学, 32(12): 17—24
- 胡敦欣, 吕良洪, 熊庆成等, 1980. 关于浙江沿岸上升流的研究. 科学通报, 25(3): 131—133
- 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
- 唐峰华, 伍玉梅, 樊 伟等, 2010. 长江口浮游植物分布情况及与径流关系的初步探讨. 生态环境学报, 19(12): 2934—2940
- 翁学传, 王从敏, 1985. 台湾暖流水的研究. 海洋科学, 9(1): 7—10
- 楼琇林, 2010. 浙江沿岸上升流遥感观测及其与赤潮灾害关系研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 102—107
- 管秉贤, 陈上及, 1964. 全国海洋综合调查报告 第五册: 中国近海的海流系统. 北京: 国家科委海洋组海洋综合调查办公室, 1—85
- 潘玉球, 徐端蓉, 许建平, 1985. 浙江沿岸上升流区的锋面结构、变化及其原因. 海洋学报, 7(4): 401—411
- 戴鑫烽, 陆斗定, 夏 平等, 2014. 2010—2011 年东海藻华高发区水体层化对东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense* Lu) 藻华的影响. 海洋与湖沼, 45(2): 217—224
- Chang P H, Isobe A, Kang K R *et al*, 2014. Summer behavior of the Changjiang diluted water to the East/Japan Sea: A modeling study in 2003. Continental Shelf Research, 81: 7—18
- Chen C S, Xue P F, Ding P X *et al*, 2008. Physical mechanisms for the offshore detachment of the Changjiang Diluted Water in the East China Sea. Journal of Geophysical Research-Oceans, 113(C2): C02002
- GEOHAB, 2008. Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms, GEOHAB Core Research Project: HABs in Stratified Systems., Paris, France, and Newark, Delaware, USA: IOC and SCOR, 59
- Guan B X, Mao H L, 1982. A note on circulation of the East China Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1(1): 5—16
- Guo X Y, Miyazawa Y, Yamagata T. 2006. The Kuroshio onshore intrusion along the shelf break of the East China Sea: The origin of the Tsushima Warm Current. Journal of Physical Oceanography, 36(12): 2205—2231
- Li H M, Tang H J, Shi X Y *et al*, 2014a. Increased nutrient loads from the Changjiang (Yangtze) River have led to increased Harmful Algal Blooms. Harmful Algae, 39: 92—101
- Li H M, Shi X Y, Wang H *et al*, 2014b. An estimation of nutrient fluxes to the East China Sea continental shelf from the Taiwan Strait and Kuroshio subsurface waters in summer. Acta Oceanologica Sinica, 33(11): 1—10
- Lie H J, Cho C H, Lee J H *et al*, 2003. Structure and eastward extension of the Changjiang River plume in the East China Sea. Journal of Geophysical Research-Oceans, 108(C3): 3077
- Liu H, Xu W S, Kang H X *et al*, 2014. Numerical Simulation of the Nutrient Limitation in the Yangtze River Estuary. In: Ma S W, Jia L, Li X *et al* eds. Life System Modeling and Simulation, Berlin Heidelberg: Springer, 461: 188—197
- 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
- Qi J F, Yin B S, Zhang Q L *et al*, 2014. Analysis of seasonal variation of water masses in East China Sea. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 32(4): 958—971
- Ras M, Steyer J P, Bernard O, 2013. Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. Reviews in Environmental Science and Bio-Technology, 12(2): 153—164
- Shi J Z, Lu L F, 2011. A short note on the dispersion, mixing, stratification and circulation within the plume of the partially-mixed Changjiang River estuary, China. Journal of Hydro-Environment Research, 5(2): 111—126
- 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
- Tang D L, Di B P, Wei G F *et al*, 2006. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea. *Hydrobiologia*, 568(1): 245—253
- Tyler M A, Seliger H H, 1978. Annual subsurface transport of a red tide dinoflagellate to its bloom area: Water circulation patterns and organism distributions in the Chesapeake Bay. *Limnology and Oceanography*, 23(2): 227—246
- 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
- Wei H, Luo X F, Zhao Y D *et al*, 2015. Intraseasonal variation in the salinity of the Yellow and East China Seas in the summers of 2011, 2012, and 2013. *Hydrobiologia*, 754(1): 13—28
- Yang D Z, Yin B S, Liu Z L *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
- Yin K D, 2003. Influence of monsoons and oceanographic processes on red tides in Hong Kong waters. *Marine Ecology Progress Series*, 262: 27—41
- 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
- Zhu M Y, Xu Z J, Li R X *et al*, 2009. Interspecies competition for nutrients between *Prorocentrum donghaiense* Lu and *Skeletonema costatum* (Grev.) Cleve in mesocosm experiments. *Acta Oceanologica Sinica*, 28(1): 72—82

RELATIONSHIP BETWEEN HARMFUL ALGAL BLOOMS AND WATER STRATIFICATION IN WATERS OFF CHANGJIANG RIVER ESTUARY

ZHOU Zheng-Xi^{1,2}, YU Ren-Cheng^{1,3}, LV Song-Hui⁴, GUAN Wei-Bing⁵, ZHOU Ming-Jiang¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology & Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 4. Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 5. The Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract Coastal waters off Changjiang River estuary suffered from high-frequency of harmful algal blooms (HABs) in China in recent decade under complicated environmental conditions in which Changjiang Diluted Water (CDW) and Taiwan Warm Current (TWC) were active, the distribution, dynamics, and consequences of algal blooms were affected. Focusing on the potential effects of water stratification on algal blooms, an investigation was conducted and data collected during the cruises in 2011 as a part of the GEOHAB II project. To understand possible link of the changes of thermocline and halocline to diatom or dinoflagellate bloom, distribution of different algal blooms and water stratification were studied. As our data show, the thermocline and halocline became apparent during spring blooms. Particularly, they cohered to the CDW for diatom bloom, to different ocean currents for dinoflagellate bloom. The phytoplankton biomass was boosted in the CDW above thermocline and halocline during spring blooms. Diatom blooms were found associated with strong stratification affected by CDW, while dinoflagellate blooms were with relatively weaker stratification in near-shore seawaters affected by upwelling and intrusion of Kuroshio. It was concluded that the CDW played an important role in affecting the distribution of diatom bloom in this region, while the dinoflagellate bloom was partially affected by the upwelling and intrusion of open sea waters. The results of this study may help further elucidate the different mechanisms of diatom blooms and dinoflagellate blooms, and to predict the long-term changes of HABs in this region.

Key words Changjiang River estuary; harmful algal blooms; chlorophyll *a*; thermocline; halocline