

长江口南部赤潮区春季表层沉积物中色素组成、含量与分布状况

亢振军^{1,2,3}, 于仁成¹, 孔凡洲¹, 高岩^{1,2}, 王云峰¹, 郭伟^{1,2}, 陈建华^{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, 山东青岛 266071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 钦州学院广西北部湾海洋生物多样性养护重点实验室, 广西钦州 535099)

摘要: 为剖析长江口邻近海域春季硅藻藻华后期藻类沉降与底层水体缺氧现象之间的关系, 作者于 2011 年春季, 在长江口南部赤潮区采集了表层沉积物样品, 并通过高效液相色谱法(HPLC), 对浮游植物色素进行了分析。结果表明, 硅藻藻华发生后, 表层沉积物中叶绿素 *a*(Chl *a*)、岩藻黄素(Fuco)和 19'-丁酰氧基岩藻黄素(But-Fuco)含量有显著增加, 高值区主要分布在调查海域东南侧 50 m 等深线外侧, 与底层低氧水体分布区基本吻合。因此, 硅藻藻华后沉降的藻类对于该海域夏季缺氧区的形成应具有-一定作用, 其具体过程和机制仍有待于研究。

关键词: 藻华; 沉积物; 色素; 低氧

中图分类号: P734.3 文献标识码: A
doi: 10.11759/hyxx20130423001

文章编号: 1000-3096(2014)10-0030-10

近 40 年来, 中国近海的有害藻华问题渐趋严峻, 有害藻华发生频率不断增加, 藻华类型明显增多^[1]。在东海长江口邻近海域, 微藻形成的有害藻华现象(常称为赤潮)尤为突出^[2]。20 世纪中后期, 形成藻华的生物一般是骨条藻(*Skeletonema* spp.)等无毒硅藻; 2000 年以后, 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)、亚历山大藻(*Alexandrium* spp.)等有毒有害甲藻所形成的有害藻华开始占据优势^[3-4]。同时, 有害藻华开始的规模也在不断扩大, 影响区域不断扩展。自 2000 年以来, 东海连年发生面积在 10 000 km² 以上的大规模甲藻藻华^[5]。对长江口邻近海域的多年调查表明, 大规模藻华主要出现在长江口东南部 30~50 m 等深线附近海域, 是中国近海的一个典型赤潮区。而且, 每年春夏季大规模甲藻藻华发生前都会出现硅藻藻华, 在硅藻藻华和甲藻藻华之间, 有时还会出现微型鞭毛藻(Microflagellates)类形成的小规模藻华现象^[6]。

在藻华后期, 大量死亡的藻细胞会沉入海底, 藻体有机质的分解会消耗水体溶解氧, 导致或加速底层缺氧区的形成。因此, 富营养化海域的藻华现象与底层水体缺氧现象之间存在密切联系。世界资源协会(WRI)和费吉尼亚海洋研究所(VIMS)在全球认定的 534 处低氧“死亡区”中, 许多和富营养化及有害藻华问题存在关联^[7]。对密西西比河口和墨西哥湾北部陆架区的研究表明, 该海域季节性缺氧区的形成受到春季硅藻藻华的显著影响。在长江口邻近海域, 底层水体缺氧现象也呈现出加剧态势。近 20 年来,

多次观测到大范围的底层缺氧区^[8]。对于长江口邻近海域缺氧区的形成, 通常认为与外海低氧水入侵、夏季水体层化以及沉降有机质的降解有关, 但是, 对于该海域的大规模藻华现象与底层缺氧区的关系, 仍缺乏深入的认识。

浮游植物色素是一类重要的生物标志物, 可以用于指示浮游植物类群组成及生源有机质的沉降状况^[9]。不同浮游植物类群的色素组成特征存在一定差异, 许多浮游植物类群具有自己独特的色素^[10], 如岩藻黄素(Fuco)是硅藻的特征色素, 多甲藻黄素(Perid)是甲藻的特征色素, 19'-丁酰氧基岩藻黄素(But-Fuco)是定鞭藻类(Haptophytes)和金藻类(Chrysophytes)等类群的特征色素, 别黄素(Allo)是隐藻(Cryptophytes)的特征色素, 玉米黄素(Zea)是蓝藻的特征色素, 叶绿素 *b*(Chl *b*)和叶黄素(Lut)是绿藻的特征色素等^[11-12]。因此, 作者尝试以浮游植物色素作为指示物, 分析长江口邻近海域硅藻藻华发生前后死亡、沉降的浮游植物在表层沉积物中的

收稿日期: 2013-04-23; 修回日期: 2014-06-26

基金项目: 科技部 973 重点基础研究项目(2010CB428705); 自然科学基金委创新群体项目(41121064); 国家自然科学基金资助项目(41206098); 山东省联合基金资助项目(U1406403); 中国科学院先导资助专项(XDA11020304)

作者简介: 亢振军(1982-), 男, 山西宁武人, 博士研究生, 主要从事有害赤潮及其影响, E-mail: kzj823@163.com; 于仁成, 通信作者, E-mail: rcyu@qdio.ac.cn

分布情况,并初步探讨了硅藻藻华与水体底层缺氧区的关系。

1 材料与方法

1.1 研究区域概述

2011年4月~5月“藻华973”春季航次执行期间采集样品。研究区域(图1)位于长江口以南、舟山群岛外侧沿岸海域(121.95°~123.5°E, 28.17°~30.5°N),是东海海域赤潮高发区。共设置有ra, rb, za, zb和zc 5条断面,同一断面相邻两站位间隔约15'。调查区域水深17~70 m,平均水深45 m。研究区域水文状况主要受到长江冲淡水、台湾暖流、闽浙沿岸流等影响。该海域的有害藻华现象一般出现在春夏季(4~6月),藻华基本上沿30~50 m等深线分布^[5],硅藻藻华通常发生在3~4月,甲藻藻华通常出现在5~6月。

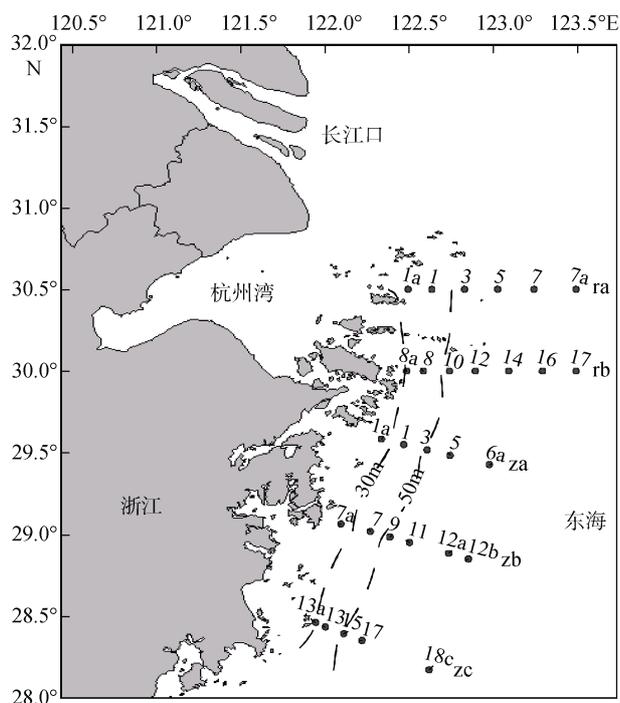


图1 样品采集站位

Fig.1 Location of the sampling stations in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary

1.2 样品采集与处理

出海调查期间多次采集水样和表层沉积物样品,用于色素分析。其中水样于2011年3月29日~5月26日用Niskin采水器采集。海水样品先用200 μm筛绢过滤,去除可能存在的浮游动物干扰。取500 mL滤液,用Whatman GF/F玻璃纤维滤膜过滤,将滤膜

用铝箔包好,放入冻存管中,置于液氮中保存,用于色素分析。

表层沉积物于2011年3月29日~5月7日采用箱式采泥器采集。用不锈钢小铲取表层1 cm左右的沉积物,于锡箔纸包裹好后放入密封塑料袋中,-20℃冷冻保存,用于色素分析。

调查期间水体溶解氧数据系采用海鸟系列温盐深测量仪(CTD SBE25)所带溶解氧传感器现场测定。

1.3 材料与试剂

实验中用的甲醇、乙腈、丙酮等有机溶剂均为HPLC级;色素标准品购自丹麦DHI公司,包括叶绿素a、岩藻黄素、多甲藻黄素、19'-丁酰氧基岩藻黄素、别黄素、玉米黄素和叶黄素等。用作色素内标的8'-阿朴-β,ψ-胡萝卜素(8'-apo-beta-carotenal)购自Sigma公司。

1.4 样品处理与色素提取

将冷冻的滤膜从低温冰箱中取出,于黑暗条件下解冻,展开至洁净培养皿中,用不锈钢剪刀将滤膜剪成细条,并转移至容积为1.5 mL棕色样品瓶中。加入1 350 μL HPLC级甲醇和150 μL内标母液(8'-apo-beta-carotenal)。以不锈钢针头挤压、捣碎滤膜,使滤膜完全浸入甲醇提取液中。然后将样品瓶置于冰水浴中,超声处理5 min。用玻璃注射器吸取上清液,以0.2 μm孔径针式有机相滤头过滤,将滤液注入1.5 mL样品瓶中。准确吸取700 μL滤液至液相进样瓶中,加入140 μL超纯水,在涡旋振荡器上混匀后,立即上机分析。

冷冻的表层沉积物样品处理过程如下:将冷冻的表层沉积物样品解冻后,搅拌均匀,取约4~5 g样品(湿质量)装入玻璃培养皿,放入冷冻干燥机进行冷冻干燥。冻干样品以玻璃研钵研磨,并过100目筛。准确称取2 g研磨泥样,置于10 mL玻璃离心管中,加入3 mL HPLC级甲醇和100 μL内标母液,于冰水浴中超声处理5 min,静置12 h后,在4℃条件下,以5 000 r/m的转速离心5 min,取上清液置于棕色小瓶中。上述提取过程重复3次,合并提取液,用0.2 μm孔径针式有机相滤头过滤,氮气吹干后,加入1 mL甲醇复溶,用微量进样针吸取700 μL复溶液至样品瓶中,加入140 μL超纯水,在涡旋振荡器上混匀后立即上机分析。

1.5 色素分析

色素分析参照 Zapata^[13]等建立的方法。所用HPLC系统为Waters E2695系列,采用Waters Sym-

metry C8 色谱柱(3.5 μm , 4.6 mm \times 150 mm)分离各色素组分, 二元梯度洗脱。其中, 流动相 A 为甲醇: 乙腈: 吡啶水溶液(2%, pH 5.0)(50: 2: 25, *V/V/V*); 流动相 B 为甲醇: 乙腈: 丙酮溶液(20: 60: 20, *V/V/V*)。流速设定为 1 mL/min, 梯度洗脱程序为: 初始状态为 100%流动相 A 运行, 在 22 min 的时间内流动相 A 从 100%降到 50%, 在第 28 分钟的时候流动相 A 降到 20%, 在第 40 分钟的时候流动相 A 降到 5%并保持 3 min, 之后恢复到 100%流动相 A 初始状态并保持 2 min, 整个梯度程序运行 45 min。检测过程中柱温保持 27 $^{\circ}\text{C}$ 。样品进样量为 100 μL , 进样前用 100%甲醇洗针, 样品室温度保持 4 $^{\circ}\text{C}$ 。

采用 PDA 检测器对色素组分进行记录和鉴别,

波长 440 nm, 带宽 20 nm, 狭缝宽度 4 nm, 同时扫描并记录 300~750 nm 的光谱信息。通过色素峰保留时间和 PDA 检测器获得的吸收光谱图, 与色素标准品对比确定色素成分。色素的定量分析采用内标工作曲线定量法进行。

2 结果

2.1 样品中检出的色素组分

通过高效液相色谱法从水体和表层沉积物中共检测出 16 种色素, 色谱图和色谱信息如图 2 和表 1 所示。叶绿素 *a*、岩藻黄素、多甲藻黄素、19'-丁酰氧基岩藻黄素、别黄素、玉米黄素和叶黄素等 7 种色素的含量在样品中普遍较高, 几乎在每一样品中都能检测到。

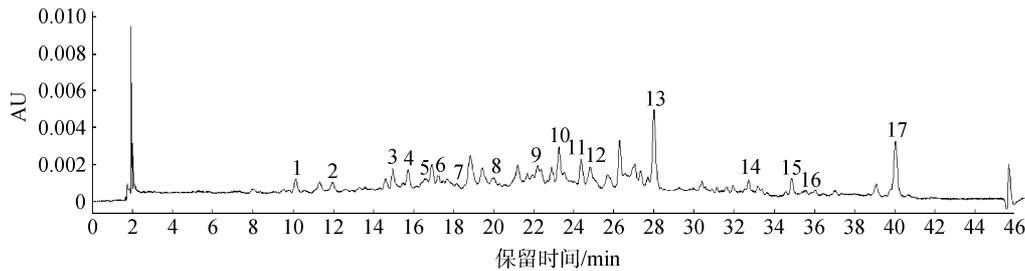


图 2 沉积物样品中色素分析色谱图(440 nm)

Fig.2 Chromatograms of pigments in a sediment sample (at 440 nm)

图中序号数字与表 1 中数字代表含义相同

The numbers in chromatograms are the same in Tab.1

表 1 沉积物样品中可检测到的色素情况

Tab.1 List of pigments detected from the sediment samples

出峰序号	色素中文名称	色素简称	保留时间(min)	特征吸收峰(nm)
1	叶绿素 <i>c</i> ₂	Chl <i>c</i> ₂	10.00	450.6 —
2	多甲藻黄素	Perid	11.95	474.9 —
3	19'-丁酰氧基岩藻黄素	But-Fuco	14.96	447.0 472.5
4	岩藻黄素	Fuco	15.73	450.8 —
5	新黄素	Neo	16.61	439.7 466.4
6	青绿素	Pras	17.23	453.1 —
7	紫黄素	Viola	18.15	439.7 470.0
8	硅甲藻黄素	Diadino	20.02	448.2 476.1
9	硅藻黄素	Diato	22.17	453.1 481.0
10	别黄素	Allo	23.28	454.3 481.0
11	玉米黄素	Zea	24.37	451.8 481.0
12	叶黄素	Lut	24.71	447.0 474.9
13	8'-阿朴- β , ψ -胡萝卜素(内标)	8'-Apo	28.01	460.3 —
14	叶绿素 <i>b</i>	Chl <i>b</i>	32.72	464.0 645.9
15	叶绿素 <i>a</i>	Chl <i>a</i>	35.17	430.0 665.6
16	叶绿素 <i>a</i> 异构体	Chl <i>a</i> epi	35.65	419.1 665.6
17	β -胡萝卜素	β -car	40.35	447.0 476.1

注: 表中各色素的特征吸收峰一般为 2 个, “—”所在行表示只有 1 个特征吸收峰

2.2 水体中浮游植物色素的组成和分布

水体中浮游植物样品采样期间正值硅藻藻华盛期, 主要藻种为骨条藻(*Skeletonema* spp.)和海链藻(*Thalassiosira* spp.), 细胞丰度平均为 21.3×10^4 个/L。检测到的色素主要为 Chl *a* 和硅藻的特征色素 Fuco, 此外, 也有少量 Perid 和 But-Fuco。Chl *a* 含量范围为 200~5 500 ng/L, 主要分布在 50 m 等深线及其东部海域, 其高值区以 za6a 站位为中心, 分布在 122.5°E~123.5°E, 29°N~30°N 范围内。作为硅藻的主要指示色素, Fuco 整体上的分布态势与 Chl *a* 相一致, 其含量范围为 60 ng/L~2 900 ng/L。从图 3a 与图 3b 可以看出, Fuco 的高值区与 Chl *a* 的高值区几乎完全重叠。Perid 是甲藻的主要指示色素, 含量

范围为 9~310 ng/L, 其高值区位于 ra7 和 rb16 站位靠近外海一侧区域(图 3c), 但在 zb7a 站位附近的近岸海域含量也较高, 整体在 za 断面的平均含量值较高, 可达 120 ng/L 以上。从图 3d 看出, But-Fuco 的分布态势与其他色素明显不同, 表现为从近岸到外海逐渐降低, 其高值区域分布于研究海域的西北角, 即 ra 和 rb 断面的近岸部分, 平均含量达 30 ng/L 以上。

2.3 表层沉积物中色素的组成和分布

4 月份表层沉积物中 Chl *a* 的平均含量为 94 ng/g dw(dry weight, 干质量)(表 2), 高值区(平均为 150 ng/g dw)出现在调查海域南部, zb 和 zc 断面的中段, 以及 za 断面外海一侧; Fuco 含量的高值区(平均为 150 ng/g dw)

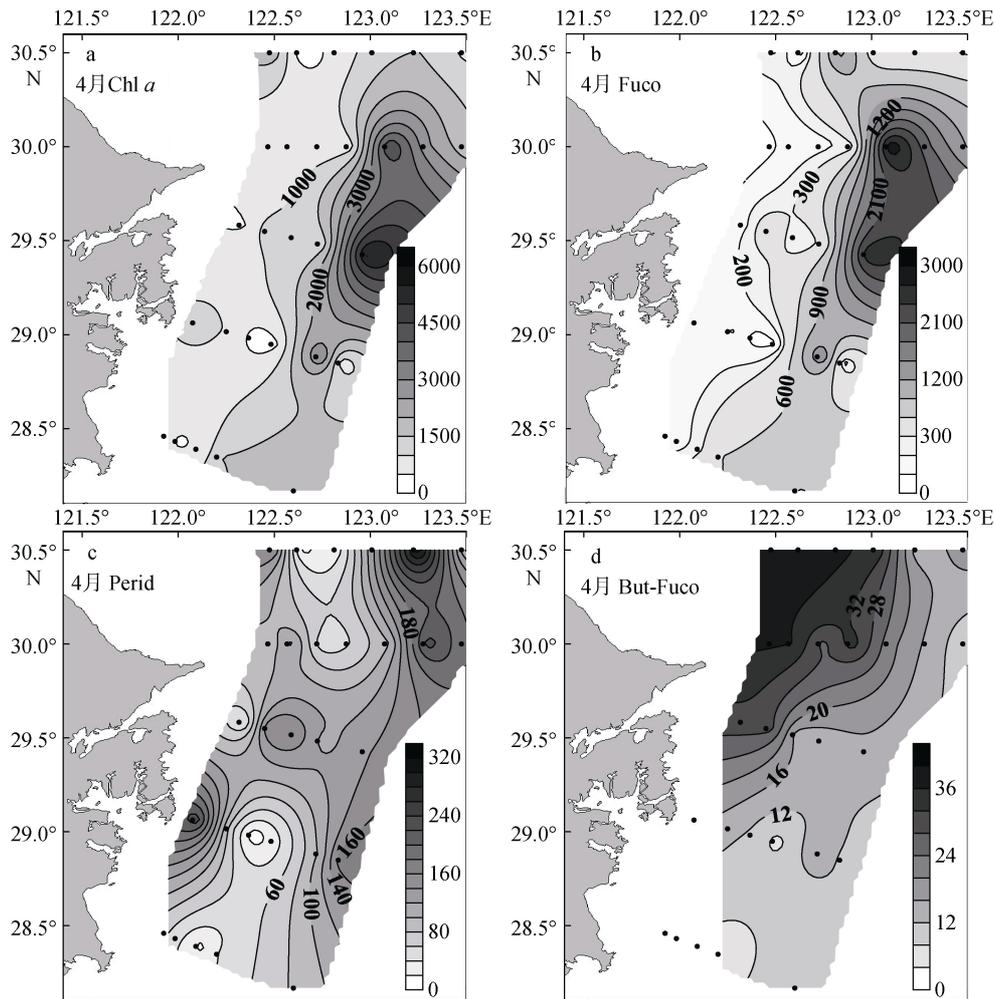


图3 2011年4月长江口南侧赤潮区水体中叶绿素*a*、岩藻黄素、多甲藻黄素和19'-丁酰氧基岩藻黄素的分布与含量(ng/L)
Fig.3 Distribution and concentration(ng/L)of chlorophyll *a*, fucoxanthin, peridinin and 19'-butanoyloxyfucoxanthin in the red tide zone south to the Changjiang River estuary in April, 2011

图中黑点表示采样站位(图4, 图5, 图6同)

Black dots in the figures represent sampling sites (the same as fig.4, fig.5 and fig.6)

表 2 2011 年 4 月和 5 月调查区表层沉积物中主要色素的质量比情况

Tab.2 Pigment content in surface sediment samples collected in April and May, 2011

色素中文名称	色素简称	平均值(最小值~最大值)(ng/g dw)	
		4 月份	5 月份
叶绿素 <i>a</i>	Chl <i>a</i>	94.48 (16.48~235.34)	160.15(13.4~762.18)
多甲藻黄素	Perid	25.10 (6.86~80.03)	24.10(6.86~72.63)
19'-丁酰氧基岩藻黄素	But-Fuco	21.64 (3.65~57.13)	53.36(3.57~458.62)
岩藻黄素	Fuco	93.47 (7.65~210.76)	183.97(8.57~1083.87)
硅甲藻黄素	Diadino	9.40(3.00~21.75)	14.62(3.51~67.42)
别黄素	Allo	19.07(4.08~61.88)	11.92(3.82~67.91)
硅藻黄素	Diato	18.83(4.03~48.80)	23.65(4.40~81.10)
玉米黄素	Zea	21.13(3.64~61.73)	20.85(3.64~64.19)
叶黄素	Lut	11.09(3.24~39.13)	9.41(2.23~26.69)
β -胡萝卜素	β -car	49.55(3.48~145.62)	59.40(11.34~174.91)

与 Chl *a* 的高值区吻合度很好, Perid 含量的高值区分布与 Chl *a* 和 Fuco 基本一致, 最高值出现在 zb9 和 zc13 站位。4 月份 But-Fuco 平均含量为 30 ng/g dw, 各站位间差异并不显著(图 4)。

与 4 月份相比, 5 月份 Chl *a*、Fuco 和 But-Fuco 的含量均有明显增加, 而 Perid 的含量变化不大。5 月份 Chl *a*、Fuco、But-Fuco 的高值区基本一致, 出现在调查区域东南部 50 m 等深线外一侧。rb17, za6a, zb9, zb12b, zc13 站位成为 Chl *a* 含量的高值点, 其中在 zb12b 站位达到极大值(762 ng/g dw)。与 4 月份相比, 5 月份这一高值区的 Chl *a*(平均为 550 ng/g dw)、Fuco(平均为 650 ng/g dw)、But-Fuco(平均为 250 ng/g dw)的含量均有明显增加(图 4)。

2.4 研究海域水体溶解氧含量状况

从图 5 可以看出, 4 月份研究海域表、中、底层溶解氧含量总体较高, 仅调查海域东南部海区底层海水中的溶解氧含量偏低(DO \approx 4.4 mg/L); 5 月份表层溶解氧含量较高, 而中层大部分区域溶解氧含量偏低, 底层水溶解氧含量与 4 月份相比显著降低(DO \approx 3.4 mg/L), 缺氧区开始出现。

从调查期间 zb 断面溶解氧含量的变化来看, 4 月 20 日 zb 断面水体溶解氧含量状况基本正常(图 6a); 5 月 2 日, zb8 外海一侧 20 m 以下水层溶解氧含量下降为 3.5 mg/L(图 6b); 5 月 5 日, zb9 到 zb10 站位之间底层水溶解氧含量低于 3 mg/L, 底层缺氧区开始出现(图 6c); 5 月 14 日, zb7 外海一侧出现缺氧区, 厚度超过 20 m(图 6d); 5 月 26 日, zb9 到 zb11 之间底层水体出现缺氧区, 厚度接近 30m(图 6e)。

3 讨论

3.1 硅藻藻华前后表层沉积物中色素组成、含量与分布的变化

在长江口邻近海域赤潮区, 以往对于表层沉积物中的色素分析工作较少。朱卓毅^[14]分析了长江口邻近海域(122°~125°E; 28°~33°N)表层沉积物中的色素组成与分布特征, 发现以单位干质量沉积物中的 Chl *a* 含量或单位质量有机碳(OC)中的 Chl *a* 含量来表征 Chl *a* 分布特征, 没有明显差异。因此, 本研究中采用单位干质量沉积物中 Chl *a* 含量来表示 Chl *a* 分布状况, 以尽可能直观地指示表层沉积物中藻类的沉降情况。朱卓毅^[14]曾对长江口邻近海域 6~8 月期间采集的表层沉积物样品进行分析, 发现 Fuco 是表层沉积物中含量最高的色素, 平均值为 38 mg/g OC, 再次是 Perid, 平均值为 17 mg/g OC, Fuco 和 Perid 与 Chl *a* 的分布特征比较相似, 均在长江口门附近区域含量较低, 而长江口南北两侧含量较高。

在长江口南侧赤潮区, 朱卓毅^[14]分析发现 H1-21a 站位(123°E, 29°N)附近存在一个色素分布高值区, 但由于数据有限, 未能详细刻画其分布特征。

本研究对长江口南部赤潮区 4、5 月份表层沉积物中色素组成与含量状况进行了分析, 发现两个月份之间色素含量和分布特征出现了明显变化。在分析的所有色素中, Chl *a*、Fuco 和 But-Fuco 的含量变化最大, 而且 3 种色素的高值区分布范围几乎完全一致。在表层沉积物中, Fuco 含量远高于 But-Fuco。Fuco 是硅藻的特征色素, 因此, 可以推断在 4~5 月份之间有较多死亡沉降的硅藻。以往的调查结果表

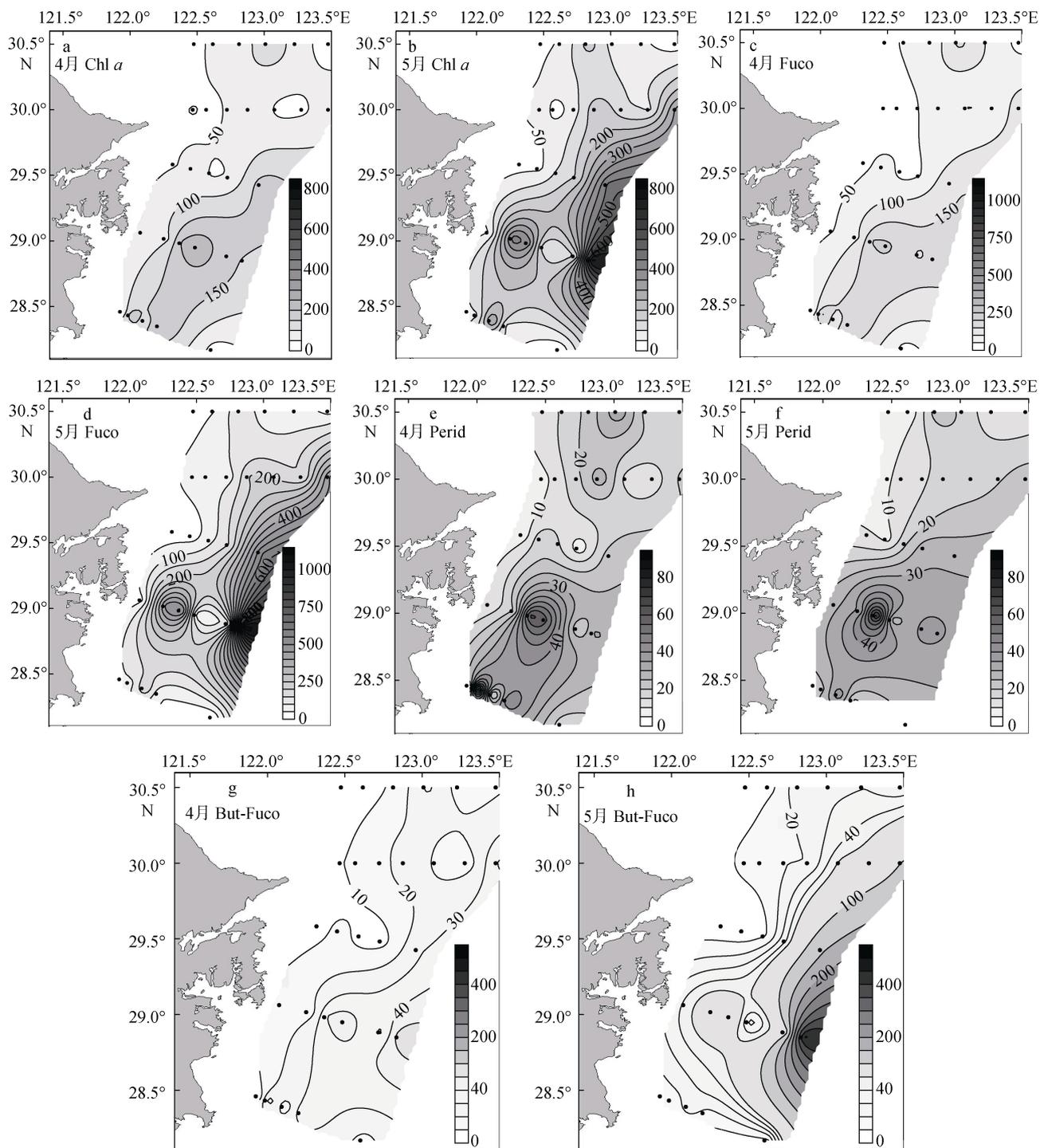


图4 2011年4、5月份长江口南部赤潮区表层沉积物中叶绿素 *a*、岩藻黄素、多甲藻黄素和 19'-丁酰氧基岩藻黄素的分布与质量比(ng/g dw)状况

Fig.4 Distribution and concentration (ng/g dw) of chlorophyll *a*, fucoxanthin, peridinin and 19'-butanoyloxyfucoxanthin in surface sediments in April and May, 2011

明, 3月底至4月初是长江口邻近海域硅藻藻华盛期。根据4月初水体中浮游植物色素的分析结果可以看出, 这一时期表层水体中 Chl *a* 的分布特征与 Fuco 的分布特征基本吻合, 而其他色素的分布特征有

明显差异, 也说明了硅藻是这一阶段水体中 Chl *a* 的主要贡献者。对比水体和表层沉积物中 Chl *a* 和 Fuco 的分布范围可以看出, 尽管最高值点有所不同, 但高值区都是分布在调查区 50 m 等深线外侧海域,

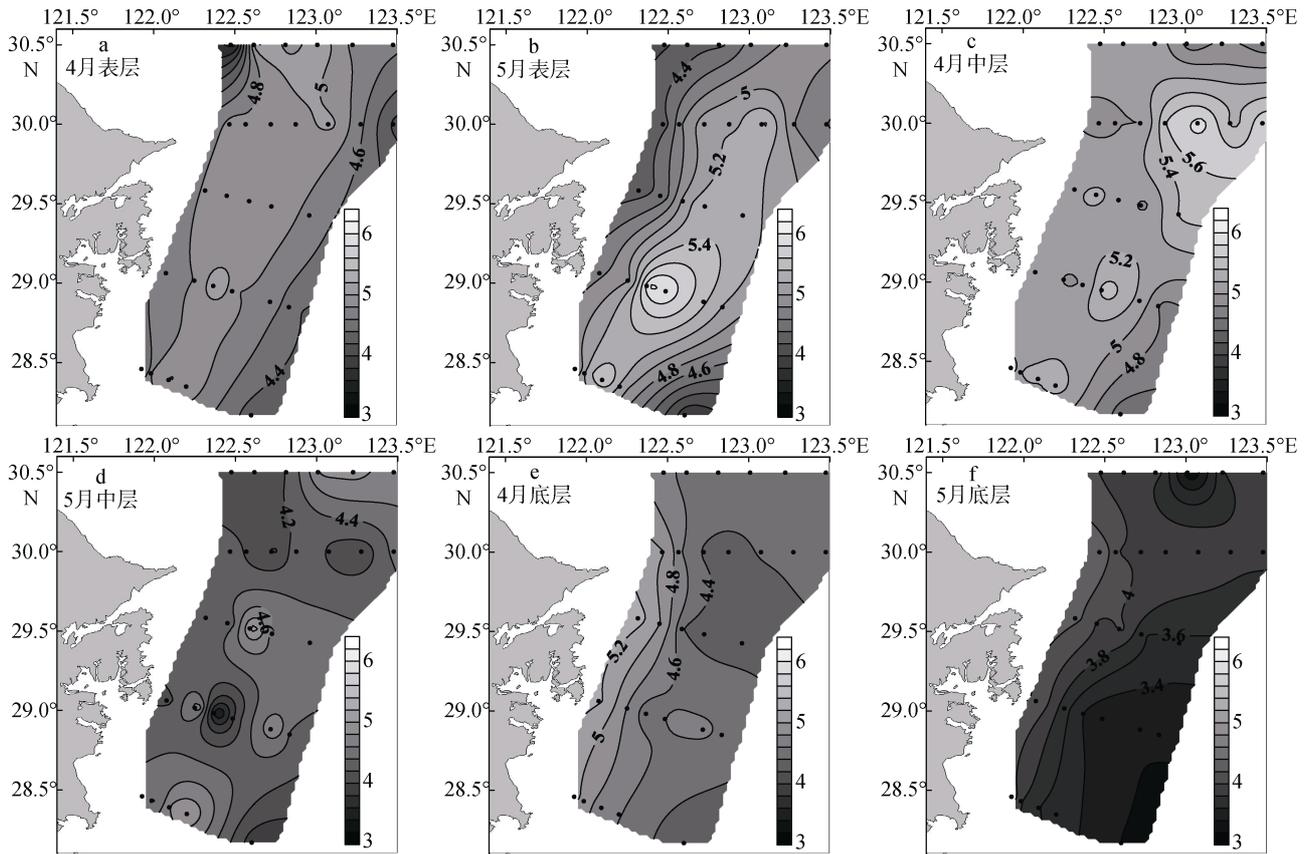


图5 研究海域水体溶解氧 DO(mg/L)在时间和空间上的变化情况(根据 CTD 资料所绘)
Fig.5 Concentration of dissolved oxygen in seawater in the study area

表层沉积物中 Chl *a* 含量的增加应主要源于硅藻藻华之后大量硅藻的沉降。

5 月份表层沉积物中 But-Fuco 的高值区与 Chl *a* 和 Fuco 的高值区几乎一致, 说明以 But-Fuco 为特征色素的微藻类群也应存在与硅藻相似的沉降现象。But-Fuco 是部分定鞭藻类、金藻类、硅鞭藻类和海金藻类的特征色素, 代表了水体中一部分重要的微型鞭毛藻类生物。从 4 月份水体中浮游植物色素的分析结果来看, But-Fuco 主要分布在近河口区, 与 5 月份表层沉积物中 But-Fuco 的高值分布区明显不同。因此, 4 月份近河口区这一部分含有 But-Fuco 的微藻类群应当不是表层沉积物中 But-Fuco 的主要来源。根据以往“藻华 973”项目的调查结果, 在硅藻藻华(3~4 月)和甲藻藻华(5~6 月)之间, 有时会观察到小规模微型鞭毛藻类藻华。但是, 由于藻细胞个体小, 难以确定其优势种类。根据 5 月份表层沉积物中色素组成特征推测, 在硅藻藻华之后, 可能出现了由含有 But-Fuco 色素的微藻形成的藻华, 其沉降区域与硅藻相似。

长江口邻近海域的大规模甲藻藻华是该海域近 10 年来最为突出的生态现象, 大量死亡甲藻对底层水体溶解氧状况的影响尤其令人关注。但是, 在本研究中, 对比 4、5 月份表层沉积物中 Perid 的含量可以看出, 其含量没有明显差异。这主要是由于 5 月份甲藻藻华正处于发展阶段, 甲藻细胞生理状态较好, 沉降较少所致。另外, 以往研究也表明, 甲藻类的死亡分解很快, 大部分有机质在水体中就可完成分解和周转, 这也应是 4、5 月份之间未在表层沉积物中观察到 Perid 含量明显变化的原因。因此, 要分析甲藻藻华与该海域底层水体缺氧区形成的关系, 还需在甲藻藻华后期进行样品的采集和分析。

3.2 藻华后期有机质的沉降及其与底层水体缺氧的关系

在近海富营养化海域, 有害藻华和底层水体缺氧是与富营养化密切相关的两大生态环境问题^[15,16]。藻华期间产生的大量有机碳^[17], 除部分通过捕食作用向高营养级生物传递外, 有相当一部分通过沉降进入底

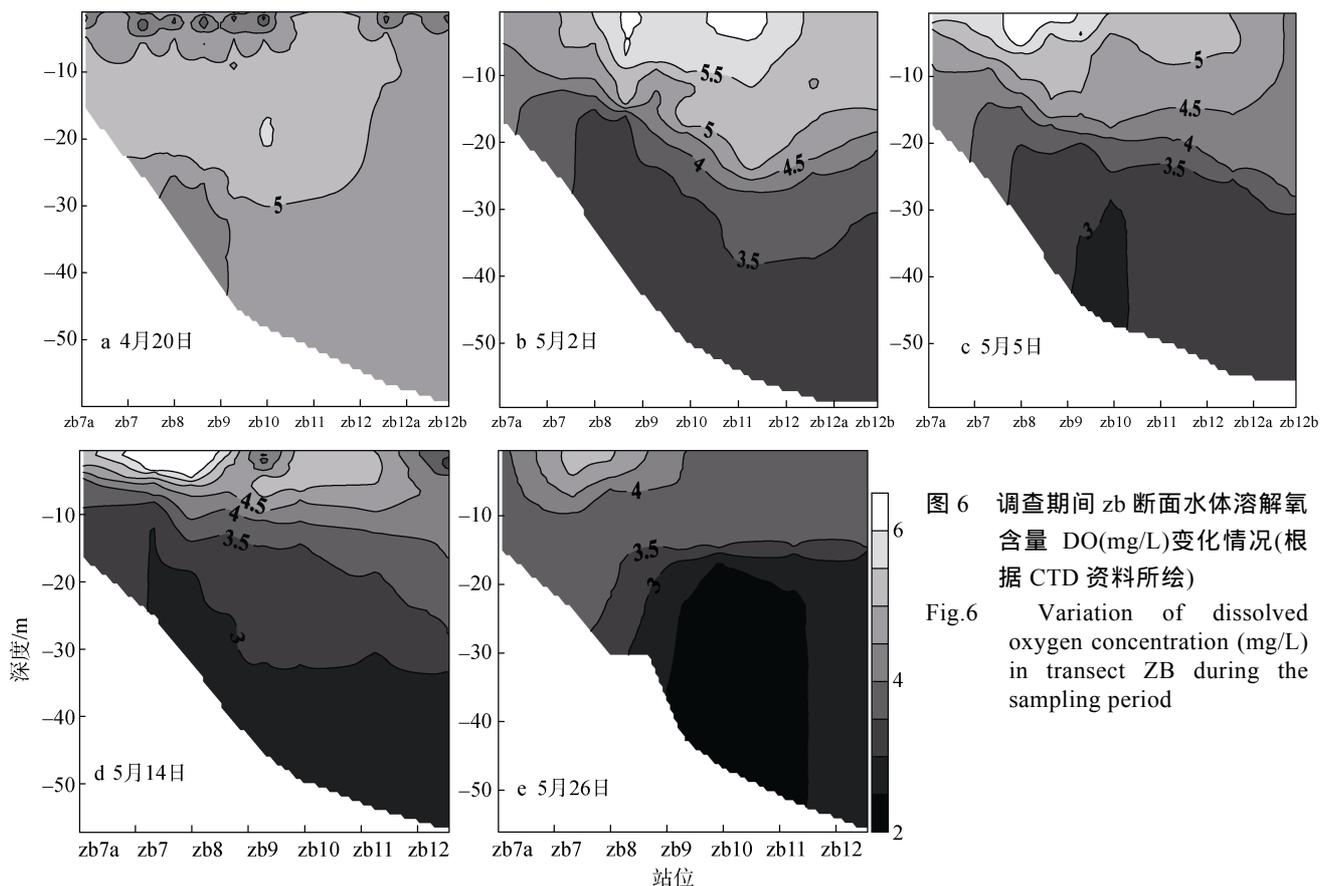


图6 调查期间 zb 断面水体溶解氧含量 DO(mg/L)变化情况(根据 CTD 资料所绘)
Fig.6 Variation of dissolved oxygen concentration (mg/L) in transect ZB during the sampling period

层水体, 导致沉积物中有机质的积累^[18]。Buessler^[19]等在研究初级生产力与有机碳颗粒(POC)沉降通量的关系时发现, 大多数水域有机碳输出通量较低或者保持稳定, 但是在高纬度海域硅藻藻华发生期间, 输出通量会出现明显增加。许多证据表明, 沉降的藻类分解将消耗底层水体溶解氧, 产生或加剧底层水体缺氧现象^[20]。意大利里雅斯特湾超过 25 年的严重缺氧, 就是由于营养盐的大量输入导致藻华发生, 对海底持续输入有机质所致; 在卡特加特海峡, 由于 20 世纪 70 年代频繁发生的有害藻华, 引起该海域 80 年代的夏季季节性缺氧现象^[21]; 对沉积物中的生物标志物研究表明, 墨西哥湾北部密西西比河口陆架区域的低氧与春季的硅藻藻华有密切关系, 根据 1999 年观测结果, 该区域低氧区达 20 000 km², 2001 年则增加到 21 700 km²^[22]。

本研究以表层沉积物中的浮游植物色素作为指示物, 分析了春季硅藻藻华发生前后表层沉积物中色素含量与分布状况的变化, 发现在硅藻藻华之后, 表层沉积物中色素含量显著增加。对比同一航次调查中 CTD 记录的溶解氧资料(图 5, 图 6)得出, 沉降有机质的高值区与底层溶解氧低值区基本吻合。同

时, 两者还存在时间上的关联, 随着 4~5 月表层沉积物中色素含量的上升, 水体溶解氧水平也有明显下降。这说明硅藻藻华后期有机质的沉降与底层缺氧区的分布之间可能存在内在联系, 沉降的有机质分解会进一步促进缺氧区的形成。

长江口邻近海域缺氧区形成机制比较复杂, 与该海域海底地形特点、黑潮次表层水和台湾暖流入侵、春夏季水体层化及生物生产过程有关。在以往研究中, 有证据表明藻类的沉降是加剧该海域缺氧状况的原因之一^[23, 24]。在本研究区域之外, 朱建荣^[25]等曾报道, 长江口以东海域(123°E, 32°N 附近)表层 Chl *a* 含量最大值处对应着底层水体的一个溶解氧极小值区域(DO<2.5 mg/L)。2003 年 6 月中旬, 长江口现场调查数据也显示, 表层水体中 Chl *a* 极大值的分布区域, 底层水体溶解氧水平低至 2 mg/L~3 mg/L^[26]。结合以上研究结果可以认为, 长江口南侧赤潮区春季硅藻藻华期间沉降的有机质对该海域夏季缺氧区的形成应具有一定作用, 但其过程和机制还需进一步研究。

4 结论

本研究针对长江口以南赤潮区, 应用高效液相

色谱法,对 2011 年春季硅藻藻华前后表层沉积物中色素组成、含量和分布的变动状况进行了分析:

(1) 从赤潮区表层沉积物中检测到 16 种色素,其中 Chl *a*、Perid、But-Fuco、Fuco、Allo、Zea 和 Lut 等 7 种色素是主要的色素组分。

(2) 从 4 月份到 5 月份,表层沉积物中 Chl *a*、Fuco 和 But-fuco 的含量显著增加;而且 3 种色素的高值区基本一致,均位于研究海域 50 m 等深线外侧。对比 4 月份硅藻藻华期间水体中色素的组成和分布状况可以看出,5 月份表层沉积物中 Chl *a* 含量的增加应主要来源于硅藻细胞的沉降。表层沉积物中 But-fuco 含量的增加表明硅藻藻华后可能出现了定鞭藻类、金藻类、海金藻类或硅鞭藻类的藻华,而且表现出与硅藻相似的沉降现象。

(3) 5 月份表层沉积物中 Chl *a*、Fuco 和 But-fuco 的高值分布区与该海域溶解氧低值区基本吻合,而且随着色素含量的增加,底层水体溶解氧水平也有降低的趋势。可以认为,长江口南侧赤潮区春季硅藻藻华期间沉降的有机质对于该海域夏季缺氧区的形成具有一定作用,但其过程和机制还需进一步研究。

致谢:本研究在采样过程中,得到了航次首席吕颂辉教授、陆斗定研究员和“润江 I 号”全体工作人员的帮助,在表层沉积物分析过程中得到了王巧宁的帮助,在图片编辑过程中得到了谭雪静老师细心专业地指导,在此一并表示感谢!

参考文献:

- [1] 周名江,于仁成. 有害赤潮的形成机制、危害效应与防治对策[J]. 自然杂志, 2007, 72-77.
- [2] 范丽,程金平,郭光勇,等. 我国东海海域赤潮发生年际变化趋势及其影响因素分析[J]. 上海环境科学, 2009, 28(1): 15-23.
- [3] Zhu Z Y, Ning W M, Liu S M, et al. Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: A study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2009, 84: 393-401.
- [4] Tang D L, Di B P, Wei G, et al. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea[J]. Hydrobiologia, 2006, 568: 245-253.
- [5] 周名江,颜天,邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探[J]. 应用生态学报, 2003: 1031-1038.
- [6] 周名江,朱明远. 我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及与预测防治研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 673-679.
- [7] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. Science, 2008, 321: 926-929.
- [8] 李道季,张经,黄大吉,等. 长江口外氧的亏损[J]. 中国科学 D 辑, 2002, 32(8): 686-694.
- [9] Lionard M, Muylaert K, Tackx M, et al. Evaluation of the performance of HPLC-CHEMTAX analysis for determining phytoplankton biomass and composition in a turbid estuary (Schelde, Belgium)[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, 76: 809-817.
- [10] Volkman J K, Barrett S M, Blackburn S I, et al. Microalgal biomarkers: A review of recent research developments[J]. Organic Geochemistry, 1998, 29: 1163-1179.
- [11] Tani Y, Matsumoto G I, Soma M, et al. Photosynthetic pigments in sediment core HDP-04 from Lake Hovsgol, Mongolia, and their implication for changes in algal productivity and lake environment for the last 1 Ma[J]. Quaternary International, 2009, 205: 74-83.
- [12] Reuss N. Sediment pigments as biomarkers of environmental change [D]. Copenhagen: University of Copenhagen, 2005.
- [13] Zapata M, Rodriguez F, Garrido J L. Separation of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton: a new HPLC method using a reversed phase C-8 column and pyridine-containing mobile phases[J]. Marine Ecology Progress Series, 2000, 195: 29-45.
- [14] 朱卓毅. 长江口及邻近海域低氧现象的探讨[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [15] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems[J]. Science, 2008, 321: 926-929.
- [16] Heisler J, Glibert P, Burkholder J M, et al. Eutrophication and harmful algal blooms: A scientific consensus[J]. Harmful Algae, 2008, 8: 3-13.
- [17] Goldman J C. Potential role of large oceanic diatoms in new primary production[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1993, 40: 159-168.
- [18] Ramanampisoa L, Disnar J R. Primary control of

- paleoproduction on organic matter preservation and accumulation in the Kimmeridge rocks of Yorkshire (UK)[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 21: 1153-1167.
- [19] Buesseler K O. The decoupling of production and particulate export in the surface ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12: 297-310.
- [20] Hagy J D, Boynton W R, Keefe C W, et al. Hypoxia in Chesapeake Bay, 1950-2001: Long-term change in relation to nutrient loading and river flow[J]. *Estuaries*, 2004, 27: 634-658.
- [21] Diaz R J. Overview of hypoxia around the world[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30: 275-281.
- [22] Rabouille C, Conley D, Dai M, et al. Comparison of hypoxia among four river-dominated ocean margins: The Changjiang (Yangtze), Mississippi, Pearl, and Rhone rivers[J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 1527-1537.
- [23] Chen C C, Gong G C, Shiah F K. Hypoxia in the East China Sea: One of the largest coastal low-oxygen areas in the world[J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 64: 399-408.
- [24] Zhu Z Y, Zhang J, Wu Y, et al. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Oxygen depletion and organic matter decomposition[J]. *Marine Chemistry*, 2011, 125: 108-116.
- [25] 朱建荣. 长江口外海区叶绿素 a 浓度分布及其动力成因分析[J]. *中国科学 D 辑*, 2004, 34: 757-762.
- [26] 朱建荣, 王金辉, 沈焕庭, 等. 2003 年 6 月中下旬长江口外海区冲淡水和赤潮的观测及分析[J]. *科学通报*, 2005, 50: 59-65.

Pigment composition, content and distribution in surface sediment of the red-tide zone south to the Changjiang River estuary in spring

KANG Zhen-jun^{1, 2, 3}, YU Ren-cheng¹, KONG Fan-zhou¹, GAO Yan^{1, 2},
WANG Yun-feng¹, GUO Wei^{1, 2}, CHEN Jian-hua^{1, 2}, ZHOU Ming-jiang¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Beibu Gulf Marine Biodiversity Conservation, Qinzhou University, Qinzhou 535099, China)

Received: Apr., 23, 2013

Key words: Algal bloom; sediment; pigment; hypoxia

Abstract: To reveal the relationship between microalgae deposition and bottom-water hypoxia in the red-tide zone of the Changjiang River estuary and the adjacent coastal waters, surface sediment samples were collected in spring of 2011, and phytoplankton pigments in surface sediment were analyzed with high performance liquid chromatography (HPLC). It is found that content of Chlorophyll *a* (Chl *a*), fucoxanthin (Fuco) and 19'-butanoyloxyfucoxanthin (But-Fuco) in surface sediment increased significantly after the bloom of diatoms. The region with high concentration of Chl *a*, Fuco and But-Fuco in surface sediment distributed mainly in the southeastern part of the investigation area, similar to the area with low level of dissolved oxygen in seawater at the bottom. It is concluded that deposited algae after the diatom bloom is important for the formation of summer hypoxic zone in this region. However, detailed processes and mechanisms still need further studies in the future.

(本文编辑: 谭雪静)