

冬季黄东海溶解有机碳的分布特征^{*}

商荣宁¹, 王作华², 张传松¹, 石晓勇^{1*}

(1. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛, 266100; 2. 同济大学 化学系, 上海 200092)

摘要:于 2007-01-02 对黄东海溶解有机碳(DOC)进行采样并用高温催化氧化法进行测定,分析了其质量浓度和平面分布特征。结果表明,DOC 的质量浓度范围为 0.440~2.491 mg/L,平均质量浓度为(0.967±0.284) mg/L; DOC 的平面分布呈现近岸高外海低的特征,近岸高值主要集中在长江口以南海域,主要受陆源输入的影响;外海 DOC 高值区主要集中在 28°N 以南,126°E 以西的海域,来源于浮游植物的初级生产;东海东南部为 DOC 的低值区,主要受贫营养的黑潮水控制。垂直方向上,DOC 由表到底变化较小,表层和 10 m 层受生物活动影响质量浓度相对较高,底层高值主要来自于沉积物再悬浮的作用。

关键词:DOC; 分布特征; 黄东海

中图分类号: P734

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2012)01-0094-08

占全球面积 71% 的海洋,是地球上最大的一个碳库,是大气 CO₂ 的汇,对于调节大气中含碳量起着重要作用。溶解有机碳(DOC)是海洋中最大的碳贮库,约占海洋总有机碳的 90%^[1],是海洋中有机碳的主要存在形式,在海洋碳循环和海洋生态系统中起着重要的作用。DOC 是表征水体中有机物含量和生物活动水平的重要参数,对于化学海洋学和生物海洋学的研究具有重要意义;对 DOC 的研究可对海洋生产力、海洋化学的研究提供基本的参数;同时其对于总有机碳的通量、分布和循环研究也有重要意义;此外,海水中的 DOC 还是一种关于污染和生物活动水平的综合指标^[2],判断海洋污染程度等。因此海水中溶解有机碳的研究是生物地球化学的重要内容,在全球海洋通量研究(JGOFS)中,对于了解海洋对大气 CO₂ 的吸收、转移和垂直迁移碳的能力具有重要的作用^[3]。因此,研究 DOC 对研究整个海洋有机物具有重要意义。

大陆架在全球海洋表面积中所占的比例不足 20%,但它在碳、氮的海洋生物地球化学循环中的作用与在深海中的作用同样重要^[4]。黄海是一个半封闭陆架浅海,水更新周期长,至少需要 5 a^[5],通常把山东半岛东端成山角与朝鲜半岛长山串连线,作为北黄海和南黄海的分界线^[6],南黄海相对于北黄海而言生态环境有其特殊性,北上的黄海暖流,南下的沿岸流,季节性的黄海冷水团使得南黄海的生态系统复杂多样。东海拥有世界上最为广阔的大陆架,海域宽阔,受地理和水文环境影响生态环境十分复杂,因此 DOC 的分布特征及其影响因子也不尽相同。

近年来,有关黄海、东海海域溶解有机碳来源、分布特征和影响因子等方面的研究也已经有了一些报道^[1,3,7-12],但仍缺乏系统的空间分布特征的研究,对不同海区 and 同一海区不同位置的研究还不够详尽。本研究就 2007 年对黄海和东海海域的调查资料,概述了 DOC 的平面分布特征。

1 调查区域与分析方法

2007-01-22—02-13 用“东方红 2 号”考察船对东中国海海域进行了现场调查,站位布设如图 1 所示。调

* 收稿日期:2010-10-19

资助项目:国家重点基础研究发展计划项目——典型水域生源要素循环及浮游植物多样性对海洋物理环境演变的影响(2005CB422305);
国家海洋局公益性项目——入海污染物总量控制和减排技术集成与示范(200805065)

作者简介:商荣宁(1985-),女,山东滨州人,硕士,主要从事海洋生物地球化学与海水分析化学方面研究. E-mail: shangrongning8516@163.com

* 通讯作者, E-mail: shixy@ouc.edu.cn

(张 骞 编辑)

查范围大约从 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$, 覆盖了黄东海的大部分陆架区。现场调查由北向南共设置 10 条断面, 共计 54 个站位; 采样深度从几米到千余米不等, 采水层次为 0, 10, 30, 50, 75 m 和底层。

调查过程中每个站位海水的深度、温度、和盐度均使用 SeaBird 911-Plus CTD 现场测量, 同时使用电控 12 联装 Niskin 采水器及时采集各层次水样, 采得的水样立即用孔径为 $0.7\ \mu\text{m}$ 的 Whatman GF/F 滤膜 (预先于 $450\ ^{\circ}\text{C}$ 灼烧 6 h) 在全玻过滤器上抽滤。所得滤液转移至玻璃瓶 ($450\ ^{\circ}\text{C}$ 灼烧 6 h) 中, 并加入饱和 HgCl_2 溶液, 冷冻保存, 至陆地实验室测定。

实验室分析时, 滤液充分解冻并经室温下平衡后在岛津总有机碳分析仪 TOC-VCPH 上以邻苯二甲酸氢钾为标准溶液测定样品中的溶解有机碳, 其测定相对标准偏差小于 2%, 在空白被准确测定的条件下, 这种方法的精度为 $0.005\ \text{mg/L}$ [13]。本研究中所需的其它相关参数的测定均依据《海洋调查规范》或相关国际通用方法进行 [13-15]。

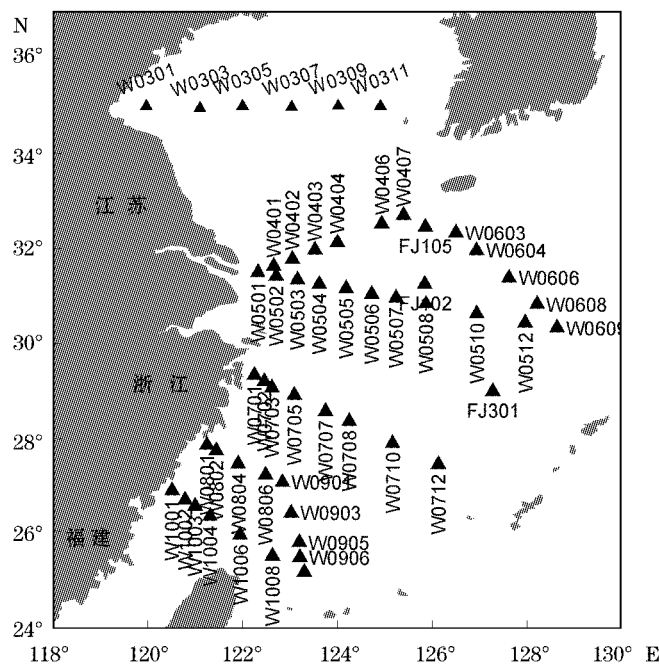


图 1 调查站位分布图

Fig. 1 Location of sampling stations

2 结果与讨论

2.1 DOC 质量浓度特征

如表 1 所示, 整个调查海区 DOC 的质量浓度范围 (以 C 计, 下同) 为 $0.444\sim 2.491\ \text{mg/L}$, 平均质量浓度为 $(0.967\pm 0.284)\ \text{mg/L}$ (表 1)。整体而言, 垂直方向上, 研究海域冬季受水体垂直混合均匀的影响, DOC 的质量浓度平均值随深度变化不大, 各层次之间平均值的最大变幅仅为 $0.154\ \text{mg/L}$ 。具体来说, 表层 DOC 的质量浓度变化范围最大为 $0.444\sim 2.491\ \text{mg/L}$, 平均值除了比 10 m 层略低外, 均高于其他各层; 10 m 层 DOC 的质量浓度平均值最高, 为 $(1.066\pm 0.266)\ \text{mg/L}$; 30 m 层和 50 m 层 DOC 的平均质量浓度基本相当, 且与整体平均值接近; 底层 DOC 质量浓度有所回升, 其平均值为 $(0.986\pm 0.299)\ \text{mg/L}$ 。总之, 调查海域 DOC 质量浓度的垂向分布特征基本表现为受生物活动影响较为强烈的表层和 10 m 层以及受沉积物再悬浮作用影响较为强烈的底层数值相对较高。

表 2 列出了中国近海及大洋水 DOC 质量浓度数据。与文献数据相比,虽然本次所测得的 DOC 质量浓度与以往在黄东海测定的值有所差异,但仍在同一数量级水平上(表 2)。研究海域 DOC 的质量浓度值仅低于渤海(2.01 mg/L)、河口区(2.18 mg/L)及南黄海(2.02 mg/L),但与南海及大洋水(0.50 mg/L)相比较,整个黄东海 DOC 的质量浓度均高于这两个海域,这主要归因于充足的陆源输入和旺盛的生物活动。河口主要受到陆源碳输入的影响,而渤海为中国内海,黄海是半封闭陆架浅海,水更新周期长,且接受大量的陆地径流输入及人类生产活动产生的大量有机物,可直接或间接转化为 DOC,使得 DOC 的质量浓度整体较高。

表 1 调查海区内 DOC 的质量浓度(mg·L⁻¹)

Table 1 The contents of DOC in the survey area(mg·L⁻¹)

参 数	DOC	
	质量浓度	平均值±S. D.
表 层	0.444~2.491	1.017±0.320
10m 层	0.621~1.763	1.066±0.266
30m 层	0.514~1.865	0.950±0.312
50m 层	0.623~1.650	0.956±0.283
75m 层	0.623~1.373	0.912±0.279
底 层	0.440~1.763	0.986±0.299
调查海域	0.440~2.491	0.967±0.284

表 2 中国近海及大洋水 DOC(mg·L⁻¹) 数据对比

Table 2 Comparison of DOC data in coastal area of China and open sea (mg·L⁻¹)

调查区域	DOC		来 源
	质量浓度	平均值	
黄东海(冬季)	0.440~2.491	0.967	本 文
南黄海(夏季)	1.050~4.080	—	文献[9]
南黄海(秋末冬初)	1.620~2.420	2.020	文献[11]
东 海	0.780~0.900	—	文献[10]
东海南部(春秋季节)	0.960~1.430	—	文献[1]
琉球群岛邻近海域(夏季)	0.470~1.960	—	文献[3]
南 海	0.840~1.020	—	文献[16]
南海南沙海域	0.900~2.760	—	文献[8]
渤海(春季)	1.330~3.030	2.010	文献[17]
黄河口	1.970~3.510	—	文献[18]
长江口	—	2.180	文献[8]
南大洋(49°~66°S,62°E)	0.620~0.760	0.500	文献[19]

注:表中“—”代表未测量

2.2 DOC 平面分布特征

图 2 为调查海区 DOC 各层的平面分布图。从图中可以看出,整体而言,冬季调查海域各层次 DOC 的分布均表现出近岸高、外海低的特征,DOC 的高值区域主要出现在东海南部 28°N 以南,126°E 以西海域;低值区则主要出现在东海东南部海区。整个海区 DOC 与叶绿素之间呈现显著正相关关系($R=0.29, N=248, P<0.0001$),由此表明调查时期黄东海 DOC 的分布受到浮游植物现场生产的影响。

具体来说,表层 DOC 的质量浓度为 0.444~2.491 mg/L,平均质量浓度为(1.017±0.320) mg/L。图

2a 为 2007 年冬季表层 DOC 的等值线图,整体上看,DOC 的分布呈现由近岸向外海逐渐降低的趋势。南黄海近岸 DOC 的质量浓度较高,中部海区明显减小,差值可达 0.636 mg/L。东海 DOC 的分布趋势与黄海相似,也呈现明显的近岸高、外海低的特征,其中外海区在 28°N 以南,126°E 以西出现一等值线十分密集的 DOC 的高值区,且 DOC 质量浓度以 27.1°N,122.8°E 为中心呈辐射状向四周递减,中心质量浓度可高达 2.491 mg/L(W0901 站);低值区则主要集中在东海东南部 28°~32°N,124°~127°E 的海域,等值线极为稀疏,且 DOC 的质量浓度均小于 0.80 mg/L,最低值出现在台湾东北部的 W1008 站(25.5°N,122.6°E)。与叶绿素表层分布图(图 2e)相比较而言,长江口南部近岸虽然营养盐含量很高(以 DIN 为例),但是由于浊度较大(>190),光照受到限制,叶绿素在近岸并未出现高值,可见叶绿素不是近岸 DOC 出现高值的主要原因。而表层近岸盐度较低(图 3a)也可证明,近岸 DOC 高值主要来自于沿岸流和长江冲淡水等的陆源输入。对应于东海南部 DOC 的高值区,叶绿素在此处也出现高值区域(中心质量浓度为 2.562 $\mu\text{g/L}$),这是因为该区域温度比较高($t > 17\text{ }^\circ\text{C}$),浊度较小(<5),且冬季长江冲淡水南下,给此处带来相对充足的营养盐(N/P>25),这些条件均适宜浮游植物的生长,其现场生产释放的溶解有机碳成为该海域 DOC 高值的主要原因,也可由 DOC 和叶绿素之间呈现弱的正相关得到证明($R=0.15, N=17$)。对于东海东南部 DOC 的低值区,叶绿素的低值区域恰好与其相吻合,这主要是由于受贫营养的黑潮表层水的控制而导致。

10 m 层(图 2b)DOC 的质量浓度为 0.621~1.763 mg/L,平均质量浓度为(1.066±0.266) mg/L,与表层相比,DOC 质量浓度差别不大,且其平面分布状况也与表层相似,仅在细节方面存在一定的差异,表现为:南黄海 DOC 质量浓度略高于表层;东海近岸 DOC 质量浓度有所增加,且 DOC 最大值北移至 W0701 站(29.3°N,122.2°E),为 1.763 mg/L;东海南部高值区内 DOC 中心质量浓度明显低于表层,等值线较为稀疏;DOC 低值区范围比表层略小,且 0.8 mg/L 等值线南移。与同层次叶绿素 10 m 层分布图(图 2f)相比较而言,叶绿素在东海南部近岸浓度很低,而盐度在近岸也较低(图 3b),由此可知近岸 DOC 质量浓度较高主要与陆源输入有关;叶绿素的高值区(中心质量浓度为 1.828 $\mu\text{g/L}$)仍与 DOC 的高值区相对应,表明浮游植物的初级生产是控制该海域 DOC 分布的主要因素,也可由该区域 DOC 与叶绿素之间存在较好的正相关得到证明($R=0.567, N=16$)。

30 m 层(图 2c)DOC 的质量浓度为 0.514~1.865 mg/L,平均质量浓度为(0.950±0.312) mg/L,其平面分布特征与同海域表层和 10 m 层相近,东海南部 28°N 以南,126°E 以西的海域仍为 DOC 的高值区,仅在细节方面有所差异,如与表层和 10 m 层相比,DOC 质量浓度有所减小;东海南部 DOC 高值中心略向南偏移,且中心质量浓度低于表层;东海东南部低值区范围明显扩大。与同层次叶绿素的分布图(图 2g)相比较而言,DOC 的高值区域仍与叶绿素的高值区域(中心质量浓度为 1.464 $\mu\text{g/L}$)恰好相吻合,且两者之间有较好的正相关($R=0.519, N=14$),这表明浮游植物的初级生产对 DOC 有一定的贡献。

50 m 层(图略)DOC 的质量浓度为 0.623~1.650 mg/L,平均质量浓度为(0.956±0.283) mg/L,与 30 m 层接近,DOC 的分布趋势与 30 m 以浅海域相似,但南黄海东部高值状况明显,推测可能与朝鲜近岸沿岸流有关;东海东南部 DOC 低值区与叶绿素低值区相吻合,可见贫营养的黑潮水的控制更加明显;75 m 层(图略)DOC 的质量浓度为 0.623~1.373 mg/L,平均质量浓度为(0.912±0.279) mg/L,为各层中最低,DOC 在东海东南部仍存在高值区,叶绿素同样也存在高值,证明 DOC 高值仍来源于该海区浮游植物的初级生产。

底层(图 2d)DOC 的质量浓度为 0.440~1.763 mg/L,平均质量浓度为(0.986±0.299) mg/L,DOC 的分布特征与表层和 10 m 层相近,表现为明显的由近岸向外海降低的趋势,DOC 等值线几乎与海岸线平行;有所不同的是,30 m 以浅海域东海东南部 DOC 的高值区消失。近岸水深较浅处主要受控于黄海沿岸流及长江冲淡水的影响而具有较高含量,质量浓度均在 1.00 mg/L 以上;东海南部向外海方向随着深度的增大,受高盐贫营养的黑潮水的控制,DOC 质量浓度普遍较低(<0.8 mg/L),呈现大洋海水的分布特征^[20]。该层 DOC 与叶绿素的平面分布趋势相近,但两者之间的相关性较弱($R=0.284, N=41$),表明叶绿素已不是控制 DOC 分布的主要因素,但是在一定程度上仍影响着 DOC 的分布。

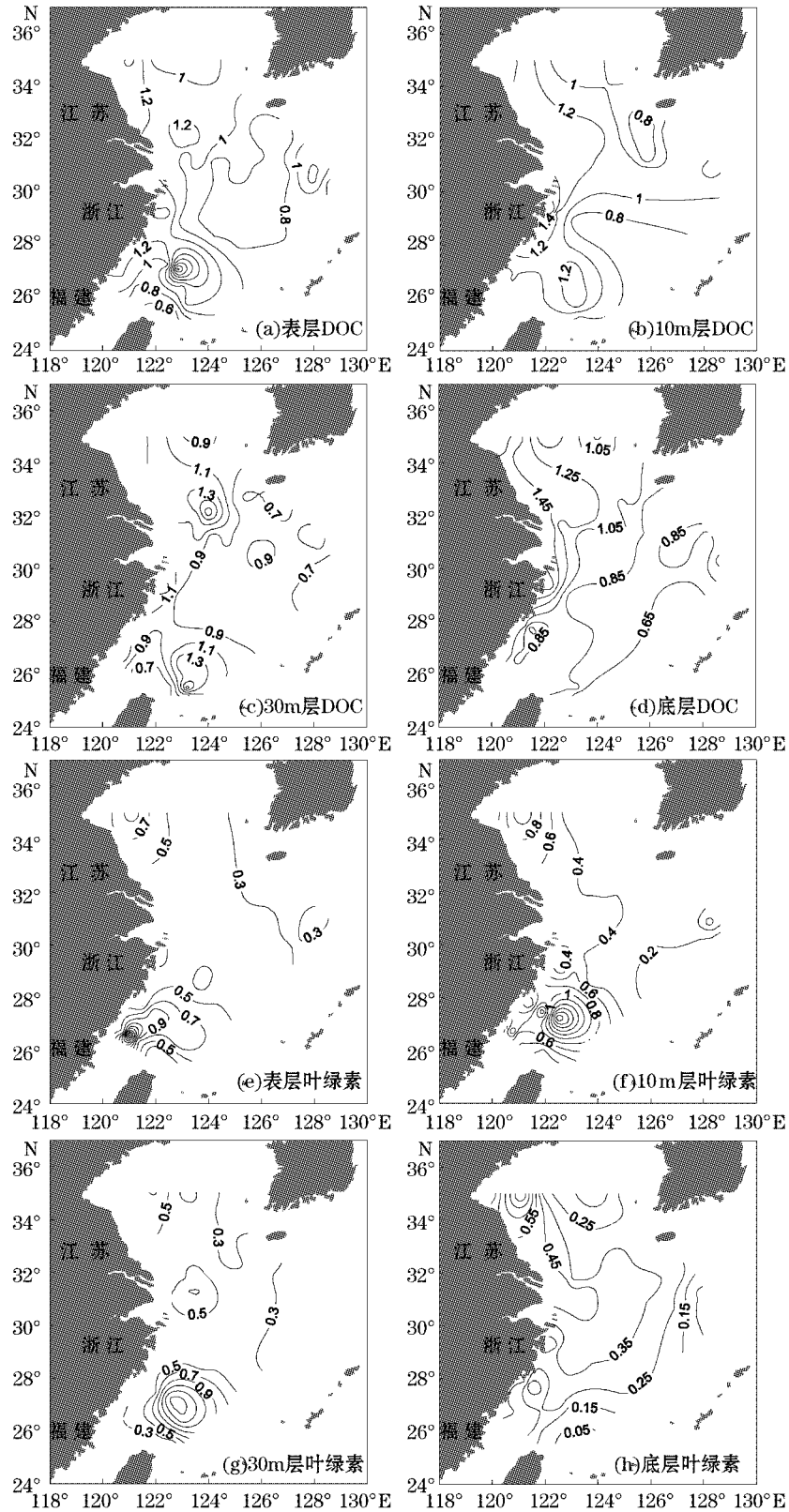


图2 表层、10 m层、30 m层和底层 DOC($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和叶绿素($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)质量浓度的平面分布

Fig. 2 Horizontal distribution of DOC(mg/L) and Chlorophyll($\mu\text{g}/\text{L}$) in the surface, 10 m, 30 m and bottom layer

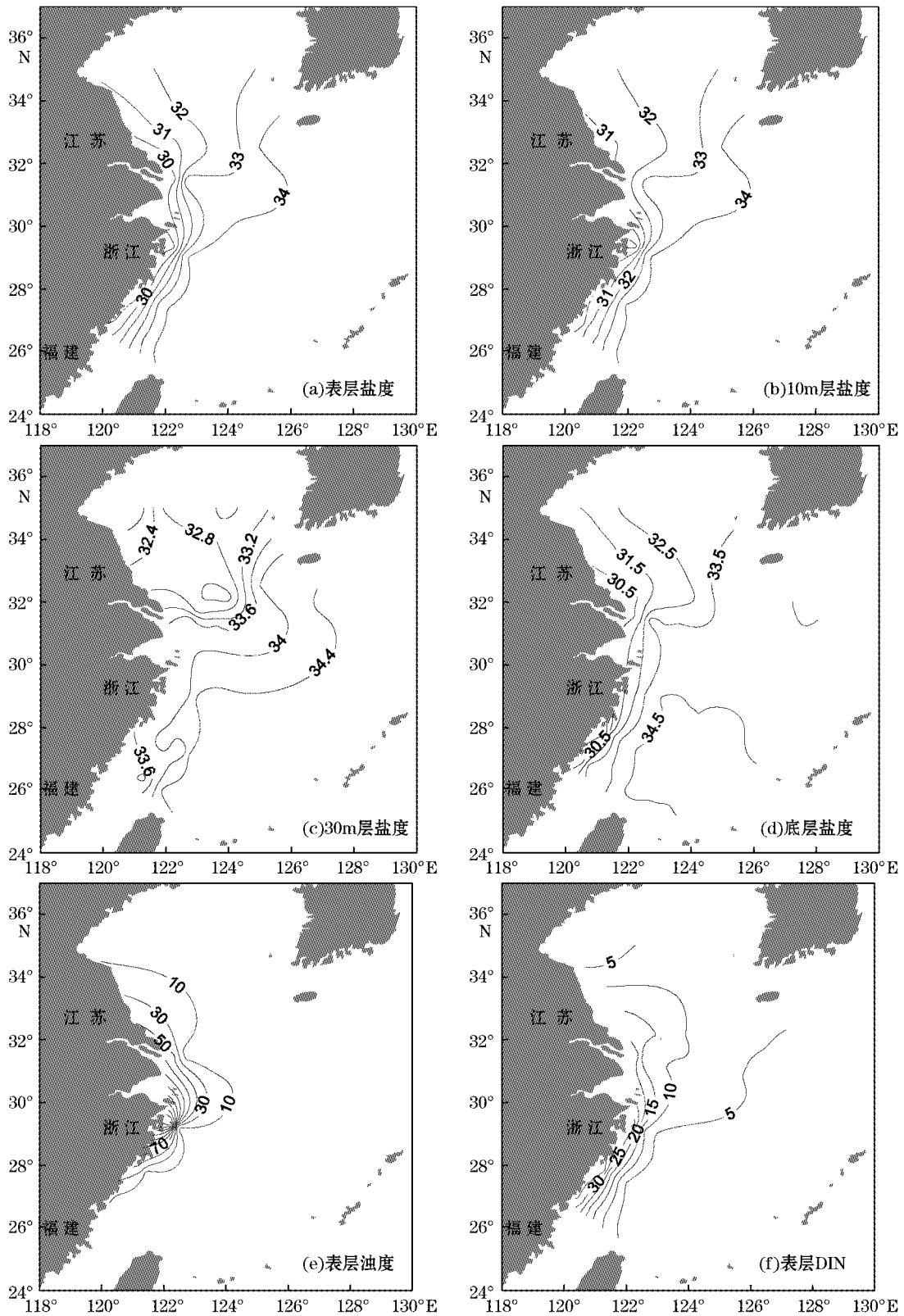


图3 各层盐度和表层浊度及DIN($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)的平面分布

Fig. 3 Horizontal distribution of salinity in all layers and Turbidity and DIN($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) in the surface layer

3 结 论

1)2007 年冬季黄东海海域 DOC 质量浓度的变化范围为 0.440~2.491 mg/L,平均质量浓度为(0.967±0.284) mg/L。垂直方向上,DOC 平均质量浓度随深度增加变化不大,表层、10 m 层和底层数值相对较高,表层、10 m 层高值主要受生物活动的影响,而底层高值主要受沉积物再悬浮的影响。

2)DOC 的平面分布表现为由近岸向远海降低的特征,近岸 DOC 高值区主要集中在长江口以南海域,主要来自于陆源输入;外海 DOC 高值区主要集中在出现在生物活动较为活跃的 28°N 以南,126°E 以西一带,主要来源于浮游植物的初级生产;东海东南部为 DOC 的低值区,主要受贫营养的黑潮水的控制。

致谢:中国海洋大学王江涛老师在样品测定和分析过程中提供的帮助。

参考文献(References):

- [1] HUNG J J, LIN P L, LIU K K. Dissolved and particulate organic carbon in the southern East China[J]. *Continental Shelf Research*, 2000,20:545-569.
- [2] COLLINS K J, LE P J, WILLIAMS B. An automated photochemical method for the determination of dissolved organic carbon in sea and estuarine waters[J]. *Marine Chemistry*,1977,5(2):123-141.
- [3] WANG J T, TAN L J. Preliminary studies of DOC in seawater near the Ryukyu Island[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*,1999,29(Suppl. 1):124-127. 王江涛,谭丽菊. 琉球群岛邻近海域溶解有机碳的初步研究[J]. *青岛海洋大学学报*,1999,29(Suppl. 1):124-127.
- [4] WALSH J J. Importance of continental margins in the marine biogeochemical cycling of carbon and nitrogen[J]. *Nature*,1991,350:53-55.
- [5] PARK Y C, CHOI J K. Oceanographical consideration on waste disposal in the marine environment [J]. *Journal of the Korean Society of Oceanography*,1993,28:142-152.
- [6] SONG J M. Chemistry of sediment-seawater interface in Chinese offshore areas[M]. Beijing: Ocean Press,1997:1-3. 宋金明. 中国近海沉积物—海水界面化学[M]. 北京:海洋出版社,1997:1-3.
- [7] XU L, HONG H S. Chemical Speciation and vertical flux of organic carbon in Western Xiamen Sea[J]. *Journal of Xiamen University: Natural Science*,1994,33(Suppl.):1-6. 徐立,洪华生. 厦门西海域有机碳存在形态分布和垂直通量研究[J]. *厦门大学学报:自然科学版*,1994,33(增刊):1-6.
- [8] WANG J T. The biogeochemical analysis of dissolved organic carbon in the East and South China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of Qingdao,1994. 王江涛. 中国东海和南海溶解有机碳的生物地球化学研究[D]. 青岛:青岛海洋大学,1994.
- [9] LI L, ZHANG Z B, LIU L S, et al. The distribution of colloidal and dissolved organic carbon in the Southern Yellow Sea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*,1999,29(2):321-324. 李丽,张正斌,刘莲生,等. 南黄海胶体有机碳和溶解有机碳的分布[J]. *青岛海洋大学学报*,1999,29(2):321-324.
- [10] OGAWA H, USUI T, KOIKE I. Distribution of dissolved organic carbon in the East China Sea[J]. *Deep-Sea Research II*,2003,50:353-366.
- [11] HE Z P, SONG J M, ZHANG N X. Analysis of biogeochemical characteristics of Dissolved Organic Carbon in the Southern Yellow Sea [J]. *Advances in Marine Science*,2006,24(4):478-488. 贺志鹏,宋金明,张乃星. 南黄海溶解有机碳的生物地球化学特征分析[J]. *海洋科学进展*,2006,24(4):477-488.
- [12] XIE L P, WEI X H, WANG Z L, et al. Distribution of total organic carbon and its influence factors in the Southern Yellow Sea in summer [J]. *Advances in Marine Science*,2008,26(4):497-505. 谢琳萍,魏修华,王宗灵,等. 夏季南黄海总有机碳的分布特征及其影响因素[J]. *海洋科学进展*,2008,26(4):497-505.
- [13] GRASSHOFF K, KREMLING K, Ehrhardt M. Methods of seawater analysis[M]. Chichester: John Wiley & Sons,1999:201-223.
- [14] PARSON T R, MAITA Y, LALLI C M. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis[M]. New York: Pergamon Press, 1984:173.
- [15] GB17378. 7—1998 The specification for marine monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998. GB17378. 7—1998 海洋监测规范[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [16] HUNG J J, WANG S M, CHEN Y L. Biogeochemical controls on distributions and fluxes of dissolved and particulate organic carbon in

- the Northern South China Sea[J]. Deep-Sea Research II, 2007, 54: 1486-1503.
- [17] BAI J, LI K R, LI Z Y, et al. Relationship between the environmental factors and distribution of bacterioplankton in the Bohai Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao: Natural Science, 2003, 33(2): 841-846. 白洁, 李岿然, 李正炎, 等. 渤海春季浮游细菌分布与生态环境因子的关系[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2003, 33(2): 841-846.
- [18] ZHANG X S. Temporal and Spatial distribution of organic carbon and its influence aspects in Huanghe Estuary[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004. 张向上. 黄河口有机碳的时空分布及影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [19] WIEBINGA C J, DE BAAR H J W. Determination of the distribution of dissolved organic carbon in the Indian sector of the Southern Ocean[J]. Marine Chemistry, 1998, 61: 185-201.
- [20] RILEY J P, SKIRROW G. Chemical Oceanography[M]. New York: 2nd Edition, Academic Press, 1975, 2: 365-383.

Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Yellow Sea and East China Sea in Winter

SHANG Rong-ning¹, WANG Zuo-hua², ZHANG Chuan-song¹, SHI Xiao-yong¹

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Department of Chemistry, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Dissolved Organic Carbon (DOC) was collected during January and February in 2007 in the Yellow Sea and East China Sea. DOC concentration was determined by high temperature catalytic oxidation (HTCO) method and the horizontal distribution of DOC was studied. The results showed that the concentration of DOC ranged from 0.440 to 2.491 mg/L and the average concentration was (0.967 ± 0.284) mg/L. The horizontal distribution showed that the highest DOC content was in the coastal area and it tended to decrease in the offshore region. The high DOC value was in the southern part of Yangtze River Estuary which was mainly affected by the terrestrial inputs. The high values of DOC in open sea were mainly found in an area between southern of 28°N and western of 126°E, and were mainly from the primary production of phytoplankton. The lowest value was mainly in the southeast part of East China Sea because of the influence of oligotrophic Kuroshio. In vertical distribution, the change of DOC was smaller from surface to bottom, its concentration in both surface and 10m layers were relatively high because of the effect of biological activity, the high value of bottom layer was mainly from the sediment resuspension.

Key words: DOC; distribution characteristics; Yellow Sea and East China Sea

Received: October 19, 2010