

黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究

郭兴森¹, 吕迎春^{2*}, 孙志高², 王传远², 赵全升¹

(1. 青岛大学环境科学与工程系, 青岛 266000; 2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003)

摘要: 河口是全球碳循环的重要区域. 为了研究黄河口表层水中溶解无机碳(DIC)的时空分布特征, 2013年春季、夏季、秋季、深秋分别对表层水进行采样分析, 讨论了DIC含量与环境因子间的相关关系. 结果表明, 黄河口表层水体DIC浓度在26.34~39.43 mg·L⁻¹, 其分布趋势为淡水端高于海水端, 在盐度小于15‰的区域发生明显亏损, 最大亏损量为20.46%; 季节分布规律表现为春季>秋季>深秋>夏季. 通过主成分分析表明, 水温、悬浮物、盐度、叶绿素a是影响黄河口表层水DIC浓度变化的主要因素, 其解释效率达83%, 而碱度、pH、溶解有机碳、溶解氧等因素对DIC分布特征的影响不容忽视. DIC在低盐区亏损的主要原因是碳酸盐沉积. 黄河口DIC呈逐年增长趋势, 主要受水体停留时间、温度、外源输入及环境条件等因素的影响.

关键词: 黄河口; 溶解无机碳; 时空分布; 贡献率; 年际变化

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0457-07 DOI: 10.13227/j.hjcx.2015.02.012

Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary

GUO Xing-sen¹, LÜ Ying-chun^{2*}, SUN Zhi-gao², WANG Chuan-yuan², ZHAO Quan-sheng¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266000, China; 2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Estuary is an important area contributing to the global carbon cycle. In order to analyze the spatial-temporal distribution characteristics of the dissolved inorganic carbon (DIC) in the surface water of Yellow River estuary. Samples were collected in spring, summer, fall, winter of 2013, and discussed the correlation between the content of DIC and environmental factors. The results show that, the DIC concentration of the surface water in Yellow River estuary is in a range of 26.34–39.43 mg·L⁻¹, and the DIC concentration in freshwater side is higher than that in the sea side. In some areas where the salinity is less than 15‰, the DIC concentration appears significant losses—the maximum loss is 20.46%. Seasonal distribution of performance in descending order is spring, fall, winter, summer. Through principal component analysis, it shows that water temperature, suspended solids, salinity and chlorophyll a are the main factors affecting the variation of the DIC concentration in surface water, their contribution rate is as high as 83%, and alkalinity, pH, dissolved organic carbon, dissolved oxygen and other factors can not be ignored. The loss of DIC in the low area is due to the calcium carbonate sedimentation. DIC presents a gradually increasing trend, which is mainly due to the effects of water retention time, temperature, outside input and environmental conditions.

Key words: Yellow River estuary; DIC; spatial and temporal distribution; contribution rate; annual variation

碳作为一种生源要素,参与生态系统大部分的生物地球化学循环过程^[1-2],因此对碳循环的研究是目前全球变化研究中的热点.河口是陆架边缘海的一个重要组成部分,也是陆地与陆架边缘海相互作用的重要纽带之一,每年都有大量的淡水和各种营养物质通过河口输送到陆架边缘海,对其中发生的许多生物地球化学过程均有显著影响^[3-7].河口水体中溶存着大量的含碳化合物,其中绝大部分是溶解无机碳(DIC),主要包括:无机碳酸盐、碳酸氢盐、碳酸及二氧化碳气体. DIC的各主要成分之间通过一系列热力学平衡构成的CO₂体系,在缓冲水体pH值、指示发生在河口水体生态系统中的光合作用与呼吸作用方面扮演着重要角色^[8-9].

黄河是中国最有代表性的入海河流之一,并且

是世界上泥沙含量最高的河流,每年向陆架边缘海输送大量溶解无机碳,这些DIC的输入对于海洋科学的各个分支都有重要意义.许多学者曾对黄河口碳循环进行了研究:Gu等^[10]研究发现黄河口DIC浓度在汛期小于非汛期,由河口向海洋运输过程中DIC亏损10%.王飞^[11]研究发现2003年8月黄河口北部DIC含量明显高于河口南部,9月表、中、底层水体DIC分布呈现降低趋势,主要因为DIC来源

收稿日期: 2014-06-30; 修订日期: 2014-09-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103073); 中国科学院烟台海岸带研究所一三五项目(Y254021031); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)

作者简介: 郭兴森(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为水生态和水环境, E-mail: guoxyc1015@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yclv@yic.ac.cn

不同. 王晓亮^[12]的研究表明 2004 年春季黄河口咸淡水混合区碱度、溶解无机碳与盐度明显呈负相关关系,低盐度区域碱度和 DIC 亏损,中盐度区表现出盈余. 张向上等^[2]研究指出咸淡水混合过程中呈现 pH 异常增高现象,低盐度区生物耗氧呼吸和碳酸钙沉降是控制水体中 DIC 的主要因素,并估算出 2006 年黄河口 DIC 有效入海通量为 5.86×10^5 t,它是渤海 DIC 的主要来源之一. 这些报道主要侧重于河口溶解无机碳的平面分布特征、影响因素和入海通量的研究,但对于河口溶解无机碳的季节分布的研究鲜有报道,对主控因素贡献率大小的研究也很少见. 为了更好地了解黄河口 DIC 的时空分布特征,本文对黄河口 DIC 进行了较为详细的研究,以为河口水体无机碳生物地球化学循环的主要过程提供理论依据.

1 材料与方法

为了充分了解黄河口水体中 DIC 的分布特征,在黄河湿地保护区新滩浮桥至河海分界线之间共布设 12 个采样点(图 1). 采样按春季、夏季、秋季、深秋设计并实施,分别为 2013 年 5 月 5 日、8 月 29

日、10 月 31 日、11 月 25 日. 为了降低潮汐对 DIC 的影响,均在小潮期落潮时采样. 用有机玻璃采水器对水面以下约 0.5 m 处水体进行采集. 水样中的 pH、温度(t)、盐度(S)、溶解氧(DO)均由 YSI-5000 现场测定,准确度在 0.1% 以内.

DIC、叶绿素 a(Chl-a)、悬浮物(TSS)、总碱度(TA)水样按如下方法进行处理并测定.

将水样分三部分,第一部分用孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维滤膜过滤,滤膜在 60°C 条件下干燥后用重量法测定水体中悬浮颗粒物. 第二部分现场用饱和 MgCO_3 溶液固定,返回实验室后用 $0.7 \mu\text{m}$ GF/F Whatman 玻璃纤维滤膜过滤,滤膜剪碎后放入离心管中,用 15 mL 9:1 丙酮溶液低温萃取 24 h 后,离心 10 min,取上清液用荧光分光光度计(Turner10 型荧光计)测定叶绿素 a. 第三部分水样现场用饱和 HgCl_2 溶液固定,返回实验室后用预先 450°C 灼烧过的 $0.7 \mu\text{m}$ GF/F Whatman 玻璃纤维滤膜过滤,滤液用 TOC-V_{CPN} 总有机碳分析仪测定溶解无机碳(DIC). 测定范围 $0 \sim 3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,检测限 $4 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,精密度 1.5% 以内. 用 Gran 滴定法测定总碱度.

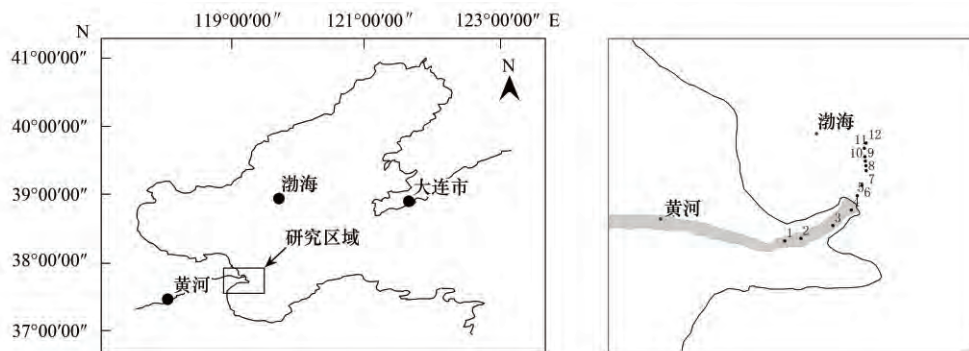


图 1 黄河口采样点位置示意

Fig. 1 Sample stations in the Yellow River estuary

数据采用 ARCGIS 软件进行作图分析,ORIGIN 7.5 软件进行相关性分析,SPSS 软件进行主成分和逐步回归分析. 两端混合模型^[2],在混合过程中当溶解态物质(M)不受其他因素影响时,与盐度应该是保守的降低趋势,即根据淡水端、海水端溶解物质(M)的浓度可以求得 dC_m/dS ,任意盐度区溶解物质的理论值为:

$$C_{m\text{理论值}} = C_{m1} - S \times (dC_m/dS)$$

式中 $C_{m\text{理论值}}$ 为任意盐度区域的理论值, S 为盐度, C_{m1} 为淡水端 M 的浓度.

2 结果与分析

2.1 黄河口水体水质参数变化特征

黄河口表层水体中各水质参数变化特征如表 1 所示. 不同季节黄河口淡水端终点出现的位置不同,2013 年 5 月(春季)淡水端终点出现在距新滩浮桥约 11 km 处,8 月(夏季)转移到距浮桥 12 km 处,10 月(秋季)为 8 km 处,11 月(深秋)为 10 km 处. 这种不同的差异主要是由不同季节河口形态和淡水输入量的变化造成的,盐度的空间变化主要是咸淡

水混合的结果. 河口区表层水体 pH 在不同季节分布特征也有很大的差异(表 1), 秋季和深秋 pH 变化范围分别为 7.71~8.81 和 8.30~8.88, 平均值明显大于春季和夏季, 其变化范围分别为 8.14~8.48 和 7.64~8.44, 春季 pH 平均值略高于夏季. 空间分布上, 淡水端和海水端较为稳定, 在混合区 pH 出现一个峰值, 春季为 8.48, 夏季为 8.44, 秋季为 8.81, 深秋为 8.88. 黄河口表层水体悬浮物含量平均值的

季节变化规律为春季 > 秋季 > 深秋 > 夏季, 空间分布上均表现为淡水端及混合区悬浮物浓度高于海水端. 叶绿素 a 在不同季节的分布差异也很大(表 1), 夏季叶绿素 a 明显高于其他月份, 深秋最低. 河口溶解氧分布与叶绿素 a 相呼应, 夏季溶解氧含量最高, 变化范围为 13.63~14.43 mg·L⁻¹, 深秋最低为 7.84~10.05 mg·L⁻¹, 春秋季变化不大, 分别为 9.01~9.92 mg·L⁻¹ 和 9.42~11.94 mg·L⁻¹.

表 1 水质环境特征

Table 1 Water quality environment characteristics

水文条件	春季		夏季		秋季		深秋	
	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围
盐度/‰	5.21	0.49~25.95	6.67	0.47~23.68	6.46	0.45~21.04	2.23	0.46~8.73
pH	8.30	8.14~8.48	8.26	7.64~8.44	8.69	7.71~8.81	8.63	8.30~8.88
悬浮物/g·L ⁻¹	0.49	0.12~0.63	0.21	0.06~0.32	0.41	0.12~0.54	0.32	0.04~0.61
溶解氧/mg·L ⁻¹	9.54	9.01~9.92	14.08	13.63~14.43	10.10	9.42~11.94	8.90	7.84~10.05
叶绿素 a/μg·L ⁻¹	3.20	1.25~4.32	12.45	1.89~20.14	4.02	3.59~4.66	1.72	0.91~2.03

2.2 黄河口表层水体 DIC 时空分布特征

黄河口表层水体 DIC 含量(图 2) 在时间上整体呈现春季 > 秋季 > 深秋 > 夏季的特点; 春季黄河口表层水体 DIC 浓度范围为 26.34~39.43 mg·L⁻¹, 平均值为 35.85 mg·L⁻¹; 夏季黄河口 DIC 含量在 25.68~32.20 mg·L⁻¹ 之间, 均值为 30.20 mg·L⁻¹; 秋季黄河口表层 DIC 含量在 29.23~35.89 mg·L⁻¹, 平均含量为 34.18 mg·L⁻¹. 深秋黄河口 DIC 浓度范围为 30.82~33.58 mg·L⁻¹, 平均浓度为 32.08 mg·L⁻¹. 空间上, 各季节 DIC 浓度自浮桥向近海延伸方向上呈现逐渐降低的分布趋势, 淡水端明显高于海水端. 靠近浮桥区域 DIC 浓度最大, 距浮桥 2~13km 左右区域 DIC 空间变化很小, 各季节 DIC 浓度变化量仅为 0.3 mg·L⁻¹. 距浮桥 13~15 km 左右区域, DIC 浓度变化较快, 呈现明显的浓度梯度, 春季 DIC 浓度亏损量达 20.46%.

根据两端混合模型, 春季在盐度小于 15‰ 的区

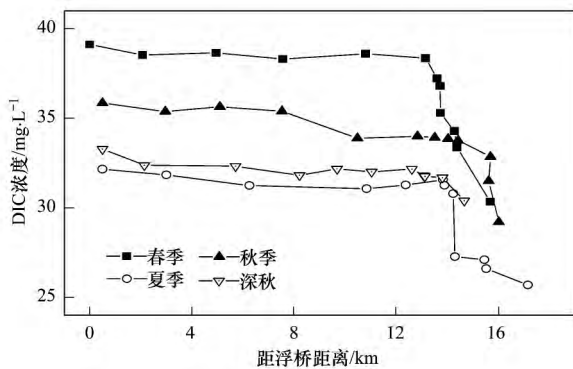


图 2 河口表层水 DIC 含量季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of DIC in the Yellow River estuary

域, DIC 实测值在理论混合线之下(图 3), 夏季、秋季、深秋这一现象发生在盐度小于 5‰ 左右的区域, 这说明黄河口表层水体 DIC 在不同季节盐度较小的区域呈现非保守现象, 这种非保守现象表现为 DIC 浓度的亏损, 即河口过程存在 DIC 清除机制, 使淡水端输入的 DIC 未能有效进入海洋.

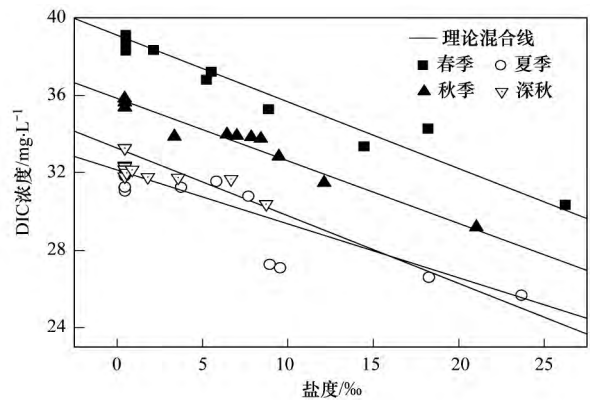


图 3 盐度与 DIC 含量关系

Fig. 3 Relationship between salinity and DIC

3 讨论

3.1 影响黄河口水体 DIC 含量的环境因子分析

为了探讨影响黄河口表层水体 DIC 含量的可能主控因素, 本研究对黄河口 4 个月份的 8 个环境因素进行了主成分分析($n = 35$). 选取的环境因素包括水温、盐度、碱度、溶解氧、pH、叶绿素 a、溶解有机碳、悬浮物. 依据主成分分析原理, 选取了特征值大于 1 的前 4 个主成分 C1、C2、C3、C4(表 2), 其累积贡献率达到了 90.45%, 较好地反映了黄

表 2 特征值及主成分贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
C1	3.33	41.66	41.66
C2	1.67	20.88	62.54
C3	1.13	16.17	78.71
C4	1.05	11.74	90.45
C5	0.54	5.73	96.18
C6	0.23	1.83	98.01
C7	0.18	1.26	99.27
C8	0.06	0.73	100

河口表层水体的环境特征。

根据主成分分析结果(表 3),第一主成分 C1 与温度和叶绿素 a 呈显著正相关,与 pH、碱度呈显著负相关,而这些因素均与温度变化情况有关,因此可以看作是温度条件的代表。第二主成分 C2 可以看作是悬浮物条件的代表。第三主成分 C3 可以看作是盐度的条件代表。第四个主成分 C4 可以看作是叶绿素 a 条件的代表。选取每一个主成分中相关系数绝对值较大者作为代表,通过逐步引入-剔除法建立这些环境因素与 DIC 含量的多元回归方程:

$$Y = 39.51 - 0.19S - 0.34(\text{Chl-a}) - 0.44t + 3.95(\text{TSS})$$

$$(R^2 = 0.83, n = 35, P < 0.005)$$

表 3 主成分载荷

环境因子	主成分			
	C1	C2	C3	C4
温度	0.87	0.30	-0.10	0.34
盐度	0.31	-0.49	0.74	0.26
pH	-0.76	0.43	-0.18	-0.13
溶解有机碳	0.24	-0.50	-0.43	0.52
碱度	-0.92	0.14	0.28	-0.16
溶解氧	0.45	0.25	-0.17	0.41
叶绿素 a	0.84	0.20	0.11	0.73
悬浮物	0.32	0.81	0.03	0.10

环境因素中只有盐度、叶绿素 a、温度和悬浮物进入回归方程,说明盐度、叶绿素 a、温度、悬浮物对河口 DIC 含量分布具有较大影响,同时回归分析还发现 pH、溶解有机碳、碱度、溶解氧对 DIC 含量分布虽有一定的影响,但其影响较小。

盐度反映了淡水混合的过程,其对 DIC 季节分布影响不大,与空间分布呈负相关,浮桥至混合区淡水端,盐度基本保持不变,说明以淡水输入为主,海水影响较小,其浓度保持不变。随着盐度逐渐增加,大量低 DIC 浓度的海水与淡水混合,海水稀释作用占主导,使水中 DIC 浓度降低。同时混合区离

子强度增大,促进碳酸钙沉降,对 DIC 浓度的降低也有一定影响^[13]。不同季节混合区盐度急剧变化的位置不同,显示了不同季节河口形态的差异,这种差异也可能影响不同季节 DIC 分布。

叶绿素 a 反映水体初级生产力,是浮游植物光合作用的直接表现,在盐度为 0~5‰ 的混合区,叶绿素 a 含量较低,呈现微弱的增长趋势。在盐度大于 5‰ 的混合区,多元回归分析显示 DIC 浓度与叶绿素 a 含量负相关,这与张向上^[14]对黄河口的研究结果相符。叶绿素 a 含量增加,光合作用强烈,不断将无机碳转化为有机碳,可使 DIC 浓度迅速降低。为了进一步验证水温与 DIC 浓度的关系,对水温和 DIC 做相关性分析[图 4(a)]结果显示河口表层水体 DIC 含量与水温呈极显著负相关($P < 0.0001$),这与逐步多元回归分析结果一致,也与李宁^[15]对长江口的研究结果相符。首先水温的增减可以影响水体浮游植物的生长,通过控制叶绿素 a 进而影响 DIC 含量。其次水温可以影响水气界面 CO_2 通量来影响 DIC 分布,水温越高,河水对 CO_2 的溶解度降低, CO_2 向大气扩散,使 DIC 浓度降低;水温降低, CO_2 向河水溶解增多,DIC 浓度上升。再次水温可以通过控制微生物活性来影响 DIC 分布^[1],水温升高,微生物活性增强,呼吸作用和反硝化作用均会增加水体 CO_2 含量,但是微生物活动并不是随水温的升高呈线性增长^[1]。在只考虑叶绿素 a 和水温影响下,夏季叶绿素 a 含量最高,光合作用最强烈,无机碳向有机碳转化较多,可使 DIC 浓度迅速降低。夏季水温也最高,河水中 CO_2 含量也最少,可降低 DIC 浓度。温度较高,微生物活动理论上使 DIC 浓度升高,但夏季实测 DIC 浓度最低,说明夏季光合作用和水气界面 CO_2 通量是 DIC 浓度的主控因素。秋季水温比夏季低,光合作用开始减弱,对 CO_2 的消耗减少;同时由于水温降低,河水对大气 CO_2 的溶解能力增强,也增加了 DIC 的含量^[15]。水温升高,微生物活性也会逐渐增强,大量细菌对有机质的分解开始,造成 DIC 含量升高,因此秋季 DIC 浓度比夏季高。深秋水温和叶绿素 a 均低于秋季,即光合作用减弱, CO_2 向河水溶解比秋季多,使 DIC 浓度升高;微生物活动减弱应该使 DIC 浓度降低。而实测深秋 DIC 浓度低于秋季,说明深秋 DIC 分布主要受微生物活动影响。春、秋季节河水温度差异不大,水气界面 CO_2 通量和微生物活动对两个季节的影响程度相同,春季叶绿素 a 含量比秋季低,光合作用消耗 CO_2 减少,使春季 DIC 浓度高于秋季。

本研究各季节 DIC 浓度与悬浮物平均浓度正相关 [图 4 (b)] ,张龙军等^[16] 也曾研究指出黄河水体 DIC 与悬浮物浓度也有一定关系. 河口水体中富含碳酸盐的悬浮颗粒物通过碳酸盐体系的固-液平衡控制着水体中的 DIC 浓度^[17]. 本研究中春季黄

河口表层水体悬浮物含量最高 ,其中的颗粒无机碳经过强烈的风化作用转化为 DIC ,使春季 DIC 浓度最高. 夏季大量河水将悬浮物浓度稀释至最低值 ,颗粒无机碳向 DIC 转化量最少 ,因此夏季 DIC 浓度最低.

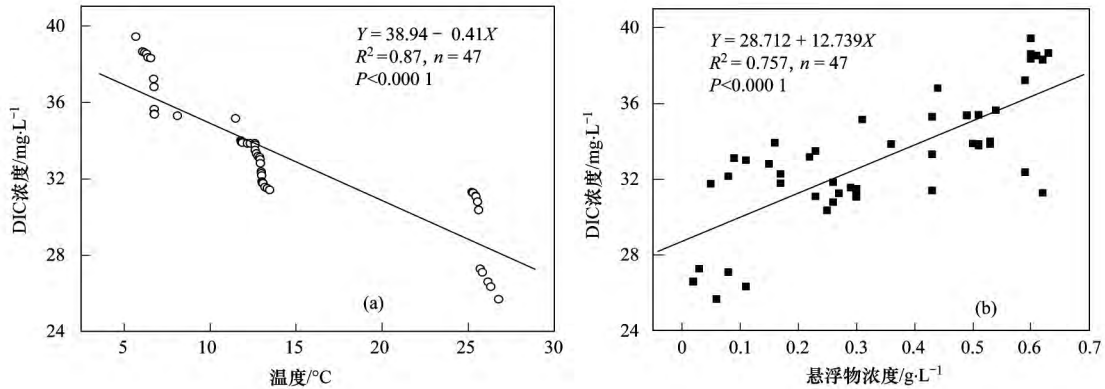


图 4 温度和悬浮物与 DIC 关系

Fig. 4 Relationship between temperature , suspended solids and DIC

研究表明河口表层水体 DIC 含量季节变化特征还与不同季节河水流量有关. 河水流量的平衡对控制不同季节水体中碳酸氢盐含量起着至关重要的作用^[18]. Cai 等^[19] 指出碳酸氢盐含量与河水流量呈现显著负相关. 非雨季 DIC 含量较高的主要原因就是在相同时期有更少的水流量. 各季节河口平均流量见图 5 ,夏季河水流量最大 ,稀释作用使该季节 DIC 含量降到最低 ,而秋季黄河水流量比春季大 ,从而使秋季 DIC 含量低于春季. 自深秋至春季 ,DIC 浓度逐渐升高 ,应该是春季风化作用增强所致 ,随着水流量的增加 ,更多的颗粒态碳酸盐通过化学风化而被消耗转化为 DIC^[20] ,使 DIC 浓度增加. 深秋河水流量远低于秋季 ,但 DIC 浓度也低于秋季 ,说明深秋河口 DIC 浓度分布受河水流量影响较小.

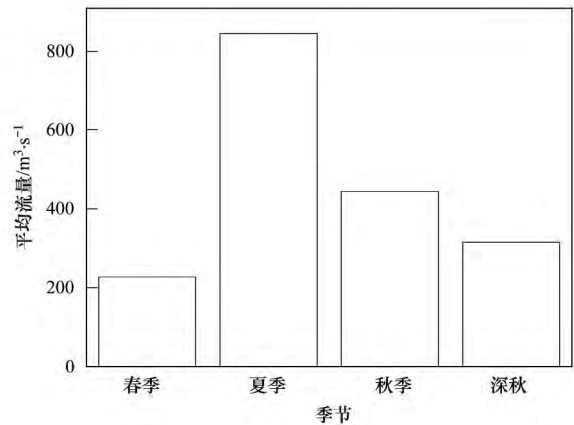


图 5 各季节河口平均流量

Fig. 5 Average flow of each season in the Yellow River estuary

3.2 控制黄河口低盐度区 DIC 亏损的机制分析

黄河口表层水体中 DIC 含量(图 3) 在不同季节低盐度小于 15‰ 区域呈现亏损现象. 出现亏损现象的原因可能有很多 ,Guo 等^[21] 曾报道珠江河口 DIC 发生亏损是由于多条支流混合作用的结果; 王晓亮^[12] 研究指出黄河口水体 DIC 急剧减少可能与碳酸钙沉降有关; 刘志媛等^[22] 指出河口 DIC 非保守性降低可能与植物光合作用有关. 调查发现研究区无任何支流输入、输出 ,因此多条支流混合作用可以排除. 根据对河口 DIC 和总碱度数据监测发现在 DIC 发生亏损的区域 ,总碱度也同样发生了亏损(图 6). 浮游植物光合作用消耗 CO₂ 将无机碳转化为有机碳使水中 DIC 浓度降低 ,但是对碱度的

分布变化无明显影响^[23]. 因此 ,光合作用不是影响河口低盐度区 DIC 亏损的主要原因. 在河口区 ,淡咸水混合使水体离子强度增大 ,Ca²⁺ 迅速增加 ,碳酸钙沉降反应过程如下:



CO₂ 向大气释放 ,导致河口低盐度区过饱和和碳酸盐发生沉降 ,从而使河口 DIC 呈现非保守亏损. 由碳酸钙沉降的反应过程可知若碳酸钙沉降为主要原因 ΔDIC: ΔTA = 1: 2 ,而本研究中 4 个航次 ΔDIC: ΔTA 值均在 0.48 左右 ,因此 DIC 非保守亏损主要是碳酸钙沉降的原因 ,这与王晓亮^[12] 的观点一致. Liu 等^[24] 在近期的研究中通过计算 ΔDIC: ΔTA > 1: 2 ,指出河口 DIC 非保守亏损也可能与微生物活动有关 ,因为微生物活动对 DIC 浓度的急剧下降有很

大的影响,但是对碱度的亏损作用不大. 两次研究 DIC 亏损机制不同,可能是不同研究时期水体环境条件的影响,因此对于不同时期不同环境水体 DIC 亏损还将进一步研究.

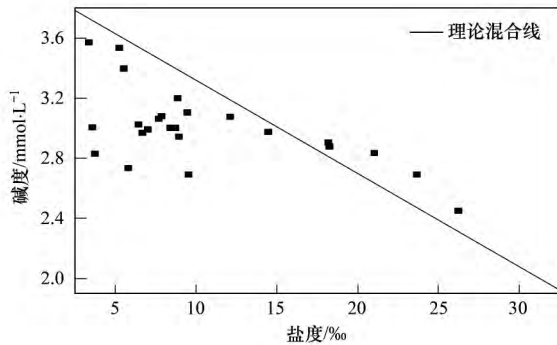


图6 黄河口表层水体碱度分布

Fig. 6 Distribution of alkalinity in the Yellow River estuary

3.3 黄河口表层水体 DIC 年际变化动态

根据已有文献报道(表4),对比1985年、2005年、2009年黄河口DIC含量,而2006年4月DIC含量与已有数据的其他年份5月、8月、9月相比都高. 呈现出近年来黄河口水体中DIC的含量逐步上升的趋势.

表4 黄河口DIC含量

Table 4 DIC concentration in the Yellow River estuary

日期(年-月)	DIC浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水温/ $^{\circ}\text{C}$	文献
1985-05	25~29	16.87	[23]
2003-08	18~30	22.50	[12]
2004-09	27~32	20.82	[13]
2005-05	29~33	17.92	[14]
2006-04	30~44	12.84	[11]
2009-05	26~35	19.36	[24]
2013-05	26~39	17.41	本研究

黄河口表层水体DIC含量逐年增加,可能是由于近年来黄河人工堤坝工程对黄河水进行了蓄存调控,增加了水体的滞留时间,水库水量的蒸发作用明显促进了水质的浓化过程. 彭希等^[25]研究结果也表明筑坝对河口水体DIC含量增长有促进作用. 表4显示不同时期河口DIC浓度与温度相呼应,温度越高的年份,碳循环的季节性变化将会被减弱,此时在DIC浓度降低过程中,微生物活性降低占主导地位,而气体交换和横向运输的减弱为次要原因. 因此温度不仅通过控制水气界面 CO_2 通量,而且通过控制微生物活性影响不同年份DIC分布. Holger等^[26]的特征值数据模型同样说明影响河口水体DIC含量年际变化的主控因素为温度和水停留时间. 黄河沿岸不同支流汇入,使DIC浓度有所差异,

气候、地质、水文、地貌、土壤组成及植被种类等自然环境因素差异显著,这就造成了不同区域的风化过程有所差异. 同时黄河上游人口活动密集,大量植被破坏,水土流失逐步加重,土壤风化作用加强,使陆源无机碳的输入增加,导致河口水体中DIC含量逐年升高.

4 结论

(1) 本研究结果显示2013年黄河口表层水体中DIC含量在 $26.34 \sim 39.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,与往年相比有增加的趋势. 具体来说,时间上表现为春季>秋季>深秋>夏季. 空间上表现为淡水端高于海水端,在盐度小于15‰区域由于碳酸钙沉降发生明显亏损.

(2) 黄河口表层水体环境变化较为复杂,DIC含量受多重环境因素的控制. 通过主成分分析发现,DIC含量分布特征可能主要与水温、悬浮物、盐度、叶绿素a的差异有关,其累计贡献率达90.45%,而碱度、pH、溶解氧、溶解有机碳等对DIC含量分布的影响也不容忽视.

(3) 黄河口表层水体DIC含量呈逐年递增趋势,主要受水体停留时间、温度、陆源输入及环境条件的影响.

参考文献:

- [1] 黄道建,于锡军,郭振仁,等. 大亚湾表层水中溶解无机碳的时空分布[J]. 生态科学,2013,32(2): 331-337.
- [2] 张向上,张龙军. 黄河口无机碳输运过程对pH异常增高现象的响应[J]. 环境科学,2007,28(6): 1216-1222.
- [3] Meybeck M. Riverine transport of atmospheric carbon: sources, global typology and budget[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1993,70(1-4): 443-463.
- [4] Amiotte S P, Probst J L. A global model for present-day atmospheric/soil CO_2 consumption by chemical erosion of continental rocks (GEM- CO_2) [J]. Tellus B, 1995,47(1-2): 273-280.
- [5] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. Global Biogeochemical Cycle, 1996,10(1): 23-41.
- [6] Abril B, Etcheber H, Borges A V, et al. Excess atmospheric carbon dioxide transported by rivers into the Scheldt estuary[J]. Earth and Planetary Sciences, 2000,330(11): 761-768.
- [7] 高学鲁,宋金明,李学刚,等. 长江口及杭州湾邻近海域夏季表层海水中的溶解无机碳[J]. 海洋科学,2008,3(4): 61-67.
- [8] Whitfield M, Turner D R. The carbon dioxide system in estuaries—An inorganic perspective [J]. Science of the Total Environment, 1986,49: 235-255.
- [9] 赵敏,刘春颖,杨桂朋,等. 春季黄、东海表层水中的溶解

- 无机碳[J]. 海洋环境科学, 2011, **30**(5): 626-630.
- [10] Gu D J, Zhang L J, Jiang L Q. The effects of estuarine processes on the fluxes of inorganic and organic carbon in the Yellow River estuary [J]. Journal of Ocean University of China, 2009, **8**(4): 352-358.
- [11] 王飞. 黄河口无机碳的时空分布及其输运通量[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004. 16-52.
- [12] 王晓亮. 黄河口无机碳输运行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005. 21-53.
- [13] 刘志媛. 黄河河口过程中碳的行为变化[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. 29-48.
- [14] 张向上. 黄河口碳输运过程及其对莱州湾的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006. 56-64.
- [15] 李宁. 长江口邻近海域的溶解有机碳和溶解无机碳系统[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011. 30-43.
- [16] 张龙军, 徐雪梅, 温志超. 秋季黄河 $p\text{CO}_2$ 控制因素及水-气界面通量[J]. 水科学进展, 2009, **20**(2): 227-235.
- [17] Cai W J, Wang Y C. The chemistry, fluxes, and sources of carbon dioxide in the estuarine waters of the Satilla and Altamaha rivers, Georgia [J]. Limnology and Oceanography, 1998, **43**(4): 657-668.
- [18] Borges A V, Schiettecatte L S, Abril G, *et al.* Carbon dioxide in European coastal waters [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, **70**(3): 375-387.
- [19] Cai W L, Dai M H, Wang W D, *et al.* The biogeochemistry of inorganic carbon and nutrients in the Pearl River estuary and the adjacent Northern South China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2003, **24**(12): 1301-1319.
- [20] Atekeana E A, Krishnamurthy R V. Seasonal variations of dissolved inorganic carbon and of surface waters: application of modified gas evolution technique [J]. Journal of Hydrology, 1998, **205**(3-4): 265-278.
- [21] Guo X H, Cai W J, Zhai W D, *et al.* Seasonal variations in the inorganic carbon system in the Pearl River (Zhujiang) estuary [J]. Continental Shelf Research, 2008, **28**(12): 1424-1434.
- [22] 刘志媛, 张龙军, 张向上. 黄河口春、秋季季节无机碳的行为变化[J]. 中国海洋大学学报, 2012, **42**(1-2): 41-48.
- [23] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yang Tze and Yellow River (China) [J]. Marine Chemistry, 1993, **43**(1-4): 235-246.
- [24] Liu Z Y, Zhang L J, Cai W J, *et al.* Removal of dissolved inorganic carbon in the Yellow River Estuary [J]. Limnology and Oceanography, 2014, **59**(2): 413-426.
- [25] 彭希, 刘丛强, 王宝利, 等. 筑坝对喀斯特河流水体溶解性无机碳地球化学行为的影响[J]. 科学通报, 2014, **59**(4-5): 366-373.
- [26] Holger B, Nicolas G, Keeling C D. Interannual variability of the upper ocean carbon cycle at station ALOHA near Hawaii [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, **18**(4), doi: 10.1029/2004GB002245.