

网络优先数字出版时间: 2015-08-19

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20150819.0947.016.html>

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.2015.03.002

渤海湾西北部沿岸主要入海河流表层沉积物中无机碳形态研究*

Inorganic Carbon Formation in the Surface Sediments of the Major Coastal Rivers along the North West Side of Bohai Bay

张永, 高学鲁, 王允周

ZHANG Yong, GAO Xue-lu, WANG Yun-zhou

(中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东烟台 264003)

(Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong, 264003, China)

摘要:【目的】调查渤海湾西北部沿岸河流表层沉积物中不同形态无机碳(IC)的分布和影响因素, 阐明我国近岸不同环境沉积物中 IC 分布形态的异同和调控机制。【方法】采用连续浸取方法, 根据 IC 在沉积物中的结合强度, 将其分为交换态(氯化钠相)、弱碱结合态(氨水相)、强碱结合态(氢氧化钠相)、弱酸结合态(盐酸羟胺相)和残渣态, 分析表层沉积物中不同形态的 IC 含量, 并讨论其与各地球化学参数之间的关系。【结果】渤海湾西北部沿岸河流表层沉积物中总 IC 的平均含量为 6.76 mg/g。沉积物中各相 IC 的平均含量为盐酸羟胺相(3.21 mg/g) > 残渣相(1.92 mg/g) > 氨水相(0.77 mg/g) > 氯化钠相(0.64 mg/g) > 氢氧化钠相(0.22 mg/g)。盐酸羟胺相是沉积物 IC 的主要形态。总有机碳(TOC)对各形态 IC 影响较强。氨水相 IC 与沉积物各参数间存在较为紧密的联系。【结论】研究区域沉积物中不同形态 IC 的组成和分布空间变化显著, 不同地点样品中 IC 的活跃程度和可能的环境影响因子差异很大。

关键词: 渤海湾 表层沉积物 连续浸取 无机碳形态 河流

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2015)03-0161-06

Abstract: 【Objective】The environmental behavior and mobility of inorganic carbon (IC) depend strongly on their specific chemical forms and binding state. This study investigated the specific chemical forms of IC in the surface sediments collected from the coastal rivers along the Bohai Bay. 【Methods】Sediment samples were extracted sequentially using solutions of sodium chloride (NaCl), ammonia ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), sodium hydroxide (NaOH), hydroxylamine hydrochloride ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$), resulting in five fractions: Exchangeable fraction (NaCl fraction), weak alkali extractable fraction ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ fraction), strong alkali extractable fraction (NaOH fraction), weak acid extractable fraction ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ fraction) and residual fraction. Geochemical factors affecting the IC content were discussed. 【Results】The average IC content in surface sediments of

收稿日期: 2015-06-11

修回日期: 2015-07-10

作者简介: 张永(1976-), 男, 助理研究员, 主要从事海洋生物地球化学研究。

*中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA11020702)资助。

the coastal rivers along the Bohai Bay was 6.76 mg/g. The average content of IC in different fractions was $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ fraction (3.21 mg/g) > residual fraction (1.92 mg/g) > $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ fraction (0.77 mg/g) > NaCl fraction (0.64 mg/g) > NaOH fraction (0.22 mg/g). $\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$ fraction was the main speciation of IC in sediments. Total organic carbon (TOC) had a strong impact on various IC fractions. The IC content extracted by $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ was closely related to sediment parameters. **【Conclusion】**The composition and distribution of different forms of inorganic carbon in the surface sediments of the studied area exhibited a significant spatial variation. In addition, a significant difference was found in the mobility of IC and the possible environmental parameters in the sediments from different sampling site.

Key words: Bohai Bay, surface sediment, sequential extraction, inorganic carbon fractionation, rivers

0 引言

【研究意义】海洋沉积物是碳元素的重要源与汇,在海洋碳循环中起着重要的作用。海洋沉积物中的碳分为有机碳(TOC)和无机碳(IC),其中无机碳的含量往往比有机碳高很多,特别是在近海^[1]。每年海洋中产生约 5.3 Pg 碳酸盐,其中积累在沉积物中的量约为 3.2 Pg,剩下的约 40%在各种因素作用下又重新溶解进入水体^[2]。在海洋酸化的背景下,海洋沉积物中无机碳的迁移和转化受到越来越多研究者的关注^[3~5]。**【前人研究进展】**碳酸盐是海洋沉积物碳的主要组分,它的沉淀和溶解与上覆水和孔隙水温度、盐度、pH 值、碱度、氧化还原电位^[6]及生物扰动^[7]等多种因素密切相关,并影响到海水碳酸盐系统的平衡^[8]。另外,海洋沉积物中碳酸盐矿物种类繁多,各种矿物在不同 pH 值介质中的溶解能力不同,比如菱钴矿和菱锌矿溶于氨水,白铅矿和角铅矿可溶于 NaOH,方解石和文石则主要溶于酸^[9]。所以可根据碳酸盐矿物的这些特征,选择不同强度的浸取剂溶解不同形态的碳酸盐,从而为进一步探讨沉积物中无机碳在海洋碳循环中的行为奠定基础。**【本研究切入点】**我国近海沉积物中无机碳的形态分布和影响因素在长江口和胶州湾^[9,10]、辽东湾^[11]、渤海湾^[12]、大亚湾和四十里湾^[13]已有相关报导,但对河流沉积物中 IC 的形态研究尚未见报道。**【拟解决的关键问题】**利用不同强度的浸取剂,对渤海湾西北部沿岸河流的表层沉积物进行处理,分离测定沉积物中不同结合强度的 IC,并考察各种环境因素对其含量及分布的影响,阐明渤海湾西北部沿岸主要入海河流表层沉积物中 IC 形态的分布状况。通过对比分析的方法阐明我国近岸不同环境沉积物中 IC 分布形态的异同和调控机制,丰富我国

近岸沉积物中 IC 形态的数据资料库。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及采样点设置

渤海湾位于渤海西部,以滦河口和黄河口连线连接渤海中部海域,面积约为 1.59 万 km^2 ,约占渤海面积 1/5,是渤海的三大海湾之一,为典型的半封闭海湾。渤海湾海底地势由岸边向海湾中间缓慢加深,湾内地形单调,平均水深 12.5 m,最大深度约 25 m(在湾口中部)。渤海湾经历了各地质时期构造运动,形成典型的粉砂淤泥质海岸,沿岸发育有中国规模最大的潮间带^[14]。

沿岸主要河流包括:北排水河(BPS)、子牙新河(ZYX)、青静黄河(QJH)、独流减河(DLJ)、海河(HH)、永定新河(YDX)、潮白新河(CB)、蓟运河(JY)和陡河(DH)。2008年5月,对这些沿岸河流的表层沉积物进行采样。采样站位共计 21 个,具体如图 1 所示。

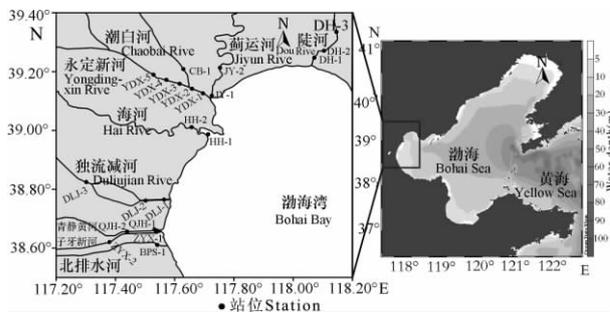


图 1 采样点分布

Fig. 1 Sampling sites

1.2 含水率和粒度的测定

样品含水率采用 60℃ 烘干称重法测定。激光粒度分析使用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪,仪器测量范围为 0.02 ~ 2000 μm ,样品具体测定方法如下^[15]:将去除大颗粒(直

径大于 2 mm)后的样品混合均匀,然后根据样品颗粒大小确定取样量。粘土质粉砂或粉砂质粘土等细颗粒沉积物的取样量一般为 0.1~0.2 g,颗粒大的取样量适度增加,一般为 0.3~0.5 g。样品加入去离子水浸泡 24 h 后,超声 15 min,然后上机测试,仪器涡轮搅拌速度控制在 3000 r/min,每个样品共测定 3 次,时间大约 8 min。

1.3 总氮(TN)、总碳(TC)、IC和TOC测定

使用德国元素分析仪测定 TN 和 TC 含量。根据沉积物 TN 和 TC 的大概含量范围,用锡箔称量并包取适量研磨后的沉积物,放入样品盘中,依次进入燃烧管中,通入氧气(O₂),在 900℃ 的高温下剧烈燃烧,生成的气体由载气(He)送入吸附柱,通过吸附解吸过程分离,由热导检测仪测得气体中的碳(C)、氮(N)元素含量,相对标准偏差小于 1%。沉积物 IC 含量利用岛津 TOC-V_{CPH}-SSM-5000A 分析仪测定,TC 和 IC 两者之差为 TOC 含量。具体过程和原理:称量 0.20 g 左右研磨后的沉积物,放入样品舟内;加入适量磷酸后,推入 200℃ 燃烧管内反应;生成的 CO₂ 气体以 O₂ 为载气,通过非红外色散检测器(NDIR)检测,相对标准偏差小于 5%。

1.4 IC 形态浸取流程

采用连续浸取法将沉积物样品中的 IC 分为交换态(氯化钠相)、弱碱结合态(氨水相)、强碱结合态(氢氧化钠相)、弱酸结合态(盐酸羟胺相)和残渣态。干燥预处理过程对不同形态 IC 的影响较为复杂,很难估计干燥过程会对顺序浸取的 IC 含量造成多大改变,因此在实验中直接利用含水率称取等重的湿样来浸取沉积物中的 IC。不同形态 IC 按如下方法浸取^[16]:

氯化钠相(I):根据含水率称取相当于 0.5 g 干重的湿样,置于 50 mL 离心管中,加入 25 mL 1 mol/L 的氯化钠溶液,摇匀振荡 2 h 后,离心分离,倒出浸取液,在残渣中加入 25 mL 蒸馏水,再振荡 10 min,离心分离,合并两次离心液。

氨水相(II):在第 I 步残渣中加入 12.5 mL 0.1 mol/L 的 NH₃·H₂O,摇匀振荡 2 h 后,离心分离,倒出浸取液,在残渣中加入 25 mL 蒸馏水,再振荡 10 min,离心分离,合并两次离心液。

氢氧化钠相(III):在第 II 步残渣中加入 12.5 mL 0.1 mol/L 的 NaOH 溶液,其余操作同第 II 步。

盐酸羟胺相(IV):在第 III 步残渣中加入 12.5 mL 0.2 mol/L 盐酸羟胺,摇匀振荡 1 h 后,倒掉上清液。

残渣相(V):将 IV 步残渣烘干,利用岛津 TOC-V_{CPH}-SSM-5000A 分析仪测定其中碳含量,记为残渣相 IC 含量。

浸取液中的 IC 用岛津 TOC-V_{CPH} 分析仪测定,最后换算为沉积物中 IC 的含量。盐酸羟胺相 IC 含量由总无机碳含量减去其它 4 相无机碳含量得到。在浸取反应同时,对空白样品进行分析测定,重复测定的相对误差在 15% 以内。

2 结果与分析

2.1 含水率、TOC、TN 和中值粒径 D50

渤海湾西北部沿岸河流沉积物的含水率为 22.1%~66.6%,平均值为 43.4%,最低值位于 DLJ-1 站位,最高值位于 DH-2 站位(图 2)。部分河流的沉积物含水率沿着向海方向降低,如青静黄河、独流减河、蓟运河和陡河;部分河流的沉积物含水率沿着向海方向升高,如子牙新河、海河、永定新河。各河流表层沉积物含水率大多为 40%~50%,其中独流减河的含水率偏低,平均为 27.9%,陡河的含水率偏高,平均为 58.6%,而且陡河两个站位的沉积物含水率波动最大,差值超过 25%。

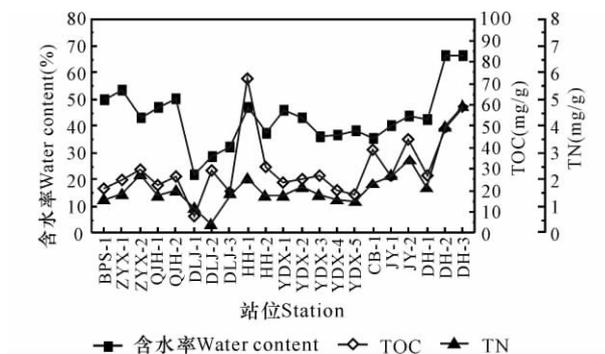


图 2 表层沉积物的含水率、TOC 和 TN

Fig. 2 Water content, TOC and TN of the surface sediments

各河流表层沉积物的 TOC 含量为 8.50~72.45 mg/g,平均为 30.58 mg/g,最低值位于 DLJ-1 站位,最高值位于 HH-1 站位(图 2)。渤海湾北部河流表层沉积物的 TOC 含量要明显高于西部。渤海湾北部的潮白新河、蓟运河和陡河几个表层沉积物 TOC 的平均值为 40.72 mg/g,其它河流沉积物的 TOC 平均含量为 26.52 mg/g,而海河作为一条重污染河流,沉积物的 TOC 含量异常偏高,平均值达到 51.77 mg/g。

各河流表层沉积物的 TN 含量为 0.33~4.73 mg/g,平均为 1.79 mg/g,最低值位于 DLJ-2 站位,

最高值位于 DH-3 站位(图 2)。大部分河流沉积物的 TN 含量沿着向海方向降低,如子牙新河、青静黄河、独流减河、蓟运河和陡河,其它河流沉积物的 TN 含量变化较不规律。

渤海湾河流 21 个沉积物有 16 个属于粘土质粉砂,其它沉积物中除 DLJ-1 站位为砂质粉砂外,剩下都为粉砂。各河流中,独流减河沉积物的颗粒最粗,D50 最高,达到 $31.8 \mu\text{m}$ 。其它河流沉积物 D50 大多为 $5\sim 10 \mu\text{m}$,平均为 $8.9 \mu\text{m}$ (图 3)。

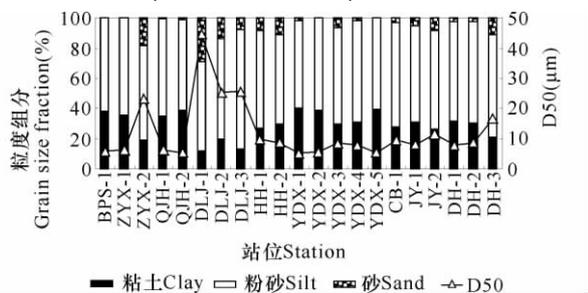


图 3 表层沉积物的粒度组成

Fig. 3 Grain size distribution of the surface sediments

2.2 不同形态 IC 的分布特征

如图 4 所示,沿岸河流沉积物中,各形态 IC 的平均含量为盐酸羟胺相 (3.21 mg/g) > 残渣相 (1.92 mg/g) > 氨水相 (0.77 mg/g) > 氯化钠相 (0.64 mg/g) > 氢氧化钠相 (0.22 mg/g)。

氯化钠相 IC 在各河流沉积物总 IC 中的平均比例为 12.4%,略低于氨水相的 15.2%,但要远高于氢氧化钠相的 4.2%。此相 IC 含量大部分为 $0.5\sim 0.7 \text{ mg/g}$,个别站位含量异常偏高,如青静黄河的两个站位,含量都在 0.9 mg/g 附近。

氨水相 IC 在各河流间的变化幅度较大,最低值位于 DLJ-1 站位,为 0.21 mg/g ,最高值位于 YDX-1 站位,为 1.56 mg/g 。此相 IC 在河流入海口处沉积物中的平均含量为 0.92 mg/g ,明显高于其它站位的平均含量 0.63 mg/g ,河流的输送过程可能是造成这种变化的主要原因。

氢氧化钠相 IC 的含量范围为 $0.11\sim 0.46 \text{ mg/g}$,最低值位于 DLJ-1 站位,最高值位于 YDX-2 站位。独流减河的平均含量最低,仅为 0.13 mg/g ,青静黄河的平均含量最高,也仅为 0.28 mg/g 。

盐酸羟胺相和残渣相 IC 在河流沉积物中的含量变化比较剧烈。总体上,盐酸羟胺相高值多而低值少,残渣相低值多而高值少。前者低于 1 mg/g 的站位只出现在 BPS-1、ZYX-1 和 QJH-1,后者高

于 2 mg/g 的站位只出现在 BPS-1、ZYX-1、JY-1、DH-2 和 DH-3。

渤海湾西部河流沉积物 IC 总量的变化范围为 $3.30\sim 22.28 \text{ mg/g}$,平均值为 4.74 mg/g 。北部蓟运河和陡河沉积物无机碳总量较高,达到 13.20 mg/g 。区域地质环境的不同有可能是造成沉积物无机碳含量变化的主要原因。

渤海湾西部河流沉积物的 IC 总量略高于渤海湾近海表层沉积物中的 IC 总量 ($1.41\sim 9.21 \text{ mg/g}$,平均值为 4.54 mg/g),但是各形态 IC 含量的大小顺序两者一致^[12]。这一分布规律归因于沿岸河流输入是近海表层沉积物的主要来源。另外盐酸羟胺相是沉积物中 IC 的主要形态这一结论与四十里湾和大亚湾^[13]的研究结论一致,但是不同于辽东湾(氨水相是主要形态)^[11],长江口和胶州湾^[9,10]。

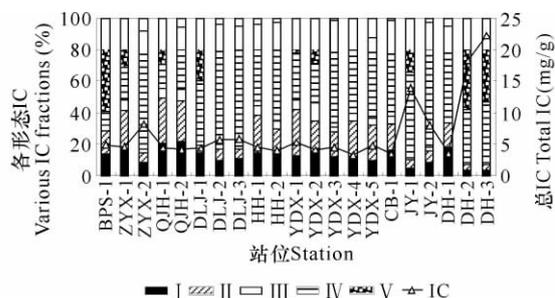


图 4 表层沉积物中总 IC 含量及不同形态 IC 相对含量
Fig. 4 Total IC contents of the surface sediments and the percentages of different IC fractions

2.3 IC 形态分布的影响因素分析

相关分析表明(表 1):渤海湾沿岸河流沉积物中 IC 受到含水率、TOC、TN 的影响较强,而受粒度的影响较弱。含水率表征沉积物中孔隙水的含量,而孔隙水是固-固和固-液界面间物质交换的桥梁和纽带^[9],同时,含水率的高低直接影响沉积物的再悬浮程度,所以含水率的高低可能影响 IC 在沉积物-河水间的溶解释放与沉积成岩过程。TOC 是沉积物碳库的重要组分,其埋藏矿化会导致沉积物中 IC 含量的升高,这也是 TOC 与所有形态 IC 都呈现正相关的原因。TN 与氨水相 IC 存在负相关,与其它相正相关,其中与总 IC、盐酸羟胺相和残渣相存在显著正相关,这是因为沉积物中氮元素的氨化/硝化作用都会影响沉积物环境的 pH 值,导致碳酸盐沉淀溶解平衡发生移动。粒度与总 IC 以及各相 IC 之间较弱的关联说明粒度可能不是影响成岩过程的关键因素。

表1 各形态 IC 与沉积物主要地球化学参数之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients among various IC fractions and the main geochemical parameters

	IC	I	II	III	IV	V
I	0.214	1				
II	-0.117	0.329	1			
III	0.120	0.450*	0.561**	1		
IV	0.822**	-0.011	-0.373	-0.166	1	
V	0.930**	0.256	-0.028	0.210	0.565**	1
含水率 Water content(%)	0.637**	0.526*	0.415	0.557**	0.248	0.722**
TOC	0.494*	0.176	0.066	0.252	0.444*	0.412
TN	0.877**	0.308	-0.055	0.252	0.699**	0.820**
粘土 Clay(%)	-0.214	0.141	0.767**	0.521*	-0.474*	-0.072
粉砂 Silt(%)	0.218	-0.100	-0.431	-0.345	0.343	0.136
砂 Sand(%)	0.111	-0.101	-0.618**	-0.388	0.335	-0.002

注: * 在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, ** 在 $P < 0.01$ 水平上显著相关(双尾检验)。

Note: * Values are significant at $P < 0.05$, ** values are significant at $P < 0.01$ (two-tailed test).

在沉积物成岩过程中,各形态 IC 可能存在相同的成因、来源或相互转化现象。从表 1 中可以看出,总 IC 与盐酸羟胺相和残渣相之间存在显著的正相关,这可能是因为这两相是总 IC 的主要组分,受总 IC 含量变化的影响较大。氯化钠相与氢氧化钠相之间、氨水相与氢氧化钠相之间均存在显著正相关关系,说明他们之间可能存在相同的成因或来源。盐酸羟胺相与残渣相之间的较显著的正相关关系说明这两相 IC 之间可能存在相同的成因或来源。

3 结论

通过对渤海湾西北部沿岸河流表层沉积物各形态 IC 含量及其与各影响因素之间的关系进行分析,得到如下结论:

研究区内,表层沉积物总 IC 的平均含量为 6.76 mg/g。各相 IC 含量特征为:盐酸羟胺相 > 残渣相 > 氨水相 > 氯化钠相 > 氢氧化钠相。盐酸羟胺相 IC 的含量最高,在沉积物总 IC 中的平均比例接近 50%。

沉积物含水率、TN、TOC 和粒度等参数在一定程度上影响各形态 IC 含量。河流沉积物不同形态 IC 与不同环境参数间的相关系数差异较大,显示出河流沉积物受环境因素影响的复杂性。

某些形态 IC 之间可能存在相同的成因或来源:氯化钠相 IC 与强碱浸取相 IC 之间存在显著正相关关系;两种碱浸取相 IC 之间存在显著正相关关系;各形态 IC 中残渣相 IC 与沉积物的结合最为牢固,其与盐酸羟胺相 IC 有显著相关关系。

参考文献:

- [1] 高学鲁,宋金明,李学刚,等. 中国近海碳循环研究的主要进展及关键影响因素分析[J]. 海洋科学,2008,32(3):83-90.
Gao X L, Song J M, Li X G, et al. A review of the major progress on carbon cycle researches in the Chinese marginal seas and the analysis of the key influence factors[J]. Marine Science, 2008, 32(3): 83-90.
- [2] Milliran J D. Production and accumulation of calcium carbonate in the ocean: Budget of a nonsteady state [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 927-957.
- [3] Andersson A J, Mackenzie F T, Lerman A. Coastal ocean CO₂-carbonic acid-carbonate sediment system of the Anthropocene [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20(1): Gb1s92.
- [4] Andersson A J, Mackenzie F T, Ver L M. Solution of shallow-water carbonates: An insignificant buffer against rising atmospheric CO₂ [J]. Geology, 2003, 31(7): 513-516.
- [5] Burdige D, Zimmerman R, Hu X. Rates of carbonate dissolution in permeable sediments estimated from pore-water profiles: The role of sea grasses [J]. Limnology and Oceanography, 2008, 53(2): 549-565.
- [6] Yates K K, Halley R B. Diurnal variation in rates of calcification and carbonate sediment dissolution in Florida Bay [J]. Estuaries and Coasts, 2006, 29(1): 24-39.
- [7] Hu X P, Burdige D J. Enriched stable carbon isotopes in the pore waters of carbonate sediments dominated by seagrasses: Evidence for coupled carbonate dissolu

- tion and reprecipitation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(1): 129-144.
- [8] Millero F J. The marine inorganic carbon cycle[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(2): 308-341.
- [9] 李学刚. 近海环境中无机碳的研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2004.
- Li X G. Studies on Inorganic Carbon in Offshore Environments[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [10] Li X G, Song J M, Yuan H M. Inorganic carbon of sediments in the Yangtze River Estuary and Jiaozhou Bay[J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(2): 177-197.
- [11] 牛丽凤, 李学刚, 宋金明, 等. 辽东湾柱状沉积物中无机碳的形态[J]. *海洋科学*, 2006, 30(11): 17-22.
- Niu L F, Li X G, Song J M, et al. Forms of inorganic carbon in Liaodong Bay core sediments[J]. *Marine Sciences*, 2006, 30(11): 17-22.
- [12] 王允周, 高学鲁, 杨玉玮. 渤海湾北部和西部海域表层沉积物中无机碳形态研究[J]. *海洋科学*, 2011, 35(2): 52-56.
- Wang Y Z, Gao X L, Yang Y W. Fraction of inorganic carbon in the surface sediments of northern and western Bohai Bay[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(2): 52-56.
- [13] 解学良, 王允周, 张培玉, 等. 大亚湾和四十里湾附近海域表层沉积物中无机碳形态研究[J]. *环境化学*, 2011, 30(6): 1108-1113.
- Xie X L, Wang Y Z, Zhang P Y, et al. Fraction of inorganic carbon in surface sediments of Daya Bay and Sishili Bay areas [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(6): 1108-1113.
- [14] 陈文文, 刘东生, 邢军辉. 渤海湾北部底栖有孔虫的组合分布及沉积环境[J]. *内蒙古石油化工*, 2008, 23: 135-138.
- Chen W W, Liu D S, Xing J H. Distribution of benthic foraminifera and sedimental environment in the northern Bohai Bay [J]. *Inner Mongolia Petrochemical*, 2008, 23: 135-138.
- [15] 王君波, 朱立平. 不同前处理对湖泊沉积物粒度测量结果的影响[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(1): 17-23.
- Wang J B, Zhu L P. Influence of different pre-treatment on grain-size measurement of lake sediments [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(1): 17-23.
- [16] 李学刚, 李宁, 宋金明. 海洋沉积物中不同结合态无机碳的测定[J]. *分析化学*, 2004, 32(4): 425-429.
- Li X G, Li N, Song J M. Determination for the different combined-form inorganic carbon in marine sediments[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2004, 32(4): 425-429.

(责任编辑: 陆 雁)