

# 渤海湾北部和西部海域表层沉积物中无机碳形态研究

王允周<sup>1,2</sup>, 高学鲁<sup>1</sup>, 杨玉玮<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 烟台海岸带研究所 海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 采用氯化钠(NaCl)、氨水(NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O)、氢氧化钠(NaOH)、盐酸羟胺(NH<sub>2</sub>OH·HCl)溶液对渤海湾北部和西部海域表层沉积物中无机碳进行了连续浸取, 并将无机碳分为 5 种赋存形态: 交换态(NaCl 相)、弱碱结合态(NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 相)、强碱结合态(NaOH 相)、弱酸结合态(NH<sub>2</sub>OH·HCl 相)和残渣态。同时, 结合沉积物其他地球化学参数, 对影响各形态无机碳含量变化的因素进行了讨论。结果表明: 研究区表层沉积物中 NaCl 相、NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 相、NaOH 相、NH<sub>2</sub>OH·HCl 相、残渣相无机碳的平均含量分别为 0.66、0.86、0.23、2.56、0.46 mg/g。NaOH 相无机碳占总无机碳的比例最小, 约为 5%; NH<sub>2</sub>OH·HCl 相的比例最大, 在 50%左右。无机碳的不同形态及沉积物地球化学参数之间的相关关系分析表明, NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 相受沉积物含水率、总氮(TN)、总有机碳(TOC)和沉积物细组分的影响极为显著, NaOH 相受沉积物 TN 和 TOC 的影响极为显著, 残渣相受含水率的影响较为显著, 其余 2 相受各因素的影响较弱; 在沉积物早期成岩过程中, NaCl 相和残渣相无机碳之间可能存在一定相互转化关系。

**关键词:** 渤海湾; 沉积物; 连续浸取; 无机碳形态

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2011)02-0052-06

工业革命以来, 化石燃料燃烧和土地利用变化等人类活动产生大量二氧化碳(CO<sub>2</sub>), 使大气中 CO<sub>2</sub> 浓度(体积比)由工业革命前的约 280×10<sup>-6</sup> 增加到 2008 年的 385×10<sup>-6</sup>[1-2]。快速升高的 CO<sub>2</sub> 浓度带来一系列生态环境问题, 如温室效应、海水酸化及全球灾害性气候增加等[3], 引起了各国科学家和政府首脑的高度重视。为了研究碳元素在大气圈、水圈、生物圈和岩石圈之间相互转换和运移的过程, 预测未来气候变化, 科研工作者做了大量研究工作。作为地球上最大的碳库之一, 海洋中的碳储量约是大气圈的 50 倍, 陆地生物圈的 20 倍[4], 吸收掉约 48% 的来自工业活动的 CO<sub>2</sub>[5], 对大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化起到极大的缓冲作用[6]。经过对海洋碳循环的多年研究, 人们对碳在大洋中的迁移转化获得了比较清晰的认识, 但对生物地球化学过程极为复杂的近海的研究还存在较多的不确定性[7]。

近海海域是连接陆地和海洋两大生态系统的关键环节, 在全球碳循环中起着重要作用[8-9]。它接受着河流输入的大量陆源物质, 并通过物理、化学和生物过程与大洋进行各种物质和能量交换。作为高生产力海域, 虽然近海只占全球海洋面积的 7%, 但每年产生了全球海洋约 80% 有机碳沉积和 50% 碳酸盐沉积[10]。

碳酸盐是沉积物中的碳组分之一, 它的沉淀与溶解受到上覆水及孔隙水温度、盐度、pH、碱度、氧化还原电位[11]和生物扰动[12]等多种因素的控制, 并影响海水碳酸盐系统的平衡[3]。海洋沉积物中碳酸盐矿物种类繁多, 形成和溶解条件各不相同[13], 因此在海洋碳循环中的作用也明显不同。渤海湾是位于渤海西部的半封闭海湾, 接收着沿岸多条河流的汇入, 为中国典型近海海域。本研究利用不同强度的浸取剂, 对渤海湾北部和西部海域表层沉积物进行处理, 分离测定沉积物中不同结合强度的无机碳, 并考察各种环境因素对其含量及分布的影响。

## 1 采样与分析

2008 年 5 月, 在渤海湾北部和西部海域进行了采样, 共设置了 M、K、T 和 U 4 个断面 23 个站位, 具体站位分布如图 1 所示。M、K 和 T 断面分别位于陡河、永定新河和独流减河的入海口方向, U 断面位

收稿日期: 2010-01-20; 修回日期: 2010-04-24

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX1-YW-06-02, KZCX2-YW-Q07-03, KZCX2-YW-JC203)

作者简介: 王允周(1985-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事海洋生物地球化学研究, 电话: 0535-2109135, E-mail: yzwang@yic.ac.cn; 高学鲁, 男, 通信作者, 电话: 0535-2109132, E-mail: xlgao@yic.ac.cn

于青静黄河和子牙新河的入海口方向。样品采集后装入封口袋密封保存在 4 °C 冰箱中。

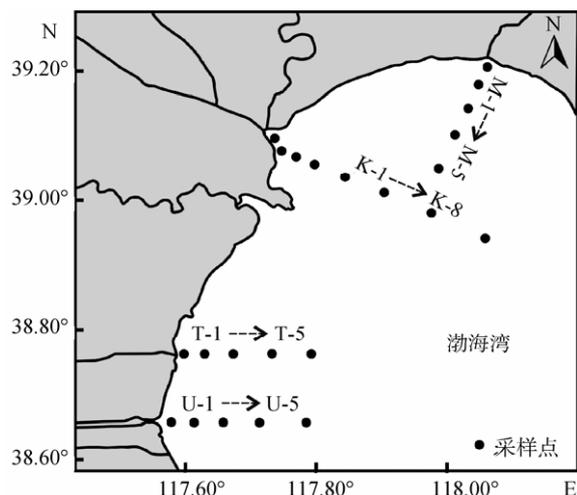


图 1 渤海湾北部和西部采样站位示意图

Fig. 1 Sampling sites in the northern and western Bohai Bay

样品含水率采用 60 °C 烘干称重法测定, 沉积物粒度利用英国马尔文公司 Mastersizer 2000 型激光衍射粒度分析仪测定, 总氮(TN)含量利用德国元素分析仪测定。总碳(TC)和总无机碳(TIC)含量利用岛津 TOC-V<sub>CPH</sub>-SSM5000A 分析仪测定, 两者之差为总有机碳(TOC)含量。不同形态无机碳按如下方法浸取<sup>[13]</sup>: NaCl 相: 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 NaCl 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, 再振荡洗涤 10 min, 离心分离, 两次离心液合并; NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 相: 在第 1 步残渣中加入 12.5 mL 0.1 mol/L 的 NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O, 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, 再振荡洗涤 10 min, 离心分离, 两次离心液合并; NaOH 相: 在第 2 步残渣中加入 12.5 mL 0.1 mol/L 的 NaOH 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, 再振荡洗涤 10 min, 离心分离, 两次离心液合并; NH<sub>2</sub>OH·HCl 相: 在第 3 步残渣中加入 12.5 mL 0.2 mol/L 的 NH<sub>2</sub>OH·HCl 溶液, 摇匀振荡 1 h 后, 倒掉上清液; 残渣相: 将第 4 步残渣烘干, 用岛津 TOC-V<sub>CPH</sub>-SSM5000A 分析仪测定其中无机碳含量, 记为残渣相无机碳含量。浸取液中的无机碳用岛津 TOC-V<sub>CPH</sub> 分析仪测定, 最后换算为沉积物中无机碳的含量。NH<sub>2</sub>OH·HCl 相无机碳含量由总无机碳含量减去其他

4 相无机碳含量得到。各相无机碳分析的相对标准误差小于 15%。

## 2 结果与讨论

### 2.1 无机碳及相关参数的分布特征

#### 2.1.1 沉积物粒度、TOC 和 TN 的分布特征

研究区各站位沉积物粒度、TOC 和 TN 的分布如表 1 所示。4 个断面的沉积物类型主要为黏土质粉砂, M、K、T 和 U 断面的中值粒径(D50)分别为 10.4、8.0、9.7 和 9.0 μm; 其中, T-1 站沉积物所含的粗粒度组分最多, D50 为 16.5 μm, K-3 站沉积物所含的细粒度组分最多, D50 为 5.1 μm。沉积物 TOC 含量变化范围为 10.6~22.8 mg/g, 总体上离岸较近的沉积物中 TOC 的含量较高, 如 M-1、K-1 和 U-1 站, 分别为所在断面的最高值, 可能与陆源输入有关。T-1 站 TOC 的含量较低可能与此处沉积物的粒径较粗有一定的关系。沉积物 TN 含量在 0.33~1.35 mg/g 范围内变

表 1 沉积物粒度、TOC 和 TN 的分布

Tab. 1 Distributions of grain-size, TOC and TN in sediments

站位	TOC (mg/g)	TN (mg/g)	D50 (μm)
U-1	22.78	1.35	7.0
U-2	17.09	0.98	9.2
U-3	19.81	0.94	11.4
U-4	19.78	0.95	8.7
U-5	14.79	0.90	8.7
T-1	13.84	0.75	16.5
T-2	17.38	1.09	6.8
T-3	16.03	0.99	7.5
T-4	14.28	0.93	9.4
T-5	16.04	0.91	8.4
K-1	21.86	0.90	5.2
K-2	16.30	0.87	10.7
K-3	20.29	1.17	5.1
K-4	16.43	1.23	10.2
K-5	17.34	1.22	7.5
K-6	19.05	1.01	7.8
K-7	13.38	0.61	8.0
K-8	14.93	0.89	9.5
M-1	15.57	0.62	10.7
M-2	12.90	1.00	11.8
M-3	11.25	0.83	12.2
M-4	11.90	0.33	8.9
M-5	10.64	0.95	8.2

化, 最高值和最低值分别出现在 U-1 和 M-4 站, 总体上其变化趋势与 TOC 有一定的相似性。

### 2.1.2 沉积物无机碳及其不同形态的分布特征

各站位不同形态无机碳分布及总量如图 2 所示。总无机碳的含量在 1.41~9.21 mg/g 之间, 平均值为 4.54 mg/g。不同形态无机碳含量的大小顺序一般为:  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相 >  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相 >  $\text{NaCl}$  相 > 残渣相 >  $\text{NaOH}$  相。其中,  $\text{NaCl}$  相无机碳的含量在 0.53~0.79 mg/g 之间, 平均值为 0.66 mg/g;  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相无机碳的含量在 0.47~1.52 mg/g 之间, 平均值为 0.86 mg/g;  $\text{NaOH}$  相无机碳的含量在 0.06~0.86 mg/g 之间, 平均值为 0.23 mg/g;  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相无机碳的含量在 0.56~7.13 mg/g 之间, 平均值为 2.56 mg/g; 残渣相无机碳的含量在 0~2.38 mg/g 之间, 平均值为 0.46 mg/g。  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相无机碳的含量最高, 在总无机碳中所占的比例超过了 50%。所有断面中, 断面 T 的无机碳平均含量最高, 达到 5.70 mg/g, 断面 M 的

无机碳平均含量最低, 为 2.68 mg/g。不同断面间,  $\text{NaCl}$  和  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相无机碳的含量变化相对较小, 分别在 0.65 mg/g 和 0.86 mg/g 附近, 其余 3 相无机碳含量变化较大。

## 2.2 影响因素分析

### 2.2.1 沉积物来源影响

其他研究区沉积物中各形态无机碳在总无机碳中所占的平均比例如表 2 所示。在胶州湾和长江口沉积物中, 前 3 相无机碳的相对含量一般小于 10%,  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相则在 30%左右, 残渣相一般都超过 40%<sup>[14]</sup>; 辽东湾柱状沉积物中,  $\text{NaCl}$  相和  $\text{NaOH}$  相无机碳的相对含量都小于 10%, 其余 3 相都在 20%以上, 其中  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相最高, 达到 31.4%<sup>[15]</sup>; 而在黄河口外海表层沉积物中, 各形态无机碳的大小关系为  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相 (29.6%) > 残渣相 (29.4%) >  $\text{NaOH}$  相 (21.4%) >  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相 (14.8%) >  $\text{NaCl}$  相 (4.8%)<sup>[16]</sup>。

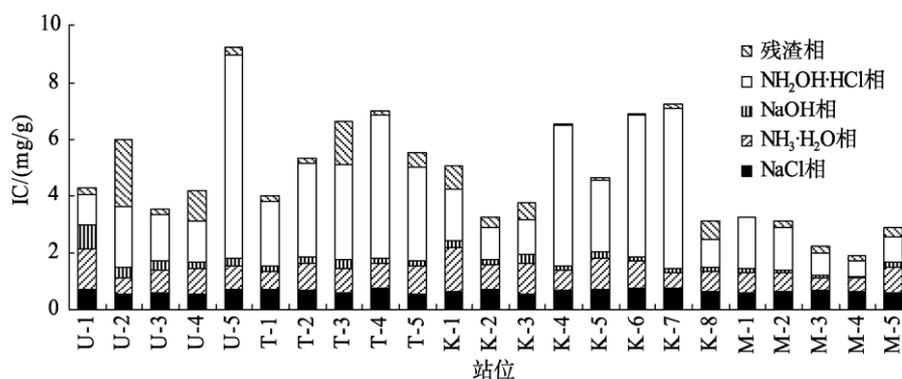


图 2 各形态无机碳含量

Fig. 2 The contents of inorganic carbon in different fractions

表 2 不同海域沉积物中各形态无机碳的含量

Tab. 2 The percentage of inorganic carbon in various fractions of sediments from different sea areas

研究区域	不同形态无机碳在总无机碳中的含量(%)					参考文献
	NaCl 相	$\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 相	NaOH 相	$\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 相	残渣相	
胶州湾	5.8	5.2	6.5	26.4	56.1	[14]
长江口	3.1	5.5	6.4	36.7	48.3	[14]
辽东湾	5.5	31.4	8.7	26.1	28.3	[15]
黄河口外海	4.8	29.6	21.4	14.8	29.4	[16]
渤海湾北部和西部海域	13.8	18.0	4.8	53.8	9.6	本研究

各形态无机碳含量的差异与不同研究区沉积物中碳酸盐矿物的来源及组成的差异有着密切关系。长江流域广阔、支流众多, 而且流域范围内岩石类型多种多样, 因而形成了沉积物中成分复杂的碳酸盐矿物, 除了陆源矿物碎屑外, 淡水钙质生物碎屑也

构成了长江口沉积物碳酸盐的重要组成部分<sup>[17]</sup>。胶州湾是深水港, 接受着周围十几条河流的物质输入, 辽东湾海域主要接受辽河及周边河流输入的大量物质, 黄河口海域受到黄河来沙的强烈影响。本研究区受黄河的影响相对较弱, 海河等河流在人类活动影

响下,入海物质也大为减少,潮流输送成为沉积物的主要来源<sup>[18]</sup>。沉积物来源的差异必然造成沉积矿物种类和性质的不同,进而对无机碳含量及其在各形态间的分配造成影响。

### 2.2.2 沉积物性质影响

表 3 列出了研究区海洋沉积物各形态无机碳与沉积物地球化学参数之间的相关系数。从表中可以看出,含水率与  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相、 $\text{NaOH}$  相和残渣相无机碳正相关,与  $\text{NaCl}$  相和  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相无机碳负相关,其中含水率与  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相、残渣相无机碳之间的相关关系显著。这说明含水率增高可能促使无机碳向  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相和残渣相无机碳转变,还可能促使不稳定的  $\text{NaCl}$  相无机碳溶解入海水或转化为  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相无机碳。含水率表征沉积物中的孔隙水含量,而孔隙水是固-固和固-液界面间物质交换的桥梁和纽带<sup>[14]</sup>,同时,含水率的大小还可以反映沉积物的疏松情况,并直接影响沉积物的再悬浮程度<sup>[19]</sup>,所以无机碳在沉积物-海水间的溶解释放与沉淀成岩过程与含水率之间可能存在一定关系。

表 3 各形态无机碳与沉积物主要地球化学参数之间的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between various fractions of inorganic carbon and the main geochemical parameters of sediments

形态	含水率	TN	TOC	黏土	粉砂	砂
$\text{NaCl}$ 相	-0.320	0.036	-0.120	-0.065	-0.190	0.271
$\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 相	0.710**	0.592**	0.771**	0.706**	-0.274	-0.410*
$\text{NaOH}$ 相	0.387	0.590**	0.681**	0.361	-0.016	-0.345
$\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 相	-0.075	0.074	-0.047	-0.047	0.147	-0.113
残渣相	0.444*	0.092	0.193	0.127	0.158	-0.298

注: \*表示在 0.05 水平上显著相关, \*\*表示在 0.01 水平上显著相关(双尾检验)

在所有形态无机碳中,只有  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相与沉积物粒度之间存在显著的相关关系,沉积物细粒度组分越多,  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相无机碳含量越大,其他各形态与粒度的相关关系均较弱。粒度对无机碳的影响具有一定的不确定性:东海表层沉积物中,粗粒级(>0.045 mm)无机碳含量高,细粒级(<0.045 mm)中等、砂、砾级中的无机碳异常富集<sup>[17]</sup>;对南沙群岛柱状沉积物的研究却表明,沉积物粒度不是控制碳酸盐垂向变化的主要因素<sup>[22]</sup>;李学刚测定了沉积物不同粒度组分中各个形态无机碳含量,发现  $\text{NaCl}$  相无机碳在沉积物的中等粒度组分富集,  $\text{NaOH}$  相无机碳在沉积物的粗粒度组分贫化,其他各形态无机碳在沉积物不同粒度间的分布没有显著性差异<sup>[13]</sup>。

TN 与所有形态无机碳都正相关,其中与  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{NaOH}$  相无机碳有极显著的相关关系,说明沉积物氮含量的增加可能会使这两相无机碳含量增加。元素氮主要是通过氨化和硝化作用影响沉积物无机碳。当沉积物中氨化作用占优势时,消耗氢离子,导致 pH 值升高;硝化作用占优势时,生成氢离子, pH 值降低。这两种作用都能促使碳酸盐沉淀溶解平衡发生移动<sup>[20]</sup>。

TOC 与  $\text{NaCl}$  相、 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相无机碳负相关,与其他 3 相正相关,其中与  $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  相、 $\text{NaOH}$  相无机碳有极显著的相关关系。有机碳是沉积物碳库的重要组成部分,主要源于生物碎屑、水体浮游和底栖生物残骸、底层微生物组织中的油脂、碳氢化合物、蛋白质等<sup>[21]</sup>。沉积物中的有机质参与了各种生物化学和地球化学作用,是活泼的生物地球化学要素。早期成岩过程中,有机质分解产生  $\text{HCO}_3^-$ ,制约沉积物孔隙水碱度和溶解无机碳含量,进而改变孔隙水的碳酸盐沉淀溶解平衡关系,影响碳酸盐的溶蚀和结晶<sup>[21]</sup>。

### 2.2.3 各形态无机碳间的相互影响

在沉积物早期成岩过程中,各形态无机碳处于一种动态平衡,可能存在相互转化的现象。从表 4 中可以看出,总无机碳与  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相无机碳之间存在极显著的相关关系,而与其他各形态无机碳的相关关系不显著,这可能是因为此相是总无机碳的主要组分,受总无机碳的影响较大。 $\text{NaCl}$  相无机碳与酸浸取相无机碳之间存在着显著的相关关系,而与碱浸取相无机碳的相关关系不显著,  $\text{NaCl}$  相与  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$  相无机碳之间较显著的正相关关系说明这两相无机碳可能存在相同的成因或来源,与残渣相无机碳之间极显著的负相关关系说明这两相无机碳在成岩过程中可能相互转化。碱浸取相无机碳之

表 4 各形态无机碳之间的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients among various fractions of inorganic carbon

形态	IC	NaCl 相	NH <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O 相	NaOH 相	NH <sub>2</sub> OH·HCl 相	残渣相
NaCl 相	0.290	1				
NH <sub>3</sub> ·H <sub>2</sub> O 相	0.179	-0.015	1			
NaOH 相	0.189	-0.027	0.616**	1		
NH <sub>2</sub> OH·HCl 相	0.740**	0.500*	-0.068	-0.112	1	
残渣相	0.216	-0.588**	0.005	0.253	-0.165	1

注: \*表示在 0.05 水平上显著相关, \*\*表示在 0.01 水平上显著相关(双尾检验)

间存在极显著的正相关关系, 与其他各形态间的相关关系不显著, 说明这两相无机碳可能也存在着相同的成因或来源, 且较难向其他 3 相转化。

### 3 结论

通过对渤海湾北部和西部海域表层沉积物各形态无机碳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, 表层沉积物总无机碳的平均含量为 4.54 mg/g。NaCl 相、NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 相、NaOH 相、NH<sub>2</sub>OH·HCl 相和残渣相无机碳的平均含量分别为 0.66、0.86、0.23、2.56 和 0.46 mg/g。所有样品中, NaOH 相无机碳的比例最小, 约为 5%; NH<sub>2</sub>OH·HCl 相的比例最大, 在 50%附近; 余下的 3 相各占 10%左右。

沉积物含水率、TN、TOC 和粒度等因素在一定程度上影响各形态无机碳含量。其中, NaCl 相与各参数间的相关关系较弱, NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O 相受沉积物含水率、TN、TOC 和沉积物细组分的影响极为显著, NaOH 相受沉积物 TN 和 TOC 的影响极为显著, NH<sub>2</sub>OH·HCl 相受各因素的影响较弱, 残渣相受含水率的影响较为显著。

在沉积物早期成岩过程中, 各形态无机碳之间可能存在相互转化现象。NaCl 相无机碳与酸浸取相无机碳之间存在显著的相关关系, 与残渣相无机碳之间存在极显著的负相关关系, 这说明 NaCl 相和残渣相无机碳在成岩过程中可能相互转化。碱浸取相无机碳之间存在极显著的正相关关系, 与其他各形态间的相关关系不显著, 说明这两相无机碳可能较难向其他 3 相转化。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2007: impacts, adaptation and

vulnerability. Contribution of working group I to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

- [2] Le Quéré C, Raupach M R, Canadell J G, et al. Trends in the sources and sinks of carbon dioxide [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(12): 831-836.
- [3] Millero F J. The Marine inorganic carbon cycle [J]. *Marine Chemistry*, 2007, 107: 308-341.
- [4] Falkowski P, Scholes R, Boyle E, et al. The global carbon cycle: a test of our knowledge of earth as a system [J]. *Science*, 2000, 290(5490): 291-296.
- [5] Sabine C L, Feely R A, Gruber N, et al. The oceanic sink for anthropogenic CO<sub>2</sub> [J]. *Science*, 2004, 305: 367-341.
- [6] Feely R A, Sabine C L, Lee K, et al. Impact of anthropogenic CO<sub>2</sub> on the CaCO<sub>3</sub> system in the oceans [J]. *Science*, 2004, 305: 362-366.
- [7] Chen C T A, Liu K K, MacDonald R. Continental margin exchanges [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003: 53-97.
- [8] Borges A V. Do we have enough pieces of the jigsaw to integrate CO<sub>2</sub> fluxes in the coastal ocean? [J]. *Estuaries*, 2005, 28(1): 3-27.
- [9] Borges A V, Schiettecatte L S, Abril G, et al. Carbon dioxide in European coastal waters [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 70: 375-387.
- [10] Gattuso J P, Frankignoulle M, Wollast R. Carbon and carbonate metabolism in coastal aquatic ecosystems [J]. *Annual Review of Ecology System*, 1998, 29: 405-434.
- [11] 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.
- [12] Hu X, Burdige D J. Enriched stable carbon isotopes in the pore waters of carbonate sediments dominated by seagrasses: Evidence for coupled carbonate dissolution

- and reprecipitation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71: 129-144.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王飞. 黄河口无机碳的时空分布及其输送通量[M]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [17] 杨作升, 范德江, 郭志刚, 等. 东海陆架北部泥质区表层沉积物碳酸盐粒级分布与物源分析[J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 1-6.
- [18] 胡世雄, 齐晶. 海河流域入海河口萎缩及其对洪灾的影响[J]. *海河水利*, 2000, 1: 11-13.
- [19] 谭镇, 钟萍, 应文晔, 等. 惠州西湖底泥中氮磷特征的初步研究[J]. *生态科学*, 2005, 24(2): 318-321.
- [20] 王晓亮. 黄河口无机碳输送行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [21] 万国江, 白占国, 王浩然, 等. 洱海近代沉积物中碳-氮-硫-磷的地球化学记录[J]. *地球化学*, 2000, 29(2): 189-197.
- [22] 高学鲁, 陈绍勇, 马福俊, 等. 南沙群岛西部海域两柱状沉积物中碳和氮的分布和来源特征及埋藏通量估算[J]. *热带海洋学报*, 2008, 27(3): 38-44.

## Fractionation of inorganic carbon in the surface sediments of northern and western Bohai Bay

WANG Yun-zhou<sup>1, 2</sup>, GAO Xue-lu<sup>1</sup>, YANG Yu-wei<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: Jan., 20, 2010

**Key words:** Bohai Bay; sediment; sequential extraction; fractionation of inorganic carbon

**Abstract:** Fractionation of inorganic carbon (IC) in the surface sediments of northern and western Bohai Bay was extracted sequentially with solutions of sodium chloride (NaCl), ammonia (NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O), sodium hydroxide (NaOH), hydroxylamine hydrochloride (NH<sub>2</sub>OH·HCl), resulting in five fractions: the exchangeable fraction (NaCl fraction), weak alkali extractable fraction (NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O fraction), strong alkali extractable fraction (NaOH fraction), weak acid extractable fraction (NH<sub>2</sub>OH·HCl fraction), and residual fraction. Combined with other sediment geochemical parameters, the factors which affected the IC content were discussed. The results showed that in the surface sediments of the study area, the average contents of IC in different fractions, i.e. NaCl fraction, NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O fraction, NaOH fraction, NH<sub>2</sub>OH·HCl fraction and Residual fraction, were 0.66, 0.86, 0.23, 2.56 and 0.46 mg/g, respectively. The NaOH fraction accounted for the smallest proportion (about 5%) of the TIC. The NH<sub>2</sub>OH·HCl fraction ration was the largest, in the vicinity of 50%. Correlation analysis among different IC fractions and geochemical parameters indicated that the sediment moisture content, total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC) and sediment fine fraction had a highly significant effect on the NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O fraction of IC; TN and TOC had a significant effect on the NaOH fraction IC; sediment moisture content had a significant effect on residual fraction IC; and there was no significant correlation between various sediment geochemical factors and the other two fractions. During early diagenesis, there might be a certain transformation between the NaCl and the residual fractions of IC.

(本文编辑: 康亦兼)