

胶州湾沉积物的放射性核素含量分布与沉积速率

刘广山¹⁾ 李冬梅¹⁾ 易勇¹⁾ 刘素美²⁾ 白洁³⁾ 张经⁴⁾

1) 厦门大学海洋系, 福建厦门 361005

2) 中国海洋大学化学化工学院, 山东青岛 266100

3) 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266100

4) 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062

摘要 用HPGe γ 谱方法测定了胶州湾表层沉积物、沉积物岩心、潮间带沉积物和周围陆地沉积物的放射性核素 ^{238}U 、 ^{228}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{40}K 和 ^{137}Cs 。笔者对胶州湾沉积物、潮间带沉积物和陆地表层沉积物的放射性核素分布进行研究, 结果得出, 湾东部沉积物和东岸陆地沉积物具有较高的放射性核素含量。对沉积物岩心放射性核素分布的成因进行了分析, 并用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 方法估算了沉积速率, 给出的胶州湾的沉积速率为 $0.64\sim 1.74\text{ cm/a}$ 。

关键词 胶州湾; 沉积物; 放射性核素; 沉积速率

中图分类号: P597.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-3021(2008)06-769-09

Radionuclide Distribution in Sediments and Sedimentary Rates in the Jiaozhou Bay

LU Guangshan¹⁾ LI Dongmei¹⁾ YI Yong¹⁾ LIU Sumei²⁾ BAI Jie³⁾ ZHANG Jing⁴⁾

1) Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005;

2) College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100;

3) College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100

4) State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062

Abstract Radionuclides in sediments of the Jiaozhou Bay and its surrounding area were measured using the HPGe γ spectrum method. ^{238}U , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{40}K and ^{137}Cs were detected in sediment samples. The results show that the radionuclide contents of the sediments collected from the east bay are relatively high. The vertical distribution of nuclides in the sediment cores was analyzed, and the sedimentary rates were evaluated by $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs methods, yielding the value of $0.64\sim 1.74\text{ cm/a}$.

Key words Jiaozhou Bay; sediments; radionuclide; sedimentary rate

测定沉积物中的放射性核素, 研究其地球化学行为, 用其作为示踪剂来揭示海洋学过程的机制, 探讨各种地质过程与环境演变, 并通过估算海洋沉积物沉积速率推断出海洋环境中发生的历史事件 (Sakanoue et al, 1990; Yokoyama et al, 1990; 伊凡诺维奇等, 1991; 刘广山等, 1998; 李冬梅等, 2005)。

海洋的放射性核素来源于陆地、大气圈和海洋

系统内部。铀系核素 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{222}Rn 和 ^{210}Pb 钍系核素 ^{228}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{228}Ac 和 ^{224}Ra 等, 已成为海洋过程的时钟和常用的沉积物测年工具 (Baskaran et al, 1995; Fuller et al, 1999; San Miguel et al, 2001; 刘广山等, 2003)。特别是 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 适用于几十年到百年时间尺度的年代测定, 是研究近海沉积环境最常用的核素。

本文由国家自然科学基金项目 (编号: 40036010) 资助。

收稿日期: 2008-09-20; 改回日期: 2008-10-25; 责任编辑: 刘志强。

第一作者简介: 刘广山, 男, 1959年生, 教授, 主要从事同位素海洋学研究; 通讯地址: 361005, 福建省厦门市厦门大学; E-mail: lgshan@

xmu.edu.cn

表 1 沉积物样品采样位置、采样日期和性状描述

Table 1 Sampling locations and dates and description of samples

站位	纬度	经度	采样日期	类型	性状描述
A3	36°9'36"N	120°15'12"E	2001 8 13	表层沉积物	黄褐色粉砂质泥
B1	36°7'39"N	120°11'54"E	2001 8 13	表层沉积物	黄褐色粉砂质泥
B3	36°7'39"N	120°15'12"E	2001 8 13	表层沉积物	黄褐色粉砂质泥
B5	36°7'39"N	120°18'30"E	2001 8 13	表层沉积物	灰黑色粉砂质泥
C2	36°5'24"N	120°13'42"E	2001 8 13	表层沉积物	黄褐色粉砂质泥
C3	36°5'24"N	120°15'12"E	2001 8 13	表层沉积物	灰黑色粉砂质泥
C23	36°5'23"N	120°14'36"E	2002 9 27	岩心	长 271 cm, 灰色泥
4A2	36°10'57.1"N	120°19'18"E	2004 9 29	岩心	长 46 cm, 灰色泥,
4C12	36°7'14.3"N	120°8'48.6"E	2004 9 29	岩心	长 40 cm, 灰色泥
4C3	36°7'24.6"N	120°13'18"E	2004 9 29	岩心	长 48 cm, 灰色泥
4C45	36°7'25.6"N	120°18'30"E	2004 9 29	岩心	长 32 cm, 灰色泥
T1	36°12'706"N	120°12'45"E	2004 10 1	潮间带表层沉积物	黄褐色细砂质泥
T2	36°05'059"N	120°11'39"E	2004 10 1	潮间带表层沉积物	灰色淤泥
T3	36°04'176"N	120°10'51"E	2004 10 1	潮间带表层沉积物	灰色细砂
T4	36°04'588"N	120°11'17"E	2004 10 1	潮间带表层沉积物	灰色细砂
L1	36°08'56.9"N	120°29'42"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	黑色粗砂
L2	36°08'56.7"N	120°29'40"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	褐色粗砂, 少量细砂
L3	36°09'48.1"N	120°27'26"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	灰色细砂, 结块成大颗粒
L4	36°15'59.6"N	120°28'01"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	深褐色细砂
L5	36°18'39.6"N	120°21'18"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	灰色细砂
L6	36°19'47.6"N	120°18'17"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	深褐色细砂
L7	36°20'22.9"N	120°12'07"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	深褐色细砂, 结块成大颗粒
L8	36°20'09.0"N	120°08'56"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	深褐色细砂
L9	36°08'35.0"N	120°01'09"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	褐色(偏红)细砂
L10	36°05'40.5"N	119°59'56"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	褐色中砂
L11	36°05'01.2"N	120°01'01"E	2004 10 1	陆地表层沉积物	深褐色细砂

已有一些胶州湾表层沉积物放射性核研究的报道, 国家海洋局第一海洋研究所(1984)对胶州湾的沉积物和生物样品中的 ^{55}Fe 、 ^{65}Zn 和 ^{137}Cs 分别进行了调查研究; 尹毅等(1983)对青岛沿海海洋环境的放射性污染状况进行了研究; 李培泉等(1986)和贾成霞等(2003)分别对胶州湾表层沉积物的放射性核素分布进行了测定。

笔者用 HPGe γ 谱方法测定了胶州湾表层沉积物、沉积物岩心、潮间带沉积物和周围陆地沉积物的放射性核素 ^{238}U 、 ^{228}Ra 、 ^{228}Th 、 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{40}K 和 ^{137}Cs 用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 方法估算了沉积速率, 并对胶州湾的沉积速率进行了综合分析。

1 样品的采集与测量

胶州湾位于黄海之滨的山东半岛南部, 东岸为青岛市区。湾口开向东南, 口门最窄处仅 3.1 km, 海湾面积为 397 km² (中国海湾志编纂委员会, 1993)。本研究的采样站位, 采样日期和样品性状如图 1 和表 1 所示, 6 个表层沉积物样品用抓斗式采泥器采集, 采样深度约 10 cm, 样品采集后在塑料

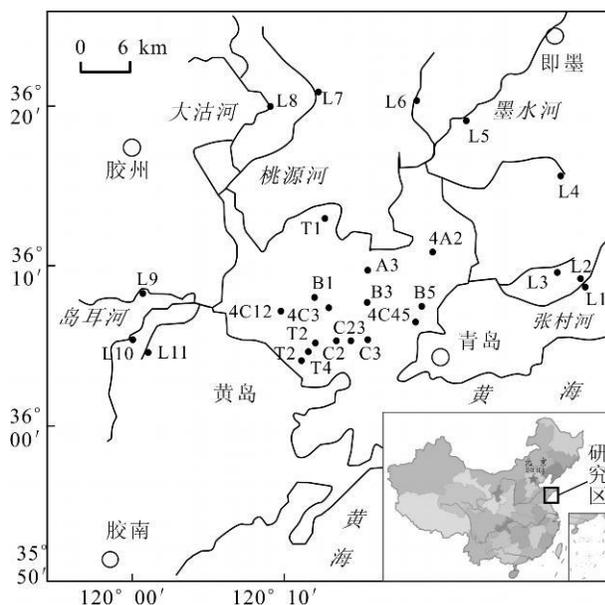


图 1 研究海区与采样站位

Fig. 1 The studied sea area and sampling stations

盆内中混匀, 取约 1000 g 湿样, 回实验室分样。C23 岩心用重力采样器采集, 岩心长度为 271 cm, 直径

表 2 表层沉积物放射性核素含量 /Bq·kg⁻¹
Table 2 Radionuclide contents in surface sediments /Bq·kg⁻¹

站位	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs	²¹⁰ Pb	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb _{ex}	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²²⁸ Th/ ²²⁸ Th	²³⁸ U	²²⁶ Ra/ ²³⁸ U
A3	692±58	2.95±0.56	51±12	20.6±2.7	30±12	35.7±4.7	40.9±4.4	1.15	42±12	0.50
B1	691±58	4.26±0.76	66±13	24.1±3.3	42±13	36.8±4.9	41.6±4.5	1.13	37±2	0.37
B3	700±58	2.89±0.57	50±10	23.8±2.8	26±10	36.5±4.1	41.3±4.3	1.13	35±8	0.68
B5	607±52	2.75±0.59	70±18	44.1±5.1	26±18	57.3±6.4	58.0±6.2	1.01	56±7	0.78
C2	732±62	3.99±0.73	66±15	22.6±3.0	43±15	37.5±4.1	41.4±4.6	1.10	32±12	0.70
C3	707±59	2.86±0.60	63±10	23.5±2.9	40±10	37.9±4.7	45.8±4.8	1.21	47±11	0.49
范围值	607~732	2.75~4.26	50~70	20.6~44.1	26~43	35.7~57.3	40.9~58.0	1.01~1.21	32~56	0.37~0.78
平均值	688	3.28	61	26.5	35	40.3	44.8	1.11	39	0.67

表 3 沉积物铀系核素的含量范围与平均值 /Bq·kg⁻¹
Table 3 Content ranges and average values of uranium series nuclides in sediments /Bq·kg⁻¹

岩心	²¹⁰ Pb		²²⁶ Ra		²³⁸ U		²¹⁰ Pb _{ex}		²²⁶ Ra/ ²³⁸ U	
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
C23	16.1~59.6	38.0	17.5~27.6	22.3	22.9~37.7	31.8	0~40.2	22.9	0.56~0.87	0.70
4A2	30.7~67.7	45.7	24.6~30.5	26.3	27.3~40.7	33.2	6.1~39.0	19.2	0.64~0.98	0.82
4C12	50.4~105.0	68.2	22.8~28.2	25.3	32.7~44.2	38.4	25.9~78.1	43.0	0.60~0.73	0.66
4C3	42.8~64.8	53.0	20.4~30.1	27.0	28.1~45.4	34.5	2.9~37.1	17.7	0.46~1.03	0.81
4C45	80.0~138.0	114.0	23.9~40.6	34.2	49.0~60.2	53.6	56.1~97.7	79.5	0.49~0.72	0.64
表层沉积物	50.0~70.0	61.1	20.6~44.1	26.5	32.0~56.2	41.5	25.9~43.4	34.6	0.37~0.78	0.59
潮间带沉积物	60.6~74.5	68.9	23.1~32.5	26.7	31.9~47.9	42.5	37.5~50.1	42.3	0.55~0.72	0.63
陆地表层沉积物	31.8~124.0	80.4	17.6~29.2	24.7	35.5~57.6	45.8	10.5~94.8	55.7	0.47~0.77	0.55

10.5 cm, 上层 36 cm 按 1 cm 间隔进行分样, 其余 36 ~ 271 cm 按 2 cm 间隔分样, 共 155 个样品。4 个短岩心 (4A2, 4C12, 4C3, 4C45) 用箱式采泥器采集, 在船上甲板取直径为 7 cm 的岩心, 4 cm 间隔分割样品。在胶州湾北部和西南部潮滩采集了 4 个潮间带表层沉积物样品 (T1~T4)。在胶州湾周围各主要河流岸边采集了 11 个表层沉积物样品 (L1~L11)。

在厦门大学同位素海洋学实验室用 γ 谱仪测量样品, 测量前将样品用塑料袋气密封放置 20 d 以上时间, 装入 $\Phi 75$ mm \times 50 mm 的聚乙烯塑料盒中, 压实测量样品的高度。样品高度在 10~45 mm 之间。样品直接放置在探测器端帽上方收集谱数据。封装前, 每个样品取 10 g 左右 105℃ 烘干, 恒重测量含水量。测定结果校正为采样时的沉积物干重含量。效率刻度方法同文献 (刘广山等, 2001)。用由模拟介质掺入 GBW 0412 标准物质制作的刻度源进行效率刻度。

测量 ⁴⁰K 用 1460.5 keV (分支比 10.67%) γ 射线; 测量 ²¹⁰Pb 用 46.5 keV (4.0%) γ 射线; 测量 ²²⁶Ra 用 ²¹⁴Pb 的 351.9 keV (37.09%) 和 ²¹⁴Bi 的 609.3 keV (46.1%)、1120.3 keV (15.0%) γ 射线; 测量 ²²⁸Ra 用 ²²⁸Ac 的 338.7 keV (11.9%)、911.2

keV (27%) 和 968.8 keV (16.3%) γ 射线; 测量 ²²⁸Th 用 ²¹²Pb 的 238.6 keV (43.6%) 和 ²⁰⁸Tl 的 583.1 keV (30.96%) γ 射线; 测量 ²³⁸U 用 ²³⁴Th 的 63.2 keV (分支比 3.826%) γ 射线; 测量 ¹³⁷Cs 用 661.6 keV (85%) γ 射线。

2 沉积物中放射性核素含量水平分布

表层沉积物放射性核素含量、过剩的 ²¹⁰Pb、²²⁸Th/²²⁸Ra 和 ²²⁶Ra/²³⁸U 活度比列于表 2。除 B5 站外, 样品中 ⁴⁰K、²²⁶Ra、²²⁸Ra、²²⁸Th 的分布基本均匀, 而 ¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、²³⁸U 含量变化较大, 但全部核素含量均分别在同一水平。B5 站位于湾东部, 各个核素的含量不同于其余站点, ⁴⁰K 和 ¹³⁷Cs 含量稍低于其他站点, 而 ²¹⁰Pb、²²⁶Ra、²²⁸Ra、²²⁸Th、²³⁸U 含量高于其他站点。包括 B5 站在内, 全部表层沉积物样品中 ²¹⁰Pb 相对于 ²²⁶Ra 过剩, ²²⁶Ra 相对于 ²³⁸U 亏损。

表 3 和 4 按铀系核素和钍系核素列出了沉积物岩心、表层沉积物、潮间带沉积物、和胶州湾周围陆地表层沉积物放射性核素含量范围和平均值, 从中可以得出以下结论:

(1) 除 ⁴⁰K 以外, 湾东南部采集的岩心 (4C45) 中的核素含量平均值高于其余海区, 也高于潮间带

表 4 沉积物中¹³⁷Cs、⁴⁰K、²²⁸Ra和²²⁸Th的含量范围与平均值/Bq·kg⁻¹Table 4 Content ranges and average values of ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁸Ra and ²²⁸Th in sediments /Bq·kg⁻¹

岩心	¹³⁷ Cs		⁴⁰ K		²²⁸ Ra		²²⁸ Th		²²⁸ Th/ ²²⁸ Ra	
	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值	范围值	平均值
C23	0.10~14.3	3.75	612~799	706	29.1~63.1	49.9	32.6~62.5	48.2	0.77~1.30	0.97
4A2	1.21~3.37	2.05	564~684	637	30.6~40.1	35.9	30.7~42.6	38.8	1.00~1.19	1.08
4C12	2.39~3.55	3.02	651~784	735	39.3~50.3	46.0	41.7~53.7	47.5	0.94~1.09	1.03
4C3	0.71~3.88	2.07	697~776	736	35.8~57.7	48.6	42.4~58.9	51.3	0.97~1.18	1.06
4C45	2.61~4.33	3.48	696~778	729	43.9~67.7	55.8	40.4~63.3	53.3	0.92~1.03	0.95
表层沉积物	2.75~4.26	3.28	607~732	688	35.7~57.3	40.3	40.9~58.0	44.8	1.01~1.21	1.11
潮间带沉积物	1.09~2.01	1.52	459~778	656	28.5~44.1	37.4	28.2~45.4	37.2	0.91~1.06	1.00
陆地表层沉积物	0.20~6.30	2.13	520~1075	760	35.8~69.9	51.0	33.7~69.6	51.0	0.91~1.00	0.96

和周围陆地表层沉积物,与表层沉积物的测量结果一致。与表层沉积物的结果不同的是C45岩心中¹³⁷Cs含量平均值也是4个短岩心中最高的。

(2)湾东北部的4A2岩心中的¹³⁷Cs、⁴⁰K、²²⁸Ra和²²⁸Th的含量平均值是全部岩心中最低的。

(3)全部样品中²²⁶Ra/²³⁸U活度比都小于1;与表层沉积物不同,岩心、潮间带沉积物和周围陆地表层沉积物中的²²⁸Th/²²⁸Ra活度比平均值接近1,这可能是陆地和潮间带沉积物²²⁸Th与²²⁸Ra的分离不象有较深水体中那么明显,所以形不成明显的²²⁸Th过剩,而长岩心较下面的层段²²⁸Ra向上覆水扩散较少,且已经历了较长的时间,²²⁸Th与²²⁸Ra已达到衰变平衡。

3 沉积物岩心放射性核素分布

3.1 C23岩心

C23岩心中的放射性核素含量分布如图2所示。整个岩心中所探测到的核素为⁴⁰K、²¹⁰Pb、²²⁶Ra、²²⁸Ra、²²⁸Th和²³⁸U,120cm以上层位探测到¹³⁷Cs

¹³⁷Cs含量为0~14.27Bq/kg,平均值为3.75Bq/kg,分别在43cm和63cm处有一峰值,在40cm以上层位¹³⁷Cs含量较小。

⁴⁰K的含量为612~799Bq/kg,平均值为706Bq/kg,整个岩心中随深度变化不大,符合沉积物岩心中⁴⁰K分布的典型特征。

²¹⁰Pb的含量为16.1~59.6Bq/kg,平均值为38.0Bq/kg,表层至60cm处,²¹⁰Pb含量变化不明显,可以认为是混合层;60~140cm层位,²¹⁰Pb含量随着深度增加逐渐降低,近似呈指数衰减形式,160cm以下层位变化较小,且与²²⁶Ra达到了衰变平衡。

²²⁶Ra的含量为17.5~27.6Bq/kg,平均值为22.3Bq/kg,表层²²⁶Ra含量较低,随深度增加逐渐增加,到36cm后含量略有降低,但不明显,60cm

深度以下,²²⁶Ra含量有涨落,但变化趋势不明显。

²³⁸U的含量为22.9~33.7Bq/kg,平均值为31.8Bq/kg,表层²³⁸U含量较低,随深度的增加而增加,到达20cm深度后变化不大,²³⁸U含量有涨落,但变化趋势不明显。

²²⁶Ra相对于²³⁸U亏损,²²⁶Ra/²³⁸U活度为0.56~0.87,平均值为0.70,从表层起,²²⁶Ra/²³⁸U活度比逐渐增加,约10cm层位以下变化不再明显。

²²⁸Ra的含量为29.1~63.1Bq/kg,平均值为49.9Bq/kg,表层含量较低,随着深度的增加含量会增加,达到56cm左右时,含量达到极大值;56cm深度以下有缓缓增加趋势,但变化不明显。

²²⁸Th的含量为32.6~62.5Bq/kg,平均值为48.2Bq/kg,²²⁸Th变化趋势与²²⁸Ra大致相同,差异在于表层变化不大,从32cm左右开始增加,56cm深度达到极大值;56cm后含量变化不大。

²²⁸Th/²²⁸Ra活度比范围为0.77~1.30,平均值为0.97,表层明显大于1,随深度增加很快减少到1左右,说明除了表层²²⁸Th过剩外,整个沉积物岩心中均不存在²²⁸Th过剩。因为快速下沉的颗粒物质会给沉积物供给无支持²²⁸Th,且沉积物中的²²⁸Ra向上扩散,所以表层沉积物中²²⁸Th/²²⁸Ra活度比大于1,对下层沉积物而言,²²⁸Ra扩散进入上覆水的可能性比较小,而且经历较长时间达到衰变平衡,所以深层沉积物中²²⁸Th/²²⁸Ra活度比约等于1。

3.2 其他岩心

除C23岩心外,其他岩心均比较短,在48cm以下。全部岩心中的¹³⁷Cs含量分布均未象C23那样观察到峰出现,这可能是由于岩心较短,采样深度没有达到1963年的沉积层,还有可能是由于样品分割间距较大,淹没了可能出现的峰。

4A2岩心的⁴⁰K、²²⁶Ra、²²⁸Ra和²²⁸Th活度,以及²²⁶Ra/²³⁸U和²²⁸Th/²²⁸Ra活度比呈均匀分布,表层

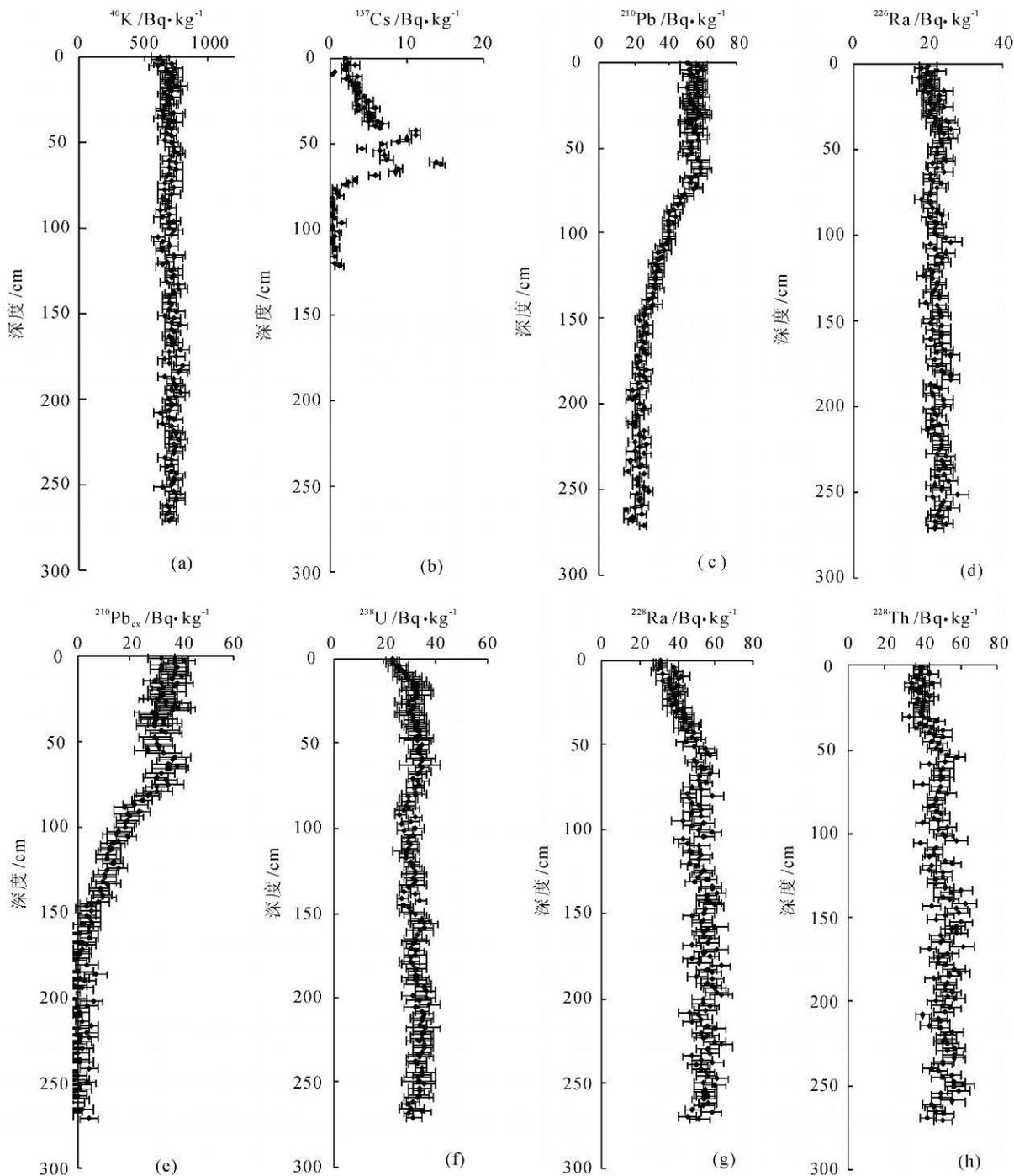


图 2 C23岩心放射性核素活度分布

Fig. 2 Distribution of radionuclides in sediment core C23

16 cm 的 ^{137}Cs , ^{210}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{238}U 活度随深度增加, 16 cm 以下层段, 活度变化有起伏, 但不存在明显的规律性。整个岩心, ^{226}Ra 相对于 ^{238}U 亏损, ^{228}Th 于相对 ^{228}Ra 过剩。整个岩心探测到 ^{137}Cs

4C12岩心 ^{40}K , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th 和 ^{238}U 活度, 以及 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 和 $^{228}\text{Th}/^{228}\text{Ra}$ 活度呈均匀分布, 表层 10 cm 的 ^{137}Cs , ^{210}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度随深度增加, 10 cm

以下层段, 活度变化有起伏, 但不存在明显的规律性。只在 0~26 cm 层段探测到 ^{137}Cs 与 4A2 岩心类似, 整个岩心, ^{226}Ra 相对于 ^{238}U 亏损, ^{228}Th 于相对 ^{228}Ra 过剩。

4C3岩心 ^{210}Pb 和 ^{40}K 在整个岩心中基本呈均匀分布。由于 ^{226}Ra 随深度呈增加趋势, 所以 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 呈现出随深度降低的趋势。在 32 cm 以上层, ^{238}U 活

表 5 潮间带和周围陆地沉积物样品核素含量 /Bq·kg⁻¹Table 5 Nuclide contents of sediments collected from the intertidal zone and coastal land /Bq·kg⁻¹

样品号	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K	²¹⁰ Pb	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb _{ex}	²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²²⁸ Th/ ²²⁸ Ra	²³⁸ U	²²⁶ Ra/ ²³⁸ U
T-1	1.2±0.2	709±29	66.8±7.4	27.4±2.5	39.6±9.9	41.1±3.4	37.6±3.1	1.0	47.9±6.5	0.6
T-2	2.0±0.1	457±19	73.7±7.7	23.6±2.1	52.1±9.8	35.7±3.0	37.7±3.0	1.0	43.1±5.6	0.5
T-3	1.7±0.2	778±31	60.0±6.4	23.1±2.0	36.9±8.4	28.5±2.5	28.2±2.3	1.0	31.9±4.4	0.7
T-4	1.0±0.1	677±27	74.5±8.0	32.5±2.8	41.5±10.8	44.1±3.7	45.4±3.7	1.0	46.9±6.3	0.7
平均值	1.5±0.2	655±29	68.7±7.4	26.6±2.3	42.1±9.7	37.4±6.0	37.2±3.0	1.0	42.5±5.7	0.6
范围	1.0~2.0	457~778	60.0~74.5	23.1~32.5	36.9~52.1	28.5~35.7	28.2~45.4	1.0	31.9~47.9	0.5~0.7
L-1	0.4±0.2	1055±43	91.6±9.7	27.5±2.5	64.1±12.1	57.4±4.8	52.8±4.3	0.9	56.3±7.3	0.5
L-2	3.6±0.3	1075±44	107±11	29.2±2.7	77.6±14.0	64.0±5.4	60.4±4.9	0.9	57.6±7.7	0.5
L-3	0.5±0.2	824±33	80.9±8.6	29.0±2.6	51.9±11.2	63.2±5.2	57.7±4.6	0.9	52.3±6.9	0.6
L-4	1.1±0.9	747±59	49.1±6.9	23.8±2.1	25.3±9.0	69.9±5.0	69.6±6.8	1.0	70.4±9.1	0.7
L-5	3.1±0.3	687±28	124±13	29.2±2.7	94.9±15.6	56.0±4.7	54.2±4.4	1.0	38.1±5.1	0.4
L-6	2.4±0.2	520±21	67.8±7.2	21.4±1.9	46.4±9.1	35.8±3.0	34.1±2.8	1.0	41.5±5.5	0.6
L-7	0.4±0.1	687±28	78.3±8.2	23.2±2.1	55.2±10.3	45.2±3.5	43.8±3.5	1.0	47.1±6.1	0.6
L-8	6.3±0.2	692±28	94.4±9.8	24.9±2.2	69.5±12.0	41.0±3.5	39.9±3.2	1.0	53.1±6.8	0.5
L-9	3.0±0.3	624±25	88.7±9.3	25.0±2.2	63.7±11.5	42.2±3.6	41.4±3.4	1.0	36.5±4.9	0.5
L-10	0.2±0.1	808±33	71.1±7.5	17.6±1.7	53.6±9.2	36.4±3.1	33.7±2.7	0.9	36.1±6.1	0.5
L-11	2.4±0.3	640±50	31.8±4.3	21.3±1.9	10.5±6.2	49.4±3.6	49.4±4.8	1.0	35.5±5.2	0.6
平均值	2.2±0.3	760±31	80.4±8.7	24.7±2.2	55.7±10.9	51.0±4.2	48.8±4.1	1.0	47.7±6.4	0.5
范围	0.2~6.3	520~1075	31.8~124	17.6~29.2	10.5~94.9	35.8~69.9	33.7~69.6	0.9~1.0	35.5~70.4	0.4~0.7

度为 23.9~27.7 Bq/kg 在 32 cm 以下层段, 上升至 35.5~38.6 Bq/kg, 但 ²²⁶Ra/²³⁸U 活度比并没有呈现出明显的变化趋势。该岩心中 ²²⁸Ra 和 ²²⁸Th 活度随深度增加, 但 ²²⁸Th/²²⁸Ra 活度比大于一, 且随深度减小, 说明 ²²⁸Th 相对于 ²²⁸Ra 的过剩随深度增加减小。在 20 cm 以上层位, 4C3 岩心中 ¹³⁷Cs 具有较高的活度, 为 2.48~3.88 Bq/kg, 20 cm 以下层段降低为 0.71~1.43 Bq/kg。

4 潮间带与近岸陆地沉积物的放射性核素含量

潮间带和周围陆地沉积物样品中放射性核素含量如表 5 所示。探测到的核素为 ¹³⁷Cs、⁴⁰K、²¹⁰Pb、²²⁶Ra、²³⁸U、²²⁸Th 和 ²²⁸Ra。

4.1 潮间带沉积物放射性核素

潮间带沉积物样品中的放射性核素含量平均值与表层沉积物接近, 但 T2 站样品中的 ⁴⁰K 含量仅 457 Bq/kg 是全部样品中 ⁴⁰K 含量最低的, 这可能是由于 T2 站样品是泥质的, 其中的 K 元素易于溶解于水中。潮间带其他样品/其他核素含量平均值与其他种类的沉积物中的含量水平没有明显差异。

4.2 胶州湾周围陆地沉积物放射性核素含量分布

按照位置不同可以将站位分为 4 个流域: L1、L2 和 L3 站为张村河流域, L4、L5 和 L6 为墨水河流域, L7 和 L8 为大沽河流域, L9、L10 和 L11 为岛

耳河流域。

陆地沉积物中 ¹³⁷Cs 含量分布基本上不具备规律性, L1、L3、L7 和 L10 4 个站 ¹³⁷Cs 含量极低, L8 站 ¹³⁷Cs 含量最高, 为 6.3 Bq/kg, 其他几个站位的含量都在 3.0 Bq/kg 左右。⁴⁰K 平均含量的大小顺序为: 张村河流域 > 岛耳河流域 > 大沽河流域 > 墨水河流域。²³⁸U、²²⁸Ra 和 ²²⁸Th 平均含量的大小顺序为: 张村河流域 > 墨水河流域 > 岛耳河流域 > 大沽河流域。²²⁶Ra 和 ²¹⁰Pb 平均含量的大小顺序为: 张村河流域 > 大沽河流域 > 墨水河流域 > 岛耳河流域。

5 胶州湾的沉积速率及结论

可用 ²¹⁰Pb_{ex} 和 ¹³⁷Cs 方法进行近岸沉积物沉积速率的估算, ²¹⁰Pb_{ex} 法测定沉积速率要求岩心中的 ²¹⁰Pb_{ex} 分布呈指数衰减形式, 这种分布形式存在是用 ²¹⁰Pb_{ex} 方法估算沉积速率的前提条件, 因为它证明岩心或岩心的一段未受到扰动。¹³⁷Cs 方法估算沉积速率假设人类利用原子能前环境中不存在 ¹³⁷Cs, 而且大多数情况下利用 1963 作为最大沉降年, 在沉积物岩心中, 含有 ¹³⁷Cs 的层段是核爆开始以后时间沉积的, 但是, 从笔者对多个岩心的测量结果和文献报道的岩心中 ¹³⁷Cs 的分布看, 岩心中的 ¹³⁷Cs 大都是以 1963 年峰值作为起始点, 在 1963 年峰值之前, 岩心中的 ¹³⁷Cs 含量只是扩散的结果, 而且很快含量降到探测不到, 所以可以认为岩心中含有 ¹³⁷Cs 总是在

表 6 胶州湾的沉积速率

Table 6 Sedimentary rates of the Jiaozhou Bay

序号	研究海区	岩心	站位		方法	沉积速率 /cm·a ⁻¹	资料来源
			纬度	经度			
1	湾中部	C23	36°5'23"N	120°14'36"E	²¹⁰ Pb _{ex} 法 / ¹³⁷ Cs法	1.64 1.65	本文
2	湾东北部	4A2	36°10'57.1"N	120°19'18"E	¹³⁷ Cs法	> 1.2	
3	湾西部	4C12	36°7'14.3"N	120°8'48.6"E	²¹⁰ Pb _{ex} 法 ¹³⁷ Cs法	0.667 < 0.7	
4	湾中部	4C3	36°7'24.6"N	120°13'18"E	¹³⁷ Cs法	> 1.2	
5	湾东南部	4C45	36°7'25.6"N	120°18'30"E	²¹⁰ Pb _{ex} 法 ¹³⁷ Cs法	0.92 > 0.8	
6	李村河口	L1	36°9'20"N	120°21'9.4"E	²¹⁰ Pb _{ex} 法	1.32	张丽洁等, 2003
7		L2	36°9'21"N	120°21'7.0"E	²¹⁰ Pb _{ex} 法	1.74	
8	湾北部	J39	36°9'20.4"N	120°14'9.6"E	²¹⁰ Pb _{ex} 法	0.768	李凤业等, 2003
9	湾中央偏西	J37	36°7'25.6"N	120°13'20.4"E	²¹⁰ Pb _{ex} 法	0.64	
10					海图对比	0~2.5	边淑华等, 2001
11					卫星资料分析	0.52(1915~1963) 1.4(1963~1988)	郑安全等, 1992
12							
13					河流输沙量	0.14	王文海, 1986
14	大沽河口附近				河流输入沉积物	0.22	国家海洋局第一海洋研究所, 1984
15	洋河口附近					0.37	
16	辛安河口附近					0.20	
17	墨水河口附近					0.03	
18	湾内				¹⁴ C法	0.07~0.09	王文海等, 1982
19	黄岛前湾				¹⁴ C法	0.025~0.09	

1960年代之后。

笔者研究的 5 个沉积物心中, C23 的 60~140 cm 层位, 4C12 岩心的 24~40 cm 层位, 4C45 岩心的 14~32 cm 层位, ²¹⁰Pb_{ex} 随深度呈指数衰减分布, 用来计算沉积速率。C23 岩心 ¹³⁷Cs 含量在 62 cm 为峰值, 此处以下, 含量逐渐降低, 直到探测不到, 该峰对应于最大沉降年 1963 年, 由此估算得沉积速率与 ²¹⁰Pb_{ex} 法的结果一致; 4A2 岩心的 ²¹⁰Pb_{ex} 分布不能用来估算沉积速率, 整个岩心均探测到了 ¹³⁷Cs 可以估算得, 该采样站位的沉积速率在 1.2 cm/a 以上; 4C12 岩心 24~40 cm 层段的 ²¹⁰Pb_{ex} 分布适合于估算沉积速率, 仅在 20 cm 以上层段探测到 ¹³⁷Cs 由此估算得该岩心的沉积速率, 两种的估算结果基本一致; 4C3 岩心也只能用 ¹³⁷Cs 方法估算沉积速率; 用两种方法估算得岩心 4C45 的沉积速率一致。

每个岩心 ²¹⁰Pb_{ex} 和 ¹³⁷Cs 方法估算得到的沉积速率列于表 6。在表中同时列出文献报道的胶州湾沉积速率。分析表中的数据可以得到以下结论:

(1) ²¹⁰Pb_{ex} 和 ¹³⁷Cs 两种方法得到的沉积速率基本一致。本文得到的沉积速率与文献(表 6)报道用 ²¹⁰Pb_{ex} 方法估算的结果也基本一致。²¹⁰Pb_{ex} 和 ¹³⁷Cs 方法给出的胶州湾的沉积速率为 0.64~1.74 cm/a。

(2) 本文的结果中, 湾中部的沉速率 (C23) 大于东部 (4A2 和 4A45) 和西部 (4C12), 也高于李凤业等 (2003) 报道的湾北部 (J39) 的沉积速率。由于本文的采样站位和李凤业等的采样站位均不是很靠近岸边, 所以可能出现这样一种沉积速率的分布图象, 即湾中部具有高的沉积速率 (> 1 cm/a), 而西、北、东具有较低的沉积速率 (< 1 cm/a)。再靠近岸边又有较高的沉速率 (> 1 cm/a), 象张洁丽等 (2003) 报道的李村河口。

(3) 本文的 C23 岩心的采样站与李凤业等 (2003) 的 J37 岩心的采样站位非常接近, 但给出的沉速率相差很大, 可能的原因是两者所用的 ²¹⁰Pb_{ex} 法估算沉积速率的岩心层位不同, 笔者用 60~140 cm 层段, 60 cm 以上层段属于混合层, 而李凤业等 (2003) 所用的是 0~40 cm 层段 (从文章 ²¹⁰Pb_{ex} 分布估计), 由此判断, 尽管两站位相距很近, 但海底情况可能差别很大。这也说明, 对于胶州湾这样一个复杂的海区, 不同采样站位沉积物的沉积速率可能相差很大。

(4) 笔者认为, ²¹⁰Pb_{ex} 方法估算得沉积速率是合理的。胶州湾 0.64~1.72 cm/a 的沉积速率也与近岸海区的沉积速率相符合。对表 6 中列出的其他方

法估算的沉积速率作以下分析： ^{14}C 方法适合于2000~20000 aBP时段年代测定，由于所能测定的年代时间尺度不同， ^{14}C 的测年结果不能与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 方法的测年结果进行比较；边淑华等(2001)海图对比和郑安全等(1992)卫星资料分析的结果与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 方法的测定结果是一致的，这也佐证了这些方法的可用性。

参考文献

- 边淑华, 胡泽建, 韦爱平, 夏东兴. 2001 近130年胶州湾自然形态和冲淤演变探讨[J]. 黄渤海海洋, 19(3): 46~53.
- 国家海洋局第一海洋研究所. 1984 胶州湾自然环境[M]. 北京: 海洋出版社.
- 贾成霞, 刘广山, 徐茂泉, 黄奕普, 张经. 2003 胶州湾表层沉积物放射性核素含量与矿物组成[J]. 海洋与湖沼, 34(5): 490~498.
- 李冬梅, 徐茂泉, 刘广山, 李超, 许文彬. 2005 福建兴化湾外近海沉积物岩心放射性核素分布[J]. 地球学报, 26(增刊): 220~223.
- 李凤业, 宋金明, 李学刚, 汪亚平, 齐君. 2003 胶州湾现代沉积速率和沉积通量[J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(4): 29~33.
- 李培泉, 苗绿田, 刘志和. 1986 青岛胶州湾表层沉积物五种重要放射性同位素的测定[J]. 海洋科学, 10(6): 18~21.
- 刘广山, 陈敏, 黄奕普, 夏小明, 李炎. 2001 海洋沉积物岩心放射性核素的 γ 谱测定[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 40(3): 669~674.
- 刘广山, 黄奕普. 1998 沉积物中 ^{238}U 等9种放射性核素 γ 谱同时测定[J]. 台湾海峡, 17(4): 359~363.
- 刘广山, 黄奕普, 李静, 叶林. 2003 不平衡铀系和钍系核素的 γ 谱测定[J]. 海洋学报, 25(5): 65~75.
- SAKANOU E M, EURUYAMA K, OKUBO T. 1990 海水中的 ^{226}Ra [C]. 见: 同位素海洋化学. 北京: 海洋出版社. 156~164.
- 王文海. 1986 胶州湾自然环境概述[J]. 海岸工程, 5(3): 18~24.
- 王文海, 王润玉, 张书欣. 1982 胶州湾的泥沙来源及其自然沉积速率[J]. 海岸工程, 1: 83~90.
- 尹毅, 刘光章. 1983 青岛沿海海洋环境放射性污染状况的调查研究[J]. 黄渤海海洋, 1(2): 18~21.
- 伊凡诺维奇 M, 哈蒙 R S. 1991 铀放射系不平衡及其在环境研究中的应用. 北京: 海洋出版社, 91~93.
- YOKOYAMA Y, NGUYEN H V. 1990 应用高分辨的 γ 能谱法直接和不破坏试样地测定海洋沉积物、锰结核和珊瑚的年龄[A]. 见: 同位素海洋化学[C]. 北京: 海洋出版社.
- 张洁丽, 王贵, 姚德, 段国政. 2003 胶州湾李村河口沉积物重金属污染特征研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 17(1): 8~14.
- 郑全安, 吴隆业, 戴懋英, 潘家祯, 纪育强. 1992 胶州湾遥感研究 II 动力参数计算[J]. 海洋与湖沼, 23(1): 1~6.
- 中国海湾志编纂委员会. 1993 胶州湾. 见: 中国海湾志第四分册[M]. 北京: 科学出版社. 157~260.

References

- BASKARAN M, NAIDU A S. 1995. ^{210}Pb -derived chronology and the fluxes of ^{210}Pb and ^{137}Cs isotopes into continental shelf sediments East Chukchi Sea - Aaskan Arctic[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(21): 4435~4448.
- BIAN Shuhua, HU Zejian, WEI Aiping, XIA Dongxing. 2001. An Exploration on the Natural Morphology and siltation and erosion development of the Jiaozhou Bay in recent 130 years[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas*, 19(3): 46~53 (in Chinese with English abstract).
- EDITORIAL BOARD OF GULF ANNALS OF CHINA. 1993. Jiaozhou Bay[M]. In: *Gulf annals of China* (4). Beijing: Science Press. 157~260.
- FULLER C C, VAN GREEN A, BASKARAN A, ANMA R. 1999. Sediment chronology in San Francisco Bay, California defined by ^{210}Pb , ^{234}Th , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ [J]. *Marine Chemistry*, 64(1~2): 7~27.
- FIRST INSTITUTE OF OCEANOGRAPHY OF STATE OCEANIC ADMINISTRATION. 1984. The natural Environment of Jiaozhou Bay[M]. Beijing: China Ocean Press.
- JIA Chenxia, LIU Guangshan, XU Maoquan, HUANG Yipu, ZHANG Jing. 2003. Radionuclides and Minerals in surface sediments of Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 34(5): 490~498 (in Chinese with English abstract).
- LI Dongmei, XU Maoquan, LIU Guangshan, LI Chao, XU Wenbin. 2005. The distribution of radionuclides in sediment cores from offshore area of Xinghua Bay[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(supp): 220~223 (in Chinese with English abstract).
- LI Fengye, SONG Jiming, LIXuegang, WANG Yaping, QI Jun. 2003. Modern sedimentation rate and flux in the Jiaozhou Bay[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 23(4): 29~33 (in Chinese with English abstract).
- LI Peiquan, MAO Lutian, LIU Zhhe. 1986. The determination of five important radionuclides in surface sediment in Jiaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 10(6): 18~21 (in Chinese with English abstract).
- LIU Guangshan, CHEN Min, HUANG Yipu, XIA Xiaoming, LI Yan. 2001. Measurement of radionuclides in sediment cores by HPG γ spectroscopy[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 40(3): 669~674 (in Chinese with English abstract).
- LIU Guangshan, HUANG Yipu. 1998. Simultaneous measurement of nine radionuclides in sediment samples using HPG γ spectrum meter[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 17(4): 359~363 (in Chinese with English abstract).
- LIU Guangshan, HUANG Yipu, LI Jing, YE Lin. 2003. Measurement of nuclides of uranium and thorium series of disequilibrium using γ -spectroscopy[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 25(5): 65~75 (in Chinese with English abstract).
- SAKANOU E M, EURUYAMA K, OKUBO T. 1990. ^{226}Ra in seawater [C]. In: *Isotope marine chemistry*. Beijing: China Ocean Press. 156~164.
- SAN MIGUEL E G, BOLIVAR J P, GARCIA-TENORIO R, MARTIN J

- E. 2001. $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ activity ratios as a chronological marker complementing ^{210}Pb dating in an estuarine system affected by industrial release [J]. *Environmental pollution* 112: 361~368.
- WANG Wenhai. 1986. Survey of natural environment of Jiaozhou Bay [J]. *Coastal Engineering* 5(3): 18~24 (in Chinese with English abstract).
- WANG Wenhai, WANG Rongyu, ZHANG Shuxin. 1982. The source of sediment and sedimentation rate of in Jiaozhou Bay [J]. *Coastal Engineering* 1: 83~90 (in Chinese with English abstract).
- WANG yaping. 2000. Sediment dynamics of Jiaozhou Bay and adjacent sea area [D]. Doctor thesis. Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract).
- YIN Yi, LU Guangzhang. 1983. Radioactive pollution survey in coastal sea area near Qingdao [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas* 1(2): 18~21 (in Chinese with English abstract).
- IVANOVICH M., HARMON R. S. 1991. Uranium-series disequilibrium and application to environment study. Beijing: China Ocean Press, 91~93.
- YOKOYAMA Y., NGUYEN H. V. 1990. Directive and non-destructive measurements of ages of marine sediments, manganese nodules and coral using γ energy spectroscopy with high resolution [C]. In: *Isotope marine chemistry*. China Ocean Press, Beijing, 165~183.
- ZHANG Lijie, WANG Gui, YAO De, DUAN Guozheng. 2003. Characteristics of heavy metal pollution in the Lichun river estuary Jiaozhou Bay, Qingdao [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Sci. and Tech.)*, 17(1): 8~14 (in Chinese with English abstract).
- ZHENG Quanan, WU Longye, DAI Maoying, PAN Jayi, JI Yuqiang. 1992. A remote sensing study of Jiaozhou Bay II calculation of dynamical parameters [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 23(1): 1~6 (in Chinese with English abstract).

“1: 2500万世界大型超大型矿床成矿图”项目成果报告通过 中国地质调查局评审验收并获得高度评价

由中国地质科学院矿产资源研究所裴荣富院士、梅燕雄研究员等完成的地质调查工作项目“1: 2500万世界大型超大型矿床成矿图编制及全球矿产成矿规律研究与评价”成果报告, 2008年5月16日在北京通过中国地质调查局组织的评审验收并被评定为优秀等级。

由陈毓川院士、李廷栋院士、马宗晋院士、翟裕生院士、张洪涛研究员、王瑞江研究员、卢民杰研究员、毛景文研究员组成的评审委员会高度评价该项编图和研究成果, 认为以成果报告总体达到国际先进水平, 其中关于大型超大型矿床成矿偏在性、异常成矿作用的研究达到国际领先水平, 一致通过评审验收并评定为优秀等级。此前, 该项成果被评为中国地质科学院2005年十大科技进展。

据项目组介绍, 该项目也是世界地质图委员会在新世纪首次接纳的矿产资源编图国际合作项目, 主要编图人员来自中国、俄罗斯、阿根廷、伊朗等国

家。通过5年多的编图和研究工作, 开展了全球7大洲、121个国家和地区、22种矿产、1285个主要矿床的综合对比与分析, 建立了包括地理、经济、地质、成矿背景4方面特征、19项属性和445个矿床的世界大型超大型矿床数据库, 首次在国际上编制完成1: 2500万世界大型超大型矿床成矿图, 划分出劳亚、冈瓦纳、特提斯、环太平洋4大成矿域和北美、格陵兰、欧洲、乌拉尔—蒙古等21个巨型成矿区带, 初步总结了世界大型超大型矿床的成矿特征及成矿规律, 进行了世界主要矿产资源战略评价, 提出了全球成矿作用的统一性、不同区域成矿的特殊性、大型超大型矿床成矿的偏在性和异常成矿作用等新概念和新认识, 研究和探讨了中国矿产资源战略问题并提出了若干对策和建议。

(中国地质科学院矿产资源研究所 供稿)