

九龙江河口区水体中 ^{224}Ra 的分布及其应用*

陈性保 黄奕普 谢永臻 陈 敏 邱雨生

(厦门大学海洋系, 厦门 361005)

摘 要 研究了九龙江河口区表层水体中 ^{224}Ra 的分布, 发现同世界其他河口一样, ^{224}Ra 在九龙江河口区呈非保守行为; 同时发现 ^{224}Ra -S 关系受季节变化的影响显著; 与世界其他河口相比, 九龙江河口表层水体中 ^{224}Ra 含量偏高; 用九龙江河口区海端溶解态 ^{224}Ra 估算九龙江河口水流向外海的流速在夏季为 2.5 cm/s, 冬季为 0.91 cm/s.

关键词 九龙江 河口区 ^{224}Ra 分布

1 引言

^{224}Ra 属 ^{232}Th 放射系, 半衰期为 3.66 d, 适合研究时间尺度为 1~10 d 的海洋过程, 是研究河流与河口水体的交换、河口水与外海水的交换、沉积物间隙水与上覆水交换以及沿岸可溶污染物的迁移的理想示踪剂.

Elsinger 与 Moore^[1]报道了 Winyah 湾和 Delaware 湾水体中的 ^{224}Ra , 得出 ^{224}Ra 均呈不保守性, 悬浮颗粒的解吸和底部沉积物的扩散是其不保守的主要原因. Bollinger 和 Moore^[2,3]利用 ^{224}Ra 求得盐沼泽沉积物间隙水与上覆水的交换时间. Levy 与 Moore^[4]报道了南卡罗莱纳陆架水中 ^{224}Ra 的分布与离岸距离的关系. Rama 等^[5]研究 Savannah 河口表层水体 ^{224}Ra 随盐度和深度的变化. DeMaster 等^[6]报道在离亚马逊河口 380 km 的表层海水中 ^{224}Ra 的过剩比活度为 2.5~3.3 Bq/m³. Astwood^[7]通过一系列的解吸实验得出亚马逊河口区有 40% 的 ^{224}Ra 来自悬浮颗粒的解吸, 而 Hancock 和 Murray^[8]却发现在 Bega 河口来自悬浮颗粒解吸的 ^{224}Ra 只占 1% 左右. Moore 和 Todd^[9]研究 Orinoco 河口 ^{224}Ra 的分布, 并利用其分布计算河口水流向外海的流速. Webster 等^[10]研究了 Bega 河口的 ^{224}Ra , 并利用它研究沉积物间隙水的交换深度. Moore 等^[11]研究了影响 ^{224}Ra 从沉积物解吸的诸因素(盐度、颗粒大小、沉积物的浓度). 鉴于海水中 ^{224}Ra 的浓度极低(约 2.1×10^{-21} g/dm³), 半衰期又短, 迄今我国对海水中 ^{224}Ra 的研究报道还极少. 本文研究了九龙江河口区 ^{224}Ra 随盐度的分布以及随季节的变化, 并利用 ^{224}Ra 求出九龙江河口水流向外海的流速. 该研究对厦门海沧投资区附近海域的水体运动和环境保护具有理论和实际意义.

本文于 1997-08-11 收到, 修改稿于 1997-11-21 收到.

* 福建省自然科学基金(编号: D96001)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(编号: 9538403).

第一作者简介: 陈性保, 男, 33 岁, 助教, 硕士, 主要从事同位素、海洋化学方面的研究.

2 样品的采集和分析

2.1 采样

我们对九龙江河口区水体 ^{224}Ra 的研究共进行了3个航次(940429航次、950710航次、951218航次),所有的水样都是用手提式微型潜水泵(QXD型)抽取并盛于体积为60L的塑料桶内。3个航次均由厦门大学“海洋1号”调查船完成。采样的站位见图1。

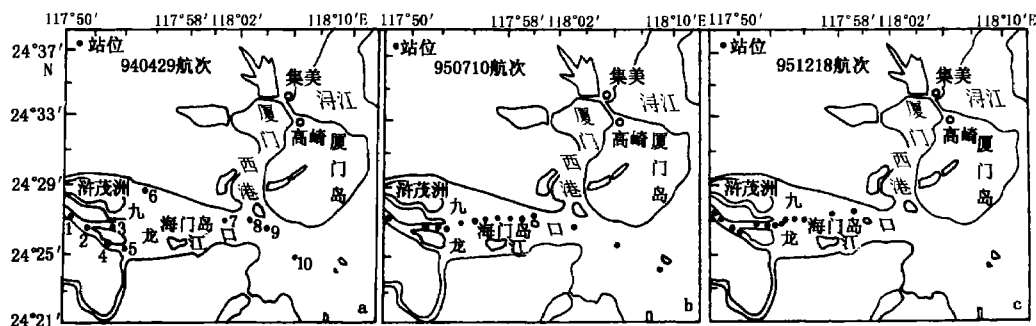


图1 九龙江河口区采样站位

2.2 海水中 ^{224}Ra 的富集、测定

本文采用 MnO_2 -纤维富集、 ^{220}Rn 的连续射气闪烁法测定海水中的 ^{224}Ra ,详见文献[12]。

3 结果与讨论

九龙江河口区3个航次的研究结果见表1。

940429航次的采样时间为1994年4月29日,河水的径流量大,浊度高。950710航次的采样时间为1995年7月10日,采样时下着暴雨,水很浑浊。951218航次的采样时间为1995年12月18日,河流的径流量小。对九龙江来说,春季(3~5月)为丰水期,河水的径流量最大;冬季(12月到翌年2月)为枯水期,河水的径流量最小;夏季(6~8月)径流量仅次于春季。九龙江的径流量在一年内逐月变化的情况见图2^[13]。

3个航次的 ^{224}Ra 、 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}¹⁾和 $^{224}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ _{A.R.}随盐度的变化分别见图3至图5。

3.1 九龙江河口区 ^{224}Ra 与盐度的关系

图3表明 ^{224}Ra 在九龙江河口区的分布呈非保守性。春季溶解 ^{224}Ra 的最大值为 $(37.7 \pm 1.6) \text{ Bq/m}^3$,相应的盐度为9.76;冬季 ^{224}Ra 的最大值为 $(34.7 \pm 0.2) \text{ Bq/m}^3$,相应的盐度为18.68。无论在春、夏还是冬季,在盐度0~8之间 ^{224}Ra 随盐度增加而增加,在盐度大于20(940429航次为盐度大于15)随盐度增加而减小,这种变化情况与世界其他河口相似(如Winyah湾, Delaware湾, Orinoco河口, Amazon河口, Bega河口)^[1,9,10]。前者是悬浮颗粒中 ^{224}Ra 解吸随盐度而增加的结果,后者则是低 ^{224}Ra 的外海水稀释和 ^{224}Ra 本身衰变双重作用的结果。在盐度10~20之间 ^{224}Ra 随盐度有增有减,呈多峰分布。

由表2可知, Winyah、Savannah和 Delaware ^{224}Ra 的峰位与九龙江河口区夏、冬季接近,

1) A.R. 即 activity ratio.

高于春季, Bega 河口的峰值高于九龙江河口区, 但 ^{224}Ra 的峰值略低于九龙江河口区, 九龙江河口区水体中的 ^{224}Ra 比活度比其他河口区都来得高。

表 1 九龙江河口区表层水体中 Ra 同位素的放射性比度

航次	站号	TSM /mg·dm ⁻³	盐度	放射性比度/Bq·m ⁻³		
				^{224}Ra	^{226}Ra	^{228}Ra
940429						
	JA01	—	0.00	7.1±0.5	3.2±0.1	8.6±0.4
	JA02	—	0.90	11.7±0.7	5.1±0.3	14.5±0.4
	JA03	—	0.00	7.2±0.5	3.5±0.2	10.0±0.4
	JA04	—	6.76	34.8±1.4	6.2±0.3	28.9±0.4
	JA05	—	11.07	33.5±1.6	6.2±0.3	34.7±0.6
	JA06	—	9.76	37.7±1.6	6.8±0.3	35.2±0.7
	JA07	—	15.19	35.8±1.9	7.7±0.3	35.1±0.8
	JA08	—	17.07	19.0±1.3	4.5±0.2	28.6±0.6
	JA09	—	16.40	28.6±1.6	6.4±0.8	—
	JA10	—	21.07	16.2±0.8	2.6±0.1	—
950710						
	JB01	24.3	0.00	4.6±0.3	1.4±0.1	11.0±1.0
	JB02	41.7	0.59	5.9±0.2	1.5±0.1	23.8±1.2
	JB03	30.2	2.15	9.4±0.3	2.4±0.1	26.9±1.2
	JB04	24.7	6.15	18.6±0.4	2.8±0.1	9.0±0.9
	JB05	16.9	9.96	9.7±0.3	2.5±0.1	26.0±1.2
	JB06	36.6	16.39	20.7±0.4	3.5±0.1	18.0±0.6
	JB07	33.0	15.57	28.5±0.3	3.4±0.1	26.8±1.3
	JB08	31.1	18.30	14.9±0.4	3.5±0.1	19.9±0.6
	JB09	13.1	18.62	7.4±0.4	3.4±0.1	17.8±0.6
	JB10	110.0	20.47	24.7±0.3	3.3±0.1	29.5±1.3
	JB12s	47.2	25.78	20.0±0.5	2.7±0.1	17.8±1.1
	JB12b*	—	26.56	20.1±0.5	2.7±0.1	26.3±1.2
	JB13	18.1	28.07	18.5±0.4	2.4±0.1	21.4±1.1
951218						
	JC01	98.4	0.60	6.4±0.4	0.9±0.1	12.0±0.7
	JC02	76.8	1.21	8.4±0.4	1.4±0.1	13.3±0.7
	JC03	43.2	3.72	13.9±0.5	1.7±0.1	19.5±0.8
	JC04	28.9	5.92	23.0±0.9	2.4±0.1	14.9±0.7
	JC05	32.8	10.48	18.4±0.5	3.3±0.2	28.7±0.9
	JC07	24.9	11.99	28.7±0.7	3.5±0.2	32.3±0.9
	JC08	21.1	16.60	22.7±0.7	3.8±0.2	28.6±0.9
	JC10	17.2	18.68	34.7±1.2	3.5±0.2	36.2±1.0
	JC11	9.4	25.61	19.5±0.5	3.7±0.2	37.4±1.0
	JC12s	7.4	27.52	11.2±0.3	2.7±0.1	29.9±1.0
	JC12b	20.5	29.80	12.9±0.5	3.3±0.1	31.8±0.9
	JC13S	9.5	30.52	10.1±0.5	2.3±0.1	28.1±0.9
	JC13b**	31.9	31.75	8.3±0.5	2.6±0.2	22.7±0.8

* 采样水深为 2.5 m; ** 采样水深为 6 m.

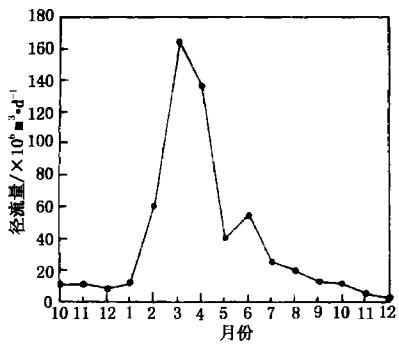


图2 九龙江河水径流量逐月变化

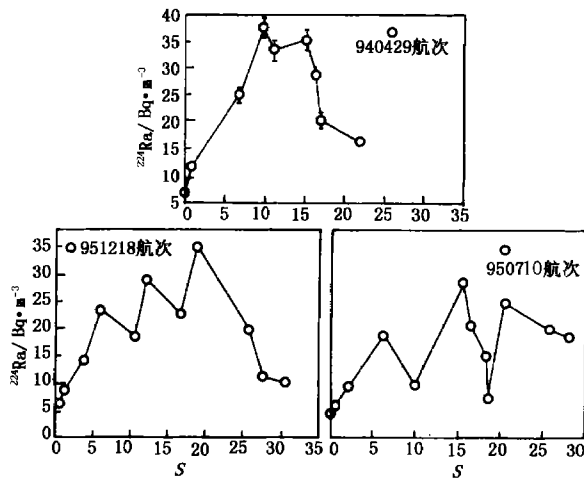
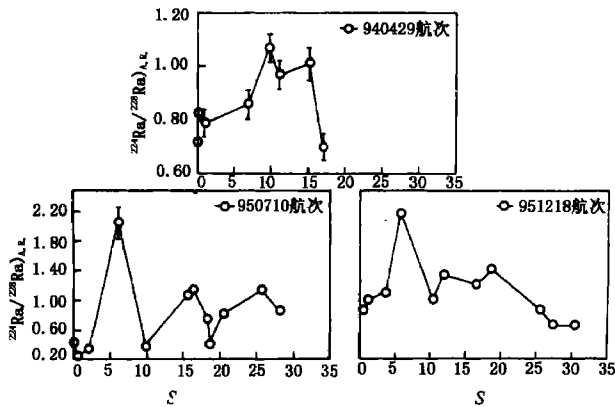
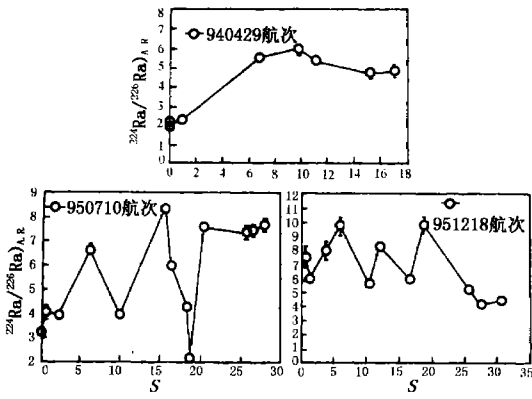
图3 ^{224}Ra 随盐度变化

图4显示3航次 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}随盐度的变化.各航次均有 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}大于1的情况,但大多数小于或等于1. ^{224}Ra 和 ^{228}Ra 分别来自沿岸和海底沉积物中颗粒活性同位素 ^{228}Th 和 ^{232}Th 的衰变,因 ^{224}Ra 的半衰期比 ^{228}Ra 小得多,底部沉积物的再悬浮对 ^{224}Ra 有很大的影响,因为只要海底表层几厘米沉积物的再悬浮就能提供其已再生完全的

图4 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}随盐度变化

^{224}Ra ,而 ^{228}Ra 则需几十厘米厚的沉积物的再悬浮才能提供其已再生的 ^{228}Ra ^[14,22].至于950710和951218航次几乎在同一盐度处出现 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}大于1,可能与该处悬浮颗粒的停留时间及水文、地貌等特征有关.Elsinger和Moore^[1]认为,如果悬浮颗粒的停留时间足够长,从水体中清除的 ^{228}Th 较多,由悬浮颗粒上 ^{228}Th 衰变产生的 ^{224}Ra 也就多;另外,可能该处沉积物再悬浮提供的 ^{224}Ra 比 ^{228}Ra 多,两方面的综合影响造成 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}大于1.

Moore与Todd^[9]报道委内瑞拉奥里诺科河口丰水期 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}大于1,而枯水期近于1.Elsinger与Moore^[1]研究Winyah湾 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}近于1,而他们同期研究的Delaware湾的 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}却与Winyah湾不同,呈现随盐度增加而逐渐降低的特征.委内瑞拉奥里诺科河口枯水期和Winyah湾的 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}近于1是因为悬浮物以及再悬浮的沉积物可能在河口储存了很久,以至 ^{232}Th 系中 ^{228}Ra 后的各核素之间达到放射性平衡,而丰水期奥里诺科河口和Delaware湾的 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ _{A.R.}大于1可能是刚引进的沉积物多次再悬浮的结果.

图5 $^{224}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 随盐度变化表2 九龙江河口区的 ^{224}Ra 与世界其他河口或海湾的比较

河口	^{224}Ra 的范围/ $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	$[\text{Ra}]_{\text{max}}$ 对应的盐度	资料来源
Winyah 湾	0.5~10.5	25	[1]
Delaware 湾	1.8~6.0	15	[1]
Winyah 湾	2.8~10.7	17.2	[4]
Savannah	6.5~14.2	17	[5]
Bega	5.0~28.3	26.7	[8]
九龙江 (春)	7.1~37.7	9.76	本文
九龙江 (夏)	4.6~28.5	15.57	本文
九龙江 (冬)	6.4~34.7	18.68	本文

3.2 九龙江河口区 ^{224}Ra -S 关系的季节变化

通过上述 3 航次, 我们可了解九龙江河水径流量对 ^{224}Ra -S 关系的影响 (表 3)。

表3 九龙江的径流量对河口区 ^{224}Ra 的影响

航次	径流量/ $\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$	河端溶解的 $^{224}\text{Ra}/\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$	溶解 ^{224}Ra 的最大值 ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) 对应的 (S)
940429	40×10^6	7.1 ± 0.5	37.7 ± 1.6 (9.76)
950710	26×10^6	4.6 ± 0.3	28.5 ± 0.3 (15.57)
951218	2×10^6	6.4 ± 0.4	34.7 ± 0.2 (18.68)

由表 3 看出, 径流量大, ^{224}Ra 的最大值高, 相应的盐度偏低. 径流量大, 河流带来的悬浮颗粒浓度高, 解吸的 ^{224}Ra 多, 且解吸是影响 ^{224}Ra 在河口区呈不保守行为的主要原因之一. Webster^[10] 的研究表明影响 Ra 在河口区解吸的因素有盐度、颗粒大小和悬浮物的浓度. 水体的停留时间、盐楔的入侵程度和底部沉积物中 ^{224}Ra 的扩散也是影响水体中 ^{224}Ra 的分布的重要原因. 冬季虽然河水的径流量比夏季小, 但外海水的入侵程度大, 水体的停留时间都比夏季长, 海水与沉积物的接触面增大, 沉积物供给的 ^{224}Ra 相应增多^[1,2,9]. 九龙江河口区

至于 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ 小于 1 是 ^{224}Ra 的半衰期比 ^{228}Ra 短, 在河口混合过程中它的衰变比 ^{228}Ra 快得多, 再加上 ^{224}Ra 的母体—— ^{228}Th 的清除, 故水体中 $^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ 小于 1 也就不难理解了.

$^{224}\text{Ra}/^{228}\text{Ra}$ 、 $^{224}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ 随盐度的变化具有低盐度区随盐度递增 (见图 4、图 5)、高盐度区随盐度递减的特征.

冬、夏两季水体中²²⁴Ra的最大值及其对应的盐度恰好证明了这点(表3)。

无论在春季、夏季和冬季,在盐度10~20之间,²²⁴Ra随盐度呈多峰分布(见图3),在950710航次,有一点落在保守混合线之下,且在盐度15~19之间,²²⁴Ra锐减。这种分布与理想的非保守混合大相径庭。九龙江河口区的²²⁸Ra也有类似的分布。Elsinger与Moore^[14]报道长江口²²⁶Ra和²²⁸Ra的分布和九龙江河口区很相似,在盐度16处,²²⁸Ra落在保守混合线之下,他们认为系人为操作造成的结果。长江口的Ba随盐度的分布也有类似的双峰存在。Ra和Ba属于同一主族,在河口区均呈非保守性。Moore与Todd^[9]报道的Orinoco河口的²²⁶Ra随盐度分布也有类似的波动现象,特别在盐度8~25之间²²⁶Ra变化复杂,其中在盐度11~12之间²²⁶Ra比度剧烈下降,是否暗示²²⁶Ra的迁出? Dion^[15]在研究亚马逊河口时曾发现有生物迁移镭的现象,尔后的研究者却没有发现这种现象^[16,17],可能生物迁移镭与季节有关。Moore等^[11]认为生物迁出的Ra是影响亚马逊河口区Ra通量的一个因素。

在河-海水剧烈混合过程中,伴随着水体的水文、物理和化学条件的剧变,发生一系列化学和生物反应,诸如氧化-还原反应、溶解-沉淀及吸附-解吸作用、潮汐作用等。这些作用每时每刻都在进行,都会影响Ra在河口区的分布,因此,对河口区Ra的分布的多样性也就不难理解。

3.3 九龙江河口区²²⁴Ra与世界其他河口的比较

在河口区盐度是保守混合的,若认为在盐度为15时河水与海水等体积混合,则应有如下的关系:

$$[\text{Ra}]_{S=15} = ([\text{Ra}]_{S=0} + [\text{Ra}]_{oc})/2 + [\text{Ra}]_{\text{added}}$$

利用上式可粗略估算在河、海水混合过程中添加的²²⁴Ra。九龙江口3航次的添加值与世界其他河口的比较见表4。

由表4可看出九龙江河口区水体中²²⁴Ra最大值比世界其他河口高, $[\text{Ra}]_{\text{added}}$ 也比世界其他河口高,呈现了统一性。这可能与厦门海域及其周边地区的地质特征有关。地质学上认为厦门邻近海域处于滨海石英砂矿带,海砂中独居石含量高^[18],独居石富含钍。²²⁸Ra的比活度高于世界其他河口^[19],因而²²⁴Ra比活度大也是理所当然。同时由表4还看出添加的²²⁴Ra与水体中溶解的²²⁴Ra最大值变化趋势一致。

表4 世界一些河口或海湾²²⁴Ra的添加值

河口	$[\text{Ra}]_{\text{max}}$ (Bq·m ⁻³) 对应的(S)	$[\text{Ra}]_{\text{added}}$ /Bq·m ⁻³	资料来源
Delaware湾	6.0±0.8 (15)	6.67	[1]
Winyah湾	10.5±1.0 (25)	3.83	[1]
Savannah河口	14.17 (17)	-	[5]
Winyah湾	10.67 (17.20)	-	[4]
Orinoco河口	19.6 (30.63)	-	[9]
九龙江口(春)	37.7±1.8 (9.76)	52.10	本文
九龙江口(夏)	28.5±0.3 (15.57)	24.68	本文
九龙江口(冬)	34.7±0.2 (17.21)	26.47	本文

3.4 九龙江河口水流向外海流速的估算——²²⁴Ra的示踪应用

本项研究目的之一是想利用短寿命的²²⁴Ra研究九龙江河口水与邻近外海水之间的交换

速率. 追踪河水在外海中的分布曾用卫星图象技术^[20]、盐度和溶解硅的化学要素等方法^[21]. Moore等^[22]利用Ra同位素研究获知, 离亚马逊河口1500 km的大西洋表层海水有30%来自亚马逊河口. Moore与Todd^[9]利用过剩的²²⁴Ra研究Orinoco河口水流向外海的流速为15~33 cm/s.

若不考虑降雨和蒸发的影响, 盐度是保守的, 则某观测站应有以下的关系:

$$S_{\text{obs}} = f_{\text{oc}}S_{\text{oc}} + S_{\text{es}}f_{\text{es}}, \quad (1)$$

$$f_{\text{oc}} + f_{\text{es}} = 1, \quad (2)$$

式中, S 代表盐度, f 代表混合百分数, oc 代表大洋, es 代表河口, obs 代表某个观测站.

$$t = \ln[{}^{224}\text{Ra}_{\text{obs}}/{}^{224}\text{Ra}_{\text{es}}f_{\text{es}}]/\lambda_{224}, \quad (3)$$

结合式(1)~(3), 藉助河—海混合区²²⁴Ra的分布, 可以求出河口区水体流向外海的流速, 其前提是假使²²⁴Ra离开河口后在1~10 d范围内只受衰变和混合的影响, 没有其他的输入和输出. 河端和海端的选定对计算的结果有一定的影响. Moore等^[22]分别取海端成分为盐度31.8和21.5, 二者可造成30%的误差.

利用九龙江河口区夏季和冬季²²⁴Ra的分布, 经计算得到夏季九龙江河口水流向外海的流速为2.5 cm/s, 冬季为0.91 cm/s, 这些结果与Moore和Todd^[9]报道的Orinoco河口水流入外海的流速相差约1个数量级, 但与九龙江河口区入海端的最大表层退潮流2.0 cm/s^[23]相近. 我们是在河口从高潮开始, 沿盐度增大方向采样, 因而所反映的流速应当是表层退潮流. 从理论上讲所用²²⁴Ra应该是过剩的, 即扣除²²⁸Th支持的那部分. 由于水体中²²⁸Th含量低, 没有实测水体的²²⁸Th, 可能使计算的结果略为偏低.

4 结论

4.1 九龙江河口区水体中²²⁴Ra呈不保守性, $({}^{224}\text{Ra}, {}^{226}\text{Ra}/{}^{228}\text{Ra})_{\text{A.R.}}$, $({}^{224}\text{Ra}/{}^{226}\text{Ra})_{\text{A.R.}}$ 随盐度的变化大致有低盐度区随盐度递增、高盐度区随盐度递减的特征.

4.2 ²²⁴Ra-盐度的关系随季节而变化, 3个航次²²⁴Ra的峰值和峰位随径流量的不同而异.

4.3 由²²⁴Ra示踪法估算出九龙江河口水流向外海的流速夏季为2.5 cm/s, 冬季为0.91 cm/s, 与水文学得到的表层退潮流一致.

参考文献

- 1 Elsinger R J, Moore W S. ²²⁴Ra, ²²⁶Ra and ²²⁸Ra in the Winyah Bay and Delaware Bay. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1983, (64): 430~436
- 2 Bollinger M S, Moore W S. Radium fluxes from a salt marsh. *Nature*, 1984, 309, 444~446
- 3 Bollinger M S, Moore W S. Evaluation of salt marsh hydrology using radium as a tracer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57 (10): 2203~2212
- 4 Levy D M, Moore W S. ²²⁴Ra in continental shelf waters. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1985, 73, 226~230
- 5 Rama J F, Todd J B, Moore W S. A new method for the rapid measurement of ²²⁴Ra in natural waters. *Mar. Chem.*, 1987, 22, 43~54
- 6 DeMaster D J, Moore W S, Mckee B A *et al.*. Geochemical process occurring in the waters at the Amazon River/ocean boundary. *Oceanography*, 1991, 4, 15~20
- 7 Astwood H M. The desorption of radium from Amazon sediment [M. S. thesis]. Univ. South Carolina, 1991
- 8 Hancock G J, Murray A S. Source and distribution of dissolved radium in the Bega River Estuary, southeastern Australia. *Earth Plan-*

- et. Sci. Lett., 1996, **138**, 145~155
- 9 Moore W S, Todd J F. Radium isotopes in the Orinoco estuary and eastern Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, 1993. **98** (c2): 2233~2244
- 10 Webster I T *et al.*. Modelling the effect of salinity on radium desorption from sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, **59** (12): 2469~2476
- 11 Moore W S, Astwood if, Lindstrom C *et al.*. Radium isotopes in coastal waters on the Amazon shelf., *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1995, **59** (20): 4285~4298
- 12 陈性保. 九龙江河口区、厦门湾水体中Ra同位素的分布与通量的研究 [硕士论文]. 厦门大学, 1996
- 13 陈水土, 阮五崎, 张立平. 九龙江诸营养要素的化学特性及其入海通量估算, *热带海洋*, 1985, **4** (4): 16~23
- 14 Elsinger R J, Moore W S. Ra-226 and Ra-228 in the mixing zones of the Pee Dee River-Winyah Bay, Yangtze River and Delaware Bay estuaries. *Est. Coast. Shelf. Sci.*, 1984, **18**, 601~613
- 15 Dion E P. Trace elements and radionuclides in the connectocutt and Amazon River Estuary [Ph. D. thesis]. Yale Univ., New Haven, Conn, 1983, 233
- 16 Key R M, Stallard R F, Moore W S *et al.*. Distribution and flux of ²²⁶Ra and ²²⁸Ra in the Amazon River Estuary. *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**, 6995~7004
- 17 Moore W S, Edmond J M. Radium and barium in the Amazon River system. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**, 2061~2065
- 18 谭启新, 孙岩编. 中国滨海砂矿. 北京: 科学出版社, 1988
- 19 谢永臻, 黄奕普, 施文远等. 九龙江河口区水体中的²²⁶Ra, ²²⁸Ra. *台湾海峡*, 1994b, **13**, 394~399
- 20 Muller-Karger F E, McClain C R, Richardson P L. The dispersal of the Amazon water. *Nature*, 1988, **333**, 56~59
- 21 Froelich P N, Atwood D K Sr, Greiese G S. Influence of Amazon River discharge on surface salinity and dissolved silicate concentration in the Caribbean Sea. *Deep-Sea Res.*, 1978, **25**, 735~744
- 22 Moore W S, Sarmiento J L, Key R M. Tracing the Amazon component of surface Atlantic water using ²²⁸Ra, salinity and silica. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91** (C2): 2574~2580
- 23 王寿景. 厦门港湾海洋环境综合调查报告 (I), *台湾海峡*, 1987, **6** (4): 349~357

Distribution of ²²⁴Ra in the Jiulong Estuarine waters and its application

Chen Xingbao,¹ Huang Yipu,¹ Xie Yongzhen,¹ Qiu Yusheng¹

1. *Department of Oceanography, Xiamen University, Xiamen 361005*

Abstract—The distribution of ²²⁴Ra in the Jiulong estuarine waters has been investigated. The results show that ²²⁴Ra is non-conservative in this estuary, just as the other estuaries of the world. Variation of ²²⁴Ra activities with salinities is examined and ²²⁴Ra-S relationship is affected obviously by the seasons. The maxima of dissolved ²²⁴Ra in the Jiulong estuarine waters is (37.7±1.6) Bq/m³ (S=15.57) during spring and (37.7±0.2) Bq/m³ (S=18.68) during winter. Based on dissolved ²²⁴Ra data, the current speeds of the Jiulong estuarine waters seawards are estimated as 2.5 cm/s in summer and 0.91 cm/s in winter.

Key words Jiulong Estuary, ²²⁴Ra, distribution, current speed