

珠江口外陆架区溶解态 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 的季节性分布及影响因素分析*

1. 厦门大学环境与生态学院; 2. 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室; 3. 厦门大学海洋与地球学院
王树玲¹ 王桂芝^{2,3} 王张勇¹ 李青²

[摘要] 该文调查了珠江口外陆架区一个断面上 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 随季节变化的活度分布及其影响因素。夏季珠江径流量最大, 故在距离河口最近的 A9 站位表层镭活度夏季高于其他季节。但夏季珠江冲淡水扩散方向偏离本研究的断面方向, 故其整个剖面平均活度小于沉积物贡献非常大的秋季的垂向平均活度。春季, 珠江径流量较大, 但其扩散方向偏离断面方向, 故春季各个站位的垂向平均活度均小于其他季节。珠江口外陆架区溶解态 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 的分布受控于沉积物、珠江径流量及珠江冲淡水的扩散方向。

[关键词] 珠江口外陆架区 镭 季节分布 珠江冲淡水

冲淡水是指河流入海后与外海水混合所形成的低盐水团, 一般认为盐度 32 为外海水与冲淡水的界限^[1]。某些河流冲淡水的扩散距离可达上百公里^[2], 因其密度较小在扩散过程中极少与周围水体交换而保持了其化学特性^[3]。冲淡水中含有大量陆源营养盐、无机碳、有机碳等, 对河流冲淡水的扩散途径和扩散范围的了解对于研究其周边的生物地球化学变化有着极其重要的作用。

镭同位素因其独特的化学保守性质常被用来作为地球化学过程的示踪剂, 其有四种同位素, 包括短半衰期的 ^{223}Ra (半衰期 11.3 天) 和 ^{224}Ra (半衰期 3.66 天)、长半衰期的 ^{226}Ra (半衰期 1600 年) 和 ^{228}Ra (半衰期 5.8 年)。河水中离子强度小, 颗粒态镭主要吸附在颗粒上。在河水与海水交界处, 即河口区, 随盐度的增加、离子强度的增大, 颗粒态镭逐渐解析, 同时由于海底地下水的输入和沉积物的贡献而使河口区镭有着大量的添加, 因此河流冲淡水含有较高活度的镭。冲淡水在陆架扩散过程中, 一般因为密度跃层的阻隔, 不存在镭的沉积物和海底地下水来源, 而因为衰变(对短半衰期镭而言)和混合过程中的损失, 镭的活度逐渐降低, 到开阔大洋已基本没有短周期镭的存在。故可根据水团中的镭的活度来判断其是否受冲淡水的影响。利用镭示踪冲淡水的影响范围的研究在密西西比河口和阿查法拉亚河口^[4]已经开展, 在奥利诺科河流入大西洋及加勒比海的研究^[5]中也应用了镭同位素示踪方法。在中国南海西部^[6]以及东海西南海区^[7]同样运用了镭来示踪水团运动。此外, 根据半衰期的差异,

镭同位素还可用来估算水体停留时间^[8]、估算海水混合速率^[9]、估算海底地下水通量^[10]等。

珠江年平均径流量为 3091 亿 m^3 , 超过黄河, 仅次于长江。珠江以如此巨量的淡水注入南海, 在珠江口外形成了一股显著的冲淡水, 对南海北部陆架区的生物地球化学循环产生深远影响^[11]。本文首次调查了珠江口外陆架区垂直岸线的一条断面上溶解态 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 的平面和剖面分布, 并对比其季节性差异, 结合整个断面上盐度与温度的分布, 推断出影响镭活度分布的主要因素, 且得出珠江冲淡水的大致影响范围。

1 研究区域

研究区域位于珠江口外陆架区(图 1), 选取的研究断面, 面对珠江口, 垂直于岸线, 距离珠江口门 33km, 各站位水深均小于 100m。该区域风向季节性变化明显, 夏季盛行西南季风, 冬季盛行东北季风。因此珠江冲淡水在不同风场等因素影响下, 向西或向东与南海水混合, 同时由于水深较浅, 沉积物影响显著, 所以该区域是研究陆架边缘海生物地球化学的一个独特场所。

由于不同因素的影响, 珠江冲淡水扩散方向各个季节不同^[12]。在夏季, 冲淡水扩散方向主要受西南季风(频率与平均风速)与近岸海面月平均高度共同影响。当西南季风强盛, 珠江冲淡水以向东扩散为主, 若近岸海面高度有显著增加, 珠江冲淡水以向西扩展为主^[13]。夏季, 珠江冲淡水方向可分为“向海扩展型”、“粤东扩展型”、“粤西扩展型”、“似对称扩

* 基金项目: 973 计划(编号 2009CB421204) 国家自然科学基金青年基金项目(编号 41006041) 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20090121120022) 感谢东方红 号全体船员对采样工作的帮助, 感谢谭萼辉对 2012 年夏季采样及测样工作的协助。

展型”4 个类型^[14]。珠江冲淡水夏季向西可扩展至茂名一带，向东最远可扩展至汕尾一带，最南可达到 21°N ^[13]。冬季，由于珠江径流量减弱，加上东北季风的影响，冲淡水向西扩散且在沿岸形成一条带状淡水区^[12]。而四月和九月属于季风方向变化时间。因此珠江冲淡水的方向与大小不仅存在季节性变化，相同季节因为控制机理的复杂也存在不同的扩散方向。

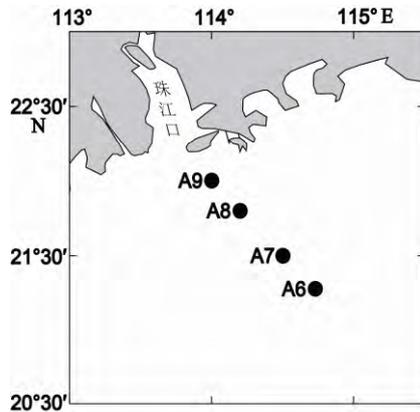


图 1 珠江口外陆架区采样站位

2 样品采集与测定

2.1 镭的样品

我们分别于 2009 年 8 月 6 至 7 日、2010 年 11 月 5 至 6 日、2011 年 5 月 16 至 17 日及 2012 年 7 月 31 日，利用“东方红”号科考船，在图 1 所示站位采集了全水柱镭的样品。2009 年 A6 和 2012 年 A8 只采集表层样品。2009 年、2010 年、2011 年和 2012 年采集样品数量分别为 11 个、26 个、27 个和 14 个。A9、A8、A7、A6 站位深度分别为 35 m、47 m、72 m、90 m（因采样站位未完全重合，故存在细微差别）。

我们于 2012 年 7 月 28 日在 22.21°N 、 113.81°E 乘坐“天龙号”采集了表层镭样品作为珠江冲淡水的端元。其中表层水样利用塑料水桶或者 Niskin 采水器采集，剖面样品全部采用 Niskin 采水器采集。表层样品采集 50 ~ 120 L 左右，剖面样品采集 20 L 左右，记录采样时间。样品采集后，连接孔径为 $1\mu\text{m}$ 的滤芯和装有 MnO_2 的醋酸纤维（简称锰纤维）的柱子，然后用潜水泵（浙江森森实业有限公司的 JP-053）抽水过滤，流速控制在 0.5 L/min 之内，以确保大部分镭富集到锰纤维上^[15]，记录过滤后的水样体积。样品富集后，将锰纤维脱水脱盐^[15]，吹至半干，用 RaDeCC(Scientific Instrument Inc 公司)在样品采集当天或第二天、采集一周以及采集 25 天时分别进行测量（第一次得到总的 ^{224}Ra 活度，第二次得到 ^{223}Ra 的活度，第三次得到 ^{228}Th 的活度，通过第一和第三次测量活度的差值得到过剩的 ^{224}Ra 活度），通过单位时间 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 的子体衰变释放的粒子的个数从而得到 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 的活度^[16]。利用双纤维柱法测得锰纤维对镭的富集效率达到 95%

以上。

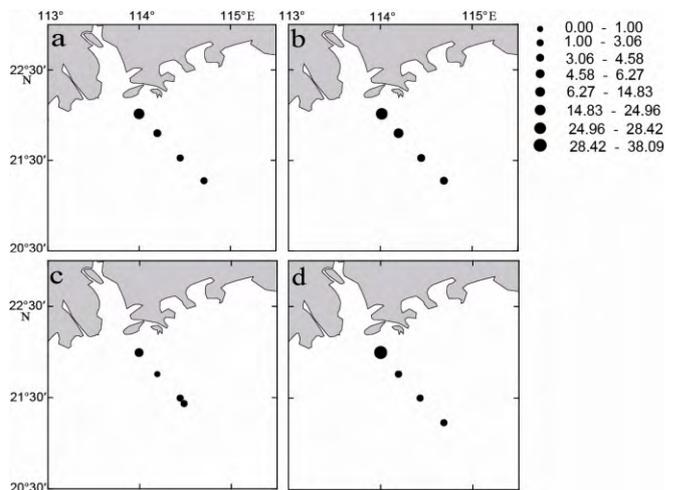
2.2 温度、盐度及深度测量

采用已校准过的 SBE-19-plus CTD 来测量盐度、温度以及水深。

3 结果与讨论

3.1 表层水体溶解态 ^{223}Ra 和 ^{224}Ra 的分布

^{224}Ra 分布总体上符合离岸距离增加而活度递减的规律（图 2）。由于受到珠江冲淡水与沉积物的影响，A9 站位表层 ^{224}Ra 的活度远高于其他站位。2011 年春季，A8 表层活度小于 A7 及 A6，这表明珠江冲淡水对 A8 及 A8 以外的站位没有影响，且 A7 及 A6 存在其他高活度镭的来源。从季节差异来看，A9 站位 ^{224}Ra 活度大小为：2012 年夏季 > 2010 年秋季 > 2009 年秋季 > 2011 年春季，这与盐度分析结果完全相符合，虽然 2010 年秋季流量最小，但因其整个剖面的水是完全混合均匀的，沉积物对其表层镭分布有很大贡献从而导致其活度大于 2009 年秋季。而在其他三个站位，2010 年秋季 ^{224}Ra 活度远高于其他三个季节，且结合盐度分析来看，沉积物对表层水镭的活度有极大的贡献，而其他三个季节都未受到珠江冲淡水与沉积物的影响，这说明珠江冲淡水扩散类型不是“向海扩展型”，其扩展可能是向粤西方向^[13]。

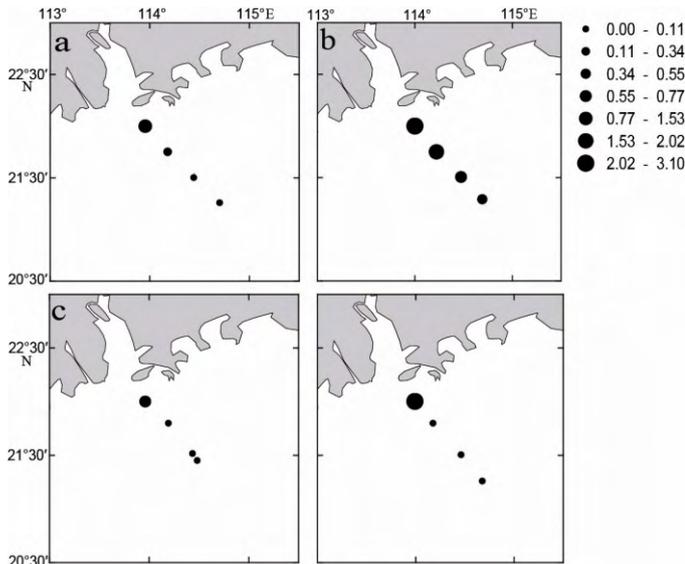


(a) 2009 年秋季，(b) 2010 年春季

(c) 2011 年秋季，(d) 2012 年春季

图 2 表层水 ^{224}Ra 活度的分布（单位： $\text{dpm } 100\text{ L}^{-1}$ ）

表层 ^{223}Ra 的分布类似于 ^{224}Ra （图 3），活度随离岸距离的增加而显著降低。站位 A9 受珠江冲淡水及沉积物的影响导致其镭的活度远高于其他站位，但季节差异明显，即：2010 年秋季 \approx 2012 年秋季 > 2009 年秋季 > 2011 年春季，这与 ^{224}Ra 的结果类似。而对于其他三个站位，除了 2010 年秋季受到沉积物的影响而有较高镭的活度外，其他三个季节镭的活度都很低，近似于零，同样与 ^{224}Ra 结果类似。



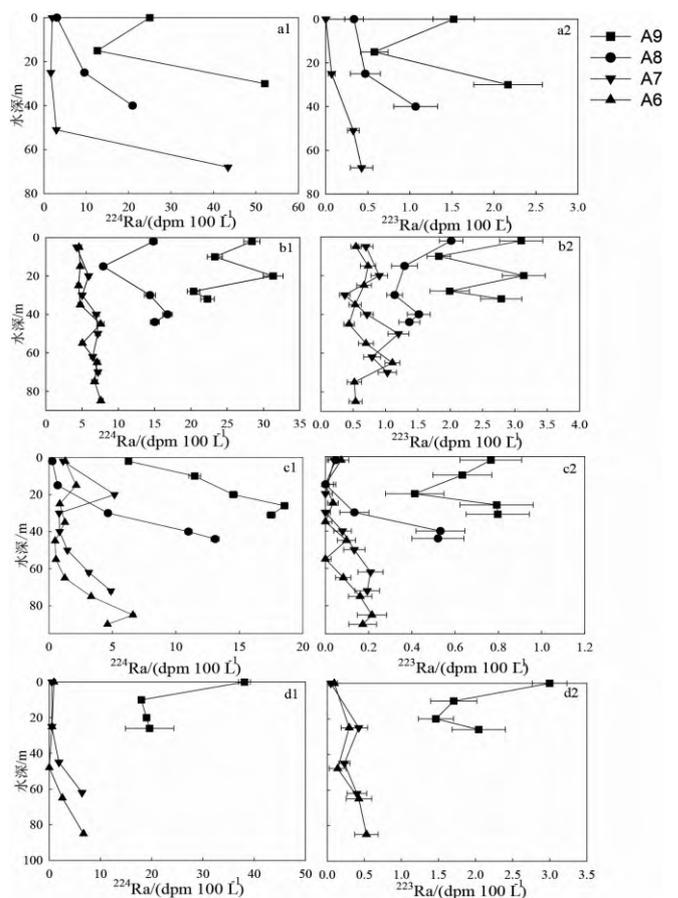
(a) 2009 年夏季, (b) 2010 年秋季
(c) 2011 年春季, (d) 2012 年夏季

图 3 表层水 ²²³Ra 的分布 (单位: dpm 100 L⁻¹)

3.2 溶解态 ²²³Ra 和 ²²⁴Ra 的垂向分布

同一季节不同站位的垂向分布如图 4 所示。总体来看, 同一层位镭同位素的活度大小为 A9 > A8 > A7 > A6, 这是由于受到珠江冲淡水以及地下水的影响, 使得近岸水体镭的活度高, 而随着距离增加, 由于衰变和与远海镭活度低的水体的交换, 镭的活度逐渐下降。从垂向分布来看, A9 站的活度随深度存在先降低后增加的趋势, 在 20 m 深度左右有极小值, 这是因为在 20 m 以浅站位, 由于富含镭的珠江冲淡水输入, 导致其表层镭的活度高, 这也同时表明珠江冲淡水影响深度小于 20 m; 而在底部, 由于沉积物的贡献, 镭的活度由底部向上慢慢降低, 在 20 m 处为两者贡献量最小处。2010 年秋季, 尽管从温盐分布来看是全水柱均匀混合, 然而在 20 m 水深处 ²²³Ra、²²⁴Ra 活度存在一个极大值, 这既非表层冲淡水也非底层沉积物可以支持, 在 A7 站位 20 m 处同样存在一个极大值, 推测在 20 m 左右水深存在一个垂直海岸向外扩散的地下水输入。2011 年春季, A9 站位 ²²⁴Ra 垂向活度分布随深度增加而增加, 同时该站位短寿命镭小于其他三个季节, 说明 2011 年春季珠江冲淡水可能向粤西扩展而对本研究区域影响甚小, 此时对镭活度分布占主导影响的因素为沉积物来源, 包含沉积物扩散和海底地下水输送。A8 有相同的趋势。而在 A7 和 A6 站位没有明显的随深度增加活度增加的趋势, 原因是 A7 和 A6 的水深较深, 距离岸线较远, 海底地下水排泄的输入即使存在, 其量值也非常小, 因此沉积物来源的镭的量也相应较少。对于 A8 站位, 除 2010 年秋季表层因受到沉积物很大影响而表现出较高活度外, 其他季节活度较低。A6、A7 站位表层不受珠江冲淡水的影响, 活度较低, 在近

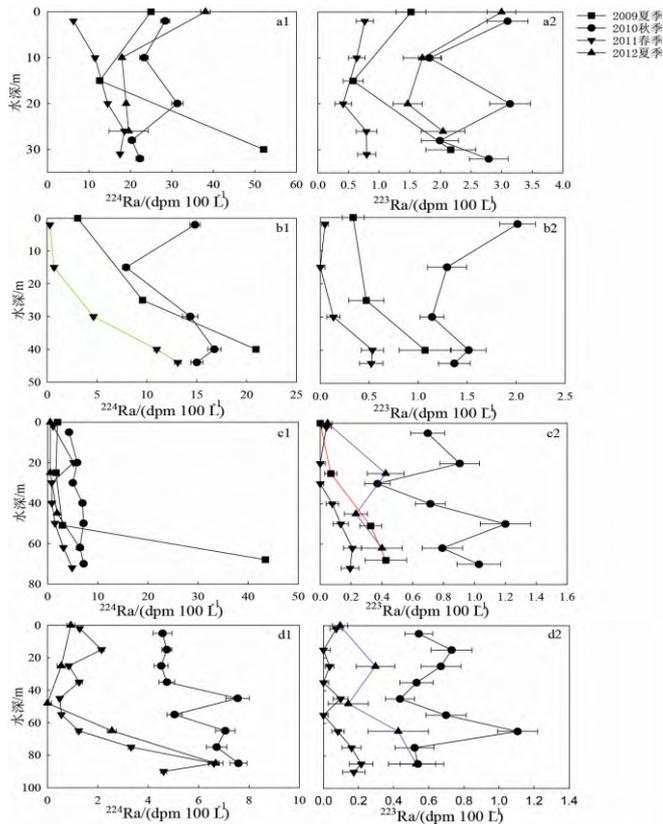
底层因为沉积物扩散而有较高活度。



(a1) (a2) 2009 年夏季, (b1) (b2) 2010 年秋季
(c1) (c2) 2011 年春季, (d1) (d2) 2012 年夏季

图 4 相同季节不同站位 ²²⁴Ra、²²³Ra 的垂向分布对比图

相同站位不同季节比较如图 5。从图中可以看出, 对于相同的站位, 在整个剖面相同层位上, ²²³Ra、²²⁴Ra 活度大小为: 2010 年秋季 > 2009 年夏季 ≈ 2012 年夏季 > 2011 年春季。这是因为 2010 年秋季整个剖面为混合均匀剖面, 其上层水体受沉积物影响而表现出较大的镭的活度。2011 年径流量非常大, 但是从盐度与表层镭分布来看, 其受珠江冲淡水的影响非常小, 冲淡水扩散方向可能为“粤西扩展型”, 故 2011 年春季整个剖面活度最小。控制夏季珠江冲淡水扩展方向的因素复杂, 且 2012 年珠江流量要大于 2009 年, 故其剖面分布也不完全相同。



(a1) (a2)A9 站位, (b1) (b2)A8 站位
(c1) (c2)A7 站位, (d1) (d2)A6 站位

图 5 相同站位不同季节 ^{223}Ra 、 ^{224}Ra 活度的垂向分布图

4 结论

珠江口外陆架区 ^{223}Ra 、 ^{224}Ra 的活度分布受珠江径流量和珠江冲淡水扩散方向与沉积物的共同影响。秋季整个断面是混合均匀的, 沉积物对上层水体有非常大的贡献, 所以整个剖面镭的活度大于其他季节。夏季珠江冲淡水扩散方向受季风和近岸海面月平均高度共同控制, 其扩散方向可能向粤西而偏离研究断面, 故夏季除 A9 站位活度高于其他季节外, 其他站位仍低于秋季, 且不同年份镭的活度分布也不尽相同。春季珠江径流量虽然很大, 但是珠江冲淡水方向偏离研究断面的方向, 故在观测的几个季节中, 春季研究断面的各个站位的剖面活度最低。在四个季节中, 2012 年夏季对研究断面影响范围最大, 离岸距离可达近 35 km, 深度可达 10 m; 2011 年春季影响范围最小, 离岸距离不足 10 km; 2010 年因为沉积物贡献很大, 不能甄别出冲淡水的影响范围。

参考文献:

- [1] 毛汉礼, 甘子钧, 蓝淑芳. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨[J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(3): 183-206.
- [2] MULLER-KARGER F E, MCCLAIN C R, RICHARDSON P L. The dispersal of the Amazon water[J]. Nature, 1988(333): 56-59.
- [3] HITCHCOCK G L, WISEMAN JR W J, BOICOURT W C. Property fields in an effluent plume of the Mississippi river[J]. J Mar Sys, 1997, 12(1-4): 109-126.
- [4] MOORE W S, KREST J. Distribution of ^{223}Ra and ^{224}Ra in the plumes of the Mississippi and Atchafalaya Rivers and the Gulf of Mexico[J]. Mar Chem, 2004, 86(3-4): 105-119.
- [5] MOORE W S, TODD J F. Radium isotopes in the Orinoco estuary and eastern Caribbean Sea[J]. J Geophys Res, 1993, 98(C2): 2233-2244.
- [6] CHEN WEIFANG, LIU QIAN, HAU CHIH-AN et al. Signature of the Mekong River plume in the western South China Sea revealed by radium isotopes[J]. J Geophys Res, 2010, 115: C12002.
- [7] 张磊, 刘哲, 张经. 海洋四水团混合的定量化分析和方法比较及其在东海西南海区的应用[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(5): 451-454.
- [8] MOORE W S, BLANTON J O, JOYE S B. Estimates of flushing times, submarine groundwater discharge, and nutrient fluxes to Okatee Estuary, South Carolina[J]. J Geophys Res, 2006, 111(C9): C09006, 1-14.
- [9] 郭占荣, 黄磊, 刘花台, 等. 镭同位素示踪隆教湾的海底地下水排泄[J]. 地球学报, 2008, 29(5): 647-652.
- [10] LIU QIAN, DAI MINHAN, CHEN WEIFANG et al. How significant is submarine groundwater discharge and its associated dissolved inorganic carbon in a river-dominated shelf system? [J]. Biogeosciences, 2012(9): 1777-1795.
- [11] HAN AIQIN, DAI MINHAN, KAO SHUHI et al. Nutrient dynamics and biological consumption in a large continental shelf system under the influence of both a river plume and coastal upwelling[J]. Limnol Oceanogr, 2012, 57(2): 486-502.
- [12] 张燕, 夏华永, 钱立兵, 等. 冬季珠江口附近海域水文特征调查分析[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(1): 20-28.
- [13] 庞海龙, 高会旺, 宋萍萍, 等. 夏季珠江冲淡水扩散路径分析[J]. 海洋预报, 2006, 23(3): 58-63.
- [14] OU SUYING, ZHANG HONG, WANG DONGXIAO, et al. Horizontal characteristics of buoyant plume off the Pearl River Estuary during summer[J]. J Coast Res, 2007(50): 652-657.
- [15] MOORE W S. Sampling radium-228 in the deep ocean[J]. Deep Sea Res, 1976, 23(7): 647-651.
- [16] MOORE W S, ARNOLD R. Measurement of ^{223}Ra and ^{224}Ra in coastal waters using delayed coincidence counter[J]. J Geophys Res, 1996, 101(C1): 1321-1329.