

海洋颗粒物 POC/²³⁴Th 比值的控制机制

邓芳芳, 蔡平河, 赵道辰, 李青

(厦门大学 环境与生态学院 近海海洋环境科学国家重点实验室 福建 厦门 361005)

摘要: 通过测定南海北部 A1 站四季上层 500 m 分粒径 (1~10 μm, 10~53 μm, >53 μm) 颗粒物上 POC、²³⁴Th 和 ²²⁸Th 活度, 发现中等粒径与大粒径的 POC、²³⁴Th、²²⁸Th 值比小粒径的 POC、²³⁴Th、²²⁸Th 低约一个量级。3 种粒径 POC/²³⁴Th (POC/²²⁸Th) 比值的垂直分布皆呈现随深度增加而降低的趋势。统计分析 POC/²³⁴Th、POC/²²⁸Th、²³⁴Th/²²⁸Th 比值随粒径的变化, 结果表明 POC 优先再矿化是影响 POC/²³⁴Th 比值变化的主要控制因素。

关键词: POC/²³⁴Th 比值; 分粒径; 控制因素

中图分类号: P734 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2014)06-0907-06

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2014.06.016

Mechanisms controlling POC/²³⁴Th ratios in marine particles

DENG Fang-fang, CAI Ping-he, ZHAO Dao-chen, LI Qing

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The controlling factor of the POC/²³⁴Th ratios has been the focus of the research in the POC export flux. We measured the POC concentrations, ²³⁴Th, and ²²⁸Th activities on size-fractionated class particles in the upper 500 m at station A1 during four cruises to the South China Sea. Results show that POC concentrations, ²³⁴Th and ²²⁸Th activities on the medium and large particles were lower than those on the small particles by about an order of magnitude. The depth profiles of POC/²³⁴Th (POC/²²⁸Th) showed decreasing trend with depth. By analyzing the POC/²³⁴Th, POC/²²⁸Th, ²³⁴Th/²²⁸Th ratios versus particle size, we concluded that preferential remineralization of POC is the main factor of controlling POC/²³⁴Th ratio in marine particles.

Key words: POC/²³⁴Th ratios; marine particles; controlling mechanisms

海洋天然放射性同位素示踪法可用于研究海洋颗粒有机碳 (POC) 通量, 迄今为止应用最广泛的属 ²³⁴Th/²³⁸U 不平衡法^[1-3], 而颗粒物上 C/²³⁴Th 比值是影响 POC 通量计算准确度的关键因素。C/²³⁴Th 比值会因采样方法、颗粒粒径、深度、季节、海区不同而发生变化, 其范围高达 3 个数量级之巨^[4-5]。基于 Niskin 采样瓶的 C/²³⁴Th 通常高于大体积泵所采集样品之 C/²³⁴Th^[6-7], 原因可能

是前者采集到更多的浮游动物而浮游动物具有高的 C/²³⁴Th 比值所致^[8]。C/²³⁴Th 比值随颗粒粒径没有统一的变化规律, 或随粒径增加而增加^[9], 或随粒径增加而减小^[4, 10], 或不随粒径而变^[11]。小颗粒物虽然占海洋颗粒物的大多数, 但其沉降速率通常缓慢。习惯上, 研究者将 >53 μm 或 >70 μm 颗粒物视为沉降颗粒物^[9, 12], 其 C/²³⁴Th 比值视为沉降颗粒物的本征 C/²³⁴Th 比

收稿日期: 2013-07-12, 修订日期: 2013-09-27

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2009CB421203); 中国近海碳收支、调控机理及生态效应研究

作者简介: 邓芳芳 (1987-), 女, 江西南昌人, 硕士, 主要从事海洋生物地球循环的研究, E-mail: dffmn@yahoo.cn

通讯作者: 蔡平河, E-mail: caiph@xmu.edu.cn

值。有研究表明,上层海洋颗粒动力过程时间尺度与 ^{234}Th 在海洋中的停留时间尺度接近^[13]。但关于 $\text{POC}/^{234}\text{Th}$ 比值的控制机制迄今为止尚不清楚。

^{228}Th ($T_{1/2} = 1.91 \text{ a}$) 由母体 ^{228}Ra ($T_{1/2} = 5.75 \text{ a}$) 衰变产生,与 ^{234}Th 化学性质类似,但因半衰期较长,结合 ^{234}Th 和 ^{228}Th ,可更深入探讨 $\text{POC}/^{234}\text{Th}$ 比值的控制机制^[14]。本研究测定南海北部A1站位四季上层500 m水柱分粒级(1 μm ~ 10 μm , 10 μm ~ 53 μm , > 53 μm) POC 、 ^{234}Th 和 ^{228}Th ,旨在进一步探讨颗粒物粒径大小对 $\text{POC}/^{234}\text{Th}$ 的影响。

1 材料与方法

1.1 样品采集

对南海北部A1站进行4季采样,航次时间依次为:2009年7月至9月(夏季) 2009年12月至2010年1月(冬季) 2010年11月至12月(秋季) 2011年5月至6月(春季)。采样站位如图1所示:A1站(20°11.59' N, 115°43.74' E,水深约为920 m)。

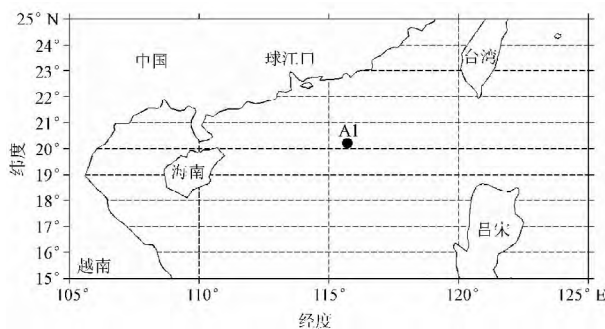


图1 采样站位

Fig. 1 Sampling location

利用原位大体积泵采集大体积海水样品^[4,9,15]。将直径为142 mm、孔径为53 μm 和10 μm 的筛绢(Nitex)及孔径1.0 μm 的Whatman QMA(石英滤膜)膜装于大体积泵相应位置^[16]。原位泵布设于预定深度后,海水依次流经孔径53 μm 、10 μm 、1.0 μm 的筛绢(或滤膜)和A、B MnO_2 纤维柱(用于溶解态 ^{228}Th , ^{228}Ra 分析)。筛绢(或滤膜)用于收集颗粒样品,依次对载有颗粒态样品的滤膜除盐,以预先过滤的100 mL深层海水超声震荡筛绢3遍,每次90 s,样品过滤于直径47 mm,孔径1.0 μm 预先灼烧的QMA膜上,取一

有效直径为15.5 mm和18 mm的分样,前者用于 ^{234}Th 分析,后者用于 ^{13}C 测定,剩余膜样用于 ^{228}Th 分析;于1.0 μm 的QMA膜样上取一有效直径为22 mm和两个有效直径为47 mm的分样,余下膜样用于分析 ^{228}Th 。将所有膜样放于烘箱烘干,待处理。

1.2 分析方法

将载有颗粒物的QMA膜样置于烘箱烘干后制成源样,以 β 计数器(RIS ϕ GM-25-5)测量 ^{234}Th ,半年后测量其本底。通过衰变校正和回收率校正,算出采样时间点不同粒径颗粒物上 ^{234}Th 活度。详细参考文献[14]。

测定颗粒态 ^{234}Th 样品本底后,取出样品,用浓HCl将样品和滤膜共同酸熏,其目的是除去无机碳。以PE-2400 SERIES II CHNS/O元素分析仪测定POC,测定的精密度优于 $\pm 10\%$ ^[17]。

向取样后的QMA膜中加入3~4 dpm ^{230}Th 示踪剂,以浓 $\text{HNO}_3 + \text{HF} + \text{HClO}_4$ 完全消解QMA膜。用经典的阴离子交换柱法分离并纯化样品^[14,18],并转至离心管中,用0.25 mol/L的苯/TTA(Thenoyltrifluoro-acetone)溶液萃取并点源至不锈钢片上,用 α 能谱仪测定 ^{228}Th ,再经回收率及衰变校正得到采样时刻海水中颗粒态 ^{228}Th 活度。

2 结果与讨论

2.1 不同粒径颗粒物的POC, ^{234}Th 和 ^{228}Th 活度

A1站位不同季节,不同粒径之POC数据见图2。春、夏、秋、冬4季小粒径(1~10 μm) POC浓度范围分别为:0.35~1.46 $\mu\text{mol/L}$ (平均值:0.76 $\mu\text{mol/L}$)、0.22~1.46 $\mu\text{mol/L}$ (平均值:0.74 $\mu\text{mol/L}$)、0.32~1.23 $\mu\text{mol/L}$ (平均值:0.53 $\mu\text{mol/L}$)、0.20~1.13 $\mu\text{mol/L}$ (平均值:0.62 $\mu\text{mol/L}$)。中等粒径与大粒径POC浓度相差不显著,季节差异小,比小粒径POC浓度低约一个量级。由图2看出,总体而言,3种粒径POC浓度都呈现表层比底层高的特征。200 m以深,POC浓度基本稳定。真光层以深小粒径POC浓度相对真光层以浅有明显降低,说明小颗粒物在弱光层会有明显再矿化。总体而言,真光层以浅POC浓度季节变化大于真光层以深。

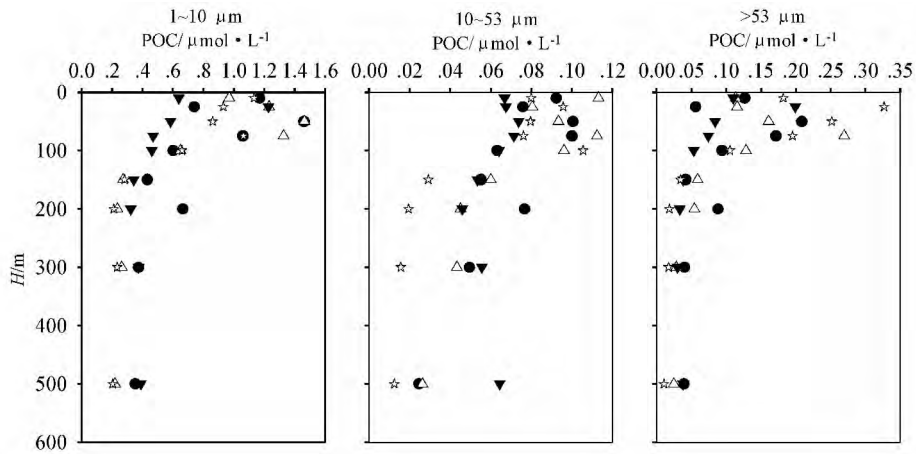


图 2 A1 站位不同季节上层 500 m 不同粒径 POC 含量的垂直分布
(●: 春季; △: 夏季; ▼: 秋季; ☆: 冬季)

Fig. 2 The vertical distributions of particulate organic carbon in different size classes particles in the upper 500 m at station A1 in spring summer autumn , winter

A1 站位上层 500 m 水柱不同季节不同粒径 ²³⁴Th 及 ²²⁸Th 数据结果见表 1。小粒径 (1 ~ 10 μm) 颗粒 ²³⁴Th 及 ²²⁸Th 活度比中、大粒径高一个数量级,而中等粒径与大粒径的活度相近^[14]。小、中、大粒径颗粒物上 ²³⁴Th 活度范围分别为: 0.14 ~ 0.32 dpm/L、0.002 ~ 0.044 dpm/L、0.006 ~ 0.144 dpm/L。²²⁸Th 活度范围为: 0.40 ~ 1.20 dpm/L、0.014 ~ 0.564 dpm/L、0.067 ~ 0.424 dpm/m³。

2.2 不同粒径 POC/²³⁴Th、POC/²²⁸Th 的时空变化
将颗粒物上 POC 浓度和 ²³⁴Th (²²⁸Th) 作比,可得不同粒径颗粒物上 POC/²³⁴Th (POC/²²⁸Th) 的值。小粒径 (1 ~ 10 μm) 颗粒上 POC/²³⁴Th 比值

变化范围为: 0.7 ~ 8.4 μmol/dpm,中等粒径 (10 ~ 53 μm) 颗粒的比值落在 1.3 ~ 13.1 μmol/dpm,大粒径 (>53 μm) 颗粒的比值介于 0.7 ~ 10.7 μmol/dpm,该范围与前人的研究结果基本接近^[19]。总体而言,3 种粒径 POC/²³⁴Th 比值的垂直分布皆呈现表层高底层低的特点。真光层以浅比值随深度有降低趋势,表明 POC 相对于 ²³⁴Th 优先再矿化。真光层以深,POC/²³⁴Th 比值基本稳定,季节差异小,该现象与陈蔚芳研究结果类似。中等粒径和大粒径除 25 m 以浅存在较大季节差异,其它水层差异较小,而小粒径在 0 ~ 100 m 都存在明显季节变化。

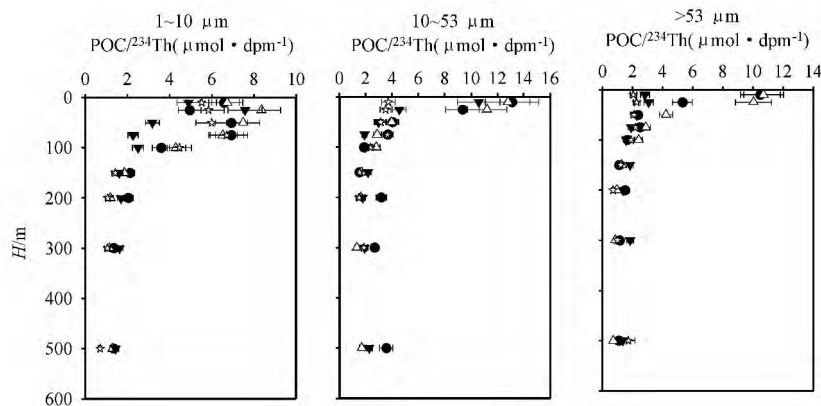


图 3 A1 站不同季节上层 500 m 不同粒径颗粒物上 POC/²³⁴Th 比值随深度的变化
(●: 春季; △: 夏季; ▼: 秋季; ☆: 冬季)

Fig. 3 Depth profiles of POC/²³⁴Th ratios in the upper 500 m at station A1 in Spring , Summer , Autumn , Winter

表1 四季A1站上层500m分粒径POC浓度, ^{234}Th 及 ^{228}Th 活度Tab.1 Size-fractionated POC concentrations, ^{234}Th and ^{228}Th activities in the upper 500 m at station A1 in Spring, Summer, Autumn, Winter

H/m	$^{234}\text{Th}/\text{dpm} \cdot \text{L}^{-1}$			$^{228}\text{Th}/\text{dpm} \cdot \text{m}^{-3}$		
	1~10 μm	10~53 μm	>53 μm	1~10 μm	10~53 μm	>53 μm
2011年5月(春季)						
10	0.18 ± 0.01	0.007 ± 0.001	0.012 ± 0.001	0.58 ± 0.02	0.049 ± 0.002	0.085 ± 0.007
25	0.15 ± 0.01	0.008 ± 0.001	0.010 ± 0.001	0.47 ± 0.02	0.107 ± 0.009	0.067 ± 0.003
50	0.21 ± 0.01	0.025 ± 0.001	0.088 ± 0.002	0.61 ± 0.02	0.079 ± 0.004	0.256 ± 0.013
75	0.15 ± 0.01	0.027 ± 0.001	0.068 ± 0.001	0.40 ± 0.02	0.133 ± 0.009	0.175 ± 0.008
100	0.17 ± 0.01	0.034 ± 0.001	0.056 ± 0.002	0.52 ± 0.02	0.098 ± 0.005	0.144 ± 0.007
150	0.20 ± 0.01	0.036 ± 0.001	0.037 ± 0.001	0.78 ± 0.03	0.135 ± 0.006	0.143 ± 0.007
200	0.32 ± 0.01	0.024 ± 0.001	0.059 ± 0.002	1.20 ± 0.05	0.136 ± 0.007	0.300 ± 0.014
300	0.28 ± 0.01	0.018 ± 0.001	0.035 ± 0.001	1.15 ± 0.04	0.119 ± 0.006	0.175 ± 0.011
500	0.26 ± 0.01	0.007 ± 0.001	0.036 ± 0.001	0.96 ± 0.03	0.043 ± 0.003	0.129 ± 0.007
2009年8月(夏季)						
10	0.14 ± 0.01	0.009 ± 0.001	0.011 ± 0.001	0.91 ± 0.03	0.052 ± 0.003	0.089 ± 0.004
25	0.15 ± 0.01	0.007 ± 0.001	0.012 ± 0.001	0.82 ± 0.03	0.042 ± 0.002	0.134 ± 0.006
50	0.20 ± 0.01	0.023 ± 0.001	0.038 ± 0.001	0.84 ± 0.03	0.074 ± 0.003	0.204 ± 0.03
75	0.20 ± 0.01	0.039 ± 0.001	0.093 ± 0.001	0.95 ± 0.03	0.166 ± 0.008	0.424 ± 0.017
100	0.15 ± 0.01	0.034 ± 0.001	0.053 ± 0.001	0.71 ± 0.03	0.186 ± 0.009	0.298 ± 0.013
150	0.15 ± 0.01	0.035 ± 0.001	0.046 ± 0.001	0.82 ± 0.03	0.112 ± 0.005	0.157 ± 0.008
200	0.20 ± 0.01	0.028 ± 0.001	0.057 ± 0.001	0.92 ± 0.03	0.111 ± 0.005	0.165 ± 0.008
300	0.23 ± 0.01	0.033 ± 0.001	0.033 ± 0.001	1.02 ± 0.03	0.044 ± 0.002	0.110 ± 0.004
500	0.17 ± 0.01	0.015 ± 0.001	0.034 ± 0.001	0.91 ± 0.03	0.014 ± 0.000	0.081 ± 0.02
2010年11月(秋季)						
10	0.14 ± 0.01	0.006 ± 0.001	0.039 ± 0.001	0.94 ± 0.04	0.137 ± 0.006	0.276 ± 0.013
25	0.17 ± 0.01	0.015 ± 0.001	0.065 ± 0.001	0.86 ± 0.04	0.119 ± 0.006	0.350 ± 0.017
50	0.18 ± 0.01	0.025 ± 0.001	0.038 ± 0.001	0.96 ± 0.04	0.564 ± 0.028	0.191 ± 0.009
75	0.21 ± 0.01	0.037 ± 0.001	0.039 ± 0.001	0.98 ± 0.05	0.200 ± 0.010	0.214 ± 0.010
100	0.18 ± 0.01	0.033 ± 0.001	0.034 ± 0.001	0.93 ± 0.03	0.239 ± 0.012	0.177 ± 0.008
150	0.21 ± 0.01	0.025 ± 0.001	0.021 ± 0.001	0.73 ± 0.03	0.131 ± 0.006	0.125 ± 0.013
200	0.19 ± 0.01	0.026 ± 0.001	0.024 ± 0.001	1.00 ± 0.04	0.259 ± 0.013	0.142 ± 0.007
300	0.23 ± 0.01	0.029 ± 0.001	0.016 ± 0.001	0.84 ± 0.04	0.147 ± 0.006	0.094 ± 0.004
500	0.27 ± 0.01	0.028 ± 0.001	0.028 ± 0.001	1.01 ± 0.03	0.109 ± 0.005	0.114 ± 0.006
2010年1月(冬季)						
10	0.21 ± 0.02	0.022 ± 0.002	0.089 ± 0.003	0.78 ± 0.03	0.241 ± 0.012	0.312 ± 0.015
25	0.16 ± 0.01	0.027 ± 0.002	0.144 ± 0.003	0.87 ± 0.03	0.149 ± 0.007	0.533 ± 0.022
50	0.14 ± 0.01	0.025 ± 0.002	0.120 ± 0.003	0.54 ± 0.02	0.103 ± 0.005	0.105 ± 0.005
75	0.16 ± 0.01	0.021 ± 0.001	0.089 ± 0.002	0.48 ± 0.02	0.188 ± 0.009	0.326 ± 0.016
100	0.15 ± 0.01	0.044 ± 0.002	0.055 ± 0.002	0.47 ± 0.02	0.139 ± 0.007	0.195 ± 0.009
150	0.20 ± 0.01	0.019 ± 0.001	0.029 ± 0.002	0.59 ± 0.02	0.101 ± 0.005	0.123 ± 0.005
200	0.20 ± 0.01	0.013 ± 0.001	0.026 ± 0.001	0.86 ± 0.03	0.154 ± 0.007	0.125 ± 0.006
300	0.22 ± 0.01	0.008 ± 0.001	0.017 ± 0.001	0.92 ± 0.03	0.054 ± 0.003	0.139 ± 0.006
500	0.29 ± 0.01	0.002 ± 0.001	0.006 ± 0.001	0.98 ± 0.03	0.132 ± 0.006	0.070 ± 0.004

²²⁸Th 与 ²³⁴Th 的生物地球化学行为相似^[19], 但二者半衰期不同, 所以控制 POC/²²⁸Th 的机制不完全相同。研究表明, POC/²²⁸Th 比值受 ²²⁸Th 衰变影响小, 其原因为 ²²⁸Th 半衰期长^[14]。小粒径 (1 ~ 10 μm) 颗粒上 POC/²²⁸Th 比值变化范围为:

0.21 ~ 2.67 mmol/dpm, 中等粒径 (10 ~ 53 μm) 和大粒径 (> 53 μm) 颗粒物上的比值分别落在 0.09 ~ 2.18 mmol/dpm、0.23 ~ 2.40 mmol/dpm 之间。不同粒径 POC/²²⁸Th 的时空变化如图 4, 呈现出与 POC/²³⁴Th 比值类似的分布特征。

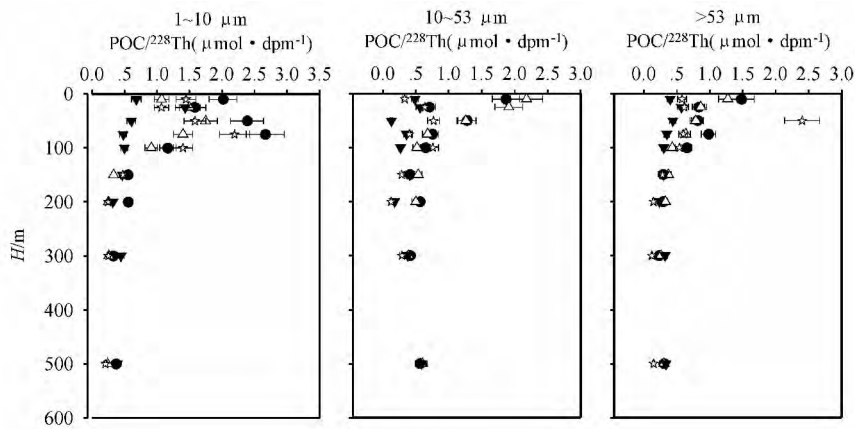


图 4 A1 站不同季节上层 500 m 不同粒径颗粒物上 POC/²²⁸Th 比值随深度的变化 (●: 春季; △: 夏季; ▼: 秋季; ☆: 冬季)

Fig. 4 Depth profiles of POC/²²⁸Th ratios in the upper 500 m at station A1 in Spring, Summer, Autumn, Winter

2.3 POC/²³⁴Th、POC/²²⁸Th 随粒径的变化

本文将 1 ~ 53 μm 颗粒物 (1 ~ 10 μm 颗粒物和 10 ~ 53 μm 颗粒物之和) 视为悬浮颗粒物, 将 > 53 μm 看作沉降颗粒物。将所有季节所有层位两种颗粒物上 POC/Th 比值随粒径变化作统计分析, 将比值范围界定在真实值 ± 6 内, 分为 3 种趋势: 比值随粒径增大而降低、随粒径增

大而升高和比值相对稳定, 见表 2。 n (POC/²³⁴Th)、 n (POC/²²⁸Th)、 n (²³⁴Th/²²⁸Th) 分别表示 POC/²³⁴Th、POC/²²⁸Th、²³⁴Th/²²⁸Th 比值出现某一趋势的次数。 λ (POC/²³⁴Th)、 λ (POC/²²⁸Th)、 λ (²³⁴Th/²²⁸Th) 依次代表 POC/²³⁴Th、POC/²²⁸Th、²³⁴Th/²²⁸Th 比值出现该趋势的概率。

表 2 POC/²³⁴Th、POC/²²⁸Th、²³⁴Th/²²⁸Th 比值随粒径变化的统计分析

Tab. 2 POC/²³⁴Th, POC/²²⁸Th, ²³⁴Th/²²⁸Th ratios versus size

比值随粒径变化情况	n (POC/ ²³⁴ Th)	λ (POC/ ²³⁴ Th) / (%)	n (POC/ ²²⁸ Th)	λ (POC/ ²²⁸ Th) / (%)	n (²³⁴ Th/ ²²⁸ Th)	λ (²³⁴ Th/ ²²⁸ Th) / (%)
随粒径增加而降低	24	69	27	77	13	37
随粒径增加而升高	2	6	1	3	10	34
相对稳定	9	25	7	20	12	29

由表 2 可知, 比值随粒径的变化趋势主要以随粒径增加而降低为主。发生 POC/²³⁴Th, POC/²²⁸Th 比值随粒径增加而降低的概率分别为 69%、77%, 说明在颗粒物聚集过程中, POC 优先再矿化是影响 POC/Th 比值变化的主要因素。发生 POC/²³⁴Th, POC/²²⁸Th 比值随粒径增加而升高的概率分别为 6%、3%, 说明表面吸附 (小颗粒物比表面积大, 对 Th 的吸附能力更强) 或 ²³⁴Th 衰变是控制 POC/Th 比值随粒径变化的次要因素。另一部分 POC/²³⁴Th, POC/²²⁸Th 比值不随粒径变

化。且比值不随粒径变化的层位大部分落于弱光层, 该研究结果与前人研究结果类似, 其原因为大颗粒物在该区域停留时间短, 从真光层输出的大颗粒物未被矿化直接迁出弱光层^[25]。

上层海洋颗粒物聚集过程通常需要几天至几星期, ²²⁸Th 半衰期远长于颗粒物聚集的时间尺度, 而 ²³⁴Th 与之接近。故在上层海洋颗粒物聚集过程中, ²²⁸Th 衰变可忽略, ²³⁴Th 衰变的影响不可忽略。然而, 由表 2 知, ²³⁴Th/²²⁸Th 比值随粒径增加而降低的概率为 37%。与 ²³⁴Th/²²⁸Th 比值随粒

径增加而升高的概率或与比值不随粒径变化概率相当,表明海洋颗粒并非单向由小颗粒物单向聚集成大颗粒物,小颗粒物与大颗粒物存在复杂的相互作用。

3 结论

(1) 海洋中中等粒径(10~53 μm)与大粒径(>53 μm)颗粒物上的POC、²³⁴Th、²²⁸Th值比小粒径颗粒物(1~10 μm)上的POC、²³⁴Th、²²⁸Th低约一个量级。海洋上层100 m以浅3种粒径POC/²³⁴Th(POC/²²⁸Th)比值随深度有降低趋势,100 m以深,POC/²³⁴Th(POC/²²⁸Th)比值基本稳定。

(2) 统计分析POC/²³⁴Th、POC/²²⁸Th、²³⁴Th/²²⁸Th比值随粒径的变化,表明POC优先再矿化是影响POC/²³⁴Th比值变化的主控因素,且小颗粒物与大颗粒物间存在复杂相互作用。

参考文献:

- [1] KAUFMAN A, LI Y H, TUREKIAN K K. The removal rates of ²³⁴Th and ²²⁸Th from waters of the New York Bight [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1981, 54: 385-392.
- [2] COALE K H, BRULAND K W. ²³⁴Th/²³⁸U disequilibria within the California Current [J]. *Limnology and Oceanography*, 1985, 30(1): 22-33.
- [3] COALE K H, BRULAND K W. Oceanic stratified euphotic zone as elucidated by ²³⁴Th: ²³⁸U disequilibria [J]. *Limnology and Oceanography*, 1987, 32: 189-200.
- [4] BUESSELER K O, ANDREWS J A, HARTMAN M C, et al. Regional estimates of the export flux of particulate organic carbon derived from thorium-234 during the JGOFS EqPac program [J]. *Deep-Sea Research Part II. Topical Studies In Oceanography*, 1995, 2(2/3): 777-804.
- [5] BUESSELER K O, BENITEZ-NELSON C R, MORAN S B, et al. An assessment of particulate organic carbon to thorium-234 ratios in the ocean and their impact on the application of ²³⁴Th as a POC flux proxy [J]. *Marine Chemistry*, 2006, 100: 213-233.
- [6] CAI P, CHEN W, DAI M, et al. A high-resolution study of particle export in the southern South China Sea based on ²³⁴Th: ²³⁸U disequilibrium [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: C04019, doi: 04010. 01029/02007JC004268.
- [7] KAWAKAMI H, HONDA M C. Time-series observation of POC fluxes estimated from Th in the northwestern North Pacific [J]. *Deep Sea Research Part I*, 2007, 54: 1070-1090.
- [8] PASSOW U, DE LA ROCHA C L. Accumulation of mineral ballast on organic aggregates [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20: doi: 10. 1029/2005GB00257.
- [9] BUESSELER K O. The decoupling of production and particulate export in the surface ocean [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(2): 297-310.
- [10] HUNG C C, GUO L D, ROBERTS K A, et al. Upper ocean carbon flux determined by size-fractionated ²³⁴Th data and sediment traps in the Gulf of Mexico [J]. *Geochemical Journal*, 2004, 38: 601-611.
- [11] BUESSELER K O, BENITEZ-NELSON C R, MORAN S B, et al. An assessment of particulate organic carbon to thorium-234 ratios in the ocean and their impact on the application of ²³⁴Th as a POC flux proxy [J]. *Marine Chemistry*, 2006, 100: 213-233.
- [12] COCHRAN J K, BUESSELER K O, BACON M P, et al. Short-lived thorium isotopes (²³⁴Th, ²²⁸Th) as indicators of POC export and particle cycling in the Ross Sea, southern ocean [J]. *Deep Sea Research Part II*, 2000, 47: 3451-3490.
- [13] MURRAY J W, DOWNS J N, STROMS S, et al. Nutrient assimilation, export production and ²³⁴Th scavenging in the eastern equatorial Pacific [J]. *Deep-Sea Research Part I*, 1989, 36: 1471-1489.
- [14] CAI P, DAI M, CHEN W, et al. On the importance of the decay of ²³⁴Th in determining size-fractionated C/²³⁴Th ratio on marine particles [J]. *Geophysics Research Letters*, 2006, 33: L23602, doi: 10. 1029/2006GL027792.
- [15] BUESSELER K O, BENITEZ-NELSON C R, RUTGERS VAN DER LOEFF M M, et al. An intercomparison of small- and large-volume techniques for thorium-234 in seawater [J]. *Marine Chemistry*, 2001, 74: 15-28.
- [16] CHARETTE M A, MORAN S B. Rates of particle scavenging and particulate organic carbon export estimated using ²³⁴Th as a tracer in the subtropical and equatorial Atlantic Ocean [J]. *Deep-Sea Research*, 1999, 46: 885-906.
- [17] KNAP A, MICHAELS A, CLOSE A, et al. Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements. JGOFS Report Nr. 19, vi + 170 pp [M]. UNESCO, 1994. Reprint of the IOC Manuals and Guides No. 29.
- [18] ANDERSON R F, FLEER A P. Determination of natural actinides and plutonium in marine particulate material [J]. *Analytical Chemistry*, 1982, 54: 1142-1147.
- [19] 陈蔚芳. 南海北部颗粒有机碳输出通量、季节变化及其调控过程 [D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [20] 吕冬伟. 南海北部弱光层颗粒动力学 [D]. 厦门: 厦门大学, 2005.