科学通报
第41卷 第5期 CHINESE SCIENCE BULLETIN 1996年3月

西沙珊瑚礁锶同位素特征及其古环境意义*

孙志国 刘宝柱 刘 健 蓝先洪
吴建政 周墨清 韩春瑞 业渝光
(地质矿产部海洋地质研究所，青岛 266071)

关键词 西沙 珊瑚礁 古环境 锶同位素

深海钻探计划(DSDP)的执行在全球范围内推动了"锶同位素地层学"的研究[1~3]. 赵焕庭等[4]和于津生等[5]报道了南沙群岛"南永一井"的34个样品的锶同位素数据，并对珊瑚礁的锶同位素地球化学作了开拓性的研究工作. 本文将研究西沙群岛"西琛一井"(16°27′N, 111°42′E)第四纪珊瑚礁地层的锶同位素组成特征，并探讨其古环境意义.

1 地质背景及样品分析方法

根据有孔虫资料，"西琛一井"中第三系和第四系的界限在孔深210 m处，即1.90 Ma B.P.左右[6]. ^{14}C年龄资料和自旋电子测年(ESR)资料[7]以及"西琛一井"的岩性、沉积间断面与"南永一井"的对比研究[4]，证实"西琛一井"中存在全新统，全新统(Q_4)与上更新统(Q_3)的分界在孔深16.91m处. 下更新统(Q_1)与中更新统(Q_2)的界限、中更新统(Q_2)与上更新统(Q_3)的界限，分别在孔深98.36 m和30.60 m处[8].

"西琛一井"中，Q_4(0～16.91 m): 未胶结的珊瑚砾块和生物砾砂屑，主要矿物为文石和高镁方解石; Q_3(16.91～30.60 m): 灰白色礁格架灰岩; Q_2(30.60～98.36 m): 主要为泥灰岩、泥粒灰岩、礁格架灰岩; Q_1(98.36～210.00 m): 主要为藻屑泥灰岩、礁格架灰岩. 共取样112个，平均间距1.88 m. 每个样品称20～50 mg，因样品属纯碳酸盐，采用稀盐酸(3%)溶样，用阳离子交换柱分离Rb和Sr; 在VG-354质谱计上进行$^{87}Sr/^{86}Sr$比值测量，分析精度好于$1/10^5$，相对误差小于0.002 8%. 为了讨论的方便，模仿轻同位素的分馏定义

$$\Delta^{87}Sr=\left[\frac{(^{87}Sr/^{86}Sr)_{样品}}{(^{87}Sr/^{86}Sr)_{标准海水}}-1\right]\times 10^3,$$

其中现代标准海水锶同位素组成引用Elderfield(1986)所采用的值$^{87}Sr/^{86}Sr=0.709\,20$[1].

2 结果与讨论

2.1 锶同位素组成特征

如图1所示，"西琛一井"第四系中，锶同位素成分变化很大，$\Delta^{87}Sr$在-0.18～0.83之

1995-06-26收稿，1995-09-05收修改稿
*国家自然科学基金资助项目

间，平均0.16，标准差0.21，变异系数为1.31．各统的锶同位素分布特征如表1．如图1所示，上更新统(Q_3)的放射性成因同位素^{87}Sr较其他各统富集，$\Delta^{87}Sr$和$^{87}Sr/^{86}Sr$的平均值分别高达0.33和0.709 43．

根据"西琛一井"的地质背景和样品的$^{87}Sr/^{86}Sr$比值及$\Delta^{87}Sr$，我们将放射性成因同位素^{87}Sr的富集程度分为I，II和III三级．I级($^{87}Sr/^{86}Sr \geqslant 0.709\,43$，$\Delta^{87}Sr \geqslant 0.33$)：$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$大于或等于"西琛一井"上更新统的平均值($\Delta^{87}Sr=0.33$，$^{87}Sr/^{86}Sr=0.709\,43$)，比其他各统($Q_1$，$Q_2$，$Q_4$)的高得多(表1)，$^{87}Sr$相对富集，$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$为正异常．II级($0.709\,20 \leqslant ^{87}Sr/^{86}Sr < 0.709\,43$，$0 \leqslant \Delta^{87}Sr < 0.33$)：$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$略大于或等于现代大洋标准海水的，相对于南海这一受陆源物质影响较强的半封闭边缘海，$^{87}Sr/^{87}Sr$和$\Delta^{87}Sr$属正常分布范围，^{87}Sr富集程度为正常情况．III级($^{87}Sr/^{86}Sr < 0.709\,20$，$\Delta^{87}Sr < 0$)：$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$比现代大洋海水的低，相对于受陆源物质影响较强的半封闭边缘海南海，$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$属负异常，^{87}Sr相对亏损．

如图1所示，"西琛一井"0～210 m深度范围内，锶同位素分布存在16个负异常带(N1～N16)和18个正异常带(P1～P18)．

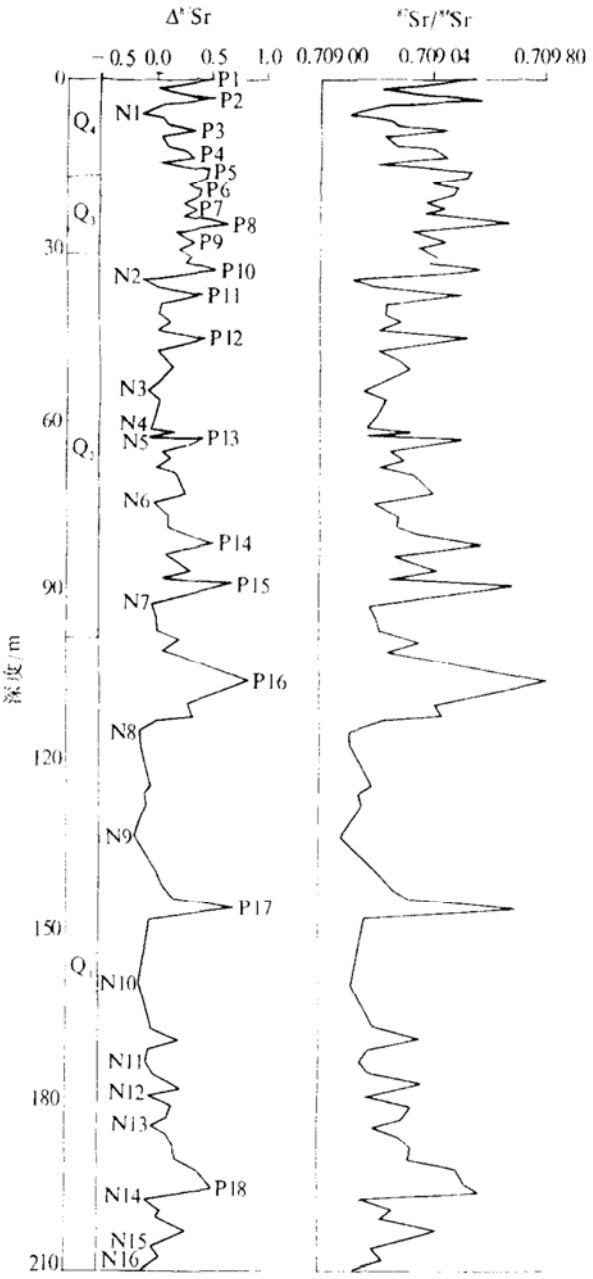


图1　西沙群岛"西琛一井"锶同位素的波动曲线

2.2　古环境意义

海水的$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$受控于物源的输入，反映物源区物质的性质[1～5]．地幔源物质可通过热液活动，火山喷发作用和玄武岩的海底风化作用将元素Sr转移到海洋中去，这样来源的Sr一般贫放射成因同位素^{87}Sr，会导致海水的$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$降低．大陆壳源物质经化学风化作用，剥蚀作用和河流搬运作用被带入海洋中，这样来源的Sr一般富含放射成因^{87}Sr，会导致海水的$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$增加．

生物骨骼生长时记录了当时海水的锶同位素成分[1～5]．生物碳酸盐骨骼中Rb/Sr比值极低，而^{87}Rb衰变的半衰期较长(4880 Ma)，对于地质年代上较年轻的生物碳酸盐岩，沉积以后^{87}Rb的衰变作用可忽略不计．因此，"西琛一井"第四纪珊瑚礁锶同位素记录仍反映骨骼生长时海水的锶同位素组成．

表 1 西沙群岛"西琛一井"锶同位素分布特征

	$\Delta^{87}Sr$					$^{87}Sr/^{86}Sr$				
地层	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q
最大值	0.83	0.68	0.62	0.52	0.83	0.709 79	0.709 68	0.709 64	0.709 57	0.709 79
最小值	−0.18	−0.13	0.17	−0.14	−0.18	0.709 07	0.709 11	0.709 32	0.709 10	0.709 07
极 差	1.01	0.81	0.45	0.66	1.01	0.000 72	0.000 57	0.000 32	0.000 47	0.000 72
平均值	0.11	0.14	0.33	0.19	0.16	0.709 28	0.709 30	0.709 43	0.709 34	0.709 31
标准差	0.23	0.18	0.12	0.20	0.21	0.000 17	0.000 13	0.000 08	0.000 14	0.000 15
变异系数	2.09	1.29	0.36	1.05	1.31	0.000 24	0.000 18	0.000 11	0.000 20	0.000 21
样品数	43	43	12	14	112	43	43	12	14	112

幔源玄武质物质输入会导致海水中 ^{87}Sr 相对亏损[1~5]. 前人研究表明,南海断块活动与火山喷发作用相伴,第四纪期间南海断块发生多期活动,南海及其周围岛屿的玄武质火山喷发作用呈现多阶段的特点[9~11]. 显然,这些玄武质火山活动产物的输入,必然降低南海海水的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $\Delta^{87}Sr$,致使 ^{87}Sr 相对亏损,因此,我们推断:"西琛一井"中 16 个锶同位素负异常带(N1 ~ N16)记录了南海第四纪期间 16 次相当大规模的断块活动和火山喷发作用事件. "西琛一井"全新统(Q_4)的锶同位素负异常带(N1),可与雷琼地区近期玄武质火山岩(Q_4)[10]和南海北部陆坡上第一火山灰层[1]对比. 上更新统(Q_3)中无锶同位素负异常带,这是因为晚更新世陆源物质大量输入南海,干扰了锶同位素对火山喷发作用的记录. 中更新统(Q_2)、下更新统(Q_1)分别有 6 个(N2 ~ N7)和 9 个(N8 ~ N16)锶同位素负异常带(图 1). 第四纪火山活动的直接产物——早期玄武质火山岩(Q_1)和中期玄武质火山岩(Q_2)广泛分布于雷琼地区[10, 11]. 但是南海及其周缘地区早、中更新世(Q_1 ~ Q_2)断块活动和火山喷发的次数尚未有人报道,本文所发现的锶同位素 ^{87}Sr 负异常记录可作为这方面研究的依据.

因为陆源物质大量输入,才会致使海水的 ^{87}Sr 富集[1~5],所以我们推断:"西琛一井"第四纪地层中 18 个 ^{87}Sr 正异常带(P1 ~ P18),是 1.9 Ma B.P. 以来南海 18 次陆源物质大规模输入事件的记录(图 1). 其中全新世(Q_4)有 4 次(P1 ~ P4),除河流作用外,风的搬运作用可能也起了一定的作用,因为华南沿海全新世发生多期风砂沉积作用[12]. 上更新统(Q_3)中,$\Delta^{87}Sr$ 较大,在 0.17 ~ 0.62 之间,平均高达 0.33,标准偏差 0.12,变异系数仅为0.36,有 5 个锶同位素正异常带(P5 ~ P9),这表明晚更新世西沙海域受陆源物质影响较大. 中更新统(Q_2)、下更新统(Q_1)分别具有 6 个(P10 ~ P15)和 3 个(P16 ~ P18)陆源物质大量输入事件的记录.

海水的锶同位素组成与青藏高原隆起有关. 前人研究表明:100 Ma 以来,太平洋海水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值是上升的,尤其是 80 ~ 65 Ma B.P. 之间和 40 ~ 15 Ma B. P. 之间,其中 40 ~ 15 Ma B.P. 期间太平洋海水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的显著升高是由于印度板块与欧亚板块的碰撞,是青藏高原的隆起所致[1~3]. 南沙群岛"西永一井"第四纪珊瑚礁地层中第 II 段 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值升高及正的 $\Delta^{87}Sr$ 峰值被解释为喜马拉雅山脉上升的结果[5].

更新世以来大洋海水 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值变化小[1~3]. 然而,"西琛一井"资料表明,1.9 Ma B.P. 以来,西沙海域海水的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值较大,变化幅度也很大,明显不同于同期的大洋海水. 这

1) 陈文斌,周福根. 南海北部晚第四纪火山玻璃的分布及其地质意义. 见:陈文斌,郑连福主编,南海海洋沉积作用和地球化学研究. 北京:海洋出版社(出版中)

是因为南海是一个半封闭的边缘海，而且又有汇水流域包括青藏高原的湄公河注入．和南沙相比较，西沙水域更靠近中国大陆，更远离南海与太平洋的通道，致使"西琛一井"的$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$总体上明显高于南沙群岛的"南永一井"[4,5].

西沙海域海水锶同位素波动与青藏高原隆起相关．青藏高原隆起分3个主要阶段：(1)晚中新世末期的强烈构造运动阶段；(2)上新世～早更新世的高原面形成阶段；(3)早更新世末以来的阶段性整体隆升阶段[13]．早更新世末(大约1.4 Ma B.P.前后)开始了青藏高原阶段性整体隆升，此后隆升的速度分段加快(尤其是在布容期)，其间尚有多次构造相对稳定或振荡的阶段[13]．而不同地质历史时期西沙海域海水中$\Delta^{87}Sr$和$^{87}Sr/^{86}Sr$波动有明显不同：布容期(Q_2～Q_4)波动频率高，幅度低，尤其是晚更新世(Q_3)，而早更新世(Q_1)(属松山期)则以波动频率低，幅度高为特点(图1)．

青藏高原整体隆升速率越高，"西琛一井"中锶同位素正异常出现的频率越高．从高原整体隆升开始以来各阶段的隆升速率来看，大致表现为年代越轻，速率越大，即1.3～0.9 Ma B.P.为1.0 mm/a；0.9～0.5 Ma B.P.为1.9 mm/a；0.5～0.1 Ma B.P.为1.7 mm/a；0.1～0.008 Ma B.P.为5.4 mm/a，最近8 ka隆升速率高达18.8 mm/a[13]．而第四纪以来"西琛一井"锶同位素正异常出现频率越来越高，早更新世(Q_1)(1.9～0.73 Ma B.P.)有3个^{87}Sr正异常，频率为2.6个/Ma；中更新世(Q_2)(0.73～0.125 Ma B.P.)有6个^{87}Sr正异常，频率为9.9个/Ma；晚更新世(Q_3)(0.125～0.01 Ma B.P.)有5个^{87}Sr正异常，频率为43.5个/Ma，而全新世(0.01 Ma B.P.以来)有4个^{87}Sr正异常，频率高达400个/Ma.

总之，青藏高原隆起，控制了南海及其周边区域的过去环境演变，从而影响到西沙水域地生态系统中海水$^{87}Sr/^{86}Sr$和$\Delta^{87}Sr$的波动．

参　考　文　献

1 Elderfield H. Strontium isotope stratigraphy. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1986, 57: 71～90
2 Hess J, Bender L M, Schilling J G. Evolution of the ratio of strontium-87 to strontium-86 in seawater from Cretaceous to present. Science, 1988, 231: 979～984
3 韦刚健．海水中Sr同位素组成变化的环境意义与Sr同位素地层学．海洋科学，1995，(1)：23～25
4 赵焕庭，沙庆安，朱袁智等．南沙群岛永署礁第四纪珊瑚礁地质．北京：海洋出版社，1992．153～156；83～85
5 于津生，陈毓蔚，桂训唐等．"南永1井"礁相碳酸盐C、O、Sr、Pb同位素组成及其古环境意义探讨．中国科学，B辑，1994，24(7)：757～765
6 孟祥营．西沙群岛晚中新世以来有孔虫生物地层界限及古环境变化．微体古生物学报，1989，(4)：346～352
7 业渝光，和　杰，刁少波等．西琛一井的ESR年代学．见：中国海陆第四纪对比研究．北京：科学出版社，1991．224～231
8 张明书，何起祥，业治铮等．西沙生物礁碳酸盐沉积地质学研究．北京：科学出版社，1989
9 中国科学院南海海洋研究所海洋地质构造研究室．南海地质构造与陆缘扩张．北京：科学出版社，1988
10 中国科学院南海海洋研究所海洋地质研究室．华南沿海第四纪地质．北京：科学出版社，1978
11 孙嘉诗．南海北部及广东沿海新生代火山活动．海洋地质与第四纪地质，1991，11(3)：45～68
12 吴　正，吴克则，黄　山等．华南沿海全新世海岸沙丘研究．中国科学，B辑，1995，25(2)：211～218
13 吴锡浩，王富葆，安芷生等．晚新生代青藏高原隆升的阶段和高度．见：刘东生，安芷生主编．黄土·第四纪地质·全球变化，第三集．北京：科学出版社，1992．1～13