

东太平洋早中新世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 CaCO_3 的 短周期旋回及其古海洋学意义^①

刘季花¹ 陈迎蓉² 梁宏锋¹ 王应喜³

1(国土资源部海洋地质研究所 青岛 266071) 2(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

3(南京大学现代分析中心 南京 210093)

摘要 以5 cm为间隔取得东太平洋5794岩心早中新世超微化石软泥须(24.06~22.06 Ma)的55个样品,用同位素质谱仪、耦合等离子光谱仪和化学溶解法分别对软泥中可溶碳酸盐组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、全岩的 Al_2O_3 和 CaCO_3 含量进行了测定。结果显示, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 CaCO_3 呈反向发育了2个完整旋回和1个半旋回。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 CaCO_3 短期旋回具有重要的古海洋学意义:(1) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的正负旋回分别反映了陆壳风化强度和海底火山作用加强的趋势, CaCO_3 正负旋回分别反映了温度降低和升高的趋势,而火山活动强烈时期与温度下降时期对应。(2)相对早中新世和晚中新世,南极底层流在早中新世对东太平洋的影响较弱,但是也形成两个 CaCO_3 溶解带和底栖有孔虫高含量带。

关键词 东太平洋 是中新世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 CaCO_3 旋回 古海洋学

第一作者简介 刘季花 女 1965年出生 博士研究生 副研究员 海洋沉积地球化学

中图分类号 P736.2 **文献标识码** A

1 前言

从60年代末开始,由于锶同位素具有独特的地球化学性质使得其在海洋研究中得到了广泛的应用。首先, ^{87}Sr 为放射性元素 ^{87}Rb 衰变而来, ^{87}Rb 富集于酸性和碱性系列火成岩中(陆壳主要组分),而在基性岩(洋壳组分)中贫乏, ^{87}Sr 是稳定同位素, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为常数,因此体系的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值可以反映陆源和幔源物质的相对比例;其次, ^{87}Rb 的半衰期长, Sr 在海水中的滞留时间(4 Ma)也长于海水混匀时间(1000 a),因此海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值能够反映海水长期的变化,从而有长期地层学的意义^[1~2]。海水是一个开放体系,海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值受到了如下物源的影响:(1)年轻的洋脊、岛弧或海底火山岩;(2)老的陆壳硅质岩;(3)海洋碳酸盐溶解或成岩再循环。其中,第(3)个来源对整个海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 贡献约为海水的1/50,因此,海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值取决于海洋火山源和陆源的输入比例^[2~4]。海水的锶同位素研究取得的最显著的成果是建立了

显生宙以来高精度的海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 长周期性变化曲线^[5~6]。同时人们从不同角度研究 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化与海平面、洋流体系、洋中脊扩张速率、火山活动、古气候等因素之间的联系^[7~9]。也有人从短范围内研究 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的变化,目前对上新世以来 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的高分辨率研究较多,而对早第三纪的研究少见^[10~11]。相对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 而言, CaCO_3 和氧同位素的古海洋意义的研究更为完善。中新世是研究古海洋学最为重要的时期,而赤道东太平洋又是一个受到了洋脊火山作用和南极底层流等因素影响的复杂的区域^[12],因此,本文将以东太平洋反重岩心PC5794早中新世的超微化石软泥岩段为研究对象,通过综合研究 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 CaCO_3 、氧同位素及有关元素的变化,揭示东太平洋早中新世时期海水的同位素来源、古温度、南极底层流演变特征。

2 PC5794岩心地层学特征

PC5794岩心由国土资源部广州海洋地质调查局“海洋四号”科学考察船1993年地赤道北东太平

① 国家自然科学基金资助项目(编号:49676291)和大洋协会资助项目(DY95-2-10)
收稿日期:1999-06-21

洋克里帕顿—克拉里昂断裂带之间取得,坐标为 145°06′45.3″W, 7°31′23.7″E, 丘陵地形,水深 5 000 m,岩心长 698 cm。PC5794 岩心的岩性地层、微体古生物地层和古地磁地层表现于图 1 中。0~30 cm,为第四系,硅质粘土,发育第四纪硅藻化石和分布容正极性期和松山负极性期 1 和 1r,底部年龄为 0.92 Ma。30~698 cm 属于早中新统,其中 30~45 cm 为深海粘土,45~130 cm 为硅质软泥,130~140 cm 为硅质沉积向钙质沉积变化的过渡

地磁年龄,最终确定了超微化石软泥段的年龄为 22.06~24.06 Ma,而且根据沉积速率计算了该岩段的时间标尺^[13]。

3 样品和分析方法

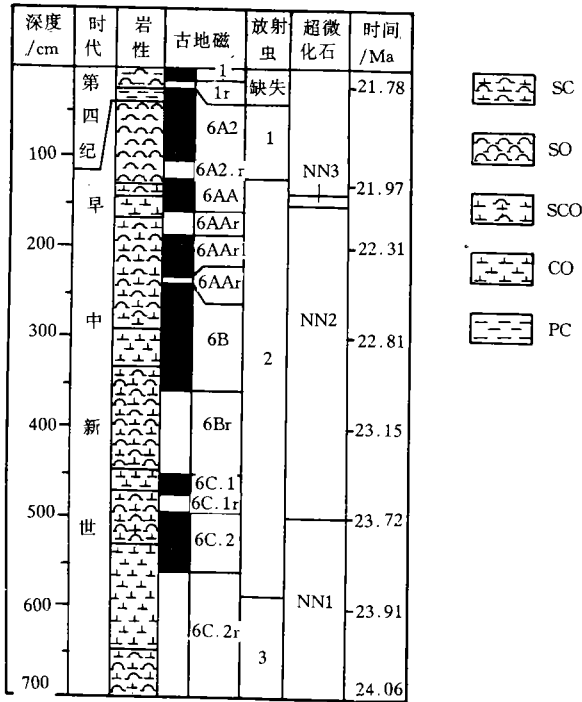
以 5 cm 为间隔取得超微化石软泥段的 55 个样品,分别用偶合等离子光谱仪(ICP)和化学解法(0.5MHCL 溶解)测得全岩 Al_2O_3 和 $CaCO_3$ 含量。用同位素质谱仪测定了软泥中可溶碳酸盐组分的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值,具体步骤如下:(1)全岩样品中混有少量的有孔虫个体碎片,个体大于 0.063 mm,而远洋浮游超微化石的个体均小于 0.032 mm。将原始样品分离过筛取得小于 0.03 mm 组分进行 Sr 同位素分析;(2)样品用蒸馏水漂洗 2~3 次,取 5 g 样品,浸泡于 50 ml 0.5 m HAc 中,搅拌,30 分钟后,离心,取得上清液待分析用;(3) $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值由南京现代分析中心 VG354 表面热电离同位素质谱仪测得。采用美国标准局 NBS987 标样 $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.71022 \pm 4(2\sigma)$,标准化值 $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.1194$ 。测试偏差小于 0.000 03。

4 结果

4.1 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 旋回

PC5794 岩心超微化石段(24.06~22.06 Ma)的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值变化范围为 0.708 328~0.708 715,这一范围大大的超过了 Elderfield(1986)建立的显生宙的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 的标准曲线的值(24~22 Ma)的变化范围为 0.708 2~0.708 4^[5]。由于测试中样品的监控效果很好,因此这种差异不是由测试造成的,可能是在样品进行酸处理时,溶解了部分粘土中所吸附的 Sr。由于东太平洋沉积物中粘土组分多来自陆源^[14],且陆壳铝硅酸盐的 $^{87}Sr/^{86}Sr \approx 0.720$,极少量的陆源物质就会影响到生物组分的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值,但从整个测定的结果看,这些值小于现代海水的值(0.709 2),平均值为 0.708 49,可见测定值主要受到海水的 Sr 同位素的影响,可以反映海水 Sr 同位素的演变趋势。

$^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值两个高峰或低峰值构成一个完整的旋回,这样,在时间剖面上,以 23.98 Ma 和 22.63 Ma 为界限,从早到晚划分出 1 和 2 两个完整旋回及—3 半旋回。各个旋回的特征列于表 1。—1_r: 24.06~23.81 Ma, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值从 0.708 412 降为 0.708 347。+1_s: 23.81~23.59 Ma, 比值从



SC: 硅质粘土, SO: 硅质软泥, SCO: 含硅质超微化石软泥, CO: 超微化石软泥, PC: 远洋粘土。

图 1 PC5794 岩心的地层剖面

Fig. 1 The stratigraphy of Core PC5794.

SC: Siliceous clay, SO: siliceous ooze,

SCO: siliceous nanno-ooze, and PC: pelagic clay

层, 140~698 cm 间钙质软泥与硅质钙质软泥相间发育, 且岩性层之间均呈过渡现象。140 cm 以下岩心发育三个超微化石带: 500~710 cm 为 NN1 带, 150~500 cm 为 NN2 带, 140~150 cm 为 NN3 带。40~698 cm 从上至下发育 3 个放射虫化石带, 第 1 个带(40~120 cm)为 *Stichocorys delmontensis* 带, 第 2 个带(120~586 cm)为 *Cyrtocapsella tetrapera* 带, 第 3 个带(586~698 cm)为 *Lychnocanoma elongata* 带。30~699 cm 为 6A. 2~6C. 2r 极性期, 年龄为 21.45~24.14 Ma, 缺失 1r-1~6A. 1r 极性期。根据化石带中某些特定化石的初现和绝灭年龄, 结合古

0.708 347增为 0.708 616。-2_{Sr}:23.59~22.98 Ma, 比值从 0.708 616 降 0.708 328。+2_{Sr}:22.98~22.63 Ma, 比值由 0.708 328 上升为 0.708 785。-3_{Sr}:22.63~22.06 Ma, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 迅速降低,且值的变化范围较大。

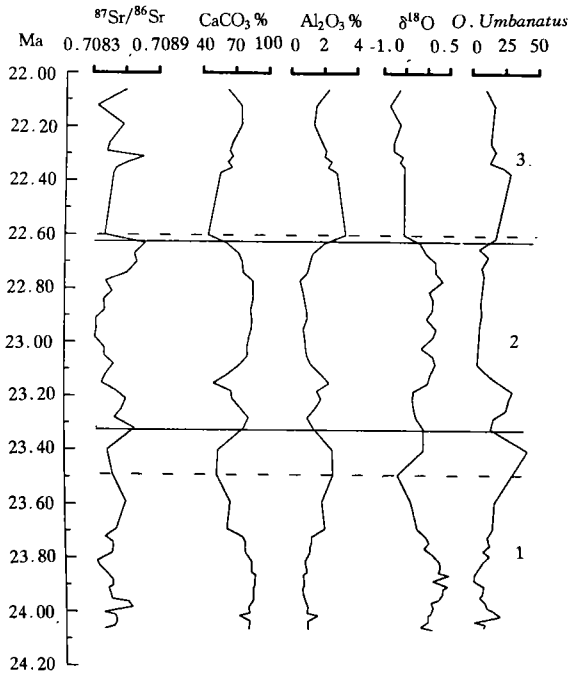
表 1 PC5794 岩心的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、CaCO₃ 旋回对比

Table. 1 The comparison of the cycles between ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and CaCO₃

⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr		CaCO ₃	
时间(Ma)	旋回	时间(Ma)	旋回
22.06~23.81	-1 _{Sr}	24.06~23.86	+1 _{CaCO₃}
23.81~23.59	+1 _{Sr}	23.86~23.49	-1 _{CaCO₃}
23.59~22.98	-2 _{Sr}	23.49~22.81	+2 _{CaCO₃}
22.98~22.63	+2 _{Sr}	22.81~22.6	-2 _{CaCO₃}
22.63~22.06	-3 _{Sr}	22.6~22.06	+3 _{CaCO₃}

4.2 CaCO₃ 旋回

PC5794 岩心的 CaCO₃ 含量的变化范围为 45.46%~89.19%, 也呈旋回性变化(图 2)。+1_{CaCO₃}:24.06~23.86 Ma, CaCO₃ 略有上升, 由



横过曲线的直线为⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 旋回界线,折线为 CaCO₃ 旋回界线

图 2 PC5794 岩心的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr CaCO₃ 及其他参数随时间的变化曲线

Fig Variations of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr CaCO₃ and other parameters with time in Core PC5794

83.3%增为 89.19%。-1_{CaCO₃}:23.86~23.49Ma,

CaCO₃ 由 89.19%降为 53.94%。+2_{CaCO₃}:23.49~22.81 Ma, CaCO₃%略有上升, 由 83.3%增为 89.19%。-1_{CaCO₃}:23.85~23.49 Ma, CaCO₃ 由 89.19%降为 53.94%。+2_{CaCO₃}:23.49~22.81 Ma, CaCO₃ 由 53.94%上升为 85.97%, 其中在 23.15~23.21 Ma 间, CaCO₃ 有一个低峰值。-2_{CaCO₃}:22.81~22.6 Ma, CaCO₃ 由 85.97%降为 45.46%。+3_{CaCO₃}:22.6~22.06 Ma, CaCO₃ 略有增加, 由 56.06%上升为 75.24%。

5 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 CaCO₃ 旋回的古海洋学意义

5.1 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的物源示踪意义

如前所述,PC5794 岩心超随微化石软泥的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值不是海水的 Sr 同位素组成的值,但能反映海水 Sr 同位素演变的趋势。海水的 Sr 同位素组成受到了两种来源的控制,一个是洋壳的玄武岩,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.703,玄武岩化所形成的 Sr 会降低海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值,而陆壳岩石(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为 0.720)化学风化后产生的 Sr 经河水带入大洋,会增加海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值^[2~4,7~9],因此,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 短周期变化能反映较小时间范围内大陆的风化以及海底火山活动的相对强度,其中,负旋回标记着海底火山活动增强,正旋回表示海水受中陆源影响大。PC5794 岩心早中新世的 24.06~22.06 Ma 间,存在⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 的 3 个负旋回和 2 个正旋回,表明早中新世时期海底有频繁的火山活动存在,在火山活动减弱时期,陆源对海洋的作用开始加强。全岩中的 Al₂O₃ 与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值在时间剖面上有一定的关系 Al₂O₃ 和 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 在 23.69~23.15 Ma 和 23.69~22.6 Ma 间都有高峰值。通常,大洋沉积物中的 Al₂O₃ 有 95%以上被认为来自陆源,沉积物中 Al₂O₃%越高,表明陆源组分越多,大陆受化学风化强烈。这与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 反映的结果是相吻合的。

5.2 CaCO₃ 的古气候效应

海洋沉积物中 CaCO₃ 的变化受到了沉积速率和侵蚀速率的影响。已证实,CaCO₃ 的沉积速率与大气 CO₂ 浓度有密切的关系,而且球大气 CO₂ 浓度主要受到火山活动的制约,频繁的火山活动加快了 CaCO₃ 的沉积^[15]。PC5794 岩心的 CaCO₃ 与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 呈反向旋回与证实了东太平洋早中新世时期 CaCO₃ 的形成与火山活动密切相关。此外,CaCO₃ 的变化与

气候有一定的关系。这是由于火山活动向空中排放火山灰,使得地球表面温度降低,因此, CaCO_3 含量高的时期,可能是温度下降的时期。PC5794 岩心超微化石全岩的氧同位素组成($\delta^{18}\text{O}$)表现出与 CaCO_3 同步变化的旋回(图2),这进一步说明,东太平洋是中新世古气候经历了旋回性的变化,火山活动强烈时期,气温降低,利于 CaCO_3 的沉积;陆地风化强度高时,气温升高, CaCO_3 含量减少。

5.3 南极底层流

南极底层流从晚渐新世以来一直活跃于太平洋。在 25~22 Ma 间,绕南极环流体系伴随着南部大陆的移去、塔斯马尼亚通道和德雷克海峡的打开及科盖伦海底高地的形成而得到发展。中中新世及晚中新世的冰期极盛期使得南极底层流极为活跃。明显的证据是在地层中形成沉积间断^[16~17]。PC5794 岩心存在早中新世至第四纪的沉积间断,也证实了这一段时期南极底层流在东太平洋发育。在早中新世,PC5794 岩心早中新世时期未见明显的沉积间断,表明早中新世没有发生气温骤然降低事件,底层流也不似中新世和晚中新世活跃,但是,由于南权底层流对碳酸盐有物理侵蚀作用,易造成 CaCO_3 含量的减少和沉积速率的降低。在 PC5794 岩心中,可见到两个重要的 CaCO_3 溶解期: 23.69~23.15 Ma 和 22.6~22.4 Ma,在溶解期中,沉积物沉积速率较低,发育较多的远洋粘土矿物,更为明显的是底栖有孔虫(低温环境下发育) *Oridortos Umbanatus* 的个数也最高,证实确有底层流发育。

6 结论

(1) PC5794 岩心早中新世 24.06~22.06 Ma 间 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 CaCO_3 呈旋回性变化,发育了互为反向的 2 个完整旋回和一个半旋回。

(2) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的正负旋回分别反映了陆壳风化强度和海底火山作用加强的趋势。而 CaCO_3 旋回与 $\delta^{18}\text{O}$ 所反映的气温旋回相反, CaCO_3 正负旋回分别反映了温度降低和升高的趋势,而火山活动强烈时期与温度下降时期对应。

(3) 相对早中新世和晚中新世,南极底层流在早中新世对东太平洋的影响较弱,但是,明显的 CaCO_3 低含量和高的底栖有孔虫含量表明在 23.69~23.15 Ma 和 22.6~22.4 Ma 间底层流发育。

参 考 文 献

- 魏菊英,王关玉. 同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社,1988. 22~41
- Faure G. Principles of isotope geology[M]. New York: John Wiley & Sons(second edition),1986. 183~199
- Chaudhuri S, Clauer N. Fluctuations of isotopic composition of Strontium in seawater during the Phanerozoic Eon[J]. Chemical Geology(Isotope Geoscience Section),1986,59:293~303
- Richter F M, Depaolo D J. Diagenesis and Sr isotopic evolution of seawater using data from DSDP Site 590B and 575[J]. Earth and Planetary Science Letter,1988,90:382~394
- Elderfield H. Strontium isotope stratigraphy[J]. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleocology,1986:71~90
- Koepnick R B, Burke W H, Hetherington D, et al. Construction of the seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ curve for the Cenozoic and Cretaceous: Supporting data [J]. Chemical Geology (Isotope Geoscience Section),1985,58:55~81
- 韦刚建. 海水中 Sr 同位素组成的环境意义与 Sr 同位素地学[J]. 海洋科学,1995,(1):23~24
- Richer F M, Rowley D B, DePaolo D J. Sr isotope evolution of seawater; the role of tectonics[J]. Earth and Planetary Science Letters,1992,109:11~23
- Derry L A, France-Lanord C. Neogene Himalayan weathering history and river $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; impact on the marine Sr record[J]. Earth and Planetary Science Letters,1996,142:59~74
- Hodell D A, Mead G A, Muller P A. Variation in the strontium isotopic composition of seawater (8Ma to present); implications for chemical weathering rates and dissolved fluxes to oceans[J]. Chemical Geology,1990,80:291~307
- Oslic J S, Miller K G, Feigerson M D, et al. Oligocene-Miocene strontium isotopes; Stratigraphic revisions and correlations to an inferred glacioeustatic record[J]. Paleoclimatology,1994,9:427~443
- 许东禹,陈宗团,孟祥营. 太平洋中部晚新生代古海洋环境及事件[J]. 北京:地质出版社,1994. 119~129
- 韩建修,李学杰,崔建秋等. 古海洋环境与多金属结核形成的关系[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1997. 1~60
- Chamley H. Clay sedimentology [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989. 163~192
- Frakes L A. Mesozoic-Cenozoic climatic history and causes of the glaciation[A]. In: Hsu K J, ed. Mesozoic and Cenozoic oceans[C]. Hsu K J, ed. Washington D. C. : The American Geophysical Union, 1986. 33~48
- Kennett J P. Miocene paleoceanography and plankton evolution [A]. In: Hsu K J, ed. Mesozoic and Cenozoic oceans[C]. Washington D. C. : The American Geophysical Union, 1986, 119~122
- Barron J A, Keller G. Widespread Miocene deep-sea hiatuses; Coincidence with periods of global cooling[J]. Geology,1982,3:577~561

The Short-term Cycles of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and CaCO_3 in Early Miocene and the Implications for Paleoceanography of the East Pacific

LIU Ji-hua¹ CHEN Ying-rong² LIANG Hong-feng¹ WANG Ying-xi³

1(Institute of Marine Geology, MLNR, Qingdao, Shandong 266071) 2(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao Shandong 266071)

3(Modern Analysis Center, Nanjing Univ, Nanjing 210093)

Abstract

The piston core PC5794, 698cm long, was recovered from the East Pacific Ocean. It is composed of Quaternary and early Miocene in stratigraphy. 55 nannofossils ooze samples of early Miocene (698-140cm, 24.06~22.06Ma) were collected in the interval of 5cm, and the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ Isotope-MS, ICP and chemical method respectively. The fluctuations of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and CaCO_3 through time display two and an half short-term cycles which are opposite in direction. The cycles are significant to paleoceanography. (1) The positive and negative cycles of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ reflect the increased trends of chemical weathering of old crust and volcanic activities in ocean respectively, while the positive and negative CaCO_3 cycles are constant with warming and cooling trends of paleoclimate. In general, the temperatures of air were lower in the eras of strong volcanic activity. (2) Compared to middle and late Miocene, the influences of the Antarctic Bottom Water to sedimentation and water of east Pacific were less important in early Miocene. But the Antarctic Bottom Water formed CaCO_3 dissolution and high contents of benthic foraminifera.

Key words the east Pacific Ocean Early Miocene cycles of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and CaCO_3 paleoceanography