

文章编号: 1000-0550(2006) 01-0068-07

西藏南部晚白垩世厚壳蛤不同壳层的地球化学特征 及其对古海洋信息的保存性^①

黄思静¹ 卿海若² 胡作维¹ 吴素娟¹ 孙治雷¹ 裴昌蓉¹

(1 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室 地球科学学院 成都 610059

2 加拿大里贾纳大学地质学系 加拿大里贾纳 S4S 0A2)

摘要 测试了西藏南部岗巴剖面上白垩统宗山组上段地层中厚壳蛤不同壳层的 Sr、Mn、Al、Si 含量, 以及碳、氧、锶同位素组成, 测试结果表明: 1) 厚壳蛤的不同壳层 (包括柱状层、珍珠层和二者间的过渡层) 的碳酸盐矿物均已新生变形为成岩低镁方解石 (DIMC), 各种原始碳酸盐矿物 (沉积低镁方解石或文石) 都已不同程度地发生重结晶; 2) 从壳的外层 (柱状层) 向内层 (珍珠层) 方向, 碳酸盐矿物重结晶作用有逐渐增强的趋势, 柱状层仍具有很好的柱状结构, 其平均阴极发光强度明显弱于内部的珍珠层; 3) 厚壳蛤不同壳层的 Sr 含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都呈现有规律的变化, 从靠外部的柱状层到内部的珍珠层, Sr 含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都逐渐降低, 同样说明内部的珍珠层丢掉的海水信息相对较多; 4) 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值都显著低于前人报道的同期海水值, 说明在新生变形过程中, 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的氧同位素都与大气水或其它成岩流体发生了交换, 但柱状层的氧同位素与大气水 (或其它成岩流体) 的交换相对较少; 5) 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的锶、碳同位素组成与同期海水值接近, 不同壳层之间也没有表现出有规律性的变化, 因而在矿物的新生变形过程中, 厚壳蛤的锶、碳同位素与成岩流体间的交换相对较少, 同时也说明, 在氧、碳、锶三种同位素中, 氧很容易与成岩流体发生同位素交换, 而碳、锶同位素则更多地代表了海水信息。

关键词 西藏南部晚白垩世 厚壳蛤 碳、氧、锶同位素 Sr、Mn 含量 成岩蚀变

第一作者简介 黄思静 男 1949 年出生 教授 沉积学

中图分类号 P512.2 P59 **文献标识码** A

白垩纪是地球系统的一个重要变革时期, 同时也是国际上研究最为详细的地质时代之一, 已经形成了若干相关地质概念和理论, 如大洋缺氧事件 (Oceanic Anoxic Event OAE) 便源于白垩纪的古海洋学研究^[1,2]。较新的研究表明, 在中生代的三次较大的大洋缺氧事件中, 有两次都发生在白垩纪^[3], 持续的大洋缺氧事件导致了有机碳的大规模埋藏、全球气候变化、海相碳酸盐碳同位素正偏移和生物的大规模绝灭^[4], 并伴随海水溶解氧的降低, 白垩纪的古海洋学也因此成为全球地学研究的热点领域之一。为了获得白垩纪古海洋的各种信息, 人们寻找能较好记录古海水信息的材料以进行与白垩纪古海水信息有关的各种研究。在白垩纪的各种碳酸盐材料中, 厚壳蛤是最为重要的大化石之一, 广泛分布于白垩纪海相地层中, 也是人们经常选用的代表海水信息的碳酸盐材料之一。Sar1 等^[5]在 2004 年利用土耳其晚白垩世的厚壳蛤壳 (*hippuritid-radiolitid* 组合), 测试了其⁸⁷Sr/

⁸⁶Sr 值, 并获得了很好的年龄值; Steuber^[6]也在 2001 年利用 Calcareous 北部和阿尔卑斯山中部 (奥地利和德国) 白垩纪厚壳蛤壳的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值成功地进行了锶同位素地层学研究; Steuber^[7]又在 2003 年利用古特提斯白垩纪 17 个厚壳蛤层中 *hippuritid* 厚壳蛤壳的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值 (相应样品的 Fe 含量在 200×10^{-6} 以下, Mn 含量在 20×10^{-6} 以下) 进行了精细的地层学研究, 并根据从⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值获得的样品分布的精确时间, 研究了白垩纪 *hippuritid* 厚壳蛤壳形态变异与演化速度。我国西藏地区白垩纪、尤其是晚白垩世的台地相碳酸盐地层中, 有丰富的厚壳蛤产出。黄思静等^[8]根据西藏南部岗巴剖面上白垩统宗山组上段地层中 4 个不同层位中厚壳蛤壳的锶同位素组成, 尝试对其进行了年龄标定。尽管如此, 人们仍然想知道, 白垩纪厚壳蛤所记录的地球化学信息能在多大程度上代表白垩纪的原始海水, 或者说, 在这些地球化学信息中, 哪些能较好地代表原始海水, 哪些已不能代

① 国家自然科学基金资助项目 (批准号: 40272059) 和国家重点基础研究发展规划项目前期研究专项 (批准号: 2001CCA01800) 研究成果。
收稿日期: 2005-04-19

表原始海水,这便是本文所要想回答的问题。

1 样品与实验方法

厚壳蛤样品采自西藏南部岗巴剖面累积厚度 358 m 处(样品在剖面中的具体位置见黄思静等在 2004 年的有关研究^[9])的宗山组上段(相当于 Maastrichtian 阶)。前人在该地区有过较多的研究,最早的研究可追溯到 20 世纪初^[10]。万晓樵^[11]在 1985 年对该地区宗山剖面进行了详细的地层划分;万晓樵等^[12]又在 2000 年对宗山剖面上白垩统的划分重新做了厘定,进一步建立了晚白垩世 12 个浮游有孔虫化石带;赵文金^[13]在 2001 年对该地区晚白垩世有孔虫动物群与海平面变化的关系作了研究;赵文金等^[14]又在 2001 年研究了该地区晚白垩世生物的绝灭及有孔虫的复苏;胡修棉等^[15]在 2001 年报道了该剖面碳酸盐的碳同位素组成;黄思静等^[9]在 2004 年报道了该剖面晚白垩世海相碳酸盐的锶同位素组成。

厚壳蛤样品如图 1 所示,肉眼下即可识别出厚壳蛤壳所具有的良好多层结构(图 1A),靠近外部的第 1 壳层和第 2 壳层较好地保留了软体动物的原始结构(图 1 中的第 1 和第 2 层),而靠内的壳层则因重结晶而具晶粒结构(图 1 中的第 3 层),厚壳蛤的体腔则由微晶方解石基质(包括细小的生物碎屑)充填(图 1 中的第 4 层)。用于化学分析、X 射线衍射分析和各种同位素分析的样品的采集借助于牙钻在双目镜下完成,虽然该厚壳蛤样品较大,但仍有较多的方解石细脉穿过了不同壳层(图 1A),因而取样时尽可能回避了这些方解石细脉。样品经挑选后粉碎至 200 目,缩分成五份,分别用于在国内外不同单位进行各种同位素分析、化学分析和 X 射线衍射分析。

沿厚壳蛤样品的 X—Y 断面方向切片(图 1A),制作双面抛光的阴极发光薄片,分别在偏光显微镜和阴极发光显微镜下观察其结构和相应的阴极发光性。阴极发光分析由成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成,使用美国 Luminescope 公司的 CL4 型阴极发光仪,照相时的电压设定在 10 kV。

厚壳蛤不同壳层碳酸盐样品的 SO_2 、 Al_2O_3 、Mn 和 Sr 含量分析由四川攀枝花地矿检测中心完成。 SO_2 、 Al_2O_3 含量由常规化学分析方法测试,检测限 1×10^{-2} ,误差 5×10^{-2} ; Mn、Sr 含量由原子吸收光度法测试,检测限分别为 5×10^{-6} 和 42×10^{-6} ,误差分别为 13×10^{-2} 和 14×10^{-2} 。

同位素分析同时在加拿大萨斯喀彻温大学、中国

科学院地质与地球物理研究所和四川石油管理局勘探开发研究院进行(表 1)。在多个单位进行同位素分析的主要目的是为了保证样品的分析精度。

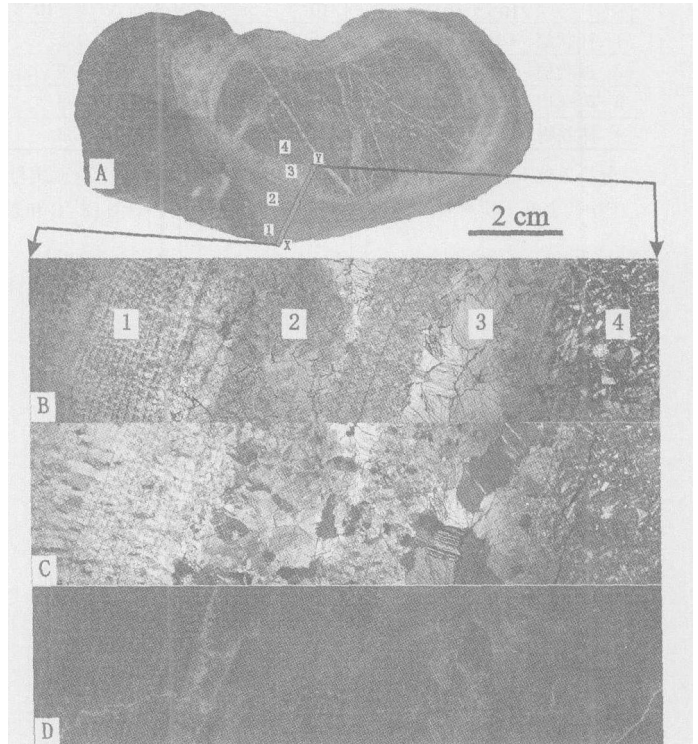


图 1 厚壳蛤磨光面, X—Y 截面的透射光显微照片和阴极发光照片(A:磨光面;B:透射光,单偏光;C:透射光,正交偏光;D:阴极发光),标尺同时适用于样品和显微照片,图中编号 1、2、3、4 和表 1 对应

Fig 1 Polished slab of the nudist bivalve and photomicrograph of a thin section (with the succession from X to Y: (A) Polished slab (B) under plane polarized light (C) under crossed polarized light and (D) luminescence under luminescope. Scale for both sample and thin section photomicrograph

厚壳蛤不同壳层样品的 X 射线衍射分析由成都理工大学 X 射线分析室完成,使用日本理学 D/MAX—III C 型 X 射线衍射仪,测试条件为 35 kV, 200 mA。

2 实验结果及讨论

2.1 厚壳蛤不同壳层的矿物组成、显微结构和阴极发光性

厚壳蛤不同壳层的 X 射线衍射分析结果(图 2)说明,其所有壳层(包括外部的柱状层、内部的珍珠层和二者间的过渡层)都已新生变形为成岩低镁方解石(DIMC),其 d_{104} 值都在 3.03 \AA 的附近,没有见到残余的文石反射;另外,衍射曲线中除了(低镁)方

表 1 厚壳蛤不同壳层的 SD_2 、 Al_2O_3 、 Mn 、 Sr 含量, $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值

Table 1 Concentrations of SiO_2 , Al_2O_3 , Mn , Sr , $\delta^{13}C$, $\delta^{18}O$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$

编号 产状	SD_2 /10 ⁻²	Al_2O_3 /10 ⁻²	Mn /10 ⁻⁶	Sr /10 ⁻⁶	Mn/Sr	分析单位 1		分析单位 2		分析单位 3	
						$^{87}Sr/^{86}Sr$	2σ / ($\pm 10^{-6}$)	$^{87}Sr/^{86}Sr$	2σ / ($\pm 10^{-6}$)	$\delta^{13}C$ / ‰	$\delta^{18}O$ / ‰
1 柱状层 UD UD UD	769.5	0.006	0.707956	22	0.707768	19	1.86	-6.283	1.66	-6.81	
2 过渡层 UD UD UD	695.9	0.007	0.707804	9	0.707907	20	1.738	-6.622	1.52	-7.11	
3 珍珠层 UD UD UD	575.0	0.009	0.707768	8	0.707760	15	2.246	-6.931	1.98	-7.2	
4 体腔物 UD UD UD	621.5	0.008	0.707776	3	0.707784	13	1.674	-8.125	1.64	-8.53	

分析单位 1: 加拿大萨斯喀彻温大学; 分析单位 2 中国科学院地质与地球物理研究所; 分析单位 3 四川石油管理局勘探开发研究院

UD 代表低于检测限; Mn/Sr 按 Mn 的检测限 5×10^{-6} 计算; $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 为 PDB 标准

解石的反射外,基本上没有发现其它的反射,因而厚壳蛤所有壳层都是由很纯的(低镁)方解石组成的(图 2)基本上不含陆源碎屑矿物和自生的非碳酸盐矿物。

显微镜下的结构观察和阴极发光显微镜下的发光观察说明厚壳蛤的壳层都已不同程度地发生了重结晶(图 1B、C), 总体上有从壳的外层(柱状层)向内层(珍珠层)方向重结晶作用逐渐增强的趋势,不同壳层的主要特征及其差别如下: (a)靠外的柱状层仍具有很好的柱状结构(图 1B、C、D), 该层仍有部分结构完全没有阴极发光(图 1D), 其平均阴极发光强度也小于其它壳层, 说明柱状层具有非常低的 F_{Mn} 含量^[16]; (b)靠内的过渡层和珍珠层均已显著重结晶, 而且珍珠层的方解石晶体显著大于过渡层, 总体平均发光强度也大于过渡层; (c)作为体腔充填物的部分(显微镜下可将其定义为生物碎屑微晶灰岩)(图 1B、C)几乎没有发生重结晶, 如果不考虑裂缝中充填的方解石, 其平均发光强度大致与层 2(过渡层)相当(图 1D); (d)裂缝和缝合线中充填的方解石都具有很强的阴极发光, 其沉淀作用显然不是在海水中发生的。

结构和阴极发光观察说明: (a)厚壳蛤的外部层(可能主要是其原始的柱状层)抵抗成岩蚀变的能力相对较强, 其原因尚不十分清楚, 但已有研究认为^[7], 一些种属的厚壳蛤(如 *hippuritid rudists*)类似于箭石, 其外部壳层的原始矿物是低镁方解石, 这可能是其抗成岩蚀变能力较强的主要原因; (b)厚壳蛤的内层(可能相当于其原始的珍珠层及其和柱状层间的过渡层)抗成岩蚀变的能力显著弱于外部的柱状层, 其原始组成矿物应是文石质的; (c)生物碎屑微晶灰岩或其它细结构的碳酸盐岩由于其原始孔隙度较低, 成岩流体难以进入并与其发生作用, 其抗成岩蚀变的能力可能强于壳体的珍珠层、或类似于珍珠层, 但弱于柱状层(图 1D); (d)裂缝和缝合线中充填的方解石无论具有何种结构, 大都是成岩作用的产物, 对海水缺乏代表性。

2.2 厚壳蛤不同壳层及体腔充填物的主要地球化学特征

2.2.1 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物 Si 、 Al 、 Mn 、 Sr 含量的总体特征

厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 SD_2 、 Al_2O_3 、 Mn 、 Sr 含量具有如下总体特征:

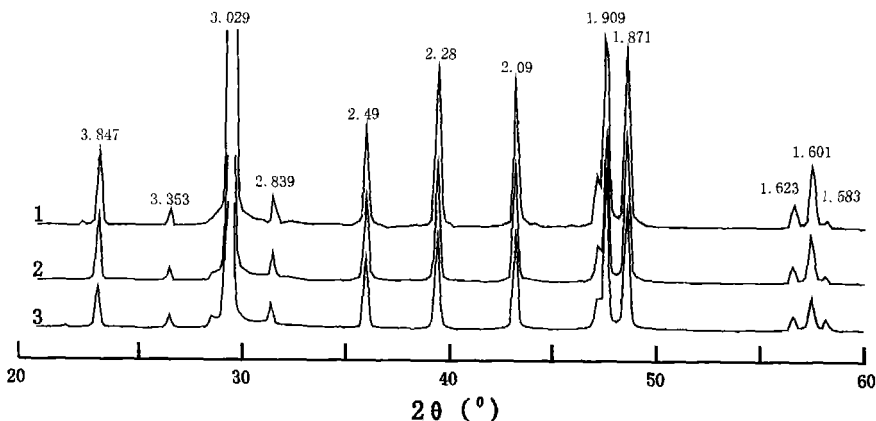


图 2 厚壳蛤不同壳层构成碳酸盐矿物的 X 射线衍射曲线, 各壳层编号与图 1 和表 1 对应

Fig 2 XRD profiles for different shell layers of the nudist bivalve shown in Fig 1

1) 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 SO_2 和 Al_2O_3 含量都在检测限以下, 这与 X 射线衍射分析结果中样品几乎不含陆源碎屑矿物是一致的, 因而在进行锶同位素分析时, 因溶解方法造成的铝硅酸盐的溶解和壳源锶带入的影响会很小;

2) 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 Mn 含量都在检测限以下, 这与样品总体具很弱的阴极发光性是一致的。在锶同位素地层学研究中, 当样品的 Mn 含量小于 250×10^{-6} 时, 便可以认为该样品对海水有较好的代表性, 如 Korte 等^[17] 在研究欧洲阿尔卑斯地区三叠系海相碳酸盐锶同位素组成时, 将 Mn 含量小于 250×10^{-6} 的样品视为锶同位素地层学研究的好样品;

3) 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 Sr 含量总体上都较高, 平均值超过 665×10^{-6} , 且都已超过 Derry^[18] 在利用萨瓦尔巴特群岛和东格陵兰前寒武系碳酸盐岩进行锶同位素地层学研究时所采用的样品的 Sr 含量的下限值 (200×10^{-6}); 不同壳层和体腔充填物的 Mn/Sr 平均值为 0.008, 该数值也显著小于 Kaufman 等^[19, 20] 在进行加拿大西北部新元古代沉积序列的生物地层学和化学地层学对比时, 以及在通过文德期海水锶、碳同位素变化反演构造和古气候时所利用样品 Mn/Sr 的上限值 ($\text{Mn/Sr} = 2 \sim 3$), 因而从 Sr 含量和 Mn/Sr 值的角度来说, 构成厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的碳酸盐矿物所经历的成岩蚀变性很小。

2.2.2 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的同位素组成及其对海水的代表性

2.2.2.1 锶同位素

该厚壳蛤样品产于上白垩统宗山组上段地层中, 与 Maastrichtian 阶相当^[12], 当时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在 $0.70773 \sim 0.70783$ 之间^[9, 21-22] (按 Palmer 的年龄刻度^[23], 以 $71.3 \sim 65\text{Ma}$ 作为 Maastrichtian 阶的年龄值)。两个单位 (加拿大萨斯喀彻温大学和中国科学院地质与地球物理研究所) 对厚壳蛤 3 个不同壳层和体腔充填物所进行了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值测定, 共获得了 8 个数据, 这 8 个数据和不同壳层之间没有显示出某种规律性的关系, 除有两个数据 (萨斯喀彻温大学分析数据中的柱状层和中国科学院地质与地球物理研究所分析的过渡层) 大于 0.7079 而且这两个数据都具有最大的分析误差, 尤其是萨斯喀彻温大学的分析结果, 其 2σ 值比其它样品高一个数量级, 因而我们把这两个数据视为异常的不可靠数据。其余 6 个样品

的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值都在 $0.707768 \sim 0.707804$ 之间, 也基本上在 $71.3 \sim 65\text{Ma}$ 时间段 (Maastrichtian 阶) 海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的范围内, 因而我们从锶同位素组成的角度来说, 该厚壳蛤不同壳层 (包括充填于体腔中的生物碎屑和微晶方解石) 都基本上代表了海水的组成, 数据的波动主要是分析过程造成的 (在一定程度上可能与样品量较少有关, 尤其是在国外分析的样品, 个别样品已少到使实验室难于分析)。由于分析过程的污染所带入的主要是壳源锶, 因而所有分析数据中的最小值 (0.707768) 应最接近当时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值, 其对应的年龄值应在 69.4Ma 左右^[8]。

2.2.2.2 碳、氧同位素

厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大致变化在 $1.5\% \sim 2.2\%$ 之间 (仅有 1 个数据超过 2%)。两个单位 (加拿大萨斯喀彻温大学和四川石油管理局勘探开发研究院) 的分析结果没有实质性的差别。根据 D'Hondt 等人^[24] 从南大西洋 DSDP (深海钻探计划) 528 站位获得 Maastrichtian 阶碳酸盐样品的数据 (主要是浮游有孔虫和底栖有孔虫), 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值多数在 $1\% \sim 3\%$ 的范围内。D'Hondt 等获得的底栖有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要偏低一些, 主要在 $1\% \sim 2\%$ 的范围内 (个别样品略大于 2%), 这与本文作为底栖生物的厚壳蛤不同壳层 (包括体腔充填物) 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布范围一致, 说明该厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍较好代表了 Maastrichtian 阶的海水。

厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大致变化在 $-6.2\% \sim -8.5\%$ 之间。两个单位 (加拿大萨斯喀彻温大学和四川石油管理局勘探开发研究院) 的分析结果没有实质性的差别。根据 D'Hondt 等人^[24] 从南大西洋 DSDP (深海钻探计划) 528 站位获得 Maastrichtian 阶碳酸盐样品的数据, 其 $\delta^{18}\text{O}$ 值多数在 $0\% \sim -2\%$ 的范围内, 其中底栖有孔虫的 $\delta^{18}\text{O}$ 值还要稍高一些, 主要在 $0\% \sim -1\%$ 的范围内。这与本文作为底栖生物的厚壳蛤不同壳层 (包括体腔充填物) 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的分布范围大相径庭。显然 D'Hondt 等^[24] 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值更为接近海水, 并很容易求得当时的古海水温度值; 而从本文厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值求得的古海水温度会显著偏离可以接受的数值。因而从氧同位素的角度来说, 厚壳蛤不同壳层已遭受了成岩蚀变, 氧同位素已与大气水交换 (这些取自地表的样品显然已长时间地经历过大气淡水成岩作用); 而 D'Hondt 等^[24] 从南大西洋 DSDP (深海钻探计划) 528 站位获得的碳酸盐样品从未经历大

气淡水成岩作用,从 70Ma 到现在,南大西洋 528 站的海水水深变化在 1 387~3 800 m 之间^[24]。

2.3 不同壳层成岩蚀变性的差别

我们曾在前文从结构和阴极发光观察结果证明厚壳蛤的外壳层(可能主要是其原始的柱状层)抗成岩蚀变的能力相对较强,而其内壳层(可能相当于其原始的珍珠层及其和柱状层间的过渡层)抵抗成岩蚀变的能力相对较弱,但在锶同位素和碳同位素指标上,不同壳层并没有显示出成岩蚀变性的差别,不同壳层的碳、锶同位素组成都基本能代表海水。由于在碳酸盐岩的成岩系统中,水/岩比值对碳(实际上也包括了锶)来说,是非常低的,而对氧来说,该比值则是非常高的^[25,26],因而成岩过程中氧同位素是最容易与成岩流体发生交换的,碳酸盐样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值对成岩作用也是最为敏感的,并可作为成岩蚀变最为敏感的判断指标。厚壳蛤不同壳层碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 值说明,作为其内部壳层的珍珠层的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低(图 3a),受大气淡水(可能还包括了埋藏成岩过程中的孔隙水)的改造程度最深,其外部柱状层的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最高(图 3a),对原始海水的氧同位素组成保存相对较好。另外,虽然不同壳层碳酸盐矿物的 Sr 含量都相对较高,这些 Sr 及其在同位素组成上对原始海水的代表性都相对较好,但我们注意到,从外部的柱状层到内部的珍珠层, Sr 含量也是逐渐降低的(图 3b),这同样说明大气淡水或其它非海源成岩流体造成的珍珠层等内部壳层锶元素的丢失和相应的成岩蚀变性也相对较强。

3 结论

(1) 从矿物学的角度来说,西藏南部晚白垩世厚壳蛤的不同壳层(包括柱状层、珍珠层和二者间的过渡层)的碳酸盐矿物均已新生变形成低镁方解石;

(2) 从结构的角度来说,厚壳蛤的不同壳层的碳酸盐矿物都已不同程度地发生了重结晶,但总体上有从壳的外层(柱状层)向内层(珍珠层)方向重结晶作用逐渐增强的趋势,靠外的柱状层仍具有很好的柱状结构,其平均阴极发光强度明显弱于内部的珍珠层;

(3) 厚壳蛤的不同壳层的 Sr 含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都呈现有规律的变化,从靠外部的柱状层到内部的珍珠层, Sr 含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 值都逐渐降低,同样说明内部的珍珠层丢掉的海水信息相对较多;

(4) 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值都显著低于前人报道的同期海水值,说明在新生变形过程中,厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的氧同位素都与大气水(或其它成岩流体)发生了交换,但靠外的柱状层的氧同位素与大气水(或其它成岩流体)的交换相对较少;

(5) 厚壳蛤不同壳层和体腔充填物的锶、碳同位素组成与同期海水值接近,不同壳层之间也没有表现出有规律性的变化,因而在新生变形过程中,厚壳蛤的锶、碳同位素与成岩流体间的交换相对较少,同时也说明,在氧、碳、锶三种同位素中,氧很容易与成岩流体发生同位素交换,而碳、锶同位素则更多地代表了海水信息。

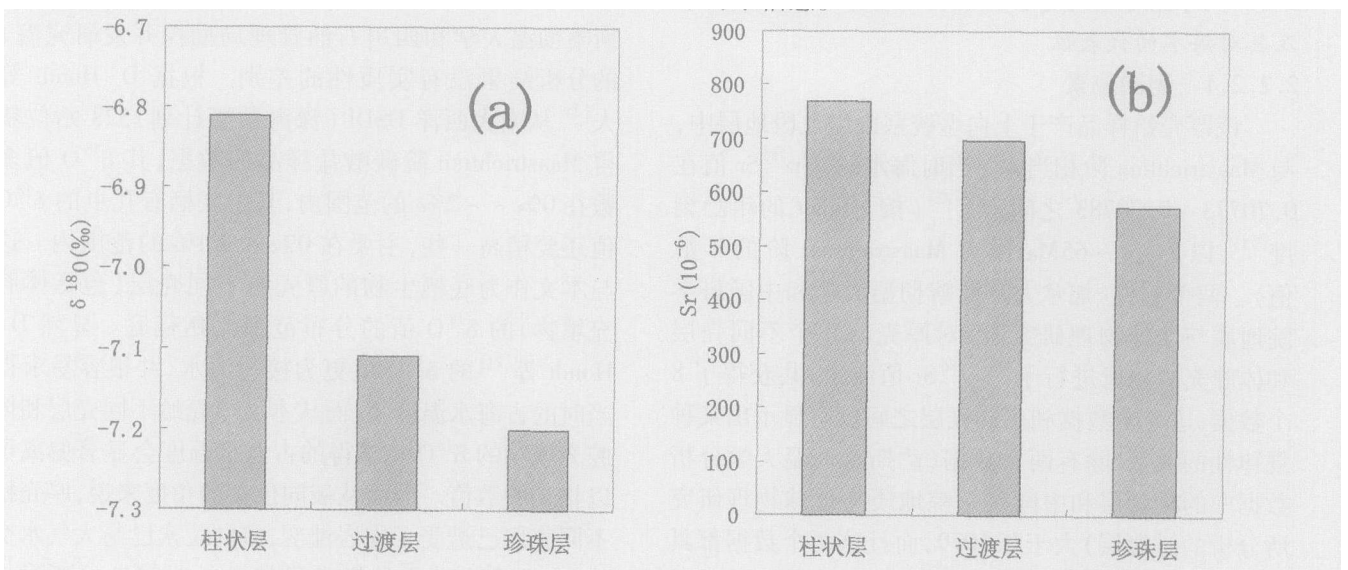


图 3 厚壳蛤不同壳层构成碳酸盐矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布直方图 (a) 和 Sr 含量分布直方图 (b)

Fig 3 $\delta^{18}\text{O}$ values and strontium concentrations for different shell layers of the rudist bivalve

参考文献 (References)

- 1 Schlinger S O, Jenkyns H C. Cretaceous oceanic anoxic events: cause and consequence. *Geology Magazine*, 1976, 55: 179~184
- 2 Jenkyns H C. Cretaceous anoxic events: from continents to oceans. *Journal of Geological Society of London*, 1980, 137: 171~188
- 3 Jones C E and Jenkyns H C. Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous. *American Journal of Science*, 2001, 301: 112~149
- 4 Walliser O H. *Global events and events stratigraphy in the Phanerozoic*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996, 242~252
- 5 Sarl B, Steuber T, Zer S. First record of Upper Turonian nudists (Mollusca: Hippuritoida) in the Bey Dağları carbonate platform, Western Taurides (Turkey): taxonomy and strontium isotope stratigraphy of *Vaccinites praegiganteus* (Toucas, 1904). *Cretaceous Research*, 2004, 25: 235~248
- 6 Steuber T. Strontium isotope stratigraphy of Turonian Campanian Gosau-type nudist formations in the Northern Calcareous and Central Alps (Austria and Germany). *Cretaceous Research*, 2001, 22: 429~441
- 7 Steuber T. Strontium isotope stratigraphy of Cretaceous hippuritid nudist bivalves: rates of morphological change and heterochronic evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 200: 221~243
- 8 黄思静, 石和, 张萌, 等. 西藏南部晚白垩世厚壳蛤的锶同位素年龄标定. *地球科学—中国地质大学学报*, 2005, 30(4): 437~442 [Huang Sijing, Shi H, Zhang Meng *et al.* Strontium isotope stratigraphy age calibration of nudist Bivalves from Late Cretaceous Section in South Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(4): 437~442]
- 9 黄思静, 石和, 沈立成, 等. 西藏晚白垩世锶同位素曲线的全球对比及海相地层的定年. *中国科学 (D辑)*, 2004, 34(4): 335~344 [Huang Sijing, Shi H, Shen Licheng *et al.* Global correlation for strontium isotope curve in the Late Cretaceous of Tibet and dating marine sediments. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(2): 199~209]
- 10 Hayden H H. The geology of Spiti. *Mem. Geology Survey of India*, 1912, 36: 1~144
- 11 万晓樵. 西藏岗巴地区白垩纪地层及有孔虫动物群. 青藏高原地质文集 (16). 北京: 地质出版社, 1985, 203~228 [Wan Xiaojiao. Cretaceous Strata and Foraminifera of Gamba Region, Xizang (Tibet). Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau (16). Beijing: Geological Publishing House, 1985, 203~228]
- 12 万晓樵, 赵文金, 李国彪. 对西藏岗巴上白垩统的新认识. *现代地质*, 2000, 14(3): 281~285 [Wan Xiaojiao, Zhao Wenjin, Li Guobiao. Restudy of the upper Cretaceous in Gamba, Tibet. *Geoscience*, 2000, 14(3): 281~285]
- 13 赵文金. 西藏岗巴晚白垩世有孔虫动物群与海平面变化. *高校地质学报*, 2001, 7(1): 106~117 [Zhao Wenjin. Late Cretaceous foraminiferal faunas and eustatic change in Gamba Area, southern Tibet. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(1): 106~117]
- 14 赵文金, 万晓樵. 西藏南部岗巴地区晚白垩世 Cenomanian-Turonian 集群灭绝事件后有孔虫动物群的复苏. *古生物学报*, 2001, 40(2): 189~194 [Zhao Wenjin, Wan Xiaojiao. Recovery of foraminifera from the late Cretaceous Cenomanian-Turonian mass extinction in Gamba, southern Tibet. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2001, 40(2): 189~194]
- 15 胡修棉, 王成善, 李祥辉. 藏南海相白垩纪碳酸盐碳稳定同位素演化与古海洋溶解氧事件. *自然科学进展*, 2001, 11(7): 721~728 [Hu Xiujian, Wang Chengshan, Li Xianghui. Carbon stable isotopes and the event of paleo-dissolved oxygen of marine Cretaceous in Southern Tibet. *Progress in Natural Science*, 2001, 11(7): 721~728]
- 16 黄思静. 碳酸盐矿物的阴极发光性与其 Fe, Mn 含量的关系. *矿物岩石*, 1992, 12(4): 74~79 [Huang Sijing. Relationship between cathodoluminescence and concentration of iron and manganese in carbonate minerals. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 12(4): 74~79]
- 17 Korte C, Kozur HW, Bruckschen P, *et al.* Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(1): 47~62
- 18 Derry LA, Keto L, Jacobsen S, *et al.* Sr isotopic variations in Upper Proterozoic carbonates from Svalbard and East Greenland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53: 2331~2339
- 19 Kaufman A J, Knoll A H and Awramik SM. Biostratigraphic and chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic sedimentary successions, Upper Tindir Group, northwestern Canada, as a test case. *Geology*, 1992, 20: 181~185
- 20 Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The Vendian record of Sr- and C- isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate. *Earth Planet Science Letters*, 1993, 120: 409~430
- 21 Howarth R J, McArthur JM. Statistics for strontium isotope stratigraphy: a robust LOWESS fit to marine Sr-isotope curve for 0 to 206 Ma with look-up table for derivation of numeric age (look-up table version 8/96). *Journal of Geology*, 1997, 105: 441~456
- 22 McArthur JM, Howarth R J, Bailey T R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3. Best fit to marine Sr-Isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age. *Journal of Geology*, 2001, 109: 155~170
- 23 Palmer AR, Geissman J. *Geologic time scale*. The Geological Society of America, Product code CTS004, 1999, 1
- 24 Dhondt S, Lindinger M. A stable isotopic record of the Maastriichtian ocean-climate system: South Atlantic DSDP site 528. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1994, 112: 363~378
- 25 Banner J L, Hanson G N. Calculation of simultaneous isotopic and trace element variations during water-rock interaction with application to carbonate diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54: 3123~3138
- 26 Banner J L. Application of the trace element and isotope geochemistry of strontium to studies of carbonate diagenesis. *Sedimentology*, 1995, 42: 805~824

Geochemistry in Different Shell Layers of Rudist Bivalve from Late Cretaceous in the South of Tibet and Preservation for the Information of Sea Water

HUANG Si-jing¹ QING Hai-nuo¹ HU Zuo-wei¹ WU Su-juan¹ SUN Zhi-lei¹ PEI Chang-rong¹

(1. State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, College of Geoscience,
Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

2. Department of Geology, University of Regina, Regina SK Canada S4S 0A2)

Abstract The concentrations of Mn, Sr, SO₂, Al₂O₃, and values of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ have been measured for different shell layers of rudist bivalve from a Late Cretaceous section in the south of Tibet. The study results are as follows:

1) The constitution minerals in the pillar, pearl and transition layers for the shell of rudist bivalve have totally transposed to diagenetic low magnesium calcite (DLMC) by neomorphism and all the original carbonates are recrystallized to a certain extent.

2) The recrystallization of inner shell layers (pearl or transition layer) is much stronger than that of outer shell layer. The outer shell layer with duller catholuminescence has pillar texture.

3) The concentration of Sr and value of $\delta^{18}\text{O}$ displays a regular variety from the outer shell layer (pillar layer) to inner shell layer (pearl layer). The concentration of Sr and value of $\delta^{18}\text{O}$ for outer shell layer are lower than those of inner shell layer, suggesting that the inner shell layer lost more information of sea water during neomorphism.

4) The $\delta^{18}\text{O}$ values of all the shell layers and the cement filling are much lower than those of original sea water reported by the published papers, so the exchange with meteoric water (or other diagenetic fluid) in oxygen isotope should have happened during neomorphism of precursory minerals in the shell, but relatively less exchange happened in outer shell layer.

5) The carbon and strontium isotope composition of different shell layers is close to the values of coeval sea water and no regular variation among different shell layers, indicating less exchange with diagenetic fluid in carbon and strontium isotope. The reason is that diagenetic recrystallization of carbonates is accomplished in a system with a low water/rock ratio for carbon (also for strontium), but a high ratio for oxygen, and therefore the isotope compositions of carbon and strontium contain more information for original sea water.

Key words Late Cretaceous in southern Tibet, rudist bivalves, carbon, oxygen and strontium isotopes, concentrations of Mn and Sr, diagenetic alteration.