

文章编号: 1000-0550(2008) 01-0028-11

羌塘盆地中央隆起带南侧隆额尼—昂达尔错布曲组古油藏白云岩稀土元素特征及成因意义¹

刘建清 贾保江 杨平 陈文彬 陈文西 付修根

(成都地质矿产研究所沉积与能源地质研究室 成都 610082)

摘要 以系统的岩石学及沉积相分析为基础,深入探讨了隆额尼—昂达尔错古油藏白云岩及其伴生灰岩的稀土元素地球化学特征,认为该区灰岩及白云岩 Σ REE仍受沉积相带及沉积过程的控制,且具 Σ REE 较低的总体特征,白云岩中 HREE 比 LREE 更具贫化的特点,这些特征均系淡水淋漓作用的结果;灰岩及白云岩在配分模式上,均为相对平坦的页岩配分模式。其中灰岩在配分模式上,在 Σ REE 较高的情况下表现出起伏较大的特点,而白云岩在 Σ REE 较低的情况下,表现出较为平坦的特征,白云岩化过程中稀土元素有贫化和均一的趋势;灰岩与白云岩相比,灰岩 δE_u 值较高,而白云岩 δC_e 较高,反映出灰岩形成于水体较深的还原环境,而白云岩形成于古地理相对高点的氧化环境。该区白云岩为混合水交代成因。

关键词 白云岩 混合水交代 稀土元素 羌塘盆地

第一作者简介 刘建清 男 1969 年出生 副研究员 沉积学 E-mail liujq@163.net

中图分类号 P594 P512.2 文献标识码 A

羌塘盆地是中国勘探程度最低的含油气盆地之一,就目前研究程度而言,认为盆地具备生油的烃源岩条件,制约盆地成为油气战略接替地的关键因素有两个:一是油气的保存条件;二是主要为低孔低渗的致密性储层^[1,2]。然而,在盆地中央隆起带南侧的隆额尼—昂达尔错一线发现了东西长达 100 km,南北宽 20 km 的中侏罗统布曲组古油藏白云岩带,其孔隙度达 5%~15%^[3]。因此,研究该白云岩特征及成因机制具重要的现实意义。就这方面的研究而言,前人认为该白云岩为混合水交代成因,但并未提出全面和系统的证据^[1],对白云岩地球化学特征及成因意义的研究更未涉及。为此本次工作在隆额尼—昂达尔错古油藏白云岩的中段(扎仁地区,图 1)系统测制了两条剖面,并踏勘了隆额尼地区古油藏白云岩,其中扎仁白云岩剖面(剖面代号 ZRP,起点座标 N: 32°51.069'E: 89°13.563',终点座标 N: 32°50.850'E: 89°13.429')相当于前人^[3]认为的古油藏北带,而巴格底加日剖面(剖面代号 BP,起点座标 N: 32°45.491'E: 89°26.321',终点座标 N: 32°45.088'E: 89°26.229')则相当于南带,剖面及样品的分布可保证南北古油藏带及其与区域的对比和综合分析。本文以岩石学及沉积相分析为基础,旨在深入探讨该区

白云岩及伴生灰岩的稀土元素地球化学特征及其蕴含的成因意义。

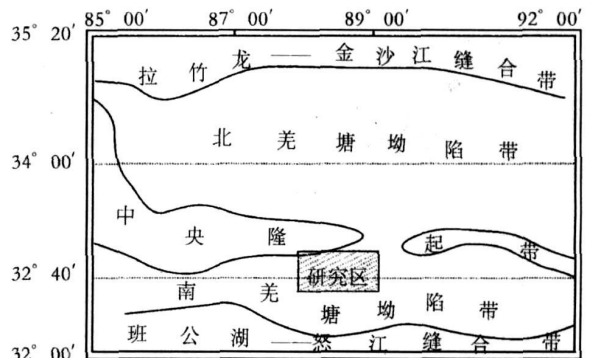


图 1 羌塘盆地构造单元划分及研究区位置

Fig. 1 Division of tectonic units of Qiangtang Basin and location of the study area

1 岩石学特征及沉积相分析

1.1 矿物成分及含量

该区白云岩矿物成分主要由白云石和方解石组成。

白云石:含量在 85%~95%左右,一般为自形一半自形粒状,粗中细晶粒均有,不规则相间分布,晶棱

¹ 国家油气专项(编号: XQ2004-06)资助

收稿日期: 2007-03-05 收修修改稿日期: 2007-04-27

多较平直。白云石常具雾心亮边结构, 少量具环带构造。阴极发光显微镜下, 白云石一般发暗桔红色光, 亮边常发亮桔红色光, 环带构造白云岩常呈暗桔红色—亮桔红色的交替变换(图 2)。

方解石: 含量在 5% ~ 15% 左右, 主要表现为两

种类型: 一种为交代残余方解石, 在镜下亦难观察, 但染色后, 呈星点状分布于白云石内部或颗粒之间; 一种为后期方解石脉, 表面一般很干净, 呈大小不一的连晶状, 主要充填白云石晶间孔、晶间缝和晶间溶孔, 多为后期富 Ca 碳酸盐岩水溶液沿孔缝充填而成。

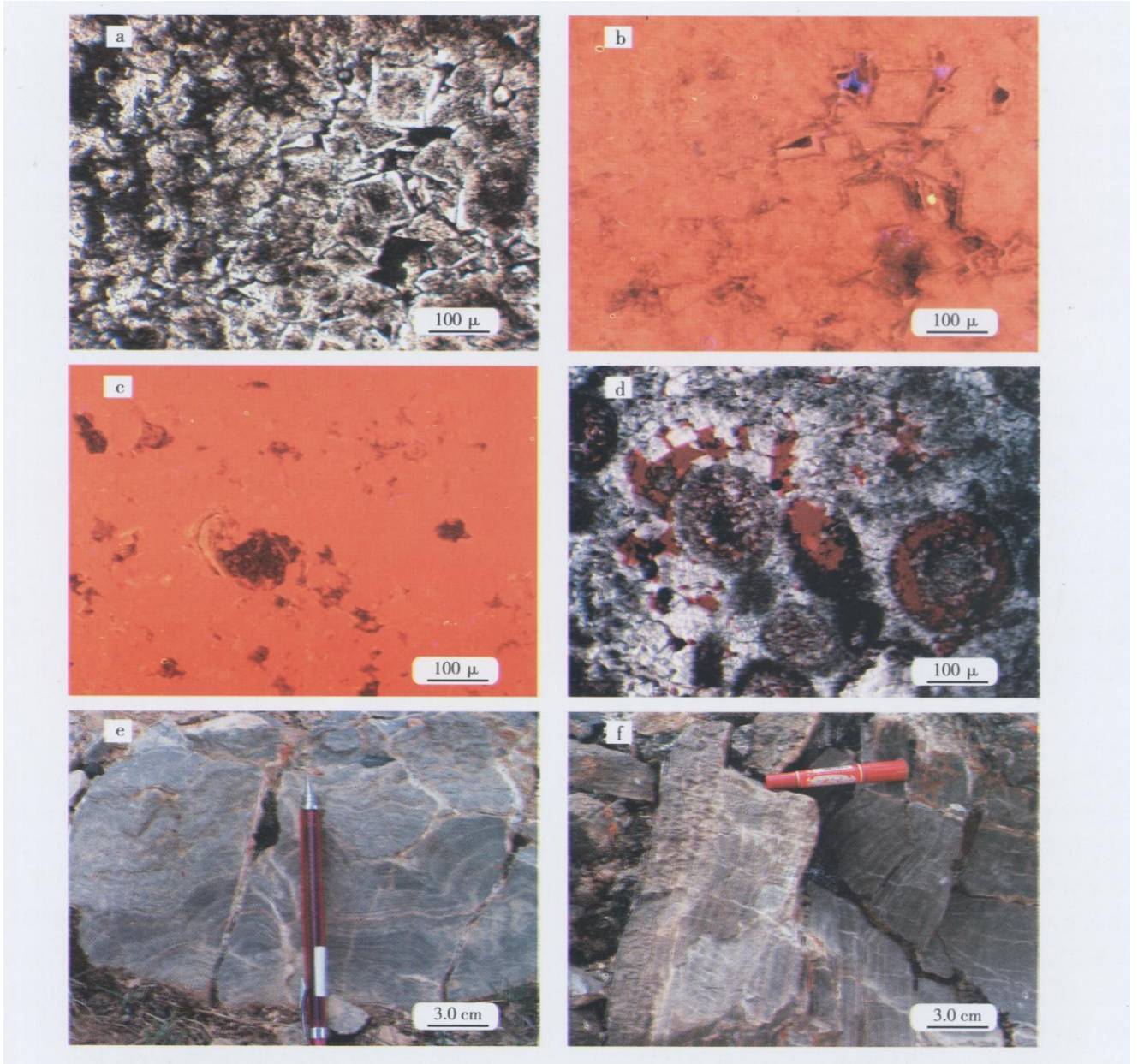


图 2 隆额尼—昂达尔错古油藏白云岩典型组构特征

Fig 2 The typical microstructure and sedimentary structure of Longen iAngdanro paleo-oil dolomite

注: (a) ZRP-6白云岩不等粒结构及白云石的雾心亮边结构, 白云石以细粒为主, 少量为中粒, 岩石具交代残留幻影构造。单偏光镜下; (b) 视域同(a), 雾心亮边及环带构造白云石的阴极发光特性, 白云石发桔红色光, 白云石边缘及环带构造发暗玫瑰红色光; (c) BP-12交代残余方解石的阴极发光特性, 发亮桔黄色光, 呈星点状分布, 其中主体为白云石, 发桔红色光; (d) ZRP-9白云岩交代残余鲕粒结构及后期溶蚀扩大孔, 其中鲕粒结构清晰可见, 沿后期溶蚀孔充填有黑色沥青。单偏光镜下; (e) 野外照片, 隆鄂尼古油藏白云岩中残留的半球形藻丘礁, 呈纹层状灰岩块体; (f) BP-12稳定延伸的潮坪纹层状白云岩, 纹层平行层面分布。

1.2 岩石组构特征

1.2.1 成岩组构特征

该区白云岩主要发育以下成岩组构类型: 不等粒结构、雾心亮边结构、环边胶结和世代生长结构(图 2)。

不等粒结构: 根据晶体粒度特征, 主要为不等粒白云岩, 其中以细—中粒白云石为主, 少量为粗晶白云石, 细中粒白云石表面灰泥较多, 镜下呈雾状, 普遍具有雾心亮边结构, 少部分见明显的环带构造。粗粒白云石表面干净, 晶棱平直, 解理清楚, 多呈规则多面体自形晶, 并具波状消光及解理面弯曲的特点, 具重结晶作用并受到后期构造作用的影响。对于超咸度盐水准同生沉淀白云岩而言, 一般呈致密隐晶或微晶结构^[4]。同时, 该区野外地质调查均未发现有超盐度成因的石膏, 因此, 认为该区白云岩并非超盐原生沉淀的白云石。

雾心亮边结构: 该区大部分白云石具雾心亮边结构, 表现为白云石中心呈一多边形或浑圆形阴影。这些污浊的杂质与原岩组分中残余物有关, 有时保存有铁质、泥质和泥晶方解石残余痕迹, 四周边缘清洁明亮, 但核心和环边光性一致。在白云石晶体中出现的中心不清楚(雾心)和边缘清楚(亮边)的现象, 被认为是成岩孔隙流体与淡水作用的结果^[4]。白云石核心阴影是孔隙流体相对高 Mg/Ca 比, 快速结晶的产物。随着淡水稀释, 盐度和 Mg/Ca 比下降, 生成干净明亮、无包体的淡水白云石环边。

环边胶结结构: 这种特征主要表现在尚未完全白云岩化的颗粒灰岩(以鲕粒灰岩为主)中, 可见到纤维状、柱状方解石孔隙充填物及细晶白云石沿鲕粒边缘呈等厚环边胶结和世代生长结构。这种结构是大气水潜流带常见识别特征^[5], 它指示了大气淡水下渗对颗粒的胶结作用以及随 Mg/Ca 比的逐步降低, 白云石对方解石的交代作用。

1.2.2 原生组构特征

该区白云岩主要具有残余粒屑结构及藻纹层构造(图 2)。

残余粒屑结构: 大量普通薄片及铸体薄片研究证实, 该区除具纹层状构造白云岩外, 其余白云岩均具有残余粒屑结构特征, 且这种残余粒屑结构白云岩主要分布在扎仁剖面。粒屑以鲕粒为主, 尚见有少量正常海洋窄盐度生物如苔藓虫、珊瑚、双壳类以及棘皮类化石。粒屑大部分交代已比较彻底, 呈交代幻影, 颗粒边界模糊可辨, 部分颗粒形态保存完好, 但实际

均呈镶嵌颗粒状。

藻纹层构造: 该区藻纹层白云岩分为两类: 一种为藻丘礁, 其叠层石藻礁常与高能带颗粒滩共生。藻丘基座为泥晶—亮晶颗粒灰岩(白云岩), 礁核相由蓝绿藻叠层石组成, 呈半球状、叠锥状和灌丛状, 叠锥宽度 10~15 cm, 高度 20~35 cm, 个别规模较大, 宽度、高度均大于 1 m, 藻礁侧部相连, 见少量珊瑚, 附礁生物有腹足类、双壳类和腕足类。礁顶被颗粒灰岩(白云岩)覆盖。叠层石藻丘礁向海一侧坡度较陡, 可见塌积成因的前斜坡碎石裙堆积角砾岩, 角砾大小 5~15 cm, 最大见有 20~30 cm 礁岩块; 另一种为潮坪藻席, 其特征主要为藻纹层与层面平行, 在走向上延伸稳定, 其延伸长度常大于 3 m, 其中藻类种属亦为蓝绿藻。藻纹层白云岩中白云石粒度主要为细—中晶结构, 在阴极发光显微镜下均可见到白云石交代灰岩后方解石残留体呈星点状分布。

白云岩以上原生组构特征说明, 该区白云岩并非超盐原生沉淀或准同生白云岩, 而系交代成因。

1.3 沉积相分析

根据野外实测白云岩剖面、路线地质调查并结合室内普通薄片、铸体薄片等的综合研究, 认为该区白云岩原岩沉积时为局限的碳酸盐岩台地环境, 并可进一步划分为泻湖、潮上带、台地边缘藻丘礁、台地边缘塌积岩、潮上高能带及潮下低能带六个沉积相带(图 3)。其中, 泻湖环境为泥晶灰岩, 其盐度可能不正常, 未见到正常海洋窄盐度生物如苔藓虫、珊瑚、双壳类以及棘皮类化石; 潮下低能带为内碎屑泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、生屑微晶灰岩、球粒泥晶灰岩; 潮坪环境为稳定延伸的藻纹层白云岩、藻纹层灰岩, 藻纹层与层面平行; 台地边缘藻丘礁为半球状、叠锥状和灌丛状藻纹层白云岩、藻纹层灰岩; 台地边缘塌积岩为重力作用沿斜坡跨塌形成的塌积角砾岩, 其中偶见单体珊瑚化石; 潮上高能环境为具残余鲕粒结构白云岩、砾屑亮晶灰岩、亮晶内碎屑灰岩、内碎屑鲕粒亮晶灰岩、亮晶粒屑灰岩。

对该区两条白云岩短剖面沉积相分析表明, 该区主要发育泻湖、潮上带、潮上高能带及潮下低能带四个沉积相带, 而台地边缘藻丘礁、台地边缘塌积岩两个沉积相带很不发育, 仅局部地方可见。同时从该区沉积相分析图中也可看出, 白云岩所处的沉积环境集中在三个沉积相带: 潮上高能带、潮坪环境及台地边缘藻丘礁。

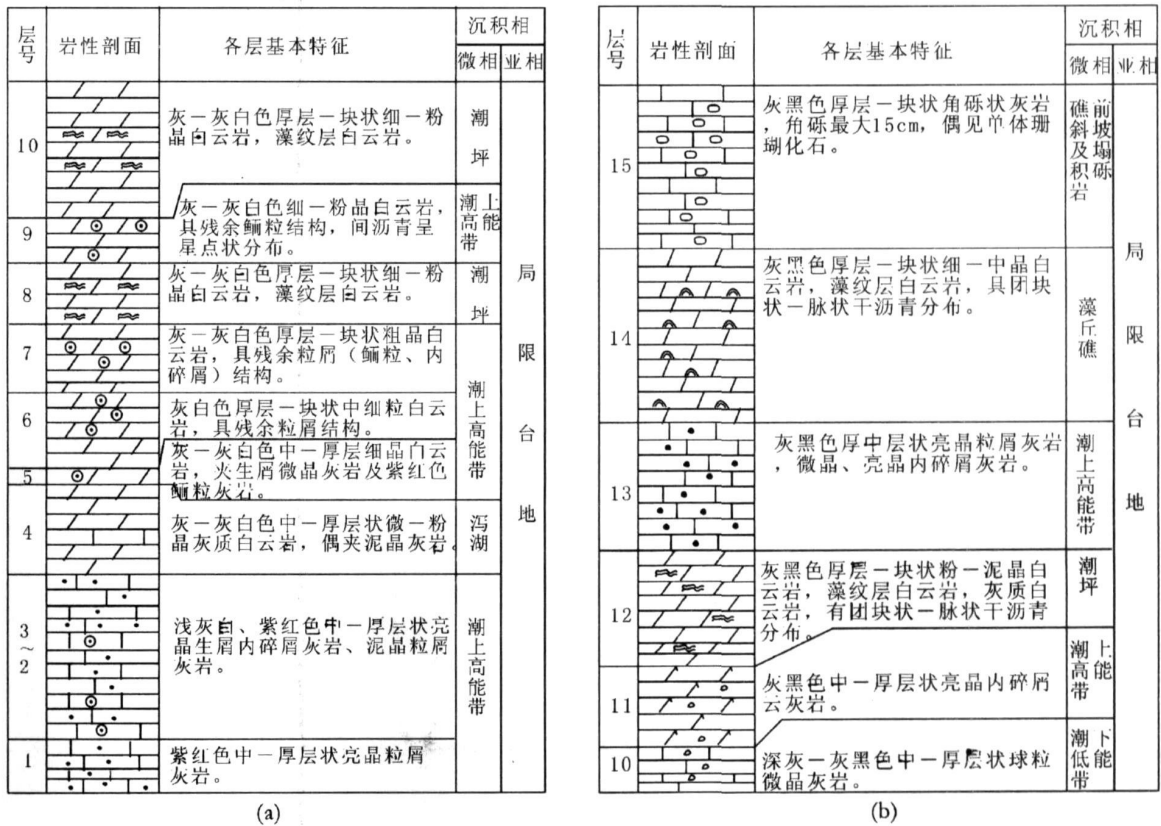


图 3 隆额尼—昂达尔错古油藏白云岩典型剖面沉积相分析

Fig 3 Facies analysis of the Longni-Angdanro paleo-oil dolomite in typical profiles

注: (a) 北带典型剖面(扎仁白云岩剖面: ZRP)沉积相分析, 比例尺 1: 3000

(b) 南带典型剖面(巴格底加日剖面: BP)白云岩层段沉积相分析, 比例尺 1: 2000.

2 白云岩及伴生灰岩的稀土元素特征

碳酸盐岩为内源沉积作用的产物, 是由海洋盆地水体中直接提供的沉积物质, 其中的各类元素主要来自三个方面: 一部分来源于陆壳风化产生的溶解物质; 另有一部分物质来源于海底和大陆火山喷发溶液、气体及地壳深部物质; 还有一部分来自成岩流体带入的各种元素。因此, 可将碳酸盐岩中的某些指纹元素作为研究古海洋盆地发展演化及成岩环境变迁的示踪剂。前人研究表明, 将稀土元素应用于古海洋盆地的研究应尽量减少陆源物质的影响, 并作如下限制: SD_2 含量小于 3%, Al_2O_3 含量小于 1%, $CaO + MgO + CO_2$ 值大于 95%^[6]。对上述氧化物分析表明, 该区白云岩及灰岩符合该条件(表 1)。该区常量和微量元素测定采用 ICP-MS 稀土元素含量测定采用等离子质谱仪(X-series), 测定误差小于 0.02%, 测试结果及部分稀土特征参数值见表 2。

2.1 稀土总量及配分模式

该区灰岩及白云岩具有稀土总量 REE 较低的特点, 而白云岩与灰岩相比, 白云岩 REE 总量更低。其中灰岩 REE 总量均值 2.0003×10^{-6} , 最大值 4.76×10^{-6} , 最小值 0.773×10^{-6} ; 白云岩 REE 总量均值 1.2685×10^{-6} , 最大值 2.116×10^{-6} , 最小值 0.71×10^{-6} (表 2)。从图 4 中可看出白云岩 ΣREE 落点主要位于左侧, 而灰岩则主要位于图的右侧。

已有的研究表明, 沉积岩中不同类型岩石稀土总量 REE 也不相同: 泥质岩中 REE 最高, 可达 $200 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$, 碳酸盐中最低, 多小于 100×10^{-6} , 砂岩则介于两者之间。该区灰岩及白云岩 REE 非常低, 均小于 5×10^{-6} , 该值小于中国陕南及安徽北部下古生界碳酸盐岩 REE 总量(前者 ΣREE $3.98 \times 10^{-6} \sim 13.06 \times 10^{-6}$, 后者 ΣREE $7.945 \times 10^{-6} \sim 26.09 \times 10^{-6}$), 表明该区灰岩及白云岩在稀土总量上存在着贫化现象^[6, 7]。交代白云岩化作用有三种主要形式: 埋藏成因、构造成因、混合水交代成因, 但该区白云岩在稀土总量上并未表现出埋藏成因或构造

表 1 研究区常量元素特征

Table 1 The main element characteristics of dolomite and concomitant calcite in the study area

样号	岩性	单位: 10^{-2}					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	CO ₂	CaO+MgO+CO ₂
BP-2	泥晶灰岩	1.200	0.189	0.352	55.243	43.354	98.948
BP-3	内碎屑鲕粒亮晶灰岩	0.200	0.302	1.146	55.243	41.418	97.806
BP-4	泥晶灰岩	0.386	0.227	0.342	55.693	40.526	96.561
BP-5	泥晶灰岩	0.643	0.227	0.362	54.883	40.599	95.844
BP-6	内碎屑泥晶灰岩	0.170	0.283	0.291	55.803	40.416	96.511
BP-7	泥—微量灰岩	0.170	0.302	0.251	55.923	42.596	98.771
BP-8	生屑泥晶灰岩	0.536	0.227	0.281	55.413	42.077	97.772
BP-9	亮晶内碎屑灰岩	0.214	0.150	0.241	55.963	42.431	98.636
BP-10	球粒微晶灰岩	0.557	0.264	0.382	55.183	42.334	97.898
BP-11	亮晶内碎屑灰岩	0.140	0.359	9.428	45.107	43.799	98.334
BP-13	亮晶粒屑灰岩	0.170	0.302	1.246	54.512	42.541	98.300
BP-16	亮晶内碎屑灰岩	0.321	0.227	0.332	56.103	42.541	98.976
BP-17	亮晶内碎屑灰岩	0.040	0.079	0.171	56.033	42.541	98.745
BP-19	纹层状灰岩	0.110	0.189	0.332	55.803	42.541	98.676
ZRP-2	泥晶粒屑灰岩	0.140	0.120	0.643	55.303	43.341	99.287
ZRP-4	微—粉晶灰岩	0.621	0.302	0.563	54.903	43.390	98.855
ZRP-5	生屑微晶灰岩	0.471	0.227	17.840	34.771	46.580	99.191
D3	砾屑灰岩	0.110	0.160	0.864	54.903	42.236	98.003
BP-12	纹层白云岩	0.060	0.246	19.157	34.090	45.253	98.500
BP-14	纹层白云岩	0.160	0.246	18.705	34.240	46.190	99.135
ZRP-6	残余鲕粒白云岩	0.100	0.227	20.785	31.469	46.450	98.704
ZRP-7	残余鲕粒白云岩	0.200	0.189	19.127	33.370	45.850	98.347
ZRP-8	纹层状白云岩	0.110	0.120	20.273	32.169	46.660	99.102
ZRP-9	残余鲕粒白云岩	0.100	0.079	19.187	33.580	46.047	98.814
ZRP-10	纹层状白云岩	0.257	0.180	20.584	31.749	46.930	99.263
D1	纹层状白云岩	0.060	0.264	18.755	33.790	45.660	98.205

注: ① 样品分析由国家地质实验测试中心分析; ④ BP为巴格底加日剖面; ZRP为扎仁剖面; D₁、D₃为隆额尼样品。

成因: 在埋藏成岩环境下或构造作用下, 由于高浓度成岩流体的参与以及来自砂泥岩、变质岩、岩浆岩流体的作用, 稀土总量一般会呈增长的趋势^[8,9]。但该区白云岩反呈相反的趋势。因此, 可认为, 该区灰岩及白云岩形成于近岸的局限台地环境, 在海平面相对下降期间, 受大气淡水的淋漓作用导致了稀土总量的降低, 其中白云岩处于古地理环境中相对高点的潮上高能带、潮坪环境及台地边缘藻丘礁, 在原始沉积及后来海平面相对下降期间, 均更容易受到大气淡水的淋漓作用, 表现出稀土总量更低的特点。基于此认为, 该区白云岩应系混合水交代成因。

沉积过程中 REE 主要以几种状态搬运, 一是碎屑态, 最稳定, 即 REE 存在于碎屑矿物晶格中随碎屑矿物迁移而搬运; 二是吸附态, 主要是粘土矿物吸附 REE 能力较强, 尤其是 LREE; 三是溶解态, REE 呈可溶的络合物搬运^[10]。碳酸盐岩沉积环境中碎屑矿物主要为粘土矿物, 而粘土矿物与沉积相带有着密切关系, 主要沉积在泻湖等水动力较弱的低能环境中。

基于此, 研究了沉积相带与 Σ REE 的相关性。其中, 泻湖环境为泥晶灰岩; 潮下低能带为内碎屑泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩、生屑微晶灰岩、球粒泥晶灰岩; 潮坪环境为藻纹层白云岩、藻纹层灰岩; 台地边缘藻丘礁为半球状、叠锥状和灌丛状藻纹层白云岩、藻纹层灰岩; 台地边缘塌积岩为重力作用沿斜坡跨塌形成的塌积角砾岩; 潮上高能环境为具残余鲕粒结构白云岩、砾屑亮晶灰岩、亮晶内碎屑灰岩、内碎屑鲕粒亮晶灰岩、亮晶粒屑灰岩。研究表明: 碳酸盐岩 Σ REE 与沉积环境关系十分明显, 在泻湖和潮下低能带 Σ REE 最高, 其次为潮上高能带, 潮坪及台地边缘藻丘礁 Σ REE 最低 (图 5)。反映了在各相带水动力的状况及粘土矿物沉淀、吸附作用的强弱。由于粘土矿物是 Al 的主要载体之一, 从该区灰岩及碳酸盐岩 Al 含量与 Σ REE 的相关性可看出, 二者呈正相关关系, 这从另一方面也反映了粘土矿物与 Σ REE、沉积环境与 Σ REE 的内在相关性 (图 5), 表明该区 Σ REE 仍受沉积相带及沉积过程的控制, 未发生大的变动, 该区白

表 2 灰岩及白云岩稀土元素值及特征参数

Table 2 The REE characteristics and typical index of dolomite and concomitant calcite (to be continued)

样号	岩性	单位: 10^{-6}											
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm
BP-2	泥晶灰岩	0.24	0.47	0.06	0.20	0.04	0.01	0.10	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00
BP-3	内碎屑鲕粒亮晶灰岩	0.24	0.43	0.05	0.19	0.04	0.01	0.08	0.01	0.06	0.01	0.03	0.00
BP-4	泥晶灰岩	0.25	0.45	0.05	0.19	0.04	0.01	0.09	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00
BP-5	泥晶灰岩	0.40	0.67	0.09	0.35	0.06	0.01	0.12	0.01	0.06	0.02	0.05	0.01
BP-6	内碎屑泥晶灰岩	0.24	0.44	0.06	0.21	0.04	0.01	0.09	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00
BP-7	泥—微量灰岩	0.34	0.59	0.08	0.31	0.08	0.01	0.07	0.01	0.04	0.02	0.03	0.00
BP-8	生屑泥晶灰岩	0.23	0.41	0.07	0.20	0.06	0.03	0.08	0.03	0.05	0.04	0.04	0.02
BP-9	亮晶内碎屑灰岩	0.23	0.31	0.05	0.13	0.04	0.02	0.07	0.01	0.04	0.02	0.03	0.01
BP-10	球粒微晶灰岩	0.61	0.93	0.13	0.50	0.10	0.03	0.11	0.02	0.08	0.07	0.06	0.01
BP-11	亮晶内碎屑灰岩	0.89	1.77	0.18	0.63	0.13	0.03	0.13	0.02	0.11	0.02	0.07	0.01
BP-13	亮晶粒屑灰岩	0.31	0.57	0.06	0.25	0.04	0.01	0.09	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01
BP-16	亮晶内碎屑灰岩	0.40	0.43	0.07	0.31	0.08	0.01	0.13	0.01	0.08	0.02	0.06	0.01
BP-17	亮晶内碎屑灰岩	0.10	0.12	0.02	0.07	0.01	0.01	0.06	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00
BP-19	纹层状灰岩	0.16	0.26	0.03	0.12	0.03	0.01	0.07	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00
ZRP-2	泥晶粒屑灰岩	0.19	0.32	0.04	0.15	0.03	0.01	0.11	0.00	0.03	0.01	0.02	0.00
ZRP-4	微—粉晶灰岩	0.60	1.11	0.13	0.51	0.10	0.01	0.15	0.02	0.08	0.02	0.05	0.01
ZRP-5	生屑微晶灰岩	0.58	1.01	0.11	0.44	0.08	0.01	0.15	0.01	0.07	0.01	0.03	0.01
D3	砾屑灰岩	0.25	0.43	0.05	0.19	0.03	0.01	0.08	0.01	0.04	0.01	0.02	0.00
BP-12	纹层白云岩	0.12	0.23	0.03	0.12	0.02	0.01	0.07	0.01	0.03	0.01	0.01	0.00
BP-14	纹层白云岩	0.15	0.28	0.03	0.12	0.03	0.01	0.08	0.01	0.02	0.01	0.02	0.00
ZRP-6	残余鲕粒白云岩	0.28	0.49	0.06	0.22	0.04	0.01	0.11	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00
ZRP-7	残余鲕粒白云岩	0.37	0.71	0.08	0.33	0.05	0.02	0.13	0.01	0.05	0.01	0.03	0.00
ZRP-8	纹层状白云岩	0.18	0.32	0.04	0.17	0.03	0.00	0.09	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00
ZRP-9	残余鲕粒白云岩	0.10	0.18	0.02	0.08	0.02	0.00	0.10	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00
ZRP-10	纹层状白云岩	0.33	0.64	0.07	0.26	0.05	0.01	0.09	0.01	0.05	0.01	0.03	0.01
D1	纹层状白云岩	0.18	0.31	0.04	0.16	0.04	0.01	0.08	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00

注: ① 样品分析由国家地质实验测试中心分析; ② BP为巴格底加日剖面; ZRP为扎仁剖面; D₁、D₃为隆额尼样品。

云岩应为混合水交代形成。

沉积岩的 REE 配分模式与页岩相似, 较轻微差异都在图上有明显反映, 故采用北美页岩 (NASC, Haskin, 1968) 标准化来比较样品的 REE 分馏情况。页岩标准值见表 3(除 D_x Y 外, 其它均采用北美页岩的数据)。

对该区灰岩及白云岩页岩标准化之后, 可以看出均为相对平坦的页岩标准化曲线形态(图 4), 且 Gd 处呈一尖峰, 为正异常, 分馏程度高, 这种特征无论在灰岩及白云岩样品的平均值标准化及单个的样品中均可见到(图 4), 说明灰岩及白云岩经历了相似的沉积环境及成岩过程。

具体而言, 灰岩在纵坐标上标准化值整体上偏, 其稀土总量总体上比白云岩高, 在灰岩样品均值配分模式图(图 4)中 La—Eu 段及 Tb—Y 段曲线形态呈多次的高低起伏, Gd 处呈一明显峰值, δGd (δGd 为讨论 δGd 异常, 引入的与 δEu 相似的定义: $\delta Gd = 2^*$

$Gd_N / (Eu_N + Tb_N)$) 均值 2.155 最大值 3.550 最小值 0.517, $W_N(La) / W_N(Yb)$ 均值 1.141, 最大值 2.420 最小值 0.484, 总体属轻稀土弱富集型; 白云岩标准化曲线形态除在 Gd 处呈一峰值之外, 在白云岩样品均值配分模式图中 La—Eu 段及 Tb—Y 段均较灰岩平坦, 稀土元素在这两个区段内分馏程度低。其 δGd 均值 3.060, 最大值 4.850 最小值 1.957, 总体上 δGd 值较灰岩大。 $W_N(La) / W_N(Yb)$ 均值 1.136 最大值 1.740 最小值 0.726 总体属轻稀土弱富集型。

2.2 轻稀土和重稀土

该区灰岩及白云岩在轻、重稀土特征上有着不同的表现, 根据上述稀土配分模式的相似性, 认为在沉积及成岩环境存在共性基础上两大岩类又存在彼此的差异。

具体而言, 该区灰岩与白云岩相比具轻、重稀土相对富集的特征, 在 $W(LREE) - W(HREE)$ 相互关系图及 $W(REE) - W(LREE) / W(HREE)$ 相关图(图 4)

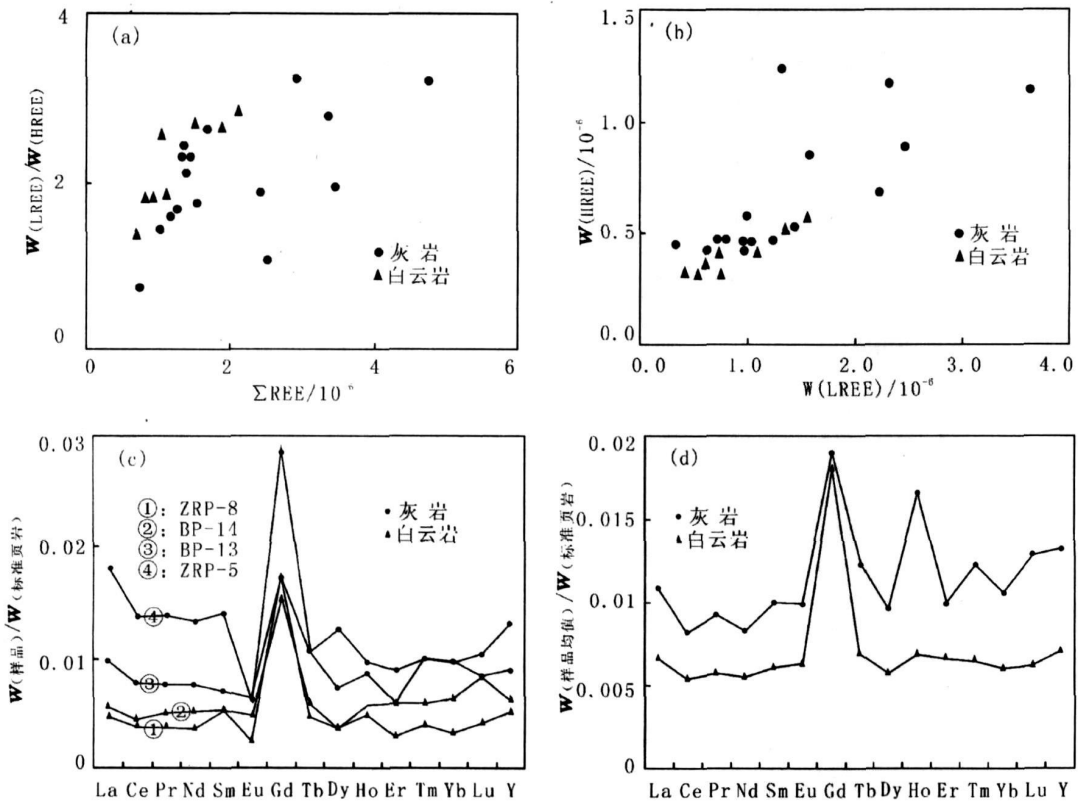


图 4 研究区白云岩及伴生灰岩稀土总量与配分模式

Fig 4 The amount of ΣREE, HREE, LREE and REE distributed model for Longgeni-Angdanroo paleo-oildolomite and the concomitant calcite

注: (a) ΣREE-W(LREE)/W(HREE)相关图,白云岩稀土总量偏低; (b) W(LREE)-W(HREE)相关图,白云岩轻稀土、重稀土总量均较灰岩低; (c) 典型灰岩及白云岩样品稀土配分模式,灰岩样品稀土总量较白云岩高; (d) 灰岩及白云岩样品均值稀土配分模式,灰岩样品稀土总量较白云岩高。

上,白云岩落点相对集中,分别位于左下角及左上角,表现出白云岩轻、重稀土元素均有所贫化及重稀土贫化更为强烈的规律。从具体数据上看,灰岩中 W(LREE)均值 1 362 最大值 3 630 最小值 0 325,而白云岩中 W(LREE)均值 0 880,最大值 1 560 最小值 0 404。白云岩在轻稀土含量上有所贫化;灰岩中 W(HREE)均值 0 639 最大值 1 249 最小值 0 409,而白云岩中 W(HREE)均值 0 388 最大值 0 556 最小值 0 288。白云岩中重稀土总量有所降低,白云岩化过程中重稀土亦有明显的带出现象;灰岩中 W(LREE)/W(HREE)均值 2 116 最大值 3 232 最小值 0 725,而白云岩中 W(LREE)/W(HREE)均值 2 185 最大值 2 806 最小值 1 320。白云岩过程中在轻重稀土含量均有所贫化的情况下,白云岩 W(LREE)/W(HREE)总体相对较高,多系重稀土贫化更为严重结果。

环境中,稀土元素的碳酸盐岩离子络合物是其主要的溶解相,且络合作用从 LREE 向 HREE 有规律地增加,使得 LREE 优先被吸附到颗粒表面,而 HREE 优先残留在溶剂中。溶解的 HREE 在海水中比 LREE 更稳定,使 HREE 在自然界的迁移能力强于 LREE^[11-16]。该区灰岩及白云岩均表现为轻稀土富集型,其成因机制多系轻、重稀土元素地球化学性质差异,轻稀土被优先吸附在颗粒表面的结果。而灰岩及白云岩在轻、重稀土含量上表现出的差异性,结合该区灰岩及白云岩在岩石结构、沉积环境的研究,可有如下的认识:在海平面相对下降的情况下,原先局限台地环境表现为相对的抬升,受到大气降水、地表水等淡水的作用和影响,潮坪、台地边缘藻丘礁及潮上高能带由于其处于相对地形上的高点,此时,更多地受到淡水的作用,重稀土元素由于其迁移能力较强,从原来的沉积物中更多地被带走。该区灰岩及白云岩稀土总量偏低均与淡水的作用有着密切的关系。

已有的研究表明:在碳酸盐岩沉积及成岩环

续表 2 灰岩及白云岩稀土元素值及特征参数

Table 2 The REE characteristics and typical index of dolomite and concomitant calcite (continued)

样号	单位: 10 ⁻⁶			δEu	δCe	W(La) _N /W(Yb) _N	δGd	单位: 10 ⁻⁶	单位: 10 ⁻⁶	单位: 10 ⁻⁶	单位: 10 ⁻²
	Yb	Lu	Y					ΣLREE	ΣHREE	ΣREE	A1
BP-2	0.02	0.00	0.24	0.55	0.85	1.16	2.93	1.02	0.44	1.46	0.10
BP-3	0.02	0.00	0.24	0.65	0.85	1.16	2.15	0.96	0.45	1.41	0.16
BP-4	0.01	0.00	0.23	0.46	0.87	2.42	3.00	0.99	0.41	1.40	0.12
BP-5	0.05	0.01	0.53	0.38	0.77	0.78	2.53	1.58	0.86	2.43	0.12
BP-6	0.02	0.00	0.25	0.60	0.80	1.16	2.23	1.00	0.43	1.43	0.15
BP-7	0.03	0.00	0.31	0.47	0.78	1.10	1.70	1.41	0.52	1.92	0.16
BP-8	0.04	0.02	0.25	1.87	0.70	0.56	0.52	1.00	0.57	1.57	0.12
BP-9	0.02	0.01	0.27	1.58	0.63	1.11	0.97	0.78	0.48	1.26	0.08
BP-10	0.06	0.01	0.75	1.25	0.72	0.98	0.89	2.30	1.17	3.47	0.14
BP-11	0.08	0.01	0.68	1.01	0.96	1.08	1.05	3.63	1.13	4.76	0.19
BP-13	0.03	0.00	0.26	0.53	0.90	1.00	2.03	1.24	0.47	1.71	0.16
BP-16	0.06	0.01	0.87	0.37	0.55	0.65	2.63	1.30	1.25	2.55	0.12
BP-17	0.02	0.00	0.30	0.61	0.58	0.48	2.64	0.33	0.45	0.77	0.04
BP-19	0.03	0.00	0.26	0.60	0.81	0.52	2.34	0.61	0.43	1.04	0.10
ZRP-2	0.01	0.00	0.28	0.55	0.80	1.84	3.54	0.74	0.47	1.21	0.06
ZRP-4	0.04	0.01	0.51	0.35	0.86	1.45	1.83	2.46	0.89	3.35	0.16
ZRP-5	0.03	0.01	0.38	0.26	0.86	1.87	3.55	2.23	0.69	2.92	0.12
D3	0.02	0.00	0.23	0.62	0.83	1.21	2.28	0.96	0.41	1.37	0.08
BP-12	0.01	0.00	0.15	0.67	0.83	1.16	2.12	0.53	0.29	0.82	0.13
BP-14	0.02	0.00	0.18	0.47	0.90	0.73	2.87	0.62	0.34	0.95	0.13
ZRP-6	0.02	0.00	0.21	0.40	0.82	1.36	3.33	1.10	0.41	1.51	0.12
ZRP-7	0.03	0.00	0.29	0.96	0.90	1.19	1.96	1.56	0.56	2.12	0.10
ZRP-8	0.01	0.00	0.15	0.21	0.82	1.74	4.86	0.74	0.29	1.04	0.06
ZRP-9	0.01	0.00	0.12	0.28	0.87	0.97	4.85	0.40	0.31	0.71	0.04
ZRP-10	0.03	0.00	0.29	0.56	0.91	1.07	2.08	1.36	0.52	1.88	0.10
D1	0.02	0.00	0.23	0.50	0.79	0.87	2.42	0.74	0.40	1.14	0.14

注: 1 样品分析由国家地质实验测试中心分析; ④BP为巴格底加日剖面; ZRP为扎仁剖面; D₁、D₃为隆额尼样品

表 3 页岩稀土元素标准值

Table 3 REE standard value of shale

岩性	数据来源	W _B /10 ⁻⁶														
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
	•	32	73	7.9	33	5.7	1.24	5.2	0.85	1.04	3.4	0.5	3.1	0.48		
页岩	*	41	83	10.1	38	7.5	1.61	6.35	1.23	5.5	1.34	3.75	0.63	3.53	0.06	
	#	42.12	81.08	9.42	35.34	347.08	1.2	6.45	1.01	5.65	1.21	3.24	0.53	3.16	0.53	28.8

注: • NASC, 据 Haskin等 1968 * 据 Anders等, 1982 #据胡云中等, 1985(中国桂北地区)

2.3 δEu和 δCe

稀土元素属于过渡类元素, 但紧靠金属元素, 有很强的金属性, 研究表明 Ce和 Eu的变价现象最为突出。在强碱性氧化环境中, Ce³⁺ 将不断氧化而迁移, 从 Eh-pH 图解 (图 6) 中可清楚看出, 在 25℃和 0.1 MPa (即相当于一个大气压的地表环境), 当 Eh > 0 (即高氧逸度) 和处于碱性环境时, Ce³⁺ 容易氧化成 Ce⁴⁺, 并以难溶的 CeO₂析出, 从而与其他三价稀土离子分离; 而在强酸性还原环境中, Eu³⁺ 将被还原而迁

移: Eu³⁺ + e⁻ = Eu²⁺。这就决定了 Ce和 Eu随环境变迁, 易于与 3价稀土元素相分离, 而成为稀土元素地球化学研究的重要对象^[15]。

总体而言, 研究区灰岩与白云岩相比灰岩具有较高的 δEu值, 而白云岩具较高的 δCe值, 反映出灰岩形成于相对还原的环境, 而白云岩形成于相对氧化的环境。从数据特征看, 灰岩 δEu均值 0.707, 最大值 1.867, 最小值 0.263, 白云岩 δEu均值 0.506, 最大值 0.955, 最小值 0.214, 总体上灰岩 δEu值较高 (图

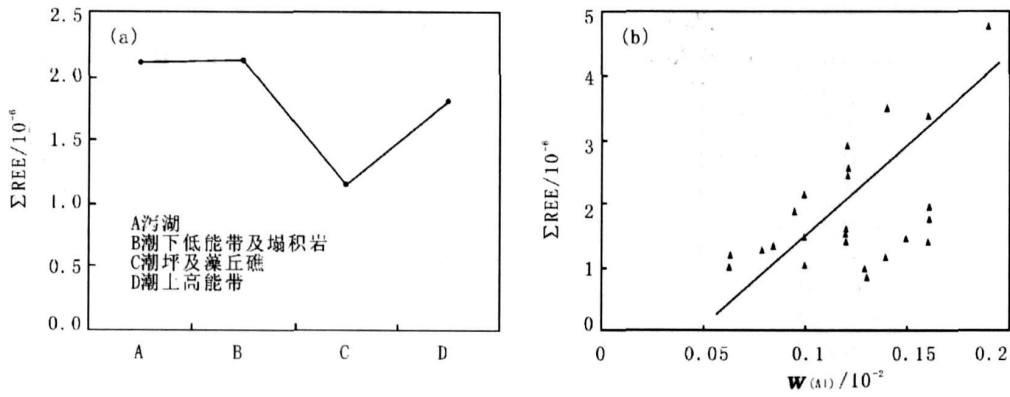


图 5 研究区白云岩及伴生灰岩 ΣREE 与沉积相带的关系

Fig 5 The relationship between ΣREE and sedimentary facies

注: (a) ΣREE 在泻湖含量最高, 其次为潮下低能带, 再次为潮上高能带, 潮坪及台地边缘藻丘礁最低;
 (b) ΣREE 与粘土矿物的主要载体之一铝 (A1) 呈正相关关系, 表明稀土矿物主要受沉积相带控制。

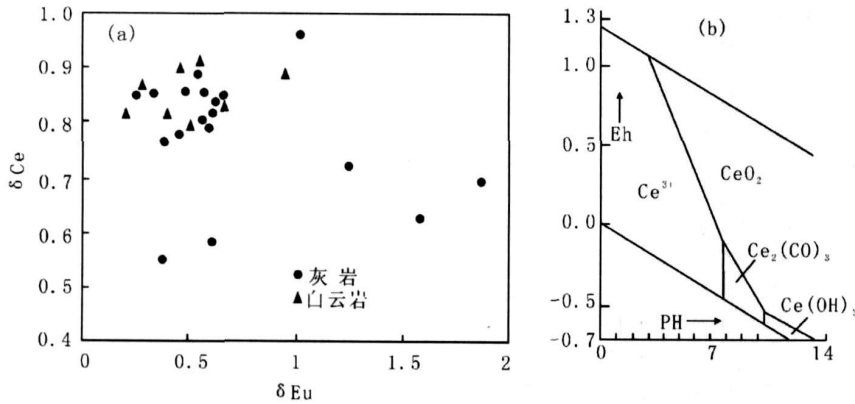


图 6 研究区白云岩及伴生灰岩的 δEu, δCe 特征及 Ce 随 Eh, pH 变化特征

Fig 6 The δEu and δCe of dolomite and concomitant calcite and the relationship between Ce, Eh and pH

注: (a) 白云岩及伴生灰岩的 δEu, δCe 特征, 灰岩具较高的 δEu 值, 而白云岩具相对较高的 δCe 值, 反映出灰岩形成于相对的还原环境, 而白云岩形成于相对的氧化环境;

(b) Ce 在 25℃ 和 0 MPa 时的 Eh-pH 图解^[15]。

6); 灰岩 δCe 均值 0.785, 最大值 0.958, 最小值 0.552, 白云岩 δCe 均值 0.857, 最大值 0.915, 最小值 0.795。总体上白云岩 δCe 较大, 且数据离散度较低。在还原环境下, 由于 Eu 被还原, 从海水中沉淀而在沉积物中得以富集; 而在氧化环境下, Ce 氧化成 4 价的 CeO₂ 从海水中析出, 在沉积物中富集。以上特征说明, 灰岩形成于相对的还原环境, 而白云岩形成于相对氧化的环境。这与对该区白云岩沉积环境的研究认识是一致的: 该区白云岩形成于潮上带及潮下高能带, 在地形上处于相对的高点, 无论在原始沉积及后来海平面相对下降遭受淡水作用期间都更容易受到大气的氧化作用, 从而导致较高的 δCe 值。

3 结论与探讨

近 30 年来, 稀土元素作为指纹元素在火山岩、岩浆岩、变质岩的成因演化及其形成构造环境等方面的研究中得到了广泛的应用^[17, 18], 但将稀土元素地球化学资料应用于沉积岩的物源、形成条件及构造环境的研究相对较少, 本文即是在这一研究领域的有益尝试。

结合岩石学特征及沉积相的综合分析, 对隆额尼—昂达尔错古油藏白云岩的稀土元素地球化学特征研究认为, 该区灰岩及白云岩 ΣREE 仍受沉积相带及沉积过程的控制, 且具 ΣREE 较低的总体特征,

其稀土总量与目前研究较少的碳酸盐岩 Σ_{REE} 相比, 均明显偏低, 其中白云岩在 Σ_{REE} 及 LREE、HREE 与灰岩相比亦有明显偏低, 白云岩中 HREE 比 LREE 更具贫化的特点, 这些特征均系淡水淋漓作用的结果; 该区灰岩及白云岩在配分模式上, 均为相对平坦的页岩配分模式, 在 Gd 处均呈正异常, 分馏程度高, 可能是该区灰岩及白云岩的一个特征。其中灰岩在配分模式上, 在 Σ_{REE} 较高的情况下表现出起伏较大的特点, 而白云岩在 Σ_{REE} 较低的情况下, 表现出较为平坦的特征, 反映了白云岩化过程中稀土元素有贫化和均一的趋势; 该区灰岩与白云岩相比, 灰岩 δ_{Eu} 值较高, 而白云岩 δ_{Ce} 较高, 反映出灰岩形成于相对的还原环境, 而白云岩形成于相对的氧化环境, 这些均与其古地理环境有着密切的关系。

综上所述, 认为隆额尼—昂达尔错古油藏白云岩为混合水交代作用形成, 其混合水交代成因的雾心亮边结构、等厚环边和世代生成结构及残留的大量原生组构均是其直接的证据。在特定的古地理条件下, 白云岩及伴生灰岩在稀土元素特征上均有相应和不同的表现, 这些表现与交代白云岩的其它两种主要形式: 埋藏作用、构造作用截然不同。因此, 沿隆额尼—昂达尔错一线有利的沉积相带, 将是羌塘盆地储层分布的有利指向区。

应当看到, 构造作用对该区白云岩的影响也是客观存在的, 这主要表现在白云岩中的少量粗晶白云石具波状消光及解理面的弯曲等, 说明白云石在构造作用下存在局部的重溶结晶, 并受到构造应力的挤压。但这并不是该区白云岩化的主导因素, 在古地理上处于相对高点的礁、滩等环境并受到淡水的作用与影响才是该区白云岩化(混合水白云岩化)的根本原因。

参考文献 (References)

- 赵正璋, 李永铁. 青藏高原中生界沉积相及油气储盖层特征 [M]. 北京: 科学出版社, 2000 [Zhao Zhengzhang Li Yongtie. The features of Mesozoic Strata sedimentary facies, reservoir and seal rock in Tibet [M]. Beijing: Science Press, 2000]
- 赵正璋, 李永铁. 青藏高原海相烃源岩的油气生成 [M]. 北京: 科学出版社, 2000 [Zhao Zhengzhang Li Yongtie. The features of Mesozoic oceanic wtata source rock in Tibet [M]. Beijing: Science Press, 2000]
- 王成善, 尹海生, 李亚林. 西藏羌塘盆地古油藏发现及其意义 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25 (2): 139-143 [Wang Chengshan Yi Haisheng Li Yalin. Discovery of paleo-oil reservoir in Qiangtang Basin in Tibet and its geological significance [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25 (2): 139-143]
- Hardie L.A. Diagenitization: a critical view of some current views [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1989, 59: 166-183
- 刘宝珺. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1985 [Liu Baojun. Sedimentary Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985]
- 高长林. 陕西南岭碳酸盐岩的稀土元素特征及其古海洋学意义 [J]. 地球化学, 1992, 4: 383-389 [Gao Changlin. REE geochemical characteristics of carbonate rocks in Southern Qinling, Shaanxi Province and their paleo-oceanological significance [J]. Geochimica, 1992, 4: 383-389]
- 李定龙. 皖北奥陶系碳酸盐岩稀土元素地球化学特征及其古岩溶意义 [J]. 地质前缘, 2000, 7 (2): 353-365 [Li Dinglong. REE geochemical features of carbonate rocks and its paleokarst significance in the Ordovician in Northern Anhui [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7 (2): 353-365]
- 李振宏, 杨永恒. 白云岩成因研究现状及进展 [J]. 油气地质与采收率, 2005, 12 (2): 5-9 [Li Zhenhong Yang Yongheng. Present situation and progress of research on白云岩 genesis [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12 (2): 5-9]
- 邱家骥, 林景仟. 岩石化学 [M]. 北京: 地质出版社, 1993 [Qiu Jiaji Lin Jingqian. Rock Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993]
- 杨守业, 李从先. REE 示踪沉积物物源研究进展 [J]. 地球科学进展, 1999, 14 (2): 164-167 [Yang Shouye Li Congxian. Research progress in REE tracer for sedimentary source [J]. Advances in Earth Sciences, 1999, 14 (2): 164-167]
- Cullers R L, Basu A, Suttner L J. Geochemical signature of provenance in sand-size mineral in soil and stream near the tobacco root batholith, Montana, USA [J]. Chemical Geology, 1988, 70: 335-348
- Byrne R H, Kim K H. Rare earth element scavenging in seawater [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54: 2645-2656
- Lee J H, Byrne R H. Examination of comparative rare earth element complexation behavior using linear free-energy relationship [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 1127-1138
- Lee J H, Byrne R H. Complexation of trivalent rare earth elements (Ce, Eu, Gd, Th, Yb) by carbonate ions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 295-302
- Millero F J. Stability constants for the formation of rare earth element inorganic complexes as a function of ionic strength [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1992, 56: 3123-3132
- Cantrell K J, Byrne R H. Rare earth element complexation by carbonate and oxalate ions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51: 597-605
- 王中刚. 稀土元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989 [Wang Zhonggang. Rare earth element geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1989]
- Henderson. General geochemical properties and abundances of rare element [C] // Henderson P ed. Rare earth element geochemistry. New York: Elsevier, 1984: 1-30
- 熊应乾, 刘振夏, 杜德文. 东海陆架 EA01 孔常微量元素变化及意义 [J]. 沉积学报, 2006, 24 (3): 356-364 [Xiong Yingqian Liu

Zhenxi Du. Variation and its implication of major and trace element EA01 from the continental shelf of East China Sea[J]. Acta

Sedimentologica Sinica, 2006, 24(3): 356-364]

Characteristics of the Pale-Oil Dolomite REE Geochemistry of Buqu Formation in Southern Part of the Central Uplift Zone of Qiangtang Basin and Its Significance

LIU Jian-qing JIA Bao-jiang YANG Ping CHEN Wen-bin CHEN Wen-xi FU Xi-gen

(Department of Sedimentary Petrography and Energy Resources, Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610082)

Abstract Based on systematic analysis of lithological composition, microstructure and sedimentary facies, in this paper any discusses have been conducted for the REE characteristics of Longen-Angdan paleo-oil dolomite in southern part of the central uplift zone of Qiangtang basin. The amount of Σ REE in dolomite and concomitant calcite is lower in comparison with other carbonates in China, and is still under the control of sedimentary facies and process. The HREE of dolomite is even more impoverished than LREE compared to concomitant calcite in this area. In distributed patterns, all the carbonates show a complicated model, and the dolomite is even more flat compared to concomitant calcite. For the two typical indexes, the δ Eu of calcite is higher, and the δ Ce of dolomite is higher. All these show that REE have been undergoing an impoverished process in dolomitization, and the calcite has been formed in deep water deoxidized environment, the dolomite being formed in shallow water oxidized environment. The dolomite in this area should be the result of mixed water replacement to calcite.

Key words dolomite, mixed water replacement, REE, Qiangtang Basin