

文章编号:1000-0550(2011)03-0529-08

羌塘盆地那底岗日地区布曲组碳酸盐岩烃源岩 稀土元素分布特征及意义^①

陈文彬^{1 2} 谭富文¹ 伊海生² 付修根¹ 冯兴雷¹

(1. 中国地质调查局成都地质调查中心 成都 610082; 2. 成都理工大学沉积地质研究院 成都 610059)

摘要 对采自羌塘盆地那底岗日地区布曲组碳酸盐岩烃源岩进行了稀土元素地球化学研究,分析结果表明:海相碳酸盐岩烃源岩稀土总量(ΣREE)最大值 75.21 $\mu\text{g/g}$,最小值 20.58 $\mu\text{g/g}$,平均值为 36.67 $\mu\text{g/g}$ 。稀土元素北美页岩标准化后具有相对富集轻稀土,亏损重稀土的特点。布曲组碳酸盐岩烃源岩 Ce/Ce^* 值为 0.83 ~ 0.93,平均为 0.88,显弱负异常; Eu/Eu^* 值为 0.68 ~ 1.58,大部分样品的 Eu/Eu^* 为弱负异常,少部分样品显正异常。稀土元素的这些特征大体反映了那底岗日地区布曲组沉积期总体为弱氧化的沉积环境,由于海侵的扩大和水体分层影响,部分底层水体由于缺氧而变为还原环境。

关键词 羌塘盆地 那底岗日 布曲组 碳酸盐岩 稀土元素

第一作者简介 陈文彬 男 1979 年出生 工程师 硕士 沉积地球化学 E-mail: cdcwenbin@qq.com

中图分类号 P595 **文献标识码** A

稀土元素在地质过程中具有相近的地球化学行为,往往以一个“整体”运移,但不同的稀土元素之间的地球化学性质仍存在一定差异,因而在一些特定的环境变化中发生分异并记录在地质体中,是良好的地球化学指示剂^[1~3]。近些年来,稀土元素地球化学在火山岩、岩浆岩、变质岩的成因和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^[1,2]。同时对稀土元素的研究也广泛应用于沉积岩的物源、沉积环境的判别、构造背景的分析及沉积矿床成矿作用等诸多方面,并取得了一些重要认识^[4~10]。羌塘盆地是中国勘探程度最低的含油气盆地之一,其中中侏罗世布曲组海相碳酸盐岩地层沉积厚度大,分布广泛,是该地区一套重要的烃源岩,陈文彬^[11]等对北羌塘布曲组烃源岩生物标志物特征进行了研究,认为布曲组碳酸盐岩烃源岩有机母质类型较好,具有较好生烃潜力;谢渊等^[12]通过碳、氧、锶同位素来对此做了一些研究,讨论盆地演化及沉积环境,认为那底岗日布曲组沉积期为海平面上升期的正常的海相沉积环境,本文则结合最新的稀土元素分析成果,初步探讨了其地球化学特征及地质意义。

1 地质背景

西藏羌塘盆地位于藏北高原“无人区”,南北宽

300 km,东西长 640 km,面积 $18.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。它是形成于前泥盆纪基底上、以泥盆纪—侏罗纪巨厚海相地层为主体沉积盖层的一个大型复合沉积盆地,并以横亘于其间的中央隆起带为界划分为南、北羌塘两个拗陷带。

羌塘盆地布曲组时期差异升降作用明显的减弱,羌北地区经历了前期的快速沉积充填作用以后,盆地底形大大变缓。随着班公湖—怒江洋盆的进一步扩张,全区发生了整体性大规模下沉(拗陷),产生了区内侏罗纪最大的海侵事件,前期大部分物源区被海水淹没,陆源碎屑供应量急剧减少,沉积了大套碳酸盐岩,整个盆地处于相对稳定的边缘海—大陆边缘沉积环境,主体为障壁型碳酸盐岩海岸沉积。研究区位于北羌塘拗陷带西南缘的那底岗日地区(图 1),主要以薄—中层状泥晶灰岩为主,还含有生物介壳灰岩、泥灰岩、及少量鲕粒灰岩、砂砾屑灰岩、钙质石英粉砂岩、钙质泥岩等,总体上为一套潮坪—潟湖沉积环境。泥晶灰岩中偶见生物碎片(主要为腕足和双壳类),发育潜穴构造、干裂纹构造、小型波痕沉积构造,反映了一种水体浅、水动力较弱、蒸发量大的低能潟湖沉积环境。生物介壳灰岩中生物以双壳和腕足类为主,部分层位底部少量化石保存完整,向上逐渐变为介壳碎片,分选和磨圆较好,为水动力相对较强的潮坪沉

^①国家油气专项“青藏高原重点盆地油气资源战略选区”(XQ-2009-1)、国家自然科学基金项目(批准号:40702020)及四川省青年科技基金项目(09ZQ026-006)联合资助。

收稿日期:2010-04-01; 收修改稿日期:2010-05-31

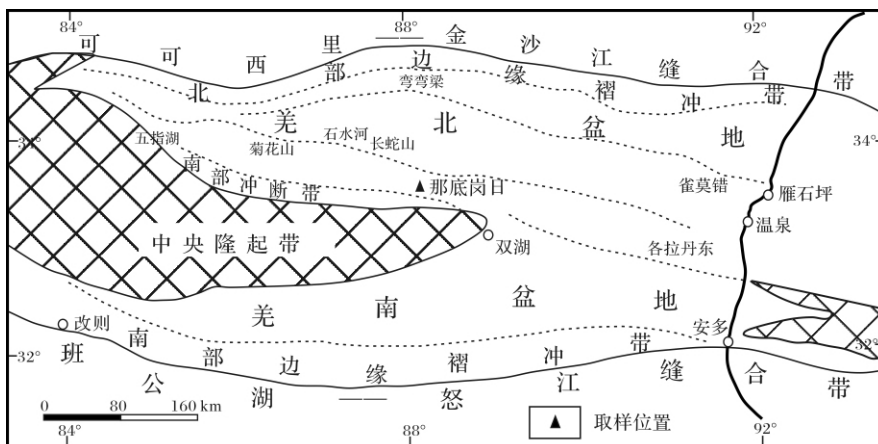


图1 研究区构造带及采样位置

Fig. 1 Tectonic belt and sampling location in the study area

积相环境。

2 分析结果

为详细地了解羌塘盆地那底岗日剖面中侏罗布曲组垂向上的沉积地球化学特征及沉积环境演化,本次工作从该剖面自下而上采集了15件样品,岩性均为碳酸盐岩,包括灰黑色泥晶灰岩和含生屑泥灰岩及泥灰岩等。稀土元素分析方法为DZ/T0223—2001(电感耦合等离子体质谱(ICP—MS)方法通则,测试仪器为Finnigan MAT制造,HR—ICP—MS(Element I),仪器编号为6493,测试温度为20℃,相对湿度为30%,测定误差小于0.02%,测试结果见表1。

2.1 稀土元素含量及特征值

为了便于讨论研究区布曲组碳酸盐岩烃源岩样

品的稀土元素特征和变化,本文对分析结果进行了页岩标准化,标准化后结果见表2,样品在地层剖面上的变化特征见图2中。

布曲组烃源岩具有稀土总量(ΣREE)较低的特点, ΣREE 最大值75.21 $\mu g/g$,最小值20.58 $\mu g/g$,均值36.67 $\mu g/g$,明显小于北美页岩组合样平均值(173.2 $\mu g/g$)。已有的研究表明,沉积岩中不同类型岩石 ΣREE 也不相同:泥质岩中 ΣREE 最高,可达200~300 $\mu g/g$,碳酸盐中 ΣREE 最低,多小于100 $\mu g/g$,有的甚至只有20~30 $\mu g/g$ (一些生物灰岩),砂岩则介于两者之间,泥质的增加,相应稀土元素含量也增加,研究的布曲组碳酸盐岩烃源岩样品中 ΣREE 值较低,符合碳酸盐岩中 ΣREE 低的特点。

表1 那底岗日地区布曲组碳酸盐岩的稀土元素地球化学分析数据($\mu g/g$)

Table 1 The REE data of the Buqu Formation carbonate in Nadigangri area ($\mu g/g$)

样品	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
NP-38	灰岩	7.07	13.00	1.51	6.10	0.96	0.26	0.88	0.15	0.83	0.16	0.43	0.08	0.49	0.09
NP-37	灰岩	14.60	26.80	3.10	11.60	2.20	0.31	1.77	0.33	1.83	0.35	1.01	0.15	0.92	0.15
NP-36	灰岩	4.54	8.30	1.04	4.05	0.68	0.13	0.59	0.09	0.53	0.10	0.32	0.05	0.33	0.05
NP-34	灰岩	7.38	13.70	1.54	5.78	1.18	0.19	0.96	0.16	0.92	0.16	0.52	0.08	0.47	0.09
NP-33	灰岩	7.23	14.60	1.78	7.43	1.01	0.35	1.13	0.15	0.79	0.16	0.40	0.06	0.37	0.06
NP-32	灰岩	7.75	15.70	1.87	7.41	1.45	0.39	1.33	0.19	1.19	0.22	0.66	0.08	0.47	0.09
NP-31	灰岩	9.35	18.20	2.18	8.17	1.70	0.30	1.46	0.25	1.43	0.24	0.77	0.10	0.69	0.10
NP-30 ²	灰岩	7.15	13.10	1.52	5.93	0.96	0.24	0.93	0.12	0.89	0.14	0.43	0.06	0.41	0.07
NP-30 ¹	灰岩	6.03	12.30	1.51	5.95	1.00	0.21	1.05	0.13	0.77	0.17	0.42	0.07	0.42	0.07
NP-29	灰岩	4.28	7.49	0.79	3.10	0.64	0.13	0.47	0.07	0.45	0.07	0.26	0.04	0.22	0.04
NP-28	灰岩	6.92	12.90	1.48	5.87	0.96	0.19	0.84	0.16	0.89	0.17	0.53	0.08	0.61	0.09
NP-27	灰岩	5.51	11.60	1.33	5.34	0.85	0.15	0.74	0.14	0.62	0.10	0.33	0.05	0.31	0.05
NP-25	灰岩	4.37	8.37	0.98	3.43	0.52	0.13	0.67	0.08	0.51	0.10	0.31	0.04	0.25	0.05
NP-24 ²	灰岩	4.89	9.12	1.10	3.94	0.68	0.15	0.51	0.12	0.55	0.12	0.33	0.05	0.28	0.06
NP-24 ¹	灰岩	7.54	14.90	1.75	6.54	1.15	0.19	1.19	0.18	1.22	0.22	0.77	0.11	0.68	0.10
	北美页岩	32.00	73.00	7.90	33.00	5.70	1.24	5.20	0.85	5.80	1.04	3.40	0.50	3.10	0.48

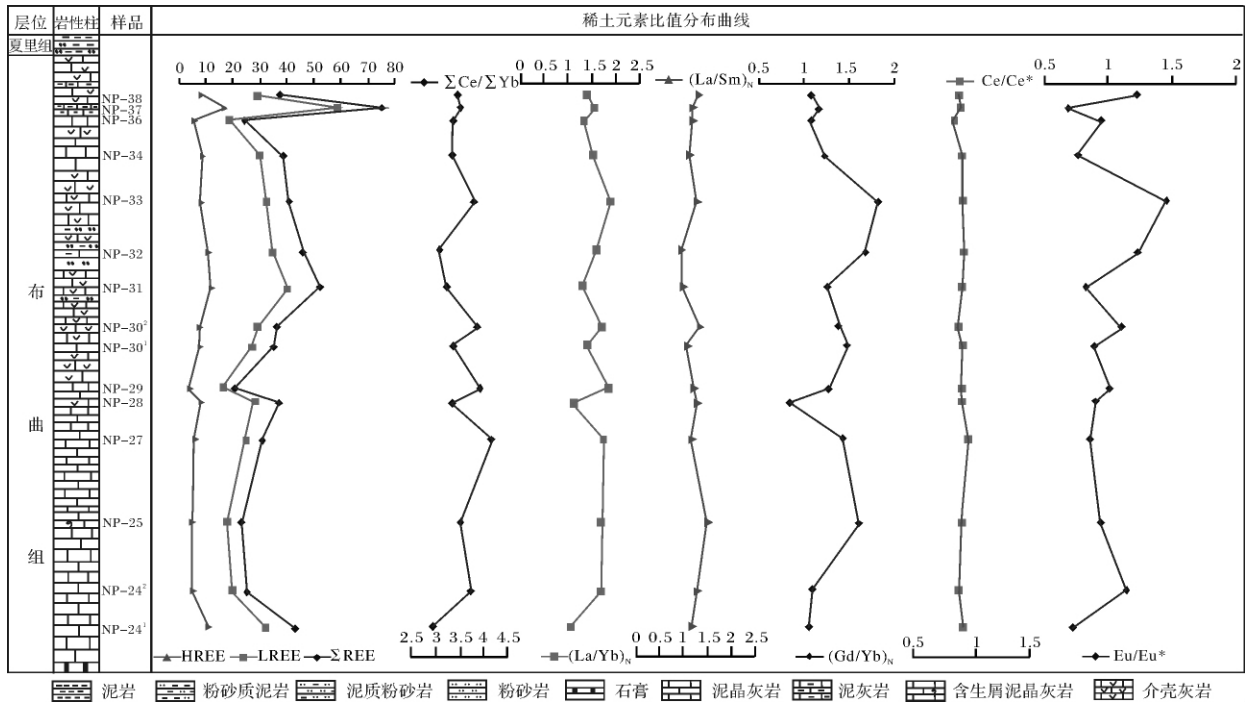


图 2 研究区布曲组碳酸盐岩北美页岩标准化稀土元素参数剖面图

Fig. 2 NASC-normalized REE evolution in the Buqu Formation carbonate in Nadigangri area

表 2 那底岗日地区布曲组碳酸盐岩稀土元素参数

Table 2 The REE ratio of the Buqu Formation carbonate in Nadigangri area

样品	岩性	ΣREE	LREE	HREE	ΣCe/ΣYb	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	Eu/Eu*	Ce/Ce*	Pr/Pr*
NP-38	灰岩	37.22	28.90	8.33	3.47	1.41	1.31	1.08	1.22	0.86	1.05
NP-37	灰岩	75.21	58.61	16.60	3.53	1.55	1.18	1.15	0.68	0.87	1.09
NP-36	灰岩	24.28	18.74	5.54	3.38	1.33	1.19	1.07	0.90	0.83	1.11
NP-34	灰岩	38.65	29.77	8.89	3.35	1.52	1.11	1.22	0.78	0.88	1.07
NP-33	灰岩	40.92	32.40	8.51	3.81	1.89	1.28	1.82	1.45	0.89	1.06
NP-32	灰岩	45.75	34.57	11.18	3.09	1.59	0.95	1.68	1.23	0.90	1.08
NP-31	灰岩	52.18	39.90	12.28	3.25	1.31	0.98	1.26	0.83	0.88	1.11
NP-30 ²	灰岩	36.35	28.89	7.46	3.87	1.71	1.33	1.37	1.10	0.86	1.07
NP-30 ¹	灰岩	35.01	27.00	8.02	3.37	1.38	1.08	1.48	0.89	0.89	1.10
NP-29	灰岩	20.58	16.43	4.15	3.95	1.86	1.20	1.27	1.01	0.88	1.02
NP-28	灰岩	36.78	28.32	8.46	3.35	1.11	1.28	0.83	0.90	0.88	1.06
NP-27	灰岩	30.73	24.78	5.95	4.17	1.74	1.16	1.43	0.86	0.93	1.05
NP-25	灰岩	22.82	17.79	5.03	3.54	1.69	1.50	1.60	0.94	0.88	1.13
NP-24 ²	灰岩	25.18	19.89	5.30	3.75	1.69	1.28	1.09	1.14	0.86	1.14
NP-24 ¹	灰岩	42.98	32.07	10.91	2.94	1.08	1.17	1.05	0.72	0.89	1.10

注: ΣREE、LREE 和 HREE 的单位为 μg/g; LREE = La + Ce + Pr + Nd + Sm + Eu; HREE = Gd + Tb + Dy + Ho + Er + Tm + Yb + Lu; REE = LREE + HREE; Ce/Ce* = 2(Ce/Ce_N) / (La/La_N + Pr/Pr_N); Eu/Eu* = 2(Eu/Eu_N) / (Sm/Sm_N + Gd/Gd_N); Pr/Pr* = 2(Pr/Pr_N) / (Ce/Ce_N + Nd/Nd_N)

ΣCe/ΣYb 为轻、重稀土元素比值,在一定程度上反映了样品的轻稀土(LREE)、重稀土(HREE)的分异状况,在同一岩石类型中,这一数值较大,表明轻稀土富集,重稀土亏损。研究的布曲组碳酸盐岩轻稀土 LREE 值介于 16.43 ~ 58.61 μg/g, 均值 28.43 μg/g, 重稀土 HREE 值介于 4.15 ~ 16.6 μg/g, 均值 8.23

μg/g。轻重稀土之比 ΣCe/ΣYb 值介于 2.94 ~ 4.17 之间,平均 3.50, 低于北美页岩(7.44 μg/g)的比值,反映轻稀土元素相对富集的特点。(La/Yb)_N 值是稀土元素标准化图解中分布曲线的斜率, > 1 时, 曲线为右倾型, 表明了轻稀土富集; < 1 时, 曲线为左倾型, 表明轻稀土有亏损; 约等于 1 时不亏损。研究的

样品中 $(La/Yb)_N$ 值为1.08~1.89之间,平均1.53,略大于1,曲线略左倾,表明了轻稀土略富集。 $(La/Sm)_N$ 值反映了轻稀土元素之间的分馏程度,该值越大,轻稀土越富集; $(Gd/Yb)_N$ 比值反映了重稀土元素之间的分馏程度,该值越小,重稀土越富集。 $(La/Sm)_N$ 值介于0.95~1.5,平均值1.19,轻稀土分馏较低。 $(Gd/Yb)_N$ 比值介于0.83~1.82,均值1.31,重稀土分馏较低。综合来看,研究的碳酸盐岩样品LREE相对富集,HREE相对亏损,但总体轻重稀土分异程度不大。

2.2 稀土元素的北美页岩标准化配分模式

在稀土元素(REE)地球化学研究中,常采用样品测量值与页岩或球粒陨石标准样品中对应元素比值,通过数值法(如La/Lu比、轻稀土/重稀土比)和图解法来反映稀土元素的富集与亏损。球粒陨石的稀土元素丰度代表地球原始组成的REE含量,多用于火成岩的研究,而页岩稀土元素含量(如北美页岩组合样NASC)则反映上地壳的REE平均丰度,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,各样品稀土元素分布模式图见图2,从图中可以发现那底岗日布曲组碳酸盐岩样品稀土分布模式有如下特点:总体上表现为轻稀土相对富集,重稀土亏损型,La—Eu段轻稀土配分曲线表现为略微“右倾”,说明轻稀土元素之间的分馏程度中等;Gd—Lu具有段重稀土配分曲线较为平坦、斜率较小,重稀土元素之间的分馏程度较低。所有样品可以分为2两种REE分配模式:一种为Eu正异常型(图3a),另一种是Eu负异常型(图3b)。

3 稀土元素地质意义

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,其中的各类元素来自三

个方面:①来源于陆壳风化产生的溶解物质;②来源于海底和大陆火山喷发溶液、气体及地壳深部物质;③来自成岩流体带入的各种元素,还可能含有一定量的生物成因有机质^[2,13]。Al被认为是一个典型的陆源元素,它主要分布于黏土矿物如高岭石、伊利石之中,它的含量多少代表了岩石组中陆源碎屑组分相对含量的高低。Ca是水成元素的标志,它主要以方解石或白云石矿物形式出现,其含量高低反映岩石中化学成因组分的少。但是大部分水成元素事实上都是成因的,它们既出现在化学成因组分中,而且在陆源碎屑组分中也有一定含量^[14]。因此,在应用稀土元素判别环境变化前,首先要消除陆源输入物的影响。目前,广泛应用的方法是以所测样品元素的含量除以与同一样品陆源元素Al含量或Ti或标准样品(如NASC、PAAS)来扣除陆源输入部分的影响,这一流程称之为标准化或归一化,再以元素Al(或元素Ti)标准化值之间的相互关系作为环境变化研究的替代指标^[15,16]。图4a是研究区所有碳酸盐岩样品 Σ REE与Ca含量标准化投影图,在消除了陆源来源 Σ REE的叠加影响后, Σ REE与Ca呈线性相关关系,因此推测研究的碳酸盐岩样品中稀土元素主要是海水成因的。另据研究,海相沉积物La正异常对于污染非常敏感,即使极少量页岩的混染都会“擦除”La的正异常特征以及REE的其它元素的海相特征^[17],而图4b所示所有研究样品的Pr/Pr*值均大于1,Ce/Ce*的值均小于1,符合现代海水稀土元素同时具备La的正异常和Ce的负异常的重要特征,进一步排除了陆源碎屑物质对样品的干扰。因此,研究的碳酸盐岩成因中稀土元素的变化可作为研究古水介质及沉积环境的判别。

研究表明,REE、LREE和HREE等的变化对古水介质变化具有一定的指相意义^[18~20]:在碳酸盐岩沉积及成岩环境中,稀土元素的碳酸盐岩离子络合物

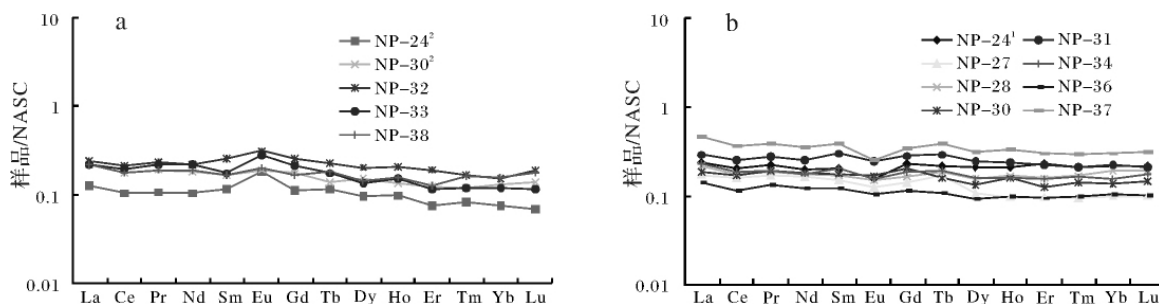
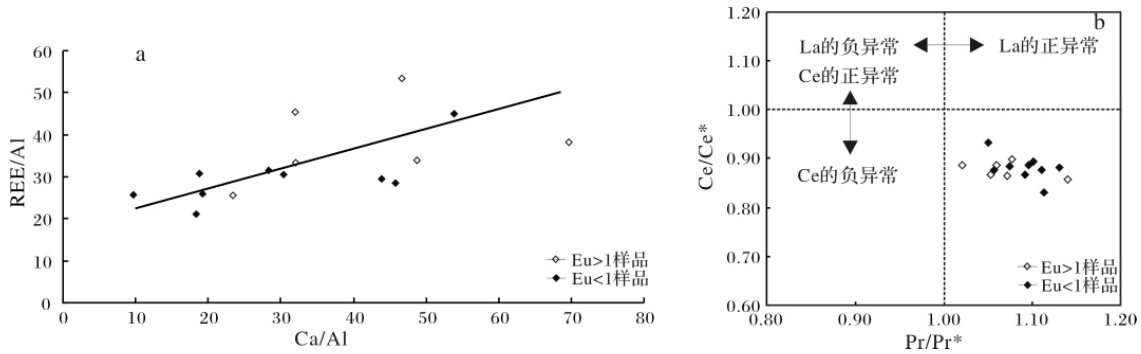


图3 那底岗日地区布曲组碳酸盐岩北美页岩(NASC)标准化稀土元素分布模式

Fig. 3 NASC-normalized REE distribution patterns of the Buqu Formation carbonate in Nadigangri area

图 4 研究区 $\Sigma\text{REE}-\text{Ca}/\text{Al}$ 及 $\text{Ce}/\text{Ce}^*-\text{Pr}/\text{Pr}^*$ 相关图Fig. 4 The relationship between $\Sigma\text{REE}-\text{Ca}/\text{Al}$ and $\text{Ce}/\text{Ce}^*-\text{Pr}/\text{Pr}^*$ in the study area

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, 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。研究的那底岗日地区布曲组碳酸盐岩烃源岩样品总体表现为轻稀土含量大于重稀土,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。研究区古地理研究表明:那底岗日地区布曲组沉积期发生了北羌塘最大规模的海侵,沉积水体逐渐加深,盐度逐渐恢复正常,那么可以认为,随着海侵的进行,在海平面不断上升的情况下,由于水体加深逐渐恢复正常, HREE 由于其迁移能力较强,从原来的沉积物中更多地被带走。可见该区碳酸盐岩重稀土亏损,轻稀土相对富集与布曲组沉积时期的海侵造成海平面上升的沉积环境有着密切的关系。

在稀土元素中, Ce 具有最不稳定的 4f 亚层结构, Ce^{3+} 给出一个 4f 电子而成为 Ce^{4+} , 并转化为惰性气体氙的结构。尤其在海水 Eh、pH 范围内, Ce^{3+} 更容易转变为 Ce^{4+} 而水解,故海水中明显贫 Ce; Ce 负异常的存在是海相环境特点一个指标。一般认为,海相碳酸盐岩相中的 Ce 异常取决于古海洋底的氧化还原条件,如海水在还原状态,所有的 Ce 将变为三价且伴随三价的 La,其结果呈正常的 REE 模式;如海水在氧化环境,海水中 Ce 亏损,结果则形成 Ce 亏损的碳酸盐岩稀土模式^[13]。王中刚等^[1]研究了沉积相展布与 Ce 异常关系表明,在边缘海、浅海区、被陆地封闭的海中, Ce 浓度基本正常,亏损不严重;在外海、开阔海域, Ce 亏损严重。因此,沉积体系中的 Ce 异常可以直接反映沉积介质的 Eh、pH 及水深条件的变化,但是常受到陆源及后期成岩作用的影

响。研究区那底岗日布曲组碳酸盐岩烃源岩在消除了陆源来源的 Ce 叠加影响之后, Ce 与 Ca 具有相关性(图 5a)表明碳酸盐岩烃源岩中的 Ce 来自海水成因而非陆源; Ce 异常在后期成岩作用中会改变^[21, 22], 只有当 $(\text{La}/\text{Sm})_N > 0.35$, 且 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 与 Ce 异常无相关性时, Ce 异常才代表形成时的古水化学条件^[23]。研究区碳酸盐岩样品的稀土分配模式曲线比较平坦(图 3), 其 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 比值介于 0.95 ~ 1.50 之间(表 2), 并且与 Ce/Ce^* 没有相关性(图 5b)表明 Ce 异常并未受到成岩成矿作用的影响,也未受到风化作用的影响,因此, Ce 异常可基本反映研究区古水介质及沉积环境。由于北羌塘布曲组沉积时期发生海侵,沉积水体逐渐加深,研究的布曲组烃源岩 Ce/Ce^* 为 0.83 ~ 0.93, 平均为 0.88, Ce 弱负异常,说明中侏罗布曲组沉积期的海水总体面貌是弱氧化的环境; Ce/Ce^* 在从下至上在剖面上也有微弱的波动(图 2), 这可能是由于研究区古海水随着海侵扩大、海平面上升、底层海水的循环程度改善,局部氧化还原条件有所改善而呈现波动有关。

Eu 有 Eu^{2+} 和 Eu^{3+} 两种价态。在碱性、氧化条件下, Eu^{2+} 可以氧化成 Eu^{3+} ; 而在强酸性、还原条件下可以还原成 Eu^{2+} 。现代海水中 Eu 以三价态出现,但在强酸性还原环境中, Eu^{3+} 将被还原而迁移: $\text{Eu}^{3+} + e^- = \text{Eu}^{2+}$ 。因此,一般 $\text{Eu}/\text{Eu}^* > 1$ 表示 Eu 正异常,指示还原环境; $\text{Eu}/\text{Eu}^* < 1$ 表示 Eu 负异常,指示氧化环境^[24]。研究区那底岗日布曲组碳酸盐岩烃源岩的 Eu 在消除了陆源来源的 Eu 叠加影响之后, Eu 与 Ca 也呈现较好相关性(图 5c), 表明碳酸盐岩烃源岩中的 Eu 也可能为海水成因形成的; 刘士林^[25]等在文中指出国外学者 Shields 等通过对稀土元素的研究指出成岩作用可以改变 Ce 异常值,通常会导

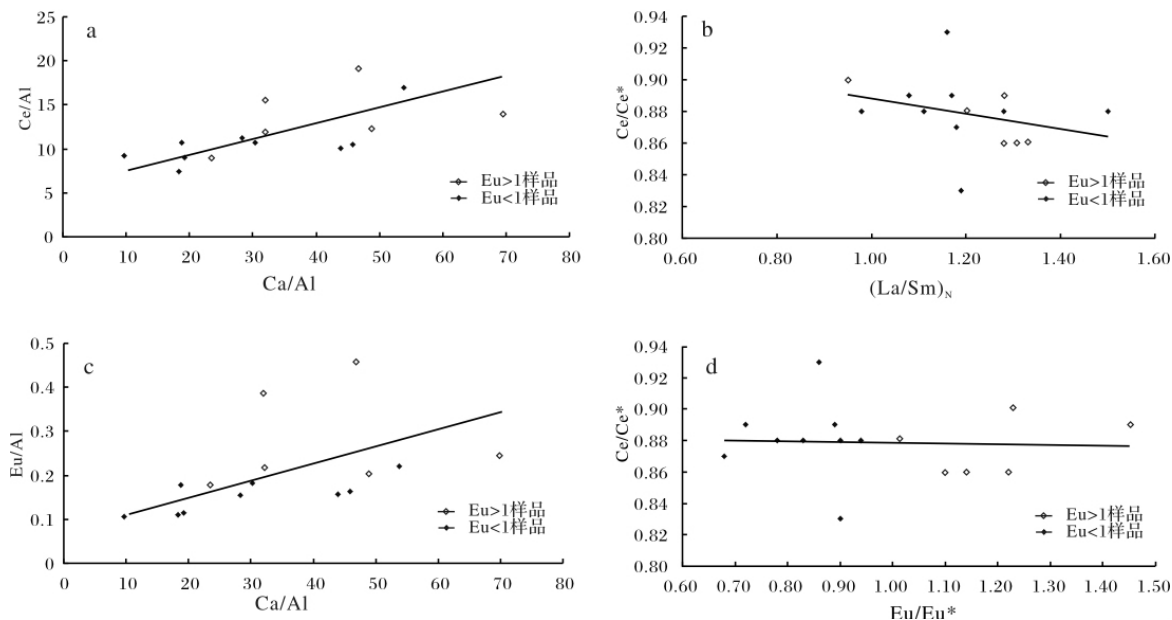


图5 研究区碳酸盐岩烃源岩 $Ce/Al-Ca/Al$ 、 $Ce/Ce^*-(La/Sm)_N$ 、 $Eu/Al-Ca/Al$ 和 $Ce/Ce^*-Eu/Eu^*$ 图解

Fig. 5 The relationship between $Ce/Al-Ca/Al$, $Ce/Ce^*-(La/Sm)_N$, $Eu/Al-Ca/Al$ and $Ce/Ce^*-Eu/Eu^*$ in the study area

Ce^* 与 Eu/Eu^* 具有较好的相关性。研究的样品 Ce/Ce^* 与 Eu/Eu^* 均无明显相关性(图 5d), 表明成岩作用对它的影响也十分有限。因此, 研究区得 Eu 异常基本可以代表沉积物和海水的原始信息。研究的布曲组碳酸盐岩烃源岩样品中, Eu/Eu^* 值为 0.68 ~ 1.58, 均值为 0.97, 反映那底岗日地区布曲组沉积期水体总体为弱氧化的环境, 同时部分样品如 NP-24²、NP-30²、NP-32、NP-33 及 NP-38 大于 1, 反映了还原环境。地球化学方面, 在研究区布曲组碳酸盐岩烃源岩中均检测到一定含量的伽马蜡烷, 它通常被认为形成于还原环境, 且与水体的分层有关^[26]。据研究, 水体分层的程度及水体的厚度、横向范围等最终取决于气候循环, 也可能受到水深变化影响, 海平面上升有利于水体分层; 反之, 则不利于水体分层^[24-27]。Wilde^[28] 等研究则认为, 海平面上升, 底层水体溶解氧浓度降低; 海平面下降, 底层水体溶解氧浓度升高。研究的布曲组沉积时期海平面处在快速上升时期, 有利于水体分层, 这样可能会造成部分底层水体溶解氧浓度降低, 显示还原环境。鉴于以上解释, 可认为研究区布曲组碳酸盐岩烃源岩样品的稀土元素特征大体反映了当时的沉积环境: 羌塘盆地那底岗日布曲组沉积时期, 由于班公错—怒江断裂带拉张事件和中央隆起带转为沉降的影响, 盆地内发生大规模海侵, 古陆消沉并被海水淹没, 气候半温暖、半干热, 形成北羌塘最大海侵期的较深水台地相泥晶灰岩、泥灰岩夹颗

粒灰岩等碳酸盐岩沉积, 沉积水体盐度逐步恢复正常, 总体上表现为弱氧化的环境(Ce 亏损不严重)。同时由于海侵的不断扩大及水体分层影响, 部分底层水体由于缺氧而变为还原环境(部分样品 Eu 正异常)。

4 结论

(1) 羌塘盆地那底岗日地区布曲组烃源岩样品稀土总量(ΣREE) 含量较低, 轻重稀土元素分馏中等, 相对富集轻稀土, 亏损重稀土, Ce/Ce^* 值为 0.83 ~ 0.93, 平均为 0.88, 显弱负异常; Eu/Eu^* 值为 0.68 ~ 1.58, 大部分样品的 Eu 为弱负异常, 部分样品 Eu 正异常。

(2) 羌塘盆地那底岗日地区布曲组碳酸盐岩烃源岩样品标准化模式总体上表现为轻稀土相对富集, 重稀土亏损, $La-Eu$ 段轻稀土配分曲线表现为略微“右倾”, 说明轻稀土元素之间的分馏程度中等; $Gd-Lu$ 具有段重稀土配分曲线较为平坦、斜率较小, 表明重稀土元素之间的分馏程度较低。

(3) 羌塘盆地那底岗日地区布曲组碳酸盐岩烃源岩样品的稀土元素特征大体反映了当时总体为沉积水体较深的弱氧化的沉积环境, 随着海侵的不断扩大和水体分层影响, 部分底层水体由于缺氧而变为还原环境。

致谢 审稿专家、编辑等对该论文提出了宝贵修

改意见 在此谨表谢意。

参考文献 (References)

- 1 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]
- 2 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]
- 3 Henderson P. General geochemical properties and abundances of the rare elements[C]//Henderson P, ed. Rare Earth Element Geochemistry[M]. New York: Elsevier, 1984: 1-30
- 4 Haskin L A, Gehl M A. The rare earth distribution in sediment [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67: 2537-2541
- 5 Wang Y L. Rare earth element geochemistry of South Atlantic deep sea sediments Ce anomaly change at 54 My [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1986, 50(10): 1337-1355
- 6 Piper D Z. Rare earth elements in the sedimentary cycle: a summary [J]. Chemical Geology, 1974, 14(4): 285-304
- 7 樊金涛. 江苏连云港—淮阴地区前寒武系沉积岩稀土地球化学及其时代[J]. 地质论评, 1993, 39(5): 381-389 [Fan Jintao. Age and REE geochemistry of pre-Cambrian sedimentary rocks in Lianyungang-Huaiying area of Jiangsu Province [J]. Geological Review, 1993, 39(1): 381-389]
- 8 刘建清, 贾保江, 杨平, 等. 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[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 28-38 [Liu Jianqing, Jia Baojiang, Yang Ping, et al. Characteristics of the paleo-oil reservoir dolomite REE geochemistry of Buqu Formation in the southern part of the central uplift zone of Qiangtang Basin and its significance [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 28-38]
- 9 周瑶琪, 柴之芳, 毛雪瑛, 等. 混合成因模式—中国南方二叠—三叠系界线地层元素地球化学及其启示[J]. 地质论评, 1991, 37(1): 52-62 [Zhou Yaoqi, Chai Zhifang, Mao Xueying, et al. A mixing model—the elemental geochemistry of Permian-Triassic boundaries in South China and its implications [J]. Geological Review, 1991, 37(1): 51-63]
- 10 李洪英, 赫英, 杨磊, 等. 鄂尔多斯盆地东南缘煤中沥青微量元素和稀土元素特征[J]. 新疆石油地质, 2008, (4): 159-162 [Li Hongying, He Ying, Yang Lei, et al. Characteristics of bitumen trace elements and rare earth elements of coal in southeastern margin of Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, (4): 159-162]
- 11 陈文彬, 廖忠礼, 付修根, 等. 北羌塘盆地布曲组烃源岩生物标志物特征及意义[J]. 沉积学报, 2007, 25(5): 808-814 [Chen Wenbin, Liao Zhongli, Fu Xiugen, et al. Biomarker characteristics and significance of hydrocarbon source rocks in Buqu Formation of the North Qiangtang Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(5): 808-814]
- 12 谢渊, 罗建宁, 张哨楠, 等. 羌塘盆地那底岗日地区中侏罗世碳酸盐岩碳、氧、锶同位素与古海洋沉积环境[J]. 矿物岩石, 2000(1): 80-86 [Xie Yuan, Luo Jianning, Zhang Shaonan, et al. Paleooceanic sedimentary environment during the middle Jurassic in Nadi-gangri area, Qiangtang basin [J]. Journal of Mineral and Petrology, 2000, 20(1): 80-86]
- 13 伊海生, 彭军, 夏文杰. 扬子东南大陆边缘晚前寒武纪古海洋演化的稀土元素记录[J]. 沉积学报, 1995(4): 131-136 [Yi Haisheng, Peng Jun, Xia Wenjie. The Late Precambrian Paleoocean evolution of the southeast Yangtze continental margin: REE record [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, (4): 131-136]
- 14 伊海生, 林金辉, 赵西西, 等. 西藏高原沱沱河盆地渐新世—中新世湖相碳酸盐岩稀土元素地球化学特征与正铕异常成因初探[J]. 沉积学报, 2008(2): 1-10 [Yi Haisheng, Lin Jinhui, Zhao Xixi. Geochemistry of rare earth elements and origin of positive europium anomaly in Miocene-Oligocene lacustrine carbonates from Tuotuohe Basin of Tibetan Plateau [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, (2): 808-84]
- 15 Lyons T W, Werne J P, Hollander D J, et al. Contrasting sulfur geochemistry and Fe/Al and Mo/Al ratios across the last oxic to anoxic transition in the Cariaco Basin, Venezuela [J]. Chemical Geology, 2003, 195: 131-157
- 16 Reitz A, Pfeifer K, de Langeiogenic G J, et al. Biogenic barium and the detrital Ba/Al ratio: a comparison of their direct and indirect determination [J]. Marine Geology, 2004, 204: 289-300
- 17 Bau M, Dulski P. Distribution of yttrium and rare earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa [J]. Precambrian Research, 1996, 79: 27-55
- 18 Lee J H, Byrne R H. Complexation of trivalent rare earth elements (Ce, Eu, Gd, Tb, Yb) by carbonate ions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 295-302
- 19 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
- 20 Cullers R L, Basu A, Suttner L J. Geochemical signature of provenance in sand-size minerals in oil and stream near the tobacco root batholith, Montana, USA [J]. Chemical Geology, 1988, 70: 335-348
- 21 Johannesson K H, Zhou X P. Origin of middle rare earth element enrichments in acid waters of a Canadian high arctic lake [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(1): 153-165
- 22 Elderfield H, Upstillgoddard R, Sholkovitz E R. The rare earth elements in rivers, estuaries, and coastal seas and their significance to the composition of ocean waters [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1990, 54(4): 971-991
- 23 Sholkovitz E R, Landing W M, Lewis B L. Ocean particle chemistry—the fractionation of rare earth elements between suspended particles and seawater [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(6): 1567-1579
- 24 熊国庆, 王剑, 胡仁发. 贵州梵净山地区震旦系微量元素特征及沉积环境[J]. 地球学报, 2008, (1): 51-60 [Xiong Guoqing, Wang Jian, Hu Renfa. Trace element characteristics and sedimentary

- environment of the Sinian system of the Fanjingshan area in Guizhou province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, (1): 51-60]
- 25 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2006, 20(3): 449-456 [Liu Shilin, Liu Yunhua, Lin Ge, *et al.* REE geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Neogene, Nanpu Sag, Bohai Basin[J]. *Geoscience*, 2006, 20(3): 449-456]
- 26 Mackenzie A S, Hoffmann C F, Maxwell J R. Molecular parameters of maturation in the Toarcian shales, Paris Basin, France—III. Changes in aromatic steroid hydrocarbons[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(8): 1345-1355
- 27 Schutter S R. Petrology clay mineralogy, paleontology and depositional environments of four Missourian(Upper Pennsylvanian) shales of Mid-continent and Illinois Basin [J]. *Dissertation Abstract International (section B)*, 1983, 44(12): 36-93
- 28 Wilde P, Quinby-Hunt M S, Edrmlnna B D. The whole-rock cerium anomaly: a potential indicator of eustatic sea-level changes in shales of anoxic facies[J]. *Sedimentary Geology*, 1996, 101: 43-53

REE Characteristics and Its Geological Significance of Buqu Formation Carbonate Source Rocks in Nadigangri Area, Qiangtang Basin of Tibet

CHEN Wen-bin^{1 2} TAN Fu-wen¹ YI Hai-sheng² FU Xiu-gen¹ FENG Xing-lei¹

(1. Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, Chengdu 610081;

2. Institute of Sedimentary Geology of Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract Rare earth element concentrations were determined in 15 Middle Jurassic carbonate source rocks from Buqu Formation in Nadigangri area, Qiangtang basin of Qinghai-Tibet Plateau. The results show that analyses of the REEs, especially ΣREE , Ce/Ce^* values and Eu/Eu^* values change regularly, which are closely related to its sedimentary environment. The total REE contents (ΣREE) of Buqu Formation marine carbonate source rocks cover a range from 20.58 $\mu\text{g}/\text{g}$ to 75.21 $\mu\text{g}/\text{g}$, and the average value of all samples is 36.67 $\mu\text{g}/\text{g}$. The NASC (North American Shale Composite) normalized REE patterns display low REE enrichments and relatively high REE loss, the LREE patterns are a little rightward heeling, and the HREE patterns are flat. However, the different ΣLREE and ΣHREE in the samples infer that REE was removed and HREE was more easily removed than LREE, sedimentary environment evolution may be in sound relationship with rising of the sea level rising. They all have slightly negative Ce anomalies (Ce/Ce^* values are from 0.83 to 0.93, and the average is 0.88), most of them have slightly negative Eu anomalies, and others have positive Eu anomalies (Eu/Eu^* values are from 0.68 to 1.58, and most of them are less than 1). These features are probably due to the geochemistry of weak oxidation of sedimentary environment for Buqu Formation carbonate source rocks in Nadigangri area of Qiangtang basin, but with vertical variation of both sedimentary environment and water column stratification. Being the continuous of expansion of transgression and the water column's stratification effects, some water column in the bottom become into reducing environment for lacking of oxygen.

Key words Qiangtang Basin; Nadigangri area; Buqu Formation; carbonate source rocks; REE