

内蒙古苏尼特左旗地区敖包亭浑迪组砂岩地球化学特征及物源分析

杨志新¹, 游国庆¹, 童英¹, 李佳林^{1,2}, 贾孝新¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 苏尼特左旗达来苏木地区位于中亚造山带东南部, 索伦缝合带之北, 发育特征性的下泥盆统敖包亭浑迪组变火山-沉积岩系。这套地层主要由安山岩、凝灰质砂岩、砂岩、粉砂岩以及火山碎屑岩等组成, 磨圆度较差, 具有近源沉积特征。地球化学分析结果显示, 砂岩的 SiO_2 和 K_2O 含量中等, Na_2O 含量较高, Fe_2O_3 和 MgO 含量较低; 微量元素蛛网图呈右倾型, 含量和变化趋势与上地壳相似; 稀土元素配分特征显示轻稀土富集、重稀土亏损, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均为 6.44, 负 Eu 异常明显 (Eu/Eu^* 平均为 0.72)。综上并结合区域分析显示砂岩形成于活动大陆边缘和大陆岛弧, 源岩主要为英安岩和部分安山岩, 进而推测在早泥盆世古亚洲洋仍处于向北俯冲的构造环境, 敖包亭浑迪组的物源应主要为北部的乌里雅苏台地区上地壳长英质岩系。

关键词: 地球化学; 物源分析; 构造背景; 砂岩; 敖包亭浑迪组; 苏尼特左旗

中图分类号: P588.21+2.3; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)03-0434-11

Geochemical characteristics and provenance analysis of the sandstone from Obootingundi Formation in Sonid Left Banner, Inner Mongolia

YANG Zhi-xin¹, YOU Guo-qing¹, TONG Ying¹, LI Jia-lin^{1,2} and JIA Xiao-xin¹

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Sonid Left Banner area, located in the southeast of the Central Asian Orogenic Belt and north of the Suolun suture zone, develops a characteristic volcanic-sedimentary rock series of the Lower Devonian Obootingundi Formation. The strata are mainly composed of andesite, tuffaceous sandstone, sandstone and siltstone as well as pyroclastic rock. The rock has poor roundness and shows near-source sedimentary characteristics. The results of geochemical analysis show that the sandstone has medium SiO_2 and K_2O content, high Na_2O content, and low Fe_2O_3 and MgO content. Trace elements show right-inclined feature on the spider map, and the content and change trend are similar to those of the upper crust; rare earth element distribution characteristics display LREE-enrichment but HREE-depletion. The average $(\text{La}/\text{Yb})_N$ is 6.44, and the Eu anomaly is obvious (Eu/Eu^* average 0.72). Combined with regional analysis, the authors hold that the sandstone was formed on the active continental margin and the continental island arc. The source rocks are mainly metamite with minor andesite, and it is inferred that the Early Devonian paleo-Asian ocean was still in a tectonic setting of northward subduction. The source of the Obootingundi Formation should mainly be the upper crust felsic rock series of the Uliastai area in the north.

Key words: geochemistry; provenance analysis; tectonic setting; sandstone; Obootingundi Formation; Sonid Left Banner

收稿日期: 2017-03-14; 接受日期: 2018-04-08

基金项目: 中国地质调查资助项目(DD20160345, DD20160102)

作者简介: 杨志新(1992-), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yangzx0122@126.com; 通讯作者: 游国庆(1964-), 男, 副研究员, 主要从事区域构造地质研究, E-mail: youchina@126.com.

Fund support: China Geological Survey Project(DD20160345, DD20160102)

中亚造山带位于西伯利亚板块、塔里木和华北板块之间(Sengör *et al.*, 1993; Windley *et al.*, 2007; Jian *et al.*, 2008),它是由古亚洲洋中一系列的微陆块、蛇绿岩带、岛弧带、增生楔等长期向南增生而形成的(Sengör *et al.*, 1993; Badarch *et al.*, 2002; Windley *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2009, 2012)。关于古亚洲洋的演化一直是地学界重点研究的科学问题之一,特别是古亚洲洋洋盆最终关闭的时限问题,仍存在不同的认识。索伦缝合带作为古亚洲洋东段的最终闭合带获得了大部分学者的认可(陈斌等, 2000; Xiao and Windley, 2003; Jian *et al.*, 2008, 2010),该缝合带大致呈 NEE 走向(Jahn, 2004),位于南蒙古板块和华北板块之间,由多个代表不同构造环境的杂岩拼贴而成,所以索伦缝合带的形成时限代表古亚洲洋最终闭合时限。大多数学者认为索伦缝合带形成于晚古生代-早中生代(Xiao and Windley, 2003; 韩宝福等, 2006; Windley *et al.*, 2007; 李锦轶等, 2007),但也有学者认为形成于晚泥盆世-早石炭世(洪大卫等, 1994),甚至还有学者依据内蒙古苏左旗南部晚泥盆世的浊积岩判断索伦缝合带在晚泥盆世之前就形成了(Xu *et al.*, 2013)。显然,索伦缝合带及邻近地区泥盆纪地层的沉积特性及其反映的构造属性研究是解决古亚洲洋演化重大科学问题的重要方面。然而,沉积地层中砂岩岩石学和地球化学特征记录了地质历史时期沉积物源、古环境等信息,对于沉积盆地演化历史的研究和古地理环境分析具有重要地质意义。

苏尼特左旗达来苏木地区在大地构造位置上处于中亚造山带东南部,索伦-苏尼特左旗-林西缝合带的北部,发育下泥盆统敖包亭浑迪组沉积-火山岩系。对于这套地层中砂岩岩石地球化学的研究,能够明晰敖包亭浑迪组砂岩沉积物的源区特征,推测地层形成的大地构造背景,可以为深化中亚造山带构造演化的认识提供地质依据。

1 区域地层

研究区主要出露中下奥陶统乌宾敖包组、下泥盆统敖包亭浑迪组、下二叠统宝力格组、上侏罗统特诺尔组以及新生代地层和侵入其中的花岗岩(图1)。敖包亭浑迪组地层呈北东向展布,出露于白音

宝力格公社至吉尔嘎郎图大队及国境线一带。岩石类型主要为砂岩、粉砂岩、凝灰岩和火山碎屑岩,由于受到区域构造和区域变质作用的影响,岩层构造变形强烈,轻微变质。

根据内蒙古区域地质调查报告,敖包亭浑迪组地层可划分为2个岩性段(图2),岩性段之间为断层接触。第1岩段位于敖包亭浑迪组底部地层,主要为黄绿色变质粉砂岩、变质砂岩、变泥岩夹蚀变安山岩、变质砾岩。累计厚度大约2 420 m以上。第2岩段位于上部敖包亭浑迪组地层,依据岩性组合特征又可分为上部和下部,上部地层主要为灰褐色含生物碎屑沉凝灰岩、粉砂质泥岩夹生物碎屑灰岩透镜体;下部地层主要为黄绿色片理化长石石英细砂岩、硅化泥板岩、结晶灰岩夹凝灰质细砂岩、变质粉砂岩。该地层含动物化石,如 *Megastrophia Pseudointerstitialis*、*Coelospirella orientalis*、*Rhytistrophia beckett*、*Odontochile deleshanense*、*Ptychopieria* (*Actinopteria*) *maxima* 等。累计厚度大约1 000 m以上。

2 样品特征与分析方法

2.1 样品特征

本次样品采集地点位于内蒙古苏尼特左旗达来苏木地区(图1),层位上处于下泥盆统敖包亭浑迪组下部(图2),共采集21件碎屑岩样品。采集的样品主要包括凝灰质砂岩和粉砂岩,其中粉砂岩主要为细粒结构,颗粒分选较好,磨圆一般,以次圆状为主,颗粒支撑,接触式胶结(图3a)。成分主要为石英、长石和黑云母,石英含量约75%~85%,长石以斜长石为主(图3b),含量约5%~15%,黑云母含量约5%,基质主要为粘土物质和少量火山灰,含量约5%,部分长石发生绿泥石化(图3c);砂岩主要为凝灰质砂岩,细粒结构,主要由石英、岩屑和少量长石组成,磨圆一般,主要为次圆状,石英含量约70%,岩屑含量约10%,主要为石英岩岩屑和火山岩岩屑,填隙物以火山灰为主,多为隐晶质,约占15%(图3d)。

2.2 实验分析方法

样品清洗、磨片、碎样等制备工作由河北省廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成。21件样品主量、微量及稀土元素分析由国家地质实验测试中心和澳实分析检测(广州)有限公司共同完成,其中主

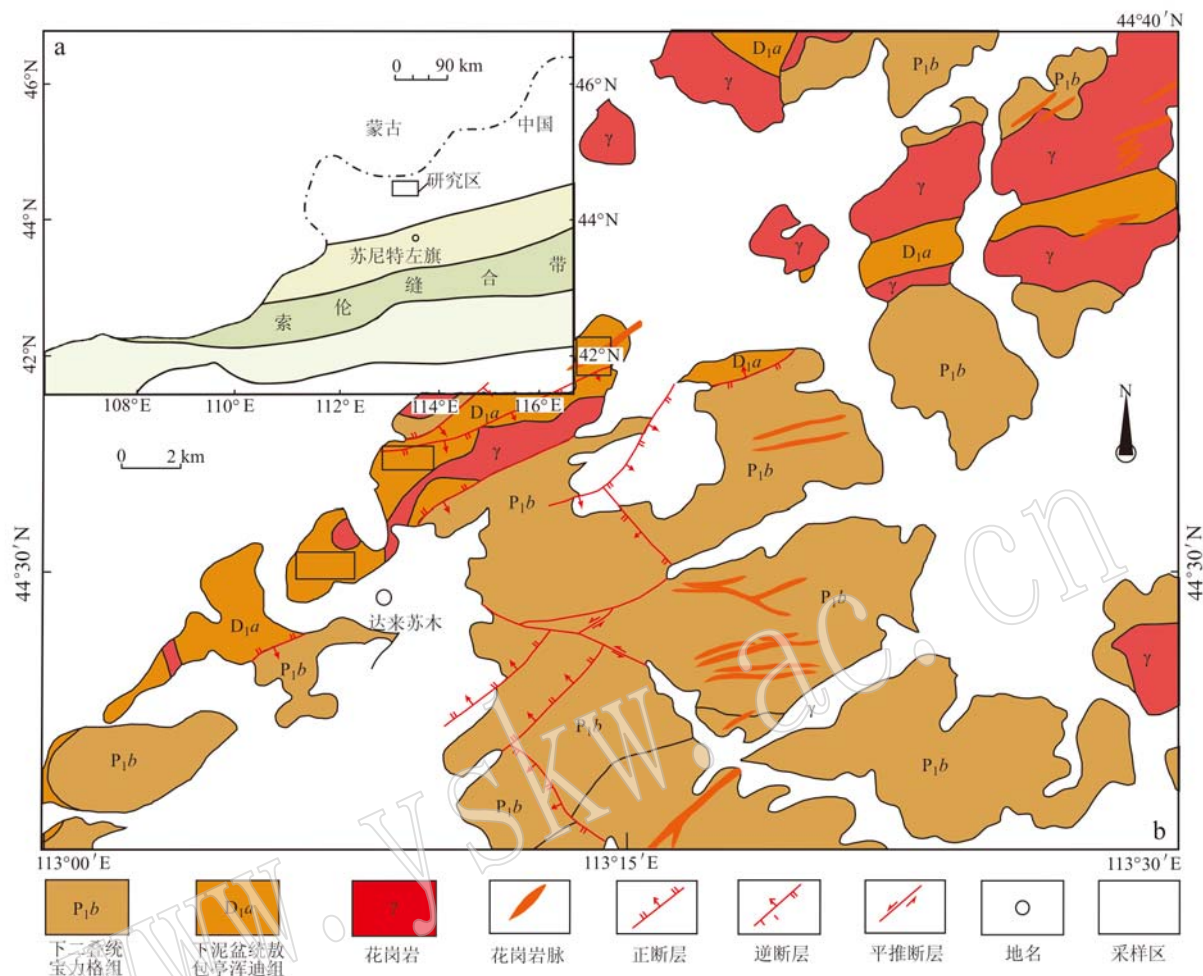


图1 研究区大地构造位置图(a, 据内蒙古区调四队, 1980^①)和内蒙古达拉苏木地区地质图(b, 据 Zhang *et al.*, 2013)

Fig. 1 Tectonic position (a, modified after No. 4 Inner Mongolia Regional Geological Survey Party, 1980^①) and geological map (b, modified after Zhang *et al.*, 2013) of the Dalaisumu area in Inner Mongolia

量元素采用 X 射线荧光光谱仪(PW4400)测定(依据 GB/T14506.28-2010)、稀土元素和微量元素采用等离子质谱仪(X-series)(依据 DZ/T0233-2001)测定,分析精度优于 5%~10%。

3 测试数据处理分析

砂岩主量、微量及稀土元素测试结果见表 1。

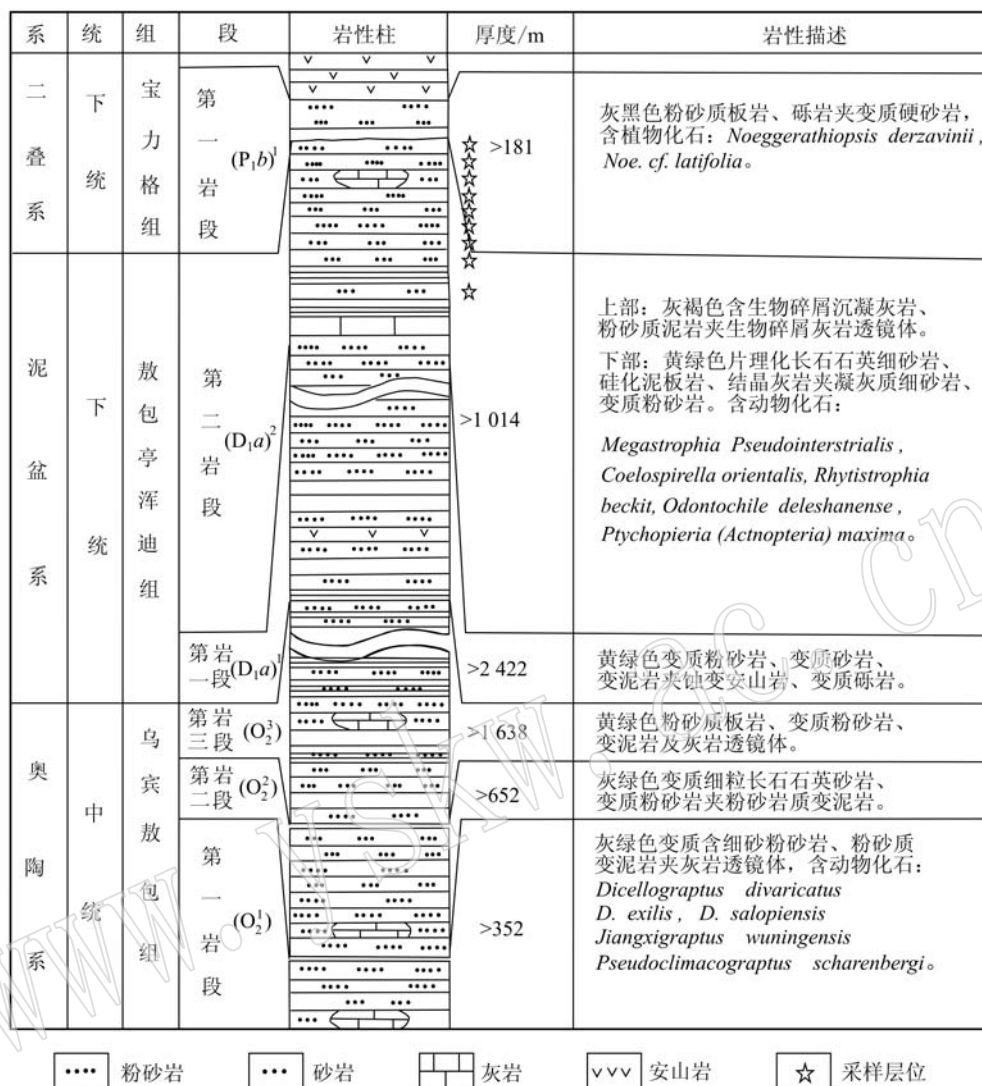
砂岩化学蚀变指数 CIA(Nesbitt *et al.*, 1982)和化学风化指数 CIW(Harnois, 1988)代表了源岩物质受风化程度,其数值越大代表风化程度越强。研究区敖包亨浑迪组砂岩 CIA 指数值介于 58.24%~

72.54%之间,平均为 64.00%,指示低-中等化学蚀变程度;CIW 指数值介于 63.58%~83.25%之间,平均为 71.55%,其中样品 D15827-1 的 CIW 值为 91.46,可能受后期风化较严重,但总体指示低-中等化学风化程度。CIA 指数和 CIW 指数指示研究区岩石风化程度较弱,其地球化学指标数可以真实反映沉积岩源区的信息。

3.1 主量元素

砂岩主量元素测试结果显示,砂岩具有 SiO₂ 含量中等(59.59%~72.06%),除个别样品外 K₂O 总体上含量中等,相对而言 Na₂O(绝大部分 >3%)、Al₂O₃(14.12%~17.49%)含量较高,CaO(<3.98%)、

① 内蒙古区调四队. 1980. 白音乌拉幅(L49-XXXVI)1:20 万区域地质调查报告.

图2 内蒙古达拉苏木地区下泥盆统敖包亭浑迪组地层柱状图(据内蒙古区测三队, 1979)^①Fig. 2 Stratigraphic columnar section of the Lower Devonian Oobootingundi Formation in Dalaisumu area of Inner Mongolia (modified after No. 3 Inner Mongolia Regional Geological Survey Party, 1979)^①

Fe_2O_3 ($<3.98\%$) 和 MgO (多数 $<3\%$) 含量则明显偏低。

3.2 稀土元素

稀土元素(REE)具非迁移性,在沉积岩中的稀土含量主要受源区岩石的元素丰度以及源区风化条件的控制,沉积过程和沉积后成岩过程对REE含量的改变比较微小,源区岩石的REE性质可以很好保存在沉积岩中(Bhatia, 1985b; Taylor and McClenan, 1985; Gu *et al.*, 2002)。

稀土元素配分模式总体呈右倾型,轻稀土富集,

重稀土相对亏损,呈现较明显的负Eu异常(Eu/Eu^* 平均为0.72)(图4a),稀土元素总量相对较高, ΣREE 变化范围为 $87.04 \times 10^{-6} \sim 206.42 \times 10^{-6}$ (表1),平均为 134.11×10^{-6} (表2), $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 平均为6.44(表2), LREE/HREE 平均为6.50(表2)。

3.3 微量元素

在测试的样品微量元素含量(表1)中,富集大离子亲石元素(Rb、Sr、Ba的平均含量分别为 89.5×10^{-6} 、 361.0×10^{-6} 、 587.9×10^{-6})和高场强元素(Th、Nb、Zr平均含量分别为 10.1×10^{-6} 、 8.8×10^{-6} 、

① 内蒙古区测三队, 1979. 达拉幅(L49-XXXV)1:20万区域地质调查报告。

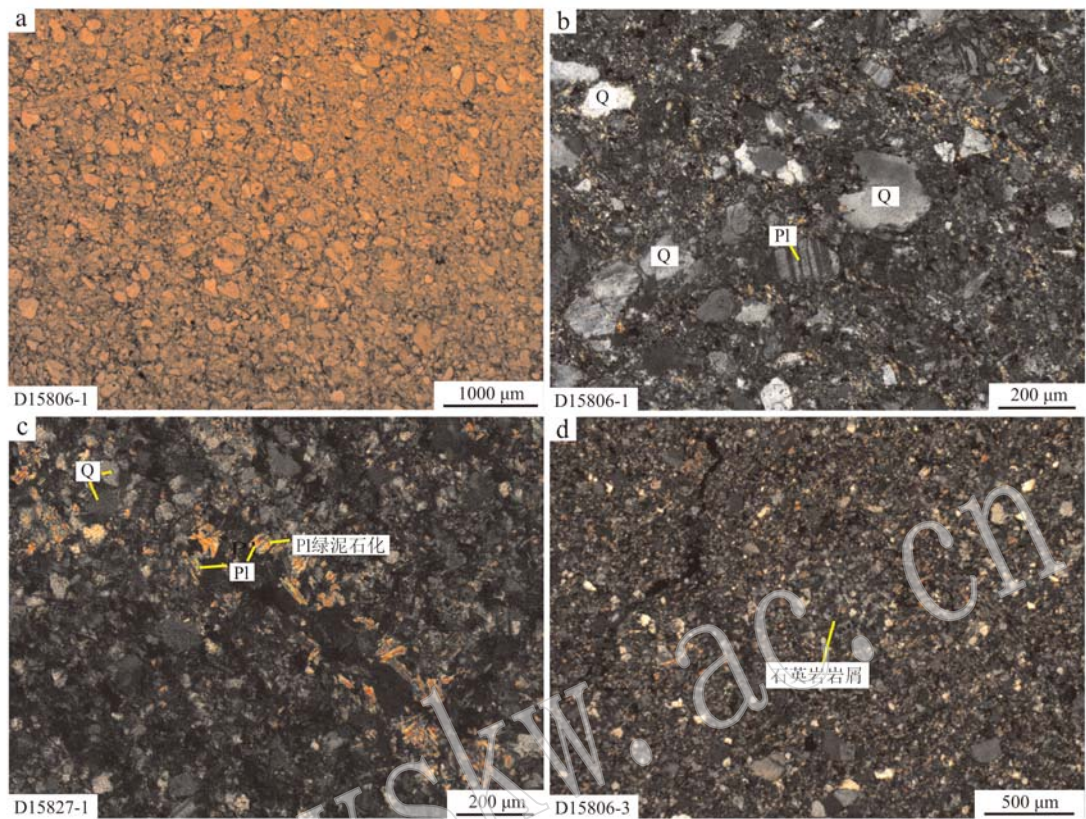


图 3 内蒙古达拉苏木地区敖包亨浑迪组砂岩显微照片

Fig. 3 Microphotograph of sandstone rocks of Obootinghundi Formation in Dalaisumu area of Inner Mongolia

Q—石英; Pl—斜长石

Q—quartz; Pl—plagioclase

217.8×10^{-6}), 具有明显的 Nb、Ta、Ti 的负异常(图 4b)。

沉积岩微量元素 La、Ce、Y、Th、Sc 等活动性较弱,在风化、搬运和沉积过程中能定量转移到碎屑沉积物中,因而可以较好地反映母岩性质和其形成时

期构造环境。将砂岩样品部分微量元素含量及比值与典型大地构造环境下砂岩微量元素含量与比值进行对比(表 2),发现元素 Sc 含量与大陆岛弧环境下砂岩 Sc 含量大致相同,La/Th、La/Y、La/Sc 比值与大陆岛弧砂岩比值几乎相同,综合考虑这些微量元

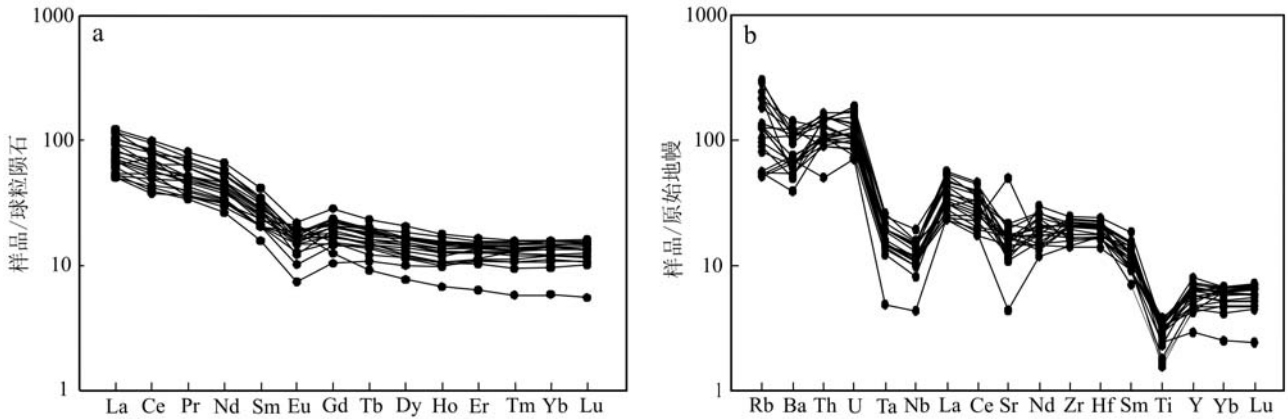


图 4 敖包亨浑迪组砂岩稀土元素配分曲线(a, Henderson, 1984)及微量元素蛛网图(b, McDonough and Sun, 1995)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns(a, after Henderson, 1984) and trace elements spider diagram of sandstone of Obootinghundi Formation(b, after McDonough and Sun, 1995)

素含量与比值可以判定源岩形成时的构造环境可能为大陆岛弧环境。

4 讨论

4.1 物源区判别

稀土元素能够反映沉积岩源岩的地球化学特征,在指示源岩性质时有重要的意义(Cullers and Podkovyrov, 2000)。由表1可知,敖包亭浑迪组砂岩的 δEu 介于0.51~1.13之间,有较为明显的负Eu异常。样品的稀土元素配分模式呈现轻稀土富集、重稀土亏损和明显Eu负异常的特征,说明敖包亭浑迪组砂岩源岩主要来自于上地壳。

为了进一步验证砂岩的源岩,采用砂岩主量元素和微量元素的某些判别图解来分析砂岩的物源。

由表1可知,砂岩的CIA平均值为64%,说明沉积物经受的风化程度较弱,主量元素可以在某种程度上代表物源的性质(Nesbitt *et al.*, 1982)。Girty等(1996)研究指出,若沉积岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2 > 14$,则沉积物的物源主要为长英质,由表2中表明研究区样品中 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 的平均值为26.12,说明沉积物的物源主要为长英质。

Roser等(1988)通过研究提出了沉积岩常量元素物源判别方程,并提出了相应的判别图。在 F_2-F_1 判别图中(图5),样品点主要分布在长英质火山

岩区域内,少量落在中性火山岩和沉积岩区域内,说明样品沉积物的物源主要为长英质火山岩。

在碎屑岩中,K与Rb的相互关系能够反映沉积物物源的特征(Roser and Korsch, 1986)。从K-Rb图(图6)中可以得出源区物质沿岩浆演化趋势变化,沉积物主要集中在中酸性区域,指示沉积物的物源主要为长英质物质。

在 $\text{Th}/\text{Sc}-\text{Zr}/\text{Sc}$ 判别图(图7),样品主要沿岩浆演化趋势变化,其中沉积物的物源主要来自上地壳,原岩介于花岗岩和安山岩之间,可能主要为英安岩和少量的火山岩和花岗岩。

4.2 敖包亭浑迪组形成的构造环境及其构造意义

砂岩薄片鉴定中发现凝灰质砂岩,部分砂岩基质中发现大量火山灰,说明砂岩搬运距离岛弧较近,推测这部分砂岩形成时的构造背景为大陆岛弧。敖包亭浑迪组砂岩主量元素与典型大地构造背景下的砂岩主量元素相比较(表2),其 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 与上地壳砂岩主量元素非常吻合, Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 TiO_2 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ 与大陆岛弧和活动大陆边缘都很相似。在砂岩主量元素判别构造环境函数图解 $[\text{K}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) - \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3]$ 中, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 大致代表岩石中长石与石英的比例, $\text{K}_2\text{O}/(\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 大致代表岩石中钾长石和斜长石与白云母的比例。两组比值的变化指示构造环境为岛弧环境、活动大陆边缘、被动大陆边缘(Fang, 1993)。据图8a所示,研究区样品点绝大部分分布在活动大陆边缘和岛弧环境,其中只有一个样品点落在被动大陆边缘环境。

在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 - (\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 判别图中, $(\text{FeO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 大致代表样品中基性组分与长英质组分的比率,进化岛弧和成熟岩浆弧分别代表岛弧环境和活动大陆边缘环境(Gu *et al.*, 2002)。据图8b所示,研究区样品点主要分布在成熟岩浆弧和进化岛弧区。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图解(图8c)和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图8d)也给出了同样结果,大部分样品落入活动大陆边缘和岛弧环境。

稀土元素受沉积成岩过程的影响较小,主要受物源区性质的影响,敖包亭浑迪组砂岩与不同构造背景下砂岩稀土元素含量及比值对比,发现元素La、Ce含量及 $\sum \text{REE}$ 、 Eu/Eu^* 、 La/Yb 、 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 LREE/HREE 比值都更接近大陆岛弧环境下的数值

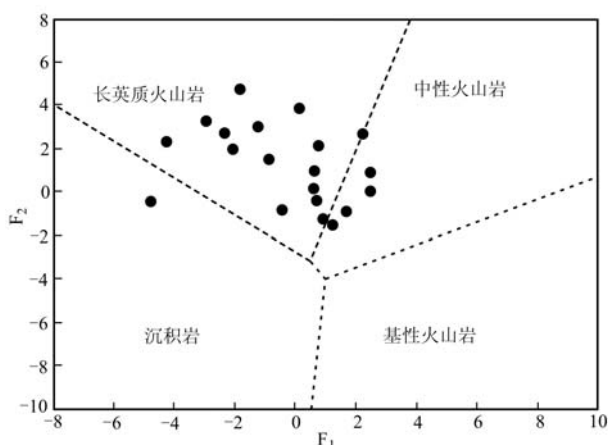


图5 砂岩常量元素源区判别函数图解(Girty *et al.*, 1996)

Fig. 5 The sandstone major element source area discriminant function plot(after Girty *et al.*, 1996)

$$F_1 = -1.773 \text{TiO}_2 + 0.607 \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.76 \text{Fe}_2\text{O}_3^T - 1.5 \text{MgO} + 0.616 \text{CaO} + 0.509 \text{Na}_2\text{O} - 1.224 \text{K}_2\text{O} - 9.09$$

$$F_2 = 0.445 \text{TiO}_2 + 0.07 \text{Al}_2\text{O}_3 - 0.25 \text{Fe}_2\text{O}_3^T - 1.142 \text{MgO} + 0.438 \text{CaO} + 1.475 \text{Na}_2\text{O} + 1.426 \text{K}_2\text{O} - 6.861$$

表1 敖包亭浑迪组砂岩主量元素($w_B/\%$)、微量元素和稀土元素($w_B/10^{-6}$)数据表及分析结果

Table 1 The analytical results of the major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of sandstone rocks in the Obootinghundi Formation																					
样品号	D158 06-1	D158 06-3	D158 7-2	D158 27-1	D158 27-2	D158 27-3	D158 27-6	D158 27-7	D178 4-2-6	D158 4-8-6	D178 4-2-10	D158 4-8-2	D158 4-8-4	D178 4-5-2	D178 4-5-3	D178 4-7-4	D178 4-2-7	D178 4-7-3	D178 4-7-5	D178 4-2-8	D178 4-6-1
SiO ₂	72.06	63.22	61.88	69.97	63.55	62.33	65.65	69.68	66.52	63.56	62.58	66.05	67.50	70.22	64.76	61.48	66.52	61.66	59.59	60.07	65.47
Al ₂ O ₃	14.32	15.45	15.09	15.69	15.61	17.01	14.73	14.12	14.48	16.93	17.49	15.39	15.87	15.4	16.59	15.92	14.48	15.08	16.14	16.12	16.83
CaO	0.71	3.89	3.30	0.95	2.94	2.16	2.72	3.62	3.21	1.20	1.88	1.84	1.58	0.86	0.51	2.62	3.21	3.98	3.33	3.01	2.70
Fe ₂ O ₃	2.02	2.18	2.93	1.53	2.04	1.07	1.14	1.67	1.94	2.18	2.11	1.88	1.53	1.22	2.33	2.78	2.39	3.42	3.98	3.61	2.03
K ₂ O	1.73	1.07	0.89	4.43	2.21	4.42	2.67	2.63	1.08	5.38	4.82	3.69	4.20	2.80	2.22	2.24	1.08	1.38	1.74	1.14	2.13
MgO	1.00	2.63	2.87	1.47	2.72	2.51	2.71	1.66	2.92	2.33	2.26	2.31	1.73	0.70	2.09	3.69	2.92	3.72	3.92	4.03	1.43
TiO ₂	0.72	0.66	0.61	0.60	0.59	0.34	0.72	0.78	0.72	0.81	0.83	0.79	0.53	0.39	0.71	0.68	0.37	0.72	0.65	0.63	0.50
Na ₂ O	4.74	4.96	5.08	0.56	3.54	2.90	5.17	3.01	4.83	2.34	4.17	3.93	3.29	4.42	4.52	4.07	4.83	4.27	4.24	5.27	4.35
LOI	1.46	2.22	3.65	3.14	1.36	1.99	0.78	0.81	0.94	1.64	1.04	0.93	1.04	1.83	2.51	1.81	0.94	1.63	2.10	1.82	1.80
Cr	27	111	100	28.30	108	77.80	91.50	40.50	150	70	70	60	60	20	130	180	150	200	200	170	10.00
Ga	16	18.20	18.20	21.90	16.20	18.10	15.10	15.90	19.90	21.90	19.50	17.80	17.90	16.90	19.20	18.70	15.60	18.70	21.40	20.50	22.00
Rb	57.30	35.60	35.10	183	79.30	135	81.20	66.80	138	192.5	154.5	116.5	137.5	86.20	82.90	83.00	32.80	51.70	61.10	35.30	33.60
Sr	229	348	306	92.4	392	455	260	313	453	241	409	343	346	359	245	351	285	373	362	363	1 055
Ba	349	526	274	816	451	994	854	762	363	734	763	839	665	770	427	519	462	444	467	378	488
Th	13.10	8.78	8.39	12.10	7.75	10.70	7.67	11.10	9.26	14.00	12.55	13.25	13.00	8.99	12.45	9.11	9.53	8.90	8.49	7.68	4.30
U	2.85	2.41	2.01	3.94	2.13	2.16	1.81	2.17	2.64	3.43	3.68	2.60	2.82	1.57	3.23	2.42	2.27	1.97	2.20	1.78	1.50
Nb	10.30	8.32	7.84	11.30	7.04	9.35	7.02	9.97	8.20	13.80	10.40	10.80	11.00	5.80	10.60	8.00	8.60	7.60	7.60	7.70	3.10
Ta	0.80	0.66	0.62	1.07	0.58	0.77	0.55	0.80	0.60	1.00	0.80	0.80	0.90	0.50	0.80	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.20
Zr	233	198	259	162	177	227	187	183	200	236	246	230	226	187	277	225	266	249	228	219	158
Hf	6.58	5.45	6.85	5.28	5.04	6.39	5.06	5.23	5.50	6.70	6.60	6.50	6.10	5.10	7.40	6.10	7.00	6.60	6.00	5.50	4.30
La	20.30	21.70	16.00	17.10	19.20	36.80	21.70	29.70	25.5	32.90	37.1	32.10	29.9	26.4	38.8	17.20	22.40	24.10	16.00	22.5	16.50
Ce	59.00	44.70	31.00	32.40	35.90	64.60	40.70	52.60	58.20	67.90	79.30	70.40	65.60	52.60	82.30	44.70	47.30	50.20	34.50	47.50	40.60
Pr	5.32	6.44	4.52	4.21	5.00	8.98	5.95	7.91	6.43	7.55	9.06	8.32	7.54	6.23	10.15	4.45	5.89	6.48	4.38	5.73	4.84
Nd	20.8	28.20	19.30	16.10	20.30	36.20	24.20	32.10	25.20	27.70	35.50	32.70	28.70	24.10	40.70	18.00	24.40	26.20	19.00	22.9	19.80

续表 1
Continued Table 1

样品号	DI58 06-1	DI58 06-3	DI58 7-2	DI58 27-1	DI58 27-2	DI58 27-3	DI58 27-6	DI58 27-7	DI58 4-2-6	DI58 4-8-6	DI58 4-2-10	DI58 4-8-2	DI58 4-8-4	DI58 4-5-2	DI58 4-5-3	DI58 4-7-4	DI58 4-2-7	DI58 4-7-3	DI58 4-7-5	DI58 4-2-8	DI58 4-6-1
Sm	4.08	5.76	4.11	3.13	4.08	6.61	4.86	6.39	5.46	5.63	6.93	6.73	6.19	4.50	8.25	4.12	5.20	5.60	4.67	5.09	4.06
Eu	0.76	1.45	0.95	0.55	1.11	1.35	1.10	1.22	1.24	0.91	1.29	1.35	1.13	1.58	1.64	1.24	1.15	1.43	1.22	1.29	1.39
Gd	3.80	5.46	4.00	2.73	3.89	5.79	4.51	5.86	5.29	5.03	6.14	6.24	5.33	4.04	7.51	4.39	5.33	5.60	4.56	4.79	3.29
Tb	0.70	0.95	0.68	0.52	0.66	0.91	0.73	0.98	0.87	0.78	0.91	0.95	0.88	0.58	1.12	0.74	0.85	0.82	0.70	0.78	0.44
Dy	4.22	5.27	3.92	3.26	3.72	4.82	3.96	5.47	5.58	4.97	5.40	6.06	5.47	3.75	6.72	4.75	5.52	5.39	4.50	4.74	2.52
Ho	0.86	1.05	0.78	0.71	0.73	0.91	0.77	1.06	1.12	0.99	1.09	1.23	1.12	0.76	1.30	1.00	1.13	1.07	0.91	0.95	0.49
Er	2.91	3.11	2.37	2.42	2.31	2.77	2.33	3.23	3.11	3.01	3.08	3.34	3.22	2.18	3.54	2.91	3.20	2.95	2.67	2.70	1.35
Tm	0.48	0.48	0.37	0.43	0.35	0.42	0.35	0.51	0.46	0.46	0.43	0.51	0.49	0.31	0.52	0.43	0.50	0.44	0.41	0.39	0.19
Yb	3.33	3.17	2.53	3.01	2.36	2.99	2.29	3.29	2.99	3.04	3.01	3.30	3.29	2.04	3.34	2.85	3.13	2.99	2.59	2.55	1.24
Lu	0.52	0.48	0.39	0.47	0.35	0.44	0.35	0.49	0.43	0.49	0.44	0.49	0.51	0.33	0.53	0.44	0.49	0.44	0.41	0.38	0.18
Sc	6.38	15.00	14.50	10.80	16.60	13.40	13.90	10.00	16.20	12.00	11.00	10.80	11.50	5.80	10.10	18.00	14.60	19.80	19.40	16.90	7.80
Y	22.40	28.2	21.50	19.70	19.30	24.50	21.30	29.10	30.30	25.80	30.60	33.10	32.20	20.4	36.40	28.6	32.30	30.00	26.20	26.30	13.30
Σ REE	127.08	128.22	90.92	87.04	99.96	173.59	113.80	150.81	141.88	161.36	189.68	173.72	159.37	129.4	206.42	107.22	126.49	133.71	96.52	122.29	96.89
LREE/HREE	6.56	5.42	5.05	5.42	5.96	8.11	6.44	6.22	6.15	7.60	8.25	6.85	6.85	8.25	7.40	5.12	5.28	5.79	4.76	6.08	8.99
(La/Yb) _N	4.37	4.91	4.54	4.08	5.84	8.83	6.80	6.48	6.12	7.76	8.84	6.98	6.52	9.28	8.33	4.33	5.13	5.78	4.43	6.33	9.54
Eu/Eu [*]	0.58	0.78	0.71	0.56	0.84	0.65	0.71	0.60	0.70	0.51	0.59	0.63	0.59	1.11	0.63	0.89	0.66	0.77	0.80	0.79	1.13
CIA(%)	61.56	65.34	62.26	62.37	64.79	66.24	70.01	64.54	61.43	61.56	63.34	63.92	65.69	67.36	61.34	62.20	72.54	64.83	64.35	58.24	60.01
CIW(%)	71.68	64.69	64.04	91.46	71.36	77.58	65.04	68.59	64.47	83.25	74.32	73.35	77.06	74.59	77.07	70.01	63.58	65.24	68.39	66.46	70.32
Al ₂ O ₃ /TiO ₂	20.11	25.65	28.67	25.65	26.90	45.29	23.04	20.41	20.11	18.62	19.45	20.41	31.75	36.72	21.76	22.19	42.41	21.68	26.17	23.38	28.24

注: 化学蚀变作用指标: CIA = $[\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$ (Nesbitt et al., 1982); 化学风化指数: CIW = $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O}) \times 100$ (Harnois, 1988); 式中 CaO^{*} 为岩石硅酸盐矿物中的 CaO 含量。

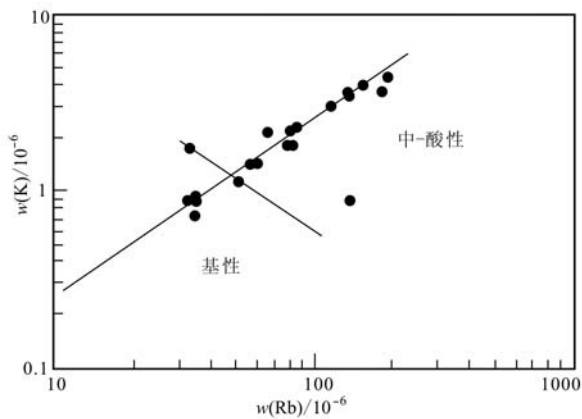


图6 敖包亨浑迪组砂岩 K-Rb 分布图(Roser and Korsch, 1986)

Fig. 6 K-Rb diagram of sandstone of Obootingundi Formation(after Roser and Korsch, 1986)

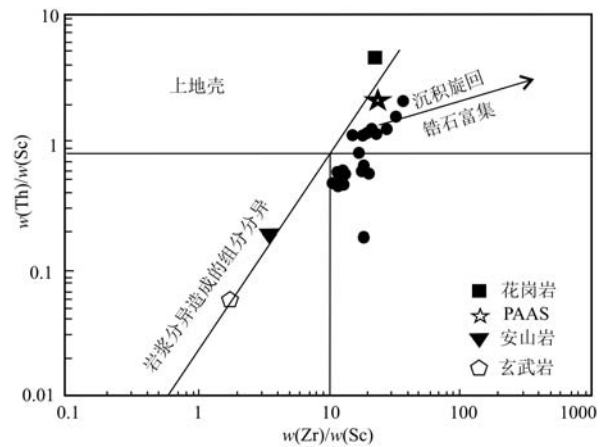


图7 敖包亨浑迪组 Th/Sr-Zr/Sc 图解(Mc Lennan et al., 1993)

Fig. 7 Th/Sr-Zr/Sc diagram of Obootingundi Formation (after Mc Lennan et al., 1993)

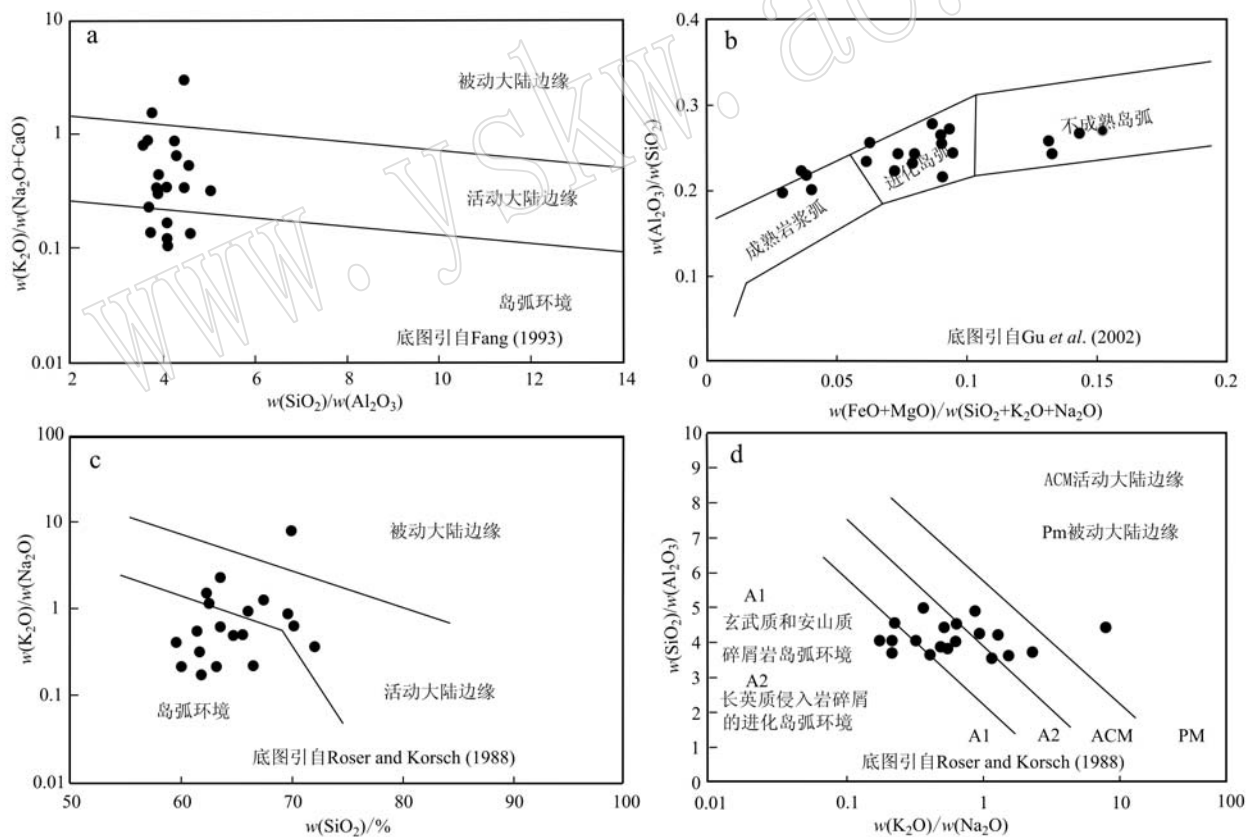


图8 内蒙古敖包亨浑迪组碎屑砂岩主量元素构造环境判别图

Fig. 8 The tectonic setting discrimination of major elements of the sandstones of Obootingundi Formation in Inner Mongolia

(表2),进一步表明砂岩形成于大陆岛弧环境。

排除全岩样品分析和测试过程中的误差,综合各种主量元素地球化学参数和构造环境判别图解,

认为下泥盆统敖包亨浑迪组形成时的构造环境主要为活动大陆边缘和岛弧环境。

上述的分析表明,下泥盆统敖包亨浑迪组形成

表2 内蒙古敖包亭浑迪组砂岩与典型构造背景砂岩的主量元素($w_B/\%$)、稀土元素($w_B/10^{-6}$)及特征参数比较
Table 2 Comparison of major elements of sandstones ($w_B/\%$), REE ($w_B/10^{-6}$) of Oobotinghundi formation with various tectonic setting in Inner Mongolia

	研究区	大洋岛弧	大陆岛弧	活动大陆边缘	被动大陆边缘	上地壳
SiO ₂	64.97	58.83	70.69	73.86	81.95	66
Al ₂ O ₃	15.65	17.11	14.04	12.89	8.41	15.20
Fe ₂ O ₃	2.19	1.95	1.43	1.3	1.32	*
CaO	2.39	5.83	2.68	2.48	1.89	4.20
MgO	2.46	3.65	1.97	1.23	1.39	2.20
Na ₂ O	4.02	4.10	3.12	2.77	1.07	3.90
K ₂ O	2.57	1.60	1.89	2.90	1.71	3.40
TiO ₂	0.64	1.06	0.64	0.46	0.49	0.50
Fe ₂ O ₃ + MgO	4.65	11.73	6.79	4.63	2.89	7.15
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0.24	0.29	0.20	0.18	0.10	0.23
K ₂ O/Na ₂ O	1.02	0.39	0.61	0.99	1.60	0.87
La	24.95	8.20	27	37	39	30
Ce	52.48	19.40	59	78	85	64
ΣREE	134.11	58	146	186	210	146
Eu/Eu *	0.72	1.04	0.80	0.6	0.55	0.65
La/Yb	8.98	4.20	11	12.5	15.90	13.60
(La/Yb) _N	6.44	2.80	7.50	8.30	10.80	9.20
LREE/HREE	6.50	3.80	7.70	9.10	8.50	9.47
Sc	13.07	19.50	14.80	8	6	11
La/Th	2.53	4.26	2.36	1.77	2.20	2.80
La/Y	0.96	0.48	1.02	1.33	1.31	1.36
La/Sc	2.16	0.55	1.82	4.55	6.25	2.73

注:数据引自 Bhatia(1985a)、Bhatia and Crook(1986)、高山等(1999)。

于大陆弧环境,说明早泥盆世古亚洲洋仍处于俯冲状态,这得到了前人依据花岗岩研究结果的支持,即490~422 Ma的花岗岩多为弧花岗岩(陈斌等,2000;石玉若等,2005,2007;Jian *et al.*, 2008)。

5 结论

(1) 敖包亭浑迪组砂岩岩石组构分析表明为一套近源沉积的火山-沉积岩系,属于活动大陆边缘-岛弧沉积序列。

(2) 敖包亭浑迪组砂岩的物源主要为上地壳的长英质物质,源岩可能为英安岩和安山岩,源区主要为北部乌拉雅苏台地区和蒙古 Enshoo 地区。敖包亭浑迪组砂岩岩石地球化学分析结果表明,常量元素具有较高 SiO₂、Al₂O₃、K₂O 和较低 MgO、Fe₂O₃ 含量的特征,大离子亲石元素 Rb、Sr 相对富集,而高场强元素 Cr、Ni、Zr、Hf 含量较低,稀土元素中轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损,呈明显右倾型,具有明显的负 Eu 异常,微量元素和稀土元素含量和配分模式与上地壳有明显相似性,源岩主要为上地壳的长英质物质,可能为英安岩和安山岩。

(3) 地球化学特征显示敖包亭浑迪组砂岩应形

成于岛弧环境,表明当时的古亚洲洋未封闭,且俯冲而形成俯冲造山带。

致谢 本次研究工作在室内岩石薄片分析方面得到了中国地质科学院矿产资源研究所刘淑琴研究员的帮助,在此深表感谢。

References

- Badarch G, Cunningham W D and Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: Implications for the Phanerozoic crustal growth of central Asia[J]. *Asian Earth Sci.*, 21: 87~110.
- Bhatia M R and Crook K A. 1986. Trace element characteristics of greywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181~193.
- Bhatia M R. 1985a. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones: A reply[J]. *Journal of Geology*, 93(93): 85~87.
- Bhatia M R. 1985b. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1~2): 97~113.
- Chen Bin, Zhao Guochun and Simon WILDE. 2000. Subduction-and collision-related granitoids from Southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonics implications[J]. *Geological Review*, 47(4): 361~367(in Chinese with English abstract).
- Cullers R L and Podkovyrov V N. 2000. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications

- for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. *Precambrian Research*, 104(1): 77 ~ 93.
- Fang G Q. 1993. $K_2O/(Na_2O + CaO) - SiO_2/Al_2O_3$: A diagram for determining the plate tectonic setting of flysh[J]. *Northwest Geoscience*, 15(3): 72 ~ 83.
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, *et al.* 1999. Structure and composition of the continental crust in East China[J]. *Science China(Earth Sciences)*, 42(2): 129 ~ 140(in Chinese with English abstract).
- Girty G H, Lawrence J, Burke T, *et al.* 1996. The Shoo Fly complex: Its origin and tectonic significance[J]. *Pacific*, 37(2): 125 ~ 136.
- Gu X X, Liu J M, Zheng M H, *et al.* 2002. Provenance and tectonic setting of the proterozoic turbidites in Hunnan, south China: geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393 ~ 407.
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part 1): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 077 ~ 1 086(in Chinese with English abstract).
- Harnois L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 55(3 ~ 4): 319 ~ 322.
- Henderson P. 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. Amsterdam: Elsevier, 343 ~ 374.
- Hong Dawei, Huang Huaizeng, Xiao Yijun, *et al.* 1994. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 219 ~ 230(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society London Special Publications*, 226(1): 73 ~ 100.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, *et al.* 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: implications for continental growth[J]. *Lithos*, 101: 233 ~ 259.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, *et al.* 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 118(1 ~ 2): 169 ~ 190.
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, *et al.* 2007. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565 ~ 582.
- Mc Lennan S M, Hemming S R, Mc Daniel D K, *et al.* 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 284: 21 ~ 40.
- Mcdonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 120(3 ~ 4): 223 ~ 253.
- Nesbitt, Amp H W and Young G M. 1982. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299(5 885): 715 ~ 717.
- Roser B P and Korsch R J. 1988. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. *Chemical Geology*, 67(1 ~ 2): 119 ~ 139.
- Roser B P and Korsch R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and K_2O/Na_2O ratio[J]. *Journal of Geology*, 94: 635 ~ 650.
- Sengör A M C, Natalín B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Al-taited tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299 ~ 307.
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Qi, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongolia China and its tectonic implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183 ~ 189(in Chinese with English abstract).
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Jian Ping, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP dating of K-rich granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongona[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(5): 424 ~ 428(in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McClennan S H. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Black-well, 117 ~ 140.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 31 ~ 47.
- Xiao W J, Li S Z, Santosh M, *et al.* 2012. Orogenic belts in Central Asia: Correlations and connections[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 1 ~ 6.
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C, *et al.* 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Al-taits: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 189 ~ 1 217.
- Xiao W J and Windley B F. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner, Mongolia, China: termination of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1 069.
- Xu B, Charvet J, Chen Y, *et al.* 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia(China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 23: 1 342 ~ 1 364.
- Zhang W, Jian P, Kröner A, *et al.* 2013. Magmatic and metamorphic development of an early to mid-Paleozoic continental margin arc in the southernmost Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 72(4): 63 ~ 74.

附中文参考文献

- 陈 斌, 赵国春, Simon WILDE. 2000. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义[J]. *地质论评*, 47(4): 361 ~ 367.
- 高 山, 骆庭川, 张本仁, 等. 1999. 中国东部陆壳的组分和构造[J]. *中国科学:地球科学*, 42(2): 129 ~ 140.
- 韩宝福, 季建清, 宋 彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 077 ~ 1 086.
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君, 等. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. *地质学报*, 68(3): 219 ~ 230.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 23(3): 565 ~ 582.
- 石玉若, 刘敦一, 简 平, 等. 2005. 内蒙古中部苏尼特左旗富钾花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 24(5): 424 ~ 428.
- 石玉若, 刘敦一, 张 旗, 等. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义[J]. *地质通报*, 26(2): 183 ~ 189.