

# 内蒙古正镶白旗贡淖尔地区中二叠统额里图组下段 细碎屑岩地球化学特征及意义

汪彪<sup>1,2)</sup>, 施立志<sup>1)\*</sup>, 阮壮<sup>2)</sup>, 黄静宜<sup>3)</sup>, 罗立艳<sup>1)</sup>

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3) 防灾科技学院, 河北三河 065201

**摘要:** 广泛发育于内蒙古正镶白旗及邻区的额里图组的沉积建造近些年来被认为是我国北方晚古生代重要的潜在含油气地层, 因其地处兴蒙构造带与华北板块拼合的交界区, 并于中二叠世形成的一套一段下部以碎屑岩、上部以凝灰质胶结的苔藓虫生物格架礁灰岩、二段以浅海相喷出岩为特点的海相沉积-火山岩沉积建造。本文通过在前人研究的基础上, 对正镶白旗贡淖尔地区额里图组剖面进行了修测、采样。重点对剖面下段的粗碎屑岩开展了详细的镜下岩相学研究, 以及广泛发育的细碎屑岩进行了全岩主量元素、微量元素和稀土元素特征分析。结果表明: (1) 砂岩的颗粒分选性差, 主要呈棱角状-次棱角状, 颗粒主要由火山岩岩屑、石英颗粒、长石、燧石组成, 填隙物为凝灰物质和泥质杂基, 整体上为近源快速堆积的低成熟度的岩屑长石硬砂岩; (2) 细碎屑岩源区的古气候条件呈现出略微寒冷干燥→温暖湿润→略微寒冷干燥→温暖湿润→略微寒冷干燥的演变趋势, 整体上属于温暖潮湿的气候环境; (3) 细碎屑岩大多属于构造活跃地区的第一次旋回的沉积物, 源区成分主要以上地壳的长英质火成岩和石英质沉积岩为特征; (4) 源区大地构造背景为活动大陆边缘和大陆岛弧环境, 沉积盆地为弧后盆地。

**关键词:** 额里图组; 细碎屑岩; 地球化学; 大地构造背景; 内蒙古

中图分类号: P618.13; P595 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.113001

## Geochemistry and Significance of Siliciclastic Rocks from the Lowest Elitu Formation of Middle Permian in the Gongnaoer Area, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

WANG Biao<sup>1,2)</sup>, SHI Li-zhi<sup>1)\*</sup>, RUAN Zhuang<sup>2)</sup>, HUANG Jing-yi<sup>3)</sup>, LUO Li-yan<sup>1)</sup>

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

3) Institute of Disaster Prevention, Sanhe, Hebei 065201

**Abstract:** The Elitu Formation of Middle Permian is widely developed in Zhengxiangbaiqi and its adjacent areas in Inner Mongolia and in the junction area of Xingmeng orogenic belt and North China plate. In recent years, it has been considered as a potential oil and gas bearing Upper Paleozoic strata in the northern China. This formation is characterized by marine siliciclastic rocks in the lowest member, tuff-cemented bryozoan reef limestone in the upper part, and shallow marine eruptive rocks in the second member. We measured the Gongnaoer profile of the Elitu formation in Zhengxiangbaiqi and conducted detailed microscopic petrographic studies on the lower section of the profile. Whole rock geochemistry, including the major elements, trace elements, and rare earth elements (REEs), of the fine-grained siliciclastic rocks widely developed in the lower section was

本文由中国地质调查局项目“二连盆地及外围石炭-二叠系油气地质调查”(编号: 202016000000180202)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(编号: KK2005)和国家自然科学基金项目“兴蒙地区晚二叠世海相沉积的古环境重建”(编号: 41572098)联合资助。

收稿日期: 2021-07-19; 改回日期: 2021-11-29; 网络首发日期: 2021-12-02。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 汪彪, 男, 1993年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: 865796658@qq.com。

\*通讯作者: 施立志, 男, 1976年生。博士, 正高级工程师。主要从事油气地质综合研究工作。E-mail: 86547864@qq.com。

analyzed. The results show that (1) the sorting of sandstone is poor, with angular sand grains. The particles are mainly composed of volcanic rock debris, quartz particles, feldspar, and chert. The cement is tuffaceous material and argillaceous matrix. Overall, it is a low-maturity lithic feldspar greywacke with near-source rapid accumulation. (2) The paleoclimatic conditions of the source area of fine clastic rocks has an evolving trend of slightly cold and dry→warm and humid→slightly cold and dry→warm and humid→slightly cold and dry, which is a generally warm and humid climate environment. (3) Most of the fine clastic rocks belong to the sediments of the first cycle in the active tectonic area, and the source area is mainly composed of felsic igneous rocks and quartziferous sedimentary rocks from the upper crust. (4) The tectonic background of the source region is the active continental margin and continental island arc environment, and the sedimentary basin is the back-arc basin.

**Keywords:** Elitu Formation; fine clastic rocks; geochemistry; tectonic background; Inner Mongolia

研究区位于我国内蒙古自治区正镶白旗贡淖尔地区,大地构造位置上处于华北板块北缘与华北板块和西伯利亚板块形成的兴蒙造山带南缘拼合部位(图 1)。前人为解决古亚洲洋的闭合时限、位置以及区内大地构造属性及演化等科学问题,对区域内额里图组的研究形成了一系列成果认识。其中,田树刚等(2011, 2012, 2016a, b, 2018, 2021)研究认为研究区晚古生代还存在通畅的海洋环境。朱俊宾和和政军(2017)、和政军等(1997)认为额里图组为正常陆相沉积。梅杨等(2013)则认为额里图组是在海相、滨海相沉积的三面井组的沉积后形成的陆相火山岩和湖相碎屑岩。陈井胜等(2015)认为额里图组的沉积环境是海陆过渡相、三角洲相。额里图组作为二连盆地及外围地区晚古生代形成的重要地层,同时被认为是我国北方晚古生代重要的潜在含油气地层(中国地质科学院矿产资源研究所, 2019)。因此,厘清其物源类型、源区大地构造背景以及沉积盆地属性,对正确认识我国北方石炭—二叠纪构造古地理演化并指导区域油气勘探具有重要意义。

运用沉积岩全岩的主量元素、微量元素和稀土元素及 Nd 同位素特征,可以很好地识别沉积岩源区,并进而重建盆地的气候特点及其大地构造背景,是地球科学研究的有力手段(Zhang, 2004; Zhang et al., 2006, 2007, 2012, 2017; 孙林华和桂和荣, 2011; 徐小涛和邵龙义, 2018)。Zhang(2004), Zhang et al. (2006, 2007, 2012)、李明龙等(2019)认为细粒沉积物的微量元素地球化学受后期成岩作用以及风化作用影响相对较小,用细碎屑沉积岩的微量元素地球化学特征能够可靠的进行源区和环境示踪。因此,本文在前人的研究基础上,通过对野外剖面的修测,在厘定各层段的岩性组合特征和沉积构造的基础上,系统采集了该组地层中发育的细碎屑岩样品,进行了全岩的主、微量元素和稀土元素特征分析,粗碎屑岩开展了镜下岩相学观察,探讨了研究区贡淖尔剖面额里图组下段的细碎屑岩的物源类型、源区大地构造背景,进而推断了对应的沉积盆地类型,这

将为我国北方晚古生代油气地质调查的有利潜在含油气区带的优选提供重要参考依据。

## 1 地质背景

研究区位于中亚造山带的东段(兴蒙造山带)南缘的温都尔庙—翁牛特旗造山带(Windley et al., 2007),处于赤峰—巴彦敖包断裂为界限的华北板块北缘和以二连—贺根山断裂缝合带为界的西伯利亚板块南缘之间,紧靠华北板块北缘(图 1)。额里图组在内蒙古自治区东部广泛分布,为晚古生代大陆边缘弧后滨岸盆地沉积,下部为杂色含砾粗粒长石砂岩、石英砂岩、细砂岩、粉砂岩、粉砂质页岩夹火山碎屑岩;上部为灰色与灰黑色凝灰角砾岩、安山岩(内蒙古自治区矿产地质局, 1991)。以整合或平行不整合沉积于下二叠统三面井组之上,上覆地层为中二叠统于家北沟组,两者呈整合接触(郑月娟等, 2018)。

贡淖尔剖面位于内蒙古自治区正镶白旗南东东约 28 km 处(图 1),剖面长度约 2.4 km,累计地层厚度约 1790 m。剖面由底到顶共被划分 35 层,剖面起点坐标为 E115°22'10.58", N42°14'45.07",剖面终点 E115°22'2.56", N42°13'30.83",剖面方向为 185°。剖面由底到顶岩性见综合柱状图中的岩性描述(图 3)。

剖面下部(第 3 层(图 2A, B)、第 10 层(图 2C))的砂岩颗粒主要为棱角状的石英、半自形的长石(多为斜长石和条纹长石)、火山岩屑(主要为凝灰质岩屑和安山岩岩屑),颗粒间呈接触式支撑,填隙物主要是泥质杂基和绢云母,其中火山岩屑含量相对偏少但含量有所增加。剖面中-上部(第 14 层中上部及以后(图 2D-H))的砂岩:颗粒主要是岩屑,其中以火山岩屑为主,火山岩屑成分是安山岩和凝灰岩,岩屑表面明显发生了溶蚀现象,主要是斜长石被蚀变成绢云母,另外,自形的棱角状的斜长石颗粒表面也发生了绢云母化,其次是出现沉积岩岩屑,主要是次圆状-圆状的燧石岩屑,再其次是棱角状的

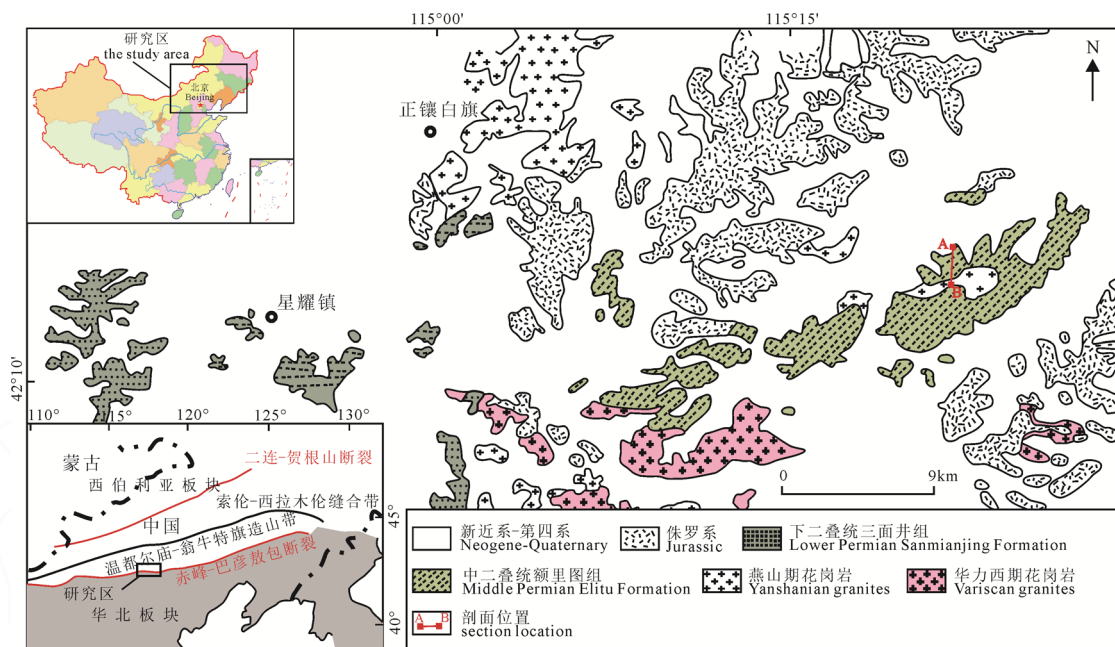


图1 研究区地质与构造简图

Fig. 1 Geologic and geotectonic sketch map of Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

石英,分选差,颗粒粗大的石英表面有裂纹,颗粒之间的接触方式由颗粒支撑变为杂基支撑,胶结物为凝灰物质,并且随着地层变新,燧石岩屑和凝灰物质的含量越来越多。上述特征表明,贡淖尔剖面额里图组的碎屑岩具有极近源的火山岩和远距离的古老沉积岩的双重物源供给特征,并且主要为极近源的且快速堆积的火山岩物质,古老沉积岩远距离供给为辅,沉积过程中伴随着强烈的火山作用和构造运动,即研究区在额里图期处于构造极为活跃的状态。

## 2 样品特征与分析测试方法

### 2.1 样品描述

共分析 18 块样品,岩性为灰黑色泥岩-页岩、灰黑色泥质粉砂岩或深灰色-灰黑色粉砂岩。考虑到该剖面中发育大量的暗色泥页岩、粉砂岩,采样规则主要是根据每层暗色泥页岩、泥质粉砂岩在各层段中的发育情况,有规律的采集,在发育较厚的部位则在其顶底界限附近以及中部各采集一件,保证采样具有代表性。具体采样位置见图 3。

### 2.2 分析测试方法

在北京核工业地质研究院对样品进行了全岩主微量元素分析。主量元素在 AB104L, Axios-mAX 波长色散 X 射线荧光光谱仪上完成,依据 GB/T 14506.14-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 14 部分:氧化亚铁量测定》,GB/T 14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法 第 28 部分:16 个主次成分量测定》,岩石矿物分析\*《第四版 16.20 灼烧减量的测定》,相对偏差<5%。微量元素(含稀土元素)依据 GB/T 14506.30-2010《硅酸盐岩石化学分析方

法第 30 部分:44 个元素量测定》,在 ELEMENT XR 等离子体质谱仪上进行,分析精度优于 3%。

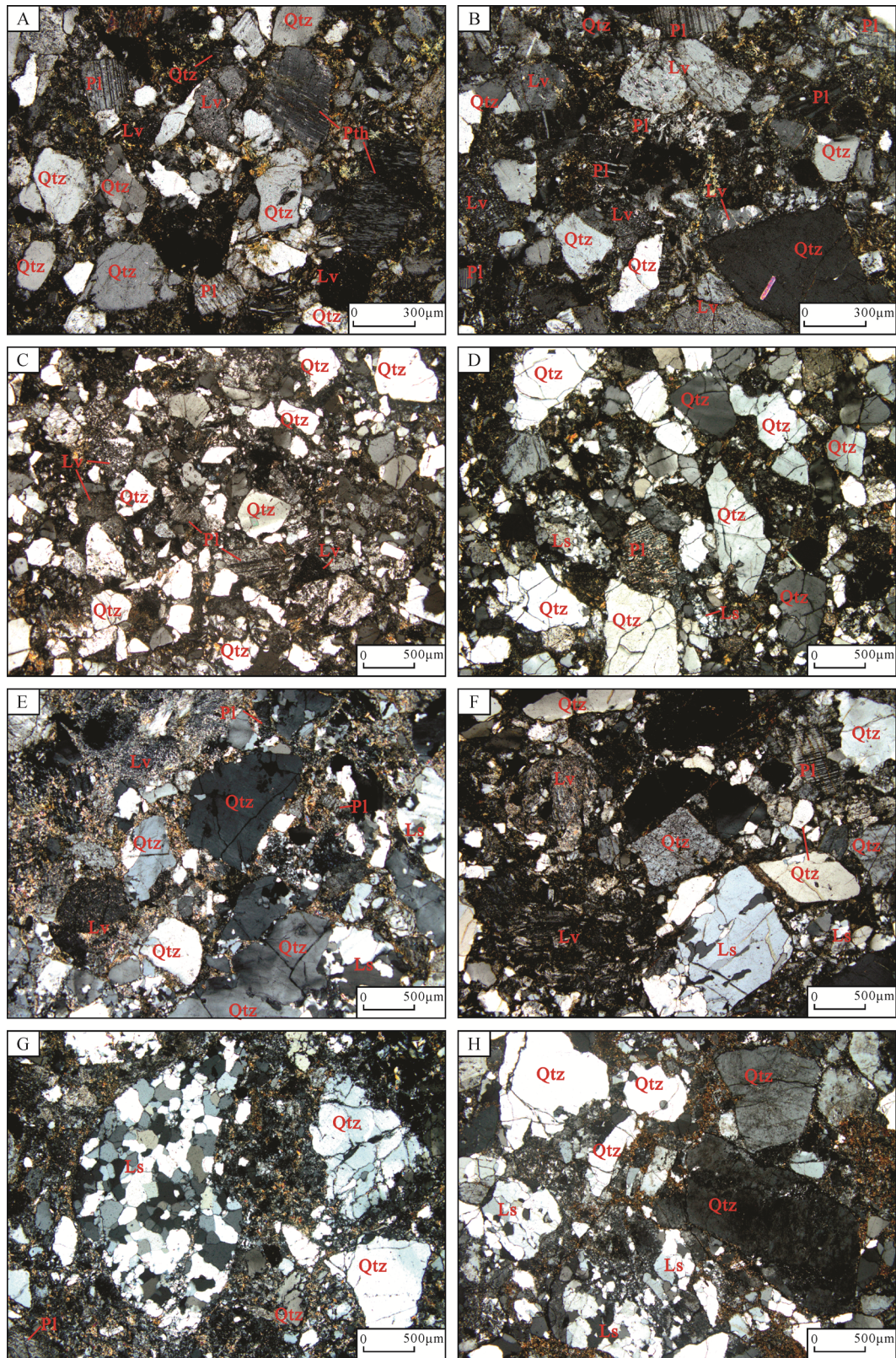
## 3 分析结果

### 3.1 主量元素

分析结果见表 1。其中  $\text{SiO}_2$  质量分数为 55.03%~62.51%(平均值为 58.19%);  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数为 17.03%~20.85%(平均值为 19.68%);  $\text{K}_2\text{O}$  的质量分数为 3.50%~6.30%(平均值为 4.96%);  $\text{Na}_2\text{O}$  的质量分数为 0.52%~2.07%(平均值为 1.33%);  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (全铁)的质量分数为 4.37%~8.35%(平均值为 6.92%);  $\text{FeO}_2$  的质量分数为 1.43%~6.61%(平均值为 3.92%);  $\text{MgO}$  的质量分数为 1.94%~2.93%(平均值为 2.48%);  $\text{CaO}$  的质量分数为 0.41%~1.70%(平均值为 0.78%);  $\text{MnO}$  的质量分数为 0.03%~0.18%(平均值为 1.10%);  $\text{TiO}_2$  的质量分数为 0.75%~1.00%(平均值为 0.86%);  $\text{P}_2\text{O}_5$  的质量分数为 0.19%~0.30%(平均值为 0.23%)。  $\text{SiO}_2$  与其他氧化物表现出不同程度的相关性:  $\text{TiO}_2(r = -0.02)$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3(r = -0.34)$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}(r = -0.37)$ ,  $\text{MnO}(r = -0.01)$ ,  $\text{MgO}(r = -0.07)$ ,  $\text{CaO}(r = -0.08)$ ,  $\text{Na}_2\text{O}(r = -0.08)$  和  $\text{K}_2\text{O}(r = 0.05)$ 。表明沉积岩中的碳酸盐岩碎屑或基质是原生的而非次生的(Feng and Kerrich, 1990; Gu et al., 2002; Zhang, 2004; Zhang et al., 2012)。其中  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Na}_2\text{O}$  的负相关性,可能与长石发生次生蚀变有关(Zhang, 2004; 张英利等, 2011; Zhang et al., 2012),笔者采集的砂岩镜下特征均显示出斜长石表面大多发生了绢云母化和绿泥石化(图 2),这也映证了这一点。

化学风化指数(CIW)和化学蚀变指数(CIA)通常可以用来表征碎屑岩母岩遭受古化学风化程度,





Qtz—石英; Pl—斜长石; Lv—火山岩岩屑; Ls—沉积岩岩屑; Pth—条纹长石。

Qtz—quartz; Pl—plagioclase; Lv—volcanic lithoclast; Ls—sedimentary lithoclast; Pth—perthite.

图2 正镶白旗额里图组贡淖尔剖面下段砂岩镜下特征照片

Fig. 2 Microphotographs of sandstone from the lower part of the Elitu Formation in the Gongnaoer area, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

通常 CIW 值、CIA 值越大表明母岩风化程度越强(冯连君等, 2003; 杨江海等, 2007)。一般认为 CIA 值在  $50\pm$ , 碎屑岩母岩未遭受化学风化, CIA 值在  $100\pm$ ,

表明碎屑岩母岩遭受了强烈的化学风化(Zhang, 2004; Zhang et al., 2012; 徐小涛和邵龙义, 2018)。样品 CIA 值为 64~75(平均值为 70); CIW 值为



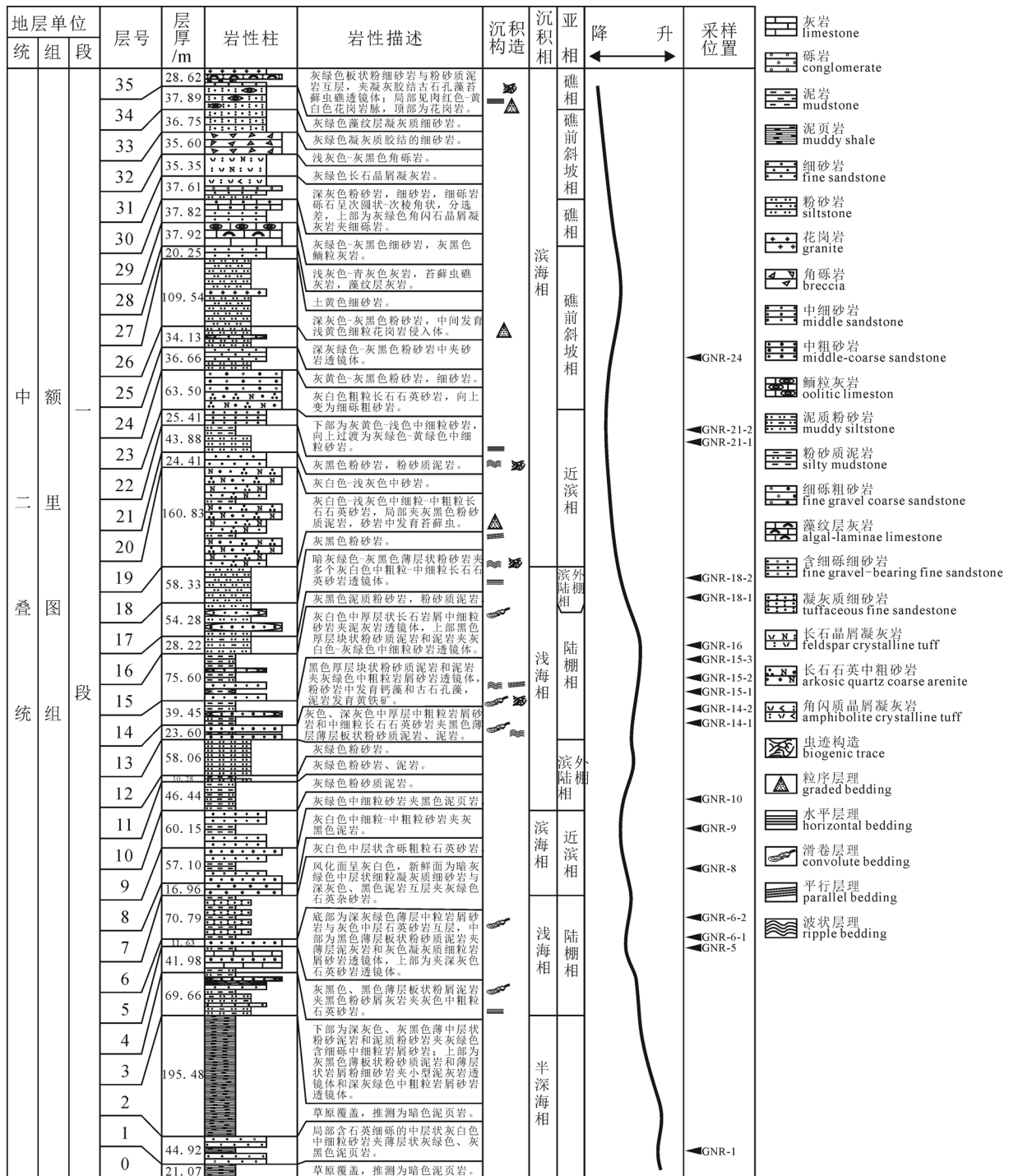


图3 正镶白旗额里图组贡淖尔剖面综合柱状图

Fig. 3 Synthetic columnar diagram of the Elitu Formation in the Gongnaoer area, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

79~95(平均值为 87)。指示出母岩总体上遭受了一定程度(中等强度)的化学风化。并且 CIA 值和 CIW 值在纵向剖面上呈现出升高-降低-升高-降低的整体趋势, 表明在时间轴上呈现出化学风化增强→减弱→增强→减弱的趋势。

成分变异指数(ICV)可以用来表征碎屑岩源岩的成分成熟度。沉积物在循环过程中非黏土矿物含量的降低或第一次循环碎屑输入量的降低, 都将导致 ICV 值的降低; 黏土矿物质量分数较低的岩石

ICV 值一般 > 1, 多属于构造活动地区第一次旋回的沉积物; 黏土矿物质量分数较高的碎屑岩 ICV 值 ≤ 1, 形成于构造平静的环境, 此背景下第一次循环沉积物的再循环十分发育(Bhatia and Crook, 1986; 田洋等, 2015)。样品中 ICV 值均为 0.86~1.21(平均值为 1.04), 仅有个别样品(GNR-9 和 GNR-10)ICV 值明显小于 1, 其余均明显大于 1, 指示其沉积物大多属于构造活跃地区第一次旋回的沉积物, 个别层段处于构造平静期, 这与剖面上的特征相一致。

表 1 贡淖尔剖面额里图组碎屑岩主要元素分析结果(wt. %)  
Table 1 Major elemental composition (wt. %) of fine-grained siliciclastic rocks from the Eritu Formation in the Gongnaocer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

样品原号	GNR-1	GNR-5	GNR-6-1	GNR-6-2	GNR-8	GNR-9	GNR-10	GNR-14-1	GNR-14-2	GNR-15-1	GNR-15-2	GNR-15-3	GNR-16	GNR-18-1	GNR-18-2	GNR-21-1	GNR-21-2	GNR-24	
岩性	灰黑色 泥岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	深灰-灰 黑色泥质 粉砂岩
SiO <sub>2</sub>	58.680	55.860	57.140	62.510	58.180	60.930	61.240	58.360	58.970	57.820	57.130	59.250	57.000	56.900	56.150	56.780	55.030	59.410	59.410
TiO <sub>2</sub>	0.901	0.978	0.911	0.792	0.922	0.773	0.864	0.805	0.795	0.809	0.864	0.748	0.849	0.825	0.845	0.884	0.995	0.852	0.852
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.340	20.580	20.500	17.030	19.760	19.320	20.020	19.450	19.590	19.240	20.440	18.080	20.440	19.860	20.110	19.460	20.850	19.130	19.130
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.040	1.170	2.260	2.990	3.510	4.130	2.410	3.170	2.160	3.440	3.210	3.270	2.750	3.370	2.200	1.930	1.010	1.050	1.050
FeO	2.870	5.330	4.020	3.080	2.890	1.430	1.760	4.210	4.230	3.820	3.020	2.970	4.240	3.920	5.330	5.370	6.610	5.480	5.480
MnO	0.033	0.051	0.062	0.047	0.042	0.040	0.036	0.169	0.179	0.127	0.094	0.089	0.117	0.105	0.123	0.119	0.158	0.131	0.131
MgO	2.180	2.820	2.670	2.510	2.330	2.280	1.940	2.660	2.590	2.770	2.190	2.450	2.490	2.450	2.460	2.630	2.930	2.250	2.250
CaO	0.949	0.684	0.627	0.728	0.530	0.408	0.524	0.448	0.461	0.508	0.925	0.806	0.681	0.594	0.782	1.700	1.610	1.110	1.110
Na <sub>2</sub> O	1.050	1.760	1.950	1.200	1.350	0.515	1.250	0.823	0.890	0.825	1.870	1.870	1.070	0.685	1.080	1.560	2.070	2.060	2.060
K <sub>2</sub> O	5.540	6.180	5.930	4.440	4.880	4.800	5.540	4.670	6.300	5.320	4.290	5.870	5.200	4.670	4.500	4.070	3.500	3.560	3.560
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.241	0.241	0.225	0.185	0.230	0.210	0.255	0.204	0.197	0.234	0.218	0.226	0.238	0.256	0.259	0.297	0.266	0.228	0.228
LOI	4.750	3.250	3.240	4.140	4.970	4.960	3.960	4.550	3.150	4.640	5.310	4.020	4.450	5.840	5.050	4.060	3.780	3.520	3.520
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	5.230	7.090	6.730	6.410	6.720	5.720	4.370	7.850	6.860	7.680	6.570	6.570	7.460	7.730	8.120	7.900	8.350	7.140	7.140
F <sub>1</sub>	-3.300	-3.420	-3.030	-3.430	-2.080	-3.170	-3.880	-1.760	-4.250	-2.940	-0.240	-3.860	-1.650	-1.300	-0.380	0.070	1.510	0.440	0.440
F <sub>2</sub>	1.030	1.730	1.850	-1.370	-0.230	-1.420	1.590	-2.070	0.690	-1.210	0.090	1.780	-0.470	-1.900	-1.560	-1.230	-1.640	-0.900	-0.900
F <sub>1</sub> '	-0.200	1.070	0.470	-0.820	-0.530	-1.750	-0.490	-0.990	-0.830	-0.760	-0.120	-0.100	-0.250	-0.570	0.350	1.220	1.760	1.040	1.040
F <sub>2</sub> '	-3.280	-5.990	-4.860	-2.100	-1.940	-0.940	-2.430	-3.020	-5.960	-3.250	-1.450	-3.810	-3.980	-2.320	-3.570	-3.040	-3.120	-3.150	-3.150
CIA	70.000	67.000	67.000	69.000	71.000	75.000	70.000	74.000	69.000	72.000	70.000	64.000	72.000	75.000	73.000	68.000	69.000	69.000	69.000
CIF	88.000	85.000	84.000	86.000	88.000	95.000	89.000	92.000	91.000	92.000	83.000	82.000	89.000	93.000	89.000	80.000	79.000	80.000	80.000
ICV	0.933	1.132	1.102	1.130	0.981	0.870	0.864	1.018	1.068	1.074	0.974	1.211	0.999	0.959	1.003	1.152	1.141	1.061	1.061
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	5.300	3.500	3.000	3.700	3.600	9.300	4.400	5.700	7.100	6.500	2.300	3.100	4.900	6.800	4.200	2.600	1.700	1.700	1.700

注: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup> 为全铁; F<sub>1</sub>' = -1.773×TiO<sub>2</sub>+0.607×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+0.76×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>-1.5×MgO+0.616×CaO+0.509×Na<sub>2</sub>O-1.224×K<sub>2</sub>O-9.09; F<sub>2</sub>' = 0.445×TiO<sub>2</sub>+0.07×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.25×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>-1.142×MgO+0.438×CaO+1.475×Na<sub>2</sub>O+1.426×K<sub>2</sub>O-6.861; F<sub>1</sub>' = -0.0447×SiO<sub>2</sub>-0.972×TiO<sub>2</sub>+0.008×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.267×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+0.208×MnO+0.14×MgO+0.195×CaO+0.719×Na<sub>2</sub>O-0.032×K<sub>2</sub>O+7.51×P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+0.303; F<sub>2</sub>' = -0.421×SiO<sub>2</sub>+1.988×TiO<sub>2</sub>+0.526×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-0.551×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1.61×FeO+2.72×MnO+0.881×MgO-0.907×CaO-0.177×Na<sub>2</sub>O-1.84×K<sub>2</sub>O+7.224×P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+43.57。上述判别式均引用于Bhatia(1983), 式中氧化物均代表其质量百分含量; 化学蚀变指数(Nesbitt and Young, 1982): CIA=100×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CaO+Na<sub>2</sub>O), 成分变异指数(Cox et al., 1995): ICV=(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O+CaO+MgO+TiO<sub>2</sub>)/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 氧化物为摩尔百分含量(Nesbitt and Young, 1982), CaO' 仅代表硅酸盐矿物中的CaO(即全岩中CaO扣除化学沉积的CaO的摩尔分数), 按照McLennan(1993)的方法计算: 即按摩尔比首先排除掉P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>所消耗的CaO, 余下的CaO摩尔含量若大于Na<sub>2</sub>O的摩尔量, 则认为Na<sub>2</sub>O的摩尔量, 反之则为CaO的摩尔量, 反之为CaO的摩尔量代表硅质碎屑中的摩尔量。



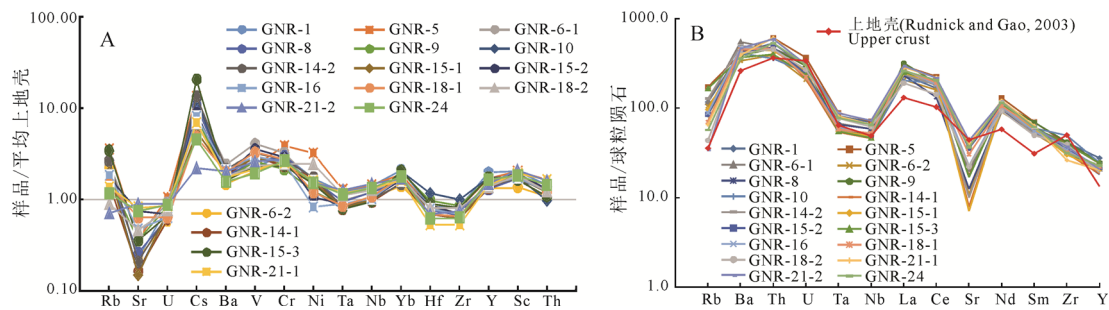


图4 正镶白旗额里图组贡淖尔剖面碎屑岩微量元素上地壳标准化图(A; 数据引自 Taylor and McLennan, 1985)和球粒陨石标准化图(B)(数据引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 UCC-normalized (A, after Taylor and McLennan, 1985) and chondrite-normalized (B, after Sun and McDonough, 1989) trace element diagrams of fine-grained clastic rocks from the Elitu Formation in Gongnaoer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

### 3.2 微量元素特征

测试结果见表 2。将样品的微量元素与平均上地壳(UCC)元素含量进行标准化处理(图 4A)和球粒陨石进行标准化处理(图 4B)。从图 4A 可以发现, 相对于平均上地壳元素含量, 大离子亲石元素 Sr、Hf、Zr 呈现亏损, 尤其是 Sr 呈现较明显的亏损。Cs 呈现明显的正异常, U 含量与平均上地壳含量几乎相当, 个别样品的 Rb 含量略低于平均上地壳值, 但大多数高于平均上地壳含量, 其余元素均高于平均上地壳含量。尽管不同样品的含量不尽一致, 但是标准化数据显示整体趋势一致, 说明采自该剖面不同层位的细碎屑岩具有相似源区及大地构造背景。从图 4B 可以看出, 其中大离子亲石元素(如 Ba、Th、La、Ce、Nd)含量均较高, 并呈现明显的正异常, 但 Sr 呈明显的负异常, Zr 含量较低。然而, 该剖面的细碎屑岩的微量元素与球粒陨石标准化后整体趋势保持一致, 能够用来进行源区示踪。标准化数据显示与上地壳的特征非常接近, 说明贡淖尔剖面的物源区为上地壳性质, 而明显的 Sr 的亏损与其沉积水体环境有关, Zr 的负异常表明锆石未经历沉积分异, 暗示了其母岩非再循环的沉积物。

### 3.3 稀土元素特征

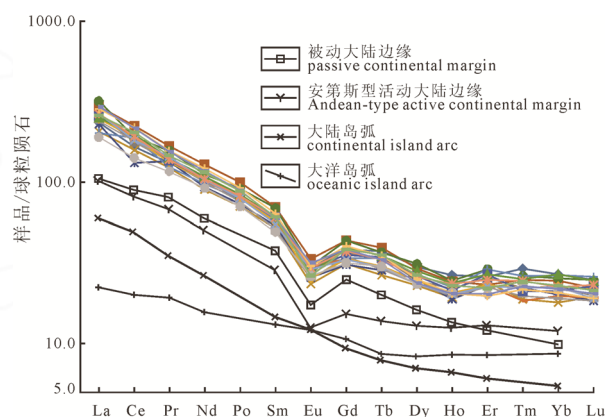
稀土元素分析结果见表 3。稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为  $218 \times 10^{-6} \sim 325 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $273 \times 10^{-6}$ 。轻稀土(LREE)和重稀土(HREE)含量分别为  $195 \times 10^{-6} \sim 297 \times 10^{-6}$  和  $22.5 \times 10^{-6} \sim 30.1 \times 10^{-6}$ , 平均值分别为  $248 \times 10^{-6}$  和  $25.5 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 在 8.0~13 之间, 平均值为 9.78。 $\delta\text{Eu}$  在 0.55~0.68 之间, 平均值为 0.62, 表现为明显的负异常。 $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  范围为 7.2~13, 平均值为 11, 表明轻重稀土分异明显。除了 GNR-8 和 GNR-9 两个样品的  $\delta\text{Ce}$  明显小于 1 之外, 其余样品的  $\delta\text{Ce}$  值均在 1 附近, 几乎无异常。前人的研究表明,  $\delta\text{Ce} > 1$  表示还原环境,  $\delta\text{Ce} < 0.95$  表示氧化环境(韦刚健等, 2001; Zhang, 2004; Zhang et

al., 2012, 2017)。根据  $\delta\text{Ce}$  值的特征, 显示沉积时期的环境为弱氧化-还原的浅水-半深水环境。尽管不同的样品的稀土元素组成含量变化较大, 然而, 在与球粒陨石标准化的稀土元素曲线(图 5)中, 所有样品整体表现出相似的趋势, 其特征为轻稀土元素呈右倾富集、重稀土相对平坦并伴有明显的铈负异常。表明贡淖尔剖面的细碎屑岩具有同源性或相似的大地构造背景特征。且与上地壳的组成特征以及安第斯型活动大陆边缘特征相一致(图 5), 表明贡淖尔剖面的细碎屑岩的源区具有安第斯型活动大陆边缘的构造特征。

## 4 讨论

### 4.1 物源区古气候分析

对于古环境的研究, 已经发生了由定性描述到



球粒陨石标准化值采用 Taylor and McLennan(1985); 大陆岛弧、大洋岛弧、被动大陆边缘、安第斯型活动大陆边缘的标准化曲线引自 Bhatia(1985)。

Normalized values are from Taylor and McLennan (1985); standard curve about continental arc, oceanic arc, passive continental margin, and Andean-type active continental margin are from Bhatia (1985).

图5 正镶白旗额里图组贡淖尔剖面细碎屑岩稀土元素与球粒陨石标准化图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE diagram of fine-grained clastic rocks from the Elitu Formation in Gongnaoer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

表 2 贡淖尔剖面额里图组碎屑岩微量元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )  
 Table 2 Trace element ( $\times 10^{-6}$ ) composition of fine-grained clastic rocks from the Elitu formation in the Gongnaoer section, Zhengxiangbaqi, Inner Mongolia

样品原号	GNR-1	GNR-5	GNR-6-1	GNR-6-2	GNR-8	GNR-9	GNR-10	GNR-14-1	GNR-14-2	GNR-15-1	GNR-15-2	GNR-15-3	GNR-16	GNR-18-1	GNR-18-2	GNR-21-1	GNR-21-2	GNR-24
岩性	灰黑色 泥岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥页岩	灰黑色 泥质粉砂岩	深灰-灰黑色 泥质粉砂岩	灰绿色 细砂岩	深灰色 粉砂岩
Li	50.600	62.400	60.300	50.500	48.500	47.300	32.700	74.600	79.300	115.000	69.600	87.000	67.500	73.500	68.600	55.000	57.600	56.500
Be	2.670	2.710	2.340	1.830	3.130	2.460	3.490	2.730	2.570	2.150	3.080	3.370	2.280	2.190	2.830	2.330	2.540	2.930
Sc	22.400	22.400	19.700	15.000	18.600	18.900	19.500	19.900	18.400	19.200	21.500	18.100	19.200	20.300	19.900	21.000	23.100	20.100
V	137.000	141.000	241.000	121.000	156.000	156.000	134.000	172.000	192.000	169.000	212.000	140.000	176.000	195.000	141.000	128.000	154.000	117.000
Cr	107.000	133.000	112.000	91.400	103.000	75.000	87.700	80.900	96.100	87.900	99.300	82.200	88.300	94.300	86.400	88.600	95.700	92.300
Co	12.100	26.500	15.000	12.400	12.300	5.230	8.180	12.700	9.930	16.700	7.050	8.640	7.450	5.820	22.300	18.500	10.800	14.500
Ni	33.600	63.600	30.500	28.500	32.800	24.400	24.600	34.300	35.000	31.500	20.900	29.500	16.400	23.800	49.300	31.700	30.500	30.700
Cu	28.800	27.200	35.500	60.600	51.000	45.500	31.900	36.700	42.900	53.300	49.100	36.900	64.100	37.800	12.700	14.700	8.940	19.400
Zn	71.100	90.000	184.000	162.000	170.000	164.000	147.000	177.000	180.000	157.000	171.000	159.000	158.000	170.000	125.000	82.800	110.000	89.200
Ga	28.300	29.200	27.600	20.800	28.900	25.700	26.700	26.800	28.300	27.300	28.400	26.300	27.100	28.000	27.900	27.300	29.400	25.200
Rb	272.000	398.000	271.000	243.000	201.000	196.000	222.000	166.000	296.000	222.000	197.000	382.000	204.000	162.000	101.000	152.000	78.900	132.000
Sr	79.000	127.000	143.000	79.000	90.700	124.000	56.900	72.300	72.300	51.300	258.000	123.000	165.000	220.000	162.000	286.000	314.000	264.000
Y	43.200	37.600	32.900	29.500	28.600	38.500	38.300	29.100	30.900	32.600	34.500	38.100	31.800	35.000	30.000	32.100	32.800	36.000
Mo	0.974	1.360	1.160	0.245	0.462	0.872	0.626	0.327	0.568	1.590	0.239	0.468	0.432	0.568	0.701	0.495	0.827	2.940
Cd	0.076	0.047	0.170	0.135	0.137	0.199	0.100	0.128	0.123	0.409	0.156	0.186	0.113	0.119	0.101	0.053	0.017	0.040
In	0.083	0.088	0.075	0.069	0.070	0.091	0.107	0.098	0.118	0.106	0.113	0.124	0.101	0.083	0.088	0.101	0.054	0.064
Sb	1.780	0.738	1.240	0.954	0.706	1.370	0.705	1.030	1.370	1.820	0.886	0.763	1.250	2.560	1.790	0.708	0.809	0.982
Cs	42.400	49.800	41.000	47.600	38.900	29.300	46.100	20.800	49.700	20.100	32.500	76.000	29.700	17.800	24.800	25.700	8.250	16.600
Ba	1 028.000	984.000	1 328.000	815.000	1 002.000	938.000	994.000	1 030.000	1 193.000	1 111.000	1 004.000	887.000	1 143.000	1 094.000	990.000	944.000	1 130.000	859.000
W	2.170	1.760	2.430	1.550	1.110	2.110	1.020	1.430	1.490	2.690	1.450	2.090	1.340	1.360	1.840	2.040	2.510	3.500
Tl	2.070	4.150	1.800	1.970	1.080	0.985	1.220	0.965	2.540	1.570	1.260	3.320	1.330	0.861	0.822	1.390	0.597	1.050
Pb	14.100	13.200	12.100	11.000	16.000	12.200	5.670	12.500	10.600	18.800	39.500	10.600	18.800	12.100	13.300	17.100	25.200	25.400
Bi	0.172	0.521	0.079	0.286	0.254	0.416	0.209	0.293	0.299	0.250	0.338	0.226	0.357	0.239	0.156	0.448	0.253	0.722
Th	15.400	17.700	13.500	11.400	13.700	13.400	10.300	14.000	13.200	12.700	13.900	11.600	13.300	13.300	13.200	17.700	17.100	15.500
U	2.340	2.930	2.590	1.650	1.790	2.360	2.000	1.710	1.920	2.070	1.950	1.870	1.780	1.780	2.160	2.400	2.450	2.440
Nb	17.000	17.500	14.300	12.500	14.300	11.900	11.400	11.300	11.900	12.000	12.200	11.400	12.400	12.800	15.200	16.100	17.800	16.000
Ta	1.150	1.230	0.939	0.845	0.912	0.811	0.755	0.753	0.789	0.765	0.869	0.762	0.856	0.809	1.070	1.130	1.220	1.080
Zr	159.000	154.000	134.000	121.000	127.000	161.000	190.000	119.000	131.000	116.000	132.000	152.000	131.000	123.000	152.000	101.000	142.000	121.000
Hf	4.770	4.730	4.860	4.020	4.440	5.700	6.840	4.030	5.130	4.200	4.920	5.190	4.610	4.010	4.670	3.050	3.950	3.620



表 3 贡淖尔剖面额里图组碎屑岩稀土元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )  
Table 3 REE composition ( $\times 10^{-6}$ ) of fine-grained clastic rocks from the Elitu formation in the Gongnaoer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

样品原号	GNR-1	GNR-5	GNR-6-1	GNR-6-2	GNR-8	GNR-9	GNR-10	GNR-14-1	GNR-14-2	GNR-15-1	GNR-15-2	GNR-15-3	GNR-16	GNR-18-1	GNR-18-2	GNR-21-1	GNR-21-1	GNR-21-2	GNR-24
岩性	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	灰黑色泥岩	深灰-灰黑色泥质粉砂岩	深灰-灰黑色泥质粉砂岩	灰绿色细深灰色粉砂岩	砂岩
La	55.400	70.200	62.300	49.100	54.700	75.500	48.200	59.900	56.700	58.900	61.300	59.700	63.500	63.100	45.100	67.500	134.000	69.800	61.800
Ce	102.000	138.000	109.000	97.600	80.800	117.000	116.000	118.000	110.000	116.000	120.000	121.000	112.000	118.000	86.800	134.000	133.000	133.000	125.000
Pr	12.500	15.9000	12.800	11.700	12.800	15.000	11.800	13.300	12.800	12.700	13.000	13.500	13.700	13.200	11.100	14.900	14.900	14.700	13.900
Nd	48.500	60.600	50.600	42.200	43.500	52.800	45.600	48.000	46.900	48.300	49.200	50.900	48.500	49.200	43.100	56.800	56.800	55.200	54.000
Sm	9.010	10.700	9.190	8.010	8.230	10.600	9.070	8.720	7.910	8.740	9.350	9.290	8.430	9.260	7.550	9.750	9.750	9.210	9.360
Eu	1.780	1.950	1.570	1.370	1.490	1.750	1.690	1.730	1.470	1.480	1.730	1.600	1.680	1.720	1.530	1.750	1.750	1.850	1.540
Gd	7.850	9.020	7.450	6.440	6.390	8.970	7.010	6.890	7.140	6.890	7.330	8.110	6.820	7.710	6.530	8.320	8.320	7.950	7.950
Tb	1.410	1.470	1.290	0.995	1.070	1.380	1.270	1.110	1.080	1.140	1.280	1.320	1.120	1.240	1.130	1.310	1.310	1.240	1.330
Dy	7.620	7.460	6.260	5.870	6.380	7.930	6.840	6.010	5.990	6.230	6.680	7.190	6.000	6.610	5.980	6.380	6.380	6.070	6.810
Ho	1.520	1.380	1.240	1.100	1.070	1.390	1.270	1.130	1.120	1.180	1.210	1.350	1.150	1.340	1.180	1.160	1.160	1.160	1.300
Er	4.330	3.870	4.280	4.000	3.790	4.810	4.770	3.8000	3.740	3.830	4.480	4.450	3.750	4.150	3.360	3.270	3.270	3.360	3.660
Tm	0.748	0.639	0.569	0.483	0.566	0.673	0.672	0.471	0.508	0.572	0.543	0.640	0.564	0.632	0.587	0.556	0.556	0.582	0.618
Yb	4.610	4.170	3.860	3.080	3.430	4.320	4.530	3.380	3.250	3.850	3.640	4.580	3.810	3.840	3.690	3.540	3.540	3.720	3.920
Lu	0.636	0.565	0.505	0.500	0.469	0.630	0.661	0.492	0.470	0.561	0.578	0.623	0.487	0.589	0.519	0.485	0.485	0.522	0.546
$\Sigma$ REE	258.000	326.000	271.000	232.000	225.000	303.000	259.000	273.000	259.000	270.000	280.000	284.000	272.000	281.000	218.000	310.000	310.000	308.000	292.000
$\Sigma$ LREE	229.000	297.000	245.000	210.000	202.000	273.000	232.000	250.000	236.000	246.000	255.000	256.000	248.000	254.000	195.000	285.000	285.000	284.000	266.000
$\Sigma$ HREE	28.700	28.600	25.500	22.500	23.200	30.100	27.000	23.300	23.300	24.300	25.700	28.300	23.700	26.100	23.000	25.000	25.000	24.600	26.100
$\Sigma$ LREE/ $\Sigma$ HREE	8.000	10.000	9.600	9.400	8.700	9.100	8.600	11.000	10.000	10.000	9.900	9.100	10.000	9.800	8.500	11.000	11.000	12.000	10.000
$L_{\text{an}}/Y_{\text{bn}}$	8.100	11.000	11.000	11.000	11.000	12.000	7.200	12.000	12.000	10.000	11.000	8.800	11.000	11.000	8.200	13.000	13.000	13.000	11.000
$\delta$ Eu	0.650	0.610	0.580	0.580	0.630	0.550	0.650	0.680	0.600	0.580	0.640	0.560	0.680	0.620	0.670	0.590	0.590	0.660	0.550
$\delta$ Ce	0.930	0.990	0.930	0.980	0.730	0.840	1.170	1.010	0.980	1.020	1.020	1.030	0.910	0.980	0.930	1.020	1.020	1.000	1.030

半定量或定量方向的转变。其中运用全岩地球化学特征判别古气候特征不断地得到了发展,早在 20 世纪 80 年代 Nesbitt 等就提出了利用 CIA 指数确定物源区的化学风化程度的方法。一般而言,风化程度的强度与所处的古气候条件有关。温暖湿润的气候条件下,岩石受风化程度更强烈,寒冷干燥的气候条件下,岩石受风化程度相对较弱(冯连君等, 2003)。根据主量元素的 CIA 值、CIW 值(表 1)在剖面纵向上呈现出升高—降低—升高—降低的整体趋势的特征,表明古气候在时间轴上呈现出由略微寒冷干燥→温暖湿润→略微寒冷干燥→温暖湿润→略微寒冷干燥的演变特征,但是总体表现为温暖潮湿的气候特征,这与张泓等(1999)研究认为华北板块晚石炭世—早二叠世期间处于热带雨林气候的结果一致,同时,剖面中的砂岩、上部凝灰质砂岩中发育的钙藻+古石孔藻以及苔藓虫生物礁也证明了温暖潮湿的气候特征。

#### 4.2 源区成分特征

前人的研究成果表明,通过碎屑岩的主量元素、微量元素、稀土元素及其比值法分析可以有效的分析判别沉积物源区的性质(Zhang, 2004; Zhang, et al., 2006, 2007, 2012; 徐小涛和邵龙义, 2018)。根据 Roser and Korsch(1986)提出的  $TiO_2-SiO_2$  图解判断物源区的类型进行投图(图 6A),结果显示贡淖尔剖面的额里图组细碎屑岩的物源主要来源于火成岩区,个别点落入沉积岩区,指示火成岩物源区是贡淖尔剖面额里图组的主要贡献者。Roser and Korsch(1988)提出了利用主量元素判别函数确定沉积物源区的类型。图 6B 中,数据绝大部分落入长英质火成物源区,少部分落入石英质沉积岩物源区。表明贡淖尔剖面额里图组的物源区成分是长英质火成岩区和石英质沉积岩物源区,粗碎屑岩中发育的火山岩岩屑和沉积岩岩屑也映证了这一结论。

一些微量元素、稀土元素因其化学性质极其稳定,几乎不受风化、搬运、沉积作用的影响,通常完整地保留了母岩的信息(Taylor and McLennan, 1985; Bhatia and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1988; Zhang, 2004; Zhang et al., 2006, 2007, 2012, 2017; 孙林华和桂和荣, 2011; 张英利等, 2011; 蓝先洪等, 2018)。因此,常用微量元素及其比值法图解能够有效判别源区成分属性。根据前人的研究成果,将额里图组贡淖尔剖面的数据进行投图。在 Th/Sc-Zr/Sc 图解(图 6C)中,样品集中落在安山岩和长英质火山岩演化连线上,暗示物源区应当包含了中性和酸性火成岩的性质,没有沉积再循环的物质加入,这与主量元素投图(图 6A, B)结果和 CIA 值、

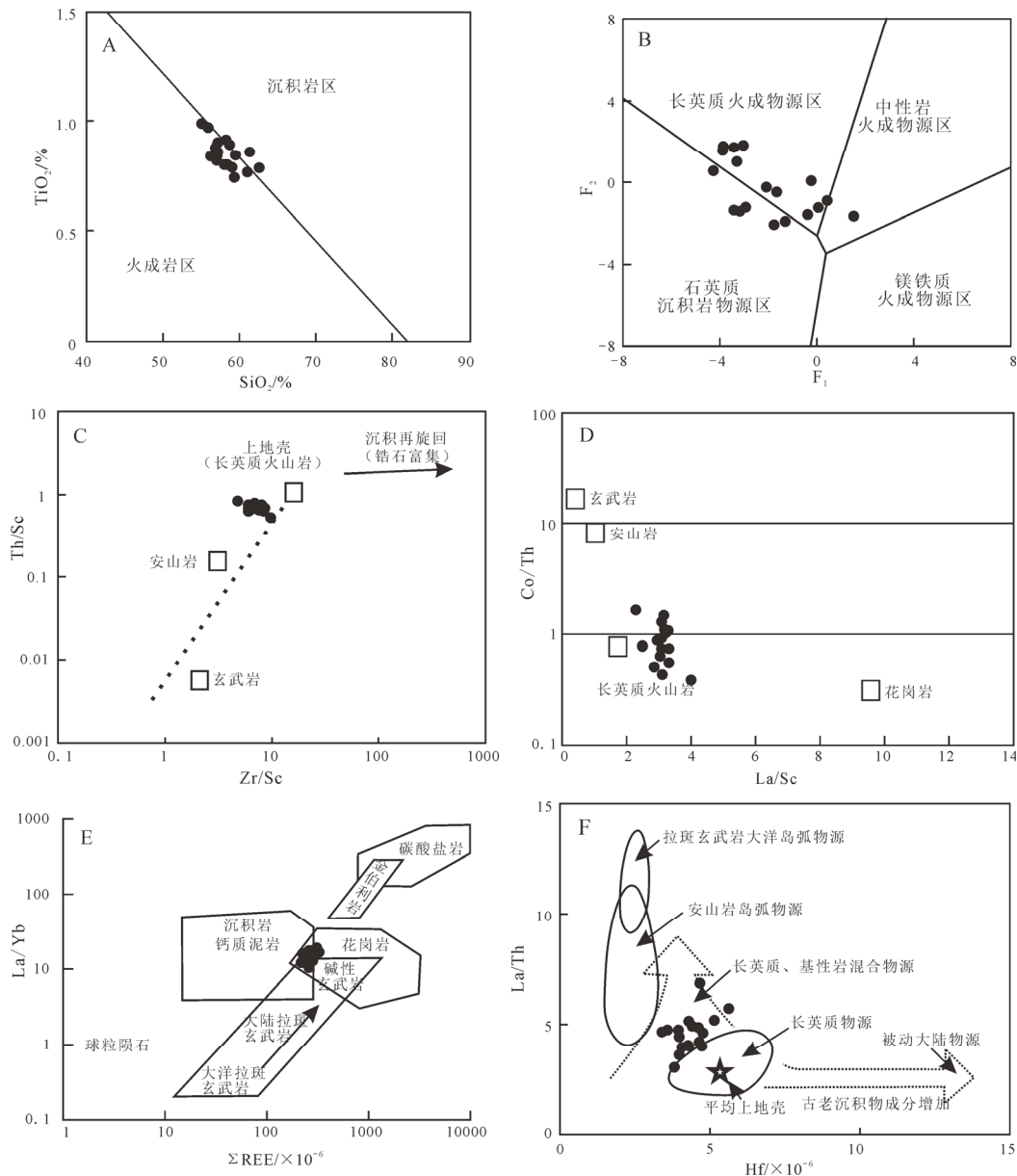
ICV 值以及 CIW 值分析结果相一致。在 Co/Th-La/Sc 图解(图 6D)中,样品集中落在长英质火山岩附近,但是 La/Sc 值略有偏高,而 Co/Th 值变化范围较大,说明额里图组贡淖尔剖面的沉积物存在多源区背景提供物源的特征。在 La/Yb- $\Sigma$ REE 图解中,样品点集中落在碱性玄武岩、花岗岩与沉积岩-钙质泥岩的重叠区(图 6E)。在 La/Th-Hf 图解中,样品点几乎全部落入长英质、基性岩混合物源区域,仅有一个样品落入参考区域之外(图 6F)。而根据样品的平均微量元素与球粒陨石标准化后(图 7A),发现除了个别大离子亲石元素(如 Sr)发生了较为明显的亏损外,整体趋势与上地壳的相一致。根据样品的平均稀土元素与球粒陨石标准化后(图 7B),样品的标准化曲线与上地壳标准化曲线平行且更富集。这与前人研究的在同构造背景下泥岩的 REE 质量分数要高于杂砂岩的 REE 质量分数 20%±(李福来等, 2016)认识相一致。综上所述,内蒙古正镶白旗贡淖尔地区额里图组下段沉积物母岩成分为长英质火成岩物源区和石英质沉积岩物源区的混合源区,来自大陆上地壳。

#### 4.3 源区构造背景

前人研究表明, $K_2O/Na_2O$  值与  $SiO_2$  含量之间的相关关系可以有效识别碎屑岩的母岩形成的构造背景(Roser and Korsch, 1988; Zhang, 2004; Zhang et al., 2012)。在  $K_2O/Na_2O-SiO_2$  图解中,大部分样品落入活动大陆边缘和被动大陆边缘,仅有一个点落入岛弧环境(图 8A)。由于长石发生蚀变作用,尤其是钠长石较钾长石更易发生风化蚀变,因此原岩的  $K_2O/Na_2O$  值较现今的比值应当更低。根据 Bhatia(1983)提出的运用常量元素区分源区构造背景的判别函数  $F_1'$  和  $F_2'$  进行投图后,结果样品全部落在活动大陆边缘区域(图 8B),而图 6 中显示出的源区母岩成分特征也表明原岩的大地构造背景不可能是来自被动大陆边缘环境,同时高  $K_2O$  也表明源区与活动大陆边缘有关。

微量稀土元素因其地球化学性质极其稳定,构造活动、成岩作用对其影响很小,而保存在碎屑组分中的一些微量元素和稀土元素特征包含了源区的大地构造环境信息(Bhatia, 1983; Roser and Korsch, 1986, 1988; McLennan, 1993; Zhang, 2004; Zhang et al., 2006, 2007, 2012, 2017)。因此,根据上述特性,地质学家研究沉积岩母岩、沉积盆地性质以及大地构造背景时,常用稀土元素和微量元素进行示踪。本文通过 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10 和 Th-Sc-Zr/10 三角图解进行判别正镶白旗额里图组贡淖尔剖面的原岩大地构造背景,结果显示 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10





A—TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>图解(据 Roser and Korsch, 1986); B—F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub>图解(据 Roser and Korsch, 1986); C—Th/Sc-Zr/Sc图解(据张英利等, 2011); D—Co/Th-La/Sc图解(据 Gu et al., 2002); E—La/Yb-ΣREE图解(据 Bhatia, 1985); F—La/Th-Hf图解(据 Floyd and Leveridge, 1987)。

A, B—TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> diagram and F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub> diagram (after Roser and Korsch, 1986); C—Th/Sc-Zr/Sc diagram (after ZHANG et al., 2011); D—Co/Th-La/Sc diagram (after Gu et al., 2002); E—La/Yb-ΣREE diagram (after Bhatia, 1985); F—La/Th-Hf diagram (after Floyd and Leveridge, 1987)。

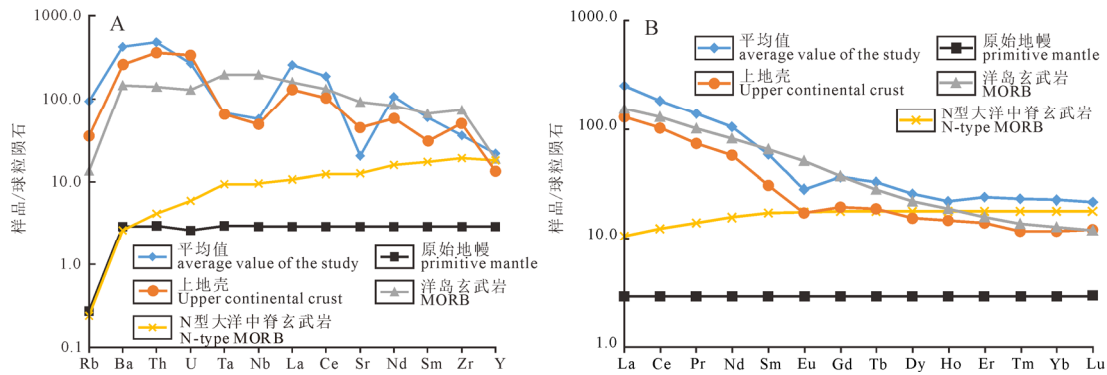
图 6 正镶白旗额里图组贡淖尔剖面细碎屑岩物源区判别分析图

Fig. 6 Discrimination diagrams illustrating sedimentary provenance of fine-grained clastic rocks from the Elitu Formation in Gongnaoer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

图解中样品点集中落入大陆岛弧及其附近(图 9A, C), 而 Th-Co-Zr/10 图解中样品点比较分散地落入活动大陆边缘内及其附近, 仅有 1 个点落入大陆岛弧内(图 9B)。结合主量元素判别图解、原岩成分特征判别结果和稀土元素示踪结果综合分析, 认为内蒙古正镶白旗地区贡淖尔剖面额里图组下段的母岩大地构造背景与大陆岛弧和活动大陆边缘相关。

而根据剖面的特征显示内蒙古正镶白旗地区贡淖尔剖面额里图组下段的碎屑岩具有以近源火山碎屑快速堆积为主远距离的沉积岩碎屑补充为辅的双物源供给的特征(图 2), 笔者参考了区域上大地构

造演化资料, 在晚石炭—二叠世, 华北北缘因古亚洲洋的俯冲而表现为安第斯型活动大陆边缘, 由华北板块北缘向北发育完整的弧-沟体系(Xiao et al., 2003)。同时, 在赤峰—巴彦敖包断裂带一线及以北地区广泛发育的石炭纪—二叠纪的钙碱性花岗岩侵入岩和二叠纪的岛弧火山岩, 尤其是研究区西部白乃庙以及研究区东北部可丹山地区均广泛发育石炭—早二叠纪岛弧火山岩(Hong et al., 1995; Xiao et al., 2003)。最新的研究表明, 研究区西南部额里图组的下伏早二叠世三面井组为岛弧型陆缘, 并伴随着强烈的火山活动(田树刚等, 2021)。上述两处岛弧可以

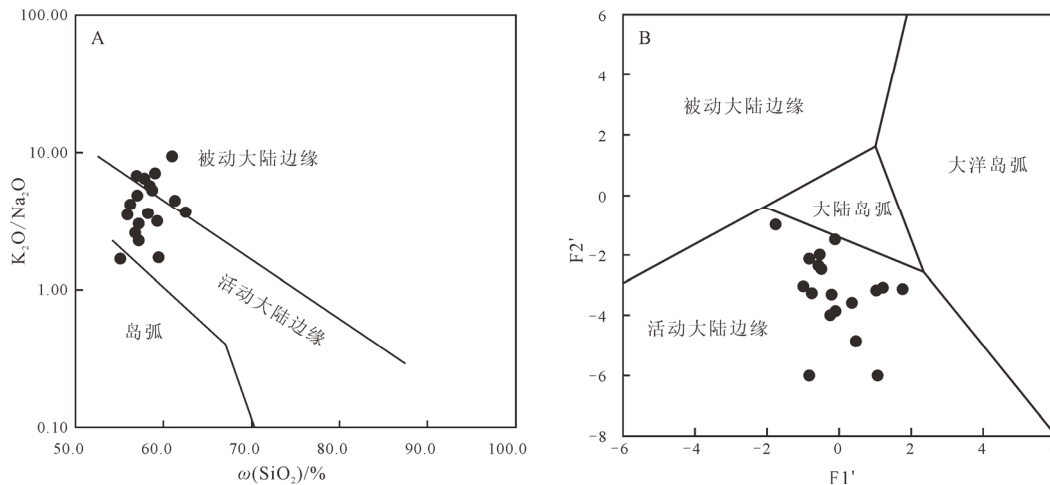


球粒陨石标准化值采用 Taylor and McLennan(1985); 上地壳值来源于 Rudnick and Gao(2014); 原始地幔、N 型大洋中脊玄武岩、洋岛玄武岩数据均来源于 Sun and McDonough(1989)。

Chondrite-normalized values are from Taylor and McLennan (1985); the Upper continental composition values of REE are from Rudnick and Gao (2014); the primitive mantle (PM), N-type mid-ocean ridge basalt (N-MORB) and oceanic island basalt (OIB) composition values of REE are from Sun and McDonough (1989).

图 7 正铕白旗额里图组贡淖尔剖面细碎屑岩微量元素(A)、稀土元素标(B)与球粒陨石标准化图

Fig. 7 Chondrite-normalized trace-elements (A) and REE diagram (B) of fine-grained clastic rocks from the Elitu Formation in Gongnaoer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia

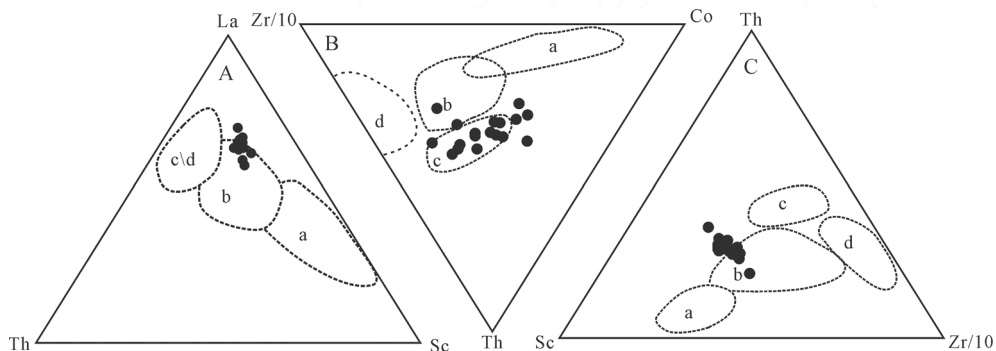


a— $K_2O/Na_2O-SiO_2$  图解(据 Roser and Korsch, 1986); b— $F1'-F2'$ 判别函数图解(据 Bhatia, 1983)。

a— $K_2O/Na_2O-SiO_2$  diagram(after Roser and Korsch, 1986); b—discrimination function (DF) analyses (after Bhatia, 1983).

图 8 正铕白旗额里图组贡淖尔剖面细碎屑岩主要元素构造环境分析图

Fig. 8 Tectonic discrimination plots by using major element of fine-grained clastic rocks from the Elitu formation in Gongnaoer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia



A—La-Th-Sc 图解; B—Th-Co-Zr/10 图解; C—Th-Sc-Zr/10 图解; a—大洋岛弧; b—大陆岛弧; c—主动大陆边缘; d—被动大陆边缘。

A—La-Th-Sc diagram; B—Th-Co-Zr/10 diagram; C—Th-Sc-Zr/10 diagram; a—Oceanic Island Arc; b—Continental Island Arc; c—Active Continental Margin; d—Passive Continental Margin.

图 9 正铕白旗额里图组贡淖尔剖面细碎屑岩微量元素构造环境判别图(据 Bhatia and Crook, 1986)

Fig. 9 Trace elements tectonic discrimination diagrams of fine-grained clastic rocks from Elitu Formation in Gongnaoer section, Zhengxiangbaiqi, Inner Mongolia (after Bhatia and Crook, 1986)

为盆地提供大量以火山物质为主的沉积物。而南部的华北克拉通不可能提供诸如本文上述特征的大量

火山碎屑的近源沉积物, 但是不排除提供长距离搬运的沉积岩屑(石英砂岩岩屑)的可能。同时, 区内额



里图组二段发育的安山岩、凝灰质安山岩也可能指示岛弧的存在, 只是额里图组一段沉积岩中的火山岩屑的更准确的亲缘性还有待进一步研究验证。因此, 综合区域上的大地构造演化资料, 结合本文取得的认识, 笔者认为研究区额里图组的沉积盆地性质为弧后盆地。

## 5 结论

(1)根据剖面出露的岩性特征以及代表性砂岩的镜下特征, 额里图组下段低成熟度的沉积物为近源快速堆积的结果, 并且沉积过程中伴随着强烈的火山作用和构造运动。

(2)内蒙古正镶白旗贡淖尔剖面额里图组下段常量元素特征表明, 研究区额里图组古气候呈现出由略微寒冷干燥→温暖湿润→略微寒冷干燥→温暖湿润→略微寒冷干燥的演变趋势, 但是总体表现为温暖潮湿的气候特征, 并且, 岩母岩遭受了中等程度的化学风化作用。

(3)沉积物大多属于构造活跃地区第一次旋回的沉积物, 母岩成分主要是来自上地壳的长英质火成岩和石英质沉积岩源区。

(4)综合主量元素、微量元素和稀土元素的特征, 并结合前人的研究, 内蒙古正镶白旗贡淖尔剖面额里图组下段沉积物的源区的大地构造背景与大陆岛弧和活动大陆边缘相关, 沉积盆地为弧后盆地。

**致谢:** 感谢中国地质科学院地质研究所的田树刚老师和中国地质科学院矿产资源研究所的张英利老师分别在地质认识和岩石地球化学与大地构造背景之间的联系方面提供的指导和帮助, 以及一起进行采样、记录、拍照、剖面测制、样品整理的同学们, 北京核工业地质研究院的样品测试的老师, 以及对本文提出修改意见的评审专家和编辑部工作人员, 在此我真心地向他们一并表示感谢!

## Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. 20201600000180202), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. KK2005), and National Natural Science Foundation of China (No. 41572098).

## 参考文献:

陈井胜, 邢德和, 刘森, 张德军, 马国祥, 杨佳林, 张志斌. 2015. 内蒙古元宝山小建昌营子地区三面井组沉积环境[J]. 世界地质, 34(4): 1013-1023.

冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用[J]. 地学前缘, 10(4): 539-544.

和政军, 刘淑文, 任纪舜, 王瑜. 1997. 内蒙古林西地区晚二叠

世一早三叠世沉积演化及构造背景[J]. 中国区域地质, 16(4): 403-427.

蓝先洪, 徐晓达, 王中波, 李日辉, 顾兆峰, 陈晓辉. 2018. 渤海西部表层沉积物的稀土元素分布特征与物源约束[J]. 地球学报, 39(1): 37-44.

李福来, 肖飞, 孟凡超, 任泽樱. 2016. 内蒙古索伦地区上二叠统林西组碎屑岩地球化学特征及其对物源的指示意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 46(6): 1769-1780.

李明龙, 陈林, 田景春, 郑德顺, 许克元, 方喜林, 曹文胜, 赵军, 冉中夏. 2019. 鄂西走马地区南华纪古城期-南沱早期古气候和古氧相演化: 来自细碎屑岩元素地球化学的证据[J]. 地质学报, 93(9): 2158-2170.

梅杨. 2013. 内蒙古正镶白旗二叠系地层特征及对比[D]. 石家庄: 石家庄经济学院.

内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 1-725.

孙林华, 桂和荣. 2011. 皖北地区新元古代构造背景的转换: 来自碎屑岩地球化学的证据[J]. 地球学报, 32(5): 523-532.

田树刚, 范嘉松, 施立志, 汪彪. 2021. 内蒙古、河北交界区中二叠世三面井期岛弧型陆缘环境[J]. 地球学报, 42(4): 472-486.

田树刚, 李子舜, 王峻涛, 詹立培, 牛绍武. 2012. 内蒙古东部及邻区石炭纪—二叠纪构造地层格架与形成环境[J]. 地质通报, 31(10): 1554-1564.

田树刚, 李子舜, 张永生, 宫月莹, 翟大兴, 王猛. 2016b. 内蒙古东部及邻区晚石炭世—二叠纪构造古地理环境及演变[J]. 地质学报, 90(4): 688-707.

田树刚, 张永生, 宫月莹, 李子舜, 高联达, 翟大兴, 朱常伟. 2016a. 内蒙古林西县及邻区晚二叠世生物礁和环境意义[J]. 中国科学: 地球科学, 46(7): 963-975.

田树刚, 张永生, 王俊涛, 牛绍武. 2011. 兴安-内蒙古地区晚古生代生物礁及其构造和油气意义[J]. 中国科学: 地球科学, 41(4): 493-503.

田树刚, 张永生, 翟大兴, 宫月莹. 2018. 内蒙古南部晚二叠世同生变形构造与陆缘裂陷[J]. 地球学报, 39(2): 144-154.

田洋, 赵小明, 王令占, 涂兵, 谢国刚, 曾波夫. 2015. 鄂西南利川三叠纪须家河组地球化学特征及其对风化、物源与构造背景的指示[J]. 岩石学报, 31(1): 261-272.

韦刚健, 陈毓蔚, 李献华, 刘颖. 2001. NS93-5 钻孔沉积物不活泼微量元素记录与陆源输入变化探讨[J]. 地球化学, 30(3): 208-216.

徐小涛, 邵龙义. 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素[J]. 古地理学报, 20(3): 515-522.

杨江海, 杜远生, 徐亚军, 朱杰. 2007. 砂岩的主量元素特征与盆地物源分析[J]. 中国地质, 34(6): 1032-1044.

张泓, 沈光隆, 何宗莲. 1999. 华北板块晚古生代古气候变化对聚煤作用的控制[J]. 地质学报, 73(2): 131-139.

张英利, 王宗起, 闫臻, 王涛. 2011. 库鲁克塔格地区新元古代贝义西组的构造环境: 来自碎屑岩地球化学的证据[J]. 岩石学报, 27(6): 1785-1796.

郑月娟, 黄欣, 孙跃武, 宋绍钧, 陈树旺, 张健, 公繁浩, 张德军, 张海华, 苏飞. 2018. 松辽盆地及外围石炭系—二叠系

划分与对比[J]. 地质与资源, 27(1): 1-15.

中国地质科学院矿产资源研究所. 2019. 松辽外围南部盆地群油气基础地质调查[R]. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所.

朱俊宾, 和政军. 2017. 兴蒙造山带南缘早—中二叠世砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其构造意义[J]. 地质通报, 36(2-3): 357-371.

## References:

BHATIA M R, CROOK K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92: 181-193.

BHATIA M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627.

BHATIA M R. 1985. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic greywackes and mudstones: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 45(1-2): 97-113.

CHEN Jing-sheng, XING De-he, LIU Miao, ZHANG De-jun, MA Guo-xiang, YANG Jia-lin, ZHANG Zhi-bin. 2015. Depositional environment of Sanmianjing Formation in Xiaojianchangyingzi area of Yuanbaoshan, Inner Mongolia[J]. *Global Geology*, 34(4): 1013-1023(in Chinese with English abstract).

COX R, LOWE D R, CULLERS R L. 1995. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919-2940.

FENG Lian-jun, CHU Xue-lei, ZHANG Qi-ru, ZHANG Tong-gang. 2003. CIA (Chemical Index of Alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 539-544(in Chinese with English abstract).

FENG R, KERRICH R. 1990. Geochemistry of fine-grained clastic sediments in the Archean Abitibi greenstone belt, Canada: Implications for provenance and tectonic setting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(4): 1061-1081.

FLOYD P A, LEVERIDGE B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 144: 531-542.

Geological and Mineral Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. Regional Geological Records of Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-725(in Chinese).

GU X X, LIU J M, ZHENG M H, TANG J X, QI L. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393-407.

HARNOIS L. 1988. The CIW index: A new chemical index of weathering[J]. *Sedimentary Geology*, 55(3-4): 319-322.

HE Zheng-jun, LIU Shu-wen, REN Ji-shun, WANG Yu. 1997. Late Permian-early Triassic sedimentary evolution and tectonic setting of the Linxi region, Inner Mongolia[J]. *Regional Geology of China*, 16(4): 403-427(in Chinese with English abstract).

HONG Da-wei, HUANG Huai-zeng, XIAO Yi-jun, XU Hai-ming, JI Man-yuan. 1995. Permian Alkaline Granites in Central

Inner Mongolia and Their Geodynamic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 8(1): 27-39.

Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 2019. Basic geological survey of oil and gas in southern basin group of songliao periphery[R]. Beijing: Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).

LAN Xian-hong, XU Xiao-da, WANG Zhong-bo, LI Ri-hui, GU Zhao-feng, CHEN Xiao-hui. 2018. Distribution Characteristics characteristics of Rare rare Earth earth Elements elements and Their their Provenance provenance Constraints constraints in the Surface surface Sediments sediments from the Western Bohai Sea[J]. *Acta Geologica Geoscientia Sinica*, 39(1): 37-44(in Chinese with English abstract).

LI Fu-lai, XIAO Fei, MENG Fan-chao, REN Ze-ying. 2016. Geochemical characteristics and implication for provenance of upper Permian Linxi formation clastic rocks in Solonker area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 46(6): 1769-1780(in Chinese with English abstract).

LI Ming-long, CHEN Lin, TIAN Jing-chun, ZHENG De-shun, XU Ke-yuan, FANG Xi-lin, CAO Wen-sheng, ZHAO Jun, RAN Zhong-xia. 2019. Paleoclimate and paleo-oxygen evolution during the Gucheng Period-early Nantuo Period of Nanhua System in the Zouma area, West Hubei: evidence from elemental geochemistry of fine clastic rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(9): 2158-2170(in Chinese with English abstract).

MCLENNAN S M. 1993. Weathering and Global Denudation[J]. *The Journal of Geology*, 101(2): 295-303.

NESBITT H W, YOUNG G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 299: 715-717.

ROSER B P, KORRSCH R J. 1986. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ration[J]. *The Journal of Geology*, 94(5): 635-650.

ROSER B P, 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.

RUDNICK R L, GAO S. 2014. Composition of the Continental Crust[C]/HOLLAND H D, TUREKIAN K K. *Treatise on Geochemistry(Second Edition)*. Oxford: Elsevier-Pergamon: 1-51.

SUN Lin-hua, GUI He-rong. 2011. Transition of Neoproterozoic tectonic background in Northern Anhui Province: Evidence from geochemistry of clastic rocks[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 32(5): 523-532(in Chinese with English abstract).

SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]/SAUNDERS A D, NORRIS M J. *Magmatism in the Ocean Basalts*. London: Geological Society Special Publication: (42): 313-345.

TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific.

TIAN Shu-gang, FAN Jia-song, SHI Li-zhi, WANG Biao. 2021.

- Sanmianjingian stage conditions of the island-arc type epicontinental environment in the Heibei-Inner Mongolia border area[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(4): 472-486(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shu-gang, LI Zi-shun, WANG Jun-tao, ZHAN Li-pei, NIU Shao-wu. 2012. Carboniferous-Permian tectonic and stratigraphic framework of eastern Inner Mongolia as well as adjacent areas and its formation environment[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(10): 1554-1564(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shu-gang, LI Zi-shun, ZHANG Yong-sheng, GONG Yue-xuan, ZHAI Da-xing, WANG Meng. 2016b. Late Carboniferous-Permian tectono-geographical conditions and development in Eastern Inner Mongolia and adjacent areas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 688-707(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shu-gang, ZHANG Yong-sheng, GONG Yue-xuan, LI Zi-shun, GAO Lian-da, ZHAI Da-xing, ZHU Chang-wei. 2016a. Environmental and tectonic significance of Late Permian reefs in the Linxi and adjacent areas in Inner Mongolia of China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 46(7): 963-975(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shu-gang, ZHANG Yong-sheng, WANG Jun-tao, NIU Shao-wu. 2011. Late Paleozoic reefs and their significance for tectonics and oil-gas exploration in the Hinggan-Inner Mongolia area[J]. *Science China Earth Science*, 41(4): 493-503(in Chinese with English abstract).
- TIAN Shu-gang, ZHANG Yong-sheng, ZHAI Da-xing, GONG Yue-xuan. 2018. Late Permian syngenetic deformation structures and epicontinental faulted depression in Southern Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(2): 144-154(in Chinese with English abstract).
- TIAN Yang, ZHAO Xiao-ming, WANG Ling-Zhan, TU Bing, XIE Guo-gang, ZENG Bo-fu. 2015. Geochemistry of clastic rocks from the Triassic Xujiahe Formation, Lichuan area, southwestern Hubei: Implications for weathering, provenance and tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 261-272(in Chinese with English abstract).
- WEI Gang-jian, CHEN Yu-wei, LI Xian-hua, LIU Ying. 2001. Immobile trace element records of sediments of Core NS93-5: Implications for terrestrial input variation[J]. *Geochimica*, 30(3): 208-216(in Chinese with English abstract).
- WINDLEY B F, ALEXEIEV D, XIAO W J, KRÖNER A, BADARCH G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164: 31-47.
- XIAO Wen-jiao, WINDLEY B F, HAO Jie, ZHAI Ming-guo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1-20.
- XU Xiao-tao, SHAO Long-yi. 2018. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance[J]. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 20(3): 515-522(in Chinese with English abstract).
- YANG Jiang-hai, DU Yuan-sheng, XU Ya-jun, ZHU Jie. 2007. Major element characteristics of sandstones and provenance analysis of basins[J]. *Geology in China*, 34(6): 1032-1044(in Chinese with English abstract).
- YANG Mei. 2013. Characteristics and correlation of the Permian strata in ZhengXiangBaiQi, Inner Mongolia[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang University of Economics(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hong, SHEN Guang-long, HE Zong-lian. 1999. Control of palaeoclimatic change on Late Palaeozoic coal accumulation of the North China Plate[J]. *Acta Geologica Sinica*, 73(2): 131-139(in Chinese with English abstract).
- ZHANG K J, LI B, WEI Q G. 2012. Diversified provenance of the Songpan-Ganzi triassic turbidites, central China: Constraints from geochemistry and Nd isotopes[J]. *Journal of Geology*, 120(1): 68-82.
- ZHANG K J, LI Q H, YAN L L, ZENG L, LU L, ZHANG Y X, HUI J, JIN X, TANG X C. 2017. Geochemistry of limestones deposited in various plate tectonic settings[J]. *Earth-Science Reviews*, 167: 27-46.
- ZHANG K J, ZHANG Y X, LI B, ZHONG L F. 2007. Nd isotopes of siliciclastic rocks from Tibet, western China: Constraints on the pre-Cenozoic tectonic evolution[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3-4): 604-616.
- ZHANG K J, ZHANG Y X, LI B, ZHU Y T, WEI R Z. 2006. The blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt (northern Tibet, China) as an in situ suture zone: Evidence from geochemical comparison with the Jinsa suture[J]. *Geology*, 34(6): 493-496.
- ZHANG K J. 2004. Secular geochemical variations of the Lower Cretaceous siliciclastic rocks from central Tibet (China) indicate a tectonic transition from continental collision to back-arc rifting[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 229(1-2): 73-89.
- ZHANG Ying-li, WANG Zong-qi, YAN Zhen, WANG Tao. 2011. Tectonic setting of Neoproterozoic Beiyixi Formation in Quruqtagh area, Xinjiang: Evidence from geochemistry of clastic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1785-1796(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yue-juan, HUANG Xin, SUN Yue-wu, SONG Shao-jun, CHEN Shu-wang, ZHANG Jian, GONG Fan-hao, ZHANG De-jun, ZHANG Hai-hua, SU Fei. 2018. The Carboniferous-Permian stratigraphic division and correlation in the Songliao Basin and its peripheral areas[J]. *Geology and Resources*, 27(1): 1-15(in Chinese with English abstract).
- ZHU Jun-bin, HE Zheng-jun. 2017. Detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes of Early-Middle Permian sandstones from the south margin of Xing-Meng orogenic belt and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(2-3): 357-371(in Chinese with English abstract).