

贺兰山地区晚三叠世沉积主微量元素物源分析及方法探讨

李 蒙^{1,2}, 赵红格^{1,2}, 李文厚^{2*}, 任战利², 刘稳航³

1. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;

2. 西北大学 地质学系, 西安 710069;

3. Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

摘要: 通过系统总结贺兰山地区晚三叠世的物源研究成果, 结合研究区周缘地质概况、上三叠统延长组地层厚度变化和主微量元素分析, 对延长组物源时空演化进行了综合研究, 认为贺兰山地区晚三叠世延长组早期(T_{3y1}-T_{3y2})物源主要来自西北部、西部和南部, 晚期(T_{3y3}-T_{3y5})物源主要来自西北部、西部、南部和东部。在物源综合研究的基础上, 对现今主微量元素常用的物源分析方法做了对比分析, 认为主量元素/UCC、碎屑岩主量元素源区岩性函数判别图、微量元素/UCC, La/Th与Hf判别图、Co/Th与La/Sc判别图、Th/Sc与Zr/Sc判别图以及Th/U与Th判别图在物源分析过程中均有较好效果, 总体判别结果比较接近, 但也存在一些差异。岩性判别、CIA指数、Eu异常、Rb/Sr判别分析对反映不同性质母岩有很好的效果, 可以推广并作为判断物源复杂程度的重要参考手段。文章详细阐述了几种物源分析方法的优势与问题, 得出了一些新的认识和见解, 对完善物源分析手段提供了一定的参考。

关键词: 贺兰山; 晚三叠世; 主微量元素; 物源时空演化

中图分类号: P588.2; P534.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7493 (2018) 06-0841-15

Major and Trace Elements of the Late Triassic Strata in the Helan Mountain: Constraints on the Provenance and Discussions on Different Methods

LI Meng^{1,2}, ZHAO Hongge^{1,2}, LI Wenhou^{2*}, REN Zhanli², LIU Wenhong³

1. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

3. Institute of Geological Sciences, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

Abstract: Systematic provenance analysis of the Late Triassic strata in the Helan Mountain area have been performed, based on the geological conditions, thickness variation, and major and trace elements. Results show that sediments of the Late Triassic Yanchang Formation in the Helan Mountain were mainly derived from its northwest, west, south and east in the early stage (the lower two members) and from its northwest, west and south in the later stage (the upper three members). In this study, we systemically compare the effectiveness of various major and trace elements as provenance indicators. Analysis of the major elements/UCC, main elements of discriminant function diagram, trace elements/UCC, La/Th and Hf, Co/Th and La/Sc, Th/Sc and Zr/Sc discrimination diagrams, and Th/U and Th discrimination diagram yields largely similar results in term of indicating provenance, though differences exists. Besides

收稿日期: 2018-04-13; 修回日期: 2018-06-04

基金项目: 西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项项目 (BJ08133-14; BJ081334-2); 国家自然科学基金项目 (41330315; 40902032); 国家科技油气重大专项项目 (2011ZX05023-001-002); 中国地质调查局矿产资源调查评价项目: 鄂尔多斯周缘盆地群油气基础地质调查 (121201011000150014) 联合资助

作者简介: 李蒙, 男, 1989年生, 博士研究生, 主要从事沉积盆地物源研究及沉积学研究; E-mail: limengdxxr@sina.com

***通讯作者:** 李文厚, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积学研究; E-mail: liwenhou@263.net

the above indicators, analysis of lithological discriminant, CIA index, Eu anomaly, and Rb/Sr discrimination can also provide effective information for provenance, and can be used as important indicator for judging the complex provenance compositions. This paper provides details about the advantages and disadvantages of various methods for provenance analysis by major and trace elements and draws some new insights, which provided a scientific basis for further improving provenance analysis.

Key words: Helan Mountain; Late Triassic; major and trace elements; provenance spatial-temporal evolution

Corresponding author: LI Wenhou, Professor; E-mail: liwenhou@263.net

沉积地球化学方法主要根据主微量元素分析来判断沉积物母岩区岩性 (Floyd and Leveridge, 1987; Roser and Korsch, 1988; Pearce et al., 1983; McLennan and Taylor, 1983; Taylor and McLennan, 1985; Condie, 1991; Crichton and Condie, 1993)、反映沉积物风化程度 (Nesbitt and Young, 1982; Kimberley and Grandstaff, 1986)、反映沉积物搬运距离 (Taylor and McLennan, 1985; McLennan et al., 1993)、判断沉积区大地构造背景 (Roser and Korsch, 1988) 以及判断沉积物岩石类型 (Herron, 1988) 等方面, 而且近些年来的应用非常广泛, 但是, 对于改进各模式的应用范围, 深入探讨早期学者创立的沉积地球化学应用模式的局限性涉及较少。本文在贺兰山地区晚三叠世延长组大量沉积物源研究成果的基础上, 探讨了各沉积地球化学方法的应用范围, 分析了不同沉积地球化学方法反映物源属性的差异问题, 并改进了部分方法的应用范围, 为完善沉积地球化学方法在物源分析中的应用提供部分实践基础。

贺兰山地区晚三叠世延长组物源问题是鄂尔多斯盆地西北缘沉积构造演化和原盆恢复研究的关键环节, 根据目前的研究成果来看, 贺兰山地区上三叠统延长组主要物源来自于西北部和西部 (叶连俊, 1983; Liu, 1998; 苏春乾等, 2004; 王锋等, 2006; 刘池洋等, 2006; 赵文智等, 2006; 杨华等, 2011; 赵红格等, 2012), 也有学者认为南部也是主要物源来源之一 (李蒙, 2015), 此外, 东部可能也提供了少量物源 (柯保嘉等, 1992; 汤锡元等, 1992; 杨俊杰和李克勤, 1992; Ritts et al., 2004; 魏红红等, 2001; 高山林, 2001; 李蒙, 2015)。前人研究认为贺兰山地区晚三叠世西北部物源主要为阿拉善-兴蒙造山带太古代-古元古代变质岩和岩浆岩, 部分为

周邻寒武纪一早中三叠世的沉积岩及岩浆岩 (赵红格等, 2012; 蒋盛, 2016), 另一些学者认为贺兰山盆地北部物源主要来自正谊关断裂之北的贺兰山群古老变质岩, 盆地西缘主要来自于阿拉善古陆 (苏春乾等, 2004)。本文对上三叠统延长组一段至五段进行了系统采样, 通过地层厚度变化和主微量元素判别对延长组各段物源区属性及其演化过程开展了进一步研究, 并在此基础上综合探讨了主微量元素方法的应用范围与问题。

1 研究区周邻地质概况及延长组地层特征

贺兰山西北部狼山地区主要发育古元古代阿拉善群、元古界狼山群。古元古代阿拉善群主要为石榴子石黑云斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩及少量的大理岩夹层 (杨福新, 1998)。贺兰山北部主要为古元古代角闪岩相-麻粒岩相的高级区域变质岩系, 即孔兹岩系 (胡能高等, 1994; Zhai et al., 2000; Zhao et al., 2005; 周喜文和耿元生, 2009; Dong et al., 2014; Liu et al., 2014), 也含有部分太古代岩石 (周喜文和耿元生, 2009; 董春艳等, 2007; Dong et al., 2014; Liu et al., 2014), 主要岩性为富铝片麻岩、石榴黑云变粒岩、石榴黑云斜长变粒岩和大理岩 (胡能高等, 1994; 卢良兆等, 1996)。现今鄂尔多斯盆地东北部阴山、大青山和乌拉山地区主要出露孔兹岩系、高级变质片麻岩与基性片麻岩以及闪长质片麻岩、绿片岩, 此外还有部分石英岩、变粒岩、大理岩出露 (蔡佳等, 2013; 钟长汀等, 2014)。贺兰山南部出露的岩浆岩、变质岩主要为赵池沟群和黄旗口花岗岩, 赵池沟群主要出露于炭井沟南部赵池沟地区, 岩性以黑云斜长片麻岩、黑云母二长片麻岩为主^① (霍福臣

①宁夏地质局区域地质调查队. 1978. 巴伦别立幅 1:200000 区域地质调查报告: 1-117.

等, 1987)。黄旗口花岗岩呈南北向分布, 主要岩性为黑云母英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩, 岩体中普遍含深灰色细粒黑云母变粒岩、暗灰色黑云斜长片麻岩等变质岩捕虏体, 且有伟晶岩、辉绿岩脉体大量发育^① (王成等, 2012)。

根据钻井资料以及地层出露情况绘制了贺兰山地区及周边地质概况及延长组地厚分布图。研究区位于鄂尔多斯地块西北部、贺兰山北部地区, 如图1所示。贺兰山地区上三叠统延长组一段

至五段岩性由下至上粒度逐渐变细, 下部主要为黄绿色厚层砾岩、含砾砂岩、中粗粒长石石英砂岩, 岩性总体有自东向西变粗的趋势; 上部总体为中细粒长石石英砂岩、黑色粉砂岩、灰黑—黑色页岩^{①、②}。沉积相由早期冲积扇、辫状河沉积发展为湖泊相沉积。研究区延长组厚度在 2000~2500 m 左右, 鄂尔多斯盆地西部延长组的厚度在 500~1000 m 左右, 二者厚度相差很大, 而且贺兰山地区延长组自西向东厚度逐渐减薄, 而鄂尔多

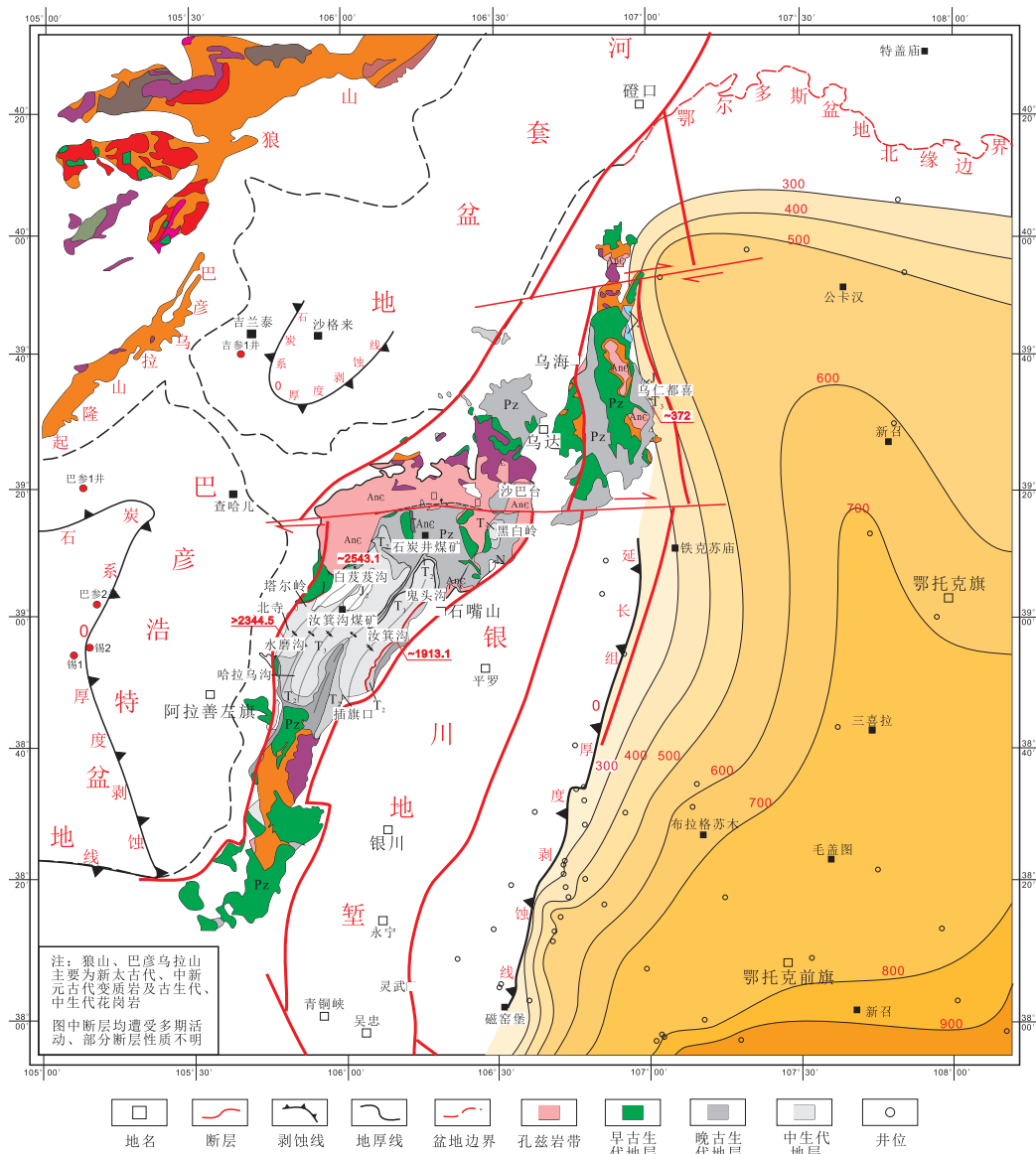


图1 贺兰山地区及周边地质概况和延长组地层厚度分布图

Fig. 1 Map showing the geology of the Helan mountain and the isopach of the Late Triassic Yanchang Formation

①宁夏地质局区域地质调查队. 1982a. 阿拉善左旗幅 1:200000 区域地质调查报告: 1-139.

②宁夏地质局区域地质调查队. 1982b. 石嘴山市幅 1:200000 区域地质调查报告: 1-162.

2.1.1 母岩区岩性判别

经测试所有样品 TiO_2 含量在 0.16%~0.87% 之间, MgO 含量在 0.34%~7.22%, CaO 含量在 0.07%~12.78% 之间, Na_2O 含量在 0.10%~2.50%, K_2O 含量在 1.68%~5.21% 之间。依据 Roser 和 Korsch (1988) 的研究结果对样品物源区岩石性质进行研究。计算公式为:

$F1 = F1'(\text{TiO}_2) * \text{样品}(\text{TiO}_2) + F1'(\text{Al}_2\text{O}_3) * \text{样品}(\text{Al}_2\text{O}_3) + F1'(\text{Fe}_2\text{O}_3) * \text{样品}(\text{Fe}_2\text{O}_3) + F1'(\text{MgO}) * \text{样品}(\text{MgO}) + F1'(\text{CaO}) * \text{样品}(\text{CaO}) + F1'(\text{Na}_2\text{O}) * \text{样品}(\text{Na}_2\text{O}) + F1'(\text{K}_2\text{O}) * \text{样品}(\text{K}_2\text{O}) + C(F1' \text{ 为表 1 对应的常数})$, $F2$ 的计算公式和 $F1$ 相同, 计算结果如图 3 所示:

总体上, 样品的物源区主要为石英岩物源区, 物源区岩性在同一区域相似关系较好。南部样品 DHLW-04, CQG-01 和 13TJG-01 投点位置接近, 反映源区岩性比较相似。沿中部汝箕沟至古拉本一线样品主要为石英岩物源区, 而北部样品 13GTG-13 位于中性岩物源区。分段来看, 延长组一段样品 DHLW-04, CQG-01, TJG-01 主要集中在研

究区南部, 物源主要来自石英岩物源区。延长组二段样品 RJG-04 为长英质物源区, 13RJG-05, RJG-11 为石英岩物源区, 三者相距不远, 但母岩岩性存在明显差别。延长组三段样品 13RJG-09 为长英质物源区 SMG-03, DHL-05 为石英岩物源区。延长组四段样品 13GLB-13 为石英岩物源区, RJG-10 为长英质物源区, 13GTG-13 为中性岩物源区。延长组五段样品 XSS-03, DSG-01, 13GTG-11 为石英岩物源区, 13RJG-23, 13GLB-06 为铁镁质物源区, 此时研究区主体为湖相沉积, 沉积中心位于汝箕沟—香棒子沟一带, 样品 13RJG-23, 13GLB-06 所在区域源岩表现为铁镁质特征, 与其东西两侧样品完全不同, 一定程度上反映贺兰山东西一线物源源区并不一致。从主量元素分析来看, 中部古拉本地区很可能主要受北部孔兹岩带的影响, 西部 XSS-03 地区主要受西部再循环物源的影响, 东部 DSG-01, 13GTG-11 主要受东部物源的影响。

2.1.2 化学风化蚀变系数

CIA 指数判别主要考虑搬运距离远近及化学风化差异, 由于研究区面积相对较小, 化学风化差异相对较小。在化学风化不明显的环境下 CIA, 指数主要受搬运距离及物源区岩性的影响, CIA 指数均进行了 CaO 含量校正 (Bock et al., 1998)。研究区延长组沉积相由下至上经历了冲积扇—辫状河—湖相的演化过程, 沉积粒度整体逐渐变细, 搬运距离随着剥蚀区的后移逐渐增加。

平均上地壳物质组成主要根据沉积岩、变质岩和岩浆岩的不同比例组合得出 (Wedepohl, 1995; Rudnick 与 Gao, 2003), 平均上地壳的 CIA 值一定程度上代表了上地壳风化程度的平均值, 以 Rudnick 与 Gao (2003) 的地壳物质组成平均值进行计算, CIA 指数为 61.45, 本文所有样品的 CIA 指数值均高于 61.45, CIA 指数范围为 62.62~82.35。

$\text{CIA} = \text{Al}_2\text{O}_3 / [\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}^*] * 100$ (Nesbitt and Young, 1982)

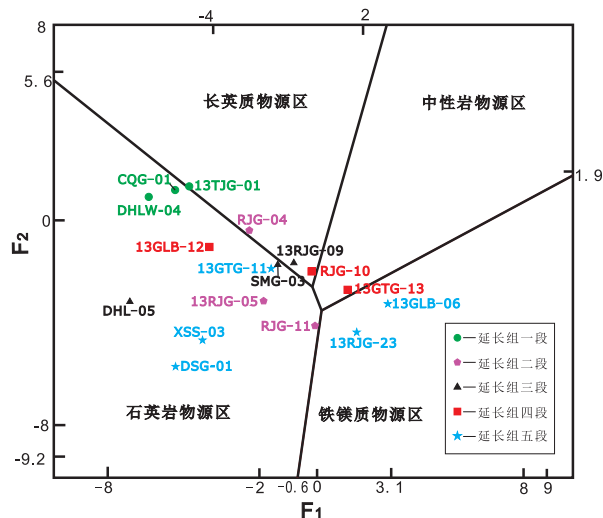


图3 碎屑岩源区性质函数判别图解(图版据 Roser and Korsch, 1988; 后文层位标注符号均一致, 不再说明)

Fig. 3 Discrimination diagram for provenance analysis of clastic rocks (Roser and Korsch, 1988; The position notation is the same as those in the following diagrams)

表 1 砂、泥岩源区性质判别系数

Table 1 Discriminant coefficient of sand and mudstone source rock properties (After Roser and Korsch, 1988)

变量	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	C(常数)
F1'系数	-1.773	-0.607	0.76	-1.5	0.616	0.509	-1.224	-9.090
F2'系数	0.445	0.070	-0.25	-1.142	0.438	1.475	1.426	-6.816

如图4所示,可以看出南北向上CIA指数没有明显的规律性,从延长组一段至延长组五段也没有统一的升高趋势,整体上南北两端的CIA指数较低,而中部荒草滩一带CIA指数较高,很可能是南北方向物源比较复杂所致。分段看,中部荒草滩一带CIA指数从延长组二段RJG-11至延长组四段RJG-10逐渐增高,这与物源搬运距离的增加比较一致。北部延长组四段13GTG-13至延长组五段13GTG-11 CIA指数有明显降低,说明物源组分发生了一定程度的变化。南部延长组一段CQG-01至延长组五段DSG-01 CIA指数增高,但相较于东部荒草滩一带CIA指数明显较低,说明南部DSG-01与东部物源可能并不一致。

东西向上,西部延长组一段样品13TJG-01至延长组五段样品13GLB-06的CIA指数逐渐增高与西部沉积相由冲积扇到湖相的演化趋势相吻合,也一定程度上反映了西部物源影响到样品13GLB-06地区。东部13RJG-05至RJG-10也具有CIA指数逐渐增高的趋势,与该处沉积相由辫状河至湖相的演化规律一致。此外,延长组二段RJG-04相对于东部13RJG-05, RJG-11的CIA指数明显降低,说明物源不同于东部和西部,很可能主要来自西北部的岩浆岩、变质岩物源区。

总体来看, CIA指数在没有判定出物源主体方向和各方向母岩区岩性的情况下很难单独分析物源方向,以“组”为单位进行研究和分“段”研究差别可能很大。此外,物源区岩性对CIA指数影响也较大,比如西部再循环物源区DHL-05至13GLB-06一线相对于南部CQG-01, DSG-01和北部

13GTG-13, 13GTG-11的岩浆岩、变质岩物源区的样品CIA指数普遍较高。CIA指数可以用来分析物源的复杂程度,随着沉积物演化表现出的CIA指数不规律变化可以用来反映研究区物源方向和源区岩性的多样性。CIA指数的高低可以较好反映母岩的岩石组成,比如,泥页岩较低的CIA指数表明其很可能来自于岩浆岩、变质岩物源区,而不是沉积再循环物源区。

2.1.3 样品主量元素/UCC

主量元素的变化趋势反映样品矿物组成的整体比例,一定程度上可以反映不同物源的差异。通过与平均上地壳值(Rudnick and Gao, 2003)的对比可以发现(图5),东西古拉本-汝箕沟一线除样品SMG-03, DSG-01, RJG-04, RJG-11之外,整体相似性较好,但与南部样品主量元素组成有较大不同,可以说明二者物源并不一致。汝箕沟地区RJG-04, RJG-11与东西两侧样品主量元素组成差异较大,说明东西物源方向并不是唯一的。北部样品的整体趋势与东、西部样品比较一致,二者物源可能有一定继承关系或者母岩比较相似。总的来看,在多物源、母岩岩性较复杂的情况下,主量元素组成分析可以作为物源判别的参考,而且可以较好的反映不同区域的物源差异。

2.2 微量元素分析

由于在碎屑物质沉积搬运过程中微量元素具有很好的稳定性,能够比较好的反映沉积区可能的物源区及源区岩性,在物源分析过程中有着重要作用,泥岩、粉砂岩的微量元素特征反映原岩性质更为准确(Pearce et al, 1983; McLennan and Taylor, 1983; Taylor and McLennan, 1985; Condie, 1991; Crichton et al, 1993)。

2.2.1 Eu异常特征

图6为样品Eu异常分布图,可见样品Eu异常处于上地壳平均Eu异常上下位置。南部样品相对于其他地区负Eu异常最不明显;西部DHL-05至13RJG-23整体具有由西向东升高的趋势,层位由下至上负Eu异常降低;东部样品RJG-04至13RJG-05变化较大,规律性较差,反映了该处物源较复杂。DHLW-04, SMG-03相对于西部古拉本一带, Eu异常值比较低,这与主量元素分析反映的差异特征一致。通过分析可以看出Eu异常值也可以作为物源组分复杂程度判别的一种手段。

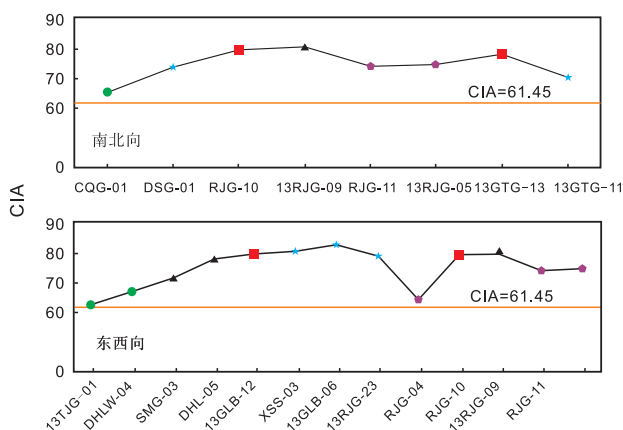
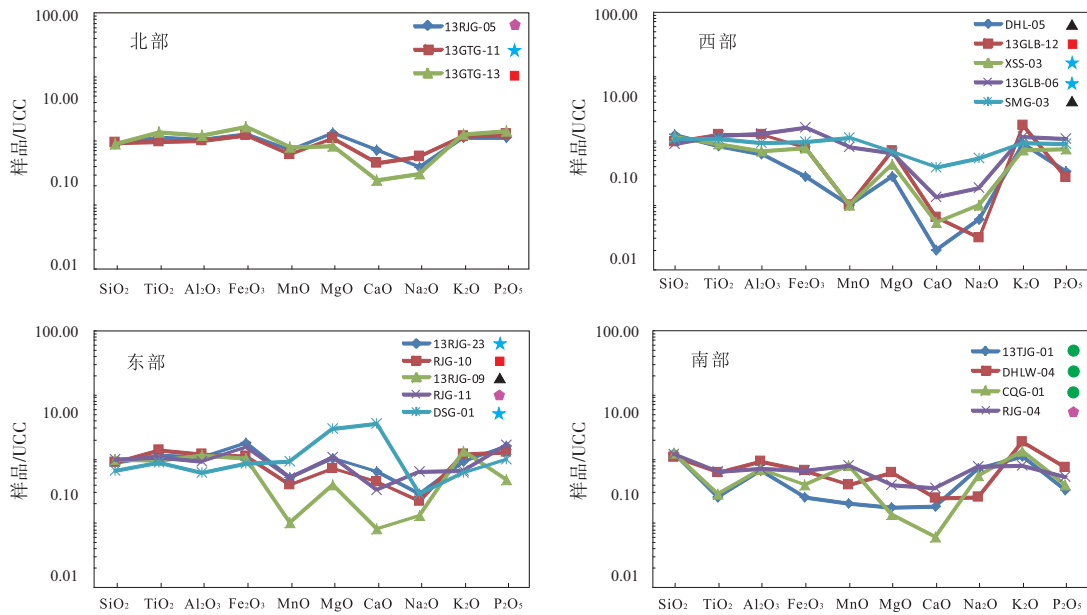


图4 样品CIA指数变化趋势

Fig. 4 CIA Changes of samples



样品 RJG-04 与南部样品相似,故主、微量相差图件均放入南部

图5 样品主量元素/UCC均一化蛛网图

Fig. 5 UCC-normalized major element spidergrams of the studied samples (UCC from Rudnick and Gao, 2003)

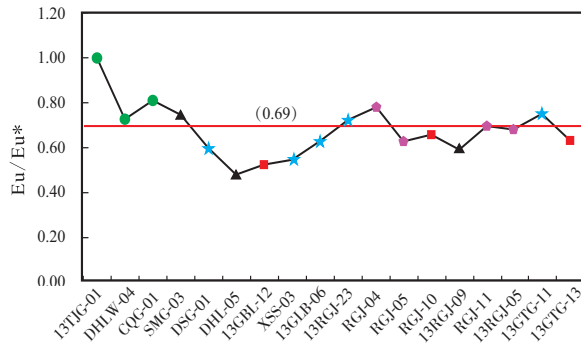


图6 样品Eu异常分布图

Fig. 6 Eu/Eu* distribution diagram for the studied samples (Eu/Eu* = 0.69, Rudnick and Gao, 2003)

2.2.2 微量元素UCC均一化分析

微量元素UCC均一化可以直观反映所有样品微量元素组成的差异(图7),北部样品和东部样品整体微量元素组成比较相似,南部样品和西部样品微量元素组成均区别于其他地区。东部样品RJG-04与周围样品的微量元素组成差异很大,与西部样品微量元素组成也没有相似特征,体现了东西物源的差异。北部样品13GTG-11, 13GTG-13与东部RJG-05, 13RJG-05, RJG-23, RJG-11, 13RJG-09, 13RJG-23的微量元素组成较为相似,说明物源组分比较一致。西部样品13GLB-06与13GLB-12较为相似, DHL-05与XSS-03较为相似,而样品

SMG-03微量元素和主量元素反映的特征相同,均与古拉本地区差异较大,说明西部地区南北方向物源存在差异,并且古拉本一带随着沉积演化物源组分发生了明显改变。

根据元素组成相似性进行差异对比,故将东部RJG-05, 13RJG-05放于北部,东部样品RJG-05放于南部区域分段来看(图8),延长组一段(图7南部)CQG-01, DHLW-04微量元素组成较为相似,但与13TJG-01有明显差别。延长组二段东部RJG-04与其他东部样品RJG-05, 13RJG-05, RJG-11有明显区别,尤其是RJG-04与其他东部样品虽然距离较近,但微量元素组成差别很大,说明二者物源不同。延长组三段西部DHL-05, SMG-03与东部13RJG-09在元素组成上均有明显差异, DHL-05与SMG-03在元素Ga, Ba, Pb有差异, 13RJG-09在元素Co, Ga, Zr, Cs有自己的变化趋势,说明三者物源组分有一些差别。延长组四段北部13GTG-13与东部RJG-10有非常好的一致性,说明二者很可能是相同组分的物源,而西部13GLB-12与二者在元素Co, Zn, Rb, Zr, Cs, Hf的含量和趋势上有较多差异。延长组五段13RJG-23, 13GLB-06和13GTG-11组成接近,样品XSS-03在元素Zr, Cs, Ba, Hf, Ta的变化上与前三者不同,样品DSG-01在Co, Zr, Cs, Ba元素趋势上与前三者略有不同,这与稀土元素

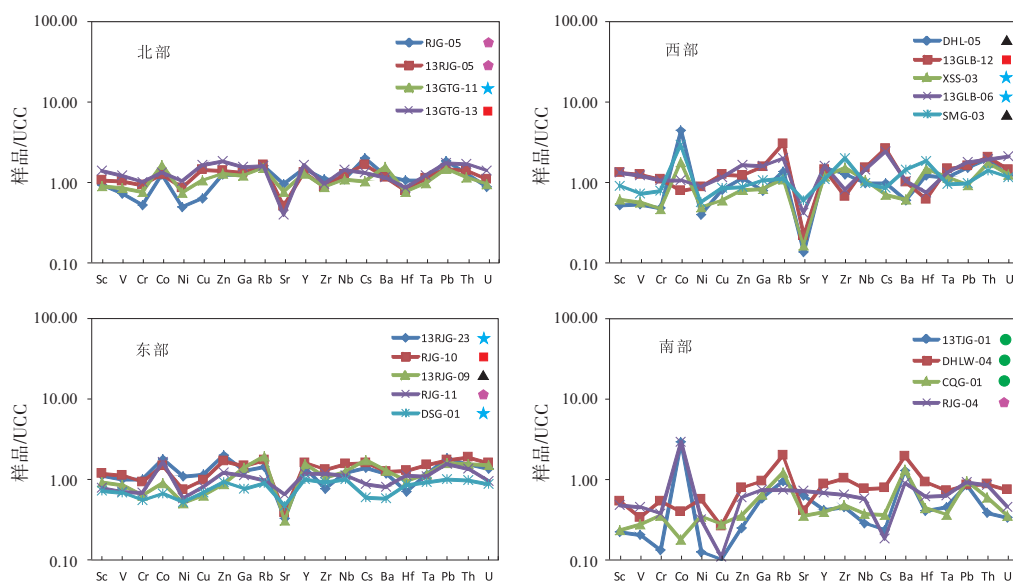


图7 贺兰山不同区域延长组样品/UCC均一化蛛网图

Fig. 7 UCC spider diagram of the samples from the Yanchang Formation in different regions of the Helan Mountain (UCC from Rudnick and Gao, 2003)

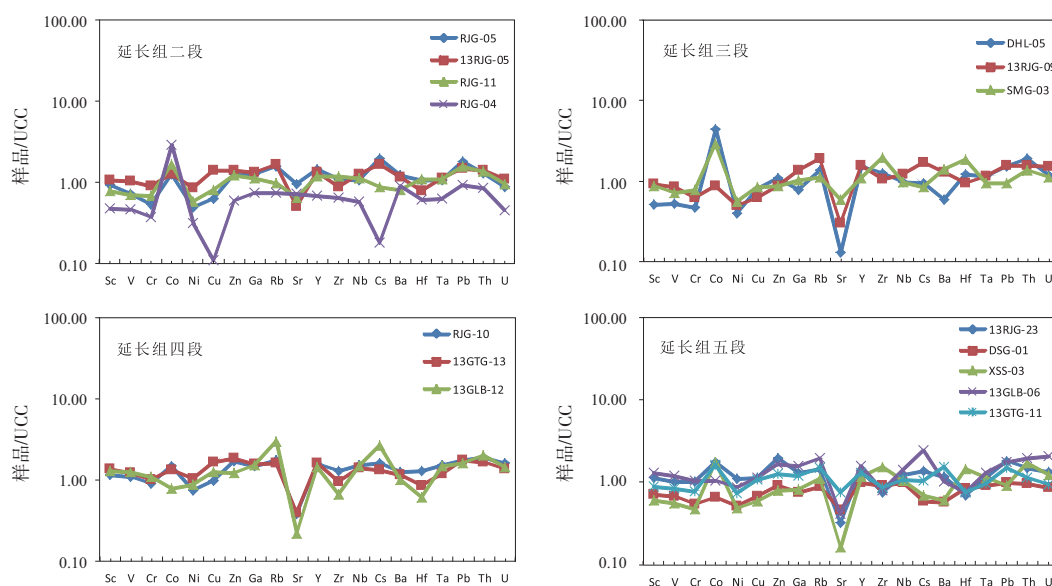


图8 上三叠统延长组各段样品/UCC均一化蛛网图 (延长组一段见图7南部样品, UCC值据Rudnick and Gao, 2003)

Fig. 8 UCC spider diagrams of different members of the Upper Triassic Yanchang Formations in each section

反映的情况一致,说明在延长组五段沉积时,由于湖盆面积最大沉积粒度相对最细,导致整体混源程度最大,沉积物组分差异性变小,但不同沉积区域仍然受主要物源供给的影响,只是影响程度大大降低。所以,相对于其他河流相的环境而言,湖相样品较小的微量元素组分差异就可能反映着物源成分的不同。由此可见,在微量元素分析过程中需要注意沉积相演化与混源程度的相互关系,进而辩证分析物源组分的差异。

2.2.3 La/Th-Hf判别分析

La/Th-Hf判别图上样品均处于酸性岩浆物源区、长英质、基性岩混合物源区和古老沉积物组分为主的物源区(图9),符合研究区整体的物源状况。区域相近的样品在判别图上并没有处于同一投点区域,说明物源组分为较为复杂。从判别图上可以看出,西部SMG-03物源具有明显的古老沉积物组分,与其相近的DHL-05和XSS-03古老沉积物组分也较多。早期物源研究认为13GTG-13和

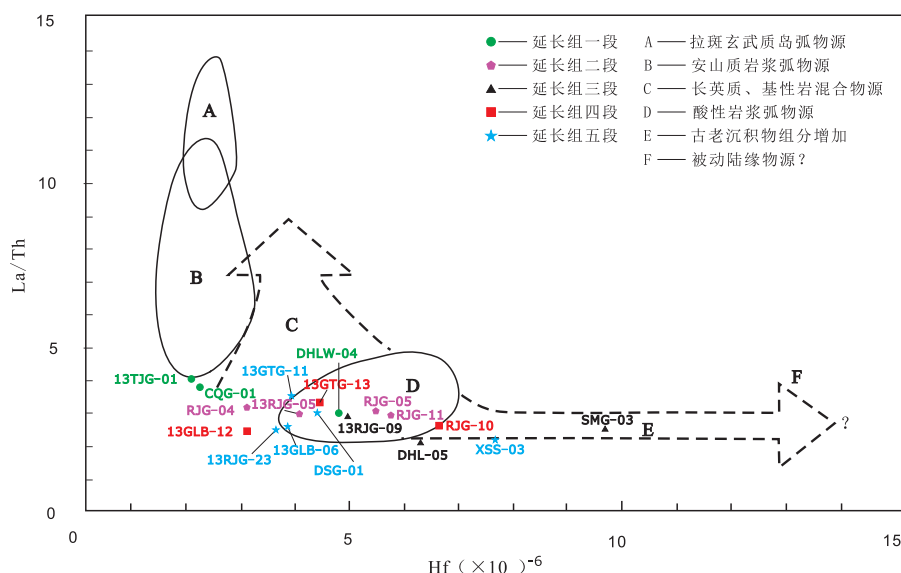


图9 La/Th-Hf判别图

Fig. 9 La/Th-Hf discriminant graph (After Floyd and Leveridge, 1987)

13GTG-11受孔兹岩系的影响较大(李蒙, 2015), La/Th-Hf判别图上二者基本处于酸性岩浆物源区, 这与孔兹岩系的主体岩性较为吻合。分段来看, 延长组一段南部样品CQG-01, DHLW-04物源组成上有些出入。延长组二段最东部的样品13RJG-05, RJG-11和RJG-05与RJG-04物源组分略有不同。延长组三段西部样品SMG-03, DHL-05与东部样品13RJG-09物源组分有明显不同, 也说明西部再旋回物源与西北部、北部岩浆岩、变质岩物源在汝箕沟—古拉本一线发生混源。延长组四段西部样品13GLB-12为酸性岩浆物源, 东部样品RJG-10老的沉积物组成比例最高, 北部样品13GTG-13为酸性岩浆物源。延长组五段除西部最靠近再循环沉积物源区的样品XSS-03之外, 基本处于酸性岩浆物源区域, 如果仅仅是西部再循环物源自西向东影响该区域, 应该以古老沉积物组分为主, 但东西并不相同, 反映了多物源的特征。

总体上, La/Th-Hf判别图与主量元素判别图有明显区别, 但部分样品也较为一致。古老沉积物组分的增加大致相当于主量元素判别中的“石英岩物源区”, 但二者并不完全一致, La/Th-Hf判别图相较于主量元素判别图体现出了“混源”问题, 但主量元素判别图对这个问题没有区分, 这是主量元素研究物源问题的一种局限。La/Th-Hf判别图对西部“再循环物源”有较好的指示效果, 荒草滩至汝箕沟一带表现出了混源的特征, 即RJG-04,

13RJG-23, 13GTG-11均处于长英质、基性岩混合物源区。DHLW-04在La/Th-Hf判别图和主量元素判别图、稀土元素分析中与样品CQG-01, 13TJG-01投点区域均有明显不同, 说明不同判别图分析的结果可能存在较大出入, 需要合理分析选择。

2.2.4 Co/Th-La/Sc判别分析

Co/Th-La/Sc判别图对物源组分整体岩性属性有较好的反映, 样品投点反映的成分差异与上文多数判别图也有较多不同。总体来看, 所有样品的La/Sc比值均高于上地壳平均值, 大部分样品的Co/Th比值低于上地壳平均值(图10)。样品投点位置基本接近“长英质”组分区域, 大部分样品与TTG岩系的组分有着明显相似, 说明周围大量出露的孔兹岩系很可能是重要的物源供给区; 南部DHLW-04, CQG-01偏“花岗岩”组分。同样受西部再旋回物源影响明显的DHL-05, XSS-03, 13GLB-12在该图中也基本偏向“长英质”组分, 与主量元素判别的“石英岩物源”有些出入。处于东部的RJG-05, RJG-11, 13RJG-05, RJG-10, 13RJG-23与处于西部的DHL-05, XSS-03, 13GLB-12有明显差别, 而处于二者之间的RJG-04与东西两侧又有明显不同, 同样反映了汝箕沟—古拉本一线东西物源组成不同。

Co/Th-La/Sc判别图对物源总体组分有一个直观的反映, 参照的TTG平均组分对于有孔兹岩系出露的地区物源判别比较有益, 该图对混源的

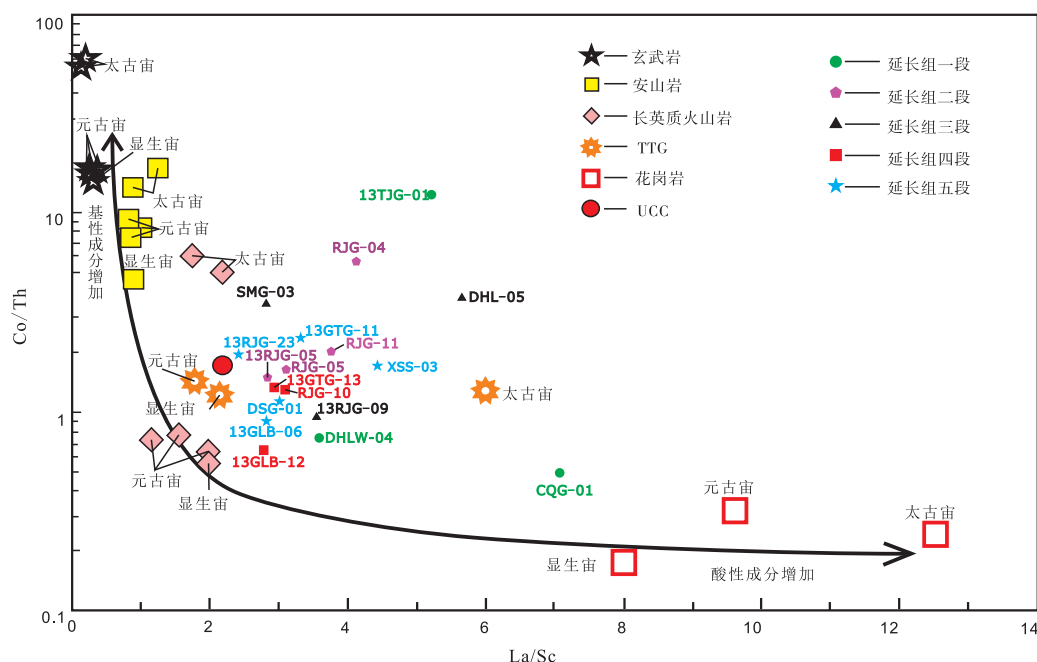


图10 Co/Th-La/Sc判别图

Fig. 10 Co/Th-La/Sc discriminant graph (UCC After Rudnick and Gao, 2003; After Condie, 1993)

表现相对不足。

2.2.5 Th/Sc-Zr/Sc判别分析

前人研究表明,随着沉积搬运距离的远近以及沉积所处大地构造背景的不同Th/Sc-Zr/Sc的比值会呈现一种规律性的变化,即总体上会随着搬运距离的增加而增大(Taylor and McLennan, 1985; McLennan et al., 1993)。从图11来看,延长组一段CQG-01, DHLW-04和13TJG-01靠近图中右上部分,说明其母岩具有较高的Th/Sc, Zr/Sc比值。延长组二段样品均低于平均上地壳的Zr/Sc

值,相对于南部延长组一段样品投点位置更靠近左下部位,说明并不是南部物源搬运而来,与南部物源并不相同。延长组三段样品分布于研究区东西两端,东部13RJG-09与周围二段样品对比更靠近图件的左下方。延长组四段样品位于研究区东部、北部和西部,RJG-10相较于周围三段样品更靠近图件的左下方,13GLB-12相较于DHL-05也更靠近图件的左下方。延长组五段是整个延长组水深最深的时期,也是湖盆面积最大的时期,但样品13RJG-23和13GLB-06 d的Th/Sc-Zr/Sc值均比较低,这与样品XSS-03相差较大,说明样品13RJG-23和13GLB-06所在区域的物源组分与XSS-03物源组分存在较大不同,且不是同一物源。

总的来看,延长组一段至延长组五段沉积物稳定组分总体比例下降,反映了源区物源组分的不断变化,不稳定组分含量较高的物源供给不断增加。北部物源和南部物源组分存在明显不同。

2.2.6 Th/U判别分析

Th/U比值在研究碎屑沉积的源区特征是一个有效参数(Rodazz et al., 2006)。沉积物由于氧化风化和U元素流失往往具有更高的Th/U比值,Th/U含量在岩石风化过程中随着高岭石含量的增加而增加(McLennan et al., 1980)。Th元素通常以

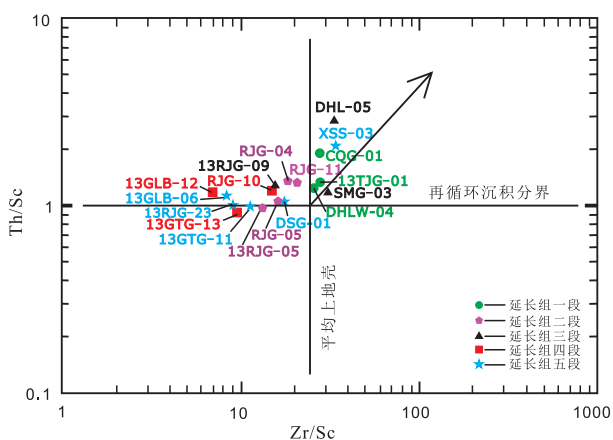


图11 Th/Sc-Zr/Sc判别图

Fig. 11 Th/Sc-Zr/Sc discriminant graph

化合物的形式存在于独居石等矿物中, 和稀土元素及 Hf 的氧化物共生。所以 Th/U-Th 判别图在一定程度上可以反映出样品的搬运距离和物源区的母岩属性。

一般来说, 页岩的 Th/U > 3.8 反映经历了风化或者沉积循环过程 (McLennan et al, 1993), 如图 12 所示, 样品 Th/U 比值整体上高于上地壳平均值, 说明样品遭受了风化作用或者沉积循环过程。西部样品 DHL-05, 13GLB-12, XSS-03 的 Th/U 比值均非常高, 与再循环物源的特征吻合, 但 13GLB-06 和 13RJG-23 具有很低的 Th/U 比值, 与最西部的样品有明显差别, 说明二者母岩不同。东部样品与北部样品在 Th/U 比值上比较接近, 但 RJG-04 同样比较特殊, 具有最高的 Th/U 比值, 也说明其物源组分区别于东部其他样品。南部样品 CQG-01 在 Th/U 比值上与 13TJG-01, DHLW-04 具有明显差别, 说明二者在物源组分上也有一些不同。

2.2.7 Rb/Sr 判别分析

Rb/Sr 比值在一定程度上可以反映源区的风化程度 (Kimberley and Grandstaff, 1986), 一般认为 Rb/Sr > 0.5 可以反映风化和沉积循环过程 (McLennan et al., 1993), 如图 13 所示, 所有样品均具有一定程度的风化或者沉积循环。整体上, 样品 Rb/Sr 值从延长组一段至五段并不是显示逐渐增高的趋势, 说明研究区物源并不唯一或者源区母岩岩性发生了明显改变。南部延长组一段样品 CQG-01 的 Th/U 比值虽然很高, 但是 Rb/Sr 相对较低, 反映近距离搬运且母岩 Th/U 比值较高的特征。西部样品 DHL-05, 13GLB-12, XSS-03 均具有非

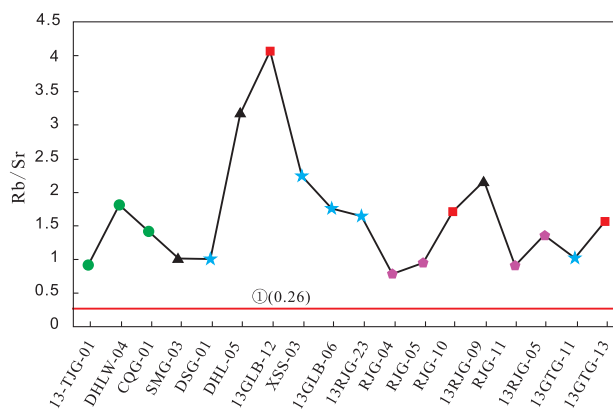


图 13 样品 Rb/Sr 比值分布图(①为上地壳平均值, 据 Rudnick and Gao, 2003)

Fig. 13 Rb/Sr ratios of samples from the Helan Mountain

常高的 Rb/Sr 比值, 这与再旋回物源的特征一致。东部样品 RJG-04 有着最高的 Th/U 比值, Rb/Sr 比值却是最低的, 相较于东部其他样品特殊性同样明显。分段来看, 延长组一段和二段样品 Rb/Sr 相对较低, 比较接近。延长组三段西部 SMG-03 和 DHL-05 有明显的差异, 应该是二者母岩有明显差异, 13RJG-05 相较于 DHL-05 样品的 Rb/Sr 降低, 没有自西向东降低的趋势, 反映二者并不是相同物源。延长组四段西部 13GLB-12 样品比东部 RJG-10 样品的 Rb/Sr 明显高出很多, 北部 13GTG-13 与 RJG-10 样品的 Rb/Sr 比较接近。延长组五段由西向东样品 XSS-03, 13GLB-06, 13RJG-23, DSG-01 样品的 Rb/Sr 依次降低, 反映东西方向物源并不是单一供给。北部样品在延长组四段和延长组五段相较于东部样品的 Rb/Sr 要低, Rb/Sr 比值在由北向南方向有升高趋势。

3 讨论

3.1 物源综合分析

根据贺兰山周围地质概况、延长组地层厚度变化和主微量元素分析, 结合前人的研究成果, 本次研究认为贺兰山晚三叠世延长组沉积物源主体分为西部、西北部、南部和东部, 其中东部物源出现较晚 (延长组三段沉积之后), 影响范围相对较小, 西部和西北部物源控制着贺兰山中北部, 是最主要的物源区, 南部物源主要控制贺兰山南部插旗口至哈拉乌沟地区。

延长组早期 (延长组一段至三段沉积时期) 物源主要来自西部、西北部和南部, 结合砾石分

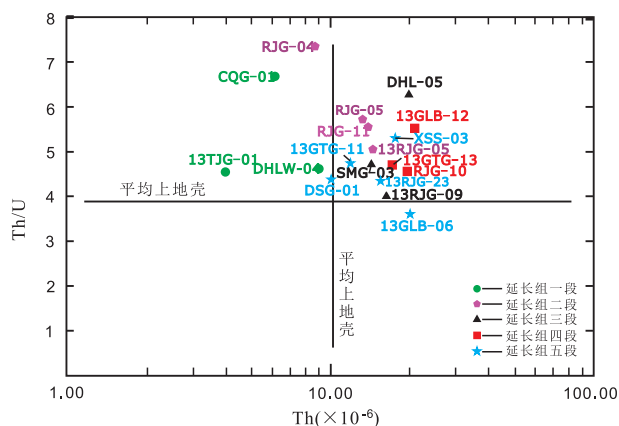


图 12 Th/U-Th 判别图

Fig. 12 Th/U-Th discriminant graph

析(李蒙, 2015)和贺兰山周围地质概况, 如研究区东西两侧主要为沉积岩地层, 北部为孔兹岩带, 西北部为沉积岩和狼山、巴彦乌拉山的岩浆岩与变质岩(图1), 表明西部沉积再循环物源主要影响水磨沟—古拉本—汝箕沟一带; 西北部物源在延长组早期也存在大量沉积再循环物源, 并且主要影响到白芨芨沟—磨盘山至鬼头沟最西部一带; 南部物源主要分为南部西段和南部东段, 南部西段为岩浆岩、变质岩物源并含有少量沉积物源, 主要影响至水磨沟、哈拉乌沟及其以南地区, 南部东段岩浆岩、变质岩物源主要影响至插旗沟地区(图14)。

延长组晚期(延长组三段至五段沉积时期)物源总体继承了延长组早期的物源格局, 新增加了来自东部的物源。延长组晚期西部物源和西北部物源的混合程度增加, 二者共同影响着古拉本、汝箕沟、白芨芨沟至香棒子沟一带, 南部物源影响范围略有缩小, 东部物源开始出现, 并控

制着大水沟以北至鬼头沟一带(图15)。根据现今贺兰山东部银川地堑两侧延长组厚度的不规律变化(东侧自西向东逐渐增厚, 西侧自西向东逐渐减薄), 一定程度上支持东部物源存在的合理性。根据主微量元素分析, 西部延长组早期主要以沉积再循环物源为主, 晚期来自西北部的岩浆岩、变质岩组分逐渐增加, 并影响整个中东部地区; 随着沉积相在延长组晚期逐渐演化为湖相, 为细粒沉积物质的混合提供了更为有利的环境, 这也是延长组晚期主微量元素分析反映的沉积物“成熟度”反而降低的两个主要因素。根据现今的研究结果, 古亚洲洋在中晚二叠世至早三叠世之前基本完成闭合造山是学术界普遍认同的观点(Xiao et al, 2003, 2009; 张拴宏等, 2007; 李锦轶等, 2007; Jian et al, 2010; Eizenhöfer et al, 2014; Li et al, 2014; Yuan et al, 2016), 因此贺兰山晚三叠世在大地构造背景上存在来自西北部及北部造山带沉积岩、变质岩物源的古地理基础, 源汇关

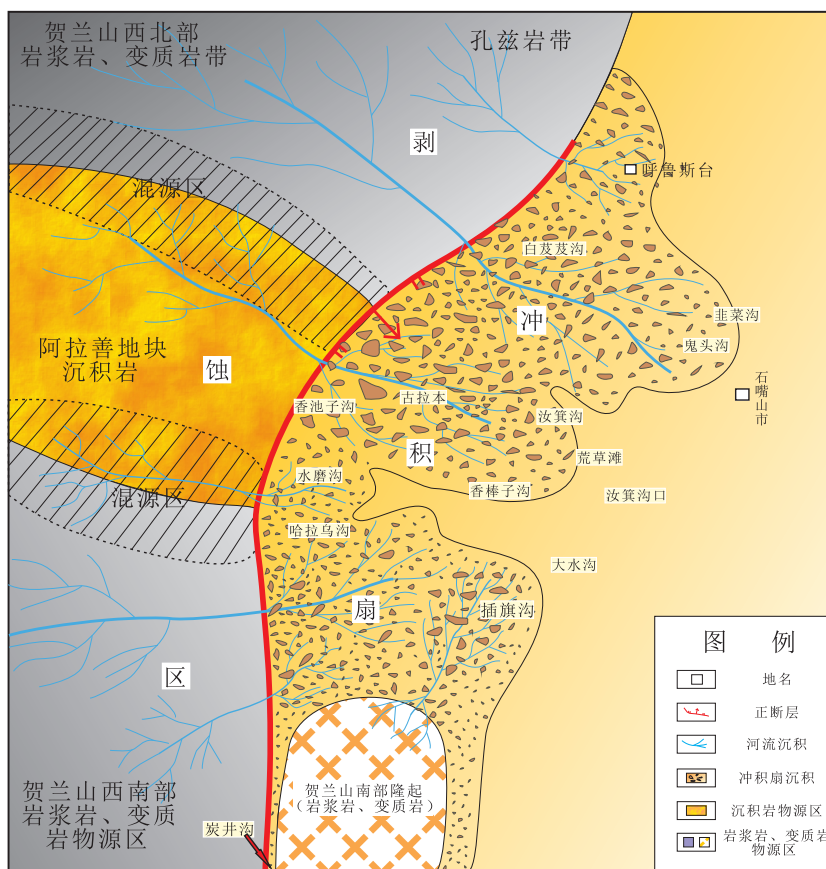


图14 贺兰山地区晚三叠世延长组早期古地理面貌及物源来源模式图

Fig. 14 Palaeogeographical framework and a provenance model during the early stage of the Late Triassic Yanchang Formation in the Helan Mountain

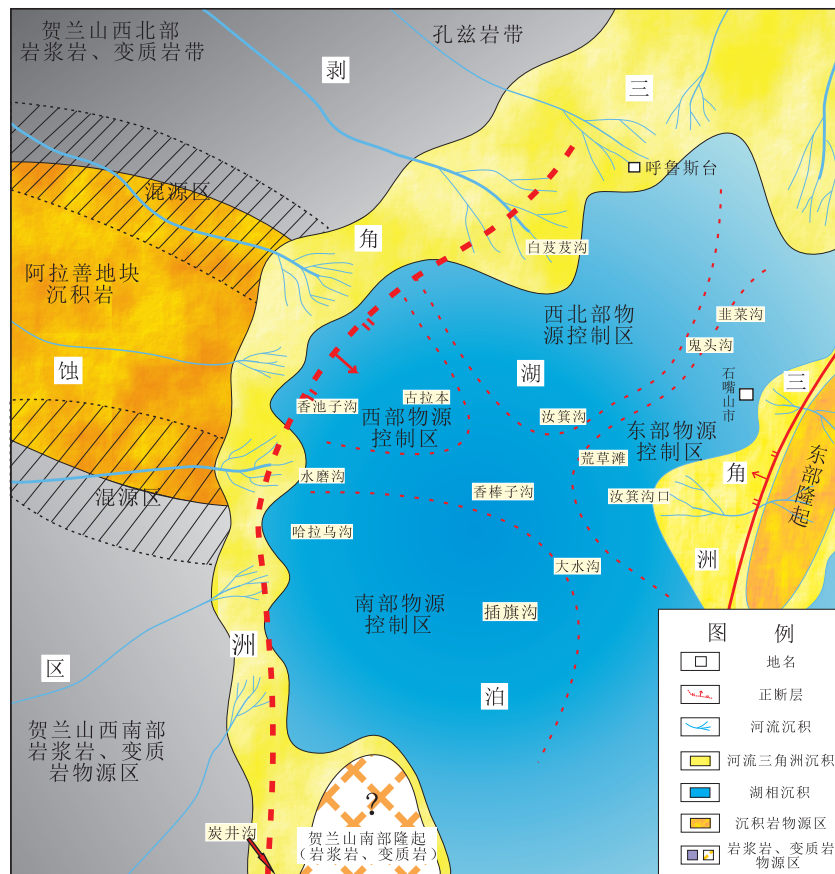


图 15 贺兰山地区晚三叠世延长组晚期古地理面貌及物源来源模式图

Fig. 15 Palaeogeographical framework and a provenance model during the later stage of the Late Triassic Yanchang Formation in the Helan Mountain

系能够很好吻合。

3.2 主微量元素物源分析方法探讨

通过对样品各主微量元素判别方法的系统分析，结合研究区周围地质概况和沉积厚度的变化，可以看出，主微量元素物源分析方法各有优劣，侧重点不同，反映的物源信息也有一些差异。主量元素/UCC、碎屑岩主量元素源区岩性函数判别图、微量元素/UCC、La/Th-Hf判别图、Co/Th-La/Sc判别图、Th/Sc-Zr/Sc判别图以及Th/U-Th判别图在区分研究区物源组分差异时均有一定作用，而且总体判别结果比较接近，比如样品RJG-04的独特性在图中皆有较好反映。CIA指数、Rb/Sr、Th/U在判断风化程度和搬运距离上比较实用，但是Th/U一定要考虑母岩岩性的差异，否则将出现错误的判断。一般来说，在同一物源控制的情况下，沉积物搬运距离和风化程度沿搬运方向应该是均匀的上升趋势，同一地点上下层位随着搬运距离的增加，风化程度也应是逐渐增加。

物源分析方法中CIA指数、Rb/Sr、Th/U、Th/Sc、Zr/Sc均应具有这种特征，如果实际分析过程中这种趋势并不明显或者不协调，则应该考虑研究区的面积，研究区物源的多源问题或者研究区风化程度的差异问题，在没有很好判断以上三个问题所带来的影响就进行物源分析，只能是管窥蠡测，漏洞百出。通过物源综合分析可以看出CIA指数、Rb/Sr比值在指示多物源或者复杂母岩的情况比较理想，可以推广并作为物源复杂程度的判别依据。“二维”变量或者“多维”变量分析相对于“一维”变量分析更容易表现出样品微量元素组成的差异，在物源分析中多变量的系统分析是值得探索的研究方向。

主微量分析与早期重矿物分析（李蒙等，2018）也存在不一致的情况，研究表明，重矿物组成分析一般选取中、粗砂岩，而主微量元素一般选用粉砂岩、泥岩，一般来讲粉砂岩、泥岩的物源混合程度要高于中、粗砂岩，在同一地点上

下层位采集的中、粗砂岩与粉砂岩、泥岩在物源分析结果上可能存在较大不同。此外,沉积环境对物源分析的结果也会造成一定的影响,比如,河流相沉积与湖相、海相沉积的砂岩、泥岩的重矿物组成和主微量元素组成的差异程度,前者一般小于后者(前提是沉积物源区岩性复杂程度相近)。这些因素可能是造成重矿物分析与主微量元素分析结果不一致的原因。由此可见,在物源分析过程中应遵循多方法系统分析的原则,合理看待数据的不一致问题,不能过于偏执于一种方法。

综上所述,对于贺兰山晚三叠世这类多物源、小型盆地而言,混源问题突出,物源时空演化非常明显,一定要注意动态分析。晚三叠世延长组厚度在2000~2500 m左右,沉积时限可能在30 Ma左右,期间剥蚀区位置、母岩各岩性供给比例、不同沉积相的混源程度时刻发生着改变,需要综合考虑各种因素,合理分析各类测试结果才能够得出科学的物源演化过程。

4 结论

(1) 贺兰山晚三叠世延长组早期(延长组一段至三段沉积时期),物源主要来自西部沉积再循环物源、西北部岩浆岩、变质岩及部分沉积再循环物源和南部岩浆岩、变质岩物源。延长组晚期(延长组三段至五段沉积时期)物源总体继承了延长组早期的物源格局,新增加了来自东部的物源。延长组晚期西部物源和西北部物源的混合程度增加,二者共同影响着古拉本、汝箕沟、白茆沟至香棒子沟一带,南部物源影响范围略有缩小,东部物源开始出现,并控制着大水沟以北至鬼头沟一带。

(2) 主量元素/UCC、碎屑岩主量元素源区岩性函数判别图、微量元素/UCC蛛网图、La/Th-Hf判别图、Co/Th-La/Sc判别图、Th/Sc-Zr/Sc判别图以及Th/U-Th判别图在沉积物源分析时均有一定的作用,而且总体判别结果比较接近。沉积物CIA指数、Eu异常、Rb/Sr比值在指示多物源或者复杂母岩的情况比较理想,可以推广并作为物源复杂程度的判别依据。

(3) 在复杂构造背景下的小型沉积盆地往往具有多源、混源的特征,这与大型沉积盆地的情况有明显不同,这种情况下需要注意不同物源判

别方法的适用范围和精度,以大厚度为单位进行物源研究往往会得出错误的结论,应尽量细分层位进行研究,对小型沉积盆地进行物源分析时应时刻注意到其物源时空演化的复杂性。

致谢: 成稿过程中几位匿名审稿专家给出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References):

- 蔡佳,刘平华,刘福来,等. 2013. 大青山—乌拉山变质杂岩带石拐地区富铝片麻岩成因矿物学与变质演化[J]. 岩石学报, 29(2): 437-461.
- 董春艳,刘敦一,李俊健,等. 2007. 华北克拉通西部孔兹岩带形成时代新证据: 巴彦乌拉山—贺兰山地区锆石 SHRIMP 定年和 Hf 同位素组成[J]. 科学通报, 52(16): 1913-1922.
- 高山林. 2001. 鄂尔多斯盆地西缘中生代构造与地层分析及盆地演化研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所博士学位论文: 1-147.
- 霍福臣,曹景轩,董燕生,等. 1987. 贺兰山—阿拉善地区下、中前寒武系的划分对比及其变质、成矿作用特征[J]. 长春地质学院学报, 17(1): 35-46.
- 胡能高,杨家喜,王志博. 1994. 贺兰山变质杂岩的组成及演化[M]. 西安: 西安地图出版社: 1-121.
- 蒋盛. 2016. 贺兰山东部晚三叠世沉积物源及其古构造环境意义[D]. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1-75.
- 柯保嘉,陈昌明,陈志明,等. 1992. 试论贺兰山地区延长群与鄂尔多斯盆地的关系[J]. 地质科学, 27(2): 124-130.
- 李蒙,赵红格,李文厚,等. 2018. 贺兰山地区中晚三叠世物源分析及其时空演化过程[J]. 古地理学报, 20(6): 1043-1060.
- 李蒙. 2015. 贺兰山地区晚三叠世延长组物源属性及其古构造意义[D]. 西安: 西北大学硕士学位论文: 1-72.
- 李锦铁,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的时限的约束[J]. 岩石学报, 23(3): 565-582.
- 刘池洋,赵红格,桂小军,等. 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 80(5): 617-638.
- 卢良兆,徐学纯,刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系[M]. 长春: 长春出版社: 1-176.
- 苏春乾,杨兴科,刘继庆,等. 2004. 从贺兰山区的三叠—侏罗系论国内前陆盆地的研究[J]. 岩石矿物学杂志, 23(4): 318-326.
- 汤锡元,郭忠铭,陈荷立. 1992. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探[M]. 西安: 西北大学出版社: 1-392.
- 王成,孟方,毛自力. 2012. 贺兰山黄旗口花岗岩锆石 SHRIMP- Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. 宁夏工程技术, 11(3): 206-219.
- 王锋,刘池洋,赵红格,等. 2006. 贺兰山西麓中生代构造反转及意义[J]. 石油实验地质, 28(3): 206-209.
- 魏红红,李文厚,邵磊,等. 2001. 汝箕沟盆地上三叠统延长组沉积环境[J]. 西北大学学报, 31(2): 171-174.
- 杨福新. 1998. 内蒙狼山地区糜棱岩岩石特征及构造意义[J]. 西北地质, 19(1): 1-8.
- 杨华,付金华,欧阳征健,等. 2011. 西鄂尔多斯盆地西缘晚三叠世构造—沉积环境分析[J]. 沉积学报, 29(3): 427-439.
- 杨俊杰,李克勤. 1992. 中国石油地质志卷120长庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社: 1-490.
- 叶连俊. 1983. 华北地台沉积建造[M]. 北京: 科学出版社: 1-141.
- 钟长汀,邓晋福,万渝生,等. 2014. 内蒙古大青山地区元古代花岗岩: 地球化学、锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 30

- (11): 3172–3188.
- 张拴宏, 赵越, 刘健, 等. 2007. 华北地块北缘晚古生代—中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义[J]. 岩石学报, 23(3): 625–638.
- 赵红格, 刘池洋, 王海然, 等. 2012. 贺兰山北段晚三叠世沉积物源分析[J]. 沉积学报, 30(4): 654–660.
- 赵文智, 王新民, 郭彦如, 等. 2006. 鄂尔多斯盆地西部晚三叠世原型盆地恢复及其改造演化[J]. 石油勘探与开发, 33(1): 6–13.
- 周喜文, 耿元生. 2009. 贺兰山孔兹岩系的变质时代及其对华北克拉通西部陆块演化的制约[J]. 岩石学报, 25(8): 1843–1852.
- Bock B, McLennan S M and Hanson G N. 1998. Geochemistry and provenance of the middle Ordovician Austin Glen Member (Normanskill Formation) and the Taconian orogeny in New England [J]. *Sedimentology*, 45(4): 635–655.
- Condie K C. 1991. Another look at rare earth elements in shales [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(9): 2527–2531.
- Condie K C. 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales [J]. *Chemical Geology*, 104(1–4): 1–37.
- Crichton J G and Condie K C. 1993. Trace elements as source indicators in Cratonic sediments: A case study from the Early Proterozoic Libby Creek group, southeastern Wyoming [J]. *The Journal of Geology*, 101(3): 319–332.
- Dong C Y, Wan Y S, Wilde S A, et al. 2014. Earliest Paleoproterozoic supracrustal rocks in the North China Craton recognized from the Daqingshan area of the Khondalite Belt: Constraints on craton evolution [J]. *Gondwana Research*, 25(4): 1535–1553.
- Eizenhöfer P R, Zhao G, Zhang J, et al. 2014. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic and sedimentary rocks [J]. *Tectonics*, 33(4): 441–463.
- Floyd P and Leveridge B. 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(4): 531–540.
- Herron M M. 1988. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 58(5): 820–829.
- Jian P, Liu D, 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.
- Kimberley M M and Grandstaff D E. 1986. Profiles of elemental concentrations in Precambrian paleosols on basaltic and granitic parent materials [J]. *Precambrian Research*, 32(2–3): 133–154.
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3): 207–224.
- Liu P H, Liu F L, Liu C H, et al. 2014. Multiple mafic magmatic and high-grade metamorphic events revealed by zircons from meta-mafic rocks in the Daqingshan-Wulashan Complex of the Khondalite Belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 246(6): 334–357.
- Liu S F. 1998. The coupling mechanism of basin and orogen in the western Ordos Basin and adjacent regions of China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(4): 369–383.
- Li Y L, Zhou H W, Brouwer F W, et al. 2014. Early Paleozoic to Middle Triassic divergent accretion in the Central Asian Orogenic Belt: insights from zircon U–Pb dating of ductile shear zones in central Inner Mongolia, China [J]. *Lithos*, 205(9): 84–111.
- McLennan S M, Nance W B and Taylor S R. 1980. Rare earth element–Thorium correlation in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(11): 1833–1839.
- McLennan S M and Taylor S R. 1983. Geochemical evolution of Archean shales from South Africa I: The Swaziland and Pongola Supergroups [J]. *Precambrian Research*, 22(1): 93–124.
- McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. 1993. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 284: 21–40.
- Nesbitt H W and Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 299 (5885): 715–717.
- Pearce J A. 1983. Role of the Sub-continental Lithosphere in Magma Genesis at Active Continental Margins [M] // Hawkesworth C J, Norry M J (Eds). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*, Shiva Publishing Ltd, Cheshire: 230–249.
- Rudnick R and Gao S. 2003. *Composition of the Continental Crust* [M] // Rudnick, Oxford: Elsevier-Pergamon, 3: 1–64.
- Ritts B D, Hanson A D, Darby B J, et al. 2004. Sedimentary record of Triassic intraplate extension in North China: evidence from the nonmarine NW Ordos Basin, Helanshan and Zhuozhi Shan [J]. *Tectonophysics*, 38 (6): 177–202.
- Roddaz M, Viers J, Brusset S, et al. 2006. Controls on weathering and provenance in the Amazonian foreland basin: insights from major and trace element geochemistry of Neogene Amazonian sediments [J]. *Chemical Geology*, 226 (1–2): 31–65.
- 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.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution: An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks [J]. *Journal of Geology*, 94 (4): 632–633.
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217–1232.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. 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.
- 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 Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189–1217.
- Yuan L L, Zhang X H, Xue F H, et al. 2016. Late Permian high-Mg andesite and basalt association from northern Liaoning, North China: Insights into the final closure of the Paleo-Asian ocean and the orogeny-craton boundary [J]. *Lithos*, 258: 58–76.
- Zhai M G, Bian A G and Zhao T P. 2000. The amalgamation of the supercontinent of North China Craton at the end of Neo-Archaean and its breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic [J]. *Science in China (Series D)*, 43(S1): 219–232.
- Zhao G C, Sun M, Wilde S A, et al. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited [J]. *Precambrian Research*, 136(2): 177–202.