



开鲁盆地南部三叠统红砬组地球化学特征及沉积环境分析 ——以奈参1井为例

冉波¹, 刘 邦¹, 裴家学¹, 张 健², 张德军², 杨 曦¹, 李 皓¹, 孙爽晨¹, 王宝生¹

1. 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010;

2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 为揭示开鲁盆地南部地区三叠统红砬组的构造背景及沉积环境, 对奈参1井26件细碎屑岩样品进行了常量、微量以及稀土元素测试分析。研究表明: 红砬组沉积物源具有多样性, 主要来自上地壳长英质岩石源区, 还有少量来自中、基性火成岩物源区。物源构造背景主要为主动大陆边缘, 可能形成于靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造背景。红砬组沉积环境总体上处于氧化-弱还原的陆相淡水-半咸水环境, 向上水体盐度有增大趋势, 古气候整体上为干旱炎热气候。

关键词: 奈曼凹陷; 早三叠世; 红砬组; 地球化学特征; 沉积环境; 开鲁盆地

GEOCHEMISTRY AND SEDIMENTARY ENVIRONMENT OF LOWER TRIASSIC HONGLA FORMATION IN SOUTHERN KAILU BASIN: A Case Study of NC1 Well

RAN Bo¹, LIU Bang¹, PEI Jia-xue¹, ZHANG Jian², ZHANG De-jun², YANG Xi¹, LI Hao¹,
SUN Shuang-chen¹, WANG Bao-sheng¹

1. Exploration and Development Research Institute of Liaohe Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjin 124010, Liaoning Province, China;

2. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The major, trace and rare earth elements of 26 fine clastic rock samples from NC1 well are tested and analyzed to reveal the tectonic setting and sedimentary environment of Lower Triassic Hongla Formation in southern Kailu Basin. The results show that the sediment sources of Hongla Formation are diverse, mainly from the felsic rock source area in the upper crust with minors from the intermediate and basic igneous rock source areas. The tectonic setting of the provenance is mainly active continental margin, which may be formed in the tectonic background of active continental margin near the continental island arc. The Hongla Formation is generally in an oxidative-weakly reductive terrestrial freshwater-brackish water sedimentary environment, with the water salinity increasing from bottom to top. The paleoclimate was arid and hot on the whole.

Key words: Naiman sag; Early Triassic; Hongla Formation; geochemistry; sedimentary environment; Kailu Basin

收稿日期: 2023-03-03; 修回日期: 2023-03-22. 编辑: 黄欣.

基金项目: 中国石油天然气集团公司项目“开鲁地区义县组及深层勘探目标优选研究”(2022KJZX-05-02); 中国地质调查局项目“东北地区重要盆地多能源资源地质调查”(DD20221664).

作者简介: 冉波(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事石油地质综合研究工作, 通信地址 辽宁省盘锦市兴隆台区辽河油田勘探开发研究院, E-mail//ranb@petrochina.com.cn

通信作者: 张健(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事油气地质调查研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街280号, E-mail//48487885@qq.com

0 引言

地质历史时期,红层广布于全球,据其成因,可分为大洋红层和大陆红层^[1]。传统研究认为,红层是炎热干旱气候和氧化环境下的产物^[2];然而有研究表明,潮湿的热带气候条件、强烈的季节性变化或半干旱气候环境也能形成红层^[1,3-5];此外,红层的形成还可能与沉积岩成岩后遭受含铁矿物(Fe_2O_3)的侵染作用有关^[6-7]。可见,欲用红层来指示古气候,确定其是否受控于沉积成因至关重要。晚二叠世末期—早三叠世,全球多地由温暖、潮湿的海洋性气候向干燥、炎热的大陆性气候转变^[8-9],区域上多以发育红层沉积为特征。开鲁地处松辽盆地西南部,其西部、北部的大兴安岭地区以及南部、东部的辽西—辽东南一带广泛而零散出露下三叠统红色碎屑沉积,大兴安岭地区发育幸福之路组、老龙头组,而辽西—辽东南则发育红砬组,以河流、滨浅湖相等陆源碎屑沉积为主。

红砬组源于张丽旭 1943 年在辽宁省葫芦岛市南票大红石砬子村创名的红砬统,原指发育在南票地区晚古生代富隆山统之上,含火山物质(火山岩)的中生界之下的一套紫红色砂砾岩沉积。1963 年李星学改称红砬组^[10]。张武、董国义、杨欣德等进一步明确了红砬组的定义^[11-12]。现指早中生代(三叠纪)分布在华北地层区阴山—辽西地层分区^[13],整合或不整合于蛤蟆山组或前中生界之上,由砂岩、粉砂岩、泥页岩夹砾岩组成的红色岩系,发育交错层理、干裂等沉积构造。开鲁南部地区下三叠统最早报道于奈曼凹陷和八仙筒凹陷奈参 1 井(1 143~1 567.5 m)和仙参 1 井(1 191~2 282.5 m)深部,岩性主要为紫色凝灰岩,紫褐色泥岩,紫红色粉砂质泥岩、泥岩^[14]。丁秋红等认为开鲁地区的下三叠统下段(仙参 1 井 1 191~2 282.5 m)火山碎屑沉积可与大兴安岭地区的哈达陶勒盖组对比,虽其上段(奈参 1 井 1 143~1 567.5 m)与哈达陶勒盖组明显不同,但因资料较少,不具备建组条件,故将其归入下三叠统哈达陶勒盖组^[14]。杨雅军等将分布于奈曼旗地区的哈达陶勒盖组划归老龙头组,将老龙头组厘定为“以灰—黄灰色砂岩、粉砂岩、泥岩、板岩以及紫红色砂岩、粉砂岩、砂砾岩为主,可夹中性或中酸性火山岩,含双壳、叶肢介、介形类及孢粉化石,一般厚 400~1 000 m,与下伏林西组及上覆哈达陶勒盖组多呈整合接触,时代为早三叠世”^[15]。然而,前人对奈曼旗

地区下三叠统孢粉组合特征的研究表明,奈参 1 井、仙参 1 井中的孢粉组合与陕甘宁盆地早三叠世的刘家沟组、和尚沟组可对比^[14],且其地层归属于华北地层区阴山—辽西地层分区^[13]。因此本研究将开鲁南部地区的下三叠统沉积厘定为红砬组。为了明确开鲁南部地区下三叠统红砬组红层的成因及沉积环境,对奈参 1 井进行了重新编录和系统采样分析,旨在通过地球化学特征分析,探讨开鲁南部地区下三叠统红砬组形成的构造背景和沉积环境,这对研究华北地台北缘早三叠世红色碎屑沉积的成因具有重要意义。

1 区域地质概况

开鲁南部奈曼凹陷地处内蒙古自治区奈曼旗,为开鲁盆地(松辽盆地开鲁拗陷)西南部的一个次级构造单元,是发育于古生代正常沉积或海西期褶皱基底之上的中生代凹陷,呈 NNE 向狭长条带状分布,面积约 800 km²,最大埋深 3 600 m,据其内部构造特征,可划分为西部陡坡带、中央洼陷带和东部斜坡带。奈曼凹陷西北、东北分别与新庙凹陷和八仙筒凹陷为邻^[16],三者均位于西拉木伦河断裂以南(图 1),早中生代属华北地层区阴山—辽西地层分区^[13]。目前已有的钻孔揭示,该地区三叠系—侏罗系发育下三叠统红砬组(原称哈达陶勒盖组)和中侏罗统海房沟组。其中,下三叠

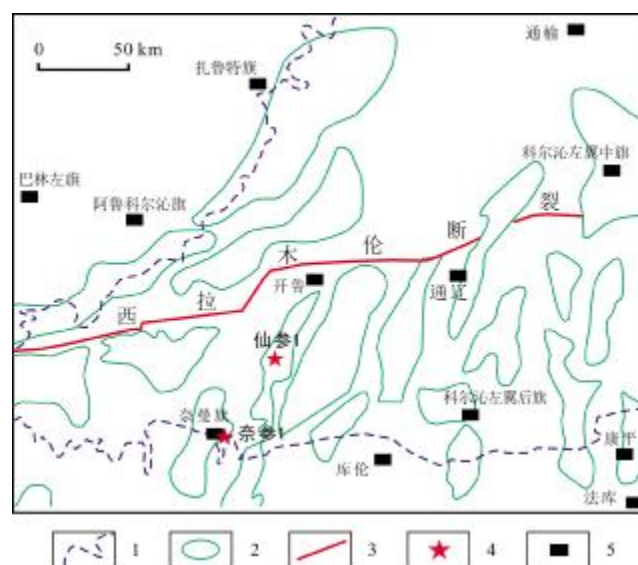


图 1 开鲁地区奈参 1 井位置图

Fig. 1 Location map of NC1 well in Kailu area

1—松辽盆地边界(boundary of Songliao Basin); 2—凹陷边界(boundary of sag); 3—断裂(fault); 4—钻孔(borehole); 5—城镇(city and town)

统红砬组不整合于石炭-二叠系浅变质砂岩、板岩之上,角度不整合于中侏罗统海房沟组之下(图 2)。而海房沟组之上则先后发育有下白垩统九佛堂组、沙海组、阜新组、孙家湾组和新生界。

2 分析方法

为了分析开鲁南部地区下三叠统红砬组地球化学特征、形成环境及其古气候条件,对奈参 1 井红砬组(1 143~2 528 m 井段) 26 件岩心样品开展主量、微量和稀土元素测试分析(图 2)。测试工作在国土资源部东北矿产资源监督检测中心完成,测试均在无污染的设施中进行。主量元素用 X 射线荧光光谱法(XRF),微量元素和稀土元素采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)完成,分析误差小于 5%。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

研究区地球化学分析样品均采自开鲁地区奈曼凹陷奈参 1 井红砬组。样品中 Al_2O_3 值相对较高,介于 13.12%~21.67% 之间,平均为 17.56%; SiO_2 的含量 51.13%~67.46%,平均为 59.28%; CaO 的含量为 0.54%~5.18%,平均为 2.45%; TiO_2 的含量为 0.45%~0.87%,平均为 0.72%; FeO 的含量为 0.47%~6.08%,平均为 2.27%; Fe_2O_3 的含量为 0.89%~6.58%,平均为 4.01%; MgO 的含量为 0.29%~2.67%,平均为 1.33%; K_2O/Na_2O 比值为 1.19~4.39,平均为 2.47; $Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$ 比值为 2.34~15.38,平均为 5.36。

3.2 微量元素

样品中微量元素 Ba、Rb 和 Zr 等含量相对较高,一般可达到 100×10^{-6} 以上。与大陆上、下地壳微量元素丰度^[17]相比,大离子亲石元素 Rb、Ce 含量较高,大部分样品高于上地壳的丰度(112.0×10^{-6} 、 4.9×10^{-6}),绝大部分远高于下地壳丰度值(5.3×10^{-6} 、 0.3×10^{-6})。高场强元素 Nb、Zr、Ta 中, Nb 含量大部分高于上地壳丰度值(25.0×10^{-6}),均高于下地壳丰度值(6.0×10^{-6}); Zr 的丰度值大部分高于上地壳(190×10^{-6}),基本均高于下地壳(70×10^{-6})。低场强元素 Th、U、Sr 中, Th 含量部分样品高于上地壳丰度值(10.7×10^{-6}),部分略低于上地壳丰度值,均高于下地壳丰度值(1.06×10^{-6}); U 含量部分高于上地壳丰度值(2.8×10^{-6}),并均高于下地壳丰度

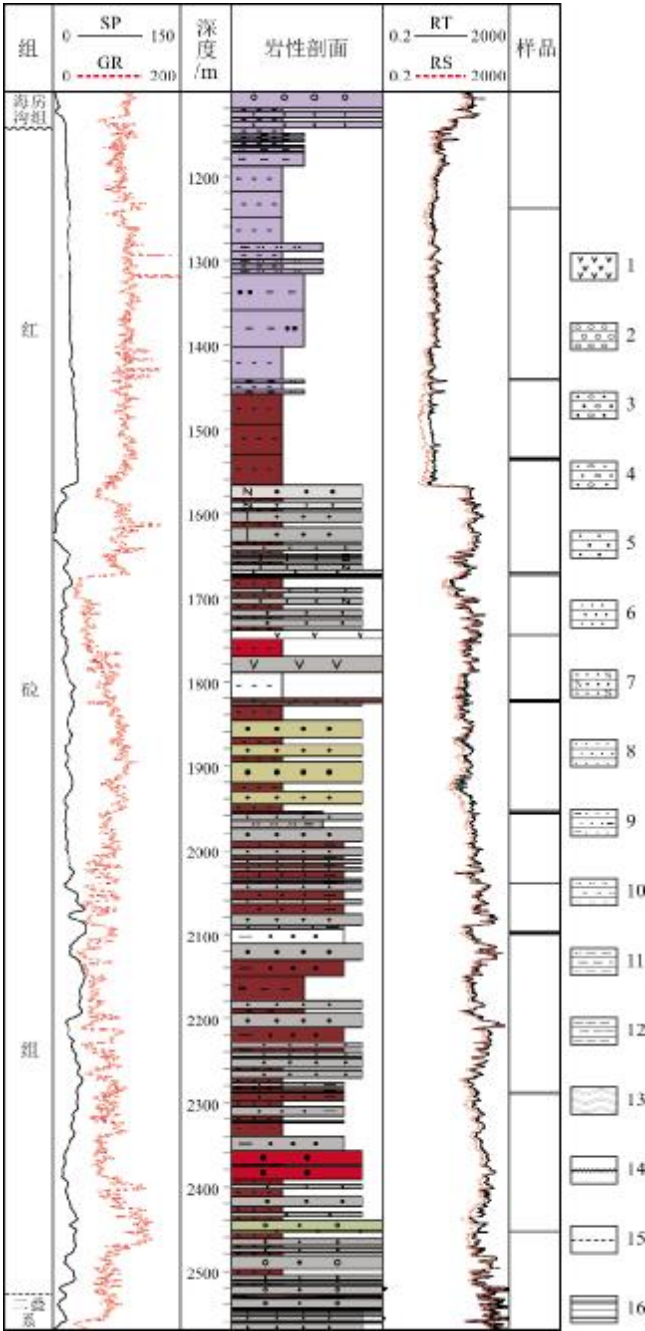


图 2 奈参 1 井红砬组柱状图

Fig. 2 Stratigraphic column of Hongla Formation in NC1 well
1—安山岩 (andesite); 2—砾岩 (conglomerate); 3—含砾粗砂岩 (gravel coarse sandstone); 4—含砾中砂岩 (gravel medium sandstone); 5—粗砂岩 (coarse sandstone); 6—中砂岩 (medium sandstone); 7—长石砂岩 (feldspar sandstone); 8—细砂岩 (fine sandstone); 9—含泥砂岩 (argillaceous sandstone); 10—粉砂岩 (siltstone); 11—粉砂质泥岩 (silty mudstone); 12—泥岩 (mudstone); 13—板岩 (slate); 14—角度不整合 (angular unconformity); 15—平行不整合 (parallel unconformity); 16—样品 (sample)

值(0.28×10^{-6}); Sr 含量少部分高于上地壳丰度(350×10^{-6}), 其余低于上地壳, 一部分低于下地壳丰度值(230×10^{-6}), Sr 丰度相对低的原因可能与其离子半径相对较小, 容易以游离态形式被地下水和地表水带走有关(图 3).

3.3 稀土元素

样品中稀土元素丰度整体变化很小, 均表现为轻稀土元素富集、重稀土元素相对平坦, Eu 具有相对明显的负异常, 个别具有正异常(图 4). 碎屑岩的稀土元素总量 ΣREE 介于 $96.45\times10^{-6}\sim217.44\times10^{-6}$ 之间, 平均值为 179.59×10^{-6} . LREE/HREE 值介于 6.10~9.58 间, 平均值为 8.57, 且高于北美页岩^[18]. $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 6.63~10.62 之间, 指示轻重稀土元素分异程度相对较高, LREE 相对富集. 指示轻稀土元素分异程度的 $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$

在 2.59~4.36 之间, 变化范围相对较小, 平均值在 3.68 左右, 指示轻稀土分馏中等; 指示重稀土元素分异程度的 $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 在 1.32~1.69, 平均值为 1.53, 表明重稀土元素分馏较低, 曲线较平坦; Eu 负异常相对较低, 其值介于 0.54~0.95 间, 平均值为 0.80, 总体表现为铕的负异常.

4 讨论

4.1 物源区性质

碎屑岩中稀土元素的含量主要是由原始物源区的岩石成分决定. 稀土元素因具有不可溶性质, 在水体中的含量极低, 搬运的过程中主要是以碎屑颗粒形式进行搬运, 同时受成岩作用的影响较小, 元素的配分模式可客观反映沉积物源区性质, 因而可作为物源区重

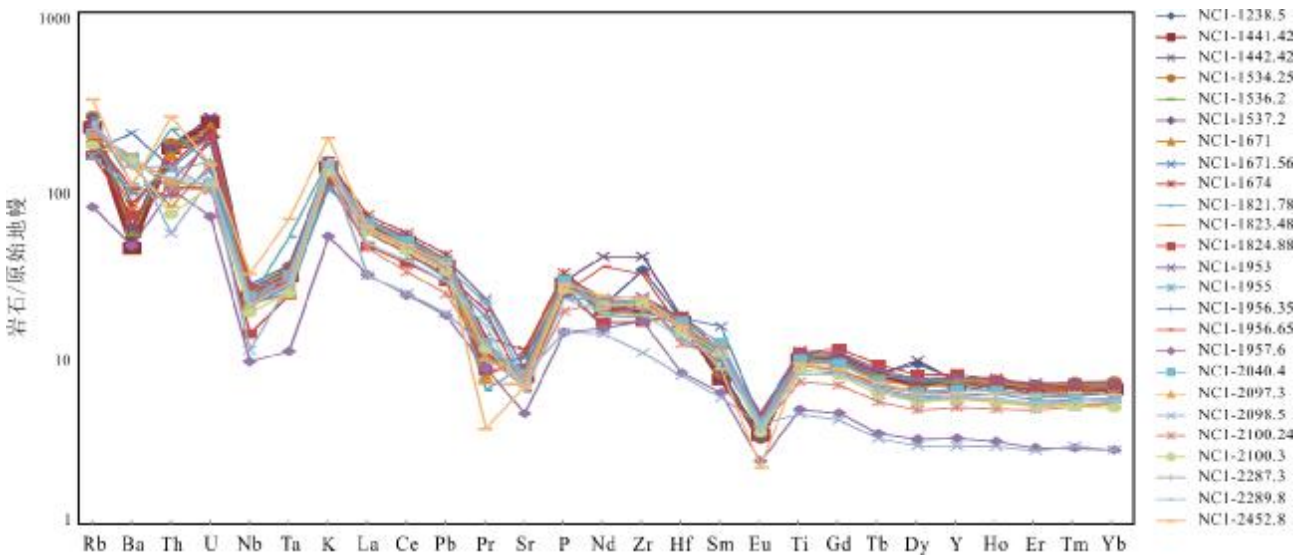


图 3 开鲁地区早三叠世碎屑岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 3 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of Early Triassic clastic rocks in Kailu area

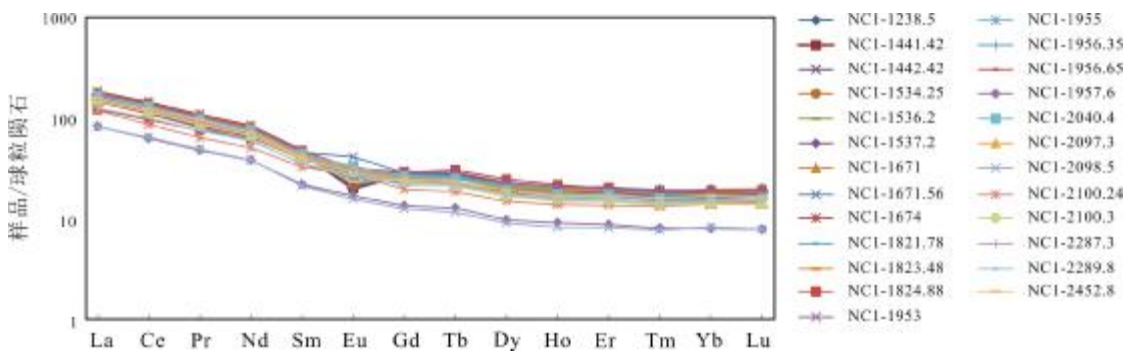


图 4 开鲁地区早三叠世碎屑岩稀土元素球粒陨石标准化曲线

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of Early Triassic clastic rocks in Kailu area

要的示踪元素^[19-24], 本次研究的样品稀土元素经球粒陨石标准化后, 表现为轻稀土元素富集、重稀土元素均一(轻度亏损), Eu 元素总体具有相对明显的负异常, 较少部分具有轻微的正异常。这与上地壳中稀土元素的配分形式一致, 表明研究区沉积岩的原始物质来自上地壳。

从微量元素蛛网图上可以看出(图 3), 样品具有大致相似的微量元素分布特征, 大致以亏损 Sr、Nb、Ta, 富集 Rb、Ba、Pb、Nd、La、Ce、Sm 等为特征。由上述微量元素分布特征可知, 开鲁地区早三叠世沉积物主要来自上地壳的长英质岩石。

研究表明, 沉积物中 Al_2O_3/TiO_2 小于 14 时, 沉积物源可能来自镁铁质岩石, Al_2O_3/TiO_2 值在 19~28 时, 物源可能与花岗闪长质和英云闪长质(或安山质和流纹质)岩石有关^[25]。研究区 Al_2O_3/TiO_2 绝大部分介于 20.44~24.90, 表明物源主要来自花岗闪长岩和英云闪长岩。

Cr/Zr 的比值可用来反映镁铁质岩石和长英质岩石对沉积物的相对贡献。研究区样品 Cr/Zr 绝大部分值介于 0.10~0.25, 平均值为 0.20, 明显小于 1, 说明碎屑物物源来自长英质岩石。样品中 Ni 的含量介于 $6.49 \times 10^{-6} \sim 35.70 \times 10^{-6}$ 之间, TiO_2 的含量为 0.45%~0.80% 间。在 Floyd 等^[26]提出的 Ni-TiO₂ 成分判别图解上, 研究区样品的投影点大多数都位于长英质源区内, 与其他物质成分的源区具有明显的区别(图 5)。

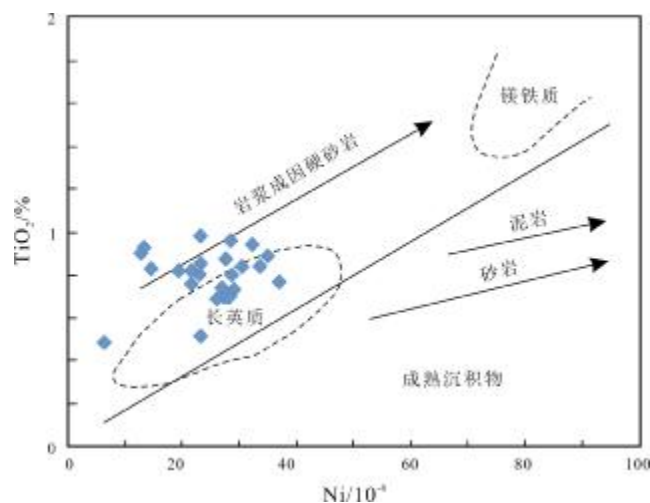


图 5 开鲁地区早三叠世碎屑岩 Ni-TiO₂ 图解

(据文献[26]修改)

Fig. 5 The of Ni-TiO₂ diagram of Early Triassic clastic rocks in Kailu area
(After Reference [26])

在 La/Th-Hf 判别图解(图 6)中, 样品投点大部分落入上地壳长英质物源区及长英质与玄武岩混合源区内或其附近, 主体为长英质源区。在 La/Yb- Σ REE 源岩判别图解(图 7)中, 样品投点都集中落在钙质泥岩区和玄武岩区的混合区。

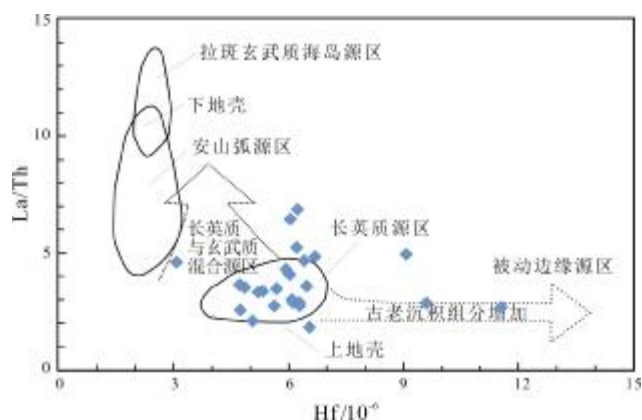


图 6 开鲁地区早三叠世碎屑岩 La/Th-Hf 图解

(据文献[27]修改)

Fig. 6 The La/Th-Hf diagram of Early Triassic clastic rocks in Kailu area
(After Reference [27])

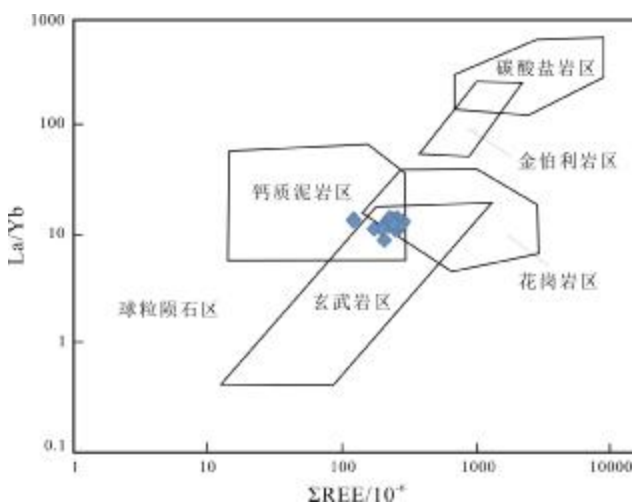


图 7 开鲁地区早三叠世碎屑岩 La/Yb- Σ REE 图解

(据文献[26-27]修改)

Fig. 7 The La/Yb- Σ REE diagram of Early Triassic clastic rocks in Kailu area
(After References [26-27])

综上所述, 研究区奈参 1 井早三叠世沉积物母岩源区物质较复杂, 应主要来源于上地壳的长英质沉积物源区, 还有部分来自中、基性火成岩物源区, 说明该区早三叠世沉积物源具有多样性, 主要为长英质岩石,

是经过剥蚀、搬运、沉积后的产物。

4.2 构造背景

Roser 等^[27]通过对已知区构造背景的砂岩、泥岩及现代砂泥岩沉积物的主量元素特征分析,认为主量元素的 K_2O/Na_2O 比值是反映构造环境的最有效的指标之一,提出了 SiO_2-K_2O/Na_2O 构造背景判别图解。研究区样品投点大多数位于活动大陆边缘区域,部分落在岛弧区和被动大陆边缘区(图 8a),表明研究区沉积物的物源区背景以主动大陆边缘的构造环境为主。依据 $F1$ 、 $F2$ 判别函数及公式计算得出判别函数值^[28-29]进行投图和分析,在 $F1-F2$ 构造判别图(图 8b)上,样品投点几乎都落在活动大陆边缘区,同样表明碎屑岩的物源区背景是以主动大陆边缘构造环境为主。

陆源碎屑中的微量元素与主量元素相比,具有稳定性较好的特征, Cr 、 Co 、 Th 、 Sc 、 La 和 Zr 在沉积环境中保持稳定,可以用以判定源区性质及构造环境。在 $Th-Co-Zr/10$ 构造判别图(图 8c)上,数据点大部分都落在大陆岛弧的范围内或其附近,反映了源区应为大陆岛弧构造背景。

稀土元素常被用来判断现代和古代沉积物的构造背景或物源区的性质。Murry^[30]的研究表明, Ce 异常与沉积盆地的构造背景相关,以北美页岩作为标准化值,距洋脊顶 400 km 之内的扩张脊附近,有明显的 Ce 负异常, Ce 值为 0.29×10^{-6} ;大洋盆地为中等的 Ce 负异常,其值为 0.55×10^{-6} ;大陆边缘区的 Ce 异常消失或者为正异常, Ce 值介于 $0.9 \times 10^{-6} \sim 1.30 \times 10^{-6}$ 。研究区样品 Ce 异常介于 $0.91 \times 10^{-6} \sim 1.04 \times 10^{-6}$ 之间,为很弱的负

异常和弱的正异常,从而说明了碎屑物的沉积源区应为靠近大陆边缘区域,类似于大陆边缘环境。

综合以上地球化学研究结果可以看出,开鲁地区奈参 1 井早三叠世碎屑岩的沉积物可能来自靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造环境。

4.3 沉积环境

不同沉积环境下沉积物的元素富集特征存在一定的差异。通过对沉积物中常量元素和微量元素的分析,应用 Sr 元素和 Sr/Ba 、 Th/U 比值法研究水体古盐度,运用 $V/(V+Ni)$ 、 V/Cr 、 Ni/Co 比值法判断沉积氧化还原条件,利用 Rb/Sr 、 MgO/CaO 比值推测古气候特征(图 9)。

Sr 元素是判断古盐度的常用指标,在陆相淡水中 Sr 含量介于 $100 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$,在海相咸水中的含量一般为 $800 \times 10^{-6} \sim 1\ 000 \times 10^{-6}$ ^[31]。研究区样品 Sr 元素含量在 $130 \times 10^{-6} \sim 424 \times 10^{-6}$,平均值为 240.77×10^{-6} ,整体上形成于淡水环境。 Sr/Ba 、 Th/U 比值也是恢复古盐度的常用指标。通常认为,陆相淡水沉积物中 Sr/Ba 值小于 1.0、 Th/U 值大于 7,陆相半咸水中 Sr/Ba 值为 0.6~1.0、 Th/U 值为 2~7,而海相沉积物中 Sr/Ba 值大于 1.0、 Th/U 值小于 2^[32-33]。研究区样品 Sr/Ba 值分布在 0.11~0.77,平均值为 0.43,总体上为淡水环境;而 Th/U 值分布在 1.78~7.66,平均值为 3.69,总体上为陆相淡水-半咸水环境,至下而上古盐度有增大的趋势,与 Sr/Ba 值反映的古盐度变化趋势较一致。

$V/(V+Ni)$ 比值常用来判断沉积介质氧化还原条件,当 $V/(V+Ni)$ 小于 0.6 时指示氧化环境, $V/(V+Ni)$ 值在 0.6~0.84 指示贫氧环境, $V/(V+Ni)$ 大于 0.84 时指

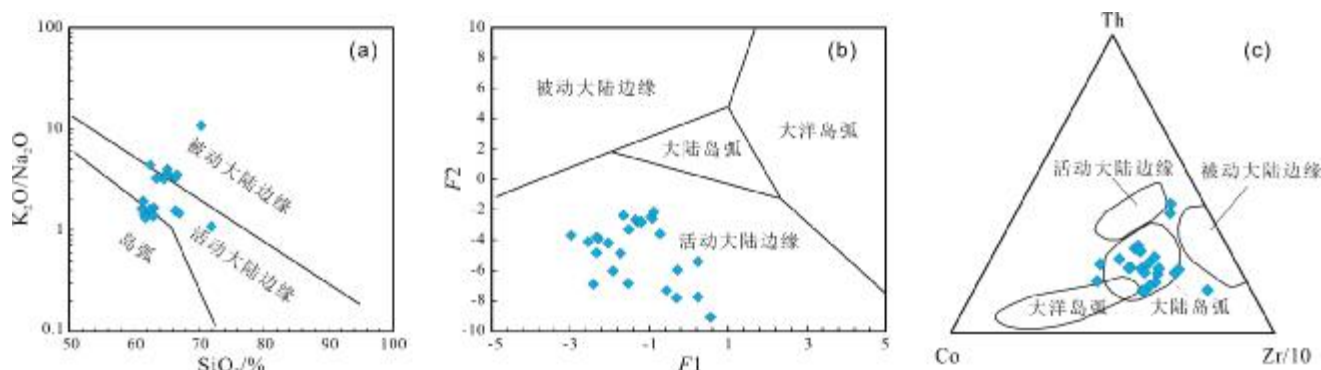


图 8 开鲁地区早三叠世碎屑岩构造背景判别图

(据文献[26-27]修改)

Fig. 8 Tectonic setting discrimination diagram of Early Triassic clastic rocks in Kailu area

(After References [26-27])

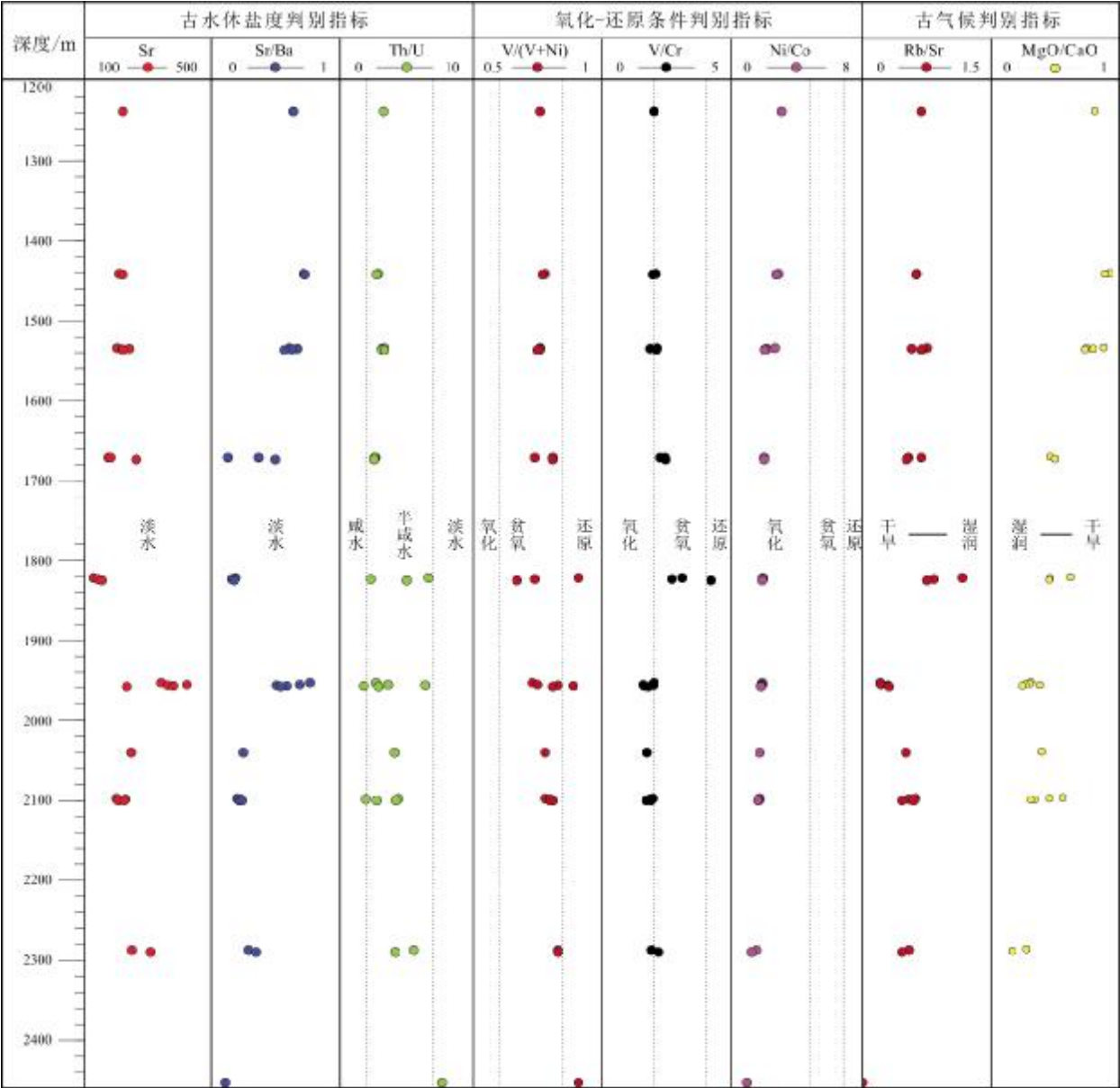


图 9 开鲁地区早三叠世碎屑岩地球化学环境判别图

Fig. 9 Geochemical environment discrimination diagram of Early Triassic clastic rocks in Kailu area

示极贫氧环境^[34]. 研究区样品 $V/(V+Ni)$ 值介于 0.67~0.91 之间, 平均 0.79, 指示水体环境为氧化-还原过渡环境. V/Cr 、 Ni/Co 比值也可以用于判断水体的氧化还原条件, 当 V/Cr 值小于 2.00、 Ni/Co 小于 5 时指示氧化环境, V/Cr 值在 2.00~4.25、 Ni/Co 在 5~7 之间指示次氧化环境, V/Cr 值大于 4.25、 Ni/Co 值大于 7 指示还原环境^[35]. 研究区 V/Cr 值在 1.61~4.23 之间, 平均为 2.16, 反映了水体整体为氧化-还原过渡环境. Ni/Co 值在 0.98~3.11, 平均为 2.00, 指示了沉积水体为氧化环境. 综上分析, 研究区奈参 1 井早三叠世沉积环境整

体上表现为氧化-弱还原过渡环境, 自上而下氧化还原程度变化不明显.

Rb/Sr 值能够反映古气候变化, 气候干旱时, 降水较少, Sr 残留的多, 使 Rb/Sr 呈低值; 气候湿润气条件下, Sr 大量流失, 使得 Rb/Sr 值升高^[36-37]. 研究区样品 Rb/Sr 值主要分布在 0.21~1.17, 平均值为 0.57, 总体上 Rb/Sr 值较低, 指示为干旱炎热气候. MgO/CaO 也可作为古气候的判断的指标^[38], 代表的古气候意义与 Rb/Sr 值变化趋势相反, 高值指示干旱气候, 低值指示温湿气候. 研究区 MgO/CaO 值在 0.17~1.32 之间, 平均

为 0.55, 上部较下部数值略微升高, 指示了古气候由湿热向干旱炎热气候转变。

5 结论

1) 地球化学分析表明, 开鲁南部奈曼凹陷早三叠世碎屑岩地层母岩源区物质复杂, 沉积物源具有多样性, 但以上地壳长英质岩石源区为主, 还有少量来自中、基性火成岩物源区; 碎屑岩沉积物的物源区背景以主动大陆边缘的构造环境为主, 反映源区应为大陆岛弧构造背景, 即来自靠近大陆岛弧的活动大陆边缘构造背景, 应与兴蒙造山带和板块的俯冲、碰撞背景有关。

2) 研究区下三叠统红红组地球化学特征分析指示沉积环境处于氧化-弱还原环境, 水介质条件为陆相淡水-半咸水环境, 向上水体盐度有增大趋势, 古气候总体上为干旱炎热气候。

参考文献(Reference):

- [1] 谭聪, 于炳松, 袁选俊, 等. 鄂尔多斯盆地三叠统刘家沟组与和尚沟组红层成色机制[J]. 现代地质, 2020, 34(4): 769-783.
Tan C, Yu B S, Yuan X J, et al. Color origin of the Lower Triassic Liujiagou and Heshanggou formations red beds in the Ordos Basin[J]. Geoscience, 2020, 34(4): 769-783.
- [2] 王成善, 胡修棉. 白垩纪世界与大洋红层[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 11-21.
Wang C S, Hu X M. Cretaceous world and oceanic red beds[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 11-21.
- [3] Retallack G J, Veevers J J, Morante R. Global coal gap between Permian-Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants[J]. GSA Bulletin, 1996, 108(2): 195-207.
- [4] Woods A D. Paleooceanographic and paleoclimatic context of Early Triassic time[J]. Comptes Rendus Palevol, 2005, 4(6/7): 463-472.
- [5] Linol B, Bercovici A, Bourquin S, et al. Late Permian to Middle Triassic correlations and palaeogeographical reconstructions in southwestern European basins: New sedimentological data from Minorca (Balearic Islands, Spain)[J]. Sedimentary Geology, 2009, 220(1/2): 77-94.
- [6] Walker T R. Formation of red beds in moist tropical climates: A hypothesis[J]. GSA Bulletin, 1974, 85(4): 633-638.
- [7] Kadir S, Eren M. The occurrence and genesis of clay minerals associated with Quaternary caliches in the Mersin area, southern Turkey[J]. Clays and Clay Minerals, 2008, 56(2): 244-258.
- [8] 南君亚, 叶健骝, 王筑明, 等. 贵州二叠纪-三叠纪古气候和古海洋环境的地球化学研究[J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 239-249.
Nan J Y, Ye J L, Wang Z M, et al. Geochemistry of paleoclimate and paleo-ocean environment during Permian-Triassic in Guizhou Province [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1998, 18(2): 239-249.
- [9] 陈树旺, 郑月娟, 张健, 等. 大兴安岭南部二叠系-三叠系界线及沉积环境演化[J]. 中国地质, 2020, 47(3): 821-838.
Chen S W, Zheng Y J, Zhang J, et al. The sedimentary environment and boundary of Permian-Triassic strata in the southern Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 2020, 47(3): 821-838.
- [10] 全国地层委员会. 全国地层会议学术报告汇编: 中国晚古生代陆相地层[M]. 北京: 科学出版社, 1963: 122-129.
National Stratigraphic Committee. Proceedings of the National Stratigraphic Conference: Late Paleozoic continental strata in China [M]. Beijing: Science Press, 1963: 122-129. (in Chinese)
- [11] 辽宁省地质矿产勘查局. 辽宁省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991: 6-57.
Liaoning Bureau of Geology and Mineral Exploration. Stratigraphy (lithostratic) of Liaoning Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991: 6-57.
- [12] 张武, 董国义. 辽宁的三叠系[J]. 地层学杂志, 1982, 6(1): 20-32.
Zhang W, Dong G Y. Triassic of Liaoning Province [J]. Journal of Stratigraphy, 1982, 6(1): 20-32. (in Chinese)
- [13] 童金南, 楚道亮, 缪雪, 等. 中国三叠纪岩石地层划分和对比[J]. 地层学杂志, 2021, 45(3): 340-363.
Tong J N, Chu D L, Miao X, et al. Lithostratigraphic subdivision and correlation of the Triassic in China [J]. Journal of Stratigraphy, 2021, 45(3): 340-363.
- [14] 丁秋红, 张立君, 许坤. 松辽盆地西南部下三叠统及其孢粉组合[J]. 微体古生物学报, 2005, 22(1): 107-114.
Ding Q H, Zhang L J, Xu K. The Lower Triassic series and its palynological assemblages in southwestern Songliao Basin, NE China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2005, 22(1): 107-114.
- [15] 杨雅军, 张立东, 张立君, 等. 大兴安岭地区三叠系划分与对比[J]. 地质与资源, 2012, 21(1): 67-73.
Yang Y J, Zhang L D, Zhang L J, et al. Division and correlation of the Triassic strata in Daxinganling region [J]. Geology and Resources, 2012, 21(1): 67-73.
- [16] 赵兴齐, 陈践发, 张晨, 等. 开鲁盆地奈曼凹陷奈 1 区块原油地球化学特征及油源分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012, 36(3): 44-53.
Zhao X Q, Chen J F, Zhang C, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source analysis in Nai 1 block for Naiman depression, Kailu Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2012, 36(3): 44-53.
- [17] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 117-140.

- [18] Haskin L A, Haskin M A, Frey F A, et al. Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths [C]// Ahrens L H. Origin and distribution of the elements. Oxford: Pergamon, 1968: 889–912.
- [19] Culler R L. The controls on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. [J]. Chemical Geology, 1995, 123(1/4): 107–131.
- [20] Savoy L E, Stevenson R K, Mountjoy E W. Provenance of Upper Devonian-Lower Carboniferous miogeoclinal strata, southeastern Canadian Cordillera: Link between tectonics and sedimentation [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70(1): 181–193.
- [21] 沈渭洲, 舒良树, 向磊, 等. 江西井冈山地区早古生代沉积岩的地球化学特征及其对沉积环境的制约 [J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2442–2458.
- Shen W Z, Shu L S, Xiang L, et al. Geochemical characteristics of Early Paleozoic sedimentary rocks in the Jinggangshan area, Jiangxi Province and the constraining to the sedimentary environment [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(10): 2442–2458.
- [22] 张英利, 王宗起, 闫臻, 等. 库鲁克塔格地区新元古代贝西组的构造环境: 来自碎屑岩地球化学的证据 [J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1785–1796.
- Zhang Y L, Wang Z Q, Yan Z, et al. Tectonic setting of Neoproterozoic Beiyixi Formation in Quruqtagh area, Xinjiang: Evidence from geochemistry of clastic rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1785–1796.
- [23] 刘士林, 刘蕴华, 林舸, 等. 渤海湾盆地南堡凹陷新近系泥岩稀土元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 现代地质, 2006, 20(3): 449–456.
- Liu S L, Liu Y H, Lin G, et al. REE geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Neogene, Nanpu Sag, Bohai Basin [J]. Geoscience, 2006, 20(3): 449–456.
- [24] 施璐, 唐振, 张渝金, 等. 大兴安岭中段索伦地区中侏罗统万宝组沉积环境及地球化学特征 [J]. 地质与资源, 2022, 31(5): 579–587, 605.
- Shi L, Tang Z, Zhang Y J, et al. Sedimentary environment and geochemistry of the Middle Jurassic Wanbao Formation in Suolun area, middle Daxinganling Mountains [J]. Geology and Resources, 2022, 31(5): 579–587, 605.
- [25] Girty G H, Ridge D L, Knaack C. Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and argillite, Sierra Nevada, California [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(1): 107–118.
- [26] Floyd P A, Winchester J A, Park R G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland [J]. Precambrian Research, 1989, 45(1/3): 203–214.
- [27] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO_2 content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ratio [J]. The Journal of Geology, 1986, 94(5): 635–650.
- [28] Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. The Journal of Geology, 1983, 91(6): 611–627.
- [29] Yan Z, Wang Z Q, Yan Q R, et al. Geochemical constraints on the provenance and depositional setting of the Devonian Liuling Group, East Qinling Mountains, Central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling Orogenic belt [J]. Journal of Sedimentary Research, 2012, 82(1): 9–20.
- [30] Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Jones D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. Geology, 1990, 18(3): 268–271.
- [31] 田景春, 张翔. 沉积地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2016: 63–77.
- Tian J C, Zhang X. Sedimentary geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 63–77.
- [32] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20–25.
- Zheng R C, Liu M Q. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20–25.
- [33] 张文正, 杨华, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地长7优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境 [J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59–64.
- Zhang W Z, Yang H, Yang Y H, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59–64.
- [34] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark shale member of the Dennis limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/3): 65–82.
- [35] 张涛, 李永飞, 孙守亮, 等. 冀北-辽西地区洪水庄期海洋氧化还原环境的不均一性 [J]. 地质与资源, 2021, 30(3): 257–264.
- Zhang T, Li Y F, Sun S L, et al. Heterogeneity of marine redox environment during the sedimentary period of Hongshuizhuang Formation in northern Hebei-western Liaoning [J]. Geology and Resources, 2021, 30(3): 257–264.
- [36] 陈骏, 汪永进, 陈旻, 等. 中国黄土地层 Rb 和 Sr 地球化学特征及其古季风气候意义 [J]. 地质学报, 2001, 75(2): 259–266.
- Chen J, Wang Y J, Chen Y, et al. Rb and Sr geochemical characterization of the Chinese loess and its implications for palaeomonsoon climate [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 259–266.
- [37] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 936–946.

- Fu J H, Li S X, Xu L M, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 936–946.
- [38] 李俊, 赵红格, 汪建, 等. 鄂尔多斯盆地西缘中部三叠系延长组碎屑岩沉积环境及物源示踪[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.120>, 2022–11–26.
- Li J, Zhao H G, Wang J, et al. Sedimentary environment and provenance tracing of clastic rocks from the Triassic Yanchang Formation in the western margin of the Ordos Basin [J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.120>, 2022–11–26.

(上接第 11 页/Continued from Page 11)

- [31] 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 冀东都山花岗岩基及相关花岗斑岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 法定年及其意义[J]. *地球化学*, 2003, 32(2): 173–180.
- Luo Z K, Miao L C, Guan K, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Dushan granitic batholiths and related granite-porphyry dyke, eastern Hebei Province, China, and their geological significance[J]. *Geochimica*, 2003, 32(2): 173–180.
- [32] 罗镇宽, 李俊建, 关康, 等. 辽宁凌源柏杖子金矿区花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质调查与研究*, 2004, 27(2): 82–85, 128.
- Luo Z K, Li J J, Guan K, et al. SHRIMP zircon U-Pb age of the granite at Baizhangzi gold field in Lingyuan, Liaoning Province[J]. *Geological Survey and Research*, 2004, 27(2): 82–85, 128.
- [33] 马芳, 穆治国, 刘玉琳. 河北滦平球状闪长岩年代学及其地质意义[J]. *地质论评*, 2004, 50(4): 360–364.
- Ma F, Mu Z G, Liu Y L. Geochronology and geologic significance of the orbicular dioritic rocks in Luanping, Hebei Province[J]. *Geological Review*, 2004, 50(4): 360–364.
- [34] 张拴宏, 赵越, 刘健, 等. 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*, 2007, 23(3): 625–638.
- Zhang S H, Zhao Y, Liu J, et al. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 625–638.
- [35] 田伟, 陈斌, 刘超群, 等. 冀北小张家口超基性岩体的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 583–590.
- Tian W, Chen B, Liu C Q, et al. Zircon U-Pb age and Hf isotopic composition of the Xiaozhangjiakou ultramafic pluton in northern Hebei[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 583–590.
- [36] Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a Late Palaeozoic active continental margin[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(2): 451–463.

(上接第 23 页/Continued from Page 23)

- [41] 彭玉鲸, 齐成栋, 周晓东, 等. 吉黑复合造山带古亚洲洋向滨太平洋构造域转换[J]. *地质与资源*, 2012, 21(3): 261–265.
- Peng Y J, Qi C D, Zhou X D, et al. Transition from Paleo-Asian Ocean domain to circum-Pacific Ocean domain for the Ji-Hei composite orogenic belt: Time mark and relationship to global tectonics[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(3): 261–265.
- [42] Xu W L, Ji W Q, Pei F P, et al. Triassic volcanism in eastern Heilongjiang and Jilin provinces, NE China: Chronology, geochemistry, and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34(3): 392–402.
- [43] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1–30.
- [44] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean-Proterozoic boundary: Identification and significance [J]. *Lithos*, 1989, 23(1/2): 1–18.
- [45] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69(1): 33–47.
- [46] Zhang S H, Zhao Y, Davis G A, et al. Temporal and spatial variations of Mesozoic magmatism and deformation in the North China Craton: Implications for lithospheric thinning and decratonization[J]. *Earth-science Reviews*, 2014, 131: 49–87.