



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

施璐¹, 唐振¹, 张渝金¹, 杨柳¹, 杜玉春²

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004

摘要: 为了深入研究大兴安岭地区中生代断陷盆地构造背景, 利用野外地质调查、岩石地球化学等方法, 系统研究了索伦地区中侏罗统万宝组的沉积环境及地球化学性质。结果表明万宝组为一套分布于山间断陷盆地的陆相沉积碎屑岩建造, 为辫状河三角洲相沉积环境。地球化学特征显示索伦地区万宝组富集大离子亲石元素(如 Th、U、LREE)和 Zr、Hf 元素, 亏损高场强元素(如 Nb、Ta、P、Ti)和 Ba、Sr 元素, 稀土元素配分曲线具有轻稀土富集的右倾特征。万宝组沉积物源主要来自中酸性岩浆岩源区, 具有大陆岛弧构造背景特征, 可能与蒙古-鄂霍茨克洋的南向俯冲弧后伸展作用有关。

关键词: 万宝组; 沉积环境; 物源分析; 构造背景; 大兴安岭中段; 松辽盆地

SEDIMENTARY ENVIRONMENT AND GEOCHEMISTRY OF THE MIDDLE JURASSIC WANBAO FORMATION IN SUOLUN AREA, MIDDLE DAXINGANLING MOUNTAINS

SHI Lu¹, TANG Zhen¹, ZHANG Yu-jin¹, YANG Liu¹, DU Yu-chun²

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China;

2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China

Abstract: To further research the tectonic settings of Mesozoic fault basin in Daxinganling Mountains, on the basis of field geological survey and petrogeochemical analysis, this paper systematically studies the sedimentary environment and geochemical properties of Middle Jurassic Wanbao Formation in Suolun area. The results indicate that Wanbao Formation is a set of continental sedimentary clastic rocks distributed in the intermountain fault basin, with the sedimentary environment of braided river delta facies. The Wanbao Formation is geochemically characterized by enrichment of LILEs (Th, U, LREE), Zr and Hf, and depletion of HFSEs (Nb, Ta, P, Ti), as well as Ba and Sr. The REE patterns reveal right-dipping LREE enrichment. The sediment provenance mainly comes from acid-intermediate magmatic rocks, with the characteristics of continental island arc tectonic setting, which may be related to the southward subduction and back-arc extension of Mongolia-Okhotsk Ocean.

Key words: Wanbao Formation; sedimentary environment; provenance analysis; tectonic setting; middle Daxinganling Mountains; Songliao Basin

收稿日期: 2021-01-27; 修回日期: 2021-03-08. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“大兴安岭中段龙江盆地中侏罗统地层新研究”(编号 41702032); 中国地质调查局项目“内蒙古 1:5 万奈玛拉吉、巨里河、荷叶哈达幅区域地质调查”(编号 DD20190039-03), “内蒙古 1:5 万楞吉曼达坂、吉日根林场外站、西马拉吐、乌兰沼、巴彦套海幅区域地质调查”(编号 DD20160048-02).

作者简介: 施璐(1988—), 男, 博士, 工程师, 主要从事岩石学和区域地质调查研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//shilu880208@hotmail.com

通信作者: 唐振(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地层与古生物研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//303094990@qq.com

0 前言

以往松辽盆地及外围的油气勘探工作主要集中在白垩系和古近系等已知目的层系，近年来侏罗系地层也作为主要生烃层系成为油气勘探工作的新目标^[1-4]，在突泉盆地突参1井侏罗系万宝组也发现了轻质原油^[3]。由于大面积的上侏罗统一下白垩统火山岩覆盖，侏罗系沉积地层出露面积较少，制约了对于侏罗系沉积地层沉积环境、物源特征和构造背景等特征的认识。中侏罗统万宝组作为潜在的烃源岩层位之一，是侏罗系主要的陆相沉积地层，确定其岩性组合特征、产出状况、沉积环境、物源特征等就显得尤为重要^[5-6]。区域

上万宝组岩性可分为上、下两部分，下部为灰、灰白、灰绿色砾岩夹砂岩和凝灰岩，上部为灰黑色泥岩、灰与灰黑色砂岩和粉砂岩夹凝灰岩及煤层，含植物化石。万宝组通常以底部砾岩与下伏红旗组呈角度不整合接触，其上被塔木兰沟组火山岩不整合覆盖。笔者在大兴安岭中段索伦地区阿拉达尔吐等地发现了一套陆相火山沉积碎屑岩，通过孢粉化石、岩石组合等特征将其厘定为中侏罗统万宝组(图1)。本文以索伦地区万宝组为研究对象，通过岩石地层层序、岩石地球化学等研究，确定万宝组的沉积环境，探讨其物源属性和大地构造背景，为松辽盆地进一步的油气勘探工作提供地质依据。

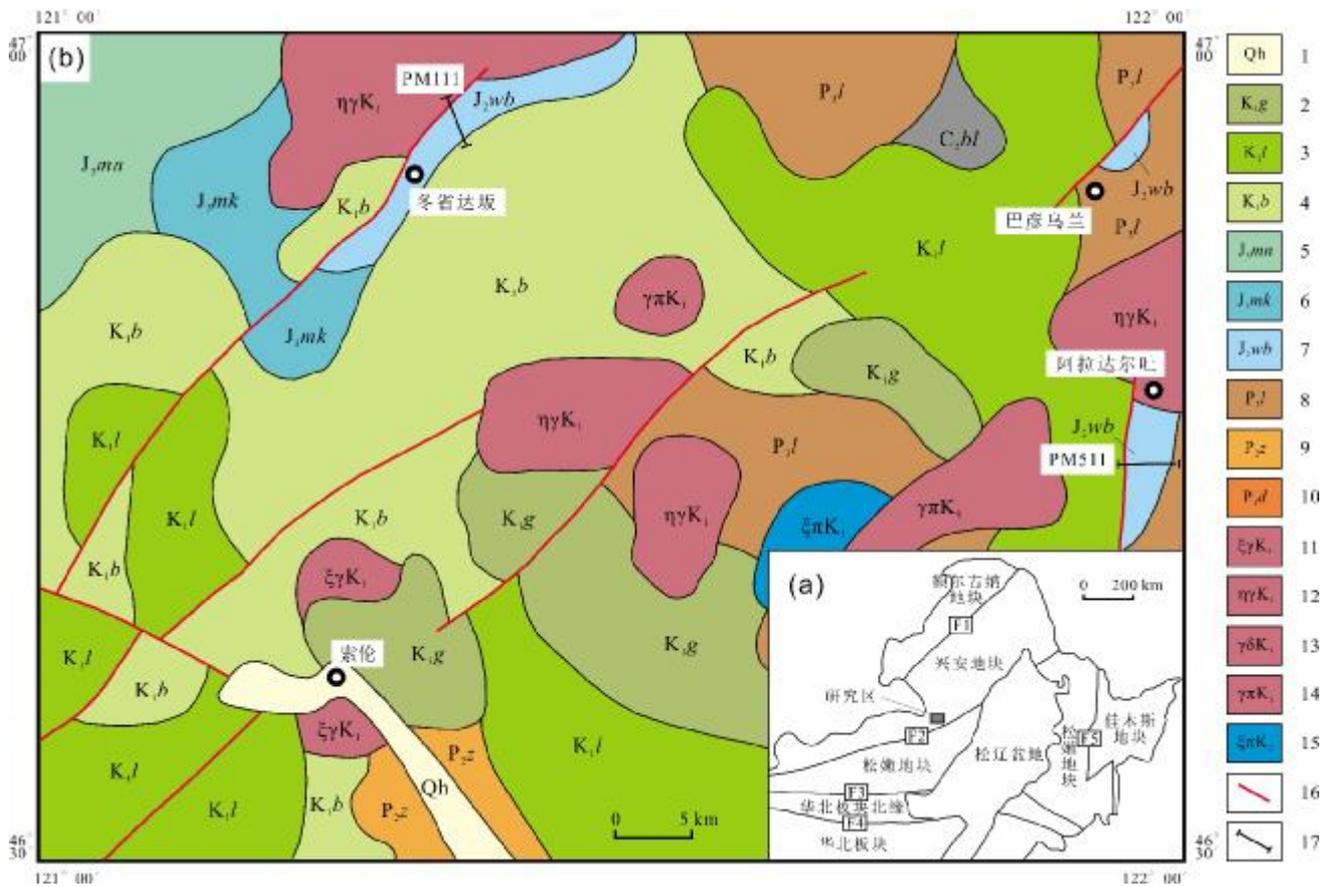


图1 大兴安岭中段索伦地区地质简图

Fig. 1 Geological map of Suolun area in middle Daxinganling Mountains

1—第四系(Quaternary); 2—下白垩统光华组(Lower Cretaceous Guanghua fm.); 3—下白垩统龙江组(Lower Cretaceous Longjiang fm.); 4—下白垩统白音高老组(Lower Cretaceous Baiyingaolao fm.); 5—上侏罗统玛尼吐组(Upper Jurassic Manitu fm.); 6—上侏罗统满克头鄂博组(Upper Jurassic Manketouebo fm.); 7—中侏罗统万宝组(Middle Jurassic Wanbao fm.); 8—上二叠统林西组(Upper Permian Linxi fm.); 9—中二叠统哲斯组(Middle Permian Zhesi fm.); 10—下二叠统大石寨组(Lower Permian Dashizhai fm.); 11—早白垩世正长花岗岩(Early Cretaceous syenogranite); 12—早白垩世二长花岗岩(Early Cretaceous monzogranite); 13—早白垩世花岗岩闪长岩(Early Cretaceous granodiorite); 14—早白垩世花岗斑岩(Early Cretaceous granite porphyry); 15—早白垩世正长斑岩(Early Cretaceous orthophyre); 16—断裂(fault); 17—剖面位置(profile location); F1—塔源-喜桂图断裂(Tayuan-Xiguitu fault); F2—贺根山-黑河断裂(Hegenshan-Heihe fault); F3—西拉木伦-延吉断裂(Xar Moron-Yanji fault); F4—赤峰-开原断裂(Chifeng-Kaiyuan fault); F5—牡丹江断裂(Mudanjiang fault)

1 区域地质背景

索伦地区位于松辽盆地西缘大兴安岭中段, 大地构造位置处于贺根山-黑河断裂以北的兴安地块东南缘(图 1a), 经历了古生代古亚洲洋构造域和中新生代蒙古-鄂霍次克洋及环太平洋构造域演化和叠加改造^[7-10]. 索伦地区晚古生代以浅变质的海相-陆相沉积作用为主, 产出地层有下二叠统大石寨组(P_1d)、中二叠统哲斯组(P_2z)海相沉积地层和上二叠统林西组(P_3l)湖沼相沉积地层. 中生代以陆相火山沉积作用为主, 产出地层有中侏罗统万宝组(J_2wb), 上侏罗统满克头鄂博组(J_3mk)、玛尼吐组(J_3mn), 下白垩统白音高老组(K_1b)、龙江组(K_1l)、光华组(K_1g)(图 1b).

索伦地区万宝组主要分布在冬省达坂、巴彦乌兰、阿拉达尔吐等地, 总体以条带状出露于研究区晚中生代火山喷发盆地的底部和盆缘一带(图 1b). 该组为一套分布于山间断陷盆地的陆相火山沉积碎屑岩建造, 主要岩性为凝灰质砂砾岩、砂岩、粉砂岩及火山碎屑岩. 笔者在该地区万宝组砂岩中获得大量孢粉化石, 孢粉组合以 *Cyclogranisporites-Protopenus-Pristinuspollenites* (圆形粒面孢-原始松粉-原始双囊粉) 为代表, 孢子类型以侏罗纪常见孢粉化石为主, 确认索伦地区万宝组形成时代应为中侏罗世^[11-13].

2 岩石地层层序

本次研究在索伦地区冬省达坂实测了万宝组地层

剖面(PM111, 图 2), 剖面走向 166° , 长度 1.83 km, 地层层序自上而下如下.

上覆: 白音高老组流纹质晶岩屑凝灰岩

----- 喷发不整合 -----

总厚度: 416.50 m

| | |
|------------------------|---------|
| 10. 浅灰色凝灰质细砂岩夹薄层状粉砂岩 | 21.90 m |
| 9. 深灰色凝灰质细砂粉砂岩 | 46.10 m |
| 8. 深灰色凝灰质细砂岩 | 70.30 m |
| 7. 浅灰色凝灰质粉砂质泥岩 | 2.80 m |
| 6. 深灰色凝灰质细砂粉砂岩 | 55.10 m |
| 5. 浅灰绿色凝灰质细砂岩夹凝灰质中细粒砂岩 | 27.30 m |
| 4. 浅灰色凝灰质中细粒砂岩夹细砂岩 | 48.00 m |
| 3. 深灰色凝灰质粉砂岩 | 36.00 m |
| 2. 浅灰绿色凝灰质粉砂岩 | 44.40 m |
| 1. 深灰色凝灰质粉砂细砂岩 | 57.40 m |
| 未见底 | |

该剖面显示万宝组为一套以凝灰质细砂岩、粉砂岩为主夹少量凝灰质中细砂岩的沉积岩建造. 根据剖面图整体进行分析, 可划分出 4 个沉积韵律, 由上到下依次为: ①凝灰质粉砂细砂岩-粉砂岩沉积韵律; ②凝灰质中细粒砂岩-泥岩沉积韵律; ③细砂岩-细砂粉砂岩沉积韵律; ④细砂粉砂岩-细砂岩沉积韵律. ①—③沉积韵律向上变细, 表现出水进过程(即退积); 而④沉积韵律向上变粗, 则表现出水退过程(即进积).

在阿拉达尔吐地区实测万宝组地层剖面(PM511, 图 3), 剖面走向 88° , 长度 1.27 km, 地层层序自上而下如下.

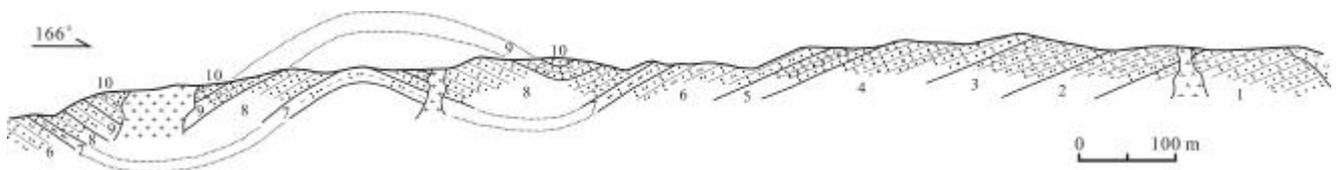


图 2 索伦地区冬省达坂万宝组地层实测剖面(PM111)

Fig. 2 Stratigraphic profile PM111 of Wanbao Formation at Dongshengdaban in Suolun area

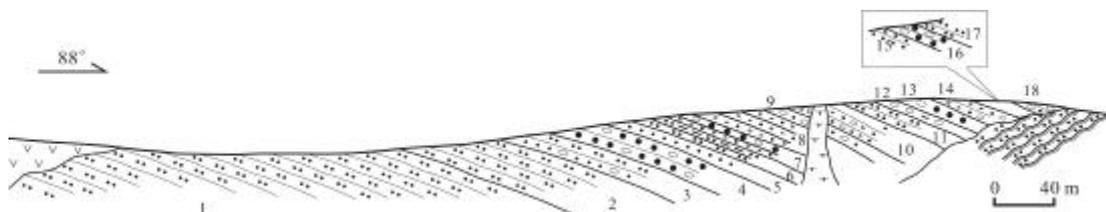


图 3 索伦地区阿拉达尔吐万宝组地层实测剖面(PM511)

Fig. 3 Stratigraphic profile PM511 of Wanbao Formation at Alada'ertu in Suolun area

| | |
|----------------------------|---------|
| 上覆:龙江组安山岩 | |
| ~~~~~ 喷发不整合 ~~~~~ | |
| 总厚度:183.02 m | |
| 18.灰色细砾岩夹灰黄色含砾中粗粒长石岩屑砂岩 | 3.50 m |
| 17.灰绿色粉砂岩 | 2.04 m |
| 16.黄绿色含砾粗砂岩与灰绿色砂砾岩互层(中厚层状) | 2.04 m |
| 15.黄绿色细砂岩 | 3.45 m |
| 14.灰黄色含砾中细粒长石岩屑砂岩 | 9.40 m |
| 13.灰黄色含砾粗砂岩 | 10.49 m |
| 12.灰色砂质复成分砾岩 | 3.98 m |
| 11.灰绿色粉砂岩夹灰紫色粉砂岩 | 9.94 m |
| 10.灰黄色含砾粗粒长石岩屑砂岩 | 16.04 m |
| 9.灰黄色砂砾岩 | 6.32 m |
| 8.灰黄色中粒长石岩屑砂岩 | 24.11 m |
| 7.灰黄色粗粒长石岩屑砂岩与含砾粗砂岩互层 | 5.56 m |
| 6.灰紫色粉砂岩与灰紫色粉砂质泥岩互层 | 8.30 m |
| 5.灰绿色细砂岩 | 6.48 m |
| 4.灰黄色含砾粗砂岩 | 14.51 m |
| 3.灰紫色含砾细砂岩与黄绿色粉砂岩互层 | 12.10 m |
| 2.灰紫色粉砂岩与灰绿色粉砂岩互层 | 7.67 m |
| 1.灰绿色粉砂岩 | 37.09 m |
| ~~~~~ 角度不整合 ~~~~~ | |
| 下伏:林西组粉砂岩 | |

该剖面显示万宝组为一套以粗砂岩、中细粒长石岩屑砂岩及复成分砾岩为主,夹少量粉砂岩的沉积建造,含植物化石(未定种)。根据实测剖面综合分析,可划分为4个沉积韵律,由下到上依次为:①灰绿色粉砂岩-灰黄色含砾粗砂岩-粉砂岩沉积韵律;②粗粒长石岩屑砂岩-中粒长石岩屑砂岩沉积韵律;③砂砾岩-粉砂岩沉积韵律;④复成分砾岩-含砾中细粒长石岩屑砂岩-细砂岩沉积韵律。①④沉积韵律为一套相对完整的V级沉积体系;②③则表现为水进过程(即退积)。

3 沉积相分析

综合分析两条剖面,可将索伦地区万宝组地层沉积相划分为辫状河三角洲相,形成于辫状河体系前积到停滞水体中富含砂和砾石的三角洲沉积环境,沉积水动力环境介于粗碎屑为主的扇三角洲和细碎屑为主的正常三角洲之间^[14]。

PM111剖面中,根据岩石组合与基本层序特征自下而上可划分为两个亚相:辫状河前三角洲亚相(1—7层)——以浅灰色—深灰色凝灰质粉砂岩、细粒凝灰质

砂岩互层为主体,局部发育中细粒凝灰质砂岩或凝灰质粉砂质泥岩夹层;辫状河三角洲前缘亚相(8—10层)——深灰色中厚层状细粒凝灰质砂岩、凝灰质细砂粉砂岩夹薄层状凝灰质粉砂岩。

PM511剖面中根据岩石组合与基本层序特征自下而上可划分为两个亚相:辫状河三角洲前缘亚相(1—3层)——底部以薄层状粉砂岩为主,中部为灰紫色薄层状粉砂岩与细粒凝灰质砂岩互层为主体,至顶部出现灰紫色含砾细砂岩与灰黄色砂质砾岩夹层,呈现逆粒序特征;辫状河三角洲平原亚相(4—18层)——由多个向上变细的正粒序沉积韵律组成,每个韵律底部为灰色-灰黄色砂砾岩、凝灰质含砾粗砂岩,中部为灰黄色灰绿色中细粒凝灰质砂岩,顶部为灰紫色-灰绿色粉砂岩、粉砂质泥岩。

4 岩石地球化学特征

本次工作对索伦地区万宝组砂岩样品进行的主量、微量、稀土元素分析在自然资源部东北矿产资源监督检测中心完成,分析结果见表1。将新鲜未风化的样品洗净、烘干后研磨至小于200目的粉末,用于主、微量元素分析。主量元素采用X射线荧光光谱法(XRF)分析,微量和稀土元素采用等离子质谱法(ICP-MS)分析。

由表1可知,万宝组砂岩SiO₂含量为61.81%~71.72%,说明物源可能为酸性岩区。Al₂O₃含量为13.37%~19.63%,CaO为0.31%~4.29%,Na₂O为0.77%~4.19%,K₂O为2.23%~5.69%,MgO为0.51~2.55%,Fe₂O₃为0.21~1.92%,FeO为2.34~5.17%,Mg、Fe含量普遍较低,推测母岩主要来自上地壳。根据微量元素蛛网图(图4)可知,万宝组砂岩相对富集大离子亲石元素(如Th、U、LREE)和Zr、Hf元素,亏损高场强元素(如Nb、Ta、P、Ti)和Ba、Sr元素,该特征也与大陆上地壳相似。岩石的稀土元素总量(ΣREE)介于133.15×10⁻⁶~225.64×10⁻⁶之间,轻重稀土元素比值(LREE/HREE)为7.29~9.00,轻重稀土分馏系数(La/Yb)_N介于7.62~10.70之间。δEu为0.45~0.93,具有中等到弱的负Eu异常,δCe为0.87~1.03,异常不明显。在球粒陨石标准化的稀土元素配分曲线(图5)上具有轻稀土富集的右倾特征,相对富集轻稀土元素,亏损重稀土元素。

表1 索伦地区万宝组砂岩主量元素及微量元素分析结果

Table 1 Contents of major and trace elements in the sandstones from Wanbao Formation

| 样品号 | TWT03-1 | TWT03-2 | TWT03-3 | TWT03-4 | TWT03-5 | PM111-38-1 | PM111-38-2 | PM111-39-1 | PM111-39-2 |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|
| SiO ₂ | 62.16 | 62.04 | 61.88 | 62.30 | 61.81 | 70.73 | 71.72 | 63.57 | 66.81 |
| TiO ₂ | 0.98 | 0.96 | 0.99 | 0.97 | 1.00 | 0.33 | 0.43 | 0.65 | 0.68 |
| Al ₂ O ₃ | 15.57 | 15.56 | 15.60 | 15.54 | 15.52 | 13.37 | 13.84 | 19.63 | 15.89 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.70 | 1.92 | 1.92 | 1.67 | 1.57 | 0.46 | 0.21 | 1.42 | 0.89 |
| FeO | 3.62 | 3.41 | 3.46 | 3.59 | 3.86 | 2.38 | 2.34 | 3.32 | 5.17 |
| MnO | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.09 | 0.23 | 0.14 | 0.05 | 0.06 |
| MgO | 2.45 | 2.55 | 2.40 | 2.40 | 2.45 | 0.59 | 0.51 | 1.18 | 1.13 |
| CaO | 4.12 | 3.94 | 4.09 | 3.82 | 4.20 | 4.29 | 3.50 | 0.31 | 0.52 |
| Na ₂ O | 4.02 | 4.19 | 3.92 | 4.02 | 3.84 | 3.92 | 3.65 | 0.77 | 1.44 |
| K ₂ O | 3.10 | 3.11 | 3.10 | 3.08 | 3.06 | 2.43 | 2.23 | 5.69 | 4.41 |
| P ₂ O ₅ | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.23 | 0.08 | 0.07 | 0.04 | 0.08 |
| LOI | 2.07 | 2.07 | 2.09 | 2.07 | 1.97 | 0.86 | 1.03 | 3.40 | 2.71 |
| Total | 100.11 | 100.07 | 99.77 | 99.78 | 99.60 | 99.67 | 99.67 | 100.03 | 99.79 |
| Zr | 209 | 212 | 211 | 207 | 211 | 142 | 200 | 260 | 276 |
| Hf | 4.21 | 4.22 | 4.15 | 4.22 | 4.16 | 3.09 | 3.31 | 6.39 | 5.02 |
| Nb | 10.6 | 10.6 | 9.82 | 10.6 | 10.9 | 10.0 | 11.8 | 16.7 | 16.2 |
| Ta | 0.23 | 0.59 | 0.49 | 0.51 | 0.58 | 0.76 | 0.63 | 1.78 | 1.98 |
| Th | 9.16 | 9.13 | 9.26 | 8.98 | 9.13 | 12.3 | 13.2 | 19.2 | 14.5 |
| Co | 19.5 | 19.0 | 19.1 | 19.2 | 19.4 | 11.2 | 11.2 | 10.3 | 17.8 |
| Cr | 26.3 | 28.0 | 23.5 | 28.2 | 26.5 | 15.4 | 17.6 | 31.0 | 32.0 |
| Ga | 17.0 | 16.8 | 17.2 | 17.2 | 17.9 | 14.8 | 15.6 | 25.4 | 19.1 |
| Rb | 69.7 | 71.6 | 74.4 | 69.9 | 66.4 | 63.0 | 67.9 | 223 | 207 |
| U | 1.46 | 1.47 | 1.43 | 1.46 | 1.52 | 2.56 | 3.12 | 5.21 | 4.70 |
| V | 75.4 | 74.6 | 74.8 | 75.9 | 80.6 | 28.9 | 30.8 | 64.4 | 54.6 |
| Sc | 14.8 | 15.0 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 8.33 | 7.83 | 15.3 | 11.1 |
| Sr | 624 | 624 | 622 | 630 | 617 | 437 | 299 | 76.5 | 66.5 |
| Ni | 21.2 | 20.5 | 19.6 | 19.1 | 19.2 | 9.81 | 9.38 | 18.8 | 25.6 |
| Ba | 866 | 897 | 879 | 931 | 872 | 457 | 405 | 748 | 501 |
| La | 26.60 | 27.75 | 26.66 | 27.04 | 27.2 | 28.4 | 32.91 | 44.40 | 34.32 |
| Ce | 56.96 | 54.20 | 53.58 | 54.08 | 54.6 | 50.5 | 63.66 | 93.56 | 73.90 |
| Pr | 6.53 | 6.93 | 6.67 | 6.81 | 6.8 | 6.6 | 7.42 | 10.96 | 8.62 |
| Nd | 25.42 | 26.57 | 26.02 | 26.19 | 26.5 | 25.5 | 26.95 | 41.54 | 32.94 |
| Sm | 5.17 | 5.31 | 5.22 | 5.24 | 5.33 | 5.06 | 5.19 | 8.21 | 6.78 |
| Eu | 1.33 | 1.52 | 1.45 | 1.35 | 1.30 | 1.06 | 0.98 | 1.27 | 0.95 |
| Gd | 4.36 | 4.46 | 4.36 | 4.27 | 4.46 | 4.43 | 4.56 | 6.93 | 5.76 |
| Tb | 0.63 | 0.61 | 0.61 | 0.62 | 0.61 | 0.68 | 0.65 | 1.06 | 0.85 |
| Dy | 3.35 | 3.62 | 3.39 | 3.40 | 3.48 | 4.19 | 3.88 | 6.57 | 5.01 |
| Ho | 0.68 | 0.65 | 0.66 | 0.67 | 0.66 | 0.77 | 0.75 | 1.31 | 1.01 |
| Er | 2.15 | 2.19 | 2.14 | 2.09 | 2.11 | 2.74 | 2.51 | 4.43 | 3.36 |
| Tm | 0.29 | 0.29 | 0.28 | 0.28 | 0.29 | 0.40 | 0.38 | 0.61 | 0.49 |
| Yb | 1.83 | 1.86 | 1.83 | 1.84 | 1.86 | 2.47 | 2.57 | 4.18 | 3.16 |
| Lu | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.38 | 0.37 | 0.61 | 0.47 |
| Y | 20.47 | 20.11 | 19.82 | 19.79 | 19.7 | 25.8 | 23.37 | 41.12 | 31.02 |

测试单位:自然资源部东北矿产资料监督检测中心.含量单位:主量元素为%,微量元素为10⁻⁶.

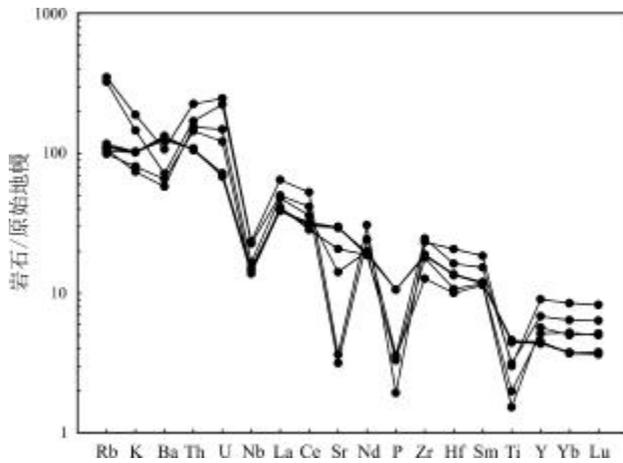


图4 万宝组砂岩原始地幔标准化微量元素蛛网图
(据文献[15])

Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element spidergram of the sandstones from Wanbao Formation
(After Reference [15])

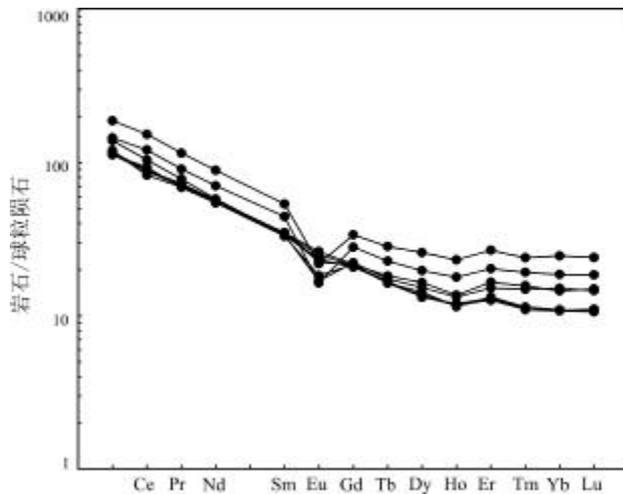


图5 万宝组砂岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图
(据文献[16])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of the sandstones from Wanbao Formation
(After Reference [16])

5 物源属性

沉积物的地球化学组成主要取决于源区的成分或不同源区成分的混合比例,因此碎屑岩的地球化学特征可以反映沉积物源的属性^[17-18]. Roser等^[19]以砂-泥岩中的几种氧化物为变量,建立了砂-泥岩物源区性质多变量判别图解.利用万宝组样品的主量元素测试结果进行投图(图6)^[19],样品投点落入酸性和中性火

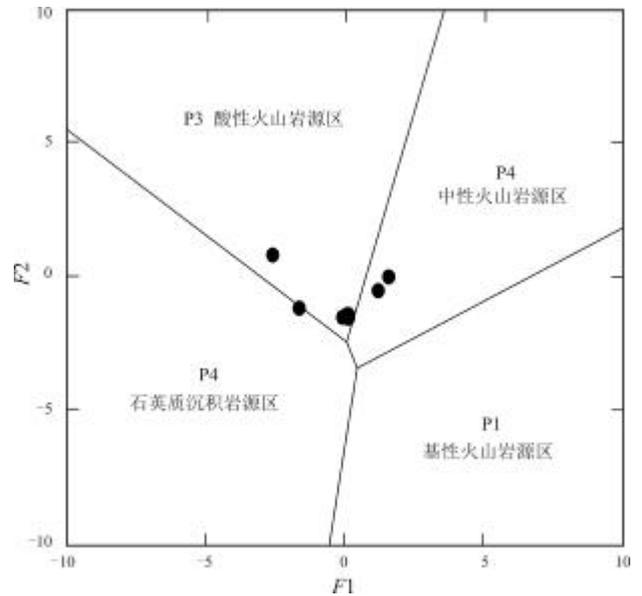


图6 索伦地区万宝组砂岩物源区性质函数判别图解
(据文献[19])

Fig. 6 Function discrimination diagram of provenance property for sandstones from Wanbao Formation
(After Reference [19])

$$F1 = -1.773\text{TiO}_2 + 0.607\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.76\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} - 1.5\text{MgO} + 0.616\text{CaO} + 0.509\text{Na}_2\text{O} - 1.224\text{K}_2\text{O} - 9.09; F2 = 0.445\text{TiO}_2 + 0.07\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.25\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} - 1.142\text{MgO} + 0.438\text{CaO} + 0.475\text{Na}_2\text{O} + 1.426\text{K}_2\text{O} - 6.861$$

山岩区,暗示万宝组的沉积物源主要来自中酸性火山岩源区.REE、Zr、Th、Sc等微量元素在岩石风化、搬运和成岩过程中相对稳定,能够较好地提供物源区的成分信息.在(La/Th)-Hf图解(图7)^[20]中,万宝组砂岩主要落入长英质物源区,位于上地壳平均成分附近.在(Co/Th)-(La/Sc)图解(图8)^[17,20]中,万宝组样品投点也落在长英质火山岩物源区,更靠近活动构造型碎屑物源.

6 构造背景

研究表明砂-泥岩中一些化学性质不活泼的微量元素(如La、Th、Sc、Zr、Ti)及其比值较稳定,能够判定沉积时期的构造背景,主要包括大洋岛弧、大陆岛弧、主动大陆边缘和被动大陆边缘4种构造背景^[21].在万宝组砂岩微量元素构造环境判别图解(图9)中,样品投点几乎全部落入大陆岛弧区域,判断中侏罗统万宝组物源区为大陆岛弧环境.依据Bhatia^[22]归纳总结的不同构造背景下的砂岩REE特征值,将研究区沉积岩的有关参数与各种构造背景下的砂岩参数进行对比

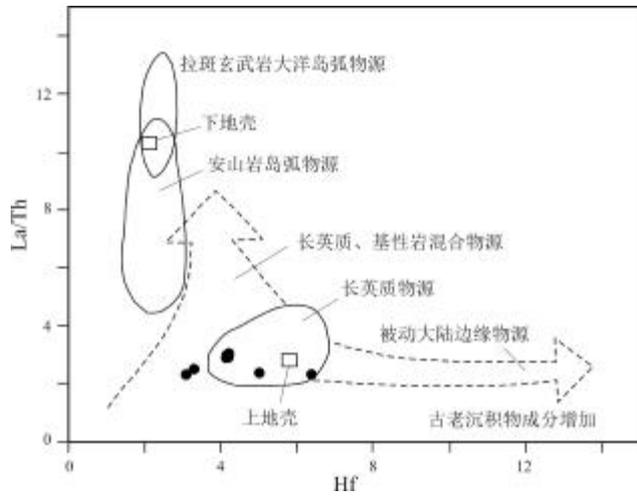


图 7 万宝组砂岩 La/Th-Hf 沉积物源判别图解
(据文献[20])

Fig. 7 The La/Th-Hf discrimination diagram of sediment source for sandstones from Wanbao Formation
(After Reference [20])

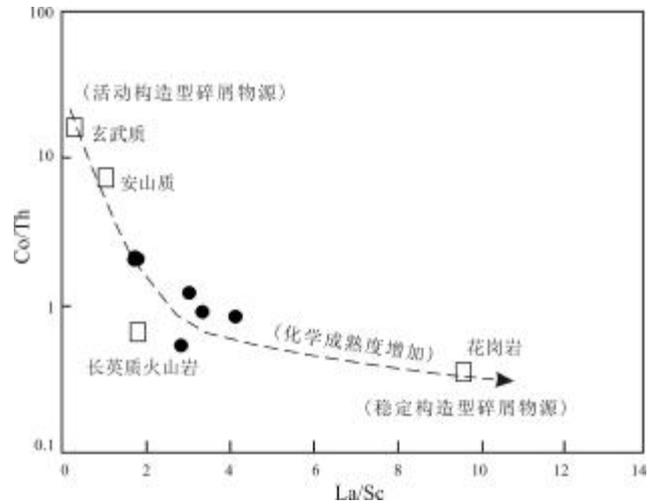


图 8 万宝组砂岩 Co/Th-La/Sc 沉积物源判别图解
(底图据文献[20];虚线据文献[17])

Fig. 8 The Co/Th-La/Sc discrimination diagram of sediment source for sandstones from Wanbao Formation
(After References [17, 20])

(表 2)发现,研究区中侏罗统万宝组砂岩化学成分也多与大陆岛弧背景相似。

从侏罗纪开始,中国东北地区的构造格架由古亚洲洋构造体系转变为蒙古-鄂霍次克构造体系和环太平洋构造体系的演化阶段^[23-26],构造线也由东西向构造转变为北东和北北东向构造。年代学研究显示,中侏罗世一早白垩世早期(164~140 Ma)的火山岩主要分布于松辽盆地以西地区,而在吉黑东部尚未发现^[25],这也暗示了松辽盆地西缘中侏罗世一早白垩世早期的构造环境可能与古太平洋板块的俯冲作用无关。近年来,众多学者确定了蒙古-鄂霍次克洋存在向南的俯冲作用^[27-28],因此研究区中侏罗统万宝组沉积岩地球

化学特征显示的大陆岛弧背景更可能与蒙古-鄂霍次克洋的南向俯冲弧后伸展作用有关。

7 结论

1) 索伦地区万宝组为一套分布于山间断陷盆地的陆相沉积碎屑岩建造,主要岩性为凝灰质砂砾岩、砂岩、粉砂岩及火山碎屑岩,沉积相为辫状河三角洲相。

2) 地球化学特征指示索伦地区万宝组沉积物源主要来自中酸性岩浆岩源区,具有大陆岛弧构造背景特征,可能与蒙古-鄂霍次克洋的南向俯冲弧后伸展作用有关。

表 2 索伦地区万宝组碎屑岩与各种构造背景下砂岩的有关参数对比

Table 2 Comparison of parameters between clastic rocks from Wanbao Formation in Suolun area and sandstones under various tectonic settings

| 构造背景 | 物源区类型 | La/10 ⁻⁶ | Ce/10 ⁻⁶ | ΣREE/10 ⁻⁶ | La/Yb | ΣLREE/ΣHREE |
|------------|---------|---------------------|---------------------|-----------------------|----------|-------------|
| 大洋岛弧 | 未切割的岩浆弧 | 8±1.7 | 19±3.7 | 58±10 | 4.2±1.3 | 3.8±0.9 |
| 大陆岛弧 | 切割的岩浆弧 | 27±4.5 | 59±8.2 | 146±20 | 11.0±3.6 | 7.7±1.7 |
| 活动大陆边缘 | 基底隆起 | 37 | 78 | 186 | 12.5 | 9.1 |
| 被动大陆边缘 | 克拉通内构造 | 39 | 85 | 210 | 15.9 | 8.5 |
| 索伦地区万宝组平均值 | | 30.6 | 61.7 | 151.5 | 13.2 | 8.5 |

据文献[22].

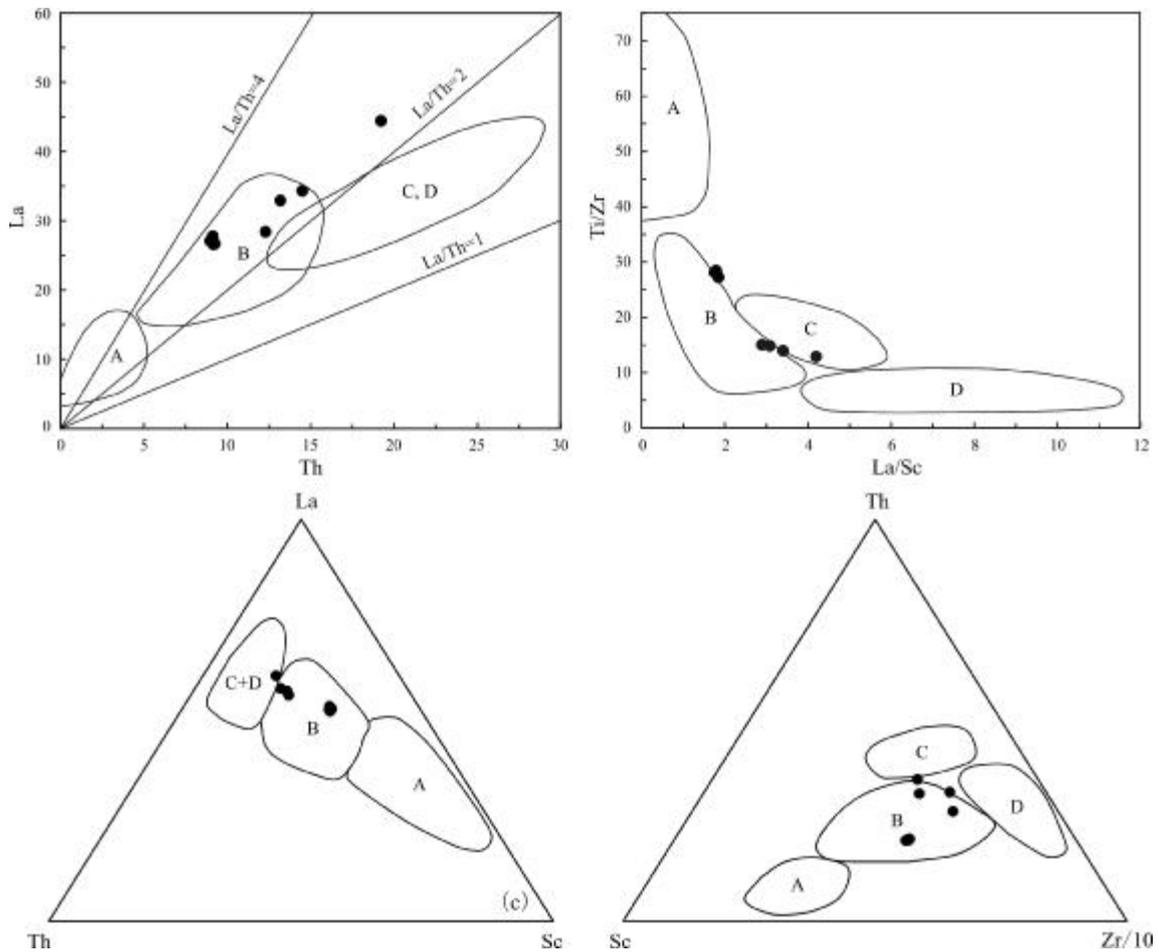


图9 索伦地区万宝组砂岩微量元素构造环境判别图解

(据文献[21])

Fig. 9 Tectonic setting discrimination diagrams for the sandstones from Wanbao Formation in Suolun area

(After Reference [21])

A—大洋岛弧(oceanic island arc); B—大陆岛弧(continental island arc); C—活动大陆边缘(active continental margin); D—被动大陆边缘(passive continental margin)

参考文献(References):

- [1]陈树旺, 李永飞. 松辽盆地外围油气地质调查进展[J]. 地质与资源, 2020, 29(4): 401.
Chen S W, Li Y F. Progress of the geological survey for oil-gas in surroundings of Songliao Basin[J]. Geology and Resources, 2020, 29(4): 401.
- [2]陈树旺, 张健, 公繁浩, 等. 内蒙古突泉盆地侏罗系油气发现及工作展望[J]. 地质与资源, 2015, 24(1): 1-6.
Chen S W, Zhang J, Gong F H, et al. Discovery and prospects of the Jurassic oil and gas in Tuquan Basin, Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2015, 24(1): 1-6.
- [3]李世臻, 周新桂, 王丹丹, 等. 内蒙古突泉盆地突参1井原油地球化学特征与油源分析[J]. 地质通报, 2015, 34(10): 1946-1951.
Li S Z, Zhou X G, Wang D D, et al. Geochemical characteristics of crude oil and oil-source correlation of well Tucan 1, Tuquan Basin, Inner Mongolia[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(10): 1946-1951.
- [4]苏飞, 张海华, 张健, 等. 内蒙古突泉盆地突D1井中侏罗统万宝组烃源岩地球化学特征[J]. 地质与资源, 2017, 26(4): 377-382, 396.
Su F, Zhang H H, Zhang J, et al. Geochemistry of the hydrocarbon source rock of middle Jurassic Wanbao formation from Well TD1 in Tuquan Basin, Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2017, 26(4): 377-382, 396.
- [5]王辉, 朱占平, 宋土顺, 等. 突泉盆地中侏罗统万宝组沉积环境与烃源岩特征[J]. 断块油气田, 2019, 26(6): 687-692.
Wang H, Zhu Z P, Song T S, et al. Sedimentary environment and characteristics of hydrocarbon source rock of Middle Jurassic Wanbao

- Formation in Tuquan Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(6): 687-692.
- [6]张渝金, 张超, 吴新伟, 等. 龙江盆地西缘中侏罗统万宝组物源分析: 来自碎屑锆石年代学和岩石地球化学的制约[J]. *古地理学报*, 2019, 21(3): 490-504.
- Zhang Y J, Zhang C, Wu X W, et al. Provenance analysis of the Middle Jurassic Wanbao Formation on western edge of Longjiang Basin: Constraints from detrital Zircon ages and geochemistry characteristics[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(3): 490-504.
- [7]黄始琪, 董树文, 胡健民, 等. 蒙古-鄂霍次克构造带的形成与演化[J]. *地质学报*, 2016, 90(9): 2192-2205.
- Huang S Q, Dong S W, Hu J M, et al. The formation and tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk Belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(9): 2192-2205.
- [8]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: 时间标志与全球构造的联系[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.
- [9]王五力, 郭胜哲. 中国东北古亚洲与古太平洋构造域演化与转换[J]. *地质与资源*, 2012, 21(1): 27-34.
- Wang W L, Guo S Z. The evolution and transformation of Paleo-Asia and Paleo-Pacific tectonic domain of Northeast China[J]. *Geology and Resources*, 2012, 21(1): 27-34.
- [10]许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程[J]. *地球科学*, 2019, 44(5): 1620-1646.
- Xu W L, Sun C Y, Tang J, et al. Basement nature and tectonic evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt[J]. *Earth Science*, 2019, 44(5): 1620-1646.
- [11]杜宝安. 甘肃靖远王家山中侏罗世孢粉及其地层、古地理意义[J]. *地质论评*, 1985, 31(2): 131-141.
- Du B A. Sporo-pollen assemblages from the middle Jurassic in the Wangjiashan basin of Jingyuan, Gansu, and their stratigraphic and paleogeographic significance[J]. *Geological Review*, 1985, 31(2): 131-141.
- [12]刘兆生. 新疆沙湾县中侏罗世西山窑组孢粉组合[J]. *古生物学报*, 1990, 29(1): 63-83, 149-152.
- Liu Z S. Sporo-pollen assemble age from middle Jurassic Xishanyao formation of Shawan, Xinjiang, China [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1990, 29(1): 63-83, 149-152.
- [13]王永栋, 江德昕, 杨惠秋, 等. 新疆吐鲁番-鄯善地区中侏罗世孢粉组合[J]. *植物学报*, 1998, 40(10): 969-976.
- Wang Y D, Jiang D X, Yang H Q, et al. Middle Jurassic spore pollen assemblages from Turpan Shanshan area, Xinjiang[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(10): 969-976.
- [14]陈建强, 周洪瑞, 王训练. 沉积学及古地理学教程[M]. 北京: 地质出版社, 2004.
- Chen J Q, Zhou H R, Wang X L. *Sedimentology and sedimentary palaeogeography*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.
- [15]Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [16]Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. *Developments in Geochemistry*, 1984, 2: 63-114.
- [17]陈小双, 吕奥, 宋贺民, 等. 新疆阿合奇地区志留系砂岩地球化学特征及大地构造背景[J]. *古地理学报*, 2018, 20(2): 271-284.
- Chen X S, Lü A, Song H M, et al. Geochemical characteristics and tectonic history of the Silurian sandstones in Akeqi area, Xinjiang[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(2): 271-284.
- [18]周成林, 唐友军, 刘彬. 大兴安岭中南段下二叠统寿山沟组典型泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. *地质与资源*, 2019, 28(2): 140-148.
- Zhou C L, Tang Y J, Liu B. Typical mudstone of the Lower Permian Shoushangou Formation in middle-south Daxinganling Mountains: Geochemical characteristics and geological implications [J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(2): 140-148.
- [19]Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J]. *Chemical Geology*, 1988, 67(1/2): 119-139.
- [20]Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3): 393-407.
- [21]Bhatia M R, Crook K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 92(2): 181-193.
- [22]Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97-113.
- [23]李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 2007, 23(3): 565-582.
- Li J Y, Gao L M, Sun G H, et al. Shuangjingzi middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the east Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-plates[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(3): 565-582.

- Science Publishers, 1997.
- [29]Wilde S A, Wu F Y, Zhang X Z. Late Pan-African magmatism in northeastern China: SHRIMP U-Pb zircon evidence from granitoids in the Jiamusi massif[J]. *Precambrian Research*, 2003, 122(1/4): 311–327.
- [30]Wilde S A, Zhang X Z, Wu F Y. Extension of a newly identified 500 Ma metamorphic terrane in North East China: Further U-Pb SHRIMP dating of the Mashan complex, Heilongjiang Province, China[J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1/2): 115–130.
- [31]张兴洲, 周建波, 迟效国, 等. 东北地区晚古生代构造-沉积特征与油气资源[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(5): 719–725.
- Zhang X Z, Zhou J B, Chi X G, et al. Late Paleozoic tectonic-sedimentation and petroleum resources in northeastern China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(5): 719–725.
- [32]Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt[J]. *Tectonophysics*, 2009, 478(3/4): 230–246.
- [33]周长勇, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭北段塔河辉长岩的岩石学特征及其构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(2): 143–149.
- Zhou C Y, Ge W C, Wu F Y, et al. Petrological characteristics and tectonic implications of the Tahe gabbro in the northern part of the Great Xing'an Range[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2005, 35(2): 143–149.
- [34]Wilde S A, 吴福元, 张兴洲. 中国东北麻山杂岩晚泛非期变质的锆石 SHRIMP 年龄证据及全球大陆再造意义[J]. *地球化学*, 2001, 30(1): 35–50.
- Wilde S A, Wu F Y, Zhang X Z. The Mashan complex: SHRIMP U-Pb zircon evidence for a Late Pan-African metamorphic event in NE China and its implication for global continental reconstructions [J]. *Geochimica*, 2001, 30(1): 35–50.
- [35]周建波, 张兴洲, 马志红, 等. 中国东北地区的构造格局与盆地演化[J]. *石油与天然气地质*, 2009, 30(5): 530–538.
- Zhou J B, Zhang X Z, Ma Z H, et al. Tectonic framework and basin evolution in northeast China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(5): 530–538.
- [36]任收麦, 乔德武, 张兴洲, 等. 松辽盆地及外围上古生界油气资源战略选区研究进展[J]. *地质通报*, 2011, 30(2/3): 197–204.
- Ren S M, Qiao D W, Zhang X Z, et al. The present situation of oil & gas resources exploration and strategic selection of potential area in the Upper Paleozoic of Songliao Basin and surrounding area, NE China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3): 197–204.
-
- (上接第 587 页/Continued from Page 587)
- [24]任战利, 崔军平, 史政, 等. 中国东北地区晚古生代构造演化及后期改造[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 734–742.
- Ren Z L, Cui J P, Shi Z, et al. The late Paleozoic tectonic evolution and later transformation in Northeast China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(6): 734–742.
- [25]许文良, 王枫, 裴福萍, 等. 中国东北中生代构造体制与区域成矿背景: 来自中生代火山岩组合时空变化的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 339–353.
- Xu W L, Wang F, Pei F P, et al. Mesozoic tectonic regimes and regional ore-forming background in NE China: Constraints from spatial and temporal variations of Mesozoic volcanic rock associations [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 339–353.
- [26]Zhang S H, Zhao Y, Song B, et al. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. *GSA Bulletin*, 2009, 121(1/2): 181–200.
- [27]陈志广, 张连昌, 卢百志, 等. 内蒙古太平川铜钼矿成矿斑岩时代、地球化学及地质意义[J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1437–1449.
- Chen Z G, Zhang L C, Lu B Z, et al. Geochronology and geochemistry of the Taipingchuan copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, and its geological significances[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(5): 1437–1449.
- [28]曾维顺, 周建波, 董策, 等. 蒙古-鄂霍茨克洋俯冲的记录: 额尔古纳地区八大关变质杂岩的证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 1948–1960.
- Zeng W S, Zhou J B, Dong C, et al. Subduction record of Mongol-Okhotsk Ocean: constrains from Badaguan metamorphic complexes in the Erguna Massif, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 1948–1960.