

# 松辽盆地北部大庆长垣南端 上白垩统四方台组物源体系分析

肖鹏<sup>1,2</sup>, 金若时<sup>1,2</sup>, 汤超<sup>1,2</sup>, 刘华健<sup>1,2</sup>, 邓永辉<sup>3</sup>, 魏佳林<sup>1,2</sup>, 徐增连<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局 天津地质调查中心 非化石能源矿产实验室, 天津 300170; 3. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 物源体系制约着层间水的流动方向及砂体储层的展布。前人对松辽盆地北部上白垩统物源体系分析多集中在四方台组以下, 缺乏对四方台组物源的报道。因此, 在结合区域地质认识的基础上, 通过沉积构造分析、砂体展布形态及重矿物分析等手段, 系统研究了松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组物源体系特征, 明确了物源方向与母岩类型。结果表明, 四方台组地层的母岩类型主要为中酸性岩浆岩与中高级变质岩; 通过与源区对比分析, 认为大庆长垣南端四方台组物源主要来自张广才岭、吉黑东部及盆地东南部地区。

**关键词:** 物源体系; 四方台组; 上白垩统; 大庆长垣南端; 松辽盆地北部

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

## Provenance system of the Late Cretaceous Sifangtai Formation in the south of Daqing placanticline of the northern Songliao Basin

XIAO Peng<sup>1,2</sup>, JIN Ruoshi<sup>1,2</sup>, TANG Chao<sup>1,2</sup>, LIU Huajian<sup>1,2</sup>, DENG Yonghui<sup>3</sup>, WEI Jialin<sup>1,2</sup>, XU Zenglian<sup>1,2</sup>

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Laboratory of Non-fossil Energy Minerals, Tianjin Center of China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. CNOOC Shenzhen Branch, Shenzhen, Guangdong 518000, China)

**Abstract:** The provenance system restricted the flow direction of interlayer water and the distribution characteristics of sandstone reservoirs. The previous analysis of the upper Cretaceous provenance system in the northern Songliao Basin was focused below the Sifangtai Formation, and there was a lack of reports on the origin of the Sifangtai Formation. We systematically studied the characteristics of source systems of the Sifangtai Formation at the southern end of Daqing placanticline in the northern Songliao Basin using regional geological understanding, through sedimentary structural analysis, sand body distribution pattern and heavy mineral analysis, and identified the source direction and parent rock type. The results showed that the main parent rocks of the Sifangtai Formation are intermediate acid magmatic rocks and intermediate and high-grade metamorphic rocks. Through contrast analysis with the source regions, it was concluded that the provenance of the Sifangtai Formation in the south of Daqing placanticline was mainly from the Zhangguangcai Ranges, the eastern Jilin-Heilongjiang provinces and the southeastern region of the basin.

**Key words:** provenance system; Sifangtai Formation; Upper Cretaceous; southern Daqing placanticline; northern Songliao Basin

物源分析对古地理重建、古环境与古气候恢复、沉积盆地分析、沉积矿产预测和大地构造背景分析均非常重要<sup>[1]</sup>。四方台组沉积时的构造背景为松辽盆地由凹陷转换为反转隆起时期<sup>[2]</sup>, 研究四方台组的沉积演化历史对于了解松辽盆地晚白垩世构造演化特征具有重要的指示作用。

物源体系分析是盆地分析的基础。物源分析目前较成熟的方法主要包括重矿物分析、岩屑类型分析、地球化学分析和沉积特征分析等<sup>[3-4]</sup>。前人通过上述方法对松辽盆地北部上白垩统不同地区、不同层位物源特征展开研究。刘宗堡等<sup>[5]</sup>基于沉积学和层序地层学理论, 研究了大庆长垣南端嫩江

组黑帝庙油层物源方向;韩建辉等<sup>[6]</sup>通过研究盆地尺度的层序结构与沉积充填,提出了松辽盆地拗陷期的物源变化特征;彭国亮等<sup>[7]</sup>从岩石矿物成分、砂体平面展布、重矿物和泥岩颜色区域分布等方面,对松辽盆地北部上白垩统嫩江组二、三段物源方向进行了判断;莫午零等<sup>[8]</sup>通过地震沉积学中的地层切片方法,结合岩石岩屑组分分析和重矿物组分分析方法,对松辽盆地北部上白垩统嫩江组进行了物源及古流向分析。围绕油田生产需要,前人对松辽盆地晚白垩世的物源研究多集中在嫩江组及以下赋油层位,缺少在大量实际资料基础之上对四方台组物源体系的系统分析。

本文在岩心、分析化验资料基础之上,通过重矿物组合、沉积学特征、碎屑锆石年龄对比等方法分析四方台组物源体系特征,以期为研究区沉积环境、松辽盆地晚白垩世构造演化提供依据。

### 1 区域地质概况

研究区主要位于松辽盆地北部中央拗陷区内的二级正向构造单元大庆长垣南端,东邻三肇凹陷、朝阳沟阶地,西接齐家—古龙凹陷,面积近 420 km<sup>2</sup>(图 1a)。研究区白垩纪经历了 4 期构造演化阶段<sup>[9]</sup>:火石岭组—登娄库组沉积期为断陷构造阶段;泉头组—嫩江组沉积期为拗陷构造阶段;四方台组—明

水组沉积期为差异性沉降阶段;明水组沉积末期松辽盆地从区域拉张转为挤压,形成现今构造格局<sup>[10]</sup>。

研究区自下而上充填了泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组和泰康组。目的层四方台组底部与嫩江组五段呈假整合接触,顶部与明水组呈整合接触;研究区北部靠近长垣隆起侧,四方台组与泰康组砂砾岩呈角度不整合接触。四方台组是“嫩江运动”后盆地差异性沉降背景下沉积的一套地层。该组地层在盆地内广泛发育,但厚度差异较大,位于齐家—古龙凹陷内的松科 1 井(北孔)四方台组厚度超过 200 m<sup>[11]</sup>;研究区内厚度在 100~130 m 之间,位于靠近齐家—古龙凹陷一侧地区地层厚度较厚、倾角大。四方台组是盆地拗陷沉降萎缩阶段形成的一套曲河流—湖泊三角洲沉积体系,岩性以灰色、绿灰色中细砂岩,夹灰红色、灰色粉砂岩、泥岩为主。依据钻孔岩心岩性及各类电测曲线特征,将四方台组进一步划分为 3 段,一段底部砂体为主要的赋油层段(图 1b)。

### 2 分析方法及测试结果

重矿物因其耐磨蚀、稳定性强,能够较多地保留其母岩的特征<sup>[3]</sup>,可以有效判别母岩类型。研究区四方台组沉积时代较新、且埋藏较浅,受后期

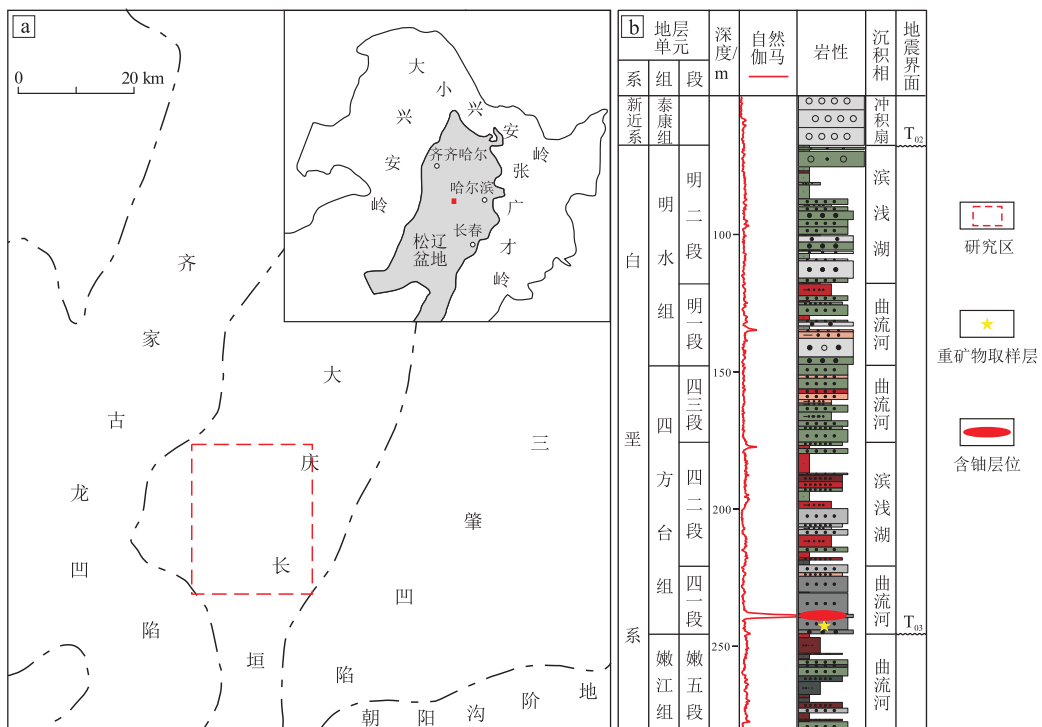


图 1 松辽盆地北部大庆长垣南端构造分区(a)及四方台组地层综合柱状图(b)

Fig.1 Geotectonic map of the southern Daqing placanticline of the northern Songliao Basin(a) and stratigraphic column of the Sifangtai Formation (K<sub>2s</sub>) (b)

改造的影响较小<sup>[12]</sup>,因此通过重矿物数据可以获得较为可靠的结果。

### 2.1 样品采集与分析方法

样品采集之前,通过井震统层,确定四方台组一段底部砂体位置(图1b),依托全井段取心资料,系统采集18口井重矿物样品,确保所有样品的等时性。样品以灰色、绿灰色细砂岩、中细砂岩为主。处理过程为:对样品进行破碎、酸化和水洗处理,采用重液将重矿物分离;再提取出粒径在63~250 μm的混合粒级的重矿物,在双目镜下对其进行鉴定统计(图2)。此外,同一重矿物,其种属、化学元素组成不同,代表的母岩也不同。为了识别四方台组的母岩类型,选取研究区内含量最高的钛铁矿与石榴子石进行电子探针分析。样品由天津地质矿产研究所分析测试中心实验室完成,仪器型号:电子探针ETMA1600,能谱仪Inca Energy;加速电压:15.0 kV;电子束斑:1 μm;探针束流:2.00×10<sup>-8</sup> A。

### 2.2 测试结果

研究区重矿物组成基本一致(图2),井与井之

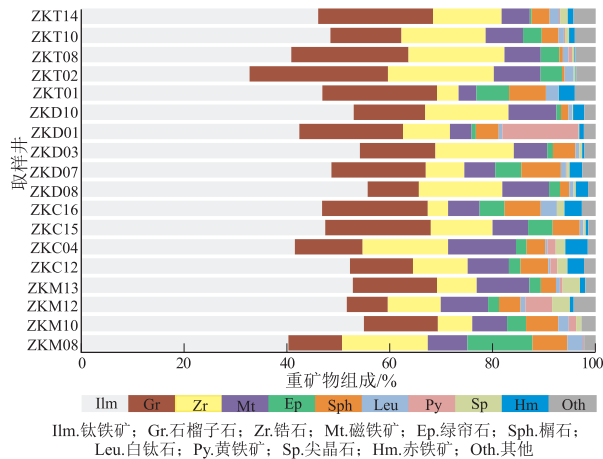


图2 松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组一段底部砂岩重矿物组成特征

Fig.2 Heavy mineral assemblage in sandstones at the bottom of K<sub>2</sub>s<sub>1</sub> in the southern Daqing placanticline, northern Songliao Basin

间变化不大。18个样品鉴定出的重矿物主要包括:钛铁矿、石榴子石、锆石、磁铁矿、绿帘石、榍石、白钛石、黄铁矿、尖晶石和赤铁矿。统计数据显示以钛铁矿、石榴子石、锆石、磁铁矿和绿帘石为主,个别井黄铁矿含量较高,探针片下呈草莓状形态,推测其应为沉积成因。其中,钛铁矿含量在32.41%~53.88%之间,平均达46.5%;石榴子石含量在7.8%~26.62%之间,平均16.39%;磁铁矿平均含量7.45%,镜下形态以次圆粒状为主,次棱角粒状少,个别圆粒状,说明其经历了长距离搬运。

随机各选取15颗钛铁矿、石榴子石进行电子探针分析。四方台组一段底部钛铁矿电子探针分析结果(表1)显示,MgO含量在0~3.21%之间,平均1.2%。MnO含量在0.40%~13.40%之间,平均4.12%。四方台组一段底部石榴子石电子探针分析结果(表2)表明,FeO含量在5.41%~38.27%,多数在30%以上;CaO含量在0.82%~32.62%之间,多数在10%以内;MgO含量在0.11%~8.01%之间。

## 3 沉积特征分析

砂体展布形态反映物源方向。四方台组沉积时期,区域上以曲流河—湖泊三角洲相为主,平面上微相变化快,垂向上缺少较为明显的标志层,大庆长垣隆起地区,地层受到剥蚀作用影响,缺失部分地层,常用的砂地比分析、砂体厚度分析等方法在研究区内并不适用。为了真实地反映砂体的平面展布形态,统计四方台组一段底部(T<sub>03</sub>不整合面之上)砂体厚度。四方台组一段底部砂体厚度在1.5~16 m之间,走向为北西向。砂体厚度图(图3)上表明,沿走向方向,砂体连续性较好,厚度变化不大,主砂体带内,厚度基本都在13 m以上;垂直走向上,砂体厚度变化大,非均质性强。四方台组沉积时期,沉积环境以曲流河、泛滥平原为主,河流的改道作用频繁发生,因此在砂体厚度图上并没有呈现出自东南部向西北部逐渐减薄的趋势,但砂

表1 松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组一段钛铁矿(Il<sub>m</sub>)电子探针分析结果

Table 1 Electron microprobe analyses of ilmenite from the K<sub>2</sub>s<sub>1</sub> in the southern Daqing placanticline, northern Songliao Basin

化合物	样品号														
	Ilm1	Ilm2	Ilm3	Ilm4	Ilm5	Ilm6	Ilm7	Ilm8	Ilm9	Ilm10	Ilm11	Ilm12	Ilm13	Ilm14	Ilm15
MgO	0.58	0.01	0.51	0.00	1.64	0.49	0.04	0.59	0.19	1.68	2.67	2.03	3.21	1.49	2.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.02	0.05	0.05	0.09	0.04	0.07	0.20	0.11	0.53	0.54	0.20	0.18	0.10	0.25
CaO	0.01	0.01	0.00	0.05	0.01	0.00	0.08	0.07	0.04	0.10	0.11	0.04	0.00	0.00	0.01
TiO <sub>2</sub>	56.92	57.87	1.07	65.02	54.22	50.43	48.99	54.56	54.14	38.15	38.06	48.25	50.29	47.06	44.46
MnO	5.74	1.64	8.42	5.83	13.40	1.32	1.40	7.66	12.49	0.46	0.85	0.43	0.71	1.08	0.40
FeO	36.00	39.33	40.16	28.78	30.62	47.85	49.42	36.70	31.98	57.33	56.95	49.55	45.61	50.69	52.33

%

表 2 松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组一段石榴子石 (Grt) 电子探针分析结果

Table 2 Electron microprobe analyses of garnet from the  $K_2s_1$  in the southern Daqing placanticline, northern Songliao Basin

分析项目	样品号														
	Grt1	Grt2	Grt3	Grt4	Grt5	Grt6	Grt7	Grt8	Grt9	Grt10	Grt11	Grt12	Grt13	Grt14	Grt15
SiO <sub>2</sub>	36.31	37.15	36.50	37.04	41.04	38.63	39.29	37.97	39.42	38.50	36.93	36.88	36.66	38.76	37.50
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.44	0.18	0.05	0.14	0.15	0.04	0.28	0.08	0.04	0.07	0.06	0.22	0.06	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.66	18.64	19.21	19.95	19.41	18.96	19.69	19.00	19.37	18.76	19.12	19.82	18.55	19.29	19.96
FeO	33.00	35.02	32.19	36.91	5.41	30.95	33.00	29.80	34.64	38.27	35.86	35.60	35.28	35.71	35.47
MnO	0.68	1.99	2.42	0.80	1.38	4.43	1.87	3.73	0.59	1.51	5.33	1.30	2.65	0.61	0.66
MgO	8.01	1.80	2.19	3.49	0.11	2.14	3.36	2.22	6.68	3.59	2.31	4.64	1.03	5.59	5.78
CaO	1.26	6.53	7.47	3.03	32.62	6.40	3.95	7.20	1.03	1.00	1.72	1.03	5.12	0.82	0.87
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
Si	2.88	2.97	2.93	2.95	3.13	3.07	3.10	3.05	39.42	38.50	36.93	36.88	36.66	38.76	37.50
Ti	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.08	0.04	0.07	0.06	0.22	0.06	0.11
Al	1.84	1.76	1.82	1.87	1.74	1.77	1.83	1.80	19.37	18.76	19.12	19.82	18.55	19.29	19.96
Fe <sup>3+</sup>	0.41	0.26	0.29	0.24	0.00	0.08	0.00	0.08	1.40	1.57	3.73	2.62	2.67	1.11	2.91
Fe <sup>2+</sup>	1.78	2.08	1.87	2.22	0.35	1.97	2.18	1.92	33.38	36.86	32.50	33.25	32.88	34.71	32.85
Mn	0.05	0.14	0.17	0.05	0.09	0.30	0.13	0.25	0.59	1.51	5.33	1.30	2.65	0.61	0.66
Mg	0.95	0.21	0.26	0.41	0.01	0.25	0.40	0.27	6.68	3.59	2.31	4.64	1.03	5.59	5.78
Ca	0.11	0.56	0.64	0.26	2.66	0.54	0.33	0.62	1.03	1.00	1.72	1.03	5.12	0.82	0.87
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00
Alm	61.83	69.61	63.62	75.36	11.09	64.29	71.84	62.79	80.09	85.80	77.64	82.67	78.89	83.18	81.80
Pyr	32.86	7.16	8.91	14.05	0.39	8.25	13.04	8.67	16.03	8.36	5.52	11.54	2.47	13.40	14.39
Gros	3.72	18.71	21.86	8.76	85.66	17.74	11.00	20.26	2.47	2.33	4.11	2.56	12.28	1.97	2.17
Spes	1.60	4.52	5.61	1.83	2.86	9.72	4.12	8.28	1.42	3.51	12.73	3.23	6.36	1.46	1.64

注: Alm. 铁铝榴石; Pyr. 镁铝榴石; Gros. 钙铝榴石; Spes. 锰铝榴石。

体沿北西走向展布的特征明显,指示区域上物源方向为近南东—北西向。

沉积构造反映水动力条件与沉积环境变化,两者一定程度上反映物源信息。四方台组一段以曲流河相沉积为主,底部砂体普遍发育冲刷面构造,其中砾石以泥砾、硅质砾石为主。研究区东南部地区,砾石类型主要有红色、绿色泥砾(图 4a, b, c),粒度在 10~30 mm 之间,排列略具定向性,偶见钙质颗粒(图 4c),部分井还可见到硅质砾石(图 4b),粒度在 10~20 mm 之间,磨圆一般,分选较差。而研究区西北部地区,砾石以绿色泥砾为主(图 4e, f),未见到红色泥砾,个别井内同样可以见到硅质砾石(图 4d),但粒度基本都在 10 mm 以内。泥砾作为内碎屑沉积物,是滑塌体原地堆积或滑塌碎块短距离搬运而形成的<sup>[13]</sup>,属于“近源沉积物”,可以反映当时的沉积环境;泥岩因其孔渗性差,受后期改造影响较小,因此泥砾颜色亦可以反映当时的沉积环境;红色调一般代表水上或水体较浅的沉积环境,绿色调一般代表弱氧化或弱还原条

件。因此,从冲刷面内泥砾的颜色上可以推测出研究区东南部较西北部更靠近物源区。此外,研究区位于盆地内部,距离物源区相对较远,碎屑沉积物成熟度较高,因此冲刷面内发育稳定性更高的硅质颗粒,但沿砂体走向上,由南东向北西其粒度逐渐变小,分选逐渐变好,也指示东南部较西北部更靠近物源区。

## 4 讨论

### 4.1 物源方向

研究区位于松辽盆地北部二级构造单元中央拗陷区内,东部的张广才岭、东北部的小兴安岭、西部的大兴安岭及盆地周缘地区都可以作为四方台组潜在物源区(图 1a)。晚白垩世时期,松辽盆地已由古亚洲洋构造域转为古太平洋构造域控制<sup>[14-15]</sup>,盆地接受北西向应力的挤压,东南部相对抬升,沉积沉降中心不断向西北方向迁移<sup>[2,16-18]</sup>,研究区西侧即为盆地的沉积中心齐家—古龙凹陷,大兴安岭地区的物源从盆地西侧跨过沉积中心,运

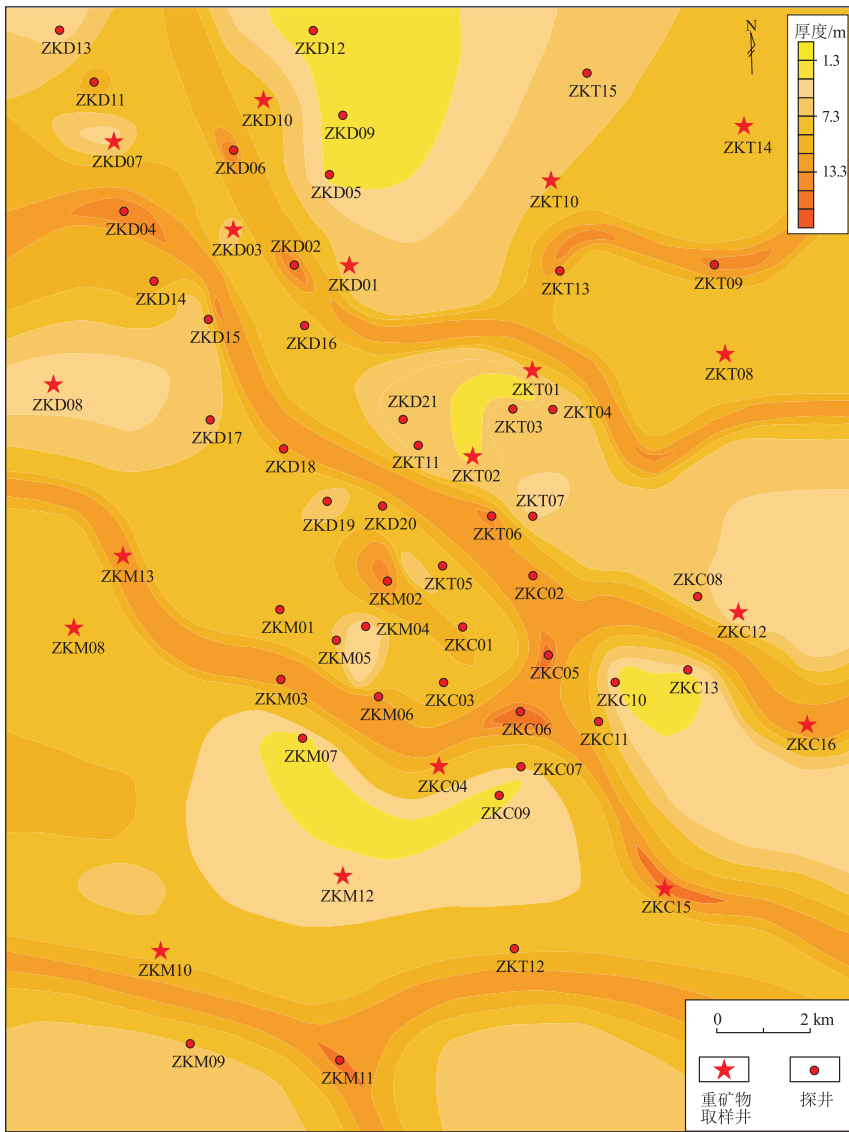


图 3 松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组一段底部砂体厚度  
研究区位置见图 1a。

Fig.3 Sand thickness at the bottom of  $K_2s_1$  in the southern Daqing placanticline, northern Songliao Basin

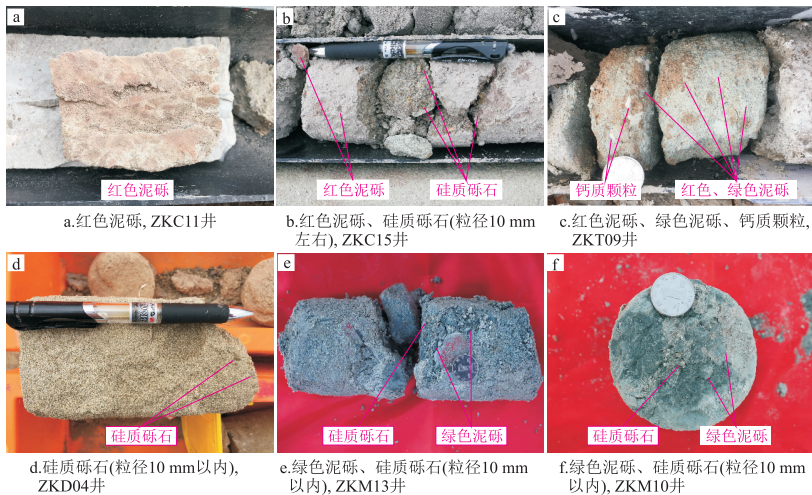


图 4 松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组一段底部冲刷面特征

Fig.4 Characteristics of erosion surface at the bottom of  $K_2s_1$  in the southern Daqing placanticline, northern Songliao Basin

移至研究区的可能性较小。大兴安岭地区广泛分布的一期岩浆事件发生在早白垩世时期<sup>[14,19]</sup>, 110~150 Ma 之间的花岗岩、火山岩构成了大兴安岭主体<sup>[19-21]</sup>, 而碎屑锆石(图 5)落在这一区间内的数据很少, 因此从沉积构造演化与同位素测年结果上分析, 大兴安岭地区不是研究区四方台组的物源区。小兴安岭西部地区出露的岩体大多年龄在 290~260 Ma<sup>[22]</sup> 与 170~160 Ma<sup>[23-24]</sup> 之间, 而碎屑锆石落在这一区间内的数据较少。小兴安岭西部位于研究区北部, 而四方台组的沉积特征显示物源主要来自于东部地区, 因此小兴安岭西侧地区也不是研究区四方台组的物源区。小兴安岭东侧地区报道的岩体包括 508~471 Ma 的下古生界花岗岩<sup>[25]</sup>、(222 ± 5) Ma 的 A 型花岗岩<sup>[26]</sup>, 部分年龄可以与碎屑锆石数据吻合, 但其地理位置位于研究区东北部, 沉积特征显示研究区物源方向更靠近东部, 因此判断小兴安岭东侧地区不是研究区四方台组的主要物源区。

碎屑锆石中存在 80~105 Ma、175~240 Ma 和 1.8 Ga 三组峰值区间数据(图 5)。1.8 Ga 的年龄数据在盆地内部钻井内及盆地周缘均有报道, 但主要还是集中在松辽盆地的东南隆起区与盆地东南缘的华北克拉通<sup>[15,27-30]</sup>, 四方台组是在嫩江组末期构造运动基础上沉积的一套地层, 这一时期, 盆地东南部普遍遭受剥蚀, 因此 1.8 Ga 的锆石代表了来自盆地东南部地区的物源。80~105 Ma 的年龄数据与吉黑东部广泛分布的晚白垩世岩浆活动良好对应, 作为当时欧亚大陆东部活动大陆边缘的组成部分, 吉黑东部晚白垩世与俯冲相关的岩浆活动大量存在<sup>[31-35]</sup>。175~240 Ma 的年龄数据与松辽盆地东部张广才岭晚三叠—中侏罗世之间的基岩年

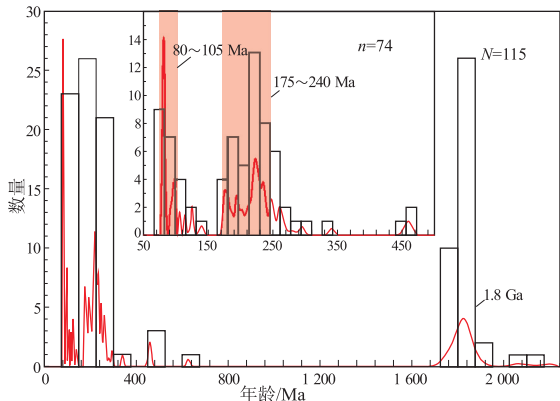


图 5 松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组一段碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱

Fig.5 U-Pb age histogram of detrital zircon from K<sub>2s1</sub> in the southern Daqing placanticline, northern Songliao Basin

龄一致<sup>[14,19-20]</sup>, 其中 175~210 Ma 与古太平洋板块的洋壳向松嫩地块下俯冲相对应<sup>[36]</sup>, 210~240 Ma 与古亚洲洋闭合伸展作用相关。综上所述, 碎屑锆石峰值年龄与张广才岭、吉黑东部、盆地东南部地区相吻合, 砂体沿北西走向展布的特征明显, 沉积环境自东南向西北由偏氧化过渡为偏还原, 水动力由东南向西北逐渐变弱, 据此判断四方台组物源主要来自张广才岭、吉黑东部及盆地东南部地区。

#### 4.2 母岩类型

物源体系研究既包括物源方向的研究, 同时也包括母岩类型方面的内容。重矿物特征与母岩性质有着密切的关系, 能够较好地反映物源区母岩的特征, 其类型及组合是了解母岩极为有利的线索和指示剂<sup>[12,37]</sup>。基于石榴子石与钛铁矿在研究区内含量较大, 而且其稳定性较高的特点, 我们选取石榴子石与钛铁矿进行化学成分测定和统计分析, 进而识别四方台组地层的母岩类型。

石榴子石既可以是变质成因, 也可以是岩浆成因, 同时作为变质岩中的典型矿物, 原岩及变质程度不同, 对应的石榴子石种属也不同。图 6 为石榴子石中 3 种端元组分比例情况, 有 14 个样品落在了铁铝榴石中, 1 个样品落在了钙铝榴石中, 结果表明四方台组地层中的碎屑石榴子石以铁铝榴石为主。由于石榴子石族矿物化学成分上的不同, 低钙榴石比高钙榴石更稳定, 因此在利用石榴子石种属判断母岩类型之前必须确定其是原生还是次生。而研究区内四方台组地层埋深较浅, 成岩期及成岩后期所经历的温压条件较低, 并且在四方台组的重矿物组合中, 绿帘石大量存在, 在这种情况下, 高钙石榴石不可能完全消失<sup>[38]</sup>。因此, 样品中

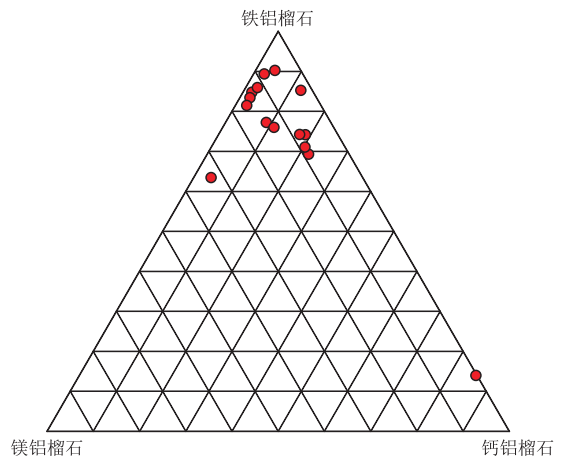


图 6 松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组一段石榴子石端元组分三角图解

Fig.6 End members of garnets from K<sub>2s1</sub> in the southern Daqing placanticline, northern Songliao Basin

的铁铝榴石在很大程度上直接来自于源区的母岩。铁铝榴石形成时的压力较大,表明其母岩以中高级变质岩为主。事实上,盆地东部的张广才岭增生杂岩带、盆地东南部的长春—延吉增生杂岩带存在大量中高级变质岩,其变质矿物均以铁铝榴石为主<sup>[36,39]</sup>。该杂岩带的变质时代为晚三叠—早侏罗世<sup>[39]</sup>,这一年龄区间也落在碎屑锆石主峰年龄(175~240 Ma)内。

重矿物统计数据显示区内钛铁矿平均含量达45.94%,在重矿物组分中比重最大,因此其代表了更多的母岩信息。钛铁矿既可以产出于岩浆岩中,也可以出现在变质岩中。曾有学者指出 Mn 元素为岩浆成因钛铁矿的特征元素, Mg 元素为变质成因钛铁矿的特征元素<sup>[40]</sup>。随机选取的 15 个样品的电子探针结果显示,其中有 9 个样品 Mn 元素含量多于 Mg 元素, 6 个样品的 Mg 元素多于 Mn 元素。根据这一标准,研究区四方台组地层内的钛铁矿既有变质成因,也有岩浆成因,以岩浆成因为主。一定数量来自变质成因的钛铁矿与上文所述的母岩中存在中高级变质岩相对应。一般认为钛铁矿主要产出于基性岩浆岩中,现今张广才岭、吉黑东部地区报道的基性岩体多呈小岩体形态产出,而年龄区间集中在 175~240 Ma 的中酸性岩浆岩广泛存在且体量巨大,前人在对这些岩体开展研究的过程中均提及其副矿物中含有大量钛铁矿<sup>[22,41]</sup>,由此判断四方台组母岩类型还包括大量的中酸性岩浆岩。

通过石榴子石与钛铁矿的类型分析,综合重矿物组合特征,认为富 Mn 钛铁矿、锆石和磁铁矿的重矿物组合指示母岩为中酸性岩浆岩,铁铝榴石、富 Mg 钛铁矿和绿帘石的重矿物组合指示母岩为中高级变质岩。

#### 4.3 地质意义

随着近年来砂岩型铀矿找矿工作的不断推进,首次在松辽盆地北部大庆长垣南端四方台组中取得了重大发现。物源体系记录了构造运动信息,通过对物源体系特征研究可以了解沉积与构造的响应关系,进而指导下一步的铀矿勘探。从前面论述可知,四方台组重矿物组成特征一致,均以钛铁矿、石榴子石、锆石等稳定重矿物为主,表明四方台组沉积时期盆地构造运动较稳定,这与晚白垩世以来松辽盆地整体受环太平洋构造域控制相一致<sup>[14-15]</sup>;对比前人对松辽盆地北部泉头组、嫩江组物源体系的研究,四方台组沉积时期,来自东部、东南部的物源占据了盆地物源供给的主导地位。

区域资料显示四方台组地层在松辽盆地北部分布广泛,勘探实践中发现除大庆长垣南端外,在朝阳沟阶地、西部斜坡等三级构造单元内的四方台组地层中也存在大量放射性异常。四方台组受控于稳定的构造环境与物源供给,为铀矿的富集提供了地质基础,是松辽盆地继姚家组之后新发现的一套富铀地层,具备良好的成矿地质条件。这一认识为在松辽盆地北部寻找砂岩型铀矿开辟了新的层系,对铀矿勘探开发具有重要意义。

## 5 结论

(1) 四方台组一段底部砂体沿北西走向展布的特征明显,沉积环境自东南向西北由偏氧化过渡为偏还原,水动力由东南向西北逐渐变弱,通过与源区对比分析,认为大庆长垣南端四方台组物源主要来自张广才岭、吉黑东部及盆地东南部地区。

(2) 富 Mn 钛铁矿、锆石和磁铁矿的重矿物组合指示物源为中酸性岩浆岩,铁铝榴石、富 Mg 钛铁矿和绿帘石的重矿物组合指示物源为中高级变质岩。

(3) 四方台组受控于稳定的构造环境与物源供给,为铀矿的富集提供了地质基础,具备良好的成矿地质条件,是松辽盆地寻找砂岩型铀矿的新层系。

#### 参考文献:

- [1] 杨仁超,李进步,樊爱萍,等.陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J].沉积学报,2013,31(1):99-107.  
YANG Renchao, LI Jinbu, FAN Aiping, et al. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(1): 99-107.
- [2] 王璞珺,赵然磊,蒙启安,等.白垩纪松辽盆地:从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J].地学前缘,2015,22(3):99-117.  
WANG Pujun, ZHAO Ranlei, MENG Qi'an, et al. The Cretaceous Songliao Basin: dynamic background from volcanic rift to interior sag basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 99-117.
- [3] 赵红格,刘池洋.物源分析方法及研究进展[J].沉积学报,2003,21(3):409-415.  
ZHAO Hongge, LIU Chiyang. Approaches and prospects of provenance analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3): 409-415.
- [4] 刘宁,樊德华,郝运轻,等.稀土元素分析方法研究及应用:以渤海湾盆地东营凹陷永安地区物源分析为例[J].石油实验地质,2009,31(4):427-432.  
LIU Ning, FAN Dehua, HAO Yunqing, et al. REE analysis method and application: taking source rocks in Yonggan region of the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin as example [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 427-432.
- [5] 刘宗堡,吕延防,杨志,等.基于高分辨率层序地层学的大庆

- 长垣南部浅层气分布特征研究[J]. 地层学杂志, 2009, 33(4): 382-390.
- LIU Zongbao, LU Yanfang, YANG Zhi, et al. Shallow gas distribution character of the Heidimiao reservoir in the southern Daqing placanticline based on high-resolution sequence stratigraphy[J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(4): 382-390.
- [6] 韩建辉, 王英民, 李树青, 等. 松辽盆地北部湖盆萎缩期层序结构与沉积充填[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 479-486.
- HAN Jianhui, WANG Yingmin, LI Shuqing, et al. Sequence structure and depositional filling of northern Songliao Basin during shrinkage stage[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3): 479-486.
- [7] 彭国亮, 吴朝东, 张顺, 等. 松辽盆地北部上白垩统嫩江组二、三段物源分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, 46(4): 555-562.
- PENG Guoliang, WU Chaodong, ZHANG Shun, et al. Provenance analysis of the member 2 and 3 of the Upper Cretaceous Nenjiang Formation in northern Songliao Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46(4): 555-562.
- [8] 莫午零, 吴朝东, 张顺, 等. 松辽盆地北部上白垩统嫩江组物源及古流向分析[J]. 石油实验地质, 2012, 34(1): 40-46.
- MO Wuling, WU Chaodong, ZHANG Shun, et al. Provenance and palaeocurrent direction of Upper Cretaceous Nenjiang Formation in northern Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(1): 40-46.
- [9] 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 1-654.
- HOU Qijun, FENG zhiqiang, FENG Zihui. Terrestrial petroleum geology of Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 1-654.
- [10] 陈骁, 李忠权, 陈均亮, 等. 松辽盆地反转期的界定[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3): 305-311.
- CHEN Xiao, LI Zhongquan, CHEN Junliang, et al. Determination of the reverse period of Songliao Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(2/3): 305-311.
- [11] 王成善, 冯志强, 王璞珺. 白垩纪松辽盆地松科 1 井大陆科学钻探工程[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- WANG Chengshan, FENG Zhiqiang, WANG Pujun. Initial report of continental scientific drilling project of the Cretaceous Songliao Basin (SK1)[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [12] 付玲, 关平, 赵为永, 等. 柴达木盆地古近系路乐河组重矿物特征与物源分析[J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2867-2875.
- FU Ling, GUAN Ping, ZHAO Weiyong, et al. Heavy mineral feature and provenance analysis of Paleogene Lulehe Formation in Qaidam Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(8): 2867-2875.
- [13] 高志勇, 周川闽, 冯佳睿, 等. 库车坳陷白垩系巴什基奇克组泥砾的成因机制与厚层状砂体展布[J]. 石油学报, 2016, 37(8): 996-1010.
- GAO Zhiyong, ZHOU Chuanmin, FENG Jiarui, et al. Mechanism and sedimentary environment of the muddy gravel concomitant with thick layer sandstone of Cretaceous in Kuqa Depression [J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 37(8): 996-1010.
- [14] ZHAO Bin, WANG Chengshan, WANG Xiaofu, et al. Late Cretaceous (Campanian) provenance change in the Songliao Basin, NE China: evidence from detrital zircon U-Pb ages from the Yaojia and Nenjiang formations[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 385(9): 83-94.
- [15] LI Shuangqing, CHEN Fukun, SIEBEL W, et al. Late Mesozoic tectonic evolution of the Songliao Basin, NE China: evidence from detrital zircon ages and Sr-Nd isotopes [J]. Gondwana Research, 2012, 22(3/4): 943-955.
- [16] 高有峰, 王璞珺, 瞿雪姣, 等. 松辽盆地东南隆起区白垩系嫩江组一段沉积相、旋回及其与松科 1 井的对比[J]. 岩石学报, 2010, 26(1): 99-108.
- GAO Youfeng, WANG Pujun, QU Xuejiao, et al. Sedimentary facies and cyclostratigraphy of the Cretaceous first member of Nenjiang Formation in the southeast uplift zone, Songliao Basin and its correlation with the CCSD-SK-I [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(1): 99-108.
- [17] 程日辉, 王国栋, 王璞珺, 等. 松科 1 井北孔四方台组—明水组沉积微相及其沉积环境演化[J]. 地质前缘, 2009, 16(6): 85-95.
- CHENG Rihui, WANG Guodong, WANG Pujun, et al. Uppermost Cretaceous sediments: sedimentary microfacies and sedimentary environment evolution of Sifangtai Formation and Mingshui Formation in SK-I(n) [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(6): 85-95.
- [18] FENG Zhiqiang, JIA Chengzao, XIE Xinong, et al. Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao Basin, northeast China [J]. Basin Research, 2010, 22(1): 79-95.
- [19] WU Fuyuan, SUN Deyou, GE Wenchun, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.
- [20] WANG Fei, ZHOU Xinhua, ZHANG Lianchang, et al. Late Mesozoic volcanism in the Great Xing'an Range (NE China): timing and implications for the dynamic setting of NE Asia [J]. Earth & Planetary Science Letters, 2006, 251(1/2): 179-198.
- [21] ZHANG Jiheng, GE Wenchun, WU Fuyuan, et al. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China [J]. Lithos, 2008, 102(1/2): 138-157.
- [22] WU Fuyuan, SUN Deyou, LI Huimin, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. Chemical Geology, 2002, 187(1/2): 143-173.
- [23] 隋振民, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭东北部侏罗纪花岗岩质岩石的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因 [J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 461-480.
- SUI Zhenmin, GE Wenchun, WU Fuyuan, et al. Zircon U-Pb age, geochemistry and its petrogenesis of Jurassic granites in northeastern part of the Da Hinggan Mts [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 461-480.
- [24] MIAO Laicheng, FAN Weiming, ZHANG Fuqing, et al. Zircon SHRIMP geochronology of the Xinkailing-Kele complex in the northwestern Lesser Xing'an Range, and its geological implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(2): 201-209.
- [25] 刘建峰, 迟效国, 董春艳, 等. 小兴安岭东部早古生代花岗岩



- 的发现及其构造意义[J].地质通报,2008,27(4):534-544.
- LIU Jianfeng, CHI Xiaoguo, DONG Chunyan, et al. Discovery of Early Paleozoic granites in the eastern Xiao Hinggan mountains, northeastern China and their tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(4): 534-544.
- [26] 孙德有, 吴福元, 高山. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定[J]. 地球学报, 2004, 25(2): 213-218. SUN Deyou, WU Fuyuan, GAO Shan. LA-ICPMS zircon U-Pb age of the Qingshui pluton in the east Xiao Hinggan mountains[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2004, 25(2): 213-218.
- [27] DARBY B J, GEHRELS G. Detrital zircon reference for the North China block[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26(6): 637-648.
- [28] MENG Fanxue, GAO Shan, YUAN Honglin, et al. Permian-Triassic (260-220 Ma) crustal growth of eastern Central Asian Orogenic Belt as revealed by detrital zircon studies[J]. American Journal of Science, 2010, 310(5): 364-404.
- [29] 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2008, 33(5): 603-617. PEI Fuping, XU Wenliang, YANG Debin, et al. Mesozoic volcanic rocks in the southern Songliao Basin: zircon U-Pb ages and their constraints on the nature of basin basement[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2008, 33(5): 603-617.
- [30] 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 等. 松辽盆地基底变质岩中锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2006, 51(24): 2881-2887. PEI Fuping, XU Wenliang, YANG Debin, et al. Zircon U-Pb geochronology of basement metamorphic rocks in the Songliao Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(24): 2881-2887.
- [31] 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 Wenliang, WANG Feng, PEI Fuping, 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.
- [32] XU Wenliang, PEI Fuping, WANG Feng, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 74: 167-193.
- [33] 张磊, 韩宝福, 朱永峰, 等. 黑龙江省东部双鸭山二长辉长岩的年代学、矿物学、结晶过程及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(3): 577-587. ZHANG Lei, HAN Baofu, ZHU Yongfeng, et al. Geochronology, mineralogy, crystallization process and tectonic implications of the Shuangyashan monzogabbro in eastern Heilongjiang province[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(3): 577-587.
- [34] 于介江, 张彦龙, 葛文春, 等. 三江盆地北缘晚白垩世花岗岩质岩石的年代学、地球化学及其构造意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 369-385. YU Jiejia, ZHANG Yanlong, GE Wenchun, et al. Geochronology and geochemistry of the Late Cretaceous granitoids in the northern margin of the Sanjiang Basin, NE China and its tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(2): 369-385.
- [35] TANG Jie, XU Wenliang, NIU Yaoling, et al. Geochronology and geochemistry of Late Cretaceous - Paleocene granitoids in the Sikhote-Alin orogenic belt: petrogenesis and implications for the oblique subduction of the paleo-Pacific plate[J]. Lithos, 2016, 266/267: 202-212.
- [36] 邵济安, 李永飞, 唐克东. 张广才岭造山过程的重构及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 2959-2970. SHAO Ji'an, LI Yongfei, TANG Kedong. Restoration of the orogenic processes of Zhangguangcai range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 2959-2970.
- [37] MORTONAB A C, HALLSWORTH C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. Sedimentary Geology, 1999, 124(1/4): 3-29.
- [38] 杨丛笑, 赵澄林. 石榴石电子探针分析在物源研究中的应用[J]. 沉积学报, 1996, 14(1): 162-166. YANG Congxiao, ZHAO Chenglin. Application of electron microprobe analysis of detrital garnet to provenance studies[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(1): 162-166.
- [39] 周建波, 韩杰, SIMON A W, 等. 吉林—黑龙江高压变质带的初步厘定: 证据和意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 386-398. ZHOU Jianbo, HAN Jie, SIMON A W, et al. A primary study of the Jilin-Heilongjiang high-pressure metamorphic belt: evidence and tectonic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(2): 386-398.
- [40] OLIVARIUS M, RASMUSSEN E S, SIERSMA V, et al. Provenance signal variations caused by facies and tectonics: zircon age and heavy mineral evidence from Miocene sand in the north-eastern north sea basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 49(1): 1-14.
- [41] 李俊杰. 吉黑东部花岗岩类的副矿物组合特征[J]. 地质与资源, 2005, 14(1): 8-11. LI Junjie. Characteristics of the assemblages of accessory minerals in granitoids in eastern Jilin and Heilongjiang provinces[J]. Geology and Resources, 2005, 14(1): 8-11.