

碎屑重矿物分析对内蒙古西乌旗早二叠世寿山沟组的物源指示及构造意义

张英利¹, 郭现轻¹, 孙立新², 马收先¹, 施立志¹

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 2. 中国地质调查局 天津地质调查中心, 天津 300170)

摘要: 碎屑重矿物由于相对比较稳定, 蕴含重要的成因信息, 对其进行电子探针成分分析, 能够还原岩石形成的物源区和盆地构造背景。内蒙古西乌旗早二叠世寿山沟组一段主要由砂岩夹砾岩等组成, 二段主要由粉砂岩、泥岩等组成。重矿物分析表明, 寿山沟组一段和二段砂岩重矿物主要有锆石、尖晶石和石榴子石等, 指示其物源区为岩浆岩和变质岩。重矿物电子探针成分分析结果显示, 电气石成分指示其具贫锂花岗岩和变沉积岩物源, 尖晶石成分指示其具岛弧和洋中脊玄武岩类物源, 石榴子石成分指示其具高级变质基性岩源区。综合物源分析显示, 寿山沟组主要来源于迪彦庙蛇绿岩、锡林浩特杂岩和本巴图组玄武岩等。结合区域地质对比, 认为寿山沟组形成于弧后盆地, 古亚洲洋在早二叠世时期尚未闭合。

关键词: 兴蒙造山带; 西乌旗; 寿山沟组; 物源分析; 电子探针; 弧后盆地

中图分类号: P588.21+2; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)06-1155-16

Detrital heavy minerals analysis of Early Permian Shoushangou Formation in the Xi Ujimqin, Inner Mongolia: Implications for provenance and tectonic setting

ZHANG Ying-li¹, GUO Xian-qing¹, SUN Li-xin², MA Shou-xian¹ and SHI Li-zhi¹

(1. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China;
2. Tianjin Center of Geological Survey, CGS, Tianjin 300170, China)

Abstract: The detrital heavy minerals are relatively stable and contain important genetic information. The EPMA composition analysis of them can provide the provenance and basin tectonic setting. The first member of Shoushangou Formation is mainly composed of sandstone and conglomerate, and the second member is mainly composed of siltstone and mudstone. The assemblages of heavy minerals in the sandstones are mainly composed of zircon, spinel and garnet, suggesting that the provenance rocks were magmatic and metamorphic rocks. The results of electron probe microanalysis show that tourmalines were derived mainly from lithium-poor granite and metasedimentary rocks, spinels were sourced from island arc basalts and mid ocean ridge basalts, and garnets from the source of high-grade metabasic rocks. Comprehensive provenance analysis shows that they were mainly derived from Diyanmiao ophiolite, Xilinhot complex and basalts of Benbatu Formation. Combined with regional geological correlation, the sediments of Shoushangou Formation were formed in a backarc basin, suggesting that the Paleo-Asian Ocean was not closed in the Early Permian.

收稿日期: 2020-11-20; 接受日期: 2021-08-02; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 深地资源勘查开采项目(2019YFC0605202); 中国地质调查项目(DD20201173, DD20190099)

作者简介: 张英利(1979-), 男, 教授级高工, 主要从事沉积学与盆地构造研究, E-mail: yinglizh@126.com。

网络首发时间: 2021-08-19; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210819.1205.002.html>

Key words: Xing-Meng Orogenic Belt; Xi Ujimqin; Shoushangou Formation; provenance analysis; electron probe microanalysis; backarc basin

Fund support: Deep Resources Exploration and Mining Project(2019YFC0605202); Project of China Geological Survey(DD20201173, DD20190099)

内蒙古西乌旗早二叠世为兴蒙造山带的组成部分。前人研究表明,兴蒙造山带是中亚造山带的重要组成部分,受古亚洲洋的影响经历了复杂的演化过程(李锦轶等, 2019; Xiao *et al.*, 2020)。对于早二叠世古亚洲洋关闭与否一直存在争论: ① 认为古亚洲洋在早二叠世已经关闭(徐备等, 2014; Zhao *et al.*, 2017; 张焱杰等, 2018), 形成了大陆裂谷相关的沉积物和岩浆岩等, 早二叠世沉积记录反映大陆裂谷环境, 西乌旗南的辉绿岩地球化学特征也支持这一认识(Zhu *et al.*, 2017); ② 认为古亚洲洋在早二叠世未关闭(Lu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Xiao *et al.*, 2020)。随着研究的进一步深入, 又有复式增生造山的模式提出(Xiao *et al.*, 2018, 2020)。Xiao 等(2003, 2018)将古生代兴蒙造山带划分出多个岛弧-增生杂岩单元, 将西乌旗地区确定为宝力道岛弧-增生杂岩大地构造单元(图1)。受早二叠世古亚洲洋俯冲影响, 西乌旗为弧后盆地(Xiao *et al.*, 2003; 张晓飞等, 2018; Wang *et al.*, 2020)。与此同时, 西乌旗地区侵入岩的地球化学特征呈现出岛弧特征(刘锐等, 2016; 刘敏等, 2017; 王金芳等, 2018)。

西乌旗地区早二叠世寿山沟组因发育油气较好的烃源岩——深灰色厚层泥岩受到关注(公繁浩等, 2013a)。目前, 对寿山沟组的物源已有大量研究, 但仍存在不同观点: ① 碎屑锆石 U-Pb 年龄表明寿山沟组的物源来自南侧和北侧, 即主要来自于苏尼特左旗—锡林浩特—西乌旗一带早石炭世末—晚石炭世岩浆弧及贺根山—东乌旗一带(张晓飞等, 2018); ② 碎屑锆石 U-Pb 年龄表明其源自南侧, 即主要来自于苏尼特左旗—锡林浩特—西乌旗一带早石炭世晚期—晚石炭世岩浆弧, 部分来自乌兰浩特地区大石寨组火山岩(郑月娟等, 2013); ③ 碎屑锆石 U-Pb 年龄结果表明, 物源来自南侧岛弧岩浆岩(Wang *et al.*, 2020); ④ 碎屑岩的地球化学分析结果, 寿山沟组沉积物主要来源于长英质岩石, 并混有少量铁镁质火山岩, 岩浆岩年龄几乎接近沉积时代(Lu *et al.*, 2020), 源岩构造背景为大陆岛弧(Li *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2020)。

物源分析是盆地分析的重要内容(Walsh,

2016; Chew *et al.*, 2020), 可以获取源区母岩、构造单元特征和构造环境等相关资料, 尤其是碎屑重矿物, 例如电气石、尖晶石和石榴子石等(Henry and Guidotti, 1985; Arai, 1992; Yan *et al.*, 2014, 2019; Chew *et al.*, 2020), 由于其相对稳定, 已成为沉积物源分析的重要手段之一。通过碎屑重矿物的物源分析, 可以判断沉积期的构造背景。

本文以西乌旗寿山沟组碎屑岩为研究对象, 详细分析其重矿物特征, 恢复古水流方向, 确定沉积物搬运方向, 以阐明西乌旗地区寿山沟组的物源特征, 探讨寿山沟组形成的构造环境, 分析古亚洲洋关闭的时限, 进而为区域构造演化提供基础。

1 区域地质背景

研究区位于贺根山断裂以南, 西拉木伦河断裂以北, 属于宝力道岛弧-增生杂岩构造单元(图1a; Xiao *et al.*, 2003)。宝力道岛弧-增生杂岩构造单元中岛弧主要由晚石炭世不同程度变形的花岗闪长岩、石英闪长岩和花岗闪长岩等组成(Chen *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2003)。宝力道岛弧南侧(苏尼特左旗附近)原前寒武纪岩石构成增生杂岩, 在岛弧北侧与岛弧同时的火山-沉积岩形成于岛弧和弧后环境(Xiao *et al.*, 2003)。

西乌旗地区主要出露锡林郭勒杂岩、蛇绿岩、石炭-二叠纪以及中生代地层(图1b)。锡林郭勒杂岩由中元古代-古生代不同变质程度的黑云片麻岩、变粒岩、石英岩、花岗片麻岩以及斜长角闪岩等组成(孙俊俊等, 2012; 周文孝等, 2013; Li *et al.*, 2014)。蛇绿岩分布在北部的梅劳特乌拉和南部的迪彦庙, 梅劳特乌拉蛇绿岩形成于晚石炭世(李英杰等, 2015), 迪彦庙蛇绿岩形成于早石炭世—晚石炭世(Song *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2018)。晚石炭世地层主要出露本巴图组和阿木山组, 本巴图组为玄武岩、安山岩和英安岩夹碎屑岩, 阿木山组为一套海相碳酸盐岩夹碎屑岩(内蒙古自治区地质矿产局, 1996)。二叠纪地层主要出露寿山沟组、大石寨组和哲斯组。寿山沟组主要为一套碎屑岩, 可分为一段

和二段。一段为黄灰色、灰色黑色砾岩、含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩等(图 2a)。在哈日根台以东的罕乌拉,寿山沟组一段见有凝灰岩(Wang *et al.*, 2020),根据哈日根台南的寿山沟组一段砂岩交错层理恢复的古水流指示物源来自于南部(图 1b)。寿山沟组二段以灰黑色粉砂质泥岩、泥岩和粉砂岩为主(图 2b),局部夹安山岩(施立志等, 2020)或流纹岩和火山碎屑岩(Wang *et al.*, 2020)。寿山沟组上覆的大石寨组由玄武岩、安山岩、流纹岩等组成。哲斯组下部为厚层灰岩,上部为碎屑岩夹灰岩透镜体等(内蒙古自治区地质矿产局, 1996)。中生代地层主要为酸性火山熔岩、火山碎屑岩和碎屑岩(内蒙古自治区地质矿产局, 1996)。

研究区寿山沟组主体为一套陆源碎屑岩。BY剖面位于哈日根台(图 1b),为寿山沟组一段(图 2a),主要由深灰色砂岩和薄层粉砂岩、泥岩组成。底部由灰色块状颗粒支撑砾岩组成,砾岩局部为基质支撑。砾径较大,从几厘米至米级。砾石分选较差,磨圆较好,呈次圆状。颗粒间无定向排列,主要是颗粒流搬运过程中携带高浓度颗粒的流体快速分散所致(Mutti and Ricci Lucchi, 1978; Stow *et al.*, 1982; Lowe, 1982)。深灰色砂岩发育平行层理和正粒序层理。粉砂岩、泥岩发育水平层理,可见遗迹化石和自形较好的黄铁矿。深灰色砂岩和粉砂岩、泥岩等构成鲍玛序列的不同层段。剖面下部砂岩为块状,为不同高密度流体转换过程的产物(Haughton

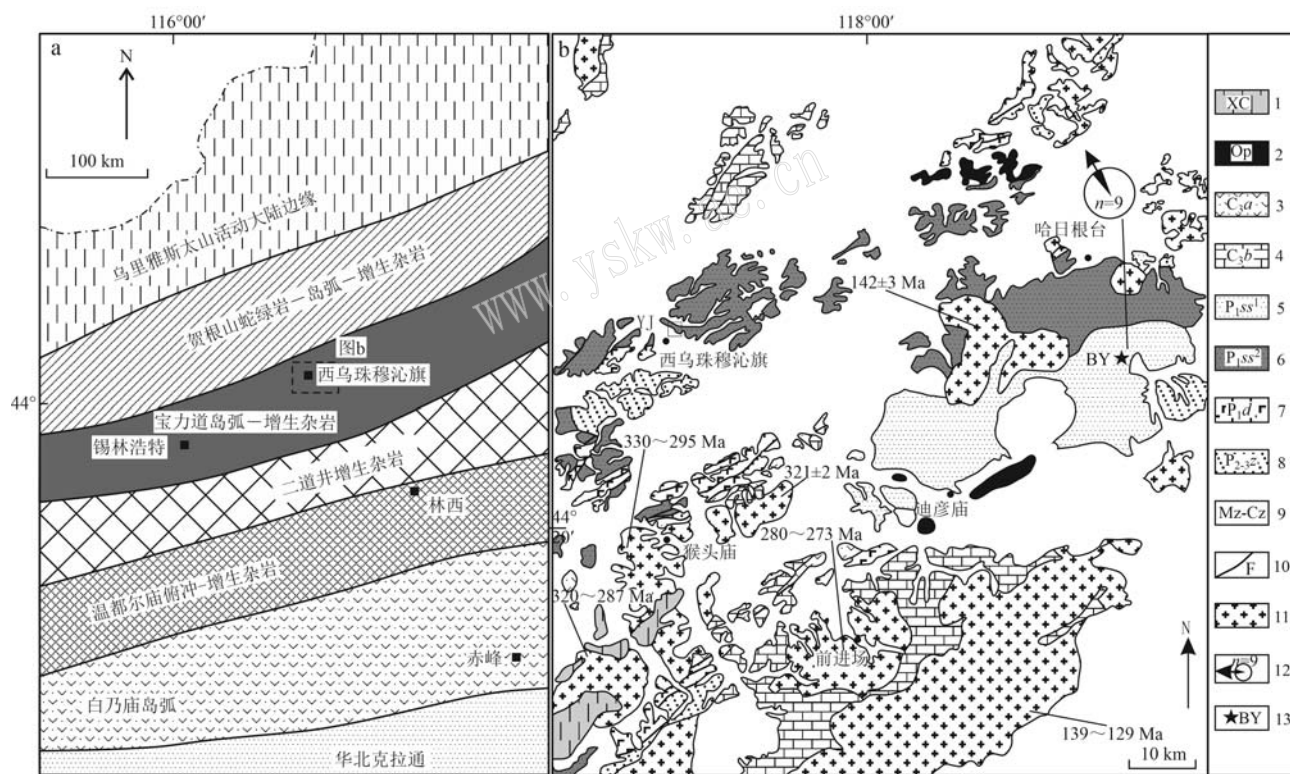


图 1 内蒙古中部构造单元位置图[a, 据 Xiao 等(2003)修改]及研究区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic units of the central Inner Mongolia (a, modified after Xiao *et al.*, 2003) and simplified geological map of the study area (b)

1—锡林郭勒杂岩; 2—蛇绿岩; 3—阿木山组; 4—本巴图组; 5—寿山沟组一段; 6—寿山沟组二段; 7—大石寨组; 8—哲斯组; 9—中生界; 10—断层; 11—侵入岩; 12—古水流; 13—剖面位置; 蛇绿岩分布区域依据李英杰等(2013, 2018); 侵入岩年龄数据引自刘建峰等(2009)、Wu 等(2011)、徐佳佳等(2012)、王新宇等(2013)、Liu 等(2016, 2018)和刘敏等(2017)

1—Xilin Gol complex; 2—ophiolite; 3—Amushan Formation; 4—Benbatu Formation; 5—first member of Shoushangou Formation; 6—second member of Shoushangou Formation; 7—Dashizhai Formation; 8—Zhesi Formation; 9—Mesozoic-Cenozoic; 10—fault; 11—intrusive rock; 12—paleocurrent direction; 13—section location; the ophiolite areas are based on Li Yingjie *et al.* (2013, 2018); age data of plutons are adopted from Liu Jianfeng *et al.* (2009), Wu *et al.* (2011), Xu Jiajia *et al.* (2012), Wang Xinyu *et al.* (2013), Liu *et al.* (2016, 2018), Liu Min *et al.* (2017)

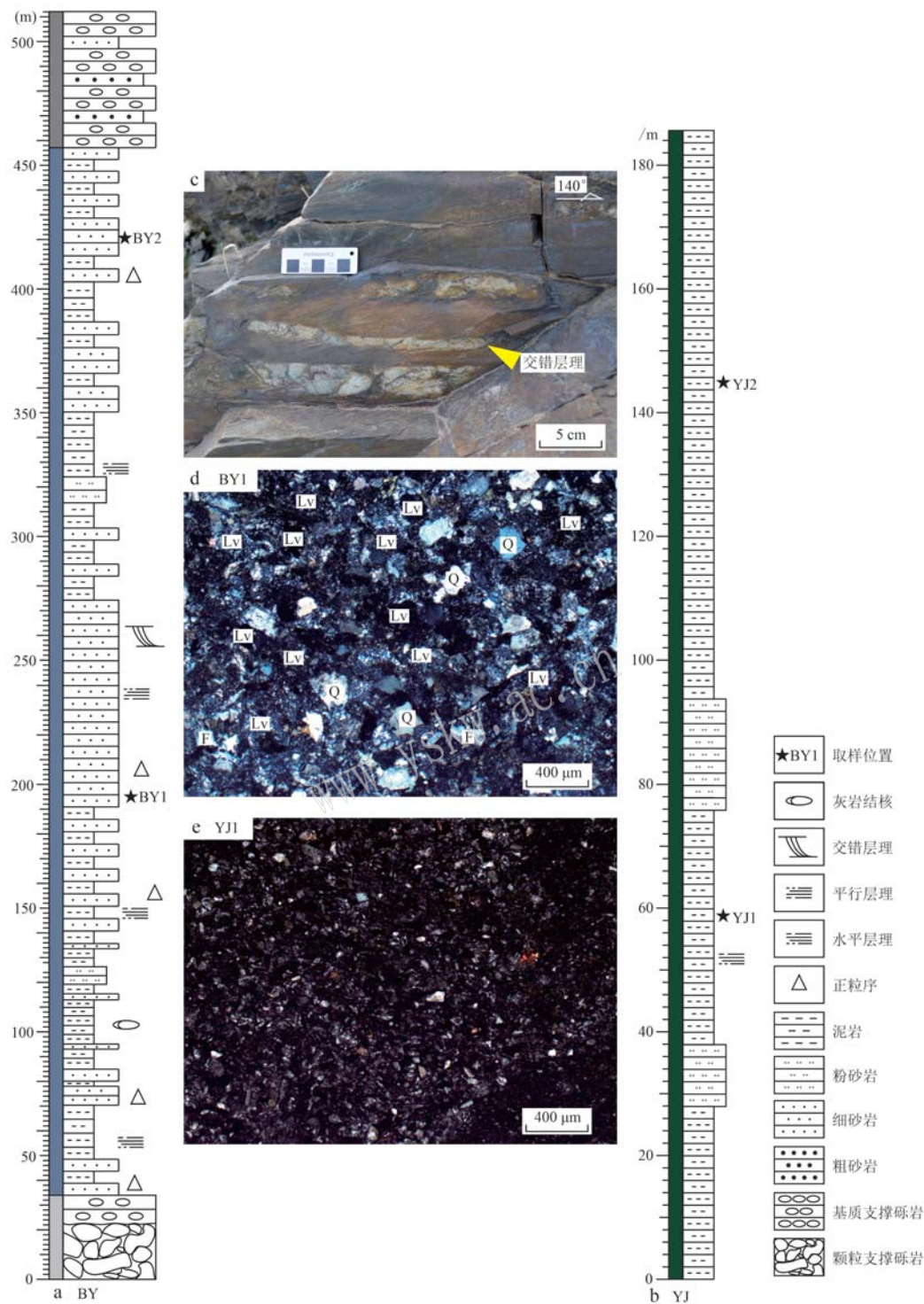


图 2 内蒙古西乌旗寿山沟组沉积序列图(a、b)、交错层理(c)和样品显微特征(d、e)
Fig. 2 Measured stratigraphic sections (a, b), cross beddings (c) and microphotographs (d, e) of the Shoushangou Formation in the Xi Ujimqin, Inner Mongolia
Q—石英; F—长石; Lv—火山岩岩屑
Q—quartz; F—feldspar; Lv—volcanic lithics

et al., 2003)。剖面顶部由灰色、灰白色基质支撑砾岩(Gmm)组成,分选较差,磨圆度较好,呈次圆状,为碎屑流成因(Nemec and Steel, 1984)。YJ剖面位于西乌旗东北(图 1b),为寿山沟组二段(图 2b),

以灰绿色薄层泥岩为主,夹灰绿色薄层粉砂岩。泥岩呈现弱水平层理。

岩相分析表明,寿山沟组整体沉积环境为半深海-深海环境,与前人分析塔宾庙林场的沉积环境基本一致(公繁浩等, 2013b),且符合遗迹化石指示的环境特征(黄欣等, 2013)。显微镜下显示,砂岩碎屑颗粒主要由次棱角状石英和岩屑组成,长石较少,其中岩屑主要由火山岩岩屑组成(图 2d)。泥岩碎屑颗粒磨圆度较差(图 2e),石英颗粒较大。

2 样品采集和分析方法

2.1 样品采集

根据寿山沟组的区域分布和岩性特点进行了采样,其中寿山沟组一段砂岩样品 BY1 和 BY2 采自哈日根台 BY 剖面(44°35'41", 118°30'40"),二段粉砂岩样品 YJ1 和 YJ2 采自西乌旗东北 YJ 剖面(44°38'16", 117°38'13"),具体位置见图 1 和图 2。4 个样品均进行了重矿物鉴定分析,另在此基础上,又对在 BY1 和 YJ1 两个样品中挑选出的电气石、尖晶石和石榴子石单矿物进行了电子探针成分分析。

2.2 电子探针

电子探针测试分析在中国地质科学院地质研究所重点实验室电子探针实验室完成,仪器型号为 JXA-8230,测试加速电压为 20 kV,电流为 20 nA,束斑直径为 5 μm 。测试使用的标样为天然样品和人工合成氧化物,包括石英(Si)、斜长石(Na)、硬玉(Al)、赤铁矿(Fe)、金红石(Ti)、红钛锰矿(Mn)、镁铝榴石(Mg)、磷灰石(Ca)、钾长石(K)等。所有数据经过 ZAF 法校正。

基于 31 个氧原子(Henry *et al.*, 2011)采用 Excel 经验公式对电气石数据进行了处理。尖晶石数据采用 CALCMIN excel 程序(Brandelik, 2009)进行处理。基于 8 个阳离子和 12 个氧原子,对石榴子石进行数据处理,将其划分为 6 个端员, Fe^{2+} 和 Fe^{3+}

的含量根据石榴子石的公式计算。

3 重矿物分析结果

3.1 重矿物组成

寿山沟组一段砂岩重矿物主要由赤-褐铁矿、尖晶石和锆石组成,其余为磷灰石、电气石、磁铁矿等。寿山沟组二段砂岩重矿物主要为尖晶石和锆石,其余包括磷灰石、赤褐铁矿和石榴子石(表 1)。尖晶石、磁铁矿等指示母岩为基性岩,石榴子石指示母岩为变质岩。重矿物 CZi 指数[$\text{CZi} = 100 \times \text{尖晶石} / (\text{锆石} + \text{尖晶石})$]很高,介于 59~81 之间,表明基性岩的物源占主导(Morton and Hallsworth, 1994)。因此,寿山沟组一段和二段砂岩物源区以岩浆岩和变质岩为主。一段至二段砂岩重矿物组成变化明显,锆石、尖晶石和石榴子石的含量增多,而赤-褐铁矿的含量减少。重矿物组成除了主要受物源区的岩石类型控制之外,也可能与样品的粒度、沉积环境及成岩作用有关(Morton and Hallsworth, 2007; Garzanti *et al.*, 2009)。

3.2 电子探针测试

3.2.1 电气石

电气石样品的电子探针成分分析结果列于表 2。从图像可以看出,寿山沟组一段砂岩(BY1)中电气石主要呈黄色和褐黄色(图 3a),指示其可能来自不同类型的岩石。电气石呈棱角状-次棱角状,表明为近源沉积。背散射图像表明其没有明显的成分分带。电气石探针结果显示,其主要为碱性系列(图 3b),成分主要为黑电气石和镁电气石,且两种类型的电气石个数比基本相当(图 3c)。

3.2.2 尖晶石

尖晶石样品的电子探针成分分析结果列于表 3。由图 4a、4b 可见,尖晶石呈次棱角状-次圆状,表明部分源岩经历了一定距离的搬运。电子探针分析结果显示, $\text{Cr}^\# > 0.5$, $\text{Mg}^\#$ 介于 0.02~0.78 之间。寿山沟组

表 1 内蒙古西乌旗早二叠世寿山沟组重矿物组成

$w_B/\%$

Table 1 Heavy mineral composition of Shoushangou Formation in the Xi Ujimqin, Inner Mongolia

样品	锆石	磷灰石	尖晶石	电气石	磁铁矿	赤-褐铁矿	石榴子石	其他	CZi
YJ1	23.75	0.50	58.75	-	-	5.88	5.88	5.24	71.21
YJ2	31.06	0.75	46.87	-	-	9.55	5.19	6.58	60.14
BY1	10.90	0.41	15.72	0.11	3.02	58.64	+	11.20	59.05
BY2	9.60	0.10	39.39	0.05	0.57	41.60	+	8.69	80.40

注: +代表重矿物含量较少,仅有少量颗粒; -代表低于检测限; $\text{CZi} = 100 \times \text{尖晶石} / (\text{锆石} + \text{尖晶石})$ (Morton and Hallsworth, 1994)。

表 2 内蒙古西乌旗早二叠世寿山沟组砂岩电气石电子探针数据表 $w_B/\%$
Table 2 Representative chemical composition of the detrital tourmalines from the Shoushangou Formation sandstone in the Xi Ujimqin, Inner Mongolia

样品点	BY1-1	BY1-2	BY1-3	BY1-4	BY1-5	BY1-6	BY1-7	BY1-8	BY1-9	BY1-10	BY1-11	BY1-12	BY1-13
SiO ₂	36.20	36.32	38.14	34.37	36.78	36.07	36.32	34.10	37.81	35.92	37.17	34.26	34.72
TiO ₂	1.14	0.78	0.45	0.88	1.11	0.88	0.77	0.52	0.36	0.91	0.72	1.24	0.78
Al ₂ O ₃	29.41	31.64	26.92	31.90	29.14	30.13	31.74	31.90	31.39	32.49	32.34	32.17	30.16
Cr ₂ O ₃	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.22	0.03	0.05	0.07	0.00
FeO	9.43	8.64	11.48	10.28	8.51	8.35	10.83	12.68	1.26	8.37	6.72	8.27	9.25
MgO	6.04	5.52	4.94	3.22	5.63	5.36	2.65	1.54	8.67	4.38	5.08	4.34	5.25
CaO	1.08	0.44	0.92	0.54	0.97	0.68	0.42	0.36	0.64	1.30	0.46	1.24	0.61
MnO	0.09	0.00	0.00	0.07	0.00	0.11	0.09	0.11	0.02	0.12	0.05	0.04	0.12
Na ₂ O	2.13	2.25	2.02	1.74	1.73	1.80	1.80	1.62	1.84	1.19	1.77	1.34	2.05
K ₂ O	0.02	0.00	0.04	0.07	0.04	0.02	0.05	0.05	0.04	0.06	0.03	0.06	0.04
H ₂ O [*]	3.60	3.63	3.60	3.50	3.59	3.56	3.59	3.45	3.70	3.62	3.66	3.54	3.49
B ₂ O ₃ [*]	10.43	10.53	10.43	10.14	10.40	10.32	10.40	10.01	10.71	10.49	10.62	10.25	10.12
Li ₂ O [*]	0.38	0.31	1.23	0.35	0.78	0.53	0.69	0.30	0.86	0.49	0.75	0.44	0.21
Total	99.95	100.08	100.16	97.05	98.71	97.80	99.37	96.64	97.52	99.38	99.43	97.24	96.79
Si	6.03	5.99	6.36	5.89	6.15	6.07	6.07	5.92	6.14	5.95	6.09	5.81	5.96
Ti	0.14	0.10	0.06	0.11	0.14	0.11	0.10	0.07	0.04	0.11	0.09	0.16	0.10
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00
Al	5.77	6.15	5.29	6.44	5.74	5.98	6.25	6.53	6.00	6.34	6.24	6.43	6.10
Fe ²⁺	1.31	1.19	1.60	1.47	1.19	1.18	1.51	1.84	0.17	1.16	0.92	1.17	1.33
Mg	1.50	1.36	1.23	0.82	1.40	1.34	0.66	0.40	2.10	1.08	1.24	1.10	1.34
Mn	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02
Li [*]	0.26	0.21	0.82	0.24	0.53	0.36	0.47	0.21	0.56	0.33	0.49	0.30	0.14
Ca	0.19	0.08	0.16	0.10	0.17	0.12	0.08	0.07	0.11	0.23	0.08	0.23	0.11
Na	0.69	0.72	0.65	0.58	0.56	0.59	0.58	0.55	0.58	0.38	0.56	0.44	0.68
K	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
r	0.11	0.20	0.18	0.31	0.25	0.29	0.33	0.38	0.30	0.37	0.35	0.32	0.20

注: H₂O^{*}、B₂O₃^{*} 和 Li₂O^{*} 表示电子探针无法直接测得其含量, 主要根据电气石的标准化学组成反算获得, Li^{*} 原子数是根据反算的 Li₂O^{*} 含量计算而得, r 原子数表示阳离子空位原子数, 电气石 XY₃Z₆(T₆O₈)(BO₃)₃V₃W 中 X 位阳离子包括 Na⁺、Ca²⁺ 和阳离子空位 r。

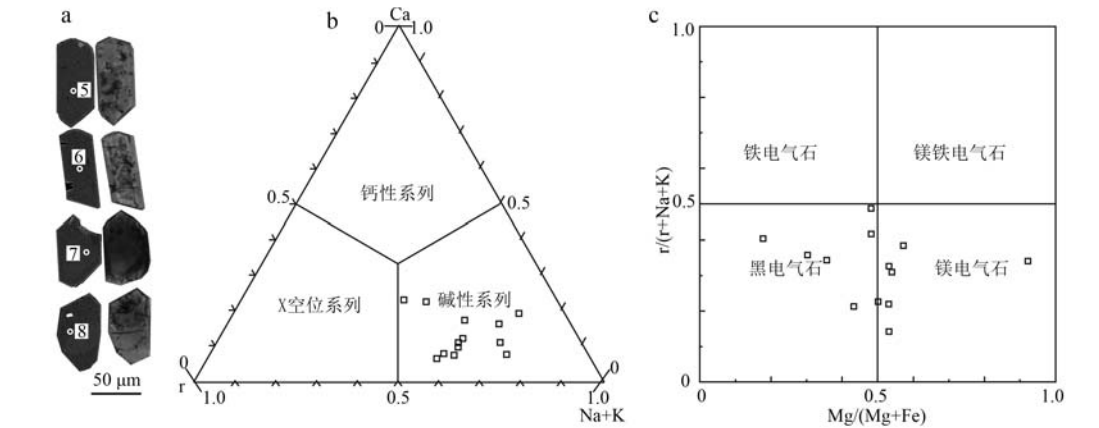


图 3 内蒙古西乌旗寿山沟组一段砂岩碎屑电气石 BSE 图像(a)、主量元素三元分类(b)和二元分类(c)图
(底图据 Henry *et al.*, 2011)
Fig. 3 Backscattered electron (BSE) images (a) and major element composition in the ternary diagram (b) and binary diagram (c) of Shoushangou detrital tourmalines from the Xi Ujimqin area (based map from Henry *et al.*, 2011)

表 3 内蒙古西乌旗早二叠世寿山沟组砂岩尖晶石电子探针数据表

Table 3 Representative chemical composition of the detrital spinels from the Shoushangou Formation sandstone in the Xi Ujimqin, Inner Mongolia																							$w_B/\%$
点号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	NiO	Total	FeO	Fe ₂ O ₃	Si	Ti	Al	Cr	Fe ³⁺	Fe ²⁺	Mn	Mg	Ni	Mg [#]	Cr [#]	
YJ1-1	0.02	0.22	11.42	47.92	32.21	0.50	6.83	0.00	99.11	23.04	10.19	0.00	0.01	0.45	1.28	0.26	0.65	0.01	0.34	0.00	0.35	0.74	
YJ1-3	0.07	0.32	13.56	52.03	17.80	0.30	15.59	0.14	99.82	10.39	8.23	0.00	0.01	0.50	1.29	0.19	0.27	0.01	0.73	0.00	0.73	0.72	
YJ1-4	0.08	1.08	25.21	30.95	28.60	0.27	13.23	0.06	99.48	16.62	13.31	0.00	0.02	0.90	0.74	0.30	0.42	0.01	0.60	0.00	0.59	0.45	
YJ1-5	0.09	0.28	17.00	48.49	19.83	0.27	13.86	0.18	99.99	13.58	6.94	0.00	0.01	0.62	1.19	0.16	0.35	0.01	0.64	0.00	0.65	0.66	
YJ1-6	0.07	0.57	13.08	44.58	28.66	0.33	11.25	0.08	98.62	16.89	13.08	0.00	0.01	0.50	1.15	0.32	0.46	0.01	0.55	0.00	0.54	0.70	
YJ1-7	0.06	0.51	20.73	42.36	21.94	0.33	13.81	0.13	99.86	14.38	8.40	0.00	0.01	0.75	1.03	0.19	0.37	0.01	0.63	0.00	0.63	0.58	
YJ1-9	0.07	0.44	11.82	52.57	21.21	0.30	13.47	0.12	100.00	13.53	8.53	0.00	0.01	0.44	1.33	0.20	0.36	0.01	0.64	0.00	0.64	0.75	
YJ1-10	0.07	0.42	12.62	51.32	20.20	0.28	14.45	0.04	99.39	12.07	9.03	0.00	0.01	0.47	1.29	0.22	0.32	0.01	0.68	0.00	0.68	0.73	
YJ1-11	0.09	0.43	11.00	50.71	24.38	0.39	12.47	0.03	99.51	14.82	10.62	0.00	0.01	0.42	1.30	0.26	0.40	0.01	0.60	0.00	0.60	0.76	
YJ1-12	0.09	0.66	14.08	40.92	29.65	0.34	11.83	0.08	97.64	15.97	15.20	0.00	0.02	0.54	1.05	0.37	0.43	0.01	0.57	0.00	0.57	0.66	
YJ1-13	0.08	0.64	13.16	43.47	28.42	0.31	13.12	0.07	99.27	14.41	15.57	0.00	0.02	0.49	1.10	0.37	0.38	0.01	0.62	0.00	0.62	0.69	
YJ1-15	0.06	0.38	13.35	46.41	27.37	0.39	11.56	0.10	99.62	16.52	12.06	0.00	0.01	0.51	1.18	0.29	0.44	0.01	0.55	0.00	0.56	0.70	
YJ1-17	0.02	0.31	30.57	33.38	21.18	0.30	13.76	0.12	99.62	15.71	6.08	0.00	0.01	1.07	0.78	0.14	0.39	0.01	0.61	0.00	0.61	0.42	
YJ1-18	0.04	0.38	20.81	32.14	33.89	0.37	11.20	0.21	99.04	18.02	17.63	0.00	0.01	0.77	0.80	0.42	0.47	0.01	0.52	0.01	0.53	0.51	
YJ1-19	0.05	0.57	12.44	46.26	28.37	0.44	11.20	0.04	99.37	17.00	12.63	0.00	0.01	0.48	1.19	0.31	0.46	0.01	0.54	0.00	0.54	0.71	
YJ1-20	0.11	0.41	12.96	51.37	19.08	0.33	14.66	0.07	98.98	11.61	8.30	0.00	0.01	0.49	1.29	0.20	0.31	0.01	0.69	0.00	0.69	0.73	
YJ1-21	0.03	0.64	18.86	35.78	32.22	0.36	10.78	0.09	98.75	18.57	15.16	0.00	0.02	0.71	0.90	0.36	0.49	0.01	0.51	0.00	0.51	0.56	
YJ1-23	0.08	0.37	12.50	50.95	20.32	0.29	15.18	0.09	99.77	10.97	10.39	0.00	0.01	0.46	1.27	0.25	0.29	0.01	0.71	0.00	0.71	0.73	
YJ1-24	0.07	0.29	28.39	33.77	23.97	0.34	12.09	0.12	99.04	17.74	6.91	0.00	0.01	1.01	0.81	0.16	0.45	0.01	0.55	0.00	0.55	0.44	
YJ1-26	0.07	0.75	21.07	39.78	21.95	0.28	15.66	0.22	99.08	11.82	11.26	0.00	0.02	0.75	0.95	0.26	0.30	0.01	0.71	0.01	0.70	0.56	
YJ1-27	0.05	0.47	10.27	55.63	19.44	0.38	12.57	0.17	98.98	14.18	5.85	0.00	0.01	0.39	1.44	0.14	0.39	0.01	0.61	0.00	0.61	0.78	
YJ1-28	0.03	0.48	10.59	48.84	24.73	0.30	14.30	0.09	99.36	11.99	14.16	0.00	0.01	0.40	1.23	0.34	0.32	0.01	0.68	0.00	0.68	0.76	
YJ1-30	0.04	0.41	12.10	47.64	26.43	0.32	12.76	0.13	99.83	14.59	13.16	0.00	0.01	0.46	1.20	0.32	0.39	0.01	0.61	0.00	0.61	0.73	
BY1-2	0.05	0.35	14.97	43.23	27.58	0.26	9.30	0.00	95.73	19.20	9.31	0.00	0.01	0.59	1.15	0.24	0.54	0.01	0.46	0.00	0.46	0.66	
BY1-4	0.05	0.41	30.15	32.69	17.75	0.28	14.18	0.13	95.65	13.84	4.35	0.00	0.01	1.09	0.79	0.10	0.35	0.01	0.65	0.00	0.65	0.42	
BY1-5	0.02	0.34	10.97	50.81	23.12	0.23	12.45	0.12	98.07	14.29	9.82	0.00	0.01	0.42	1.32	0.24	0.39	0.01	0.61	0.00	0.61	0.76	
BY1-7	0.06	0.38	13.10	47.75	22.40	0.26	12.03	0.00	95.98	14.80	8.45	0.00	0.01	0.51	1.25	0.21	0.41	0.01	0.59	0.00	0.59	0.71	
BY1-8	0.05	0.25	11.05	48.51	26.18	0.33	9.80	0.09	96.25	17.62	9.51	0.00	0.01	0.44	1.30	0.24	0.50	0.01	0.49	0.00	0.50	0.75	
BY1-9	0.03	0.51	15.11	46.78	20.25	0.27	12.84	0.15	95.93	13.77	7.20	0.00	0.01	0.58	1.21	0.18	0.38	0.01	0.63	0.00	0.62	0.68	
BY1-10	0.07	0.59	15.83	45.01	24.14	0.26	12.93	0.12	98.95	14.92	10.25	0.00	0.01	0.59	1.13	0.24	0.40	0.01	0.61	0.00	0.61	0.66	
BY1-12	0.11	0.58	10.68	47.73	25.87	0.31	11.25	0.16	96.70	15.95	11.03	0.00	0.01	0.42	1.26	0.28	0.45	0.01	0.56	0.00	0.56	0.75	
BY1-14	0.09	0.33	13.27	49.18	18.44	0.25	13.17	0.22	94.95	12.51	6.60	0.00	0.01	0.52	1.29	0.16	0.35	0.01	0.65	0.01	0.65	0.71	
BY1-15	0.10	0.30	12.59	49.61	21.48	0.28	11.13	0.11	95.59	15.77	6.35	0.00	0.01	0.50	1.32	0.16	0.44	0.01	0.56	0.00	0.56	0.73	
BY1-16	0.09	0.23	31.90	31.43	20.58	0.21	12.20	0.08	96.71	17.50	3.41	0.00	0.01	1.15	0.76	0.08	0.45	0.01	0.55	0.00	0.55	0.40	
BY1-17	0.04	0.49	12.87	46.50	26.78	0.32	9.47	0.07	96.53	18.83	8.83	0.00	0.01	0.51	1.23	0.22	0.53	0.01	0.47	0.00	0.47	0.71	
BY1-18	0.06	0.47	16.11	47.13	19.02	0.32	13.12	0.24	96.46	13.50	6.13	0.00	0.01	0.61	1.21	0.15	0.37	0.01	0.63	0.01	0.63	0.66	
BY1-19	0.07	0.29	15.04	47.14	21.17	0.22	11.27	0.22	95.43	15.61	6.19	0.00	0.01	0.59	1.24	0.15	0.43	0.01	0.56	0.01	0.56	0.68	
BY1-20	0.07	0.38	20.70	42.66	20.75	0.22	12.41	0.14	97.33	15.72	5.99	0.00	0.01	0.77	1.07	0.13	0.42	0.01	0.59	0.00	0.58	0.58	
BY1-21	0.07	0.23	13.38	50.93	19.77	0.27	12.78	0.04	97.46	13.95	6.46	0.00	0.01	0.51	1.31	0.16	0.38	0.01	0.62	0.00	0.62	0.72	
BY1-23	0.03	0.30	12.88	51.54	17.29	0.18	13.22	0.05	95.50	12.63	5.18	0.00	0.01	0.50	1.35	0.13	0.35	0.00	0.65	0.00	0.65	0.73	
BY1-24	0.06	0.42	26.66	37.02	19.01	0.26	12.57	0.08	96.08	16.06	3.28	0.00	0.01	0.98	0.91	0.08	0.42	0.01	0.58	0.00	0.58	0.48	
BY1-25	0.03	0.51	10.92	47.27	25.99	0.24	11.42	0.06	96.44	15.60	11.55	0.00	0.01	0.43	1.25	0.29	0.44	0.01	0.57	0.00	0.57	0.74	
BY1-26	0.05	0.35	10.72	52.68	18.36	0.34	13.56	0.05	96.10	11.93	7.14	0.00	0.01	0.42	1.38	0.18	0.33	0.01	0.67	0.00	0.67	0.77	
BY1-28	0.12	0.25	18.69	45.39	17.12	0.21	14.54	0.04	96.36	11.85	5.85	0.00	0.01	0.70	1.14	0.14	0.31	0.01	0.69	0.00	0.69	0.62	
BY1-29	0.06	0.73	24.00	37.99	18.82	0.17	12.33	0.14	94.25	15.71	3.46	0.00	0.02	0.91	0.96	0.08	0.42	0.00	0.59	0.00	0.59	0.52	

注: FeO*表示全铁, Fe₂O₃根据尖晶石的化学计量比计算。

TiO₂ 的含量变化较大,一段为 0.22%~1.08%,二段为 0.23%~0.75%,大多数超过 0.2%,为火山岩成因(图 4c)。

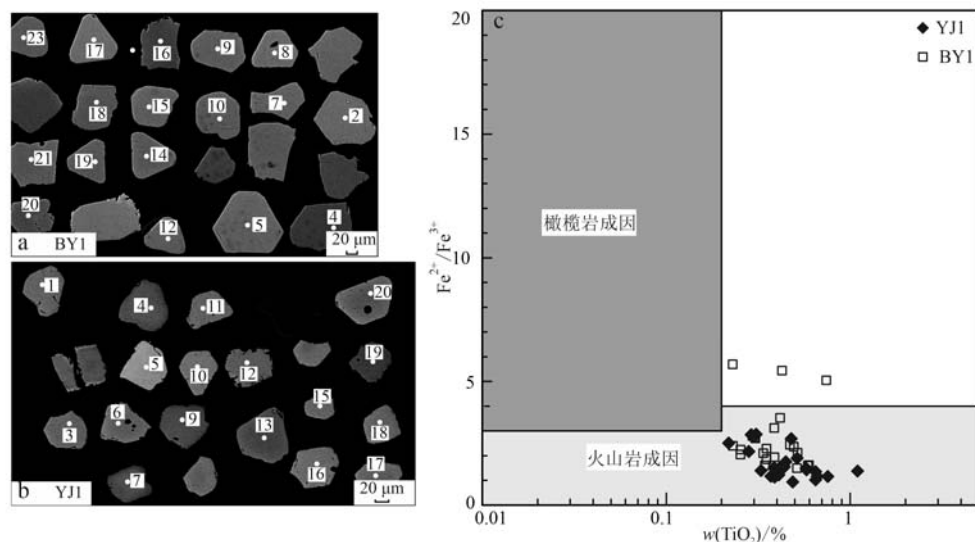


图 4 寿山沟组砂岩碎屑尖晶石背散射图像(a、b)和成因类型[c, 据 Lenaz 等(2000)]

Fig. 4 Backscattered electron images (a, b) and genetic type of detrital spinel from the Shoushangou Formation sandstones (c, after Lenaz *et al.*, 2000)

3.2.3 石榴子石

石榴子石样品的电子探针成分分析结果列于表 4。背散射图像显示,寿山沟组二段砂岩(YJ1)石榴子石多呈粉色,呈次棱角状,成分均一,无明显的环带结构(图 5a)。根据石榴子石的电子探针分析结果,其主要划分为 3 类:多数石榴子石主要为铁铝榴石(Alm)且具有较高的镁铝榴石(Prp)和钙铝榴石(Grs)含量,少数石榴子石具有较高的铁铝榴石和镁铝榴石含量,极个别铁铝榴石和钙铝榴石含量高(图 5b、5c)。

4 物源区及构造意义

基于交错层理的古水流分析可以指示沉积物的供给方向(Potter and Pettijohn, 1977; Miall, 2000)。校正后寿山沟组一段砂岩发育的交错层理(图 2c)指示其物源主要来自于南侧(图 1b)。

4.1 源区岩石类型

黑电气石(锂电气石系列)源自花岗岩,以富铁为特征,电气石形成于岩体分异演化的晚期阶段;镁电气石主要来自于变沉积岩(Henry and Guidotti, 1985),在粗粒碎屑岩的成岩过程中,变质作用使得

流体进入颗粒孔隙中,形成电气石。根据 Al-Fe-Mg 图解划分,寿山沟组一段电气石物源以贫锂花岗岩类伴生伟晶岩和细晶岩(B 区域)、变质板岩和变质砂岩(D 和 E 区域)为主(图 6a)。Ca-Fe-Mg 图解则表明主要来自于贫锂花岗岩类伴生伟晶岩和细晶岩(区域 2)、贫钙变质板岩、变质砂岩和电气石石英岩(区域 4)(图 6b)。

根据尖晶石中 TiO₂、Cr 和 Al 的相互关系,划分出不同岩浆岩的 TiO₂ 和 Cr/(Cr+Al) 特征(图 7a),寿山沟组一段和二段尖晶石位于岛弧玄武岩和洋中脊玄武岩区域。受熔岩成分、八面体占位和冷却速率影响,不同环境的尖晶石特征明显,而尖晶石中的 TiO₂ 和 Al₂O₃ 含量与熔岩成分具有很好的相关性(Kamenetsky *et al.*, 2001)。在以 TiO₂ 和 Al₂O₃ 含量为标准的判别图解中,寿山沟组一段和二段尖晶石主要位于岛弧玄武岩,少量位于洋中脊玄武岩区域(图 7b)。Fe³⁺-Cr-Al 图解则显示,大部分尖晶石落于岛弧玄武岩、洋中脊和大洋溢流玄武岩以及大陆溢流玄武岩的叠合区域(图 7c)。

基于石榴子石的物源区判别图解(图 8),寿山沟组二段样品 YJ1 主要来自于高级变基性岩,少部分为麻粒岩相和角闪岩相的变沉积岩和中酸性火山岩。

表 4 内蒙古西乌旗早二叠世寿山沟组砂岩石榴子石电子探针数据表

 $w_B/\%$

Table 4 Representative chemical composition of the detrital garnets from the Shoushangou Formation sandstone in the Xi Ujimqin, Inner Mongolia

分析点号	SiO ₂	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Si	Ti	Cr	Al	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Prp	Alm	Sps	Grs	And	Uv
YJ1-1	39.01	0.03	0.06	21.31	21.19	0.44	8.32	9.59	0.01	0.01	99.97	2.980	0.002	0.003	1.925	1.274	0.080	0.028	0.948	0.785	0	0	31.80	40.92	0.95	22.15	4.02	0.17
YJ1-2	38.85	0.04	0.06	21.58	21.05	0.44	7.35	10.15	0.01	0.00	99.51	2.987	0.002	0.004	1.959	1.312	0.042	0.029	0.842	0.836	0	0	28.19	42.87	0.96	25.69	2.12	0.18
YJ1-3	39.21	0.01	0.15	21.26	20.77	0.47	8.02	10.11	0.01	0.00	99.99	2.993	0.001	0.009	1.918	1.256	0.070	0.030	0.913	0.827	0	0	30.55	40.77	1.01	23.71	3.52	0.44
YJ1-4	38.42	0.05	0.00	21.16	21.32	0.46	7.68	10.66	0.04	0.01	99.80	2.953	0.003	0.000	1.926	1.266	0.105	0.030	0.880	0.878	0	0	29.79	39.45	1.02	24.41	5.33	0.00
YJ1-5	39.49	0.06	0.05	20.96	21.06	0.47	7.99	9.72	0.03	0.00	99.84	3.018	0.004	0.003	1.894	1.275	0.072	0.030	0.910	0.796	0	0	30.92	41.03	1.03	23.22	3.64	0.16
YJ1-6	39.38	0.00	0.07	21.19	20.64	0.52	8.26	9.60	0.02	0.00	99.67	3.008	0.000	0.004	1.914	1.253	0.065	0.034	0.940	0.786	0	0	31.69	40.68	1.14	22.97	3.31	0.21
YJ1-7	39.25	0.04	0.11	21.84	20.61	0.49	8.24	8.81	0.00	0.01	99.40	3.005	0.002	0.006	1.972	1.306	0.013	0.032	0.940	0.723	0	0	31.48	43.25	1.07	23.21	0.67	0.33
YJ1-8	39.11	0.07	0.07	21.95	20.74	0.46	7.69	9.32	0.04	0.00	99.46	3.000	0.004	0.004	1.985	1.324	0.006	0.030	0.879	0.766	0	0	29.39	44.00	1.00	25.08	0.32	0.21
YJ1-9	39.01	0.03	0.07	21.87	20.25	0.46	7.83	9.54	0.00	0.00	99.06	2.999	0.002	0.004	1.983	1.291	0.011	0.030	0.897	0.786	0	0	29.94	42.84	1.00	25.44	0.57	0.21
YJ1-10	38.49	0.02	0.01	21.24	20.71	0.46	8.03	10.33	0.03	0.02	99.34	2.962	0.001	0.001	1.934	1.243	0.090	0.030	0.921	0.852	0	0	31.10	39.15	1.00	24.17	4.54	0.04
YJ1-11	39.24	0.05	0.05	21.24	21.01	0.46	8.06	9.82	0.05	0.00	99.97	2.997	0.003	0.003	1.917	1.271	0.071	0.030	0.917	0.804	0	0	30.79	41.23	0.99	23.26	3.59	0.14
YJ1-12	39.05	0.00	0.06	21.74	20.15	0.44	7.55	9.91	0.03	0.01	98.93	3.008	0.000	0.004	1.975	1.287	0.011	0.029	0.866	0.818	0	0	29.04	42.60	0.96	26.65	0.58	0.18
YJ1-13	38.93	0.04	0.06	21.76	20.46	0.47	7.79	9.49	0.03	0.01	99.04	2.997	0.002	0.004	1.976	1.299	0.018	0.031	0.894	0.783	0	0	29.84	43.00	1.02	25.03	0.92	0.19
YJ1-14	39.32	0.00	0.03	21.04	20.85	0.48	8.68	9.18	0.00	0.00	99.57	3.005	0.000	0.002	1.902	1.252	0.081	0.031	0.988	0.751	0	0	33.32	40.32	1.04	21.13	4.10	0.10
YJ1-15	39.53	0.10	0.02	22.44	23.61	0.18	12.60	1.00	0.00	0.00	99.47	2.990	0.005	0.001	2.000	1.490	0.003	0.011	1.420	0.081	0	0	47.50	49.41	0.38	2.51	0.14	0.07
YJ1-16	38.97	0.06	0.07	21.77	20.91	0.51	7.66	9.21	0.02	0.00	99.17	3.000	0.003	0.004	1.976	1.332	0.015	0.033	0.879	0.759	0	0	29.39	44.12	1.11	24.44	0.73	0.22
YJ1-17	38.88	0.00	0.05	21.05	21.03	0.49	8.11	9.77	0.00	0.00	99.37	2.988	0.000	0.003	1.914	1.267	0.084	0.032	0.930	0.804	0	0	31.11	40.92	1.06	22.52	4.24	0.15
YJ1-18	38.95	0.03	0.08	21.84	20.69	0.45	7.27	10.18	0.03	0.00	99.52	2.992	0.002	0.005	1.979	1.309	0.020	0.029	0.832	0.838	0	0	27.81	43.19	0.98	26.76	1.00	0.25
YJ1-19	37.78	0.11	0.01	20.98	27.95	0.39	2.15	10.40	0.05	0.00	99.81	3.001	0.006	0.000	1.967	1.835	0.022	0.026	0.255	0.886	0	0	8.55	60.86	0.88	28.56	1.12	0.02
YJ1-20	38.95	0.02	0.04	21.34	20.48	0.39	8.44	10.11	0.02	0.00	99.78	2.975	0.001	0.003	1.927	1.225	0.083	0.025	0.961	0.827	0	0	32.30	39.06	0.84	23.47	4.21	0.13
YJ1-21	38.60	0.10	0.02	21.06	21.34	0.49	8.10	9.75	0.03	0.00	99.50	2.969	0.006	0.001	1.917	1.279	0.094	0.032	0.928	0.803	0	0	31.26	40.61	1.08	22.21	4.77	0.07
YJ1-22	39.30	0.01	0.01	21.67	20.42	0.41	7.79	9.38	0.04	0.00	99.04	3.021	0.000	0.001	1.964	1.300	0.012	0.027	0.893	0.773	0	0	30.11	42.92	0.91	25.39	0.63	0.04
YJ1-23	39.23	0.08	0.07	20.99	20.72	0.48	7.73	10.56	0.03	0.01	99.88	3.001	0.005	0.004	1.899	1.244	0.081	0.031	0.882	0.865	0	0	29.72	40.06	1.05	24.86	4.11	0.20
YJ1-24	39.42	0.07	0.08	21.03	20.87	0.49	7.88	10.08	0.01	0.00	99.92	3.011	0.004	0.005	1.899	1.261	0.072	0.032	0.897	0.825	0	0	30.34	40.66	1.07	24.03	3.65	0.25
YJ1-25	39.00	0.13	0.05	21.56	20.65	0.47	7.43	9.67	0.02	0.01	98.98	3.007	0.008	0.003	1.961	1.313	0.019	0.031	0.854	0.798	0	0	28.72	43.38	1.04	25.78	0.95	0.14
YJ1-26	38.88	0.09	0.04	22.10	20.84	0.44	7.76	9.37	0.02	0.00	99.54	2.981	0.005	0.002	1.998	1.324	0.012	0.029	0.887	0.770	0	0	29.76	43.46	0.96	25.12	0.59	0.12
YJ1-27	38.79	0.00	0.01	22.01	27.60	0.32	10.14	0.64	0.00	0.01	99.52	2.989	0.000	0.000	2.000	1.770	0.009	0.021	1.165	0.053	0	0	38.98	58.57	0.69	1.27	0.47	0.02
YJ1-28	38.97	0.06	0.04	21.83	28.36	0.27	8.76	1.44	0.02	0.00	99.76	3.010	0.004	0.003	1.989	1.839	0.000	0.018	1.008	0.120	0	0	33.78	61.62	0.60	3.87	0.00	0.14
YJ1-29	39.21	0.02	0.07	21.11	20.90	0.48	8.13	10.00	0.02	0.01	99.93	2.995	0.001	0.004	1.907	1.253	0.082	0.031	0.926	0.818	0	0	31.06	40.46	1.03	23.10	4.14	0.21
YJ1-30	38.87	0.04	0.03	21.87	20.48	0.43	7.65	9.62	0.04	0.00	99.03	2.994	0.002	0.002	1.987	1.306	0.013	0.028	0.878	0.794	0	0	29.32	43.24	0.93	25.76	0.66	0.10

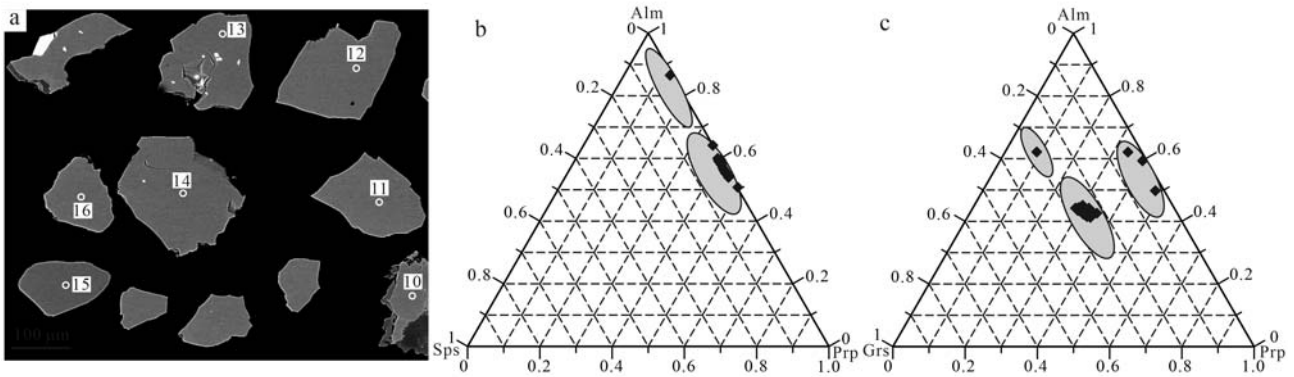


图5 西乌旗寿山沟组二段砂岩碎屑石榴子石背散射图像(a)和成分三角图(b、c, 据 Mange 和 Morton, 2007)

Fig. 5 Backscattered electron images (a) and chemical composition in ternary diagrams (b and c, according to Mange and Morton, 2007) of detrital garnets in Shoushangou Formation from the Xi Ujimqin area

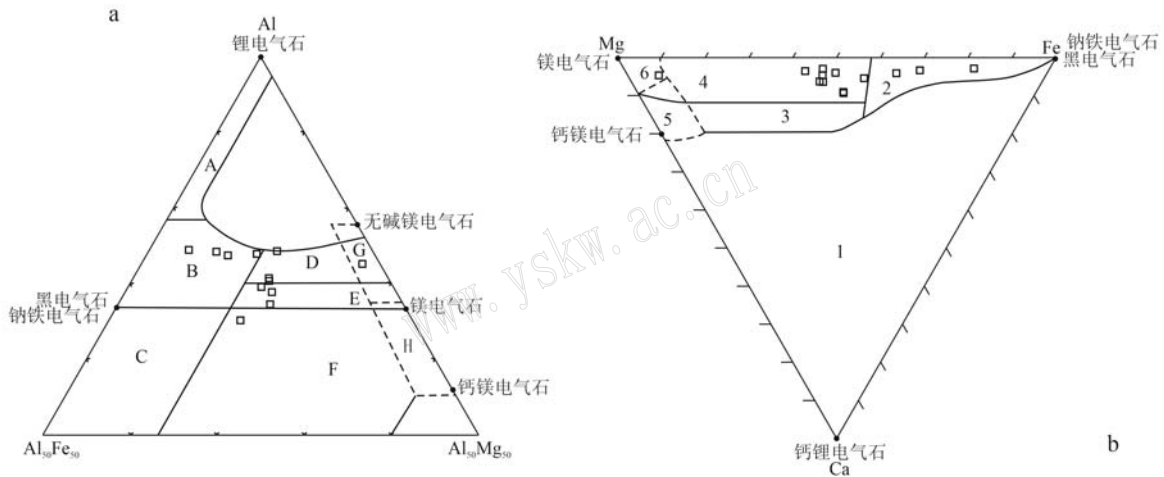


图6 内蒙古西乌旗寿山沟组砂岩碎屑电气石成分划分图解(底图据 Henry 和 Guidotti, 1985)

Fig. 6 Composition of detrital tourmaline from the Xi Ujimqin (after Henry and Guidotti, 1985)

A—富锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩；B—贫锂花岗岩类及其关联的伟晶岩和细晶岩；C—富铁电气石岩石(蚀变花岗岩)；D—伴生铝饱和和相共存的变质板岩和变质砂岩；E—不伴生铝饱和和相的变质板岩和变质砂岩；F—富铁电气石石英岩、钙质硅酸盐岩和变质板岩；G—低钙变超基性岩和富铬、钒变沉积岩；H—变碳酸盐岩和变质辉石岩；1—富锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩；2—贫锂花岗岩类伴生伟晶岩和细晶岩；3—富钙变质板岩、变质砂岩和钙质硅酸盐岩；4—贫钙变质板岩、变质砂岩和电气石石英岩；5—变质碳酸盐岩；6—变超基性岩

A—Li-rich granitoid, pegmatites and aplites; B—Li-poor granitoids and their associated pegmatites and aplites; C—Fe-rich tourmaline rocks (hydrothermally altered granites); D—metaslates and metapsammities coexisting with an Al-saturating phase; E—metaslates and metapsammities not coexisting with an Al-saturating phase; F—Fe-rich quartz-tourmaline rocks, calc-silicate rocks, and metaslates; G—Low-Ca metaultrabasic rocks and Cr, V-rich metasediments; H—metacarbonates and metapyroxenites; 1—Li-rich granitoid, pegmatites and aplites; 2—Li-poor granitoids and associated pegmatites and aplites; 3—Ca-rich metaslates, metapsammities, and calc-silicate rocks; 4—Ca-poor metaslates, metapsammities, and quartz-tourmaline rocks; 5—metacarbonates; 6—metaultrabasic rocks

4.2 源岩

猴头庙附近的花岗岩、闪长岩等年龄为 330~295 Ma(刘建峰等, 2009; 刘锐等, 2016; 刘敏等, 2017; Liu *et al.*, 2018), 前进场西部花岗岩的侵入年龄为 320~287 Ma(Wu *et al.*, 2011; 王新宇等, 2013), 迪彦庙蛇绿岩中斜长花岗岩年龄为 328.6 ± 2.1 Ma 和 327.1 ± 2.1 Ma (Li *et al.*, 2018)。这些花

岗岩类可能为寿山沟组一段的物源区。同时阿木山组、本巴图组以及下伏锡林郭勒杂岩中分布的变沉积岩也可能是电气石的来源。

由于尖晶石主要来自于基性-超基性岩浆岩, 且呈次棱角状-次圆状, 说明部分经历搬运。根据研究区的区域岩石类型分布, 研究区南的迪彦庙蛇绿岩包括白音布拉拉和南部舜来可吐蛇绿岩, 主要

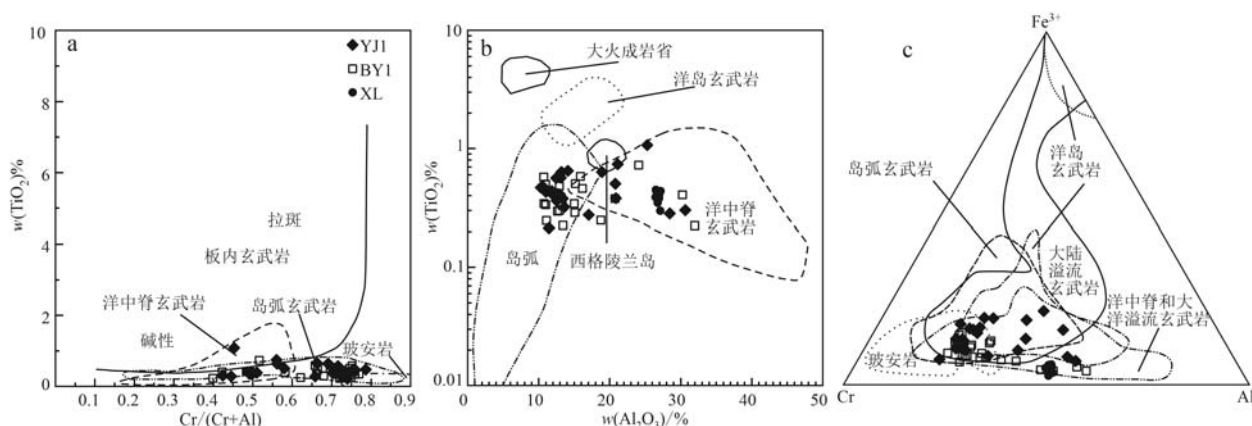


图7 西乌旗早二叠世寿山沟组尖晶石源岩构造背景判别图

Fig. 7 Discrimination diagrams of tectonic setting for detrital spinels from the Shoushangou Formation in the Xi Ujimqin area a— $\text{TiO}_2 - \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ 图解 (Arai, 1992); b— $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解 (Kamenetsky *et al.*, 2001); c— $\text{Fe}^{3+} - \text{Cr} - \text{Al}$ 图解 (Barnes and Roeder, 2001); XL(迪彦庙蛇绿岩)数据引自 Song 等 (2015)

a— $\text{TiO}_2 - \text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ diagram (Arai, 1992); b— $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram (after Kamenetsky *et al.*, 2001); c— $\text{Fe}^{3+} - \text{Cr} - \text{Al}$ diagram (Barnes and Roeder, 2001); data of Diyanmiao ophiolite (XL) was adopted from Song *et al.*, 2015

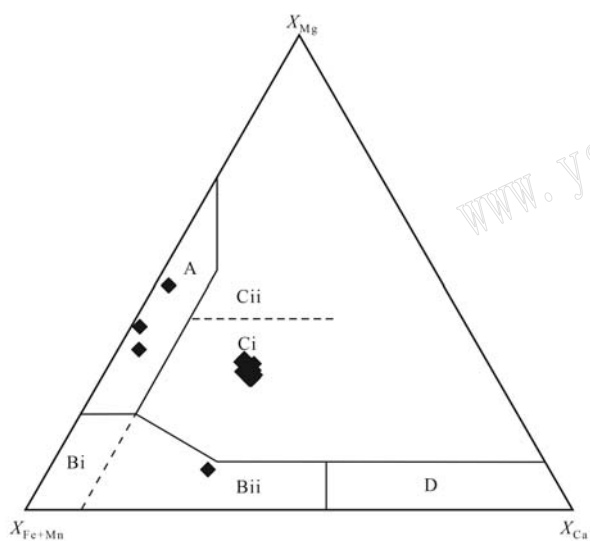


图8 西乌旗寿山沟组砂岩碎屑石榴子石物源岩石判别图解 (Mange and Morton, 2007)

Fig. 8 The provenance discriminant diagram of detrital garnets in sandstone from the Shoushangou Formation in the Xi Ujimqin area (Mange and Morton, 2007)

A—高级麻粒岩相变沉积岩、紫苏花岗岩和来源于地壳深部的中酸性火山岩; Bi—中酸性火山岩; Bii—角闪岩相变沉积岩; Ci—高级变基性岩; Cii—超基性岩; D—接触交代变质岩、低级变基性岩和超高温钙硅酸盐麻粒岩

A—high-grade granulite-facies metasediments, charnokites and intermediate-to-acidic volcanic rocks sourced from deep crust; Bi—intermediate-acidic volcanic rocks; Bii—amphibolites-facies metasediments; Ci—high-grade metabasic rocks; Cii—ultrabasic rocks; D—metasomatic rocks, low-grade metabasic rocks, and ultra-high temperature calc-silicate granulites

由橄榄岩、玄武岩、细碧岩、角斑岩等组成 (李英杰等, 2013), 其具有 MORB 特征, 为寿山沟组的物源区岩石 (图 7b)。西乌旗本巴图组的玄武岩 (刘建峰, 2009; 李瑞杰, 2013) 形成于岩浆弧环境。另外, 锡林郭勒杂岩中发育的斜长角闪岩 (原岩为变基性火山岩) 形成于岛弧环境 (Li *et al.*, 2014; 康健丽等, 2016)。这些基性岩浆岩都可能是寿山沟组的物源区。

石榴子石指示物源主要来自于高级变基性岩, 少量为变沉积岩。根据研究区岩石地层, 本巴图组和阿木山组岩石轻微变质。而锡林浩特杂岩由一套片麻岩夹层状斜长角闪岩、磁铁石英岩和变粒岩等变质岩组成, 变质程度达到角闪岩相, 其原岩包括基性火山岩 (玄武岩)、杂砂岩等 (葛梦春等, 2011; 孙俊俊等, 2012; 周文孝等, 2013)。因此, 石榴子石主要来自于锡林郭勒杂岩。

寿山沟组的电气石、尖晶石和石榴子石物源区岩石类型表明, 研究区南部的花岗岩类、阿木山组沉积岩、本巴图组的基性火山岩和沉积岩、蛇绿岩和锡林郭勒杂岩等为潜在的物源区。但阿木山组发育的基性火山岩形成于大陆裂谷环境 (Zhu *et al.*, 2017), 未为尖晶石提供物源, 故寿山沟组的物源区不包括阿木山组。因此, 寿山沟组物源来自南部的花岗岩类、本巴图组、锡林郭勒杂岩和迪彦庙蛇绿岩等。根据寿山沟组重矿物组成和物源分析结果, 从寿山沟组一段至二段, 物源区岩石从花岗岩、迪彦庙蛇绿岩、本巴图组玄武岩和锡林郭勒杂岩逐渐转

变为迪彦庙蛇绿岩、本巴图组玄武岩和锡林郭勒杂岩,且锡林郭勒杂岩的含量逐渐增加。

4.3 构造意义

关于早二叠世西乌旗地区的构造环境一直存在争议:根据沉积序列和岩石组合判断其属于裂谷环境(徐备等, 2014; Zhao *et al.*, 2017; 张焱杰等, 2018), 辉绿岩地球化学特征指示其为裂谷环境(Zhu *et al.*, 2017), 花岗岩等地球化学特征指示其为古亚洲洋向北俯冲的岛弧环境(王新宇等, 2013; 刘锐等, 2016; 刘敏等, 2017; 王金芳等, 2018), 西乌旗猴头庙和前进场花岗岩指示其为后碰撞伸展环境(Wang *et al.*, 2018), 根据寿山沟组砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄及物源分析推测其为弧后盆地(Wang *et al.*, 2020)。

根据上述物源区岩石类型的成因分析, 寿山沟组物源区猴头庙部分花岗岩(年龄为 330~282 Ma)形成于岛弧(刘建峰等, 2009; 王新宇等, 2013, 刘敏等, 2017)。迪彦庙蛇绿岩主要包括白音布拉拉和南部舜来可吐蛇绿岩, 主要由橄榄岩、玄武岩、细碧岩、角斑岩等组成(李英杰等, 2013), 蛇绿岩中达哈特玄武岩锆石 U-Pb 年龄为 333.4 ± 8.5 Ma, 蛇绿岩中辉长岩和玄武岩的锆石 U-Pb 年龄为 346 ± 2 Ma 和 304 ± 4 Ma(Song *et al.*, 2015)。白音布拉格蛇绿岩中辉长岩、玄武岩岩石地球化学特征指示达哈特玄武岩兼具洋中脊和岛弧双重特征, 更像洋中脊, 与马里亚纳前弧玄武岩相一致(李英杰等, 2013, 2018; Li *et al.*, 2018)。西乌旗本巴图组火山岩由玄武岩、安山岩和流纹岩等组成, 形成时代为 336 ± 2 Ma(李瑞杰, 2013)或 318 ± 3 Ma(刘建峰, 2009), 形成于岩浆弧环境。另外, 锡林郭勒杂岩中发育斜长角闪岩(原岩为变基性火山岩)年龄为 334~319 Ma, 形成于岛弧环境(Li *et al.*, 2014, 2017; 康健丽等, 2016)。

从寿山沟组一段至二段的物源区岩石成因分析, 源区岩石形成于岛弧环境或弧前环境, 源区岩石年龄 330~282 Ma。西乌旗东部寿山沟组下部凝灰岩年龄为 320.1 ± 0.82 Ma, 上部流纹岩年龄为 280.15 ± 0.76 Ma(Wang *et al.*, 2020), 寿山沟组沉积物年龄与部分物源区的年龄重叠, 因此寿山沟组沉积物形成于岛弧相关盆地。寿山沟组沉积物来源于南部的岛弧和弧前构造单元, 同时根据研究区地质图中蛇绿岩、锡林郭勒杂岩以及花岗岩的时空配

置关系(图 1), 认为寿山沟组沉积物形成于弧后盆地(图 9), 为宝力道岛弧-增生杂岩的重要组成部分。

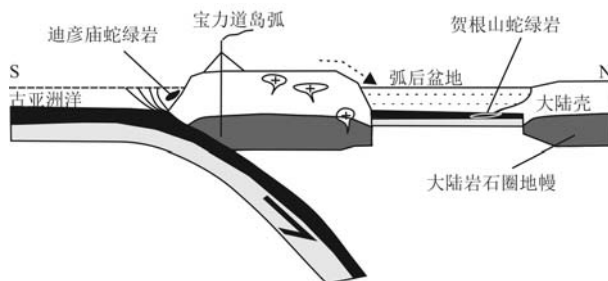


图 9 西乌旗寿山沟组原型盆地示意图

Fig. 9 Sketch modeling of Shoushangou Formation depositional tectonic setting in Xi Ujimqin area

区域资料显示, 西乌旗东北蒙西地 1 井寿山沟组发育近 50 m 安山岩(施立志等, 2020), 哈日根台以东 50 km 的罕乌拉地区寿山沟组一段发育凝灰岩, 寿山沟组二段发育流纹岩和火山碎屑岩(Wang *et al.*, 2020), 可见寿山沟组的岩石组合除了陆源碎屑岩之外, 还发育一定比例的熔岩和火山碎屑岩。根据塔宾庙林场剖面遗迹化石的组合、种属等, 确定寿山沟组沉积环境为半深海环境(黄欣等, 2013)。根据塔宾庙林场剖面的岩石类型、沉积构造以及化石组合, 确定寿山沟组的海底扇沉积环境, 并根据岩层厚度和砂泥比等将寿山沟组的沉积环境划分为内扇、中扇和外扇亚相(公繁浩等, 2013b)。因此, 寿山沟组的岩石组成和沉积岩相古地理等特征与日本弧后盆地、西太平洋 Lau 弧后盆地等类似(Masuda, 1994; Rothwell *et al.*, 1994; Sierra-Rojas *et al.*, 2016)。

古亚洲洋的闭合时限争论已久, 一种观点认为在晚泥盆世关闭, 之后发育陆内裂谷等沉积物(徐备等, 2014; Zhao *et al.*, 2017; 张焱杰等, 2018); 另外一种观点则认为古亚洲洋在晚二叠世—早三叠世俯冲结束(Lu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Xiao *et al.*, 2020)。寿山沟组重矿物为近源搬运, 尖晶石主要来自岛弧环境和弧前环境岩浆岩, 石榴子石主要来自岛弧性质的岩石。根据区域对比, 源区的岩石时代为早石炭世—早二叠世, 而且寿山沟组形成于弧后盆地, 这进一步说明古亚洲洋在早石炭世—早二叠世尚未闭合, 这为研究古亚洲洋的演化提供了有利的证据。

5 结论

西乌旗早二叠世寿山沟组砂岩的重矿物主要由锆石、尖晶石和石榴子石等组成, 其特征以及构造指示意义为:

(1) 电气石主要来自于贫锂花岗岩和变沉积岩, 物源区为周缘花岗岩和下伏地层的变沉积岩; 尖晶石主要来自于岛弧和洋中脊玄武岩类(蛇绿岩、锡林郭勒杂岩和本巴图组); 石榴子石主要源自高级变基性岩, 少量来自变沉积岩和变火山岩, 主要来自锡林郭勒杂岩;

(2) 重矿物综合分析表明, 西乌旗早二叠世寿山沟组形成于弧后盆地, 说明古亚洲洋在早二叠世尚未闭合。

致谢 本文电子探针测试分析在中国地质科学院地质研究所重点实验室完成, 感谢毛小红老师的帮助! 同时对提出修改意见的匿名评审专家也表示感谢!

References

- Arai S. 1992. Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry[J]. *Mineralogical Magazine*, 56: 173~184.
- Barnes S J and Roeder P L. 2001. The range of spinel compositions in terrestrial mafic and ultramafic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42: 2 279~2 302.
- Brandelik A. 2009. CALCMIN—An EXCEL™ visual basic application for calculating mineral structural formulae from electron microprobe analyses[J]. *Computers & Geosciences*, 35: 1 540~1 551.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Nei Mongol Autonomous Region. 1996. Stratigraphy (lithostratic) of Nei Mongol Autonomous Region resources [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 179~287 (in Chinese).
- Chen B, Jahn B M, Wilde S, *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328: 157~182.
- Chew D, O'Sullivan G, Garacciolo L, *et al.* 2020. Sourcing the sand: Accessory mineral fertility, analytical and other biases in detrital U-Pb provenance analysis [J]. *Earth-Science Review*, 202: 1030993.
- Garzanti E, Andò S and Vezzoli G. 2009. Grain-size dependence of sediment composition and environmental bias in provenance studies[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 277(3/4): 422~432.
- Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, Yu Yang, *et al.* 2011. Dissolution and supracrustal rocks dating of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 182~195 (in Chinese with English abstract).
- Gong Fanhao, Huang Xin, Chen Shuwang, *et al.* 2013a. Organic geochemical characteristics of source rocks in Shoushangou Formation, Xi Ujimqin Banner of Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(8): 1 322~1 328 (in Chinese with English abstract).
- Gong Fanhao, Huang Xin, Zheng Yuejuan, *et al.* 2013b. Significance of the submarine fan of Lower Permian Shoushangou Formation in west Ujimqin-Qi, Inner Mongolia[J]. *Geology and Resources*, 22(6): 478~483 (in Chinese with English abstract).
- Haughton P D W, Barker S P, McCaffrey W D. 2003. 'Linked' debrites in sand-rich turbidite systems—Origin and significance[J]. *Sedimentology*, 50(3): 459~482.
- Henry D J, Novák M, Hawthorne F C, *et al.* 2011. Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals[J]. *American Mineralogist*, 96: 895~913.
- Henry D J and Guidotti C V. 1985. Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: An example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine[J]. *American Mineralogist*, 70: 1~15.
- Huang Xin, Gong Fanhao, Zheng Yuejuan, *et al.* 2013. The discovery of trace fossils of Early Permian Shoushangou Formation in Xi Ujimqin Banner of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(8): 1 283~1 288 (in Chinese with English abstract).
- Kamenetsky V S, Crawford A J and Meffer S. 2001. Factors controlling chemistry of magmatic spinel: An empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42: 655~671.
- Kang Jianli, Xiao Zhibin, Wang Huichu, *et al.* 2016. Late Paleozoic subduction of the Paleo-Asic Ocean: Geochronological and geochemical evidence from the Meta-basic volcanic of Xilinhaot, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 383~397 (in Chinese with English abstract).
- Lenaz D, Kamenetsky V S, Crawford A J, *et al.* 2000. Melt inclusions in detrital spinel from the SE Alps (Italy-Slovenia): A new approach to provenance studies of sedimentary basins[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139: 748~758.

- Li D P, Chen Y L, Wang Z, *et al.* 2012. Paleozoic sedimentary record of the Xing-Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenance and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt [J]. Chinese Science Bulletin, 57(7): 776~785.
- Li Jinyi, Liu Jianfeng, Qu Junfeng, *et al.* 2019. Major geological features and crustal tectonic framework of Northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 35(10): 2 989~3 016 (in Chinese with English abstract).
- Li Ruijie. 2013. The Research of Geochemical Characteristics, Geochronology and Geology Significance of the Benbatu Formation Volcanic Rocks of the Xiwuqi Area in Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 1~61(in Chinese with English abstract).
- Li Y J, Wang J F, Wang G H, *et al.* 2018. Discovery of the plagiogranites in the Diyanmiao ophiolite, Southeastern Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China and its tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 92(2): 568~585.
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of Baiyinbulageophiolite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(8): 2 719~2 730 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, *et al.* 2015. Recognition of Meilaotewula ophiolite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(5): 1 461~1 470 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Wang Genhou, *et al.* 2018. Discovery and significance of the Dabate fore-arc basalts from the Diyanmiao ophiolite in Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(2): 469~482 (in Chinese with English abstract).
- Li Y L, Brouwer F M, Xiao W J, *et al.* 2017. Subduction-related metasomatic mantle source in the eastern Central Asian orogenic belt: Evidence from amphibolites in the Xilingol complex, Inner Mongolia, China[J]. Gondwana Research, 43: 193~212.
- Li Y L, Zhou H W, Brouwer F M, *et al.* 2014. Nature and timing of the Solonker suture of the Central Asian Orogenic Belt: Insights from geochronology and geochemistry of basic intrusions in the XilinGol Complex, Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Earth Sciences, 103: 41~60.
- Liu C F, Xu M T, Zhou Z G, *et al.* 2018. Magmatic history during late Carboniferous to early Permian in the North of the central Xing'an-Mongolia Orogenic Belt: A case study of the Houtoumiaol pluton, Inner Mongolia[J]. International Geology Review, 60: 1 918~1 939.
- Liu Jianfeng. 2009. Late Paleozoic Magmatism and Its Constraints on Regional Tectonic Evolution in Linxi-Dongwuqi Area Inner Mongolia [D]. Changchun: Jilin University, 1~142 (in Chinese).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhang Xingzhou, *et al.* 2009. Geochemical characteristic of Carboniferous quartz-diorite in the southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. Acta Geologica Sinica, 83(3): 365~376 (in Chinese with English abstract).
- Liu Min, Zhao Hongtao, Zhang Da, *et al.* 2017. Chronology, geochemistry and tectonic implications of Late Palaeozoic intrusions from South of Xiwuqi, Inner Mongolia[J]. Earth Science, 42(4): 527~548 (in Chinese with English abstract).
- Liu Rui, Yang Zhen, Xu Qidong, *et al.* 2016. Zircon U-Pb ages, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Hercynian granitoids from the southern segment of the Da Hinggan Mts.: Petrogenesis and tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 32(5): 1 505~1 528 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y F, Jiang S H and Bagas L. 2016. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu-(Sn-W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn-polymetal system, Inner Mongolia, China[J]. Ore Geological Review, 75: 150~173.
- Lowe D R. 1982. Sediment gravity flows: Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 52: 279~297.
- Lu L, Qin Y, Zhang K J, *et al.* 2020. Provenance and tectonic settings of the Late Paleozoic sandstones in central Mongolia, NE China: Constraints on the evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 77: 111~135.
- Mange M A and Morton A C. 2007. Geochemistry of heavy minerals[A]. Mange M A and Wright D T. Heavy Minerals in Use[C]. Amsterdam: Elsevier, 345~391.
- Masuda F. 1994. Onlap and downlap patterns in Plio-Pleistocene forearc and backarc basin-fill successions, Japan[J]. Sedimentary Geology, 93(3~4): 237~246.
- Miall A D. 2000. Principles of Sedimentary Basin Analysis (third edition)[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 283~288.
- Morton A C and Hallsorth C. 1994. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones[J]. Sedimentary Geology, 90(3~4): 241~256.
- Morton A C and Hallsorth C. 2007. Stability of detrital heavy minerals during burial diagenesis[A]. Mange M A and Wright D T. Heavy minerals in use[C]. Amsterdam: Elsevier, 215~245.
- Mutti E and Ricci Lucchi F. 1978. Turbidites of the northern Apennines: Introduction to facies analysis [J]. International Geology Review, 20: 125~166.

- Nemec W and Steel R J. 1984. Alluvial and coastal conglomerates: Their significance features and some comments on gravelly mass-flow deposits [A]. Koster E H. and Steel R J. Sedimentology of Gravels and Conglomerates [C]. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 10: 1~31.
- Potter P E and Pettijohn F J. 1977. Paleocurrents and Basin Analysis (Second Edition) [M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1~398.
- Rothwell R G, Bednarz U, Bøe R, *et al.* 1994. Sedimentation and sedimentary processes in the Lau backarc basin: Results from LEG 135 [A]. Hawkins J, Parson L, Allan J, *et al.* Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results [C]. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 135: 829~842.
- Sierra-Rojas M, Molina-Garza R S and Lawton T F. 2016. The Lower Cretaceous Atzompa Formation in South-Central Mexico: Record of evolution from extensional backarc basin margin to carbonate platform [J]. Journal of Sedimentary Research, 86: 712~733.
- Shi Lizhi, Zhang Yingli, Zhang Yongsheng, *et al.* 2020. The discovery of a thick shale gas hydrocarbon-generation layer in the Lower Permian Shoushangou Formation, Mengxidi No. 1 Well, Erlan Basin, Inner Mongolia [J]. Geology in China, 47(5): 1 594~1 595 (in Chinese with English abstract).
- Song S G, Wang M M, Xu X, *et al.* 2015. Ophiolites in the Xing'an- Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events [J]. Tectonics, 34(10): 2 221~2 248.
- Stow D A V, Bishop C D and Mills S J. 1982. Sedimentology of the Brae oilfield, North Sea: Fan models and controls [J]. Journal of Petroleum Geology, 5: 129~148.
- Sun Junjun, Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, *et al.* 2012. Lithofacies, geochemical characteristics and tectonic environment of Xilinhot Group, Inner Mongolia, China [J]. Earth Science Frontiers, 19(5): 144~155 (in Chinese with English abstract).
- Walsh J P. 2016. Source-to-sink research: Economy of the Earth's surface and its strata [J]. Earth-Science Review, 153: 1~6.
- Wang B R, Zhou Z G, Yang X S, *et al.* 2020. A Late Carboniferous-Early Permian back-arc basin in the southeastern Central Asian Orogenic Belt: Constraint from sedimentological and geochronological investigations of the Shoushangou Formation in the central Inner Mongolia [J]. Geological Journal, 55: 1 098~1 114.
- Wang G S, Liu C F, Pei W X, *et al.* 2018. Geochemistry and zircon U-Pb-Hf isotopes of the granitoids of Qianjinchang pluton in the Xi Ujimqi, Inner Mongolia: Implications for petrogenesis and geodynamic setting [J]. Geological Journal, 53: 767~787.
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, *et al.* 2018. Zircon U-Pb dating and tectonic setting of the Wulangouadakite in Inner Mongolia [J]. Geological Bulletin of China, 37(10): 1 933~1 943 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xinyu, Hou Qingye, Wang Jin, *et al.* 2013. SHRIMP geochronology and Hf isotope of zircons from granitoids of the Weilasituo deposit in Inner Mongolia [J]. Geoscience, 37(1): 67~78 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, *et al.* 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 41: 1~30.
- Xiao W J, Song D F, Windley B F, *et al.* 2020. Accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: Advances and perspectives [J]. Science China Earth Sciences, 63: 329~361.
- Xiao W J, Windley B F, Han C M, *et al.* 2018. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia [J]. Earth-Science Reviews, 186: 94~128.
- 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/OL]. Tectonics, 22(6): 1 069, doi: 10.1029/2002TC001484.
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, *et al.* 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB) [J]. Acta Petrologica Sinica, 30(7): 1 841~1 857 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jiajia, Lai Yong, Cui Dong, *et al.* 2012. Petrology and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Qianjinchang pluton, southeastern Inner Mongolia [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 48(4): 617~628 (in Chinese with English abstract).
- Yan Z, Fu C L, Aitchison J C, *et al.* 2019. Retro-foreland basin development in response to Proto-Tethyan Ocean closure, NE Tibet Plateau [J]. Tectonics, 38: 4 229~4 248.
- Yan Z, Guo X Q, Fu C L, *et al.* 2014. Detrital heavy mineral constraints on the Triassic tectonic evolution of the West Qinling terrance, NW China: Implications for understanding subduction of the Paleotethyan Ocean [J]. The Journal of Geology, 122: 591~608.
- Zhang Xiaofei, Wang Biren, Zhang Huachuan, *et al.* 2018. The detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb age of Early Permian Shoushangou Formation in Hanwula area of Xi Ujimqi Banner, Inner Mongolia, and its significance [J]. Geological Bulletin of China, 37(5): 863~880 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yanjie, Xu Bei, Tian Yingjie, *et al.* 2018. The Late Paleozoic ex-

- tending processes of Xingnan Mongolia Orogenic Belt (XMOB): Evidence from Carboniferous-Permian sedimentary strata in the northeastern Erenhot, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(10): 3 083~3 100 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P, Xu B and Zhang C H. 2017. A rift system in southeastern Central Asian Orogenic Belt: Constraint from sedimentological, geochronological and geochemical investigations of the Late Carboniferous-Early Permian strata in northern Inner Mongolia (China)[J]. *Gondwana Research*, 47: 342~357.
- Zheng Yuejuan, Gong Fanhao, Chen Shuwang, *et al.* 2013. U-Pb age of detrital zircons from Early Permian 'Shoushangou Formation' in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(8): 1 260~1 268 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenxiao and Ge Mengchun. 2013. Redefinition and significance of metamorphism Xilinhot Group in Xilinhot area, Inner Mongolia, China[J]. *Earth Science*, 38(4): 715~724 (in Chinese with English abstract).
- Zhu W P, Tian W, Wei C J, *et al.* 2017. Late Paleozoic rift-related basalts from central Inner Mongolia, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 155~170.
- ### 附中文参考文献
- 葛梦春, 周文孝, 于洋, 等. 2011. 内蒙古锡林郭勒杂岩解体及表壳岩系年代确定[J]. *地学前缘*, 18(5): 182~195.
- 公繁浩, 黄欣, 陈树旺, 等. 2013a. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区寿山沟组烃源岩有机地球化学特征[J]. *地质通报*, 32(8): 1 322~1 328.
- 公繁浩, 黄欣, 郑月娟, 等. 2013b. 内蒙古西乌旗下二叠统寿山沟组海底扇的发现及意义[J]. *地质与资源*, 22(6): 478~483.
- 黄欣, 公繁浩, 郑月娟, 等. 2013. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区下二叠统寿山沟组遗迹化石的发现及意义[J]. *地质通报*, 32(8): 1 283~1 288.
- 康健丽, 肖志斌, 王惠初, 等. 2016. 内蒙古锡林浩特早石炭世构造环境: 来自变质基性火山岩的年代学和地球化学证据[J]. *地质学报*, 90(2): 383~397.
- 李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 等. 2019. 中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J]. *岩石学报*, 35(10): 2 989~3 016.
- 李瑞杰. 2013. 内蒙古西乌旗本巴图组火山岩地球化学特征、年代学及地质意义研究(硕士论文)[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1~61.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 2013. 内蒙古西乌旗白音布拉格蛇绿岩地球化学特征[J]. *岩石学报*, 29(8): 2 719~2 730.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 2015. 内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的识别[J]. *岩石学报*, 31(5): 1 461~1 470.
- 李英杰, 王金芳, 王根厚, 等. 2018. 内蒙古迪彦庙蛇绿岩带达哈特前弧玄武岩的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 34(2): 469~482.
- 刘建峰. 2009. 内蒙古林西—东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约(博士论文)[D]. 长春: 吉林大学, 1~142.
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 等. 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 83(3): 365~376.
- 刘敏, 赵洪涛, 张达, 等. 2017. 内蒙古西乌旗南部晚古生代侵入岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. *地球科学*, 42(4): 527~548.
- 刘锐, 杨振, 徐启东, 等. 2016. 大兴安岭南段海西期花岗岩类锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学: 岩石成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 32(5): 1 505~1 528.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1996. 全国地层多重划分对比研究 15·内蒙古自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 179~287.
- 施立志, 张英利, 张永生, 等. 2020. 蒙西地 1 井发现下二叠统寿山沟组巨厚页岩气生烃层[J]. *中国地质*, 47(5): 1 594~1 595.
- 孙俊俊, 葛梦春, 周文孝, 等. 2012. 内蒙古锡林浩特岩群岩相学、地球化学特征及构造环境分析[J]. *地学前缘*, 19(5): 144~155.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2018. 内蒙古乌兰沟埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及构造环境[J]. *地质通报*, 37(10): 1 933~1 943.
- 王新宇, 侯青叶, 王瑾, 等. 2013. 内蒙古维拉斯托矿床花岗岩类 SHRIMP 年代学及 Hf 同位素研究[J]. *现代地质*, 37(1): 67~78.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探[J]. *岩石学报*, 30(7): 1 841~1 857.
- 徐佳佳, 赖勇, 崔栋, 等. 2012. 内蒙古前进场岩体岩石学与锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 48(4): 617~628.
- 张晓飞, 王必任, 张华川, 等. 2018. 内蒙古西乌旗罕乌拉地区下二叠统寿山沟组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 37(5): 863~880.
- 张焱杰, 徐备, 田英杰, 等. 2018. 兴蒙造山带晚古生代伸展过程: 来自二连浩特东北部石炭-二叠系沉积地层的证据[J]. *岩石学报*, 34(10): 3 083~3 100.
- 郑月娟, 公繁浩, 陈树旺, 等. 2013. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区下二叠统原寿山沟组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质通报*, 32(8): 1 260~1 268.
- 周文孝, 葛梦春. 2013. 内蒙古锡林浩特地区中元古代锡林浩特岩群的厘定及其意义[J]. *地球科学*, 38(4): 715~724.