

扬子北缘下高川盆地上泥盆统 铁矿梁组沉积物源分析

贾晓彤^{1,2}, 张英利¹, 王宗起¹, 王坤明¹, 王刚¹

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 中国地质大学(北京)研究生院, 北京 100083)

摘要:下高川盆地为扬子地块和秦岭造山带结合处的特殊构造单元,其构造演化与相邻的构造单元存在明显差异,晚泥盆世尤为突出。为全面理解下高川盆地的构造演化,重点研究了下高川盆地上泥盆统铁矿梁组砂岩的沉积物源。以石英砂岩为研究对象,分析重矿物组成,进而进行电气石电子探针分析和 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年。砂岩样品的闪锌矿、白钛石、钛铁矿重矿物组合说明其物源为岩浆岩。电气石电子探针分析结果表明,铁矿梁组石英砂岩主要来自于变质板岩和变质砂岩,少量为贫锂花岗岩类、伟晶岩和细晶岩。砂岩锆石 U-Pb 年龄谱分析表明,铁矿梁组砂岩的主要物源来自 425~530 Ma 的天水和丹凤花岗岩、佛坪片麻岩、清水英安岩,以及 578~982 Ma 的柞水(黑沟)碱性花岗岩、天水和西峡的花岗质片麻岩、丹凤和卢氏的花岗岩。另外,1 015~1 551 Ma 的佛坪黑云母斜长片麻岩,1 658~1 957 Ma 的太白和宝鸡花岗岩、佛坪片麻岩,2 329~2 502 Ma 的丹凤石榴黑云斜长片麻岩和 2 625~3 147 Ma 的商南太古宙结晶基底岩石均经历多次搬运,为扬子北缘下高川盆地提供次要物源。综合区域资料,晚泥盆世的物源大致来自北部,同时古地理格局表现为天水、丹凤、清水、西峡等地区岩体隆升剥蚀,成为物源区,而在华北古陆与扬子北缘下高川盆地之间可能存在多个较小古陆,如佛坪也属于物源区。

关键词:沉积物源;铁矿梁组;晚泥盆世;重矿物;电气石电子探针;锆石 U-Pb 年龄;下高川盆地;扬子北缘

中图分类号:P512.2

文献标志码:A

Analysis of Sediment Provenance of Upper Devonian Tiekuangliang Formation in Xiagaochuan Basin, the Northern Margin of Yangtze Plate

JIA Xiao-tong^{1,2}, ZHANG Ying-li¹, WANG Zong-qi¹, WANG Kun-ming¹, WANG Gang¹

(1. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,

Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Graduates,

China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Xiagaochuan Basin is a special tectonic unit between Yangtze Block and Qinling orogen. The tectonic evolution of Late Devonian is obviously different from that of the adjacent tectonic units. In order to understand the tectonic evolution of Xiagaochuan Basin, the sediment provenance of sandstone of Upper Devonian Tiekuangliang Formation was studied. Taking quartz sandstone as the research object, heavy mineral assemblages were analyzed, and then the

收稿日期:2016-09-18

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160176,12120114009401);

中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务费专项资金项目(K1613(2016))

作者简介:贾晓彤(1992-),女,山东枣庄人,中国地质大学(北京)理学硕士研究生,E-mail:jiaxiaotong1925@163.com。

通讯作者:张英利(1979-),男,山东烟台人,副研究员,理学博士,E-mail:yinglizh@126.com。

tourmaline electron microprobe analysis and LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating were determined, respectively. The heavy mineral assemblages of sphalerite, leucite and ilmenite indicate that they can be provided by magmatic rocks. The tourmaline electron microprobe analysis shows that the sandstone from Tiekuangliang Formation is mainly from metapelites and metapsammites, and a small amount of Li-poor granitoids and associated pegmatites and aplites. The zircon U-Pb age spectra of sandstone suggest that the provenance of sandstone from Tiekuangliang Formation mainly comes from the rocks with the ages of 425-530 Ma and 578-982 Ma. The 425-530 Ma rocks are Tianshui and Danfeng granites, Foping gneiss and Qingshui dacite; the 578-982 Ma rocks are Zhashui (Heigou) alkaline granite, Tianshui and Xixia gneisses, and Danfeng and Lushi granites. Furthermore, the rocks including 1 015-1 551 Ma Foping biotite plagioclase gneiss, 1 658-1 957 Ma Taibai and Baoji granites, and Foping gneiss, 2 329-2 502 Ma Danfeng garnet gneiss, and 2 625-3 147 Ma Shangnan Archean crystalline basement, have undergone several transportation and provided secondary provenance from Xiagaochuan Basin, the northern margin of Yangtze Plate. Based on the regional data, the Late Devonian provenance is roughly from the north. Meantime, the paleogeographic pattern shows that the rocks in Tianshui, Danfeng, Qingshui and Xixia areas are uplifted and eroded, becoming the provenance areas. Moreover, there are many small oldlands between North China paleoland and Xiagaochuan Basin, the northern margin of Yangtze Plate, such as Foping, which is also the provenance area.

Key words: sediment provenance; Tiekuangliang Formation; Late Devonian; heavy mineral; tourmaline electron microprobe; zircon U-Pb age; Xiagaochuan Basin; the northern margin of Yangtze Plate

0 引言

下高川盆地位于扬子地块和秦岭造山带结合处,地层分区上属于褚河地层小区。其独特的构造位置成为研究秦岭造山带和扬子地块演化的理想场所。桑宝樑等对下高川地区进行了大量研究,建立了研究区地层格架^[1-5]。与周边的构造单元相比较,下高川盆地有着独特的沉积序列,发育震旦系、寒武系、上泥盆统一三叠统地层,缺失奥陶系、志留系和中一下泥盆统。李瑞保等认为其早期的构造演化和勉略带大致相似,是晚古生代勉略裂谷的一部分,从勉略带上挤入到大巴山冲断-推覆构造带与大巴山前陆构造带之间,并被挟持在大巴山构造带浅部^[6-8]。梅志超等认为泥盆纪时期南秦岭向北俯冲的同时,地壳首先与南侧的勉县—巴山断裂带沿线发生扩张,演化成有限洋盆,与扬子地块分离,逐渐演化成裂陷盆地与断块隆起相间的格局^[9]。沉积学研究表明,南秦岭泥盆系是被古陆分隔的几个裂陷盆地的沉积产物,有南北成带、东西分隔的趋势^[10-11]。下高川盆地作为晚古生代秦岭南缘裂谷^[12]或新生拗拉槽的一部分^[13],只保留了沉积序列,晚泥盆世总体

表现为缓坡型碳酸盐台地体系^[12]。因此,对于下高川盆地的演化仍然存在着争议。

沉积物源分析(包括碎屑锆石 U-Pb 定年和电子探针分析等)可以确定沉积物源区岩石年龄、性质等^[14-18],反演物源区的剥露过程^[13,19],为构造演化提供进一步证据。本文以下高川盆地上泥盆统铁矿梁组(D₃t)砂岩沉积物源为研究对象,分析重矿物,进而对电气石、碎屑锆石进行电子探针和 LA-ICP-MS 测年分析;根据野外数据和获取的测试结果,综合分析下高川盆地晚泥盆世沉积物的源区母岩性质,结合区域地质特征及前人研究成果,确定其源区特征,为下高川盆地的构造演化提供依据。

1 区域地质背景

下高川盆地位于扬子地块和秦岭造山带结合处,发育两条深大断裂,即大巴山断裂和红椿坝断裂(图 1)。大巴山断裂主要由星子山—断头崖断裂、大市川—断头崖断裂和大市川—麻柳坝断裂组成,大巴山断裂所夹持的地区即为下高川盆地,星子山—断头崖断裂以西为南大巴山地区,大巴山断裂以东为北大巴山地区,而北大巴山地区又被红椿坝

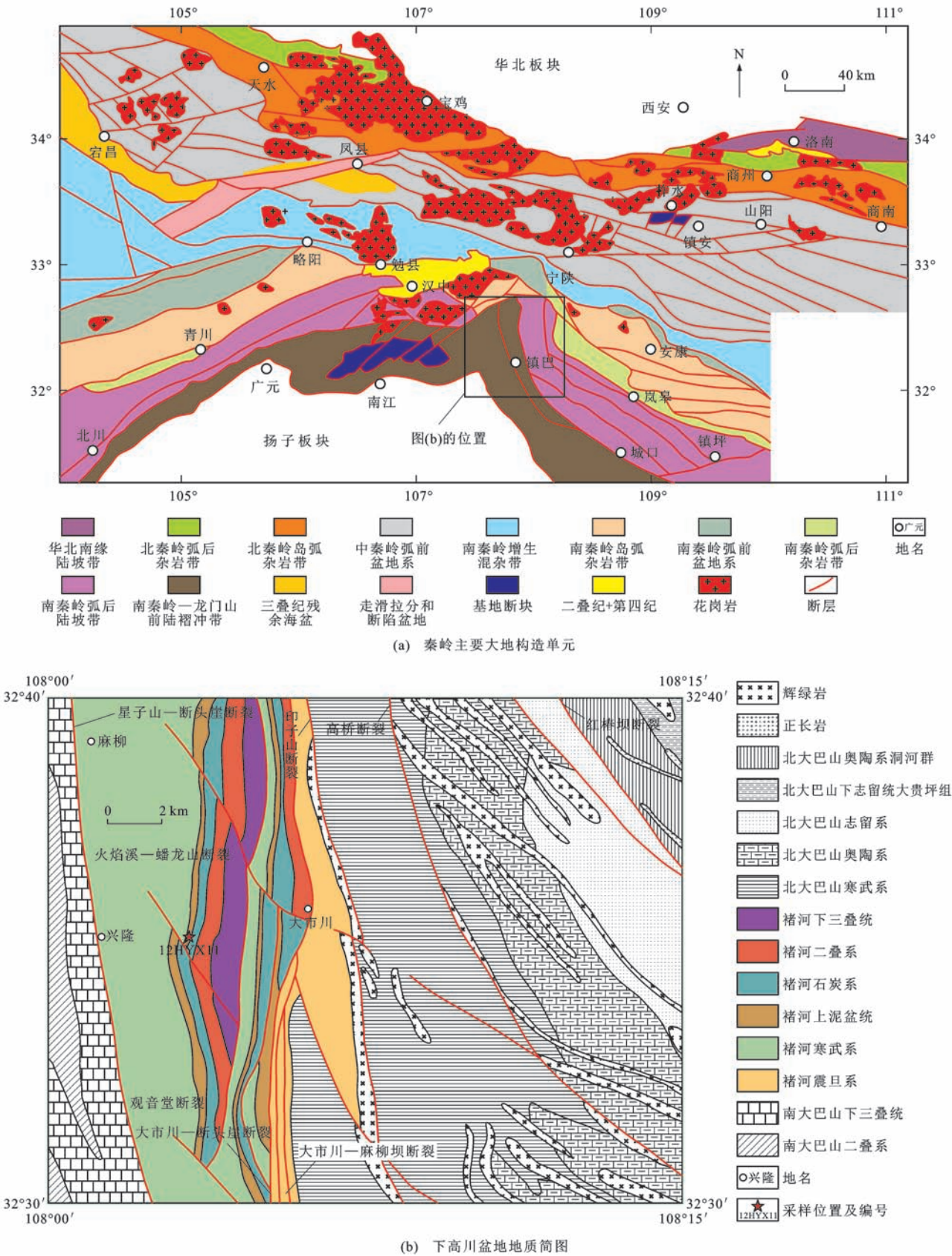


图 1 秦岭主要大地构造单元及下高川盆地地质简图

Fig. 1 Simplified Maps of Qinling Main Tectonic Units and Xiagaochuan Basin

断裂所分隔^[22-24]。研究区在地层分区上属于褚河小区,发育地层包括震旦系、寒武系、上泥盆统、石炭系、二叠系和中一下三叠统,其中震旦系以灰岩和含碳质泥质页岩为主。寒武系主要为灰岩及白云岩,寒武系与上泥盆统呈平行不整合接触,上泥盆统与上覆石炭系为整合接触。上泥盆统铁矿梁组主要为灰褐色石英砂岩夹灰黑色薄层钙质泥岩;蟠龙山组(D₃p)为深灰及灰色的薄、厚层状生物碎屑灰岩。石炭系灰岩最发育,二叠系为灰黑色粉砂岩、泥岩,中一下三叠统发育灰黄色及浅灰色白云质灰岩、灰岩夹泥岩,与下伏二叠系为断层或平行不整合接触。北大巴山地区发育早古生代地层以及基性侵入岩;南大巴山地区出露二叠纪一早三叠世灰岩。

2 沉积学特征

本次工作对下高川盆地镇巴地区火焰溪剖面上泥盆统铁矿梁组进行详细观测(图2)。结果表明:铁矿梁组与上覆蟠龙山组灰岩呈整合接触,与下伏寒武纪白云岩呈平行不整合接触;铁矿梁组主要为灰褐色石英砂岩夹灰黑色薄层钙质泥岩;泥岩中发育黄铁矿结核,砂岩中可见泥岩团块和植物碎屑。显微镜下,铁矿梁组砂岩主要由石英组成,长石和岩屑含量较少,分选较好,磨圆一般,为次棱角一次圆状,砂岩为颗粒支撑结构,杂基含量较低,说明沉积物经过了较长距离的搬运和筛选。黄铁矿结核的出现表明其处于还原环境。综合以上特征认为,铁矿梁组沉积环境为滨岸相。

3 分析方法

样品 12HXY11 采自位于陕西省镇巴县兴隆场东的火焰溪剖面上泥盆统铁矿梁组,采样坐标为(32°35'16"N, 108°03'20"E)(图1),剖面内采样位置见图2。样品 12HXY11 为石英砂岩,质量约 8 kg。

3.1 重矿物分析

重砂鉴定分析在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。首先取样品 10 kg 进行碎样,筛分之后分别进行淘洗、磁选、电磁选等,计算各种重矿物含量(质量分数,下同)。挑选重矿物中的电气石和锆石,以便进行电子探针分析和 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年测试分析。

3.2 电气石电子探针分析

电子探针分析在中国地质大学(北京)电子探针实验室完成,仪器型号为日本岛津公司生产的 EPMA-1600。测试条件包括:加速电压为 15 kV,激发电流

为 10 nA,电子束直径为 1 μm。测试结果采用 ZAF 法修正。分析标样采用磁铁矿(Fe)、钠长石(Si、Na、Al)、磷灰石(Ca、P)、金红石(Ti)、蔷薇辉石(Mn)、透长石(K)、橄榄石(Mg)、萤石(F)等。主元素(含量高于 20%)允许的相对误差不高于 5%;含量在 3%~20%之间的元素允许相对误差不高于 10%;含量在 1%~3%之间的元素允许的相对误差不高于 30%;而含量在 0.5%~1.0%之间的元素允许的相对误差低于 50%。基于 31 个氧原子^[25-26],采用 Excel 经验公式^[27]对电子探针分析数据进行处理。

3.3 碎屑锆石 U-Pb 定年

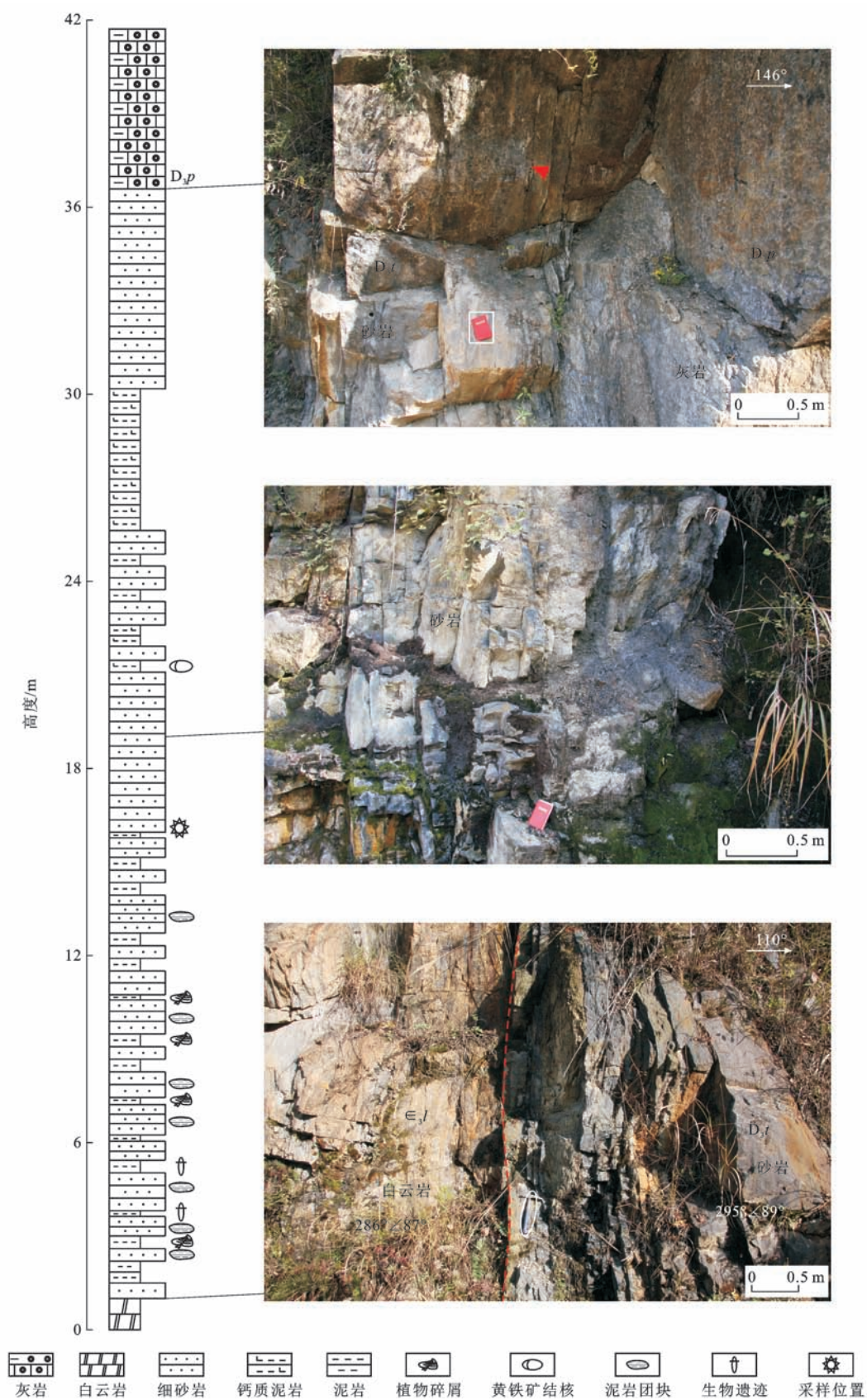
样品碎样和锆石的挑选工作在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。锆石样品的制靶工作由中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室完成。锆石的阴极发光(CL)图像在中国地质科学院地质研究所 HITACHI S3000-N 型扫描电子显微镜及 GATAN 公司 Chroma 阴极发光探头分析仪器上完成的。锆石 U-Pb 年龄测定之前,依据透射光图像、反射光图像和阴极发光图像,对碎屑锆石样品随机圈定裂隙和包裹体不发育的颗粒。LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在中国地质调查局天津地质调查中心同位素实验室完成,详细试验过程参见文献[28]和[29]。采用 GJ-1 作为外部锆石年龄标准进行 U、Pb 同位素分馏校正^[30]。利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序^[31],普通 Pb 校正采用 Anderson 方法^[32],锆石年龄谐和图由 Isoplot 3.0 程序完成^[33]。

对于锆石年龄大于 1 000 Ma 的数据,采用 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄,而对于年龄小于 1 000 Ma 的数据,采用 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄^[34-35]。以 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄和 $N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄的比值作为标准遴选 U-Pb 年龄数据^[14,34,36-38],不谐和度绝对值不高于 10%的数据为有效数据。

4 结果分析

4.1 重矿物组分

铁矿梁组砂岩识别的重矿物主要有锆石、金红石、黄铁矿、电气石、闪锌矿、白钛石、钛铁矿等(表1)。主要重矿物为黄铁矿和锆石,含量分别为 56.72%和 26.15%,金红石和电气石次之。显微镜下,粉黄色锆石较少,约占锆石总量的 35%,呈半自形,搬运痕迹不太明显,推测距母岩区较近;另外一种锆石是褐玫瑰色,约占锆石总量的 65%,磨圆



D_{3l} 为上寒武统鲁家坪组

图 2 铁矿梁组沉积序列及野外照片

Fig. 2 Sedimentary Sequence and Field Photos of Tiekuangliang Formation

表 1 铁矿梁组砂岩重矿物组成

Tab. 1 Heavy Mineral Composition of Sandstone from Tiekuangliang Formation

%

样品编号	锆石含量	金红石含量	黄铁矿含量	电气石含量	闪锌矿含量	白钛石含量	钛铁矿含量	其余矿物含量
12HXY11	26.15	2.30	56.72	1.61	0.36	0.18	0.31	12.36

度较高,分选性较好,推测锆石经一定距离搬运。重矿物分析中,由于在还原作用下可形成自生黄铁矿,所以黄铁矿体积分数对于物源分析没有指示意义。金红石和电气石有多种来源,故矿物本身不能确定母岩类型。其余矿物组合(如闪锌矿、白钛石、钛铁矿)可指示物源来自岩浆岩。

4.2 电气石电子探针分析

样品 12HXY11 电气石背散射图像中无明显的

核-边结构,成分比较均一(图 3),而且电子探针数据也表明,电气石的核部成分与其他部位无明显差异(图 3 中 6、7、8),很少受外部侵蚀。电气石颗粒呈棱角一次圆状,磨圆由较差到较好,但次棱一次圆居多,说明物源未经搬运或者经过短距离搬运。

电子探针分析结果显示(表 2),电气石成分中除 SiO_2 之外, Al_2O_3 占的比例较大, MgO 和 FeO 依次减小,而且 FeO 、 Al_2O_3 含量与 SiO_2 含量呈负相

表 2 铁矿梁组砂岩电气石电子探针分析结果

Tab. 2 Tourmaline Electron Microprobe Analysis Results of Sandstone from Tiekuangliang Formation

编号	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15
矿物名称	镁电气石	镁电气石	镁电气石	镁电气石	镁电气石	镁电气石	镁电气石	镁电气石	黑电气石	镁电气石	镁电气石	黑电气石	镁电气石	镁电气石	镁电气石
$w(\text{SiO}_2)/\%$	36.55	37.13	37.29	35.91	36.84	36.72	37.07	36.25	36.48	36.18	36.19	37.15	36.88	36.51	37.07
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.44	0.75	0.58	0.79	1.08	0.30	0.46	0.59	0.82	0.82	1.61	0.33	0.79	0.27	0.70
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	33.12	32.47	32.58	33.87	29.30	29.64	30.44	28.63	31.42	33.22	31.42	30.81	29.54	31.50	30.81
$w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/\%$	—	—	0.08	0.08	—	0.06	—	—	0.07	—	0.05	0.09	0.04	0.09	—
$w(\text{FeO})/\%$	9.00	8.54	6.43	10.28	10.41	8.76	9.86	10.72	7.87	7.75	9.62	5.76	9.87	11.27	9.41
$w(\text{MgO})/\%$	4.46	5.73	6.78	3.75	6.37	7.75	6.52	6.61	7.43	5.83	4.87	8.95	6.78	4.54	6.46
$w(\text{CaO})/\%$	0.06	0.66	0.73	0.80	—	0.80	0.47	0.74	0.42	0.81	0.89	0.55	0.40	0.25	0.10
$w(\text{MnO})/\%$	—	0.08	0.15	0.06	—	0.17	—	0.08	—	—	0.01	0.02	—	0.11	0.02
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	2.31	1.96	2.14	1.89	2.96	2.58	2.59	2.62	2.33	2.16	1.83	2.55	2.63	2.45	2.58
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	0.11	—	—	—	—	0.07	—	—	—	0.02	—	0.05	—	0.08	—
$w(\text{H}_2\text{O}^*)/\%$	3.66	3.71	3.73	3.69	3.64	3.65	3.67	3.59	3.68	3.70	3.65	3.70	3.65	3.64	3.68
$w(\text{B}_2\text{O}_3^*)/\%$	10.61	10.76	10.81	10.69	10.55	10.57	10.65	10.40	10.66	10.73	10.59	10.71	10.57	10.55	10.65
$w(\text{Li}_2\text{O}^*)/\%$	0.38	0.30	0.37	0.38	0.27	0.13	0.24	0.20	0.04	0.36	0.39	0.16	0.23	0.23	0.20
$w_{\text{total}}/\%$	100.70	102.09	101.66	102.18	101.42	101.20	101.97	100.42	101.22	101.58	101.12	100.83	101.38	101.48	101.68
Si^{4+} 原子数	5.985	5.995	5.997	5.839	6.069	6.036	6.051	6.058	5.948	5.863	5.941	6.029	6.063	6.017	6.047
B^{3+} 原子数	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Al^{3+} 原子数	6.392	6.178	6.175	6.491	5.689	5.742	5.856	5.639	6.037	6.344	6.079	5.893	5.723	6.118	5.923
Mg^{2+} 原子数	1.089	1.379	1.625	0.909	1.564	1.899	1.586	1.646	1.806	1.408	1.192	2.165	1.662	1.115	1.571
Cr^{3+} 原子数	0.000	0.000	0.010	0.010	0.000	0.008	0.000	0.000	0.009	0.000	0.006	0.012	0.005	0.012	0.000
Ti^{4+} 原子数	0.054	0.091	0.070	0.097	0.134	0.037	0.056	0.074	0.101	0.100	0.199	0.040	0.098	0.033	0.086
Mn^{2+} 原子数	0.000	0.011	0.020	0.008	0.000	0.024	0.000	0.011	0.000	0.000	0.001	0.003	0.000	0.015	0.003
Fe^{2+} 原子数	1.232	1.153	0.865	1.398	1.434	1.204	1.346	1.498	1.073	1.050	1.321	0.782	1.357	1.553	1.284
Li^{+} 原子数	0.248	0.192	0.238	0.248	0.179	0.086	0.155	0.131	0.026	0.234	0.261	0.105	0.155	0.153	0.134
SY 原子数	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Ca^{2+} 原子数	0.011	0.114	0.126	0.139	0.000	0.141	0.082	0.132	0.073	0.141	0.157	0.096	0.070	0.044	0.017
Na^{+} 原子数	0.733	0.614	0.667	0.596	0.945	0.822	0.820	0.849	0.737	0.679	0.582	0.802	0.838	0.783	0.816
K^{+} 原子数	0.023	0.000	0.000	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.010	0.000	0.017	0.000
r 原子数	0.233	0.272	0.207	0.265	0.055	0.022	0.098	0.019	0.190	0.177	0.261	0.092	0.091	0.156	0.167

续表 2

编号	T16	T17	T18	T19	T20	T21	T22	T23	T24	T25	T26	T27	T28	T29	T30
矿物名称	黑电 气石	镁电 气石	镁电 气石	黑电 气石	黑电 气石	镁电 气石	镁电 气石	黑电 气石	镁电 气石	镁电 气石	黑电 气石	镁电 气石	镁电 气石	黑电 气石	镁电 气石
$w(\text{SiO}_2)/\%$	37.17	35.25	37.35	36.87	37.15	36.39	37.35	36.76	35.27	35.97	37.17	35.91	35.96	37.19	37.17
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.65	0.52	0.89	0.91	0.73	0.61	0.22	1.05	1.09	1.26	0.57	0.49	0.80	0.86	0.88
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	32.51	32.66	31.40	31.87	28.37	30.90	32.40	32.41	32.98	33.37	33.57	33.17	34.37	32.37	29.80
$w(\text{Cr}_2\text{O}_3)/\%$	0.09	—	—	—	—	—	0.02	—	0.10	—	0.14	0.09	0.04	0.06	0.05
$w(\text{FeO})/\%$	6.92	8.99	6.76	7.73	7.63	9.60	9.12	8.49	10.87	6.70	6.89	10.53	5.92	4.85	6.71
$w(\text{MgO})/\%$	7.19	6.16	7.17	6.22	9.30	6.25	5.84	5.20	3.95	6.24	5.74	3.60	6.21	8.02	9.12
$w(\text{CaO})/\%$	0.75	1.48	0.30	0.14	0.41	0.71	0.33	0.23	0.78	0.97	0.42	0.42	1.12	0.95	1.54
$w(\text{MnO})/\%$	—	—	0.15	0.11	0.05	—	0.05	—	—	—	—	0.06	0.11	—	—
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	2.24	1.76	2.65	2.70	3.05	2.33	2.13	2.41	2.10	2.00	2.26	2.09	1.92	2.21	2.09
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	—	—	0.02	—	—	0.02	0.02	—	0.05	0.07	0.02	—	—	0.09	—
$w(\text{H}_2\text{O}^*)/\%$	3.74	3.65	3.71	3.69	3.66	3.65	3.71	3.69	3.65	3.71	3.74	3.64	3.72	3.75	3.71
$w(\text{B}_2\text{O}_3^*)/\%$	10.85	10.59	10.76	10.69	10.61	10.57	10.76	10.69	10.58	10.75	10.83	10.55	10.80	10.86	10.76
$w(\text{Li}_2\text{O}^*)/\%$	0.27	0.14	0.39	0.33	0.17	0.15	0.24	0.41	0.32	0.41	0.46	0.34	0.44	0.41	0.17
$w_{\text{total}}/\%$	102.38	101.21	101.56	101.26	101.13	101.18	102.18	101.33	101.74	101.45	101.80	100.89	101.41	101.61	101.99
Si ⁴⁺ 原子数	5.955	5.784	6.032	5.994	6.085	5.983	6.035	5.978	5.794	5.814	5.968	5.917	5.789	5.955	6.006
B ³⁺ 原子数	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Al ³⁺ 原子数	6.139	6.317	5.976	5.976	5.477	5.988	6.171	6.212	6.386	6.356	6.352	6.442	6.522	6.108	5.675
Mg ²⁺ 原子数	1.717	1.507	1.726	1.507	2.271	1.532	1.407	1.261	0.967	1.504	1.374	0.884	1.49	1.914	2.197
Cr ³⁺ 原子数	0.011	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.000	0.013	0.000	0.018	0.012	0.005	0.008	0.006
Ti ⁴⁺ 原子数	0.078	0.064	0.108	0.111	0.090	0.075	0.027	0.128	0.135	0.153	0.069	0.061	0.097	0.104	0.107
Mn ²⁺ 原子数	0.000	0.000	0.021	0.015	0.007	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008	0.015	0.000	0.000
Fe ²⁺ 原子数	0.927	1.234	0.913	1.051	1.045	1.320	1.232	1.155	1.493	0.906	0.925	1.451	0.797	0.649	0.907
Li ⁺ 原子数	0.171	0.094	0.256	0.216	0.110	0.102	0.154	0.266	0.211	0.267	0.295	0.225	0.285	0.262	0.108
SY 原子数	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Ca ²⁺ 原子数	0.129	0.260	0.052	0.024	0.072	0.125	0.057	0.040	0.137	0.168	0.072	0.074	0.193	0.163	0.267
Na ⁺ 原子数	0.696	0.560	0.830	0.851	0.969	0.743	0.667	0.760	0.669	0.627	0.703	0.668	0.599	0.686	0.655
K ⁺ 原子数	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.004	0.004	0.000	0.010	0.014	0.004	0.000	0.000	0.018	0.000
r 原子数	0.175	0.180	0.114	0.125	0.000	0.128	0.271	0.200	0.183	0.191	0.220	0.258	0.207	0.133	0.079

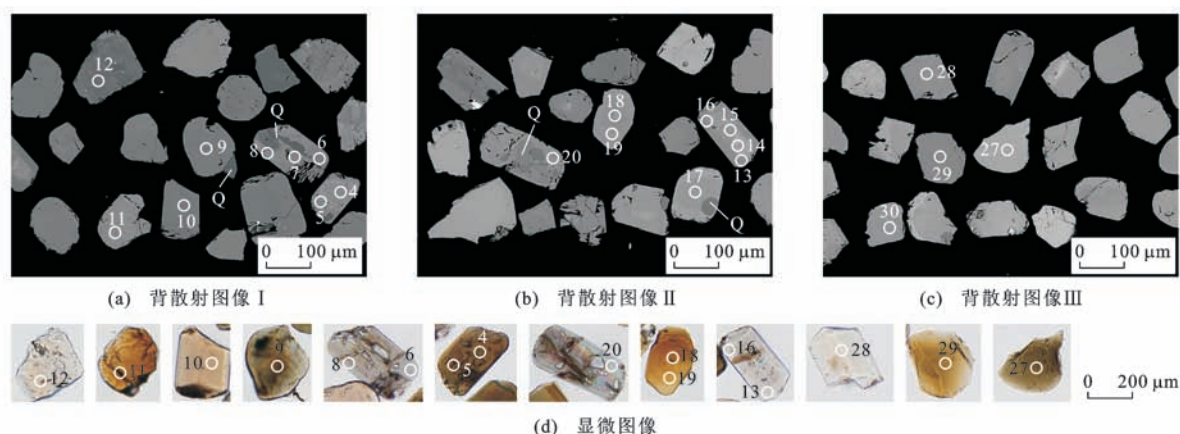
注: $w(\cdot)$ 为元素或化合物含量; w_{total} 为主量元素总含量;电子探针分析以 31 个氧原子计算阳离子;所有样品 OH^- 原子数为 4, F^- 、 Cl^- 原子数为 0; H_2O^* 、 B_2O_3^* 、 Li_2O^* 表示电子探针无法直接测得其含量,主要根据电气石的标准化学组成反算得到,而 Li^{+*} 原子数则是利用反算的 Li_2O^* 含量计算得到的;SY 原子数表示电气石($\text{XY}_3\text{Z}_6(\text{T}_6\text{O}_8)(\text{BO}_3)_3\text{V}_3\text{W}$)Y 位所有阳离子(包括 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 、 Al^{+} 、 Cr^{3+} 、 V^{3+} 和 Fe^{3+})原子数之和;r 原子数表示阳离子空位原子数,电气石($\text{XY}_3\text{Z}_6(\text{T}_6\text{O}_8)(\text{BO}_3)_3\text{V}_3\text{W}$)X 位阳离子包括 Na^{+} 、 Ca^{2+} 和阳离子空位 r;“—”表示低于检测限。

关系,而 MgO 含量与 SiO_2 含量呈正相关关系(相关系数为 0.6)。在 Al-Fe-Mg 三元图解[图 4(a)]中,电气石物源来自变质板岩和变质砂岩,少量来自贫锂花岗岩类及其伴生的伟晶岩和细晶岩,以及富铁电气石石英岩、钙质硅酸盐岩和变质板岩;在 Ca-Fe-Mg 三元图解[图 4(b)]中,电气物源石主要源自贫钙变质板岩、变质砂岩和电气石石英岩,少量来自

贫锂花岗岩类及其伴生的伟晶岩和细晶岩。因此,综合 Al-Fe-Mg、Ca-Fe-Mg 三元图解(图 4),笔者认为铁矿梁组石英砂岩主要来自于变质板岩和变质砂岩,少量为贫锂花岗岩类、伟晶岩和细晶岩。

4.3 碎屑锆石 U-Pb 年龄

对砂岩样品 12HYP11 进行 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,共分析碎屑锆石颗粒 109 个,获得



圆圈为打点位置,数字为编号

图3 铁矿梁组电气石背散射图像和显微图像

Fig. 3 Backscattered Images and Microphotographs of Tourmaline from Tiekuangliang Formation

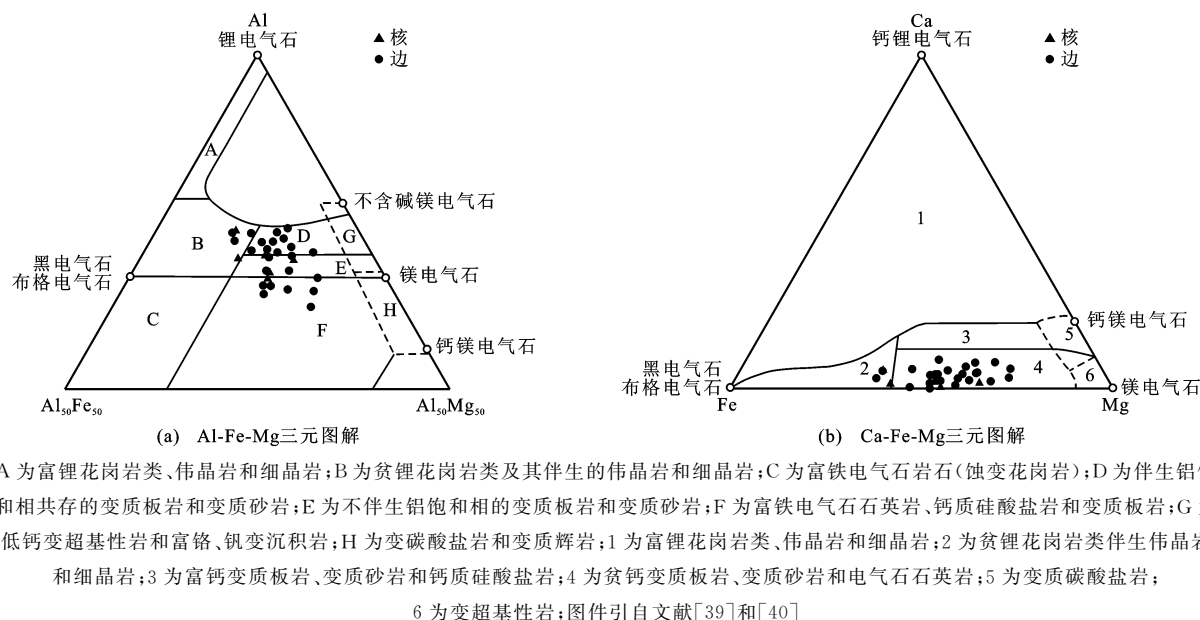


图4 电子探针物源判别图解

Fig. 4 Provenance-discriminant Diagrams of Electron Microprobe

有效年龄 108 个(表 3)。其 U-Pb 谐和曲线及 U-Pb 年龄谱图见图 5。锆石年龄分布于 425~3 142 Ma, 集中分布于 425~530、578~982 Ma, 峰值较明显, 而 1 658~1 957、2 329~2 502、1 015~1 551、2 625~3 147 Ma 区间相对分散, 没有明显的峰值。主要年龄峰值与区域上主要构造事件大致对应: 425~530 Ma 记录了早古生代晚加里东期一早海西期北秦岭发生较大规模的造山运动^[9,41-43]; 而 578~982 Ma 记录了新元古代早期秦岭造山带发生洋壳俯冲、陆陆碰撞事件造山作用, 以及之后秦岭造山带中秦岭与扬子克拉通北缘发生了大规模裂解^[44-48]。

大部分锆石磨圆较好, 形态不完整, 是典型的碎屑锆石(图 6), 经历了多次搬运, 直接来自于沉积岩源区。而部分磨圆较差、较完整的岩浆锆石和变质

锆石可能直接来自于岩浆岩和变质岩源区。另外, 大多数碎屑锆石具有规律的振荡环带, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值大于 0.4, 而且 Th、U 含量高(图 6 中 25、82、88、91、92 等), 指示其属于岩浆成因; 还有部分碎屑锆石明显具有变质特征(如出现明显的白色变质边)(图 6 中 53、70、75), 属于变质成因。

5 讨论

5.1 沉积物源

扬子北缘下高川盆地所处的秦巴地区由于早古生代晚期的南北地块逐渐拼合, 晚古生代时结束了活动的地质发展阶段, 进入相对稳定期, 从早泥盆世开始, 缓慢海侵, 直到晚泥盆世, 海水逐渐变通畅, 水域扩大^[48-49]。岩相古地理资料表明, 巴山弧形断裂

表 3 铁矿梁组砂岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果

Tab. 3 Results of LA-MC-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of Sandstone from Tiekuangliang Formation

分析点	w(Pb)/ 10 ⁻⁶	w(Th)/ 10 ⁻⁶	w(U)/ 10 ⁻⁶	w(Th)/ w(U)	N(²⁰⁷ Pb)/ N(²⁰⁶ Pb)	n(²⁰⁷ Pb)/ n(²³⁵ U)	n(²⁰⁶ Pb)/ n(²³⁸ U)	N(²⁰⁷ Pb)/ N(²⁰⁶ Pb)年龄/Ma	n(²⁰⁷ Pb)/ n(²³⁵ U)年龄/Ma	n(²⁰⁶ Pb)/ n(²³⁸ U)年龄/Ma	谐和度/ %
1	91	124	164	0.76	0.161 2±0.001 3	10.177 3±0.188 7	0.457 8±0.007 6	2 468±14	2 451±17	2 430±34	102
2	39	40	77	0.52	0.151 3±0.001 6	9.161 2±0.234 9	0.439 0±0.008 0	2 361±18	2 354±23	2 346±36	101
3	139	583	656	0.89	0.076 5±0.000 5	1.885 5±0.029 4	0.178 9±0.002 2	1 107±14	1 076±10	1 061±12	104
4	20	215	248	0.87	0.056 2±0.001 9	0.532 9±0.023 5	0.068 8±0.000 8	459±74	434±16	429±5	101
5	176	93	637	0.15	0.105 2±0.000 7	4.011 5±0.065 2	0.276 5±0.003 5	1 718±12	1 637±13	1 574±18	109
6	43	199	198	1.01	0.073 1±0.000 7	1.784 6±0.035 9	0.177 1±0.002 3	1 016±20	1 040±13	1 051±12	97
7	76	685	810	0.85	0.056 0±0.000 5	0.617 9±0.009 9	0.080 0±0.000 8	454±18	489±6	496±5	99
8	22	135	134	1.01	0.065 1±0.001 6	1.210 6±0.042 0	0.134 8±0.001 5	779±52	805±19	815±9	99
9	53	186	330	0.56	0.066 9±0.000 6	1.359 3±0.024 3	0.147 3±0.002 0	835±17	872±10	886±11	98
10	40	372	251	1.48	0.061 7±0.000 7	1.031 0±0.024 2	0.121 1±0.001 8	665±25	719±12	737±10	98
11	19	61	87	0.69	0.078 7±0.001 4	2.059 5±0.058 9	0.189 8±0.002 4	1 165±35	1 135±20	1 120±13	104
12	75	114	140	0.81	0.148 5±0.001 5	8.832 3±0.183 1	0.431 4±0.005 1	2 329±18	2 321±19	2 312±23	101
13	21	101	138	0.73	0.062 3±0.001 5	1.164 8±0.037 6	0.135 7±0.001 3	683±51	784±18	820±7	96
14	122	97	174	0.56	0.208 6±0.002 0	16.437 6±0.252 9	0.571 5±0.004 1	2 895±15	2 903±15	2 914±17	99
15	47	118	290	0.41	0.069 6±0.000 6	1.494 4±0.027 7	0.155 8±0.002 2	916±17	928±11	933±12	99
16	3	34	14	2.41	0.067 1±0.003 0	1.232 0±0.072 6	0.133 1±0.002 2	842±92	815±33	806±13	101
17	39	173	382	0.45	0.058 6±0.000 8	0.794 3±0.018 7	0.098 4±0.001 2	552±30	594±11	605±7	98
18	109	251	504	0.50	0.079 2±0.000 7	2.195 8±0.038 4	0.201 2±0.002 5	1 176±16	1 180±12	1 182±13	99
19	18	185	97	1.90	0.066 5±0.002 9	1.100 1±0.058 4	0.119 9±0.001 4	823±89	753±28	730±8	103
20	220	178	286	0.62	0.243 3±0.002 5	20.740 5±0.402 3	0.618 2±0.006 5	3 142±16	3 127±19	3 103±26	101
21	23	83	60	1.39	0.102 1±0.001 6	4.159 4±0.115 8	0.295 3±0.004 4	1 663±29	1 666±23	1 668±22	100
22	16	33	37	0.89	0.120 1±0.002 0	6.002 9±0.162 7	0.362 6±0.004 8	1 957±29	1 976±24	1 994±23	98
23	28	129	129	1.00	0.071 9±0.001 2	1.780 7±0.047 3	0.179 7±0.002 3	982±33	1 038±17	1 066±12	92
24	14	84	198	0.42	0.056 1±0.002 0	0.532 8±0.025 1	0.068 8±0.001 0	458±77	434±17	429±6	101
25	29	156	220	0.71	0.063 1±0.000 9	1.036 4±0.025 8	0.119 2±0.001 6	710±29	722±13	726±9	99
26	24	52	96	0.54	0.086 8±0.001 4	2.704 2±0.068 8	0.226 0±0.002 7	1 356±30	1 330±19	1 313±14	103
27	70	84	98	0.86	0.219 4±0.001 6	16.602 1±0.350 8	0.548 8±0.009 2	2 976±12	2 912±20	2 820±38	106
28	42	60	51	1.18	0.233 7±0.001 4	19.454 7±0.256 3	0.603 7±0.006 3	3 078±9	3 065±13	3 045±25	101
29	18	74	125	0.59	0.067 7±0.002 1	1.238 4±0.047 4	0.132 6±0.001 1	860±64	818±22	803±6	102
30	60	156	161	0.97	0.104 5±0.001 5	4.421 1±0.114 5	0.306 8±0.003 7	1 706±27	1 716±21	1 725±18	99
31	10	69	59	1.16	0.069 8±0.003 4	1.340 8±0.084 2	0.139 4±0.002 4	922±98	864±37	841±13	103
32	54	271	273	0.99	0.072 8±0.000 6	1.649 0±0.030 3	0.164 2±0.002 2	1 010±17	989±12	980±12	101
33	16	77	98	0.78	0.066 3±0.002 0	1.283 3±0.049 1	0.140 4±0.001 4	815±61	838±22	847±8	99
34	33	255	172	1.48	0.070 1±0.000 9	1.406 9±0.031 4	0.145 7±0.001 7	930±26	892±13	877±9	102
35	27	313	334	0.94	0.054 1±0.001 0	0.512 5±0.016 3	0.068 7±0.001 0	377±43	420±11	428±6	98
36	31	208	295	0.70	0.061 0±0.000 8	0.812 9±0.017 3	0.096 7±0.000 9	637±29	604±10	595±5	102
37	12	42	83	0.50	0.067 9±0.002 9	1.236 8±0.059 7	0.132 2±0.000 9	864±87	817±27	800±5	102
38	19	75	134	0.56	0.067 4±0.002 0	1.226 8±0.043 3	0.132 0±0.000 8	851±62	813±20	799±4	102
39	25	89	135	0.66	0.073 0±0.001 3	1.737 5±0.043 2	0.172 5±0.001 5	1 015±35	1 023±16	1 026±8	99
40	15	319	120	2.66	0.048 3±0.003 9	0.523 0±0.046 2	0.078 6±0.000 6	112±176	427±31	488±4	88
41	6	39	39	0.98	0.066 1±0.005 2	1.102 3±0.100 2	0.121 0±0.001 8	808±163	754±48	737±10	102
42	10	29	59	0.49	0.075 1±0.003 3	1.615 0±0.084 5	0.156 0±0.001 5	1 070±87	976±33	935±9	104
43	202	538	738	0.73	0.0910±0.000 5	3.064 4±0.037 0	0.244 1±0.002 7	1 447±10	1 424±9	1 408±14	103
44	13	81	90	0.90	0.066 9±0.002 4	1.154 9±0.053 8	0.125 2±0.001 6	835±74	780±25	760±9	103
45	14	72	117	0.62	0.061 5±0.002 3	0.937 1±0.041 3	0.110 5±0.000 8	657±80	671±22	676±5	99
46	142	503	394	1.27	0.105 7±0.000 6	4.220 7±0.051 5	0.289 6±0.002 6	1 727±10	1 678±10	1 640±13	105
47	42	253	273	0.93	0.068 3±0.000 9	1.251 5±0.027 0	0.132 9±0.001 3	878±27	824±12	804±8	102
48	13	5	28	0.16	0.161 4±0.002 3	9.926 3±0.228 2	0.446 2±0.004 7	2 470±23	2 428±21	2 378±21	104
49	22	71	61	1.16	0.104 0±0.001 8	4.206 0±0.099 8	0.293 3±0.002 3	1 697±30	1 675±19	1 658±11	102
50	30	124	219	0.57	0.066 1±0.001 2	1.197 4±0.029 5	0.131 3±0.001 0	810±37	799±14	796±5	100
51	43	333	212	1.57	0.071 3±0.001 0	1.537 0±0.031 9	0.156 4±0.001 2	965±28	945±13	937±6	101
52	29	389	236	1.65	0.062 2±0.001 4	0.804 9±0.023 6	0.093 8±0.000 8	682±45	600±13	578±4	104
53	31	156	218	0.72	0.066 2±0.001 0	1.169 6±0.026 8	0.128 1±0.001 2	814±30	786±13	777±7	101
54	12	24	67	0.36	0.074 8±0.002 5	1.869 1±0.076 8	0.181 3±0.001 5	1 063±65	1 070±27	1 074±8	99

续表 3

分析点	$w(\text{Pb})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/10^{-6}$	$w(\text{U})/10^{-6}$	$w(\text{Th})/w(\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$	$N(^{207}\text{Pb})/N(^{206}\text{Pb})$ 年龄/Ma	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$ 年龄/Ma	$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄/Ma	谐和度/%
55	7	25	44	0.57	$0.063\ 7\pm0.005\ 5$	$1.255\ 5\pm0.121\ 9$	$0.143\ 0\pm0.001\ 8$	731 ± 174	826 ± 55	862 ± 10	96
56	33	554	307	1.81	$0.056\ 8\pm0.001\ 2$	$0.617\ 5\pm0.019\ 1$	$0.078\ 9\pm0.000\ 8$	484 ± 46	488 ± 12	489 ± 5	100
57	18	226	94	2.41	$0.064\ 8\pm0.002\ 5$	$1.108\ 2\pm0.052\ 5$	$0.124\ 1\pm0.001\ 3$	767 ± 76	757 ± 25	754 ± 8	100
58	237	1 093	751	1.46	$0.090\ 7\pm0.000\ 6$	$3.054\ 0\pm0.038\ 7$	$0.244\ 3\pm0.002\ 0$	$1\ 439\pm12$	$1\ 421\pm10$	$1\ 409\pm10$	102
59	172	315	892	0.35	$0.077\ 2\pm0.000\ 6$	$2.011\ 6\pm0.033\ 8$	$0.189\ 0\pm0.002\ 5$	$1\ 126\pm14$	$1\ 119\pm11$	$1\ 116\pm14$	101
60	19	310	163	1.90	$0.055\ 0\pm0.004\ 5$	$0.636\ 9\pm0.058\ 6$	$0.084\ 1\pm0.000\ 9$	411 ± 175	500 ± 36	520 ± 5	96
61	13	145	160	0.91	$0.057\ 4\pm0.002\ 9$	$0.545\ 7\pm0.032\ 6$	$0.068\ 9\pm0.000\ 8$	508 ± 105	442 ± 21	430 ± 5	103
62	65	203	220	0.92	$0.094\ 8\pm0.000\ 7$	$3.279\ 5\pm0.052\ 7$	$0.250\ 9\pm0.002\ 8$	$1\ 524\pm14$	$1\ 476\pm13$	$1\ 443\pm15$	106
63	52	64	79	0.81	$0.197\ 5\pm0.001\ 2$	$14.480\ 1\pm0.200\ 9$	$0.531\ 8\pm0.006\ 2$	$2\ 806\pm10$	$2\ 782\pm13$	$2\ 749\pm26$	102
64	23	72	218	0.33	$0.060\ 4\pm0.001\ 2$	$0.892\ 6\pm0.025\ 3$	$0.107\ 2\pm0.001\ 2$	618 ± 39	648 ± 14	656 ± 7	99
65	22	260	75	3.47	$0.069\ 0\pm0.002\ 7$	$1.512\ 1\pm0.075\ 4$	$0.158\ 9\pm0.001\ 9$	899 ± 77	935 ± 30	951 ± 11	98
66	5	47	28	1.66	$0.065\ 2\pm0.008\ 3$	$1.205\ 2\pm0.174\ 4$	$0.134\ 1\pm0.002\ 7$	781 ± 257	803 ± 80	811 ± 15	99
67	53	83	299	0.28	$0.073\ 4\pm0.000\ 8$	$1.778\ 3\pm0.032\ 4$	$0.175\ 7\pm0.001\ 6$	$1\ 025\pm20$	$1\ 038\pm12$	$1\ 043\pm9$	98
68	248	349	642	0.54	$0.117\ 4\pm0.000\ 7$	$5.592\ 6\pm0.068\ 7$	$0.345\ 6\pm0.003\ 3$	$1\ 916\pm10$	$1\ 915\pm11$	$1\ 914\pm16$	100
69	12	31	17	1.79	$0.158\ 1\pm0.003\ 1$	$10.073\ 3\pm0.293\ 2$	$0.462\ 1\pm0.005\ 1$	$2\ 436\pm32$	$2\ 442\pm27$	$2\ 449\pm22$	99
70	31	147	218	0.68	$0.066\ 1\pm0.001\ 7$	$1.156\ 5\pm0.041\ 8$	$0.126\ 8\pm0.001\ 4$	811 ± 53	780 ± 20	770 ± 8	101
71	99	55	178	0.31	$0.177\ 0\pm0.001\ 2$	$12.297\ 1\pm0.182\ 2$	$0.503\ 9\pm0.006\ 2$	$2\ 625\pm10$	$2\ 627\pm14$	$2\ 631\pm27$	100
72	39	125	90	1.38	$0.112\ 3\pm0.000\ 9$	$5.013\ 9\pm0.086\ 4$	$0.323\ 8\pm0.003\ 9$	$1\ 837\pm14$	$1\ 822\pm15$	$1\ 808\pm19$	102
73	68	83	191	0.44	$0.107\ 9\pm0.000\ 8$	$4.893\ 7\pm0.062\ 8$	$0.328\ 9\pm0.002\ 4$	$1\ 764\pm12$	$1\ 801\pm11$	$1\ 833\pm12$	96
74	21	42	72	0.58	$0.096\ 1\pm0.001\ 4$	$3.504\ 1\pm0.073\ 8$	$0.264\ 3\pm0.001\ 9$	$1\ 551\pm26$	$1\ 528\pm17$	$1\ 512\pm10$	103
75	24	139	148	0.94	$0.067\ 6\pm0.001\ 5$	$1.241\ 7\pm0.035\ 3$	$0.133\ 2\pm0.001\ 0$	857 ± 43	820 ± 16	806 ± 6	102
76	38	137	534	0.26	$0.056\ 4\pm0.000\ 9$	$0.553\ 3\pm0.011\ 1$	$0.071\ 1\pm0.000\ 4$	469 ± 33	447 ± 7	443 ± 2	101
77	92	107	171	0.63	$0.155\ 5\pm0.001\ 3$	$9.690\ 4\pm0.163\ 4$	$0.452\ 0\pm0.004\ 5$	$2\ 407\pm13$	$2\ 406\pm16$	$2\ 404\pm20$	100
78	72	192	519	0.37	$0.066\ 8\pm0.000\ 5$	$1.244\ 6\pm0.018\ 9$	$0.135\ 1\pm0.001\ 6$	832 ± 14	821 ± 9	817 ± 9	100
79	27	64	76	0.84	$0.101\ 8\pm0.001\ 4$	$4.121\ 4\pm0.091\ 5$	$0.293\ 5\pm0.003\ 1$	$1\ 658\pm24$	$1\ 659\pm18$	$1\ 659\pm16$	100
80	328	265	617	0.43	$0.163\ 2\pm0.001\ 1$	$10.508\ 6\pm0.154\ 3$	$0.467\ 1\pm0.005\ 0$	$2\ 489\pm11$	$2\ 481\pm14$	$2\ 471\pm22$	101
81	127	70	506	0.14	$0.095\ 9\pm0.000\ 9$	$3.364\ 8\pm0.073\ 7$	$0.254\ 4\pm0.005\ 5$	$1\ 547\pm17$	$1\ 496\pm17$	$1\ 461\pm28$	106
82	24	201	311	0.65	$0.053\ 5\pm0.001\ 3$	$0.521\ 0\pm0.017\ 9$	$0.070\ 6\pm0.000\ 8$	351 ± 53	426 ± 12	440 ± 5	97
83	101	115	257	0.45	$0.119\ 6\pm0.000\ 8$	$5.825\ 4\pm0.083\ 3$	$0.353\ 4\pm0.004\ 3$	$1\ 950\pm11$	$1\ 950\pm12$	$1\ 951\pm21$	100
84	27	158	123	1.28	$0.070\ 3\pm0.001\ 5$	$1.565\ 6\pm0.048\ 6$	$0.161\ 6\pm0.002\ 0$	936 ± 40	957 ± 19	966 ± 11	99
85	44	149	234	0.64	$0.072\ 0\pm0.000\ 7$	$1.628\ 7\pm0.029\ 3$	$0.164\ 1\pm0.001\ 9$	986 ± 18	981 ± 11	979 ± 11	100
86	22	129	122	1.06	$0.068\ 4\pm0.002\ 7$	$1.345\ 4\pm0.063\ 4$	$0.142\ 6\pm0.001\ 3$	882 ± 77	866 ± 27	859 ± 7	101
87	33	304	389	0.78	$0.055\ 7\pm0.001\ 3$	$0.550\ 7\pm0.017\ 6$	$0.071\ 8\pm0.000\ 7$	439 ± 50	445 ± 12	447 ± 4	100
88	42	233	582	0.40	$0.056\ 9\pm0.000\ 7$	$0.534\ 7\pm0.011\ 3$	$0.068\ 2\pm0.000\ 7$	487 ± 27	435 ± 7	425 ± 4	102
90	14	27	98	0.28	$0.067\ 7\pm0.002\ 4$	$1.269\ 8\pm0.057\ 9$	$0.136\ 0\pm0.001\ 6$	860 ± 70	832 ± 26	822 ± 9	101
91	10	133	78	1.72	$0.061\ 9\pm0.005\ 6$	$0.731\ 4\pm0.076\ 6$	$0.085\ 8\pm0.001\ 4$	669 ± 184	557 ± 45	530 ± 8	105
92	17	176	140	1.25	$0.059\ 0\pm0.002\ 5$	$0.694\ 8\pm0.036\ 4$	$0.085\ 5\pm0.001\ 1$	565 ± 86	536 ± 22	529 ± 6	101
93	15	83	74	1.11	$0.067\ 3\pm0.002\ 7$	$1.335\ 1\pm0.069\ 0$	$0.143\ 9\pm0.001\ 9$	847 ± 80	861 ± 30	867 ± 11	99
94	6	68	60	1.14	$0.056\ 5\pm0.004\ 5$	$0.542\ 4\pm0.052\ 2$	$0.069\ 6\pm0.001\ 3$	473 ± 169	440 ± 34	434 ± 8	101
95	9	40	44	0.92	$0.073\ 2\pm0.004\ 0$	$1.570\ 5\pm0.106\ 9$	$0.155\ 6\pm0.002\ 3$	$1\ 020\pm106$	959 ± 42	932 ± 13	103
96	15	27	33	0.83	$0.115\ 1\pm0.004\ 4$	$5.539\ 6\pm0.281\ 0$	$0.349\ 1\pm0.004\ 9$	$1\ 881\pm66$	$1\ 907\pm44$	$1\ 930\pm23$	97
97	29	164	155	1.06	$0.066\ 6\pm0.001\ 3$	$1.269\ 3\pm0.035\ 4$	$0.138\ 2\pm0.001\ 3$	825 ± 38	832 ± 16	835 ± 7	100
98	44	100	310	0.32	$0.067\ 2\pm0.000\ 7$	$1.263\ 2\pm0.023\ 4$	$0.136\ 3\pm0.001\ 4$	845 ± 20	829 ± 10	823 ± 8	101
99	35	233	443	0.53	$0.055\ 5\pm0.001\ 0$	$0.542\ 6\pm0.013\ 5$	$0.071\ 0\pm0.000\ 6$	431 ± 37	440 ± 9	442 ± 4	100
100	30	35	52	0.66	$0.164\ 4\pm0.001\ 6$	$10.370\ 5\pm0.181\ 5$	$0.457\ 4\pm0.004\ 5$	$2\ 502\pm15$	$2\ 468\pm16$	$2\ 428\pm20$	103
101	47	72	76	0.96	$0.162\ 8\pm0.000\ 9$	$10.506\ 5\pm0.104\ 2$	$0.468\ 0\pm0.005\ 5$	$2\ 485\pm8$	$2\ 480\pm9$	$2\ 475\pm24$	100
102	22	122	140	0.87	$0.067\ 3\pm0.001\ 4$	$1.207\ 6\pm0.037\ 7$	$0.130\ 2\pm0.001\ 5$	846 ± 42	804 ± 17	789 ± 9	102
103	48	10	320	0.03	$0.071\ 3\pm0.000\ 5$	$1.583\ 5\pm0.019\ 4$	$0.161\ 1\pm0.001\ 5$	966 ± 12	964 ± 8	963 ± 8	100
104	20	59	132	0.45	$0.069\ 2\pm0.001\ 4$	$1.344\ 9\pm0.038\ 1$	$0.140\ 9\pm0.001\ 3$	906 ± 39	865 ± 16	850 ± 8	102
105	14	87	84	1.03	$0.066\ 0\pm0.002\ 2$	$1.215\ 4\pm0.055\ 3$	$0.133\ 7\pm0.001\ 9$	805 ± 65	808 ± 25	809 ± 11	100
106	110	111	208	0.53	$0.160\ 1\pm0.001\ 1$	$10.058\ 3\pm0.114\ 3$	$0.455\ 7\pm0.006\ 7$	$2\ 457\pm11$	$2\ 440\pm10$	$2\ 420\pm30$	102
107	68	125	108	1.16	$0.163\ 6\pm0.000\ 7$	$10.420\ 1\pm0.099\ 8$	$0.461\ 9\pm0.003\ 9$	$2\ 493\pm7$	$2\ 473\pm9$	$2\ 448\pm17$	102
108	40	141	187	0.76	$0.077\ 5\pm0.000\ 6$	$1.930\ 2\pm0.032\ 0$	$0.180\ 7\pm0.002\ 2$	$1\ 133\pm14$	$1\ 092\pm11$	$1\ 071\pm12$	106
109	42	267	237	1.12	$0.067\ 3\pm0.000\ 6$	$1.278\ 7\pm0.020\ 9$	$0.137\ 8\pm0.001\ 4$	847 ± 16	836 ± 9	832 ± 8	100

注: $N(\cdot)/N(\cdot)$ 为同一元素同位素比值, $N(\cdot)$ 为该元素的原子丰度; $n(\cdot)/n(\cdot)$ 为不同元素同位素比值, $n(\cdot)$ 为元素的物质的量;误差类型为1 σ ;分析点40的数据为不谐和数据。

谐和图和直方图绘制以及探讨源区和区域构造事件时均不予考虑。

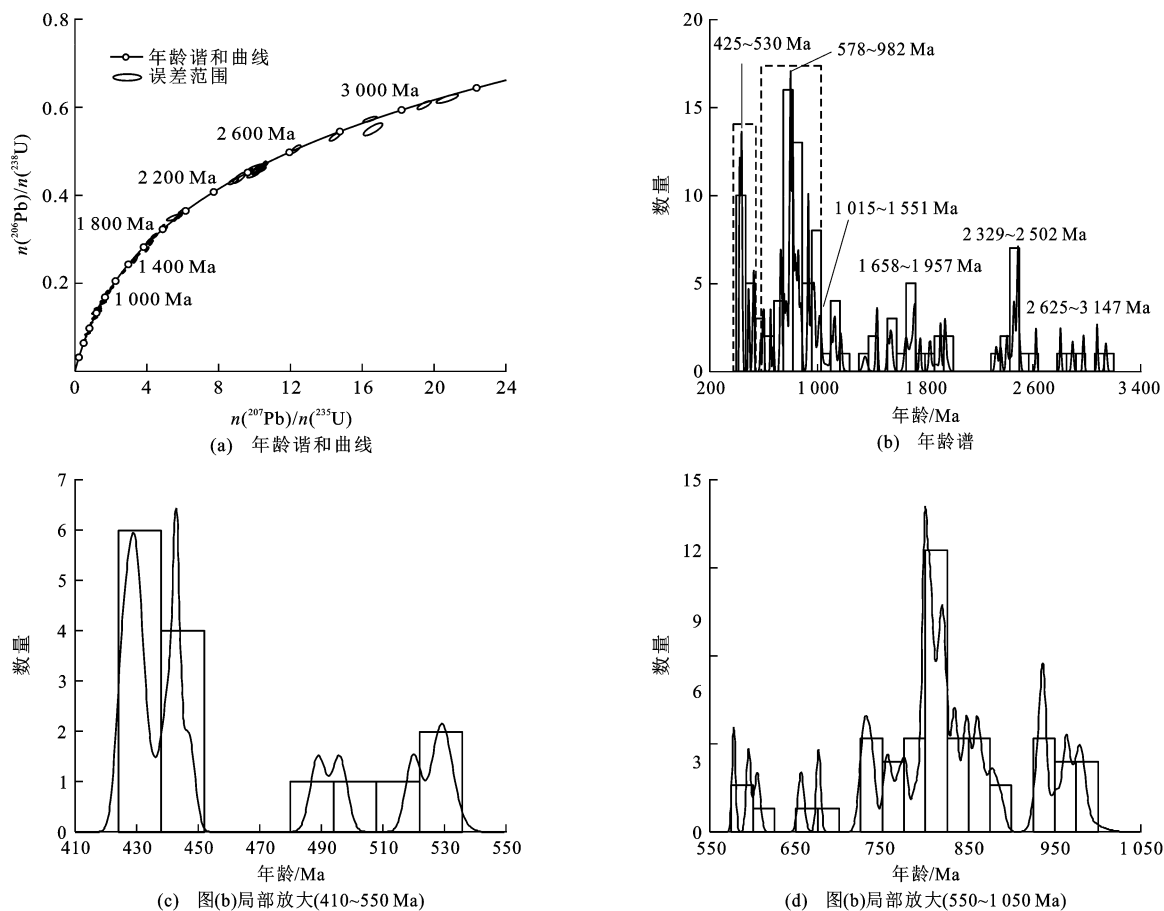
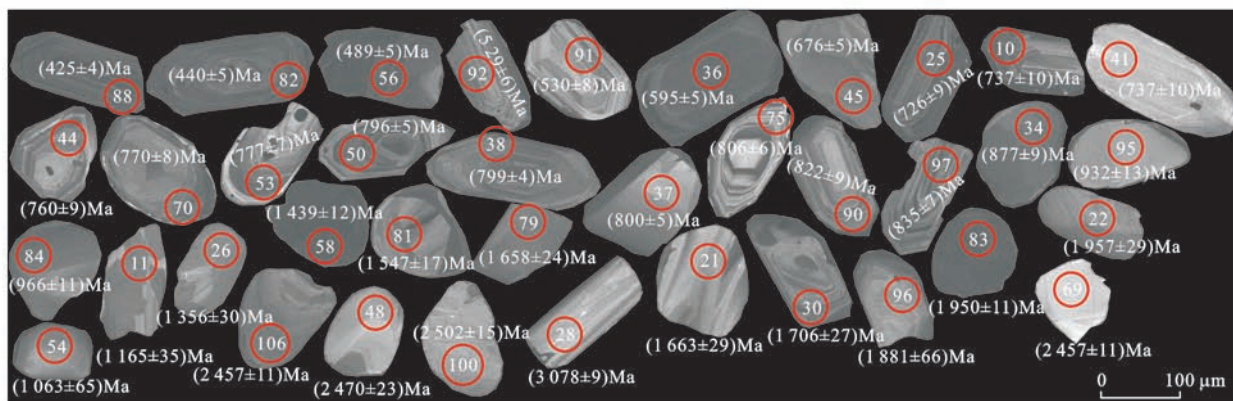


图 5 铁矿梁组砂岩锆石 U-Pb 年龄谱和曲线及年龄谱

Fig. 5 Zircon U-Pb Concordia Diagram and Age Spectra of Sandstone from Tiekuangliang Formation



带圆圈数字为分析点编号

图 6 铁矿梁组锆石阴极发光图像

Fig. 6 CL Images of Zircons from Tiekuangliang Formation

对其到商丹缝合带之间的南秦岭陆缘弧后裂谷盆地的发育影响明显,导致靠近断裂一侧为盆地中心,古地形上北高南低,并使盆地呈南倾斜的不对称箕状^[50]。而且,秦岭总体呈北高南低的古地形特征,海侵总体呈 SW—NE 向^[51]。高川地区仅发育上泥盆统地层,上部蟠龙山组地层厚度大于下部的铁矿梁组滨岸相地层。因此,下高川盆地虽然形成较晚,

但是充填序列仍显示向上变细变深^[9],甚至铁矿梁组的沉积厚度自北而南逐渐变薄^[5]。

在泥盆纪时期,秦巴地区的沉积中心不断迁移,晚泥盆世海侵范围达到最大,北达天水、太白、周至、商县的南侧,南部东段已到西乡—镇巴—旬阳,佛坪地区成为被海水包围的佛坪岛,西峡位于秦巴地区的东侧,属华北古陆。由于南部的扬子古陆以及若

尔盖古陆地形高差不大,碎屑物供给极少,主要陆屑供给仍是北部的华北古陆^[52]。因此,综合区域资料,笔者认为晚泥盆世的物源大致来自北部。

5.2 锆石 U-Pb 年龄谱

源自 425~530 Ma 的锆石颗粒约占总数的 15%。大部分锆石颗粒自形程度高,具有明显的振荡环带(图 6 中 56、82、88、91、92), $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值大于 0.4,而且 Th、U 含量高,指示其属于岩浆成因。已有的研究资料显示:北大巴山地区基性岩墙的锆石年龄为 400~450 Ma^[53-58];天水二长花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(438 \pm 3) \text{ Ma}$ ^[59];清水新城英安岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(447 \pm 8) \text{ Ma}$ ^[60];丹凤奥长花岗岩的单颗粒锆石 Pb-Pb 年龄为 $(490 \pm 10) \text{ Ma}$ ^[61];秦岭佛坪变质结晶岩系龙草坪黑云斜长片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 430~510 Ma^[62]。上述岩石年龄与本文中处于 425~530 Ma 的碎屑锆石年龄接近,而且与新元古代北秦岭向华北陆块聚合时间(423~470 Ma)、沿商丹缝合带发育的俯冲作用时间(422~514 Ma)一致^[63],因此,该期间产出的岩体为铁矿梁组提供物源。重矿物分析中缺少基性岩的指相矿物(如辉石或者尖晶石等),因此,北大巴山的基性岩墙为铁矿梁组提供物源的可能性极小。电气石电子探针分析结果显示,铁矿梁组主要来自于变质板岩和变质砂岩,少量物源为贫锂花岗岩类、伟晶岩和细晶岩。另外,锆石基本呈棱角状,说明搬运距离较短。因此,铁矿梁组的沉积物可能直接来自天水和丹凤的花岗岩、佛坪的片麻岩和清水的英安岩。

源自 578~982 Ma 的碎屑锆石颗粒为 48 个,占总碎屑颗粒的 44.86%。大部分锆石呈自形;锆石阴极发光图像(图 6 中 37、75、90)显示,岩浆环带明显,Th、U 含量较高, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值大于 0.4,指示其为岩浆成因。少部分锆石(图 6 中 53、70、75)为变质成因,可见白色变质边。结合区域岩体的年龄分布,本次研究的锆石年龄多与卢氏牛角山岩体的 S 型花岗岩体和花岗岩脉(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (955 ± 13) 、 $(929 \pm 25) \text{ Ma}$ ^[64]),丹凤石槽沟花岗岩(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(925 \pm 11) \text{ Ma}$ ^[65]),天水元龙花岗质片麻岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (924.2 ± 2.7) 、 $(914.7 \pm 7.6) \text{ Ma}$ ^[66]),天水新阳花岗质片麻岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(978.5 \pm 4.8) \text{ Ma}$ ^[67]),西峡德河黑云母二长花岗片麻岩(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(943 \pm 18) \text{ Ma}$ ^[68])一致。对应的锆石形态表明其多为圆一次

圆状(图 6 中 37、84、95),说明源岩经历多次搬运到达研究区。而少量棱角状(图 6 中 45)锆石颗粒经过较短距离到达铁矿梁组,与来自柞水(黑沟)的碱性花岗岩年龄(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(686 \pm 10) \text{ Ma}$ ^[69])一致。由岩相古地理资料可知,晚泥盆世的柞水地区由于海水进一步入侵成为沉降区^[52],所以柞水(黑沟)碱性花岗岩成为物源区的可能性较小。综合电气石电子探针分析结果、区域岩体的年龄分布以及锆石形态,天水和西峡的花岗片麻岩以及丹凤和卢氏的花岗岩经历多次搬运,为铁矿梁组提供物源。

源自 1 015~1 551 Ma 的锆石约占碎屑锆石总数的 14%,具有典型的环带结构,部分锆石属于面状结构, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值为 0.14~1.46,指示其为典型的岩浆锆石。新元古代同造山期的花岗岩侵入体集中分布于秦岭造山带的“北秦岭变质体”之中,几乎都经历了变质作用,并形成片麻岩^[46]。1 015~1 551 Ma 期间产出的火山-沉积浅变质岩系属于过渡性基底,出露广泛^[70]。区域岩石年龄数据显示,秦岭佛坪变质结晶岩系龙草坪黑云斜长片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1 033~1 483 Ma^[62],而年龄为 $(1 356 \pm 30) \text{ Ma}$ 的锆石颗粒(图 6 中 26)呈次圆状,与佛坪黑云母角闪斜长片麻岩(原岩为中酸性岩浆岩)的锆石年龄(SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 1 371 Ma^[62])及特征一致,因此,推测源岩先期变质形成佛坪黑云母片麻岩,之后经历风化剥蚀和多次搬运,沉积于铁矿梁组。

1 658~1 957 Ma 的锆石约占碎屑锆石总数的 11%,多为长柱状,具有韵律环带,部分环带较弱且多数锆石 $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值大于 0.4,指示其为岩浆成因。而 1 658~1 957 Ma 的锆石对应的岩浆侵入作用恰好与吕梁运动及 Columbia 超大陆的形成时代^[44,46,71]相当。已有的年龄数据显示:北秦岭太白的二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(1 741 \pm 41) \text{ Ma}$ ^[72];宝鸡的二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(1 770 \pm 41) \text{ Ma}$ ^[73];秦岭佛坪变质结晶岩片麻岩锆石年龄为 1 853~1 944 Ma^[62,74]。锆石形态多呈圆一次圆状(图 6 中 30),说明源岩经历了多次搬运。综合电气石电子探针分析结果,太白和宝鸡的花岗岩以及佛坪片麻岩多次搬运沉积在铁矿梁组,因此,铁矿梁组的沉积物可间接来源于太白、宝鸡的花岗岩和佛坪片麻岩。

2 329~2 502 Ma 的锆石约占碎屑锆石总数的 10%,但年龄比较分散,峰值不明显。锆石多磨圆较

好,不完整;大部分锆石有规律的环带, $w(\text{Th})/w(\text{U})$ 值绝大部分大于0.4,指示其属于岩浆成因。已有的研究区及周边地区岩体的年龄很少,仅有丹凤石榴黑云斜长片麻岩(原岩为碎屑岩)的部分锆石年龄(LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $951 \sim 2\,472\text{ Ma}$ ^[75])与本次研究获得的锆石年龄(图6中48)一致。而电子探针分析得到铁矿梁组的原岩主要为变质板岩和变质砂岩,因此,推测丹凤地区陆源碎屑岩先期变质形成片麻岩,之后经过搬运沉积在铁矿梁组砂岩中。

$2\,625 \sim 3\,147\text{ Ma}$ 的锆石颗粒有5个,仅占碎屑锆石总数的6%。锆石岩浆环带明显,磨圆极好,是典型的岩浆锆石。研究区及周边地区岩体关于此时期的年龄报道很少。张宗清等测定陕西省商南县秦岭造山带出露的太古宙结晶基底中部的斜长角闪岩-浅粒岩(由玄武岩、英安岩至流纹质火山岩构成的变质火山岩套)和黑云二长石英片岩(变质泥砂质岩石)的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄均大于 $(2\,488 \pm 8)\text{ Ma}$ ^[76]。因此,商南的秦岭造山带太古宙结晶基底的岩石在出露之后遭受剥蚀,并经过多次搬运,最终沉积在铁矿梁组。

锆石 U-Pb 年龄谱分析和电子探针分析表明,铁矿梁组砂岩的物源主要来自 $425 \sim 530\text{ Ma}$ 的天水和丹凤花岗岩、佛坪片麻岩、清水英安岩, $578 \sim 982\text{ Ma}$ 的柞水(黑沟)碱性花岗岩、天水和西峡的花岗质片麻岩、丹凤和卢氏的花岗岩。另外, $1\,015 \sim 1\,551\text{ Ma}$ 的佛坪黑云母斜长片麻岩, $1\,658 \sim 1\,957\text{ Ma}$ 的太白和宝鸡花岗岩、佛坪片麻岩, $2\,329 \sim 2\,502\text{ Ma}$ 的丹凤石榴黑云斜长片麻岩和 $2\,625 \sim 3\,147\text{ Ma}$ 的商南太古宙结晶基底岩石均经历多次搬运,为扬子北缘下高川盆地提供次要物源。

综上所述,晚泥盆世古地理格局为天水、丹凤、佛坪、清水、西峡等地区岩体隆升剥蚀,成为物源区,而在华北古陆与扬子北缘下高川盆地之间可能存在多个较小古陆,如佛坪也属于物源区。

6 结 语

(1) 扬子北缘下高川盆地铁矿梁组砂岩的重矿物主要有锆石、金红石、黄铁矿、电气石、闪锌矿、白钛石、钛铁矿等。其中,闪锌矿、白钛石、钛铁矿重矿物组合指示其物源可来自于岩浆岩。

(2) 电气石电子探针分析结果表明,铁矿梁组石英砂岩主要来自于变质板岩和变质砂岩,少量来自贫锂花岗岩类、伟晶岩和细晶岩。

(3) 砂岩碎屑 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谱分

析和电子探针分析表明,铁矿梁组砂岩的主要物源来自 $425 \sim 530\text{ Ma}$ 的天水和丹凤花岗岩、佛坪片麻岩、清水英安岩, $578 \sim 982\text{ Ma}$ 的柞水(黑沟)碱性花岗岩、天水和西峡的花岗质片麻岩、丹凤和卢氏的花岗岩。另外, $1\,015 \sim 1\,551\text{ Ma}$ 的佛坪黑云母斜长片麻岩, $1\,658 \sim 1\,957\text{ Ma}$ 的太白和宝鸡花岗岩、佛坪片麻岩, $2\,329 \sim 2\,502\text{ Ma}$ 的丹凤石榴黑云斜长片麻岩和 $2\,625 \sim 3\,147\text{ Ma}$ 的商南太古宙结晶基底岩石均经历多次搬运,为扬子北缘下高川盆地提供次要物源。

(4) 晚泥盆世的物源大致来自北部,同时古地理格局表现为天水、丹凤、清水、西峡等地区岩体隆升剥蚀,成为物源区,而在华北古陆与扬子北缘下高川盆地之间可能存在多个较小古陆,如佛坪也属于物源区。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 桑宝樑. 陕西西乡—镇巴东部泥盆纪地层[J]. 地质学报, 1962, 42(1): 57-61.
SANG Bao-liang. The Devonian Strata in Xixiang-Zhenba Eastern Area of Shaanxi[J]. Acta Geologica Sinica, 1962, 42(1): 57-61.
- [2] 陕西省地质矿产勘查开发局. 陕西省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998.
Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. Rock Strata in Shaanxi Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1998.
- [3] 陕西省地质矿产勘查开发局. 陕西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Shaanxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.
- [4] 侯鸿飞, 王世涛, 高联达, 等. 中国地层 7: 中国的泥盆系[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
HOU Hong-fei, WANG Shi-tao, GAO Lian-da, et al. China Formation 7: The Devonian Strata in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [5] 杜定汉. 陕西秦巴地区泥盆系研究[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.
DU Ding-han. Research of the Devonian System of Qin-Ba Region Within the Territory of Shaanxi[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [6] 李瑞保, 裴先治, 刘战庆, 等. 扬子北缘镇巴—高川地区两类不同二叠系对比及区域构造意义[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 125-131.
LI Rui-bao, PEI Xian-zhi, LIU Zhan-qing, et al. Strati-

- graphic Correlations of Two Different Types of Permian Strata and Their Regional Tectonic Significance in Zhenba-Gaochuan Area, Northern Margin of Yangtze Block[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(2): 125-131.
- [7] 刘战庆, 裴先治, 丁仁平, 等. 南大巴山西北段镇巴—下高川地区地质构造解析[J]. *地球科学与环境学报*, 2011, 33(1): 54-63.
- LIU Zhan-qing, PEI Xian-zhi, DING Sa-ping, et al. Geological Structure Analysis of Zhenba-Xiagaochuan Area in the Northwest Section of Southern Dabashan [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2011, 33(1): 54-63.
- [8] 胡健民, 董树文, 孟庆任, 等. 大巴山西段高川地体的构造变形特征及其意义[J]. *地质通报*, 2008, 27(12): 2031-2044.
- HU Jian-min, DONG Shu-wen, MENG Qing-ren, et al. Structural Deformation of the Gaochuan Terrane in the Western Dabashan Tectonic Belt, China and Its Significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(12): 2031-2044.
- [9] 梅志超, 孟庆任, 崔智林, 等. 秦岭造山带泥盆纪的沉积体系与古地理格局演化[J]. *古地理学报*, 1999, 1(1): 32-40.
- MEI Zhi-chao, MENG Qing-ren, CUI Zhi-lin, et al. Devonian Depositional System and Palaeogeographic Evolution of Qinling Orogenic Belt [J]. *Journal of Palaeogeography*, 1999, 1(1): 32-40.
- [10] 李晋僧, 曹宣铎, 杨家禄. 秦岭显生宙古海盆沉积和演化史[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- LI Jin-seng, CAO Xuan-duo, YANG Jia-lu. Phanerozoic Paleo Sea Basin Sedimentary Evolution History in Qinling Mountains[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.
- [11] 殷鸿福, 杨逢清, 赖旭龙, 等. 秦岭三叠系分带及印支期发展史[J]. *现代地质*, 1988, 2(3): 355-365.
- YIN Hong-fu, YANG Feng-qing, LAI Xu-long, et al. Triassic Belts and Indosinian Development of the Qinling Mountains[J]. *Geoscience*, 1988, 2(3): 355-365.
- [12] 孟庆任, 张国伟, 于在平, 等. 秦岭南缘晚古生代裂谷: 有限洋盆沉积作用及构造演化[J]. *中国科学: D 辑, 地球科学*, 1996, 26(增 1): 28-33.
- MENG Qing-ren, ZHANG Guo-wei, YU Zai-ping, et al. Late Paleozoic Sedimentation and Tectonics of Rift and Limited Ocean Basin at Southern Margin of the Qinling [J]. *Science in China: Series D, Earth Sciences*, 1996, 26(S1): 28-33.
- [13] 高长林, 黄泽光, 方成名. 南秦岭泥盆纪: 周缘前陆盆地和新生海洋盆地并列[J]. *石油实验地质*, 2009, 31(2): 136-141.
- GAO Chang-lin, HUANG Ze-guang, FANG Cheng-ming. South Qinling in the Devonian: Juxtaposition of Peripheral Foreland Basins and New-born Oceanic Basins[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2009, 31(2): 136-141.
- [14] NAIPAUER M, VUJOVICH G I, CINGOLANI C A, et al. Detrital Zircon Analysis from the Neoproterozoic-Cambrian Sedimentary Cover (Cuyania Terrane), Sierra de Pie de Palo, Argentina: Evidence of a Rift and Passive Margin System? [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2010, 29(2): 306-326.
- [15] TSIKOURAS B, PE-PIPER G, PIPER D J W, et al. Varietal Heavy Mineral Analysis of Sediment Provenance, Lower Cretaceous Scotian Basin, Eastern Canada [J]. *Sedimentary Geology*, 2011, 237 (3/4): 150-165.
- [16] 张英利, 王宗起, 王刚, 等. 北大巴山地区晚古生代滔河口组碎屑锆石年代学研究及对古生代岩浆事件的限定[J]. *地质学报*, 2016, 90(4): 728-738.
- ZHANG Ying-li, WANG Zong-qi, WANG Gang, et al. Detrital Zircon Geochronology of the Late Paleozoic Taohekou Formation and Its Constraints on the Paleozoic Magmatic Events in North Daba Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(4): 728-738.
- [17] 张英利, 王宗起, 闫臻, 等. 新疆库鲁克塔格早志留世地层沉积学、物源分析新认识[J]. *地质学报*, 2014, 88(10): 1970-1980.
- ZHANG Ying-li, WANG Zong-qi, YAN Zhen, et al. New Insights on Sedimentology, Provenance Analysis of the Early Silurian in the Quruqtagh Area, Xinjiang [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(10): 1970-1980.
- [18] 张英利, 王宗起. 西秦岭造山带徽成盆地早白垩世地层物源综合分析[J]. *地质学报*, 2011, 85(12): 2014-2030.
- ZHANG Ying-li, WANG Zong-qi. Integrated Analyses Constraining the Provenance of Early Cretaceous Huicheng Basin, Western Qinling Orogenic Belt [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(12): 2014-2030.
- [19] CRADDOCK J P, KONSTANTINOU A, VERVOORT J D, et al. Detrital Zircon Provenance of the Mesoproterozoic Midcontinent Rift, Lake Superior Region, U. S. A. [J]. *The Journal of Geology*, 2013, 121(1): 57-73.
- [20] MATTAUER M, MATTE P H, MALAVIEILLE J, et al. Tectonics of the Qinling Belt: Build-up and Evolution of Eastern Asia [J]. *Nature*, 1985, 317: 496-500.
- [21] 王宗起, 闫全人, 闫臻, 等. 秦岭造山带主要大地构

- 造单元的新划分[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1527-1546.
- WANG Zong-qi, YAN Quan-ren, YAN Zhen, et al. New Division of the Main Tectonic Units of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(11): 1527-1546.
- [22] 王坤明, 王宗起, 张英利, 等. 北大巴山滔河镁铁质岩中钛闪石的厘定及指示意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(3): 506-516.
- WANG Kun-ming, WANG Zong-qi, ZHANG Ying-li, et al. Determination of Kaersutite and Its Implication for Mafic Rock in Taohe Area, North Daba Mountain [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2016, 35(3): 506-516.
- [23] 闫 臻, 王宗起, 张英利, 等. 北大巴山与志留纪火山作用相关的碳酸盐岩沉积学特征及形成环境[J]. 沉积学报, 2011, 29(1): 31-40.
- YAN Zhen, WANG Zong-qi, ZHANG Ying-li, et al. Sedimentary Features and Tectonic Environments of Silurian Volcanic-related Carbonates in the North Daba Mountains[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 31-40.
- [24] 覃小丽, 李荣西, 董树文. 大巴山陆内造山带构造流体及其形成条件研究[J]. 地学前缘, 2016, 23(4): 183-189.
- QIN Xiao-li, LI Rong-xi, DONG Shu-wen, et al. Tectonic Fluid and Its Formation Conditions of Dabashan Intra-continent Orogenic Belt[J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(4): 183-189.
- [25] CLARK C M. Tourmaline: Structural Formula Calculations[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2007, 45(2): 229-237.
- [26] HENRY D J, NOVAK M, HAWTHORNE F C, et al. Nomenclature of the Tourmaline-supergroup Minerals [J]. *American Mineralogist*, 2011, 96(5/6): 895-913.
- [27] SELWAY J, XIONG J. Microsoft Excel Spreadsheets Developed by Julie Selway and Jian Xiong[EB/OL]. (2015-12-06) [2016-05-15]. <http://www.open.ac.uk/earth-research/tindle/AGTWebPages/AGTSoft.html>.
- [28] 李怀坤, 耿建珍, 郝 爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 2009, 29(增 1): 600-601.
- LI Huai-kun, GENG Jian-zhen, HAO Shuang, et al. Study on the Determination of Zircon U-Pb Isotope Age by Laser Ablation Multi Receiver Plasma Mass Spectrometer(LA-MC-ICP-MS)[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(S1): 600-601.
- [29] 张英利, 王宗起, 王 刚, 等. 上扬子会泽地区早三叠世飞仙关组砂岩物源特征: 来自重矿物锆尖晶石和碎屑锆石的限定[J]. 地质论评, 2016, 62(1): 54-72.
- ZHANG Ying-li, WANG Zong-qi, WANG Gang, et al. Chromian Spinel, Zircon Age Constraints on the Provenance of Early Triassic Feixianguan Formation Sandstones from Huize Area, Upper Yangtze Region[J]. *Geological Review*, 2016, 62(1): 54-72.
- [30] JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The Application of Laser Ablation-inductively Coupled Plasma-mass Spectrometry to In-situ U-Pb Zircon Geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47-69.
- [31] LIU Y S, GAO S, HU Z C, et al. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2009, 51(1/2): 537-571.
- [32] ANDERSON T. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do Not Report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [33] LUDWING K R. User's Manual for Isoplot 3.0: Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [34] GEHRELS G E, JOHNSON M J, HOWELL D G. Detrital Zircon Geochronology of the Adams Argillite and Nation River Formation, East-central Alaska, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1999, 69(1): 135-144.
- [35] SIRCOMBE K N. Tracing Provenance Through the Isotope Ages of Littoral and Sedimentary Detrital Zircon, Eastern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/2/3/4): 47-67.
- [36] NELSON J, GEHRELS G. Detrital Zircon Geochronology and Provenance of the Southeastern Yukon-Tanana Terran [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2007, 44(3): 297-316.
- [37] KALSBECK F, FREI D, AFFATON P. Constraints on Provenance, Stratigraphic Correlation and Structural Context of the Volta Basin, Ghana, from Detrital Zircon Geochronology: An Amazonian Connection? [J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 212(1/2/3/4): 86-95.
- [38] GONZALEZ-LEON C M, VALENCIA V A, LAWTON T F, et al. The Lower Mesozoic Record of Detrital Zircon U-Pb Geochronology of Sonora, Mexico, and Its

- Paleogeographic Implications[J]. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*, 2009, 26(2): 301-314.
- [39] HENRY D J, GUIDOTTI C V. Tourmaline as a Petrogenetic Indicator Mineral: An Example from the Staurolite-grade Metapelites of NW Maine[J]. *American Mineralogist*, 1985, 70(1): 1-15.
- [40] PRESTON J, HARTLEY A, MANGE-RAJETZKY M, et al. The Provenance of Triassic Continental Sandstones from the Beryl Field, Northern North Sea: Mineralogical, Geochemical, and Sedimentological Constraints[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(1): 18-29.
- [41] 张国伟, 梅志超, 周鼎武. 秦岭造山带的形成及其演化[M]. 西安: 西北大学出版社, 1988.
- ZHANG Guo-wei, MEI Zhi-chao, ZHOU Ding-wu. The Formation and Evolution of the Qinling Mountains Orogenic Belt[M]. Xi'an: Northwest University Press, 1988.
- [42] 张本仁. 秦岭造山带地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- ZHANG Ben-ren. Geochemistry of the Qinling Mountains Orogenic Belt[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [43] 杨为先. 陕西西乡县下高川地区晚古生代—早中生代地层特征及构造演化[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- YANG Wei-xian. The Stratigraphy Features and Tectonic Evolution from Late Paleozoic to Early Mesozoic in Xiagaochuan Area in Xixiang County, Shaanxi Province[D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [44] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 秦岭中—新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- LU Song-nian, LI Huai-kun, CHEN Zhi-hong. Qinling Meso-Neoproterozoic Geological Evolution and Response to Rodinia Super-continent Events[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [45] 陈志宏. 秦岭造山带东部新元古代热-构造事件及其地质意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2004.
- CHEN Zhi-hong. The Neoproterozoic Tectono-thermal Events in the Qinling Orogen, and Their Geotectonic Significances[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2004.
- [46] 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中—新元古代(早期)地质演化[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 107-112.
- LU Song-nian, CHEN Zhi-hong, LI Huai-kun, et al. Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic Evolution of Qinling Orogen[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(2): 107-112.
- [47] 张宗清, 唐索寒, 宋彪, 等. 秦岭造山带晋宁期强烈地质事件及其构造背景[J]. 地球学报, 1997, 18(增 1): 43-45.
- ZHANG Zong-qing, TANG Suo-han, SONG Biao, et al. Jinning Strong Geological Event to Take Place in the Qinling Orogenic Belt and Their Tectonic Setting[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18(S1): 43-45.
- [48] DONG Y P, ZHANG G W, HAUZENBERGER C, et al. Palaeozoic Tectonics and Evolutionary History of the Qinling Orogen: Evidence from Geochemistry and Geochronology of Ophiolite and Related Volcanic Rocks[J]. *Lithos*, 2010, 122(1/2): 39-56.
- [49] 曹宣铎, 张瑞林, 张汉文. 秦巴地区泥盆纪地层及重要含矿层位形成环境的研究[C]// 中国地质学会. 中国地质科学院西安地质矿产研究所文集. 北京: 地质出版社, 1990: 1-124.
- CAO Xuan-duo, ZHANG Rui-lin, ZHANG Han-wen. On Stratigraphy and Sedimentary Environment of Important Ore-bearing Horizon in Devonian Period, Qinling-Dabashan Area, China[C]// Geological Society of China. Proceedings of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 1-124.
- [50] 唐永忠, 齐文, 刘淑文, 等. 南秦岭古生代热水沉积盆地与热水沉积成矿[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 1091-1100.
- TANG Yong-zhong, QI Wen, LIU Shu-wen, et al. Paleozoic Hydrothermal Sedimentary Basin and Hydrothermal Sedimentary Mineralization in the Southern Qinling[J]. *Geology in China*, 2007, 34(6): 1091-1100.
- [51] 杜远生. 秦岭造山带泥盆纪古海洋研究[J]. 地球科学, 1995, 20(6): 617-623.
- DU Yuan-sheng. Devonian Paleo-ocean of Qinling Orogenic Belt[J]. *Earth Sciences*, 1995, 20(6): 617-623.
- [52] 张瑞林. 由秦巴泥盆纪岩相古地理研究探讨古构造活动[J]. 沉积与特提斯地质, 1990(2): 16-26.
- ZHANG Rui-lin. Palaeotectonic Activities: An Investigation of Devonian Sedimentary Facies and Palaeogeography in the Qinling-Bashan Area[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 1990(2): 16-26.
- [53] 张成立, 高山, 袁洪林, 等. 南秦岭早古生代地幔性质: 来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr-Nd-Pb 同位素证据[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 2007, 37(7): 857-865.
- ZHANG Cheng-li, GAO Shan, YUAN Hong-lin, et al. Sr-Nd-Pb Isotopes of the Early Paleozoic Mafic-ultramafic Dykes and Basalts from South Qinling Belt and

- Their Implications for Mantle Composition[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 2007, 37(7): 857-865.
- [54] 王存智,杨坤光,徐 扬,等. 北大巴基性岩墙群地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其大地构造意义[J]. 地质科技情报, 2009, 28(3): 19-26.
WANG Cun-zhi, YANG Kun-guang, XU Yang, et al. Geochemistry and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age of Basic Dike Swarms in North Daba Mountains and Its Tectonic Significance[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(3): 19-26.
- [55] 邹先武,段其发,汤朝阳,等. 北大巴山镇坪地区辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 282-291.
ZOU Xian-wu, DUAN Qi-fa, TANG Chao-yang, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Dating and Lithogeochemical Characteristics of Diabase from Zhenping Area in North Daba Mountain[J]. Geology in China, 2011, 38(2): 282-291.
- [56] 王坤明,王宗起,张英利,等. 陕西柞木沟铁矿矿物学、成矿年代学特征及对矿床成因的指示意义[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 235-254.
WANG Kun-ming, WANG Zong-qi, ZHANG Ying-li, et al. Characteristics of Mineralogy and Geochronology and Their Implications for Ore-forming Mechanism of Zhamugou Mineral Deposit in Shaanxi Province[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 235-254.
- [57] WANG K M, WANG Z Q, ZHANG Y L, et al. Geochronology and Geochemistry of Mafic Rocks in the Xuhe, Shaanxi, China: Implications for Petrogenesis and Mantle Dynamics[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2015, 89(1): 187-202.
- [58] 向忠金,闫全人,宋 博,等. 北大巴山超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩形成时代的新证据及其地质意义[J]. 地质学报, 2016, 90(5): 896-916.
XIANG Zhong-jin, YAN Quan-ren, SONG Bo, et al. New Evidence for the Ages of Ultramafic to Mafic Dikes and Alkaline Volcanic Complexes in the North Daba Mountains and Its Geological Implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(5): 896-916.
- [59] 王 婧,张宏飞,徐旺春,等. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学, 2008, 33(4): 474-486.
WANG Jing, ZHANG Hong-fei, XU Wang-chun, et al. Petrogenesis of Granites from Dangchuan Area in West Qinling Orogenic Belt and Its Tectonic Implication[J]. Earth Science, 2008, 33(4): 474-486.
- [60] 李王晔. 西秦岭—东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究: 对特提斯洋演化的制约[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- LI Wang-ye. Geochronology and Geochemistry of the Ophiolites and Island-arc-type Igneous Rocks in the Western Qinling Orogen and the Eastern Kunlun Orogen: Implication for the Evolution of the Tethyan Ocean[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008.
- [61] 苏 犁,宋述光,宋 彪,等. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1209-1211.
SU Li, SONG Shu-guang, SONG Biao, et al. SHRIMP Zircon U-Pb Ages of Garnet Pyroxenite and Fushui Gabbroic Complex in Songshugou Region and Constraints on Tectonic Evolution of Qinling Orogenic Belt[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(12): 1209-1211.
- [62] 张宗清,宋 彪,唐索寒,等. 秦岭佛坪变质结晶岩系年龄和物质组成特征: SHRIMP 锆英石 U-Pb 年代学和全岩 Sm-Nd 年代学数据[J]. 中国地质, 2004, 31(2): 161-168.
ZHANG Zong-qing, SONG Biao, TANG Suo-han, et al. Age and Material Composition of the Foping Metamorphic Crystalline Complex in the Qinling Mountains: SHRIMP Zircon U-Pb and Whole-rock Sm-Nd Geochronology[J]. Geology in China, 2004, 31(2): 161-168.
- [63] DONG Y P, ZHANG G W, NEUBAUER F, et al. Tectonic Evolution of the Qinling Orogen, China: Review and Synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(3): 213-237.
- [64] 王 涛,张宗清,王晓霞,等. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代: 强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定[J]. 地质学报, 2005, 79(2): 220-231.
WANG Tao, ZHANG Zong-qing, WANG Xiao-xia, et al. Neoproterozoic Collisional Deformation in the Core of the Qinling Orogen and Its Age: Constrained by Zircon SHRIMP Dating of Strongly Deformed Syn-collisional Granites and Weakly Deformed Granitic Veins[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(2): 220-231.
- [65] CHEN D L, LIU L, SUN Y, et al. Determination of the Neoproterozoic Shicaogou Syn-collision Granite in the Eastern Qinling Mountains and Its Geological Implications[J]. Acta Geologica Sinica: English Edition, 2004, 78(1): 73-82.
- [66] 刘会彬,裴先治,丁仁平,等. 西秦岭天水市元龙地区新元古代花岗岩质片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年

- 及其地质意义[J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1315-1320.
- LIU Hui-bin, PEI Xian-zhi, DING Sa-ping, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Neoproterozoic Granitic Gneisses in the Yuanlong Area, Tianshui City, West Qinling, China, and Their Geological Significance[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11): 1315-1320.
- [67] 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 772-786.
- PEI Xian-zhi, DING Sa-ping, ZHANG Guo-wei, et al. Zircons LA-ICP-MS U-Pb Dating of Neoproterozoic Granitoid Gneisses in the North Margin of West Qinling and Geological Implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 772-786.
- [68] 陈志宏, 陆松年, 李怀坤, 等. 北秦岭德河黑云二长花岗片麻岩体的成岩时代: TIMS 和 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素年代学[J]. 地质通报, 2004, 23(2): 136-141.
- CHEN Zhi-hong, LU Song-nian, LI Huai-kun, et al. The Age of the Dehe Biotite Monzogranite Gneiss in the North Qinling: TIMS and SHRIMP U-Pb Zircon Dating[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(2): 136-141.
- [69] 牛宝贵, 和政军, 任纪舜, 等. 秦岭地区陡岭—小茅岭隆起带西段几个岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质论评, 2006, 52(6): 826-835.
- NIU Bao-gui, HE Zheng-jun, REN Ji-shun, et al. SHRIMP U-Pb Ages of Zircons from the Intrusions in the Western Douling-Xiaomaoling Uplift and Their Geological Significances[J]. Geological Review, 2006, 52(6): 826-835.
- [70] 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 1995, 11(2): 101-114.
- ZHANG Guo-wei, ZHANG Zong-qing, DONG Yun-peng. Nature of Main Tectono-lithostratigraphic Units of the Qinling Orogen: Implications for the Tectonic Evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(2): 101-114.
- [71] 郭进京, 张国伟, 陆松年. 中国新元古代大陆拼合与 Rodinia 超大陆[J]. 高校地质学报, 1999, 5(2): 148-156.
- GUO Jin-jing, ZHANG Guo-wei, LU Song-nian, et al. Neoproterozoic Continental Block Collage of China and Rodinia Supercontinent[J]. Geological Journal of China Universities, 1999, 5(2): 148-156.
- [72] 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 太白岩基巩坚沟变形侵入体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及大地构造意义: 吕梁运动在北秦岭造山带的表现初探[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 1660-1667.
- WANG Hong-liang, HE Shi-ping, CHEN Juan-lu, et al. LA-ICP-MS Dating of Zircon U-Pb and Tectonic Significance of the Gongjiangou Deformation Intrusions of Taibai Rock Mass, Shaanxi Province: The Primary Study on the Response in North Qinling Orogenic Belt to Luliang Movement[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(11): 1660-1667.
- [73] 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段胡店片麻状二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质, 2007, 34(1): 17-25.
- WANG Hong-liang, HE Shi-ping, CHEN Juan-lu, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Hudian Gneissic Monzogranite in the Western Segment of the North Qinling and Its Geological Significance[J]. Geology in China, 2007, 34(1): 17-25.
- [74] 王根宝. 南秦岭佛坪片麻岩系同位素年代学及其地质意义[J]. 西北地质科学, 1997, 18(2): 21-25.
- WANG Gen-bao. Isotope Chronology and Its Significances of Foping Gneiss System, South Qinling[J]. Northwest Geoscience, 1997, 18(2): 21-25.
- [75] 杨力, 陈福坤, 杨一增, 等. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄: 北秦岭地体中新元古代岩浆作用和早古生代变质作用的记录[J]. 岩石学报, 2010, 26(5): 1589-1603.
- YANG Li, CHEN Fu-kun, YANG Yi-zeng, et al. Zircon U-Pb Ages of the Qinling Group in Danfeng Area: Recording Mesoproterozoic and Neoproterozoic Magmatism and Early Paleozoic Metamorphism in the North Qinling Terrain[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(5): 1589-1603.
- [76] 张宗清, 刘敦一, 宋彪, 等. 秦岭造山带中部存在太古宙岩块: 陕西商南县湘河地区楼房沟斜长角闪岩—浅粒岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其意义[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 579-587.
- ZHANG Zong-qing, LIU Dun-yi, SONG Biao, et al. An Archean Block in the Central Qinling Orogenic Belt: Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the Loufanggou Amphibolite-leucogranite (Leptite) in the Xianghe Area, Shangnan, Shaanxi, and Their Implications[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 579-587.