

西秦岭下三叠统江里沟组构造环境和物源特征

——来自碎屑岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学的约束

曾俊杰¹⁾, 李康宁¹⁾, 严康¹⁾, 韦乐乐²⁾, 火兴达¹⁾, 张健鹏¹⁾

1) 甘肃省地矿局第三地质矿产勘查院, 兰州, 730050;

2) 陕西国际商贸学院珠宝学院, 陕西省宝石教学示范中心, 西安, 712000

内容提要: 甘肃省夏河—合作地区是西秦岭重要的金矿富集区之一, 下三叠统江里沟组是区内主要的赋矿地层, 主要岩性有长石砂岩、泥质板岩。砂板岩中 $\text{SiO}_2 = 53.2\% \sim 69.34\%$, 平均值 62.36% ; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10.80\% \sim 17.46\%$, 平均值 14.20% ; $\text{FeO} = 0.45\% \sim 4.85\%$, 平均值 3.31% ; $\text{CaO} = 1.92\% \sim 7.66\%$, 平均值 3.59% 。稀土元素总量较高, $\text{REE} = 117.97 \times 10^{-6} \sim 258.93 \times 10^{-6}$, 平均 $= 179.98 \times 10^{-6}$ 。经球粒陨石标准化, 曲线明显右倾, 富集轻稀土元素, $\delta\text{Eu} = 0.55 \sim 0.77$, 平均值 0.65 , 具有明显的负异常; 经北美页岩标准化, 可见曲线近似平行略向右倾斜, $\delta\text{Eu} = 0.85 \sim 1.18$, 平均值 1.00 , 不具有异常。锆石的年龄范围为 $260 \sim 2594 \text{ Ma}$, 主要集中在印支期—海西期 (峰值 276 Ma , 391 Ma)、加里东期 (峰值 463 Ma)、古元古代—新太古代 (峰值 1866 Ma , 2501 Ma) 三个阶段。通过碎屑岩主微量元素地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系、结合区域地质背景综合判断, 江里沟组源区的构造环境主要呈现出大陆岛弧、活动大陆边缘的特征, 物源主要是来自上地壳的长英质火山岩, 绝大多数来自西秦岭及其邻区同期岩浆岩, 部分来自北秦岭构造带、祁连造山带及华北板块南缘的变质基底。本次研究为西秦岭地区构造演化提供了沉积学的证据。

关键词: 西秦岭; 下三叠统; 早三叠世; 江里沟组; 碎屑锆石

秦岭造山带以商丹带和勉略带两条古蛇绿构造混杂岩带, 将秦岭划分为华北板块、秦岭微板块和扬子板块。西秦岭造山带为秦岭造山带的西延部分, 位于文县—徽县—成县盆地—凤县—太白盆地一线以西, 东侧为东秦岭造山带, 北以宝鸡—天水—武山—临夏为界与祁连造山带相邻, 南以玛沁—文县—勉县—略阳为界与松潘—甘孜地块过渡衔接, 西与柴达木和昆仑造山带毗邻 (图 1a)。西秦岭挟持于华北板块南缘祁连—北秦岭加里东构造带和扬子板块北缘海西构造带的拼结部位, 是诸多地块和造山带汇聚交接地带 (任纪舜等, 1991; 闫臻, 2002)。总体上是由大小数量不等海陆相间的微板块组成的一个多岛小洋盆 (潘桂棠等, 1997; 许志琴等, 2006), 具有多期多阶段多旋回性、软碰撞的特点 (殷鸿福等, 1992; Zhang Kexin, 2000)。

西秦岭造山带是我国重要的金、锑、铅、锌等多金属

成矿区之一, 近年来随着早子沟金矿、加甘滩金矿等一批大型、超大型金矿的发现, 使西秦岭夏河—合作地区成为我国重要金矿富集区。在西秦岭夏河—合作地区广泛分布的三叠纪地层是金矿的主要赋矿层位 (图 1b), 三叠系主要为一套砂板岩复理石沉积, 记录了西秦岭及其周缘晚古生代—中生代构造岩浆演化、成矿作用和物质来源等重要信息, 具有独特的地质意义。一直以来, 大多数学者将目光聚焦于研究区岩浆岩和金矿方面, 并取得了不少成果, 但对这一地区沉积岩关注极少, 只通过剖面测量或区域调查, 对三叠系地层进行了地层层序、沉积环境等方面的研究 (殷鸿福等, 1992; 何海清, 1996; 李永军等, 2003; 闫臻等, 2012)。本文通过对区内下三叠统江里沟组碎屑岩主微量元素地球化学特征以及碎屑锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨其构造属性和物源组成, 为研究西秦岭造山带盆地构造演化提供新的证据。

注: 本文为国家重点研发计划深地资源勘查开采专项“深部矿产资源三维找矿预测评价示范”课题 (编号: 2017YFC0601506) “甘肃省玛曲—合作地区资源潜力评价与深部找矿预测示范”专题; 甘肃省基础地质调查研究项目“甘肃玛曲—合作整装勘查区深部找矿预测”; 中国地质调查局项目“甘肃省夏河—合作地区金矿整装勘查区矿产调查与找矿预测” (编号: 12120100000160901-60、12120100000160901-49) 的成果。

收稿日期: 2020-07-15; 改回日期: 2020-11-28; 责任编辑: 黄道衷、章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.006

作者简介: 曾俊杰, 男, 1970 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质矿产调查及技术管理工作; Email: 436044828@qq.com。通讯作者: 李康宁, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事地质矿产调查与找矿预测工作; Email: 379607468@qq.com。

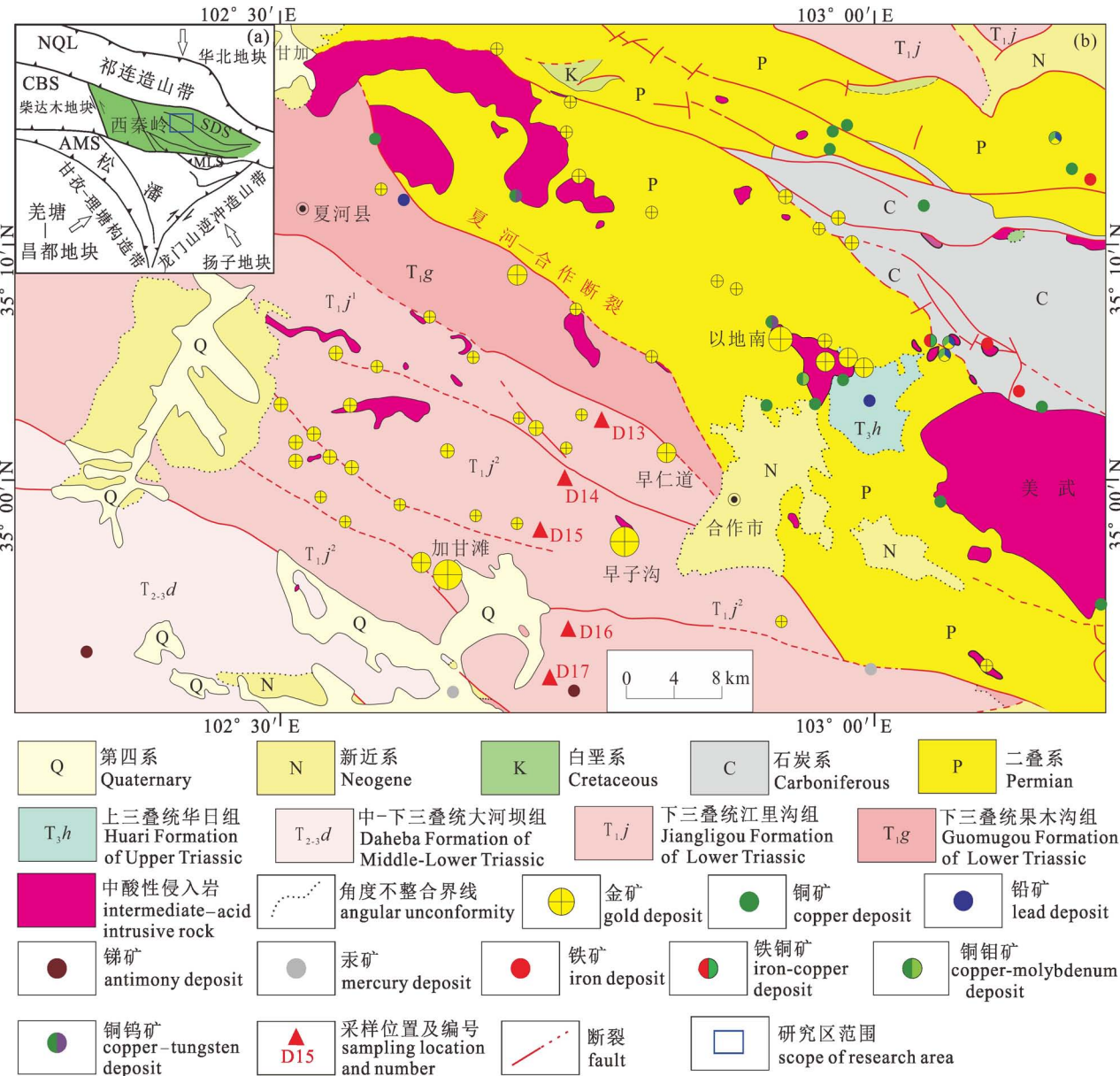


图 1 甘肃夏河—合作地区地质简图(据张国伟等,1995;李康宁等,2019)

Fig. 1 Geological map of Xiahe—Hezuo area, Gansu (from Zhang Guowei et al. , 1995&;Li Kangning et al. , 2019&)
CBS—柴达木盆地北缘古缝合带;SDS—商南—丹凤古缝合带;KLS—东昆仑古缝合带;AMS—阿尼玛卿古缝合带;
NQL—北祁连缝合带;MLS—勉县—略阳古缝合带
CBS—Paleo-suture belt on the northern margin of the Qaidam Basin;SDS—Shannan—Danfeng paleo-suture belt;KLS—East Kunlun paleo-suture
belt;AMS—Animaqing paleo-suture belt;NQL—North Qilian suture belt;MLS—Mianxian—Lüeyang paleo-suture belt

1 地质背景

研究区位于西秦岭西北部夏河—合作一带,岩浆岩发育,呈弧形北西向断续分布,以石英闪长玢岩—花岗闪长岩组合为主,时代集中在 210~250 Ma,形成于活动大陆边缘弧构造环境(刘伯崇等,2018)。区域地层整体呈一背斜构造(力士山复背

斜),北西向带状展布。以夏河—合作断裂为界,以北为古生代地层,主要有石炭系、二叠系,为滨浅海相陆源碎屑岩夹碳酸盐岩建造;以南主要为三叠系,为一套半深海斜坡相细碎屑岩复理石建造。

下三叠统江里沟组为区内最主要的赋矿地层,早子沟金矿、加甘滩金矿两个特大型金矿均位于这套地层中。江里沟组北西向展布,顶、底分别与中—

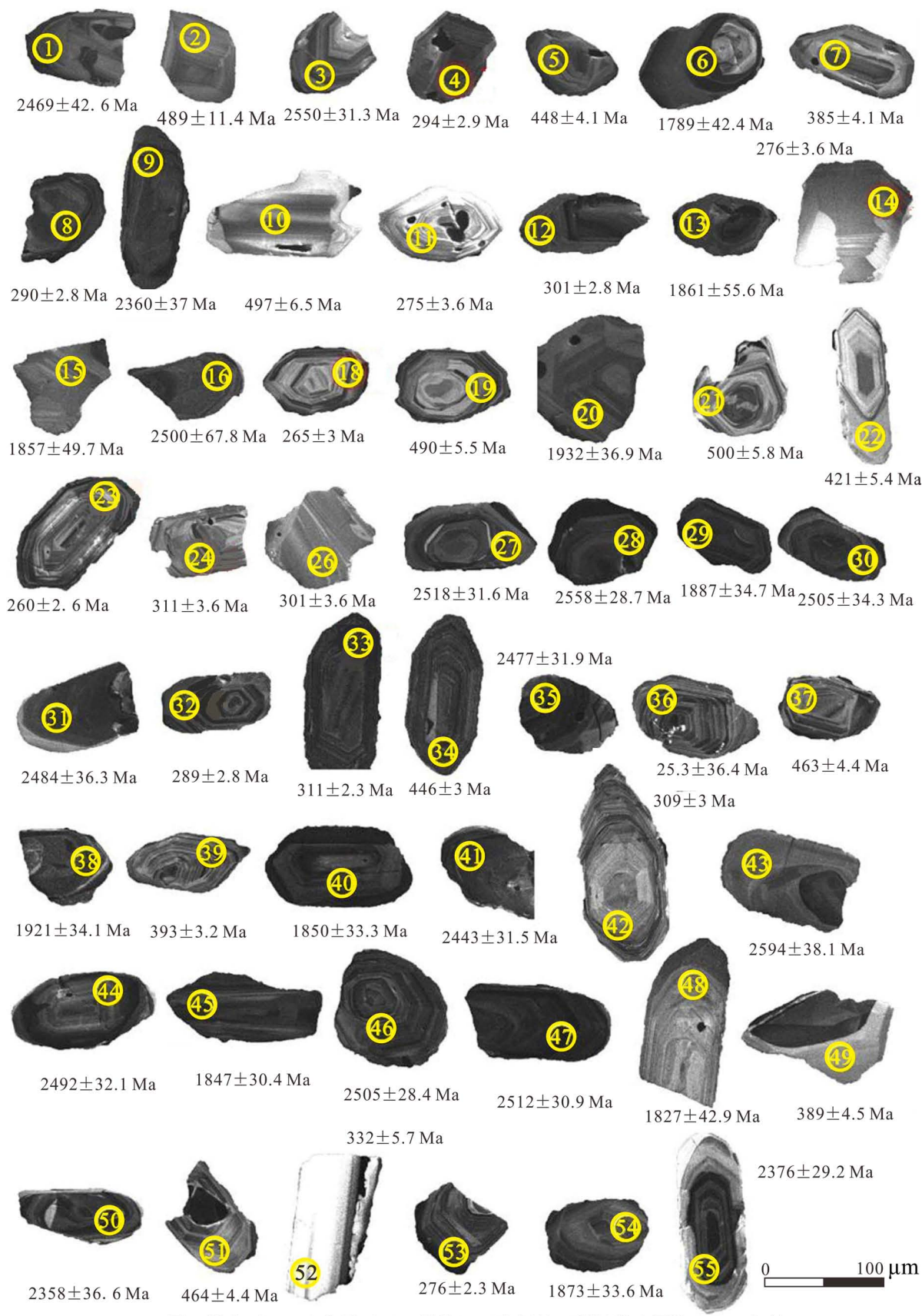


图2 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组锆石阴极发光图像及U-Pb年龄

Fig. 2 U-Pb ages and CL images of the zircon from the Lower Triassic Jiangligou Fm. in Xiahe-Hezuo area, Gansu

下三叠统大河坝组、下三叠统果木沟组呈断层接触。下三叠统江里沟组可分为三段:一段由灰色泥硅质、粉砂质板岩夹深灰色砂岩和灰色泥晶灰岩、砂质灰岩透镜组成;二段由灰黑色泥硅质板岩、粉砂质板岩夹灰褐色长石石英砂岩、含砾长石石英砂岩组成;三段下部岩性组合为灰褐色岩屑长石砂岩、长石石英砂岩、粉砂岩夹板岩,上部出现微晶灰岩透镜。正粒序层理、水平层理、平行层理、交错层理非常发育。罗根明等(2007)根据化石资料和区域对比,将这套地层划分为早三叠世奥伦尼克期,沉积于大陆斜坡边缘半深海环境。

2 样品描述和分析方法

2.1 样品特征

江里沟组(T_{J^1})一共采取地层岩石样品 5 件。其中 D13 样品取自江里沟组一段(T_{J^1})底部,岩性为灰白色中粒岩屑石英砂岩;D14、D15 样品取自江里沟组二段(T_{J^2})底部和顶部,岩性分别为灰黑色粉砂质板岩、灰黑色细粒石英砂岩;D16、D17 样品取自江里沟组三段(T_{J^3})底部和顶部,岩性分别为

褐色泥质粉砂岩、灰色细粒石英砂岩。挑选的锆石颗粒主要为无色透明,形态以短柱状、不规则状和长柱状为主。从阴极发光图上可以看出锆石发育明显的振荡环带,部分锆石因为后期的变质作用或者热液活动出现部分的变质增生结构(图 2)。

2.2 样品测试

主量元素由国土资源部武汉矿产资源监督检测中心测试,采用 X-射线荧光光谱仪(XRF),分析仪器型号 XRF-1800,相对误差小于 1%;微量元素在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测试,采用等离子发射光谱法(ICP-MS),仪器为美国安捷伦公司 Agilent 7700 型,相对误差小于 5%。

锆石制靶、阴极发光(CL)电子成像和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。ICP-MS 仪为 Agilent7500a,激光剥蚀系统为 GoLas2005。激光束斑直径 44 μm ,激光能量密度 8 mJ/cm ,剥蚀频率 8 Hz。使用标准锆石 91500 作为外标进行同位素比

表 1 甘肃夏河—合作地区下三叠统江沟组碎屑岩主量元素(%)、微量元素($\times 10^{-6}$)和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果及主要参数
Table 1 The contents of major elements (%), trace elements ($\times 10^{-6}$) and rear earth elements ($\times 10^{-6}$) in the clastic rocks of the Lower Triassic Jiangligou Formation in Xiahe—Hezuo area, Gansu

岩性	灰白色中粒岩屑石英砂岩			灰黑色粉砂质板岩			灰黑色细粒石英砂岩			灰色细粒石英砂岩				
样品编号	D13-1	D13-2	D13-3	D14-1	D14-2	D14-3	D15-1	D15-2	D15-3	D16-2	D16-3	D17-1	D17-2	D17-3
SiO ₂	69.34	61.34	67.6	57.7	57.93	59.24	61.62	61.8	59.86	53.2	68.46	65.44	65.3	64.18
TiO ₂	0.58	0.43	0.53	0.58	0.71	0.61	0.68	0.66	0.69	0.61	0.55	0.72	0.68	0.78
Al ₂ O ₃	11.45	10.80	11.67	15.29	17.46	14.92	16.70	16.39	16.60	15.87	13.03	12.77	13.15	12.64
Fe ₂ O ₃	0.35	0.29	0.38	0.90	1.09	1.00	1.75	1.58	1.74	6.05	3.39	0.42	0.75	0.44
FeO	2.95	2.52	2.92	4.85	4.85	4.72	3.88	3.88	3.65	0.45	0.45	3.85	3.52	3.88
MnO	0.05	0.19	0.06	0.07	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.06
MgO	1.44	1.93	1.39	2.79	2.83	2.70	2.62	2.57	2.57	1.03	0.77	2.11	2.07	2.36
CaO	2.46	7.44	3.39	4.79	2.85	4.41	1.92	2.19	3.12	7.66	3.20	2.12	2.01	2.70
Na ₂ O	2.14	1.44	2.09	1.83	2.09	2.02	2.24	2.30	2.21	0.18	2.03	2.25	2.15	2.26
K ₂ O	2.57	2.29	2.70	2.62	3.10	2.41	2.99	2.88	3.04	4.21	2.19	1.91	2.04	1.96
P ₂ O ₅	0.11	0.08	0.09	0.15	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.14	0.14	0.16	0.16	0.16
H ₂ O ⁺	1.67	1.99	1.67	3.48	3.65	3.36	3.80	3.73	3.69	4.27	2.89	2.41	2.67	2.45
CO ₂	4.24	9.02	5.08	4.40	2.90	4.10	1.30	1.55	2.30	6.17	2.67	5.28	4.97	5.50
Total	99.35	99.76	99.57	99.45	99.68	99.71	99.7	99.73	99.66	99.89	99.81	99.49	99.52	99.37
Rb	100.0	88.6	107.0	118.0	133.0	104.0	135.0	133.0	134.0	189.0	95.6	81.0	87.7	81.7
Ba	438	375	468	335	391	315	487	480	485	303	227	201	212	203
Th	13.1	7.56	10.3	11.2	13.2	11.4	13.3	13.5	13.7	14.8	11.9	15.7	14.8	17.6
U	2.6	1.7	2.1	2.6	2.9	2.5	2.9	2.9	3.0	3.1	1.5	3.1	2.9	3.3
Nb	12.0	8.5	10.8	11.2	13.0	11.4	13.4	13.2	13.5	15.1	11.2	13.4	13.4	14.4
Ta	0.90	0.65	0.81	0.82	0.96	0.83	1.01	0.94	0.99	1.10	0.86	1.05	1.00	1.10
Sr	256	381	326	333	228	330	141	159	202	206	272	318	329	396
Zr	299	154	203	130	162	140	175	187	174	130	244	368	325	434

岩性	灰白色中粒岩屑石英砂岩			灰黑色粉砂质板岩			灰黑色细粒石英砂岩			灰色细粒石英砂岩				
样品编号	D13-1	D13-2	D13-3	D14-1	D14-2	D14-3	D15-1	D15-2	D15-3	D16-2	D16-3	D17-1	D17-2	D17-3
Hf	7.70	4.03	5.14	3.57	4.45	3.68	4.56	4.89	4.45	3.57	6.31	9.41	8.58	11.30
La	35.10	24.88	31.08	33.54	36.69	33.93	37.62	36.69	37.42	37.08	36.85	49.48	44.37	57.44
Ce	73.12	49.69	62.45	71.10	76.53	71.09	78.45	75.95	76.49	75.55	74.63	98.44	89.82	114.48
Pr	7.90	5.60	6.95	7.93	8.37	8.15	8.73	8.41	8.58	8.24	8.20	10.83	9.95	12.51
Nd	29.17	20.91	26.41	29.53	31.36	30.74	32.28	31.10	31.65	30.61	30.03	39.51	37.00	45.12
Sm	5.33	4.04	4.86	5.84	5.95	5.95	5.92	5.92	6.00	5.68	5.67	6.90	6.79	7.62
Eu	1.07	0.96	1.07	1.16	1.12	1.15	1.14	1.17	1.13	1.15	1.14	1.21	1.20	1.25
Gd	4.48	3.62	4.13	5.00	5.03	5.24	5.07	5.13	5.05	4.84	4.64	5.74	5.62	6.23
Tb	0.69	0.56	0.60	0.77	0.78	0.76	0.76	0.79	0.74	0.72	0.66	0.85	0.81	0.95
Dy	3.75	3.13	3.57	4.50	4.82	4.72	4.63	4.83	4.67	4.37	3.91	4.82	4.88	5.34
Ho	0.79	0.62	0.69	0.88	0.95	0.91	0.93	0.98	0.90	0.87	0.77	0.96	0.94	1.06
Er	2.17	1.78	1.99	2.59	2.73	2.71	2.68	2.85	2.60	2.49	2.20	2.66	2.73	2.94
Tm	0.35	0.26	0.30	0.38	0.44	0.41	0.40	0.44	0.42	0.38	0.34	0.44	0.42	0.45
Yb	2.26	1.66	1.94	2.48	2.81	2.79	2.65	2.81	2.62	2.42	2.27	2.79	2.66	3.05
Lu	0.35	0.26	0.30	0.38	0.42	0.40	0.42	0.45	0.40	0.39	0.34	0.42	0.42	0.49
Y	22.29	18.64	19.73	26.04	27.74	26.78	26.22	28.47	27.02	23.88	22.59	27.56	27.35	30.11
Sc	9.32	7.50	8.98	14.77	15.94	14.59	14.24	14.26	14.26	15.41	9.36	11.60	11.28	11.20
Ga	13.1	11.8	13.3	19.7	22.1	19.5	20.6	21.1	21	21.7	15.3	15.7	16.3	16.1
Cs	7.89	6.74	9.10	5.15	6.30	5.29	7.06	7.01	8.23	15.60	8.51	4.91	5.50	5.30
Ti	0.58	0.51	0.62	0.65	0.78	0.61	0.75	0.70	0.75	1.02	0.55	0.45	0.50	0.50
Li	8.37	6.57	6.28	57.60	58.20	58.90	51.40	51.00	50.90	60.00	23.50	41.50	38.80	40.20
V	57.5	47.3	56.1	98.5	110.0	96.6	98.0	96.9	99.5	96.0	56.6	76.7	79.3	78.1
Cr	54.5	44.0	49.9	65.3	75.0	64.6	70.4	71.6	71.6	67.7	50.9	66.9	64.4	66.7
Co	38.2	28.9	33.8	16.2	17.1	17.1	21.3	20.7	18.6	15.1	30.1	29.3	29.0	29.1
Ni	18.8	16.8	19.9	34.5	35.5	33.8	32.9	33.3	32.5	31.4	18.4	25.4	22.9	22.8
Fe ₂ O ₃ ^T	3.63	3.09	3.63	6.29	6.48	6.25	6.07	5.90	5.80	6.55	3.89	4.70	4.67	4.76
Fe ₂ O ₃ ^T +MgO	5.07	5.02	5.02	9.08	9.31	8.95	8.69	8.47	8.37	7.58	4.66	6.81	6.74	7.12
K ₂ O/Na ₂ O	1.20	1.59	1.29	1.43	1.48	1.19	1.33	1.25	1.38	23.39	1.08	0.85	0.95	0.87
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	6.06	5.68	5.79	3.77	3.32	3.97	3.69	3.77	3.61	3.35	5.25	5.12	4.97	5.08
K ₂ O/(CaO+Na ₂ O)	0.56	0.26	0.49	0.40	0.63	0.38	0.72	0.64	0.57	0.54	0.42	0.44	0.49	0.40
F1	-2.71	-0.34	-1.92	1.31	0.63	1.18	-0.33	-0.21	0.23	3.93	0.54	-1.47	-1.42	-1.68
F2	-2.29	-1.01	-1.59	-3.29	-3.27	-3.60	-3.56	-3.48	-2.76	2.08	-1.78	-4.31	-4.14	-4.23
F3	0.02	0.34	0.08	1.62	1.34	1.52	0.73	0.88	0.89	-1.75	-1.03	0.84	0.60	0.97
F4	-3.01	-4.62	-4.10	-5.29	-4.63	-4.50	-3.04	-3.06	-3.63	-7.62	-1.06	-1.46	-1.46	-1.37
ΣREE	166.53	117.97	146.34	166.08	178.00	168.95	181.68	177.52	178.67	174.79	171.65	225.05	207.61	258.93
LREE	151.69	106.08	132.82	149.10	160.02	151.01	164.14	159.24	161.27	158.31	156.52	206.37	189.13	238.42
HREE	14.84	11.89	13.52	16.98	17.98	17.94	17.54	18.28	17.40	16.48	15.13	18.68	18.48	20.51
LREE/HREE	10.22	8.92	9.82	8.78	8.90	8.42	9.36	8.71	9.27	9.61	10.35	11.05	10.23	11.62
Y/Ho	32.41	32.94	32.10	53.08	45.51	55.41	43.87	47.57	43.33	30.78	33.45	56.44	45.80	45.60
(La/Yb) _N	11.14	10.75	11.49	9.70	9.37	8.72	10.18	9.37	10.24	10.99	11.64	12.72	11.96	13.51
(δEu) _N	0.67	0.77	0.73	0.66	0.63	0.63	0.64	0.65	0.63	0.67	0.68	0.59	0.59	0.55
(δCe) _N	1.08	1.03	1.04	1.07	1.07	1.05	1.06	1.06	1.05	1.06	1.05	1.04	1.05	1.05
(La/Sm) _N	4.25	3.98	4.13	3.71	3.98	3.68	4.10	4.00	4.03	4.21	4.20	4.63	4.22	4.87
(Gd/Lu) _N	1.58	1.72	1.70	1.63	1.48	1.62	1.49	1.41	1.56	1.53	1.69	1.69	1.65	1.57
(La/Yb) _S	1.46	1.41	1.51	1.28	1.23	1.15	1.34	1.23	1.35	1.44	1.53	1.67	1.57	1.78
(δEu) _S	1.03	1.18	1.12	1.01	0.96	0.97	0.98	1.00	0.96	1.03	1.04	0.90	0.91	0.85
(δCe) _S	1.04	1.00	1.01	1.03	1.04	1.01	1.03	1.03	1.01	1.03	1.02	1.01	1.01	1.01
(La/Sm) _S	1.23	1.15	1.20	1.08	1.15	1.07	1.19	1.16	1.17	1.22	1.22	1.34	1.22	1.41
(Gd/Lu) _S	1.08	1.18	1.16	1.11	1.01	1.11	1.02	0.96	1.07	1.05	1.15	1.16	1.13	1.08
La/Yb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02

注：F1 = - 1.773TiO₂ + 0.607Al₂O₃ + 0.76Fe₂O₃^T - 1.5MgO + 0.616CaO + 0.509Na₂O - 1.224K₂O - 9.09; F2 = 0.445TiO₂ + 0.07Al₂O₃ - 0.25Fe₂O₃^T - 1.142MgO + 0.438CaO + 0.475Na₂O + 1.462K₂O - 6.861; F3 = 30.638TiO₂/Al₂O₃ - 12.541Fe₂O₃^T/Al₂O₃ + 7.329MgO/Al₂O₃ + 12.031Na₂O/Al₂O₃ + 35.402K₂O/Al₂O₃ - 6.382; F4 = 36.5TiO₂/Al₂O₃ - 10.879Fe₂O₃^T/Al₂O₃ + 30.875MgO/Al₂O₃ - 5.404Na₂O/Al₂O₃ + 11.11Al₂O₃-3.89; 下标 N 代表球粒陨石标准化; 下标 S 代表北美页岩标准化。

值校正,元素含量以国际标样 NIST610 为外标。同位素比值和元素含量计算采用软件 ICPMSDATAAL11 处理,并利用 ISOPLLOT/Ex_ver3 (Ludwig,2003) 获得谐和年龄和图解。为避免古老锆石 (>1.0 Ga) 普遍存在铅丢失的现象,采用 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 年龄作为锆石年龄,对于 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄 <1000 Ma 的锆石,则选用 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄作为锆石年龄。

3 岩石地球化学特征

3.1 主量元素

主量元素分析数据见表 1。江里沟组碎屑岩 $\text{SiO}_2 = 53.2\% \sim 69.34\%$, 平均值 62.36% ; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10.80\% \sim 17.46\%$, 平均值 14.20% ; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 0.29\% \sim 6.05\%$, 平均值 1.44% ; $\text{FeO} = 0.45\% \sim 4.85\%$, 平均值 3.31% ; $\text{CaO} = 1.92\% \sim 7.66\%$, 平均值 3.59% , 含量较高; $\text{Na}_2\text{O} = 0.18\% \sim 2.30\%$, 平均值 1.95% ; $\text{K}_2\text{O} = 1.91\% \sim 4.21\%$, 平均值 2.64% ; $\text{TiO}_2 = 0.43\% \sim 0.78\%$, 平均值 0.63% ; $(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} + \text{MgO}) = 4.66\% \sim 9.31\%$, 平均值 7.21% ; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 = 0.17 \sim 0.30$, 平均值 0.23 ; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.85 \sim 23.39$, 平均值 2.80 。

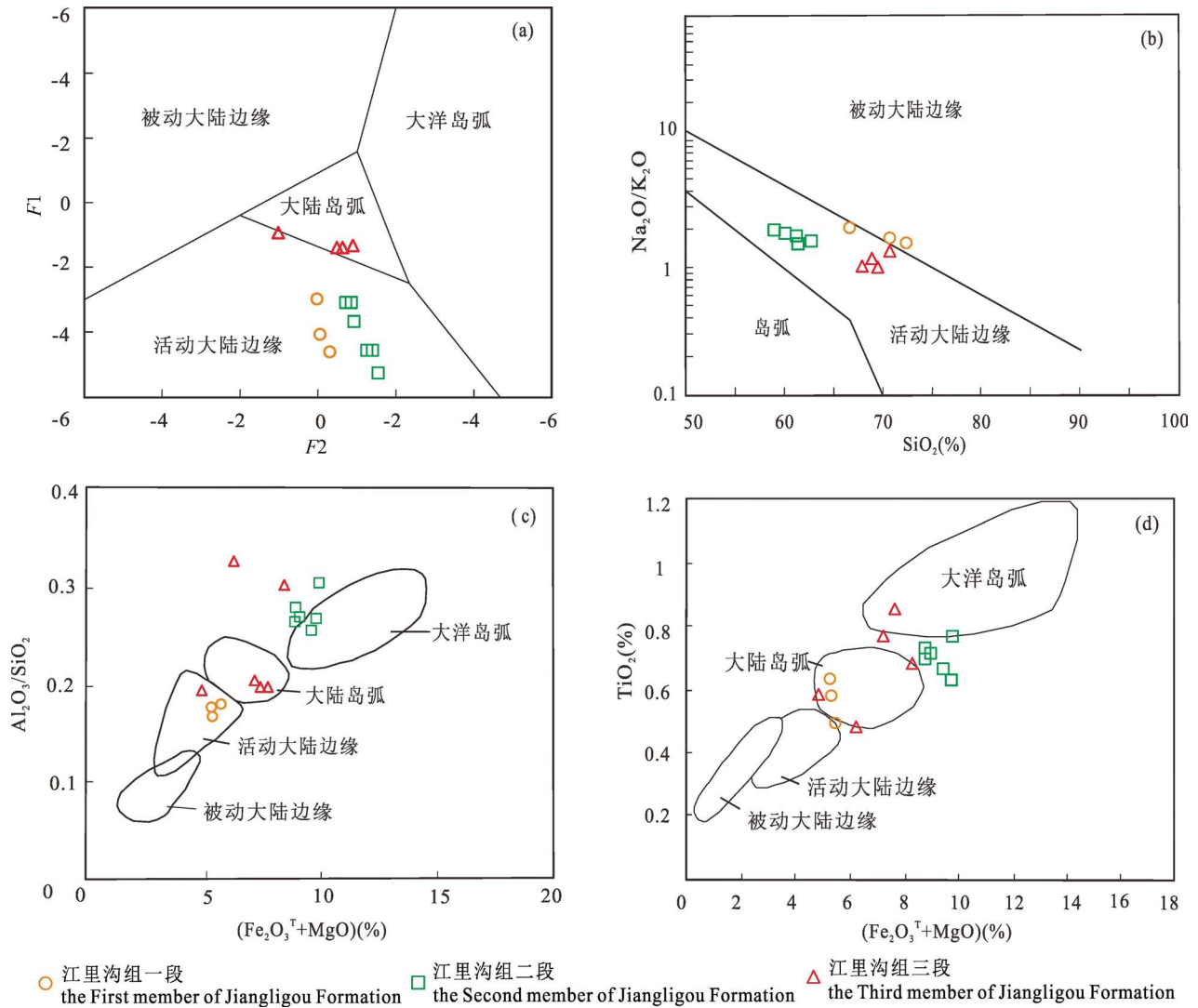


图 3 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组主量元素构造环境判别图解
[底图(a)、(c)据 Bhatia,1983;底图(b)据 Roser and Korsch,1986;底图(d)据 Bhatia,1985]

Fig. 3 Structure environment discrimination diagram of major elements from stones samples in the Lower Triassic Jiangligou Formation in Xiahe—Hezuo area, Gansu [Base map (a) and (c) after Bhatia, 1983; base map (b) after Roser and Korsch, 1986; base map (d) after Bhatia, 1985]

总体来看,江里沟组一段中 SiO_2 、 CaO 较高,二段中 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 含量较高,三段各种元素含量介于一段与二段之间。

利用主量元素 $F1-F2$ 构造环境判别图(图 3a)可得知江里沟组一段和二段构造环境为活动大陆边缘;三段构造环境为活动大陆边缘和大陆岛弧。从 $\lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-\text{SiO}_2$ 构造环境判别图解(图 3b)可得知样品主要落入活动大陆边缘中。从 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2-(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO})$ 图解(图 3c)中看出,一段落入活动大陆边缘区域;二段落入大洋岛弧附近;三段落入大陆岛弧区域。从 $\text{TiO}_2-(\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}+\text{MgO})$ 图解中(图 3d)看出,一段落入大陆岛弧区域;二段和三段落在大陆岛弧附近。综上,主量元素特征显示江里沟组主要为活动大陆边缘和大陆岛弧环境。

在 $\lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图解中(图 4a),这些样品主要为杂砂岩和岩屑砂岩,成分成熟度较低。在主量元素 $F3-F4$ 判别图解中(图 4b),江里沟组一段样品落入长英质火成物源区和石英岩沉积物源区,二段、三段落入中性岩火成物源区,没有样品落入镁铁质火成物源区,说明碎屑物质主要来源于陆壳。

3.2 稀土及微量元素

江里沟组的 ΣREE 为 $117.97\times10^{-6}\sim258.93\times$

10^{-6} ,平均值 179.98×10^{-6} , LREE/HREE 值为 $8.42\sim11.62$,平均值 9.66 ;La 含量为 $24.88\times10^{-6}\sim57.44\times10^{-6}$,平均值 38.01×10^{-6} ;La/Yb 值为 $12.16\sim18.83$,平均值 15.12 。经球粒陨石标准化(图 5a),可见曲线明显右倾,富集轻稀土,与上地壳和 PAAS 具有相似分布; $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ 值为 $0.55\sim0.77$,平均值 0.65 ,具有明显的负异常; $(\delta\text{Ce})_{\text{N}}$ 值为 $1.03\sim1.08$,平均值 1.05 ,基本不具有异常; $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ 值为 $8.72\sim13.51$,平均值 10.84 ; $(\text{La/Sm})_{\text{N}}$ 值为 $3.68\sim4.87$,平均值 4.14 。 $(\delta\text{Eu})_{\text{N}}$ 值为 $0.85\sim1.18$,平均值 1.00 ,不具有异常; $(\delta\text{Ce})_{\text{N}}$ 值为 $1.00\sim1.04$,平均值 1.02 ,基本不具有异常。经北美页岩标准化(图 5b),可见曲线近似平行且向右倾斜, $(\text{La/Yb})_{\text{s}}$ 值为 $1.15\sim1.78$,平均值 1.43 ; $(\text{La/Sm})_{\text{s}}$ 值为 $1.07\sim1.41$,平均值 1.20 ; $(\text{Gd/Lu})_{\text{s}}$ 值为 $0.96\sim1.18$,平均值为 1.09 。总体来看,江里沟组地层中,由老到新,REE 逐渐增加。

从微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5c)上可以看出,江里沟组的样品都富集 Th、U、Rb 等高场强元素和大离子亲石元素,亏损 Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti 等元素,可见其与大陆上地壳具有相似的分布,表明物源具有陆源的特征。

由于地层经历了轻微蚀变及变质作用,可进一

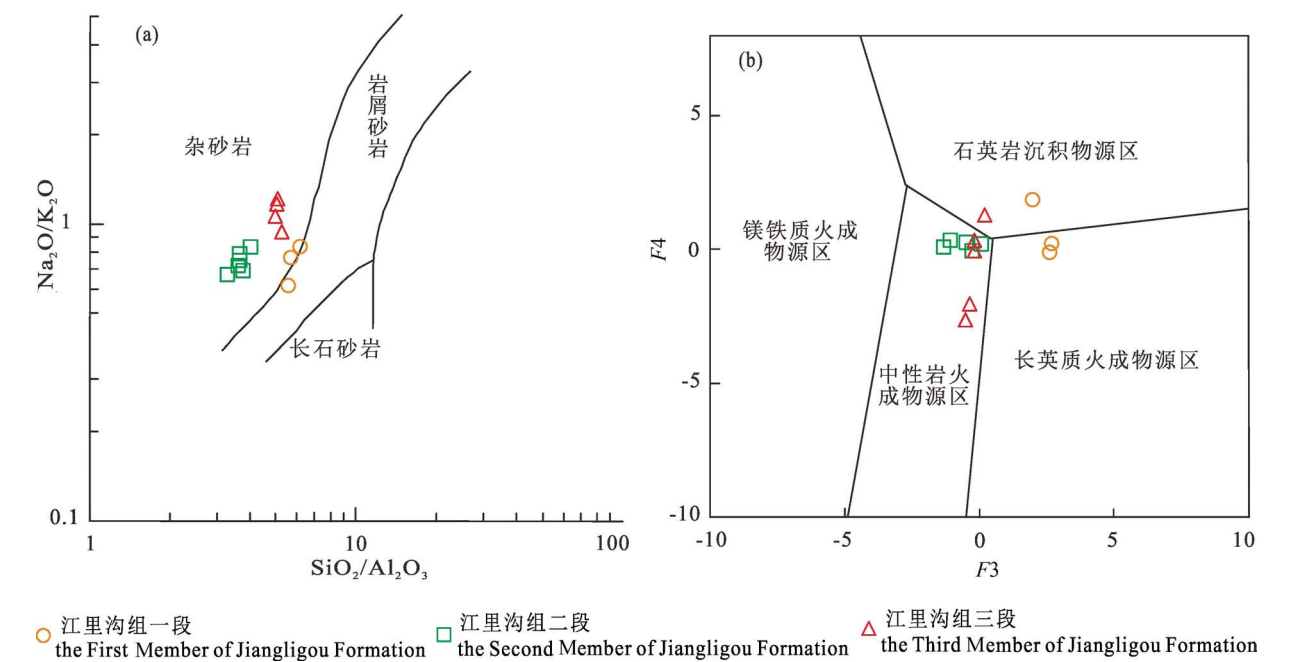


图 4 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组物源判别图解
[底图(a)据 Roser and Korsch,1986;底图(b)据 Pettijohn et al. ,1972)]

Fig. 4 Provenance discrimination diagram of the stone samples from the Lower Triassic Jiangligou Formation in Xiahe—Hezuo area, Gansu [Base map (a) after Roser and Korsch, 1986; base map (b) after Pettijohn et al. , 1972]

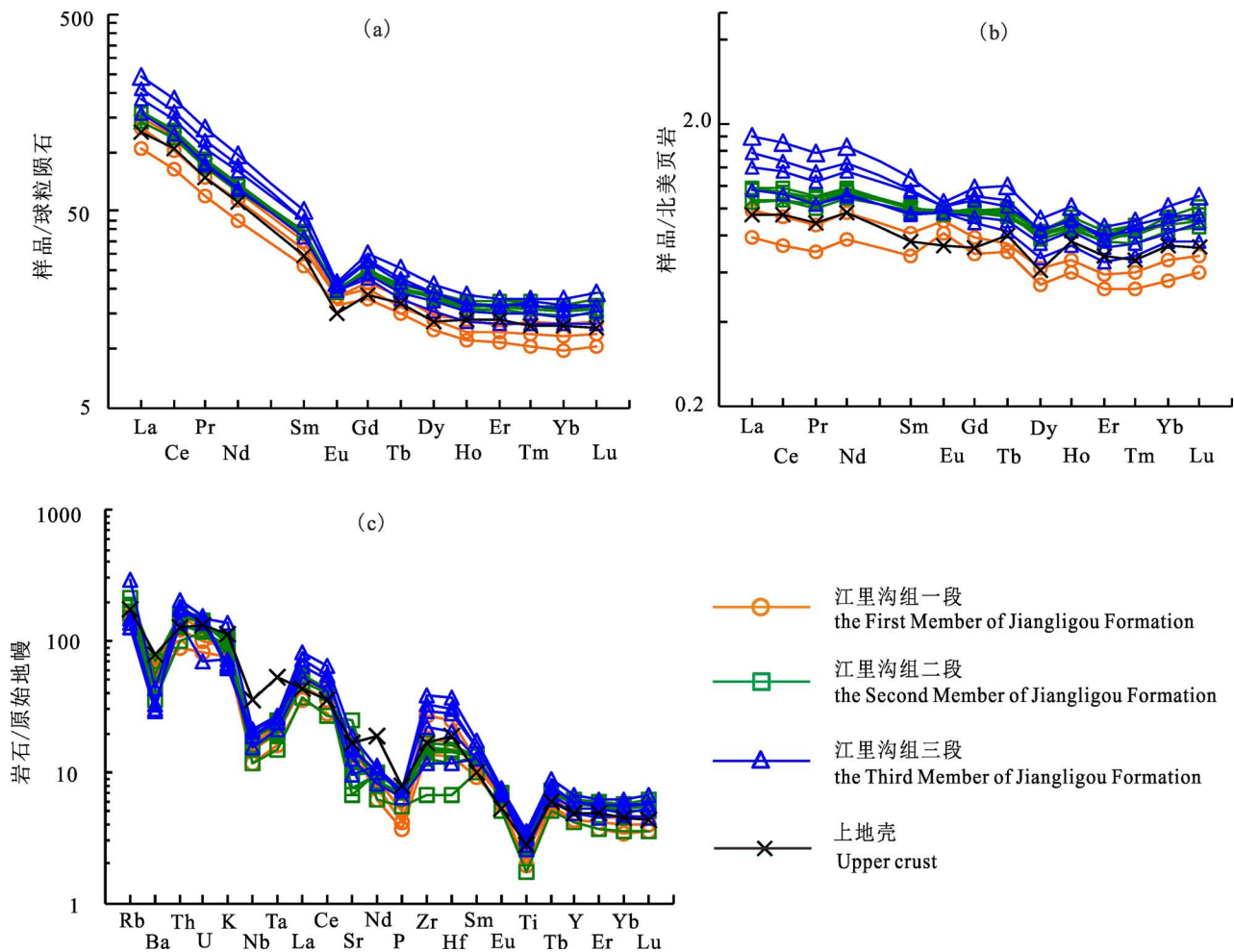


图 5 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)、稀土元素北美页岩标准化(b)、球粒陨石标准化配分曲线图(c) (球粒陨石标准值、原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989; 北美页岩标准值据 Haskin et al., 1966)

Fig. 5 Primitive mantle-normalized spider diagram (a), North American shale-normalized REE pattern (b), and chondrite-normalized pattern (c) of the stone samples from the Lower Triassic Jiangligou Formation in Xiahe—Hezuo area, Gansu (The standard values of chondrite and primitive mantle are from Sun and McDonough, 1989; North American shale standard values are from Haskin et al., 1966)

步用微量元素对构造环境进行约束。在 La—Th—Sc 判别图(图 6a)中,江里沟组落入大陆岛弧及其附近;在 Th—Co—Zr/10 判别图(图 6b)中,落入大陆岛弧与活动大陆边缘及其附近;在 Th—Sc—Zr/10 判别图(图 6c)中,落入大陆岛弧及其附近。综合主量元素和微量元素特征判断,江里沟组主要呈现出大陆岛弧、活动大陆边缘的特征。

利用 Co/Th—La/Sc 和 La/Th—Hf 源岩属性判别图解进行探讨。通过 Co/Th—La/Sc 图解(图 7a)可见,样品落于长英质火山岩附近。通过 La/Th—Hf 图解(图 7b)可见,样品落于长英质物源区内,并且呈现出较老沉积物成分增加的趋势。因此,江里沟组碎屑成分来自上地壳的长英质火山岩源区。

4 碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系及物源分析

4.1 定年结果

对江里沟组 55 颗碎屑锆石进行 U-Pb 定年,得到有效数据 53 个(表 2)。锆石的年龄范围为 260~2594 Ma,主要集中在三个阶段(图 8):① 260~500 Ma(26 颗),占有效年龄总数 49%,峰值为 276 Ma、391 Ma、463 Ma;② 1798~1932 Ma(10 颗),占有效年龄总数的 19%,峰值为 1866 Ma;③ 2358~2594 Ma(17 颗),占有效年龄总数的 32%,峰值为 2501 Ma。总体而言,锆石年龄主要集中在晚古生代 276 Ma 和 391 Ma、早古生代 463 Ma、古元古代 1866 Ma、

表 2 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定数据
Table 2 LA-ICP-MS U-Pb age data of detrital zircons from the Lower Triassic Jiangligou Formation, Xiahe—Hezuo area, Gansu

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			
					1 σ	测值	1 σ	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
D15-01	112.7	37.7	50.8	0.74	0.1612	0.0041	10.933	0.2684	0.4883	0.0048	2469	42.6	2517.0	22.9	2563.0	20.7	98
D15-02	38.9	52.6	93.1	0.56	0.0561	0.0029	0.6063	0.0299	0.0789	0.0019	457	112.0	481.0	18.9	489.0	11.4	98
D15-03	187.4	31	60.6	0.51	0.1691	0.0037	11.931	0.2623	0.5084	0.0049	2550	31.3	2599.0	20.7	2650.0	21.2	98
D15-04	8.4	142	301	0.47	0.0525	0.0019	0.3396	0.0121	0.0467	0.0005	306	76.8	297.0	9.2	294.0	2.9	99
D15-05	34.5	134	205	0.65	0.0586	0.0023	0.5814	0.0218	0.0720	0.0007	554	85.2	465.0	14.0	448.0	4.1	96
D15-06	99.6	136	489	0.28	0.1098	0.0025	4.7021	0.1091	0.3084	0.0021	1798	42.4	1768.0	19.5	1733.0	10.5	98
D15-07	23.9	433	253	1.71	0.0545	0.0020	0.4671	0.0187	0.0615	0.0007	391	85.2	389.0	13.0	385.0	4.1	98
D15-08	7.9	192	417	0.46	0.0536	0.0019	0.3418	0.0124	0.0461	0.0004	354	81.5	299.0	9.4	290.0	2.8	97
D15-09	114.7	90.9	155	0.58	0.1513	0.0033	9.9590	0.2236	0.4744	0.0036	2360	37.0	2431.0	20.8	2503.0	15.8	97
D15-10	41.7	63.1	93.8	0.67	0.0570	0.0028	0.6288	0.0304	0.0802	0.0011	500	102.8	495.0	19.0	497.0	6.5	99
D15-11	3.7	114	135	0.84	0.0560	0.0032	0.3324	0.0177	0.0435	0.0006	454	129.6	291.0	13.5	275.0	3.6	94
D15-12	12.9	231	471	0.49	0.0511	0.0020	0.3385	0.0134	0.0478	0.0004	243	90.7	296.0	10.2	301.0	2.8	98
D15-13	104.7	98.1	232	0.42	0.1138	0.0035	5.4591	0.1714	0.3454	0.0031	1861	55.6	1894.0	27.0	1913.0	14.7	99
D15-14	4.1	257	306	0.84	0.0490	0.0020	0.2961	0.0114	0.0437	0.0005	150	92.6	263.0	8.9	276.0	2.9	95
D15-15	108.4	41.1	69.1	0.59	0.1136	0.0031	5.5479	0.1522	0.3524	0.0035	1857	49.7	1908.0	23.6	1946.0	16.9	98
D15-16	111.7	216	205	1.05	0.1642	0.0034	11.158	0.2311	0.4879	0.0032	2500	67.8	2536.0	19.4	2561.0	14.1	99
D15-18	3.5	143	222	0.64	0.0508	0.0024	0.2950	0.0137	0.0419	0.0005	232	112.0	262.0	10.7	265.0	3.0	99
D15-19	40.7	136	267	0.51	0.0558	0.0018	0.6134	0.0195	0.0790	0.0009	456	75.0	486.0	12.3	490.0	5.5	99
D15-20	109.7	32.6	89.7	0.36	0.1184	0.0028	5.8523	0.1317	0.3561	0.0033	1932	36.9	1954.0	19.6	1964.0	15.9	99
D15-21	44.3	74.6	132	0.57	0.0572	0.0024	0.6371	0.0259	0.0806	0.0010	502	92.6	501.0	16.1	500.0	5.8	99
D15-22	33.5	69.7	103	0.68	0.0627	0.0031	0.5805	0.0267	0.0674	0.0009	698	103.7	465.0	17.2	421.0	5.4	90
D15-23	2.6	332	310	1.07	0.0515	0.0023	0.2935	0.0133	0.0411	0.0004	261	103.7	261.0	10.4	260.0	2.6	99
D15-24	17.7	152	200	0.76	0.0540	0.0026	0.3685	0.0166	0.0495	0.0006	369	109.3	319.0	12.3	311.0	3.6	97
D15-26	13.7	152	138	1.1	0.0562	0.0030	0.3691	0.0184	0.0478	0.0006	461	118.5	319.0	13.6	301.0	3.6	94
D15-27	115.9	140	122	1.15	0.1661	0.0032	11.046	0.2107	0.4794	0.0042	2518	31.6	2527.0	17.8	2525.0	18.5	99
D15-28	178.3	197	345	0.57	0.1701	0.0029	11.767	0.2042	0.4981	0.0034	2558	28.7	2586.0	16.3	2605.0	14.9	99
D15-29	105.9	65.5	310	0.21	0.1154	0.0022	5.5533	0.1049	0.3469	0.0026	1887	34.7	1909.0	16.3	1920.0	12.7	99
D15-30	165.9	215	267	0.8	0.1647	0.0034	11.354	0.2343	0.4966	0.0038	2505	34.3	2553.0	19.3	2599.0	16.3	98
D15-31	139.2	97.2	190	0.51	0.1627	0.0034	11.075	0.2313	0.4909	0.0039	2484	36.3	2529.0	19.5	2575.0	17.1	98
D15-32	7.3	334	493	0.68	0.0525	0.0018	0.3331	0.0111	0.0459	0.0004	306	80.5	292.0	8.5	289.0	2.8	99
D15-33	18.1	533	756	0.71	0.0574	0.0015	0.4206	0.0110	0.0527	0.0004	509	57.4	356.0	7.9	331.0	2.3	92
D15-34	33.7	398	593	0.67	0.0556	0.0014	0.5522	0.0137	0.0716	0.0005	435	55.6	446.0	9.0	446.0	3.0	99

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)	
	Pb	Th	U	Th/U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$			
					测值	1 σ	1 σ	测值	1 σ	1 σ	测值	1 σ	1 σ	测值	1 σ		1 σ
D15-35	192.0	219	430	0.51	0.1621	0.0030	11.448	0.2117	0.5087	0.0039	2477	31.9	2560.0	17.4	2651.0	16.6	96
D15-36	108.6	83.2	161	0.52	0.1645	0.0036	11.128	0.2370	0.4874	0.0041	2503	36.4	2534.0	19.9	2559.0	17.9	99
D15-37	34.6	127	216	0.59	0.0548	0.0020	0.5655	0.0208	0.0745	0.0007	406	83.3	455.0	13.5	463.0	4.4	98
D15-38	110.9	79.2	531	0.15	0.1177	0.0022	6.0796	0.1131	0.3721	0.0025	1921	34.1	1987.0	16.3	2039.0	11.9	97
D15-39	30.3	393	425	0.92	0.0549	0.0015	0.4775	0.0127	0.0629	0.0005	409	65.7	396.0	8.8	393.0	3.2	99
D15-40	107.2	126	426	0.3	0.1131	0.0021	5.4863	0.0982	0.3498	0.0026	1850	33.3	1898.0	15.4	1934.0	12.5	98
D15-41	149.1	179	403	0.44	0.1587	0.0030	10.835	0.1975	0.4922	0.0035	2443	31.5	2509.0	17.0	2580.0	15.4	97
D15-42	16.2	206	316	0.65	0.0519	0.0019	0.3527	0.0128	0.0491	0.0005	280	86.1	307.0	9.6	309.0	3.0	99
D15-43	242.1	123	88.7	1.39	0.1737	0.0039	12.954	0.2854	0.5379	0.0045	2594	38.1	2676.0	20.8	2775.0	18.8	96
D15-44	117.2	189	207	0.92	0.1634	0.0031	10.978	0.2103	0.4837	0.0034	2492	32.1	2521.0	17.9	2543.0	15.0	99
D15-45	103.4	128	706	0.18	0.1129	0.0019	5.3660	0.0905	0.3424	0.0024	1847	30.4	1879.0	14.5	1898.0	11.4	99
D15-46	106.7	480	522	0.92	0.1647	0.0028	11.152	0.1853	0.4871	0.0032	2505	28.4	2536.0	15.6	2558.0	14.0	99
D15-47	239.5	283	573	0.49	0.1655	0.0030	12.021	0.2161	0.5226	0.0038	2512	30.9	2606.0	16.9	2710.0	16.3	96
D15-48	101.1	68.7	136	0.51	0.1117	0.0026	5.2499	0.1192	0.3384	0.0029	1827	42.9	1861.0	19.4	1879.0	13.9	99
D15-49	24.4	123	129	0.96	0.0519	0.0026	0.4453	0.0205	0.0622	0.0007	283	116.7	374.0	14.4	389.0	4.5	96
D15-50	113.4	96.5	283	0.34	0.1511	0.0032	9.4549	0.1957	0.4505	0.0039	2358	36.6	2383.0	19.1	2398.0	17.3	99
D15-51	35.7	158	224	0.71	0.0536	0.0020	0.5530	0.0194	0.0747	0.0007	354	50.9	447.0	12.7	464.0	4.4	96
D15-52	18.3	30	68.7	0.44	0.0525	0.0035	0.3787	0.0225	0.0528	0.0009	309	151.8	326.0	16.6	332.0	5.7	98
D15-53	6.0	398	699	0.57	0.0554	0.0015	0.3375	0.0097	0.0438	0.0004	428	67.6	295.0	7.3	276.0	2.3	93
D15-54	102.1	68.1	237	0.29	0.1146	0.0021	5.4269	0.0996	0.3415	0.0023	1873	33.6	1889.0	15.8	1894.0	11.0	99
D15-55	112.2	183	430	0.43	0.1526	0.0027	9.2773	0.1654	0.4381	0.0032	2376	29.2	2366.0	16.4	2342.0	14.4	99

新太古代 2501 Ma。前人研究认为,西秦岭地区三叠系碎屑锆石存在 250~300 Ma、400~500 Ma、2~2.5 Ga 三个年龄峰值(Weislogel et al.,2006,2010;陈岳龙等,2008;闫臻等,2012),这也与本次测试结果基本相符。

4.2 年龄谱系及物源分析

(1)海西期年龄(277~307 Ma 峰值)。江里沟组该年龄段的碎屑锆石年龄数据较多。从江里沟组一段到二段、三段,海西期年龄锆石占比逐渐增加,与加里东期碎屑锆石互为消长,反映来自海西期岩体比例逐渐增加。尽管目前在西秦岭及邻区该期岩浆年龄报道较少,但不同样品均显示明显的年龄峰值,指示在西秦岭及邻区发育该期岩浆事件,但由于后期三叠系大面积盖层覆盖,可能未出露地表。区域上青海江里沟二长花岗岩年龄为 260±3~269±3 Ma,冷湖地区盐场北山花岗岩年龄为 265±2~273±5 Ma(董增产等,2015),西秦岭东段中川二长花岗岩年龄为 264.4±1.3 Ma(徐学义等,2014)。结合勉略洋盆的演化及西秦岭发育大量印支期同碰撞到碰撞后花岗岩的事实,在勉略洋北侧,也就是西秦岭南部应该发育与洋片俯冲相关弧岩浆构造带,因此该年龄段的岩浆锆石应该来源于此。

(2)加里东时期年龄(466 Ma 峰值)。该阶段年龄占比也较大,形成一个峰值,同时周缘板块分布也较广。祁连地块东段出露加里东期与俯冲—碰撞相关的基性侵入体(470~434 Ma)(何世平等,2008;杨贺,2016),中南祁连西缘肃北地区也存在这一时期的三个洼塘花岗岩(416.7±4.3 Ma)(罗志文等,2015)。北秦岭构造带中早古生代花岗质岩浆活动可以划分为 3 个不同的演化阶段:分别为

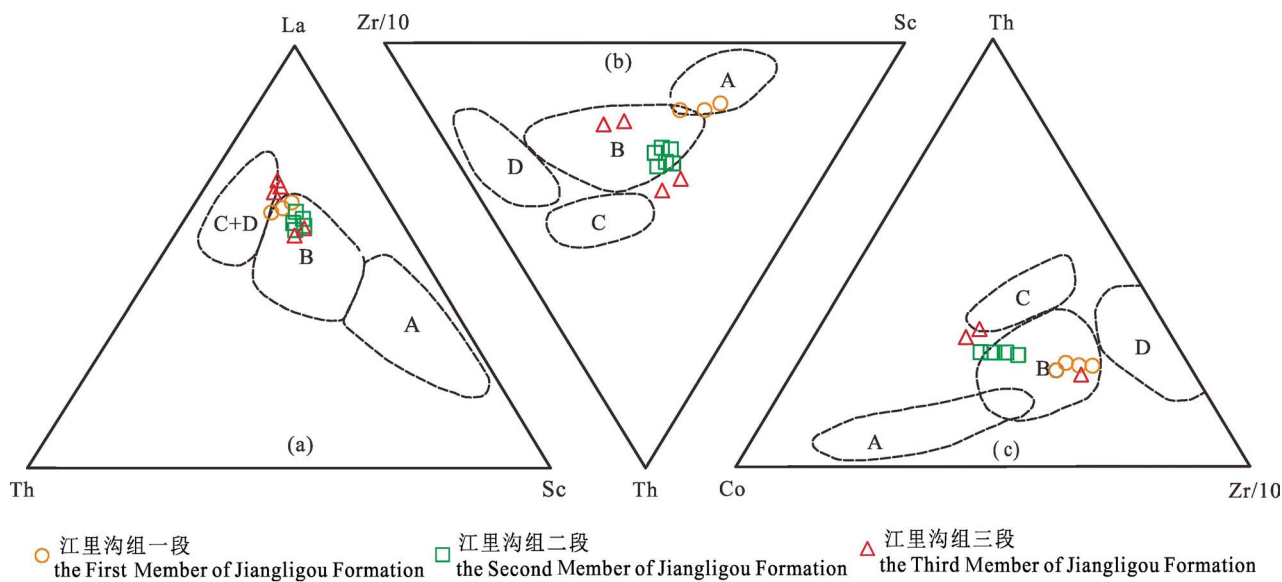


图 6 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组源区构造环境微量元素判别图(底图据 Bhatia and Crook, 1986)
A—大洋岛弧;B—大陆岛弧;C—活动大陆边缘;D—被动大陆边缘

Fig. 6 Trace elements structural environments discrimination diagrams of the stone samples from the Lower Triassic Jiangligou Formation in Xiahe—Hezuo area, Gansu (Base map after Bhatia and Crook, 1986). A—Ocean island arc;B—continental island arc;C—active continental margin;D—passive continental margin

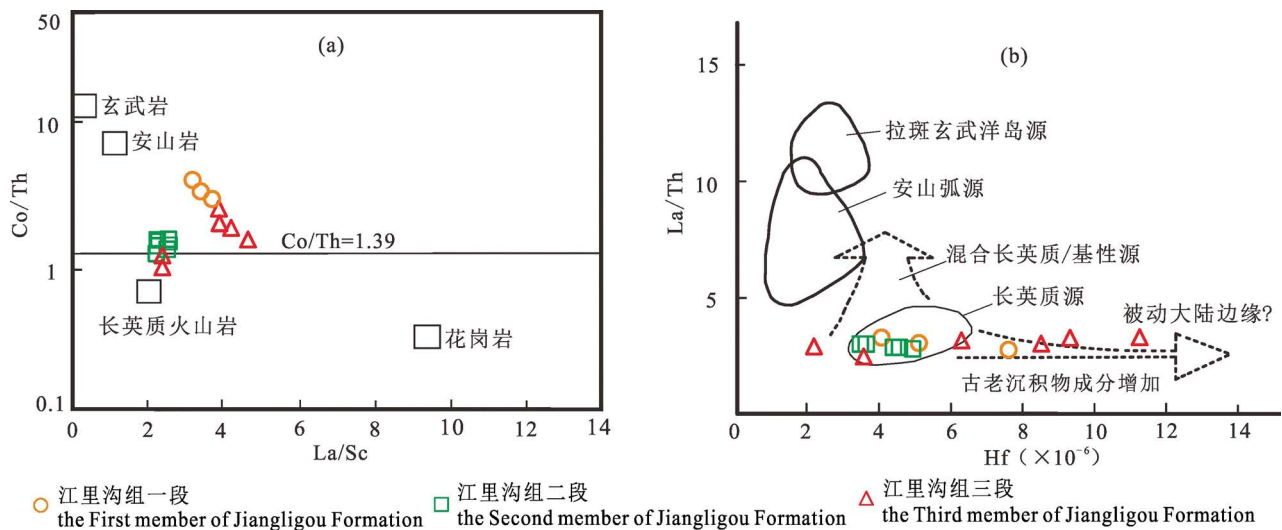


图 7 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组源岩属性判别图解

[底图(a)据 Gu Xuexiang et al., 2002;底图(b)据 Floyd and Leveridge, 1987]

Fig. 7 Discrimination diagrams of source rocks of the stone samples from the Lower Triassic Jiangligou Formation in Xiahe—Hezuo area, Gansu [Base map (a) after Gu Xuexiang et al., 2002; base map (b) after Floyd and Leveridge, 1987]

500 Ma(陆松年等,2003) ,450 Ma(陈隽璐等,2008) 和 400 Ma(张成立等,2013) ,这些岩浆活动在北秦岭构造带中产生了大量的花岗质岩石。据此我们认为江里沟组加里东期锆石可能来自于祁连地块和北秦岭地块,也可能来自下伏地层再旋回沉积。

(3) 中元古代—太古宙时期年龄(1907 Ma、

2541 Ma 峰值)。该阶段年龄占比很大,周缘板块也分布较多。华北地块存在 1700~2000 Ma 和 2400~2600 Ma 这两个特征年龄峰值(翟明国等,2007)。祁连造山带古老的变质基底主要包括祁连西段的古元古代北大河岩群、托赖岩群和祁连中段古元古代湟源岩群、化隆岩群(或称尕斯群)、祁连东段古元

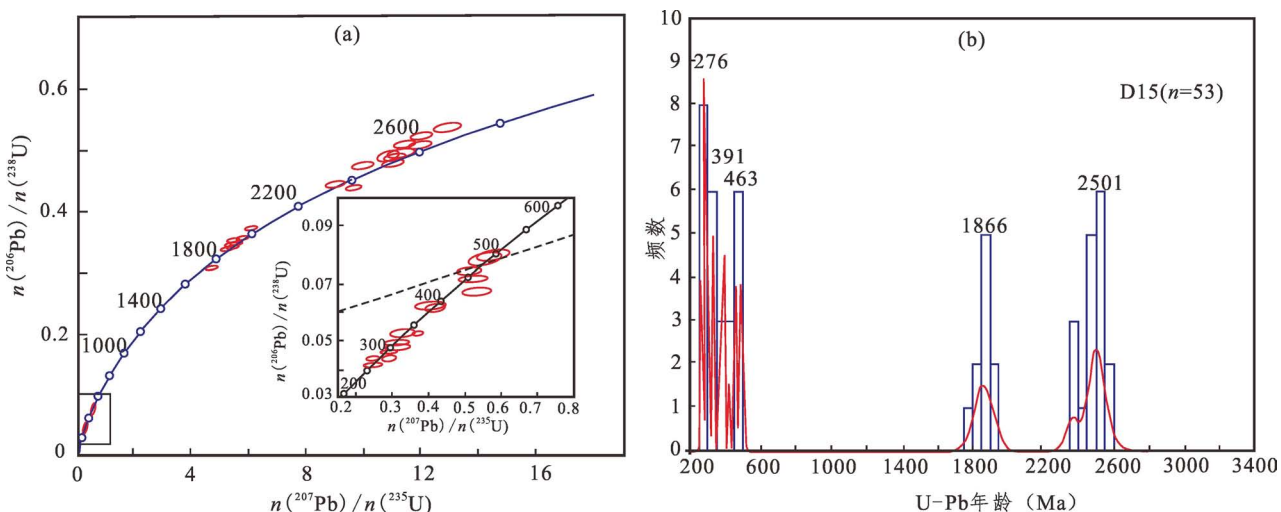


图 8 甘肃夏河—合作地区下三叠统江里沟组碎屑锆石年龄谐和曲线图(a)和年龄分布直方图(b)

Fig. 8 Age concordance curve (a) and distribution histogram (b) of the detrital zircons from the Lower Triassic Jiangligou Formation in Xiahe—Hezuo area, Gansu

古代陇山岩群(徐旺春等,2007;李怀坤等,2007;陆松年等,2009;何世平等,2007;杨昕,2015)。据此认为江里沟组该年龄段的锆石来自于祁连地块、华北地块以及下伏沉积地层的再旋回沉积。

综上所述,江里沟组的物源区来自其北向及北西向,西秦岭及其邻区同期岩浆岩为其沉积提供了大部分的物质来源,另有部分碎屑来自于北秦岭构造带、祁连造山带和华北板块南缘基底,也可能来自多旋回沉积物。

5 结论

(1)西秦岭下三叠统江里沟组碎屑岩总体上低硅(53.2%~69.34%,平均值62.36%),高钙(1.92%~7.66%,平均值3.59%),高钾低钠($K_2O/Na_2O=0.85\sim23.39$,平均值2.80); $Al_2O_3/(Na_2O+CaO)$ 值分布在0.17~0.30,江里沟组一段中 SiO_2 、 CaO 较高,二段中 TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 较高,三段各种元素含量介于一段与二段之间。稀土元素总量较高, $\Sigma REE=117.97\times10^{-6}\sim258.93\times10^{-6}$,平均值 179.98×10^{-6} ,轻重稀土分异明显,LREE/HREE值为8.42~11.62,经球粒陨石标准化具有明显的Eu负异常;富集Th、U、Rb等高场强元素和大离子亲石元素,亏损Ba、Nb、Ta、Sr、P、Ti等元素,可见其与大陆上地具有相似的分布,物源具有陆源的特征。

(2)江里沟组碎屑锆石U-Pb锆石年龄主要集中在晚古生代276 Ma和391 Ma、早古生代463 Ma、

古元古代1866 Ma、新太古代2501 Ma,海西期—印支期岩浆活动是本区碎屑锆石的主要来源。研究区及邻区在早三叠世之前至少存在三期大规模的岩浆活动或构造变质事件。

(3)江里沟组碎屑岩源区构造背景为活动大陆边缘和大陆岛弧,源区复杂,既有西秦岭同期岩浆岩,也有祁连造山带及华北板块南缘的变质基底,碎屑物质来自上地壳的长英质火山岩源区。

致谢:感谢中国地质大学(武汉)丁振举教授及其研究团队在野外调查、数据测试分析以及论文写作等方面给予的帮助和指导。

参考文献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a “*” is in Chinese without English abstract)
- 陈岳龙,李大鹏,周建,张宏飞,刘飞,聂兰仕,蒋丽婷,柳小明. 2008. 中国西秦岭碎屑锆石U-Pb年龄及其构造意义. 地学前缘, 15(4): 88~107.
- 陈隽璐,徐学义,王洪亮,王宗起,曾佐勋,王超,李平. 2008. 北秦岭西段唐藏石英闪长岩岩体的形成时代及其地质意义. 现代地质, 22(1): 45~52.
- 董增产,杨成,辜平阳,王红,查显锋,陈锐明,张海迪. 2015. 青海冷湖盐场北山黑云母二长花岗岩年代学、地球化学及其地质意义. 大地构造与成矿学, 39(1): 167~178.
- 何海清. 1996. 西秦岭早三叠世沉积特征及其构造控制作用. 沉积学报, 14(1): 86~91.
- 何世平,王洪亮,陈隽璐,徐学义,张宏飞,任光明,余吉远. 2008. 中祁连山岩群内基性岩墙群锆石LA-ICP-MS U-Pb年代学及其构造意义. 地球科学, 33(1): 35~45.
- 何世平,李荣社,王超,于浦生,张宏飞,辜平阳,时超. 2007. 南祁连东

段化隆岩群形成时代的进一步限定. 岩石矿物学杂志, 30(1): 34~44.

李怀坤, 陆松年, 相振群, 周红英, 李惠民, 刘敦一, 宋彪, 郑健康, 顾瑛. 2007. 北祁连山西段北大河岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. 地质论评, 53(1): 132~140.

李康宁, 李鸿睿, 贾儒雅, 严康, 李鹏兵, 王涛, 韦乐乐. 2019. 甘肃早子沟金矿“三位一体”找矿预测地质模型的构建. 矿产勘查, 10(6): 1397~1408.

李永军, 赵仁, 刘志武, 董俊刚. 2003. 西秦岭三叠纪沉积盆地演化. 中国地质, 30(3): 268~273.

刘伯崇, 李康宁, 史海龙, 蒲万峰, 汪宏涛, 王舒恒. 2018. 西秦岭甘青交界一带晚三叠世火山岩岩石成因及构造指示意义. 现代地质, 32(4): 704~717.

陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 2003. 秦岭造山带中—新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京: 地质出版社: 1~194.

陆松年, 李怀坤, 王惠初, 陈志宏, 郑健康, 相振群. 2009. 秦-祁-昆造山带元古宙副变质岩层碎屑锆石年龄谱研究. 岩石学报, 25(9): 2195~2207.

罗根明, 张克信, 林启祥, 寇晓虎, 朱云海, 徐亚东, 施彬. 2007. 西秦岭地区晚二叠世—早三叠世沉积相分析和沉积古环境再造. 沉积学报, 25(3): 332~342.

罗志文, 张志诚, 李建锋, 冯志硕, 汤文豪. 2015. 中南祁连西缘肃北三个洼塘地区古生代两类花岗岩质侵入岩年代学及其地质意义. 岩石学报, 31(1): 176~188.

任纪舜, 张正坤, 牛宝贵. 1991. 论秦岭造山带中朝与扬子陆块的拼合过程. 西安: 西北大学出版社: 99~110.

潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社. 86~97.

徐旺春, 张宏飞, 柳小明. 2007. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义. 科学通报, 52(010): 1174~1180.

许志琴, 杨经绥, 李海兵, 张建新, 曾令森, 姜枚. 2006. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合、碰撞造山及青藏高原隆升的深部驱动力. 中国地质, 33(2): 221~238.

徐学义, 陈冀隼, 高婷, 李平, 李婷. 2014. 西秦岭北缘花岗岩质岩浆作用及构造演化. 岩石学报, 30(2): 371~389.

闫臻. 2002. 西秦岭晚古生代弧前盆地沉积与成矿作用. 导师: 王宗起. 北京: 中国科学院研究生院地质与地球物理研究所, 20~50.

闫臻, 王宗起, 李继亮, 许志琴, 邓晋福. 2012. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程. 岩石学报, 28(6): 1808~1828.

杨贺. 2016. 中祁连东段早古生代岩浆侵入作用及其深部过程. 导师: 张宏飞. 武汉: 中国地质大学: 1~174.

杨昕. 2015. 中祁连西段托赖(岩)群的解体及其地质意义. 导师: 刘文灿. 北京: 中国地质大学: 1~80.

殷鸿福, 杨逢清, 黄其胜, 赖旭龙, 王恒书. 1992. 秦岭及邻区的三叠系. 武汉: 中国地质大学出版社: 1~200

翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通元古代构造事件. 岩石学报, (11): 2665~2682.

张成立, 刘良, 王涛, 王晓霞, 李雷, 龚齐福, 李小菲. 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩岩浆作用. 科学通报, 58: 2323~2329.

张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 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. 岩石学报, 11(2): 101~113.

Bhatia M R. 1983. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. Journal of Geology, 91: 611~627.

Bhatia M R. 1985. Rare earth elements geochemistry of Australian Paleozoic graywacks and mudstones provenance and tectonic control. Sedimentary Geology, 45(1~2): 97~113.

Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywacke and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contrib. Mineral. Petrol., 92: 181~193.

Chen Yuelong, Li Dapeng, Zhou Jian, Zhang Hongfei, Liu Fei, Nie Lanshi, Jiang Liting, Liu Xiaoming. 2008. Zircon U-Pb age and its tectonic significance of western Qinling, China. Geoscience Front., 15(4): 88~107.

Chen Junlu, Xu Xueyi, Wang Hongliang, Wang Zongqi, Zeng Zuoxiong, Wang Chao, Li Ping. 2008. The formation age of tangzang quartz diorite in the western part of North Qinling and its geological significance. Modern Geology, 22(1): 45~52.

Dong Zengchan, Yang Cheng, Gu Pingyang, Wang Hong, Cha Xianfeng, Chen Ruiming, Zhang Haidi. 2015. Geochronology, geochemistry and geological significance of biotite monzogranite in Beishan, Lenghu salt field, Qinghai Province. Geotectonics and Metallogeny, 39(1): 167~178.

Floyd P A, Leveridge B E. 1987. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. Journal of the Geological Society, 144(4): 531~542.

Gu Xuexiang, Liu Jiangming, Zheng Minghua, Tang Juxing. 2002. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence. Journal of Sedimentary Research, 72: 393~407.

Haskin M A, Frey F A. 1966. Dispersed and not so rare earths. Science, 152: 299~314.

He Haiqing. 1996. Sedimentary characteristics and tectonic control of Early Triassic in West Qinling. Acta Sedimentology, 14(1): 86~91.

He Shiping, Wang Hongliang, Chen Juanlu, Xu Xueyi, Zhang Hongfei, Ren Guangming, Yu Jiyuan. 2008. Zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology of mafic dyke swarms in the middle Qilian Maxianshan group and its tectonic significance. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 33(1): 35~45.

He Shiping, Li Rongshe, Wang Chao, Yu Pusheng, Zhang Hongfei, Gu Pingyang, Shi Chao. 2007. Further determination of the formation age of Hualong Group in the eastern part of South Qilian. Journal of Petrology and Mineralogy, 30(1): 34~44.

Li Huaikun, Lu Songnian, Xiang Zhenqun, Zhou Hongying, Liu Dunyi, Song Biao, Zheng Jiankang, Gu Ying. 2007. SHRIMP U-Pb geochronological research on detrital zircons from the Beidahe Complex - Group in the western segment of the North Qilian Mountains, Northwest China. Geological Review, 53(1): 132~140.

Li Kangning, Li Hongrui, Jia Ruya, Yang Kang, Li Pengbing, Wang Tao, Wei Lele. 2019. Construction of the geological model of “Trinity” prospecting prediction in Zaozigou Gold Deposit, Gansu Province. Mineral Exploration, 10(6): 1397~1408.

Li Yongjun, Zhao Ren, Liu Zhiwu, Dong Jungang. 2003. Evolution of Triassic sedimentary basin in West Qinling. Geology of China, 30(3): 268~273.

Liu Bochong, Li Kangning, Shi Hailong, Pu Wangfeng, Wang Hongtao, Wang Shuheng. 2018. Petrogenesis and tectonic implication of volcanic rocks during the Late Triassic Period at the junction of Gansu and Qinghai in West Qinling Mountains. Geoscience, 32(4): 704~717.

Lu Songnian, Li huaikun, Chen Zhihong. 2003. Meso Neoproterozoic Geological Evolution of the Qinling Orogenic Belt and Its Response to the Rodinia Supercontinent Event. Beijing: Geological Publishing

- House.
- Lu Songnian, Li huaikun, Wang huichu, Chen Zhihong, Zheng Jiangkang, Xiang ZHENqun. 2009&. Detrital zircon age spectrum of Proterozoic parametamorphic rocks in the Qin Qi Kun orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (9): 2195~2207.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot3.0: A Geochronological Toolkit for Mirosoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center.
- Luo Genming, Zhang Kexin, Lin Qixiang, Kou Xiaohu, Zhu Yunhai, Xu Yadong, Shi Bin. 2007&. Sedimentary facies analysis and paleoenvironment reconstruction of the Late Permian Early Triassic in the West Qinling area. *Journal of Sedimentation*, 25 (3): 332~342.
- Luo Zhiwen, Zhang Zhicheng, Li Jianfeng, Feng Zhishuo, Tang Wenhao. 2015&. Geochronology of two types of Paleozoic granitic intrusive rocks in Subei three Wadang areas in the western margin of Central South Qilian Mountains and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 31 (1): 176~188.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen. 1997&. Formation and Evolution of the East Tethys Geological Structure. Beijing: Geological Publishing House; 86~97.
- Pettijohn F J, Potter P E, Siever R. 1972. Sand and Sandstone. New York: Springer Verlag; 1~618.
- Rorer B P, Korsch R J. 1988. Provenance signature of sandstone mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chemical Geology*, 67: 119~139.
- Ren Jishun, Zhang Zhengkun, Niu Baogui. 1991. Study on the Process of Assembling the Qinling Orogenic Belt and the Yangtze Block in the Yangtze Region. Xi'an: Northwestern University Press; 99~110.
- Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z. 2006. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan—Ganzi complex; Sedimentary record of collision of the North and South China blocks. *Geology*, 34: 97~100.
- Weislogel A L, Graham S A, Chang E Z. 2010. Tectonics, erosional exhumation, and sediment production Upper Triassic Songpan—Ganzi complex, central China; Record of collisional detrital zircon provenance from three turbidite depocenters. *Geological Society of America Bulletin*, 122: 2041~2062.
- Xu Wangchun, Zhang Hongfei, Liu Xiaoming. 2007&. Zircon U-Pb dating limits the formation age of the Qilian Mountain high-grade metamorphic rock series and its tectonic significance. *Scientific Bulletin*, 52 (10): 1174~1180.
- Xu Xueyi, Chen Junlu, Gao Ting, Li Ping, Li Ting. 2014&. Granitic magmatism and tectonic evolution in the northern margin of West Qinling. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (2): 371~389.
- Xu Zhiqin, Yang jingsui, Li Haibing, Zhang Jiangxin, Zeng Linsen, Jiang Mu. 2006&. The deep driving force of Qinghai Tibet Plateau and continental dynamics terrane amalgamation, collision orogeny and uplift of Qinghai Tibet Plateau. *Chinese Geology*, 33 (2): 221~238.
- Yan Zhen. 2002&. Sedimentation and Mineralization of the Late Paleozoic Fore Arc Basin in the West Qinling. Tutor: Wang Zongqi. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Graduate School, Chinese Academy of Sciences; 1~150.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang, Xu Zhiqin, Deng Jinfu. 2012&. Tectonic properties and accretive orogenic process of wedge in the West Qinling Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 28 (6): 1808~1828.
- Yang He. 2016&. Early Paleozoic magmatic intrusion and its deep process in the eastern part of the middle Qilian. Tutor: Zhang Hongfei. Wuhan: China University of Geosciences; 1~174.
- Yang Xin. 2015&. Disintegration of the Tolai Group in the Western Part of the Middle Qilian Mountains and Its Geological Significance. Tutor: Liu Wencan. Beijing: China University of Geosciences; 1~80.
- Yin Hongfu, Huang Qisheng, Yang Fengqing, Lai Xulong, Wang Hengshu. 1993&. Triassic in Qinling and Its Adjacent Areas. Wuhan: China University of Geosciences Press; 1~89.
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007&. Paleoproterozoic tectonic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 52(11): 2665~2682.
- Zhang Chengli, Liu Liang, Wang Tao, Wang Xiaoxia, Li Lei, Gong Qifu, Li Xiaofei. 2013&. Granitic magmatism during early Paleozoic continental collision in North Qinling. *Scientific Bulletin*, 58: 2323~2329.
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. 1995&. Structural properties and Geotectonic Significance of main structural lithostratigraphic units in Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 11 (2): 101~113.
- Zhang Kexin. 2000. Application of radiolarians and other fossils in non-Smithstrata; Exemplified by the Animaqing mélange belt in eastern Kunlun Mountains. *Science in China (Series D)*, 43(4): 364~374.

**Tectonic setting and provenance characteristics of the Lower Triassic
Jiangligou Formation in West Qinling**
——Constraints from geochemistry of clastic rocks and U-Pb geochronology of detrital zircon

ZENG Junjie¹⁾, LI Kangning¹⁾, YAN Kang¹⁾, Wei Lele²⁾, HUO Xingda¹⁾, ZHANG Jianpeng¹⁾

1) *The Third Institute Geological and Mineral Exploration of Gansu Provincial Bureau of Geology
and Mineral Resources, Lanzhou, 730050;*

2) *Shaanxi Institute of International Trade Jewelry Institute, Shaanxi Province Gemmological
Teaching Demonstration Center, Xi'an, 712000*

Abstract: Xiahe—Hezuo area in Gansu Province is one of the important gold mineralization areas in the West Qinling metallogenic area. The Lower Triassic Jiangligou Formation is the main ore bearing stratum in the area which is mainly composed of feldspathic sandstone and argillaceous slate, referred as a set of fine clastic flysch formation of semi deep sea slope facies. SiO₂ are ranging from 53.2% to 69.34%, with an average of 62.36%; Al₂O₃ are ranging from 10.80% to 17.46%, with an average of 14.20%; FeO are ranging from 0.45% to 4.85% with an average of 3.31%; and CaO are ranging from 1.92% to 7.66% with an average of 3.59%, respectively. The total amount of rare earth elements (REE) is relatively high, and the average value is 179.98×10⁻⁶. In the chondrite-normalized diagram, the samples are characterized by enrichment in light rare earth elements (LREE), and obvious negative Eu anomaly with δEu varying from 0.55 to 0.77. Comparatively speaking, the enrichment in LREE and Eu anomaly (δEu = 0.85 ~ 1.18) are not obvious in the North American shale-normalized REE distribution diagram. Furthermore, the zircon geochronological studies showed that there are some age clusters in the studied clastic rock samples including the Paleoproterozoic—Neoproterozoic (peaking at 1866 Ma and 2501 Ma), Caledonian (peaking at 463 Ma), and Indosinian—Hercynian (peaking at 276 Ma and 391 Ma). Based on the geochemical features of the clastic rocks and the age data, the tectonic setting of the source area of the Jiangligou Formation could be referred to as the continental island arc and the active continental margin. The source materials of the Jiangligou Formation clastic rocks are mainly from the felsic volcanic rocks which are majorly the contemporaneous magmatic rocks from the West Qinling Mountains and adjacent areas, and some are from the basement rocks of the North Qinling structural belt, Qilian Orogenic Belt and south margin of the North China Craton.

Keywords: West Qinling Mountains; Early Triassic; Jiangligou Formation; detrital zircon

Acknowledgements: Supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFC0601506), China Geological Survey Program (No. 121201004000160901) and The provincial basic geological survey project of Gansu Province “Deep prospecting prediction of Maqu—Hezuo integrated exploration area in Gansu Province”

First author: ZENG Junjie, male, born in 1970, master, senior engineer, engaged in geological and mineral survey and technical management; Email: 436044828@qq.com

Corresponding author: LI Kangning, male, born in 1986, Engineer, master, majors in mineral institute and evaluation in the field; Email: 379607468@qq.com

Manuscript received on: 2020-07-15; Accepted on: 2020-11-28; Edited by: HUANG Daomao, ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2021.01.006