

龙首山地块的构造属性—— 来自 U-Pb 锆石年龄的约束

闫海卿¹, 刘巧峰¹, 汤中立¹, 范模春¹, 王强², 任建梅¹, 范超峰¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054; 2. 延安市子长县余家坪镇中心学校, 陕西延安 717300)

[摘要] 在金川矿集区大陆科学钻探岩芯中采集到 1 000 m 以下的样品, 岩石地球化学分析显示, 变玄武岩的稀土元素配分模式呈轻稀土富, 轻、重稀土分馏明显的右倾型模式, 微量元素显示 Rb、Ba、La、Ce、Nd、Sm 相对富集, Nb、Ta、Sr、Zr、Hf 亏损。Nb/Yb 比值高, Th/Ta=1.7~5.63, Ta/Hf=0.10~0.21, 具有大陆裂谷初期的玄武岩特征。由此推断, 古元古代龙首山地块为一个正处于初期裂解的大陆块。锆石 U-Pb 同位素测年显示, 龙首山地块白家嘴子组至少经历了三期强烈的构造岩浆变质事件, 主峰期分别为 2.1 Ga、1.9 Ga 和 1.85 Ga。对比龙首山地块与华北板块、扬子板块、塔里木板块和西域板块的地层结构与构造演化特征, 龙首山地块与西域板块有诸多相似性, 今后的找矿方向应着眼于整个西域板块。

[关键词] 金川铜镍矿床; 构造属性; 龙首山地块; 西域板块; 找矿方向

[中图分类号] P597+.1; P548 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)02-0059-14

1 前言

甘肃金川铜镍矿床外围找矿, 已成为久攻不下的科学难题, 困扰着众多国内外矿业公司。金川矿床大地构造位置属于龙首山地块, 其构造属性长期存在争议。一种观点认为龙首山地块属于阿拉善地块南缘与塔里木地块亲缘性较强^[1]; 另一种观点认为龙首山地块是阿拉善地块的一部分具有亲华北克拉通的构造属性^[2-5]; 也有观点认为发生在龙首山地块上 800 Ma 的 Rodinia 超大陆裂解事件具亲华南板块的属性^[6]; 更有认为塔里木、阿拉善、中祁连地块和柴达木地块在古生代时期的克拉通划分为独立的西域板块^[7, 8]。龙首山地块的构造属性划分直接影响找矿方向和工作部署。

本文在“金川铜镍矿集区科学钻探选址预研究”项目的实施过程中, 对科学钻探岩芯中龙首山

群白家嘴子组中部的一套含磁铁矿的斜长角闪岩和一套花岗片麻岩进行了岩石化学分析和锆石 U-Pb 同位素年龄测试, 取得部分成果供研究者商榷。

2 地质背景

龙首山地块位于中国西北甘肃省, 西起甘肃省金塔县, 向东南经高台县合黎山、山丹到金昌龙首山一带, 呈北西向延伸的狭长带状展布。龙首山地块边界均为断裂所限, 西以阿尔金断裂为界, 东以巴彦乌拉山断裂为界, 南、北边界分别为龙首山南缘断裂和北缘断裂所限(见图 1)。龙首山地块的基底由龙首山岩群组成。龙首山岩群自下而上可划分为四个岩组。

1) 麒麟沟岩组: 该岩组在龙首山岩群的最下部, 由条纹状、条带状、眼球状混合岩夹混合质斜长角闪岩, 混合质片麻岩及薄层大理岩、蛇纹石化大

[收稿日期] 2014-12-02

[基金项目] 国土资源部行业基金项目(201311172); 中国工程院咨询项目(2013-04-XY-001)

[作者简介] 闫海卿, 1963 年出生, 男, 河南滎池县人, 博士, 副教授, 研究方向为矿床成因、区域成矿规律与成矿预测, 岩浆矿床等;
E-mail: haiqingyan@126.com

理岩所组成,原岩属中基性火山岩-沉积岩建造的低角闪岩相变质岩系。

2) 白家嘴子岩组:本岩组主要由大理岩夹黑云母片麻岩、含石榴子石二云母石英片岩、斜长角闪岩组成。该岩组为海相陆源碎屑岩-富镁碳酸岩建造的低角闪岩相变质岩系。

3) 塔马沟岩组:该岩组在全区均有分布,金昌墩子沟剖面最具代表性。主要以二云母石英片岩、斜长角闪岩及斜长浅粒岩为主,夹大理岩或白云岩、黑云母斜长片麻岩、石英岩等组成。为原岩属海相碳酸盐岩-类复理石建造的高绿片岩相变质岩系;与白家嘴子组呈角度不整合接触。

4) 石井口岩组:本岩组主要分布于合黎山南部,高台县七坝泉剖面最具代表性,由下部浅粒岩、石英岩夹变质英安岩;中部为云母石英片岩夹片麻岩;上部为变粒岩夹片岩、结晶灰岩所组成,是原岩属海相沉积火山岩-陆源碎屑岩建造的低绿片岩相为主的变质岩系,与下伏塔马沟组呈平行不整合接触。上覆盖层为蓟县系墩子沟群是一套富硅质厚层碳酸盐岩夹板岩、千枚岩及硅质岩的浅变质岩系与龙首山岩群呈角度不整合接触。震旦系韩母山群为一套冰碛岩、薄层灰岩及变质基性火山岩与墩子沟群成角度不整合接触^[9]。

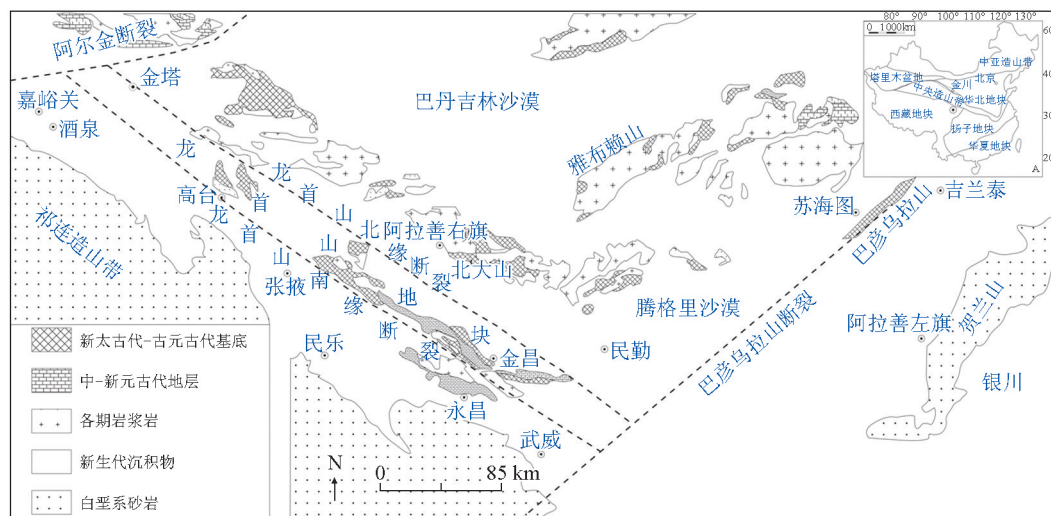


图1 龙首山地块地质图

Fig. 1 Geological map of Longshou Mountain block

3 样品特征

3.1 样品位置与岩石学特征

样品采自金川科学钻探钻孔岩芯,地表地理坐标: N38°28'37", E102°10'14"。本文共采用了19个样品,其中锆石样品采集了五个层位,分别是JC1和JC2采自地表,JC3采自钻孔(576.30~576.60 m),JC4采自钻孔(1 514.47~1 514.57 m),JC5采自钻孔(1 603.50~1 604.00 m)。

JC1为灰绿色中细粒斜长角闪岩,主要矿物由斜长石(40%)和角闪石(50%)组成,其次含少量黑云母(4%)。显微镜下斜长石绢云母化和高岭土化强烈,局部发生绿泥石化,角闪石局部发生绿帘石

化,可见不透明矿物可能为磁铁矿。

JC2样品岩性为花岗片麻岩,中粗粒不等粒变晶结构,条带状构造,主要由石英(40%)和斜长石(55%)组成,其次为黑云母(5%)。显微镜下可见长石发生高岭土化,绢云母化;黑云母发生绿帘石化,石英呈港湾状镶嵌,细小的石英颗粒集合体弱定向排列。

JC3、JC4和JC5样品岩性均为花岗片麻岩(见图2),条带状构造,中粗粒不等粒花岗变晶结构,主要矿物为石英(44%)和钾长石(40%),斜长石(10%),黑云母(5%),磷灰石和黄铁矿(1%)。显微镜下可见钾长石发生高岭土化,黑云母发生绿帘石化。采样位置见表1。

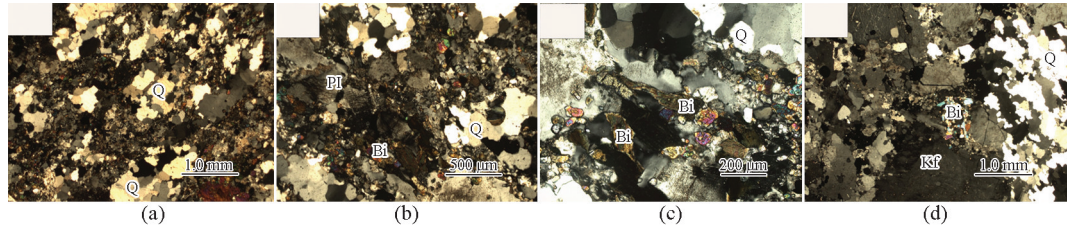


图2 花岗片麻岩显微照片(正交偏光)

Fig. 2 Microphotographs of Granite gneiss (orthogonal polarization)

表1 采样位置及岩性

Table 1 Sampling position and lithology

样品号	样品位置	采样深度	岩性
JC1	金川科钻塔南 50 m	地表	斜长角闪岩
JC2	金川科钻塔南 40 m	地表	花岗片麻岩
JC6	金川科钻 JCSD-1 岩芯	357.02 m	斜长角闪岩
JC7	金川科钻 JCSD-1 岩芯	436.31 m	斜长角闪岩
JC3	金川科钻 JCSD-1 岩芯	576.3 m	片麻状花岗岩
JC8	金川科钻 JCSD-1 岩芯	725.57 m	斜长角闪岩
JC9	金川科钻 JCSD-1 岩芯	768.12 m	斜长角闪岩
JC10	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 021.97 m	斜长角闪岩
JC11	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 154.98 m	斜长角闪岩
JC12	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 342.94 m	斜长角闪岩
JC13	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 375.08 m	斜长角闪岩
JC14	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 399.76 m	斜长角闪岩
JC15	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 405.67 m	斜长角闪岩
JC16	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 413.62 m	斜长角闪岩
JC4	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 514.47 m	片麻状花岗岩
JC17	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 564.16 m	斜长角闪岩
JC5	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 603.5 m	片麻状花岗岩
JC18	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 654.73 m	斜长角闪岩
JC19	金川科钻 JCSD-1 岩芯	1 673.33 m	斜长角闪岩

3.2 变质原岩恢复

4个片麻岩样品通过 $(al+fm)-(c+alk)$ 与 si 图解^[10](见图3)和 $La/Yb-\sum REE$ 关系图^[11](见图4),进行原岩恢复图解判定,除了JC2落入泥质沉积岩,其余全部落入火成岩中。15个斜长角闪岩在 $TiO_2-(FeO+Fe_2O_3)/(FeO+Fe_2O_3+MgO)$ 判别图解分类图^[12]中,样品全部都落入了正斜长角闪岩中(见图5);对15个正变质的斜长角闪岩进行 $La/Yb-\sum REE$ 关系图判别,全部投入玄武岩中(见图6)。由此可见,除了样品JC2是副变质岩外,其余18个样品均为正变质岩。

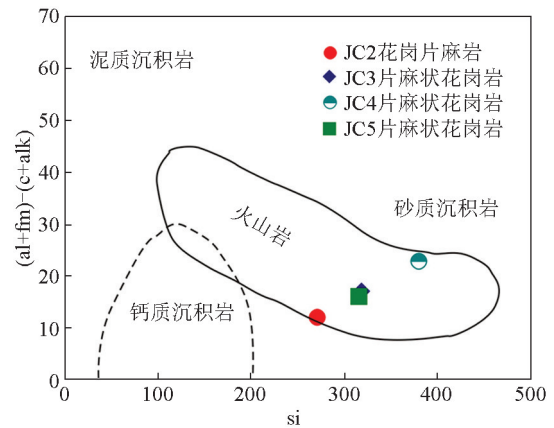


图3 $(al+fm)-(c+alk)$ 与 si 图解^[10]

Fig. 3 $(al+fm)-(c+alk)$ versus si diagram of granitic gneiss^[10]

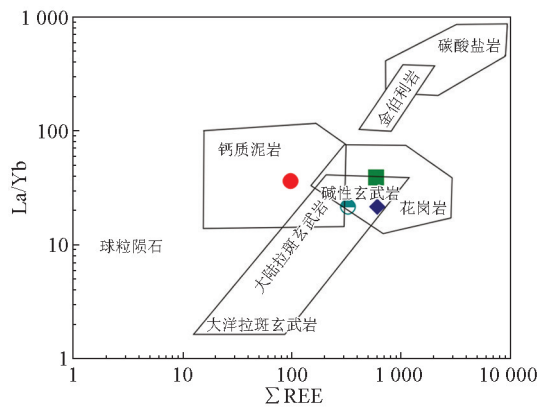


图4 花岗片麻岩 La/Yb-ΣREE 关系图^[11]

Fig. 4 La/Yb-ΣREE diagram of granitic gneiss^[11]

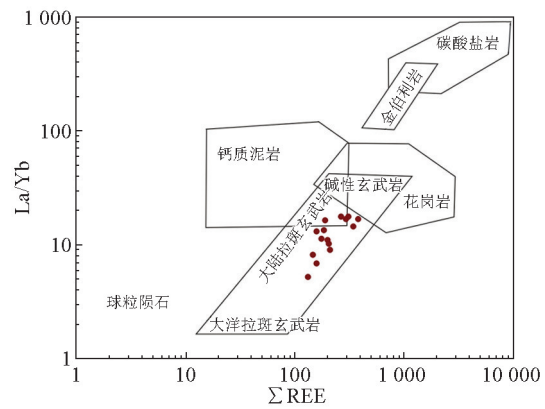


图6 斜长角闪岩 La/Yb-ΣREE 关系图^[11]

Fig. 6 La/Yb-ΣREE diagram of amphibolites^[11]

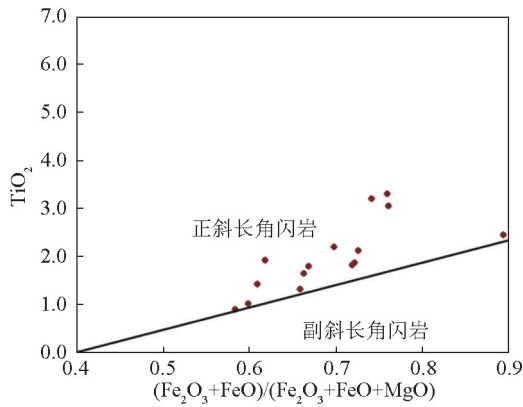


图5 斜长角闪岩 $TiO_2-(FeO+Fe_2O_3)/(FeO+Fe_2O_3+MgO)$ 判别图^[12]

Fig. 5 $TiO_2-(FeO+Fe_2O_3)/(FeO+Fe_2O_3+MgO)$ diagram of amphibolites^[12]

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素地球化学特征

斜长角闪岩和花岗片麻岩的主量元素成分分析结果见表2。其中15件斜长角闪岩样品的SiO₂含量为39.65 wt%~54.41 wt%(wt%为重量百分比),平均值为48.74 wt%;TiO₂含量0.83 wt%~3.37 wt%,TFe₂O₃含量为11.52 wt%~18.46 wt%;MgO含量较高,为2.05 wt%~9.31 wt%。M/F < 0.5,为铁质基性岩。

表2 样品主量元素分析数据表(wt%)

Table 2 The data of major elements of all samples (wt%)

样品	JC1	JC2	JC3	JC4	JC5	JC6	JC7	JC8	JC9	JC10	JC11	JC12	JC13	JC14	JC15	JC16	JC17	JC18	JC19
岩性	斜长角闪岩	片麻岩	花岗片麻状岩																
SiO ₂	39.65	66.21	69.34	70.58	66.80	47.52	47.91	49.25	48.51	47.45	47.85	47.16	53.28	54.41	48.76	53.53	47.66	52.1	46.03
TiO ₂	1.23	0.36	0.63	0.70	0.38	1.67	1.86	3.28	3.15	3.37	1.07	2.25	1.86	1.38	1.92	2.53	0.83	2.20	2.00
Al ₂ O ₃	12.44	14.87	13.40	12.70	15.64	15.59	14.63	13.76	13.9	13.94	13.7	14.72	14.2	14.23	14.77	12.62	15.14	14.89	14.23
TFe ₂ O ₃	12.39	6.75	5.47	5.61	4.48	14.16	14.52	16.32	16.88	16.9	14.23	16.81	13.2	11.52	15.81	18.46	14.07	14.16	15.01
Fe ₂ O ₃	2.73	1.95	2.14	2.20	1.92	3.17	3.36	4.78	4.65	4.87	2.57	3.75	3.36	2.88	3.42	4.03	2.33	3.70	3.50
FeO	8.70	4.33	3.00	3.07	2.30	9.89	10.04	10.4	11.01	10.83	10.5	11.75	8.85	7.78	11.15	12.99	10.56	9.41	10.36
MnO	0.18	0.03	0.09	0.02	0.02	0.16	0.19	0.20	0.20	0.30	0.17	0.24	0.17	0.16	0.22	0.10	0.25	0.19	0.20
MgO	7.30	0.13	0.81	0.18	0.13	6.67	6.65	5.30	4.93	5.00	8.76	6.74	4.80	5.51	5.65	2.05	9.31	4.98	8.57
CaO	7.27	3.98	3.72	0.34	0.59	9.51	9.50	7.50	8.56	7.33	10.38	7.02	7.72	8.91	7.95	5.30	8.41	7.88	9.97
Na ₂ O	2.82	4.91	2.79	1.66	1.96	3.11	3.07	2.34	2.11	3.63	2.66	2.33	1.88	0.67	3.10	2.87	2.09	0.91	2.07
K ₂ O	0.96	2.69	3.65	8.13	9.92	1.34	1.43	1.59	1.18	1.48	1.00	2.35	2.13	2.92	1.57	2.22	2.04	1.68	1.56
P ₂ O ₅	0.27	0.06	0.10	0.08	0.08	0.26	0.26	0.47	0.58	0.60	0.15	0.37	0.75	0.30	0.25	0.32	0.21	1.02	0.36
合计	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

3件正变质的片麻状花岗岩,岩石化学分析SiO₂含量为66.69 wt%~69.85 wt%,全碱(K₂O+Na₂O)含量为6.38 wt%~11.68 wt%,Al₂O₃含量为12.57 wt%~15.61 wt%;A/CNK值0.87~1.04;属于准铝质-偏铝质。JC4、JC5样品的碱铝比值(Na₂O+K₂O)/Al₂O₃分子数比值(NKA)>0.8,显示出A型花岗岩特征。

4.2 稀土、微量元素地球化学特征

JC1—JC9样品稀土、微量元素分析结果见表3, JC10—JC19样品的稀土和微量元素的分析结果见表4。其中3件正变质的片麻状花岗岩样品的稀土元素球粒陨石标准化模式图(见图7a),显示轻、重稀土分馏明显,曲线整体呈右倾型,ΣLREE/ΣHREE: 4.58~7.28(平均值5.77), (La/Yb)_N: 14.54~26.14,平均值18.44, La/Sm: 3.93~7.47, δEu

值<0.3表现出强烈的Eu负异常。微量元素原始地幔标准化蜘蛛图解(见图7b),表现出Sr、P、Ti亏损, Ba轻微亏损。

另外15件基性变质火山岩的稀土元素球粒陨石标准化模式图(见图8a),呈轻稀土富集的右倾型配分特点, ΣLREE/ΣHREE: 2.97~4.43(平均值3.72), (La/Yb)_N: 14.54~26.14(平均值18.44), La/Sm值为2.77~5.16, δEu具有轻微的Eu负异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图^[13](见图8b) Rb、Ba、La、Ce、Nd、Sm相对富集, Nb、Ta、Sr、Zr、Hf亏损。轻稀土富集具有板内玄武岩的稀土元素配分特征, Nb/Yb比值高显示大陆玄武岩的微量元素特征^[11]。Th/Ta=1.7~5.63, Ta/Hf=0.10~0.21, 显示大陆裂谷初期的玄武岩特征^[15,16]。

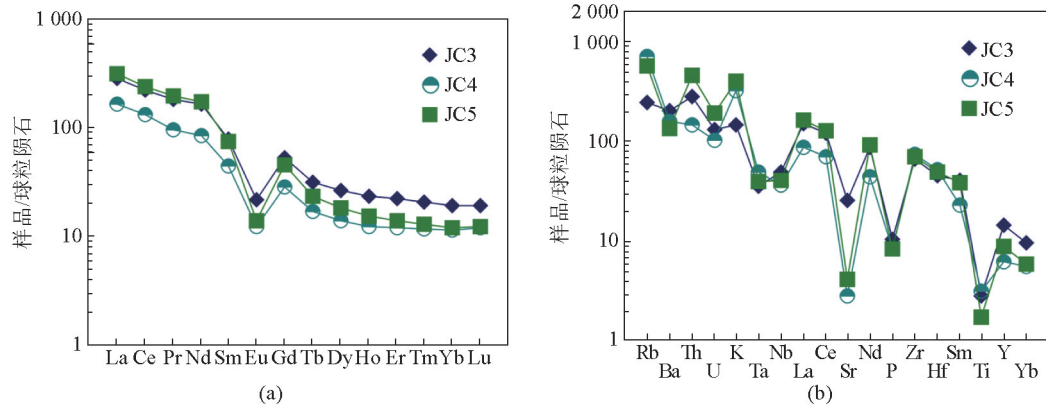


图7 片麻状花岗岩稀土、微量元素标准化配分图^[13]

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and spidergrams of trace elements for gneissic granite^[13]

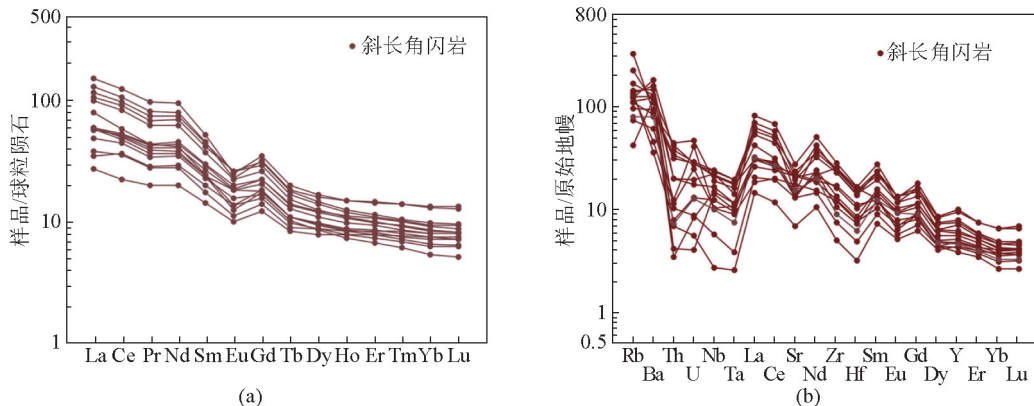


图8 基性火山变质岩稀土、微量元素标准化配分图^[13]

Fig. 8 Chondrite-normalized REE patterns and spidergrams of trace elements for mafic volcanic metamorphic^[13]

表3 样品JC1—JC9 稀土、微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)Table 3 The REE, trace elements results of samples JC1—JC9($\times 10^{-6}$)

样品	JC1	JC2	JC3	JC4	JC5	JC6	JC7	JC8	JC9
岩性	斜长角闪岩	花岗片麻岩		片麻状花岗岩			斜长角闪岩		
Li	15.35	1.08	5.14	0.16	0.15	12.1	17.46	13.26	13.04
Be	1.03	6.57	2.23	1.32	1.66	1.01	2.69	1.41	1.49
Sc	39.11	3.38	12.19	6.93	5.11	29.52	33.46	35.23	37.23
V	363.3	77.89	26.15	12.64	10.59	312.1	327.4	372.7	381.4
Cr	158.5	4.02	2.24	5.79	1.79	76.28	122.6	125.2	106.1
Co	64.88	6.23	4.00	2.53	4.07	56.93	55.42	49.66	49.89
Ni	205.2	12.42	6.38	3.53	1.59	108.4	121.7	72.07	61.03
Cu	506.0	6.00	37.75	2.56	1.40	16.12	1.66	72.19	57.35
Zn	153.4	25.17	87.30	13.37	15.90	104.4	126.7	169.4	173.6
Ga	28.64	35.20	31.62	22.98	30.80	23.14	21.87	27.53	29.24
Rb	50.94	145.6	156.3	448.6	361.0	47.37	81.76	80.55	61.4
Sr	331.9	269.2	535.1	58.94	87.44	447.4	372.9	421.2	504.4
Y	21.58	7.10	65.34	28.20	40.08	18.02	19.72	28.79	35.04
Zr	101.9	442.7	746.4	837.3	790.6	139.7	136.1	257	270.7
Nb	7.26	6.96	35.36	25.70	29.30	7.51	7.57	15.86	16.91
Cd	0.21	0.18	0.25	0.22	0.25	0.16	0.13	0.34	0.25
In	0.084	0.059	0.14	0.10	0.074	0.07	0.08	0.08	0.09
Cs	0.24	0.39	1.03	2.22	1.45	1.18	2.51	0.51	0.51
Ba	565.7	399.6	1417	1095	949.6	425.2	322.7	882.2	664.3
La	22.14	20.23	102.9	60.25	113.2	18.09	12.97	37.08	39.83
Ce	48.48	38.74	213.5	125.5	228.0	43.28	35.62	80.04	88.19
Pr	5.45	3.71	24.83	13.01	26.67	4.77	3.94	8.65	9.48
Nd	27.76	15.94	117.6	59.84	123.4	25.18	21.24	44.68	49.62
Sm	5.64	2.71	18.17	10.34	17.28	5.35	4.68	8.70	9.76
Eu	1.60	0.58	1.89	1.05	1.21	1.37	1.22	1.99	2.30
Gd	5.53	2.26	16.28	8.75	13.78	5.22	4.87	8.18	9.14
Tb	0.64	0.24	1.82	0.97	1.35	0.60	0.58	0.89	0.99
Dy	3.59	1.25	10.02	5.26	6.89	3.30	3.36	4.82	5.42
Ho	0.72	0.24	1.99	1.04	1.29	0.64	0.67	0.94	1.04
Er	1.96	0.66	5.49	2.94	3.47	1.70	1.85	2.51	2.78
Tm	0.26	0.09	0.74	0.41	0.46	0.22	0.25	0.33	0.37
Yb	1.64	0.56	4.78	2.78	2.92	1.36	1.58	2.11	2.35
Lu	0.25	0.08	0.73	0.45	0.46	0.20	0.24	0.32	0.36
Hf	1.97	8.23	13.99	15.88	15.29	2.53	2.43	4.40	4.67
Ta	0.31	0.34	1.45	2.02	1.62	0.45	0.38	0.74	0.81
Pb	9.51	14.78	15.97	15.40	46.76	8.48	6.78	20.37	5.91
Bi	0.18	0.059	0.10	0.024	0.052	0.11	0.11	0.04	0.03
Th	0.63	4.96	23.74	12.55	39.53	1.08	1.00	3.57	2.89
U	0.27	1.55	2.77	2.18	4.06	0.87	0.52	0.60	0.59

表4 样品 JC10—JC19 稀土、微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)Table 4 The REE, trace elements results of samples JC10—JC19($\times 10^{-6}$)

样品	JC10	JC11	JC12	JC13	JC14	JC15	JC16	JC17	JC18	JC19
岩性	斜长角闪岩									
Li	9.51	12.31	15.56	10.15	29.71	13.24	8.08	9.59	16.94	23.61
Be	1.68	0.40	1.57	1.29	1.18	1.70	1.15	0.89	1.64	0.75
Sc	38.95	45.02	37.53	37.59	32.25	40.43	22.06	45.41	34.62	39.91
V	395.4	165.8	379.4	219.3	280.3	408.5	421.9	229.3	239.9	399.6
Cr	95.69	87.59	127.7	142.6	123.3	99.71	38.47	343.8	118	114.8
Co	50.34	24.61	68.75	35.47	47.05	64.8	44.6	58.41	35.98	66.74
Ni	57.54	52.4	167.8	32.59	126	112.5	81.67	154.3	25.21	211.4
Cu	53.51	11.42	3.43	30.93	0.94	3.04	3.97	17.96	23.36	1.04
Zn	138.9	61.06	160.2	135.2	131.5	149	109.5	135.6	187.4	127.7
Ga	28.36	15.54	29.66	26.21	26.43	26.99	24.96	21.33	31.09	28.51
Rb	77.72	27.32	142.9	85.67	204.7	87.29	70.59	90.9	105.3	71.13
Sr	310.6	149	282.1	445.1	473.8	294.4	303.6	277.6	580.4	438
Y	36.86	20.63	27.73	44.57	23.95	25.78	22.35	22.79	46.85	32.93
Zr	281.4	57.88	152.7	257.2	194.3	185.7	288.8	86.57	320.7	119.1
Nb	17.28	2.01	10.81	12.13	15.35	8.99	13.59	4.15	16.12	10.24
Cd	0.16	0.07	0.11	0.15	0.18	0.16	0.17	0.10	0.22	0.15
In	0.09	0.04	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.06	0.09	0.09
Cs	0.30	0.79	2.23	0.92	4.73	1.36	1.19	0.57	8.81	0.85
Ba	1 261	834.3	760.9	1101	614.9	250.6	593.2	1034	905.5	857.9
La	43.23	10.04	22.02	47.7	21.45	22.26	29.34	14.13	56.57	21.18
Ce	93.93	21.43	51.96	102.4	46.43	49.83	56.21	34.71	120.5	50.3
Pr	10.2	2.78	6.04	11.27	5.09	5.64	6.11	3.88	13.54	5.91
Nd	53.18	14.54	32.73	57.75	26.08	29.64	30.11	19.96	68.89	31.54
Sm	10.5	3.32	7.02	10.57	5.64	6.28	5.69	4.08	12.25	6.78
Eu	2.30	0.88	1.78	2.01	1.10	1.60	1.20	0.99	2.22	1.64
Gd	9.71	3.77	7.00	9.78	5.46	6.37	5.67	4.32	10.86	6.94
Tb	1.05	0.49	0.81	1.08	0.65	0.75	0.64	0.53	1.17	0.83
Dy	5.66	3.05	4.64	6.18	3.79	4.24	3.67	3.36	6.42	4.77
Ho	1.09	0.67	0.92	1.28	0.76	0.85	0.74	0.72	1.30	0.97
Er	2.92	1.97	2.50	3.65	2.16	2.35	2.06	2.12	3.67	2.68
Tm	0.38	0.28	0.34	0.50	0.29	0.31	0.27	0.3	0.51	0.36
Yb	2.46	1.89	2.15	3.29	1.88	2	1.79	2.03	3.33	2.31
Lu	0.37	0.29	0.32	0.50	0.28	0.31	0.28	0.31	0.52	0.34
Hf	4.85	1.01	2.69	4.38	3.49	3.21	5.01	1.55	5.23	2.32
Ta	0.82	0.11	0.48	0.48	0.73	0.4	0.67	0.16	0.59	0.42
Pb	3.39	5.50	7.81	8.90	24.45	14.99	10.79	8.55	33.72	8.88
Bi	0.04	0.03	0.10	0.04	0.15	0.07	0.09	0.07	0.08	0.05
Th	3.21	0.60	0.30	1.73	2.71	0.68	3.77	0.9	1.71	0.36
U	0.62	0.12	0.18	0.37	0.6	0.28	1.00	0.19	0.42	0.09

5 同位素年龄

5.1 分析方法

锆石 U-Pb 同位素年代学是在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用的是单颗粒锆石的激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)原位测试,该方法将激光剥蚀产生的干气溶胶按照 1:3 的分配系数导入至 Q-ICPMS,进行锆石 U-Pb 定年分析,实现了锆石 U-Pb 定年原位分析。锆石 U-Pb 年龄测定采用国际标准锆石 91500 作为外标校正^[17],元素含量采用 NIST610 作为外标校正^[18]。

5.2 分析结果

五个样品中 JC5 样品的锆石颗粒呈长柱状晶形

完整,锆石阴极发光图像呈现出核-幔-边结构,并且具有亮白色震荡环,显示出岩浆锆石的特征^[19,20](见图 9a);JC4 样品,锆石呈溶蚀状、碎裂浑圆状的碎屑(见图 9b),其余三个样品的锆石为短柱状,阴极发光图像呈云雾状暗色核幔结构,无震荡环的变质重结晶特征(见图 9c, d, e)。

三件变质锆石样品 测得 52 个有地质意义的年龄,其中核部 26 个数据,年龄集中在 1 868~1 928 Ma,加权平均年龄为(1 900±11)Ma(MSWD=1.16),在锆石边部获得 26 个年龄在 1 864~1 901 Ma,加权平均年龄为(1 884±12)Ma(MSWD=0.20,见图 10),1.9~1.8 Ga 的峰值可以确定为变质事件年龄(见图 11)。

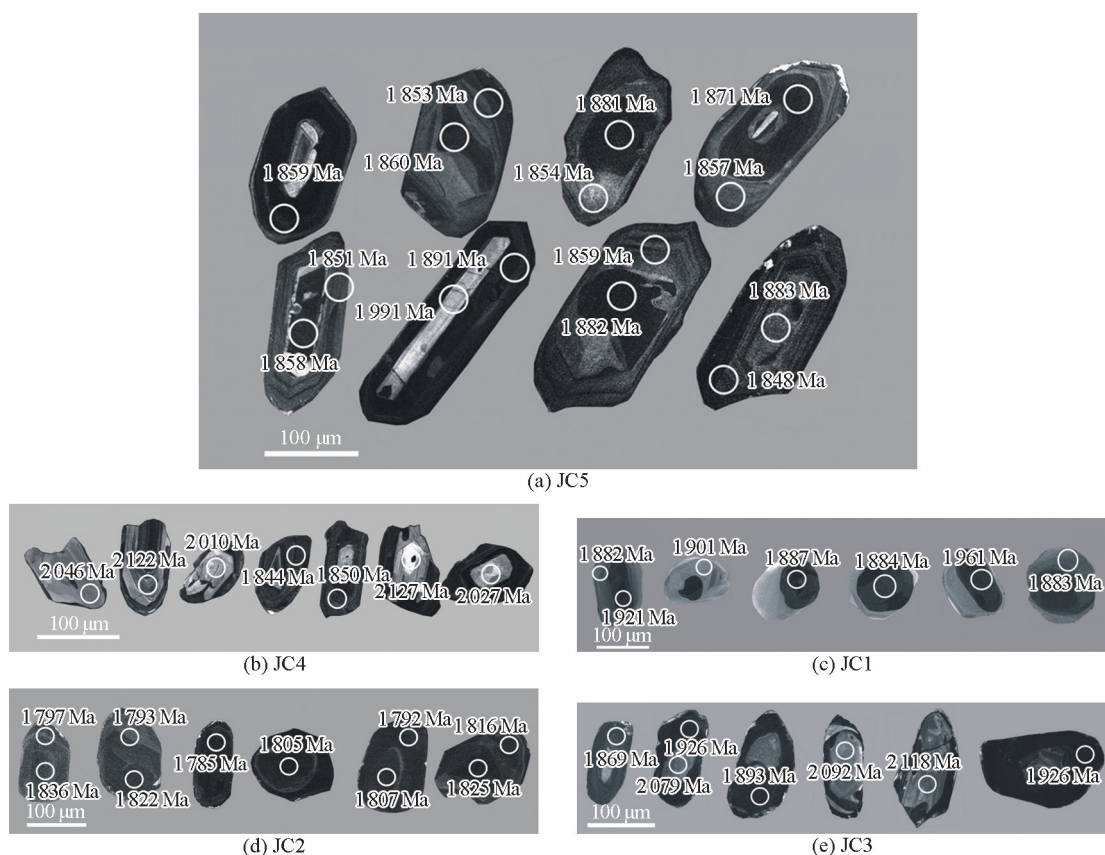


图9 锆石阴极发光图像

Fig. 9 CL images of the zircons

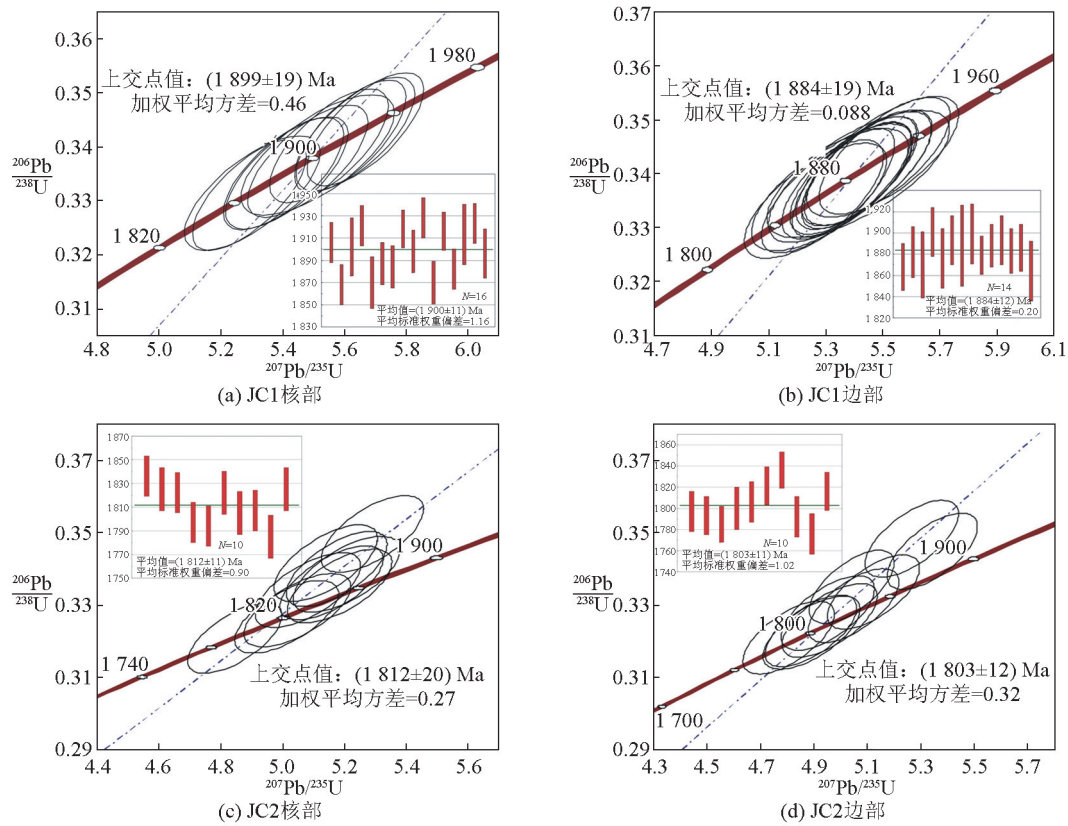


图 10 JC1、JC2 U-Pb 锆石年龄谐和图

Fig. 10 Zircon U-Pb concordia diagrams of samples JC1 and JC2

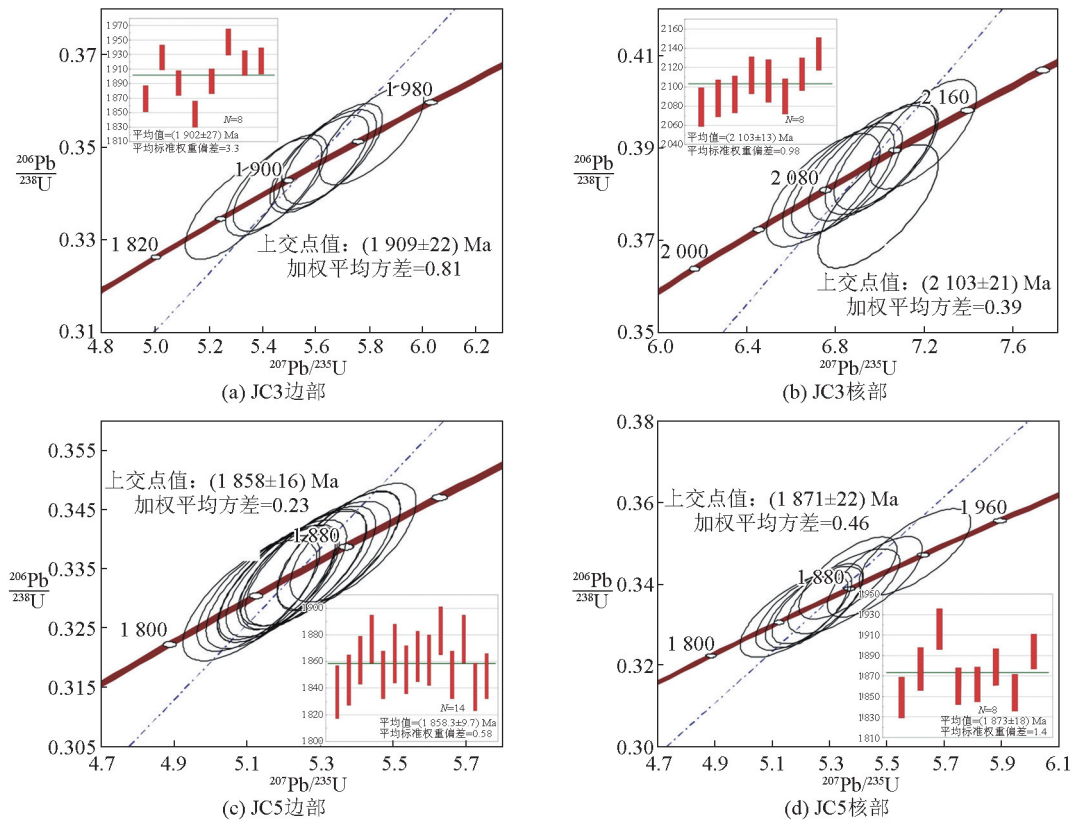


图 11 JC3、JC5 锆石年龄谐和图

Fig. 11 Zircon U-Pb concordia diagrams of sample JC3 and JC5

6 讨论

6.1 构造背景

从微量元素 Ti-Zr 构造环境判别图解^[21](见图 12)和 Zr/Y-Zr 构造环境判别图解^[22](见图 13)可以看出,样品几乎全部落入板内玄武岩区域,暗示白家嘴子组基性火山岩形成时的构造背景为板内环境;微量元素 Nb/Yb 比值高显示大陆玄武岩特点, Th/Ta、Ta/Hf 比值特征显示出大陆初期裂谷特征。此外,正片麻岩的岩石化学特征显示为 A 型花岗岩,其源区是处于一种地壳伸展减薄的构造背景。综合两类岩石反映的构造背景,推断白家嘴子组地层形成时龙首山地区处于陆内地壳伸展减薄的大陆裂谷初期的构造背景。

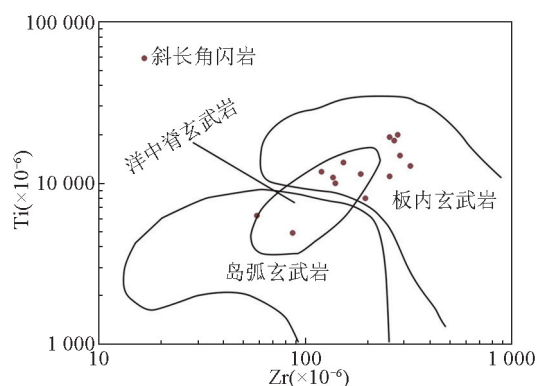


图 12 斜长角闪岩 Ti-Zr 图解^[21]

Fig. 12 The Ti-Zr diagrams of amphibolite^[21]

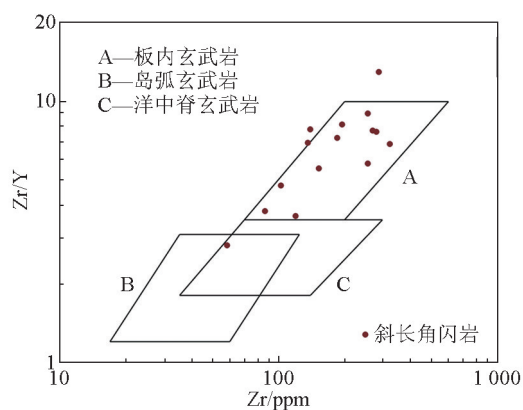


图 13 斜长角闪岩 Zr-Zr/Y 图解^[22]

Fig. 13 The Zr-Zr/Y diagrams of amphibolite^[22]

6.2 龙首山岩群的变质过程及热事件

本文所测的变质锆石年龄为 1.90 Ga 和 1.85 Ga, 而 1.90 Ga 为碎屑锆石核部的年龄, 代表龙首山岩群变质岩系物源区变质碎屑的年龄是成岩

前的变质事件; 在五个样品中 26 个锆石暗色变质增生边部 ($Th/U < 0.1$), 获得的 1.85 Ga 年龄峰值数据, 特别是黑云斜长片麻岩副变质岩中的变质锆石变质年龄 1.88 Ga, 由此推断龙首山岩群的变质时代为古元古代。样品 JC4 碎屑锆石的核部为岩浆锆石碎屑, 24 个为核部锆石测试数据, 年龄集中在 2 027 ~ 2 127 Ma, 加权平均年龄为 $(2\ 072 \pm 37)$ Ma (MSWD = 6.0, 见图 14), 代表了该花岗质片麻岩物源区的原岩年龄; 由此可见龙首山地块的构造演化经历了两次明显的变质热事件 (1.9 Ga 和 1.8 Ga) 其物源的年龄应该大于碎屑锆石核部的锆石年龄 $(2\ 072 \pm 37)$ Ma。

6.3 不同板块地层结构与构造热事件对比

6.3.1 华北克拉通构造演化

古太古代-冥古代陆核的形成^[23-25], 中太古代 (2.9 ~ 2.7 Ga) 广泛的大陆地壳生长^[26-28], -2.5 Ga 局部的地壳生长和克拉通化^[29, 30]; 古元古代 (1.95 ~ 1.82 Ga) 的俯冲-增生-碰撞造山及华北克拉通的最终形成^[31], 其中 -2.5 Ga 岩浆变质事件与 -1.85 Ga 变质事件是华北克拉通区别于其他克拉通最显著的特征。

6.3.2 扬子克拉通构造演化

基底形成于晋宁期或扬子期 (约 800 Ma 前), 并经历了 3 个重要的构造期: 即吕梁期 (约 1 700 Ma 前)、四堡期 (约 1 000 Ma 前) 和晋宁期或扬子期 (约 800 Ma 前)。不同时期的洋壳俯冲及岛弧带的形成使分散的陆核、孤岛增长连在了一起, 最终形成了克拉通 (地台) 的统一褶皱基底。扬子克拉通基底形成后, 自震旦纪开始就进入相对稳定的发展阶段, 即进入了相对稳定的克拉通发展阶段^[32]。

6.3.3 “西域克拉通”构造演化

“西域克拉通”包括我国西北地区南天山—中蒙边界以南、昆仑山以北、贺兰山以西的广袤区域, 即通常意义的塔里木、阿拉善、中祁连和柴达木地块, 并将这个古生代期间的“西域克拉通”称之为西域板块。主要岩浆构造热事件有: 2.5 Ga 构造热事件形成了以麻粒岩相为主的深层片麻岩、孔兹岩、奥长花岗岩 (trondhjemite)、英云闪长岩 (tonalite)、花岗闪长岩 (granodiorite) 岩系 (TTG) 构成的晚太古宙克拉通化基底; 1.8 Ga 构造热事件形成了以角闪岩-高绿片岩相为主的早元古宙克拉通化基底; 0.9 ~ 0.8 Ga 大陆拼合的构造热事件形成了以低绿片岩相为主的新元古代早期克拉通化基底和一条值得注意的早新元古代大陆缝合带^[7]。

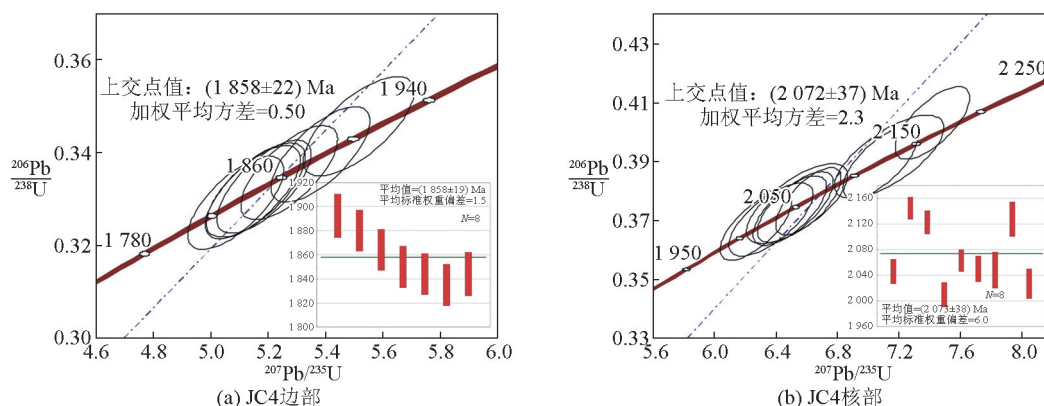


图 14 JC4 U-Pb 锆石年龄谐和图
Fig. 14 Zircon U-Pb concordia diagrams of samples JC4

6.3.4 塔里木板块构造演化

塔里木板块是一个具有完整的前寒武纪结晶基底和并发育了良好的新元古代盖层的大陆块体^[33-35]。主要的岩浆构造热事件有:2.8~2.6 Ga形成了以TTG为主的初始大陆地壳,古元古代早期可能经历了一次裂解事件,在1.9~1.8 Ga发生造山事件;在漫长的中元古代发育了类似被动大陆边缘的沉积建造,1.0~0.9 Ga发生了造山事件,形成Rodinia超大陆;760~820 Ma,塔里木存在洋壳俯冲;740 Ma开始,塔里木与澳大亚分离,表明Rodinia超大陆解体^[36]。

6.3.5 龙首山地块

最近研究表明龙首山地块经历了三期古元古代岩浆事件(-2.04 Ga、-2.17 Ga、-2.33 Ga)和两期

古元古代晚期变质事件(-1.95~1.90 Ga)和1.85 Ga^[37],并在龙首山杂岩中获得了一个(2468±9) Ma年龄,在金川地区花岗岩测的2233 Ma年龄^[38],反映龙首山地块很可能存在太古宙基底。

7 结语

本次对白家嘴子组变质岩系的同位素年龄的剖析和岩石地球化学研究表明,龙首山地区在古元古代时期就已经是一个相对稳定的大陆块,它们经历了2.1 Ga、1.9 Ga和1.85 Ga三期强烈的构造岩浆变质事件。

不同板块热事件和地层结构^[39,40]对比(见表4)可以看出,龙首山地块经历的三期强烈的构造岩浆变质事件在华北板块和西域克拉通内部广泛存在。

表 4 龙首山地块地层结构对比表

Table 4 The contrast of stratigraphic structure between Longshoushan block and the other cratons

宙代	年龄/Ma	华北板块	华南板块	塔里木板块	西域板块	龙首山地块
晚古生代	>510	缺失泥盆系和下石炭统,二叠系海陆交互碎屑含煤建造	海相碳酸盐-陆相碎屑岩建造	泥盆系磨拉石建造,石炭-二叠系碳酸盐岩-碎屑岩建造	泥盆系磨拉石建造,石炭-二叠系海陆交互碳酸盐岩-碎屑岩建造	
显生宙	早古生代	缺失上奥陶统、志留系	O-S碳酸盐岩夹笔石页岩建造	O-S深海到滨浅海相沉积	O-S碳酸盐岩夹笔石页岩建造	
	<600	寒武-奥陶碳酸盐岩建造	含磷硅质岩与碳酸盐岩建造	早寒武世含磷层,属于亲扬子型非成熟克拉通	寒武系含磷富硅碳酸盐岩建造	

续表

宙代	年龄/Ma	华北板块	华南板块	塔里木板块	西域板块	龙首山地块
元古宙	600~800	缺失	震旦系(冰碛砾岩) 南华系		震旦纪晚震旦世南沱期的冰碛岩 ^[40]	震旦系韩母山群为一套冰碛岩、薄层灰岩及变质基性火山岩(盖层)
	800~1000	青白口系碎屑岩夹铁矿层	810 Ma 晋宁运动,该地块发生克拉通化0.8 Ga		0.9~0.8 Ga 大陆拼合的构造热事件形成了以低绿片岩相为主的新元古代早期克拉通化基底	缺失地层 823 Ma 超镁铁岩岩体的年龄(Rodinia 超大陆裂解事件 ^[6])
	1000~1400	蓟县系:含沥青质白云岩,夹锰矿层	中元古代中低级变质火山沉积岩系	长城系、蓟县系浅变质岩系,已出现 ^[39]	西域各地块发育一套成熟度较高的长石-石英砂岩和碳酸岩建造,没有统一焊接在一起	长城-蓟县系:墩子沟群一套富硅质碳酸盐岩夹板岩、千枚岩及硅质岩的浅变质岩系与龙首山岩群呈角度不整合接触
	1400~1850	长城系:含铁矿层及碱性火山岩(基底隆升,长城系裂解事件)1.95~1.82 Ga ^[28]	1.7~1.0 Ga		1.8 Ga 构造热事件形成了以角闪岩-高绿片岩相为主的早元古宙克拉通化基底	龙首山群(主要形成于古元古代1.9~1.8 Ga
	1850~2600	溱沱群:浅变质岩(2.5 Ga 变质壳熔作用;1.9~1.85 Ga 终极克拉通 ^[40])		古元古代为一套高级副变质岩系	2.5 Ga 以麻粒岩相为主的深层片麻岩、孔兹岩、TTG 岩系构成的晚太古宙克拉通化基底	2.1~1.9 Ga 可能存在大于2.4 Ga 的岩浆事件 ^[37,38]
太古宙	2600~3000	润沟河群-遵化绿岩带, 2700~2800 Ma(陆壳增生,末期微陆块拼合)2.9~2.7 Ga ^[28]		2.8~2.6 Ga 形成了以TTG 为主的初始大陆地壳		石井口组 塔马沟组 白家嘴子组 麒麟沟组
	3000~3500	迁西岩群:片麻岩,变质沉积岩;曹庄岩组:灰色片麻岩,最老年龄3851 Ma				
	>3500					

而龙首山地块上发生的0.8 Ga的岩浆事件,反映出非华北克拉通的属性;与华南板块和西域克拉通表现出的Rodinia超大陆裂解事件较为吻合。然而龙首山地块的基底存在大于2.4~2.3 Ga热事件,具有更多的亲华北板块的演化事件。由此可见,龙首山地块在古元古代与华北板块更具亲缘性,而在中新元古代时期与华南板块更具亲缘性;从整体来看它与西域板块更具有相似性。因此,今后寻找金川型^[41]铜镍硫化物矿床的方向应着眼于整个西域板块。

致谢

感谢中国工程院咨询项目的资助,感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室的博士柳小明和第五春荣协助与支持。

参考文献

- [1] 董国安,杨宏仪,刘敦一,等. 龙首山岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报,2007,52(6):688-697.
- [2] 汤中立,白云来. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J]. 地学前缘,1999,6(2):271-283.
- [3] 汤中立,白云来. 北祁连造山带两种构造基底岩块及成矿系统[J]. 甘肃地质学报,2001,10(2):1-11.
- [4] Lu S N, Zhao G C, Wang H C, et al. Precambrian metamorphic basement and sedimentary cover of the North China craton: a review [J]. Precambrian Research, 2008, 160(1/2): 77-93.
- [5] 夏明哲,夏昭德,卢荣辉,等. 龙首山地块的归属问题:来自地壳结构和中新元古代地层的证据[J]. 地球科学与环境学报, 2011,33(2):132-136.
- [6] Li X H, Su L, Chung S L, et al. Formation of the Jinchuan ultramafic intrusion and the world's third largest Ni-Cu sulfide deposit: associated with the ~825 Ma South China mantle Plume?[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2005, 6(Q11004).DOI: 10.1029/2005GC001006.
- [7] 葛肖虹,刘俊来. 被肢解的“西域克拉通”[J]. 岩石学报,2000,16(1):5966.

- [8] 车自成,刘良,刘洪福,等.阿尔金断裂的组成及相关中生代含油气盆地的成因特征[J].中国区域地质,1998,17(4):377-384.
- [9] 甘肃省地质矿产局.甘肃省区域地质志[M].北京:地质出版社,1989:9-46.
- [10] Simon A. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofenidic, Early archean supracrustal rocks in south-western Finland[J]. Geological Survey of Finland, Bulletin, 1953, 160:64.
- [11] Allegor C J, Hart S R. Trace Elements in Igneous Petrology[M]. New York: Developments in Petrology, 1973.
- [12] Misra S N. Chemical distinction of high-grade ortho and parame-tabasite[J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 1971, 51: 311-316.
- [13] Mc Donough W F, Sun S S. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process [C]// Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [14] 李献华,李寄,刘颖,等.华夏古陆古元古代变质火山岩的地球化学特征及其构造意义[J].岩石学报,1999,15(3):364-370.
- [15] 汪云亮,张成江,修淑芝.玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf图解判别[J].岩石学报,2001,17(03):413-421.
- [16] Shinjo R, Chung S L, Kato Y, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of volcanic rocks from the Okinawa Trough and Ryukyu Arc: Implications for the evolution of a young, intracontinental back arc basin[J]. Journal of Geophysical Research-atmospheres, 1999, 104(B5): 10591-10608.
- [17] 袁洪林,吴福元,高山,等.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J].科学通报,2003,48(14):1511-1520.
- [18] 柳小明,高山,第五春荣,等.单颗粒锆石的 20 μm 小斑束原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和微量元素的同时测定[J].科学通报,2007,52(2):228-235.
- [19] 闫海卿,赵焕强,丁瑞颖,等.甘肃北山大山头基性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J].西北地质,2012,45(4):216-228.
- [20] Yan Haiqing, Ding Ruiying, Tang Zhongli, et al. Zircon U-Pb Age and Geochemistry of the Ore-hosting Ultramafic Complex of Zhouan PGE-Cu-Ni Deposit, Henan Province, Central China [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(6): 801-812.
- [21] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. Earth and Planetary Science Letters. 1973, 19: 290-300.
- [22] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contrib Mineral Petrol 1979, 69: 33-47.
- [23] Liu D Y, Nutman A P W, Compston W, et al. Remnants of ≥ 3 800 Ma crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. Geology, 1992, 20, 339-342.
- [24] Song B, Allen P N, Liu D Y, et al. 3 800 to 2 500 Ma crustal evolution in the Anshan area of Liaoning Province, northeastern China[J]. Precambrian Research, 1996, 78: 79-94.
- [25] 万渝生,耿元生,刘福来,等.华北克拉通及邻区孔兹岩系的成分与年龄[J].前寒武纪研究进展,2000,23(4):221-237.
- [26] 吴福元,杨进辉,柳小明,等.冀东 3.8 Ga 锆石 Hf 同位素特征与华北克拉通早期地壳时代[J].科学通报,2005,50(18):1996-2003.
- [27] Zhai M G, Santosh M. The Early Precambrian odyssey of the North China Craton: A synoptic overview[J]. Gondwana Research, 2011, 20(1):6-25.
- [27] Geng Y S, Du L L, Ren L D. Growth and reworking of the early Precambrian continental crust in the North China Craton: Constraints from zircon Hf isotopes[J]. Gondwana Research, 2012, 21(2-3):517-529.
- [29] 刘富,郭敬辉,路孝平,等.华北克拉通 2.5 Ga 地壳生长事件的 Nd-Hf 同位素证据:以怀安片麻岩为例[J].科学通报,2009,54: 2517-2526.
- [30] 第五春荣,孙勇,王倩.华北克拉通地壳生长和演化:来自现代河流碎屑锆石 Hf 同位素组成的启示[J].岩石学报,2012,28: 3520-3530.
- [31] Wan Y S, Liu D Y, Song B. Geochemical and Nd isotopic composition of 3.8 Ga meta-quartz dioritic and trondhjemitic rocks from the Archean area and their geological significance[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2005, 24: 563-575.
- [32] 田海芹.中国古生代扬子、华北及塔里木克拉通统一体特征[J].石油大学学报,1998,22(6):11-20.
- [33] 马世鹏,汪玉珍,方锡廉.西昆仑山北坡陆台盖层型元古宇的基本特征[J].新疆地质,1991,9(1):59-71.
- [34] 高振家,王务严,彭文昌,等.新疆震旦系[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1985:5-78.
- [35] 高振家,朱诚顺.新疆前寒武纪地质[M].乌鲁木齐:新疆人民出版社,1984:12-45.
- [36] 张传林,李怀坤,王洪燕.塔里木地块前寒武纪地质研究进展评述[J].地质论评,2012,58(5):923-936.
- [37] 宫江华,张建新,于胜尧.阿拉善地块南缘龙首山岩群及相关岩石的起源和归属—来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的制约[J].岩石矿物学杂志,2011,30(5):795-818.
- [38] 刘勇.甘肃金川古元古代花岗岩的特征及地质意义[D].北京:中国地质大学(北京),2008.
- [39] 刘训,姚建新,王永.再论塔里木板块的归属问题[J].地质论评,1997,43(1):1-9.
- [40] 高振家,吴绍祖.新疆塔里木古陆的构造发展[J].科学通报,1983,28(23):1448-1450.
- [41] 闫海卿,王强,胡延强,等.金川铜镍硫化物岩浆矿床前峰岩浆与岩浆通道[J].中国地质,2013,40(3):509-521.

Structural properties of the Longshoushan block: Constraint from LA-ICP-MS U-Pb zircon dating

Yan Haiqing¹, Liu Qiaofeng¹, Tang Zhongli¹,
Fan Mochun¹, Wang Qiang², Ren Jianmei¹,
Fan Chaofeng¹

(1. College of Earth Science and Resource, Chang'An University, Xi'an 710054, China;

2. Yanan City, Zichang County Yu Jia Ping Town Center School, Yanan, Shaanxi 717300, China)

[Abstract] The samples were collected from Jinchuan continental scientific drilling core of 1000 meters below. The geochemical analysis of variational basalts show that the distribution patterns of the rare-earth element (REE) were rich in light REE and the light and heavy REE fractionation significantly right mode. Trace elements show Rb, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Nb, Ta are relative enrichment and Sr, Zr, Hf are deficit. High Nb/Yb ratio, Th/Ta=1.7~5.63, Ta/Hf=0.10~0.21, which shows that the characteristics of continental rift basalt in the early time. We can conclude that Paleoproterozoic Longshoushan block is in the initial stage of continental block cracking. Zircon U-Pb isotopic ages indicate that the Longshoushan Block Baijiazuzi Group experienced at least three intense tectonic magmatic metamorphism event, period of peak events are respectively 2.1 Ga, 1.9 Ga and 1.85 Ga. Contrast of the tectonic evolution and stratigraphic structure of the Longshoushan block and North China plate, Yang Zi plate, Tarim plate and Western China Craton, we know that Longshoushan block has most similarities with Western China Craton. So the prospecting orientation for the Cu-Ni sulfide deposit in the future should be put in the whole Western China Craton.

[Key words] Jinchuan copper-nickel deposit; structural properties; Longshoushan block; Western China Craton; prospecting orientation