

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.01.001

青海省都兰县艾日克汗森地区榴辉岩地球 化学特征及其地质意义

王启蒙^{1,2}

(1. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院,河南 洛阳 471000;2. 河南省金银
多金属成矿系列与深部预测重点实验室,河南 洛阳 471000)

摘 要:青海省都兰县艾日克汗森地区的榴辉岩位于都兰北榴辉岩带西北方向约 12 km,是最新发现的较大规模榴辉岩产地。此榴辉岩为柴北缘高压-超高压变质带的一部分,大部分退变质程度较高。锆石 U-Pb 年龄为 (435 ± 4) Ma,代表了此榴辉岩峰期变质年龄;该榴辉岩 SiO_2 含量为 48.36%~49.22%, $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 含量为 3.28%~3.65%, Na_2O 含量均大于 K_2O ;原岩为基性玄武岩,为亚碱性拉斑玄武岩系列,构造环境为大洋中脊玄武岩环境。榴辉岩稀土配分曲线表现为右倾型模式,弱富集轻稀土元素,亏损重稀土元素, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.70 \sim 2.34$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.18 \sim 2.54$,属于慢源 E-MORB 型。微量元素表现为强烈亏损 Th、P、Zr 等高场强元素,富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素。指示了柴北缘晚奥陶世到早志留世时期柴达木陆块与欧龙布鲁克微陆块的深俯冲与碰撞造山背景。

关键词:柴北缘;艾日克汗森;榴辉岩;锆石 U-Pb 年龄;地球化学

中图分类号:P597

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2020)01-0001-12

Geochemical Characteristics and Geological Significance of Eclogite in Airikehansen Area, Dulan County, Qinghai Province

WANG Qimeng

(1. No. 1 Institute of Geological and Mineral Resources Survey of Henan, Luoyang 471000, Henan, China,
2. Key Laboratory of Gold and Silver Polymetallic Ore-forming Series and Deep Prognosis of Henan Province,
Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: The eclogite discovered in the Airikehansen area of Dulan County Qinghai Province, is about 12km northwest of northern Dulan eclogite belt. It is the newly discovered large-scale eclogite producing area and is a part of the HUP metamorphic belt in the Northern Qaidam. Most eclogites in the belt have a high degree of retrograde metamorphism. Its zircon U-Pb age is 435 ± 4 Ma, which represents the peak metamorphic age of the eclogite. The content of SiO_2 in eclogite ranges from 48.36% to 49.22%, $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ from 3.28% to 3.65% ($w(\text{Na}_2\text{O}) > w$

收稿日期:2019-08-10;修回日期:2019-12-01

基金项目:中国地质调查局“青海省乌兰县赛坝沟地区 J47E020009、J47E020010 两幅 1:5 万区域地质矿产调查”项目
(12120114018216)

作者简介:王启蒙(1987-),男,工程师,主要从事区域地质及矿产地质调查工作。E-mail:717720215@qq.com

(K_2O)。The original rocks of eclogites are basic basalts, subalkaline tholeiite series. The tectonic setting is mid-ocean ridge environment. The REE distribution curve of eclogite shows a right-leaning pattern, with weak enrichment of light REE and deficiency of heavy REE, (La/Sm) $N=1.70-2.34$, (La/Yb) $N=1.18-2.54$, which belongs to mantle-derived E-MORB type. The trace elements of eclogites show strong depletion of high field strength elements such as Th, P and Zr, and enrichment of large ion lithophile elements such as Rb and Ba. This indicates the deep subduction and orogenic collision background of the Qaidam block and the Olongbluk micro-block in the northern Qaidam basin from Late Ordovician to Early Silurian.

Keywords: northern margin of Qaidam; Airikehansen; eclogite; zircon U-Pb age; geochemistry

柴达木盆地北缘呈北西西—南东东走向展布,简称柴北缘,是加里东期焊接柴达木陆块与欧龙布鲁克微陆块的重要边界,为一条重要的铜、金、钨成矿带。近20年以来,地质工作者(张雪亭等,1999;杨经绥等,2000;张建新等,2002)先后在都兰、大柴旦、锡铁山等地区发现了大量榴辉岩,证实柴北缘存在一条高压-超高压变质带。2016年,在参与实施托莫尔日特幅(J47E020010)1:5万区矿调项目过程中,项目组于图幅南部艾日克汗森地区发现了榴辉岩的存在,此榴辉岩位于都兰北榴辉岩带西北方向约12 km。通过对榴辉岩岩相学、岩石化学及年代学等特征的研究,结合对区域不同地质体的最新研究成果,探讨了本区榴辉岩的岩石特征、成分特征、原岩性质、形成时代,以及柴北缘高压-超高压变质带形成的大地构造背景,将对整个柴北缘高压-超高压变质带的研究提供新的重要线索和基础资料。

1 地质背景

研究区的大地构造位置属秦祁昆造山系-柴北缘结合带,结合带主要出露的地质体有:寒武—早奥陶世滩间山群变火山-碎屑岩、中奥陶世英云闪长岩体、花岗闪长岩体、早志留世石英二长闪长岩、二长花岗岩、正长花岗岩、托莫尔日特-赛坝沟蛇绿构造混杂岩带、沙柳河高压-超高压变质带、晚泥盆世牦牛山组碎屑岩、早石炭世怀头他拉组碳酸盐建造,为一套完整的构造-岩浆造山旋回(王振强等,2016)。

沙柳河高压-超高压变质带断续出露于鱼卡、铁石观、锡铁山、都兰等区域(图1),在以上区域均发现了榴辉岩的存在。榴辉岩主要呈规模不等的透镜状、似层状分布在片麻岩中,鱼卡和都兰北地区出露的榴辉岩较新鲜(张雪亭等,1999;杨经绥等,2000;

张建新等,2002),铁石观、锡铁山地区的榴辉岩多已经退变质为榴闪岩(张建新等,2002;陈鑫等,2016)。通过不同学者对榴辉岩的研究,表明此带的峰期变质时代集中于晚奥陶世到早志留世,柴北缘高压-超高压变质带在早古生代发生了深俯冲而经历过高压-超高压变质作用。

本次发现的榴辉岩产出都兰县北部艾日克汗森地区沙柳河高压-超高压变质带中的沙柳河岩群(Pt_2S)中,该岩群为一套层状无序的中深变质岩系,变形复杂,无根褶皱发育,主要岩性有花岗质片麻岩、黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、角闪斜长片麻岩等,出露少量的云母石英片岩、大理岩等。在研究区内共发现有7个规模较大的榴辉岩体(图2)。榴辉岩的围岩主要为花岗片麻岩,少量的云母石英片岩、伟晶岩,岩石轻微糜棱岩化(图3、图4)。榴辉岩局部退变质强烈,呈现为榴闪岩,主要呈脉状、似层状或透镜状分布,走向以近东西向为主,长450~700 m,宽45~170 m,单体长轴方向与片麻理走向基本一致,与围岩片麻岩接触界线清楚,为侵入接触或镶嵌式接触。

2 样品特征与测试方法

2.1 样品特征

榴辉岩样品呈灰绿-灰黑色,块状或片麻状构造,显微镜下可见粒柱状变晶结构、交代残留结构、后成合晶结构;岩石的矿物组合主要为辉石(30%~35%)、石榴子石(20%~25%)、角闪石(10%~15%)、斜长石(15%~20%),含有少量的绿辉石、金红石、石英、多硅白云母等(图5)。辉石呈他形粒状,无色,与斜长石一起构成指纹状后成合晶结构;石榴子石具自形-半自形晶,大小0.2~3 mm不等,

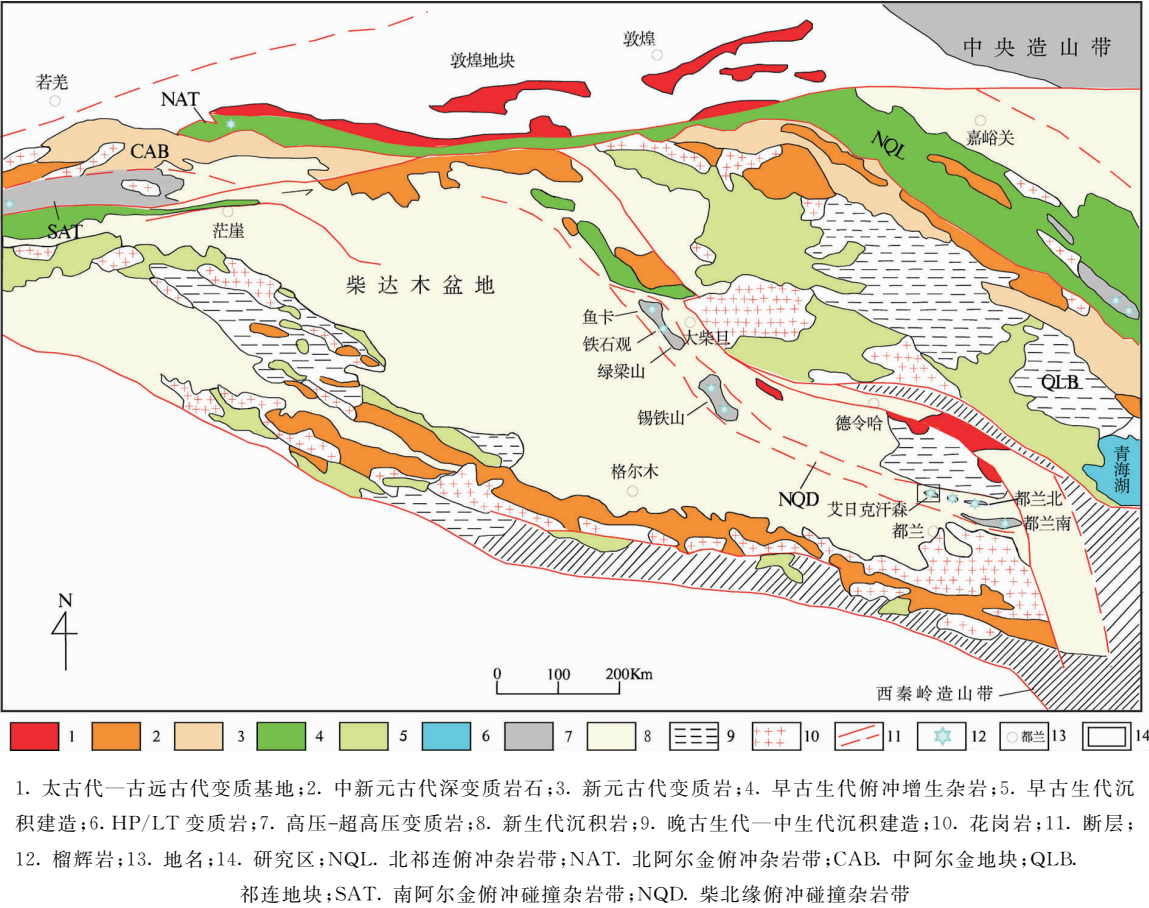


图 1 柴北缘超高压变质带地质简图(据王永开等,2014)

Fig. 1 Geological sketch map of the northern Qaidam UHP metamorphic belt

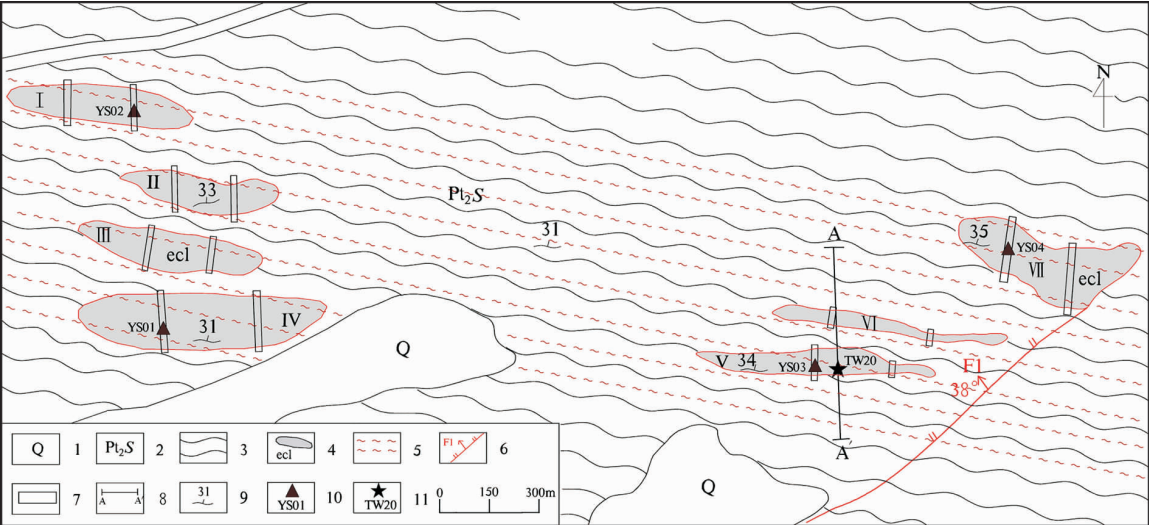
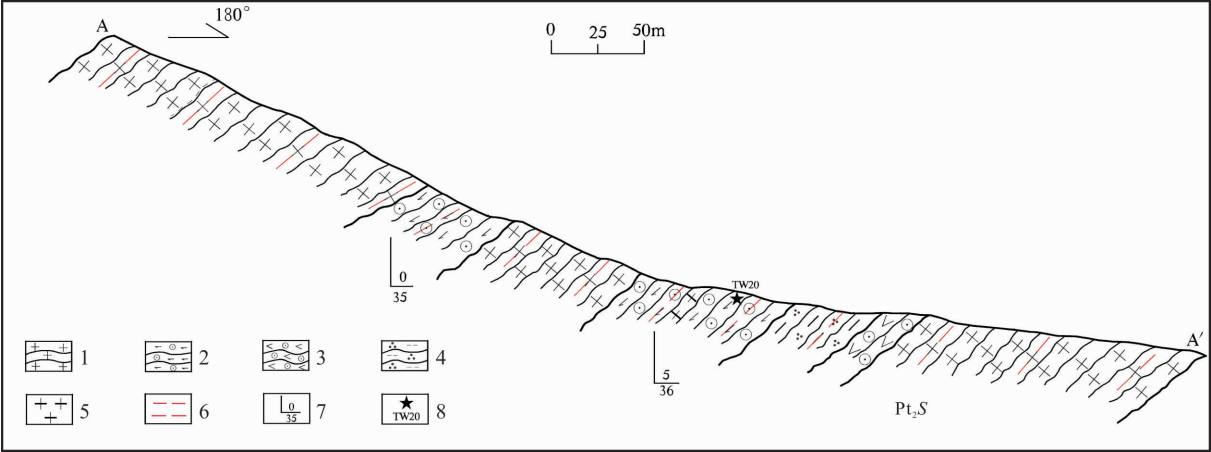


图 2 艾日克汗森地区地质简图

Fig. 2 Geological sketch map of Airikehansen area



1. 花岗片麻岩;2. 榴辉岩;3. 石榴角闪岩;4. 云母石英片岩;5. 伟晶岩;6. 弱糜棱岩化;7. 片麻理产状;8. 年龄样位置

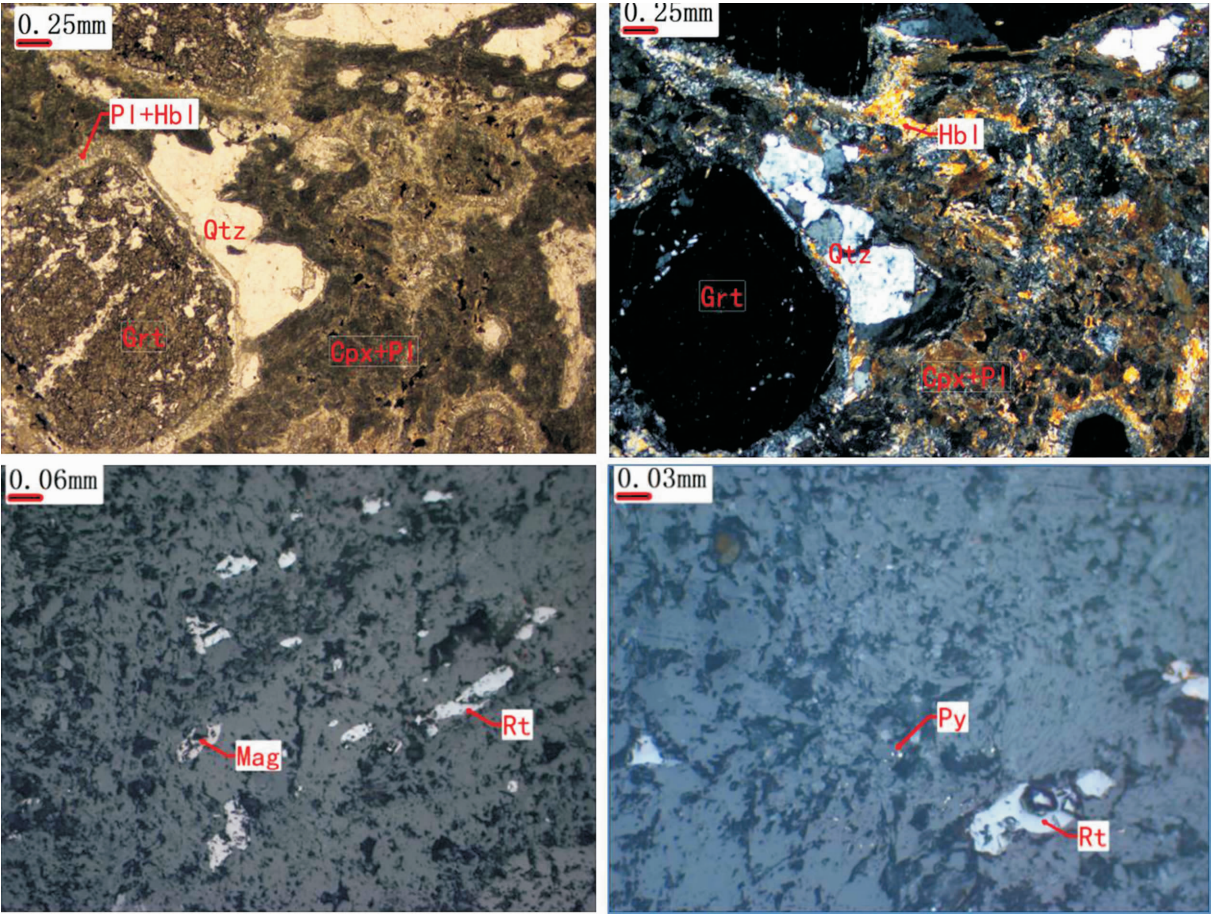
图 3 艾日克汗森地区剖面图

Fig. 3 The profile of Airikehansen area



图 4 艾日克汗森地区榴辉岩的分布特征图

Fig. 4 The distribution characteristics of eclogites in Airikehansen area



Grt. 石榴石; Rt. 金红石; Pl. 斜长石; Hbl. 角闪石; Cpx. 单斜辉石; Spn. 榍石

图 5 榴辉岩显微照片(据图 4D)

Fig. 5 The microphotographs of eclogites(After Figure 4D)

具有结构环带,内核含角闪石、金红石和石英等包裹体,沿边部不同程度的变质结晶为细粒的斜长石、角闪石,原始轮廓清晰可辨,呈交代残留结构;斜长石轻微的绢云母化。

榴闪岩样品为榴辉岩强烈退变质作用形成的,主要矿物成分为角闪石(50%~55%)、辉石(10%~15%)、斜长石(10%~15%)、石榴子石(10%~15%),与榴辉岩相比,石榴子石含量明显减少,角闪石含量增多。在后期退变质作用下,原岩中绿辉石几乎全部变质结晶为斜长石、单斜辉石、角闪石,石榴子石不同程度的退变为斜长石、角闪石等,细粒状的斜长石与角闪石、辉石等呈后成合晶结构。

2.2 样品测试方法

样品元素地球化学分析在华北有色地质勘查局燕郊中心实验室进行。主量元素 FeO 采用容量滴定法, H₂O 用重量法,其他元素分析方法均为 X 射

线荧光光谱法(XRF),分析精度优于 1%。微量元素和稀土元素使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析误差小于 5%。在地质剖面上采集锆石测年样品 1 件,岩型为榴辉岩。锆石分选工作在廊坊宇能矿物分选公司完成。样品粉碎至 80 目,分选细淘后,经磁选和重液分离,然后在双目镜下人工挑选纯度在 99% 以上的锆石。锆石阴极发光(CL)照相在北京锆年领航科技有限公司完成。锆石 U-Pb 同位素测年在天津地质矿产研究所实验室进行。通过激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)仪来测定,进行了锆石 U、Th、Pb 同位素含量测定, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均值误差为 ±1σ,加权平均年龄误差为 95% 置信度。测试数据的计算处理采用 ISOPLOT3.0 程序(LUDWIG, 2003) 和 ICPMSDateCal 程序(LIU et al., 2010)。

3 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄

从锆石的 CL 图像可知,榴辉岩样品的锆石大部分呈半自形-他形短柱状,部分呈浑圆状,锆石长宽比约 1.3:1~1:1(图 6),发育扇形震荡环带或弱分带,Th/U 均值为 0.024 5,均小于 0.1,显示变质

增生锆石的特征(雷玮琰等,2013)。其中,样品 TW20 共有效测定 19 粒锆石的 19 个测点,其中 7 个测点结果偏离谐和曲线,剔除这 7 个测点结果后,其余均位于 U-Pb 谐和曲线上(图 7),²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄介于 428~441 Ma(表 1),加权平均年龄为(435±4)Ma。表明该榴辉岩的峰期变质年龄属晚奥陶世到早志留世时期。

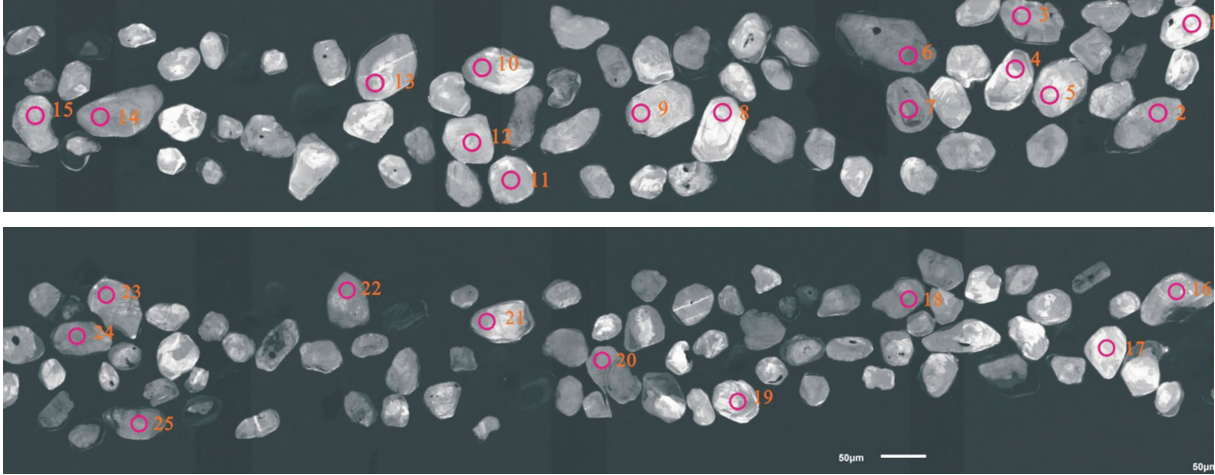


图 6 榴辉岩代表性样品锆石阴极发光图像

Fig. 6 The zircon cathodoluminescence image of representative eclogite samples

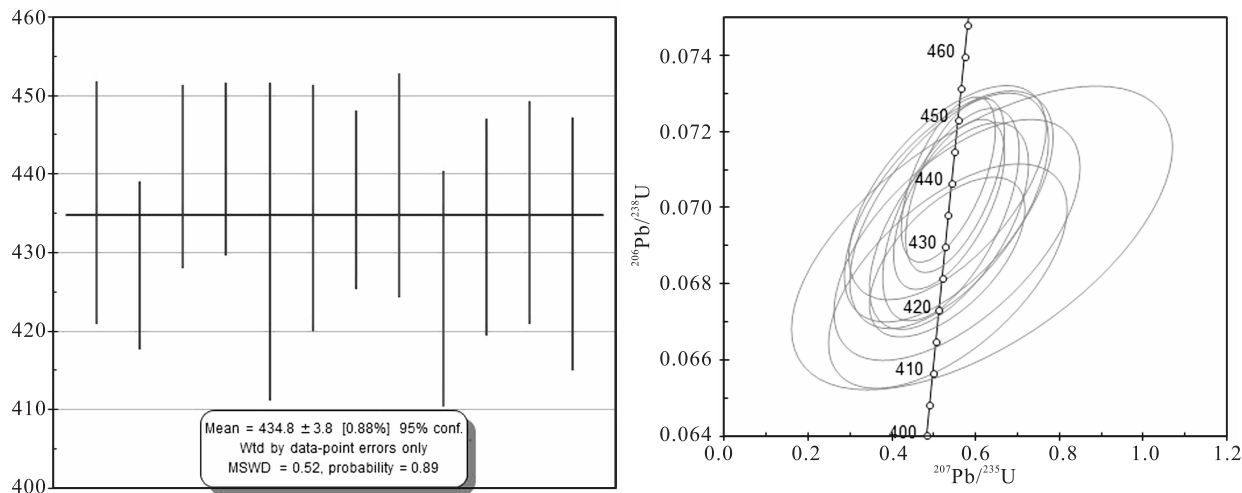


图 7 榴辉岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及分布直方图

Fig. 7 The Zircon U-Pb age figure and harmonic distribution histogram of eclogites

表 1 榴辉岩 LA- ICP- MS U- Pb 同位素分析结果表
Tab.1 Isotope analysis results of the eclogite

样品号		含量(10^{-6})		同 位 素 比 值										年 龄 (Ma)				
TW20	Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
2	3	40	0.070 0	0.001 2	0.535 6	0.101 8	0.055 5	0.011 0	0.304 7	0.481 7	0.004 8	0.002 5	436	8	435	83	431	442
3	5	73	0.068 7	0.000 9	0.531 8	0.075 9	0.056 1	0.007 9	0.176 9	0.067 8	0.007 4	0.003 3	428	5	433	62	458	312
4	1	9	0.073 1	0.004 3	2.316 1	0.462 2	0.229 7	—	2.420 3	1.731 0	0.022 3	0.027 9	455	27	1 217	243	3 050	156
5	1	15	0.084 2	0.001 8	2.723 7	0.181 8	0.234 6	0.016 8	0.300 6	0.148 8	0.022 5	0.006 1	521	11	1 335	89	3 084	114
6	3	51	0.070 6	0.000 9	0.550 6	0.048 1	0.056 6	0.005 0	0.000 0	—	0.023 2	0.000 3	440	6	445	39	475	194
7	4	54	0.070 7	0.000 9	0.534 5	0.045 9	0.054 8	0.004 7	0.008 3	0.004 3	0.056 6	0.000 9	441	6	435	37	404	194
11	2	36	0.070 0	0.001 2	0.536 4	0.098 9	0.055 5	0.011 3	0.153 3	0.165 6	0.012 8	0.002 7	436	8	436	80	434	453
14	2	23	0.069 2	0.001 6	0.615 1	0.185 8	0.064 5	0.018 2	0.227 4	0.235 8	0.026 0	0.010 1	431	10	487	147	757	597
15	2	23	0.077 7	0.002 0	1.704 1	0.224 2	0.159 0	0.019 7	0.387 9	0.044 6	0.043 2	0.001 3	482	13	1 010	133	2 446	210
16	2	31	0.069 9	0.001 3	0.536 7	0.097 0	0.055 7	0.010 2	0.158 6	0.029 7	0.017 9	0.001 1	436	8	436	79	439	406
18	3	47	0.070 1	0.000 9	0.536 5	0.054 2	0.055 5	0.005 7	0.306 6	0.391 0	0.005 7	0.002 8	437	6	436	44	433	230
22	2	25	0.070 4	0.001 1	0.532 8	0.096 2	0.054 9	0.010 1	0.000 0	—	0.015 4	0.003 2	439	7	434	78	408	413
23	2	25	0.068 2	0.001 2	0.533 5	0.116 4	0.056 7	0.013 0	0.000 0	—	0.071 6	0.225 7	425	8	434	95	481	504
24	3	39	0.069 5	0.001 1	0.536 3	0.077 7	0.056 0	0.007 9	0.213 7	0.109 7	0.008 2	0.001 7	433	7	436	63	450	315
26	1	7	0.075 8	0.002 9	2.460 4	0.316 0	0.235 5	0.049 9	0.274 0	0.206 9	0.069 1	0.024 3	471	18	1 260	162	3 090	338
27	1	9	0.079 0	0.002 9	1.390 5	0.293 2	0.127 7	0.051 2	0.469 0	0.060 7	0.045 8	0.003 8	490	18	885	187	2 066	707
28	2	25	0.078 9	0.001 4	1.838 9	0.142 4	0.168 9	0.012 8	2.765 5	1.983 4	0.003 4	0.002 3	490	9	1 059	82	2 547	127
37	4	57	0.069 8	0.001 1	0.540 9	0.066 5	0.056 2	0.007 1	0.093 4	0.073 4	0.008 7	0.001 3	435	7	439	54	460	279
39	2	25	0.069 2	0.001 3	0.555 3	0.120 0	0.058 2	0.014 5	0.324 5	0.154 6	0.000 8	0.000 5	431	8	448	97	539	546

注:测试单位:北京皓年领航科技有限公司,2016。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

从榴辉(闪)岩样品的岩石化学成分显示(表2), $w(\text{SiO}_2)=48.36\%\sim49.22\%$, $w(\text{TiO}_2)=$

$1.21\%\sim3.02\%$;榴辉岩 TiO_2 含量明显高于榴闪岩, $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=3.28\%\sim3.65\%$,贫碱, Na_2O 含量均大于 K_2O , $w(\text{CaO})=9.72\%\sim11.38\%$,较稳定,具有亚碱性拉斑玄武岩的特点。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)=12.1\%\sim13.75\%$, $w(\text{MgO})=5.15\%\sim7.81\%$,榴辉岩中 Al_2O_3 及 MgO 含量均低于榴闪岩。

表 2 榴辉岩主微量元素(%)、稀土和微量元素(10^{-6})分析结果表
Tab. 2 Major(%) and trace elements(10^{-6})composition of the eclogite

送样号	YS01	YS02	YS03	YS04	送样号	YS01	YS02	YS03	YS04
岩石名称	榴闪岩	榴闪岩	榴辉岩	榴辉岩	岩石名称	榴闪岩	榴闪岩	榴辉岩	榴辉岩
CaO	9.72	11.38	9.80	10.17	P	611	218	916	1 091
K ₂ O	1.36	0.88	1.23	1.35	Zr	68.3	34.9	49.1	46.2
MgO	7.26	7.81	5.47	5.15	Hf	3.36	1.5	2.52	2.37
MnO	0.25	0.21	0.27	0.25	Sm	4.25	2.95	7.34	8.38
Na ₂ O	1.92	2.66	2.42	2.29	Ti	7 554	7 254	15 347	18 105
P ₂ O ₅	0.14	0.05	0.21	0.25	Y	32.2	27.1	45.3	53.3
Al ₂ O ₃	13.75	13.50	12.80	12.10	Yb	3.36	2.96	4.58	5.49
Fe ₂ O ₃	1.96	1.25	1.44	1.50	Lu	0.49	0.49	0.74	0.86
TiO ₂	1.26	1.21	2.56	3.02	La	7.25	5.19	17.2	19.6
SiO ₂	49.13	48.36	49.22	48.46	Ce	16.4	10.5	33.3	39.6
FeO	10.02	9.35	9.83	10.00	Pr	2.59	1.99	6.09	7.01
Loss	1.31	1.1	1.17	2.55	Nd	13.6	9.75	28.2	31.9
Tol	99.95	99.93	99.97	99.97	Sm	4.25	2.95	7.34	8.38
(Na ₂ O+ K ₂ O)	3.28	3.54	3.65	3.64	Eu	1.44	0.97	2.2	2.46
K ₂ O/Na ₂ O	0.71	0.33	0.51	0.59	Gd	4.96	2.87	6.59	7.43
<FeO>	11.78	10.47	11.12	11.35	Tb	0.89	0.65	1.31	1.51
A/CNK	0.62	0.52	0.55	0.51	Dy	6.09	4.41	7.92	9.36
Rb	98.3	40.9	47.4	57.7	Ho	1.26	1.03	1.77	2.07
Ba	468	212	389	509	Er	3.5	2.86	4.77	5.51
Th	0.73	0.78	3.03	4.38	Tm	0.53	0.46	0.78	0.92
U	0.52	0.35	1.3	1.63	Yb	3.36	2.96	4.58	5.49
K	11 290	7 305	10 211	11 207	Lu	0.49	0.49	0.74	0.86
Ta	0.35	0.53	1.4	1.46	Y	32.2	27.1	45.3	53.3
Nb	4.51	4.77	16.8	19.1	ΣREE	66.61	47.08	122.79	142.10
La	7.25	5.19	17.2	19.6	LREE/HREE	2.16	1.99	3.31	3.29
Ce	16.4	10.5	33.3	39.6	(La/Yb) _N	1.46	1.18	2.54	2.41
Sr	222	146	332	236	(La/Sm) _N	1.71	1.76	2.34	2.34
Nd	13.6	9.75	28.2	31.9	δEu	0.96	1.01	0.95	0.93

在 $\text{MgO}-\text{CaO}-(\text{FeO})$ 图解中,样品落入正变质基性岩中,在火山岩全碱-硅(TAS)分类图中,落入玄武岩区域, $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解中,显示为亚碱性, $\text{TFEO}/(\text{MgO}-\text{SiO}_2)$ 图解中落入拉斑玄武岩系列。

4.2 稀土元素特征

由分析结果可知(表 3),夏日达乌一带榴辉

(闪)岩的稀土总量 $\Sigma\text{REE}=74.2\times10^{-6}\sim195.4\times10^{-6}$,均值为 134.1×10^{-6} ,榴辉岩稀土总量大于榴闪岩。稀土球粒陨石标准化配分曲线均表现为右倾型模式(榴辉岩更为明显,图 8),富集轻稀土元素 $[(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=1.70\sim2.34,(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.18\sim2.54]$,重稀土元素略亏损,类似于幔源 E-MORB。 $\delta\text{Eu}=0.93\sim1.01$,无明显 Eu 的负异常。

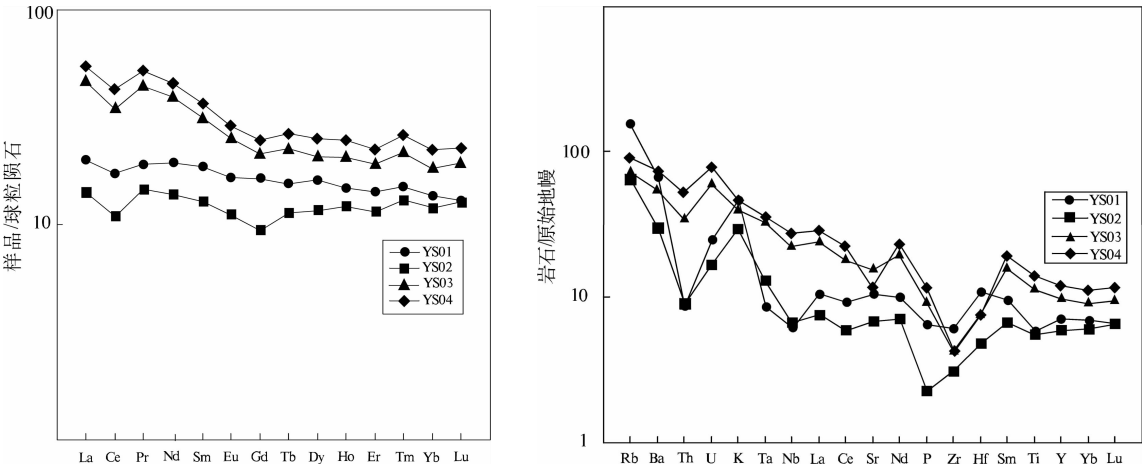


图 8 榴辉岩微量元素蛛网图和稀土配分曲线(据 SUN et al. ,1989)

Fig. 8 The primitive mantle-normalized trace element patterns and chondrite-normalized REE distribution patterns of the eclogites(After SUN et al. ,1989)

4.3 微量元素特征

在微量元素原始地幔标准化蛛网图上(图 8),榴辉岩微量元素含量普遍高于榴闪岩,榴辉(闪)岩均强烈亏损元素 Th、P、Zr 等高场强元素,富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素。此外,榴辉岩还强烈亏损 Sr 元素,榴闪岩强烈亏损 Nb 元素。

5 讨论

5.1 原岩性质及构造环境

研究区大部分榴辉岩都经历了强烈的角闪岩相的退变质叠加改造。由榴辉(闪)岩的岩石地球化学特征可知,研究区榴辉岩原岩为基性火山岩(玄武岩),该基性火山岩为亚碱性拉斑玄武岩系列。岩石贫碱,低 P_2O_5 ,亏损 Zr、Rb、Ba 等不相容元素,富集轻稀土元素,均与大洋中脊玄武岩的特征较为相近。岩石中并不贫 K_2O ,可能与洋脊拉张速度较慢、熔融部位较深有关。Ti-V 环境判别图中样品也落入大洋中脊玄武岩范围(图 9),故研究区榴辉岩原岩

的形成环境为洋脊环境(MORB)。

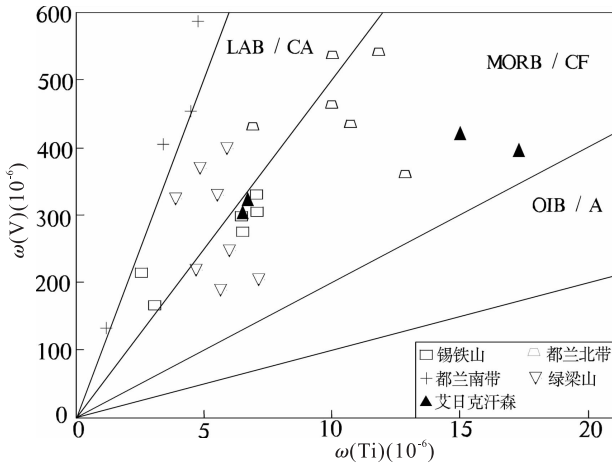


图 9 Ti-V 环境判别图(据杨经绥等,2003 修改)

Fig. 9 Ti-V diagram(Modified after YANG et al. ,2003)

研究区榴辉岩可分为高 Ti 型(榴辉岩)、中 Ti 型(榴闪岩)(图 10)。中 Ti 型退变质程度较高;高

Ti 型稀土总量及微量元素含量大于中 Ti 型, 稀土配分曲线右倾更为明显, 轻稀土元素更为富集, 可能与俯冲折返退变质过程中受到地壳物质的混染有关(张建新等, 2002)。

已有资料(图 10)表明, 柴北缘大柴旦鱼卡地区的榴辉岩较新鲜, 原岩全部属于变质的基性火山岩(玄武岩), 且以亚碱性拉斑玄武岩系列为主, 偶有碱性玄武岩系列, 形成环境大部分为岛弧环境, 少量为洋岛环境(杨经绥等, 2003; 王永开等, 2014; 陈鑫等, 2016); 绿梁山榴辉岩为中、低 Ti 型, 退变质程度较高, 原岩为拉斑玄武岩系列, 主要显示洋脊玄武岩和岛弧拉斑玄武岩的特征, 形成环境主要为洋脊环境, 部分为岛弧环境(杨经绥等, 2003); 锡铁山地区榴辉岩为中、低 Ti 型, 已经大量退变, 只在一些石榴角闪岩的核部才残存一些榴辉岩, 原岩为拉斑玄武岩系列, 主要为洋脊环境产出特征(孟繁聪等, 2003; YANG et al., 2006); 都兰北带榴辉岩为中、高 Ti 型, 大部分较为新鲜, 保留了绿辉石+多硅白云母组合, 原岩主要为拉斑玄武岩系列, 主要为岛弧玄武岩和洋脊玄武岩(张学亭等, 1999; 杨经绥等, 2003; 宋述光等, 2016); 都兰南带榴辉岩为低 Ti 型, 退变质程度较高, 原岩为拉斑玄武岩系列, 具备岛弧玄武岩的特征, 可能形成环境为岛弧环境(张学亭等, 1999)。

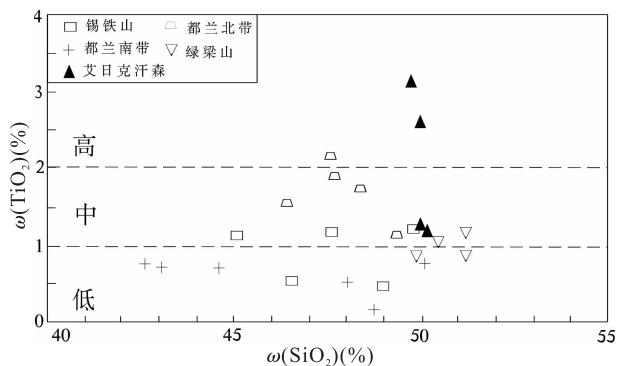


图 10 $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ 变异图(据杨经绥等, 2003 修改)

Fig. 10 $\text{TiO}_2 - \text{SiO}_2$ variation diagrams (Modified after YANG et al., 2003)

总体看来, 柴北缘榴辉岩的原岩主要为亚碱性拉斑玄武岩系列, 其构造环境主要为洋脊、岛弧。研究区和锡铁山、绿梁山地区榴辉岩退变质强烈可能与以洋脊产出环境为主有关。而鱼卡和都兰北榴辉岩均具有岛弧产出环境, 搬运及俯冲折返距离更近、

时间更短, 退变质程度较低的特征。

5.2 构造背景及演化讨论

据研究区及柴北缘其他几个榴辉岩产地的资料, 榴辉岩围岩主要为花岗质片麻岩, 次为云母斜长片麻岩、角闪斜长片麻岩等。从区域上看, 此花岗片麻岩带年龄相近, 断续延伸几百千米, 是柴北缘高压-超高压变质带的重要组成部分(张雪亭等, 1999; 杨经绥等, 2003; 张建新等, 2015)。通过托莫尔日特幅 1:5 万区矿调对研究区花岗片麻岩的研究表明(王振强等, 2016), 其原岩显示了碰撞型花岗岩的特点, 花岗片麻岩的加权平均年龄值均为 890.8 Ma, 时代为新元古代, 表征了晋宁期发生过一次陆-陆碰撞事件, 即在全球 Rodinia 超大陆汇聚碰撞的过程中, 柴北缘地壳的增厚导致下部地壳物质发生局部熔融, 岩浆沿断层上侵, 形成碰撞型的新元古代花岗片麻岩体。

杨经绥(2003)、孟繁聪(2015)等学者的研究表明, 柴北缘榴辉岩的原岩年龄分别为 800~750 Ma 和 ~1 000 Ma, 显示 800~750 Ma 超大陆裂解过程中, 部分榴辉岩形成并侵入到花岗片麻岩中。从野外观察看, 榴辉岩与围岩主要为侵入及嵌入的“原地”关系, 即高压变质带内的榴辉岩与围岩一起经历了深俯冲高压-超高压变质作用。

托莫尔日特幅 1:5 万区矿调研究表明, 研究区北部托莫尔日特-赛坝沟蛇绿岩带为发育在弧后扩张脊 SSZ 型蛇绿岩, 区内蛇绿岩上部变基性火山岩(绿泥片岩)同位素年龄为 480 Ma, 显示研究区具有寒武一早奥陶世岛弧及弧后盆地形成; 而研究区东部发育的一套英云闪长岩+花岗闪长岩的 TTG 岩石组合(463 Ma)显示了中奥陶世弧后盆地闭合-陆缘岩浆弧发育; 研究区东北希里沟湖边早志留世花岗岩带, 同位素年龄为 439~430 Ma, 显示地壳重熔型花岗岩的特点, 属同碰撞构造环境产物, 与研究区沙柳河高压-超高压变质带榴辉岩峰期变质年龄 434 Ma 较为接近, 指示此时柴达木陆块已经俯冲至欧龙布鲁克微陆块的下部, 并发生了榴辉岩相变质作用, 此后折返至地表, 在柴北缘出露为一条高压-超高压变质带(王振强等, 2016)。

6 结论

(1) 研究区榴辉岩 SiO_2 含量为 48.36%~

49.22%, TiO_2 含量为 1.21%~3.02%, ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量为 3.28%~3.65%, Na_2O 含量均大于 K_2O , 原岩为正变质基性玄武岩, 属亚碱性拉斑玄武岩系列, 形成于大洋中脊构造环境。

(2) 榴辉(闪)岩的稀土总量 $\Sigma \text{REE} = 74.2 \times 10^{-6} \sim 195.4 \times 10^{-6}$, 均值为 134.1×10^{-6} , 稀土配分曲线均表现为右倾型模式, 弱富集轻稀土元素、亏损重稀土元素, 无明显 Eu 的负异常, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}} = 1.70 \sim 2.34$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 1.18 \sim 2.54$, 属于幔源 E-MORB。强烈亏损元素 Th、P、Zr 等高场强元素, 富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素。

(3) 研究区内榴辉岩锆石 U-Pb 年龄介于 428~441 Ma, 加权平均年龄为 $(\pm 435 \pm 4) \text{Ma}$, 代表榴辉岩峰期变质年龄, 属晚奥陶世到早志留世, 显示了柴北缘高压-超高压变质带在早古生代发生了深俯冲且经历过高压-超高压变质作用。

致谢: 感谢项目组成员野外的辛勤工作和周红英、耿建珍老师在同位素测试和数据处理方面给予的帮助, 论文得到审稿专家的有益建议, 在此一并致谢。

参考文献(References):

张雪亭, 吕惠庆, 陈正兴. 柴北缘造山带沙柳河地区榴辉岩相高压变质岩石的发现及初步研究[J]. 青海地质, 1999, 1(2): 1-13.

ZHANG Xueting, LU Huiqing, CHEN Zhengxing. Discovery of high-pressure metamorphic rocks of eclogite facies in shaliuhe area of the north margin orogenic belt of qaidam basin and its preliminary study[J]. Geology of Qinghai Province, 1999, 1(2): 1-13.

李怀坤, 陆松年, 赵风清, 等. 柴达木盆地北缘鱼卡河含柯石英榴辉岩的确定及其意义[J]. 现代地质, 1999, (1): 43-50.

LI Huaikun, LU Songnian, ZHAO Fengqing, et al. Determination and significance of the coesite eclogite on the yuqia river on the north margin of the qaidam basin[J]. Geoscience, 1999, (1): 43-50.

杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 青海都兰榴辉岩的发现及对中 国中央造山带内高压-超高压变质带研究的意义[J]. 地质学报, 2000, 74(2): 156-168.

YANG Jingsui, XU Zhiqin, SONG Shuguang, et al. Discovery of Eclogite in Dulan, Qinghai Province and Its Significance for Studying the HP-UHP Metamorphic Belt along the Central Orogenic Belt of China[J]. Acta Geologica Sinica, 2000, 74(2): 156-168.

张建新, 孟繁聪, 戚学祥. 柴达木盆地北缘大柴旦和锡铁山榴辉岩中石榴子石环带对比及地质意义[J]. 地质通报, 2002, 21(3): 124-129.

ZHANG jianxin, MENG Fancong, QI Xuexiang. Comparison of garnet zoning between eclogites in Da Qaidam and Xitieshan on the northern margin of the Qaidam basin[J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(3): 124-129.

陈鑫, 郑有业, 许荣科, 等. 柴北缘超高压变质带折返过程对金红石成矿的制约: 来自鱼卡和铁石观西地区石榴石成分环带的证据[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(2): 143-159.

CHEN Xin, ZHENG Youye, XU Rongke, et al. Exhumation Processes of UHP Metamorphic Belt in the Northern Qaidam and Their Constraints to Rutile Mineralization: Evidences from Compositional Zoning of Garnets in Yuqia and West Tieshiguan Areas[J]. Journal of Earth Sciences & Environment, 2016, 38(2): 143-159.

王永开, 徐永利, 郑有业, 等. 柴达木盆地北缘鱼卡—铁石观一带金红石矿床的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(6): 900-911.

WANG Yongkai, XU Yongli, ZHENG Youye, et al. The discovery of rutile deposits in Yuqia-Tieshiguan area on the northern margin of Qaidam Basin and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(6): 900-911.

雷琰玮, 施光海, 刘迎新. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 273-284.

LEI Weiyang, SHI Guanghai, LIU Yingxin. Research progress on trace element characteristics of different origins[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 273-284.

杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 等. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 291-314.

YANG Jingsui, ZHANG Jianxin, MENG Fancong, et al. Ultrahigh pressure eclogites of the north qaidam

- and altun mountains, nw china and their protoliths[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 291-314.
- 孟繁聪, 崔美慧, 贾丽辉, 等. 2015. 东昆仑造山带早古生代的大陆碰撞: 来自榴辉岩原岩性质的证据[J]. *地质学报*, 2015, 31(12): 3581-3594.
- MENG Fancong, CUI Meihui, JIA Lihui, et al. Paleozoic continental collision of the East Kunlun orogen: Evidence from protoliths of the eclogites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3581-3594.
- 宋述光, 杨经绥. 柴达木盆地北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据[J]. *地质学报*, 2001, 75(2): 180-185.
- SONG Xuguang, YANG Jingsui. Sanidine+Quartz Inclusions in Dulan Eclogites Evidence for UHP Metamorphism on the North Margin of the Qaidam Basin, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(2): 180-185.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3531-3554.
- ZHANG JX, YU SY, LI YS, et al. Subduction, accretion and closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic accretion/collision orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3531-3554.
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据[J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 217-222.
- ZHANG Jianxin, YANG Jingsui, XU Zhiqin, et al. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin, northwestern China: Evidences from U-Pb and Ar-Ar dates [J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 217-222.
- 校培喜, 王永和, 张汉文, 等. 阿尔金山中段高压—超高压带(含菱镁矿)石榴子石二辉橄榄岩的发现及其地质意义[J]. *西北地质*, 2001, 34(4): 67-74.
- XIAO Peixi, WANG Yonghe, ZHANG Hanwen, et al. The discovery of magnesite-bearing garnet lherzolite of high-ultrahigh pressure belt and its geological significance in the middle section of Altgn Tagh [J]. *Northwestern Geology*, 2001, 34(4): 67-74.
- 林成贵, 许荣科, 郑有业, 等. 柴北缘超高压变质带鱼卡榴辉岩型金红石矿地质特征及原岩性质探讨[J]. *西北地质*, 2017, 50(2): 142-155.
- LIN Chenggui, XU Rongke, ZHENG Youye, et al. Geological Characteristic and Protolith Nature of Yuqia Eclogite-type Rutile Deposit in Northern Qaidam UHP Metamorphic Belt [J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(2): 142-155.
- 王振强, 王启蒙, 冯建之, 等. 青海省乌兰县赛坝沟地区 J47E020009、J47E020010 两幅 1:5 万区域地质矿产调查报告[R]. 青海, 河南省地矿一院区矿调报告, 2016.
- CHEN Xin, XU Rongke, ZHENG Youye, et al. The geodynamic setting of Dulan Eclogite-type rutile deposits in the North Qaidam orogen, western China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 110.
- LUDWIG, K. R. ISOPLOT 3.00: A geochronological toolkit for microsoft excel [J]. *Berkeley Geochronology Center*, Berkeley, 2003.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins* [J]. Volume 42, London: Geological Society, 1989, 313-345.
- LIU Yongsheng, HU Zhaochu, ZONG Keqing, et al. Reappraisal and refinement of zircon 21-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science 22-Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1546.