青岛大珠山高分异花岗岩地球化学特征 与含矿性分析



刘瑞杨^{1, 2, 3)},周瑶琪^{1, 2, 3)},周腾飞¹⁾,陈彤彤^{1, 2, 3)}, 刘汉青^{1, 2, 3)}.白冰洋¹⁾.李孙义¹⁾

1) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛,266580;

2) 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京,102206;

3) 中国石化油气成藏重点实验室,江苏无锡,214126

内容提要:青岛大珠山位于莱州湾南西,小珠山南西侧,属于中生代晚燕山期酸性侵入花岗岩体,岩性以中粗粒 钾长花岗岩和花岗斑岩为主。前人对小珠山地球化学特征已有研究,但大珠山花岗岩地球化学研究尚处空白阶段。 对所取的十件样品进行岩相学、全岩主微量及稀土元素、Li同位素、锆石 U-Pb 测年、斜长石电子探针原位分析。结 果显示:岩相学表明研究区花岗岩含有锂辉石,有明显伟晶岩脉,岩石类型为 I—S 型花岗岩;样品为高硅花岗岩 (SiO₂=66.97%~74.97%);全碱含量高(Na₂O+K₂O=8.70%~10.73%),属于过铝质高钾钙碱性系列;Eu 负异常明 显(*δ*Eu=0.25~0.56)。计算高分异花岗岩常见指数:铝饱和指数(*A/CNK*=0.91~1.01);分异指数(*DI*)为 87.07~ 96.65;锆饱和温度为 836.3~862.6℃;锆石 Ti 温度计反映岩浆结晶温度为 698.5~738.9℃。年代学表明样品年龄为 113.1±0.36 Ma,为早白垩世崂山期花岗岩。研究区花岗岩具有明显稀土元素四分组效应(*TE*_{1,3}=1.04~1.15)和较 高氧逸度,表明研究区花岗伟晶岩具有锂矿的成矿潜力。花岗岩分异过程经历斜长石、锆石、磷灰石等矿物的分离 结晶。岩浆沿岛弧和大陆碰撞俯冲带裂缝上涌,形成具有成矿潜力的高分异花岗岩。

关键词:大珠山;岩石地球化学;高分异花岗岩;成矿潜力

在山东东部近海地区发育大规模中生代岩浆岩体,属于高硅酸性侵入岩。前人研究集中在大珠山 花岗岩脆性变形机制(田野等,2009),崂山花岗岩 侵入年代学和 I—A 型花岗岩类型划分上(赵广涛 等,1997,1998)。对大珠山花岗岩地球化学特征研 究较少,特别是对胶南地区高分异花岗岩研究还处 于空白阶段。据前人研究:高分异花岗岩特指经历 强烈结晶分异作用的淡色花岗岩或白岗岩(Cerny et al.,2005; Breiter et al.,2006),主要产于岩体 顶部,从底部到顶部具有岩石分带(饶灿等,2022); 高分异花岗岩富集不相容元素(包括许多稀有金 属),往往被称为稀有金属花岗岩(李晓峰等, 2022)。国内学者已对新疆和西藏地区 12~33 Ma 的淡色花岗岩含矿性(锂、铍矿)有了初步研究(刘 志超等,2020;刘海永等,2022;李五福等,2021);此 外在广东南岭成矿带也发现了A型黑云母钾长花 岗岩,形成于拉张的板内环境,具有成矿潜力(谢昊 等,2020),但没有分析可能的成矿种类。表明我国 花岗伟晶岩研究多倾向于和稀有金属资源相结合 (王汝成等,2021),已建立了高分异伟晶岩熔体— 流体演化矿物标型特征(李建康等,2021),但对伟 晶岩成矿机制还未有深入研究。再者,锂辉石伟晶 岩已经在湖北发现(李建康等,2021),但在山东东 部地区还未有锂辉石伟晶岩的研究。山东东部地区 的火山岩是否具有成矿条件?值得研究。因此在大 珠山地区开展野外踏勘,对所得样品进行全岩主微 量元素、稀土元素、Li 同位素;锆石 U-Pb 测年;斜长 石电子探针测试。确定花岗岩类型、岩浆侵入时间、

注:本文为山东省重大科技创新工程项目"山东东部海域日青威盆地油气赋存条件研究(编号:2017CXGC1608)"、中石化科技部项目"北 黄海—渤海湾盆地低勘探程度区勘探潜力评价(编号:P20028)"、中石化石勘院开放基金"深水混合沉积过程及其对页岩储层发育的控制 作用——以日青威盆地莱阳组为例(编号:HX20220005)"的成果。

收稿日期:2022-07-04;改回日期:2022-10-11;网络首发:2022-10-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.10.025 作者简介:刘瑞杨,女,1997年出生,硕士研究生,主要从事高分异花岗岩地球化学特征研究;Email: liuruiyang_1997@126.com。通讯作 者:周瑶琪,男,1963年出生,博士、教授、博士生导师,主要从事地球动力学研究;Email: zhouyq@upc.edu.cn。

岩浆分异过程的矿物形成种类,结合稀土元素四分 组效应和锂同位素特征分析大珠山高分异花岗伟晶 岩含矿性;为研究山东东部近海地区晚燕山期高分 异花岗岩分异过程提供基础资料。

1 区域地质背景

大珠山位于青岛主城区南西海边,隔小珠山与 莱州湾相邻,属于中生代晚燕山期酸性侵入复式花 岗岩体,岩性以中粗粒钾长花岗岩和花岗斑岩为主。 呈 NW 向展布,出露面积约 65 km²(田野等,2008)。 在晚侏罗世到早白垩世,受古太平洋板块俯冲作用 影响,强烈构造岩浆活动发生在山东东部,出现了一 系列火山沉积盆地。晚白垩世以来研究区一直处于 隆升剥蚀状态,最终露出现今大珠山、小珠山岩体 (田野等,2008;张振凯等,2015)。在大珠山取得样 品,取样位置如图 1 所示:从石门寺(N35°49′19″、 E119°57′15″)进入,经过山顶(N35°47′58″、E119° 58′18″)、小寨山(N35°47′22″、E119°58′8″)、大寨山 (N35°47′12″、E119°58′7″)、杜鹃谷(N35°47′15″、 E120°8′8″)取得样品 10 件。

2 岩相学及样品特征

大珠山主要出露中生代崂山期细粒白岗岩 (DZS-1)、黑云母花岗岩(DZS-2)、中粒白岗岩 (DZS-H)、中粗粒花岗岩(DZS-SS)、花岗斑岩 (DZS-CD)和中粗粒正长花岗岩(GZK-1)。在研究 区发现石英脉和伟晶岩脉,呈岩脉状产出(图 2a、 c)。显微镜下观察具有球粒花岗岩放射状结构(图 2b、c)、块状构造(图 2e、f)。花岗岩主要矿物有钾 长石、斜长石、石英等,钾长石、斜长石呈半自形板 状。其中斜长石被绢云母和黝帘石岩石胶结(图 2e)。次生矿物有磁铁矿、磷灰石、锆石、榍石等(图 2d)。片状黑云母零星分布,极少角闪石被微晶黑 云母胶结。部分石英镶嵌在条纹长石中(图 2f),矿 物表面略脏,矿物之间有溶蚀边。可见绢英岩化,表 现为钾长石叠加绢英岩化,长石被蚀变为绢云母和 石英(图 2e)。此外,在镜下还发现了花岗伟晶岩 岩脉(DZS-DL)中翠绿色的锂辉石颗粒(图 2b、c), 呈板柱状。

3 测试方法

3.1 矿物学测试

岩相学分析在中国石油大学(华东)岩石圈动 力学与地球化学开放实验室完成,使用徕卡光学显 微镜下观察矿物,型号为 LEICA DM2700P。在光学 显微镜下观察矿物,找到斜长石,圈点后进行电子探 针微区原位分析。斜长石电子探针微区分析在中国 石油大学(华东)深层油气重点实验室完成。仪器 为日本岛津电子公司生产的 EPMA-1720。主要进 行电镜(SE、BSE)观测和主量元素氧化物的元素定 量分析实验。加速电压为 15 kV,探针电流为 30 nA,电子束直径为 20 μm,因为矿物颗粒较大,采用



图 1 山东东部大地构造简图(a)和大珠山花岗岩分布简图(b) Fig. 1 Geological map of eastern Shandong (a) and that of Dazhushan granite(b)



图 2 青岛大珠山花岗岩岩相学:(a) 含脉体花岗岩;(b) 锂辉石与斜长石;(c) 后期脉体;(d) 绢云母和磁铁矿; (e) 自形绢云母与黑云母;(f) 石英镶嵌在长石中;(g) 港湾状钾长石;(h) 花岗岩手标本

Fig. 2 Petrography of the Dazhushan granite in Qingdao: (a) veined granite; (b) spodumene and plagioclase; (c) late veins; (d) sericite and magnetite; (e): automorphic sericite and biotite; (f) quartz embedded in feldspar; (g) baylike potassium feldspar; (h) granite hand sample

较大的电子束。测试采用标样为铝硅酸钠和磷酸钛 氧钾,选择测试项目为氧化物。选取元素有 Na、 Mg、Al、Si、P、K、Ca、Fe,元素特征峰设定时间为 10s, 每个测试点选取两个点位去平均为所得结果(Yang Shuiyuan et al., 2022)

3.2 全岩主、微量元素测试

样品委托于廊坊市峰泽源岩矿检测技术有限公司,全岩主量元素分析利用帕纳科 Axios^{MAX} XRF 分析完成,样品分析的精密度和准确度满足 GB/T14506.28-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 28 部分:16个主次成分量测定》的要求。全岩微量元素分析利用 Elan DRC-e ICP-MS 分析完成。样品分析的精密度和准确度满足 GB/T14506-2010《硅酸盐岩石化学分析方法第 30 部分:44 个元素量测定》。

3.3 全岩 Li 同位素测试

测试由兰州大学地质科学与矿产资源学院李素 讲师在美国马里兰大学完成。使用多接收器型电感 耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)将含有锂离子 的液相分离提纯,样品与标准物质(L-SVEC)进行样 品—标样交叉法以校正锂同位素质量歧视。锂同位 素测试结果用相对千分之偏差 δ⁷Li。表述为:

$$\delta^{7} \mathrm{Li} = \left[\frac{n(^{7}\mathrm{Li})/n(^{6}\mathrm{Li})_{\#_{\mathrm{fff}}}}{n(^{7}\mathrm{Li})/n(^{6}\mathrm{Li})_{\mathrm{L-SVEC}}} - 1 \right] \times 1000\%$$

3.4 锆石 U-Pb 同位素测年

锆石 U-Pb 定年微区分析委托廊坊市峰泽源岩 矿检测技术有限公司和北京锆年领航科技有限公司 测试。使用激光剥蚀—电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS)完成。激光剥蚀平台采用 Resolution SE型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Applied Spectra,美国),配备 S155 型双体积样品池。质谱仪 采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪。

4 测试结果

4.1 全岩主、微量元素特征

大珠山高分异花岗岩: SiO₂ = 72.92% ~ 74.97%, K₂O+Na₂O = 8.69% ~ 9.81%, K₂O/Na₂O = 1.02~1.25, K₂O = 4.51% ~ 5.46%, Al₂O₃ = 12.28% ~14.72%, 铝饱和指数(A/CNK) = 0.96~1.01, 属于 偏铝质和过铝质系列; MgO = 0.12% ~ 0.25%, CaO = 0.59% ~ 0.80%, TiO₂ = 0.11% ~ 0.28%。P₂O₅, CaO、 TiO₂, MgO 含量均较低(表1)。在各类组合图解中 (图 3), 属于高钾钙碱性系列。Mg[#] = 20.25 ~ 34.97, A/NK = 1.02~1.11, 表明样品为弱过铝质岩 石。岩石具有较高的分异程度, 根据 CIPW 标准矿 物计算可知分异指数(DI) = 91.03~96.65。固结指 数(SI)=1.21~2.29。锆饱和温度=838.57~851.8 ℃(计算公式见表1)。其次,在研究区取得含矿高 分异花岗伟晶岩(DZS-DL)样品:K,O/Na,O=0.02, $K_2O + Na_2O = 8.83\%$, $K_2O = 0.18\%$, $Na_2O = 8.66\%$, Mg#=34.97, DI=96.65。属于过铝质钙碱性系列, K₂O 和 Na₂O 显示出较大差异(表 1)。此外,在研究 区还取得了3块花岗闪长岩样品:SiO₂=66.97%~ 67. 79%, $K_2O + Na_2O = 10.18\% \sim 10.72\%$, K_2O/Na_2O $= 0.97 \sim 1.24$, K₂O $= 5.04\% \sim 5.94\%$, Al₂O₃ =16.11%~16.16%; A/CNK = 0.93~1.01, 属于过铝 质; MgO = 0.40% ~ 0.58%, CaO = 1.02% ~ 1.77%, TiO₂ = 0.41%~0.43%。P₂O₅、CaO、TiO₂、MgO 含量 均较低。本部分样品属于过铝制钙碱性系列。Mg* =24.22~41.37, A/NK=1.12~1.15, 为弱过铝质系 列。岩石的分异程度较低,根据 CIPW 标准矿物计 算可知分异指数(DI)约为87,固结指数(SI)=2.50 ~4.21, 锆饱和温度=852.50~862.61℃。

表1青岛大珠山花岗岩主量元素(%)、微量元素和稀土元素(×10⁻⁶)分析结果

	Table 1 Major elements (%)	, trace elements ($(\times 10^{-6})$	and rare earth elements	(×10 ⁻⁶) in Dazhushan	granites.	Oingdae
--	----------------------------	--------------------	--------------------	-------------------------	---------------------	----------------	-----------	---------

样品号	GZK-1	DZS-1	DZS-2	DZS-SS	DZS-DL	DZS-Z	DZS-H	DZS-CD	DZS-YX-1	DZS-YX-2
SiO ₂	74.18	74.62	72.92	74.97	74.24	73.18	74.76	66.97	67.38	67.79
TiO_2	0.18	0.13	0.28	0.11	0.17	0.18	0.15	0.43	0.44	0.41
Al_2O_3	13.18	13.24	13.49	12.28	14.72	14.03	13.33	16.11	16.16	16.15
TFe_2O_3	1.38	1.09	2.01	0.68	0.85	1.11	1.05	1.64	2.48	2.45
TFeO	1.24	0.98	1.81	0.62	0. 77	1.00	0.94	1.48	2.23	2.20
MnO	0.04	0.05	0.08	0.03	0.04	0.04	0.05	0.10	0.09	0.10
MgO	0.26	0.14	0.30	0.12	0.23	0.23	0.15	0.58	0.47	0.40
CaO	0.80	0.67	0.73	0.60	0.16	0.63	0.68	1.77	1.05	1.02
K20	5.01	4.89	4. 52	4.62	0.18	5.46	5.01	5.04	5.80	5.94
Na ₂ O	4. 29	4.46	4.41	4.08	8.66	4.36	4.32	5.14	4.77	4.78
P_2O_5	0.05	0.03	0.09	0.02	0.03	0.05	0.03	0.17	0.09	0.08
烧失	0.51	0.57	1.03	2.42	0.68	0. 59	0.38	1.75	0.58	0.38
总量	99.88	99.88	99.87	99.92	99.94	99.86	99.89	99.70	99.30	99.49
K ₂ O+Na ₂ O	9.30	9.35	8.93	8.70	8.83	9.82	9.33	10.18	10.57	10.73
K ₂ O/Na ₂ O	1.17	1.10	1.02	1.13	0.02	1.25	1.16	0.98	1.22	1.24
A/CNK	0.94	0.96	1.00	0.96	1.00	0.99	0.97	0.94	1.01	1.00
A/NK	1.06	1.05	1.11	1.05	1.02	1.07	1.06	1.16	1.14	1.13
固结指数(SI)	2.11	1.21	2.29	1.15	2.16	1.87	1.28	4.21	2.98	2.50
锆饱和温度(℃)	836.3	836.8	851.8	840.0	840.9	845.8	838.6	852.5	862.6	859.5
分异指数(DI)	93.37	94.68	91.03	95.86	96.65	94.01	94.46	87.21	87.07	88.32
Mg [#]	26.93	20.26	22.76	25.17	34.98	28.84	21.67	41.38	27.29	24.22
Be	5.93	9.50	7.40	4.03	3.95	8.95	6.29	2.71	2.52	2.44
Li	17.17	93.00	25.76	12.68	14.53	15.82	22.57	20.78	23.83	35.99
Sc	1.88	1.64	2.95	1.74	2.36	2.06	2.26	4.49	3.49	3.35
V	12.00	9.25	13.69	7.61	11.74	11.77	10.48	19.83	24.03	20.03
Cr	11.80	12.14	13.84	12.21	13.93	12.70	13.32	26.55	9.70	3.00
Со	1.41	0.69	2.37	0.27	2.55	1.01	0.61	3.18	3.51	2.59
Ni	5.62	1.61	12.18	1.40	2.54	2.65	1.20	4.13	5.28	1.69
Cu	0. 74	0.67	1.66	0.76	1.69	1.49	0.83	3.60	2.12	1.38

样品号	GZK-1	DZS-1	DZS-2	DZS-SS	DZS-DL	DZS-Z	DZS-H	DZS-CD	DZS-YX-1	DZS-YX-2
Zn	27.57	26.04	42.02	12.22	34.02	26.20	21.55	51.74	46.02	40.39
Ga	17.33	19.80	19.54	16.56	18.94	18.32	18.36	16.85	17.59	18.37
Rb	171.89	237.74	166.85	179.27	4.40	210.94	199.63	101.81	116.24	116.54
Sr	99.60	69.13	161.35	34.85	127.83	136.82	60.50	181.46	185.60	160.55
Y	20.03	35.26	26.21	14. 53	8.32	17.38	14.74	18.30	20.43	16.75
Zr	97.58	158.06	175.02	131.28	108.18	75.99	127.37	141.16	353.57	361.44
Nb	33.62	56.89	56.48	27.42	27.92	25.89	35.81	27.50	28.95	26.33
Мо	0.64	0.78	0.98	0.10	0.16	0.16	0.10	1.39	1.67	4.46
Cd	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.03	0.00	0.25	0.55	0.55
In	0.03	0.03	0.06	0.02	0.02	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03
Sn	2.56	2.16	4.80	1.46	2.29	2.81	2.18	1.53	1.57	1.37
\mathbf{Sb}	0.11	0.14	0.12	0.12	0.10	0.11	0.12	0.04	0.04	0.03
Те	0.02	0.04	0.02	0.01	0.01	0.04	0.03	0.01	0.01	0.01
Cs	2.58	1.75	1.34	1.02	0.13	3.14	1.81	0.79	1.12	1.02
Ba	399.75	271.82	307.60	146.95	23.50	567.27	271.07	729.71	859.49	698.06
Hf	3.90	7.12	7.37	5.59	4.23	3.28	5.64	4.23	9.68	9.98
Та	2.33	3.25	2.81	1.57	1.82	1.49	2.38	1.53	1.63	1.42
W	0.48	0.79	0.93	0.46	0.43	0.71	0.53	2.63	1.01	1.37
Tl	0. 78	1.15	0.92	0.88	0.06	0.88	0.91	0.48	0.51	0.51
Pb	16.88	24.73	21.16	26.22	3.27	28.08	30.49	14.13	18.44	17.08
Bi	0.08	0.08	0.08	0.15	0.05	0.09	0.23	0.01	0.02	0.01
Th	7.88	22. 23	22.57	20.77	19.98	19.09	33.28	11.84	11.14	11.44
U	1.50	4.43	2.99	3.11	1.77	2.50	3.34	1.78	1.35	1.21
La	44.04	36.63	45.54	29.14	24.95	53.35	44.62	102.52	125.87	133.55
Ce	67.54	58.97	96.00	41.11	64.34	77.66	66.48	174.27	204.93	210.73
Pr	6.65	6.30	8.44	3.71	3.25	6.91	6.03	17.88	20.30	20.00
Nd	22.84	22.99	30.98	11.93	9.75	21.90	18.77	58.59	63.35	58.88
Sm	3. 74	4.47	5.81	1.87	1.40	3.25	2.68	7.65	8.14	6.81
Eu	0. 52	0.38	0.47	0.26	0.19	0.55	0.35	1.32	1.24	0.97
Tb	0.56	0.77	0.87	0.32	0.22	0.45	0.37	0.79	0.87	0.69
Gd	3.37	4.32	5.13	1.79	1.13	2.64	2.26	6.94	7.52	6.55
Dy	3.22	4.97	5.10	1.95	1.30	2.58	2.20	3.78	4.27	3.26
Ho	0.66	1.09	0.98	0.44	0.29	0.54	0.48	0.69	0.79	0.61
Er	2.04	3.47	2.95	1.60	0.95	1.82	1.67	2.00	2.31	1.90
Tm	0.34	0.63	0.50	0.29	0.19	0.32	0.31	0.29	0.33	0.29
Yb	2.32	4.21	3.23	2.19	1.38	2.17	2.24	1.99	2.23	1.96
Lu	0.37	0.68	0.51	0.35	0.23	0.37	0.39	0.34	0.37	0.34
Nb/Ta	14.46	17.50	20.08	17.46	15.31	17.37	15.07	17.96	17.72	18.56
Zr/Hf	25.00	22. 21	23.74	23.49	25.58	23.18	22.60	33. 39	36.54	36.21
Zr/Y	4.87	4.48	6.68	9.03	13.01	4.37	8.64	7.71	17.31	21.58
Sr/Yb	42.97	16.44	49.97	15.93	92.66	63.10	26.95	91.37	83.36	81.93
Σ REE	178.26	185.15	232.71	111.47	117.87	191.89	163.59	397.33	462.96	463.29
LREE	145.34	129.75	187.23	88.01	103.88	163.63	138.94	362.22	423.83	430.94
HREE	31.98	53.95	44.10	22.79	13.55	27.44	23.89	33.98	37.90	31.33
LREE/HREE	4. 54	2.40	4.25	3.86	7.67	5.96	5.82	10.66	11.18	13.76
(La/Yb) _N	9.78	4.48	7.26	6.85	9.30	12.66	10.23	26.56	29.09	35.06
La/Nb	1.31	0.64	0.81	1.06	0.89	2.06	1.25	3.73	4.35	5.07
Th/Nb	0.34	0.97	0.73	1.74	2.05	0.87	1.77	0.20	0.18	0.19
Th/La	0.18	0.61	0.50	0.71	0.80	0.36	0.75	0.12	0.09	0.09
δEu	0.44	0.26	0.25	0.42	0.45	0.56	0.42	0.54	0.48	0.44
$(La/Sm)_N$	4.91	3.41	3.26	6.50	7.42	6.84	6.93	5.59	6.44	8.17
	$n(Al_2O_3$,)		$n(\operatorname{Al}_2O_3)$	#	n(Mg)	11.11			

注:A/CNK= $\frac{n(M_2O_3)}{n(CaO)+n(Na_2O)+n(K_2O)}$;A/NK= $\frac{n(M_2O_3)}{n(Na_2O)+n(K_2O)}$;Mg[#]= $\frac{n(Mg)}{n(Mg)+n(TFe)}$;锆饱和温度算法见熊双才等,2019;DI=

石英+钠长石+霞石+白榴石+六方钾霞石+正长石; $SI = \frac{100 \times n(MgO)}{n(MgO) + n(TFeO) + n(TFe_2O_3) + n(Na_2O) + n(K_2O)}$; $\delta Eu = \frac{2Eu_N}{Sm_N + Gd_N}$, Eu_N 、 Sm_N、Gd_N 为标准化之后的值。







高分异花岗岩样品具有相似稀土配分模式: SREE=111.46×10⁻⁶~232.71×10⁻⁶,LREE/HREE= 2.40~7.66,LREE=88.01×10⁻⁶~187.23×10⁻⁶, HREE=22.79×10⁻⁶~53.95×10⁻⁶,Yb=1.38×10⁻⁶~ 4.21×10⁻⁶,(La/Yb)_N=4.48~12.66,轻重稀土分异 明显,轻稀土富集重稀土亏损。 δ Eu=0.25~0.56, 具有强烈 Eu 负异常; δ Ce=0.85~1.51,无明显 Ce 异常。含矿高分异花岗伟晶岩中的锂元素含量为 Li=12.68×10⁻⁶~93.00×10⁻⁶,计算得 Li₂O 最高为 0.66%。高分异花岗岩样品具有较高的 Ga 含量 (10000×Ga/Al=1.93~2.83),当分离结晶作用进行 时,残余岩浆中的 Ga 会明显富集(刘志超等, 2020)。大珠山岩体 La/Nb 值平均为 2.18,Th/Nb 值平均为 0.53,Th/La 值平均为 0.39。以上三值略

高于或等于大陆地壳平均值(La/ Nb = 2.2; Th/Nb = 0.44; Th/La =0.22),显示大珠山花岗岩具明显 的壳源特征。Nb/Ta = 14.46~ 20.07, Zr/Hf = 22.21~36.54。岩 体显示中等程度的 LREE 富集、明 显负 Eu 异常和较平坦的 HREE 配分模式(表1)。在稀土元素球 粒陨石标准化模式图中(图 4a). 显示出"海鸥型"的特征。与上述 高分异花岗岩样品明显不同的含 矿高分异花岗伟晶岩(DZS-DL)样 品:HREE=13.55×10⁻⁶,明显低于 一般高分异花岗岩; Rb = 6.92× 10⁻⁶、Ba=3.36×10⁻⁶都显著低于 一般高分异花岗岩;在微量元素 蛛网图(图 4b)中也表现出了与其 余样品不同的变化趋势:具有深 入研究的价值。此外,3块花岗闪 长岩样品具有较高的 ΣREE = 397.33×10⁻⁶~462.95×10⁻⁶,轻重 稀土分异更加明显 LREE/HREE = 10.66~13.75;也具有更高的 (La/Yb)_N=26.55~35.06,但Th/ Nb = 0. 17 ~ 0. 20; Th/La = 0. 08 ~ 0.11,明显低于大陆地壳平均值, 且硅质含量均低 70%,因此不属 于高分异花岗岩范畴。

4.2 矿物学分析结果

斜长石在各种地质环境中相 对稳定,是控制岩浆岩和熔体中

稀土元素的重要载体矿物(严清高等,2022),斜长 石还可以保存原始岩浆信息、明确岩浆演化过程和 氧逸度变化(Cao Mingjia et al., 2021);此外花岗伟 晶岩 与稀有金属矿床形成有关(Wolf et al., 1994);因此选择斜长石开展精细原位主量测试。 为验证花岗岩的分离结晶作用,选取高分异花岗岩 样品7件进行电子探针矿物氧化物分析。将探针片 喷碳后找到斜长石位置,准确对焦。待图像清晰后 放慢扫描速度,获取放大60倍的背散射(BSE)图像 (图5)。根据矿物特征调节电流10 nA、束斑10 μm、加速电压15 kV(赵珊茸等,2022)。得到斜长 石氧化物含量如表2所示,已知斜长石的化学式为 Na[AlSi₃O₈]-Ca[Al₂Si₂O₈],几种最基本的氧化物



Fig. 4 Simple REE distribution pattern (a, after Sun et al., 1989) and Primitive mantle-normalized trace element spider diagram (b, after Sun et al., 1989)

有 SiO₂、Al₂O₃和 K₂O,总量接近 100%,表明矿物选择正确。通过背散射图可以看出斜长石自形程度较好,双晶现象已不明显,但可清楚的看到有韵律性的条纹在矿物表面。说明在分异过程中的分离结晶作用使得斜长石不断生长,代表矿物结晶过程。分析斜长石原位微区的全碱含量,可知高分异花岗岩之所以都属于高碱性岩类,是因为 K、Na 等元素基本存在于长石族矿物中,分离结晶时量长石族矿物析出,存于岩体中。

4.3 锆石 U-Pb 同位素测年结果

因本研究主要围绕含矿高分异花岗岩,所以选取分异程度和具有锂辉石的样品基性年代学研究。 样品 DZS-H 选取锆石进行 LA-ICP-MS 法 U-Pb 定年 分析,在排除继承锆石测试点之后,获得 35 个花岗 岩锆石微量数据组。因谐和度限定(95%以上),故 去除 7、17 号两个点,余下 33 点进行分析(表 3)。 样品中锆石主要为长柱状,部分不规则短柱状和粒 状,自形程度较好,少数锆石晶体表面有裂纹发育, 粒径在 100~180 μm,长宽比约为2:1,锆石以灰黑 色为主,颜色较深。阴极发光图像显示具有岩浆韵 律振荡环带(图 6),为典型岩浆锆石。内部结构清 晰,环带密度大,表现为花岗质高黏度岩浆中锆石缓 慢结晶的特征(缪字等,2021)。由于受到高 U 含 量或残余熔体交代,经历蜕晶化和重结晶(李五福 等,2021)。样品中锆石 U=248×10⁻⁶~2145×10⁻⁶、 Th=210×10⁻⁶~2270×10⁻⁶,Th/U=0.76~2.08(表 3),符合岩浆锆石 Th/U 值>0.4的特征。样品在谐 和曲线上 33 个数据点加权平均年龄为 113.1±0.36 Ma(MSWD=0.73)(图 7),表明大珠山高分异花岗 岩侵位年龄为早白垩世晚燕山期,指示本时期的岩

浆作用。

表 2 青岛大珠山斜长石电子探针分析结果(%)

a analysis results (\mathcal{O}_{a}) of placed

	section	probe ai	liarysis ru	courts (7	o) of pla	agiociase		lusiiaii	, Qiligua
测试样品	GZK-1	DZS-2	DZS-1	DZS-DL	DZS-SS	DZS-H	DZS-CD	元素	Sample
SiO_2	62.403	68.790	65.680	61.090	65.280	62.543	61.740	Si	NaAlSi2Oe
Al_2O_3	15.839	10.789	17.887	15.897	18.987	23.091	15.171	Al	$NaAlSi_2O_6$
MgO	2.695	1.515	1.537	3.313	1.566	1.745	1.258	Mg	$NaAlSi_2O_6$
FeO	4.627	0.001	0.000	5.120	0.004	1.429	0.014	Fe	$NaAlSi_2O_6$
CaO	3.740	5.017	4. 783	4.140	0.060	0.335	0.081	Са	$NaAlSi_2O_6$
P_2O_5	2.388	0.011	0.013	2.640	0.107	0.000	0.095	Р	KTiOPO_4
K ₂ O	1.479	0.012	0.005	1.640	0.301	1.588	4.636	K	KTiOPO_4
Na ₂ O	0.149	4.537	7.801	0.160	4.231	0.047	9.281	Na	$NaAlSi_2O_6$
Total	93.320	90.672	97.706	94.000	90.536	90. 778	92.276	/	/

查素含量,和较低的 Th/U 和 Eu/ Eu*值,体现较高的演化程度,与 岩石矿物地球化学特征(高硅、富
一)及岩相学(石英脉、浅色矿物
6 伊)及岩相学(石英脉、浅色矿物
6 占主要成分)一致(李安邦等,
2020)。根据大珠山野外考察发现,研究区花岗岩演化程度较高, 可能与成矿伟晶岩具有直接成因 关系。大珠山锆石微量元素具有 以下特征: \$\Sec State Sta

花岗岩锆石具有较高的 Hf 元



图 5 青岛大珠山花岗岩斜长石矿物背散射电子图像:(a)条纹长石;(b)长柱状斜长石; (c)蚀变条纹长石;(d)蚀变长石(图片均为放大 60 倍、15 kV 电压下拍摄)

Fig. 5 Electron backscatter images of plagioclase minerals in the Dazhushan granite in Qingdao: (a) striated feldspar; (b) long columnar plagioclase; (c) altered striation feldspar; (d) altered feldspar) (Pictures are magnified 60 times, 15 kV voltage shooting)

Bt-黑云母;Kfs-钾长石;Ser-绢云母;Qtz-石英;Pl-斜长石 Bt-biotite; Kfs-potassium feldsapr; Ser-sericite; Qtz-quartz; Pl-plagioclase

11338.09×10⁻⁶,平均为 5029.48×10⁻⁶,LREE = 170.31×10⁻⁶,HREE=4495.21×10⁻⁶,LREE/HREE = 0.0226~0.0532,Eu/Eu^{*} = 0.19~0.36,平均为 0.26;Ce/Ce^{*} = 11.29~364.84,平均为 197.5(表 4)。总体来说,大珠山花岗岩样品中锆石微量元素 有富集重稀土元素,相对亏损轻稀土元素的特征,且 具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常(图 8a)。

锆石 Ti 温度计是一种计算锆石结晶温度的方法,利用 Ferry (2007)提出的公式对锆石结晶温度

进行计算:

 $lg[w(Ti-in-Zircon)/10^{-6}] = (5.711\pm0.072) - (4800\pm86)/(T/K) - lg\alpha_{Si0_2} + lg\alpha_{Ti0_2}$

其中:w(Ti-in-Zircon)为锆石中 Ti 的质量分数, α_{sio_2} 和 α_{TiO_2} 分别为岩石中 SiO₂和TiO₂的活度。测试样品为花岗岩体系,存在大量的石英,因此可以将 α_{sio_2} 取值1,在该类样品中多出现钛铁矿等含钛矿物,因此将 α_{TiO_2} 估为0.6(高晓英等,2011),温度计算结果见表4。锆石Ti 温度计计算出的锆石结晶温

	Qingdao
P-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果	ing results of Dazhushan sample, (
表 3 青岛大珠山样品 LA-IC	Table 3 LA-ICP-MS Zircon U-Pb dat

			ļ										1				
	元素	<1×1	(0_0				同位灵	素比值				-	同位素年間	铃(Ma)			
测点号	Чd	۴Ľ	I	Th/U	$n(^{207} \text{Pb}).$	$/n(^{235}U)$	$n(^{206} {\rm Pb})$.	$/n(^{238}U)$	$n(^{207}{\rm Pb})/$	$n(^{206}\mathrm{Pb})$	$n(^{207}\mathrm{Pb})/n$	$n(^{206}{\rm Pb})$	$n(^{207}\mathrm{Pb})/n$	$n(^{235}U)$	$n(^{206}\mathrm{Pb})/n$	$n(^{238}U)$	谐和度
		1	þ		测值	10	测值	10	测值	10	测值	lσ	测值	10	测值	lσ	(%)
DZS-H- 1	19	1124	716	1.57	0.1240	0.0120	0.0176	0.0004	0.0504	0.0046	118.0	11.0	112.7	2.7	105.1	5.3	95
DZS-H- 2	22	1443	729	1.98	0.1195	0.0064	0.0178	0.0002	0.0485	0.0026	114.0	5.8	113.6	1.4	117.4	2.9	100
DZS-H- 3	23	1082	932	1.16	0.1226	0.0086	0.0179	0.0004	0.0494	0.0035	117.1	7.7	114.1	2.3	115.7	4.6	76
DZS-H- 4	21	1218	969	1.75	0.1300	0.0230	0.0176	0.0006	0.0540	0.0093	124.0	21.0	112.1	4.0	113.2	8.5	06
DZS-H- 5	18	794	716	1.11	0.1210	0.0130	0.0177	0.0005	0.0502	0.0060	116.0	12.0	113.2	3.4	116.9	6.4	98
DZS-H- 6	21	957	795	1.2	0.1173	0.0076	0.0176	0.0003	0.0490	0.0033	113.3	7.2	112.1	1.8	113.7	4.4	66
DZS-H- 7	107	400	423	0.95	0.2235	0.0092	0.0179	0.0003	0.0897	0.0034	204.0	7.6	114.6	1.6	148.5	4.1	44
DZS-H- 8	16	742	619	1.09	0.1153	0.0085	0.0176	0.0003	0.0465	0.0032	110.3	7.7	112.3	2.1	110.8	4.7	98
6 -H-SZU	26	67	1182	0.82	0.1173	0.0064	0.0176	0.0003	0.0478	0.0025	112.4	5.9	112.7	1.9	118.3	4.1	100
DZS-H- 10	20	950	834	1.14	0.1238	0.0085	0.0177	0.0004	0.0506	0.0036	118.1	7.7	113.3	2.8	117.6	4.9	96
DZS-H- 11	26	1142	1145	1	0.1155	0.0075	0.0177	0.0003	0.0471	0.0031	110.7	6.8	113.2	1.7	116.7	4.3	98
DZS-H- 12	46	2270	2039	1.11	0.1199	0.0083	0.0177	0.0005	0.0494	0.0036	114.8	7.6	113.0	3.2	119.5	4.7	98
DZS-H- 13	17	881	737	1.2	0.1150	0.0110	0.0178	0.0005	0.0489	0.0057	114.0	12.0	113.9	3.1	112.8	6.9	100
DZS-H- 14	47	2386	1794	1.33	0.1169	0.0050	0.0175	0.0002	0.0485	0.0019	112.0	4.6	112.0	1.4	105.2	2.4	100
DZS-H-15	43	2091	1567	1.33	0.1172	0.0072	0.0177	0.0003	0.0487	0.0030	112.2	6.5	113.4	1.7	110.3	2.9	66
DZS-H- 16	29	1046	1379	0.76	0.1170	0.0100	0.0179	0.0004	0.0480	0.0042	112.1	9.5	114.6	2.7	120.2	6.4	98
DZS-H- 17	25	1050	843	1.25	0.1990	0.0140	0.0193	0.0004	0.0754	0.0049	182.0	12.0	123.0	2.3	137.8	5.1	61
DZS-H- 18	22	1283	824	1.56	0.1162	0.0061	0.0177	0.0003	0.0484	0.0026	1111.1	5.6	112.9	1.7	110.4	2.7	98
DZS-H- 19	46	1982	1964	1.01	0.1169	0.0059	0.0177	0.0003	0.0484	0.0023	112.0	5.3	113.2	1.8	112.4	3.1	66
DZS-H- 20	40	2146	1490	1.44	0.1190	0.0065	0.0176	0.0003	0.0500	0.0027	113.8	5.9	112.5	1.8	106.3	2.5	66
DZS-H- 21	28	1461	1077	1.36	0.1206	0.0073	0.0180	0.0003	0.0494	0.0030	115.2	6.6	114.9	2.0	110.3	3.8	100
DZS-H- 22	54	2604	2145	1.21	0.1169	0.0050	0.0177	0.0003	0.0486	0.0021	112.1	4.5	113.0	1.7	111.0	3.6	66
DZS-H- 23	22	1194	807	1.48	0.1178	0.0066	0.0177	0.0002	0.0482	0.0026	112.6	6.0	113.2	1.5	108.6	2.7	66
DZS-H- 24	11	506	418	1.21	0.1280	0.0170	0.0177	0.0007	0.0557	0.0082	121.0	16.0	112.8	4.7	119.0	9.5	93
DZS-H- 25	45	2056	1711	1.2	0.1252	0.0097	0.0181	0.0004	0.0505	0.0037	119.5	8.7	115.4	2.8	121.8	5.4	76
DZS-H- 26	41	2056	1440	1.43	0.1194	0.0078	0.0178	0.0004	0.0492	0.0030	114.2	7.1	113.5	2.3	107.6	4.1	66
DZS-H- 27	31	1158	1202	0.96	0.1198	0.0088	0.0177	0.0004	0.0496	0.0037	114.6	7.9	113.0	2.6	111.6	4.5	66
DZS-H- 28	26	1945	936	2.08	0. 1213	0.0073	0.0177	0.0003	0.0496	0.0030	115.6	6.6	112.8	1.9	108.5	3.4	98
DZS-H- 29	24	1044	1104	0.95	0.1134	0.0085	0.0175	0.0004	0.0467	0.0032	108.8	7.7	112.0	2.7	116.2	5.9	76
DZS-H- 30	13	516	544	0.95	0.1175	0.0074	0.0178	0.0003	0.0481	0.0031	112.2	6.7	113.5	1.8	111.5	4.1	66
DZS-H- 31	9	211	248	0.85	0.1180	0.0130	0.0180	0.0004	0.0475	0.0054	111.0	11.0	114.9	2.3	125.1	6.9	76
DZS-H- 32	11	638	390	1.64	0.1150	0.0100	0.0174	0.0004	0.0481	0.0046	109.7	9.4	111.2	2.2	113.7	5.2	66
DZS-H- 33	22	1446	730	1.98	0.1260	0.0130	0.0176	0.0004	0.0514	0.0054	120.0	12.0	112.6	2.8	111.7	5.1	94
DZS-H- 34	26	1264	848	1.49	0.1220	0.0130	0.0181	0.0006	0.0472	0.0049	116.0	12.0	115.9	3.7	118.9	5.4	100
DZS-H- 35	31	1594	1177	1.35	0.1178	0.0058	0.0177	0.0002	0.0484	0.0023	113.5	5.3	112.1	1.6	110.5	2.7	66





Fig. 6 Representative zircon cathodoluminescence images of the Dazhushan granite in Qingdao





度在一定程度上反映了岩浆结晶的温度。花岗岩的 结晶温度为 698.5~738.9℃,平均温度为 712.2℃。 随着温度与 Ti 元素含量的降低锆石中的 Hf 元素含 量升高,锆石中的 Hf 元素含量可以反映分异程度, 元素含量变化也可在一定程度上反映岩浆冷却的结 晶过程(图 8b)。

4.4 全岩 Li 同位素测试结果

全岩 Li 同位素测试数据见表 5,大珠山花岗岩 δ^7 Li=1.00‰~5.66‰,平均值为 3.32‰,Li 元素含 量为 9.03×10⁻⁶~55.52×10⁻⁶。大珠山花岗闪长岩 δ^7 Li=2.48~‰~3.36‰,平均值为 2.92‰;Li 元素 含量为 15.49×10⁻⁶~35.98×10⁻⁶。此外,测试样品 基性 捕 掳 体 δ^7 Li = 1.04‰ ~ 5.87‰, 平均 值 为 3.95‰;Li 元素含量为 9.03×10⁻⁶~55.52×10⁻⁶。显 示出了不均一性(图 9),捕掳体有较大的变化范围, 而花岗岩全岩的同位素值相对集中。

5 讨论

5.1 高分异花岗岩成因和岩石类型判别

花岗岩镜下岩相学特征显示,石英和斜长石具 有明显的港湾状边缘(图 2g),说明岩浆形成过程 中有后期岩浆的注入。在早期岩浆上涌过程中岩浆 房逐渐冷却,岩浆中部分早期结晶矿物的析出。随 着高温岩浆的注入导致早期结晶的矿物被重新加热



Fig. 8 Zircon rare earth elements distribution pattern (a, after Sun et al., 1989) and diagram of zircon—Ti thermometer—Hf (b) of the Dazhushan granite in Qingdao





至矿物液相线温度,在已结晶矿物表面发生了重新 熔融而形成港湾状结构,并随着高温岩浆的再次冷 却使溶蚀结构得以保存并最终完成结晶(缪宇等, 2021)。10000×Ga/Al可以将 A型、I型与 S型花岗 岩进行区分(图 10)(谢昊等,2020)。CaO 含量随着 分异指数(DI)的增加而明显降低(图 11);指示斜 长石和磷灰石的分离结晶(刘志超等,2020)。但 P₂O₅ 含量低,说明磷灰石几乎全部结晶;Ba、Sr、Eu、 Zr 元素的含量也随分异指数(DI)的增加而显著降



图 10 青岛大珠山花岗岩高分异类型 TFeO/MgO-(Zr+Nb+Ce+Y)图解(a)(据 Whalen, 1987)和花岗岩类型 Zr-Ga/Al图解(b)(据 Whalen, 1987) Fig. 10 TFeO/MgO-(Zr + Nb + Ce + Y) diagram for classification of high differentiation granite (a) (after

classification of high differentiation granite (a) (after Whalen, 1987) and Zr—Ga/Al diagram (b) of the Dazhushan granite in Qingdao (after Whalen, 1987)

低(图 11),更说明了斜长石的分离结晶作用,Zr、 Hf、Th含量的显著变化反映出岩浆演化晚期阶段经 历了显著的副矿物分离结晶作用。随着分异指数 (*DI*)的增高,Th元素含量的显著降低指示了独居石 的分离结晶,Zr元素含量的降低指示锆石的分离结 晶(刘志超等,2020)。Be元素含量大于4×10⁻⁶就 表明岩浆岩已经分异,大珠山花岗岩样品 Be含量 平均值为5.19×10⁻⁶,表明已经为分异花岗岩。再 者,由图 10 所示,所采样品有非高分异花岗岩存在, 与主微量分析结果一致。

表 4 青岛大珠山锆石微量元素特征以及锆石 Ti 温度计算结果

Table 4 Trace element characteristics of zircon and calculation results of zircon Ti temperature in Dazhushan, Qingdao

样品号	Ti	Y (‰)	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Si	m	Eu	Ge	I T	b	Dy	Ho	Er	Tm
DZS-H-1	5.0	2.39	33.1	8.5	173.0	2.4	15.1	9.	1	2.8	61.	0 19	. 9	225.0) 75.9	368	79.3
DZS-H-2	10.3	2.30	25.8	0.1	182.5	0.4	5.5	10	. 6	3.6	57.	5 17	. 8	207.6	5 75.0	350	70.7
DZS-H-3	7.1	2.34	37.4	0.0	126.1	0.2	3.2	7.	6	2.3	47.	7 16	. 6	207.5	5 76.2	2 370	78.8
DZS-H-4	9.2	1.83	20.9	0.7	143.1	0.5	6.0	10	. 4	2.9	49.	7 15	. 3	172.0) 59.0	280	56.2
DZS-H-5	6.5	1.92	29.2	0.0	89.0	0.1	2.0	5.	8	1.4	39.	2 13	. 5	169.6	6 62.0	302	63.7
DZS-H-6	5.2	2.09	29.7	0.1	105.0	0.2	2.8	7.	0	1.8	42.	7 15	. 0	187.7	7 70.8	3 335	68.8
DZS-H-8	5.0	3.13	20.2	0.0	104.7	0.4	5.5	12	. 1	2.8	67.	8 21	. 7	274.0) 101.	4 489	104.2
DZS-H-9	5.2	2.73	48.2	0.0	112.1	0.1	2.3	6.	6	1.8	44.	0 16	. 3	217.9	85.6	5 439	98.5
DZS-H-10	6.0	3.36	36.9	0.0	157.4	0.3	5.2	13	. 2	3.2	70.	7 24	. 1	286.8	3 109.	9 524	109.2
DZS-H-11	7.4	2.95	53.5	0.0	140.5	0.1	2.9	7.	2	2.1	50.	6 18	. 1	240.2	2 94.5	5 473	105.4
DZS-H-12	5.6	2.88	80.1	0.2	115.5	0.2	2.3	7.	5	2.2	46.	2 17	. 4	235.3	3 90.2	2 476	109.6
DZS-H-13	7.6	3.06	34.1	0.0	163.9	0.4	5.6	12	. 1	3.2	64.	5 21	. 7	273.0) 99.7	466	97.0
DZS-H-14	6.0	2.92	58.2	0.2	125.7	0.1	2.4	7.	5	1.8	48.	6 18	. 2	232.5	5 88.9	455	99.5
DZS-H-15	4.9	2.53	46.6	0.1	128.7	0.1	2.5	7.	1	1.9	45.	1 15	. 1	199.2	2 77.5	5 391	84.6
DZS-H-16	4.3	2.22	44.6	0.0	83.1	0.1	1.5	3.	7	1.1	30.	8 12	. 4	166.7	67.4	362	83.7
DZS-H-18	6.6	2.31	31.8	0.0	154.7	0.2	4.3	9.	4	2.5	52.	6 17	. 6	216.4	1 75.6	5 361	74.5
DZS-H-19	4.7	2.74	56.9	0.0	111.0	0.1	1.5	5.	7	1.7	38.	9 14	. 8	203.0) 79.5	5 425	98.0
DZS-H-20	7.1	2.57	47.0	0.0	135.2	0.2	2.3	7.	1	2.1	46.	8 17	.3	211.7	7 79.2	395	85.0
DZS-H-21	6.0	2.63	41.5	0.0	134.8	0.1	2.9	8.	2	2.0	54.	2 19	. 0	240.4	4 86.2	2 409	85.9
DZS-H-22	8.3	6.17	79.0	0.1	236.5	0.3	4.5	14	.3	3.5	93.	7 35	. 7	481.0) 187.	8 966	212.2
DZS-H-23	7.1	2.86	39.2	0.0	180.0	0.3	4.7	10	3	2.8	59	1 20	5	257 (93 6	5 455	93.8
DZS-H-24	32.7	1.30	16.7	0.1	90.1	0.1	2.3	4	3	1.4	26	5 9	4	116.2	2 41 1	204	42.1
DZS-H-25	4 9	2 17	42 2	0.6	90.7	0.4	3.6	5	1	1.6	32	9 12	1	163 6	5 65 6	5 348	78.3
DZS-H-26	53	3 00	54 4	2.6	173 4	0.5	4 1	10	5	2 4	62	6 20	4	261 0	9 93 4	5 460	95.8
DZS-H-27	33	2 11	38.2	0.4	81.5	0.3	2.7	4	6	1 0	32	1 11	7	157 5	5 63 1	337	77 1
DZS-H-28	10.9	3 49	37.2	2.6	293 0	1.2	10.6	19	1	4 9	96	5 27	8	342 (113	5 524	109 4
DZS-H-20	7.0	3 33	59.1	0.0	146 9	0.1	2.2	8	2	2 3	52	0 19	7	261 (102	9 527	121 4
DZS-H-30	5.0	1.87	24 0	0.0	96.6	0.1	2.2	6	2	1.6	38	5 13	1	166 0	$\frac{102}{60}$	298	63 1
DZS-H-31	6.1	2 09	27.1	0.0	87.4	0.1	2.4	4	9	0.7	31	3 12	1	166.5	5 66 3	341	74 4
DZS-H-32	73	2.07	12 5	0.0	110.8	0.3	4.8	8	8	27	45	7 15	1	186 4	1 66 9) 319	68 7
DZS-H-32	11.9	3 19	45 0	8.5	218 2	2.6	15.9	16	5	37	81	0 25	4	306 (105	0 484	96.7
DZS-H-34	9.0	2 27	37.6	0.3	138 8	0.3	3.6	7	1	23	45	3 16	. . 2	196 0	$\frac{105}{71}$	346	72 4
DZS-H-35	7.0	2.27	46.5	0.0	153.7	0.2	3.0	9	0	2.5		$\frac{3}{2}$ 20	6	264 2	9 94 7	454	95.8
DZ:5-11-55	7.0	2. 71	+0.5	0.0	155.7	0.2	5.7	<u> </u>		2. 7	57.	2 20	. 0	204.2			75.0
样旦旦	vh	T.,	Hf	Та	ΣREF		HR	EE	LREE	51		8C a	摄	氏度	Vb/CJ	V/VL	Ca/Sm
件吅与	10	Lu	(%0)	Ta	(‰)	LUL	Ľ (%	o)	HREE	01	u	oce	(°C)	1 D/ Ga	1/10	Ce/ Sm
DZS-H-1	690	148.4	10.43	7.6	4, 61	210.	8 4.0)5	0.05	0.	27	9.29	72	23.9	11.31	3.46	19.01
DZS-H-2	644	126.4	9.48	5.8	4, 41	202.	6 3.8	35	0.05	0.	36	134.3	7	7.7	11.20	3. 57	17.25
DZS-H-3	729	142.7	11.03	10.8	4.51	139	3 4 (01	0.03	0	28	191_0	7	1.2	15 28	3 22	16.61
DZS-H-4	500	104.9	9.65	5.0	3. 55	163.	5 3.0	07	0.05	0.	32	59.50	7	5.7	10.06	3.67	13.76
DZS-H-5	599	117 2	11 40	9.1	3 71	98	3 3	29	0.03	0	21	225 3	70	9 7	15 28	3 22	15.70
DZS-H-6	621	123 1	11 48	9.2	4 01	116	8 3 4	56	0.03	0	25	174 1	70)6.0	14 54	3 38	14 96
DZS-H-8	945	186.2	10 64	5 7	5 83	125	4 5	32	0.02	0	23	85 40	70	15 3	13 94	3 31	8 65
DZS-H-0	0/8	180.2	11 84	13 0	5.05	123.	8 1	77	0.02	0.	25	302 6	70	6.0	21 55	2.88	17.00
DZS-H-10	1004	101.7	10.80	0.8	6.23	170	3 5	58	0.03	0.	25	170.3	70	18 1	14 20	2.00	11 02
DZS H 11	057	191.7	11.26	12 0	5.61	179.	5 5.0 8 5.0	18	0.03	0.	20	411 5	7	1 0	14.20	3.09	10.51
DZS-H-12	1038	200 3	12 25	17 1	5 64	132.	9 5	10	0.03	0.	28	110 1	70	17 2	22 17	2 78	15.31
DZS-H-12	015	174 1	10 12	80	5 74	127.	2 5	17	0.03	0.	28	120.7		2 4	14 10	3 3/	13.40
DZS-H 14	033	188 2	12 15	15 2	5 50	133.	8 10	8	0.04	0.	20	120.7	7	8 1	10 20	3 12	16 72
DZS-H-15	810	165 7	12.13	12.5	1 82	1/10	3 1 1	32	0.03	0.	$\frac{2}{24}$	326.0	70)5 0	17.06	3 13	18 13
DZS-H 16	830	171 6	12.23	11.9	4.02	80	4 20	6	0.03		$\frac{27}{22}$	325 1)) &	27 24	2 65	22 52
DZS-H-10	666	120 0	12.75	0.0	4.44	171	т ј 3.5 1 2 (21	0.02	0.	24	200 7		0.0	12 66	2.05	16 53
DZS-11-10	000	202 7	10.4/	1/ 0	5 21	120	0 4	78	0.04	0.	$\frac{2}{26}$	209.7	/ 7/	10.0	24 01	2.40	10.55
DF2-U-1A	909	203.7	12.78	14.9	3. 31	120.	4.	0	0.03	0.	20	339.0		r+. 3	24.91	2. 04	19.34

样品号	Yb	Lu	Hf (‰)	Та	ΣREE (‰)	LREE	HREE (‰)	LREE HREE	δEu	δCe	摄氏度 (℃)	Yb/Gd	Y/Yb	Ce/Sm
DZS-H-20	785	158.7	12.04	12.5	4.85	146.7	4.35	0.03	0.26	289.5	711.2	16.77	3.28	19.15
DZS-H-21	774	150.6	11.40	11.6	4.94	148.1	4.46	0.03	0.22	354.1	708.4	14.28	3.41	16.40
DZS-H-22	1997	397.5	10.23	14.5	11.33	259.2	10.54	0.02	0.22	229.4	713.9	21.31	3.09	16.54
DZS-H-23	843	163.4	10.61	10.3	5.41	198.1	4.84	0.04	0.27	214.3	711.2	14.26	3.40	17.53
DZS-H-24	386	76.9	11.58	5.0	2.61	98.3	2.21	0.04	0.31	201.7	738.9	14.57	3.38	20.90
DZS-H-25	768	156.7	13.03	11.7	4.25	102.0	3.79	0.03	0.28	41.62	705.0	23.34	2.83	17.78
DZS-H-26	910	179.2	11.59	14.1	5.64	193.5	5.09	0.04	0.22	34.68	706.3	14.54	3.30	16.51
DZS-H-27	757	157.6	13.04	11.5	4.15	90.5	3.70	0.02	0.19	59.12	698.5	23.58	2.79	17.68
DZS-H-28	991	184.1	9.35	10.7	6.61	331.4	5.88	0.06	0.28	40.21	718.7	10.27	3.52	15.34
DZS-H-29	1131	222.3	11.11	13.1	6.35	159.8	5.77	0.03	0.26	364.8	711.0	21.75	2.94	17.91
DZS-H-30	577	114.8	11.02	8.2	3.63	106.9	3.20	0.03	0.25	269.7	705.3	14.99	3.24	15.58
DZS-H-31	674	131.0	10.18	5.2	3.99	95.3	3.59	0.03	0.13	302.8	708.6	21.53	3.11	17.69
DZS-H-32	631	126.5	8.67	3.8	4.02	127.4	3.53	0.04	0.33	114.7	711.7	13.81	3.29	12.55
DZS-H-33	844	160.9	10.49	9.6	5.92	265.4	5.29	0.05	0.26	11.29	720.2	10.42	3.78	13.23
DZS-H-34	667	129.7	10.85	9.3	4.30	152.4	3.82	0.04	0.30	105.5	715.3	14.72	3.41	19.55
DZS-H-35	859	168.7	11.05	12.9	5.46	169.8	4.93	0.03	0.24	277.4	711.0	14.51	3.39	15.60

注:表中元素的质量分数,除注明者外,单位为×10⁻⁶; $\delta Eu = \frac{2Eu_N}{Sm_N + Gd_N}$; $\delta Ce = \frac{2Ce_N}{La_N + Pr_N}$; $Eu_N \ Sm_N \ Gd_N \ Ce_N \ La_N \ Pr_N$ 为标准化之后的值。

表 5 青岛大珠山 Li 同位素分析结果 Table 5 Results of Li isotope analysis

in	Daz	hus	han	, (Q	ingd	lao
----	-----	-----	-----	-----	---	------	-----

测试样品	$\frac{n(^{7}\text{Li})}{n(^{6}\text{Li})}$	δ ⁷ Li (‰)	Li (×10 ⁻⁶)
DZS-DL	13.96	4.4	14. 53
DZS-DL(捕掳体)	14. 52	5.9	11.02
DZS-SS	14.50	4.6	12.68
DZS-SS (捕掳体)	14.45	1.0	39.65
DZS-H	14.48	2.8	22.56
DZS-H(捕掳体)	14.50	3.7	55.52
DZS-Z	14. 53	5.7	15.82
DZS-Z (捕掳体)	14.48	2.1	46.95
DZS-1	14. 15	1.0	93.00
DZS-1 (捕掳体)	14.44	1.9	9.03
DZS-2	14.45	2.5	25.76
DZS-2 (捕掳体)	13.92	2.7	10.42
GZK-1	13.94	3.4	17.16
GZK-1 (捕掳体)	14.44	2.5	15.49
DZS-YX-1(花岗闪长岩)	14.63	3.1	23.83
DZS-YX-2(花岗闪长岩)	14.62	2.5	35.98
DZS-CD(花岗闪长岩)	14.63	3.2	20.77

5.2 高分异花岗岩的稀土元素四分组效应与

锂矿成矿潜力预测

花岗质岩浆高度分异演化后期会出现熔体—流体相互作用的特征,可以通过评估熔体—流体相互 作用强度来揭示相关稀有金属成矿潜力(吴浩然 等,2022)。稀土元素四分组效应是指在稀土元素 球粒陨石标准化配分模式图中被分割的四个部分, 第一组从 La 到 Nd,第二组从 Nd 到 Gd,第三组从 Gd 到 Ho, 第四组从 Er 到 Lu(帅雪, 2019)。大部分 高硅高演化岩浆中常存在本效应, 是花岗岩浆演化 程度的标志。简化的计算公式为(Irber, 1999):

$$TE_{1,3} = \sqrt{T_1 \times T_3},$$

$$T_1 = \sqrt{Ce/Ce^T \times Pr/Pr^T},$$

$$T_3 = \sqrt{Tb/Tb^T \times Dy/Dy^T},$$

$$Ce/Ce^T = \frac{Ce_N}{\sqrt[3]{(La_N)^2 \times Nd_N}},$$

$$Pr/Pr^T = \frac{Pr_N}{\sqrt[3]{La_N \times (Nd_N)^2}},$$

$$Tb/Tb^T = \frac{Tb_N}{\sqrt[3]{(Gd_N)^2 \times Ho_N}},$$

$$Dy/Dy^T = \frac{Dy_N}{\sqrt[3]{Gd_N \times (Ho_N)^2}}$$

大珠山花岗岩样品中发现 TE_{1,3}=1.15 的样品两块 (表 6),随着分异指数增加含矿性有略微增加(图 12),且与岩相学观察到的含有锂辉石的样品相符 (图 2b、c);此外,样品的 Li 含量较高,计算得到 Li₂O 最高为 0.66%,相较于锂辉石矿床品位 (1.50%)相差较远,说明含有锂矿,但是远达不到工 业开采水平。但通过分析可知样品稀土元素四分组 效应与锂同位素呈正相关(图 13),证明 Li 稀土元 素四分组效应会造成锂同位素升高(陆一敢等, 2020),有利于进步一成矿。同位素值接近地幔平 均值(Teng et al., 2008),表明有显著的幔源组分贡

论评



图 11 青岛大珠山花岗岩分异指数哈克图解 Fig. 11 Harker diagram of differentiation index of the Dazhushan granite in Qingdao

献。Li 同位素直接运用到花岗岩源区的研究相对 较少(吴迪迪,2021)。前人研究表明:伟晶岩和围 岩之间存在 Mg、Ti、V 进入伟晶岩和 Li、B、Al 进入 围岩的情况,随着岩浆岩分异程度增加,Li、Mn、 Zn、F的含量可以指示伟晶岩矿化类型(凤永刚等, 2021)。研究 Li 同位素可以揭示岩浆分异过程和水 热过程中花岗岩富集稀有金属的规律(Li et al., 2018)。俯冲过程发生部分熔融的蚀变洋壳 δ⁷Li 值





约为 1‰~8‰ (Teng Fangzhen et al., 2009)。本文 取得的样品 δ⁷Li 值与俯冲带中地幔楔的 δ⁷Li 同位 素接近(3‰~4‰)(Teng Fangzhen et al., 2009),说 明早期俯冲对早白垩世花岗岩源区作用不太显著, 在 120 Ma 左右太平洋板块俯冲,大规模火山作用峰 值过去之后,这些幔源组分发生部分熔融,且混入了 古老地壳物质。

5.3 岩浆演化与花岗伟晶岩含矿性分析

华北克拉通东部中生代强烈岩浆活动发生在 130~120 Ma,矿化作用发生在 125~120 Ma。花岗 质岩浆的高度分异是花岗微晶岩型稀有金属矿床成 矿的关键控制因素(严清高等,2022;李建康等, 2021)。成矿性取决于岩石内部的分异演化(王臻,





2021),山东东部大火成岩省在130~120 Ma 期间剧 烈岩浆活动控制着大量矿床形成(曾普胜等, 2021)。与稀土元素有关的矿脉中含有金矿、钨锡 铌钽矿等;与长英质火成岩大省有关的矿产有金、 铜、钨、锡、钼、铋、锑、铀、锂、铍、铌、钽、铯等(张旗, 2007;凤永刚等,2019)。在岩浆演化过程中金属元 素富集行为可以形成矿体(张招崇等,2022;李五福 等,2021),研究区花岗伟晶岩都是岩浆后期热液作 用形成的,经地化分析可知存在过铝质 S 型花岗岩, 是 LCT(Li—Cs—Ta)矿床的主要载体;还有少量钙 碱性淡色 I 型花岗岩,是 Sn—TI—B 矿物的主要载

指标	GZK-1	DZS-1	DZS-2	DZS-SS	DZS-DL	DZS-Z	DZS-H	DZS-CD	DZS- YX-1	DZS- YX-2
La _N	185.84	154.58	192.14	122.93	105.26	225.11	188.29	432.57	531.10	563.49
Ce_N	110.36	96.35	156.86	67.18	105.13	126.89	108.63	284.75	334.85	344.34
Pr_N	70.02	66.34	88.89	39.03	34.21	72.75	63.48	188.17	213.71	210.53
Nd_N	48.92	49.23	66.33	25.54	20.87	46.90	40.19	125.46	135.64	126.07
Gd_{N}	16.39	21.03	24.98	8.72	5.50	12.86	10.97	33.76	36.61	31.86
Tb_{N}	15.06	20.56	23.22	8.44	5.76	12.03	9.90	21.23	23.21	18.38
Dy_{N}	12.67	19.58	20.06	7.68	5.14	10.14	8.64	14.88	16.83	12.85
Ho_{N}	11.72	19.27	17.37	7.81	5.08	9.52	8.41	12. 19	13.99	10.84
Ce/Ce^{T}	0.93	0.92	1.17	0.93	1.72	0.96	0.97	1.00	1.00	1.01
Pr/Pr ^T	0.92	0.92	0.94	0.91	0.96	0.92	0.95	1.00	1.01	1.02
$\mathrm{Tb}/\mathrm{Tb}^{\mathrm{T}}$	1.03	1.01	1.05	1.01	1.08	1.04	0.99	0.89	0.88	0.83
Dy/Dy^T	0.97	0.99	1.03	0.95	0.99	0.97	0.94	0.87	0.88	0.83
T_1	0.93	0.92	1.05	0.92	1.28	0. 94	0.96	1.00	1.00	1.02
T_3	1.00	1.00	1.04	0.98	1.03	1.00	0.96	0.88	0.88	0.83
$TE_{1,3}$	0.96	0.96	1.05	0.95	1.15	0.97	0.96	0.94	0.94	0.92

表 6 青岛大珠山样品稀土元素四分组效应计算结果 Table 6 Results of tetrad effect of rare earth elements in Dazhushan sample, Qingdao

体;尚未发现 NYF(Nb-Y-REE-Zr-F) 矿床的 主要载体,此矿床主要为 高分异 A 型碱性花岗岩。 矿化花岗岩在地球化学上 也显示出在相同分异程度 情况下,锆石中 Sn 含量较 高,锆石中金属元素异常 (Eu/Eu*和 Ce/Ce*)以 及 Sn/Sn*和 Cu/Cu*也可 以识别花岗岩是否矿化 (Gardiner et al., 2021) 因为锆石中的 Eu 负异常 是由于长石和锆石同时结 晶,长石带走了锆石里的 Eu(陈谋等,2022)。此 外,Nb/Ta 值被视为区分 无矿和矿化过铝质花岗岩的重要指标 (Ballouard et al., 2016)。S 型花岗岩是沉积岩部分熔融的产物, 且全岩组分会受到岩浆演化晚期岩浆流体的改造作 用,岩体具有良好的成矿条件。 $TE_{1,3}$ —DI 图解可以 指示花岗岩的含矿性 (图 12):随着分异指数的增 加, $TE_{1,3}$ 略有增加。成矿岩体锆石的 (Ce/Nd)/Y 含量一般较高,并且锆石的 Eu/Eu* >0.3、10000×(Eu/Eu*)/Y>1、全岩 10000×(Eu/Eu*)/Y>400 可 以判别样品是否为成矿岩体 (Lu Yongjun et al., 2016)。

高氧逸度是成矿的必要非充分条件(李守奎 等,2021),锆石 Ti 温度计可以获得岩浆的绝对氧逸 度,锆石中 Ce、Eu 元素可以反映岩浆相对氧逸度大 小,Ce⁴⁺/Ce³⁺和 δEu 作为岩体含矿与否的评判标 准。锆石 Eu 负异常是岩浆中斜长石结晶分异或是 在还原环境下结晶的结果,但 Ce 正异常是因为氧 化条件下 Ce³⁺氧化为 Ce⁴⁺(缪宇等,2021)。含矿岩 体较不含矿岩体的锆石具有较大的 Ce⁴⁺/Ce³⁺值和 较小的 Eu 异常。计算锆石氧逸度时通常用全岩化 学成分代替锆石结晶的真实熔体成分,锆石 Ce⁴⁺/ Ce³⁺值可以估算锆石形成时的岩浆相对氧逸度。 Ce/Nd 值越高表明岩体越氧化(李家桢等,2021;帅 雪,2019)。通过以下公式进行计算(李守奎等, 2021):

ln(Ce/Ce^{*})_{CHUN}=(0.1156±0.0050)×lnf0₂+ (13860±708)(*T*/K)-(6.125±0.48) fO₂ 为绝对氧逸度;

 $(Ce/Ce^{*})_{CHUN} = \frac{\sqrt{\frac{Ce_{\text{ff} a}}{La_{\text{ff} a} \times Pr_{\text{ff} a}}}}{\sqrt{\frac{Ce_{\text{ff} a}}{La_{\text{ff} a} \times Pr_{\text{ff} a}}}}$

T为锆石结晶时的绝对温度,可通过修正锆石中的 Ti 地质温度计求得。已经计算得锆石的结晶温度 平均为712.15 ℃(表4),与下地壳平均温度基本一 致,揭示了花岗岩母岩岩浆来自下地壳(缪宇等, 2021)。岩浆演化过程伴随着氧逸度的变化,氧逸 度随岩浆演化程度增加而增加,变化原因可能是由 于伟晶岩熔体自花岗岩分离迁移发生在构造相对封 闭到相对开放的转换过程中,伴随 H₂等还原性组 分的逃逸,造成其升高(Rivalta et al., 2006)。锆石 微量分析结果显示 Eu 负异常和 Ce 正异常,两种差 异较大的元素,可能在氧化条件下才会有如此的分 配特征。Ce³⁺/Ce⁴⁺和 Fe³⁺/Fe²⁺不断升高反映熔体 从花岗岩演化成伟晶岩(李家桢等,2021)。

告饱和温度反映了岩浆的起源温度(王涛等, 2013),计算表明大珠山地区的花岗岩锆饱和温度 较高,属于高温花岗岩,高热的产生与软流圈地幔上 升有关。但是锆石 Ti 温度计所反映的岩浆结晶温 度要显著低于岩浆起源温度,表明大珠山地区花岗 岩从起源到最终成岩经历的显著的降温过程。随着 温度的降低岩浆不断分异,最终形成高分异花岗岩。

5.4 山东东部硅质火成岩大省初探

大火成岩省(LIP)用来描述在几百万年甚至更 短时间内发生超过100万km²的镁铁质火成岩喷发 或侵入,不包括洋中脊处海底扩张产生的玄武岩海 床以及其他正常板块构造形成的火成岩区域。大火 成岩省不仅是指铁镁质火成岩的大规模堆积,也包 括了所有类型的火成岩(李娴,2021)。前人研究主 要集中在晚二叠纪峨眉山火成岩大省、早二叠纪塔 里木火成岩省的研究,主要涉及时空分布特征和岩 浆动力学过程分析(徐义刚等,2013)。中国东部燕 山期大规模岩浆活动,分布于郯庐断裂带南段以西 的华北地台内。晚侏罗世—早白垩世的大火成岩省 中的辽东—胶东半岛地区花岗岩是典型的硅质大火 成岩省(SLIP),岩性以碱性流纹岩--花岗岩为主, 面积超过 30 万 km²,且与关键金属成矿关系密切 (曾普胜等,2021;薄弘泽等,2020)。山东东部早白 垩世岩浆活动(~120 Ma),以双峰式岩浆组合为主 (张旗,2007;薄弘泽等,2020),双峰式岩浆组合以 碱性流纹岩--碱性玄武岩为主,伴随高钾钙碱性火 成岩石组合,形成原因可能是地幔柱晚期活动岩浆 供给减少,在地壳岩浆房内停留时间较长,岩浆发生 分离结晶作用(徐义刚等,2013;张旗,2007)。硅质 大火成岩省(SLIP)流纹岩/花岗岩特别发育:是中 国东部超级地幔柱上涌,对同岩石圈板片对流,在郯 庐断裂的快速下插,挤压地幔物质上升,引起长英质 (F-LIP)地壳物质重熔,伴生有同时代的基性岩 墙。从地球化学特征来看,岩石中黑云母发育,多为 钙碱性系列,发现从 I 型向 A 型花岗质岩石过渡 (薄弘泽等,2020),有巨量熔结凝灰岩形成,与破火 山机构关系密切。与镁铁质大火成岩省产出位置不 同,硅质火成岩省多位于大陆边缘,呈条带状分布。 本研究旨在寻找山东东部近海地区晚燕山期硅质火 成岩省序列,从基性玄武岩到高硅花岗岩分析岩浆 演化过程,在小珠山地区发现基性玄武岩岩脉和高 硅花岗岩样品●:在灵山岛洋礁洞地区发现韵律性 极强的流纹质凝灰岩样品(Liu Ruiyang et al., 2022),都可以作为证明山东东部近海地区存在硅质火成岩大省的证据。

6 结论

青岛大珠山 I-S 型花岗伟晶岩含有锂辉石,局 部发育斜长石、钾长石聚片双晶,重结晶现象明显。 花岗岩 SiO,含量平均为 71.57%;铝饱和指数平均 为 0.96:分异指数平均为 92.13: 锆饱和温度平均为 849.56℃;反映岩浆起源温度。上述结果表明样品 为准过铝质钙碱性系列,岩石具有较高的分异程度。 大珠山锆石 LA-ICP-MS 法 U-Pb 定年的平均年龄为 113.1±0.36 Ma(MSWD=0.73),表明高分异花岗岩 侵位年龄为早白垩世晚燕山期。利用锆石 Ti 温度 计来反映岩浆结晶温度平均为712.15℃;表明岩浆 分异过程中经历显著降温过程。锆石微量元素分析 结果显示 Eu 负异常和 Ce 正异常, Ce3+/Ce4+显示了 高氧逸度的特征。岩浆来源于地壳物质的部分熔 融,并在岩浆演化过程中发生了斜长石为主的结晶 分异,同时伴有部分副矿物(磷灰石、锆石、独居石 和富 Ti 矿物等)的分离结晶过程。硅质火成岩省多 位于大陆边缘,呈条带状分布。根据稀土元素四分 组效应(TE13=1.15)与锂同位素限定,大珠山花岗 伟晶岩具有锂矿的成矿潜力。

致谢:本文撰写期间,得到了很多教授和同学的 帮助。尤其感谢李素讲师测试的锂同位素数据。感 谢审稿人提出了建设性修改建议,在此一并致以衷 心感谢。

注释 / Note

刘瑞杨,周瑶琪,周腾飞,陈彤彤,白冰洋,李孙义. 2022.小珠 山高分异花岗岩地球化学特征与成因机制.内部资料

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)

- 薄弘泽,张招崇. 2020. 硅质大火成岩省的形成机制及其与资源环 境的关系. 岩石学报,36(7):1973~1985.
- 陈谋, 王核, 张晓宇, 闫庆贺, 高昊. 2022. 新疆康西瓦伟晶岩的成 矿潜力判断:来自锆石 U-Pb 年代学、地球化学与 Hf 同位素证 据. 岩石学报, 38(7): 2095~2112.
- 风永刚,王艺茜,张泽,梁婷,周义,高景刚,腾家欣. 2019. 新疆 大红柳滩伟晶岩型锂矿床中磷铁锂矿地球化学特征及其对伟晶 岩演化的指示意义. 地质学报,93(6):1405~1421.
- 高晓英,郑永飞. 2011. 金红石 Zr 和锆石 Ti 含量地质温度计. 岩石 学报, 27(2): 417~432.
- 李五福,李善平,王秉璋,王春涛,刘金恒,张新远,曹锦山,许传

兵,刘建栋,金婷婷. 2022. 青海三江北段草(绿柱石—) 锂辉 石花岗伟晶岩的发现及其 Li—Be 找矿意义. 大地构造与成矿 学:1~25.

- 李家桢, 吴松, 林毅斌, 蒋宗洋, 易建洲, 蒋光武, 刘晓峰, 华康, 次琼, 赵亚云. 2021. 西藏次玛班硕斑岩铜矿蚀变—矿化样式 及找矿潜力. 地球科学: 1~33.
- 李安邦,黄勤,冯超,杨细华,闫刚刚,赵子娟,董湘杰,祝明明, 张金阳. 2021. 幕阜山复式花岗岩体锆石年代与微量元素对伟 晶岩矿床成因的限定.地球科学,46(12):4517~4532.
- 李建康,李鹏,严清高,刘强,熊欣. 2021. 中国花岗伟晶岩的研究 历程及发展态势. 地质学报,95(10):2996~3016.
- 李娴. 2019. "大火成岩省" 是什么省? 矿物岩石地球化学通报, 38 (2):441~442.
- 李守奎,刘学龙,卢映祥,张世涛,刘思晗,陈建航,李振焕,余海 军,张传昱. 2022. 锆石氧逸度对义敦岛弧南段中甸矿集区斑 岩型矿床差异性成矿控制因素的指示.地球科学,47(4):1435 ~1458.
- 李晓峰, 韦星林. 2022. 稀有金属锂铍矿床研究中的几个关键科学 问题——代序. 岩石学报, 38(7): 1843~1847.
- 刘志超,刘小驰,俞良军,王建刚. 2020. 喜马拉雅康巴淡色花岗岩 的高分异成因及岩浆—热液演化特征. 南京大学学报(自然科 学),56(6):800~814.
- 刘海永,唐菊兴,曾庆高,华康,赵洪飞,王雨,央宗. 2022. 西藏 中部塔吉冈矿区早白垩世花岗岩成因及地质意义. 地球科学, 47(4):1217~1233.
- 陆一敢,肖益林,王洋洋,万红琼,李东永,仝凤台,余成龙. 2021. Li同位素在矿床学中的应用:现状与展望. 地球科学,46(12): 4346~4365.
- 缪宇,吴亮,肖长源,李锁明,李致伟,宋文婷,田瑜峰. 2021. 黔 西北普宜地区下三叠统嘉陵江组沉凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、微量元素特征及其地质意义. 地质论评, 67(2):289 ~310,288.
- 饶灿,王汝成,车旭东,李晓峰,王琪,张志琦,吴润秋. 2022.关 键金属铍的成矿机制与找矿前景.岩石学报,38(7):1848~ 1860.
- 帅雪. 2019. 拉萨地体北部卓嘎普高分异花岗岩"四分组"效应的成因. 导师:朱成弟.北京:中国地质大学(北京)博士论文.
- 田野,单业华.2008. 胶南晚中生代大珠花岗岩岩体的脆性变形机制. 大地构造与成矿学,(4):427~435
- 王臻. 2021. 川西甲基卡伟晶岩型锂矿床岩浆—热液演化与成矿的 矿物学示踪.导师:陈毓川.北京:中国地质科学院博士论文.
- 王涛, 刘燊. 2013. 胶南花岗岩锆石饱和温度及其地质意义. 矿物 岩石地球化学通报, 32(5): 619~624.
- 王汝成, 邬斌, 谢磊, 车旭东, 向路, 刘晨. 2021. 稀有金属成矿全 球时空分布与大陆演化. 地质学报, 95(1): 182~193.
- 吴迪迪,李舢. 2021. 中亚造山带东南缘三叠纪解放营子岩体全岩 Sr—Nd—Li同位素特征及成因. 地球科学,47(9):3301~ 3315.
- 吴浩然,杨浩,葛文春,纪政,王可勇,井佳浩,景妍. 2022.大兴 安岭南段那斯嘎吐云英岩型铍矿化的形成时代和成因探讨:独 居石年代学和地球化学证据.岩石学报,38(7):1915~1936.
- 谢吴,梁新权,王策,梁细荣,董超阁. 2020. 广东白石嶂钼矿区花 岗岩 U-Pb 年代学及其地球化学特征. 地球化学,49(5):479~ 493.
- 熊双才,张征峰,李广,刘润泽,华叙登,赵富庄,周鹏飞,李关禄. 2019. 东准噶尔老爷庙地区碱性花岗岩锆石 U-Pb 定年、地球 化学及其地质意义.地质论评,65(1):221~231.
- 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 刘海泉. 2013. 我国大火成岩省和地幔柱研

究进展与展望. 矿物岩石地球化学通报, 32(1): 25~39.

- 严清高,李建康,李超,陈振宇,熊欣. 2022. 川西扎乌龙—青海草 陇花岗伟晶岩型稀有金属矿床磷灰石地球化学特征及地质意 义.岩石学报,38(2):341~360.
- 赵广涛,王德滋,曹钦臣. 1997. 崂山花岗岩岩石地球化学及成因. 高校地质学报,(5):1~15.
- 赵广涛,王德滋,曹钦臣.于联生.1998.I—A 复合型花岗岩体的 热演化及其意义(以崂山花岗岩体为例).中国科学,(28): 296~302.
- 张振凯,周瑶琪,梁文栋. 2015. 山东东部晚中生代岩浆演化历史. 地质论评, 61(S1): 778~779.
- 张旗,金惟俊,李承东,王焰,王元龙. 2011. 花岗岩与地壳厚度关 系探讨. 大地构造与成矿学, 35(2): 259~269.
- 张招崇,侯通,程志国. 2022. 大火成岩省的成矿效应. 地质学报, 96(1):131~154.
- 赵珊茸, 宇坤, 徐畅. 2022. 岩石中斜长石双晶的背散射电子衍射 测试与分析. 地球科学, 47(4): 1399~1414.
- 曾普胜,李睿哲,刘斯文,温利刚,赵九江,王十安.2021.中国东 部燕山期大火成岩省:岩浆一构造一资源—环境效应.地球学 报,42(6):721~748.
- Ballouard C, Poujol M, Boulvais P, Branquet Y, Tartèse R, Vigneresse J L. 2016. Nb—Ta fractionation in peraluminous granites: a marker of the magmatic—hydrothermal transition. Geology, 44 (3): 231~ 234.
- Bo Hongze, Zhang Zhaochong. 2020&. Genesis of silicic Large Igneous Provinces and effects of resources and environment. Acta Petrologica Sinica, 36(7): 1973~1985.
- Breiter K, Förster H J, Škoda R. 2006. Extreme P-, Bi-, Nb-, Sc-, Uand F-rich zircon from fractionated perphosphorous granites: the peraluminous Podlesí granite system, Czech Republic. Lithos, 88(1 ~4): 15~34.
- Cao Mingjian, Evans N J, Hollings P, Cooke D R, McInnes B I A, Qin Kezhang. 2021. Apatite texture, composition, and O—Sr—Nd isotope signatures record magmatic and hydrothermal fluid characteristics at the Black Mountain porphyry deposit, Philippines. Economic Geology, 116(5): 1189~1207.
- Cerny P, Meintzer R E, Anderson A J. 1985. Extreme fractionation in rare-element granitic pegmatites; selected 344 examples of data and mechanisms. The Canadian Mineralogist, 23(3): 381~421, 345.
- Chen Mou, Wang He, Zhang Xiaoyu, Yan Qinghe, Gao Hao. 2022&. Judgment of metallogenic potential of Kangxiwa pegmatite in Xinjiang: Evidence from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Lu—Hf isotope. Acta Petrologica Sinica, 38(7): 2095~2112.
- Ferry J M, Watson E B. 2007. New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. Contributions to Mineralogy and Petrology, 154(4), 429~437.
- Feng Yonggang, Wang Yiqian, Zhang Ze, Liang Ting, Zhou Yi, Gao Jinggang, Teng Jiaxin. 2019&. Geochemistry of triphylite in Dahongliutan lithium pegmatites, Xinjiang: implications for pegmatite evolution. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1405~1421.
- Gardiner N J, Hawkesworth C J, Robb L J, Mulder J A, Wainwright A N, Cawood P A. 2021. Metal anomalies in zircon as a record of granite-hosted mineralization. Chemical Geology, 585: 120580.
- Gao Xiaoying, Zheng Yongfei. 2011&. On the Zr-in-rutile and Ti-inzircon geothermometers. Acta Petrologica Sinica, 27(2): 417 ~ 432.
- Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A Guide to the Chemical Classification of the Common Volcanic Rocks. Canadian Journal of

Earth Sciences, 8(5): 523~548.

- Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/ Rb, Eu/Eu^{*}, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(3~4): 489 ~508.
- Li Jie, Huang Xiaolong, Wei Gangjian, Liu Ying, Ma Jinlong, Han Li, He Pengli. 2018. Lithium isotope fractionation during magmatic differentiation and hydrothermal processes in rare-metal granites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 240: 64~79.
- Li Anbang, Huang Qin, Feng Chao, Yang Xihua, Yan Ganggang, Zhao Zijuan, Dong Xiangjie, Zhu Mingming, Zhang Jinyang. 2021&. Genesis of Mufushan Pegmatite Deposits constrained by U-Pb ages and trace elements of zircon from complex granitic batholith. Earth Science, 46(12): 4517~4532.
- Li Jiankang, Li Peng, Yan Qinggao, Liu Qiang, Xiong Xin. 2021&. History of granitic pegmatite research in China. Acta Geologica Sinica, 95(10): 2996~3016.
- Li Jiazhen, Wu Song, Lin Yibin, Jiang Zongyang, Yi Jianzhou, Jiang Guangwu, Liu Xiaofeng, Hua Kang, Ci Qiong, Zhao Yayun. 2021&. Alteration—mineralization style and prospecting potential of the Cimabanshuo porphyry copper deposit in Tibet. Earth Science : 1~33.
- Li Shoukui, Liu Xuelong, Lu Yingxiang, Zhang Shitao, Liu Sihan, Chen Jianhang, Li Zhenhuan, Yu Haijun, Zhang Chuanyu, 2022&. Indication of zircon oxygen fugacity to different mineralization control factors of porphyry deposits in Zhongdian ore-concentrated area, Southern Yidun Arc. Earth Science, 47(4): 1435~1458.
- Li Wufu, Li Shanping, Wang Bingzhang, Wang Chuntao, Liu Jinheng, Zhang Xinyuan, Cao Jinshan, Xu Chuanbing, Liu Jiandong, Jin Tingting. 2022&. Discovery of the (beryl-bearing) spodumene pegmatite in the Caolong Area in the Sanjiang Northern section of the Qinghai: implications for Li—Be mineralization. Geotectonica et Metallogenia: 1~25.
- Li Xian. 2019&. What is the province of igneous province. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 38 (2): 441~442.
- Li Xiaofeng, Wei Xinglin. 2022&. The key scientific problems for the research on the rare metal lithium—beryllium deposits. Acta Petrologica Sinica, 38(7): 1843~1847.
- Liu Haiyong, Tang Juxing, Zeng Qinggao, Hua Kang, Zhao Hongfei, Wang Yu, Yang Zong, 2022&. Petrogenesis and geological significance of Early Cretaceous granites in Tajigang mining area, Central Tibet. Earth Science, 47(4): 1217~1233.
- Liu Ruiyang, Zhou Yaoqi, Dong Shihui, Zhou Tengfei, Mu Hongyu, Bai Bingyang, Li Sunyi. 2022. Early Cretaceous volcanic edifice activity in the Sulu Orogenic Belt: evidences from volcanic sedimentary rhythum characteristics in Lingshan Island, eastern Shandong Province, China. Front. Earth Sci., 10: 908193.
- Liu Zhichao, Liu Xiaochi, Yu Liangjun, Wang Jiangang. 2020&. Highly fractionated origin and magmtic—hydrothermal evolution of the Kampa leucogranites in the Tethyan Himalaya. Journal of Nanjing University (Natural Science): 56(6): 800~814.
- Lu Yigan, Xiao Yilin, Wang Yangyang, Wan Hongqiong, Li Dongyong, Tong Fengtai, Yu Chenglong, 2021&. Exploration of Li Isotope in Application of Ore Deposits. Earth Science, 46(12): 4346~4365.
- Lu Yongjun, Loucks R R, Fiorentini M, McCuaig T C, Evans N J, Yang Zhiming, Hou Zengqian, Kirkland C L, Parra Avila L A, Kobussen A. 2016. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu±Mo± Au deposits. Society of Economic Geologists. Special Publications

Series, 19: 329~347.

- Miao Yu, Wu Liang, Xiao Changyuan, Li Suoming, Li Zhiwei, Song Wenting, Tian Yufeng. 2021&. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages, trace element characteristics of the Lower Triassic Jialingjiang formation tuffites in the Puyi area, northwestern Guizhou, and their geological significance. Geological Review, 67(2): 289~310.
- Rao Can, Wang Rucheng, Che Xudong, Li Xiaofeng, Wang qi, Zhang Zhiqi, Wu Runqiu. 2022&. Metallogenic mechanism and prospect of key metal beryllium. Acta Petrologica Sinica, 38(7): 1848 ~ 1860.
- Rivalta E, Dahm T. 2006. Acceleration of buoyancy-driven fractures and magmatic dikes beneath the free surface. Geophysical Journal International, 166(3): 1424~1439.
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22(4): 247~263.
- Shuai Xue. 2019&. The genesis of the "Tetrad Effect" of the Zhuogapu highly fractionated granite in the northern Lhasa Terrane. Tutor: Zhu Dicheng. China University of Geosciences Doctoral thesis.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313 ~ 345.
- Teng Fangzhen, Dauphas N, Helz R T. 2008. Iron isotope fractionation during magmatic differentiation in Kilauea Iki lava lake. Science, 320(5883): 1620~1622.
- Teng Fangzhen, Rudnick R L, McDonough W F, Wu Fuyuan. 2009. Lithium isotopic systematics of A-type granites and their mafic enclaves: Further constraints on the Li isotopic composition of the continental crust. Chemical Geology, 262(3~4), 370~379.
- Tian Ye, Shan Yehua. 2008&. Brittle deformational mechanisms of Late Mesozoic Dazhushan grantic body (Jiaonan, Shandong). Geotectonica et Metallogenia, (4): 427~435.
- Wang Zhen. 2021&. Mineralogical tracing of magmatic—hydrothermal evolution and mineralization of Jiajika pegmatite type lithium deposit, Western Sichuan, China. Chinese Academy of Geological Sciences.
- Wang Tao, Liu Shen. 2013&. Zircon saturation temperatures of granites in the Jiaonan area and their geological significations. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry : 32 (5): 619~624.
- Wang Rucheng, Wu Bin, Xie Lei, Che Xudong, Xiang Lu, Liu Chen. 2021 &. Global tempo-spatial distribution of rare-metal mineralization and continental evolution. Acta Geologica Sinica, 95 (1): 182~193.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407~419.
- Wolf M B, London D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplograntic melts: an experimental study of solubilities and mechanisms. Geochimica et Cosmochimica Acta, 58(19): 4127 ~ 4145.
- Wu Didi, Li Shan. 2021&. The whole-rock Sr—Nd—Li isotopic characteristics and genesis of the Triassic Jiefangyingzi pluton in the

southeastern margin of the Central Asian Orogenic Belt. Earth Science, 47(9): 3301~3315.

- Wu Haoran, Yang Hao, Ge Wenchun, Ji Zheng, Wang Keyong, Jing Jiahao, Jing Yan. 2022&. Formation age and genesis of the Nasigatu greisen-type beryllium mineralization in the southern Great Xing´an Range: Monazite chronological and geochemical evidence. Acta Petrologica Sinica, 38(7): 1915~1936.
- Xie Hao, Liang Xinquan, Wang Ce, Liang Xirong, Dong Chaoge. 2020&. U-Pb geochronological and geochemical significance of granites from the Baishizhang Molybdenum area, Guangdong Province. Geochimica, 49(5): 479~493.
- Xiong Shuangcai, Zhang Zhengfeng, Li Guang, Liu Runze, Hua Xudeng, Zhao Fuzhuang, Zhou Pengfei, Li Guanlu. 2019&. Zircon U-Pb dating, geochemical characteristics of alkali- granites in Laoyemiao area, eastern Junggar, and geological significance. Geological Review, 65(1): 221~231.
- Xu Yigang, He Bin, Luo Zhenyu, Liu Haiquan. 2013&. Study on mantle plume and Large Igneous Provinces in China: an overview and perspectives. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(1): 25~39.
- Yang Shuiyang, Jiang Shaoyong, Mao Qian, Chen Zhenyu, Rao Can, Li Xiaoli, Li Wancai, Yang Wenqiang, He Pengli, Li Xiang. 2022. Electron probe microanalysis in geosciences: analytical procedures and recent advances. Atom Spectrosc, 43: 186~200.
- Yan Qinggao, Li Jiankang, Li Chao, Chen Zhenyu, Xiong Xin. 2022&. The geochemical characteristics and their geological significance of apatite from the Zhawulong—Caolong granitic pegmatite-hosted rare metal deposit in Sichuan and Qinghai provinces, West China. Acta Petrologica Sinica, 38(2): 341~355.
- Zhao Guangtao; Wang Dezi; Cao Qinchen. 1997&. The geochemistry and genesis of the Laoshan granitoids, Shandong Province. Geological Journal of China Universities, (5): 1~15.
- Zhao Guangtao, Wang Dezi, Cao Qinchen. Yu Liansheng. 1998&. Thermal evolution of I—A composite granite and its significance (Laoshan granite for example). Chinese Science, (28): 296 ~ 302.
- Zhang Zhenkai, Zhou Yaoqi, Liang Wendong. 2015&. Late Mesozoic magmatic evolution history in eastern Shandong. Geological Review, 61 (S1): 778~779.
- Zhang Qi, Jin Weijun, Li Chengdong. 2011&. Granitic rocks and their formation depth in the crust. Geotectonica et Metallogenia, 35(2): 259~269.
- Zhao Shanrong, Liu Yukun, Xu Chang, 2022&. Electron back-scatter diffraction analysis for twins of plagioclase in some rocks. Earth Science, 47(4): 1399~1414.
- Zhang Zhaochong, Hou Tong, Cheng Zhiguo. 2022&. Mineralization related to Large Igneous Provinces. Acta Geologica Sinica, 96(1): 131~154.
- Zeng Pusheng, Li Ruizhe, Liu Siwen, Wen Ligang, Zhao Jiujiang, Wang Shian. 2021&. Yanshanian large igneous province in eastern China: magmatic—tectonic—resource—environmental effects. Acta Geoscientica Sinica, 42 (6) : 721~748.

Geochemical characteristics and mineralization analysis of Dazhushan highly differentiated granite

LIU Ruiyang^{1, 2, 3)}, ZHOU Yaoqi^{1, 2, 3)}, ZHOU Tengfei¹⁾, CHEN Tongtong^{1, 2, 3)}, LIU Hanqing^{1, 2, 3)}, BAI Bingyang¹⁾, LI Sunyi¹⁾

1) School of Geosciences China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong, 266580;

2) State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing, 102206;

3) SINOPEC Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, Wuxi, Jiangsu, 214126

Objectives: Dazhushan is located southwest of Xiaozhushan and belongs to Mesozoic's Late Yanshanian acidic intrusive granite. The lithology is mainly potassium feldspar granite and granite porphyry. Previous studies on the geochemical characteristics of Xiaozhushan have been conducted, while the geochemical study of Dazhushan granite remains blank.

Methodologies: The ten samples were analyzed by petrography, main trace and rare earth elements of the whole rock, Lithium isotope, zircon U-Pb dating, and plagioclase electron probe.

Results: The results indicate that, through the petrography analysis, the granite in the study area contains spodumene, pegmatite veins obvious, and rock type belonging to I—S granite. The samples are high silica granite $(SiO_2 = 66.97\% \sim 74.97\%)$, high total alkali content $(Na_2O + K_2O = 8.70\% \sim 10.73\%)$, belonging to peraluminous high potassium calc-alkaline series; Eu negative anomaly is obvious $(\delta Eu = 0.25 \sim 0.56)$. Calculating the highly differentiated granities index: aluminium saturation index is $(A/CNK = 0.91 \sim 1.01)$; differentiation index (DI) is 87.07 \sim 96.65; zircon saturation temperature is 836.26 \sim 862.16°C; zircon Ti thermometers reflect magma crystallization temperatures range from 698.52 \sim 738.91°C_o Geochronology shows that the sample age is 113.1±0.36 Ma, which is Early Cretaceous Laoshan granite.

Conclusions: The granite in the study area has the tetrad effect of rare earth elements ($TE_{1,3} = 1.04 \sim 1.15$) and a high oxygen fugacity, indicating that the granite pegmatite in the study area has the metallogenic potential of lithium deposit. The differentiation process of granite experienced the separation and crystallization of plagioclase, zircon, apatite and other minerals. Magma upwelling along the fractures of the island arc and continental collision subduction zone, forming highly differentiated granites with metallogenic potential.

Keywords: Dazhushan; petrogeochemistry; highly differentiated granite; metallogenic potential

Acknowledgements: This paper was supported by the major scientific and technological innovation project in Shandong Province including "The Study of Oil and Gas Occurrence Conditions in the Riqingwei Basin in the Eastern Sea Area of Shandong Province (No. 2017CXGC1608)", The project of the Ministry of Science and Technology of Sinopec "The Evaluation of Exploration Potential in the Low Exploration Degree Area of the North Yellow Sea—Bohai Bay Basin (No. P20028)" and the open fund of the Chinese Petroleum Exploration Institute "The Deep-water Mixed Deposition Process and its Control Over the Development of Shale Reservoirs—the Results of Joint Funding of the Laiyang Formation in the Ri-qing-wei Basin (No. HX20220005)"

First author: LIU Ruiyang, female, born in 1997, master, major in geochemical studies of highly differentiated granites; Email: liuruiyang_1997@126.com

Corresponding author: ZHOU Yaoqi, male, born in 1963. Ph. D. tutor, engaged in geodynamics; Email: zhouyq@upc.edu.cn

 Manuscript received on: 2022-07-04; Accepted on: 2022-10-11; Network published on: 2022-10-20

 Doi: 10.16509/j.georeview. 2022. 10.025
 Edited by: ZHANG Yuxu