

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.01.002

新疆博格达中段木垒地区基性侵入岩岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其构造意义

龙登红

(甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质矿产勘查院,甘肃 天水 741020)

摘要:博格达造山带大量分布基性岩,其成因研究对区域构造演化具有重要意义。本次对博格达造山带中段木垒地区的基性岩进行了系列研究工作,初步对岩石成因和构造环境进行了探讨,为博格达造山带研究提供了新的依据。岩石地球化学特征显示,辉绿岩的 SiO_2 含量为 47.71%~53.7%, K_2O 含量为 0.61%~1.87%, Na_2O 含量为 2.97%~5.14%,显示富钠贫钾特征,属准铝质中-高钾钙碱性岩石系列。 $\text{Mg}^\#$ 值为 29.80~47.89,远低于原始玄武质岩浆的参考数值 65,表明区内基性岩可能是原始岩浆经历较强程度分异作用后的产物;分异指数(DI)均大于 35.00,固结指数均远小于 30,均显示辉绿岩分异程度较高。稀土元素特征显示较高稀土总量、轻稀土强烈富集的右倾模式,相对富集 Rb、Ba、K、Th 等大离子亲石元素,相对亏损 Nb、Ti、Hf、Zr 等高场强元素。辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 $(305.9 \pm 3.1) \text{ Ma}$;辉绿岩岩浆可能源于亏损尖晶石橄榄岩相至原始尖晶石橄榄岩相之间,为较低程度部分熔融及分异演化综合作用形成的产物,为晚石炭世博格达弧后裂陷盆地晚期局限性伸展作用的产物。

关键词:博格达造山带;基性岩;弧后裂陷盆地;锆石 U-Pb 测年

中图分类号:P595

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)01-0015-15

Geochemistry, Zircon U-Pb Dating and Tectonic Significance of Basite in the Middle Section of Bogda Orogenic Belt, Xinjiang

LONG Denghong

(The 1st Geological and Mineral Exploration Institute of Gansu Geological and Mineral Exploration Bureau, Tianshui 741020, Gansu, China)

Abstract: Basic rock is widely distributed in Bogda orogenic belt. Studies on its genesis is of great significance to the regional tectonic evolution. Geochemical characteristics of rocks show that the SiO_2 in Diabases is 47.71 %~53.7 %, the K_2O is 0.61 %~1.87 %, and Na_2O is 2.97 %~5.14 %. are metaluminous, and show transitional characteristics from the calc-alkaline to high-potassic calc-alkaline series, belonging to quasi-aluminous medium-high calc-alkaline series. The $\text{Mg}^\#$ values range from 29.80 to 47.89, which is much lower than the reference value of the original

收稿日期:2019-07-29;修回日期:2019-12-10

基金项目:新疆地质勘查基金项目管理中心中央返还两权价款项目“新疆木垒县白杨河一带 1:5 万 K46E002001、K46E002002、K46E003002 三幅区域地质矿产调查”(T16-1-LQ10)

作者简介:龙登红(1987-),男,汉族,甘肃环县人,本科,工程师,地质学专业,主要从事区域基础地质调查研究工作。E-mail: 625571323@qq.com

basaltic magma 65, indicating that the basic rocks in this area may be the product of strong differentiation from the primitive magma. The differentiation index (DI) is higher than 35.00, while the consolidation index is lower than 30, implying that the diabase suffered strong differentiation. The characteristics of rare earth element (REE) show a right-dipping mode with high total contents and intense enrichment of light REEs. Large-ionic lithophilic elements such as Rb, Ba, K, and Th, are relatively enriched and high-field elements such as Nb, Ti, Hf, and Zr are relatively depleted. The diabase zircon U-Pb dating is (305.9 ± 3.1) Ma. Diabase magma may derive from the transitional phase of Depleted spinel peridotite facies and Primitive spinel peridotite facies and is a moderate partial melting of the lithospheric mantle and the evolution of magma differentiation, which is the product of limited extension of Bogda post-arc rift basin in Late Carboniferous.

Keywords: Bogda orogenic belt; basic rock; post-arc rift basin; zircon U-Pb dating

对基性岩脉的研究具有重要的地质意义(孙林华,2007;周晶,2008;曾孝文,2019)。基性脉岩的岩浆来源、形成条件、在岩石圈深部的动力学特征为地学界研究的热点。基性脉岩成因主要有富集型地幔部分熔融(孙丰月等,1995;顾连兴,2001;张航,2018)、基性岩浆陆壳混染(赵霞,2008;刘彬,2013)、岩浆混合(齐有强,2008;卢成忠,2009)等。基性岩脉形成于伸展构造背景下,岩浆起源于岩石圈地幔和软流圈。在基性岩浆上侵入途中,虽然可能熔融岩浆房通道的地壳物质导致岩浆的化学成分发生部分改变,但最终形成的脉岩仍会保留部分软流圈和地幔的重要信息(徐学义,2005;崔方磊,2015;高秦,2019)。因此,开展基性岩脉的研究能够获得源区岩浆的物理化学特征,进而研究岩浆形成的构造环境等重要地质意义。

博格达造山带是天山东部地区晚古生代构造演化的产物,为天山构造演化研究中争论的焦点,其构造归属及成因至今仍存在不同的认识。有裂谷(顾连兴等,2001;夏林圻等,2002;王金荣等,2010;汪晓伟等,2015;孙吉明等,2018)、岩浆弧(左国朝等,2006)、弧后盆地环境(李锦轶等,2004;罗婷,2016)等不同认识。博格达地区石炭纪—二叠纪早期经历了强烈的大规模碰撞后伸展作用,形成大量的基性—超基性岩体、岩脉(夏林圻等,2006;李江涛,2018)。前人研究认为这些中基性岩是博格达造山带岩石圈拉张减薄时的产物,反映晚石炭世早期博格达造山带处于岩石圈拉张的构造环境与动力学背景(靳刘圆,2014;高景刚,2013;雷万杉,2016;夏冬,2018)。以往工作对博格达基性岩的研究主要集中在博格达

东段(高景刚,2013;屈翠霞,2015;刘亮等,2020)和博格达西段(李江涛,2018),两侧的演化时间和构造环境具有一定的差异性。本次研究区位于博格达造山带中部木垒地区,通过对区内的辉绿岩进行岩石学、岩石地球化学和年代学研究,深入探讨其岩石成因及构造意义。

1 区域地质背景

博格达造山带位于准噶尔盆地与吐哈盆地之间(图1),区域上延伸长约为600 km,南北宽约为40~80 km。研究区位于博格达造山带中部木垒地区,出露地层主要为早石炭世七角井组(C_1q)、晚石炭世柳树沟组(C_2l)和祁家沟组(C_2q)。早石炭世七角井组(C_1q)为中基性火山碎屑岩夹火山熔岩,在其顶部见陆源碎屑岩;晚石炭世柳树沟组(C_2l)为海相基、中、酸性火山岩夹少量陆源细碎屑岩及灰岩透镜体;晚石炭世祁家沟组(C_2q)主要为滨海相陆源碎屑岩及灰岩夹少量安山岩及凝灰质砂岩。侵入岩主要以基性岩为主,岩性为辉绿岩、辉长岩等,酸性岩不发育,仅在局部地段出露脉岩和小岩体。

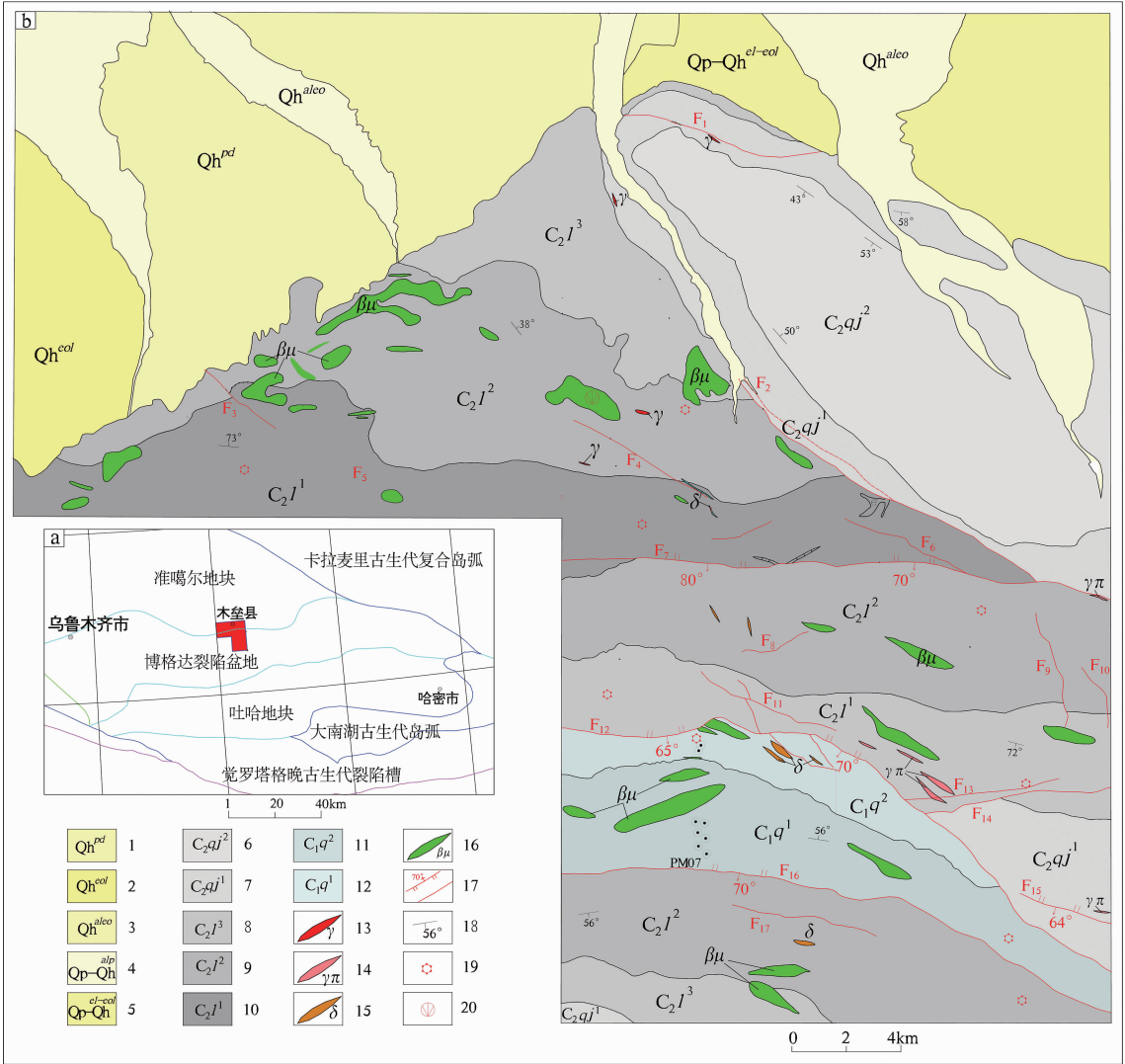
2 岩相学和矿物学特征

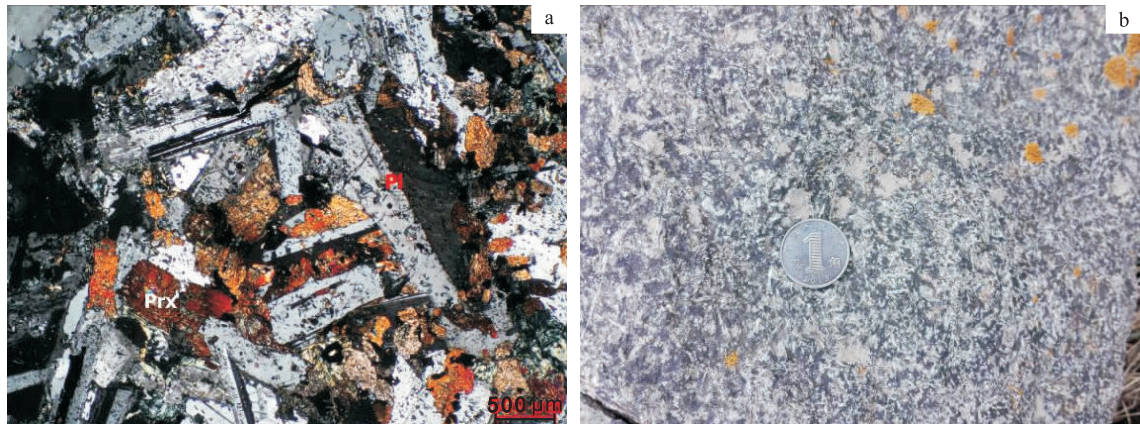
研究区内的中基性侵入岩侵入至早石炭世七角井组(C_1q)和晚石炭世柳树沟组(C_2l),岩性主要以辉绿岩、辉长岩等为主。辉绿岩主要呈脉状、长条状、带状等,宽约为2~500 m,延伸长度为100~

2 000 m不等。在岩体与火山岩和碎屑岩的接触带上仅发育细粒化边(宽约数厘米)、角岩化等,而与灰岩的的接触带上发育宽度约为 1~3 m 的绿泥石、绿帘石化带。区内无酸性岩体,局部仅见少量花岗岩脉,脉宽为 1~5 m,延伸长度为 100~500 m。

辉绿岩岩石呈斑状结构、辉绿结构、嵌晶含长结构,块状构造。主要由斜长石(50%~70%)、辉石(20%~40%)、角闪石(2%~5%)、少量金属矿物(1%~4%)等组成,副矿物主要为榍石、锆石及其他

透明矿物(约为 1%~3%)。其中,斜长石粒度在 1~6 mm,具绢云母化、黏土化,表面混浊,部分具强烈的绿泥石化,有的颗粒已完全被绿泥石所取代,部分双晶清晰可见,个别可见环带结构;角闪石为柱状,多色性明显,具强烈的绿泥石化,大多颗粒可见一组解理,少量颗粒可见两组角闪石式解理;辉石主要分布在较自形的斜长石板状晶体搭成的近三角形孔隙中,部分辉石具较强烈的绿泥石化。金属矿物为集合体状、粉粒状,不均匀分布(图 2)。





a. 显微照片; b. 野外照片

图 2 灰绿色辉绿岩图

Fig. 2 Grey-green diabase(a-Micrograph;b-Macro photo)

3 样品采集及分析测试方法

本次在区内多个辉绿岩的不同部位采集研究样品。同一样点处采集了一套分析样品,包括标本、薄片、常量元素、稀土元素、微量元素等样品;在研究区中部的平顶山辉绿岩的样品中,增加采集锆石 U-Pb 年龄样品。采集样品时,选择蚀变较弱或无蚀变的岩体,在岩体的中部采集,取样时去除表面风化部分,采集新鲜基岩样品,以确保样品的代表性。共采集测试样品 6 套(包括薄片、常量、微量、稀土),其中一套包括锆石 U-Pb 测年样。

常量元素、稀土元素和微量元素由甘肃省地矿局一勘院实验测试中心测试分析。将样品表面风化部分去除后,颞式破碎机破碎岩石后,用玛瑙球磨机粉碎到 200 目以上进行分析。主量元素均采用日本理学 ZSX Primus II 型荧光光谱仪测定,微量元素和稀土元素采用美国热电 ICAP-Q 型电感耦合等离子质谱仪 ICP-MS 测定。

锆石分选在南京宏创地质勘查技术服务公司完成。将岩石样经粉碎淘洗后,将得到的重砂矿物进行电磁选,初步筛选出锆石样品后,在双目镜下挑选出较好晶形的锆石。锆石粘贴在环氧树脂表面,制成锆石样品靶。对阴极发光图像分析,根据锆石的形态、环带特征等,选择可能与岩浆同期形成的锆石颗粒,在增生环带上选点进行 U-Pb 测年。

湖北省地质实验室测试中心负责完成锆石 U-Pb 测年工作,本次采用激光剥蚀电感耦合等离子体

质谱分析系统(LA-ICP-MS)完成;最终检测误差低于 5×10^{-9} ,符合技术要求。采用 ICP-MS-Data Cal 9.0 对样品的同位素比值和元素含量进行处理,采用 Isoplot 3.0 软件进行年龄加权平均值的计算及锆石年龄谐和图的绘制。

4 岩石地球化学及年代学特征

4.1 常量元素

各样品的岩石化学分析见表 1。研究区的辉绿岩分析样品中烧失量较高(2.38%~5.6%),显示后期轻微程度的改造作用。辉绿岩的 SiO_2 含量在 47.71%~53.7%,为基性岩;全碱 $\omega(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 含量为 3.16%~6.18%,其中 K_2O 含量为 0.61%~1.87%(平均为 1.19%), Na_2O 含量为 2.97%~5.14%(平均为 3.88%), Na_2O 含量明显高于 K_2O 含量,显示富钠贫钾特征。TAS 分类图上,样点位于二长闪长岩-碱性玄武岩之间,相对比较分散,认为可能由于在岩浆上侵和次生蚀变过程中,活动性元素浓度发生变化,从而引起硅-碱图解在鉴定岩石类型时有偏差。因此,选择相对较稳定的微量元素 Zr/TiO_2 - Nb/Y 图解对岩石类型进行划分,其结果表明样品均为亚碱性玄武质岩石;从 AFM 图解可以看出,样品为钙碱性系列;铝饱和指数(A/CNK)为 0.60~0.91,A/NK 指数值为 1.36~3.23,属准铝质岩石;里特曼指数 σ 为 2.23~5.69,均值为 3.17(小于 3.3),岩石属高-中钾钙碱性系列。由此可见,研究区内基性侵入岩类型应属于准铝质中-高

钾钙碱性岩石系列。CIPW 计算结果中,碱度率 AR 值偏高(1.35~1.97,均值为 1.59,略大于 1.50)。 $Mg^\#$ 值 $[100Mg/(Mg+Fe_{tot}^{2+})]$ 为 29.80~47.89,平均值为 41.50,远低于原始岩浆的参考数值 65,显示

岩浆可能经历较强程度分异作用。分异指数(DI)较高,为 30.94~53.28(均大于 35.00),固结指数(SI)较低,为 13.11~25.98(均小于 30),2 个参数均显示辉绿岩分异程度较高。

表 1 研究区基性岩常量元素分析结果表(%)
Tab. 1 Diabase test result of constant element(%)

编号	02-54	12-25	07-27	07-30	07-32	07-35
岩石名称	辉绿岩	辉绿岩	辉绿玢岩	辉绿玢岩	辉绿岩	辉绿岩
Al ₂ O ₃	16.79	19.08	15.69	18.88	14.03	12.43
CaO	7.9	7.53	9.85	11.22	7.16	6.47
Fe ₂ O ₃	2.93	3.28	1.95	0.9	1.15	2.64
MgO	2.81	4.6	4.81	4.32	4.43	2.7
MnO	0.21	0.18	0.23	0.18	0.51	0.28
P ₂ O ₅	0.33	0.19	0.1	0.077	0.17	0.56
TiO ₂	1.14	1.16	1.31	0.94	1.33	2.19
K ₂ O	1.72	0.54	0.79	0.61	1.61	1.87
Na ₂ O	3.59	4.13	2.97	3.15	5.14	4.31
SiO ₂	53.7	48.7	47.08	47.71	49.2	52.87
FeO	5.6	6.56	8.94	7.65	10	9.07
烧失量	2.38	3.38	5.6	3.85	4.97	3.49
H ₂ O ⁻	0.1	0.3	0.3	0.4	0.5	0.2
Σ	99.2	99.63	99.62	99.887	100.2	99.08
K ₂ O+Na ₂ O	5.31	4.67	3.76	3.76	6.75	6.18
Mg [#]	38.05	46.54	44.74	47.89	41.95	29.81
FeO*	8.24	9.51	10.69	8.46	11.03	11.45

注: $Mg^\# = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe_{tot}^{2+})$, $FeO^* = FeO + 0.8998 \times Fe_2O_3$ 。

4.2 稀土元素

由表 2 可知,研究区的稀土元素总量相对较富集,ΣREE=55.21×10⁻⁶~196.57×10⁻⁶(均值为 100.86×10⁻⁶),LREE=45.88×10⁻⁶~163.76×10⁻⁶(均值为 83.02×10⁻⁶),HREE=9.33×10⁻⁶~32.81×10⁻⁶(均值为 17.84)。稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 3)显示,各样品的稀土分配模式变化规律较为一致,为中等右倾斜的平行曲线,LREE/HREE 值为 4.21~4.99,轻稀土元素(LREE)相对重稀土元素(HREE)富集明显,显示可能为同源演化的产物;根据稀土元素标准化比值,La_N/Yb_N值为 3.93~4.98,La_N/Sm_N值为 1.62~1.90,Gd_N/Yb_N值为 1.52~1.89,表明轻重稀土之间存在一定的分馏作用,且轻稀土较重稀土分馏作

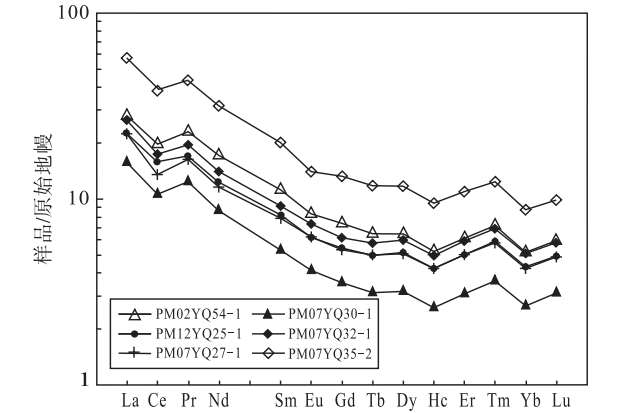


图 3 稀土元素原始地幔标准化分布型式图

Fig. 3 Primitive mantle-normalized REE patterns

用强烈。各样品的 Eu 异常均不明显(δEu 为 0.85

~0.90),指示岩浆没有发生明显的斜长石分离结晶。与研究区内的柳树沟组、七角井组的玄武岩稀土元素配分曲线基本一致,具有相似的轻稀土元素富集配分曲线特征。

4.3 微量元素

从微量元素原始地幔标准化蛛网图上可以看出(图4),各样品分配模式基本相似,显示其具有同源性。曲线整体为右倾型,相对富集 Rb、Ba、K、Th 等大离子亲石元素,Rb 和 Ba 的质量分数为 $9.6\times10^{-6}\sim39.8\times10^{-6}$ 、 $213.3\times10^{-6}\sim453.5\times10^{-6}$ (表3);样品中均相对亏损 Nb、Ti、Hf、Zr 等高场强元素(HFSE),Nb、Ti 的质量分数为 $3.9\times10^{-6}\sim19.1\times10^{-6}$ 、 $4\ 766\times10^{-6}\sim11\ 344\times10^{-6}$ 。样品中的 Rb、K、Ba 等活泼元素的含量变化范围大,样品中的烧失量整体偏大,常量元素 K₂O 与 Na₂O 的迁移变化造成岩石定名存在偏差等,可能由于活动元素在地温蚀变过程流失造成。Nb/Ta 值为 33.26~43.08(均值为 36.69),Zr/Hf 值为 27.05~33.42(均值为 30.77),与原始地幔 Nb/Ta 值(17.8)、Zr/Hf 值差距较大,可能反映岩浆形成中经历了较为明显的分离结晶作用。

4.4 年代学研究

辉绿岩样品(PM12-25)的锆石 U-Pb 年龄谐和图、加权平均年龄图、阴极发光图像(CL)以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试结果见图5和表4。

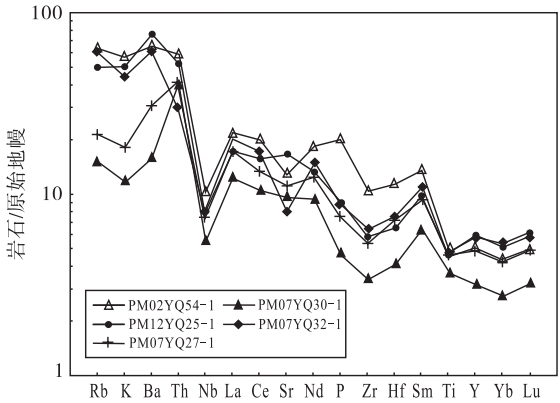


图4 微量元素原始地幔标准化蛛网图
Fig.4 Primitive mantle-normalized spider diagram of trace elements

阴极发光图像(CL)显示,锆石呈长柱状、半截锥状,颗粒大小不一,长宽比为 2:1~3:1;锆石环带不清晰,其主要原因为锆石中 U、Th 含量过高造成。锆石 Th/U 值为 0.42~1.75,均大于 0.40,且正相关性,表现出岩浆成因锆石特点。锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 年龄谐和图显示,数据的投影点均集中在和谐曲线上,具有一致的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值,加权平均年龄为(305.9±3.1)Ma(MSWD=0.87,n=21)。该年龄可准确反映辉绿岩的形成年龄,为晚石炭世。

表2 基性岩稀土元素分析结果表(10⁻⁶)
Tab.2 Diabase test result of trace rare earth element(10⁻⁶)

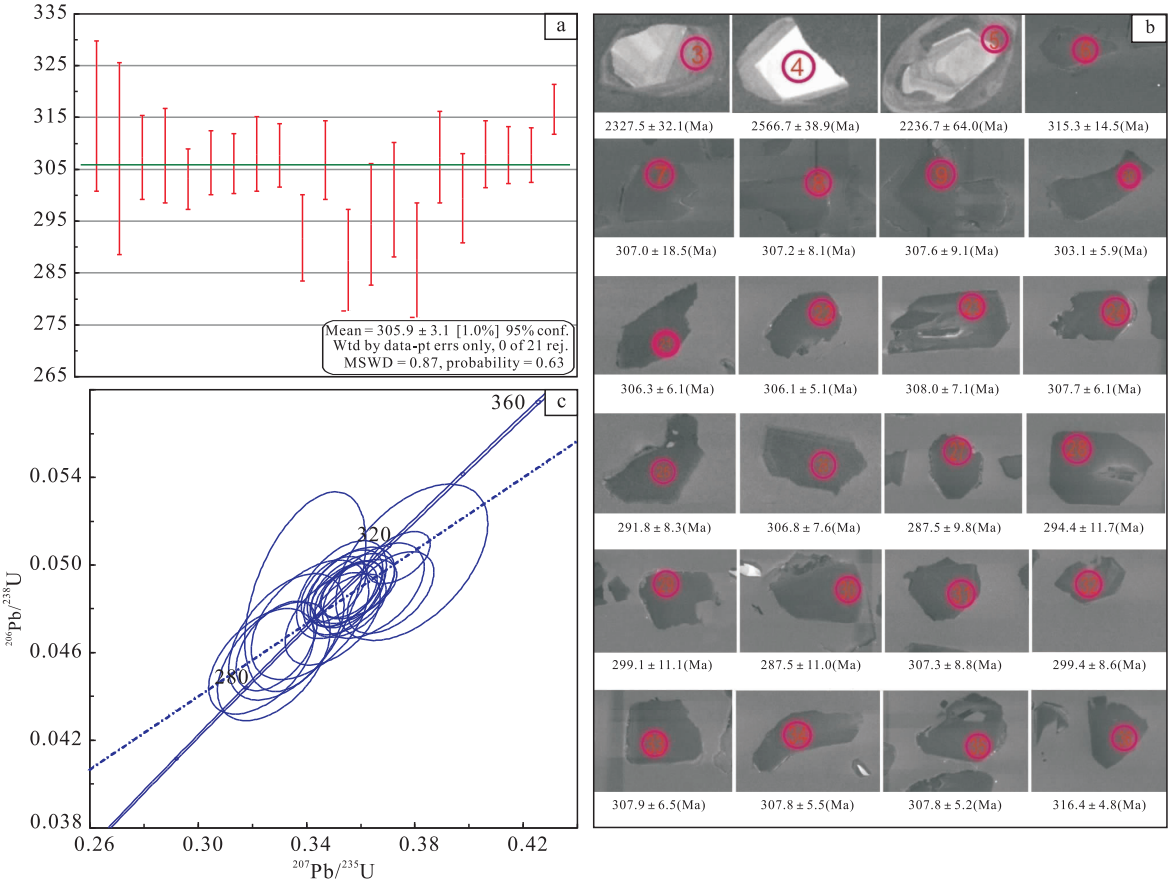
编号	02-54	12-25	07-27	07-30	07-32	07-35
岩石名称	辉绿岩	辉绿岩	辉绿玢岩	辉绿玢岩	辉绿岩	辉绿岩
La	14.96	11.73	11.72	8.34	13.81	29.8
Ce	34.9	27.7	23.46	18.63	30.25	66.38
Pr	4.85	3.55	3.39	2.61	4.06	9.01
Nd	25	17.8	16.7	12.67	20.13	45.42
Sm	5.96	4.3	4.09	2.83	4.79	10.5
Eu	1.6	1.17	1.18	0.8	1.39	2.65
Gd	5.62	4.07	3.98	2.69	4.63	9.81
Tb	0.85	0.63	0.63	0.41	0.73	1.49
Dy	5.1	3.94	3.92	2.51	4.64	9.03
Ho	0.98	0.77	0.77	0.48	0.91	1.73
Er	2.91	2.34	2.32	1.46	2.76	5.05
Tm	0.4	0.32	0.31	0.2	0.38	0.67
Lu	0.46	0.37	0.36	0.24	0.44	0.73
Yb	2.62	2.12	2.09	1.35	2.52	4.29
Y	26.42	23.04	22.24	14.35	26.64	46.28

续表 2

编号	02-54	12-25	07-27	07-30	07-32	07-35
岩石名称	辉绿岩	辉绿岩	辉绿玢岩	辉绿玢岩	辉绿岩	辉绿岩
ΣREE	106.2	80.81	74.93	55.21	91.43	196.57
LREE	87.27	66.25	60.54	45.88	74.42	163.76
HREE	18.93	14.56	14.39	9.33	17.02	32.81
LREE/HREE	4.61	4.55	4.21	4.92	4.37	4.99
L _{en} N/Yb _N	4.09	3.96	4.02	4.45	3.93	4.98
L _{en} N/Sm _N	1.62	1.76	1.85	1.9	1.86	1.83
G _d N/Yb _N	1.77	1.59	1.57	1.65	1.52	1.89
δEu	0.85	0.85	0.9	0.88	0.9	0.8
δCe	1	1.05	0.91	0.98	0.99	0.99

表 3 研究区基性岩微量元素分析结果表(10⁻⁶)
Tab.3 Diabase test result of trace elements(10⁻⁶)

编号	02-54	12-25	07-27	07-30	07-32	07-35
岩石名称	辉绿岩	辉绿岩	辉绿玢岩	辉绿玢岩	辉绿岩	辉绿岩
Ba	454	522	213	109	428	371
Co	22.5	38.3	34	30.6	32.5	23.6
Nb	7.3	5.6	5.3	3.9	5.8	19.1
P	1 902	857	705	439	822	3 120
Rb	39.8	31.2	13.7	9.6	38.5	26.7
Ti	6 317	5 968	6 110	4 766	6 108	11 344
V	240	240	287	191	341	213
Zr	117	64.9	60.4	38.2	71.8	293
K	14 100	12 600	4 500	2 900	11 000	11 900
Sn	2.98	2.21	0.9	1.11	0.81	3.95
Li	9.42	15.26	14.22	20.18	26.62	13.61
Be	0.95	0.77	0.89	0.73	0.86	2.35
Sc	25.10	29.97	42.71	31.59	46.16	32.74
Sr	269	350	233	202	170	128
Cs	1.60	0.88	2.95	1.89	2.64	2.08
Hf	3.51	2.02	2.23	1.26	2.32	3.97
Ta	0.21	0.13	0.13	0.11	0.16	0.57
Th	497	444	348	337	248	188
Co	24.8	24.7	40.8	35.2	33.6	23.6
Cr	43.4	82	50.6	49.9	51.1	20.5
Cu	94	37.1	56.7	11	90.4	66.7
Ni	21.5	20.53	23.2	25.6	15.9	10.4
Pb	7.53	5.37	9.31	5.28	6.05	8.73
Zn	73.7	54.13	102.3	33.4	96.1	100.8
As	0.58	1.1	0.74	2.88	1.06	0.32
Sb	0.64	0.36	0.68	0.72	0.7	0.71
Bi	0.115	0.093	0.116	0.19	0.115	0.108
W	0.47	0.23	0.26	0.21	0.36	0.41



a. 加权年龄图;b. 阴极发光照片;c. 谐和图

图 5 辉绿岩锆石 U-Pb 年龄

Fig. 5 The age of zircons from diabase

4.5 锆石矿化研究

对锆石中 U 含量的研究对评价岩体产铀远景有着重要意义(郑慙公,1984;李耀崧,1995;陈振宇,2014)。锆石中 U 含量随着岩石中 U 含量的增加而增加,具有良好的正相关性,锆石中 U 含量相对较高的地区一般都是具有一定产铀远景的地区;锆石 U 含量指示作为成矿物质来源的母岩体富集铀的程度,锆石含 U 高说明岩体富铀程度高,形成铀矿床所能提供的铀源充分(郑慙公,1984)。前人对南岭地区岩体的锆石 U 含量进行了大量统计,认为产铀岩体锆石的 U 含量多在 $1\,000 \times 10^{-6}$ 以上,不产铀岩体锆石的 U 含量一般低于 $1\,000 \times 10^{-6}$;产铀岩体锆石的 U、Th 含量均变化较大,单个样品中不同颗粒的点分析结果可以相差 1~2 个数量级,这一

点可与产铀岩体 U 的分布不均匀特点相对应(陈振宇,2014)。本次样品的 21 颗锆石中,U 含量最高可达到 $24\,579 \times 10^{-6}$,最低为 $3\,551 \times 10^{-6}$,均值为 $12\,267 \times 10^{-6}$,其中在 $10\,000 \times 10^{-6}$ 有 11 个值;Th 含量最高可达到 $14\,151 \times 10^{-6}$,最低为 $3\,109 \times 10^{-6}$,均值为 $8\,068 \times 10^{-6}$ (实验室对该值进行重复检查测定,分析精度和质量达到相关要求)。锆石中 U、Th 异常明显高于正常背景,为背景场的 10~20 倍以上,与南岭地区的产铀岩体特征相似。分析认为,博格达中段地区石炭纪部分岩体可能为产铀或者为铀矿提供物源的岩体,显示研究区具有铀矿的找矿前景,在以往研究中尚未开展铀矿调查,需要下一步工作中加强调查研究,补充相关工作,有望使得该地区的铀矿找矿取得新进展。

表 4 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果表
Tab. 4 La-ICP-MS zircon U-Pb data of the diabase

测点 编号	元素含量(10 ⁻⁶)			同位素比值						同位素年龄				谐和度		
	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
6	3 285.71	4 435.35	0.74	0.056 75	0.002 89	0.378 90	0.018 51	0.050 12	0.002 36	483.38	112.95	326.23	13.63	315.28	14.46	96%
7	3 109.04	7 470.06	0.42	0.052 37	0.001 38	0.339 53	0.014 75	0.048 78	0.003 01	301.91	61.11	296.82	11.18	307.01	18.51	96%
8	12 410.83	14 240.05	0.87	0.052 82	0.001 10	0.355 72	0.011 11	0.048 82	0.001 32	320.43	48.14	309.02	8.32	307.25	8.09	99%
9	8 804.94	15 513.00	0.57	0.052 64	0.001 07	0.352 89	0.010 99	0.048 88	0.001 48	322.28	50.92	306.89	8.25	307.62	9.08	99%
20	12 175.12	16 070.99	0.76	0.053 13	0.000 86	0.355 83	0.008 94	0.048 14	0.000 96	344.50	37.03	309.09	6.70	303.10	5.88	98%
21	10 552.49	24 579.17	0.43	0.052 71	0.000 80	0.355 89	0.008 46	0.048 65	0.001 00	316.73	33.33	309.14	6.34	306.25	6.14	99%
22	8 512.75	13 807.10	0.62	0.052 41	0.000 78	0.353 69	0.008 17	0.048 63	0.000 94	301.91	5.56	307.49	6.13	306.11	5.81	99%
23	4 667.30	5 442.07	0.86	0.052 36	0.000 92	0.354 27	0.009 20	0.048 93	0.001 16	301.91	40.74	307.92	6.90	307.96	7.14	99%
24	7411.43	10 082.03	0.74	0.051 72	0.000 75	0.349 99	0.007 92	0.048 88	0.001 00	272.29	33.33	304.71	5.96	307.67	6.12	99%
25	9 850.39	17 329.98	0.57	0.051 37	0.000 80	0.328 90	0.009 87	0.046 30	0.001 35	257.47	39.81	288.73	7.55	291.77	8.30	98%
26	8 824.57	17 462.08	0.51	0.055 39	0.001 26	0.371 09	0.010 54	0.048 74	0.001 23	427.83	50.00	320.46	7.81	306.80	7.58	95%
27	5 852.02	9 462.60	0.62	0.050 97	0.000 93	0.323 29	0.012 83	0.045 60	0.001 59	238.96	40.73	284.43	9.85	287.46	9.80	98%
28	4 355.94	9 569.98	0.46	0.051 69	0.000 98	0.332 54	0.014 06	0.046 72	0.001 91	272.29	47.22	291.51	10.71	294.35	11.73	99%
29	5 451.36	9 134.42	0.60	0.051 86	0.001 03	0.341 23	0.014 33	0.047 50	0.001 80	279.69	46.29	298.10	10.85	299.13	11.07	99%
30	14 151.12	21 449.09	0.66	0.052 01	0.000 89	0.327 89	0.013 72	0.045 61	0.001 79	287.10	34.26	287.96	10.49	287.49	11.04	99%
31	4 505.38	3 561.52	1.27	0.054 16	0.001 22	0.364 67	0.012 39	0.048 83	0.001 43	388.94	50.00	315.70	9.22	307.31	8.81	97%
32	9 093.66	16 707.67	0.54	0.053 31	0.001 07	0.349 66	0.011 62	0.047 55	0.001 39	342.65	46.29	304.46	8.74	299.44	8.58	98%
33	11 051.33	20 060.49	0.55	0.052 79	0.001 11	0.357 17	0.010 10	0.048 93	0.001 05	320.43	17.59	310.10	7.56	307.92	6.46	99%
34	11 423.37	8 669.67	1.32	0.052 97	0.000 97	0.359 11	0.009 39	0.048 90	0.000 89	327.84	42.59	311.55	7.02	307.76	5.50	98%
35	7 720.47	9 010.10	0.86	0.052 84	0.000 86	0.356 63	0.007 41	0.048 90	0.000 85	320.43	41.66	309.70	5.55	307.75	5.24	99%
36	6 231.70	3 551.44	1.75	0.053 73	0.000 87	0.374 00	0.007 69	0.050 34	0.000 78	366.72	35.18	322.62	5.69	316.60	4.82	98%

注:湖北省地质实验测试中心,2018。

5 讨论

5.1 岩石成因

研究表明来源于不同矿物相源区、不同部分熔融程度形成的玄武质岩浆具有不同的 Zr/Nb 和 Ce/Y 值 (Deniel, 1998)。研究区辉绿岩的 Zr/Nb 值为 $9.79 \sim 16.08$, Ce/Y 值为 $1.05 \sim 1.43$, 在 $Zr/Nb - Ce/Y$ 判别图解中, 显示岩浆源于半亏损尖晶石橄榄岩, 且部分熔融程度中等偏低 (图 6)。研究认为, 可使用 Dy/Yb 值对部分熔融作用源区研究, 在含石榴子石地幔源区中显示 $Dy/Yb > 2.5$, 而在尖晶石地幔源区显示 $Dy/Yb < 1.5$ (Miller, 1999), 研究区内辉绿岩的 Dy/Yb 为 $1.84 \sim 2.10$, 说明为含石榴子石地幔源区与尖晶石地幔源区的过渡相。从 $Dy/Yb - La/Yb$ 图解中可以看出, 显示区内辉绿岩形成于石榴子石二辉橄榄岩与尖晶石二辉橄榄岩之间过渡型岩浆源区 (图 7), 部分熔融程度偏低。

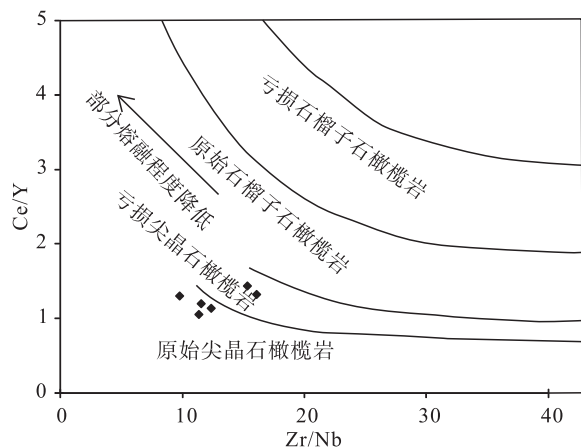


图 6 辉绿岩 $Zr/Nb - Ce/Y$ 图解 (据 Deniel, 1998)

Fig. 6 $Zr/Nb - Ce/Y$ diagram of diabase

对岩浆岩形成时的温度和压力进行研究判别, 可为岩浆的源区、演化、构造环境判别等分析提供重要信息。根据 $t_{pl} = 1\ 144.7 - 136.26 \times MnO - 19.23 \times TiO_2 + 7.41 \times Al_2O_3 - 1.04 \times FeO$ (Куталин, 1966), 得出斜长石的结晶温度为 $1\ 143 \sim 1\ 234\ ^\circ C$, 均值为 $1\ 194\ ^\circ C$ 。根据温度 $T(^{\circ}C) = 2\ 000 \times MgO / (MgO + SiO_2) + 969$ (Albarede, 1992), 得出辉绿岩形成温度为 $1\ 066 \sim 1\ 154\ ^\circ C$, 平均温度为 $1\ 116\ ^\circ C$ 。辉绿岩形成温度略低于岩石圈地幔底部的界面温度 (约为 $1\ 200\ ^\circ C$), 向深部软流圈温度

更高, 说明岩浆可能来源于岩石圈地幔中下部。辉绿岩样品的 Cr 平均含量为 49.6×10^{-6} , Ni 平均含量为 19.5×10^{-6} , 远低于原始玄武岩浆含量 ($Cr = 300 \times 10^{-6}$, $Ni = 250 \times 10^{-6}$), 这主要可能由于岩浆演化中发生橄榄石和辉石的结晶分异造成。

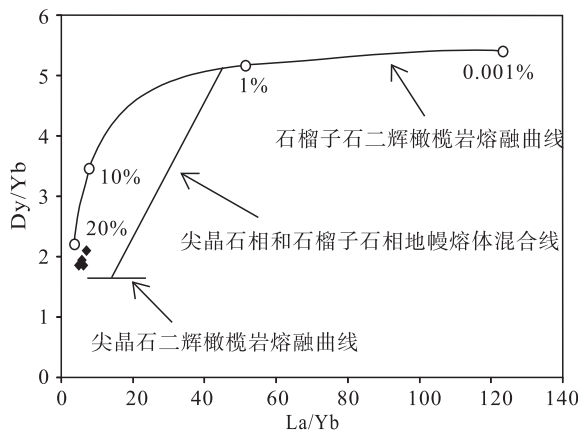


图 7 辉绿岩 $La/Yb - Dy/Yb$ 图解 (据 Miller, 1999)

Fig. 7 $La/Yb - Dy/Yb$ diagram of diabase

对岩浆岩形成过程的识别可利用 $Mg^{\#}$ 变化进行分析 (Frey, 1978)。研究区辉绿岩 $Mg^{\#}$ 值在 $29.8 \sim 47.9$, 均值为 41.5 (玄武质原始岩浆的 $Mg^{\#}$ 为 $68 \sim 73$), 显示岩浆分异演化作用较强; 辉绿岩的 Rb/Sr 平均值为 0.13 (原始地幔 Rb/S 值为 0.029), Rb/Ba 平均值为 0.08 (原始地幔 Rb/Ba 值为 0.088) (Sun, 1989), 显示岩浆分异演化作用较强。研究岩浆演化的 $La/Yb - La/Sm$ 图解中 (图 8), 显示岩浆发生了部分熔融作用和结晶分异作用。综合分析认为, 辉绿岩可能为地幔中等程度部分熔融形成的原始岩浆后, 后期发生了岩浆分异作用的综合产物。

5.2 构造环境分析

博格达造山带的构造属性有裂谷环境 (顾连兴等, 2001; 汪晓伟等, 2015; 孙吉明等, 2018)、岛弧环境 (马瑞士, 1997; 左国朝等, 2006)、弧后裂陷盆地 (李锦轶等, 2004; 罗婷, 2016) 等观点。高场强元素活性小, 对其特征分析研究, 可进行探讨辉绿岩的大地构造成因背景。在 $Ti - Zr - Y$ 构造环境判别图中, 样品主要落在岛弧拉斑玄武岩和岛弧钙碱性玄武岩区域 (图 9), 具有岛弧玄武岩和弧后盆地玄武岩的共性特征; 在 $Zr/4 - Y - Nb \times 2$ 图中 (图 10), 样点主要落在火山弧环境; 在 $Cr - Y$ 图中 (图 11), 研究区样点主要落在洋中脊环境和板内玄武岩相交的区

域;结合形成时间所处的构造环境,认为博格达晚石炭纪处于弧后裂陷盆地。该构造环境下形成的岩石在盆地的不同位置,其岩石化学特具有岛弧或者裂谷的不同特征。

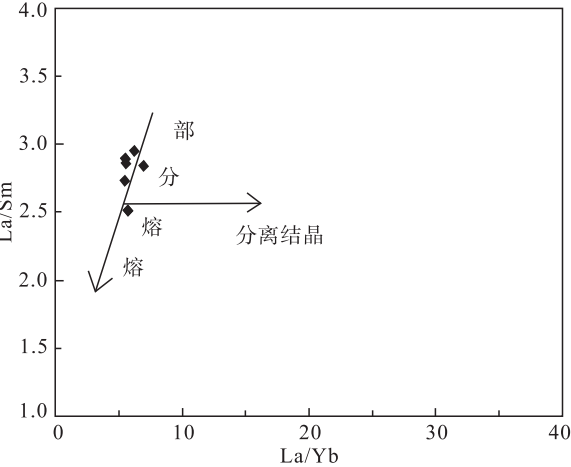
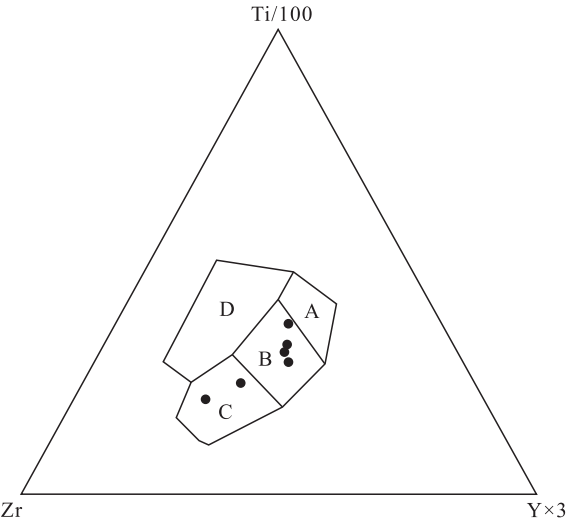


图 8 La/Yb - La/Sm 图解

Fig. 8 La/Yb - La/Sm diagram of diabase



A. 岛弧拉斑玄武岩;B. 岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩;
C. 岛弧钙碱性玄武岩;D. 板内玄武岩

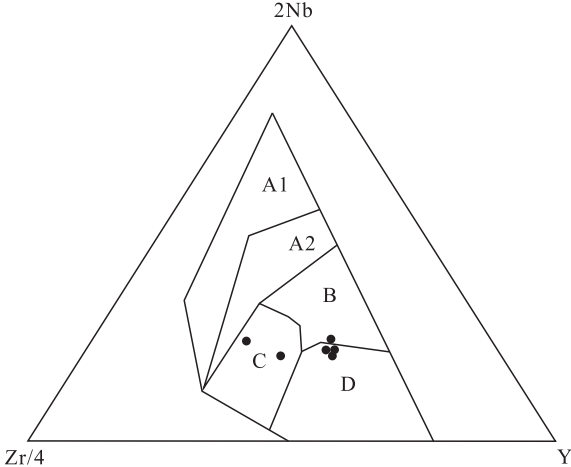
图 9 Ti - Zr - Y 环境判别图解

Fig. 9 Tectonic environment diabase of Ti - Zr - Y diagram

基性侵入岩属高钾钙碱性岩石系列,具有相对亏损 Ta、Nb、Y 等高场强元素(HFSE)元素、相对富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素(LILE)特征,结合稀土元素特征图分析,认为其具有大陆裂谷属性;微量元素 Nb/La 值为 0.42~0.64,平均为 0.49,与上地壳接近(Nb/La $\approx$ 0.39)(Pearce, 1982),La/Sm 值为 2.51~2.95,与中下地壳相似(La/Sm $\approx$ 2.86~5.22);Zr、Y

等微量元素能够较准确地恢复玄武岩的构造环境(夏林圻,2007),且 $w(\text{Zr})$ 为 $38.20 \times 10^{-6} \sim 293.10 \times 10^{-6}$ (均值为 107.63×10^{-6}),Zr/Y 值为 2.66~6.33 (均值为 3.61, >3.50),与板内玄武岩值相当。结合区域地质背景,表明博格达造山带木垒地区在晚石炭世时期不属于岛弧环境,而代表着一个以陆壳为基底的裂谷,则可能为弧后裂陷盆地。

对基性侵入岩的研究和分析后,认为在晚古生代期间博格达造山带存在大面积的与弧后裂陷演化有关的岩浆活动,符合弧后盆地的原有认识,与博格达造山带相接的哈尔里克造山带构造演化过程具有一定的相似性,可进行区域对比和分析探讨。



A1+A2. 板内玄武岩;A2+C. 板内拉斑玄武岩;B. 富集型洋中脊玄武岩;C+D. 火山弧玄武岩;D. 亏损型洋中脊玄武岩

图 10 Zr/4 - Y - Nb $\times$ 2 环境判别图解

Fig. 10 Tectonic environment diabase of Zr/4 - Y - Nb $\times$ 2 diagram

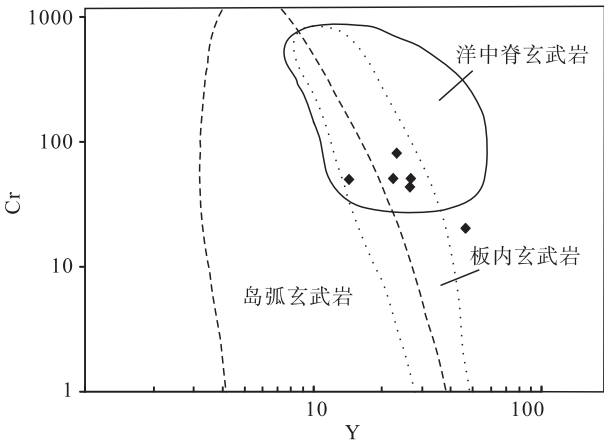


图 11 辉绿岩 Cr - Y 图解(据 Pearce, 1982)

Fig. 11 Tectonic environment diabase of Cr - Y diagram

样品均为钙碱性火山岩系列,较高的稀土总量、轻稀土强烈富集的右倾模式,Nb、Ta 的强烈亏损,总体表明辉绿岩形成于多重构造背景交接部位。前人研究认为,弧后裂陷盆地玄武岩具有从洋中脊玄武岩向岛弧玄武岩过渡的性质,其地幔源区由于受到俯冲流体的影响而不同程度的富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素(张进江等,2019),其特征与区内辉绿岩一致。综合分析,认为研究区石炭纪构造环境可能为弧后裂陷盆地。

基性岩体的出现可以作为裂谷由完全伸展期转为局限伸展期的标志。从区域上看,博格达西段甘河子地区的辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 (305.0 ± 1.6) Ma(李江涛等,2018);博格达中段木垒地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 (305.9 ± 3.1) Ma,色皮口地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 (300.5 ± 1.7) Ma(高景刚等,2013);博格达东段巴里坤地区辉绿岩锆石 U-Pb 年龄为 (314.7 ± 1.5) Ma(崔方磊等,2015),苏吉山辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 (308.1 ± 3.3) Ma(雷万杉等,2016),总体显示博格达伸展作用由东向西发展,这也进一步说明木垒地区大量的辉绿岩应为晚石炭纪大规模火山活动转向局限性伸展作用的产物。

6 结论

(1)岩石地球化学特征显示,基性侵入岩属准铝质中-高钾钙碱性岩石系列;稀土元素特征显示较高稀土总量、轻稀土强烈富集的右倾模式,大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Th 等相对富集,高场强元素 Nb、Ti、Hf、Zr 等相对亏损。

(2)研究区辉绿岩岩浆可能源于亏损尖晶石橄榄岩相至原始尖晶石橄榄岩相之间,为较低程度部分熔融形成、分异演化综合作用形成的产物。

(3)木垒地区辉绿岩的锆石 U-Pb 年龄为 (305.9 ± 3.1) Ma,属晚石炭世,为晚石炭纪大规模局限性伸展作用的产物。分析认为博格达局限性伸展作用为自东向西发展。

参考文献(References):

陈振宇,王登红. 锆石 Th、U 含量和 Th/U 比值对产铀、不产铀花岗岩体的判别意义[J]. 矿床地质,2014,33(s1):

1159-1160.

CHEN Zhenyu, WANG Denghong. Content of Th、U and ratio of Th/U for zircon has important significance to uranium granite[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(s1): 1159-1160(in Chinese with English abstract).

崔方磊,汪晓伟,徐学义,等. 东天山七角井-巴里坤地区辉绿岩脉年代学及岩石成因[J]. 西北地质, 2015, 48(2): 43-56.

CUI Fanglei, WANG Xiaowei, XU Xueyi, et al. Geochronology and genesis of the diabase-dykes from qijiaoing-balikun area in eastern tianshan mountain[J]. Northwest-ern Geology, 2015, 48(2): 43-56(in Chinese with English abstract).

高景刚,李文渊,郭新成,等. 新疆博格达东缘色皮口一带辉绿岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 新疆地质, 2013, 31(2): 117-123.

GAO Jinggang, LI Wenyuan, GUO Xincheng, et al. Studies on the geochemistry, zircon u-pb age and geological significance of diabase in the sepikou region, eastern bogda, xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(2): 117-123(in Chinese with English abstract).

高秦,于津海,朱光磊. 地幔组成差异对扬子地块和华夏地块西延边界的限定:来自幔源岩脉的地球化学证据[J]. 地球化学, 2019, 48(01): 11-31.

GAO Qin, YU Jinhai, ZHU Guanglei. Geochemistry of certain mantle-derived dykes: Constraint on the western boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. Geochemica, 2019, 48(01): 11-31(in Chinese with English abstract).

顾连兴,胡受奚,于春水,等. 博格达陆内碰撞造山带挤压-拉张构造转折期的侵入活动[J]. 岩石学报, 2001, 17(2): 187-198.

GU Lianxing, HU Shouxi, YU Chunshui, et al. Intrusive activities during compression-extension tectonic conversion in the Bogda intracontinental orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(2): 187-198(in Chinese with English abstract).

靳刘圆,刘伟,朱志新,等. 博格达三个山地区基性岩墙 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 新疆地质, 2014, 32(3): 316-321.

JIN Liuyuan, LIU Wei, ZHU Zhixin, et al. U-Pb Age, Geochemistry and Tectonic Implications of Mafic Dyke in Sangeshan, Bogda[J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(3):

- 316-321(in Chinese with English abstract).
- 雷万杉,许鹏,郭俊锋,等. 博格达山东段苏吉山辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地质地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评,2016,62(2):317-330.
- LEI Wanshan,XU Peng,GUO Junfeng,et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating,geological and geochemical features of sujishan gabbro pluton, eastern bogda mountains,and their tectonic significances[J]. Geological Review,2016,62(2):317-330(in Chinese with English abstract).
- 李江涛,何学锋,杨鹏涛,等. 新疆东天山博格达造山带西段基性侵入岩的 U-Pb 年代学、地球化学及其构造意义[J]. 地质科技情报,2018,37(1):96-107.
- LI Jiangtao,HE Xuefeng,YANG Pengtao,et al. U-Pb dating,geochemical and tectonic significances of basic intrusive rocks from the west of bogda orogenic belt,eastern xinjiang[J]. Geological Science and Technology Information,2018,37(1):96-107(in Chinese with English abstract).
- 李锦轶,王克卓,李文铅,等. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. 地质论评,2004,50(3):304-322.
- LI Jinyi,WANG Kezhuo,LI Wenqian,et al. Late Neoproterozoic and Paleozoic framework and evolution of eastern Xinjiang,northwestern China[J]. Geological Review,2004,50(3):304-322(in Chinese with English abstract).
- 李耀崧,朱杰辰,夏毓亮. 锆石特征及铀含量在铀成矿远景评价中的意义[J]. 中国核科技报告,1995,S2:283-297.
- LI Yaosong,ZHU Jiechen,XIA Yuliang. Significance of zircon characteristics and uranium content in uranium met-allogenic prospect evaluation[J]. China Nuclear Science and Technology Report,1995,S2:283-297(in Chinese with English abstract).
- 刘彬,马昌前,蒋红安,等. 东昆仑早古生代洋壳俯冲与碰撞造山作用的转换:来自胡晓钦镁铁质岩石的证据[J]. 岩石学报,2013,29(6):2093-2106.
- LIU Bing,MA Changqin,JIANG Hongan,et al. Early Paleozoic tectonic transition from ocean subduction to collisional orogeny in the Eastern Kunlun region: Evidence from Huxiaoqin mafic rocks[J]. Acta Petrologica Sinica,2013,29(6):2093-2106(in Chinese with English abstract).
- 卢成忠,杨树锋,顾明光,等. 浙江次坞地区晋宁晚期双峰式岩浆杂岩带的地球化学特征:Rodinia 超大陆裂解的岩石学记录[J]. 岩石学报,2009,25(1):67-76.
- LU Chengzhong,YANG Shufeng,GU Mingguang,et al. Geochemical characteristics of Late Jinningian bimodal magmatic complex suite in the area of Ciwu,Zhejiang: Petrological record of Rodinia supercontinent break[J]. Acta Petrologica Sinica,2009,25(1):67-76(in Chinese with English abstract).
- 罗婷. 中亚造山带西南缘石炭纪火山岩岩石成因、时空演化及其构造意义[D]. 武汉:中国地质大学,2016.
- LUO Ting. Carboniferous Volcanic Rocks in Southwestern Central Asian Orogenic Belt: Petrogenesis, Temporal and Spatial Evolution and Associated Geodynamic Processes[D]. Wu Han: China University of Geosciences,2016. (in Chinese with English abstract).
- 齐有强,胡瑞忠,刘燊,等. 岩浆混合作用研究综述[J]. 矿物岩石地球化学通报,2008,27(4):409-416.
- QI Youqiang,HU Ruizhong,LIU Shen,et al. Review on Magma Mixing and Mingling[J]. Bull Mineral, Petrol Geochem,2008,27(4):409-416(in Chinese with English abstract).
- 屈翠霞. 新疆东天山及邻区石炭-二叠纪中基性岩浆岩成因演化及构造意义[D]. 西安:长安大学,2015.
- QU Cuixia. The cause evolution and tectonic implications of the late Carboniferous-early Permian Intermediate-mafic Magmatic rocks in the East Tianshan and Its Adjacent Area, Xinjiang[D]. Xi'an:Chang'an University,2015(in Chinese with English abstract).
- 孙吉明,白建科,朱小辉,等. 东天山博格达造山带东段七角井组枕状玄武岩地球化学特征及构造背景探讨[J]. 地质学报,2018,92(3):520-530.
- SUN Jiming,BAI Jianke,ZHU Xiaohui,et al. Geochemistry of the Qijiaoing formation pillow basalt in orogenic belt,east tianshan and its implications for the eastern bogda tectonic setting[J]. Acta Geologica Sinica,2018,92(3):520-530(in Chinese with English abstract).
- 孙林华,王岳军,范蔚茗,等. 新疆巴楚辉绿岩岩脉的岩石成因和大地构造意义[J]. 岩石学报,2007,23(6):1369-1380.
- SUN Lihua,WANG Yuejun,FAN Weiming,et al. Petrogenesis and tectonic significances of the diabase dikes in the Bachu area,Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica,

- 2007, 23 (6): 1369-1380 (in Chinese with English abstract).
- 汪晓伟, 徐学义, 马中平, 等. 博格达造山带东段早石炭世火山岩地球化学特征及构造属性[J]. 地质与勘探, 2015, 51(1): 108-122.
- WANG Xiaowei, XU Xueyi, MA Zhongping, et al. Geochemistry and tectonic setting of the early carboniferous volcanic rocks in the eastern section of the bogda orogenic belt in Xinjiang[J]. Geology and Exploration, 2015, 51 (1): 108-122 (in Chinese with English abstract).
- 王金荣, 李泰德, 田黎萍, 等. 新疆博格达造山带东段晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及其地球化学证据[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1103-1115.
- WANG Jinrong, LI Taide, TIAN Liping, et al. Late Paleozoic tectono-magmatic evolution in Bogda Orogenic Belt, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1103-1115 (in Chinese with English abstract).
- 夏冬, 彭玉旋, 罗照华, 等. 新疆石炭-二叠纪双亚幔柱特征及其对矿产资源的约束[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 10-23.
- XIA Dong, PENG Yuxuan, LUO Zhaohua, et al. Characteristic of Carboniferous-Permian Double Sub-mantle Plumes in Xinjiang and Their Constraints on Mineral Resources [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 10-23 (in Chinese with English abstract).
- 夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等. 天山石炭-二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱[J]. 西北地质, 2006, 39(1): 1-49.
- XIA Linqi, LI Xiangmin, XIA Zuchun, et al. Carboniferous-permian rift-related volcanism and mantle plume in the Tianshan, Northwestern China[J]. Northwestern Geology, 2006, 39(1): 1-49 (in Chinese with English abstract).
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山古生代洋陆转化特点的几点思考[J]. 西北地质, 2002b, 35(4): 9-20.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi, et al. Some thoughts on the characteristics of Paleozoic oceancontinent transition from Tianshan mountains [J]. Northwestern Geology, 2002b, 35(4): 9-20 (in Chinese with English abstract).
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 77-88.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi, et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26(1): 77-88 (in Chinese with English abstract).
- 徐学义, 马中平, 夏林圻, 等. 北天山巴音沟蛇绿岩形成时代的精确厘定及意义[J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27(02): 17-20.
- XU Xueyi, MA Zhongping, XIA Linqi, et al. Accurate dating of Bayingou ophiolite in northern Tianshan mountains and its tectonic significance [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27(02): 17-20 (in Chinese with English abstract).
- 曾孝文, 王明, 范建军, 等. 藏北阿索地区早白垩世基性岩脉地球化学及年代学特征: 对班公湖-怒江洋闭合时限的约束[J]. 地球科学, 2019, 44(7): 2408-2425.
- ZENG Xiaowen, WANG Ming, FAN Jianjun, et al. Geochemistry and Chronological Characteristics of the Early Cretaceous Mafic Dikes in the Asia Area, North Tibet: Constraints on the Closure Time of the Bangong-Nujiang Ocean [J]. Editorial Committee of Earth Science, 2019, 44(7): 2408-2425 (in Chinese with English abstract).
- 张航, 柏勇, 徐争启, 等. 攀枝花大田地区辉绿岩脉岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2018, 38(04): 32-40.
- ZHANG Hang, BAI Yong, XU Zhengqi, et al. Geochemical characteristics and geological significance of diabase vein rocks in datian area of panzhihua [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2018, 38(04): 32-40 (in Chinese with English abstract).
- 张进江, 商姗, 魏春景, 等. 大陆岩石圈流变学研究的发展现状与前景[J]. 地球学报, 2019, 40(1): 12-19.
- ZHANG Jinjiang, SHANG Shan, WEI Chunjing, et al. Present Status and Development Prospect of Studies of Rheology of Continental Lithosphere [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2019, 40(1): 12-19 (in Chinese with English abstract).
- 赵磊, 牛宝贵, 徐芹芹, 等. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩带两侧志留-石炭系沉积和构造特征分析及其意义[J]. 中国地质, 2019, 46(3): 615-628.
- ZHAO Lei, NIU Baogui, XU Qinqin, et al. An analysis of Silurian-Carboniferous sedimentary and structural char-

- acteristics on both sides of Karamaili ophiolitic belt of Xinjiang and its significance[J]. *Geology in China*, 2019, 46(3): 615-628 (in Chinese with English abstract).
- 赵霞,贾承造,张光亚,等. 准噶尔盆地东-五彩湾地区石炭系中、基性火山岩地球化学及其形成环境[J]. *地学前缘*, 2008,15(2):272-279.
- ZHAO Xia, JIA Chengzao, ZHANG Guangya, et al. Geochemistry and tectonic settings of Carboniferous intermediate-basic volcanic rocks in Ludong-Wucuiwan, Junggar basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 272-279(in Chinese with English abstract).
- 郑懋公,朱杰辰. 我国中酸性岩浆岩锆石铀含量变化及其地质意义[J]. *放射性地质*, 1984, 3:17-22.
- ZHENG Maogong, ZHU Jiechen. Variation of zircon uranium content of magmatic rocks and its geological significance [J]. *Uranium of Geology*, 1984, 3:17-22.
- 周晶,季建清,韩宝福,等. 新疆北部基性岩脉⁴⁰Ar/³⁹Ar年代学研究[J]. *岩石学报*, 2008, 24(5):997-1010.
- ZHOU Jing, JI Jianqing, HAN Baofu, et al. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Geochronology of mafic dykes in north Xinjiang [J]. *Acta Petrologica sinica*, 2008, 24(5): 997-1010 (in Chinese with English abstract).
- 左国朝,梁广林,陈俊,等. 东天山觉罗塔格地区夹白山一带晚古生代构造格局及演化[J]. *地质通报*, 2006, 25(1): 48-57.
- ZUO Guochao, LIANG Guanglin, CHEN Jun, et al. Late Paleozoic tectonic framework and evolution in the Jiabaisihan area Qoltag, eastern Tianshan Mountains, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 25(1): 48-57(in Chinese with English abstract).
- 刘亮,李江涛,杨鹏涛,等. 新疆博格达造山带石炭纪的构造属性:来自辉长岩年代学与地球化学的证据[J]. *中国地质*, 2020, 47(3): 725-741.
- LIU Liang, LI Jiangtao, YANG Pengtao, et al. The Carboniferous tectonic attributes of the Bogda orogenic belt in Xinjiang: Evidence from gabbro chronology and geochemistry[J]. *Geology in China*, 2020, 47(3): 725-741 (in Chinese with English abstract).
- Albarede F. How deep do common basaltic magmas form and differentiate? [J]. *Geophys. Res.*, 1992, 97:10997-11009.
- Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: Identification and significance[J]. *Lithos*, 1989, 23:1-18.
- Deniel C. Geochemical and isotopic (Sr, Nd, Pb) evidence for plume-lithosphere interactions in the genesis of Grande Comore magmas (Indian Ocean)[J]. *Chem. Geol.*, 1998, 144:281-303.
- Frey FA, Prinz M. Ultramafic inclusion from San Carlos, Arizona: petrologic and geochemical data bearing on their petrogenesis[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1978, 38:129-176.
- Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[M]. New York: John Wiley and Sons, 1982:525-548.
- Sun, McDonough. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London Special Publications*, 1989, 42(1):313-345.
- Basins. *Geological Society*[J], London, Special Publications, 1989, 42:313-345.
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, et al. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis [J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40:1399-1424.