https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.327

西昆仑麻扎达坂辉绿岩墙的成因:来自年代学和地球化学证据

查显锋[1,2],高晓峰[1],李 平[1],计文化[1]

1.中国地质调查局西安地质调查中心,造山带地质研究中心,陕西西安 710054

2.自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室,陕西西安 710054

摘要:西昆仑造山带显生宙以来经历了原特提斯洋和古特提斯洋两个重要的演化阶段.目前对古特提斯洋构造过程的认识仍然存在较大争议.通过对麻扎达坂辉绿岩墙进行详细的野外地质、岩石学、锆石U-Pb年代学及岩石地球化学研究,结果表明,辉绿岩锆石U-Pb谐和年龄为287±4.6 Ma,代表了辉绿岩浆的结晶年龄,表明该辉绿岩墙为早二叠世岩浆活动的产物.辉绿岩的SiO_2含量为48.29%~50.21%,低$Mg^{\#}$值(0.36~0.39),属亚碱性拉斑系列玄武岩.辉绿岩富集LREE、LILE(如Rb、Ba、Sr),亏损Nb-Ta、P等高场强元素,总体表现出类似岛弧火山岩的地球化学特征.同时,麻扎达坂辉绿岩锆石Hf同位素组成($\varepsilon_{Hf}(t)$=4.00~13.71,平均值为7.61,T_{DM1}(Hf)=0.76~0.38 Ga)说明其不是来源于类似N-MORB的亏损地幔源区.区域地质研究表明,西昆仑及以北塔里木克拉通在早二叠世处于伸展构造背景,不存在同期的俯冲消减事件,倾向于认为麻扎达坂辉绿岩墙是在造山后伸展背景下,早期俯冲流体交代的岩石圈地幔部分熔融形成的原始岩浆经过一定程度的分异结晶沿区域性断裂侵位形成的,而与塔里木地幔柱不具有地球动力学上的联系.

关键词:辉绿岩墙;锆石U-Pb测年;地球化学;西昆仑造山带;地质年代学.

中图分类号:P59 **文章编号**:1000-2383(2018)12-4269-14 **收稿日期**:2018-09-12

Origin of Diabase Dykes in Mazar Area in West Kunlun Orogenic Belt: Evidences from Zircon U-Pb Dating and Geochemistry

Zha Xianfeng[1,2], Gao Xiaofeng[1], Li Ping[1], Ji Wenhua[1]

1.*Xi'an Center of Geological Survey, Orogen Research Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, China*

2.*Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China*

Abstract: The West Kunlun orogenic belt underwent the tectonic process of Proto- and Paleo-Tethys Oceans since Phanerozoic. However, there is still much controversy over the evolution of the Paleo-Tethys Ocean. Geochemistry and zircon U-Pb and Hf isotopic compositions of the diabase dykes in Mazar, West Kunlun are reported in this paper. Zircon U-Pb dating results give an emplacement age of 287±4.6 Ma for the Mazar diabase. These rocks span a SiO_2 range of 48.29%-50.21% and $Mg^{\#}$ (0.36-0.39), characterized by moderate LREE/HREE fractionation, strong LILEs (such as Rb, Ba, Sr) enrichment and depleted Nb-Ta, P and weakly Eu depletion. They have more radiogenic zircon Hf isotopic compositions ($\varepsilon_{Hf}(t)$=4.00-13.71, average value is 7.61) than N-MORB. In combination with the evolution of regional geology, it is suggested that these melts were derived from partial melting of an enriched lithospheric mantle that underwent early subducted fluid metasomatization. The origin of the Mazar diabase dykes indicates that the post-orogenic extension in West Kunlun, from Late Devonian to Early Permian,

基金项目:国家科技支撑课题(No.2015BAB05B01);中国地质调查局项目(No.DD20160002);陕西省自然科学基金项目(Nos.2013KJXX-68,2017JM4001).

作者简介:查显锋(1984-),男,硕士,助理研究员,主要从事构造地质学及区域地质相关专业研究.ORCID:0000-0002-7471-1169.
E-mail:zha_xianfeng@126.com

引用格式:查显锋,高晓峰,李平,等,2018.西昆仑麻扎达坂辉绿岩墙的成因:来自年代学和地球化学证据.地球科学,43(12):4269-4282.

may be not related to the Tarim mantle plume.

Key words: diabase dyke; zircon U-Pb age; geochemistry; West Kunlun orogenic belt; geochronology.

0 引言

西昆仑造山带属于中央造山带最西端，南北分别与青藏高原与塔里木盆地相接，西邻帕米尔高原，向东以南阿尔金断裂为界与东昆仑造山带相分割. 已有的研究表明，早古生代—三叠纪期间，西昆仑经历了原特提斯洋和古特提斯洋俯冲消减过程而形成了复合造山带(Wang *et al.*, 2001; Xiao *et al.*, 2002, 2005; 李荣社等, 2007; 杨军等, 2015; Zhang *et al.*, 2016, 2017). 目前，在区域上已发现和报道了大量新元古代—早古生代及三叠纪岩浆作用事件(Zhang *et al.*, 2003; 王超等, 2009, 2013; 高晓峰等,

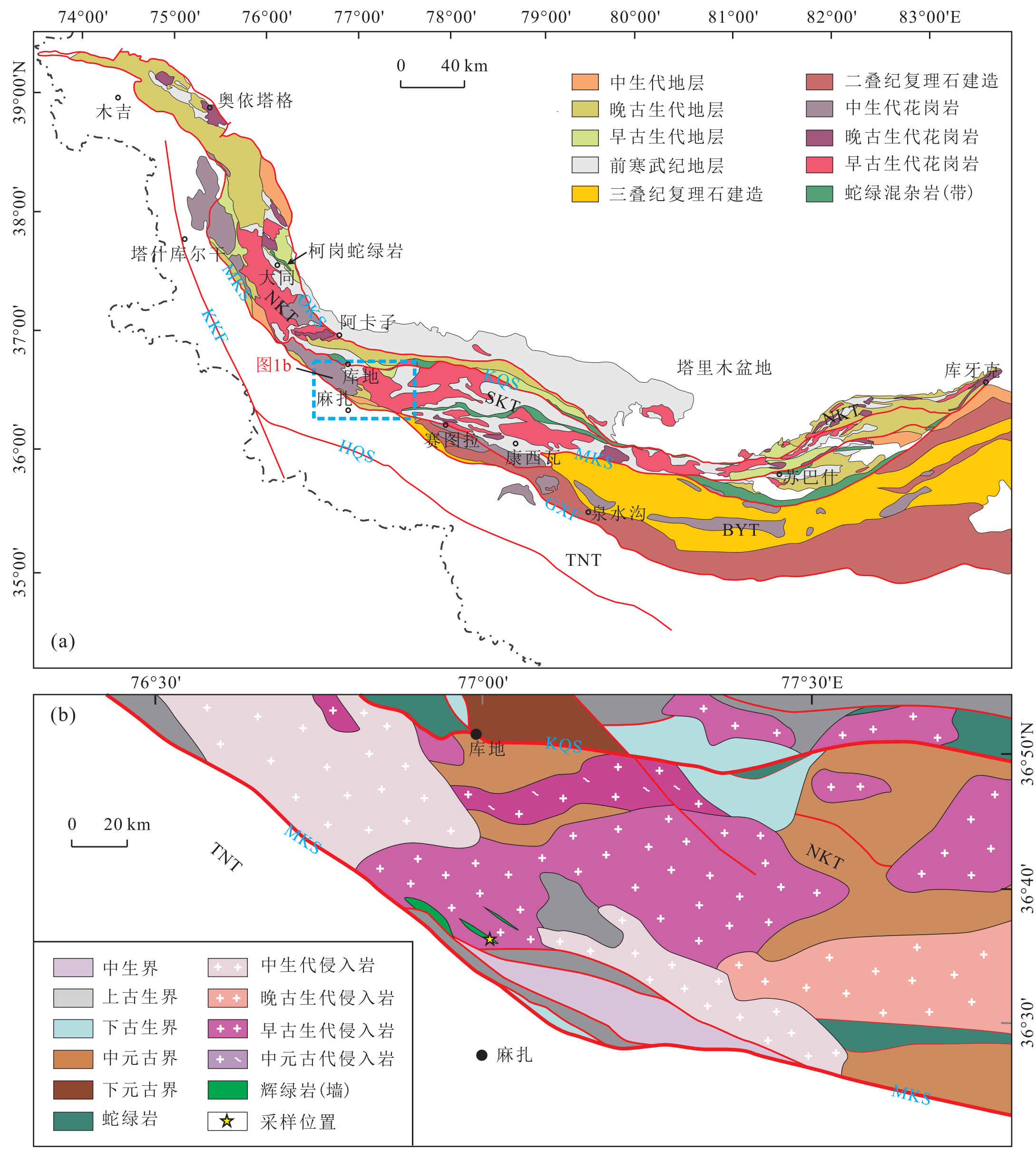

图 1 西昆仑造山带(a)和麻扎地区(b)地质简图

Fig.1 Schematic geological maps of the West Kunlun orogenic belt (a) and Mazar area (b)

据李荣社等(2008)和王超等(2013). OKS.奥依塔格—柯岗断裂带；KQS.库地—其曼于特蛇绿岩带；MKS.麻扎—康西瓦—苏巴什蛇绿岩带；GXF.郭扎错—西金乌兰断裂；KKF.喀喇昆仑断裂；HQS.红山湖—乔尔天山断裂；NKT.昆北地体；SKT.昆南地体；BYT.巴颜喀拉地体；TNT.甜水海—北羌塘地块

2013a，2013b；张辉善等，2016），为揭示原特提斯洋的裂解－闭合和古特提斯洋的构造过程提供了丰富详实的构造－岩浆证据.

早古生代存在以库地－其曼于特蛇绿构造混杂岩带为代表的洋盆消减闭合过程，区域上广泛出露的泥盆纪磨拉石建造（奇自拉夫组）标志着造山作用的结束基本取得了共识（陈守建等，2007）；而晚古生代－早中生代古特提斯洋演化过程仍存在较大争议.例如对以苏巴什蛇绿岩为代表的洋盆打开时限的认识存在早古生代和晚古生代两种截然不同的观点（韩芳林等，2004；计文化等，2004；李博秦等，2007）.晚古生代洋盆的消减极性和闭合时限也存在较大的分歧：一类观点认为麻扎－康西瓦一带于石炭纪开始消减（李博秦等，2006）；另一种观点认为，西昆仑早石炭世处于伸展拉张构造背景（贠杰等，2015；陈宁等，2016），西昆仑东段下二叠统阿羌组上段大量安山岩的出现标志着由强烈的扩张转化为收缩（李荣社等，2008）.从已报道的资料来看，产生这些分歧的原因在于西昆仑地区岩浆活动主要发育于早古生代和中生代，而晚古生代（特别是石炭纪－二叠纪）的岩浆作用（特别是中－基性岩浆）相对匮乏，以及同期沉积岩保存相对较少，因而在较大程度上制约了人们对晚古生代构造－岩浆过程的详细刻画.

本文以康西瓦－苏巴什深大断裂附近侵入早古生代二长花岗岩体中的辉绿岩墙（图 1b）为研究对象，通过系统的岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征分析，结合区域构造背景资料，揭示其岩石成因及深部的动力学过程，为衔接原特提斯洋和古特提斯洋转换过程或古特提斯洋消减时限提供可能的制约.

1　区域地质概况及岩石学特征

西昆仑造山带由北向南可划分为（图 1a）昆北地体（NKT）和昆南地体（SKT），包括 3 条主缝合带（奥依塔格－柯岗缝合带、库地－其曼于特缝合带和麻扎－康西瓦－苏巴什缝合带）（李荣社等，2008）.麻扎达坂辉绿岩墙位于麻扎达坂北坡，南邻麻扎－康西瓦－苏巴什蛇绿构造混杂岩带，构造上处于南昆仑地体，发育大量早古生代和中生代侵入体.露头上辉绿岩墙侵入围岩为早古生代二长花岗岩，岩墙产状陡倾，走向约为 290°，延伸稳定，呈脉群平行产出（图 2），单个脉体宽为 1～5 m.辉绿岩呈灰黑－灰绿色，块状构造、细粒状结构，弱绿帘石化，岩石局部发育裂隙，并被方解石充填.辉绿岩样品采集于 G

图 2　麻扎辉绿岩墙野外露头特征

Fig.2　The field occurrence of Mazar diabase dykes

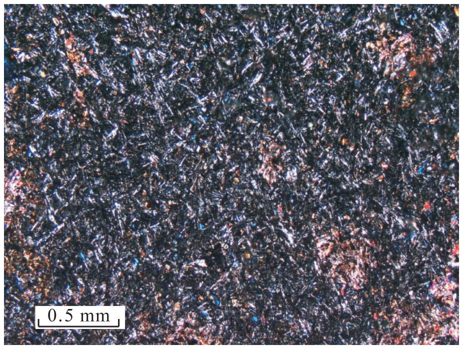

图 3　麻扎辉绿岩显微镜下特征

Fig.3　The micrograph of Mazar diabase

219 公路 196 km 处，地理坐标为 36°41′07″N、77°09′29″E，H＝4 099 m.

辉绿岩显微镜下呈块状构造、局部发育杏仁状构造，细粒－少斑结构，少量斑晶为斜长石（约25%），粒径为 0.2～0.4 mm；基质主要由斜长石组成，其次为暗色矿物、金属矿物钛铁矿和火山玻璃.斜长石矿物晶体呈小板条状杂乱分布，其空隙充填辉石、火山玻璃及金属矿物，呈间隐间粒结构.部分辉石被绿帘石交代，火山玻璃发育脱玻化被绿泥石交代.岩石中有少量杏仁构造，形态不规则，粒径为 0.6～1.7 mm，充填绿泥石、长石等（图 3）.

2　分析测试方法

野外采集新鲜、弱蚀变辉绿岩系列样品（15KD02）.锆石样品是从辉绿岩脉样品中经人工重砂、电磁选，在双目镜下挑选得到.锆石CL图像及

锆石原位分析测定是在西安地质矿产研究所实验测试中心完成.其中,锆石 LA-ICP-MS 年龄和 Hf 同位素分析采用 Agilent 7500 型 ICP-MS 进行联机测试,激光斑束为 30 μm.测试结果通过 GLITTER 4.4.1 软件进行计算,并进行了普通铅校正.详细分析步骤和数据处理方法参考 Meng *et al*.(2017).

辉绿岩主、微量元素分析在西安地质矿产研究所实验测试中心用 X 荧光光谱(XRF)和等离子光谱质谱法(ICP-MS)测定,其中主量元素的分析测试误差小于1%,FeO 含量通过湿化学方法进行测定;微量元素分析误差在5%以内.

3 辉绿岩锆石 U-Pb 年龄

来自辉绿岩脉中的锆石呈浅黄色—白色,长柱状、不规则状,少量圆形,粒径为 50~200 μm,CL 图像中锆石振荡环带发育,呈岩浆锆石的形态特征;锆石 Th/U 比值为 0.42~0.61(表1),位于岩浆锆石的比值范围内.锆石 U-Pb 同位素年龄在谐和图上较为集中(图4),14个测点的加权平均年龄为287±4.6 Ma(n=14,MSWD=0.11),与谐和年龄在误差范围内一致,可代表辉绿岩脉锆石的结晶年龄.

4 辉绿岩元素地球化学特征和 Hf 同位素组成

辉绿岩主、微量元素的分析结果见表2.主、微量元素经100%无水化处理后,辉绿岩的 SiO_2 含量为 48.29%~50.21%,Al_2O_3 含量为 17.72%~19.17%,MgO 含量为 4.46%~5.36%,Na_2O 含量为 2.88%~3.22%,K_2O 含量为 1.53%~2.68%,$Mg^{\#}$ =0.36~0.39.在 $Zr/TiO_2\times 0.0001-Nb/Y$ 图解上,辉绿岩样品落入亚碱性玄武岩区,在 FeOt/MgO−SiO_2 分类图解上属于拉斑玄武岩系列(图5).

在 Harker 图上(图6),随着 SiO_2 含量的增加,MgO、FeOt 明显地一致减少,特别是低的 MgO 含量(均小于5.36%)及低 $Mg^{\#}$(0.36~0.39),反映辉绿岩浆上侵过程经历过较明显的富镁铁矿物如橄榄石、斜方辉石等的分离结晶;CaO、CaO/Al_2O_3 虽不如 MgO、FeOt 减少明显,但也有一定程度的减少,说明含 CaO 的单斜辉石有一定程度的分离结晶;而 Al_2O_3 和 K_2O 有一定程度的减少,Na_2O 基本没有变化,反映斜长石等的分离结晶作用不明显.麻扎辉绿岩明显具有高 MgO、FeOt 和 TiO_2 含量,以及明显低 Na_2O 含量,区别于典型岛弧玄武岩(如 Sunda 岛弧)(Gertisser and Keller, 2003).

在稀土元素球粒陨石标准化配分图解上(图7a),辉绿岩表现出 LREE 略富集的右倾分配模式,$\sum$REE=100.50×10^{-6}~123.30×10^{-6},$(La/Yb)_N$=5.27~5.79,$(La/Sm)_N$=2.12~2.41,$(Dy/Yb)_N$=1.15~1.28,重稀土内部基本不分馏,并具有弱的 Eu 负异常(Eu/Eu^*=0.91~0.94),说明斜长石分异结晶作用不明显.在微量元素蛛网图上(图7b),辉绿岩的微量元素分布型式表现出富集大离子亲石元素(如 Rb、Ba),明显亏损 Nb-Ta、Ti 等元素.辉绿岩的不相容元素比值 Zr/Nb=0.94~1.04,Nb/Ta=0.85~0.96,Zr/Hf=1.22~1.28.总体上,虽然麻扎辉绿岩表现出与典型岛弧玄武岩(如 Sunda 岛弧)相似的稀土和微量分布型式,但是其 Th、U 明显亏损以及 Ti 不明显亏损,说明二者不同的熔融源区类型.

辉绿岩锆石14个测点的 Lu-Hf 同位素分析结

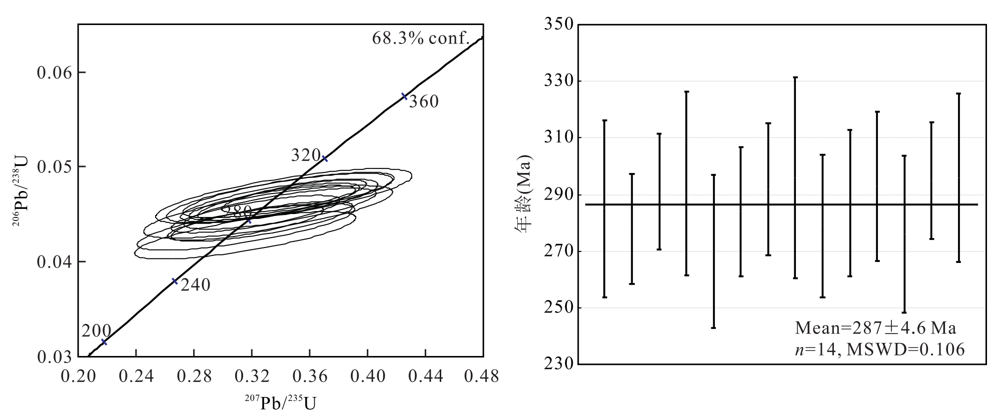

图4 辉绿岩谐和年龄图

Fig.4 The concordia diagrams of the zircons from diabase

表 1　西昆仑麻扎达坂辉绿岩墙（15KD02）锆石 LA-ICP-MS 同位素测年结果

Table 1　LA-ICP-MS U-Pb dating results of the diabase dykes(15KD02) from Mazar

样品测点	同位素比值								同位素年龄(Ma)								同位素含量(10^{-6})		Th/U
	^{207}Pb/^{206}Pb		^{207}Pb/^{235}U		^{206}Pb/^{238}U		^{208}Pb/^{232}Th		^{207}Pb/^{206}Pb		^{207}Pb/^{235}U		^{206}Pb/^{238}U		^{208}Pb/^{232}Th		Th	U	
15KD02-1	0.053	0.009	0.331	0.057	0.045	0.002	0.013	0.001	328	306	291	43	285	11	262	29	45.70	93.77	0.49
15KD02-5	0.052	0.006	0.316	0.036	0.044	0.001	0.014	0.001	279	204	279	28	278	7	284	17	73.72	136.51	0.54
15KD02-10	0.052	0.006	0.334	0.038	0.046	0.001	0.015	0.001	302	208	293	29	291	7	295	18	51.37	96.23	0.53
15KD02-14	0.053	0.008	0.339	0.052	0.047	0.002	0.016	0.001	311	272	297	39	294	11	313	29	45.56	105.43	0.43
15KD02-15	0.053	0.009	0.315	0.051	0.043	0.002	0.016	0.001	346	286	278	39	270	10	326	29	50.83	106.27	0.48
15KD02-16	0.052	0.006	0.323	0.039	0.045	0.001	0.019	0.001	281	216	284	30	284	8	371	23	47.44	98.68	0.48
15KD02-17	0.053	0.006	0.339	0.037	0.046	0.001	0.017	0.001	325	196	296	28	292	8	331	20	90.69	173.65	0.52
15KD02-18	0.053	0.009	0.342	0.059	0.047	0.002	0.018	0.002	322	304	299	44	296	12	354	33	47.54	93.08	0.51
15KD02-20	0.054	0.007	0.327	0.041	0.044	0.001	0.014	0.001	352	227	287	32	279	9	282	20	76.65	151.51	0.51
15KD02-22	0.054	0.007	0.340	0.044	0.046	0.001	0.017	0.001	369	234	297	33	287	9	344	26	38.37	92.35	0.42
15KD02-23	0.053	0.007	0.339	0.045	0.046	0.002	0.017	0.001	325	241	296	34	293	9	349	25	47.56	105.77	0.45
15KD02-26	0.052	0.008	0.316	0.050	0.044	0.002	0.011	0.001	304	282	279	38	276	10	230	21	60.09	98.67	0.61
15KD02-27	0.054	0.005	0.349	0.033	0.047	0.001	0.013	0.001	370	170	304	25	295	7	270	17	72.04	154.75	0.47
15KD02-29	0.053	0.008	0.345	0.048	0.047	0.002	0.015	0.001	339	252	301	36	296	10	300	24	45.39	87.98	0.52

表2 麻扎达坂辉绿岩(15KD02)主量元素(%)和微量元素(10^{-6})含量

Table 2 Major element (%) and trace element (10^{-6}) concentrations of the diabase (15KD02) from Mazar

样品	1	2	3	4	5	6	7
SiO_2	50.15	50.15	48.29	50.11	49.75	49.08	50.21
Al_2O_3	18.14	17.99	19.17	18.17	17.99	18.52	17.72
Fe_2O_3	2.82	2.56	2.50	3.02	3.46	2.72	3.56
FeO	6.26	6.50	6.88	6.05	5.70	6.75	6.00
CaO	6.70	6.83	5.39	7.18	8.09	6.67	6.94
MgO	5.08	5.13	5.16	4.94	4.46	5.36	4.61
K_2O	2.18	1.98	2.69	1.89	1.55	2.08	1.53
Na_2O	2.94	2.88	2.88	2.92	3.00	2.67	3.22
TiO_2	1.10	1.10	1.12	1.10	1.11	1.13	1.14
P_2O_5	0.24	0.22	0.23	0.25	0.24	0.23	0.24
MnO	0.18	0.18	0.25	0.18	0.17	0.19	0.19
LOI	4.17	4.41	5.40	4.13	4.41	4.53	4.58
$Mg^{\#}$	0.39	0.39	0.38	0.38	0.36	0.39	0.36
A/CNK	0.75	0.74	0.90	0.72	0.66	0.78	0.72
A/CN	2.52	2.61	2.50	2.65	2.72	2.79	2.55
Total	99.96	99.93	99.96	99.94	99.93	99.93	99.94
La	21.02	18.23	16.74	19.57	18.68	19.00	19.96
Ce	48.47	44.21	38.51	46.21	45.21	44.21	48.21
Pr	6.12	5.49	5.03	5.87	5.88	5.49	6.06
Nd	23.79	21.12	19.54	23.15	23.52	21.42	23.54
Sm	5.49	5.02	4.65	5.36	5.56	5.05	5.40
Eu	1.61	1.51	1.37	1.55	1.62	1.47	1.58
Gd	4.98	4.60	4.28	4.89	4.90	4.55	5.00
Tb	0.77	0.75	0.66	0.75	0.75	0.70	0.77
Dy	4.50	4.35	3.99	4.42	4.35	4.11	4.59
Ho	0.89	0.86	0.77	0.92	0.87	0.84	0.92
Er	2.47	2.28	2.16	2.53	2.44	2.35	2.50
Tm	0.38	0.34	0.33	0.37	0.36	0.36	0.39
Yb	2.45	2.21	2.15	2.41	2.35	2.32	2.51
Lu	0.36	0.32	0.32	0.36	0.35	0.35	0.38
Y	24.98	22.57	20.58	22.83	23.49	22.80	23.85
Cu	29.2	27.9	14.4	27.7	32.7	24.9	20.4
Pb	10.6	9.2	74.6	14	30.7	9.27	12.4
Zn	130	132	190	131	124	138	153
Cr	28.2	31.2	34.0	29.7	28.0	33.4	28.8
Ni	13.4	12.8	11.6	14.0	10.8	13.8	11.3
Co	25.2	26.3	26.1	26.0	24.6	28.4	25.6
Li	105.0	88.6	133.0	100.0	96.6	117.0	112.0
Rb	90.8	99.9	145.0	103.0	87.2	126.0	95.5
Cs	3.2	4.0	4.6	2.9	2.0	4.5	1.6
Sr	739.0	676.0	576.0	839.0	881.0	629.0	816.0
Ba	528.0	430.0	490.0	494.0	467.0	395.0	487.0
V	202.0	207.0	211.0	208.0	200.0	210.0	204.0
Sc	20.0	21.4	21.0	21.8	19.6	21.4	22.9
Nb	8.56	8.35	7.39	8.53	8.42	8.17	8.71
Ta	0.58	0.56	0.45	0.52	0.52	0.51	0.54
Zr	126	123	114	128	137	122	132
Hf	3.38	3.27	3.07	3.47	3.65	3.15	3.44
Ga	18.4	19.7	21.0	20.3	21.2	19.8	22.1
U	0.98	0.95	0.82	1.02	1.02	0.91	1.33
Th	2.86	2.97	2.57	3.24	3.11	2.91	3.31
Ba/La	25.12	23.59	29.27	25.24	25.00	20.79	24.40
Th/Yb	1.17	1.35	1.20	1.34	1.32	1.26	1.32

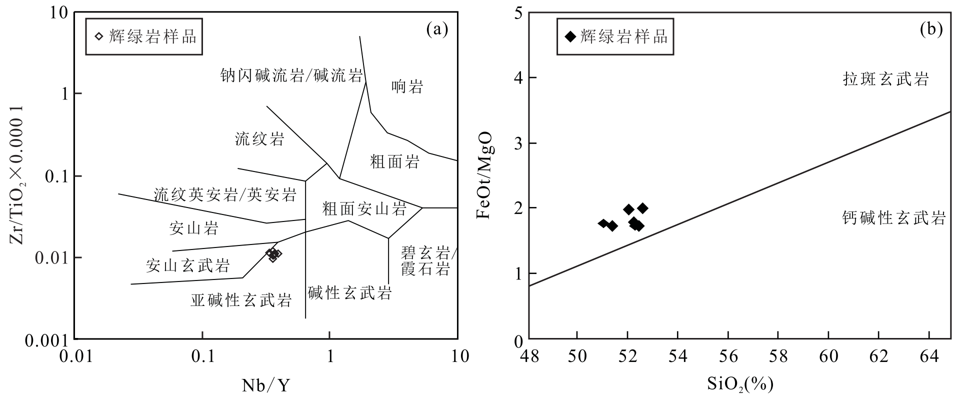

图 5　辉绿岩 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ 图解(a)和 $FeOt/MgO-SiO_2$ 图解(b)

Fig.5　Plots of Zr/TiO_2 vs.Nb/Y (a) and $FeOt/MgO-SiO_2$ (b) showing diabase sample composition variations

a.据 Winchester and Floyd(1977)

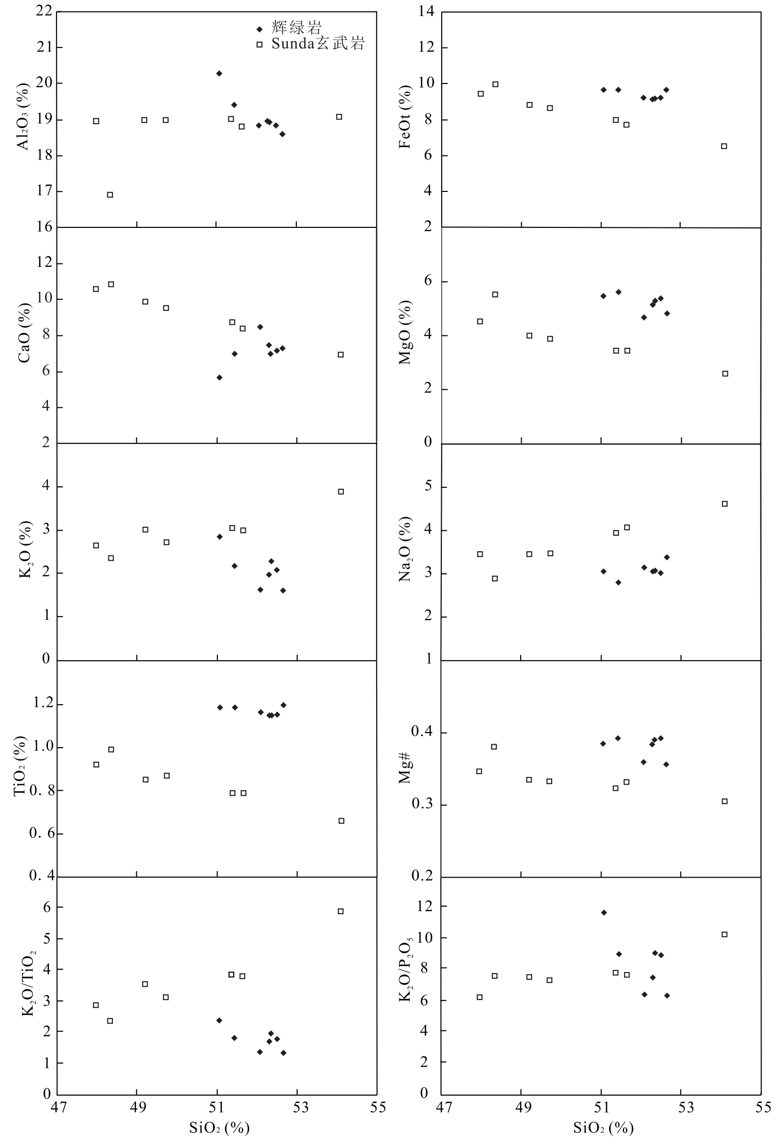

图 6　麻扎达坂辉绿岩 SiO_2－主要氧化物协变图

Fig.6　SiO_2 vs. major oxide plots of Mazar diabase

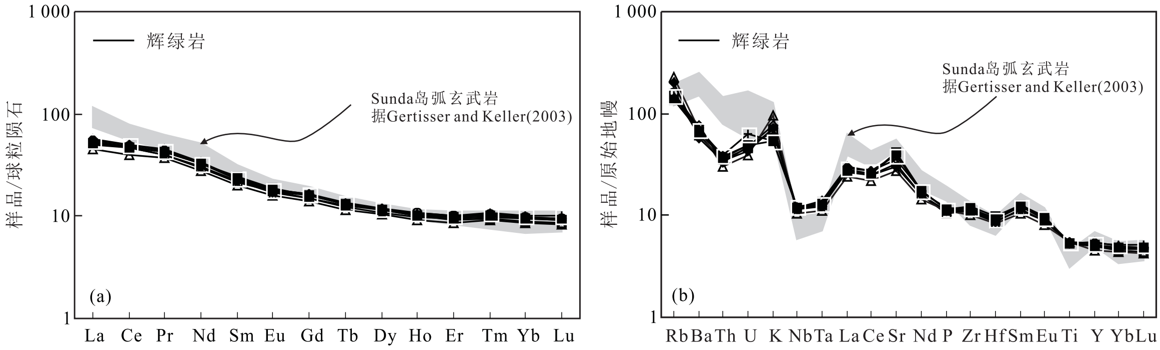

图7 麻扎大坂辉绿岩稀土元素球粒陨石标准化配分图解(a)与微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle normalized spidegram (b) for Mazar diabase

据 Taylor and McLennan(1985);Sun and McDonough(1989)

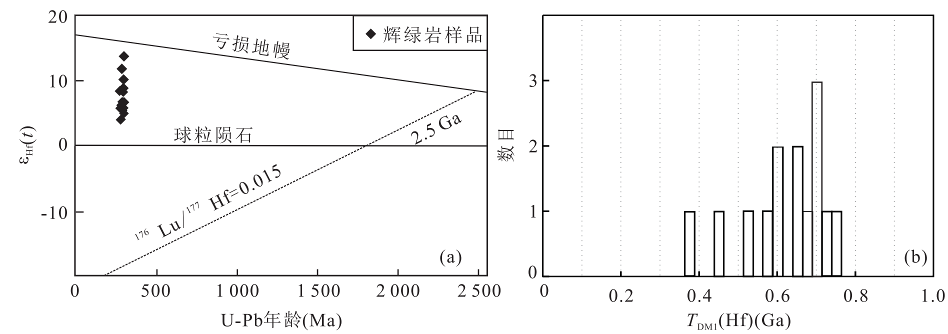

图8 锆石Hf同位素特征(a)及模式年龄频率分布直方图(b)

Fig.8 Temporal variations of ε_{Hf} values (a) and Hf model age histogram (b) of zircons from Mazar diabase

表3 麻扎达坂辉绿岩(15KD02)锆石Hf同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic data of the diabase (15KD02) from Mazar

测点	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	±2σ	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1}(Ga)	T_{DM2}(Ga)	$f_{Lu/Hf}$
15KD02-1	0.054 493	0.001 291	0.282 791	0.000 022	6.72	0.66	0.88	−0.96
15KD02-5	0.040 078	0.000 924	0.282 761	0.000 025	5.74	0.70	0.94	−0.97
15KD02-10	0.044 622	0.001 021	0.282 832	0.000 023	8.24	0.60	0.78	−0.97
15KD02-14	0.073 878	0.001 757	0.282 890	0.000 035	10.14	0.52	0.66	−0.95
15KD02-15	0.081 298	0.001 911	0.282 842	0.000 026	8.41	0.60	0.77	−0.94
15KD02-16	0.079 855	0.001 858	0.282 937	0.000 030	11.78	0.46	0.55	−0.94
15KD02-17	0.068 240	0.001 611	0.282 765	0.000 033	5.77	0.70	0.94	−0.95
15KD02-18	0.105 478	0.002 426	0.282 994	0.000 026	13.70	0.38	0.43	−0.93
15KD02-20	0.056 655	0.001 345	0.282 776	0.000 037	6.19	0.68	0.91	−0.96
15KD02-22	0.053 303	0.001 289	0.282 754	0.000 026	5.42	0.71	0.96	−0.96
15KD02-23	0.074 737	0.001 715	0.282 853	0.000 032	8.84	0.58	0.74	−0.95
15KD02-26	0.032 291	0.000 780	0.282 711	0.000 021	4.00	0.76	1.05	−0.98
15KD02-27	0.036 467	0.000 868	0.282 738	0.000 026	4.95	0.73	0.99	−0.97
15KD02-29	0.042 410	0.000 984	0.282 788	0.000 021	6.67	0.66	0.88	−0.97

果见表3.对应的$^{176}Hf/^{177}Hf$比值为0.282 711～0.282 994,平均值为0.282 817;对应的$\varepsilon_{Hf}(t)$值为4.00～13.70(图8a),平均值为7.61,T_{DM1}(Hf)变化范围为0.76～0.38 Ga(图8b).

5 岩石成因

5.1 岩浆过程

麻扎辉绿岩具有较低的MgO含量(4.46%～5.36%)、$Mg^{\#}$值(0.36～0.39)及Cr(28.0×10^{-6}～

34.0×10^{-6})、Ni(10.8×10^{-6}～14.0×10^{-6})含量，说明其是原始岩浆经过一定程度分异结晶的产物.随着 SiO_2 含量的增加(图 6)，MgO、FeOt 含量减少，说明在岩浆演化过程中经历了辉石等镁铁质矿物的分离结晶，虽然 Al_2O_3 含量也表现出减少的趋势，但是其并没有表现出明显的 Eu 负异常，说明斜长石并不是其主要的分离结晶相，TiO_2 等含量微弱变化，则说明钛铁矿、锆石等副矿物的分离结晶，这些得到岩石组成结构的支持(图 3).

对于大陆岩浆来说，在其上升过程中不可避免的会受到地壳物质的混染.首先，辉绿岩脉与围岩的截然接触界线(图 2)，说明岩浆由深部快速上侵并冷却结晶形成脉岩，与围岩之间的相互反应较少，因此岩浆受到上部地壳混染的可能性不大.由于地壳的 K_2O 高，TiO_2 和 P_2O_5 很低，K_2O/TiO_2、K_2O/P_2O_5 比值较高，若岩浆经历下地壳混染，则岩浆的 K_2O/TiO_2、K_2O/P_2O_5 比值会随 SiO_2 增加而增加，辉绿岩的主要氧化物协变图并没有显示这种正相关关系(图 6).因此，麻扎辉绿岩墙表现出的地球化学特征不是岩浆过程中地壳混染或 AFC 作用的结果，而主要反映了富集的壳源物质参与了其熔融源区.

5.2　熔融源区特征

一般认为大陆亚碱性玄武岩主要包括以下几种方式：(1)软流圈来源，其岩石性质主要取决于岩浆源区和深度(Takahashi *et al.*, 1993; Kushiro, 2001)；(2)软流圈来源岩浆受到地壳混染的影响(Hooper and Hawkesworth, 1993; Hawkesworth *et al.*, 1995)；(3)软流圈源岩浆渗透进入岩石圈，从而导致软流圈源熔体与岩石圈围岩相互作用(MacDonald *et al.*, 2001)；(4)富集岩石圈地幔来源(Zhi *et al.*, 1990; Song *et al.*, 1990).

麻扎辉绿岩明显富集 LILE(如 Rb、Ba)和 LREE、亏损 Nb-Ta 和 HREE 等高场强元素，明显不同于 MORB 和 OIB，同时锆石 Hf 同位素组成明显低于同期亏损地幔同位素组成($\varepsilon_{Hf}(t)=4.00$～13.70，平均值为 7.61，图 8a)，说明其不可能来源于亏损的软流圈.如上论及，麻扎辉绿岩的地球化学特征主要反映了熔融源区的特征，而不是软流圈来源岩浆受到地壳混染或 AFC 过程的产物.在不相容元素 Zr/Y－Zr 和 Ta/Hf－Th/Hf 图解上(图 9)，麻扎辉绿岩落入板内玄武岩范围，同时已有研究结果表明，西昆仑及邻近的塔里木地区在早二叠世期间存在原特提斯洋闭合造山后伸展(并导致古特提斯洋打开)和塔里木地幔柱两种地球动力学体制.塔里木二叠纪大火成岩省主要由两期岩浆活动组成，早期以柯坪一带玄武岩为代表，晚期则以巴楚－皮羌一带的超基性－基性－长英质层状侵入岩和辉绿岩墙群为代表(姜常义等，2004；Yang *et al.*, 2007；厉子龙等，2008；Zhang *et al.*, 2010；李洪颜等，2013；徐义刚等，2013；Deng *et al.*, 2017).区域上二叠纪岩浆活动主要以西昆仑北带棋盘组玄武岩为主(290～284 Ma)，并被认为是塔里木大火成岩省早期岩浆活动的组成部分(Yang *et al.*, 2007；厉子龙等，2008；李洪颜等，2013；徐义刚等，2013).厉子龙等(2008)通过对棋盘组玄武岩研究认为其为地幔柱烘烤下大陆岩石圈地幔发生熔融形成并受到一定程度的地壳混染；李洪颜等(2013)通过 Hf-Nd 同位素解耦关系提出棋盘组玄武岩来源于 Rodinia 聚合过程中俯冲沉积物改造的岩石圈地幔，并根据其更为富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成($^{87}Sr/^{86}Sr(i)=0.7078$～$0.7086$，$\varepsilon_{Nd}(t)=-4.8$～$-3.9$，$\varepsilon_{Hf}(t)=-2.4$～$-1.6$)，提出其熔融源区相比于塔里木内部同期岩浆活动受到更多俯冲物质的交代.通过与同期塔里木大火成岩省棋盘组玄武岩相比，麻扎辉绿岩具有富集 LILE(如 Rb、Ba)和 LREE、亏损 Nb-Ta、Ti 等元素的类似岛弧玄武岩地球化学特征以及更为亏损 Hf 同位素组成，而且，岩石中未发现超镁铁质包体或辉石的反环带结构(张宏福，2006)，说明其不可能是软流圈和岩石圈相互作用的塔里木地幔柱早期岩浆活动产物(徐义刚等，2013).因此，大陆岩石圈地幔是麻扎辉绿岩的可能熔融源区.

对于大陆岩石圈地幔，主要存在板内交代和俯冲交代两种方式来形成相对亏损 HFSE 而富集 LILE、LREE 的地幔源区.板内地幔交代过程包括 2 种：(1)富 CO_2 流体/熔体交代作用(Dupuy *et al.*, 1992)；(2)小比例富碱熔体交代作用(Foley, 1992).前者形成以高度富集 LREE 为特征的地幔源区，在微量元素蛛网图上呈 Zr-Hf 相对 Sm、Eu 的亏损特征；后者形成以富集 LILF 为特征的地幔源区，HFSE 亏损不明显(甚至不亏损)，并且富碱熔体交代地幔形成的岩浆主要为碱性玄武岩.麻扎辉绿岩属亚碱性拉斑玄武岩，表现为富集 LREE、亏损 Nb-Ta 的特征，反映了单一的板内交代过程，无论是富碳酸盐岩还是富碱熔体/流体都难以解释这套岩石元素地球化学特征.在板块俯冲过程中，随着被俯冲洋壳或陆壳达到含水矿物相的脱水条件，被俯冲作用带入的沉积物和板片发生脱水作用，析出相对亏

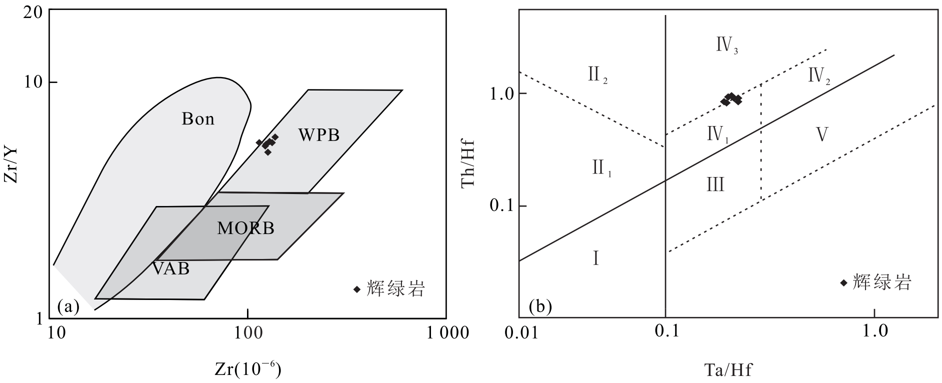

图 9　辉绿岩墙的构造环境判别图

Fig.9　Zr/Y－Zr and Ta/Hf－Th/Hf discrimination diagrams

据 Pearce and Norry(1979)；汪云亮等(2001).Ⅰ.板块离散边缘 N-MORB 区；Ⅱ.板块汇聚边缘区；Ⅱ1.大洋岛弧玄武岩；Ⅱ2.陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩)；Ⅲ.大洋板内洋岛、海山玄武岩及 T-MORB、E-MORB 区；Ⅳ.大陆板内(Ⅳ1.陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区，Ⅳ2.陆内裂谷碱性玄武岩区，Ⅳ3.大陆裂谷带玄武岩区)；Ⅴ.地幔柱玄武岩区

损 HFSE、富集 LILE 和 LREE 的流体/熔体，对上覆的地幔楔进行交代作用(Workman *et al*.，2004).因此，由板片析出的交代介质能够满足麻扎辉绿岩所要求的地幔源区同时具有亏损 HFSE、富集 LILE 和 LREE 的特征.

麻扎辉绿岩表现出富集 LILE(如 Rb、Ba)和 LREE、亏损 HFSE 元素等特征，结合其略微亏损的锆石 Hf 同位素组成($\varepsilon_{Hf}(t)$＝4.00～13.70，平均值为 7.61，T_{DM1}＝0.76～0.38 Ga，t＝287 Ma)，并且区域上不存在同期的俯冲、消减事件或相关岩浆－沉积记录，因此本文倾向于认为辉绿岩岩浆源于早期俯冲消减过程中板片交代富集的岩石圈地幔.在板片(包括洋壳和上覆的沉积物)俯冲过程中，俯冲板片释放的流体和形成的熔体都能造成地幔楔的富集.已有的研究表明，相对于 MORB，岛弧玄武岩富集大离子亲石元素(如 Li、B、Rb、K、Ba)和 Th 及轻稀土元素(LREE)，说明这些元素在俯冲过程中由流体和/或熔体带入到地幔楔，但由于俯冲过程温度及压力等方面的影响，俯冲流体对活动元素(如 Li、B、Rb、K、Ba、U 和 Pb 等)是相容的，而对 Th 和 LREE 等元素是不相容的.相反的是，板片熔融形成的硅质熔体对于 Th 和 LREE 具有较高的相容性(Woodhead *et al*.，2001；Barry *et al*.，2006).因此，通过微量元素的比值(如 Ba/La、Th/Yb)能够有效识别是俯冲流体或熔体造成的地幔楔或岩石圈地幔的富集.麻扎辉绿岩具有较高的 Ba/La 比值(20.79～29.27)和较低 Th/Yb 比值(1.17～1.35)(表 2)，所以区域上岩石圈地幔是由早期俯冲流体交代富集的.已有的研究表明，由于 Hf-Nd 同位素具有强烈的正相关性(Vervoort *et al*.，2011)，因此根据 Hf-Nd 同位素的相互协变关系可以有效识别源区富集的时限，本次工作未能开展 Nd 同位素的研究工作，因此麻扎辉绿岩源区的富集过程仍需进一步的研究确定.

5.3　构造意义

区域上已有的研究表明，西昆仑早古生代期间长期处于原特提斯洋演化阶段(李荣社等，2008；高晓峰等，2013b)的俯冲背景(王超等，2013).志留纪末至早泥盆世，塔里木、柴达木、扬子等地块汇聚到 Gondwana 北缘(Zhang *et al*.，2015)，最终形成 Gondwana 大陆，并导致了中央造山带和华南地区广泛发育早古生代晚期的构造－岩浆及高压变质事件(Zhang *et al*.，2015，2018；查显锋等，2016；施斌等，2016).自泥盆纪研究区转为相对稳定的演化阶段，晚泥盆世广泛发育的挤压－伸展型磨拉石建造(奇自拉夫组)(陈守建等，2007)标志着早古生代构造旋回的终结.晚泥盆世－石炭纪，伴随着古特提斯洋的打开，Gondwana 北缘的微陆块(群)开始裂离(Robinson，2015)，西昆仑地区再次处于区域伸展背景，康西瓦－麻扎－瓦卡结合带以北地区逐步形成堑垒相间的构造格局，从北向南依次为和田大陆边缘台地、昆盖山－阿羌裂谷盆地和西昆仑中隆起带；康西瓦－麻扎－瓦卡地区形成了以苏巴什蛇绿岩为代表的洋盆(计文化等，2004).

目前对西昆仑地区晚古生代裂解－消减构造转换时限仍存在不同认识(李博秦等，2006；李荣社等，2008；Metcalfe，2013；贠杰等，2015；陈宁等，2016).麻扎辉绿岩墙(群)的年代学及地球化学研究表明，

在早二叠世(约 287 Ma)区域尚处于伸展背景.而康西瓦－麻扎－瓦卡以北的地区广泛发育海西期岩浆作用(284～251 Ma)(李荣社等，2008；Wang *et al*.，2016).这些资料表明，约 287 Ma 的基性岩墙可能代表了区域造山期后伸展作用的延续，为伸展－聚合构造体制转换提供了重要的年代学限定.

综合来看，麻扎辉绿岩墙可能是晚泥盆世－三叠纪构造旋回过程中，伸展－汇聚体制转化时最晚期伸展构造的岩浆记录.从全球尺度来看，表明 Gondwana 裂解事件在西昆仑地区可能持续到早二叠世.区域上，中二叠世末期仅在巴颜喀拉地区有残留海盆地，歇武一带残留洋盆，沿昆南一带发育同期碰撞－走滑的构造形迹(250～203 Ma)(查显锋等，2012)，中三叠世末期－晚三叠世的造山运动(伴随同期的大量侵入岩)结束了西昆仑康西瓦－苏巴什以北地区大洋的演化历程(李荣社等，2008)，使其进入板内演化阶段.

6　结论

(1)麻扎辉绿岩墙锆石 U-Pb 年龄为 287±4.6 Ma，为早二叠世岩浆活动的产物.

(2)辉绿岩具有较高 TiO_2 含量、亏损 HFSE 元素、富集 LILE(如 Rb、Ba)和 LREE 等特征，表明麻扎辉绿岩墙是早期俯冲流体交代的岩石圈地幔部分熔融形成的原始岩浆经过一定程度的分异结晶沿区域性断裂侵位形成的.

(3)早二叠世辉绿岩墙的发育标志着西昆仑地区原特提斯洋俯冲、闭合造山期后伸展事件在麻扎地区至少持续到早二叠世.

致谢：论文在成文及修改过程中得到了隋清霖博士的帮助；张传林教授和王超教授细致地审阅了本文，并提出了诸多宝贵意见.作者在此一并致谢！

References

Barry, T. L., Pearce, J. A., Leat, P. T., et al., 2006. Hf Isotope Evidence for Selective Mobility of High-Field-Strength Elements in a Subduction Setting: South Sandwich Islands. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(3－4): 223－244. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.09.034

Chen, N., Wang, J. C., Yang, T., et al., 2016. Age and Tectonic Significance of LA-ICP-MS Zircon U-Pb of the Shangqihan Volcanic Rocks in West Kunlun. *Geological Survey of China*, 3(3): 21－28 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.19388/j.zgdzdc.2016.03.004

Chen, S. J., Li, R. S., Ji, W. H., et al., 2007. The Deposition Characteristics and Tectono-Paleogeographic Environment of Kunlun Orogenic Belt in Late Devonian. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 44－51 (in Chinese with English abstract).

Deng, Y. F., Levandowski, W., Kusky, T., 2017. Lithospheric Density Structure beneath the Tarim Basin and Surroundings, Northwestern China, from the Joint Inversion of Gravity and Topography. *Earth and Planetary Science Letters*, 460: 244－254. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.10.051

Dupuy, C., Liotard, J. M., Dostal, J., 1992. Zr/Hf Fractionation in Intraplate Basaltic Rocks: Carbonate Metasomatism in the Mantle Source. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(6): 2417－2423. https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90198-r

Foley, S., 1992. Vein-Plus-Wall-Rock Melting Mechanisms in the Lithosphere and the Origin of Potassic Alkaline Magmas. *Lithos*, 28(3－6): 435－453. https://doi.org/10.1016/0024-4937(92)90018-t

Gao, X. F., Xiao, P. X., Kang, L., et al., 2013a. Origin of Datongxi Pluton in the West Kunlun Orogen: Constraints from Mineralogy, Elemental Geochemistry and Zircon U-Pb Age. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3065－3079 (in Chinese with English abstract).

Gao, X. F., Xiao, P. X., Kang, L., et al., 2013b. Origin of the Volcanic Rocks from the Ta'axi Region, Taxkorgan Xinjiang and Its Geological Significance. *Earth Science*, 38(6): 1169－1182 (in Chinese with English abstract).

Gertisser, R., Keller, J., 2003. Trace Element and Sr, Nd, Pb and O Isotope Variations in Medium-K and High-K Volcanic Rocks from Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: Evidence for the Involvement of Subducted Sediments in Sunda Arc Magma Genesis. *Journal of Petrology*, 44(3): 457－489. https://doi.org/10.1093/petrology/44.3.457

Han, F. L., Cui, J. T., Ji, W. H., et al., 2004. New Results and Major Progress in Regional Geological Survey of the Yutian County and Bolike Sheets. *Geological Bulletin of China*, 23(5－6): 555－559 (in Chinese with English abstract).

Hawkesworth, C. J., Lightfoot, P. C., Fedorenko, V. A., et al., 1995. Magma Differentiation and Mineralisation in the Siberian Continental Flood Basalts. *Lithos*, 34(1－3): 61－88. https://doi.org/10.1016/0024-4937(95)90011-x

Hooper, P. R., Hawkesworth, C. J., 1993. Isotopic and Geochemical Constraints on the Origin and Evolution of the Columbia River Basalt. *Journal of Petrology*, 34(6): 1203－

1246.https://doi.org/10.1093/petrology/34.6.1203

Ji,W.H.,Han,F.L.,Wang,J.C.,et al.,2004.Composition and Geochemistry of the Subashi Ophiolitic Mélange in the West Kunlun and Its Geological Significance.*Geological Bulletin of China*,23(12):1196-1201 (in Chinese with English abstract).

Jiang,C.Y.,Zhang,P.B.,Lu,D.R.,et al.,2004.Petrogenesis and Magma Source of the Ultramafic Rocks at Wajilitag Region,Western Tarim Plate in Xinjiang.*Acta Petrologica Sinica*,20(6):1433-1444 (in Chinese with English abstract).

Kushiro,I.,2001.Partial Melting Experiments on Peridotite and Origin of Mid-Ocean Ridge Basalt.*Annual Review of Earth and Planetary Sciences*,29(1):71-107. https://doi.org/10.1146/annurev.earth.29.1.71

Li,B.Q.,Yao,J.X.,Ji,W.H.,et al.,2006.Characteristics and Zircon SHRIMP U-Pb Ages of the Arc Magmatic Rocks in Mazar,Southern Yecheng,West Kunlun Mountains.*Geological Bulletin of China*,25(1-2):124-132 (in Chinese with English abstract).

Li,B.Q.,Yao,J.X.,Wang,J.C.,et al.,2007.Composition,Age and Geological Significance of the Liushitage Volcanics in West Kunlun Mountains.*Acta Petrologica Sinica*,23(11):2801-2810 (in Chinese with English abstract).

Li,H.Y.,Huang,X.L.,Li,W.X.,et al.,2013.Age and Geochemistry of the Early Permian Basalts from Qimugan in the Southwestern Tarim Basin.*Acta Petrologica Sinica*,29(10):3353-3368 (in Chinese with English abstract).

Li,R.S.,Ji,W.H.,Yang,Y.C.,et al.,2008.Geology of Kunlun Mountains and Adjacent Regions.Geological Publishing House,Beijing,271-317 (in Chinese).

Li,R.S.,Ji,W.H.,Zhao,Z.M.,et al.,2007.Progress in the Study of the Early Paleozoic Kunlun Orogenic Belt.*Geological Bulletin of China*,26(4):373-382 (in Chinese with English abstract).

Li,Z.L.,Yang,S.F.,Chen,H.L.,et al.,2008.Chronology and Geochemistry of Taxinan Basalts from the Tarim Basin: Evidence for Permian Plume Magmatism.*Acta Petrologica Sinica*,24(5):959-970(in Chinese with English abstract).

MacDonald,R.,Rogers,N.W.,Fitton,J.G.,et al.,2001. Plume-Lithosphere Interactions in the Generation of the Basalts of the Kenya Rift,East Africa.*Journal of Petrology*,42(5):877-900.https://doi.org/10.1093/petrology/42.5.877

Meng,E.,Wang,C.Y.,Li,Y.G.,et al.,2017.Zircon U-Pb-Hf Isotopic and Whole-Rock Geochemical Studies of Paleoproterozoic Metasedimentary Rocks in the Northern Segment of the Jiao-Liao-Ji Belt,China:Implications for Provenance and Regional Tectonic Evolution.*Precambrian Research*,298:472-489.https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.004

Metcalfe,I.,2013.Gondwana Dispersion and Asian Accretion:Tectonic and Palaeogeographic Evolution of Eastern Tethys.*Journal of Asian Earth Sciences*,66:1-33.https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.020

Pearce,J.A.,Norry,M.J.,1979.Petrogenetic Implications of Ti,Zr,Y,and Nb Variations in Volcanic Rocks.*Contributions to Mineralogy and Petrology*,69(1):33-47. https://doi.org/10.1007/bf00375192

Robinson,A.C.,2015.Mesozoic Tectonics of the Gondwanan Terranes of the Pamir Plateau.*Journal of Asian Earth Sciences*,102:170-179.https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.09.012

Shi,B.,Zhu,Y.H.,Zhong,Z.Q.,et al.,2016.Petrological,Geochemical Characteristics and Geological Significance of the Caledonian Peraluminous Granites in Heihai Region,Eastern Kunlun.*Earth Science*,41(1):35-54 (in Chinese with English abstract).https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.003

Song,Y.,Frey,F.A.,Zhi,X.C.,1990.Isotopic Characteristics of Hannuoba Basalts,Eastern China:Implications for Their Petrogenesis and the Composition of Subcontinental Mantle.*Chemical Geology*,88(1/2):35-52. https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90102-d

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.https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19

Takahashi,E.,Shimazaki,T.,Tsuzaki,Y.,et al.,1993.Melting Study of a Peridotite KLB-1 to 6.5 GPa,and the Origin of Basaltic Magmas.*Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A:Physical and Engineering Sciences*,342(1663):105-120.https://doi.org/10.1098/rsta.1993.0008

Taylor,S.R.,McLennan,S.M.,1985.The Continental Crust:Its Composition and Evolution.*Geological Magazine*,122(6):673.https://doi.org/10.1017/s0016756800032167

Vervoort,J.D.,Plank,T.,Prytulak,J.,2011.The Hf-Nd Isotopic Composition of Marine Sediments.*Geochimica et Cosmochimica Acta*,75(20):5903-5926.https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.07.046

Wang,C.,Liu,L.,Che,Z.C.,et al.,2009.Zircon U-Pb and Hf Isotopic from the East Segment of Tiekelike Tectonic Belt:Constrains on the Timing of Precambrian Basement at the Southwestern Margin of Tarim,China.*Acta*

Geologica Sinica,83(11):1647-1656 (in Chinese with English abstract).

Wang,C.,Liu,L.,He,S.P.,et al.,2013.Early Paleozoic Magmatism in West Kunlun:Constraints from Geochemical and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Studies of the Bulong Granite.*Chinese Journal of Geology*,48(4):997-1014 (in Chinese with English abstract).

Wang,C.,Liu,L.,Korhonen,F.,et al.,2016.Origins of Early Mesozoic Granitoids and Their Enclaves from West Kunlun,NW China:Implications for Evolving Magmatism Related to Closure of the Paleo-Tethys Ocean. *International Journal of Earth Sciences*,105(3):941-964.https://doi.org/10.1007/s00531-015-1220-0

Wang,Y.L.,Zhang,C.J.,Xiu,S.Z.,2001.Th/Hf-Ta/Hf Identification of Tectonic Setting of Basalts.*Acta Petrologica Sinica*,17(3):413-421 (in Chinese with English abstract).

Wang,Z.H.,Sun,S.,Hou,Q.L.,et al.,2001.Effect of Melt-Rock Interaction on Geochemistry in the Kudi Ophiolite (Western Kunlun Mountains,Northwestern China):Implication for Ophiolite Origin.*Earth and Planetary Science Letters*,191(1-2):33-48.https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00400-9

Winchester,J.A.,Floyd,P.A.,1977.Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements.*Chemical Geology*,20:325-343.https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2

Woodhead,J.D.,Hergt,J.M.,Davidson,J.P.,et al.,2001.Hafnium Isotope Evidence for 'Conservative' Element Mobility during Subduction Zone Processes.*Earth and Planetary Science Letters*,192(3):331-346.https://doi.org/10.1016/s0012-821x(01)00453-8

Workman,R.K.,Hart,S.R.,Jackson,M.,et al.,2004.Recycled Metasomatized Lithosphere as the Origin of the Enriched Mantle II (EM2) End-Member:Evidence from the Samoan Volcanic Chain.*Geochemistry,Geophysics,Geosystems*,5(4):Q04008.https://doi.org/10.1029/2003gc000623

Xiao,W.J.,Windley,B.F.,Chen,H.L.,et al.,2002.Carboniferous-Triassic Subduction and Accretion in the Western Kunlun,China:Implications for the Collisional and Accretionary Tectonics of the Northern Tibetan Plateau. *Geology*,30(4):295-298.https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0295:ctsaai>2.0.co;2

Xiao,W.J.,Windley,B.F.,Liu,D.Y.,et al.,2005.Accretionary Tectonics of the Western Kunlun Orogen,China:A Paleozoic-Early Mesozoic,Long-Lived Active Continental Margin with Implications for the Growth of Southern Eurasia.*The Journal of Geology*,113(6):687-705.https://doi.org/10.1086/449326

Xu,Y.G.,He,B.,Luo,Z.Y.,et al.,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 (in Chinese with English abstract).

Yang,J.,Cai,K.K.,Zhao,Z.Q.,et al.,2015.Genesis and Tectonic Significance of the Kuda Ophiolites in Western Kunlun Mountains,Xinjiang.*Sedimentary Geology and Tethyan Geology*,35(2):88-96 (in Chinese with English abstract).

Yang,S.F.,Li,Z.L.,Chen,H.L.,et al.,2007.Permian Bimodal Dyke of Tarim Basin,NW China:Geochemical Characteristics and Tectonic Implications.*Gondwana Research*,12(1-2):113-120.https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.018

Yun,J.,Gao,X.F.,Xiao,P.X.,et al.,2015.Geochemical Characteristics of the Lower Carboniferous Volcanic Rocks of the Wuluate Formation in the Western Kunlun Mountains and Their Geological Significance.*Geology in China*,42(3):587-600 (in Chinese with English abstract).

Zha,X.F.,Gu,P.Y.,Dong,Z.C.,et al.,2016.Geological Record of Tectono-Thermal Event at Early Paleozoic and Its Tectonic Setting in West Segment of the North Qaidam.*Earth Science*,41(4):586-604 (in Chinese with English abstract). https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.048

Zha,X.F.,Ji,W.H.,Zhang,H.D.,et al.,2012.A Discussion on the Deformation Phases and Tectonic Process of the Southern Kunlun Accretionary Complex Belt,in Central Qinghai.*Geological Bulletin of China*,31(12):2015-2024 (in Chinese with English abstract).

Zhang,C.L.,Dong,Y.G.,Zhao,Y.,et al.,2003.Geochemistry of Mesoproterozoic Volcanic Rocks in the Western Kunlun Mountains:Evidence for Plate Tectonic Evolution.*Acta Geologica Sinica (English Edition)*,77(2):237-245. https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2003.tb00567.x

Zhang,C.L.,Santosh,M.,Zhu,Q.B.,et al.,2015.The Gondwana Connection of South China:Evidence from Monazite and Zircon Geochronology in the Cathaysia Block. *Gondwana Research*,28(3):1137-1151.https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.09.007

Zhang,C.L.,Xu,Y.G.,Li,Z.X.,et al.,2010.Diverse Permian Magmatism in the Tarim Block,NW China:Genetically Linked to the Permian Tarim Mantle Plume?*Lithos*,119(3/4):537-552.https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.007

Zhang,C.L.,Zou,H.B.,Ye,X.T.,et al.,2018.Tectonic Evolution of the NE Section of the Pamir Plateau:New Evidence from Field Observations and Zircon U-Pb Geochronology. *Tectonophysics*, 723: 27－40. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.036

Zhang, H.F., 2006. Peridotite-Melt Interaction: An Important Mechanism for the Compositional Transformation of Lithospheric Mantle. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 65－75 (in Chinese with English abstract).

Zhang, H.S., He, S.P., Ji, W.H., et al., 2016. Implications of Late Cambrian Granite in Tianshuihai Massif for the Evolution of Proto-Tethy Ocean: Evidences from Zircon Geochronology and Geochemistry. *Acta Geologica Sinica*, 90(10): 2582－2602 (in Chinese with English abstract).

Zhang, L., Long, X.P., Zhang, R., et al., 2017. Source Characteristics and Provenance of Metasedimentary Rocks from the Kangxiwa Group in the Western Kunlun Orogenic Belt, NW China: Implications for Tectonic Setting and Crustal Growth. *Gondwana Research*, 46: 43－56. https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.02.014

Zhang, Y., Niu, Y.L., Hu, Y., et al., 2016. The Syncollisional Granitoid Magmatism and Continental Crust Growth in the West Kunlun Orogen, China—Evidence from Geochronology and Geochemistry of the Arkarz Pluton. *Lithos*, 245: 191－204. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.007

Zhi, X.C., Song, Y., Frey, F.A., et al., 1990. Geochemistry of Hannuoba Basalts, Eastern China: Constraints on the Origin of Continental Alkalic and Tholeiitic Basalt. *Chemical Geology*, 88(1－2): 1－33. https://doi.org/10.1016/0009-2541(90)90101-c

附中文参考文献

陈宁,王炬川,杨涛,等,2016.西昆仑上其汗地区火山岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及构造意义.中国地质调查,3(3):21－28.

陈守建,李荣社,计文化,等,2007.昆仑造山带晚泥盆世沉积特征及构造古地理环境.大地构造与成矿学,31(1):44－51.

高晓峰,校培喜,康磊,等,2013a.西昆仑大同西岩体成因:矿物学、地球化学和锆石U-Pb年代学制约.岩石学报,29(9):3065－3079.

高晓峰,校培喜,康磊,等,2013b.新疆塔什库尔干塔阿西一带火山岩成因及地质意义.地球科学,38(6):1169－1182.

韩芳林,崔建堂,计文化,等,2004.于田县幅、伯力克幅地质调查新成果及主要进展.地质通报,23(5－6):555－559.

计文化,韩芳林,王炬川,等,2004.西昆仑于田南部苏巴什蛇绿混杂岩的组成、地球化学特征及地质意义.地质通报,23(12):1196－1201.

姜常义,张蓬勃,卢登荣,等,2004.新疆塔里木板块西部瓦吉里塔格地区二叠纪超镁铁岩的岩石成因与岩浆源区.岩石学报,20(6):1433－1444.

李博秦,姚建新,计文化,等,2006.西昆仑叶城南部麻扎地区弧火成岩的特征及其锆石SHRIMP U-Pb测年.地质通报,25(1－2):124－132.

李博秦,姚建新,王炬川,等,2007.西昆仑柳什塔格峰西侧火山岩的特征、时代及地质意义.岩石学报,23(11):2801－2810.

李洪颜,黄小龙,李武显,等,2013.塔西南其木干早二叠世玄武岩的喷发时代及地球化学特征.岩石学报,29(10):3353－3368.

李荣社,计文化,杨永成,等,2008.昆仑山及邻区地质.北京:地质出版社,271－317.

李荣社,计文化,赵振明,等,2007.昆仑早古生代造山带研究进展.地质通报,26(4):373－382.

厉子龙,杨树锋,陈汉林,等,2008.塔西南玄武岩年代学和地球化学特征及其对二叠纪地幔柱岩浆演化的制约.岩石学报,24(5):959－970.

施彬,朱云海,钟增球,等,2016.东昆仑黑海地区加里东期过铝质花岗岩岩石学、地球化学特征及地质意义.地球科学,41(1):35－54.

王超,刘良,车自成,等,2009.塔里木南缘铁克里克构造带东段前寒武纪地层时代的新限定和新元古代地壳再造:锆石定年和Hf同位素的约束.地质学报,83(11):1647－1656.

王超,刘良,何世平,等,2013.西昆仑早古生代岩浆作用过程:布隆花岗岩地球化学和锆石U-Pb-Hf同位素组成研究.地质科学,48(4):997－1014.

汪云亮,张成江,修淑芝,2001.玄武岩类形成的大地构造环境的Th/Hf-Ta/Hf图解判别.岩石学报,17(3):413－421.

徐义刚,何斌,罗震宇,等,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.

杨军,蔡柯柯,赵志强,等,2015.西昆仑库地蛇绿岩的成因及构造意义.沉积与特提斯地质,35(2):88－96.

贠杰,高晓峰,校培喜,等,2015.西昆仑下石炭统乌鲁阿特组火山岩地球化学特征及地质意义.中国地质,42(3):587－600.

查显锋,辜平阳,董增产,等,2016.柴北缘西段早古生代构造-热事件及其构造环境.地球科学,41(4):586－604.

查显锋,计文化,张海迪,等,2012.青海中部昆南增生杂岩带变形分期及构造过程.地质通报,31(12):2015－2024.

张宏福,2006.橄榄岩－熔体的相互作用:岩石圈地幔组成转变的重要方式.地学前缘,13(2):65－75.

张辉善,何世平,计文化,等,2016.甜水海地块晚寒武世花岗岩对原特提斯洋演化的启示:来自锆石年代学和地球化学的证据.地质学报,90(10):2582－2602.