引用格式：杜晓飞，王威，张传林，等，2025. 新疆东天山哈尔里克山早二叠世超基性岩墙锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质力学学报，31（1）：156−168. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024020

Citation: DU X F，WANG W，ZHANG C L，et al.，2025. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics, and tectonic implications of the early Permian ultrabasic dykes in the Harlik Mountain, east Tianshan, Xinjiang[J]. Journal of Geomechanics，31（1）：156−168. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024020

新疆东天山哈尔里克山早二叠世超基性岩墙锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义

杜晓飞[1,2]，王　威[1,2]，张传林[3]，马华东[1,2]，朱炳玉[1,2]，邱　林[1,2]
DU Xiaofei[1,2]，WANG Wei[1,2]，ZHANG Chuanlin[3]，MA Huadong[1,2]，ZHU Bingyu[1,2]，QIU Lin[1,2]

1. 新疆自然资源与生态环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830000；
2. 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室，新疆 乌鲁木齐 830000；
3. 河海大学海洋学院，江苏 南京 210098

1. *Xinjiang Natural Resources and Ecological Environment Research Center*, *Urumqi* 830000, *Xinjiang*, *China*;
2. *The National* 305 *Project Office of Xinjiang*, *Urumqi* 830000, *Xinjiang*, *China*;
3. *College of Oceanography*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *Jiangsu*, *China*

Zircon U-Pb age, geochemical characteristics, and tectonic implications of the early Permian ultrabasic dykes in the Harlik Mountain, east Tianshan, Xinjiang

Abstract: ［**Objective**］During multiple stages of magmatic activity in the Harlik Mountains of the east Tianshan, extensive granitic and mafic dyke swarms were formed. This study aims to constrain the closure time of the Paleo-Asian Ocean in this area and to elucidate the tectonic environment in which ultrabasic dykes were formed.［**Methods**］This study reports petrography, geochemistry, and zircon U-Pb ages of a particular type of ultrabasic dyke swarms (amphibolites) in Qincheng, Hami.［**Results**］The amphibolites have SiO_2 contents from 39.00% to 45.48%, TiO_2 contents from 1.60% to 3.01%, and $Mg^{\#}$ values from 50 to 60. They are relatively weakly enriched in light rare earth elements $(La/Yb)_N$ = 1.34～2.25) and show no Eu anomalies (δEu = 0.76～1.12). They are enriched in large ion lithophile elements (LILEs: Rb, Ba, K, Sr) and depleted in high field strength elements (HFSEs: Nb, Zr, Hf). The amphibolites belong to the alkaline rock series. LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb dating reveals that these three amphibolites crystallized at 298.4±1.7 Ma, 297.7±1.6 Ma, and 295.5±1.6 Ma, respectively. Whole rock Sr-Nd analysis reveals initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios from 0.7047 to 0.7051 and $\varepsilon_{Nd}(t)$ values from −2.63 to 1.81.［**Conclusion**］Based on the comprehensive analysis of regional geology, chronology, geochemistry, and Sr-Nd isotopes, it is suggested that the primitive magma of the early Permian amphibolites in Qincheng may have been created by partial melting of the lithospheric mantle, and these rocks were formed in a post-collisional extensional tectonic setting. It is furthermore implied that the Paleo-Asian Ocean in the Harlik Mountains region closed before the early Permian.

Keywords: hornblendite; LA-MC-ICP-MS U-Pb dating; Sr-Nd isotopes; geochemical characteristics; Hami

摘　要：在东天山哈尔里克山发育多期岩浆活动，形成了大面积的花岗岩和超基性岩墙。为限定古亚洲洋在该区的闭合时限，同时阐述超基性岩墙形成的构造环境，文章报道了哈密沁城超基性岩墙（角闪石岩）岩相学、岩石地球化学和锆石 U-Pb 年龄。研究表明，角闪石岩 SiO_2 含量为 39.00%～45.48%、

基金项目：新疆维吾尔自治区自然科学基金项目（2022D01A144）；自治区公益性科研院所基本科研业务费（KY2024112）
This research is financially supported by the Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Grant No. 2022D01A144) and the Basic Research Business Expenses of Public Welfare Research Institutes in the Autonomous Region (Grant No. KY2024112).

第一作者：杜晓飞（1987—），男，高级工程师，主要从事矿产勘查及矿床地球化学研究。Email：503179378@qq.com

收稿日期：2024−02−19；**修回日期：**2024−08−24；**录用日期：**2024−08−28；**网络出版日期：**2024−10−17；**责任编辑：**吴芳

TiO_2（1.60%～3.01%）、$Mg^{\#}$在50～60之间，轻稀土相对弱富集（（La/Yb）$_N$=1.34～2.25）），铕异常不明显（δEu=0.76～1.12），富集大离子亲石元素（Rb、Ba、K、Sr），相对亏损高场强元素（Nb、Zr、Hf）。角闪石岩属于碱性系列岩石，3件角闪石岩样品的LA-MC-ICPMS锆石U-Pb年龄分别为298.4±1.7 Ma、297.7±1.6 Ma、295.5 ±1.6 Ma。全岩Sr-Nd组成表明，岩石初始$^{87}Sr/^{86}Sr$比值为0.7047～0.7051之间，$\varepsilon_{Nd}(t)$变化范围在−2.63至+1.81之间。结合对区域地质、年代学、元素地球化学以及Sr-Nd同位素等资料的全面分析，认为沁城早二叠世角闪石岩原岩的岩浆可能起源于岩石圈地幔的部分熔融，形成于后碰撞伸展环境下，同时，暗示哈尔里克山地区古亚洲洋在早二叠世之前闭合。

关键词：角闪石岩；LA-MC-ICPMS U-Pb测年；Sr-Nd同位素；地球化学特征；哈密
中图分类号：P588.1; P597　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−6616(2025)01−0156−13
DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2024020

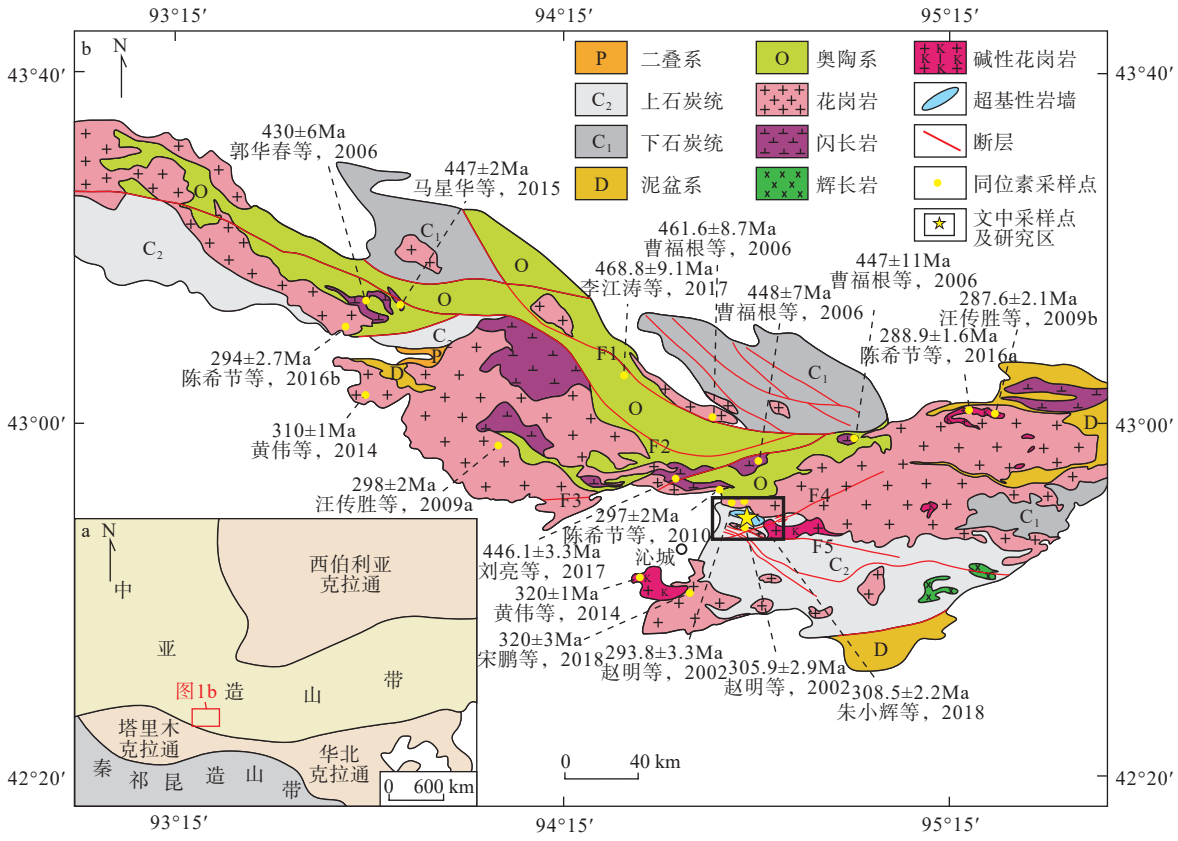
0　引言

哈尔里克山位于东天山东段，吐哈盆地东北缘，向北与南蒙古戈壁天山相连，是中亚造山带的重要组成部分，其构造岩浆带记录着古亚洲洋俯冲−增生、碰撞造山等一系列地质演化过程（肖文交等，2006; 李锦轶等，2006），因此，该地区成为众多学者关注和研究的热点地区之一。学者们对哈尔里克地区的构造演化做了大量研究（王赐银等，1996; 赵明等，1997, 2002; 赵明和王赐银，1998; 顾连兴等，1999, 2006; 孙桂华等，2005, 2006, 2007; 李锦轶等，2006; 朱文斌等，2006; 汪传胜等，2009b; 靳刘圆，2014; 马星华等，2015, 陈希节等，2016a），研究结果表明，哈尔里克地区主要发育3期岩浆活动：①早古生代岩浆活动，以小规模的岩株、岩枝状和脉状侵入岩为特征，岩性为闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩等，主要分布在哈尔里克山的主脊附近（图1），其侵位时代晚奥陶世—早志留世（曹福根等，2006; 郭华春等，2006; 马星华等，2015; 刘亮等，2017），属于岛弧构造环境，与康古尔塔格一带洋壳残片代表的洋盆岩石圈板块向北的俯冲有关；②晚石炭世岩浆活动，主要为花岗岩和钾质花岗岩，分布广泛，侵位时代为320～308 Ma前后（孙桂华等，2006, 2007; 朱小辉等，2018），属弧后伸展或碰撞环境；③早二叠世岩浆活动，此期侵入岩在研究区非常发育，岩石类型复杂，主要有黑云母花岗岩、碱性花岗岩和超基性岩墙，碱性花岗岩和黑云母花岗岩出露在哈尔里克山东段，超基性岩墙则分布在哈尔里克山前上石炭统中。

超基性、基性岩墙群作为一种特殊的构造岩浆类型，是岩石圈（地壳）伸展事件及克拉通构造演化的重要标志（李江海等，1997），同时，超基性、基性岩墙群是探讨构造演化重要的地质载体（向忠金等，2016）。近期，研究团队在哈密沁城雅克铺一带发现了以角闪石岩为主的超基性岩墙，超基性岩墙走向以近东西向为主，为区内最晚的一期岩浆活动。该地区广泛发育早古生代闪长岩及晚古生代花岗岩，目前研究多集中于闪长岩及花岗质岩石，而对记录深部地幔岩浆事件的超基性岩墙的研究十分薄弱。文章以角闪石岩为主的超基性岩墙为研究对象，通过岩相学、岩石地球化学、LA-MC-ICPMS锆石U-Pb测年及Sr-Nd同位素研究，厘定其岩石特征、成岩时代及构造属性，确定该区二叠纪构造演化，以期为哈尔里克造山带的构造演化历史研究提供新的证据。

1　地质背景

哈尔里克山是中亚增生造山带的一部分（图1），早古生代初期，由于古亚洲洋壳的形成、扩张及俯冲，伴随着强烈的火山、岩浆活动（胡霭琴等，2006），形成了奥陶系以海相火山碎屑岩为主夹少量灰岩、玄武岩的地层（朱志新等，2018），晚奥陶世—早志留世，随着洋壳俯冲，形成以闪长岩、石英闪长岩、花岗闪长岩为代表的岛弧岩浆活动（曹福根等，2006; 郭华春等，2006; 马星华等，2015; 刘亮等，2017）。中志留世—晚泥盆世为弧后隆起，哈尔里克山暂未发现沉积记录，石炭纪发育钙碱性火山岩为主的地层，同时，发育大规模花岗岩基（赵明等，2002; 汪传胜等，2009a; 陈希节等，2016a; 朱小辉等，2018）。二叠纪发育超基性基性岩墙群、钾长花岗



a—中亚造山带及邻区地质简图（据 Jahn et al., 2000b 修编）；b—哈尔里克山地区区域地质图（据新疆维吾尔自治区地质局区域地质测量大队，1966 修编）

图 1 哈尔里克山地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the Harlik Mountain region

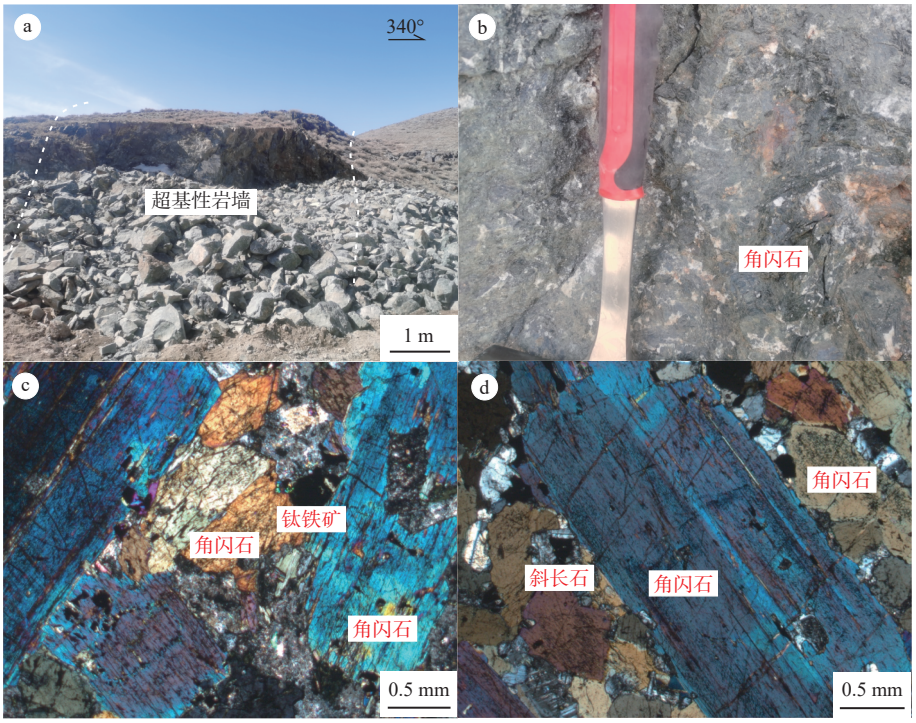
(a) Geological sketch map of the Central Asian Orogenic Belt and the adjacent region (modified after Jahn et al., 2000b); (b) Regional geological map of the Harlik mountains (modified after Regional Geological Survey Brigade of the Geology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1966)

岩、碱性花岗岩，对钾长花岗岩、碱性花岗岩研究已获得精确的年龄数据（Gu et al., 1999; 汪传胜等，2009b; 陈希节等，2016a）。

2 样品及分析方法

沁城角闪石岩侵入到上石炭统居里得能组中，脉宽 10～15 m（图 2a），沿走向延伸近百米，走向 280°，近直立。岩石呈灰黑色，中粗粒-伟晶半自形粒状结构，块状构造（图 2b—2d）。岩石由角闪石、斜长石、辉石组成。普通角闪石：柱状，粒径一般为 2～7 mm，伟晶可达 2～6 cm（图 2d），黄-绿色，具闪石式解理，含量 70%～95%；斜长石：呈半自形板状，粒径 1.2～2 mm，聚片双晶发育，填充在角闪石颗粒间，含量 5%～12%；辉石：柱状、柱粒状，粒径 0.6～2.8 mm，淡紫色-淡灰绿色，具辉石式解理，含量 1%～5%，可见黄铁矿化及少部分褐铁矿化。角闪石岩样品采自沁城雅克铺金红石矿区（采样位置坐标：94°45′05″E；42°49′11″N），共采集 3 件年代学样品（HQ-1、HQ-2、HQ-3），6 件地球化学样品（HQ-1、HQ-2、HQ-3、HQ-4、ZK3-1-9 和 ZK1-2-7），岩石碎样、锆石挑选由廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成；阴极发光（CL）显微照相由河海大学实验室完成；3 件样品 HQ-1、HQ-2、HQ-3 的主量、微量元素、Sr-Nd 同位素测由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成，锆石 U-Pb 定年及其余样品主量、微量元素、Sr-Nd 同位素由中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。

锆石 U-Pb 同位素定年所采用的测试设备为激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪（LA-MC-ICPMS）系统，其中多接收器电感耦合等离子体质谱仪为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune，激光器为美



a—超基性岩墙；b—角闪石岩；c—角闪石岩镜下照片(+)；d—角闪石岩镜下照片(+)

图 2　沁城角闪石岩野外及镜下特征

Fig. 2　Field and microscopic characteristics of hornblendite from Qincheng

(a) Ultrabasic dike; (b) Hornblendite; (c) Photomicrograph of the hornblendite (+); (d) Photomicrograph of the hornblendite (+)

国 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器，激光波长 193 nm，脉冲宽度 5 ns。详细的仪器操作条件和实验流程方法见李怀坤等(2009)。采用 ^{208}Pb 校正法对普通铅进行校正。元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算均采用软件 ICPMS Data Cal 9.0 进行处理。锆石 U-Pb 年龄谐和图的绘制和 MSWD 的计算则采用 Isoplot/Ex_ver3。3 件锆石样品的 U-Pb 同位素分析结果见表 1。

主微量分析方法参照 GB/T14506.28-93 硅酸盐岩石化学分析方法 X 射线荧光光谱法，在飞利浦 PW2404X 射线荧光光谱仪上完成了主量元素的测试分析。采用 DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱方法在 FinniganMAT ELEMENT 型高分辨率等离子体质谱仪 (ICP-MS) 上测定微量元素和稀土元素。岩石的主、微量分析结果见表 2。

Sr-Nd 同位素分析方法采用 ISOPROBE-T 热电离质谱仪开展测试，单带，M+。用 $^{86}Sr/^{88}Sr=0.1194$ 校正质量分馏；标准测量结果：NBS987 为 0.710250±7。实验室流程的本底为：Rb=2×10^{-10}，Sr=2×10^{-10}；Nd 同位素分析为三带，M+；质量分馏用 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.7219$ 校正。标准测量结果：JMC 为 $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512109\pm3$。测试结果见表 3。

3　锆石 U-Pb 年龄

锆石阴极发光图像显示，哈密沁城一带角闪石岩锆石外形特征主要以自形柱状晶体为主，颗粒长 200～400 μm，宽 100～300 μm，个别可达 700 μm，样品 HQ-1、HQ-2 中锆石边界清晰、平直，柱面发育，生长环带多不清晰，和大多数镁铁超镁铁岩体中锆石特征一致，说明被测锆石为岩浆结晶锆石，HQ-3 中锆石颗粒部分可见震荡环带结构，部分具有典型的条带状结构(图 3)，这与 HQ-3 样品偏基性有关。

3 件样品共测定 75 个测点，测试结果表明，锆石的 Th/U 比值大多数分布于 0.4～1.0 区间内(表 1)。所有样品点均投影在谐和线上或附近(图 4)，谐和度均在 95% 以上，$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值在误差范围内一致，且 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄与 $^{207}Pb/^{235}U$ 表面年龄谐和一致。获得 3 件样品 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为分别为 297.7±1.6 Ma、298.4±1.7 Ma、295.5±1.6 Ma，代表了超基性岩墙成岩年龄，表明角闪石岩形成于早二叠世。

表 1 角闪石岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircons U-Pb data for the hornblendites

测点	元素含量/×10⁻⁶			Th/U	同位素比值						同位素年龄/ Ma					
	Pb	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
HQ.1-1	21	241	416	0.58	0.0515	0.0013	0.3365	0.0092	0.0474	0.0007	264	59	294	8	298	4
HQ.1-2	8	66	156	0.42	0.0546	0.0030	0.3555	0.0199	0.0473	0.0007	394	123	309	17	298	4
HQ.1-3	24	370	457	0.81	0.0539	0.0012	0.3443	0.0086	0.0463	0.0006	368	52	300	7	292	4
HQ.1-4	28	366	536	0.68	0.0539	0.0012	0.3509	0.0084	0.0473	0.0007	365	48	305	7	298	4
HQ.1-5	45	617	847	0.73	0.0541	0.0009	0.3566	0.0072	0.0478	0.0007	374	39	310	6	301	4
HQ.1-6	22	300	422	0.71	0.0559	0.0015	0.3687	0.0105	0.0478	0.0007	449	59	319	9	301	4
HQ.1-7	25	228	524	0.43	0.0567	0.0011	0.3662	0.0079	0.0469	0.0006	478	43	317	7	295	4
HQ.1-8	47	768	845	0.91	0.0528	0.0009	0.3468	0.0069	0.0476	0.0007	321	39	302	6	300	4
HQ.1-9	32	463	609	0.76	0.0550	0.0011	0.3587	0.0079	0.0473	0.0007	413	44	311	7	298	4
HQ.1-10	14	203	252	0.81	0.0551	0.0023	0.3609	0.0157	0.0475	0.0007	416	93	313	14	299	4
HQ.1-11	16	151	336	0.45	0.0526	0.0021	0.3433	0.0147	0.0473	0.0007	313	90	300	13	298	4
HQ.1-12	17	160	341	0.47	0.0548	0.0015	0.3611	0.0105	0.0478	0.0007	403	61	313	9	301	4
HQ.1-13	17	168	341	0.49	0.0536	0.0016	0.3510	0.0114	0.0475	0.0007	355	68	305	10	299	4
HQ.1-14	14	126	285	0.44	0.0552	0.0017	0.3590	0.0118	0.0472	0.0007	419	69	311	10	297	4
HQ.1-15	10	91	215	0.42	0.0596	0.0025	0.3899	0.0166	0.0475	0.0007	588	90	334	14	299	4
HQ.1-16	31	479	567	0.84	0.0541	0.0013	0.3439	0.0086	0.0461	0.0006	375	52	300	7	291	4
HQ.1-17	34	322	678	0.48	0.0563	0.0012	0.3683	0.0089	0.0474	0.0007	464	48	318	8	299	4
HQ.1-18	8	91	155	0.59	0.0544	0.0028	0.3600	0.0191	0.0480	0.0007	388	118	312	17	302	4
HQ.1-19	11	133	206	0.65	0.0532	0.0024	0.3463	0.0161	0.0472	0.0007	337	102	302	14	297	4
HQ.1-20	14	196	251	0.78	0.0525	0.0021	0.3379	0.0139	0.0467	0.0006	306	91	296	12	294	4
HQ.1-21	20	184	407	0.45	0.0495	0.0014	0.3189	0.0096	0.0467	0.0007	173	65	281	8	294	4
HQ.1-22	9	126	175	0.72	0.0520	0.0029	0.3376	0.0196	0.0471	0.0007	284	129	295	17	297	4
HQ.1-23	14	143	273	0.52	0.0541	0.0018	0.3544	0.0123	0.0476	0.0006	373	75	308	11	299	4
HQ.1-24	15	163	289	0.56	0.0558	0.0015	0.3650	0.0107	0.0475	0.0006	443	62	316	9	299	4
HQ.1-25	15	218	287	0.76	0.0513	0.0017	0.3331	0.0115	0.0471	0.0006	254	76	292	10	297	4
HQ.2-1	15	144	326	0.44	0.0553	0.0014	0.3553	0.0096	0.0466	0.0007	422	55	309	8	294	4
HQ.2-2	15	144	307	0.47	0.0552	0.0015	0.3566	0.0103	0.0469	0.0007	419	60	310	9	295	4
HQ.2-3	15	139	315	0.44	0.0549	0.0015	0.3557	0.0103	0.0470	0.0007	409	60	309	9	296	4
HQ.2-4	17	222	334	0.66	0.0573	0.0014	0.3776	0.0099	0.0478	0.0007	502	52	325	8	301	4
HQ.2-5	16	222	308	0.72	0.0526	0.0016	0.3504	0.0114	0.0483	0.0007	311	70	305	10	304	4
HQ.2-6	29	287	578	0.50	0.0517	0.0010	0.3431	0.0076	0.0481	0.0007	272	44	299	7	303	4
HQ.2-7	79	772	1600	0.48	0.0519	0.0007	0.3407	0.0060	0.0476	0.0007	282	33	298	5	300	4
HQ.2-8	28	263	566	0.46	0.0528	0.0010	0.3496	0.0075	0.0480	0.0007	321	43	304	7	302	4
HQ.2-9	10	165	188	0.88	0.0533	0.0021	0.3519	0.0142	0.0479	0.0007	341	88	306	12	302	4
HQ.2-10	54	541	1098	0.49	0.0524	0.0008	0.3455	0.0065	0.0478	0.0007	302	36	301	6	301	4
HQ.2-11	50	612	956	0.64	0.0538	0.0009	0.3564	0.0069	0.0480	0.0007	364	37	310	6	302	4
HQ.2-12	61	666	1201	0.55	0.0535	0.0008	0.3531	0.0065	0.0479	0.0007	348	35	307	6	302	4

续表 1

测点	元素含量/×10⁻⁶			Th/U	同位素比值						同位素年龄/ Ma					
	Pb	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
HQ.2-13	104	1557	1900	0.82	0.0537	0.0008	0.3553	0.0062	0.0480	0.0007	360	33	309	5	302	4
HQ.2-14	247	4021	4426	0.91	0.0522	0.0007	0.3430	0.0059	0.0477	0.0007	294	32	299	5	300	4
HQ.2-15	137	1680	2649	0.63	0.0522	0.0007	0.3415	0.0057	0.0474	0.0007	296	32	298	5	299	4
HQ.2-16	34	457	652	0.70	0.0525	0.0011	0.3440	0.0081	0.0475	0.0007	308	49	300	7	299	4
HQ.2-17	24	235	490	0.48	0.0542	0.0011	0.3561	0.0083	0.0476	0.0007	380	45	309	7	300	4
HQ.2-18	41	408	817	0.50	0.0524	0.0008	0.3426	0.0066	0.0475	0.0007	301	37	299	6	299	4
HQ.2-19	9	71	193	0.37	0.0535	0.0019	0.3492	0.0127	0.0473	0.0007	350	80	304	11	298	4
HQ.2-20	62	767	1192	0.64	0.0534	0.0008	0.3486	0.0063	0.0473	0.0007	347	34	304	5	298	4
HQ.2-21	218	3113	4157	0.75	0.0525	0.0007	0.3338	0.0056	0.0461	0.0007	307	31	292	5	291	4
HQ.2-22	206	3487	3680	0.95	0.0544	0.0008	0.3520	0.0058	0.0469	0.0007	388	31	306	5	296	4
HQ.2-23	19	302	347	0.87	0.0556	0.0015	0.3535	0.0101	0.0461	0.0007	437	59	307	9	291	4
HQ.2-24	82	888	1620	0.55	0.0523	0.0008	0.3408	0.0061	0.0473	0.0007	299	34	298	5	298	4
HQ.2-25	61	683	1240	0.55	0.0536	0.0008	0.3432	0.0062	0.0464	0.0006	355	36	300	5	293	4
HQ.3-1	14	221	281	0.79	0.0536	0.0020	0.3401	0.0130	0.0460	0.0006	354	85	297	11	290	4
HQ.3-2	201	3704	3656	1.01	0.0543	0.0007	0.3497	0.0059	0.0467	0.0006	384	31	304	5	294	4
HQ.3-3	60	434	1268	0.34	0.0531	0.0008	0.3449	0.0060	0.0471	0.0006	333	34	301	5	297	4
HQ.3-4	89	993	1769	0.56	0.0533	0.0008	0.3467	0.0058	0.0472	0.0006	341	32	302	5	297	4
HQ.3-5	149	1199	3224	0.37	0.0540	0.0008	0.3407	0.0055	0.0458	0.0006	371	32	298	5	288	4
HQ.3-6	62	798	1214	0.66	0.0539	0.0008	0.3472	0.0061	0.0467	0.0007	368	33	303	5	294	4
HQ.3-7	83	923	1658	0.56	0.0539	0.0008	0.3531	0.0060	0.0475	0.0006	367	33	307	5	299	4
HQ.3-8	56	241	1227	0.20	0.0538	0.0008	0.3510	0.0065	0.0473	0.0007	363	35	305	6	298	4
HQ.3-9	188	3744	3165	1.18	0.0534	0.0007	0.3492	0.0059	0.0474	0.0007	346	31	304	5	299	4
HQ.3-10	56	755	1053	0.72	0.0538	0.0008	0.3525	0.0066	0.0475	0.0007	364	34	307	6	299	4
HQ.3-11	54	443	1109	0.40	0.0526	0.0008	0.3426	0.0062	0.0472	0.0007	312	35	299	5	298	4
HQ.3-12	38	149	830	0.18	0.0526	0.0009	0.3425	0.0068	0.0473	0.0007	311	38	299	6	298	4
HQ.3-13	23	212	476	0.45	0.0533	0.0011	0.3468	0.0081	0.0472	0.0007	341	48	302	7	297	4
HQ.3-14	73	1709	1177	1.45	0.0527	0.0008	0.3404	0.0061	0.0469	0.0007	316	34	297	5	295	4
HQ.3-15	20	152	423	0.36	0.0534	0.0013	0.3456	0.0089	0.0469	0.0007	347	54	301	8	296	4
HQ.3-16	180	1452	3774	0.38	0.0528	0.0007	0.3405	0.0057	0.0468	0.0007	320	31	298	5	295	4
HQ.3-17	13	118	252	0.47	0.0532	0.0023	0.3516	0.0152	0.0479	0.0008	338	98	306	13	302	5
HQ.3-18	18	199	366	0.55	0.0549	0.0014	0.3558	0.0099	0.0470	0.0007	409	58	309	9	296	4
HQ.3-19	26	173	561	0.31	0.0529	0.0010	0.3442	0.0073	0.0472	0.0006	326	43	300	6	297	4
HQ.3-20	130	1257	2672	0.47	0.0526	0.0007	0.3425	0.0056	0.0472	0.0006	314	31	299	5	297	4
HQ.3-21	17	140	350	0.40	0.0557	0.0012	0.3614	0.0088	0.0470	0.0007	441	49	313	8	296	4
HQ.3-22	78	1530	1447	1.06	0.0536	0.0008	0.3434	0.0061	0.0465	0.0006	354	35	300	5	293	4
HQ.3-23	20	165	435	0.38	0.0534	0.0013	0.3432	0.0086	0.0466	0.0006	345	53	300	8	294	4
HQ.3-24	17	118	369	0.32	0.0523	0.0018	0.3345	0.0115	0.0463	0.0006	300	76	293	10	292	4
HQ.3-25	27	248	566	0.44	0.0543	0.0013	0.3477	0.0091	0.0464	0.0006	383	55	303	8	293	4

表 2 沁城角闪石岩的主量（%）、稀土和微量元素（$\times10^{-6}$）分析结果

Table 2 Major (%), REE and trace element ($\times10^{-6}$) concentrations of the Qincheng hornblendite

样号	HQ-1	HQ-2	HQ-3	HQ−4	ZK3−1−9	ZK1−2−7	样号	HQ-1	HQ-2	HQ-3	HQ−4	ZK3−1−9	ZK1−2−7
岩性	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩	岩性	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩	角闪石岩
SiO_2	44.32	45.48	41.06	39.00	40.30	41.22	Sb	0.29	0.25	0.19	0.35	0.02	0.12
Al_2O_3	18.41	22.83	19.42	17.21	16.96	17.36	Cs	1.64	2.85	2.14	0.63	1.24	2.71
CaO	9.88	9.36	11.43	10.01	9.96	7.85	Ba	201	241	104	96	101	177
TFe_2O_3	13.42	10.41	14.12	18.78	16.38	15.23	La	10.20	5.33	3.83	5.06	3.90	7.49
FeO	4.89	5.06	6.85	9.95	9.45	9.34	Ce	29.10	14.10	11.30	15.20	12.70	21.70
K_2O	0.81	1.41	0.42	0.35	0.37	1.07	Pr	4.21	2.07	1.96	2.41	2.14	3.34
MgO	6.91	4.44	7.66	8.31	9.40	9.77	Nd	22.50	11.00	12.00	10.20	8.76	13.70
MnO	0.11	0.08	0.11	0.13	0.13	0.16	Sm	6.69	3.66	4.40	4.57	4.03	5.19
Na_2O	2.31	2.24	1.90	1.75	1.92	1.77	Eu	1.98	1.23	1.48	1.35	1.21	1.35
P_2O_5	0.23	0.06	0.03	0.02	0.03	0.08	Gd	5.52	2.98	3.45	5.05	4.60	5.70
TiO_2	2.05	1.60	2.03	3.01	2.74	2.03	Tb	1.10	0.55	0.65	0.88	0.78	0.96
LOI	1.51	2.04	1.71	1.41	1.82	3.45	Dy	6.69	3.79	4.36	5.25	4.63	5.71
Total	99.96	99.94	99.90	99.99	100.01	99.98	Ho	1.40	0.76	0.82	1.06	0.90	1.16
Li	16.70	14.10	17.70	16.00	11.90	37.90	Er	3.60	1.84	2.26	2.67	2.45	2.91
Be	1.00	1.09	0.43	0.46	0.43	0.86	Tm	0.50	0.29	0.33	0.37	0.33	0.43
Sc	55.10	36.70	47.70	84.20	76.50	72.20	Yb	3.06	1.84	1.84	2.00	1.96	2.43
V	553	410	576	1030	906	616	Lu	0.43	0.24	0.26	0.26	0.26	0.36
Cr	5.03	2.54	34.60	27.00	31.00	95.40	Y	37.30	21.20	22.70	25.00	21.80	28.20
Co	57.80	32.40	49.90	70.10	78.20	63.20	ΣREE	96.98	49.68	48.93	56.33	48.65	72.43
Ni	12.60	11.50	52.40	12.80	14.40	32.70	LREE/HREE	3.35	3.04	2.51	2.21	2.06	2.68
Cu	92.90	134.00	81.60	46.60	64.40	64.80	$(La/Yb)_N$	2.25	1.95	1.40	1.71	1.34	2.08
Zn	166	118	152	104	95	105	δEu	0.97	1.11	1.12	0.86	0.86	0.76
Ga	22.20	24.00	22.90	22.30	18.40	18.40	Ta	0.29	0.26	0.21	0.77	0.62	0.66
Rb	23.50	50.60	7.09	8.80	7.44	42.10	W	0.35	0.59	0.46	0.77	0.13	0.78
Sr	529	594	612	508	440	334	Tl	0.17	0.38	0.07	0.044	0.028	0.26
Hf	2.19	1.27	1.55	1.63	1.26	1.67	Pb	5.28	4.95	3.47	3.06	1.96	3.73
Zr	43.10	29.70	36.00	43.00	31.60	45.20	Bi	0.15	0.25	0.22	0.31	0.05	0.16
Nb	3.37	2.64	1.90	2.99	2.26	3.13	Th	1.27	1.41	0.30	0.6	0.54	0.98
Mo	0.22	0.32	0.17	0.26	0.19	0.20	U	0.43	0.82	0.18	0.37	0.48	0.51
Cd	0.17	0.17	0.14	0.18	0.04	0.15	$Mg^{\#}$	55	50	56	51	57	60
In	0.10	0.10	0.09	0.13	0.09	0.10							

注: $Mg^{\#}$ =(MgO/40.31)/(MgO/40.31+TFe_2O_3*0.8998/71.85*0.85)×100

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素和微量元素

角闪石岩中 SiO_2 含量区间为 39.00%～45.48%，有较高的 TiO_2（1.60%～3.01%），Al_2O_3 含量高，变化在 16.96%～22.83% 之间（表 2），TFe_2O_3 含量高（10.41%～18.78%），平均为 14.72%，MgO 含量中等，平均为 7.75%，贫 MnO（0.08%～0.16%）、Na_2O（1.75%～2.31%）、K_2O（0.35%～1.41%）和 P_2O_5（0.02%～0.23%），Na_2O> K_2O，$Mg^{\#}$在 50～60 之间。在 TAS 图解中（图 5），样品显示碱性系列特征。

微量元素方面，角闪石岩稀土丰度较低，∑REE 介于 48.65×10^{-6}～96.98×10^{-6}。$(La/Yb)_N$= 1.34～2.25，轻稀土相对弱富集，稀土配分曲线弱左倾，铕异常不显著（δEu=0.76～1.12；表 2，图 6a）。在原始地幔标准化图解中（图 6b），岩石不同程度富集大离子亲石元素（LILE），相对亏损高场强元素（Nb、Zr、

表 3　全岩铷–锶和钐–钕同位素数据

Table 3　Whole rock Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data

样品	Rb /×10^{-6}	Sr /×10^{-6}	^{87}Rb/^{86}Sr	^{87}Sr/^{86}Sr	2σ	$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	Sm /×10^{-6}	Nd /×10^{-6}	^{147}Sm/^{144}Nd	^{143}Nd/^{144}Nd	2σ	$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$	$\varepsilon_{Nd}(t)$
HQ-1	23.50	529	0.128	0.705626	17	0.705090	6.69	22.50	0.180	0.512639	10	0.512290	0.67
HQ-2	50.60	594	0.246	0.706168	11	0.705139	3.66	11.00	0.201	0.512739	9	0.512347	1.81
HQ-3	7.09	612	0.034	0.704935	14	0.704796	4.40	12.00	0.222	0.512551	11	0.512123	−2.63
HQ-4	8.80	508	0.050	0.705065	6	0.704857	4.57	10.20	0.271	0.512757	3	0.512234	−0.47
ZK3-1-9	7.44	440	0.049	0.705048	7	0.704845	4.03	8.76	0.278	0.512776	13	0.512239	−0.37
ZK1-2-7	42.10	334	0.365	0.706207	9	0.704696	5.19	13.70	0.229	0.512673	3	0.512231	−0.53

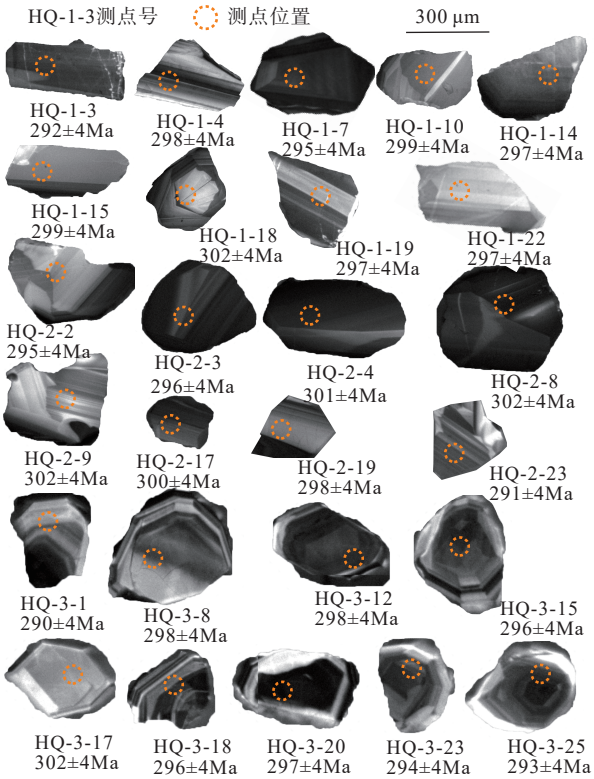


图 3　角闪石岩锆石阴极发光图像

Fig. 3　CL images of zircon from the hornblendites

Hf)。Ti 呈正异常。

4.2　Sr-Nd 同位素

哈密沁城一带角闪石岩全岩 Sr-Nd 同位素组成表明，初始^{87}Sr/^{86}Sr 比值为 0.7047～0.7051 之间（表 3），呈现锶含量高初始值低的特征。$\varepsilon_{Nd}(t)$ 变化范围在 −2.63 至+1.81 之间。

5　讨论

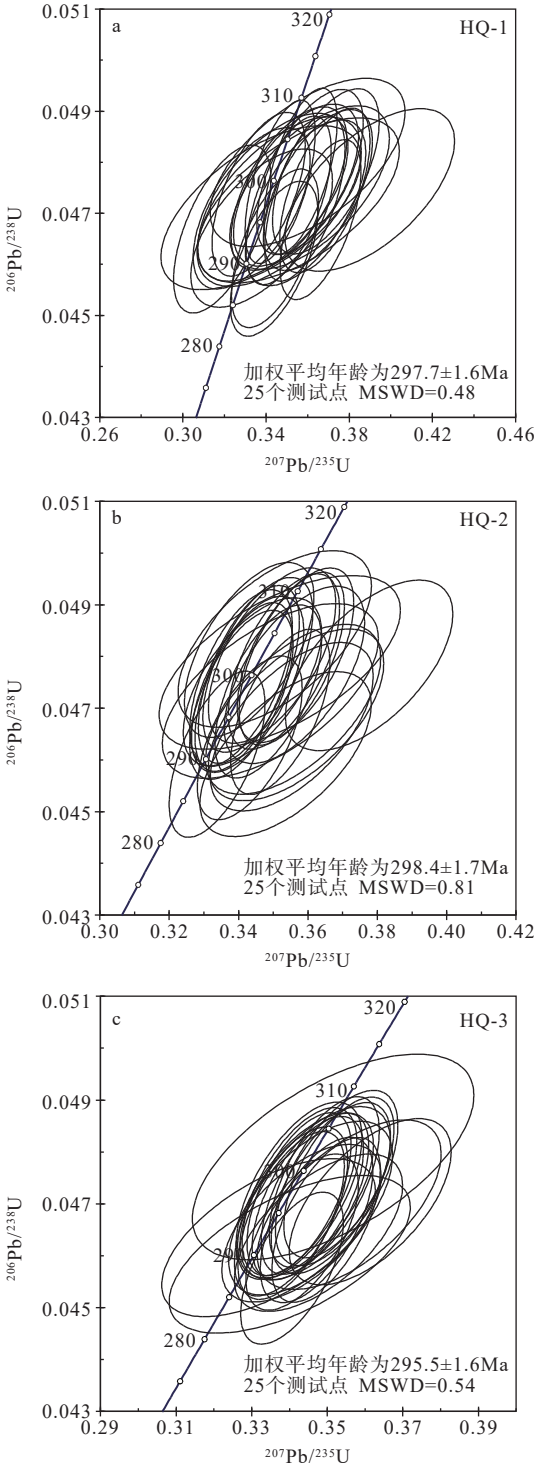
5.1　源区性质及地壳混染

哈密沁城一带超基性岩墙呈现较低的 SiO_2 含量（39.00%～45.48%），表明来源于地幔源区，稀土总量较低，轻、重稀土元素分馏不明显，无明显铕异常（图 6a），Sr 同位素初始比值为 0.7047～0.7051，变化范围小。$\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为−2.63～+1.81。这些特征表明，岩浆受地壳混染程度低（图 7a），因为地壳混染会导致轻稀土富集，并使岩石的 SiO_2 和 Sr 初始值升高，Nd 初始值降低。岩石富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K 等，相对亏损高场强元素（Nb、Zr、Hf）。综上所述，角闪石岩原岩起源于不均一地幔源区的部分熔融。

Pearce（2008, 2014）研究表明 Th 和 Nb 都是高度不相容元素，在地幔熔融过程中保持几乎恒定的比例。然而，在俯冲过程中 Th 和 Nb 具有明显不同的性质，Th 相对于 Nb 更具有活动性，从而导致它们解耦合，因此绝大多数俯冲带上熔岩具有高 Th/Nb。由于大陆地壳至少部分是由俯冲形成的，因此它也具有很高的 Th/Nb 值，同化了大陆地壳的岩浆也具有较高的 Th/Nb 值。此次采样的超基性岩墙表现出高的 Th/Yb（图 7b），样品投点偏离了 MORB-OIB 演化线，暗示源区可能受到了俯冲组分的影响，或幔源岩浆上升过程有地壳物质的加入，与 Sr-Nd 同位素特征一致。综上所述，角闪石岩原岩起源于不均一地幔源区的部分熔融并遭受地壳物质的混染。

5.2　构造意义

在哈尔里克山南缘沁城一带发现了早二叠世形成的角闪石岩，岩石地球化学特征显示 SiO_2 含量低（39.00%～45.48%）、高镁，相容元素 V、Cr、Co、Ni 含量高，指示岩浆来源于地幔源区。角闪石岩全岩初始^{87}Sr/^{86}Sr 比值为 0.7047～0.7051 之间，具有正的 $\varepsilon Nd(t)$ 值（少量负值与地壳物质混入有关），同样反映地幔源区特点。这期岩浆活动的侵位时代集中在 298 Ma～287 Ma，成因认识分歧较大，有人认为是地幔柱（夏林圻等，2006；张传林等，2010；王玉往等，2013），也有人认为是后碰撞阶段幔源岩浆底垫



a—样品 HQ-1 年龄协和图；b—样品 HQ-2 年龄协和图；c—样品 HQ-3 年龄协和图

图 4 角闪石岩 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams for zircon from the hornblendite

(a) Concordia diagram for zircon from the sample HQ-1; (b) Concordia diagram for zircon from the sample HQ-2; (c) Concordia diagram for zircon from the sample HQ-3

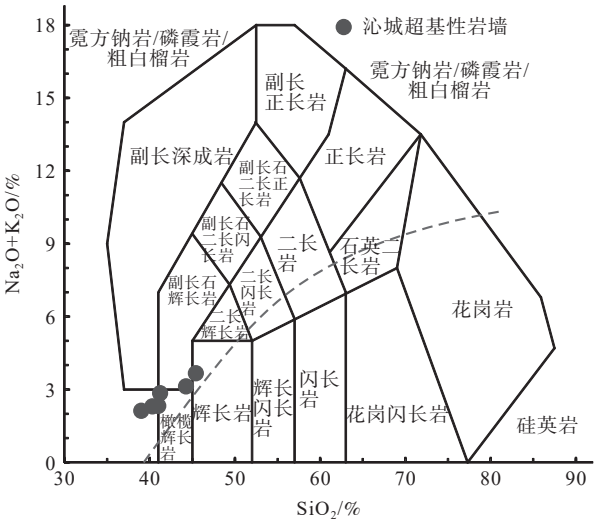


图 5 角闪石岩的 TAS 图解（Middlemost，1994）

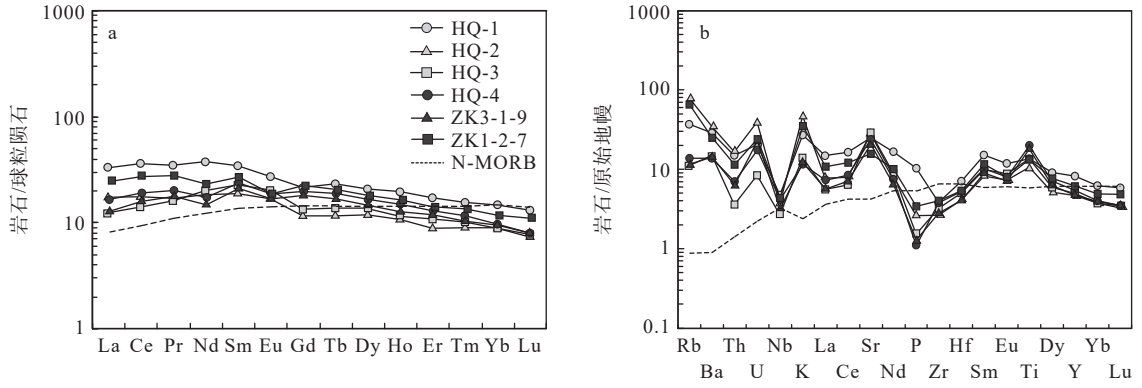
Fig. 5 TAS diagram of the hornblendites (Middlemost, 1994)

作用所导致的地壳伸展作用的结果(韩宝福等, 2004)，根据近年来的研究，倾向于后者的观点，属后碰撞伸展环境或挤压−伸展转折(陈希节和舒良树, 2010; 陈希节等, 2016a, 2016b; 赵明等, 2002)。哈尔里克山南缘的角闪石岩形成于陆内伸展环境，代表着一次陆内伸展的构造−岩浆活动。

超基性、基性岩墙作为岩石圈伸展的重要标志，是大地构造演化过程中特殊的单元(李江海等, 1997; 霍海龙等, 2019, 2024)，形成时代对于构造演化具有很好的限定，古亚洲洋闭合时限一直备受争议，二叠纪—三叠纪闭合(肖文交等, 2006)；晚石炭世—早二叠世闭合(李锦轶等)；早二叠世晚期或以后才闭合(毛启贵等, 2006)。此次研究的沁城超基性岩墙形成于 295～298 Ma, 与哈尔里克地区同时发育的钾长花岗岩(293～297 Ma; 赵明等, 2002; 陈希节和舒良树, 2010)、碱性花岗岩(288～287 Ma; 汪传胜等, 2009b; 陈希节等, 2016a)组合碰撞后伸展阶段的典型标志(Gu et al., 1999; 汪传胜等, 2009b; 陈希节等, 2016b)，指示应力相对松弛的后碰撞构造背景。表明 298 Ma 后哈尔里克山南缘转化为以伸展构造为主，哈尔里克山地区古亚洲洋在早二叠世之前闭合。

6 结论

哈尔里克山地区的超基性岩墙属于碱性系列，具高钛($TiO_2$1.60%～ 3.01%)、中等 $Mg^{\#}$值(50～60)，富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K、Sr)，轻稀土相对



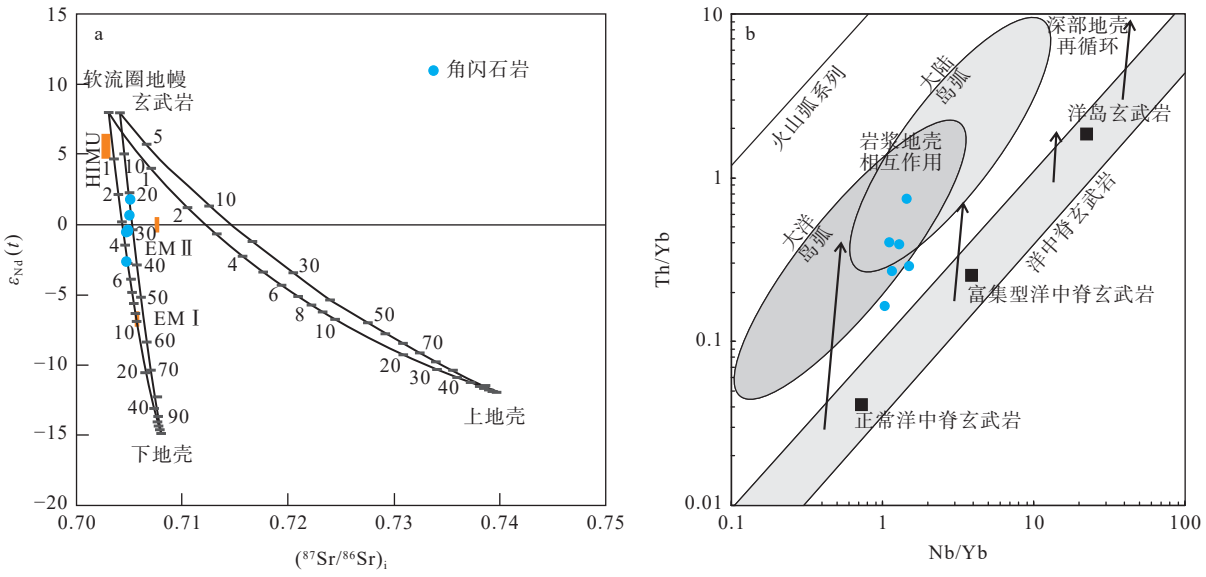
a—球粒陨石标准化稀土元素配分模式图；b—原始地幔标准化微量元素蛛网图

（球粒陨石标准化值据 Boynton, 1984；原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989）

图 6　沁城角闪石岩稀土和微量元素图解

Fig. 6　Rare earth element and trace element diagrams for the hornblendite in Qincheng

(a) Chondrite-normalized rare earth element distribution pattern diagram; (b) Primary Mantle- normalized trace element spider diagram（the chondrite normalization values are from Boynton, 1984, and the primitive mantle normalization values are from Sun and McDonough, 1989）



a—$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$–$\varepsilon_{Nd}(t)$ 图解；b—Th/Yb-Nb/Yb 图解（Pearce, 2008）

a 图中数字表示地壳物质参与的比例，计算采用的参数 Nd（$\times10^{-6}$）、$\varepsilon_{Nd}(t)$、Sr（$\times10^{-6}$）和 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值如下：软流圈地幔分别为 1.2、+8、20 和 0.703；玄武岩分别为 15、+8、200 和 0.704；上地壳分别为 30、−12、250 和 0.740（据 Jahn et al., 2000a 修改）；下地壳分别为 20、−15、230 和 0.708（据 Wu et al., 2000 修改）

图 7　哈密沁城角闪石岩 Sr-Nd 同位素及 Th/Yb-Nb/Yb 图解

Fig. 7　$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$vs. $\varepsilon_{Nd}(t)$ diagram and Th/Yb-Nb/Yb diagram for the hornblendite in Qincheng, Hami

(a) $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$-$\varepsilon_{Nd}(t)$ diagram; (b) Th/Yb-Nb/Yb diagram (Pearce, 2008)

The numbers in Figure a represent the proportion of crustal materials involved. The values of the parameters Nd ($\times10^{-6}$), $\varepsilon_{Nd}(t)$, Sr ($\times10^{-6}$) and $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ used for the calculation are as follows: for the asthenospheric mantle, they are 1.2, +8, 20 and 0.703 respectively; for basalt, they are 15, +8, 200 and 0.704 respectively; for the upper crust, they are 30, −12, 250 and 0.740 respectively (after Jahn et al., 2000a); for the lower crust, they are 20, −15, 230 and 0.708 respectively (after Wu et al., 2000).

弱富集，相对亏损高场强元素（Nb、Zr、Hf），具有较低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$。锆石 U-Pb 年龄表明哈密沁城一带角闪石岩形成于 295.5～298.4 Ma，属于早二叠世岩浆活动的产物。研究认为沁城早二叠世角闪石岩

原岩的岩浆可能起源于被交代的岩石圈地幔部分熔融,形成于后碰撞伸展环境下,同时,暗示哈尔里克山地区古亚洲洋在早二叠世之前闭合。

致谢:本项研究野外调查期间得到了新疆地矿局第一区域地质调查大队吴福泉的全力帮助,表示衷心的谢意。

References

BOYNTON W V, 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. Rare Earth Element Geochemistry, 2: 63-114.

CAO F G, TU Q J, ZHANG X M, et al., 2006. Preliminary determination of the Early Paleozoic magmatic arc in the Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China: evidence from zircon SHRIMP U-Pb dating of granite bodies in the Tashuihe area[J]. Geological Bulletin of China, 25(8): 923-927. (in Chinese with English abstract)

CHEN X J, SHU L S, 2010. Features of the post-colisional tectono-magmatism and geochronological evidence in the Harlik Mt. , Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(10): 3057-3064. (in Chinese with English abstract)

CHEN X J, ZHANG K H, ZHOU J, 2016a. Geochronology and geochemistry characteristics of the Early Permian monzogranite and dioritic enclaves of East Tianshan and their tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica, 90(9): 2334-2354. (in Chinese with English abstract)

CHEN X J, ZHANG K H, ZHANG G L, et al., 2016b. Characteristics, petrogenesis and tectonic implications of the Permian Omoertage alkaline granites in Harlik area, Xinjiang[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 35(6): 929-946. (in Chinese with English abstract)

GU L X, HU S X, CHU Q, et al., 1999. Pre-collision granites and post - collision intrusive assemblage of the Kelameili - Harlik orogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 73(3): 316-329.

GU L X, ZHANG Z Z, WU C Z, et al., 2006. Some problems on granites and vertical growth of the continental crust in the eastern Tianshan Mountains, NW China[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1103-1120. (in Chinese with English abstract)

GUO H C, ZHONG L, LI L Q, 2006. Zircon SHRIMP U-Pb dating of quartz diorite in the Koumenzi area, Karlik Mountains, East Tianshan, Xinjiang, China, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 25(8): 928-931. (in Chinese with English abstract)

HAN B F, HE G Q, WU T R, et al., 2004. Zircon U-Pb dating and geochemical features of early Paleozoic granites from Tianshan, Xinjiang: implications for tectonic evolution[J]. Xinjiang Geology, 22(1): 4-11. (in Chinese with English abstract)

HU A Q, ZHANG G X, CHEN Y B, et al. , 2006. Geologicalevolution, petrogenesis and metallogeny of North Xinjiang[M]. Beijing: Science Press: 1-146 (in Chinese).

HUO H L, CHEN Z L, CHEN G M, et al., 2019. The U-Pb geochronology and geochemical characteristics of the Saergan mafic rocks in the Keping area, Southwest Tianshan, China[J]. Journal of Geomechanics, 25(S1): 60-65. (in Chinese with English abstract).

HUO H L, CHEN Z L, ZHANG Q, et al., 2024. Quartz deformation characteristics, deformation temperature, and their constraints on pegmatites of the 509 Daobanxi lithium deposit in the West Kunlun area, Xinjiang[J]. Journal of Geomechanics, 30(1): 72-87. (in Chinese with English abstract)

JAHN B M, WU F Y, HONG D W, 2000a. Important crustal growth in the Phanerozoic: isotopic evidence of granitoids from East-Central Asia[J]. Journal of Earth System Science, 109(1): 5-20.

JAHN B M, WU F Y, CHEN B, 2000b. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. Episodes, 23(2): 82-92.

JIN L Y. 2014. Geological characteristics and its tectonic significance of the Paleozoic volcanic rocks in Bogda-Harlik[D]. Urumqi: Xinjiang University. (in Chinese with English abstract)

LI H K, GENG J Z, HAO S, et al., 2009. Study on zircon U-Pb dating by LA-ICP MS[J]. Acta Mineralogica Sinica, 29(S1): 600-601. (in Chinese with English abstract)

LI J H, HE W Y, QIAN X L, 1997. Genetic mechanism and tectonic setting of Proterozoic mafic dyke swarm: its implication for paleoplate reconstruction[J]. Geological Journal of China Universities, 3(3): 272-281. (in Chinese with English abstract)

LI J Y, WANG K Z, LI Y P, et al., 2006. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains[J]. Geological Bulletin of China, 25(8): 895-909. (in Chinese with English abstract)

LIU L, HE X F, LI J T, et al., 2017. Petrogenesis and tectonic signficances of the Qincheng Tianshengquan pluton in the Harlik orogen of eastern Xinjiang[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 36(2): 86-96. (in Chinese with English abstract)

MA X H, CHEN B, WANG C, et al., 2015. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from the Harlik pluton, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(1): 89-104. (in Chinese with English abstract)

MAO Q G, XIAO W J, HAN C M, et al., 2006. Zircon U-Pb age and the geochemistry of the Baishiquan mafic-ultramafic complex in the eastern Tianshan, Xinjiang province: constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(1): 153-162. (in Chinese with English abstract)

MIDDLEMOST E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 37(3-4): 215-224.

PEARCE J A, 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. Lithos, 100(1-4): 14-48.

PEARCE J A, 2014. Immobile element fingerprinting of ophiolites[J]. Elements, 10(2): 101-108.

SUN G H, LI J Y, CAO L M, et al., 2005. Zircon SHRIMP U-Pb age of a dioritic pluton in the Harlik Mountain, eastern Xinjiang, and its tectonic implication[J]. Geological Review, 51(4): 463-469. (in Chinese with English abstract)

SUN G H, LI J Y, YANG T N, et al., 2006. Permian post-collisional NS-compression deformation in Tianshan orogen: example from Koumenzi ductile shear zone of thrusting-type in northern slope of Harlik mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1359-1368. (in Chinese with English abstract)

SUN G H. 2007. Structural Deformation and Tectonic Evolution of Harlik

Mountain, in Xinjiang Since the Paleozoic[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

SUN G H, LI J Y, ZHU Z X, et al., 2007. Zircons SHRIMP U-Pb dating of gneissoid-biotitic granite in Harlik Mountains, eastern of Xinjiang and it's geological implications[J]. Xinjiang Geology, 25(1): 4-10. (in Chinese with English abstract)

SUN S S, MCDONOUGH W F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//SAUNDERS A D, NORRY M J. Magmatism in the ocean basins. London: Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313-345.

Regional Geological Survey Brigade of the Geology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, 1966. 1:200000 Geological and Mineral Map of Yiwu Sheet and Its Instruction Manual [R]. Qitai: Geology Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region.

WANG C S, ZHANG Z Z, WU C Z, et al., 2009a. Petrologic characteristics, zircon geochronology of dioritic enclaves in Early Permian Badashi monzogranite of East Tianshan Mountains and their geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 28(4): 299-315. (in Chinese with English abstract)

WANG C S, GU L X, ZHANG Z Z, et al., 2009b. Petrogenesis and tectonic implications of the Permian alkaline granite and quartz-syenite assemblage in Harlik Mountains, Xinjiang[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3182-3196. (in Chinese with English abstract)

WANG C Y, SHU L S, ZHAO M, et al., 1996. Late Paleozoic thrust tectonics and related magmatism in Haerlike area, North segment of eastern Tianshan belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2(2): 198-206. (in Chinese with English abstract)

WANG Y W, WANG J B, LI D D, et al., 2013. Types, temporal-spatial distribution and metallogenic lineage of ore deposits related to mantle-derived magma in northern Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 32(2): 223-243. (in Chinese with English abstract)

WU F Y, JAHN B M, WILDE S A, et al., 2000. Phanerozoic continental crustal growth: U- Pb and Sr- Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. Tectonophysics, 328: 89-113

XIA L Q, LI X M, XIA Z Z, et al., 2006. Carboniferous-Permian rift-related volcanism and mantle plume in the Tianshan, northwestern China[J]. Northwestern Geology, 39(1): 1-49. (in Chinese with English abstract)

XIANG Z J, YAN Q R, SONG B, et al., 2016. New evidence for the ages of ultramafic to mafic dikes and alkaline volcanic complexes in the North Daba Mountains and its geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 90(5): 896-916. (in Chinese with English abstract)

XIAO W J, HAN C M, YUAN C, et al., 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of northern Xinjiang (NW China): constraints for the tectonics of the southern Paleoasian Domain[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1062-1076. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C L, ZHOU G, WANG H Y, et al., 2010. A review on two types of mantle domains of the Permian large igneous province in Tarim and the western section of Central Asian orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 29(6): 779-794. (in Chinese with English abstract)

ZHAO B B, DENG Y F, ZHOU T F, et al., 2018. Petrogenesis of the Baixintan Ni-Cu sulfide-bearing mafic-ultramafic intrusion, East Tianshan: evidence from geochronology, petrogeochemistry and Sr-Nd isotope[J]. Acta Petrologica Sinica, 34(9): 2733-2753. (in Chinese with English abstract)

ZHAO M, SHU L S, WANG C Y, 1997. Characteristics of metamorphism in the Harlik metamorphic belt, East Xinjiang, and its tectonic environment[J]. Geological Journal of China Universities, 3(1): 40-50. (in Chinese with English abstract)

ZHAO M, WANG C Y, 1998. Characteristics of amphibole from the Harlik metamorphic belt in eastern Xinjiang and its geological significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 17(1): 15-17. (in Chinese with English abstract)

ZHAO M, SHU L S, ZHU W B, et al., 2002. Zircon U-Pb dating of the rocks from the Harlik metamorphic belt in eastern Xinjiang and its geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 76(3): 379-383. (in Chinese with English abstract)

ZHU W B, SHU L S, WAN J L, et al., 2006. Fission-track evidence for the exhumation history of Bogda-Harlik Mountains, Xiniiang since the cretaceous[J]. Acta Geologica Sinica, 80(1): 16-22. (in Chinese with English abstract)

ZHU X H, ZHU T, ZHANG X, et al., 2018. Petrogenesis and geological implications of late CARBONIFEROUS leucogranites in Harlik area, eastern Tianshan[J]. Earth Science, 43(12): 4443-4458. (in Chinese with English abstract)

ZHU Z X, LI P, ZHAO T Y, et al., 2018. Tectonic magmatic evolution and minerralization of Bogda-Harlik tectonic belt, Xinjiang, China[J]. Xinjiang Geology, 36(1): 1-7. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

曹福根，涂其军，张晓梅，等，2006. 哈尔里克山早古生代岩浆弧的初步确定：来自塔水河一带花岗质岩体锆石 SHRIMP U-Pb 测年的证据[J]. 地质通报，25(8)：923-927.

陈希节，舒良树，2010. 新疆哈尔里克山后碰撞期构造-岩浆活动特征及年代学证据[J]. 岩石学报，26(10)：3057-3064.

陈希节，张奎华，周健，2016a. 东天山哈密地区早二叠世花岗岩体及镁铁质包体的年代学，岩石地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报，90(9)：2334-2354.

陈希节，张奎华，张关龙，等，2016b. 新疆东天山哈尔里克二叠纪奥莫尔塔格碱性花岗岩特征、成因及构造意义[J]. 岩石矿物学杂志，35(6)：929-946.

顾连兴，胡受奚，诸强，等，1999. 新疆克拉麦里-哈尔里克造山带碰撞前花岗岩和碰撞后侵入岩组合[J]. 地质学报，73(3)：316-329.

顾连兴，张遵忠，吴昌志，等，2006. 关于东天山花岗岩与陆壳垂向增生的若干认识[J]. 岩石学报，22(5)：1103-1120.

郭华春，钟莉，李丽群. 2006. 哈尔里克山口门子地区石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. 地质通报，25(8)：928-931.

韩宝福，何国琦，吴泰然，等，2004. 天山早古生代花岗岩锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学特征及其大地构造意义[J]. 新疆地质，22(1)：4-11.

胡霭琴, 张国新, 陈义兵, 等, 2006. 中国新疆地壳演化主要地质事件年代学和地球化学[M]. 北京: 地质出版社: 1-146.

霍海龙, 陈正乐, 陈贵民, 等, 2019. 西南天山柯坪地区萨尔干基性岩脉 U-Pb 年代学及地球化学特征[J]. 地质力学学报, 25(S1): 60-65.

霍海龙, 陈正乐, 张青, 等, 2024. 新疆西昆仑 509 道班西锂矿伟晶岩石英变形特征、温度及其对伟晶岩就位的约束[J]. 地质力学学报, 30(1): 72-87.

靳刘圆. 2014. 博格达—哈尔里克古生代火山岩地质特征及构造意义[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学.

李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等, 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 29(S1): 600-601.

李江海, 何文渊, 钱祥麟, 1997. 元古代基性岩墙群的成因机制、构造背景及其古板块再造意义[J]. 高校地质学报, 3(3): 33-42.

李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 等, 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J]. 地质通报, 25(8): 895-909.

刘亮, 何学锋, 李江涛, 等, 2017. 新疆东部哈尔里克造山带沁城天生圈岩体岩石成因及其构造意义[J]. 地质科技情报, 36(2): 86-96.

马星华, 陈斌, 王超, 等, 2015. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自新疆哈尔里克侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素证据[J]. 岩石学报, 31(1): 89-104.

毛启贵, 肖文交, 韩春明, 等, 2006. 新疆东天山白石泉铜镍矿床基性-超基性岩体锆石 U-Pb 同位素年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 22(1): 153-162.

孙桂华, 李锦轶, 高立明, 等, 2005. 新疆东部哈尔里克山闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质论评, 51(4): 463-469.

孙桂华, 李锦轶, 杨天南, 等, 2006. 天山造山带二叠纪后碰撞南北向挤压变形: 以哈尔里克山北坡口门子逆冲型韧性剪切带为例[J]. 岩石学报, 22(5): 1359-1368.

孙桂华, 李锦轶, 朱志新, 等, 2007. 新疆东部哈尔里克山片麻状黑云母花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 新疆地质, 25(1): 4-10.

汪传胜, 张遵忠, 吴昌志, 等, 2009a. 东天山八大石早二叠世二长花岗岩中闪长质包体的特征、锆石定年及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 28(4): 299-315.

汪传胜, 顾连兴, 张遵忠, 等, 2009b. 新疆哈尔里克山二叠纪碱性花岗岩-石英正长岩组合的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 25(12): 3182-3196.

王赐银, 舒良树, 赵明, 等, 1996. 东天山北部哈尔里克晚古生代推覆构造与岩浆作用研究[J]. 高校地质学报, 2(2): 198-206.

王玉往, 王京彬, 李德东, 等, 2013. 新疆北部幔源岩浆矿床的类型、时空分布及成矿谱系[J]. 矿床地质, 32(2): 223-243.

夏林圻, 李向民, 夏祖春, 等, 2006. 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, 39(1): 1-49.

向忠金, 闫全人, 宋博, 等, 2016. 北大巴山超基性、基性岩墙和碱质火山杂岩形成时代的新证据及其地质意义[J]. 地质学报, 90(5): 896-916.

肖文交, 韩春明, 袁超, 等, 2006. 新疆北部石炭纪-二叠纪独特的构造-成矿作用: 对古亚洲洋构造域南部大地构造演化的制约[J]. 岩石学报, 22(5): 1062-1076.

新疆维吾尔自治区地质局区域地质测量大队, 1966. 1: 200000 伊吾幅地质矿产图及说明书[R]. 奇台: 新疆维吾尔自治区地质局.

张传林, 周刚, 王洪燕, 等, 2010. 塔里木和中亚造山带西段二叠纪大火成岩省的两类地幔源区[J]. 地质通报, 29(6): 779-794.

赵明, 舒良树, 王赐银, 1997. 东疆哈尔里克变质地带变质作用特征及形成构造环境研究[J]. 高校地质学报, 3(1): 40-50.

赵明, 王赐银, 1998. 东疆哈尔里克造山带中角闪石的特征及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 17(1): 15-17.

赵明, 舒良树, 朱文斌, 等, 2002. 东疆哈尔里克变质带的 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 76(3): 379-383.

朱文斌, 舒良树, 万景林, 等, 2006. 新疆博格达—哈尔里克山白垩纪以来剥露历史的裂变径迹证据[J]. 地质学报, 80(1): 16-22.

朱小辉, 朱涛, 张欣, 等, 2018. 东天山哈尔里克地区晚石炭世淡色花岗岩成因及其地质意义[J]. 地球科学, 43(12): 4443-4458.

朱志新, 李平, 赵同阳, 等, 2018. 新疆博格达-哈尔里克构造带构造岩浆演化与成矿作用研究[J]. 新疆地质, 36(1): 1-7.