

doi: 10.12097/gbc.2021.10.010

内蒙古希仁布敦钾玄质火山岩锆石 U-Pb 年龄及构造环境

成义¹, 陈公正², 李英杰², 王金芳^{2*}

CHENG Yi¹, CHEN Gongzheng², LI Yingjie², WANG Jinfang^{2*}

1. 河北省地矿局第七地质大队, 河北 燕郊 065201;

2. 河北地质大学地球科学学院, 河北 石家庄 050031

1. The Seventh Geological Team of Hebei Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Yanjiao 065201, Hebei, China;

2. College of Earth Sciences, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China

摘要: 内蒙古希仁布敦地区钾玄质火山岩出露于贺根山缝合带梅劳特乌拉-迪彦庙蛇绿混杂岩带内, 岩性为玄武粗安岩和粗安岩, 研究其形成时代、岩石成因和构造环境, 对探讨贺根山缝合带构造演化具有重要启示。粗安岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测年获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值为 176.3±0.8 Ma, 形成时代为早侏罗世。岩石相对富碱 Na₂O+K₂O(5.28%~7.19%, >5%)、高 Al₂O₃(16.13%~17.42%)、高 K₂O/Na₂O 值(0.66~1.14, >0.5)、高 Fe₂O₃/FeO 值(0.82~1.50, >0.5)、低 TiO₂(0.91%~1.16%, <1.3%)、富集 Th、U、Sr 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素。稀土元素含量为 168.53×10⁻⁶~233.03×10⁻⁶, 稀土元素配分曲线为右倾式分布。岩石学和岩石地球化学特征表明, 希仁布敦地区玄武粗安岩-粗安岩为后造山钾玄质岩石, 与古亚洲洋俯冲作用有关, 形成于古亚洲洋俯冲板片后撤-断离-后造山伸展构造环境。晚古生代末古亚洲洋俯冲洋壳+俯冲深积物析出流体交代上覆地幔楔, 形成贺根山缝合带富集地幔, 中生代早期古亚洲洋俯冲板片断离-后造山伸展作用诱发富集地幔部分熔融, 产生该区钾玄质岩浆。

关键词: 钾玄质火山岩; 锆石 U-Pb 定年; 后造山伸展环境; 地质调查工程; 内蒙古

中图分类号: P588.14; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)05-0827-12

Cheng Y, Chen G Z, Li Y J, Wang J F. Zircon U-Pb age and tectonic setting of the shoshonitic volcanic rocks in the Xirenbudun area, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(5): 827-838

Abstract: The shoshonitic volcanic rocks in the Xirenbudun area of Inner Mongolia occur in the Meilaotewula - Diyanmiao ophiolitic melange belt of the Hegenshan suture zone. The volcanic rocks include basaltic trachyandesite and trachyandesite. The study of the formation age, petrogenesis, and tectonic setting in the volcanic rocks has important implications for the tectonic evolution of the Hegenshan suture zone. The zircon LA-ICP-MS U-Pb dating for the trachyandesite yielded a weighted mean ²⁰⁶Pb/²³⁸U age of 176.3±0.8 Ma, suggesting that its formation age is Early Jurassic. The volcanic rocks are rich in Na₂O+K₂O(5.28%~7.19%, >5%), Al₂O₃(16.13%~17.42%) and high K₂O/Na₂O ratio (0.66~1.14, >0.5), Fe₂O₃/FeO ratio (0.82~1.50, >0.5) but low in TiO₂(0.91%~1.16%, <1.3%). The rocks are obviously enriched in Th, U, Sr and LREEs, and depleted in Nb, Ta and Ti, with remarkably negative Nb, Ta, P and Ti anomalies on primitive mantle-normalized incompatible element patterns. The contents of rare earth elements range from 168.53×10⁻⁶ to 233.03×10⁻⁶. The chondrite normalized REE distribution patterns are of right-inclined shape. The basaltic

收稿日期: 2021-10-08; 修订日期: 2021-11-04

资助项目: 国家自然科学基金项目《内蒙古西乌旗迪彦庙蛇绿岩年代学、地球化学及大地构造意义》(批准号: 41502211)、中国地质调查局项目《内蒙古 1:5 万高力罕牧场三连等四幅区调》(编号: 1212011120711)和河北省自然资源厅项目《河北省康保县北沙城铅锌矿普查》(编号: 2021044)

作者简介: 成义(1968-), 男, 高级工程师, 从事区域地质与矿产地质工作。E-mail: shitou919@126.com

* 通信作者: 王金芳(1983-), 女, 硕士, 副教授, 从事岩石学研究。E-mail: wjfb1983@163.com

trachyandesite-trachyandesite belong to post orogenic shoshonitic rocks, were related to the subduction of the Palaeo-Asian Ocean (PAO), and formed in the subsequent subducted slab roll back-break off-post orogenic extension tectonic setting. In the end of Late Paleozoic, the fluids dehydrated from the subducted oceanic crust+sediments of the PAO metasomatized the overlying mantle wedge to form the enriched mantle of the Hegenshan suture. In the Early Mesozoic, the PAO subducted slab break off-the post orogenic extension triggered partial melting of the enriched mantle to produce the shoshonitic magma in this area.

Key words: shoshonitic volcanic rocks; zircon U-Pb dating; post orogenic extension setting; geological survey engineering; Inner Mongolia

造山带环境下的钾玄质岩(钾玄岩、粗面玄武岩、玄武粗安岩、粗安岩、安粗岩、粗面岩等)通常属于与大洋俯冲作用有关的富碱高钾的钾玄质系列岩石组合,主要为大洋俯冲板片流体交代的地幔楔橄榄岩部分熔融的产物(Morrison, 1980; Mueller et al., 1992; Aftabi et al., 2000; 邱检生等, 2002, 2003, 2013; Williams et al., 2004; 王良玉等, 2016; 贾小辉等, 2017)。识别和研究与大洋俯冲作用有关,而形成于后造山环境的钾玄质火山岩,可为判别大洋俯冲作用和俯冲板片断离-后造山伸展造山带构造演化提供重要证据(Foley et al., 1992; Wyborn, 1992; Pe-Piper et al., 2014; 尼玛次仁等, 2015; 王金芳等, 2020b, 2021c)。内蒙古中部二连-贺根山缝合带作为华北板块与西伯利亚板块的重要缝合界线之一,广泛发育晚古生代 SSZ 型蛇绿岩-岛弧岩浆岩(陈斌等, 2001; Miao et al., 2008; Xiao et al., 2009; Liu et al., 2013; 刘锐等, 2016; 李钢柱等, 2017; 王树庆等, 2018; 王帅等, 2021; 程天赦等, 2023)和中生代后造山型岩浆岩(图 1)(张晓晖等, 2006; 石玉若等, 2007; 李可等, 2012; 程天赦等, 2014; 张学斌等, 2015; 袁建国等, 2017)。然而,与晚古生代蛇绿岩-岛弧岩浆岩和中生代后造山 A 型花岗岩-流纹岩相对比,贺根山缝合带中生代钾玄质火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学和构造环境的研究相对缺乏,特别是早侏罗世钾玄质火山岩尚未见有报道。而且,中亚造山带东段古亚洲洋“晚二叠世-早三叠世闭合”和“中三叠世-早白垩世后造山伸展”构造演化的认识(Sengor et al., 1993; Chen et al., 2000; Windley et al., 2007; 李锦轶等, 2007; 邓晋福等, 2015b; 张晓飞等, 2018; 程杨等, 2019; 范玉须等, 2019),仍需要进一步的后造山伸展阶段岩浆活动证据的约束。因此,本文在 1:5 万高力罕牧场三连等四幅区域地质矿产调查的基础上,选择内蒙古西乌旗梅劳特乌拉-迪彦庙蛇绿混杂岩带(俯冲增生杂岩)中新识别出的钾玄质火山岩进行锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,探讨其岩石属

性、源区特征和形成构造环境,为中亚造山带东段二连-贺根山缝合带构造演化提供新的岩石学与年代学证据。

1 区域地质背景和岩石学特征

内蒙古西乌旗希仁布敦地区钾玄质火山岩,位于二连-贺根山缝合带东段梅劳特乌拉-迪彦庙蛇绿混杂岩带(俯冲增生杂岩带)内(图 1、图 2-a)(李英杰等, 2012, 2015, 2018, 2023; 王金芳等, 2019; 刘志斌等, 2023)。研究区出露地层主要为中生界下侏罗统满克头鄂博组玄武粗安岩-粗安岩等钾玄质火山岩,少量流纹岩;南部可见上古生界下二叠统寿山沟组复理石浊积岩(俯冲增生杂岩)(图 1-b、图 2-a)。侵入岩主要为早二叠世钾长花岗岩和石英闪长岩。满克头鄂博组火山岩呈角度不整合覆盖在下二叠统寿山沟组复理石浊积岩和早二叠世钾长花岗岩-石英闪长岩体之上。该玄武粗安岩-粗安岩等钾玄质火山岩上覆于流纹岩之上,出露面积约 26 km²,其堆积厚度约 230 m。1:20 万罕乌拉幅区域地质调查将其归为上侏罗统上兴安岭组酸性火山岩(内蒙古自治区地质局区域地质测量队, 1976),1:25 万西乌旗幅将其归为上侏罗统马尼吐组中性火山岩(沈阳地质矿产研究所, 2005),缺少地球化学和年代学等资料。本文最新锆石 U-Pb 测定结果表明,该套以粗安岩为主的火山岩形成时代为早侏罗世,为下侏罗统满克头鄂博组火山岩。

希仁布敦地区火山岩以玄武粗安岩和粗安岩为主,少量流纹岩和粗安质-流纹质火山碎屑岩。玄武粗安岩-粗安岩深灰色,斑状结构,块状构造(图 2),局部可见气孔-杏仁构造。岩石由斑晶(10%~20%)和基质(80%~90%)组成。斑晶主要为斜长石,少量角闪石和黑云母,粒度 1~5 mm。斜长石主要为中长石,呈半自形板状,可见绢云母化;角闪石呈半自形柱粒状,可见暗化边和绿泥石化;黑云母呈鳞片

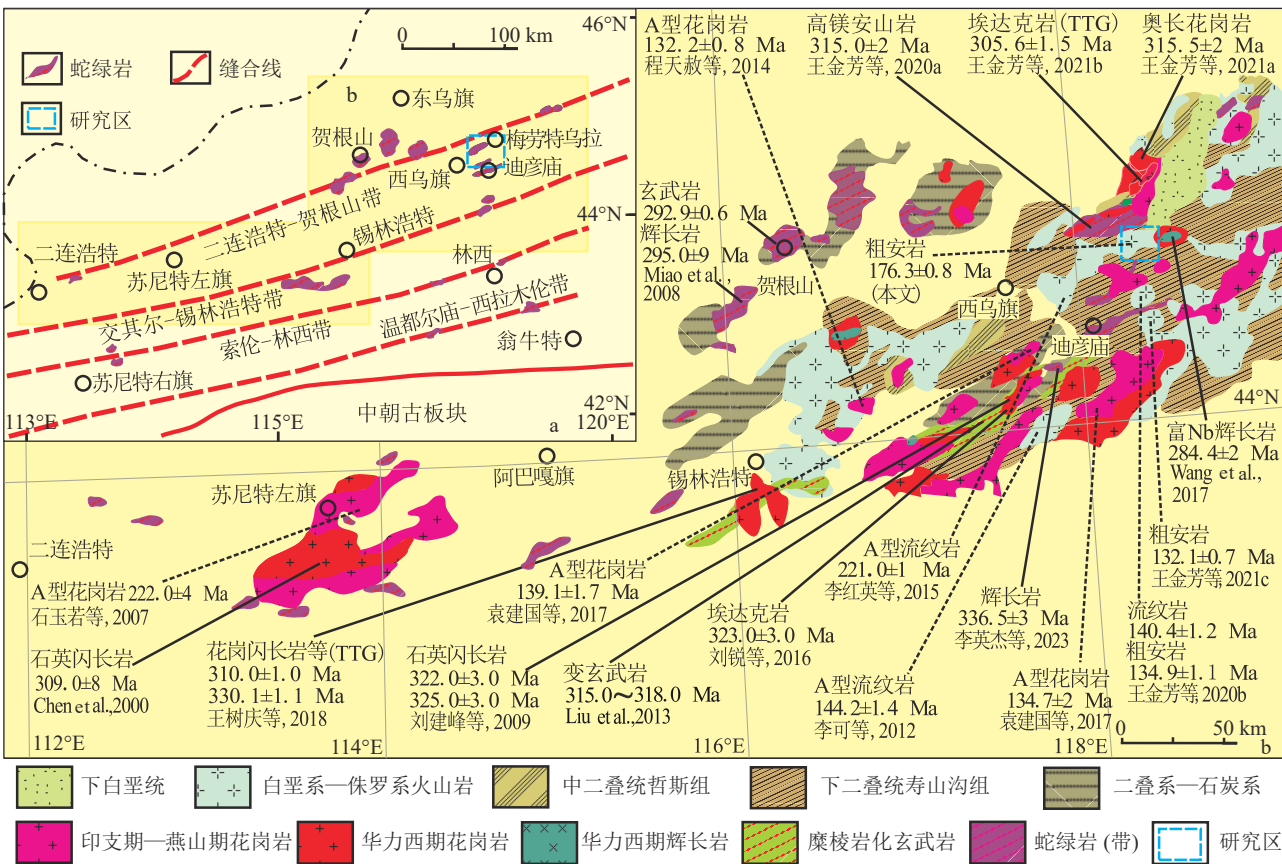


图 1 内蒙古希仁布敦钾玄质火山岩区域构造 (a) 与地质简图 (b)

Fig. 1 Sketch tectonic map (a) and regional geological map (b) of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks in Inner Mongolia

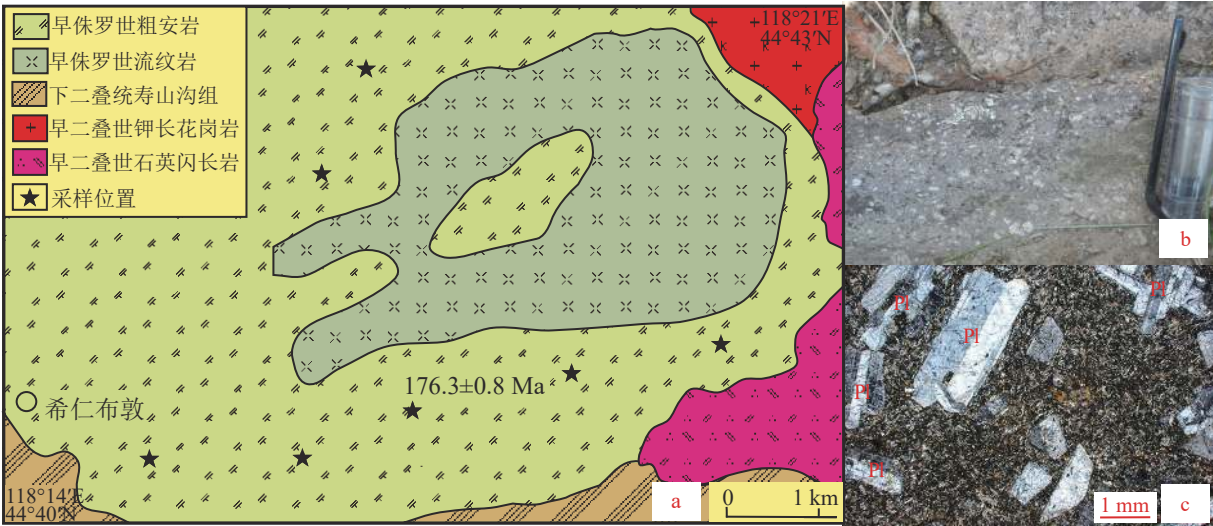


图 2 希仁布敦钾玄质火山岩地质简图 (a) 和样品野外 (b)、显微照片 (c)

Fig. 2 Geological map (a), field photo (b) and micrograph (c) of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

b—粗安岩; c—斑状结构。Pl—斜长石

状,见铁质化。基质主要为斜长石、钾长石和玻璃质。

2 锆石 U-Pb 测年

2.1 测试方法

本文锆石 U-Pb 测年样品采自西乌旗希仁布敦地区钾玄质火山岩中的粗安岩,样品编号为 PT134,采样地理位置为北纬 44°41'20"、东经 118°17'30" (图 2-a)。粗安岩年龄样品 (PT134) 锆石分选在河北省廊坊区域地质调查研究所完成。样品经粉碎、磁选和重选分选出纯度较高的锆石,并在双目镜下挑选出无色透明、晶形好、无明显裂痕的测年锆石。在北京锆年领航科技有限公司完成样品制靶、透射光、反射光照片拍摄和锆石阴极发光 (CL) 图像分析 (图 3-a)。锆石 U-Pb 年龄测定工作在中国地质调查局天津地质调查中心进行。利用 193 nm 激光器对锆石进行烧蚀,激光烧蚀的斑束直径为 35 μm ,剥蚀采样时间为 45 s。测试数据的普通铅校正采用 Anderson 的方法 (Andersen, 2002), 锆石 U-Pb 同位素比值及元素含量运用 4.4 版本 Glitter 程序,年龄加权平均计算使用 3.0 版本的 ISOPLOT 程序完成。

2.2 测试结果

在阴极发光 (CL) 图像 (图 3-a) 上,粗安岩样品的 25 颗锆石结构均一,呈自形一半自形短柱状,长宽比为 1:1~2:1,25 颗锆石均具较为宽缓稀疏的生长环带,反映中性岩浆成因锆石特征 (Claesson et al., 2000; Corfu et al., 2003)。粗安岩样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果见表 1。25 颗

锆石测定的 Th/U 值为 0.78~2.24,平均值为 1.73 (表 1),与岩浆锆石的 Th/U 值大于 0.4 一致,为岩浆成因锆石特征。该样品 25 颗锆石测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中于谐和线上及其附近,获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $176.3 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (MSWD = 0.83),代表了粗安岩的成岩年龄 (表 1; 图 3),故将希仁布敦地区钾玄质火山岩的形成时代置于早侏罗世。

3 地球化学特征

在希仁布敦地区玄武粗安岩-粗安岩中,共采集了 7 件地球化学样品,全岩主量、微量和稀土元素化学分析在河北省廊坊区域地质调查研究所完成。7 件样品按照常规方法首先在破碎机上进行粗碎,然后在玛瑙钵体和柱头研磨机上研磨至 200 目以下。主量元素分析采用 X 射线荧光光谱 (XRF) 分析,检测下限为 0.01%,分析误差优于 5%。微量元素采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 测定,检测限优于 5×10^{-9} ,相对标准偏差优于 5%。希仁布敦地区玄武粗安岩-粗安岩的全岩主量、微量和稀土元素测试分析结果见表 2。

3.1 主量元素

希仁布敦地区玄武粗安岩-粗安岩的 SiO_2 含量为 54.34%~61.30%,平均 58.19%;岩石相对富碱, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 5.28%~7.19%,平均 6.30%; Al_2O_3 含量明显较高,为 16.13%~17.42%,平均 16.85%;相对富钾, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.66~1.14,平均 0.86; TiO_2 含量明显较低,为 0.91%~1.16%,平均 0.99%; $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值

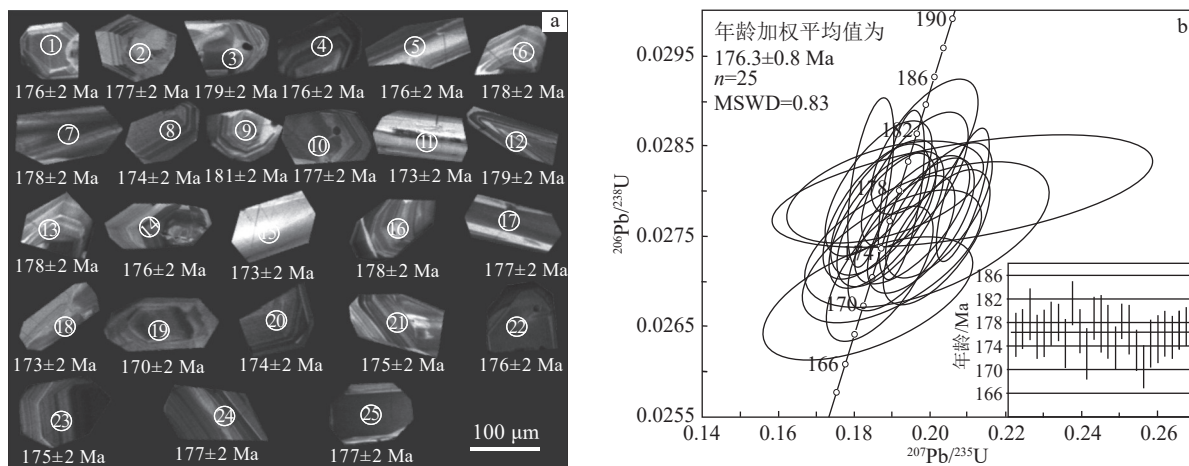


图 3 希仁布敦钾玄质火山岩锆石阴极发光图像 (a) 和锆石 U-Pb 年龄 (b)

Fig. 3 Cathodoluminescent images (a) and U-Pb ages (b) of zircons from the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

表 1 希仁布敦钾玄质火山岩 (PT134) LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb dating results of zircons from the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma	
	Pb	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
1	85	2092	1.9399	0.0497	1.12	0.1897	1.42	0.0277	1.06	176	± 2
2	40	1009	1.7461	0.0482	2.08	0.1849	2.47	0.0278	0.95	177	± 2
3	67	1638	1.8170	0.0477	1.15	0.1856	1.44	0.0282	1.22	179	± 2
4	108	2909	1.5326	0.0483	1.08	0.1839	1.52	0.0276	1.06	176	± 2
5	44	1173	1.5199	0.0512	1.23	0.1958	1.45	0.0277	1.13	176	± 2
6	51	1336	1.5992	0.0542	1.14	0.2088	1.36	0.0280	1.06	178	± 2
7	80	2084	1.4926	0.0487	6.29	0.1880	5.63	0.0280	0.88	178	± 2
8	64	1597	1.9786	0.0496	1.02	0.1876	1.22	0.0274	1.18	174	± 2
9	40	997	1.5956	0.0513	2.60	0.2017	2.90	0.0285	1.00	181	± 2
10	82	2190	1.4508	0.0494	6.90	0.1891	3.86	0.0278	1.09	177	± 2
11	37	994	1.7245	0.0485	1.87	0.1814	1.72	0.0271	1.26	173	± 2
12	129	3189	1.8387	0.0514	1.66	0.1991	2.18	0.0281	1.02	179	± 2
13	58	1461	1.8778	0.0497	1.09	0.1915	1.37	0.0280	1.38	178	± 2
14	44	1070	1.9406	0.0507	1.63	0.1941	2.33	0.0277	1.29	176	± 2
15	56	1061	1.9523	0.0505	4.67	0.1900	5.11	0.0273	1.10	173	± 2
16	112	2176	1.9426	0.0539	9.40	0.2083	9.92	0.0280	0.85	178	± 2
17	75	2057	1.5861	0.0511	1.13	0.1960	1.12	0.0278	1.18	177	± 2
18	106	2653	2.1731	0.0508	1.19	0.1908	1.86	0.0273	0.97	173	± 2
19	4	140	0.7880	0.0498	5.57	0.1838	6.20	0.0268	1.02	170	± 2
20	45	1122	1.9914	0.0528	4.94	0.1997	6.59	0.0274	1.19	174	± 2
21	46	1221	1.8398	0.0521	1.34	0.1978	1.67	0.0275	1.14	175	± 2
22	78	2147	1.6415	0.0488	1.12	0.1861	1.14	0.0277	1.08	176	± 2
23	28	821	1.2241	0.0534	1.82	0.2030	1.85	0.0276	1.03	175	± 2
24	32	863	1.7207	0.0488	1.74	0.1871	1.81	0.0278	0.93	177	± 2
25	85	2082	2.2431	0.0480	1.46	0.1847	1.37	0.0279	0.92	177	± 2

注: 实验测试在天津地质矿产研究所完成

较高, 为 0.82~1.50, 平均 1.24%; MgO 含量较低, 为 1.87%~2.91%, 平均 2.40%。A/CNK 值为 0.85~1.07, A/NK 值为 1.73~2.39, 属于准铝质-弱过铝质岩石。

在火山岩 TAS 分类命名图解 (图 4-a) 中, 7 个样品点均落入亚碱性系列的玄武粗安岩-粗安岩范围。在 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (图 4-b) 中, 7 个样品点均落在钾玄质区域。在岩浆系列硅碱 ($\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$) 判别图解 (图 5) 中, 5 个样品点落在高钾钙碱性系列, 2 个样品点落于钾玄岩系列, 表明该区玄武粗安岩-粗安岩可能为钾玄质岩石。

3.2 稀土元素

该区玄武粗安岩-粗安岩的稀土元素总量为 $168.53 \times 10^{-6} \sim 233.03 \times 10^{-6}$ (表 2)。(La/Yb)_N 值为 4.72~7.49, 平均 6.27, 轻、重稀土元素分馏明显。在

稀土元素球粒陨石标准化配分图 (图 6) 上, 7 个样品具有近于一致的轻稀土元素富集的右倾分布模式 (图 6; 表 2), 可能较好地反映了同源岩浆演化特征。 δEu 值为 0.75~0.87, 平均 0.81, 呈现出微弱的 Eu 负异常。

3.3 微量元素

该区玄武粗安岩-粗安岩明显富集 Th、U、Sr 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素 (表 2; 图 7)。其中, Th 含量为 $8.71 \times 10^{-6} \sim 15.90 \times 10^{-6}$, U 含量为 $2.23 \times 10^{-6} \sim 3.22 \times 10^{-6}$, Sr 含量为 $570.73 \times 10^{-6} \sim 822.12 \times 10^{-6}$, Nb 含量为 $10.36 \times 10^{-6} \sim 11.84 \times 10^{-6}$, Ta 含量为 $0.79 \times 10^{-6} \sim 0.88 \times 10^{-6}$ 。在原始地幔标准化微量元素蛛网图 (图 7) 上, 7 个样品总体具有近于一致的微量元素右倾式分布曲线, 明显的 Nb、Ta、P、Ti 负

表 2 希仁布敦钾玄质火山岩的主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace element and REE analyses of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

样品号 岩性	PT131 玄武粗安岩	PT132 玄武粗安岩	PT133 玄武粗安岩	PT134 粗安岩	PT135 粗安岩	PT136 粗安岩	PT137 粗安岩
SiO ₂	54.34	56.47	57.05	58.18	59.35	60.67	61.30
Al ₂ O ₃	17.42	16.58	17.05	16.13	16.67	16.99	17.14
TiO ₂	1.16	0.98	1.01	0.97	0.97	0.93	0.91
Fe ₂ O ₃	3.78	3.15	2.92	3.58	3.51	3.42	3.46
FeO	3.09	3.69	3.54	2.49	2.51	2.39	2.30
CaO	7.12	6.61	5.51	5.96	3.87	3.41	3.37
MgO	2.44	2.30	2.87	2.91	2.34	2.07	1.87
K ₂ O	2.31	2.19	2.47	2.60	3.26	3.76	3.83
Na ₂ O	3.52	3.09	3.07	3.66	3.64	3.33	3.36
MnO	0.12	0.09	0.16	0.10	0.08	0.09	0.09
P ₂ O ₅	0.33	0.26	0.27	0.27	0.31	0.28	0.27
烧失量	4.17	4.42	3.84	2.95	3.05	2.47	1.96
总计	99.80	99.83	99.77	99.80	99.56	99.83	99.86
La	40.59	33.88	34.05	29.73	34.58	38.12	37.13
Ce	86.90	72.21	72.50	63.24	67.50	68.60	63.14
Pr	12.00	10.10	10.42	8.84	9.76	9.84	10.13
Nd	49.66	41.75	42.78	36.54	39.92	41.23	37.10
Sm	10.07	8.42	8.42	7.12	7.82	8.23	7.54
Eu	2.41	1.92	2.09	1.89	1.94	2.15	1.92
Gd	8.37	6.97	7.11	5.88	6.51	6.99	6.30
Tb	1.38	1.28	1.17	0.97	1.07	1.22	1.12
Dy	7.89	7.04	6.42	5.32	5.74	6.00	5.35
Ho	1.58	1.44	1.29	1.06	1.15	1.22	1.13
Er	4.93	4.50	3.77	3.34	3.47	3.21	3.63
Tm	0.76	0.68	0.56	0.50	0.52	0.63	0.50
Yb	5.24	4.84	3.67	3.28	3.36	3.59	3.34
Lu	1.23	1.12	0.81	0.82	0.87	0.67	0.77
ΣREE	233.03	196.15	195.05	168.53	184.21	191.70	179.09
Y	33.18	30.95	26.75	22.34	24.19	24.81	24.33
Cr	37.07	53.17	66.62	81.70	47.39	52.14	48.57
Co	20.40	18.64	21.20	19.50	16.18	17.43	16.52
Ni	13.11	15.00	19.41	18.90	15.14	16.12	15.42
Rb	57.94	51.57	51.27	53.52	51.83	41.60	40.26
Sr	822.12	570.73	756.13	675.40	696.21	711.30	629.96
Zr	259.00	252.00	227.60	228.80	265.80	249.60	254.90
Nb	11.75	10.42	10.36	10.94	11.84	11.45	11.73
Cs	4.21	12.64	6.16	1.93	8.55	11.43	9.16
Ba	426.10	483.60	859.80	631.50	566.18	489.40	432.05
Hf	6.82	7.28	6.25	6.06	7.14	6.81	6.98
Ta	0.85	0.80	0.79	0.85	0.88	0.83	0.85
Pb	26.47	32.32	16.49	13.51	37.31	42.22	46.57
Th	15.90	14.64	9.99	8.71	12.61	11.19	13.26
U	3.05	3.22	2.74	2.76	2.23	2.73	2.45

注: 主量元素含量单位为%, 稀土、微量元素含量单位为10⁻⁶

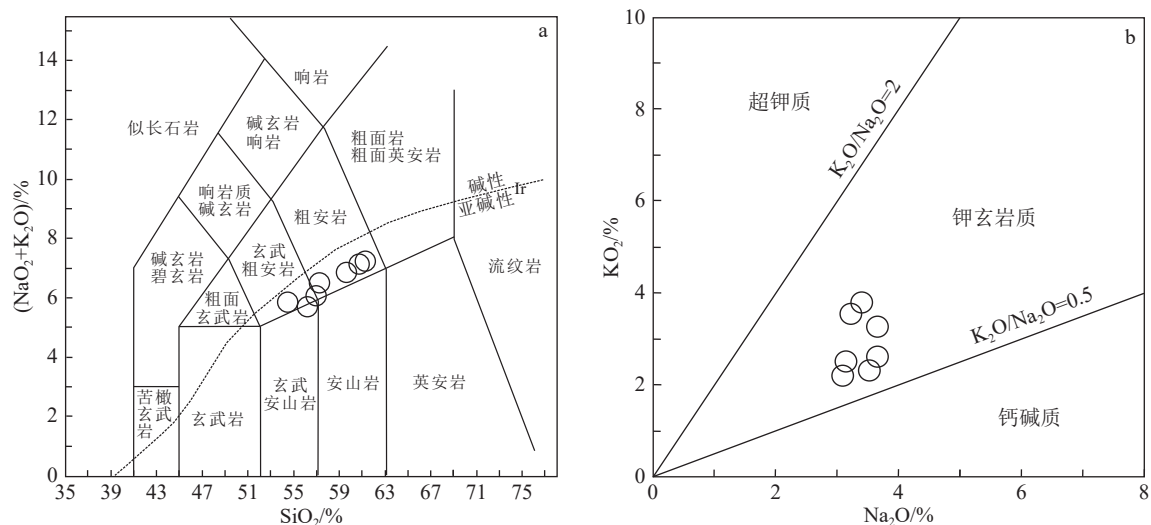


图 4 希仁布敦钾玄质火山岩 TAS 分类图解 (a, 底图据 Middlemost, 1994) 和 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (b, 底图据 Miller et al., 1999)

Fig. 4 Total alkalis vs. silica(TAS) (a) and $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ (b) diagrams of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

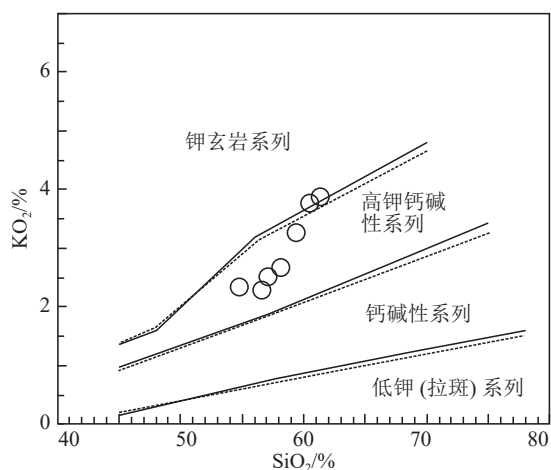


图 5 希仁布敦钾玄质火山岩 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 分类图解

(底图据 Peccerillo et al., 1976)

Fig. 5 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ classification diagram of the shoshonitic volcanic rocks

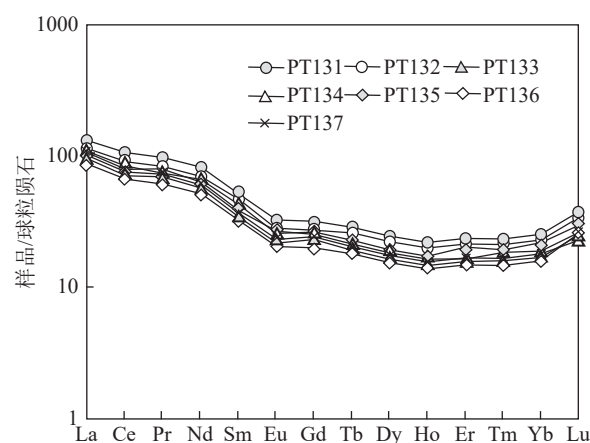


图 6 希仁布敦钾玄质火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式 (标准化值据 Boynton, 1984)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

异常和 Th、U 正异常。该区玄武粗安岩-粗安岩具有明显较高的 Th/Yb (2.66~3.97) 和 Ta/Yb (0.16~0.26) 值, 在 $\text{Ta}/\text{Yb}-\text{Th}/\text{Yb}$ 图解 (图 8) 中, 7 个样品点均投影在钾玄质系列范围, 与主量元素 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 判别结果吻合, 表明该区玄武粗安岩-粗安岩为钾玄质岩石。

4 讨论

4.1 岩石属性与源区特征

希仁布敦玄武粗安岩-粗安岩相对富碱 ($\text{Na}_2\text{O}+$

$\text{K}_2\text{O}=5.28\%\sim 7.19\%$, $>5\%$)、高 Al_2O_3 (16.13%~17.42%)、高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值 (0.66~1.14, >0.5)、高 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值 (0.82~1.50, >0.5)、低 TiO_2 (0.91%~1.16%, $<1.3\%$)、富集 Th、U 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素。这些地球化学特征与典型钾玄岩系列岩石特征一致 (Foley et al., 1992; Wyborn, 1992; 邱检生等, 2002, 2003, 2013; Williams et al., 2004; 张祥信等, 2016; 贾小辉等, 2017)。因此, 根据岩石地球化学特征, 参考 $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (图 4-b)、 $\text{Ta}/\text{Yb}-\text{Th}/\text{Yb}$ 图解 (图 8)、 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解 (图 5)、稀土元素配分图 (图 6) 和微量元素蛛网图 (图 7), 希仁布敦地区玄武

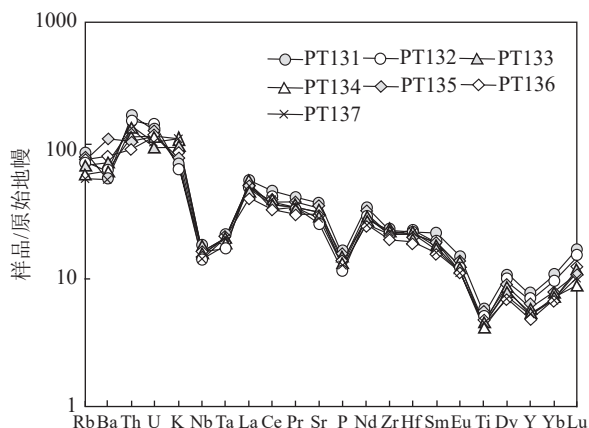


图7 希仁布敦钾玄质火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图 (标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

粗安岩-粗安岩属于钾玄质岩石 (Turner et al., 1996; 章邦桐等, 2011; 邓晋福等, 2015a; Jahangiri et al., 2016)。

造山带环境下的钾玄质岩主要起源于与俯冲作用有关的俯冲板片析出流体交代的上覆地幔楔橄榄岩。在 $Ce/Yb-Cs/Rb$ 和 $Ce/Yb-Pb/Ce$ 地幔流体交代作用判别图解 (图 9-a, b) 上, 希仁布敦地区钾玄质火山岩 7 个样品的 Cs/Rb 和 Pb/Ce 值变化趋势与地幔流体交代作用趋向线一致, 表明大洋俯冲作用释放流体交代作用参与钾玄质火山岩的形成过程 (Sun et al., 2001; 邱检生等, 2003, 2013; 章邦桐等, 2011)。

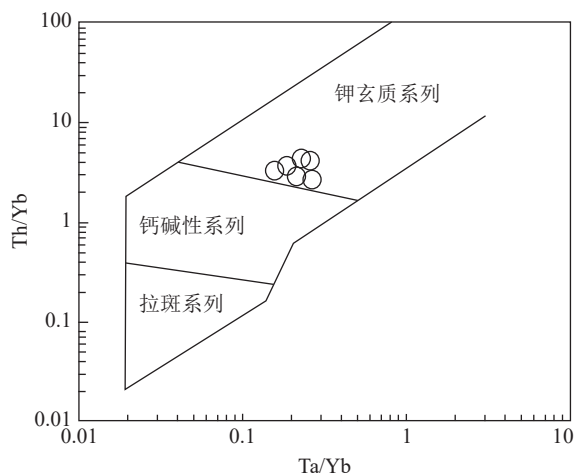


图8 希仁布敦钾玄质火山岩 Ta/Yb-Th/Yb 图解 (底图据 Mueller et al., 1992)

Fig. 8 Ta/Yb-Th/Yb diagram for the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

在 $(La/Sm)_N-(Ba/La)_N$ 图解 (图 9-c) 上, 该区钾玄质火山岩 7 个样品均位于深海沉积物区域内, 进一步揭示俯冲洋壳+俯冲深海沉积物组分进入上覆地幔楔参与成岩作用 (Othman et al., 1989; 邱检生等, 2003, 2013; Conticelli et al., 2015)。该区钾玄质火山岩 Th/Ta (10.31~18.79)、 Th/Nb (0.80~1.40)、 Ba/Nb (36.26~82.99) 和 Ce/Nb (5.38~7.40) 值明显较高, 反映岩浆源区为大洋俯冲作用释放流体交代而富集的地幔源区 (Pearce et al., 1995; Elliott et al., 1997)。而且, 该区钾玄质火山岩稀土元素和高场强元素含量

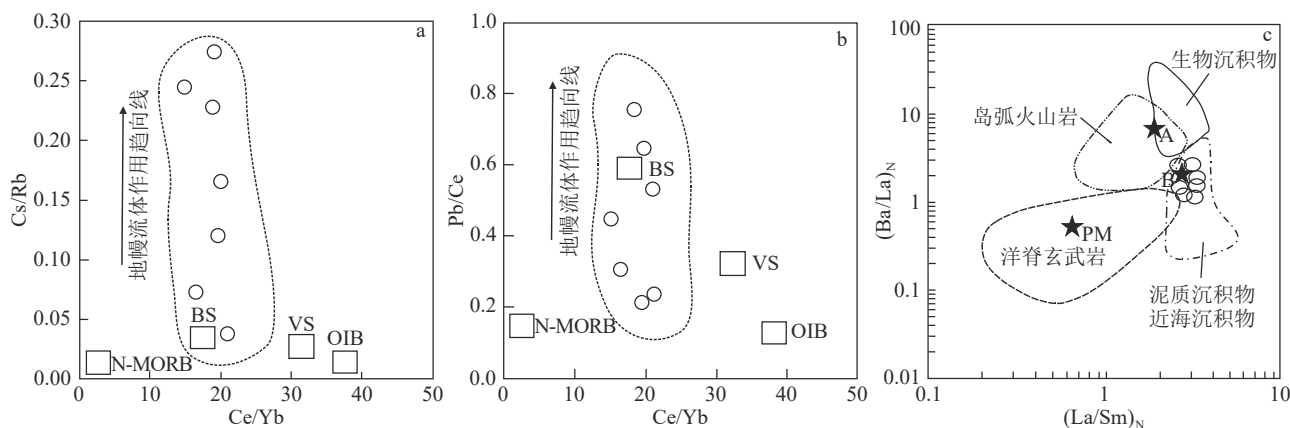


图9 希仁布敦钾玄质火山岩 $Ce/Yb-Cs/Rb$ (a)、 $Ce/Yb-Pb/Ce$ (b) 和 $(La/Sm)_N-(Ba/La)_N$ (c) 图解

(a, b 底图据 Sun et al., 2001; c 底图据 Othman et al., 1989)

Fig. 9 $Cs/Rb-Ce/Yb$ (a), $Ce/Yb-Pb/Ce$ (b) and $(La/Sm)_N-(Ba/La)_N$ (c) diagrams of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

N-MORB—N 型洋脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; VS—火山碎屑沉积物; BS—全部沉积物; B—海洋沉积物平均值; PM—原始地幔; A—太平洋高 Ba/La 值生物沉积物

相对较低, K/Rb 值 (331~789, < 1100) 和 Ba/Rb 值 (0.52~1.14, < 20) 明显较低, 揭示该区富集地幔源区主要富钾含水矿物为金云母而非角闪石, 表明该区钾玄质火山岩可能源于含金云母的富集地幔, 含金云母的富集地幔部分熔融产生了该区钾玄质岩浆 (Sun et al., 1989; Massonne 1992; Furman et al., 1999; Ebert et al., 2004; Chakrabarti et al., 2009)。

综上所述, 希仁布敦地区钾玄质火山岩岩浆源区应为古亚洲洋俯冲板片脱水释放流体交代上覆地幔楔而形成的富集地幔。该区钾玄质岩浆的形成过程可能为古亚洲洋俯冲-碰撞缝合期间俯冲洋壳+俯冲深积物析出流体交代上覆地幔楔, 形成含金云母的二辉橄榄岩-富集地幔, 随后的俯冲板片断离-后造山伸展触发富集地幔部分熔融, 产生钾玄质岩浆。

4.2 构造环境

造山带环境的钾玄质岩主要形成于与大洋俯冲作用有关的初始洋弧、晚期洋弧、大陆弧和后造山等构造环境 (Morrison, 1980; Mueller et al., 1992; Aftabi et al., 2000; 邱检生等, 2002, 2003, 2013; Pe-Piper et al., 2014; 贾小辉等, 2017)。在 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 构造环境判别图解 (图 10-a) 上, 希仁布敦钾玄质火山岩 7 个样品均落在大陆弧-后造山钾玄质岩范围内; 而在大陆弧和后造山钾玄质岩 3Zr - 50Nb - $\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5$ 三角形构造环境判别图解 (图 10-b) 中, 7 个样品均落在后造山钾玄质岩范围,

表明其形成于后造山构造环境。

希仁布敦地区钾玄质火山岩的后造山构造环境, 与中亚造山带东段古亚洲洋晚二叠世-早三叠世俯冲-碰撞闭合和中三叠世-早白垩世俯冲板片断离-后造山伸展构造演化一致 (Xiao et al., 2003, 2015; 李锦轶等, 2007; Jian et al., 2012; Liu et al., 2013; 杨宾等, 2018; 张庆奎等, 2018; 王金芳等, 2020a, 2021a, 2021b; 董培培等, 2021; 孙巍等, 2023)。这种与古亚洲洋俯冲作用有关而形成于后造山伸展环境的钾玄质火山岩, 与二连-贺根山缝合带广泛发育晚古生代 SSZ 型蛇绿岩-岛弧岩浆岩和中生代后造山型岩浆岩吻合 (Windley et al., 2007; 刘建峰等, 2009, 2022; Wang et al., 2017, 2020; Li et al., 2018, 2020; 李锦轶等, 2019a, 2019b; 董培培等, 2021)。而且, 希仁布敦钾玄质火山岩的后造山构造环境可以与中亚造山带东段和其他不同地质时期造山带钾玄岩系列岩石和 A_2 型花岗岩的俯冲板片断离-后造山伸展构造环境相类比 (Morrison, 1980; Mueller et al., 1992; Miller et al., 1999; 邱检生等, 2002, 2003; 李红英等, 2015; 尼玛次仁等, 2015; 杨华本等, 2016; 王金芳等, 2020b, 2021c, 2024; 孙巍等, 2023)。因此, 贺根山缝合带梅劳特乌拉-迪彦庙蛇绿混杂岩带中希仁布敦后造山钾玄质火山岩的出现, 可能提供了中亚造山带东段晚古生代末古亚洲洋俯冲作用和中生代早期古亚洲洋俯冲板片断离-

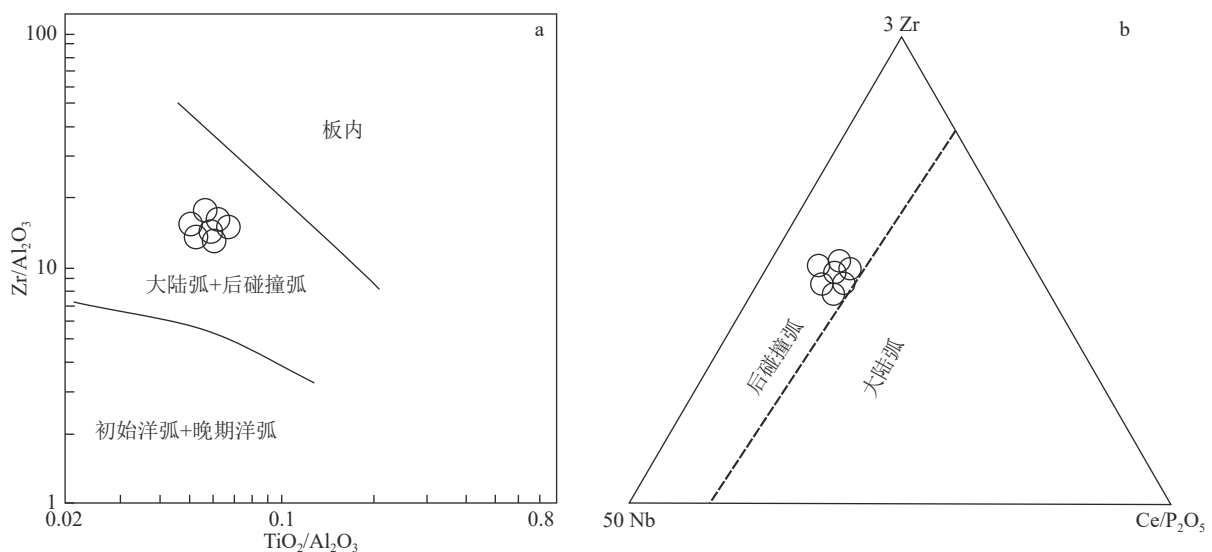


图 10 希仁布敦钾玄质火山岩 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) 和 3Zr - 50Nb - $\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5$ (b) 判别图解 (底图据 Mueller et al., 1992)

Fig. 10 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (a) and 3Zr - 50Nb - $\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5$ (b) discrimination diagrams of the Xirenbudun shoshonitic volcanic rocks

后造山伸展构造演化新佐证。

5 结 论

(1) 希仁布敦地区钾玄质火山岩岩性为玄武粗安岩和粗安岩, 岩石富碱 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 、高 Al_2O_3 、高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 和 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值、低 TiO_2 , 富集 Th、U、Sr 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 属于钾玄质岩。

(2) 希仁布敦钾玄质火山岩的粗安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 176.3 ± 0.8 Ma, 提供了贺根山缝合带早侏罗世钾玄质岩浆作用的证据。

(3) 希仁布敦钾玄质火山岩与晚古生代末古亚洲洋俯冲作用有关, 形成于中生代早期的古亚洲洋俯冲板片后撤-断离-后造山伸展环境, 为后造山钾玄质岩提供了晚古生代末古亚洲洋俯冲作用和中生代早期大洋俯冲板片后撤-断离-后造山伸展构造演化新佐证。

参考文献

- Aftabi A, Atapour H. 2000. Regional aspects of shoshonitic volcanism in Iran[J]. *Episodes*, 23(2): 119-125.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Boynton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies/Henderson P. Rare earth element geochemistry[M]. Elsevier: 63-114.
- Chakrabarti R, Basu A R, Santo A P, et al. 2009. Isotopic and geochemical evidence for a heterogeneous mantle plume origin of the Virunga volcanics, Western Rift, East African Rift system[J]. *Chemical Geology*, 259: 273-289.
- Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328: 157-182.
- Claesson S, Vetrin V, Bayanova T. 2000. U-Pb zircon age from a Devonian carbonatite dyke, Kola peninsula, Russia: A record of geological evolution from the Archaean to the Palaeozoic[J]. *Lithos*, 51: 95-108.
- Conticelli S, Avanzinelli R, Ammannati E, et al. 2015. The role of carbon from recycled sediments in the origin of ultrapotassic igneous rocks in the central mediterranean[J]. *Lithos*, 232: 174-196.
- Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O. 2003. Atlas of Zircon Textures[J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53(1): 469-500.
- Ebert E, Grove T L. 2004. Phase relationships of a Tibetan shoshonite lava: Constraints on the melting conditions and the source rock[J]. *Lithos*, 73(1/2): S31.
- Elliott T, Plank T, Zindler A, et al. 1997. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc[J]. *J. Geophys. Res.*, 102(B7): 14991-15019.
- Foley S, Peccerillo A. 1992. Potassic and ultrapotassic magmas and their origin[J]. *Lithos*, 28(3/6): 181-185.
- Furman T, Graham D. 1999. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: geochemical evidence from the Kivu volcanic province[J]. *Developments in Geotectonics*, 24: 237-262.
- Jahangiri A, Fadaeian M, Songjian A. 2016. Geochemistry and emplacement of post-collisional shoshonitic dyke swarms, NW of Iran[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 90(S1): 99.
- Jian P, Krner A, Windley B F, et al. 2012. Carboniferous and Cretaceous mafic-ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral Hegenshan ophiolite[J]. *Lithos*, 142/143: 48-66.
- Li Y J, Wang J F, Wang G H, et al. 2018. Discovery of the plagiogranites in the Diyanmiao ophiolite, southeastern Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia, China and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 92(2): 568-585.
- Li Y J, Wang G H, Santosh M, et al. 2020. Subduction initiation of the SE Paleo-Asian Ocean: Evidence from a well preserved intra-oceanic forearc ophiolite fragment in central Inner Mongolia, North China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 535: 116087.
- Liu J F, Li J Y, Chi X G, et al. 2013. A late-Carboniferous to early early-Permian subduction-accretion complex in Daqing pasture, southeastern Inner Mongolia: Evidence of northward subduction beneath the Siberian paleoplate southern margin[J]. *Lithos*, 77(2): 285-296.
- Massonne H J. 1992. Evidence for low-temperature ultrapotassic siliceous fluids in subduction zone environments from experiments in the system $\text{K}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}(\text{KMASH})$ [J]. *Lithos*, 28: 421-434.
- Miao L C, Fan W M, Liu D Y. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5/6): 348-370.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth Sci. Rev.*, 37: 215-224.
- Miller C, Schuster R, Klotzli U, et al. 1999. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. *J. Petrol.*, 40(9): 1399-1424.
- Morrison G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association[J]. *Lithos*, 13(1): 97-108.
- Mueller D, Rock N M S, Groves D I. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A pilot study[J]. *Mineralogy & Petrology*, 46(4): 259-289.
- Othman D B, White W M, Patchett J. 1989. The geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis, and crust-mantle recycling[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 94(1/2): 1-21.
- Pe-Piper G, Zhang Y, Piper D J W, et al. 2014. Relationship of mediterranean type lamproites to large shoshonite volcanoes, miocene

- of lesbos, ne aegean sea[J]. *Lithos*, 184/187(1): 281–299.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas[J]. *Ann. Rev. Earth Planet Sci.*, 23: 251–285.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63–81.
- Sengor A M C, Natalin B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299–307.
- Sun C H, Stern R J. 2001. Genesis of Mariana shoshonites: Contribution of the subduction component[J]. *J. Geophys. Res.*, 106(B1): 589–608.
- Sun W D, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: Implication for mantle composition and processes[J]. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 42: 313–345.
- Turner S, Arnaud N, Liu J, et al. 1996. Post-collisional shoshonitic volcanism on the Tibetan plateau: Implications for convective thinning of the lithosphere and the source of ocean island basalts[J]. *J. Petrol.*, 37: 45–71.
- Wang J F, Li Y J, Li H Y. 2017. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age and island-arc origin of the Bayanhua gabbro in the Hegenshan suture zone, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 91(6): 2316–2317.
- Wang J F, Li Y J, Li H Y, et al. 2020. Intra-oceanic subduction of the Paleo-Asian Oceanic slab: New evidence from the Early Carboniferous quartz diorite in the Diyanmiao ophiolite[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 94(2): 565–567.
- Williams H M, Turner S P, Pearce J A, et al. 2004. Nature of the source regions for post-collisional, potassic magmatism in southern and northern Tibet from geochemical variations and inverse trace element modelling[J]. *J. Petrol.*, 45: 555–607.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, et al. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31–47.
- Wyborn D. 1992. The tectonic significance of Ordovician magmatism in the eastern Lachlan Fold Belt[J]. *Tectonophysics*, 214(1/4): 177–192.
- Xiao W J, Windley B F, Hao J. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1069–1089.
- Xiao W J, Windley B F, Huang B C. 2009. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids; implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia[J]. *Int. J. Earth Sci.*, 98: 1189–1217.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. 2015. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in Central Asia: oroclinal sutures, and terminal accretion[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 477–507.
- 陈斌, 赵国春, Wilde S. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义[J]. *地质评论*, 47(4): 361–367.
- 程天赦, 杨文静, 王登红. 2014. 内蒙古西乌旗阿鲁包格山 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 38(3): 718–728.
- 程天赦, 杨文静, 滕超, 等. 2023. 内蒙古西乌旗早泥盆 I 型石英闪长岩的发现及其地质意义[J]. *现代地质*, 37(6): 1624–1633.
- 程杨, 肖庆辉, 李廷栋, 等. 2019. 中亚造山带东缘迪彦庙俯冲增生杂岩带早二叠世洋内弧岩浆作用及构造背景[J]. *地球科学*, 44(10): 3454–3468.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 2015a. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. *地质评论*, 61(3): 473–484.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 等. 2015b. 古亚洲构造域侵入岩时-空演化框架[J]. *地质评论*, 2015, 61(6): 1211–1224.
- 董培培, 李英杰, 许展, 等. 2021. 内蒙古查干拜兴晚石炭世埃达克岩的成因及其洋内俯冲作用的约束[J]. *地质学报*, 95(12): 3676–3690.
- 范玉须, 李廷栋, 肖庆辉, 等. 2019. 内蒙古西乌珠穆沁旗晚二叠世花岗岩的锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质评论*, 65(1): 248–266.
- 贾小辉, 王晓地, 杨文强, 等. 2017. 钾玄质系列岩石的研究现状[J]. *地质评论*, 63(6): 1587–1601.
- 李钢柱, 王玉净, 李成元. 2017. 内蒙古索伦山蛇绿岩带早二叠世放射虫动物群的发现及其地质意义[J]. *科学通报*, 62(5): 400–406.
- 李红英, 周志广, 张达, 等. 2015. 内蒙古西乌旗格勒楚鲁晚三叠世流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 546–555.
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束[J]. *岩石学报*, 23(3): 0565–0582.
- 李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 等. 2019a. 中国东北地区主要地质特征和地壳构造格架[J]. *岩石学报*, 35(10): 2989–3016.
- 李锦轶, 刘建峰, 曲军峰, 等. 2019b. 中国东北地区古生代构造单元: 地块还是造山带?[J]. *地球科学*, 44(10): 3157–3177.
- 李可, 张志诚, 李建峰, 等. 2012. 内蒙古西乌珠穆沁旗地区中生代中性火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 31(5): 671–685.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 2012. 内蒙古西乌旗迪彦庙蛇绿岩的识别[J]. *岩石学报*, 28(4): 1282–1290.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳, 等. 2015. 内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的识别[J]. *岩石学报*, 31(5): 1461–1470.
- 李英杰, 王金芳, 王根厚, 等. 2018. 内蒙古迪彦庙蛇绿岩带达哈特前弧玄武岩的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 34(2): 469–482.
- 李英杰, 王金芳, 董培培, 等. 2023. 内蒙古西乌旗米斯庙蛇绿岩的识别及其地质意义[J]. *岩石学报*, 39(5): 1305–1321.
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲. 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 83(3): 365–376.
- 刘建峰, 李锦轶, 赵硕, 等. 2022. 中亚造山带东南部晚古生代—早中生代地壳增生和古亚洲洋演化: 来自内蒙古东南部林西—东乌旗地区岩浆岩的证据[J]. *岩石学报*, 38(8): 2181–2215.
- 刘锐, 杨振, 徐启东, 等. 2016. 大兴安岭南段海西期花岗岩类锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学: 岩石成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 32(5): 1505–1528.
- 刘志斌, 李英杰, 曹侃, 等. 2023. 内蒙古迪彦庙蛇绿岩带早石炭世闪长岩成因与古亚洲洋内俯冲作用[J]. *地质学报*, 97(10): 3265–3277.
- 内蒙古自治区地质局区域地质测量队. 1976. L-50-XXIX (罕乌拉幅)

- 1: 200000 地质图[R].
- 尼玛次仁, 王国灿, 顿都, 等. 2015. 西藏狮泉河地区高钾-钾玄质火山岩的岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 34(9): 1656-1667.
- 邱检生, 刘亮, 李友连, 等. 2013. 沂沭断裂带中南段钾质火山岩的元素地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素组成及其对岩石成因的制约[J]. 地质学报, 87(9): 1193-1210.
- 邱检生, 王德滋, 刘洪, 等. 2002. 大别造山带北缘后碰撞富钾火山岩: 地球化学与岩石成因[J]. 岩石学报, (3): 319-330.
- 邱检生, 徐夕生, 蒋少涌. 2003. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因[J]. 地学前缘, 10(3): 191-200.
- 沈阳地质矿产研究所. 2005. L50 C 004003(西乌珠穆沁旗幅) 1: 250000 地质图[R].
- 石玉若, 刘敦一, 张旗, 等. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义[J]. 地质通报, 26(2): 183-189.
- 孙巍, 许逢明, 吴大天, 等. 2023. 大兴安岭中部扎赉特旗晚三叠世 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. 西北地质, 56(2): 80-91.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2019. 贺根山缝合带白音呼舒奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 65(4): 857-872.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2020a. 古亚洲洋晚石炭世俯冲作用: 梅劳特乌拉蛇绿岩中扎嘎音高镁安山岩证据[J]. 地质论评, 66(2): 289-306.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2020b. 古亚洲洋俯冲板片断离与后造山伸展: 贺根山缝合带火山岩年代学和地球化学证据[J]. 地质学报, 94(12): 3561-3580.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2021a. 贺根山缝合带晚石炭世 TTG 岩浆事件: 奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学制约[J]. 地质学报, 95(2): 396-412.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2021b. 二连—贺根山缝合带晚石炭世埃达克岩的发现及古亚洲洋洋内俯冲作用[J]. 中国地质, 48(2): 520-535.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2021c. 贺根山缝合带阿萨格图钾玄质火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 67(4): 918-935.
- 王金芳, 宋宇桐, 李康硕, 等. 2024. 冀北古元古代东瓦窑杂岩体的发现及其对华北克拉通伸展事件的制约[J]. 地质通报, 43(1): 46-60.
- 王良玉, 廖群安, 江云川, 等. 2016. 内蒙古锡林浩特早白垩世晚期钾玄质火山岩成因及构造环境[J]. 地质通报, 35(6): 919-931.
- 王树庆, 胡晓佳, 杨泽黎, 等. 2018. 兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区石炭纪岛弧型侵入岩年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地球科学, 43(3): 1-31.
- 王帅, 李英杰, 王金芳, 等. 2021. 内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束[J]. 地质通报, 40(1): 82-94.
- 杨宾, 张彬, 张庆奎, 等. 2018. 内蒙古东部马鞍山地区早石炭世高镁安山岩特征及地质意义[J]. 地质通报, 37(9): 1760-1770.
- 杨华本, 王文东, 闫永生, 等. 2016. 大兴安岭北段新林区塔兰兰沟组火山岩成因及地幔富集作用[J]. 地质论评, 62(6): 1471-1486.
- 袁建国, 顾玉超, 肖荣阁, 等. 2017. 内蒙古锡林浩特东部地区早白垩世花岗岩地球化学、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 现代地质, 31(1): 20-32.
- 章邦桐, 吴俊奇, 凌洪飞, 等. 2011. 板内橄榄玄粗岩 (shoshonite) 地幔流体交代作用及成因的元素地球化学证据: 以赣南会昌橄榄玄粗岩为例[J]. 地球化学, 40(5): 443-453.
- 张庆奎, 杨宾, 邵学峰, 等. 2018. 内蒙古巴拉格歹地区构造混杂岩带中浊积岩、震积岩特征及意义——以内蒙古哈拉黑等八幅 1: 5 万区域地质调查为例[J]. 地质通报, 37(9): 1731-1735.
- 张祥信, 高永丰, 雷世和. 2016. 内蒙古中部红格尔地区玛尼吐组钾玄质火山岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学及其地质意义[J]. 地球化学, 45(4): 356-373.
- 张晓飞, 周毅, 曹军, 等. 2018. 内蒙古西乌旗罕乌拉地区双峰式侵入体年代学、地球化学特征及其对古亚洲洋闭合时限的制约[J]. 地质学报, 92(4): 665-686.
- 张晓晖, 张宏福, 汤艳杰, 等. 2006. 内蒙古中部锡林浩特—西乌旗早三叠世 A 型酸性火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(11): 2769-2780.
- 张学斌, 周长红, 来林, 等. 2015. 锡林浩特东部早白垩世白音高老组岩石地球化学特征、LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质与勘探, 51(2): 290-302.