

内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中埃达克岩的发现及其演化模式

王金芳,李英杰,李红阳,董培培

河北地质大学资源学院,石家庄,050031

内容提要:本文报道在内蒙古西乌旗梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩中新发现的早二叠世洋内弧呼和德埃达克岩。该埃达克岩位于贺根山缝合带内,侵位于晚石炭世梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩带之中,岩性为细粒一中粒花岗闪长岩。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年表明,呼和德埃达克岩的侵位年龄为 294.7 ± 1.7 Ma, 其形成时代为早二叠世。呼和德埃达克岩属于低钾拉斑系列与中钾钙碱性系列的过渡型岩石, SiO_2 为 64.93%~69.50%, MgO 为 0.80%~1.48%, Al_2O_3 为 15.72%~19.11%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 3.01~8.60; Sr 为 $368 \times 10^{-6} \sim 700.40 \times 10^{-6}$, Yb 为 $0.95 \times 10^{-6} \sim 1.76 \times 10^{-6}$, Y 为 $5.26 \times 10^{-6} \sim 9.27 \times 10^{-6}$; 相对富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb 和 Sr 等, 亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr、Ti 和 P 等; 稀土元素总量较低($32.68 \times 10^{-6} \sim 66.69 \times 10^{-6}$), 轻重稀土分馏明显, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 3.31~5.10, 无明显的 Eu 负异常, 显示了典型埃达克岩的地球化学特征。呼和德埃达克岩与梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩, 构成梅劳特洋内弧初始俯冲作用较为完整连续的蛇纹石化方辉橄榄岩、层状一块状辉长岩、枕状拉斑玄武岩、玻安岩、富 Nb 玄武岩和高镁或镁安山岩等岩石组合序列。岩石学和地球化学特征表明, 呼和德埃达克岩形成于洋内弧环境, 为洋内弧初始俯冲作用早期的深成岩。这标志着古亚洲洋贺根山缝合带洋壳初始俯冲发生于早二叠世。根据晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋内弧的主要特征和识别标志, 初步建立了晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋内弧初始俯冲系统形成演化模式。

关键词:埃达克岩; 洋内弧岩浆岩; 锆石 U-Pb 定年; 早二叠世; 梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩

华北板块与西伯利亚板块之间的古生代古亚洲洋最终闭合时间与位置, 一直是中亚造山带东段研究与争论的焦点(Cao Congzhou et al., 1986; Shao Ji'an, 1991; Xu Liquan et al., 1997; Windley et al., 2007; Chen B et al., 2009; Liu Jianfeng et al., 2014; Shi Yuruo et al., 2014; Li Yingjie et al., 2015; Kang Jianli et al., 2016; Zheng Rongguo et al., 2016)。古生代大洋最终闭合时间可能在二叠纪末, 最晚至早三叠世(Sengor et al., 1993; Shang QH, 2004; Wang Hui et al., 2005; Zhang Xiaohui et al., 2006; Xiao WJ et al., 2009; Jian P et al., 2010; Liu Jianfeng et al., 2014; Shi Yuruo et al., 2014; Zhang Haihua et al. 2015; Zhang ZC et al., 2015; Tian Shugang et al., 2016)。古亚洲洋东段古生代洋盆最终闭合位置有 3 种观点: 索伦—二连—贺根山古生代洋盆闭合—缝合带、索伦—林西古生代洋盆闭合—缝合带和索伦—西拉木伦河古生代洋盆闭

合—缝合带。其中, 内蒙古中部二连—贺根山古生代洋盆闭合—缝合带, 广泛分布有近东西向的古生代蛇绿岩(带)和俯冲岛弧型岩浆岩(Cao Congzhou et al., 1986; Shao Ji'an, 1991; Liang Rixuan, 1994; Chen Bin et al., 2001; Miao L et al., 2008; Liu Jianfeng et al., 2009; Jian P et al. 2012; Shi Yuruo et al., 2014; Li Yingjie et al., 2012, 2015; Kang Jianli et al., 2016; Huang Bo et al., 2016), 特别是发育早石炭世—晚石炭世 SSZ 型蛇绿岩和早石炭世—早二叠世岛弧型岩浆岩。在西乌旗地区二连—贺根山古生代洋盆—缝合带出露较广和发育较好。因此, 识别与研究岛弧型岩浆岩与 SSZ 型蛇绿岩等地质体之间的时空分布与内在成因关系, 能加深对古亚洲洋二连—贺根山古生代洋盆扩张时限和大洋俯冲消亡过程的认识。本文报道侵位入于贺根山缝合带蛇绿岩之中的早二叠世岛弧型埃达克岩体, 讨论了二连—贺根山洋盆大洋扩张起止时间和大洋俯

注: 本文为国家自然科学基金(批准号: 41502211)、中国地质调查局“内蒙古 1: 5 万高力罕牧场三连等四幅区调(编号: 1212011120711)和河北省教育厅科技项目(编号: ZC20165013)资助的成果。

收稿日期: 2017-01-19; 改回日期: 2017-07-05; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 王金芳, 女, 1983 年生。讲师。从事岩石学和地球化学研究。Email: wjfb1983@163.com。

冲消亡过程。

1 地质背景和岩石学特征

研究区区域地质构造背景为中亚造山带东段华北陆块北缘增生带,区域内自南而北有温都尔庙—西拉木伦、索伦—林西、交其尔—锡林浩特、二连浩特—贺根山等缝合带,时代自早古生代至晚古生代,由南向北变新(图 1)。梅劳特乌拉蛇绿岩带和侵位于其中的呼和德埃达克岩体属于二连浩特—贺根山古生代洋盆—缝合带,位于内蒙古西乌旗东北部梅劳特乌拉一带,为贺根山缝合带蛇绿岩和俯冲岛弧型岩浆岩典型发育区(图 1,图 2)。呼和德埃达克岩岩性为细粒—中粒花岗闪长岩,岩体呈小岩株状产出,出露面积约 9.5km²。岩体侵入于晚石炭世梅劳特乌拉蛇绿岩带之中,内接触带岩石粒度变细,为细粒花岗闪长岩,岩体中心为中粒花岗闪长岩(图 2)。细粒花岗闪长岩与中粒花岗闪长岩之间为渐变接触关系,由老到新侵位顺序为细粒花岗闪长岩至中粒花岗闪长岩。梅劳特乌拉蛇绿岩岩石主要为蛇纹石化辉橄榄岩、层状—块状辉长岩、枕状拉斑玄武岩、玻安岩、富 Nb 玄武岩、辉斑玄武岩和细碧岩等(Li Yingjie et al., 2015, 表 1),可见上覆岩系硅质岩和硅质泥岩等(Li Yingjie et al., 2015)。该蛇绿

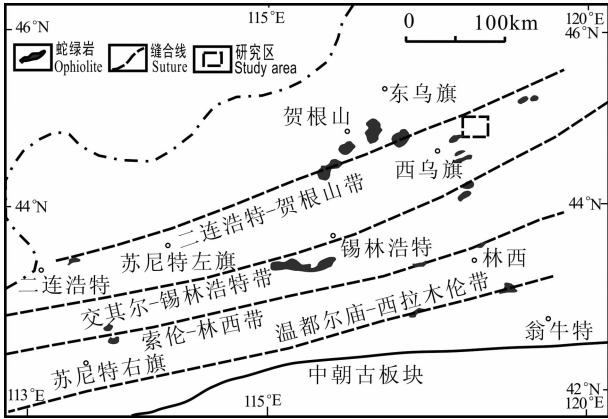


图 1 内蒙古西乌旗呼和德埃达克岩区域构造简图 (据 Miao et al. 2008 和 Li Yingjie et al., 2015)

Fig. 1 Sketch tectonic map of the Huhede adakite in Xiwuqi, Inner Mongolia(modified from Miao et al. 2008 and Li yingjie et al. 2015)

岩普遍强烈糜棱岩化和片理化,发育菱形网格状强变形带和弱变形域,强变形带形成蛇纹石片岩,片理化辉长岩、片理化玄武岩、片理化玻安岩和绿片岩等糜棱岩(Li Yingjie et al., 2015)。呼和德埃达克岩强烈糜棱岩化,发育菱形网格状强变形带和弱变形域,形成糜棱岩化花岗闪长岩和花岗闪长质眼球状糜棱岩等(图 3)。

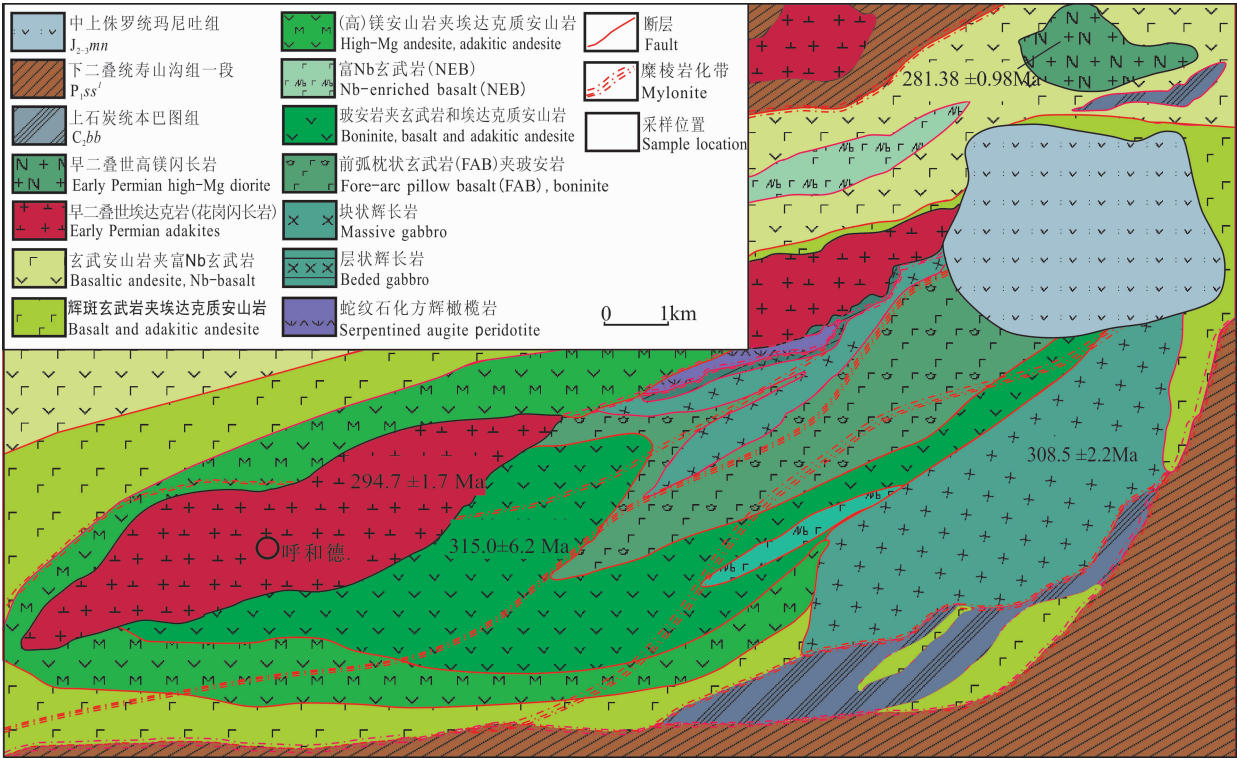


图 2 呼和德埃达克岩地质简图

Fig. 2 Sketch geological map of the Huhede adakite

表 1 呼和德埃达克岩和梅劳特乌拉蛇绿岩中火山熔岩的主量元素、微量元素和稀土元素分析结果

Table 1	Major element, trace element and REE measurements of the Huhede adakite and lavas in the Meilaotewula ophiolite												
样号	P12 ($\times\gamma P_1$)	P16 ($\times\gamma P_1$)	P15 ($\times\gamma P_1$)	P13 ($\times\gamma P_1$)	P14 ($\times\gamma P_1$)	X30 (FAB)	P11 (FAB)	P97 玻安岩	P19 玻安岩	P55 (NEB)	P50 (NEB)	高 Si 埃达克岩	马利亚纳 FAB
SiO ₂	69.50	66.13	68.73	64.93	67.09	48.84	45.58	53.32	57.64	48.85	49.73	64.80	50.47
TiO ₂	0.33	0.39	0.40	0.18	0.36	0.72	0.84	0.35	0.33	2.77	3.34	0.56	1.08
Al ₂ O ₃	15.97	16.12	15.72	19.11	17.17	16.28	14.12	11.71	12.39	15.16	15.34	16.64	15.41
Fe ₂ O ₃	1.44	2.07	1.15	1.21	1.18	2.95	3.31	1.85	3.40	7.45	10.65	4.75	11.03
FeO	0.81	1.20	1.34	0.79	1.34	4.44	5.08	5.92	3.81	3.98	3.19		
MnO	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.13	0.16	0.17	0.13	0.24	0.21	0.08	0.15
MgO	1.18	1.26	1.41	0.80	1.48	8.88	5.94	9.06	8.12	3.41	3.94	2.18	7.02
CaO	3.54	4.76	2.55	4.40	3.38	10.93	9.69	9.86	7.42	5.76	3.55	4.63	11.90
Na ₂ O	5.16	4.90	4.94	6.10	5.46	0.19	4.01	3.38	3.28	0.70	0.12	4.19	2.52
K ₂ O	0.60	1.63	0.93	0.86	0.69	2.42	1.42	0.43	0.69	5.90	6.36	1.97	0.24
P ₂ O ₅	0.12	0.11	0.12	0.06	0.11	0.04	0.06	0.12	0.16	0.90	0.64	0.20	0.09
LOI	1.21	1.28	2.59	1.38	1.59	4.06	9.67	3.70	2.46	4.81	2.83		
Total	99.90	99.89	99.92	99.87	99.90	99.89	99.88	99.86	99.84	99.93	99.91		99.92
Mg#	50	42	51	43	52	69	57	68	68	36	35	48	53
La	11.23	7.60	7.18	6.09	6.38	0.84	1.47	5.43	5.64	16.82	15.35	19.20	2.09
Ce	25.53	16.26	15.34	11.31	14.21	3.00	4.54	12.46	12.69	44.08	39.51	37.30	6.02
Pr	3.40	2.21	2.05	1.49	1.87	0.61	0.92	1.85	2.03	7.13	6.55		1.00
Nd	13.84	9.90	8.65	5.90	8.07	3.82	5.81	8.74	10.13	35.01	32.75	18.20	5.62
Sm	2.94	2.29	1.56	1.33	1.71	1.51	2.21	2.17	2.30	9.15	8.84	3.40	2.21
Eu	0.95	0.97	0.65	0.95	0.77	0.62	0.83	0.67	0.67	3.33	3.36	0.90	0.87
Gd	2.46	2.08	1.52	1.22	1.90	1.78	2.83	2.16	2.26	8.70	8.70	2.80	3.25
Tb	0.38	0.39	0.24	0.23	0.29	0.41	0.65	0.42	0.42	1.60	1.64		0.65
Dy	1.97	2.18	1.17	1.35	1.70	2.92	4.60	2.54	2.52	10.08	10.46	1.90	4.47
Ho	0.35	0.43	0.23	0.26	0.34	0.61	0.99	0.54	0.56	1.90	1.97		1.01
Er	1.41	1.33	0.75	1.01	1.11	1.67	2.93	2.04	1.65	5.00	5.25	0.96	2.93
Tm	0.15	0.20	0.11	0.14	0.15	0.28	0.48	0.32	0.30	0.76	0.80		0.44
Yb	1.76	1.53	0.95	1.24	1.39	1.62	3.21	2.27	2.10	4.46	4.62	0.88	2.85
Lu	0.32	0.27	0.13	0.16	0.18	0.23	0.41	0.34	0.30	0.78	0.82	0.17	0.45
TREE	66.69	47.64	40.53	32.68	40.07	19.90	31.87	41.94	43.59	148.80	140.62		33.86
δEu	1.05	1.33	1.28	2.24	1.30	1.15	1.02	0.94	0.88	1.12	1.16		0.99
(La/Yb) _N	4.30	3.35	5.10	3.31	3.09	0.35	0.31	1.61	1.81	2.54	2.24		0.50
Y	9.27	9.37	5.26	6.31	7.37	13.50	19.97	12.21	11.89	43.27	45.88	10.00	26.48
Ba	116.10	103.50	125.30	108.40	101.70	40.26	132.00	206.90	177.90	273.80	103.60	721.00	8.52
Rb	8.50	21.80	13.50	7.70	7.80	2.72	26.69	8.30	15.09	10.43	1.43	52.00	8.57
Sr	488.20	462.70	368.00	700.40	540.60	77.11	110.00	314.00	355.76	112.30	95.77	565.00	75.82
Zr	106.90	85.90	93.10	62.00	90.60	51.82	52.70	20.10	32.40	207.00	195.60	108.00	53.42
Nb	2.06	1.89	1.55	1.55	1.77	0.92	0.65	0.62	0.78	6.29	5.57	6.00	1.95
Th	1.80	1.93	1.32	2.38	1.56	0.10	0.39	1.79	2.12	1.46	0.95		0.16
Ni	13.90	16.50	16.00	12.10	16.00	148.20	92.40	55.07	102.20	2.64	6.52	20.00	104.00
V	36.90	86.00	49.90	28.70	42.10	145.96	257.60	288.40	291.00	145.34	268.42	95.00	372.40
Cr	30.60	35.50	33.60	33.50	34.80	366.70	413.60	280.30	402.00	3.26	6.03	41.00	323.40
Hf	3.37	2.42	3.73	3.12	4.54	2.80	3.01	0.79	1.52	6.77	5.98		1.60
Sc	5.00	8.90	4.60	4.70	5.60	23.49	43.28	65.21	46.38	23.41	31.73		28.98
Ta	0.70	0.12	0.14	0.19	0.22	0.59	0.20	0.05	0.07	0.50	0.47		0.13
Co	5.70	6.30	8.60	3.40	7.10	35.77		35.31	36.81	19.56	31.47		
Li	10.50	3.40	12.30	5.20	5.50	14.31		16.73	9.86	20.96	24.85		
U	0.60	0.53	0.28	0.85	0.46	0.31		0.51	0.86	0.79	0.48		0.14

注:氧化物含量%,稀土、微量元素含量 10^{-6} 。xydP₁—细粒花岗闪长岩,zydP₁—中粒花岗闪长岩,FAB—梅劳特乌拉蛇绿岩前弧枕状拉斑玄武岩;NEB—梅劳特乌拉蛇绿岩富Nb玄武岩;高Si埃达克岩为267个样品平均值(据Martin et al., 2005);马利亚纳FAB—马利亚纳前弧玄武岩5个样品平均值(据Reagan et al., 2010);Mg# = $100 \times (\text{MgO}/40.3044)/(\text{MgO}/40.3044 + \text{FeOT}/71.844)$ 。

细粒花岗闪长岩,岩石风化面为灰白色,新鲜面暗灰色,细粒半自形粒状结构、糜棱结构、块状构造和眼球状构造(图3),矿物成分主要为斜长石(45%~52%)、钾长石(15%±)、石英(18%~20%)、角闪

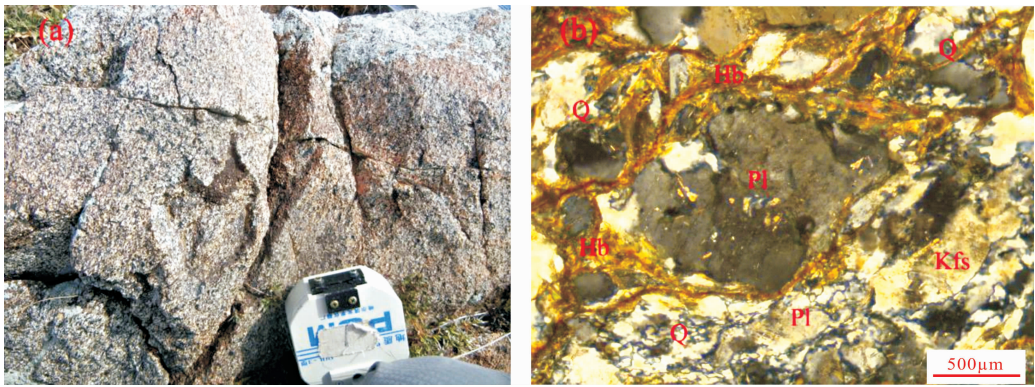


图 3 呼和德埃达克岩野外(a)和显微照片(b)

Fig. 3 Outcrop(a)and micrograph(b) of the Huhede adakite

(b)—眼球状构造,Pl—斜长石;Q—石英;Kfs—钾长石;Hb—角闪石

(b)—Augen structure,Pl—plagioclase;Q—quartz;Kfs—K-feldspar;Hb—hornblende

石(12%±)、黑云母(1%~2%),矿物粒径 0.5~1mm。斜长石呈自形一半自形板状,大小 1~2.5mm,部分颗粒具环带构造,均已不同程度绢云母化;钾长石它形粒状,大小 0.2~2mm,主要为正长石和微斜长石,见高岭土化;石英它形粒状,粒径 0.2~2mm,波状消光;角闪石半自形柱状,大小 0.5~2mm,可见角闪石式解理,可见黝帘石化和绿泥石化;黑云母自形片状,大小 0.5~2mm,含量较少,多绿泥石化。可见斜长石、钾长石和石英呈眼球状,角闪石和黑云母呈弯曲状。副矿物组合为锆石—磁铁矿—赤褐铁矿型,含少量绿帘石、白钛石和磷灰石。

中粒花岗闪长岩,岩石风化面为灰色,新鲜面暗灰色,中粒半自形粒状结构、糜棱结构、块状构造和眼球状构造(图 3),主要矿物成分为斜长石(50%±)、钾长石(17%±)、石英(20%±)、角闪石(12%±)、黑云母(2%±),矿物粒径 2~5mm。斜长石自形一半自形板状,大小 3~5mm,部分颗粒具环带构造,可见不同程度绢云母化;钾长石呈它形粒状,大小 2~4mm,主要为正长石和微斜长石,多高岭土化;石英它形粒状,粒径 3~5mm,波状消光;角闪石半自形柱状,大小 3~4mm,可见角闪石式解理,部分颗粒发生黝帘石化和绿泥石化;黑云母自形片状,大小 2~3mm,可见绿泥石化和绿帘石化。可见斜长石、钾长石和石英呈眼球状,角闪石和黑云母呈弯曲状。副矿物组合为锆石—磁铁矿—钛铁矿—赤褐铁矿型,含少量绿帘石、磷灰石和黄铁矿。

2 锆石 U-Pb 年代学

本次研究对呼 and 德埃达克岩体采集了 1 件锆石 U-Pb 同位素年龄样品,岩性为中粒花岗闪长岩,样

品编号为 S10T,采样位置见图 2,采样点地理位置为 N44°49′40.0″、E118°11′22.2″。

2.1 测试方法

呼 and 德埃达克岩体同位素年龄样品锆石的分选,由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,经重液浮选和电磁分离分选后,在双目镜下挑选出晶形完好、透明度高、无包裹体和无裂纹的锆石颗粒作为测定对象。挑选好的锆石与标样一起固定在环氧树脂中抛光制靶,进行阴极发光(图 4)、透射光和单偏光照相。锆石阴极发光(CL)图像分析在北京锆年领航科技有限公司高分辨热场发射能谱阴极发光室进行,锆石原位 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室 LA-ICP-MS 仪器上进行,对测试数据进行了普通铅校正(Andersen,2002),年龄计算和谐和图绘制采用 ISOPLOT(3.0 版)。

2.2 测试结果

呼 and 德埃达克岩(S10T)样品,共选取 27 粒锆石进行了测点,所选锆石阴极发光图像(CL)显示岩石中的锆石结构均一,呈自形一半自形双锥状或柱状,长宽比为 2:1,具明显的条带环状结构,为酸性岩浆成因锆石的特征(图 4)(Claesson et al., 2000)。27 粒锆石测点的 U 与 Pb 含量分别介于 $65 \sim 286 \times 10^{-6}$ 和 $3.0 \times 10^{-6} \sim 14 \times 10^{-6}$ 之间,Th/U 在 0.1954~0.5151 之间(表 2),平均值为 0.34,具有岩浆成因锆石特征(Koschek,1993;Claesson et al., 2000;Corfu et al., 2003)。该样品 27 粒锆石的测点位于震荡环带发育部位,测定的年龄值均落在谐和线上或附近,测试结果在 289~306Ma 之间,其加权平均值(Mean)为 294.7 ± 1.7 Ma(MSWD=3.4)

表 2 呼和德埃达克岩(S10T)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb dating of zircons from the Huhede adakite

点号	$w_B/(\times 10^{-6})$		$w(\text{Th})/$	同位素原子比率						表面年龄(Ma)	
	Pb	U	$w(\text{U})$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
1	4	93	0.2282	0.0754	5.86	0.4913	7.21	0.0473	0.82	298	± 2
2	6	125	0.3942	0.0623	4.86	0.4041	3.13	0.0470	0.77	296	± 2
3	14	286	0.2217	0.0549	5.15	0.3897	3.25	0.0515	0.74	324	± 2
4	6	129	0.4769	0.0451	14.76	0.3001	3.38	0.0482	0.94	304	± 3
5	7	151	0.3193	0.0817	3.48	0.5232	2.62	0.0464	0.73	293	± 2
6	8	170	0.3667	0.0733	4.82	0.4736	7.96	0.0469	0.75	295	± 2
7	6	122	0.4829	0.0588	6.40	0.3737	4.25	0.0461	0.81	290	± 2
8	11	241	0.4015	0.0500	3.07	0.3194	4.85	0.0463	0.68	292	± 2
9	5	110	0.3639	0.0431	7.96	0.2747	3.73	0.0463	0.81	292	± 2
10	3	74	0.3524	0.0490	9.91	0.3120	8.05	0.0462	0.87	291	± 3
11	4	86	0.5151	0.0537	8.03	0.3408	5.95	0.0461	0.80	290	± 2
12	5	114	0.3408	0.0518	6.15	0.3280	3.73	0.0459	0.79	289	± 2
13	4	84	0.3488	0.0464	9.01	0.2945	3.44	0.0461	0.83	290	± 2
14	3	65	0.3411	0.0762	9.27	0.5099	3.71	0.0485	1.06	306	± 3
15	4	89	0.4171	0.0507	8.87	0.3290	4.45	0.0471	0.87	297	± 3
16	4	85	0.2879	0.0599	8.49	0.3890	3.73	0.0471	0.86	297	± 3
17	5	95	0.2598	0.0607	7.37	0.3969	5.27	0.0474	0.83	299	± 2
18	4	87	0.1954	0.0640	12.49	0.4248	3.82	0.0481	1.25	303	± 4
19	5	94	0.2936	0.0625	7.89	0.4033	6.74	0.0468	0.89	295	± 3
20	6	128	0.2914	0.0514	6.00	0.3349	3.61	0.0472	0.74	298	± 2
21	4	87	0.3165	0.0665	8.38	0.4265	9.51	0.0465	0.94	293	± 3
22	6	118	0.3432	0.0424	9.36	0.2749	8.30	0.0470	0.78	296	± 2
23	7	147	0.4054	0.0545	5.48	0.3478	7.01	0.0463	0.74	292	± 2
24	3	68	0.3158	0.0417	15.08	0.2720	3.47	0.0473	1.01	298	± 3
25	4	80	0.3651	0.0479	10.19	0.3124	5.00	0.0473	0.91	298	± 3
26	5	94	0.2936	0.0625	7.89	0.4033	6.74	0.0468	0.89	295	± 3
27	3	65	0.3411	0.0762	9.27	0.5099	3.71	0.0485	1.06	306	± 3

注:误差为 1 σ ;Pb* 指示放射成因铅。实验测试在天津地质矿产研究所完成。

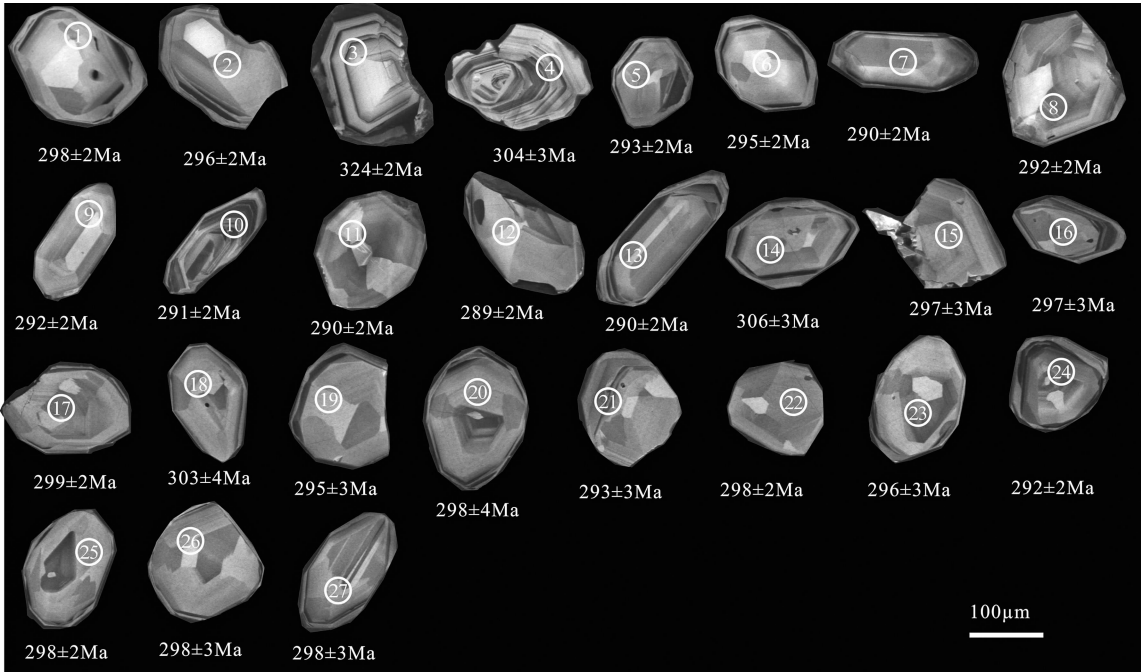


图 4 呼和德埃达克岩(S10T)锆石阴极发光图像及其 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

Fig. 4 Cathodoluminescent images and LA-ICP-MS U-Pb ages of zircons from the Huhede adakite

(图 4,图 5,表 2),代表了埃达克岩的成岩年龄。

根据呼和德埃达克岩体侵入于晚石炭世梅劳特乌拉蛇绿岩带之中,以及细粒和中粒埃达克岩之间的渐变过渡接触关系,该岩体获得的 294.7 ± 1.7 Ma 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,代表了呼和德埃达克岩体的侵位年龄,揭示了西乌旗呼和德埃达克岩的形成时代为早二叠世,为确定贺根山缝合带西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩之中存在早二叠世埃达克岩提供了年代学证据与约束。

3 地球化学特征

西乌旗梅劳特乌拉地区呼和德埃达克岩的主量元素、微量元素和稀土元素分析测试,均在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,主元素分析采用 Panalytical 公司 PW440 型 X 荧光光谱仪(XRF)测定,分析误差低于 5%,微量元素和稀土元素采用 Thermo Fisher 公司 X-Series p 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定,检测限优于 5×10^{-9} ,相对标准偏差优于 5%。本文对西乌旗呼和德埃达克岩 5 件样品进行了元素地球化学分析,全岩主量元素、微量元素和稀土元素分析测试结果及特征值如表 1。

在主量元素上,呼和德埃达克岩富硅富铝, SiO_2 含量为 64.93%~69.50%,均 $>56\%$; Al_2O_3 含量为 15.72%~19.11%,均 $>15\%$;高钠低钾, Na_2O 含量为 4.90%~6.10%, K_2O 含量为 0.60%~1.63%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 3.01~8.60,均 >1 ;低 MgO , MgO 含量为 0.80%~1.48%,均 $<3\%$, $\text{Mg}^\#$ 为 42~52;贫 TiO_2 (0.18%~0.40%) 和 P_2O_5 (0.06%~0.12%)。在 $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (TAS)

分类图解中,样品落入亚碱性花岗闪长岩区域(图 6)。其 A/CNK 为 0.87~1.14, A/NK 为 1.64~1.76,属准铝质—过铝质。

在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 分类图解(图 7)中,5 个样品中有 4 个样品落在低钾拉斑系列与中钾钙碱性系列分界线附近的低钾拉斑系列一侧,1 个样品分布在中钾钙碱性系列区域内,可能反映呼和德埃达克岩具有低钾拉斑系列与中钾钙碱性系列的过渡型岩石特征,与埃达克质岩石的化学成分较为接近(Droummod 和 Defant,1990;Martin,1993,1999)。在 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 分类图解中,岩体主要落在钙碱性系列区域,并与梅劳特乌拉蛇绿岩的火山熔岩投点区域总体相对应。

在稀土元素上,呼和德埃达克岩的稀土元素含量明显较低, $\sum \text{REE}$ 为 $32.68 \times 10^{-6} \sim 66.69 \times 10^{-6}$,平均值为 45.52×10^{-6} ; Yb 含量为 $0.95 \times 10^{-6} \sim 1.76 \times 10^{-6}$, Yb 均 $<1.9 \times 10^{-6}$; Y 含量为 $5.26 \times 10^{-6} \sim 9.27 \times 10^{-6}$, Y 均 $<18 \times 10^{-6}$ (表 1),明显不同于与一般岛弧。该埃达克岩的铕异常不明显, $\delta \text{Eu}=1.05 \sim 2.24$,平均值为 1.4, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 为 3.09~5.10,轻重稀土分离明显,稀土配分曲线为右倾型(图 8)。在图 8 中,该埃达克岩的稀土元素配分曲线与梅劳特乌拉蛇绿岩的玻安岩 U 型配分曲线较为吻合或相类似,且位于富 Nb 玄武岩稀土元素配分曲线的下方,表现出亏损地幔源区的特征,以及与梅劳特乌拉蛇绿岩火山熔岩之间的成因联系。

在微量元素上,高 Sr 和高 Sr/Y ,Sr 含量为 $368 \times 10^{-6} \sim 700.40 \times 10^{-6}$,平均值为 511.98×10^{-6} ; Sr/Y 为 49.38~111.00,平均值为 71.27,均 >40 ;相容元素 Cr 和 Ni 等含量相对较高,Cr 为 $30.60 \times$

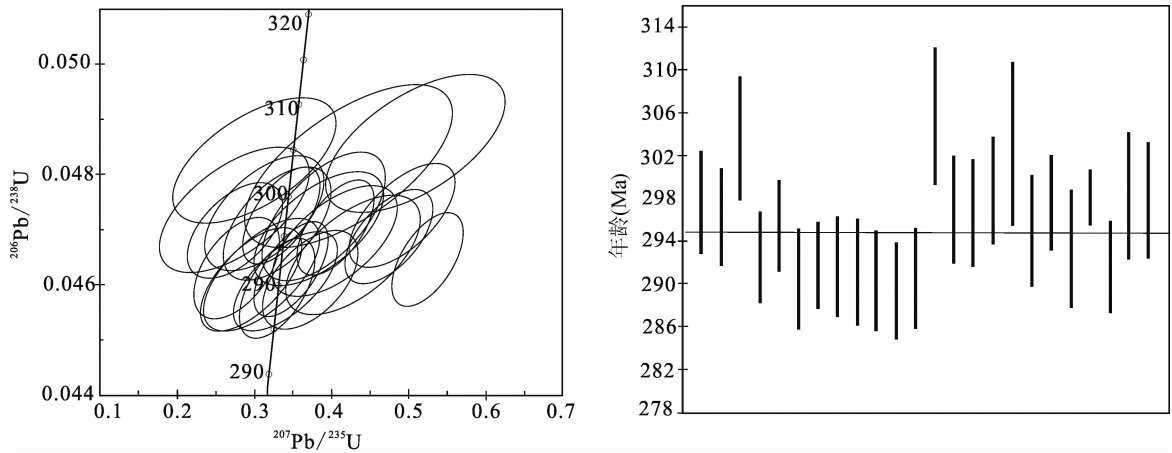


图 5 呼和德埃达克岩(S10T)锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图和直方图
Fig. 5 U-Pb concordia diagram of zircons from the Huhede adakite

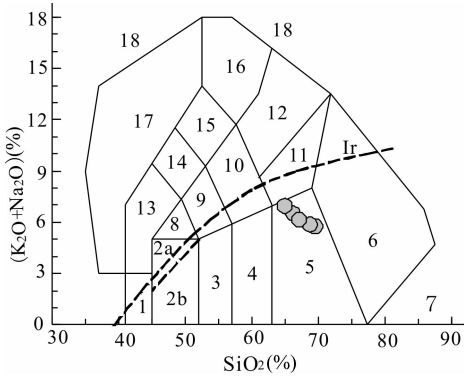


图 6 呼和德埃达克岩 TAS 分类图
Fig. 6 Total alkalis vs. silica(TAS) diagram of the Huhede adakite
5—花岗闪长岩
5—Granodiorite

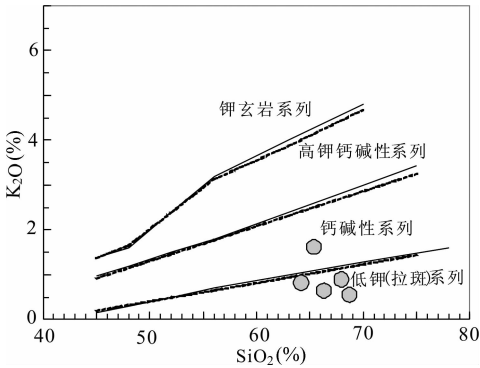


图 7 呼和德埃达克岩 SiO₂-K₂O 分类图解(据 Peccerillo et al. , 1976)
Fig. 7 SiO₂-K₂O classification diagrams of the Huhede adakite(after Peccerillo et al. , 1976)

$10^{-6} \sim 35.50 \times 10^{-6}$),Ni 为 $12.1 \times 10^{-6} \sim 16.50 \times 10^{-6}$ 。呼和德埃达克岩相对富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb 和 Sr 等,亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr、Ti 和 P 等。在原始地幔标准化蛛网图上,具有明显的 Rb、Sr、K 和 Hf 正异常“峰”和 Nb、Ta、Ti 和 P 负异常“槽”(图 9)。

在图 9 中,该岩石与梅劳特乌拉蛇绿岩的火山熔岩微量元素曲线总体一致,均表现出明显的富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb 和 Sr 等,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Ti 和 P 等,特别是与玻安岩的微量元素曲线较为吻合,但明显富集大离子亲石元素 Rb 和 K,并与富 Nb 玄武岩形成明显的 Sr 微量元素互补性。呼和德埃达克岩微量元素组分反映了大洋俯冲带组分(SZC)特征,揭示了与大洋俯冲带有关的岛弧构造环境(Dafant et al,1990; Kelemen et al. ,2003),与梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩

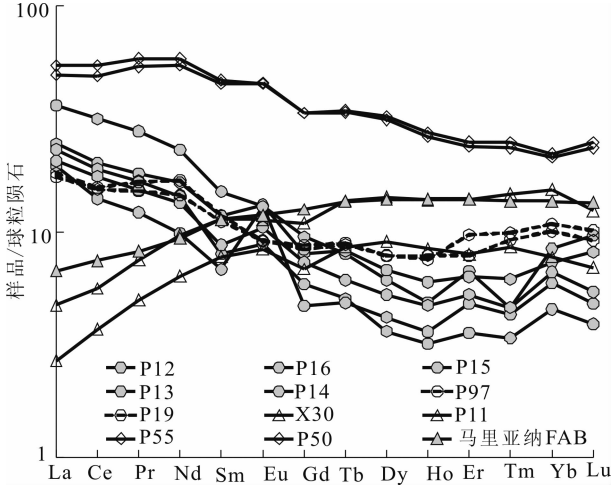


图 8 呼和德埃达克岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式
(球粒陨石标准化数值据 Boynton, 1984)
Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution patterns of the Huhede adakite(normalizing values after Boynton, 1984)

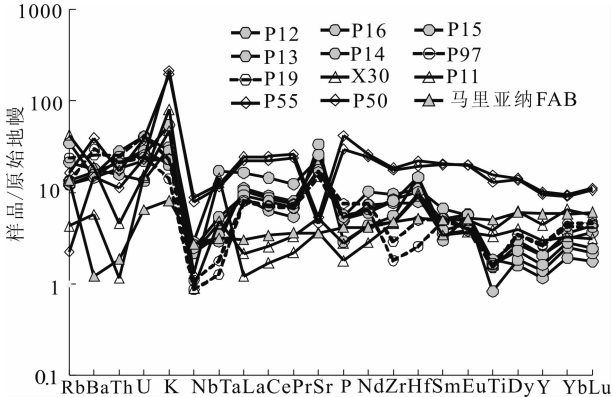


图 9 呼和德埃达克岩微量元素原始地幔标准化蛛网图
(原始地幔标准化数值据 Sun 和 McDonough, 1989)
Fig. 9 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of the Huhede adakite (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

和蛇绿岩带火山熔岩的前弧环境相吻合(Li Yingjie et al. ,2015)。

4 讨论

4.1 形成时代

在内蒙古中部二连—贺根山缝合带及其外围区域内,早石炭世—晚二叠世与古亚洲洋大洋俯冲有关的岛弧型岩浆岩形成年龄数据较多,但是,侵入于贺根山缝合带蛇绿岩之中的早二叠世岛弧型埃达克岩体形成年龄的报道本文可能尚属首次。

Chen Bin et al. (2001)在西乌旗西部苏左旗白音宝力道岛弧型石英闪长岩体中获得 310Ma 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄,为晚石炭世。Li

Chengdong et al. (2007) 在吉林色洛河地区岛弧型高镁安山岩中获得 $252\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄, 为晚二叠世。Zeng Junjie et al. (2008) 在固阳地区岛弧型埃达克质花岗岩获得 $281.9 \pm 3.1\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 为早二叠世。Zhang Yuqing (2009) 在苏尼特左旗巴音乌拉岛弧型埃达克质花岗闪长岩获得 $256.1 \pm 0.9\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 为晚二叠世。Liu Jianfeng et al. (2009) 在西乌旗南部达其浑迪和金星岛弧型石英闪长岩中获得 $325 \pm 3\text{Ma}$ 和 $322 \pm 3\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 为早石炭世。Hao Baiwu (2012) 在镶白旗岛弧型埃达克质花岗岩中获得 $267.2 \pm 1.4\text{Ma}$ 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 为中二叠世。Liu Jun et al. (2014) 在镶黄旗岛弧型花岗斑岩和闪长岩中分别获得 $271 \pm 3\text{Ma}$ 和 $267 \pm 3\text{Ma}$ 的 SHRIMP U-Pb 锆石年龄, 为中二叠世。Kang Jianli et al. (2016) 在锡林浩特地区岛弧型变质基性火山岩中获得 $323 \sim 334\text{Ma}$ 的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 为早石炭世。然而, 这些区域上的二叠纪岛弧型埃达克岩, 未见其产于 SSZ 型蛇绿岩之中, 也未见其与枕状拉斑玄武岩、玻安岩 (玻安岩系)、富 Nb 玄武岩、高镁或镁安山岩和高镁闪长岩等洋内弧岩石组合序列的共生组合与时空分布。

近年来, 作者在内蒙古中部西乌旗地区进行 1:5 万区域地质调查时, 新识别出早二叠世埃达克岩体出露。前人 1:20 万罕拉乌幅将其划为华力西晚期石英闪长岩, 缺少年代学资料。该埃达克岩体侵入于晚石炭世梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩 ($315 \sim 308\text{Ma}$) 之中。作者在梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩中, 获得块状辉长岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $308.5 \pm 2.2\text{Ma}$ (Li Yingjie et al., 2015), 获得玻安岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $315.0 \pm 6.2\text{Ma}$ ^①。本次对该埃达克岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年, 获得了 $294.7 \pm 1.7\text{Ma}$ 年龄。该岩石样品的锆石颗粒呈自形一半自形柱状, 振荡环带细密清晰, 为酸性岩浆锆石的特征, 锆石 U-Pb 年龄应代表埃达克岩岩浆结晶侵位年龄。而且, 该埃达克岩的形成时代与内蒙古中部地区晚石炭世—晚二叠世俯冲带岛弧型岩浆岩形成年龄相吻合 (Chen Bin et al., 2001; Li Chengdong et al., 2007; Zeng Junjie et al., 2008; Zhang Yuqing, 2009; Hao Baiwu, 2012; Liu Jun et al., 2014)。本文通过岩相学、岩石地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学

和梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩对比研究, 并结合二连—贺根山地区岛弧型岩浆岩、埃达克岩和国内外洋内弧初始洋壳俯冲作用等相关研究成果 (Chen Bin et al., 2001; Shervais, 2001; Liu Jianfeng et al., 2009; Li Yingjie et al., 2012, 2015; Reagan, 2013; Ishizuka et al., 2014; Huang Feng et al., 2015; Xiao Qinghui et al., 2016; Kang Jianli et al., 2016; Li Fenqi et al., 2016; Dong Xuefa et al., 2016), 明确了二连—贺根山缝合带西乌旗梅劳特乌拉晚石炭世 SSZ 型蛇绿岩中存在早二叠世埃达克岩体。与此同时, 也反映了呼和德早二叠世埃达克岩岩浆侵入活动 ($294.7 \pm 1.7\text{Ma}$) 紧随晚石炭世梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩 ($315 \sim 308\text{Ma}$) 形成之后的有序产出。

4.2 岩石属性、成因和构造环境

埃达克岩 (adakite) 最初是指与大洋俯冲作用有关的一种特殊的岛弧型岩浆岩, 岩性主要为安山岩、英安岩、流纹岩及相应的英云闪长岩和奥长花岗岩等深成岩, 为俯冲的年轻洋壳 (一般 $<25\text{Ma}$) 直接部分熔融所产生的岛弧型中酸性富钠火成岩, 并作为鉴别俯冲消减带的一项岩浆岩标志 (Defant et al. 1990; Drummond et al. 1990; Stern et al., 1996; Samaniego et al., 2002; Liu Dunyi et al., 2003)。目前, 有关埃达克岩的研究存在着俯冲带、碰撞造山带 (去根)、大陆板块内部 (减薄) 等多种构造环境和多种成因模型等观点。但是, 地质工作者普遍认为与俯冲带有关的岛弧型埃达克岩 (adakite) 具有独特的地球化学特征与标志, 表现为 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{MgO} < 3\%$ (个别大于 6%), $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, $\text{Sr} \geq 400 \times 10^{-6}$, 重稀土元素亏损, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$, $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$, LREE 富集, Eu 异常不明显。呼和德花岗闪长岩 SiO_2 $64.93\% \sim 69.50\%$, MgO $0.80\% \sim 1.48\%$, Al_2O_3 $15.72\% \sim 19.11\%$, Sr $368 \times 10^{-6} \sim 700.40 \times 10^{-6}$, Yb $0.95 \times 10^{-6} \sim 1.76 \times 10^{-6}$, Y $5.26 \times 10^{-6} \sim 9.27 \times 10^{-6}$, Sr/Y 为 $49.38 \sim 111.00$; 相对富集大离子亲石元素 (LILE) K、Rb 和 Sr 等, 亏损高场强元素 (HFSE) Nb、Ta、Zr、Ti 和 P 等 (表 1, 图 8, 图 9); 稀土元素总量较低, 轻重稀土分馏明显, 稀土元素配分曲线为右倾型, δEu 为 $1.05 \sim 2.24$, 铕异常不明显 (表 1, 图 8, 图 9), 具有大洋俯冲带的组分 (SZC) 和岛弧型岩浆岩的地球化学特征。该花岗闪长岩的地球化学属性与中亚造山带东段内蒙古中东部地区俯冲带岛弧型埃达克岩的地球化学特征相一致 (Wang Yan et al., 2000; Liu Duiyi et al., 2003; Xu Liquan et al., 2003; Shi

Yuruo et al. ,2005;Zeng Junjie et al. ,2008;Zhang Yuqing, 2009; Hao Baiwu, 2012; Liu Jianfeng et al. ,2013; Zhang Wei et al. ,2014;Wang Lu et al. , 2016),可与世界上典型俯冲带岛弧型埃达克岩(高 Si 埃达克岩)相类比(图 10)(Defant et al. ,1990; Martin,1999;Wang Qiang et al. ,2003,2006;Zhang Le et al. ,2014;Huang Gang et al. ,2016),其岩相学、岩石化学和微量元素特征表明其为高 Si 埃达克岩(Martin et al. , 2005)。例如,在 SiO₂-MgO 和 (CaO+NaO₂)-Sr 图解中(图 10),该岩石 5 个样品均落入高 Si 埃达克岩区域,并投在玄武岩熔融实验熔体范围内,表明该岩石的属性为高 Si 埃达克岩(Martin et al. , 2005)。

大洋俯冲带岛弧型埃达克岩,分为高 Si 埃达克岩(HSA)和低 Si 埃达克岩(LSA)两种类型(Martin et al. ,2005)。高 Si 埃达克岩为俯冲洋壳熔融上升与上覆地幔楔橄榄岩反应成因,玄武岩熔融实验熔体主要与高 Si 埃达克岩相吻合;低 Si 埃达克岩为俯冲洋壳硅质熔体与上覆地幔楔橄榄岩反应促使地幔楔橄榄岩熔融成因(Martin et al. , 2005)。一般认为,基性玄武岩部分熔融形成的熔体的 Mg[#] 值≤45,而大洋俯冲板片熔融作用形成的富 Si 熔体由俯冲带上升与地幔楔橄榄岩相互作用,可促使富 Si 熔体的 Mg[#] 值明显提高,Mg[#] 值提高的程度指示富 Si 熔体与上覆地幔楔橄榄岩相互作用的强度(Atherton et al. ,1993; Rapp et al. ,1995, 1999)。呼和德埃达克岩的 Mg[#] 值平均为 47.6,明显大于基性玄武岩部分熔融形成的熔体的 Mg[#] 值(≤45);其 SiO₂ 含量平均值为 67.28%,明显高于高 Si 埃达克岩 267 个样品的 SiO₂ 含量平均值

(64.8%)(表 1),表现出更富 Si;而且具有明显高于 MORB 和前弧玄武岩的较高 Th 含量(平均值 1.80 ×10⁻⁶)和较高 Th/La(0.16~0.39)、Th/Sm(0.61~1.79)、Th/Yb(1.02~1.92)和 Th/Ce(0.07~0.21)比值(表 1)。Th 元素通常富集于沉积物中,较高的 Th 含量和较高的 Th/La、Th/Sm、Th/Yb 和 Th/Ce 比值,反映岩浆源区大洋俯冲沉积物组分的加入。这些特征反映呼和德埃达克岩的岩浆源区可能并非仅仅是俯冲洋壳的部分熔融形成的熔体,亦有俯冲沉积物部分熔融形成的富 Si 熔体参与。这些熔体由俯冲带上升进入上覆地幔楔,与地幔楔橄榄岩相互作用,导致埃达克质熔体的 Mg[#] 值明显增高。而且,与高 Si 埃达克岩 267 个样品的 La/Yb 平均比值 21.82 相对比,该岩体与梅劳特乌拉蛇绿岩的玻安岩和富 Nb 玄武岩均具有较低的 La/Yb 比值(平均值分别为 5.68、2.54 和 3.55)(表 1),也反映出大洋俯冲沉积物来源熔体对岩浆源区地幔楔橄榄岩的作用。因此,呼和德埃达克岩可能为俯冲洋壳+俯冲深积物部分熔融形成的埃达克质熔体由俯冲带上升与上覆地幔楔橄榄岩相互作用成因。

有关俯冲带岛弧型埃达克岩的构造环境,近年来在大洋俯冲带岛弧前弧区发现埃达克岩为洋内弧前弧岩石组合的重要岩石类型之一,其与前弧玄武岩 FAB、玻安岩、富铌玄武岩 NEB 和高镁安山岩 HMA 等构成特殊的火成岩组合序列,又称之为洋内弧前弧玄武岩家族;因此,产于梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩之中,与前弧玄武岩 FAB、玻安岩、富铌玄武岩 NEB 和高镁安山岩 HMA 等共生组合的呼和德埃达克岩,可能形成于洋内初始俯冲的洋内弧环境(Tang Gongjian et al. , 2010; Reagan, 2013;

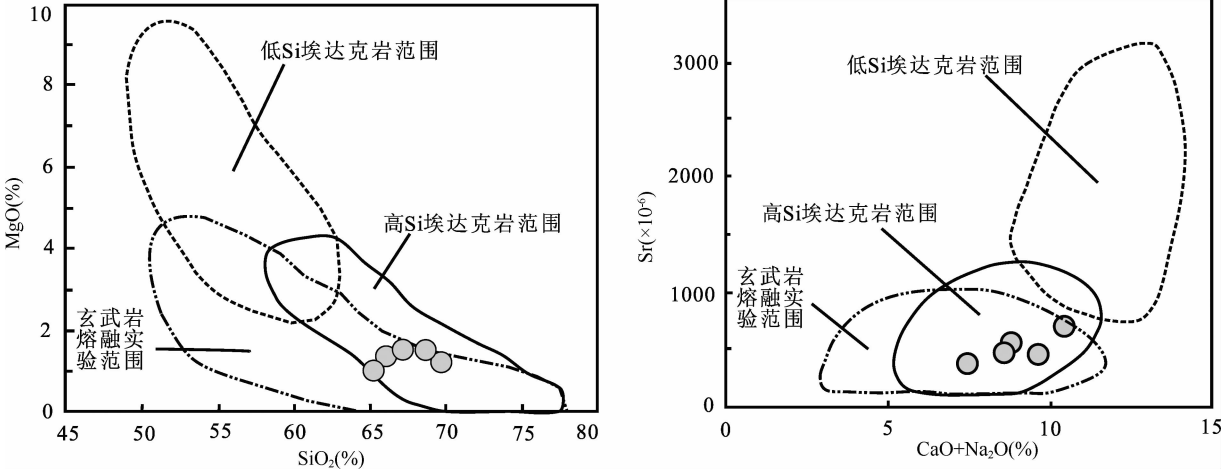


图 10 呼和德埃达克岩 SiO₂-MgO 和 (CaO+NaO₂)-Sr 图解(据 Martin et al. , 2005)
Fig. 10 SiO₂-MgO and (CaO+NaO₂)-Sr diagrams of the Huhede adakite(after Martin et al. , 2005)

Ishizuka et al. , 2014; Deng Jinfu et al. , 2010, 2015; Huang Feng et al. , 2015; Xiao Qinghui et al. , 2016; Li Fenqi et al. , 2016; Dong Xuefa et al. , 2016)。

在 Rb-(Yb+Nb)和 Ta-Yb 构造环境判别图解上(图 11),呼和德埃达克岩样品均投影到火山岛弧区,并可与梅劳特乌拉蛇绿岩的前弧玄武岩 FAB、玻安岩和富铌玄武岩 NEB 等火山熔岩相对比(图 11),两者均位于火山岛弧区(图 11),表明两者之间存在着明显的成因关系(Thorkelson et al. 2005; Virtue et al. 2007)。

在 Hf/3-Th-Nb/16 和 Hf/3-Th-Ta 构造判别图解中(图 12),呼和德埃达克岩 5 个样品中的 2 个样品落入岛弧拉斑玄武岩区,3 个样品落在岛弧钙碱性玄武岩区,同样表现出岩石具有岛弧拉斑玄武岩与岛弧钙碱性玄武岩的双重特征。呼和德埃达克

岩与梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩的火山熔岩相对比(图 12),两者在岛弧拉斑玄武岩—岛弧钙碱性玄武岩区存在着明显的线性关系(图 12),而且埃达克岩明显主要在中段,主要位于岛弧钙碱性玄武岩区,而玻安岩位于线性关系的底端岛弧钙碱性玄武岩区,枕状拉斑玄武岩和富 Nb 玄武岩则明显集中在线性关系的顶端岛弧拉斑玄武岩区(图 12),可能反映两者之间存在着成因与递进演变关系(Thorkelson et al. 2005, Virtue et al. 2007)。

在 wY-wSr/wY 和 Yb_N-(La/Yb)_N 构造判别图解中(图 13,图 14),呼和德埃岩体 5 个样品均落入埃达克岩区,揭示其岩石属性为埃达克岩。在图 13 和图 14 中,梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩的火山熔岩样品主要投在岛弧岩石区,玻安岩 2 个样品投在埃达克岩与岛弧岩石区分界线附近,可能反映了呼和德埃埃达克岩与梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩的玻安

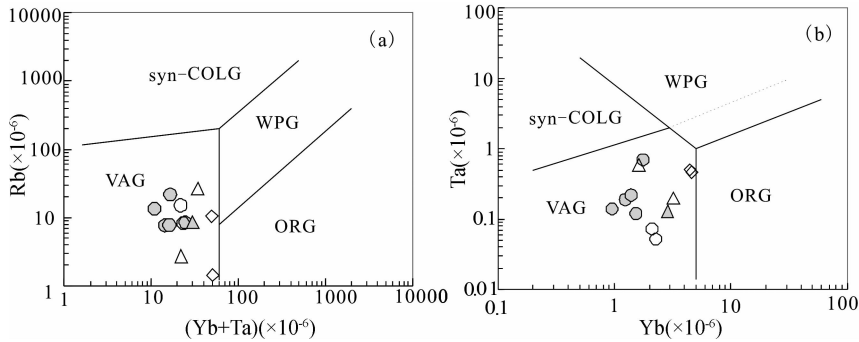


图 11 呼和德埃达克岩 Rb-(Y+Nb)和 Ta-Yb 构造判别图解(据 Pearce,1984;岩性符号同图 8)

Fig. 11 Rb-(Y+Nb) and Ta-Yb tectonicdiscriminant diagrams of the Huhede adakite (after Pearce,1984;the same symbols as in figure 8)

syn-collision(syn-COL), volcanic arc (VA), within plate (WP) and normal and anomalous ocean ridge (OR) granites

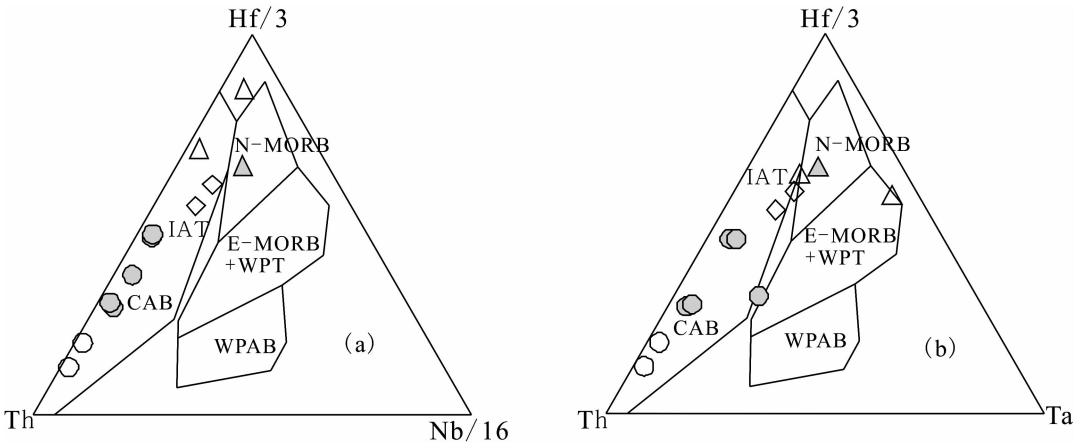


图 12 呼和德埃达克岩 Hf/3-Th-Nb/16 和 Hf/3-Th-Ta 构造判别图解(据 Wood,1980;岩性符号同图 8)

IAT—岛弧拉斑玄武岩;CAB—岛弧钙碱性玄武岩;WPT—板内拉斑玄武岩;WPAB—板内碱性玄武岩

Fig. 12 Hf/3-Th-Nb/16 and Hf/3-Th-Ta tectonic discriminant diagrams of the Huhede adakite (after Wood,1980;the same symbols as in figure 8)

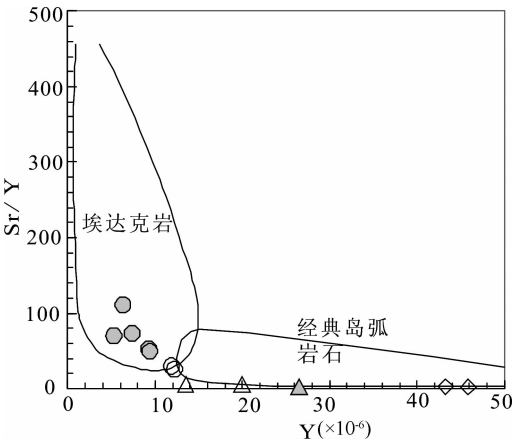


图 13 呼和德埃达克岩 wY-wSr/wY 构造判别图解(据 Defant and Drummond,1990; Martin,1999;岩性符号同图 8)
Fig. 13 wY-wSr/wY tectonic discriminant diagrams of the Huhede adakite(after Defant and Drummond,1990; Martin, 1999;the same symbols as in figure 8)

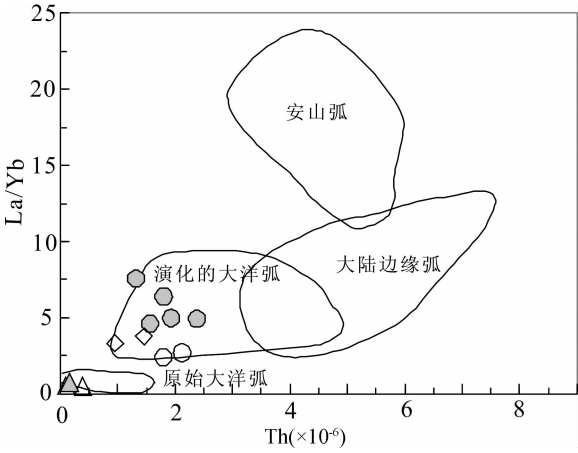


图 15 呼和德埃达克岩 Th-La/Yb 构造判别图解
(据 Condie,1986;岩性符号同图 8)
Fig. 15 Th-La/Yb tectonic discriminant diagrams of the Huhede adakite(after Condie,1986; the same symbols as in figure 8)

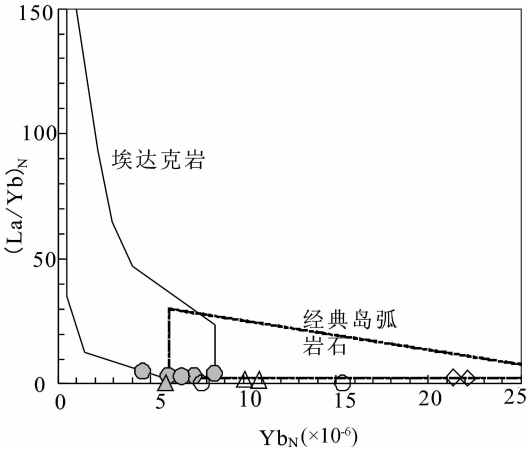


图 14 呼和德埃达克岩 Yb_N-(La/Yb)_N 构造判别图解(据 Defant and Drummond,1990; Martin,1999;岩性符号同图 8)
Fig. 14 The Yb_N-(La/Yb)_N tectonic discriminant diagrams of the Huhede adakite(after Defant and Drummond,1990; Martin,1999;the same symbols as in figure 8)

岩之间内在成因联系(Wang Qiang et al. ,2003,2006; Qiu Ruizhao et al. ,2004;Shi Rendeng et al. ,2004; Zhang Le et al. ,2014;Huang Gang et al. ,2016)。

利用 Th-La/Yb 图解可以区为原始大洋弧(大洋初始弧)、演化的大洋弧、大陆边缘弧和安山弧(安第斯岛弧)(Cui Meihui et al. ,2011;Li Fenqi et al. , 2016),即可以对大洋岛弧或洋内弧更进一步进行判别(图 15)。在 Th-La/Yb 构造判别图解中(图 15),呼和德埃达克岩 5 个样品投点均落入演化的大洋弧区内,梅劳特乌拉蛇绿岩的枕状拉斑玄武岩和马里亚纳前弧玄武岩(FAB)样品投点落入原始大洋弧

区,玻安岩和富 Nb 玄武岩主要分布在原始大洋弧与演化的大洋弧边界过渡区附近,表现出明显的洋内弧前弧初始弧的地球化学特征,可能进一步反映了该埃达克岩应为梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩的枕状拉斑玄武岩和玻安岩岩浆递进演变稍晚侵位的深成侵入岩(Thorkelson et al. 2005; Virtue et al. 2007)。

综上所述,在梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩中新识别出的呼和德埃达克岩侵入岩体,具有洋内弧性质,可能形成于洋内弧环境,应属于大洋俯冲带岩浆作用和洋内弧型岩浆岩,可与典型洋内弧型岩浆岩相对比(图 8~15)(Shervais,2001;Tang Gongjian et al. ,2010;Reagan, 2013;Ishizuka et al. ,2014;Deng Jinfu et al. , 2010,2015;Huang Feng et al. ,2015; Xiao Qinghui et al. ,2016;Li Fenqi et al. , 2016; Dong Xuefa et al. , 2016)。因此,对比国内外近年洋内弧岩石组合序列研究的成果,呼和德埃达克岩与梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩(蛇纹石化方辉橄榄岩、层状一块状辉长岩)、枕状拉斑玄武岩、玻安岩和富 Nb 玄武岩等,可能构成梅劳特乌拉洋内弧初始俯冲作用较为完整连续的岩石组合序列和梅劳特乌拉洋内弧,可与马里亚纳洋内弧相对比,具有统一的洋内弧洋内初始俯冲作用的亏损地幔楔源区和成因机制。因此,呼和德埃达克岩可能为洋内初始俯冲洋壳板片的部分熔融产物,洋内初始俯冲洋壳板片的部分熔融可能构成了梅劳特乌拉蛇绿岩早二叠世洋内弧呼和德埃达克岩的成因机制(Defant et al. , 1990; Sajona et al. , 1993; Peacock et al. , 1994;

Thorkelson et al., 2005; Virtue et al., 2007)。

4.3 地质意义

作者本次在呼德埃达克岩中获得的 294.7 ± 1.7 Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, 与内蒙古中部地区二叠纪岛弧型埃达克岩形成年龄相吻合 (Li Chengdong et al., 2007; Zeng Junjie et al., 2008; Zhang Yuqing, 2009; Hao Baiwu, 2012; Liu Jun et al., 2014), 与该地区下二叠统寿山沟组的半深海—深海复理石建造 (Li Yingjie et al., 2012, 2015; Gong Fanhao et al., 2013) 相对应, 也与内蒙古中东部地区中二叠统哲斯组泥岩中发现放射虫化石所反映的古洋盆环境相吻合 (Shang, 2004), 进一步表明了古亚洲洋二连—贺根山洋盆在早二叠世并没有消失, 而是正处于洋壳俯冲消减阶段 (Li Chengdong et al., 2007; Zeng Junjie et al., 2008; Zhang Yuqing, 2009; Hao Baiwu, 2012; Liu Jun et al., 2014), 或者早二叠世仅仅为二连—贺根山洋盆梅劳特乌拉洋内弧洋内初始俯冲阶段, 早二叠世之后的一段时间可能为古亚洲洋二连—贺根山洋盆的洋壳俯冲期。该埃达克岩体侵位于梅劳特乌拉蛇绿岩之中, 其 294.7 ± 1.7 Ma 的岩浆结晶侵位年龄与梅劳特乌拉蛇绿岩 315~308 Ma 的形成年龄相吻合, 这一特征进一步揭示了洋内弧洋内初始俯冲作用形成 SSZ 型蛇绿岩或洋壳, 产生枕状拉斑玄武岩、玻安岩和稍晚侵位的深成侵入岩等岩浆递进演变过程及有序产出的时代关系 (Sengor, 1993, 1996; Shervais, 2001; Ishikawa et al., 2005; Dilek et al., 2009, 2011, 2014; Ishizuka et al., 2006, 2009, 2011, 2014; Reagan, 2008, 2010, 2013; Deng Jinfu et al., 2015; Xiao Qinghui et al., 2016; Dong Xuefa et al., 2016)。

梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩构造就位处于下二叠统寿山沟组与大石寨组之中, 最终构造就位时间应在早二叠世之后 (Li Yingjie et al., 2012, 2015)。在二连—贺根山地区蛇绿岩相关年龄数据上, 梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩的形成时代、洋内弧大洋初始洋壳俯冲时间和梅劳特乌拉蛇绿岩构造就位时间相对较晚, 可能更好地反映了古亚洲洋二连—贺根山洋盆在早二叠世之后或二叠纪晚期的俯冲消亡碰撞缝合事件, 为古亚洲洋二连浩特—贺根山洋盆的形成时限和贺根山缝合带以及整个中亚造山带东段古生代洋盆在二叠纪晚期闭合, 华北板块与西伯利亚板块最终碰撞造山缝合时间为二叠纪末 (最晚至早三叠世) 提供了进一步的岩石学证据与时间约束

(Sengor et al., 1993; Chen Bin et al., 2001; Jian et al., 2010; Li Yingjie et al., 2012, 2013; Shi Yuruo et al., 2014; Kang Jianli et al., 2016)。

随着呼德埃达克岩和梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩、枕状拉斑玄武岩、玻安岩和富 Nb 玄武岩等晚石炭世—早二叠世洋内弧岩石类型的不断识别与研究, 并结合国内外洋内弧洋内初始俯冲作用的岩石组合相关成果, 可初步建立晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋内弧洋内初始俯冲作用的岩石组合序列: 梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩 (蛇纹石化方辉橄榄岩、层状一块状辉长岩)、前弧枕状拉斑玄武岩、玻安岩、埃达克岩、富 Nb 玄武岩、高镁或镁安山岩和高镁闪长岩 (图 16), 可与马利亚纳等典型洋内弧洋内初始俯冲作用岩石组合序列相对比 (Sengor, 1993, 1996; Shervais, 2001; Ishikawa et al., 2005; Dilek et al., 2009, 2011, 2014; Ishizuka et al., 2006, 2009, 2011, 2014; Reagan, 2008, 2010, 2013; Deng Jinfu et al., 2015; Xiao Qinghui et al., 2016; Dong Xuefa et al., 2016)。

呼德埃达克岩和梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩、枕状拉斑玄武岩 FAB、玻安岩和富 Nb 玄武岩等晚石炭世—早二叠世洋内弧初始俯冲的岩石组合序列特征与识别标志, 可初步概况为以下 5 个方面 (图 16):

(1) 梅劳特乌拉洋内弧前弧的基底为梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩 (洋壳), 其为洋内弧前弧初始俯冲岩石组合序列中不可缺少的最基本的组成单元和标志性特征, 也是洋内大洋板块刚开始发生初始 (浅) 俯冲阶段在初始俯冲带之上的产物与标志特征之一 (图 16)。

(2) 梅劳特乌拉洋内弧岩石组合序列, 自下而上由老到新从约 315 Ma 到 279 Ma 不间断的连续有序产出 (图 16)。枕状拉斑玄武岩为洋内初始俯冲作用产生的首次岩浆作用产物, 代表了洋内初始俯冲与洋陆初始转变的时代, 为洋内弧前弧初始俯冲岩石组合序列中不可缺少的最基本的组成单元和标志性岩石类型之一。枕状拉斑玄武岩表现出具有特殊地球化学特征的比岛弧拉斑玄武岩 (IAT 或 IAB) 更像洋中脊玄武岩 (MORB-like) 的拉斑玄武岩, 其主要产于前弧中而不是洋中脊, 故又称之为 MORB-Like 玄武岩或前弧枕状拉斑玄武岩 (FAB)。玻安岩、埃达克岩和富 Nb 玄武岩在前弧玄武岩 (FAB) 之后相继形成与产出 (图 16)。特别是玻安岩、埃达克岩、高镁安山岩和富 Nb 玄武岩, 也是洋

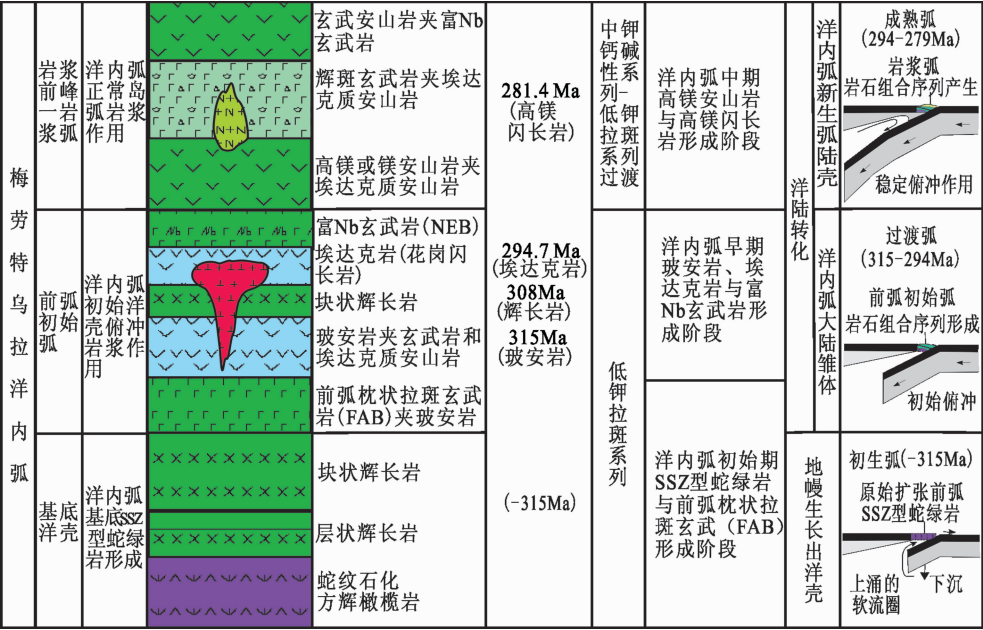


图 16 晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋
内弧初始俯冲系统形成演化模式

Fig. 16 The formation and evolution model of the Late Carboniferous-Early Permian
Meilaotewula intraoceanic arc initial subduction

内弧前弧岩石组合中不可缺少的标志性岩石类型。

(3)梅劳特乌拉洋内弧前弧枕状拉斑玄武岩(FAB)、玻安岩、埃达克岩、富 Nb 玄武岩、高镁或镁安山岩和高镁闪长岩等,各标志性岩石之间和各标志性岩石与一般正常类型岩石之间普遍发育过渡类型岩石(图 16)。

(4)自下而上由老到新,梅劳特乌拉洋内弧前弧的岩石组合序列有(低钾)拉斑系列递进演变为(低钾)拉斑系列与(中钾)钙碱性系列的过渡型岩石组合(图 16)。

(5)梅劳特乌拉洋内弧岩石组合序列总体自南向北的有序产出,可能反映梅劳特乌拉洋内弧洋壳初始俯冲为向北俯冲。

4.4 演化模型

通过国内外洋内弧初始俯冲系统形成模式对比(Sengor, 1993, 1996; Shervais, 2001; Ishikawa et al. 2005; Dilek et al. 2009, 2011, 2014; Ishizuka et al. 2006, 2009, 2011, 2014; Reagan, 2008, 2010, 2013; Deng Jinfu et al. , 2015; Xiao Qinghui et al. , 2016; Dong Xuefa et al. , 2016),可初步建立晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋内弧初始俯冲系统形成演化模式,可分以下 4 个阶段(图 16):

(1)梅劳特乌拉洋内弧初始期 SSZ 型蛇绿岩—前弧枕状拉斑玄武岩(FAB)形成阶段(图 16)。

该阶段在梅劳特乌拉洋内弧初始洋壳俯冲带之上形成梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩,而且,初始俯冲洋壳产生的水和高温岩浆熔体作用与上覆残余难熔地幔楔,使地幔楔部分熔融而产生梅劳特乌拉前弧枕状拉斑玄武熔岩(FAB)(图 16)。

(2)梅劳特乌拉洋内弧早期玻安岩—埃达克岩—富 Nb 玄武岩形成阶段(图 16)。

玻安岩、埃达克岩和富 Nb 玄武岩为梅劳特乌拉洋内弧前弧的标志性岩石,在前弧玄武岩(FAB)喷发之后相继形成与产出(图 16)。其中,玻安岩又先于埃达克岩和富 Nb 玄武岩形成,上覆于前弧玄武岩(FAB)之上,为洋内弧早期初始阶段的标志性和指示性岩石(图 16),是初始俯冲洋壳的富含不相容元素的富水流体作用于上覆地幔楔中高度亏损的残余难熔地幔橄榄岩,并在低压高温条件下导致残余难熔地幔橄榄岩发生部分熔融的产物。在玻安岩之后,俯冲洋壳部分熔融形成埃达克岩。富 Nb 玄武岩形成于多次俯冲与改造的俯冲带中,为俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克质熔体交代过的地幔楔橄榄岩发生部分熔融的产物。

(3)梅劳特乌拉洋内弧中期高镁或镁安山岩—高镁闪长岩形成阶段(图 16)。

随着洋内弧洋内初始俯冲作用不断加强,梅劳特乌拉洋内弧火山喷发和深成岩浆侵入活动广泛发

育,形成梅劳特乌拉洋内弧高镁或镁安山岩、辉斑玄武岩、细碧岩和高镁闪长岩等,构成梅劳特乌拉洋内弧主体(图 16)。该阶段形成的岩石组合主要为低钾拉斑系列与中钾钙碱性系列的过渡型岩石,表现出硅饱和程度更高,更富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb、Sr 和 LREE 等,亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr、Ti、P 和 HREE 等。该阶段的高镁或镁安山岩、辉斑玄武岩和细碧岩等火山岩,早期归为梅劳特乌 SSZ 型拉蛇绿岩的火山熔岩单元,其上为梅劳特乌拉蛇绿岩的上覆岩系硅质岩和硅质泥岩等(Li Yingjie et al., 2015)。

(4)梅劳特乌拉洋内弧晚期构造就位阶段。

梅劳特乌拉蛇绿岩呈透镜状构造岩片沿着梅劳特乌拉韧性剪切带构造就位位于下二叠统寿山沟组与大石寨组之中,最终构造就位时间应在早二叠世之后(Li Yingjie et al., 2015)。而近年研究揭示下二叠统寿山沟组为典型的半深海—深海复理石建造(Li Yingjie et al., 2012, 2013, 2015; Gong Fanhao et al., 2013),而且,梅劳特乌拉蛇绿岩带与下二叠统寿山沟组复理石为构造接触关系,在构造接触部位寿山沟组复理石密集劈理化、碎裂岩化、千枚岩化,局部糜棱岩化和片理化,形成宽几十 m 至几百 m 不等的挤压破碎带,但总体变形与蛇绿岩带相对比明显较弱(Li Yingjie et al., 2015)。

洋内弧洋内俯冲带是洋盆演化形成大陆的诞生地或大陆雏体(图 16)(Sengor, 1993, 1996; Shervais, 2001; Ishikawa et al. 2005; Dilek et al. 2009, 2011, 2014; Ishizuka et al. 2006, 2009, 2011, 2014; Reagan, 2008, 2010, 2013; Deng Jinfu et al., 2015; Xiao Qinghui et al., 2016; Dong Xuefa et al., 2016)。因此,梅劳特乌拉蛇绿岩中早二叠世洋内弧埃达克岩和晚石炭世梅劳特乌拉洋内弧的岩石组合、地质地球化学特征、初始俯冲系统形成演化模式的研究与探讨,可能为识别和研究古亚洲洋贺根山缝合带构造演化、洋内弧和洋陆转换过程提供某些岩石学和年代学证据与信息。

5 结论

(1) 呼和浩特埃达克岩侵位于梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩带之中, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $294.7 \pm 1.7\text{Ma}$, 形成于早二叠世, 提供了贺根山缝合带西乌旗地区存在早二叠世埃达克岩的年代学证据与约束, 表明早二叠世古亚洲洋可能仍然存在着大洋俯冲作用。

(2) 呼和浩特花岗闪长岩属于低钾拉斑系列与中钾钙碱性系列的过渡型岩石, SiO_2 64.93~69.50%, MgO 0.80%~1.48%, Al_2O_3 15.72~19.11%, Sr $368 \sim 700.40 \times 10^{-6}$, Yb $0.95 \sim 1.76 \times 10^{-6}$, Y $5.26 \sim 9.27 \times 10^{-6}$; 相对富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb 和 Sr 等, 亏损高场强元素(HFSE) Nb、Ta、Zr、Ti 和 P 等; 稀土元素总量较低, 轻重稀土分馏明显, 稀土元素配分曲线为右倾型, 应属于埃达克岩, 具有洋内弧性质, 可能形成于洋内弧环境, 为洋内弧初始俯冲洋壳部分熔融的产物。

(3) 呼和浩特埃达克岩与梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩, 构成晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋内弧初始俯冲作用较为完整连续的蛇纹石化方辉橄榄岩、层状一块状辉长岩、前弧枕状拉斑玄武岩(FAB)、玻安岩、埃达克岩、富 Nb 玄武岩(NEB)、高镁或镁安山岩和高镁闪长岩等洋内弧岩石组合序列, 可与马里亚纳洋内弧相对比。

(4) 晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋内弧可初步概况 5 个方面的特征与识别标志, 可初步建立晚石炭世—早二叠世梅劳特乌拉洋内弧初始俯冲系统形成演化模式, 可能为识别和研究古亚洲洋贺根山缝合带构造演化、洋内弧和洋陆转换过程提供某些岩石学和年代学证据与信息。

致谢: 本文在野外调查中得到中国地质调查局天津地质调查中心谷永昌、辛后田、刘永顺等的热情指导和帮助, 三位审稿专家和编辑部为本文提供了宝贵的修改意见与建议, 在此一并表示衷心的感谢!

注 释

- ① 河北地质大学. 2016. 中华人民共和国 1:5 万区域地质调查报告(萨如勒图牙生产队幅)。
- ② 河北地质大学. 2016. 中华人民共和国 1:5 万区域地质调查报告(六一二矿幅)。

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192: 59~79.

Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362 (6416): 144~146.

Boynnton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies/Henderson P. Rare earth element geochemistry. Elsevier, 63~114.

Cao Congzhou, Yang Fanglin, Tian Changlie, Yuan Chao. 1986. The ophiolite in Hegenshan district, Nei Mongol and the

- position of suture line between Sino-Korean and Siberian plate. In: Contributions to the project of plate tectonics in Northern China (1). Beijing: Geological Publishing House, 64 ~ 86. (in Chinese with English abstract).
- Chen B, Jahn B M, Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone constraints from U-Pb ages, Hf isotopic ratios and zircon whole-rock Nd, Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34: 245 ~ 257.
- Chen Bin, Zhao Guochun, Wilde Simon. 2001. Subduction and collision-related granitoids from southern Songzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implications. *Geological Review*, 47(4): 361 ~ 367. (in Chinese with English abstract).
- 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. *Lithos*, 51: 95 ~ 108.
- Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early proterozoic supracrustal rocks in the southwest United States. *J. Geology*, 94: 845 ~ 861.
- Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O. 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53(1): 469 ~ 500.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662 ~ 665.
- Defant M J, Maury R C, Joron J L, Feigenson M D, Leterrier J, Bellon H, Jacques D and Richard M. 1990. The geochemistry and tectonic setting of the northern section of the Luzon arc (the Philippines and Taiwan). *Tectonophysics*, 183: 187 ~ 205.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun. 2015. Magmatic arc and ocean-continent transition: Discussion. *Geological Review*, 61(3): 473 ~ 484. (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, et al. 2010. High magnesian andesitic/dioritic rocks (HMA) and magnesian andesitic/dioritic rocks (MA): two igneous rock types related to oceanic subduction. *Geology in China*, 37(4): 1112 ~ 1118. (in Chinese with English abstract).
- Dilek Y, Furnes H. 2009. Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems. *Lithos*, 113: 1 ~ 20.
- Dilek Y, Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123: 387 ~ 411.
- Dilek Y, Furnes H. 2014. Ophiolites and their origins. *Elements*, 10: 93 ~ 100.
- Dong Xuefa, Yu Shengqiang, Tang Zengcai. 2016. Geochemical characteristics of the intra-oceanic arc type metabasic-volcanics in the Chencai accretion complex of Zhejiang Province and their geological significance. *Geology in China*, 43(3): 817 ~ 828. (in Chinese with English abstract).
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *J. Geophys. Res.*, 95(B13): 21503 ~ 21521.
- Gong Fanhao, Huang Xin, Zheng Yuejuan, Chen Shuwang. 2013. Significance of the submarine fan of Lower Permian Shoushangou Formation in West Ujimqin-Qi, Inner Mongolia. *Geology and Resources*, 22(6): 478 ~ 483. (in Chinese with English abstract).
- Hao Baiwu. 2012. Discovery of adakite granite in Narenwula, Inner Mongolia: its genesis, zircon U-Pb ages and tectonic significance. *J. Mineral. Petrol.*, 32(1): 28 ~ 39. (in Chinese with English abstract).
- Huang Bo, Fu Dong, Li Shucai, Ge Mengcun, Zhou Wenxiao. 2016. The age and tectonic implications of the Hegenshan ophiolite in Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 32(1): 158 ~ 176.
- Huang Feng, Xu Jifeng, Chen Jianlin, Kang Zhiqiang, Dong Yanhui. 2015. Early Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation and Sangri Group: Products of continental marginal arc and intra-oceanic arc during the subduction of Neo-Tethys Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2089 ~ 2100.
- Huang Gang, Niu Guangzhi, Wang Xinlu, Guo Jun, Yu Feng. 2016. Early Silurian adakitic rocks of East Junggar, Xinjiang: Evidence from zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope of the quartz diorite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(5): 751 ~ 767. (in Chinese with English abstract).
- Ishikawa T, Fujisawa S, Nagaishi K. 2005. Trace element characteristics of the fluid liberated from amphibolite-facies slab: Inference from the metamorphic sole beneath the Oman ophiolite and implication for boninite genesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 240: 355 ~ 377.
- Ishizuka O, et al. 2011. The timescales of subduction initiation and subsequent evolution of an oceanic island arc. *Earth and Planetary Science Letters*, 306: 229 ~ 240.
- Ishizuka O, Kimura Jun-ichi, Li Yi B. 2006. Early stages in the evolution of Izu-Bonin arc volcanism: New age, chemical, and isotopic constraints. *Earth and Planetary Science Letters*, 250: 385 ~ 401.
- Ishizuka O, Tani K, Reagan M. 2014. Izu-Bonin-Mariana forearc Crust as a modern ophiolite Analogue. *Elements*, 10: 115 ~ 120.
- Ishizuka O, Yuasa M, Taylor RN. 2009. Two contrasting magmatic types coexist after the cessation of back-arc spreading. *Chemical Geology*, 266: 274 ~ 296.
- Jian P, Liu DY, Kroner A, Windley BF, Shi YR, Zhang W, Zhang FQ, Miao LC, Zhang LQ, Tomurhuu D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118: 169 ~ 190.
- Jian P, Kröner A, Windley BF, Shi YR, Zhang W, Zhang LQ and Yang WR. 2012. Carboniferous and Cretaceous mafic-ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral

- “Hegenshan ophiolite”. *Lithos*, 142~143: 48~66.
- Kang Jianli, Xiao Zhibin, Wang Huichu, Chu Hang, Ren Yunwei, Liu Huan, Gao Zhirui, Sun Yiwei. 2016. Late Paleozoic Subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and Geochemical Evidence from the Meta-basic Volcanics of Xilinhot, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 90(2): 383~397.
- Kelemen P B, Hangh K, Greenem A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Rudnick RL, ed. *Treatise On Geochemistry*, 3: 593~659.
- Koschek G. 1993. Origin and significance of the SEM cathodoluminescence from zircon. *Journal of Microscopy*, 171(3): 223~232.
- Li Chengdong, Zhang Fuqin, Miao Laicheng, Lin Hangqiang, Xu Yawen. 2007. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of Late Permian high-Mg andesites in Seluohe area, Jan province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 767~776.
- Li Fenqi, Li Yiduo, Zhang Shizheng. 2016. The 90Ma island-arc type plutonism in the subduction-accretionary complex in Langxian County area, Tibe. *Geology in China*, 43(1): 142~152. (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang. 2012. Recognition of Shijiashan ophiolite in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1282~1290. (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang. 2013. Geochemical characteristics of Baiyinbulage ophiolite in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8): 2719~2730. (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang. 2015. Recognition of Meilaotewula ophiolite in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1461~1470. (in Chinese with English abstract).
- Liang Rixuan. 1994. The features of ophiolites in the central sector of Inner Mongolia and its geological significance. *Regional Geology of China*, 1: 37~45. (in Chinese with English abstract).
- Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qiz, Zhang Fuqin, Shi Yuruol, Shi Guanghaiz, Zhang Nuqiao, Tao Hua. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317~330. (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhang Xingzhou, Ma Zhihong, Zhao Zhi, Wang Tiefu, Hu Zhaochu, Zhao Xiuyu. 2009. Geochemical Characteristic of Carboniferous Quartz-Diorite in the Southern Xiwuqi Area, Inner Mongolia and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 365~376. (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhao Zhi, Hu Zhaochu, Chen Junqiang. 2013. Zircon U-Pb age and petrogenetic discussion on Jianshetun adakite in Balinyouqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 827~839. (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Li Jinzhi, Chi Xiaoguo, Qu Junfeng, Hu Zhaochu, Guo Chunli. 2014. Petrological and Geochemical Characteristics of the Early Triassic Granite Belt in Southeastern Inner Mongolia and Its Tectonic Setting. *Acta Geologica Sinica*, 88(9): 1677~1690. (in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Wu Guang, Li Tiegang, Wang GLi Yingjie, Wu Hao. 2014. SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry, Sr-Nd isotopic analysis of the Late Paleozoic intermediate-acidic intrusive rocks in the Hadamiao area, Xianghuang Banner, Inner Mongolia and its geological significances. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 95~108. (in Chinese with English abstract).
- Liu Yifei, Jiang Sihong, Zhang Yi. 2010. The SHRIMP zircon U-Pb dating and geological features of Bairendaba diorite in the Xilin-haute area, Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 29(5): 688~696.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid; Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1-2): 1~24.
- Martin H. 1993. The mechanisms of petrogenesis of the Archaean continental crust-comparison with modern processes. *Lithos*, 30: 373~388.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas; modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46: 411~429.
- Miao L, Shi Y, Guo F. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(4): 404~415.
- Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust. *Earth Planet Sci. Lett.*, 121: 227~244.
- Pearce J A, Lippard S J and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar BP and Howells MF (eds.). *Marginal Basin Geology*. Geological Society of London Special Publication, 16: 77~94.
- Peccherillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rapp R P, Shimizu N, Norman M D and Applegate G S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3. 8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335~356.
- Qiu Rui zhao, Cai Zhiyong, Li Jinfa. 2004. Boninite of ophiolite belts in Western Qinghai-Tibet Plateau and its geological implication. *Geoscience*, 18(3): 305~308. (in Chinese with English abstract).
- Reagan. 2013. The geology of the Southern Mariana fore-arc crust: Implications for the scale of Eocene Volcanism in the western

- pacific. *Earth and planetary science Letters*, 380: 41~51.
- Reagan M K, B B Hanan, M T Heizler, et al. 2008. Petrogenesis of volcanic rocks from Saipan and Rota, Mariana Islands, and implications for the evolution of nascent island arcs. *Journal of Petrology*, 49(3): 441~464.
- Reagan M K, Ishizuka Osamu, Sterner R J. 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(3): 1~17.
- Sajona F G, and the Maury R C, Bellon H. et al. 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao. *Philippines. Geology*, 21: 1007~1010.
- Samaniego P., Martin H. 2002. Transition from talc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions. *Geology*, 30(11): 967~970.
- Sengor A M C, Natalin B A. 1996. Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis/Yin An, Harrison M T (eds.). *The Tectonic Evolution of Asia*, Cambridge. Cambridge Univ. Press, 486~640.
- Sengor A M C, Natalin B A. Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299~307.
- Shang Q H. 2004. The discovery and significance of Permian radiolarians Northern Orogenic belt in the northern and middle Inner Mongolia, *Chinese Science Bulletin*. 49: 2574~2579.
- Shao Ji'an. 1991. *Crustal Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of the Sino-Korean Plate*. Beijing: Peking University Press, 1~136. (in Chinese with English abstract).
- Shervais J W. 2001. Birth, death and resurrection: the life cycle of suprasubduction zone ophiolites. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2(1): 148~159.
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Qi Xuexiang. 2004. Discovery of the Boninite series volcanic rocks in the Bangong Lake ophiolite mélangé, western Tibet, and its tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 49(12): 1272~1278.
- Shi Yuruo, Liu Cui, Deng Jinfu, Jian Pin. 2014. Geochronological frame of granitoids from Central Inner Mongolia and its tectonomagmatic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3155~3171. (in Chinese with English abstract).
- Shi Yuruo, Liu Dunyi, Zhang Qi, Jian Pin, Zhang Fuqin, Miao Laisheng, Shi Guanghai, Zhang Luqiao, Tao Ha. 2005. The petrogenesis and SHRIMP dating of the Baiyinbaoliao adakitic rocks in southern Suzuoqi, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 143~150. (in Chinese with English abstract).
- Stern C R, Killian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 263~281.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London, Special Publication*, 42: 313~345.
- Tang Gongjian, Wang Qiang. 2010. High Mg andesite and their geodynamic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26: 2495~2512. (in Chinese with English abstract).
- Tian Shugang, Li Zishun, Zhang Yongsheng, Gong Yuxuan, Zhai Daxing, Wang Meng. 2016. Late Carboniferous-Permian Tectono-geographical Conditions and Development in Eastern Inner Mongolia and Adjacent Areas. *Acta Geologica Sinica*, 90(4): 688~707.
- Thorkelson D J and Breitsprecher K. 2005. Partial melting of slab window margins: genesis of adakitic and non-adakitic magmas. *Lithos*, 79: 24~41.
- Virtue J E, Contreras F, Stein C. 2007. Magmatic relationships and ages between adakites, magnesian andesites and Nb-enriched basalt-andesites from Hispaniola: record of a major change in the Caribbean island arc magma sources. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2007.01.008.
- Wang Hui, Wang Yujing, Chen Zhiyong, Li Yuxi, Su Maorong, Bai Libing. 2005. Discovery of the Permian Radiolarians from the Bayanaobao area, Inner Mongolia. *Journal of Stratigraphy*, 29(4): 368~372. (in Chinese with English abstract).
- Wang Lu, Zhao Qingying, Li Pengchuan, Li Zihao, Qiu Shilong, Tian Zilong. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Dongliang pluton in Balinyouqi, Inner Mongolia and its geochemical characteristics. 35(2): 370~386. (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenghua, Bai Zhenghua. 2003. Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basaltic rocks association in the Alatau Mountains, north Xinjiang: interactions between slab melt and mantle peridotite and implications for crustal growth. *Chinese Science Bulletin*. 48(19): 2108~2115.
- Wang Qiang, Zhao Zhenhua, Xu Jifeng. 2006. Carboniferous adakite-high Mg andesite-Nb-enriched basaltic rock suites in the Northern Tianshan area: Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt and Cu-Au mineralization. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 11~30. (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Zhang Qi, Qian Qing. 2000. Adakite: geochemical characteristics and tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251~256. (in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, Krner F, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Nb diagram to problems of tectomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of the British Tertiary volcanic province. *Earth Planet Sci Lett*, (50): 11~30.
- Xiao Qinghui, Li Tingdong, Pan Guitang. 2016. Petrologic ideas for identification of ocean-continent transition: Recognition of intra-oceanic arc and initial subduction. *Geology in China*, 43(3): 721~737. (in Chinese with English abstract).
- 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. *Int. J. Earth Sci.*, 98: 1189~1217.

Xu Bei, Chen Bin. 1997. The structure and evolution of a Middle-Paleozoic orogenic belt between the North China and Siberian Blocks, orthern Inner Mongolia, China, *Science in China (SeriesD)*, 27 (3): 227 ~ 232. (in Chinese with English abstract).

Xu Liquan, Deng Jinfu, Cheng Zhiyong. 2003. The identification of Ordovician adakites and its signification in northern Damao, inner Mongolia. *Geoscience*, 17(4): 428~434. (in Chinese with English abstract).

Zeng Junjie, Zheng Youye, Qi Jianhong, Dai Fanghua, Zhang Gangyang, Pang Yingchun, Wu Bin. 2008. Foundation and Geological Significance of Adakitic Granite at Guyang of Inner Mongolia. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 33 (6): 755 ~ 762. (in Chinese with English abstract).

Zhang Haihua, Zheng Yuejuan, Chen Shuwang, Zhang Jian, Su Fei, Gong Fanhao. 2015. LA-ICP MS U-Pb Geochronology of the Permian Detrital Zircons in Baarin Left Banner of Inner Mongolia and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(10): 1703~1717.

Zhang Le, Dong Yongsheng, Zhang Xiuzheng, Deng Mingrun, Xu Wang. 2014. The discovery of the Early Permian adakitic rockin the Hongji Mountainarea within central and western Qiangtang, Tibet Plateau, and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 33(11): 1728~1739. (in Chinese with English abstract)

Zhang Wei, Wang Jinrong, Chen Wanfeng, Zhai Xinwei, Ma Jinlong. 2014. The Discovery of the Carboniferous Adakite and its Tectonic Implications in AlxaYouqi. *Geological Journal of China Universities*, 20 (3): 378 ~ 387. (in Chinese with English abstract).

Zhang Z C, Li K, Li J F, Tangy W H, Chen Y and Luo Z W. 2015. Geochronology and geochemistry of the eastern Erenhot ophiolitic complex; Implications for the tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97 (Part B): 279~293.

Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Tang Yanjie, Liu Jianming. 2006. Early Triassic A-type felsic volcanism in the Xilinhaote-Xiwuqi, central Inner Mongolia; Age, geochemistry and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2769~2780. (in Chinese with English abstract).

Zhang Yuqing. 2009. Geochemical characteristics of Permian adakitic granodiorite in Bayinwula of Sonid Left Banner, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(4): 329~338. (in Chinese with English abstract).

Zheng Rongguo, Wu Tairanj, Xiao Wenjiao, Meng Qingpeng, Zhang Wen. 2016. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications of the Shuangjizi Composite Pluton in the Northern Beishan. *Acta Geologica Sinica*, 90(11): 3153~3172.

参 考 文 献

曹从周,杨芳林,田昌烈,袁朝. 1986. 内蒙古贺根山地区蛇绿岩及中朝板块和西伯利亚板块之间的缝合带位置. 见:中国北方板块构造论文集(1). 北京:地质出版社,64~86.

陈斌,赵国春,Simon Wilde. 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. *地质论评*, 47(4): 361~367.

邓晋福,冯艳芳,狄永军. 2015. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. *地质论评*, 61(3): 473~484.

邓晋福,刘翠,冯艳芳. 2010. 高镁安山岩/闪长岩类(HMA)和镁安山岩/闪长岩类(MA):与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类. *中国地质*, 37(4): 1112~1118.

董学发,余盛强,唐增才. 2016. 浙江“陈蔡增生杂岩”中洋内弧型变基性火山岩的地球化学特征及其地质意义. *中国地质*, 43(3): 817~828.

公繁浩,黄欣,郑月娟,陈树旺. 2013. 内蒙古西乌旗下二叠统寿山沟组海底扇的发现及意义. *地质与资源*, 22(6): 478~483.

郝百武. 2012. 内蒙古那仁乌拉埃达克质花岗岩的发现、成因、锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. *矿物岩石*, 32(1): 28~39.

黄波,付冬,树才,葛梦春,周文孝. 2016. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成时代及构造启示. *岩石学报*, 32(1): 158~176.

黄丰,许继峰,陈建林,康志强,董彦辉. 2015. 早侏罗世叶巴组与桑日群火山岩:特提斯洋俯冲过程中的陆缘弧与洋内弧? *岩石学报*, 31(7): 2089~2100.

黄岗,牛广智,王新录,郭俊,宇峰. 2016. 新疆东准噶尔早志留世埃达克岩—来自锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素的证据. *岩石矿物学杂志*, 35(5): 751~767.

康健丽,肖志斌,王惠初,初航,任云伟,刘欢,高知睿,孙义伟. 2016. 内蒙古锡林浩特早石炭世构造环境:来自变质基性火山岩的年代学和地球化学证据. *地质学报*, 90(2): 383~397.

李承东,张福勤,苗来成,领航强,许雅雯. 2007. 吉林色洛河晚二叠世高镁安山岩 SHRIMP 锆石年代学及其地球化学特征. *岩石学报*, 23(4): 767~776.

李奋其,李益多,张士贞. 2016. 西藏朗县地区增生楔杂岩带 90Ma 岛弧型深成岩浆活动和意义. *中国地质*, 43(1): 142~152.

李英杰,王金芳,李红阳. 2012. 内蒙古西乌旗迪彦庙蛇绿岩的识别. *岩石学报*, 28(4): 1282~1290.

李英杰,王金芳,李红阳. 2013. 内蒙西乌旗白音布拉格蛇绿岩地球化学特征. *岩石学报*, 29(8): 2719~2730.

李英杰,王金芳,李红阳. 2015. 内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的识别. *岩石学报*, 31(5): 1461~1470

梁日暄. 1994. 内蒙古中段蛇绿岩特征及地质意义. *中国区域地质*, (1): 37~45.

刘敦一,简平,张旗,张福勤,石玉若,施光海,张履桥,陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年:早古生代洋壳消减的证据. *地质学报*, 77(3): 317~330.

刘建峰,迟效国,张兴洲,马志红,赵芝,王铁夫,胡兆初,赵秀羽. 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. *地质学报*, 83(3): 365~376.

刘建峰,迟效国,赵芝,胡兆初,陈军强. 2013. 内蒙古巴林右旗建设屯埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及成因讨论. *岩石学报*, 29(3): 827~839.

- 刘建峰,李锦轶,迟效国,曲军峰,胡兆初,郭春丽. 2014. 内蒙古东南部早三叠世花岗岩带岩石地球化学特征及其构造环境. 地质学报, 88(9):1677~1690.
- 刘军,武广,李铁刚,王国瑞,吴昊. 2014. 内蒙古镶黄旗哈达庙地区晚古生代中酸性侵入岩的年代学、地球化学、Sr-Nd 同位素组成及其地质意义. 岩石学报, 30(1):95~108.
- 刘翼飞,江思宏,张义. 2010. 内蒙古东部拜仁达坝矿区闪长岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地球化学特征. 地质通报, 29(5):688~696.
- 邱瑞照,蔡志勇,李金发. 2004. 青藏高原西部蛇绿岩中玻安岩(boninite)及其地质意义. 现代地质, 18(3):305~308.
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京:北京大学出版社, 1~136
- 石玉若,刘翠,邓晋福,简平. 2014. 内蒙古中部花岗岩类年代学格架及该区构造岩浆演化探讨. 岩石学报, 30(11):3155~3171.
- 石玉若,刘敦一,张旗,简平,张福勤,苗来成,施光海,张履桥,陶华. 2005. 内蒙古苏左旗白音宝力道 Adakite 质岩类成因探讨及其 SHRIMP 年代学研究. 岩石学报, 21(1):143~150.
- 史仁灯,杨经绥,许志琴,戚学祥. 2004. 西藏班公湖蛇绿混杂岩中玻安岩系火山岩的发现及构造意义. 科学通报, 49(12):1179~1184.
- 唐功建,王强. 2010. 高镁安山岩及其地球动力学意义. 岩石学报, 26:2495~2512.
- 田树刚,李子舜,张永生,宫月萱,翟大兴,王猛. 2016. 内蒙东部及邻区晚石炭世—二叠纪构造古地理环境及演变. 地质学报, 90(4):688~707.
- 王惠,王玉净,陈志勇,李玉玺,苏茂荣,白立兵. 2005. 内蒙古巴彦敖包二叠纪放射虫化石的发现. 地层学杂志, 29(4):368~372.
- 王璐,赵庆英,李鹏川,李子昊,邱士龙,田子龙. 2016. 内蒙古巴林右旗东梁岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地球化学特征. 世界地质, 35(2):370~386.
- 王强,赵振华,白正华. 2003. 新疆阿拉套山石炭纪埃达克岩、富 Nb 岛弧玄武质岩:板片熔体与地幔橄榄岩相互作用及地壳增生. 科学通报, 48(12):1342~1349.
- 王强,赵振华,许继峰. 天山北部石炭纪埃达克岩—高镁安山岩—富 Nb 岛弧玄武质岩:对中亚造山带显生宙地壳增生与铜金成矿的意义. 岩石学报, 2006, 22(1):11~30.
- 王焰,张旗,钱青. 2000. 埃达克(adakite)的地球化学特征及其构造意义. 地质科学, 35(2):251~256.
- 肖庆辉,李廷栋,潘桂棠. 2016. 识别洋陆转换的岩石学思路—洋内弧与初始俯冲的识别. 中国地质, 43(3):721~737.
- 徐备,陈斌. 1997. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构和演化. 中国科学(D辑), 27(3):227~232.
- 曾俊杰,郑有业,齐建宏,代芳华,张刚阳,庞迎春,武彬. 2008. 内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义. 地球科学:中国地质大学学报, 33(6):755~762
- 许立权,邓晋福,陈志勇. 2003. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义. 现代地质, 17(4):428~434.
- 张海华,郑月娟,陈树旺,张健,苏飞,公繁浩. 2015. 内蒙古巴林左旗二叠系碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及构造意义. 地质学报, 89(10):1703~1717.
- 张乐,董永胜,张修政,邓明荣,许王. 2014. 藏北羌塘中西部红脊山地区早二叠世埃达克质岩石的发现及其地质意义. 地质通报, 33(11):1728~1739.
- 张伟,王金荣,陈万峰,翟新伟,马锦龙. 2014. 阿拉善右旗地区晚石炭世埃达克岩的发现及其大地构造意义. 高校地质学报, 20(3):378~387.
- 张晓晖,张宏福,汤艳杰,刘建明. 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. 岩石学报, 22(11):2769~2780.
- 张玉清. 2009. 内蒙古苏尼特左旗巴音乌拉二叠纪埃达克质花岗闪长岩类地球化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 28(4):329~338.
- 郑荣国,吴泰然,肖文交,孟庆鹏,张文. 2016. 北山北部双井子复式岩体年代学、地球化学及其大地构造意义. 地质学报, 90(11):3153~3172.

Discovery of Early Permian Intra-oceanic Arc Adakite in the Meilaotewula Ophiolite, Inner Mongolia and its Evolution Model

WANG Jinfang, LI Yingjie, LI Hongyang, DONG Peipei

School of Nature Resources, Hebei GeoUniversity, Shijiazhuang, Hebei, 050031

Abstract

The study reports the discovery that the Early Permian intra-oceanic arc Huhede adakite was found to occur in the Meilaotewula SSZ ophiolite in Xiwuqi, Inner Mongolia. The Huhede adakite occurring along the Hegenshan suture zone emplaced within the Late Carboniferous Meilaotewula SSZ-type ophiolite mélange consisting mainly of fine-grained and medium-grained granodiorites. The zircon U-Pb LA-ICP-MS dating yielded an emplacement age of 294.7 ± 1.7 Ma for the adakite, suggesting that it formed during Early Permian. The adakite belongs to low-K tholeiitic and middle-K calc-alkaline series. The rock is characterized by high SiO_2 ($64.93\% \sim 69.50\%$), Al_2O_3 ($15.72\% \sim 19.11\%$), Sr ($368 \times 10^{-6} \sim 700.40 \times 10^{-6}$), and low MgO ($0.80\% \sim 1.48\%$), Yb ($0.95 \times 10^{-6} \sim 1.76 \times 10^{-6}$), Y ($5.26 \times 10^{-6} \sim 9.27 \times 10^{-6}$) contents, with $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ratio varying from 3.01 to 8.60; relatively enriched in large ion lithophile elements (LILE), such as K, Rb and Sr, and depleted in high field strength elements (HFSE), such as Nb, Ta, Zr, Ti and P. Low total REE ($32.68 \times 10^{-6} \sim 66.69 \times 10^{-6}$), with distinct REE fractionation ($\text{La}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N} = 3.31 \sim 5.10$), no obvious negative Eu anomaly. All of the geochemical characteristics indicate that the Huhede pluton belongs to adakite. The Huhede adakite and the Meilaote SSZ ophiolite mélange constitute the more complete, continuous rock assemblage series consisting of serpentinized augite peridotite, bedded-massive gabbro, pillow basalt, boninite, Nb-enriched basalt, and high-Mg andesite formed by the Meilaotewula intraoceanic arc initial subduction. The petrological and geochemical characteristics suggest that the Huhede adakite should be plutonic rocks produced by the intra-oceanic arc subduction initiation intra-oceanic arc environment during early stage, demonstrating that the initial subduction of the Hegenshan suture of the Paleo-Asian Ocean started in the Early Permian. Based on the main characteristics and recognition of the Late Carboniferous-Early Permian Meilaotewula intra-oceanic arc, the formation and evolution model of the initial intra-oceanic arc subduction has been preliminarily established.

Key words: Adakite; intra-oceanic arc magmatic rock; zircon U-Pb dating; Early Permian; Meilaotewula SSZ ophiolite