

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.014>



内蒙古索伦山地区三叠纪侵入岩锆石U-Pb年龄、岩石地球化学特征及地质意义

连琛芹^{1,2,3},李钢柱^{2*},于 洋⁴,姚佛军³,张思源²,王丕军²,崔舜铫¹

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083
2. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心,内蒙古呼和浩特 010010
3. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037
4. 中国地质大学地质调查研究院,湖北武汉 430074

摘要: 内蒙古索伦山地区朱恩道欧恩呼尔新识别出一套早中生代侵入岩,主要由角闪二长岩和二长闪长岩组成。通过LA-ICP-MS锆石U-Pb定年确定,角闪二长岩的结晶年龄为 248 ± 1 Ma(MSWD=1.1),表明该岩体形成于早三叠世。它们的SiO₂含量介于51.82%~60.17%之间,具有高镁($Mg^# = 53.17 \sim 59.03$)、富碱($K_2O + Na_2O = 7.36\% \sim 9.83\%$)、富钠($K_2O/Na_2O = 0.25 \sim 0.53$)特征,属于准铝质碱性岩。样品稀土总量变化范围为 $117.52 \times 10^{-6} \sim 160.89 \times 10^{-6}$,表现出一致的稀土元素和微量元素配分型式,即呈现出轻稀土元素相对于重稀土元素富集($(La/Yb)_N = 9.57 \sim 15.42$)的右倾曲线,且无明显Eu异常($\delta Eu = 0.76 \sim 1.00$),并富集Ba、Sr等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Ti、Y等高场强元素,高Sr、低Y、高Sr/Y比值,具有高镁埃达克质闪长岩的地球化学特征。综合岩石地球化学特征及区域构造背景,朱恩道欧恩呼尔早中生代高镁埃达克质闪长岩类是由残余俯冲洋壳部分熔融形成的熔体与地幔橄榄岩相互作用而形成。朱恩道欧恩呼尔富碱侵入岩的形成与华北板块与西伯利亚板块碰撞后的伸展作用有关,这些新的年龄和岩石地球化学数据表明古亚洲洋闭合早于248 Ma。

关键词: 后碰撞;早三叠世;LA-ICP-MS;U-Pb年龄;索伦山;地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2021)01-087-14

收稿日期: 2019-01-28

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Whole-Rock Geochemistry of the Triassic Intrusive Rocks in the Solon Obo Area, Inner Mongolia and Its Geological Significance

Lian Chenqin^{1,2,3}, Li Gangzhu^{2*}, Yu Yang⁴, Yao Fojun³, Zhang Siyuan², Wang Pijun², Cui Shunyao¹

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Hohhot Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Huhhot 010010, China
3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
4. Institution of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The Early Mesozoic Zhuendaoouenhuer intrusion is located in Solon Obo area, Inner Mongolia. It mainly consists of hornblende monzonite and monzodiorite. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yields the Early-Triassic age of 248 ± 1 Ma for the

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(No. 12120113071800);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(No. K1501);中国地质调查局基本科研业务费项目(No. JYYWF201830)。

作者简介: 连琛芹(1992—),男,硕士研究生,主要从事矿物学、岩石学、矿床学专业研究。ORCID:0000-0002-6927-2771. E-mail: lianchenqin@foxmail.com

***通讯作者:** 李钢柱,ORCID:0000-0003-3565-2861. E-mail: ligzh08@163.com

引用格式: 连琛芹,李钢柱,于洋,等,2021.内蒙古索伦山地区三叠纪侵入岩锆石U-Pb年龄、岩石地球化学特征及地质意义.地球科学,46(1):87—100.

hornblende monzonite. Both the hornblende monzonite and monzodiorite are rich in silica ($\text{SiO}_2=51.82\%-60.17\%$), $\text{MgO}(\text{Mg}^\# = 53.17-59.03)$, alkali ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=7.36\%-9.83\%$) and $\text{Na}(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=0.25-0.53)$, suggesting a typical alkaline series with the metaluminous feature ($\text{A/CNK}=0.53-0.75$). The rocks are poor in rare earth elements ($\sum \text{REE}=117.52 \times 10^{-6}-160.89 \times 10^{-6}$), enriched in LREE [$(\text{La/Yb})_{\text{N}}=9.57-15.42$] and LILEs (Ba, Sr), and depleted in HFSE, especially Nb, Ta, Ti, Y, and insignificant Eu anomalies ($\delta \text{Eu}=0.76-1.00$), and had high Sr, low Y, high Sr/Y ratio, suggesting geochemical characteristics of high-Mg adakite diorite. The combination of geological setting and geochemical characteristics of the Zhenadaouenhuer high-Mg adakitic rocks were most probably derived from partial melting of the remnant Paleo-Asian oceanic subducted slabs and subsequently hybridized by mantle peridotite. The formation of the Zhenadaouenhuer adakitic intrusive rocks is related to the extension of the collision between the North China plate and the Siberian plate. These new age and rock geochemical data indicate that the ancient Asian Ocean closed earlier than 248 Ma.

Key words: post collision; Early Triassic epoch; LA-ICP-MS; U-Pb dating; Solon Obo; geochemistry.

0 引言

位于中蒙边境的内蒙古索伦山地区,不仅保存了大量的大洋岩石圈残片——蛇绿岩,而且发育早古生代、晚古生代弧岩浆岩及早中生代富碱侵入岩,是研究华北板块与西伯利亚板块之间古亚洲洋形成、发展及消亡的时间与过程的关键地区,受到地质学者的广泛关注(Xiao *et al.*, 2003, 2015; Li *et al.*, 2006; Miao *et al.*, 2007; Windley *et al.*, 2007; Jian *et al.*, 2008, 2010; 李锦铁等, 2009; Xu *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2014).

索伦山缝合带被普遍认为代表着古生代存在于华北板块与西伯利亚板块之间的古亚洲洋最终闭合的位置(邵济安, 1991; Sengor *et al.*, 1993; Xiao *et al.*, 2003, 2009, 2015; Li *et al.*, 2006; Windley *et al.*, 2007; 潘桂棠等, 2016),但是对这两大板块的对接时间及演化过程尚存在不同认识. 目前关于古亚洲洋最终闭合时间至少有:(1)晚志留世—泥盆纪(Sengor and Natal' in, 1996)、(2)中—晚泥盆世(Tang, 1990; Xu *et al.*, 2013; 徐备等, 2014)、(3)晚泥盆世—早石炭世(邵济安, 1991; 洪大卫等, 1994)、(4)二叠纪(Windley *et al.*, 2007)、(5)晚二叠世—早、中三叠世(Xiao *et al.*, 2003, 2015; 李朋武等, 2006; Li *et al.*, 2006; 李锦铁等, 2007, 2009; Jian *et al.*, 2010; Eizenhofer *et al.*, 2014; 潘桂棠等, 2016)等不同观点.

索伦山地区处于特殊的构造部位,作为研究古亚洲洋演化的关键地区受到地质学者的广泛关注. 但是由于其地处边境人迹罕至的大漠戈壁,区内基础地质研究十分薄弱. 最近开展的“内蒙古索伦山地区扎嘎乌苏等 6 幅 1:5 万区域地质矿产调查”工作,在索伦山地区蛇绿岩带中首次发现了早二叠世

放射虫化石(李钢柱等, 2017),在原划分的二叠纪侵入岩中识别出晚奥陶世岛弧岩浆岩、中二叠世 TTG 岩系(薛建平等, 2018),以及三叠纪侵入岩. 索伦山地区位于古亚洲洋最后闭合的位置,该地区发育的晚二叠世到早、中三叠世侵入岩对研究华北板块与西伯利亚板块的拼合时间具有重要意义.

本文是在上述 1:5 万区矿调工作的基础上,对内蒙古索伦山地区朱恩道欧恩呼尔岩体进行详细的野外地质调查,系统采集了不同岩性样品,开展了年代学、岩石学、岩石地球化学等研究,试图对索伦山地区古亚洲洋构造域晚古生代—早中生代构造岩浆演化及大洋闭合时间提供新证据.

1 地质背景

兴蒙造山带自南向北主要由白乃庙岛弧、温都尔庙俯冲增生杂岩带、索伦山缝合带、宝力道岛弧增生杂岩带、贺根山蛇绿混杂岩带、以及南蒙活动大陆边缘等构造单元组成(Xiao *et al.*, 2015)(图 1a). 索伦山地区地处索伦山缝合带西端,出露地层包括古元古界宝音图岩群、新元古界艾勒格庙组、奥陶系布龙山组、志留系徐尼乌苏组及中新生界盖层. 宝音图岩群是一套以片岩为主,夹少量片麻岩及斜长角闪岩的变质岩系,与徐尼乌苏组断层接触;艾勒格庙组是一套以石英岩、大理岩及千枚岩、变质石英砂岩为主的浅变质岩系,与徐尼乌苏组、布龙山组断层接触;布龙山组主要由杂砂岩和火山碎屑岩组成,其中火山碎屑岩以安山岩和英安岩为主,具有岛弧火山岩的特征,与艾勒格庙组、徐尼乌苏组断层接触,在朱恩道欧恩呼尔南与徐尼乌苏组不整合接触;徐尼乌苏组是一套以砂岩、板岩为主的岩石组合,与宝音图岩群、艾勒格庙组、布龙山组

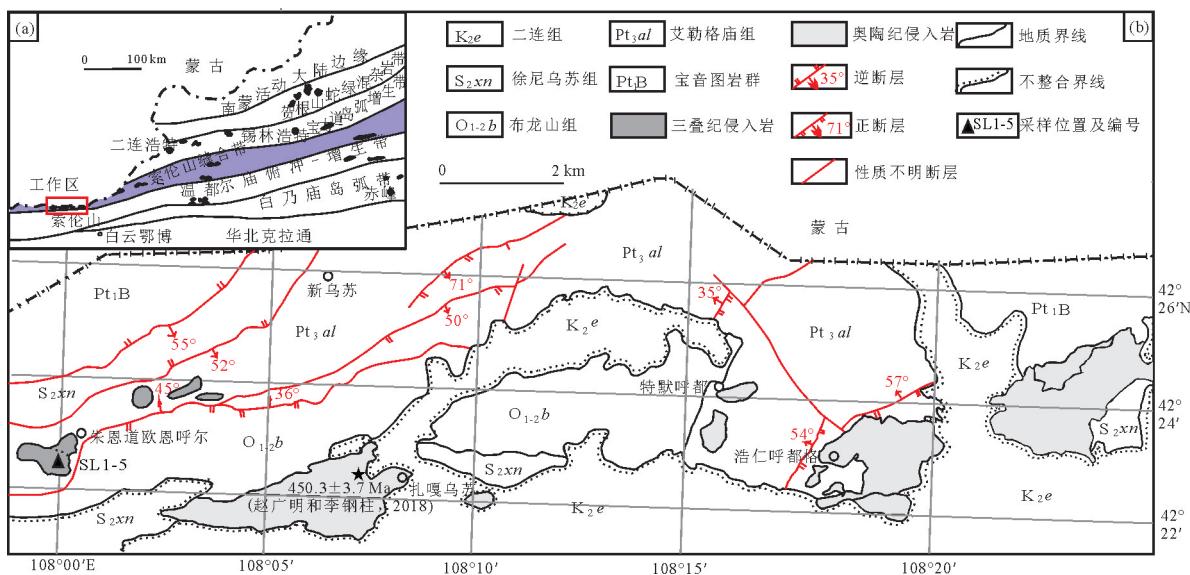


图1 内蒙古乌拉特中旗朱恩道欧恩呼尔地区大地构造位置(a)及岩体分布(b)

Fig.1 Simplified geology of the Zhuendaoouenhu area in Urad Middle Banner, Inner Mongolia, showing distribution of the plutons

a. 据 Xiao *et al.*(2015)

断层接触，在朱恩道欧恩呼尔南与布龙山组不整合接触。

此外,该区域内还存在强变形或弱变形侵入岩。强变形侵入岩主要沿扎嘎乌苏—浩仁呼都格一带呈 NEE 向带状展布,侵入布龙山组、艾勒格庙组及宝音图岩群中,形成于晚奥陶世(年龄 450.3 ± 3.7 Ma),因强烈的构造变形而发生糜棱岩化和矿物显微破碎。弱变形侵入岩呈小岩株状或岩枝状侵入艾勒格庙组,主要出露于朱恩道欧恩呼尔—伊和日查干一带,呈北东东向带状分布(图 1)。

2 岩石学特征

朱恩道欧恩呼尔岩体主要由角闪二长岩和二长闪长岩组成,二者呈渐变过渡接触关系。角闪二长岩呈灰色,具中细粒半自形粒状结构,块状构造,主要由斜长石(65%~70%)、钾长石(10%~15%)、角闪石(10%~15%)、石英(2%~3%)以及少量磁铁矿等组成。斜长石呈半自形板状,绢云母化,粒径1~3 mm;钾长石:它形填隙状,粒径小于0.5 mm;角闪石呈半自形柱状,绿泥石化,粒径1.0~1.5 mm;石英呈它形,填隙状,粒径小于1 mm(图2)。

3 样品及分析方法

本文样品采自朱恩道欧恩呼尔岩体中心部位，地表露出的新鲜岩石，其中用于锆石 U-Pb 定年的

角闪二长岩(SL1-5)采样位置为:N 42°22'19", E 107°59'59". 在河北省区域地质调查研究所实验室(廊坊)完成锆石单矿物分选, 将重约6 kg的样品破碎到60~80目, 通过常规浮选和磁选之后在双目显微镜下人工挑选. 阴极发光及背散射电子照射工作在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室完成.

锆石 U-Pb 同位素年龄分析在中国科学院地质与地球物理研究所 MC-ICP-MS 实验室利用 LA-ICP-MS 完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 型紫外激光剥蚀系统, ICP-MS 为 Agilent7500a 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪 (Q-ICP-MS)。激光波长为 193 nm, 激光脉冲宽度 15 ns, 脉冲输出能量最高为 200 mJ。激光剥蚀过程中采用高纯 He 作为剥蚀物质的载气。每个分析点气体背景采集时间约 20 s, 样品信号采集时间为 60 s。

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 的比值则采用哈佛大学的国际标准锆石 91500 为外部标准对剥蚀和传输以及离子化过程中的质量歧视效应和同位素分馏进行校正, 同时使用锆石中含量稳定的 ^{29}Si 作为内标, 消除激光能量在单点分析过程中以及分析点之间的飘移。 $^{207}\text{U}/^{235}\text{U}$ 比值利用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、进行计算 ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}=137.88$). 所测单点的同位素比值及元素含量采用 GLITTER 4.0 程序进行计算, 样品校正后的同位素比值标准偏差计算中, 除了考虑样品和外标锆石 91500 同位素比值

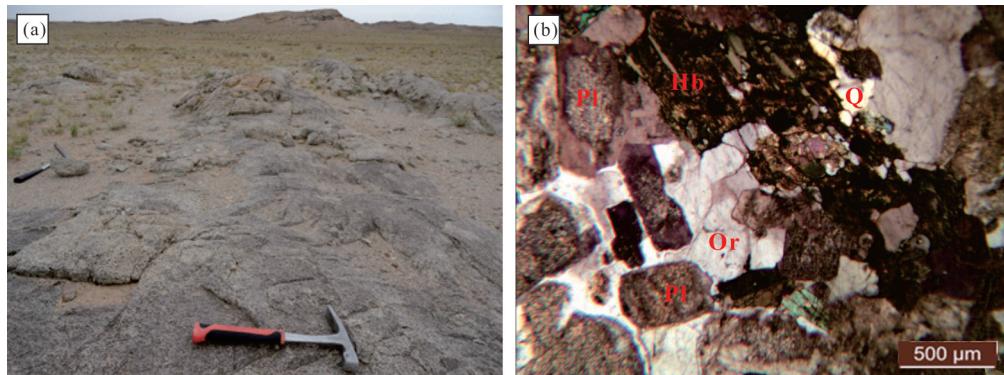


图 2 朱恩道欧恩呼尔岩体野外产状(a)与岩石学角闪二长岩显微特征(b)

Fig. 2 Field occurrence and micrograph of the Zhuendaouenhuer intrusive rocks

在测定过程中产生的标准偏差外,91500 同位素比值的推荐值的标准偏差也考虑在内,其相对标准偏差设定为 2%。依据 Anderson(2002)的方法对输出数据进行普通铅校正,最后应用 IDL(ver5.5)程序进行加权平均年龄计算和谐和图绘制(Ludwig, 2001)。单个分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为 1σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄按 95% 的置信度给出。

样品的主、微量元素化学分析在中国地震局地壳动力学重点实验室完成。主量元素化学分析前处理采用碱熔法,在 Panalytical Axios X 荧光光谱仪上测定,工作条件为 50 kV, 60 mA。微量元素和稀土元素化学分析采用 Thermo X-series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)分析,将 200 目以下的粉末样品放入高压密闭 Teflon 溶样罐中经高纯硝酸和氢氟酸酸化后,加盖装入溶样钢套,放入烘箱于 170 °C 恒温 72 h 进行溶样,采用 Thermo X-series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。测试时内标为 Rh 和 Re。测试数据误差 RSD $\leqslant 5\%$ 。

4 分析结果

4.1 锆石 U-Pb 定年结果

锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析和年龄结果见表 1。本次研究对朱恩道欧恩呼尔岩体中角闪二长岩样品 SL1-5 中的 25 个锆石颗粒进行了 U-Pb 同位素分析。

透射光及阴极发光图像(图 3)显示角闪二长岩中锆石多为无色或淡黄粉色、透明、自形一半自形双锥柱状及断柱状,普遍由无环带或弱环带核部及具密集震荡生长环带的边部共同组成。锆石 Th/U 比介于 0.61~1.27 之间,大部分接近于 1(平均为

1.04),类似于典型的岩浆成因锆石(Belousova *et al.*, 2002)。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年谐和图见图 4,样品锆石年龄具有两个峰值:一组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 241~254 Ma 之间,由 18 个谐和年龄给出 248 ± 1 Ma(MSWD=1.1)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄;另一组 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 232~241 Ma 之间,相对年轻的 7 个年龄给出 235 ± 2 Ma (MSWD=0.85) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄。其中 232~241 Ma 这组年龄多数测点明显偏离谐和线,应该是由于后期热扰动或放射性成因 Pb 丢失造成的;243~254 Ma 这组年龄反映的应该是岩浆结晶时代,表明这套角闪二长岩的结晶年龄为 248 ± 1 Ma,时代为早三叠世。

4.2 主微量元素地球化学特征

朱恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩和二长闪长岩的主量元素、微量元素和稀土元素分析结果见表 2。角闪二长岩和二长闪长岩的 SiO_2 含量在 51.82%~60.17% 之间, Al_2O_3 含量为 12.42%~13.62%, MgO 含量为 3.90%~5.87% ($\text{Mg}^{\#} = 53.17\sim 59.03$), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量 7.36%~9.83%, 样品均呈现 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.25~0.53。样品具有较低的 SiO_2 和高的全碱含量,成分类似于二长岩和二长闪长岩(图 5a),属于碱性岩(图 5b)。它们表现出较低的 Al_2O_3 含量和 A/CNK 比值(A/CNK=0.53~0.75),属于准铝质—过碱质岩石(图 5c)。此外,它们还具有较高的 MgO 和 Na_2O 含量,及高的 $\text{Mg}^{\#}$ 和低的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比。

朱恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩和二长闪长岩球粒陨石标准化稀土元素(REE)配分曲线和原始地幔标准化微量元素配分曲线如图 6a, 6b 所示。样品稀土元素总量介于 117.52×10^{-6} ~ $160.89 \times$

表1 朱恩道欧恩呼尔角闪二长岩(SL1-5)LA-ICP-MS锆石U-Pb定年分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb age data of zircons separated from the hornblende monzonite (SL1-5) of the Zhuendaouenhu intrusive rocks

分析点	含量(10^{-6})		同位素比值								年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	rho	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ
1	526	465	1.13	0.0514	0.0017	0.276	0.009	0.0389	0.0005	0.3801	261	51	247	7	246	3
2	428	400	1.07	0.0514	0.0022	0.274	0.011	0.0386	0.0006	0.3501	260	68	246	9	244	3
3	592	549	1.08	0.0505	0.0015	0.272	0.008	0.0390	0.0005	0.4020	219	45	244	6	247	3
4	178	254	0.70	0.0522	0.0026	0.280	0.014	0.0389	0.0006	0.3185	293	82	251	11	246	4
5	204	230	0.89	0.0512	0.0026	0.284	0.014	0.0402	0.0006	0.3104	251	85	254	11	254	4
6	798	736	1.08	0.0507	0.0013	0.266	0.007	0.0381	0.0004	0.4324	228	38	240	5	241	3
7	515	464	1.11	0.0502	0.0019	0.256	0.009	0.0369	0.0005	0.3573	205	59	231	7	234	3
8	664	636	1.04	0.0523	0.0015	0.266	0.007	0.0370	0.0004	0.4244	297	40	240	6	234	3
9	572	540	1.06	0.0528	0.0016	0.267	0.008	0.0367	0.0004	0.3999	318	44	240	6	232	3
10	379	373	1.01	0.0540	0.0020	0.273	0.010	0.0367	0.0005	0.3568	369	58	245	8	232	3
11	429	432	0.99	0.0521	0.0018	0.278	0.009	0.0387	0.0005	0.3738	289	53	249	7	245	3
12	830	721	1.15	0.0531	0.0020	0.273	0.010	0.0373	0.0005	0.3915	333	54	245	8	236	3
13	494	517	0.96	0.0525	0.0016	0.278	0.008	0.0385	0.0005	0.3903	309	47	249	7	243	3
14	523	493	1.06	0.0497	0.0016	0.274	0.008	0.0400	0.0005	0.3746	183	50	246	7	253	3
15	297	304	0.98	0.0506	0.0024	0.273	0.013	0.0391	0.0006	0.3297	222	78	245	10	247	4
16	710	565	1.26	0.0516	0.0016	0.282	0.008	0.0395	0.0005	0.4032	270	46	252	7	250	3
17	475	478	0.99	0.0496	0.0016	0.267	0.008	0.0390	0.0005	0.3923	178	49	240	7	247	3
18	437	409	1.07	0.0509	0.0017	0.277	0.009	0.0394	0.0005	0.3707	234	53	248	7	249	3
19	589	545	1.08	0.0532	0.0016	0.292	0.008	0.0398	0.0005	0.4113	339	43	260	6	251	3
20	762	632	1.21	0.0499	0.0013	0.260	0.007	0.0378	0.0004	0.4324	188	38	234	5	239	3
21	353	389	0.91	0.0483	0.0017	0.260	0.009	0.0390	0.0005	0.3640	114	55	234	7	247	3
22	552	541	1.02	0.0494	0.0014	0.268	0.007	0.0393	0.0004	0.4105	166	43	241	6	248	3
23	467	771	0.61	0.0506	0.0011	0.275	0.006	0.0395	0.0004	0.4893	221	29	247	5	250	2
24	1063	838	1.27	0.0508	0.0011	0.274	0.006	0.0391	0.0004	0.4927	229	29	246	4	247	2
25	685	582	1.18	0.0500	0.0013	0.259	0.007	0.0375	0.0004	0.4266	193	38	233	5	237	2



图3 朱恩道欧恩呼尔角闪二长岩样品(SL1-5)锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of the zircons from the hornblende monzonite (SL1-5) of the Zhuendaouenhu intrusive rocks

表 2 朱恩道欧恩呼尔早三叠世侵入岩主量元素(%)分析结果
Table 2 Whole rock major element compositions of the Zhuendaoouenhuer intrusive rocks

样号	WL1836-1	WL1836-2	WL1836-3	WL1836-4	WL1837	WL1837-1	WL1837-2
岩性	二长闪长岩	二长闪长岩	角闪二长岩	角闪二长岩	角闪二长岩	角闪二长岩	角闪二长岩
SiO ₂	51.82	54.46	56.74	56.03	55.35	57.01	60.17
Al ₂ O ₃	13.22	13.23	12.42	12.70	12.89	12.73	13.62
Fe ₂ O ₃	8.55	8.02	7.33	8.07	7.58	6.87	6.60
CaO	6.25	7.43	4.27	6.08	5.90	5.14	1.71
MgO	5.87	4.90	5.28	5.01	5.18	3.90	4.16
K ₂ O	1.66	2.03	2.17	2.15	2.88	3.16	2.14
Na ₂ O	6.61	5.50	6.01	5.21	6.08	5.99	7.69
MnO	0.14	0.12	0.11	0.12	0.11	0.10	0.09
TiO ₂	1.41	1.29	1.04	1.31	1.25	1.11	0.86
P ₂ O ₅	0.52	0.50	0.39	0.49	0.45	0.47	0.33
烧失量(%)	2.61	1.02	2.62	2.01	2.01	2.41	2.61
Mg [#]	57.86	54.99	59.03	55.39	57.75	53.17	55.76

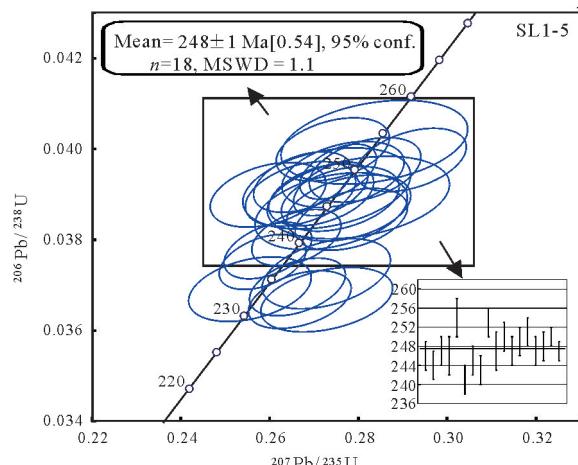


图 4 朱恩道欧恩呼尔角闪二长岩锆石 U-Pb 年龄谱和图
Fig. 4 The U-Pb concordia diagram of the zircon analysis data of from the hornblende monzonite of the Zhuendaoouenhuer intrusive rocks

10^{-6} , 均呈现轻稀土元素相对于重稀土元素富集 ($(La/Yb)_N=9.57\sim15.42$) 的右倾曲线, Eu 异常不明显 ($\delta Eu=0.76\sim1.00$) (图 6b). 原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6b)显示, 高场强元素 Nb、Ta、Ti、Y 等亏损, 大离子亲石元素 Ba、Sr 等富集的特征.

5 讨论

5.1 朱恩道欧恩呼尔岩体的结晶年龄

朱恩道欧恩呼尔岩体的形成时代长期缺乏高精度的同位素年代学限定. 索伦幅 1:20 万地质图根据区域对比将该岩体划归晚华力西期,之后的地质

图修编工作(例如, 邓晋福等(2015)修编的“中国侵入岩大地构造图(1:250万)”)均沿用 1:20 万区调资料将其归为二叠纪侵入岩.

本次工作对朱恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 精确定年, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $248\pm1\text{ Ma}$ (MSWD=1.1) (图 5), 代表了岩体中角闪二长岩的结晶年龄, 表明朱恩道欧恩呼尔岩体的形成时代为早三叠世.

5.2 岩石成因

朱恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩和二长闪长岩具有高 MgO 和 Mg[#]、富碱、尤其富 Na、富集 Ba、Sr 等 LILE 元素和 LREE、亏损 Nb、Ta、Ti 等 HFSE 元素和 HREE 元素, 无明显 Eu 异常, Sr 含量介于 $1.039\times10^{-6}\sim1.699.8\times10^{-6}$ 之间, 均大于 400×10^{-6} ; Y 含量介于 $11.16\times10^{-6}\sim20.14\times10^{-6}$ 之间, 多数样品小于或接近 18×10^{-6} , Sr/Y 介于 $66.3\sim138.5$ 之间; 具有高 Sr、相对低 Y、高 Sr/Y 比值的特征(图 7), 虽然 Al₂O₃ 含量比典型的埃达克岩低(可能与岩浆形成过程中幔源物质的参与有关), 但这些特征总体类似于典型的埃达克岩(Defant and Drummond, 1990), 符合大部分学者所称的埃达克质岩石范畴(Xu *et al.*, 2002; Gao *et al.*, 2004), 这套侵入岩具有高镁埃达克质闪长岩的地球化学特征.

Mg[#] 及 Cr、Ni 是判断富 Si 熔体是否与橄榄岩相互作用的重要指标(Rapp *et al.*, 1999; Gao *et al.*, 2004), 实验岩石学研究业已证实含水玄武质岩石 0.8~3.2 GPa 脱水部分熔融形成熔体的 Mg[#] 通常低于 45 (Rapp and Watson, 1995; Rapp *et al.*, 1999).

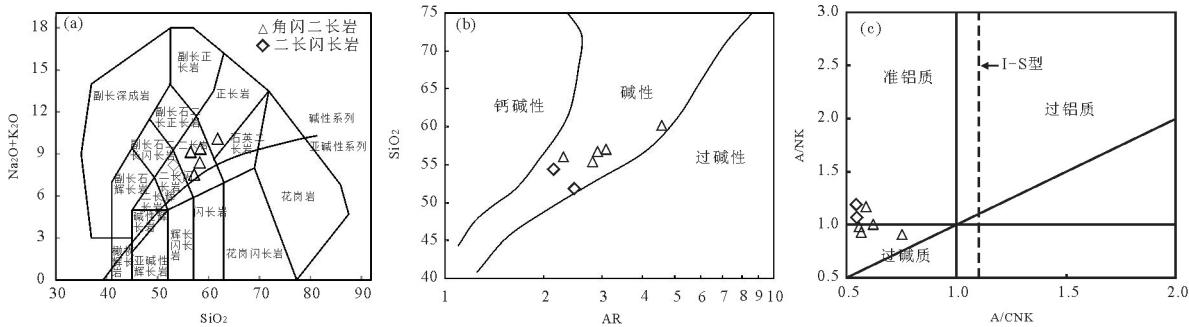
表3 朱恩道欧恩呼尔早三叠世侵入岩微量元素(10^{-6})分析结果
Table 3 Whole rock trace element compositions of the Zhuendaoouenhuer intrusive rocks

样号	WL1836-1	WL1836-2	WL1836-3	WL1836-4	WL1837	WL1837-1	WL1837-2
岩性	二长闪长岩	二长闪长岩	角闪二长岩	角闪二长岩	角闪二长岩	角闪二长岩	角闪二长岩
Li	29.34	24.28	39.10	30.34	22.90	27.00	31.00
Sc	7.16	7.16	7.16	7.16	7.16	7.16	7.16
V	117.32	123.34	109.40	125.82	119.06	106.50	101.94
Cr	102.48	122.34	141.18	119.42	119.00	81.28	113.68
Co	16.71	15.66	13.59	17.17	15.20	11.94	16.55
Ni	25.74	19.87	35.48	23.04	20.70	12.30	54.78
Cu	18.95	19.64	22.30	21.04	18.43	12.92	37.18
Zn	96.02	80.96	78.68	89.56	79.12	76.18	77.56
Ga	20.14	20.74	17.73	19.74	19.11	20.04	19.68
Rb	30.96	35.20	38.04	31.38	54.34	44.88	39.76
Sr	1 598.40	1 267.20	1 154.00	1 699.80	1 039.00	1 607.00	1 545.40
Y	19.37	19.11	16.05	18.02	20.14	16.38	11.16
Zr	173.02	198.62	124.42	132.04	161.86	218.80	123.32
Nb	10.60	10.12	7.76	9.86	10.03	10.31	7.35
Cs	1.62	1.40	1.46	1.59	0.92	0.89	1.70
Ba	1 274.20	526.80	619.40	1 326.40	557.40	655.80	1 476.40
La	25.92	25.54	23.36	26.00	30.16	33.76	25.02
Ce	57.30	56.82	49.42	55.72	64.56	69.24	50.34
Pr	6.98	6.80	5.75	6.68	7.44	7.80	5.62
Nd	28.70	27.94	22.96	27.62	29.74	29.88	21.66
Sm	5.63	5.47	4.54	5.41	5.69	5.15	3.86
Eu	1.69	1.53	1.18	1.65	1.43	1.34	1.25
Gd	5.41	5.35	4.47	5.27	5.65	5.04	3.64
Tb	0.73	0.70	0.59	0.69	0.74	0.62	0.45
Dy	4.04	4.01	3.39	3.88	4.17	3.34	2.39
Ho	0.73	0.73	0.61	0.71	0.77	0.62	0.44
Er	2.15	2.17	1.84	2.07	2.28	1.90	1.34
Tm	0.29	0.29	0.24	0.27	0.30	0.25	0.18
Yb	1.94	1.88	1.63	1.78	2.03	1.70	1.16
Lu	0.27	0.27	0.24	0.26	0.29	0.25	0.17
Hf	4.03	4.82	3.34	3.16	4.09	5.31	3.30
Ta	0.70	0.69	0.54	0.59	0.72	0.69	0.47
Pb	12.58	12.78	13.56	12.52	13.75	16.31	15.58
Bi	0.19	0.13	0.18	0.11	0.13	0.18	0.20
Th	5.02	6.58	8.06	4.41	9.35	10.78	7.12
U	1.46	1.61	1.18	1.13	2.26	2.67	1.38
Σ REE	141.78	139.49	120.24	138.00	155.25	160.89	117.52
(La/Yb) _N	9.57	9.73	10.27	10.47	10.65	14.24	15.42
δ Eu	0.92	0.85	0.79	0.93	0.76	0.80	1.00
δ Ce	1.02	1.04	1.01	1.01	1.03	1.01	1.00

注:球粒陨石标准值据Sun and McDonough(1989)。

高镁埃达克质岩石通常被认为由拆沉的加厚下地壳部分熔融后与地幔橄榄岩相互作用而形成(Gao *et al.*, 2004),或者是由俯冲洋壳熔融后与上覆地幔

楔相互作用而形成(Kelemen, 1995; Kepezhinskas *et al.*, 1995),也有学者认为是富集地幔起源的基性岩浆与壳源酸性岩浆混合形成(陈斌等, 2013)。朱

图 5 朱恩道欧恩呼尔侵入岩 TAS 图解、AR-SiO₂ 和 A/CNK-A/NK 图解Fig. 5 TAS, AR-SiO₂ and A/CNK-A/NK diagrams of the Zhuendaoouenhu intrusive rocks

底图据 a. Middlemost(1994); b. Wright(1969); c. Maniar and Piccoli(1989); 图 a 中横纵坐标单位为%; 图 b 中纵坐标单位为%

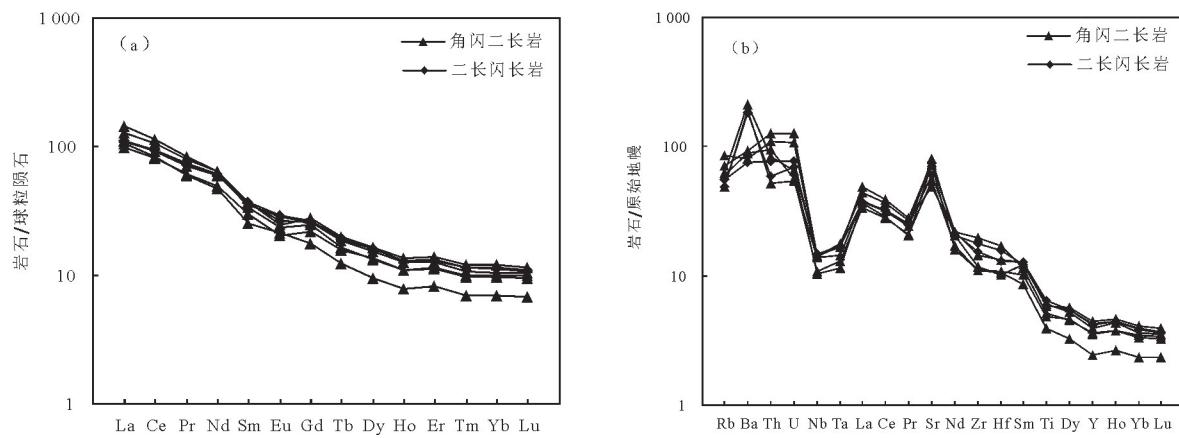


图 6 朱恩道欧恩呼尔侵入岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns of the Zhuendaoouenhu intrusive rocks

标准化值据 Sun and McDonough(1989)

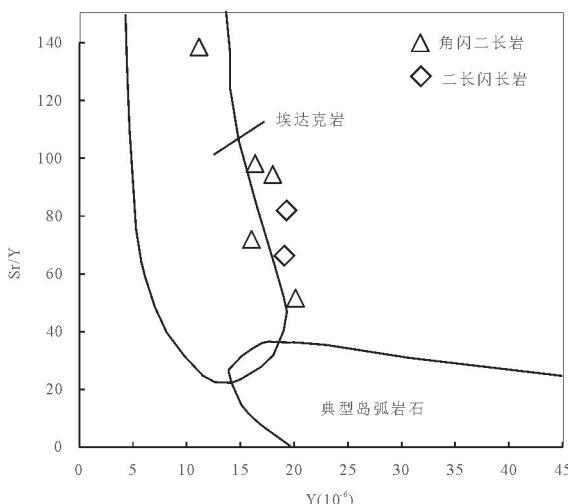


图 7 朱恩道欧恩呼尔侵入岩 Sr/Y-Y 图解

Fig. 7 Sr/Y-Y diagrams of the Zhuendaoouenhu intrusive rocks

底图据 Xu et al.(2002)

恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩和二长闪长岩高 Mg[#] 值和高 Cr、Ni 等特征, 表明它们由加厚下地壳镁铁质岩部分熔融形成的埃达克质岩的可能性较小, 且加厚下地壳熔融形成的埃达克岩往往富钾贫钠 (Wang et al., 2005), 壳源酸性岩浆与基性岩浆混合形成的岩石通常也富钾贫钠, 而朱恩道欧恩呼尔侵入岩具有富钠贫钾的岩石地球化学特征。幔源岩浆经过角闪石等矿物的结晶分异也会导致熔体 Sr/Y、La/Yb 比值升高, 但该套岩石中相容元素 Cr、Ni 的相关关系显示, 岩浆演化过程中角闪石的分离结晶并不明显(图 8b)。因此, 朱恩道欧恩呼尔岩体高 Sr、低 Y、高 Sr/Y 比值等埃达克岩特征应该是由洋壳部分熔融形成的。

朱恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩和二长闪长岩的地球化学特征类似于洋壳部分熔融并与地幔橄榄岩相互作用形成的熔体。SiO₂-Mg 图显示, 岩石源于大洋板片的埃达克岩(图 8a), La-La/Yb 相关

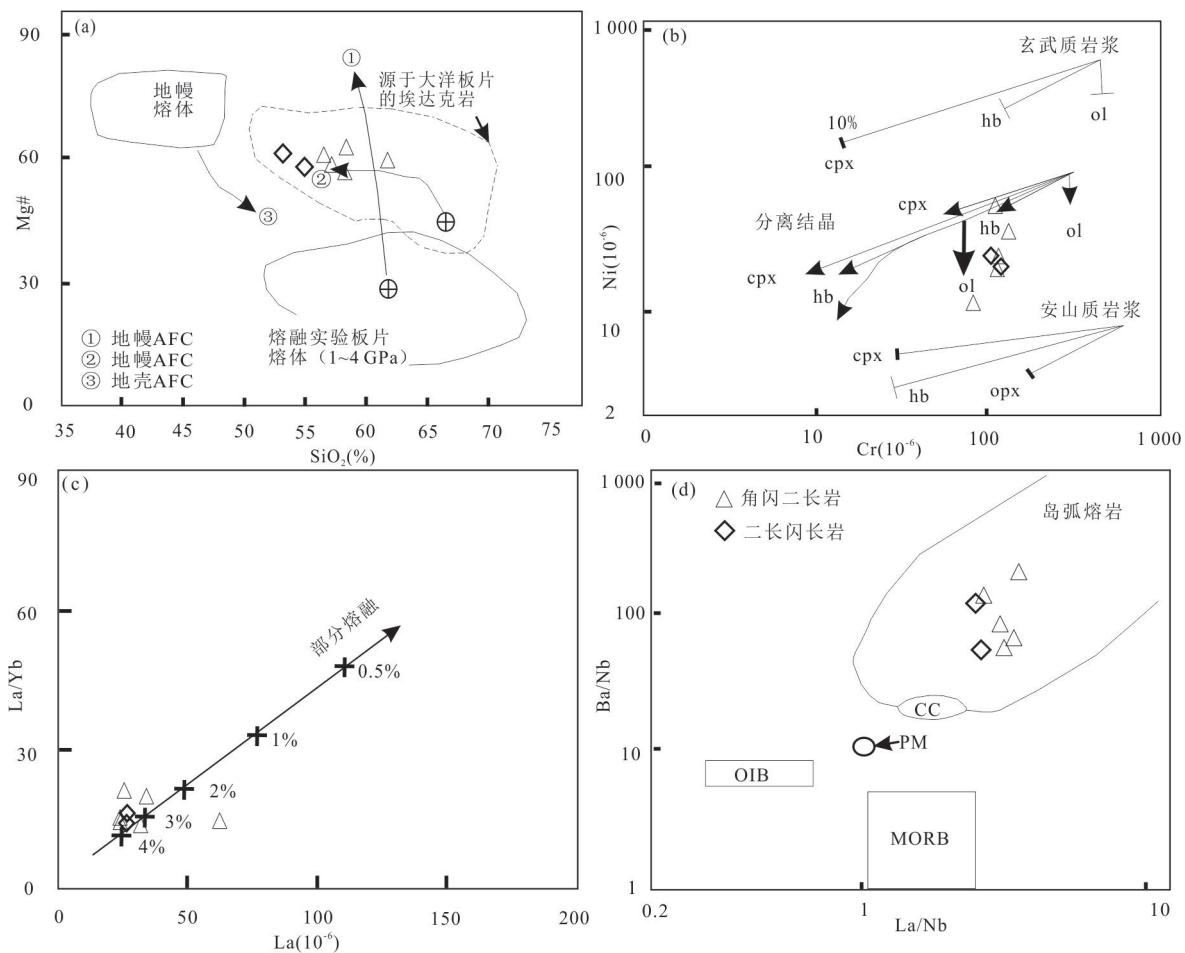


图8 朱恩道欧恩呼尔侵入岩源区判别图解

Fig.8 Source discrimination diagrams of the Zhuendaoouenhuer intrusive rocks

CC. 大陆地壳;PM. 原始地幔;OIB. 洋岛玄武岩;MORB. 洋中脊玄武岩;底图据Jahn *et al.*(1999)(b)和汤艳杰等(2014)(a)

性变化显示,该岩体应该是地幔源区物质经历了较高程度部分熔融的产物(图8c),在La/Nb-Ba/Nb判别图上,岩石明显保留了岛弧熔岩的特征(图8d).基于岩体地质特征及岩石地球化学特征,结合区域地质特征,推测朱恩道欧恩呼尔岩体高镁埃达克质闪长岩类源于残留在地幔中的俯冲大洋板片的部分熔融,榴辉岩相的残余洋壳部分融熔形成具有埃达克岩特征的初始熔体,熔体上升过程中与地幔橄榄岩相互作用,从而形成了高镁埃达克质熔体.实验岩石学也证明在压力2.0 GPa,温度1 300~1 350 °C时,榴辉岩熔体与橄榄岩反应产生的熔体具有高镁安山岩的成分特征(Mg[#]>45),表明榴辉岩熔体-橄榄岩反应可能是高镁安山岩形成的主要原因之一(王超等,2010).因此,朱恩道欧恩呼尔岩体高镁埃达克质闪长岩类应是由残余俯冲大洋板片部分熔融并与地幔橄榄岩相互作用而形成.在索伦山—西拉木伦缝合带东段林西地区亦有早中生

代(244 Ma)高镁埃达克质安山岩出露,是保存在古俯冲带地幔中的残余洋壳部分熔融后与地幔橄榄岩相互作用形成的(王冬兵等,2009),与朱恩道欧恩呼尔岩体高镁埃达克质闪长岩类似.

综上所述,朱恩道欧恩呼尔富碱侵入岩主要来源于残余俯冲大洋板片部分熔融,并经过熔体与地幔橄榄岩相互作用而形成.这些俯冲大洋板片源于古生代以来古亚洲洋的汇聚,华北北缘三叠纪富碱侵入岩的形成所指示的拉张环境意味着古亚洲洋的最终闭合以及华北与蒙古陆块俯冲/碰撞作用的结束(汤艳杰等,2014).因此,朱恩道欧恩呼尔岩体应是古亚洲洋闭合,华北板块与西伯利亚板块碰撞之后的伸展作用下所形成的,其对古亚洲洋的闭合时限提供了限定.

朱恩道欧恩呼尔岩体东南约4 km处扎嘎乌苏地区出露的晚奥陶世岛弧侵入岩,变形非常强烈,岩石糜棱岩化十分发育,镜下见组成岩石的主要矿

物如石英、斜长石等普遍破碎,可能与古亚洲洋板块在古生代向华北板块下俯冲,以及华北板块与西伯利亚板块二叠纪末期的碰撞作用有关。而同处于索伦山缝合带中的朱恩道欧恩呼尔岩体,其变质形弱,岩石中也未见明显的矿物破碎现象,而岩体的围岩艾勒格庙组及附近分布的中下奥陶统地层均已强烈变形。这些特征表明朱恩道欧恩呼尔岩体侵位后并未经历强烈的区域构造变形,与围岩明显不同,暗示了其可能是古亚洲洋闭合之后岩浆作用的产物。在朱恩道欧恩呼尔岩体东部索伦山缝合带中,出露早、中二叠世蛇绿混杂岩(其中早二叠世蛇绿岩块混杂在早—中二叠世浊积岩基质中)(李钢柱等,2017)、中二叠世岛弧 TTG 岩(薛建平等,2017),显示早、中二叠世古亚洲洋板块仍在向华北板块下俯冲;而在华北板块北缘大量发育的三叠纪 A型花岗岩则指示了其转为陆内演化阶段;因而晚二叠世—中三叠世在兴蒙造山带构造演化过程中是重要的洋陆转换期,古亚洲洋闭合时间普遍被认为在晚二叠世到早、中三叠世(Xiao et al., 2003, 2015; 李朋武等, 2006; Li et al., 2006; Jian et al., 2010; 潘桂棠等, 2016)。朱恩道欧恩呼尔岩体的上述年龄及地质、地球化学特征,结合区域构造演化特征,表明该岩体是在古亚洲洋关闭后的后碰撞伸展早期的构造环境下形成的。

5.3 构造环境及其地质意义

研究区位于索伦山缝合带,索伦山缝合带目前被地学界普遍认为是古亚洲洋最后闭合的位置,但是其闭合时间还存在不同认识。

位于华北板块与西伯利亚板块之间的古亚洲洋,目前研究认为至少在新元古代就已经拉开(Xiao et al., 2015; 潘桂棠等, 2016)。在索伦山缝合带与华北板块北缘之间的南部造山带(Jian et al., 2010),或称为温都尔庙俯冲增生杂岩带和白乃庙岛弧带,发育大量古生代弧岩浆岩,尤以奥陶纪—志留纪弧岩浆岩和石炭纪—中二叠世弧岩浆岩最为发育,记录了古生代古亚洲洋向华北板块下的俯冲作用(Zhang et al., 2009; 童英等, 2010)。例如,朱恩道欧恩呼尔岩体东南出露的扎嘎乌苏岩体,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 450.3 ± 3.7 Ma, 为一套埃达克质岛弧岩浆岩,是晚奥陶世古亚洲洋板块向华北板块俯冲作用的产物。石炭纪—中二叠世的弧岩浆岩也多有报道,例如兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区石炭纪岛弧型侵入岩,LA-ICP-MS 锆石

U-Pb 年龄为 $330 \sim 310$ Ma(王树庆等, 2018); 达茂旗到固阳一带的一套闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩形成时代为 $293 \sim 266$ Ma, 被认为是早中二叠世与索伦山消减带对应的华北板块北缘的陆缘弧(张维和简平, 2012)。索伦山地区 1:5 万区调工作获得索伦山缝合带中岛弧英云闪长岩的年龄为 266.7 ± 3.7 Ma(薛建平等, 2017)。上述证据显示,古亚洲洋板块向华北板块下俯冲不晚于早奥陶世,在中二叠世俯冲作用仍在进行。

关于研究区古亚洲洋最终闭合时间存在多种不同观点,目前主要有以下两种认识:根据区域地质对比、岩浆岩同位素年代学等证据,有学者提出古亚洲洋“早古生代闭合,晚古生代伸展”的观点,认为中—晚泥盆世内蒙古及东北地区完成了由古亚洲洋到兴蒙造山带的构造格局转变(Xu et al., 2013; 徐备等, 2014);根据古生物化石、岩浆岩年代学及古地磁证据,一些学者认为古亚洲洋在晚古生代至少到早、中二叠世仍存在,最终闭合时间是在晚二叠世—早、中三叠世(Xiao et al., 2003, 2015; 李朋武等, 2006; Li et al., 2006; 李锦铁等, 2009; Jian et al., 2010; Eizenhofer et al., 2014; 潘桂棠等, 2016)。

兴蒙造山带两侧呈带状分布的富碱侵入岩,为西伯利亚板块与华北板块拼合的时间提供了直接证据(张万益等, 2012)。前人研究表明,在西伯利亚板块南缘二连浩特—东乌珠穆沁旗—黑龙江的黑河一带,发育大规模的二叠纪碱性侵入岩带(同位素年龄集中在 $290 \sim 260$ Ma)(洪大卫等, 1994; 孙德有等, 2000; 张玉清等, 2009; 童英等, 2010),和三叠纪碱性侵入岩带(同位素年龄多在 $240 \sim 220$ Ma)(石玉若等, 2007; 童英等, 2010; 张万益等, 2012),被认为与造山后的伸展作用有关(洪大卫等, 1994; 孙德有等, 2000; Wu et al., 2002)。在华北板块北缘发育大规模的三叠纪富碱侵入岩带,同位素年龄集中在 $250 \sim 210$ Ma(洪大卫等, 1994; 阎国翰等, 2000; Zhang et al., 2009; 张拴宏等, 2010; 汤艳杰等, 2014)。李锦铁等(2007)研究认为西伯利亚板块南缘的二叠纪碱性花岗岩可能是局部弧—陆碰撞的产物,华北板块与西伯利亚板块在二叠纪中晚期碰撞。童英等(2010)认为南部索伦山—西拉木伦蛇绿岩与北部贺根山蛇绿岩代表两个洋盆,北部贺根山洋在中二叠世之前就已经闭合了,而南部的西拉木伦洋在中二叠世晚期—三叠纪沿索伦山—西拉

木伦河一带才最终闭合。汤艳杰等(2014)研究认为华北板块北缘三叠纪富碱侵入岩源于富集的岩石圈地幔并有下地壳物质的参与,标志着古亚洲洋的闭合及华北与蒙古陆块碰撞的结束。

基于上述研究成果及本次研究结果,西伯利亚板块南缘的二叠纪富碱侵入岩带,可能是早二叠世之前贺根山洋闭合的地质记录,此时在索伦山—西拉木伦一带古亚洲样仍存在。华北板块北缘和西伯利亚板块南缘的三叠纪富碱侵入岩带,对称分布且成岩时间相近,应是华北板块与西伯利亚板块对接之后,由汇聚转为伸展环境的地质记录。

本文研究的朱恩道欧恩呼尔碱性岩体属于华北板块北缘三叠纪富碱侵入岩带的组成部分。其中角闪二长岩和二长闪长岩地球化学特征显示为贫K富Na准铝质碱性侵入岩,表明区内早三叠世侵入岩可能就位于后碰撞伸展阶段早期的构造环境中,指示索伦山地区早三叠世(248 ± 1 Ma)古亚洲洋已经关闭,因此西伯利亚板块与华北板块的对接应发生在 248 ± 1 Ma之前。

6 结论

(1) 索伦山地区朱恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 248 ± 1 Ma,表明朱恩道欧恩呼尔岩体的形成时代为早三叠世。

(2) 朱恩道欧恩呼尔岩体角闪二长岩和二长闪长岩具有富碱、尤其富Na、高Mg[#],富集Ba、Sr等LILE和LREE、亏损Nb、Ta、Ti等HFSE元素和HREE元素,无明显Eu异常,高Sr、低Y、高Sr/Y比值,具有高镁埃达克质闪长岩类的地球化学特征。

(3) 朱恩道欧恩呼尔高镁埃达克质闪长岩类可能是由残留在地幔中的古亚洲洋俯冲大洋板片部分熔融形成的熔体与地幔橄榄岩相互作用而形成的。

(4) 索伦山地区朱恩道欧恩呼尔侵入岩的形成与华北板块与西伯利亚板块之间的古亚洲洋闭合后的伸展作用有关,为造山带碰撞晚期后造山“松弛”阶段岩浆作用的产物,表明西伯利亚板块与华北板块的对接是在早三叠世(248 ± 1 Ma)之前。

致谢:衷心感谢中国地质大学(武汉)葛梦春教授、天津地质调查中心辛后田研究员赴野外指导,并在成文过程中提供宝贵的意见建议;同时特别感谢对本文提出宝贵修改意见的两位匿名审稿人!

References

- Anderson, T., 2002. Correction of Common Lead in U - Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1/2): 59—79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Belousova, E., Griffin, W., O'Reilly, S. Y., et al., 2002. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602—622. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0364-7>
- Chen, B., Chen, C.J., He, J.B., et al., 2013. Origin of Mesozoic High-Mg Adakitic Rocks from Northeastern China: Petrological and Nd-Sr-Os Isotopic Constraints. *Chinese Science Bull.*, 58(20): 1941—1953(in Chinese with English abstract).
- Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of Some Modern Arc Magmas by Melting of Young Subducted Lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662—665. <https://doi.org/10.1038/347662a0>
- Eizenhofer, P. R., Zhao, G. C., Zhang, J., et al., 2014. Final Closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from Geochronological and Geochemical Data of Permian Volcanic and Sedimentary Rocks. *Tectonics*, 33(4): 441—463. <https://doi.org/10.1002/2013tc003357>
- Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432(7019): 892—897. <https://doi.org/10.1038/nature03162>
- Hong, D. W., Huang, H. Z., Xiao, Y. J., et al., 1994. The Permian Alkaline Granites in Central Inner Mongolia and Their Geodynamic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 219—230 (in Chinese with English abstract).
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Lo, C. H., et al., 1999. Crust-Mantle Interaction Induced by Deep Subduction of the Continental Crust: Geochemical and Sr-Nd Isotopic Evidence from Post-Collisional Mafic-Ultramafic Intrusions of the Northern Dabie Complex, Central China. *Chemical Geology*, 157(1/2): 119—146. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00197-1](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00197-1)
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2008. Time Scale of an Early to Mid-Paleozoic Orogenic Cycle of the Long-Lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: Implications for Continental Growth. *Lithos*, 101(3/4): 233—259. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.07.005>
- Jian, P., Liu, D. Y., Kröner, A., et al., 2010. Evolution of a Permian Intraoceanic Arc-Trench System in the Solonker Suture Zone, Central Asian Orogenic Belt, China and

- Mongolia. *Lithos*, 118(1/2): 169—190. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.04.014>
- Kelemen, P. B., 1995. Genesis of High Mg[#] Andesites and the Continental Crust. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 120(1): 1—19. <https://doi.org/10.1007/s004100050054>
- Kepezhinskas, P. K., Defant, M. J., Drummond, M. S., 1995. Na Metasomatism in the Island - Arc Mantle by Slab Melt-Peridotite Interaction: Evidence from Mantle Xenoliths in the North Kamchatka Arc. *Journal of Petrology*, 36(6): 1505—1527. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.petrology.a037263>
- Li, G. Z., Wang, Y. J., Li, C. Y., et al., 2017. Discovery of Early Permian Radiolarian Fauna in the Solon Oboophiolite Belt, Inner Mongolia and Its Geological Significance. *Chinese Science Bull*, 62(5): 400—406 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., 2006. Permian Geodynamic Setting of Northeast China and Adjacent Regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and Subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3/4): 207—224. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.09.001>
- Li, J. Y., Gao, L. M., Sun, G. H., et al., 2007. Shuangjingzi Middle Triassic Syn-Collisional Crust-Derived Granite in the East Inner Mongolia and Its Constraint on the Timing of Collision between Siberian and Sino-Korean Paleo-Plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565—582 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. Y., Zhang, J., Yang, T. N., et al., 2009. Crustal Tectonic Division and Evolution of the Southern Part of the North Asian Orogenic Region and Its Adjacent Areas. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 39(4): 584—605 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. W., Gao, R., Guan, Y., et al., 2006. Palaeomagnetic Constraints on the Final Closure Time of Solonker Linxi Suture. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 36(5): 744—758 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K.R., 2001. Squid 1.02: A User's Manual. Berkeley Geochronology Centre, Special Publication, Berkeley, 1—19.
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- Miao, L., Zhang, F., Fan, W. M., et al., 2007. Phanerozoic Evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt in North China: Constraints from Geochronology of Ophiolites and Associated Formations. *Geological Society, London, Special Publications*, 280(1): 223—237. <https://doi.org/10.1144/sp280.11>
- Middlemost, E. A. K., 1994. Naming Materials in the Magmatic/Igneous Rock System. *Earth Science Reviews*, 37(3/4): 215—224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
- Pan, G. T., Lu, S. N., Xiao, Q. H., et al., 2016. Division of Tectonic Stages and Tectonic Evolution in China. *Earth Science Frontiers*, 23(6): 1—23 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between Slab-Derived Melts and Peridotite in the Mantle Wedge: Experimental Constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335—356. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(99\)00106-0](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(99)00106-0)
- Rapp, R. P., 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. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.4.891>
- Sengor, A. M. C., Natal' in, B. A., 1996. Paleotectonics of Asia: Fragments of a Synthesis. In: Yin, A., Harrison, M., eds. *The Tectonic Evolution of Asia*. Cambridge University Press, Cambridge, 486—640.
- Sengor, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299—307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Shao, J. A., 1991. Crust Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of Sino-Korean Plate. Peking University Press, Beijing, 1—91 (in Chinese).
- Shi, Y. R., Liu, D. Y., Jian, P., et al., 2007. SHRIMP U-Pb Zircon Dating of Triassic A-Type Granites in Sonid Zuqi, Central Inner Mongolia, China and Its Tectonic Implications. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183—189 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. Y., Wu, F. Y., Li, H. M., 2000. Emplacement Age of the Postorogenic A-Type Granites in Northwestern Lesser Xing'an Ranges, and Its Relationship to the Eastward Extension of Suolunshan-Hegenshan-Zhalaitai Collisional Suture Zone. *Chinese Science Bull*, 45(20): 2217—2222 (in Chinese).
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tang, K. D., 1990. Tectonic Development of Paleozoic Fold-

- belts at the North Margin of the Sino-Korean Craton. *Tectonics*, 9(2): 249—260. <https://doi.org/10.1029/tc009i002p00249>
- Tang, Y. J., Zhang, H. F., Ying, J. F., 2014. Genetic Significance of Triassic Alkali-Rich Intrusive Rocks in the Yinshan and Neighboring Areas. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2031—2040.
- Tong, Y., Hong, D. W., Wang, T., et al., 2010. Spatial and Temporal Distribution of Granitoids in the Middle Segment of the Sino-Mongolian Border and Its Tectonic and Metallogenetic Implications. *Acta Geoscientifica Sinica*, 31(3): 395—412(in Chinese with English abstract).
- Wang, D. B., Liu, Y. S., Zong, K. Q., et al., 2009. Early Mesozoic O-Type High-Mg Adakitic Andesites from Linxi Area, Inner Mongolia and Its Implication. *Geological Science and Technology Information*, 28(6): 31—38 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., McDermott, F., Xu, J. F., et al., 2005. Cenozoic K-Rich Adakitic Volcanic Rocks in the Hohxil Area, Northern Tibet: Lower-Crustal Melting in an Intercontinental Setting. *Geology*, 33(6): 465. <https://doi.org/10.1130/g21522.1>
- Wang, S. Q., Hu, X. J., Yang, Z. L., et al., 2018. Geochronology, Geochemistry, Sr-Nd-Hf Isotopic Characteristics and Geological Significance of Carboniferous Yuejin Arc Intrusive Rocks of Xilinhot, Inner Mongolia. *Earth Science*, 43(3): 672—695(in Chinese with English abstract).
- Windley, B. F., Alexeiev, D., Xiao, W. J., et al., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31—47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Wright, J. B., 1969. A Simple Alkalinity Ratio and Its Application to Questions of Non-Orogenic Granite Genesis. *Geological Magazine*, 106(4): 370—384. <https://doi.org/10.1017/s0016756800058222>
- Wu, F. Y., Sun, D. Y., Li, H. M., et al., 2002. A-Type Granites in Northeastern China: Age and Geochemical Constraints on their Petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1/2): 143—173. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00018-9](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00018-9)
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Hao, J., et al., 2003. Accretion Leading to Collision and the Permian Solonker Suture, Inner Mongolia, China: Termination of the Central Asian Orogenic Belt. *Tectonics*, 22(6): 1—18. <https://doi.org/10.1029/2002tc001484>
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Huang, B. C., et al., 2009. End-Permian to Mid-Triassic Termination of the Accretionary Processes of the Southern Altaiids: Implications for the Geodynamic Evolution, Phanerozoic Continental Growth, and Metallogeny of Central Asia. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1189—1217. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0407-z>
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Sun, S., et al., 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 477—507. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105254>
- Xu, B., Charvet, J., Chen, Y., et al., 2013. Middle Paleozoic Convergent Orogenic Belts in Western Inner Mongolia (China): Framework, Kinematics, Geochronology and Implications for Tectonic Evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4): 1342—1364.
- Xu, B., Zhao, P., Bao, Q. Z., et al., 2014. Preliminary study on the Pre-Mesozoic Tectonic Unit Division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB). *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1841—1857 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002. Origin of Mesozoic Adakitic Intrusive Rocks in the Ningzhen Area of East China: Partial Melting of Delaminated Lower Continental Crust? *Geology*, 30(12): 1111. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<1111:oomair>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<1111:oomair>2.0.co;2)
- Xue, J. P., Liu, M. Y., Li, G. Z., et al., 2018. Zircon Geochronology and Geochemistry of Haer Bogetuoer TTG Rock, Solonker Zone, Inner Mongolia and Their Tectonic Implications. *Earth Science Frontiers*, 25(3), 230—239 (in Chinese with English abstract).
- Yan, G. H., Mu, B. L., Xu, B. L., et al., 2000. Triassic Alkaline Intrusives in the Yanliao-Yinshan Area: Their Chronology, Sr, Nd and Pb Isotopic Characteristics and Their Implication. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 30(4): 383—387 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Xu, L. Q., Kang, X. L., et al., 2009. Age Dating of Alkali Granite in Jingesitai Area of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and Its Significance. *Geology in China*, 36(9): 988—995 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. D., Ma, C. Q., Wang, L. Q., et al., 2018. Subduction-Type Magmatic Rocks in Post-Collision Stage: Evidence from Late Triassic Diorite-Porphyrite of Nao-muhungou Area, East Kunlunorogeny. *Earth Science*, 43(4): 1183—1206 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. H., Gao, R., Li, H. Y., et al., 2014. Crustal Structures Revealed from a Deep Seismic Reflection Profile Across the Solonker Suture Zone of the Central Asian Orogenic Belt, Northern China: An Integrated Interpretation. *Tectonophysics*, 612—613: 26—39. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.07.011>

- org/10.1016/j.tecto.2013.11.035
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Kröner, A., et al., 2009. Early Permian Plutons from the Northern North China Block: Constraints on Continental Arc Evolution and Convergent Margin Magmatism Related to the Central Asian Orogenic Belt. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1441–1467. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0368-2>
- Zhang, S. H., Zhao, Y., Liu, J. M., et al., 2010. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic Magmatism in the Northern Margin of the North China Block: A Preliminary Review. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824–842 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. Y., Nie, F. J., Gao, Y. G., et al., 2012. Geochemical Characteristics and Genesis of Triassic Chagan Obo Alkalinequartz Diorites in Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 525–534 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Jian, P., 2012. SHRIMP Dating of the Permian Guyang Diorite - Quartz Diorite - Tonalite Suite in the Northern Margin of the North China Craton. *Geology in China*, 39(6): 1593–1603 (in Chinese with English abstract).
- 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等, 2016. 中国大地构造阶段划分和演化. *地学前缘*, 23(6): 1–23.
- 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, 1–91.
- 石玉若, 刘敦一, 简平, 等, 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义. *地质通报*, 26(2): 183–189.
- 孙德有, 吴福元, 李惠民, 等, 2000. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山—贺根山—扎赉特碰撞拼合带东延的关系. *科学通报*, 45(20): 2217–2222.
- 汤艳杰, 张宏福, 英基丰, 2014. 阴山及邻区三叠纪富碱侵入岩的成因意义. *岩石学报*, 30(7): 2031–2040.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等, 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义. *地球学报*, 31(3): 395–412.
- 王冬兵, 刘勇胜, 宗克清, 等, 2009. 内蒙古林西早中生代 O 型高镁埃达克质安山岩的发现及其意义. *地质科技情报*, 28(6): 31–38.
- 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. *地球科学*, 43(3): 672–695.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等, 2014. 兴蒙造山带前中生代构造单元划分初探. *岩石学报*, 30(7): 1841–1857.
- 薛建平, 刘美玉, 李钢柱, 等, 2018. 内蒙古索伦山地区哈尔博格托尔 TTG 岩锆石年代学、岩石地球化学及大地构造意义. *地学前缘*, 25(3): 230–239.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等, 2000. 燕辽—阴山三叠纪碱性侵入岩年代学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及意义. *中国科学 D 辑(地球科学)*, 30(4): 383–387.
- 张明东, 马昌前, 王连训, 等, 2018. 后碰撞阶段的“俯冲型”岩浆岩: 来自东昆仑瑙木浑沟晚三叠世闪长玢岩的证据. *地球科学*, 43(4): 1183–1206.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等, 2010. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 824–842.
- 张万益, 聂凤军, 高延光, 等, 2012. 内蒙古查干敖包三叠纪碱性石英闪长岩的地球化学特征及成因. *岩石学报*, 28(2): 525–534.
- 张维, 简平, 2012. 华北大平原固阳二叠纪闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩套 SHRIMP 年代学. *中国地质*, 39(6): 1593–1603.
- 张玉清, 许立权, 康小龙, 等, 2009. 内蒙古东乌珠穆沁旗京斯台碱性花岗岩年龄及意义. *中国地质*, 36(9): 988–995.

附中文参考文献

- 陈斌, 陈长健, 贺敬博, 等, 2013. 华北东部中生代高镁埃达克质岩浆的起源: 岩石学和 Nd-Sr-Os 同位素证据. *科学通报*, 58(20): 1941–1953.
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖怡君, 等, 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义. *地质学报*, 68(3): 219–230.
- 李钢柱, 王玉净, 李成元, 等, 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. *科学通报*, 62(5): 400–406.
- 李锦铁, 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. *岩石学报*, 23(3): 565–582.
- 李锦铁, 张进, 杨天南, 等, 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 584–605.
- 李朋武, 高锐, 管烨, 等, 2006. 内蒙古中部索伦林西缝合带封闭时代的古地磁分析. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(5): 744–758.