

文章编号: 1000-4734(2015)04-0529-11

内蒙古迪彦钦阿木地区 260 Ma 玄武岩地球化学特征及其地质意义

孙海瑞^{1,2,3,4}, 黄智龙^{4*}, 严再飞⁴, 严光生^{1,2}, 吕志成^{1,2}

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 国土资源部勘查技术指导中心; 3. 中国地质大学, 北京 100083; 4. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 本文对中亚造山带东段内蒙古迪彦钦阿木地区玄武岩 (~260 Ma) 开展了岩石学和地球化学的系统研究。元素和 Sr-Nd 同位素地球化学研究表明, 该区玄武岩具有富集 LREE 和亏损 HREE 的特征, 呈现出明显的 Eu 正异常, 而几乎无 Ce 异常。微量元素组成表现出富集 LILE (如 Rb、Th 和 K) 和亏损 HFSE (如 Nb、Ta、Zr 和 Hf) 的特征。同时, 该区玄武岩具有较高的 Nb/Ta 比值 (>17), 较低的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值 (0.7026~0.7033), 以及正的 $Nd(t)$ 值 (3.6~4.6)。综合分析表明, 该区玄武岩具有俯冲带火山岩的地球化学特征, 其源区主要为亏损的岩石圈地幔, 并局部有软流圈物质的加入, 但岩浆演化过程中壳源物质混染程度不高。通过元素判别图解及区域地质资料分析, 我们推测该区玄武岩的形成与弧后伸展环境下软流圈物质上涌而导致岩石圈地幔的部分熔融有关。因此, 古亚洲洋的闭合时限应该不早于该玄武岩的喷发时间 (~260 Ma), 并且同期存在古亚洲洋板块向北方的西伯利亚或者南蒙古微陆块的俯冲。

关键词: 中亚造山带; 玄武岩; 元素地球化学; Sr-Nd 同位素

中图分类号: P579; P618.45

文献标识码: A

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2015.04.018

作者简介: 孙海瑞, 男, 1987 年生, 博士后, 从事矿床学研究. E-mail: HaiRuiSun@126.com

Geochemical Characteristics and Geological Significance of 260 Ma Basalt from Inner Mongolia, China

SUN Hai-rui^{1,2,3,4}, HUANG Zhi-long⁴, YAN Zai-fei⁴, YAN Guang-sheng^{1,2}, LU Zhi-cheng^{1,2}

(1. Development Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China; 2. Technical Guidance Center of Mineral Exploration, Ministry of Land and Resources, Beijing 100120, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Diyanqinamu basalt emplaced at ~260 Ma and located at the eastern part of Central Asian Orogenic Belt (CAOB). Geochemical results show that these basalts are enriched in LREE and depleted in HREE with distinct positive Eu anomaly and minor/no Ce anomaly. In the view of trace elements composition normalized to primitive mantle, they are also enriched in LILES (such as Rb, Ba and Th) and depleted in HFSES (such as Nb, Ta, Zr and Hf). In addition, they are consistent with relatively high Nb/Ta ratios (>17), low initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios (0.7026—0.7032) and positive $Nd(t)$ (3.6—4.5). These geochemical signatures indicate that the basalts from Diyanqinamu district are similar to the volcanics distributed along the subduction belt of the world. Compared with regional geological information, however, the basalts most probably inherited the geochemical information from history subduction events and sourced from the depleted lithospheric mantle with some contribution of asthenosphere material while the crustal contamination is feeble. Element discrimination diagram and regional geological analysis indicate that the

收稿日期: 2014-9-18

基金项目: 中国科学院矿床地球化学国家重点实验室“十二五”项目群 (编号: SKLOGD-ZY125-02); 山东黄金集团科研项目

* 通讯作者, E-mail: huangzhi-long@vip.gyig.ac.cn

formation of basalts from Diyanqinamu are connected with the lithospheric mantle partial melting triggered by the upwelling of asthenosphere material under back-arc extension environment. Then, the closure of Paleo-Asian Ocean should be later than the eruption age of the basalts (~260 Ma). Meanwhile, the paleo-Asian Ocean plate is subducting underneath the Siberian Plate or South Mongolia Microplate.

Keywords: geochemistry; basalt; Diyanqinamu; CAO

中亚造山带位于西伯利亚克拉通、华北克拉通以及塔里木克拉通之间宽约 300 km 的地带上,由古亚洲洋板块的俯冲消减,岛弧、微陆块以及残存洋壳的拼合形成^[1-7]。该造山带是全球显生宙陆壳增生与改造最为显著的地区之一,也是近年来研究的热点地区^[8-11]。目前,重建中亚造山带的形成和演化历史是该地区最为重要的研究内容^[1,9,12],然而,解决这一问题的关键是精确确定古亚洲洋的闭合时间和空间位置。目前,普遍认同索伦缝合带是古亚洲洋缝合的最终位置^[4,6,13-17],但是,关于古亚洲洋最终闭合的时间尚存在诸多争议。对于古亚洲洋闭合时限的认识有早志留世-泥盆纪^[18]、中泥盆世^[15]、晚泥盆世-早石炭世^[19-20]、晚石炭世^[21]、晚二叠世^[16,22-23]、二叠纪-三叠纪^[13-14,17,24]、早三叠世^[4]以及白垩纪^[25]。此外,关于古亚洲洋闭合前大洋板块的俯冲形式也争议较大,主要认识有两种有:(1)双向俯冲,即同时存在向南(华北克拉通)和向北(西伯利亚板块或南蒙古微陆块)的俯冲^[16,26-28],(2)只存在向南的单向俯冲^[29-30]。由此可见,是否存在向北方西伯利亚或者南蒙古微陆块的俯冲也是目前争论的焦点。

迪彦钦阿木位于内蒙古东乌珠穆沁旗东北部,地处索伦缝合带和贺根山蛇绿岩带以北的乌里雅斯太晚古生代活动陆源之上^[16,31]。由于该区第四系覆盖严重,中/晚二叠世玄武岩露头在野外不易被发现。在找矿过程中,通过钻探工程发现厚层玄武岩(由于岩石发生蚀变,早期认为是安山岩^[32])。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究表明,该区玄武岩就位于 260±4 Ma (中/晚二叠世),并发现三颗时代为 797、830 和 1113 Ma 的老锆石^[32]。中/晚二叠世玄武岩在本区尚属首次发现,通过地球化学研究,能够为揭示该区晚古生代区域大地构造背景以及限制古亚洲洋的闭合时限提供重要信息。鉴于此,本文开展了岩石学、元素和 Sr-Nd 同位素地球化学的系统研究,以深入分析本区玄武岩形成的古构造环境,进而为解决古亚洲洋的闭合时限,揭示同期古亚洲洋板块的俯冲形式提供依据。

1 区域地质和岩石学特征

中亚造山带又称阿尔泰造山带,其形成与古亚洲洋的演化密切相关(图 1A)^[6]。索伦缝合带位于该造山带的东部,被多数学者认为是古亚洲洋闭合的最终位置。迪彦钦阿木钼矿位于该缝合带以北的晚古生代活动大陆边缘之上(图 1B)。晚古生代至早中生代该区主要受古亚洲洋构造域制约,中-晚中生代所处构造环境较为复杂,可能受到蒙古-鄂霍茨克构造域和古太平洋构造域的影响^[33-34]。本区及邻区古生代-中生代火山-沉积岩分布广泛,各类侵入岩十分发育,为中亚造山带的重要组成部分^[35-37]。

研究区及邻区均为草原覆盖区,出露地层连续性较差,但古生代和中生代地层均有不同程度分布^[38]。该区基底由奥陶系和泥盆系的碎屑岩、中基性火山岩和火山碎屑岩组成;其上为石炭系陆相酸性火山熔岩、火山碎屑岩和碎屑岩组合;早二叠统为海相火山岩、火山碎屑岩及沉积岩组合,并被侏罗系的陆相碎屑岩和中性火山岩不整合覆盖^[35]。受古蒙古洋、西伯利亚板块和华北板块的多期次俯冲、碰撞和对接作用影响,区域内各种类型的侵入岩广泛分布。其中,以晚古生代花岗岩最为发育,中生代侵入岩次之。

由于草原区第四系覆盖较为严重,中/晚二叠世玄武岩在本区尚属首次发现。在迪彦钦阿木钼矿区内,玄武岩主要分布在矿区东南部的深部(图 1C),厚度较大,由于尚未穿透,所以其真实厚度尚未确定。岩石呈黑色、灰黑色等,无斑或少斑结构,基质具间粒结构,普遍见有杏仁构造(图 2)。斑晶以斜长石为主,含量约为 5%;基质主要为无定向排列的细小斜长石,并分布有少量辉石和磁铁矿;岩石蚀变较弱,以绢云母化为主(图 2)。

2 样品采集及分析方法

玄武岩样品均采自迪彦钦阿木钼矿矿区内的岩芯(图 1C)。样品经磨片观察和鉴定后,挑选蚀变较弱的玄武岩进行化学分析。主量元素在澳实分析检测有限公司(广州)采用 X 射线荧光光谱(XRF)分析,分析精度优于±2%。微量元素分析在中国科

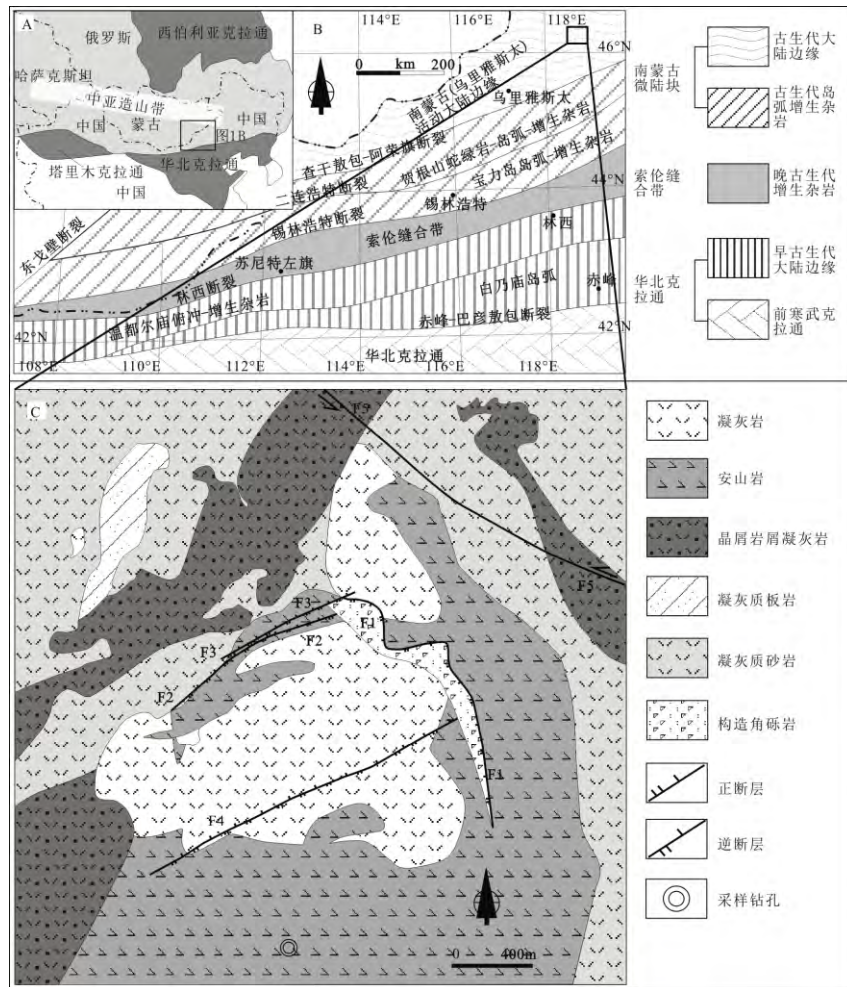


图 1 中亚造山带东段以及迪彦钦阿木钼矿矿区地质简图 (据 Sun 等^[37]和 Xiao 等^[16]修改)
 Fig. 1. Simplified geological map of the eastern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and Diyanqinamu Mo Deposit.

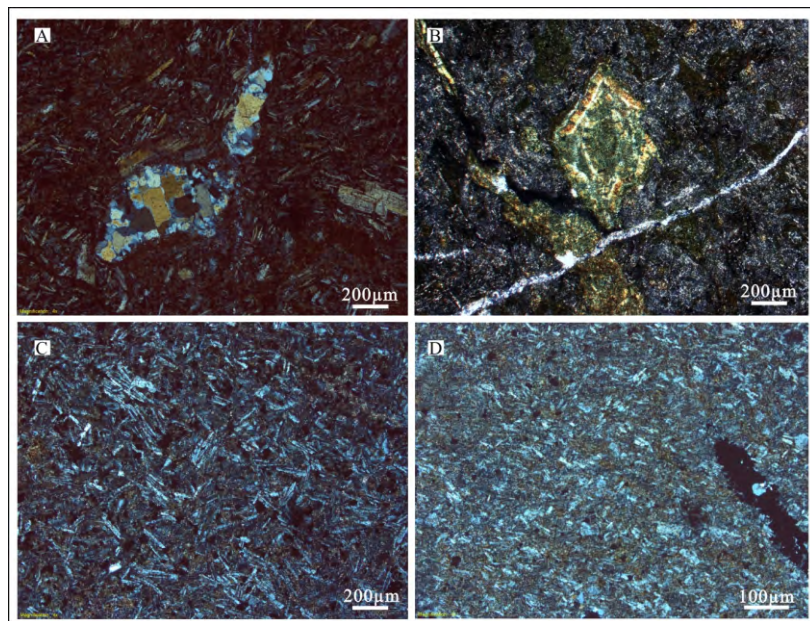


图 2 玄武岩的杏仁构造 (A 和 B) 和显微结构 (C 和 D) 照片。
 Fig. 2. Microphotos of basalt from Diyanqinamu Mo Deposit.

学院地球化学研究所矿床国家重点实验室完成，采用仪器为电感耦合等离子质谱 (ICP-MS)。微量元素分析方法详见文献[39]。微量元素分析采用国际标样 OU-6 和 GBPG-1 和国内标样 GSR-1 和 GSR-3 作为质量监控。稀土元素的分析精度优于±5%，其它微量元素的分析精度优于±10%。Sr-Nd 同位素分析在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室 TIMS 实验室完成。Sr 和 Nd 的分析流程相似，首先将 100 mg 粉末样品溶解于纯化的 HF+HClO₄ 混合试剂中，在高温下完全溶解。Rb、Sr 和 Sm、Nd 的分离和纯化采用传统的阳离子交换树脂方法进行。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测定值分别用 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.1194 和 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.7219 进行标准化，分析误差用 2σ 表示。NBS-987 标样的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为 0.710254±5 (2σ)，标样 La Jolla 和 Jndi-1 的 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值为 0.511544±3 (2σ) 和 0.512104±5 (2σ)。其中参与同位素计算的 Rb、Sr 和 Sm、Nd 的元素含量均来自上述微量元素分析方法所获得数据，采用计算的玄武岩年龄为 260 Ma^[32]。

3 分析结果

3.1 主量和微量元素

从表 1 可以看出，玄武岩的主量元素含量变化较大，但总体较为一致。其它氧化物与 SiO₂ 在含量上具有明显的线性关系(图 3)。TiO₂ 含量为 1.12%~2.39%，平均值为 1.66%；Al₂O₃ 含量为 14.63%~18.62%，平均值为 16.23%；TFe₂O₃ 含量为 6.50%~13.56%，均值为 9.71%；Mg[#] 介于 46.8 和 55.2 之间，均值为 50.5。所有玄武岩均具有 Na₂O>K₂O 的特点，说明该基性岩浆并不是钾质岩浆。由于本区玄武岩受到了一定程度的蚀变，用 TAS 图解判别岩石类型可能存在偏差。因此，我们选择一些蚀变过程中不活泼的元素来做岩石类型的进一步判别。Nb、Y、Zr 均为不活泼微量元素，较少受到蚀变和变质作用的影响，对于碱性和亚碱性系列火山岩，其 Nb/Y 比值的区间范围十分稳定，尤其对于基性、中基性和中酸性岩石，其碱性和亚碱性的系列的区分主要取决于 Nb/Y 比值，而较少受到 SiO₂ 含量变化的影响。在 Nb/Y-Zr/TiO₂ 和 Na₂O+K₂O-TFe₂O₃-MgO 图解上，所有岩石均落入亚碱性玄武岩(图 4)和钙碱性区域内(图 5)，说明他们均属于钙碱性系列玄武质岩石。

玄武岩的稀土和微量元素分析结果及相关参数见表 1。从表 1 可以看出所有玄武岩样品具有相近的稀土元素总量 (ΣREE 含量为 88.2×10⁻⁶~148×

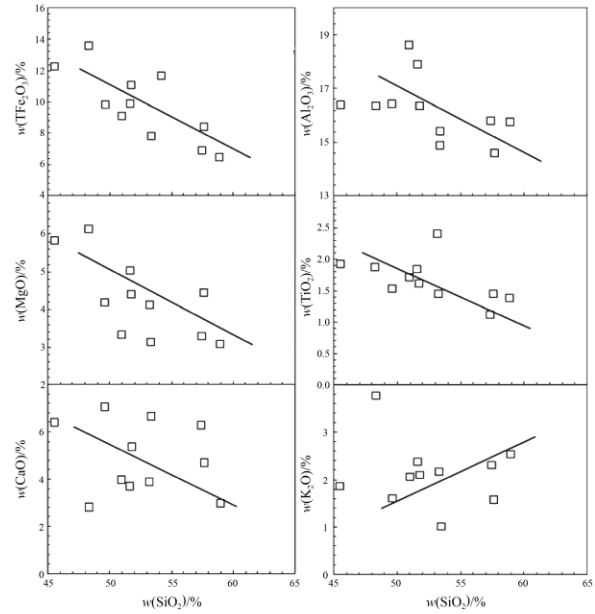


图 3 迪彦钦阿木钼矿区玄武岩 Haker 图解
Fig. 3. Haker diagrams for basalt from Diyanqinamu Mo Deposit.

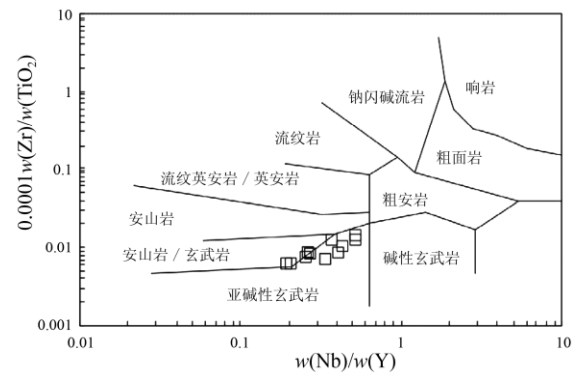
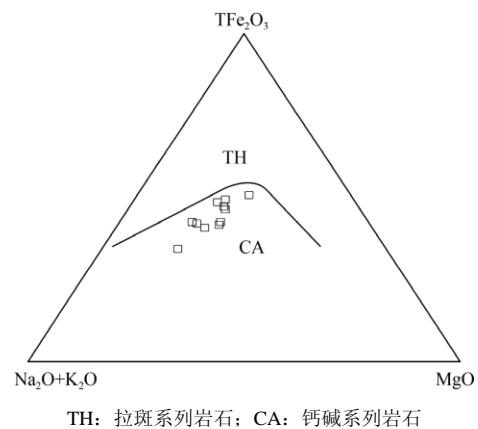


图 4 Nb/Y-Zr/TiO₂ 岩石类型判别图解
(底图据 Winchester 和 Floyd^[63])
Fig. 4. Rock type discrimination diagram for Nb/Y-Zr/TiO₂.



TH: 拉斑系列岩石; CA: 钙碱系列岩石
图 5 钙碱性岩石和拉斑玄武质岩石判别图解 (底图据 Irvine 和 Baragar^[69])
Fig. 5. Discrimination diagram for sub-alkaline rocks.

表 1 迪彦钦阿木玄武岩主量 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果
Table 1. Major and trace elements composition of basalts from Diyanqinamu area

样品	SHK3-1	SHK3-2	SHK3-3	SHK3-4	SHK3-5	SHK3-6	SHK3-7	SHK3-8	SHK3-9	SHK3-10	SHK3-11
深度/m	140	160	290	380	420	490	496	530	540	580	600
SiO ₂	51.02	45.56	51.67	53.37	48.35	49.66	51.80	53.25	58.93	57.44	57.65
Al ₂ O ₃	18.62	16.37	17.89	15.43	16.36	16.41	16.35	14.88	15.78	15.81	14.63
TFe ₂ O ₃	9.05	12.25	9.85	7.81	13.56	9.79	11.03	11.70	6.50	6.91	8.40
CaO	3.97	6.38	3.66	6.66	2.78	7.03	5.34	3.88	3.03	6.30	4.68
MgO	3.33	5.82	5.01	3.12	6.11	4.18	4.38	4.47	3.09	3.28	4.44
Na ₂ O	5.89	3.29	4.91	5.72	4.51	4.22	3.98	4.58	5.80	3.67	4.87
K ₂ O	2.04	1.85	2.36	1.01	3.77	1.59	2.08	2.46	2.54	2.32	1.58
TiO ₂	1.71	1.92	1.61	1.52	2.39	1.87	1.83	1.45	1.37	1.12	1.44
MnO	0.13	0.20	0.12	0.19	0.12	0.30	0.14	0.17	0.23	0.13	0.12
P ₂ O ₅	0.57	0.59	0.59	0.48	0.39	0.47	0.47	0.26	0.52	0.41	0.47
LOI	3.22	5.40	1.90	4.36	1.64	3.83	1.89	2.19	2.09	1.48	1.41
Total	99.55	99.63	99.57	99.67	99.98	99.35	99.29	99.29	99.88	98.87	99.69
V	188	199	220	185	278	144	197	189	116	124	201
Rb	218	231	470	307	620	81.8	163	214	310	313	137
Sr	749	666	1040	526	449	374	651	506	548	345	577
Ba	292	238	441	195	155	89.4	214	90.5	230	360	108
Zr	142	132	195	133	145	156	136	89	167	160	146
Hf	4.14	3.56	3.82	3.46	3.48	3.76	3.73	2.23	3.91	3.70	3.18
Nb	7.13	6.37	8.04	6.08	5.31	7.49	6.56	3.87	7.75	7.39	6.97
Ta	0.509	0.449	0.718	0.411	0.458	0.504	0.444	0.322	0.543	0.525	0.625
Pb	18.0	19.5	11.5	9.75	3.61	42.3	11.4	46.3	11.4	20.5	5.00
Th	3.01	1.80	2.48	1.95	1.12	3.93	2.01	0.79	5.01	5.21	2.28
U	1.09	0.76	0.90	1.42	0.57	1.15	0.80	0.67	1.92	1.91	0.80
La	25.3	20.6	25.4	16.8	15.6	23.4	18.8	12.7	24.3	23.6	23.0
Ce	56.0	47.2	58.9	40.4	39.6	49.6	43.5	32.0	48.1	45.7	52.9
Pr	7.30	6.72	7.07	5.73	5.31	6.39	6.19	4.22	5.65	5.46	6.13
Nd	31.8	29.2	26.0	26.0	25.6	25.7	27.8	19.0	21.8	20.2	25.4
Sm	6.87	6.11	7.07	6.12	6.10	5.14	6.63	4.69	4.23	3.96	4.61
Eu	2.40	2.17	1.79	2.05	2.51	1.72	2.19	2.48	1.17	1.13	1.60
Gd	4.82	4.11	5.15	4.33	5.88	3.31	4.46	4.66	2.91	2.59	4.40
Tb	0.90	0.73	0.74	0.80	0.89	0.62	0.85	0.73	0.52	0.47	0.63
Dy	5.13	3.90	3.67	4.62	4.73	3.35	4.84	3.53	2.82	2.50	2.93
Ho	1.13	0.782	0.734	0.959	0.933	0.706	1.04	0.687	0.595	0.556	0.549
Er	3.02	2.18	1.93	2.61	2.40	1.96	2.67	1.78	1.71	1.62	1.45
Tm	0.38	0.26	0.25	0.32	0.35	0.25	0.33	0.22	0.20	0.19	0.19
Yb	2.59	1.57	1.63	2.06	2.11	1.64	2.18	1.30	1.39	1.29	1.18
Lu	0.375	0.234	0.240	0.304	0.298	0.243	0.306	0.179	0.206	0.182	0.187
Y	26.0	18.7	21.5	23.0	25.8	18.1	25.5	20.1	14.9	13.9	15.8
Mg [#]	46.2	52.5	54.2	48.2	51.2	49.9	48.1	44.8	52.6	52.5	55.2
Na ₂ O/K ₂ O	2.89	1.78	2.08	5.66	1.20	2.65	1.91	1.86	2.28	1.58	3.08
∑REE	148	126	143	113	112	124	122	88	116	109	125
(La/Yb) _n	7.00	9.42	5.86	16.36	11.18	10.24	6.20	5.30	7.01	12.79	13.98
Ti/V	51.4	58.0	43.9	43.1	51.5	77.8	55.8	46.0	70.7	54.1	42.9
Ba/Th	97	132	178	100	138	22.7	107	115	45.9	69.1	47.4
Nb/Zr	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05
Nb/Ta	14.0	14.2	11.2	14.8	11.6	14.9	14.8	12.0	14.3	14.1	11.2

10⁻⁶)。在稀土元素球粒陨石标准化配分曲线上, LREE (轻稀土元素) 和 HREE (重稀土元素) 分馏明显[(La/Yb)_N=5.30~16.36], 具有明显地右倾配分特征, 同时展现出明显的 Eu 正异常而无明显 Ce 异常 (图 6A)。在微量元素原始地幔标准化图解上, 本区玄武岩明显富集 LILE (大离子亲石元素) Rb、U、K, 以及 Pb, 亏损 HFSE (高场强元素) Nb、Ta 和 Ti (图 6B)。

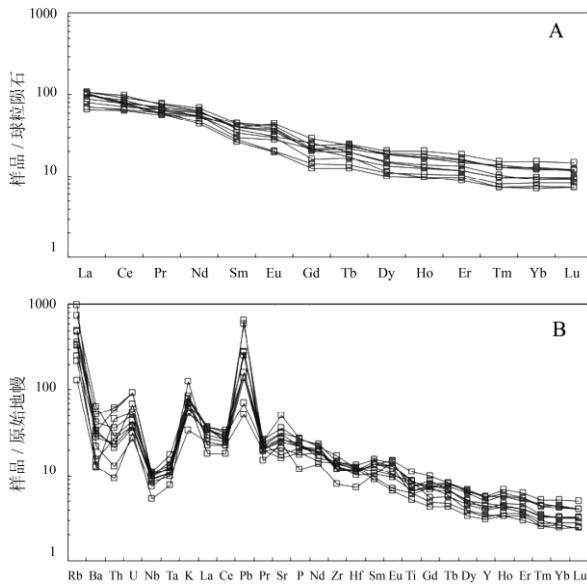


图 6 稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔蛛网图

(球粒陨石和原始地幔值引自 Sun 和 McDonough^[41])

Fig. 6. CI Chondrite normalized REE patterns and primitive mantle normalized patterns of trace elements in basalt.

3.2 Sr-Nd 同位素

玄武岩的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 2。分析结果表明, 所有玄武岩样品的 Sr 和 Nd 同位素组成变化范围较小, 玄武岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 测试值变化范围为 0.705239 ~ 0.707791, ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 测试值为 0.512701~0.512788。经计算得其初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值变化范围为 0.7026~0.7033, 平均值为 0.7028, ε_{Nd}(t) 变化范围为 3.6~4.6, 平均值为 4.0。总体可以看出,

玄武岩的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值以及 ε_{Nd}(t) 较为一致。

4 讨论

4.1 岩浆源区

岩浆系列是判别构造环境的重要依据之一^[40]。图 3 表明, 研究区玄武岩的氧化物含量具有较大的变化范围, 与 SiO₂ 具有明显的线性关系。此外, 所有玄武岩均展现出较低含量的 MgO 以及其它相容元素 (如 Cr、Ni 等), 稀土和微量元素展布特征也几乎一致 (图 6A、B)。La/Sm 比值有随 La 含量升高而增大的趋势 (图 7), 暗示本区玄武岩主要受部分熔融作用的控制, 而结晶分异影响较弱。总体分析表明它们可能为同一岩浆的演化产物。

图 6 可以看出, 本区玄武岩显富集 LREE、LILE 和 Pb、亏损 HFSE (Nb、Ta、Ti), 并具有较低的 Nb/Ta 比值 (<17^[41]), 总体展现出火山弧环境火山岩的地球化学特征^[42]。然而, 大陆地壳或岩石圈地幔的混染作用也可以给出类似消减带的信号, 并导致受到混染的大陆玄武岩被误判为岛弧玄武岩^[43]。但是, 该区玄武岩的运移过程中不可能受到大规模陆壳物质的混染, 主要证据为: (1) 已有年代学研究结果表明, 该玄武岩中具有古老年龄的捕虏锆石

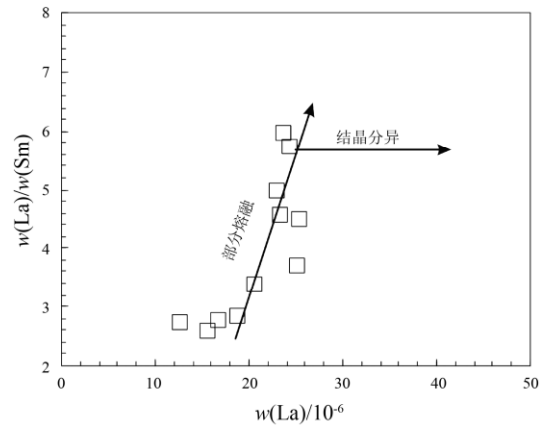


图 7 迪彦钦阿木矿区玄武岩 La-La/Sm 图解

Fig. 7. La-La/Sm diagram for basalt from Diyanqinamu Mo Deposit.

表 2 迪彦钦阿木地区玄武岩 Sr-Nd 同位素特征

Table 2. Rb, Sr, Sm and Nd isotope composition of basalts from Diyanqinamu area

样品	w _B /10 ⁻⁶				⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	ε _{Nd} (t)
	Rb	Sr	Sm	Nd						
SHK3-1	218	749	6.87	31.8	0.705749	12	0.7026	0.512746	2	4.3
SHK3-3	470	1040	7.07	26.0	0.707506	8	0.7027	0.512765	2	3.6
SHK3-6	82	374	5.14	25.7	0.705239	10	0.7024	0.512701	2	3.8
SHK3-7	163	651	6.63	27.8	0.705436	8	0.7028	0.512749	2	4.0
SHK3-8	214	506	4.69	19.0	0.707791	12	0.7033	0.512788	4	4.6

很少^[32]; (2) 相较于地壳而言, 本区玄武岩的不相容元素含量均较高, 即使是最低 SiO₂ 含量的玄武岩也具有较高的不相容元素含量; (3) 所有样品的初始 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 均较为一致, 不存在较大的变化, 并且与 1/Sr 没有相关性 (图 8); (4) 元素比值 (Nb/Ta、Bb/Zr、Ba/Th 以及 Ti/V) 几乎一致。以上证据均说明在玄武岩岩浆的运移过程中陆壳物质混染的程度很弱, 玄武岩主要继承了其岩浆源区地球化学特征。此外, 从表 1 可以看出, Ba/Th 比值随 Nb/Zr 的变化而基本保持一致, 说明本区玄武岩主要受俯冲作用控制而与富集地幔没有联系^[44]。但是, 碰撞后的岩浆活动会携带与俯冲作用有关的地球化学印记, 这种现象可能与早期进入到岩浆源区的由俯冲作用带入的流体有关, 以至于碰撞后的板内岩浆活动继承某些俯冲带岩浆活动的地球化学特征^[45-48], 即稍晚于俯冲事件的岩浆活动也是可以呈现出其源区早期受俯冲事件改造的特征。此外, Sr-Nd-Pb 同位素图解显示所用火山岩均位于 MORB 附近 (图 9), 与锡林浩特部分玄武岩相似。因此, 我们推测该基性岩浆来源于早期受俯冲改造的岩石圈地幔的部分熔融, 同时岩浆上升过程中经历了较弱程度的结晶分异, 但期间受地壳混染的程度不高。

4.2 构造环境和古亚洲洋闭合时限

玄武质岩石常常出现在大洋和大陆弧环境^[49]。从判别图解可以看出, 本区所有玄武岩均落于火山弧和板内环境 (图 10-12)。此外, 所有玄武岩样品的 Ti/V 比值均大于 20 (表 1), 与岛弧玄武岩具有明显的差异^[50]。说明这些玄武岩并非典型的板内玄

武岩也不是典型的火山弧玄武岩。这种复杂的特征与新疆三塘湖盆地二叠纪玄武岩极为相似, 郝建荣等^[51]认为后者可能为造山后期伸展裂陷的火山作用产物。火山岩的 Ce 异常是火山岩形成环境的重要标志, Ce 负异常说明火山岩形成于海相环境, 而无 Ce 异常者形成于陆相环境^[40]。研究区所有玄武岩均无明显 Ce 异常, 说明其可能形成于陆相环境。近年来研究表明, 在早二叠世, 迪彦钦阿木地区位于乌拉雅斯太活动大陆边缘之上^[16,52-53]。因此, 本区玄武岩地球化学特征虽与火山弧玄武岩虽有相似之处, 但极有可能是形成于板内伸展环境。板内伸展可以出现在多种环境, 地幔柱引起的大陆裂解、造山后板片拆沉以及俯冲板片断离等。然而, 地球化学特征表明, 该区玄武岩具有明显的亏损地幔的特征, 明显与地幔柱无关。

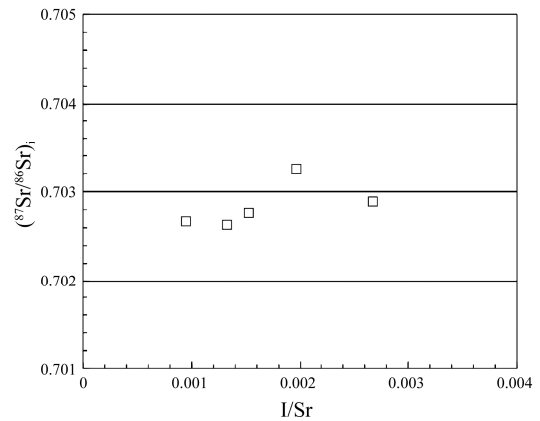
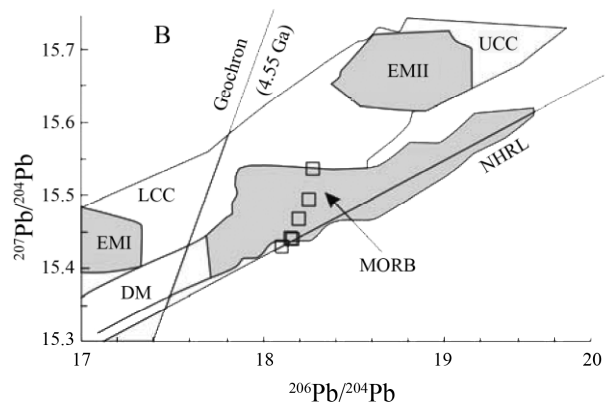
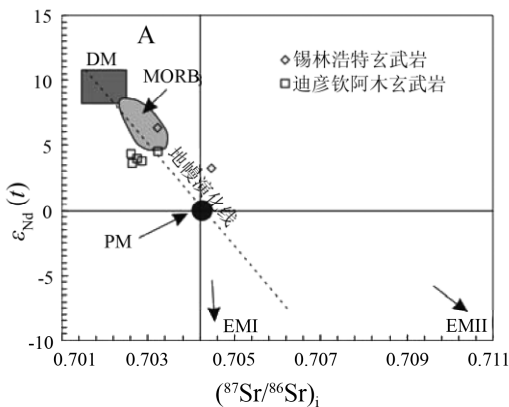


图 8 迪彦钦阿木矿区玄武岩 1/Sr-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 图解
Fig. 8. 1/Sr-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i diagram for basalt from Diyanqinamu Mo Deposit.



NHRL-北半球 Pb 同位素演化参考线; UCC-上地壳; LCC-下地壳; DM-亏损地幔; EM I 和 EM II 均为富集地幔; MORB 为洋中脊玄武岩

图 9 大兴安岭地区玄武岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i vs. εNd(t) 和 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 图解. 锡林浩特玄武岩 Sr-Nd 同位素数据来自张连昌等^[64], 迪彦钦阿木玄武岩的 Pb 同位素数据来自 Sun 等^[32] (底图据 Zindle 和 Hart^[65])

Fig. 9. (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i vs. εNd(t) and ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb diagrams for basalts from the Great Xing'an Range.

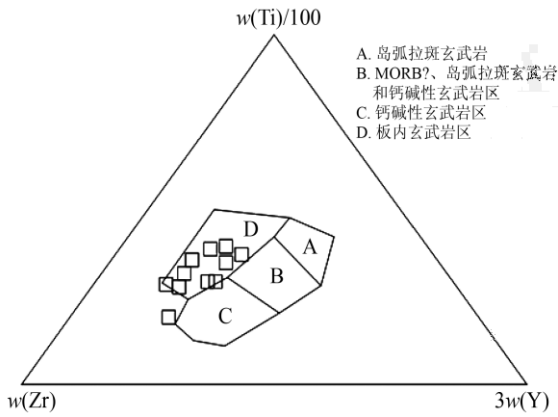


图 10 玄武岩 Ti-Zr-Y 构造环境判别图解
(底图据 Pearce 和 Cann^[66])

Fig. 10. Ti-Zr-Y diagram for volcanis from Diyanqinamu Mo Deposit.

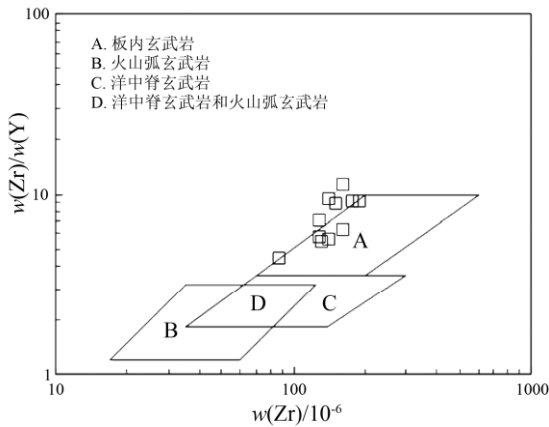


图 11 玄武岩 Zr-Zr/Y 构造环境判别图解
(底图据 Pearce 和 Norry^[67])

Fig. 11. Zr-Zr/Y diagram for volcanis from Diyanqinamu Mo Deposit.

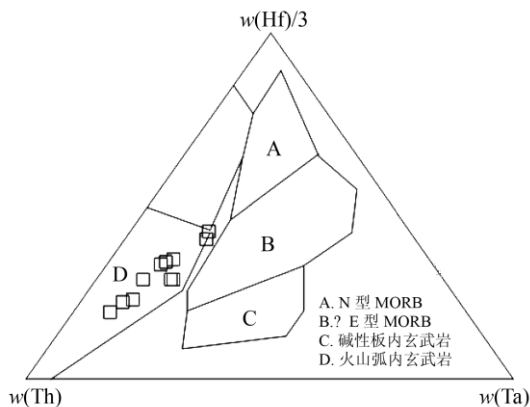


图 12 玄武岩 Hf-Th-Ta 构造环境判别图解
(底图据 Wood^[68])

Fig. 12. Hf/3-Th-Ta diagram for volcanis from Diyanqinamu Mo Deposit.

大量研究认为，花岗岩的研究对于古构造环境的分析具有重要意义。张万益等^[38]认为位于研究区东北部的阿尔哈达 A 型花岗岩 (~220 Ma) 形成于造山后的伸展环境，说明同期古亚洲洋已经闭合。但是，对邻区花岗岩的统计发现，与本区玄武岩同时代的花岗岩多数与俯冲和碰撞有关^[23,54-57]。除花岗岩研究外，古生物研究认为内蒙古中部在中二叠世时仍然有古大洋残存^[58]。古地磁研究也证实西伯利亚板块在石炭纪至晚二叠世基本保持稳定，而华北板块则明显向北漂移^[58]。这些证据均说明，古亚洲洋在晚二叠世时尚未闭合，造山后伸展也不能解释形成本区玄武岩的特殊构造环境。

除上述与俯冲和碰撞有关的花岗岩外，沿兴安造山带贺根山-黑河一线分布有大量的晚古生代 A 型花岗岩，并呈现出明显的线性分布特征。通过 Sm-Nd 同位素研究，洪大卫等^[60]认为这些花岗岩的形成有幔源物质的加入。Wu 等^[60]通过年代学和地球化学的系统研究，认为这些 A 型花岗岩的形成时代集中在 290~260 Ma，并且与俯冲板块断离有关。然而，随着该碱性岩带上更多 A 型花岗岩的发现，张磊等^[36]认为这些 A 型花岗岩的侵位应集中在 325~260 Ma，而不是 Wu 等^[60]所认为的 290~260 Ma。如此大的时间跨度 (~70 Ma) 似乎很难从板片断离的角度解释。张磊等^[36]认为在活动陆缘环境下，大洋板块以高角度俯冲时会诱发软流圈物质对流上涌，在到达岩石圈底部时转而向两侧分流，这种分流张力即而成为弧后陆壳伸展的动力来源，活动陆缘在这种张力下形成了弧后的伸展环境，从而促进了高温 A 型花岗岩的形成。研究区玄武岩形成于 ~260 Ma，位于该贺根山-黑河碱性岩带的中部，并与该碱性岩带上的 A 型花岗岩具有相似的 Sm-Nd 同位素组成。由此可见，本区玄武岩与该碱性岩带上碱性花岗岩的分布在时间和空间上是重叠的，很可能形成于活动大陆边缘的弧后伸展环境。

值得一提的是，中亚造山带是全球最重要的地壳增生和金属成矿带之一，也是近年来研究的热点地区之一^[62]，关于其东段的闭合时限目前仍有诸多争议。例如，De Jong 等^[22]提出闭合时间为晚二叠世、Eizenhofer 等^[13]认为二叠纪-三叠纪以及 Han 等^[4]提出早三叠世，等等。通过上述系统的地球化学分析和区域地质对比，本区中/晚二叠世玄武岩很可能形成于古亚洲洋向北俯冲的弧后伸展环境，从侧面说明此时华北板块和西伯利亚板块尚未最终闭合，进而将其闭合时限限定为 260 Ma 之后。

5 结论

通过对迪彦钦阿木钼矿区~260 Ma 玄武岩元素和同位素地球化学系统的研究, 我们得出以下几点结论:

(1) 本区玄武岩属钙碱性系列岩石, 其形成主要受部分熔融作用的控制, 结晶分异作用较弱; 岩浆源区主要为岩石圈地幔, 可能有少量软流圈物质的加入, 但岩浆演化过程壳源物质混染微弱。

(2) 该区位于索伦缝合带以北的弧后区域, 玄武岩的形成与弧后伸展环境有关。

(3) 结合区域地构造演化, 本文推测古亚洲洋东段的闭合时间不早于 260 Ma。

致谢: 感谢锡林郭勒盟金仓矿业有限责任公司朱兆庆工程师、杨松学工程师以及中国科学院地球化学研究所丁伟博士、甘婷博士、杜丽娟博士在野外地质考察中的支持与帮助。

参考文献:

- [1] Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21(1): 87-110.
- [2] Cope T, Ritts, B D, Darby B J, Fildani A, Graham S A. Late Paleozoic sedimentation on the northern margin of the North China block: implications for regional tectonics and climate change [J]. *International Geology Review*, 2005, 47(3): 270-296.
- [3] Dobretsov N. Evolution of the structures of Urals, Kazakhstan, Tien Shan, and Altai-Sayan region within the Ural-Mongolian fold belt [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2003, 44: 5-27.
- [4] Han J, Zhou J B, Wang B, Cao J L. The final collision of the CAOB: constraint from the zircon U-Pb dating of the Linxi Formation, Inner Mongolia [J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6(2): 211-225.
- [5] Heubeck C. *Assembly of Central Asia During the Middle and Late Paleozoic* [C]. Memoirs-Geological Society of America, 2001: 1-22.
- [6] Sengor A M C, Natalin B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid Tectonic Collage and Paleozoic Crustal Growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299-307.
- [7] Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia [J]. *American Journal of Science*, 2004, 304(4): 370-395.
- [8] Hong D W, Wang S G, Xie X L, Zhang J S, Wang T. Metallogenic province derived from mantle sources: Nd, Sr, S and Pb isotope evidence from the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2003, 6(4): 711-728.
- [9] Jahn B M., Wu F Y, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh-Earth Sciences*, 2000, 91: 181-193.
- [10] Jahn B M, Capdevila R, Liu D Y, Vernon A, Badarch G. Sources of Phanerozoic granitoids in the transect Bayanhongor-Ulaan Baatar, Mongolia: geochemical and Nd isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23(5): 629-653.
- [11] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1-30.
- [12] Miao LC, Fan W M, Liu D Y, Zhang F Q, Shi Y R, Guo F. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32(5-6): 348-370.
- [13] Eizenhofer P R, Zhao G C, Zhang J, Sun M. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic and sedimentary rocks [J]. *Tectonics*, 2014, 33(4): 441-463.
- [14] Li Y L, Zhou H W, Brouwer F M, Xiao W J, Wijbrans J R, Zhong Z Q. Early Paleozoic to Middle Triassic bivergent accretion in the Central Asian Orogenic Belt: insights from zircon U-Pb dating of ductile shear zones in central Inner Mongolia, China [J]. *Lithos*, 2014, 205: 84-111.
- [15] Tang K D. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north margin of the Sino-Korean Craton [J]. *Tectonics*, 1990, 9(2): 249-260.
- [16] Xiao W J, Windley B F, Hao J, Zhai M G. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22(6), DOI: 10.1029/2002TC001484.
- [17] Zhang X H, Zhang H F, Tang Y J, Wilde S A, Hu Z C. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic Belt [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249(3-4): 262-281.
- [18] Yue Y, Liou J G, Graham S A. *Tectonic Correlation of Beishan and Inner Mongolia Orogens and Its Implications for the Palinspastic Reconstruction of North China* [C]. Memoirs-Geological Society of America, 2001: 101-116.
- [19] Hong D W, Huang H Z, Xiao Y J, Xu H M, Jin M Y. Permian alkaline granites in Central Inner Mongolia and their geodynamic significance [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 1995, 8(1): 27-39.
- [20] 邵济安. 中朝板块北缘中段地壳演化[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991: 1-136.
- [21] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, Kroner A, Basarch G. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of the*

- Geological Society*, 2007, 164: 31-47.
- [22] De Jong K, Xiao W J, Windley B F, Masago H, Lo C H. Ordovician $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ phengite ages from the blueschist-facies Ondor Sum subduction-accretion complex (Inner Mongolia) and implications for the early Paleozoic history of continental blocks in China and adjacent areas [J]. *American Journal of Science*, 2006, 306(10): 799-845.
- [23] 陈斌, 赵国春, Wilde S. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义[J]. 地质论评, 2001, 47(4): 361-367.
- [24] Chen B, Jahn B M, Wilde S, Xu B. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 2000, 328(1): 157-182.
- [25] Nozaka T, Liu Y. Petrology of the Hegenshan ophiolite and its implication for the tectonic evolution of northern China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 202(1): 89-104.
- [26] Li J Y. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(3-4): 207-224.
- [27] Li Y L, Zhou H W, Brouwer F M, Xiao W J, Wijbrans J R, Zhao J H, Zhong Z Q, Liu H F. Nature and timing of the Solonker suture of the Central Asian Orogenic Belt: insights from geochronology and geochemistry of basic intrusions in the Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2014, 103(1): 41-60.
- [28] Xu B, Charvet J, Chen Y, Zhao P, Shi G Z. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1342-1364.
- [29] Jian P, Liu D Y, Kroner A, Windley B F, Shi Y R, Zhang F Q, Shi G H, Miao L C, Zhang W, Zhang Q, Zhang L Q, Ren J S. 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 [J]. *Lithos*, 2008, 101(3-4): 233-259.
- [30] Jian P, Liu D Y, Kroner A, Windley B F, Shi Y R, Zhang W, Zhang F Q, Miao L C, Zhang L Q, Tomurhuu D. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia [J]. *Lithos*, 2010, 118(1-2): 169-190.
- [31] Xiao W J, Windley B F, Huang B C, Han C M, Yuan C, Chen H L, Sun M, Sun S, Li J L. End-Permian to mid-Triassic termination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodynamic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1189-1217.
- [32] Sun H R, Huang Z L, Li W B, Ye L, Zhou J X. Geochronological, isotopic and mineral geochemical constraints on the genesis of the Diyanqinamu Mo deposit, Inner Mongolia, China [J]. *Ore Geology Reviews*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.006>.
- [33] Ying J F, Zhou X H, Zhang L C, Wang F. Geochronological framework of Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, NE China, and their geodynamic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 39(6): 786-793.
- [34] Zhang J H, Gao S, Ge W C, Wu F Y, Yang J H, Wilde S A, Li M, et al.. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination [J]. *Chemical Geology*, 2010, 276(3): 144-165.
- [35] 聂凤军, 江思宏, 张义, 等. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1-574.
- [36] 张磊, 吕新彪, 刘阁, 等. 兴蒙造山带东段大陆弧后 A 型花岗岩特征与成因[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 869-884.
- [37] Sun H R, Huang Z L, Li W B, Leng C B, Ma D Y, Zhang X C. Chronology, geochemistry and Sr-Nd isotope studies of Jurassic intrusions in the Diyanqinamu porphyry Mo mine, central Inner Mongolia, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 88(10): 85-97.
- [38] 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古东乌珠穆沁旗岩浆活动与金属成矿作用[M]. 北京: 中国地质出版社, 2009: 1-131.
- [39] Qi L, Grégoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards Newsletter*, 2000, 24(1): 51-63.
- [40] 张招崇, 周刚, 闫升好, 等. 阿尔泰山南缘晚古生代火山岩的地质地球化学特征及其对构造演化的启示[J]. 地质学报, 2007, 3: 344-358.
- [41] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [42] Woodhead J, Hergt J M, Davidson J P, Eggins S M. Hafnium isotope evidence for 'conservative' element mobility during subduction zone processes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 331-346.
- [43] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 77-89.
- [44] 马昌前, 明厚利, 杨坤光. 大别山北麓的奥陶纪岩浆弧: 侵入岩年代学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 393-402.
- [45] De Jong K., Wang B, Faure M, Shu L S, Cluzel D, Charvet J, Ruffet G, Chen Y. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the Late Palaeozoic tectonic evolution of the western Tianshan (Xinjiang, northwestern China), with emphasis on Permian fluid ingress [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2009, 98(6): 1239-1258.
- [46] Wang K L, Chung S L, O'reilly S, Sun S S, Shinjo R, Chen C H. Geochemical constraints for the genesis of post-collisional magmatism and the geodynamic evolution of the northern Taiwan region [J]. *Journal of Petrology*, 2004, 45(5): 975-1011.
- [47] Zheng Y F, Xiao W J, Zhao G C. Introduction to tectonics of China [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1189-1206.
- [48] 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 等. 内蒙古查干花钼矿区成矿花岗岩地球化学, 年代学及成岩作用[J]. 岩石学报, 2012, 28(2): 409-420.
- [49] Chen L, Zhao Z F, Zheng Y F. Origin of andesitic rocks: Geochemical constraints from Mesozoic volcanics in the Luzong basin, South China [J]. *Lithos*, 2014, 190: 220-239.

- [50] 叶海敏, 叶现韬, 张传林. 新疆西天山尼勒克二叠纪火山岩的地球化学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 2013, (10): 3389-3401.
- [51] 郝建荣, 周鼎武, 柳益群, 等. 新疆三塘湖盆地二叠纪火山岩岩石地球化学及其构造环境分析[J]. 岩石学报, 2006, (1): 189-198.
- [52] Li D P, Chen Y L, Wang Z, Lin Y, Zhou J. Paleozoic sedimentary record of the Xing-Meng Orogenic Belt, Inner Mongolia: Implications for the provenances and tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(7): 776-785.
- [53] 江小燕, 刘永江, 周冰, 等. 大兴安岭南段兴-蒙草原区二叠纪砂岩物源分析[J]. 地质通报, 2011, 30(7): 1085-1098.
- [54] 陈军林, 何雨栗, 杨国林, 等. 内蒙古苏左旗北部晚二叠世花岗岩地球化学特征及意义[J]. 高校地质学报, 2014, 20(1): 68-80.
- [55] 刘治博, 张维杰. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒中二叠世石英闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质学报, 2014, 88(2): 198-207.
- [56] 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 乌拉特中旗二叠纪 I 型花岗岩类地球化学特征及构造意义[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, (5): 805-820.
- [57] 冉焱, 张维杰, 刘治博. 内蒙古阿拉善右旗杭嘎勒晚二叠世二长花岗岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2012, 31(10): 1565-1575.
- [58] Shang Q H. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol (Inner Mongolia) and their geological significance to the Northern China Orogen [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2613-2619.
- [59] 任收麦, 黄宝春. 晚古生代以来古亚洲洋构造域主要块体运动学特征初探[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 113-120.
- [60] 洪大卫, 肖宜君, 徐海明, 等. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义[J]. 地质学报, 1994, 68(3): 219-230.
- [61] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1): 143-173.
- [62] 肖文交, 舒良树, 高俊, 等. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用[J]. 新疆地质, 2008, 26(1): 4-8.
- [63] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.
- [64] 张连昌, 英基丰, 陈志广, 等. 大兴安岭南段三叠纪基性火山岩时代与构造环境[J]. 岩石学报, 2008, (4): 911-920.
- [65] Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1986, 14: 493-571.
- [66] Pearce J A, Cann J. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290-300.
- [67] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69(1): 33-47.
- [68] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50(1): 11-30.
- [69] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8(5): 523-548.