

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*

张万益^{1,2} 聂凤军³ 高延光^{1,4} 刘妍³

ZHANG WanYi^{1,2}, NIE FengJun³, GAO YanGuang^{1,4} and LIU Yan³

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

4. 中国地质调查局, 北京 100037

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

3. Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China

4. China Geological Survey, Beijing 100037, China

2011-10-01 收稿, 2012-01-12 改回.

Zhang WY, Nie FJ, Gao YG and Liu Y. 2012. Geochemical characteristics and genesis of Triassic Chagan Obo alkaline quartz diorites in Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 28(2): 525–534

Abstract Many Triassic alkaline granites have been discovered in southern Siberian plate margin in recent years, and these alkaline granites construct an alkaline granite belt. The Chagan Obo quartz diorite is an important intrusion in this alkaline granite belt. Its formation age was determined as 237Ma using SHRIMP U-Pb method. These alkaline quartz diorites in this intrusion display their SiO₂ contents of 60.70% to 62.67% with an average value of 61.76%, K₂O + Na₂O contents of 9.18% to 10.48% with an average value of 9.74%, and Na₂O > K₂O. These rocks are characterized by total rare earth concentrations from 236.3 × 10⁻⁶ to 260.0 × 10⁻⁶ with an average of 246.5 × 10⁻⁶ and right-decline REE distribution models with LREE/HREE ratios of 18.91 to 20.11 with an average value of 19.48 and slightly negative Eu anomaly. Similarly, they are also characterized by high Sr and Ba but low Y, exhibit Sr, Ba and Y concentrations of 1216 × 10⁻⁶ to 2028 × 10⁻⁶ (average value of 1707 × 10⁻⁶), 1597 × 10⁻⁶ to 1947 × 10⁻⁶ (average value of 1717 × 10⁻⁶), and 12.9 × 10⁻⁶ to 16.5 × 10⁻⁶ (average value of 15.3 × 10⁻⁶), respectively. These geochemical features suggest they belong to adakite-like lithological assemblage. The quartz diorite lithological assemblage shows higher ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (from 18.172 to 18.529 with an average value of 18.314), ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb (from 37.831 to 38.120 with an average value of 38.016), and ε_{Nd}(t) (from 3.3 to 3.8 with an average value of 3.5) but low ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb (from 15.465 to 15.529 with an average value of 15.503) and initial ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr values (from 0.70405 to 0.70411 with an average value of 0.70408), which suggest that the original magma of the quartz diorites was derived from partial melting of residual subducted oceanic slabs after collision between Siberia and China-Korean plates. This original magma was contaminated by ultramafic and K-enriched alkaline fluids. Therefore, these quartz diorites are synchronous products of Triassic alkaline granitoid magmatism in northern margin of Sino-Korean plate. The paper provides new evidence for the end time of finally collision between Siberian and Sino-Korean plates.

Key words Triassic alkaline quartz diorites; Adakite-like lithological assemblage; Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes; Petrogenesis; Inner Mongolia

摘要 近年来在西伯利亚板块南缘发现多处三叠纪碱性花岗岩, 构成了一个碱性花岗岩带。产出在该碱性花岗岩带上的查干敖包石英闪长岩岩体, SHRIMP 年龄为 237Ma。本文通过元素地球化学和同位素地球化学分析, 结果显示 SiO₂ 含量

* 本文受国家重点自然科学基金项目(41030421)和地质矿产调查评价专项项目(1212011085534)联合资助。

第一作者简介: 张万益, 男, 1974 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事矿产勘查及矿床学研究工作, E-mail: wanyizhang0810@qq.com

60.70% ~ 62.67%, 平均值 61.76%; $K_2O + Na_2O$ 为 9.18% ~ 10.48%, 平均值 9.74%, 且 $Na_2O > K_2O$ 。这些岩石具有 REE 总量为 $(236.3 \sim 260.0) \times 10^{-6}$, 平均 246.5×10^{-6} , 右斜式稀土配分模式, LREE/HREE 为 18.91 ~ 20.11, 平均 19.48, 显示微弱的 Eu 负异常的特征。它们也表现高的 Sr 和 Ba 含量、低的 Y 含量, 其中 Sr 为 $1216 \times 10^{-6} \sim 2028 \times 10^{-6}$, 平均为 1707×10^{-6} , Ba 为 $1597 \times 10^{-6} \sim 1947 \times 10^{-6}$, 平均为 1717×10^{-6} 。Y 为 $12.9 \times 10^{-6} \sim 16.5 \times 10^{-6}$, 平均为 15.3×10^{-6} 。 $^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值为 18.172 ~ 18.529, 平均值为 18.314, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 值为 15.465 ~ 15.529, 平均值为 15.503, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 值为 37.831 ~ 38.120, 平均值为 38.016; 初始铈比较集中, 变化于 0.70405 ~ 0.70411, 平均 0.70408; $^{147}Sm/^{144}Nd$ 的比值为 0.0671 ~ 0.0679, 平均 0.06747; $^{143}Nd/^{144}Nd$ 的比值变化范围为 0.512605 ~ 0.512631, 平均值为 0.512619。 $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为正值, 变化范围为 3.3 ~ 3.8, 平均 3.5。Pb、Sr、Nd 同位素特征均显示地幔来源的特征。这些地球化学和同位素特征值指示查干敖包石英闪长岩属于碱性岩类, 源于西伯利亚板块与中朝板块碰撞后, 由残留的古老俯冲洋壳部分熔融并经过富钾的基性幔源物质污染而成, 与中朝板块北缘的三叠纪碱性岩带属同一期次岩浆活动的产物。该成果为西伯利亚板块与中朝板块碰撞闭合的时限提供了新证据。

关键词 三叠纪碱性石英闪长岩; 埃达克岩; 地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素; 岩石成因; 内蒙古

中图法分类号 P588.122

1 引言

兴蒙造山带是目前已知发展历史最长、构造岩浆活动最复杂的一条巨型造山带(任纪舜, 1991)。兴蒙造山带两侧的西伯利亚板块、中朝板块碰撞缝合的位置和时代, 一直是地质学界研究的热点(Tang, 1990; 王荃等, 1991; 洪大卫等, 1994; 徐备和陈斌, 1997; 邵济安等, 1999; Chen *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2003; 石玉若等, 2004; 聂凤军等, 2007; 李锦轶等, 2007)。自 20 世纪 80 年代以来, 许多学者对本区花岗岩的形成机制、地球动力学背景、成岩物质来源及与金属成矿关系等做过深入研究, 试图通过花岗岩岩石学、地球化学、同位素年代学等特征, 探索该区地壳侧向增生与垂向增生的形成机理, 揭示中朝板块、古蒙古洋壳和西伯利亚板块之间的俯冲、碰撞、对接、拼贴和增生的造山过程, 取得了许多重要成果。其中, 关于西伯利亚板块与中朝板块碰撞的时间, 目前致少有泥盆纪(曹从周等, 1986; Zhang and Tang, 1989; Sengor *et al.*, 1993)、晚泥盆世-早石炭世(邵济安, 1991)、石炭纪末期(白登海等, 1993a, b)、自三叠纪初期形成到晚侏罗世-早白垩世结束(李双林和欧阳自远, 1998)、早二叠世末-早三叠世初(王荃, 1986; 樊志永, 1996; 王友等, 1999; Li, 2006; 李锦轶等, 2007; 童英等, 2010)和中生代中期(110 ~ 130Ma)(Nozaka and Liu, 2002)等不同的观点。

兴蒙造山带两侧呈带状分布的碱性岩, 则为板块拼合的时间提供了直接证据。研究者们更多关注西伯利亚板块南缘的二叠纪碱性花岗岩带(洪大卫等, 1994; 孙德有等, 2000; Wu *et al.*, 2002)、中朝板块北缘的三叠纪碱性岩带(阎国翰等, 1989; 洪大卫等, 1994; 张招崇和王永强, 1997), 认为是西伯利亚板块和中朝板块面积和质量的悬殊, 导致碱性岩带形成时间上的有先有后(洪大卫等, 1994), 而对西伯利亚板块南缘的三叠纪碱性岩没有引起足够的重视。近年来, 在白音乌拉-东乌珠穆沁旗碱性花岗岩带及其东延部分的黑河一带, 逐渐发现了许多碱性花岗岩, 其形成时代均为三叠纪(孙德有等, 2004; 石玉若等, 2007)。本文报道的西伯利亚板

块南缘查干敖包石英闪长岩体就是其中之一, 并已获得 SHRIMP 年龄为 237Ma(张万益等, 2008)。为了解该岩体的成因及构造背景, 本文通过岩石学、地球化学、同位素研究, 对该石英闪长岩作进一步研究, 为探讨上述板块拼合过程提供新的证据。

2 地质背景

查干敖包石英闪长岩位于西伯利亚板块东南缘查干敖包-奥尤特-朝不楞早古生代构造-岩浆岩带, 其东南侧就是西伯利亚板块与华北地台的对接带——贺根山-索伦山缝合带。区域范围内出露的地层有中奥陶统、上志留统、泥盆系、下二叠统、侏罗系和白垩系火山-沉积岩以及第三系和第四系沉积物, 其中, 上泥盆统安格爾音乌拉组分布面积较广, 岩性组合为砂岩、粉砂岩、板岩和火山碎屑岩, 为区域范围内重要的容矿围岩。相比之下, 奥陶系多宝山组零星出露于查干敖包及额仁高毕东一带, 根据岩性组合特征, 分上下两个岩段, 其中下岩段岩性主要为绿灰色绿帘石英岩、灰黄色绿帘石透辉石砂卡岩夹铁锌矿层及锰矿化层。

区内岩浆岩分布广泛, 以海西期和燕山期花岗岩最为发育并且与金属矿床具有密切空间分布关系(赵一鸣等, 1994; 洪大卫等, 2003; 聂凤军等, 2004; 金岩等, 2005)。海西期侵入岩大多呈岩滴状侵入于中泥盆统地层中或与晚侏罗统火山岩不整合接触。燕山期岩浆活动在本区表现最为强烈, 侵入岩主要呈岩株、岩基状侵位于朝不楞北东向复背斜和查干敖包北东向复背斜的轴部或两翼, 代表性侵入岩主要为深成相的富钾、碱性偏高的钙碱性花岗岩质石(聂凤军等, 2004)。

区内主干断裂为北东向贺根山-索伦山深断裂和查干敖包-东乌旗深大断裂。褶皱构造发育, 褶皱轴向与区域主干断裂一致, 表现为一系列的北东向复式背斜和向斜。

3 岩石学特征

查干敖包岩体位于查干敖包铁锌矿的北东侧(图 1), 东

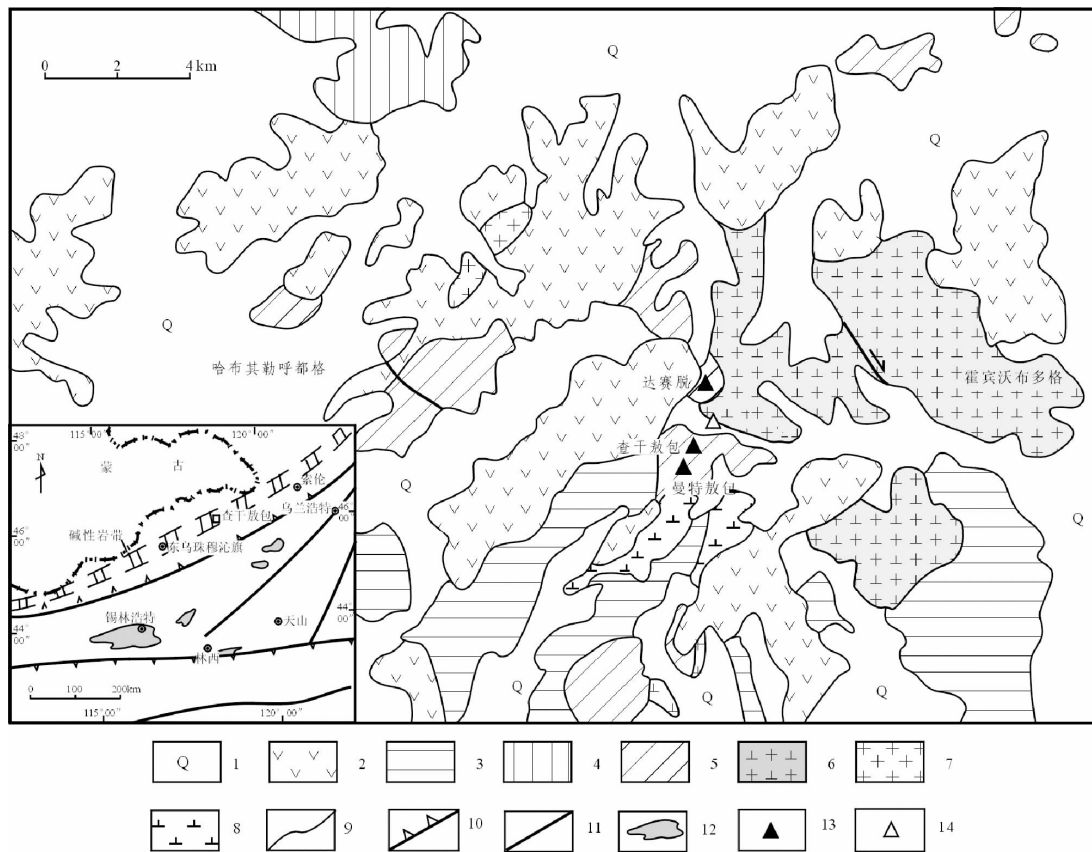


图1 查干敖包地区地质简图(据张万益等,2008)

1-第四系; 2-侏罗系火山岩; 3-石炭系宝力格庙组斑状板岩、火山硬砂岩、英安质凝灰熔岩; 4-上泥盆统安格尔音乌拉组变质粉砂岩和泥质板岩; 5-奥陶系多宝山组细碧角闪岩、斑状板岩、砂卡岩夹铁-锌矿层及锰矿层; 6-石英闪长岩; 7-花岗斑岩脉; 8-闪长玢岩; 9-地质界线; 10-板状缝合线; 11-断层; 12-前寒武纪中间地块; 13-矿床(点)位置; 14-采样位置

Fig. 1 Simplified geological map of the Chagan Obo district (after Zhang *et al.*, 2008)

西长约 10km, 南北宽约 6km, 面积约 60km², 呈岩株状侵位于石炭系宝力格庙组和奥陶系多宝山组火山-沉积岩中, 其上被上侏罗统火山岩覆盖。在岩体和奥陶系多宝山组火山-沉积岩的接触部位, 往往形成含铁-锌矿层及锰矿层的砂卡岩带。砂卡岩带的形态和产状受构造和接触带特征控制, 铁-锌矿体主要呈层状、条带状和透镜状分布于砂卡岩带中。近年来, 随着找矿勘探工作的不断深入, 除查干敖包铁-锌矿以外, 在查干敖包岩体周围还陆续发现了以锌为主的曼特敖包铅-锌中型矿床、达赛脱铅-锌矿点和数处铜异常。

查干敖包岩体的代表性岩石是石英闪长岩, 岩石呈似斑状结构, 基质具半自形-他形细粒结构。岩石矿物组成主要有斜长石(大部分为钠长石)(≥60%)、普通角闪石(15%~20%)、钾长石(10%)和石英(5%~10%), 此外, 还见有榴石(<1%)、磁铁矿(1%~2%)、磷灰石(<1%)、锆石(<1%)以及少量绿帘石、绿泥石等。斑晶以自形板状、宽板状斜长石为主, 自形钾长石, 长柱状、柱状普通角闪石次之, 大小一般在 1~2mm 之间, 约占岩石总量的 30%~40%。基质主要由他形-半自形细粒斜长石和普通角闪石组成, 粒度较细, 一般在 0.1~0.3mm 之间。

4 分析方法

样品采自查干敖包铁-锌矿区北部的钻孔岩芯(图 1), 样品新鲜, 呈灰白略带浅肉红色。岩石主量元素、微量元素由国家地质测试中心测试。主量元素使用型号为理学 3080E 的 X-荧光光谱仪测试, 检测下限为 0.05%, 其中 FeO 采用容量滴定法, CO₂ 用电导法, H₂O⁺ 用重量法分析。微量元素分析使用仪器型号为等离子质谱 ICP-MS (Excell), 其测试方法参照 DZ/T0223-2001 进行, 其中稀土元素检测下限为 0.05 × 10⁻⁶, 部分元素检测下限为 0.5 × 10⁻⁶。Pb、Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素由核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试, Pb 同位素用热表面电离质谱法进行测量, 仪器型号为 ISOPROBE-T, 分析精度对 1μg Pb 含量其 ²⁰⁴Pb/²⁰⁶Pb 低于 0.05%, ²⁰⁸Pb/²⁰⁶Pb 一般不大于 0.005%, 对国际标样 NBS981 的测试结果在万分之一。Rb-Sr 同位素采用 ISOPROBE-T 热电质谱计分析, 质量分馏用 ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 校正, 标准测量结果 NBS987 为 0.710250 ± 7。Sm-Nd 同位素采用 ISOPROBE-T 热电质谱

表1 查干敖包石英闪长岩的主元素(wt%)、稀土和微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Major (wt%), REE and trace ($\times 10^{-6}$) elements compositions of Chagan Obo quartz diorite

样品号	CG7	CG6	CG8	CG5	CG3	CG2	样品号	CG7	CG6	CG8	CG5	CG3	CG2
SiO ₂	61.50	62.54	62.67	60.93	60.70	62.19	Ho	0.50	0.42	0.47	0.52	0.51	0.48
TiO ₂	0.50	0.49	0.50	0.56	0.58	0.50	Er	1.52	1.25	1.40	1.59	1.47	1.42
Al ₂ O ₃	16.96	16.97	16.78	16.49	16.87	16.79	Tm	0.20	0.18	0.20	0.20	0.20	0.20
Fe ₂ O ₃	2.05	1.72	1.79	2.03	2.15	1.91	Yb	1.40	1.17	1.35	1.47	1.38	1.41
FeO	2.16	2.07	2.16	2.37	2.17	2.01	Lu	0.21	0.18	0.21	0.22	0.21	0.21
MnO	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	∑REE	268.8	238.4	251.5	276.5	274.3	260.7
MgO	2.04	1.86	1.96	2.31	2.39	1.94	LREE/HREE	19.35	20.11	19.55	18.91	19.57	19.36
CaO	3.05	3.46	3.42	3.48	3.92	3.60	(La/Yb) _N	28.54	31.21	27.68	27.81	29.84	27.57
Na ₂ O	5.89	5.60	5.63	5.16	5.22	5.29	δEu	0.93	0.97	0.96	0.90	0.96	0.94
K ₂ O	4.15	3.58	3.98	5.32	4.43	4.20	δCe	1.00	0.98	1.01	1.00	1.00	1.01
P ₂ O ₅	0.30	0.25	0.26	0.32	0.31	0.28	Cu	30.9	121	19.4	56.6	44.7	56.6
H ₂ O ⁺	0.76	0.90	0.66	1.16	0.64	0.68	Zn	48.9	50.0	46.0	54.0	57.0	54.2
CO ₂	0.05	0.05	0.09	0.09	0.05	0.07	Rb	108	89.7	79.5	139	107	118
LOI	0.69	0.74	0.36	1.15	0.66	0.58	Sr	1216	2028	1719	1567	1964	1745
Total	100.17	100.30	100.33	101.45	100.17	100.12	Nb	5.41	4.72	5.85	5.69	5.80	5.82
K ₂ O + Na ₂ O	10.04	9.18	9.61	10.48	9.65	9.49	Mo	0.53	0.59	0.74	3.58	14.3	1.40
Na ₂ O/K ₂ O	1.42	1.56	1.41	0.97	1.18	1.26	Ba	1624	1611	1597	1947	1898	1599
DI	27.85	28.37	29.34	33.21	29.53	31.19	Ta	0.41	0.37	0.47	0.43	0.44	0.46
σ	5.45	4.31	4.70	6.13	5.26	4.69	Pb	21.6	26.9	27.4	27.0	26.2	26.6
Mg [#]	62.72	61.55	61.78	63.46	66.24	63.23	Bi	0.63	5.17	0.44	0.46	0.74	1.02
A/CNK	0.86	0.88	0.85	0.80	0.82	0.85	Th	12.1	9.91	13.2	12.3	12.1	12.4
La	55.7	50.9	52.1	57.0	57.4	54.2	U	2.47	1.99	3.56	3.74	4.19	3.40
Ce	114	101	107	117	116	111	Zr	221	209	219	233	230	234
Pr	13.0	11.5	12.1	13.3	13.1	12.5	Hf	5.28	5.23	5.06	5.60	5.48	5.62
Nd	48.5	43.1	44.9	50.0	49.7	46.8	As	12.3	5.75	25.9	16.6	88.3	84.4
Sm	7.34	6.48	6.84	7.67	7.55	7.02	Au	0.002	—	—	—	—	0.001
Eu	1.97	1.82	1.90	2.00	2.11	1.94	Ag	0.10	0.11	0.10	0.13	0.11	0.12
Gd	5.23	4.61	4.77	5.50	5.37	5.12	Sn	4.50	4.50	1.77	3.69	2.31	7.50
Tb	0.59	0.51	0.55	0.63	0.60	0.58	Y	15.9	12.9	15.2	16.5	15.9	15.2
Dy	2.78	2.36	2.55	2.93	2.82	2.64							

注:国家地质测试中心分析

计分析,质量分馏用¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 校正,标准测量结果 SHINESTU 为 0.512118 ± 3(标准值为 0.512110)。

5 分析结果

5.1 主量元素特征

查干敖包石英闪长岩主量元素氧化物含量见表1。从表1中可以看出,6件样品的化学分析结果表现为:(1)SiO₂含量为60.70%~62.67%,平均值为61.76%;(2)Al₂O₃含量较高,为16.49%~16.97%,平均值为16.81%。A/CNK值为0.80~0.88,显示铝略不饱和,在A/NK-A/CNK图(图2a)上,数据投影点位于偏铝质范围;(3)碱含量较高:K₂O + Na₂O为9.18%~10.48%,平均值为9.74%;K₂O含量为3.58%~5.32%,平均值为4.28%;Na₂O含量为5.16%~5.89%,平均值为5.47%;Na₂O/K₂O为0.97~1.56,除编号为CG5的样品Na₂O/K₂O < 1外,其余样品Na₂O的含量均大

于K₂O含量,属钠质类型岩石;(4)分异指数(DI)较低,变化范围为27.85~33.21,平均29.9;CIPW标准矿物计算中没有出现过铝质矿物;(5)镁、钛、磷等含量较高;(6)Mg[#]的分子数较高,变化范围为61.55~66.24,平均63.16;(7)在SiO₂-K₂O判别图上,除一个样品落入高钾钙碱性系列外,其余样品均落入钾玄岩系列;(8)里特曼组合指数σ值为4.31~6.13,平均5.09,属碱性岩系列。碱度率AR = 2.63~3.21 (AR = (Al₂O₃ + CaO + K₂O + Na₂O)/(Al₂O₃ + CaO - K₂O - Na₂O), Wright, 1969),在AR-SiO₂图(图2b)上,样品均在碱性岩区。

5.2 稀土元素特征

查干敖包石英闪长岩的REE总量为236.3 × 10⁻⁶~260.0 × 10⁻⁶(表1),平均246.5 × 10⁻⁶;LREE/HREE为18.91~20.11,平均19.48,LREE相对HREE更为富集,表现高的(La/Yb)_N值,其变化于25.33~28.65之间,平均26.43;δEu

表 2 查干敖包石英闪长岩铅同位素组成

Table 2 Pb isotopic compositions of Chagan Obo quartz diorite

样品号	测试对象	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	SHRIMP 年龄 (Ma)	模式年龄 (Ma)	μ	ω	Th/U
CG2	钾长石	38.120	15.512	18.335	237	111	9.30	34.82	3.62
CG5		37.991	15.500	18.246		162	9.28	34.66	3.61
CG6		38.108	15.523	18.381		91	9.32	34.64	3.60
CG8		38.085	15.529	18.529		-13	9.31	33.85	3.52
CG3		37.831	15.465	18.172		172	9.22	34.08	3.58
CG7		37.961	15.488	18.220		166	9.26	34.57	3.61

注:核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析;SHRIMP 年龄数据引自张万益等,2008

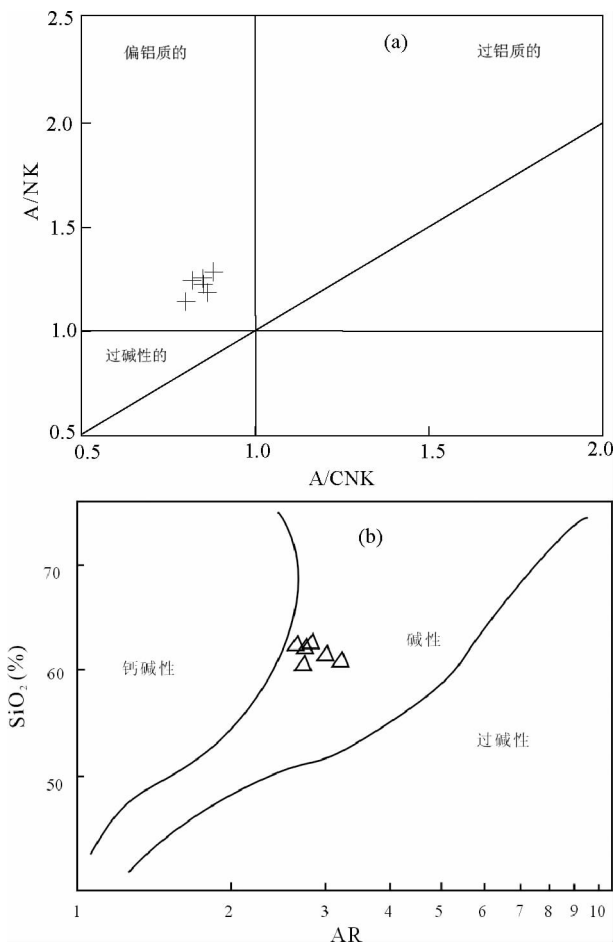


图 2 查干敖包石英闪长岩 A/NK-A/CNK 图 (a) 及碱度率图解 (b)

Fig. 2 The A/NK-A/CNK (a) and alkalinity ratio diagrams (b) of Chagan Obo quartz diorite

为 0.91 ~ 0.98, 平均 0.95, 为弱的 Eu 负异常。在稀土元素球粒陨石标准化稀土图谱上 (图 3a), 6 件样品的稀土配分曲线极为相似, 总体表现为右倾斜型配分曲线, 其中重稀土 Ho-Lu 表现为平坦型, 轻稀土元素分馏程度较高。石英闪长岩的稀土元素特征暗示其源区残留相中有石榴子石和辉石或者角闪石。

5.3 微量元素特征

代表性样品化学分析结果表明 (表 1), 查干敖包石英闪长岩 Sr 和 Ba 含量较高, 其中 Sr 变化范围为 $1216 \times 10^{-6} \sim 2028 \times 10^{-6}$, 平均为 1707×10^{-6} ; Ba 变化范围为 $1597 \times 10^{-6} \sim 1947 \times 10^{-6}$, 平均为 1717×10^{-6} 。Y 含量较低, 为 $12.9 \times 10^{-6} \sim 16.5 \times 10^{-6}$, 平均为 15.3×10^{-6} 。在微量元素原始地幔标准化蛛网图上 (图 3b), 6 件样品的标准化曲线形态一致, 显示大离子亲石元素 (Rb、Ba、Th、U、K) 富集, 高场强元素 (Ta、Nb、Ti、P) 明显亏损, 指示了与俯冲作用相关的微量元素地球化学特征。

5.4 同位素组成

5.4.1 Pb 同位素

查干敖包石英闪长岩 6 件代表性样品中的钾长石铅同位素分析结果列于表 2。分析结果表明, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值变化范围为 18.172 ~ 18.529, 平均值为 18.314, 而 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.465 ~ 15.529, 平均值为 15.503, 相对较低, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值较高 (37.831 ~ 38.120), 平均值为 38.016。采用单阶段铅演化模式计算的 μ 、 ω 和 Th/U 等参数, 不同样品的参数值变化不大。 μ 值为 9.22 ~ 9.32, 变化范围较小, 低于 μ 值为 9.74 的陆壳演化线。Th/U 值变化范围为 3.52 ~ 3.62, 接近球粒陨石 Th/U 值 3.58 (魏菊英和王关玉, 1996), 说明石英闪长岩与幔源岩浆活动有关。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上 (图 4a, b), 其分布形态显示出地幔铅的特征; 在图 4c 上, 铅同位素组成位于地球等时线右侧, 处于 MORB 的铅分布区。综上所述, 查干敖包石英闪长岩铅同位素组成和构造模式图解揭示出该岩体具有幔源组分的亲缘性。

5.4.2 Rb-Sr 同位素

3 件样品 Sr 计算结果表明 (表 3), 查干敖包石英闪长岩的初始 ϵ_{Sr} 比较集中, 变化于 0.70405 ~ 0.70411, 平均 0.70408, 在现今上地幔 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.702 ~ 0.706) 比值的范围内。 $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 变化范围为 -2.4 ~ -1.6, 均为负值。Sr 同位素显示查干敖包石英闪长岩具有地幔来源特征。

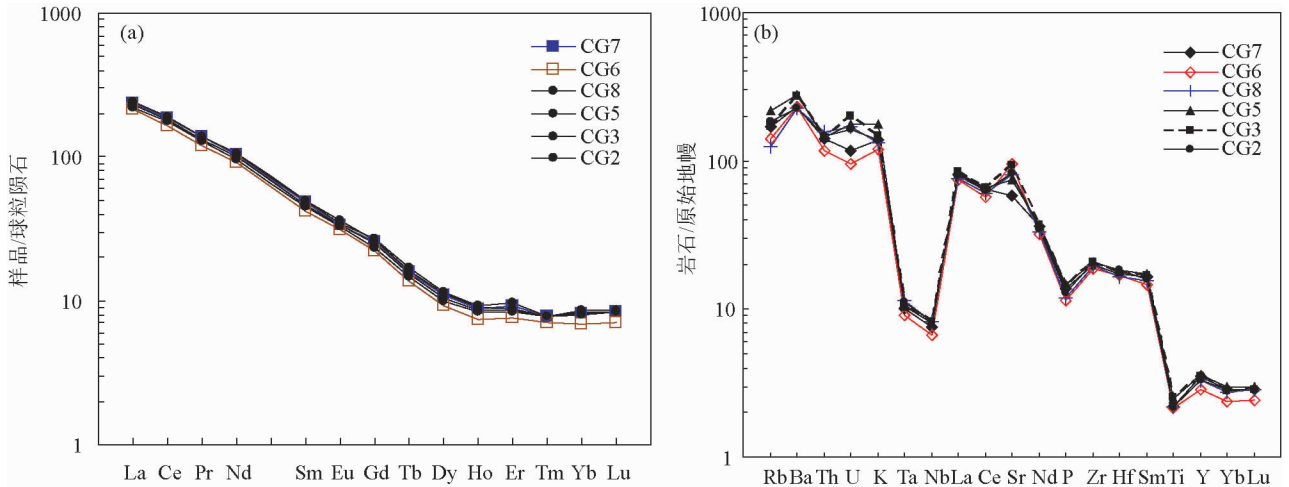


图3 查干敖包石英闪长岩稀土元素球粒陨石标准化曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化曲线图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 The chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of Chagan Obo quartz diorite (normalizing values after Sun and McDonough, 1989)

5.4.3 Sm-Nd 同位素

Sm-Nd 同位素分析结果见表3。从表中看出,3件样品 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 的比值变化范围为0.0671~0.0679,平均0.06747,小于球粒陨石均一库的初始值(0.1967),富集系数 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 变化范围为-0.65~-0.66; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的比值变化范围为0.512605~0.512631,平均值为0.512619。根据Sm、Nd同位素分析结果(表3),在单阶段模式下,查干敖包石英闪长岩的 t_{DM} 模式年龄变化范围为543~569Ma,平均为556Ma,比其实际侵入年龄(237Ma)要大,但与中新元古代温都尔庙群变质基性火山岩的地幔亏损模式年龄568~857Ma(张臣和吴泰然,1998)接近。 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 值为-0.65~-0.66,说明源岩Sm、Nd分异不明显,可以认为岩石中的Sm、Nd同位素体系

表3 查干敖包石英闪长岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr and Nd isotopic compositions of Chagan Obo quartz diorite

样品号	CG2	CG6	CG7
样品名称	石英闪长岩		
$(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_{\text{m}}$	0.1525	0.0975	0.1939
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{m}}$	0.704626	0.704407	0.704703
$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}}$	0.0679	0.0674	0.0671
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{m}}$	0.512620	0.512631	0.512605
t_{Ma}	237(锆石 SHRIMP)		
$\epsilon_{\text{Sr}}(0)$	1.8	-1.3	2.9
$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	-1.6	-2.0	-2.4
$f_{\text{Rb}/\text{Sr}}$	0.84	0.18	1.34
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{i}}$	0.70411	0.70408	0.70405
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	-0.4	-0.1	-0.6
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	3.5	3.8	3.3
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.65	-0.66	-0.66
t_{DM}	556	543	569
$t_{2\text{DM}}$	723	705	745
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{i}}$	0.512515	0.512526	0.512501

注:核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析;SHRIMP 年龄数据引自张万益等,2008

较好地记录了源岩的特征。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 均为正值,变化范围为3.3~3.8,平均3.5。Sm-Nd同位素特征显示,查干敖包石英闪长岩无论是 t_{DM} 还是 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 都与兴蒙造山带的正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 花岗岩(洪大卫等,2000,2003;邵济安等,2002)相似。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值与侵入时代关系图上(图略),投影点都落入兴蒙造山带花岗岩的范围内。这一方面反应了它们源岩同位素之间的密切联系,另一方面也暗示它们来源于地幔的成因。

6 讨论

6.1 岩石成因

通过对比研究发现,查干敖包石英闪长岩与经典的埃达克岩具有相似的元素地球化学特征,在 Yb_N -(La/Yb) $_N$ 图解和 $\text{Y} \times 10^{-6}$ - Sr/Y 图解上(图5),大部分投影点落入或靠近埃达克岩区域。埃达克岩(adakite)是最早由Kay(1978)发现于美国阿留申群岛中的埃达克岛(Adak Island)、首次由Defant and Drummond(1990)厘定的一类特殊中酸性火成岩组合。其地球化学特征表现为 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, MgO 常小于3%(很少超过6%),较低的Y和Yb含量($\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$),正Eu、正Sr异常,Sr含量较高($> 400 \times 10^{-6}$), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值小于0.7040(Defant and Drummond,1990)。目前认为埃达克岩具有多种成因,除最初Defant and Drummond(1990)定义的经典埃达克岩由年轻的($< 25\text{Ma}$)热板片俯冲熔融外,还有增厚下地壳的部分熔融(Atherton and Petford, 1993; Arculus *et al.*, 1999; Yumul, *et al.*, 1999)、底侵玄武质岩浆的分异(Sajona, *et al.*, 1993; Drummond *et al.*, 1996)、古老的俯冲洋壳的部分熔融(Sajona *et al.*, 2000)等。与中国东部其它埃达克质花岗岩(葛小月等,2002)相比,查干敖包石英闪长岩的碱含量、 Al_2O_3 及Sr

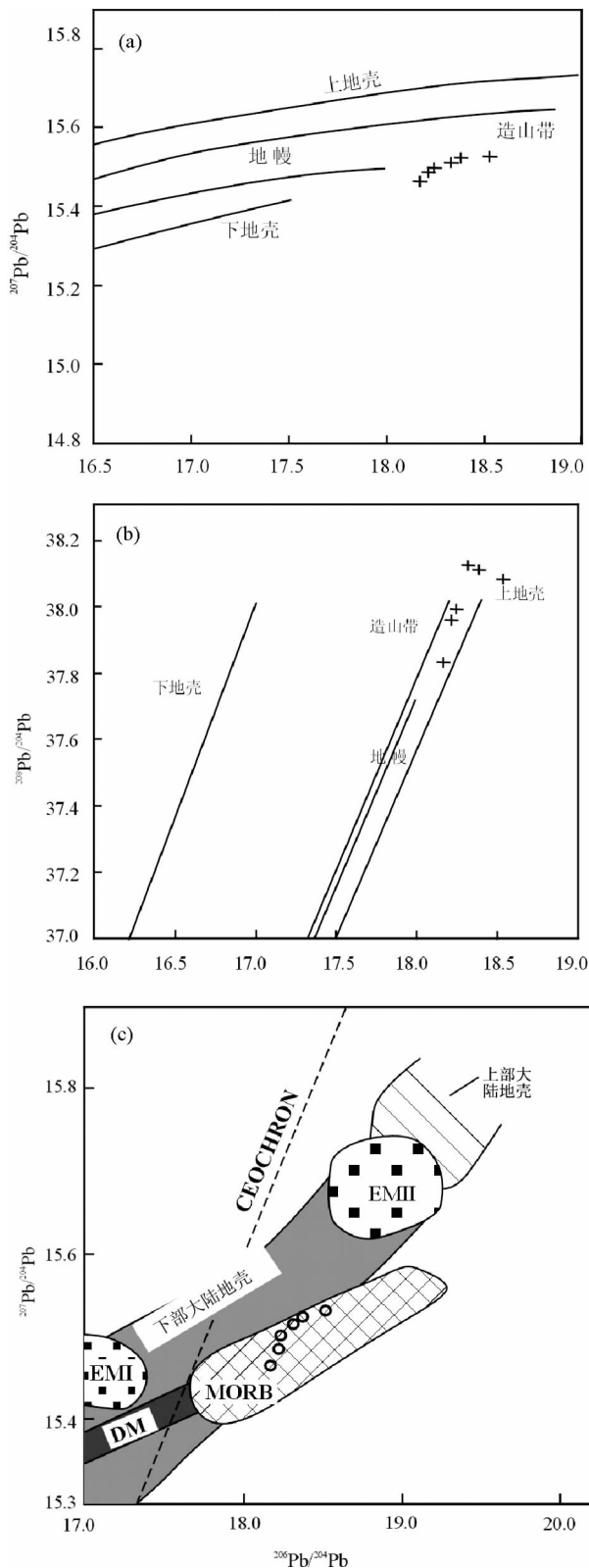


图4 查干敖包石英闪长岩铅同位素构造模式图(a、b 原图据 Zartman and Doe, 1981; c,原图据 Hugh, 1993)
Fig. 4 The plumbotectonic framework diagrams of Chagan Obo quartz diorite (a, b, after Zartman and Doe, 1981; c, after Hugh, 1993)

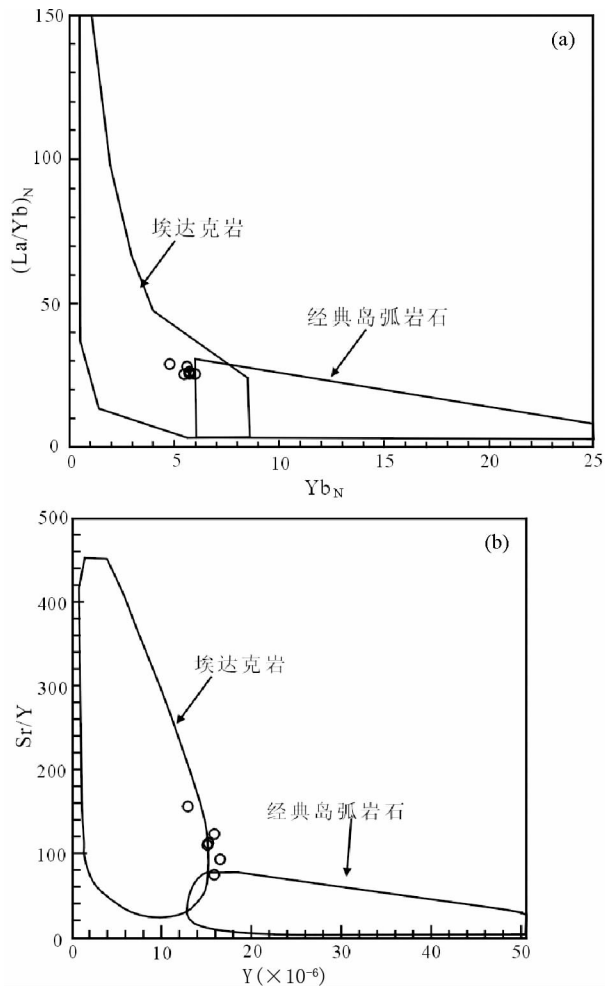


图5 查干敖包石英闪长岩的 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 和 $Y \times 10^{-6}-Sr/Y$ 图解(据 Atherton and Petford, 1996)
Fig. 5 The $Yb_N-(La/Yb)_N$ and $Y \times 10^{-6}-Sr/Y$ diagrams of Chagan Obo quartz diorite (after Atherton and Petford, 1996)

偏高,具有更高的 $Mg^\#$ 值。

查干敖包石英闪长岩虽然富钾,但铝不饱和, $\epsilon_{Nd}(t)$ 均为正值, Sr-Nd-Pb 同位素均显示了具有幔源特征,这些特征与区域上同位于板块缝合线附近且同期的西拉木伦河以北双井子(237Ma, 李锦轶等, 2007)、吉林中部的大玉山(248Ma, 孙德有等, 2004)等造山带加厚地壳重熔的岩体有明显差别。另一方面,实验岩石学研究结果表明,低钾拉斑玄武岩的部分熔融不能产生高钾钙碱性岩浆(Roberts and Clemens, 1993),洋中脊拉斑玄武岩(MORB)熔融产生的熔体的 $Mg^\#$ 值小于 60,但若受到比玄武岩更基性物质的混染,则 $Mg^\#$ 值就会明显升高(Beard and Lofgren, 1991, 董申保和田伟, 2004),高 $Mg^\#$ 值和高 K_2O 含量的查干敖包石英闪长岩不可能直接由 MORB 熔融产生,必须有富钾和更基性的地幔物质混染。综合以上分析认为查干敖包石英闪长岩可能是由残留的古老俯冲洋壳(早奥陶世?)部分熔融,受到富钾的基

性幔源物质污染而形成。

如前所述,查干敖包石英闪长岩有地幔亲缘性,与 MORB 有关(图 4)。查干敖包石英闪长岩富 Sr 以及具有弱的 Eu 负异常,说明源岩中斜长石已大部分进入熔体,残留相中的斜长石很少;低 Y 和亏损 HREE 表明残留相中存在石榴石和辉石或角闪石;高场强元素 Ta、Nb、Ti、P 亏损暗示源区存在含 Ta、Nb(铌钽矿物)、Ti(金红石等)、P(磷灰石等)的矿物。因此可以认为查干敖包石英闪长岩的源区为残留的无斜长石的石榴石+辉石或角闪石+磷灰石+金红石+铌钽矿物组合。

6.2 构造背景

前人研究结果表明,在西伯利亚板块南缘形成大规模的白音乌拉-东乌珠穆沁旗碱性花岗岩带,该碱性花岗岩带向西进入蒙古国境内,经蒙古戈壁、天山延伸至东准格尔,向东延伸至黑龙江的黑河。同位素年龄测定结果显示碱性花岗岩的侵位时间为 276~290Ma,大部分形成于二叠纪,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;施光海等,2004)。在中朝板块北缘,缺少二叠纪碱性花岗岩带,直到三叠纪才形成大规模的碱性花岗岩带,同位素年龄集中在 210~230Ma(阎国翰等,1989;洪大卫等,1994;张招崇和王永强,1997)。这种分别位于两个板块边缘的碱性岩带形成时间上的先后差异,被认为是西伯利亚板块和中朝板块的面积和质量的悬殊而导致岩浆活动的不对称性(洪大卫等,1994)。

然而,近年来,地质工作者们在白音乌拉-东乌珠穆沁旗碱性花岗岩带及其东延部分的黑河一带,逐渐发现了许多碱性花岗岩,如苏尼特左旗 A 型花岗岩(222Ma,石玉若等,2007),本文报导的查干敖包石英闪长岩(237±6Ma,张万益等,2008),查干敖包北东 80km 处的宾巴勒查干 A 型花岗岩(218±5Ma,作者未发表资料),黑河南侧的清水 A 型花岗岩(222±5Ma,孙德有等,2004)等,这些碱性花岗岩呈带状分布,形成时代均为三叠纪。李锦轶等(2007)通过对双井子花岗岩的深入研究,认为西伯利亚板块与中朝板块的碰撞时间发生在二叠纪中晚期,二叠纪碱性花岗岩可能是局部弧-陆碰撞的结果,而不是古亚洲洋关闭的地质记录,到三叠纪晚期才进入伸展构造背景。从本文的研究结果看,笔者也认为西伯利亚板块与中朝板块拼合的时间发生在三叠纪以前。因此,分别位于西伯利亚板块南缘的白音乌拉-东乌珠穆沁旗碱性岩带、中朝板块北缘的碱性岩带,在时间上同属于三叠纪,在空间上对称出现,是两板块碰撞后伸展环境下的地质响应。

7 结论

元素地球化学分析结果显示,查干敖包石英闪长岩表现为铝略不饱和,富碱、镁,贫钽、磷, Mg[#] 的分子数较高,轻稀

土元素分馏程度较高,大离子亲石元素富集以及高场强元素亏损等。结合 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学特征,对比发现该岩体具有埃达克岩的特征且来源于地幔,是区域上的西伯利亚板块南缘三叠纪碱性花岗岩带中的重要成员之一。成因上为西伯利亚板块与中朝板块碰撞后,在拉伸环境下由残留的古老俯冲洋壳部分熔融,经过富钾的基性幔源物质污染而形成,与中朝板块北缘的三叠纪碱性花岗岩带属同一期次岩浆活动的产物,再次为西伯利亚板块与中朝板块碰撞闭合的时限提供新证据。

致谢 野外工作期间得到内蒙古兴业集团温银维总工程师和东乌旗查干敖包铁矿许俊杰副矿长热情帮助;成文期间得到了左力艳博士,刘勇、张可硕士的大力帮助;刘树文教授,陈文明、江思宏研究员提出了宝贵的修改意见;在此表示衷心地感谢。

References

- Arculus RJ, Lapiierre H and Jaillard E. 1999. Geochemical window into subduction and accretion processes: Raspas metamorphic complex, Ecuador. *Geology*, 27: 547–550
- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362: 144–146
- Atherton MP and Petford N. 1996. Plutonism and the growth of Andean crust at 90°S from 100 to 3 Ma. *J. South Am. Earth Sci.*, 9: 1–9
- Bai DH, Zhang L, Kong XR *et al.* 1993a. A magnetotelluric study of the palaeozoic collision zone in the east of Inner-Mongolia—I. Observations and data analyses. *Chinese Journal of Geophysics*, 36(3): 326–336 (in Chinese with English abstract)
- Bai DH, Zhang L and Kong XR. 1993b. A magnetotelluric study of the palaeozoic collision zone in the east of Inner-Mongolia—II. Two-dimensional modelling. *Chinese Journal of Geophysics*, 36(6): 773–783 (in Chinese with English abstract)
- Beard JS and Lofgren GE. 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and phibolites at 1, 3, and 6.9 kb. *J. Petrol.*, 32: 365–401
- Cao CZ, Yang FL, Tian CL and Yuan C. 1986. The ophiolite in Hegen Shan district, Nei Mongol and the position of suture line between Sino-Korean and Siberian plates. In: Tang KD (ed.). *Contributions to the Project of Plate Tectonics in Northern China*, No. 1. Beijing: Geological Publishing House, 64–85 (in Chinese)
- Chen B, Jahn BM, Wilde SA and Xu B. 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: Petrogenesis and tectonic implications. *Tectonophysics*, 328: 157–182
- Defant and Drummond. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347: 662–665
- Dong SB and Tian W. 2004. The nomenclature, characteristics and petrogenesis of adakite. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 585–594 (in Chinese with English abstract)
- Drummond MS, Defant MJ and Kepezhinskas PK. 1996. The petrogenesis of slab derived trondhjemite-tonalite-dacite adakite magmas. *Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci.*, 87: 205–216
- Ge XY, Li XH, Chen ZG and Li WP. 2002. Geochemistry and genesis of Yanshanian felsic igneous rocks with high Sr and low Y in eastern China constraints on thickness of the eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474–480 (in Chinese)
- Kay RW. 1978. A leucian magnesian andesites; Melts from subducted Pacific Ocean crust. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 4: 117–132

- Hong DW, Huang HZ, Xiao YJ *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)
- Hong DW, Wang SG, Xie XL *et al.* 2000. Genesis of positive $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts. -Mongolia orogenic belt and growth continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441–456 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Wang SG, Xie XL *et al.* 2003. Metallogenic province derived from mantle sources: A case study of Central Asian orogenic belt. *Mineral Deposits*, 22(1): 41–55 (in Chinese with English abstract)
- Hugh RR. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. London: Longman Scientific Technical Limited
- Jin Y, Liu YT and Xie YL. 2005. Relationship between magmatism and polymetal mineralization in Dongwuqi area, Inner Mongolia. *Geology and Mineral Resources of South China*, (1): 8–12 (in Chinese with English abstract)
- Li JY. 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: 207–224
- Li JY, Gao LM and Sun GH *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 SL and Ouyang ZY. 1998. Tectonic framework and evolution of Xing'anling-Mongolian orogenic belt (XMOB) and its adjacent region. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 18(3): 45–54 (in Chinese with English abstract)
- Nozaka T and Liu Y. 2002. Petrology of the Hegenshan ophiolite and its implication for the tectonic evolution of northern China. *EPSL*, 202: 89–104
- Nie FJ, Jiang SH, Zhang Y *et al.* 2004. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its neighboring area. *Mineral Deposits*, 23(2): 176–189 (in Chinese with English abstract)
- Nie FJ, Jiang SH, Bai DM *et al.* 2007. *Metallogenic Studies and Prospecting Orientation in Central and Eastern Segments along China-Mongolia*. Beijing: Geological Publishing House, 1–574 (in Chinese)
- Ren JS. 1991. The basic characteristics of the tectonic evolution of the continental lithosphere in China. *Regional Geology of China*, 10(4): 289–293 (in Chinese with English abstract)
- Roberts MP and Clemens JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21: 825–828
- Sajona FG, Maury RC, Bellon H *et al.* 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao, Philippines. *Geology*, 21: 1007–1010
- Sajona FC, Maury RC, Pubellier M *et al.* 2000. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in a postcollision setting, central Mindanao (Philippines). *Lithos*, 54: 173–206
- Sengor AMC, Natalin BA and Burtaman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364: 299–307
- Shao JA. 1991. *Crustal Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of the Sino-Korean Plate*. Beijing: Peking University Press, 136 (in Chinese with English abstract)
- Shao JA, Han QJ, Zhang LQ *et al.* 1999. Cumulate complex xenoliths in the Early Mesozoic in eastern Inner-Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 44(5): 478–485 (in Chinese)
- Shao JA, Hong DW and Zhang LQ. 2002. Genesis of Sr-Nd isotopic characteristics of igneous rocks. *Geological Bulletin of China*, 21(12): 817–822 (in Chinese with English abstract)
- Shi GH, Miao LC, Zhang FQ *et al.* 2004. The age and its regional tectonic implications of the Xilinhaote A-type granites, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 384–389 (in Chinese)
- Shi YR, Liu DY, Zhang Q *et al.* 2004. SHRIMP dating of diorites and granites in southern Suzuqi, Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 789–799 (in Chinese with English abstract)
- Shi YR, Liu DY, Zhang Q *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of Triassic A-type granites in Sonid Zuoqi, central Inner Mongolia, China, and its tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 26(2): 183–189 (in Chinese with English abstract)
- Sun DY, Wu FY, Li HM and Lin Q. 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-Zhalaita collisional suture zone. *Chinese Science Bulletin*, 45(20): 2217–2222 (in Chinese)
- Sun DY, Wu FY, Zhang YB *et al.* 2004. The final closing time of the west Lamulun River-Changchun-Yanji plate suture zone: Evidence from the Dayushan granitic pluton, Jilin Province. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 174–181 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Oceanic Basalts*. Geological Society Special Publication, 313–345
- Tang KD. 1990. Tectonic development of the Paleozoic foldbelts on the northern margin of the Sino-Korean craton. *Tectonics*, 9: 249–260
- Tong Y, Hong DW, Wang T *et al.* 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 395–412 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q. 1986. Recognition of the suture between the Sino-Korean and Siberian paleoplates in the middle part of Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, (1): 31–43 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Liu XY and Li JY. 1991. *Plate Tectonics between Cathaysia and Angaraland in China*. Beijing: Peking University Press, 74–101 (in Chinese)
- Wang Y, Fan ZY, Fang S *et al.* 1999. New geological data discovered in the north bank of Xar Moron river and their tectonic significance. *Geology of Inner Mongolia*, (1): 6–28 (in Chinese with English abstract)
- Wei JY and Wang GY. 1996. *Isotopic Geochemistry*. Beijing: Geological Publishing House, 1–166 (in Chinese)
- Wu FY, Sun DY, Li HM *et al.* 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187: 143–173
- Xiao WJ, Windley BF, 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): 81–820
- Xu B and Chen B. 1997. The structure and evolution of a Middle Paleozoic orogenic belt between the North China and Siberian Blocks, northern Inner Mongolia, China. *Science in China (Series D)*, 27(3): 227–232 (in Chinese)
- Yan GH, Mu BL and Zeng YS. 1989. Age and distribution of alkaline and subalkaline intrusive rocks in Northern China and their tectonic implication. *Bulletin of Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences*, 19: 93–100 (in Chinese with English abstract)
- Yumul GPJr, Dimalanta CB, Faustino DV *et al.* 1999. Silicic arc volcanism and lower crust melting: An example from the central Luzon, Philippines. *J. Geology*, 154: 13–14
- Zartman RE and Doe BR. 1981. Plumbotectonics: The model. *Tectonophysics*, 75: 135–162
- Zhang C and Wu TR. 1998. Sm-Nd, Rb-Sr isotopic isochron of metamorphic volcanic rocks of Ondorsum Group, Inner Mongolia. *Scientia Geologica Sinica*, 33(1): 25–30 (in Chinese with English abstract)
- Zhang WY, Nie FJ, Jiang SH *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb age of quartz diorite in Qagan Obo of Inner Mongolia and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(3): 177–184 (in Chinese with English abstract)

- Zhang YP and Tang KD. 1989. Pre-Jurassic tectonic evolution of intercontinental region and the suture zone between the North China and Siberian platforms. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 3: 47–55
- Zhao YM, Wang DW and Zhang DQ. 1994. Geological Setting and Exploration Model for the Polymetallic Deposits Occurring in the Southeastern Part of Inner Mongolia. Beijing: Seismological Press, 1–234 (in Chinese)
- Zhang ZC and Wang YQ. 1997. Indosinian alkaline magmatism in northern Hebei Province and its geodynamic significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 16(4): 214–217 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 白登海, 张丽, 孔祥儒等. 1993a. 内蒙古东部古生代块体碰撞区的大地电磁测深研究—I 观测与资料分析. *地球物理学报*, 36(3): 326–336
- 白登海, 张丽, 孔祥儒. 1993b. 内蒙古东部古生代块体碰撞区的大地电磁测深研究—II. 二维解释. *地球物理学报*, 36(6): 773–783
- 曹从周, 杨芳林, 田烈昌, 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: 唐克东编. 中国北方板块构造论文集(1). 北京: 地质出版社, 64–85
- 董申保, 田伟. 2004. 埃达克岩的原义、特征与成因. *地学前缘*, 11(4): 585–594
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 李伍平. 2002. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约. *科学通报*, 47(6): 474–480
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖宜君等. 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
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林等. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. *地学前缘*, 7(2): 441–456
- 洪大卫, 王式洸, 谢锡林等. 2003. 试析地幔来源物质成矿域——以中亚造山带为例. *矿床地质*, 22(1): 41–55
- 金岩, 刘玉莹, 谢玉玲. 2005. 内蒙古东乌旗地区岩浆活动与多金属成矿的关系. *华南地质与矿产*, (1): 8–12
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华等. 2007. 内蒙古东部双井子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. *岩石学报*, 23(3): 565–582
- 李双林, 欧阳远. 1998. 兴蒙造山带及邻区的构造格局与构造演化. *海洋地质与第四纪地质*, 18(3): 45–54
- 聂凤军, 江思宏, 张义等. 2004. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因. *矿床地质*, 23(2): 176–189
- 聂凤军, 江思宏, 白大明等. 2007. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向. 北京: 地质出版社, 1–574
- 樊志勇. 1996. 内蒙古西拉木伦河北岸杏树洼一带石炭纪洋壳“残片”的发现及其构造意义. *中国区域地质*, (4): 382
- 任纪舜. 1991. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征. *中国区域地质*,

10(4): 289–293

- 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
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥等. 1999. 内蒙古东部早古生代堆积杂岩捕虏体的发现. *科学通报*, 44(5): 478–485
- 邵济安, 洪大卫, 张履桥. 2002. 内蒙古火成岩 Sr-Nd 同位素特征及成因. *地质通报*, 21(12): 817–822
- 施光海, 苗来成, 张福勤等. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义. *科学通报*, 49(4): 384–389
- 石玉若, 刘敦一, 张旗等. 2004. 内蒙古苏左旗地区闪长-花岗岩类 SHRIMP 年代学. *地质学报*, 78(6): 789–799
- 石玉若, 刘敦一, 张旗等. 2007. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义. *地质通报*, 26(2): 183–189
- 孙德有, 吴福元, 李惠民, 林强. 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-扎鲁特碰撞拼合带东延的关系. *科学通报*, 45(20): 2217–2222
- 孙德有, 吴福元, 张艳斌等. 2004. 西拉木伦河-长春-延吉板块缝合带的最后闭合时间——来自吉林大玉山花岗岩体的证据. *吉林大学学报(地球科学版)*, 34(2): 174–181
- 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
- 王荃. 1986. 内蒙古中部中朝与西伯利亚古板块间缝合线的确定. *地质学报*, (1): 31–43
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造. 北京: 北京大学出版社, 74–101
- 王友, 樊志勇, 方曙等. 1999. 西拉木伦河北岸新发现地质资料及其构造意义. *内蒙古地质*, (1): 6–28
- 魏菊英, 王关玉. 1996. 同位素地球化学. 北京: 地质出版社, 1–166
- 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
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善. 1989. 中国北方碱性和偏碱性侵入岩的时空分布及大地构造意义. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊*, 19: 93–100
- 张臣, 吴泰然. 1998. 内蒙古温都尔庙群变质基性火山岩 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素年代研究. *地质科学*, 33(1): 25–30
- 张万益, 聂凤军, 江思宏等. 2008. 内蒙古查干敖包石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石矿物学杂志*, 27(3): 177–184
- 赵一鸣, 王大畏, 张德全等. 1994. 内蒙古东南部铜多金属成矿地质条件及找矿模式. 北京: 地震出版社, 1–234
- 张招崇, 王永强. 1997. 冀北印支期碱性岩浆活动及其地球动力学意义. *矿物岩石地球化学通报*, 16(4): 214–217