内蒙古查干拜兴晚石炭世埃达克岩的成因及其洋内俯冲作用的约束

董培培[1,2)]，李英杰[1,2)]，许展[3)]，鞠文信[3)]，王金芳[1)]，李红阳[1)]

1）河北地质大学地球科学学院，河北石家庄，050031；

2）河北地质大学河北省战略性关键矿产资源重点实验室，河北石家庄，050031；

3）内蒙古自治区地质调查院，内蒙古呼和浩特，010020

内容提要：由于缺少可靠的埃达克岩石的发现和系统研究，内蒙古索伦地区有无洋内初始弧火成岩组合和洋内俯冲作用尚不清楚，制约了古亚洲洋东段古生代古大洋俯冲消亡过程的进一步认识。本文报道在内蒙古苏尼特右旗蛇绿混杂岩带中新发现的晚石炭世埃达克岩，岩性为英云闪长岩。锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年显示，查干拜兴埃达克岩的形成时间为 322.3±5.2 Ma，时代为晚石炭世。该埃达克岩属于低钾拉斑系列-中钾钙碱性系列岩石，SiO_2 含量为 65.57%～67.89%，Al_2O_3 为 15.48%～16.55%，MgO 为 0.76%～1.63%，Na_2O/K_2O 为 2.39～18.09，Sr 为 371×10^{-6}～486×10^{-6}，Yb 为 0.60×10^{-6}～1.76×10^{-6}，Y 为 4.87×10^{-6}～7.82×10^{-6}。相对富集大离子亲石元素 K、Rb 和 Sr 等，亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Ti 和 P，稀土元素总量（∑REE）较低（22.83×10^{-6}～80.63×10^{-6}），贫重稀土元素，无明显的 Eu 异常，显示了典型埃达克岩的地球化学特征。查干拜兴埃达克岩具有岛弧型岩浆岩特征，形成于俯冲带岛弧环境，可能为俯冲洋壳部分熔融而形成的埃达克质熔体，经俯冲带上升过程中与地幔楔橄榄岩发生相互作用而形成。根据查干拜兴埃达克岩与区域石炭纪蛇绿岩的时空分布与演化特征，表明古亚洲洋东段索伦缝合带在晚石炭世存在洋内俯冲作用。

关键词：埃达克岩；岛弧型岩浆岩；晚石炭世；古亚洲洋东段；内蒙古苏尼特右旗

埃达克岩（adakite）泛指具有一定地球化学特征的中酸性岩石，如其 $SiO_2\geqslant56\%$，$Al_2O_3\geqslant15\%$，$MgO<3\%$（很少 $>6\%$），Sr 含量高（$Sr>400\times10^{-6}$）、贫 Y 和 Yb（$Y\leqslant18\times10^{-6}$，$Yb\leqslant1.9\times10^{-6}$），轻稀土（LREE）富集，无 Eu 异常（或轻微负 Eu 异常）。最初定义指大洋板块俯冲过程中年轻洋壳部分熔融形成的岛弧型中酸性富钠火成岩，其形成被认为与大洋俯冲作用有关（Drummond et al.，1990；Stern et al.，1996；Liu Dunyi et al.，2003）。此外，有的学者提出了加厚或拆沉玄武质下地壳熔融也可以形成埃达克岩（Sheppard et al.，2001；Hou Zengqian et al.，2004；Xu Wenliang et al.，2008）。还有其他学者提出了埃达克（质）岩的其他可能成因模式，如基性岩浆的分离结晶（Castillo et al.，1999）和岩浆混合成因（Streck et al.，2007）。尽管埃达克岩已经有多种不同的成因模式，但在造山带中识别出大洋板块俯冲作用下洋壳部分熔融形成的埃达克岩，对于判别俯冲带岛弧环境、揭示板块俯冲作用过程中洋壳物质变化与岩浆作用过程信息，以及洋壳俯冲消减过程中壳幔作用都具有重要意义。

中亚造山带位于西伯利亚板块和塔里木、华北板块之间（图 1a），是全球显生宙陆壳增生与改造最显著的造山带，广泛分布古生代蛇绿岩、俯冲-增生杂岩、大量岛弧岩浆岩和大陆碎片等，被认为是典型的增生型造山带（图 1b；Windley et al.，1990；2007；Xiao Wenjiao et al.，2019）。中亚造山带的形成与

注：本文为国家自然科学基金项目（编号 41972061）、中国地质调查局项目（编号 1212011120711 和 DD20190004）和河北地质大学科技创新团队项目（编号 KJCXTD-2021-07）联合资助的成果。

收稿日期：2021-08-16；改回日期：2021-09-25；网络发表日期：2021-11-04；责任编委：张招崇；责任编辑：蔡志慧。

作者简介：董培培，女，1985 年生。硕士，讲师，主要从事岩石学和地球化学研究。E-mail：120650334@qq.com。通讯作者：李英杰，女，1976 年生。博士，教授，主要从事岩浆岩与大地构造研究。E-mail：liyingjie820@126.com。

引用本文：董培培，李英杰，许展，鞠文信，王金芳，李红阳. 2021. 内蒙古查干拜兴晚石炭世埃达克岩的成因及其洋内俯冲作用的约束. 地质学报，95(12)：3676～3690，doi：10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022104.

Dong Peipei, Li Yingjie, Xu Zhan, Ju Wenxin, Wang Jinfang, Li Hongyang. 2021. Petrogenesis of the Late Carboniferous adakite in Chaganbaixing, Inner Mongolia and constraints of intra-oceanic subduction. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3676～3690.

古亚洲洋的长期俯冲过程密切相关，是大陆动力学和成矿作用研究的天然实验室，成为地球科学研究前沿和热点（Xiao Wenjiao et al.，2019），长期以来受到国内外地球科学家的关注，并取得了一系列重要研究成果（Jahn et al.，2000；Xiao Wenjiao et al.，2003，2009；Li Yingjie et al.，2012，2013，2015，2018a，2018b，2020a，2020b；Song Shuguang et al.，2015；Li Tingdong et al.，2019；Pan Guitang et al.，2019；Xiao Wenjiao et al.，2019；Wang Jinfang et al.，2021a，2021b）。然而，古生代古亚洲洋最终闭合时间与位置在中亚造山带东段仍然存在明显争议。一种主流的观点认为古亚洲洋在石炭纪—二叠纪为洋陆转换阶段，在晚二叠世—早三叠世沿着索伦—西拉木伦闭合（Xiao Wenjiao et al.，2003；Jian Ping et al.，2008，2010；Liu Yongjiang et al.，2017）。另一种观点认为中晚泥盆世古亚洲洋闭合，晚古生代火成岩形成于大陆裂谷环境（Xu Bei et al.，2013；Zhao Pan et al.，2016，2017）。导致认识不一致的主要原因是对古洋盆重建—蛇绿岩的形成时代、形成环境，以及对晚古生代构造—岩浆作用过程及其反映的大地构造背景认识不统一，缺乏从蛇绿岩到洋内初始俯冲洋内弧的系统识别和研究（Xiao Wenjiao.，2019）。近年来，通过对西太平洋伊豆-小笠原-马里亚纳（IBM）前弧的深海钻探和地球物理综合研究揭示，洋内初始俯冲作用首先形成 SSZ 型蛇绿岩和前弧玄武岩（fore-arc basalt，FAB），然后是玻安岩，其后为过渡型高镁安山岩（闪长岩）、埃达克岩和富铌玄武岩等，这些岩浆递进演变过程及有序产出的时代关系，为研究古亚洲洋俯冲过程和解决以上争议提供了重要的岩石学思路（Reagan et al.，2010，2013；Xiao Qinghui et al.，2016）。

值得注意的是，最近在中亚造山带东部兴蒙造山带的内蒙古中部地区的一些 SSZ 型蛇绿岩中陆续发现了洋内弧岩石组合，如在西乌旗迪彦庙 SSZ 型蛇绿岩（Li Yingjie et al.，2013，2018b）和梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩（Li Yingjie et al.，2015）中，都发现前弧玄武岩、埃达克岩、富铌玄武岩、玻安岩及高镁安山岩等洋内初始弧火成岩组合（Li Yingjie et al.，2018b，2020b；Dong Peipei et al.，2020；Wang Shuai et al.，2021）。然而，在索伦缝合带中，至今少见蛇绿岩和洋内弧的系统识别，制约了对该缝合带洋内俯冲和洋陆转换过程的研究。作者在新发现的苏尼特右旗哈冷岭蛇绿混杂岩带（Xu Guo et al.，2019）的查干拜兴地区新识别出了埃达克岩，这为系统研究古亚洲洋东部洋内俯冲作用提供了新的信息。本文试图通过对其岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学详细研究，为古亚洲洋东段晚古生代古大洋俯冲消亡过程提供岩石学、地球化学证据和时间约束。

1　地质背景和岩石学特征

查干拜兴埃达克岩位于苏尼特右旗北部，大地构造位置处于中亚造山带东南缘兴蒙造山带（图 1b），近几年的研究显示，兴蒙造山带从南向北可分为 5 个 ENE — WSW 的构造带：白乃庙岛弧杂岩、温都尔庙俯冲增生杂岩、索伦缝合带、宝力道弧增生杂岩、贺根山-弧-增生杂岩带和乌里雅斯太活动大陆边缘（Xiao Wenjiao et al.，2009）（图 1b）。从区域上看，查干拜兴埃达克岩位于索伦山缝合带的中部（图 1b）。索伦山缝合带具有发育构造混杂岩、残余岛弧和蛇绿岩的特征（Xiao Wenjiao et al.，2003），该带内断续出露索伦蛇绿岩、满都拉蛇绿岩、柯单山蛇绿岩和杏树洼蛇绿岩等几个北东向展布的蛇绿岩岩块。这里保留了板块闭合前古亚洲洋的信息，是了解古亚洲洋俯冲消减作用的重要地区（Jahn et al.，2004）。

查干拜兴埃达克岩出露于内蒙古苏尼特右旗哈冷岭蛇绿混杂岩带中（图 2）。哈冷岭蛇绿岩是索伦山缝合带中保存较完整的 SSZ 型蛇绿岩之一，构造就位于下二叠统寿山沟组与下二叠统大石寨组之中，主要岩性为蛇纹石化方辉橄榄岩、层状辉长岩、均质辉长岩、枕状玄武岩、块状玄武岩、球颗玄武岩、细碧岩、上覆硅质岩等。蛇绿岩带和周围的寿山沟组与大石寨组地层普遍发生一定范围和强度的密集劈理化、碎裂岩化、千枚岩化和糜棱岩化（Xu Guo et al.，2019）。查干拜兴埃达克岩出露于哈冷岭蛇绿混杂岩带的北部，岩性为中细粒英云闪长岩和粗中粒英云闪长岩。岩体边部为中细粒英云闪长岩（图 3a），中部为粗中粒英云闪长岩，两者为渐变接触关系。岩体呈小岩株状呈北东向条带状展布产出，出露面积约 10.7 km^2（图 2）。北部侵入于下石炭统查干诺尔组火山岩中，局部被中二叠统大石寨组、哲斯组和下白垩统白音高老组不整合覆盖（图 2），南部被第四系不整合覆盖。该英云闪长岩中发育强变形带和弱变形域，强变形带中形成强糜棱岩化英云闪长岩。

英云闪长岩：风化面灰白色，新鲜面暗灰色，中细粒半自形粒状结构，块状构造（图 3a）。矿物成分

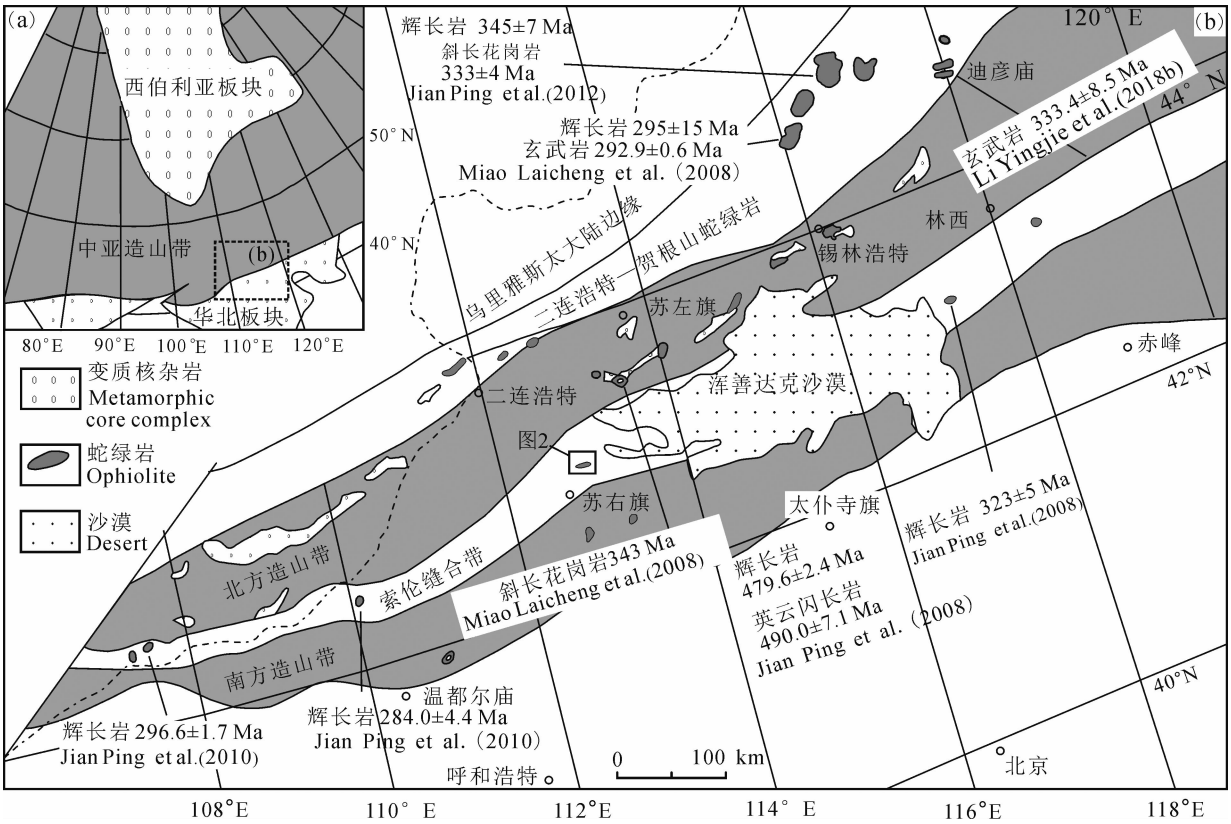

图 1 内蒙古查干拜兴地区大地构造位置示意图

Fig. 1 Geological map showing the tectonic units of Chaganbaixing, Inner Mongolia

(a)—据 Jahn(2004)修改;(b)—据 Badarch et al. (2002)、Miao Laicheng et al. (2008)、Xiao Wenjiao et al. (2009)、Jian Ping et al. (2010, 2012)修改;古生代蛇绿混杂岩的同位素年龄据 Jian Ping et al. (2008, 2010, 2012)、Xiao Wenjiao et al. (2009)、Li Yingjie et al. (2018b)

(a)—Modified after Jahn(2004);(b)—modified after Badarch et al. (2002), Miao Laicheng et al. (2008), Xiao Wenjiao et al. ,2009) and Jian Ping et al. (2010,2012); Palaeozoic isotopic ages of the ophiolitic are shown modified after Jian Ping et al. (2008, 2010, 2012), Xiao Wenjiao et al. (2009) and Li Yingjie et al. (2018b)

主要为斜长石(60%)、石英(25%)、角闪石(15%±)(图 3b)。斜长石多呈自形—半自形板状,见卡钠复合双晶,部分颗粒具环带构造,均已不同程度绢云母化。石英他形粒状,表面光滑,部分颗粒具波状消光;角闪石半自形柱状,见角闪石式解理,部分颗粒发生绿泥石化、绿帘石化。

2 分析方法

查干拜兴英云闪长岩的主量、微量和稀土元素分析测试均在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。样品加工采用刚玉腭板腭式破碎机破碎,再放入刚玉罐行中在行星式粉碎机中粉碎至 200 目。主量元素分析采用的仪器是 X 射线荧光光谱仪(帕纳科公司产 Axios ^{max})碱溶制备成晶体片后上机测定,分析精度为 0.05%;FeO 采用滴定分析完成;灼烧减量、H_2O^+ 和 H_2O^- 用重量法完成。大多数微量元素和稀土元素的分析采用酸溶法将样品制备好后,使用电感耦合等离子质谱仪(赛默飞世尔公司产 X Serrise2)测试完成,而 Zr 采用 X 射线荧光光谱法测试。稀土元素分析精度为 0.1×10^{-6},微量元素的测试精度均为$\leqslant5\times10^{-6}$,测试方法详见 Gao Jianfeng et al. (2003)。

锆石分选在河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,采用重液浮选和电磁分离方法进行挑选,在双目镜下对分选出的锆石进行人工挑选,尽量挑选无包裹体、无裂纹和透明度高、晶形完好的锆石颗粒作为测定对象。锆石阴极发光(CL)图像分析由北京锆年领航科技有限公司的高分辨热场发射能谱阴极发光室(SEM-EDS-CL)完成。锆石原位 U-Pb 同位素年龄分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,锆石定年所用仪器为 Thermo Fisher 公司 Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 New Wave UP 193 激光剥蚀系统。激光剥蚀斑束直径为 325 μm,激光剥蚀样品的深度为 20～40

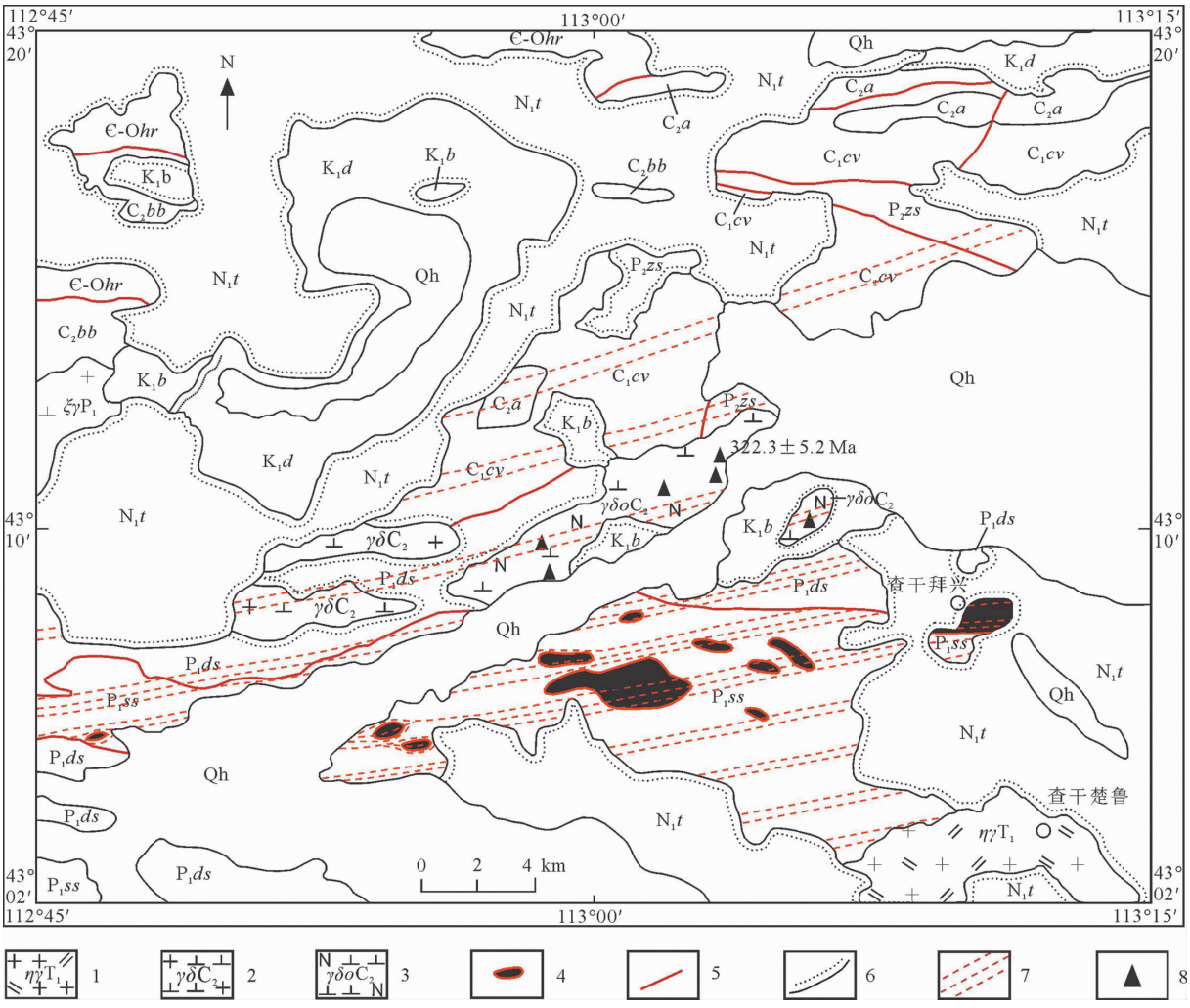

图 2　查干拜兴地区地质简图

Fig. 2　Simplified geological map of Chaganbaixing area

1—早三叠世二长花岗岩；2—晚石炭世花岗闪长岩；3—晚石炭世英云闪长岩；4—蛇绿构造混杂岩；5—断层界线；6—角度不整合接触；7—糜棱岩化带；8—采样位置；Qh—第四系；N_1t—中新统通古尔组；K_1d—下白垩统大磨拐河组；K_1b—下白垩统白音高老组；P_2zs—中二叠统哲丝组；P_2ds—中二叠统大石寨组；P_1ss—下二叠统寿山沟组；C_2a—上石炭统阿木山组；C_2cv—上石炭统查干诺尔组；C_2bb—上石炭统本巴图组；∈-Ohr—寒武系-奥陶系哈尔哈达组

1—Early Triassic monzogranite; 2—Late Carboniferous granodiorite; 3—Late Carboniferous tonalite; 4—ophiolite; 5—fault; 6—unconformity; 7—mylonitized zone; 8—sample location; Qh—Quaternary; N_1t—Miocene Tongguer Formation; K_1d—Lower Cretaceous Damoguaihe Formation; K_1b—Lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; P_2zs—Middle Permian Zhesi Formation; P_2ds—Middle Permian Dashizhai Formation; P_1ss—Lower Permian Shoushangou Formation; C_2a—Upper Carboniferous A'mushan Formation; C_2cv—Upper Carboniferous Chaogannuo'er Formation; C_2bb—Upper Carboniferous Benbatu Formation; ∈-Ohr—Cambrian-Ordovician Ha'erhada Formation

μm，锆石年龄计算采用国际上通用的标准锆石 GJ-1 作为外标，元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标，[29] Si 作为内标元素进行校正。数据处理采用 ICPMSDataCal 8.4 程序，并采用 Andersen(2002) 方法对测试数据进行普通铅校正，年龄计算及谐和图绘制采用 ISOPLOT(3.0 版)(Ludwig, 1991, 2003)完成。

3　分析测试结果

3.1　锆石 U-Pb 年龄

对查干拜兴英云闪长岩样品(GS2752)进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析(表 1)。中细粒英云闪长岩(GS2752)样品共选取 16 粒锆石进行测定，CL 图像显示岩石样品的锆石呈半自形双锥柱状及柱状，长宽比 1∶1～3∶1，发育清晰的岩浆韵

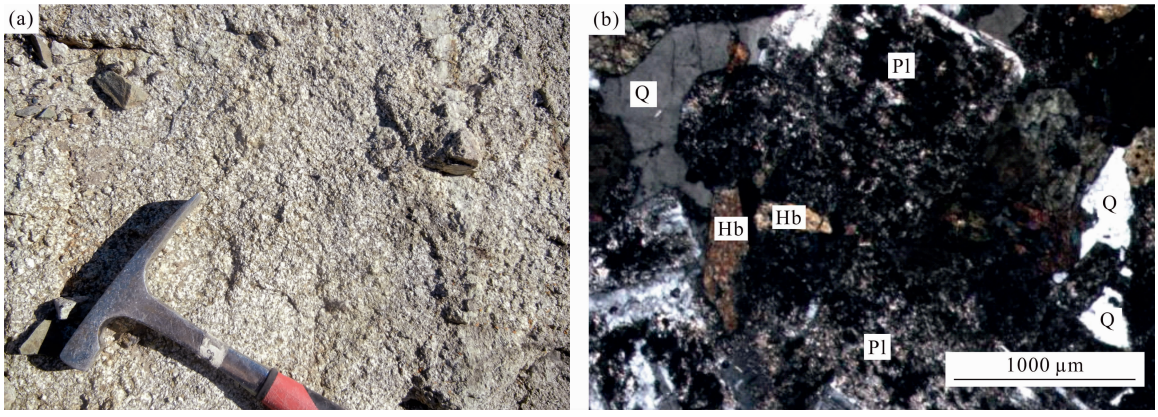

图 3 查干拜兴中细粒英云闪长岩宏观野外露头(a)及显微镜下照片(b)(正交偏光)

Fig. 3 Outcrop(a)and microphotograph (b)(perpendicular polarized light) of the Chaganbaixing medium-fine-grained tonalite

Pl—斜长石;Q—石英;Hb—角闪石

Pl—Plagioclase;Q—quartz;Hb—hornblende

律震荡环带(图 4a),说明这类锆石为酸性岩浆成因(Wu Yuanbao et al.,2004)。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果(表 1)显示,16 个测点的谐和度均较高,$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值为 308±3～339±6 Ma,16 个数据点均落在谐和线上或其附近(图 4b),加权平均年龄为 322.3±5.2 Ma(MSWD =3.9)(图 4c),认为可以代表该中细粒英云闪长岩的结晶年龄。

3.2 地球化学特征

查干拜兴 5 件英云闪长岩代表性样品的主量元素和微量元素分析结果见表 2。从表 2 可以看出,查干拜兴英云闪长岩样品富硅(SiO_2 含量为 65.57% ～ 67.89%,平均值为 66.74%),高铝(Al_2O_3 含量为 15.48%～16.55%,大于 15%),富钠、贫钾,Na_2O 含量为 4.13%～6.33%,K_2O 含量为 0.35%～1.89%,Na_2O/K_2O 值为 2.39～18.09,均大于 1%,MgO 含量为 0.76%～1.63%,均小于 3%,$Mg^{\#}$ ($Mg^{\#}=100\times Mg^{2+}/(Mg^{2+}+Fe^{2+})$)平均 46.88,较高;贫 TiO_2(0.32%～0.57%)和 P_2O_5(0.09%～0.15%)。在 SiO_2-(Na_2O+K_2O)(TAS)分类图解中(图 5a),样品点落入花岗闪长岩区域,其 $Al_2O_3/(CaO+Na_2O+K_2O)$(A/CNK)值在 0.93～1.12 之间,$Al_2O_3/(Na_2O+K_2O)$(A/NK)值为 1.43～1.86,属于准铝质—弱过铝质岩石。

在 SiO_2-K_2O 分类图解(图 5b)中,有 2 个样品落在低钾拉斑系列,3 个样品分布在中钾钙碱性系列区域内。查干拜兴英云闪长岩样品属于低钾(拉斑)—中钾钙碱性系列,与梅劳特乌拉蛇绿岩带中的埃达克岩样品的地球化学成分较为相似(Wang Jinfang et al.,2017)。

从表 2 中可以看出:查干拜兴英云闪长岩的稀土元素总量明显较低,∑REE 为 22.83×10^{-6}～80.63×10^{-6};稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(图 6a)显示,轻稀土(LREE)富集,贫重稀土元素(HREE),轻重稀土分异明显,$(La/Yb)_N=3.07$～10.42),稀土配分曲线为右倾型;无明显 Eu 异常(δEu=0.83～1.15);Yb 含量为 0.60×10^{-6}～1.20×10^{-6},均小于 1.9×10^{-6};Y 含量为 4.87×10^{-6}～12.10×10^{-6},均小于 18×10^{-6};Sr 含量为 371×10^{-6}～486×10^{-6},接近或大于 400×10^{-6},其地球化学特征符合典型埃达克岩的地球化学特征(Defant et al.,1990; Zhang Qi et al.,2003)。样品显示大离子亲石元素(LILE)Rb、K、Sr 和 U 相对富集,而高场强元素(HFSE)Nb、Ta 和 Ti(图 6a)相对亏损,具典型的俯冲相关岩浆岩的特征(Kelemen et al.,2003)。

在图 6b 中,查干拜兴英云闪长岩的微量元素模式与梅劳特乌拉蛇绿岩带中的埃达克岩(Wang Jinfang et al.,2017; Dong Peipei et al.,2020)的微量元素模式一致,具有 LILE(K、Rb 和 Sr)富集和 HFSE(Nb、Ta 和 Ti)亏损的特征,与大洋俯冲带有关的岛弧构造环境相一致(Defant et al.,1990; Kelemen et al.,2003)。

4 讨论

由于样品受到了不同程度的蚀变,所以一些易活动的元素(如 K, Na, Ba, Sr, Rb 等)会受到不同程度的影响(Zhang Zhaochong et al., 2012; Zhang Dongyang et al., 2012),所以本文在讨论岩石成因时将选择一些相对惰性的元素(如一些高场强元素)。

表 1　查干拜兴英云闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 1　LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analysis of Chaganbaixing tonalite

点号	元素含量 ($\times10^{-6}$)		同位素比值								年龄(Ma)			
	Pb	U	$^{206}Pb/^{238}U$	1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1σ	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ
1	1	13	0.0540	0.0010	0.3980	0.0300	0.0534	0.0041	0.0144	0.0010	339	6	340	26
2	1	14	0.0525	0.0011	0.3958	0.0273	0.0547	0.0038	0.0190	0.0008	330	7	339	23
3	2	40	0.0520	0.0008	0.3925	0.0163	0.0547	0.0022	0.0162	0.0004	327	5	336	14
4	1	19	0.0528	0.0008	0.4177	0.0198	0.0574	0.0027	0.0206	0.0007	332	5	354	17
5	2	31	0.0524	0.0008	0.3913	0.0149	0.0542	0.0021	0.0177	0.0005	329	5	335	13
6	2	30	0.0529	0.0007	0.4115	0.0180	0.0564	0.0024	0.0186	0.0006	332	5	350	15
7	1	22	0.0507	0.0012	0.3889	0.0304	0.0556	0.0043	0.0153	0.0009	319	8	334	26
8	1	14	0.0521	0.0011	0.3724	0.0355	0.0518	0.0050	0.0165	0.0011	328	7	321	31
9	1	23	0.0525	0.0009	0.3880	0.0193	0.0536	0.0027	0.0155	0.0005	330	6	333	17
10	1	20	0.0494	0.0008	0.3736	0.0231	0.0549	0.0033	0.0143	0.0005	311	5	322	20
11	0	0	0.0489	0.0004	0.3680	0.0286	0.0546	0.0043	0.0160	0.0004	308	3	318	25
12	2	30	0.0526	0.0010	0.3673	0.0172	0.0506	0.0023	0.0156	0.0006	330	6	318	15
13	2	40	0.0510	0.0007	0.3846	0.0154	0.0547	0.0022	0.0147	0.0004	321	4	330	13
14	3	47	0.0505	0.0006	0.3908	0.0128	0.0561	0.0019	0.0159	0.0003	318	4	335	11
15	3	48	0.0513	0.0007	0.3932	0.0157	0.0556	0.0021	0.0164	0.0004	322	5	337	13
16	1	19	0.0524	0.0008	0.3834	0.0200	0.0531	0.0028	0.0135	0.0007	329	5	330	17

注:测试单位为中国地质调查局天津地质调查中心;σ 为测年误差绝对值。

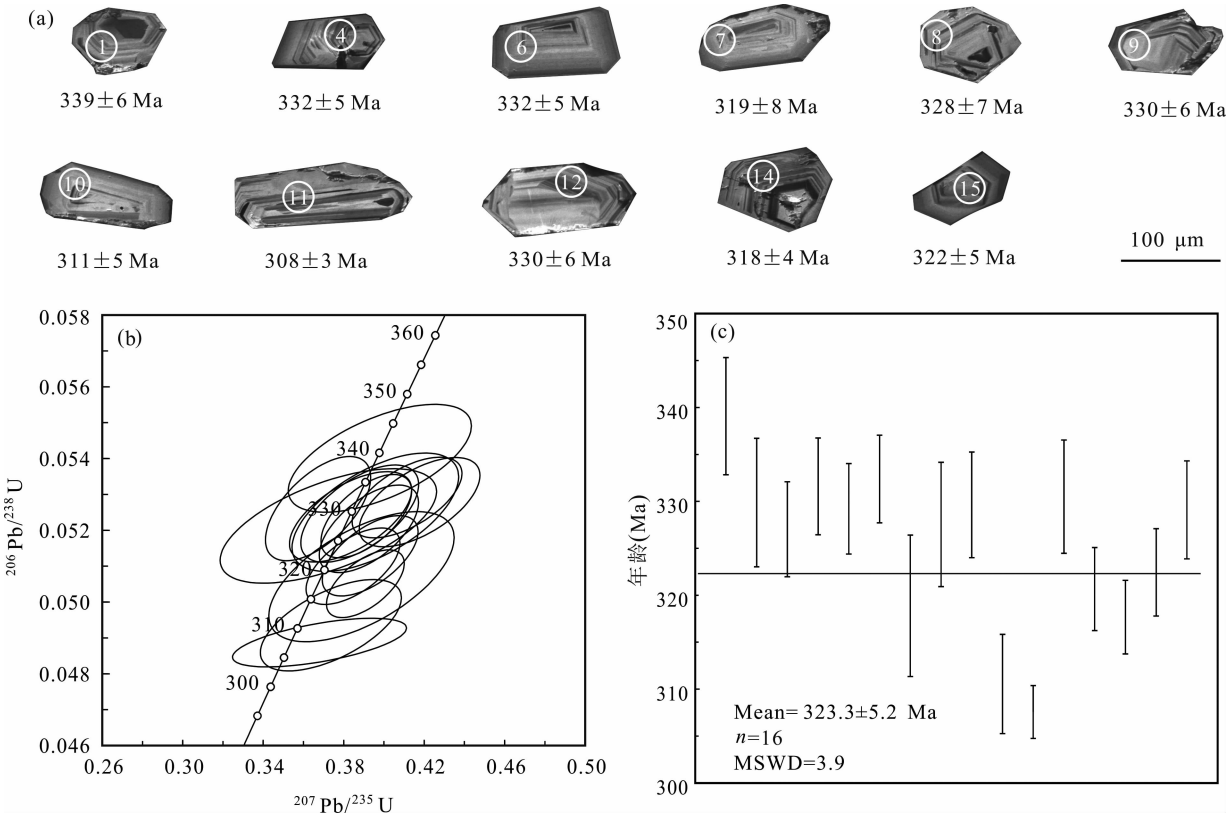

图 4　查干拜兴英云闪长岩锆石阴极发光代表图像(a)、锆石 U-Pb 谐和图(b)及加权平均年龄图(c)

Fig. 4　Representative cathodoluminescence images (a), U-Pb concordia diagram (b) and weihted average age (c) for zircons from the Chaganbaixing tonalite

查干拜兴埃达克岩样品 SiO_2 含量为 65.5%～67.89%，MgO 为 0.76%～2.63%，Al_2O_3 为 15.48%～16.55%，Na_2O 为 4.13%～6.33%，Na_2O/K_2O 值为 2.39～18.09，Sr 为 371×10^{-6}～486×10^{-6}，Y 为 4.87×10^{-6}～7.82×10^{-6}，Yb 为 0.60×10^{-6}～1.76×10^{-6}，稀土元素总量较低，LREE

表 2 查干拜兴英云闪长岩主量元素(%)和微量元素($\times10^{-6}$)分析结果

Table 2 Major (%) and trace ($\times10^{-6}$) elements analysis results of Chaganbaixing tonalite

样品号	GS1576-1	GS2752	GS2753	P21XT15	P21XT21
岩石名称	中细粒英云闪长岩			粗中粒英云闪长岩	
SiO_2	67.88	67.89	65.77	65.57	66.59
TiO_2	0.32	0.35	0.39	0.57	0.46
Al_2O_3	15.96	15.48	16.46	16.55	16.12
Fe_2O_3	2.32	1.46	1.90	1.15	1.18
FeO	0.27	1.48	1.18	1.34	1.34
MnO	0.05	0.06	0.09	0.07	0.07
MgO	0.76	1.33	1.29	1.49	1.63
CaO	3.94	2.80	4.82	3.04	3.14
Na_2O	5.07	6.33	5.08	4.65	4.13
K_2O	1.33	0.35	0.50	1.89	1.73
P_2O_5	0.09	0.10	0.11	0.14	0.15
LOS	1.72	1.99	2.07	1.83	1.89
总计	99.70	99.83	99.82	99.66	99.90
Na_2O/K_2O	3.81	18.09	10.16	2.46	2.39
$Mg^{\#}$	36.52	45.94	44.33	52.83	54.78
La	5.19	3.03	3.07	14.70	11.10
Ce	11.40	7.38	8.16	33.40	20.60
Pr	1.76	1.22	1.25	4.00	2.58
Nd	7.35	5.56	5.44	15.70	10.20
Sm	1.51	1.26	1.23	3.30	2.15
Eu	0.49	0.33	0.43	0.97	0.75
Gd	1.34	1.12	1.00	2.69	1.78
Tb	0.22	0.18	0.16	0.40	0.26
Dy	1.25	1.03	0.88	2.25	1.42
Ho	0.25	0.21	0.17	0.43	0.29
Er	0.77	0.60	0.51	1.22	0.73
Tm	0.13	0.10	0.08	0.18	0.12
Yb	0.96	0.70	0.60	1.20	0.76
Lu	0.17	0.11	0.10	0.19	0.13
∑REE	32.79	22.83	23.08	80.63	52.78
δEu	1.03	0.83	1.15	0.97	1.13
$(La/Yb)_N$	3.88	3.10	3.67	8.84	10.42
Y	7.38	5.60	4.87	12.10	7.82
Ni	5.92	6.28	8.84	5.75	6.68
Rb	20.30	6.42	8.40	40.30	36.00
Cr	9.47	9.21	10.5	7.61	7.92
Co	5.39	6.36	7.89	8.33	8.65
Zr	78.30	75.80	66.60	94.20	95.90
Hf	2.65	2.46	2.12	2.86	2.75
Ta	0.12	0.06	0.06	0.28	0.13
Sr	400.00	413.00	371.00	445.00	486.00
Ba	124.00	49.30	80.20	615.00	513.00
Nb	1.52	0.97	0.86	3.29	1.82
Th	0.99	0.42	0.38	3.84	3.44
U	0.66	0.67	0.97	1.05	0.86

富集、重稀土亏损,Eu 异常不明显(表 2,图 6),相对富集大离子亲石元素(LILE)K、Rb 和 Sr 等,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Ti 和 P 等,具有大洋俯冲带组分(SZC)和岛弧岩浆岩的地球化学特征。该埃达克岩的地球化学特征与中亚造山带东段内蒙古中部俯冲带岛弧型埃达克岩的地球化学特征相一致(Liu Dunyi et al.,2003; Zeng Junjie et al.,2008; Hao Baiwu et al.,2012; Liu Jianfeng et al.,2013)。在 Sr/Y-Y(图 7)图解中,样品投点均落入埃达克岩区域,与梅劳特乌拉蛇绿岩带中的埃达克岩样品投点近重合。因此,查干拜兴英云闪长岩应归属为埃达克岩。

近年来,有关埃达克岩的研究受到国内外学者的广泛关注,埃达克岩的成因目前主要有以下几种:① 俯冲洋壳的部分熔融(Defant et al.,1990)。② 加厚下地壳部分熔融(Zhang Qi et al.,2001)。③ 拆沉下地壳部分熔融(Xu Jifeng et al.,2002)。④ 基性岩浆的分离结晶(Castillo et al.,1999;Macpherson et al.,2006)。⑤ 岩浆混合作用(Streck et al.,2007)。

加厚地壳的下地壳部分熔融或拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩通常具有相对富钾、低 MgO 含量和 $Mg^{\#}$($Mg^{\#}<45$)(Rapp et al.,1999;Defant et al.,2001)的特征,且 Na_2O/K_2O 比值相对较小,一般认为多在 1~2,甚至于 $Na_2O/K_2O\leqslant1$,岩石中锆石通常含有壳源继承性锆石,主要与造山带碰撞造山后"去根"作用或大陆板内古老克拉通的"减薄"作用有关(Zhang Qi et al.,2001)。然而,查干拜兴埃达克岩的主量元素显示其为低钾(拉斑)系列—中钾钙碱性系列岩石(图 5b),明显富 Na_2O(4.13%~6.33%)、贫 K_2O(0.35%~1.89%),$Mg^{\#}$ 值相对较高($Mg^{\#}$ 平均值为 46.49)。因此,查干拜兴埃达克岩不是由加厚地壳或拆沉下地壳部分熔融形成的。

基性岩浆一般具有高的 MgO 含量和低的 Sr/Y(2.8~53.5,平均 22.8)值,若基性岩浆通过分离结晶演化成富硅的埃达克质岩浆,则 Sr/Y 值一般随着 $Mg^{\#}$ 的降低而升高。角闪石和单斜辉石在低压条件下分异稀土元素和 Y 等微量元素(Rapp et al.,1994),而且通常优先富集中稀土,其次是重稀土,亏损轻稀土元素(Green,1994)。角闪石分离结晶作用会导致中稀土 Dy 降低,所以角闪石的分离结晶作用会导致 Dy/Yb 降低。角闪石和单斜辉石矿物分离结晶会使残余熔体产生$(Dy/Yb)_N$和$(La/Yb)_N$之间具负相关关系;斜长石的分离结晶会导致 Sr 和 Eu 具有明显的负异常,斜长石富集 Sr,不富集 Y,所以斜长石的分离结晶作用会导致 Sr/Y 的降低。查干拜兴埃达克岩具有轻微 Eu 异常(δEu=0.83~1.13),$(Dy/Yb)_N$和$(La/Yb)_N$之间存在较好的正相关关系(图 8),Sr/Y 和 Dy/Yb 比值也没有

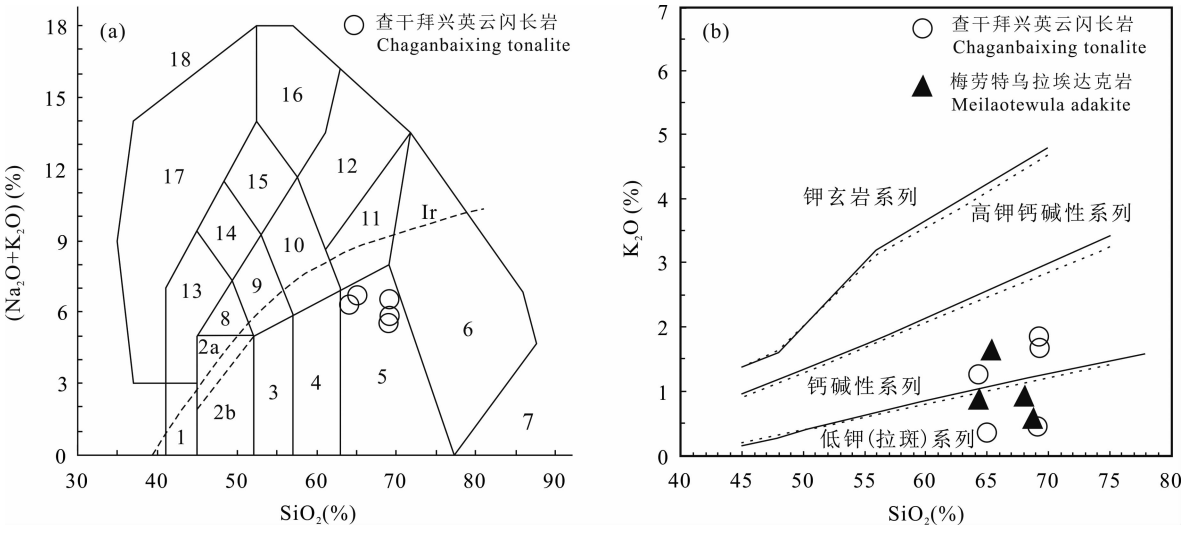

图 5　查干拜兴英云闪长岩 SiO_2-(Na_2O/K_2O)岩石分类图(a)(据 Middlemost, 1994)和 SiO_2-K_2O 分类图解(b)(据 Middlemost,1985)

Fig. 5　SiO_2-(Na_2O/K_2O)diagram(a)(after Middlemost, 1994) and SiO_2-K_2O diagram (b) (after Middlemost,1985)of the Chaganbaixing tonalite

梅劳特乌拉埃达克岩数据引自 Wang Jinfang et al. (2017);1—橄榄辉长岩;2a—碱性辉长岩;2b—亚碱性辉长岩;3—辉长闪长岩;4—闪长岩;5—花岗闪长岩;6—花岗岩;7—硅英岩;8—二长辉长岩;9—二长闪长岩;10—二长岩;11—石英二长岩;12—正长岩;13—副长石辉长岩;14—副长石二长闪长岩;15—副长石二长正长岩;16—副长正长岩;17—副长深成岩;18—霓方钠岩/磷霞岩/粗白榴岩;Ir—Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

Meilaotewula adakite data are shown after Wang Jinfang et al. (2017);1—peridotgabbro;2a—alkaline gabbro;2b—subalkaline gabbro;3—gabbroic diorite; 4—diorite; 5—granodiorite; 6—granite; 7—quartzolite; 8—monzogabbro; 9—monzodiorite; 10—monzonite; 11—quartz monzonite;12—syenite;13—foid gabbro;14—foid monzodiorite;15—foid monzosyenite;16—foid syenite;17—foidolite pluton;18—tawite/urtite/italite

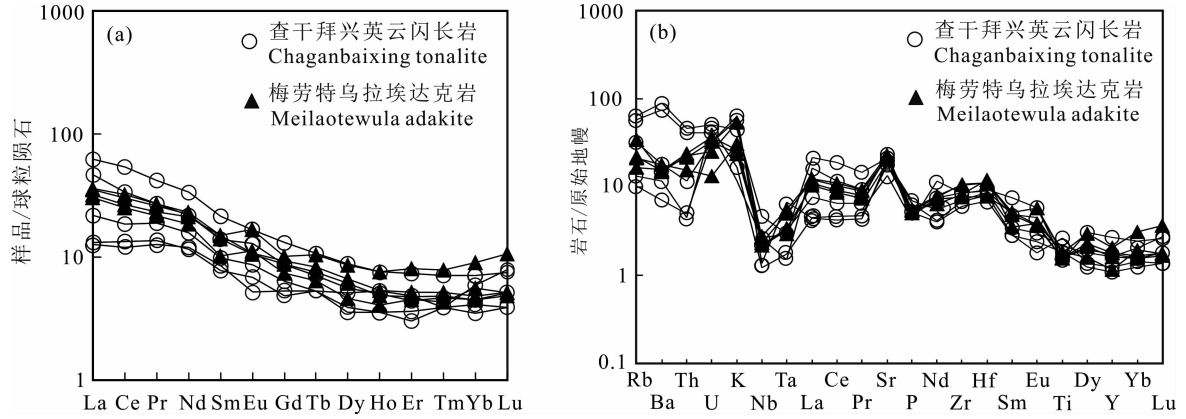

图 6　查干拜兴英云闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)(标准化值据 Boynton,1984)和微量元素原始地幔标准化配分曲线图(b)(标准化值据 Sun et al. ,1989)

Fig. 6　Chondrite-normalized REE distribution patterns(a)(normalizing values after Boynton,1984)and primitive mantle-normalized trace element spider diagram(b)(normalizing values after Sun et al. ,1989)of the Chaganbaixing tonalite

梅劳特乌拉埃达克岩数据据 Wang Jinfang et al. (2017)和 Dong Peipei et al. (2020)

Meilaotewula adakite data are shown after Wang Jinfang et al. (2017)and Dong Peipei et al. (2020)

呈现出随 SiO_2 的增加而降低的趋势(图 9a、b)。因此,不具备玄武质岩浆分离结晶成因特征。

岩浆混合作用造成微量元素比值如 La/Yb、Rb/Sr 和 U/Th 随 SiO_2 含量的增加和 MgO 含量的减少(即下地壳熔体比例的增加)而增加(Zhang Hongfu et al. ,2008)。查干拜兴埃达克岩 La/Yb、

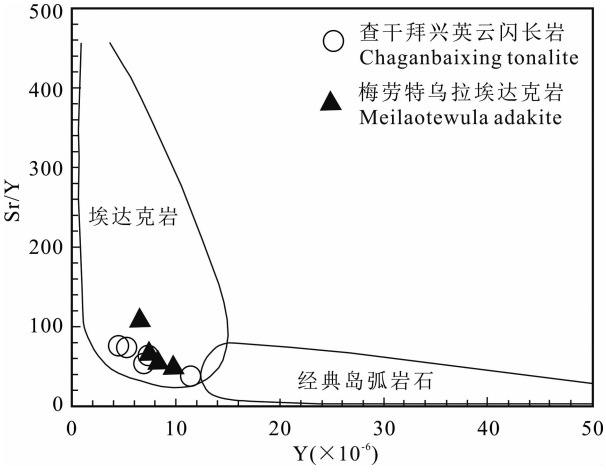

图 7 查干拜兴英云闪长岩 Y-Sr/Y 构造判别图解
(据 Defant et al.,1990;Martin,1999)
Fig. 7 Y-Sr/Y diagram of the Chaganbaixing tonalite
(after Defant et al.,1990;Martin,1999)
梅劳特乌拉埃达克岩数据 Wang Jinfang et al.(2017)和 Dong Peipei et al.(2020)
Meilaotewula adakite data are shown after Wang Jinfang et al. (2017) and Dong Peipei et al. (2020)

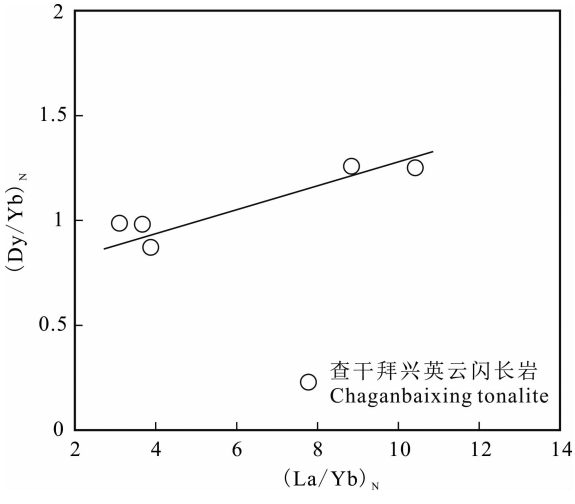

图 8 查干拜兴英云闪长岩$(Dy/Yb)_N$-$(La/Yb)_N$协变图
Fig. 8 $(Dy/Yb)_N$-$(La/Yb)_N$ diagram of the Chaganbaixing tonalite

Rb/Sr 和 U/Th 比值没有呈现出随 SiO_2 含量的增加和 MgO 含量的减少而增加的现象(图 10)。因此,查干拜兴埃达克岩不是由岩浆混合作用形成。

查干拜兴埃达克岩高铝、高钠(Na_2O 为 4.13%~6.33%,Na_2O/K_2O 值为 2.39~18.09)、高 Sr、贫 Y、Yb,相对富集大离子亲石元素(LILE)K、Rb、和 Sr,亏损高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Zr、Ti 和 P 等(表 2,图 6),稀土元素总量较低,贫重稀土元素,轻重稀土分馏明显,δEu=0.83~1.13,轻微 Eu 异常,与中亚造山带东段内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩带中的埃达克岩地球化学特征较一致,梅劳特乌拉埃达克岩与梅劳特乌拉 SSZ 型蛇绿岩中的前弧玄武岩(FAB)、玻安岩和高镁安山岩等共同组成古亚洲洋东段洋内弧前弧岩石组合,形成于俯冲带岛弧环境(Wang Jinfang et al.,2017,2021b;Li Yingjie et al.,2020b; Dong Peipei et al.,2020)。富钠、贫钾和较高的 Na_2O/K_2O 值是俯冲洋壳玄武岩的特征。与玄武岩相比,贫重稀土元素(HREE)和 Y、高 Sr 表明查干拜兴埃达克岩是俯冲洋壳在中高压条件下部分熔融形成的。此外,与典型的埃达克岩相比,查干拜兴埃达克岩中硅和镁的含量更高(表 2)。一般认为,玄武岩部分熔融形成的熔体 $Mg^{\#}<45$,而大洋俯冲板片熔融作用形成的初始埃达克质熔体在上升至地表过程中需穿越地幔楔,它必然与地幔橄榄岩发生物质交换与相互作用,这种相互作用会使残余熔体的 MgO 和 $Mg^{\#}$ 含量增高(Atherton et al.,1993;Rapp et al.,1995)。因此,查干拜兴埃达克岩可能是俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克质熔体,经俯冲带上升至地表过程中与地幔楔橄榄岩发生相互作用而形成。

与迪彦庙前弧玄武岩相比,查干拜兴埃达克岩具有较高的 Th 含量(平均值 1.81×10^{-6})和较高的 Th/La(0.12~0.31)、Th/Sm(0.31~1.60)、Th/Yb(0.60~4.52)和 Th/Ce(0.05~0.17)比值(表 2),Th 元素通常富集于沉积物中,反映岩浆源区有大洋俯冲沉积物组分的加入;反映出从早期较少大洋俯冲沉积物组分参与的前弧玄武岩到晚期俯冲作用加强的埃达克岩的洋内弧地球化学渐进演化特征。

综上所述,查干拜兴埃达克岩具有洋内弧的地球化学特征,可能形成于洋内弧环境,应属于大洋俯冲带岩浆作用和洋内弧型岩浆岩,可与典型洋内弧型岩浆岩相对比(Wood,1980;Condie,1986;Shervais,2001)。因此,查干拜兴埃达克岩可能形成于古亚洲洋东段洋内弧的前弧环境或洋内俯冲的初始阶段。

查干拜兴埃达克岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 322.3±5.2 Ma,与内蒙古中部地区晚石炭世俯冲带岛弧型岩浆岩形成年龄相吻合(Li Chengdong et al.,2007; Zeng Junjie et al.,2008; Hao Baiwu et al.,2012; Wang Shuai et al.,2021; Wang Jinfang et al.,2021a,2021b),结合区域上近年来陆续识别出的早石炭世迪彦庙蛇绿岩(~340

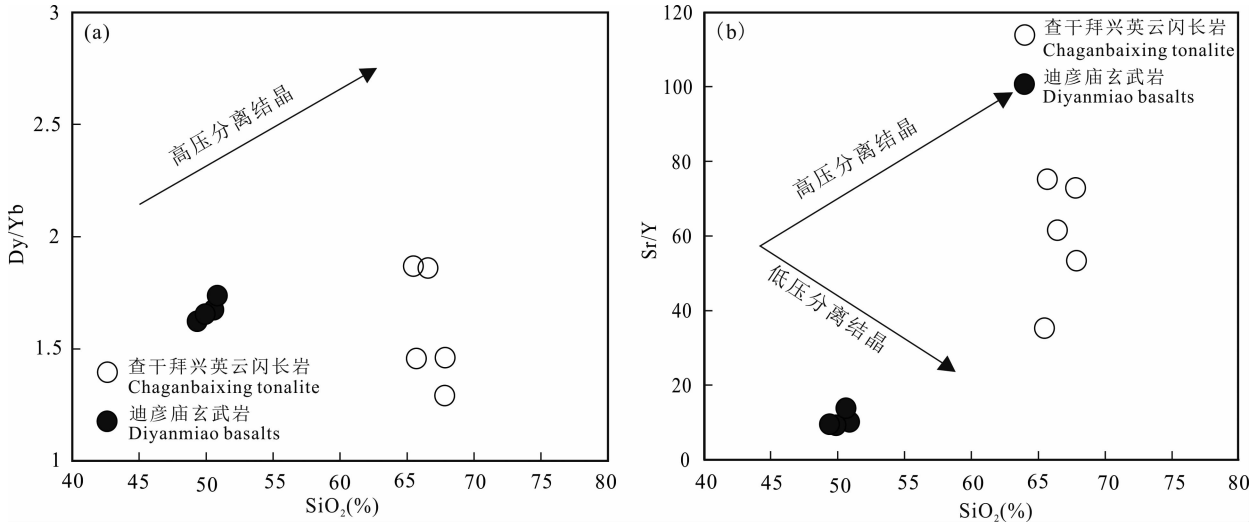

图 9　查干拜兴英云闪长岩 Dy/Yb-SiO_2 图解(a)(据 Li Yingjie et al.，2020b)、Sr/Y-SiO_2 图解(b)(据 Li Yingjie et al.，2020b)

Fig. 9　Dy/Yb-SiO_2 diagram (a) (after Li Yingjie et al.，2020b) and Sr/Y-SiO_2 diagram (b) (after Li Yingjie et al.，2020b) of the Chaganbaixing tonalite

高压分离结晶包括石榴子石(据 Macperson et al.，2006)，低压分离结晶包括橄榄石＋单斜辉石＋斜长石＋角闪石＋钛磁铁矿(Castillo et al.，1999)；迪彦庙玄武岩数据据 Li Yingjie et al.(2018b)

High-pressure fractionation involving garnet (after Macperson et al.，2006)，low-pressure fractionation involving olivine＋clinopyroxene＋plagioclase＋amphibole＋titanomagnetite(Castillo et al.，1999)；Diyanmiao basalts data are shown after Li Yingjie et al.(2018b)

Ma)(Li Yingjie et al.，2018a)、前弧玄武岩(335.6 Ma)(Li Yingjie et al.，2020a)、玻安岩(～328 Ma)(Li Yingjie et al.，2020a)、以及晚石炭世马尼塔埃达克岩(315 Ma)(Wang Shuai et al.，2021)，表明在晚石炭世之前，古亚洲洋东段仍未闭合，而是正在经历洋内俯冲过程。结合国内外洋内初始俯冲作用的岩石组合相关成果，可初步建立早石炭世-晚石炭世古亚洲洋东段洋内初始俯冲作用的岩石组合序列：SSZ 型蛇绿岩(蛇纹石化方辉橄榄岩、层状—块状辉长岩)、前弧枕状玄武岩、玻安岩、埃达克岩，可与马里亚纳等典型洋内弧洋内初始俯冲作用岩石组合序列相对比(Reagan et al.，2010；Xiao Qinghui et al.，2016)。迪彦庙 FAB 可能代表初始俯冲阶段，源区无明显的俯冲组分，很少或没有俯冲板片物质输入的亏损 MORB 型地幔发生减压熔融产生 FAB；玻安岩代表随着大洋板片的渐进性俯冲，来自俯冲板片的富水流体或熔体使残留的、更亏损的地幔在浅层发生高度熔融形成；新发现的埃达克岩可能代表俯冲洋壳进一步俯冲到比较深的位置(达到石榴子石相)发生部分熔融形成，然而，一般情况下，俯冲的洋壳比较冷，不能发生部分熔融，所以必须是年轻的洋壳，即大洋中脊离海沟比较近，此时俯冲洋壳比较热才能发生部分熔融。以上信息揭示，早石炭世—晚石炭世古亚洲洋东段可能发生了洋脊初始俯冲作用。

因此，出露于索伦缝合带中段的查干拜兴埃达克岩的识别与确认为研究古亚洲洋东段索伦缝合带的洋内初始俯冲详细过程提供了岩石学证据和时间约束。结合区域的 SSZ 型蛇绿岩、前弧玄武岩、玻安岩和埃达克岩年代学结果显示，晚石炭世由俯冲洋壳部分熔融而形成的埃达克质岩浆，发生了侵入作用(形成英云闪长岩)，可能为洋脊俯冲的产物。晚石炭世记录了古亚洲洋东部洋内弧的初始俯冲阶段，在中晚泥盆世古亚洲洋并没有闭合。

5　结论

(1)查干拜兴英云闪长岩属于低钾拉斑系列与中钾钙碱性系列的过渡岩石，其地球化学特征符合埃达克岩的地球化学特征，应属于埃达克岩，具有洋内弧性质，可能形成于洋内弧环境，为洋脊初始俯冲洋壳部分熔融的产物。

(2)查干拜兴埃达克岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 322.3±5.2 Ma，形成于晚石炭世，表明古亚洲洋东段在晚石炭世可能发生了洋内俯冲作用。

(3)查干拜兴埃达克岩和区域石炭纪 SSZ 型蛇绿岩、前弧玄武岩、玻安岩和埃达克岩的时空分布与演化关系，反映了晚石炭世在索伦缝合带古亚洲洋

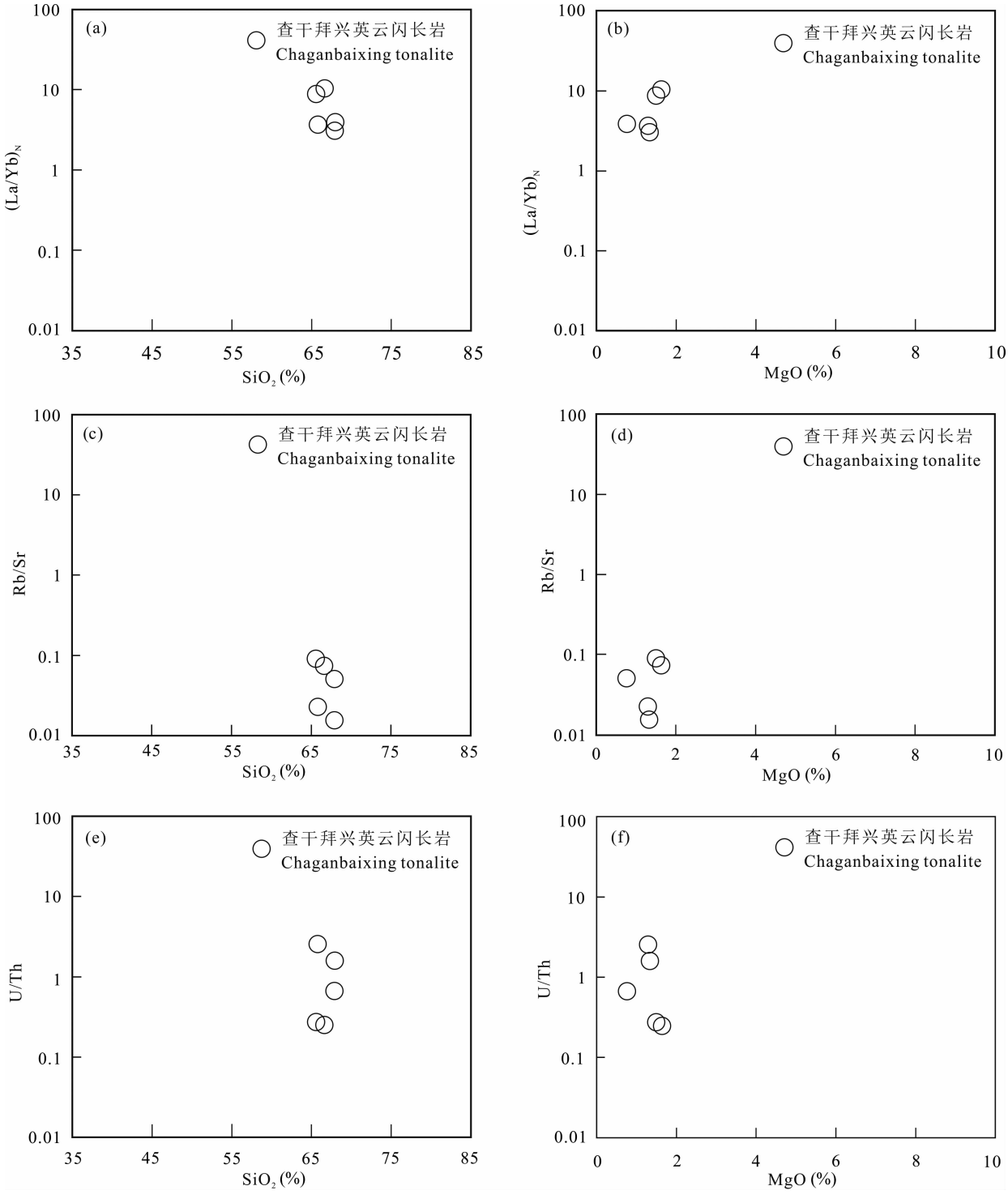

图 10 查干拜兴英云闪长岩 SiO_2 和 MgO 含量与$(La/Yb)_N$、Rb/Sr、U/Th 比值图解(据 Zhang et al.,2008)

Fig. 10 SiO_2 and MgO contents versus $(La/Yb)_N$, Rb/Sr, U/Th ratios diagram of the Chaganbaixing tonalite(after Zhang et al.,2008)

仍然存在,可能主要表现为洋内俯冲与洋内弧岩浆作用。

致谢:本文在野外调查和写作过程中得到中国地质大学(北京)袁国礼教授、王根厚教授等的热情指导和帮助,河北地质大学王帅、张夏炜等也做了大量工作,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that

do not report ^{204}Pb. Chemical Geology, 192: 59～79.

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

Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 21(1): 87～110.

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. Developments in Geochemistry, 2: 63～114.

Castillo P R. Janney P E, Solidum R U. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. Contributions to Mineralogy and Petrology, 134: 33～51.

Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early Protero zoic supracrustal rocks in the Southwest United States. Journal of Geology, 94: 845～861.

Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662～665.

Defant M J, Kepezhinskas P. 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. EOS, 82: 62～69.

Dong Peipei, Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang. 2020. The Early Permian adakite in the Meilaotewula ophiolite, Inner Mongolia and intra-oceanic subduction in the eastern Palaeo-Asian Ocean. Geological Bulletin of China, 39(9): 1474～1487 (in Chinese with English abstract).

Drummond M S, Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. Journal of Geophysical Research, 95(B13): 21503～21521.

Gao Jianfeng, Lu Jianjun, Lai Mingyuan, Lin Yuping, Pu Wei. 2003. Analysis oftrace elements in rock samples using HR-ICPMS. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 39(6): 844～850 (in Chinese with English abstract).

Green T H. 1994. Experimental sudies of trace-element partitioning applicable to igneous petrogenesis-Sedona, 16 years later. Chemical Geology, 117: 1～36.

Hao Baiwu. 2012. Discovery of adakite granite in Narenwula, Inner Mongolia: its genesis, zircon U-Pb ages and tectonic significance. Mineral Petrol, 32(1): 28～39 (in Chinese with English abstract).

Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Qu Xiaoming, Rui Zongyao, Mo Xuanxue. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east — west extension in southern Tibet. Earth and Planetary Science Letters, 220: 139～155.

Jahn B M, Griffin W L, Windley B. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from central Asia. Tectonophysics, 328: vii～x.

Jahn B M, Windley B, Natal'in B, Dobretsov N. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia. Journal of Asian Earth Sciences, 23(5): 599～603.

Jahn B M. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. Geological Society London Special Publications, 226: 73～100.

Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner A, Brian F. Windley, Shi Yuruo, Zhang Fuqin, Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Wei, Zhang Qi, Zhang Liqiao, Ren Jishun. 2008. Time scale of the 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.

Jian Ping, Liu Dunyi, Kröner A, Brian F. Windley, Shi Yuruo, Zhang Wei, Zhang Fuqin, Miao Laicheng, Zhang Liqiao, Dondov Tomurhuu. 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.

Jian Ping, Kröner A, Windley B F, Ping Jian, Alfred Krner, Brian F. Windley, Shi Yuruo, Zhang We, Zhang Liqao , Yang Weiran. 2012. Carboniferous and cretaceous mafic-ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): a SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral "Hegenshan ophiolite". Lithos, 142-143: 48～66.

Kelemen P B, Hangh K, Ureenem A R. 2003. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In: Rudnick RL, ed. Treatise On Geochemistry, 3: 593～659

Li Chengdong, Zhang Fuqi. Miao Laicheng, Xie Hangqiang, Xu Yawei. 2007. Zircon SHRIMP geochronology and geochemistry of Late Permian high-Mg andesites in Seluohe area, Jan province, China. Acta Petrologica Sinica, 23(4): 767～776 (in Chinese with English abstract).

Li Tingdong, Xiao Qinghui, Pan Guitang, Chen Songnian, Ding Xiaozhong, Liu Yong. 2019. A Consideration about the development of ocean plate geology. Earth Science, 44: 1441～1451(in Chinese with English abstract).

Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, Dong Peipei. 2012. Recognition of Diyanmiao ophiolite in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 28(4): 1282～1290 (in Chinese with English abstract).

Li Yingjie, Wang Jinfang, Dong Peipei, He Qiuli, Zhang Hongchen, Song Peng. 2013. Geochemical characteristics of Baiyinbulage ophiolite in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica. 29(8): 2917～2730 (in Chinese with English abstract).

Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, Dong Peipei. 2015. Recognition of Meilaotewula ophiolite in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia. Acta Petrologica Sinica, 31(5): 1461～1470 (in Chinese with English abstract).

Li Yingjie, Wang Genhou, Santosh M, Wang Jinfang, Dong Peipei, Li Hongyang. 2018a. Supra-subduction zone ophiolites from Inner Mongolia, North China: implications for the tectonic history of the southeastern Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 59: 126～143.

Li Yingjie, Wang Jinfang, Li Hongyang, Dong Peipei. 2018b. Discovery and significance of the Dahate fore-arc basalts from the Diyanmiao ophiolite in Inner Mongolia. 34(2): 469～482 (in Chinese with English abstract).

Li, Yingjie, Wang Genhou, Santosh M, Wang Jinfang, Li Hongyang. 2020a. Subduction initiation of the SE Paleo-Asian Ocean: evidence from a well preserved intra-oceanic forearc ophiolite fragment in central Inner Mongolia. Earth and Planetary Science Letters, 535: 116087.

Li Yingjie, Wang Jinfang, Xin Houtian, Dong Peipei, Li Hongyang. 2020b. Subduction initiation in the southeastern Palaeo-Asian Ocean: constraints from early Permian adakites in suprasubduction zone ophiolites, central Inner Mongolia, North China. Geological Journal, 55: 2044～2061.

Liu Dunyi, Jian Ping, Zhang Qi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Shi Guanghai, Zhang Lvqiao, Tao Hua. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite. Inner Mongolia: evidence for the Early Paleozoic subduction. Acta Geologica Sinica, 77(3): 317～330 (in Chinese with English abstract).

Liu Jianfeng, Li Jinyi, Chi Xiaoguo, Qu Junfeng, Hu Zhaochu, Fang Shu, Zhang Zhong. 2013. A late Carboniferous to early early Permian subduction-accretion complex in Daqing pasture, southeastern Inner Mongolia: evidence of northward subduction beneath the Siberian paleoplate southern margin. Lithos, 177: 285～296.

Liu Yongjiang, Li Weiming, Feng Zhengqiang, Wen Quanbo, Neubauer F, Liang Chenyue. 2017. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 43: 123～148.

Ludwig K R. 1991. Isotope: a plotting and regression program for radiogenic-isotope data. US Geological Survey Open-File Report, 39: 91～445.

Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3. 00: A

Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronological Center. Special Publication, 4: 71.

Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines. Earth and Planetary Science Letters, 243: 581～593.

Martin, H. 1999. Adakitic magmas:modern analogues of Archaean gran itoids. Lithos, 46: 411～429.

Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, Shi Yuruo, Guo Feng. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling rogenic Belt, China. Journal of Asian Earth Science, 32(5-6): 348～370.

Middlemost E A K. 1985. Magmas and Magmatic Rocks. London: Longman.

Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Science Reviews, 37: 215～224.

Rapp R P. 1994. Partial melting of metabasalts at 2—7 GPa: Experimental results and implications for lower crustal and subduction zone processes. Mineralogical Magazine, 58A: 760.

Rapp R P, Watson E B. 1995. De hydration melting of meta basalt at 8 ～ 32 kbar: implications for continental growth and crustmantle recycling. Journal of Petrology, 36(4): 891～931.

Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, ApplegateG S. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge; experimental constraints at 3. 8 GPa. Chemical Geology, 160: 335～356.

Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, Kelley K A, Ohara Y, Blichert-Toft J, H. Bloomer S, Cash J, Fryer P, B. Hanan B, y Hickey-Vargas R, Ishii T, Kimura J I, W. Peate D, C. Rowe M, Woods M. 2010. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 11: Q03X12.

Reagan M K, McClelland W C, Girard G, Goff K R, Peate D W, Ohara Y, Stern J R. 2013. The geology of the southern Mariana fore-arc crust: implications for the scale of Eocene volcanism in the western pacific. Earth and Planetary Science Letters, 380: 41～51.

Sheppard S, Griffin T J, Tyler I M, Page R W. 2001. High and low K granites and adakites at a Paleoproterozoic plate boundary in northwestern Australia. Journal of the Geological Society, 158(3): 547～560.

Shervais J W. 2001. Birth, death and resurrection: the life cycle of sprasubduction zone ophiolites. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2(1): 148～159.

Song Shuguang, Wang Mingming, Xu Xin, Wang Chao, Niu Yaoling, Allen M B, Su Li. 2015. Ophiolites in the Xing'an-Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events. Tectonics, 34: 2221～2248.

Streck Martin J, Leeman William P, Chesley John. 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt. Geology, 35: 351～354.

Stern C R, Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. Contributions to Mineralogy & Petrology, 123(3): 263～281.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 42: 313～345.

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2017. Discovery of Early Permianintra-oceanic arc adakite in the Meilaotewula ophiolite inner Mongolia and its evolution model. Acta Geologica Sinica, 91(8): 1776～1795 (in Chinese with English abstract).

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2021a. Late Carboniferous TTG magmatic event in the Hegenshan suture zone: zircon U-Pb geochronology and geochemical constraints from the Huduge trondhjemi te. Acta Geologica Sinica, 95(2): 396～412 (in Chinese with English abstract).

Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, Dong Peipei. 2021b. Discovery of the Late Carboniferous adakite in the Erenhot-Hegenshan suture zone and intra-oceanic subduction of the Paleo-Asian Ocean. Geology in China, 48(2): 520～535 (in Chinese with English abstract).

Wang Shuai, Li Yingjie, Wang Jinfang, Dong Peipei, Li Hongyang, Guo Leiliang, Wang Xuanchen. 2021. Discov-ery of Late Carboniferous adakite in Manita, Inner Mongolia and its constraints on intra-oceanic subduction in eastern Paleo-Asian Ocean. Geological Bulletin of China, 40(1): 82～94(in Chinese with English abstract).

Windley B F, Allen M B, Zhang C, Zhao Z Y, Wang G R. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan range, central Asia. Geology, 18: 128～131.

Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian orogenic belt. Journal of the Geological Society, 164: 31～47.

Wood D A. 1980. The application of Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to est- ablishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province. Earth and Planetary Science Letters, 50: 11～30.

Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1554～1569.

Xu Bei, Charvet J, Chen Yan, Zhao Pan, Shi Guangzhong. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evoluti- on of the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 23: 1324～1364.

Xu Guo, Liu Huichuan, Li Yinglei, Xu Zhan, Xie Yan. 2019. Early Permian Sunidyouqi suprasubduction-zone ophiolites in the central Solonker suture zone (Inner Mongolia, China). Geoscience Frontiers, 3(10): 1101～1111.

Xu Jifeng, Shinjio R, Defant M J, Wang Qiang, Rapp R P. 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China : partial melting of delaminated lower continental crust? Geology, 12: 1111～1114.

Xu Wenliang, Hergt J M, Gao Shan, Pei Fuping, Wang Wei, Yang Debin. 2008. Interaction of adakitic meltperidotite: implications for the high-Mg# signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton. Earth and Planetary Science Letters, 265(1-2): 123～137.

Xiao Qinghui, Li Tingdong, Pan Guitang, Lu Songnian, Ding Xiaozhong, Deng Jinfu, Feng Yimin, Liu Yong, Kou Caihua, Yang Linlin. 2016. Petrologic ideas for identification of ocean-continent transition: recognition of intra-oceanic arc and initial subduction. Geology in China, 43(3): 721～737 (in Chinese with English abstract).

Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretionleading to collision and the Permian Solon- ker Suture, Inner Mongolia, China: termination of the Central Asian Orogenic Belt. Tectonics, 22(6): 1069～ 1090.

Xiao Wenjiao, Windley B F, Huang Baochun, Han Chunming, Yuan Chao, Chen Hanlin, Sun Min, Sun Shu, Li Jiling. 2009. End-Permian to mid-Triassic ermination of the accretionary processes of the southern Altaids: implications for the geodyna-mic evolution, Phanerozoic continental growth, and metallogeny of Central Asia. Int J Earth Sci-Geol Rundsch, 98: 1189～1217.

Xiao Wenjiao, Song Dongfang, Windley B F, Li Jiliang, Han Chunming, Wan Bo, Zhang Jien, Ao Songjian, Zhang Zhiyong. 2019. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt. Science

China Earth Sciences, 49(10): 1512～1545 (in Chinese with English abstract).

Zeng Junjie, Zheng Youye, Qi Jianhong, Dai Fanghua, Zhang Gangyang, Pang Yingchun, Wu Bin. 2008. Foundation andgeological significance of adakite granite at Guyang of Inner Mongolia. Earth Science-Journal of China University of Geosciences. 33(6): 755～763 (in Chinese with English abstract).

Zhang Hongfu, Shao Ji'an. 2008. Volcanic lavas of the Yixian Formation in western Liaoning province, China: Products of lower crust delamination or magma mixing? Acta Petrologica Sinica, 24(1): 37～48(in Chinese with English abstract).

Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, Wang Yan, Zhao Taiping, Hao Jie, Guo Guangjun. 2001. An East China Plateau in mid-late Yanshanian Period Implication from adakites. Chinese Journal of Geology, 36(2): 248～255 (in Chinese with English abstract).

Zhang Qi, Wang Yan, Wang Yuanlong. 2003. On the relationship between adakite and its tectonic setting. Geotectonica et Metallogenia, 27(2): 706～713 (in Chinese with English abstract).

Zhang Dongyang, Zhang Zhaochong, Encarnación John, Xue Chunji, Duan Shigang, Zhao Zhidan, Liu Junlai, 2012. Petrogenesis of the Kekesai composite porphyry intrusion, western Tianshan, NW China: implications for metallogenesis, tectonic evolution and continental growth during Late Paleozoic time. Lithos, 146-147: 65～79.

Zhang Zhaochong, Kang Jianli, Kusky Timothy, Santosh M., Huang He, Zhang Dongyang, Zhu Jiang, 2012. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of Neoproterozoic basalts from Sugetbrak, northwest Tarim block, China: implications for the onset of Rodinia supercontinent breakup. Precambrian Research, 220-221: 158～176.

Zhao Pan, Xu Bei, Tong Qinlong, Chen Yan, Faure M. 2016. Sedimentological and geochronological constraints on the Carboniferous: evolution of central Inner Mongolia, southeastern Central Asian Orogenic Belt: inland sea deposition in a post-orogenic setting. Gondwana Research, 31: 253～270.

Zhao Pan, Xu Bei, Zhang Chenhao. 2017. A rift system in southeastern Central Asian Orogenic Belt: constraint from sedimentological, geochronological and geochemical investigations of the Late Carboniferous—Early Permian strata in northern Inner Mongolia (China). Gondwana Research, 47: 342～357.

参　考　文　献

董培培，李英杰，王金芳，李红阳. 2020. 内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中早二叠世埃达克质安山岩的发现与古亚洲洋东段洋内俯冲. 地质通报，39(9): 1474～1487.

高剑峰，陆建军，赖鸣远，林雨萍，濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分析. 南京大学学报（自然科学版），39(6): 844～850.

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

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

李廷栋，肖庆辉，潘桂棠，陆松年，丁孝忠，刘勇. 2019. 关于发展洋板块地质学的思考. 地球科学，44: 1441～1451.

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

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

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

李英杰，王金芳，王根厚，李红阳，董培培. 2018b. 内蒙古迪彦庙蛇绿岩带达哈特前弧玄武岩的发现及其地质意义. 岩石学报，34(2): 469～482.

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

王金芳，李英杰，李红阳，董培培. 2017. 内蒙古梅劳特乌拉蛇绿岩中埃达克岩的发现及其演化模式. 地质学报，91(8): 1776～1795.

王金芳，李英杰，李红阳，董培培. 2021a. 贺根山缝合带晚石炭世 TTG 岩浆事件：奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学制约. 地质学报，95(2): 396～412.

王金芳，李英杰，李红阳，董培培. 2021b. 二连—贺根山缝合带晚石炭世埃达克岩的发现及古亚洲洋洋内俯冲作用. 中国地质，48(2): 520～535.

王帅，李英杰，王金芳，董培培，李红阳，郭雷亮，汪轩辰. 2021. 内蒙古西乌旗晚石炭世马尼塔埃达克岩的发现及其对古亚洲洋东段洋内俯冲的约束. 地质通报，40(1): 82～94.

肖庆辉，李廷栋，潘桂棠，陆松年，丁孝忠，邓晋福，冯益民，刘勇，寇彩化，杨琳琳. 2016. 识别洋陆转换的岩石学思路洋内弧与初始俯冲的识别. 中国地质，43(3): 721～737.

肖文交，宋东方，Windley B F，李继亮，韩春明，万博，张继恩，敖松坚，张志勇. 2019. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展. 中国科学，49(10): 1512～1545.

曾俊杰，郑有业，齐建宏，代芳华，张刚阳，庞迎春，武彬. 2008. 内蒙古固阳地区埃达克质花岗岩的发现及其地质意义. 地球科学：中国地质大学学报，33(6): 755～762.

张宏福，邵济安. 2008. 辽西义县组火山岩：拆沉作用还是岩浆混合作用的产物？岩石学报，24(1): 37～48.

张旗，钱青，王二七，王焰，赵太平，郝杰，郭光军. 2001. 燕山中晚期的中国东部高原：埃达克岩的启示. 地质科学，36(2): 248～255.

张旗，王焰，王元龙. 2003. 埃达克岩与构造环境. 大地构造与成矿学，27(2): 706～713.

Petrogenesis of the Late Carboniferous adakite in Chaganbaixing, Inner Mongolia and constraints of intra-oceanic subduction

DONG Peipei[1,2], LI Yingjie*[1,2], XU Zhan[3], JU Wenxin[3], WANG Jinfang[1], LI Hongyang[1]

1) *College of the Earth Sciences, Heibei GEO University, Shijiazhuang, Hebei* 050031, *China*;

2) *Hebei Key Laboratory of Strategic Critical Mineral Resources, Heibei GEO University, Shijiazhuang, Hebei* 050031, *China*;

3) *Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot, Inner Mongolia* 010020, *China*

* *Corresponding author*: *liyingjie*820@126.*com*

Abstract

Due to the lack of reliable discovery and systematic study of adakitic rocks, it is not clear whether there is an intra oceanic initial arc igneous rock association and intra oceanic subduction in Solonker area, Inner Mongolia, which restricts the further understanding of the Paleozoic subduction extinction process of the eastern part of the paleo Asian Ocean. The study reports that the late Carboniferous adakite in the Suniteyouqi ophiolite, Inner Mongolia, consists mainly of tonalite. The zircon U-Pb LA-ICP-MS dating result reveals that the Chaganbaixing adakite is dated at 322.3±5.2 Ma, suggesting that it formed during Late Carboniferous. The adakite belongs to the low-K tholeiitic and medium-K calc-alkaline series. The rocks show following geochemical characteristics, such as high SiO_2 (65.57%～67.89%) and Al_2O_3 (15.48%～16.55%) content with sodium-rich and potassium-poor (Na_2O=4.13%～6.33%, K_2O=0.35%～1.89%, Na_2O/K_2O=2.39～18.09). For trace elements, they show high content of Sr (371×10^{-6}～486×10^{-6}) and low content of Yb (0.60×10^{-6}～1.76×10^{-6}) and Y (4.87×10^{-6}～7.82×10^{-6}). In addition, they are relatively enriched in large-ion lithophile elements (such as K, Rb, and Sr) and depleted in high-field-strength elements (such as Nb, Ta, Zr, Ti and P). Furthermore, they have low total rare-earth element (REE) contents (22.83×10^{-6}～80.63×10^{-6}), with low heavy rare-earth elements (HREE) without obvious Eu anomaly. Above geochemical characteristics indicate that the Chaganbaixing tonalite belongs to adakite. The adakite was formed in the island arc environment of subduction zone, which may have originated from partial melting of the subducted oceanic crust and then interacted with mantle wedge peridotite during the rise of subduction zone. Combined with the study of spatio-temporal evolution of the Chaganbaixing adakite and regional Carboniferous ophiolites, it is assumed that the initial intraoceanic subduction occurred at the Late Carboniferous in the Palaeo-Asian Ocean.

Key words: adakite; island arc magmatic rock; Late Carboniferous; eastern Paleo-Asian Ocean; Suniteyouqi, Inner Mongolia