

内蒙古沙巴尔吐地区中二叠世蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩的发现及地质意义

李英雷^{1,2}, 武 广¹, 贺宏云³, 陈公正¹, 杨 飞^{1,2}, 李铁刚¹, 宋广超⁴, 肖剑伟³

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 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; 3. 内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 4. 内蒙古第三地质矿产勘查开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘 要: 中亚造山带东段内蒙古兴安盟扎赉特旗地区作为二连-贺根山断裂的东延部分, 蕴含了古亚洲洋俯冲消亡过程及洋-陆转换的关键信息, 然而对于该区蛇绿构造混杂岩的研究相对薄弱, 成为制约古亚洲洋构造演化研究的瓶颈。本文在扎赉特旗沙巴尔吐地区发现了蛇绿构造混杂岩, 与岛弧环境相关的英云闪长岩-奥长花岗岩和碱长花岗岩组合。对蛇绿构造混杂岩中超镁铁质岩和碱长花岗岩开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年显示其年龄分别为 279.2 ± 3.3 Ma 和 278.2 ± 1.7 Ma, 表明其形成于中二叠世早期。超镁铁质岩含有低的 SiO_2 含量 (43.54%~46.38%), 低 Na_2O 和 K_2O 而富 MgO , $\text{Mg}^\#$ 为 89~94, 显示亏损地幔-过渡型地幔特征, 起源于约 70% 的石榴石二辉橄榄岩的部分熔融, 属俯冲型 (SSZ) 蛇绿岩。英云闪长岩-奥长花岗岩属准铝质钙碱性系列, 高 Al_2O_3 含量, 相对富钠贫钾, 高 Sr (平均 600.00×10^{-6})、低 Y (平均 12.50×10^{-6}) 和 Yb (平均 1.18×10^{-6}), 具典型 O 型埃达克岩特征, 是俯冲环境下低钾洋壳玄武岩部分熔融的产物。碱长花岗岩富硅和碱, 低铁和镁, 具有高的正 $\varepsilon_{\text{HF}}(t)$ 值 (平均 +18.9), 位于亏损地幔线之上, 一阶段、二阶段模式年龄基本近于或者小于岩石结晶年龄, 起源于岛弧型的新生地壳。沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩代表中二叠世早期洋内俯冲的产物, 表明古亚洲洋在中二叠世早期未闭合, 仍存在持续性的俯冲活动, 闭合时间至少应在中二叠世之后。

关键词: 中亚造山带; 大兴安岭; 中二叠世; 蛇绿构造混杂岩; 花岗质杂岩; 古亚洲洋

中图分类号: P588.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)02-0217-19

The discovery and tectonic implications of Middle Permian ophiolite mélange and coeval granitic complex in the Shabaetu area, Inner Mongolia

LI Ying-lei^{1,2}, WU Guang¹, HE Hong-yun³, CHEN Gong-zheng¹, YANG Fei^{1,2}, LI Tie-gang¹,
SONG Guang-chao⁴ and XIAO Jian-wei³

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, 100871 Beijing, China; 3. Inner Mongolia Key Laboratory of Magmatic Mineralization and Ore-Prospecting, Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China; 4. No. 3 Institute of Geological Exploration, Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources, Hohhot 010010, China)

Abstract: Located in the eastern part of the Central Asian Orogenic Belt, the Jalaid Banner of Inner Mongolia is considered to be controlled by the eastern extension of Erlian-Hegenshan fault. It contains the key information of the subduction and extinction process of the Paleo-Asian Ocean. However, the studies of the Ophiolite mélange in this area are relatively weak. In this study, the ophiolite mélange, tonalites-trondhjemite and alkali feldspar granite assemblages

收稿日期: 2020-11-01; 接受日期: 2021-01-11; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 科技部深地专项 (2017YFC0601303); 国家自然科学基金资助项目 (4190021252); 中国地质调查局项目 (DD20160048-09)

作者简介: 李英雷 (1986-), 博士, 男, 工程师, 从事地质矿产调查工作, E-mail: cumtlyl@126.com; 通讯作者: 武 广 (1965-), 男, 研究员, 从事地质矿产研究工作, E-mail: wuguang65@163.com。

related to island arc environment were found in Shabaertu region. Zircon U-Pb dating of the ophiolite mélange shows that their ages are 279.2 ± 3.3 Ma and 278.2 ± 1.7 Ma, respectively, indicating their emplacement in Early Permian. The ultramafic rocks have low SiO_2 content (43.54% ~ 46.38%), low Na_2O and K_2O values, but rich MgO , with $\text{Mg}^\#$ of 89 ~ 94, showing the features of depleted mantle-transitional mantle, which originated from about 70% partial melting of garnet lherzolite. They belong to the supra-subduction zone type (SSZ). The tonalite-trondhjemite is a typical O-type adakite and belongs to the metaluminous and calc-alkaline series, relatively rich in Al_2O_3 and Sr (averaging 600.00×10^{-6}), but low in Y (averaging 12.50×10^{-6}) and Yb (averaging 1.18×10^{-6}), suggesting that they originated from partial melting of the low-K oceanic crust basalts in subduction environment. The alkali feldspar granites are rich in silicon and alkali and low in iron and magnesium. They have high positive $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values (averaging + 18.9) and are located above the depleted mantle line, with the in-situ zircon Hf isotope one-stage and two-stage model age equal to or less than the crystallization ages of rocks, so they might have been derived from the island arc type juvenile crust. The Shabaertu ophiolite mélange represents the product of intra-oceanic subduction in the early Middle Permian, implying that the Paleo-Asian Ocean was not closed in the early Middle Permian, and the closure time should be at least after the Middle Permian.

Key words: Central Asian Orogenic Belt; Da Hinggan Mountains; Middle Permian; ophiolite mélange; granitic complex; the Paleo-Asian Ocean

Fund support: Special Project of Ministry of Science and Technology (2017YFC0601303); National Natural Science Foundation of China(4190021252); China Geological Survey Project(DD20160048-09)

蛇绿岩套主要由橄榄岩、辉长岩以及玄武岩组成,与深海沉积物(如放射虫硅质岩和黏土岩)紧密共生,是确定古板块边界的重要标志(史仁灯, 2005; Dilek and Furnes, 2011)。蛇绿构造混杂岩记录了造山带中古大洋岩石圈形成演化过程,是恢复古板块格局和探讨地幔演化的主要研究对象,对于研究造山过程中古大洋的开启与消亡、板块拼贴位置、造山带的形成时间具有重要意义(张进等, 2012; 冯志强等, 2019)。中亚造山带是全球范围内显生宙增生较为强烈的地区,它的形成与古亚洲洋的演化密切相关,是目前为止时间最长、岩浆-构造演化最为复杂的造山带之一(Xiao *et al.*, 2003; Windley *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2017; 苏茂荣等, 2020)。

内蒙古兴安盟扎赉特旗沙巴尔吐地区地处大兴安岭东南部,区域大地构造位置属于中亚造山带东段,位于二连-贺根山缝合带东延部分与嫩江-八里罕断裂交汇转折位置(图 1a; 贺宏云等, 2020)。该区经历了多期构造演化,近年来在周边区域发现蛇绿构造混杂岩和与岛弧环境相关的钙碱性辉长岩-闪长岩组合,主要受古亚洲洋构造域的影响,成为地学界研究古亚洲洋俯冲消亡过程及洋-陆转换的热点区域(Xiao *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2019; 刘永江等, 2019)。古亚洲洋在空间上划分为西段、中部

和东段,其中东段主要分布于内蒙和黑龙江,有学者认为早古生代古亚洲洋东段主洋盆位于艾力格庙-贺根山-林西-黑河一线,晚古生代主洋盆位于索伦-温都尔庙-西拉木伦-延吉一线,东段洋盆于晚二叠世闭合,但仍存在争议(卜建军等, 2020)。关于古亚洲洋的闭合时限主要存在两种观点:中晚泥盆世-早石炭世闭合(徐备等, 2014; 李英杰等, 2018; 王成等, 2018)和晚二叠世-早三叠世闭合(陈斌等, 2001; Li, 2006; 柳志华等, 2020)。此外,一部分学者认为中亚造山带东段古亚洲洋的增生过程不仅与主洋盆有关,还与古亚洲洋的一些分支洋盆关系密切(Xu *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2018; 李英杰等, 2018)。而且前人对二连-贺根山缝合带的研究总体多集中于西乌旗、东乌旗及锡林浩特等地区,而对于缝合带东延部分大石寨-扎赉特旗-扎兰屯地区研究程度明显偏弱,该区已成为制约二连-贺根山缝合带构造演化研究的瓶颈,同时也是探讨中亚造山带东南缘晚古生代构造演化的突破点。

本文选择大兴安岭东南缘兴安盟扎赉特旗沙巴尔吐地区出露的一套蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩作为研究对象,通过对其中超镁铁质岩及同时期花岗质杂岩进行的岩石学、地球化学和年代学研究,探讨该套岩石的形成时代和构造背景,为中亚造山带东段古亚洲洋闭合时限及演化过程研究提供约束。

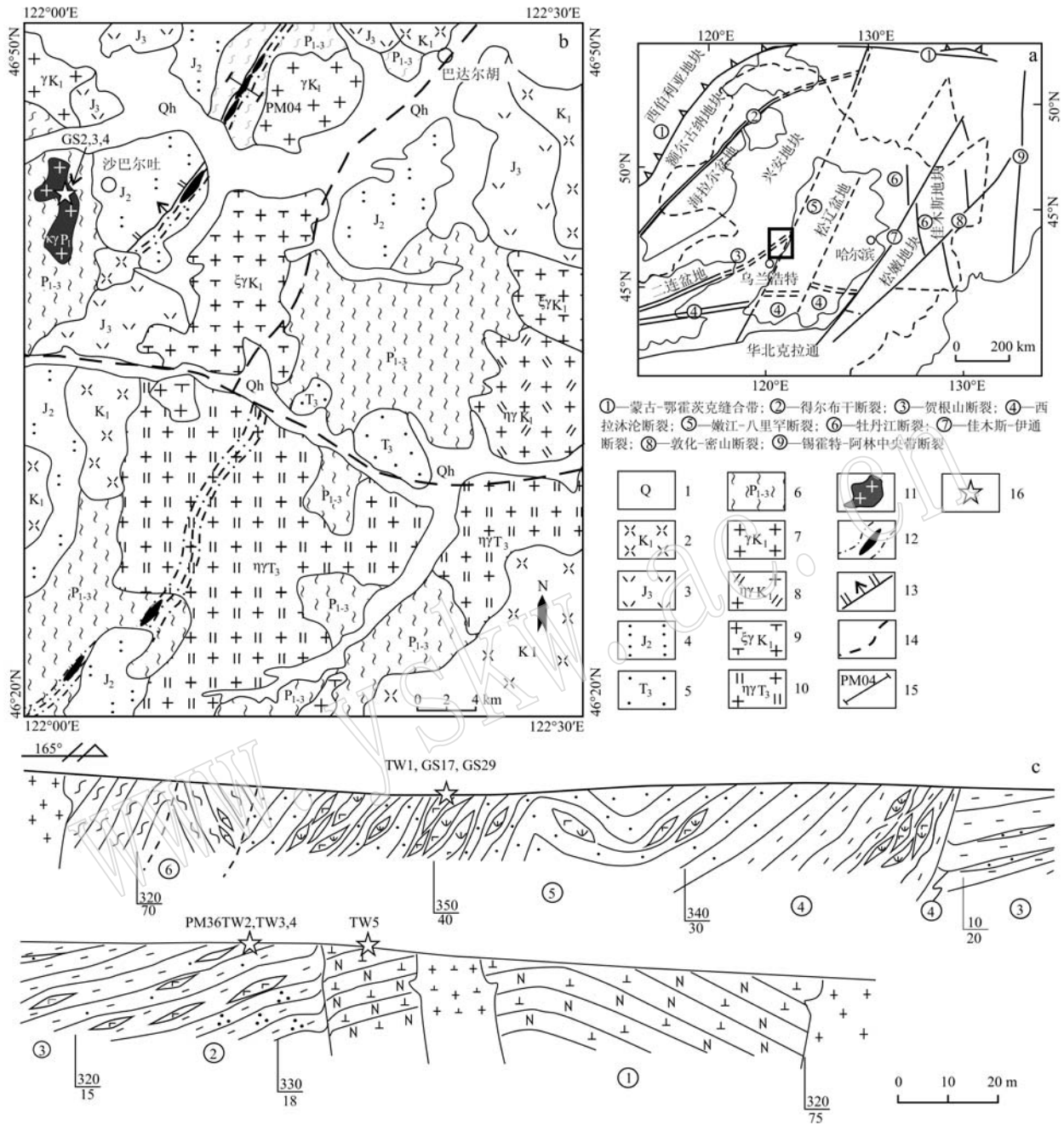


图1 研究区大地构造位置图(a)、区域地质图(b)及剖面图(c) (据贺宏云等, 2020)

Fig. 1 Tectonic division of Northeast China (a) and geological sketch map of the study area (b) and geological section (c) (after He Hongyun *et al.*, 2020)

1—第四系; 2—早白垩世火山岩; 3—晚侏罗世火山岩; 4—中侏罗世火山碎屑岩; 5—晚三叠世火山岩; 6—二叠系; 7—早白垩世花岗岩; 8—早白垩世二长花岗岩; 9—早白垩世正长花岗岩; 10—晚三叠世二长花岗岩; 11—中二叠世碱长花岗岩; 12—蛇绿构造混杂岩; 13—正断层; 14—推测断层; 15—剖面位置; 16—采样位置; ①—糜棱岩化中粗粒英云闪长岩; ②—石英二长片岩; ③—长英质浅粒岩; ④—变泥质岩夹变质砂岩透镜体、蛇绿岩块; ⑤—变质粉砂岩夹蛇绿岩块; ⑥—蛇纹石化绿泥片岩夹玄武岩块

1—Quaternary; 2—Early Cretaceous volcanic rocks; 3—Late Jurassic volcanic rocks; 4—Middle Jurassic pyroclastic rocks; 5—Late Triassic volcanic rocks; 6—Permian rocks; 7—Early Cretaceous granite; 8—Early Cretaceous monzogranite; 9—Early Cretaceous syenogranite; 10—Late Triassic monzogranite; 11—Middle Permian alkali feldspar granite; 12—ophiolite mélangé; 13—normal fault; 14—inferred fault; 15—profile position; 16—sampling location; ①—mylonitized medium coarsed tonalite; ②—quartz monzonite schist; ③—felsic leptite; ④—metapelite with metasandstone and ophiolite block; ⑤—metamorphic siltstone with ophiolite block; ⑥—serpentinized chlorite schist with metabasalt block

1 地质背景

研究区区域上零星出露古元古界额尔格图片岩,岩性为斜长角闪片岩、黑云母片岩和石英片岩等,岩石普遍发生变形变质,褶皱发育。古生界出露海相、浅海相沉积岩—火山—内陆湖沼相细碎屑沉积建造,地层为二叠系寿山沟组、大石寨组、哲斯组和林西组。中生代主要出露陆相火山岩建造,地层包括中三叠世老山门火山岩,中侏罗统万宝组,上侏罗统满克头鄂博组、玛尼吐组,下白垩统白音高老组、龙江组、光华组。第四系松散堆积物大都沿沟谷及其两侧分布。

沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩可划分为2个独立填图单元:超基性岩和细粒碱长花岗岩。超基性岩主要分布于研究区北部及西南部,沿嫩江—八里罕断裂乌兰浩特段大断裂带北东—南西向出露。细粒碱长花岗岩仅分布在研究区西北部,基本与区域主构造方向一致。

1.1 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩

该蛇绿构造混杂岩零星出露在研究区西北部及

西南部,面积约0.25 km²左右。位于查干居鲁河、前联合屯幅芒和屯一带。整体呈脉状和透镜状产出,北东—北北东走向,与围岩均为断层接触,断续出露长20~100 m,延伸约2~4 km,宽5~15 m。混杂岩主要由灰绿色蛇纹石化橄榄岩和枕状变玄武岩(图2a)、透辉石岩、辉长岩、辉橄岩、硅质岩岩块、英云闪长质糜棱岩、透闪斜长变粒岩、二云母绿泥片岩、透闪石蛇纹滑石岩等组成,其中橄榄岩分布最广。岩石蚀变较强,多为碳酸盐化、滑石化、蛇纹石化,表面具滑感,并见有白色、浅灰白色纤维状石棉呈脉状充填在其裂隙中。部分岩石中蛇纹石呈透镜体存在,局部片理发育,透闪石与片理斜交或切割片理。

灰绿色含磁铁碳酸盐化滑石化蛇纹岩(图2b):显微鳞片状结构,块状构造。岩石主要由蛇纹石、滑石、次生碳酸盐和磁铁矿组成,为橄榄岩发生强蚀变形成。蛇纹石滑石呈<0.3 mm的显微鳞片状,次生碳酸盐不均匀分布,磁铁矿呈0.03~0.30 mm微粒状。蛇纹石含量80%(体积分数)、滑石10%、次生碳酸盐5%、磁铁矿5%。斜长石呈0.1~0.3 mm的粒状变晶,几乎全部绢云母化;石英呈0.1~0.3 mm的粒状变晶,颗粒之间齿状镶嵌;黑云母呈0.1~0.3

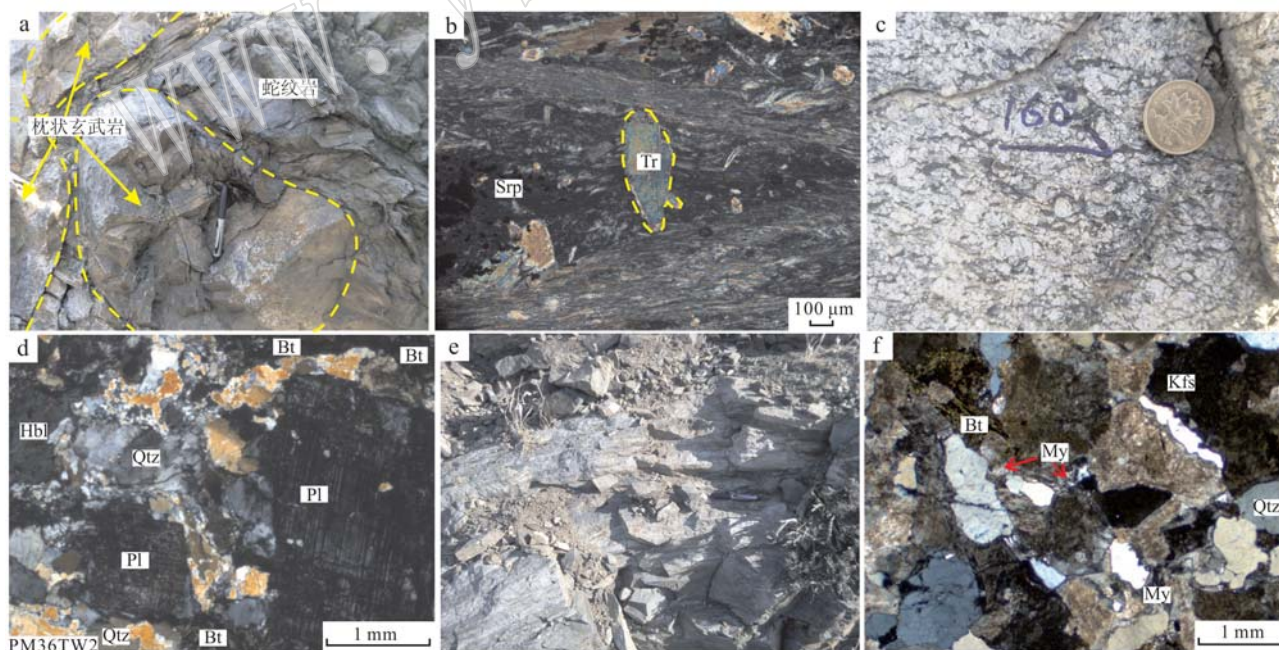


图2 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩野外及正交偏光镜下照片

Fig. 2 Field photos and microscope photos (+) of the Shabaetu ophiolite mélangé and coeval granitic complex
Srp—蛇纹石; Tr—透闪石; Qtz—石英; Hbl—角闪石; Pl—斜长石; Bt—黑云母; Kfs—钾长石; My—蠕英石(矿物缩写符号据沈其韩, 2009)

Srp—serpentine; Tr—tremolite; Qtz—quartz; Hbl—hornblende; Pl—plagioclase; Bt—biotite; Kfs—K-feldspar;
My—myrmekite (mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)

mm 的片状, 普遍发生绿泥石化。斜长石(绢云母化)含量 40%、石英 45%、黑云母 15%。

1.2 沙巴尔吐花岗质杂岩

沙巴尔吐花岗质杂岩主要分布在研究区的西北部, 包括糜棱岩化粗中粒含角闪黑云英云闪长岩和细粒碱长花岗岩, 前者呈断块状、条带状分布在蛇绿构造混杂岩中, 后者仅在研究区北部伊力楚代乌拉一带出露, 面积约 10.5 km², 呈岩株状产出。

浅灰色弱糜棱岩化粗中粒含角闪黑云英云闪长岩(图 2c、2d), 斜长石多数呈 2~5 mm, 部分呈 5~6 mm 的半自形板状-板状, 发育聚片双晶, 部分绢云母化; 石英呈 0.1~0.8 mm 的粒状变晶, 颗粒集中分布, 略显条带状; 黑云母呈 0.2~1.2 mm 的片状, 黄色-深棕色, 部分解理缝弯曲, 多数发生绿泥石化; 角闪石呈 0.5~4.5 mm 的长柱状或柱粒状, 淡黄-绿色; 榍石呈 0.3~1.0 mm 的菱形或不规则粒状, 具高级白干涉色, 正极高突起。斜长石含量 70%、石英 21%、黑云母(绿泥石化)5%、角闪石 4%、榍石少量。

细粒碱长花岗岩, 肉红色, 细粒花岗结构, 块状构造(图 2e、2f)。岩石由钾长石(70%)、石英(20%)、角闪石(3%)、长英质(5%)、磁铁矿(2%)等组成, 矿物粒径主要在 0.25~2.00 mm 之间, 部分大者达 4 mm。钾长石为板状, 泥化, 具卡氏双晶, 为条纹长石、正长石; 石英为粒状, 呈充填状分布; 长英质(蠕英石)多分布于钾长石的边部, 具显微文象结构; 角闪石为柱状, 全部变为细小鳞片状黑云母集合体, 析出铁质。该岩体侵入下二叠统寿山沟组。

2 样品与测试

共采集测年样品 2 件, 其中蛇纹石化橄榄岩样品 1 件(TW1), 碱长花岗岩样品 1 件(GS2)。主微量测试样品共 10 件, 其中蛇绿混杂岩样品 3 件(TW1、GS17、GS29), 碱长花岗岩样品 3 件(GS2、GS3、GS4), 英云闪长岩样品 3 件(PM36TW2、TW3、TW4), 奥长片岩样品 1 件(TW5)。

主微量元素的分析测试在北京燕都中实测试技术有限公司完成, 测试流程为: 将岩石粉碎粗碎至厘米级的块体, 选取无蚀变及脉体穿插的新鲜样品用纯化水冲洗干净, 烘干并粉碎至 200 目以备使用。主量元素测试首先将粉末样品称量后加 Li₂B₄O₇ (1:8) 助熔剂混合, 并使用融样机加热至 1 150℃ 使其在金铂坩埚中熔融成均一玻璃片体, 后使用 XRF

(Shimadzu XRF-1800) 测试, 测试结果保证数据误差小于 1%。

微量元素测试将 200 目粉末样品称量并置放入聚四氟乙烯溶样罐并加入 HF+HNO₃, 在干燥箱中将的高压消解罐保持在 190℃ 温度 72 h, 后取出经过赶酸并将溶液定容为稀溶液上机测试。测试使用 ICP-MS(M90, analytikjena) 完成, 所测数据根据监控标样 GSR-2 显示误差小于 5%, 部分挥发性元素及极低含量元素的分析误差小于 10%。

锆石 U-Pb 同位素测年和原位 Hf 同位素测试均在内蒙古自治区岩浆活动成矿与找矿重点实验室完成。运用 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统(LA-MC-ICP-MS), 激光束斑 32 μm, 具体分析测试方法见参考文献(李怀坤等, 2009)。

3 结果与分析

3.1 岩石地球化学特征

研究区超基性岩样品的主量、微量和稀土元素分析结果(表 1)显示, 该岩石 SiO₂ 含量为 43.54%~46.38%, Al₂O₃ 为 0.99%~4.60%, FeO^T 为 3.54%~8.48%, MgO 含量为 25.72%~33.01%, TiO₂ 为 0.03%~0.45%, 烧失量(LOI)为 10.88%~12.03%。运用根据 Zr/TiO₂-Nb/Y 图解(图 3a), 样品落入碱性玄武岩、玄武岩区域, 结合 FeO^T/MgO-SiO₂ 和 AFM 图解(图 3b、3c), 岩石属钙碱性-拉斑质系列, 具有与岛弧有关的超镁铁质堆晶岩特征。岩石 Mg[#] 为 89~94, 稀土元素配分图和微量元素蛛网图显示明显右倾(图 4a、4b), 具弱负 Eu 异常或正异常, 表明斜长石未参与多阶段的分离结晶(Eu/Eu^{*}=0.76~1.25)。相对亏损 Rb、P、Ti 元素, 稀土总量极低, (Σ REE)=8.18×10⁻⁶~24.54×10⁻⁶。

根据 An-Ab-Or 图解(图 3d), 样品 PM36TW2、TW3 和 TW4 位于英云闪长岩区, TW5 位于奥长花岗岩区。样品的全岩地球化学数据结果显示(表 1), 该系列侵入岩 SiO₂ 含量 58.04%~71.55%, Al₂O₃ 为 15.16%~18.50%, FeO^T 为 1.80%~5.91%, TiO₂ 为 0.33%~1.12%, 全碱含量(Na₂O+K₂O)为 5.45%~7.63%, A/CNK 为 0.93~1.06, 总体为钙碱性系列(图 3f), 偏铝质, 个别为弱过铝质, Mg[#] 为 33~49。在稀土元素配分图和微量元素蛛网图上显示右倾(图 4a、4b), 具微弱负 Eu 异常(Eu/Eu^{*}=0.80~0.96),

表 1 样品主量($w_B/\%$)、微量和稀土($w_B/10^{-6}$)元素分析测试结果

Table 1 Major ($w_B/\%$) and trace elements ($w_B/10^{-6}$) analytical results

样品号	TW1	GS17	GS29	GS2	GS3	GS4	PM36TW2	TW3	TW4	TW5
岩性	蛇纹石化 橄榄岩	超镁铁 质岩	超镁铁 质岩	碱长花 岗岩	碱长花 岗岩	碱长花 岗岩	英云闪 长岩	英云闪 长岩	英云闪 长岩	奥长花 岗岩
SiO ₂	46.38	44.75	43.54	74.16	70.15	70.41	64.64	64.82	58.04	71.55
TiO ₂	0.45	0.29	0.03	0.27	0.42	0.33	0.64	0.66	1.12	0.33
Al ₂ O ₃	4.60	3.07	0.99	13.65	14.20	14.58	16.36	16.20	18.50	15.16
Fe ₂ O ₃	1.76	6.94	4.78	1.10	1.57	0.88	2.31	2.16	6.44	1.78
FeO	1.96	1.34	4.18	0.45	1.17	1.13	2.04	2.18	0.12	0.20
MnO	0.10	0.07	0.12	0.04	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.04
MgO	25.72	30.80	33.01	0.22	0.57	0.43	1.81	1.91	1.92	0.42
CaO	6.09	0.60	0.79	0.31	1.29	0.92	4.10	4.06	6.29	1.93
Na ₂ O	0.23	1.03	0.00	3.98	5.00	4.90	4.30	4.05	4.64	4.42
K ₂ O	0.15	0.05	0.05	4.54	4.16	4.28	2.24	2.32	0.81	3.21
P ₂ O ₅	0.02	0.05	0.02	0.05	0.10	0.09	0.20	0.18	0.35	0.11
LOI	11.43	10.88	12.03	0.97	1.02	0.99	1.06	1.14	1.68	0.85
Total	98.89	99.88	99.54	99.74	99.71	99.00	99.78	99.75	99.99	100.00
A/CNK	0.40	1.08	0.66	1.14	0.94	1.02	0.97	0.98	0.93	1.06
Mg [#]	94	89	89	24	32	32	48	49	41	33
Rb	2.08	1.62	1.02	108.00	88.10	94.50	33.40	47.00	15.10	61.50
Ba	29.60	35.80	14.30	585.00	692.00	663.00	564.00	600.00	306.00	833.00
Li	19.20	34.00	29.10	10.99	8.03	13.54	11.00	12.50	10.60	10.60
Cs	0.61	0.50	0.67	1.91	2.61	2.31	1.94	1.20	1.10	0.92
V	59.60	44.30	37.10	12.46	26.96	21.13	80.20	81.80	104.00	19.20
Sc	13.80	9.42	8.80	12.79	11.91	11.84	6.86	7.11	4.99	2.55
Th	2.06	0.97	0.28	8.93	6.50	8.35	3.52	3.35	1.80	3.88
U	0.17	0.24	1.39	1.71	1.81	1.93	0.76	0.75	0.56	0.42
Nb	2.44	3.78	2.04	9.68	7.94	8.76	5.99	6.35	6.30	7.39
Ta	0.10	0.34	0.21	1.17	1.13	1.03	0.47	0.50	0.36	0.54
Sr	136.00	34.60	27.60	74.60	241.00	156.00	518.00	613.00	889.00	379.00
Zr	70.00	29.10	3.31	205.00	475.00	253.00	127.00	129.00	203.00	148.00
Hf	1.81	0.88	0.10	6.78	7.64	7.72	3.97	4.00	5.66	4.58
Cr	2 933.00	2 550.00	3 480.00	22.40	25.70	26.50	15.80	20.30	11.90	4.54
Ni	1 316.00	1 660.00	2 700.00	2.07	6.17	4.40	7.44	11.70	7.80	4.85
Co	73.40	77.00	106.00	2.13	3.45	2.82	9.90	10.50	13.00	2.84
La	3.62	4.58	1.85	26.30	26.10	28.00	20.40	21.40	18.90	22.20
Ce	8.70	9.15	3.01	58.90	54.00	63.00	39.40	44.20	38.40	28.30
Pr	1.11	1.12	0.44	7.17	6.89	7.19	5.17	5.49	5.96	5.99
Nd	5.17	4.50	1.76	26.20	26.70	27.80	20.20	21.40	26.60	25.70
Sm	1.21	0.91	0.28	5.66	5.51	5.40	3.69	3.90	5.24	5.32
Eu	0.29	0.29	0.11	0.55	0.99	0.91	1.08	1.11	1.48	1.25
Gd	1.12	0.92	0.26	4.68	4.66	4.63	3.24	3.41	4.22	4.24
Tb	0.20	0.16	0.04	0.87	0.83	0.89	0.47	0.49	0.62	0.62
Dy	1.28	0.93	0.18	4.81	4.70	4.93	2.40	2.49	2.92	3.10
Ho	0.21	0.18	0.04	0.99	0.91	0.91	0.44	0.45	0.50	0.55
Er	0.70	0.52	0.10	3.09	2.97	3.08	1.22	1.27	1.31	1.50
Tm	0.12	0.07	0.01	0.56	0.52	0.50	0.18	0.18	0.18	0.22
Yb	0.71	0.50	0.09	3.70	3.17	3.59	1.10	1.17	1.10	1.34
Lu	0.10	0.08	0.02	0.63	0.49	0.64	0.17	0.18	0.17	0.19
Y	7.32	4.50	0.99	27.80	26.20	27.90	11.40	11.60	12.80	14.20
Σ REE	24.54	23.91	8.18	144.11	138.44	151.47	99.16	107.14	107.60	100.52
LREE	20.10	20.55	7.45	124.78	120.19	132.30	89.94	97.50	96.58	88.76
HREE	4.44	3.36	0.73	19.33	18.25	19.17	9.22	9.64	11.02	11.76
Eu/Eu [*]	0.76	0.97	1.25	0.33	0.60	0.56	0.95	0.93	0.96	0.80

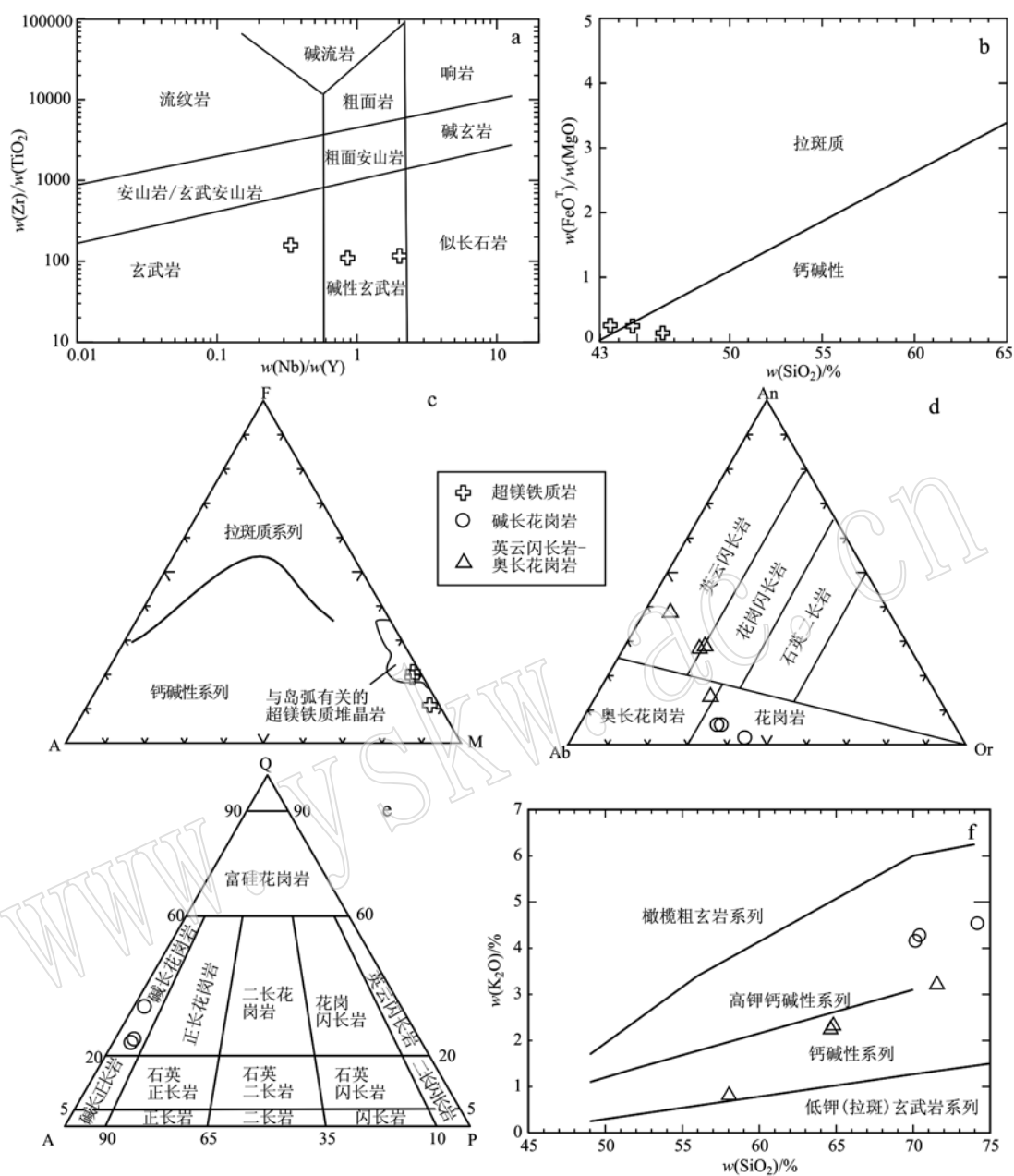


图3 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩岩石分类判别图解

Fig. 3 The classification and discrimination diagrams for the Shabaertu Ophiolite mélangé and coeval granitic complex

a—Zr/TiO₂ - Nb/Y 图 (Defant *et al.*, 1992); b—FeO^T/MgO - SiO₂ 图 (Miyashiro, 1974); c—AFM 图 (Irvine and Baragar, 1971); d—An-Ab-Or 图 (冯艳芳等, 2011); e—QAP 图 (Le Maitre *et al.*, 2004); f—K₂O - SiO₂ 图 (Le Maitre *et al.*, 2004)

a—Zr/TiO₂ - Nb/Y diagram (after Defant *et al.*, 1992); b—FeO^T/MgO - SiO₂ diagram (after Miyashiro, 1974); c—AFM diagram (after Irvine and Baragar, 1971); d—An-Ab-Or diagram (after Feng Yanfang *et al.*, 2011); e—QAP diagram (after Le Maitre *et al.*, 2004); f—K₂O - SiO₂ diagram (after Le Maitre *et al.*, 2004)

表明斜长石基本未参与分离结晶作用。相对亏损 Nb、Ta、P 和 Ti 等元素。稀土元素总量偏低 ($99.16 \times 10^{-6} \sim 107.60 \times 10^{-6}$)。

根据 QAP 图解 (图 3e), 样品 GS2、GS3 和 GS4 均落入碱长花岗岩区。SiO₂ 含量 70.15%~74.16%,

Al₂O₃ 为 13.65%~14.58%, CaO 含量为 0.31%~1.29%, TiO₂ 为 0.27%~0.42%, 全碱含量为 8.52%~9.18%, A/CNK 为 0.94~1.14, 属高钾钙碱性系列 (图 3f), Mg[#] 为 24~32。在稀土元素配分图和微量元素蛛网图中为右倾模式 (图 4a、4b)。细粒碱长花岗

岩具有中等程度的负 Eu 异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.33 \sim 0.60$), 显示斜长石参与了岩浆的分离结晶作用。相对亏损高场强元素 Nb、Ta、P 和 Ti。稀土元素总量中等 ($138.44 \times 10^{-6} \sim 151.47 \times 10^{-6}$)。

3.2 锆石 U-Pb 年龄和原位 Lu-Hf 同位素分析

对沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩中蛇纹石化橄榄岩

样品(TW1)进行了测年。从锆石阴极发光图像可见(图5a), 所选锆石主要可分为2组, 第1组锆石具有典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带结构, 获得锆石 U-Pb 同位素年龄为 279.2 ± 3.3 Ma (图5c), 此外, 本次获得多个捕获锆石, 年龄 450 Ma 左右; 第2组锆石颜色偏暗, 中心常见熔蚀结构, 环带不明显,

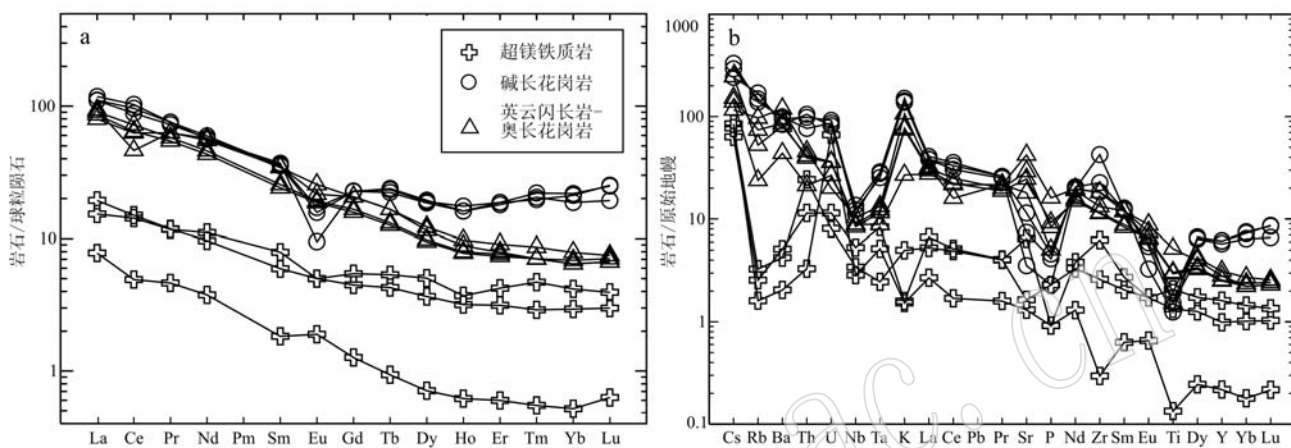


图4 蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图(原始地幔和球粒陨石数据根据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Primitive mantle normalized incompatible element spidergrams and chondrite-normalized REE patterns of the Shabaetu ophiolite mélangé and coeval granitic complex (primitive mantle and chondrite data after Sun and McDonough, 1989)

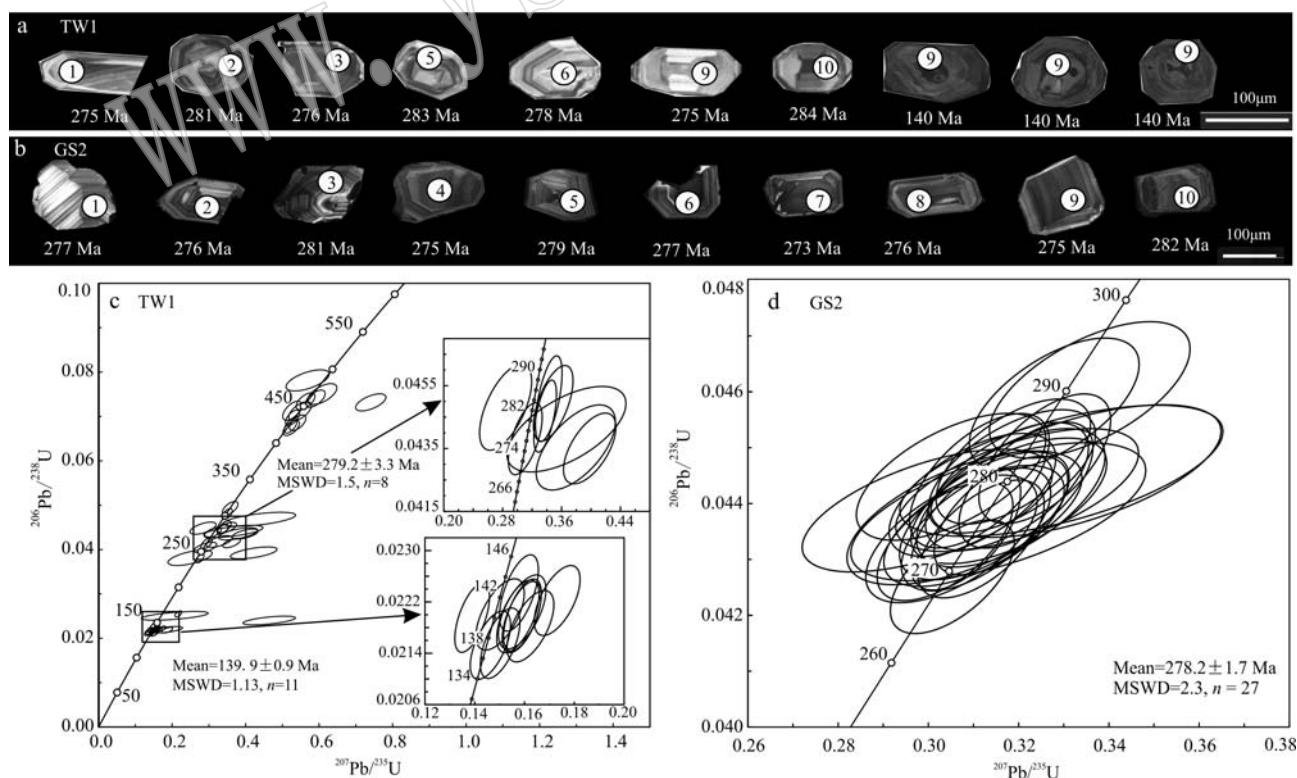


图5 锆石 CL 图像(a,b)和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄谐和图(c,d)

Fig. 5 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircon grains (a, b) and LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams (c, d) for samples

具后期热液锆石特征, 获得锆石 U-Pb 同位素年龄为 139.9±0.9 Ma(图 5c), 代表晚期构造热扰动事件年龄。 综上, 279.2 Ma 为蛇绿岩形成年龄, 表明蛇绿构造混杂岩形成于中二叠世早期, 锆石 U-Pb 测年结果见表 2。

表 2 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 Zircon U-Pb isotopic analyses for the samples

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
TW1.1	33	991	1 390	1.40	0.062 30	0.000 89	0.216 89	0.002 68	0.025 49	0.000 13	684	1.87	199	1.75	162	1.07
TW1.2	16	577	854	1.48	0.052 43	0.000 93	0.152 26	0.002 75	0.021 07	0.000 08	304	2.15	144	2.19	134	1.01
TW1.3	34	432	372	0.86	0.054 87	0.000 38	0.527 74	0.004 34	0.069 72	0.000 27	407	1.39	430	1.49	434	1.02
TW1.4	6	118	105	0.89	0.065 93	0.002 17	0.398 25	0.013 68	0.043 50	0.000 21	804	3.50	340	3.65	275	1.06
TW1.5	18	668	764	1.14	0.051 09	0.000 72	0.157 73	0.002 53	0.022 34	0.000 12	245	1.86	149	2.02	142	1.09
TW1.6	18	333	380	1.14	0.055 03	0.000 72	0.337 69	0.004 69	0.044 53	0.000 21	414	1.78	295	1.86	281	1.05
TW1.7	26	506	327	0.65	0.052 91	0.000 47	0.350 09	0.003 39	0.048 02	0.000 21	325	1.50	305	1.57	302	1.04
TW1.8	16	659	469	0.71	0.047 21	0.000 69	0.147 69	0.002 21	0.022 74	0.000 11	60	1.89	140	1.95	145	1.07
TW1.9	14	566	521	0.92	0.049 29	0.000 91	0.146 29	0.002 77	0.021 53	0.000 08	162	2.20	139	2.26	137	1.01
TW1.10	14	571	413	0.72	0.050 49	0.000 85	0.150 21	0.002 65	0.021 56	0.000 10	218	2.07	142	2.16	137	1.04
TW1.11	15	580	541	0.93	0.052 53	0.000 82	0.158 86	0.002 52	0.021 96	0.000 09	309	1.98	150	2.01	140	1.03
TW1.12	17	739	510	0.69	0.049 31	0.000 74	0.143 51	0.002 22	0.021 13	0.000 09	163	1.92	136	1.98	135	1.03
TW1.13	11	467	326	0.70	0.049 36	0.001 09	0.150 20	0.003 50	0.022 01	0.000 09	165	2.52	142	2.64	140	1.03
TW1.14	35	385	419	1.09	0.072 29	0.001 04	0.740 56	0.014 11	0.073 18	0.000 39	994	1.88	563	2.27	455	1.08
TW1.15	44	576	444	0.77	0.055 79	0.000 28	0.522 42	0.003 06	0.067 92	0.000 23	444	1.31	427	1.37	424	1.00
TW1.16	12	448	659	1.47	0.051 62	0.001 19	0.149 97	0.003 59	0.021 03	0.000 08	269	2.61	142	2.69	134	1.02
TW1.17	20	279	148	0.53	0.056 40	0.000 65	0.524 01	0.006 46	0.067 41	0.000 28	468	1.67	428	1.75	421	1.03
TW1.18	9	192	136	0.71	0.051 58	0.001 39	0.310 72	0.008 58	0.043 81	0.000 22	267	2.95	275	3.03	276	1.07
TW1.19	22	280	244	0.87	0.057 23	0.000 58	0.541 71	0.006 22	0.068 58	0.000 31	500	1.58	440	1.69	428	1.04
TW1.20	10	433	336	0.78	0.046 20	0.001 20	0.134 44	0.003 54	0.021 13	0.000 09	8	2.86	128	2.91	135	1.04
TW1.21	17	687	564	0.82	0.052 63	0.000 79	0.159 16	0.002 39	0.022 00	0.000 10	313	1.93	150	1.95	140	1.04
TW1.22	9	179	172	0.96	0.063 13	0.001 48	0.361 63	0.008 74	0.041 45	0.000 17	713	2.64	313	2.72	262	1.03
TW1.23	10	417	234	0.56	0.061 32	0.001 59	0.186 99	0.005 56	0.021 82	0.000 15	650	2.86	174	3.22	139	1.18
TW1.24	14	574	394	0.69	0.051 89	0.000 96	0.159 05	0.003 37	0.022 04	0.000 11	281	2.21	150	2.46	141	1.07
TW1.25	16	195	149	0.77	0.057 80	0.000 74	0.589 48	0.008 19	0.073 99	0.000 38	522	1.77	471	1.86	460	1.07
TW1.26	16	190	168	0.88	0.055 67	0.000 74	0.562 87	0.007 79	0.073 44	0.000 36	439	1.80	453	1.86	457	1.06
TW1.27	38	940	549	0.58	0.052 63	0.000 33	0.276 23	0.002 40	0.038 04	0.000 20	313	1.37	248	1.51	241	1.08
TW1.28	14	560	472	0.84	0.056 86	0.001 09	0.173 11	0.003 08	0.022 22	0.000 08	486	2.26	162	2.17	142	1.00
TW1.29	16	684	480	0.70	0.045 90	0.000 72	0.138 97	0.002 26	0.021 95	0.000 08	456	2.67	132	2.05	140	1.00
TW1.30	9	168	162	0.97	0.056 21	0.001 56	0.348 67	0.010 09	0.044 94	0.000 25	461	3.03	304	3.15	283	1.09
TW1.31	11	455	338	0.74	0.054 03	0.001 08	0.162 37	0.003 27	0.021 82	0.000 10	372	2.33	153	2.37	139	1.04
TW1.32	12	515	361	0.70	0.051 93	0.000 91	0.157 34	0.002 88	0.021 97	0.000 10	282	2.13	148	2.21	140	1.05
TW1.33	3	79	43	0.55	0.049 35	0.004 37	0.248 94	0.024 37	0.038 15	0.000 61	165	8.95	226	9.87	241	1.85
TW1.34	22	295	160	0.54	0.053 60	0.000 64	0.526 63	0.008 30	0.071 28	0.000 58	354	1.70	430	2.01	444	1.24
TW1.35	3	70	37	0.53	0.077 62	0.004 43	0.422 18	0.025 42	0.039 25	0.000 41	1 137	5.83	358	6.15	248	1.40
TW1.36	1	40	24	0.60	0.062 07	0.011 20	0.207 13	0.037 11	0.025 05	0.000 32	677	18.08	191	17.96	160	1.60
TW1.37	20	423	420	0.99	0.051 59	0.000 75	0.293 74	0.005 15	0.041 36	0.000 33	267	1.90	261	2.15	261	1.23
TW1.38	2	37	16	0.44	0.069 76	0.006 27	0.437 78	0.039 91	0.046 82	0.000 48	921	9.07	369	9.20	295	1.39
TW1.39	3	58	29	0.50	0.060 92	0.005 60	0.366 73	0.032 69	0.044 12	0.000 37	636	9.27	317	9.00	278	1.26
TW1.40	7	290	120	0.41	0.057 03	0.003 33	0.185 69	0.017 25	0.021 94	0.000 22	493	5.97	173	9.37	140	1.37
TW1.41	3	66	26	0.39	0.063 76	0.003 58	0.379 32	0.021 46	0.043 54	0.000 37	734	5.74	327	5.79	275	1.27
TW1.42	13	290	22	0.07	0.052 59	0.000 92	0.357 99	0.007 46	0.049 32	0.000 41	311	2.13	311	2.42	310	1.26
TW1.43	12	386	183	0.47	0.125 07	0.005 47	0.464 19	0.028 62	0.024 02	0.000 33	2 030	4.54	387	6.29	153	1.67
TW1.44	11	435	446	1.02	0.050 67	0.001 15	0.153 26	0.003 91	0.02190	0.000 19	226	2.58	145	2.84	140	1.29
TW1.45	15	316	149	0.47	0.055 10	0.000 81	0.342 60	0.006 02	0.045 09	0.000 36	416	1.91	299	2.15	284	1.24
TW1.46	5	105	44	0.42	0.057 53	0.002 37	0.328 02	0.013 75	0.041 83	0.000 36	512	4.29	288	4.37	264	1.28
TW1.47	6	131	111	0.85	0.051 86	0.002 11	0.290 38	0.012 08	0.040 45	0.000 31	279	4.24	259	4.34	256	1.21
TW1.48	9	121	48	0.40	0.058 87	0.001 28	0.608 13	0.014 60	0.075 06	0.000 65	562	2.49	482	2.70	467	1.28
TW1.49	13	179	91	0.51	0.055 70	0.000 90	0.548 02	0.010 55	0.071 17	0.000 56	440	2.01	444	2.29	443	1.22
TW1.50	5	63	12	0.19	0.052 51	0.002 09	0.568 69	0.023 02	0.078 14	0.000 64	307	4.17	457	4.23	485	1.25
TW1.51	15	303	146	0.48	0.238 05	0.007 64	1.159 76	0.045 06	0.031 63	0.000 54	3 107	3.43	782	4.08	201	1.94
TW1.52	5	108	69	0.64	0.046 17	0.002 24	0.284 03	0.014 03	0.044 82	0.000 37	6	5.01	254	5.09	283	1.25
TW1.53	5	244	88	0.36	0.048 05	0.002 13	0.141 63	0.006 34	0.021 59	0.000 19	102	4.59	134	4.64	138	1.29

续表 2

Continued Table 2

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
GS2. 1	7	131	157	1.20	0.049 56	0.001 84	0.299 78	0.011 34	0.043 87	0.000 45	174	86.67	266	10.07	277	2.83
GS2. 2	17	333	341	1.03	0.052 35	0.000 98	0.316 09	0.006 05	0.043 79	0.000 43	301	42.74	279	5.34	276	2.73
GS2. 3	12	218	261	1.20	0.051 79	0.001 19	0.318 52	0.007 57	0.044 58	0.000 45	276	52.72	281	6.67	281	2.84
GS2. 4	13	257	232	0.90	0.051 65	0.001 09	0.310 57	0.006 76	0.043 54	0.000 45	270	48.29	275	5.98	275	2.84
GS2. 5	12	238	232	0.98	0.050 86	0.001 20	0.309 77	0.007 55	0.044 15	0.000 45	235	54.46	274	6.68	279	2.83
GS2. 6	6	110	117	1.06	0.051 93	0.002 14	0.315 50	0.013 35	0.043 85	0.000 50	282	94.48	278	11.78	277	3.18
GS2. 7	20	364	448	1.23	0.050 84	0.001 00	0.303 69	0.006 14	0.043 33	0.000 43	234	45.46	269	5.45	273	2.74
GS2. 8	11	234	179	0.76	0.051 70	0.001 23	0.312 42	0.007 68	0.043 78	0.000 47	272	54.73	276	6.79	276	2.95
GS2. 9	25	473	601	1.27	0.051 33	0.000 79	0.308 27	0.004 98	0.043 55	0.000 45	256	35.39	273	4.41	275	2.81
GS2. 10	17	319	362	1.13	0.051 69	0.001 10	0.318 82	0.007 00	0.044 75	0.000 46	272	48.57	281	6.17	282	2.88
GS2. 11	14	265	261	0.98	0.051 99	0.001 18	0.327 89	0.007 69	0.045 78	0.000 48	285	51.85	288	6.75	289	3.03
GS2. 12	14	267	239	0.90	0.050 95	0.001 02	0.311 31	0.006 33	0.044 41	0.000 49	239	46.30	275	5.59	280	3.10
GS2. 13	12	222	244	1.10	0.052 86	0.001 37	0.335 76	0.009 08	0.046 03	0.000 50	323	58.74	294	7.95	290	3.14
GS2. 14	9	191	149	0.78	0.049 65	0.001 35	0.305 07	0.008 58	0.044 48	0.000 46	179	63.51	270	7.61	281	2.93
GS2. 15	9	195	128	0.66	0.050 93	0.001 24	0.305 13	0.007 76	0.043 37	0.000 47	238	56.34	270	6.88	274	2.94
GS2. 16	17	364	247	0.68	0.052 12	0.000 93	0.311 68	0.005 72	0.043 37	0.000 43	291	40.66	275	5.06	274	2.72
GS2. 17	10	194	207	1.07	0.051 70	0.001 36	0.310 15	0.008 17	0.043 60	0.000 44	272	60.11	274	7.23	275	2.79
GS2. 18	17	340	307	0.90	0.051 92	0.000 94	0.305 32	0.005 61	0.042 69	0.000 42	282	41.61	271	4.98	269	2.62
GS2. 19	8	153	186	1.22	0.051 35	0.001 82	0.308 01	0.010 64	0.043 75	0.000 49	257	81.44	273	9.42	276	3.09
GS2. 20	15	308	222	0.72	0.052 00	0.001 19	0.317 43	0.007 39	0.044 31	0.000 47	285	52.29	280	6.51	280	2.94
GS2. 21	11	215	197	0.91	0.052 32	0.001 32	0.318 28	0.008 54	0.044 10	0.000 51	299	57.47	281	7.52	278	3.19
GS2. 22	21	381	467	1.23	0.052 65	0.000 90	0.325 79	0.005 96	0.044 80	0.000 47	314	38.71	286	5.24	283	2.99
GS2. 23	6	122	111	0.91	0.054 08	0.002 07	0.332 73	0.013 14	0.044 58	0.000 49	374	86.23	292	11.52	281	3.06
GS2. 24	7	128	133	1.04	0.052 42	0.001 80	0.319 68	0.011 00	0.044 24	0.000 45	304	78.07	282	9.69	279	2.83
GS2. 25	9	168	171	1.01	0.052 42	0.001 42	0.317 83	0.008 87	0.044 05	0.000 46	304	61.74	280	7.82	278	2.90
GS2. 26	5	95	90	0.95	0.053 45	0.002 33	0.329 48	0.014 64	0.044 59	0.000 48	348	98.46	289	12.85	281	3.02
GS2. 27	16	302	247	0.82	0.052 56	0.000 94	0.321 64	0.006 07	0.044 33	0.000 46	310	40.73	283	5.34	280	2.91

在沙巴尔吐细粒碱长花岗岩(GS2)中采集了同位素测年样品,阴极发光图像显示单颗粒锆石形态呈短柱状、长棱角状及不规则粒状,发育清晰环带结构(图5b),锆石的Th/U值介于0.66~1.27之间,具岩浆成因的特征,获得单颗粒锆石U-Pb同位素年龄加权平均值为278.2 \pm 1.7Ma(图5d),代表该期花岗岩侵位结晶的年龄,时代定为中二叠世,锆石U-Pb测年结果见表2。

碱长花岗岩(GS2)样品锆石原位Lu-Hf同位素结果显示 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为0.28296~0.28328,其 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值为+12.6~+23.3(表3和图6),平均值为+18.9,Hf同位素单阶段模式年龄小于或与岩石结晶年龄相近,基本无有效二阶段模式年龄。

4 讨论

4.1 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩及花岗质杂岩形成时代

沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩位于内蒙古兴安盟呼和浩特和哈达-大石寨-巴达尔胡蛇绿构造混杂岩的东北部,Zhou等(2019)对大石寨蛇绿混杂岩带内辉长

岩、安山岩中锆石获得U-Pb年龄294~281Ma(表4),认为该混杂岩是典型的SSZ型蛇绿混杂岩,块体包括蛇绿质-超镁铁质岩、火山岩、硅质岩以及早二叠世变形板岩基质中的辉长岩。有学者在研究区西南部突泉县牡牛海地区发现了与亏损软流圈地幔源有关的岛弧环境的超镁铁质岩,时代为277~271Ma,在科尔沁右翼中旗布敦花牧场也发现有蛇纹石化橄榄岩,获得锆石U-Pb年龄为289 \pm 3Ma(付俊彧等,2017)。西部索伦山地区也报道过发育中二叠世蛇绿岩,其中玄武岩和辉长岩锆石U-Pb年龄分别为276.4 \pm 1.4Ma和273.9 \pm 3.3Ma(柳志华等,2020)。此外,西乌旗-大石寨一带出露有一系列二叠纪火山岩,包括玄武岩、安山岩、流纹岩等(表4),结合本次发现的蛇绿构造混杂岩(279Ma)和碱长花岗岩(278Ma),指示大兴安岭中南段发育广泛的中二叠世岩浆活动,并且洋壳的初始俯冲发生在中二叠世早期。

4.2 岩石成因及源区特征

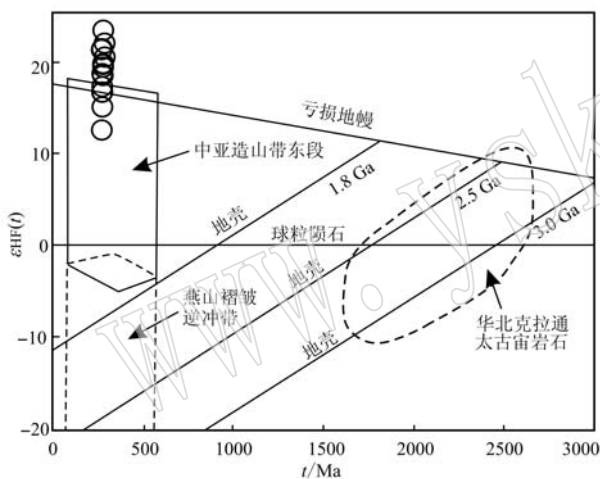
4.2.1 蛇纹石化橄榄岩源区

蛇纹石化橄榄岩含有低的SiO₂含量(43.54%~46.38%),Mg[#]为89~94,高于幔源玄武质原生岩浆

表3 锆石原位 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon in-situ Lu-Hf isotopic data for the samples

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
GS2.1	278	0.059 89	0.000 59	0.002 21	0.000 01	0.283 08	0.000 02	16.7	248	225	-0.93
GS2.2	278	0.078 81	0.001 51	0.002 92	0.000 05	0.283 14	0.000 03	18.7	161	76	-0.91
GS2.3	278	0.078 99	0.000 44	0.003 12	0.000 03	0.283 16	0.000 02	19.3	135	34	-0.91
GS2.4	278	0.049 89	0.002 58	0.001 86	0.000 09	0.283 08	0.000 03	16.8	243	215	-0.94
GS2.5	278	0.087 37	0.002 07	0.003 27	0.000 08	0.283 14	0.000 03	18.5	170	94	-0.90
GS2.6	278	0.047 17	0.000 84	0.001 72	0.000 02	0.283 04	0.000 02	15.1	313	340	-0.95
GS2.7	278	0.079 76	0.001 28	0.002 84	0.000 01	0.283 22	0.000 03	21.4	46	-122	-0.91
GS2.8	278	0.072 88	0.002 65	0.002 68	0.000 10	0.283 10	0.000 03	17.3	221	178	-0.92
GS2.9	278	0.095 06	0.001 42	0.003 38	0.000 06	0.283 22	0.000 03	21.4	42	-123	-0.90
GS2.10	278	0.121 94	0.006 36	0.004 33	0.000 24	0.283 28	0.000 04	23.3	-48	-256	-0.87
GS2.11	278	0.095 67	0.003 71	0.003 44	0.000 09	0.283 23	0.000 03	21.8	26	-148	-0.90
GS2.12	278	0.089 24	0.002 87	0.003 33	0.000 10	0.283 17	0.000 03	19.7	117	4	-0.90
GS2.13	278	0.083 56	0.003 33	0.003 03	0.000 09	0.283 19	0.000 03	20.3	95	-37	-0.91
GS2.14	278	0.082 38	0.000 73	0.002 94	0.000 04	0.283 17	0.000 03	19.8	116	-1	-0.91
GS2.15	278	0.031 52	0.001 82	0.001 15	0.000 05	0.282 96	0.000 03	12.6	412	522	-0.97

图6 碱长花岗岩锆石原位 $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ 图(据 Yang *et al.*, 2006)Fig. 6 Zircon $\varepsilon\text{Hf}(t)-t$ diagram for the alkali feldspar granite (after Yang *et al.*, 2006)

($\text{Mg}^\# = 68 \sim 75$), 与纯橄榄岩接近 ($\text{Mg}^\# = 86$) (付俊或等, 2017), 反映岩浆未发生过明显的结晶分异作用, 属于与岛弧有关的超镁铁质堆晶岩系列 (图 3c)。样品烧失量普遍较大 (10.88% ~ 12.03%), 与岩石普遍发生蛇纹石化、透闪石化等蚀变作用相关, 而高场强元素如 Nb、Ta、Zr、Hf、Y、Cr、Ni 和 REE 在交代过程中具有十分稳定的化学性质, 基本不受后期交代和变质作用影响, 一般被认为可以代表原岩原始的元素丰度 (Janney and Castillo, 1996)。岩石含有低的稀土元素总量 ($8.18 \times 10^{-6} \sim 24.54 \times 10^{-6}$), Zr/Hf 值为 34.12 ~ 38.67, 接近原始地幔 (36.27)

(张玉涛等, 2007), 暗示岩石可能直接来源于原始地幔。但相对原始地幔明显亏损 K_2O (0.05% ~ 0.15%)、 Na_2O (0.002% ~ 1.03%), 具有高 MgO (25.72% ~ 33.01%) 和 Cr (平均 $2.988.00 \times 10^{-6}$)、Ni (平均 $1.892.00 \times 10^{-6}$)、Co (平均 85.50×10^{-6}) 含量。通常亏损地幔的 Zr/Nb 值大于 18, 原始地幔的 Zr/Nb 值为 18, 过渡型地幔和富集型地幔的 Zr/Nb 值小于 18 (Le Roex *et al.*, 1983; 郑吉林等, 2020), 样品蛇纹石化橄榄岩 (TW1) Zr/Nb 值为 28.7, 而另两件样品 Zr/Nb 值为 2~8 总体显示亏损地幔-过渡型地幔特征。根据 Nb/La 值也可间接反映源区特征, 一般大洋中脊和原始地幔的 Nb/La 值大于 1.0, 陆壳的比值接近于 0.7 (Huang *et al.*, 2000), 样品的 Nb/La 值为 0.67 ~ 1.10, 落在洋岛玄武岩与岩石圈地幔与软流圈地幔相互作用区域 (图 7a)。岩石相对富集 Th 和 Ce, 低 K、Na、P 和 Ti, 具洋岛拉斑玄武岩特征 (Pearce and Peate, 1995)。此外, La/Ta 值为 8.8 ~ 36.2 (<50), Zr/Y 值为 3.3 ~ 9.6 (>3), Sr/Zr 和 Hf 轻微富集, 高场强元素 Nb、Ta 亏损的现象, 具有类似 OIB 的源区特征, 这种现象可能是源区受到消减作用影响所致 (Volpe *et al.*, 1988), 显示岛弧钙碱性岩特征 (图 3c)。在 Sm/Yb-Sm 图解中 (图 7b), 样品的 Sm/Yb 值总体近于或高于石榴石二辉橄榄岩曲线比值, 靠近 70% 熔融区域, 说明石榴石二辉橄榄岩相应源区的部分熔融作用对该超镁铁质岩原始岩浆贡献较大, 为较深的原始地幔源区岩石 70% 左右的部分熔融形成。

表4 大兴安岭中南段中二叠世岩浆岩年龄一览表

Table 4 Previous dating results for the Middle Permian magmatic rocks in the southern part of the Da Hinggan Mountains

序号	位置	样品编号	岩性	年龄/Ma	测试方法	参考文献
1	西乌旗	B1709	流纹岩	276 ± 0.8	LA-ICP-MS	张晓飞等, 2018
2	锡林浩特	D2538	英安岩	287.5 ± 1.4	LA-ICP-MS	张晓飞等, 2016
3	巴林右旗	W41N-1	玄武安山岩	280.1 ± 2.7	LA-ICP-MS	关庆彬等, 2016
4	苏尼特左旗	SZ8-1	流纹岩	272.1 ± 3.1	SHRIMP	梅可辰等, 2015
5	克什克腾旗	WD1019-01	枕状玄武岩	277 ± 3	LA-ICP-MS	王炎阳等, 2014
6	西乌旗	U. Pb. 294	流纹岩	280.3 ± 1.4	LA-ICP-MS	樊航宇等, 2014
7	锡林浩特	GSY47	石英角斑岩	287.4 ± 1.7	LA-ICP-MS	程天赦等, 2013
8	满都拉地区	3P5TW20-1	玄武岩	285 ± 11	LA-ICP-MS	陶继雄等, 2003
9	满都拉地区	3P4TW14-2	辉长岩	280 ± 1.1	LA-ICP-MS	陶继雄等, 2003
10	大石寨镇	D04-TW1	安山岩	294 ± 2	LA-ICP-MS	张能, 2013
11	大石寨镇		安山岩	276 ~ 298	LA-ICP-MS	张健, 2012
12	大石寨镇	D9910	安山岩	294 ± 1	LA-ICP-MS	Zhou <i>et al.</i> , 2019
13	大石寨镇	SL05	辉长岩	294 ± 1	LA-ICP-MS	Zhou <i>et al.</i> , 2019
14	巴达尔胡	D003	辉长岩	287 ± 1	LA-ICP-MS	Zhou <i>et al.</i> , 2019
15	巴达尔胡	SL04	凝灰岩	281 ± 1	LA-ICP-MS	Zhou <i>et al.</i> , 2019

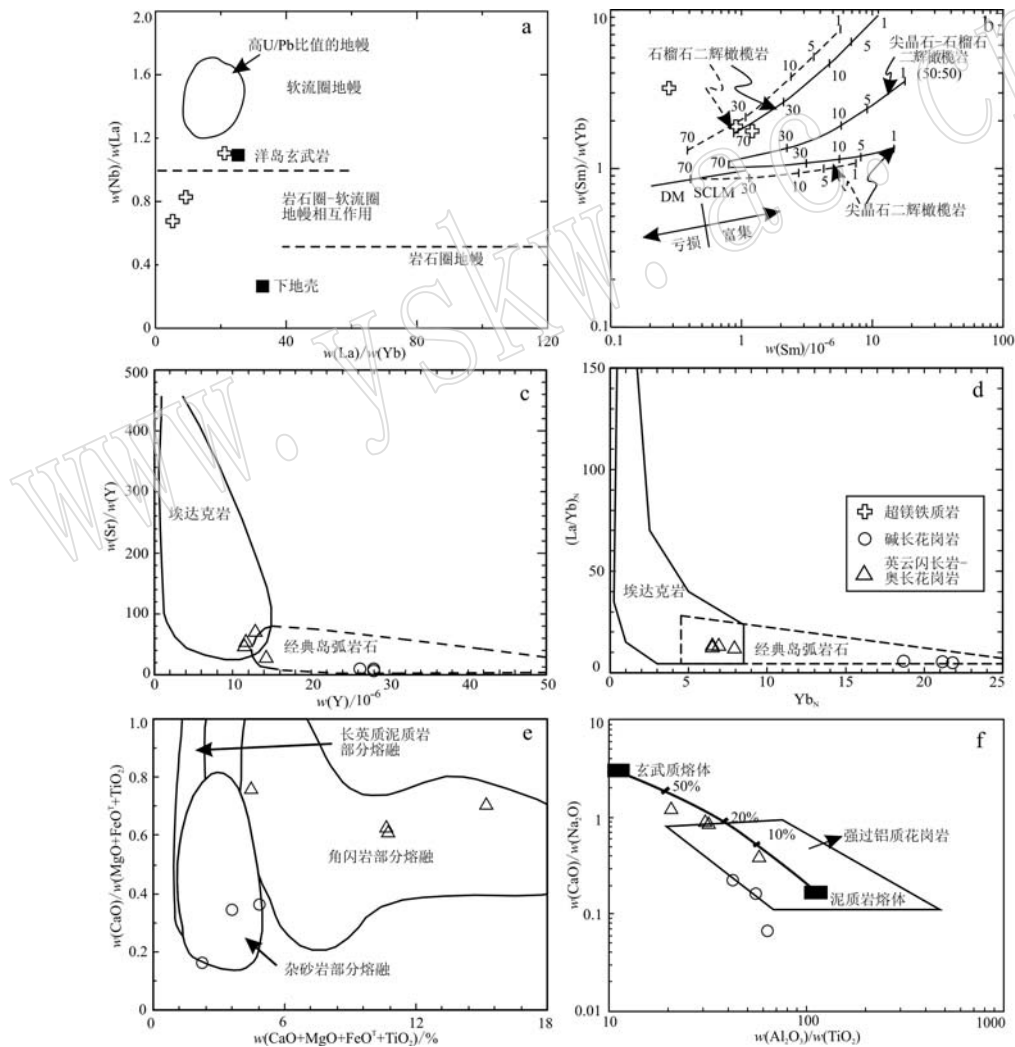


图7 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩岩浆来源判别图

Fig. 7 Discrimination diagrams of magma source for the Shabaertu ophiolite mélangé and coeval granitic complex
a—Nb/La—La/Yb 图 (Abdel-Rahman and Nassar, 2004); b—Sm/Yb—Sm 图 (据贺宏云等, 2020); c—Sr/Y—Y 图 (据 Castillo *et al.*, 1999); d— $(La/Yb)_N - Yb_N$ 图 (据 Castillo *et al.*, 1999); e— $CaO/(MgO+FeO^T+TiO_2) - (CaO+MgO+FeO^T+TiO_2)$ 图; f— $CaO/Na_2O - Al_2O_3/TiO_2$ 图 (据 Patiño, 1995; Sylvester, 1998)
a—Nb/La—La/Yb diagram (after Abdel-Rahman and Nassar, 2004); b—Sm/Yb—Sm diagram (after He Hongyun *et al.*, 2020); c—Sr/Y—Y diagram (after Castillo *et al.*, 1999); d— $(La/Yb)_N - Yb_N$ diagram (after Castillo *et al.*, 1999); e— $CaO/(MgO + FeO^T + TiO_2) - (CaO + MgO + FeO^T + TiO_2)$ diagram; f— $CaO/Na_2O - Al_2O_3/TiO_2$ diagram (after Patiño, 1995; Sylvester, 1998)

综上,该蛇纹石化橄榄岩可能来源于与岛弧有关的亏损地幔,源自石榴石二辉橄榄岩接近 70% 熔融,属俯冲型(SSZ)蛇绿岩,其就位机制与持续洋内俯冲有关。

4.2.2 英云闪长岩-奥长花岗岩源区

该套侵入岩表现为高 SiO_2 (平均 64.76%)、 Al_2O_3 (平均 16.56%), 富 Na_2O (平均 4.35%), 富集 LREE、亏损 HREE、高 Sr (平均 600.00×10^{-6})、低 Y (平均 12.50×10^{-6}) 和 Yb (平均 1.18×10^{-6}) 等特征,与典型埃达克岩特征相似。在 Sr/Y - Y 图解和 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$ 图解上,所有样品均落入典型埃达克岩区域(图 7c、7d)(张旗等, 2002; Rapp *et al.*, 2003; 邓晋福等, 2018)。在微量元素蛛网图上显示相对富集 Ba、Sr 而相对亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等元素,与大洋俯冲带岛弧型岩浆岩微量元素特征相似(王金芳等, 2019)。总体为钙碱性系列(图 3f),基本未发生斜长石分离结晶作用($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.80 \sim 0.96$)。岩石相对富钠贫钾, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 1.38 ~ 5.73, $(\text{Na}_2\text{O} - 2)/\text{K}_2\text{O}$ 值为 0.75 ~ 3.26, 均值 1.48, 显示钠质特征,归属 O 型埃达克岩,是俯冲环境下板片熔融的产物,通常解释为俯冲洋壳在 75 ~ 85 km 深处(相当于角闪岩-榴辉岩过渡带)部分熔融形成的(Peacock *et al.*, 1994; 李世超等, 2017; 王金芳等, 2019)。在 $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^T + \text{TiO}_2) - (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}^T + \text{TiO}_2)$ 图解中落入角闪岩部分熔融区(图 7e), 在 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解中基本落入玄武岩熔体 10% ~ 50% 区域(图 7f)。综上分析,该套岩石为低钾洋壳玄武岩类在较高温度下较高程度部分熔融成因。

4.2.3 碱长花岗岩源区

碱长花岗岩样品具高 SiO_2 (70.41% ~ 74.16%), 富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.52\% \sim 9.18\%$), A/CNK 为 0.93 ~ 1.14, 低 FeO (平均 0.92%)、MgO (平均 0.41%) 和 CaO (平均 0.74%) 和 P_2O_5 (平均 0.08%) 特征,属偏铝质-弱过铝质高钾钙碱性系列。含角闪石、黑云母等暗色矿物,蠕英石多分布于钾长石的边部,具显微文象结构,具有中等程度的负 Eu 异常($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.33 \sim 0.60$),说明岩浆发生了一定程度的斜长石分离结晶作用。岩石轻重稀土元素分馏明显 [$(\text{La}/\text{Yb})_N = 5.1 \sim 5.91$], 固结指数(SI)较小(2.14 ~ 4.57), 相对富集 Rb (平均 96.87×10^{-6})、K 等大离子亲石元素,相对亏损高场强元素 Nb、Ta, 亏损 Sr、P、Ti 等元素,说明本区碱长花岗岩为高钾钙碱性高

分异 I 型花岗岩(李猛兴等, 2020)。Ti 和 P 亏损可能与源区残留钛铁矿、金红石和磷灰石有关。岩石富硅, 低铁、镁及低 $\text{Mg}^\#$ (24 ~ 32), 表明岩石可能来源于壳源(吴子杰等, 2020)。岩石 Nb/Ta 值(7.0 ~ 8.5, 均值 7.9) 低于幔源岩浆(17), 而与下地壳接近(8.3)接近(Hans, 1995)。在 $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^T + \text{TiO}_2) - (\text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}^T + \text{TiO}_2)$ 图解中落入杂砂岩熔融区(图 7e), 在 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 图解中基本位于高铝花岗岩区和泥质岩区(图 7f)。此外, 岩石具有高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(平均 +18.9), 在地壳演化线上普遍投影到亏损地幔线之上(图 6), 反映该岩体来自亏损的地幔源区, 岩石单阶段模式年龄基本近于或者小于岩石结晶年龄, 总体无有效二阶段模式年龄, 说明岩石起源于岛弧型的新生地壳。实验证明基性玄武岩在高温(~950℃) 高压(~1 GPa) 条件下经过熔融和结晶分异作用可产生少量的酸性岩石(Patiño, 1995; Rapp and Watson, 1995)。综上分析, 该碱长花岗岩起源于岛弧型富铝质洋壳玄武岩的部分熔融, 并经历强烈的结晶分异作用而形成。

4.3 地质意义

研究区蛇绿构造混杂岩岩石组合完整, 包括变橄榄岩、枕状玄武岩、辉长岩、硅质岩和泥质岩块, 伴生 O 型埃达克质英云闪长岩-奥长花岗岩系及碱长花岗岩(Zhou *et al.*, 2019)。O 型埃达克岩富 Na, 分布于洋内及其周边地区, 其成因与板块的消减作用或玄武岩底侵有关(张旗等, 2001), 进一步表明其形成于大洋俯冲带岛弧环境, 构成典型的与洋壳俯冲相关的 SSZ 型蛇绿岩、岛弧型岩浆岩组合。前文提及本区为二连-贺根山缝合带的东延部分, 汪岩等(2013)在扎赉特旗一带发现早石炭世末期岛弧基性岩, 揭示二连-贺根山构造带北东延至扎赉特旗一带。虽然有关古亚洲洋闭合位置和时间一直存在争议, 但结合古生物学研究, 有学者认为古亚洲洋东段在早古生代主洋盆位于贺根山-林西-黑河一线或者以南地区(卜建军等, 2020)。至晚古生代初($D_3 - C_1$), 华北板块与中亚蒙古陆块之间的洋盆闭合, 两大板块对接形成二连-贺根山缝合带(唐克东, 1992)。前人在西乌旗白音呼舒获得晚石炭世大洋俯冲带岛弧型奥长花岗岩体(309.2 ± 1.6 Ma), 表明古亚洲洋二连-贺根山洋盆在晚石炭世并未关闭, 而是处于大洋俯冲消减和陆壳增生过程中(王金芳等, 2019)。区域上存在着早中二叠世蛇绿岩及岛弧岩

浆岩组合(王惠等, 2005; 王金芳等, 2017), 而且本区构造蛇绿混杂岩变形强烈, 岩石多呈断块状, 区域上早中二叠世大石寨组发育海相火山岩-沉积岩组合, 显示该时期存在较为强烈的岩浆活动, 至中二叠世哲斯组发育为浅海相碎屑岩沉积, 构造环境相对稳定, 二者构造环境发生了显著变化(Yu *et al.*, 2016)。而本次研究中的构造混杂岩(279 Ma)正对应该构造环境变化期, 记录了洋壳初始俯冲事件, 至晚二叠世过渡到陆相环境, 并发育陆相湖沼相碎屑沉积的林西组(贺宏云等, 2019)。三叠纪已经处于碰撞-后碰撞-拉张的转换期, 存在 I 型-A 型过渡的花岗岩及火山岩(240~220 Ma), 岩石基本无变形, 构造属性由区域性挤压为主并逐渐转为弧后伸展的构造环境(贺宏云等, 2020)。至白垩纪, 研究区地处北东向的嫩江-八里罕断裂边缘, 经历区域性的升

降和走滑运动, 东南缘发育松辽盆地(Wang *et al.*, 2016; 王东星等, 2018), 构成区域性的构造热事件, 样品(TW1)所获得的锆石 U-Pb 年龄(139 Ma)印证了该构造热扰动事件的存在。该区从 Th/Yb - Ta/Yb 构造图解(图 8a)和 $Ce_N - Sr_N - Sm_N$ 图解(图 8b)可知, 超镁铁质岩-枕状玄武岩样品基本投于岛弧环境的钙碱性玄武岩区和洋岛拉斑玄武岩区。同期英云闪长岩-奥长花岗岩系和碱长花岗岩在 Rb 与 Y+Nb 图解和 Ta - Yb 图解(图 8c、8d)也均位于岩浆弧花岗岩区, 暗示形成于岛弧的构造环境。岩石组合的递进演变反映了与俯冲作用有关的岩浆作用具有由洋盆向大陆转化的性质, 记录了洋盆向大陆转化的演化历史, 代表了俯冲作用由浅到深递进演变过程(肖庆辉等, 2016)。

综上所述, 古亚洲洋在中二叠世早期未闭合, 仍

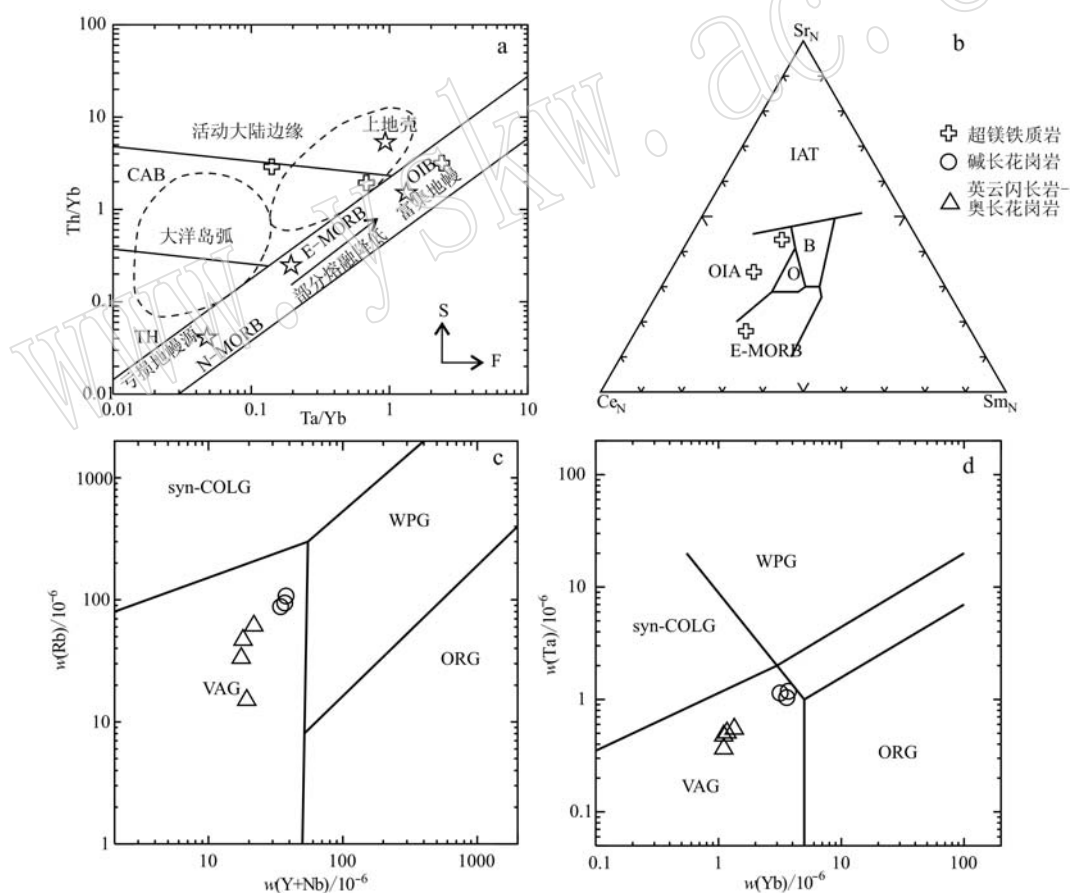


图 8 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩及同期花岗质杂岩构造环境判别图(据 Förster *et al.*, 1997; Pearce, 2008)

Fig. 8 Tectonic discrimination diagrams for the Shabaertu ophiolite mélangé and coeval granitic complex (after Förster *et al.*, 1997; Pearce, 2008)

ORG—洋脊花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; IAT—岛弧拉斑玄武岩; OIA—洋岛碱性玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; TH—拉斑玄武岩; N-MORB—洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; ORG—ocean ridge granite; VAG—volcanic arc granite; WPG—within plate granite; syn-COLG—syn-collisional granite; IAT—oceanic island alkaline basalt; CAB—calc alkaline basalt; OIB—oceanic island basalt; TH—tholeiite; N-MORB—normal mid ocean ridge basalt; E-MORB—enrichment mid ocean ridge basalt

存在持续性的俯冲活动,伴随着洋壳的消减,发生了新生地壳的增生活动,而本次研究的蛇绿构造混杂岩和同期花岗质杂岩完整记录了该洋壳俯冲及地壳增生过程,为古亚洲洋的构造演化提供了新的研究资料。

5 结论

(1) 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩中超镁铁质岩和碱长花岗岩锆石 U-Pb 谐和年龄分别为 279.2 ± 3.3 Ma 和 278.2 ± 1.7 Ma, 表明该蛇绿构造混杂岩形成于中二叠世早期。

(2) 蛇绿构造混杂岩中超镁铁质岩具有与岛弧有关的亏损地幔—过渡型地幔特征,源区起源于石榴石二辉橄榄岩接近 70% 熔融,属俯冲型(SSZ)蛇绿岩。英云闪长岩—奥长花岗岩岩系具典型埃达克岩特征,归属 O 型埃达克岩,是俯冲环境下低钾洋壳玄武岩类部分熔融产物。碱长花岗岩具有高的正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(平均+18.9),位于亏损地幔线之上,起源于岛弧型的新生地壳。

(3) 沙巴尔吐蛇绿构造混杂岩代表中二叠世早期洋内俯冲的产物,表明古亚洲洋在中二叠世早期未闭合,仍存在持续性的俯冲活动,闭合时间应在中二叠世之后。

致谢 野外地质调查、剖面测制和样品采集工作得到了内蒙古自治区地质调查院柳永正、张海平、王东星等项目组人员的大力帮助,岩矿鉴定和实验过程中得到了实验室张有宽、张爱和张成工程师的悉心指导,在此一并表示感谢。

References

- Abdel-Rahman A-F M and Nassar P E. 2004. Cenozoic volcanism in the Middle East: Petrogenesis of alkali basalts from northern Lebanon [J]. *Geological Magazine*, 141(5): 545~563.
- Bu Jianjun, He Weihong, Zhang Kexin, *et al.* 2020. Evolution of the Paleo-Asian Ocean: Evidences from paleontology and stratigraphy [J]. *Earth Science*, 45(3): 711~727 (in Chinese with English abstract).
- Castillo P R, Janney P E and 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[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33~51.
- Chen Bin, Zhao Guochun and Simon Wilde. 2001. Subduction- and collision-related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implications[J]. *Geological Review*, 47(4): 361~367 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Zhang Cheng, Wang Pin, *et al.* 2017. The Mo deposits of Northeast China: A powerful indicator of tectonic settings and associated evolutionary trends[J]. *Ore Geology Reviews*, 81: 602~640.
- Cheng Tianshe, Yang Wenjing and Wang Denghong. 2013. Zircon U-Pb age of the spilite-keratophyre sequence of the Dashizhai Formation in Maodeng of Xilinhaote, Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Geoscience*, 27(3): 525~536 (in Chinese with English abstract).
- Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, *et al.* 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview[J]. *Journal of the Geological Society*, 149(4): 569~579.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Di Yongjun, *et al.* 2018. Discussion on the tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) petroctectonic assemblage and its subtypes[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 42~50 (in Chinese with English abstract).
- Dilek Y and Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere [J]. *GSA Bulletin*, 123(3~4): 387~411.
- Dong Yu, He Zhonghua, Ren Zihui, *et al.* 2018. Formation of the Permian Taipinggou igneous rocks, north of Luobei (Northeast China): Implications for the subduction of the Mudanjang Ocean beneath the Bureya-Jiamusi Massif[J]. *International Geology Review*, 60(10): 1 195~1 212.
- Fan Hangyu, Li Mingchen, Zhang Quan, *et al.* 2014. Age and geochemical characteristics of the Dashizai Formation volcanic rocks in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1 284~1 292 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yanfang, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, *et al.* 2011. Recognizing the TTG rock types: Discussion and suggestion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 406~414 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhiqiang, Liu Yongjiang, Jin Wei, *et al.* 2019. Spatiotemporal distribution of ophiolites in the northern Great Xing'an Range and its relationship with the geotectonic evolution of NE China[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(2): 120~136 (in Chinese with English abstract).

- Förster H J, Tischendorf G and Trumbull R B. 1997. An evaluation of the Rb vs. (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks[J]. *Lithos*, 40(2): 261~293.
- Fu Junyu, Wang Yan, Zhong Hui, *et al.* 2017. Geochemistry and source characteristics of ultramafic rocks in Tuquan Mangniuhai, Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 47(4): 1 172~1 186 (in Chinese with English abstract).
- Guan Qingbin, Liu Zhenghong, Bai Xinhui, *et al.* 2016. Age and tectonic setting of volcanic rocks of the Dashizhai Formation from Xinkaiba, Balinyouqi area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2 029~2 040.
- Hans W K. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1 217~1 232.
- He Hongyun, Li Yinglei, Liu Huichuan, *et al.* 2020. Geochronology and geochemistry of the Middle Triassic magmatic rocks in the southeastern part of the Da Hinggan Mountains and their constraints on the tectonic evolution of Paleo-Asian Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(7): 1 046~1 061 (in Chinese with English abstract).
- He Hongyun, Liu Yongzheng, Guo Yonglie, *et al.* 2019. Redivision of the Upper Permian Linxi Formation in the Shabaertu region, Ulanhot, Inner Mongolia[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(3): 101~111 (in Chinese with English abstract).
- Huang Yiming, Hawkesworth C, Smith I, *et al.* 2000. Geochemistry of late Cenozoic basaltic volcanism in Northland and Coromandel, New Zealand: Implications for mantle enrichment processes[J]. *Chemical Geology*, 164(3): 219~238.
- Irvine T N and Baragar WR A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523~548.
- Janney P E and Castillo P R. 1996. Basalts from the Central Pacific Basin: Evidence for the origin of Cretaceous igneous complexes in the Jurassic western Pacific[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2): 2 875~2 893.
- Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, *et al.* 2004. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms; Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*[M]. New York: Cambridge University Press.
- Le Roex A P, Dick H J B, Erlank A J, *et al.* 1983. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian ridge between the Bouvet Triple Junction and 11 degrees east[J]. *Journal of Petrology*, 24(3): 267~318.
- Li Huaikun, Geng Jianzhen, Hao Shuang, *et al.* 2009. Study on the de-termination of zircon U-Pb isotopic age by laser ablation multi-receiver plasma mass spectrometer (LA-MC-ICPMS) [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 600~601 (in Chinese with English abstract).
- Li J Y. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3~4): 207~224.
- Li Mengxing, Zhang Rui and Sun Hua. 2020. Petrogenesis and geological implications of the Daoter intrusive complex in the Dongwuqi Area in the Southern Xing'an Block[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39: 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Li Shichao, Zhang Lingyu, Li Pengchuan, *et al.* 2017. Discovery and tectonic implications of Early Triassic O-type adakite in middle of Great Xing'an Range[J]. *Earth Science*, 42(12): 2 117~2 128 (in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang, Wang Genhou, *et al.* 2018. Discovery and significance of the Dahate fore-arc basalts from the Diyanmiao ophiolite in Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(2): 469~482 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongjiang, Feng Zhiqiang, Jiang Liwei, *et al.* 2019. Ophiolite in the eastern Central Asian Orogenic Belt, NE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 35(10): 3 017~3 047 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhihua, Gu Xuexiang, Zhang Yongmei, *et al.* 2020. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry characteristics and geological significance of the Solonker ophiolite, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 34(3): 399~417 (in Chinese with English abstract).
- Mei Kechen, Li Qiugen, Wang Zongqi, *et al.* 2015. SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry and tectonic significance of the Dashizhai Formation rhyolites in Sunid Left Banner, middle part of Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(12): 2 181~2 194 (in Chinese with English abstract).
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins[J]. *American Journal of Science*, 274(4): 321~355.
- Patiño Douce A E. 1995. Experimental generation of hybrid silicic melts by reaction of high-Al basalt with metamorphic rocks[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B8): 15 623~15 639.
- Peacock S M, Rushmer T and Thompson A B. 1994. Partial melting of subducting oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 121(1): 227~244.
- Pearce J A. 2008. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean ocean-

- ic crust[J]. *Lithos*, 100(1): 14~48.
- Pearce J A and Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic ARC magmas[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251~285.
- Rapp R P, Shimizu N and Norman M D. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. *Nature*, 425(6 958): 605~609.
- Rapp R P and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500 (in Chinese with English abstract).
- Shi Rendeng. 2005. Comment on the progress in and problems on ophiolite study[J]. *Geological Review*, 51(6): 681~693 (in Chinese with English abstract).
- Su Maorong, Li Yinglei, Liu Huichuan, *et al.* 2020. Paleoproterozoic basement in eastern Central Asia Orogenic Belt: Evidence from granite and sedimentary strata in Sino-Mongolia border area[J]. *Geology of China*, 47(4): 1 186~1 203 (in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29~44.
- Tang Kedong. 1992. Tectonic Evolution and Metallogenic Regularity of Fold Belt on the Northern Side of Sino Korean Plate[M]. *Peking University Press*, 1~285 (in Chinese).
- Tao Jixiong, Bai Libing, Bao Yinwuliji, *et al.* 2003. Rock record of Permian subducting orogenic process in Mandula, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 26(4): 241~249 (in Chinese with English abstract).
- Volpe A M, Douglas Macdougall J and Hawkins J W. 1988. Lau Basin basalts (LBB): Trace element and SrNd isotopic evidence for heterogeneity in backarc basin mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(2): 174~186.
- Wang Cheng, Ren Limin, Zhang Xiaojun, *et al.* 2018a. Ages, origin and geological implications of adamellite in Early Permian in Hegenshan, Inner Mongolia[J]. *Xinjiang Geology*, 36(2): 159~168 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dongxing, He Hongyun, Zhao Lei, *et al.* 2018b. The response of Early Cretaceous ductile deformation to the Nenjiang-Balihan fault in Ulanhot area, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(9): 1 704~1 709 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hui, Wang Yujing, Chen Zhiyong, *et al.* 2005. Discovery of the Permian radiolarians from the bayanaobao area, Inner Mongolia[J]. *Journal of Stratigraphy*, 29(4): 368~371 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, *et al.* 2019. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of Baiyinhushu trondhjemite in Hegenshan suture zone and their tectonic implications[J]. *Geological Review*, 65(4): 857~872 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, *et al.* 2017. Discovery of Early Permian Intra-oceanic arc adakite in the Meilaotewula ophiolite, Inner Mongolia and its evolution model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(8): 1 776~1 795 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pujun, Mattern F, Didenko N A, *et al.* 2016. Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin[J]. *Earth—Science Reviews*, 159: 82~102.
- Wang Yan, Fu Junyu, Na Fuchao, *et al.* 2013. Geochemical characteristics and zircon U-Pb age of the gabbro-diorite in Jalaidd Banner of Inner Mongolia and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(10): 1 525~1 535 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanyang, Xu Bei, Cheng Shengdong, *et al.* 2014. Zircon U-Pb dating of the mafic lava from Wudaoshimen, Hexigten, Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 2 055~2 062 (in Chinese with English abstract).
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao Wenjiao, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Wu Zijie, Wang Yang, Cui Peilong, *et al.* 2020. The Early Carboniferous A-type granite in Nuominhe area, northern Da Hingan Mountains: Geochronology, geochemistry and Hf isotope studies[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2 200~2 211 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Li Tingdong, Pan Guitang, *et al.* 2016. Petrologic ideas for identification of ocean-continent transition: Recognition of intra-oceanic arc and initial subduction[J]. *Geology of China*, 43(3): 721~737 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Han Chunming, *et al.* 2018. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia[J]. *Earth—Science Reviews*, 186: 94~128.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, *et al.* 2003. Accretion leading to

- collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6).
- Xu Bei, Zhao Pan, Bao Qingzhong, *et al.* 2014. Preliminary study on the pre-Mesozoic tectonic unit division of the Xing-Meng Orogenic Belt (XMOB) [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1 841~1 857 (in Chinese with English abstract).
- Xu Bei, Zhao Pan, Wang Yanyang, *et al.* 2015. The pre-Devonian tectonic framework of Xing'an-Mongolia orogenic belt (XMOB) in north China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97: 183~196.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Ji'an, *et al.* 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3): 336~352.
- Yu Qian, Ge Wenchun, Zhang Jian, *et al.* 2016. Geochronology, petrogenesis and tectonic implication of Late Paleozoic volcanic rocks from the Dashizhai Formation in Inner Mongolia, NE China[J]. *Gondwana Research*, 43: 164~177.
- Zhang Jian. 2012. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks from the Dashizhai Formation in Eastern Inner Mongolia [D]. Jilin University, 1~85 (in Chinese).
- Zhang Jin, Deng Jinfu, Xiao Qinghui, *et al.* 2012. New advances in the study of ophiolites[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 1~12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Neng. 2013. Late Paleozoic Tectonic Framework and Evolution for the Dashizhai Area Inner Mongolia, China[D]. China University of Geosciences (Beijing), 1~172 (in Chinese).
- Zhang Qi, Wang Yan and Liu Wei, *et al.* 2002. Adakite: Its characteristics and implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431~435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaofei, Liu Junlai, Feng Junling, *et al.* 2016. Geochronological and geochemical features of volcanic rocks of Dashizhai Formation in Ural Sutaï of Xilin Hot, Inner Mongolia, and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(5): 766~775 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaofei, Zhou Yi, Liu Junlai, *et al.* 2018. Geochronology and geochemistry for volcanic rocks of Dashizhai Formation and its geological significance in Xi U jimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(6): 1 775~1 791 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yutao, Zhang Lianchang, Ying Jifeng, *et al.* 2007. Geochemistry and source characteristics of early Cretaceous volcanic rocks in Tahe, north Da Hinggan Mountain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2 811~2 822 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Jilin, Liu Tao, Xu Liming, *et al.* 2020. Geochemical and chronologic characteristics of ultramafic rocks in Gaxian ophiolitic melange of the Da Hinggan Mountains and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(4): 480~490 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhiguang, Liu Changfeng, Wang Guosheng, *et al.* 2019. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of the Dashizhai ophiolitic melange belt, southeastern Xing'an-Mongolia orogenic belt[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 108(1): 67~88.

附中文参考文献

- 卜建军, 何卫红, 张克信, 等. 2020. 古亚洲洋的演化: 来自古生物地层学方面的证据[J]. *地球科学*, 45(3): 711~727.
- 陈斌, 赵国春, Simon Wilde. 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义[J]. *地质论评*, 47(4): 361~367.
- 程天赦, 杨文静, 王登红. 2013. 内蒙古锡林浩特毛登牧场大石寨组细碧-角斑岩系地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *现代地质*, 27(3): 525~536.
- 邓晋福, 刘翠, 狄永军, 等. 2018. 英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩(TTG)岩石构造组合及其亚类划分[J]. *地学前缘*, 25(6): 42~50.
- 樊航宇, 李明辰, 张全, 等. 2014. 内蒙古西乌旗地区大石寨组火山岩时代及地球化学特征[J]. *地质通报*, 33(9): 1 284~1 292.
- 冯艳芳, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 2011. TTG 岩类的识别: 讨论与建议[J]. *高校地质学报*, 17(3): 406~414.
- 冯志强, 刘永江, 金巍, 等. 2019. 东北大兴安岭北段蛇绿岩的时空分布及与区域构造演化关系的研究[J]. *地学前缘*, 26(2): 120~136.
- 付俊或, 汪岩, 钟辉, 等. 2017. 内蒙古突泉县牯牛海地区超镁铁质岩地球化学及源区特征[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 47(4): 1 172~1 186.
- 关庆彬, 刘正宏, 白新会, 等. 2016. 内蒙古巴林右旗新开坝地区大石寨组火山岩形成时代及构造背景[J]. *岩石学报*, 32(7): 2 029~2 040.
- 贺宏云, 李英雷, 刘汇川, 等. 2020. 大兴安岭东南段中三叠世岩浆岩年代学、地球化学特征及其对古亚洲洋构造演化时限的制约

- [J]. 地质通报, 39(7): 1 046~1 061.
- 贺宏云, 柳永正, 郭永烈, 等. 2019. 内蒙古乌兰浩特沙巴尔吐地区上二叠统林西组重新划分[J]. 沉积与特提斯地质, 39(3): 101~111.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝 爽, 等. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 29(S1): 600~601.
- 李猛兴, 张 瑞, 孙 华. 2020. 兴安地块南段道特杂岩体成因及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 39: 1~14.
- 李世超, 张凌宇, 李鹏川, 等. 2017. 大兴安岭中段早三叠世 O 型埃达克岩的发现及其大地构造意义[J]. 地球科学, 42(12): 2 117~2 128.
- 李英杰, 王金芳, 王根厚, 等. 2018. 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[J]. 岩石学报, 34(2): 469~482.
- 刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 等. 2019. 中国东北地区蛇绿岩[J]. 岩石学报, 35(10): 3 017~3 047.
- 柳志华, 顾雪祥, 章永梅, 等. 2020. 内蒙古索伦山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 34(3): 399~417.
- 梅可辰, 李秋根, 王宗起, 等. 2015. 内蒙古中部苏尼特左旗大石寨组流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 34(12): 2 181~2 194.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 史仁灯. 2005. 蛇绿岩研究进展、存在问题及思考[J]. 地质论评, (6): 681~693.
- 苏茂荣, 李英雷, 刘汇川, 等. 2020. 中亚造山带东段古元古代结晶基底: 来自中蒙边境花岗岩和沉积地层的证据[J]. 中国地质, 47(4): 1 186~1 203.
- 唐克东. 1992. 中朝板块北侧褶皱带构造演化及成矿规律[M]. 北京大学出版社, 1~285.
- 陶继雄, 白立兵, 宝音乌力吉, 等. 2003. 内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录[J]. 地质调查与研究, 26(4): 241~249.
- 王 成, 任利民, 张晓军, 等. 2018. 内蒙古贺根山地区早二叠世二长花岗岩时代、成因及构造意义[J]. 新疆地质, 36(2): 159~168.
- 王东星, 贺宏云, 赵 磊, 等. 2018. 内蒙古乌兰浩特地区早白垩世韧性变形对嫩江-八里罕断裂的响应[J]. 地质通报, 37(9): 1 704~1 709.
- 王 惠, 王玉净, 陈志勇, 等. 2005. 内蒙古巴彦敖包二叠纪放射虫化石的发现[J]. 地层学杂志, 29(4): 368~371.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 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[J]. 地质学报, 91(8): 1 776~1 795.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2019. 贺根山缝合带白音呼舒奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 65(4): 857~872.
- 汪 岩, 付俊彧, 那福超, 等. 2013. 内蒙古扎赉特旗辉长岩-闪长岩地球化学特征和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质通报, 32(10): 1 525~1 535.
- 王炎阳, 徐 备, 程胜东, 等. 2014. 内蒙古克什克腾旗五道石门基性火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 30(7): 2 055~2 062.
- 吴子杰, 汪 洋, 崔培龙, 等. 2020. 大兴安岭北部诺敏河地区早石炭世 A 型花岗岩的年代学、地球化学及 Hf 同位素研究[J]. 地质学报, 94(8): 2 200~2 211.
- 肖庆辉, 李廷栋, 潘桂棠, 等. 2016. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别[J]. 中国地质, 43(3): 721~737.
- 徐 备, 赵 盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴安造山带前中生代构造单元划分初探[J]. 岩石学报, 30(7): 1 841~1 857.
- 张 健. 2012. 内蒙古东部大石寨组火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地球化学研究[D]. 吉林大学, 1~85.
- 张 进, 邓晋福, 肖庆辉, 等. 2012. 蛇绿岩研究的最新进展[J]. 地质通报, 31(1): 1~12.
- 张 能. 2013. 内蒙古东部大石寨地区晚古生代构造格局及演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1~172.
- 张 旗, 王 焰, 刘 伟, 等. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 21(7): 431~435.
- 张 旗, 王 焰, 钱 青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. 岩石学报, 17(2): 236~244.
- 张晓飞, 刘俊来, 冯俊岭, 等. 2016. 内蒙古锡林浩特乌拉苏太火石寨组火山岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 35(5): 766~775.
- 张晓飞, 周 毅, 刘俊来, 等. 2018. 内蒙古西乌旗大石寨组火山岩年代学和地球化学特征及地质意义[J]. 岩石学报, 34(6): 1 775~1 791.
- 张玉涛, 张连昌, 英基丰, 等. 2007. 大兴安岭北段塔河地区早白垩世火山岩地球化学及源区特征[J]. 岩石学报, 23(11): 2 811~2 822.
- 郑吉林, 刘 涛, 徐立明, 等. 2020. 大兴安岭嘎仙蛇绿混杂岩中超镁铁质岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 39(4): 480~490.