

· 专题研究 ·

内蒙古阿如罕敖包花岗闪长岩年代学和地球化学及其对古亚洲洋演化的启示

程天赦¹, 杨文静², 张学斌², 滕超¹, 杨欣杰¹, 陈喜庆¹, 肖登¹,
吴荣泽², 周长红²

(1. 自然资源实物地质资料中心, 河北 三河 065201; 2. 天津市地质调查研究院, 天津 300191)

摘要: 内蒙古西乌旗阿如罕敖包花岗闪长岩体出露于贺根山缝合带中东段南侧。阿如罕敖包花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果为 $332 \pm 3 \sim 327 \pm 1$ Ma, 显示其形成于早石炭世; 岩石具有高硅 (SiO_2 含量为 65.20% ~ 68.27%)、富钠 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 2.56 ~ 4.35)、高铝 (Al_2O_3 含量为 15.61% ~ 17.35%, A/CNK 值为 1.02 ~ 1.17)、低镁 (MgO 含量为 1.16% ~ 1.61%, $\text{Mg}^\#$ 值为 29.54 ~ 41.75) 等特征; 稀土元素总量较低 ($\Sigma\text{REE} = 44.73 \times 10^{-6} \sim 88.11 \times 10^{-6}$)、轻重稀土元素分馏明显 [$\text{LREE}/\text{HREE} = 6.75 \sim 10.18$, ($\text{La}/\text{Yb})_N = 6.65 \sim 13.85$]、钕无明显异常 ($\delta\text{Eu} = 0.79 \sim 1.07$); 高 Sr (Sr 含量为 $472 \times 10^{-6} \sim 552 \times 10^{-6}$)、低 Yb (Yb 含量为 $0.86 \times 10^{-6} \sim 1.13 \times 10^{-6}$)、低 Y (Y 含量为 $7.29 \times 10^{-6} \sim 11.42 \times 10^{-6}$)、高 Sr/Y 值 ($\text{Sr}/\text{Y} = 43.45 \sim 75.68$)。岩石地球化学特征显示阿如罕敖包花岗闪长岩具有典型高 Si 岛弧型埃达克岩 (O 型) 的特征, 形成于活动大陆边缘弧环境, 其源岩可能是俯冲洋壳+大洋沉积物的部分熔融与上覆地幔橄榄岩发生反应的产物, 在形成过程中发生了结晶分异和壳源物质的混染。本次发现可能佐证了古亚洲洋贺根山洋盆中东段在早石炭世尚未闭合。结合区域研究成果, 本文初步认为古亚洲洋贺根山洋盆在早石炭世可能存在双向俯冲消减, 这与前人认为古亚洲洋贺根山洋盆向北单向俯冲消减的观点不同。

关键词: 贺根山缝合带; 埃达克岩; 贺根山洋盆双向俯冲; 早石炭世; 活动大陆边缘弧; 花岗闪长岩; 西乌旗

中图分类号: P581; P588.12

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)05-1218-17

Chronology and geochemistry of the Aruhan granodiorite in Inner Mongolia and their implications for the evolution of the Paleo-Asian Ocean

CHENG Tian-she¹, YANG Wen-jing², ZHANG Xue-bin², TENG Chao¹, YANG Xin-jie¹, CHEN Xi-qing¹,
XIAO Deng¹, WU Rong-ze² and ZHOU Chang-hong²

(1. Cores and Samples Center of Natural Resources, China Geological Survey, Sanhe 065201, China; 2. Tianjin Institute of Geological Survey, Tianjin 300191, China)

Abstract: The Aruhan granodiorite intrusion in Xiwuqi, Inner Mongolia, is exposed along the central and eastern parts of the Hegenshan suture zone. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that the ages of the granodiorite are ranging from 332 ± 3 to 327 ± 1 Ma, suggesting emplacement during the Early Carboniferous. The Aruhan granodiorite is characterized by high contents of SiO_2 (65.20% to 68.27%), Al_2O_3 (15.61% to 17.35%), Sr (472×10^{-6} to 552×10^{-6}) and low contents of MgO (1.16% to 1.61%), Yb (0.86×10^{-6} to 1.13×10^{-6}), Y (7.29×10^{-6} to 11.42×10^{-6}), and high Sr/Y value ($\text{Sr}/\text{Y} = 43.45 \sim 75.68$). The geochemical characteristics of the Aruhan granodiorite show typical high Si island arc type adakite (O type) features, formed in an active continental margin environment. Its protolith may be the partial melting of subducted oceanic crust + oceanic sediments and the overlying mantle peridotite. The present discovery may corroborate that the eastern part of the Paleo-Asian Ocean Hegen Shan basin was not closed in the Early Carboniferous. Combined with regional research results, this paper preliminarily believes that the Hegen Shan basin of the Paleo-Asian Ocean may have experienced bidirectional subduction and elimination in the Early Carboniferous, which is different from the previous view of unidirectional subduction and elimination to the north.

收稿日期: 2023-05-26; 接受日期: 2024-05-20; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局三级项目 (DD20242250, DD20221814, [2010] 矿评 01-19-01)

作者简介: 程天赦 (1982-), 男, 博士, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: chengtianshe515@163.com; 通讯作者: 杨文静 (1982-), 女, 高级工程师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: yangwenjing515@163.com。

to 11.42×10^{-6} , with $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ and Sr/Y ratios ranging from 2.56 to 4.35 and 43.45 to 75.68, respectively. The total REE is low (44.73×10^{-6} to 88.11×10^{-6}), the fractionation of REE is significant [$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 6.65 \sim 13.85$], and the anomaly of Eu ($\delta\text{Eu} = 0.79$ to 1.07) is not obvious. The geochemical characteristics of the whole-rock indicate that the Aruhan granodiorite belongs to typical high- SiO_2 island arc adakites (O-type) series, formed in an environment of active continental marginal arc. The source of the magma might be the product of partial melting of subducting oceanic crust with oceanic sediments, which reacts with overlying mantle peridotite. Crystallization differentiation and contamination by crustal materials might occur during its emplacement. This discovery may support the fact that the central and eastern parts of the Hegenshan Ocean was not yet closed during the Early Carboniferous. Combined with the regional research, we preliminarily believe that the Hegenshan Ocean may have undergone bidirectional subduction and abatement during the Early Carboniferous, which is different from the previous view that the Hegenshan Ocean underwent unidirectional subduction and abatement northward only.

Key words: Hegenshan suture zone; adakite; bidirectional subduction of the Hegenshan Ocean; Early Carboniferous; active continental margin; granodiorite; Xiwuqi

Fund support: China Geological Survey Project (DD20242250, DD20221814, [2010] Mining evaluation 01-19-01)

埃达克岩初始定义是指大洋俯冲作用中年轻洋壳直接部分熔融形成的岛弧型中酸性富钠火成岩, 可作为识别大洋俯冲带存在的证据 (Defant and Drummond, 1990, 1993; Sajona *et al.*, 1993; Stern and Killian, 1996; Samaniego *et al.*, 2002; Bourdon *et al.*, 2003)。尽管相关学者对埃达克岩的岩石成因及其形成的构造环境提出了不同的认识, 但普遍认为与大洋俯冲作用有关的岛弧型埃达克岩(O型)具以下独特的地球化学特征: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, $\text{MgO} < 3\%$, $\text{Sr} \geq 400 \times 10^{-6}$, 亏损重稀土元素(HREE), $\text{Y} \leq 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} \leq 1.9 \times 10^{-6}$, 富集轻稀土元素(LREE), Eu异常不明显(王焰等, 2000; Kay and Kay, 2002; Castillo, 2006, 2012; Richards and Kerrich, 2007; 张旗等, 2019, 2020)。

贺根山洋作为古亚洲洋北侧分支洋, 古生代—中生代由于俯冲消减—碰撞造山等过程, 在兴蒙造山带北部形成了二连浩特至贺根山一带呈北东向展布的巨型缝合带即贺根山缝合带。内蒙古西乌旗地区位于锡林浩特微陆块北西缘和贺根山缝合带南东侧, 是研究贺根山洋地质演化的重要地区之一。近年来, 西乌旗地区发现了大量晚石炭世岩浆岩, 为揭示贺根山洋晚石炭世地质演化提供了重要载体。王金芳等(2020, 2021a, 2021b)在西乌旗梅劳特乌拉发现晚石炭世埃达克岩、高镁安山岩、奥长花岗岩, 认为贺根山洋在晚石炭世存在大洋俯冲环境; 王帅等(2021)认为西乌旗马尼塔埃达克岩与该地区晚石炭世洋内俯冲消减有关; 杨智荔等(2022)认为西乌旗猴头庙晚石炭世辉长岩—花岗岩形成于贺根山洋

洋脊俯冲环境。这与区域上东乌旗晚石炭世角闪辉长岩(张夏炜等, 2021)、苏左旗—西乌旗一带晚石炭世角闪闪长岩—石英闪长岩—英云闪长岩—花岗闪长岩(刘建峰等, 2009)等研究认识较一致。然而, 对于古亚洲洋中东段贺根山洋盆早石炭世构造环境的认识依据不足。早石炭世岩浆岩主要分布于贺根山缝合带北西侧, 吴煜等(2019)在苏左旗北部恩格日音棚地区发现早石炭世火山岩并结合二连—东乌旗一带的早石炭世二长花岗岩、花岗闪长岩、石英闪长岩等, 认为贺根山古洋壳于早石炭世开始向北俯冲并进入消减阶段。近年来, 李英杰等(2018)在西乌旗迪彦庙蛇绿岩带西侧达哈特发现了前弧玄武岩, 认为贺根山洋在早石炭世发生了洋内初始俯冲和洋陆转化。由于贺根山缝合带南东侧早石炭世岩浆岩发现较少, 对于贺根山洋早石炭世构造环境的认识需进一步寻找依据。

本次区域地质调查工作在贺根山缝合带南东侧西乌旗阿如罕敖包地区发现了早石炭世花岗闪长岩, 对于研究贺根山洋早石炭世的构造环境提供了重要载体。基于此, 本文对阿如罕敖包花岗闪长岩进行了锆石 U-Pb 精确测年和岩石地球化学分析, 试图为探讨贺根山洋早石炭世的地质演化提供依据。

1 区域地质背景及岩石特征

研究区位于内蒙古锡林浩特西乌旗西南, 大地构造上位于锡林浩特微陆块(岩浆弧)中部北西缘和贺根山缝合带中东部南东侧(图 1b)。研究区地质

演化与贺根山洋俯冲消减密切相关,地质体的展布方向与贺根山缝合带延伸方向一致,呈 NE-SW 向展布,石炭纪侵入岩主要有辉长岩、奥长花岗岩、高镁

安山岩、石英闪长岩、玄武岩、英安岩及埃达克岩等(图1c),记录了石炭纪贺根山洋的构造-岩浆作用过程。

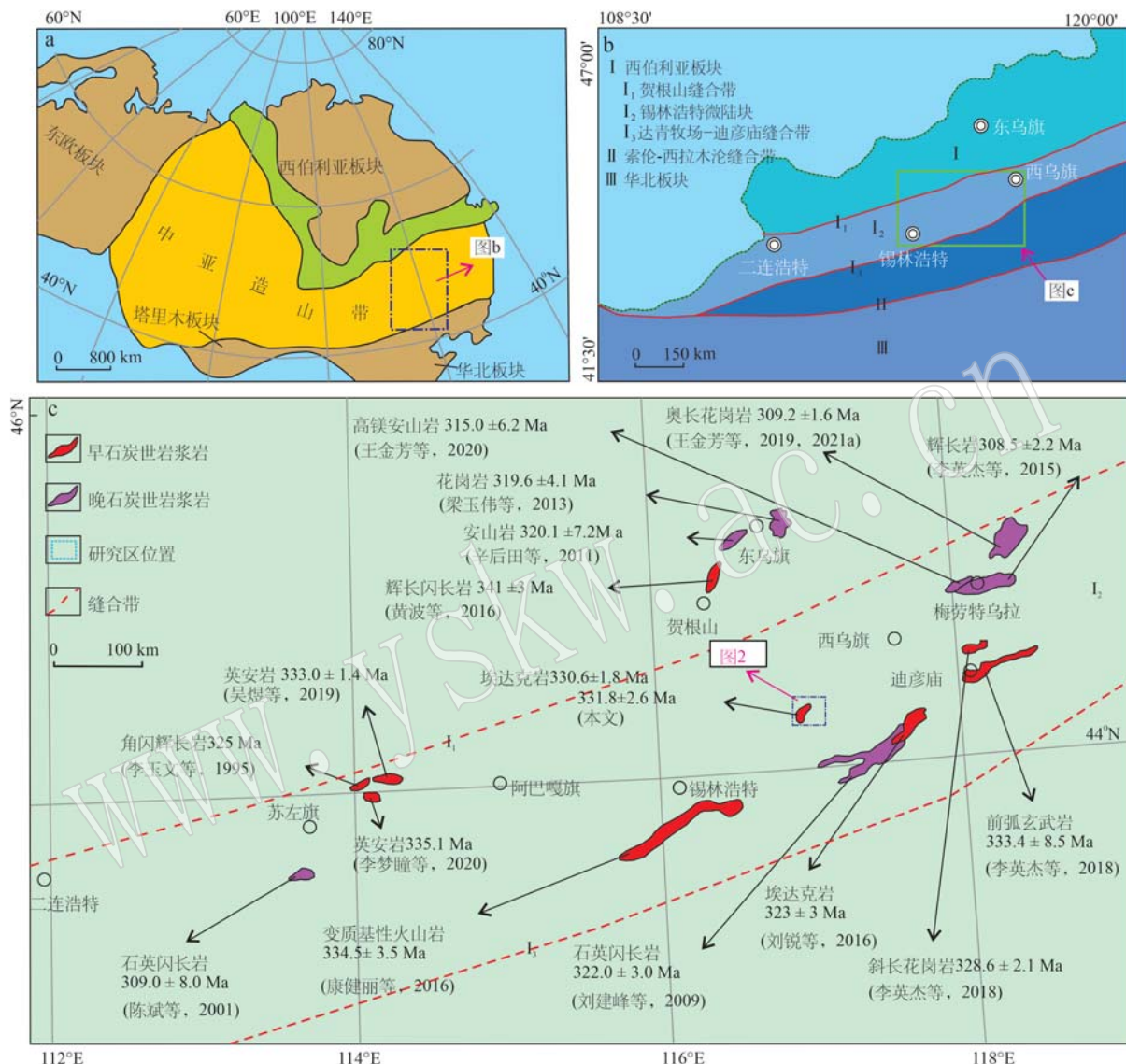


图1 中亚造山带大地构造划分(a,据 Sengör 等,1993)及研究区区域构造简图[b, 据叶天竺(2002); c, 据王金芳等(2021a)修改]

Fig. 1 Tectonic division of the Central Asian orogenic belt (a, Sengör *et al.*, 1993) and regional structural diagram of the study area (b, after Ye Tianzhu, 2002; c, after Wang Jinfang *et al.*, 2021a)

阿如罕敖包花岗闪长岩体呈不规则岩株状产出(图2),出露面积为 23.55 km²,岩性较为单一,主要为中粗粒花岗闪长岩。岩石露头较差,风化严重,地表多见风化碎块(图3a),风化面呈浅灰色,新鲜面呈灰色。岩体中未见围岩捕掳体及暗色包体。岩体北部侵入于早泥盆世石英闪长岩之中,北部和南部

被早白垩世白音高老组火山岩不整合覆盖,东侧及南侧局部可见被早石炭世二长花岗岩侵入,西侧被早石炭世辉石岩、辉长岩及早二叠世二长花岗岩侵入。内蒙古自治区地质局(1976)及内蒙古自治区地质调查院(2008)均将其形成时代归属为中二叠世,但均缺乏精确的年代学依据。

2 研究方法

2.1 样品采集

野外采集薄片样品 3 件 (A01、A02、A03)、锆石 U-Pb 年龄样 3 件 (A01、A02、A03)、岩石地球化学分

析样 6 件 (A01、A02、A03、A04、A05、A06), 均为新鲜未风化岩石, 采集位置如图 2。

2.2 分析测试

锆石单矿物分离由河北省区域地质矿产调查研究所协助完成, 阴极发光 (CL) 测试由中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室完成。

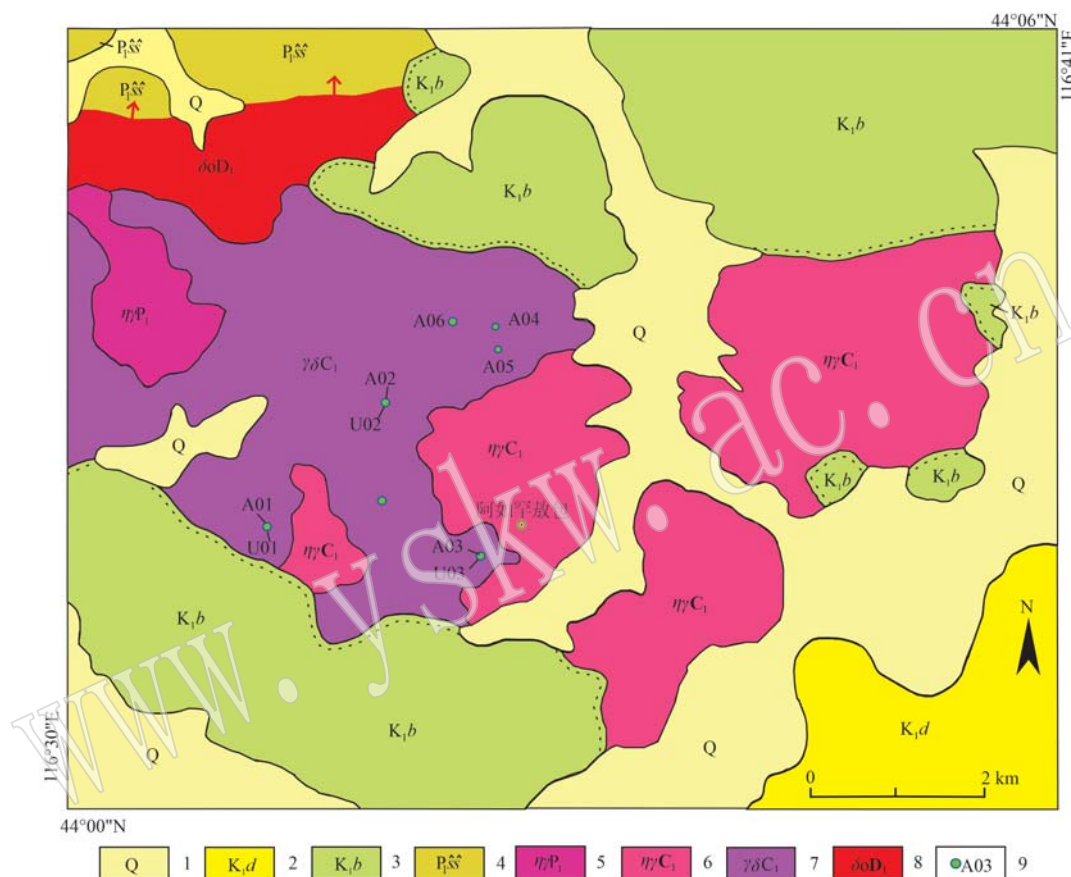


图 2 阿如罕敖包花岗闪长岩地质概图

Fig. 2 Geological sketch map of the Aruhan granodiorite

1—第四系; 2—下白垩统大磨拐河组; 3—下白垩统白音高老组; 4—下二叠统寿山沟组; 5—早二叠世二长花岗岩; 6—早石炭世二长花岗岩; 7—早石炭世花岗闪长岩; 8—早泥盆世石英闪长岩; 9—采样位置及编号

1—Quaternary; 2—Lower Cretaceous Damoguaihe Formation; 3—Lower Cretaceous Baiyingaolao Formation; 4—Lower Permian Shoushangou Formation; 5—Early Permian monzogranite; 6—Early Carboniferous monzogranite; 7—Early Carboniferous granodiorite; 8—Early Devonian quartz diorite; 9—location and number of sampling

锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质调查局天津地质调查中心利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为美国 NewWave 公司生产的 UP193FX 型 193 nm ArF 准分子系统, 激光器来自德国 ATL 公司, ICP-MS 为 Agilent 7500a 型质谱仪。激光器波长为 193 nm, 脉冲宽度 < 4 ns, 激光束斑直径为 35 μm , Plesovice ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 337.13 ± 0.37 Ma) 和 Qinghu 标准锆石 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $159.45 \pm$

0.16 Ma) 作为外标进行基体校正, NISTSRM 612, 其中 ^{29}Si 作为内标元素。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER-ver 4.0 (Macquarie University) 程序, 普通铅校正采用 Anderson (2002) 提出的 ComPbCorr#3.17 校正程序, U-Pb 谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄加权平均计算使用 Isoplot/Ex_ver 3 (Ludwig, 2000) 程序完成。详细测试与数据处理流程见参考文献 (Liu *et al.*, 2008, 2010a, 2010b)。

岩石地球化学测试由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成,主量元素测试采用 XRF 荧光测试法完成,测试误差小于 2%;稀土和微量元素测试采用等离子体质谱 (ICP-MS) 法,测定精度优于 5%。

3 研究结果

3.1 矿物学特征

阿如罕敖包花岗闪长岩地表呈陡坎状出露 (图 3a、3b),呈中细粒花岗结构、交代结构,块状构造 (图 3c、3d),主要由斜长石、钾长石、石英、角闪石组成。

斜长石呈半自形板状,少数呈他形粒状,粒度一般 0.2~2 mm,部分 2~3.6 mm,高岭土化、绢云母化、黝帘石化明显,可见环带,与钾长石接触部位可

见交代蠕虫结构,沿边部包嵌少量石英,聚片双晶发育,斜长石牌号 $An = 33$, 为中长石,斜长石含量 50%±;钾长石呈半自形板状,少数呈他形粒状,为微斜条纹长石,杂乱状、似填隙状分布,粒度一般 0.2~2 mm,少量 2~2.5 mm,轻高岭土化,交代斜长石,内含斜长石、黑云母、白云母包体,局部可见格子双晶,少见钠质补片,可见粒内包嵌少量石英,钾长石含量 15%±;石英呈他形粒状,填隙状分布于长石间,粒度一般 0.1~2 mm,少量 2~4.2 mm,粒内波状消光明显,石英含量 20%±;角闪石呈半自形柱状或近菱形六边形自形-半自形晶,粒度一般 0.2~2 mm,少量 2~4.5 mm,多色性明显,沿边部阳起石化明显,局部被黑云母假像交代,角闪石含量 15%±;黑云母呈片状,片径 0.1~1.7 mm,杂乱分布,多色性明显,沿边部及解理缝少被绿泥石交代,黑云母含量 5%±。副矿物主要由锆石、磷灰石、钛铁矿、磁铁矿组成。

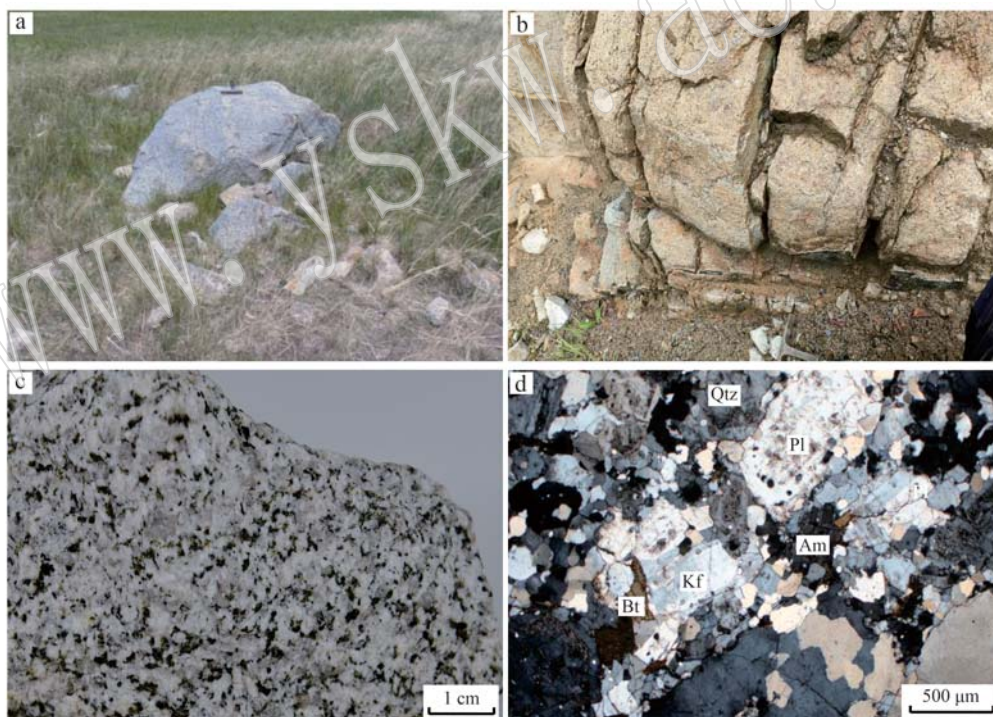


图 3 阿如罕敖包花岗闪长岩宏观露头(a、b)、手标本(c)和显微结构(d, 正交偏光)照片

Fig. 3 Macroscopic outcrop(a, b), hand specimen (c) and microstructure(d, crossed polars) of the Aruhan granodiorite

Pl—斜长石; Kf—钾长石; Qtz—石英; Am—角闪石; Bt—黑云母

Pl—plagioclase; Kf—K-feldspar; Qtz—quartz; Am—pyroxene; Bt—biotite

3.2 锆石 U-Pb 年代学

阿如罕敖包花岗闪长岩锆石呈黄粉色,自形程度较好,柱状-短柱状,长轴约 100~200 μm ,短轴约 20~100 μm ,长宽比值为 2:1~4:1。阴极发光图像

(CL) (A01、A02、A03) 显示锆石内部具有岩浆成因的振荡环带结构 (图 4),韵律环带结构发育,少量可见残留核,次生裂隙较少,锆石 $\text{Th}/\text{U} = 0.51 \sim 2.28$,均大于 0.1,指示锆石均属岩浆成因。

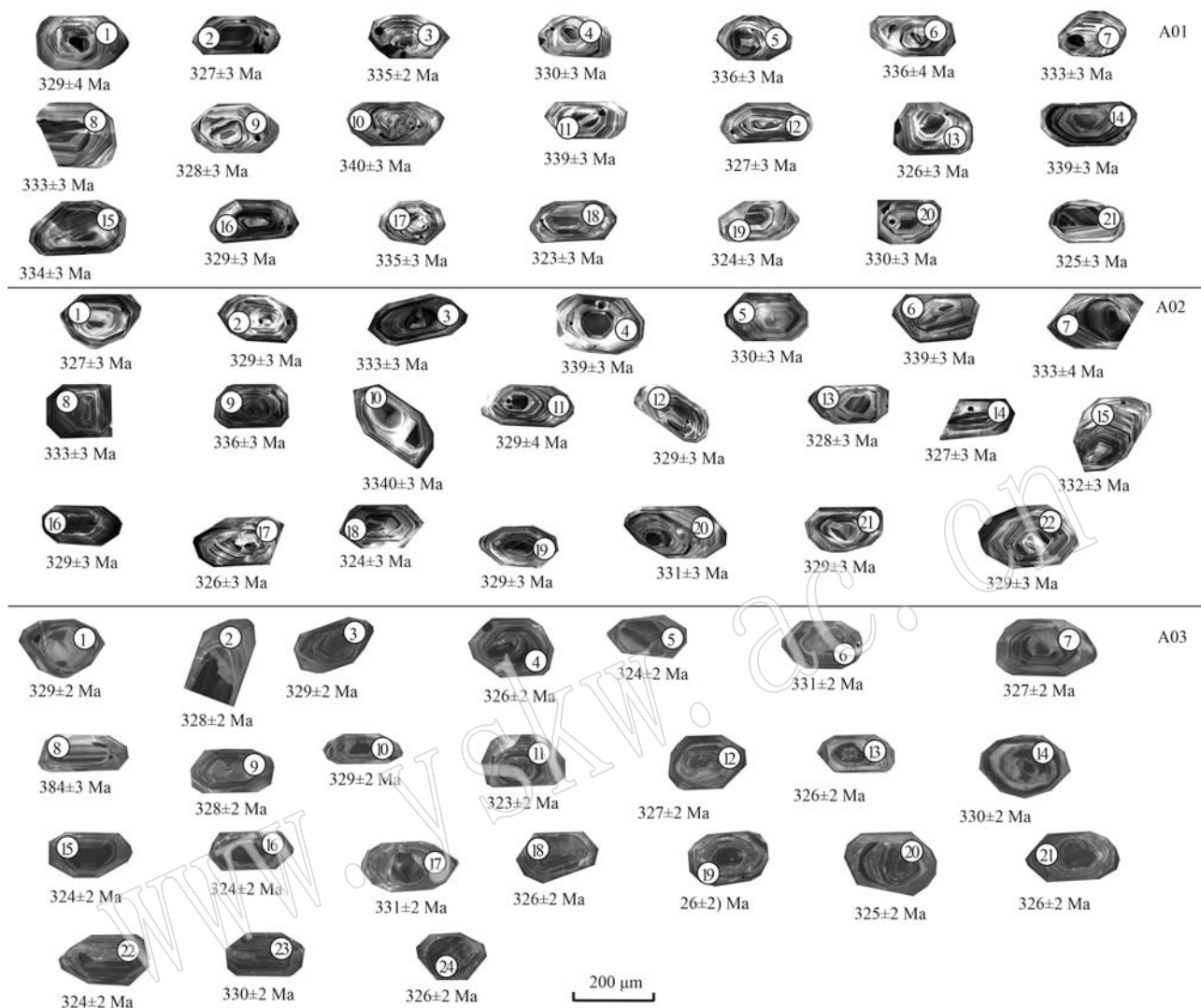


图4 阿如罕敖包花岗闪长岩(A01、A02、A03)锆石阴极发光图像(CL)及分析点位

Fig. 4 Cathodoluminescence images and analysis points of zircons from sample of the Aruhan granodiorite(A01, A02, A03)

3个样品(A01、A02、A03)的锆石测年结果见表1。A01样品的21颗锆石所有测点的谐和度均大于95%,测点基本都落在谐和曲线上或附近(图5a),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 332 ± 3 Ma, MSWD=3.6。

A02样品的22颗锆石的所有锆石测点的谐和度均大于95%,测点基本都落在谐和曲线上或附近(图5b),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 331 ± 2 Ma, MSWD=1.7。

A03样品的24颗锆石颗粒除8测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值偏大外(可能为捕获的残留锆石),其余23个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值均比较相近,其变化范围为332~324 Ma,在谐和线上呈群簇状分布,24

个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄值为 327 ± 1 Ma, MSWD=1.9(图5c)。

阿如罕敖包花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $332\pm3\sim327\pm1$ Ma,形成于早石炭世。

3.3 岩石地球化学

(1) 主量元素

阿如罕敖包花岗闪长岩主量元素分析结果如表2。

如表2所示,阿如罕敖包花岗闪长岩 SiO_2 含量较高(65.20%~68.27%,平均 $66.57\%\geq 56\%$), K_2O 含量为0.98%~1.61%, Na_2O 含量为3.69%~4.65%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为2.56~4.35(平均值为 $3.34>2$),表现出贫钾富钠的特征; Al_2O_3 含量较高

表 1 阿如罕散包花岗岩长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of the Aruhan granodiorite

样品号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值				同位素年龄/Ma							
	Pb	^{232}Th	^{238}U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
样品 A01															
1	5	120	63	0.052 4	0.000 6	0.409 5	0.036 9	0.056 6	0.005 0	329	4	349	31	477	194
2	6	128	70	0.052 0	0.000 5	0.418 3	0.025 4	0.058 4	0.003 3	327	3	355	22	543	125
3	7	180	90	0.053 3	0.000 4	0.396 4	0.020 8	0.053 9	0.002 8	335	2	339	18	368	115
4	7	133	65	0.052 6	0.000 5	0.425 0	0.014 3	0.058 6	0.001 9	330	3	360	12	553	69
5	7	115	87	0.053 5	0.000 5	0.402 0	0.013 6	0.054 5	0.001 7	336	3	343	12	393	71
6	5	90	58	0.053 4	0.000 6	0.410 4	0.019 5	0.055 7	0.002 5	336	4	349	17	441	100
7	9	217	109	0.052 9	0.000 5	0.390 6	0.020 4	0.053 5	0.002 8	333	3	335	17	351	116
8	12	218	106	0.053 1	0.000 4	0.408 0	0.010 4	0.055 8	0.001 4	333	3	347	9	443	54
9	9	202	94	0.052 2	0.000 4	0.412 4	0.023 9	0.057 3	0.003 1	328	3	351	20	503	118
10	9	195	102	0.054 2	0.000 5	0.395 8	0.012 3	0.052 9	0.001 6	340	3	339	11	325	68
11	9	197	106	0.054 0	0.000 5	0.398 1	0.009 5	0.053 5	0.001 2	339	3	340	8	348	52
12	10	241	124	0.052 0	0.000 5	0.390 1	0.017 2	0.054 4	0.002 3	327	3	334	15	386	95
13	7	163	87	0.051 9	0.000 5	0.389 1	0.023 6	0.054 3	0.003 2	326	3	334	20	385	132
14	9	191	98	0.054 1	0.000 5	0.407 6	0.012 1	0.054 7	0.001 5	339	3	347	10	399	63
15	8	154	100	0.054 9	0.000 5	0.403 8	0.013 4	0.053 3	0.001 7	345	3	344	11	343	71
16	10	240	108	0.052 4	0.000 5	0.392 9	0.016 5	0.054 3	0.002 1	329	3	336	14	385	88
17	10	223	104	0.053 3	0.000 4	0.396 7	0.015 2	0.054 0	0.002 0	335	3	339	13	369	83
18	9	193	127	0.051 3	0.000 5	0.382 4	0.015 4	0.054 0	0.002 1	323	3	329	13	373	89
19	9	222	105	0.051 6	0.000 5	0.389 2	0.019 7	0.054 7	0.002 7	324	3	334	17	401	109
20	8	174	99	0.052 5	0.000 5	0.402 8	0.019 3	0.055 6	0.002 5	330	3	344	16	438	100
21	9	234	112	0.051 7	0.000 5	0.375 0	0.017 1	0.052 6	0.002 4	325	3	323	15	312	102
样品 A02															
1	8	77	144	0.052 1	0.000 5	0.408 7	0.017 1	0.057 1	0.002 4	327	3	348	15	495	92
2	7	66	117	0.052 3	0.000 5	0.428 7	0.024 0	0.055 2	0.003 0	329	3	362	20	420	122
3	7	67	122	0.053 0	0.000 4	0.411 2	0.024 7	0.054 2	0.003 1	333	3	350	21	381	130
4	7	54	101	0.054 0	0.000 5	0.403 3	0.014 0	0.124 6	0.004 0	339	3	344	12	2 023	57
5	7	66	113	0.052 6	0.000 5	0.423 3	0.022 8	0.079 0	0.003 9	330	3	358	19	1 171	99
6	8	60	126	0.053 9	0.000 4	0.409 7	0.021 0	0.064 5	0.003 2	339	3	349	18	758	103
7	5	48	73	0.053 1	0.000 6	0.393 5	0.020 4	0.107 3	0.005 4	333	4	337	17	1 754	93
8	7	60	121	0.053 1	0.000 4	0.399 0	0.024 6	0.060 0	0.003 4	333	3	341	21	604	123
9	6	54	92	0.053 4	0.000 6	0.408 1	0.028 2	0.069 0	0.004 4	336	3	347	24	898	133
10	8	69	139	0.053 2	0.000 5	0.438 3	0.022 7	0.059 8	0.002 9	334	3	369	19	596	106
11	5	49	86	0.052 4	0.000 6	0.410 6	0.029 1	0.069 3	0.004 6	329	4	349	25	908	136

续表 1
Continued Table 1

样品号	$w_B/10^{-6}$			同位素比值						同位素年龄/Ma			
	Pb	^{232}Th	^{238}U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
12	7	61	125	0.052 3	0.000 5	0.406 4	0.023 7	0.056 4	0.003 0	329	3	346	20
13	9	82	163	0.052 1	0.000 5	0.393 0	0.015 1	0.054 7	0.002 0	328	3	337	13
14	7	70	116	0.052 0	0.000 4	0.428 8	0.025 0	0.059 9	0.003 4	327	3	362	21
15	10	94	166	0.052 8	0.000 5	0.402 1	0.021 0	0.055 2	0.002 7	332	3	343	18
16	9	79	151	0.052 3	0.000 5	0.431 2	0.023 0	0.059 8	0.003 0	329	3	364	19
17	8	76	138	0.051 9	0.000 5	0.412 6	0.021 4	0.057 7	0.002 9	326	3	351	18
18	6	56	105	0.051 5	0.000 5	0.394 6	0.028 4	0.055 6	0.003 8	324	3	338	24
19	12	114	208	0.052 3	0.000 5	0.396 8	0.014 0	0.055 0	0.001 9	329	3	339	12
20	9	115	150	0.052 7	0.000 5	0.408 8	0.020 3	0.060 1	0.002 8	331	3	348	17
21	8	78	149	0.052 4	0.000 5	0.393 4	0.020 1	0.055 5	0.002 8	329	3	337	17
22	10	143	168	0.052 4	0.000 5	0.391 6	0.015 4	0.054 2	0.002 1	329	3	336	13
样品 A03													
1	5	70	85	0.052 4	0.000 4	0.408 2	0.017 2	0.056 5	0.002 6	329	2	348	15
2	7	103	118	0.052 2	0.000 3	0.401 4	0.010 6	0.055 8	0.001 5	328	2	343	9
3	6	65	100	0.052 4	0.000 3	0.384 2	0.012 3	0.053 2	0.001 7	329	2	330	11
4	7	86	119	0.051 9	0.000 3	0.390 8	0.013 8	0.054 6	0.002 0	326	2	335	12
5	9	113	156	0.051 6	0.000 3	0.390 7	0.006 9	0.055 0	0.001 0	324	2	335	6
6	8	87	134	0.052 6	0.000 3	0.394 5	0.008 5	0.054 4	0.001 2	331	2	338	7
7	10	126	161	0.052 0	0.000 3	0.382 9	0.007 2	0.053 4	0.001 0	327	2	329	6
8	12	129	179	0.061 4	0.000 4	0.502 5	0.006 4	0.059 3	0.000 7	384	3	413	5
9	10	154	160	0.052 3	0.000 3	0.388 9	0.008 3	0.054 0	0.001 2	328	2	334	7
10	7	75	119	0.052 4	0.000 3	0.386 0	0.012 2	0.053 5	0.001 7	329	2	331	10
11	8	96	131	0.051 4	0.000 3	0.418 8	0.009 5	0.059 1	0.001 4	323	2	355	8
12	7	81	132	0.052 0	0.000 3	0.386 4	0.009 5	0.053 9	0.001 3	327	2	332	8
13	9	98	151	0.051 9	0.000 3	0.386 0	0.009 0	0.053 9	0.001 3	326	2	331	8
14	10	123	172	0.052 5	0.000 3	0.390 5	0.0087	0.053 9	0.001 2	330	2	335	7
15	7	77	120	0.051 6	0.000 3	0.377 2	0.009 5	0.053 1	0.001 4	324	2	325	8
16	10	152	167	0.051 6	0.000 3	0.381 7	0.006 9	0.053 7	0.001 0	324	2	328	6
17	8	71	142	0.052 7	0.000 3	0.399 5	0.007 9	0.054 9	0.001 1	331	2	341	7
18	9	124	153	0.051 9	0.000 3	0.400 8	0.008 0	0.056 0	0.001 1	326	2	342	7
19	8	85	143	0.051 8	0.000 3	0.418 9	0.008 0	0.058 6	0.001 1	326	2	355	7
20	6	65	103	0.051 6	0.000 3	0.383 4	0.011 3	0.053 9	0.001 6	325	2	330	10
21	10	156	168	0.051 8	0.000 3	0.411 4	0.009 9	0.057 6	0.001 4	326	2	350	8
22	9	101	158	0.051 5	0.000 3	0.408 6	0.008 4	0.057 5	0.001 2	324	2	348	7
23	10	102	177	0.052 6	0.000 3	0.391 6	0.007 8	0.054 0	0.001 1	330	2	336	7
24	9	111	154	0.051 9	0.000 3	0.460 3	0.009 6	0.064 3	0.001 4	326	2	384	8

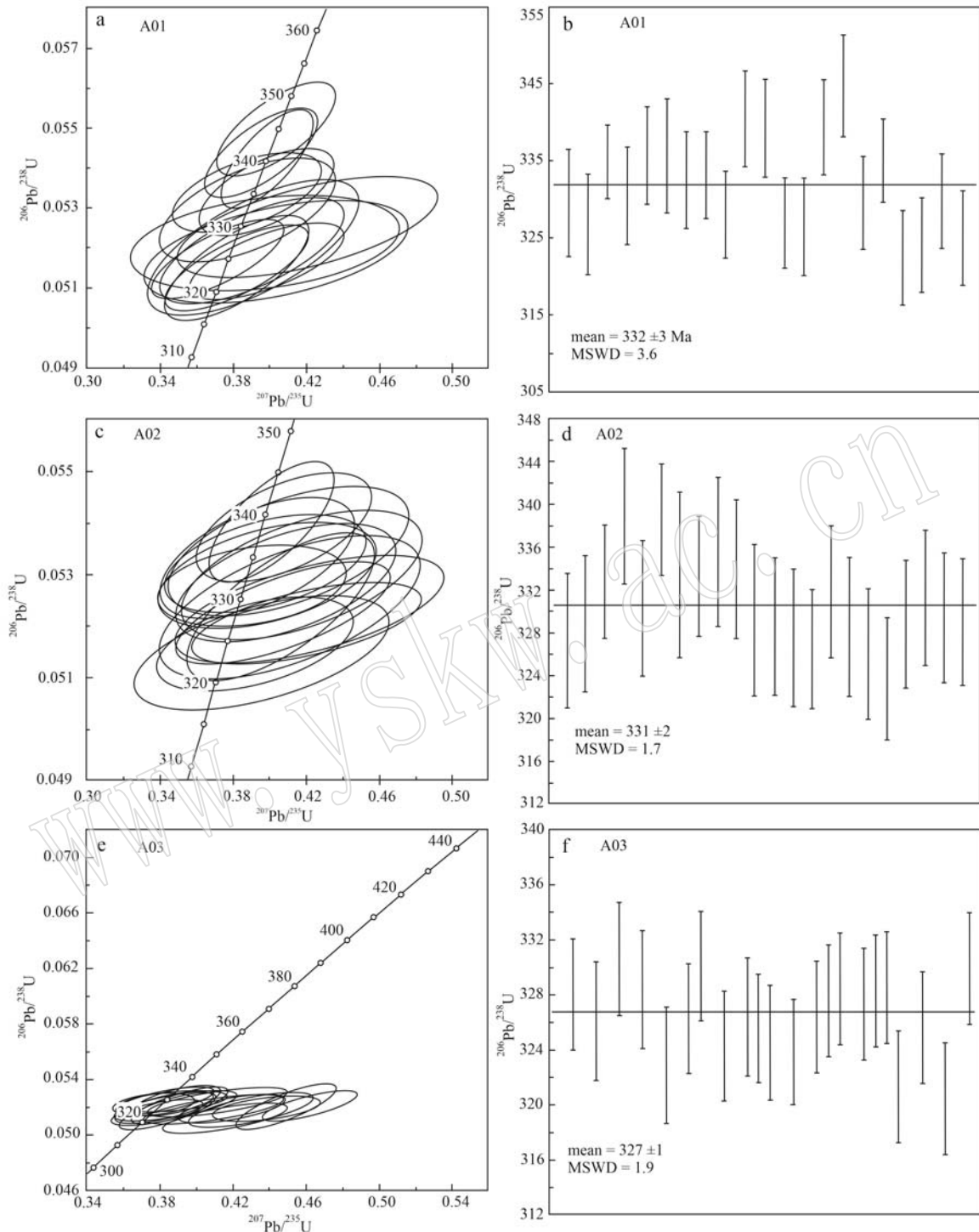


图 5 阿如罕敖包花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图(a、c、e)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄柱状图(b、d、f)

Fig. 5 U-Pb age concordia diagrams(a, c, e) and weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages histograms(b, d, f) of the Aruhan granodiorite

(15.61%~17.35%, 平均 16.43% $\geq$ 15%), A/CNK 值为 1.02~1.17, 属过铝质岩石; MgO 含量较低, 为 1.16%~1.61% (平均 1.41% < 3%), $\text{Mg}^\#$ 值为 29.54~41.75; MnO、 P_2O_5 及 TiO_2 含量较低。在 TAS 图解(图 6a)内, 样品点主要落入花岗闪长岩区; 在 AFM

图解(图 6b)中, 样品点落入钙碱性系列。阿如罕敖包花岗闪长岩属弱过铝质钙碱性系列。

(2) 稀土、微量元素

阿如罕敖包花岗闪长岩稀土元素、微量元素分析结果如表 3。

表 2 阿如罕敖包花岗闪长岩主量元素含量

Table 2 Major element contents of the Aruhan granodiorite

样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	LOI	Total	Mg [#]	A/CNK
A01	65.20	17.35	0.44	1.82	1.96	4.40	1.61	0.98	4.26	0.07	0.14	1.41	0.32	1.67	99.89	30.86	1.06
A02	68.27	16.35	0.37	1.24	1.65	3.29	1.16	1.42	4.65	0.05	0.13	1.17	0.15	1.31	99.88	29.54	1.06
A03	66.73	16.71	0.45	1.52	1.63	3.25	1.28	1.13	4.18	0.07	0.12	1.14	0.27	1.38	99.86	29.93	1.17
A04	66.51	16.11	0.37	1.61	1.57	3.21	1.53	1.28	4.03	0.07	0.14	1.42	0.32	1.17	99.33	33.65	1.14
A05	65.78	16.47	0.46	1.58	1.51	4.01	1.56	1.61	4.12	0.05	0.13	1.25	0.29	1.15	99.97	34.74	1.02
A06	66.95	15.61	0.29	0.74	1.19	3.92	1.33	1.24	3.69	0.05	0.13	1.17	0.22	1.23	99.67	41.75	1.05

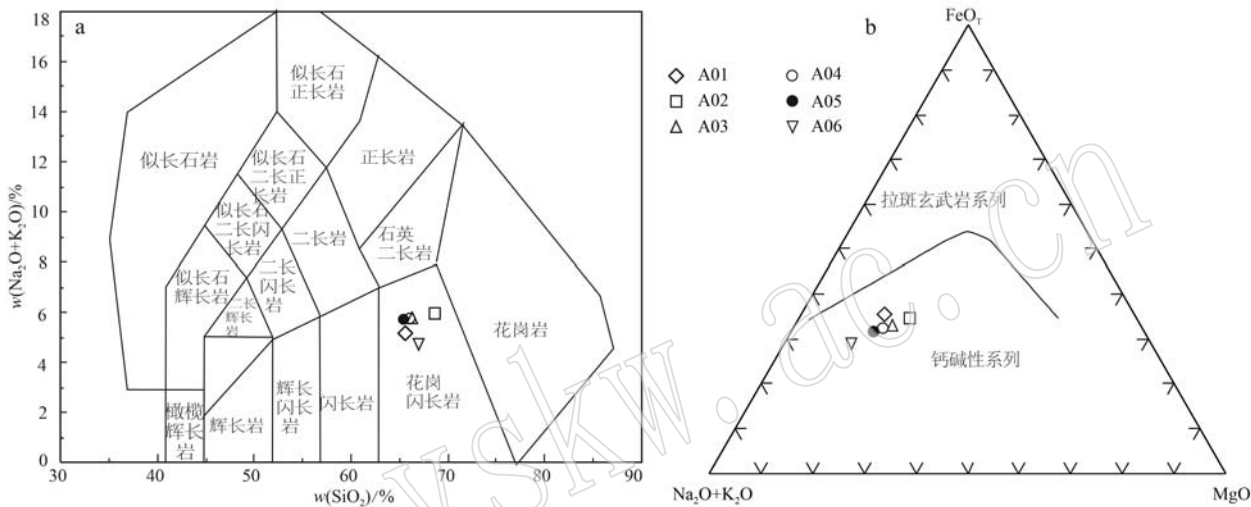


图 6 阿如罕敖包花岗闪长岩 TAS (a, 据 Middlemost, 1994) 和 AFM(b, 据 Irvine and Barager, 1971) 图解

Fig. 6 TAS (a, after Middlemost, 1994) and AFM (b, after Irvine and Barager, 1971) diagrams of the Aruhan granodiorite

表 3 阿如罕敖包花岗闪长岩稀土元素、微量元素丰度

Table 3 Contents of REE elements, trace elements of the Aruhan granodiorite

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
A01	8.70	16.73	2.21	8.87	1.81	0.64	1.77	0.28	1.46	0.27	0.82	0.14	0.86	0.18	7.29
A02	14.47	27.56	3.46	13.35	2.44	0.72	2.29	0.36	1.74	0.33	1.01	0.17	1.01	0.28	8.84
A03	9.47	21.22	3.58	11.28	2.38	0.65	2.12	0.26	1.61	0.22	1.11	0.19	0.96	0.22	7.95
A04	15.13	31.72	4.86	13.41	3.26	0.71	1.99	0.35	2.11	0.32	0.97	0.21	0.89	0.19	10.27
A05	22.38	28.92	5.17	18.93	3.15	0.88	2.46	0.24	1.92	0.35	1.28	0.15	1.13	0.27	11.42
A06	20.95	37.11	3.16	15.45	2.73	0.69	2.51	0.49	1.83	0.44	1.25	0.24	1.02	0.24	8.92

样号	Sr	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Zr	Hf	Pb	Ti
A01	552.00	36.00	230.60	2.48	0.78	0.26	2.85	66.00	2.07	10.00	2 656
A02	484.40	38.80	359.40	3.37	1.09	0.28	3.31	101.70	2.74	12.50	2 206
A03	472.00	47.00	335.00	4.72	1.11	0.25	3.43	74.30	3.12	15.60	2 573
A04	512.20	39.91	324.70	3.31	1.21	0.23	3.69	80.12	3.96	27.16	2 487
A05	496.15	45.37	298.13	3.55	1.16	0.36	3.37	91.22	3.08	22.98	2 316
A06	509.12	51.79	386.75	4.16	1.18	0.29	3.63	85.62	3.06	23.17	2 419

如表 3 所示,阿如罕敖包花岗闪长岩的稀土元素总量较低 ($44.73 \times 10^{-6} \sim 88.11 \times 10^{-6}$), $LREE/HREE = 6.75 \sim 10.18$, $(La/Yb)_N = 6.65 \sim 13.85$,轻重稀土元素分馏明显; $(La/Sm)_N = 3.02 \sim 4.83$, $(Gd/Yb)_N = 1.66 \sim 1.99$,轻稀土元素内部发生较明显分馏,重稀土元素较平坦; δEu 为 $0.79 \sim 1.07$, 铈无明显异常; Yb 为 $0.86 \sim 1.13 \times 10^{-6} (\leq 1.9 \times 10^{-6})$, 含量较低。花岗闪长岩球粒陨石 (Boynton, 1984) 标准化配分图 (图 7a) 显示稀土元素配分曲线呈明显的右倾型,与典型的埃达克岩配分曲线类似。

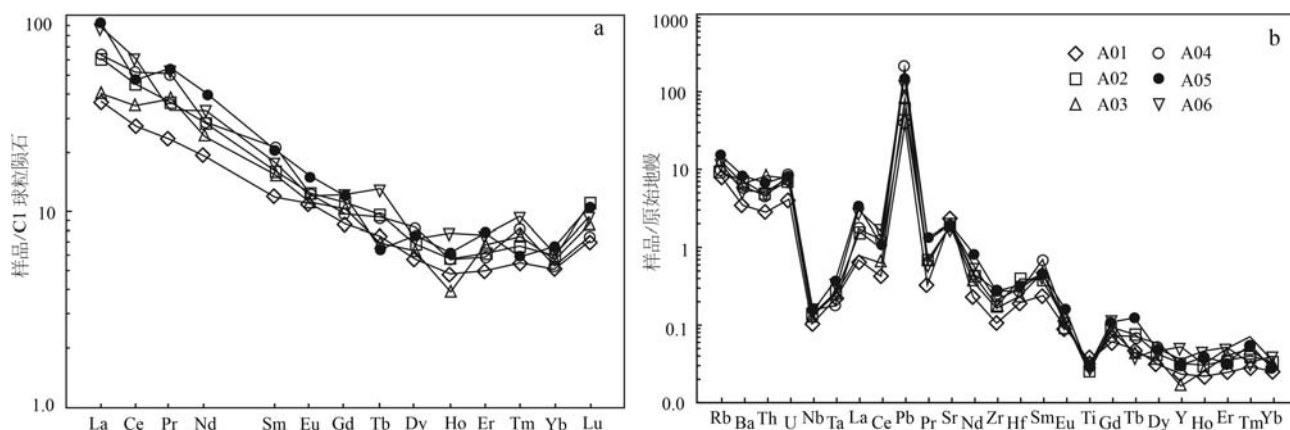


图7 阿如罕敖包花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(a, 标准值据 Boynton, 1984)和微量元素原始地幔标准化配分曲线(b, 标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE(a, after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized trace elements distribution patterns (b, after Sun and McDonough, 1989) of the Aruhan granodiorite

如表3所示,阿如罕敖包花岗闪长岩Sr含量较高,为 $472.00 \times 10^{-6} \sim 552.00 \times 10^{-6}$;Y含量较低,为 $7.29 \times 10^{-6} \sim 11.42 \times 10^{-6}$ ($\leq 18 \times 10^{-6}$);Sr/Y值高(43.45~75.68)。微量元素原始地幔(Sun and McDonough, 1989)标准化蛛网图(图7b)所示,花岗闪长岩微量元素总体呈现高含量特征,大离子亲石元素如Rb、Ba、Pb、Sr、Eu相对富集,高场强元素如Th、U相对富集,而Nb、Ta、Ti相对亏损,与岛弧型岩浆岩微量元素分布特征相似。

4 讨论

4.1 形成时代

前人对阿如罕敖包花岗闪长岩缺乏精确的地质年代学研究,内蒙古自治区地质局(1976)在1:20万毛登幅区调报告中将阿如罕敖包花岗闪长岩归属华力西晚期中酸性侵入岩;内蒙古自治区地质调查院(2008)在1:25万朝克乌拉幅区调报告中推测其形成于中二叠世。本次对3件样品通过LA-ICP-MS锆石U-Pb精确测年,获得阿如罕敖包花岗闪长岩年龄分别为 332 ± 3 Ma (MSWD=3.6)、 331 ± 2 Ma (MSWD=1.7)、 321 ± 1 Ma (MSWD=1.9),显示阿如罕敖包花岗闪长岩形成于早石炭世,并非前人认为的华力西晚期或中二叠世。本次在西乌旗地区首次发现早石炭世侵入岩,将研究区构造-岩浆活动记录从二叠纪提前至石炭纪,为探究贺根山洋早石炭世构造环境提供了精确的年代学依据。

4.2 成因类型

如前所述,阿如罕敖包花岗闪长岩富含 SiO_2 (平均含量为66.57% > 56%)、 Al_2O_3 (平均含量为16.43% > 15%)、Sr(平均含量为 504.3×10^{-6} > 400×10^{-6})、MgO(平均含量为1.41% < 3%)、Yb(0.98×10^{-6} < 1.9×10^{-6})、Y(9.11×10^{-6} < 18×10^{-6})、铈无明显异常($\delta\text{Eu} = 0.79 \sim 1.07$),高Sr/Y值(43.45~75.68),在Sr/Y-Y(图8a)和 $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$ 图解(图8b)中,阿如罕敖包花岗闪长岩体样品落入埃达克岩区。

对比埃达克岩的岩石地球化学定义(Defant and Drummond, 1990; Castillo, 2006)及埃达克岩的分类(Martin *et al.*, 2005; 张旗等, 2006),发现阿如罕敖包花岗闪长岩具有高Si埃达克岩的岩石地球化学特征,在MgO-SiO₂(图9a)、Sr-(CaO+Na₂O)(图9b)、Sr/Y-Y(图9c)和Nb-SiO₂图解(图9d)中,该岩石样品均位于高Si埃达克岩范围,并总体上位于玄武岩熔体实验范围内;同时,阿如罕敖包花岗闪长岩Na₂O/K₂O值为2.56~4.35(平均2.85 ≥ 2),钠含量较高。因此,认为阿如罕敖包花岗闪长岩应归属为岛弧型高Si埃达克岩(O型)。李世超等(2020)认为岛弧型高Si埃达克岩(O型)是大洋俯冲洋壳部分熔融并与上覆地幔楔橄榄岩反应后形成的,这一认识与玄武岩熔体实验结果较一致。一般情况下,基性玄武岩部分熔融形成的熔体 $\text{Mg}^\# \leq 45$,而大洋俯冲洋壳熔融作用形成的富Si熔体通过俯冲带上升与地幔橄榄岩相互作用可导致富Si熔体的

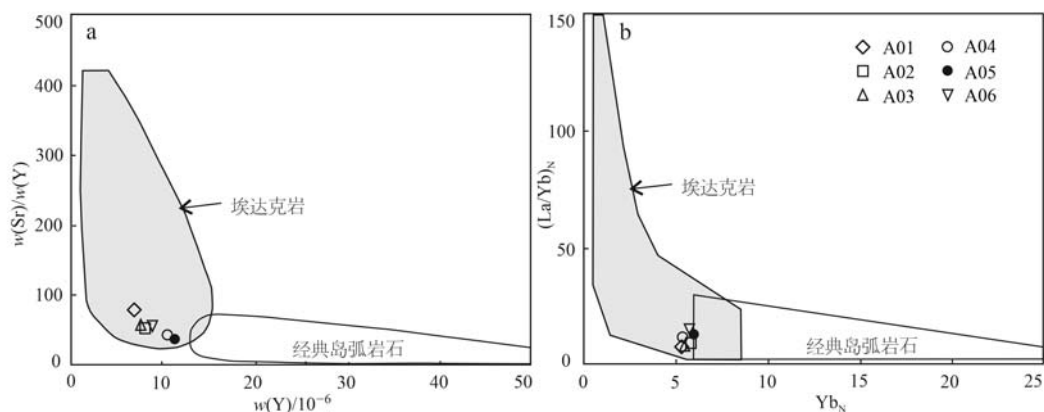


图8 阿如罕包花岗闪长岩 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (a) 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ 判别图 (b) (底图据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 8 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (a) and $(\text{La}/\text{Yb})_N-\text{Yb}_N$ (b) discriminant diagrams of the Aruhan granodiorite (after Defant and Drummond, 1990)

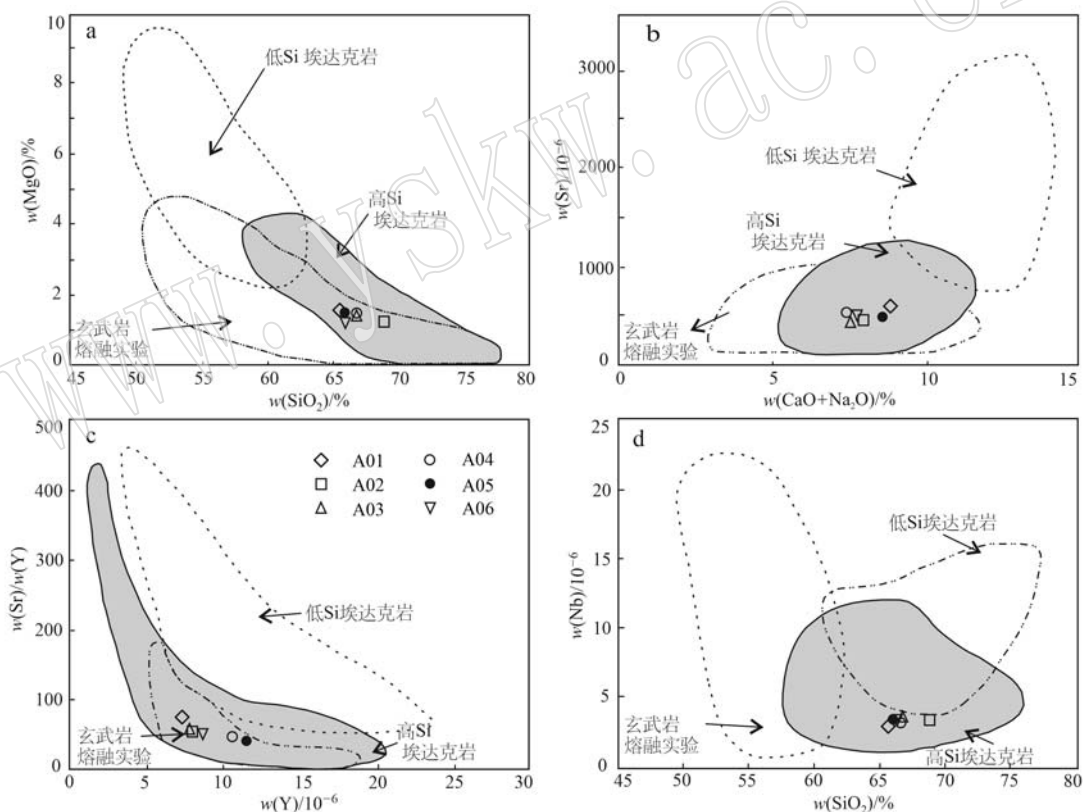


图9 阿如罕包花岗闪长岩 $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (a)、 $\text{Sr}-(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ (b)、 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (c) 和 $\text{Nb}-\text{SiO}_2$ (d) 图解 (底图据 Martin, 2005)

Fig. 9 $\text{MgO}-\text{SiO}_2$ (a)、 $\text{Sr}-(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ (b)、 $\text{Sr}/\text{Y}-\text{Y}$ (c) and $\text{Nb}-\text{SiO}_2$ (d) diagrams of the Aruhan granodiorite (after Martin, 2005)

$\text{Mg}^\#$ 值增高,随后在岩浆上升过程中由于部分铁镁质矿物的分离结晶或由于地壳混染作用导致岩浆演化晚期 MgO 含量及 $\text{Mg}^\#$ 值明显降低。阿如罕包花岗

闪长岩 $\text{Mg}^\#$ 值较低 (29.64~41.85),说明其岩浆可能来源于大洋俯冲洋壳的部分熔融并与上覆地幔楔橄榄岩反应的产物,在上侵过程中可能经历了岩浆结晶

分异与地壳物质的混染,同时,阿如罕敖包花岗闪长岩具有较高的 Th ($2.48 \times 10^{-6} \sim 4.72 \times 10^{-6}$)、 Pb ($10 \times 10^{-6} \sim 27.16 \times 10^{-6}$) 含量及 Th/La ($0.16 \sim 0.50$)、 Th/Sm ($1.02 \sim 1.98$)、 Th/Yb ($2.89 \sim 4.92$)、 Th/Ce ($0.10 \sim 0.22$) 值,均说明岩浆源区不仅仅是俯冲洋壳的部分

熔融,可能也有大洋俯冲沉积物的加入(王金芳等, 2018)。因此,俯冲洋壳与大洋沉积物部分熔融形成的富 Si 熔体与上覆地幔橄榄岩发生反应,并在上升过程中发生了结晶分异和壳源物质混染,这一过程可能是阿如罕敖包花岗闪长岩形成的机制(图 10)。

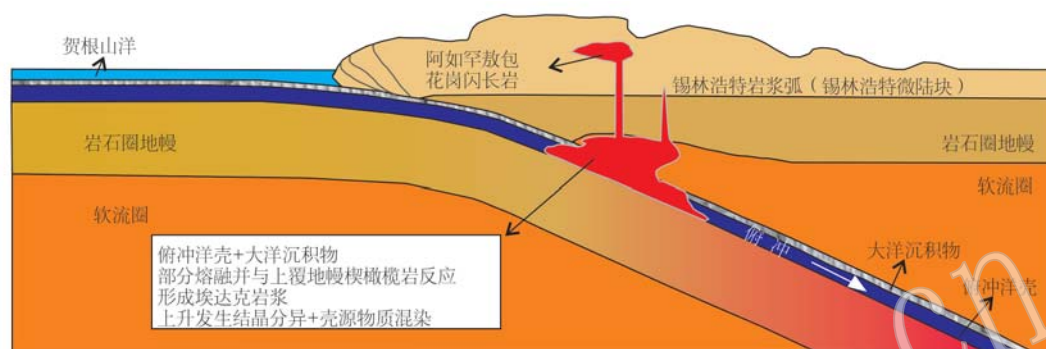


图 10 阿如罕敖包花岗闪长岩成因模式图

Fig. 10 Genetic model of the Aruhan granodiorite

4.3 地质意义

对于贺根山洋闭合时间主要存在两种观点:一种观点认为贺根山洋于晚泥盆世-早石炭世已经闭合;另一种较主流的观点认为贺根山洋一直持续到中二叠世最终闭合(王金芳等, 2019)。近年来 1:5 万区域地质调查工作在锡林浩特-西乌旗一带相继识别出了大量石炭纪岩浆岩,研究认为贺根山洋中东段在石炭纪仍然存在,处于俯冲消减阶段。王树庆等(2018)在锡林浩特跃进地区发现早石炭世石英闪长岩 (330.1 ± 1.1 Ma) 和晚石炭世花岗闪长岩 (319 ± 1 Ma), 均形成于活动大陆边缘;康健丽等(2016)在锡林浩特地区锡林郭勒杂岩中发现早石炭世变质基性火山岩 (334.5 ± 3.5 Ma 和 323.4 ± 2.4 Ma), 形成于一般岛弧环境即活动大陆边缘;刘锐等(2016)在苏勒陶勒盖、达青牧场发现晚石炭世埃达克岩 ($323 \sim 318$ Ma), 形成于活动大陆边缘;刘建峰等(2009)在西乌旗达其浑迪和金星发现了石炭纪石英闪长岩 (325 ± 3 Ma 和 322 ± 3 Ma), 形成于活动大陆边缘;李英杰等(2018)在迪彦庙蛇绿岩带达哈特发现早石炭世前弧玄武岩 (333.4 ± 8.5 Ma), 形成于洋中脊, 提出早石炭世贺根山洋发生洋内初始俯冲;王金芳等(2020, 2021a)在西乌旗梅劳特乌拉、额根敖包图识别出晚石炭世埃达克岩 (315.0 ± 6.2 Ma、 305.6 ± 1.5 Ma), 认为贺根山洋在晚石炭世处于以洋

内俯冲为特征的大洋俯冲消亡过程中;前人通过西乌旗地区本巴图组内玄武岩、安山岩等火山岩岩石学、年代学研究,发现这些火山岩形成于岛弧或大陆边缘弧构造环境,与晚石炭世古亚洲洋的俯冲消减有关(刘建峰等, 2009; 潘世语, 2012; 李瑞杰, 2013)。阿如罕敖包花岗闪长岩在 $\text{Rb}-(\text{Yb} + \text{Ta})$ (图 11a) 和 $\text{Rb}-(\text{Y} + \text{Nb})$ (图 11b) 判别图解中 (Pearce *et al.*, 1984), 所有样品均位于火山弧环境, 结合岩石成因分析,初步认为阿如罕敖包花岗闪长岩形成于早石炭世活动大陆边缘弧环境,不同于 1:20 万毛登幅、1:25 万朝克乌拉幅区域地质调查所推测的其于中二叠世与西伯利亚板块和华北板块之间的陆陆碰撞有关的认识。这些石炭纪弧岩浆岩的岩石学、年代学证据与贺根山缝合带内晚石炭世本巴图组、阿木山组碳酸盐岩古生物、同位素及海绿石所反映的古洋盆环境相吻合(王俊涛等, 2011; 曲跃, 2019)。

因此,越来越多的研究成果表明贺根山洋在石炭纪仍然存在,尚未闭合。本次西乌旗阿如罕敖包早石炭世埃达克岩的发现,进一步为贺根山洋石炭纪尚未闭合提供了岩石学依据和年代学约束。同时,根据贺根山缝合带两侧均发现有早石炭世弧岩浆岩,初步认为早石炭世贺根山洋可能存在双向俯冲,西乌旗阿如罕敖包一带处于活动大陆边缘(图 12)。

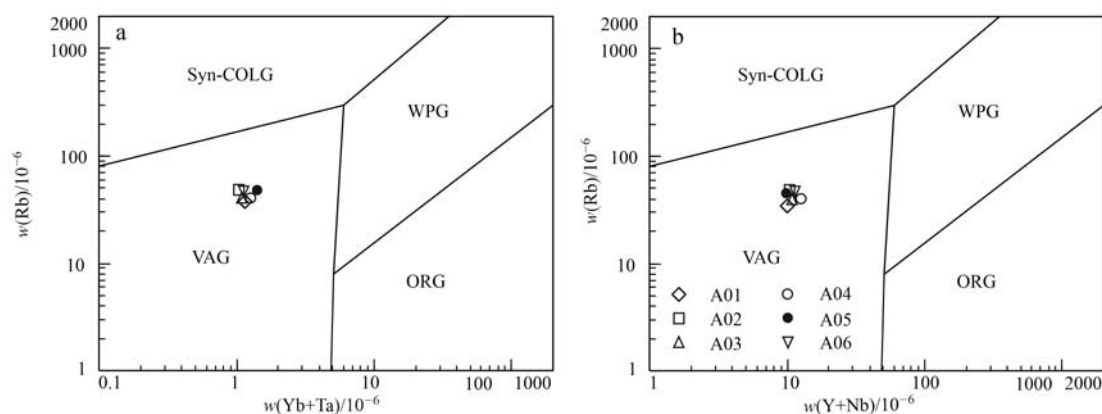


图 11 阿如罕敖包花岗闪长岩 Rb-(Yb+Ta) (a)、Rb-(Y+Nb) (b) 判别图解 (底图据 Pearce *et al.*, 1984)
Fig. 11 Rb-(Yb+Ta) (a)、Rb-(Y+Nb) (b) diagrams of the granodiorite in Aruhan (base map after Pearce *et al.*, 1984)

Syn-COLG—后碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

Syn-COLG—syn-collision granite; WPG—within plate granite; VAG—volcanic arc granite; ORG—mid ocean ridge granite

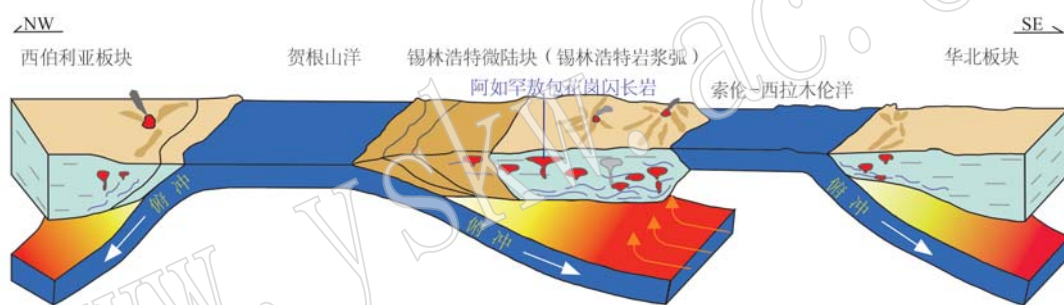


图 12 早石炭世古亚洲洋中东段构造演化模式图

Fig. 12 Tectonic evolution model of the middle and east section of the Paleo-Asian Ocean in the Early Carboniferous

5 结论

(1) 内蒙古西乌旗阿如罕敖包花岗闪长岩体 3 件 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果分别为 332 ± 3 Ma、 331 ± 2 Ma、 327 ± 1 Ma, 代表了阿如罕敖包花岗闪长岩的形成年龄, 指示其形成于早石炭世, 并非前人推测的中二叠世。

(2) 阿如罕敖包花岗闪长岩具有岛弧型高 Si 埃达克岩(O 型)的岩石地球化学特征, 其源岩可能为俯冲洋壳与大洋沉积物部分熔融形成的富 Si 熔体与上覆地幔橄榄岩发生反应的产物。

(3) 阿如罕敖包花岗闪长岩形成于活动大陆边缘环境, 并非前人推测的陆陆碰撞环境, 初步认为早石炭世古亚洲洋贺根山洋盆可能尚未闭合, 正处于向南锡林浩特微陆块俯冲消减阶段。

(4) 阿如罕敖包花岗闪长体的发现, 可能显示

早石炭世古亚洲洋贺根山古洋盆在西乌旗一带存在双向俯冲消减, 这与人认为贺根山洋向北单向俯冲消减的观点不同, 有可能为进一步揭示早石炭世古亚洲洋中东段构造演化机制提供了地质依据。

References

- Bourdon E, Eissen J P, Gutscher M A, *et al.* 2003. Magmatic response to early aseismic ridge subduction: The Ecuadorian margin case (South America) [J]. *EPSL*, 205: 123~138.
- Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [C]// *Developments in Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Bureau of Inner Mongolia Geology. 1976. 1:200 000 Maodeng Regional Geological Survey Report [R]. 1~184 (in Chinese).
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(3): 257~268.

- Castillo P R. 2012. Adakite petrogenesis[J]. *Lithos*, 134: 304~316.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662~665.
- Defant M J and Drummond M S. 1993. Mount St. Helens: Potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 21(6): 547.
- Irvine T N and Barager W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 8: 523~548.
- Institute of Inner Mongolia Autonomous Region Geological Survey. 2008. 1:250,000 Chaokewula Regional Geological Survey Report[R]. 1~256(in Chinese).
- Kang Jianli, Xiao Zhibin, Wang Huichu, *et al.* 2016. Late paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical evidence from the meta-basic volcanics of Xilinhot, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 90(2): 383~397 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W and Kay S M. 2002. Andean adakites: Three ways to make them[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 303~311.
- Li Mongtong, Tang Jun, Wang Zhiwei, *et al.* 2020. Geochronology and geochemistry of the Early Carboniferous volcanic rocks in Sonid Zuqi, Inner Mongolia: Implication for the Carboniferous tectonic evolution and crustal nature of the eastern Central Asia Orogenic Belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(3): 799~819(in Chinese with English abstract).
- Li Shichao, Wang Hongtao, Li Gang, *et al.* 2020. Northward plate subduction process of the Paleo-Asian Ocean in the middle part of the Central Asian orogenic belt: Evidence from adakites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(8): 2 521~2 536(in Chinese with English abstract).
- Li Yingjie, Wang Jinfang and Li Hongyang. 2015. Recognition of Meilaotewula ophiolite in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1 461~1 470(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).
- Li Yuwen, Deng Jinfu, Luo Zhaohua, *et al.* 1995. Discovery of cumulus crystal bojiert and its significance in Sonid zuoqi area, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 9(2): 212~219 (in Chinese with English abstract).
- Liang Yuwei, Yu Cunlin, Shen Guozhen, *et al.* 2013. Geochemical characteristics of granites in the Suonaga Pb-Zn-Ag deposit of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and their tectonic and ore-forming implications [J]. *China Geology*, 40(3): 767~779 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Zhang Xingzhou, *et al.* 2009. Geochemical characteristic of carboniferous quartz-diorite in the southern Xiwuqi area, Inner Mongolia and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(3): 365~376 (in Chinese with English abstract).
- Liu Rui, Yang Zhen, Xu Qidong, *et al.* 2016. Zircon U-Pb ages, elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of the Hercynian granitoids from the southern segment of the Da Hinggan Mts.: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5): 1 505~1 528 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1~2): 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535~1 546.
- Ludwig K R. 2000. Users manual for Isoplot/Ex, Vresion 2: A Geochronological Toolkit Microsoft Excel[J]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1a: 55.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, *et al.* 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 79(1~2): 1~24.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Richards J P and Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis [J]. *Economic Geology*, 102(4): 537~576.
- Qu Yue. 2019. Palaeo Environment of the Carboniferous-Permian Carbonate Rocks in Mandula Xilinhot, Inner Mongolia[D]. Jilin: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Sajona F G, Maury R C, Bellon H, *et al.* 1993. Initiation of subduction and the generation of slab melts in western and eastern Mindanao,

- Philippines[J]. *Geology*, 21(11): 1 007.
- Samaniego P, Martin H, Robin C, *et al.* 2002. Transition from calc-alkalic to adakitic magmatism at Cayambe volcano, Ecuador: Insights into slab melts and mantle wedge interactions[J]. *Geology*, 30(11): 967.
- Sengör A M C, Natalin B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299~307.
- Stern C R and Kilian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123(3): 263~281.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle compositions and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, *et al.* 2018. Zircon U-Pb dating and tectonic setting of the Wulan'gou adakite in Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 37(10): 1 933~1 943 (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.* 2020. Late Carboniferous intraoceanic subduction of the Paleo-Asian Ocean: New evidences from the Zagayin high-Mg andesite in the Meilaotewula SSZ ophiolite[J]. *Geological Review*, 66(2): 289~306 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, *et al.* 2021a. Discovery of the Late Carboniferous adakite in the Erenhot-Hegenshan suture zone and intra-oceanic subduction of the Paleo-Asian Ocean[J]. *China Geology*, 48(2): 520~535(in Chinese with English abstract).
- Wang Jinfang, Li Yingjie, Li Hongyang, *et al.* 2021b. Late Carboniferous TTG magmatic event in the Hegenshan suture zone: Zircon U-Pb geochronology and geochemical constraints from the Huduge trondhjemite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(2): 396~412 (in Chinese with English abstract).
- Wang Juntao, Zhang Yongsheng and Song Tianrui. 2011. Characteristics and sedimentary environment of authigenic glauconite from limestone of the Amushan Formation in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(2): 259~266 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuai, Li Yingjie, Wang Jinfang, *et al.* 2021. Discovery of Late Carboniferous adakite in Manita, Inner Mongolia, and its constraints on intra-oceanic subduction in eastern Paleo-Asian Ocean[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(1): 82~94 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shuqing, Hu Xiaojia, Yang Zeli, *et al.* 2018. Geochronology, geochemistry, Sr-Nd-Hf isotopic characteristics and geological significance of carboniferous Yuejin arc intrusive rocks of Xilinhot, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 43(3): 672~695 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Zhang Qi and Qian Qing. 2000. Geochemical characteristics and tectonic significance of adakite[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251~256 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yu, Tian Qiangguo, Wang Zhenqiang, *et al.* 2019. The Early Carboniferous volcanic rocks in Engeriyinping area of Sonid Left Banner, Inner Mongolia: Discovery and its tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(7): 1 170~1 182 (in Chinese with English abstract).
- Xin Houtian, Teng Xuejian and Cheng Yinhang. 2011. Stratigraphic subdivision and isotope geochronology study on the Baoligaomiao Formation in the East Ujimqin County, Inner Mongolia[J]. *Geological Survey and Research*, 34(1): 1~9(in Chinese).
- Yang Zhili, Zhang Xiaohui, Gao Yanlong, *et al.* 2022. Late Carboniferous gabbro-granite suite from West Ujimqin of central Inner Mongolia: Petrogenesis and geodynamic implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 38(3): 830~854 (in Chinese with English abstract).
- Ye Tianzhu. 2002. 1:250 000 0 China Tectonic Map[M]. Development Research Center of China Geological Survey(in Chinese).
- Zhang Qi and Jiao Shoutao. 2020. Adakite comes from a high-pressure background: A scientific, reliable, predictable scientific discovery[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(6): 1 675~1 683 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Jiao Shoutao, Li Mingchao, *et al.* 2019. Applicability of quantum entanglement technology in geology[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(4): 159~169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Li Chengdong, *et al.* 2006. Granite classification on the basis of Sr and Yb contents and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(9): 2 249~2 269 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈 斌, 赵国春, Wilde Simon. 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.
- 黄波, 付冬, 李树才, 等. 2016. 内蒙古贺根山蛇绿岩形成时代及构造启示[J]. 岩石学报, 32(1): 158~176.
- 康健丽, 肖志斌, 王惠初, 等. 2016. 内蒙古锡林浩特早石炭世构造环境: 来自变质基性火山岩的年代学和地球化学证据[J]. 地质学报, 90(2): 383~397.
- 李梦瞳, 唐军, 王志伟, 等. 2020. 内蒙中部苏左旗早石炭世火山岩年代学与地球化学研究: 对中亚造山带东部石炭纪构造演化及地壳属性的制约[J]. 岩石学报, 36(3): 799~819.
- 李瑞杰. 2013. 内蒙古西乌旗本巴图组火山岩地球化学特征、年代学及地质意义研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 李世超, 王洪涛, 李刚, 等. 2020. 中亚造山带中段古亚洲洋北向平板俯冲过程: 来自埃达克岩的证据[J]. 岩石学报, 36(8): 2 521~2 536.
- 李英杰, 王金芳, 李红阳. 2015. 内蒙古西乌旗梅劳特乌拉蛇绿岩的识别[J]. 岩石学报, 31(5): 1 461~1 470.
- 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.
- 李玉文, 邓晋福, 罗照华, 等. 1995. 内蒙古苏尼特左旗地区堆晶角闪辉长岩的发现及地质意义[J]. 现代地质, 9(2): 212~219.
- 梁玉伟, 余存林, 沈国珍, 等. 2013. 内蒙古东乌旗索纳嘎铅锌银矿区花岗岩地球化学特征及其构造与成矿意义[J]. 中国地质, 40(3): 767~779.
- 刘建峰, 迟效国, 张兴洲, 等. 2009. 内蒙古西乌旗南部石炭纪石英闪长岩地球化学特征及其构造意义[J]. 地质学报, 83(3): 365~376.
- 刘锐, 杨振, 徐启东, 等. 2016. 大兴安岭南段海西期花岗岩类锆石 U-Pb 年龄、元素和 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学: 岩石成因及构造意义[J]. 岩石学报, 32(5): 1 505~1 528.
- 内蒙古自治区地质局. 1976. 1:200 000 毛登幅区域地质调查报告[R].
- 内蒙古自治区地质调查院. 2008. 1:250 000 朝克乌拉幅区域地质调查报告[R].
- 潘世语. 2012. 内蒙古苏尼特右旗晚石炭世本巴图组火山岩地球化学特征及构造意义[D]. 长春: 吉林大学.
- 曲跃. 2019. 内蒙古满都拉-锡林浩特地区石炭纪-二叠纪碳酸盐岩古环境分析[D]. 长春: 吉林大学.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2018. 内蒙古乌兰沟埃达克岩锆石 U-Pb 年龄及构造环境[J]. 地质通报, 37(10): 1 933~1 943.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2019. 贺根山缝合带白音舒奥长花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 65(4): 857~872.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2020. 古亚洲洋晚石炭世俯冲作用: 梅劳特乌拉蛇绿岩中扎嘎音高镁安山岩证据[J]. 地质论评, 66(2): 289~306.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2021a. 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[J]. 中国地质, 48(2): 520~535.
- 王金芳, 李英杰, 李红阳, 等. 2021b. 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[J]. 地质学报, 95(2): 396~412.
- 王俊涛, 张永生, 宋天锐. 2011. 内蒙古西乌旗穆沁旗阿木山组海绿石的特征及其沉积环境[J]. 岩石矿物学杂志, 30(2): 259~266.
- 王帅, 李英杰, 王金芳, 等. 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[J]. 地质通报, 40(1): 82~94.
- 王树庆, 胡晓佳, 杨泽黎, 等. 2018. 兴蒙造山带中段锡林浩特跃进地区石炭纪岛弧型侵入岩: 年代学、地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 地球科学, 43(3): 672~695.
- 王焰, 张旗, 钱青. 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 35(2): 251~256.
- 吴煜, 田强国, 王振强, 等. 2019. 内蒙古苏尼特左旗北部恩格日音棚地区早石炭世火山岩的发现及其构造意义[J]. 地质通报, 38(7): 1 170~1 182.
- 辛后田, 滕学建, 程银行. 2011. 内蒙古东乌旗宝力高庙组地层划分及其同位素年代学研究[J]. 地质调查与研究, 34(1): 1~9.
- 杨智荔, 张晓晖, 高延龙, 等. 2022. 内蒙古中部西乌旗晚石炭世辉长岩-花岗岩系列: 岩石成因与地球动力学意义[J]. 岩石学报, 38(3): 830~854.
- 叶天竺. 2002. 1:250 000 0 中国大地构造图[M]. 中国地质调查局发展研究中心.
- 张旗, 焦守涛. 2020. 埃达克岩来自高压背景——一个科学的、可靠的、有预见性的科学发现[J]. 岩石学报, 36(6): 1 675~1 683.
- 张旗, 焦守涛, 李明超, 等. 2019. 量子纠缠技术在地质学上应用的可能性[J]. 地学前缘, 26(4): 159~169.
- 张旗, 王焰, 李承东, 等. 2006. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 22(9): 2 249~2 269.