

中亚造山带东南缘额仁淖尔地区早二叠世花岗岩 锆石 U-Pb 年代学、源区特征及其意义

郭磊¹, 童英¹, 莫南², 王涛¹, 焦永艳², 王文志², 赵辉²

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100029)

摘要: 位于中蒙边境额仁淖尔地区的查干德勒含角闪石黑云母二长花岗岩和卫境黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄分别为 276 ± 2 Ma 和 279 ± 1 Ma, 均为早二叠世岩体。地球化学数据显示两个岩体均具有高 SiO_2 含量(67.63%~74.75%)和高 K_2O 含量(2.94%~6.13%), 具弱的铕负异常($\delta\text{Eu}=0.53\sim 0.80$), A/CNK 均小于 1.1, 属弱过铝质的高钾钙碱性系列, 具有 I 型花岗岩的特征。查干德勒岩体锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $-18.65\sim -10.95$, 模式年龄 t_{DM2} 在 2470~1989 Ma 之间, 反映了深部源区可能存在古老地壳物质。卫境岩体锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $+1.71\sim +5.44$, 模式年龄 t_{DM2} 在 1193~954 Ma 之间, 具有年轻的源区特征, 反映了年轻地壳的生长。额仁淖尔地区同时代两个花岗岩的锆石 Hf 同位素反映了完全不同的物源性质, 也说明古老物质的再循环和新地壳的生长可以发生在同一个区域。

关键词: 早二叠世; I 型花岗岩; 深部地壳信息; 构造环境

中图分类号: P588.12⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)05-0601-19

Zircon U-Pb ages and isotope characteristics of Early Permian granitoids in Eren Nur area on the southeastern margin of Central Asian Orogenic Belt and their tectonic implications

GUO Lei¹, TONG Ying¹, MO Nan², WANG Tao¹, JIAO Yong-yan², WANG Wen-zhi² and ZHAO Hui²

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Located in the Eren Nur area of China-Mongolia border region, the Qagan Dele amphibole- and biotite-bearing monzogranitic pluton and the Weijing biotite monzogranitic pluton have zircon U-Pb ages of 276 ± 2 Ma and 279 ± 1 Ma, respectively. They are both Early Permian plutons. Geochemical data show that these two granite bodies have high SiO_2 (67.63%~74.75%), K_2O (2.94%~6.13%) values and weak Eu negative anomalies with A/CNK ratios less than 1.1, thus belonging to weakly peraluminous high potassium calc-alkaline series and exhibiting I-type granitoids features. Qagan Dele granites have zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ values between -18.65 to -10.95 and older model ages (t_{DM2}) in the range of 2470~1989 Ma, suggesting the probable existence of older crustal materials in the source. Weijing granites have zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ values between $+1.71$ and $+5.44$ and younger model ages (t_{DM2}) in the range of 1193~954 Ma, implying juvenile source at depth and crustal growth. Combined with regional tectonic evolution, it is held that these granitoids might have been formed in a syn-collisional to post-collisional setting. The fact that the two different plutons in the same area have different

收稿日期: 2015-06-15; 修订日期: 2015-07-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2013CB429803); 国家自然科学基金面上项目(41372006, 41372077); 中国地质调查局地质调查子项目(12120115069701, 12120113094000)

作者简介: 郭磊(1981-), 男, 博士, 构造地质学专业, E-mail: guolei-cn@sina.com

zircon Hf isotopes indicates completely different sources, which implies that recycling of old crust and crustal growth could occurred in the same region.

Key words: Early Permian; I-type granitoids; deep crustal information; tectonic setting

中亚造山带(CAOB),也有学者称之为阿尔泰构造拼合体(Sengör *et al.*, 1993),位于西伯利亚板块和塔里木克拉通及华北克拉通之间(Xiao *et al.*, 2003; Windley *et al.*, 2007),被认为是显生宙全球最大的增生型造山带(Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Xiao *et al.*, 2009, 2010)。构造研究表明中亚造山带由一系列新元古代至中生代的块体、微陆块、岛弧、蛇绿岩、海山和增生楔块组成,并沿着中蒙边界一线闭合(Sengör *et al.*, 1993; Khain *et al.*, 2002, 2003; Xiao *et al.*, 2003, 2009, 2010; Kovalenko *et al.*, 2004; Windley *et al.*, 2007; Kröner *et al.*, 2014)。中亚造山带也是显生宙最显著的年轻地壳生长区(Hu *et al.*, 2000; Wu *et al.*, 2000; Jahn *et al.*, 2000a, 2000b; Patchett and Samson, 2003; Jahn, 2004; Hong *et al.*, 2004; Kovalenko *et al.*, 2004; 洪大卫等, 2000, 2003)。但也有学者(Kröner *et al.*, 2014)认为中亚造山带显生宙新生地壳所占的比例被高估了,其中古老物质再循环起重要作用。

不同学者对于该地区古生代以来的构造演化模式持有不同的观点。一种观点认为古亚洲洋由浑善达克地块分隔成两支,并分别向南俯冲至华北板块之下形成白乃庙岛弧,向北俯冲至艾里格庙-锡林浩特-兴安地块之下形成宝力道岛弧(Tang, 1990; Xu *et al.*, 2013; 徐备等, 2014)。浑善达克地块与华北克拉通以及北部的艾里格庙-锡林浩特-兴安地块于晚泥盆世已碰撞闭合,之后晚古生代进入陆表海-伸展盆地演化阶段(徐备等, 2014)。另一种观点则认为华北板块与南蒙古大陆边缘之间并无显著陆块,古亚洲洋的俯冲从奥陶纪一直持续到二叠纪,直到晚二叠世一早三叠世华北板块与南蒙古板块最终闭合(Chen *et al.*, 2000, 2009; Xiao *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2009; Jian *et al.*, 2010; Eizenhöfer *et al.*, 2014)。争论的焦点主要集中在古亚洲洋最终闭合的时限以及微陆块的存在与否。花岗岩作为大陆地壳的重要组分,在中亚造山带广泛分布(Jahn, 2004; 童英等, 2010),其同位素组成(如 Nd、Hf 等)可用于示踪源岩性质(DePaolo *et al.*, 1991; Chen and Jahn, 1998; Hong *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2011; Muöz *et al.*, 2013),并被

应用于探讨地壳基底岩石的性质和时代。因此,花岗岩的年代学和同位素特征对鉴别深部新老地壳的分布架构具有重要意义,可以用来探讨中亚造山带内古老微陆块的存在与否。

本文对研究相对薄弱的中亚造山带东南缘中段额仁淖尔地区与古亚洲洋演化相关的早二叠世花岗岩开展了锆石年代学研究和 Hf 同位素测试,以期探讨该区岩浆作用类型和岩石成因,特别是同位素特征所反映的源区信息,从而为探索该区深部新老地壳特征提供信息。

1 区域地质概况

额仁淖尔地区位于二连浩特市西南,额仁淖尔苏木附近中蒙边界地区,构造上属于索伦缝合带以北的北部陆块(图 1)(Jian *et al.*, 2010)。北部陆块包括南蒙古的乌里雅斯太地块(Badarch *et al.*, 2002)和内蒙的北造山带(Jian *et al.*, 2008),额仁淖尔地区属于北造山带。研究区出露的主要地层为前寒武纪的艾勒格庙群大理岩、石英岩、绢云母石英片岩,晚二叠世西里庙群火山-沉积岩以及早白垩世沉积盆地。花岗质岩浆活动在该区及邻区广泛发育(图 1b),大部分花岗岩形成于古生代(童英等, 2010),少部分为呈穹隆产出的早白垩世岩体(许东青等, 2008, 图 1c),而二叠纪是岩浆活动的峰期(童英等, 2010; Tong *et al.*, 2015)。火山岩则广泛发育早二叠世的片理化流纹岩(聂风军等, 2009a),产出迄今为止在全球范围内找到的最大规模单一萤石矿床——苏莫查干敖包矿床(李士勤, 1985)。

该区被认为是艾勒格庙-锡林浩特-兴安地块的西缘(徐备等, 2014),向西与南蒙古的 HutagUul 地块相连(Badarch *et al.*, 2002)。前寒武纪的岩浆岩和变质岩在东边的锡林浩特和西部的 HutagUul 地区陆续发现。Yarmolyuk 等(2005)在蒙古境内的 Totoshan 地区测得片麻状花岗岩中锆石的上交点年龄为 952 ± 8 Ma, 该数据代表原岩形成时代。Wang 等(2001)测得中蒙边境亚干地区片麻状花岗岩的锆石谐和年龄为 916 ± 16 Ma。孙立新等(2013)报道了苏尼特左旗东部花岗片麻岩年龄为 1516 ± 31 Ma

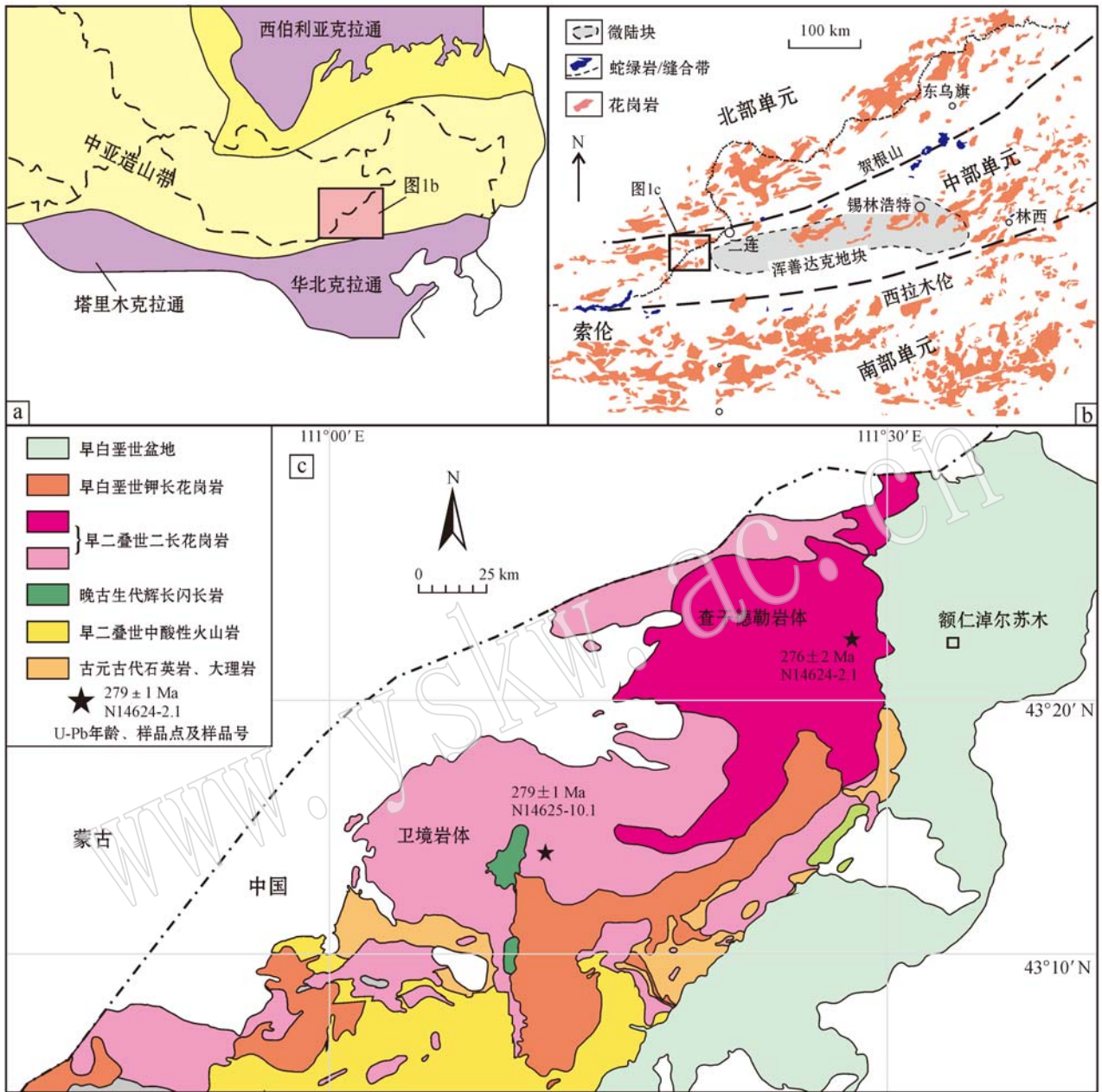


图 1 额仁淖尔地区岩体地质简图和构造简图[修改自 Xiao 等(2003)和童英等(2010)]

Fig. 1 Simplified geological map of Eren Nur area and tectonic map (modified after Xiao *et al.*, 2003 and Tong *et al.*, 2010)

和 1390 ± 17 Ma, 认为该区存在中元古代变质基底。

2 岩体地质和岩石学特征

2.1 查干德勒含角闪石黑云母二长花岗岩

查干德勒岩体长约 18 km, 宽约 15 km, 主要风化类型为球形风化, 呈岩基状产出(图 2a), 在岩体中可见有大量后期的花岗岩细脉和伟晶岩脉发育(图 2b)。岩体侵入于前寒武纪艾勒格庙群大理岩和石

英岩中。主要岩石类型为含角闪石黑云母二长花岗岩, 风化面为青灰色, 新鲜面为灰白色, 中粒结构, 块状构造, 主要矿物组成为石英、钾长石、斜长石、黑云母及角闪石(图 2c、2d, 长石与深绿色黑云母呈半自形-自形板状, 浅绿色六方柱状角闪石发育一组裂理, 石英呈他形充填其中)。石英为无色, 它形粒状, 粒度为 0.2~3 mm, 含量约 30%; 钾长石为无色, 半自形板状, 局部表面为高岭土化, 长轴范围为 1~4 mm, 部分钾长石中含有石英矿物颗粒包体, 钾长石

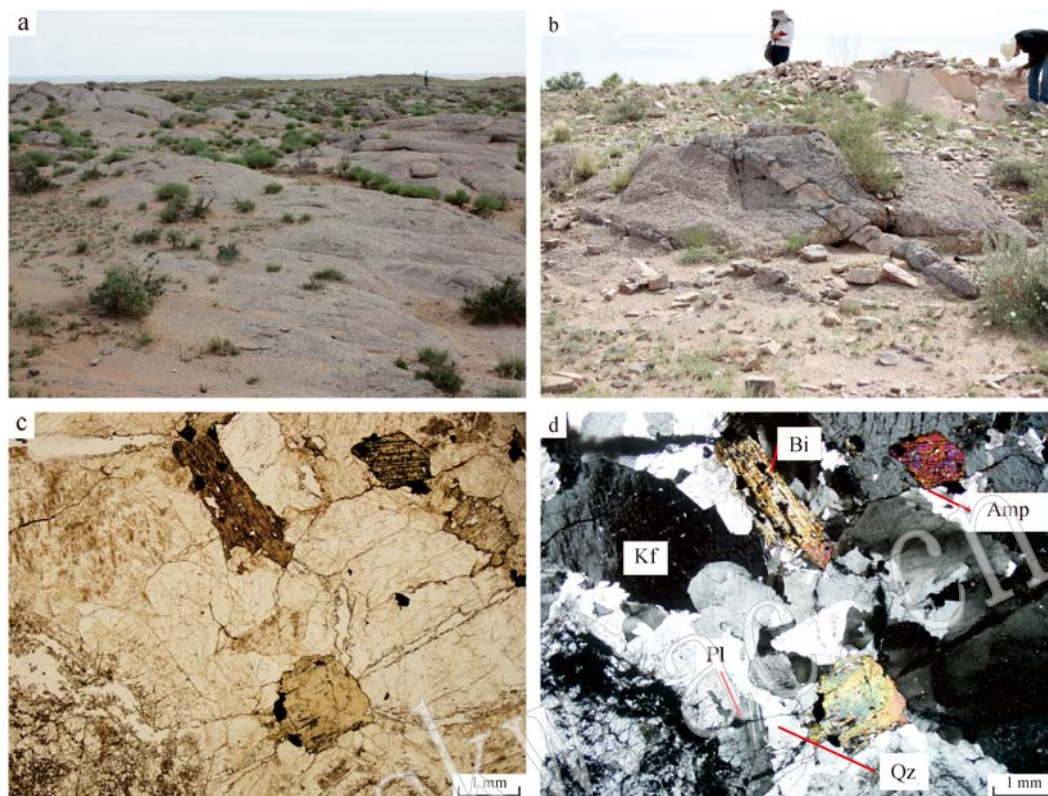


图2 查干德勒岩体野外露头(a,b)和显微(c,d)照片

a—岩体风化面；b—后期大量脉体；c—年龄测试样品(单偏光)；d—年龄测试样品(正交偏光)；Qz—石英；Bi—黑云母；Kf—钾长石；Pl—斜长石；Amp—角闪石

Fig. 2 Field occurrence (a, b) and microscope petrography (c, d) of Qagan Dele granitic pluton

a—weathering surface; b—late dykes; c—microphotographs of dated sample (plainlight); d—microphotographs of dated sample (crossed nicols); Qz—quartz; Bi—biotite; Kf—K-feldspar; Pl—plagioclase; Amp—amphibole

含量约为30%；斜长石为无色，半自形-自形板状，局部见绢云母化，长轴方向为1~3 mm，斜长石含量约为20%；黑云母，片状，具有多色性，浅绿色-深绿色，浅棕色-深棕色，发育一组极完全解理，最高干涉色为Ⅱ级蓝、黄，含量约为15%；角闪石呈柱状，微弱多色性，浅绿色-深绿色，含量约为2%。其他副矿物主要为磁铁矿、锆石等，含量共计约3%。

2.2 卫境黑云母二长花岗岩

卫境岩体长约为20 km，宽约为18 km，风化程度较高，多为第三系及第四系覆盖(图3a)，在岩体中部见有早期的中基性岩体辉长闪长岩产出(图1、图3b)，西南部被早白垩世苏莫查干岩体(聂风军等，2009b)侵位，岩体中常见伟晶岩脉发育。主要岩石类型为黑云母二长花岗岩，岩石样品新鲜面为灰白色，中粒结构，块状构造。岩石矿物组成为石英、钾长石、斜长石及黑云母(图3c、3d，半自形微斜长石发

育格子双晶，斜长石可见聚片双晶，深绿色黑云母为细长条状，他形石英充填空隙)。石英含量约为30%，无色，它形粒状，粒度为0.2~3 mm。钾长石为无色，局部见高岭土化，半自形板状，长轴范围为1~4 mm，最高干涉色为Ⅰ级灰，双晶类型以格子双晶为主，钾长石的类型以微斜长石为主，含量约为40%；斜长石无色，半自形-自形板状，可见聚片双晶，蚀变类型以绢云母化为主，含量约为10%；黑云母可见多色性，深棕色-浅棕色，片状，可见一组极完全解理，含量约为15%。其他副矿物含量约为5%，主要为磁铁矿、锆石等。

3 测试方法

锆石 U-Pb 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室完成，使用仪器为 Neptune 多接收电

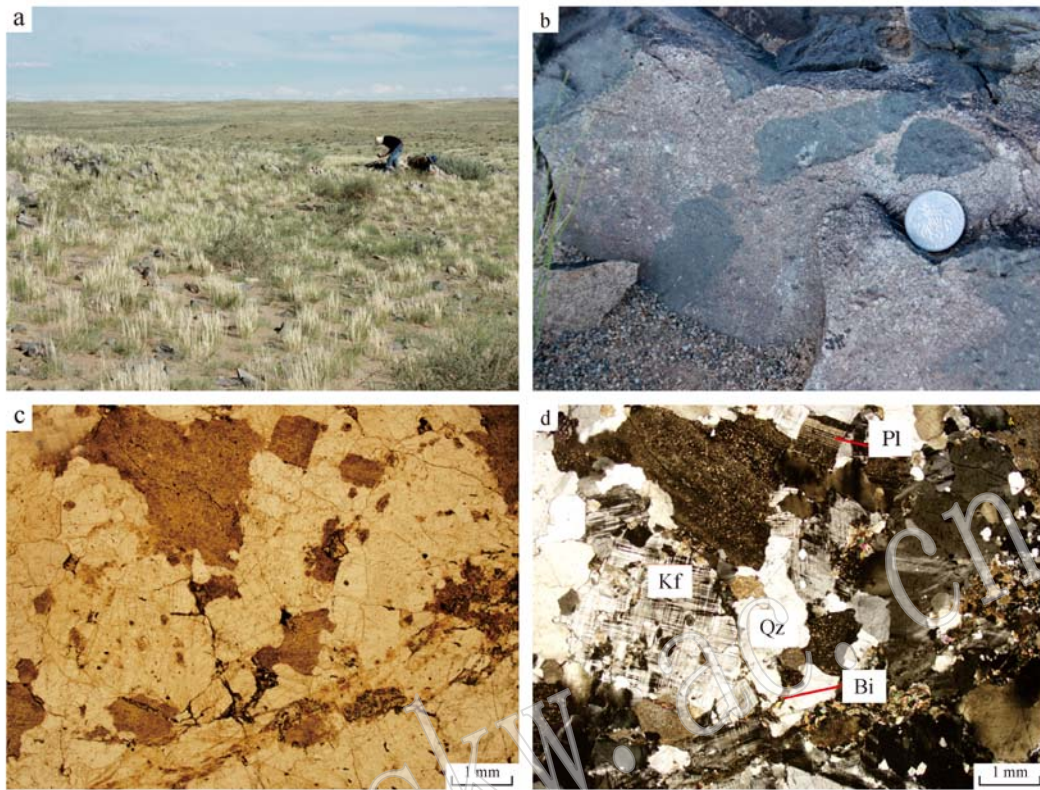


图 3 卫境岩体野外露头(a,b)和显微(c,d)照片

Fig. 3 Field occurrence (a, b) and microscope petrography (c, d) of Weijing granitic pluton

a—岩体风化面; b—岩体含辉长闪长岩包体; c—年龄测试样品(单偏光); d—年龄测试样品(正交偏光); Qz—石英; Bi—黑云母; Kf—钾长石; Pl—斜长石

a—weathering surface; b—mafic enclaves; c—microphotographs of dated sample (plainlight); d—microphotographs of dated sample (crossed nicols); Qz—quartz; Bi—biotite; Kf—K-feldspar; Pl—plagioclase

感耦合等离子体质谱仪和 193 nm 激光取样系统 (LA-MC-ICP-MS)。激光剥蚀的斑束为 $35 \mu\text{m}$, 能量密度为 $13 \sim 14 \text{ J/cm}^2$, 频率为 $8 \sim 10 \text{ Hz}$, 激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune (MC-ICP-MS)。锆石标样采用 TEMORA 标准锆石。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序 (Liu *et al.*, 2010) 和 Isoplot 程序 (Ludwig, 2003) 做图, 采用 ^{208}Pb 对普通铅进行校正。利用 NIST612 作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。

样品主量、微量和稀土元素分析在加拿大温哥华 Acme 实验室完成。主量元素测试首先对样品进行偏硼酸锂/四硼酸盐融合和硝酸稀释溶解, 选取 0.2 g 样品进行 ICP-AES 分析, 烧失量根据点火后在 1000°C 时的质量差别测定。微量和稀土元素分析包括 2 个独立的测试, 稀土元素和难溶元素的测定先选取样品进行偏硼酸锂/四硼酸盐融合和硝酸稀释溶解, 再进行 ICP-MS 分析; 另外单独选取 0.5 g

样品经王水溶解, 进行 ICPMS 分析贵金属和基础金属的含量。

锆石 Lu-Hf 同位素测试在中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室完成, 所用仪器为 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统 (LA-MC-ICP-MS), 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 根据锆石大小, 剥蚀直径采用 $55 \mu\text{m}$ 或 $40 \mu\text{m}$, 测定时使用国际上通用的锆石标样 GJ1 作为参考物质, 分析过程中 GJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 0.282015 ± 8 ($2\sigma, n = 10$)。

4 锆石 U-Pb 年代学

分别对额仁淖尔地区两个早二叠世岩体样品进行了锆石 U-Pb 年代学测试: 样品 N14624-2.1 采自查干德勒岩体, 采样坐标为北纬 $43^\circ 22' 29.4''$ 、东经

E111°28'53.5"; 样品 N14625-10.1 采自卫境岩体, 采样坐标为北纬 43°14'11.1"、东经 111°09'42.9" (样品点见图 1)。从样品中分选出的锆石外形多为长柱状, 部分为短柱状, 无色, 可见发育明显的振荡环带, 具有岩浆锆石的典型特征。

查干德勒花岗岩样品 N14624-2.1 的测试结果见表 1, 典型锆石和年龄谱和图见图 4。锆石 Th/U 值为 0.30~0.74, 30 个测试点获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表

面年龄区间为 266~282 Ma, 加权平均年龄为 276 ± 2 Ma (MSWD=0.67, 其中点 11 因可信度较差未参与计算)。

卫境花岗岩样品 N14625-10.1 的测试结果见表 2, 典型锆石和年龄谱和图见图 5。锆石 Th/U 值为 0.06~0.96, 24 个测试点获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄区间为 274~285 Ma, 加权平均年龄为 279 ± 1 Ma (MSWD=1.09)。

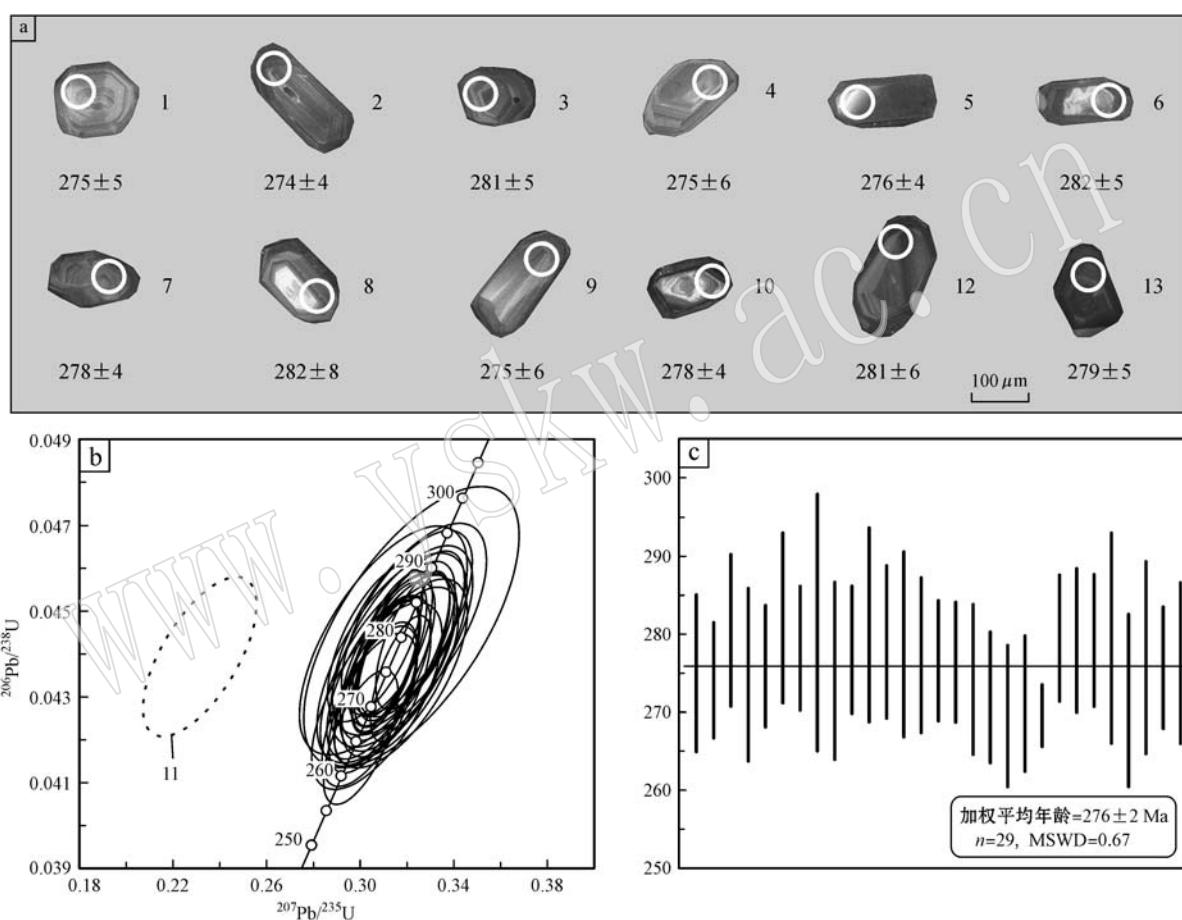


图 4 查干德勒岩体样品 N14624-2.1 典型锆石阴极发光照片(a)、锆石年龄谱和线图(b)和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布统计图(c)
Fig. 4 Typical zircon CL images (a), U-Pb zircon concordia diagrams (b) and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean ages (c) of sample N14624-2.1 from Qagan Dele granitic pluton

两个样品的锆石 U-Pb 年龄表明查干德勒岩体和卫境岩体的侵位时代均为早二叠世。

5 地球化学特征

查干德勒和卫境花岗岩主量元素、微量元素及稀土元素分析测试结果见表 3。两个岩体具有相似的主量元素特征: SiO_2 含量为 67.63%~74.75%,

表现出酸性岩浆岩的化学成分特征, Al_2O_3 含量相对较高, 为 12.89%~15.59%, Fe_2O_3 含量为 0.70%~3.44%, MgO 含量为 0.21%~0.91%, CaO 含量为 0.63%~1.98%, TiO_2 含量为 0.12%~1.64%, P_2O_5 含量较低, 为 0.03%~0.29%, MnO 含量 (0.02%~0.06%) 也很低, Na_2O 含量为 2.71%~4.94%, K_2O 含量为 2.94%~6.13%, 全碱含量 ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$) 较高, 为 7.73%~9.16%, 烧失量 (LOI)

表 1 查干德勒花岗岩样品 N14624-2.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
Table 1 Zircon U-Pb LA-ICP-MS analytical data of sample N14624-2.1 from Qagan Dele granite

样品点号	$w_{\text{Pb}}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值										年龄/Ma	
	Pb	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
1	6	107	0.49	0.0436	0.0008	0.3171	0.0102	0.0528	0.0018	0.0146	0.0007	275	5	280	8
2	39	698	0.70	0.0434	0.0006	0.3173	0.0053	0.0530	0.0008	0.0137	0.0003	274	4	280	4
3	11	214	0.63	0.0445	0.0008	0.3218	0.0093	0.0525	0.0016	0.0135	0.0005	281	5	283	7
4	9	188	0.47	0.0436	0.0009	0.3173	0.0117	0.0529	0.0021	0.0123	0.0008	275	6	280	9
5	16	296	0.45	0.0437	0.0006	0.3111	0.0060	0.0516	0.0010	0.0139	0.0004	276	4	275	5
6	6	110	0.52	0.0447	0.0009	0.3199	0.0114	0.0519	0.0020	0.0132	0.0007	282	5	282	9
7	19	349	0.68	0.0441	0.0006	0.3134	0.0061	0.0515	0.0010	0.0134	0.0003	278	4	277	5
8	14	242	0.39	0.0446	0.0013	0.3219	0.0188	0.0523	0.0033	0.0173	0.0017	282	8	283	14
9	31	633	0.41	0.0436	0.0009	0.3116	0.0117	0.0518	0.0021	0.0129	0.0008	275	6	275	9
10	13	247	0.46	0.0441	0.0007	0.3155	0.0067	0.0519	0.0011	0.0140	0.0004	278	4	278	5
11	13	248	0.47	0.0439	0.0008	0.2314	0.0099	0.0383	0.0017	0.0137	0.0006	277	5	211	8
12	12	214	0.48	0.0446	0.0010	0.3210	0.0135	0.0522	0.0023	0.0134	0.0009	281	6	283	10
13	19	349	0.51	0.0442	0.0008	0.3178	0.0093	0.0521	0.0016	0.0136	0.0006	279	5	280	7
14	28	525	0.22	0.0442	0.0010	0.3176	0.0124	0.0522	0.0022	0.0144	0.0012	279	6	280	10
15	14	241	0.74	0.0440	0.0008	0.3149	0.0096	0.0520	0.0017	0.0131	0.0005	277	5	278	7
16	23	420	0.67	0.0438	0.0006	0.3113	0.0057	0.0515	0.0009	0.0134	0.0003	277	4	275	4
17	19	333	0.53	0.0438	0.0006	0.3116	0.0057	0.0516	0.0009	0.0146	0.0003	276	4	275	4
18	29	575	0.30	0.0435	0.0008	0.3080	0.0091	0.0514	0.0016	0.0136	0.0008	274	5	273	7
19	9	177	0.45	0.0431	0.0007	0.3067	0.0072	0.0517	0.0012	0.0129	0.0005	272	4	272	6
20	18	381	0.51	0.0427	0.0007	0.3040	0.0083	0.0516	0.0015	0.0130	0.0005	270	5	270	6
21	12	229	0.66	0.0429	0.0007	0.3056	0.0078	0.0516	0.0013	0.0135	0.0004	271	4	271	6
22	14	306	0.35	0.0421	0.0006	0.3003	0.0065	0.0518	0.0011	0.0122	0.0004	266	4	267	5
23	20	405	0.33	0.0443	0.0007	0.3224	0.0064	0.0528	0.0010	0.0150	0.0005	280	4	284	5
24	11	210	0.47	0.0443	0.0008	0.3065	0.0083	0.0502	0.0014	0.0126	0.0006	279	5	271	6
25	27	559	0.34	0.0443	0.0007	0.3138	0.0070	0.0514	0.0012	0.0136	0.0005	279	4	277	5
26	8	164	0.46	0.0443	0.0011	0.3099	0.0146	0.0507	0.0026	0.0162	0.0012	280	7	274	11
27	10	202	0.41	0.0430	0.0009	0.3071	0.0114	0.0518	0.0020	0.0136	0.0009	272	6	272	9
28	8	158	0.34	0.0439	0.0010	0.3136	0.0131	0.0518	0.0023	0.0142	0.0012	277	6	277	10
29	15	285	0.41	0.0437	0.0006	0.3107	0.0059	0.0516	0.0010	0.0141	0.0004	276	4	275	5
30	17	338	0.46	0.0438	0.0008	0.3163	0.0102	0.0524	0.0018	0.0123	0.0007	276	5	279	8

表 2 卫境花岗岩样品 N14625-10.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果
 Table 2 Zircon U-Pb LA-ICP-MS analytical data of sample N14625-10.1 from Weijing granite

样品点号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		同位素比值		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		年龄/Ma			
	Pb	U	1 σ	Th/U	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ		
1	38	820	0.0447	0.57	0.0004	0.3199	0.0058	0.0519	0.0009	0.0118	0.0004	282	282	5
2	44	963	0.0446	0.53	0.0004	0.3196	0.0053	0.0520	0.0008	0.0111	0.0003	281	282	5
3	62	1378	0.0452	0.40	0.0004	0.3230	0.0049	0.0518	0.0007	0.0116	0.0003	285	284	4
4	24	498	0.0441	0.85	0.0004	0.3211	0.0079	0.0528	0.0013	0.0120	0.0003	278	283	7
5	63	1364	0.0445	0.59	0.0004	0.3243	0.0050	0.0529	0.0007	0.0117	0.0003	280	285	4
6	42	919	0.0439	0.53	0.0004	0.3182	0.0057	0.0526	0.0009	0.0113	0.0003	277	281	5
7	27	557	0.0446	0.72	0.0004	0.3178	0.0078	0.0517	0.0012	0.0111	0.0004	281	280	7
8	60	1320	0.0438	0.53	0.0004	0.3142	0.0051	0.0520	0.0008	0.0115	0.0004	276	277	4
9	43	862	0.0445	0.97	0.0004	0.3214	0.0061	0.0524	0.0009	0.0114	0.0004	281	283	5
10	14	315	0.0435	0.52	0.0004	0.3156	0.0130	0.0527	0.0022	0.0113	0.0004	274	279	12
11	24	533	0.0443	0.52	0.0004	0.3234	0.0072	0.0529	0.0011	0.0120	0.0004	280	285	6
12	31	672	0.0440	0.54	0.0004	0.3211	0.0073	0.0529	0.0011	0.0130	0.0004	278	283	6
13	28	642	0.0436	0.41	0.0004	0.3127	0.0068	0.0520	0.0011	0.0129	0.0004	275	276	6
14	37	827	0.0438	0.44	0.0004	0.3191	0.0054	0.0529	0.0008	0.0127	0.0004	276	281	5
15	29	633	0.0439	0.49	0.0004	0.3161	0.0065	0.0523	0.0010	0.0132	0.0004	277	279	6
16	43	959	0.0441	0.36	0.0004	0.3147	0.0053	0.0518	0.0008	0.0133	0.0005	278	278	5
17	32	731	0.0439	0.32	0.0004	0.3211	0.0072	0.0531	0.0011	0.0114	0.0004	277	283	6
18	53	1160	0.0438	0.70	0.0004	0.3180	0.0054	0.0527	0.0008	0.0100	0.0003	276	280	5
19	39	836	0.0436	0.80	0.0004	0.3101	0.0059	0.0515	0.0009	0.0101	0.0003	275	274	5
20	38	936	0.0442	0.06	0.0004	0.3199	0.0058	0.0525	0.0009	0.0010	0.0000	279	282	5
21	14	319	0.0441	0.59	0.0004	0.3201	0.0113	0.0527	0.0018	0.0096	0.0003	278	282	10
22	37	756	0.0452	0.67	0.0004	0.3227	0.0096	0.0518	0.0015	0.0124	0.0004	285	284	8
23	30	668	0.0443	0.47	0.0004	0.3179	0.0090	0.0521	0.0014	0.0131	0.0004	279	280	8
24	35	718	0.0442	0.70	0.0004	0.3224	0.0063	0.0529	0.0010	0.0126	0.0004	279	284	6

表 3 额仁淖尔地区早二叠世花岗岩主量元素($w_B/\%$)、稀土元素和微量元素组成($w_B/10^{-6}$)
 Table 3 Composition of major($w_B/\%$), trace and rare earth elements($w_B/10^{-6}$) of Early Permian granites from Eren Nur area

岩体样号	查干德勒岩体										卫境岩体		
	NI4624-2.1	NI4624-3	NI4624-4.1	NI4624-4.2	NI4624-5	NI4624-7	NI4624-8	NI4624-10.1	NI4624-10.2	NI4625-10.1	NI4625-10.2		
SiO ₂	73.17	71.22	74.57	71.88	73.40	71.70	73.50	73.18	74.75	72.13			67.63
TiO ₂	0.14	0.31	0.13	0.17	0.26	0.26	0.12	0.18	0.19	0.39			0.64
Al ₂ O ₃	14.79	14.73	14.42	15.59	13.95	14.79	14.67	13.79	12.89	14.09			15.17
Fe ₂ O ₃	0.79	2.01	0.87	1.09	1.39	1.77	0.70	1.51	1.62	2.45			3.44
MnO	0.02	0.04	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.02			0.04
MgO	0.26	0.80	0.21	0.35	0.55	0.59	0.21	0.37	0.39	0.46			0.91
CaO	1.34	0.63	1.50	1.98	0.75	1.92	1.23	1.00	1.20	1.15			1.33
Na ₂ O	4.28	4.70	4.25	4.94	4.12	4.36	3.84	2.86	2.71	4.83			3.70
K ₂ O	4.26	4.08	3.60	2.94	4.55	3.37	5.16	6.13	4.97	3.33			5.46
P ₂ O ₅	0.03	0.12	0.04	0.06	0.10	0.07	0.04	0.06	0.04	0.11			0.29
Cr ₂ O ₃	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002			0.002
LOI	0.8	1.2	0.3	0.9	0.8	1.0	0.4	0.8	1.1	0.8			1.1
Total	99.91	99.86	99.93	99.93	99.90	99.90	99.89	99.91	99.94	99.76			99.69
A/CNK	1.05	1.11	1.06	1.04	1.07	1.03	1.04	1.05	1.07	1.03			1.05
A/NK	1.27	1.21	1.32	1.38	1.19	1.37	1.23	1.21	1.31	1.22			1.26
K ₂ O+Na ₂ O	8.54	8.78	7.85	7.88	8.67	7.73	9	8.99	7.68	8.16			9.16
Ba	355	454	225	130	397	238	576	337	167	971			935
Be	3	3	3	3	3	3	1	2	<1	5			6
Co	1.0	4.5	1.0	1.7	1.8	2.7	1.2	2.0	3.1	3.1			6.6
Cs	3.4	9.0	6.8	7.5	19.9	9.8	3.7	2.4	3.4	5.2			2.3
Ga	17.6	17.9	16.6	19.5	16.3	17.7	15.3	12.2	12.2	16.8			18.8
Hf	3.10	4.70	2.70	2.40	3.70	3.80	2.40	4.30	4.70	7.30			10.20
Nb	9.10	9.50	8.70	11.30	8.70	8.90	4.80	7.60	7.80	21.00			30.20
Rb	208.0	203.5	212.2	198.9	265.6	193.0	224.6	242.2	206.5	78.9			119.8
Sn	1	2	1	2	2	2	1	1	1	1			1
Sr	245.0	264.5	181.7	219.5	184.7	257.9	256.6	143.4	117.1	396.6			600.5
Ta	1.1	1.1	1.5	1.7	0.8	1.3	0.8	0.7	0.7	2.2			2.0

续表 3
Continued Table 3

岩体样号	查干德勒岩体										卫境岩体		
	NI4624-2.1	NI4624-3	NI4624-4.1	NI4624-4.2	NI4624-5	NI4624-7	NI4624-8	NI4624-10.1	NI4624-10.2	NI4625-10.1	NI4625-10.2		
Th	14.2	22.5	15.6	14.8	17.2	19.3	13.8	30.7	36.7	31.8		19.7	
U	1.9	3.5	1.4	1.9	3.5	2.8	1.7	1.4	2.1	1.9		2.3	
V	17.0	40.0	15.0	19.0	24.0	28.0	14.0	21.0	19.0	39.0		47.0	
W	0.5	0.7	0.5	0.6	8.8	0.5	0.5	0.5	0.5	3.1		5.4	
Zr	76.8	142.2	78.7	75.6	120.7	111.5	67.6	129.0	136.7	280.5		413.9	
Y	5.8	11.0	10.4	11.1	11.2	12.0	6.0	16.1	15.0	19.4		17.7	
La	13.3	20.8	13.8	16.5	20.5	15.9	10.8	19.7	22.6	60.0		105.8	
Ce	24.5	47.7	26.9	29.3	39.1	34.6	24.6	34.3	46.5	118.1		165.8	
Pr	2.88	4.85	3.02	3.17	4.14	3.91	2.30	4.49	5.30	13.87		19.16	
Nd	9.5	16.9	10.6	10.6	14.6	13.9	8.2	16.4	18.1	48.0		62.4	
Sm	1.67	2.80	2.07	1.97	2.51	2.43	1.45	3.10	3.21	7.69		8.21	
Eu	0.37	0.64	0.50	0.44	0.49	0.52	0.36	0.55	0.53	1.18		1.59	
Gd	1.39	2.34	1.91	2.00	2.20	2.18	1.23	2.88	2.78	5.52		5.70	
Tb	0.18	0.34	0.31	0.32	0.32	0.32	0.18	0.48	0.43	0.74		0.71	
Dy	0.95	1.80	1.86	1.68	1.72	1.74	0.95	2.90	2.43	3.95		3.23	
Ho	0.20	0.33	0.36	0.36	0.35	0.35	0.21	0.62	0.51	0.65		0.58	
Er	0.53	1.03	1.09	1.03	0.90	1.03	0.51	1.69	1.67	1.82		1.50	
Tm	0.10	0.18	0.17	0.17	0.15	0.16	0.09	0.27	0.25	0.26		0.23	
Yb	0.70	1.11	1.19	1.13	0.89	1.17	0.55	1.77	1.65	1.66		1.38	
Lu	0.13	0.17	0.19	0.19	0.14	0.20	0.11	0.26	0.25	0.26		0.21	

说明: $A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$; $A/NK = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$ 。

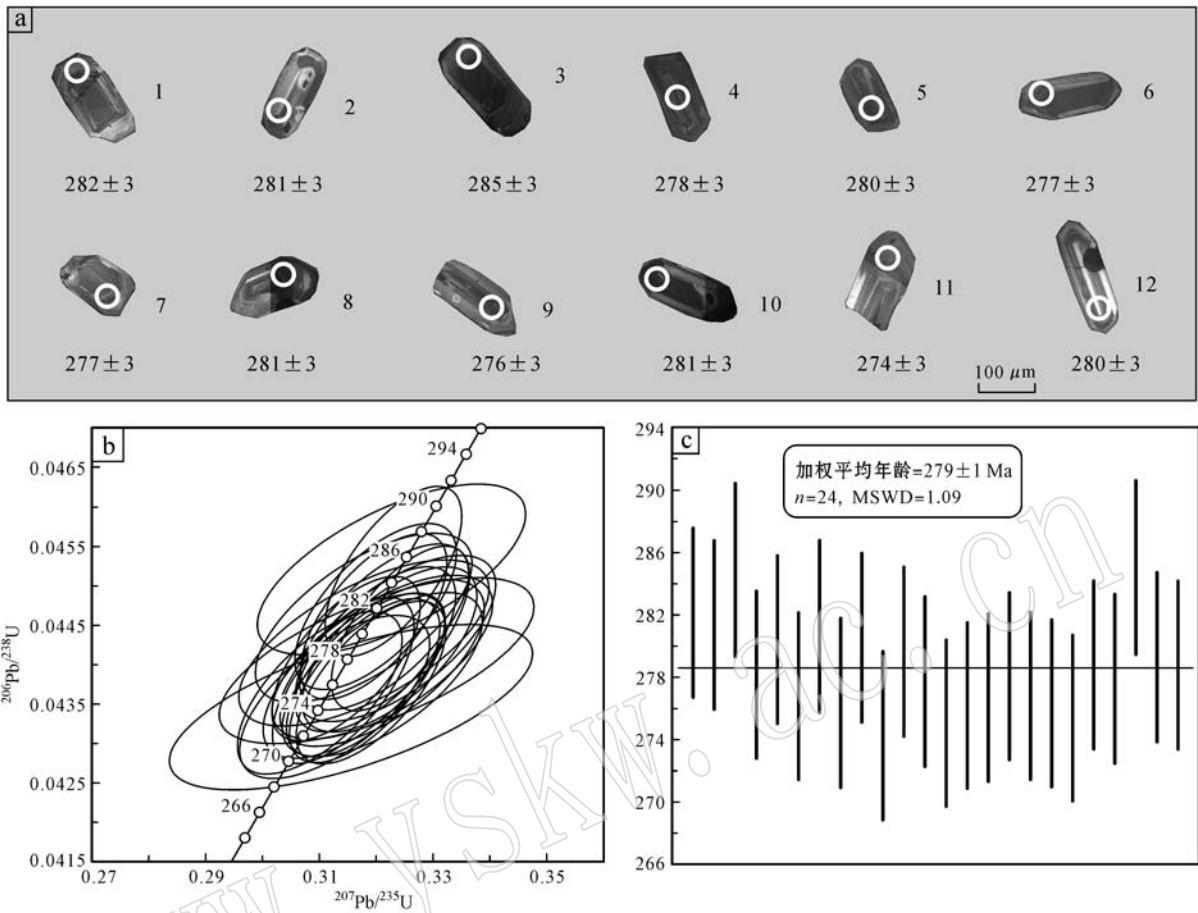


图 5 卫境岩体样品 N14625-10.1 典型锆石阴极发光照片(a)、锆石年龄谐和线图(b)和²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布统计图(c)

Fig. 5 Typical zircon CL images (a), U-Pb zircon concordia diagrams (b) and ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted mean ages (c) of sample N14624-2.1 from Weijing granitic pluton

在 0.3 到 1.2 之间。在 K₂O-SiO₂ 图解(图 6a)中绝大部分样品落在高钾钙碱性系列区域, 2 个样品落在钾玄岩系列区域, 1 个样品落在钙碱性系列区域; 铝饱和指数 A/CNK 为 1.03~1.11, A/NK 为 1.21~1.38, 在 A/NK-A/CNK 图解(图 6b)中落在弱过铝质区域。

研究区花岗岩稀土元素总量(ΣREE)为 51.54 × 10⁻⁶~376.50 × 10⁻⁶, 两个岩体稀土元素配分曲线都呈现右倾型(图 7a), 富集轻稀土元素, 轻重稀土元素分异较为明显, LREE/HREE 为 7.63~26.81, (La/Yb)_N = 8.32~25.93, 表现出轻微 Eu 负异常(δEu = 0.53~0.80), 卫境花岗岩相对查干德勒花岗岩略富集轻稀土元素。样品 Rb 含量为 78.9 × 10⁻⁶~265.6 × 10⁻⁶, Nb 含量为 4.8 × 10⁻⁶~21 × 10⁻⁶, Ta 含量较低, 为 0.8 × 10⁻⁶~2.2 × 10⁻⁶, Sr 含量为 143.4 × 10⁻⁶~600.5 × 10⁻⁶, Ba 含量为 130 × 10⁻⁶

~971 × 10⁻⁶, 在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 7b), 两个岩体都显示出 Rb、K 等大离子亲石元素相对富集以及 Ta、Nb 等高场强元素相对亏损等特征。

6 锆石 Hf 同位素

查干德勒含角闪石黑云母二长花岗岩锆石的 Hf 同位素分析结果见表 4。¹⁷⁶Yb/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 的值分别为 0.035 084~0.091 826 和 0.000 714~0.001 861(干扰校正后), 其¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282 080~0.282 297, 根据测定的¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 和 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值计算得到 εHf(t) = -18.65~-10.95, 平均为 -14.07, 对应的二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})为 2 470~1 989 Ma, 平均 2 184 Ma。

卫境黑云母二长花岗岩锆石的 Hf 同位素分析

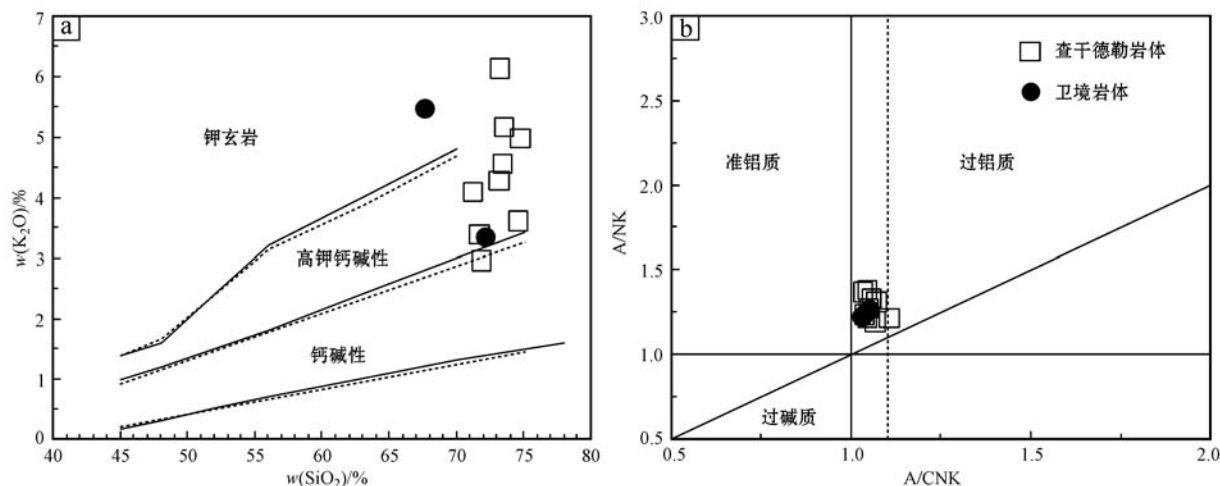


图 6 K₂O-SiO₂ 图解(a)和 A/NK-A/CNK 图解(b) (底图据 Ewart, 1982)

Fig. 6 K₂O-SiO₂ diagram (a) and A/NK-A/CNK diagram (b) (base diagram after Ewart, 1982)

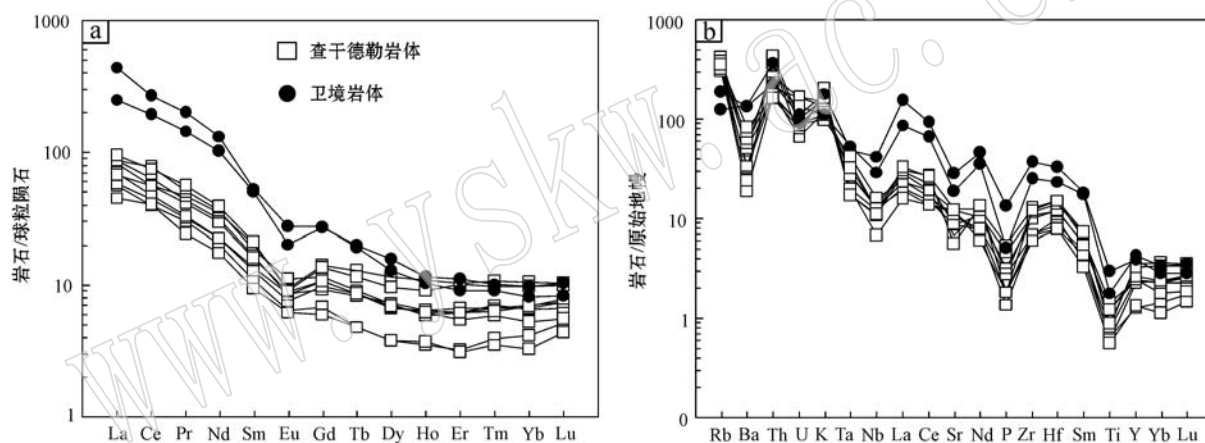


图 7 球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化的多元素配分图(b)(球粒陨石和原始地幔标准值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) for granites of the two plutons (The chondrite and primitive-mantle values used for normalization are from Sun and McDonough, 1989)

结果见表 5。 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的值分别为 0.057 815~0.166 767和0.001 249~0.003 811(干扰校正后),其 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ = 0.282 653~0.282 772,根据测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值计算得到 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ = +1.71~+5.44,平均为+3.74,对应的二阶段 Hf 模式年龄($t_{\text{DM}2}$)为 1 193~954 Ma,平均 1 064 Ma。

7 讨论

7.1 岩石类型

查干德勒花岗岩暗色矿物主要为黑云母,不含白云母,出现了角闪石,表现出 I 型花岗岩的岩相学

特征。卫境花岗岩暗色矿物主要为黑云母,与查干德勒花岗岩不同的是未发现有角闪石。两个岩体都表现出类似于 I 型花岗岩的地球化学特征,如 SiO₂ 含量较高,为 67.63%~74.75%,K₂O 含量为 2.94%~6.13%,A/CNK 均小于 1.1,为弱过铝质的高钾钙碱性系列,弱的铕负异常(δ_{Eu} = 0.53~0.80),Ga/Al 值较低,在 Nb、Y、Zr 和 K₂O+Na₂O 对 10 000 Ga/Al 图解(图 8)中也基本位于 I 型花岗岩区域。因此,额仁淖尔地区的两个早二叠世花岗岩体都以 I 型花岗岩为主。

7.2 源区特征及地质意义

卫境花岗岩的锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄($t_{\text{DM}2}$)为 1 193 Ma~954 Ma,明显小于查干德勒花岗

表 4 查干德勒花岗岩(NI4624-2.1)中锆石的 Hf 同位素组成
Table 4 Zircon Hf isotope data of sample NI4624-2.1 from Qagan Dele granite

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	276	0.035 084	0.000 714	0.282 188	0.000 026	0.282 18	-20.65	-14.73	1 489	2 225	-0.98
2	276	0.091 826	0.001 861	0.282 255	0.000 026	0.282 24	-18.30	-12.58	1 440	2 091	-0.94
3	276	0.066 646	0.001 321	0.282 263	0.000 033	0.282 26	-18.01	-12.19	1 407	2 067	-0.96
4	276	0.065 303	0.001 299	0.282 248	0.000 031	0.282 24	-18.53	-12.71	1 427	2 099	-0.96
5	276	0.058 030	0.001 082	0.282 177	0.000 031	0.282 17	-21.04	-15.19	1 518	2 254	-0.97
6	276	0.048 661	0.000 956	0.282 171	0.000 029	0.282 17	-21.24	-15.36	1 521	2 265	-0.97
7	276	0.044 686	0.000 884	0.282 212	0.000 026	0.282 21	-19.80	-13.91	1 462	2 174	-0.97
8	276	0.037 146	0.000 737	0.282 227	0.000 031	0.282 22	-19.29	-13.36	1 436	2 140	-0.98
9	276	0.061 900	0.001 220	0.282 248	0.000 031	0.282 24	-18.54	-12.70	1 425	2 099	-0.96
10	276	0.059 885	0.001 225	0.282 297	0.000 026	0.282 29	-16.78	-10.95	1 355	1 989	-0.96
11	276	0.079 595	0.001 580	0.282 161	0.000 031	0.282 15	-21.60	-15.83	1 561	2 294	-0.95
12	276	0.062 257	0.001 207	0.282 080	0.000 031	0.282 07	-24.49	-18.65	1 660	2 470	-0.96
13	276	0.056 756	0.001 137	0.282 196	0.000 030	0.282 19	-20.35	-14.51	1 493	2 212	-0.97
14	276	0.045 838	0.000 863	0.282 186	0.000 027	0.282 18	-20.71	-14.81	1 497	2 231	-0.97
15	276	0.047 885	0.000 975	0.282 273	0.000 029	0.282 27	-17.66	-11.78	1 381	2 041	-0.97
16	276	0.086 926	0.001 751	0.282 197	0.000 031	0.282 19	-20.33	-14.59	1 517	2 217	-0.95
17	276	0.042 777	0.000 872	0.282 210	0.000 028	0.282 21	-19.87	-13.97	1 464	2 178	-0.97
18	276	0.062 426	0.001 345	0.282 240	0.000 022	0.282 23	-18.81	-13.00	1 440	2 118	-0.96
19	276	0.043 921	0.000 894	0.282 205	0.000 027	0.282 20	-20.05	-14.15	1 472	2 190	-0.97
20	276	0.036 157	0.000 737	0.282 141	0.000 028	0.282 14	-22.33	-16.41	1 555	2 330	-0.98

$$\epsilon\text{Hf}(t) = \left\{ \frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s (e^{\lambda t} - 1)}{[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s (e^{\lambda t} - 1)] - 1} \right\} \times 10\,000, \quad t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \ln \left\{ 1 + \frac{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}]}{[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}]} \right\}, \quad t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \ln \left\{ 1 + \frac{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{s,t} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}]}{[(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM1}}]} \right\} + t, \quad (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772, \quad (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2, \quad (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25, \quad (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4 \text{ (Blichert-Toft and Albarede, 1997; Griffin et al., 2000); } s \text{ 代表样品, } t \text{ 为样品形成时间, } \lambda = 0.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1} \text{ (Söderlund et al., 2004), } (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c = 0.015.$$

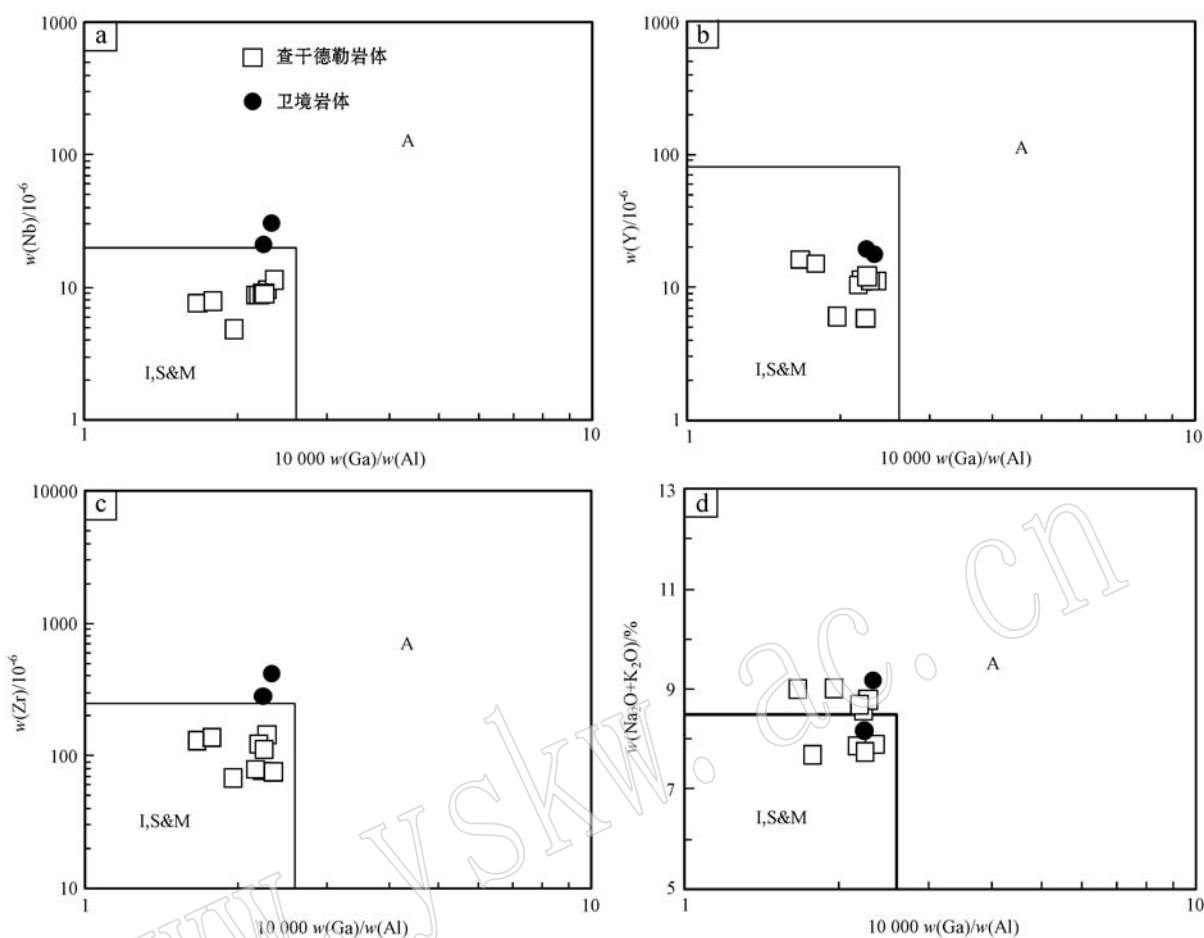


图 8 Nb、Y、Zr 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 对 $10\,000 \text{ Ga}/\text{Al}$ 图解(底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 8 Nb, Y, Zr and $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ versus $10\,000 \text{ Ga}/\text{Al}$ diagrams (base diagram after Whalen *et al.*, 1987)

岩(图 9b), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值在 $+1.71 \sim +5.44$ 之间。在锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值演化图(图 9a)中, 卫境花岗岩位于球粒陨石和亏损地幔之间的区域, 表明该岩体应该具有年轻的地壳物源特征。此外, 该岩体发育有基性岩包体(图 3b), 因此, Hf 同位素特征也有可能与地幔基性岩浆加入导致的岩浆混合有关。卫境花岗岩的锆石 Hf 同位素特征也与索伦缝合带以北已发表的石炭-二叠纪花岗岩的 Hf 同位素数据基本一致, 都具有正的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和相对年轻的 Hf 模式年龄 ($\leq 1.1 \text{ Ga}$) (图 9a, Tong *et al.*, 2015 及所引文献)。本研究和前人成果一致, 这些都反映了研究区深部存在年轻物源的可能, 显示了显生宙以来的地壳生长。

但是, 额仁淖尔地区查干德勒花岗岩的锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 为 $2\,470 \sim 1\,989 \text{ Ma}$, 明显老于该地区的其他二叠纪花岗岩, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 在 $-18.65 \sim -10.95$ 之间, 位于 2.0 Ga 地壳演化线附

近(图 9a)。这显示出深部源区古元古代或更老地壳物质的信息。本文捕获到了该区深部地壳古老物质的重要信息, 为浑善达克地块(徐备等, 2014)深部延伸到该区提供了重要的深部信息。

许多学者在研究区的西侧(HutagUul 地区, Yarmolyuk *et al.*, 2005)和东侧研究区(锡林浩特杂岩, 孙立新等, 2013)都报道了中新元古代纪变质侵入岩的存在, 而研究区也出露有前寒武纪艾勒格庙群的变质沉积岩系(最年轻的碎屑锆石年龄为 $1151 \pm 41 \text{ Ma}$, 即中元古代之后沉积, 徐备未发表资料)。以上资料说明这一地区可能存在更老(即古中元古代或太古宙)的基底, 与本文查干德勒花岗岩反映的深部信息是一致的。

目前, 对于中亚造山带中年轻地壳和古老陆块各自所占的比例, 或者说是对于陆壳生长量, 存在不同认识。Sengör 等(1993)认为古生代亚洲俯冲-增生物质的面积达到 $530 \times 10^6 \text{ km}^2$, 其中大约 50% 的

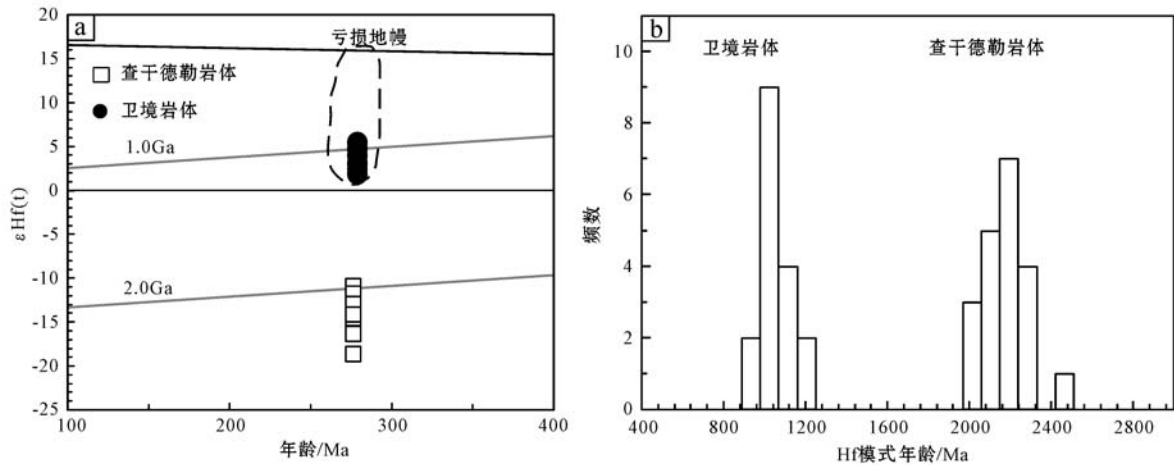


图 9 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 对侵入年龄(a)和锆石 Hf 二阶段模式年龄统计分布图(b)

Fig. 9 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ versus intrusive age (a) and distribution of zircon Hf model ages (b) diagrams
 a 中虚线区域为研究区及邻区晚古生代-早中生代花岗岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布范围, 数据来源于 Tong 等(2015)及所引文献
 data within dashed line are $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of Late Paleozoic granitoids (after Tong *et al.*, 2015 and references therein)

年轻物质与地幔有关; Jahn 等(2000a)通过对中亚造山带花岗岩 Nd 同位素的相关研究, 认为中亚造山大于 70% 的地壳为新生地壳; Kröner 等(2014)则质疑中亚造山带显生宙的新生地壳所占的比例被高估了, 古老物质再循环起到重要作用。

额仁淖尔地区同时代的两个花岗岩的锆石 Hf 同位素反映了完全不同的物源性质, 显示既有古老物质的存在及再循环(Kröner *et al.*, 2014), 也发育年轻物源, 显示新地壳的生长(Jahn, 2004)。这可能是中亚造山带古生代岩浆物源特征和深部组成复杂的表现。需要指出的是, 岩浆岩同位素填图已经被应用来示踪深部地壳组成(如 Wang *et al.*, 2009)。本文的研究说明, 在同一地区, 不同花岗岩体可以显示不同的物源特征, 揭示了深部物源组成的复杂。这就提醒我们, 在同位素填图过程中, 可能会因为某些岩浆岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值而忽略该区域存在古老物质的可能。年轻的幔源岩浆的侵入及对古老地壳熔融岩浆的混合, 也有可能導致出现年轻物源特征。而花岗岩体的古老物源特征一般则可以反映深部的古老物源的存在。这在今后的同位素填图中, 值得注意。

7.3 构造环境

额仁淖尔地区早二叠世花岗岩主体并未发育构造变形, 侵入至艾勒格庙群浅变质岩系中, 整体为近东西向分布, 与区域晚古生代花岗岩的分布基本一致(童英等, 2010)。仅在卫境花岗岩体南缘边部观察到后期因晚中生代伸展而形成的韧性剪切带(另文发表), 并被更晚的早白垩世花岗岩(聂风军等,

2009b)切割。因此, 这些花岗岩可能并未卷入到古亚洲洋古生代俯冲带中而发生强烈改造。

在花岗岩 Rb - Nb + Y 和 Nb - Y 构造环境判别图解(图 10, Pearce *et al.*, 1984)中, 查干德勒花岗岩落在同碰撞花岗岩-后碰撞花岗岩的过渡区域, 卫境花岗岩则落在后碰撞花岗岩区, 显示同碰撞-后碰撞的构造环境特点。

同时期的早二叠世以及晚二叠世岩浆岩在中亚造山带南缘和华北北缘广泛发育, 与古亚洲洋的消亡密切相关(童英等, 2010; 张拴宏等, 2010; Tong *et al.*, 2015)。索伦缝合带获得的斜长花岗岩和辉长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 288 ± 6 Ma 和 284 ± 4 Ma, 其被认为属 SSZ(Super Subduction Zone)型蛇绿岩的一部分(Jian *et al.*, 2010), 从而进一步表明古亚洲洋在该时期仍在俯冲; Tong 等(2015)对研究区以北南蒙古和内蒙地区的二叠纪(292~275 Ma)富碱侵入岩进行了系统总结, 认为这些碱性花岗岩与晚石炭世岛弧环境花岗岩完全不同, 形成于后碰撞伸展环境, 显示古亚洲洋的闭合可能结束于 285~275 Ma 之前。因此, 上述特征显示, 额仁淖尔地区的早二叠世花岗岩(276~279 Ma)可能形成于俯冲结束后同碰撞-后碰撞过渡的构造背景下。

8 结论

(1) 索伦缝合带以北额仁淖尔地区查干德勒含角闪石黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 276 ± 2 Ma,

表 5 卫境花岗岩(N14625-10.1)中锆石的 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotope data of sample N14625-10.1 from Weijing granite

点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$
1	279	0.065 028	0.001 484	0.282 712	0.000 026	0.282 70	-2.13	3.73	775	1 064	-0.96
2	279	0.064 659	0.001 433	0.282 696	0.000 022	0.282 69	-2.68	3.19	796	1 098	-0.96
3	279	0.106 592	0.002 398	0.282 761	0.000 029	0.282 75	-0.38	5.31	722	963	-0.93
4	279	0.102 624	0.002 241	0.282 742	0.000 025	0.282 73	-1.07	4.65	748	1 005	-0.93
5	279	0.104 992	0.002 427	0.282 738	0.000 028	0.282 73	-1.19	4.50	756	1 015	-0.93
6	279	0.104 238	0.002 348	0.282 690	0.000 031	0.282 68	-2.90	2.80	826	1 123	-0.93
7	279	0.096 193	0.002 083	0.282 719	0.000 028	0.282 71	-1.87	3.88	777	1 054	-0.94
8	279	0.084 049	0.001 904	0.282 715	0.000 031	0.282 70	-2.03	3.75	780	1 063	-0.94
9	279	0.058 903	0.001 369	0.282 691	0.000 027	0.282 68	-2.86	3.02	802	1 019	-0.96
10	279	0.097 541	0.002 126	0.282 737	0.000 029	0.282 73	-1.23	4.51	752	1 014	-0.94
11	279	0.076 329	0.001 679	0.282 721	0.000 025	0.282 71	-1.80	4.02	766	1 045	-0.95
12	279	0.057 815	0.001 249	0.282 653	0.000 023	0.282 65	-4.20	1.71	853	1 193	-0.96
13	279	0.065 562	0.001 366	0.282 662	0.000 026	0.282 66	-3.88	2.00	843	1 174	-0.96
14	279	0.127 930	0.002 561	0.282 750	0.000 030	0.282 74	-0.78	4.88	742	990	-0.92
15	279	0.101 193	0.002 030	0.282 718	0.000 029	0.282 71	-1.92	3.84	778	1 057	-0.94
16	279	0.166 767	0.003 811	0.282 772	0.000 034	0.282 75	0.01	5.44	735	954	-0.89
17	279	0.127 657	0.002 579	0.282 681	0.000 034	0.282 67	3.23	2.43	845	1 147	-0.92

$\epsilon\text{Hf}(t) = \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s(e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}(e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10\,000$; $t_{\text{DM1}} = 1/\lambda \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$, $t_{\text{DM2}} = 1/\lambda \ln \{1 + [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{s,t} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{s,t} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}]\} + t$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} = 0.282\,772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997; Griffin *et al.*, 2000); s 代表样品, t 为样品形成时间, $\lambda = 0.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Söderlund *et al.*, 2004), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c = 0.015$.

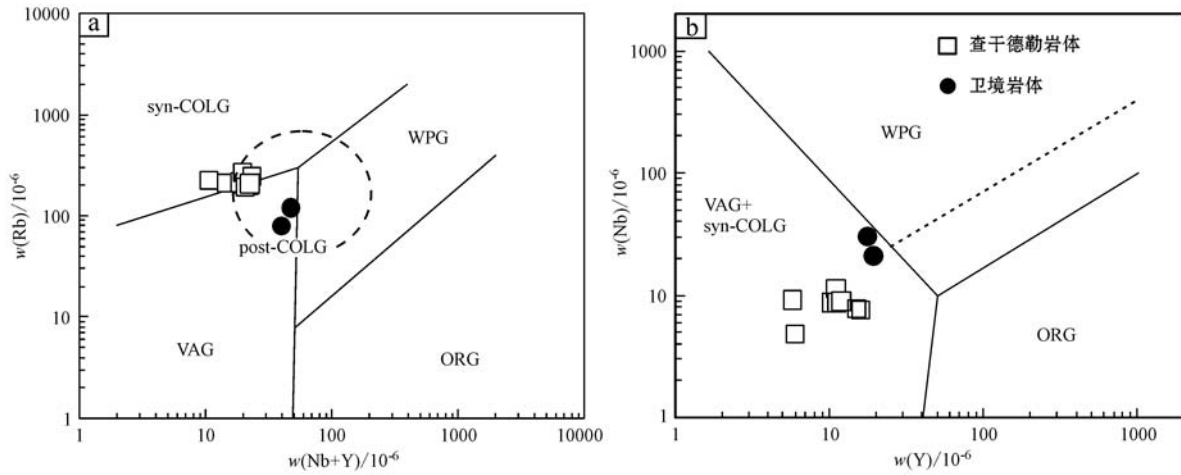


图 10 花岗岩 Rb - Nb + Y(a)和 Nb - Y(b)构造环境判别图解(Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 10 Rb versus Nb + Y(a) and Nb versus Y (b) tectonic discrimination diagrams (after Pearce *et al.*, 1984)
 syn-COLG—碰撞花岗岩; VAG—火山岛弧花岗岩; ORG—洋脊花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩; WPG—板内花岗岩
 syn-COLG—syn-collisional granite; VAG—volcanic arc granite; ORG—oceanic ridge granite; post-COLG—post-collisional granite;
 WPG—intraplate granite

卫境黑云母二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 279 ± 1 Ma, 均为早二叠世岩体, 属于弱过铝质的高钾钙碱性系列, 具有 I 型花岗岩的特征。

(2) 查干德勒岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-18.65 \sim -10.95$, 模式年龄 t_{DM2} 在 2470~1989 Ma 之间, 反映了深部可能存在古老地壳物质; 卫境岩体锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+1.71 \sim +5.44$, 模式年龄 t_{DM2} 在 1193~954 Ma 之间, 表现出年轻的源区特征, 反映了年轻地壳的生长。

(3) 额仁淖尔地区同时代的两个花岗岩的锆石 Hf 同位素反映了完全不同的物源性质, 说明古老物质的再循环和新地壳的生长可以在同一个地区发生, 提示在利用花岗岩物源示踪深部地壳信息时应谨慎。

致谢 成文过程中得到了张磊博士、杨奇荻博士和张建军博士的帮助, 锆石 Hf 同位素测试得到了吴才来研究员的大力支持, 在此表示真诚的感谢。

References

Badarch G, Cunningham W D and Windley B F. 2002. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(1): 87~110.
 Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry

of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1): 243~258.
 Chen J and Jahn B. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*, 284(1~2): 101~133.
 Chen B, Jahn B M and Tian W. 2009. Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction and collision-related magmas and forearc sediments[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 245~257.
 Chen B, Jahn B, Wilde S, *et al.* 2000. Two contrasting Paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 328(1): 157~182.
 DePaolo D J, Linn A M and Schubert G. 1991. The continental crustal age distribution: methods of determining mantle separation ages from Sm-Nd isotopic data and application to the Southwestern United States[J]. *Journal of Geophysical Research*, 96(B2): 2071~2088.
 Eizenhöfer P R, Zhao G, Zhang J, *et al.* 2014. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic and sedimentary rocks[J]. *Tectonics*, 33(4): 441~463.
 Ewart A. 1982. The mineralogy and petrology of Tertiary-recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range[A]. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*[C]. 25~95.
 Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon

- megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, *et al.* 2000. Genesis of positive(Nd, t) granitoids in the Da Hinggan Mts.-Mongolia orogenic belt and growth continental crust[J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing)*, 7(2): 441~456(in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, *et al.* 2003. Continental crustal growth and the supercontinental cycle from the positive $\epsilon(\text{Nd, t})$ value granites[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 203~209(in Chinese with English abstract).
- Hong D, Zhang J, Wang T, *et al.* 2004. Continental crustal growth and the supercontinental cycle: evidence from the Central Asian Orogenic Belt [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 799~813.
- Hu A, Jahn B, Zhang G, *et al.* 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks[J]. *Tectonophysics*, 328(1): 15~51.
- Jahn B. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 226(1): 73~100.
- Jahn B, Wu F and Chen B. 2000a. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic[J]. *Transactions Royal Society of Edinburgh. Earth Science*, 91(1~2): 181~193.
- Jahn B, Wu F and Chen B. 2000b. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic[J]. *Episodes*, 23: 82~92.
- Jian P, Liu D, Kröner A, *et al.* 2008. Time scale of an early to mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic Belt, Inner Mongolia of China: implications for continental growth [J]. *Lithos*, 101(3): 233~259.
- Jian P, Liu D, Kröner A, *et al.* 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 118(1): 169~190.
- Khain E V, Bibikova E V, Kröner A, *et al.* 2002. The most ancient ophiolites of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Duzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 199(3~4): 311~325.
- Khain E V, Bibikova E V, Salnikova E B, *et al.* 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Paleozoic: new geochronologic data and palaeotectonic reconstructions[J]. *Precambrian Research*, 122(1~4): 329~358.
- Kovalenko V I, Yarmolyuk V V, Kovach V P, *et al.* 2004. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian mobile belt: geological and isotopic evidence[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 605~627.
- Kröner A, Kovach V, Belousova E, *et al.* 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 25(1): 103~125.
- Li Shiqin. 1985. The super-large fluorite deposit formed by volcanism [J]. *Geology and Exploration*, 21(1): 30~31(in Chinese).
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, *et al.* 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *China Science Bulletin*, 55(15): 1535~1546.
- Ludwig K R. 2003. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Special Publication 4. California: Berkeley Geochronology Center, 25~32.
- Muñoz M, Fariás M, Charrier R, *et al.* 2013. Isotopic shifts in the Cenozoic Andean arc of central Chile: Records of an evolving basement throughout cordilleran arc mountain building[J]. *Geology*, 41(8): 931~934.
- Nie Fengjun, Xu Dongqing, Jiang Sihong, *et al.* 2009a. Zircon SHRIMP U-Pb dating on rhyolite samples from the Xilimiao Group occurring in the Su-Cha (Sumoqagan Obo) fluorite district, Inner Mongolia[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(4): 496~504(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Xu Dongqing, Jiang Sihong, *et al.* 2009b. Zircon SHRIMP U-Pb dating of K-feldspar granite samples from the Aobaotu granite stock in the Su-Cha (Sumoqagan Obo) fluorite district, Inner Mongolia[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 803~811(in Chinese with English abstract).
- Patchett P J and Samson S D. 2003. Ages and growth of the continental crust from radiogenic isotopes[J]. *Treatise on Geochemistry*, 3: 321~348.
- Pearce J A, Harris N B and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Sengör A, Natal'In B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Al-taid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 364: 299~307.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3): 311~324.
- Sun Lixin, Ren Bangfang, Zhao Fengqing, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotopic compositions of the Meso-proterozoic granitic gneiss in Xilinhot Block, Inner Mongolia[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(2/3): 327~340(in Chinese with English abstract).
- Sun 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.
- Tang K. 1990. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north margin of the Sino-Korean craton[J]. *Tectonics*, 9(2): 249~260.

- Tong Ying, Hong Dawei, Wang Tao, *et al.* 2010. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the border between Mongolia and China and their implication for tectonic and metallogenesis[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(3): 395~412(in Chinese with English abstract).
- Tong Y, Jahn B, Wang T, *et al.* 2015. Permian alkaline granites in the Erenhot-Hegenshan belt, northern Inner Mongolia, China: Model of generation, time of emplacement and regional tectonic significance[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 97(Part B): 320~336.
- Wang T, Jahn B, Kovach V P, *et al.* 2009. Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 110(1~4): 359~372.
- Wang T, Zheng Y D, Gehrels G E, *et al.* 2001. Geochronological evidence for existence of the south Mongolian microcontinent: a zircon U-Pb age of granitoid gneisses from the Yagan-OnchHayrhan metamorphic core complex on the Sino-Mongolian border[J]. *China Science Bulletin*, 46: 2 005~2 008.
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95 (4): 407~419.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, *et al.* 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31~47.
- Wu F, Jahn B, Wilde S, *et al.* 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China[J]. *Tectonophysics*, 328(1): 89~113.
- Xiao W, Huang B, Han C, *et al.* 2010. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens[J]. *Gondwana Research*, 18(2~3): 253~273.
- Xiao W, Kröner A and Windley B. 2009. Geodynamic evolution of Central Asia in the Paleozoic and Mesozoic[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1 185~1 188.
- Xiao W, Windley B F, Hao J, *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): 8-1~8-20.
- Xu B, Charvet J, Chen Y, *et al.* 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 342~1 364.
- 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 Dongqing, Nie Fengjun, Jiang Sihong, *et al.* 2008. Yanshanian peraluminous granite in Sumochagan area, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 89~100(in Chinese with English abstract).
- Yarmolyuk V V, Kovalenko V I, Sal'nikova E B, *et al.* 2005. U-Pb age of syn- and post-metamorphic granitoids of South Mongolia: Evidence for the presence of Grenvillides in the Central Asian Foldbelt[J]. *Doklady Earth Sciences*, 404: 986~990.
- Zhang Shuanghong, Zhao Yue, Liu Jianmin, *et al.* 2010. Geochronology, Geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824~842(in Chinese with English abstract).
- Zhang S, Zhao Y, Song B, *et al.* 2009. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 121(1~2): 181~200.
- Zhu D, Zhao Z, Niu Y, *et al.* 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1): 241~255.

附中文参考文献

- 洪大卫, 王式浣, 谢锡林, 等. 2000. 兴蒙造山带正 $\epsilon(\text{Nd}, t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. *地学前缘*, 7(2): 441~456.
- 洪大卫, 王式浣, 谢锡林, 等. 2003. 从中亚正 $\epsilon(\text{Nd})$ 值花岗岩看超大陆演化和大陆地壳生长的关系[J]. *地质学报*, 77(2): 203~209.
- 李士勤. 1985. 火山作用形成的特大型沉积萤石矿床[J]. *地质与勘探*, 21(1): 30~31.
- 聂凤军, 许东青, 江思宏, 等. 2009a. 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿区流纹岩锆石 SHRIMP 定年及地质意义[J]. *地质学报*, 83(4): 496~504.
- 聂凤军, 许东青, 江思宏, 等. 2009b. 苏-查萤石矿区钾长花岗岩锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义[J]. *地球学报*, 30(6): 803~811.
- 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 2013. 内蒙古锡林浩特地块中元古代花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. *地质通报*, 32(2/3): 327~340.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. *地球学报*, 31(3): 395~412.
- 徐备, 赵盼, 鲍庆中, 等. 2014. 兴蒙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.
- 许东青, 聂凤军, 江思宏, 等. 2008. 内蒙古苏莫查干地区燕山期过铝质花岗岩研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(2): 89~100.
- 张拴宏, 赵越, 刘健民, 等. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 824~842.