

内蒙古乌拉山大桦背岩体成因:地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素制约*

王梁^{1,2} 王根厚^{1**} 雷时斌³ 常春郊² 侯万荣⁴ 贾丽琼¹ 赵广明⁴ 陈海舰⁴

WANG Liang^{1,2}, WANG GenHou^{1**}, LEI ShiBin³, CHANG ChunJiao², HOU WanRong⁴, JIA LiQiong¹, ZHAO GuangMing⁴ and CHEN HaiJian⁴

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

2. 武警黄金地质研究所,廊坊 065000

3. 武警黄金指挥部,北京 100055

4. 武警黄金第二支队,呼和浩特 010010

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Gold Geology Institute of Chinese Armed Police Force, Langfang 065000, China

3. Headquarters of Gold Exploration Branch of Chinese Armed Police Force, Beijing 100055, China

4. No. 2 Team of Gold Exploration Branch of Chinese Armed Police Force, Hohhot 010010, China

2014-09-20 收稿, 2015-02-11 改回.

Wang L, Wang GH, Lei SB, Chang CJ, Hou WR, Jia LQ, Zhao GM and Chen HJ. 2015. Petrogenesis of Dahuabei pluton from Wulashan, Inner Mongolia: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Hf isotopes. Acta Petrologica Sinica, 31(7):1977-1994

Abstract The Dahuabei pluton is comprised of potassium-feldspar granite and porphyritic biotite monzogranite. Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating yields a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean age of 328.3 ± 1.5 Ma, which indicates the Dahuabei pluton was the production of the Early Carboniferous magmatism in the northern margin of the North China Craton. The granites are characterized by high silicon and alkali contents ($\text{SiO}_2 = 70.59\% \sim 76.04\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.41\% \sim 8.99\%$) and low zircon saturation temperature ($620 \sim 810^\circ\text{C}$). They belong to metaluminous and weak peraluminous series ($A/\text{CNK} = 0.98 \sim 1.11$) and can be attributed to the genetic type of highly fractionated high-K calc-alkaline granites. Besides high Th/Ta ratios ($10.30 \sim 21.60$) and low Ce/Pb ratios ($0.90 \sim 3.13$), the rocks are enriched in LILEs (K, Rb, Th, U) and LREEs and depleted in HFSEs (Nb, Ta, Ti, P) and HREEs, which is shared by many arc magmatic rocks. The granites have homogeneous Sr-Nd isotopic compositions ($(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70480 \sim 0.70627$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.8 \sim -8.2$) and highly variable zircon Hf isotopic compositions ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -8.31 \sim -2.64$), indicating the magma mixing genesis. Based on regional tectonic evolution, it is inferred that the formation of the Dahuabei pluton is probably related to southward subduction of the Paleo-Asian Ocean beneath the North China Craton. It was produced by a hybridization process of lower crust-derived magma and subcontinental lithospheric mantle-derived magma metasomatized by subduction fluid. While ascending, the hybridized magma suffered pronounced crystal fractionation and minor crustal assimilation.

Key words Dahuabei pluton; Sr-Nd-Hf isotopes; Tectonic evolution; The northern margin of the North China Craton

摘要 大桦背岩体由钾长花岗岩和似斑状黑云母二长花岗岩组成。锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年获得其侵位年龄为 328.3 ± 1.5 Ma, 表明该岩体属早石炭世岩浆活动产物。大桦背岩体总体上富硅 ($\text{SiO}_2 = 70.59\% \sim 76.04\%$)、富碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8.41\% \sim 8.99\%$)、准铝质-弱过铝质 ($A/\text{CNK} = 0.98 \sim 1.11$), 形成温度较低 ($620 \sim 810^\circ\text{C}$), 属于高分异高钾钙碱性 I 型花岗岩。岩石富集大离子亲石元素 K、Rb、Th、U 和 LREE, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti、P 和 HREE, 具有较高的 Th/Ta 比值 ($10.30 \sim 21.60$) 及较低的 Ce/Pb 比值 ($0.90 \sim 3.13$), 显示大陆弧岩浆岩地球化学特征。除暗色微粒包体广泛发育外, 岩体具有均一 Sr-

* 本文受中国地质调查局项目 (1212011120725, 12120113072200) 和国家自然科学基金项目 (41090371) 联合资助。

第一作者简介: 王梁, 男, 1987 年生, 博士生, 构造地质学专业, E-mail: liang-wang@sohu.com

** 通讯作者: 王根厚, 男, 1963 年生, 教授, 主要从事构造地质学研究, E-mail: wgh@cugb.edu.cn

Nd 同位素组成 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.704799 ~ 0.706272, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.8 \sim -8.2$) 和较大变化范围的锆石 Hf 同位素 ($\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -8.3 \sim -2.6$), 暗示岩体为岩浆混合成因。结合区域地质背景, 认为大桦背岩体的形成与古亚洲洋向华北克拉通之下的俯冲密切相关, 是俯冲板片流体交代诱发熔融的岩石圈地幔岩浆与下地壳岩浆相混合的产物。混合岩浆在上升侵位过程中又发生了显著的分异结晶作用和较弱的地壳物质的同化混染。

关键词 大桦背岩体; Sr-Nd-Hf 同位素; 构造演化; 华北北缘

中图法分类号 P588.121; P597.3

中亚造山带夹持于华北克拉通与西伯利亚板块之间, 是世界上显生宙增生造山及地壳生长最显著的地区之一, 通常认为该造山带是由西伯利亚板块与华北克拉通之间的岛弧与微陆块拼贴而成, 并同时导致了古亚洲洋闭合以及欧亚大陆的碰撞缝合 (Sengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000)。由于其特殊的拼合方式致使蛇绿岩时间跨度大, 且断续分布, 人们对于古亚洲洋的最终闭合时间和地点一直存在诸多争论。尽管通过多年来研究, 绝大多数学者都支持索伦缝合带代表了最终碰撞拼合的位置, 但对于最终缝合时间仍然存在晚泥盆-早石炭世 (邵济安, 1991; Tang, 1990; 洪大卫等, 1994; Xu and Chen, 1997; 施光海等, 2004; 罗红玲等, 2009) 和晚二叠-早三叠世 (王荃等, 1991; Windley, 1993; Sengör *et al.*, 1993; 陈斌等, 2001; Xiao *et al.*, 2003; Shang, 2004) 两种不同观点。

地处古老克拉通与显生宙中亚造山带过渡区域的华北北缘, 古生代时期古亚洲洋的裂解-扩展-消亡和汇聚大陆边缘的俯冲碰撞伸展构成了板块构造体制下大陆演化的基本图景, 并形成了一系列携带这些因果演变连续过程印记的岩浆岩记录 (张晓晖和翟明国, 2010), 对其开展深入的年代学及地球化学研究, 不但可以为中亚造山带的构造演化提供时间上的约束, 还可以获取造山作用过程中深部岩浆演化过程及壳幔相互作用信息, 因此成为解决以上争议问题的理想研究对象。近年来, 对华北克拉通北缘前寒武纪结晶基底中晚古生代-早中生代中酸性岩浆活动的研究使人们更倾向认为, 华北北缘在晚古生代期间为安第斯型活动大陆边缘, 在晚二叠世古亚洲洋封闭后, 从早三叠世开始进入到后碰撞构造松弛阶段 (Zhang *et al.*, 2007a, 2009a; 李锦轶等, 2007; 王芳等, 2009)。然而, 以往这些研究多限于冀北的崇礼-赤城-丰宁-隆化-承德地区, 对于华北北缘中段西部地区花岗岩研究仍然较为薄弱, 关于这些早石炭-晚二叠岩体形成构造体制仍然存在着俯冲和后碰撞两种不同的认识 (罗红玲等, 2009; 张青伟等, 2011), 直接制约着对古亚洲洋在本区闭合时间的准确厘定。因此, 为了区域上的比对印证, 本文拟通过对乌拉山大桦背岩体进行锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学、Sr-Nd-Hf 同位素研究, 在探讨其区域构造演化意义的同时, 进一步限定其成因类型、源区特征、成因机制及所蕴含的深部动力学过程。

1 区域地质概况及岩体岩相学特征

研究区位于内蒙古包头西郊乌拉山地区东西向狭长山

带之内。大地构造位置属于华北克拉通北缘中段, 内蒙古隆起西部, 南以包头-呼和浩特断裂带为界与鄂尔多斯拗陷带相依, 北以临河-集宁断裂带与兴蒙造山带相邻 (图 1)。

区内出露地层主要为早古元古代乌拉山群, 呈近东西向带状展布, 是华北克拉通北缘孔兹岩带的重要组成部分之一, 为一套变质相达角闪岩相-麻粒岩相的深变质岩系。按照变质岩石组合不同, 自下而上可分为两个岩石单元。下部主要是黑云角闪质片麻岩, 岩石类型包括含石英辉石斜长角闪岩、含石英钾长/二长角闪岩、斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩、黑云角闪斜长片麻岩、黑云角闪二长片麻岩、黑云钾长/二长片麻岩夹辉石磁铁矿石英岩等; 而上部岩石单元总体与孔兹岩系相当, 主要为石榴黑云二长/斜长片麻岩、夕线石榴堇青黑云二长/斜长片麻岩、(石墨)大理岩、长石石英岩、黑云变粒岩等 (李树勋等, 1994)。

区内岩浆作用强烈, 从元古宙到燕山期发育多期次岩浆活动。其中, 元古宙岩浆活动主要表现为位于大桦背西侧, 呈岩枝状向西延伸的闪长质侵入体, 该岩体由于后期韧性剪切作用影响, 发生定向拉长, 呈现出片麻岩外貌。海西期岩浆活动以本文研究对象大桦背岩体为代表。印支期岩浆活动则主要表现为以不规则岩株状产出的西沙德盖及沙德盖钾长花岗岩, 其形成时代为 ~220Ma, 地球化学特征显示出后碰撞花岗岩的特点 (侯万荣等, 2012)。岩脉在本区广泛发育, 尤以花岗伟晶岩脉为甚。伟晶岩脉宽数十厘米到数米, 主体为近东西向展布, 脉长多在数十米左右, 最长者可达 2km 以上, 形成时间从元古宙延续至燕山期。此外, 区内还存在北东-东西和南北向两组吕梁期辉绿玢岩脉, 宽几米到数十米, 长数千米。

大桦背岩体平面上呈近椭圆形, 出露面积约为 180km², 以岩基的形式侵位于乌拉山群之中。岩体与围岩接触界线多为不规则的犬牙交错, 且在西侧接触带常派生出许多岩枝顺层贯入围岩之中, 呈东西向展布。岩体边缘及内部均未发现定向组构, 表明大桦背岩体属于被动就位。由于整个岩体剥蚀程度较浅, 因此在岩体边部常见到棱角状产出的乌拉山群围岩捕虏体。除了捕虏体外, 岩体中还发育有大量纺锤状-椭球状的闪长质暗色微粒包体。根据岩石矿物组合及结构构造特征不同, 可将大桦背岩体划分为边缘相及中心相两个岩相带, 两者之间呈渐变过渡关系。其中, 边缘相由中细粒具花岗结构的钾长花岗岩构成 (图 2a, b), 而中心相为粒度略大的似斑状黑云母二长花岗岩 (图 2c, d), 详细的岩相学特征如下。

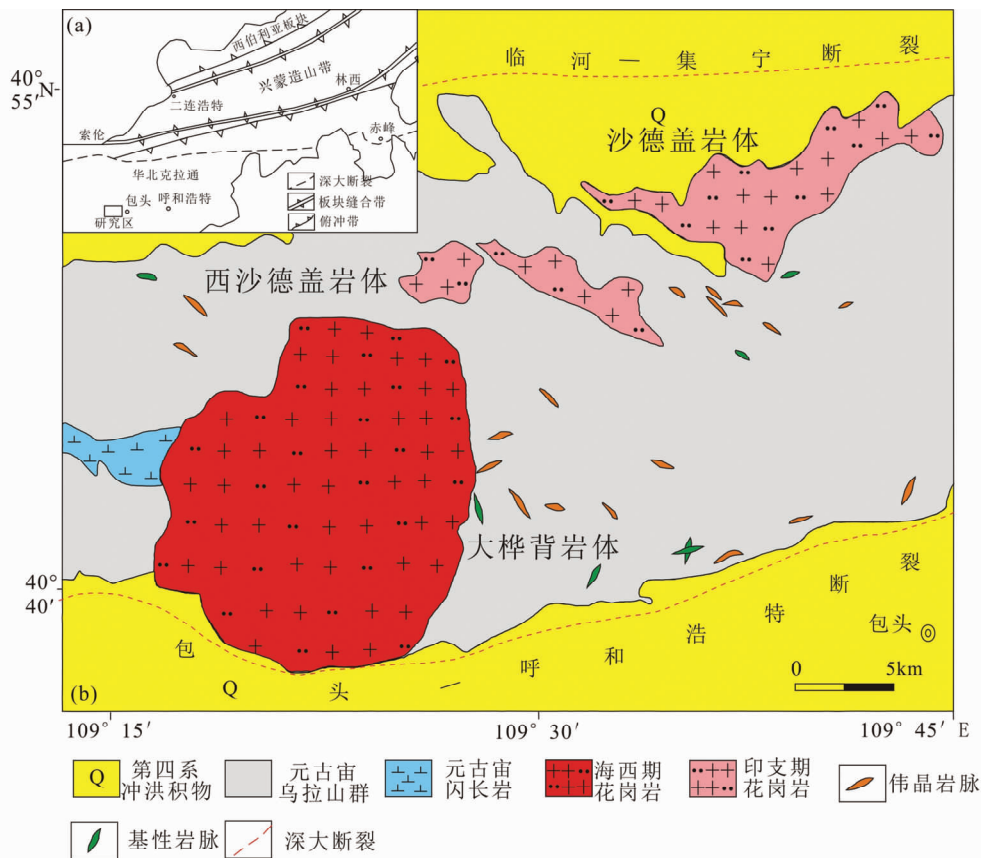


图 1 内蒙古乌拉山地区地质简图

Fig.1 Geological sketch map of Wulashan region in Inner Mongolia

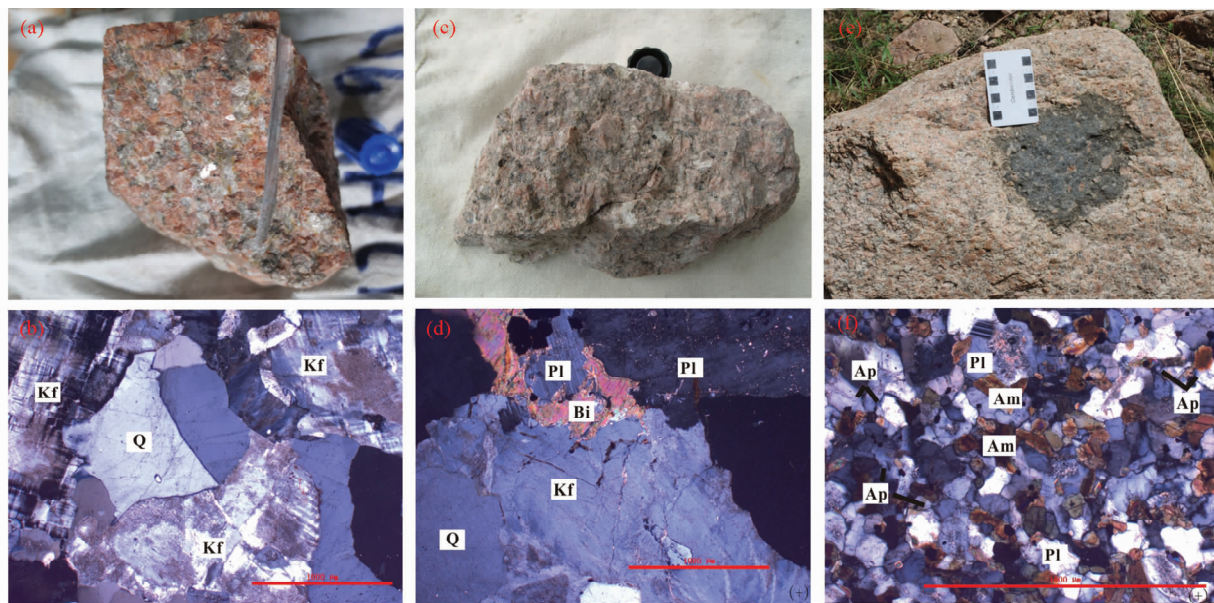


图 2 大桦背岩体照片

Fig.2 Photos of Dahuabei pluton

边缘相钾长花岗岩呈浅肉红色，中细粒结构，块状构造，主要组成矿物为钾长石、斜长石、石英和黑云母。钾长石多

为自形-半自形板状，粒度以 2 ~ 3.5mm 的中粒为主，0.2 ~ 2mm 的细粒次之，发育出溶条纹及卡式双晶和格子双晶，有

轻微高岭土化,部分较大的晶粒内嵌布板条状斜长石,总体含量约为35%左右。斜长石多为半自形板条状,粒度变化于0.05~3mm之间,以2~3mm的中粒为主,聚片双晶发育,隐约可见环带结构,部分颗粒被钾长石呈蠕虫状、补片状交代,含量约在25%左右。石英为他形粒状,粒度多在0.04~3mm之间,呈单晶或集合体分布于长石之间,具轻微的波状、带状消光,含量约为30%。黑云母呈叶片状零星分布,大小为0.1~1.2mm,局部可见绿泥石化、钠长石化,多色性明显,含量在3%左右。副矿物主要为磷灰石、榍石、锆石以及不透明的钛铁氧化物。

中心相似斑状黑云母二长花岗岩呈浅灰白色-浅肉红色,似斑状结构,块状构造。斑晶主要由钾长石及斜长石组成,约占整个岩石的40%。基质具显微花岗结构,粒度在0.05~2mm之间,主要由钾长石、斜长石、石英、黑云母构成。钾长石呈自形-半自形板状,作为斑晶粒度集中在2~5mm之间,而在基质中粒度多在0.5~2mm之间,在晶体内部多见格子双晶及显微条纹构造,部分晶粒内还嵌布有板条状斜长石,总体含量在35%左右。斜长石多呈半自形板状,斑晶中大小以2~4mm的中粒为主,基质中多集中在0.1~2mm之间,晶粒内环带结构发育,多被钾长石蠕虫状、补片状交代,含量在35%左右。石英呈他形粒状,粒度为0.04~3.2mm不等,呈单晶或集合体分布于长石间,具轻微波状、带状消光,含量约为20%。黑云母呈鳞片状,零星分布,粒度为0.05~2mm,含量在5%左右。副矿物主要为锆石、磷灰石、榍石、褐帘石以及不透明的钛铁氧化物。

2 测试方法

锆石的挑选工作由廊坊河北省区域地质矿产调查研究所承担。采用常规方法将岩石样品粉碎至300 μm 左右,经淘洗、重选富集,再经磁选和密度分选后,在双目镜下进一步挑选出晶型完好、透明度和色泽度较好的锆石颗粒。进行锆石U-Pb定年的样品用环氧树脂粘贴于样品靶上,进行打磨和抛光,使锆石露出新鲜截面。对锆石靶镀碳并进行阴极发光(CL)照相,在光学显微镜下对靶上锆石的微裂隙和包裹体发育情况进行观察,经透射光和反射光显微照相,据此选择并标记晶体特征良好的典型岩浆锆石进行U-Pb定年和Hf同位素分析。

LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年分析在中国地质科学院矿产资源研究所LA-MC-ICP-MS实验室完成。所用仪器为Finnigan Neptune型MC-ICP-MS及与之配套的New wave UP213激光剥蚀系统。所用斑束直径为25 μm ,频率为10Hz,能量密度约为2.5J/cm²,以He为载气。信号较小的²⁰⁷Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁴Pb(+²⁰⁴Hg), ²⁰²Hg用离子计数器(multi-ion-counters)接收,²⁰⁸Pb, ²³²Th, ²³⁸U信号用法拉第杯接收。测试过程中每测定5~7个样品前后重复测定两个锆石GJ1对样品进行校正,并测量一个锆石Plesovice,观察仪器的状态以

保证测试精确度。数据处理采用ICP MS Data Cal程序(Liu et al., 2010),测量过程中绝大多数分析点²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb > 1000,未进行普通铅校正,²⁰⁴Pb由离子计数器检测,对²⁰⁴Pb含量异常高的分析点在计算时剔除,锆石年龄谱和图用Isoplot 3.0程序获得。详细实验分析过程参见侯可军等(2009)。

锆石Hf同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室Neptune多接收等离子质谱和New wave UP213紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行,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 μm ,测定时使用锆石国际标样GJ1和Plesovice作为参考物质,分析点接近U-Pb定年分析点位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。

全岩样品的主量及稀土微量元素测试工作在核工业北京地质研究院完成。将新鲜的岩石样品粉碎至200目以下的粉末。主量元素分析采用碱熔法在飞利浦PW2404 X射线荧光光谱仪上进行,测试精度高于1%。稀土及微量元素在Finnigan MAT制造的HR-ICP-MS上采用在线内标(Rh)法进行测量,测试精度在5%~10%以内。

Rb-Sr和Sm-Nd同位素分析在天津地质矿产研究所TRITON热电离质谱仪(08-100016sb)上完成。全流程空白本底稳定在Rb = 5.6 × 10⁻¹⁰g, Sr = 3.8 × 10⁻¹⁰g, Sm = 3.0 × 10⁻¹¹g, Nd = 5.4 × 10⁻¹¹g。Sr的质谱标准样NBS987 Sr的结果为⁸⁷Sr/⁸⁶Sr = 0.710253 ± 6; J. M. C Nd质谱标准样的结果为¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.511132 ± 5。

锆石原位微量元素分析在国家地质实验测试中心Thermo Element II等离子质谱仪上完成。所采用激光剥蚀系统为New Wave UP-213。激光剥蚀孔径为40 μm ,激光脉冲为10Hz,能量为90mJ,详细的分析方法和流程见胡明月等(2008)。数据处理过程中选择Ca作为内标元素,国际标准玻璃NIST610用于外标校正,分析精度优于10%。

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb年代学

本次主要针对采自大棒背岩体中心相的似斑状黑云母二长花岗岩样品进行了锆石U-Pb年代学研究。岩石中锆石多呈长柱状晶型,晶棱清晰,淡棕-棕黄色,较为透明,金刚光泽,长径多在100~150 μm ,长宽比集中在2:1~3:1。CL图像显示清晰的岩浆振荡环带。锆石中Th/U比值在0.55~2.12之间,Th和U之间正相关性较好(表1)。所有锆石的 ΣREE 含量较高(表2),重稀土富集,在稀土元素配分模式图上(图3),均表现出向左倾斜的陡倾曲线,并有明显的Ce正异常,Pr负异常和Eu的弱负异常。以上特征均与典型的岩浆锆石特征一致(Hoskin and Ireland, 2000)。

对26个锆石颗粒的26个测点进行了定年,其中6个测

表 1 大桦背岩体锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄分析结果

Table 1 Results of zircon U-Pb LA-MC-ICP-MS age of Dahuabei pluton

测点号	含量 ($\times 10^{-6}$)				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb	T	U	Th/U	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Ratio	1 σ	Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ	Age (Ma)	1 σ
11HB17-1	4352	1997	942	2.12	0.0704	0.0009	0.4922	0.0074	0.0506	0.0004	942.6	27.0	406.4	5.0	318.1	2.2
11HB17-2	1579	915	440	2.08	0.0532	0.0008	0.3814	0.0117	0.0520	0.0012	344.5	35.2	328.1	8.6	326.6	7.6
11HB17-3	2663	1860	1061	1.75	0.0530	0.0002	0.3842	0.0032	0.0525	0.0004	331.5	9.3	330.1	2.3	329.9	2.5
11HB17-4	2241	1572	789	1.99	0.0534	0.0002	0.3836	0.0027	0.0520	0.0003	346.4	7.4	329.7	2.0	327.0	1.9
11HB17-5	3690	2760	1393	1.98	0.0538	0.0003	0.3836	0.0034	0.0517	0.0004	361.2	11.1	329.7	2.5	324.8	2.4
11HB17-6	2065	1442	1149	1.26	0.0539	0.0003	0.3872	0.0054	0.0520	0.0006	368.6	11.1	332.3	4.0	326.7	3.8
11HB17-7	1153	1562	834	1.87	0.0553	0.0007	0.3933	0.0111	0.0516	0.0015	433.4	29.6	336.8	8.1	324.3	9.2
11HB17-8	652	562	501	1.12	0.0535	0.0003	0.3879	0.0039	0.0526	0.0005	346.4	11.1	332.9	2.9	330.6	2.9
11HB17-9	417	1104	569	1.94	0.0549	0.0003	0.3903	0.0045	0.0516	0.0005	405.6	11.1	334.6	3.3	324.3	3.3
11HB17-10	435	598	712	0.84	0.0530	0.0012	0.3789	0.0098	0.0519	0.0014	327.8	54.6	326.2	7.2	326.0	8.3
11HB17-11	78	473	642	0.74	0.0541	0.0020	0.3873	0.0153	0.0520	0.0019	376.0	76.8	332.4	11.2	326.7	11.5
11HB17-12	90	289	444	0.65	0.0537	0.0015	0.3931	0.0172	0.0530	0.0008	366.7	60.2	336.6	12.5	333.1	5.1
11HB17-13	90	387	366	1.06	0.0564	0.0007	0.4033	0.0064	0.0519	0.0008	477.8	27.8	344.1	4.7	326.0	4.9
11HB17-14	135	306	316	0.97	0.0554	0.0004	0.4433	0.0046	0.0580	0.0005	427.8	14.8	372.6	3.2	363.7	3.2
11HB17-15	87	226	227	1.00	0.0544	0.0004	0.4378	0.0045	0.0584	0.0005	387.1	47.2	368.7	3.2	366.0	3.0
11HB17-16	159	409	435	0.94	0.0547	0.0003	0.4530	0.0046	0.0600	0.0005	466.7	13.0	379.4	3.2	375.5	2.9
11HB17-17	30	191	264	0.72	0.0535	0.0010	0.3896	0.0174	0.0528	0.0017	350.1	42.6	334.1	12.7	331.5	10.4
11HB17-18	107	151	240	0.63	0.0551	0.0003	0.4588	0.0058	0.0602	0.0006	416.7	13.0	383.4	4.0	377.1	3.7
11HB17-19	39	307	348	0.88	0.0561	0.0008	0.4052	0.0245	0.0525	0.0039	453.8	33.3	345.4	17.7	329.7	24.1
11HB17-20	171	259	466	0.55	0.0582	0.0003	0.4579	0.0075	0.0570	0.0008	600.0	11.1	382.8	5.3	357.5	4.9
11HB17-21	145	179	379	0.47	0.0531	0.0004	0.3834	0.0068	0.0524	0.0008	331.5	13.9	329.5	5.0	329.2	5.1
11HB17-22	122	245	326	0.75	0.0546	0.0006	0.3934	0.0066	0.0524	0.0011	394.5	24.1	336.8	4.8	329.0	6.6
11HB17-23	127	233	364	0.64	0.0559	0.0007	0.4003	0.0070	0.0519	0.0005	455.6	27.8	341.9	5.0	326.2	2.9
11HB17-24	269	522	927	0.56	0.0554	0.0003	0.3951	0.0038	0.0517	0.0005	427.8	13.0	338.1	2.8	325.1	3.0
11HB17-25	180	381	524	0.73	0.0525	0.0002	0.3832	0.0026	0.0529	0.0003	309.3	9.3	329.4	1.9	332.4	1.9
11HB17-26	322	662	1150	0.58	0.0544	0.0002	0.3943	0.0036	0.0525	0.0004	387.1	4.6	337.5	2.6	330.1	2.6

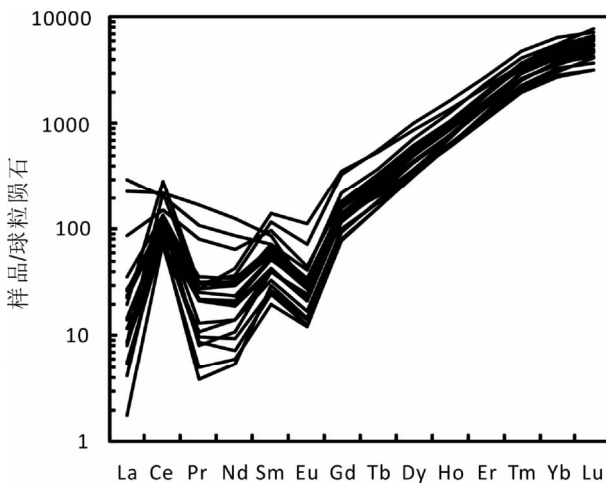


图 3 大桦背岩体中锆星球粒陨石标准化稀土元素配分图(球粒陨石值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE distribution patterns for zircons from Dahuabei pluton (chondrite values are from Sun and McDonough, 1989)

点(点 17-1, 点 17-14, 点 17-15, 点 17-16, 点 17-18, 点 17-20)明显偏离谐和一致曲线或与整体年龄不谐和, 剔除后的其余测点在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上均位于谐和线上或谐和线附近组成密集的一簇(图 4), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 324.3 ~ 333.1 Ma (表 1), 加权平均年龄为 328.3 ± 1.5 Ma (2σ , MSWD = 0.72), 可代表该岩体的形成年龄, 说明其为华北北缘早石炭世晚期岩浆活动的产物。

3.2 主量元素

大桦背岩体主量元素分析结果见表 3。岩体的 SiO_2 含量较高, 变化于 70.59% ~ 76.04% 之间, 平均为 73.23%, 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 介于 8.41% ~ 8.99% 之间, 平均为 8.79%, 总体表现出富硅富碱的特征。在图 5 上, 投点落于亚碱性系列岩石中的花岗岩范围内, 与镜下鉴定结果一致。样品相对富钾低钠, K_2O 含量为 4.49% ~ 5%, 平均为 4.76%, Na_2O 含量为 3.67% ~ 4.29%, 平均为 4.03%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 分布在 1.08 ~ 1.34 之间, 平均为 1.19, 属于钾质系列岩石。在 SiO_2 - K_2O 中, 所有投影点也均落于高钾钙碱性系列岩石之中(图

表 3 大桦背岩体主量 (wt%)、稀土及微量元素分析结果 ($\times 10^{-6}$)Table 3 Results of major (wt%), rare earth and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of Dahuabei intrusion

样品号	11HB13	11HB16	11HB17	11HB18	11HB19	11HB20	12HB88	12HB89	12HB90	12HB91	11HB14
岩性	黑云母二长花岗岩(中心相)						钾长花岗岩(边缘相)				
SiO ₂	75.33	70.59	73.44	72.01	72.45	74.18	73.48	72.53	72.26	73.20	76.04
TiO ₂	0.21	0.28	0.20	0.22	0.20	0.12	0.22	0.24	0.19	0.20	0.17
Al ₂ O ₃	12.86	14.64	13.33	14.23	14.11	13.81	13.83	14.40	14.22	13.91	12.98
FeO ^T	1.65	2.93	3.69	2.22	3.27	1.21	1.89	1.92	1.68	1.88	0.95
MnO	0.03	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.02
MgO	0.32	0.61	0.40	0.51	0.40	0.25	0.44	0.46	0.38	0.37	0.10
CaO	0.65	1.50	0.98	1.45	1.11	1.03	0.65	0.84	1.38	0.94	0.43
Na ₂ O	3.67	4.25	3.74	4.19	4.28	4.15	3.92	4.29	4.01	3.92	3.90
K ₂ O	4.90	4.74	5	4.57	4.61	4.76	4.49	4.66	4.79	4.86	4.96
P ₂ O ₅	0.05	0.3	0.07	0.09	0.08	0.04	0.08	0.09	0.07	0.08	0.03
LOI	0.47	0.83	0.17	0.83	0.29	0.52	1.17	0.75	1.16	0.81	0.51
Total	100.13	100.55	100.05	100.36	100.84	100.10	100.21	100.21	100.18	100.20	100.08
ALK	8.57	8.99	8.74	8.76	8.89	8.91	8.41	8.95	8.80	8.78	8.86
K/Na	1.34	1.12	1.34	1.09	1.08	1.15	1.15	1.09	1.19	1.24	1.27
A/NK	1.13	1.21	1.15	1.20	1.17	1.15	1.22	1.19	1.21	1.19	1.10
A/CNK	1.03	0.99	1.00	0.98	1.00	1.00	1.11	1.06	0.99	1.04	1.03
FeO ^T /MgO	5.22	4.78	9.19	4.32	8.19	4.81	4.35	4.22	4.46	5.11	9.99
La	46.8	85	46.7	49.2	42.2	21.6	55.3	56.4	51.7	46.1	28.9
Ce	82.1	124	73.9	75.4	68	35.8	89.4	92.2	83.3	72.9	58.2
Pr	8.54	12	7.12	7.55	6.6	3.46	9.09	9.45	8.34	7.67	5.39
Nd	27.6	36.4	22.5	24.1	20.3	11.2	28.4	29.8	25.5	24.5	16.5
Sm	5.21	4.76	3.38	3.67	3.14	1.71	4.02	4.34	3.45	3.65	3.15
Eu	0.556	1.010	0.691	0.833	0.729	0.528	0.772	0.885	0.827	0.722	0.325
Gd	4.23	4.11	2.73	2.92	2.42	1.38	3.04	3.42	2.65	2.76	2.44
Tb	0.743	0.635	0.485	0.496	0.405	0.232	0.487	0.527	0.404	0.436	0.477
Dy	5.23	2.84	2.36	2.44	2.00	1.13	2.28	2.54	1.86	2.09	2.53
Ho	0.935	0.543	0.459	0.480	0.389	0.217	0.426	0.487	0.334	0.385	0.453
Er	2.72	1.70	1.45	1.55	1.27	0.75	1.42	1.58	1.12	1.29	1.41
Tm	0.496	0.305	0.277	0.279	0.239	0.149	0.25	0.284	0.194	0.22	0.255
Yb	2.95	2.09	1.88	1.94	1.71	1.13	1.84	2.08	1.38	1.59	1.71
Lu	0.481	0.299	0.276	0.308	0.273	0.179	0.286	0.332	0.22	0.237	0.263
LREE	170.8	263.2	154.3	160.8	141.0	74.30	187.0	193.1	173.1	155.5	112.5
HREE	17.79	12.52	9.92	10.41	8.71	5.17	10.03	11.25	8.16	9.01	9.54
LREE/HREE	9.60	21.02	15.56	15.44	16.19	14.38	18.64	17.16	21.21	17.27	11.79
ΣREE	188.6	275.7	164.2	171.2	149.7	79.46	197.0	204.3	181.3	164.6	122.0
(La/Yb) _N	10.72	27.48	16.79	17.14	16.68	12.92	20.31	18.32	25.32	19.59	11.42
(Ce/Yb) _N	7.21	15.38	10.19	10.07	10.31	8.21	12.59	11.49	15.64	11.88	8.82
δEu	0.35	0.68	0.67	0.75	0.78	1.02	0.65	0.68	0.81	0.67	0.35
δCe	0.90	0.81	0.86	0.83	0.87	0.89	0.86	0.87	0.86	0.84	1.03
(La/Sm) _N	5.65	11.24	8.70	8.44	8.46	7.95	8.66	8.18	9.43	7.95	5.77
(Gd/Lu) _N	1.09	1.71	1.23	1.18	1.10	0.96	1.32	1.28	1.50	1.45	1.16
Y	26.3	16.8	14.3	15.1	12.4	7.63	12.8	14.4	10.2	11.8	12.6
Rb	98.7	85.8	97.8	105	91.9	107	117	116	113	106	81.5
Ba	526	1756	1066	1387	1213	1028	991	980	1089	930	297
Th	47.5	37.0	37.7	31.8	30.5	24.0	37.2	39.1	30.9	35.8	40.4
U	13.20	6.92	9.45	5.16	9.59	6.15	7.04	6.11	8.42	6.26	5.36
Nb	56.4	32.8	34.9	41.4	40.2	28.1	42.7	44.9	35.2	31.0	33.7
Ta	3.37	1.90	2.47	2.83	2.68	2.05	3.61	3.13	2.59	2.20	1.87
Sr	146	453	272	378	331	272	288	275	328	242	78.5
Nd	27.6	36.4	22.5	24.1	20.3	11.2	28.4	29.8	25.5	24.5	16.5
Zr	164	300	150	176	197	81.9	219	244	168	166	148
Hf	4.24	5.75	3.41	4.04	4.76	2.14	5.33	5.69	4.13	3.87	3.90
Sm	5.21	4.76	3.38	3.67	3.14	1.71	4.02	4.34	3.45	3.65	3.15
Cr	1.34	7.94	5.26	2.82	4.76	0.809	1.58	1.60	1.44	1.16	0.439
Co	1.48	3.37	2.40	2.58	2.40	1.10	2.11	2.09	2.96	1.84	0.628
Ni	0.883	2.09	4.29	1.39	3.5	0.477	1.78	0.439	0.321	0.493	0.098
Ga	15.6	17.2	15.3	16.9	16.5	15.8	16.1	17.6	17.2	15.5	15.4
Pb	26.3	39.6	37.1	38.3	39	39.8	29.1	35.3	40.8	35.7	37
Th/Ta	14.09	19.47	15.26	11.24	11.38	11.71	10.30	12.49	11.93	16.27	21.60
Ce/Pb	3.12	3.13	1.99	1.97	1.74	0.90	3.07	2.61	2.04	2.04	1.57
Ga/Al	2.29	2.22	2.17	2.24	2.21	2.16	2.20	2.31	2.28	2.10	2.24

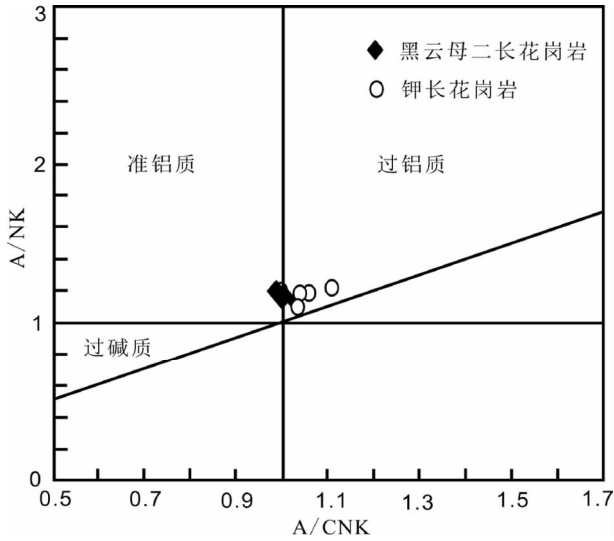


图6 大桦背岩体 A/NK-A/CNK 图解(底图据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 A/NK vs. A/CNK diagrams of granites from Dahuabei pluton (after Maniar and Piccoli, 1989)

含量为 $74.30 \times 10^{-6} \sim 263.2 \times 10^{-6}$, 平均为 162.3×10^{-6} , HREE 在 $5.17 \times 10^{-6} \sim 17.79 \times 10^{-6}$ 之间, 平均为 10.23×10^{-6} 。LREE/HREE 分布于 9.60 ~ 21.21, $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 介于 7.21 ~ 15.64 之间, 平均为 11.07, 反映轻重稀土元素发生明显分馏, 表现出轻稀土富集重稀土亏损的特征。 $(\text{La}/\text{Sm})_N$

平均值为 8.22, $(\text{Gd}/\text{Lu})_N$ 平均值为 1.27, 表明轻重稀土各自内部也发生了一定程度的分馏, 轻稀土内部分馏程度高于重稀土。 δCe 介于 0.81 ~ 1.03 之间, 平均值为 0.88, 整体表现出较弱的负异常。 δEu 除一个样品不存在异常外(1.02), 其余样品均表现出明显的负异常($\delta\text{Eu} = 0.35 \sim 0.81$), 暗示岩浆起源于一个斜长石稳定源区或者经历了斜长石的分离结晶作用。在稀土元素配分模式图上(图 8a), 所有样品的整体形态具有很高的相似性, 均表现为向右倾斜的曲线, 在轻稀土一侧为向右陡倾斜的曲线, 重稀土一侧为较为平坦的曲线。

微量元素方面, 大桦背岩体具有较高的 Th/Ta 比值(10.30 ~ 21.60)及较低的 Ce/Pb 比值(0.90 ~ 3.13), 相容元素 Cr($0.439 \times 10^{-6} \sim 7.94 \times 10^{-6}$)、Co($0.628 \times 10^{-6} \sim 3.37 \times 10^{-6}$)、Ni($0.098 \times 10^{-6} \sim 4.29 \times 10^{-6}$) 含量明显偏低且具有较大变化范围。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 8b), 所有样品的分布型式较为一致, 总体表现出富集大离子亲石元素 Rb、Th、U、K 及轻稀土元素, 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 且大离子亲石元素 Sr、Ba 表现出明显的亏损。

3.4 Sr-Nd 同位素

大桦背岩体的 Sr、Nd 同位素分析结果列于表 4。 $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 变化于 0.4968 ~ 2.0266 之间, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 介于 0.0909 ~ 0.1130 范围内。根据本次测定的锆石 U-Pb 加权平均年龄 328Ma 进行计算后发现, 岩体整体具有均一的 Sr-Nd 同位素

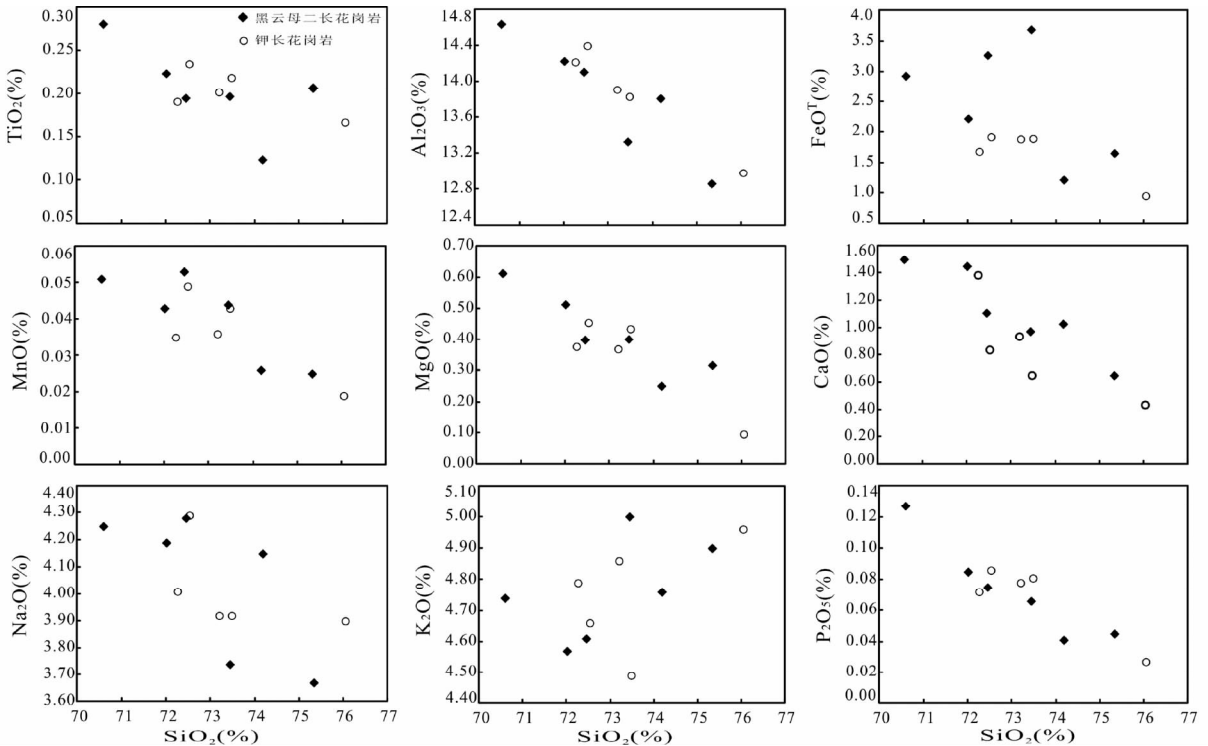


图7 大桦背岩体 Harker 图解

Fig. 7 Harker diagram of the granites from Dahuabei pluton

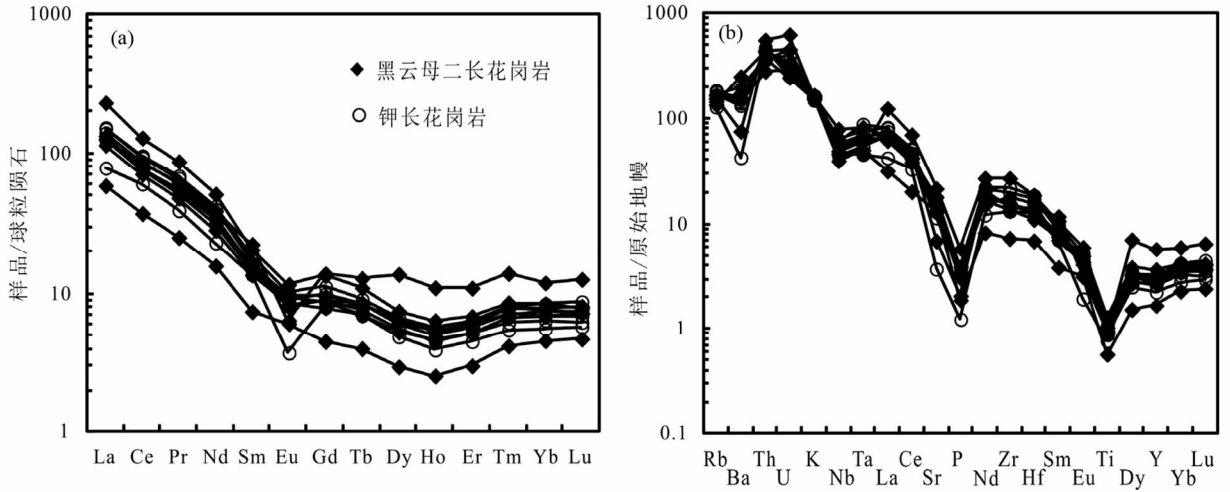


图 8 大桦背岩体球粒陨石标准化稀土配分模式图 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle normalized spidergram (b) of granites from Dahuabei pluton (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

表 4 大桦背岩体 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 4 Results of Sr-Nd isotope compositions of Dahuabei pluton

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	2σ	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	2σ	$f_{\text{Sm/Nd}}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
11HB13	108.9071	155.4924	2.0266	0.715742	6	0.706272	5.4813	29.3271	0.1130	0.512005	7	-0.43	-8.8
11HB16	86.1200	501.6368	0.4968	0.707508	4	0.705187	4.5848	30.5061	0.0909	0.511990	2	-0.54	-8.2
11HB18	103.0231	410.6655	0.7259	0.708454	3	0.705062	4.1805	27.8016	0.0909	0.511960	2	-0.54	-8.8
11HB20	116.9167	298.605	1.1329	0.710093	5	0.704799	2.0127	13.2464	0.0919	0.511974	3	-0.53	-8.6

表 5 大桦背岩体锆石 Hf 同位素分析结果

Table 5 Results of zircon Hf isotope compositions of Dahuabei pluton

测点号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	t_{Ma}	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{2\text{DM}}(\text{Ma})$	$f_{\text{La/Hf}}$
11HB17-2	0.186296	0.000964	0.004179	0.000028	0.282400	0.000015	326.6	-6.9	1770	-0.87
11HB17-3	0.127288	0.002405	0.003703	0.000055	0.282376	0.000022	329.9	-7.5	1815	-0.89
11HB17-4	0.156001	0.002137	0.003430	0.000048	0.282515	0.000016	327.0	-2.6	1503	-0.90
11HB17-5	0.121848	0.001355	0.002679	0.000032	0.282386	0.000015	324.8	-7.1	1784	-0.92
11HB17-6	0.112886	0.000757	0.002158	0.000017	0.282387	0.000018	326.7	-6.9	1772	-0.93
11HB17-7	0.111325	0.000499	0.002195	0.000008	0.282399	0.000018	324.3	-6.5	1748	-0.93
11HB17-8	0.101653	0.001119	0.002204	0.000038	0.282347	0.000017	330.6	-8.2	1860	-0.93
11HB17-9	0.119379	0.000751	0.002477	0.000017	0.282398	0.000017	324.3	-6.6	1754	-0.93
11HB17-10	0.070761	0.000604	0.001459	0.000016	0.282343	0.000019	326.0	-8.3	1861	-0.96
11HB17-11	0.131449	0.001260	0.002788	0.000024	0.282426	0.000016	326.7	-5.7	1694	-0.92
11HB17-12	0.128554	0.001467	0.002616	0.000037	0.282412	0.000020	333.1	-6.0	1719	-0.92
11HB17-13	0.118730	0.000958	0.002461	0.000013	0.282416	0.000017	326.0	-5.9	1712	-0.93
11HB17-17	0.090540	0.000820	0.001813	0.000010	0.282408	0.000021	331.5	-6.0	1719	-0.95
11HB17-19	0.106051	0.000473	0.002036	0.000015	0.282435	0.000019	329.7	-5.1	1663	-0.94
11HB17-21	0.111185	0.001016	0.002141	0.000025	0.282432	0.000018	329.2	-5.3	1671	-0.94
11HB17-22	0.152327	0.001831	0.002756	0.000028	0.282491	0.000017	329.0	-3.3	1547	-0.92
11HB17-23	0.116298	0.000824	0.002710	0.000057	0.282430	0.000026	326.2	-5.5	1683	-0.92
11HB17-24	0.176098	0.002658	0.003847	0.000081	0.282472	0.000016	325.1	-4.3	1607	-0.88
11HB17-25	0.084589	0.000523	0.001611	0.000008	0.282409	0.000016	332.4	-5.9	1713	-0.95
11HB17-26	0.084139	0.000759	0.001625	0.000009	0.282442	0.000015	330.1	-4.8	1641	-0.95

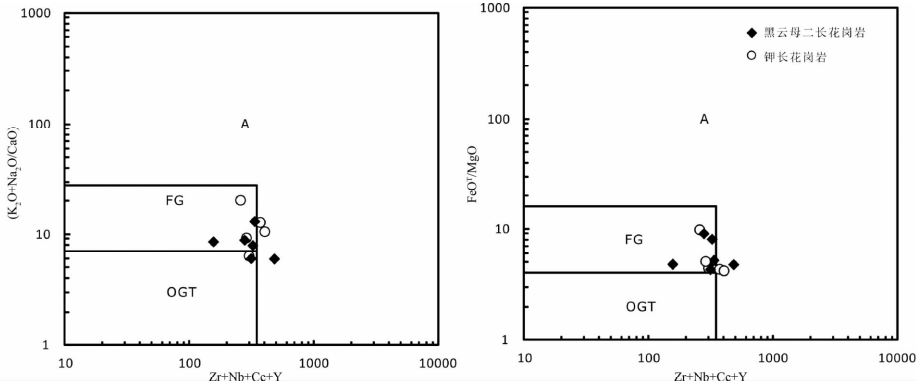


图9 大桦背岩体成因类型判别图(底图据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig.9 Genetic type discrimination diagrams of granites from Dahuabei pluton (after Whalen *et al.*, 1987)

组成, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值变化于 0.704799 ~ 0.706272 之间, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均小于 0, 介于 -8.8 ~ -8.2 之间。除一个样品外, 其余样品对应的 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 均偏离了大陆地壳平均值 -0.3 ~ -0.5, 故应采用两阶段模式(李献华, 1996), 计算得到 Nd 二阶段模式年龄为 1754 ~ 1805 Ma, 平均为 1786 Ma。

3.5 锆石 Hf 同位素

对大桦背岩体中已测年的谐和锆石样品进行了 Hf 同位素分析。从锆石的 Hf 同位素分析结果(表 5)可以看出, 20 个测点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分布于 0.282343 ~ 0.282515 之间, $f_{\text{Lw}/\text{Hf}}$ 介于 -0.96 ~ -0.87, 小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lw}/\text{Hf}}$ 值 -0.34 (Amelin *et al.*, 2000) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lw}/\text{Hf}}$ 值 -0.72 (Vervoort *et al.*, 1996), 因此两阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间(或其源区物质在地壳的平均存留年龄)。根据锆石 U-Pb 定年的原位年龄校正计算后求得, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为不同程度的负值, 且变化范围较大, 分布于 -8.3 ~ -2.6 之间, 二阶段模式年龄同样变化较大, 介于 1503 ~ 1861 Ma。

4 讨论

4.1 成因类型

大桦背岩体岩石矿物组合中未发现石榴子石、堇青石、白云母等典型富铝矿物。CIPW 标准矿物计算结果中刚玉分子含量基本都在 1% 以下。除一个样品外 ($A/\text{CNK} = 1.11$), 所有样品的 A/CNK 值均小于 1.1。这些特点都与 S 型花岗岩的强过铝特征不符。研究表明, 在强过铝 S 型花岗质岩浆中, 磷灰石的高溶解度使得其主要呈不饱和状态, 因而 P_2O_5 含量随着分异演化作用的进行而升高或基本不变, 且大多数酸性 S 型花岗岩的 P_2O_5 的含量高于 0.1%。而在准铝质到弱过铝质岩浆(I 型花岗岩)中由于磷灰石的溶解度很低, 总是优先结晶, 从而使得残余岩浆的 P_2O_5 越来越低(Chappell, 1999)。大桦背岩体总体贫磷, P_2O_5 平均含量仅为 0.07%,

在 SiO_2 - P_2O_5 图解上(图 7), 随 SiO_2 含量的增加, P_2O_5 含量逐渐降低, 变化趋势与 I 型花岗岩一致。因此, 通过以上分析, 可以排除大桦背岩体是 S 型花岗岩的可能, 其成因类型或为 A 型花岗岩或为高分异的 I 型花岗岩。

Ga/Al 值常作为判别 A 型花岗岩的重要指标, Whalen *et al.* (1987) 研究指出 A 型花岗 $\text{Ga}/\text{Al} (\times 10^4)$ 值应大于 2.6。大桦背岩体的 $\text{Ga}/\text{Al} (\times 10^4)$ 值为 2.10 ~ 2.31, 与 A 型花岗岩特征不符。尽管目前对于 A 型花岗岩的具体成因机制仍存在较大争议, 但多数学者普遍认为其形成于较高的温度条件下, 如新疆波孜果尔 A 型花岗岩(832 ~ 839°C, 刘春花等, 2012), 广东龙口 A 型花岗岩(810 ~ 847°C, 刘昌实等, 2003), 苏鲁造山带 A 型花岗岩(876 ~ 961°C, 王涛等, 2009), 这些 A 型花岗岩均形成于 800°C 以上的高温环境。根据 Watson *et al.* (2006) 提出的锆石 Ti 饱和温度计, 计算出大桦背岩体形成温度区间为 620 ~ 810°C, 平均 740°C, 明显低于上述 A 型花岗岩的形成温度, 而与东秦岭金山庙岩体(718 ~ 777°C, 肖娥等, 2012), 福建太武山花岗岩体(726 ~ 809°C, 赵蛟龙等, 2012), 福建东北沿海的南镇、大层山、三沙和大京岩体岩体(730 ~ 779°C, 邱检生等, 2008) 等高分异 I 型花岗岩形成温度相当。在判别图解中(图 9), 所有样品投影点也基本都落于高分异的 I 型花岗岩范围内。综上, 大桦背岩体应属高分异的 I 型花岗岩。

4.2 岩石成因

对于高钾钙碱性 I 型花岗岩的成因, 一直存在着较大争议, 目前能够被广泛接受的成因模式主要有以下几种: (1) 幔源玄武质岩浆的分离结晶作用 (Bacon and Druitt, 1988; Cribb and Barton, 1996); (2) 地壳内富钾的安山岩和玄武岩的部分熔融 (Roberts and Clements, 1993; 刘洪涛等, 2002); (3) 壳幔岩浆的混合作用 (Li *et al.*, 2013; Karsli *et al.*, 2010; 汪传胜等, 2009)。

由于研究区内缺乏与大桦背岩体同期活动的幔源岩浆记录, 再加上大桦背岩体体积巨大, SiO_2 含量最高可达

76.04%，且整体变化范围较窄，因此由幔源岩浆的分离结晶作用直接形成的可能性较小。大桦背岩体侵位于前寒武纪结晶基底之中，故可以排除其起源于上地壳的可能性，而岩体具有低 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值，负 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值以及古老的 Nd、Hf 同位素模式年龄，暗示其可能形成于古老下地壳的部分熔融。

实验岩石学研究业已证明，在无水条件下，地壳内发生部分熔融需要较高的温度 (800 ~ 900°C) (Wolf and Wyllie, 1994; López and Castro, 2001)，而流体相加入则可以在低于 800°C 的条件下在地壳内形成大规模熔体 (Chappell *et al.*, 2004; Miller *et al.*, 2003)。大桦背岩体岩浆温度低于 800°C (620 ~ 810°C, 平均 740°C)，暗示源区可能存在有大量流体。但华北地区下地壳主要为贫水的麻粒岩相变质岩系，因此源区富水的特征不可能来源于下地壳本身，应与外来流体注入有关。研究表明，来自深部幔源岩浆中含水矿物的脱水反应产生的流体在构造活动中可以进入到下地壳显著降低下地壳的固相线温度 (Miller *et al.*, 2003; Patiño Douce, 1999)。因此，大桦背岩体在较低温度条件下的熔融，可能与来自深部镁铁质岩浆的流体注入有关。

大桦背岩体同位素特征表明，幔源岩浆可能不但为源区的熔融提供了流体，甚至直接参与到了岩浆的物质组成之中。在图 10 中，所有锆石测点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均显著高于镁铁质下地壳演化区，且有部分样品点靠近球粒陨石，指示岩体并非单纯起源于下地壳物质的熔融，形成过程中应有幔源组分参与。另一方面，锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布于 -8.3 ~ -2.6 之间，变化幅度高达 5 个 ε 单位，明显超出了分析方法自身误差的影响 (Wu *et al.*, 2006)，但岩体却具有均一的 Sr-Nd 同位素组成，表现出与壳幔岩浆混合成因花岗岩相似的同位素变化特征 (Zhao *et al.*, 2012; 邱检生等, 2011)。这是因为在岩浆混合作用过程中，Sr-Nd 同位素体系由于封闭温度较低，经历了充分的壳幔岩浆物质成分交换趋向于达到均一化，而锆石 Hf 同位素体系具有较高的封闭温度，不但记录了早期未混合岩浆的初始同位素组成，而且可以记录后期受幔源岩浆混合后体系的同位素组成 (邱检生等, 2008)。

大桦背岩体中广泛发育的暗色微粒包体 (图 2e) 则是幔源岩浆提供流体并与寄主岩浆发生岩浆混合最直观的证据。暗色微粒包体为闪长质，含有大量角闪石及黑云母等含水矿物，表明其所代表的幔源岩浆是富水和挥发份的，能够提供一定的流体。包体具典型的岩浆结构，明显不同于下地壳难熔残留体以及围岩捕掇体 (片麻岩) 成因的包体。宏观上包体表现出明显的压扁、拉长等塑性流变特点，但在包体内部却没有观察到任何塑性变形或者是重结晶现象，反映包体所表现出的塑性流变特点是岩浆流动而不是变质作用的固态流动所致，包体与其寄主岩曾一度同为熔融状态，符合岩浆混合作用的特点。包体中大量发育的针状磷灰石 (图 2f) 正是岩浆混合作用过程中高温的幔源岩浆注入到温度较低的壳源岩浆中在“淬冷”条件下的产物。在大桦背岩体中，横切

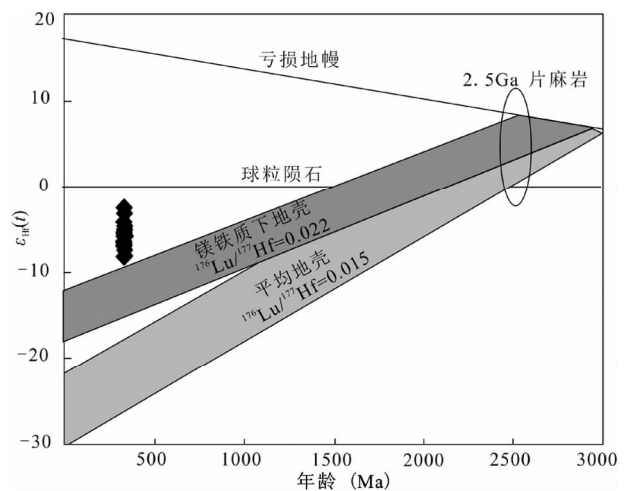


图 10 大桦背岩体锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解 (底图据 Zhang *et al.*, 2012 修改)

Fig. 10 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. age diagram of zircons from Dahuabei pluton (modified after Zhang *et al.*, 2012)

包体与寄主岩的界线上以及部分暗色包体中都存在钾长石斑晶，且三种位置的钾长石，除了包体中的钾长石棱角显示出因熔蚀而圆化的特点外，其他特征与寄主岩中的钾长石斑晶并没有太大的区别，说明钾长石斑晶为寄主岩中的斑晶，是在壳幔混合时被带到幔源岩浆中的。而钾长石斑晶存在于这三个位置，也正好勾勒出钾长石斑晶从花岗岩进入到暗色包体中的运移轨迹，是两种不同岩浆之间混合进行物质交换最为直观的证据。

在当时构造背景下 (详见下文)，能够形成与下地壳岩浆相混合的幔源岩浆，其源区既可能是俯冲大洋板片，也有可能是大陆岩石圈地幔。对华北东部金伯利岩的研究表明，华北岩石圈地幔在寒武纪已经轻微富集 (池际尚和路凤香, 1996; Yang *et al.*, 2009)，并在泥盆纪进一步富集 (Zhang *et al.*, 2007b)。为了进一步约束幔源岩浆的源区，根据 Faure (1986) 提出的同位素混合模型分别进行了简单的二端元混合模拟，以贺根山蛇绿岩中非堆晶成因辉绿岩、辉长岩和玄武岩的同位素数据来代表俯冲板片的组分 ($\text{Sr} = 200 \times 10^{-6}$, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7033, $\text{Nd} = 8 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 10$; Miao *et al.*, 2008)，Jahn *et al.* (1987, 1999) 总结的华北克拉通太古宙麻粒岩相下地壳同位素数据来代表相混合的下地壳成分 ($\text{Sr} = 300 \times 10^{-6}$, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.708, $\text{Nd} = 25 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -25$)，奥陶纪金伯利岩和中泥盆世华北北缘超镁铁-镁铁质岩石的同位素组成代表大陆岩石圈地幔 ($\text{Sr} = 1000 \times 10^{-6}$, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7045, $\text{Nd} = 70 \times 10^{-6}$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = -2$; Yang *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2009b)。计算结果表明 (图 11)，俯冲板片和下地壳混合模式下地壳物质所占百分比不足 30%，而大陆岩石圈地幔与下地壳混合模式下地壳物质所占百分比约为 50%。前一种模式虽然能够解释岩体同

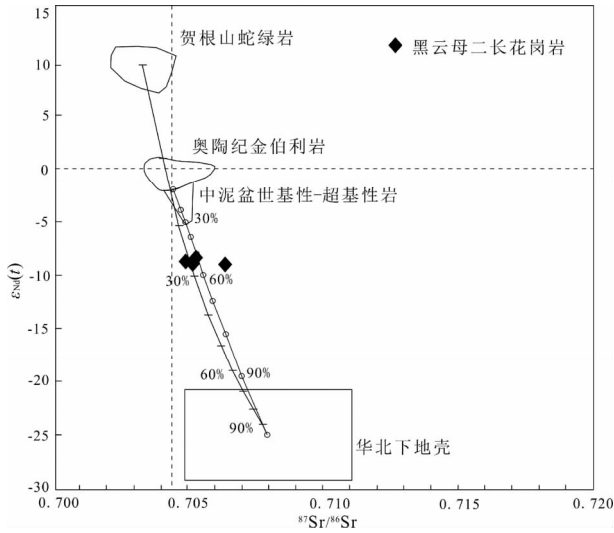


图 11 大桦背岩体 $\epsilon_{Nd}(t) - (^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解

贺根山蛇绿岩范围据 Miao *et al.*, 2008; 奥陶纪金伯利岩同位素范围据 Yang *et al.*, 2009; 华北北缘中泥盆世基性-超基性岩据 Zhang *et al.*, 2009b; 华北下地壳同位素范围据 Jahn *et al.*, 1987, 1999

Fig. 11 $\epsilon_{Nd}(t)$ vs. $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram of granites from Dahuabei pluton

位素特征,但比例如此之小的地壳物质加入,即使经历了分离结晶作用,也很难造成岩体的 SiO_2 含量高达 70% 以上。而在第二种模式下,较高的地壳混入量则可以很好地解释大桦背岩体富硅的特征。

同样,华北北缘同时期幔源岩浆活动也可以对基性混合

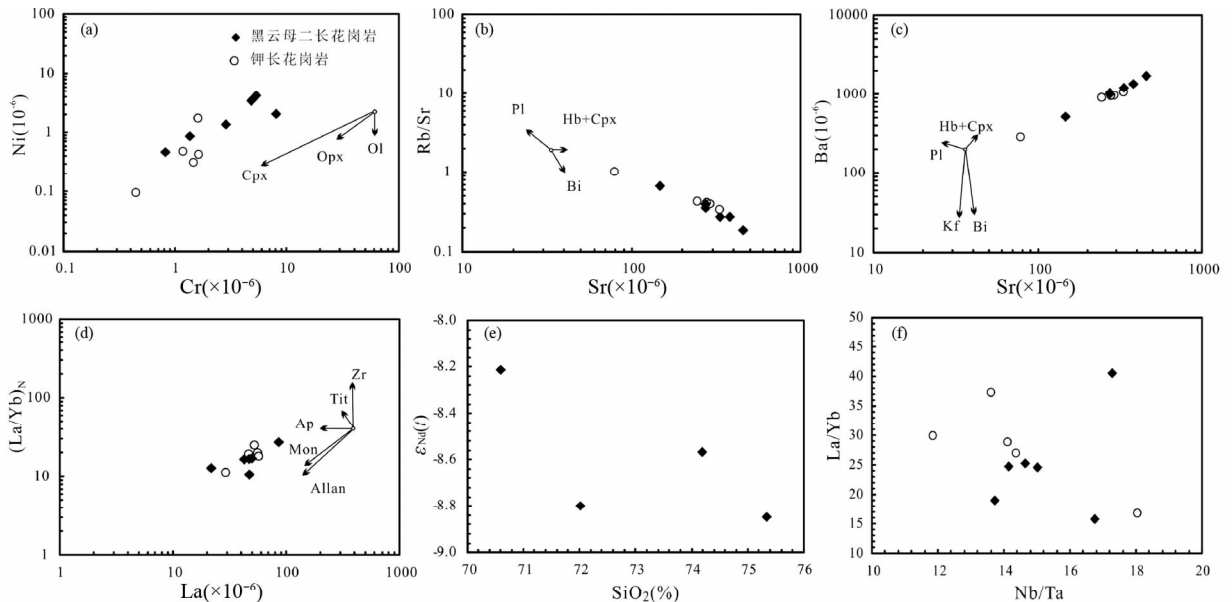


图 12 大桦背岩体分离结晶及同化混染趋势图

(a) Ni-Cr 图解; (b) Rb/Sr-Sr 图解; (c) Ba-Sr 图解; (d) $(La/Yb)_N - La_N$ 图解; (e) $\epsilon_{Nd}(t) - SiO_2$ 图解; (f) $(La/Yb)_N - Nb/Ta$ 图解

Fig. 12 Diagrams showing the fractional crystallization and crust assimilation trends of granites from Dahuabei pluton

端元的确定提供有效约束。根据现有文献报道,华北北缘晚石炭-早二叠的幔源岩浆活动代表,如东湾子辉长岩及辉石岩 ($306 \pm 6Ma$ 及 $308 \pm 4Ma$, Zhao *et al.*, 2007), 北七哥陶橄辉长岩 ($269 \pm 8Ma$, 赵磊等, 2011), 白云鄂博角闪辉长岩 ($287 \pm 13.6Ma$, 赵磊, 2008), 高寺台辉长岩 ($280.3 \pm 2.9Ma$, Chen *et al.*, 2009), 元恒永辉长岩 ($279.5 \pm 1.9Ma$, Zhang *et al.*, 2011), 镶黄旗角闪辉长岩 ($279.5 \pm 1.9Ma$, Zhang *et al.*, 2009b), 均表现出富集地幔的特征, 显示当时幔源岩浆活动主要起源于富集的大陆岩石圈地幔。即使是华北克拉通北缘同期具有明显埃达克质岩石特征的中酸性岩体, 也被证明形成于以角闪石为主(及少量的辉石+磷灰石+锆石)的分离结晶, 而与俯冲板片的熔融无关 (Ma *et al.*, 2013)。因此, 结合同位素模拟情况, 相混合的幔源岩浆极有可能起源于大陆岩石圈地幔, 而非俯冲板片。

需要注意的是, 大桦背岩体一些主量和微量元素变化特征指示其初始岩浆在上升定位过程中还存在一定程度的分异演化, 除了岩浆混合作用外, 分离结晶作用在岩体的最终形成过程中也扮演了十分重要的角色。岩体具有较低的 MgO 、 FeO^T 、 Cr 、 Co 、 Ni 含量, 在哈克图解上 (图 7), 随着 SiO_2 含量的增加, FeO^T 、 MgO 表现出明显的降低趋势, 表明在岩浆演化过程中发生过角闪石、黑云母等镁铁质矿物的分离结晶作用。在图 12a 上, 随着 Ni 含量的不断增加, Cr 含量不断增加, 表明存在单斜辉石的分离结晶。岩体明显的 Eu 、 Sr 、 Ba 负异常, 说明岩浆发生过钾长石和斜长石的分离结晶作用。样品点在分离结晶模拟拟量图中的分布形式 (图 12b, c) 也表明岩体同时发生了暗色矿物以及钾长石和斜长石的分离结晶。此外, 一些副矿物也发生了明显的分离结晶。岩石较

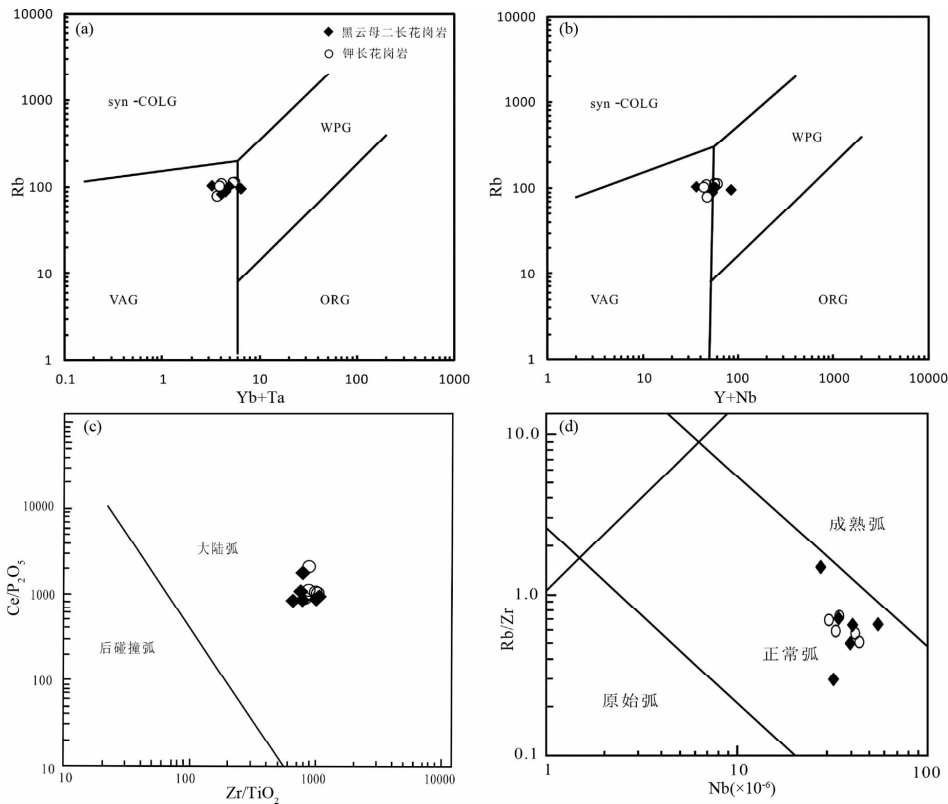


图 13 大桦背岩体构造环境判别图解

(a) Rb-Yb + Ta 图解(底图据 Pearce *et al.*, 1984); (b) Rb-Y + Nb 图解(底图据 Pearce *et al.*, 1984); (c) Zr/TiO₂-Ce/P₂O₅ 图解(底图据 Müller *et al.*, 1992); (d) Rb/Zr-Nb 图解(底图据 Brown *et al.*, 1984)

Fig. 13 Tectonic setting discrimination diagrams of granites from Dahuabei pluton

低的 P₂O₅ 含量以及 P₂O₅ 和 SiO₂ 之间的负相关关系(图 7)是磷灰石分离结晶的表现,金红石和钛铁矿的分离结晶可能是造成岩石 Nb、Ta、Ti 负异常的主要原因,而稀土元素的变异则可能主要受独居石和褐帘石等副矿物分离结晶的控制(图 12d)。

岩体边部可见围岩捕掳体,表明岩浆形成过程中经历过地壳混染。SiO₂ 含量与 ε_{Nd}(*t*) 比值的负相关(图 12e)以及 La/Yb 比值和 Nb/Ta 比值的负相关关系(图 12f),也证明在岩浆上升过程中确实存在地壳混染。但是与华北北缘同时期的大陆弧中酸性岩体相比(Ma *et al.*, 2013),大桦背岩体具有相对较低的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 比值和较高的 ε_{Nd}(*t*) 及 ε_{Hf}(*t*) 值,可能表明岩浆在上升过程中的地壳同化混染程度相对较弱。

4.3 构造意义

大桦背岩体属于高钾钙碱性 I 型花岗岩,通常认为主要在两种构造背景下可以产生高钾钙碱性岩浆:一种是与俯冲作用相关的,类似于安第斯山的大陆弧背景(Pitcher, 1987);另一种是构造体制由挤压转向碰撞后的伸展阶段(Pitcher, 1987; Liégeois *et al.*, 1998)。

大桦背岩体具有较高的 Th/Ta 比值及较低的 Ce/Pb 比

值,在原始地幔标准化蛛网图上相对富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素,表现出与俯冲带岛弧岩浆岩相似的地球化学特点(Rogers and Hawkesworth, 1989; Stern, 2002)。在花岗岩类构造环境判别图中(图 13a, b),岩体投点均落于火山弧型花岗岩范围,也说明其形成与俯冲作用密切相关。而在 Zr/TiO₂-Ce/P₂O₅ 图解中(图 13c),样品点都落在大陆弧范围内。因此,大桦背岩体可能产出在俯冲带之上的活动大陆边缘,为大陆弧型岩浆岩。这也与岩体侵位于元古界乌拉山群之中,边部可见棱角状乌拉山群围岩捕掳体的地质事实相符。同时,这也得到了沉积学研究的支持。在毗邻研究区南侧的鄂尔多斯盆地东胜地区,吴兆剑等(2013)对直罗组砂岩物源分析表明,砂岩源岩具有明显的俯冲带的特征,可能形成于大陆弧环境,盆地北侧的闪长岩-花岗岩可能为直罗组地层的主要物质来源,更确证了本区曾为大陆弧构造环境,且该弧形成之后遭受了强烈的隆升及剥蚀。Brown *et al.* (1984) 研究表明随着成熟度的增加,弧花岗岩的富集 Rb、Th、U、Ta、Nb、Hf 和 Y,亏损 Ba、Sr、P、Zr、Ti, Rb/Zr 比值与 Nb + Y 的含量表现出正相关的关系。在图 13d 上,样品点都落于正常弧范围内,反映大桦背岩体为俯冲带岛弧演化到正常弧环境的岩浆产物。

近年来华北克拉通北缘岩浆岩研究积累的众多高精度年代学资料揭示,大桦背岩体的侵位并不是一次孤立的岩浆事件,在华北北缘,还分布有大量与其形成年代相近的侵入岩体,如萨其-呼热图花岗闪长岩($323.4 \pm 3.4\text{Ma}$,张青伟, 2011),波罗诺石英闪长岩以及虎什哈花岗闪长岩($302 \pm 4\text{Ma}$ 及 $310 \pm 5\text{Ma}$,Zhang *et al.*, 2007a),大光顶花岗闪长岩($317 \pm 6\text{Ma}$,周丽云, 2009),隆化片麻状花岗闪长岩($311 \pm 2\text{Ma}$,张拴宏等, 2004),凤山闪长岩-花岗岩($334.7 \pm 2.9\text{Ma}$, $306.6 \pm 6\text{Ma}$,凤永刚等, 2009)等。这些岩体沿着华北克拉通北缘呈东西向带状展布,且均表现出俯冲带岛弧岩浆岩的地球化学特点,暗示华北北缘在石炭纪期间为安第斯型活动大陆边缘。同样,对华北北缘二叠纪早期酸性岩体的研究也得到了类似结论(Zhang *et al.*, 2009a; 张维和简平, 2012; 王婉琼等, 2012; 袁桂邦和王慧初, 2006)。这样的岩浆体系表明晚石炭世到早二叠世华北克拉通北缘中段古亚洲洋板块一直向南持续俯冲,古亚洲洋并未消亡。同样,王玉净和樊志勇(1997)在林西地区蛇绿岩中发现了中晚二叠世放射虫化石,Jian *et al.* (2010)在索伦山缝合带SSZ型蛇绿岩套内基性岩所获得的 $288 \pm 6\text{Ma}$ 及 $284 \pm 4\text{Ma}$ 的年龄,这些也都指示晚二叠世仍然存在古亚洲洋残余的洋盆。

值得注意的是,晚石炭-早二叠世在华北北缘以及其北部的兴蒙造山带同时还发育有具有后碰撞伸展侵入岩体特征的岩浆活动,如冀东东湾子镁铁质岩体($306 \pm 6\text{Ma}$ 及 $308 \pm 4\text{Ma}$;Zhao *et al.*, 2007)锡林浩特A型花岗岩($276 \pm 2\text{Ma}$;施光海等, 2004)、前进场黑云母花岗岩($273 \pm 7.7\text{Ma}$;徐佳佳等, 2012)、西乌旗大石寨组双峰式火山岩($279 \sim 281\text{Ma}$;Zhang *et al.*, 2008)等。这似乎表明,索伦缝合带在晚石炭世-早二叠世便进入到后造山伸展的背景(李益龙等, 2012)。但实际上,西伯利亚板块与华北克拉通之间的碰撞造山过程是微块体和不断生长发育的岛弧体系相互汇聚拼贴(陆-陆、弧-陆、弧-弧)的过程(薛怀民等, 2009),缝合带应该不只一条,各条缝合带的闭合时间也不尽相同。锡林浩特A型花岗岩、前进场黑云母花岗岩、西乌旗大石寨组双峰式火山岩等,空间上距离贺根山蛇绿岩较近,时间上侵位于该缝合带闭合之后(童英等, 2010),因此,可能反映的只是早期贺根山一带古亚洲洋闭合后的后伸展环境。一般来说,岩浆弧与俯冲带之间的距离小于 300km (Chen *et al.*, 2007),冀东东湾子岩体位于俯冲带以南,两者之间的距离并非岩浆弧的宽度所能到达,其所反映的张性环境是由于俯冲带退缩而形成的弧后伸展环境(马旭等, 2009),并非两大板块缝合后的后碰撞伸展。

而华北北缘中晚二叠世发育的同碰撞花岗岩,如北极各花岗岩($264 \pm 3.4\text{Ma}$;柳长峰等, 2010)和哈拉合少黑云母二长花岗岩($261.1 \pm 0.5\text{Ma}$,赵庆英等, 2007)反映从晚二叠世开始构造背景才由洋壳俯冲转为碰撞造山。包括仅距离大桦背岩体十余千米的沙德盖岩体(侯万荣等, 2011)在内的中晚三叠世华北北缘后碰撞花岗岩带以及三叠纪碱性侵入

岩带的出现(Yan *et al.*, 1999)则为古亚洲洋的俯冲事件彻底划上了句号,说明在华北克拉通与西伯利亚板块发生碰撞之后,本区已由挤压转入拉伸环境。因此,通过华北北缘岩浆作用的演化可以推测古亚洲洋的最终闭合,两大板块的最终碰撞缝合时间应该在晚二叠世至早三叠世期间内。

根据以上分析,大桦背岩体形成时古亚洲洋仍在俯冲,两大板块并未闭合,岩体的成因模式可能如下:石炭纪,随着古亚洲洋壳向华北克拉通之下俯冲,俯冲板片流体对上覆地幔楔的交代使得先前已经富集的华北大陆岩石圈地幔更加富集,并使地幔楔的地幔岩部分熔融形成富水的幔源基性岩浆。幔源岩浆在上升至下地壳底部,底侵所带来的高热和分异的流体促使下地壳岩石发生部分熔融而形成花岗质岩浆,并与幔源岩浆发生混合。随后,这一壳幔混合岩浆在上升侵位过程中又发生了显著的分异结晶作用和较弱的地壳物质的同化混染,并最终定位于地壳浅部固结形成大桦背岩体。

5 结论

(1)大桦背岩体由钾长花岗岩和似斑状黑云母二长花岗岩所组成,形成年龄为 $328.3 \pm 1.5\text{Ma}$,为华北北缘早石炭世岩浆活动的产物。

(2)岩体具有富硅、富碱、富钾、准铝质-弱过铝质、低温的特征,属于高分异的高钾钙碱性I型花岗岩。

(3)岩体是受俯冲板片流体交代诱发熔融的岩石圈地幔岩浆与下地壳岩浆相混合的产物。混合岩浆在上升侵位过程中又发生了显著的分异结晶作用和较弱的地壳物质的同化混染。

(4)岩体形成于古亚洲洋板块向南侧的华北克拉通俯冲下的大陆弧环境。古亚洲洋在早石炭世并未消亡,其最终闭合在晚二叠世-早三叠世。

References

- Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-Middle Archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(24): 4205-4225
- Bacon CR and Druitt TH. 1988. Compositional evolution of the zoned calc-alkaline magma chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 224-256
- Brown CG, Thorpe RS and Webb PC. 1984. The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *Journal of the Geological Society*, 141(3): 411-426
- Chappell BW. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535-551
- Chappell BW, White AJR, Williams IS and Wyborn D. 2004. Low- and high-temperature granites. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 95(1-2): 125-140

- Chen B, Zhao GC and Wilde S. 2001. Subduction-and collision-related granitoids from southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia; Isotopic ages and tectonic implications. *Geological Review*, 47(4): 361 – 364 (in Chinese with English abstract)
- Chen B, Suzuki K, Tian W, Jahn BM and Ireland T. 2009. Geochemistry and Os-Nd-Sr isotopes of the Gaositai Alaskan type ultramafic complex from the northern North China Craton: Implications for mantle-crust interaction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(5): 683 – 702
- Chen YJ, Chen HY, Zaw K, Pirajno F and Zhang ZJ. 2007. Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1–4): 139 – 169
- Chi JS and Lu FX. 1996. Characteristics of Paleozoic Lithospheric Mantle and Kimberlite of North China Platform. Beijing: Science Press, 1 – 283 (in Chinese with English abstract)
- Cribb JW and Barton M. 1996. Geochemical effects of decoupled fractional crystallization and crustal assimilation. *Lithos*, 37(4): 293 – 307
- Faure G. 1986. Principles of Isotope Geology. New York: John Wiley and Sons, 567 – 570
- Feng YG, Liu SW, Lü YJ, Tian W and Liu XM. 2009. Petrogenesis of the Late Paleozoic diorites-granitoids in Fengshan area, northern Hebei Province: Constraints from petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 45(1): 59 – 70 (in Chinese with English abstract)
- Hong DW, Huang HZ, Xiao JY and Xue HM. 1994. The Permian alkaline granites in central Inner Mongolia and their geodynamic significance. *Acta Geologica Sinica*, 68(3): 219 – 230 (in Chinese with English abstract)
- Hoskin PWO and Ireland TR. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627 – 630
- Hou KJ, Li YH, Zou TR, Qu XM, Shi YR and Xie GQ. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595 – 2604 (in Chinese with English abstract)
- Hou KJ, Li YH and Tian YY. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481 – 492 (in Chinese with English abstract)
- Hou WR, Nie FJ, Hu JM, Liu YF, Xiao W, Liu Y and Zhang K. 2011. Geochronology and geochemistry of Shadegai granites in Wulashan area, Inner Mongolia and its geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(6): 1914 – 1927 (in Chinese with English abstract)
- Hou WR, Nie FJ and Jiang SH. 2012. Magmatic Activities and Ore-forming Process of Gold Deposit-taking Hadamengou and Jinchangouliang Gold Deposit for Examples. Beijing: Geological Publishing House, 28 – 75 (in Chinese)
- Hu MY, He HL, Zhan XC, Fan XT, Wang G and Jia ZR. 2008. Matrix normalization for in-situ multi-element quantitative analysis of zircon in laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 36(7): 947 – 953 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Auvray B, Cornichet J, Bai YL, Shen QH and Liu DY. 1987. 3.5Ga old amphibolites from eastern Hebei Province, China: Field occurrence, petrology, Sm-Nd isochron age and REE geochemistry. *Precambrian Research*, 34(3–4): 311 – 346
- Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemistry and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157(1–2): 119 – 146
- Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82 – 29
- Jian P, Liu DY, Kröner A, Windley BF, Shi YR, Zhang W, Zhang FQ, Miao LC, Zhang LQ and Tomurhuu D. 2010. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia. *Lithos*, 118(1–2): 169 – 190
- Karsli O, Dokuz A, Uysal I, Aydin Faruk, Chen B, Kandemir R and Wijbrans J. 2010. Relative contributions of crust and mantle to generation of Campanian high-K calc-alkaline I-type granitoids in a subduction setting, with special reference to the Harsit Pluton, Eastern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(4): 467 – 487
- Li JY, Gao LM, Sun GH, Li YP and Wang YB. 2007. Shuangjingzi Middle Triassic syn-collisional crust-derived granite in the East Inner Mongolia and its constraint on the timing of collision between Siberian and Sino-Korean paleo-plates. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 565 – 582 (in Chinese with English abstract)
- Li S, Wilde AS and Wang T. 2013. Early Permian post-collisional high-K granitoids from Liuyuan area in southern Beishan orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 179: 99 – 119
- Li SX, Xu XC, Liu XS and Sun DY. 1994. Early Precambrian Geology of Wulashan Region, Inner Mongolia. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 140 (in Chinese with English abstract).
- Li XH. 1996. A discussion on the model and isochron ages of Sm-Nd isotopic systematics: Suitability and limitation. *Scientia Geologica Sinica*, 31(1): 97 – 104 (in Chinese with English abstract)
- Li YL, Zhou HW, Xiao WJ, Zhong ZQ, Yin SP and Li FL. 2012. Superposition of paleo-Asian and West-Pacific tectonic domains in the eastern section of the Solonker suture zone: Insights from petrology, geochemistry and geochronology of deformed diorite in Xar Moron fault zone, Inner Mongolia. *Earth Science*, 37(3): 433 – 450 (in Chinese with English abstract)
- Liégeois JP, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids: The use of sliding normalization. *Lithos*, 45(1–4): 1 – 28
- Liu CF, Zhang HR, Yu YS, Zhou ZG, Liu WC and Zhang HF. 2010. Dating and petrochemistry of the Beijige pluton in Siziwangqi, Inner Mongolia. *Geoscience*, 24(1): 112 – 150 (in Chinese with English abstract)
- Liu CH, Yin JW, Wu CL, Cai J, Shao XK, Yang HT, Gao YH, Lei M, Xu HM and Wang J. 2012. Mineralogy and temperature of magma generation for A-type granitoids in Boziguoer, Baicheng County, Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 589 – 602 (in Chinese with English abstract)
- Liu CS, Chen XM, Wang RC and Hu H. 2003. Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Liu HT, Sun SH, Liu JM and Zhai MG. 2002. The Mesozoic high-Sr granitoids in the northern marginal region of North China Craton: Geochemistry and source region. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 257 – 274 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, Gao CG, Gao S, Xu J and Chen HH. 2010. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535 – 1546
- López S and Castro A. 2001. Determination of the fluid-absent solidus and supersolidus phase relationships of MORB-derived amphibolites in the range 4 ~ 14kbar. *American Mineralogist*, 86: 1396 – 1403
- Luo HL, Wu TR and Zhao L. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of Wuliangsitai A-type granite on the northern margin of the North China Plate and tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 515 – 526 (in Chinese with English abstract)
- Ma X, Chen B and Niu XL. 2009. Genesis of the Late Paleozoic Dongwanzi pluton, eastern Hebei. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 1975 – 1988 (in Chinese with English abstract)
- Ma X, Chen B, Chen JF and Niu XL. 2013. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemical, Sr-Nd isotopic, and in-situ Hf isotopic data of the Late Carboniferous-Early Permian plutons in the northern margin of the North China Craton. *Science China (Earth Sciences)*, 56(1): 126 – 144

- Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635–643
- Miao LC, Fan WM, Liu DY, Zhang FQ, Shi YR and Guo F. 2008. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex; Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 348–370
- Miller CF, McDowell SM and Mapes RW. 2003. Hot and cold granites? Implications of zircon saturation temperatures and preservation of inheritance. *Geology*, 31(6): 529–532
- Müller D, Rock NMS and Groves DI. 1992. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A pilot study. *Mineralogy and Petrology*, 46(4): 259–289
- Patiño Douce AE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? *Geological Society, London, Special Publications*, 168: 55–75
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Pitcher WS. 1987. Granites and yet more granites forty years on. *Geologische Rundschau*, 76(1): 51–79
- Qiu JS, Xiao E, Hu J, Xu XS, Jiang SY and Li Z. 2008. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the coastal area of northeastern Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Nd-Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2468–2484 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JS, Liu L and Li Z. 2011. Zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry of quartz syenite from Wanghaigang pluton in Huangyan County, Zhejiang Province and their implications for petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1557–1572 (in Chinese with English abstract)
- Roberts MP and Clements JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21(9): 825–828
- Rogers G and Hawkesworth CJ. 1989. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: Evidence for crustal generation from the mantle wedge. *Earth and Planetary Science Letters*, 91(3–4): 271–285
- Şengör AMC, Natal' in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299–307
- Shang QH. 2004. Occurrences of Permian radiolarians in central and eastern Nei Mongol (Inner Mongolia) and their geological significance to the Northern China Orogen. *Chinese Science Bulletin*, 49(24): 2613–2619
- Shao JA. 1991. The Crust Evolution in the Middle Part of Northern Margin of the Sino-Korean Plate. Beijing: Peking University Press (in Chinese with English abstract)
- Shi GH, Miao LC, Zhang FQ, Jian P, Fan WM and Liu DY. 2004. The age and regional tectonic significance of A-type granite in Xilinhot, Inner Mongolia. *Chinese Science Bulletin*, 49(4): 384–389 (in Chinese)
- Stern RJ. 2002. Subduction zones. *Reviews of Geophysics*, 40(4): 1–38
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magma-tism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tang KD. 1990. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north margin of the Sino-Korean Craton. *Tectonics*, 9(2): 249–260
- Tong Y, Hong DW, Wang T, Shi XJ, Zhang JJ and Zeng T. 2012. Spatial and temporal distribution of granitoids in the middle segment of the Sino-Mongolian border and its tectonic and metallogenic implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(3): 395–412 (in Chinese with English abstract)
- Vervoort JD, Pachelt PJ, Gehrels GE and Nutman AP. 1996. Constraints on early earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes. *Nature*, 379(6566): 624–627
- Wang CS, Gu LX, Zhang ZZ, Wu CZ, Tang JH and Tang XQ. 2009. Petrogenesis and geological implications of the Permian high-K calc-alkaline granites in Harlik Mountains of eastern Tianshan, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1499–1511 (in Chinese with English abstract)
- Wang F, Chen FK, Hou ZH, Peng P and Zhai MG. 2009. Zircon ages and Sr-Nd-Hf isotopic composition of Late Paleozoic granitoids in the Chongli-Chifeng area, northern margin of the North China Block. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3057–3074 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Liu XY and Li JY. 1991. Plate Tectonics Between Cathaysia and Angara Land in China. Beijing: Peking University Press, 56–60 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Liu S, Hu RZ, Feng CX, Qi YQ, Feng GY and Wang CH. 2009. Elemental geochemistry and petrogenesis of A-type granites in the Sulu orogen. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 676–688 (in Chinese with English abstract)
- Wang WQ, Liu ZH, Wang XA, Zhang C, Fan ZW, Shi Y and Zhu K. 2012. SHRIMP U-Pb dating of the zircon from the Hercynian biotite monzonitic granites in Urad Zhongqi, Inner Mongolia, and its geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(6): 1771–1782 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ and Fan ZY. 1997. Discovery of Permian radiolarians in ophiolite belt on northern side of Xar Moron River, Nei Mongol and its geological significance. *Acta Paleontologica Sinica*, 36(1): 58–69 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB, Wark DA and Thomas JB. 2006. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineral and Petrology*, 151(4): 413–433
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407–419
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach*. London: Unwin Hyman, 1–468
- Windley BF. 1993. Proterozoic anorogenic magmatism and its orogenic connection. *Journal of Geological Society*, 150(1): 39–50
- Wolf MB and Wyllie PJ. 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10kbar: The effects of temperature and time. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(4): 369–383
- Wu FY, Yang YH, Xie LW, Yang JH and Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1–2): 105–126
- Wu ZJ, Han XZ, Yi C, Qi CJ, Hui XC and Wang MT. 2013. Geochemistry of sandstones from the Middle Jurassic Zhiluo Formation, Dongsheng district, northeastern Ordos basin: Implication for provenance and tectonic setting. *Geoscience*, 27(3): 557–567 (in Chinese with English abstract)
- Xiao E, Hu J, Zhang ZZ, Dai BZ, Wang YF and Li HY. 2012. Petrogeochemistry, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic compositions of the Haoping and Jinshanmiao granites from the Huashan complex batholith in eastern Qinling Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 4031–4036 (in Chinese with English abstract)
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J and Zhai MG. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1062–1069
- Xu JJ, Lai Y, Cui D and Lu B. 2012. Petrology and LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of the Qianjinchang pluton, southeastern Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(4): 617–628 (in Chinese with English abstract)
- Xu B and Chen B. 1997. Framework and evolution of the Middle Paleozoic orogenic belt between Siberian and North China Plates in northern Inner Mongolia. *Science in China (Series D)*, 40(5): 463–469
- Xue HM, Guo LJ, Hou ZQ, Zhou XW, Tong Y and Pan XF. 2009. The Xilingele complex from the eastern part of the Central Asian-Mongolia

- Orogenic Belt, China; Products of Early Variscan orogeny other than ancient block. Evidence from zircon SHRIMP U-Pb ages. *Acta Petrologica Sinica*, 25(8): 2001–2010 (in Chinese with English abstract)
- Yan GH, Mou BL, Xu BL, He GQ, Tan LK, Zhao H, He ZF, Zhang RY and Qiao GS. 1999. Triassic alkaline intrusives in the Yanliao-Yinshan area: Their chronology, Sr, Nd and Pb isotopic characteristics and their implication. *Science in China (Series D)*, 42(6): 582–587
- Yang YH, Wu FY, Wilde SA, Liu XM, Zhang YB, Xie LW and Yang JH. 2009. In situ perovskite Sr-Nd isotopic constraints on the petrogenesis of the Ordovician Mengyin kimberlites in the North China Craton. *Chemical Geology*, 264(1–4): 24–42
- Yuan GB and Wang HC. 2006. Magmatic activity and its tectonic implications during the Early Permian in the northwestward of Wuchuan, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 29(4): 303–310 (in Chinese with English abstract)
- Zhang QW. 2011. Characteristics of Late Paleozoic granitoids and their geological significances in the middle segment of north margin of North China plate. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University (in Chinese with English summary)
- Zhang QW, Liu ZH, Chai SL, Xu ZY and Xu XC. 2011. Zircon U-Pb dating of the garnet-bearing granite from Wulan area of Urad Zhongqi in Inner Mongolia and its geological significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(3): 745–752 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Song B and Wu H. 2004. The Late Paleozoic gneissic granodiorite pluton in Early Pre-Cambrian high grade metamorphic terrains near Longhua County in northern Hebei Province, North China: Result from zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 621–626 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SH, Zhao Y, Song B, Yang ZY, Hu JM and Wu H. 2007a. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: Implications for a Late Paleozoic active continental margin. *Journal of the Geological Society, London*, 164(2): 451–463
- Zhang SH, Zhao Y, Song B and Liu DY. 2007b. Petrogenesis of the Middle Devonian Gushan diorite pluton on the northern margin of the North China block and its tectonic implications. *Geological Magazine*, 144(3): 553–568
- Zhang SH, Zhao Y, Kröner A, Liu XM, Xie LW and Chen FK. 2009a. Early Permian plutons from the northern North China Block: Constraints on continental arc evolution and convergent margin magmatism related to the Central Asian Orogenic Belt. *International Journal of Earth Science*, 98(6): 1411–1467
- Zhang SH, Zhao Y, Liu XC, Liu DY, Chen FK, Xie LW and Chen HH. 2009b. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complex from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle. *Lithos*, 110(1–4): 229–246
- Zhang W and Jian P. 2012. SHRIMP dating of the Permian Guyang diorite-quartz diorite-tonalite suite in the northern margin of the North China Craton. *Geology in China*, 39(6): 1593–1603 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XH, Zhang HF, Tang YJ, Wilde SA and Hu ZC. 2008. Geochemistry of Permian bimodal volcanic rocks from central Inner Mongolia, North China: Implication for tectonic setting and Phanerozoic continental growth in Central Asian Orogenic belt. *Lithos*, 249(3–4): 262–281
- Zhang XH and Zhai MG. 2010. Magmatism and its metallogenetic effects during the Paleozoic continental crustal construction in northern North China: An overview. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5): 1329–13416 (in Chinese with English abstract)
- Zhang XH, Mao Q, Zhang HF, Zhai MG, Yang YH and Hu ZC. 2011. Mafic and felsic magma interaction during the construction of high-K calc-alkaline plutons within a metacratonic passive margin: The Early Permian Guyang batholith from the northern North China Craton. *Lithos*, 125(1–2): 569–591
- Zhang XH, Xue HF, Yuan LL, Ma YG and Wilde SA. 2012. Late Permian appinite-granite complex from northwestern Liaoning, North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. *Lithos*, 155: 201–217
- Zhao GC, Wilde SA, Li SZ, Sun M, Grant ML and Li XP. 2007. U-Pb zircon age constraints on the Dongwanzi ultramafic-mafic body, North China, confirm it is not an Archean ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 255(1–2): 85–93
- Zhao JL, Qiu JS, Li Z, Liu L and Li YL. 2012. Petrogenesis of the Taiwushan granite pluton in Fujian Province: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3938–3950 (in Chinese with English abstract)
- Zhao KD, Jiang SY, Yang SY, Dai BZ and Lu JJ. 2012. Mineral chemistry, trace elements and Sr-Nd-Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the Shi-Hang zone, South China. *Gondwana Research*, 22(1): 310–324
- Zhao L. 2008. Geochemistry and tectonic implications of the Late Palaeozoic mafic-ultramafic rocks belt on the middle segment of the northern margin of the North China Plate. Ph. D. Dissertation. Beijing: Peking University (in Chinese with English summary)
- Zhao L, Wu TR and Luo HL. 2011. SHRIMP U-Pb dating, geochemistry and tectonic implications of the Beiqigetao gabbros in Urad Zhongqi area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10): 3071–3082 (in Chinese with English abstract)
- Zhao QY, Liu ZH, Wu XW and Chen XF. 2007. Characteristics and origin of Halaheshao pluton in Daqingshan region, Inner Mongolia. *Journal of Mineral and Petrology*, 27(1): 46–51 (in Chinese with English abstract)
- Zhou LY. 2009. Magmatic flow of granodiorite and its tectonic significance in the northern margin of the North China Craton. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English summary)

附中文参考文献

- 陈斌, 赵国春, Wilde S. 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. *地质评论*, 47(4): 361–364
- 池际尚, 路凤香. 1996. 华北地台金伯利岩及古生代岩石圈地幔特征. 北京: 科学出版社, 1–283
- 凤永刚, 刘树文, 吕勇军, 田伟, 柳小明. 2009. 冀北凤山晚古生代闪长岩-花岗质岩石的成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素制约. *北京大学学报(自然科学版)*, 45(1): 59–70
- 洪大卫, 黄怀曾, 肖军宜, 薛怀民. 1994. 内蒙古中部二叠纪碱性花岗岩及其地球动力学意义. *地质学报*, 68(3): 219–230
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595–2604
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481–492
- 侯万荣, 聂凤军, 胡建民, 刘翼飞, 肖伟, 刘勇, 张可. 2011. 内蒙古乌拉山地区沙德盖岩体年代学、地球化学特征及成因探讨. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1914–1927
- 侯万荣, 聂凤军, 江思宏. 2012. 岩浆活动与金的成矿作用——以哈达门沟和金厂沟梁金矿床为例. 北京: 地质出版社, 28–75
- 胡明月, 何红蓼, 詹秀春, 樊兴涛, 王广, 贾泽荣. 2008. 基体归一定量技术在激光烧蚀-等离子体质谱法锆石原位多元素分析中的应用. *分析化学*, 36(7): 947–953
- 李锦轶, 高立明, 孙桂华, 李亚萍, 王彦斌. 2007. 内蒙古东部双井

- 子中三叠世同碰撞壳源花岗岩的确定及其对西伯利亚与中朝古板块碰撞时限的约束. 岩石学报, 23(3): 565–582
- 李树勋, 徐学纯, 刘喜山, 孙德育. 1994. 内蒙古乌拉山区早前寒武纪地质. 北京: 地质出版社, 1–140
- 李献华. 1996. Sm-Nd 模式年龄和等时线年龄的适用性与局限性. 地质科学, 31(1): 97–104
- 李益龙, 周汉文, 肖文交, 钟增球, 尹淑苹, 李福林. 2012. 古亚洲构造域和西太平洋构造域在索伦缝合带东段的叠加: 来自内蒙古林西县西拉木伦断裂带内变形闪长岩的岩石学、地球化学和年代学证据. 地球科学, 37(3): 433–450
- 柳长峰, 张浩然, 於焱森, 周志广, 刘文灿, 张华峰. 2010. 内蒙古中部四子王旗地区北极各岩体锆石定年及其岩石化学特征. 现代地质, 24(1): 112–150
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢. 2003. 广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩的成因. 岩石矿物学杂志, 22(1): 1–10
- 刘春花, 尹京武, 吴才来, 蔡佳, 邵兴坤, 杨海涛, 邵源红, 雷敏, 徐海明, 王军. 2012. 新疆拜城县波孜果尔 A 型花岗岩类矿物学特征及岩浆形成的温度条件. 矿物岩石学杂志, 31(4): 589–602
- 刘洪涛, 孙世华, 刘建明, 翟明国. 2002. 华北克拉通北缘中生代高锆花岗岩类: 地球化学与源区性质. 岩石学报, 18(3): 257–274
- 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 2009. 华北板块北缘乌梁斯太 A 型花岗岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及构造意义. 岩石学报, 25(3): 515–526
- 马旭, 陈斌, 牛晓露. 2009. 冀东晚古生代东湾子岩体的岩石成因研究. 岩石学报, 25(8): 1975–1988
- 邱检生, 肖娥, 胡建, 徐夕生, 蒋少涌, 李真. 2008. 福建北东沿海高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Nd-Hf 同位素制约. 岩石学报, 24(11): 2468–2484
- 邱检生, 刘亮, 李真. 2011. 浙江黄岩望海岗石英正长岩的锆石 U-Pb 年代学与 Sr-Nd-Hf 同位素地球化学及其对岩石成因的约束. 岩石学报, 27(6): 1557–1572
- 邵济安. 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京: 北京大学出版社, 1–139
- 施光海, 苗来成, 张福勤, 简平, 范蔚茗, 刘敦一. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义. 科学通报, 49(4): 384–389
- 童英, 洪大卫, 王涛, 史兴俊, 张建军, 曾涛. 2010. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义. 地球科学, 31(3): 395–412
- 汪传胜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 唐俊华, 汤晓茜. 2009. 东天山哈尔里克山区二叠纪高钾钙碱性花岗岩成因及地质意义. 岩石学报, 25(6): 1499–1511
- 王芳, 陈福坤, 侯振辉, 彭澎, 翟明国. 2009. 华北陆块北缘崇礼-赤城地区晚古生代花岗岩类的锆石年龄和 Sr-Nd-Hf 同位素组成. 岩石学报, 25(11): 3057–3074
- 王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 1991. 中国华夏与安加拉古陆间的板块构造. 北京: 北京大学出版社, 56–60
- 王涛, 刘燊, 胡瑞忠, 冯彩霞, 齐有强, 冯光英, 王长华. 2009. 苏鲁造山带 A 型花岗岩的元素地球化学及其成因. 吉林大学学报(地球科学版), 39(4): 676–688
- 王婉琼, 刘正宏, 王兴安, 张超, 范志伟, 时溢, 朱凯. 2012. 内蒙古乌拉特中旗海西期黑云母二长花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 42(6): 1771–1782
- 王玉净, 樊志勇. 1997. 内蒙古西拉木伦河北部蛇绿岩带中二叠纪放射虫的发现及其地质意义. 古生物学报, 36(1): 58–69
- 吴兆剑, 韩效忠, 易超, 祁才吉, 惠小朝, 王明太. 2013. 鄂尔多斯盆地东胜地区直罗组砂岩的地球化学特征与物源分析. 现代地质, 27(3): 557–567
- 肖娥, 胡建, 张遵忠, 戴宝章, 王艳芬, 李海勇. 2012. 东秦岭花山复式岩基中蒿坪与金山庙花岗岩体岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素组成. 岩石学报, 28(12): 4031–4036
- 徐佳佳, 赖勇, 崔栋, 鲁彬. 2012. 内蒙古前进场岩体岩石学与锆石 U-Pb 年代学研究. 北京大学学报(自然科学版), 48(4): 617–628
- 薛怀民, 郭利军, 侯增谦, 周喜文, 童英, 潘晓非. 2009. 中亚-蒙古造山带东段的锡林郭勒杂岩: 早华力西期造山作用的产物而非古老陆块? 锆石 SHRIMP U-Pb 年代学证据. 岩石学报, 25(8): 2001–2010
- 袁桂邦, 王惠初. 2006. 内蒙古武川西北部早二叠世岩浆活动及其构造意义. 地质调查与研究, 29(4): 303–310
- 张青伟. 2011. 华北板块北缘中段晚古生代花岗岩类特征及其地质意义. 博士学位论文. 长春: 吉林大学
- 张青伟, 刘正宏, 柴社立, 徐仲元, 徐学纯. 2011. 内蒙古乌拉特中旗乌兰地区含石榴石花岗岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 41(3): 745–752
- 张拴宏, 赵越, 宋彪, 吴海. 2004. 冀北隆化早前寒武纪高级变质区内的晚古生代片麻状花岗闪长岩-锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造意义. 岩石学报, 20(3): 621–626
- 张维, 简平. 2012. 华北北缘固阳二叠纪闪长岩-石英闪长岩-英云闪长岩套 SHRIMP 年代学. 中国地质, 39(6): 1593–1603
- 张晓晖, 翟明国. 2010. 华北北部古生代大陆地壳增生过程中的岩浆作用与成矿效应. 岩石学报, 26(5): 1329–1341
- 赵蛟龙, 邱检生, 李真, 刘亮, 李友连. 2012. 福建太武山花岗岩体成因: 锆石 U-Pb 年代学与 Hf 同位素制约. 岩石学报, 28(12): 3938–3950
- 赵磊. 2008. 华北板块北缘中段晚古生代镁铁-超镁铁岩的岩石地球化学特征及其构造意义. 博士学位论文. 北京: 北京大学
- 赵磊, 吴泰然, 罗红玲. 2011. 内蒙古乌拉特中旗北七哥陶辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 27(10): 3071–3082
- 赵庆英, 刘正宏, 吴新伟, 陈晓峰. 2007. 内蒙古大青山地区哈拉合少岩体特征及成因. 矿物岩石, 27(1): 46–51
- 周丽云. 2009. 冀北花岗岩闪长岩的岩浆流动特征及其地质意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学