

内蒙古克什克腾旗大石寨组凝灰岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义

许强伟¹⁾, 王玘²⁾, 王志强³⁾, 王成明⁴⁾, 郑义⁴⁾, 方京⁵⁾

1) 北京大学地球与空间科学学院, 北京, 100871;

2) 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室, 南海海洋研究所, 广州, 510301;

3) 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥, 230009;

4) 中山大学地球科学与工程学院, 广州, 510275;

5) 中国科学院深海科学与工程研究所, 海南三亚, 572000

内容提要: 本文对内蒙古克什克腾旗长岭子地区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学、锆石原位 Hf 同位素分析及地球化学研究。测年结果表明样品中锆石年龄主要分七组: $3140 \pm 19 \sim 2826 \pm 36$ Ma, $2761 \pm 36 \sim 2273 \pm 23$ Ma, $2025 \pm 27 \sim 1673 \pm 89$ Ma, $1036 \pm 144 \sim 673 \pm 17$ Ma, $574 \pm 19 \sim 422 \pm 11$ Ma, $392 \pm 11 \sim 312 \pm 10$ Ma 和 $224 \pm 18 \sim 133 \pm 2$ Ma。结合锆石的原位微区 Hf 同位素结果 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-18.0 \sim 16.8$, $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 和 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 分别为 $0.000235 \sim 0.005759$ 和 $0.280524 \sim 0.283022$, $T_{\text{DM2}} = 4291 \sim 293$ Ma, 我们认为大石寨组岩屑晶屑凝灰岩中第一组锆石 (3140 ~ 2826 Ma) 指示东北地区或其邻区可能发育过中太古代—古太古代的古老基底。第二组锆石 (2761 ~ 2273 Ma) 记录了 Kenorland 超大陆汇聚的地质事件, 揭示了大兴安岭地区太古代—古元古代古老结晶基底的信息。第三组锆石 (2025 ~ 1673 Ma) 则是 Columbia 超大陆形成地质事件的响应。第四、五组锆石 (1036 ~ 673 Ma, 574 ~ 422 Ma) 来源于东北地区, 分别记录了区域新元古代 Rondinia 和泛非期 Gondwana 两期重大地质事件。第六组锆石 (392 ~ 312 Ma) 峰值年龄为 347 Ma, 加权平均年龄为 350.0 ± 6.5 Ma (MSWD = 4.0, $n = 43$), 占总数 48%, 代表凝灰岩的形成时代, 属于早石炭世。第七组锆石 (224 ~ 133 Ma) 可能与后期流体改造有关。岩石地球化学分析表明, 大石寨组岩屑晶屑凝灰岩大部分样品属于偏铝质 ($A/\text{CNK} = 0.65 \sim 1.95$)、钙碱性 ($\delta = 0.88 \sim 2.50$) 火山岩, 具有轻稀土富集, 重稀土相对亏损, 无明显 Eu 异常, 富集 Ba、Rb、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素的特点, 与安第斯型活动大陆边缘火山岩相似。结合前人已发表地质资料, 我们认为克什克腾旗大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩为古亚洲洋俯冲过程中洋壳脱水产生的流体与上覆地幔楔相互作用后形成的。形成于活动大陆边缘弧环境, 指示古亚洲洋在早石炭世尚未闭合。

关键词: 克什克腾旗; 大石寨组; 年代学; 岩石地球化学; 古亚洲洋

中亚造山带北与西伯利亚板块相邻, 南与华北克拉通和塔里木克拉通毗邻 (Sengör et al., 1993), 在其构造演化过程中, 经历了大洋开启与俯冲、板块碰撞拼合、后造山等阶段, 由岛弧、蛇绿岩、洋岛、海山、增生楔、洋底高原和微陆块等增生拼贴而成 (Dobretsov et al., 1995; Windley et al., 2007)。我国东北地区位于中亚造山带东段, 夹于西伯利亚板块和华北克拉通之间, 主要由松辽盆地、大兴安岭地区、华北克拉通北缘和吉黑褶皱带组成, 以微地块与

褶皱带的交织分布为特征 (图 1)。该地区构造演化历史复杂, 既有古亚洲洋演化特征, 又有滨太平洋造山带所叠加的特点 (黄汲清, 1987; 任纪舜等, 1990; 邵济安等, 1995; 吴福元等, 1999; 彭玉鲸等, 2002), 是大陆造山带地质构造研究遗留问题和争议较多的地区, 也是研究构造域转换、叠合成矿作用的理想地区 (陈衍景等, 2009, 2012; Chen Yanjing et al., 2017)。

有关古亚洲洋闭合的时间和位置就是目前争议

注: 本文为国家自然科学基金青年基金资助项目 (编号: 41602065)、克什克腾旗金达矿业开发有限责任公司项目 (编号: 20150008) 的成果。

收稿日期: 2018-04-09; 改回日期: 2018-12-13; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.009

作者简介: 许强伟, 男, 1986 年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, Email: qwxu@pku.edu.cn。通讯作者: 王玘, 女, 1987 年生, 博士, 矿床学、岩石学、矿床学专业, Email: wangpin@scsio.ac.cn。

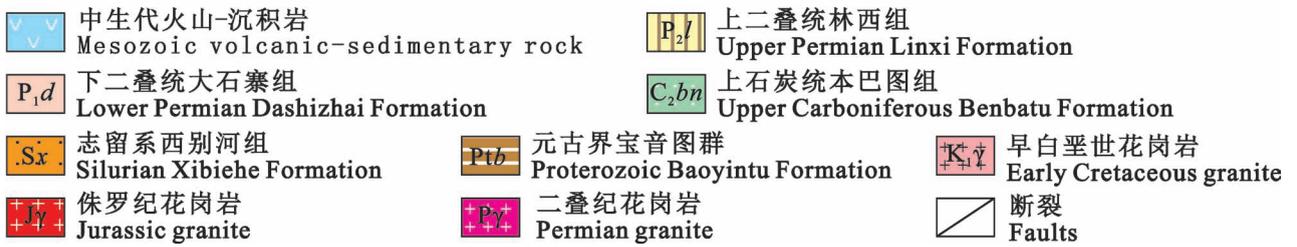
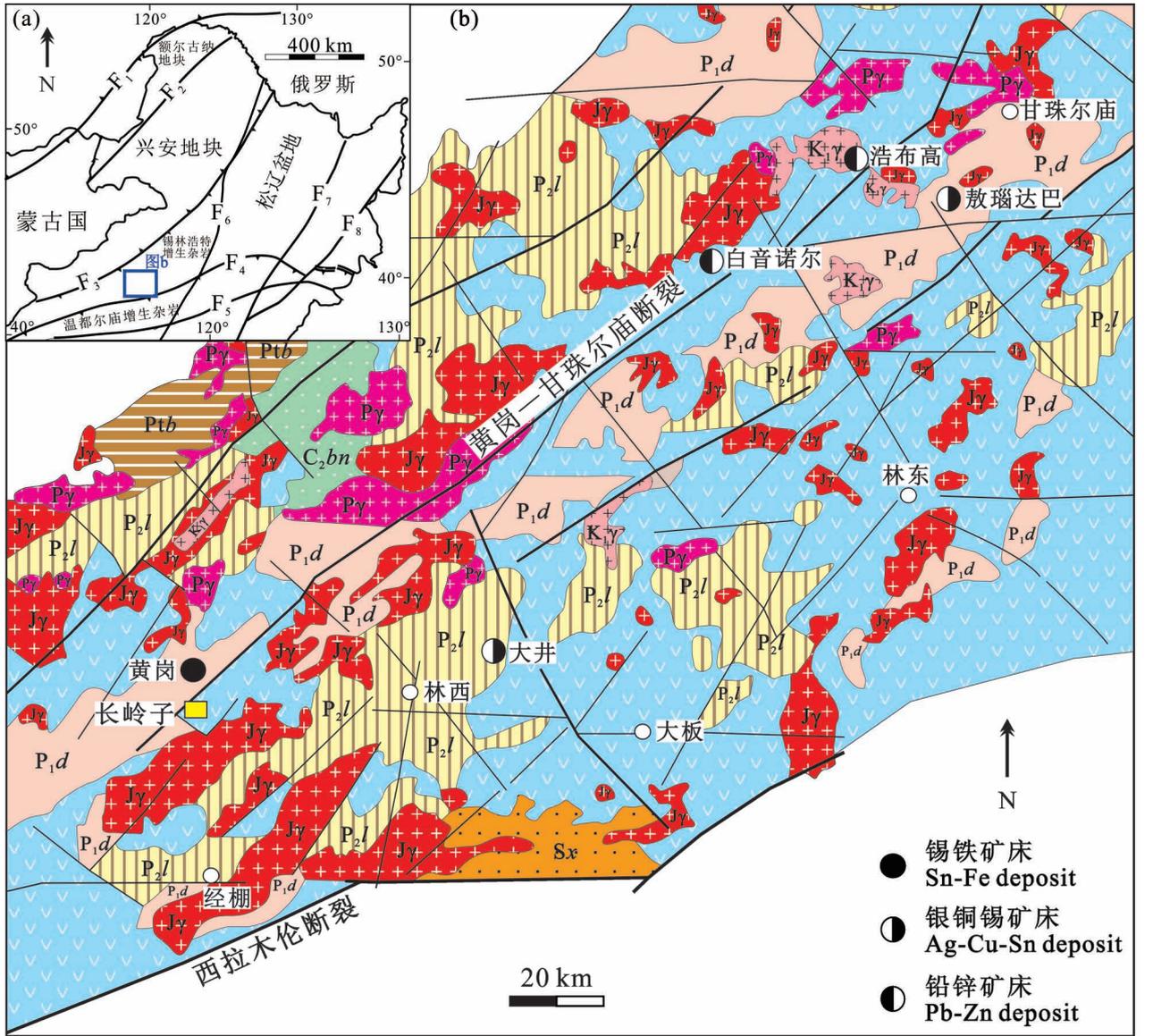


图 1 (a) 中国东北大地构造简图(据陈衍景等, 2012; Chen Yanjing et al., 2017 修改);
(b) 黄岗—甘珠尔庙地区地质简图(据芮宗瑶等, 1994 修改)

Fig. 1 (a) Simplified tectonic map of the Northeast China (Modified after Chen Yanjing et al., 2012&, 2017);
(b) Sketch geological map of the Huanggang—Ganzhuermiao area (Modified after Rui Zongyao et al., 1994&)

F₁—蒙古—鄂霍茨克缝合带; F₂—得尔布干断裂; F₃—二连—贺根山断裂; F₄—西拉木伦断裂;
F₅—康宝—赤峰断裂; F₆—嫩江断裂; F₇—依兰—伊通断裂; F₈—敦密断裂

F₁—Mongolia—Okhotsk suture zone; F₂—De'erbugan faults; F₃—Erlian—Hegenshan faults; F₄—Xilamulun faults;
F₅—Kang—Chifeng faults; F₆—Nenjiang faults; F₇—Yilan—Yitong faults; F₈—Dunmi faults

较多的一个问题(王荃, 1986; Tang Kedong, 1990; 徐备等, 1997; 李双林等, 1998; Xiao Wenjiao et al., 2003, 2009; 汪相, 2018; 吕洪波等, 2018), 大石寨组中酸性火山岩广泛发育在内蒙古中东部地区, 对它的研究能够为研究古亚洲洋的演化提供重要依据。近年来大量的学者对不同地区的大石寨组火山岩进行了同位素年代学研究, 获得的年龄范围比较宽泛, 介于 242 ~ 439 Ma(汪润洁, 1987; 高德臻等, 1998; Zhu Yongfeng et al., 2001; 陶继雄等, 2003; Zhang Xiaohui et al., 2008; 郭锋等, 2009; 曾维顺等, 2011; 张健, 2012; 陈彦等, 2014; 梅可辰等, 2015; 关庆彬等, 2016)。而关于大石寨组火山岩的构造背景也存在一定的争议, 目前主要存在以下几种观点: ① 裂谷或裂隙槽的拉张环境(唐克东, 1989; 任纪舜, 1990; 邵济安, 1991; 唐克东, 1992; 苏养正, 1996; 张臣等, 1997; 吕志成等, 2002; Zhang Xiaohui et al., 2008); ② 岛弧或活动大陆边缘弧背景(高德臻等, 1998; 耿明山, 1998; 陶继雄等, 2003; 赵芝, 2008; 郭锋等, 2009; 刘建峰, 2009; 张健, 2012; 樊航宇等, 2014; 梅可辰等, 2015); ③ 西伯利亚板块和华北板块碰撞完成后的伸展环境(Zhu Yongfeng et al., 2001)。

本文对内蒙古克什克腾旗长岭子地区的大石寨组凝灰岩进行了岩石学、岩石地球化学及锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究, 进而探讨了大石寨组凝灰岩的形成时代、岩石成因以及构造环境, 补充了大石寨组火山岩的年龄, 为其构造环境和岩石成因提供新的依据, 同时为古亚洲洋闭合的时间提供证据。

1 地质背景

1.1 区域地质

中亚造山带西起哈萨克斯坦向东延伸至西伯利亚, 宽约 300 km, 其北为西伯利亚克拉通, 南为塔里木及华北克拉通(图 1; Xiao Wenjiao et al., 2003; 汪相, 2018)。大兴安岭属于中亚造山带东段, 其北以蒙古—鄂霍茨克缝合带与西伯利亚克拉通为界, 南以康保—赤峰断裂与华北克拉通为界(最近也有学者研究认为二者最终拼合界线应该南移至儿狼山—阴山—燕山一线(吕洪波等, 2018), 东以嫩江断裂与松辽盆地为界, 向西延伸至俄罗斯、蒙古境内(图 1a), 区内包括四个主要的构造单元, 自北向南依次为额尔古纳地块、兴安地块、锡林浩特晚古生代增生杂岩带以及温都尔庙早古生代弧增生杂岩带, 分别以得尔布干断裂、二连—贺根山断裂、西拉

木伦断裂为界(图 1a; 陈衍景等, 2012; Li Nuo et al., 2012; 祁进平等, 2005)。二连—贺根山断裂带(索伦缝合带), 被认为是古亚洲洋最终闭合的位置(陈衍景等, 2012; 祁进平等, 2005)。

该区主要发育四个岩石地层序列: 以额尔古纳地块中新元古代兴华渡口群为代表的前寒武纪变质基底(Wu Guang et al., 2012); 由片岩、砂质页岩、大理岩和安山岩组成的早古生代变质火山—沉积岩序列; 广泛发育的晚古生代低级变质火山—沉积岩; 侏罗纪—白垩纪中酸性火山岩(Wu Fuyuan et al., 2011; Zhai Degao et al., 2014; Zhou Jianbo et al., 2012)。该区侵入岩主要形成于晚古生代和中生代, 并有少量早古生代侵入岩出露于漠河、塔河以及多宝山地区(Ge Wenchun et al., 2005; Liu Jun et al., 2012; Wu Guang et al., 2005, 2012)。晚古生代和中生代侵入岩主要为花岗岩类, 可见少量晚古生代镁铁质—超镁铁质岩石沿构造单元的边界部位发育(刘建明等, 2004)。

内蒙古克什克腾旗长岭子地区位于大兴安岭南段黄岗—甘珠尔庙地区, 西拉木伦断裂、二连—贺根山断裂以及嫩江断裂的交汇处, 属于中亚造山带的东段(图 1a)。区域内主要出露有元古代、古生代、中生代和新生代的地质, 其中二叠系和侏罗系出露最为广泛。元古界宝音图群是区域内最古老的地质单元, 为一套经历了绿片岩相到低角闪岩相的变质岩系, 岩性为云母片岩、黑云斜长片麻岩、云母石英片岩和石英岩, 夹有阳起石片岩、炭质千枚岩、变质砂岩、大理岩。古生代地层包括志留系西别河组、上石炭统本巴图组、下二叠统大石寨组和上二叠统林西组。志留系西别河组以板岩为主, 夹有少量砂岩和灰岩; 本巴图组为晚石炭世的海相碎屑岩岩系, 区域内主要为灰岩, 局部夹少许砂岩, 含丰富的化石; 下二叠统大石寨组由中、酸性火山岩、细碧角斑岩夹砂岩、板岩组成, 为一套海相火山岩建造; 上二叠统林西组主要由砂岩、板岩夹泥页岩组成, 是一套潟湖—淡水湖相沉积; 中侏罗统新民组主要岩石组合为砂岩、砾岩、泥岩夹煤层; 上侏罗统满克头鄂博组主要岩石组合为酸性熔岩、凝灰岩、熔结凝灰岩夹凝灰质砂岩; 下白垩统白音高老组主要岩石组合为酸性火山岩、局部见中性火山岩、火山碎屑岩、砂岩、砂砾岩夹煤层; 目前关于白音高老组的年龄存在争议。早先的地质工作一般将白音高老组归为晚侏罗世(内蒙古自治区地质矿产局, 1991; 李文国, 1996), 但最新的定年结果显示其形成时代为早白垩世(苟

军等, 2010; 张吉衡, 2009; 秦涛等, 2014)。

区内古生代地层经历了强烈的褶皱, 黄岗—甘珠尔庙复式背斜呈 NE—SW 向贯穿本区。区内断裂构造发育, 以 NE—NNE 向和 EW 向为主。这些断裂近乎等距分布, 相互切割成格子状, 构成区域基本构造格架(图 1b; 舒启海等, 2011)。NE 向的黄岗—甘珠尔庙断裂带对本区二叠纪和侏罗纪地质发展起着重要的控制作用(王琦, 1991; 舒启海等, 2011)。

区内海西期以来的岩浆活动频繁, 表现为强烈的火山喷发和岩浆侵入活动, 且自 SW 向 NE 火山岩呈现由基性向中酸性演化的趋势(王琦, 1991; 舒启海等, 2011)。伴随强烈的岩浆活动, 区内燕山期成矿作用活跃, 成为中亚造山带兴蒙段最主要的大规模成矿作用发生时期(陈衍景等, 2009a)。区内晚侏罗世火山活动表现为一套陆相喷发的中酸性火山岩系列, 其分布受区域构造的控制, 总体呈 NE 向展布(图 1b)。

1.2 研究区地质特征

长岭子研究区地层出露简单, 主要有大石寨组、下白垩统白音高老组及第四系(图 2)。大石寨组厚度大于 1000 m, 主要岩性为英安质岩屑晶屑凝灰岩、砾岩、砂岩, 分布于研究区北部。白音高老组主要由流纹质岩屑晶屑凝灰岩和流纹质晶屑凝灰岩组成, 分布于研究区南部, 与大石寨组呈不整合接触关系, 呈盖层状覆盖其上(图 2)。

研究区内褶皱构造和断裂构造在地表发育不明显。钻孔揭露出研究区北部大石寨组内存在构造角砾岩带和揉皱构造: 构造角砾岩带中, 岩石破碎, 角砾呈拉长状、次棱角状—浑圆状, 含黑色泥质和炭质胶结物; 揉皱构造主要发育在板

岩和碎屑灰岩内, 方解石、硅灰石等矿物沿层理面充填, 呈条带状, 褶曲状。而研究区南部钻孔揭露少量断裂构造的发育, 表现为构造角砾岩带, 岩石破碎, 带中见绿泥石化、碳酸盐化蚀变, 控制长度约 600 m, 走向 65°, 倾向北西, 倾角 50° ~ 65°。该断裂构造控制了铜、银多金属矿体的产出, 矿体一般赋存在断裂构造的上部。

研究区内岩浆岩出露较少, 仅在研究区北部出露出一花岗斑岩体, 呈岩株状产出, 侵入到大石寨组砾岩和砂岩中, 出露面积约 0.5 km²(图 2)。

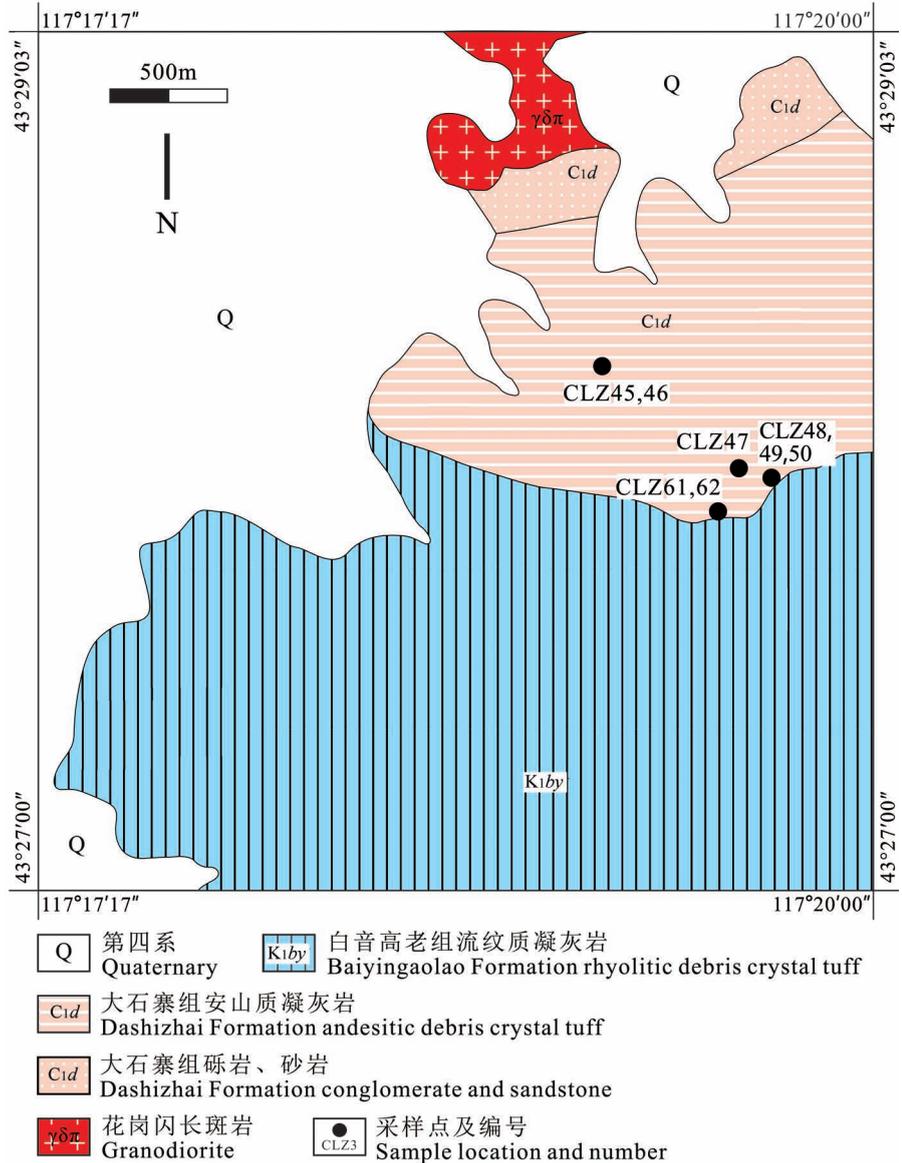


图 2 克什克腾旗长岭子研究区地质简图

(据内蒙古山金地质矿产勘查有限公司[●]修改)

Fig. 2 Geological map of the Changlingzi Pb—Zn area, Hexigten Banner (Modified after Inner Mongolia Shandong Gold Geological mineral exploration Co. Ltd.[●])

2 样品及测试方法

2.1 样品特征

本文采集了研究区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品 8 块 (CLZ45 ~ 50、61、62) (图 3)。

大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩标本呈灰黑色,凝灰结构,块状构造(图 3)。基质主要为火山灰,粒度 <0.1 mm,含量 $>80\%$ 。晶屑包括石英和长石,石英晶屑粒度为 $0.3 \sim 2$ mm,含量为 8% 左右,表面干净,可见波状消光;长石晶屑包括钾长石(3%)和斜长石(2%),粒度为 $0.4 \sim 1.5$ mm,可见典型的正长石卡式双晶和斜长石聚片双晶,长石普遍发生高岭土化和绢云母化;岩屑粒度为 $0.4 \sim 3.5$ mm,含量 = 6% ,呈次棱角状。

2.2 分析方法

为了准确厘定研究区火成岩的成岩年龄,本文选取了大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品 CLZ46 和 CLZ47 的锆石进行 U-Pb 定年测试。首先将待测年样品经过手工破碎、淘洗、电磁选、重液分选,在双目镜下挑选,得到含包裹体少、无明显裂隙且晶型完好的锆石。然后将锆石置于环氧树脂内研磨,再抛光清洗制成激光样品靶。锆石的阴极发光(CL)图像主要是查明锆石内部结构并结合透射光和反射光照片选出晶形较好、无裂纹及包裹体不发育的锆石

晶体进行测试。样品 CLZ46 和 CLZ47 锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 同位素年龄分析在中山大学广东省海洋资源与近岸工程重点实验室完成。测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7700x)和准分子激光剥蚀系统(GeoLasPro)联机,激光器为 ArF 准分子激光器。激光剥蚀束斑直径为 $32 \mu\text{m}$,激光能量密度为 5 J/cm^2 ,剥蚀频率为 5 Hz 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,Ar 为辅助气。锆石年龄计算采用标准锆石 91500 (1062 Ma) 为外标,标准锆石 Plesovice (337 Ma) 为监控盲样。元素含量采用国际标样 NIST610 作为外标,为内标元素进行校正。剥蚀样品前采集 18 s 的空白,随后进行 45 s 的样品剥蚀,剥蚀完成后进行 27 s 的样品池冲洗。采样方式为单点剥蚀,每完成 5 个测点的样品测定,加测标样一次。在 10 个锆石样品点前、后各测一次 NIST610。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 ICPMSDataCal 程序计算,加权平均年龄及谐和图的绘制使用 Isoplot/Ex (3.0) (Ludwig, 2003) 完成。分析数据及锆石 U-Pb 谐和图给出误差为 2σ ,95%的置信度。

Hf 同位素分析在天津地质矿产研究所进行。锆石原位 Lu-Hf 同位素测定采用 NEPTUNE 多接收电感耦合等离子体质谱仪和 NEW WAVE 193 nm FX ArF 准分子激光器完成。Lu-Hf 同位素分析方法

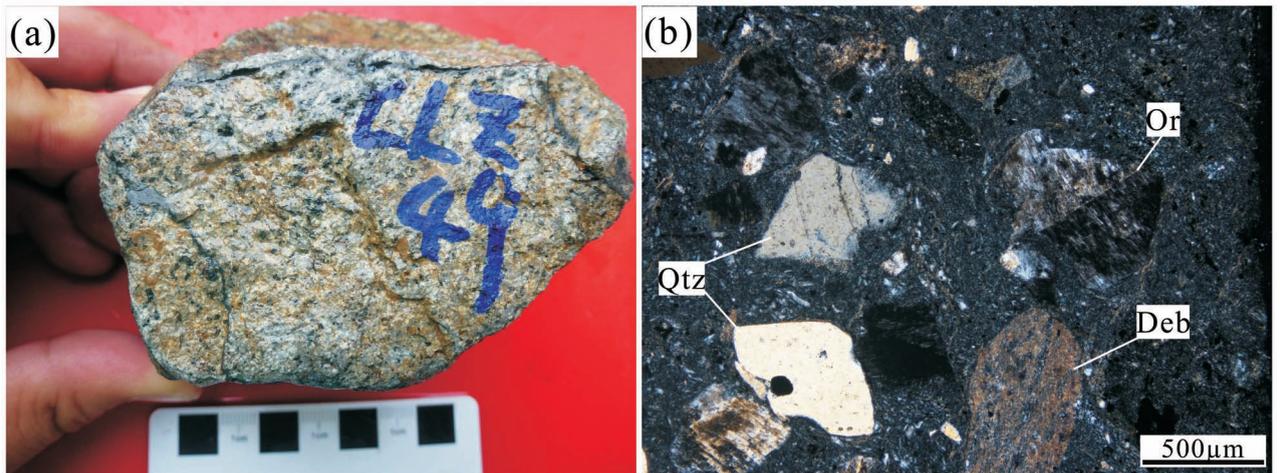


图 3 克什克腾旗长岭子研究区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩岩相学特征:(a)大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩手标本照片;(b)大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩显示凝灰结构,正长石具有典型的卡式双晶(正交光)

Fig. 3 Petrographic characteristics of igneous rocks in the Changlingzi deposit: (a) Hand specimen photo of the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuff; (b) Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuff shows tuffaceous texture, and the orthoclases show typical Carlsbad twin (perpendicular polarized light)

Deb—岩屑;Or—正长石;Qtz—石英
Deb—Debris;Or—Orthose;Qtz—Quartz

和同位素分馏校正见参考文献 (Wu Fuyuan et al., 2006; 耿建珍等, 2011)。

$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 的计算采用 ^{176}Lu 衰变常数为 1.867×10^{-11} (Söderlund et al., 2004), 现今的球粒陨石 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.0332$ 和 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.282772$ (Blichert-Toft and Albarède, 1997); Hf 单阶段亏损地幔模式年龄 T_{DM1} 的计算采用现今的亏损地幔 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf}) = 0.0384$ 和 $n(^{176}\text{Hf})/$

$n(^{177}\text{Hf}) = 0.28325$ (Griffin et al., 2000); Hf 两阶段亏损地幔模式年龄 (T_{DM2}) 的计算采用亏损地幔 $f_{\text{DM}} = 0.16$ 和平均地壳 $f_{\text{CC}} = 0.55$ (Amelin et al., 2000; Griffin et al., 2000)。

由于锆石 Lu-Hf 同位素体系具有非常高的封闭温度, 锆石的同位素比率在后期部分熔融或分离和结晶过程中不发生变化。因此, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值可以代表岩浆源区的组成特征。一般认为, 具有正

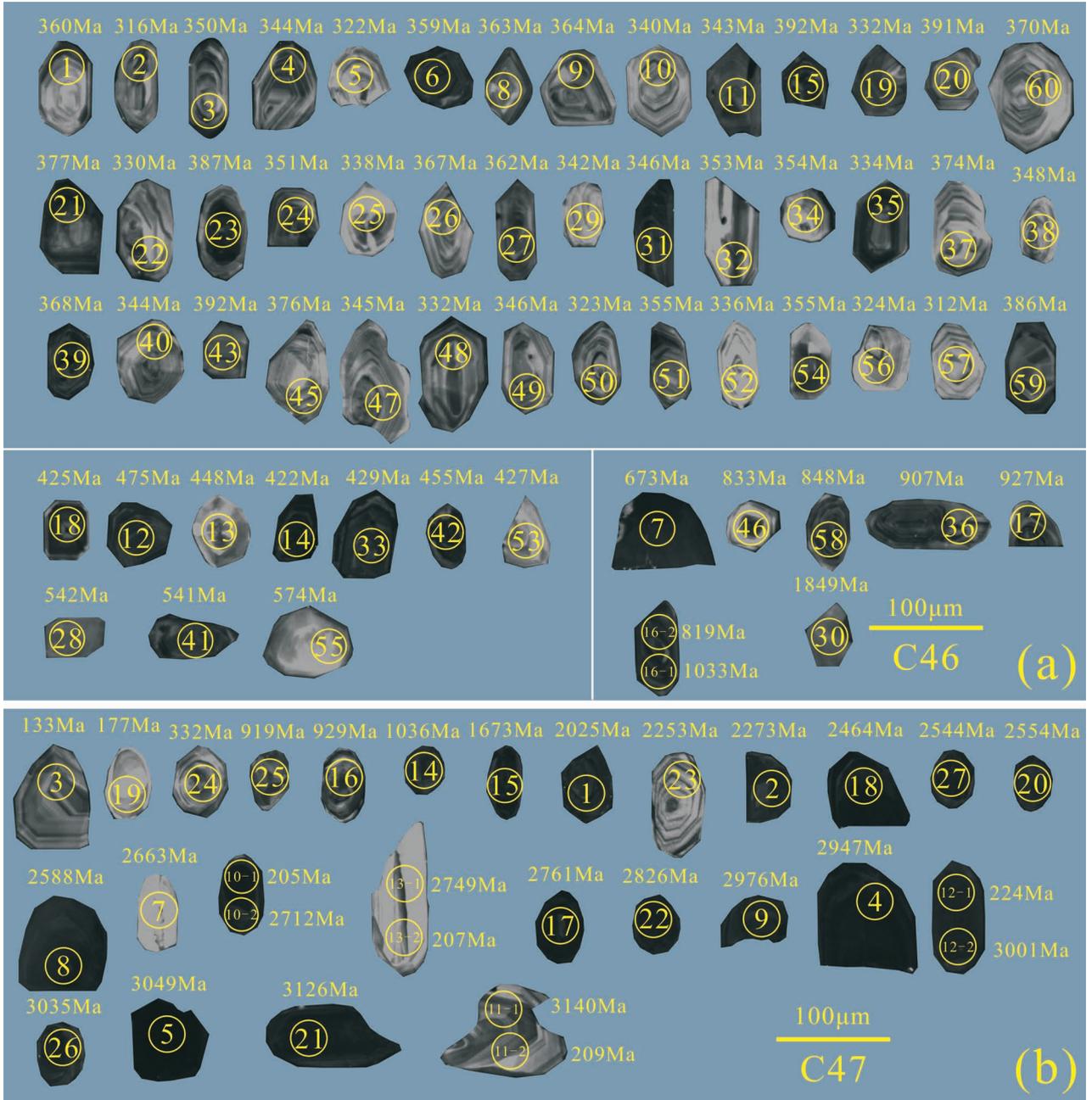


图4 克什腾旗长岭子地区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品 CLZ46(a) 和 CLZ47(b) 中锆石阴极发光图像
 Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircon grains from the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs CLZ46 (a) and CLZ47 (b) in Changlingzi area, Hexigten Banner

表 1 克什克腾旗长岭子大石寨组安山质屑层凝灰岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS Zircon U-Pb analysis for the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs in Changlingzi area, Hexigten Banner

测点号	元素含量 ($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄 (Ma)						不谐和度 (%)	
	Pb	Th	U	Th/U		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$			
				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		
46-1	17.19	154.7	200.3	0.7723	0.0540	0.0065	0.4274	0.0513	0.0575	0.0020	369	252.3	360.1	12.27	361.3	36.47	0
46-2	42.77	419.7	587.7	0.7142	0.0527	0.0038	0.3652	0.0261	0.0503	0.0015	315.9	153.7	316.1	8.92	316.1	19.39	0
46-3	50.55	534.6	508.6	1.051	0.0539	0.0039	0.4122	0.0301	0.0557	0.0016	366	155.0	349.5	9.95	350.4	21.65	0
46-4	39.96	433.5	427.9	1.013	0.0535	0.0029	0.4040	0.0223	0.0548	0.0015	347.8	117.2	344	9.03	344.5	16.11	0
46-5	21.75	219.5	265.3	0.8274	0.0544	0.0043	0.3821	0.0306	0.0512	0.0016	386.3	169.9	321.6	9.52	328.6	22.5	-2
46-6	72.42	456.5	996.7	0.4580	0.0551	0.0031	0.4329	0.0247	0.0572	0.0016	414.3	119.0	358.7	9.67	365.2	17.53	-2
46-7	302.8	1933	1149	1.682	0.0630	0.0027	0.9532	0.0433	0.1101	0.0030	706.5	88.59	673.4	17.24	679.8	22.53	-1
46-8	29.04	303.2	280.0	1.083	0.0551	0.0042	0.4388	0.0339	0.0579	0.0017	414.4	162.7	363.1	10.48	369.4	23.9	-2
46-9	40.46	397.0	474.3	0.8370	0.0544	0.0033	0.4351	0.0268	0.0581	0.0017	388.3	129.7	364.2	10.05	366.8	18.94	-1
46-10	34.96	399.6	301.5	1.325	0.0543	0.0049	0.4045	0.0366	0.0542	0.0017	382.2	191.7	340	10.56	344.9	26.43	-1
46-11	48.43	361.3	645.4	0.5598	0.0578	0.0041	0.4344	0.0313	0.0546	0.0016	522.1	149.9	342.6	10.04	366.3	22.14	-7
46-12	70.55	363.6	902.5	0.4029	0.0573	0.0034	0.6031	0.0364	0.0765	0.0022	501.9	125.7	475	13.18	479.2	23.05	-1
46-13	21.05	170.1	147.0	1.157	0.0556	0.0081	0.5513	0.0788	0.0720	0.0031	436.2	294.8	448.2	18.47	445.8	51.61	1
46-14	181.7	1416	1958	0.7232	0.0630	0.0031	0.5863	0.0295	0.0676	0.0019	708	99.86	421.6	11.38	468.5	18.86	-11
46-15	90.84	658.7	1017	0.6476	0.0576	0.0029	0.4964	0.0257	0.0626	0.0018	512.9	106.9	391.5	10.59	409.3	17.46	-5
46-16-1	121.5	169.5	852.4	0.1988	0.0737	0.0028	1.715	0.0701	0.1689	0.0046	1033	75.33	1006	25.53	1014	26.23	3
46-16-2	99.88	166.9	701.4	0.2380	0.0670	0.0024	1.250	0.0473	0.1354	0.0035	836.7	72.1	818.5	19.78	823.4	21.34	-1
46-17	100.2	293.5	530.3	0.5535	0.0700	0.0029	1.491	0.0660	0.1546	0.0043	928.3	83.84	926.7	23.92	926.6	26.89	0
46-18	86.80	704.0	775.1	0.9083	0.0551	0.0025	0.5163	0.0247	0.0681	0.0019	414.2	98.9	424.6	11.31	422.7	16.51	0
46-19	42.21	359.8	717.6	0.5014	0.0534	0.0037	0.3883	0.0267	0.0528	0.0016	346.3	147.0	331.6	9.68	333.1	19.52	0
46-20	25.53	198.7	329.1	0.6038	0.0546	0.0041	0.4696	0.0356	0.0625	0.0019	395.3	161.4	390.6	11.77	390.9	24.58	0
46-21	33.30	182.8	417.7	0.4376	0.0540	0.0046	0.4475	0.0376	0.0601	0.0018	369.6	179.7	376.5	11.11	375.6	26.36	0
46-22	19.84	228.9	254.4	0.8996	0.0535	0.0056	0.3875	0.0405	0.0526	0.0017	350.8	221.7	330.1	10.23	332.6	29.65	-1
46-23	99.21	1031	959.7	1.075	0.0544	0.0035	0.4632	0.0299	0.0618	0.0018	387.6	137.6	386.5	10.68	386.5	20.73	0
46-24	34.39	238.6	500.0	0.4772	0.0540	0.0025	0.4157	0.0196	0.0559	0.0015	368.8	99.11	350.7	9.01	353	14.06	-1
46-25	9.882	83.87	138.0	0.6076	0.0528	0.0047	0.3913	0.0347	0.0538	0.0016	320.8	189.4	337.5	9.73	335.3	25.29	1
46-26	15.39	150.3	169.7	0.8857	0.0532	0.0058	0.4296	0.0468	0.0586	0.0020	335.6	231.5	367.3	12.03	362.9	33.21	1
46-27	28.58	223.8	388.1	0.5767	0.0546	0.0039	0.4344	0.0314	0.0578	0.0017	393.9	154.5	362.1	10.33	366.3	22.25	-1
46-28	21.95	110.3	200.6	0.5496	0.0585	0.0030	0.7067	0.0371	0.0877	0.0024	548.1	108.6	541.7	14.2	542.8	22.09	0
46-29	9.538	97.69	110.2	0.8868	0.0602	0.0066	0.4521	0.0492	0.0545	0.0019	610.5	221.5	342	11.54	378.7	34.38	-11

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						不谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ			
46-30	78.38	77.11	190.3	0.4052	0.1130	0.0032	5.179	0.1633	0.3324	0.0086	1849	50.13	1849	41.65	1849	26.83	0
46-31	55.38	451.1	719.0	0.6274	0.0576	0.0031	0.4384	0.0240	0.0552	0.0015	514.9	114.6	369.1	9.3	369.1	16.96	-7
46-32	30.23	438.7	254.8	1.721	0.0533	0.0050	0.388	0.0388	0.0563	0.0018	340.7	200.5	351.3	10.95	351.3	27.89	0
46-33	72.70	475.7	689.9	0.6896	0.0575	0.0033	0.5457	0.0318	0.0689	0.0019	509.1	122.3	442.2	11.63	442.2	20.91	-3
46-34	14.76	167.9	159.2	1.055	0.0547	0.0060	0.4252	0.0460	0.0564	0.0020	397.8	228.3	359.7	12.07	359.7	32.76	-2
46-35	67.40	607.3	746.0	0.8140	0.0536	0.0037	0.3928	0.0275	0.0532	0.0015	351.9	150.0	336.4	9.25	336.4	20.05	-1
46-36	45.56	155.8	230.9	0.6745	0.0691	0.0034	1.438	0.0723	0.1511	0.0042	900.2	97.88	904.8	23.5	904.8	30.11	0
46-37	16.13	162.1	179.9	0.9009	0.0540	0.0054	0.4444	0.0439	0.0597	0.0020	372.4	210.6	373.3	12.2	373.3	30.88	0
46-38	22.08	291.6	223.1	1.307	0.0521	0.0038	0.3981	0.0292	0.0555	0.0017	288.9	159.1	340.3	10.09	340.3	21.2	2
46-39	50.68	418.6	564.8	0.7412	0.0532	0.0028	0.4306	0.0229	0.0587	0.0016	336.4	113.6	363.6	9.75	363.6	16.26	1
46-40	24.86	262.3	293.6	0.8935	0.0534	0.0040	0.4036	0.0299	0.0548	0.0016	346	158.7	344.3	9.59	344.3	21.64	0
46-41	53.02	275.5	442.1	0.6233	0.0584	0.0027	0.7038	0.0335	0.0875	0.0024	543	97.61	541.1	14.01	541.1	19.96	0
46-42	153.4	187.9	2215	0.0849	0.0564	0.0018	0.5682	0.0197	0.0731	0.0019	466.9	68.77	456.8	11.29	456.8	12.73	0
46-43	28.01	176.7	368.1	0.4799	0.0542	0.0035	0.4690	0.0302	0.0628	0.0018	379.7	137.6	390.5	10.93	390.5	20.89	0
46-44	32.85	39.03	1101	0.0355	0.0692	0.0034	0.2866	0.0145	0.0301	0.0008	903.7	98.82	255.9	5.2	255.9	11.42	-34
46-45	18.84	209.7	183.6	1.142	0.0545	0.0073	0.4511	0.0600	0.0601	0.0022	390.6	276.8	378.1	13.51	378.1	42	-1
46-46	24.42	74.38	150.5	0.4941	0.0667	0.0067	1.267	0.1255	0.1379	0.0050	826.9	195.8	831	28.07	831	56.19	0
46-47	16.02	145.8	207.8	0.7013	0.0534	0.0049	0.4042	0.0371	0.0550	0.0016	343.6	194.8	344.7	9.93	344.7	26.81	0
46-48	30.65	446.1	306.2	1.457	0.0547	0.0058	0.3991	0.0416	0.0529	0.0018	400.1	220.8	341	11.25	341	30.19	-3
46-49	36.15	361.0	414.4	0.8713	0.0537	0.0031	0.4081	0.0237	0.0551	0.0015	358.6	123.4	347.5	9.15	347.5	17.05	0
46-50	31.67	379.6	286.1	1.327	0.0529	0.0034	0.3745	0.0245	0.0513	0.0015	326	140.4	323	9.08	323	18.09	0
46-51	16.72	168.6	213.5	0.7895	0.0545	0.0070	0.4259	0.0541	0.0567	0.0022	391.7	266.4	360.2	13.53	360.2	38.55	-1
46-52	10.81	131.2	120.5	1.089	0.0534	0.0045	0.3942	0.0334	0.0536	0.0016	345	181.2	337.4	9.91	337.4	24.35	0
46-53	11.19	90.02	120.4	0.7478	0.0552	0.0043	0.5220	0.0411	0.0685	0.0021	421.8	166.7	426.5	12.43	426.5	27.4	0
46-54	36.91	420.3	392.8	1.070	0.0539	0.0031	0.4199	0.0241	0.0566	0.0016	364.8	122.3	356	9.72	356	17.25	0
46-55	15.22	112.7	91.51	1.231	0.0597	0.0061	0.7665	0.0774	0.0931	0.0033	593.7	206.8	577.8	19.22	577.8	44.48	-1
46-56	11.11	83.31	174.2	0.4782	0.0529	0.0050	0.3756	0.0352	0.0515	0.0016	322.9	200.4	323.8	9.51	323.8	26.01	0
46-57	25.26	360.3	238.9	1.508	0.0524	0.0060	0.3589	0.0407	0.0497	0.0016	303.7	241.5	311.4	10.08	311.4	30.42	0
46-58	76.59	222.1	411.7	0.5394	0.0671	0.0030	1.301	0.0600	0.1406	0.0037	840.8	90.02	846.2	21.11	846.2	26.48	0
46-59	34.69	249.5	394.6	0.6322	0.0547	0.0046	0.4650	0.0385	0.0616	0.0019	401.1	176.2	387.7	11.39	387.7	26.68	-1
46-60	9.987	86.05	120.4	0.7147	0.0531	0.0066	0.4325	0.0538	0.0590	0.0019	334.8	260.4	364.9	11.7	364.9	38.11	1
47-1	324.3	224.0	1031	0.2173	0.1247	0.0019	5.143	0.0869	0.2995	0.0041	2025	26.93	1843	20.41	1843	14.36	17
47-2	292.3	72.30	763.7	0.0947	0.1438	0.0019	8.106	0.1227	0.4093	0.0055	2273	22.58	2243	25.18	2243	13.68	3

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						不谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	
47-3	32.49	998.3	798.6	1.250	0.0484	0.0029	0.1394	0.0083	0.0209	0.0004	119.6	136.3	133.4	2.39	132.5	7.4	1
47-4	478.2	69.60	655.7	0.1061	0.2154	0.0050	0.4732	0.5826	0.0146	0.0146	2947	36.87	2959	59.51	2952	26.24	0
47-5	1542	435.6	2002	0.2175	0.2296	0.0025	0.2816	0.6667	0.0087	0.0087	3049	17.5	3293	33.52	3143	12.94	-8
47-6	54.23	699.0	466.3	1.499	0.0952	0.0185	0.2990	0.0559	0.0228	0.0013	1533	327.9	145.1	8.37	265.6	43.68	-83
47-7	1902	307.5	2520	0.1220	0.1811	0.0024	0.2109	0.5570	0.0074	0.0074	2663	21.77	2854	30.82	2744	14.36	-7
47-8	274.7	144.8	485.1	0.2984	0.1731	0.0025	0.1918	0.5001	0.0068	0.0068	2588	23.71	2614	29.14	2600	15.04	-1
47-9	1343	544.0	1715	0.3172	0.2194	0.0026	0.2463	0.5872	0.0076	0.0076	2976	18.77	2978	30.78	2978	13.32	0
47-10-1	23.57	277.8	679.1	0.4091	0.0507	0.0033	0.0144	0.0322	0.0006	0.0006	228.2	142.5	204.5	3.72	206.5	11.9	-1
47-10-2	243.0	151.0	257.4	0.5864	0.1865	0.0068	0.5185	0.5217	0.0157	0.0157	2712	58.75	2706	66.58	2710	36.51	0
47-11-1	2286	1289	2274	0.5671	0.2430	0.0029	0.2989	0.6463	0.0082	0.0082	3140	18.64	3214	31.91	3169	13.38	-2
47-11-2	9.588	102.0	259.5	0.3930	0.0505	0.0065	0.0291	0.0329	0.0012	0.0012	217.4	271.9	208.8	7.2	209.6	24.02	0
47-12-1	22.00	234.0	539.0	0.4342	0.0508	0.0041	0.0194	0.0353	0.0007	0.0007	233.8	174.0	223.6	4.54	224.7	15.8	0
47-12-2	2087	1420	2005	0.7085	0.2228	0.0045	0.4456	0.5947	0.0151	0.0151	3001	31.88	3009	60.86	3004	23.48	0
47-13-1	471.1	138.8	827.4	0.1677	0.1908	0.0030	0.2430	0.5336	0.0073	0.0073	2749	25.9	2757	30.72	2753	16.39	0
47-13-2	15.94	202.3	392.7	0.5151	0.0507	0.0059	0.0262	0.0325	0.0011	0.0011	225.9	247.7	206.1	6.59	207.8	21.68	-1
47-14	11.07	17.97	63.40	0.2834	0.0738	0.0055	0.1308	0.1746	0.0042	0.0042	1036	144.1	1038	22.78	1038	47.78	0
47-15	196.5	119.8	709.1	0.1689	0.1027	0.0051	0.1919	0.2666	0.0078	0.0078	1673	89.16	1523	39.43	1587	40.83	9
47-16	87.94	259.6	417.8	0.6214	0.0703	0.0031	0.0680	0.1550	0.0041	0.0041	937.1	86.87	928.9	22.94	931.4	27.59	0
47-17	722.7	15.30	1212	0.0126	0.1922	0.0042	0.3732	0.5338	0.0132	0.0132	2761	35.62	2757	55.28	2760	25.01	0
47-18	155.0	54.26	252.2	0.2151	0.1608	0.0053	0.3714	0.4684	0.0129	0.0129	2464	54.66	2477	56.62	2470	33.1	-1
47-19	15.42	33.63	793.5	0.0424	0.0502	0.0048	0.0181	0.0279	0.0009	0.0009	205.6	206.0	177.1	5.49	179.2	15.44	-1
47-20	177.7	100.1	278.9	0.3591	0.1697	0.0047	0.3546	0.4858	0.0128	0.0128	2554	45.82	2552	55.49	2554	29.1	0
47-21	1544	610.0	1631	0.3740	0.2409	0.0051	0.5342	0.6246	0.0155	0.0155	3126	33.46	3128	61.66	3128	24.92	0
47-22	1300	114.0	2209	0.0516	0.2000	0.0045	0.4037	0.5525	0.0139	0.0139	2826	35.85	2836	57.66	2831	25.23	0
47-23	32.34	29.62	51.23	0.5782	0.1421	0.0067	0.3959	0.4178	0.0131	0.0131	2253	78.89	2250	59.34	2252	43.74	0
47-24	25.75	159.1	344.0	0.4625	0.0541	0.0087	0.0629	0.0529	0.0022	0.0022	373.5	327.9	332.3	13.4	337.8	45.78	-2
47-25	95.63	167.5	501.3	0.3341	0.0695	0.0030	0.0645	0.1531	0.0041	0.0041	913.0	84.95	918.5	23.14	917.4	26.54	0
47-26	2922	2727	2433	1.120	0.2275	0.0047	0.4724	0.6023	0.0151	0.0151	3035	32.6	3039	60.82	3037	24.09	0
47-27	534.1	213.5	696.8	0.3064	0.1687	0.0041	0.3180	0.4906	0.0127	0.0127	2544	39.88	2573	54.94	2558	26	-1

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的花岗质岩石来自亏损地幔或新生年轻地壳物质的部分熔融(隋振民等, 2009), 负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值通常代表古地壳起源(吴福元等, 2007)。而 Hf 同位素值特征不均一, 数值分布范围较宽者, 则暗示源区可能是一个开放体系, 与几种不同放射成因 Hf 同位素含量的岩浆混合有关(Griffin et al., 2002; Kemp et al., 2007; Ravikant et al., 2011)。

全岩主量元素分析由澳实分析检测(广州)有限公司澳实矿物实验室采用 X 射线荧光光谱(XRF)分析法完成。测试所用 X 射线荧光光谱仪型号为 PANalytical Axios, 精密度控制相对偏差 < 5%, 准确度控制相对误差 < 2%, 详细的分析流程, 见 Lee 等(1997)。全岩微量元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行。样品粉末化学预处理采用两酸($\text{HNO}_3 + \text{HF}$)高压反应釜溶样方法, 测试在 VGAXiom 高分辨多接收杯等离子质谱仪(MC-ICP-MS)上进行。对于国际标准物质 GSR-1(花岗岩)、GSR-2(安山岩)、GSR-3(玄武岩)和 JG-1a(花岗闪长岩)的分析结果表明, 所有元素分析的相对偏差(RSD) < 10%, 多数元素的(RSD) < 5%。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品 CLZ46 和 CLZ47 的锆石 U-Pb 同位素定年分析结果列于表 1。

样品 CLZ46 中所含锆石基本特征类似, 均为半自形—自形短柱状或长柱状, 粒径 65 ~ 132 μm , 无色到略带浅黄色, 透明度高, 裂隙少。CL 图像显示(图 4a), 大部分锆石具有密集而清晰的振荡环带, 为典型的岩浆锆石。锆石的 Th、U 含量平均偏高, 变化大, Th 含量为 $74.4 \times 10^{-6} \sim 1933.4 \times 10^{-6}$, U 含量为 $91.5 \times 10^{-6} \sim 2214.9 \times 10^{-6}$ (表 1), Th/U 值除了两颗锆石为 0.04 和 0.08, 其余锆石 Th/U 值在 0.20 ~ 1.72, 平均值为 0.84, 显示出岩浆成因锆石的特点, 与 CL 照片(图 4a)所得的结论一致。锆石样品点 C46-42 的 Th/U 值为 0.08, 可能为变质成因(吴元保和郑永飞, 2004)。样品 CLZ47 中所含的锆石外形呈次圆状—浑圆状, CL 图像中发光较暗, 隐约可见环带结构(图 4a)。U 和 Th 含量分别为 $15.3 \times 10^{-6} \sim 2726.6 \times 10^{-6}$ 和 $51.2 \times 10^{-6} \sim 2520.4 \times 10^{-6}$, 除了 4 颗锆石 C47-2、47-17、47-19、47-22 的 Th/U 值较低为 0.01 ~ 0.09, 可能为变质成因, 其余锆石 Th/U

值介于 0.11 ~ 1.25, 可能为岩浆锆石(吴元保和郑永飞, 2004)。

本次对样品 CLZ46 和 47 的 86 粒锆石进行了 90 次分析(表 1, 图 4 和 5), 测试结果显示 90 个年龄数据均分布在谐和线附近(图 5), 并得到年龄介于 $3049 \pm 18 \text{ Ma} \sim 133 \pm 2 \text{ Ma}$, 同位素年龄小于 1.0 Ga 的锆石采用 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 年龄, 同位素年龄大于 1.0 Ga 的锆石采用 $n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$ 年龄, 具体年龄分布情况如下:

① 8 个锆石年龄分布在 $3140 \pm 19 \text{ Ma} \sim 2826 \pm 36 \text{ Ma}$; ② 10 个锆石年龄分布在 $2761 \pm 36 \text{ Ma} \sim 2273 \pm 23 \text{ Ma}$; ③ 3 个锆石年龄分布在 $2025 \pm 27 \text{ Ma} \sim 1673 \pm 89 \text{ Ma}$; ④ 10 颗锆石年龄分布在 $1036 \pm 144 \text{ Ma} \sim 673 \pm 17 \text{ Ma}$; ⑤ 10 个锆石年龄分布在 $574 \pm 19 \text{ Ma} \sim 422 \pm 11 \text{ Ma}$; ⑥ 43 个锆石年龄分布在 $392 \pm 11 \text{ Ma} \sim 312 \pm 10 \text{ Ma}$, 占总数的 48%, 峰值年龄为 347 Ma, $n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$ 加权平均年龄为 $350.0 \pm 6.5 \text{ Ma}$ (MSWD = 4.0); ⑦ 6 个最年轻的锆石年龄分布在 $224 \pm 18 \text{ Ma} \sim 133 \pm 2 \text{ Ma}$ (图 4)。如此复杂的年龄分布, 反映了大石寨组凝灰岩的物源区组成复杂性, 也反映了物源区存在大量太古代的碎屑物质。

3.2 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Hf 同位素分析结果见表 2, 大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩绝大部分锆石的 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值均小于 0.002, 说明锆石形成以后具有较低的放射性成因 Hf 积累, 因而 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 测值可以代表锆石形成时的 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值(吴福元等, 2007)。表中大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为 $-0.99 \sim -0.83$, 平均为 -0.96 , 明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.34) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ (-0.72)(Vervoort et al., 1996), 故二阶段模式年龄能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。根据 Hf 同位素相关计算公式(吴福元等, 2007), 采用硅铝质大陆地壳 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 计算了火成岩样品的初始 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 T_{DM1} 和 T_{DM2} (表 2)。

长岭子地区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品 CLZ46 和 CLZ47 的锆石 Lu-Hf 同位素结果列于表 2。吴福元等(2007)的研究显示锆石 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值小于 0.002, 指示其放射性成因 Hf 积累较少, 因此可以代表源岩锆石中 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值, 大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩绝大部分锆石 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值均小于 0.002, 可以代表源岩中锆石对应的值。锆石的 Hf 模式年龄 T_{DM} 代表了

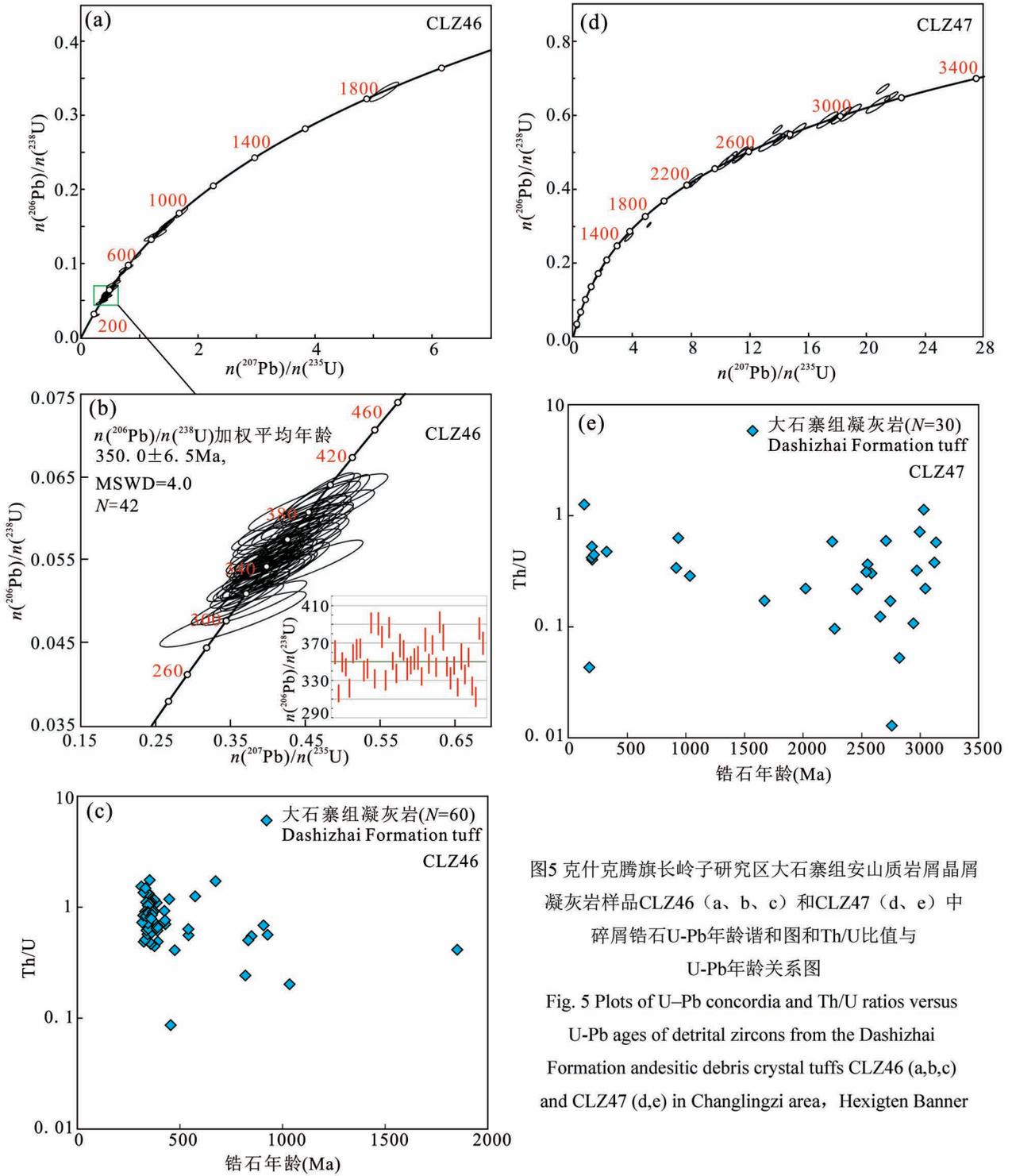


图5 克什克腾旗长岭子研究区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品CLZ46 (a、b、c) 和CLZ47 (d、e) 中碎屑锆石U-Pb年龄谐和图和Th/U比值与U-Pb年龄关系图

Fig. 5 Plots of U-Pb concordia and Th/U ratios versus U-Pb ages of detrital zircons from the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs CLZ46 (a,b,c) and CLZ47 (d,e) in Changlingzi area, Hexigten Banner

锆石寄主岩石源区从亏损地幔分离进入地壳的时间。根据 Hf 同位素相关计算公式 (吴福元等, 2007), 采用硅铝质大陆地壳 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 计算了火成岩样品的初始 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 T_{DM1} 和 T_{DM2} (表 2)。

大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 和 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 分别为 0.000235 ~

0.005759 和 0.280524 ~ 0.283022。计算出 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -18.0 ~ 16.8, $f_{\text{Lu/Hf}}$ 变化范围在 -0.99 ~ -0.83, T_{DM1} 为 3699 ~ 322 Ma, T_{DM2} 变化范围在 4291 ~ 293 Ma。

第一组锆石 (3140 ~ 2826 Ma) 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介

表2 克什克腾旗长岭子大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Zircon Lu-Hf isotope analysis for the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs in Changlingzi area, Hexigten Banner

点号	年龄 (Ma)	$\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$	$\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$	2σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
CLZ46.1	316	0.037596	0.001495	0.283153	0.000678	13.5	20.1	141	40	-0.95
CLZ46.2	344	0.017173	0.000652	0.282952	0.000025	6.4	13.8	421	469	-0.98
CLZ46.3	322	0.029934	0.001061	0.283022	0.000078	8.8	15.7	326	329	-0.97
CLZ46.4	359	0.057563	0.002144	0.282844	0.000048	2.5	9.90	597	728	-0.94
CLZ46.5	673	0.079484	0.001846	0.282824	0.000028	1.8	15.9	622	593	-0.94
CLZ46.6	340	0.020978	0.000780	0.282982	0.000030	7.4	14.7	380	404	-0.98
CLZ46.7	364	0.024907	0.000985	0.283007	0.000034	8.3	16.1	347	336	-0.97
CLZ46.8	475	0.035096	0.001174	0.282674	0.000033	-3.5	6.60	824	1030	-0.96
CLZ46.9	448	0.088085	0.002846	0.282611	0.000040	-5.7	3.30	955	1218	-0.91
CLZ46.10	1033	0.040265	0.001307	0.283112	0.000266	12.0	34.0	200	-288	-0.96
CLZ46.11	926	0.020871	0.000915	0.282952	0.000207	6.4	26.3	425	123	-0.97
CLZ46.12	425	0.191933	0.005759	0.282938	0.000041	5.9	13.6	510	544	-0.83
CLZ46.13	346	0.024072	0.000846	0.282901	0.000031	4.6	12.0	496	587	-0.97
CLZ46.14	332	0.016527	0.000594	0.282362	0.000029	-14.5	-7.30	1244	1806	-0.98
CLZ46.15	345	0.016207	0.000620	0.282986	0.000030	7.6	15.0	373	391	-0.98
CLZ46.16	376	0.018906	0.000719	0.283001	0.000033	8.1	16.2	354	340	-0.98
CLZ46.17	191	0.012191	0.000428	0.282467	0.000128	-10.8	-6.70	1094	1657	-0.99
CLZ46.18	541	0.037183	0.001404	0.283351	0.000182	20.5	31.9	-146	-545	-0.96
CLZ46.19	392	0.026311	0.000974	0.284434	0.000520	58.8	67.2	-1724	-2993	-0.97
CLZ46.20	344	0.023088	0.000916	0.283075	0.000030	10.7	18.1	249	192	-0.97
CLZ46.21	374	0.013246	0.000527	0.283064	0.000025	10.3	18.4	262	194	-0.98
CLZ46.22	907	0.016263	0.000624	0.282110	0.000034	-23.4	-3.80	1595	2017	-0.98
CLZ46.23	336	0.011972	0.000462	0.283078	0.000035	10.8	18.1	242	184	-0.99
CLZ46.24	429	0.078411	0.002353	0.282750	0.000031	-0.8	8.00	739	906	-0.93
CLZ46.25	574	0.017563	0.000605	0.281932	0.000029	-29.7	-17.3	1838	2616	-0.98
CLZ46.26	542	0.013430	0.000462	0.282465	0.000022	-10.9	0.90	1098	1444	-0.99
CLZ46.27	330	0.017657	0.000677	0.283003	0.000025	8.2	15.3	350	362	-0.98
CLZ46.28	386	0.062687	0.002019	0.282727	0.000029	-1.6	6.40	765	976	-0.94
CLZ46.29	377	0.028359	0.001046	0.282956	0.000026	6.5	14.5	420	446	-0.97
CLZ46.30	370	0.015658	0.000568	0.283022	0.000022	8.8	16.8	322	293	-0.98
CLZ47.1	2761	0.008257	0.000235	0.280524	0.000122	-79.5	-18.0	3699	4291	-0.99
CLZ47.2	133	0.052736	0.001913	0.282556	0.000025	-7.6	-4.90	1010	1501	-0.94
CLZ47.3	2464	0.035794	0.001174	0.280834	0.000025	-68.6	-15.4	3372	3909	-0.96
CLZ47.4	2947	0.013958	0.000421	0.280844	0.000020	-68.2	-2.70	3293	3510	-0.99
CLZ47.5	3126	0.039787	0.001222	0.280828	0.000023	-68.7	-0.90	3384	3536	-0.96
CLZ47.6	2253	0.023771	0.000799	0.281398	0.000022	-48.6	0.60	2577	2775	-0.98
CLZ47.7	332	0.048000	0.001727	0.282748	0.000028	-0.9	6.10	729	954	-0.95
CLZ47.8	919	0.036348	0.001125	0.282364	0.000021	-14.4	5.20	1260	1462	-0.97
CLZ47.9	3035	0.009086	0.000284	0.280938	0.000025	-64.9	2.90	3157	3234	-0.99
CLZ47.10	2588	0.022477	0.000660	0.280892	0.000022	-66.5	-9.60	3250	3655	-0.98
CLZ47.11	2712	0.014186	0.000420	0.280892	0.000022	-66.5	-6.40	3230	3552	-0.99
CLZ47.12	206	0.042074	0.001264	0.282741	0.000029	-1.1	3.30	730	1037	-0.96
CLZ47.13	3001	0.011827	0.000350	0.280977	0.000028	-63.5	3.40	3111	3180	-0.99

注:计算公式如下:

$$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)} - 1 \right\}$$

$$T_{DM1} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_S - \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_S - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{DM}} \right\}$$

$$T_{DM2} = T_{DM1} - (T_{DM1} - t) \cdot \frac{f_{CC} - f_S}{f_{CC} - f_{DM}}; f_{Lu/Hf} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_S}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{CHUR}} - 1$$

其中: $\lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.865 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Scherer et al., 2001); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_S$ 和 $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_S$ 为样品测量值; $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{CHUR} = 0.0332$, $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{CHUR,0} = 0.282772$ (Blichert-Toft et al., 1997); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{DM} = 0.0384$, $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{DM} = 0.28325$ (Griffin et al., 2000); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{CC} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{CHUR}} - 1$; $f_S = f_{Lu/Hf}$; $f_{DM} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{DM}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{CHUR}} - 1$; t 为锆石结晶年龄。

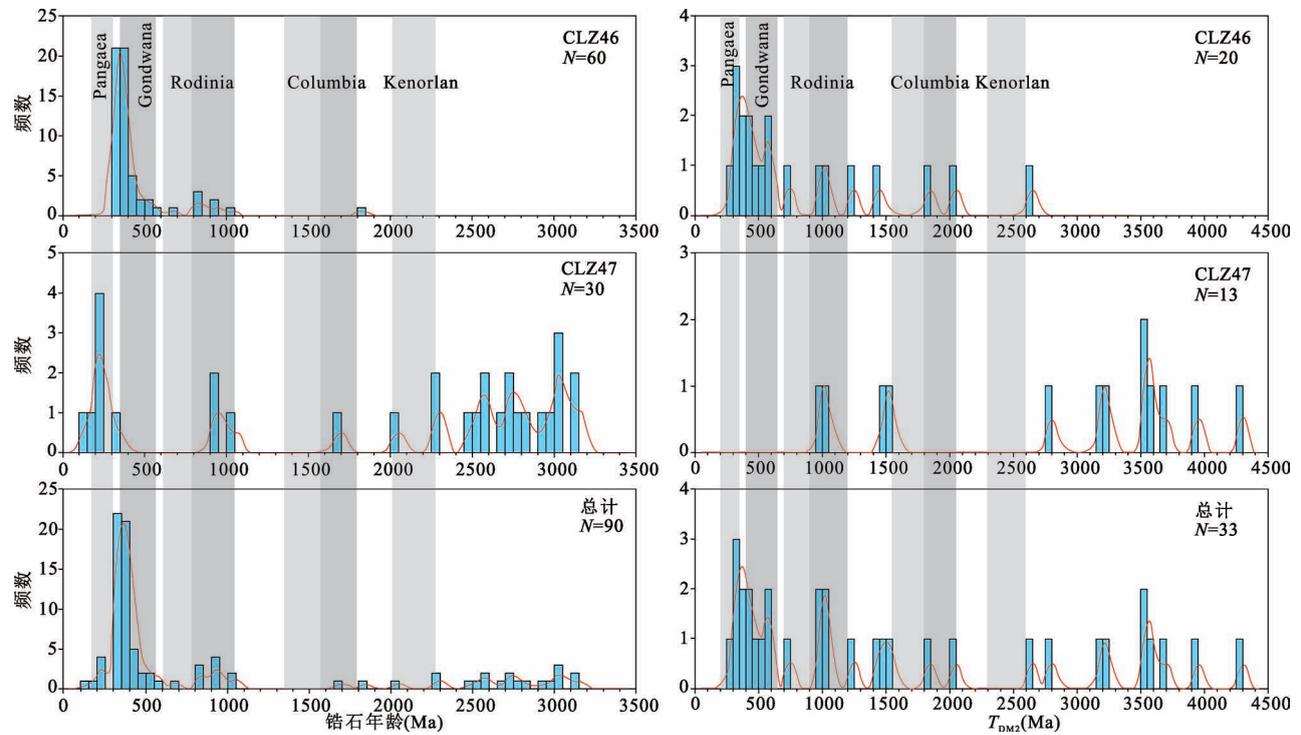


图 6 克什克腾旗长岭子地区大石寨组安山质屑晶屑凝灰岩样品 TAS 图解 (据 Le Maitre, 2002) (a)、AFM 图解 (据 Rollinson, 1993) (b)、 $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ 图解 (c) (据 Peccerillo et al., 1976) 以及 A/CNK—A/NK 图解 (d)

Fig. 6 TAS (a) (after Le Maitre, 2002), AFM (b) (after Rollinson, 1993), $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ (c) (after Peccerillo et al., 1976) and A/CNK—A/NK (d) diagram for Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs in Changlingzi area, Hexigten Banner

于 $-2.7 \sim 3.4$, T_{DM1} 介于 $3384 \sim 3111 \text{ Ma}$, T_{DM2} 变化于 $3536 \sim 3180 \text{ Ma}$; 第二组锆石 ($2761 \sim 2273 \text{ Ma}$) 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-18.0 \sim 0.6$, T_{DM1} 介于 $3699 \sim 2577 \text{ Ma}$, T_{DM2} 变化范围在 $4291 \sim 2775 \text{ Ma}$; 第四组锆石 ($1036 \sim 673 \text{ Ma}$) 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化于 $-3.8 \sim$

15.9 , T_{DM1} 介于 $1595 \sim 622 \text{ Ma}$, T_{DM2} 介于 $2017 \sim 593 \text{ Ma}$; 第五组锆石 ($574 \sim 422 \text{ Ma}$) 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $0.9 \sim 13.6$, T_{DM1} 介于 $1098 \sim 510 \text{ Ma}$, T_{DM2} 变化范围在 $1444 \sim 544 \text{ Ma}$; 第六组锆石 ($392 \sim 312 \text{ Ma}$) 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 $-7.3 \sim 16.8$, T_{DM1} 介于 $1244 \sim$

322 Ma, T_{DM2} 介于 1806 ~ 293 Ma; 第七组锆石 (224 ~ 133 Ma) 对应的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 为 -4.9 ~ 3.3, T_{DM1} 介于 1010 ~ 730 Ma, T_{DM2} 变化范围在 1501 ~ 1037 Ma; 未能得到第三组锆石 (2025 ~ 1673 Ma) 有效的 Lu-Hf 同位素比值, 故缺少第三组锆石的 Hf 同位素数据。

3.3 主微量元素地球化学特征

长岭子研究区 8 个大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品主微量和稀土元素测试分析结果如表 3 所示。

3.2.1 主量元素

大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品的 SiO_2 含量介于 53.64% ~ 57.22%, Al_2O_3 介于 13.54% ~

19.04%, 富 MgO (2.79% ~ 4.80%)、 $Fe_2O_3^T$ (6.58% ~ 11.67%)、 CaO (5.39% ~ 8.28%), 贫 K ($w(K_2O) = 0.38\% \sim 1.80\%$)、富 Na ($w(Na_2O) = 2.99\% \sim 4.60\%$)、 K_2O/Na_2O 介于 0.13 ~ 0.57。在 TAS 图解 (图 6a) 中样品分布于玄武安山岩—安山岩区域, 属于亚碱性系列; 由于样品属于亚碱性系列, 我们再利用 AFM 图解鉴别岩石特性 (邓晋福等, 2015a), 在 AFM 图解中落入了钙碱性系列区域 (图 6b); 确定研究样品为钙碱性系列后, 我们利用 SiO_2-K_2O 图解来进一步鉴别岩石特性, 在 SiO_2-K_2O 图解 (图 6c) 中落在低钾—钙碱性系列区域; 岩石样品铝饱和指数 A/CNK 为 0.65 ~ 1.95, A/NK 值为 1.99 ~ 3.20, 指示岩石为偏铝质 (图 6d)。

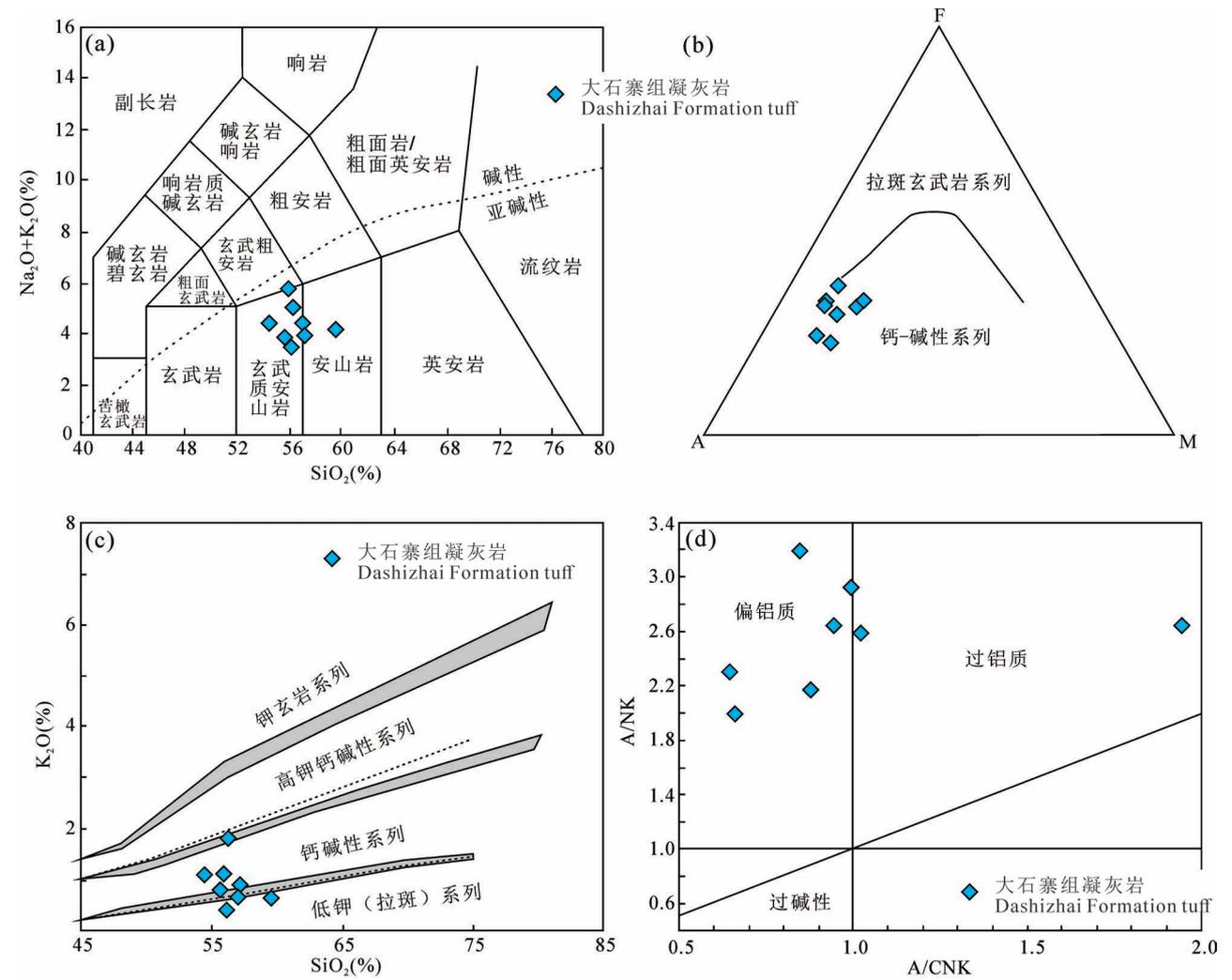


图 7 克什克腾旗长岭子研究区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线 (a) 和原始地幔标准化微量元素蛛网图 (b) (球粒陨石标准化值和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) for Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuff in Changlingzi area, Hexigten Banner (chondrite normalization values and primitive mantle normalization values after Sun and McDonough, 1989)

3.2.2 稀土元素特征

长岭子大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩的微量元素分析结果见表 3。球粒陨石标准化稀土配分图解见图 7。从表 3 和图 7a 可以看出,长岭子大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩稀土总量 $\Sigma \text{REE} = 30.50 \times 10^{-6} \sim 123.2 \times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE} = 1.14 \sim 3.21$, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 2.39 \sim 9.31$, 稀土配分型式为右倾斜型(图 7a), 轻稀土富集, 重稀土相对亏损; $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.67 \sim 5.96$, 轻稀土弱分馏, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.10 \sim 1.75$, 重稀土分馏不明显; 无明显 Eu 异常, δEu 值为 $0.75 \sim 1.07$ 。

3.2.3 微量元素特征

长岭子大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩的微量元素分析结果见表 3, 原始地幔标准化蛛网图解见图 7。从表 3 和图 7b 可以看出, 长岭子大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩显示为富集 Ba、Rb、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(图 7b)。

4 讨论

4.1 成岩时代

关于大石寨组的年代学, 前人已有大量的研究, 他们对不同地区出露的大石寨组岩石样品进行了年代学研究, 并取得了丰富的成果(表 4)。

综上所述, 前人获得的有关大石寨组岩石的

表 3 长岭子大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩全岩主量元素(%)、微量元素($\times 10^{-6}$)和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果

样品号	compositions of Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuff in Changlingzi area																
	CLZ45	CLZ46	CLZ47	CLZ48	CLZ49	CLZ50	CLZ61	CLZ62	样品号	CLZ45	CLZ46	CLZ47	CLZ48	CLZ49	CLZ50	CLZ61	CLZ62
SiO ₂	57.22	56.32	55.98	55.7	59.60	56.20	57.07	54.50	K	7100	14700	8600	6600	4900	3000	4800	8300
TiO ₂	13.54	14.30	0.67	0.7	0.72	0.65	0.71	0.84	P	840	780	720	660	600	520	880	1210
Al ₂ O ₃	0.93	1.00	19.04	16.99	16.59	17.22	18.00	17.38	Pb	10.0	8.90	23.7	23.3	44.5	48.4	26.9	37.4
Fe ₂ O ₃ ^T	8.99	8.66	7.25	11.67	8.98	9.79	6.58	9.01	Rb	26.8	36.8	35.4	23.0	14.5	5.60	15.0	33.9
CaO	8.28	7.94	7.08	6.19	5.39	8.20	6.72	7.86	Ti	5500	6050	3910	4420	4320	3920	4140	4770
MgO	4.80	4.65	3.52	3.3	2.79	2.88	4.58	4.13	Ni	93.5	96.7	15.4	14.0	12.4	25.7	30.3	39.1
MnO	0.39	0.21	0.17	0.19	0.18	0.17	0.17	0.14	La	13.9	16.3	3.20	6.30	6.20	5.20	4.40	14.4
K ₂ O	0.88	1.80	1.10	0.78	0.62	0.38	0.64	1.08	Ce	28.5	32.3	6.70	12.6	11.9	11.3	9.60	29.2
Na ₂ O	2.99	3.17	4.60	3.01	3.48	3.02	3.71	3.36	Pr	3.60	4.30	0.96	1.91	1.76	1.53	1.32	3.56
P ₂ O ₅	0.19	0.17	0.17	0.14	0.14	0.11	0.21	0.28	Nd	15.0	18.4	4.50	8.90	8.30	6.90	6.30	14.4
烧失	1.56	1.53	1.18	1.46	1.70	1.32	1.61	1.86	Sm	3.62	4.36	1.24	2.40	2.25	1.82	1.56	2.97
总和	99.77	99.75	100.76	100.13	100.19	99.94	100.00	98.58	Eu	0.90	1.29	0.36	0.61	0.65	0.57	0.42	1.00
K/N	0.29	0.57	0.24	0.26	0.18	0.13	0.17	0.17	Gd	3.71	4.86	1.27	2.57	2.58	2.09	1.48	2.75
A/CNK	0.65	0.66	0.88	1.00	1.02	0.85	0.95	1.95	Tb	0.56	0.75	0.20	0.43	0.42	0.33	0.22	0.38
A/NK	2.31	1.99	2.17	2.93	2.59	3.20	2.65	2.65	Dy	3.84	4.83	1.40	2.85	2.90	2.30	1.33	2.37
Ba	250	820	129	185	182	243	145	411	Ho	0.81	1.07	0.30	0.60	0.63	0.49	0.27	0.45
Cr	163	207	20	20	20.0	110	70.0	60.0	Er	2.46	3.00	0.90	1.89	1.87	1.48	0.76	1.22
Hf	2.80	2.50	1.10	1.30	1.40	1.80	0.90	2.00	Tm	0.37	0.43	0.13	0.27	0.27	0.22	0.11	0.17
Nb	7.00	6.00	0.90	1.20	1.30	1.60	0.80	7.60	Yb	2.49	2.76	0.90	1.81	1.86	1.48	0.70	1.11
Sr	289	405	374	351	359	543	437	574	Lu	0.40	0.42	0.14	0.28	0.29	0.25	0.11	0.17
Ta	0.50	0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.40	Y	23.9	28.1	8.30	16.0	16.5	13.8	7.80	11.8
Th	4.00	3.10	0.47	0.74	0.82	1.34	0.35	1.38	ΣREE	104	123	30.5	59.4	58.4	49.8	36.4	86
U	0.80	1.00	0.34	0.44	0.45	0.42	0.42	0.50	(La/Yb) _N	4.00	4.24	2.55	2.50	2.39	2.52	4.51	9.31
V	136	155	248	343	276	247	181	205	(La/Sm) _N	2.48	2.41	1.67	1.69	1.78	1.84	1.82	5.96
Zr	155	140	33.0	43.0	45.0	60.0	29.0	86.0	(Gd/Yb) _N	1.23	1.46	1.17	1.17	1.15	1.17	1.75	1.10

年龄并不统一,其年龄分布范围介于 242 ~ 439 Ma, 尽管大石寨组在《内蒙古自治区岩石地层》(李文国, 1996)中时代划为二叠纪,前人测年数据(表 4)中大多数也显示其年龄为二叠纪,但是与此同时也确实存在泥盆纪和石炭纪的年龄,这是不容忽视的一个问题,因此有学者提出将现有的大石寨组进行分解重新厘定(郭锋等, 2009; 赵芝, 2011; 李红英, 2016)。内蒙古克什克腾旗地区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩同位素年代学前人鲜有研究,本文获得两件克什克腾旗地区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品的锆石 U-Pb 年龄,其中锆石年龄主峰年龄介于 392 ~ 312 Ma, 峰值年龄为 350 Ma, 加权平均年龄为 350 ± 6 Ma (MSWD = 4.0, $n = 43$), 占总数 48%, 结合其锆石的 CL 图像(图 4)及 Th/U 值(表 1)所显示的岩浆成因特征,因此可以代表凝灰岩的形成时代,属于早石炭世。

4.2 碎屑锆石年龄谱及物源示踪

本文中大石寨组凝灰岩样品的 90 个年龄分布范围很广,介于 3049 ± 18 Ma ~ 133 ± 2 Ma, 得出的年龄频谱图如图 8 所示。从图 8 中我们可以将大石寨组碎屑锆石年龄分为 7 组年龄群:

所测锆石中,年龄 > 2800 Ma 者有 8 颗(图 8), 年龄值介于 3140 ~ 2826 Ma, 除去 2826 Ma 锆石

Th/U 值为 0.05, 可能为变质成因,其余锆石 Th/U 值介于 0.11 ~ 1.12, 表明它们具有岩浆成因。这些太古代岩浆锆石证明了大石寨组凝灰岩记录了丰富的太古代物源信息。目前区域上所发现的中太古代的锆石较少,主要有锡林郭勒杂岩中有 3072 Ma 的碎屑锆石(施光海等, 2003), 大兴安岭北部扎兰屯群中 6 颗 3210 ~ 2806 Ma 的碎屑锆石年龄(周建波等, 2014; 苗来成等, 2007; 杨现力, 2007), 此外还在呼兰河和乌苏里江河流沉积物中发现了 3116 Ma 和 3124 Ma 的碎屑锆石(李明, 2010), 这些锆石大部分为岩浆成因,目前对于这些锆石的物源还不是很明确,可能来源于华北克拉通或者东北地区的这些微陆块,但它们的出现说明了东北地区具有中太古代的物源信息,可能存在中太古代的古结晶基底。

对于 > 2800 Ma 的锆石,其 $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值介于 0.280828 ~ 0.280977, 比值相对较低,指示其源区可能是古老基底。测点 C47-12-2 和 C47-26 其对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 较高,可达 3.4 和 2.9, 靠近 3000 Ma 时的亏损地幔的同位素值(图 9), 其单阶段模式年龄为 3111 和 3157 Ma, 而其锆石 U-Pb 年龄为 3001 和 3035 Ma, 二者比较相近,此外,其 Hf 同位素组成和该时代的亏损地幔相近,指示源区可能是中太古代亏损地幔。测点 C47-4 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -2.7$, 相对较

表 4 大石寨组已有测年数据

Table 4 Summary of the published isotope dating data from Dashizhai Formation

年龄(Ma)	岩性	方法	地点	文献来源
242 ~ 265	中基性火山岩	K-Ar	赤峰地区	汪润洁, 1987
281	安山岩	Rb-Sr	苏尼特左旗地区	高德臻等, 1998
270	玄武岩和中酸性火山岩	Rb-Sr	林西地区	Zhu Yongfeng et al., 2001
285 ± 11 280 ± 1	玄武岩 辉长岩	同位素稀释法锆石 U-Pb	满都拉地区	陶继雄等, 2003
276 ~ 298	流纹岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	大石寨地区	张健, 2012
280 ± 3	玄武岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	巴林右旗新开坝地区	关庆彬等, 2016
281 ± 11 280 ± 1	玄武安山岩 流纹岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	锡林浩特	Zhang Xiaohui et al., 2008
279 ± 4	流纹岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	西乌旗地区	陈彦等, 2014
287 ± 2	角斑岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	锡林浩特毛登牧场	程天赦等, 2013
274 ± 3	流纹岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	西乌旗猴头庙	刘建峰, 2009
271 ± 2	流纹岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	苏尼特左旗	梅可辰等, 2015
280 ± 1	流纹岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	西乌旗地区	樊航宇等, 2014
288 ± 1	英安岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	锡林浩特乌拉苏太地区	张晓飞等, 2016
314 ± 1	英安岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	大石寨地区	曾维顺等, 2011
353 ± 2 354 ± 2 306 ± 2	凝灰质流纹岩 含火山角砾流纹岩 流纹质凝灰岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb	黑龙江嫩江地区	赵芝等, 2010
439 ± 3	玄武岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	大石寨镇周边地区	郭锋等, 2009

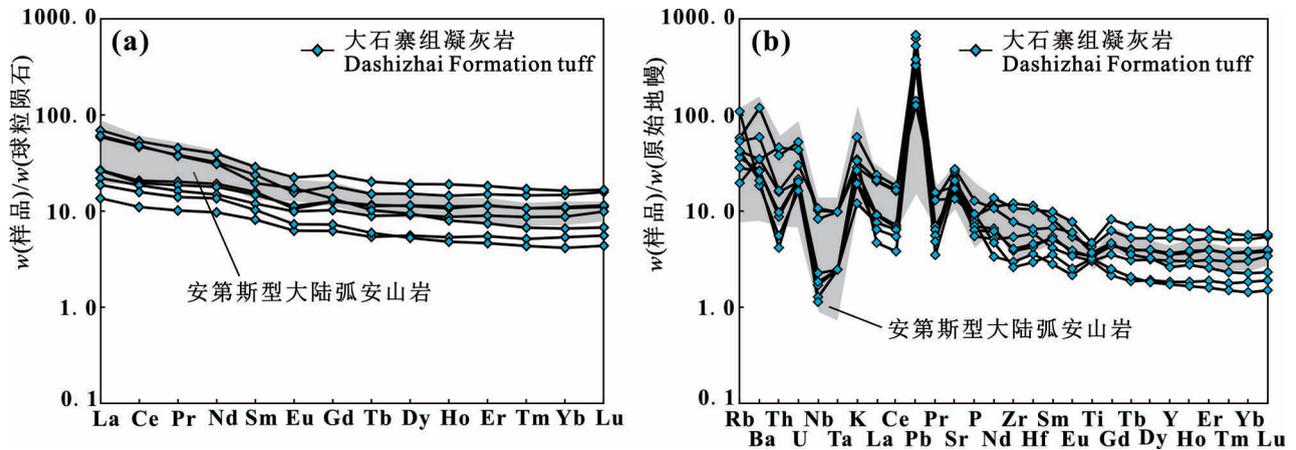


图 8 长岭子地区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品 CLZ46 和 CLZ47 中碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素二阶段模式年龄分布直方图

Fig. 8 Histogram of U-Pb ages and two-stage model ages of detrital zircons from the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs CLZ46 and CLZ47 in Changlingzi area, Hexigten Banner

低,并且在锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t 图解(图 9)中落在了 3.5 Ga 地壳平均演化线上,指示其源区可能是古老地壳。测点 C47-21 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -0.9,接近球粒陨石(图 9),其单阶段模式年龄为 3384 Ma,指示其源岩可能是古太古代壳幔物质共同作用的产物。鉴于华北克拉通北缘以及东北地区的这些微陆块均发现古太古代的年龄信息,暂时很难确定 >2800 Ma 碎屑锆石的物质来源,但它们的出现可以说明东北或者其邻区可能发育过中太古代—古太古代的古老基底。

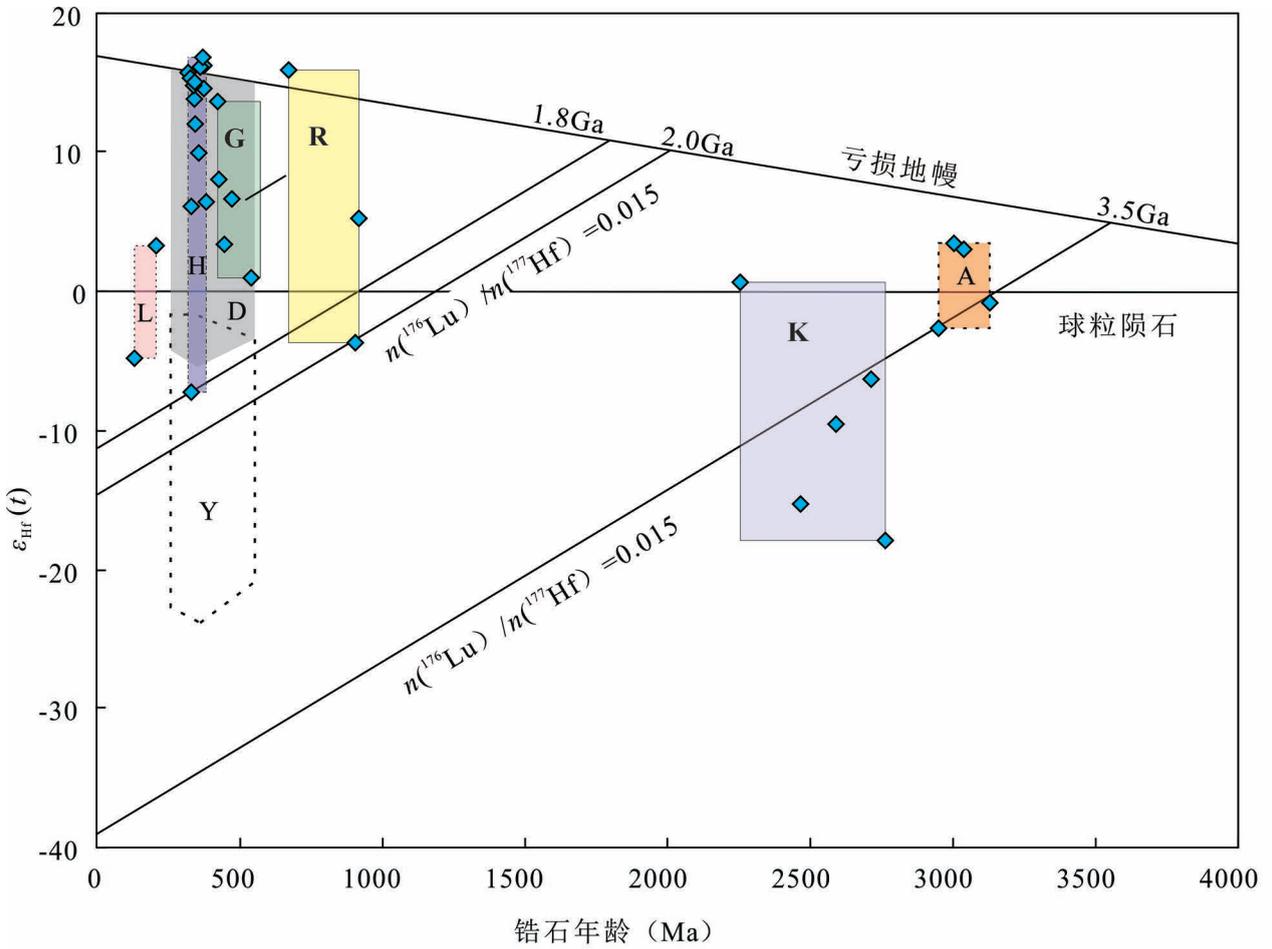
图 8 中,部分碎屑锆石分布在 2761 ~ 2273 Ma,测点 C47-2 和 C47-17 的 Th/U 值分别为 0.09 和 0.01,可能为变质成因,其余锆石 Th/U 值为 0.12 ~ 0.59,应为岩浆锆石。在这一时期发生了全球范围的超大陆汇聚地质事件,最终形成了 Kenorland 超大陆(Bekker et al., 2003; Tang Haoshu et al., 2011),在区域上这个时期的年龄有大量报道:在锡林郭勒杂岩中发现这一时期的碎屑锆石(施光海等,2003;陈斌等,2009),出露于额尔古纳地块和兴安地块的兴华渡口群变碎屑岩中存在 2700 ~ 2400 Ma 碎屑锆石(吕志成等,2002),额尔古纳地块门都里河群片麻岩存在 2450 Ma 的锆石年龄信息(罗毅等,1997),扎兰屯变质杂岩存在 2670 ~ 2185 Ma 的碎屑锆石(周建波等,2014),扎兰屯地区铜山组存在 2705 ~ 2543 Ma 的碎屑锆石(李仰春等,2013),阿鲁科尔沁旗林西组砂岩中也存在 2671 Ma 的碎屑锆石年龄(郑月娟等,2014),以及西乌珠穆沁旗本巴图组砂岩中 2505 ~ 2469 Ma 的碎屑锆石年龄(郭晓

丹等,2011)。综上所述,该组碎屑锆石年龄信息揭示了大兴安岭地区太古宙—古元古代古老结晶基底的信息。

2761 ~ 2273 Ma 的锆石,其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -18.0 ~ 0.6,其中测点 C47-23 为 0.6,接近球粒陨石(图 9),其单阶段模式年龄 $T_{\text{DM1}} = 2577$ Ma,指示其源岩可能是可能是新太古代壳幔物质共同作用的产物。其余锆石测点 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值,对应的单阶段模式年龄 T_{DM1} 明显大于锆石 U-Pb 年龄,表明其源岩可能是由古老地壳的部分熔融形成。

图 8 中出现一组锆石分布于 2025 ~ 1673 Ma, Th/U 值都大于 0.1,为岩浆成因锆石。这一时期发生了全球范围的大陆碰撞和拼贴地质事件,并最终形成了 Columbia 超大陆(Zhao Guochun et al., 2000, 2001, 2002, 2005; Li Nuo et al., 2011; Santosh, 2010; Zhou Zhenju et al., 2016)。期间,东北地区也出现了大量的构造—岩浆事件,松辽地块铁力杂岩存在大量 1997 ~ 1776 Ma 变质基底的构造岩浆事件(Zhou Jianbo et al., 2012)。锡林郭勒杂岩中也存在大量的 1858 ~ 1733 Ma 的碎屑锆石(施光海等,2003),双井微地块北缘混合岩中存在 2190 ~ 1804 Ma 的碎屑锆石(李益龙等,2008),郑月娟等(2014)报道了阿鲁科尔沁旗林西组砂岩中 2089 ~ 1791 Ma 的碎屑锆石年龄。

图 8 中出现了较多的年龄为 1036 ~ 673 Ma 的碎屑锆石,并以 923 Ma 为高峰, Th/U 值(0.20 ~ 1.68)也显示了锆石的岩浆成因,表明该时期有大



- L 后期改造 Late reformation
- D 成岩阶段 Diagenetic stage
- G Gondwana
- K Kenorland
- R Rodinia
- A 太古代基底 Archean basement
- H 兴蒙造山带东段古生代岩浆岩 Paleozoic magmatic rocks from the east part of the Hinggan-Mongolia Orogenic Belt
- Y 燕山地区古生代岩浆岩 Paleozoic magmatic rocks from the Yanshan area
- ◆ 大石寨组凝灰岩 Dashizhai Formation tuff

图9 克什克腾旗长岭子地区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)-t$ 图解
 Fig. 9 Zircon $\epsilon_{Hf}(t)-t$ diagram for Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs in Changlingzi area, Hexigten Banner

其中阴影部分代表兴蒙造山带东段古生代花岗岩和辉长岩,虚线框部分代表燕山地区岩浆岩。

数据来源:兴蒙造山带东段和燕山地区岩浆岩锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 范围据 Yang Jinhui et al., 2006

The shaded part represents the Paleozoic granite and gabbro in the eastern section of the Xing'an-Mongolian orogenic belt, the dotted frame represents the magma rock in the Yanshan area. Xing'an-Mongolian Orogenic belt and Yanshan area zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ range according to Yang Jinhui et al., 2006

量岩浆岩发育,与全球范围的 Rodinia 超大陆会聚和裂解时间相一致(Zhou Jianbo et al., 2011a, b)。

这一时期的碎屑锆石在华北克拉通北缘的相关报道较少,而在东北地区却普遍存在。例如锡林浩特杂

岩中变质辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄 740 Ma (葛梦春等, 2011); 松辽地块的基底年龄为 750 ~ 920 Ma (权京玉等, 2013); 李述靖等 (1995) 报道了苏尼特左旗南部温都尔庙群绿片岩 825 Ma 的年龄信息; 兴安地块兴华渡口群的原岩年龄为 660 ~ 970 Ma (Zhou Jianbo et al., 2011a); 额尔古纳地块漠河杂岩原岩年龄为 970 ~ 660 Ma (Zhou Jianbo et al., 2011b); 佳木斯地块蓝片岩中同样存在大量新元古代 (910 ~ 670 Ma) 的捕获锆石 (Zhou Jianbo et al., 2009)。这说明中亚造山带东段的微陆块 (额尔古纳地块、兴安地块、松辽地块、佳木斯地块) 广泛发育新元古代岩浆热事件 (Zhou Jianbo et al., 2013)。

1036 ~ 673 Ma 的碎屑锆石, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值最高可达 15.9 (测点 C46-7), 与当时亏损地幔相近 (图 9), 其单阶段模式年龄 T_{DM1} 为 622 Ma, 与锆石 U-Pb 年龄 (673 Ma) 相近, 指示源岩来自亏损地幔分异出来而未经演化的物质。测点 C47-25 位于亏损地幔和球粒陨石演化线之间, Hf 单阶段模式年龄为 1260 Ma, 表明其可能来源于中元古代壳幔物质共同作用的产物。测点 C46-36 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值 (-3.8), 且位于 2.0 Ga 地壳平均演化线上, 指示其源岩可能来自古老地壳物质。

大石寨组中大量碎屑锆石分布在 574 ~ 422 Ma (图 8), 除测点 C46-42 的 Th/U 值为 0.08 之外, 其余锆石 Th/U 值介于 0.40 ~ 1.23, 大部分锆石为岩浆成因。在全球范围内, 该时期也是 Gondwana 和 Laurentia 超大陆的形成期。在此时期, 中亚造山带东段的所有地块均经历了早古生代泛非期构造—岩浆事件, 东北地区的基底, 如兴安地块的兴华渡口群和佳木斯地块的麻山群都在此期间发生变质, 形成一系列高级变质岩。同时, 该时期也发育大量的早古生代岩浆岩。泛非期高级变质岩及其同期岩浆岩在额尔古纳、兴安、松辽和佳木斯地块上断续分布, 总体出露范围大于 1300 km (周建波等, 2011)。具有代表性的岩体包括漠河花岗岩体 (Wu Guang et al., 2005)、塔河辉长岩体 (葛文春等, 2007)、多宝山岩体 (Ge Wenchun et al., 2007) 以及小兴安岭—张广才岭地区集岭、东风山和汤旺河岩体 (刘建峰等, 2008)。东北地区早古生代花岗岩浆活动划分为两个阶段: 550 ~ 510 Ma 和 500 ~ 460 Ma。其中, 550 ~ 510 Ma 的花岗岩浆常遭受造山期高级变质作用的改造, 500 ~ 460 Ma 的花岗岩浆则为后碰撞伸展的产物 (周建波等, 2011)。

574 ~ 422 Ma 的碎屑锆石其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正值, 介于 0.9 ~ 13.6, 落于亏损地幔和球粒陨石演化线之间, Hf 单阶段模式年龄介于 1098 ~ 510 Ma, 表明其可能来源于新元古代壳幔物质共同作用的产物。在东北地区显生宙岩浆作用以新生地壳物质为主 (Wu Fuyuan et al., 2003), 多具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 而华北克拉通北缘显生宙以来的岩浆则以古老地壳重熔为主, 多具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (任邦方等, 2012; 刘建峰等, 2013; 李长民等, 2014)。这组锆石的 Hf 同位素组成与同时期的中亚造山带东段岩浆岩的 Hf 同位素组成一致 (图 9), 而区别于燕山地区同时期岩浆岩, 说明这组碎屑锆石的源区应为东北地区新元古代新生地壳物质。

大石寨组锆石最显著的年龄峰出现在 392 ~ 312 Ma, 峰值年龄为 347 Ma, 加权平均年龄为 350 Ma, 代表了大石寨组凝灰岩的成岩年龄。在这一时期, 区域岩浆活动频繁而剧烈, 是各类超基性岩—酸性岩浆侵入活动的鼎盛时期, 所形成的岩浆岩广泛分布于大兴安岭南段各构造单元。在此时期, 在索伦缝合带两侧发育弧岩浆, 由辉长闪长岩、石英闪长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩等组成 (陈斌等, 2001); 贺根山—二连一线以北也发育中晚古生代安山岩—英安岩及流纹岩—英安岩等弧火山岩组合 (王荃等, 1991)。

392 ~ 312 Ma 的锆石为大石寨组凝灰岩成岩阶段形成的锆石, 绝大部分测点的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值, 介于 6.1 ~ 16.8。一部分锆石具有很高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 与当时亏损地幔比较相近, 其单阶段模式年龄与形成年龄相近, 指示源岩来自亏损地幔分异出来而未经演化的物质。还有一部分锆石落于亏损地幔和球粒陨石演化线之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 6.1 ~ 12.0, Hf 单阶段模式年龄介于 729 ~ 496 Ma, 表明其可能来源于新元古代至寒武纪壳幔物质共同作用的产物。而测点 C46-48 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -7.3, 且位于 1.8 Ga 地壳平均演化线上, 指示其源岩可能来自古老地壳物质, 同时测点 C46-55 也落于燕山地区古生代岩浆岩的范围内, 而区别于中亚造山带东段古生代岩浆岩的 Hf 同位素组成, 说明其源区可能为华北克拉通北缘的古老地壳物质。

最年轻的一组锆石年龄分布在 224 ~ 133 Ma, 其 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -4.9 ~ 3.3, T_{DM} 介于 1010 ~ 730 Ma, T_{DM2} 介于 1501 ~ 1037 Ma, 这组锆石年龄则可能与后期热液改造有关。

4.3 岩石成因

研究区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩具有轻稀土富集,重稀土相对亏损,无明显 Eu 异常,富集 Ba、Rb、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素等特点(表 3,图 7),通常认为火山岩中 Nb、Ta 等元素亏损主要有以下几种原因:① 岩浆源区熔融过程中残留金红石等富 HFSE 的矿物(Ionov., 1999);② 岩浆源区或岩浆演化过程中受到陆壳物质的混染作用(Jahn Borming et al., 1999);③ 与俯冲流体或熔体交代作用相关(Gill, 1981)。

金红石等富 HFSE 的矿物都比较富集 Nb、Ta 等元素,如果岩浆源区熔融时金红石等富 HFSE 的矿物进入残留相,熔体会具有亏损 Nb、Ta 的特征,但同时也造成 Zr、Hf、Ti 等 HFSE 的亏损。虽然大石寨组安山质凝灰岩具有较低的 Nb($0.8 \times 10^{-6} \sim 7.6 \times 10^{-6}$)和 Ta($0.1 \times 10^{-6} \sim 0.4 \times 10^{-6}$)含量,但在原始地幔标准化蛛网图解中却没有明显的 Zr、Hf、Ti 等 HFSE 的亏损(图 7)。因此,大石寨组安山质凝灰岩中 Nb、Ta 等元素的亏损不能用岩浆源区残留富集 HFSE 矿物(如金红石)来解释;大石寨组安山质凝灰岩具有钙碱性性质,且具有安第斯型大陆边缘火山岩特征(图 7),表明岩浆演化过程有陆壳物质的加入(Michele Mattioli, 2006)。但是具有低 La/Nb、Ba/Nb 的幔源岩浆与陆壳混染的产物应该落在陆壳组成的下方,介于陆壳组成和幔源岩浆组成之间。大石寨组安山质凝灰岩的 La/Nb、Ba/Nb 值高于陆壳(图 10c),这显然不能由幔源岩浆经陆壳混染或壳幔物质混合熔融形成。因此,大石寨组火山岩所显示的 HFSE 亏损特征不能由单纯的陆壳物质加入来解释;大石寨组安山质凝灰岩地球化学特征(表 3;图 7)显示,微量和稀土元素明显具有安第斯型大陆边缘火山岩的特征,指示其与俯冲作用有关。指示俯冲环境的岩石组合主要有:TTG 组合、Adakite 组合、高镁安山岩(HMA)、镁安山岩系列(MA)、富铌玄武岩组合(NEAB)等(邓晋福等, 2015b)。在俯冲带中存在流体交代和熔体交代两种作用。流体交代作用是指俯冲板片脱水形成的富集大离子亲石元素(如 K、Rb、Sr、U、Th 等)的流体进入上覆地幔楔,发生交代作用使地幔楔橄榄岩部分熔融,形成消减带岩浆(Abe et al., 1998; Eiler et al., 2000; Grove et al., 2003)。熔体交代作用则是指俯冲的沉积物和玄武岩所产生的富水熔体(初始 Aidakitic 熔体)与上覆地幔楔橄榄岩相互作用而产

生的地幔橄榄岩熔融作用,生成混合熔体(Kelemen, 1995; Yogodzinski et al., 1998)。两种交代作用的产物具有某些相似的地球化学特征,如都可以引起 Nb、Ta 的亏损,又如均富集 LILE 和 LREE 元素,但也存在明显的区别。流体交代作用产生的岩石组合为钙碱性玄武岩—安山岩—英安岩—流纹岩及相应侵入岩组合,熔体交代作用产生的岩石组合为埃达克岩—富铌玄武岩—富镁安山岩组合(赵振华等, 2004)。在区域上,大石寨组火山岩空间分布特征显示火山岩在南北方向上具有明显的成分极性特征,从岛弧低钾拉斑玄武岩为主到钙碱性火山岩为主(高德臻等, 1998; 耿明山, 1998; 陶继雄等, 2003; 赵芝, 2008; 郭锋等, 2009; 刘建峰, 2009; 张健, 2012; 樊航宇等, 2014; 梅可辰等, 2015),并且前人研究资料中未曾报道过大石寨组含有埃达克质岩石。由此本文认为大石寨组安山质凝灰岩为古亚洲洋俯冲过程中洋壳脱水产生的流体与上覆地幔楔发生相互作用后形成的。

4.4 构造环境与地质意义

关于大石寨组火山岩的构造背景一直存在着争议,总结前人成果,主要有以下三种观点:① 裂谷或裂陷槽的拉张环境(唐克东, 1989; 任纪舜, 1990; 邵济安, 1991; 唐克东, 1992; 苏养正, 1996; 张臣等, 1997; 吕志成等, 2002; Zhang Xiaohui et al., 2008);② 岛弧或活动大陆边缘弧背景(高德臻等, 1998; 耿明山, 1998; 陶继雄等, 2003; 赵芝, 2008; 郭锋等, 2009; 刘建峰, 2009; 张健, 2012; 樊航宇等, 2014; 梅可辰等, 2015);③ 西伯利亚板块和华北板块碰撞完成后的伸展环境(Zhu Yongfeng et al., 2001)。

本次研究所取的克什克腾旗长岭子地区的大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩样品从其球粒陨石标准化稀土元素配分图(图 7a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7b)可以看出,本区安山质凝灰岩富集 Ba、Rb、K 等大离子亲石元素和轻稀土元素,而亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素,具有活动大陆边缘火山岩的特性(Gill, 1981; Francalanci et al., 1993)。此外,在 Zr—Zr/Y(Pearce et al., 1984)判别图解中(图 10a),大部分样品投点在陆缘弧区域,少部分落在大洋岛弧区域。利用 Nb/Yb—Th/Yb 图解(图 10b)(Pearce et al., 1995)可区分大洋岛弧和陆缘弧,样品落入大洋岛弧和陆缘弧交互区域。在 La/Nb—Ba/Nb 图解(图 10c)(Jahn Borming et al., 1999)中,样品基本上都投在了火山弧区域,整体显

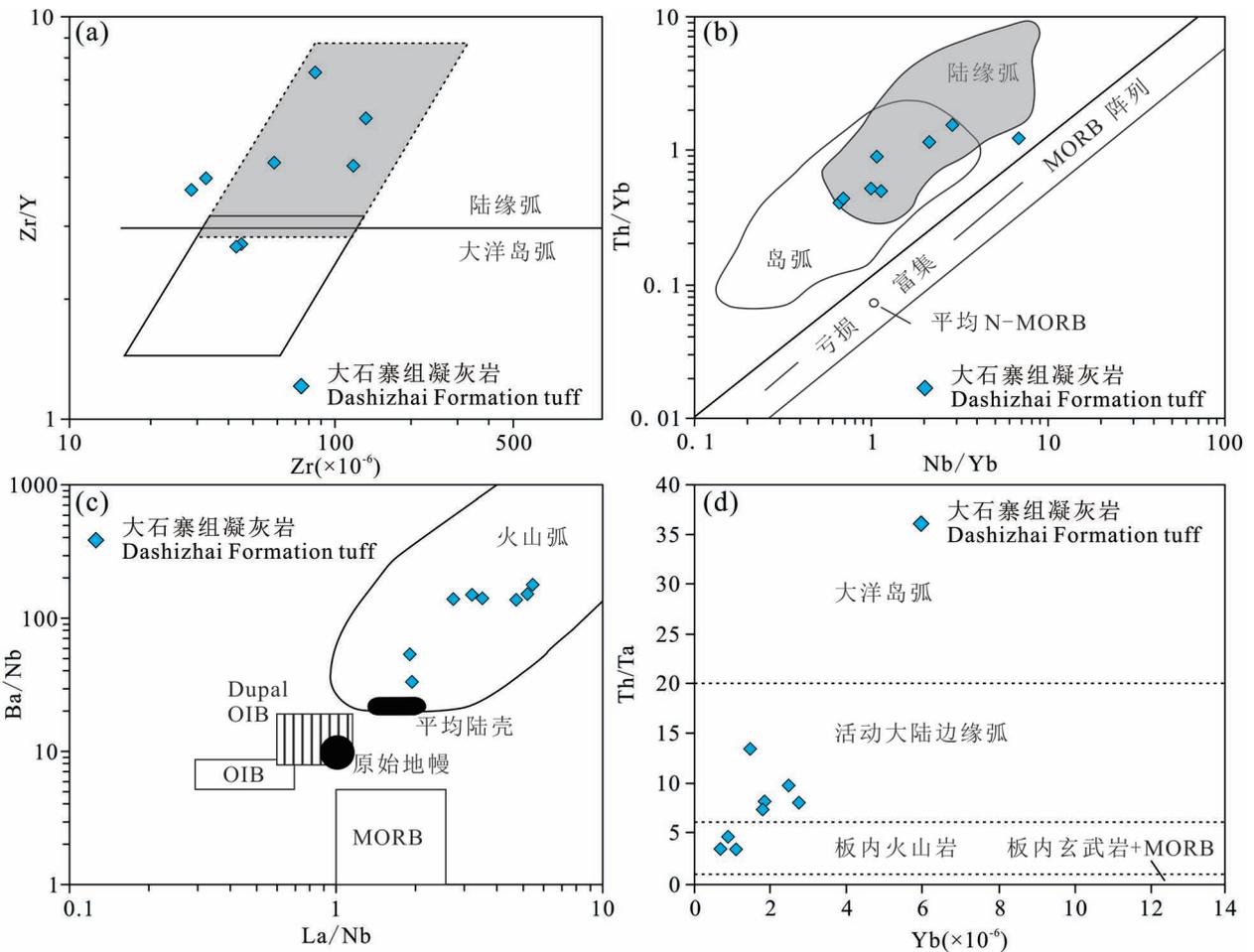


图 10 克什克腾旗长岭子大石寨组凝灰岩 Zr—Zr/Y (a) (Pearce et al., 1984), Nb/Yb—Th/Yb (b) (Pearce et al., 1995), La/Nb—Ba/Nb (c) (Jahn Borming et al., 1999) 和 Yb—Th/Ta (d) (Gorton et al., 2000) 构造判别图解

Fig. 10 The Zr—Zr/Y (a) (Pearce et al., 1984), Nb/Yb—Th/Yb (b) (Pearce et al., 1995), La/Nb—Ba/Nb (c) (Jahn Borming et al., 1999) 和 Yb—Th/Ta (d) (Gorton et al., 2000) discrimination diagrams for the Dashizhai Formation tuffs of Changlingzi area, Hexigten Banner

MORB—大洋中脊玄武岩; OIB—岛弧型玄武岩; Dupal OIB—双峰式岛弧玄武岩;

MORB—Mid ocean ridge basalt; OIB—Ocean island basalt; Dupal OIB—Dupal Ocean island basalt

示与弧火山岩相似的地球化学特征。而在 Yb—Th/Ta 判别图解 (图 10d) (Gorton et al., 2000) 中大部分样品投在了活动大陆边缘弧区域。综上所述, 本文认为大石寨组凝灰岩形成于活动大陆边缘弧环境。

关于古亚洲洋的闭合时间存在两种观点: ① 中晚泥盆世—早石炭世闭合 (洪大卫等, 1994; 鲍庆中等, 2007; 周志广等, 2010); ② 晚二叠世—早三叠世闭合 (陈斌等, 2001; Li Jinyi et al., 2006; Zhang Shuanhong et al., 2007; Chen Bin et al., 2009; 汪相, 2018)。本文的研究认为分布于内蒙古克什克腾旗长岭子地区的大石寨组安山质凝灰岩

形成于早石炭世, 其构造环境为大陆边缘弧环境, 这表明在早石炭世期间古亚洲洋向华北克拉通还存在俯冲作用, 因而古亚洲洋至少应在早石炭世之后才闭合。综上所述, 本文认为古亚洲洋闭合时间应为晚二叠世—早三叠世, 这也与 Chen Yanjing 等 (2017) 通过总结东北钼矿不同类型而指示的构造演化的认识一致, 即古亚洲洋最终闭合于晚二叠世末—三叠纪初 (黄汲清, 1987; 刘建明等, 2004), 华北板块与蒙古地块拼贴到一起, 形成华北—蒙古联合板块 (赵越, 1990; Wang Hongzhen and Mo Xuanxue, 1995; Yin and Nie, 1996; Chen Yanjing et al., 2017)。此外, 最近有学者在狼山发现了具有蛇

绿岩套特征的构造混杂岩,经研究认为狼山乃至整个阴山山脉才是华北克拉通与中亚造山带之间最后一期碰撞的造山带,也是华北克拉通北部的最终边界,而狼山的碰撞隆起时间应该在晚白垩世末期(吕洪波等,2018)。由此可见,华北克拉通与中亚造山带最终拼合位置及时间仍然需要我們做更多进一步的工作和研究。

5 结论

本文通过对内蒙古克什克腾旗长岭子研究区发育的大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩进行锆石 U-Pb 年代学、地球化学测试以及岩相学等研究,得出如下结论:

(1)测得长岭子研究区大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩形成年龄为 $350.0 \pm 6.5 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 4.0, n = 43$),属于早石炭世;此外还有六组年龄:3140 ~ 2826 Ma, 2761 ~ 2273 Ma, 2025 ~ 1673 Ma, 1036 ~ 673 Ma 和 574 ~ 422 Ma 分别记录了东北地区或其邻区太古代古老基底的信息、Kenorland 超大陆汇聚、Columbia 超大陆形成、新元古代 Rodinia 和泛非期 Gondwana 四期重大地质事件,224 ~ 133 Ma 应为后期流体改造作用。

(2)研究区下石炭统大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩具有属于偏铝质、钙碱性火山岩;相对富集轻稀土元素,轻、重稀土元素分馏中等,未显示明显的 Eu 异常,富集 Ba、Rb、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素,具有活动大陆边缘火山岩的特征。大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩为古亚洲洋俯冲过程中洋壳发生脱水产生的流体与上覆地幔楔发生相互作用后形成的;

(3)研究区下石炭统大石寨组安山质岩屑晶屑凝灰岩形成于古亚洲洋体制下的大陆边缘弧环境。

注 释 / Note

① 内蒙古山金地质矿产勘查有限公司. 2014. 内蒙古自治区克什克腾旗长岭子铅锌矿勘查 2014 年工作总结. 1~54.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 王宏, 李伟, 桑家和, 刘永生. 2007. 内蒙古东南部晚古生代裂谷区花岗岩质岩石锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 中国地质, 34(5): 790 ~ 798.

陈斌, 陈长健, 贺敬博, 刘安坤. 2013. 华北东部中生代高镁埃达克

质岩浆的起源: 岩石学和 Nd—Sr—Os 同位素证据. 科学通报, 58(20): 1941 ~ 1953.

陈斌, 马星华, 刘安坤, 木合塔尔. 2009. 锡林浩特杂岩和蓝片岩的锆石 U-Pb 年代学及其对索伦缝合带演化的意义. 岩石学报, 25(12): 3123 ~ 3129.

陈斌, 赵国春, Wilde S A. 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. 地质论评, 47(4): 361 ~ 367.

陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题. 岩石学报, 25(11): 3 ~ 34.

陈衍景, 张成, 李诺, 杨永飞, 邓轲. 2012. 中国东北钼矿床地质. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1223 ~ 1268.

陈彦, 张志诚, 李可, 罗志文, 汤文豪, 李秋根. 2014. 内蒙古西乌旗地区二叠纪双峰式火山岩的年代学、地球化学特征和地质意义. 北京大学学报自然科学版, 50(5): 843 ~ 858.

程天赦, 杨文静, 王登红. 2013. 内蒙古锡林浩特毛登牧场大石寨组细碧—角斑岩系地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 现代地质, 27(3): 525 ~ 536.

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015a. 关于火成岩常用图解的正确使用: 讨论与建议. 地质论评, 61(4): 717 ~ 734.

邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 马帅, 姚图. 2015b. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换. 地质论评, 61(3): 473 ~ 484.

樊航宇, 李明辰, 张全, 黄猛, 张晓飞, 李继军. 2014. 内蒙古西乌旗地区大石寨组火山岩时代及地球化学特征. 地质通报, 33(9): 1284 ~ 1292.

高德臻, 蒋干清. 1998. 内蒙古苏尼特左旗二叠系的重新厘定及大地构造演化分析. 地质通报, 17(4): 401 ~ 411.

葛梦春, 周文孝, 于洋, 孙俊俊, 鲍建泉, 王世海. 2011. 内蒙古锡林郭勒杂岩解体及壳岩系年代确定. 地学前缘, 18(5): 182 ~ 195.

葛文春, 李献华, 林强, 孙德有, 吴福元, 尹成孝. 2001. 呼伦湖早白垩世碱性流纹岩的地球化学特征及其意义. 地质科学, 36(2): 176 ~ 183.

葛文春, 隋振民, 吴福元, 张吉衡, 徐学纯, 程瑞玉. 2007. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义. 岩石学报, 23(2): 423 ~ 440.

葛文春, 吴福元, 周长勇, Rahman A A A. 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. 科学通报, 50(12): 1239 ~ 1247.

耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. 地质通报, 30(10): 1508 ~ 1513.

耿明山. 1998. 内蒙古中部下二叠统火山岩特征及构造环境意义. 地质与勘探, 34(1): 12 ~ 19.

苟军, 孙德有, 赵忠华, 任云生, 张学元, 付长亮, 王晰, 魏红艳. 2010. 满洲里南部白音高老组流纹岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因. 岩石学报, 26(1): 333 ~ 344.

关庆彬, 刘正宏, 白新会, 李鹏川, 万乐, 李世超. 2016. 内蒙古巴林右旗新开坝地区大石寨组火山岩形成时代及构造背景. 岩石学报, 32(7): 2029 ~ 2040.

郭锋, 范蔚茗, 李超文, 苗来成, 赵亮. 2009. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自内蒙古大石寨玄武岩的年代学与地球化学证据. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(5): 569 ~ 579.

郭晓丹, 周建波, 张兴洲, 邱海峻. 2011. 内蒙古西乌珠穆沁旗本巴图组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其意义. 地质通报, 30(2): 278 ~ 290.

韩杰, 周建波, 张兴洲, 邱海峻. 2011. 内蒙古林西地区上二叠统林西组砂岩碎屑锆石的年龄及其大地构造意义. 地质通报, 30

- (2): 258 ~ 269.
- 洪大卫, 王式, 谢锡林, 张季生. 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. 地质前缘, 7(2): 441 ~ 456.
- 黄汲清, 陈炳蔚. 1987. 中国及邻区特提斯海的演化. 北京: 地质出版社: 1 ~ 76.
- 黄猛. 2014. 内蒙古西乌旗地区白音高老组火山岩地球化学特征及其构造环境. 导师: 刘菲. 北京: 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1 ~ 53.
- 简平, 张旗, 刘敦一, 金维浚, 贾秀勤, 钱青. 2005. 内蒙古固阳晚太古代赞岐岩(sanukite)一角闪花岗岩的 SHRIMP 定年及其意义. 岩石学报, 21(1): 153 ~ 159.
- 孔元明. 2014. 内蒙古科右中旗地区早白垩世白音高老组酸性火山岩特征及形成的构造背景. 导师: 马瑞. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1 ~ 52.
- 李红英, 周志广, 李鹏举, 张达, 柳长峰, 陈诚, 陈利贞, 谷丛楠. 2016. 内蒙古西乌旗晚石炭世—早二叠世伸展事件—来自大石寨组火山岩的证据. 大地构造与成矿学, 40(5): 996 ~ 1013.
- 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.
- 李明. 2010. 中国东北现代河流碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究及大陆生长与演化. 导师: 高山. 武汉: 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 1 ~ 132.
- 李述靖, 高德臻. 1995. 内蒙古苏尼特左旗地区若干地质构造新发现及其构造属性的初步探讨. 现代地质, 9(2): 130 ~ 141.
- 李文国. 1996. 内蒙古自治区岩石地层. 北京: 中国地质大学出版社: 1 ~ 344.
- 李仰春, 汪岩, 吴淦国, 金哲岩, 张达, 杨晓平. 2013. 大兴安岭北段扎兰屯地区铜山组源区特征: 地球化学及碎屑锆石 U-Pb 年代学制约. 中国地质, 40(2): 391 ~ 402.
- 李益龙, 周汉文, 葛梦春, 廖群安, 张雄华, 钟增球. 2008. 内蒙古林西县双井片岩北缘混合岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄. 矿物岩石, 28(2): 10 ~ 16.
- 李长民, 邓晋福, 苏尚国, 刘翠, 刘新秒. 2014. 冀北水泉沟岩体西段锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究. 岩石学报, 30(11): 3301 ~ 3314.
- 刘建峰, 迟效国, 董春艳, 赵芝, 黎广荣, 赵院冬. 2008. 小兴安岭东部早古生代花岗岩的发现及其构造意义. 地质通报, 27(4): 534 ~ 544.
- 刘建峰, 李锦轶, 迟效国, 冯乾文, 胡兆初, 周坤. 2013. 华北克拉通北缘与弧—陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩—锆石 U-Pb 定年及地球化学证据. 地质通报, 32(增刊 1): 267 ~ 278.
- 刘建峰. 2009. 内蒙古林西—东乌旗地区晚古生代岩浆作用及其对区域构造演化的制约. 导师: 迟效国. 长春: 吉林大学博士学位论文: 1 ~ 142.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. 地质前缘, 11(1): 269 ~ 277.
- 刘树文, 吕勇军, 凤永刚, 张臣, 田伟, 闫全人, 柳小明. 2007. 冀北单塔子杂岩的地质学和锆石 U-Pb 年代学. 高校地质学报, 13(3): 484 ~ 497.
- 罗毅, 王正邦, 周德安. 1997. 额尔古纳超大型火山热液型铀成矿带地质特征及找矿前景. 东华理工大学学报(自然科学版), 20(1): 1 ~ 10.
- 吕洪波, 冯雪东, 王俊, 宋晓清, 董晓朋, 张海春, 章雨旭. 2018. 狼山发现蛇绿混杂岩——华北克拉通与中亚造山带碰撞边界的关键证据. 地质论评, 64(4): 777 ~ 805.
- 吕志成, 段国正, 郝立波, 李殿超, 潘军, 董广华. 2002. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨. 岩石学报, 18(2): 212 ~ 222.
- 梅可辰, 李秋根, 王宗起, 徐学义, 陈隽璐, 李智佩, 陈旭. 2015. 内蒙古中部苏尼特左旗大石寨组流纹岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 34(12): 2181 ~ 2194.
- 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 范蔚茗, 石玉若, 颜颜强. 2007. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. 科学通报, 52(5): 591 ~ 601.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社: 1 ~ 725.
- 聂立军, 贾海明, 王聪, 卢兴波. 2015. 大兴安岭中段白音高老组流纹岩年代学、地球化学及其地质意义. 世界地质, 34(2): 296 ~ 304.
- 彭澎, 翟明国. 2002. 华北陆块前寒武纪两次重大地质事件的特征和性质. 地球科学进展, 17(6): 818 ~ 825.
- 彭玉鲸, 纪春华, 辛玉莲. 2002. 中俄朝毗邻地区古吉黑造山带岩石及年代记录. 地质与资源, 11(2): 65 ~ 75.
- 祁进平, 陈衍景, Franco F. 2005. 东北地区浅成低温热液矿床的地质特征和构造背景. 矿物岩石, 25(2): 47 ~ 59.
- 秦涛, 郑常青, 崔天日, 李林川, 钱程, 陈会军. 2014. 内蒙古扎兰屯地区白音高老组火山岩地球化学、年代学及其地质意义. 地质与资源, 23(2): 146 ~ 153.
- 权京玉, 迟效国, 张蕊, 孙巍, 范乐夫, 胡兆初. 2013. 松嫩地块东部新元古代东风山群碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 32(增刊 1): 353 ~ 364.
- 任邦方, 孙立新, 程银行, 腾学建, 李艳锋, 郝爽. 2012. 大兴安岭北部永庆林场—十八站花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征. 地质调查与研究, 35(2): 109 ~ 117.
- 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵, 刘志刚. 1990. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社: 1 ~ 205.
- 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质. 北京: 地质出版社: 1 ~ 558.
- 邵济安, 何国琦, 唐克东. 2015. 华北北部二叠纪陆壳演化. 岩石学报, 31(1): 47 ~ 55.
- 邵济安, 唐克东. 1995. 中国东北地体与东北亚大陆边缘演化. 北京: 地震出版社: 1 ~ 180.
- 邵济安, 臧绍先, 牟保磊, 李晓波, 王冰. 1994. 造山带的伸展构造与软流圈隆起——以兴蒙造山带为例. 科学通报, 39(6): 533 ~ 537.
- 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 ~ 140.
- 施光海, 刘敦一, 张福勤, 简平, 苗来成, 石玉若, 陶华. 2003. 中国内蒙古锡林郭勒杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及意义. 科学通报, 48(20): 2187 ~ 2192.
- 舒启海, 赖勇, 魏良民, 孙艺, 王潮. 2011. 大兴安岭南段白音诺尔铅锌矿床流体包裹体研究. 岩石学报, 27(5): 1467 ~ 1482.
- 陶继雄, 白立兵, 宝音乌力吉, 郑武军, 苏茂荣. 2003. 内蒙古满都拉地区二叠纪俯冲造山过程的岩石记录. 地质调查与研究, 26(4): 241 ~ 249.
- 汪润洁. 1987. 大兴安岭南段下二叠统大石寨组 K-Ar 法同位素年龄的讨论. 岩石学报, 3(2): 82 ~ 93.
- 汪相. 2018. 白云鄂博超大型稀土—铌—铁矿床的成矿时代及成因探析——兼论 P-T 之交生物群灭绝事件和“阿蒙兴造山运动”. 地质论评, 64(2): 299 ~ 345.
- 王琦. 1991. 内蒙古白音诺铅锌多金属矿床卡岩及其含矿性研究. 导师: 艾永富. 北京: 北京大学硕士学位论文: 1 ~ 62.
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2003. 强烈亏损重稀土元素的中酸性火成岩(或埃达克质岩)与 Cu、Au 成矿作用. 地质前缘, 10(4): 561 ~ 572.

- 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: 1 ~ 151.
- 王婉琼. 2014. 华北板块北缘中段晚古生代构造演化: 温都尔庙—集宁火成岩年代学、地球化学的制约. 导师: 刘正宏. 长春: 吉林大学博士学位论文: 1 ~ 155.
- 吴福元, 曹林. 1999. 东北亚地区的若干重要基础地质问题. 世界地质, 18(2): 1 ~ 13.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185 ~ 220.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589 ~ 1604.
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 梅厚钧, 许继峰, 王强. 2001. 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因: Nd 和 Sr 同位素组成的限制. 岩石学报, 17(4): 514 ~ 522.
- 徐备, Charvet J, 张福勤. 2001. 内蒙古北部苏尼特左旗蓝片岩岩石学和年代学研究. 地质科学, 36(4): 421 ~ 434.
- 杨现力. 2007. 扎兰屯浅变质岩系地质特征及碎屑锆石年代学研究. 导师: 金巍. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1 ~ 83.
- 曾维顺, 周建波, 张兴洲, 邱海峻. 2011. 内蒙古科右前旗大石寨组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其形成背景. 地质通报, 30(增刊 1): 90 ~ 97.
- 翟明国, 彭澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件. 岩石学报, 23(11): 2665 ~ 2682.
- 张吉衡. 2009. 大兴安岭中生代火山岩年代学及地球化学研究. 导师: 高山. 武汉: 中国地质大学(武汉)博士学位论文: 1 ~ 105.
- 张健. 2012. 内蒙古东部大石寨组火山岩锆石 U-Pb 年代学及其地球化学研究. 导师: 葛文春. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1 ~ 85.
- 张乐彤, 李世超, 赵庆英, 李雪菲, 王璐, 李子昊. 2015. 大兴安岭中段白音高老组火山岩的形成时代及地球化学特征. 世界地质, 34(1): 44 ~ 54.
- 张控宏, 赵越, 刘建民, 胡健民, 宋彪, 刘健, 吴海. 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. 岩石矿物学杂志, 29(6): 824 ~ 842.
- 张晓飞, 刘俊来, 冯俊峰, 周毅, 滕超, 张华川, 曹军, 王必任. 2016. 内蒙古锡林浩特乌拉苏太大石寨组火山岩年代学、地球化学特征及其地质意义. 地质通报, 35(5): 766 ~ 775.
- 张学斌, 周长红, 来林, 徐翠, 田颖, 陈丽贞, 魏民. 2015. 锡林浩特东部早白垩世白音高老组岩石地球化学特征、LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 地质与勘探, 51(2): 290 ~ 302.
- 赵越. 1990. 燕山地区中生代造山运动及构造演化. 地质论评, 36(1): 1 ~ 13.
- 赵振华, 王强, 熊小林. 2004. 俯冲带复杂的壳幔相互作用. 矿物岩石地球化学通报, 23(4): 277 ~ 284.
- 赵芝, 迟效国, 潘世语, 刘建峰, 孙巍, 胡兆初. 2010. 小兴安岭西北部石炭纪地层火山岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义. 岩石学报, 26(8): 2452 ~ 2464.
- 赵芝. 2008. 内蒙古大石寨地区早二叠世大石寨组火山岩的地球化学特征及其构造环境. 导师: 迟效国. 长春: 吉林大学硕士学位论文: 1 ~ 49.
- 赵芝. 2011. 大兴安岭北部晚古生代岩浆作用及其构造意义. 导师: 迟效国. 长春: 吉林大学博士学位论文: 1 ~ 116.
- 郑月娟, 张海华, 陈树旺, 张健, 黄欣, 公繁浩, 苏飞, 甄甄. 2014. 内蒙古阿鲁科尔沁旗林西组砂岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及意义. 地质通报, 33(9): 1293 ~ 1307.
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵. 2006. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述. 地质科技情报, 25(1): 27 ~ 34.
- 周建波, 王斌, 曾维顺, 曹嘉麟. 2014. 大兴安岭地区扎兰屯变质杂岩的碎屑锆石 U-Pb 年龄及其大地构造意义. 岩石学报, 30(7): 1879 ~ 1888.
- 周建波, 张兴洲, Wilde S A, 郑常青. 2011. 中国东北 ~ 500Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义. 岩石学报, 27(4): 1235 ~ 1245.
- 周志广, 谷永昌, 柳长峰, 於扬森, 张冰, 田志君, 何付兵, 王必任. 2010. 内蒙古东乌珠穆沁旗满都胡宝拉格地区早—中二叠世华夏植物群的发现及地质意义. 地质通报, 29(1): 21 ~ 25.
- Abe N, Arai S, Yurimoto H. 1998. Geochemical characteristics of the uppermost mantle beneath the Japan island arcs: implications for upper mantle evolution. Physics of the Earth & Planetary Interiors, 107(1 ~ 3): 233 ~ 248.
- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. Nature, 362(6416): 144 ~ 146.
- Bao Qingzhong, Zhang Changjie, Wu Zhili, Wang Hong, Li Wei, Sang Jiahe, Liu Yongsheng. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids in a Late Paleozoic rift area, southeastern Inner Mongolia, and its implications. Geology in China, 34(5): 790 ~ 798.
- Bas M J L, Maitre R W L, Streckeisen A, Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali—silica diagram. Journal of Petrology, 27(3): 745 ~ 750.
- Bekker A, Eriksson K A. 2003. A Paleoproterozoic drowned carbonate platform on the southeastern margin of the Wyoming Craton: a record of the Kenorland breakup. Precambrian Research, 120(3 ~ 4): 327 ~ 364.
- Chen Bin, Chen Changjian, He Jingbo, Liu Ankun. 2013. Origin of Mesozoic high-Mg adakitic rocks from northeastern China: Petrological and Nd—Sr—Os isotopic constraints. Chinese Science Bulletin, 58(20): 1941 ~ 1953.
- Chen Bin, Jahn Borming, Suzuki K. 2013. Petrological and Nd—Sr—Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: Tectonic implications. Geology, 41(1): 91 ~ 94.
- Chen Bin, Jahn Borming, Tian Wei. 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. Journal of Asian Earth Sciences, 34(3): 245 ~ 257.
- Chen Bin, Jahn Borming, Wilde S A, Xu Bei. 2000. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications. Tectonophysics, 328(1): 157 ~ 182.
- Chen Bin, Ma Xinghua, Liu Ankun, and Muhetaer. 2009. Zircon U-Pb ages of Xilinhot metamorphic complex and blueschist, and implications for tectonic evolution of the Solonker suture. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3123 ~ 3129.
- Chen Bin, Zhao Guochun, Wilde S A. 2001. Subduction- and collision-related granitoids from southern Sonidzuqi, Inner Mongolia: Isotopic ages and tectonic implications. Geological Review, 47(4): 361 ~ 367.
- Chen Yan, Zhang Zhicheng, Li Ke, Luo Zhiwen, Tang Wenhao, Li Qiugen. 2014. Geochronology, geochemistry and geological significance of the Permian bimodal volcanic rocks in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 50(5): 843 ~ 858.
- Chen Yangjing, Zhang Cheng, Li Nuo, Yang Yongfei, Deng Ke. 2012. Geology of the Mo deposits in Northeast China. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 42(5): 1223 ~ 1268.
- Chen Yanjing, Chen Huayong, Zaw K, Pirajno F, Zhang Zengjie. 2007.

- Geodynamic settings and tectonic model of skarn gold deposits in China: An overview. *Ore Geology Reviews*, 31(1~4): 139~169.
- Chen Yanjing, Zhai Mingguo, Jiang Shaoyong. 2009. Significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3~34.
- Chen Yanjing, Zhang Cheng, Wang Pin, Pirajno F, Li Nuo. 2017. The Mo deposits of Northeast China: A powerful indicator of tectonic settings and associated evolutionary trends. *Ore Geology Reviews*, 81(2): 602~640.
- Cheng Tianshe, Yang Wenjing, Wang Denghong. 2013. Zircon U-Pb age of the silite—keratophyre sequence of the Dashizhai Formation in Maodeng of Xilinhaote, Inner Mongolia and its geological significance. *Geoscience*, 27(3): 525~536.
- Corfu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 53(1): 469~500.
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662~665.
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongjun, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015a. On the correct application in the common igneous petrological diagrams; discussion and suggestion. *Geological Review*, 61(4): 717~734.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015b. Magmatic arc and ocean—continent transition; discussion. *Geological Review*, 61(3): 473~484.
- Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian ocean. *International Geological Review*, 37(4): 335~360.
- Eiler J M, Crawford A, Elliott T, Farley K A, Valley J W, Stolper E M. 2000. Oxygen isotope geochemistry of oceanic—arc lavas. *Journal of Petrology*, 41(2): 229~256.
- Fan Hangyu, Li Mingchen, Zhang Quan, Huang Meng, Zhang Xiaofei, Li Jijun. 2014. Age and geochemical characteristics of the Dashizhai Formation volcanic rocks in Xi Ujimqin Banner, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1284~1292.
- Feeley T C, Hacker M D. 1995. Intracrustal derivation of Na-rich andesitic and dacitic magmas; an example from volcanic Otago, Andean Central Volcanic Zone. *Journal of Geology*, 103(2): 213~225.
- Gao Dezhen, Jiang Ganqing. 1998. Revision of the stratigraphic division of the Permian and tectonic evolution in the Songliao Left Banner, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 17(4): 401~411.
- Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Hongling, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Wenliang, Ling Wenli, Ayers J, Wang Xuanche, Wang Qinghai. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature*, 2004, 432(7019): 892~897.
- Ge Mengchun, Zhou Wenxiao, Yu Yang, Sun Junjun, Bao Jianquan, Wang Shihai. 2011. Dissolution and supracrustal rocks dating of Xilin Gol Complex, Inner Mongolia, China. *Earth Science Frontier*, 18(5): 182~195.
- Ge Wenchun, Li Xianhua, Lin Qiang, Sun Deyou, Wu Fuyuan, Yin Chengxiao. 2001. Geochemistry of early Cretaceous alkaline rhyolites from Hulun Lake, Daxing'anling and its tectonic implications. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 176~183.
- Ge Wenchun, Sui Zhenmin, Wu Fuyuan, Zhang Jiheng, Xu Xuechun, Cheng Ruiyu. 2007. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts., northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 423~440.
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, Rahman A A A. 2005. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Range. *Chinese Science Bulletin*, 50(18): 2097~2105.
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, Zhang Jiheng. 2007. Porphyry Cu—Mo deposits in the eastern Xing'an—Mongolian Orogenic Belt: Mineralization ages and their geodynamic implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(24): 3416~3427.
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, Zhou Hongying, Li Huimin. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508~1513.
- Geng Mingshan. 1998. Petrologic characteristics and tectonic setting of volcanic rock from Lower Permian system in the Central Inner Mongolia. *Geology and Prospecting*, 34(1): 12~19.
- Gill J B. 1981. Orogenic andesites and plate tectonics. *Mineralogical Magazine*, 46(339): 277~278.
- Goolaerts A, Mattielli N, Jong J D, Weis D, Scoates J S. 2004. Hf and Lu isotopic reference values for the zircon standard 91500 by MC-ICP-MS. *Chemical Geology*, 206(1): 1~9.
- Gorton M P, Schandl E S. 2000. From continents to island arcs: A geochemical index of tectonic setting for Arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rocks. *Canadian Mineralogist*, 38(5): 1065~1073.
- Gou Jun, Sun Deyou, Zhao Zhonghua, Ren Yunsheng, Zhang Xueyuan, Fu Changliang, Wang Xi, Wei Hongyan. 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and petrogenesis of rhyolites in Baiyingaolao Formation from the southern Manzhouli, Inner-Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 333~344.
- Grove T L, Elkins-Tanton L T, Parman S W, Chatterjee N, Muntener O, Gaetani G A. 2003. Fractional crystallization and mantle-melting controls on calc-alkaline differentiation trends. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 145(5): 515~533.
- Guan Qingbin, Liu Zhenghong, Bai Xinhui, Li Pengchuan, Wan Le, Li Shichao. 2016. Age and tectonic setting of volcanic rocks of the Dashizhai Formation from Xinkaiba, Balinyouqi area, Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 32(7): 2029~2040.
- Guo Feng, Nakamura E, Fan Weiming, Kobayoshi K, Li Chaowen. 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing; Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48(4): 661~692.
- Guo Xiaodan, Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Qiu Haijun. 2011. The detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and its significance of Benbatu Formation in Xiuzhuzhumuqin, Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 30(2): 278~290.
- Gutierrez F. 2005. The Hudson Volcano and surrounding monogenetic centres (Chilean Patagonia) An example of volcanism associated with ridge—trench collision environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 145(3): 207~233.
- Guyuan, Yang Yueheng, Xie Liewen, Yang Jinhui, Xu Ping. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 234(1~2): 105~126.
- Han Jie, Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Qiu Haijun. 2011. Detrital

- zircon U-Pb dating from sandstone of the Upper Permian Linxi Formation, Linxi area, Inner Mongolia, China and its tectonic implications. *Geological Bulletin of China*, 30(2): 258 ~ 269.
- Hong Dawei, Wang Shi, Xie Xilin, Zhang Jisheng. 2000. Genesis of positive ϵ (Nd, t) granitoids in the Dahinggan Mts. Mongolia Orogenic Belt and growth continental crust. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441 ~ 456.
- Huang Jiqing, Chen Bingwei. 1987. The Evolution of the Tethys in China and Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House: 1 ~ 76.
- Huang Meng. 2014. The geochemical characteristics and tectonic setting of volcanic rock in Baiyingaolao Formation from Xiwuzhumuqin area Inner Mongolia. Dissertation supervisor: Liu Fei. Beijing: Master's thesis of China University of Geoscience (Beijing): 1 ~ 53.
- Ionov D A, Grégoire M, Prikhod'ko V S. 1999. Feldspar—Ti-oxide metasomatism in off-cratonic continental and oceanic upper mantle. *Earth & Planetary Science Letters*, 165(1): 37 ~ 44.
- Jahn Borming, Wu Fuyuan, Chen Bin. 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 91(1 ~ 2): 181 ~ 193.
- Jahn Borming, Wu Fuyuan, Lo Chinghua, Tsaid C H. 1999. Crust—mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical 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.
- Jian Ping, Kroner A, Jahn Borming, Windley B F, Shi Yuruo, Zhang Wei, Zhang Fuqin, Miao Laicheng, Tomruhud D, Liu Dunyi. 2014. Zircon dating of Neoproterozoic and Cambrian ophiolites in West Mongolia and implications for the timing of orogenic processes in the central part of the Central Asian Orogenic Belt. *Earth-Science Reviews*, 133: 62 ~ 93.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Kroner A, Windley B F, Shi Yuruo, Zhang Fuqin, Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Wei, Zhang Qi, Zhang Liqiao, Ren Jishun. 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. *Lithos*, 101(3 ~ 4): 233 ~ 259.
- Jian Ping, Zhang Qi, Liu Dunyi, Jin Weijun, Jia Xiuqin, Qian Qing. 2005. SHRIMP dating and geological significance of Late Achaean high-Mg diorite (sanukite) and hornblende-granite at Guyang of Inner Mongolia. *Acta Petrologica Sinica*, 21(01): 153 ~ 159.
- Kalsbeek F. 2001. Geochemical comparison between Archaean and Proterozoic orthogneisses from the Nagssugtoqidian orogen, West Greenland. *Precambrian Research*, 105(2): 165 ~ 181.
- Kelemen P B. 1995. Genesis of high Mg# andesites and the continental crust. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 120(1): 1 ~ 19.
- Kong Yuanming. 2014. Characteristics and tectonic setting of acid volcanic rocks in Early Cretaceous Baiyingaolao Formation from Keyouzhongqi area, Inner Mongolia. Dissertation supervisor: Ma Rui. Changchun: Master's thesis of Jilin University: 1 ~ 52.
- Le Maitre R W. 2002. *Igneous Rocks, A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge: Cambridge University Press, (2nd ed.): 1 ~ 236.
- Li Changmin, Deng Jinfu, Su Shangguo, Liu Cui, Liu Xinmiao. 2014. Zircon U-Pb chronology and Hf isotope in the western part of the Shuiquanguo alkaline complex, northern Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3301 ~ 3314.
- Li Hongying, Zhou Zhiguang, Li Pengju, Zhang Da, Liu Changfeng, Chen Cheng, Chen Lizhen, Gu Congnan. 2016. A Late Carboniferous—Early Permian extensional event in Xi Ujimqin Qi, Inner Mongolia—Evidence from volcanic rocks of Dashizhai Formation. *Geotectonica et Metallogenia*, 40(5): 996 ~ 1013.
- Li Jinyi, Gao Liming, Sun Guihua, Li Yaping, Wang Yanbin. 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.
- Li Jinyi. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3): 207 ~ 224.
- Li Ming. 2010. Crustal growth and evolution of Northeastern China as revealed by U-Pb age and Hf isotopes of detrital zircons from modern rivers. Dissertation supervisor: Gao Shan. Wuhan: Doctor's thesis of China University of Geoscience (Wuhan): 1 ~ 132.
- Li Nuo, Chen Yanjing, Santosh M, Yao Junming, Sun Yali, Li Jing. 2011. The 1.85 Ga Mo mineralization in the Xiong'er Terrane, China; Implications for metallogeny associated with assembly of the Columbia supercontinent. *Precambrian Research*, 186(1 ~ 4): 220 ~ 232.
- Li Nuo, Chen Yanjing, Ulrich T, Lai Yong. 2012. Fluid inclusion study of the Wunugetu Cu—Mo deposit, Inner Mongolia, China. *Mineralium Deposita*, 47(5): 467 ~ 481.
- Li Shan, Wilde S A, Wang Tao, Xiao Wenjiao, Guo Qianqian. 2016. Latest Early Permian granitic magmatism in southern Inner Mongolia, China; Implications for the tectonic evolution of the southeastern Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 29(1): 168 ~ 180.
- Li Shujing, Gao Dezhen. 1995. New discoveries of geological structures in Sonid Zuoqi of Inner Mongolia and discussion on tectonic features. *Geoscience*, 9(2): 130 ~ 141.
- Li Wenguo. 1996. *Stratigraphy (Lithostratigraphic) of Nei Mongol Autonomous Region*. Beijing: China University of Geosciences Press: 1 ~ 344.
- Li Yangchun, Wang Yan, Wu Jinguo, Jin Zheyang, Zhang Da, Yang Xiaoping. 2013. The Provenance characteristics of Tongshan Formation in north Zalantun area of the Da Hinggan Mountains; The constraint of geochemistry and LA-MC-ICPMS U-Pb dating of detrital zircons. *Geology in China*, 40(2): 391 ~ 402.
- Li Yilong, Zhou Hanwen, Ge Mengchun, Liao Qun'an, Zhang Xionghua, Zhong Zengqiu. 2008. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of migmatite from north Shuangjing schist in Linxi, Inner Mongolia. *Journal of Mineralogical and Petrological Science*, 28(2): 10 ~ 16.
- Liu Jianfeng, Chi Xiaoguo, Dong Chunyan, Zhao Zhi, Li Guangrong, Zhao Yuandong. 2008. Discovery of Early Paleozoic granites in the eastern Xiao Hinggan Mountains, northeastern China and their tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 534 ~ 544.
- Liu Jianfeng, Li Jinyi, Chi Xiaoguo, Feng Qianwen, Hu Zhaochu, Zhou Kun. 2013. Early Devonian felsic volcanic rocks related to the arc—continent collision on the northern margin of North China craton—evidences of zircon U-Pb dating and geochemical characteristics. *Geological Bulletin of China*, 32 (plus 1): 267 ~ 278.
- Liu Jianfeng. 2009. Late Paleozoic magmatism and its constraints on

- regional tectonic evolution in Linxi—Dongwuqi area, Inner Mongolia. Dissertation supervisor: Chi Xiaoguo. Changchun; Doctor's thesis of Jilin University: 1 ~ 142.
- Liu Jianming, Zhang Rui, Zhang Xingzhou. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China. *Earth Science Frontiers*, 11 (1): 269 ~ 277.
- Liu Jun, Wu Guang, Li Yuan, Zhu Mingtian, Zhong Wei. 2012. Re-Os sulfide (chalcopyrite, pyrite and molybdenite) systematics and fluid inclusion study of the Duobaoshan porphyry Cu (Mo) deposit, Heilongjiang Province, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49 (3): 300 ~ 312.
- Liu Shuwen, Lv Yongjun, Feng Yonggang, Zhang Chen, Tian Wei, Yan Quanren, Liu Xiaoming. 2007. Geology and zircon U-Pb isotopic chronology of Dantazi Complex, northern Hebei Province. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 484 ~ 497.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit formicrosoft excel. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, 4: 1 ~ 71.
- Luo Yi, Wang Zhengbang, Zhou De'an. 1997. The geologic characteristics and prospecting prospect of Eerguna super-large volcanic hydrothermal type uranium metallogenic belt. *Journal of East China Geological Institute*, 20(1): 1 ~ 10.
- Lü Hongbo, Feng Xuedong, Wang Jun, Zhu Xiaoqing, Zhang Haichun, Zhang Yuxu. 2018. Ophiolitic mélanges found in Mount Langshan as the crucial evidence of collisional margin between North China Craton and Central Asian Orogenic Belt. *Geological Review*, 64 (4): 777 ~ 805.
- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, Li Dianchao, Pan Jun, Dong Guanghua. 2002. The petrological and geochemical characteristics and petrogenesis significance of spilite from lower Permian Dashizhai Group in the middle section of Da Hinggan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 212 ~ 222.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, Moyen J F, Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite—trondhjemite—granodiorite (TTG), and sanukitoid; relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1 ~ 2): 1 ~ 24.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas; modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411 ~ 429.
- Mattioli M, Renzulli A, Menna M, Holm P M. 2006. Rapid ascent and contamination of magmas through the thick crust of the CVZ (Andes, Ollagüe region): Evidence from a nearly aphyric high-K andesite with skeletal olivines. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 158(1 ~ 2): 87 ~ 105.
- Medonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120(3 ~ 4): 223 ~ 253.
- Mei Kechen, Li Qiugen, Wang Zongqi, Xu Xueyi, Chen Juanlu, Li Zhipei, Chen Xu. 2015. SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry and tectonic significance of the Dashizhai Formation rhyolites in Sunid Left Banner, middle part of Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 34(12): 2181 ~ 2194.
- Moller A, O'Brien P J, Kennedy A, Kroner A. 2003. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: an example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway). *Geological Society London Special Publications*, 220(1): 65 ~ 81.
- Nie Lijun, Jia Haiming, Wang Cong, Lu Xingbo. 2015. Chronology, geochemistry of rhyolites from Baiyingaolao Formation in the middle part of Da Hinggan Mountains and its tectonic implications. *Global Geology*, 34(2): 296 ~ 304.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956 ~ 983.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 23(1): 251 ~ 285.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63 ~ 81.
- Peng Peng, Zhai Mingguo. 2002. Two major Precambrian geological events of North China Block (NCB): characteristics and property. *Advance in Earth Sciences*, 17(6): 818 ~ 825.
- Peng Yujing, Ji Chunhua, Xin Yulian. 2002. Petrology and geochronology of the Paleo-Jilin—Heilongjiang Orogenic Belt in the adjacent areas of China, Russia and Korea. *Geology and Resources*, 11(2): 65 ~ 75.
- Qi Jinping, Chen Yanjing, Franco F. 2005. Geological characteristics and tectonic setting of the epithermal deposits in the northeast China. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 25(2): 47 ~ 59.
- Qin Tao, Zheng Changqing, Cui Tianri, Li Linchuan, Qian Cheng, Chen Huijun. 2014. Volcanic rocks of Baiyingaolao Formation in the southwest of Zhalantun, Inner Mongolia: geochemistry, geochronology and tectonic implications. *Geology and Resources*, 23 (2): 146 ~ 153.
- Quan Jingyu, Chi Xiaoguo, Zhang Rui, Sun Wei, Fan Lefu, Hu Zhaochu. 2013. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircon from the Neoproterozoic Dongfengshan Group in Songnen masiff and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 32 (plus 1): 353 ~ 364.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8 ~ 32 kbar: Implications for continental growth and Crust—Mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891 ~ 931.
- Ren Bangfang, Sun Lixin, Cheng Yinhang, Teng Xuejian, Li Yanfeng, Hao Shuang. 2012. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics of the Yongqinglingchang—Shibazhan granites in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Geological Survey and Research*, 35(2): 109 ~ 117.
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation Presentation and Interpretation. New York: Longman; 1 ~ 352.
- Rubbatto D, Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the western Alps. In: *Cathodoluminescence in Geoscience*. Berlin: Springer; 373 ~ 400.
- Rui Zongyao, Shi Lindao, Fang Ruheng. 1994. Geology of nonferrous metallic deposits in the northern margin of the North China Landmass and its adjacent area. Beijing: Geological Publishing House; 1 ~ 558.
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction. *Precambrian Research*, 178(1): 149 ~ 167.
- Sen C, Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117(4): 394 ~ 409.
- Sengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, 364

- (6435): 299 ~ 307.
- Shao Ji'an, He Guoqi, Tang Kedong. 2015. The evolution of Permian continental crust in northern part of North China. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 47 ~ 55.
- Shao Ji'an, Tang Kedong. 1995. Terranes in Northeast China and Evolution of Northeast Asia Continental Margin. Beijing: Seismological Press; 1 ~ 180.
- Shi Yuruo, Jian Ping, Kroner A, Li Linlin, Liu Cui, Zhang Wei. 2016. Zircon ages and Hf isotopic compositions of Ordovician and Carboniferous granitoids from central Inner Mongolia and their significance for early and late Paleozoic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117: 153 ~ 169.
- Shu Qihai, Lai Yong, Wei Liangmin, Sun Yi, Wang Chao. 2011. Fluid inclusion study of the Baiyinnuo'er Zn—Pb deposit, south segment of the Great Xing'an Mountain, northeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(5): 1467 ~ 1482.
- Sun S S, McDonough W E. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313 ~ 345.
- Tang Haoshu, Chen Yanjing, Wu Guang, Lai Yong. 2011. Paleoproterozoic positive $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, excursion in the northeastern Sino—Korean craton: Evidence of the Lomagundi Event. *Gondwana Research*, 19(2): 471 ~ 481.
- Tang Kedong. 1990. Tectonic development of Paleozoic foldbelts at the north Margin of the Sino—Korean Craton. *Tectonics*, 9(2): 249 ~ 260.
- Tao Jixiong, Bai Libing, Bao Yinwuliji, Zheng Wujun, Su Maorong. 2003. Rock record of Permian subducting orogenic process in Mandula, Inner Mongolia. *Geological Survey and Research*, 26(4): 241 ~ 249.
- Vervoort J D, Patchett P J. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717 ~ 3733.
- Wang Hongzhen, Mo Xuanxue. 1995. An outline of the tectonic evolution of China. *Episodes*, 18(1 ~ 2): 6 ~ 16.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Jian Ping, Bao Zhiwei, Zhao Zhenhua, Li Chaofeng, Xiong Xiaolin, Ma Jinlong. 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: Implications for the genesis of porphyry copper mineralization. *Journal of Petrology*, 47(1): 119 ~ 144.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua. 2003. Intermediate—acid igneous rocks strongly depleted in heavy rare earth elements (or Adakitic rocks) and copper—gold metallogenesis. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 561 ~ 572.
- Wang Runjie. 1987. A discussion of K—Ar ages of the Lower Permian Dashizhai Formation in the south segment of the Daxinganling. *Acta Petrologica Sinica*, 3(2): 82 ~ 93.
- Wang Wanqiong. 2014. Late Paleozoic tectonic evolution of the central—northern margin of the North China Craton: constraints from zircon U—Pb ages and geochemistry of igneous rocks in Ondor Sum—Jining area. Dissertation supervisor: Liu Zhenghong. Changchun: Doctor's thesis of Jilin University; 1 ~ 155.
- Wang Xiang. 2018. Analysis on the oreforming time and genesis of the Bayan Obo REE—Nb—Fe deposit: with a discussion on the mass extinction at the P—T boundary and "AMH Orogeny". *Geological Review*, 64(2): 299 ~ 345.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao Wenjiao, Kroner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 31 ~ 47.
- Wu Fuyuan, Cao Lin. 1999. Some important problems of geology in northeastern Asia. *World Geology*, 18(2): 1 ~ 13.
- Wu Fuyuan, Jahn Borming, Wilde S A, Lo Chinghua, Yui Tzenfu, Lin Qiang, Ge Wenchun, Sun Deyou. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (II): isotopic geochemistry and implications for crustal growth in the Phanerozoic. *Lithos*, 67(3): 191 ~ 204.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu—Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 ~ 220.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, Zhang Yanbin, Grant M L, Wilde S A, Jahn Borming. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1 ~ 30.
- Wu Guang, Chen Yuchuan, Chen Yanjing, Zeng Qingdong. 2012. Zircon U—Pb ages of the metamorphic supracrustal rocks of the Xinghuadukou Group and granitic complexes in the Argun massif of the northern Great Hinggan Range, NE China, and their tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49(3): 214 ~ 233.
- Wu Guang, Sun Fengyue, Zhao Caisheng, Li Zhitong, Zhao Ailin, Pang Qingbang, Li Guangyuan. 2005. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(23): 2733 ~ 2743.
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Liu Wei, Wan Bo, Zhang Ji'en, Ao Songjian, Zhang Zhiyong, Song Dongfang, Tian Zhonghua, Luo Jun. 2014. How many sutures in the southern Central Asian Orogenic Belt: Insights from east Xinjiang—west Gansu (NW China)? *Geoscience Frontiers*, 5(4): 525 ~ 536.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Hao Jie, Zhai Mingguo. 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt. *Tectonics*, 22(6): 1069 ~ 1090.
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, Mei Houjun, Xu Jifeng, Wang Qiang. 2001. Origin of Awulate adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: constraints for Nd and Sr isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 514 ~ 522.
- Xu Bei, Charvet J, Chen Yan, Zhao Pan, Shi Guanzhong. 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. *Gondwana Research*, 23(4): 1342 ~ 1364.
- Xu Bei, Charvet J, Zhang Fuqin. 2001. Primary study of petrology and geochronology of blueschists in Sunitezuoqi, northern Inner Mongolia. *Chinese Journal of Geology*, 36(4): 421 ~ 434.
- Xu Bei, Chen Bin. 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: Earth Sciences*, 40(5): 463 ~ 469.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Ji'an, Wilde S A, Xie Liewen, Liu Xiaoming. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth & Planetary Science Letters*, 246(3): 336 ~ 352.
- Yang Xianli. 2007. Geological characteristics and study of detrital zircon geochronology of epimetamorphic series in Zhalantun area.

- Dissertation supervisor: Jin Wei. Changchun; Master's thesis of Jilin University: 1 ~ 83.
- Yin A, Nie S. 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions. *World and Regional Geology*, 1(8): 442 ~ 485.
- Yogodzinski G M, Kelemen P B. 1998. Slab melting in the Aleutians; implications of an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt. *Earth & Planetary Science Letters*, 158(1): 53 ~ 65.
- Yuan Hongli, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Gunther D, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U - Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation - inductively coupled plasma - mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353 ~ 370.
- Zeng Weishun, Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Qiu Haijun. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the volcanic rocks from the Dashizhai Formation in Keyouqianqi, Inner Mongolia, China and its tectonic setting. *Geological Bulletin of China*, 30 (plus 1): 90 ~ 97.
- Zhai Degao, Liu Jiajun, Wang Jianping, Yang Yongqiang, Zhang Hongyu, Wang Xilong, Zhang Qibin, Wang Gongwen, Liu Zhenjiang. 2014. Zircon U-Pb and molybdenite Re-Os geochronology, and whole-rock geochemistry of the Hashitu molybdenum deposit and host granitoids, Inner Mongolia, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79(2): 144 ~ 160.
- Zhai Mingguo, Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2665 ~ 2682
- Zhang Jian. 2012. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Dashizhai Formation in eastern Inner Mongolia. Dissertation supervisor: Ge Wenchun. Changchun; Master's thesis of Jilin University: 1 ~ 85.
- Zhang Jiheng. 2009. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China. Dissertation supervisor: Gao Shan. Wuhan; Doctor's thesis of China University of Geoscience (Wuhan): 1 ~ 105.
- Zhang Letong, Li Shichao, Zhao Qingying, Li Xuefei, Wang Lu, Li Zihao. 2015. Formation age and geochemical characteristics of volcanic rocks from Baiyingaolao Formation of middle Da Hinggan mountains. *Global Geology*, 34(1): 44 ~ 54.
- Zhang Quanhong, Zhao Yue, Liu Jianmin, Hu Jianmin, Song Biao, Liu Jian, Wu Hai. 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. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824 ~ 842.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Kroner A, Liu Xiaoming, Xie Liewen, Chen Fukun. 2009. 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 Sciences*, 98(6): 1441 ~ 1467.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Song Biao, Yang Zhenyu, Hu Jianmin, Wu Hai. 2007. Carboniferous granitic plutons from the northern margin of the North China block: implications for a late Paleozoic active continental margin. *J. Geol. Soc. Lond. Journal of the Geological Society*, 164(2): 451 ~ 463.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Ye Hao, Liu Jianming, Hu Zhaochu. 2014. Origin and evolution of the Bainaimiao arc belt: Implications for crustal growth in the southern Central Asian orogenic belt. *Geological Society of America Bulletin*, 126(9 ~ 10): 1275 ~ 3000.
- Zhang Xiaofei, Liu Junlai, Feng Junling, Zhou Yi, Teng Chao, Zhang Huachuan, Cao Jun, Wang Biren. 2016. Geochronological and geochemical features of volcanic rocks of Dashizhai Formation in Ural Sutai of Xilin Hot, Inner Mongolia, and their geological significance. *Geological Bulletin of China*, 35(5): 766 ~ 775.
- Zhang Xiaohui, Wilde S A, Zhang Hongfu, Zhai Mingguo. 2011. Early Permian high-K calc-alkaline volcanic rocks from NW Inner Mongolia, North China: geochemistry, origin and tectonic implications. *Journal of the Geological Society*, 168: 525 ~ 543.
- Zhang Xiaohui, Yuan Lingling, Xue Fuhong, Yan Xin, Mao Qian. 2015. Early Permian A-type granites from central Inner Mongolia, North China: Magmatic tracer of post-collisional tectonics and oceanic crustal recycling. *Gondwana Research*, 28(1): 311 ~ 327.
- Zhang Xiaohui, Zhang Hongfu, Tang Yanjie, Wilde S A, Hu Zhaochu. 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. *Chemical Geology*, 249(3 ~ 4): 262 ~ 281
- Zhang Xuebin, Zhou Changhong, Lai Lin, Xu Cui, Tian Ying, Chen Lizhen, Wei Min. 2015. Geochemistry and zircon U-Pb dating of volcanic rocks in eastern Xilin Hot, Inner Mongolia and their geological implications. *Geology and Exploration*, 51(2): 290 ~ 302.
- Zhao Guochun, Cawood P A, Wilde S A, Sun Min, Lu Liangzhao. 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton; implications for Paleoproterozoic tectonic evolution. *Precambrian Research*, 103(1 ~ 2): 55 ~ 88.
- Zhao Guochun, Cawood P A, Wilde S A, Sun Min. 2002. Review of global 2.1 ~ 1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth Science Reviews*, 59(1): 125 ~ 162.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2003. Assembly, accretion and break-up of the Palaeo-Mesoproterozoic Supercontinent Columbia and its records in the North China Craton. *International Geology Review*, 53(53): 1331 ~ 1356.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited. *Journal of Asian Earth Sciences*, 136(2): 177 ~ 202.
- Zhao Guochun, Wilde S A, Cawood P A, Sun Min. 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and $P-T$, path constraints and tectonic evolution. *Precambrian Research*, 107(1): 45 ~ 73.
- Zhao Yue. 1990. The Mesozoic orogenies and tectonic evolution of the Yanshan area. *Geological Review*, 36(1): 1 ~ 13.
- Zhao Zhenhua, Wang Qiang, Xiong Xiaolin. 2004. Complex Mantle—Crust interaction in subduction zone. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 23(4): 277 ~ 284.
- Zhao Zhi, Chi Xiaoguo, Pan Shiyu, Liu Jianfeng, Sun Wei, Hu Zhaochu. 2010. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of Carboniferous volcanics and its geological significance in the northwestern Lesser Xing'an Range. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2452 ~ 2464.
- Zhao Zhi. 2008. Geochemistry and tectonic setting of the volcanic rocks of Early Permian Dashizhai Formation in Dashizhai area, Inner Mongolia. Dissertation supervisor: Chi Xiaoguo. Changchun; Master's thesis of Jilin University: 1 ~ 49.
- Zhao Zhi. 2011. Late Paleozoic magmatism and its tectonic significance in the northern Great Xing'an Range, Northeastern China. Dissertation supervisor: Chi Xiaoguo. Changchun; Master's thesis of Jilin University: 1 ~ 116.

- Zheng Yuejuan, Zhang Haihua, Chen Shuwang, Zhang Jian, Huang Xin, Gong Fanhao, Su Fei, Zhen Zhen. 2014. LA-ICP-MS U-Pb age of detrital zircons from Late Permian Linxi Formation in Ar Horqin Banner, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 33(9): 1293 ~ 1307.
- Zhong Yufang, Ma Changqian, She Zhenbing. 2006. Geochemical characteristics of zircon and its applications in geosciences. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 27 ~ 34.
- Zhou Jianbo, Wang Bin, Zeng Weishun, Cao Jialin. 2014. Detrital zircon U-Pb dating of the Zhalantun Metamorphic Complex and its tectonic implications, Great Xing' an, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1879 ~ 1888.
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhang Xingzhou, Liu Fulai, Liu Jianhui. 2012. Detrital zircons from phanerozoic rocks of the Songliao Block, NE China: Evidence and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 21 ~ 34.
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhang Xingzhou, Ren Shoumian, Zheng Changqing. 2011a. A >1300 km late Pan-African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing' an block and its tectonic implications. *Tectonophysics*, 509(3 ~ 4): 280 ~ 292.
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhang Xingzhou, Ren Shoumian, Zheng Changqing. 2011b. Early Paleozoic metamorphic rocks of the Erguna block in the Great Xing' an Range, NE China: Evidence for the timing of magmatic and metamorphic events and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 499(1 ~ 4): 105 ~ 117.
- Zhou Jianbo, Wilde S A, Zhang Xingzhou, Zhao Guochun, Zheng Changqing, Wang Yuejun, Zhang Xiaohui. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. *Tectonophysics*, 478(3): 230 ~ 246.
- Zhou Jianbo, Wilde S A. 2013. The crustal accretion history and tectonic evolution of the NE China segment of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 23(4): 1365 ~ 1377.
- Zhou Jianbo, Zhang Xingzhou, Wilde S A, Zheng Changqing. 2011. Confirming of the Heilongjiang ~ 500Ma Pan-African khondalite belt and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 27(4): 1235 ~ 1245.
- Zhou Zhenhua, Mao Jingwen, Lyckberg P. 2012. Geochronology and isotopic geochemistry of the A-type granites from the Huanggang Sn—Fe deposit, southern Great Hinggan Range, NE China: Implication for their origin and tectonic setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49(3): 272 ~ 286.
- Zhou Zhenju, Mao Shidong, Chen Yanjing, Santosh M. 2016. U-Pb ages and Lu-Hf isotopes of detrital zircons from the southern Qinling Orogen: Implications for Precambrian to Phanerozoic tectonics in central China. *Gondwana Research*, 35(4): 323 ~ 337.
- Zhou Zhiguang, Gu Yongchang, Liu Changfeng, Yu Tangsen, Zhang Bing, He Fubing, Wang Biren. 2010. Discovery of Early—Middle Permian cathaysian flora in Manduhubao area, Dong Ujimqin Qi, Inner Mongolia, China and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 29(1): 21 ~ 25.
- Zhu Yongfeng, Sun Shihua, Gu Libing, Ogasawara Y, Jiang Neng, Honma H. 2001. Permian volcanism in the Mongolian orogenic zone, northeast China: geochemistry, magma sources and petrogenesis. *Geological Magazine*, 138(2): 101 ~ 115.

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages, Geochemical Characteristics of the Dashizhai Formation Tuffs in Hexigten Banner, Inner Mongolia and Their Tectonic Significance

XU Qiangwei¹⁾, WANG Pin²⁾, WANG Zhiqiang³⁾, WANG Chengming⁴⁾, ZHENG Yi⁴⁾, FANG Jing⁵⁾

1) *School of earth and space science, Peking University, Beijing, 100871;*

2) *Key Laboratory of Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510301;*

3) *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009;*

4) *School of Earth Sciences and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275;*

5) *Institute of Deep-sea Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Sanya, Hainan, 572000*

Abstract: In this essay, we studied the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs developed in Changlingzi area, Hexigten Banner, Inner Mongolia, in such aspects as LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic geochronology, Hf isotopic composition analysis and geochemistry. Detrital zircon grains from the Dashizhai Formation tuffs yield seven U-Pb age clusters of 3140 ~ 2826 Ma, 2761 ~ 2273 Ma, 2025 ~ 1673 Ma, 1036 ~ 673 Ma, 574 ~ 422 Ma, 392 ~ 312 Ma and 224 ~ 133 Ma. Meanwhile, in situ zircon Hf isotopic analysis yield $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values between -18.0 and 16.8, $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ and $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ ratios are 0.000235 ~ 0.005759 and 0.280524 ~ 0.283022 respectively, and two-stage model ages are 4291 ~ 293 Ma. The first group of zircons (3140 ~ 2826 Ma) revealed the information of the ancient basements (Mesoarchean to Paleoproterozoic) in Northeast China; the second group (2761 ~ 2273 Ma) recorded the geological event of Kenorland supercontinent convergence, and revealed the information of Archean to Paleoproterozoic ancient basement in Great Hinggan

Mountains (Da Xing'an Range) area; the third group (2025 ~ 1673 Ma) corresponded to the geological event of Columbia supercontinent formation; the fourth and the fifth groups of zircons (1036 ~ 673 Ma, 574 ~ 422 Ma) may originate from the Northeast China, and these two age groups corresponded to two key tectonic events of the Gondwana and Rodinia episodes, respectively; the peak value of the sixth age cluster (392 ~ 312 Ma) is 350 Ma and its weighted mean age is 350.0 ± 6.5 Ma (MSWD = 4.0, $n = 43$), which can be identified as the protolith age of the Dashizhai Formation; the fifth cluster (224 ~ 133 Ma) may be related to fluid reformation. Whole-rock major, trace and rare earth elements analyses show that most samples exhibit metaluminous ($A/CNK = 0.65 \sim 1.95$) and sub-alkaline ($\delta = 0.88 \sim 2.50$) characteristics. In the Chondrite-normalized REE patterns, the tuffs show slightly enriched in LREE, depleted in HREE, with no obvious Eu anomalies. In the spider diagram, they show enrichment in large ion lithophile elements (Ba, Rb and K), and depletion in high field-strength elements (Nb, Ta, Ti and P). As shown above, the Dashizhai Formation tuffs exhibited an affinity with Andean active continental margin volcanic rocks. Combined with previous published regional geological data, we concluded that the Dashizhai Formation andesitic debris crystal tuffs in Hexigten Banner were formed by the fluids, which derived from dehydration of oceanic crust during the subduction of the Paleo-Asian Ocean, interacting with the overlying mantle wedge. And the tectonic environment for the formation of the tuffs was active continental marginal arc, indicating that the Paleo-Asian Ocean wasn't closed in Early Carboniferous.

Keywords: Hexigten Banner (Keshiketeng county); Dashizhai Formation; geochronology; petrogeochemistry; Paleo-Asian Ocean

Acknowledgements: This study was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41602065) and the program of Jinda Mining Development Co., Ltd. of Hexigten Banner (No. 20150008)

First author: XU Qiangwei, male, born in 1986, doctor, major in mineralogy, petrology, metallogeny. Email: qwxu@pku.edu.cn

Corresponding author: WANG Pin, female, born in 1987, doctor, major in mineralogy, petrology, metallogeny. Email: wangpin@scsio.ac.cn

Manuscript received on: 2018-04-09; Accepted on: 2018-12-13; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.009

认真谋划新时代地质科技创新工作

朱立新^{1,2)}

1) 中国地质调查局, 北京, 100037; 2) 中国地质学会, 北京, 100037

新一届中国地质调查局党组高度重视科技创新工作, 形成了以科技创新为核心的建局方略, 强力推进地质调查科技创新工作, 实现了重大理论创新、关键技术突破和核心装备研发, 支撑解决资源环境重大问题取得突破性成果, 在国内外产生了重大影响。

党的十九大描绘了新时代的宏伟蓝图。实现两个一百年目标和科技强国是新时代的新要求。在地质工作转型发展的重要关键节点, 我们需要认真谋划新时代地质科技创新工作, 加快创新, 全面提升依靠科技创新解决资源环境重大问题的能力。要实现中国地质调查局局长钟自然在培训班讲话中提出的地质调查事业发展的战略目标, 必须以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导, 认真贯彻习近平总书记两院院士大会上的重要讲话精神和党的十九大精神, 落实党中央国务院关于科技创新的决策部署, 按照局党组提出

的“将科技创新和信息化建设作为新时代地质工作转型升级的两大引擎”的重大要求, 进一步转变观念, 适应自然资源综合管理新要求, 坚持“双轮驱动”, 深化体制机制改革, 推进地质科技创新, 全面提升创新能力, 加快建设世界一流的新型中国地调局。

1 要进一步夯实科技创新基石

全面贯彻“科技创新和信息化建设是新时代地质工作转型升级两大引擎”的重大部署, 进一步夯实科技创新这个基石, 把局党组对科技创新的各项决策落实到科技外事部方方面面的工作, 在科研项目、人才培养、平台建设、成果转化、国际合作、境外地质调查等工作中, 进一步强化科技创新, 落实科技创新的目标责任, 将科技创新贯穿于地质调查的全流程管理, 真正实现用科技创新改造、支撑和引领地质调查的目的, 为建设世界一流新型地调局做出更大贡献。