

河北省宽城县孤山子超基性岩体锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征

贺文¹, 叶会寿², 陈若瑜³, 宋英昕¹, 曹晶¹

(1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点开放实验室, 北京 100037; 3. 中国地质大学 海洋学院, 北京 100083)

摘要: 华北克拉通北缘在早石炭世晚期—中二叠世出露大量中酸性侵入岩体, 但基性—超基性岩体出露较少, 因而缺乏对该时期地幔性质的认识。笔者对位于内蒙古地轴以南百余千米的孤山子超基性岩体开展锆石 U-Pb 定年、微量元素、Lu-Hf 同位素组成测试分析。结果显示, 孤山子超基性岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 296.9 ± 2.6 Ma, 为早二叠世的岩浆活动产物。锆石(样号: GSZ-B3)微量元素含量低, 具有强 Ce 正异常和弱 Eu 负异常特征以及较低的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -1.9 \sim -7.5$ ($n=17$), 表明其源区主要为富集的岩石圈地幔。锆石 $t_{\text{DM}} - t_{\text{DM}}^{\text{C}}$ 远大于其 U-Pb 年龄, 表明岩石圈地幔形成过程中有再造古老地壳加入。对比内蒙古地轴上的同时代波罗诺岩体含角闪辉长岩 (297 ± 1 Ma) 的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-17.0 \sim -14.1$), 孤山子超基性岩体的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 明显偏大, 表明孤山子超基性岩体的源区富集程度相对较小。此外, 孤山子超基性岩体还有 2 个锆石测点 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 分别为 3.2、4.0, 指示母岩浆中有少量亏损幔源物质加入, 这暗示了华北克拉通北缘局部地区, 在晚古生代已有岩石圈拉张减薄的趋势。

关键词: 锆石 U-Pb 定年; 微量元素; Lu-Hf 同位素; 华北克拉通; 孤山子超基性岩体

中图分类号: P597; P588.12+5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)01-0065-14

U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of zircons from Gushanzi ultrabasic rocks of Kuancheng County in Hebei Province

HE Wen¹, YE Hui-shou², CHEN Ruo-yu³, SONG Ying-xin¹ and CAO Jing¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Lots of late Early Carboniferous to Middle Permian acid-intermediate intrusive bodies are outcropped on the northern margin of the North China Craton. Because of rare exposure of the contemporaneous mantle-derived basic-ultrabasic rocks, it is very difficult to obtain some information concerning the mantle compositions and processes in this area. For the better understanding of the nature of the source rock, the authors chose the representative intrusions, i.e., Gushanzi ultrabasic rocks, which are about one hundred kilometers away from the southern Inner Mongolian Axis, for zircon U-Pb dating as well as trace element and Lu-Hf isotope analyzing. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of Gushanzi ultrabasic intrusion is 296.9 ± 2.6 Ma, which indicates an Early Permian magma activity. The analytical results show the characteristics of low content of trace elements,

收稿日期: 2014-09-16; 修订日期: 2014-12-11

基金项目: 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室开放研究项目(ZS1309); 地质调查项目(1212011220492)

作者简介: 贺文(1989-), 女, 硕士研究生, 矿床与地球化学专业, E-mail: 798927632@qq.com; 通讯作者: 叶会寿(1964-), 男, 研究员, 矿床学专业, 长期从事矿床研究与资源勘查工作, E-mail: yehuishou@163.com。

strong positive Ce anomalies, slight negative Eu anomalies and relatively low $\epsilon\text{Hf}(t)$ values of $-1.9 \sim -7.5$ ($n = 17$) in the sample Gushanzi-B3, indicating the source of enriched lithosphere mantle. Both t_{DM} and t_{DM}^{C} are higher than the U-Pb age, implying that the source rock was contaminated by ancient crust during its formation. Compared with zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ ($-17.0 \sim -14.1$) values of Boluonuo hornblende-bearing gabbro in the Inner Mongolian Axis whose rock-forming age is 297 ± 1 Ma, zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ values of Gushanzi ultrabasic rocks are obviously higher, implying a less enriched origin of Gushanzi ultrabasic rocks. Additionally, zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ of the other two testing plots of Gushanzi ultrabasic rocks are 3.2 and 4.0, respectively, which implies that a small amount of depleted mantle-derived substance was added to the primitive magma. The authors thus infer the existence of a local tensional and thinning setting of northern margin of North China Craton during Late Paleozoic.

Key words: zircon U-Pb dating; trace element; Lu-Hf isotope; North China Craton; Gushanzi ultrabasic rocks

华北克拉通是世界上最古老的克拉通之一, 存在 38 亿年的古老地壳(Liu *et al.*, 1992; Song *et al.*, 1996; Zheng *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2008; Xiang *et al.*, 2012) 并经历了复杂的演化历史(Goodwin, 1991; Windley, 1995; Liu *et al.*, 2002; Rogers and Santosh, 2003; Zhao *et al.*, 2005; Zhai and Santosh, 2011; Zhai and Santosh, 2011)。华北克拉通古老岩石的形成峰值约为 2.5 Ga, 约在 1.8 Ga 克拉通化完成进入稳定时期(Zhao *et al.*, 2001; Wilde *et al.*, 2002)。克拉通是地表相对稳定的构造单元, 不易受到破坏, 但华北克拉通东部自早古生代以来却发生了较大变化(吴福元等, 2008)。大量研究成果显示, 华北克拉通东部早期的古老岩石圈地幔自古生代以后, 被亏损型软流圈地幔或大洋型地幔所取代(Fan and Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Menzies and Xu, 1998; Xu *et al.*, 1995; Zheng *et al.*, 1998; 吴福元等, 1999, 2000, 2003)。在古生代, 华北克拉通东部陆块岩石圈厚度约为 200 km(路凤香等, 1991; Fan and Menzies, 1992; Griffin *et al.*, 1992; Menzies *et al.*, 1993; Menzies and Xu, 1998; 郑建平, 1999), 到新生代已减至 80~120 km(鄂莫岚等, 1987; 池际尚, 1988; Fan and Hooper, 1989)。随着进一步推进, 发现华北克拉通北缘在早石炭世晚期—早二叠世(330~265 Ma)有大量的中酸性岩浆活动(张拴宏等, 2010), 但基性岩—超基性岩体出露较少, 不利于华北克拉通幔源性质的研究。孤山子超基性岩体位于内蒙古地轴以南百余千米, 为研究幔源性质提供了良好的样品。目前对孤山子超基性岩体(东湾子岩体)进行了锆石 U-Pb 定年、全岩分析等工作(Zhao *et al.*, 2007; 马旭等, 2009, 2012), 但还没有对其源岩性质进行限定。利用火成岩的锆石

微量元素及同位素组成, 能限定源区性质。

本文拟通过对孤山子超基性岩体锆石微量元素、U-Pb 同位素测年及 Lu-Hf 同位素组成特征, 及其与之同时代不同大地构造位置的基性—超基性岩体的锆石 Hf 同位素组成的对比, 探讨华北克拉通晚古生代基性—超基性岩体的源区性质, 并为华北克拉通地幔的研究提供重要信息。

1 区域地质背景及岩体地质特征

华北克拉通北缘以赤峰—围场—多伦(CWD)断裂带为界与古亚洲洋构造域相接, 在其内部发育平泉—古北口—赤城—尚义区域性大断裂(PGCS)。该断裂带为一巨型逆冲推覆构造带, 形成于新太古代末至古元古代早期(王国灿等, 1992; 倪志耀等, 2004)。PGCS 断裂带以北为内蒙古地轴, 以南为燕山褶皱冲断带(张拴宏等, 2007)。内蒙古地轴主要出露早前寒武纪的高级变质岩, 普遍缺失中—新元古代及古生代地层, 而燕山褶皱冲断带内则非常发育中—新元古代及古生代地层。华北克拉通北缘在晚古生代—早中生代出露大量近东西走向的岩浆岩, 根据其成岩时代年龄统计结果, 大致可将其分为 3 期: 泥盆纪(400~360 Ma)、早石炭世晚期—中二叠世(330~265 Ma)、二叠纪末—三叠纪(250~200 Ma)(张拴宏等, 2010)。泥盆纪和早石炭世晚期—中二叠世的岩浆岩主要分布在内蒙古地轴上, 二叠纪末—三叠纪岩浆岩分布范围从内蒙古地轴扩展至燕山褶皱带最南端。在早石炭世晚期—中二叠世, 孤山子超基性岩体与大多数分布在内蒙古地轴上的中酸性岩浆岩不同, 它位于内蒙古地轴以南百余公里的中元古代沉积盆地中。

孤山子超基性岩体位于燕山褶皱冲断带马兰

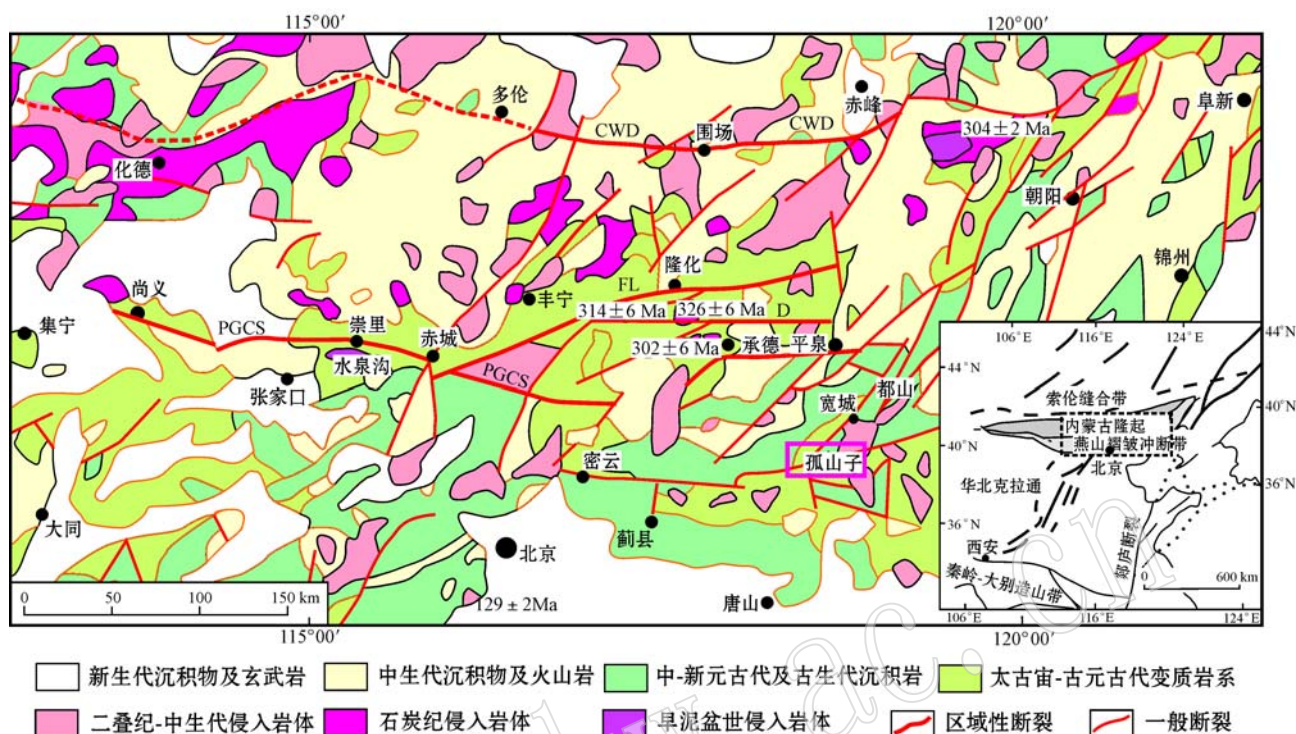


图 1 华北克拉通北缘区域地质构造略图(据张拴宏等, 2007 修改)

Fig. 1 Regional geological-tectonic sketch map of the northern margin of North China Craton (after Zhang Shuanhong *et al.*, 2007)

PGCS—平泉-古北口-赤城-尚义断裂(内蒙古隆起南缘断裂); D—大庙断裂; FL—丰宁-隆化断裂; CWD—赤峰-围场-多伦断裂(内蒙古隆起北缘断裂)

PGCS—Pingquan-Gubeikou-Chicheng-Shangyi fault (fault in southern Inner Mongolian Uplift); D—Damiao fault; FL—Fengning-Longhua fault; CWD—Chifeng-Weichang-Duolun fault (fault in northern Inner Mongolian Uplift)

峪复式背斜北侧, 距离 PGCS 大断裂约百余千米。该岩体产于东西向密云-喜峰口大断裂与喜峰口-汤道河北东向断裂交汇处, 受北东向断裂控制, 其长轴走向与断裂带一致。岩体长约 6 km, 最大宽度约 3 km, 平面上呈南西端膨大北东端缩小的楔形, 侵位于长城系大红峪组灰白色厚层燧石白云岩和紫红色石英砂岩中。岩体北西侧与围岩为断层接触, 断面倾向南东, 南东侧与围岩侵入接触, 接触面倾向北东, 纵切面呈上大下小的漏斗状。岩石类型有辉石岩、角闪辉石岩、辉石角闪石岩、辉长岩、角闪石岩及少量斜长岩。岩体内部具有分层分带现象, 从下而上, 从边缘到中心大致可分为 3 套岩石组合, 即: 角闪辉石岩夹辉石岩→角闪辉石岩与辉石角闪石岩互层→辉石角闪石岩夹角闪石岩并出露少量斜长石脉(夏国礼等, 2007)。各岩层间接触界限并非截然, 所谓的“夹层”和“互层”是指不同矿物和岩石结构呈现韵律性变化。从岩体边缘到中心: 矿物组成成分上表现为, 辉石含量相对减少, 角闪石含量相对增多;

在结构上, 从边部的细粒结构逐渐过渡为中-粗粒结构。现将角闪石岩、角闪辉长岩及辉石岩这 3 种岩石的基本特征描述如下。

角闪石岩: 深灰绿色, 等粒结构, 块状构造。矿物主要有角闪石(~85%)、斜长石(~4%)、磁铁矿(~3%)、辉石(~3%)、磷灰石(~3%)等。角闪石(2~6 mm), 半自形-他形粒状结构, 晶体内部包含自形的磷灰石(0.03~0.3 mm)(图 3b)和他形单斜辉石(0.3~0.7 mm)(图 3c), 不透明矿物磁铁矿在角闪石内部及晶体间都比较发育。斜长石呈填隙状, 主要充填于角闪石颗粒间, 表面浑浊, 发生泥化(图 3c)。

角闪辉长岩: 深灰绿色, 辉长结构, 块状构造。矿物主要有斜长石(~40%)、单斜辉石(~38%)、角闪石(~12%), 含少量磁铁矿(~4%)、磷灰石(~3%)。斜长石(1~2 mm), 呈他形-半自形板状充填于辉石颗粒间, 单偏光下表面浑浊, 普遍发生粘土化, 局部可见聚片双晶。单斜辉石(1~2 mm), 他形-

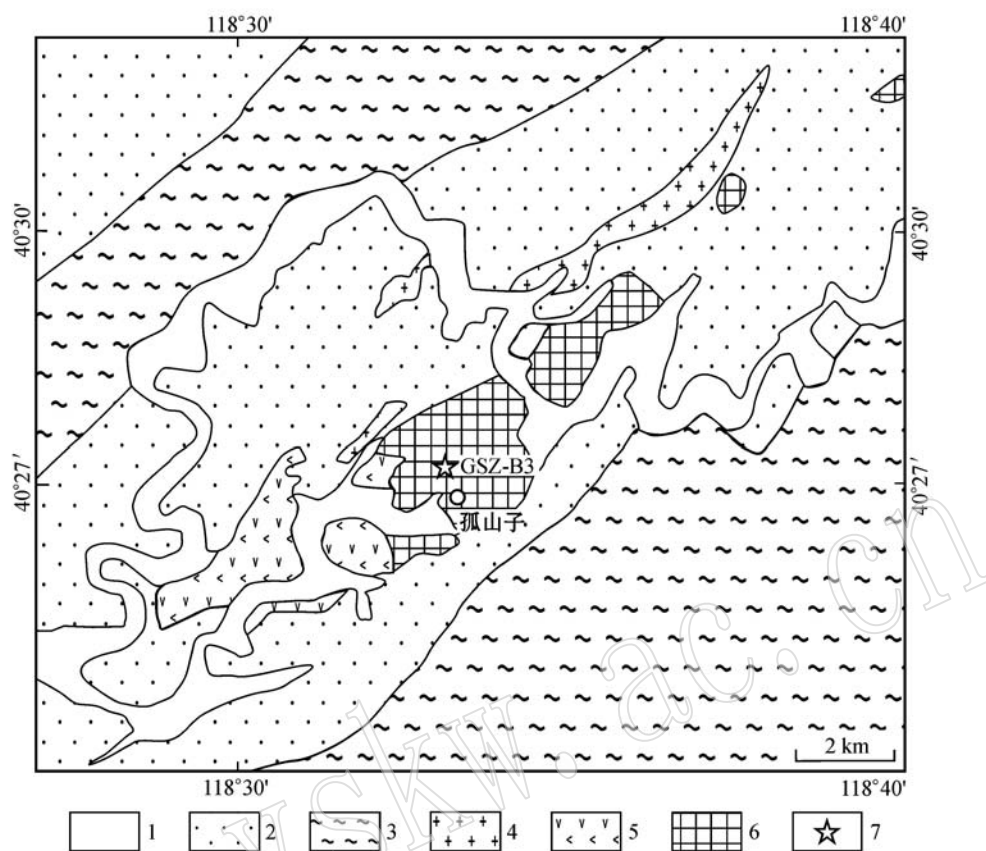


图2 孤山子超基性岩体地质略图(据夏国礼等,2007)

Fig. 2 Sketch geological map of Gushanzi ultrabasic rocks (after Xia Guoli *et al.*, 2007)

1—第四系; 2—中生代沉积岩及火山岩; 3—太古宇迁西群; 4—燕山期花岗岩; 5—燕山期闪长岩; 6—海西期超基性岩; 7—采样位置

1—Quaternary; 2—Mesozoic sediment and volcanic rocks; 3—Archean Qianxi Group; 4—Yanshanian granite; 5—Yanshanian diorite;

6—Hercynian ultrabasic pluton; 7—sampling position

半自形短柱状,无色-淡绿色,多色性不明显。角闪石与在单斜辉石具港湾状接触边(图3d),还可见残留的单斜辉石被角闪石完全包围,表明角闪石是单斜辉石与熔浆反应生成的产物。在角闪辉长岩中,角闪石主要以反应边的形式与单斜辉石共生,而未见角闪石单独晶出。磁铁矿在单斜辉石内部及晶体间都较发育。

辉石岩:辉石岩主要分为磁铁矿黑云母辉石岩和尖晶石辉石岩两类。磁铁矿黑云母辉石岩呈深灰色,细粒结构,块状构造。矿物主要有单斜辉石(~80%)、黑云母(~10%)及磁铁矿(~8%)。单斜辉石(0.5~1 mm)多呈半自形短柱状,具有堆晶结构(图3e),正交偏光下干涉色鲜艳。黑云母(0.3~0.7 mm)呈片状,单偏光下呈黄褐色,正交偏光下干涉色在二级-三级顶。磁铁矿(0.1~0.5 mm)发育于辉石、角闪石颗粒间,反映磁铁矿结晶时间晚于硅酸盐

矿物。尖晶石辉石岩呈浅灰色,细粒结构,块状构造。矿物主要有单斜辉石(~90%)、尖晶石(~9%)。单斜辉石(0.5~1.5 mm),呈半自形-他形的短柱状,正交偏光下干涉色鲜艳。尖晶石(0.3~0.5 mm),他形-半自形粒状,单偏光下为蓝绿色(图3f),表明含铁量高,正交偏光下全消光。

2 分析方法

锆石分选是在河北廊坊诚信地质服务有限公司进行的,样品经破碎、淘洗、重液分选后,在双目镜下对锆石进行手工挑纯。将选好的锆石粘在环氧树脂柱上打磨、抛光,然后送至中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室进行阴极发光和背散射照相,用于研究锆石的显微结构,以便于选择合适的待测部位。

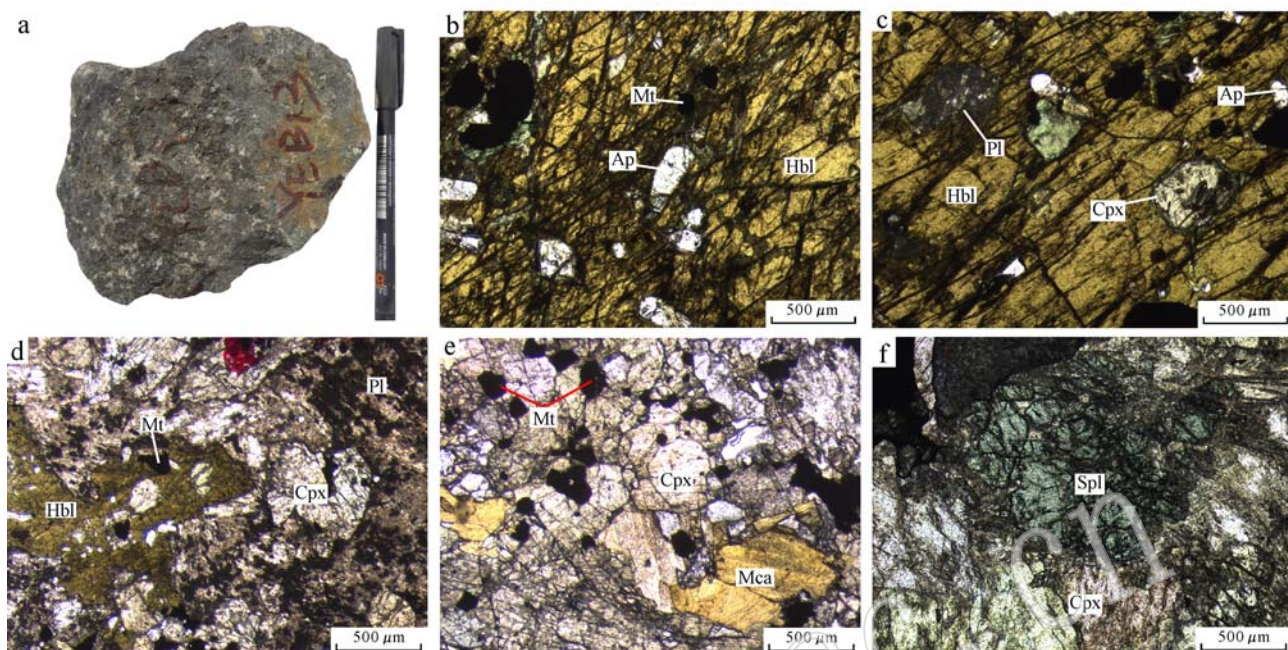


图3 孤山子超基性岩手标本及镜下照片

Fig. 3 Hand specimen photograph and microphotographs of Gushanzi ultrabasic rocks

a—角闪岩手标本特征,块状构造; b—自形磷灰石包含于角闪石中(-); c—他形单斜辉石包含于角闪石中(-); d—角闪辉长岩中的角闪石(-); e—辉石岩堆晶结构(-); f—辉石岩中的含铁量高的尖晶石(-); Ap—磷灰石; Cpx—单斜辉石; Hbl—普通角闪石; Mca—云母; Mt—磁铁矿; Spl—尖晶石; Pl—斜长石

a—hornblende hand specimen characteristics, massive structure; b—euhedral apatite in amphibole(-); c—anhedral clinopyroxene in amphibole(-); d—hornblende in hornblende gabbro(-); e—cumulate structures of pyroxenite(-); f—high-Fe spinels in pyroxenite(-); Ap—apatite; Cpx—clinopyroxene; Hbl—hornblende; Mca—mica; Mt—magnetite; Spl—spinel; Pl—plagioclase

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用 Agilent7500 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统联机进行。实验选择了标样 91500、GJ-1 对同位素比值漂移和分馏进行校正,选择 NIST 610 对微量元素分析值进行监控。使用直径为 30 μm 激光束对锆石打点,每个点激光剥蚀时间约 40~45 s,并且每完成 6 个点,加测一次 91500 标样。测得的原始数据通过 GLITTER(ver4.0)软件处理获得,年龄计算及协和图通过 Isoplot(ver3.0)软件获得。

对已测锆石 U-Pb 年龄的有效点进行 Lu-Hf 同位素组成原位分析,实验在国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。实验仪器为 Thermo Finnigan Neptune MC-ICP-MS,并配备 Newwave UP213 激光剥蚀系统。激光斑束直径为 50 μm ,剥蚀时间约 27 s。实验采用的外标为 GJ1,在实验过程

中每测 10 个点加测一次 GJ1 标样。所测标样 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围及平均值分别为 0.281 943 ~ 0.282 057 和 0.282 004 $\pm$ 0.000 015 (2σ),与标准结果在误差范围内一致。

3 分析结果

3.1 锆石形态及微量元素特征

角闪岩岩中的锆石(图4)粒径在 50~140 μm 间,呈半自形-自形。在阴极发光下为深灰色-灰色,振荡环带清楚。振荡环带的宽度与锆石结晶的岩浆温度有关,高温条件下微量元素扩散快,形成的锆石环带宽(吴元保等,2004)。样品锆石具有较宽的环带,暗示结晶温度高。测点 1、8、9、11、12、14、16、19 呈深灰色,Th、U 含量较高,分别为 359×10^{-6} ~ 2010×10^{-6} 、 382×10^{-6} ~ 860×10^{-6} ;测点 2、3、4、6、7、13、17、20 呈浅灰色,Th、U 含量低,分别为 79×10^{-6} ~ 164×10^{-6} 、 121×10^{-6} ~ 169×10^{-6} 。岩浆锆

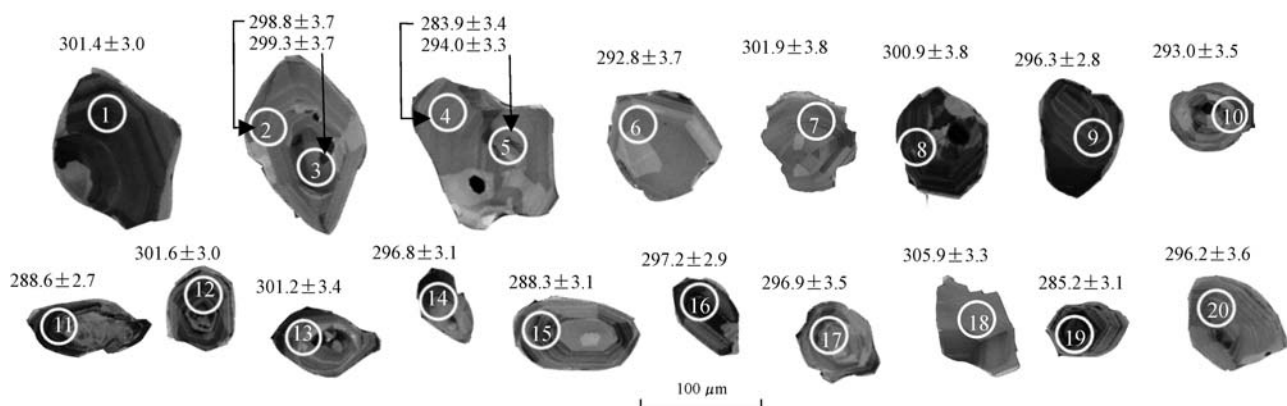


图 4 锆石阴极发光图及对应年龄

Fig. 4 CL images of zircon grains and the ages

石具有较高 Th/U(一般 >0.4)(吴元保等, 2004), 而变质锆石 Th/U 比值小(一般 <0.1)(Rubatto and Gebauer, 2000; Miller *et al.*, 2003)。测点 Th/U = 0.44~5.70, 具有典型的岩浆锆石特征。

锆石元素分析结果(表 1)显示, 其 SiO_2 无变化(误差为 1.0%, 检出下限为 0.02~0.04%), 微量元素变化范围小。除测点 16、19 测得 P、Ti 含量相对较高(P 分别为 319.6×10^{-6} 、 551×10^{-6} ; Ti 分别为 20.5×10^{-6} 、 16.7×10^{-6})外, 其余测点 $\text{P} = 42.6 \times 10^{-6} \sim 130.2 \times 10^{-6}$, 平均值为 83.2×10^{-6} , $\text{Ti} = 1.8 \times 10^{-6} \sim 9.4 \times 10^{-6}$, 平均为 6.0×10^{-6} 。Nb、Ta、Hf、REE 分别为 $0.3 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-6}$ 、 $0.1 \times 10^{-6} \sim 0.3 \times 10^{-6}$ 、 $5\,668.9 \times 10^{-6} \sim 9\,873.0 \times 10^{-6}$ 、 $227.7 \times 10^{-6} \sim 842.6 \times 10^{-6}$ 。Belousova 等(2002)认为锆石中的微量元素含量从超基性岩→基性岩→花岗质岩石有逐渐增多的趋势, 据其研究成果, P 变化范围为 $(n \times 100 \sim n \times 1\,000) \times 10^{-6}$, Ti 为 $n \times 10^{-6}$ 到 $(500 \sim 700) \times 10^{-6}$, Nb 为 $(0.4 \sim 120) \times 10^{-6}$, Ta 为 $(0.2 \sim 21) \times 10^{-6}$, Hf 为 $(5\,000 \sim 30\,000) \times 10^{-6}$, REE 为 $(n \times 10 \sim n \times 10\,000) \times 10^{-6}$ (其中 $n = 1, 2, 3, \dots, 9$)。相比之下, 本次获得锆石微量元素都在低值范围内。将其微量元素含量做进一步对比发现, 本实验得到锆石 P 含量大体上与 Belousova 等(2002)测得的金伯利岩的锆石 P 含量($20 \times 10^{-6} \sim 110 \times 10^{-6}$)相当; Hf 与 Belousova 等(2002)($\text{Hf} = 6\,400 \times 10^{-6}$)及 Wiedenbeck 等(1995)($\text{Hf} = 5\,900 \times 10^{-6}$)在基性-超基性岩中得到的锆石 Hf 含量相当; REE 与 Belousova 等(2002)(REE 含量为数百到 $1\,000 \times 10^{-6}$)在镁铁质岩石(玄武岩和辉绿岩)中测

得的锆石 REE 含量相当。通过锆石微量元素含量的对比发现, 本次锆石测点的微量元素含量都很低, 具有基性-超基性岩体的锆石特征。除此之外, 所测锆石富集 HREE, Ce 正异常强烈而 Eu 呈现较弱的负异常(图 5)。

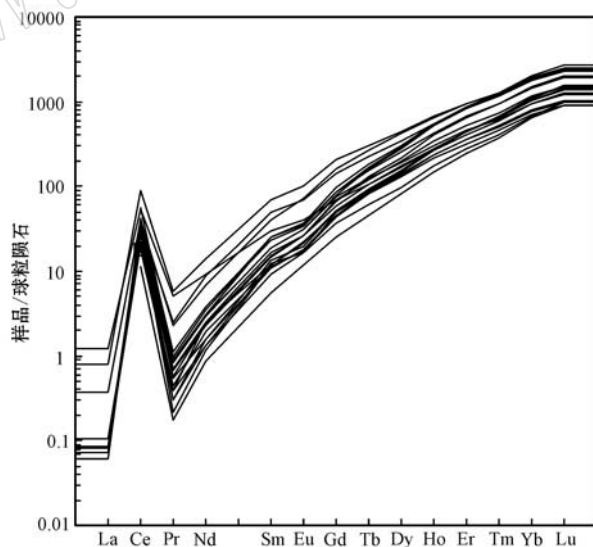


图 5 锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of zircons

3.2 锆石 LA-ICP-MS 测年结果

在数百粒锆石中挑选 20 粒锆石进行 LA-ICP-MS 测年, CL 图像显示所测锆石具有较清晰振荡环带, BSE 图像显示所测点均无裂隙。20 个测试点得到一组年龄, 定年结果见表 2。所得 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄相近, 数据点都较集中的落入谐和曲线附近(图 6), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 296.9 ± 2.6 Ma, 表明该岩体为早二叠世的岩浆活动产物。

表 1 锆石微量元素测试结果

Table 1 Analytical results of trace elements in zircon																											
测点	SiO ₂ / %	P	Ti	Nb	Ta	Hf	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/ HREE	δEu	δCe
1	32.8	79.1	6.0	0.5	0.3	8401.2	<0.01	10.9	0.0	0.6	1.9	1.0	10.3	3.2	35.3	13.3	59.1	13.0	131.3	24.8	406.7	304.5	14.4	290.1	0.05	0.5	91.8
2	32.8	86.5	7.8	0.7	0.2	5668.9	<0.01	21.3	0.1	1.2	2.6	1.5	13.5	4.8	55.8	22.6	106.7	23.9	248.8	49.6	732.2	552.4	26.6	525.8	0.05	0.6	100.0
3	32.8	69.2	7.0	0.4	0.1	6147.3	<0.02	17.6	0.0	1.2	1.8	1.3	10.3	3.2	34.7	13.1	59.3	13.2	133.6	26.3	415.7	315.5	21.9	293.6	0.07	0.7	144.9
4	32.8	83.9	7.6	1.0	0.2	6374.3	0.0	25.1	0.1	1.8	3.8	2.0	17.7	6.3	74.0	29.4	139.2	31.1	325.1	64.1	956.1	719.7	32.9	686.9	0.05	0.6	69.3
5	32.8	90.6	8.0	0.6	0.2	6047.8	<0.02	25.0	0.1	1.4	2.9	1.8	15.4	4.6	48.2	17.2	75.3	16.1	161.4	31.6	536.5	400.9	31.2	369.7	0.08	0.7	96.1
6	32.8	87.2	6.4	0.5	0.1	5874.2	0.0	21.8	0.2	4.2	7.5	4.0	29.5	8.4	87.3	31.2	136.6	29.5	298.8	57.5	977.8	716.5	37.7	678.8	0.06	0.7	28.1
7	32.8	88.8	7.8	0.9	0.2	5813.0	<0.02	25.9	0.1	1.4	2.9	1.8	16.4	5.9	72.1	29.2	137.2	30.8	318.6	62.8	948.8	705.1	32.1	673.0	0.05	0.6	101.2
8	32.8	130.2	9.4	0.4	0.1	8163.2	0.1	25.0	0.2	3.2	6.1	4.2	33.1	10.0	105.9	37.3	157.5	31.7	310.5	61.3	1154.7	786.2	38.9	747.3	0.05	0.7	30.9
9	32.8	81.4	5.3	0.4	0.2	8300.7	0.0	12.5	0.0	0.9	1.8	1.0	9.1	3.1	32.9	12.0	53.0	11.8	118.0	22.7	373.5	278.7	16.2	262.5	0.06	0.6	78.7
10	32.8	90.8	6.0	0.8	0.2	7354.5	<0.03	21.7	0.1	1.1	2.3	1.5	14.1	4.5	50.3	19.4	87.3	19.0	194.5	37.6	596.4	453.4	26.7	426.7	0.06	0.6	125.9
11	32.8	54.4	1.8	0.4	0.1	8437.1	<0.01	17.3	0.0	0.5	1.8	1.2	10.6	3.5	39.7	15.5	74.3	16.7	181.6	40.0	502.6	402.7	20.9	381.8	0.05	0.7	261.0
12	32.8	64.0	3.5	0.3	0.1	9232.1	0.0	13.9	0.0	0.6	1.4	1.0	7.6	2.3	24.8	9.8	45.7	10.5	115.5	25.2	328.2	258.3	16.9	241.4	0.07	0.7	108.8
13	32.8	89.1	4.0	0.7	0.2	9049.8	0.0	16.0	0.1	1.7	3.6	1.9	18.0	5.8	64.7	24.2	110.5	24.4	255.3	50.2	755.3	576.4	23.3	553.1	0.04	0.6	49.8
14	32.8	119.7	7.7	1.3	0.2	9873.0	<0.01	33.9	0.1	1.4	3.9	2.2	20.1	6.8	77.0	30.3	142.9	32.2	344.6	69.7	977.6	765.2	41.5	723.7	0.06	0.6	121.0
15	32.8	80.5	6.4	0.5	0.1	7189.1	<0.01	23.8	0.1	1.1	2.2	1.5	11.9	3.9	42.5	15.9	73.1	16.4	172.8	34.4	506.5	399.5	28.6	370.9	0.08	0.7	116.5
17	32.8	74.1	4.8	0.6	0.1	7255.6	<0.01	17.7	0.0	0.7	1.7	1.1	9.4	3.3	38.3	15.0	71.8	16.5	178.5	36.1	485.6	389.9	21.2	368.7	0.06	0.6	194.4
18	32.8	85.3	5.2	0.6	0.1	8159.3	<0.02	18.6	0.1	0.7	2.1	1.1	10.6	3.4	38.9	14.8	67.4	15.3	159.5	32.1	465.0	364.6	22.6	342.0	0.07	0.6	113.0
20	32.8	42.6	3.0	0.3	0.1	5814.5	<0.02	7.0	0.0	0.4	0.9	0.7	5.3	1.7	20.9	8.4	41.1	9.6	108.7	23.0	276.4	227.7	9.0	218.7	0.04	0.7	131.7

表 2 角闪石岩锆石 LA-ICP-MS 定年数据

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb dating data of zircon from hornblende

测点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值(1 σ)			年龄/Ma		
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1	360	382	0.94	0.052 31 $\pm$ 15.3	0.345 24 $\pm$ 78.1	0.047 86 $\pm$ 4.9	298.9 $\pm$ 65.23	301.1 $\pm$ 5.9	301.4 $\pm$ 2.99
2	103	121	0.85	0.051 46 $\pm$ 24.3	0.336 69 $\pm$ 144.8	0.047 45 $\pm$ 6	261.5 $\pm$ 104.85	294.7 $\pm$ 11	298.8 $\pm$ 3.72
3	161	128	1.25	0.052 98 $\pm$ 24.8	0.347 21 $\pm$ 147.7	0.047 52 $\pm$ 6	328.1 $\pm$ 102.57	302.6 $\pm$ 11.13	299.3 $\pm$ 3.67
4	129	154	0.84	0.054 82 $\pm$ 23	0.340 33 $\pm$ 126.8	0.045 02 $\pm$ 5.5	404.8 $\pm$ 90.79	297.4 $\pm$ 9.61	283.9 $\pm$ 3.39
5	306	194	1.58	0.052 3 $\pm$ 19.8	0.336 47 $\pm$ 110.5	0.046 65 $\pm$ 5.3	298.6 $\pm$ 84.18	294.5 $\pm$ 8.4	294 $\pm$ 3.28
6	130	121	1.08	0.051 87 $\pm$ 24.3	0.332 33 $\pm$ 141.3	0.046 46 $\pm$ 5.9	279.8 $\pm$ 103.56	291.3 $\pm$ 10.77	292.8 $\pm$ 3.66
7	122	145	0.84	0.052 35 $\pm$ 23.9	0.346 14 $\pm$ 143.2	0.047 95 $\pm$ 6.1	300.7 $\pm$ 101.04	301.8 $\pm$ 10.8	301.9 $\pm$ 3.75
8	805	467	1.72	0.052 67 $\pm$ 15.1	0.347 04 $\pm$ 76.1	0.047 79 $\pm$ 4.8	314.4 $\pm$ 63.78	302.5 $\pm$ 5.74	300.9 $\pm$ 2.97
9	648	653	0.99	0.052 57 $\pm$ 13.7	0.340 95 $\pm$ 63.4	0.047 04 $\pm$ 4.6	310.2 $\pm$ 58.21	297.9 $\pm$ 4.8	296.3 $\pm$ 2.82
10	217	193	1.13	0.053 95 $\pm$ 22.5	0.345 94 $\pm$ 127.7	0.046 5 $\pm$ 5.7	368.7 $\pm$ 90.58	301.7 $\pm$ 9.64	293 $\pm$ 3.52
11	359	808	0.44	0.052 39 $\pm$ 13.1	0.330 71 $\pm$ 56.9	0.045 78 $\pm$ 4.4	302.3 $\pm$ 56.05	290.1 $\pm$ 4.34	288.6 $\pm$ 2.7
12	570	421	1.35	0.052 83 $\pm$ 15.5	0.348 97 $\pm$ 79.7	0.047 9 $\pm$ 4.9	321.4 $\pm$ 65.34	303.9 $\pm$ 6	301.6 $\pm$ 3.01
13	157	217	0.72	0.052 23 $\pm$ 19.6	0.344 46 $\pm$ 111.5	0.047 83 $\pm$ 5.5	295.6 $\pm$ 83.21	300.5 $\pm$ 8.42	301.2 $\pm$ 3.38
14	549	538	1.02	0.052 22 $\pm$ 16.5	0.339 25 $\pm$ 86.9	0.047 12 $\pm$ 5	295 $\pm$ 70.52	296.6 $\pm$ 6.59	296.8 $\pm$ 3.09
15	330	236	1.40	0.050 75 $\pm$ 17.9	0.320 04 $\pm$ 95.6	0.045 73 $\pm$ 5	229.7 $\pm$ 79.38	281.9 $\pm$ 7.35	288.3 $\pm$ 3.06
16	1 889	860	2.20	0.052 37 $\pm$ 14.3	0.340 73 $\pm$ 69.4	0.047 18 $\pm$ 4.7	301.7 $\pm$ 61.15	297.7 $\pm$ 5.26	297.2 $\pm$ 2.89
17	164	169	0.97	0.052 4 $\pm$ 22.1	0.340 54 $\pm$ 128	0.047 14 $\pm$ 5.7	302.7 $\pm$ 93.39	297.6 $\pm$ 9.69	296.9 $\pm$ 3.53
18	299	268	1.11	0.051 85 $\pm$ 18	0.347 42 $\pm$ 101.5	0.048 59 $\pm$ 5.4	278.7 $\pm$ 77.4	302.8 $\pm$ 7.65	305.9 $\pm$ 3.29
19	2 010	353	5.70	0.053 3 $\pm$ 18.1	0.332 46 $\pm$ 94.7	0.045 23 $\pm$ 5	341.6 $\pm$ 75.21	291.4 $\pm$ 7.22	285.2 $\pm$ 3.06
20	79	141	0.56	0.052 55 $\pm$ 23.4	0.340 78 $\pm$ 137	0.04703 $\pm$ 5.8	309.5 $\pm$ 98.29	297.8 $\pm$ 10.37	296.2 $\pm$ 3.56

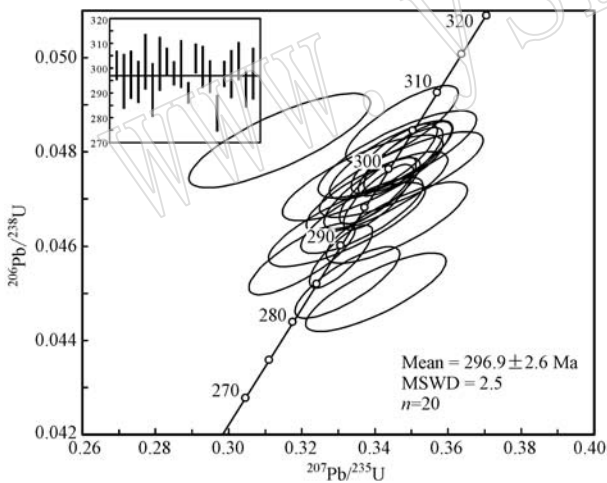


图 6 角闪石岩锆石(GSZ-B3)LA-ICP-MS 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia plots of zircon U-Pb ages of hornblende (GSZ-B3)

3.3 锆石 Hf 同位素数据

对已获得年龄的 20 个测点进行原位 Lu-Hf 同位素组成分析, 分析结果见表 3。实验获得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围为 0.282 230~0.282 702, 年龄校正后的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$ 变化范围为 0.282 22~0.282 70, $\epsilon\text{Hf}(t) = -13.4\sim4.0$ 。通过模式年龄公式得到变

化较大的亏损模式年龄 $t_{\text{DM}}(777\sim1\,501\text{ Ma})$ 和二阶段模式年龄 $t_{\text{DM}}^{\text{C}}(1\,064\sim2\,153\text{ Ma})$, 但 t_{DM} 和 t_{DM}^{C} 绝大多数计算结果都分别集中在 1 009~1 248 Ma 和 1 430~1 789 Ma。

4 讨论

4.1 岩体侵位时代及大地构造环境

前人统计了华北克拉通北缘在晚古生代—早中生代岩浆锆石 U-Pb 及部分 $^{39}\text{Ar}\text{--}^{40}\text{Ar}$ 同位素测年结果, 认为在该时期至少存在泥盆纪(400~360 Ma)、早石炭世晚期—中二叠世(330~265 Ma)及二叠纪末—三叠纪(250~200 Ma)3 期较强的岩浆作用过程(张拴宏等, 2010)。其中早石炭世晚期—中二叠世的岩浆活动强, 且主要分布在内蒙古地轴上。其岩性组合为花岗岩—英云闪长岩—花岗闪长岩—石英闪长岩—闪长岩, 为钙碱性—高钾钙碱性系(张拴宏等, 2010), 并富集大离子亲石元素(Ba、Sr、K)亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)(马旭等, 2012)。这些岩浆岩的岩石组合、地球化学特征及同位素特征表明, 内蒙古地轴在该时期为一活动陆缘弧(Xiao *et al.*, 2003; 马芳等, 2004; Zhang *et al.*, 2006, 2007; 张

表 3 角闪石岩锆石 Lu-Hf 同位素数据

Table 3 Lu-Hf isotope data of zircon from hornblende

测点	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	error	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	Error	年龄/Ma	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}(t)$	ϵHf	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}	t_{DM}	f_s
1	0.000 928	0.000 014	0.282 702	0.000 016	301.4	0.282 70	-2.5	4.0	777	1 064	-0.97
2	0.001 569	0.000 012	0.282 519	0.000 022	298.8	0.282 51	-9.0	-2.7	1 053	1 486	-0.95
3	0.001 715	0.000 007	0.282 515	0.000 023	299.3	0.282 51	-9.1	-2.8	1 062	1 495	-0.95
4	0.002 748	0.000 020	0.282 230	0.000 024	283.9	0.282 22	-19.2	-13.4	1 510	2 153	-0.92
5	0.001 447	0.000 019	0.282 400	0.000 041	294.0	0.282 39	-13.1	-7.0	1 218	1 753	-0.96
6	0.001 787	0.000 033	0.282 503	0.000 022	292.8	0.282 49	-9.5	-3.4	1 081	1 526	-0.95
7	0.001 490	0.000 003	0.282 683	0.000 021	301.9	0.282 67	-3.2	3.2	817	1 115	-0.96
8	0.001 633	0.000 012	0.282 471	0.000 022	300.9	0.282 46	-10.6	-4.4	1 123	1 593	-0.95
9	0.001 172	0.000 013	0.282 483	0.000 014	296.3	0.282 48	-10.2	-4.0	1 093	1 564	-0.96
10	0.000 541	0.000 004	0.282 440	0.000 014	293.0	0.282 44	-11.8	-5.4	1 134	1 654	-0.98
11	0.001 475	0.000 020	0.282 442	0.000 016	288.6	0.282 43	-11.7	-5.6	1 159	1 662	-0.96
12	0.000 834	0.000 012	0.282 498	0.000 013	301.6	0.282 49	-9.7	-3.2	1 062	1 522	-0.97
13	0.001 151	0.000 012	0.282 462	0.000 013	301.2	0.282 46	-11.0	-4.6	1 121	1 607	-0.97
14	0.001 217	0.000 034	0.282 448	0.000 015	296.8	0.282 44	-11.5	-5.2	1 143	1 642	-0.96
15	0.001 686	0.000 025	0.282 437	0.000 015	288.3	0.282 43	-11.8	-5.8	1 172	1 676	-0.95
16	0.001 311	0.000 011	0.282 476	0.000 017	297.2	0.282 47	-10.5	-4.2	1 106	1 579	-0.96
17	0.001 683	0.000 046	0.282 384	0.000 017	296.9	0.282 38	-13.7	-7.5	1 248	1 789	-0.95
18	0.001 396	0.000 031	0.282 446	0.000 016	305.9	0.282 44	-11.5	-5.1	1 152	1 644	-0.96
19	0.001 882	0.000 034	0.282 422	0.000 016	285.2	0.282 41	-12.4	-6.5	1 201	1 714	-0.94
20	0.001 159	0.000 003	0.282 542	0.000 022	296.2	0.282 54	-8.1	-1.9	1 009	1 430	-0.97

注：在本文的计算和讨论中，作为全球 Lu-Hf 同位素参考体系的数值分别为 $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.033\ 2$ ； $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.282\ 772$ ； $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.038\ 4$ ； $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.283\ 25$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997; Nowell, 1998)，其中 CHUR 和 DM 分别代表球粒陨石地幔和亏损地幔， ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.865\times 10^{-11}\text{a}^{-1}$ (Scherer *et al.*, 2001)。

拴宏等, 2007; 王惠初等, 2007; Zhang *et al.*, 2009a, 2009b; 张拴宏等, 2010)。孤山子超基性岩体角闪石岩锆石 U-Pb 年龄为 $296.9\pm 2.6\text{ Ma}$, 与 Zhang 等(2009b)测得辉长岩及辉石岩锆石 U-Pb 年龄(约 300 Ma)在误差范围内一致, 表明该岩体为早二叠世岩浆活动的产物。考虑到该岩体的形成时代和地质背景, 认为孤山子超基性岩体形成于晚古生代古亚洲洋向南俯冲, 俯冲带退缩形成的弧后伸展环境(马旭等, 2009)。

4.2 锆石指示源区性质

稀土元素在锆石中的分配系数取决于母岩的稀土元素成分变化(Murali *et al.*, 1983)。锆石微量元素的含量及各元素间的比率可以用来揭示不同源区的岩浆性质(Heaman *et al.*, 1990)。壳源岩浆锆石微量元素含量高, 稀土元素配分曲线显示强烈的正 Ce 异常和负 Eu 异常; 幔源岩浆锆石微量元素含量低, 稀土元素配分曲线显示弱负 Eu 异常或无异常(雷玮琰等, 2013)。孤山子角闪石岩锆石具有低的微量元素含量, 稀土元素配分曲线显示较强 Ce 正异常及弱 Eu 异常, 指示岩浆来自于地幔。

锆石 Ce 异常由岩浆氧逸度控制的观点现已被

广泛接受(Ballard *et al.*, 2002; Belousova *et al.*, 2002; Claiborne *et al.*, 2010; Han *et al.*, 2013), 高氧逸度使得 Ce 呈 +4 价, 而 Ce^{4+} 易于与 Zr^{4+} 类质同像, 比 Ce^{3+} 在锆石中相容性更强。陨石、月岩及幔源锆石中 Ce 无异常或正异常, 而在相对氧化的环境下结晶的壳源锆石 Ce 呈强烈正异常, 也表明 Ce 正异常代表相对氧化的结晶环境(Hoskin and Ireland, 2000)。而壳源锆石 Ce 正异常也常伴随强烈的 Eu 负异常, 氧化条件下 Eu 呈 +3 价, 在锆石中相容性高, 这与强 Eu 负异常相矛盾。Maas 等(1992)认为, 氧逸度不是唯一控制 Ce 异常和 Eu 异常的因素, 这与岩浆在演化过程中成分变化有关。壳源岩浆锆石 Eu 负异常被认为是在低压条件下, 斜长石分离结晶带走大量 Eu, 使得岩浆呈现 Eu 亏损, 从而导致了锆石的 Eu 负异常(Murali *et al.*, 1983; Huan *et al.*, 2013)。结合前人研究成果, 笔者认为测点的锆石稀土元素配分曲线呈现强烈 Ce 正异常, 弱负 Eu 异常, 可能代表源区岩浆有地壳物质存在, 壳源物质的加入使得岩浆氧化性提高, 而呈现与壳源锆石同样的强 Ce 正异常。而稀土元素配分曲线无强 Eu 负异常, 可能是超基性岩浆岩在演化过程中未能大量分异出斜长

石,在锆石结晶时岩浆并不亏损 Eu 造成的。

母岩浆中是否存在地壳物质,可从锆石 Hf 同位素组成得出结论。测点 $\epsilon\text{Hf}(t) = -13.4 \sim 4.0$, 变化范围大,表明源区成分较复杂。其中 17 个测点获得 $\epsilon\text{Hf}(t) = -1.9 \sim -7.5$, 平均为 -4.7 , 表明岩浆大部分源自富集的岩石圈地幔。该结果与郑建平等人 (1999a, 1999b, 2006) 认为华北克拉通北缘在晚古生代,主要表现为富集地幔的性质相符。另外,有 2 个测点获得 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 分别为 3.2、4.0, 表明岩浆中有少量亏损地幔物质加入。锆石 t_{DM} 、 t_{DM}^{C} 都远大于其 U-Pb 年龄,表明富集的岩石圈地幔在形成过程中有再造古老地壳加入。再造古老地壳的加入使得源区具有富集岩石圈地幔的性质,而由该源区部分熔融形成的岩浆锆石也获得了壳源锆石正 Ce 异常的特征。

综上所述,锆石微量元素含量、稀土元素配分模式及 Hf 同位素组成表明,该岩体的岩浆主要源自富集的岩石圈地幔。锆石 t_{DM} 、 t_{DM}^{C} 远大于 U-Pb 年龄,表明岩石圈地幔形成过程中有再造古老地壳加入,从而导致锆石稀土元素配分曲线呈现强正 Ce 异常。在锆石结晶时,无大量斜长石分离结晶,岩浆总体上不亏损 Eu,从而使得锆石稀土元素配分曲线呈弱负 Eu 异常。

4.3 同时代岩浆源区对比

位于内蒙古地轴上的波罗诺、大光顶中酸性岩体锆石 U-Pb 年龄分别为 314 ± 6 Ma (Zhang *et al.*, 2009a)、 302 ± 4 Ma (Zhang *et al.*, 2007), 具有很小的全岩 $\epsilon\text{Nd}(t) (-16.5 \sim -11.8)$ 和锆石 $\epsilon\text{Hf}(t) (-22.5 \sim -16.8)$, 这些中酸性体被认为来自于富集地幔和壳源物质的混合岩浆 (马旭等, 2012)。Zhang 等 (2009a) 得到波罗诺岩体含角闪辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 297 ± 1 Ma, $\epsilon\text{Hf}(t) = -17.0 \sim -14.1$, 结合其岩石地球化学特征,认为该岩石只受到低程度的地壳物质混染,但源区受到古亚洲洋向南俯冲过程中流体的交代作用。孤山子超基性岩体锆石 U-Pb 加权平均年龄为 296.9 ± 2.6 Ma, 锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 大多数在 $-1.9 \sim -7.5$ ($n=17$) 范围内,明显大于在内蒙古地轴上同时代侵入的波罗诺含角闪辉长岩锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$, 表明其源区富集程度相对较小。此外,孤山子超基性岩体还有 2 个锆石测点 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 分别为 3.2、4.0, 指示母岩浆中有少量亏损幔源物质加入,这暗示了华北克拉通北缘局部地区,在晚古生代已有岩石圈拉张减薄的趋势。

在晚石炭世一早二叠世期间,无论是内蒙古地轴上的中酸性岩体或者镁铁质岩体,都因受地壳物质混染或流体对源区的交代作用,而不能较好的揭示华北克拉通的源区性质。而位于内蒙古地轴以南百余千米的孤山子超基性岩体,是弧后局部拉张环境下的岩浆活动产物,不受到或受到古亚洲洋向南俯冲影响较小,其角闪石岩基性程度很高 ($\text{SiO}_2 = 34.44\% \sim 38.58\%$, 未发表数据),因而可以较准确揭示晚石炭世一早二叠世期间华北克拉通北缘的幔源性质。

5 结论

通过孤山子超基性岩体锆石数据分析及其与内蒙古地轴上侵入岩体的锆石同位素对比发现,华北克拉通北缘同时代不同大地构造环境下的岩体源区性质存在明显不同,得出结论如下:

(1) 孤山子超基性岩体角闪石岩锆石 U-Pb 年龄为 296.9 ± 2.6 Ma, 与 Zhang 等 (2009) 测得辉长岩及辉石岩锆石 U-Pb 年龄 (约 300 Ma) 在误差范围内一致,表明该岩体是早二叠世岩浆活动的产物。

(2) 锆石微量元素含量、稀土元素配分模式及 Hf 同位素组成表明岩浆主要源自富集的岩石圈地幔,有少量亏损地幔加入。锆石 t_{DM} 、 t_{DM}^{C} 都远大于其 U-Pb 年龄,表明富集的岩石圈地幔在形成过程中有再造古老地壳加入。

(3) 内蒙古地轴上同时代的中酸性岩及少量的基性-超基性岩,其锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 总体上小于本次的实验结果,表明内蒙古地轴上的岩浆源区富集程度高于孤山子超基性岩体。而孤山子超基性岩体的母岩浆有少量亏损地幔加入,暗示了在晚古生代内蒙古地轴南缘的局部地区已有岩石圈减薄的趋势。

致谢 感谢中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士在实验过程中的技术指导,同时感谢张东阳博士、孙嘉博士、张志强硕士对本文提出宝贵的意见。李正远硕士、张兴康硕士在野外工作给予了极大帮助,在此一并感谢。

References

- Ballard Julian R, Palin Michael J and Campbell Ian H. 2002. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon:

- application to porphyry copper deposits of northern Chile[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 144 (3): 347~364.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly Suzanne Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602~622.
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system: Earth Planet[J]. *Sci. Lett.*, 148: 243~258.
- Claiborne Lily L, Miller Calvin F, Wooden Joseph L, *et al.* 2010. Trace element composition of igneous zircon: a thermal and compositional record of the accumulation and evolution of a large silicic batholith, Spirit Mountain, Nevada[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(4): 511~531.
- Chi Jishang. 1988. The Study of Cenozoic Basalts and Upper Mantle Beneath Eastern China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Publishing House, 1~277(in Chinese).
- E Molan and Zhao Dasheng. 1987. Cenozoic Basalts and Deep-Seated Rock Xenoliths in Eastern China[M]. Beijing: Science Press, 1~490(in Chinese).
- Fan Q C and Hooper P R. 1989. The mineral chemistry of ultramafic xenoliths of eastern China: Implications for upper mantle composition and the paleogeotherms[J]. *Petrol.*, 30: 1117~1158.
- Fan W M and Menzies M A. 1992. Destruction of aged lower lithosphere and accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China [J]. *Geotectonica Metallogenia*, 16: 171~180.
- Goodwin A. 1991. *Precambrian Geology* [M]. London: Academic Press, 1~666.
- Griffin W L, O'Reilly S Y and Ryan C G. 1992. Composition and thermal structure of the lithosphere beneath South Africa, Siberia and China: porton microprobe studies[A]. Abstract of the International Symposium on Genozoic Volcanic Rocks and Deep-seated Xenoliths of China and its Environ[C]. Beijing: Science Press, 65~66.
- Han Yigui, Zhang Shihong, Pirajno Franco, *et al.* 2013. U-Pb and Re-Os isotopic systematics and zircon ratios in the Shiyagou Mo deposit in eastern Qinling, central China: Insights into the oxidation state of granitoids and Mo(Au) mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 55: 29~47.
- Heaman L M, Bowins R and Crocket J. 1990. The chemical composition of igneous zircon suites: implications for geochemical tracer studies [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54: 1597~1607.
- Hoskin P W O and Ireland T R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. *Geology*, 28: 627~630.
- Huan Li, Koichiro Watanabe and Kotaro Yonezu. 2013. Zircon morphology, geochronology and trace element geochemistry of the granites from the Huangshaping polymetallic deposit, South China: Implications for the magmatic evolution and mineralization processes[J]. *Ore Geology Reviews*, 60: 14~35.
- Lei Weiyan, Shi Guanghai and Liu Yingxin. 2013. Research progress on trace element characteristics of zicons of different origins[J]. *Earth Science Frontiers*, 20(4): 273~284(in Chinese with English abstract).
- Liu D Y, Nutman A P, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of 3800 Ma crust in Chinese part of the Sino-Korean craton[J]. *Geology*, 20: 339~342.
- Liu Shuwen, Pan Yuanming, Li Jianghai, *et al.* 2002. Geological and isotopic geochemical constraint on the evolution of the Fuping complex, North China Craton[J]. *Precambrian Res.*, 117: 41~56.
- Lu Fengxiang, Han Zhuguo, Zheng Jianping, *et al.* 1991. Palaeozoic lithospheric Characteristics of mantle in Fuxian, Liaoning Province [J]. *Geol. Sci. Tech. Info.*, 10 (Suppl): 2~20(in Chinese with English abstract).
- Ma Fang, Mu Zhiguo and Liu Yulin. 2004. Geochronology and Geologic Significance of the Orbicular Dioritic Rocks in Luanping, Hebei Province[J]. *Geological Review*, 50(4): 361~364(in Chinese with English abstract).
- Ma Xu, Chen Bin, Chen Jiafu, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemical, Sr-Nd isotopic, and insitu Hf isotopic data of the Late Carboniferous-Early Permian plutons in the northern margin of the North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 12: 1830~1850(in Chinese with English abstract).
- Ma Xu, Chen Bin and Niu Xiaolu. 2009. Genesis of the Late Paleozoic Dongwanzi pluton, eastern Hebei[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25 (8): 1975~1988(in Chinese with English abstract).
- Maas R, Kinny P D, Williams I S, *et al.* 1992. The earth's oldest know crust: A geochronological and geochemical study of 3900~4200 Ma old detrital zircons from Mt Narryer and Jack Hills, western Australia[J]. *Geochimica Acta*, 56: 1281~1300.
- Menzies M A, Fan W M and Zhang M. 1993. Palaeozoic and Cenozoic lithoprobe and the loss of >120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China[A]. Prichard H M, Alabaster T, Harris N B W, *et al.* *Magmatic Processes and Plate Tectonic*[C]. *Geol. Soc. Special Publ.*, 76: 71~81.

- Menzies M A and Xu Y G. 1998. Geodynamics of the North China Craton[C]. The American Geophysical Union, 155~165.
- Mller A, O' Brien P J, Kennedy A, *et al.* 2003. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway)[J]. *EMU Notes in Mineralogy*, 5: 65~82.
- Murali A V, Parthasarathy R, Mahadevan T M, *et al.* 1983. Trace element characteristics, REE patterns and partition coefficients of zircons from different geological environments: A case study on Indian zircons[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47: 2 047~2 052.
- Nowell G M, Kempton P D, Noble S R, *et al.* 1998. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionisation mass spectrometry: insights into the depleted mantle[J]. *Chem. Geol.*, 149: 211~233.
- Ni Zhiyao, Zhai Mingguo, Wang Renmin, *et al.* 2004. Discovery of the late Paleozoic retrograded eclogites from the North China Craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(6): 600~606(in Chinese with English abstract).
- Rogers J J W and Santosh M. 2003. Supercontinents in Earth history [J]. *Goudwana Res.*, 6: 357~368.
- Rubatto D and Gebauer D. 2000. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by IOM Microprobe: Some examples from the western Alps[J]. *Cathodoluminescence in Geoscience*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 373~400.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock[J]. *Science*, 293: 683~687.
- Song B, Nutman A P, Liu D Y, *et al.* 1996. 3 800 to 2 500 Ma crustal evolution in Anshan area of Liaoning Province, Northeastern China [J]. *Precamb. Res.*, 78: 79~94.
- Wang Guocan, Tan Yingjia and Wang Fangzheng. 1992. Multiphase thrusting of the Chongli- Chicheng regional fracture of north Hebei province and tectonic factors of Inner Mongolian Axis upwarping [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 17(6): 622~630 (in Chinese with English abstract).
- Wang Huichu, Zhao Fengqing, Li Huimin, *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb age of the dioritic rocks from northern Hebei: the records of late Paleozoic magmatic arc[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 597~604(in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Th, trace element and REE analyses[J]. *Geostand Newslett*, 19(1): 1~23.
- Wilde Simon A, Zhao Guochun and Sun Min. 2002. Development of the North China Craton During the Late Archaean and its Final Amalgamation at 1.8 Ga: Some Speculations on its Position Within a Global Palaeoproterozoic Supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 5(1): 85~94.
- Windley B F. 1995. The Evolving Continents[M]. Wiley, 1~526.
- Wu Fuyuan and Sun Deyou. 1999. The Mesozoic magmatism and lithospheric thinning in Eastern China[J]. *Changchun Uni. Sci. Tech.*, 29: 313~318(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Zhang Guangliang, *et al.* 2000. Deep geodynamics of Yanshan Movement[J]. *Geol. J. China Uni.*, 6: 379~388(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Ge Wenchun, Sun Deyou, *et al.* 2003. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 51~60(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Xu Yigang, Gao Shan, *et al.* 2008. Lithospheric thinning and destruction of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 145~1 174(in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Zhang Yanbin, Yang Jinhui, *et al.* 2008. Zircon U-Pb and Hf isotope constrains on the Early Archean crustal evolution in Anshan of the North China craton[J]. *Precamb. Res.*, 167: 339~362.
- Wu Yuanbao and Zheng Yongfei. 2004. A study of genetic mineralogy and its constrictions on U-Pb dating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1 589~1 604(in Chinese).
- Xia Guoli, Zhang Jiaqi and Reng Jiufeng. 2007. Copper metallogenic analysis of Gushanzi ultrabasic rocks of Kuancheng County, Hebei Province[J]. *Hebei Geology*, 3: 5~8(in Chinese).
- Xiang B, Liu S W, Wang W, *et al.* 2012. U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes of zircons from newly identified Permian-Early Triassic plutons in western Liaoning province along the northern margin of the North China Craton: constraints on petrogenesis and tectonic setting [J]. *Earth Sci. (Geol. Research)*, 102: 671~685.
- Xiao W, Windley B F, Hao J, *et al.* 2003. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 22(6): 1~20.
- Xu Y G, Fan W M and Lin G. 1995. Lithosphere-asthenosphere interaction: a comparative study on Cenozoic and Mesozoic basalts around Bohai area[J]. *Geotectonic Metallogeny*, 19(4): 1~13.
- Zhai M G. 2013. The main old lands in China and assembly of Chinese unified continent[J]. *Earth Sciences*, 11: 1 829~1 852.
- Zhai M G and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of North China Craton. A Synoptic Overview[J]. *Gondwana Res.*, 20

- (1): 6~25.
- Zhang S H, Zhao Y and Song B. 2006. Hornblende thermobarometry of the Carboniferous granitoids from the Inner Mongolia Paleo-uplift: implications for the geotectonic evolution of the northern margin of North China block[J]. *Mineralogy and Petrology*, 87: 123~141.
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jian, *et al.* 2007. Emplacement depths of the Late Paleozoic-Mesozoic granitoid intrusions from the northern North China block and their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(3): 625~638(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shuanhong, Zhao Yue, Liu Jianming, *et al.* 2010. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Late Paleozoic-Early Mesozoic magmatism in the northern margin of the North China Block: A preliminary review[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 824~842(in Chinese with English abstract).
- Zhang S H, Zhao Y, Liu X C, *et al.* 2009b. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle[J]. *Lithos*, 110: 229~246.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2007. Carboniferous granitic plutons from northern margin of the North China Block: Implications for a late Paleozoic active continental margin[J]. *Geol. Soc.*, 164: 451~463.
- Zhang S H, Zhao Y, Song B, *et al.* 2009a. Contrasting Late Carboniferous and Late Permian-Middle Triassic intrusive suites from the northern margin of the North China craton: Geochronology, petrogenesis, and tectonic implications[J]. *Geol. Soc. Amer. Bul.*, 121: 181~199.
- Zhao G C, Simon A W, Peter A C, *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China Craton: lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution[J]. *Precambrian Research*, 107(1): 45~73.
- Zhao G C, Sun M and Wilde S A. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. *Precambrian Res.*, 136: 177~202.
- Zhao G C, Wilde Simon A, Li S Z, *et al.* 2007. U-Pb zircon age constraints on the Dongwanzi ultramafic-mafic body, North China, confirm it is not an Archean ophiolite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255: 85~93.
- Zheng Jianping. 1999. Mesozoic-Cenozoic Mantle Replacement and Lithospheric Thinning Beneath East China[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~126(in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2004. 3.6 Ga lower crust in central China: new evidence on the assembly of the North China craton[J]. *Geology*, 32: 229~232.
- Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, *et al.* 2007. Mechanism and timing of lithospheric modification and replacement beneath the eastern North China Craton: Peridotitic xenoliths from the 100 Ma Fuxin basalts and a regional synthesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(21): 5203~5225.
- Zheng Jianping and Lu Fengxiang. 1999a. Mantle xenoliths from kimberlites, Shandong and Liaoning: Paleozoic mantle character and its heterogeneity[J]. *Acta Petrol. Sinica*, 15: 65~74(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, Griffin W L, *et al.* 2006. Lithospheric thinning accompanying mantle lateral spreading, erosion and replacement beneath the eastern part of North China: evidence from peridotites[J]. *Earth Sci. Frontiers*, 13(2): 76~85(in Chinese with English abstract).
- Zheng Jianping, Lu Fengxiang, O'Reilly S Y, *et al.* 1999b. Comparison between Paleozoic and Cenozoic lithospheric mantle in the eastern part of the North China block: with a discussion of mantle evolution[J]. *Acta Geol. Sinica*, 73: 47~56(in Chinese with English abstract).
- Zheng J P, O'Reilly S Y, Griffin W L, *et al.* 1998. Nature and evolution of Cenozoic lithospheric mantle beneath Shandong Peninsula, Sino-Korean Craton, Eastern China[J]. *Inter. Geol. Rev.*, 40: 471~499.

附中文参考文献

- 池际尚. 1988. 中国东部新生代玄武岩及上地幔研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~277.
- 鄂莫岚, 赵大升. 1987. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体[M]. 北京: 科学出版社, 1~490.
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. *地学前缘*, 4: 273~284.
- 路凤香, 韩柱国, 郑建平, 等. 1991. 辽宁复县地区古生代岩石圈地幔[J]. *特征地质科技情报*, S1: 2~20.
- 马芳, 穆治国, 刘玉琳. 2004. 河北滦平球状闪长岩年代学及其地质意义[J]. *地质论评*, 50: 360~364.
- 马旭, 陈斌, 陈家富, 等. 2012. 华北克拉通北缘晚古生代岩体的成因和意义: 岩石学、锆石 U-Pb 年龄、Nd-Sr 同位素及锆石原位 Hf 同位素证据[J]. *中国科学: 地球科学*, 12: 1830~1850.

- 马旭, 陈斌, 牛晓露. 2009. 冀东晚古生代东湾子岩体的岩石成因研究[J]. 岩石学报, 8: 1975~1988.
- 倪志耀, 翟明国, 王仁民, 等. 2004. 华北古陆块北缘中段发现晚古生代退变榴辉岩[J]. 科学通报, 6: 585~591.
- 王国灿, 谭应佳, 王方正. 1992. 冀北崇礼-赤城大断裂的多相逆冲-兼论内蒙地轴隆升的构造制约因素[J]. 地球科学, 17(6): 621~630.
- 王惠初, 赵凤清, 李惠民, 等. 2007. 冀北闪长质岩石的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 晚古生代岩浆弧的地质记录[J]. 岩石学报, 23: 597~604.
- 吴福元, 孙德有. 1999. 中国东部中生代岩浆作用与岩石圈减薄[J]. 长春科技大学学报, 4: 313~318.
- 吴福元, 孙德有, 张广良, 等. 2000. 论燕山运动的深部地球动力学本质[J]. 高校地质学报, 3: 379~388.
- 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 2003. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 3: 51~60.
- 吴福元, 徐义刚, 高山, 等. 2008. 华北岩石圈减薄与克拉通破坏研究的主要学术争论[J]. 岩石学报, 24(6): 1145~1174.
- 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[J]. 科学通报, 16: 1589~1604.
- 夏国礼, 张家奇, 任久峰. 2007. 河北省宽城县孤山子超基性岩体铜矿成矿性分析[J]. 河北地质, 3: 5~8.
- 张拴宏, 赵越, 刘健, 等. 2007. 华北地块北缘晚古生代-中生代花岗岩体侵位深度及其构造意义[J]. 岩石学报, 3: 625~638.
- 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 2010. 华北地块北缘晚古生代-早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 6: 824~842.
- 郑建平. 1999. 中国东部地幔置换作用与中生代岩石圈减薄[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~126.
- 郑建平, 路凤香. 1999a. 胶辽半岛金伯利岩中地幔捕虏体岩石学特征: 古生代岩石圈地幔及其不均一性[J]. 岩石学报, 1: 66~75.
- 郑建平, 路凤香, GRIFFIN W L, 等. 2006. 华北东部橄榄岩与岩石圈减薄中的地幔伸展和侵蚀置换作用[J]. 地学前缘, 2: 76~85.
- 郑建平, 路凤香, O'Reilly S Y, 等. 1999b. 华北地台东部古生代与新生代岩石圈地幔特征及其演化[J]. 地质学报, 1: 47~56.