

·专题研究·

鲁西沂南铜井闪长质岩体锆石 U-Pb 年龄、 元素及同位素地球化学特征

王 永^{1,2} 范宏瑞¹ 胡芳芳¹ 蓝廷广¹ 焦 鹏³ 王世平³

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室, 北京 100029; 2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081; 3. 山东黄金集团有限公司 沂南金矿, 山东 沂南 276300)

摘 要: 对鲁西沂南铜井岩体的中生代闪长玢岩进行了主量元素、微量及稀土元素、Sr-Nd-Pb 同位素以及锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素研究。结果表明, 铜井闪长玢岩 SiO₂ 含量为 54.68%~63.01%, 富 Na, Na₂O/K₂O 为 0.93~4.46, Mg[#] 较高, 为 55~66, 为中钾-高钾钙碱性系列, TiO₂ 含量较低, 0.2%~0.71%。样品具有显著的 LREE 富集 [(La/Yb)_n = 10~15] 以及高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 的负异常, Eu 基本无异常, Sr、Ba 含量高(分别为 241 × 10⁻⁶~711 × 10⁻⁶ 和 554 × 10⁻⁶~822 × 10⁻⁶) 的特征。I_{Sr} 和 εNd(t) 值分别为 0.706 473~0.708 867 和 -15.13~-9.18, 与鲁西方城玄武岩和前人研究的沂南辉长岩结果有所差异, 显示其源区具有多端员混合特征, 除了富集岩石圈地幔外, 亏损地幔和地壳物质的贡献也很重要, Pb 同位素也显示其源区有扬子克拉通物质的贡献, 佐证了华北克拉通中生代富集岩石圈地幔的形成与扬子克拉通的俯冲有关。闪长岩中锆石具有典型的岩浆锆石特征, U-Pb 年龄为 128~129 Ma, 锆石 εHf(t) 值主要在 -13~-8(平均值为 -10.3) 范围内, 暗示了岩浆来源于富集岩石圈地幔, 但受到亏损地幔物质的混染。沂南铜井闪长玢岩岩浆源区的多元性以及亏损地幔物质参与程度的逐渐增强, 说明该地区中生代岩石圈减薄已达到最大, 岩浆源区的差异可能也是该地区与胶东地区成矿性差异的主要原因之一。

关键词: 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 闪长玢岩; 地幔; 沂南

中图分类号: P597; P588.12+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)04-0553-14

Zircon U-Pb ages and geochemistry of elements and isotopes of the diorite from Tongjing, Yinan, western Shandong Province

WANG Yong^{1,2}, FAN Hong-ru¹, HU Fang-fang¹, LAN Ting-guang¹, JIAO Peng³ and WANG Shi-ping³

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Yinan Gold Mine, Shandong Gold Co., Ltd., Yinan 276300, China)

Abstract: Zircon U-Pb age, major and trace elements, REE, Sr-Nd-Pb, and zircon Hf isotope compositions were discussed for the Mesozoic Tongjing diorite porphyry in Yinan area of western Shandong Province. The results show that the Tongjing diorite porphyry is characterized by high SiO₂ (54.68%~63.01%) and Mg(Mg[#] = 55~66) and relatively low TiO₂ (0.2%~0.71%) content, similar to high-Mg diorite distributed extensively in western Shandong Province. There is a strong enrichment of LREE [(La/Yb)_n = 10~15] and HFSE (Nb, Ta, Ti) anomaly, with no Eu anomaly, and Sr (241 × 10⁻⁶~711 × 10⁻⁶) and Ba (554 × 10⁻⁶~822 × 10⁻⁶) content is high. The Sr-Nd isotope characteristics of rock resembling suggest that they have the same magma

收稿日期: 2010-08-11; 修订日期: 2011-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40625010, 40702016), 全国危机矿山接替资源找矿资助项目(20089930)

作者简介: 王 永(1982-), 男, 博士, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: firefly008@163.com; 通讯作者: 范宏瑞(1963-), 男, 研究员, 岩石学和地球化学专业, E-mail: fanhr@mail.igcas.ac.cn

source. The I_{Sr} and $\epsilon Nd(t)$ values are respectively 0.706 473~0.708 867 and $-15.13 \sim -9.18$, which are not consistent with the data of contemporaneous Yinan gabbro which had been studied by the former researchers. Available isotopic data of the Tongjing diorite porphyry reveal that the major magma sources were enriched lithospheric mantle. Besides, magma from the lower crust and depleted mantle is also important, and Pb isotope shows that the lower crust was formed by North China Craton and Yangtze Craton. Zircon U-Pb age is 128~129 Ma, which is an embodiment of Mesozoic large-scale magmatic activities in east NCC, and the age is similar to that of Mesozoic intrusive rock of Jiaodong area, indicating that the two areas might have the same background for magmatic activities. The $\epsilon Hf(t)$ values range mainly from -13 to -8 with a mean value of -10.3 , also implying that the magma came from enriched lithospheric mantle mixed with depleted mantle. The variety of multiple magma sources and the progressive participation of depleted mantle components in response to the lithospheric thinning reached the max in late Mesozoic in the eastern part of North China Craton. The different sources of magma might have been the main factor responsible for mineralization between Jiaodong peninsula and western Shandong Province.

Key words: geochemistry; zircon U-Pb age; diorite porphyry; mantle; Yinan

位于华北克拉通东南缘的山东地区是中生代华北岩石圈减薄作用比较强烈的地区,但长期以来的研究重点都集中在胶东地区,对鲁西地区广泛分布的中生代侵入岩研究较少。沂南地区位于沂沭断裂带西侧,是中生代岩浆活动比较强烈的地区,分布有较多的中生代侵入岩体,岩体分布受构造控制明显,岩性主要有辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩和花岗岩等,但以闪长质岩石分布最广,与成矿带关系最为密切,与闪长质岩石伴生有鲁西地区规模较大的铜井和金厂两个矽卡岩型金铜矿床,因此闪长质岩石是研究揭示中生代岩浆作用特征及岩浆活动与成矿作用关系的理想对象,同时可与胶东地区中生代岩浆活动做对比,为探讨华北克拉通东部中生代构造体制转折期强烈的岩浆活动与巨量金属成矿事件提供线索,也可为鲁西地区寻找与中生代侵入岩有关的铜金矿床提供指导意见。

沂南地区闪长质岩体分布于沂南县城北部铜井镇周围,岩性以闪长岩和闪长玢岩为主,有少量的辉长岩和辉石闪长岩,主要有铜井岩体、朝阳岩体、银山庄岩体等(图 1)。林景仟等(1996)对铜井岩体次火山岩进行了全岩及单矿物的 K-Ar 侧年,年龄值主要在 110~126 Ma;杨承海等(2008)对沂南上峪辉长-闪长岩进行过年代学和岩石地球化学研究,认为其原始岩浆起源于受陆壳物质强烈改造的富集型上地幔;顾雪祥研究小组也对沂南金矿床进行了比较详细的同位素和成矿流体研究(董树义,2008;顾雪祥等,2008a,2008b;李科,2009;刘丽等,2009),但缺乏详细的岩石学研究。此次研究以分布面积较大且

与成矿关系密切的铜井岩体闪长玢岩为对象,进行了年代学、地球化学及同位素特征研究,以揭示鲁西地区中生代岩浆活动的特征及成矿作用。

1 地质背景

鲁西地区地层具双层结构,由前寒武系结晶基底和其上的沉积盖层组成。基底主要为太古宇混合花岗岩、片麻岩等变质岩,盖层由古生界、中生界和新生界碳酸盐岩和碎屑岩组成(金振奎等,1999)。沂南地区地层倾角极小,矿区内地层出露不齐全,仅出露上部地层,铜井岩体周围主要出露寒武系长清群馒头组、朱砂洞组及九龙群张夏组。

区内构造主要为断裂和褶皱,其中断裂是矿区内主要构造,按走向可分为 NW 向断裂组、NEE 向断裂组及 EW 向断裂组,其中以 NNE 向断层最发育,构成了矿区内基本构造轮廓。铜井杂岩体受 NNE 向——葛沟断裂和 NW 向的马家窝-铜井断裂控制。铜井穹状背斜是区内唯一的褶皱构造,因铜井杂岩体的侵入,地层产生短轴状穹隆,长轴走向近南北,南端倾伏于龙头旺,北端倾伏于铜井水库,南北长约 3 km,东西宽约 2 km。盖层岩层为斜外倾,倾角 $15^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。

铜井岩体呈岩株状侵入于铜井穹状背斜核部,其边缘有似层状或舌状岩床侵入围岩中,平面为不规则方形。闪长岩类主要分布于杂岩体西部,在东部断续隐伏于地下,形成一系列捕虏体或被熔蚀的块体,晚期的闪长玢岩主要分布在杂岩体东部及四周,充填在

闪长岩类岩块四周或其间。朝阳岩体也是该区比较重要的一个岩体,位于铜井岩体北部大朝阳一带,可

分为边缘相及中间相,角闪石含量较高,岩性以角闪(石英)二长闪长玢岩及角闪正长斑岩为主。

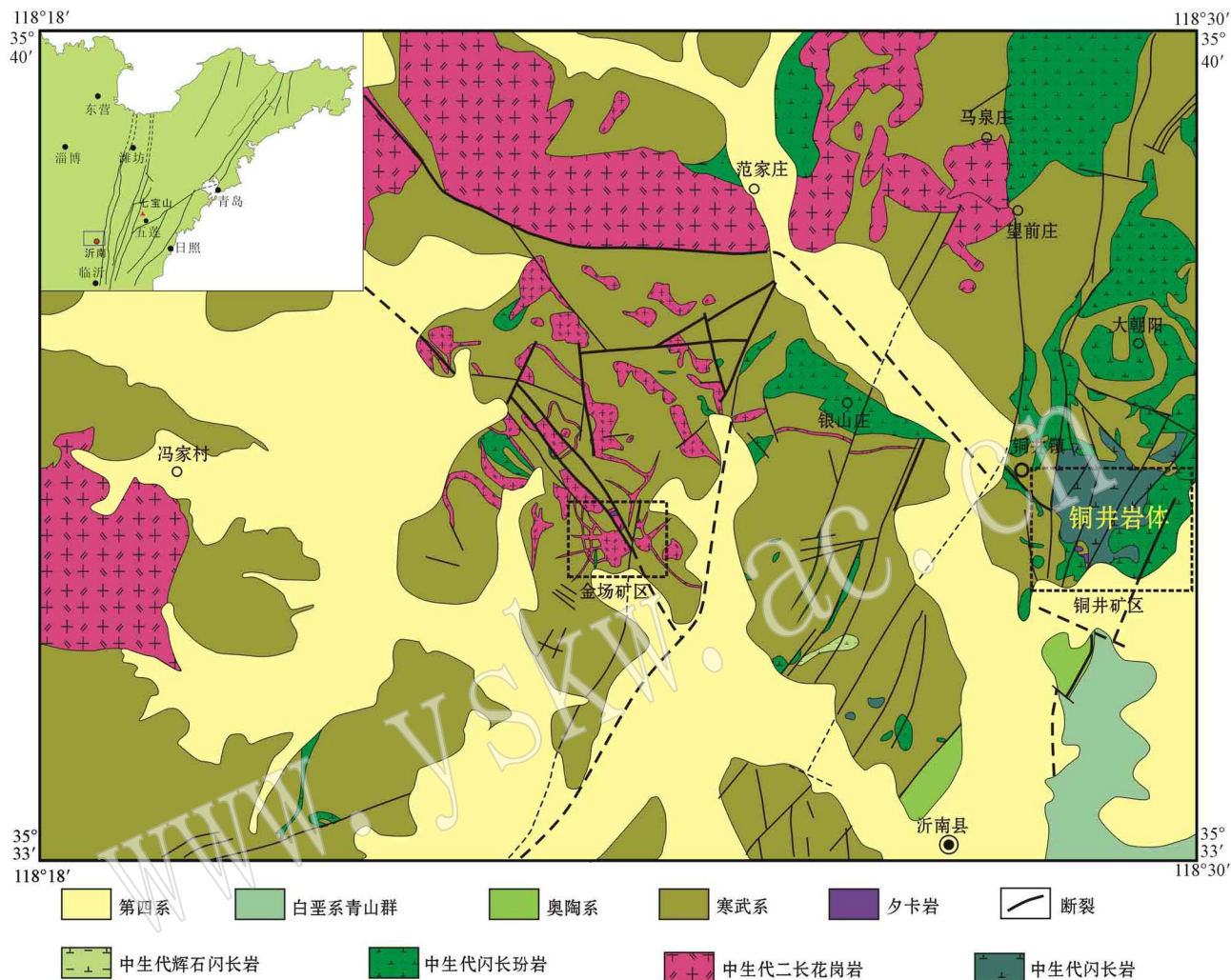


图 1 沂南地区区域地质图

Fig. 1 Sketch geological map of Yinan area

2 分析方法

2.1 主量和微量元素

主量及微量元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所元素分析实验室完成。主量元素分析先利用制样设备(M4 自动熔样机)将样品烧制成玻璃片,然后采用 X 射线荧光光谱仪 AXIOS Minerals 进行测试,分析精度优于 1%。微量元素分析先将样品充分溶解后,在 Finnigan MAT 公司生产的双聚焦电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)ELEMENT 上测定,分析精度优于 5%~8%。

2.2 锆石 U-Pb 年龄

锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素定年在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 同时分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密性(Hu *et al.*, 2008)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。对分析数据的离线处理采用软件 ICPMSDataCal

(Liu *et al.*, 2008a; Liu *et al.*, 2010a)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu 等(2008a, 2010a, 2010b)。

2.3 Sr-Nd 和 Pb 同位素

Sr-Nd、Pb 的化学分离和同位素比值测量在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室完成。称取约 100 mg 全岩粉末样品,加入适量的⁸⁷Rb-⁸⁴Sr 和¹⁴⁹Sm-¹⁵⁰Nd 混合稀释剂和纯化的 HF-HClO₄ 混合试剂后,在高温下完全溶解,利用特效树脂进行 Rb-Sr 和 Sm-Nd 的分离纯化,Sr 和 Nd 同位素比值测定分别采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.119 4 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.721 9 进行标准化,Rb-Sr 和 Sm-Nd 的全流程实验本底分别小于 100 pg 和 50 pg,铅同位素分析采用 HF 酸(2% HNO₃)在高温高压条件下将粉末样品完全溶解,在装有 80 mL AG1x8(100~200 目)交换树脂的 Teflon 交换柱上分离纯化 Pb 样品,全流程本底小于 50 pg,质量分馏校正系数为每质量单位 1‰,该校正系数源于对铅标准物质 NBS981 的大量测试所获得的数据。等时线和 Nd 模式年龄采用 Isoplot 程序计算(Ludwig, 2003),采用 2σ 误差。浓度(或¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd 和⁸⁷Rb/⁸⁶Sr 比值)误差小于 0.5%。

2.4 Hf 同位素

锆石原位 Hf 同位素分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所多通道等离子质谱实验室完成。锆石按常规方法分选,在双目镜下挑纯、制靶,然后在 CL 图像研究的基础上进行原位 Hf 同位素分析。分析测试在配有 193 nm 激光取样系统的 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱(LA-MC-ICPMS)上进行,分析时激光束直径为 40 μm 或 60 μm,激光剥蚀时间为 26 s,测定时用锆石国际标样 91500 做外标。实验中,91500 的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 和¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 测定结果分别为 0.282 304 ± 4(2σ, n = 86)和 0.000 33。

3 分析结果

3.1 主量和微量元素

分析样品取自沂南铜井矿区各个矿段的闪长玢岩,主要矿物为长石、角闪石,少量的黑云母和石英,副矿物见榍石。长石主要以斑晶和基质两种形式存在,斑晶长石大小 0.7~4.5 mm,自形-半自形,以富钠斜长石为主,大部分发生绢云母化,个别包含角闪石小颗粒,发育卡氏双晶;基质长石 0.05~0.3 mm,粒状-短柱状,卡氏双晶发育,半自形-他形。基质中

见少量石英。角闪石主要存在于斑晶中,呈粒状-短柱状,自形-半自形,蓝到绿多色性,正交下具蓝绿-褐黄干涉色,粒状角闪石近菱形,两组解理明显,解理夹角 50°~55°,大小 0.2~2.8 mm,柱状角闪石见一组解理。有些样品(07SD154、07SD155、07SD156)角闪石含量较高,主量元素总量略低于 95%。

分析结果(表 1)显示,样品的 SiO₂ 含量较高,为 54.68%~63.01%,K₂O 含量较低(1.23%~3.61%),Na₂O 含量为 2.88%~5.59%,K₂O + Na₂O 为 5.73%~8.98%,稍高于正常闪长岩的含量,岩石富 Na,Na/K 为 0.93~4.46,在 SiO₂-K₂O 判别图解(图 2)上落在高钾钙碱系列范围内。MgO 含量为 1.26%~2.69%,Mg[#] 值受矿化影响较大,未矿化样品 Mg[#] 较高,为 55~66,应该代表了岩石的真实成分,表明岩石属于高 Mg 质岩石。受矿化蚀变影响的样品,其 Mg[#] 明显降低(36~44),不作为讨论的依据。MnO 为 0.04%~0.07%,CaO 为 4.45%~8.89%,Fe₂O₃^T 含量为 1.61%~6.95%,TiO₂ 和 P₂O₅ 含量分别为 0.28%~0.71%和 0.10%~0.22%,Al₂O₃ 为 14.89%~21.41%。

样品的微量和稀土元素特征比较相似,在稀土元素球粒陨石标准化分配图(图 3a)上呈轻稀土元素富集、重稀土相对亏损(La/Yb)_N 为 10~15,轻、重稀土元素分馏明显,δEu 为 0.95~1.0,基本没有异常,暗示基本没有斜长石的结晶分异作用或者结晶分异出的斜长石留在了原始的熔体内,没有“外逃”;ΣREE 为 99.25 × 10⁻⁶~130.9 × 10⁻⁶,与鲁西铁铜沟高 Mg 闪长岩类似(杨承海等,2006)。在原始地幔标准化蛛网图(图 3b)上,富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,Sr、Ba 含量高,分别为 241 × 10⁻⁶~711 × 10⁻⁶(平均 431 × 10⁻⁶)和 554 × 10⁻⁶~846 × 10⁻⁶(平均 706 × 10⁻⁶)。样品 07SD133 受后期热液活动影响,Ba 含量明显低于其他样品,其 Sr 和 U 具有正异常。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

对沂南铜井 2 件闪长玢岩样品的锆石 U-Pb 年龄进行了测定,结果列于表 2。

样品(07SD155)采自铜井矿区堆金山矿段,锆石自形程度较好,主要为柱状和长柱状,CL 图像显示振荡环带较宽(图 4),²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 129 ± 1 Ma(MSWD = 1.07)(图 5),说明铜井矿区闪长玢岩的形成时间为晚中生代 129 Ma 左右。

另外,对邻近铜井岩体且岩性相同的银山庄闪

表 1 沂南铜井闪长岩主要元素 ($w_B/\%$) 和微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果

Table Major ($w_B/\%$) and trace element ($w_B/10^{-6}$) composition of Tongjing diorite porphyry

| 样品号 | 07SD078 | 07SD142 | 07SD154 | 07SD155 | 07SD156 | 07SD157 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| SiO ₂ | 58.12 | 63.01 | 61.26 | 55.02 | 54.68 | 55.01 |
| TiO ₂ | 0.62 | 0.46 | 0.58 | 0.70 | 0.71 | 0.68 |
| Al ₂ O ₃ | 15.01 | 16.05 | 15.52 | 15.74 | 16.01 | 14.89 |
| Fe ₂ O ₃ ^T | 4.43 | 2.30 | 2.42 | 4.53 | 6.25 | 6.95 |
| MnO | 0.04 | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.05 | 0.07 |
| MgO | 2.69 | 2.24 | 1.61 | 1.27 | 2.08 | 2.73 |
| CaO | 6.88 | 5.12 | 4.45 | 8.89 | 5.87 | 7.42 |
| Na ₂ O | 3.53 | 5.59 | 4.07 | 3.36 | 2.88 | 3.83 |
| K ₂ O | 3.12 | 3.39 | 3.61 | 2.95 | 3.11 | 1.90 |
| P ₂ O ₅ | 0.18 | 0.14 | 0.19 | 0.22 | 0.22 | 0.22 |
| Na/K | 1.13 | 1.65 | 1.13 | 1.14 | 0.93 | 2.02 |
| Total | 95.75 | 99.99 | 94.88 | 93.87 | 92.79 | 95.72 |
| Mg [#] | 55 | 66 | 57 | 36 | 40 | 44 |
| Ba | 821.9 | 845.8 | 687.1 | 728.8 | 554.4 | 599.7 |
| Rb | 95.81 | 77.63 | 79.68 | 78.99 | 80.69 | 59.54 |
| Sr | 417.8 | 691.2 | 250.0 | 461.3 | 240.6 | 526.3 |
| Ta | 0.33 | 0.27 | 0.32 | 0.33 | 0.33 | 0.31 |
| Nb | 5.41 | 6.14 | 5.19 | 5.45 | 5.45 | 5.10 |
| Zr | 115.0 | 115.8 | 120.5 | 129.6 | 118.5 | 133.8 |
| Hf | 3.02 | 3.63 | 3.38 | 3.70 | 3.41 | 3.69 |
| Th | 3.02 | 1.73 | 3.85 | 4.43 | 4.50 | 3.89 |
| U | 1.09 | 1.23 | 0.97 | 1.03 | 0.84 | 1.25 |
| Ni | 76.97 | 16.70 | 15.66 | 24.82 | 25.20 | 28.68 |
| Se | 17.53 | 7.93 | 12.45 | 16.91 | 17.28 | 16.04 |
| V | 126.6 | 68.20 | 103.7 | 140.9 | 132.2 | 124.9 |
| Pb | 6.78 | 11.89 | 7.61 | 14.40 | 10.70 | 11.15 |
| Li | 39.99 | 17.86 | 13.99 | 18.96 | 28.37 | 14.89 |
| Ga | 18.57 | 22.39 | 16.34 | 19.75 | 18.87 | 17.37 |
| Co | 20.47 | 7.53 | 11.91 | 14.21 | 16.23 | 25.06 |
| Ti | 0.60 | 0.33 | 0.60 | 0.50 | 0.53 | 0.41 |
| La | 18.00 | 12.08 | 12.21 | 24.45 | 21.85 | 23.23 |
| Ce | 36.90 | 25.74 | 27.28 | 45.47 | 41.29 | 44.91 |
| Pr | 4.42 | 3.23 | 3.82 | 5.61 | 5.14 | 5.62 |
| Nd | 16.59 | 12.27 | 14.84 | 22.64 | 19.63 | 22.16 |
| Sm | 3.40 | 2.53 | 2.99 | 4.35 | 3.85 | 4.62 |
| Eu | 1.01 | 0.77 | 0.88 | 1.36 | 1.12 | 1.42 |
| Gd | 2.78 | 2.04 | 2.32 | 3.70 | 3.24 | 3.63 |
| Tb | 0.38 | 0.27 | 0.34 | 0.54 | 0.49 | 0.55 |
| Dy | 2.12 | 1.45 | 1.83 | 3.04 | 2.72 | 2.97 |
| Ho | 0.42 | 0.27 | 0.36 | 0.58 | 0.54 | 0.59 |
| Er | 1.14 | 0.67 | 0.96 | 1.62 | 1.49 | 1.61 |
| Tm | 0.18 | 0.09 | 0.14 | 0.24 | 0.23 | 0.24 |
| Yb | 1.12 | 0.58 | 0.92 | 1.56 | 1.45 | 1.54 |
| Lu | 0.17 | 0.09 | 0.15 | 0.24 | 0.22 | 0.23 |
| Y | 10.63 | 6.95 | 9.42 | 15.47 | 13.92 | 15.18 |
| La/Yb | 12 | 15 | 10 | 11 | 11 | 11 |
| ΣREE | 99.25 | 69.03 | 78.44 | 130.9 | 117.2 | 128.5 |

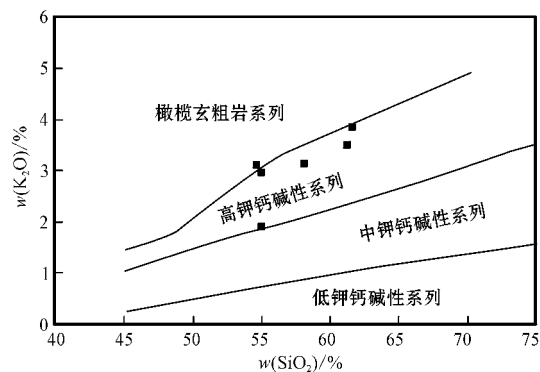


图 2 铜井闪长岩 K_2O-SiO_2 判别图解

Fig. 2 Plots of K_2O-SiO_2 for Tongjing diorite porphyry

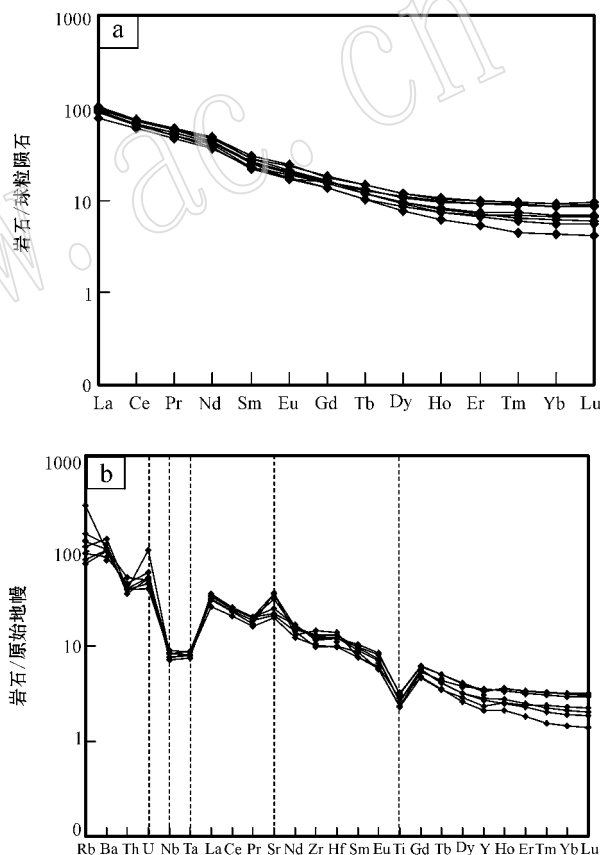


图 3 铜井闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (a) 和微量元素地幔标准化蛛网图 (b)

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spidergrams (b) of Tongjing diorite porphyry

长玢岩 (08LX086) 进行了 U-Pb 年龄测定。其锆石自形程度较好, 呈短柱状, CL 图像显示振荡环带清楚 (图 4), 一些锆石具有核边结构, 磨圆度较高, 核部颜色较暗, 边部明亮, 有振荡环带 (图 4 点 9、13), 但

表2 沂南铜井闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄
Table 2 Zircon U-Pb isotopic data of Tongjing diorite porphyry

| 点号 | $w_B/10^{-6}$ | | Th/U | 比值 | | | | | | 年龄/Ma | | | | | |
|-------------|-------------------|------------------|------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| | ^{232}Th | ^{238}U | | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ |
| 银山庄 08LX086 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01 | 119 | 139 | 0.85 | 0.061 27 | 0.004 21 | 0.164 32 | 0.010 33 | 0.019 95 | 0.000 36 | 650 | 148 | 154 | 9 | 127 | 2 |
| 02 | 229 | 321 | 0.71 | 0.049 06 | 0.002 08 | 0.135 53 | 0.005 96 | 0.020 08 | 0.000 26 | 150 | 100 | 129 | 5 | 128 | 2 |
| 03 | 140 | 141 | 0.99 | 0.049 19 | 0.003 92 | 0.127 93 | 0.008 71 | 0.020 15 | 0.000 33 | 167 | 178 | 122 | 8 | 129 | 2 |
| 04 | 42 | 71 | 0.60 | 0.065 45 | 0.006 57 | 0.177 91 | 0.015 89 | 0.019 85 | 0.000 59 | 789 | 213 | 166 | 14 | 127 | 4 |
| 05 | 43 | 63 | 0.68 | 0.061 27 | 0.006 51 | 0.163 22 | 0.017 71 | 0.019 81 | 0.000 53 | 650 | 197 | 154 | 15 | 126 | 3 |
| 06 | 33 | 58 | 0.58 | 0.095 35 | 0.027 08 | 0.261 37 | 0.068 94 | 0.020 13 | 0.000 42 | 1 544 | 558 | 236 | 56 | 128 | 3 |
| 07 | 242 | 196 | 1.23 | 0.047 36 | 0.002 80 | 0.129 66 | 0.007 61 | 0.020 09 | 0.000 34 | 78 | 133 | 124 | 7 | 128 | 2 |
| 08 | 651 | 436 | 1.49 | 0.051 52 | 0.002 31 | 0.140 21 | 0.006 39 | 0.019 75 | 0.000 30 | 265 | 99 | 133 | 6 | 126 | 2 |
| 09 | 102 | 504 | 0.20 | 0.153 48 | 0.002 49 | 9.463 14 | 0.167 89 | 0.446 01 | 0.005 91 | 2 385 | 28 | 2 384 | 16 | 2 378 | 26 |
| 10 | 46 | 70 | 0.66 | 0.063 75 | 0.006 28 | 0.164 01 | 0.014 11 | 0.019 99 | 0.000 56 | 744 | 210 | 154 | 12 | 128 | 4 |
| 11 | 41 | 29 | 1.41 | 0.157 21 | 0.004 10 | 9.434 95 | 0.257 06 | 0.436 41 | 0.006 69 | 2 426 | 44 | 2 381 | 25 | 2 335 | 30 |
| 12 | 80 | 96 | 0.83 | 0.047 09 | 0.005 53 | 0.126 89 | 0.015 18 | 0.019 74 | 0.000 57 | 54 | 268 | 121 | 14 | 126 | 4 |
| 13 | 343 | 467 | 0.74 | 0.162 03 | 0.003 35 | 10.624 80 | 0.241 83 | 0.473 76 | 0.006 27 | 2 477 | 40 | 2 491 | 21 | 2 500 | 27 |
| 14 | 36 | 59 | 0.60 | 0.049 11 | 0.012 68 | 0.163 97 | 0.041 75 | 0.023 32 | 0.001 10 | 154 | 580 | 154 | 36 | 149 | 7 |
| 15 | 87 | 159 | 0.55 | 0.056 76 | 0.005 61 | 0.167 89 | 0.015 47 | 0.021 76 | 0.000 66 | 483 | 216 | 158 | 13 | 139 | 4 |
| 16 | 83 | 165 | 0.51 | 0.166 01 | 0.002 73 | 11.128 08 | 0.263 45 | 0.482 79 | 0.007 95 | 2 518 | 23 | 2 534 | 22 | 2 539 | 35 |
| 17 | 37 | 48 | 0.75 | 0.161 35 | 0.002 98 | 10.795 41 | 0.213 94 | 0.482 60 | 0.004 74 | 2 470 | 32 | 2 506 | 18 | 2 539 | 21 |
| 18 | 199 | 252 | 0.79 | 0.162 32 | 0.002 77 | 10.759 04 | 0.213 60 | 0.479 51 | 0.007 73 | 2 480 | 29 | 2 503 | 18 | 2 525 | 34 |
| 19 | 120 | 102 | 1.18 | 0.164 92 | 0.002 89 | 10.759 73 | 0.199 75 | 0.471 68 | 0.005 89 | 2 506 | 30 | 2 503 | 17 | 2 491 | 26 |
| 20 | 112 | 131 | 0.86 | 0.050 92 | 0.003 40 | 0.140 44 | 0.008 84 | 0.020 14 | 0.000 37 | 235 | 154 | 133 | 8 | 129 | 2 |
| 21 | 177 | 151 | 1.17 | 0.049 62 | 0.002 77 | 0.136 17 | 0.007 08 | 0.020 00 | 0.000 31 | 176 | 130 | 130 | 6 | 128 | 2 |
| 22 | 86 | 166 | 0.52 | 0.045 53 | 0.003 74 | 0.128 85 | 0.010 99 | 0.020 00 | 0.000 49 | - | - | 123 | 10 | 128 | 3 |
| 23 | 182 | 256 | 0.71 | 0.054 71 | 0.003 00 | 0.164 44 | 0.008 60 | 0.021 97 | 0.000 40 | 467 | 124 | 155 | 7 | 140 | 3 |
| 24 | 41 | 116 | 0.35 | 0.057 52 | 0.003 77 | 0.158 98 | 0.010 68 | 0.020 36 | 0.000 43 | 522 | 144 | 150 | 9 | 130 | 3 |
| 25 | 372 | 288 | 1.29 | 0.051 33 | 0.002 38 | 0.140 63 | 0.006 62 | 0.019 93 | 0.000 29 | 254 | 110 | 134 | 6 | 127 | 2 |
| 铜井 07SD155 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 01 | 146 | 143 | 1.02 | 0.050 84 | 0.004 99 | 0.130 70 | 0.011 45 | 0.019 77 | 0.000 44 | 232 | 224 | 125 | 10 | 126 | 3 |
| 02 | 150 | 140 | 1.07 | 0.049 27 | 0.006 10 | 0.130 85 | 0.015 62 | 0.020 13 | 0.000 49 | 161 | 267 | 125 | 14 | 129 | 3 |
| 03 | 162 | 167 | 0.97 | 0.051 32 | 0.003 30 | 0.141 16 | 0.008 69 | 0.020 29 | 0.000 35 | 254 | 150 | 134 | 8 | 130 | 2 |
| 04 | 81 | 90 | 0.90 | 0.055 71 | 0.004 87 | 0.143 90 | 0.011 20 | 0.019 93 | 0.000 44 | 439 | 201 | 137 | 10 | 127 | 3 |
| 05 | 299 | 281 | 1.07 | 0.049 49 | 0.002 83 | 0.138 68 | 0.008 08 | 0.020 34 | 0.000 29 | 172 | 133 | 132 | 7 | 130 | 2 |
| 06 | 150 | 150 | 1.00 | 0.051 29 | 0.003 47 | 0.139 54 | 0.009 59 | 0.019 92 | 0.000 33 | 254 | 183 | 133 | 9 | 127 | 2 |
| 07 | 241 | 198 | 1.22 | 0.051 73 | 0.003 21 | 0.145 93 | 0.009 01 | 0.020 31 | 0.000 31 | 272 | 143 | 138 | 8 | 130 | 2 |
| 08 | 92 | 94 | 0.97 | 0.059 53 | 0.004 11 | 0.153 18 | 0.009 69 | 0.019 71 | 0.000 42 | 587 | 152 | 145 | 9 | 126 | 3 |
| 09 | 828 | 596 | 1.39 | 0.059 15 | 0.002 15 | 0.168 38 | 0.005 73 | 0.020 51 | 0.000 23 | 572 | 75 | 158 | 5 | 131 | 1 |
| 10 | 141 | 139 | 1.01 | 0.053 47 | 0.004 43 | 0.147 44 | 0.011 39 | 0.020 51 | 0.000 41 | 350 | 189 | 140 | 10 | 131 | 3 |
| 11 | 566 | 345 | 1.64 | 0.049 18 | 0.003 49 | 0.137 63 | 0.008 93 | 0.020 62 | 0.000 30 | 167 | 156 | 131 | 8 | 132 | 2 |
| 12 | 537 | 348 | 1.54 | 0.048 19 | 0.002 29 | 0.134 84 | 0.006 01 | 0.020 50 | 0.000 24 | 109 | 107 | 128 | 5 | 131 | 2 |
| 13 | 128 | 141 | 0.91 | 0.051 76 | 0.003 16 | 0.144 92 | 0.008 75 | 0.020 64 | 0.000 35 | 276 | 141 | 137 | 8 | 132 | 2 |
| 14 | 278 | 249 | 1.12 | 0.050 03 | 0.002 54 | 0.136 64 | 0.006 52 | 0.020 22 | 0.000 23 | 195 | 119 | 130 | 6 | 129 | 1 |
| 15 | 220 | 175 | 1.25 | 0.050 92 | 0.002 83 | 0.143 47 | 0.007 92 | 0.020 50 | 0.000 29 | 239 | 130 | 136 | 7 | 131 | 2 |
| 16 | 222 | 190 | 1.17 | 0.047 17 | 0.003 59 | 0.131 01 | 0.010 16 | 0.020 35 | 0.000 34 | 58 | 174 | 125 | 9 | 130 | 2 |
| 17 | 470 | 353 | 1.33 | 0.051 07 | 0.002 56 | 0.142 78 | 0.007 25 | 0.020 40 | 0.000 28 | 243 | 115 | 136 | 6 | 130 | 2 |
| 18 | 459 | 289 | 1.59 | 0.048 64 | 0.002 44 | 0.132 05 | 0.006 66 | 0.019 74 | 0.000 21 | 132 | 123 | 126 | 6 | 126 | 1 |
| 19 | 296 | 238 | 1.24 | 0.050 67 | 0.002 26 | 0.137 08 | 0.005 95 | 0.019 94 | 0.000 24 | 233 | 102 | 130 | 5 | 127 | 1 |
| 20 | 522 | 320 | 1.63 | 0.048 23 | 0.002 09 | 0.132 38 | 0.005 50 | 0.019 99 | 0.000 20 | 109 | -95 | 126 | 5 | 128 | 1 |

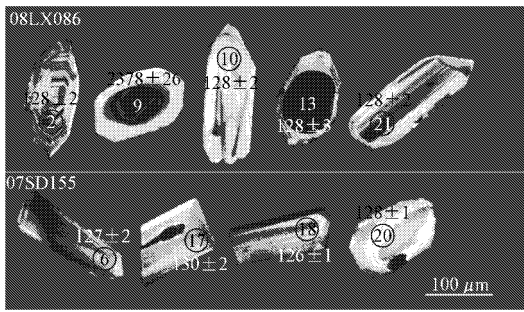


图 4 铜井矿区(07SD155)和银山庄(08LX086)闪长玢岩部分锆石 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircons from Tongjing(07SD155) and Yinshanzhuang(08LX086) diorite porphyries

核部不都具有古老的年龄,有些与边部年龄基本一致(图 4 点 13)。08LX086 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $128 \pm 1 \text{ Ma}$ (MSWD=0.17)(图 5)表明银山庄

岩体的侵位时间为 128 Ma 左右,与铜井矿区闪长玢岩体年龄在误差范围内一致,说明它们为同一期岩浆活动的产物,可能为同一岩体的地表不同分支。其中继承锆石年龄为 $2506 \pm 17 \text{ Ma}$ (图 5),与研究区大面积存在的新太古代基底年龄一致,这表明基底物质参与了铜井岩体的形成。

3.3 Sr-Nd 和 Pb 同位素

将铜井岩体与朝阳岩体和银山庄岩体样品进行 Sr-Nd-Pb 同位素组成的对比,分析结果列于表 3 和表 4。样品的初始 Sr-Nd 同位素比值计算所用的年龄采用了同一样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄(数据另文发表)样品 08LX084 和 07SD157 年龄值采用同一岩体锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的平均值。

结果显示,几个岩体的 Sr-Nd 同位素特征比较相似,显示了它们具有同源的特征, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.707017 \sim 0.709362$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 0.511787

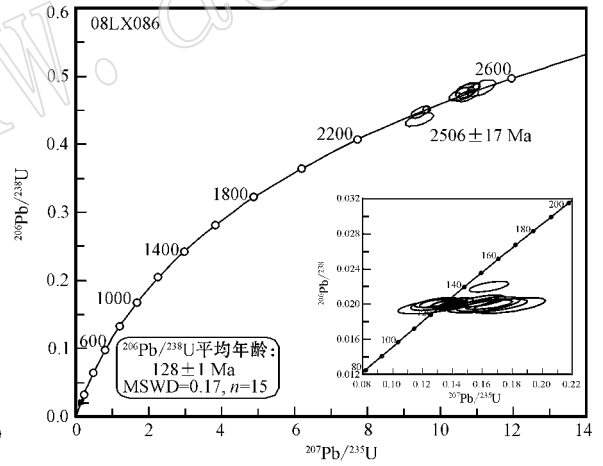
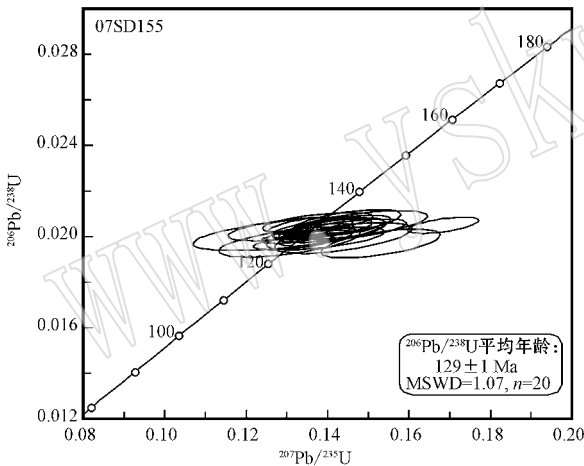


图 5 铜井岩体(07SD155)和银山庄岩体(08LX086)闪长玢岩锆石 U-Pb 年龄

Fig. 5 Zircon U-Pb ages of Tongjing(07SD155) and Yinshanzhuang(08LX086) diorite porphyries

~ 0.512167 ,其 $I_{\text{Sr}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值分别为 $0.706473 \sim 0.708867$ 和 $-15.13 \sim -9.18$,在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) - I_{\text{Sr}}$ 图解(图 6)上 5 个数据点都分布在地幔演化线区域内,显示了幔源特征。与 Xu 等(2004)所研究的沂南闪长岩比较,此次研究的闪长玢岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值略高,而 $I_{\text{Sr}}(t)$ 值明显偏低,显示了亏损地幔物质贡献的增大。

样品的初始 Pb 同位素组成中 ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) 为 $16.917 \sim 17.956$ ($^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) = $15.464 \sim 15.528$, ($^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) = $37.156 \sim 37.883$,放射性成因 Pb 含量较高。在 Pb 同位素组成相关图解(图 7)上在

NHRL(North Hemisphere Reference Line)之上分布,具有总体分散、局部集中的特征,铜井岩体样品落在扬子克拉通的范围,而朝阳岩体和银山庄岩体的样品落在了 EM I 和扬子克拉通范围之间,显示了混合的趋势,说明研究区的 Pb 同位素可能具有两个不同的源区。

3.4 Hf 同位素

沂南铜井闪长玢岩的 Hf 同位素分析结果列于表 5。由表 5 可以看出,铜井闪长玢岩新生锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 $0.000416 \sim 0.003115$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围为 $0.282317 \sim 0.282530$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -13.3

表 3 沂南铜井、朝阳和银山庄闪长玢岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotope compositions of Tongjing, Chaoyang and Yinshanzhuang diorite porphyries

| 样号 | 岩体 | t/Ma | $\omega_B/10^{-6}$ | | $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | $\omega_B/10^{-6}$ | | $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ | $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ |
|---------|-----|--------------------|--------------------|-----|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | | Rb | Sr | | | Sm | Nd | | |
| 07SD078 | 铜井 | 128 | 93.8 | 442 | 0.611 3 | 0.709 027 | 5.34 | 31.10 | 0.103 765 | 0.511 787 |
| 07SD157 | | 128 | 61.3 | 574 | 0.307 4 | 0.707 681 | 4.26 | 21.53 | 0.119 674 | 0.512 051 |
| 08LX084 | 朝阳 | 128 | 50.4 | 651 | 0.224 1 | 0.708 107 | 4.07 | 21.78 | 0.113 155 | 0.512 059 |
| 08LX085 | | 128 | 68.2 | 737 | 0.267 9 | 0.709 362 | 3.79 | 20.29 | 0.113 113 | 0.511 989 |
| 08LX086 | 银山庄 | 128 | 54.5 | 536 | 0.294 2 | 0.707 017 | 3.47 | 17.82 | 0.117 847 | 0.512 167 |
| 样品号 | 岩体 | $I_{\text{Sr}}(t)$ | $I_{\text{Sr}}(t)$ | | $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ | $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ | $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ | T_{DM2}/Ma | | |
| 07SD078 | 铜井 | 0.511 702 | 0.707 880 | | -16.61 | -15.13 | -0.47 | 2.187 | | |
| 07SD157 | | 0.511 953 | 0.707 105 | | -11.46 | -10.23 | -0.39 | 1.783 | | |
| 08LX084 | 朝阳 | 0.511 966 | 0.707 693 | | -9.97 | -11.30 | -0.42 | 1.732 | | |
| 08LX085 | | 0.511 896 | 0.708 867 | | -11.33 | -12.66 | -0.42 | 1.843 | | |
| 08LX086 | 银山庄 | 0.512 071 | 0.706 473 | | -7.93 | -9.18 | -0.40 | 1.565 | | |

表 4 沂南铜井、朝阳和银山庄闪长玢岩 Pb 同位素组成

Table 4 Pb isotope compositions of Tongjing, Chaoyang and Yinshanzhuang diorite porphyries

| 样品号 | t/Ma | 岩体 | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $2\sigma(\text{M}\%)$ | $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $2\sigma(\text{M}\%)$ | $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $2\sigma(\text{M}\%)$ | $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ | $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ | $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ |
|---------|---------------|-----|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 07SD078 | 128 | 铜井 | 18.086 | 0.015 | 15.516 | 0.016 | 38.031 | 0.018 | 17.855 | 15.505 | 37.826 |
| 07SD157 | 129 | | 18.119 | 0.009 | 15.536 | 0.009 | 38.043 | 0.010 | 17.956 | 15.528 | 37.883 |
| 08LX084 | 128 | 朝阳 | 17.397 | 0.009 | 15.487 | 0.009 | 38.256 | 0.009 | 16.917 | 15.464 | 37.156 |
| 08LX085 | 128 | | 17.101 | 0.008 | 15.509 | 0.008 | 37.895 | 0.008 | 17.009 | 15.505 | 37.624 |
| 08LX086 | 128 | 银山庄 | 17.189 | 0.009 | 15.479 | 0.008 | 37.885 | 0.009 | 16.987 | 15.469 | 37.276 |

年龄校正的 U、Th、Pb 含量采用全岩微量元素测定值。

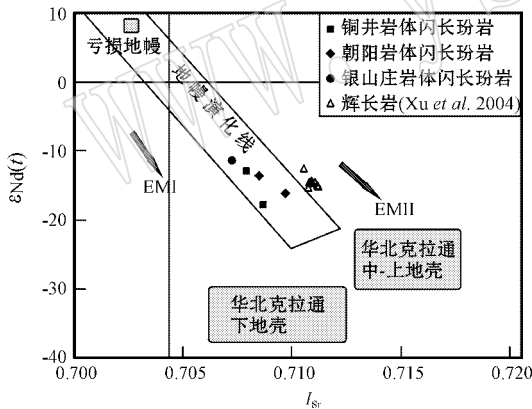
图 6 铜井闪长玢岩微量元素 $I_{\text{Sr}} - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图

Fig. 6 Plot of I_{Sr} versus $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ for Tongjing, Chaoyang and Yinshanzhuang diorite porphyries
DMM 地幔端员引自 Zindler and Har(1986) 华北克拉通下地壳、上地壳范围引自 Jahn 等(1999)
End member of DMM mantle from Zindler and Har(1986); limits of lower crust and upper crust of North China craton from Jahn et al.(1999)

~ -5.6 范围内,主要分布区间 -13 ~ -8,平均值为 -10.3,主要分布区间 -13 ~ -8 对应的 T_{DM2} 为 1.5 ~ 2.0 Ga,与金场矿区产出的闪长玢岩(07SD133,数据另文发表)具有明显不同的 Hf 同位素组成。金场矿区的闪长玢岩 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在

-21 ~ -15 之间(图 8b), T_{DM2} 为 2.1 ~ 2.5 Ga。继承锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 变化范围较小,为 0.000 416 ~ 0.006 70, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.281 308 ~ 0.281 511, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 3.3 ~ 7.6(图 8),对应的 T_{DM2} 为 2.4 ~ 2.8 Ga。

4 讨论

4.1 中生代岩浆活动

鲁西地区中生代岩浆活动主要有两期(王世进等 2009),早期以铜石杂岩体为代表(胡华斌等, 2004),以高钾钙碱性高钾碱性的岩石组合为主,主要发生于 160 ~ 180 Ma,与该区 NW 向断裂早侏罗世的强烈拉张有关,晚期岩浆活动范围较广,生成多种岩石系列和大量的杂岩体,主要发生于 130 ~ 110 Ma,此时由于沂沭断裂及其次级断裂切割地壳至上地幔,引发了钙碱性的辉长质岩浆和壳源的花岗质岩浆活动,反映了强烈伸展环境的地球动力学背景。

研究认为高 $\text{Mg}^\#$ 的鲁西辉石闪长岩起源于拆沉下地壳的部分熔融且在上升过程中与地幔橄辉岩

表 5 沂南铜井闪长岩锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotope compositions of Tongjing diorite porphyry

| 点号 | t/Ma | $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ | $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(c)$ | $\epsilon\text{Hf}(0)$ | $\epsilon\text{Hf}(t)$ | 2σ | $T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$ | T_{DM2} | $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$ |
|---------|---------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------------------|------------------------|-----------|-----------------------------|------------------|---------------------------|
| 07SD155 | | | | | | | | | | | |
| 01 | 126 | 0.023 963 | 0.000 839 | 0.282 366 | 0.282 364 | -14.4 | -11.7 | 0.7 | 1 250 | 1 924 | -0.97 |
| 02 | 129 | 0.073 984 | 0.002 513 | 0.282 389 | 0.282 387 | -13.6 | -11.0 | 0.8 | 1 275 | 1 880 | -0.92 |
| 03 | 130 | 0.051 044 | 0.001 660 | 0.282 411 | 0.282 409 | -12.8 | -10.1 | 0.8 | 1 213 | 1 825 | -0.95 |
| 04 | 127 | 0.023 002 | 0.000 771 | 0.282 410 | 0.282 408 | -12.9 | -10.2 | 0.9 | 1 187 | 1 825 | -0.98 |
| 05 | 130 | 0.056 064 | 0.001 835 | 0.282 351 | 0.282 349 | -15.0 | -12.3 | 0.8 | 1 306 | 1 961 | -0.94 |
| 06 | 127 | 0.058 042 | 0.001 845 | 0.282 405 | 0.282 403 | -13.1 | -10.4 | 0.8 | 1 229 | 1 842 | -0.94 |
| 07 | 130 | 0.059 969 | 0.001 955 | 0.282 325 | 0.282 323 | -15.9 | -13.2 | 0.9 | 1 346 | 2 017 | -0.94 |
| 08 | 126 | 0.026 577 | 0.000 875 | 0.282 378 | 0.282 376 | -14.0 | -11.3 | 0.7 | 1 234 | 1 896 | -0.97 |
| 09 | 131 | 0.092 613 | 0.003 115 | 0.282 416 | 0.282 414 | -12.7 | -10.1 | 0.9 | 1 256 | 1 822 | -0.91 |
| 10 | 131 | 0.037 270 | 0.001 209 | 0.282 410 | 0.282 408 | -12.9 | -10.1 | 0.8 | 1 201 | 1 825 | -0.96 |
| 11 | 132 | 0.040 905 | 0.001 372 | 0.282 356 | 0.282 354 | -14.8 | -12.0 | 0.8 | 1 282 | 1 945 | -0.96 |
| 12 | 131 | 0.045 448 | 0.001 471 | 0.282 409 | 0.282 407 | -12.9 | -10.2 | 0.8 | 1 210 | 1 828 | -0.96 |
| 13 | 132 | 0.049 024 | 0.001 640 | 0.282 442 | 0.282 440 | -11.7 | -9.0 | 0.7 | 1 168 | 1 755 | -0.95 |
| 14 | 129 | 0.054 316 | 0.001 830 | 0.282 394 | 0.282 392 | -13.4 | -10.8 | 0.8 | 1 243 | 1 865 | -0.94 |
| 15 | 131 | 0.064 058 | 0.002 128 | 0.282 451 | 0.282 449 | -11.4 | -8.7 | 0.8 | 1 171 | 1 738 | -0.94 |
| 16 | 130 | 0.045 019 | 0.001 492 | 0.282 398 | 0.282 396 | -13.3 | -10.6 | 0.8 | 1 227 | 1 854 | -0.96 |
| 17 | 130 | 0.034 808 | 0.001 156 | 0.282 379 | 0.282 377 | -14.0 | -11.2 | 0.7 | 1 243 | 1 895 | -0.97 |
| 18 | 126 | 0.052 707 | 0.001 711 | 0.282 366 | 0.282 364 | -14.4 | -11.8 | 0.8 | 1 280 | 1 928 | -0.95 |
| 19 | 127 | 0.068 019 | 0.002 170 | 0.282 386 | 0.282 384 | -13.7 | -11.1 | 0.8 | 1 266 | 1 884 | -0.93 |
| 20 | 128 | 0.064 322 | 0.002 140 | 0.282 418 | 0.282 416 | -12.6 | -10.0 | 0.7 | 1 219 | 1 814 | -0.94 |
| 08LX086 | | | | | | | | | | | |
| 01 | 127 | 0.042 144 | 0.001 590 | 0.282 375 | 0.282 373 | -14.1 | -11.5 | 1.4 | 1 262 | 1 906 | -0.95 |
| 02 | 128 | 0.044 743 | 0.001 744 | 0.282 456 | 0.282 454 | -11.2 | -8.6 | 1.4 | 1 152 | 1 727 | -0.95 |
| 03 | 129 | 0.047 494 | 0.001 660 | 0.282 438 | 0.282 436 | -11.9 | -9.2 | 1.4 | 1 174 | 1 765 | -0.95 |
| 04 | 127 | 0.017 924 | 0.000 701 | 0.282 494 | 0.282 492 | -9.9 | -7.2 | 1.2 | 1 068 | 1 639 | -0.98 |
| 05 | 126 | 0.027 597 | 0.001 132 | 0.282 405 | 0.282 403 | -13.0 | -10.4 | 2.0 | 1 205 | 1 838 | -0.97 |
| 06 | 128 | 0.033 450 | 0.001 193 | 0.282 358 | 0.282 356 | -14.7 | -12.0 | 0.9 | 1 274 | 1 942 | -0.96 |
| 07 | 128 | 0.041 981 | 0.001 451 | 0.282 512 | 0.282 510 | -9.3 | -6.6 | 1.0 | 1 063 | 1 601 | -0.96 |
| 08 | 126 | 0.090 096 | 0.002 906 | 0.282 427 | 0.282 425 | -12.3 | -9.7 | 1.0 | 1 232 | 1 798 | -0.91 |
| 09 | 2 378 | 0.018 340 | 0.000 670 | 0.281 513 | 0.281 511 | -44.6 | 7.6 | 1.1 | 2 416 | 2 443 | -0.98 |
| 10 | 128 | 0.027 960 | 0.001 042 | 0.282 414 | 0.282 412 | -12.7 | -10.0 | 1.0 | 1 189 | 1 817 | -0.97 |
| 11 | 126 | 0.031 935 | 0.001 162 | 0.282 465 | 0.282 463 | -10.9 | -8.3 | 1.4 | 1 121 | 1 705 | -0.96 |
| 12 | 2 500 | 0.011 354 | 0.000 416 | 0.281 381 | 0.281 379 | -49.3 | 6.1 | 0.9 | 2 579 | 2 633 | -0.99 |
| 13 | 149 | 0.026 251 | 0.000 933 | 0.282 378 | 0.282 376 | -14.0 | -10.8 | 0.7 | 1 236 | 1 884 | -0.97 |
| 14 | 139 | 0.014 432 | 0.000 628 | 0.282 356 | 0.282 354 | -14.8 | -11.8 | 0.9 | 1 258 | 1 938 | -0.98 |
| 15 | 2 539 | 0.018 938 | 0.000 667 | 0.281 433 | 0.281 431 | -47.4 | 8.4 | 0.8 | 2 525 | 2 515 | -0.98 |
| 16 | 2 491 | 0.012 971 | 0.000 473 | 0.281 310 | 0.281 308 | -51.8 | 3.3 | 0.7 | 2 678 | 2 808 | -0.99 |
| 17 | 129 | 0.010 496 | 0.000 428 | 0.282 319 | 0.282 317 | -16.1 | -13.3 | 0.9 | 1 302 | 2 025 | -0.99 |
| 18 | 128 | 0.034 378 | 0.001 199 | 0.282 328 | 0.282 326 | -15.8 | -13.1 | 0.9 | 1 315 | 2 008 | -0.96 |
| 19 | 128 | 0.028 078 | 0.001 103 | 0.282 488 | 0.282 486 | -10.1 | -7.4 | 0.9 | 1 088 | 1 653 | -0.97 |
| 20 | 140 | 0.042 658 | 0.001 644 | 0.282 532 | 0.282 530 | -8.5 | -5.6 | 1.0 | 1 040 | 1 550 | -0.95 |
| 21 | 130 | 0.022 234 | 0.000 925 | 0.282 357 | 0.282 355 | -14.7 | -12.0 | 1.9 | 1 266 | 1 942 | -0.97 |
| 22 | 127 | 0.030 829 | 0.001 148 | 0.282 466 | 0.282 464 | -10.9 | -8.2 | 0.8 | 1 119 | 1 702 | -0.97 |

发生过反应(许文良等 2006; Xu *et al.*, 2008, 2010)。沂南铜井闪长岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 128~129 Ma, 表明岩体的侵位结晶年龄为

早白垩世, 与鲁西广泛分布的闪长质岩石侵位年龄基本一致(杨承海等 2006, 2008; 杨承海 2006), 略早于附近的青山组火山岩年龄(邱检生等 2001), 同

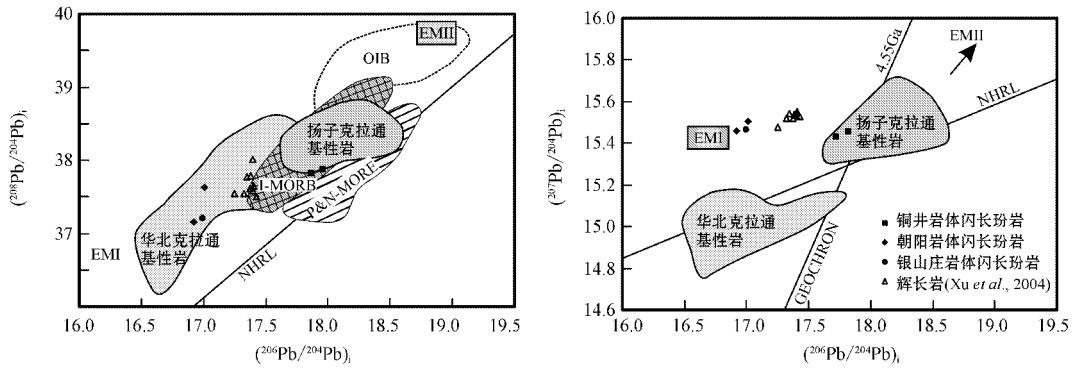


图 7 铜井、朝阳和银山庄闪长玢岩初始 Pb 同位素组成相关图

Fig. 7 Initial $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ for Tongjing, Chaoyang and Yinshanzhuang diorite porphyries. I-MORB and P&N-MORB data引自 Barry 和 Kent (1998); OIB 数据引自 Zou 等 (2000); NHRL 和 4.55 Ga 演化线数据引自 Hart (1984); 华北克拉通和扬子克拉通基性岩数据引自 Yan 等 (2003) 和 Liu 等 (2008b)

Data of I-MORB and P&N-MORB from Barry and Kent (1998); OIB data from Zou *et al.* (2000); data of NHRL and 4.55 Ga evolution curve from Hart (1984); data of badic rocks in North China craton and Yangtze craton from Yan *et al.* (2003) and Liu *et al.* (2008b)

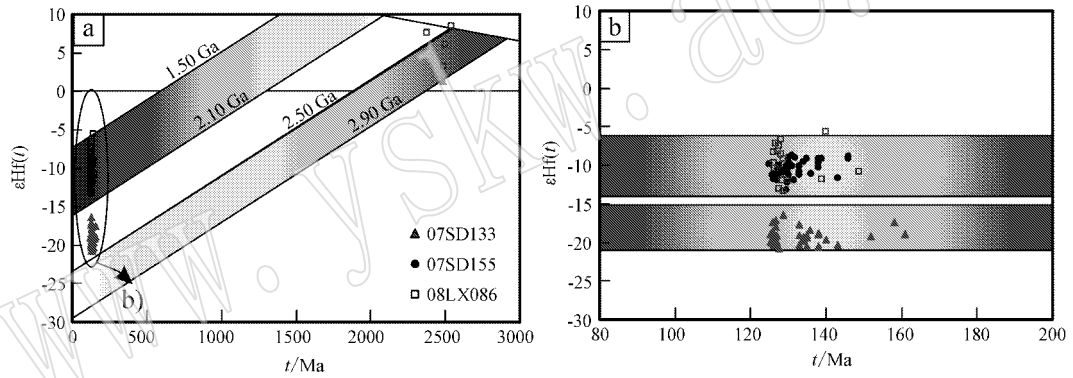


图 8 铜井闪长玢岩 (07SD155 和 08LX086) 和金场矿区闪长玢岩 (07SD133) 锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值与年龄相关图

Fig. 8 Plot of zircon $\epsilon\text{Hf}(t)$ versus U-Pb age of diorite porphyries in Tongjing (07SD155 and 08LX086) and Jinchang ore district (07SD133)

图中阴影表示 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值的主要区间

Shadow in the diagram represents the main region of $\epsilon\text{Hf}(t)$ values

时与华北克拉通东部胶东地区中生代侵入岩的锆石定年结果相近 (罗振宽等, 2002), 说明鲁西与胶东地区的中生代岩浆活动可能具有相似的背景, 为华北克拉通中生代陆壳加厚之后出现的加厚岩石圈的拆沉作用 (许文良等, 2006)。

4.2 岩石成因与源区特征

沂南铜井闪长玢岩具有高的 I_{Sr} 和低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值, 强烈亏损 Nb、Ta 等高场强元素, 具有明显壳源的地球化学特征。但是其具有较高的 $\text{Mg}^\#$ (55~67), 富 Na (Na/K 值为 0.93~4.46), 又显示了岩石圈地幔的属性。对鲁西早白垩世高 Mg 闪长岩研究显示, 其岩浆源区为岩石圈地幔 (许文良等, 1993,

2003a, 2003b; Zhang *et al.*, 2002; 杨承海等, 2006), 其壳源的地球化学特征说明在源区存在陆壳物质的混染作用 (Zhang, 2009), 造成了同位素的富集, 而陆壳物质为古老的地壳物质而非俯冲大洋板片 (Chen and Zhou, 2005; Defant and Drummond, 1990), 因此可以认为铜井是闪长玢岩起源于富集岩石圈地幔, 样品锆石中含有新太古代继承锆石表明了岩浆源区有华北克拉通古老的地壳物质参与。

铜井闪长玢岩的 Sr-Nd 组成落入地幔演化趋势内, 沿 EM I 到 EM II 型地幔演化线分布 (图 6), 指示了其 EM I 和 EM II 型地幔混合的特征。Pb 同位素组成被认为是一个区分扬子板块基底与华北克拉通

基底较好的地球化学标志。扬子克拉通基底的 Pb 同位素组成均高于华北克拉通($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 17.80$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 15.50$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 38.00$) (张理刚, 1995; 李曙光等, 2002)。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素组成图解中作为对比的朝阳岩体和银山岩体样品中完全落入华北基性岩范围内, 而铜井岩体的样品则落在了扬子克拉通范围内(图7), 暗示了其 Pb 的多源性。其 Sr-Nd、Pb 同位素组成与沂南辉长岩(Xu *et al.*, 2004)有一定的差异, 具有多端员的特征, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值高于与徐义刚等(2007)确定的富集岩石圈地幔值(-16), 说明源区有相对亏损的地幔端员的混合(徐义刚等, 2007)。沂南辉长岩均被认为来源于受扬子俯冲板片交代的岩石圈地幔(Zhang *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2004), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值高于华北基性岩, 可能受到了扬子克拉通俯冲板片的改造作用。杨承海等(2006, 2008)研究显示鲁西早白垩世高 Mg 闪长岩 Sr-Nd-Pb 同位素的空间变化具有自南东向北西方向 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值降低、 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值升高、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 初始比值降低的趋势, 与扬子克拉通沿北西方向俯冲于华北克拉通之下的构造模式相吻合。结合此次研究结果, 可以认为岩浆源区有扬子克拉通物质的贡献, 而该地区中生代富集岩石圈地幔源区的形成与陆壳物质对早期岩石圈地幔的改造有关, 而陆壳物质可能主要为华北下地壳和俯冲的扬子陆壳。

对比金场矿区的闪长玢岩(未发表数据), 研究区闪长玢岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值较高, 说明了该地区闪长玢岩源区存在不均一性, 金场矿区闪长玢岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-20~-15)与研究区下地壳 Hf 同位素组成相似(徐义刚等, 2007), 暗示了古老下地壳物质的参与程度的加强。综上, 认为沂南铜井闪长玢岩来源于富集岩石圈地幔, 富集岩石圈地幔的形成与华北下地壳物质对早期岩石圈长期的改造以及三叠纪扬子板块的深俯冲对岩石圈地幔的改造有关。

因此, 可以把沂南铜井岩体闪长玢岩的成因概括为: 三叠纪扬子陆块向华北陆块的俯冲碰撞引起华北东南部岩石圈的不稳定(张宏福, 2009), 俯冲的扬子陆壳物质熔融形成的富硅熔体与上覆的地幔橄榄岩的相互作用引起该地区岩石圈地幔性质的改变(张宏福等, 2005, 2006; 张宏福, 2009); 这种富集的岩石圈地幔闪长质岩浆在晚中生代多种因素(郟庐断裂带由走滑运动向伸展运动的转换、白垩纪以来太平洋板块向西俯冲造成的弧后扩张等)作用下, 沿

深切的郟庐断裂带上涌就位, 使该时期郟庐断裂带邻近地区中生代闪长质岩石普遍存在扬子陆壳的痕迹, 相对亏损的地幔物质的出现说明该地区岩石圈减薄开始进入转折期, 岩石圈减至最薄, 甚至在一些地区已全部消失, 从而导致软流圈与地壳直接接触。

4.3 岩浆活动与成矿作用

华北东部中生代强烈的岩浆活动和成矿作用是对同时期构造体制转折和岩石圈减薄的直接响应, 在胶东地区引发了大量的花岗质岩浆活动, 而花岗质岩浆具有很强的成矿潜力, 它不仅能作为流体和金属的来源和携带体, 还能在运移过程中萃取围岩和地层中的成矿元素, 因此胶东地区中生代大规模成矿作用与花岗岩关系密切。鲁西地区广泛发育中生代闪长质岩石, 其源区与花岗岩不同, 主要为地幔来源, 既有富集地幔来源, 又有少量亏损地幔物质, 源区的不同可能是造成它们成矿规模差别的主要因素之一。

鲁西地区一些金矿床具有 IRGD 矿床(Intrusion-Related Gold Deposits)的特征。对 IRGD 矿床研究显示, 与成矿有关的侵入岩主要起源于古老大陆地壳的钙碱性花岗质岩体, 但一般都有碱性闪长质岩体的时空伴生, 基性碱性岩浆可以为钙碱性岩浆提供挥发组分和金属, 也可以作为这类岩浆的挥发组分分析和金属迁移的催化剂, 基性岩在 IRGD 成矿作用中具有十分主要的作用。研究区也发育有同时期的壳源花岗岩(未发表数据), 铜井岩体也发育有规模较大的夕卡岩型铜金矿床, 成矿与闪长质岩体关系密切, 可能属于 IRGD 矿床, 可尝试利用 IRGD 矿床相关理论和方法指导下一步找矿勘察工作。

5 结论

(1) 沂南铜井闪长玢岩岩体侵位时间为 128~129 Ma, 与鲁西广泛分布的闪长质岩石侵位年龄基本一致。

(2) 沂南铜井闪长玢岩主要来源于受到改造的富集岩石圈地幔, 还有古老下地壳物质以及亏损地幔物质的参与。

(3) 岩体源区差异可能是导致鲁西和胶东地区成矿规模差异的主要因素之一, 闪长质岩体在成矿过程中扮演重要的角色。

致谢 该项目的野外工作得到了山东沂南金矿

相关领导和工作人员的支持和帮助,实验工作得到了地质过程与矿产资源国家重点实验室、岩石圈演化国家重点实验室及中国科学院矿产资源研究重点实验室相关实验人员的帮助和指导,二位匿名审稿人对本文提出了非常宝贵的修改意见,在此一并表示诚挚谢意。

References

- Barry T L and Kent R W. 1998. Cenozoic magmatism in Mongolia and the origin of central and east Asian basalts [A]. Flower M F J , Chung S L , Lo C H , *et al.* Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia. Geodynamics Series [C]. American Geophysical Union , 27 : 347~364.
- Chen L H and Zhou X H. 2005. Subduction-related metasomatism in the thinning lithosphere : evidence from a composite dunite-orthopyroxene xenolith entrained in Mesozoic Laiwu high-Mg diorite , North China Craton [J]. *Geochem Geophys Geosyst* , 6 , doi : 10. 1029/2005GC 000938.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature* , 347 (18) : 662~665.
- Dong Shuyi. 2008. Metallogensis , metallogenic laws and metallogenic prediction of the Yinan gold deposit , Shandong Province. PhD thesis [D]. Beijing : China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Gu Xuexiang , Dong Shuyi , Liu Li , *et al.* 2008b. Ore-forming conditions and significance of unconformity in the mineralization of the Yinan Au-Cu-Fe deposit , Shandong , China [J]. *Bulletin of Mineralogy , Petrology and Geochemistry* , 27 (3) : 254~268 (in Chinese with English abstract).
- Gu Xuexiang , Dong Shuyi , Wang Yinhong , *et al.* 2008a. An example of endogenic metallic ore formation controlled by unconformity : Yinan Au-Cu-Fe Deposit , Shandong [J]. *Geoscience* , 22 (2) : 151~161 (in Chinese).
- Hart S R. 1984. A large-scale isotope anomaly in the Southern Hemisphere mantle [J]. *Nature* , 309 : 753~757.
- Hu Huabin , Mao Jingwen , Liu Dunyi , *et al.* 2004. The shrimp age of zircon from tongshi magmatic complex in western Shandong and its geological implications [J]. *Earth Science Frontiers* , 11 (2) : 453~460 (in Chinese).
- Hu Z C , Gao S , Liu Y S , *et al.* 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* , 23 : 1 093~1 101.
- Jahn B M , Wu F Y , Lo C H , *et al.* 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 [J]. *Chem. Geol.* , 157 : 119~146.
- Jin Zhenkui , Liu Zerong and Shi Zhanzhong. 1999. The fault structure type and mechanism in West Shandong [J]. *Journal of the University of Petroleum , China* , 23 (5) : 1~5 (in Chinese with English abstract).
- Li Ke. 2009. Isotope geochemistry of Yí nan Au-Cu-Fe deposit , Shandong [D]. Beijing : China University of Geosciences (Beijing) [Master thesis] (in Chinese with English abstract).
- Li Shuguang and Yang Wei. 2002. Decoupling between suture zone in the deep of Dabie orogenic belt and on the surface , and The model of lithospheric wedge Continental collision : Sr-Nd-Pb isotopic evidence of Mesozoic mantle-derived rocks [J]. *Chinese Science Bulletin* , 47 (24) : 1 898~1 905 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jingqian , Tan Dongjuan and Jin Ye. 1996. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of Mesozoic igneous activities in western Shandong [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica* , 15 (3) : 213~220 (in Chinese with English abstract).
- Liu Li , Gu Xuexiang , Li Baohua , *et al.* 2009. The characteristics of fluid inclusions from the Yinan gold deposit , Shandong Province and their geological significance [J]. *Earth and Environment* , 37 (1) : 28~36 (in Chinese with English abstract).
- Liu S , Hu R Z , Gao S , *et al.* 2008b. U-Pb zircon age , geochemical and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic constraints on age and origin of alkaline intrusions and associated mafic dikes from Sulu orogenic belt , Eastern China [J]. *Lithos* , 106 : 365~379.
- Liu Y S , Hu Z C , Gao S , *et al.* 2008a. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology* , 257 : 34~43.
- Liu Y , Gao S , Hu Z , *et al.* 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen : U-Pb dating , Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology* , 51 : 537~571.
- Liu Y , Hu Z , Zong K , *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin* , 55 (15) : 1 535~1 545.
- Ludwig K R. 2003. User 's Manual for Isoplot 3.0 : A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center. Special Publication , 4 : 1~71.
- Luo Zhenkuan and Miao Laicheng. 2008. Granites and Gold Deposits in Zhaolai Area , Jiaodong [M]. Beijing : Metallurgy Industry Press , (in Chinese).
- Qiu Jiansheng , Wang Dezi , Luo Qinghua , *et al.* 2001. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Dating for volcanic rocks of Qingshan formation in Jiaolai Basin , Eastern Shandong province—A Case study of the Fenlingshan volcanic apparatus in Wulian county [J]. *Geological Journal of China Universities* , 7 (3) : 351~355 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shijin , Zhang Chengji , Yang Enxiu , *et al.* 2009. Division of Mesozoic intrusive stages in Luxi area [J]. *Land and Resources of Shandong* , 25 (2) : 18~23 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L , Hergt J M , Gao S , *et al.* 2008. Interaction of adakitic melt-peridotite : Implications for the high-Mg[#] signature of Mesozoic adakitic rocks in the eastern North China Craton [J]. *Earth and Planetary Science Letters* , 265 (1~2) : 123~137.

- Xu Wenliang, Wang Dongyan, Gao Shan, *et al.* 2003a. Discovery of dunite and pyroxenite xenoliths in Mesozoic diorite at Jinling, western Shandong and its significance [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (15): 1 599~1 603.
- Xu Wenliang, Wang Dongyan, Wang Qinghai, *et al.* 2003b. Petrology and geochemistry of two types of mantle-derived xenoliths in Mesozoic diorite from western Shandong province [J]. Acta Petrologica Sinica, 19(4): 623~636 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Yang Chenghai, Yang Debin, *et al.* 2006. Mesozoic high-Mg diorites in eastern North China craton: constraints on the mechanism of lithospheric thinning [J]. Earth Science Frontiers, 13 (2): 120~129 (in Chinese with English abstract).
- Xu W L, Yang D B, Gao S, *et al.* 2010. Geochemistry of peridotite xenoliths in Early Cretaceous high-Mg[#] diorites from the Central Orogenic Block of the North China Craton: The nature of Mesozoic lithospheric mantle and constraints on lithospheric thinning [J]. Chemical Geology, 270(1~4): 257~273.
- Xu Wenliang, Yuan Chao, Chi Xiaoguo, *et al.* 1993. Mesozoic Dioritic Rocks and Deep-Source Xenoliths in the Central North China [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Xu Y G, Huang X L and Ma J L. 2004. Crust-mantle interaction during the tectono-thermal reactivation of the North China craton: constraints from SHRIMP zircon U-Pb chronology and geochemistry of Mesozoic plutons from western Shandong [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 147: 750~767.
- Xu Yigang, Wu Xiangyang, Luo Zhenyu, *et al.* 2007. Zircon Hf isotope compositions of Middle Jurassic-Early Cretaceous intrusions in Shandong Province and its implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 307~316 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chenghai. 2006. Chronology and Geochemistry of Early Cretaceous High-Mg Diorites in Western Shandong: Constraints on Lithospheric Evolution of the North China Craton [D]. Jilin University PhD Thesis (in Chinese with English abstract).
- Yang Chenghai, Xu Wenliang, Yang Debin, *et al.* 2006. Petrogenesis of the Mesozoic high-Mg diorites in west Shandong: Evidence from chronology and petro-geochemistry [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 31(1): 81~92 (in Chinese with English abstract).
- Yang Chenghai, Xu Wenliang, Yang Debin, *et al.* 2008. Petrogenesis of the diorite-diorite in west Shandong: Evidence from chronology and petro-geochemistry [J]. Science in China (series D), 38(1): 44~55 (in Chinese).
- Yan J, Chen J F, Yu G, *et al.* 2003. Pb isotopic characteristics of Late Mesozoic mafic rocks from the Lower Yangtze Region: evidence for enriched mantle [J]. Geol. J. China Univ., 9: 195~206.
- Zhang H F. 2009. Peridotite-melt interaction: a key point for the destruction of cratonic lithospheric mantle. Chinese Sci Bull, 54, doi: 10.1007/s11434-009-0084-8.
- Zhang H F, Sun M, Zhou X H, *et al.* 2002. Mesozoic lithosphere destruction beneath the North China craton: evidence from major, trace element, and Sr-Nd-Pb isotope studies of Fangcheng basalts [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 144: 241~253.
- Zhang Hongfu, Ying Jifeng, Tang Yanjie, *et al.* 2006. Heterogeneity of Mesozoic and Cenozoic lithospheric mantle beneath the eastern North China Craton: evidence from olivine compositional mapping [J]. Acta Petrologica Sinica, 22(9): 2 279~2 288 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu, Zhou Xinhua, Fan Weiming, *et al.* 2005. Nature, composition, enrichment processes and its mechanism of the Mesozoic lithospheric mantle beneath the southeastern North China Craton [J]. Acta Petrologica Sinica, 21(4): 1 271~1 280 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1995. Geology of Lithospheric Blocks in East Asia: the Isotope Geochemistry and Dynamics of Upper Mantle, Basement and Granitoid [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics [J]. Annu. Rev. Earth Planet Sci., 14: 493~571.
- Zou H B, Zindler A, Xu X S, *et al.* 2000. Major, trace element, and Nd, Sr and Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations, and tectonic significance [J]. Chem. Geol., 171: 33~47.

附中文参考文献

- 董树义. 2008. 山东沂南金矿床成因与成矿规律和成矿预测(博士论文) [D]. 北京: 中国地质大学.
- 顾雪祥, 董树义, 刘 丽, 等. 2008b. 山东沂南金-铜-铁矿床成矿条件分析——兼论不整合面的控矿作用 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(3): 254~268.
- 顾雪祥, 董树义, 王银宏, 等. 2008a. 不整合面控制内生金属成矿的新实例: 山东沂南金铜铁矿床 [J]. 现代地质, 22(2): 151~161.
- 胡华斌, 毛景文, 刘敦一, 等. 2004. 鲁西铜石岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. 地学前缘, 11(2): 453~460.
- 金振奎, 刘泽容, 石占中. 1999. 鲁西地区断裂构造类型及其形成机制 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 23(5): 1~5.
- 李 科. 2009. 山东沂南金铜铁矿床同位素地球化学研究(硕士论文) [D]. 北京: 中国地质大学.
- 李曙光, 杨 蔚. 2002. 大别造山带深部地缝合线与地表地缝合线的解耦及大陆碰撞岩石圈楔入模型: 中生代幔源岩浆 Sr-Nd-Pb 同位素证据 [J]. 科学通报, 47(24): 1 898~1 905.
- 林景仟, 谭东娟, 金 焯. 1996. 鲁西地区中生代火成活动的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄 [J]. 岩石矿物学杂志, 15(3): 213~220.
- 刘 丽, 顾雪祥, 李葆华, 等. 2009. 山东沂南金矿床流体包裹体特征及地质意义 [J]. 地球与环境, 37(1): 28~36.
- 罗镇宽, 苗来成. 2002. 胶东招徕地区花岗岩与金矿床 [M]. 北京: 冶金工业出版社.
- 邱检生, 王德滋, 罗清华, 等. 2001. 鲁东胶莱盆地青山组火山岩的 ⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年——以五莲分岭山火山机构为例 [J]. 高校地质学报, 7(3): 351~355.
- 王世进, 张成基, 杨恩秀, 等. 2009. 鲁西地区中生代侵入岩期次划分 [J]. 山东国土资源, 25(2): 18~23.
- 许文良, 王冬艳, 高 山, 等. 2003a. 鲁西中生代金岭闪长岩中纯橄

- 岩和辉石岩包体的发现及其意义[J]. 科学通报, 48(8): 863~868.
- 许文良, 王冬艳, 王清海, 等. 2003b. 鲁西中生代闪长岩中两类幔源捕虏体的岩石学和地球化学[J]. 岩石学报, 19(4): 623~636.
- 许文良, 杨承海, 杨德彬, 等. 2006. 华北克拉通东部中生代高 Mg 闪长岩——对岩石圈减薄机制的制约[J]. 地学前缘, 13: 120~129.
- 许文良, 袁超, 迟效国, 等. 1993. 华北地台中部中生代闪长质岩石及深源岩石包体[M]. 北京: 地质出版社, 1~164.
- 徐义刚, 巫祥阳, 罗震宇, 等. 2007. 山东中侏罗世—早白垩世侵入岩的锆石 Hf 同位素组成及其意义[J]. 岩石学报, 23(2): 307~316.
- 杨承海. 2006. 鲁西中生代高镁闪长岩的年代学与地球化学: 对华北克拉通岩石圈演化的制约[D]. 吉林大学.
- 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等. 2006. 鲁西中生代高 Mg 闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 81~92.
- 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等. 2008. 鲁西上峪辉长-闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据[J]. 中国科学(D)辑, 38(1): 44~55.
- 张理刚. 1995. 东亚岩石圈块体地质——上地幔、基底和花岗岩同位素地球化学及其动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1~252.
- 张宏福. 2009. 橄榄岩-熔体相互作用: 克拉通型岩石圈地幔能够被破坏之关键[J]. 科学通报, 54: 2008~2026.
- 张宏福, 英基丰, 汤艳杰, 等. 2006. 华北东部中、新生代岩石圈地幔的不均一性: 来自橄榄石的组成填图结果[J]. 岩石学报, 22(9): 2279~2288.
- 张宏福, 周新华, 范蔚若, 等. 2005. 华北东南部中生代岩石圈地幔性质、组成、富集过程及其形成机理[J]. 岩石学报, 21(4): 1271~1280.

www.yskw.ac.cn