

山西临县紫金山碱性杂岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究

王亚莹¹, 蔡剑辉¹, 阎国翰², 周伟伟³, 闫志娇³

(1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用和资源评价重点实验室, 北京 100037;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

3. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 山西临县紫金山碱性杂岩体位于华北克拉通内鄂尔多斯盆地东缘, 为汾河富碱侵入岩带中最典型的碱性岩体。岩体主要岩石类型为二长岩、辉石正长岩、霓霞钛辉岩、暗霞正长岩、霞石正长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩。依据 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果, 结合前人的测年数据, 确定岩体形成于 138.7~125.0 Ma, 系早白垩世碱性岩浆事件的产物。该套岩石高钾、富碱、贫钙和镁, 属于碱性岩石系列。稀土元素总量高, 轻、重稀土元素分馏明显, Eu 异常不显著。微量元素富集 LREE 和 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素, 亏损 HREE 和 Th、U、Nb、Ta、Ti 等高场强元素。同位素分析结果显示全岩 I_{Sr} 为 0.704 228~0.706 313, $\epsilon Nd(t)$ 变化于 -12.3~-0.5 之间。锆石的 $\epsilon Hf(t)$ 为 -20.2~-16.4, 二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 2.22~2.46 Ga。推测紫金山碱性杂岩体形成于华北克拉通中生代构造体制转折后的伸展背景下, 因构造体制转换产生的强大应力作用导致吕梁地区软流圈多次上涌, 随后软流圈、岩石圈地幔和地下壳物质部分熔融产生的岩浆发生多次不同比例的混合, 所形成的各期混合岩浆分批上侵定位在地壳浅部环境, 从而形成紫金山碱性杂岩体。汾河富碱侵入岩带形成时间集中于 138.7~125.0 Ma, 是华北克拉通中西部岩石圈破坏事件的岩浆活动证据, 其与华北克拉通东部地区几乎同时发生岩石圈减薄作用。因构造体制转换产生强大应力作用导致构造薄弱地区软流圈上涌, 进而引起大规模的壳-幔岩浆相互作用, 可能为华北克拉通中西部地区中生代破坏的主要原因, 并且由北至南壳幔岩浆相互作用中幔源岩浆逐渐减少。

关键词: 紫金山; 碱性杂岩; U-Pb 年龄; Sr-Nd-Hf 同位素; 华北克拉通; 岩石圈减薄

中图分类号: P588.15; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)06-1052-21

SHRIMP zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics of the Zijinshan alkaline complex in Linxian County, Shanxi Province

WANG Ya-ying¹, CAI Jian-hui¹, YAN Guo-han², ZHOU Wei-wei³ and YAN Zhi-jiao³

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences; MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University; Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Department of Geoscience and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Located on the east margin of the Ordos Basin in the North China Craton, the Zijinshan alkaline complex, as a typical rock body in the Fenhe alkali-rich intrusive rock zone, consists of monzonite, diopside syenite, melteigite, malignite, nepheline syenite, pseudoleucite porphyry and trachyte porphyry. The results of

收稿日期: 2014-02-17; 修订日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40773041, 41073047)

作者简介: 王亚莹(1989-), 女, 汉族, 硕士研究生, 主要从事碱性岩研究, E-mail: iii329@126.com; 通讯作者: 蔡剑辉(1966-), 女, 汉族, 博士, 研究员, 主要从事岩石学、矿物学研究, E-mail: caijh_cags@163.com

SHRIMP zircon U-Pb dating, combined with previous researches, suggest that the Zijinshan complex was formed between 138.7 Ma and 125.0 Ma, thus belonging to the early Cretaceous epoch. The Zijinshan complex shows high K, enrichment of alkali, and low Ca and Mg content. These rocks all show high REE content, LREE enrichment, HREE depletion and no obvious Eu anomaly. In the PM-normalized diagram, trace element pattern exhibits enrichment of LILE (Rb, Ba, K, Sr) and LREE and relative depletion of HFSE (Th, U, Nb, Ta, Ti). Whole rocks Sr-Nd isotopic compositions are characterized by the data $I_{Sr} = 0.704\ 228 \sim 0.706\ 313$ and $\epsilon_{Nd}(t) = -12.3 \sim -0.5$. The monzonite shows a large variation in zircon Hf isotopic compositions with $\epsilon_{Hf}(t)$ being $-20.2 \sim -16.4$ and two-stage model ages from 2.22 Ga to 2.46 Ga. It can be inferred that the Zijinshan complex was formed in an extension setting after Mesozoic tectonic regime inversion in the North China Craton. Continuous athenospheric upwelling caused by the strong stress during tectonic regime inversion resulted in several times of mixing of melts from asthenosphere mantle, lithosphere mantle and lower crust in different proportions, and then mixed magma of each episode migrated upward to the shallow area of the crust to form the Zijinshan complex. The Fenhe alkali-rich intrusive rock zone was formed between 138.7 Ma and 125.0 Ma. It served as the magma evidence of the destruction in the middle and west parts of the North China Craton, which happened almost at the same time as the destruction in the east part. The athenospheric upwelling in tectonic weak areas caused by the strong stress during tectonic regime inversion led to the large-scale crust-mantle interaction, which might have been the principal mechanism of the Mesozoic destruction in the middle and west part of the North China Craton, and the mantle-derived magma in the crust-mantle interaction was gradually reduced from north to south.

Key words: Zijinshan; alkaline complex; U-Pb age; Sr-Nd-Hf isotope; North China Craton; lithosphere thinning

华北克拉通破坏是近年来中国东部岩石圈研究的热点。从古生代至新生代,华北克拉通岩石圈不仅发生了巨厚减薄,而且其性质和热状态也发生了重大转变(张宏福等, 2005; 周新华, 2006; 吴福元等, 2008; 翟明国, 2008; 嵇少丞等, 2008)。大规模、强烈的岩浆活动是克拉通破坏作用的一个重要响应,故目前华北克拉通破坏的研究主要集中于中生代岩浆活动频繁的东部地区,而华北克拉通西部地区则因中生代岩浆活动相对较少而研究程度较低。碱性岩具有来源深(与幔源岩浆密切相关)、产于拉张型构造环境的特点,是研究幔源岩浆活动、壳幔相互作用进而探讨地球深部过程的重要手段(Eby, 1992; 赵振华等, 1994; 周玲棣等, 1994, 1996; Hong *et al.*, 1996; Vorlkert *et al.*, 2000; 阎国翰等, 2008)。华北克拉通内部鄂尔多斯盆地东缘存在若干燕山期碱性-偏碱性岩体,它们位于华北克拉通中西部过渡带,并且呈线状排列组成北北东向岩带,被前人称为汾河富碱侵入岩带(阎国翰等, 1989),其中典型岩体由南至北包括临汾塔儿山-二峰山碱性杂岩群、古交狐偃山碱性杂岩体和临县紫金山碱性杂岩体(图 1a)。该富碱侵入岩带的形成时间和岩体成因对于揭示华北克拉通内部的岩石圈破坏作用,对

比东、西部克拉通岩石圈破坏的差异性具有重要指示意义。

紫金山碱性杂岩体是汾河富碱侵入岩带中最典型的碱性岩体,位于山西临县北北西向 20 km 处,出露面积约 20 km²,在大地构造位置上处于华北克拉通内鄂尔多斯盆地东缘与山西地块交界处(图 1)。本文在系统综合前人研究(Ying *et al.*, 2007; 张宏法等, 2010; 杨兴科等, 2010; 丁超等, 2011)的基础上,利用 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、岩相学及元素地球化学分析,厘定紫金山岩体的岩浆活动期次及时代,并总结了各期次岩石的地球化学特征,探讨了岩体成因机制,同时与汾河富碱侵入岩带中其他碱性岩体进行对比,为揭示华北克拉通内部中生代岩石圈减薄过程提供了相关的科学依据。

1 区域地质背景

华北克拉通具有 2.5~3.8 Ga 的结晶基底(Jahn *et al.*, 1983; Liu *et al.*, 1992),是世界上最古老的克拉通之一。它分为东、西两个陆块和中央造山带。东、西陆块为独立演化的两个地块,在 1.85 Ga~1.9 Ga 发生碰撞拼合,从而形成了华北克拉通统一结晶

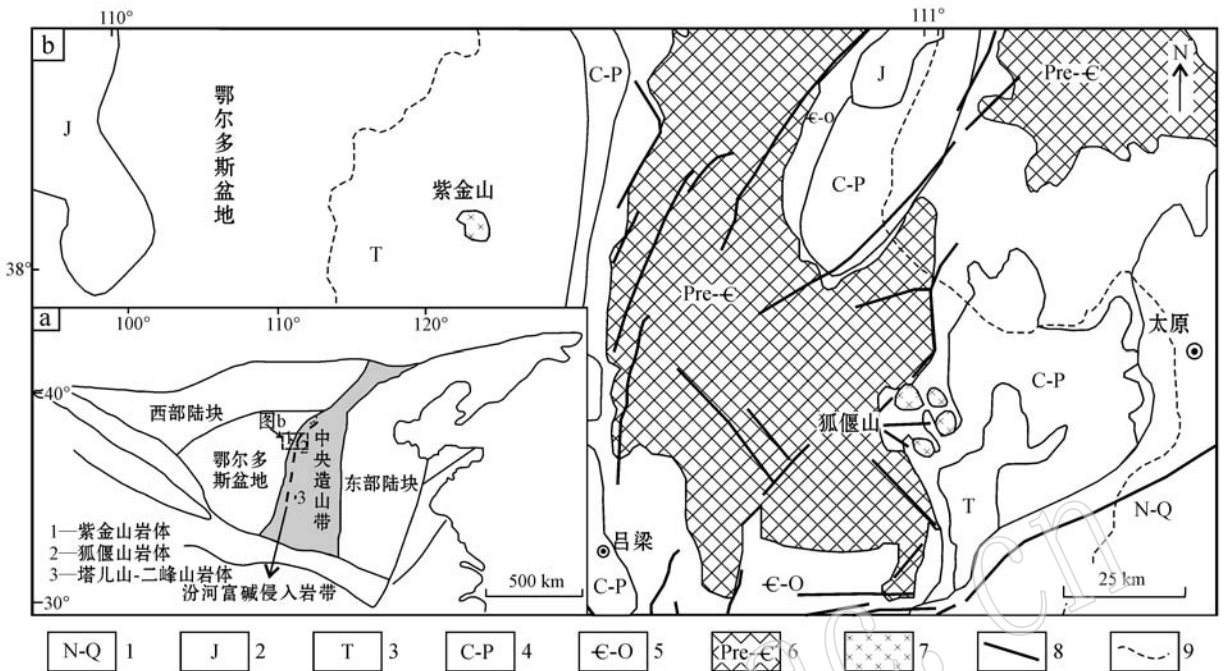


图1 华北克拉通主要地质单元简图(a, 据 Zhao *et al.*, 2001)和吕梁山地区地质简图(b, 据廖昌珍等, 2007)

Fig. 1 Simplified geological map showing major tectonic units in North China Craton (a, modified after Zhao *et al.*, 2001) and geological sketch map of Lüliang area (b, modified after Liao Changzhen *et al.*, 2007)

1—新近系-第四系; 2—侏罗系; 3—三叠系; 4—石炭系-二叠系; 5—寒武系-奥陶系; 6—前寒武系; 7—晚中生代侵入岩; 8—断层; 9—河流
1—Neogene-Quaternary; 2—Jurassic; 3—Triassic; 4—Carboniferous-Permian; 5—Cambrian-Ordovician; 6—Precambrian; 7—Late Mesozoic intrusive rocks; 8—fault; 9—river

基底(Zhao *et al.*, 2001)。紫金山岩体位于华北克拉通内鄂尔多斯盆地东缘, 东与山西地块吕梁山区相邻, 属于华北克拉通中西部过渡带。

研究区出露最早期的地层为前寒武纪变质杂岩, 主要由新太古代至古元古代 TTG 片麻岩、表壳岩、镁铁质岩墙和同构造或构造后花岗岩组成(赵国春等, 2002), 其形成年龄主要集中于 1.8~2.5 Ga (于津海等, 1997; 耿元生等, 2006; Liu *et al.*, 2011; 刘超辉等, 2013)。其后的寒武系和奥陶系为海相地层, 缺失泥盆系和志留系, 石炭至二叠纪先后经历了泻湖-潮坪、碳酸盐岩台地、三角洲、河流等沉积环境。三叠系至侏罗系为一套以河湖相为主的碎屑岩建造, 缺失白垩系和老第三系, 新第三系和第四系广泛发育(赵俊峰等, 2009)。

区域内构造运动集中于鄂尔多斯盆地东缘边界带, 南部为 N-S 走向的离石断裂带, 发育逆冲断裂和破碎带以及 NE-SW 向褶皱-断层构造, 北部为沿 N-S 向延伸的穹褶带, 由高角度逆冲断裂组成(廖昌珍等, 2007)。区域内岩浆活动发育, 主要有前寒武纪

侵入体以及古生代以后的侵入岩。前寒武纪侵入体为新太古代至古元古代变质杂岩的组成部分, 主要为经受变质的花岗闪长质、花岗质侵入体(耿元生等, 2006)。古生代以后岩浆侵入活动集中在中生代晚期, 形成的主要岩体为位于临县西北的紫金山碱性杂岩体、分布于交城西北的狐偃山碱性二长岩体和祁县隐伏石英二长岩体。

2 岩体地质及岩相学特征

2.1 岩体地质

紫金山杂岩体为一多期环状中心侵入体, 呈北西-南东向展布, 长 7.5 km, 宽 4 km, 出露面积约 20 km²。于地表呈马蹄状, 开口向南。岩体的直接围岩为中三叠统二马营组灰绿色长石砂岩夹紫红色泥岩。岩体东南、东北、西北都直接被第四系黄土覆盖(武铁山等, 1983^①)。

紫金山岩体由外环到内环共由 7 期不同类型岩石组成(图 2), 岩性依次为二长岩、透辉石正长岩、霓

① 武铁山, 吕华荣, 李忠和. 1983. 山西省中生代碱性偏碱性侵入岩. 山西省地质矿产局区域地质调查队.

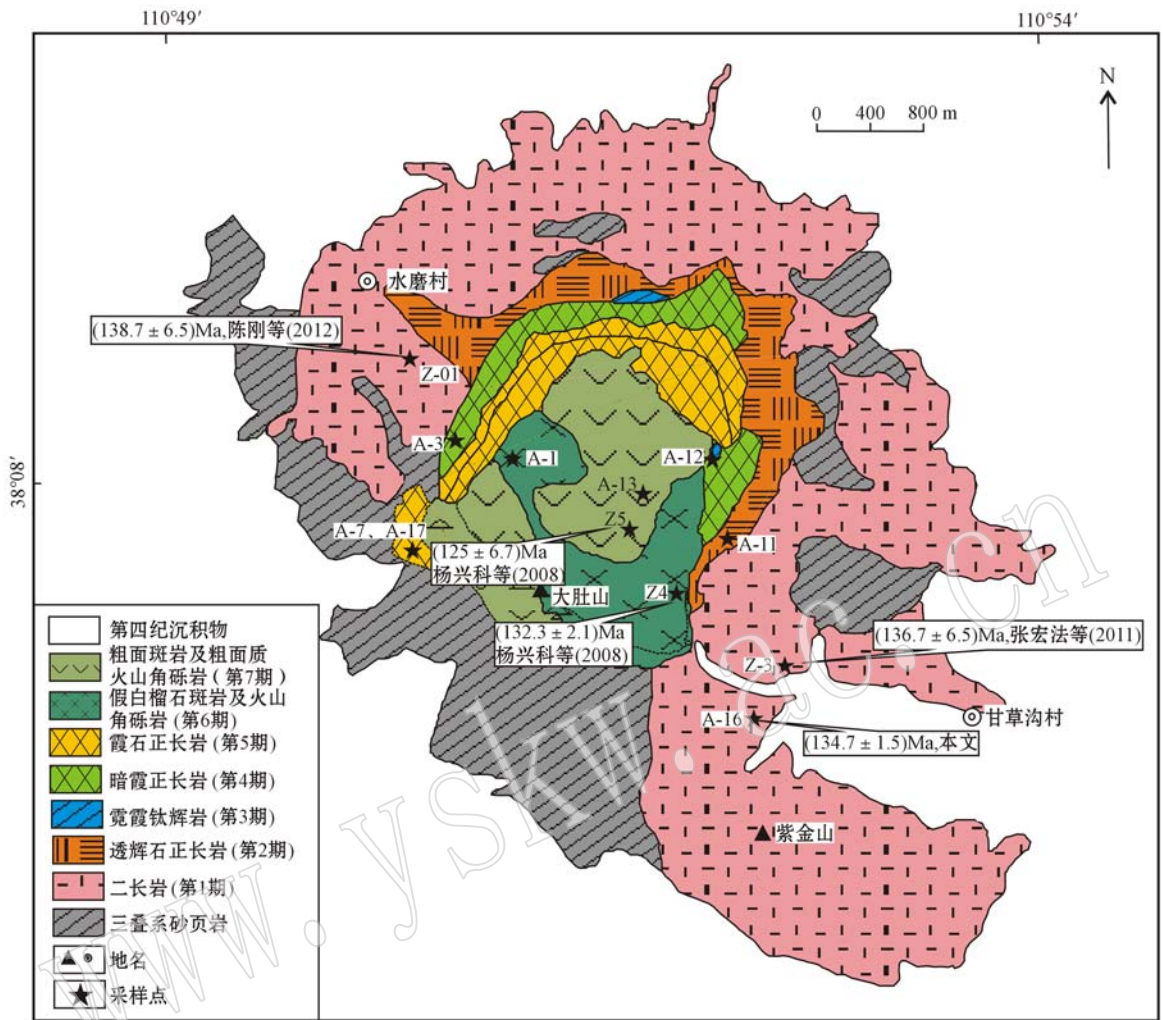


图 2 紫金山杂岩地质图(据吴利仁等, 1964)

Fig. 2 Geological sketch map of the Zijinshan alkaline complex(modified after Wu Liren *et al.*, 1964)

霞钛辉岩、暗霞正长岩、霞石正长岩、假白榴石斑岩及粗面斑岩, 形成时间由早至晚。二长岩分布于杂岩体的边缘, 组成杂岩体的外环, 出露面积最广, 达 13 km²。在岩体西南部, 二长岩直接侵入于围岩二马营组砂岩中, 接触面切割围岩层理, 二长岩距接触面较近时, 粒度变细而呈似斑状。二长岩体上部还零星残留一些砂页岩的盖层及捕掳体。上述情况表明二长岩为紫金山碱性岩体第 1 期产物。此外, 在二长岩中发育岩浆暗色包体, 以闪长岩类为主, 灰绿色, 大小不等, 与寄主岩石界限清晰(图 3a)。透辉石正长岩呈半环状分布于二长岩岩体的内侧, 面积约 2 km², 在与二长岩接触处透辉石正长岩岩枝深入二长岩中, 并在透辉石正长岩中见到二长岩捕掳体。暗霞正长岩和霞石正长岩分布于透辉石正长岩的内侧, 两者轮廓基本一致, 均呈向南开口的半环状, 出

露约 2 km²。野外观察可知, 暗霞正长岩侵入透辉石正长岩中, 而霞石正长岩则侵入暗霞正长岩中, 在霞石正长岩中有碳酸岩脉侵入(图 3b)。霓霞钛辉岩出露面积极少, 呈捕掳体形式存在于岩体北部暗霞正长岩和岩体东部教排山附近的霞石正长岩中, 可能来自深源(张宏法等, 2010)。假白榴石斑岩呈向北开口的半环状, 出露面积约 1.5 km², 侵入霞石正长岩中。粗面斑岩位于杂岩体的中央部分, 一部分位于霞石正长岩与假白榴石斑岩之间, 一部分位于后者西南侧, 出露面积约 1.5 km²。在粗面斑岩中见假白榴石斑岩角砾, 故粗面斑岩生成晚于假白榴石斑岩。

2.2 岩相学

二长岩呈灰白色, 二长结构, 块状构造, 主要由斜长石、正长石、微斜长石、透辉石及少量黑云母组

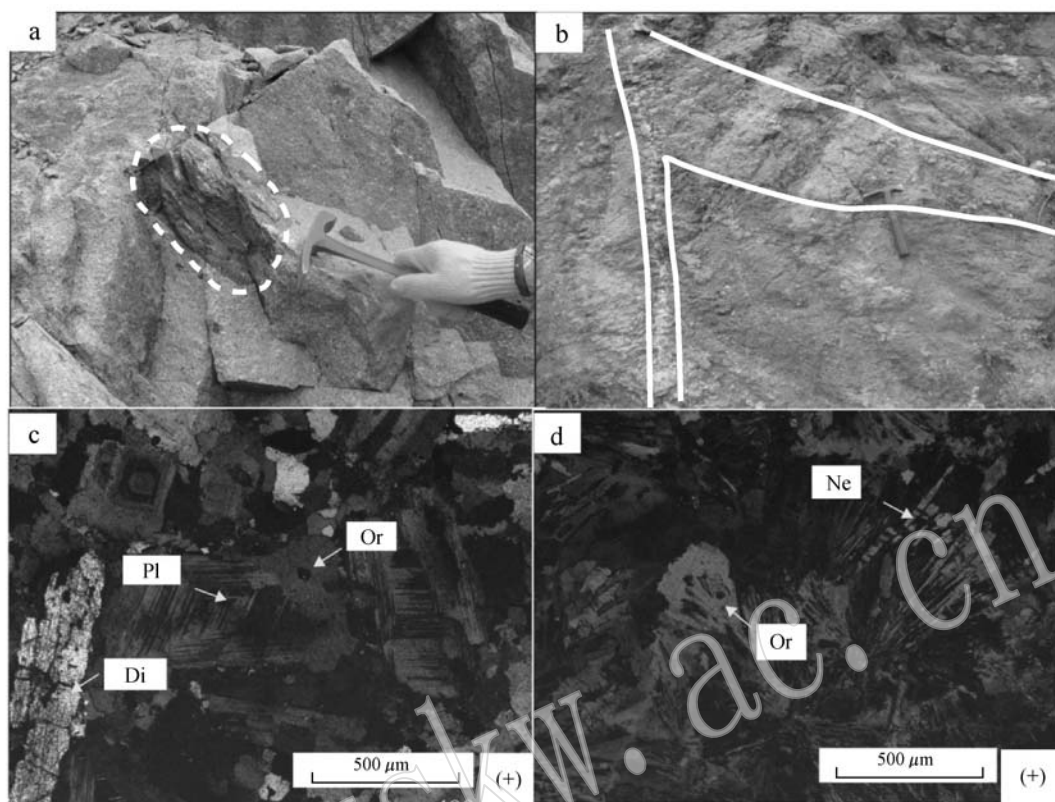


图3 紫金山杂岩岩相学特征

Fig. 3 Petrography of the Zijinshan complex

a—二长岩野外露头, 可见暗色包体; b—碳酸岩脉侵入霞石正长岩中; c—二长岩中环带构造斜长石被正长石包围; d—假白榴石斑岩斑晶中正长石和放射状霞石; Pl—斜长石; Or—正长石; Di—透辉石; Ne—霞石

a—outcrops of monzonite with dark inclusion; b—carbonatite vein that invaded into nepheline syenite; c—plagioclase with zonal structure surrounded by orthoclase in monzonite; d—orthoclase and nepheline with radial pattern in phenocryst of pseudoleucite porphyry;

Pl—plagioclase; Or—orthoclase; Di—diopside; Ne—nepheline

成。斜长石呈自形板状, 粒径 0.6~1.2 mm, 含量约 40%, 发育聚片双晶, 卡钠复合双晶及环带构造。正长石呈自形板状, 粒径 0.4~1.2 mm, 含量约 35%, 发育卡斯巴双晶, 见斜长石颗粒外围被正长石包围 (图 3c); 微斜长石呈自形板状, 含量约 5%, 发育典型的格子双晶。透辉石呈自形柱状至不规则粒状, 粒径 0.5~3 mm, 含量约 15%; 黑云母呈不规则粒状, 含量约 5%。

透辉石正长岩呈灰黑色, 中粒结构, 块状构造, 主要由正长石、透辉石、角闪石、黑云母和少量磁铁矿组成。正长石呈自形板状, 粒径 0.1~0.5 mm, 含量约 45%, 发育卡斯巴双晶; 透辉石呈自形柱状, 粒径 0.2~0.5 mm, 含量约 30%, 发育环带, 中部透明, 边缘呈暗绿色; 角闪石呈半自形至他形柱状, 粒径约 1 mm, 含量约 10%, 包裹磷灰石、磁铁矿等颗粒而呈

筛状; 黑云母呈不规则片状, 粒径约 0.5 mm, 含量约 10%, 常沿着辉石颗粒解理或边缘发育; 磁铁矿呈等轴粒状, 粒径 0.01~0.03 mm, 含量约 5%。见副矿物磷灰石。

霓霞钛辉岩呈深黑色, 密度大, 中粒结构, 块状构造, 主要由透辉石、黑云母、霞石和钛铁矿组成。透辉石呈自形短柱状至长柱状, 粒径大于 2 mm, 含量约 60%, 发育环带; 黑云母呈不规则片状晶体, 粒径约 0.8 mm, 含量约 20%, 发育 {001} 极完全解理; 霞石呈不规则他形粒状晶体, 粒径 0.3~0.5 mm, 含量约 15%; 钛铁矿为等轴粒状, 粒径 0.01~0.03 mm, 含量约 5%。

暗霞正长岩呈灰黑色, 似斑状结构, 块状构造。斑晶主要有正长石、霞石和霓辉石。正长石呈自形板状, 粒径 0.5~1.5 mm, 含量约 20%, 发育卡斯巴

双晶;霓辉石呈自形长柱状,淡绿色、绿色,多色性明显,粒径约 0.7 mm,含量约 20%;霞石呈自形板状,粒径 0.5~0.7 mm,含量约 15%,发育不规则裂理,常与正长石共生。基质为正长石(20%±)、霓辉石(15%±)、霞石(10%±)。

霞石正长岩呈灰白色,中粒结构,块状构造,主要由正长石、霞石、黑云母和霓辉石组成。正长石呈自形-半自形板状晶体,粒径约 1~2 mm,含量约 50%,发育卡斯巴双晶;霞石呈自形板状,粒径约 2 mm,含量约 35%,发育不规则裂理,常与长石共生;黑云母呈他形粒状,粒径 0.5~1 mm,含量约 10%;霓辉石呈他形粒状,粒径约 0.5 mm,含量约 5%。

假白榴石斑岩呈灰绿色,斑状结构,气孔构造。斑晶主要为正长石、霞石和少量透长石,其中正长石和霞石由白榴石斑晶蚀变而来,并仍保留白榴石外形。假白榴石斑晶中正长石和霞石呈放射状共生,正长石位于中心,霞石分布在边缘(图 3d),斑晶粒径 1.5 cm,含量约 40%。透长石小斑晶呈他形粒状,粒径 0.2~0.5 mm,含量约 5%。岩石基质主要由透长石、霞石、霓辉石和黑云母小颗粒组成,光性不明显,含量约 55%。

粗面斑岩呈灰绿色,斑状结构,气孔构造。斑晶主要为透长石和透辉石。透长石呈自形板状,粒径 1~2 mm,含量约 30%;透辉石呈自形长柱状,淡绿色,粒径 0.5~1 mm,含量约 15%,发育环带。基质由透长石(40%±)、透辉石(10%±)和黑云母(5%±)组成,透长石小颗粒呈大致平行的排列,构成粗面结构。

3 样品采集及分析方法

8 件岩石样品采样位置如图 2。为了准确测定紫金山岩体的形成年代,选取其中最早期、出露面积最大的二长岩挑选锆石,通过高精度的 SHRIMP 锆石 U-Pb 法进行年龄测定。本次用于定年的二长岩样品(A-16)采自紫金山岩体东南部甘草沟村公路一侧(图 2)。

岩石碎样和锆石分选工作在河北廊坊区调队实验室完成,锆石制靶在北京离子探针中心完成,制靶流程详见宋彪等(2002)。锆石样品的反射、透射和阴极发光(CL)照相分别在北京离子探针中心和中国地质科学院地质研究所电镜室完成。根据这些照片,选择晶形完好、无或少裂隙及包裹体、具有明显

振荡环带结构的锆石颗粒进行 SHRIMP 分析。实验在北京离子探针中心网络虚拟实验室进行,通过 SHRIMP 远程共享系统(SHRIMP Remote Operation System, SROS)远程控制位于澳大利亚 Curtin 理工大学的 SHRIMP II 仪器完成锆石 U-Th-Pb 分析。测试样品前先用标准锆石 M257 标定所测锆石的 U、Th 和 Pb 含量。测点直径约 25 μm ,测前先剥蚀 150 s,每个样品点测定统计量为 5 次 ^{204}Pb 扫描,一次离子流 O^{2-} 为 5 nA,束斑大小为 25 μm 。每测定 3 个样品点,分析 1 次标准锆石 TEM(年龄为 417 Ma),以校正元素间的分馏,分析流程和标样校正详见 Williams(1998)。数据处理采用 Ludwig SQUID-IO 及 ISOPLT 程序(Ludwig, 2001),普通铅根据实测的 ^{204}Pb 校正,采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值具有 95%的置信度。

主量元素和微量元素测试在北京大学造山带与地壳演化重点实验室的荧光光谱仪 ARLADNANT XP 上完成,仪器测试精度:主量元素 $<0.5\%$,微量元素检出限 0.1×10^{-6} 。岩石样品经破碎后用玛瑙研磨至 200 目。主量元素分析采用熔片法制样,具体操作方法是:准确称取 3 g 四硼酸锂、1 g 偏硼酸锂和 0.4 g 样品,在铂金坩埚里加热至 1 150 $^{\circ}\text{C}$ 充分熔化,摇匀后冷却。微量元素分析采用压片法制样,取适量的样品粉末,以硼酸为衬底在铝皿中加高压成片。稀土元素的测试在北京大学造山带与地壳演化重点实验室的 VGAXiom ICP-MS 系统上完成,采用酸熔法制样。Sr、Nd 同位素的分析测试在核工业北京地质研究所分析测试研究中心进行。实验在型号为 ISOPROBE-T 的热电离质谱仪上完成,Sr 同位素比值测定的校正因子采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$,标准测量结果:NBS987 为 0.710250 ± 7 。Nd 同位素比值采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正标准测量结果:SHINESTU 为 0.512118 ± 3 (标准值为 0.512110),分析方法详见赵海杰等(2010)。

锆石 Hf 同位素测试是在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室的 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行的,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径 55 μm ,测定时使用锆石国际标样 GJ1 作为参考物质,分析点位于 U-Pb 定年分析点的附近。相关仪器运行条件及详细分析流程参见文献(侯可军等, 2007)。

4 分析结果

4.1 锆石 SHRIMP 定年

二长岩样品(A-16)中的锆石呈浅黄色-无色,透明。多为近等轴粒状,也见短或长柱状,粒度一般为100~150 μm,少数颗粒长轴可达300 μm。锆石晶面完整,晶棱清晰,部分颗粒具有不规则边界。从阴极发光(CL)图像上看,锆石发育明显的震荡韵律环

带,具有岩浆锆石的特征(图4)。图中白色圆圈代表测点位置(U-Pb 定年与 Hf 同位素位置重合),图像下数字代表锆石点号及年龄,括号里面的数值为 εHf(t)值。锆石 U、Th 含量分别为 $94 \times 10^{-6} \sim 339 \times 10^{-6}$, $118 \times 10^{-6} \sim 848 \times 10^{-6}$, 13 个分析点的 Th/U 值在 1.17~2.92 之间,平均值 1.93(表 1),明显大于变质锆石的 Th/U 值(<0.1),而与岩浆锆石的 Th/U 值相当(吴元保等,2004),表明所测锆石为典型的岩浆结晶锆石。



图 4 紫金山二长岩锆石阴极发光图像

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence image of monzonite from the Zijinshan complex

表 1 紫金山二长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb dating results of Zijinshan monzonite

测点	$^{206}\text{Pb}_c/\%$	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma	
		U	Th	$^{206}\text{Pb}^*$		$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^* \pm \%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U} \pm \%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U} \pm \%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
ZJS-1.1	1.17	296	848	5.51	2.87	0.059	22	0.174	23	0.021 44	2.2	561 ± 490	136.8 ± 3.0
ZJS-2.1	1.45	128	150	2.41	1.17	0.050 8	18	0.151	18	0.021 62	2.3	232 ± 410	137.9 ± 3.2
ZJS-3.1	1.14	150	188	2.73	1.25	0.051 1	9.5	0.148	9.7	0.020 94	2.0	247 ± 220	133.6 ± 2.7
ZJS-4.1	3.07	192	395	3.64	2.05	0.032 0	27	0.094	27	0.021 36	2.1	-965 ± 790	136.2 ± 2.8
ZJS-5.1	1.03	285	832	5.38	2.92	0.045 4	13	0.136	13	0.021 73	1.8	-32 ± 310	138.6 ± 2.5
ZJS-6.1	3.37	236	566	4.37	2.39	0.035	29	0.101	29	0.020 79	2.1	-703 ± 820	132.7 ± 2.8
ZJS-7.1	0.98	339	835	6.23	2.47	0.054 9	5.1	0.160 6	5.3	0.021 19	1.6	410 ± 110	135.2 ± 2.1
ZJS-8.1	1.13	261	618	4.75	2.37	0.056 7	9.4	0.164	9.6	0.020 94	1.8	481 ± 210	133.6 ± 2.4
ZJS-9.1	1.68	215	405	3.99	1.88	0.064 7	14	0.189	14	0.021 21	2.0	765 ± 290	135.3 ± 2.6
ZJS-10.1	4.86	174	304	3.24	1.74	0.026 2	14	0.074	14	0.020 54	2.1	$-1 596 \pm 460$	131.1 ± 2.7
ZJS-11.1	-	95	123	1.76	1.29	0.081	16	0.246	17	0.022 13	2.8	$1 213 \pm 320$	141.1 ± 4.0
ZJS-12.1	6.58	94	118	1.81	1.26	0.025	89	0.073	89	0.021 06	3.5	$-1 730 \pm 3 100$	134.4 ± 4.7
ZJS-13.1	0.68	232	316	4.10	1.36	0.048 1	6.2	0.135 8	6.4	0.020 46	1.8	106 ± 150	130.5 ± 2.3

注: Pb_c 代表普通铅, Pb^* 代表放射成因铅; 假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄谱和校正普通铅。

紫金山二长岩 13 颗锆石全部测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值在 130.5~141.1 Ma 之间, 变化范围很小, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值为 134.7 ± 1.5 Ma

(MSWD=1.08)(图 5)。在 U-Pb 年龄谱和图(图 5)上, 除 ZJS-11.1 点 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值稍大、偏离谱和曲线之外, 其余测点均集中在一致曲线上及其附近一个

很小的区域内。所测锆石均为典型的岩浆成因锆石,测点数目适中,所测结果非常集中,因而其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值可代表紫金山二长岩结晶年龄。

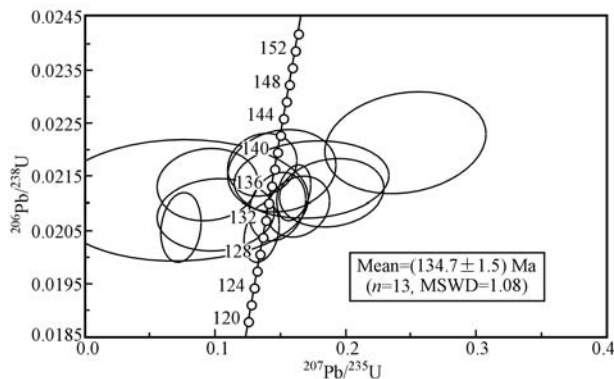


图 5 紫金山二长岩 SHRIMP U-Pb 年龄 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和线图

Fig. 5 SHRIMP U-Pb zircon concordia plot for Zijinshan monzonite

4.2 地球化学特征

紫金山碱性杂岩体中各期岩石主量、稀土和微量元素分析结果见表 2。

4.2.1 主量元素

紫金山岩体中二长岩、透辉石正长岩、霓霞钛辉岩、暗霞正长岩、霞石正长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩 SiO_2 含量分别为 56.75%~62.51%、50.78%~53.50%、42.19%、52.72%~55.65%、53.17%~59.72%、57.06%~61.81%和 57.74%~60.48%。

按酸度划分,透辉石正长岩为基性岩至中性岩,霓霞钛辉岩为超基性岩,其余岩石均为中性岩。由外环到内环,各期岩石 SiO_2 含量先降低后增高。 Al_2O_3 含量为 6.20%~21.05%,过铝指数 A/CNK 分别为 0.69~1.01、0.50~0.83、0.18、0.58~0.90、0.71~1.11、1.07~1.59 和 0.85~1.18,除霓霞钛辉岩铝含量较低外,其余岩石 Al_2O_3 含量相近,属于偏铝质到弱过铝质岩石。

紫金山岩体具有富碱特征,二长岩、透辉石正长岩、霓霞钛辉岩、暗霞正长岩、霞石正长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩碱度 ALK 分别为 8.67%~10.50%、8.51%~13.19%、5.04%、8.32%~16.28%、9.02%~16.04%、8.30%~14.10%和 9.81%~14.33%,碱率度 AR 分别为 2.24~2.86、2.24~4.59、1.61、2.16~6.00、2.58~8.71、2.57~10.49 和 2.93~7.07。除二长岩和 1 个假白榴石斑岩样品(Z4)外,各岩石 K_2O 含量均比 Na_2O 高。在 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 6a)中,几乎全部样品点均落在碱性演化线上部,在 SiO_2-AR 图解(图 6b)上,二长岩落在碱性岩区域内,霓霞钛辉岩落在过碱性岩区域内,其余岩石在碱性岩和过碱性岩区域内均有分布。

紫金山岩体 MgO 、 CaO 和 TFe_2O_3 含量分别为 0.14%~9.4%(平均 1.66%)、0.01%~15.31%(平均 4.25%)和 4.05%~17.49%(平均 7.41%)。由外环至内环, $\text{Mg}^\#$ 依次为 0.20~0.38、0.31~0.54、0.56、0.09~0.43、0.05~0.15、0.04~0.28 和 0.21~0.26,各期岩浆分异演化程度由高变低再升高。

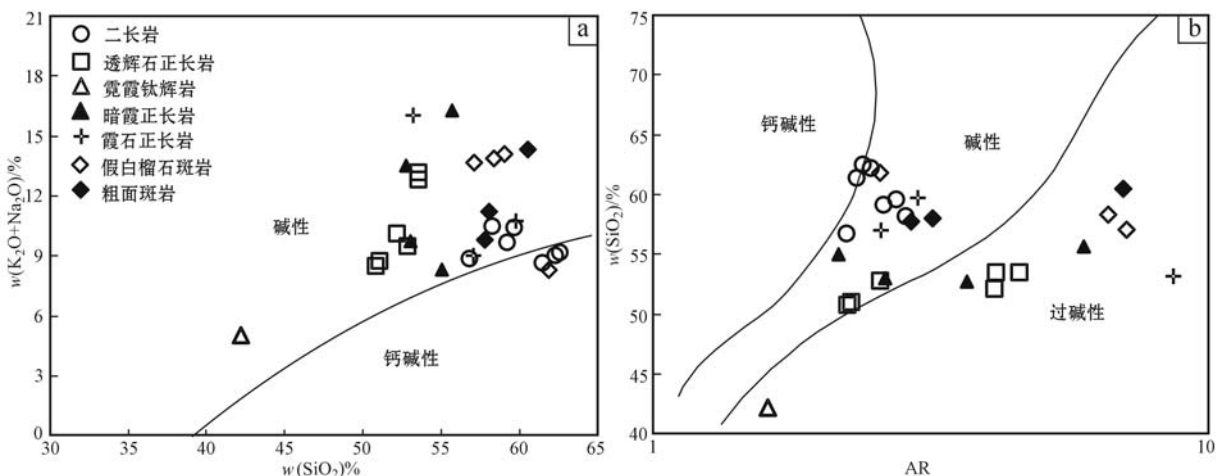


图 6 紫金山碱性杂岩体 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (a,底图据 Le Maitre 等,1989)及 SiO_2-AR (b,底图据 Wright,1969)图解
Fig. 6 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 (a, Le Maitre *et al.*, 1989) and SiO_2 versus AR (b, Wright, 1969) diagrams of rocks from the Zijinshan complex

4.2.2 微量元素

紫金山岩体中二长岩、透辉石正长岩、霓霞钛辉岩、暗霞正长岩、霞石正长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩稀土元素总质量分数 Σ REE 分别为 $189.71 \times 10^{-6} \sim 255.05 \times 10^{-6}$ 、 $165.94 \times 10^{-6} \sim 193.34 \times 10^{-6}$ 、 222.94×10^{-6} 、 $169.23 \times 10^{-6} \sim 195.30 \times 10^{-6}$ 、 $60.86 \times 10^{-6} \sim 202.09 \times 10^{-6}$ 、 $44.55 \times 10^{-6} \sim 265.50 \times 10^{-6}$ 和 $121.1 \times 10^{-6} \sim 255.80 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 比值分别为 8.78 ~ 12.00 (平均为 10.87)、8.11 ~ 9.33 (平均为 8.65)、8.43、8.64 ~ 26.15 (平均为 15.85)、7.82 ~ 18.83 (平均为 12.31)、13.51 ~ 21.05 (平均为 16.31) 和 8.96 ~ 13.08 (平均为 11.64)。(La/Yb)_N 分别为 11.49 ~ 21.42、11.27 ~ 13.34、13.41、12.62 ~ 43.83、8.89 ~ 32.03、21.04 ~ 60.97 和 14.18 ~ 22.46。 δ Eu 分别为 0.99 ~ 1.07、0.96 ~ 1.09、1.00、0.78 ~ 1.02、1.01 ~ 1.49、1.00 ~ 1.11 和 1.01 ~ 1.04。由此可见,紫金山岩体 7 种岩石均有高稀土元素总量,具有富集轻稀土元素并且轻、重稀土元素高度分馏的特点,其中暗霞正长岩和假白榴石斑岩分异程度最高,除霞石正长岩具有微弱的正铈异常外,各岩石均无明显铈异常。

在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 7a)上,各类型岩石 REE 分布曲线特征相似,均为轻稀土元素富集的向右陡倾斜模式。其中假白榴石斑岩样品 Σ REE 变化范围最广,曲线斜率最大。除霞石正长岩具有微弱的正铈异常外,各曲线均平滑,无明显铈异常。

各期岩石中微量元素具有较高的 Rb、Ba、K、Sr 含量,分别为 $53.1 \times 10^{-6} \sim 376 \times 10^{-6}$ 、 $620.7 \times 10^{-6} \sim 2632 \times 10^{-6}$ 、 $26221.3 \times 10^{-6} \sim 116917 \times 10^{-6}$ 和 $110 \times 10^{-6} \sim 2696 \times 10^{-6}$,但 Th、U、Ta、Nb、Hf 等元素含量较低,分别为 $1.28 \times 10^{-6} \sim 16.80 \times 10^{-6}$ 、 $0.19 \times 10^{-6} \sim 6.56 \times 10^{-6}$ 、 $0.23 \times 10^{-6} \sim 1.73 \times 10^{-6}$ 、 $2.60 \times 10^{-6} \sim 35.80 \times 10^{-6}$ 和 $0.36 \times 10^{-6} \sim 9.53 \times 10^{-6}$ 。Co 和 Ni 元素含量分别为 $4.14 \times 10^{-6} \sim 66.87 \times 10^{-6}$ 和 $1.26 \times 10^{-6} \sim 40.53 \times 10^{-6}$ 。Rb/Sr 值变化于 0.03 ~ 2.52,平均值为 0.28,远高于全球下地壳平均值 0.032 (Taylor and McLennan, 1995)。Nb/Ta 值为 10.97 ~ 27.33,平均值为 17.60,接近地幔的 Nb/Ta 值(17.5 ± 2.0) (Weyer *et al.*, 2002; 徐平等, 2004)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7b)中,各岩石分配曲线基本一致,均

具有富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr 和轻稀土元素 La、Ce,而亏损 Th、U、Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素的特征。霞石正长岩和假白榴石斑岩中高场强元素和重稀土元素亏损程度大,曲线右侧位置较其他岩石低。

4.2.3 全岩 Sr、Nd 同位素组成

紫金山杂岩 Sr、Nd 同位素数据列于表 3。紫金山岩体二长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩结晶年龄分别为 134、132 和 125 Ma (杨兴科等, 2008),透辉石正长岩、暗霞正长岩和霞石正长岩结晶年龄取二长岩和假白榴石斑岩结晶年龄中间值 133 Ma。由此获得二长岩 I_{Sr} 为 0.705 033 ~ 0.705 182, $\epsilon Nd(t)$ 为 -12.3 ~ -9.0;透辉石正长岩和暗霞正长岩具有较低的 I_{Sr} (0.704 228 ~ 0.704 554 和 0.704 319 ~ 0.704 729) 和较高的 $\epsilon Nd(t)$ (-8.0 ~ -6.0 和 -7.8 ~ -4.2);霞石正长岩 I_{Sr} 较低,为 0.704 400, $\epsilon Nd(t)$ 最高,为 -0.5;假白榴石斑岩和粗面斑岩 I_{Sr} 分别为 0.705 063 和 0.706 313, $\epsilon Nd(t)$ 分别为 -10.3 和 -10.5。岩石 I_{Sr} 较低,可能与其中大离子亲石元素 Rb 相对富集有关。在($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i - $\epsilon Nd(t)$ 关系图解中(图 8),紫金山岩体投点位于 EM I 型富集地幔附近。

4.2.4 锆石 Hf 同位素组成

在 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年的基础上,对紫金山二长岩(A-16)进行微区原位 Hf 同位素测试分析,结果见表 4 和图 9。大部分锆石的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值均小于 0.002 5,显示锆石在形成以后具有较低的放射性成因 Hf 的积累。

对 A-16 中锆石分析了 13 个点,除 1 粒锆石(ZJS-8.1)的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值较高外,其余锆石分析点的数据基本一致,变化范围窄, $^{176}Hf/^{177}Hf$ 初始比值介于 0.282 121 ~ 0.282 229 之间, $\epsilon Hf(t)$ 介于 -20.2 ~ -16.4 之间,二阶段 Hf 模式年龄在 2.22 ~ 2.46 Ga 之间。

5 讨论

5.1 岩体形成时代及期次

近年来,多位学者运用 SHRIMP 或 LA-ICP-MS 等高精度锆石 U-Pb 测年方法,对紫金山岩体的年龄进行限定。本文汇总前人已发表的紫金山岩体各期岩石高精度测年成果,并综合各期岩石野外相互接触关系,得到紫金山杂岩体岩浆序列(表 5)。由表 5

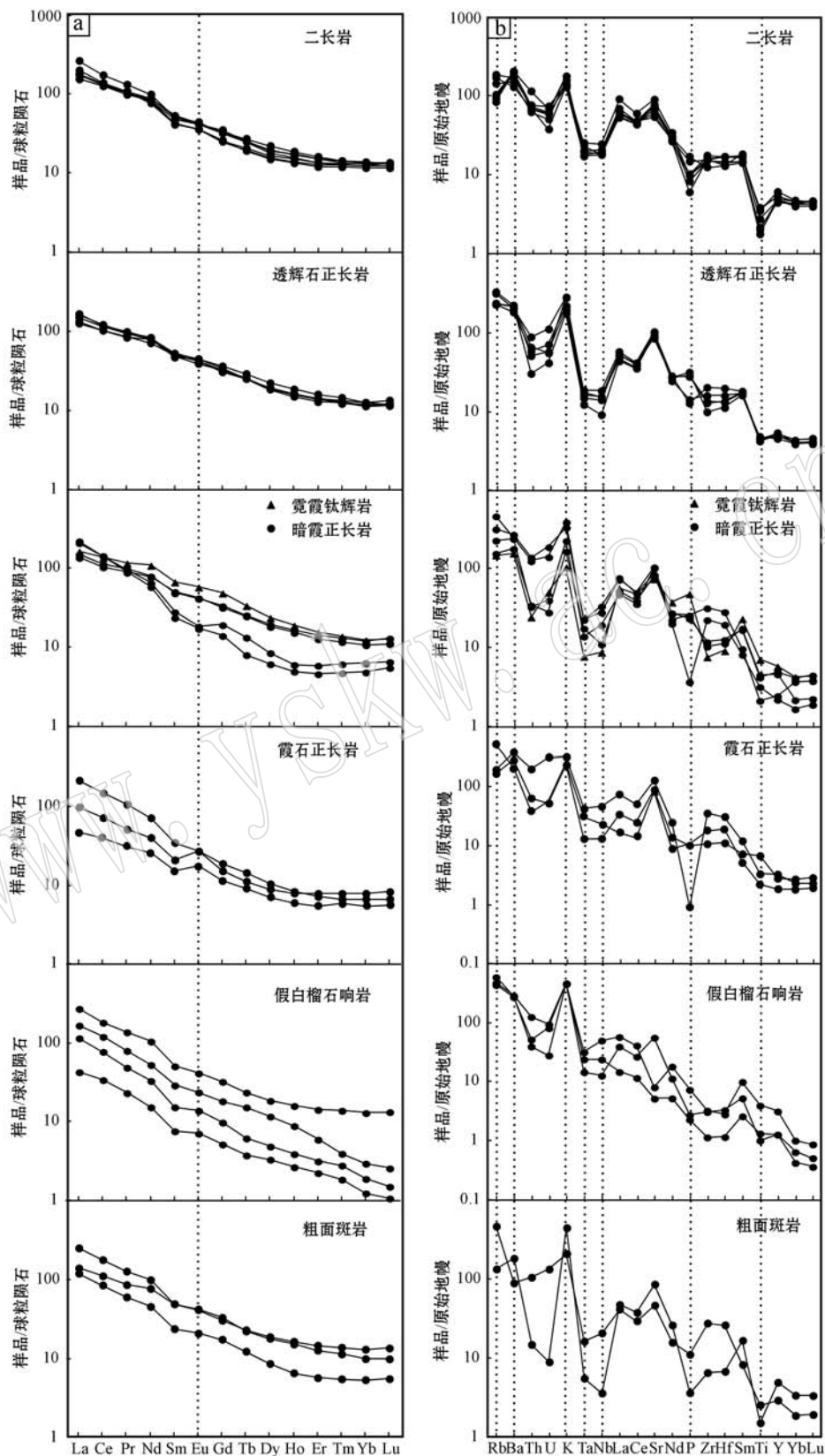


图 7 紫金山碱性杂岩体稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagram (b) of the Zijinshan complex

表3 紫金山杂岩体 Sr-Nd 同位素分析数据

Table 3 Sr-Nd isotopic ratios for the Zijinshan complex

岩石类型	样品号	年龄/Ma	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	I _{Sr}	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	εNd(0)	f _{Sm/Nd}	εNd(t)	资料来源
二长岩	A-16	134	0.222 8	0.705 457	0.705 033	0.116 3	0.511 939	-13.6	-0.41	-12.3	本文
	03ZJS01		0.132 5	0.705 434	0.705 182	0.106 5	0.511 970	-13.0	-0.46	-11.5	英基丰等(2007)
	ZJS01		0.106 5	0.705 276	0.705 073	0.104 4	0.512 036	-11.7	-0.47	-10.2	
	ZJS02		0.196 5	0.705 415	0.705 041	0.121 6	0.512 114	-10.2	-0.38	-9.0	
透辉石正长岩	A-11	133	0.207 4	0.704 620	0.704 228	0.083 7	0.512 132	-9.9	-0.57	-8.0	本文
	ZI		0.248 1	0.705 023	0.704 554	0.126 8	0.512 270	-7.2	-0.36	-6.0	杨兴科等(2010)
暗霞正长岩	A-3	133	0.480 5	0.705 227	0.704 319	0.084 8	0.512 327	-6.1	-0.57	-4.2	本文
	03ZJS09		0.175 7	0.704 760	0.704 428	0.131 6	0.512 294	-6.7	-0.33	-5.6	英基丰等(2007)
	03ZJS13		0.152 0	0.705 016	0.704 729	0.126 2	0.512 177	-9.0	-0.36	-7.8	
霞石正长岩	A-7	133	0.560 9	0.705 460	0.704 400	0.141 7	0.512 567	-1.4	-0.28	-0.5	本文
斑岩	Z4	132	0.105 8	0.705 261	0.705 063	0.104 9	0.512 033	-11.8	-0.47	-10.3	杨兴科等(2010)
粗面斑岩	Z5	125	0.203 4	0.706 674	0.706 313	0.103 2	0.512 021	-12.0	-0.48	-10.5	杨兴科等(2010)

注:表中 Sr、Nd 同位素组成的计算参数为 (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.512 638, (¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd)_{CHUR} = 0.196 7, λ_{Rb-Sr} = 1.42 × 10⁻¹¹, λ_{Sm-Nd} = 6.54 × 10⁻¹²。

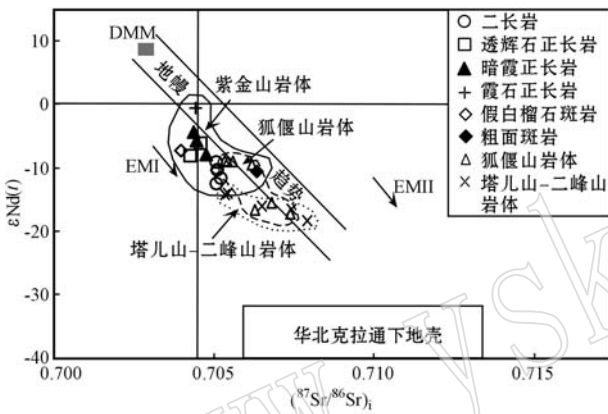


图8 紫金山岩体 εNd(t) - (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 关系图解

Fig. 8 εNd(t) - (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i diagram for the Zijinshan complex

DMM、EM I 和 EM II 引自 Zindler and Hart(1986), 华北克拉通下地壳数据引自 Jahn 等(1999), 狐偃山岩体及塔儿山-二峰山岩体数据引自 Ying 等(2011)

Data of DMM, EM I and EM II after Zindler and Hart (1986); data of lower crust from North China Craton after Jahn *et al.* (1999); data of Huyanshan rock and Taershan-Erfengshan rock after Ying *et al.* (2011)

可知,二长岩高精度测年结果相近,年龄范围为138.7~134.7 Ma,与该岩体内其他岩石测年结果相比,年龄最老,这与二长岩的野外产状一致,其位于岩体边缘,侵入围岩二马营组砂岩中,且与二长岩接触的内环岩石均侵入二长岩中,野外产状和测年结果共同表明二长岩为紫金山岩体最早期岩浆活动产物。位于二长岩内侧的第2期至第4期岩浆活动产物透辉石正长岩、霓霞钛辉岩、暗霞正长岩和霞石正长岩无高精度测年数据,由野外产状可知,除霓霞钛辉岩呈捕虏体形式存在,形成时代无法确定外,其余3期岩石依次呈开口向南的半环状排列,且靠内环岩石均侵入其外环岩石中,故可知其形成时间依次变

晚。分布于岩体中心和南部的假白榴石斑岩呈向北开口的半环状侵入霞石正长岩中,其形成时间应晚于霞石正长岩,高精度测年结果显示其形成时间为132.3 ± 2.1 Ma。粗面斑岩位于岩体中心,其与假白榴石斑岩间接触关系虽未观察到,但在粗面斑岩中见到假白榴石斑岩角砾,故粗面斑岩的形成应晚于假白榴石斑岩,测年结果显示其形成年龄为125.0 ± 6.7 Ma,进一步验证了这一点。综上所述,紫金山岩体由多期岩浆活动形成,由外环到内环,各期岩石生成时间依次变晚,形成年龄范围为138.7~125.0 Ma。各期岩浆活动间隔时间不长,紫金山杂岩体为早白垩世碱性岩浆事件的产物。

5.2 岩浆物质来源

紫金山岩体各类型岩石均具有富碱,贫铁、镁的特征,属于碱性岩石系列。稀土元素均具有富集轻稀土元素,轻、重稀土元素高度分馏,和无显著Eu负异常的特点,说明岩浆源区无斜长石残留,但有富重稀土元素矿物(如石榴子石)残留,岩浆物质来源较深。岩石均显示富集Rb、Ba、K、Sr等大离子亲石元素,亏损Th、U、Nb、Ta、P、Ti等高场强元素的特点,这与同样亏损高场强元素的富集地幔特征类似(Molzahn *et al.*, 1996; Canning *et al.*, 1996; Ma *et al.*, 1998; Downes, 2001)。可以推测,紫金山岩体岩浆来源较深,可能来自上地幔或(和)下地壳。

Sr、Nd、Hf同位素组成是示踪物源特征的重要标志。前人研究表明,由古生代末至新生代,华北克拉通岩石圈地幔发生了富集型向亏损型的转型,中生代是其地幔性质发生巨大改变的重要时期。晚中生代岩石圈地幔具有富集特征(周新华等,2001; 阎国翰等,2001,2002,2006,2008; 蔡剑辉等,2004; Zhang *et al.*, 2004; 周新华,2006; 张宏福,2009)。

表 4 紫金山岩体二长岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 4 Zircon Lu-Hf isotopic data of monzonite from the Zijinshan complex

测点号	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	εHf(<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM1} /Ga	<i>t</i> _{DM2} /Ga	<i>f</i> _{Lu/Hf}	
ZJS-1.1	136.8	0.104 926	0.000 308	0.002 216	0.000 006	0.282 156	0.000 023	0.282 151	-21.8	-19.0	1.60	2.38	-0.93
ZJS-2.1	137.9	0.071 331	0.000 669	0.001 641	0.000 014	0.282 121	0.000 020	0.282 117	-23.0	-20.2	1.62	2.46	-0.95
ZJS-3.1	133.6	0.095 821	0.000 507	0.002 073	0.000 007	0.282 197	0.000 023	0.282 192	-20.3	-17.6	1.53	2.30	-0.94
ZJS-4.1	136.2	0.126 345	0.001 781	0.002 541	0.000 031	0.282 209	0.000 024	0.282 202	-19.9	-17.2	1.54	2.27	-0.92
ZJS-5.1	138.6	0.121 382	0.002 612	0.002 414	0.000 055	0.282 229	0.000 023	0.282 223	-19.2	-16.4	1.50	2.22	-0.93
ZJS-6.1	132.7	0.078 925	0.001 824	0.001 583	0.000 030	0.282 134	0.000 022	0.282 130	-22.6	-19.8	1.60	2.43	-0.95
ZJS-7.1	135.2	0.127 246	0.000 485	0.002 507	0.000 018	0.282 211	0.000 022	0.282 204	-19.8	-17.1	1.53	2.27	-0.92
ZJS-8.1	133.6	0.196 902	0.001 323	0.003 834	0.000 041	0.282 324	0.000 028	0.282 314	-15.8	-13.3	1.42	2.02	-0.88
ZJS-9.1	135.3	0.123 103	0.001 115	0.002 406	0.000 011	0.282 171	0.000 023	0.282 165	-21.3	-18.5	1.58	2.35	-0.93
ZJS-10.1	131.1	0.165 599	0.001 967	0.003 134	0.000 034	0.282 198	0.000 028	0.282 190	-20.3	-17.7	1.58	2.30	-0.91
ZJS-11.1	141.1	0.116 155	0.000 954	0.002 165	0.000 013	0.282 212	0.000 023	0.282 207	-19.8	-16.9	1.51	2.26	-0.93
ZJS-12.1	134.4	0.078 876	0.000 585	0.001 740	0.000 013	0.282 162	0.000 020	0.282 158	-21.6	-18.8	1.57	2.37	-0.95
ZJS-13.1	130.5	0.130 214	0.001 106	0.002 583	0.000 009	0.282 149	0.000 023	0.282 143	-22.0	-19.4	1.62	2.41	-0.92

表中 Hf 同位素组成的计算参数为: (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{CHUR,0} = 0.282 772, (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{CHUR} = 0.033 2, (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.28 325, (¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf)_{DM} = 0.038 4 (据 Blichert-Toft and Albarede 1997; Griffin *et al.*, 2000), *t* = 锆石结晶年龄, λ = 1.867 × 10⁻¹¹ a⁻¹ (Soderlund *et al.*, 2004)

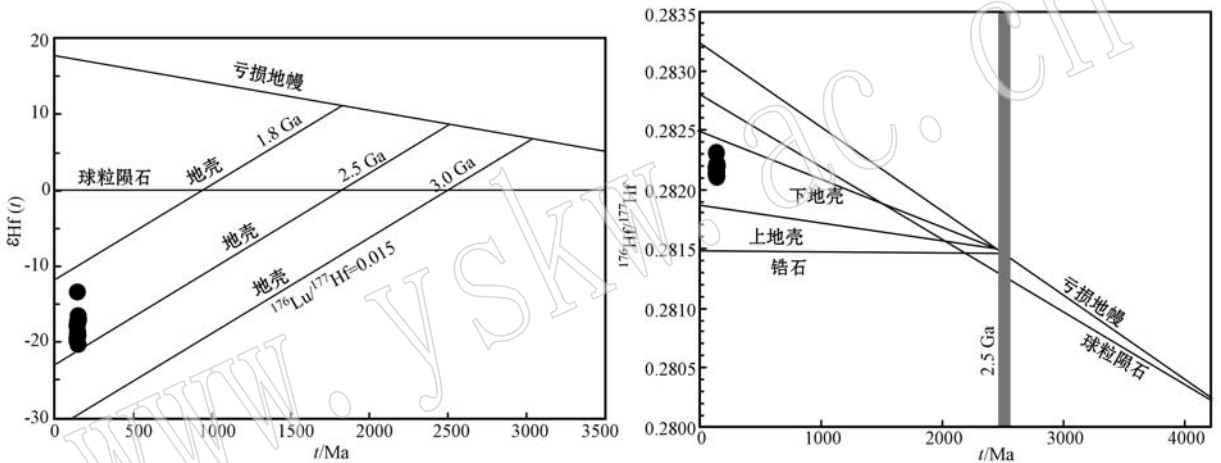


图 9 紫金山岩体二长岩 Hf 同位素演化图解

Fig. 9 Diagram of εHf(*t*) - *t* and (¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf)_i - *t* of monzonite from the Zijinshan complex

表 5 紫金山杂岩体岩浆序列

Table 5 Magma sequence of the Zijinshan alkaline complex

期次	岩石类型	野外产状	年龄/Ma	方法	参考文献
I	二长岩	分布于杂岩体边缘, 组成外环, 侵入二马营组砂岩中, 接触面切穿围岩层理。	138.7 ± 6.5	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	陈刚等(2012)
			136.7 ± 6.5	锆石 LA-ICP-MS U-Pb	张宏法等(2011)
			134.7 ± 1.5	锆石 SHRIMP U-Pb	本文
II	透辉石正长岩	呈半环状分布于二长岩岩体内侧, 侵入二长岩中			
III	霓霞钛辉岩	呈捕虏体形式存在于暗霞正长岩和霞石正长岩中			
IV	暗霞正长岩	呈向南开口的半环状分布于透辉石正长岩内侧, 侵入透辉石正长岩中			
V	霞石正长岩	呈向南开口的半环状分布于暗霞正长岩内侧, 侵入暗霞正长岩中			
VI	假白榴石斑岩	呈向北开口的半环状, 侵入霞石正长岩中	132.3 ± 2.1	锆石 SHRIMP U-Pb	杨兴科等(2008)
VII	粗面斑岩	位于杂岩体中央部分, 因植被覆盖, 与假白榴石斑岩间接接触关系未观察到	125.0 ± 6.7	锆石 SHRIMP U-Pb	杨兴科等(2008)

注: 前人测年样品采样位置见图 2。

在εNd(*t*)-(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i关系图解(图 8)中, 紫金山岩体投点集中于 EM I 型富集地幔附近, 表明其岩浆源区与华北克拉通晚中生代 EM I 型富集地幔密切相关。

岩体中少量暗色包体的存在是对这一认识的支持。

紫金山岩体各期岩石锆同位素组成相近, 但钽同位素具有较大变化范围。透辉石正长岩和暗霞正

长岩样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值介于 $-8.0 \sim -4.2$ 之间, 在 $\epsilon\text{Nd}(t) - ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_i$ 关系图解(图8)中, 样品投点最接近 EM I 型富集地幔, 前述可知其岩浆源区物质应主要为华北克拉通中生代富集型岩石圈地幔。霞石正长岩 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 最大, 为 -0.5 , 最接近原始地幔组分, 指示岩浆源区除岩石圈地幔物质外, 可能存在较亏损的端员。邢作云等(2006)指出依据岩石圈热力学衰减原理, 一定体积的深部构造可存留 $200 \sim 300$ Ma 之久, 而传导入浅表的热量则扩散较快, 因此根据大地热流值, 可将地震层析成像所显示的中生代与新生代的软流圈上涌柱区分开来, 并且通过对华北地区地震层析成像成果和大地热流值的研究, 认为吕梁地区存在中生代软流圈上涌柱。故较亏损的端员可能与软流圈物质有关。二长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值较小(基本上小于 -10), 较趋近华北克拉通下地壳, 尤其是二长岩。同时, 二长岩锆石 Hf 同位素 (${}^{176}\text{Hf}/{}^{177}\text{Hf})_i$ 为 $0.282121 \sim 0.282229$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 $-20.2 \sim -16.4$, 在锆石 Hf 同位素演化图解中(图9), Hf 同位素组成介于 $1.8 \sim 2.5$ Ga 地壳演化线之间, 远离球粒陨石演化线, 表明其源区应有壳源物质参与。华北克拉通基底岩石由新太古代至早元古代变质杂岩组成, 形成年龄介于 $1.8 \sim 2.5$ Ga 之间(耿元生等, 2000; 赵国春等, 2002)。二长岩锆石 Hf 同位素二阶段模式年龄 t_{DM2} 为 $2.02 \sim 2.46$ Ga, 并且 t_{DM2} 峰值为 $2.2 \sim 2.5$ Ga(图10), 与

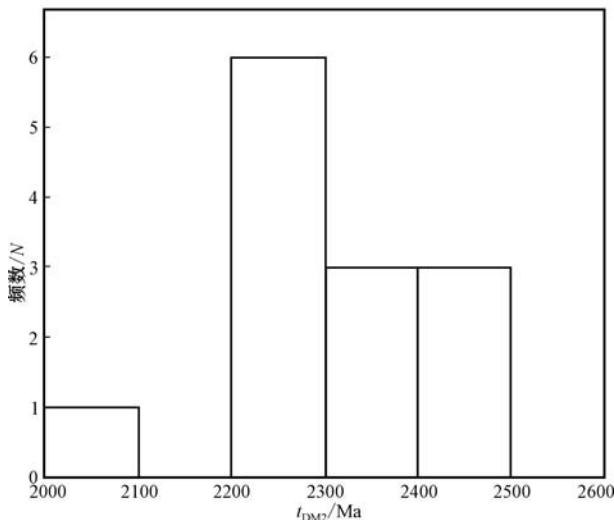


图10 紫金山岩体二长岩锆石 Hf 二阶段模式年龄 (t_{DM2}) 分布直方图

Fig. 10 Zircon Hf t_{DM2} of monzonite from the Zijinshan complex

基底岩石形成年龄相当, 表明古老基底物质可能参与了岩浆组成。综上所述, 紫金山岩体的源区物质可能有软流圈地幔、岩石圈地幔和地壳物质的共同参与, 并且各期岩浆中3种源区物质所占比例不同, 二长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩岩浆中壳源物质组分较多, 霞石正长岩岩浆可能含较多软流圈地幔物质, 透辉石正长岩和暗霞正长岩岩浆则以富集型岩石圈地幔为主。

紫金山岩体的形成可能与吕梁地区中生代软流圈上涌有关(邢作云等, 2006)。软流圈地幔的多次上涌促使来自软流圈、岩石圈地幔和下地壳物质部分熔融产生的岩浆发生多次不同比例的混合, 所形成的各期混合岩浆分批上侵定位在地壳浅部环境, 从而形成紫金山碱性杂岩体。

5.3 岩体构造背景及其意义

碱性岩形成于特定的构造环境, 常产于裂谷、地堑、地幔上拱带等拉张条件下(赵振华等, 1994; 周玲棣等, 1994; 阎国翰等, 2001)。中生代华北克拉通发生了构造体制的重大转折, 由东西向挤压构造体制转变为北北东向伸展构造体制(翟明国等, 2003)。紫金山杂岩体为典型的碱性岩体, 结合其形成的时空分布特征, 可以推测紫金山岩体为华北克拉通中生代构造体制转折后大规模伸展背景下的岩浆活动产物。晚中生代华北克拉通内广泛发育的岩浆活动是该地区构造体制转折的重要响应。侏罗纪华北克拉通内主要发育挤压环境下的壳源岩浆, 至早白垩世则主要表现为伸展环境下岩浆活动产物, 包括碱性岩、基性岩墙群、斜长岩-环斑花岗岩、双峰式火山岩、火成碳酸岩、金伯利岩、钾镁煌斑岩、高原溢流玄武岩、裂谷玄武岩等(阎国翰等, 1994; Jiang *et al.*, 2007; 陈根文等, 2008; Guo *et al.*, 2012)。形成于 $138 \sim 125$ Ma 的紫金山岩体表明该时期华北克拉通中西部已处于拉张型构造背景, 中生代华北克拉通构造格局的转变至少早于 138 Ma。

翟明国等(2003, 2004)提出华北东部构造体制转折是特提斯、古亚洲洋和太平洋等相邻板块相互作用共同导致的结果, 其峰期时限始于 $150 \sim 140$ Ma, 终于 $110 \sim 100$ Ma, 峰期为 $120 \sim 110$ Ma, 并且中生代华北克拉通构造体制转折与岩石圈减薄过程有很好的时空耦合, 在此期间华北陆块及相邻陆块的下地壳发生了大比例的熔融和壳幔物质交换。由此推测, 华北克拉通中部吕梁软流圈的上涌可能与中生代华北克拉通构造体制转折有关。中生代华北

克拉通构造体制转折产生的强大构造应力作用导致上地幔岩石圈-软流圈剧烈扰动,并在华北构造薄弱环节激起大型软流圈上涌,进而导致紫金山岩体的形成。

5.4 汾河富碱侵入岩带对华北克拉通破坏的制约

前人研究表明,华北克拉通东部和中西部地区具有不同的“破坏”表现:华北克拉通东部地区经历了岩石圈的整体性破坏以及地壳的强烈改造和减薄;华北克拉通中西部地区主体仍保留着克拉通稳定的属性,仅局部构造薄弱地区岩石圈改造或减薄,即主体稳定的鄂尔多斯盆地和环鄂尔多斯活动带(朱日祥等,2012)。以紫金山杂岩体为代表的汾河富碱侵入岩带位于鄂尔多斯盆地东缘,为“环鄂尔多斯活动带”的一部分,证实该地存在伸展背景下较大规模的碱性岩浆活动,可能正是华北克拉通中西部地区岩石圈破坏的反映。多数学者认为在华北克拉通内广泛发育岩浆活动的早白垩世(115~135 Ma)可能代表了华北克拉通破坏作用发生的高峰期(Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001; Yang *et al.*, 2003; 徐义刚, 2004; Wu *et al.*, 2005; 吴福元等, 2008)。形成于伸展环境下的汾河富碱侵入岩带典型岩体中紫金山岩体形成于 138.7~125.0 Ma, 前人利用锆石 LA-ICP MS U-Pb 定年得到狐偃山岩体形成于 129.9 Ma, 塔儿山-二峰山岩体形成于 133.9~128.0 Ma(Ying *et al.*, 2011), 故该带岩体形成年龄集中于 138.7~125.0 Ma, 与多数学者认为的华北克拉通破坏作用高峰期(115~135 Ma)几乎一致,进一步表明华北克拉通中西部古构造薄弱地区与东部地区几乎同时发生岩石圈减薄作用。

结合区域地质资料,可知华北克拉通中部除北部吕梁地区存在中生代软流圈上涌柱外,南部同样存在中条软流圈上涌柱(邢作云等, 2006; 邢集善等, 2007), 其与塔儿山-二峰山岩体的形成密切相关。结合该岩带的时空分布特征推测,因构造体制转换产生强大应力作用导致构造薄弱地区软流圈上涌进而引起的大规模壳-幔岩浆相互作用,可能为华北克拉通中西部地区中生代岩石圈破坏的主要原因。将紫金山岩体与该带其他典型岩体对比可知(表6),紫金山岩体虽出露面积较小,但岩石类型多样,并且岩石碱性程度较其他岩体高。由北至南,紫金山、狐偃山和塔儿山-二峰山岩体 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 分别为 0.703 880~0.706 313、0.705 319~0.707 379 和 0.705 136~0.707 147, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 分别为 -12.3~

-0.5、-17.1~-8.8 和 -18.2~-13.9。在 $\epsilon\text{Nd}(t)$ -($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 关系图解(图8)中,狐偃山和塔儿山-二峰山岩体位于 EM I 型富集地幔和华北克拉通下地壳之间,暗示岩浆物质由华北克拉通中生代岩石圈富集地幔和下地壳物质组成,并且由北至南,紫金山、狐偃山和塔儿山-二峰山岩体样品投点逐渐向华北克拉通下地壳靠近,表明华北克拉通中部由北至南因软流圈上涌所引起的壳幔岩浆相互作用中幔源岩浆逐渐减少。

表6 汾河富碱侵入岩带典型岩体特征一览表
Table 6 General characteristics of some typical rocks from Fenhe alkali-rich intrusive rock zone

岩体名称	紫金山	狐偃山	塔儿山-二峰山
岩性	二长岩、霞石正长岩、粗面斑岩等	二长岩、正长岩	二长岩
岩体形态	马蹄状	若干不规则状小岩体组成	多个不规则状小岩体组成
出露面积	20 km ²	55 km ²	50 km ²
成岩时代	138.7~125.0 Ma	129.9 Ma	133.9~128.0 Ma
里特曼指数	5.81~20.95	5.85~10.85	3.61~5.91
($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) _i	0.703 880~ 0.706 313	0.705 319~ 0.707 379	0.705 136~ 0.707 147
$\epsilon\text{Nd}(t)$	-12.3~-0.5	-17.1~-8.8	-18.2~-13.9
资料来源	本文	Ying 等(2011)	Ying 等(2011)

6 结论

(1) 紫金山环状碱性杂岩体中最早形成的二长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 134.7 Ma。综合前人的研究成果,认识到该岩体由 7 个期次岩浆活动形成,由外环到内环,由早而晚依次形成的主要岩石类型为二长岩、辉石正长岩、霓霞钛辉岩、暗霞正长岩、霞石正长岩、假白榴石斑岩和粗面斑岩。岩体形成于 138.7~125.0 Ma, 系早白垩世碱性岩浆事件的产物。

(2) 紫金山碱性杂岩体的岩石具有富碱,高钾,贫镁、钙的岩石化学特征,属于碱性岩石系列。其稀土元素总量高,轻、重稀土元素分馏明显, Eu 异常不显著。微量元素富集 LREE 和 Rb、Ba、K、Sr 等大离子亲石元素,亏损 HREE 和 Th、U、Nb、Ta、Ti 等高场强元素。全岩 I_{Sr} 范围为 0.704 228~0.706 313, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值为 -12.3~-0.5, 锆石的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 介于 -20.2~-16.4 之间,二阶段 Hf 模式年龄 t_{DM2} 在 2.22~2.46 Ga 之间。

(3) 紫金山碱性杂岩体形成于华北克拉通中生代构造体制转折后的伸展背景下。因构造体制转换产生强大应力作用导致吕梁软流圈上涌, 软流圈地幔的多次上涌形成软流圈、岩石圈地幔和下地壳物质按不同比例混合的多期岩浆, 各期岩浆分批上侵定位在地壳浅部环境, 从而形成紫金山碱性杂岩体。中生代华北克拉通构造格局的转变至少早于 138 Ma。

(4) 汾河富碱侵入岩带是反映华北克拉通中西部岩石圈破坏事件的岩浆活动证据, 其形成时间集中于 138.7~125.0 Ma。华北克拉通中西部古构造薄弱地区与东部地区几乎同时发生岩石圈减薄作用。因构造体制转换产生强大应力作用导致构造薄弱地区软流圈上涌进而引起大规模的壳-幔岩浆相互作用, 可能为华北克拉通内部中生代岩石圈破坏的主要原因, 并且由北至南壳幔岩浆相互作用中幔源岩浆逐渐减少。

References

- Best M G. 1982. *Igneous and Metamorphic Petrology*[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 196~221.
- Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1~2): 243~258.
- Cai Jianhui, Yan Guohan, Xiao Chengdong, *et al.* 2004. Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the Mesozoic intrusive rocks in the Taihang-Da Hinggan Mountains tectonomagmatic belt and their source region[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1 225~1 242(in Chinese with English abstract).
- Canning J C, Henney P J and Morrison M A. 1996. Geochemistry of late Caledonian minettes from Northern Britain: implication for the Caledonian sub-continental lithospheric mantle[J]. *Mineralogical Magazine*, 60: 221~236.
- Chen Gang, Ding Chao, Xu Liming, *et al.* 2012. Analysis on the thermal history and uplift process of Zijingshan intrusive complex in the eastern Ordos basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(11): 3 731~3 741(in Chinese with English abstract).
- Chen Genwen, Xia Huan and Chen Shaoqing. 2008. The geological evidences for the tectonic transition in late Mesozoic in North China [J]. *Geology in China*, 35(6): 1 162~1 177(in Chinese with English abstract).
- Ding Chao, Chen Gang, Zhang Hongda, *et al.* 2011. Geochemical characteristics and geological environment of Zijingshan complex in the eastern Ordos Basin[J]. *J. Mineral Petrol.*, 31(3): 74~81(in Chinese with English abstract).
- Downes H. 2001. Formation and modification of the shallow subcontinental lithospheric mantle: a review of geochemical evidence from ultramafic xenoliths suites and tectonically emplaced ultramafic massifs of western and central Europe[J]. *Petrol.*, 42: 233~250.
- Eby G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20: 641~644.
- Geng Yuansheng, Wan Yusheng, Shen Qihan, *et al.* 2000. Chronological framework of the early Precambrian important events in the Liliang area, Shanxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 216~223(in Chinese with English abstract).
- Geng Yuansheng, Yang Chonghui and Wan Yusheng. 2006. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Liliang area, North China Craton: constraint from isotopic geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 305~314(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133~147.
- Griffin W L, Zhang A D and O'Reilly S Y. 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean Craton[A]. Flower M F, Chung S L and Loch. *Mantle Dynamics and Plate Interactions in East Asia*[C]. Washington D C: Am. Geophys Union, Monograph, 27: 107~126.
- Guo Lei, Wang Tao, Castro Antonio, *et al.* 2012. Petrogenesis and evolution of late Mesozoic granitic magmatism in the Hohhot metamorphic core complex, Daqing Shan, North China[J]. *International Geology Review*, 54(16): 1 885~1 905.
- Hong D W, Wang S G, Han B F, *et al.* 1996. Post-orogenic alkaline granites from China and comparisons with anorogenic alkaline granites elsewhere[J]. *Journal of Southeast Asian Earth*, 13(1): 13~27.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, *et al.* 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2 595~2 604(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y, Luo 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 northern Dabie complex, central China[J]. *Chemical Geology*, 157: 119~146.
- Jahn B M and Bai Y L. 1983. Early Archean(3.5 Ga) metabasic rocks from the Tsao Zhuang Group, E Hebei, China: Sm-Nd common Pb

- and Rb-Sr isotopic ages[A]. Symposium "Precambrian Crustal Evolution"[C]. Beijing.
- Ji Shaocheng, Wang Qian and Xu Zhiqin. 2008. Break-up of the North China Craton through lithospheric thinning[J]. *Acta Geologica Sinica*, 38(4): 339~343(in Chinese with English abstract).
- Jiang N, Liu Y S, Zhou WG, *et al.* 2007. Derivation of Mesozoic adakitic magmas from ancient lower crust in the North China craton [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71: 2 591~2 608.
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, *et al.* 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms [M]. Oxford: Blackwell.
- Liao Changzhen, Zhang Yueqiao and Wen Changshun. 2007. Structural styles of the eastern boundary zone of the Ordos basin and its regional tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 81(4): 466~474(in Chinese with English abstract).
- Liu Chaohui, Liu Fulai and Zhao Guochun. 2013. Provenance and tectonic setting of the Jiehekou Group in the Lüliang Complex: Constraints from zircon U-Pb age and Hf isotopic studies[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(2): 517~532(in Chinese with English abstract).
- Liu C H, Zhao G C, Sun M, *et al.* 2011. U-Pb and Hf isotopic study of detrital zircons from the Yejiashan Group of the Lüliang Complex: Constraints on the timing of collision between the eastern and western Blocks, North China Craton[J]. *Sedimentary Geology*, 236(1~2): 129~140.
- Liu D Y, Nutman A P W, Compston W, *et al.* 1992. Remnants of $\geq 3 800$ Ma a crust in the Chinese part of the Sino-Korean Craton[J]. *Geology*, 20: 339~342.
- Ludwig K R. 2001. *Squid 1.02: a user's manual* [J]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 2: 19.
- Ma C, Li Z, Ehlers C, *et al.* 1998. A post-collisional magmatic plumbing system: Mesozoic granitoid plutons from the Dabieshan high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphic zone, east-central China[J]. *Lithos*, 45: 431~456.
- Molzahn M, Reisberg L and Worner G. 1996. Os, Sr, Nd, Pb, O isotope and trace element date from the Ferrar flood basalts, Antarctica: evidence for an enriched subcontinental lithospheric source[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 144: 529~546.
- Soderlund U, Patchett P J, Verroot J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusion[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3~4): 311~324.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, *et al.* 2002. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geological Review*, 48 (Sup.): 26~30(in Chinese with English abstract).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunderson A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. Geological Society of London, Special Publication 42, 313~345.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Rev. Geophys.*, 33: 241~165.
- Vorkert R A, Feigenson M D, Patino L C, *et al.* 2000. Sr and Nd isotopic compositions, age and petrogenesis of A-type granitoids of Vernon Supersuite, New Jersey Highlands, USA[J]. *Lithos*, 50 (4): 325~347.
- Weyer S, Munker C, Rehkamper M, *et al.* 2002. Determination of ultralow Nb, Ta, Zr and Hf concentrations and the chondritic Zr/Hf and Nb/Ta ratios by isotope dilution analyses with multiple collector ICP-MS[J]. *Chemical Geology*, 187(3): 295~313.
- Williams I S. 1998. U-Th-Pb geochronology by ionmicroprobe [A]. McKibben M A, Shanks W C and Ridley W I. *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes*[C]. *Review of Economic Geology*, 1~35.
- Wright J B. 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis[J]. *Geol. Mag.*, 106: 370~384.
- Wu F Y, Lin J Q, Wilde S A, *et al.* 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 103~119.
- 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).
- Xiao Yuanyuan, Ren Zhanli, Qin Jiangfeng, *et al.* 2007. Geochemistry and zircon La-ICP MS U-Pb dating of the Zijinshan alkaline complex in the Linxian county, Shanxi Province: Geological Implication[J]. *Geological Review*, 53(5): 656~663(in Chinese with English abstract).
- Xing Jishan, Yang Weiran, Xing Zuoyun, *et al.* 2007. Deep-seated structure characteristics of eastern China and its relation with metal mineralization-concentrated region[J]. *Earth Science Frontiers*, 14 (3): 114~130(in Chinese with English abstract).
- Xing Zuoyun, Xing Jishan, Zhao Bin, *et al.* 2006. Identification of deep structure of two episodes in North China and its significance-Yanshanian Movement and deep process[J]. *Geological Review*, 52 (4): 434~441(in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang. 2004. Lithospheric thinning beneath North China: a temporal and spatial perspective[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(3): 324~331(in Chinese with English abstract).

- Xu Y G. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archaean lithospheric keel beneath the sino-korean craton in China: evidence, timing and mechanism[J]. *Physics and Chemistry of the Earth(A)*, 26: 747~757.
- Yan Guohan, Cai Jianhui, Ren Kangxu, *et al.* 2008. Nd, Sr and Pb isotopic geochemistry of late-Mesozoic alkaline-rich intrusions from the Tanlu Fault zone: evidence of the magma source[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(6): 1 223~1 236(in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Mou Baolei, Xu Baoliang, *et al.* 2002. Characteristics and Implications of Nd, Sr and Pb Isotopes and Chronology of Phanerozoic Alkaline-rich Intrusions in North China[J]. *Geological Review*, 48(Sup.): 69~76(in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Mou Baolei and Zeng Yishan. 1989. Age and distribution of alkaline and subalkaline intrusive rocks in Northern China[J]. *Bull. Shenyang Inst. Geol. Min. Res., Chinese Acad. Geol. Sci.*, 19: 93~100(in Chinese with English abstract).
- Yan Guohan, Xu Baoliang, Mou Baolei, *et al.* 2001. Characteristics and implications of Nd, Sr, Pb in Mesozoic alkaline-rich intrusions in North China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 234~237(in Chinese with English abstract).
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan and Wilde S A. 2003. A review of the geodynamic setting of large-scale Late Mesozoic gold mineralization in the North China craton: an association with lithosphere thinning[J]. *Ore Geology Reviews*, 23: 125~152.
- Yang Xingke, Chao Huixia, Zhang Zhefeng, *et al.* 2010. Characteristics of the Zijinshan complex and its dynamic environment in the East of the Ordos Basin—Analysis of a classic example on the deep processes of thermal-magma activity in the basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(2): 269~281(in Chinese with English abstract).
- Yang Xingke, Chao Huixia, Zheng Menglin, *et al.* 2008. Geological significance of SHRIMP dating of Zijinshan alkali complex in the eastern Ordos basin, China[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 54~63(in Chinese with English abstract).
- Ying J F, Zhang H F and Tang Y J. 2011. Crust-mantle interaction in the central North China Craton during the Mesozoic Evidenced from zircon U-Pb chronology, Hf isotope and geochemistry of syenitic-monzonitic intrusions from Shanxi province[J]. *Lithos*, 125: 449~462.
- Ying J F, Zhang H F, Sun M, *et al.* 2007. Petrology and geochemistry of Zijinshan alkaline intrusive complex in Shanxi Province, western North China Craton: Implication for magma mixing of different sources in an extensional regime[J]. *Lithos*, 98: 45~66.
- Yu Jinhai, Wang Dezi, Wang Ciyin, *et al.* 1997. Ages of the Luliang Group and its main metamorphism in the Luliang mountains, Shanxi-evidence from single-grain zircon U-Pb ages[J]. *Geological Review*, 43(4): 403~408(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2008. Lower crust and lithospheric mantle beneath the North China Craton before the Mesozoic lithospheric disruption[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(10): 2 185~2 204(in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Meng Qingren, Liu Jianming, *et al.* 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in eastern North China and implication for geodynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 285~297(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfa, Chen Gang, Bao Hongping, *et al.* 2011. U-Pb zircon geochronology of the Zijinshan alkaline intrusive complex, Shanxi Province, and its geological significance by using LA-ICP-MS[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 31(1): 70~79(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfa, Chen Gang, Bao Hongping, *et al.* 2010. Petrogenesis of the alkaline complex from Linxian, Shanxi Province: Petrography and mineralogical evidences[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 40(1): 111~120(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfu. 2009. Peridotite-melt interaction: a key point for the destruction of craton lithospheric mantle[J]. *Chinese Sci Bull*, 54(14): 2 008~2 026(in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Sun Min, Zhou M F, *et al.* 2004. Highly heterogeneous Late Mesozoic lithospheric mantle beneath the North China Craton: evidence for Sr-Nd-Pb isotopic systematic of mafic igneous rocks[J]. *Geol.*, 141(1): 55~62.
- 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).
- Zhao G C, Wilde S A, Cawood P A, *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: 45~73.
- Zhao Haijie, Mao Jingwen, Xiang Junfeng, *et al.* 2010. Mineralogy and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of quartz diorite in Tonglushan deposit, Hubei Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 768~784(in Chinese with English abstract).
- Zhao Junfeng, Liu Chiyang, Wang Xiaomei, *et al.* 2009. Uplifting and evolution characteristics in the Liliang mountain and its adjacent area during the Meso-Cenozoic[J]. *Geological Review*, 55(5): 663

- ~672(in Chinese with English abstract).
- Zhou Lingdi, Zhao Zhenhua and Zhou Guofu. 1996. Isotopic chronology of some alkaline rock bodies in China[J]. *Geochimica*, 25(2): 164~171(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua. 2006. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China in the Cenozoic-Mesozoic: review and prospect[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(2): 50~64(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xinhua, Zhang Guohui, Yang Jinhui, *et al.* 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China Craton and implications to geodynamic processes[J]. *Geochimica*, 30(1): 10~14(in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, *et al.* 2012. Destruction of the North China Craton[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 42(8): 1135~1159.
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics[J]. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493~571.
- ### 附中文参考文献
- 蔡剑辉, 阎国翰, 肖成东, 等. 2004. 太行山-大兴安岭构造岩带中生代侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及物质来源探讨[J]. *岩石学报*, 20(5): 1225~1242.
- 陈刚, 丁超, 徐黎明, 等. 2012. 鄂尔多斯盆地东缘紫金山侵入岩热演化史与隆升过程分析[J]. *地球物理学报*, 55(11): 3731~3741.
- 陈根文, 夏换, 陈绍清. 2008. 华北地区晚中生代重大构造转折的地质证据[J]. *中国地质*, 35(6): 1162~1177.
- 丁超, 陈刚, 张宏达, 等. 2011. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体地球化学与构造环境分析[J]. *矿物岩石*, 31(3): 74~81.
- 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 等. 2000. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代学框架[J]. *地质学报*, 74(3): 216~223.
- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据[J]. *岩石学报*, 22(2): 305~314.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23(10): 2595~2604.
- 嵇少丞, 王茜, 许志琴. 2008. 华北克拉通破坏与岩石圈减薄[J]. *地质学报*, 82(2): 174~193.
- 廖昌珍, 张岳桥, 温长顺. 2007. 鄂尔多斯盆地东缘边界带构造样式及其区域构造意义[J]. *地质学报*, 81(4): 466~474.
- 刘超辉, 刘福来, 赵国春. 2013. 吕梁杂岩界河口群的源区特征及构造背景: 来自锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的证据[J]. *岩石学报*, 29(2): 517~532.
- 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 48(增刊): 26~30.
- 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.
- 吴利仁, 张兆忠, 张玉学, 等. 1964. 论山西台背斜碱性岩浆的成因及演化[J]. *地质科学*, 2: 125~142.
- 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*, 49(16): 1589~1604.
- 肖媛媛, 任战利, 秦江峰, 等. 2007. 山西临县紫金山碱性杂岩体 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义[J]. *地质论评*, 53(5): 656~663.
- 邢集善, 杨巍然, 邢作云, 等. 2007. 中国东部深部构造特征及其与矿集区关系[J]. *地学前缘*, 14(3): 114~130.
- 邢作云, 邢集善, 赵斌, 等. 2006. 华北地区两个时代深部构造的识别及其意义-燕山运动与深部过程[J]. *地质论评*, 52(4): 432~441.
- 徐平, 吴福元, 谢烈文, 等. 2004. U-Pb 同位素定年标准锆石的 Hf 同位素[J]. *科学通报*, 49(14): 1403~1410.
- 徐义刚. 2004. 华北岩石圈减薄的时空不均一特征[J]. *高校地质学报*, 10(3): 324~331.
- 阎国翰, 蔡剑辉, 任康绪, 等. 2006. 华北克拉通碱性岩和基性-超基性岩 25 亿年来 ϵ_{Nd} 值的演化与源区两次富集及三次转型[A]. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨论文摘要[C].
- 阎国翰, 蔡剑辉, 任康绪, 等. 2008. 郟庐断裂带晚中生代富碱侵入岩 Nd、Sr、Pb 同位素特征及源区性质探讨[J]. *岩石学报*, 24(6): 1223~1236.
- 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 2002. 中国北方显生宙富碱侵入岩年代学和 Nd、Sr、Pb 同位素特征及其意义[J]. *地质论评*, 48(增刊): 69~76.
- 阎国翰, 牟保磊, 曾贻善. 1989. 中国北方碱性和偏碱性侵入岩的时空分布及大地构造意义[J]. *中国地质科学院沈阳地质矿产研究所所刊*, 19: 93~100.
- 阎国翰, 许保良, 牟保磊. 1994. 板内拉张性岩浆作用与深部地球动力学[A]. *中国矿物岩石地球化学研究新进展[C]*. 兰州: 兰州大学出版社, 92~93.
- 阎国翰, 许保良, 牟保磊, 等. 2001. 中国北方中生代富碱侵入岩钽、铽、铅同位素特征及其意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 234~237.
- 杨兴科, 晁会霞, 张哲峰, 等. 2010. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体特征与形成的动力学环境-盆地热力-岩浆活动的深部作用典型实例剖析[J]. *大地构造与成矿学*, 34(2): 269~281.
- 杨兴科, 晁会霞, 郑孟林, 等. 2008. 鄂尔多斯盆地东部紫金山岩体 SHRIMP 测年地质意义[J]. *矿物岩石*, 28(1): 54~63.

- 于津海, 王德滋, 王赐银, 等. 1997. 山西吕梁群和其主变质作用的锆石 U-Pb 年龄[J]. 地质论评, 43(4): 403~408.
- 翟明国. 2008. 华北克拉通中生代破坏前的岩石圈地幔与下地壳[J]. 岩石学报, 24(10): 2 185~2 204.
- 翟明国, 孟庆任, 刘建明, 等. 2004. 华北东部中生代构造体制转折峰期的主要地质效应和形成动力学探讨[J]. 地学前缘, 11(3): 285~297.
- 翟明国, 朱日祥, 刘建明, 等. 2003. 华北东部中生代构造体制转折的关键时限[J]. 中国科学(D辑), 33(10): 913~920.
- 张宏法, 陈刚, 鲍洪平, 等. 2011. 山西临县紫金山碱性杂岩体内二长岩锆石 U-Pb 年代学及其意义[J]. 矿物学报, 31(1): 70~79.
- 张宏法, 陈刚, 鲍洪平, 等. 2010. 山西临县紫金山碱性火山机构岩体岩浆演化-岩相学及岩石矿物学的证据[J]. 西北大学学报, 40(1): 111~120.
- 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(14): 2 008~2 026.
- 张宏福, 周新华, 范蔚茗, 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): 1 271~1 280.
- 赵国春, 孙敏. 2002. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合[J]. 中国科学(D辑), 32(7): 538~549.
- 赵海杰, 毛景文, 向君峰, 等. 2010. 湖北铜绿山矿床石英闪长岩的矿物学及 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. 岩石学报, 26(3): 768~784.
- 赵俊峰, 刘池洋, 王晓梅, 等. 2009. 吕梁山地区中-新生代隆升演化探讨[J]. 地质论评, 55(5): 663~672.
- 赵振华, 周玲棣. 1994. 我国某些富碱侵入岩的稀土元素地球化学[J]. 中国科学(B辑), 24(10): 1 109~1 120.
- 周玲棣, 赵振华. 1994. 我国富碱侵入岩的岩石学和岩石化学特征[J]. 中国科学(B辑), 24(10): 1 093~1 101.
- 周玲棣, 赵振华, 周国富. 1996. 我国一些碱性岩的同位素年代学研究[J]. 地球化学, 25(2): 164~171.
- 周新华. 2006. 中国东部中-新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题[J]. 地学前缘, 13(2): 50~64.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等. 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义[J]. 地球化学, 30(1): 10~14.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1 135~1 159.

2013 年度部分地质学类期刊主要计量指标一览表

序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率	序号	刊名	影响因子	总被引频次	他引率
1	岩石学报	1.928	6876	0.74	17	高校地质学报	0.838	1353	0.96
2	地质学报	1.770	4430	0.92	18	地球化学	0.826	1812	0.95
3	矿床地质	1.551	2423	0.89	19*	地球科学	0.807	2117	0.92
4	地学前缘	1.403	3770	0.92	20	地质力学学报	0.788	451	0.86
5	地质通报	1.324	3132	0.88	21	岩矿测试	0.661	1215	0.72
6	大地构造与成矿学	1.292	1034	0.83	22	地球与环境	0.658	820	0.84
7	地球学报	1.263	1740	0.85	23	地质科技情报	0.647	1187	0.86
8	中国科学 地球科学	1.254	3932	0.93	24	地质与勘探	0.645	1390	0.79
9	地质论评	1.112	2407	0.93	25	地层学杂志	0.516	722	0.81
10	中国地质	1.068	1928	0.86	26	矿物岩石地球化学通报	0.507	728	0.96
11	地球科学进展	0.979	2872	0.95	27	矿物学报	0.503	931	0.93
12	岩石矿物学杂志	0.955	1157	0.92	28	新疆地质	0.422	784	0.89
13	现代地质	0.948	1815	0.77	29	地质科学	0.474	1429	0.95
14	沉积学报	0.893	2775	0.92	30	西北地质	0.374	634	0.83
15	矿物岩石	0.868	951	0.93	31	地质找矿论丛	0.268	373	0.92
16	吉林大学学报地球科学版	0.859	1869	0.87	32	矿产勘查	0.187	245	0.92

本表数据引自《2014 年版中国科技期刊引证报告(核心版)》(中国科学技术信息研究所编)。