

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.11.006

# 北秦岭碾道奥陶纪碱性正长岩的厘定及其对早古生代构造演化的制约

翟文建<sup>1,2,3</sup>, 尤阳阳<sup>4</sup>, 赵焕<sup>1,2,3</sup>, 李承东<sup>5</sup>, 李山坡<sup>1,2,3</sup>

ZHAI Wenjian<sup>1,2,3</sup>, YOU Yangyang<sup>4</sup>, ZHAO Huan<sup>1,2,3</sup>, LI Chengdong<sup>5</sup>, LI Shanpo<sup>1,2,3</sup>

1.河南省地质调查院,河南 郑州 450001;

2.河南省金属矿产成矿地质过程与资源利用重点实验室,河南 郑州 450001;

3.河南省地质研究院,河南 郑州 450016;

4.河南省地质矿产勘查开发局第一地质矿产调查院,河南 洛阳 471023;

5.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170

1.Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450001, Henan, China;

2.Henan Key Laboratory for Metallogenic Process of Metal Mineral Resource and Resource Utilization, Zhengzhou 450001, Henan, China;

3.Henan Institute of Geology, Zhengzhou 450016, Henan, China;

4.Geology and Mineral Resources Survey Institute of Henan Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Luoyang 471023, Henan, China;

5.Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

**摘要:**通过详细的野外地质调查,结合岩相学、岩石地球化学、锆石 U-Pb 测年等研究,首次在北秦岭造山带内乡县碾道一带厘定出一套奥陶纪碱性正长岩体。该岩体以构造岩块的形式赋存于朱阳关-夏馆断裂带内,但保留早期与秦岭岩群的侵入接触关系,岩石组合由角闪正长岩和霓辉正长岩构成。岩体低硅( $\text{SiO}_2 = 52.09\% \sim 67.48\%$ ),富碱( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5.82\% \sim 11.75\%$ ),贫镁( $\text{MgO} = 0.09\% \sim 1.99\%$ ),高铝( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.87\% \sim 17.81\%$ ),富集轻稀土元素、Rb 和 K,亏损 Nb、Ta、P 和 Ti,显示出  $A_2$  型花岗岩的特点。岩石地球化学特征指示,岩体可能源于受俯冲组分改造的富集型地幔的部分熔融,形成背景与岛弧环境有关。获得角闪正长岩 LA-ICP-MS 结晶锆石 U-Pb 年龄为  $457.4 \pm 1.8$  Ma,形成时代为晚奥陶世。综合区域研究成果认为,碾道碱性正长岩体可能代表了北秦岭早古生代约 450 Ma 抬升折返过程中构造负反转体制下的初始岩浆记录,其侵位结晶年龄则代表了构造负反转发生的初始年限。

**关键词:**北秦岭造山带;碾道;碱性正长岩;锆石 U-Pb 定年; $A_2$  型花岗岩;构造负反转;地质调查工程

**中图分类号:** P534.42; P588.12<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)11-1967-15

**Zhai W J, You Y Y, Zhao H, Li C D, Li S P. Confirmation of the Ordovician alkali syenite in Niandao: implications for the Early Paleozoic tectonic evolution of North Qinling. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(11): 1967-1981**

**Abstract:** Through detailed field geological surveys, combined with systematic studies of petrography, geochemical and zircon U-Pb chronology, the Ordovician alkali syenite is determined in Niandao area of Neixiang County, which was first discovered in North Qinling. The Niandao alkali syenite was involved in Zhuyangguan—Xiaguan fault belt and transformed into tectonic massif, however, the early

收稿日期:2020-05-10;修订日期:2020-08-10

资助项目:中国地质调查局项目《河南 1:5 万小水幅、夏馆幅、二郎坪幅区域地质矿产调查》(编号:DD20160043-03)、《中条-熊耳山成矿区地质矿产调查》(编号:DD20160043)和河南省自然资源厅项目《华北陆块南缘碱性岩型稀有稀土金属富集机理与找矿方向研究》(编号:豫财招标采购-2020-165-3)

作者简介:翟文建(1983-),男,硕士,高级工程师,从事区域基础地质研究。E-mail:zhaiwenjian@163.com

intrusive contact with Qinling Complex was preserved, and intrusive rocks were mainly composed of hornblende syenite and aegirine-augite syenite. Samples are characterized by relatively low silicon ( $\text{SiO}_2 = 52.09\% \sim 67.48\%$ ), total alkali ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 5.82\% \sim 11.75\%$ ), abundant aluminum ( $\text{Al}_2\text{O}_3 = 11.87\% \sim 17.81\%$ ), depleted magnesium ( $\text{MgO} = 0.09\% \sim 1.99\%$ ), enrichment of LREE, Rb and K, depletion of Nb, Ta, P and Ti, indicate that the intrusion is aluminous A-type granite and further classified to  $A_2$  type. The geochemical characteristics show that this pluton may be dominantly derived from partial melting of an enriched mantle modified by subduction-related components, and the magma produced was subjected to minor amounts of crustal contamination during its ascending process, and its formation might be related to an island arc environment. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of hornblende syenite gave  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted mean ages of  $457.4 \pm 1.8$  Ma, showing that the Niandao alkali syenite emplaced in Late Ordovician. Combined with the regional geological data, the Niandao alkali syenite ought to be initial magmatism record of negative structure inversion of North Qinling that experienced in the Paleozoic stage of exhumation at ca. 450 Ma, and its formation age should represent the initial time of negative structure inversion.

**Key words:** North Qinling orogenic belt; Niandao; alkali syenites; zircon U-Pb dating;  $A_2$ -type granite; negative structure inversion; geological survey engineering

碱性岩是地壳中分布较稀少和产出环境独特的一种岩石类型,形成于岩石圈拉张环境,深源浅成的属性载有地球深部重要信息<sup>[1-2]</sup>,与成矿作用关系密切<sup>[2-4]</sup>,近年成为关注的焦点。秦岭造山带是华北克拉通与扬子克拉通长期汇聚形成的复合造山带<sup>[5-7]</sup>,自元古宙以来经历过多次完整的构造岩浆和造山作用<sup>[8-9]</sup>,碱性岩浆活动十分强烈<sup>[10]</sup>,碱性岩种类繁多,主体以中深成侵入相和浅成相的正长岩类和霞石正长岩类为主<sup>[11]</sup>,空间上则以成对的带状近EW向展布,均集中分布于秦岭造山带与扬子板块、华北板块的接触边界断裂上及其边缘附近<sup>[11-14]</sup>。其可能受地球发展过程中3个主要张性背景阶段(Columbia超大陆裂解、Rodinia超大陆裂解和中生代中国东部构造体系转折期)的控制<sup>[13,15]</sup>,大部分形成于中-新元古代和中生代,锆石U-Pb年龄集中于1840~1469 Ma<sup>[15-16]</sup>、844.3~806 Ma<sup>[13,17]</sup>和245.5~122.8 Ma<sup>[4,18-19]</sup>;古生代碱性岩则呈零星出露,成岩于晚奥陶世-早志留世(445.2~434.3 Ma)<sup>[20-21]</sup>,仅分布于中秦岭造山带内,在北秦岭造山带内尚无相关报道。

近年来,以小水幅1:5万区域地质调查为契机,在北秦岭造山带内乡县碾道一带厘定出一套早古生代碱性岩体——碾道碱性正长岩体,由具强烈定向组构的糜棱岩化角闪正长岩-片麻状辉辉正长岩单元组成,区域上系首次发现。本文报道了碾道碱性正长岩的岩石学、地球化学、年代学等方面的研究资料,确定其形成时代、岩浆源区特征和构造背景,为深入认识北秦岭早古生代构造岩浆演化提供新的约束资料。

## 1 区域地质背景

秦岭造山带是中国大陆中央造山带(系)的主要组成部分,由2个主缝合带(商丹和勉略缝合带)和北秦岭(及华北克拉通南缘)、扬子克拉通北缘及二者间的中秦岭地块3个块体组成<sup>[5,22]</sup>。其中,北秦岭造山带位于商-丹断裂带与洛南-栾川断裂带之间(图1-a),主要岩石地层单元由宽坪岩群、丹凤岩群、二郎坪群和秦岭岩群组成<sup>[23-24]</sup>,相邻岩群之间均以大型剪切带或断裂带接触,相互叠置呈NWW向展布<sup>[6,25]</sup>。宽坪岩群出露于北秦岭的最北端,为一套高绿片岩相-角闪岩相的中浅变质岩系,由基性火山岩(绿片岩)-变质碎屑岩(各种片岩)-碳酸盐岩夹碎屑岩(大理岩、片岩)组成,是由形成于不同时代、不同构造背景的岩石单元通过构造作用混杂叠置而成的混杂地层单位<sup>[23,26]</sup>,形成时代可能从新元古代至早古生代<sup>[27]</sup>。丹凤岩群发育于北秦岭的最南端,主要由形成于古生代的N-MORB和E-MORB型蛇绿岩<sup>[6,28]</sup>和形成于洋内岛弧的火山-沉积岩<sup>[29]</sup>组成,普遍经历了绿片岩相-低角闪岩相变质作用,化石资料和测年结果显示其形成于早古生代<sup>[6,30]</sup>。二郎坪群主要为一套具有岛弧-弧后盆地特征的火山沉积组合<sup>[6,31]</sup>,由变质火山岩、变质碎屑岩、大理岩等组成,以低压连续变质为特点<sup>[32]</sup>,普遍经历了低绿片岩相-角闪岩相的变质作用<sup>[25,33]</sup>。根据早寒武世-中泥盆世的化石资料<sup>[34-36]</sup>及火山岩和侵入体的433~496 Ma结晶年龄,将二郎坪群的形成时代限定为早古生代<sup>[25,37-41]</sup>。秦岭岩群则构成北秦岭地体最古老的前寒武纪结

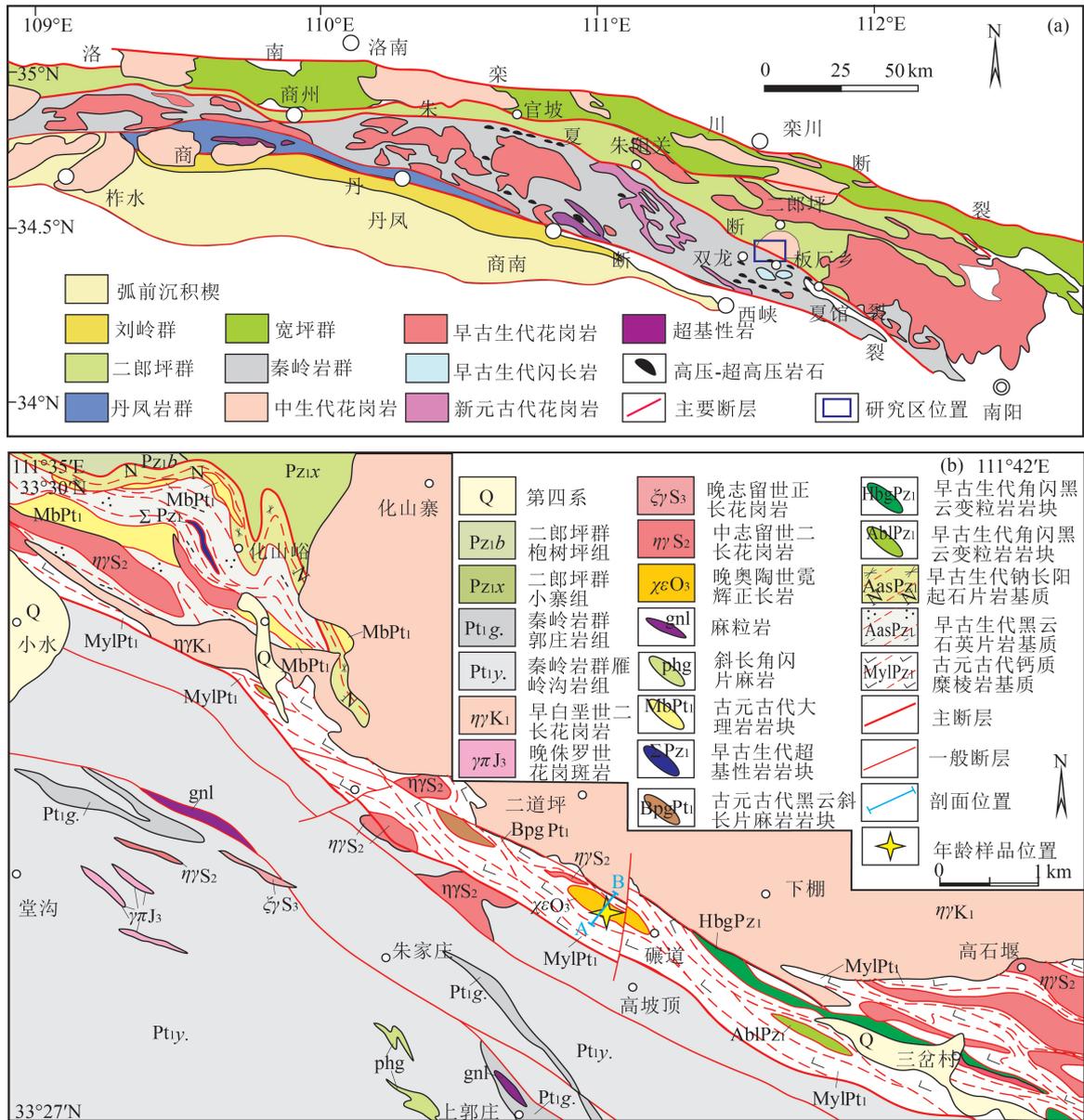


图 1 北秦岭构造带构造地质简图(a)和北秦岭小水—全神庙地区地质略图(b)

Fig. 1 Sketch geological maps of the North Qinling(a) and Xiaoshui—Quanshenmiao area in North Qinling(b)

晶基底,为一套富铝、富碳的中深变质表壳岩系<sup>[42]</sup>,变质程度普遍表现为高角闪岩相,局部可达麻粒岩相<sup>[25]</sup>,形成于古元古代<sup>[43-45]</sup>或中—新元古代<sup>[46-48]</sup>。其中,二郎坪群和秦岭岩群的构造边界线,即朱阳关—夏馆断裂带<sup>[49]</sup>,由张思纯在 1:20 万栾川幅区域地质调查报告中创名<sup>[50]</sup>,为碾道碱性正长岩体的赋存构造。该断裂位于北秦岭造山带中部,为一套由韧性、韧—脆性、脆性变形共同组成并伴随走滑性质的的大型构造带,属深达上地幔的超壳断裂<sup>[51]</sup>,

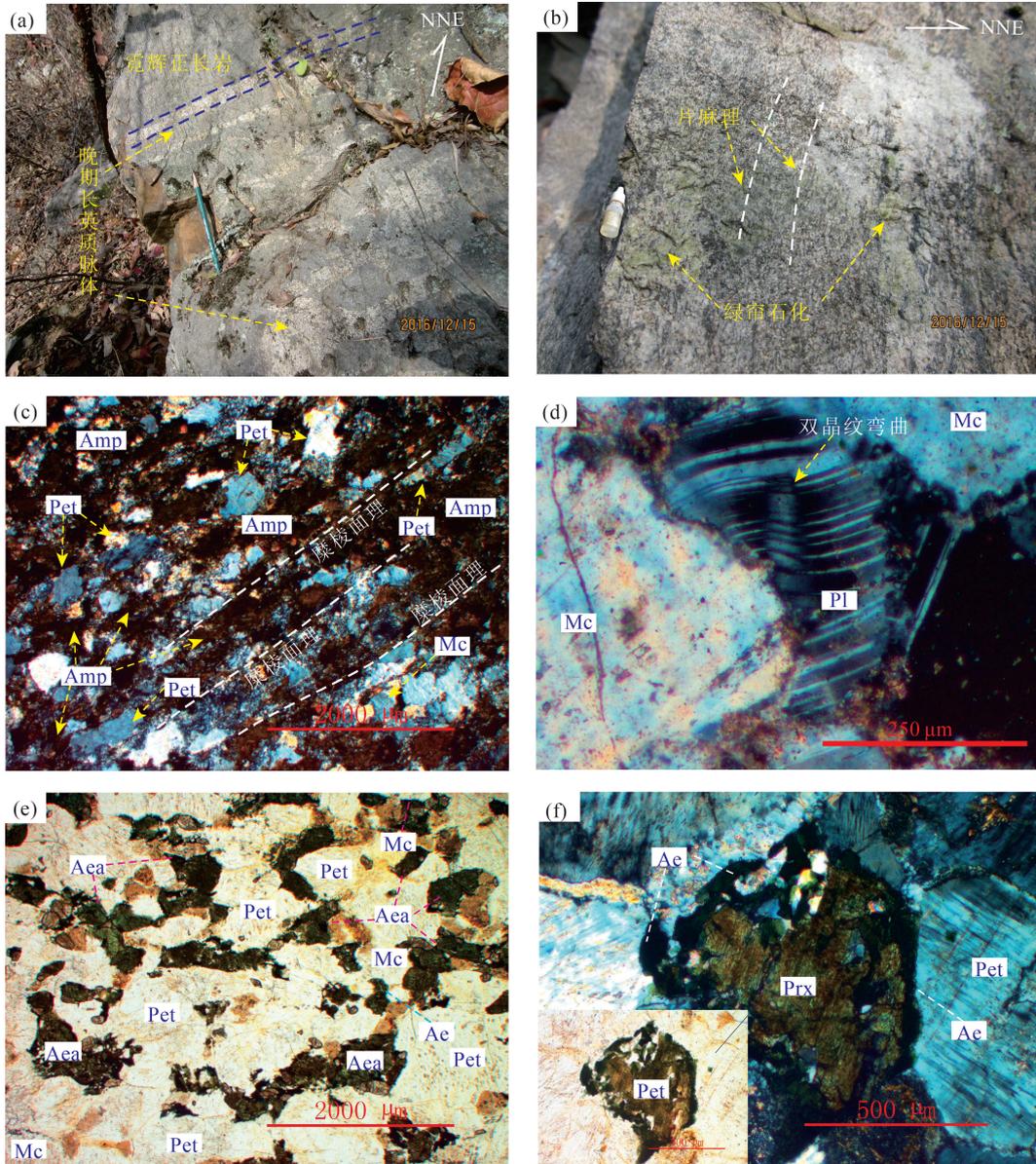
带内保存了大量汇聚时期的构造变形和结晶岩石,形成了与板块俯冲、碰撞有关的一系列构造混杂岩带、构造岩浆岩带和双变质带,具多期次、多层次长期活动的特点<sup>[49, 52-54]</sup>。

## 2 岩体地质及岩相学特征

碾道碱性正长岩体位于内乡县板厂乡刘庄东山沟碾道北西一带,现已卷入朱阳关—夏馆断裂带内(图 1-b),以构造岩块的形式赋存于由含石墨钙



图版 I Plate I



a.碱性正长岩内发育大量浅色长英质细脉,常密集集中出露,呈NW—SE向展布;b.碱性正长岩发育片麻理,绿帘石化蚀变强烈;c.条纹长石与钠铁闪石被拉长、定向,构成糜棱结构(正交偏光);d.角闪正长岩斜长石双晶纹发生弯曲(正交偏光);e.霓辉石弱定向分布在条纹长石间或包裹微斜长石;f.由普通辉石和霓辉石呈交生关系组成霓辉石的环带结构,呈八边形晶体(正交偏光)。Ae—霓石;Aea—霓辉石;Amp—角闪石;Pet—条纹长石;Prx—普通辉石;Mc—微斜长石

主量、稀土和微量元素分析由湖北省地质实验测试中心完成。挑选的样品相对新鲜、微-弱蚀变,主量元素分析采用 Magix\_pro2440 型 X 荧光光谱仪玻璃熔片(XRF)法测定;稀土和微量元素分析分别采用 X2 型和 ICAP6300 型电感耦合等离子体质谱法测定。测试分析误差一般小于 5%。

锆石的挑选由河北省廊坊区域地质调查研究所完成。在西北大学大陆动力国家重点实验室对

锆石进行阴极发光照相、U-Pb 年龄和微量元素分析的测定。阴极发光(CL)照相采用美国 Gatan 公司的 Mono CL3+X 型阴极荧光探头。锆石 U-Pb 年龄和微量元素分析测定是在连接 193 nm 深紫外线 ArF-excimer 激光器(Geolas 2005)的 Agilent 7500a 型 ICP-MS 上进行的,激光束斑直径为 32 μm,采用单点剥蚀方式,激光剥蚀样品的深度为 20~30 μm。同位素组成分析以标准锆石 91500 为

外标、国际标样 NIST610 为内标,采用 Glitter 和 Isoplot 进行数据处理和作图。

## 4 分析结果

### 4.1 岩石地球化学特征

4 件样品的岩石化学分析测试结果及部分参数见表 1。碾道碱性正长岩  $\text{SiO}_2$  含量变化于 52.09%~67.48% 之间;富碱, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  为 5.82%~11.75%, $\text{K}_2\text{O}$  含量普遍高于  $\text{Na}_2\text{O}$ , $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  值为 0.95~2.00;低  $\text{MgO}$  (0.09%~1.99%),高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (11.87%~17.81%)、 $\text{CaO}$  (0.41%~11.42%)、 $\text{TiO}_2$  (主体为 1.02%~2.32%) 和  $\text{TFeO}$  (1.25%~11.68%);CIPW 标准矿物中 113/684-1 样品出现少量橄榄石 (Ol) 和霞石 (Ne) 分子,113/682-1 样品出现少量刚玉 (C) 分子,且  $A/\text{CNK}$  值为 0.42~1.06, $A/\text{NK}$  值为 1.11~1.20,主体属准铝质岩;分异指数 (DI) 变化较大,平均值为 70.86,显示出中等分异程度;里特曼指数 ( $\sigma$ ) 为 3.29~7.89,为碱质岩类<sup>[1]</sup>。在  $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  图解上,样品点落入碱性岩区 (图 3-a),与其矿物组成中含有碱性暗色矿物对应,因此,碾道碱性正长岩是典型的碱性岩;但岩石受蚀变影响组成变化较大,在  $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  图解中,有 2 个样品点落入正长岩区,与岩石的实际矿物组成的定名基本一致,另外 2 件蚀变样品分别落入二长闪长岩区和二长岩区;在  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图解中,全部落入钾玄岩系列 (图 3-b),为钾质碱性正长岩类。

碾道碱性正长岩稀土元素总量 ( $\Sigma\text{REE}$  为  $62.04 \times 10^{-6} \sim 346.42 \times 10^{-6}$ ) 变化较大,但轻、重稀土元素分

馏相对明显,LREE/HREE 值为 5.28~9.35,平均 7.97,  $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.82 \sim 10.85$ ,平均 8.96,分配曲线呈现轻稀土元素富集的右倾平坦型 (图 4-a)。Ce 异常不明显 ( $\delta\text{Ce}$  为 0.99~1.04),Eu 显示中等至弱的负异常 ( $\delta\text{Eu}$  为 0.66~0.75),暗示在成岩过程中存在一定程度的斜长石分离结晶作用<sup>[18]</sup>。在微量元素原始地幔标准化蛛网图解 (图 4-b) 中,岩石相对富集 Rb、K 等大离子亲石元素,明显亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。

### 4.2 锆石阴极发光图像、微量元素组成及 U-Pb 定年

样品 Y113/676-1 的锆石呈无色透明状,自形程度较高,颗粒以短柱状为主,少数呈长柱状,长宽比为 3:2~2:1,粒径 70~110  $\mu\text{m}$ ;阴极发光图像显示,锆石结构单一,无继承核,发育较典型的岩浆韵律环带 (图 5),属岩浆结晶的产物<sup>[58]</sup>。

锆石微量元素亦是判定锆石性质的重要方法<sup>[59]</sup>。本次选取 26 粒锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 定年和微量元素微区分析,测年中排除 4 粒锆石分析点的明显不谐和数据,分析结果见表 2、表 3。锆石的 Th、U 含量变化较大,分别为  $1323 \times 10^{-6} \sim 6107 \times 10^{-6}$  和  $1284 \times 10^{-6} \sim 4717 \times 10^{-6}$  (表 2),除锆石点 23 的 Th/U 值小于 0.4 外,其余锆石 Th/U 值变化于 0.67~1.66 之间,这些中高比值显示岩浆锆石的特征<sup>[58]</sup>。锆石的稀土元素总量较低 ( $\Sigma\text{REE} = 61 \times 10^{-6} \sim 485 \times 10^{-6}$ ),轻、重稀土元素 (LREE =  $4 \times 10^{-6} \sim 31 \times 10^{-6}$ ,HREE =  $56 \times 10^{-6} \sim 479 \times 10^{-6}$ ) 分馏明显,整体表现为向左倾斜的轻稀土元素亏损、重稀土元素阶梯

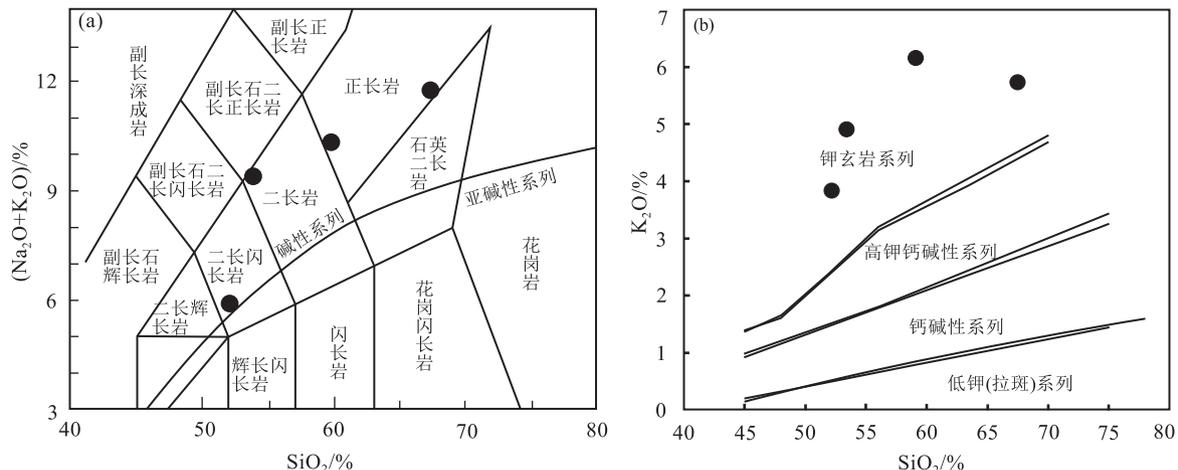


图 3 碾道碱性正长岩体  $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  图解 (a) 和  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  图解 (b)

(a 底图据参考文献 [55], b 底图据参考文献 [56])

Fig. 3  $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$  (a) and  $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$  (b) diagrams of Niandao alkali syenite

表 1 碾道碱性正长岩体主量、微量和稀土元素分析结果  
Table 1 Major, trace and rare earth elements compositions of Niandao alkali syenite

样号	113/676-1	113/678-1	113/682-1	113/684-1	样号	113/676-1	113/678-1	113/682-1	113/684-1
岩性	角闪正长岩	角闪正长岩	蚀变霓辉石正长岩	蚀变角闪正长岩	岩性	角闪正长岩	角闪正长岩	蚀变霓辉石正长岩	蚀变角闪正长岩
SiO <sub>2</sub>	59.04	67.48	52.09	53.35	Ta	1.25	0.76	1.53	1.65
TiO <sub>2</sub>	1.02	0.25	1.69	2.32	W	1.49	3.79	0.84	2.96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.84	17.81	11.87	14.96	Be	2.64	2.98	1.30	3.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.36	1.22	7.65	2.71	Th	8.65	3.69	7.76	17.56
FeO	4.62	0.15	4.80	8.02	U	1.79	0.72	1.14	3.66
MnO	0.13	0.01	0.19	0.14	Ba	859.88	481.69	933.06	906.87
MgO	0.54	0.09	0.54	1.99	Cr	2.10	2.17	3.03	2.89
CaO	4.57	0.41	11.42	4.90	Ni	0.98	3.52	0.60	1.67
Na <sub>2</sub> O	4.09	6.02	1.94	4.36	Sr	607.72	203.75	1266.13	413.46
K <sub>2</sub> O	6.15	5.74	3.88	4.91	V	13.72	7.91	22.61	79.48
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.10	0.03	0.36	0.59	Sn	4.06	4.76	3.76	3.85
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.72	0.65	0.94	1.29	La	41.06	12.61	59.06	69.88
烧失量	0.73	0.58	2.64	0.51	Ce	84.22	22.70	134.6	140.9
总计	99.91	100.43	100.01	100.05	Pr	10.62	3.04	17.14	16.93
TFeO	6.75	1.25	11.68	10.46	Nd	40.58	11.26	67.82	65.73
Mg <sup>#</sup>	0.12	0.11	0.08	0.25	Sm	7.33	2.09	12.27	12.36
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.51	0.95	2.00	1.13	Eu	1.63	0.47	2.44	2.58
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	10.24	11.75	5.82	9.27	Gd	6.06	2.04	10.28	10.94
$\sigma$	6.38	5.61	3.29	7.89	Tb	1.01	0.41	1.61	1.87
DI	74.32	95.11	48.83	65.17	Dy	5.51	2.58	8.45	10.46
A/NK	1.18	1.11	1.61	1.20	Ho	1.05	0.58	1.54	2.03
A/CNK	0.73	1.06	0.42	0.70	Er	3.02	1.82	4.40	5.94
Sc	2.78	2.89	3.22	11.78	Tm	0.43	0.28	0.61	0.80
Co	8.10	2.07	9.29	19.19	Yb	2.81	1.87	3.91	5.18
Ga	16.51	17.18	16.16	21.91	Lu	0.42	0.28	0.58	0.77
Rb	136.10	113.70	96.52	192.90	Y	27.50	15.86	40.08	56.08
Zr	276.24	78.78	368.45	543.89	$\Sigma$ REE	205.75	62.04	324.66	346.42
Nb	22.32	11.19	26.22	26.99	LREE/HREE	9.13	5.28	9.35	8.11
Mo	1.01	0.50	1.27	1.13	(La/Yb) <sub>N</sub>	10.48	4.82	10.85	9.68
Cs	3.01	2.47	2.39	14.93	$\delta$ Eu	0.75	0.70	0.66	0.68
Hf	5.88	2.02	7.81	11.17	$\delta$ Ce	0.99	0.90	1.04	1.00

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

式富集的配分模式(图 6),类似于岩浆锆石的稀土元素配分曲线特征<sup>[59]</sup>,反映锆石颗粒应从同一岩浆中结晶而成。可能受斜长石结晶分异和岩浆的低氧逸度的共同影响所致<sup>[59]</sup>,锆石具有明显的低正

Ce 异常和低负 Eu 异常, $\delta$ Ce 和  $\delta$ Eu 值分别为 133.21~0.78 和 0.75~0.44,平均值分别为 24.20 和 0.55,接近于岩浆锆石的  $\delta$ Ce(32~49)<sup>[60]</sup>和  $\delta$ Eu(小于 1.00)<sup>[59]</sup>。在 Ce/Ce\*-(Sm/La)<sub>N</sub>图解中,样品点

表 2 样品 Y113/676-1 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 测试结果  
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb dating results of sample Y113/676-1

测点	含量/ $10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
					$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$	$1\sigma$				
1	396	4346	3335	1.30	0.0736	0.0007	0.5553	0.0176	0.0544	0.0017	457.9	4.1	448.5	11.5	390.8	70.4
2	299	3396	2426	1.40	0.0734	0.0007	0.5455	0.0167	0.0536	0.0016	456.8	4.3	442.1	11.0	353.8	64.8
3	213	2362	1762	1.34	0.0738	0.0007	0.5588	0.0161	0.0548	0.0016	458.8	4.3	450.7	10.5	466.7	66.7
4	276	2361	2813	0.84	0.0736	0.0010	0.5557	0.0161	0.0546	0.0016	457.7	6.2	448.7	10.5	398.2	64.8
5	338	4031	2549	1.58	0.0736	0.0007	0.5749	0.0162	0.0563	0.0015	457.9	4.2	461.2	10.4	464.9	28.7
6	182	2108	1414	1.49	0.0728	0.0014	0.5818	0.0178	0.0586	0.0022	453.1	8.3	465.6	11.4	550.0	76.8
8	173	1586	1648	0.96	0.0735	0.0010	0.5961	0.0185	0.0587	0.0020	457.4	5.7	474.8	11.8	566.7	74.1
9	530	3740	4208	0.89	0.0735	0.0009	0.5656	0.0136	0.0555	0.0014	457.4	5.4	455.2	8.8	435.2	49.1
10	475	4059	3159	1.29	0.0735	0.0008	0.5681	0.0143	0.0558	0.0014	457.3	4.6	456.8	9.2	442.6	57.4
11	354	3363	3492	0.96	0.0735	0.0008	0.5654	0.0140	0.0555	0.0014	457.3	4.9	455.0	9.1	431.5	55.6
12	362	2662	3971	0.67	0.0735	0.0007	0.5680	0.0151	0.0557	0.0015	457.0	4.0	456.7	9.8	442.6	54.6
13	267	3012	2193	1.37	0.0736	0.0008	0.5747	0.0166	0.0563	0.0016	457.9	4.5	461.0	10.7	464.9	64.8
14	207	2372	1690	1.40	0.0735	0.0007	0.5808	0.0144	0.0571	0.0015	457.3	4.1	465.0	9.2	498.2	59.3
15	439	4717	3674	1.28	0.0740	0.0006	0.6122	0.0144	0.0597	0.0014	460.1	3.4	485.0	9.1	590.8	51.8
16	393	4313	2591	1.66	0.0734	0.0007	0.5622	0.0144	0.0552	0.0014	456.9	4.0	453.0	9.4	420.4	59.3
18	170	1696	1554	1.09	0.0735	0.0006	0.5580	0.0161	0.0549	0.0017	457.2	3.8	450.2	10.5	405.6	65.7
20	294	3351	2445	1.37	0.0736	0.0007	0.5886	0.0159	0.0578	0.0016	457.5	4.4	470.0	10.1	524.1	61.1
22	136	1284	1323	0.97	0.0736	0.0007	0.5617	0.0182	0.0553	0.0019	457.6	4.0	452.6	11.8	433.4	74.1
23	440	2062	6107	0.34	0.0731	0.0007	0.5941	0.0140	0.0587	0.0013	455.1	4.1	473.5	8.9	553.7	52.8
24	299	3720	2294	1.62	0.0734	0.0006	0.5878	0.0132	0.0580	0.0013	456.7	3.8	469.5	8.4	527.8	48.1
25	286	3333	2373	1.40	0.0736	0.0007	0.5738	0.0167	0.0563	0.0015	457.6	4.1	460.4	10.8	464.9	59.3
26	329	3067	3215	0.95	0.0734	0.0007	0.5698	0.0148	0.0562	0.0014	456.9	4.0	457.9	9.6	461.2	25.0

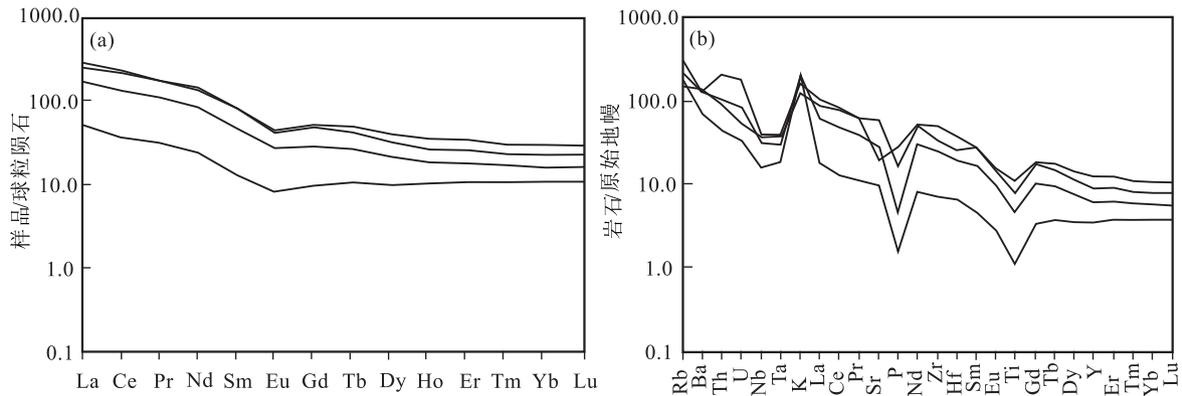


图 4 碾道碱性正长岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)  
(球粒陨石标准化和原始地幔标准化数据据参考文献[57])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns(a) and primitive mantle-normalized spider diagrams(b) for Niandao alkali syenite

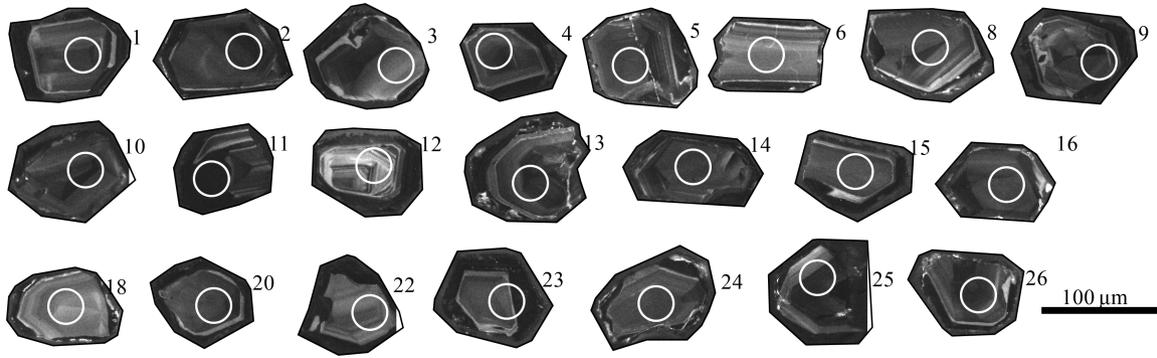


图 5 样品 Y113/676-1 锆石阴极发光图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images for zircons of sample Y113/676-1

表 3 样品 Y113/676-11 LA-ICP-MS 锆石微量元素分析结果

Table 3 LA-ICP-MS trace element analyses of zircons for sample Y113/676-1

测点	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	δEu	δCe	(Sm/La) <sub>N</sub>	U/Yb
1	45.36	0.15	3.47	0.15	0.82	1.52	0.47	4.26	1.45	15.41	6.25	31.11	6.60	71.76	10.96	160.96	154	7	148	0.56	5.62	15.51	0.63
2	41.92	0.05	4.83	0.08	0.89	1.36	0.54	5.86	1.63	22.64	8.99	46.13	9.85	110.82	20.41	226.53	234	8	226	0.59	18.41	38.62	0.38
3	26.80	0.04	7.77	0.10	1.22	1.89	0.51	6.83	1.93	20.65	7.86	41.48	8.21	82.33	14.39	183.18	195	12	184	0.44	29.53	72.94	0.33
4	109.48	2.82	7.27	0.65	2.14	1.59	0.54	6.33	2.28	29.43	12.07	59.94	13.77	170.41	25.91	275.75	335	15	320	0.52	1.32	0.87	0.64
5	41.97	0.02	4.96	0.10	1.26	2.15	0.56	6.71	1.53	19.15	7.25	37.47	7.33	81.26	13.09	177.92	183	9	174	0.45	25.21	147.68	0.52
6	40.10	0.03	8.86	0.11	1.66	2.96	0.93	10.36	2.99	35.38	12.80	58.56	11.99	126.45	22.21	314.66	295	15	281	0.51	39.49	168.38	0.32
8	116.75	0.01	13.36	0.04	0.69	1.49	0.52	7.24	2.49	33.10	13.15	65.93	14.53	165.01	30.35	395.29	348	16	332	0.48	133.21	158.21	0.71
9	73.28	0.32	12.30	0.22	1.81	1.61	0.65	6.82	2.21	24.98	9.70	43.76	8.37	103.58	18.12	233.88	234	17	218	0.60	11.23	7.71	0.71
10	37.02	0.02	3.61	0.06	0.69	1.11	0.43	3.68	0.75	5.95	2.30	8.91	3.03	28.03	4.30	45.31	63	6	57	0.65	25.58	80.42	1.32
11	208.11	0.09	3.34	0.09	0.83	1.58	0.48	5.70	3.16	48.29	21.06	103.22	22.02	236.66	38.43	509.99	485	6	479	0.49	8.92	26.98	0.88
12	141.37	0.18	6.48	0.12	1.03	1.22	0.34	4.68	1.87	25.64	9.51	44.03	9.51	100.72	16.07	224.81	221	9	212	0.44	10.84	10.56	1.40
13	29.50	0.01	5.83	0.06	0.59	1.33	0.37	3.72	1.21	10.52	3.92	20.57	3.92	51.62	8.13	94.57	112	8	104	0.51	51.72	163.40	0.57
14	27.32	0.10	3.98	0.14	1.26	1.54	0.45	4.27	1.17	13.36	5.19	25.52	5.79	64.51	11.27	128.81	139	7	131	0.54	8.28	23.87	0.42
15	76.95	0.97	12.38	0.93	4.48	3.75	1.31	8.24	2.62	30.30	10.97	53.48	10.79	119.82	21.01	298.58	281	24	257	0.72	3.21	6.00	0.64
16	23.61	0.04	3.34	0.10	1.09	1.37	0.42	4.08	0.98	9.41	3.96	20.69	4.77	53.95	10.64	98.56	115	6	108	0.55	12.48	49.02	0.44
18	29.58	0.01	3.21	0.07	0.65	0.96	0.37	2.56	0.56	5.70	2.37	10.82	2.57	25.96	5.31	53.37	61	5	56	0.73	27.21	116.61	1.14
20	27.93	0.03	4.12	0.05	0.56	1.04	0.45	3.15	1.06	12.26	5.15	26.83	6.03	66.98	10.37	123.78	138	6	132	0.75	26.02	54.18	0.42
22	31.74	0.03	2.36	0.06	0.50	0.93	0.29	3.09	0.82	6.86	2.78	11.60	2.54	25.58	4.73	96.21	62	4	58	0.53	13.24	44.54	1.24
23	146.55	8.17	11.33	1.54	6.63	2.31	0.58	5.86	2.33	34.52	14.62	69.20	14.28	155.86	26.49	306.34	354	31	323	0.49	0.78	0.44	0.94
24	28.81	0.03	4.79	0.06	0.79	1.28	0.38	3.20	1.07	12.55	4.94	29.06	6.83	76.20	12.30	106.76	153	7	146	0.58	28.24	16.03	0.38
25	66.67	0.05	8.96	0.08	0.85	1.70	0.45	5.55	1.83	20.97	8.13	36.00	7.71	88.84	15.53	179.23	197	12	185	0.45	34.91	0.00	0.75
26	78.11	0.11	8.45	0.14	1.08	1.44	0.45	4.72	1.35	15.42	5.18	23.97	4.94	52.06	8.85	116.85	128	12	116	0.53	16.86	34.83	1.50

注:微量元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

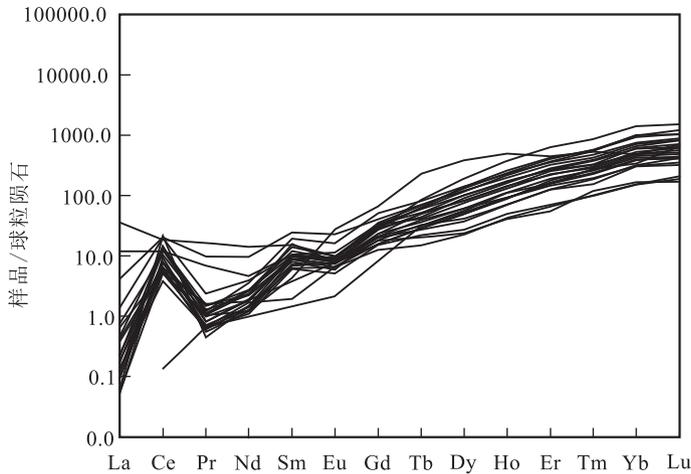


图6 样品 Y113/676-1 锆石球粒陨石标准化稀土元素配分图  
(球粒陨石标准值据参考文献[57])

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for zircons of sample Y113/676-1

主体落在岩浆锆石范围或其附近(图7-a),少数落在岩浆锆石和热液锆石的过渡区,说明这些点可能受到热液氧逸度的微弱影响;但个别点完全偏向热液锆石,可能是由岩浆热液氧逸度的降低导致 $\delta\text{Ce}$ 值偏低<sup>[59]</sup>。综合锆石微量元素特征,说明样品Y113/676-1的锆石属岩浆锆石,并在锆石U/Yb-Y构造环境判别图解中,所有样品点落入大陆锆石范围(图7-b),指示其来自于岩浆演化(玄武质岩石的部分熔融)<sup>[61]</sup>。

本次获得的22粒锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $453.1 \pm 8.3 \sim 460.1 \pm 3.4$  Ma(表2),变化范围较小,在年龄谱和

曲线图中成群分布(图8-a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $457.4 \pm 1.8$  Ma(MSWD = 0.070)(图8-b),记录了碾道碱性正长岩体的形成时代为晚奥陶世。

## 5 讨论

### 5.1 岩浆源区和构造环境

碾道碱性正长岩在矿物组合上出现了霞石、条纹碱性长石、霓辉石等矿物,属于典型的碱性岩。微量元素比值可以追索岩浆源区性质,样品的Nb/Ta值为14.76~17.92,平均值为16.53,明显大于壳源岩浆的Nb/Ta值(11.0),更接近幔源熔体的Nb/Ta值( $17.5 \pm 2.0$ )<sup>[62]</sup>,且在CIPW标准矿物中,样品点113/684-1出现橄榄石(Ol)分子,二者均显示其幔源岩浆的特征。通常富集地幔Cr、Ni含量低于原始地幔<sup>[63]</sup>。样品Cr含量为 $2.10 \times 10^{-6} \sim 3.03 \times 10^{-6}$ 、Ni含量为 $0.98 \times 10^{-6} \sim 3.52 \times 10^{-6}$ ,明显低于原始地幔Cr、Ni的含量( $500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$ ,  $250 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ )<sup>[64]</sup>,在La/Yb-Th/Ta图解(图9-a)中,样品点落入富集型地幔附近,暗示来自富集的地幔源区属性;且不相容元素La和Yb的相关性变化显示其属地幔源区物质较高程度部分熔融的产物(图9-b)。在La/Nb和Ba/Nb判别图解中,样品点明显具有岛弧熔岩的特征(图9-c),说明在岩浆形成过程中受到俯冲的大洋板片物质的影响<sup>[65-66]</sup>。此外,岩石中有Ta和Ti的负异常,揭示有大陆地壳物质的参与<sup>[63]</sup>,但其Zr/Hf值( $39.08 \sim$

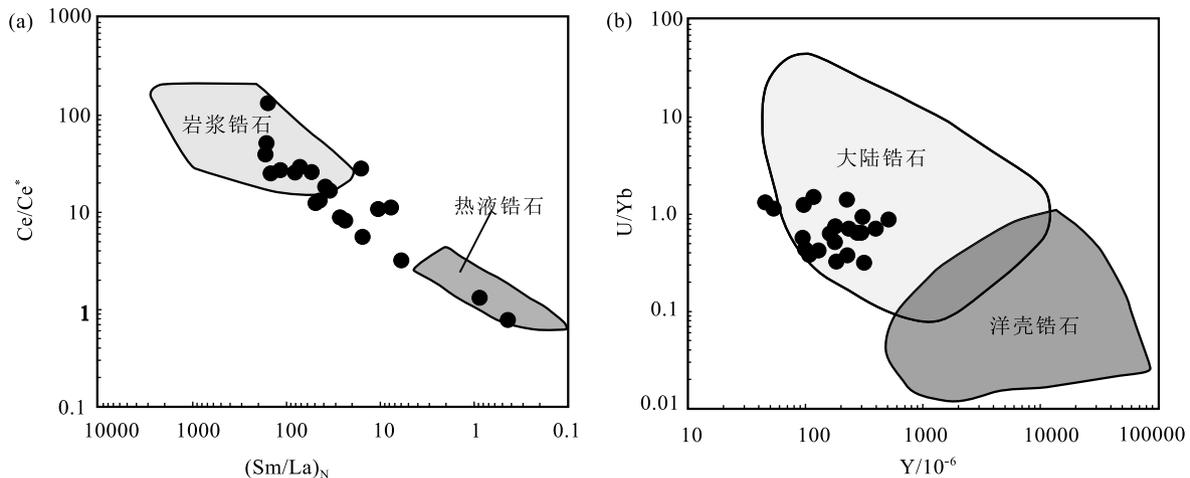


图7 样品 Y113/676-1 锆石微量元素 $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}-\text{Ce}/\text{Ce}^*$ (a)和Y-U/Yb图解(b)

Fig. 7  $\text{Ce}/\text{Ce}^*$  vs  $(\text{Sm}/\text{La})_{\text{N}}$ (a) and U/Yb vs Y(b) diagrams for zircons of sample Y113/676-1

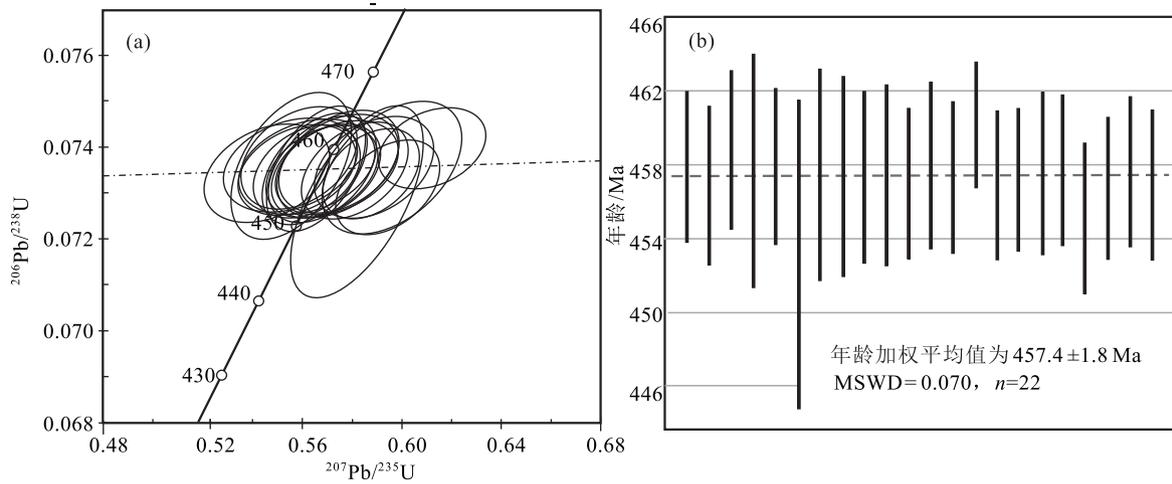


图 8 样品 Y113/676-1 锆石 U-Pb 谐和年龄 (a) 和年龄加权平均值图 (b)

Fig. 8 Zircon U-Pb concordia diagram (a) and average age (b) of sample Y113/676-1

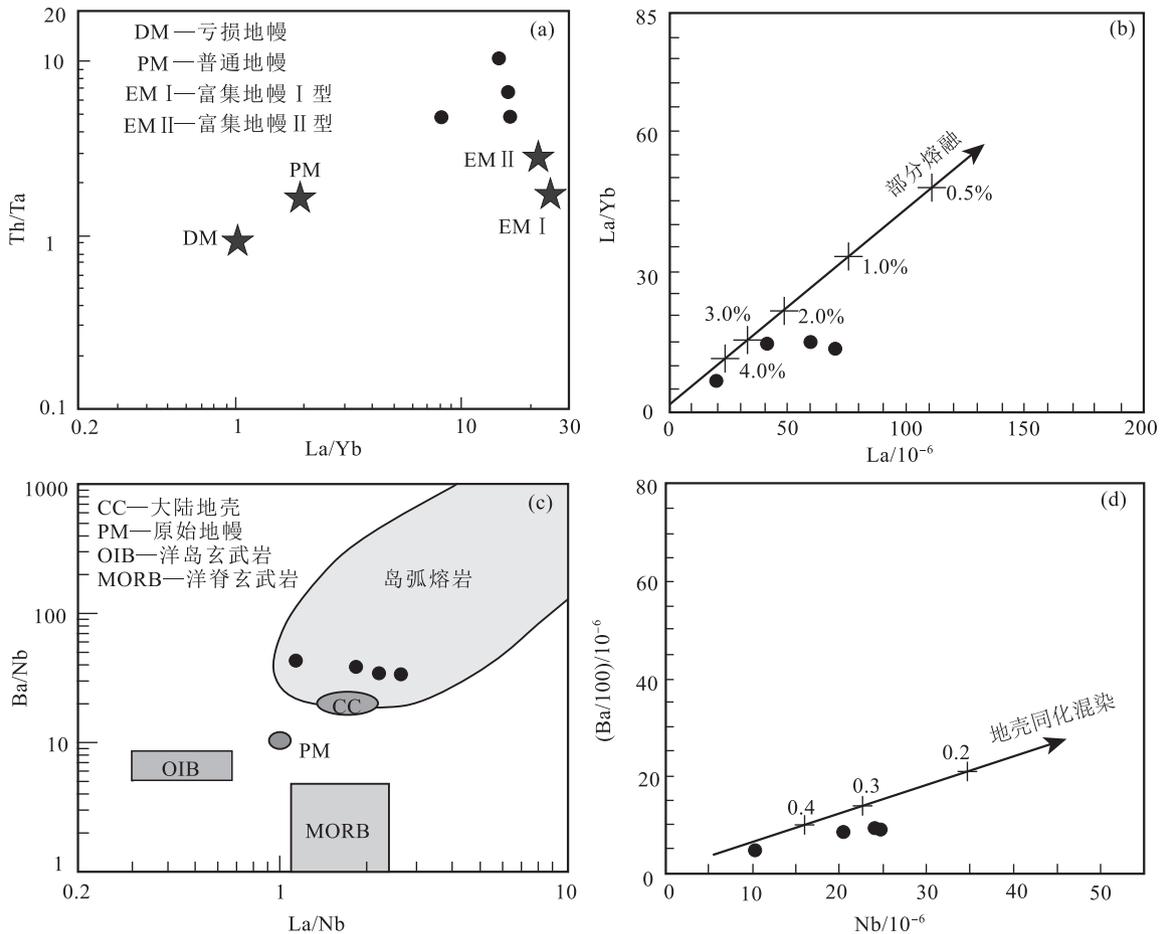


图 9 碾道碱性正长岩微量元素变化特征

Fig. 9 The variations of selected trace elements for Niandao alkali syenite

48.68) 又接近于原始地幔值, 说明源区受地壳组分影响较小<sup>[67]</sup>, Nb-Ba/100 图解则反映其母岩浆在上

升过程中经历了地壳物质同化混染作用(图 9-d)。碾道碱性正长岩的 SiO<sub>2</sub> 不饱和且含量低, 富

碱,  $\text{TFeO} > 1\%$ ,  $\text{MgO}$  含量低, 富 HFSE ( $\text{Zr} + \text{Ce} + \text{Nb} + \text{Y} = 410.28 \times 10^{-6} \sim 767.86 \times 10^{-6}$ ), 稀土元素 (REE) 丰度高且具中等至弱的负 Eu 异常, 贫 Nb、Ta、P 和 Ti, 在  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - 10000\text{Ga}/\text{Al}$  及  $\text{Zr} - 10000\text{Ga}/\text{Al}$  成分分类图上, 主体落入 A 型花岗岩区域 (图 10-a、b), 以上特征显示出 A 型花岗岩 (或 A 型岩套) 的组成特点<sup>[63, 65, 67-68]</sup>, 暗示其与伸展构造背景密切相关<sup>[66]</sup>。A 型花岗岩 (或 A 型岩套) 一般包括非造山 ( $\text{A}_1$  型或  $\text{AA}$  型) 和后造山 ( $\text{A}_2$  型或  $\text{PA}$  型) 2 种类型<sup>[68, 70]</sup>, 前者代表了大陆裂谷时期或板内背景下的岩浆作用, 后者形成于陆-陆碰撞后期构造应力松弛阶段或岛弧岩浆作用时期。在 A 型花岗岩  $\text{Y}-\text{Nb}-3\text{Ga}$ 、 $\text{Y}-\text{Nb}-\text{Ce}$  三角判别图中, 样品点均落入  $\text{A}_2$  型区域 (图 10-c、d), 且岩石属钾玄岩系列, 表明形成背景可能与岛弧环境相关, 而非板内环境<sup>[71]</sup>; 岩石富集 U 等大离子亲石元素和轻稀土 (LREE) 及显著的 Nb-Ta-Ti 负异常, 明显具岛弧钾玄岩性质<sup>[71-72]</sup> 和岛弧熔岩特征 (图 9-c), 均反映其属岛弧岩浆作

用的产物。

## 5.2 对北秦岭早古生代构造演化的制约

有关北秦岭早古生代构造演化历史, 前人认为是受秦岭洋盆沿商丹一线的北向俯冲消减作用的影响而形成的具有沟-弧-盆体系特征的活动大陆边缘<sup>[73-74]</sup>, 或是形成于约 600 Ma 的秦岭古洋盆于 520 Ma 左右发生俯冲消减后的多期弧-陆碰撞作用的结果<sup>[6, 28, 75]</sup>。近年, 随着北秦岭造山带超高压变质地体的证实和陆壳深俯冲的确定<sup>[76-78]</sup>, 证明北秦岭高压-超高压岩石经历了 500~490 Ma 的陆壳俯冲-深俯冲, 以及 470~450 Ma 和 420~400 Ma 两次抬升折返退变叠加作用过程<sup>[76, 79]</sup>。碱性岩属典型大陆岩浆作用的产物, 其形成与造山带的构造演化基本同步<sup>[11]</sup>。本文首次获得北秦岭碾道碱性正长岩体结晶锆石 U-Pb 年龄为  $457.4 \pm 1.8$  Ma, 该年龄值与带内高压-超高压岩石折返期约 450 Ma 麻粒岩相退变质年龄高度吻合, 故可能代表了北秦岭高压-超高压岩石早古生代抬升折返过程的岩浆作

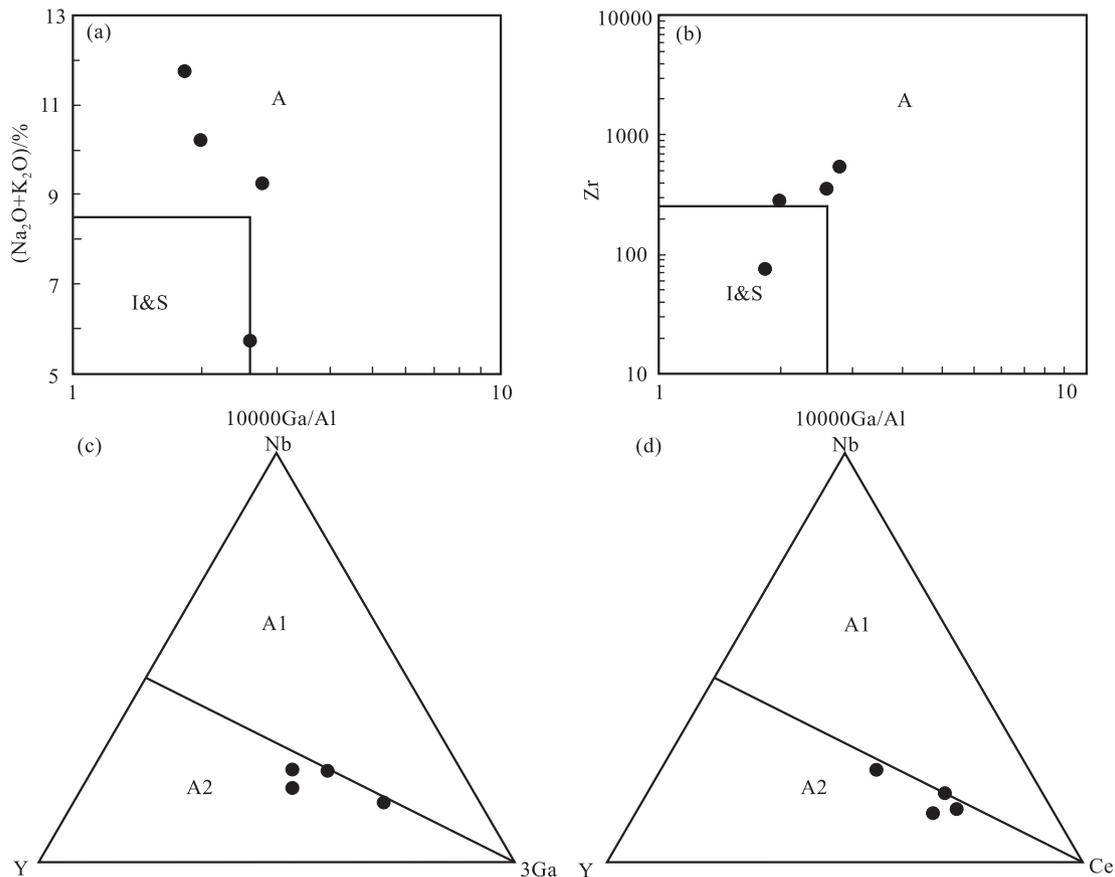


图 10 碾道碱性正长岩岩石类型判别图解 (a、b 底图据参考文献 [69], c、d 底图据参考文献 [68])

Fig. 10 The distinguish diagrams of the rock types in Niandao alkali syenite

用的响应。

区域上, 该时期配套的酸性岩浆活动最强烈<sup>[80]</sup>, 遍布整个北秦岭地区, 其中早期由以灰池子岩体(462.8±6.0~454.9±7.7 Ma)<sup>[81]</sup>为代表的 I 型花岗岩<sup>[8-9]</sup>和以五垛山(451.5±4.5~448.5±6.5 Ma)<sup>[81]</sup>、宽坪(452.8±2.0 Ma)<sup>[82]</sup>、枣园(456.1±1.9~451.0±4.0 Ma)<sup>[81-82]</sup>、黄柏岔(449.2±2.3 Ma)<sup>[81]</sup>等岩体为代表的 I-S 型花岗岩组成<sup>[81]</sup>, 具有加厚地壳熔融的地球化学属性<sup>[81]</sup>, 形成于挤压碰撞背景下的增生造山作用过程<sup>[9]</sup>; 而晚期为以武关岩体(438.6±2.2 Ma)<sup>[83]</sup>和五垛山岩体(441±15~431±6 Ma)<sup>[84-85]</sup>为代表的 I 型花岗岩<sup>[81]</sup>, 伴有岛弧型基性岩墙群的侵入(时限为 443~434 Ma)<sup>[86-87]</sup>, 形成于后碰撞加厚地壳向正常地壳转变的伸展环境<sup>[84]</sup>, 说明在约 440 Ma 或之后, 北秦岭造山带区域应力场已发生负反转。碾道碱性正长岩地球化学特征显示其 A 型花岗岩性质和后造山环境, 二者均标志着区域伸展作用的开始及挤压造山作用的结束<sup>[70]</sup>, 故该岩体可能代表了北秦岭早古生代约 450 Ma 抬升折返过程中, 构造负反转体制下的初始岩浆记录, 其侵位结晶年龄则代表发生该构造负反转的初始年限。

## 6 结 论

(1) 首次在北秦岭内乡县碾道一带厘定出一晚奥陶世碱性正长岩体——碾道碱性正长岩体, 岩石组合由角闪正长岩和霓辉正长岩构成。

(2) 获得角闪正长岩的 LA-ICP-MS 结晶锆石 U-Pb 年龄为 457.4±1.8 Ma。

(3) 碾道碱性正长岩体显示相对低的硅、富碱、贫镁、高铝, 富集轻稀土元素、Rb 和 K, 亏损 Nb、Ta、P 和 Ti, 具有 A<sub>2</sub> 型花岗岩的特征, 岩浆源区可能来自于受俯冲组分改造的富集型地幔的部分熔融, 形成背景与岛弧环境有关。

(4) 碾道碱性正长岩体可能代表了北秦岭早古生代约 450 Ma 抬升折返过程中构造负反转体制下的初始岩浆记录。

**致谢:** 感谢审稿专家提出的宝贵修改意见, 成文过程中得到中国地质大学(武汉)杨欢教授的帮助, 野外考察得到河南省地质调查院杨俊峰教授级高级工程师、郭君功高级工程师、李敏工程师等的协助, 在此一并表示感谢。

## 参考文献

- [1] 任康绪. 碱性岩研究进展述评[J]. 化工矿产地质, 2003, 25(3): 151-163.
- [2] 阎国翰, 牟保磊, 许保良, 等. 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, 2002, 48(S1): 69-76.
- [3] 雷大景, 向媚. 河南省方城北碱性岩锆钼矿化及赋存状态[J]. 地质调查与研究, 2017, 40(1): 55-62.
- [4] 卢仁, 梁涛, 白凤军, 等. 豫西磨沟正长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素[J]. 地质论评, 2013, 59(2): 355-368.
- [5] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(3): 213-237.
- [7] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 193-200.
- [8] 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示[J]. 中国科学(D 辑), 2009, 39(7): 949-971.
- [9] 王晓霞, 王涛, 张成立. 秦岭造山带花岗岩质岩浆作用与造山带演化[J]. 中国科学(D 辑), 2015, 45(8): 1109-1125.
- [10] 吴成斌, 侯广顺, 向世红, 等. 东秦岭鱼池正长岩体岩石地球化学特征及稀有金属元素、稀土元素矿化[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 58-64.
- [11] 喻学惠. 秦巴地区碱性岩与造山带构造演化关系及其特征[J]. 中国区域地质, 1992, (3): 233-240.
- [12] 邱家骧. 秦巴碱性岩[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [13] 包志伟, 王强, 白国典, 等. 东秦岭方城新元古代碱性正长岩形成时代及其动力学意义[J]. 科学通报, 2008, 53(6): 684-694.
- [14] 李石. 南秦岭武当—桐柏地区碱性岩研究[J]. 中国区域地质, 1991, (1): 40-53.
- [15] 曾令君, 包志伟, 赵太平, 等. 华北克拉通南缘潘河~1.5 Ga 正长岩的厘定及其构造意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(7): 2425-2436.
- [16] 柳晓艳, 蔡剑辉, 阎国翰. 华北克拉通南缘古元古代碱性岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 1109-1110.
- [17] 段友强. 华北陆块南缘碱性岩地球化学研究及其大地构造意义[D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2016.
- [18] 曹晶, 叶会寿, 李正远, 等. 东秦岭磨沟碱性岩体年代学、地球化学及岩石成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(5): 665-684.
- [19] 段友强, 张正伟, 杨晓勇. 华北克拉通南缘张士英岩体大陆动力学背景: 来自地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素的证据[J]. 岩石学报, 2015, 31(7): 1995-2008.
- [20] 马昌前, 余振兵, 许聘, 等. 桐柏—大别山南缘的志留纪 A 型花岗岩类: SHRIMP 锆石年代学和地球化学证据[J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34(12): 1100-1110.
- [21] Xua C, Campbell I H, Allen C M, et al. U-Pb zircon age, geochemical and isotopic characteristics of carbonatite and syenite complexes from the Shaxiongdong, China[J]. Lithos, 2008, 105: 118-128.
- [22] Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution

- of the Qinlingorogen, central China [J]. *Tectonophysics*, 2000, 323: 183-196.
- [23] 第五春荣, 孙勇, 刘良, 等. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORB [J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2025-2038.
- [24] 李承东, 赵利刚, 许雅雯, 等. 北秦岭宽坪岩群变质沉积岩年代学及地质意义 [J]. *中国地质*, 2018, 45(5): 992-1010.
- [25] 赵姣, 陈丹玲, 谭清海, 等. 北秦岭东段二郎坪群火山岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 118-125.
- [26] Zhu X Y, Chen F K, Li S Q, et al. Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition [J]. *Gondwana Research*, 2011, 20: 194-204.
- [27] 苏文, 刘景波, 陈能松, 等. 东秦岭-大别山及其两侧的岩浆和变质事件年代学及其形成的大地构造背景 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(5): 1573-1593.
- [28] Dong Y P, Zhang G W, Hauzenberger C, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: Evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks [J]. *Lithos*, 2011, (122): 1-39.
- [29] 张旗, 张宗清, 孙勇, 等. 陕西商县-丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学 [J]. *岩石学报*, 1995, 11(1): 43-54.
- [30] 崔智林, 孙勇, 王学仁. 秦岭丹凤蛇绿岩带放射虫的发现及其地质意义 [J]. *科学通报*, 1995, 40(18): 1686-1688.
- [31] Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history [J]. *Tectonophysics*, 2003, 366: 1-53.
- [32] 李亚林, 张国伟, 宋传中. 东秦岭二郎坪弧后盆地双向式俯冲特征 [J]. *高校地质学报*, 1998, 4(3): 286-293.
- [33] 徐勇航, 赵太平, 陈伟. 东秦岭二郎坪群长英质火山岩成因及其对 VMS 型矿床成矿环境的制约 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 399-412.
- [34] 李采一, 马建国, 陈瑞保, 等. 对河南省二郎坪群层序及时代的新认识 [J]. *中国区域地质*, 1990, (2): 181-185.
- [35] 王学仁, 华洪, 孙勇. 河南西峡湾潭地区二郎坪群微体化石研究 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 1995, 25(4): 353-358.
- [36] 高联达, 王宗起, 王涛, 等. 河南西峡地区二郎坪群火神庙组中发现泥盆纪孢子化石 [J]. *地质通报*, 2006, 25(11): 1287-1294.
- [37] 胡畔. 秦岭造山带二郎坪群石英斑岩 U-Pb 年代学研究及其地质意义 [C]//中国地球科学联合学术年会, 2016: 201.
- [38] 杨士杰, 陈丹玲, 官相宽, 等. 北秦岭东段二郎坪群基性火山岩中浅色岩体的地球化学、年代学及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2015, 31(7): 2009-2022.
- [39] 郭彩莲, 陈丹玲. 豫西二郎坪地区 O 型埃达克岩的厘定及其地质意义 [J]. *地质学报*, 2011, 85(12): 1994-2002.
- [40] 郭彩莲, 陈丹玲, 樊伟, 等. 豫西二郎坪满子营花岗岩体地球化学及年代学研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2010, 29(1): 15-22.
- [41] 王锦, 第五春荣, 孙勇, 等. 豫西西峡地区青岗坪花岗岩闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素组成及其地质意义 [J]. *地质通报*, 2012, 31(6): 884-895.
- [42] 翟文建, 郭君功, 杨俊峰, 等. 北秦岭双龙-夏馆地区大面积榴闪岩的发现及锆石 U-Pb 年代学研究 [J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(5): 1052-1068.
- [43] 张宗清, 刘敦一, 付国民, 等. 北秦岭变质地层同位素年代研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [44] 刘国惠, 张寿广, 游振东, 等. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [45] 游振东, 索书田, 韩郁菁, 等. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析——以东秦岭为例 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [46] 时毓, 于津海, 徐夕生, 等. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究 [J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2651-2670.
- [47] 万渝生, 刘敦一, 董春艳, 等. 西峡北部秦岭群变质沉积岩锆石 SHRIMP 定年: 物源区复杂演化历史和沉积、变质时代确定 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1172-1178.
- [48] 陆松年, 陈志宏, 相振群, 等. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义探讨 [J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 303-310.
- [49] 李亚林. 北秦岭二郎坪岩群与秦岭岩群间构造边界的地质特征 [J]. *陕西地质*, 1998, 16(2): 9-16.
- [50] 张思纯, 唐尚文. 北秦岭早古生代放射虫硅质岩的发现与板块构造 [J]. *陕西地质*, 1983, 1(2): 1-9.
- [51] 张欢. 朱阳关-夏馆断裂带构造样式与变形分析 [D]. 合肥工业大学博士学位论文, 2012.
- [52] 赵淑娟, 李三忠, 余珊, 等. 东亚原特提斯洋 (III): 北秦岭韧性剪切带构造特征 [J]. *岩石学报*, 2016, 32(9): 2645-2655.
- [53] Wang T, Pei X Z, Wang X X, et al. Orogen-Parallel Westward Oblique Uplift of the Qinling Basement Complex in the Core of the Qinling Orogen (China): An Example of Oblique Extrusion of Deep-Seated Metamorphic Rocks in a Collisional Orogen [J]. *The Journal of Geology*, 2005, 113(2): 181-200.
- [54] 田一鸣, 刘保金, 石金虎, 等. 南阳盆地朱阳关-夏馆断裂的浅部特征及活动性 [J]. *地震地质*, 2018, 40(1): 87-96.
- [55] Le Maetre R W. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms* (2nd Edition) [M]. Cambridge University Press, 2002: 33-39.
- [56] Morrison W G. Characteristics and tectonic setting of the shoshonite rock association [J]. *Lithos*, 1980, 13(1): 97-108.
- [57] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [58] 吴元保, 郑永飞. 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*, 2004, 49(16): 1589-1604.
- [59] Zhen H Z, Zhi W B, Yu L Q. A peculiar composite M- and W-type REE tetrad effect: Evidence from the Shuiquangou alkaline syenite complex, Hebei Province, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 24(55): 2684-2696.
- [60] Hoskin P W O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2005, 69(3): 637-648.
- [61] Grimes C B, John B E, Kelemen P B, et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance [J]. *Geology*, 2007, 35(7): 643-646.
- [62] Green T H. Significance of Nb/Ta as an indicator of geochemical

- processes in the crust-mantle system [J]. *Chemical Geology*, 1995, 120: 347-359.
- [63] 王宇菲, 董国臣, 陈薇, 等. 云南个旧似长石正长岩类及其岩石成因[J]. *地学前缘*, 2019, 26(4): 209-220.
- [64] Foley S F, Venturelli G, Green D H, et al. The ultrapotassic rocks: characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models [J]. *Earth-Science Reviews*, 1987, 24: 81-134.
- [65] 蔡鹏捷, 张宇, 许荣科, 等. 柴北缘双口山石英正长岩锆石 U-Pb 定年、地球化学及 Sr-Nd 同位素特征[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(2): 322-338.
- [66] 汤艳杰, 张宏福, 英基丰. 阴山及邻区三叠纪富碱侵入岩的成因意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 2031-2040.
- [67] 刘昌实, 陈小明, 陈培荣, 等. A 型岩套的分类、判别标志和成因[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 573-591.
- [68] Eby G N. Chemical subdivision of the A type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 1992, 20: 641-644.
- [69] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Springer*, 1987, 95: 407-411.
- [70] 洪大卫, 王式洸, 韩宝福, 等. 碱性花岗岩的构造环境分类及其鉴别标志[J]. *中国科学(B 辑)*, 1995, 25(4): 418-426.
- [71] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征[J]. *科学通报*, 1999, 44(18): 1992-1998.
- [72] 陈新跃, 王岳军, 张玉芝, 等. 桂东南南渡正长岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(2): 284-293.
- [73] 张国伟, 孟庆任, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. *中国科学(B 辑)*, 1995, 25(9): 994-1003.
- [74] Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China [J]. *Tectonophysics*, 2000, 323(3): 183-196.
- [75] Shi Y, Yu J H, Santosh M. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes [J]. *Precambrian Research*, 2013, 213: 19-60.
- [76] 刘良, 廖小莹, 张成立, 等. 北秦岭高压-超高压岩石的多期变质时代及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(5): 1634-1656.
- [77] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别[J]. *地质学报*, 2002, 76(4): 484-495.
- [78] 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 北秦岭造山带的早古生代多期变质作用[J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1179-1190.
- [79] 陈丹玲, 刘良, 廖小莹, 等. 北秦岭高压-超高压岩石的时空分布、P-T-t 演化及其形成机制[J]. *地球科学*, 2019, 44(12): 4017-4027.
- [80] 张成立, 刘良, 王涛, 等. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩浆作用[J]. *科学通报*, 2013, 58(23): 2323-2329.
- [81] 刘丙祥. 北秦岭地体东段岩浆作用与地壳演化 [D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2014.
- [82] 雷敏. 秦岭造山带东部花岗岩成因及其与造山带构造演化的关系 [D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2010.
- [83] 李平, 陈隽璐, 徐学义, 等. 北秦岭武关岩体 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(4): 610-624.
- [84] 周澍, 张贺, 陈福坤. 北秦岭五垛山花岗岩锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征及成因[J]. *高校地质学报*, 2019, 25(6): 901-913.
- [85] 胡鹏, 曾威, 熊金莲, 等. 北秦岭五朵山 I-S 型花岗岩成因及其对北秦岭早古生代构造演化的约束: 来自锆石 U-Pb 年龄、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素的证据 [J]. *地质通报*, 2022, 41(5): 810-823.
- [86] 陈隽璐, 何世平, 王洪亮, 等. 秦岭祁连造山带接合部位基性岩墙的 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2006, 25(6): 455-462.
- [87] 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 西秦岭天水地区百花基性岩浆杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(S1): 224-234.