

# 山西青尖坡石英二长岩锆石U-Pb年龄及其地质意义

杨全林<sup>1</sup>, 叶 枫<sup>1,2</sup>, 董国臣<sup>2</sup>

YANG Quanlin<sup>1</sup>, YE Feng<sup>1,2</sup>, DONG Guochen<sup>2</sup>

1. 山西省地质调查院,山西 太原 030006;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083

1. Shanxi Institute of Geological Survey, Taiyuan 030006, Shanxi, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

**摘要:**通过对华北克拉通北缘青尖坡石英二长岩锆石U-Pb同位素年龄分析,并结合相关主量和稀土元素数据探讨其地质意义。研究表明,石英二长岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年龄为 $241.1\pm1.7\text{Ma}$ ,为早中三叠世岩浆活动的产物。岩石具有富K、Na、Si、Al,贫Mg、Ca、Ti等特征,为高钾碱性钾玄岩系列,属于过铝质花岗岩类;轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损,具有稳定的弱负Eu异常。总体为I型花岗岩成因,但兼具S型花岗岩的特征。青尖坡石英二长岩为中下地壳部分熔融成因,有地慢物质参与,为华北克拉通北缘三叠纪碱性岩带的组成部分,形成于晚造山-造山后的伸展构造环境。

**关键词:**石英二长岩;早中三叠世;华北克拉通北缘;构造背景;青尖坡

中图分类号:P588.12<sup>+1</sup>; P597<sup>+3</sup> 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2019)09-1501-10

**Yang Q L, Ye F, Dong G C. Zircon U-Pb age and geological significance of quartz monzonite from Qingjianpo, Shanxi Province. Geological Bulletin of China, 2019, 38(9):1501-1510**

**Abstract:** In this paper, based on the study of Qingjianpo quartz monzonite of zircon U-Pb isotope age, and combine with the major element data and rare earth element data, the authors investigated its geological significance. The LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic age of quartz monzonite is  $241.1\pm1.7\text{Ma}$ , revealing that it is a product of the Early-Middle Triassic magmatism. The rock is enriched in K, Na, Si, Al and depleted in Mg, Ca, Ti, belonging to high calc alkaline shoshonite series and peraluminous granitoid. The rock exhibits the enrichment of LREE relative to HREE, and Eu shows weak negative anomaly. The genetic type of Qingjianpo quartz monzonite is I-type granite, with some features of S-type granites. Qingjianpo quartz monzonite characteristics indicate that the rock was formed from partial melting of the mid-lower crust, with the addition of mantle material. Qingjianpo quartz monzonite is a part of the alkaline magmatic belt of Middle Triassic on the northern margin of North China Craton, and it was formed in the extensional tectonic environment of late orogenic-post-orogenic activity.

**Key words:** quartz monzonite; Early-Middle Triassic; northern margin of the North China Craton; tectonic background; Qingjianpo region

在板块构造机制研究中,岩浆活动可以看作是大洋板块俯冲或大陆板块碰撞等过程伴随的深部作用的响应,也是探索地球深部作用过程的“岩石探针”<sup>[1-2]</sup>。因此,对岩浆岩的研究,是对地壳结构、构造演化、壳幔相互作用等大陆动力学问题探讨的

有效途径。

华北克拉通是全球最古老的陆核之一,在古元古代(约1.85Ga)以来一直保持稳定克拉通化<sup>[3]</sup>,但自中新生代以来,华北克拉通重新活化,发育大规模的中生代岩浆作用<sup>[4-10]</sup>,已成为地质学界关注的热点

收稿日期:2018-09-20; 修訂日期:2019-01-14

资助项目:中国地质调查局项目《1:25万大同市(K49C004004)、偏关县(J49C001003)幅区调修测》(编号:基[2010]矿评01-11-07号)

作者简介:杨全林(1969-),男,高级工程师,从事地质矿产勘查工作。E-mail:385109200@qq.com

通讯作者:叶枫(1987-),男,硕士,工程师,从事地质调查评价工作。E-mail:yefengsx@163.com

之一<sup>[10, 11-20]</sup>。华北克拉通北缘毗邻中亚造山带东段, 经历了复杂的构造演化历史<sup>[21-27]</sup>。关于其构造背景和演化一直存在较大争议<sup>[23, 25, 28-32]</sup>。

位于华北克拉通北缘的青尖坡石英二长岩, 是区内典型的早中生代酸性侵入岩。本文通过青尖坡石英二长岩U-Pb测年, 确定其岩体形成时代, 并结合其地球化学特征, 探讨青尖坡石英二长岩的岩石成因、地球动力学背景, 为深入认识华北克拉通北缘地质特征提供参考。

## 1 区域地质背景及岩体特征

研究区位于华北克拉通中部碰撞(造山)带内(图1-a), 大地构造位置位于塔里木-华北板块<sup>[33]</sup>的Ⅲ级构造单元山西地块(地理上包括山西及豫西), 研究区构造断裂主要为NW—SE向, 地层以新生代沉积物为主, 局部有侏罗系大同组砂岩、粉砂岩、流纹岩出露。区内岩浆岩发育, 主要为新太古代变质深成岩类(义合片麻岩、葛胡窑片麻岩), 以及

中元古代辉绿岩脉, 中生代侵入体主要分布于九对沟-胡窑张扭性次级破碎带中(图1-b)。

区内青尖坡石英二长岩岩体与葛胡窑片麻岩多呈陡倾侵入, 呈复杂岩枝、岩脉状侵入围岩中。部分地段为断层接触。岩体中可见围岩捕虏体。另外, 岩体明显截切数条NW向辉绿岩岩墙。石英二长岩岩体及围岩有不同程度的蚀变, 以绢云母化、黄铁矿化、硅化、碳酸盐化为主, 伴生黑云母化、钾长石化。岩石呈浅灰色、肉红色, 细粒、不等粒二长结构, 块状构造, 与围岩接触处局部发育弱片麻状构造, 主要矿物成分为斜长石(30%~45%)、钾长石(35%~40%)、石英(10%~15%)、黑云母(2%~5%), 以及少量角闪石<sup>①</sup>。

## 2 样品分析方法

石英二长岩样品(RZ100)锆石单矿物挑选、阴极发光显微照相、U-Pb同位素测年均在西北大学大陆动力学实验室完成, 阴极发光显微照相工作电

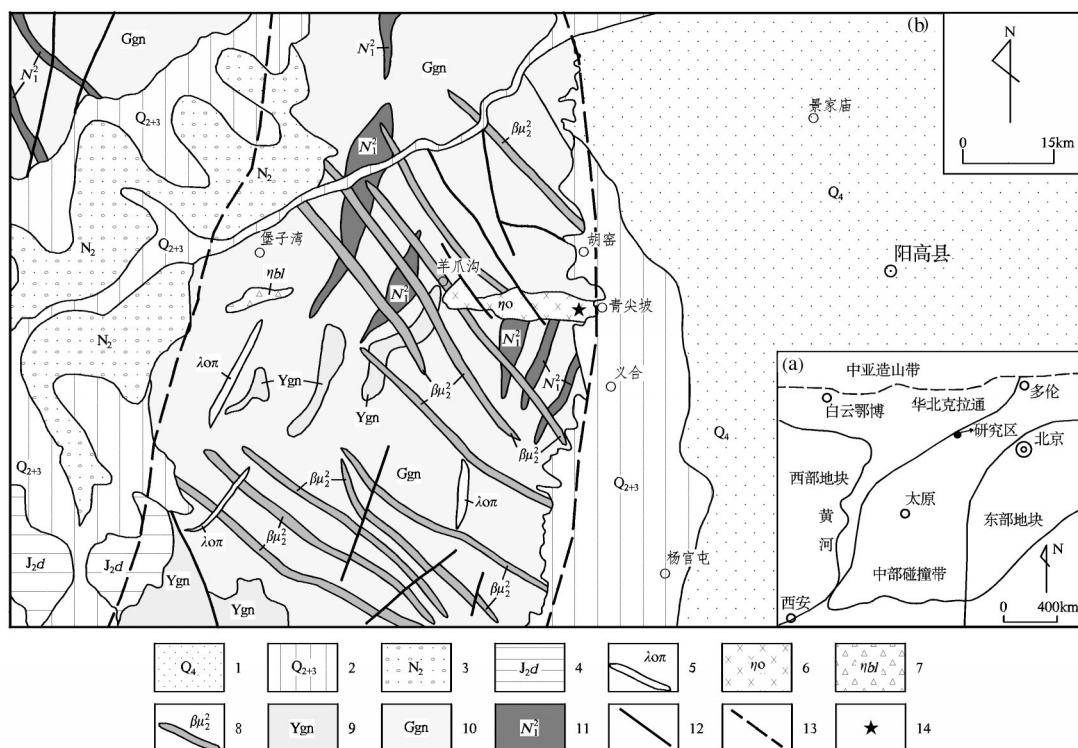


图1 华北克拉通构造简图(a)和山西青尖坡地区地质略图(b)<sup>①</sup>

Fig. 1 Simplified map of major tectonic units of the north China craton(a) and geological sketch map of the study area(b)

- 1—第四系冲积物; 2—第四系残积物; 3—新近系冲积物; 4—大同组砂岩、粉砂岩、流纹岩;
- 5—石英斑岩脉; 6—石英二长岩; 7—角砾岩; 8—辉绿岩脉; 9—义合片麻岩; 10—葛胡窑片麻岩; 11—变质基性岩;
- 12—构造断裂; 13—遥感推断断裂; 14—样品采样位置

压为15kV,电流为4nA。U-Pb同位素测年采用LA-ICP-MS分析方法。激光剥蚀系统为GeoLas 2005,ICP-MS为Agilent 7500。

石英二长岩样品(RZ100)的主量、稀土元素测定均在武汉综合岩矿测试中心完成。主量元素采用XRF法在RIX 2100仪器上分析,分析误差优于5%。稀土元素采用Agilent 7500等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析误差优于5%~10%。

### 3 样品分析结果

#### 3.1 锆石U-Pb年龄

本次对石英二长岩(RZ100)进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb定年。石英二长岩中的锆石多为粒状、长柱状(图2),自形程度较好,粒径多大于100μm。锆石的U含量为 $141 \times 10^{-6}$ ~ $652 \times 10^{-6}$ ,Th含量为 $140 \times 10^{-6}$ ~ $1361 \times 10^{-6}$ (表1)。锆石晶形多完整,呈自形棱角状,色暗,发育细密的振荡环带,Th/U值为0.54~3.01(图3-b),表明锆石为岩浆成因。对锆石测定数据(表1)运用ICP-MS DATA Cal软件处理,剔除异常较大的分析点后,22个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $241.1 \pm 1.7\text{ Ma}$ (图3-a),代表了石英二长岩的结晶年龄。

#### 3.2 地球化学特征

从岩石化学分析结果看(表2),青尖坡石英二长岩的 $\text{SiO}_2$ 含量为65.25%~71.47%,平均68.15%,属酸性岩,在TAS图解中落入石英二长岩-花岗岩区域(图4-a)。里特曼指数 $\sigma$ 为2.81~5.17,平均4.00,大体属于碱性岩系列。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为15.93%~17.09%,平均16.15%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量为8.95%~10.73%,平均9.93%; $\text{CaO}$ 含量为0.53%~1.52%,平均0.75%;具高碱、低钙的特点。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}$ 图解中落入钾玄岩系列(图4-b)。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为0.67~1.63,平均

1.22,为钾质系列, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 饱和度( $\text{A/CNK} = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ )摩尔比为0.97~1.24,平均1.13,属于过铝质花岗岩类(图5-a)。

从稀土元素分析结果看,样品稀土元素总量( $\Sigma\text{REE}$ )为 $154.91 \times 10^{-6}$ ~ $318.77 \times 10^{-6}$ ,平均 $218.11 \times 10^{-6}$ ;轻稀土元素总量( $\Sigma\text{LREE}$ )为 $147.19 \times 10^{-6}$ ~ $304.86 \times 10^{-6}$ ,平均 $207.80 \times 10^{-6}$ ;重稀土元素总量( $\Sigma\text{HREE}$ )为 $7.72 \times 10^{-6}$ ~ $13.91 \times 10^{-6}$ ,平均 $10.32 \times 10^{-6}$ ;轻稀土元素明显较重稀土元素富集, $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}=16.94$ ~22.93,平均值为20.21。

稀土元素含量采用球粒陨石标准值<sup>[38]</sup>进行标准化,标准化后稀土元素配分曲线(图5-b)为倾斜程度类似的右倾型。轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损。轻、重稀土元素分馏明显, $(\text{La/Yb})_N=27.66$ ~38.34,平均33.86。轻稀土元素内部分馏较明显, $(\text{La/Sm})_N=5.05$ ~7.08,平均6.14;重稀土元素内部分馏作用较弱, $(\text{Gd/Lu})_N=2.06$ ~4.98,平均3.26,重稀土元素活动性较弱。Ce异常不明显, $\delta\text{Ce}=0.95$ ~1.08,平均值为0.99;具有稳定的弱负Eu异常, $\delta\text{Eu}=0.77$ ~0.99,平均0.89,表明岩浆演化过程中没有发生大规模的斜长石分离结晶作用。

另外,石英二长岩负Eu异常不明显,不同于上地壳的显著负Eu异常,与中下地壳弱负Eu异常特征<sup>[39]</sup>类似,暗示青尖坡石英二长岩的形成很可能与中下地壳有关。

### 4 讨论

#### 4.1 岩浆侵位时代

石英二长岩(RZ100)LA-ICP-MS锆石U-Pb定年表明,22个分析点给出 $241.1 \pm 1.7\text{ Ma}$ 的年龄,表明其侵位时间在 $241.1 \pm 1.7\text{ Ma}$ 左右,属于早中三叠世。另外,这22个年龄集中分布(图6-a),表明青尖

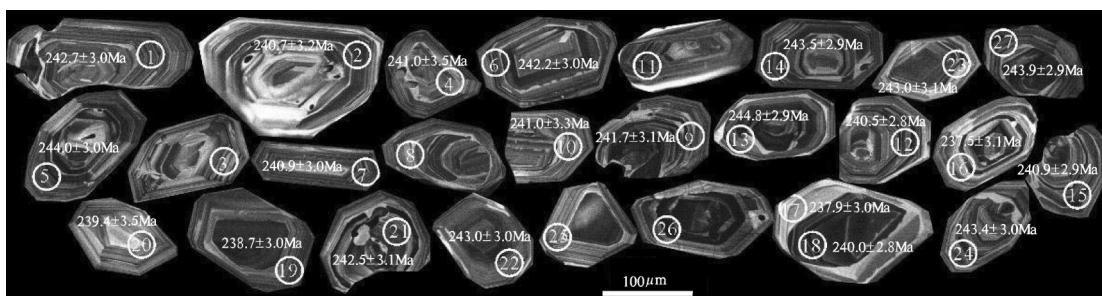


图2 青尖坡石英二长岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 2 CL images of representative zircons from Qingjianpo quartz monzonite

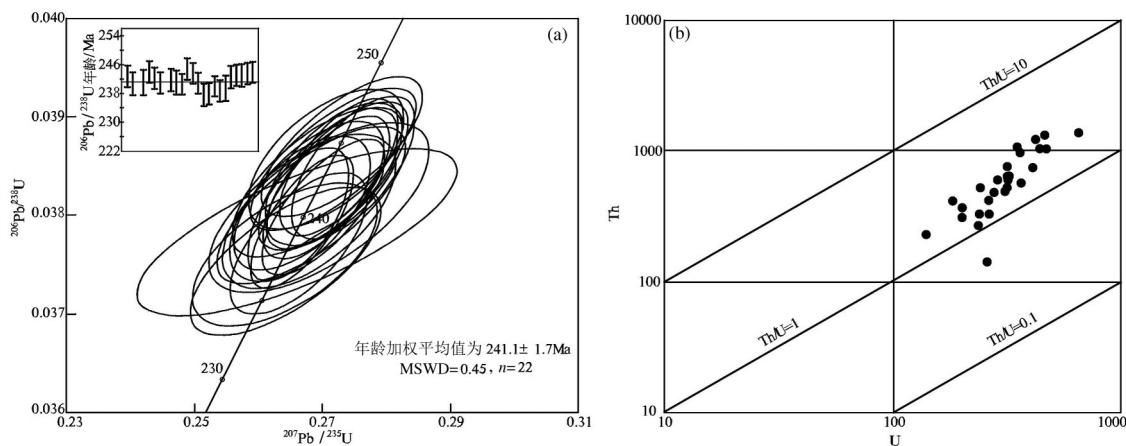


图3 青尖坡石英二长岩锆石U-Pb谐和图(a)和U-Th相关图(b)

Fig. 3 U-Pb concordia diagrams for zircons (a) and U-Th diagram (b) of Qingjianpo quartz monzonite

表1 青尖坡石英二长岩LA-ICP-MS锆石U-Th-Pb分析结果

**Table 1** The LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb result of the Qingjianpo quartz monzonite

测点号	含量/ $10^{-6}$			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
RZ100-1	14.0	331.3	264.1	1.25	0.0513	0.0017	0.271	0.008	0.0384	0.0005	252.2	73.2	243.6	6.0	242.7	3.0
RZ100-2	18.1	597.7	290.7	2.06	0.0511	0.0019	0.268	0.009	0.0380	0.0005	243.7	84.9	241.0	7.2	240.7	3.2
RZ100-3	13.1	313.3	200.6	1.56	0.0511	0.0021	0.277	0.010	0.0393	0.0005	242.9	90.5	248.2	8.1	248.7	3.1
RZ100-4	9.5	230.6	140.6	1.64	0.0513	0.0024	0.270	0.011	0.0381	0.0006	254.9	102.6	242.3	9.1	241.0	3.5
RZ100-5	30.2	1054.4	473.2	2.23	0.0511	0.0018	0.272	0.009	0.0386	0.0005	243.7	80.4	244.0	6.8	244.0	3.0
RZ100-6	32.2	1303.5	466.3	2.8	0.0513	0.0015	0.271	0.007	0.0383	0.0005	251.9	66.9	243.1	5.3	242.2	3.0
RZ100-7	12.2	271.7	237.8	1.14	0.0508	0.0016	0.266	0.007	0.0381	0.0005	229.5	72.7	239.8	5.8	240.9	3.0
RZ100-8	19.8	575.3	364.3	1.58	0.0541	0.0014	0.268	0.005	0.0360	0.0004	374.1	56.4	241.1	4.1	227.7	2.7
RZ100-9	14.8	423.4	264.9	1.6	0.0509	0.0017	0.268	0.008	0.0382	0.0005	234.2	76.1	241.0	6.2	241.7	3.1
RZ100-10	13.1	329.6	240.8	1.37	0.0510	0.0021	0.268	0.010	0.0381	0.0005	242.7	90.5	241.2	7.8	241.0	3.3
RZ100-11	154.0	140.4	259.3	0.54	0.1635	0.0033	10.642	0.129	0.4721	0.0055	2,492.0	33.9	2,492.4	11.3	2,492.6	24.0
RZ100-12	25.0	755.8	413.6	1.83	0.0508	0.0013	0.266	0.005	0.0380	0.0005	230.9	58.5	239.7	4.2	240.5	2.8
RZ100-13	25.7	979.4	359.6	2.72	0.0511	0.0018	0.273	0.008	0.0387	0.0005	247.0	78.1	245.0	6.6	244.8	2.9
RZ100-14	19.6	523.9	316.2	1.66	0.0513	0.0014	0.272	0.006	0.0385	0.0005	255.2	63.2	244.6	4.9	243.5	2.9
RZ100-15	17.1	523.2	244.2	2.14	0.0514	0.0015	0.270	0.006	0.0381	0.0005	260.1	65.4	242.7	5.1	240.9	2.9
RZ100-16	19.0	642.6	327.0	1.96	0.0510	0.0021	0.264	0.010	0.0375	0.0005	242.4	92.4	238.0	7.9	237.5	3.1
RZ100-17	17.5	488.1	278.8	1.75	0.0509	0.0020	0.264	0.010	0.0376	0.0005	236.9	90.0	237.9	7.7	237.9	3.0
RZ100-18	30.9	1234.3	427.2	2.89	0.0510	0.0013	0.267	0.005	0.0379	0.0005	240.5	59.1	240.1	4.3	240.0	2.8
RZ100-19	17.4	493.6	309.5	1.59	0.0512	0.0016	0.266	0.007	0.0377	0.0005	248.6	71.3	239.6	5.7	238.7	3.0
RZ100-20	22.5	1077.2	357.9	3.01	0.0510	0.0033	0.266	0.017	0.0378	0.0006	240.4	142.8	239.5	13.3	239.4	3.5
RZ100-21	13.7	368.5	199.6	1.85	0.0509	0.0019	0.269	0.009	0.0383	0.0005	234.3	81.7	241.7	6.9	242.5	3.1
RZ100-22	12.8	412.0	183.9	2.24	0.0513	0.0016	0.272	0.007	0.0384	0.0005	254.7	71.0	244.1	5.8	243.0	3.0
RZ100-23	21.5	748.7	319.8	2.34	0.0514	0.0017	0.272	0.007	0.0384	0.0005	259.0	72.3	244.5	5.9	243.0	3.1
RZ100-24	20.0	634.5	311.4	2.04	0.0518	0.0015	0.275	0.006	0.0385	0.0005	275.7	64.4	246.5	5.1	243.4	3.0
RZ100-25	17.0	606.3	319.5	1.90	0.0770	0.0020	0.377	0.007	0.0355	0.0004	1,120.0	50.5	324.9	5.4	225.1	2.7
RZ100-26	24.1	1361.8	652.1	2.09	0.1470	0.0032	0.427	0.006	0.0210	0.0003	2,311.1	36.9	360.7	4.3	134.2	1.6
RZ100-27	32.3	1062.5	448.3	2.37	0.0509	0.0018	0.271	0.008	0.0386	0.0005	235.0	77.4	243.1	6.5	243.9	2.9

注:第3、8、11、25、26号测点误差较大,不参加计算

表2 青尖坡石英二长岩地球化学数据

Table 2 Whole-rock major, rare-earth elements data of Qingjianpo quartz monzonite

样品编号	岩石名称	采样位置	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
RZ1100	石英二长岩	青尖坡	69.39	0.28	16.22	1.75	0.38	0.02	0.37	0.61	3.89
VIIyQ334	石英二长岩	青尖坡	68.06	0.24	16.02	1.71	0.86	0.01	0.96	0.53	4.04
H164	石英二长岩	青尖坡	67.5	0.5	15.93	2.06	1.05	0.08	0.44	0.61	6.08
Gs8138	石英二长岩	青尖坡	65.25	0.24	16.78	1.87	0.96	0.06	0.53	1.52	5.12
VIIyQ333	石英二长斑岩	青尖坡	71.47	0.22	14.87	0.63	0.9	0.01	0.9	0.29	3.4
HY-01	石英二长岩	胡窑	67.22	0.3	17.09	1.84	0.72	0.03	0.95	0.96	4.6
YQ01	石英二长(斑)岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
YQ03	石英二长(斑)岩	羊爪沟	—	—	—	—	—	—	—	—	—
样品编号	岩石名称	采样位置	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量	总计	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	A/CNK	A/NK	
RZ1100	石英二长岩	青尖坡	5.22	0.14	1.34	99.61	9.11	1.34	1.23	1.34	
VIIyQ334	石英二长岩	青尖坡	6.14	0.08	1.52	100.17	10.18	1.52	1.12	1.20	
H164	石英二长岩	青尖坡	4.1	0.18	2.43	99.66	10.18	0.67	1.02	1.10	
Gs8138	石英二长岩	青尖坡	5.61	0.22	1.62	99.78	10.73	1.1	0.97	1.16	
VIIyQ333	石英二长斑岩	青尖坡	5.55	0.08	1.43	99.75	8.95	1.63	1.22	1.28	
HY-01	石英二长岩	胡窑	4.15	0.11	0.42	100.55	10.41	1.08	1.24	1.42	
YQ01	石英二长(斑)岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
YQ03	石英二长(斑)岩	羊爪沟	—	—	—	—	—	—	—	—	—
样品编号	岩石名称	采样位置	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
RZ1100	石英二长岩	青尖坡	49.9	93	11.2	39.6	6.22	1.52	5.83	0.63	2.49
VIIyQ334	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H164	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gs8138	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VIIyQ333	石英二长斑岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HY-01	石英二长岩	胡窑	87	142	14.7	51.3	7.73	2.13	5.64	0.712	3.34
YQ01	石英二长(斑)岩	青尖坡	48.4	82.4	8.7	32	5.03	1.16	2.7	0.48	1.89
YQ03	石英二长(斑)岩	羊爪沟	40.2	70.4	6.13	25.7	3.96	0.8	2.09	0.3	1.76
样品编号	岩石名称	采样位置	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE
RZ1100	石英二长岩	青尖坡	0.43	1.17	0.15	1.04	0.15	10.9	213.33	201.44	11.89
VIIyQ334	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H164	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gs8138	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
VIIyQ333	石英二长斑岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	—	—	—
HY-01	石英二长岩	胡窑	0.573	1.66	0.251	1.53	0.206	18.2	318.77	304.86	13.91
YQ01	石英二长(斑)岩	青尖坡	0.56	0.96	0.14	0.88	0.14	8.73	185.44	177.69	7.75
YQ03	石英二长(斑)岩	羊爪沟	0.35	1.97	0.14	0.98	0.13	9.36	154.91	147.19	7.72
样品编号	岩石名称	采样位置	LREE/ HREE	(La/ Yb) <sub>N</sub>	(La/ Sm) <sub>N</sub>	(Gd/ Lu) <sub>N</sub>	δEu	δCe	数据 来源		
RZ1100	石英二长岩	青尖坡	16.94	32.35	5.05	4.98	0.77	0.95	本文		
VIIyQ334	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	②		
H164	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	②		
Gs8138	石英二长岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	②		
VIIyQ333	石英二长斑岩	青尖坡	—	—	—	—	—	—	②		
HY-01	石英二长岩	胡窑	21.92	38.34	7.08	3.51	0.99	0.96	[34]		
YQ01	石英二长(斑)岩	青尖坡	22.93	37.08	6.05	2.47	0.96	0.97	[35]		
YQ03	石英二长(斑)岩	羊爪沟	19.07	27.66	6.39	2.06	0.85	1.08	[35]		

注:ΣLREE=ΣLREE(La-Eu),ΣHREE=ΣHREE(Gd-Lu),—表示未测出。主量元素含量单位为%,稀土元素含量单位为10<sup>-6</sup>

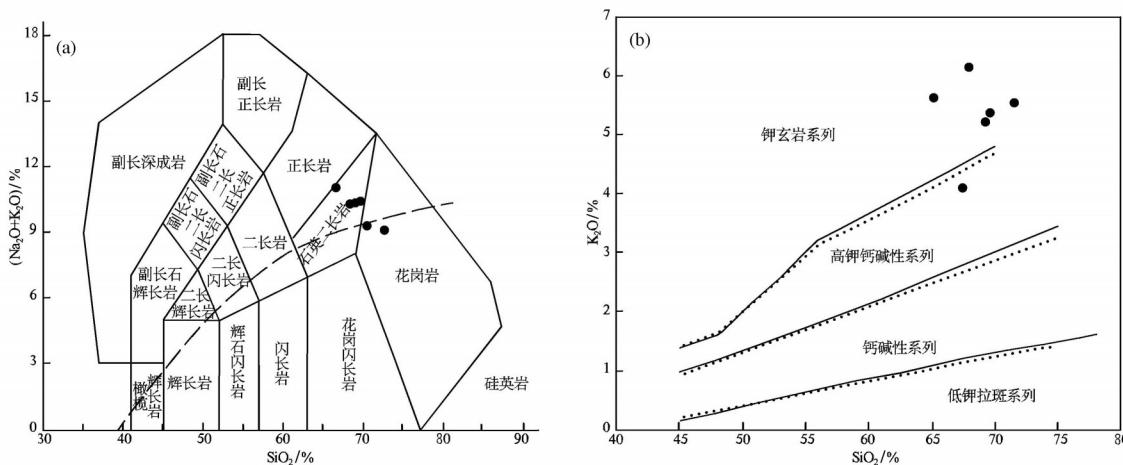


图4 青尖坡石英二长岩岩石类型(a,底图据参考文献[36])和系列划分图解(b,底图据参考文献[37])

Fig. 4 Classification and series diagrams of Qingjianpo quartz monzonite

坡英二长岩岩体是在较短地质时期形成的。

区内及周边还出露其他早中三叠世岩浆岩体,如堡子湾岩体<sup>[40]</sup>、罗家沟岩体<sup>[41]</sup>、七对沟岩体<sup>[3]</sup>、九对沟岩体<sup>[3]</sup>,对这些岩浆岩体年龄数据的研究结果(图6-b)表明,这些岩浆岩的侵位年龄介于241.1~257.8Ma之间。

因此,青尖坡石英二长岩及周边相关岩体的测年数据表明,华北克拉通北缘在早中三叠世存在岩浆活动。

#### 4.2 岩石成因

从石英二长岩岩石化学特征分析,青尖坡石英二长岩I型、S型花岗岩的特征都比较明显。CaO含

量较低,K<sub>2</sub>O含量较高,K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O值较大,岩石整体呈过铝质岩系列,显示为S型花岗岩特征<sup>[42]</sup>;而Na<sub>2</sub>O含量较高,TiO<sub>2</sub>含量较低,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>含量很低(小于0.30%)等特征则显示I型花岗岩特征<sup>[42]</sup>。但SiO<sub>2</sub>与P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>具显著负相关关系(图7-a),与I型花岗岩演化趋势一致<sup>[43]</sup>,特别是稀土元素配分曲线样式显示富集轻稀土元素,Eu异常不明显,配分曲线为右倾型(图5-b),与典型的I型花岗岩相似,不同于典型的S型花岗岩常表现出的“海鸥型”稀土元素配分型式<sup>[44]</sup>。以上特征说明,青尖坡石英二长岩总体上应为I型花岗岩,但兼具S型花岗岩的某些特征。

La与La/Sm呈正相关关系(图7-b),显示青尖坡

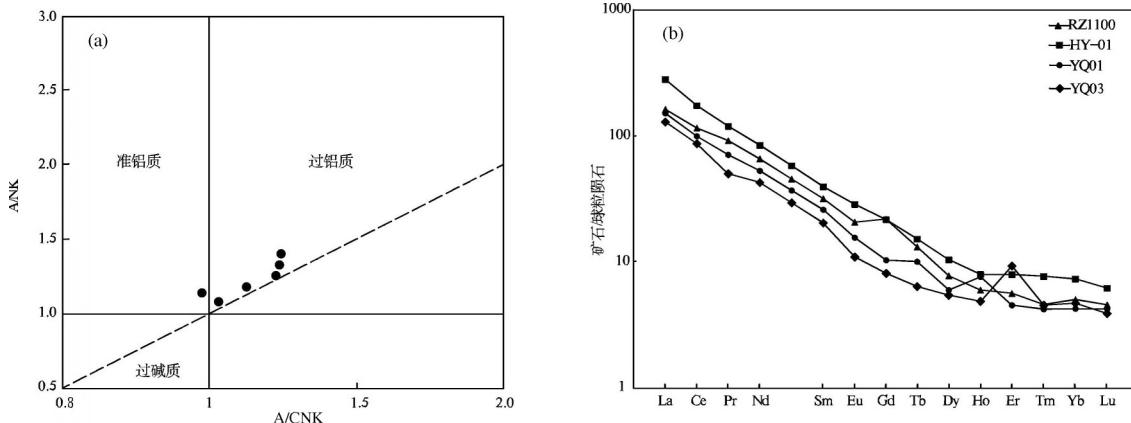


图5 青尖坡石英二长岩A/CNK-A/NK(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图解(b)

Fig. 5 A/CNK vs A/NK plot(a) and chondrite-normalized REE patterns(b) of Qingjianpo quartz monzonite

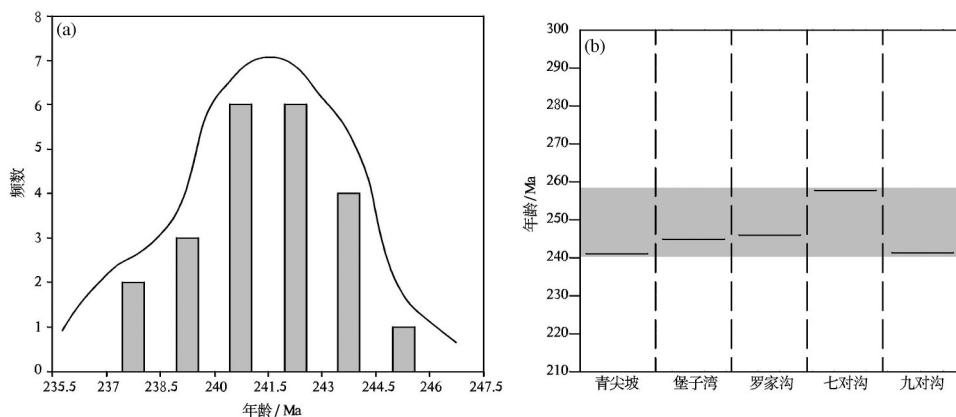


图6 青尖坡石英二长岩U-Pb年龄分布(a)和地区岩体年龄统计(b)

Fig. 6 The zircon U-Pb ages of Qingjianpo quartz monzonite(a) and zircon U-Pb ages in the region(b)

石英二长岩为平衡部分熔融成因<sup>[45]</sup>。Eu弱负异常暗示源区可能与中下地壳有关<sup>[35]</sup>,而 $\delta\text{Eu}-(\text{La/Yb})_N$ 图显示为壳幔混源型(图8-a),说明成岩过程中有幔源物质成分的加入。从TFeO-MgO判别图(图8-b)也看出远离结晶分异趋势线,具有明显的岩浆混合作用特征。

过铝质花岗岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值可以作为源区岩石部分熔融温度的指示剂<sup>[48]</sup>, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值大于100,源区部分熔融温度小于875°C; $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值小于100,源区部分熔融温度大于875°C。青尖坡石英二长岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值为31.86~69.92,均小于100,显示青尖坡石英二长岩岩浆的形成温度较高。

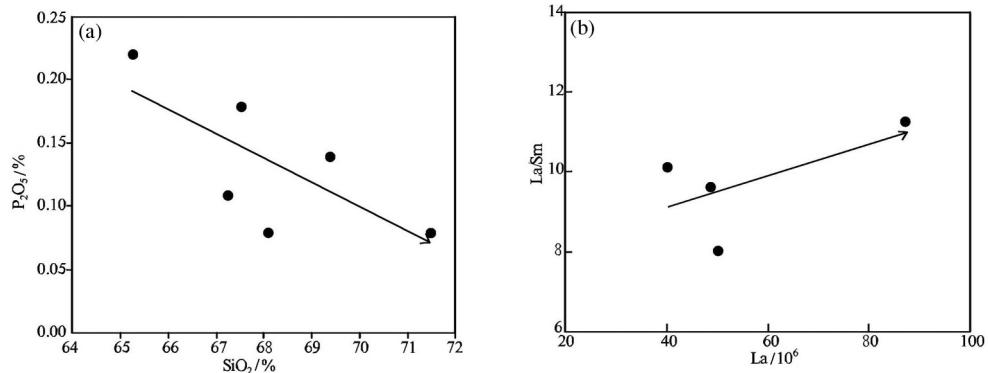
#### 4.3 岩石形成的地球动力学背景

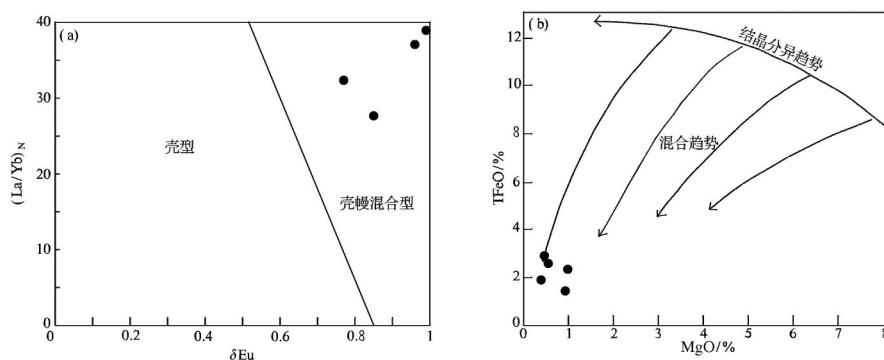
岩石的地球化学特征一定程度上能够反映其形成背景<sup>[2]</sup>,在构造环境判别R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>图(图9)上,青尖坡石英二长岩主要落于晚造山期环境,具有向后造

山环境演化的趋势,说明青尖坡石英二长岩形成于晚造山-造山后的伸展环境。

自古元古代华北克拉通拼合以来<sup>[50~51]</sup>,华北克拉通一直处于稳定的克拉通状态<sup>[3]</sup>,直至晚古生代,古亚洲洋向华北克拉通下俯冲<sup>[19]</sup>,最终在二叠纪末发生了华北克拉通北缘与西伯利亚克拉通的碰撞<sup>[25, 52~54]</sup>,并可能持续到三叠纪<sup>[25]</sup>。对青尖坡石英二长岩的研究,证实华北克拉通北缘在三叠纪处于晚造山-造山后伸展构造环境<sup>[30, 32, 55~57]</sup>,华北克拉通北缘与西伯利亚克拉通的碰撞持续到早中三叠世,而古亚洲洋盆的闭合时限应早于早中三叠世<sup>[32, 58~59]</sup>。

华北克拉通北缘发育一条近EW向分布,长达1500km左右的三叠纪碱性岩带,该碱性岩带西起内蒙古包头市,东至吉林省中部<sup>[41]</sup>。青尖坡石英二长岩与该碱性岩带岩石地球化学特征大体类

图7 青尖坡石英二长岩SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(a)和La-La/Sm图解(b)Fig. 7 SiO<sub>2</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (a) and La-La/Sm (b) diagrams for Qingjianpo quartz monzonite

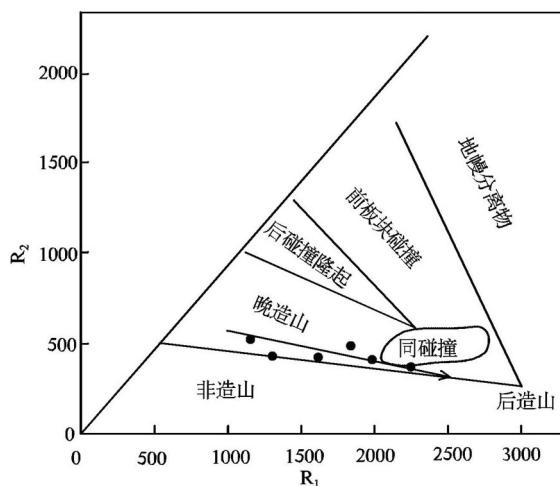
图8 青尖坡石英二长岩δEu-(La/Yb)<sub>N</sub>(a)、底图据参考文献[46])和MgO-TFeO(b)、底图据参考文献[47])图解Fig. 8 δEu-(La/Yb)<sub>N</sub> (a) and MgO-TFeO (b) diagrams for Qingjianpo quartz monzonite

似<sup>[10,55,58,60-61]</sup>,形成时代大致相当<sup>[10,41,60-62]</sup>,都形成于拉张的构造背景<sup>[55,58]</sup>,说明青尖坡石英二长岩为该碱性岩带的组成部分。

综上所述,在华北克拉通北缘与西伯利亚克拉通碰撞晚期-碰撞后期的伸展构造环境下,青尖坡石英二长岩的形成与华北克拉通北缘岩石圈拉张减薄,导致地幔上涌形成的高温使中下地壳部分熔融有关,并有幔源物质成分的加入。

## 5 结 论

(1)LA-ICP-MS锆石U-Pb测年结果表明,青尖坡石英二长岩岩体的形成时间为241.1±1.7 Ma,属早中三叠世岩浆活动的产物。

图9 青尖坡石英二长岩R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub>因子判别图

(底图据参考文献[49])

Fig. 9 Discriminant diagram of R<sub>1</sub>-R<sub>2</sub> factor for Qingjianpo quartz monzonite

(2)岩石地球化学研究表明,青尖坡石英二长岩属高钾钾玄岩系列,稀土元素配分曲线为右倾型,轻稀土元素相对富集,重稀土元素相对亏损,具有稳定的弱负Eu异常,为I型花岗岩成因,但兼具S型花岗岩的某些特征。

(3)青尖坡石英二长岩形成于晚造山-造山后的伸展环境,地幔上涌形成的高温使中下地壳发生了部分熔融,并有幔源物质成分的加入,是华北克拉通北缘三叠纪碱性岩带的组成部分。

**致谢:**感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见,感谢野外工作过程中山西省地质调查院基础中心同仁的大力帮助。

## 参 考 文 献

- [1]莫宣学,赵志丹,邓晋福,等.印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J].地学前缘,2003,10(3): 135-148.
- [2]莫宣学.岩浆作用与青藏高原演化[J].高校地质学报,2011,17(3): 351-367.
- [3]翟明国.克拉通化与华北陆块的形成[J].中国科学(D辑),2011,41(8): 1037-1046.
- [4]路凤香,郑建平,李伍平,等.中国东部显生宙地幔演化的主要样式:“蘑菇云”模型[J].地学前缘,2000,7(1): 97-107.
- [5]Fan W M, Zhang H F, Baker J, et al. On and off the North China Craton: where is the Archean Keel?[J]. Journal of Petrology, 2000, 41: 933-950.
- [6]Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism[J]. Phys. Chem. Earth., 2001, 26: 747-757.
- [7]翟明国,朱日祥,刘建明,等.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),2003,33(10): 913-920.
- [8]Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: “Continental roots-

- plumetectonics” [J]. *Earth Sci. Rev.*, 2004, 65: 223–275.
- [9]赵越,张拴宏,徐刚,等.燕山板内变形带保罗纪主要构造事件[J].  
地质通报, 2004, 23:854–863.
- [10]陈斌,牛晓露,王志强,等.华北克拉通北缘姚家庄过钾质超镁铁  
岩—正长岩杂岩体的锆石U-Pb年代学、岩石学和地球化学  
特征[J].中国科学(D辑),2013,43(7): 1073–1087.
- [11]华仁民,毛景文.试论中国东部中生代成矿大爆发[J].矿床地质,  
1999, 18(4): 300–307.
- [12]Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re–Os evidence for  
replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North  
China Craton[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198  
(10): 307–322.
- [13]Wu F Y, Walker R J, Ren X W, et al. Osmium isotopic  
constraints on the age of lithospheric mantle beneath northeastern  
China[J]. *Chemical Geology*, 2003, 196(1): 107–129.
- [14]Wu F Y, Walker R J, Yang Y H, et al. The chemical–temporal  
evolution of lithospheric mantle underlying the North China  
Craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(19): 5013–  
5034.
- [15]Deng J F, Su S G, Niu Y L, et al. A possible model for the  
lithospheric thinning of North China Craton: Evidence from the  
Yanshanian (Jura–Cretaceous) magmatism and tectonism[J]. *Lithos*,  
2007, 96: 22–35.
- [16]吴福元,徐义刚,高山,等.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,2008,24(6): 1145–1174.
- [17]Xu Y G, Blusztajn J, Ma J L, et al. Late Archean to Early  
Proterozoic lithospheric mantle beneath the western North China  
Craton: Sr–Nd–Os isotopes of peridotite xenoliths from Yangyuan  
and Fansi[J]. *Lithos*, 2008, 102: 25–42.
- [18]高山,章军锋,许文良,等.拆沉作用与华北克拉通破坏[J].科学  
通报,2009,54(1): 1962–1973.
- [19]朱日祥,陈凌,吴福元,等.华北克拉通破坏的时间、范围与机  
制[J].中国科学(D辑),2011,41(5): 583–592.
- [20]钟福平,钟建华,艾合买提江·阿不都热合曼,等.华北克拉通破  
坏时间与破坏范围分布特征——来自银根–额济纳旗盆地苏红  
图坳陷早白垩世火山岩的启示[J].中国地质,2015,42(2): 435–  
456.
- [21]吴文彬,王玉平,于海峰,等.华北克拉通北缘八当山火山岩及变  
质石英闪长岩锆石U-Pb年龄与岩石地球化学特征[J].地质通  
报,2019,38(4): 592–602.
- [22]Wang Quan, Liu Xueya. Paleoplate tectonics between Cathaysia  
and Angaraland in Inner Mongolia of China[J]. *Tectonics*, 1986, 5  
(7): 1073–1088.
- [23]王荃,刘雪亚,李锦轶.中国华夏与安加拉古陆间的板块构  
造[M].北京:北京大学出版社,1991:56–60.
- [24]Sengor A M C, Natalin B A, Burtman V S. Evolution of the  
Altaidtectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J].  
*Nature*, 1993, 364: 299–307.
- [25]Xiao W J, Windley B F, Hao J, et al. Accretion leading to collision  
and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China:  
Termination of the central Asian orogenic belt[J]. *Tectonics*, 2003,  
22(6): 1–20.
- [26]Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for  
accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the  
Geological Society London*, 2007, 164: 31–48.
- [27]李锦轶,张进,杨天南,等.北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构  
造分区与构造演化[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(4):  
584–605.
- [28]徐备,陈斌.内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中古生代  
造山带的结构和演化[J].中国科学(D辑),1997,27(3): 227–232.
- [29]侯万荣,聂凤军,徐斌,等.内蒙古中西部钼多金属矿床地质特征  
及其动力学背景[J].地质与勘探,2010,46(5): 751–764.
- [30]张拴宏,赵越,刘建民,等.华北地块北缘晚古生代—早中生代岩  
浆活动期次、特征及构造背景[J].岩石矿物学杂志,2010,29(6):  
824–842.
- [31]赵丽君.华北克拉通北缘早中生代岩体侵位与地壳变形——以  
盘山岩体周缘变形及年代学分析为例[J].地质与勘探,2010,46  
(1): 102–112.
- [32]赵越,陈斌,张拴宏,等.华北克拉通北缘及邻区前燕山期主要地  
质事件[J].中国地质,2010,37(4): 900–915.
- [33]程裕淇,沈永和,张良臣,等.中国大陆的地质构造演化[J].中国  
区域地质,1995,(4): 289–294.
- [34]龙灵利,王玉往,王京彬,等.山西堡子湾–九对沟金(钼)矿区岩  
石地球化学特征及其意义[J].矿床地质,2012,31(3): 493–505.
- [35]曹国雄,高太忠,吴有民.堡子湾金矿同位素及稀土元素地球化  
学研究[J].地质地球化学,2000,28(1): 10–14.
- [36]Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of  
igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford: Blackwell, 1989: 1–  
200.
- [37]Rollinson H. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation,  
and Interpretation[M]. Longman Scientific & Technical, Harlow,  
United Kingdom, 1993: 352.
- [38]Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite  
studies[C]//Henderson P. Rare Earth Element Chemistry.  
Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [39]张本仁,傅家模.地球化学进展[M].北京:化学工业出版社,  
2005:200–217.
- [40]牛翠伊,廖永骨,卿敏,等.山西堡子湾金矿成矿时代探讨[J].黄  
金地质,2002,8(1): 17–20.
- [41]阎国翰,牟保垒,许保良,等.燕辽–阴山三叠纪碱性侵入岩年代  
学和Sr, Nd, Pb同位素特征及意义[J].中国科学(D辑),2000,30  
(4): 384–387.
- [42]董毅,刘显凡,邓江红,等.中甸弧西班牙带印支期中酸性侵入岩  
成因与成矿意义[J].中国地质,2012,39(4): 887–899.
- [43]Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B. Hybridization between felsic and  
mafic magmas in calc–alkaline granitoids: A case study in northern  
Sardinia[J]. *Chemical Geology*, 1991, 92(1/3): 45–86.
- [44]邱家骥.岩浆岩岩石学[M].北京:地质出版社,1985:37–39.
- [45]Li X H, Li W X, Li Z X. On the genetic classification and tectonic  
implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling

- Range, South China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52 (14): 1873–1885.
- [46]王中刚,于学元,赵振华.稀土元素地球化学[M].北京:科学出版社,1989:222–246.
- [47]Schianio P, Monzier M, Eissen J P, et al. Simple mixing as the major control of the evolution of volcanic suites in the Ecuadorian Andes[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2010, 160 (2): 297–312.
- [48]Sylvester P J. Post-collisional peraluminous granites[J]. Lithos, 1998, 45: 29–44.
- [49]Bachelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1): 43–55.
- [50]Zhao G C, Cawood P A, Wilde S A, et al. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China Craton: implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 2000, 103: 55–88.
- [51]翟明国,彭澎.华北克拉通元古代构造事件[J].岩石学报,2007, 23(11):2665–2682.
- [52]Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean[J]. International Geology Review, 1995, 37: 335–360.
- [53]Windley B F, Kröner A, Guo J H, et al. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. The Journal of Geology, 2002, 110: 719–737.
- [54]Wu F Y, Zhao G C, Sun D Y, et al. The Hulan Group: Its role in the evolution of the Central Asian Orogenic Belt of NE China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 30: 542–556.
- [55]阎国翰,谭林坤,许保良,等.阴山地区印支期碱性侵入岩岩石地球化学特征[J].岩石矿物学杂志,2001,23(3): 281–292.
- [56]Li J Y. Permian Geodynamic Setting of northeast China and adjacent regions: Closure of the paleo-Asian ocean and subduction of the paleo-Pacific plate[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26(3/4): 207–224.
- [57]曾庆栋,刘建明,张作伦,等.华北克拉通北缘西拉沐沦钼多金属成矿带钼矿化类型、特征及地球动力学背景[J].岩石学报,2009, 25(5): 1225–1238.
- [58]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,2009,30(7): 2031–2040.
- [59]赵辰,巩恩普,刘锦,等.华北克拉通北缘东段“开原岩群”的解体及重新认识[J].地质与资源,2018,27(3): 209–217,256.
- [60]牟保磊,阎国翰.燕辽三叠纪碱性偏碱性杂岩体地球化学特征及意义[J].地质学报,1992,66(2): 108–121.
- [61]牛晓露,杨经绥,刘飞,等.华北克拉通北缘包头东正长岩的成因:来自岩石矿物学和地球化学的证据[J].中国科学:地球科学, 2016,46(3): 374–391.
- [62]任荣,牟保磊,韩宝福,等.河北矾山钾质碱性超镁铁岩—正长岩杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J].岩石学报,2009,25(3): 588–594.
- ①山西省地质调查院.1:25万大同市幅区域地质调查报告.2014.
- ②山西省地矿局区调队.1:5万阳高县幅区域地质调查报告.1995.
- ③山西省地质局区调队.山西省中生代中酸性侵入岩.1982.