

鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩年代学及意义

李振宏¹,冯胜斌²,袁效奇²,渠洪杰¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081; 2. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,陕西 西安 710018)

摘要:沉积盆地地层序列中的凝灰岩是源区造山活动的直接产物,与造山带的活动性密切相关。鄂尔多斯及周缘盆地地下侏罗统凝灰岩的相继发现,对于探讨早侏罗世构造演化的关键时限和大地构造背景提供了证据。以凝灰岩的锆石 U-Pb 年代学为线索,厘定了早侏罗世凝灰岩喷发的期次及关键时限,同时辅助以重点区域凝灰岩的地球化学特征,探讨了凝灰岩喷发的大地构造背景。研究认为:①下侏罗统凝灰岩分布具有明显的区域性,集中分布在鄂尔多斯盆地西南缘平凉、安口一带,鄂尔多斯盆地东北缘的宁武-静乐盆地及广灵盆地内,与北秦岭造山带和燕山造山带的演化密切相关;②不同地区凝灰岩的喷发时限并不完全具有等时性,鄂尔多斯西南缘平凉策底、安口地区凝灰岩的时代分别为 $175.2 \text{ Ma} \pm 2.4 \text{ Ma}$ 和 $168.4 \text{ Ma} \pm 1.3 \text{ Ma}$,宁武-静乐盆地陈家半沟剖面火山碎屑岩的时代为 $179.2 \text{ Ma} \pm 0.79 \text{ Ma}$,浑源-广灵盆地板塔寺剖面凝灰岩的年龄为 $171 \text{ Ma} \pm 1.0 \text{ Ma}$,总体上处于早侏罗世晚期至中侏罗世早期;③在凝灰岩微量元素 Th/Hf-Ta/Hf 构造环境判别图解中,所有投点全部落入了大陆裂谷带或者初始裂谷玄武岩区,反映了早侏罗世至中侏罗世早期鄂尔多斯及周缘地区整体上处于陆内拉张的构造背景。凝灰岩喷发时限的确定,也为鄂尔多斯盆地中生代热演化年代学的研究提供了直接的证据。

关键词:凝灰岩;锆石 U-Pb 年代学;地球化学;下侏罗统;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Chronology and its significance of the Lower Jurassic tuff in Ordos Basin and its periphery

Li Zhenhong¹, Feng Shengbin², Yuan Xiaoqi², Qu Hongjie¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xian, Shaanxi 710018, China)

Abstract: Tuff in stratigraphic sequences of sedimentary basins is a direct product of the orogenic activity of the source region, and is closely related to orogenic activity. The successive discovery of the Lower Jurassic tuff in Ordos Basin and its periphery is very important for constraining the key timing of tectonic evolution and tectonic background. In this paper, we determined the critical time of tuff eruption for the Lower Jurassic using zircon U-Pb geochronology. In conjunction with the tuff geochemistry in the key areas, we discussed the tectonic background for tuff eruption. The following results were obtained. The distribution of the Lower Jurassic tuff show obvious regional differences. They mainly occur in the Pingliang and Ankou counties in the southwestern Ordos Basin and in the Ningwu-Jingle Basin and Guangling Basin of the northeastern Ordos Basin, and are closely related to the evolution of the North Qinling Orogenic belt and the Yanshan Orogenic belt. The eruption of tuff is not completely synchronous in different regions. The tuff on Cedi section and Ankou section of the southwestern Ordos Basin are dated at $175.2 \text{ Ma} \pm 2.4 \text{ Ma}$ and $168.4 \text{ Ma} \pm 1.3 \text{ Ma}$ respectively, the volcanoclastic rocks on the Chenjiabangou section of Ningwu-Jingle Basin at $179.2 \text{ Ma} \pm 0.79 \text{ Ma}$, and the tuff on the Bantasi section of Hunyuan-Guangling Basin at $171.0 \text{ Ma} \pm 1.0 \text{ Ma}$. Overall, the eruption of tuff is date at the late Early Jurassic to early Middle Jurassic. On the Th/Hf-Ta/Hf diagrams, all the points fall into the continental rift zones or the initial rift zones, which indicates the extensional tectonic setting from the Early Jurassic to early Middle Jurassic in Ordos Basin and its periphery. The timing of tuff eruption may provide a direct chronological evidence for study of the Mesozoic thermal evolution of the Ordos Basin.

Key words: tuff, zircon U-Pb geochronology, geochemistry, Lower Jurassic, Ordos Basin

收稿日期:2014-03-20;修订日期:2014-07-20。

第一作者简介:李振宏(1973—),男,博士,沉积盆地与动力学。E-mail: lizhenhong@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41372122);中国地质调查局地质调查项目(1212011121095)。

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西部,是奠基于中、晚元古代拗拉谷基础上的大型多旋回叠合盆地^[1-2]。中生代是盆地演化的重要阶段,盆地中多种能源矿产尤其是油气成藏阶段与中生代的构造演化、主要构造热事件之间表现出明显的关联性^[3-6]。鄂尔多斯盆地中生代构造热演化年代学的研究,日益成为研究者关注的热点^[7-11]。赵孟为等(1996)利用伊利石K-Ar测年法,结合伊利石结晶度分析,得出了160~170 Ma热事件的年龄时限^[9]。更多学者则根据锆石、磷灰石的裂变径迹,认为中生代存在多期次的构造热事件。如孙少华等(1997)给出了215,135和72 Ma^[10];高峰等(2003)给出了170,130和75 Ma^[11];孙建博等(2006)给出了230~190和150~85 Ma^[7];陈刚等(2007)给出了213~194,165~141,115~113,100~81和66~59 Ma^[8]。鄂尔多斯盆地在中生代为特提斯、古亚洲和太平洋三大构造域所夹持,盆地内构造热流体的活动必然与周缘造山带之间的息息相关,造山带是盆地沉积物源的主要提供区,通过盆地内沉积物中火山物质特别是凝灰岩的发育情况,可以为构造热流体的演化提供直接的证据。本文立足于近年来在鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统中发现的凝灰岩(火山碎屑岩)夹层,在锆石U-Pb同位素测年的基础上,结合典型地区凝灰岩地球化学元素特征,分析了凝灰岩喷发时限的大地构造背景,为早-中侏罗世盆地内构造热流体的发育提供证据(图1)。

1 下侏罗统凝灰岩特征

根据近年来的区域地质调查结果,下侏罗统凝灰岩主要发育于鄂尔多斯盆地西南缘的平凉策底、安口剖面,宁武-静乐盆地陈家半沟剖面以及浑源-广灵盆地的板塔寺剖面(图1,图2)。

平凉策底下侏罗统富县组剖面,主要为一套灰绿色夹紫红色泥岩,褐红色厚层晶屑凝灰岩,其下与上三叠统安口组平行不整合接触,上覆中侏罗统延安组含煤地层(图2a,图3a)。岩石由晶屑、岩屑、火山尘组成。晶屑成分为石英(Qtz),呈棱角状-次棱角状,粒径为0.05~2 mm,含量约占岩石总量10%~15%;岩屑成分主要为碳酸岩(Cal)屑,呈棱角状-次棱角状,粒径为0.05~0.1 mm,约占岩石总量4%~5%;火山尘,约占岩石总量80%~85%。火山碎屑被火山尘胶结(图4a)。

平凉安口剖面下侏罗统富县组下部为浅灰褐色细砂岩夹粉砂质泥岩,上部为灰白色厚层-块状中-细砂岩,发育钙质结核及氧化晕圈。该套凝灰岩层厚度大约20 cm左右,横向分布比较稳定,颜色为灰白色。凝灰岩之下为一套风化壳层,铁质结核发育(图2b,图3b)。镜下鉴定岩石主要由晶屑、岩屑、火山尘组成。晶屑成分为石英(Qtz),呈棱角状-次棱角状,粒径为0.05~2 mm,含量约占岩石总量10%~15%;火山尘约占岩石总量85%~90%。火山碎屑被火山尘胶结(图4b)。

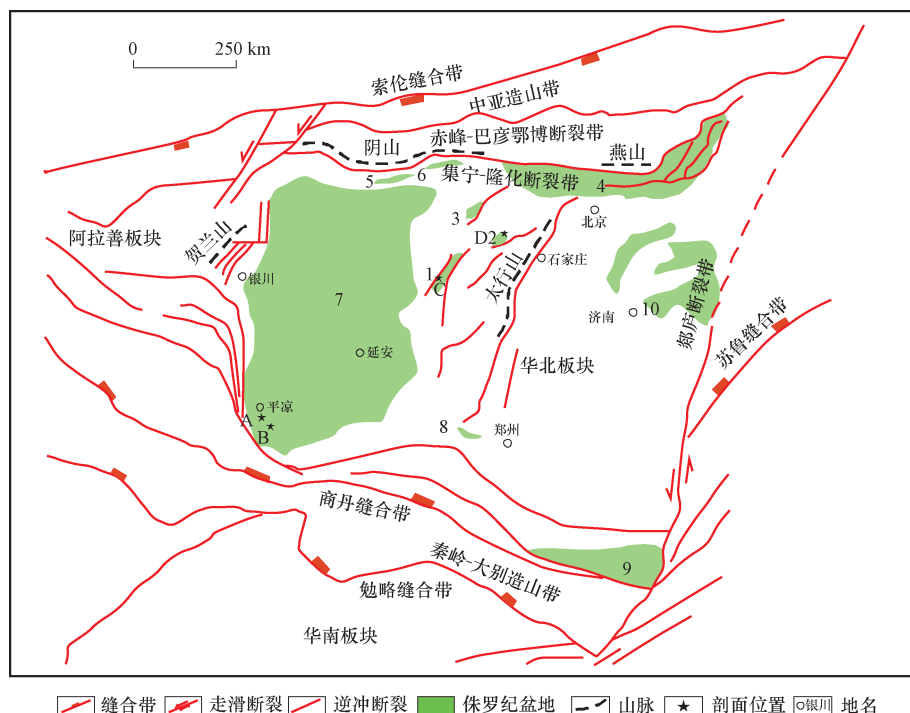


图1 华北克拉通侏罗纪盆地分布

Fig. 1 Distribution of Jurassic basins in North China Craton

1. 宁武-静乐盆地;2. 浑源-广灵盆地;3. 云岗盆地;4. 燕-辽盆地;5. 石拐子盆地;6. 卓资盆地;7. 鄂尔多斯盆地;8. 义马盆地;9. 合肥盆地;10. 鲁西地区;
A. 策底剖面;B. 安口剖面;C. 宁武-静乐盆地陈家半沟剖面;D. 广灵盆地板塔寺剖面

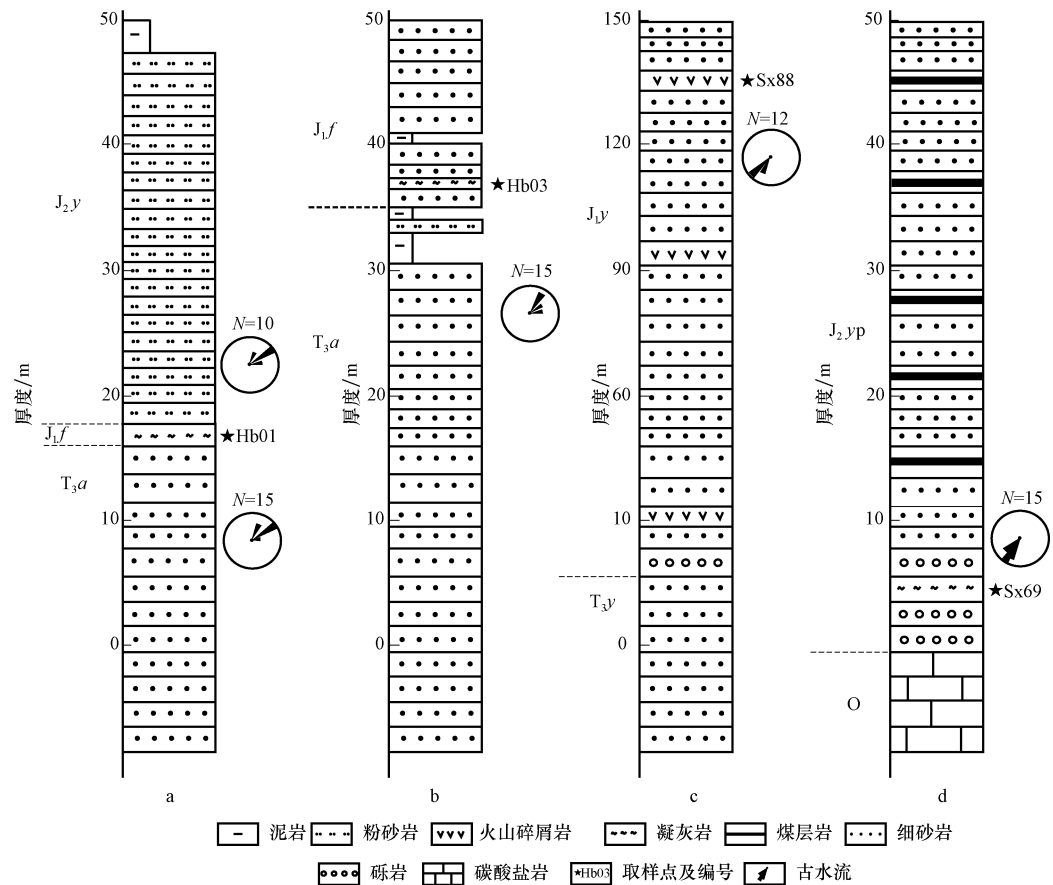


图 2 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统典型柱状图

Fig. 2 Typical stratigraphic column of the Lower Jurassic of Ordos Basin and its periphery

a. 策底剖面; b. 安口剖面; c. 宁武-静乐盆地陈家半沟剖面; d. 广灵盆地板塔寺剖面;

J₁f. 下侏罗统富县组; T₃a. 上三叠统安口组; J₂y. 中侏罗统延安组; T₃y. 上三叠统延长组; O. 奥陶系; J₂yp. 中侏罗统窑坡组

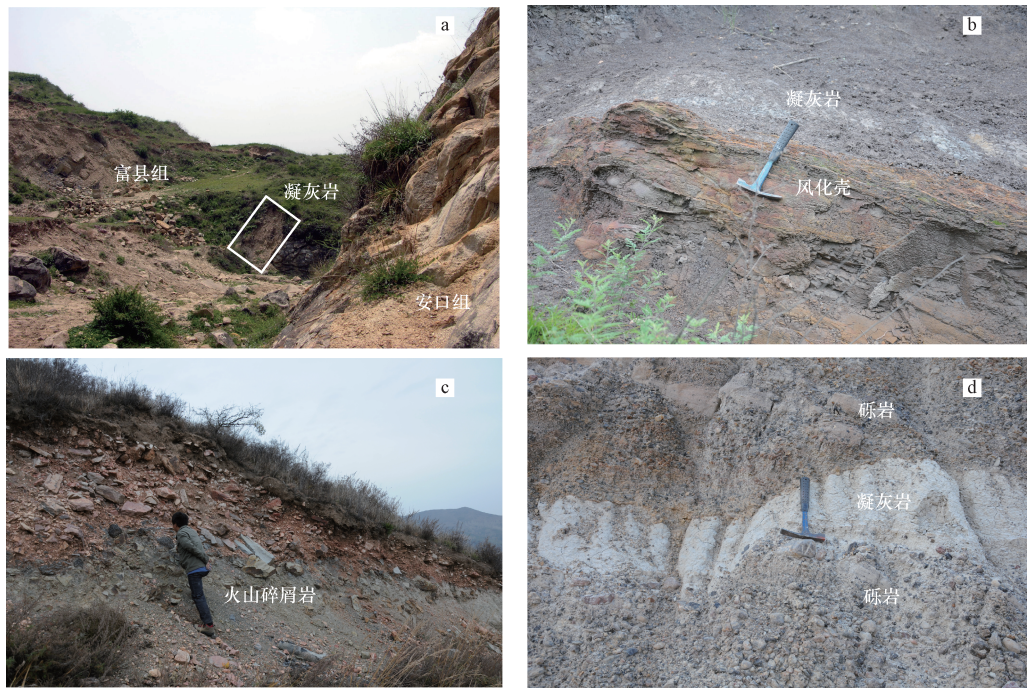


图 3 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩(火山碎屑岩)野外露头典型照片

Fig. 3 Typical photos of the tuff and the volcanoclastic rocks of Lower Jurassic in Ordos Basin and its periphery

a. 策底剖面; b. 安口剖面; c. 宁武-静乐盆地陈家半沟剖面; d. 广灵盆地板塔寺剖面

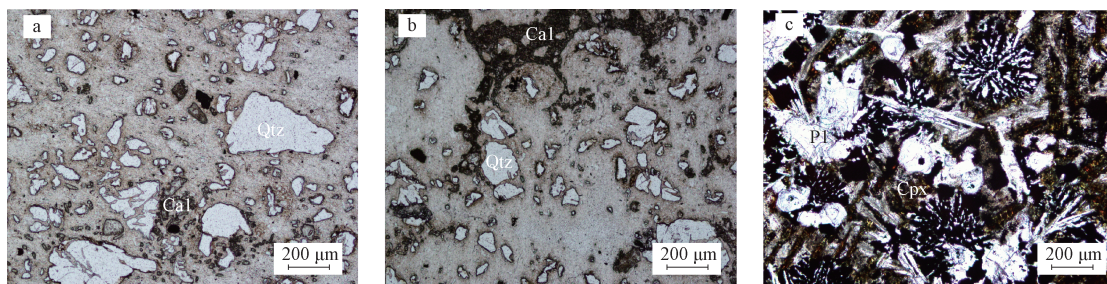


图4 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩镜下典型照片

Fig. 4 Typical microphotos for the Lower Jurassic tuff and volcaniclastic rocks in Ordos Basin and its periphery

a. 策底下侏罗统富县组; b. 安口窑下侏罗统富县组; c. 宁武-静乐盆地下侏罗统永定庄组

Qtz. 石英; Cal. 碳酸岩屑; Pl. 斜长石; Cpx. 单斜辉石

宁武-静乐盆地陈家半沟下侏罗统永定庄组是一套不含煤的杂色湖相碎屑岩地层,其底部与三叠系延长组呈平行不整合接触(图2c,图3c)。底部可见2层厚约2 m的硅质砾岩,砾石含量为70%~80%,砾石磨圆度好,但分选较差,砾径一般为2~10 cm,最大可达20 cm,砾石几乎全部为硅质,填隙物为钙质。火山碎屑岩层发育于剖面的中、下部,岩石呈黑色、灰黑色,凝灰结构,层状构造。该套火山碎屑岩在平面上厚度自盆地的北东至南西方向,厚度逐渐减薄,并消失,证明物源主要来自于盆地的东北方向。镜下鉴定岩石主由砾级碎屑、填隙物组成。砾级碎屑为细粒岩屑砂岩、粘土岩、玄武岩、气孔状玄武岩,棱角-次棱角状,部分次棱状-次圆状,大小一般为2~10 mm,部分为10~20 mm,少部分为20~30 mm,杂乱分布,为岩石之主体部分(图4c)。

广灵板塔寺剖面总体上属于中侏罗统门头沟群窑坡组,相当于鄂尔多斯盆地中侏罗统延安组(图2d,图3d)。该套地层纵向上韵律特征明显,以砂质页岩夹多套含煤地层为特征。其底部含有一套厚约10 m左右的砾岩,与下伏奥陶系冶里组、亮甲山组灰岩呈平行不整合接触。本组横向变化较大,主要表现在下部及底部地层,在距离板塔寺2.5 km的西窑附近,下部发育巨厚砾岩,可达100余米。该套砾岩顶部夹一套厚度约30 cm的灰白色凝灰岩,表面风化比较严重,成粘土状。

2 样品采集及实验方法

本次实验样品分别采集了平凉策底剖面下侏罗统富县组凝灰岩(Hb01)、安口剖面的下侏罗统富县组凝灰岩(Hb03)及浑源-广灵盆地板塔寺剖面中侏罗统窑坡组底部砾岩夹层中的凝灰岩(Sx69),对这3个剖面的凝灰岩进行系统的锆石U-Pb同位素测年,确定凝灰岩的具体喷发时限。关于宁武-静乐盆地陈家半沟剖面下侏罗统永定庄组的测年结果详见Li等

(2013)^[12-13]。同时,对安口剖面的凝灰岩进行了常量、稀土和部分微量的地球化学元素测试,以分析凝灰岩地球化学特征及大地构造背景。

锆石U-Pb同位素测年样品的碎样和锆石挑选工作在河北省区域地质矿产调查研究所完成,制靶及阴极发光照片拍摄工作由北京锆年领航科技有限公司完成。LA-MC-ICP-MS锆石U-Pb定年测试分析在天津地质矿产研究所完成。所用仪器为Neptune多接收电感耦合等离子体质谱仪和193 nm激光取样系统(LA-MC-ICP-MS)。Neptune为Thermo Fisher公司制造,离子的光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计,并采用动态变焦将质量色散扩大至17%。仪器配有9个法拉第杯接收器和4个离子计数器接收器,除了中心杯和离子计数器外,其余8个法拉第杯配置在中心杯的两侧,并以马达驱动进行精确的位置调节,4个离子计数器捆绑在L4法拉第杯上。激光器为美国ESI公司生产的ArF准分子激光器,激光波长193 nm,脉冲宽度5 ns,束斑大小2~150 μm可调,脉冲频率1~200 Hz连续可调。实验根据锆石阴极发光照片、反射光和透射光照片选择锆石的合适区域,利用193 nm FX激光器对锆石进行剥蚀,激光剥蚀的斑束为35 μm,能量密度为13 J/cm²,频率为8~10 Hz,激光剥蚀物质以He为载气送入neptune,利用动态变焦扩大色散使质量数相差很大的U-Pb同位素可以同时接收,从而进行U-pb同位素测定。锆石标样采用TEMORA标准锆石,数据处理采用中国地质大学刘勇胜编写的ICPMS DataCal程序和Ludwig(2001)的IS-PLOT程序进行分析和作图^[14],采用²⁰⁸Pb对普通铅进行校正,利用NIST612作为外标,计算锆石样品的Pb、U和Th含量。对于锆石年龄大于1 000 Ma的数据,采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄,而对于锆石年龄小于1 000 Ma的数据,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄(Sircombe, 1999)^[15]。

地球化学样品分析在国家地质实验测试中心完成。除B元素采用等离子光谱(IRIS)测定外,其它元素均采用等离子质谱(X-series)测定。主量元素

Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , P_2O_5 , SiO_2 和 TiO_2 检测方法依据 GB/T 14506.28—2010, FeO 检测方法依据 GB/T 14506.14—2010, CO_2 检测方法依据 GB 9835—1988, H_2O 检测方法依据 GB/T 14506.2—2010, B 元素的检测方法依据 JY/T 015—1996 标准,其他稀土和微量元素的检测标准均依据 DZ/T 0223—2001。

3 测试结果

从 CL 图像上来看,不同区域凝灰岩的锆石自形程度较好,震荡环带清晰,明显具有岩浆锆石的特征(图 5)。不同成因锆石有不同的 Th 和 U 含量及 Th/U 比值,岩浆锆石的 Th 和 U 含量较高, Th/U 比值较大(一般 >0.4),变质锆石的 Th 和 U 含量较低, Th/U 比值小(一般 <0.1)。平凉策底凝灰岩样品中(Hb01) Th/U 比值介于 $0.25 \sim 1.96$;安口剖面凝灰岩样品中(Hb03) Th/U 比值介于 $0.21 \sim 0.90$;广灵板塔寺剖面凝灰岩样品中(Sx69) Th/U 比值介于 $0.22 \sim 1.44$ 。各样品中 Th/U 比值远大于 0.1 ,为岩浆锆石成因无疑。平凉策底剖面凝灰岩样品共测试有效样品点 48 个,其中介于 $167 \text{ Ma} \sim 183 \text{ Ma}$ 的样品点 9 个,谐和年龄为 $175.2 \text{ Ma} \pm 2.4 \text{ Ma}$,代表了该套凝灰岩的喷发时限(图 6a;表 1)。安口剖面凝灰岩样品共测试有效样品点 21 个,其中介于 $167 \text{ Ma} \sim 170 \text{ Ma}$ 的样品点 13 个,谐和年龄为 $168.4 \text{ Ma} \pm 1.3 \text{ Ma}$,代表了该套凝灰岩的喷发时限(图 6b;表 2)。浑源—广灵盆地板塔寺凝灰岩共测试有效样品点 20 个,其中介于 $169 \text{ Ma} \sim 172 \text{ Ma}$ 的样品点 9 个,谐和年龄为 $171.0 \text{ Ma} \pm 1.0 \text{ Ma}$,代表了该套凝灰岩的喷发时限(图 6d;表 3)。

从安口剖面凝灰岩的地球化学元素分析结果来看(表 4),凝灰岩的 SiO_2 含量较高,变化于 $64.96\% \sim 68.95\%$, Al_2O_3 含量亦高,变化于 $21.06\% \sim 23.74\%$ 。 Na_2O 和 K_2O 含量较低, Na_2O 含量变化于 $0.06\% \sim 0.08\%$, K_2O 含量变化于 $0.45\% \sim 0.49\%$, K_2O 含量大于 Na_2O 含量。 Fe_2O_3 , FeO , MgO 和 CaO 含量较低,与中—酸性岩中主量元素的变化趋势基本一致。 Fe_2O_3 含量变化介于 $0.07\% \sim 0.08\%$, FeO 含量变化介于 $0.2\% \sim 0.31\%$ 。在 TAS 火山岩分类命名及 $\text{SiO}_2 - \text{Zr}/\text{TiO}_2$ 图解中,所有样品点均落入英安岩的范围内(图 7)。

凝灰岩样品稀土元素球粒陨石标准化分配模式表现出明显的轻稀土富集、重稀土亏损型,分布曲线在轻稀土处具有较大的斜率^[16]。稀土元素总量(ΣREE)变化范围介于 $50.41 \times 10^{-6} \sim 93.45 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 比值介于 $7.1 \sim 9.3$ 。具有明显的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} =$

$0.46 \sim 0.59$, 平均 0.52), Ce 值具有明显的正异常($\delta\text{Ce} = 2.38 \sim 3.20$, 平均 2.77)(图 8;表 5)。

4 问题与讨论

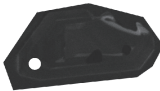
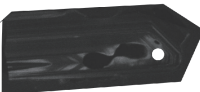
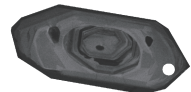
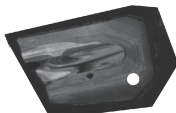
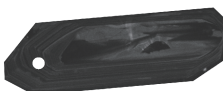
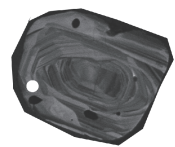
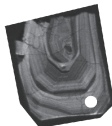
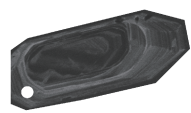
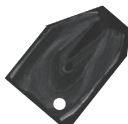
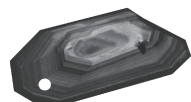
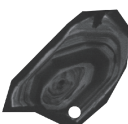
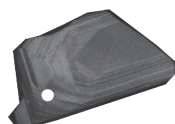
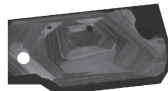
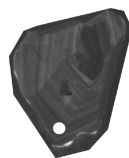
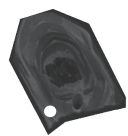
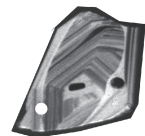
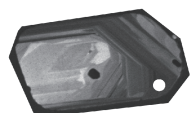
4.1 地层时代归属

通过对 4 个典型剖面凝灰岩的喷发时限的确定,可以对地层时代做出较好的约束。平凉策底剖面下侏罗统剖面富县组的厚度仅为 10 多米,本次测定的凝灰岩层位于富县组的顶部,年龄为 $175.2 \text{ Ma} \pm 2.4 \text{ Ma}$,下侏罗统在该区保存较少。安口剖面凝灰岩之下为一套铝土质的风化壳,虽然覆盖比较严重,但根据凝灰岩地球化学元素存在明显的 Ce 正异常,为该套风化壳的存在提供了相应的证据。由于长期的风化裸露,剖面上部氧化条件下 Ce^{3+} 氧化水解,水解产物主要与铁锰氧化物共同沉淀或与粘土矿物相结合,使得 Ce 相对保留富集^[17]。该套凝灰岩的年龄为 $168.4 \text{ Ma} \pm 1.3 \text{ Ma}$,证明在该区缺失了下侏罗统及中侏罗统的一部分地层,长期处于裸露剥蚀状态,可能在早侏罗世沉积时期为一个局部高地。宁武—静乐盆地是否存在下侏罗统一直存在着争议,根据下侏罗统火山碎屑岩的年龄 $179.2 \text{ Ma} \pm 0.79 \text{ Ma}$,证明了位于大同组含煤地层之下,平行不整合于三叠系延长组之上的一套河流相地层为早侏罗世沉积。

4.2 区域大地构造背景

依据鄂尔多斯及周边盆地地质调查结果,下侏罗统凝灰岩夹层在区域上主要分布于两个地区:一是鄂尔多斯盆地西南缘的平凉、安口一带;二是鄂尔多斯盆地东北缘的宁武—静乐、广灵一带。根据区域地层中的沉积构造,恢复早侏罗世的古水流方向,鄂尔多斯盆地西南缘平凉、安口一带古水流方向来自于西秦岭造山带的水天地区,而东北缘的宁武—静乐、广灵一带,古水流方向来自于阴山—燕山造山带。

根据对华北克拉通南缘造山带侏罗纪地层的调查结果,鄂尔多斯盆地西南缘下侏罗统凝灰物质的来源可能来自于西秦岭的天水一带。在该区上三叠统陈家庄组岩性为一套陆相中酸性火山岩组合,锆石 U—Pb 同位素揭示该套火山岩底部的年龄为 $211 \text{ Ma}^{[18]}$ 。其上的火麦地组为一套陆相中酸性火山岩—沉积碎屑岩组合,主要岩性为灰白色—褐灰色熔结凝灰质角砾岩夹凝灰质粉砂岩,推测其时代可能属于早侏罗世至中侏罗世早期,与平凉策底、安口一带的凝灰岩年龄保持一致(图 9)。关于该套凝灰岩形成的地球动力学背景,根据微量元素 Th/Hf—Ta/Hf 构造环境判别图解(图 10),所有投点全部落入了大陆裂谷带或者初始裂

样品	样号	年龄/Ma	样品	样号	年龄/Ma
	Hb01. 4	183		Hb03. 10	170
	Hb01. 7	170		Hb03. 11	169
	Hb01. 23	174		Hb03. 12	169
	Hb01. 24	177		Hb03. 13	169
	Hb01. 25	179		Sx69. 1	169
	Hb01. 39	174		Sx69. 2	169
	Hb01. 40	173		Sx69. 3	171
	Hb01. 41	174		Sx69. 4	172
	Hb03. 6	169		Sx69. 5	172
	Hb03. 7	169		Sx69. 7	172
	Hb03. 8	168		Sx69. 8	172

100 μm

图 5 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩典型岩浆锆石阴极发光图像

Fig. 5 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircon grains for the Lower Jurassic tuff in Ordos Basin and its periphery

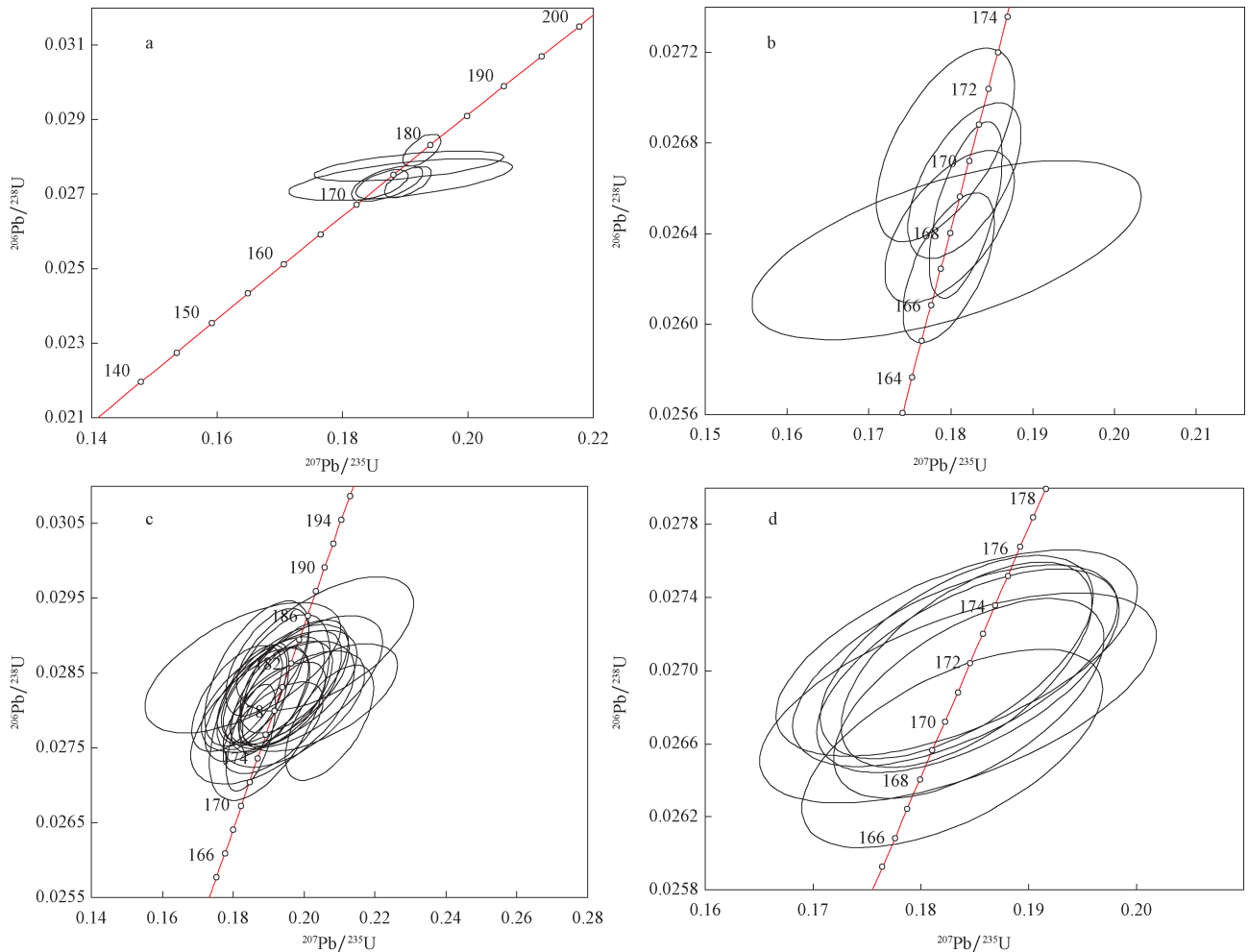


图6 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩锆石 U-Pb 年龄

Fig. 6 Concordia plots of U-Pb zircon dating results for the Lower Jurassic tuff in Ordos Basin and its periphery

a. 策底剖面; b. 安口剖面; c. 陈家半沟剖面; d. 板塔寺剖面

谷玄武岩区,代表了陆内拉张环境^[19]。同样,秦岭地区晚三叠世末期亦发育一套奥长环斑花岗岩,代表着秦岭地区早中生代重要的构造交替和转折期,即由陆内造山阶段开始向深部地幔调整和岩石圈减薄阶段转变,预示着区域应力场由挤压向拉张阶段的转变^[20],这与盆地内早-中侏罗世凝灰岩反映的大地构造背景相吻合。

同样,根据对华北克拉通北缘阴山-燕山造山带侏罗纪地层的调查结果表明,宁武-静乐盆地、浑源-广灵盆地的凝灰岩物源可能来自于燕山造山带前缘的下侏罗统南大岭组火山岩(图11)。南大岭组玄武岩出露于北京西山侏罗纪盆地,南大岭玄武岩具有气孔和杏仁构造,并夹有多层沉积岩,是一套溢流相玄武岩。赵越等(2006)对北京西山南大岭组玄武岩的继承锆石年代学进行了研究认为^[21],174 Ma ± 8 Ma 年龄组的锆石可能是南大岭玄武岩喷溢期结晶的锆石,这个年龄与本次在宁武-静乐盆地、浑源-广灵盆地火山碎屑岩或凝灰岩的年龄基本一致。该研究成果还表明,燕山造山带前缘的侏罗纪盆地在中侏罗世时期与鄂尔多

斯盆地是相通的,是作为大鄂尔多斯盆地的一部分,在燕山造山带前缘形成了一个狭长的河谷地带,为鄂尔多斯盆地提供物源。汪洋等(1995)^[22]研究认为南大岭组与蔡家岭组玄武岩代表了早侏罗世北京西山裂陷作用伴生的双峰式火山活动,为区域拉张背景下的产物。

综上所述,在早侏罗世晚期至中侏罗世早期(179 ~ 168 Ma)期间,华北克拉通南北缘整体上处于弱伸展构造环境,应当为印支运动的后效^[23-24]。另外,在沉积、构造等方面的研究上也取得了相应的证据。如:鄂尔多斯盆地及周缘盆地从早侏罗世富县期开始至中侏罗世延安期末,沉积序列整体上处于湖进的沉积序列,从河流相逐步向湖泊、沼泽相过渡,证明该阶段湖盆地形逐步扩大,整体上处于拉张的构造应力状态。盆地周缘的正断层发育,基本继承了华北地块基底的东西向构造,引张方向为南北向至北北东-南南西向^[25]。

4.3 构造热事件

构造热事件的形成必然与盆地周缘的大地构造背

表 1 鄂尔多斯盆地西南缘策底下侏罗统富县组剖面凝灰岩锆石 U-Pb 年龄数据
Table 1 U-Pb isotope dating results for the zircons in the tuff from the Lower Jurassic
Fuxian Formation on Cedi section in western Ordos Basin

Ma

样品号	含量/ 10^{-6}		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
Hb01	Pb	U	比值	偏差	误差/%	比值	偏差	误差%	比值	偏差	误差%	年龄	偏差	年龄	偏差	年龄	偏差
1	46	236	0.179 2	0.001 2	0.66	1.862 7	0.013 0	0.70	0.075 4	0.000 6	0.75	1 063	7	1 068	7	1 079	15
2	47	601	0.071 1	0.000 4	0.61	0.550 2	0.006 0	1.10	0.056 1	0.000 6	1.15	443	3	445	5	457	25
3	31	867	0.034 3	0.000 2	0.60	0.242 1	0.002 0	0.83	0.051 2	0.000 4	0.77	218	1	220	2	248	18
4	47	1 669	0.028 8	0.000 2	0.65	0.197 5	0.001 9	0.96	0.049 8	0.000 4	0.79	183	1	183	2	185	18
5	69	1 589	0.040 9	0.000 3	0.73	0.286 9	0.003 0	1.04	0.050 9	0.000 5	1.07	258	2	256	3	238	25
6	30	1 026	0.026 3	0.000 2	0.58	0.178 0	0.002 0	1.10	0.049 2	0.000 5	1.10	167	1	166	2	156	26
7	26	880	0.026 7	0.000 2	0.59	0.182 3	0.002 7	1.48	0.049 6	0.000 8	1.71	170	1	170	3	174	40
8	12	294	0.039 9	0.000 3	0.78	0.281 9	0.002 4	0.84	0.051 2	0.000 4	0.85	252	2	252	2	250	20
9	13	185	0.066 4	0.000 4	0.59	0.504 6	0.008 2	1.63	0.055 1	0.000 9	1.65	414	2	415	7	417	37
10	18	236	0.072 7	0.000 4	0.57	0.565 7	0.009 5	1.67	0.056 5	0.000 9	1.68	452	3	455	8	471	37
11	16	207	0.072 4	0.000 4	0.58	0.558 6	0.006 7	1.21	0.056 0	0.000 7	1.23	450	3	451	5	451	27
12	22	277	0.0763	0.000 5	0.60	0.846 9	0.008 8	1.04	0.080 5	0.000 7	0.87	474	3	623	6	1 208	17
13	44	727	0.055 1	0.000 4	0.68	0.406 5	0.002 6	0.64	0.053 5	0.000 4	0.74	346	2	346	2	351	17
14	45	656	0.069 5	0.000 4	0.59	0.574 1	0.004 9	0.86	0.059 9	0.000 6	0.92	433	3	461	4	600	20
15	41	525	0.069 9	0.000 4	0.57	0.535 0	0.007 6	1.43	0.055 5	0.000 8	1.41	435	2	435	6	433	31
16	22	289	0.071 3	0.000 4	0.60	0.554 5	0.004 5	0.80	0.056 4	0.000 5	0.84	444	3	448	4	468	19
17	40	1 132	0.031 8	0.000 2	0.76	0.219 7	0.002 6	1.18	0.050 2	0.000 5	0.98	202	2	202	2	202	23
18	79	1 690	0.031 6	0.000 2	0.63	0.670 2	0.018 0	2.68	0.154 0	0.004 3	2.80	200	1	521	14	2 391	48
19	23	516	0.047 5	0.000 3	0.61	0.469 6	0.009 0	1.91	0.071 8	0.001 4	1.90	299	2	391	7	979	39
20	24	330	0.070 7	0.000 4	0.62	0.545 9	0.003 9	0.71	0.056 0	0.000 4	0.77	440	3	442	3	453	17
21	42	561	0.071 9	0.000 4	0.56	0.555 8	0.005 3	0.96	0.056 1	0.000 6	1.00	448	2	449	4	455	22
22	43	580	0.069 4	0.000 4	0.56	0.529 8	0.011 4	2.15	0.055 4	0.001 1	2.05	432	2	432	9	428	46
23	11	394	0.027 3	0.000 2	0.62	0.190 4	0.001 5	0.80	0.050 5	0.000 4	0.84	174	1	177	1	220	19
24	16	565	0.027 8	0.000 2	0.59	0.190 6	0.006 2	3.24	0.049 8	0.001 6	3.17	177	1	177	6	185	74
25	14	476	0.028 2	0.000 2	0.62	0.192 7	0.001 2	0.64	0.049 6	0.000 3	0.70	179	1	179	1	175	16
26	49	1 568	0.031 5	0.000 2	0.56	0.219 2	0.002 9	1.33	0.050 5	0.000 7	1.33	200	1	201	3	217	31
27	42	1 259	0.033 6	0.000 2	0.56	0.231 8	0.001 6	0.68	0.050 1	0.000 3	0.59	213	1	212	1	199	14
28	94	426	0.206 8	0.001 5	0.71	2.310 6	0.021 3	0.92	0.081 0	0.000 9	1.17	1 212	9	1 216	11	1 223	23
29	65	897	0.067 5	0.000 4	0.62	0.742 7	0.018 1	2.43	0.079 8	0.002 0	2.45	421	3	564	14	1 193	48
30	9	219	0.037 6	0.000 2	0.60	0.284 6	0.002 1	0.73	0.054 9	0.000 4	0.73	238	1	254	2	409	16
31	45	587	0.069 4	0.000 4	0.62	0.531 6	0.007 3	1.37	0.055 6	0.000 9	1.57	432	3	433	6	436	35
32	24	398	0.049 0	0.000 3	0.69	0.350 6	0.003 4	0.97	0.051 9	0.000 5	1.01	308	2	305	3	282	23
33	36	169	0.187 1	0.001 5	0.80	3.110 2	0.019 9	0.64	0.120 6	0.000 9	0.71	1 105	9	1 435	9	1 965	13
34	64	444	0.140 7	0.000 8	0.56	1.306 3	0.027 3	2.09	0.067 3	0.001 4	2.08	849	5	849	18	848	43
35	17	230	0.069 6	0.000 4	0.56	0.529 8	0.005 9	1.11	0.055 2	0.000 6	1.13	434	2	432	5	420	25
36	19	253	0.069 9	0.000 4	0.58	0.536 4	0.004 6	0.86	0.055 6	0.000 5	0.94	436	3	436	4	437	21
37	30	411	0.069 3	0.000 4	0.57	0.610 5	0.016 9	2.76	0.063 9	0.001 7	2.73	432	2	484	13	738	58
38	25	359	0.067 3	0.000 4	0.57	0.503 8	0.007 3	1.45	0.054 3	0.000 7	1.27	420	2	414	6	385	28
39	23	751	0.027 3	0.000 2	0.71	0.187 1	0.002 3	1.25	0.049 7	0.000 6	1.27	174	1	174	2	182	30
40	17	520	0.027 3	0.000 2	0.58	0.186 3	0.001 7	0.92	0.049 5	0.000 4	0.91	173	1	173	2	174	21
41	14	392	0.027 4	0.000 2	0.83	0.189 3	0.007 3	3.85	0.050 1	0.001 9	3.79	174	1	176	7	200	88
42	13	230	0.043 2	0.000 3	0.64	0.311 3	0.003 1	1.01	0.052 2	0.000 6	1.06	273	2	275	3	296	24
43	26	355	0.068 9	0.000 4	0.56	0.526 8	0.007 7	1.47	0.055 4	0.000 8	1.53	430	2	430	6	430	34
44	26	346	0.069 2	0.000 4	0.58	0.528 3	0.007 9	1.50	0.055 4	0.001 1	2.00	431	2	431	6	427	45
45	21	286	0.069 5	0.000 4	0.59	0.520 7	0.007 2	1.39	0.054 4	0.000 6	1.09	433	3	426	6	386	25
46	28	460	0.058 2	0.000 4	0.70	0.612 2	0.019 3	3.15	0.076 3	0.001 0	1.28	365	3	485	15	1 102	26
47	21	296	0.072 2	0.000 4	0.58	0.639 7	0.014 2	2.22	0.064 3	0.001 5	2.29	449	3	502	11	751	48
48	16	388	0.039 7	0.000 2	0.61	0.282 2	0.002 4	0.85	0.051 5	0.000 5	0.88	251	2	252	2	263	20

表 2 鄂尔多斯盆地西南缘安口下侏罗统富县组剖面凝灰岩锆石 U-Pb 年龄数据
Table 2 U-Pb isotope dating results for the zircons in the tuff from the Lower Jurassic
Fuxian Formation on Ankou section in western Ordos Basin

Ma

样品号	含量/ 10^{-6}		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
	Pb	U	比值	偏差	误差/%	比值	偏差	误差/%	比值	偏差	误差/%	年龄	偏差	年龄	偏差	年龄	偏差
Hb01																	
1	8	164	0.044 3	0.000 3	0.64	0.380 7	0.009 3	2.44	0.062 3	0.001 5	2.34	280	2	328	8	684	50
2	20	463	0.041 4	0.000 3	0.72	0.348 1	0.006 5	1.87	0.061 0	0.000 9	1.48	261	2	303	6	641	32
3	18	249	0.064 8	0.000 4	0.64	0.541 1	0.007 4	1.36	0.060 6	0.000 9	1.40	405	3	439	6	625	30
4	15	209	0.063 0	0.000 3	0.53	1.005 6	0.010 9	1.08	0.115 8	0.001 2	1.04	394	2	707	8	1 892	19
5	31	426	0.069 4	0.000 4	0.58	0.581 3	0.005 9	1.02	0.060 8	0.000 6	0.95	432	3	465	5	631	20
6	17	610	0.026 5	0.000 2	0.73	0.316 9	0.010 3	3.24	0.086 6	0.002 4	2.74	169	1	279	9	1 351	53
7	35	1 256	0.026 5	0.000 2	0.60	0.181 8	0.001 8	1.01	0.049 8	0.000 5	0.91	169	1	170	2	184	21
8	33	1 318	0.026 4	0.000 1	0.52	0.179 8	0.003 2	1.80	0.049 4	0.000 9	1.77	168	1	168	3	165	41
9	31	503	0.062 2	0.000 3	0.53	0.521 2	0.006 5	1.24	0.060 8	0.000 7	1.15	389	2	426	5	630	25
10	23	892	0.026 8	0.000 1	0.55	0.203 7	0.002 1	1.03	0.055 2	0.000 6	1.02	170	1	188	2	419	23
11	19	647	0.026 6	0.000 1	0.55	0.272 9	0.004 4	1.61	0.074 5	0.001 2	1.57	169	1	245	4	1 055	32
12	16	554	0.026 6	0.000 2	0.57	0.256 9	0.007 0	2.73	0.070 1	0.001 7	2.45	169	1	232	6	930	50
13	29	1 048	0.026 6	0.000 1	0.54	0.305 7	0.004 4	1.44	0.083 4	0.001 0	1.26	169	1	271	4	1 279	24
14	29	1 113	0.026 6	0.000 1	0.53	0.218 0	0.002 2	1.01	0.059 4	0.000 6	0.97	169	1	200	2	581	21
15	17	617	0.026 8	0.000 2	0.65	0.179 4	0.003 4	1.92	0.048 6	0.000 8	1.74	170	1	168	3	126	41
16	29	615	0.042 2	0.000 2	0.54	0.540 1	0.004 3	0.79	0.092 8	0.000 7	0.75	266	1	438	3	1 484	14
17	24	893	0.026 6	0.000 1	0.56	0.254 7	0.002 5	1.00	0.069 5	0.000 7	1.07	169	1	230	2	914	22
18	18	700	0.026 6	0.000 1	0.53	0.181 7	0.002 8	1.55	0.049 5	0.000 8	1.54	169	1	169	3	170	36
19	22	806	0.026 3	0.000 2	0.61	0.179 5	0.009 7	5.42	0.049 5	0.002 6	5.20	168	1	168	9	169	121
20	18	258	0.069 6	0.000 4	0.52	0.577 5	0.011 5	1.99	0.060 2	0.001 1	1.90	434	2	463	9	610	41
21	24	938	0.026 2	0.000 1	0.52	0.179 8	0.002 3	1.27	0.049 7	0.000 6	1.26	167	1	168	2	180	29

表 3 浑源-广灵盆地中侏罗统窑坡组底部凝灰岩锆石 U-Pb 年龄数据
Table 3 U-Pb isotope dating results for the tuffaceous zircons from the Yaopo
Formation at the bottom of Middle Jurassic on Hunyuan-Guangling Basin

Ma

样品号	含量/ 10^{-6}		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
	Pb	U	比值	偏差	误差/%	比值	偏差	误差/%	比值	偏差	误差/%	年龄	偏差	年龄	偏差	年龄	偏差
Hb01																	
1	17	618	0.026 6	0.000 2	0.84	0.182 9	0.005 7	3.12	0.049 9	0.001 4	2.75	169	1	171	5	191	64
2	21	784	0.026 5	0.000 2	0.89	0.212 9	0.005 3	2.47	0.058 3	0.001 2	1.98	169	1	196	5	539	43
3	20	738	0.026 8	0.000 2	0.83	0.184 5	0.005 1	2.78	0.049 8	0.001 2	2.38	171	1	172	5	187	55
4	22	834	0.027 0	0.000 2	0.85	0.184 3	0.004 8	2.58	0.049 4	0.001 1	2.17	172	1	172	4	168	51
5	14	516	0.027 1	0.000 2	0.85	0.183 3	0.006 9	3.74	0.049 1	0.001 6	3.33	172	1	171	6	151	78
6	257	520	0.473 4	0.003 9	0.82	10.746 9	0.218 8	2.04	0.164 7	0.002 5	1.53	2 498	20	2 501	51	2 504	26
7	14	529	0.027 1	0.000 2	0.84	0.183 3	0.005 2	2.82	0.049 1	0.001 2	2.41	172	1	171	5	153	57
8	14	476	0.027 0	0.000 2	0.84	0.184 4	0.005 7	3.11	0.049 5	0.001 4	2.73	172	1	172	5	173	64
9	10	347	0.026 9	0.000 2	0.87	0.183 5	0.007 5	4.10	0.049 6	0.001 9	3.75	171	1	171	7	174	87
10	11	340	0.029 1	0.000 2	0.84	0.242 0	0.008 9	3.68	0.060 3	0.002 1	3.41	185	2	220	8	615	74
11	2	45	0.046 1	0.000 5	1.08	0.513 8	0.054 6	10.62	0.080 8	0.008 9	10.98	291	3	421	45	1 216	216
12	32	93	0.323 3	0.002 7	0.82	4.908 4	0.110 0	2.24	0.110 1	0.001 9	1.77	1 806	15	1 804	40	1 801	32
13	7	208	0.032 9	0.000 3	1.01	0.294 8	0.014 7	4.99	0.065 0	0.002 9	4.53	209	2	262	13	775	95
14	31	90	0.324 5	0.002 8	0.86	4.931 2	0.105 9	2.15	0.110 2	0.001 8	1.63	1 811	16	1 808	39	1 803	30
15	27	75	0.337 5	0.002 8	0.82	5.344 0	0.112 3	2.10	0.114 8	0.001 9	1.61	1 875	15	1 876	39	1 877	29
16	14	481	0.027 0	0.000 2	0.83	0.183 2	0.006 2	3.36	0.049 2	0.001 5	3.10	172	1	171	6	156	73
17	24	68	0.323 3	0.002 7	0.85	4.928 9	0.103 4	2.10	0.110 6	0.001 8	1.60	1 806	15	1 807	38	1 809	29
18	30	91	0.323 4	0.002 8	0.87	4.928 0	0.104 4	2.12	0.110 5	0.001 8	1.63	1 807	16	1 807	38	1 808	30
19	12	388	0.029 5	0.000 3	0.85	0.406 1	0.010 6	2.61	0.099 7	0.002 1	2.12	188	2	346	9	1 618	39
20	19	629	0.028 8	0.000 3	0.91	0.309 8	0.009 0	2.89	0.078 0	0.001 9	2.47	183	2	274	8	1 147	49

表 4 鄂尔多斯盆地西南缘安口下侏罗统富县组凝灰岩主量元素含量

Table 4 Major elements content of the tuff from the Lower Jurassic Fuxian Formation on the Ankou section in western Ordos Basin

样品号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂
Hb03-1	68.95	0.91	21.06	0.07	0.20	0.01	0.15	0.22	0.06	0.47	0.13	7.22	0.96
Hb03-2	64.96	0.90	23.74	0.08	0.31	0.01	0.16	0.27	0.08	0.49	0.22	8.48	0.26
Hb03-3	66.45	0.91	22.85	0.07	0.25	0.01	0.16	0.25	0.08	0.48	0.15	7.52	0.76
Hb03-4	65.82	0.95	23.25	0.07	0.30	0.01	0.15	0.25	0.06	0.47	0.18	7.85	0.65
Hb03-5	67.25	0.90	22.25	0.07	0.28	0.01	0.18	0.23	0.06	0.45	0.15	7.45	0.65

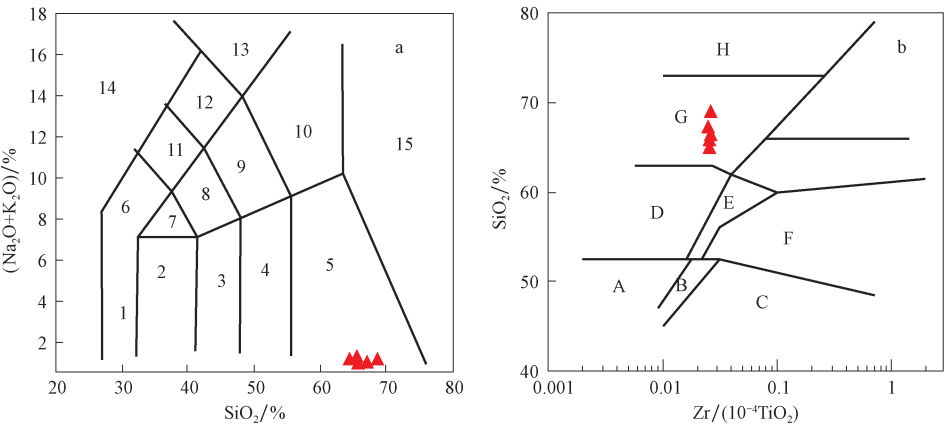


图 7 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统火山凝灰岩分类命名图解

Fig. 7 Diagram for classification and nomenclature of volcanic tuff in Ordos Basin and its periphery

a. 火山岩 TAS 分类; b. 火山岩 SiO₂ - Zr/TiO₂ 分类

1. 苦橄玄武岩; 2. 玄武岩; 3. 玄武安山岩; 4. 安山岩; 5. 英安岩; 6. 碱玄岩; 7. 粗面玄武岩; 8. 玄武粗安岩; 9. 粗安岩; 10. 粗面岩; 11. 碧玄岩; 12. 响岩质碱玄岩; 13. 碱玄质响岩; 14. 似长岩; 15. 流纹岩
- A. 亚碱性玄武岩类; B. 碱性玄武岩类; C. 粗面玄武岩、碧玄岩、霞石岩; D. 安山岩类; E. 粗面安山岩类; F. 响岩; G. 英安流纹岩, 英安岩; H. 流纹岩

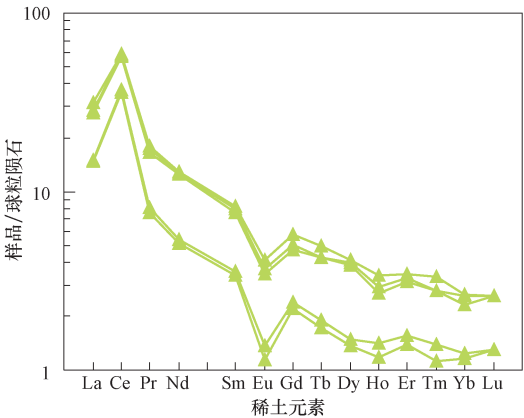


图 8 鄂尔多斯盆地西南缘安口剖面下侏罗统凝灰岩
稀土元素配分图

Fig. 8 REE patterns of the tuff on the Ankou section in western Ordos Basin

表 5 鄂尔多斯盆地西南缘安口下侏罗统富县组凝灰岩稀土/微量元素含量

Table 5 REE elements and trace elements content of the tuff from the Lower Jurassic Fuxian Formation on the Ankou section in western Ordos Basin

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Th	Hf	Ta
Hb03-1	5.51	35.5	1.11	3.86	0.82	0.12	0.73	0.11	0.57	0.12	0.39	0.05	0.31	0.05	2.82	6.02	7.41	1.41
Hb03-2	11.50	56.5	2.48	9.17	1.92	0.36	1.76	0.29	1.57	0.29	0.86	0.12	0.66	0.10	5.87	9.69	7.39	1.34
Hb03-3	10.50	55.3	2.38	9.05	1.85	0.32	1.55	0.25	1.52	0.25	0.82	0.10	0.65	0.10	5.85	7.55	7.40	1.36
Hb03-4	5.45	34.5	1.05	3.65	0.78	0.10	0.68	0.10	0.52	0.10	0.35	0.04	0.29	0.05	2.75	7.85	7.38	1.4
Hb03-5	10.20	54.5	2.25	8.95	1.75	0.3	1.45	0.25	1.48	0.23	0.78	0.10	0.58	0.10	5.65	9.55	7.25	1.38

了相邻造山带处于强烈的构造活动背景,该期火山喷发为盆地晚中生代早期构造热流体的发育创造了有利条件,促进了盆地内烃源岩的热演化进程。

2) 鄂尔多斯西南缘安口剖面凝灰岩具有明显的Ce异常,具有典型风化壳稀土元素的配分模式,Th/Hf-Ta/Hf图解反映了该套凝灰岩具有大陆拉张或初始裂谷环境,证明了早侏罗世晚期至中侏罗世早期,华北克拉通整体上处于区域拉张的构造背景。

参 考 文 献

- [1] 杨遂正,金文化,李振宏. 鄂尔多斯多旋回叠合盆地形成与演化[J]. 天然气地球科学,2006,17(4):494-498.
Yang Suizheng, Jin Wenhua, Li Zhenhong. Multicycle superimposed basin Formation and evolution of Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience,2006,17(4):494-498.
- [2] 李振宏,胡健民. 鄂尔多斯盆地构造演化与古岩溶储层分布[J]. 石油与天然气地质,2010,31(5):640-647.
Li Zhenhong, Hu Jianmin. Structural evolution and distribution of Paleokarst reservoirs in the Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010,31(5):640-647.
- [3] 陈世加,姚泾利,路俊刚,等. 储层沥青成因及其对油气运聚的影响——以鄂尔多斯盆地华庆地区长8油层组1砂组为例[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):37-44.
Chen Shijia, Yao Jingli, Lu Jungang, et al. Reservoir bitumen genesis and its impacts on hydrocarbon migration and accumulation: a case study from Chang 8¹ of Yangchang Fomation in Huaqing area, the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(1):37-44.
- [4] 苏复义,周文,金文辉,等. 鄂尔多斯盆地中生界成藏组合划分与分布评价[J]. 石油与天然气地质,2012,33(4):582-590.
Su Fuyi, Zhou Wen, Jin Wenhui, et al. Identification and distribution of the Mesozoic plays in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(4):582-590.
- [5] 陈刚,徐黎明,丁超,等. 用自生伊利石定年确定鄂尔多斯盆地东北部二叠系油气成藏期次[J]. 石油与天然气地质,2012,33(5):713-719.
Chen Gang, Xu Liming, Ding Chao, et al. Authigenic illite dating for the timing of oil-gas accumulation of the Permian reservoirs in northeastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012,33(5):713-719.
- [6] 田建锋,高永利,张蓬勃,等. 鄂尔多斯盆地合水地区长7致密油储层伊利石成因[J]. 石油与天然气地质,2013,34(5):700-707.
Tian Jianfeng, Gao Yongli, Zhang Pengbo, et al. Genesis of illite in Chang 7 tight oil reservoir in Heshui area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(5):700-707.
- [7] 孙建博,陈刚,章辉若,等. 鄂尔多斯盆地中生代构造事件的峰值年龄及其沉积响应[J]. 西北地质,2006,39(3):91-96.
Sun Jianbo, Chen Gang, Zhang Huiruo, et al. Peak ages and sedimentary responses of the Mesozoic-Cenozoic tectonic events in Ordos basin[J]. Northwestern Geology, 2006,39(3):91-96.
- [8] 陈刚,孙建博,周立发,等. 鄂尔多斯盆地西南缘构造热事件的裂变迹年龄纪录[J]. 中国科学(D),2007,37(增刊):110-118.
Chen Gang, Sun Jianbo, Zhou Lifa, et al. Fission track age records of tectonic hot events in the western Ordos Basin[J]. Science in China (D), 2007,37(S):110-118.
- [9] 赵孟为, Hans Ahrendt, Klaus Wemmer, 等. 鄂尔多斯盆地志留-泥盆纪和侏罗纪热事件-伊利石 K-Ar 年龄的证据[J]. 地质学报,1996,70(2):186-194.
Zhao Mengwei, Ahrendt H, Wemmer K, et al. Silurian-Devonian and Jurassic thermal events in the Ordos Basin, China: evidence from K-Ar dating on illites[J]. Acta Geologica Sinica, 1996,70(2):186-194.
- [10] 孙少华,李小明,龚革联,等. 鄂尔多斯盆地构造热事件研究[J]. 科学通报,1997,42(3):306-309.
Sun Shaohua, Li Xiaoming, Gong Gelian, et al. Research of the structural heat events in Ordos basin[J]. Chinese Science Bulltin, 1997, 42(3):306-309.
- [11] 高峰,王岳军,刘顺生. 利用磷灰石裂变径迹研究鄂尔多斯盆地西缘热历史[J]. 大地构造与成矿学,2000,24(1):87-91.
Gao Feng, Wang Yuejun, Liu Shunsheng. Thermal history study in the west of the Ordos basin using apatite fission track analysis [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000,24(1):87-91.
- [12] Li Zhenhong, Dong Shuwen, Qu Hongjie. Initiation and development of Jurassic orogeny at northmargin of north China craton: evidences from detrital heavy Minerals, geochemistry and zircon U-Pb geochronology[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(S):567-570.
- [13] Li Zhenhong, Dong Shuwen, Qu Hongjie. Timing of the initiation of the Jurassic Yanshan movement on the north China craton: evidence from sedimentary cycles, heavy minerals, geochemistry, and zircon U-Pb geochronology[J]. International Geology Review, 2014, 56(3):288-312.
- [14] Ludwig KR. User's manual for isoplot/Ex: a geochronological toolkit for microsoft excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001:1-56.
- [15] Sircombe KN. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia [J]. Sedimentary Geology, 1999, 124:47-67.
- [16] Boynton WV. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studied [M] // Rare Earth Element Geochemistry. New York: Elsevier, 1984:63-114.
- [17] 李艳丽,王世杰,孙承兴,等. 碳酸盐岩红色风化壳 Ce 异常特征及形成机理[J]. 矿物岩石,2005,25(4):85-90.
Li Yanli, Wang Shijie, Sun Chengxing, et al. The characteristics of Ce anomalies in weathering crusts of carbonate rocks and its formation mechanism[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(4):85-90.
- [18] 徐学义,王洪亮,陈隽璐,等. 西秦岭天水尹道寺中生代酸性火山岩锆石 U-Pb 定年和元素地球化学研究[J]. 岩石学报,2007,23(11):2845-2856.
Xu Xueyi, Wang Hongliang, Chen Juanlu, et al. Zircon U-Pb age, element geochemistry of Mesozoic acid volcanic rocks at Yindaoshi area in western Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(11):2845-2856.
- [19] 汪云亮,张成江,修淑芝. 玄武岩形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. 岩石学报,2001,17(3):413-421.
Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf inden-

- tification of tectonic setting of basalts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 413–421.
- [20] 王晓霞,王涛,卢欣祥,等.北秦岭老君山和秦岭梁环斑结构花岗岩及构造环境——一种可能的造山带型环斑花岗岩[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 650–660.
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Lu Xinxiang, et al. Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granitoids in North Qinling and their tectonic setting: a possible orogenic-type rapakivi granitoids [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 650–660.
- [21] 赵越,宋彪,张拴宏,等.北京西山侏罗纪南大岭组玄武岩的继承锆石年代学及其含义[J]. *地学前缘*, 2006, 13(2): 184–190.
- Zhao Yue, Song Biao, Zhang Shuanhong, et al. Geochronology of inherited zircons from Jurassic Nadaling basalt of Western Hills of Beijing, North China: its implication [J]. *Earth Science Frontier*, 2006, 13(2): 184–190.
- [22] 汪洋,孙金声.北京西山早侏罗世蔡家岭组火山岩岩石学特征及其成因[J]. *北京地质*, 1995, 6(4): 27–33.
- Wang Yang, Sun Jinsheng. Petrological characteristics and petrogenesis of volcanics of the early Jurassic Caijialing Formation in the western hills of Beijing [J]. *Beijing Geology*, 1995, 6(4): 27–33.
- [23] 张岳桥,董树文,赵越,等.华北侏罗纪大地构造:综评与新认识[J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1462–1480.
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Zhao Yue, et al. Jurassic tectonics of North China: a synthetic view [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1462–1480.
- [24] 董树文,张岳桥,龙长兴,等.中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1449–1461.
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1449–1461.
- [25] 张岳桥,廖昌珍,施炜,等.论鄂尔多斯盆地及其周缘侏罗纪变形[J]. *地学前缘*, 2007, 14(2): 182–196.
- Zhang Yueqiao, Liao Changzhen, Shi Wei, et al. On the Jurassic tectonics in and around the Ordos basin, north China [J]. *Earth Science Frontier*, 2007, 14(2): 182–196.
- [26] 邱欣卫,刘池洋,毛光周,等.鄂尔多斯盆地上三叠统延长组凝灰岩夹层 Th 元素的富集特征[J]. *地质通报*, 2010, 29(8): 1185–1191.
- Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Mao Guangzhou, et al. Enrichment feature of thorium element in tuff interlayers of Upper Triassic Yanchang Formation in Ordos basin, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(8): 1185–1191.
- [27] 邓秀芹, 藺昉晓, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积演化及其与早印支运动关系的探讨[J]. *古地理学报*, 2008, 10(2): 159–166.
- Deng Xiuqin, Lan Fangxiao, Liu Xianyang, et al. Discussion on relationship between sedimentary evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos basin [J]. *Journal of Paleogeography*, 2008, 10(2): 159–166.
- [28] 陈安清,陈洪德,侯明才,等.鄂尔多斯盆地中—晚三叠世事件沉积对印支运动I幕的指示[J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 1681–1690.
- Chen Anqing, Chen Hongde, Houmingcai, et al. The Middle—Late Triassic event sediments in Ordos Basin: indicators for episode I of the Indosinian Movement [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(10): 1681–1690.
- [29] 赵祯祥,杜晋峰.晋东北地区燕山运动的基本特征——来自1:25万应县幅区域地质调查的总结[J]. *地质力学学报*, 2007, 13(2): 150–162.
- Zhao Zhenxiang, Du Jinfeng. Basic characteristics of the Yanshan movement in northeastern Shanxi—a summary of regional survey of the 1:250000 Yingxian county sheet [J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13(2): 150–162.
- [30] 邹和平,张珂,李刚.鄂尔多斯盆地早白垩世构造—热事件:杭锦旗构造玄武岩的 Ar—Ar 年代学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2008, 32(3): 360–364.
- Zou Heping, Zhang Ke, Li Gang. Cretaceous tectono-thermal event in the Ordos black: an Ar-Ar chronological evidence from basalt at Hangjinqi banner, Inner Mongolia, North China Craton [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2008, 32(3): 360–364.
- [31] 杨兴科,晁会霞,郑孟林,等.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*, 2008, 28(1): 54–63.
- Yang Xingke, Zhao Huixia, Zheng Menglin, et al. Geological significance of SHRIMP dating of Zijinshan Alkali complex in the eastern Ordos basin, China [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2008, 28(1): 54–63.

(编辑 张亚雄)